新都市社会技術融合創造研究会

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

研究成果報告書

令和３年９月

トンネル点検支援技術の
高度化に関する研究プロジェクト

目　　次

はじめに

1　研究概要

1.1　概要 1-1
1.1.1　概要 1-1
1.1.2　背景 1-2
1.1.3　研究目的 1-2
1.1.4　研究内容 1-3
1.1.5　研究フローチャート 1-4
1.1.6　研究会構成 1-5
1.2　研究方針 1-6
1.2.1　基本方針 1-6
1.2.2　現地調査の実施 1-7
1.2.3　報告書構成 1-8
1.2.4　用語の定義 1-8

2　非破壊検査方法の概要

2.1　トンネル点検要領の変遷 2-1
2.2　トンネル点検における本体工（覆工）の状態把握の留意点 2-2
2.3　非破壊検査技術の概要 2-5
2.4　画像計測技術 2-5
2.5　非破壊検査技術 2-10
2.6　計測・モニタリング技術 2-15
2.7　ユースケースと要求性能について 2-20
参考文献 2-27

3　画像計測の評価

3.1　検証の概要 3-1
3.2　画像計測技術の種類 3-1
3.3　計測状況 3-8
3.4　画像計測のユースケースと要求性能 3-9
3.5　画像計測の検証 3-10
3.5.1　画像計測による変状展開図の作成手法 3-10
3.5.2　画像展開図 3-10
3.5.3　検証結果 3-17
3.6　画像計測の評価 3-23
3.6.1　圧ざ・ひび割れについて 3-23
3.6.2　うき・はく離について 3-24
3.6.3　鋼材腐食について 3-24

3.6.4　漏水について ····· 3-26
3.6.5　まとめ ····· 3-26
3.7　画像計測の留意点 ····· 3-27
参考文献 ····· 3-27

4 位置情報の有効活用

4.1　概要 ····· 4-1
4.2　レーザ位置精度に影響を与える要因 ····· 4-2
4.2.1　計測精度分類 ····· 4-2
4.2.2　衛星不可視下の影響要因 ····· 4-4
4.2.3　解析方法による要因 ····· 4-7
4.3　和知トンネルにおける検証実験 ····· 4-8
4.3.1 概要 ····· 4-8
4.3.2 令和元年の計測調査 ····· 4-9
4.3.3 令和 2 年の計測調査 ····· 4-18
4.4　レーザによる断面計測および縦断位置精度 ····· 4-29
4.4.1　速度の違いによる断面計測精度 ····· 4-29
4.4.2　再現性の検討 ····· 4-54
4.4.3　基準点による補正の検討 ····· 4-68
4.5　位置補正および二時期比較を行う上での留意点 ····· 4-84
4.5.1　2 時期比較のための補正方法の検討 ····· 4-84
4.5.2　回転補正 ····· 4-87
4.5.3　ランドマーク補正 ····· 4-91
4.5.4　スキャンマッチング ····· 4-91
4.5.5　ユースケースに応じた解析方法のまとめ ····· 4-96
4.6　まとめ ····· 4-97

5　レーザ計測の評価法

5.1　概要 ····· 5-1
5.2　変形モード解析方法 ····· 5-1
5.3　変形コンターの見方 ····· 5-9
5.4　複数回数計測の差分解析方法 ····· 5-13
5.5　運用方法 ····· 5-14
参考文献 ····· 5-15

6　非破壊検査方法の有効活用

6.1 非破壊検査の適用 ····· 6-1
6.2 地中レーダ法の原理 ····· 6-3
6.3　巻厚・空洞調査 ····· 6-5
6.3.1　非接触レーダで支援可能な内容について ····· 6-5
6.3.2　接触レーダでの支援可能な内容について ····· 6-10
6.3.3　レーダと他非破壊検査併用について ····· 6-12
6.4 AI を用いた非接触レーダ結果スクリーニングによる効率化について ····· 6-13

6.5 うき検出調査 ····· 6-14
参考文献 ····· 6-18

7 AIによるスクリーニング

7.1 概要 ····· 7-1
7.2 AI活用の目的 ····· 7-1
7.3 AI開発環境について ····· 7-2
7.3.1 Neural Network Console ····· 7-2
7.3.2 ファインチューニング ····· 7-2
7.4 教師データの作成 ····· 7-4
7.4.1 概要 ····· 7-4
7.4.2 教師データ作成ツール ····· 7-5
7.4.3 AI判定結果を使った教師データの再収集 ····· 7-7
7.4.4 教師データの判断基準 ····· 7-8
7.5 評価結果 ····· 7-13
7.5.1 初期教師データ利用AIによる判定結果 ····· 7-13
7.5.2 修正教師データ利用AIによる判定結果 ····· 7-14
7.5.3 計測機器による判定結果の違い ····· 7-15
7.6 今後の運用方法 ····· 7-20
7.6.1 異なる計測機器間の教師データの共有 ····· 7-20
7.6.2 他センサーへの画像AI開発技術の応用可能性について ····· 7-20
参考文献 ····· 7-22

8 実トンネルにおける支援内容の検証

8.1 H25既往研究（5トンネル）の再検証 ····· 8-1
8.1.1 概要 ····· 8-1
8.1.2 H25既往研究の概要 ····· 8-1
8.1.3 現在の新技術によるH25既往研究の再検証 ····· 8-7
8.1.4 まとめ ····· 8-12
8.2 近畿地整管内6トンネル計測・解析結果 ····· 8-13
8.2.1 概要 ····· 8-13
8.2.2 点検、計測、解析、診断結果のまとめ ····· 8-15
8.2.3 点検要領に対する支援評価 ····· 8-55
8.2.4 まとめ ····· 8-67
8.3 外力性変状の評価（検出）方法 ····· 8-69
8.3.1 外力性変状の事例 ····· 8-69
8.3.2 過年度の研究内容、外力性変状の評価 ····· 8-84
8.3.3 R2年度近畿地整6トンネルの評価 ····· 8-93
8.3.4 まとめ、考察 ····· 8-99
8.4 点検支援技術の評価 ····· 8-100
8.4.1 トンネル走行型計測による支援の検証 ····· 8-100
8.4.2 非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の再評価 ····· 8-110
参考文献 ····· 8-115

9　支援技術を活用した診断

9.1 概要 ····· 9-1
9.1.1　閾値（しきいち）の考え方 ····· 9-1
9.2　点検要領に対する支援内容 ····· 9-3
9.2.1　外力性、材料劣化の判定への支援 ····· 9-4
9.2.2　判定の目安に対する支援 ····· 9-10
9.2.3　健全性診断に対する支援 ····· 9-19
9.3　まとめ ····· 9-32
参考文献 ····· 9-36

10　施工時の活用

10.1　概要 ····· 10-1
10.2　施工時における現有技術の活用 ····· 10-1
10.2.1　品質管理への活用 ····· 10-1
10.2.2　出来形管理への活用 ····· 10-2
10.2.3　施工管理への活用 ····· 10-3
10.3　今後求められる技術と活用 ····· 10-4
10.3.1　デジタルデータと 3 次元モデルによる管理 ····· 10-4
10.3.2　望ましい技術 ····· 10-5
10.3.3　新技術導入への課題 ····· 10-9
参考文献 ····· 10-13

11　運用マニュアル

11.1　概要 ····· 11-1
11.2　高度なトンネル点検支援技術を活用する際の運用マニュアル ····· 11-1
11.2.1　高度なトンネル点検支援技術の定義と分類 ····· 11-1
11.2.2　適用効果が期待されるトンネルの条件 ····· 11-4
11.2.3　高度なトンネル点検支援技術運用マニュアル（案） ····· 11-5
11.3　これまでの運用マニュアルの課題 ····· 11-30
11.4　性能規定に基づく運用マニュアル案 ····· 11-30
11.4.1　性能規定に基づく支援技術運用マニュアルの考え方 ····· 11-30
11.4.2　点検支援技術のデータ活用案 ····· 11-31
11.4.3　さまざまな維持管理ステージでの活用案 ····· 11-33
11.5　まとめ ····· 11-34
参考文献 ····· 11-34

12 コスト縮減、効率化評価

12.1　コスト縮減検討 ····· 12-1
12.1.1　概要 ····· 12-1
12.1.2　比較条件、ユースケース ····· 12-1
12.1.3　縮減効果のまとめ ····· 12-1
12.1.4　過去に実施した事例 ····· 12-5
12.2　効率化評価 ····· 12-6
12.2.1　概要 ····· 12-6
12.2.2　近畿 6 トンネルの結果 ····· 12-6
12.2.3　過去に実施した事例に基づく効率化検討結果 ····· 12-8
参考文献 ····· 12-9

13 今後の展望

13.1　研究成果のまとめ ····· 13-1
13.1.1　研究成果 ····· 13-1
13.1.2　研究成果に伴う効果 ····· 13-1
13.2　現況の支援レベルの整理 ····· 13-1
13.2.1　点検支援 ····· 13-2
13.2.2　診断支援 ····· 13-4
13.2.3　内業の効率化 ····· 13-4
13.2.4　支援レベル ····· 13-5
13.3　高度化技術の有効活用 ····· 13-6
13.3.1　データ取得の重要性 ····· 13-6
13.3.2　初期値取得 ····· 13-6
13.3.3　進行性、有害な損傷早期発見 ····· 13-7
13.3.4　人とロボットのベストミックス ····· 13-8
13.3.5　総合的な判断 ····· 13-8
13.4　BIM/CIM、i-Construction への活用 ····· 13-9
13.4.1　設計から維持管理段階で一貫したデータ活用、汎用性 ····· 13-9
13.4.2　データベース ····· 13-10
13.5　高度化技術活用の留意点 ····· 13-10
13.5.1　高度化技術有効活用の条件 ····· 13-10
13.5.2　従来点検との位置づけ ····· 13-11
13.5.3　汎用性について（データ、手法） ····· 13-15
13.6　今後の方向性 ····· 13-15
13.6.1　今後求められる新技術 ····· 13-15
参考文献 ····· 13-18

おわりに

まえがき

本プロジェクトは、京都大学 大西有三名誉教授により平成 17 年から平成 24 年度末まで継続されてきた「走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究」を前身とし、平成 26 年からの、道路トンネルの近接目視定期点検の 1 巡目が終了する平成 30 年に、新都市社会技術融合創造研究会の中で、「トンネル点検支援技術の高度化に関する研究」として、新たな体制でスタートし、令和 3 年 3 月までの期間で実施した。研究の目的は、非接触・非破壊検査技術として移動体によるトンネル計測技術を整理、支援技術として立証し、社会実装することとした。

本プロジェクト発足当初の平成 30 年には、平成 26 年に策定された道路トンネル定期点検要領に基づき、5 年に 1 回の近接目視、打音検査、触診することが基本とされていたため、移動体計測技術による支援も一部に留まっており、これら最新の技術を社会実装するための実証、評価を再度行わなければならない状況下にあったが、1 巡目点検が終了する平成 31 年 3 月には、道路トンネル点検要領が改定された。この改定に伴い、従来近接目視点検が必須とされていたが新要領においては、近接目視と同等の品質で点検できるのであれば、新技術により状態把握を行ってもよいことが明確にされた。これにより、新技術を使った点検スクリーニングが可能となり、本プロジェクトでも移動体計測技術や AI、デジタルツインといった新技術による点検支援の高度化から点検代替の可能性も含めた検討を行うこととなった。

本プロジェクトは、移動体計測技術を中心として、「非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化」、「画像・計測データへの AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上」、「i-Construction 推進に向けたトンネルデータベースの有効活用検討」の 3 項目に分けて研究を行った。

「非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化の研究」では非破壊検査技術について、点検支援できる内容とレベルを整理し、さらに外力性変状、進行性評価について実トンネルで実用性検証を行った。

「画像・計測データへの AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上」では、AI 開発において課題となる教師データの収集方法を検討し、さらに AI を活用した健全部スクリーニングについて有効性を検証した。

「i-Construction 推進に向けたトンネルデータベースの有効活用検討」では、進行性

を判断するうえで重要となる 2 時期比較を適正に行うために、移動体計測において GNSS 不可視環境下で問題となる位置姿勢累積誤差に起因する回転誤差、位置誤差の補正、これらの有効性、実用化についての検証を行った。

またこれらの技術の社会実装を目的とし、本研究の技術を活用した場合のコスト縮減効果についての検討、および運用マニュアルについても作成した。

1　研究概要

1.1 概要

1.1.1 概要

1)　研究名称

新都市社会技術融合創造研究会　トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

2)　研究項目

①　非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化検討

②　AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上

③　トンネルデータベースの有効活用検討

3)　研究期間

自）2018 年 10 月　1 日

至）2021 年　3 月 31 日（全体で 3 箇年）

4)　研究体制

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト（以下、本研究プロジェクトという）は、近畿地方整備局が運営する「新都市社会技術融合創造研究会」において、プロジェクトリーダーのもと、産・学・官からなる、道路トンネル、アセットマネジメント、非破壊検査、G 空間情報、 ICT、IoT、AI 技術等を所有する経験豊富な技術者による共同研究組織である。本研究プロジェクトの研究組織（参加者：学識者のみ氏名を記載）を表 1.1.1 に示す。

表 1.1.1　研究組織表

区分	名称	摘要
リーダー	石川貴一朗　日本工業大学	
オブザーバー	大西有三　京都大学名誉教授	
学	岡山大学大学院環境科学研究科 関西大学社会安全学部 早稲田大学理工学術院基幹理工学部	西山教授 小山准教授 天野教授
産	i システムリサーチ（株）、（株）ウエスコ、（株）ウォールナット、 応用地質（株）、（株）オリエンタルコンサルタンツ、 計測検査（株）、（株）建設技術研究所、（株）鴻池組、 国際航業（株）、（株）ニュージェック、 パシフィックコンサルタンツ（株）、三井住友建設（株）、 三菱電機（株）、ライカジオシステムズ（株）	五十音順 全 14 社
官	国土交通省近畿地方整備局道路部、近畿技術事務所、 （一般）先端建設技術センター、（株）高速道路総合技術研究所、 （一般）日本建設機械施工協会、（一般）近畿建設協会	

1.1.2 背景

平成 31 年 3 月に道路トンネル定期点検要領が改訂された。前回の改訂から 5 年が経過し、全体的に一巡目の状態把握が完了したこととなるが、診断結果Ⅱが 56%であり、Ⅲが 41%となっており、実に全体の 97%が何らかの課題を残した結果となっている。定期点検は、利用者への被害の回避、通行止めなど長期にわたる機能不全の回避、長寿命化への時宜を得た対応などのトンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施する。

その行為は、基本として近接目視、打音検査、触診によって行う。点検作業は、厳しい環境条件（交通規制、昼夜間、排気ガス、高所作業等）の中で、熟練技術者による適切な判断が必要となっており、工期、コスト、安全、労働環境、精度、適任者の確保等が、変状の多いとされるトンネルの基準を満たす上で大きな課題となっている。

新要領においては、知識と技能を有するものが、所要の品質として自らの近接目視による確認と同等の対策区分の判定ができるのであれば、点検箇所の一部について、その他の方法（例えば非破壊検査技術）で状態を把握し、対策区分の判定を行っても良いということが明確になった。これは要注意・対策箇所のスクリーニング的な役割を明確にしたものと考えられる。また対策区分の判定において、変状要因が外力か、材料劣化に依存したものか、進行性が伴うものか、において、その結果に左右され、影響力が高くなったことが伺える。

国土交通省では，定期点検業務の生産性向上を目的として，新技術の導入を後押ししている。新技術の採用決定までの発注者と受注者双方の協議手順や留意点などをまとめたガイドラインおよび個別の技術をまとめた性能カタログを公表している。これらの技術を適用することで，点検の効率を高めることが期待されている。

1.1.3 研究目的

本研究プロジェクトは、こうした背景を経て、非破壊検査技術に代表されるトンネル走行型計測を効果的な支援技術として立証・実装化するために設立された。本研究では、点検支援技術をいかに高度化して、健全性診断に活用し、社会実装化に向けて、より有用な道路トンネルマネジメント手法を確立することである。その手段として、①これまでの計測結果を用いて、若手・熟練技術者による模擬診断を行い、診断結果の精度向上を目指し、点検支援技術として非常に効果的であることを実証、②変状原因の外力・材料劣化、進行性の評価法の確立とマニュアル化、③活用範囲、精度、運用方法の明確化、④支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化、⑤点群データから得られる正確な 3 次元形状データ活用方法の明確化を行うものである。

本研究は、現状で直面する課題に対する改善策として結果を取りまとめ、さらに飛躍した合理的かつ効率的なトンネルマネジメントを実施していくことを目的としている。

1.1.4 研究内容

それぞれの研究項目に対する年度別の研究内容を表 1.1.2 に、年度研究目的を表 1.1.3 に示す。

表 1.1.2　年度別研究内容

年度	研究内容
2018 年度	(1) 非破壊検査技術によるトンネル点検支援技術の高度化検討 有用な走行型計測機器の選別、計測、データの取得方法の整理検討 (2) AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上 各代表データの取得、画像 AI 教師データ作成、解析方法の検討、試行 (3) トンネルデータベースの有効活用検討 3 次元形状データによる出来型検測、従来手法よりも誤差を適正化した高度解析技術の検討
2019 年度	(1) 非破壊検査技術によるトンネル点検支援技術の高度化検討 計測方法、データ取得方法、解析方法の標準化検討、運用マニュアル検討 (2) AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上 データ取得、画像以外計測データによる AI 教師データ作成、機械学習 (3) トンネルデータベースの有効活用検討 データベースの活用方法の検討、現地検証・実験、再検討
2020 年度	(1) 非破壊検査技術によるトンネル点検支援技術の高度化検討 新技術を含めた非破壊検査技術の整理・検証、レーザ精度検証（現地検証・実験）、 非破壊検査によるうき検出の検討、支援内容の検証・確立、施工時の活用、 運用マニュアルの検討、コスト縮減・仕様の検討、取りまとめ (2) AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上 AI 判定精度の向上検討、実トンネルによる検証、取りまとめ (3) トンネルデータベースの有効活用検討 現地検証・実験、データベース構築、検証、取りまとめ

表 1.1.3　年度別研究目的表

研究項目	目的	2018年度	2019年度	2020年度
①非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化	✓ 変状原因（外力or材質劣化、進行性）の評価法の確立とマニュアル化 ✓ 活用範囲、精度、運用方法の明確化	支援技術の明確化 ・変状種別、精度 ・個人差、バラツキ 検出精度向上検討 ・レーザ点群の特徴 ・点群からの特徴量の抽出 走行型計測機器の選別、計測方法、データ取得方法、解析方法、レーザ精度検証	レーザ計測検出能力、精度検証 ・実トンネル実証試験・レーザ計測の課題 ・断面計測精度 ・速度による誤差精度 ・再現性検証	レーザ計測検出能力、精度検証 ・実トンネル補足検証 ・レーザ計測評価法 実装化検討 ・画像新技術の評価 ・うき検出検討 ・支援内容の検証・確立、 ・施工時の活用 ・運用マニュアル ・コスト縮減、標準仕様
②画像・計測データへのAI技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上	✓ 支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化	AI診断の効率化・精度向上検討 ・走行型計測の課題 ・トンネル構造物点群の抽出手法の試行 課題の明確化	AI診断の効率化・精度向上検討 ・入力ツールの開発 ・実トンネルにおける入力作業 AIによる健全部の診断，スクリーニング技術の開発	適切な教師データによるAI学習 ・変状，展開図，判定をセットにして属性付与
③i-Construction推進に向けたトンネルDBの有効活用検討	✓ 点群データから得られる正確な3次元形状データ活用方法の明確化	既設トンネルデータを用いた画像解析 ・計測の実施、解析 誤差を適正化した高度解析技術による変形評価法（位置情報・差分解析）	位置推定手法の開発 ・スキャンマッチング活用における誤差分布	レーザ計測検出能力、精度検証 ・正しい中心軸の決定 ・3次元計測の最適化検討（SLAM活用） ・位置情報の有効活用

1.1.5 研究フローチャート

本研究プロジェクトの全体のフローを図 1.1.1 に示す。

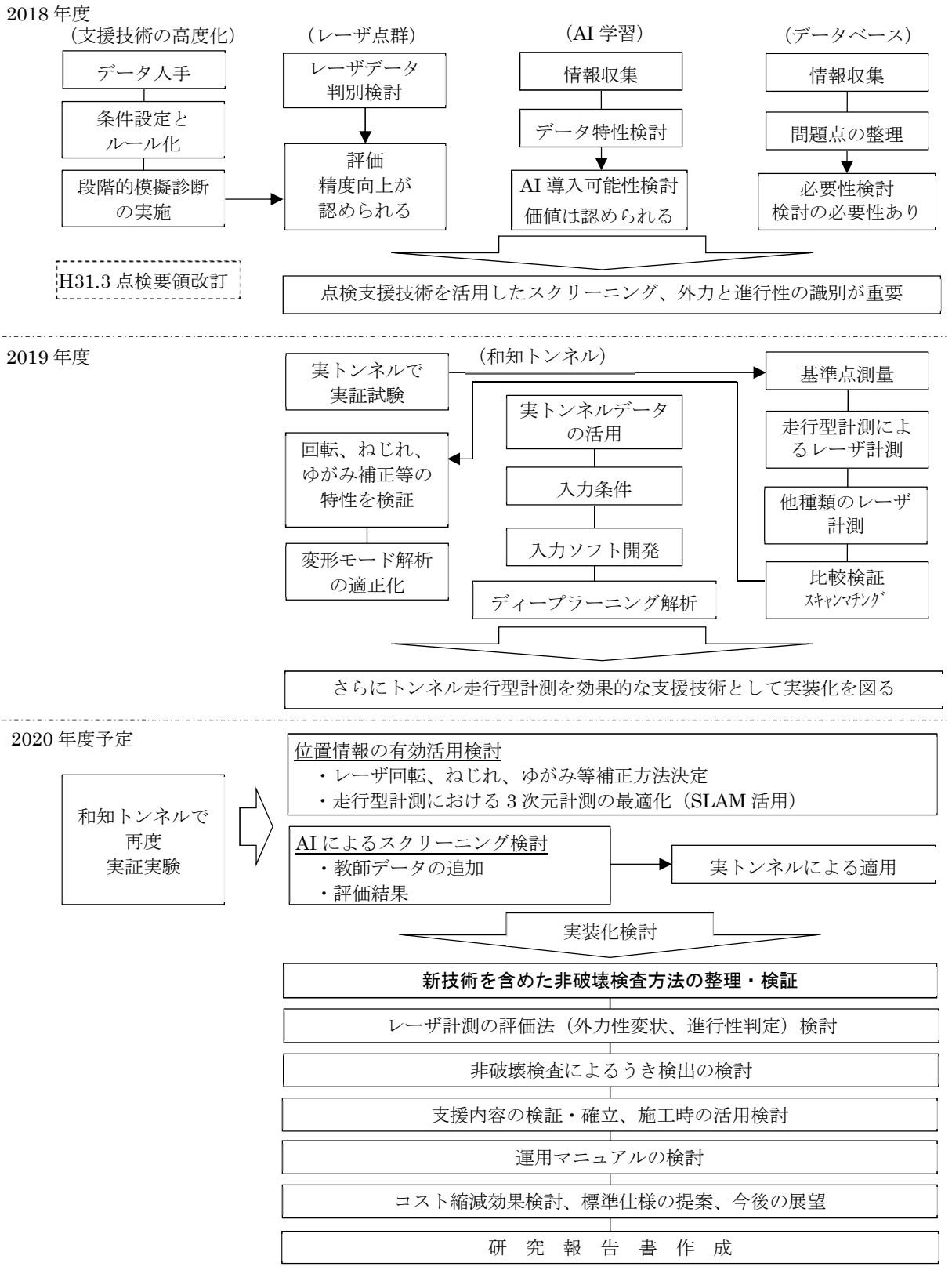


図 1.1.1　研究フローチャート

1.1.6 研究会構成

本研究プロジェクトの研究構成員（計 55 名）を、表 1.1.4 に示す。

表 1.1.4　研究会構成員（最終年度）

種別	氏名	所属･役職	種別	氏名	所属･役職
プロジェクトリーダー	石川 貴一朗	日本工業大学 基幹工学部 機械工学科 准教授	官	吉津 宏夫	近畿地方整備局 道路部 道路保全企画官
学	西山 哲	岡山大学 大学院環境生命科学研究科 教授		松本 太一	近畿地方整備局 道路部 道路構造保全官
	小山 倫史	関西大学 社会安全学部 准教授		中村 恭介	近畿地方整備局 道路部 道路工事課 課長補佐
	天野 嘉春	早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 機械科学･航空宇宙学科 教授		谷川 勝	近畿地方整備局 道路部 道路工事課 改良係長
オブザーバー	大西 有三	京都大学 名誉教授		田中 克己	近畿地方整備局 近畿技術事務所 総括技術情報管理官
産	西川 啓一	iシステムリサーチ㈱ 代表取締役社長		米村 克己	近畿地方整備局近畿技術事務所 施工調査･技術活用課 課長
	服部 明彦	㈱ウエスコ トンネル設計事業部 部長		大谷 泰士	近畿地方整備局近畿技術事務所 施工調査･技術活用課 専門官
	北澤 隆一	(株)ウォールナット 新規事業グループ 技術課長		高祖 亮一	近畿地方整備局近畿技術事務所 技術情報管理官
	山内 政也	応用地質㈱ 社会インフラ事業部 技術部 部長代理		富永 義人	近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 保全対策官
	佐藤 元紀	応用地質㈱ メンテナンス事業部 技術部 グループマネジャー		増田 寛四郎	近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 技術課長
	中西 昭友	応用地質㈱ 常務執行役員 本部長		松原 優也	近畿地方整備局 近畿道路メンテナンスセンター 技術課 工務係長
	井上 彰	㈱オリエンタルコンサルタンツ 関西支店 地下構造部 技師長		宮川 久	一般財団法人先端建設技術センター 近畿センター長
	西浦 清貴	㈱オリエンタルコンサルタンツ 関西支店 総合技術部 副主査		大津 隆治	一般財団法人先端建設技術センター 近畿センター グループリーダー
	野中 砂男	㈱オリエンタルコンサルタンツ 関西支店 事業企画部 理事		前田 徹	一般財団法人先端建設技術センター 近畿センター タスクマネジャー
	有高 慎也	計測検査㈱ 営業部 部長		中山 昭二	一般財団法人先端建設技術センター 近畿センター タスクマネジャー
	舛添 和久	計測検査㈱ 経営企画室 室長		白木 達成	一般財団法人先端建設技術センター 中部センター 次長
	野村 貢	㈱建設技術研究所 東京本社 上席技師長		山崎 哲也	㈱高速道路総合技術研究所 道路研究部 トンネル研究室長
	清野 義人	㈱建設技術研究所 東京本社 道路交通部 副参事		寺戸 秀和	一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第一部
	禿 和英	㈱建設技術研究所 東京本社 道路交通部 担当部長		先本 勉	一般社団法人近畿建設協会 技術部長
	長沼 諭	㈱鴻池組 土木事業総括本部 技術企画部 課長			
	平山 貴司	国際航業(株) インフラマネジメント部 道路計画担当部長	幹事	水口 尚司	㈱ニュージェック 交通･都市部門 部門長
	義永 茂司	㈱ニュージェック 交通･都市部門 大阪道路グループ 特任技師			
	石村 勝伸	㈱ニュージェック 交通･都市部門 九州道路グループ グループマネジャー			
	中園 康平	㈱ニュージェック 交通･都市部門 大阪道路グループ 道路第二チーム マネジャー			
	安田 亨	パシフィックコンサルタンツ㈱ 交通基盤事業本部 技術理事			
	重田 佳幸	パシフィックコンサルタンツ㈱ インフラマネジメント部 技術部長			
	田近 宏則	パシフィックコンサルタンツ㈱ 大阪交通基盤事業部 道路･トンネル室 室長			
	塩崎 正人	三井住友建設㈱ 技術本部 デジタルコンストラクション推進部 主任研究員			
	細野 秀人	三菱電機㈱ 社会環境事業部 社会システム第二部企画政策課 担当部長			
	中田 雅文	三菱電機㈱ 神戸製作所 社会システム基盤技術部 計画課(本社駐在) 課長			
	渡邊 光雄	三菱電機㈱ 神戸製作所 社会システム基盤技術部 技術課 担当課長			
	佐野 恵美子	三菱電機㈱ 神戸製作所 社会システム基盤技術部 計画課(本社駐在) 専任			
	長塚 敬介	ライカジオシステムズ㈱ ジオスペーシャルソリューション事業部 事業部長			
	Romain Sallenave	ライカジオシステムズ㈱ リアリティキャプチャー事業部 マネージャー			
	今福 成徳	ライカジオシステムズ㈱ リアリティキャプチャー事業部 サポートエンジニア			

1.2 研究方針

1.2.1 基本方針

本研究の各研究項目における、基本方針を以下に示す。

① 非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化
　課題⇒専門技術者不足の対応、損傷原因の特定力の向上
② 画像・計測データへの AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上
　課題⇒点検調書等の作成時間の短縮、診断の確実性と時間の短縮
③ Construction 推進に向けたトンネルデータベースの有効活用検討
　課題⇒損傷原因の特定が早期に可能となりより確実な診断が可能と時間短縮につながる

上記基本方針のおける重要テーマを以下に示す。

① 外力性変状の有無、進行性評価について、実トンネルにおいて具体的な検証結果を示し、実用化検討を実施する。
② 回転補正、縦断方向の位置補正の実用化検証を実施する。
③ AI を活用した健全部のスクリーニングについて、有効性を検証する。
④ 非破壊検査、ロボットなどの新技術を活用し、対策工区分の目安に対して支援できる内容とレベルを明確にし、健全度評価の効果検証および実用性検討を行う。
⑤ 本研究の技術を活用した場合の、コスト縮減効果について検討する。
⑥ 運用マニュアル、および発注仕様の案を作成する。

本研究では、上記の検討課題をクリアし、点検支援技術をいかに高度化して健全性診断に活用するかを第一の研究ポイント（図 1.2.1　基本方針における研究ポイント参照）にした上で、AI、デジタルツイン（図 1.2.2 参照）など新技術の活用も踏まえ、一層効果的で合理的なスマートインフラマネジメント手法の確立に向け取り組んでいく。

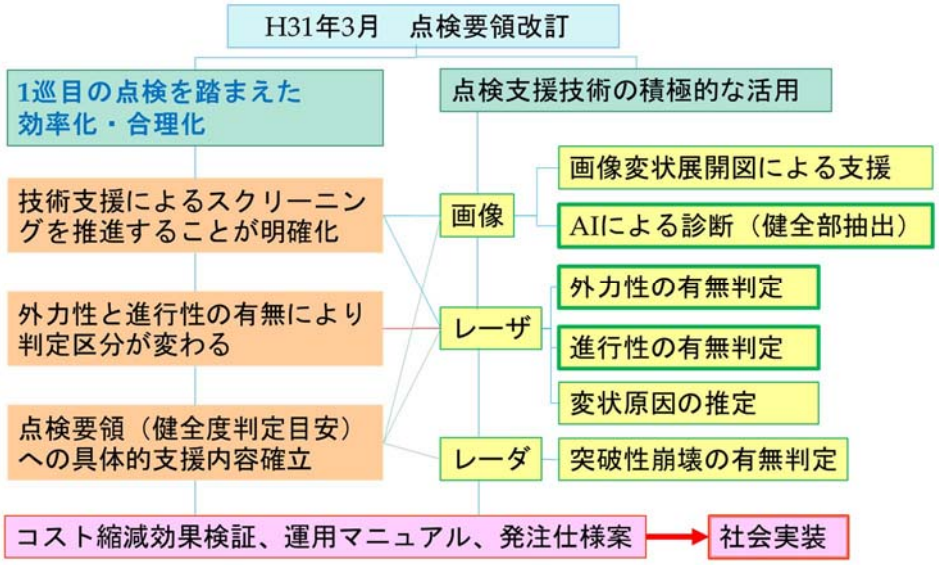


図 1.2.1　基本方針における研究ポイント

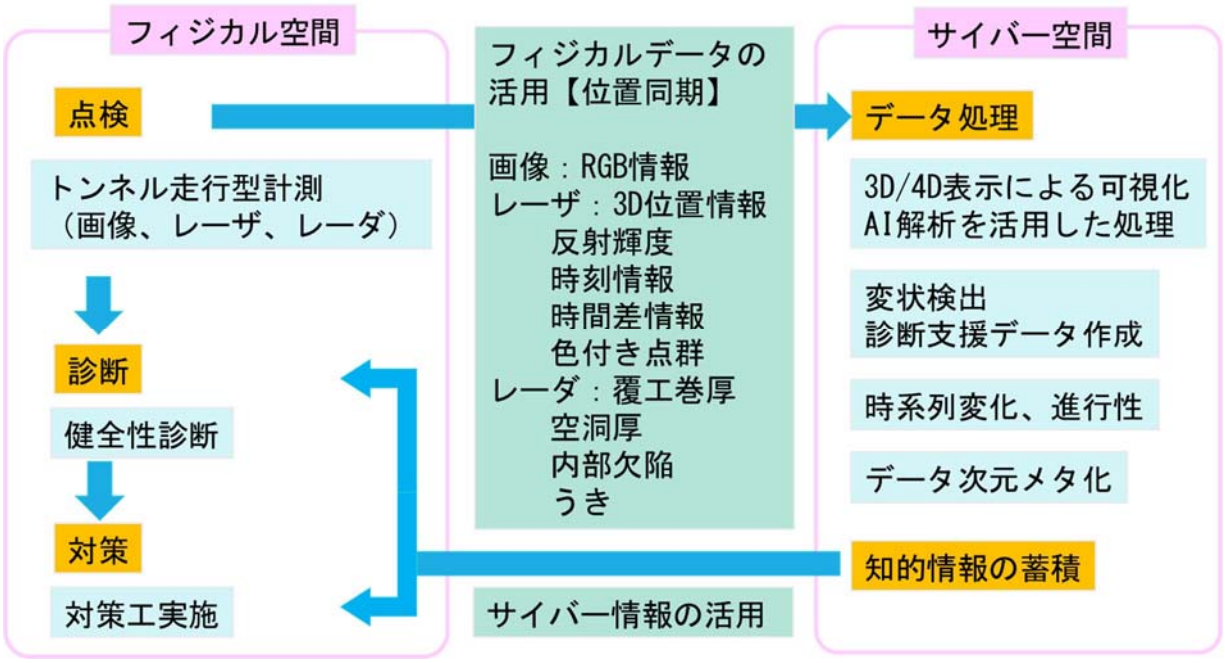


図 1.2.2　デジタルツインの具現化による健全度診断技術の高度化

1.2.2 現地調査の実施

本研究におけるそれぞれの課題解決と非破壊検査技術の有効活用・促進に向けて、近畿地方整備局管内の実トンネルを対象として、実証実験を目的とした現地調査を実施した。実証実験は、研究年度 2 年目、3 年目（2019 年度、2020 年度）の 2 箇年にわたって調査を行った。

対象トンネルは、近畿地方整備局管内のトンネルのうち、これまでに定期点検および走行型計測の履歴が 2 回以上（前回からの変状の進行や変化を客観的に確認できるため）あり、500m 以上の延長と平面曲線で両坑口が見通せない、歩道の作業スペースが比較的広いこと（3.0m 程度）を条件として、福知山河川国道管内の「和知トンネル」が適合することが確認された。

道路管理者である近畿地方整備局並びに福知山河川国道事務所にご協力いただき、調査を実施した。

① 路線：国道 27 号
② 住所：京都府船井郡京丹波町本庄
③ 名称：和知トンネル
④ 竣工：平成 10 年
⑤ 延長：740.0m
⑥ 施工法：NATM
⑦ 幅員：11.75m（歩道 3.0+路肩 0.5+車道 3.5+3.5+路肩 0.5+監査路 0.75）

1.2.3 報告書構成

上記方針に基づき、本研究成果として、図 1.2.3 の構成により報告書を取りまとめる。

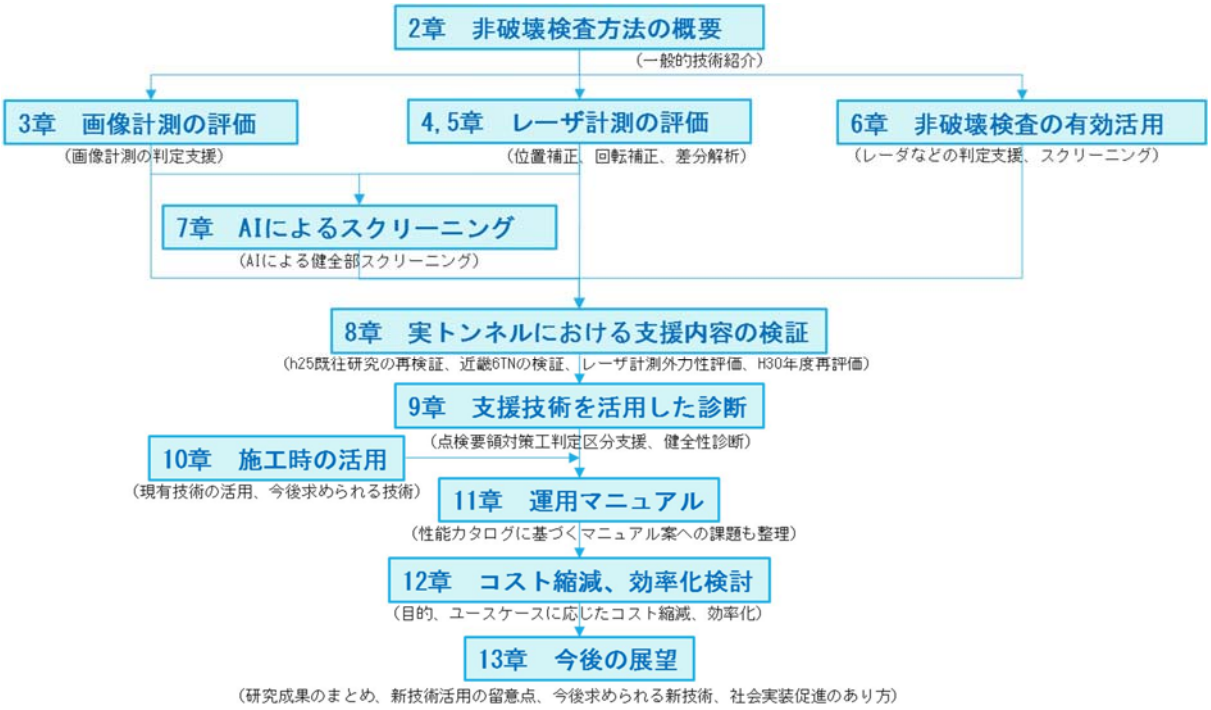


図 1.2.3　報告書構成

1.2.4 用語の定義

本報告書で使用する用語の定義は表 1.2.1 のとおりとする。

表 1.2.1　用語の定義

単語	一般的な意味	本プロジェクトでの定義
支援	力を貸して助けること	点検、診断、内業を新技術によって効率化、省力化、高精度化、客観化、コスト効率、高付加価値を高める行為
補完	不十分な部分を補って、完全なものにすること	点検、診断、内業に対して、従来点検の人力によって行っていた行為を部分的に補って、効率化、省力化、高精度化、客観化、コスト効率、高付加価値化すること
代替	それに見合う他のもので代えること 代わり	点検、診断、内業に対して、従来点検の人力によって行っていた行為を完全に置き換えて、効率化、省力化、高精度化、客観化、コスト効率、高付加価値化すること。 代替とは、完全代替をいう。
高機能化	必要なものが十分に備わること（状態を示している）	人力によって行っていた従来点検による結果以上の高付加価値化を実現すること。 例えば、自動化、遠隔化など将来構想に相当する高付加価値化をいう。
高度化	仕組みなどになること高度になること、高度な方法や仕組みなどになること	同左 研究タイトルに使っているため、総合的な定義にならざるをえない。

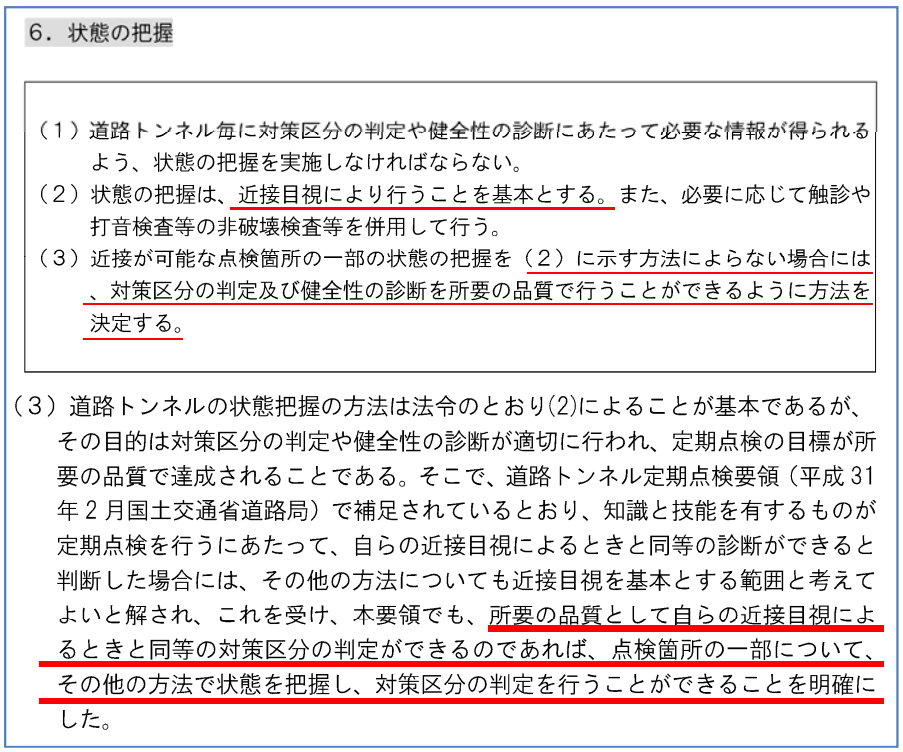
※点検、診断、内業に対して、目的に応じて効率化、省力化、高精度化、客観化、コスト効率、高付加価値の対象・種別が異なる。

2　非破壊検査方法の概要

従来のトンネル点検手法は、交通規制を必要とし、専門技術者が徒歩で調査を行った結果を点検表及び変状記録図に記録するというものであった。個人の技量差により評価のばらつきが発生する可能性や、変状の見落とし等のヒューマンエラーの恐れも想定された。また、交通規制はトンネル利用者に大きな負担をかけると同時に、交通事故の誘発も起こしかねない。この問題を解決するべく、トンネル点検において非破壊検査技術が開発され、活用されるようになった。

2.1 トンネル点検要領の変遷

道路トンネル点検要領は、平成 31 年 3 月に改訂され、近接目視と打音検査に対する新技術導入の考え方が図 2.1.1 のように示された。



6．状態の把握

（1）道路トンネル毎に対策区分の判定や健全性の診断にあたって必要な情報が得られるよう、状態の把握を実施しなければならない。
（2）状態の把握は、近接目視により行うことを基本とする。また、必要に応じて触診や打音検査等の非破壊検査等を併用して行う。
（3）近接が可能な点検箇所の一部の状態の把握を（2）に示す方法によらない場合には、対策区分の判定及び健全性の診断を所要の品質で行うことができるように方法を決定する。

（3）道路トンネルの状態把握の方法は法令のとおり(2)によることが基本であるが、その目的は対策区分の判定や健全性の診断が適切に行われ、定期点検の目標が所要の品質で達成されることである。そこで、道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 2 月国土交通省道路局）で補足されているとおり、知識と技能を有するものが定期点検を行うにあたって、自らの近接目視によるときと同等の診断ができると判断した場合には、その他の方法についても近接目視を基本とする範囲と考えてよいと解され、これを受け、本要領でも、所要の品質として自らの近接目視によるときと同等の対策区分の判定ができるのであれば、点検箇所の一部について、その他の方法で状態を把握し、対策区分の判定を行うことができることを明確にした。

図 2.1.1　点検要領抜粋 [1] **を加工**

要領によると、所要の品質として自らの近接目視によるときと同等の対策区分ができるのであれば、点検箇所の一部について、その他の方法で状態を把握することが可能となった。

また、令和 2 年 6 月には、国土交通省より点検支援技術性能カタログ（案）（以下「性能カタログ」と記載）がとりまとめられ、定期点検で点検支援技術の活用を検討する場合、性能カタログに掲載された技術を参考にすることが可能となった。また、今後の技術開発の進展に応じ、性能カタログに掲載した技術は適宜見直しを行う予定となっている。性能カタログでは、画像検査技術、非破壊検査技術、計測・モニタリング技術が掲載されている。

平成 26 年度と平成 31 年度のトンネル点検要領において、改定のポイントとして、近接目視と打音検査に対する新技術導入の考え方は、下記の通りである。平成 26 年度と平成 31 年度のトンネル点検要領を比較すると、近接目視と打音検査に対する新技術導入の考え方が図 2.1.2 に示すように改訂されている。点検要領の改訂により、さらに点検支援技術の活用が期待されている。

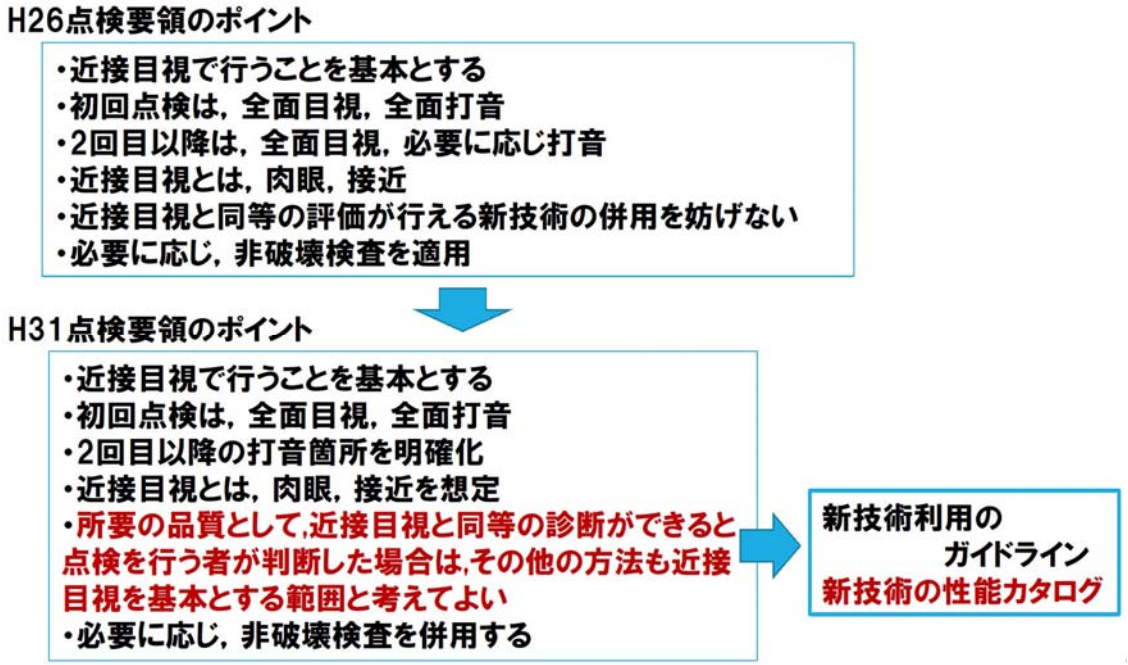


図 2.1.2　点検要領の変遷 [1) 3)] を加工

2.2 トンネル定期点検における本体工（覆工）の状態把握の留意点

トンネル定期点検における、本体工（覆工）の状態把握の留意点として、国土交通省道路局国道・技術課より、参考資料（令和 2 年 6 月）が発行されている。以下、抜粋して記載する。

1)　覆工に発生する変状の要因 [2)]

状態の把握においては、変状の発生する原因にも留意しておくとよい。変状の原因は外力の作用等の外因と使用材料や施工等の内因に大別できる。うき・はく離、はく落は、外力の作用等に起因したひび割れよって、うき・はく離が発生する場合と覆工材、補修・補強材の劣化に伴い、うき・はく離が 発生する場合がある。覆工に発生する変状の原因を表 2.2.1 に示す。外因（外力）によって発生する 変状は、変状区分「外力」に分類される。なお、内因（施工、設計）にある 覆工巻厚不足やインバートの未設置等によって覆工耐荷力が不足する状態で外力が作用すると外力による変状が顕在化する場合もある。発生する変状は外因、内因それぞれの変状原因が複合的に作用して顕在化するのが一般的であることに注意する必要がある。

表 2.2.1　覆工に発生する変状の原因[2)]

		変状の原因
外因	外力	【地形・地質によるもの】 緩み土圧、膨張性土圧、偏土圧、斜面のクリープ、 地すべり、支持力不足
		【地下水によるもの】 水圧、凍土圧
		【その他の原因】 近接施工、地震、地殻変動等
	環境	【経年によるもの】 経年劣化、鋼材腐食
		【地下水によるもの】 漏水、凍害
		【劣化促進によるもの】 塩害、有害水
		【その他の原因】 火災等
内因	材料	【骨材、セメント、コンクリートによるもの】 異常凝結、水和熱、低品質骨材、反応性骨材、 ブリーディング、乾燥収縮等
	施工	【コンクリートの施工によるもの】 打込み不良、締固め不良、養生不良、巻厚不足、 背面空洞等
		【鉄筋組み立てによるもの】 配筋の乱れ、かぶり不足等
		【型枠によるのもの】 型枠変形、早期脱型、支保工の沈下等
	設計	インバート無し、支持力不足等

2)　変状の種類及び変状区分との関係[2)]

表 2.2.2 に健全性の診断に用いる変状種類及び変状区分との関係を示す。うき・はく離は、変状区分「外力」または「材質劣化」に区分される。

表 2.2.2　変状の種類及び変状区分との関係[1)]

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

「外力」はトンネルの外部から作用する力をいう。「材質劣化」は、使用材料の品質や性能が低下するものであり、施工に起因する不具合もこれに含む。 なお、変状種類とは変状として現れる事象であり、変状区分は基本的には変状の要因を区分したものである。したがって、表 2.2.2 でいう変状区分は、必要となる対策の区分とは異なることに注意する必要がある。たとえば、材質劣化による変状が生じている場合にも、必要に応じて外力への対策が必要となる場合などがある。

3) 近接目視によらない場合の留意事項 [2)]

健全性の診断の根拠となる状態の把握は、近接目視によることが基本であるが、知識と技能を有するものが自らの近接目視によるときと同等の診断ができると判断した場合には、点検箇所の一部についてその他の方法で状態の把握を行うことができる。ただし、道路管理者においては、定期点検として所要の品質が確保されなければならないことに注意する必要がある。そのため、その他の方法の活用の範囲や対象となる変状種類等について確認し、状態の把握の内容に不足する事項等がないように留意する。

健全性の診断の品質を確保するためには、道路トンネルやその維持管理等に関する必要な知識や経験、道路トンネルに関する相応の資格等、定期点検に関する技能を有したものが従事することが重要であり、その他の方法として新技術等を活用して状態の把握を行う場合においても同様である。

4) 新技術活用に関する留意事項 [2)]

新技術等を活用して状態の把握を行う場合は、要領及び点検に関する「新技術利用のガイドライン（案）（平成 31 年 2 月 国土交通省）」、「点検支援 技術性能カタログ（案）（令和２年６月 国土交通省）」（以下「性能カタログ」という。）、「モニタリング技術も含めた定期点検の支援技術の使用について（参考資料）（令和 2 年 6 月 国土交通省道路局国道・技術課）」が参考となる。

点検箇所の一部について、近接目視によらない新技術等を活用した方法により状態の把握を行う場合の技術としては、近接目視の支援技術、打音検査の支援技術、点検記録に関する技術等があげられ、これらの技術は主に画像計測技術、非破壊検査技術に分類される。

トンネルにおける画像計測技術は、主にひび割れを検出する技術が多いが、ひび割れの発生状況を把握することは、うき・はく離の発生を検出する上で有効な手段と考えられる。画像計測技術には、車両に搭載されたカメラやレーザーなどの計測機器により覆工表面の状態を記録するもの等がある。最近では、覆工表面の画像撮影を実施し、取得した画像データを参考に変状展開図を作成、または照合することで人力によるスケッチに比べて変状の位置や規模等の確認や時間短縮等、点検または記録の効率化につながることから実施されている事例がある。

非破壊検査技術には、専用の機器等の使用により遠隔からの打音計測を行い、うき・はく離の発生を検出するもの等がある。また、高解像度のデジタルカメラやレーザー、赤外線カメラ等を組み合わせた技術により、覆工に発生している圧ざ、ひび割れ、うき・はく離、鋼材腐食、漏水等による変状などを自動検出する技術の開発も進められている。

なお、利用者被害の可能性のあるうき・はく離については、ハンマーを用いた叩き落とし等の

応急措置を含めた対応が必要なことにも留意する。

なお、措置の一部として監視を行う場合にモニタリング技術の使用を計画するにあたって、少なくとも勘案されるべき、基本的な注意点については、「監視計画の策定とモニタリング技術の活用について（参考資料）（令和 2 年 6 月 国土交通省道路局 国道・技術課）」が参考となる。

2.3 非破壊検査技術の概要

性能カタログより、トンネルにおける支援技術に加え、NETIS 登録技術や、本プロジェクト参加企業の点検支援技術など整理する。

性能カタログでは、下記の 3 分野で整理されており、これを踏襲する。

① 画像計測技術

② 非破壊検査技術

③ 計測・モニタリング技術

これらの技術は、単独で活用するケースや、組み合わせて活用するケースがある。

単独で活用するケース、また組み合わせて活用するケースについては、変状の種類別に整理し、かつ要求性能も合わせて整理する事で、ユースケースと実務レベルにおける要求性能をとりまとめる（2.4 に記載）。

3 章より、それぞれ 3 分野の非破壊検査技術について紹介する。

2.4 画像計測技術

性能カタログより、表 2.4.1 にトンネルにおける支援技術に加え、NETIS 登録技術や、本研究プロジェクト参加企業が所有する画像計測技術を整理する。

画像解析では、主に「圧ざ・ひび割れ」「うき・はく離」「鋼材腐食」「漏水等による変状」が支援可能となっている。また、画像撮影と画像解析による支援技術があり、主に画像撮影については、走行型の計測車により、交通規制を必要としない技術となっている。画像解析については、取得した画像から、変状を自動抽出する技術となっており、変状抽出の高度化、省力化を目的に開発が進められている。

表 2.4.1　画像解析技術一覧

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ登録番号
画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ定量評価技術	CB-180027-A	TN010001-V0020
社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」	KT-190025-VR	TN010002-V0020
走行型高精細画像計測システム　トンネルトレーサー	CB-180027-A	TN010003-V0120
一般車両搭載型トンネル点検システム	KT-190062-VR	TN010007-V0020
トンネル覆工表面撮影システム	KT-190037-VR	TN010008-V0120
トンネル覆工点検システム　eQ ドクターT	QS-170015-VR	－
道路性状測定車両イーグル　L&L システム	SK-160013-A	TN010004-V0120
社会インフラモニタリングシステム MMSD	HR-180004-VR	TN010005-V0020
走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）	KK-130026-VR	TN010006-V0120
3D トンネルレーザー計測システム	KT-170093-A	―
走行型近赤外線撮影による SfM 三次元画像解析システム	－	－

表 2.4.2～表 2.4.3 に画像計測技術の一覧表を挙げる。

また、表 2.4.4 に NETIS テーマ設定型の「道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術」の一覧表を挙げる。

表 2.4.2　画像解析技術一覧表（１/２）[3)]

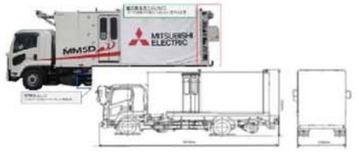
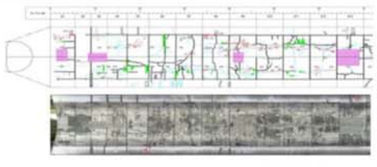
		「点検支援技術 性能カタログ（案）　令和２年６月　国土交通省」に掲載されている画像計測技術（ひびわれ）				
技術番号		TN010001−V0020	TN010002−V0020	TN010003−V0120	TN010004−V0120	TN010005−V0020
技術区分		画像解析技術	画像解析技術	走行型画像計測技術	走行型画像計測技術	走行型画像計測技術
（非破壊検査）					○	
（計測・モニタリング）						
技術名		画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ定量評価技術	社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」	走行型高精細画像計測システム(トンネルトレーサー)	道路性状測定車両イーグル(L&L システム)	社会インフラモニタリングシステム（ MMSD ®Ⅱ ）
開発者		大成建設株式会社	富士フイルム株式会社	中外テクノス株式会社	西日本高速道路エンジニアリング四国㈱	三菱電機株式会社
概要図		本技術の主な処理プロセスは，以下①～④のとおりである．①コンクリートのひび割れの写ったデジタル画像を入力 画像として，ひび割れ近傍を太線でトレースしてひび割れ候補領域を指定する．②この範囲の全ての画素に対して ウェーブレット変換を行い，一つひとつの画素ごとに得られるウェーブレット係数に基づいてひび割れを判別する．③ひび割れと判別された画素を抽出して，ひび割れ図をCAD形式ファイルに出力する．④ウェーブレット係数から画素ごとに ひび割れ幅を算定し，ひび割れ幅ごとのひび割れ長さのヒストグラムを描画する．また，ひび割れ総延長，平均ひび割れ幅，およびひび割れ密度（単位面積あたりのひび割れ長さ）を算出する．	撮影した計測機器(車載カメラ・ロボット等)の仕様に準ずる。 ・社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」はソフトウェアのため図面はなし。			
技術概要		コンクリートのひび割れをデジタル画像から画像解析により抽出し，幅や長さなどを定量的に評価する技術であり，ここにウェーブレット変換を用いていることを特徴とする．また，ひび割れを抽出して，定量的に評価するためには，いくつかの処理プロセスを経る必要があるが，本技術ではこれらを手順通りに実施できるようにひとつのプログラム ソフトに集約してシステム化している．	コンクリート構造物を撮影した写真からコンクリートに発生する「ひび割れの自動検出」と「ひび割れ幅の自動計測」をAIを活用した画像解析で行うシステムである。本技術の活用により従来人手で対応していた検出作業を削減できる。	走行型高精細画像計測システム（トンネルトレーサー）は、民生用4Kビデオカメラを使用して、交通規制なしで高解像度の覆工面画像を取得し、ひび割れやその他の変状を検出して展開画像や変状展開図を作成する技術である。	カラーラインセンサーカメラによる高精細な可視画像撮像システムを用いて、ひび割れ、はく離、漏水等の外観変状を検出する技術である。	三菱インフラモニタリングシステム（MMSD Ⅱ）は、8Kラインカメラ、高密度レーザーを搭載し、交通規制を行わずに走行しながらトンネル覆工面や路面を計測する技術である。 計測した結果は、高解像画像データ・3次元点群データとして出力する。これらのデータを三菱電機が独自に開発したソフトウェアにより解析し、ひび割れ、移動、遊離石灰、有効巻厚の減少、漏水等の変状を抽出する。
基本諸元		本技術は，①撮影条件設定，②分解能計算，③あおり補正，④画像合成，⑤ひび割れトレース，ならびに⑥ひび割れ画像解析の各プログラムから構成されており，これらをひとつのプログラムソフトに統合してシステム化したものである．		「移動用車両」に「専用フレーム」を積載した分離構造としている。積載した「専用フレーム」には複数の「ビデオカメラ」と「LED照明」を取り付け「制御盤」によりー括操作することで撮影を行う。		6t貨物車両をベースとした車両に高密度レーザー、GNSS、IMU、8Kラインカメラ等のセンシング機器を搭載
カメラ		・撮影条件・仕様等 1) 本画像解析技術を適用できる撮影画像の空間分解能の範囲：0.2～0.8mm/pixel 2) カメラ：デジタル一眼レフカメラ（推奨），デジタルカメラ 3) 撮影設定：三脚固定の場合は絞り優先設定（F6.3以上を推奨） UAV撮影の場合は露出速度優先設定（1/500秒以下を推奨） 4) ISO感度：200以下 5) ラップ率：30% 6) 画質：最高（ファイン） 7) 画質フォーマット：JPEG 8) 注意事項： デジタルズーム機能は使用しないこと	下記仕様を満たすミラーレス一眼カメラを推奨。または、フルサイズ一眼レフカメラ。 ・センサーサイズ：縦15.6mm×横23.5mm(APS-C以上) ・焦点距離（mm）：14mm～400mm ・ピクセル数：(1000Pixel×1000Pixel以上) ・ダイナミクスレンジ（bit）：8bit以上 ・コントラストAFは使用しない事を推奨	機器（ビデオカメラ）の諸元 ・ソニー製4Kビデオカメラ　FDR-AX100 ・センサーサイズ　1型（縦13.2mm×横8.8mm） ・ピクセル数（縦3840×横2160pixel） ・焦点距離（ｆ=9.3-111.6mm） ・フレーム数（30fps） ・覆工展開画像形式（オルソモザイク） ・覆工展開画像1スパンあたり（2車線道路・10.5m/スパンを目安）のデータ容量：約2GB（カメラ20台合計）	【カラーラインセンサーカメラ】 ・画素数（4096画素） ・覆工展開画像形式　：　その他（Jpeg） ・覆工展開画像1スパンあたり（2車線道路・10.5m/スパンを目安）のデータ容量　：　約25MB（Jpegの場合）	8Kラインカメラ ・ピクセル数：8192Pixel ・撮像範囲：壁面全周＋路面　※路肩部については、撮影環境により制限あり
運動性能	最小	－	－	幅3000mm×高さ4000mm程度	道路幅員2180mm×高さ3140mmよりも大きく、車両が走行できる	計測車両(全高：3.34m、幅：2.38m）が通過できるトンネル
	最大	－	－	車両との離隔が側方8m以上または上方8m以上となる場合は不可	計測機器との離隔が3.5m～5.0m程度	撮影するラインカメラの視点から7m
計測性能	撮影速度	－	－	40ｋｍ/ｈ	100ｋｍ/ｈ以下	最大80km/h
	計測精度	－	－	最小ひび割れ幅0.2mm　計測精度0.46mm	最小ひび割れ幅：0.3mm 計測精度：0.42mm	最小ひび割れ幅 0.3mm　計測精度 0.22mm
	長さ相対誤差	－	－	1.26%	1.80%	0.67%
	位置精度	－	－	進行方向：11.5mm（6測線の平均値） 周方向：35.8mm（6測線の平均値）	進行方向：63.7mm 周方向：28.7mm	縦断方向：17.5mm 進行方向：13.3mm
	色識別性能	－	－	フルカラー識別可能	フルカラー識別可能	グレースケール識別可能 輝度240未満で識別可能であり、輝度差約20を区別可能
画像処理・調書作成支援		「コンクリートのひび割れ画像解析プログラムtWAVE（ティー・ドット・ウェーブ）」（自社開発ソフト）	・社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」（ver.1.2）（当社クラウドサービス）	・「動画変換ver.1.0.0.24」（自社開発ソフト,①動画から静止画変換用） ・「連続変換ver.1.0.0.13」（自社開発ソフト、②オルソ補正用） ・「TT画像合成処理_V16.0」（自社開発ソフト、③画像結合用） ・「ひび割れ作画システムVer.1.1.15」（自社開発ソフト、④ひび割れ抽出＋⑤DXF変換用）	解析ソフト ： 自社開発ソフトを使用 （ライセンス契約による販売可）	三菱インフラモニタリングシステムⅡ（MMSDⅡ）オリジナルソフトウェア
画像処理の精度		・撮影画像の空間分解能が0.4mm/pixelの場合 測定点数144点に対して，解析値が実測値の±0.2mmの範囲にある割合は79%，±0.3mmの範囲にある割合は93% ・撮影画像の空間分解能が0.8mm/pixelの場合 測定点数216点に対して，解析値が実測値の±0.2mmの範囲にある割合は68%，±0.3mmの範囲にある割合は81%	・ひび割れ検出：検出したひび割れの総延長および本数の再現率・適合率がともに95%以上[日本全国47都道府県から収集したAI学習に使用していない画像で評価]			
概算費用		画像解析プログラムソフトの購入，あるいは一定期間のレンタル （ソフト価格：200万円/3ライセンス，レンタル価格：30万円/月）	写真1枚辺り～400円(消費税別）使用量に応じて減額。 2400万画素カメラの場合、1㎡あたりの単価:185円	・撮影：3,700千円（延長500m×10本） ・画像結合ソフト：「TT画像合成処理」（自社開発ソフト） ・解析ソフト：「ひび割れ作画システム」（自社開発ソフト） ・必要作業：担当者による解析作業 ・費用：50000円/ｋｍ	（外内業含む） 直接人件費　：　375,200円 直接経費費　：　1,762,000円 （周長17m×延長500m×10トンネルの場合）	10トンネル総延長4kmのトンネル点検時（目視打音検査含む） 55,327,000円
アウトプット例						

表 2.4.3　画像解析技術一覧表[3)]（2/2）

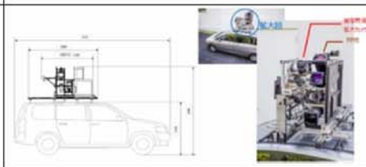
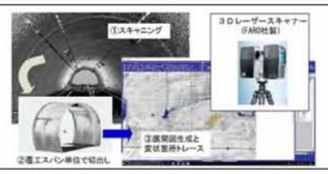
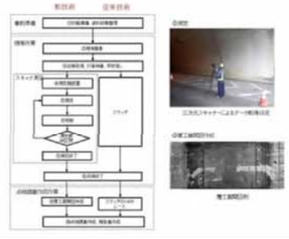
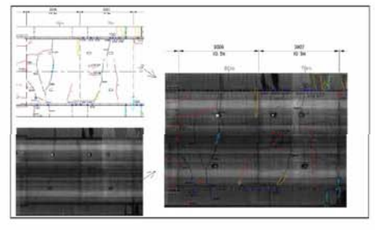
		「点検支援技術 性能カタログ（案）　令和2年6月　国土交通省」に掲載されている画像計測技術（ひびわれ）			未　掲　載	
技術番号		TN010006−V0120	TN010007−V0020	TN010008−V0120		
技術区分		走行型画像計測技術	走行型画像計測技術	走行型画像計測技術	画像計測技術	走行型画像計測技術
（非破壊検査）		○				
（計測・モニタリング）		○				
技術名		走行型高速 3D トンネル点検システム MIMMR（ミーム・アール）／MIMM(ミーム)	一般車両搭載型トンネル点検システム	トンネル覆工表面撮影システム	3Dトンネルレーザー計測システム	近赤外線画像撮影
開発者		パシフィックコンサルタンツ(株)　/ 計測検査(株)	株式会社リコー	（株）三井E&Sマシナリー、（株）トノックス	応用地質株式会社	国際航業株式会社
概要図						
技術概要		トンネル覆工壁面の連続画像撮影システム、高精度３次元レーザー計測システム、非接触レーダー探査システムを車両に搭載し、覆工表面ひび割れや漏水等の変状と、トンネル断面形状、巻厚、背面空洞等を計測する。走行型計測結果により覆工壁面展開画像および変状展開図を作成することで、近接目視点検前に変状位置を正確に把握することが可能となることから、高品質な変状展開図を作成することが可能となる。	一般車両に搭載したトンネル壁面計測装置とその展開画像を利用した調書作成支援のソフトである。計測装置は、複数のモノクロの被写界深度拡大ラインカメラ（※）と単色光のライン照明で構成され、40km/h程度で走行しながらトンネルの覆工部の画像を撮影する。画像処理技術により作成した（覆工面の）展開画像では、本体工における最小幅0.3mmのひび割れや漏水・チョーキング等の変状や附属物のねじの緩み等（合いマーク）を判別可能である。	トンネル覆工表面撮影システムは、カラーラインセンサカメラを搭載した専用車両で覆工表面を撮影しトンネル全体の展開図を作成する技術で、従来は近接目視点検時（目視検査）結果のスケッチで対応していた。	・本技術は、トンネル点検で実施される近接目視、打音検査、触診で覆工にマーキングされた変状の形状や寸法につ いて、三次元レーザースキャナを用いて高精度かつ高速に三次元点群データを取得する技術である。 ・また、取得された三次元点群データは専用ソフトを使用することにより覆工展開画像を自動で作成することができ、点 検調書を効率的かつ高精度に作成することができるようになった。	高解像度近赤外線デジタルカメラを用いた、トンネル走行型画像計測技術である。 照明としては、近赤外線照明（LED）を用い、煤を透過する波長特性を活かし、亀裂抽出精度向上を目指す。
基本諸元		3トン車両後方に切り替し可能な計測室を置き、撮影角度を0.1度刻み（位置決め精度0.03度）で調整可能な電動雲台、10倍の望遠機能を備えたデジタル・ビデオカメラ、録画装置、照明用のＬＥＤからなる画像撮影部と、高精度レーザースキャナ・ＧＰＳ・ＩＭＵ・オドメータ等で構成される高精度レーザー計測部、および2種類のレーダ計測部（覆工巻厚、背面空洞探査用レーダ、うきなど内部欠陥探査レーダ）からなる。高精度レーザスキャナは100万点／秒、回転数最大200回／秒の性能を備える。	「複数のモノクロの被写界深度ラインカメラ（※）及びライン照明を固定した計測装置」と「各カメラのデータを保存するSSDと処理装置を組み合わせた制御装置」と「制御装置とネットワークでつながっているオペレータが使用するノートPC」の構成であり、「移動車両」のルーフ部に計測装置を固定し、移動車両の中に制御装置が設置され、ノートPCにてオペレーションする。	カラーラインセンサーカメラ13台と高照度LEDを搭載した「カメラユニット」と「撮影画像処理装置」を「移動車両」に一体化させたものである。	設置型3Dレーザースキャナ	２ｔ貨物車両をベースに、高解像度近赤外線デジタルカメラ、近赤外線照明（LED）を搭載
カメラ		【ビデオカメラ】 ・有効画素数 38万画素 20台　(MIMM-R搭載) ・エリアカメラ、グローバルシャッター ・SS：標準は1／2000、50km/hの場合SS：1/3,000以上 ・動画フレームレート　30 fps ・照明　LED照明60台　3m離隔での照度は5,000lx程度 ・覆工展開画像形式　：　その他（覆工壁面正対画像(jpeg/AutoCAD外部参照反映可能)、必要に応じて、3次元テクスチャー作成も可能） ・覆工展開画像1スパンあたり（2車線道路・10.5m/スパンを目安）のデータ容量　：　50MB程度（3次元テクスチャー含まず）	・被写界深度拡大モノクロラインカメラ ・センサーサイズ（縦820mm×横0.2mm）、焦点距離（50mm以上） ※ 被写界深度拡大カメラは、通常のレンズと比べ明るさを維持したままピントの合う範囲を4-5倍近く広げることができる、「ピンボケしにくい」カメラであり、リコー独自の技術である。明るいレンズであるため、照明を省電力化でき、高解像 度の画像にも関わらず一般車両に搭載できるサイズを実現している。	・カラーラインセンサー ピクセルサイズ（5μm×10μm）：10μmピッチ 波長感度：350~1050nm(ピーク660nm) ピクセル数：4080　列配置 ライン転送速度：14.1kHz（データ転送速度56Mピクセル/ｓ） レンズ焦点距離：200mm（電動フォーカス、電動絞り機能付き） 覆工展開画像形式：オルソ 覆工展開画像1スパンあたり（2車線道路・10.5m/スパンを目安）のデータ容量：約2GB	なし	<table><tr><th>項目</th><th>概要</th></tr><tr><td>カメラ</td><td>・Basler製NIRカメラ　8台</td></tr><tr><td>波長</td><td>・近赤外線領域採用 ・スレースケール</td></tr><tr><td>有効画素数</td><td>・2,048×2,048dot(400万画素)</td></tr><tr><td>センサ</td><td>・CMOSグローバルシャッター (エリアセンサ)</td></tr><tr><td>レンズ</td><td>・12mm(0.92mm/pixel@2m)、絞り4.0 ・16mm(0.69mm/pixel@2m)、絞り2.8</td></tr></table>
運動性能	最小	R3.5m以上、R3.5m以下(SL1.5m程度)の場合、道路中央を走行することにより高さ3.8m幅3.5m程度まで対応可	道路幅員3300mm×高さ3350mm	被写体（トンネル覆工面）までの距離　車両中心から2,500㎜以上	トンネル覆工面までの距離0.6m以上	計測車両(全高：3.50m、幅：2.00m）が通過できるトンネル
	最大	R8.5m以下	道路幅員15000mm以下、高さ8500mm以下であれば撮影可能	被写体（トンネル覆工面）までの距離　車両中心から7,500㎜以下	−	撮影するカメラの視点から4m
計測性能	撮影速度	70ｋm/ｈ程度以下	40km/ｈ	最大撮影速度　80km/h	−	最大60km/h
	計測精度	最小ひび割れ幅0.2mm　計測精度0.43mm	最小ひび割れ幅 0.3mm 計測精度 0.100mm（手動にて設定した場合） 計測精度 0.326mm（自動検出結果に基づいて自動で設定した場合）	最小ひび割れ幅 0.2mm　計測精度 0.1mm	チョークによるマーキングの検出	最小ひび割れ幅 0.3mm
	長さ相対誤差	1.23%	0.88%	検証１：0.98%　検証２：0.55%	±2mm	検証中
	位置精度	進行方向：59.0mm（5測線の平均値） 周方向：19.7mm（4測線の平均値）	進行方向：54.0mm 周方向：15.7mm	検証１　進行方向：20.0mm／周方向：18.8mm 検証２　進行方向：38.2mm／周方向：9.3mm	−	検証中
	色識別性能	フルカラー識別可能	グレースケール識別可能 ほぼ全明るさ（輝度250末満）で識別可能であり、輝度差約10を区別可能	フルカラー識別可能	−	グレースケール識別可能
画像処理・調書作成支援		手法1）　ひび割れ自動抽出ソフト　HALCON （ライブラリ使用での自社開発） 手法2）　AIによる変状抽出ソフト（自社開発） ディープラーニング（CNN）　、セマンティックセグメンテーション	点検調書作成支援ソフト v1.1	「新トンネル解析ソフト ver1.0.0.7」（自社開発ソフト）	解析ソフト　：　自社開発ソフトを使用	3Dモデル作成は、フォトスキャン、展開画像は、Metashape
画像処理の精度		手法2）・ひび割れの検出：再現率80%程度（漏水、遊離石灰、チョーク、壁面汚れがひび割れに重なっておらず、明瞭なひび割れであった場合） ・漏水、遊離石灰、チョーク、壁面汚れなどがひび割れと重なっており、画像上ひび割れが分類できない状態の場合は、検出不能。 ・漏水、遊離石灰については、再現率80%～90%程度。	ひび割れの検出：正解率98.2%,精度90.6%,再現率87.8% （上記教師データのうち、9割を学習、1割をテストに用いて評価した結果）		検証中	検証中
概算費用		・トンネル500m程度　10本計測の場合 直接人件費 外業　3,500,000円 内業　11,000,000円 直接経費　3,500,000円 その他費　22,000,000円 業務価格　40,000,000円 （従来点検に比べ、30%程度縮減）	トンネルの所在地・全長等 撮影条件により異なる	撮影費用：トンネル延長1km当たり　2,363,950円 （諸経費は別途／平成30年度設計業務委託等技術者単価） 解析費用：トンネル延長1km当たり　1,389,700円 （諸経費は別途／平成30年度設計業務委託等技術者単価）	20,000㎡を対象に、計測および解析220万円	検証中
アウトプット例						

表 2.4.4　テーマ設定型　評価結果 [3)]

テーマ設定型「道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術」　評価結果

別紙－３

番号				1	2	3	4	5
技術名				三菱 インフラモニタリングシステムⅡ （ MMSD ㊗ Ⅱ ）	走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM(ミーム)	トンネル覆工点検システム (eQドクターT)	一般車両搭載型トンネル点検システム	トンネル覆工表面撮影システム
開発者				三菱電機株式会社	パシフィックコンサルタンツ株式会社	西日本高速道路エンジニアリング九州株式会社	株式会社リコー	株式会社三井 E&S マシナリー
共同開発者				なし	計測検査株式会社	西日本高速道路株式会社	なし	株式会社トノックス
NETIS番号				HR-180004-VR	KK-130026-VR	QS-170015-VR	KT-190062-VR	KT-190037-VR
NETIS登録技術名				社会インフラモニタリングシステム MMSD	走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM(ミーム)	トンネル覆工点検システム (eQドクターT)	一般車両搭載型トンネル点検システム	トンネル覆工表面撮影システム
技術概要				本技術は自動焦点機能を搭載した8Kの高解像度ラインカメラとレーザ照明により、走行しながらトンネル全周の高精細画像を撮影可能。また、毎秒100万点の計測が可能な高密度レーザを2台搭載しミリ単位の精度で位置座標を持つ毎秒200万点相当の高密度三次元点群データを収集可能。	本技術は道路トンネル定期点検を車両の高速走行で覆工面カラー画像と3次元空間位置データを計測するシステムで、従来は近接目視点検で対応していた。本技術の活用により、経済性・安全性・点検精度の向上、効率化、正確・客観的な変状展開図作成が可能となる。	最高時速100kmの高速走行でトンネル覆工表面を撮影し、取得した超高解像度のトンネル覆工表面画像からひび割れを自動抽出・図化するシステムである。また撮影照明の不可視化により他の通行車への影響も抑えた。	本技術は、普通自動車に被写界深度拡大カメラと照明装置を搭載した撮影車両で、トンネルを走行することで、覆工部の画像展開図を作成する。また、画像展開図を基に変状箇所を自動抽出もしくは手動でトレースし、変状情報・診断情報を登録することで、点検調書を所定のフォーマットで自動出力する。	本技術は、トンネル覆工コンクリート表面を高輝度LED ライトで照射、13 台のカラーラインセンサカメラで高速撮影することで、覆工コンクリート表面のひび割れ等の変状を高精度に計測する車載型システムである。
概要図								
計測対象部位				■トンネルアーチ部　■側壁部 ■路肩　■路面　■坑門	■トンネルアーチ部　■側壁部 ■路肩　■路面　□坑門	■トンネルアーチ部　■側壁部 □路肩　□路面　□坑門	■トンネルアーチ部　■側壁部 □路肩　□路面　□坑門	■トンネルアーチ部　■側壁部 ■路肩　■路面　□坑門
技術の特徴	必要な機器・装置等			専用車両	専用車両	専用車両	一般車両+計測装置	専用車両
	必要な能力・資格等			不要	不要	不要	不要	不要
	車輌寸法	車輌幅		2380mm	208 cm	2.2m		2.40m
		車輌高さ		3340mm	599 cm	3.7m		3.56m
				トラック6t級	トラック3t級	トラック3.5t級	一般車両	トラック4t級
	適用条件	天候		強風、強雨、降雪時は不可	雨天時は不可	雨天時は坑口が撮影不可	雨・雪、強風時は不可	雨天時不可 （トンネルまでの走行時にレンズに雨粒が付着するため）
		気温条件		-10～+45℃	0 ～ 40℃（動作時） -20 ～ 60℃（非動作時）	5℃～40℃程度	0～+40℃	0℃～40℃ （撮影システムの動作温度）
		時間帯・日射条件		昼夜問わず使用可能	特に指定なし	晴天時の太陽が真上に近い時間帯は，坑口天端部撮影用カメラに日光が差し込む場合がある．	制約無し	なし
		計測時の走行速度条件		10～80km/h	80 km/h以下	5～100km/h	40km/h以下	80km/h以下
		渋滞時の計測可否		10km/h程度の継続走行であれば計測可能、停止する場合は計測不可	可能であるが推奨しない	車両が停止すると再発進時に画質に乱れが生ずる可能性がある．	30秒以上停車しなければ問題なし	可
		設備等による死角条件		表面からの撮影のみ。（設備等がトンネル壁面に付帯している場合は設備を撮影し、設備の背面にある壁面は写らない。）	照明機器やジェットファン背面等の計測車両から視認できない部分、坑門面壁、非常駐車帯妻壁	設備裏のコンクリート面は撮影及び変状把握が不可能	照明設備の背面など車線上から死角となる箇所の撮影は不可	設備背面の撮影は不可
		車輌から覆工表面までの距離条件		0.3～8.0m	10 m程度以下	約7m以下（覆工面がスス等により汚れていない場合に限る）	概ね8m程度	なし
		トンネル延長の制約		なし	特に制約なし （連続記録時間３時間以内）	制約なし（複数回撮影及び記録媒体交換による）	10km	40km
		車線数の制約		なし（複数回走行により複数車線での計測に対応）	特に制約なし （複数回計測することで対処可能）	２車線以上	3車線以上も計測可能 （ただし、車両から覆工表面まで約8mの範囲内）	なし
		断面形状の制約		円形、馬蹄形、矩形に対応	車両走行できない狭小断面は不可	トンネル内空幅：およそ9～15m	トンネル内空幅：6.6m以上	トンネル内空幅：3.0m以上
		トンネル内照明の消灯の必要性		なし	なし	なし	なし	なし
		その他の条件		—	ひび割れが目視できる覆工面状況	覆工面のススなどの汚れが著しい場合、およびひび割れの直上にチョーキングが施されている場合など、ひび割れ開口部が閉塞されている状況では、ひび割れの確認レベルは著しく低下する。	レーザー安全管理者の選定が必要	ス汚れ等目視できない変状は検査不可

2.5 非破壊検査技術

性能カタログより、トンネルにおける支援技術に加え、NETIS 登録技術や、本研究プロジェクト参加企業が所有する非破壊検査技術を整理する。

非破壊検査技術では、主に「うき・はく離」「巻厚の不足または減少、背面空洞の有無」が支援可能となっている。

表 2.5.1 に非破壊検査技術の一覧表を挙げる。その内容を表 2.5.2～表 2.5.5 に示す。

表 2.5.1　非破壊検査技術一覧

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ登録番号
デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	―	TN020001－V0020
道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	―	TN020002－V0020
レーザー打音検査装置	－	TN020003－V0020
天秤方式移動型レーダ探査技術	－	TN020004－V0020
打音検査ユニット	－	TN020005－V0020
走行型高速３Ｄトンネル点検システム ＭＩMM－Ｒ（ミーム・アール） －レーダ探査技術－	KK-130026-VR	TN020006－V0020
ドローンレーダによる覆工探査技術	―	―
トンネルマスター	―	―
トンネルレーザ計測及び覆工巻厚･背面空洞レーダ探査システム	―	―

表 2.5.2　非破壊検査技術一覧表[3)]（1／4）

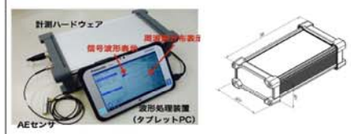
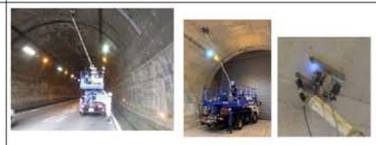
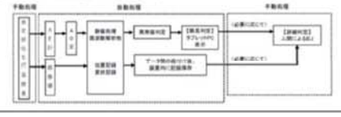
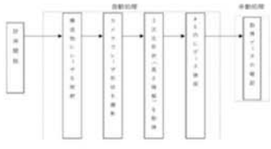
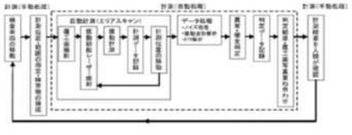
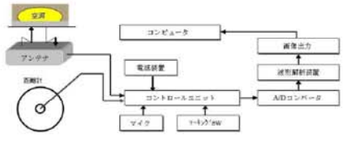
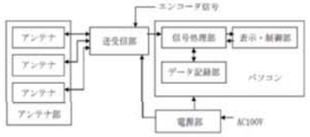
	「点検支援技術 性能カタログ（案）　令和２年６月　国土交通省」に掲載されている非破壊技術（トンネル）				
技術番号	TN020001−V0020	TN020002−V0020	TN020003−V0020	TN020004−V0020	TN020006−V0020
技術名	デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	レーザー打音検査装置	天秤方式移動型レーダ探査技術	走行型高速３Ｄトンネル点検システム ＭＩＭＭ−Ｒ（ミーム・アール）−レーダ探査技術−
開発者	原子燃料工業株式会社	西日本高速道路エンジニアリング四国㈱	株式会社フォトンラボ （QST認定・理研ベンチャー）	株式会社ウォールナット	パシフィックコンサルタンツ(株)
概要図					
技術概要	橋梁、トンネル等のコンクリート構造物、附属物を対象に、ＡＥセンサを用いた打音計測装置を用い、デジタル化された振動情報（固有周波数、振動の減衰時間）から、コンクリートのうき、はく離、内部欠陥（内部空洞、ＰＣグラウト充填不足）や、ボルトの緩みを把握する技術。	光切断法による3次元形状計測技術を利用して、覆工コンクリートのはく離の前兆である段差を非接触かつ定量的に検出する技術である。	トンネル覆工コンクリート等で実施される「近接目視」におけるハンマー打音検査を、車両に搭載した2種類のレーザーを用いて遠隔化・デジタル化することで、検査時間の短縮や判定の標準化および電子的な記録・保存を可能とする。検査は車両が停止した状態で行い、搭載されたスキャナーにより、トンネル円周方向の任意の位置で、2m×2m程度の範囲を計測することが可能である。検査点の間隔は任意に設定可能であり、設定した範囲内を自動で格子状にスキャンする。計測速度は毎秒数十回まで可変である。ハンマー打音検査と同等な深さ数cmまでの覆工コンクリート内部のうき等に由来する打音異常を検知可能であり、検査結果は装置に搭載した高精度カメラで取得した覆工面画像と重ね合わせて表示される。	天秤方式移動型レーダ探査技術は、小断面・大断面のトンネル径及びトンネル種類を問わず、時速2km～5kmで連続的に高速でレーダ探査可能な技術であり、探査対象（知りたい情報）に合わせたセンサーを設置し、計測を行うことができる。従来の計測方法は、人がセンサーを覆工面まで近づいて保持する必要があり、作業床を上げたまま計測するため探査速度が遅く、また、高所作業を伴うため安全性での課題が大きかった。地中レーダは、センサーを替えることで、覆工の厚さ（1ｍ程度）、背面空洞（2ｍ程度）、内部欠陥（ｔ＝1.0mm、5cm角以上のうき、発生深度）が検出出来る。また、設置するセンサーは地中レーダーにとどまらず、20kg以下のセンサーで有れば取り付け可能である。 トンネル壁面に接触させないと使用できないセンサーを簡易的に壁面まで近づけることが出来る。	トンネル覆工壁面の連続画像撮影システム、高精度３次元レーザー計測システム、非接触レーダー探査システムを車両に搭載し、覆工表面ひび割れや漏水等の変状と、トンネル断面形状、巻厚、背面空洞、内部欠陥等を計測する。MIMM-Rに搭載しているレーダは2種類あり、TYPE1:巻厚・空洞探査用レーダと、TYPE2:うき・ジャンカなどを探査する内部欠陥レーダである。TYPE1:覆工巻厚・背面空洞調査レーダーシステムは、H31年道路トンネル定期点検要領に定められた、巻厚の不足、または減少及び背面空洞による突発性崩壊のおそれに対する判定を行うための巻厚・空洞のデータを別途レーダー調査を行うこと無く判断することが出来る。TYPE2内部欠陥レーダは同要領に定められたうき、はく離に対する対策判定のための内部欠陥位置を検知することができる
基本諸元	ＡＥセンサと計測装置、波形処理用タブレットPCがケーブルによって接続された構造。打音検査ハンマーで打音した振動情報を記録し、現場において計測点毎に検査結果がコンクリートの変状、ボルトの変状の有無を示す基準周波数を超えているか否かを簡易的に表示する。	本計測機器は、３次元形状計測カメラ、レーザー、距離計、PC、発電機で構成され、これらは車両に搭載されている。車両を走行させることで、トンネル覆工の３次元形状スリットを取得し、PC内に記録される。	本検査装置は、「遠隔で打撃を与えつつ振動を計測するレーザー装置」と「レーザー装置を駆動するための制御装置」が、移動可能なトラック上に組み込まれている。「レーザー装置」には、検査位置にレーザーを導くスキャナーが設置されており、トンネル円周方向の任意の位置への照射が可能であり、トンネル進行方向については2ｍ程度の範囲で照射位置を動かすことが可能な構成となっている。検査装置の制御・データの取得は車両上に設置されたPCを用いて行う。検査装置を駆動するための電力はディーゼル発動機もしくは蓄電池から供給を行う。	本計測技術は、「電磁波を照射・反射を受信するアンテナ部の計測装置」、「再現性を管理するための距離計装置」、「電磁波を制御・計測データを保存するデータ収集・記録装置」がそれぞれ独立してあり、各装置間はケーブルにより接続されている。アンテナ部に取り付けた治具により、対象に応じて最適なアンテナを設置でき、探査測線に合わせる必要があるアンテナ以外は、自由な設置・配置が可能である。保持ユニット（ブーム）の先端に取り付けられるセンサーは地中レーダーにとどまらず、打撃ユニット（自動打撃装置）を設置することで、自動打音計測も可能である。	本計測機器は、「電磁波を照射・反射を受信するアンテナ部とみ合わせた計測装置」、「再現性を管理するための距離計装置」、「電磁波を制御・計測データを保存するデータ収集・記録装置」がそれぞれ独立してあり、各装置間はケーブルにより接続されている。よって探査測線に合わせる必要があるアンテナ以外は、自由な設置・配置が可能である。
移動装置	−	車両型（車両にセンシング機器を設置し、交通流にそって走行しながら車道と撮影対象箇所の離隔の範囲内でアプローチするもの）	車両上に検査装置を設置し、検査車両側の車道と検査対象箇所の離隔の範囲内でアプローチする。検査は車両が停止した状態で行うが、検査装置に搭載されたスキャナーにより、トンネル円周方向の任意の位置（地上高1ｍ以上）の計測が可能。トンネル進行方向に対しても2ｍ程度の範囲を検査することが可能。トンネル進行方向2ｍ以上の範囲の検査をする際には、車両の移動により対応する。	【人力】※天秤システム センサーを取り付けるブームとブームを操作する操作アーム、ブームと操作アームを固定する固定台の３部構成。操作アームはテコの原理により、カウンターウエイトを設置することで操作を容易にする。 【車両型】※天秤システムを搭載し計測する移動手段車両あるいは台車に天秤システムを設置し、アンテナを覆工に接触させて探査を行う。移動原理は搭載する車両もしくは人力による。	【車両型】 ・MIMM-Rまたは、車両に搭載させ、探査測線に対応した通行車線を走行しながらトンネル縦断方向のデータを取得。 搭載する車両により以下の通りである。 例1）MIMM-R　高さ3.25m　幅2.08m　長さ5.99m　重さ7.22ｔ 例2）高所作業車 高さ3.24m　幅1.88m　長さ5.57m　重さ7.27ｔ
計測装置	外形寸法	・ＡＥセンサ寸法（直径１２φ×高さ４０mm）、最大重量（０．０５kgf） ・計測装置寸法（長さ３００mm×幅１５０mm×高さ７５mm）、最大重量（２．４kgf） ・波形処理用タブレットＰＣ寸法（長さ２０３mm×幅１３２mm×高さ１８mm）、最大重量（０．８kgf）	外形寸法：5030mm×1800mm×3040mm（測定車両寸法） 車両重量：3910kg	本検査装置は、専用車両（4t平積みトラック）に搭載されている。 ・最大外形寸法（全長8.5m x 幅2.3m x 高さ3.2m）、最大重量（7.7ｔ）	天秤システム単独 ・大断面用　h＝1.7m　b＝1.0m　w＝1.0m　50ｋｇ ・小断面用　h＝0.4m　b＝1.0m　w＝0.2m　3kg　簡易足場への取り付け可能	TYPE1:空洞レーダ ・アンテナ部（電磁波照射＋受信装置）：最大外形寸法（長さ330mm×幅450mm×高さ1000mm）、最大重量（13kgf） TYEP2:内部欠陥レーダ ・アンテナ部（電磁波照射＋受信装置）小：最大外形寸法（長さ430mm×幅510mm×高さ360mm）、最大重量（8kgf）×2台 ・アンテナ部（電磁波照射＋受信装置）大：最大外形寸法（長さ600mm×幅730mm×高さ780mm）、最大重量（20kgf）
	センシングデバイス	・ＡＥセンサ　エヌエフ回路設計ブロック　ＡＥ９００Ｓ−ＷＢ ・カメラ　Panasonic FZ-M1 タブレットＰＣ内蔵カメラ	３次元形状計測カメラ：高さ分解能0.5mm	・振動励起レーザー：高強度パルスレーザー照射装置　自社開発　【非接触タイプ】 ・振動計測レーザー：レーザードップラー振動計　自社開発　【非接触タイプ】 ・覆工面撮像用カメラ：CMOSカメラ（30倍ズーム、500万画素）	アンテナ部：自社開発アンテナ、その他市販品（GSSI社400MHzアンテナ、GSSI社900MHzアンテナ、GSSI社1.6GHz、MALA社200MHz）　【接触タイプ】 自動打音装置：自社開発	・アンテナ部　　TYPE1:空洞レーダ、TYPE2:内部欠陥レーダとも自社開発 ・距離計部　アクト電子社製　MODEL　1521N ・コントローラ部　自社開発
	計測原理	測定部分において通常点検用ハンマーにより弾性波を発生させ、発生した弾性波をＡＥ（Acoustic Emission：音響）センサ表面の圧電素子で受信し、アンプ・フィルター・ＡＤ変換器により振動波形として数値化する。現場での計測値（固有周波数、振動の減衰時間）とコンクリートの変状、ボルトの変状が無いと判断した基準値とを比較することで、タブレットPCがリアルタイムで自動判定する。コンクリートの変状、ボルトの変状が無いと判断した基準値の設定方法は以下の2通り ①現場においてコンクリートの変状、ボルトの変状が無いと判断した箇所を計測 ②モックアップ試験／理論式／FEM解析	光切断法により、3次元形状計測を行う。	強度パルスレーザーを覆工表面に照射し、表面を僅かに蒸散させることでその反作用により表面を振動させ、レーザードップラー振動計により音波領域（20kHz以下）の表面振動を計測する。覆工面内部に欠陥が存在する場合、共振により特定の振動が強く発生するため、振動スペクトルを解析することで覆工面内部のうき・はく離を検知する。微小な振動を計測するため、計測は車両が停止した状態で行うが、搭載されたスキャナーにより、トンネル覆工面の任意の範囲（トンネル進行方向に対しては最大約2ｍ）の自動スキャンが可能。検査点の間隔は任意に設定可能であり、設定した範囲内を自動で格子状にスキャンする。ハンマー打音検査と同じく動領域の振動を利用した検査であり、深さ数cmまでの覆工コンクリート内部のうき等の欠陥を検知可能。検査結果は装置に搭載した高精度カメラで取得した覆工面画像と重ね合わせて表示される。	・地中レーダーセンサ アンテナ部により電磁波の照射・反射波の受信を行い、コントロール部で記録を行う。トンネル縦断方向の移動量は、距離計にて検出し、反射波と関係付けることによりトンネル内における計測位置を明確化する。横断位置は測線で管理する。また、電磁波の速度は不変なため、キャリブレーションは必要ない。 ・打音センサ 覆工を一定の力で連続的に打撃し、その音を分析ユニット（打音分析装置）で分析することで覆工の健全性（うき・はく離・空洞・表面劣化などの有無や分布）の将来を実施することも可能である。覆工の健全性の評価は、打撃音の全エネルギと欠陥部の特徴が顕著に現れる特定帯域（500Hz・3500Hz付近）の音響エネルギの比から音響エネルギ指数を算出して行う	電磁波の反射　：電磁波の速度は不変なため、計測のためのキャリブレーションは不要 TYPE1：空洞レーダ ・アンテナ部により電磁波の照射・反射波の受信を行い、コントロール部で記録を行う。トンネル縦断方向の移動量は、レーザードップラー式距離計にて検出し、反射波と関係付けることによりトンネル内における計測位置を明確化する。 TYPE2:内部欠陥レーダ FM-CW方式の電磁波を照射し、合成開口処理を行い、移動方向平均範囲除出処理、設定範囲外除処理、引算処理はレーダの移動方向に広がる信号成分を抑圧処理を行う。位置計測は同上。
	計測プロセス	①計測前後で、校正用ステンレス棒における計測結果が基準値内であることを確認する。 ②測定箇所に測定者がＡＥセンサを当て、テストハンマーにより打撃し、弾性波を発生させる。 ③発生した弾性波はAEセンサにより取得され、自動的にA/D変換されたのち、周波数解析される。同時に、タブレットPCにより対象の外観を撮影する。 ④周波数解析で得られた振動情報（固有周波数、振動の減衰時間）と、あらかじめ設定したコンクリートの変状、ボルトの変状が無い部位の振動情報（判定基準値）とを比較し、判定基準値から逸脱した場合、変状ありとして、計測結果をタブレットPC上に表示する【簡易判定】。また、撮影した画像データもデータ間の紐づけ後、タブレットPC内に記録保存される。 ⑤必要に応じて、手動処理により人間によるエンジニアリングジャッジ（EJ）を行う【詳細判定】。基本はコンピュータプログラム処理であり、異常値は人間が確認する。 面的な打音検査結果に基づき、振動情報（固有周波数、振動の減衰時間）の分布や変化量に応じて変状の程度を評価する。 	3次元形状は車両で走行しながら計測を行う。計測延長、各カメラのラップ等について確認する。データに不足が確認された場合には、再計測を実施する。 	検査位置付近まで車両を移動後、検査位置及び範囲を手動で指定し、検査を開始する。振動励起レーザー、振動計測用レーザー、スキャン装置（照射位置の移動）を自動制御して、指定した範囲の計測（エリアスキャン）を行う。計測終了後にデータ処理及び異常判定を行い、判定結果は覆工面の写真に重ね合わせて表示される。表示結果を人間が確認し、正常に検査が完了していることを確認後、次の検査に移行する。 	コントロールユニット（パルサー）でモノパルスを作り送信アンテナより送信する。送信したパルスは対象物で反射し、受信アンテナから受信する。コントロールユニット（サンプラー）で波形を合成し、設定した距離ごとに反射波を記録する。 その後AD変換を行いコンピュータに保存する。 	TYPE1:空洞レーダ パルサーでモノパルスを作り送信アンテナより送信する。送信したパルスは対象物で反射し、受信アンテナから受信する。 サンプラーで波形を合成し、設定した距離ごとに反射波を保存する。 TYPE2:内部欠陥レーダ 送信アンテナから、連続波を送信する。送信した電波は対象物で反射し、受信アンテナから受信する。合成開口処理を 行い、特異信号を自立たせる処理をする。走行前後の反射波と引き算処理を行い、特異信号のみ残る処理を行い、設定した距離ごとに反射波を保存する。 

表 2.5.3　非破壊検査技術一覧表[3)]（2／4）

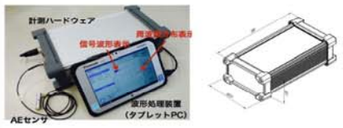
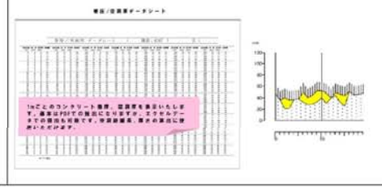
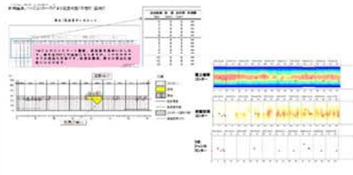
		「点検支援技術 性能カタログ（案）　令和２年６月　国土交通省」に掲載されている非破壊技術（トンネル）				
技術番号		TN020001－V0020	TN020002－V0020	TN020003－V0020	TN020004－V0020	TN020006－V0020
技術名		デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	レーザー打音検査装置	天秤方式移動型レーダ探査技術	走行型高速３Ｄトンネル点検システム ＭＩＭＭ－Ｒ（ミーム・アール）－レーダ探査技術－
開発者		原子燃料工業株式会社	西日本高速道路エンジニアリング四国㈱	株式会社フォトンラボ　（QST認定・理研ベンチャー）	株式会社ウォールナット	パシフィックコンサルタンツ㈱
概要図						
計測装置	アウトプット	【現場計測時】 ・振動計測で得られる振動波形および振動の減衰時間、振動波形を周波数解析して得られる周波数分布および固有振動数をタブレットPC上に表示。 ・コンクリートの変状、ボルトの変状の有無を示す基準周波数を超えているか否かを簡易的に表示する。 ・面的に振動計測した場合、各計測点の計測結果（固有振動数、振動の減衰時間）を面的に表示。 【現場計測後】 ・振動波形のデジタルデータ（出力形式はcsv形式） ・計測対象に紐づけされた撮影画像、並びに、手書きメモのデジタルデータ（出力形式はjpg形式）	3次元形状画像：独自形式であり専用ソフト（Je3DPF）でのみ読み込み可能。	・検査結果は、制御ソフト上で、検査直前に撮影した覆工面写真上に異常判定を色分け（欠陥は赤、健全部は緑）して 表示した画像を重ねて表示される。 ・制御ソフト上で、任意の検査箇所をクリックすることで、振動計測の結果（振動波形、振動周波数分布）を表示することが可能である。 ・画像データの出力形式はJPGであり、振動データの出力形式は、テキストまたはCSV形式である。	・地中レーダーセンサ 計測装置の最終アウトプットは電磁波の反射時間と距離情報であり、解析処理により覆工巻厚、背面空洞、内部欠陥位置などの数値データを元に、１ｍごとの巻き厚・空洞厚データ、および模式図の作成を行う。 ・打音センサ 異常箇所の発生位置を出力。 前回データと比較することにより進行性の確認	・TYPE1：巻厚・空洞厚レーダー 計測延長、１ｍごと（ニーズにより変更可能）の巻厚・空洞厚 ・TYPE2：内部欠陥レーダー 発生位置統合システムにより、画像＋変状＋巻厚・空洞厚コンター図＋内部欠陥位置の同時表示が可能
データ収集・記録装置		タブレットＰＣ寸法（長さ２０３mm×幅１３２mm×高さ１８mm）、最大重量（0．8kgf） タブレットＰＣ内部に保存。	・カメラに付属した記録メディア（SSD）にデータを保存する。保存データは、有線接続された計測用PCにて確認可能。現場作業完了後、SSDから記録用ハードディスクにデータをコピーする。	本検査装置を搭載する車両上に、装置の制御装置を兼用した、データ収集・記録装置となるPCを搭載する。データ収集・通信装置は、検査装置の制御装置（ノートパソコン）と共通である。分けることも可能である。検査中は、PCのハードディスクに保存。計測終了後、バックアップとして別記録媒体（外付けストレージ等）に出力保存。検査データは、本装置を制御するパソコンもしくはデータ保存用パソコン内に保存する。無線によるデータ転送は行わない。	データ収集装置・記録装置は、計測車両室内に設置、または荷台上にベルト等で固定する。使用するノートPCによる。市販の汎用品。専用コントローラーもしくは、ノートPC内のHDD。計測終了後、別記録媒体（CD、ＤＶＤ等）に出力保存。	計測中は、PCのハードディスクに保存。計測終了後、別記録媒体（CD、DVD、HDD等）に出力保存
運動性能	最小	－	道路幅員1800mm、高さ3040mmより大きく、車両が走行できること	・検査車両寸法　全長8.5ｍｘ幅2.3ｍｘ高さ3.2ｍ ・最小所要空間寸法　幅3ｍｘ高さ3.5ｍ程度（上記装置寸法及び必要離隔を含んだ数値） ・適用可能なトンネルの高さ 3.5 m以上	・導水路トンネルなど小断面への適用が可能で、最小所要空間寸法　幅1000mm X 高さ1000mm程度	MIMM-Rを使用する場合は、１車線の道路トンネルそれ以外の車両・台車を使用する場合には ・人道（歩道）トンネル程度 ・最小所要空間寸法　幅700mm X 高さ1500mm程度
	最大	－	計測機器との離隔が5m以下であること	レーザー出射口（地上からの高さ1.6m）からの離隔が20m以下である必要があることが望ましい。	天秤アーム長の関係から、最大高10m程度	MIMM-R搭載の場合は、2から3車線の道路トンネル 高所作業車などに搭載する場合は、特に制限はない
計測性能	計測速度	・平均点検量：100m2／日（500mm格子間隔） ・平均作業時間：5時間／日	最高速度80km/h　（検証時は10～20km/hで走行）	計測速度：約7.5分/m^2（3cm間隔計測）	検証時は4km/h前後で走行 計測速度は、０．１ｋｍ/ｈから８０ｋｍ/ｈ程度、データ間隔は、0.5cm毎から100cmまで自由に設定可能	20ｋｍ/ｈ、30ｋｍ/ｈ、40ｋｍ/ｈで検証 計測速度は、０．１ｋｍ/ｈから８０ｋｍ/ｈ程度、データ間隔は、0.5cm毎から100cmまで自由に設定可能
	計測精度	コンクリート内部の空洞 ①目地部を含む場合 検出率：53.2%、的中率：87.4% ②目地部を含まない場合 検出率：53.6%、的中率：87.4%	・厚さ3mm、□5cm×5cm以上検出可 ※計測他印象に目地部含ます（機器仕様としては、うき・はく離（前兆で段差があるもの）の凹凸0.5mm以上検出可能）	[1] 表面近くの空洞、うき、はく離 ・空洞厚10mm、深さ30mmの場合、サイズ200mm×200mm以上であれば検出可能。 ・空洞厚0.1mm、深さ30mmの場合、サイズ200mm×200mm以上であれば検出可能。 （表面近くの空洞（ジャンカ（劣化）を含む）を模擬した打音検査用模擬供試体を用いた試験結果における、検出可能な変状のサイズを記載） ※計測対象箇所に目地部を含む 目地部を含む検出率：0.43、的中率：0.84 目地部を含まない検出率：0.44、的中率：0.83	[1] 劣化、表面近くの空洞 ※全空洞に対する検出率：90%、的中率：78% ・模擬供試体で、地中レーダー測線上にある、表面近くで発生している厚さ1mmの空洞において、一部以外は検出できた。 ・試験場に設置されている全ての模擬うきを検出。模擬うきの最小サイズは、大きさ5cm角、厚み1.0mm、発生深度3cmであった。 [2]覆工厚、背面空洞 試験場に設置されている、覆工の厚さ40cm、模擬巻厚不足箇所、背面空洞、鋼製支保工の位置を100%検出。 （既往探査結果では、地中レーダーと実削孔との覆工厚さ対比の結果、探査精度は80～90%程度である。）	TYPE1:巻厚・空洞レーダー [1] 表面近くの空洞 空洞厚30mm、検り10～50mmの場合、500×500mm 以上であれば検出可能 模擬空洞7が所中、2が所検出 検出率　28%、的中率　100% [2]巻厚不足、鋼製支保工、背面空洞 ①模擬巻厚不足の検出 40cm覆工厚に対し、20cmの巻厚、1が所を検出 検出率　100% ②鋼製支保工 40cm覆工厚に対し、検り250mmで、H150の鋼製 支保工11基を検出 検出率100%、的中率　100% ③背面空洞 40cm覆工の背面空洞（空気）を検出 検出率100%、的中率　100% TYEP2:内部欠陥レーダー [1] 表面近くの空洞 非接触レーダであり、空洞の有無を探査する、小規模な検 検り含（5cm×5cm）単体の検出は難しいが、探査範囲内 に複数ある事として検出可能 模擬空洞403が所中、403が所検出 検出率　100%、的中率　100% [2] うき・はく離 空洞厚10mm、検り30mm、大きさ10cm×10cm以上であれ ば検出可能 模擬空洞10が所中、8が所検出 検出率　80%、的中率　100%
	位置精度	－	進行方向：16.7mm（3測線計測結果と真値の誤差平均） 周方向：14.7mm（3測線計測結果と真値の誤差平均）	－	距離計精度　0.1%以内　（製造メーカ仕様）	－
点検時現場条件		通常の打音検査と同等	計測対象は可視範囲に限る（ジェットファンなどの附属物の裏は計測不可） 非常駐車帯部の計測は不可	・検査車両の設置側車線の交通規制が必要である。 ・JIS C6802「レーザー製品の安全基準」に従い、レーザー管理区域の指定（検査位置から半径3m程度）が必要である。 ・レーザー管理区域内作業者の保護メガネが必要である。 ・「レーザー管理区域を指定する看板の設置」、「注意喚起の看板の設置」を行う。	作業範囲は路面より高さ10mm程度の位置の側壁下面から天端まで。交通規制を行う場合は「片側車線」	
作業条件・運用条件				・平均点検量：35m2／日（計測間隔は30mmとする） ・平均作業時間：4時間／日	計測する測線の延長を合算して6km/日程度 ※）規制の状況により多少の増減有り	・測線延長：５０ｋｍから１００ｋｍ/日
計測費用		・損害費用：2名×3万円／日 ・機器経費：1万円／日	【概算費用】（外内業含む、形状計測のみ） 直接人件費　：　625,900円 直接経費費　：　2,782,740円 （周長17m×延長500m×10トンネルの場合）	・100万円／日	・背面空洞損直500,000円/日 ・内部欠陥損直650,000円/日 ・自動打音損直500,000円/日 解析ソフト：自社開発ソフトを使用 ・背面空洞損直250,000円～500,000円/km ・内部欠陥損直500,000円～1,000,000円/km ・自動打音損直100,000円～150,000/km	空洞レーダ単独計測の場合　250,000円/日 MIMM-RでTYPE1,2とも計測する場合　1,000,000円/日 解析費・解析ソフト：自社開発ソフトを使用 ①TYPE1で空洞位置特定のみの場合　100,000円/日当たり ②TYPE1で天端１測線解析、縦断図化の場合　400,000円/km（測線長当たり） ③TYPE1で3測線　コンター展開図、断・横断面図作成の場合　700,000円/km（3測線長当たり） ④TYPE2で内部欠陥　2次元展開図化　250,000円/km（3測線/１走行当たり） ・出力イメージは、アウトプット参照
アウトプット例						

表 2.5.4　非破壊検査技術一覧表[3)]（3／4）

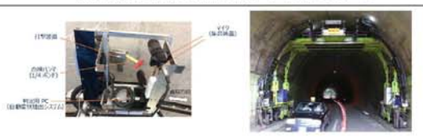
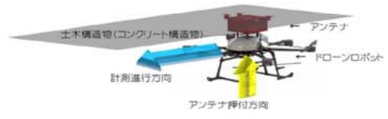
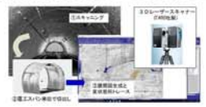
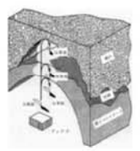
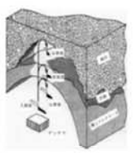
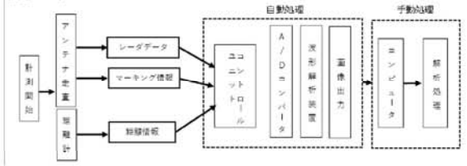
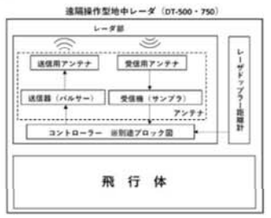
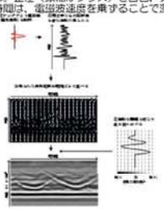
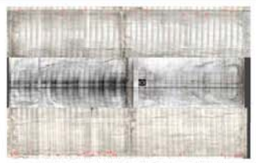
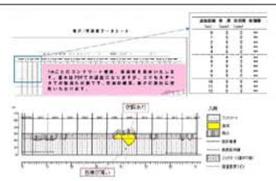
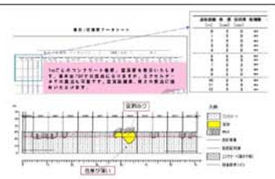
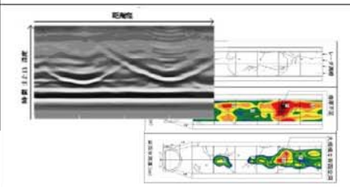
	「点検支援技術 性能カタログ（案）　令和2年6月　国土交通省」に掲載されている非破壊技術（トンネル）	未掲載		
技術番号	TN020005−V0020			
技術名	打音検査ユニット	道路トンネル防災車「トンネルマスター」	ドローンレーダによる覆工探査技術	トンネルレーザー計測及び覆工巻厚・背面空洞レーダ探査システム
開発者	東急建設株式会社 技術研究所　メカトログループ	株式会社ウォールナット	株式会社ウォールナット	応用地質株式会社
概要図				
技術概要	打音検査ユニットは、マイクにより収集した打音を自動変状抽出システムによって音響解析とAI（機械学習、またはクラスタリング）による変状自動抽出を行う。さらに、撮影画像上に打音異常の箇所を重ねて表示することができる。この打音検査ユニットは様々な機械に搭載する事が可能で、例えば走行式門型フレームにユニットを搭載して車両を通行させながらトンネル全体を一度に検査するフレーム型や、高所作業車にユニットを搭載してトンネルの半断面を検査する車両型、人力による打撃を集音し、変状自動判定する人力型がある（但し、フレーム型、車両型は警察の道路使用許可が必要）。	「トンネル防災車」は複数の調査機能を有し、道路トンネルの「巻厚の不足または減少、背面空洞」をマルチに探査できる車両である。探査機能として非接触型レーダ・天秤システム接触型レーダ・高所作業台（削孔調査）を有しており、1台で覆工背面探査の完結が可能である。「非接触型レーダ」によるスクリーニング、天秤システム接触型レーダによる詳細探査、削孔調査による検証を組み合わせることで効率的に探査を行うことが可能である。	ドローンレーダは、ドローンに搭載した地中レーダ装置によりトンネル覆工背面の探査を可能とした技術である。本技術は高所作業車や足場作成の仮設を必要しないため作業効率が向上し、ドローンの操縦者と補助員の2名で探査することが可能である。 災害時において、高所作業車の侵入が困難な場合や足場が使えない場所であっても、本技術であれば迅速な対応が可能である。	トンネル点検で実施される近接目視、打音結果、触診で覆工にマーキングされた変状の形状やせ法について、三次元レーザースキャナを用い三次元点群データとして高精度かつ高速に取得および解析する技術。 また点検作業と同時にトンネル点検車搭載型地中レーダを用いて覆工巻厚及び覆工背面空洞の分布を把握する技術。両技術を並行実施することで、作業時間の効率化、コスト縮減が見込める。  
基本諸元	打音検査ユニットは、モータ駆動により打撃を加える「打撃装置」と、その反響音をとらえる「集音装置」、そして集音した打音データを解析してうきなどの変状を抽出するための「自動変状抽出システム」から構成される 。この3つの構成要素を一体とした打音検査ユニットは、操作用タブレットPCとLANで接続され打撃装置を動作や記録および判定を開始する。打音収集および異常判定は自動で行い、打音（WAVデータ）およびXMLデータ（点検時刻、打撃回数、打音特徴量、打撃位置、判定結果）もPCに自動保存される。 打音検査ユニットは、トンネル縦断方向に移動可能な門型フレームや高所作業車に組付けたレール上を移動する移動機構等に取り付けて運用することを想定している。また、これらのシステムを切離し、人力による打音を集音装置により収集して自動変状抽出システムよって変状抽出を行う人力型がある。	当車両は、非接触型レーダ、天秤システム接触型レーダ・高所作業台を有しており、非接触型レーダによる走行計測、天秤システム型接触型レーダ・高所作業台による交通規制内での詳細計測が可能であることから覆工背面探査に関する探査がすべて対応可能な車両である。 非接触型レーダ探査時は、車両内でのアンテナ高さ調整、角度調整が可能なため調査時に車両外へ出て調整する必要がなく現場安全性が高い。 高所作業台の活用により、直接調査が可能となり従来のレーダで不足していた強度、剛性の情報を得ることが可能である。（コアボーリング、テストハンマーなど）	飛行体であるドローンに地中レーダシステムを搭載している。自由フライトを可能とさせるため本技術では、日本初の完全ケーブルレス化した地中レーダを搭載している。 ドローンに搭載された地中レーダアンテナをトンネルに押し当てて時速2ｋｍ程度で走行させながらデータを取得していく。取得したデータはWiFiによりPCに転送される。レーザードップラー距離計を搭載しており距離管理を行っている。	①当該技術の特徴 (1)トンネルレーザー計測システム ・覆工展開画像を取得し、スケッチ作業を効率化する技術 ・レーザースキャナ　・設置型 ・新設時、状態把握で計測 ・走行型計測より安価（コスト縮減） (2)覆工巻厚および背面空洞探査システム ・覆工巻厚及び覆工背面空洞の分布を把握する技術 ・地中レーダ探査　・トンネル点検車搭載型 ・新設時、状態把握で計測 ・点検と同時に覆工巻厚および覆工背面 空洞の分布を把握（効率化） ※外力による変状の健全性の診断・対策工設計に、覆工巻厚・背面空洞厚の把握が必要になる場合に実施 ・添付資料1-2
移動装置	【フレーム型】 トンネル内に車両を通行させながらトンネル縦断方向に走行可能なガントリ型フレームに搭載して遠隔操作によってトンネル全体の打音検査を行う。ガントリ型フレームにアーチ状のレールと移動機構を取り付けることで、トンネル縦断方向と周方向の移動を組み合わせた移動が可能。ガントリ型フレームは電動モータ駆動によるタイヤ走行、移動機構は電動モータによるラックレール方式を採用。 【車両型】 高所作業車の作業床にアーチ状のレールと移動機構を取り付け、打音検査ユニットを搭載することで、トンネル縦断方向と周方向の移動を組み合わせた移動を可能にしたシステム。縦断方向の移動には高所作業車の走行、周方向の移動は電動ウインチによってレール上を移動する移動機構を利用。 【人力型】 人の打音をマイクで収集して「自動変状抽出システム」によって変状抽出を行うため、打音検査を行う点検員の体（背中）にユニットを装着して移動する。この手法では「検査者」と「記録者」の2名での運用を想定していて、ユニットと接続された操作用タブレットPCを持った記録者が検査員の打撃した位置を画面にタップしながら打撃位置のデータを記録する。	【車両型】 ・防災車にレーダシステムを搭載し探査測線に対応した通行車線を走行しながらトンネル縦断方向のデータを取得。 搭載する車両により以下の通りである。 防災車　高さ2.99m　幅1.69m　長さ4.69m　重さ2.97ｔ	【自走式】 ・ドローンに上向きに搭載された地中レーダシステムをトンネル天端に押し当てながら時速2ｋｍ程度で走行させながらデータを取得していく。	②覆工巻厚および背面空洞探査システム 通常のトンネル点検車に搭載して使用
計測装置 外形寸法	【フレーム型】 最大外形寸法（長さ5000mm×幅8000mm×高さ5700mm）、最大重量（4.0t） 【車両型】 最大外形寸法（長さ3000mm×幅5600mm×高さ7700mm）、最大重量（0.65t）※ただし、高所作業車は含ます。	【非接触型レーダ寸法】 ・アンテナ部（電磁波照射＋受信装置）：最大外形寸法　長さ330mm×幅450mm×高さ1000mm　重量13kg 設置時車両高さ　最大高さ4.5m(調整可能) 【天秤システム接触型レーダ寸法】 ・天秤システム(探作アーム除く)　長さ1700mm×幅1000mm×高さ1000mm　重量30kg 設置時車両高さ　最大高さ7.5m(探作アーム長さにより調整可能)	【自走式】 ・アンテナ部（電磁波照射＋受信装置）：最大外形寸法　長さ340mm×幅380mm×高さ150mm　重量3.4kg ・ドローン部　長さ2200mm×幅1930mm×高さ1058mm　重量23.8kg（バッテリー込み31.6kg）	トンネル点検車のサイズ
計測装置 センシングデバイス	【フレーム型】【車両型】【人力型】共通 打撃装置：自社開発【点検用ハンマ使用】 集音装置：マイク【SONY製（型番ECM-VG1）】、アンプ【ROLAND製（型番UA-22）】	【アンテナ部】非接触型タイプ、接触型タイプとも自社開発 【距離計部】非接触型レーダ：アクト電子社製　レーザードップラー距離計 天秤システム型接触型レーダ：自社開発 【データ記録・収集装置】】非接触型タイプ、天秤接触型タイプとも自社開発	【アンテナ部】レーダシステム自社開発 【ドローン部】ドローンシステム自社開発 【距離計部】　アクト電子社製　レーザードップラー距離計 【データ記録・収集装置】自社開発	レーダ探査機収録器SIR-3000　GSSI社 レーダアンテナ中心周波数：400MHzほか　GSSI社
計測装置 計測原理	ハンマ等の打撃によって発生した打音をマイク（集音装置）で収集し、PCに入力する。自動変状抽出システムは、マイクによって取得した打音をスペクトル解析し、打音の特徴量をもとに機械学習やクラスタリングの解析を行うことで変状の自動識別を行う。音響信号を扱う都合上では、あらじめ人ハンマ音に対してマイクのゲイン調整を行った上で、入力の最大値に対してトリガがかかる閾値を設け、一般的な残響時間の定義で用いられている値と同様にサンプリング中のピーク値に対し60dB減衰する迄でを打音と判定する。周波数解析においては、打音として検出された区間に時間窓を設け、窓をスライドしながらFFT（Fast Furier Transformation）を行うことによってそれぞれの打音の特徴量を取得する 【クラスタリングに基づく変状抽出】 集音装置により収集した打音を周波数解析し、複数の打音を比較することで特徴を見つけ出し、その特徴量をもとに複数の集合に分けることで、健全部とうき部に分類する方法である。本手法においては、どの集合が健全であるかは特定できないため、それぞれの集合の代表値を調べ、うきと健全を区別（ラベル付け）する必要がある。実際の点検現場では、うき部に比べ健全部の分布する面積は広いため、サンプル数が多い方を健全部、サンプル数が少ない方をうき部とみなすこともできる。 【機械学習に基づく変状抽出】 クラスタリングによって分けられた健全部およびうき部の集合の特徴を学習することで、点検を行いながらリアルタイムで変状抽出が可能となる。本手法おいては、アンサンブル学習の枠組みを用いることで、特徴量設計における課題を解決し、変状検出を自動的に行うことが可能な手法の構築されている。アンサンブル学習は、識別に貢献しない特徴量が存在し単一の識別器では性能が低下する場合にも、数十個程度の異なる識別器を組み合わせることで、より性能の良い検出が可能である。本手法では、アンサンブル学習の1つであるブースティングアルゴリズムを用いて変状識別器を構成した。ブースティングアルゴリズムでは、訓練データの重みづけを更新しながら複数の弱識別器を逐次生成していき、弱識別器の重み付き多数決によって最終的な識別関数（強識別器 H(x) ）を構成する。	【地中レーダーセンサ】（非接触型・天秤接触型共通） 計測原理：電磁波の反射時間と伝搬速度より厚さを求める。 アンテナ部により電磁波の照射・反射波の受信を行い、コントロール部で記録を行う。トンネル縦断方向の移動量は、距離計にて検出し、反射波と関係付けることによりトンネル内における計測位置を明確化する。また、電磁波の速度は不変なため、キャリブレーションは必要ない。 	【地中レーダーセンサ】 計測原理：電磁波の反射時間と伝搬速度より厚さを求める。 アンテナ部により電磁波の照射・反射波の受信を行い、コントロール部で記録を行う。トンネル縦断方向の移動量は、距離計にて検出し、反射波と関係付けることによりトンネル内における計測位置を明確化する。また、電磁波の速度は不変なため、キャリブレーションは必要ない。 	レーダ探査では、送信アンテナから電磁波を覆工背面に向けて放射し、覆工中の異なる材質の境界で生じる反射波を受信する。覆工中に入射した電磁波は拡散・減衰しながら伝播し、覆工内部の空隙や異物、覆工背面、支保工、空洞上下面、地盤境界などで反射した反射波が受信アンテナに捉えられる。
計測装置 計測プロセス	【打音検査ユニットによる点検手順】 1）　事前準備 打音データはPCに保存に保存されるため、クラスタリングによる判定では現地でのデータキャリブレーションは必要としないが、機械学習による判定を行う場合は、事前に取得した教師データから識別器を生成する。ユニットに電源を入れて打撃テストを行い、打音が正常に取得できることをソフトウェア上に表示されるスペクトルのピーク値で確認する。取得できない場合は、アンプの音量ボリュームを調節する。 フレーム型および車両型を使用する場合は、点検開始位置でエンコーダをリセットさせる。人力型の場合は、点検箇所の正対画像をカメラで撮影するが、点検対象が画角に収まらない場合は複数枚に分けて撮影し、タブレットPCに保存しておく。 2）　点検作業～結果出力 専用ソフトウェアで打音検査ユニットを起動させ、打音および位置の記録を開始する。フレーム型および車両型に搭載する打撃装置も専用ソフトウェアで操作を行う。打音の収集および識別は自動で行い、打音（WAVデータ）およびXMLデータ（点検時刻、打撃回数、打音特徴量、打撃位置、判定結果【機械学習】）はPCに自動保存される。 3）　変状の自動抽出 初めて点検を行う場合は、現地で収集した複数打音のデータをクラスタリングによって複数の集合に分類し、集合ごとに打撃面積または人の判断を使用して健全とうきのラベル付けを行い、判定結果として出力する。このクラスタリングによる判定作業は事務所で行われる。機械学習では、事前に計測した健全およびうきの特徴量をもとに複数の識別器を作成し、各識別器に付加された重み付けの値から打音ごとの判定結果をリアルタイムで出力する。2回目以降の点検では、クラスタリング時に得られた打音データを機械学習で使用する教師データとして学習し、次回以降の定期点検時に使用することができる。 クラスタリングと機械学習のどちらを変状判定方法として使用するかは坑内の環境や教師データの有無によって使用者が判断する。	【地中レーダーセンサ】（非接触型・天秤接触型共通） コントロールユニット（パルサー）でモノパルスを作り送信アンテナより送信する。送信したパルスは対象物で反射し、受信アンテナから受信する。コントロールユニット（サンプラー）で波形を合成し、設定した距離ごとに反射波を記録する。 その後AD変換を行いコンピュータに保存する。 【処理フロー】 	コントロールユニット（パルサー）でモノパルスを作り送信アンテナより送信する。送信したパルスは対象物で反射し、受信アンテナから受信する。コントロールユニット（サンプラー）で波形を合成し、設定した距離ごとに反射波を記録する。 その後AD変換を行いコンピュータに保存する。 	レーダ探査では、測線に沿ってアンテナを移動させて覆工中からの反射波を受信し、反射断面記録として表示する。 ①送信アンテナより、電磁波（基本波）を放射する。 ②覆工中からの反射波を含む波形を、アンテナで受信する。 ③横軸に距離、縦軸に時間（往復走時）をとり、受信した波形記録を並べる。 ④波形の振幅に応じ、色を塗り分ける。正極（振幅がプラス）を白色、負極（振幅がマイナス）を黒色となる白黒濃淡表示とする。縦軸の時間は、電磁波速度を乗じることで深度に換算することができる。 

表 2.5.5　非破壊検査技術一覧表[3)]（4／4）

		「点検支援技術 性能カタログ（案）　令和2年6月　国土交通省」に掲載されている非破壊技術（トンネル）	未掲載		
技術番号		TN020005−V0020			
技術名		打音検査ユニット	道路トンネル防災車「トンネルマスター」	ドローンレーダによる覆工探査技術	トンネルレーザー計測及び覆工巻厚・背面空洞レーダ探査システム
開発者		東急建設株式会社 技術研究所　メカトログループ	株式会社ウォールナット	株式会社ウォールナット	応用地質株式会社
概要図					
計測装置	アウトプット	【フレーム型】【車両型】【人力型】共通 出力データ：打音データ、点検結果（点検時刻、打撃回数、打音特徴量、打撃位置、判定結果）、別途撮影した覆工コン クリート画像上に点検結果を重ねて表示した展開写真 データ出力形式：打音データ（WAV形式）、点検結果（XML形式）、展開写真（PNG形式）	計測装置の最終アウトプットは電磁波の反射時間と距離情報であり、解析処理により覆工巻厚、背面空洞、内部欠陥位置などの数値データを元に、1ｍごとの巻き厚・空洞厚データ、および模式図の作成を行う。 緊急を要する際などは概略的(空洞の有無の確認のみに確認する事も可能。(ニーズにより変更可能)	計測装置の最終アウトプットは電磁波の反射時間と距離情報であり、解析処理により覆工巻厚、背面空洞、内部欠陥位置などの数値データを元に、1mごとの巻き厚・空洞厚データ、および模式図の作成を行う。 緊急を要する際などは概略的(空洞の有無の確認のみに確認する事も可能。(ニーズにより変更可能)	覆工巻厚および背面空洞厚（数値）およびコンター図
データ収集・記録装置		【フレーム型】【車両型】共通 データ収集・解析・記録は計測機器搭載の判定用PCに内蔵 データを出力する場合は計測機器にPCを有線LAN接続しデータを出力保存 【人力型】 集音装置からUSBケーブルによって有線接続したタブレットPCにデータを収集・解析・記録 データを出力する場合はUSBメモリ等を使用	データ収集装置・記録装置は、計測車両室内に設置。 計測中は専用コントローラーもしくは、ノートPC内のHDDに保存し、計測終了後、別記録媒体（CD、DVD等）に出力保存。	データ収集装置・記録装置は、タブレットに記録される。 計測終了後、別記録媒体（CD、DVD等）に出力保存する。	レーダ探査機収録器SIR-3000　GSSI社
運動性能	最小	【フレーム型】【車両型】共通 打音検査ユニット単体の最小所要空間寸法： 幅1m X 高さ1m程度（上記装置及び必要離隔を含んだ数値） 適用可能な最小寸法は採用する移動装置に依存する。 フレーム型の場合：幅員6.4m×高さ5.5m 車両型の場合：幅員3.0m×高さ3.0m 【人力型】人が点検可能な作業スペース	最小所要空間寸法　幅2000mm X 高さ3000mm程度 車両が通行可能な道路トンネルを前提とする。 ・	トンネル直径が4m以上である事	トンネル点検車が通行できること 通行できない場合は、別途架台および台車に搭載し測定可能
	最大	【フレーム型】【車両型】共通 適用可能な最小寸法は採用する移動装置に依存する。 フレーム型の場合：片側１車線の一般道トンネル程度のサイズ（幅員8.5m×高さ5.7m程度）であれば適用可能 車両型の場合：幅員5.6m×高さ7.7m 【人力型】人が点検可能な作業度が設置できれば適用可能	非接触型レーダ：～7.5m　アンテナから壁面の離隔3m以内 天秤システム接触型レーダ：～7.5m	特になし	トンネル点検車でアクセスできるサイズ
計測性能	計測速度	①打音検査ユニット単体（200mmピッチでの打撃の場合） ・フレーム型、車両型共通：6.5 m2/min ※フレームの移動を含まない場合の点検時間 ②点検システム搭載（100～250mmピッチでの打撃の場合） ・フレーム型搭載：1.9 m2/min（3台同時使用） ・車両型搭載：1.3 m2/min（2台同時使用） ※システム搭載時の前は点検の移動、記録等の時間含む	非接触型レーダ：時速80ｋｍ/ｈ以下 天秤システム接触型レーダ：5ｋｍ/ｈ程度以下 データ間隔は、0.5cm毎から100cmまで自由に設定可能	探査速度は、2km/h程度 一回のバッテリーでは、20分程度	時速2km/h
	計測精度	[1] 劣化、表面近くの空洞 模擬供試体に空洞を模擬し、検出率と的中率を算出した。 なお、計測対象に目地部は含まれない。 50mmピッチでの打撃、計測装置のみで検証を実施 検出率=226個/337個=59.9% 的中率=226個/271個=83.4% [2] うき・はく離 当社模擬トンネルのうきをフレーム型を使用して変状検出 し、検出率と的中率を算出した。なお、計測対象に目地部 は含まれない。 200mmピッチでの打撃、フレーム型の移動装置に計測装 置を搭載して検証を実施 検出率＝103個/149個=69.1% 的中率=103個/103個=100.0%	【非接触型レーダ】 ①模擬巻厚不足の検出 　40cm覆工厚に対し、20cmの巻厚、1か所を検出 　検出率　1/1 ②鋼製支保工 　40cm覆工厚に対し、被り250mmで、H150の鋼製 　支保工11基を検出 　検出率100%、的中率　100% ③背面空洞 　40cm覆工の背面空洞（空気）を検出 　検出率100%、的中率　100% 　空洞検出探査深度は45cm程度以下 【天秤システム接触型レーダ】 試験施工に設置されている、覆工の厚さ40cm、模擬巻厚不足箇所、背面空洞、鋼製支保工の位置を100%検出。 （既往探査結果では、地中レーダと実削孔との覆工厚さ対比の結果、探査精度は80～90%程度である。）	[1] 表面近くの空洞 空洞厚30mm、被り10～50mmの場合、500×500mm 以上であれば検出可能 　模擬空洞5か所中、5か所検出 　検出率　100%、的中率　100% 　模擬鉄板2か所中、2か所検出 　検出率　100%、的中率　100%	検証中
	位置精度	当社模擬トンネルの覆工コンクリートに残るヤントルの点検空直を目印とし、空間の距離を真値とする。 フレーム型により取得した画像データから求めた距離値と比較し、位置精度を算出した。 ・周方向誤差：48.5mm、縦断方向誤差：21.5mm	距離計精度　0.1%以内　（製造メーカ仕様）	距離計精度　0.1%以内　（製造メーカ仕様）	検証中
点検時現場条件		【フレーム型】【車両型】共通 25m/h（計測時は走行を停止しているため平均点検スピード） 【移動時の走行速度】 フレーム型：1～10m/min（移動時の走行速度） 車両型：ベース車両の走行性能による	【非接触型レーダ】特になし 【天秤システム接触型レーダ】作業範囲は路面より高さ7.5m程度の位置の側壁下面から天端まで。交通規制を行う場合は「片側車線規制」を要する。	飛行範囲(計測測線)に付属物(ジェットファン等)等の障害物がないこと。 交通規制を行う場合は「全止め」	通行規制ができること
作業条件・運用条件		平均作業時間：8時間/日 【内訳】 準備：1時間、走行・移動：2時間、計測：4時間、記録1時間	【非接触型レーダ】50ｋｍから100ｋｍ/日　程度 【天秤システム接触型レーダ】計測する測線の延長を合算して6km/日程度 ※）規制の状況により多少の増減有り	4時間/日(最長飛行時間)	通行規制ができること
計測費用		約1万円/m程度（従来点検単価と同程度、画像撮影含む）	現場作業費 　非接触レーダ計測の場合　250,000円/日 　天秤システム接触型レーダ計測の場合　500,000円/日 解析費 　非接触型レーダの場合 ①空洞位置特定のみの場合　100,000円/日当たり ②天端１測線解析、縦断図化の場合　400,000円/km（測線長当たり） ③3測線　コンター展開図、断・横断面図作成の場合　700,000円/km（3測線長当たり） 　天秤システム接触型レーダ計測の場合 測線数、提出物により異なる 250,000円～700,000円/km	現場作業費 ・背面空洞調査350,000円/日 解析費 　解析ソフト：自社開発ソフトを使用 ・背面空洞調査250,000円～500,000円/km （測線長、提出物により異なる）	検討中
アウトプット例					

2.6 計測・モニタリング技術

性能カタログより、トンネルにおける支援技術に加え、NETIS 登録技術や、本研究プロジェクト参加企業が所有する計測・モニタリング技術を整理する。

計測・モニタリング技術では、主に「圧ざ・ひび割れ」「うき・はく離」「外力による、変形・移動・沈下」が支援可能となっている。

計測・モニタリング技術の一覧表を表 2.6.1 に示す。その内容を表 2.6.2 表 2.6.5 に示す（表 2.6.2～表 2.6.3、表 2.6.4～表 2.6.5 でセットとなっている。

表 2.6.1　計測・モニタリング技術一覧

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ登録番号
OSV を活用したトンネル附属物の監視技術	—	TN030001－V0020
３軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物（照明器具・標識等）の傾斜角度変位モニタリングシステム	—	TN030002－V0020
MIMM-R（ミーム・アール）のレーザースキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術	KK-130026-VR	TN030003－V0020
Leica　ProScan	—	—
走行型レーザ計測によるトンネル覆工幅と高さの把握	—	—
走行型 3D トンネル点検小型システム MIMM-S（ミーム・エス）	—	—

表 2.6.2　計測・モニタリング技術一覧[3)]（1／4）

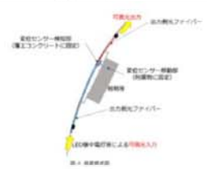
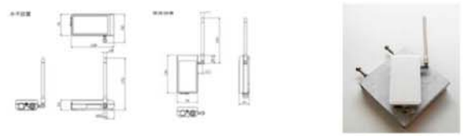
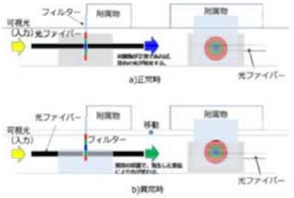
		「点検支援技術 性能カタログ(案) 令和2年6月 国土交通省」に掲載されている計測・モニタリング技術(トンネル)		
技術番号		TN030001－V0020	TN030002－V0020	TN030003－V0020
技術名		OSVを活用したトンネル附属物の監視技術	3軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物(照明器具・標識等)の傾斜角度変位モニタリングシステム	MIMM-R(ミーム・アール)のレーザースキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術
開発者		パシフィックコンサルタンツ(株) 神戸大学 OSV研究会	株式会社ザイマックス 共同開発者:オプテックス株式会社、公立大学法人兵庫県立大学	パシフィックコンサルタンツ株式会社
概要図				
技術概要		光ファイバーを用いたOSVセンサー(現場可視化技術)により照明灯具等の附属物の脱落の異常を監視するものである。本技術は、附属物の取付部材の腐食が進行し、監視を必要とするようなものを対象とし、計測対象附属物の取付金具の一部に破断等が発生した場合、附属物等に発生する変位をOSVセンサーにて検知するものである。定期点検時に監視対象の照明等の附属物に設置し、徒歩による日常パトロールや定期点検においてセンサーの発光色の変化で異常の有無を確認し、異常が認められた場合は速やかに近接目視等で点検を行い措置もしくは撤去、交換を行うことを前提としている。なお、神戸大学OSV研究会では、任意データが安全側から危険側へ変化することを、光の色の変化として表現する方法をとっている。例えば、3段階表示の場合は、青(もしくは緑)⇒黄⇒赤，5段階表示の場合は青⇒水色⇒緑⇒黄⇒赤と表示することを標準としている。	3軸加速度センサを搭載した監視センサをトンネル内附属物(照明器具・標識等)に設置し、キャリブレーションを行った後の相対傾斜角度の変位をモニタリングする技術である。監視センサは、3軸加速度センサ・電池(専用リチウム電池)・通信モジュール等で構成されており、これを最長で5年間設置しておくことで、その期間において、一定時間毎の傾斜角度を継続的に計測する。これにより、どの程度変位が発生したかが可視化できる技術である。	トンネル覆工壁面の連続画像撮影システム、高精度3次元レーザー計測システム、非接触レーダー探査システムを車両に搭載し、覆工表面ひび割れや漏水等の変状と、トンネル断面形状、巻厚、背面空洞等を計測する。3次元レーザースキャナにより、トンネル内空の断面形状や断面変形の有無を把握することができるため、外力性変状の評価するための定量的なデータを得ることができる。また、内装板と覆工コンクリートが一体として動くと仮定すると、内装板背面の覆工コンクリートの変位、変形を計測、監視ができるため、内装板を撤去して近接目視を実施するか否かの判断資料となる。
基本諸元		・光ファイバー(直径Φ2mm) 5m×2本 ・センサー本体 1個 ・センサーフィルム 1個 ・強力両面テープ 適量 ・光ファイバー固定材 適量	本監視センサは、3軸加速度センサ・電池および通信モジュール内蔵の本体のみで計測を行うものである。 計測されたデータはSigfox通信を通じて、弊社のクラウドサーバに蓄積される。お客様のパソコンやスマートフォンのインターネットブラウザから、傾斜角度の継続的データが確認・出力できる。 ※Sigfox通信 京セラコミュニケーションシステム株式会社が日本国内において基地局を設置し、電気通信事業者として展開している通信サービス https://www.kccs-iot.jp/	【計測装置の構成】 ・本計測機器は移動装置と計測装置が一体構造であり、トンネル内空の三次元座標の計測を行うものである。なお、トンネル坑外では、GNSS(GPS)で車両位置を測位しており、トンネル坑内では、IMUおよび距離計により車両の自己位置等を計測する。
移動装置		－	－	車両型 ・内燃機関を搭載した車両にて移動する。 ・車両に切り離し可能な計測室(カメラ、レーザ、レーダを搭載)を設置し、一般車両に混じって交通規制を行うことなく通常走行しながら計測を行うことが可能。 ・陸運局にて規制緩和認定を取得しており、道路使用申請なしに走行計測することができる。
計測装置	センシングデバイス	光ファイバー、LED懐中電灯等の照明(手元から入力側の光ファイバーに白色光を入力する)	オプテックス株式会社製 IoT看板センサ(型番:OFM 002S)	レーザースキャナ 1,000,000点/秒 200Hz,100Hz
	計測原理	本技術は、2本の光ファイバーをセンサー本体で接続し、センサー本体内で2本の光ファイバーの間にRGBの着色をしたフィルムを設置する。センサー本体は、覆工コンクリートに固定し、着色フィルムは、対象とする附属物等に固定する。 対象の附属物等の取付部材の一部が破断等により変位が生じたときにその変位量に同調した発色を確認することで、脱落の危険性を判断するものである。 フィルムは同心円状に内側から青(直径2mm)、緑(直径6mm)、赤(フィルム本体色)としており、変位に応じて青⇒水色⇒緑⇒黄色⇒赤と発光色が変化するものである。	3軸加速度センサを内蔵した監視センサを用いて、対象物のX・Y2軸のキャリブレーション後の相対傾斜角度を計測する。計測されたデータはすぐに弊社クラウドサーバに送信される。 	車両に搭載したレーザースキャナによりトンネル内空の三次元データを取得する。
	計測プロセス	①徒歩による日常パトロール、定期点検の際にLED懐中電灯等により白色光を入力側光ファイバーに照射させることを想定している。 ②2本の光ファイバーとOSVセンサーで構成されたセンサーをトンネル内附属施設と近傍の覆工コンクリートに設置する。 ③附属物の脱落を可視光の変化により確認する。 ④センサーからの発色は正常時は青であるが、変位が発生すると青⇒水色⇒緑⇒黄色⇒赤と変化する。 ⑤赤となった場合は、5mm以上の変位が発生しており、少なくとも1箇所の取付部材が破断等の異常が発生している状況である。 	＜事前確認＞ トンネルがSigfox通信のサービスエリア内にあるかどうかを確認する。 トンネル内の図面を用いて、監視センサを設置する附属物(照明・標識等)を確定する。 トンネル開口部付近に、小型Sigfox基地局を設置する場所(※)が確保できることを確認する。 ※3G回線による通信環境下にあり、防水環境と100V電源が確保できる十分な設置空間現場にて設置場所・設置方法を確認し、設置が可能であることを確認する。また設置時点にて通信状態の確認を行う。確認は、試験用監視センサ内部のディップスイッチにて「送信確認機能」をオンにすることで、1分ごとに10回の計測データが試験送信されるので、弊社クラウドサーバにて送信の有無を見る。本試験計測に要する目安の時間は、計測準備に15分、計測に10分、データ確認に5分である。トンネル内部においては、トンネル坑口部付近に試験用の小型Sigfox基地局を仮設置して起動し(別途電源バッテリーが必要)、通信の可否を上記の方法で確認する。 ＜取付＞ 予定した部位に監視センサを取付用のビスが付いた設置用治具をもって設置する。または監視センサをステンレス製の台座にビスで取り付け(2箇所)、それを金属用強力接着剤で対象物に接着固定する。 設置後、監視センサの傾斜角度(計測開始時の傾斜角度)をゼロ度に調整(キャリブレーション(※))を行う。 ※キャリブレーション方法:監視センサ右側面の銘板に記載された"∩"マーク(近接ポイント)に約3秒間磁石を付ける。 監視センサ内部の表示灯が点灯し、キャリブレーションが開始。表示灯が消灯するとテスト送信を行い、キャリブレーションが完了。磁石がない場合は、監視センサのカバーを開けて本体基盤にあるキャリブレーションスイッチを数秒間押す。カバーの開閉を伴うため、設置のズレに注意が必要。 ＜設置後の計測について＞ 対象物に設置した監視センサにより、あらかじめ設定した測定間隔でX・Yの2軸にて傾斜角度を計測し、Sigfox通信により弊社サーバに伝送する。伝送されたデータは一定間隔ごと(現状6時間ごとに設定)にWEBサービスに更新され閲覧・出力可能となる。	①トンネル郊外にて距離計のキャリブレーションを実施した後、GNSS(GPS)のキャリブレーションを行う。 ②対象トンネルまで自己位置をGNSS(GPS)で測位し、坑内の壁面の三次元座標をレーザースキャナにて計測し記録する。 

表 2.6.3　計測・モニタリング技術一覧[3]（2/4）

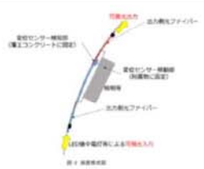
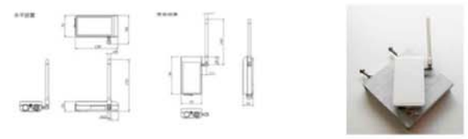
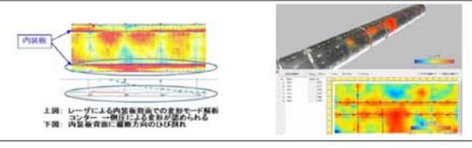
		「点検支援技術 性能カタログ(案) 令和2年6月 国土交通省」に掲載されている計測・モニタリング技術(トンネル)		
技術番号		TN030001－V0020	TN030002－V0020	TN030003－V0020
技術名		OSVを活用したトンネル附属物の監視技術	3軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物(照明器具・標識等)の傾斜角度変位モニタリングシステム	MMM-R(ミーム・アール)のレーザースキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術
開発者		パシフィックコンサルタンツ(株) 神戸大学 OSV研究会	株式会社ザイマックス 共同開発者:オプテックス株式会社、公立大学法人兵庫県立大学	パシフィックコンサルタンツ株式会社
概要図				
計測装置	アウトプット	・出力側光ファイバーの可視光の発光色	<送信後のデータ> DeviceID　監視センサ個体ごとの識別コード 傾きX　単位:度(角度)　X軸傾斜データ　傾きY　単位:度(角度)　Y軸傾斜データ 最終データ取得日時　単位:西暦年/月/日__時:分:秒　監視センサからの最終データ取得日時 変量スコアX、変量スコアY 無単位:X・Yそれぞれの軸において、各計測時点からさかのぼった過去のデータから、自己回帰移動平均モデル(※)を用いて算出された当該計測時点の予測値と実測値の乖離度合い①を、過去データの標準偏差②との比率(((①の2乗÷②の2乗)の平方根)により表したもの。この値は予測値に対する乖離の大きさを、それが発生する確率として解釈することが可能であり、2を超えることは4.55%、3を超える場合は 0.27%、4を超える場合は0.01%で起きる乖離の大きさを示している。※自己回帰移動平均モデルとは、時系列の統計的な性質(平均や分散)が観測時刻によらず一定であると考えられるデータにあてはめられるモデルであり、ある時点のデータとそれ以前のデータの相関を想定する自己回帰モデルと、各データは過去の誤差に影響されると考える移動平均モデルを組み合わせた時系列分析の統計的手法である。	①坑外のGNSS(GPS)データ、IMU(車両姿勢)データ、距離計データ、レーザースキャナ計測データから高精度処理によりトンネル壁面の三次元座標データを算出する。 ②三次元座標データからトンネルの平均的な断面、トンネルの各スパンの方向を求める。 ③算出した平均断面と各断面を比較し、変形モードを算出する。 ④二回目以降の計測においては、初回の計測結果に基づき変位・変形の進行性評価が可能。 ⑤現地計測に要する時間は、キャリブレーションに1時間、計測準備に15分、計測に2分/km(時速40km/hの場合)、データ確認に15分を要する。
データ収集・記録装置		―	通信モジュールは、計測装置(監視センサ)と一体の構造である。ただし、Sigfox通信のサービスエリア内にあるトンネルで、内部までSigfox通信が届かない場合は、小型Sigfox基地局を別途設置する。監視センサで計測したデータはSigfox通信を使用して、あらかじめ設定した計測期間ごとに順次に送信され、弊社が契約したクラウドサーバに保存される。クラウドサーバに保存されたデータは、ウェブ上で閲覧・出力可能となる。 小型Sigfox基地局の設置例	・計測機器のデータ収集・通信装置から計測したデータを車両に搭載したPCに伝送しハードディスクに保存
運動性能	最小	―	―	・R3.5m以上 ・R3.5m以下(SL1.5m程度)の場合、道路中央を走行することにより高さ3.8m幅3.5m程度まで対応可
	最大	―	―	・R8.5m以下
計測性能	計測速度	―	―	70km/h程度以下
	計測精度	1mm程度	絶対直線性(同条件の温度・湿度下における精度を表す): ±0.2°（-10° <= θ <=+10° ） ±0.4°（-25° <= θ <-10° または、10° < θ <=25° ） ※θ:キャリブレーション後の測定角度 温度特性:±1	内空断面計測(2点間距離計測精度) ±2mm 相対差分計測(内装版等変化計測) ±1mm
	位置精度	―	―	・変位差分は相対変位のため、位置精度は問題にならない
点検時現場条件		・アンカー等による固定が必要となるため、落下に留意 ・附属物の材質を確認し、異種金属腐食が発生しないことを確認	設置・撤去時においては道路規制が必要となる場合がある。設置・撤去に要する時間は約1時間の見込み。	交通規制不要
作業条件・運用条件		設置時は、高所での作業となるため、高所作業車運転資格	高所作業車を用いる場合は、作業特別教育修了者もしくは技能講習修了者である。また、高所作業車において設置撤去にかかる技量を有する。	GNSS(GPS)の受信状態の良好な時間帯が望ましい。最低5個のGPSを受信できなければ計測不可
計測費用		設置材料費20,000円/箇所 設置費　150,000円/日(1日当たり5～10箇所設置可能) 計測は道路管理者(日常パトロール等)による	監視センサ1点につき、 ・12時間毎計測の場合:バッテリー使用可能期間相当の5年契約で総額90,000円(年換算18,000円) ・6時間毎　〃　:同4年契約で総額80,000円(年換算20,000円) ・1時間毎　〃　:同1.5年契約で総額45,000円(年換算30,000円) ・15分毎　〃　:同6ヶ月契約で総額30,000円(年換算60,000円)	車両損料　750,000円/日 計測費　100,000円/日 解析費　470,000円/km
アウトプット例		表-1 OSVセンサー(出力)の発光色とセンサー都変位の関係例 変位 0mm 1mm程度 2mm程度 3mm程度 4mm程度 5mm以上 OSVセンサーの発光色	DeviceID 傾きX 傾きY 変量スコアX 変量スコアY 最終データ取得日時 742E67 0.03 -0.03 0.05609 0.07635 2020/2/7_14:26:54 742E67 0.02 -0.02 0.06543 0.09654 2020/2/7_2:26:50 742E67 0.02 -0.03 0.00275 0.08854 2020/2/6_14:26:50	 上図:レーザによる内装板背面での変状モード解析コンター一例(1)による変状が認められる 下図:内装板背面に顕著方向のひび割れ

表 2.6.4　計測・モニタリング技術一覧[3)]（3/4）

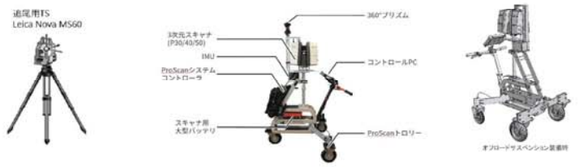
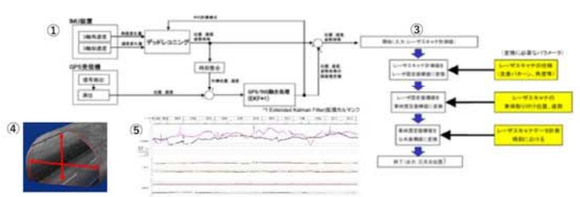
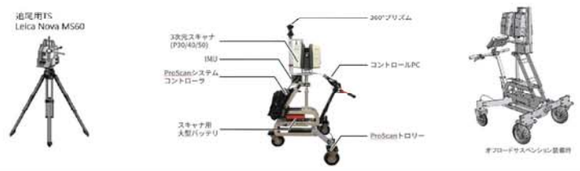
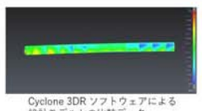
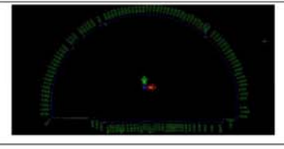
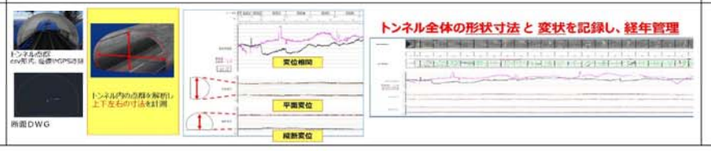
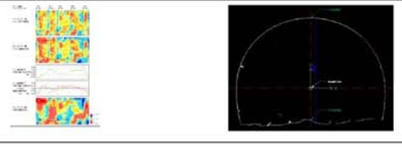
		未掲載		
技術番号				
技術名		Leica ProScan	走行型レーザー計測によるトンネル覆工幅と高さの把握	走行型3Dトンネル点検小型システム　　MIMM-S(ミーム・エス)
開発者		ライカジオシステムズ株式会社	計測検査株式会社	計測検査株式会社
概要図				
技術概要		高精度TSIによる自動追尾と組み合わせて使う地上移動体レーザースキャナーで、本体には追尾用プリズム・高精度IMU・コントローラー・レーザースキャナー・コントロール用PCを搭載している。屋内・屋内を問わず高精度な計測を可能としており、トンネル内においても屋外と変わらない絶対位置精度の点群取得を可能とする。	①走行型レーザー計測車両（写真1）で取得したレーザー点群を解析し、簡易的にトンネル覆工の幅と高さを把握するものである。200rps（写真2）のレーザー計測器を用い、時速50kmで走行した場合、約7cm間隔でトンネル断面の点群が得られる。得られた断面より近似円を計算し基準断面とトンネル中心点を求める。中心点を起点に覆工面の幅と高さを求める（図1）。　②計測によって得られたレーザー点群断面より近似円を計算し基準断面とトンネル中心点を求める。基準断面を各レーザー点群断面の最適位置（最もフィットする位置）に置き、その中心点を起点に覆工面の幅と高さを求める。全ての断面（間引き可能）の幅と高さのデータをグラフ化することで、簡易的に覆工の寸法（変形）状態を把握することが可能である。	本技術はGNSS（GPS）信号を必要とせず、IMUとLDV（レーザー距離計）の複合計算で自己位置を推定し、高精度3次元レーザー点群を取得できるシステムである。分解可能かつ小型化した高精度3次元レーザ計測システムを軽車両や台車へ搭載し、トンネル断面形状を計測する。このシステムを併用することで、断面形状や断面変形の有無を把握することが出来るため、外力性変状の評価をするための定量的なデータを得ることが出来る。
基本諸元		ポジショニング・プラットフォームの標準精度TS追尾型 水平精度 10 – 20 mm 鉛直精度 5 – 10 mm ロール & ピッチ精度 0.025° ヘディング精度 0.075° イニシャライズに要する時間 （開始 / 終了時のアライメント）3分間 コントロール用 PC Leica CS35 タブレット、10.1" タッチパネル, 128GB SSD ハードディスク, バッテリー寿命8時間 バッテリー 標準動作時間 4時間（リチウムイオン） データエクスポートオプション 成果品フォーマット バイナリ LAS 1.3, PTG, XYZ インテンシティ PTS センサープラットフォーム 重量 28 kg（スキャナー含まず）44 kg（Leica ScanStation P40 スキャナー含む） 外寸（L x W x H）104 x 90 x 135 cm（スキャナー含まず） 104 x 90 x 171 cm（Leica ScanStation P40 スキャナー含む） 動作環境 動作温度 スキャナー部以外： −10°C ～ +50°C、結露なきこと レーザースキャナーの資料も確認のこと。	本技術は走行型高速3Dトンネル点検システムMIMM（写真1）を用いレーザー計測を行う。 GNSS,IMU,オドメータ（距離計）より複合計算された自己位置からレーザー測距された位置に後処理により3次元点群（3次元座標）を出力する。	高精度3次元レーザ計測システムは高精度レーザスキャナ・IMU・LDV（レーザー距離計）等で構成される。小型かつ分解が可能なことにより、用途に応じて軽車両や手押し台車へ搭載する等の運用が可能。高精度レーザスキャナは100万点／秒、回転数最大200回／秒の性能を備える。
移動装置		手押し型 ・操舵機能・ブレーキ搭載 ・オフロード用サスペンション付きホイールも用意することにより、不整地においても計測が可能。	車両型（幅2.1m長さ5.9m高さ3.1m） ・内燃機関を搭載した車両にて移動する。 ・車両に切り離し可能な計測室（カメラ、レーザ、レーダを搭載）を設置し、一般車両に混じって交通規制を行うことなく通常走行しながら計測を行うことが可能。 ・陸運局にて規制緩和認定を取得しており、道路使用申請なしに走行計測することができる。	可搬型（組み立て時：幅0．8m長さ0．8m高さ1．3m） ・可搬型バッテリーや小型発電機を使用し軽車両等に搭載し移動する。 ・カメラ、レーザー計測装置、照明等、分解・組み立てを可能とし可搬できる仕様としている。
計測装置	センシングデバイス	レーザースキャナ　1,000,000点/秒　100Hz	レーザースキャナ　1,000,000点/秒　200rps,100rps	レーザースキャナ　1,000,000点/秒　200rps,100rps
	計測原理	手押し台車に搭載のレーザースキャナーにより、トンネル内空の三次元データを取得する。	レーザースキャナ（写真2）でレーザー計測を行う。GNSS,IMU,オドメータ（距離計）より複合計算された自己位置からレーザースキャナ（写真2）により測距された位置に後処理により3次元座標を出力する。	レーザースキャナでレーザー計測を行う。IMU,LDV（レーザー距離計）より複合計算された自己位置からレーザースキャナにより測距された位置に後処理により3次元座標を出力する。
	計測プロセス	①基準点を用いて、Leica Nova MS60 を設置し、MS60のプリズムに追尾させる ②Leica ProScanを3分間静止させ、IMUを初期化する ③6秒歩行4秒静止にて歩行しながら計測する ④Leica Nova MS60との距離が200mを超える場合、TPSの盛替えを行ってから引き続き計測をする ⑤Leica ProScanを3分間静止させ、終了処理を行う	①トンネル外にてオドメータ（距離計）、IMUのキャリブレーションを実施した後、GNSS（GPS）のキャリブレーションを行う。 ②対象トンネルまで自己位置をGNSS（GPS）で測位し、対象トンネル付近でレーザースキャナのレコーディング開始し覆工面を計測し記録する。 ③GNSS,IMU,オドメータ（距離計）,レーザスキャナの計測値を複合計算（デッドレコニング）し3次元位置（座標）を出力する。 ④出力された3次元位置（座標）を任意の位置で解析し⑤トンネル全体の幅と高さを把握する。 	①所定の場所でカメラ、レーザー計測装置、照明等、組み立てを行う（約60分）。 ②トンネル外にてIMUのキャリブレーションを行う。 ③対象トンネル付近でレーザースキャナのレコーディング開始し覆工面を計測し記録する。 ④所定の場所でカメラ、レーザー計測装置、照明等、分解、梱包を行う（約60分）。 ⑤内業：IMU,LDV（レーザー距離計）,レーザスキャナの計測値を複合計算し3次元位置（座標）を出力する。

表 2.6.5　計測・モニタリング技術一覧[3]（4/4）

		未掲載		
技術番号				
技術名		Leica ProScan	走行型レーザー計測によるトンネル覆工幅と高さの把握	走行型3Dトンネル点検小型システム　　MIMM-S(ミーム・エス)
開発者		ライカジオシステムズ株式会社	計測検査株式会社	計測検査株式会社
概要図			 写真1　写真2　図1	
計測装置	アウトプット	①抗外の基準点データを含むTPSデータ、IMU(姿勢)データ、レーザースキャナー計測データから高精度処理によりトンネル壁面の三次元座標データを算出する。 ②専用ソフトウェアからLASもしくはPTS形式で点群を出力する。 ③必要に応じて、Cyclone 3DR 等　Leica geosystems社もしくは市販のソフトウェアにより、断面解析・二時期の三次元点群比較可能。	①計測範囲内(トンネル外含む)の3次元座標データ(LAS、CSV等) ②トンネル内の3次元座標データ(LAS、CSV等) ③トンネル覆工面の寸法をトンネル延長方向にグラフ化したデータ(EXCEL等)	①計測範囲内(トンネル外含む)の3次元座標データ(LAS、CSV等) ②トンネル内の3次元座標データ(LAS、CSV等) ③トンネル覆工面の寸法をトンネル延長方向にグラフ化したデータ(EXCEL等)
デー収集・記録装置		・計測機器のデータ収集・通信装置から計測したデータをProScanに搭載したPCに伝送しハードディスクに保存	・各計測機器にて計測したデータを車両に搭載したPCに伝送しハードディスクに保存 	・各計測機器にて計測したデータを搭載したPCに伝送しハードディスクに保存
運動性能	最小	最小通行幅95cm	・R3.5m以上 ・R3.5m以下(SL1.5m程度)の場合、道路中央を走行することにより高さ3.8m幅3.5m程度まで対応可	R2.5m以上(軽車両搭載時)、R2.5m以下(SL1.5m程度)の場合、道路中央を走行することにより高さ2.5m幅2.5m程度まで対応可
	最大	-	・R8.5m以下	R8.5m以下
計測性能	計測速度	TPS盛替えを除き、歩行計測時で時速2～3km	・70km/h程度以下	40km/h程度以下
	計測精度	距離精度　1.2mm + 10ppm	内空断面計測(2点間距離計測精度)　±2mm	内空断面計測(2点間距離計測精度)　±2mm
	位置精度	水平精度 10 - 20 mm　(良コンディション時　横断方向5mm程度，縦断方向1～2cm程度) 鉛直精度 5 - 10 mm　(良コンディション時　4-5mm程度)	・断面ごと解析(相対変位)のため、絶対位置精度は問題にならない	・断面ごと解析(相対変位)のため、絶対位置精度は問題にならない
点検時現場条件		3m * 3m 程度の作業スペース確保が好ましい	・トンネル覆工表面及びトンネル内に結露、霧、霧、漏水等の乱反射要因がある場合、正常なデータが得られない場合がある。 ・交通規制は不要	・トンネル覆工表面及びトンネル内に結露、霧、霧、漏水等の乱反射要因がある場合、正常なデータが得られない場合がある。 ・交通規制は不要
作業条件・運用条件		TPSからの追尾があるため、見通しがきくこと。 開始時・終了時の静止時に、振動等がないこと。	・屋外の天候によりGNSS(GPS)信号を受信できない場合は計測できない。屋外では強風、強雨、降雪時には使用不可であるが、小雨では使用可能。	・屋外では強風、強雨、降雪時には使用不可であるが、小雨では使用可能。
計測費用		機材および後処理ソフトウェア販売のみ	車両損料　　750,000円/日 外業(計測費)　100,000円/日＋燃料費、交通費(有料道路、フェリー等) 内業(解析費等) 500,000円/km	機器損料　　360,000円/日 外業(計測費)　100,000円/日＋燃料費、交通費、配送費等 内業(解析費等) 770,000円/km
アウトプット例		 Cyclone 3DR ソフトウェアによる 設計モデルとの比較データ 		

2.7 ユースケースと要求性能について

トンネル点検における、非破壊検査方法の活用において、考えられるユースケースは、表 2.7.1 に示すとおり、トンネル点検要領における「変状の種類」が挙げられる。変状の種類は 6 ケースあり、変状の区分として、「外力」「材質劣化」「漏水」との関係で整理される。

表 2.7.1　変状の種類及び変状区分との関係 [1)]

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

変状の種類として、①圧ざ、ひび割れ、②うき、はく離、③変形、移動、沈下、④鋼材腐食、⑤巻厚の不足または減少,背面空洞、⑥漏水等による変状において、非破壊検査方法の「画像計測技術」「非破壊検査技術」「計測・モニタリング技術」のうち、どの技術が該当するか整理し、合わせて、要求性能項目についてまとめる。要求性能項目については、トンネル定期点検要領 H31.3 の対策区分の目安表を参考とした。

1)　圧ざ、ひび割れの対応技術と要求性能

圧ざ、ひび割れの変状区分は、表 2.7.2 のように「外力」「材質劣化」が該当する。変状状況に応じて、これらの変状区分を判別することが、状態の把握において重要であり、また変状毎の対策区分の判定に影響する。

表 2.7.2　変状の種類及び変状区分との関係 [1)] を加工

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

(1)　外力

外力による圧ざ、ひび割れの対応技術と要求性能を図 2.7.1 に示す。

画像計測技術と計測・モニタリング技術を組み合わせて、点検の支援を行う。画像計測のひび割れ状況に外力性の変状の有無、計測モニタリング技術において、覆工のはらみ出しや変形の有無により、外力による圧ざ、ひび割れの判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
外力	「緩み土圧，膨張性土圧，偏土圧・斜面のクリープ，地すべり，支持力不足，水圧・凍上圧」	画像計測技術 ＋ 計測・モニタリング技術	・ひび割れの幅，長さ，位置，密度が確認できる。 ・ひび割れ形状が、外力変状の特徴を有する。 ・ひび割れの進行性が確認できる。

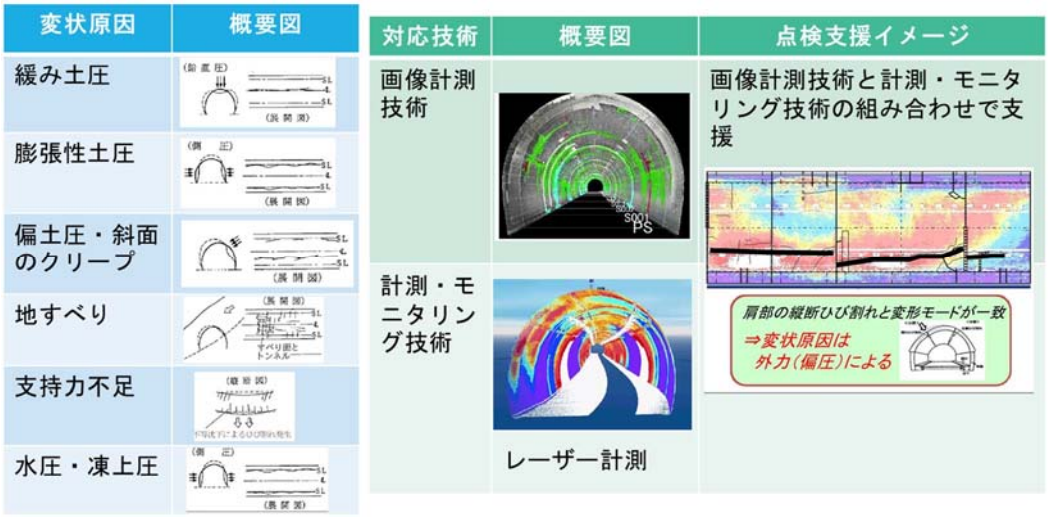


図 2.7.1　外力による圧ざ、ひび割れの対応技術と要求性能 [5] を加工

(2)　材質劣化

材質劣化による圧ざ、ひび割れの対応技術と要求性能を図 2.7.2 に示す。

変状原因		対応技術	要求性能
材質劣化	「乾燥収縮，温度伸縮，使用材料及び施工不良」	画像計測技術 ＋ 計測モニタリング技術	・ひび割れの幅，長さ，位置，密度が確認できる。 ・ひび割れ形状が、材質劣化の特徴を有する ・進行性の有無は確認できない。

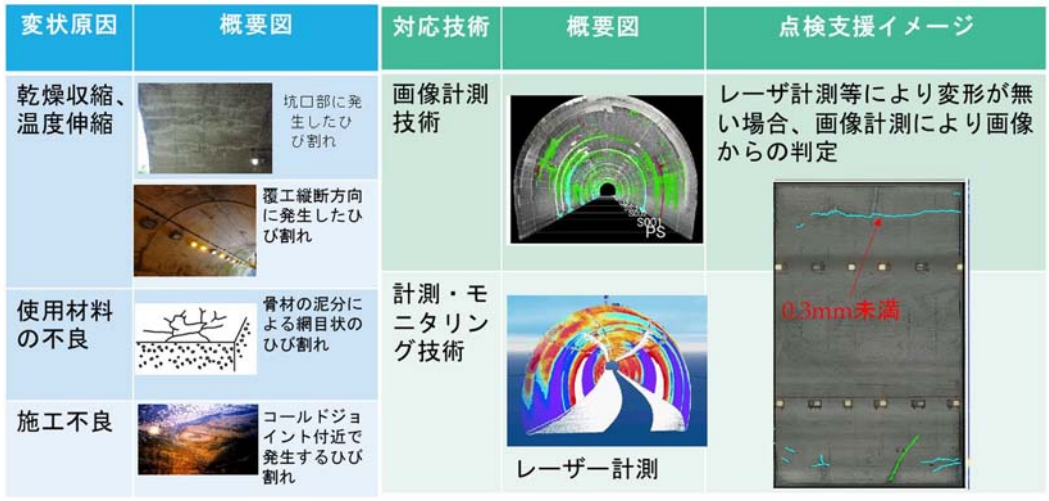


図 2.7.2　材質劣化による圧ざ、ひび割れの対応技術と要求性能 [1) 5)] を加工

画像計測技術と計測・モニタリング技術を組み合わせて、点検の支援を行う。材質劣化の変状の場合、画像計測より、ひび割れ状況が外力性では無い事が確認でき、計測・モニタリング技術においても、覆工の変形やはらみ出し等が確認されない事より、材質劣化による圧ざ、ひび割れ

の判断を行う。

2)　うき、はく離の対応技術と要求性能

うき、はく離の変状区分は、表 2.7.3 のように「外力」「材質劣化」が該当する。

変状状況に応じて、これらの変状区分を判別することが、状態の把握において重要であり、また変状毎の対策区分の判定に影響する。

表 2.7.3　変状の種類及び変状区分との関係 [1] を加工

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

(1)　外力

外力によるうき、はく離の対応技術と要求性能を図 2.7.3 に示す。

画像計測技術と非破壊検査（レーダ探査)、計測・モニタリング技術を組み合わせて、点検の支援を行う。画像計測のひび割れ状況に外力性の変状の有無、レーダ探査では、うきやジャンカの確認、計測モニタリング技術において、覆工の変形などにより、外力によるうき、はく離の判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
外力	「緩み土圧，膨張性土圧，偏土圧・斜面のクリープ，地すべり，支持力不足，水圧・凍上圧」のひび割れによって発生	画像計測＋非破壊検査＋（計測・モニタリング）	【外力による】 ・ひび割れの状況 （閉合の恐れの有無、進行による閉合の懸念）

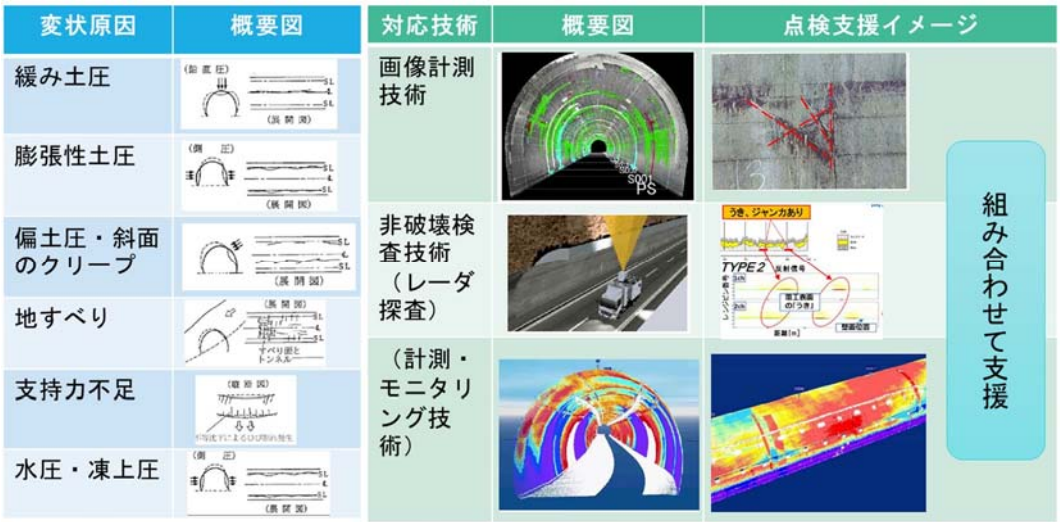


図 2.7.3　外力によるうき、はく離の対応技術と要求性能 [1) 5)] を加工

(2) 材質劣化

材質劣化によるうき、はく離の対応技術と要求性能を図 2.7.4 に示す。

画像計測技術と非破壊検査（レーダ探査）、計測・モニタリング技術を組み合わせて、点検の支援を行う。画像計測のひび割れ状況に外力性の変状の有無、レーダ探査では、うきやジャンカの確認、計測モニタリング技術において、覆工の変形などの有無により、材質劣化によるうき、はく離の判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
材質劣化	「乾燥収縮，温度伸縮，使用材料及び施工不良」及び「補修材の材質劣化」	画像計測＋非破壊検査＋（計測・モニタリング）	【材質劣化による】 ・ひび割れの状況 （閉合の恐れの有無、進行による閉合の懸念） ・漏水防止モルタルや補修材の劣化の有無 ・覆工の細片化の有無、豆板等の劣化の有無

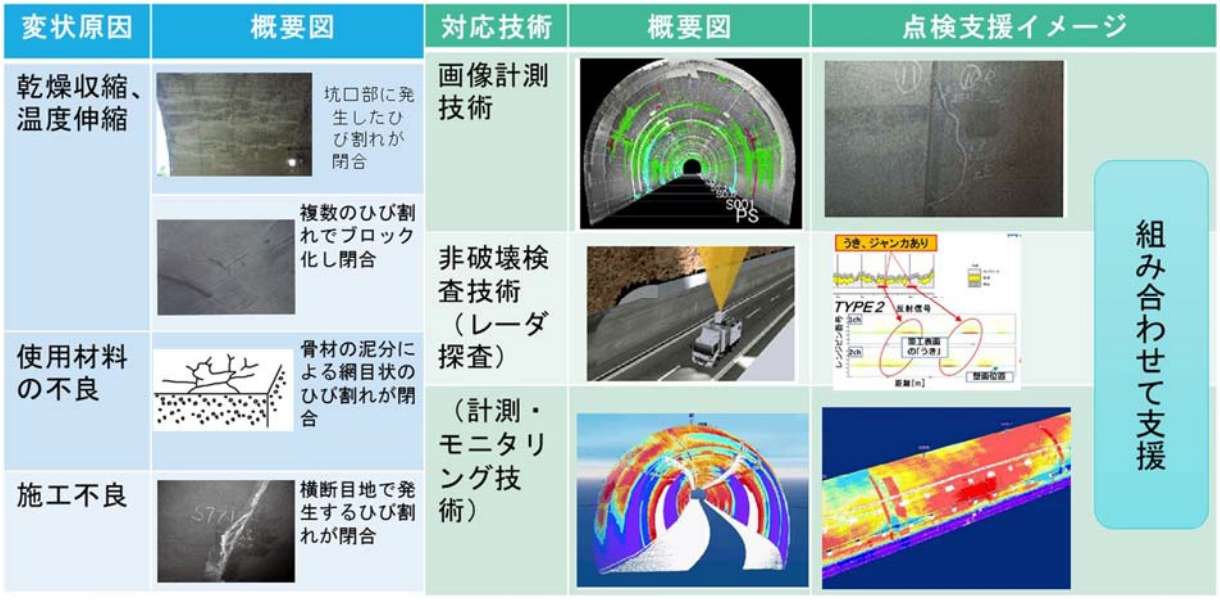


図 2.7.4 材質劣化によるうき、はく離の対応技術と要求性能 [1) 5)] を加工

3) 変形、移動、沈下の対応技術と要求性能

変形、移動、沈下の変状区分は、表 2.7.4 のように「外力」が該当する。

表 2.7.4 変状の種類及び変状区分との関係 [1)] を加工

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

外力による変形、移動、沈下の対応技術と要求性能を図 2.7.5 に示す。

計測・モニタリング技術のレーザー計測を活用し、二時期における計測データの差分を取るなど、変形、移動、沈下の判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
外力	「緩み土圧，膨張性土圧，偏土圧・斜面のクリープ，地すべり，支持力不足，水圧・凍上圧」の外力による変形、移動、沈下の発生	計測・モニタリング技術（レーザー計測）	・変形、移動、沈下の有無 ・対象箇所の変形速度（年当たりの変形量）

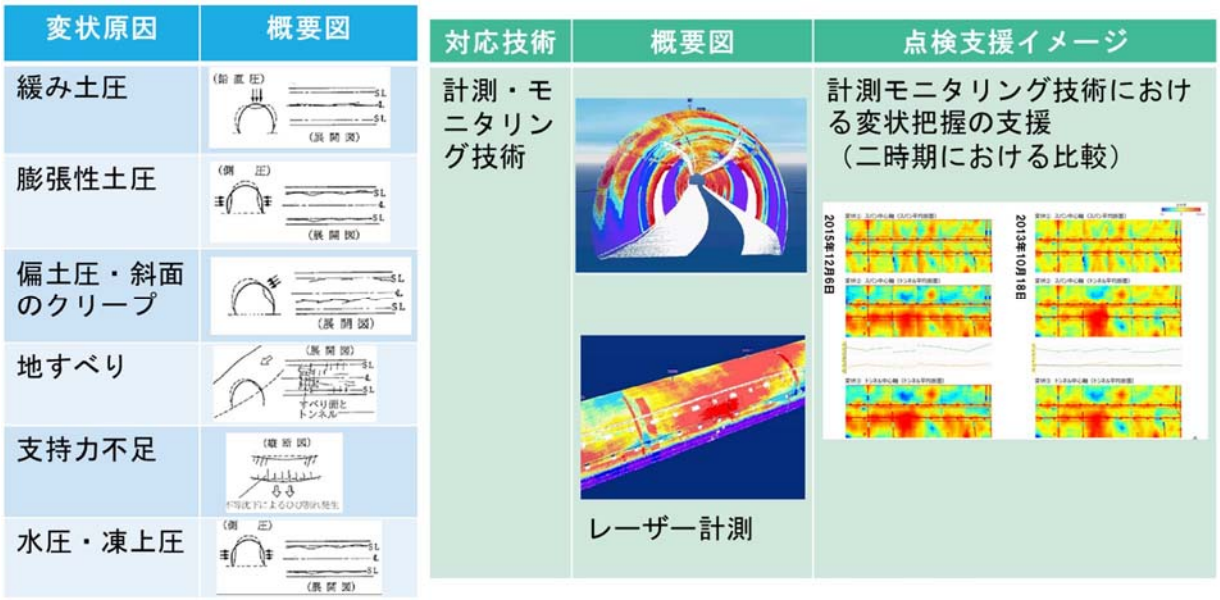


図 2.7.5　外力による変形、移動、沈下の対応技術と要求性能 [5] を加工

4)　鋼材腐食の対応技術と要求性能

鋼材腐食の変状区分は、表 2.7.5 のように「材質劣化」が該当する。

表 2.7.5　変状の種類及び変状区分との関係 [1] を加工

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

材質劣化による鋼材腐食の対応技術と要求性能を図 2.7.6 に示す。

画像計測技術を活用し、鋼材の変状範囲やうき錆の有無などから鋼材腐食の判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
材質劣化	「経年劣化，凍害，施工不良」	画像計測技術	・鋼材の変状範囲 ・うき錆の有無 ・腐食状況や断面欠損

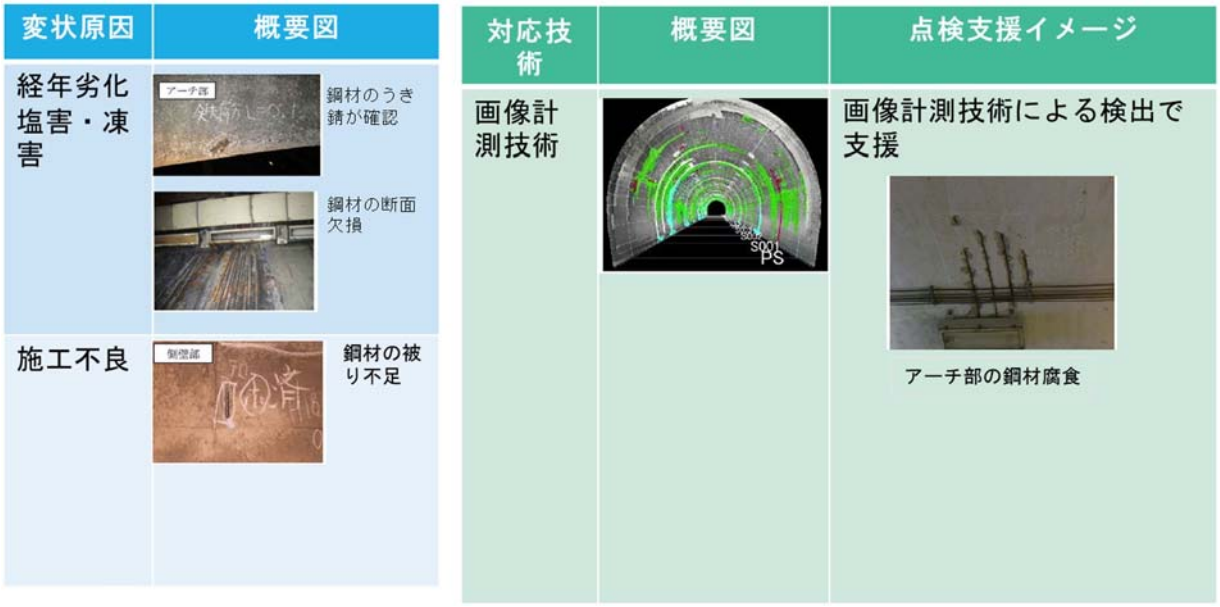


図 2.7.6　材質劣化による鋼材腐食の対応技術と要求性能 [1] を加工

5)　巻厚の不足または減少、背面空洞の対応技術と要求性能

巻厚の不足または減少、背面空洞の変状区分は、表 2.7.6 のように「材質劣化」が該当する。

表 2.7.6　変状の種類及び変状区分との関係 [1] を加工

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

材質劣化による巻厚の不足または減少、背面空洞の対応技術と要求性能を図 2.7.7 に示す。非

破壊検査技術（レーダ探査）を活用し、有効巻厚や背面空洞の有無などから判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
材質劣化	「経年劣化，凍害，アルカリ骨材反応，施工不良」	非破壊検査技術（レーダ探査）	・有効巻厚の判定 ・背面空洞の大きさ

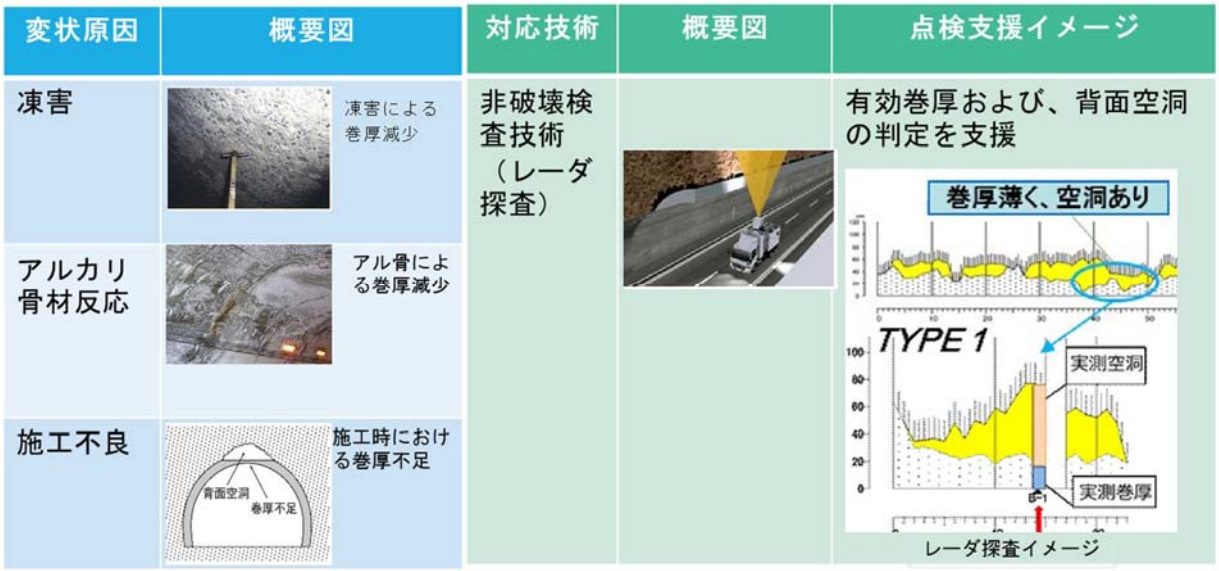


図 2.7.7　材質劣化による鋼材腐食の対応技術と要求性能 [1) 5) を加工]

6)　漏水等による変状の対応技術と要求性能

漏水等による変状区分は、表 2.7.7 のように「漏水」自体が該当する。

表 2.7.7　変状の種類及び変状区分との関係 [1) を加工]

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき、はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

漏水等による変状の対応技術と要求性能を図 2.7.8 に示す。

画像解析技術を活用し、漏水の度合、位置や凍害の有無などから判断を行う。

変状原因		対応技術	要求性能
漏水	「ひび割れ，目地からの漏水」	画像計測技術	・漏水の度合（噴出、流下、滴水、にじみ） ・漏水の位置(アーチ、側壁、路面） ・漏水による凍害（つらら、側氷、滞水、凍結）

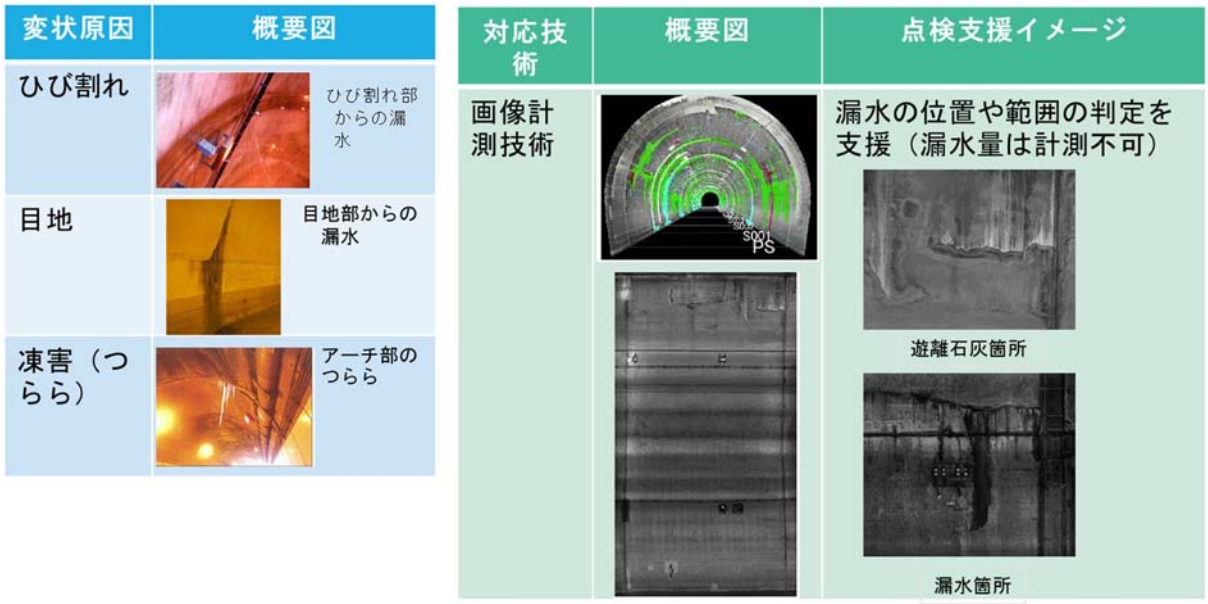


図 2.7.8　漏水による変状の対応技術と要求性能[1)] を加工

【参考文献】

1）道路トンネル定期点検要領　国土交通省　道路局　国道・技術課　平成 31 年 3 月

2）トンネル定期点検における、本体工（覆工）の状態把握の留意点　国土交通省　道路局　国道・技術課　参考資料　令和 2 年 6 月

3）点検支援技術　性能カタログ（案）　国土交通省　令和 2 年 6 月

4）国土交通省 HP　『道路トンネル点検記録作成支援ロボット技術』に関する試験結果　報道発表資料

5）道路トンネル維持管理便覧【本体工編】令和 2 年度版　日本道路協会　令和 2 年 8 月

3　画像計測の評価

3.1 検証の概要

1)検証トンネル概要

国道 27 号和知トンネル（図 3.1.1）において、画像計測技術による検証（画像撮影）を行った。

① 路線：国道 27 号
② 住所：京都府船井郡京丹波町本庄
③ 名称：和知トンネル
④ 竣工：平成 10 年
⑤ 延長：740.0m
⑥ 施工法：NATM
⑦ 幅員：11.75m（歩道 3.0+路肩 0.5+車道 3.5+3.5+路肩 0.5+監査路 0.75）

※ 調査の具体的内容については、4.3.3 章を参照のこと。



図 3.1.1　和知トンネル坑口写真

2)検証の目的

① 画像計測技術で確認できる、「圧ざ・ひび割れ」、「うき・はく離」、「鋼材腐食」、「漏水」の変状を検出する。
② 計測された変状の種類において、トンネル点検要領の状態の把握における、対策区分の判定が可能か確認する。

上記目的のもと、性能カタログおよび本研究プロジェクトに参画している 4 種類の非破壊検査技術を対象に検証を実施した。

3.2 画像計測技術の種類

1)画像計測技術

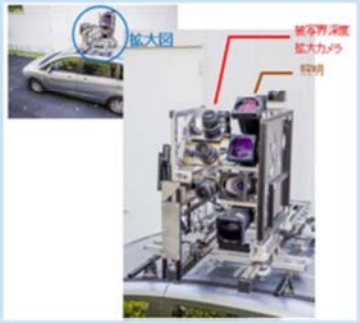
画像計測技術は、前述の通り、性能カタログに掲載されている 3 技術、本研究プロジェクトに参画している 1 技術を対象に実施した。

① 走行型高速 3D トンネル点検システム（MIMM-R）
② 社会インフラモニタリングシステム（MMSDⅡ）
③ 一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）
④ 近赤外線画像撮影による点検技術（近赤外撮影）

(1)一覧表

表 3.2.1 に計測車の概要一覧表示す。

表 3.2.1　計測車一覧表

名称	走行型高速 3D トンネル点検システム（ MIMM-R）	社会インフラモニタリングシステム（MMSDⅡ）	一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）	近赤外線画像撮影による点検技術（近赤外撮影）
会社名	パシフィックコンサルタンツ（株）	三菱電機（株）	（株）リコー	国際航業（株）
概要	連続画像撮影システム、高精度３次元レーザー計測システム、非接触レーダー探査システムを搭載	ラインセンサーカメラ、レーザスキャナーを搭載し、トンネル壁面、形状を取得する	ラインセンサーカメラを搭載し、高画質な画像を撮影する	近赤外線カメラを搭載し、トンネル壁面を撮影する
外観				

(2)運動性能・計測性能について

表 3.2.2 に計測車の運動性能および計測性能を示す。

このうち、近赤外線画像撮影技術については、性能カタログに未掲載であり、数値については参考値を記載している。

表 3.2.2　運動性能・計測性能一覧 [1)]

技術名		走行型高速 3D トンネル点検システム MIMMR（ミーム・アール）／MIMM(ミーム)	社会インフラモニタリングシステム（MMSD ⓇⅡ）	一般車両搭載型トンネル点検システム	近赤外線画像撮影
開発者		パシフィックコンサルタンツ(株) / 計測検査(株)	三菱電機株式会社	株式会社リコー	国際航業株式会社
運動性能	最小	R3.5m以上、R3.5m以下(SL1.5m程度)の場合、道路中央を走行することにより高さ3.8m幅3.5m程度まで対応可	計測車両(全高：3.34m、幅：2.38m）が通過できるトンネル	道路幅員3300mm×高さ3350mm	計測車両(全高：3.50m、幅：2.00m）が通過できるトンネル
	最大	R8.5m以下	撮影するラインカメラの視点から7m	道路幅員15000mm以下、高さ8500mm以下であれば撮影可能	撮影するカメラの視点から4m
計測性能	撮影速度	70km/h程度以下	最大80km/h	40km/h	60km/h
	計測精度	最小ひび割れ幅0.2mm　計測精度0.43mm	最小ひび割れ幅 0.3mm　計測精度 0.22mm	最小ひび割れ幅 0.3mm 計測精度 0.100mm (手動にて設定した場合) 計測精度 0.326mm (自動検出結果に基づいて自動で設定した場合)	最小ひび割れ幅 0.3mm
	長さ相対誤差	1.23%	0.67%	0.88%	検証中
	位置精度	進行方向： 59.0mm （ 5測線の平均値） 周方向： 19.7mm （ 4測線の平均値）	縦断方向：17.5mm 進行方向：13.3mm	進行方向：54.0mm 周方向：15.7mm	検証中
	色識別性能	フルカラー識別可能	グレースケール識別可能 輝度240未満で識別可能であり、輝度差約20を区別可能	グレースケール識別可能 ほぼ全明るさ（輝度250未満）で識別可能であり、輝度差約10を区別可能	グレースケール識別可能

2) 走行型高速 3D トンネル点検システム（MIMM-R）

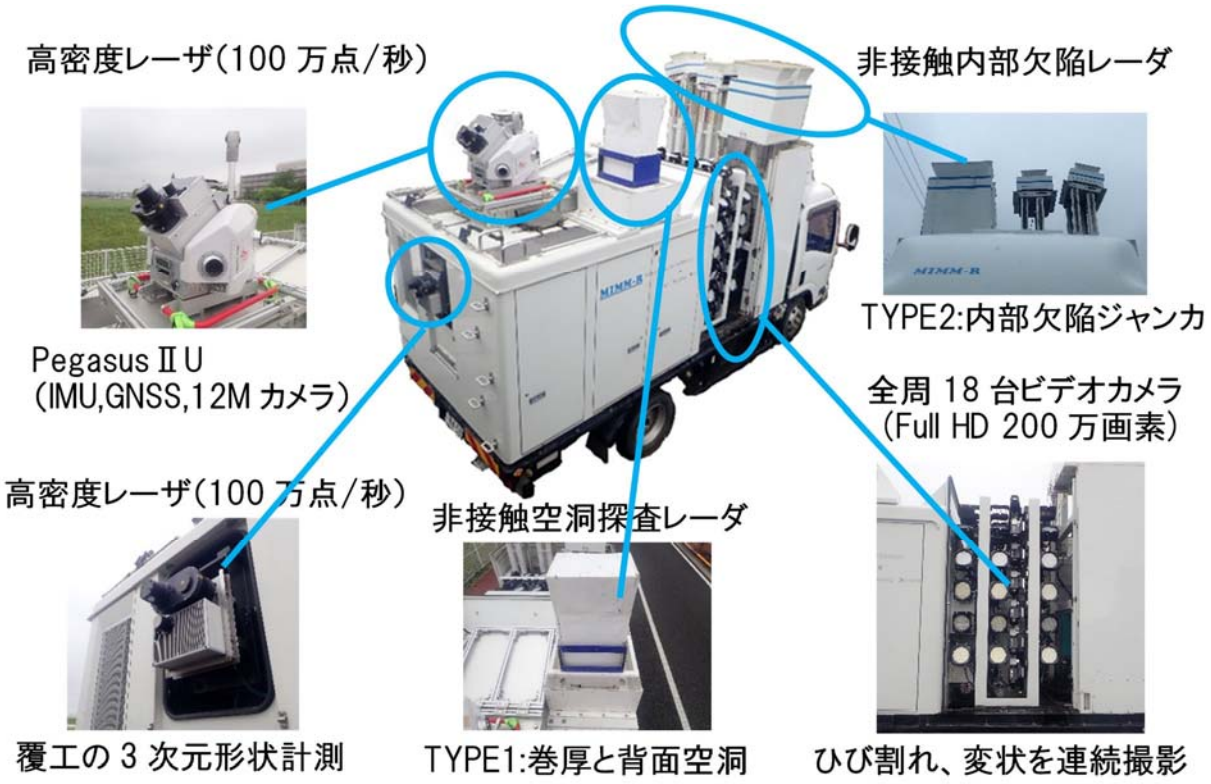


図 3.2.1　MIMM-R [2)]

表 3.2.3　MIMM-R 仕様 [2)]

	パーツ	台数	備考
MIS 部	LED 照明	48 台	3m 離隔での照度 5,000lx 程度
	カメラ	18 台	200 万画素
MMS 部	GNNS	1 台	GPS,GLONASS,Galileo,BeiDou に対応
	IMU	1 台	200Hz
	距離計	1 台	非接触ドップラー式距離計
	レーザ	2 台	1,000,000 点/秒
車両	いすゞエルフ		3 トンエアサス仕様

3)社会インフラモニタリングシステム（MMSDⅡ）



図 3.2.2　MMSDⅡ[3)]

表 3.2.4　MMSDⅡ仕様[3)]

		MMSD®Ⅱ
用途		表面変状計測、ﾄﾝﾈﾙ、路面ひび割れ（うき剥離含む）計測、鉄道沿線設備計測
走行性能		自動車道路・鉄道線路
車両	ﾍﾞｰｽ車両	6t 貨物車（軌陸車として改造）、いすゞﾌｫﾜｰﾄﾞ
	電源	発電機、AC100V、12kVA（60Hz）
ﾚｰｻﾞ計測機能		高密度ﾚｰｻﾞ 2 基
壁面撮像機能	カメラ	8K ラインカメラ 14 基
	ﾚｰｻﾞ照明	14 基
路面撮像機能	カメラ	8K ラインカメラ 2 基
	ﾚｰｻﾞ照明	2 基
座標取得機能	GPS	6 台
	IMU	3 台
	速度計	オドメータ、レーザードップラ

4)一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）





図 3.2.3　一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）[4)]

5)近赤外線画像撮影による点検技術（近赤外撮影）



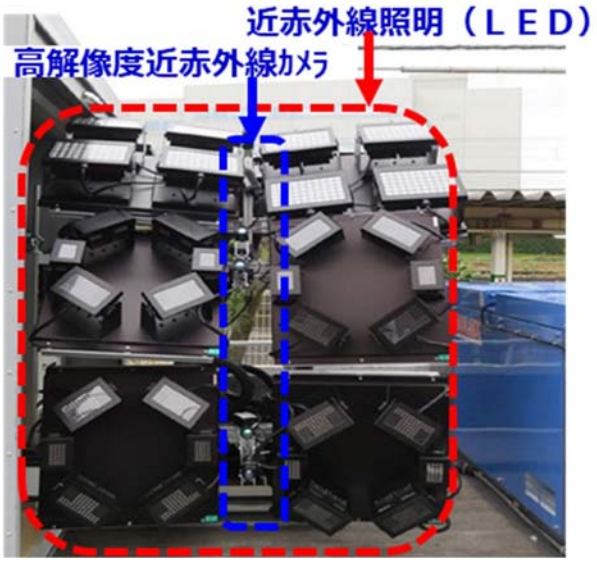


図 3.2.4　近赤外線画像撮影による点検技術（近赤外撮影）[5)]

表 3.2.5　近赤外撮影仕様[5)]

項目	概要
カメラ	・Basler製NIRカメラ　8台
波長	・近赤外線領域採用 ・スレースケール
有効画素数	・2,048×2,048dot（400万画素）
センサ	・CMOSグローバルシャッター （エリアセンサ）
レンズ	・12mm（0.92mm/pixel@2m）、絞り4.0 ・16mm（0.69mm/pixel@2m）、絞り2.8

3.3 計測状況

1)計測当日の現地状況

画像計測当日における計測状況を以下の写真に示す。



図 3.3.1　集合写真



図 3.3.2　MIMM－R



図 3.3.3　MMSDⅡ



図 3.3.4　般車両搭載型



図 3.3.5　近赤外撮影



図 3.3.6　撮影状況その１



図 3.3.7　撮影状況その２



図 3.3.8　撮影状況その３

3.4 画像計測のユースケースと要求性能

2 章でまとめたとおり、トンネル点検における対応技術とユースケース、要求性能項目は表 3.4.1 のとおりである。

表 3.4.1 より、画像計測技術で点検支援が可能な、①圧ざ、ひび割れ，②うき、はく離、④鋼材腐食、⑥漏水等による変状の評価・本検証により、画像からわかるもの、わからないものを改めて整理する。

表 3.4.1　ユースケースと要求性能

変状種類（ユースケース）	対応技術	要求性能項目の例
①圧ざ、ひび割れ	画像計測技術 計測・モニタリング技術	・ひび割れ幅，長さ、位置、密度が確認できる。 ・ひび割れ形状が、外力変状の特徴を有する。 ・ひび割れの進行性の有無が確認できる。
②うき、はく離	画像検査技術 非破壊検査技術	・ひび割れの状況 （閉合の恐れの有無、進行による閉合の懸念） ・漏水防止モルタルや補修材の劣化の有無 ・覆工の細片化、豆板等の劣化の有無（内部欠陥）
③変形、移動、沈下	計測・モニタリング技術	・変形、移動、沈下の有無 ・対象箇所の変形速度（年当たりの変形量）
④鋼材腐食	画像計測技術	・鋼材の変状範囲 ・うき錆の有無 ・腐食状況や断面欠損
⑤巻厚の不足または減少、背　面空洞	非破壊検査技術	・有効巻厚の判定 ・背面空洞の大きさ
⑥漏水等による変状	画像計測技術	・漏水の度合（噴出、流下、滴水、にじみ） ・漏水の位置(アーチ、側壁、路面） ・漏水による凍害（つらら、側氷、滞水、凍結）

3.5 画像計測の検証

3.5.1 画像計測による変状展開図の作成手法

対象となる変状は下記のとおりとする。

「ひび割れ」「うき・はく離」「鋼材腐食」「漏水（遊離石灰）」及び、変状ではないが、「付属物（照明・ケーブル）」「補修工（FRP ネット）」※このうち、「鋼材腐食」は確認されなかった。

また、変状のトレースについては、下記のルールに基づき実施した。

① チョーキングがあっても、目視で判別しにくいものは変状としてトレースしない

② チョーキングが無くても、目視で判別可能なものは変状としてトレースする

③ 対象とするスパンは、今回の監視点検において、新たなチョークが無いスパンを選定し、S035，S046，S062 の３スパンを対象とした。

3.5.2 画像展開図

1)全体一覧

図 3.5.1 に画像計測技術の画像展開図画一覧を示す。

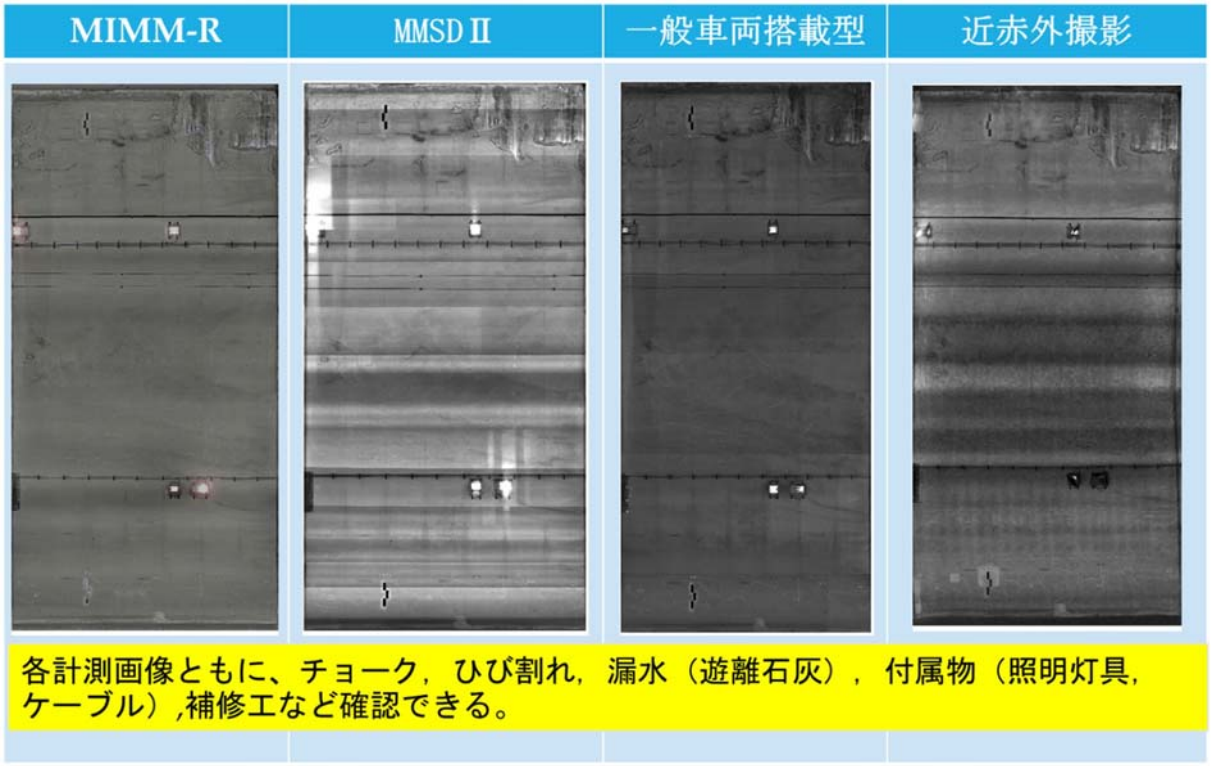


図 3.5.1　画像一覧

2)各スパンの画像展開図

次頁より、S035，S046，S062 の３スパンの画像展開図（変状検出状況）を示す。なお、左側に近接目視点検を実施した結果の変状展開図を示す。

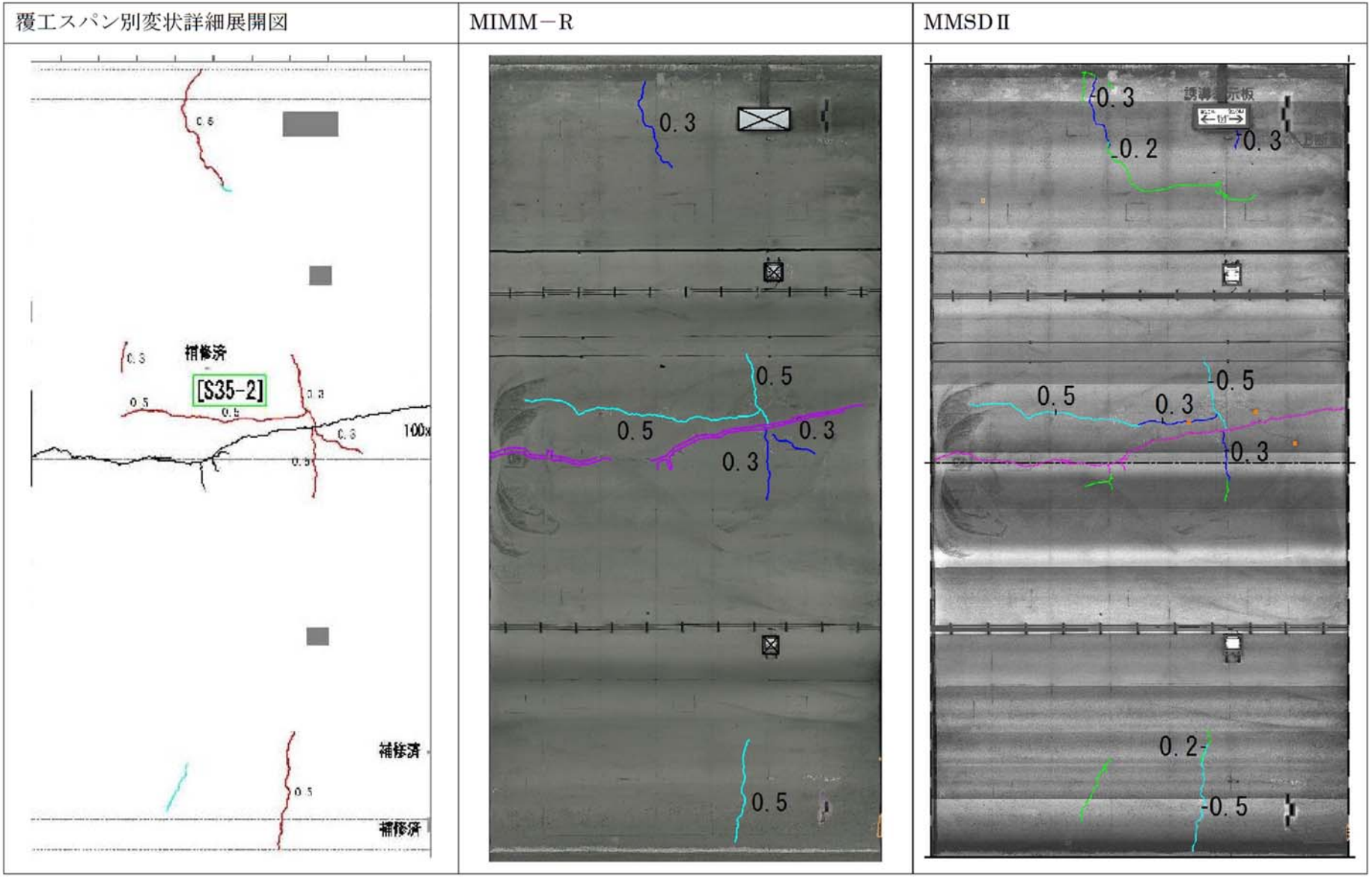


図 3.5.2　スパン３５変状展開図その１

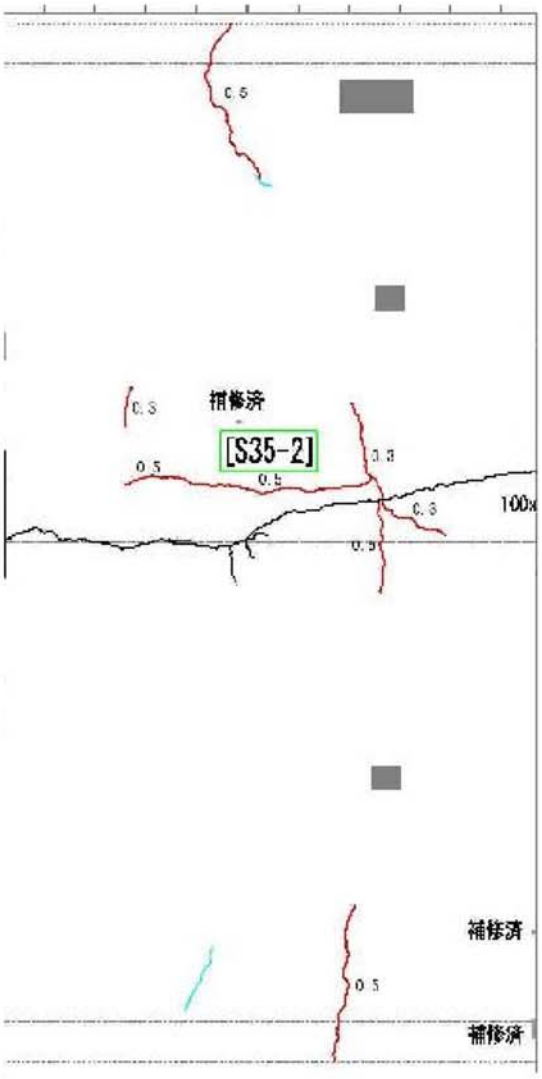
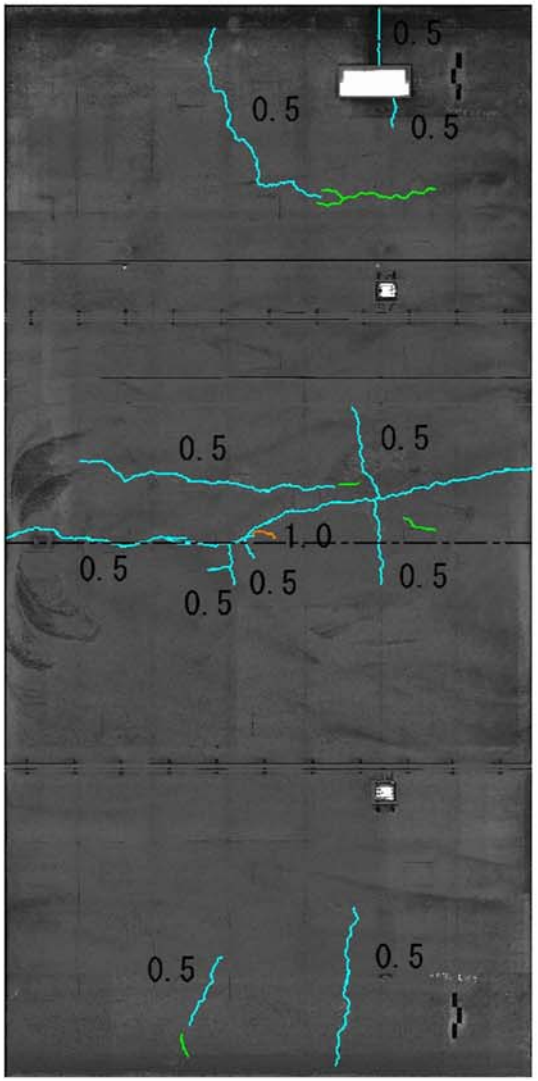
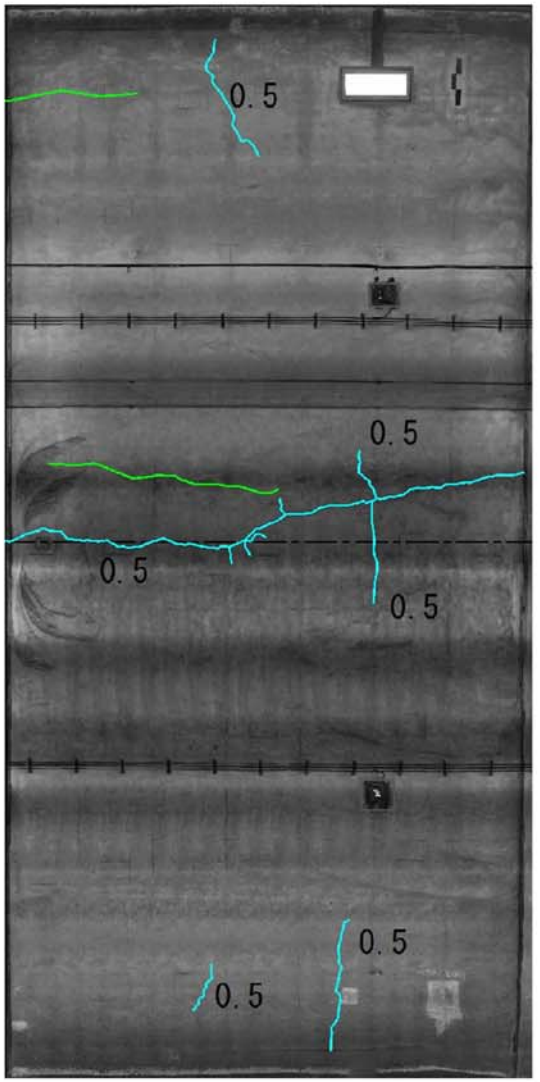
覆工スパン別変状詳細展開図	一般車両搭載型	近赤外撮影
		

図 3.5.3　スパン３５変状展開図その２

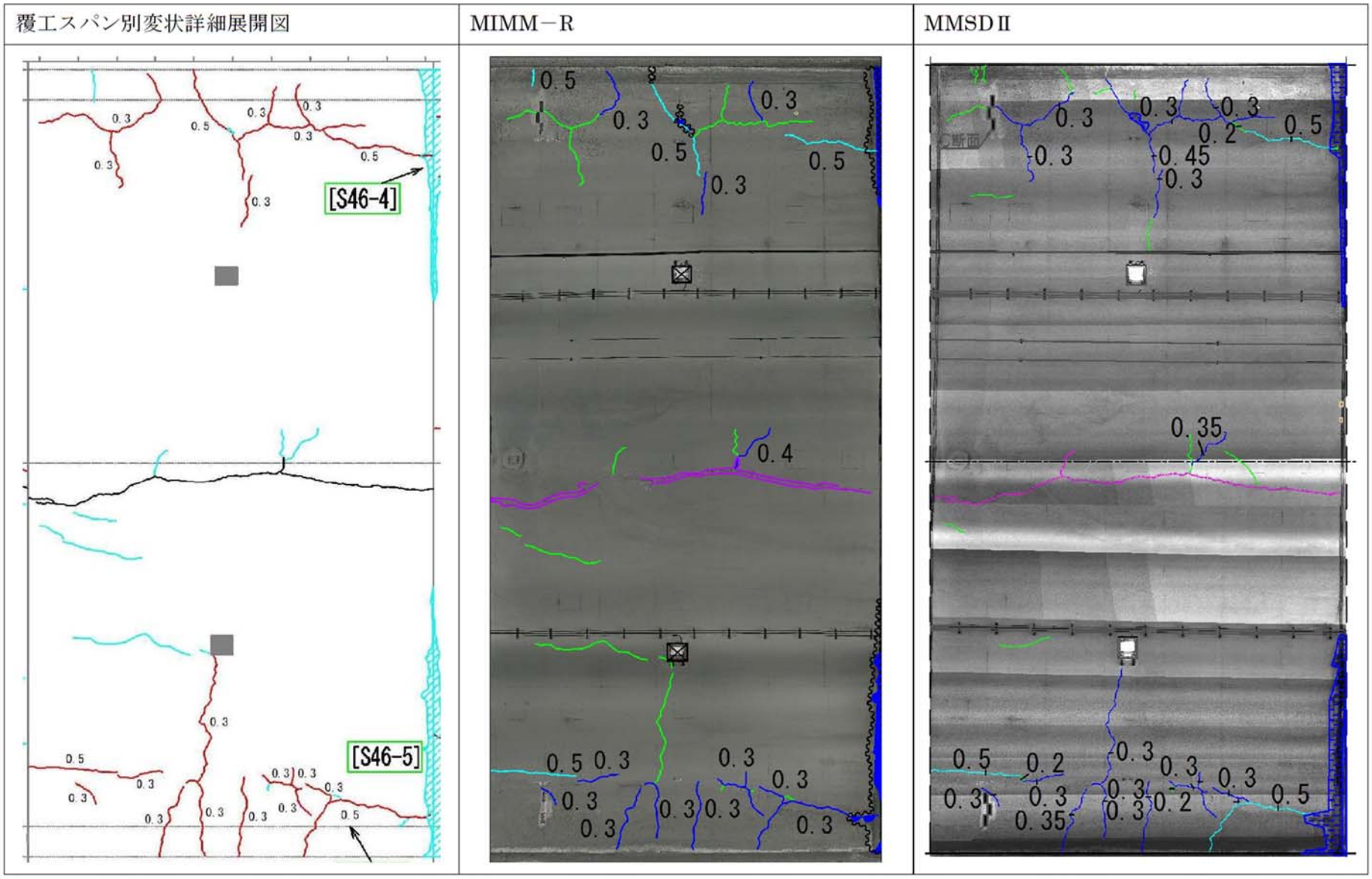


図 3.5.4　スパン４６変状展開図その１

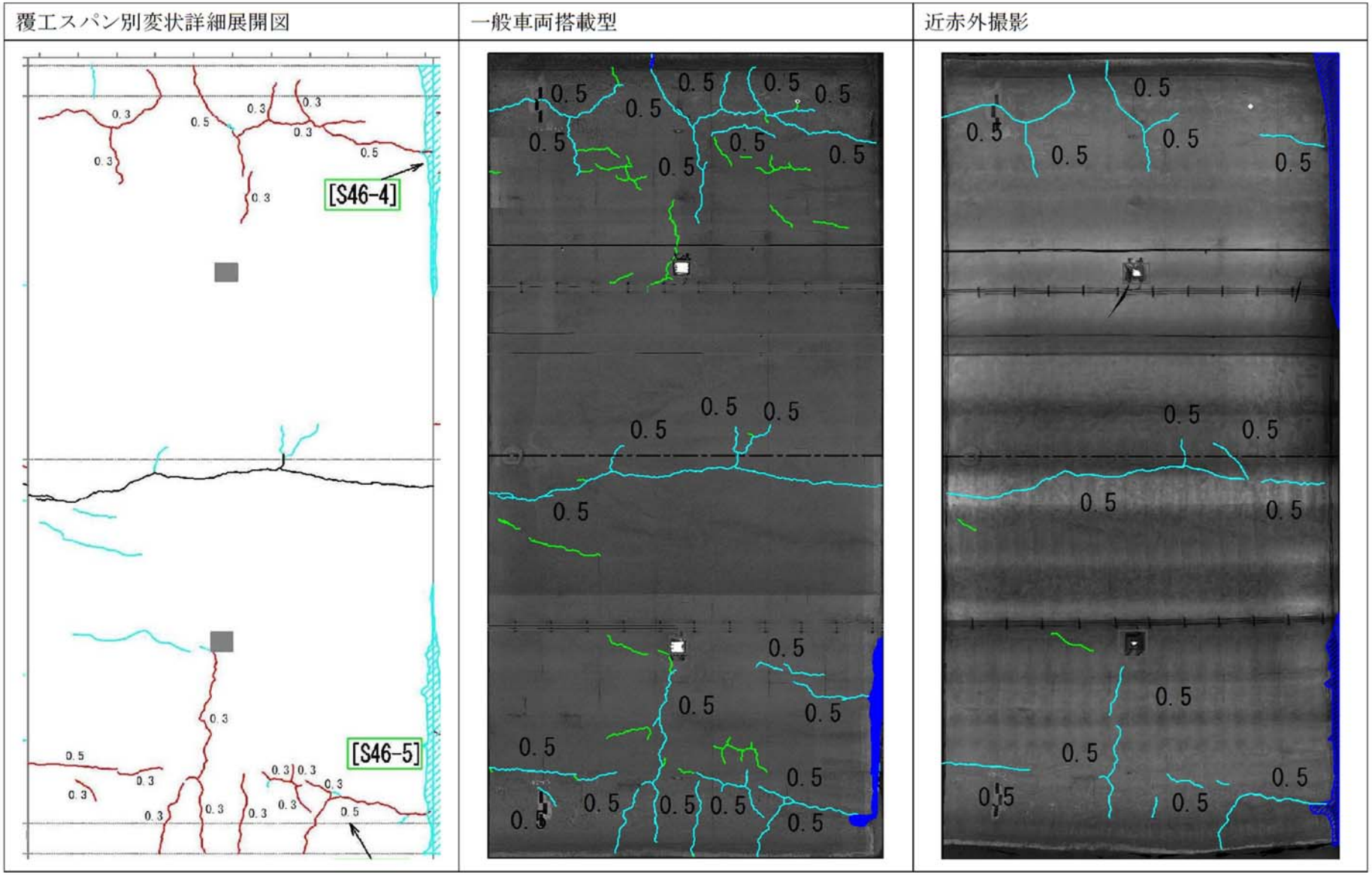


図 3.5.5　スパン４６変状展開図その２

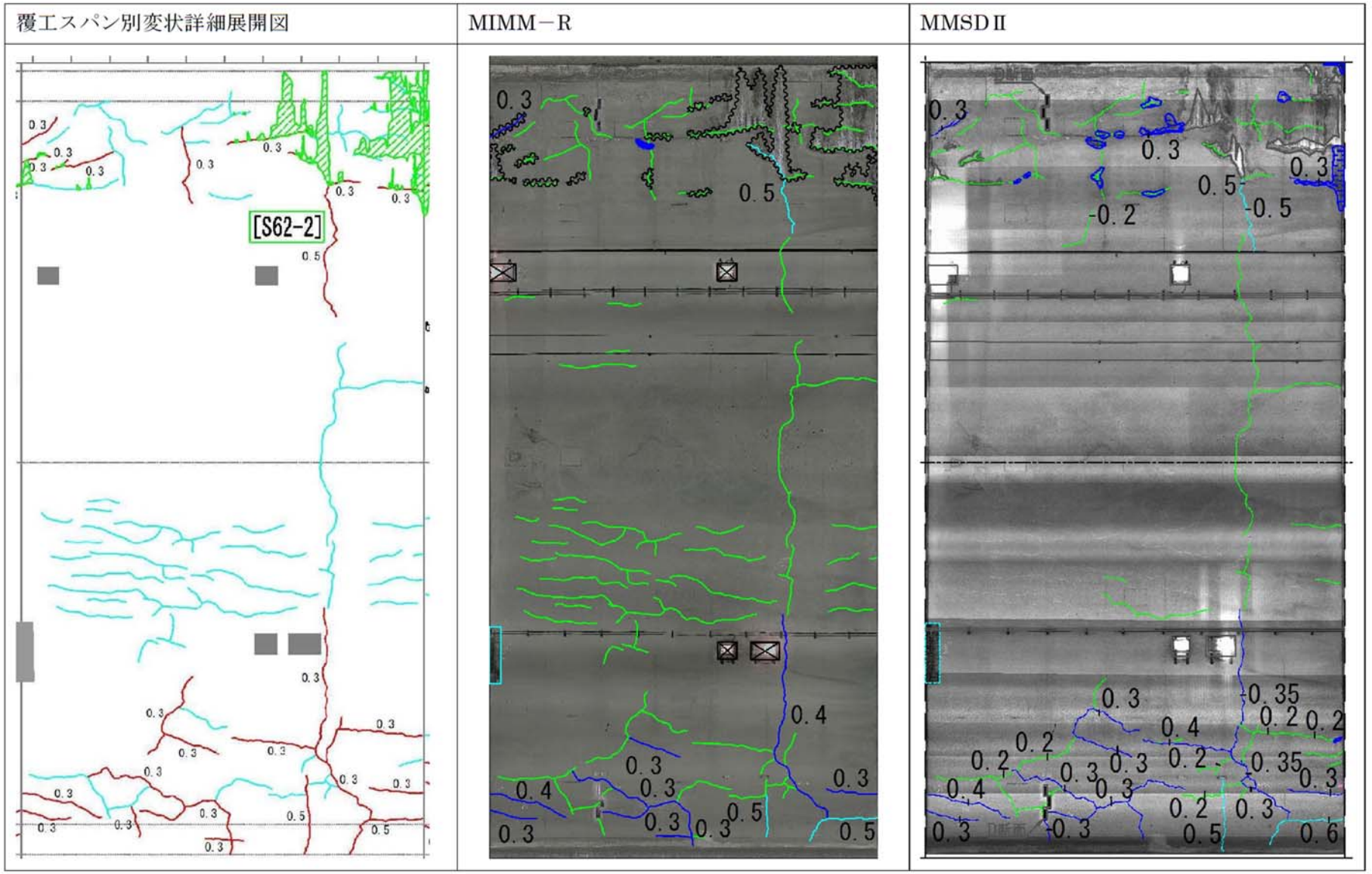


図 3.5.6　スパン６２変状展開図その１

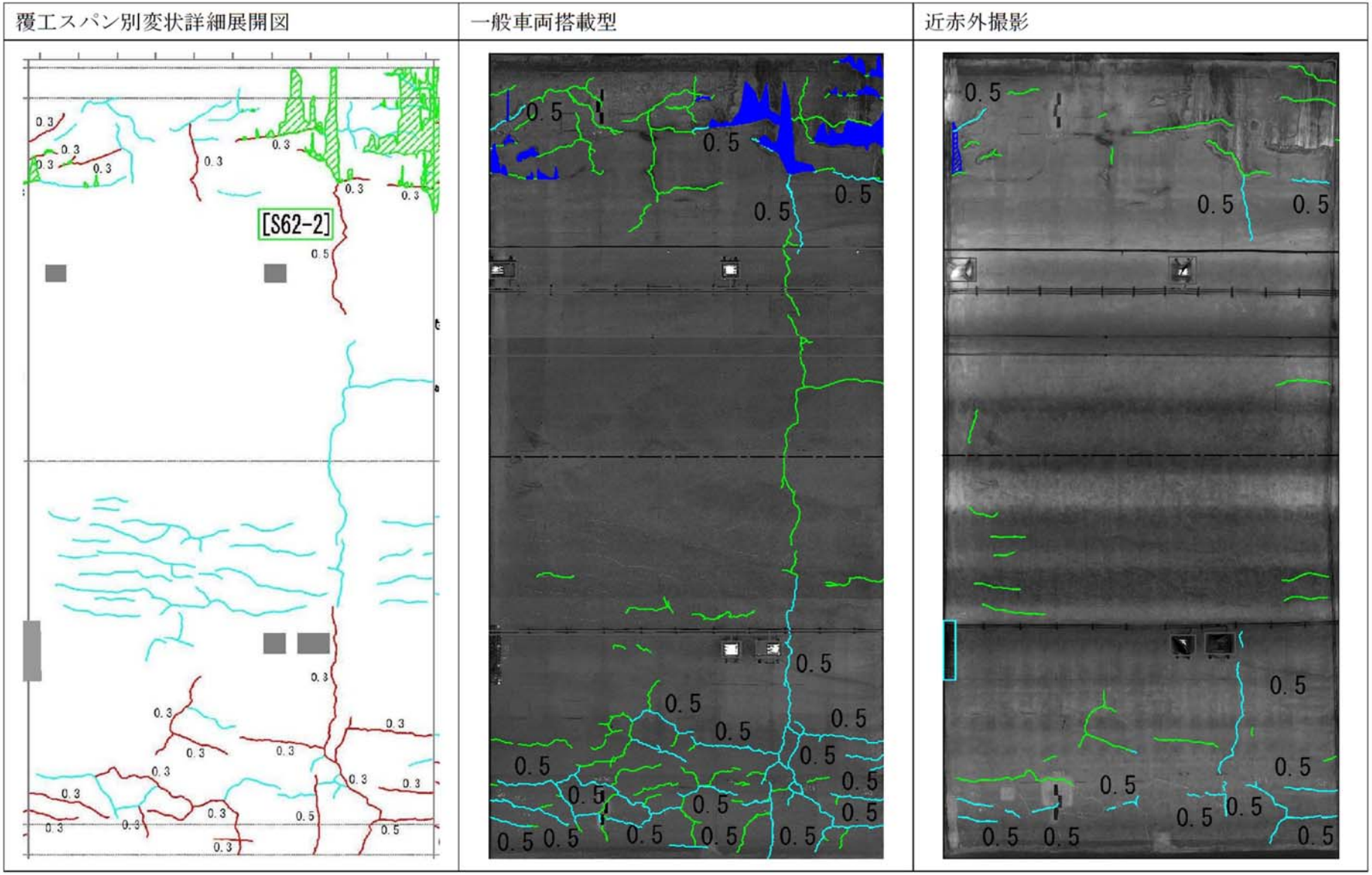


図 3.5.7　スパン６２変状展開図その２

3.5.3 検証結果

1) 全体の結果

4 技術の計測車により、S035，S046，S062 の画像より変状図を作成し、表 3.5.1 に示すひび割れ、漏水、付属物についてまとめた。概ねこれらの変状や付属物については、画像から読み取れる結果を得た。

表 3.5.1　計測技術毎の結果

	走行型高速 3D トンネル点検システム（MIMM-R）	社会インフラモニタリングシステム（MMSDⅡ）	一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）	近赤外線画像撮影による点検技術（近赤外撮影）
ひび割れ	点検調書で記載する、0.3mm以上のひび割れを抽出している。さらに0.3mm以下の微細なひび割れも抽出している。	同左	同左	点検調書で記載する、0.3mm以上のひび割れの一部抽出漏れがあった。（但しⅡｂ以上の変状は抽出されている）
漏水	漏水箇所及び遊離石灰箇所が確認できる。	同左	同左	同左
付属物	照明灯具、ケーブル、誘導表示板が確認できる。また、補修工のFRPネットも確認できる。	同左	同左	同左

2) 変状ごとの結果

道路トンネル点検要領における、点検で特に注意すべき部位、変状状況の記載があり、それらの部位、変状状況について、画像計測結果から判別できるか確認した。

図 3.5.8、図 3.5.9 に示すとおり、ひび割れや変色、漏水については、画像解析で判別可能であり、ひび割れ幅や長さ、変色や漏水の位置（範囲）についても確認できる。その他、補修工や付属物についても、図 3.5.10 に示すとおりボルトの脱落の有無や合いマークを確認できる。

ただし画像解析において確認できない変状として、図 3.5.11 に示す変状が挙げられる。これらは、非破壊検査技術や計測モニタリング技術と組み合わせる事で、点検支援が可能と考える。

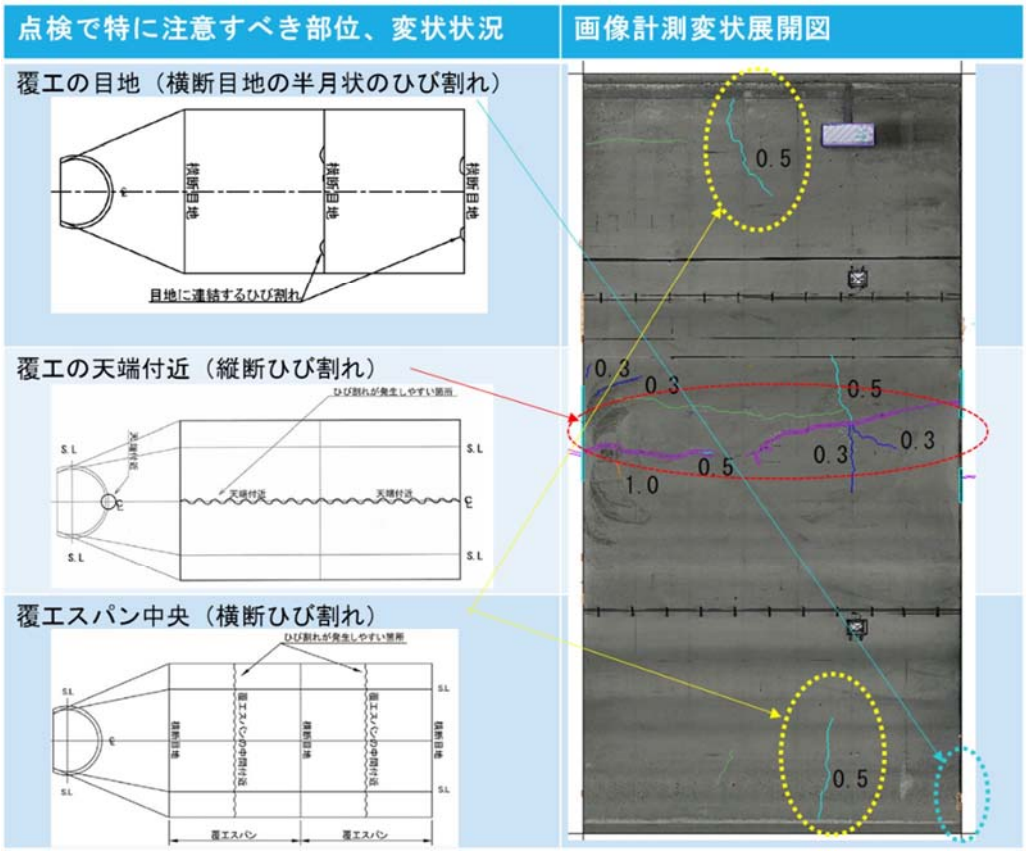


図 3.5.8　点検で注意すべき部位、変状状況と画像計測の対比（その１）

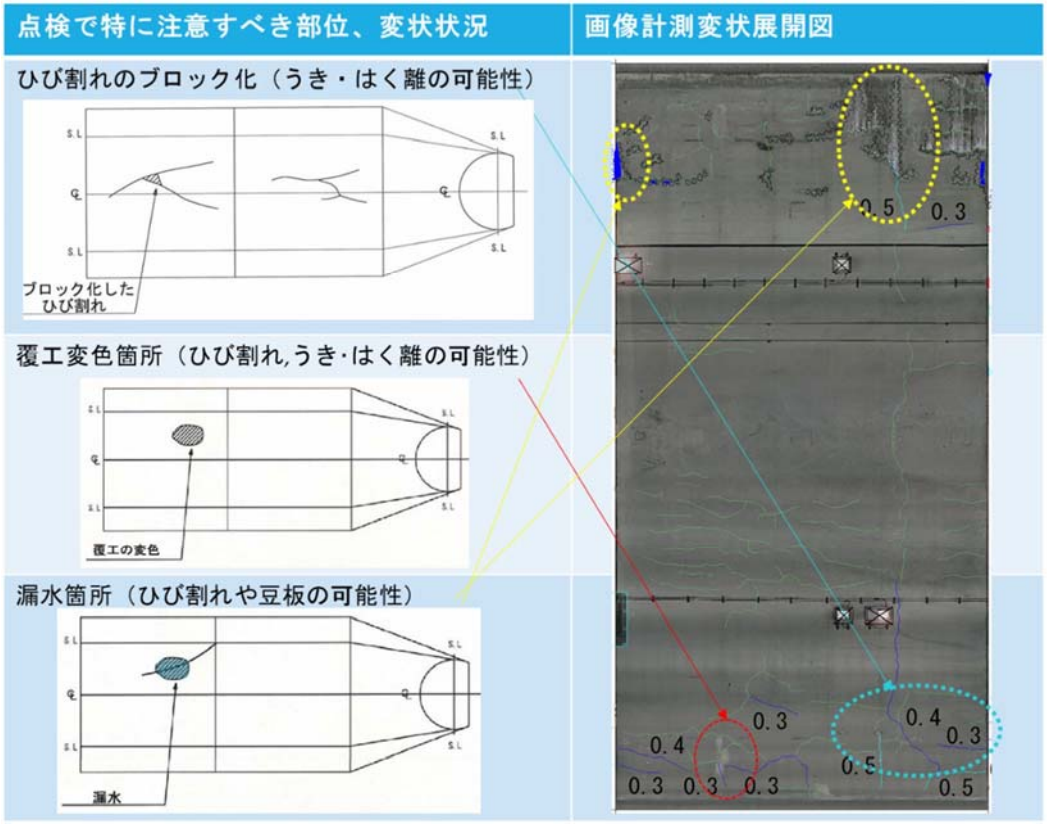


図 3.5.9　点検で注意すべき部位、変状状況と画像計測の対比（その２）

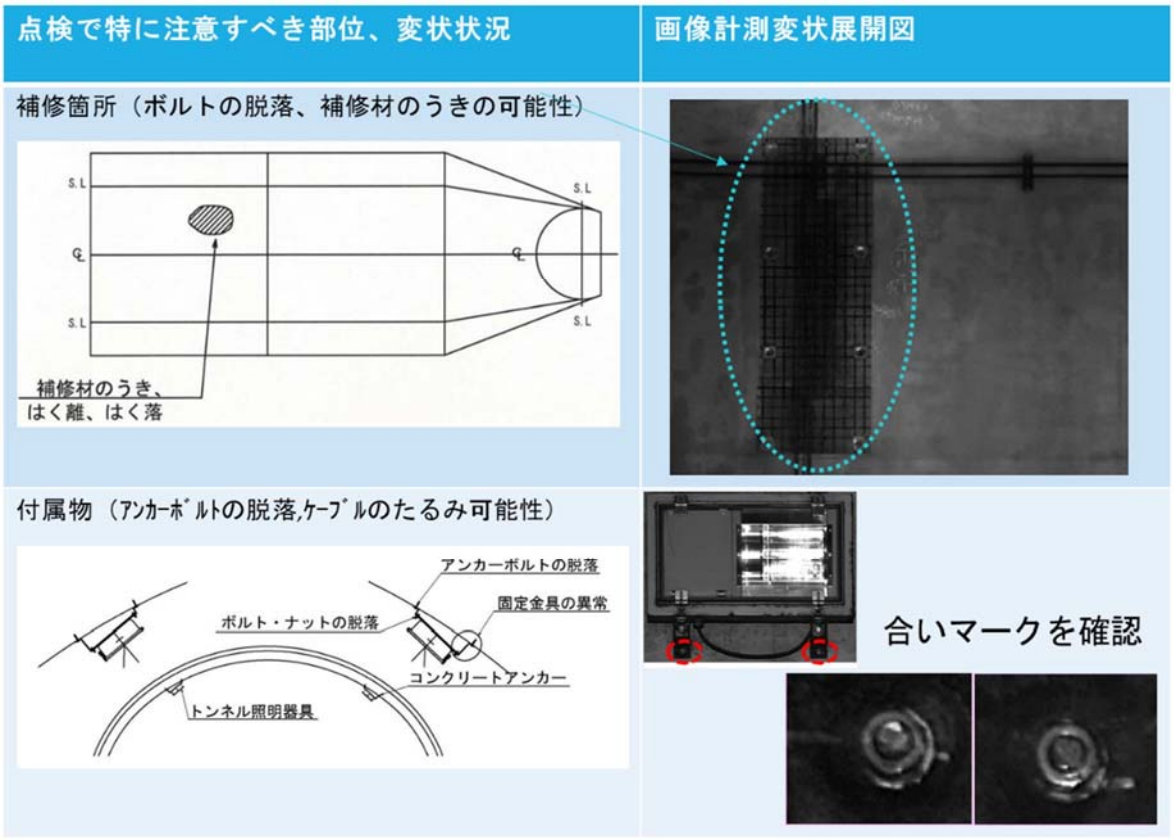


図 3.5.10　点検で注意すべき部位、変状状況と画像計測の対比（その３）

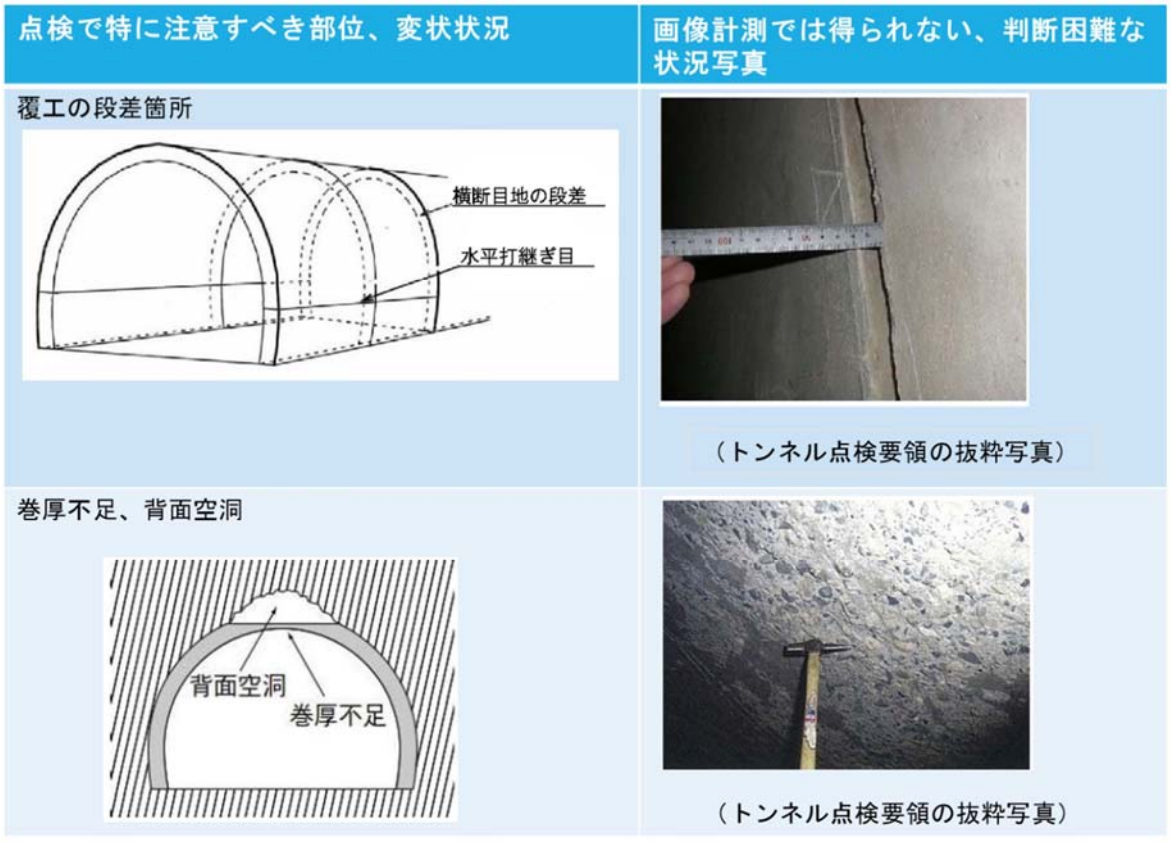


図 3.5.11　点検で注意すべき部位、変状状況と画像計測の対比（その４）

3)画像計測による個別変状の評価

和知トンネルの S035，S046，S062 の 3 スパンにおける、近接目視点検の個別変状に対し、画像計測からも判別可能であるか検証した。次頁より、3 スパンに確認されたⅡｂ変状の点検写真と変状の内容、および画像計測 4 技術の計測写真を示す。

近接目視点検において確認された個別変状は、ひび割れと漏水であった。

いずれの変状も、画像計測４技術の計測写真にて確認できた。

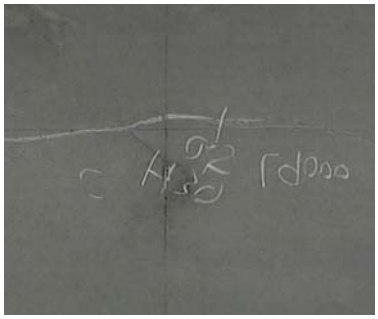
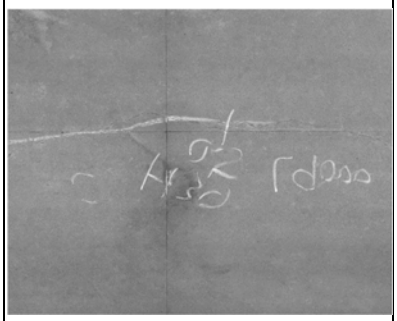
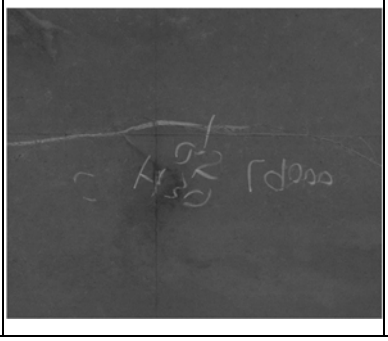
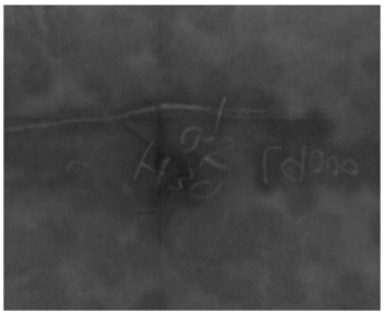
近接点検写真	MIMM－R	MMSDⅡ
		
変状の内容	一般車両搭載型	近赤外撮影
変状部位　覆工左アーチ部 変状区分　外力　ひび割れ 発生範囲　幅 0.5mm 対策区分　Ⅱｂ		

図 3.5.12　S035 の個別変状

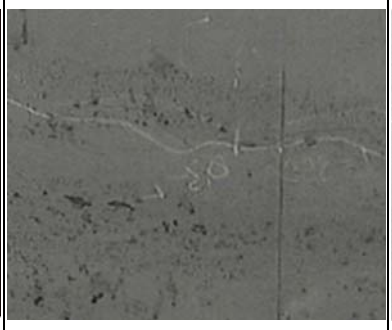
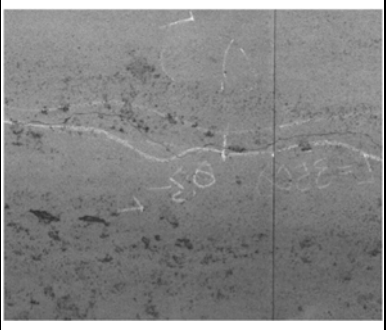
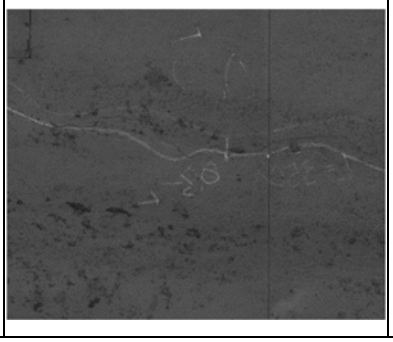
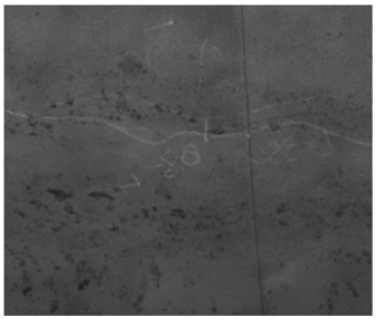
近接点検写真	MIMM－R	MMSDⅡ
		
変状の内容	一般車両搭載型	近赤外撮影
変状部位　覆工右アーチ部 変状区分　外力　ひび割れ 発生範囲　幅 0.5mm 対策区分　Ⅱｂ		

図 3.5.13　S046 の個別変状その１

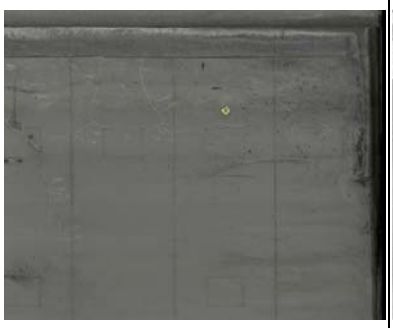
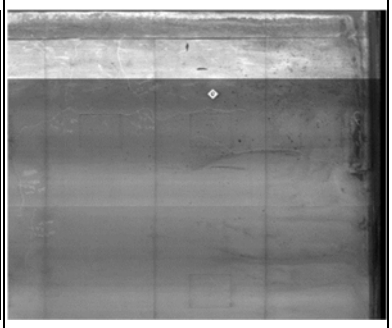
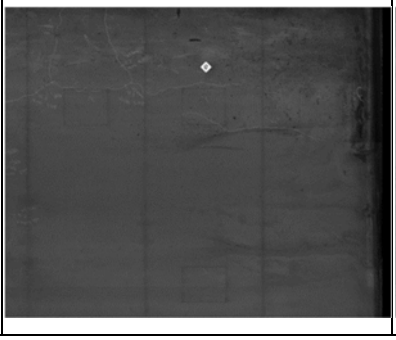
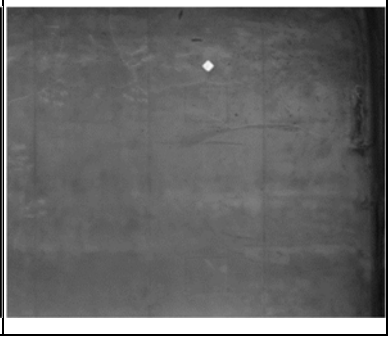
近接点検写真	MIMM－R	MMSDⅡ
		
変状の内容	一般車両搭載型	近赤外撮影
変状部位　覆工左アーチ部 変状区分　漏水 発生範囲　にじみ 対策区分　Ⅱｂ		

図 3.5.14　S046 の個別変状その２

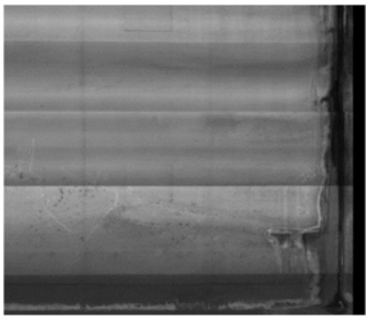
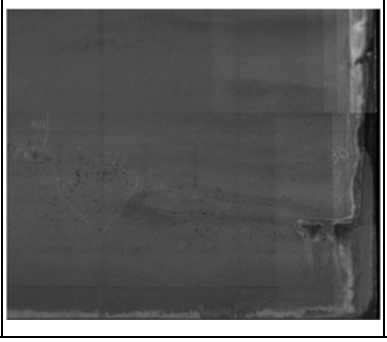
近接点検写真	MIMM－R	MMSDⅡ
		
変状の内容	一般車両搭載型	近赤外撮影
変状部位　覆工右アーチ部 変状区分　漏水 発生範囲　にじみ 対策区分　Ⅱｂ		

図 3.5.15　S046 の個別変状その３

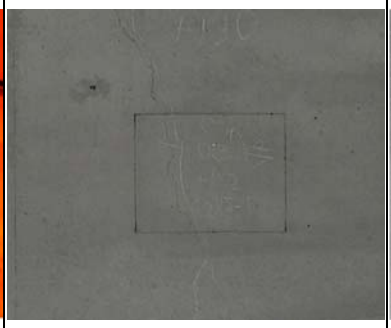
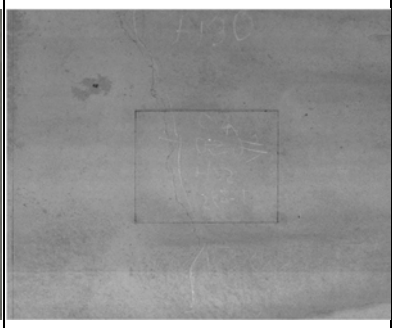
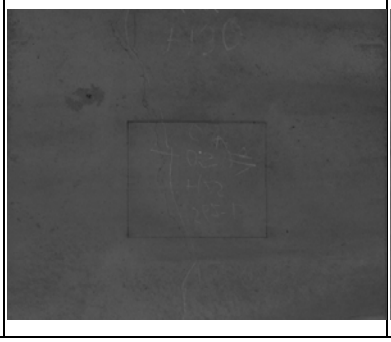
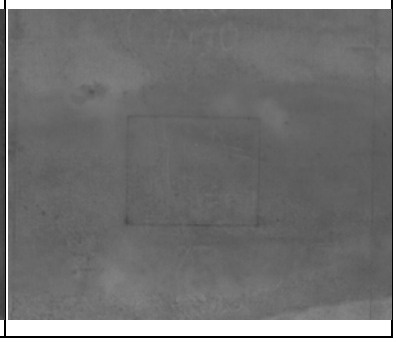
近接点検写真	MIMM－R	MMSDⅡ
		
変状の内容	一般車両搭載型	近赤外撮影
変状部位　覆工左アーチ部 変状区分　外力　ひび割れ 発生範囲　幅 0.5mm 対策区分　Ⅱｂ		

図 3.5.16　S062 の個別変状

3.6 画像計測の評価

画像計測車による画像計測技術の検証で、「圧ざ・ひび割れ」、「うき・はく離」、「鋼材腐食」、「漏水」の変状については、近接目視点検結果と画像の変状展開図を比較し、「うき・はく離」の打音検査以外は検出可能と判断できた。また、個別変状についても、Ⅱｂの判定箇所については、それぞれ検出できた。

ここでは、画像計測技術の適応における、トンネル点検要領の対策区分の判定目安例について、それぞれ考察する。

3.6.1 圧ざ・ひび割れについて

トンネル点検要領では、矢板工法における目安表は、表 3.6.1 のとおりであり、幅 3ｍｍを閾値としており、それ以下であれば、Ⅰ、Ⅱｂ、Ⅱａであり、外力性がある場合がⅡａとなる。よって、整数値である１mm を確認できれば、点検要領の対策区分の判定は、十分支援できると考える。また、画像解析技術の要求性能として、必ずしも、微細なひび割れの検出だけを目的とせず、ひび割れの状況に注目する事が重要と考える。

表 3.6.1　ひび割れ対策区分の目安[6] を加工

付表-2.2　点検時(ひび割れの進行の有無が確認できない場合)の対策区分の目安例(矢板工法)

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ						対策区分
		幅[補足1)]			長さ[補足2)]			
		5mm以上	3～5mm	3mm未満	10m以上	5～10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	Ⅰ、Ⅱb、Ⅱa[補足3)]
			○				○	Ⅱb、Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ[補足4)]
		○				○		Ⅲ
		○			○			Ⅳ

補足 1)連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。

補足 2)覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする(覆工スパン単位のひび割れ長さでは評価しない)。

補足 3)3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。

Ⅰ、Ⅱb:ひび割れが軽微で、外力か材質劣化か判断が難しい場合

Ⅱa: 地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合

なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。

補足 4)ひび割れ幅が 5mm 以上でひび割れ長さが 5m 未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生原因を考慮して、判定を行う。

3.6.2 うき・はく離について

トンネル点検要領では、ひび割れの等の状況が閉合するか、否かに着目している。または、補修材自体の劣化、豆板などの劣化の判断となっている。よって、打音異常の判定はできないが、上記のひび割れの状況や豆板については、「画像計測技術」で検出可能と考える。

表 3.6.2　うき・はく落の対策区分の目安[6] を加工

付表-2.6 うき・はく離等に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況[補足1]	打音異常[補足4]	
			有	無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合のおそれがない	Ⅱb	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱb
		ひび割れ等が閉合しブロック化[補足2]している	Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化[補足3]している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ

3.6.3 鋼材腐食について

トンネル点検要領では、表面的な腐食の有無やうき錆の有無、断面欠損が判定区分となっている。うき錆については 100%の検出は難しいが、Ⅱ判定かⅢ判定の区分はできると考える。Ⅲ、Ⅳ判定は、鋼材が露出するような変状であり、画像で検出可能と考える。

表 3.6.3　鋼材腐食の対策区分[6]

付表-2.11　鋼材腐食に対する対策区分

Ⅰ		鋼材腐食が生じてない、またはあっても軽微なため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	表面的あるいは小面積の腐食があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa	孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が損なわれているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

補足）鉄筋コンクリート構造で、鉄筋が露出している箇所を含む。

表 3.6.4　鋼材腐食の対策区分の変状例 [6)]

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			鋼材腐食が生じてない、またはあっても軽微なため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		表面的あるいは小面積の腐食があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa		孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が損なわれているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ			腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

3.6.4 漏水について

トンネル点検要領では、漏水の度合、利用者への影響の有無によって、対策区分が判定される。画像計測技術では、漏水の位置や範囲が判別できるため、これらの対策区分は検出可能と考える。（ただし、漏水量については検出ができない。また、路面部についても画像取得範囲外は検出できない）

表 3.6.5　漏水等の対策区分の目安 [6)]

付表-2.19 漏水等による変状に対する対策区分の目安例

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		対策区分[補足2)]
		噴出	流下	滴水	浸出（にじみ）	有	無[補足1)]	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ

3.6.5 まとめ

画像計測による変状抽出の評価と課題について、下記に示す。

1)画像計測による変状抽出の評価

① 計測値として、ひび割れ（幅 0.3mm、長さ、範囲、形状）を把握できる。
（ただし矢板工法において、幅１ｍｍが確実に検出できれば、ひび割れの対策区分を行うことは可能であり、重要なのは、ひび割れの微細な幅では無く、ひび割れの状況である）

② 漏水、遊離石灰、はく落、目地、変色を把握できる。

③ 付属物や補修工において、範囲や形状を把握できる。

④ ひび割れの閉合や交差、密集なども把握でき、うきにつながる変状を予測できる。

⑤ 従来のスケッチと比較し、正確に変状位置を把握できる。

2)画像計測による変状抽出の課題

① うきの打音異常は、検出困難である。

② ひび割れは、外力か、材質劣化によるものか、判断が困難である。
（ただしひび割れ状況より、目地部の半月状のひび割れ、ブロック化したひび割れ、亀甲状のひび割れで等は材質劣化と、推定は可能）

③ 覆工の段差箇所は検出が困難である。

④ 漏水の量は検出が困難である。

⑤ 巻厚不足、背面空洞は検出が困難である。

3.7 画像計測の留意点

走行型計測をより実用化させ精度・機能等を向上させていくための留意点を以下に示す。

① 広範囲にわたる漏水，結露または光沢のある（タイル等）内装板は照明の反射光がカメラレンズに入射し，後の画像目視検査に悪影響を及ぼす場合がある。その場合は照明の配置，照度等を考慮し反射光が直接入射しないように工夫する。

② トンネル内において霜，霧（モヤ，キリ）が発生する揚合，照射光が屈折するため，画像の品質に悪影響を及ぼす場合がある．季節，時間帯等を選定する事が必要である。

③ 雪や雨天またはトンネル内の漏水・湧水等，水滴がカメラレンズに付着する可能性がある場合，モニタで常に監視し撮影画像の品質を確認する必要がある。

④ 構造上の要因（吹付け，段差，付帯物の裏，補強工，導水工等）により変状の判断が困難な場合がある。

⑤ 画像から展開図作成時において，人間による判断が伴うため，検出の結果がばらつくことも考えられることから，一定水準以上の精度向上（作成に伴う技能）と画像から展開図までの一連作業の自動化技術を確立させる必要がある。

⑥ 古いトンネルは，汚れ等により誤差が生じる恐れがあるため，より慎重な判断が必要であり，機器類のキャリブレーションを入念に実施する必要がある．

⑦ カメラや照明の機能を向上させることによってひび割れ検出の精度や損傷の検出機能をさらに向上させることが重要である．

⑧ 照明や非常用設備などの付帯設備の健全性も重要であることから，画像解析により，不良箇所をあらかじめ抽出できるシステム開発が有効である。

【参考文献】

1） 点検支援技術　性能カタログ（案）　国土交通省　令和 2 年 6 月

2） パシフィックコンサルタンツ（株）ホームページ　走行型によるトンネル調査 MIMM-R

3） 三菱電機（株）ホームページ　三菱インフラモニタリングシステム

4） リコージャパン（株）ホームページ　トンネルのモニタリングシステム

5） 国際航業（株）近赤外線デジタルカメラを用いたトンネルの走行型画像計測パンフレット

6） 道路トンネル定期点検要領　国土交通省　道路局　国道・技術課　平成 31 年 3 月

4　位置情報の有効活用

4.1 概要

覆工コンクリートの凹凸や覆工変形モードを把握するため、3 次元レーザ計測により 3 次元座標を計測するものを走行型レーザ計測としている。走行型レーザ計測システムとして、「モービルマッピングシステム」について海外、国内メーカが揃って数多くの紹介を行っている。MX8、Street Mapper、VMX-250 、MMS 等多様である。それぞれのメーカの強み、特徴が打ち出されている。

走行型レーザ計測車両の定義をするならば、

① 車に GNSS 等の測位装置とレーザスキャナ等の計測装置を搭載していること。

② 道路を走りながら周辺の 3 次元形状を行うことが可能であること。

になると考える。

各車両とも、GNSS および IMU の組合せにより車両の自己位置と姿勢を計算し、そこからカメラおよびレーザスキャナによる計測結果の解析を行っている。

いずれの GNSS 測位の方式でも、これに IMU やオドメータ（距離計）を付加して、GNSS が受信できなくなるような状態でも位置、姿勢が計算できるシステムを準備している。

車両の位置および姿勢が決定したら、搭載されているカメラまたはレーザスキャナで計測したデータから走行車両周辺の 3D 化が可能になる。

レーザスキャナによる 3D 計測は直接的であり、精度が高いという特徴がある。一方でエッジが正確に直接計測できないという欠点もある。また、トンネル断面変形の進行性を把握するため 2 時期比較を行う必要があるものの、トンネル内では、衛星不可視下での計測となるため IMU の機械的な特性によって断面の回転や中心軸、トンネル縦断方向の位置のずれが発生することが明らかとなっている。

そこで、本研究では、MMS を用いたトンネル内のレーザ計測における特性を把握するとともに、2 時期比較のための補正方法について検討するものである。4.2 では衛星不可視下でのレーザ計測の位置精度に影響を与える要因を整理した。4.3 では和知トンネルにおいて高精度の定置型のレーザスキャナによる断面計測結果と MMS の計測結果を比較することで断面の計測精度や模擬変位を与えた際の変形の比較精度等の検証の方法をまとめた。4.4 では和知トンネルにおける計測結果から、計測速度の違い、再現性、模擬変位計測誤差等の特徴を整理した。4.5 では回転補正、ランドマーク補正、スキャンマッチングによる補正等について取りまとめた。

《用語説明》

本章に用いた主要用語の説明を表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1　主要用語一覧表

用　語	説　　明
GNSS	Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム 米国の GPS、日本の準天頂衛星（QZSS)、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo 等の衛星測位システムの総称
MMS	MMS（Mobile Mapping System：モバイルマッピングシステム） 道路および周辺の 3 次元座標データを取得する移動体計測装置 MLS（Mobile Laser Scanning）と呼ぶこともある
IMU	Inertial Measurement Unit / 慣性計測装置 3 次元の慣性運動（直行 3 軸方向の並進運動および回転運動）を検出する装置
TLS	TLS; Terrestrial Laser Scanner 地上型レーザスキャナ
DMI	Distance Measuring Instrument オドメーター、走行距離計
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping 位置推定と地図作成を同時に行う技術の総称

4.2 レーザ位置精度に影響を与える要因

レーザ計測においてはその位置精度が極めて重要であり、位置精度の良し悪しを考慮せず検証を行うと誤った判断を導きかねないため、慎重に検討する必要がある。

そのレーザ位置精度に影響を与える要因には、後述する複数のものがあり、最終的な結果に対しその要因が大きく影響しているのかを見極める必要がある。以下に詳細を解説する。

4.2.1　計測精度分類　（機器、計測、システム、相対、絶対、不可視化、リファレンス精度）

MMS における計測は、移動しながらデータを取得するため、正確なデータを取得するように各センサーの正確な位置と姿勢情報が常に必要である。

基本技術として、GNSS 受信機により観測した位置情報に IMU で検出した姿勢および加速度情報を統合して走行軌跡（ある時間における機材の位置および姿勢情報の連続データ）を計算することで計測が行われる。

この過程において図 4.2.1 に GNSS の可視衛星数や配置、電離層の状態や電磁ノイズなどの環境要素などが不適であった場合、あるいは GNSS による測位信号が全く受信できなかった場合などは、計算結果としての走行軌跡が実態と乖離する可能性が高まる。

計算された走行軌跡に、レーザスキャナより取得したレーザデータを重ね、最終的な「点群」データを作成する。そのため、走行軌跡の計算結果が最終的なレーザ位置精度に大きな影響を及ぼすため、この結果をいかに向上できるかが MMS における計測の要である。

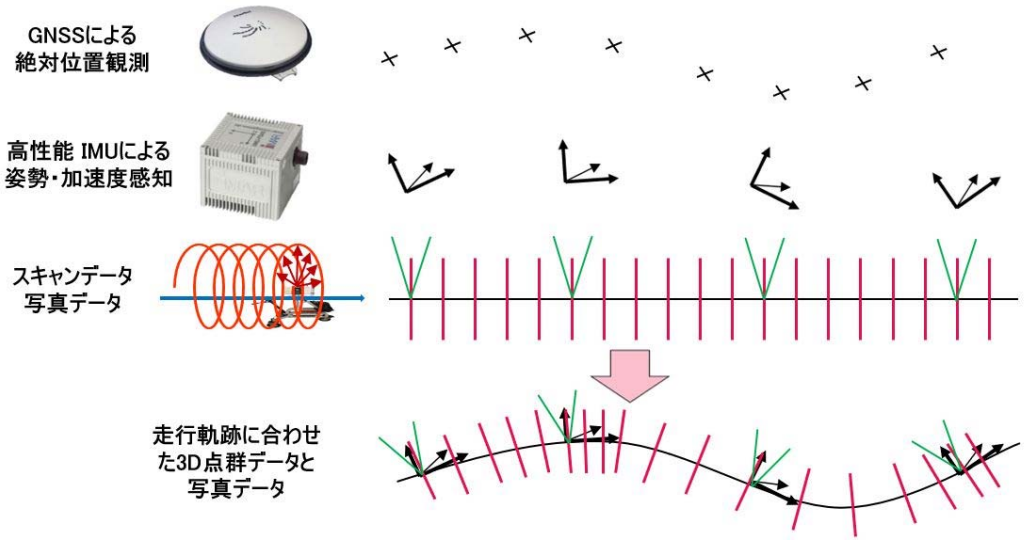


図 4.2.1　点群作成原理

また、計器における誤差も存在することを把握しておかなければならない。物体との相対距離計測を担うレーザスキャナにおいては、以下の影響を受ける。

① 反射強度（対象物の素材、計測角度）

② 計測距離

③ 温度

これらにより、相対精度は 1～2mm となる（レーザスキャナの種類による）。

自己位置推定装置は、IMU や GNSS 受信機、DMI（オドメーター）などといった複数の計器により取得された情報を複合して作られている。自己位置推定装置は、主に GNSS による測位と IMU による位置推定を行っており、計算された自己位置は GNSS による測位信号の受信環境に大きく依存する。良好な受信環境における自己位置の絶対精度は 2～3cm 程度だが、受信環境が不適切である場合は、マルチパスなどの影響により悪化することもある。また、GNSS 衛星が不可視となるトンネルなどにおいては、不可視である時間に比例して自己位置の誤差も増大する。

表 4.2.1 表 4.2.1 に MMS と TLS（地上型レーザスキャナ）における計測誤差を列挙する。

表 4.2.1　計測誤差（参考値）

	およそ誤差分
測量機器(レーザ）の誤差	プロファイラー　Z+F 9012 代表値：±1.68mm[注1]
システム断面測量誤差（2点間相対距離）	±2mm程度[注2]
絶対座標系（世界測地系）誤差	±20cm程度[注3]
衛星不可視下	不可視時間，距離により 数10cm～数m誤差
相対座標としての差分誤差（補正後）	±5cm程度[注4]
検証用地上固定レーザースキャナ測量誤差	±1～2mm程度

注1：距離5m，2σ，12000rpm，反射率80%
注2：計測の揺れ，分散処理，ターゲット計測数（母数平均），走行速度などにより異なる
注3：衛星が受信できる環境の場合、マルチパスによる誤差を含まず、使用GNSS受信機による、軌跡補正なし
注4：補正点の数によって異なる

4.2.2　衛星不可視下の影響要因（衛星数・高度・位置、機器特性、FIX、軌跡誤差、補正方法）

前節にて述べたように、衛星不可視下においては自己位置の誤差が増大するため、トンネルを計測した際の評価を難しくする。

衛星可視下（図 4.2.2 と図 4.2.3 における①および②）においては、

① 位置誤差が少ない（環境によって 3 ㎝～10 ㎝程度）

② 姿勢誤差（ロールなど）がほとんどない

という結果であっても、衛星不可視下では、

① トンネルの中心部分に誤差が一番大きい

② カーブのところに誤差が出やすい

③ 位置誤差と同時に、姿勢誤差（ロール方向を含む）が生じる

④ 進行方向に対して、大きいな位置のずれが生じる

という結果になる可能性が高い。

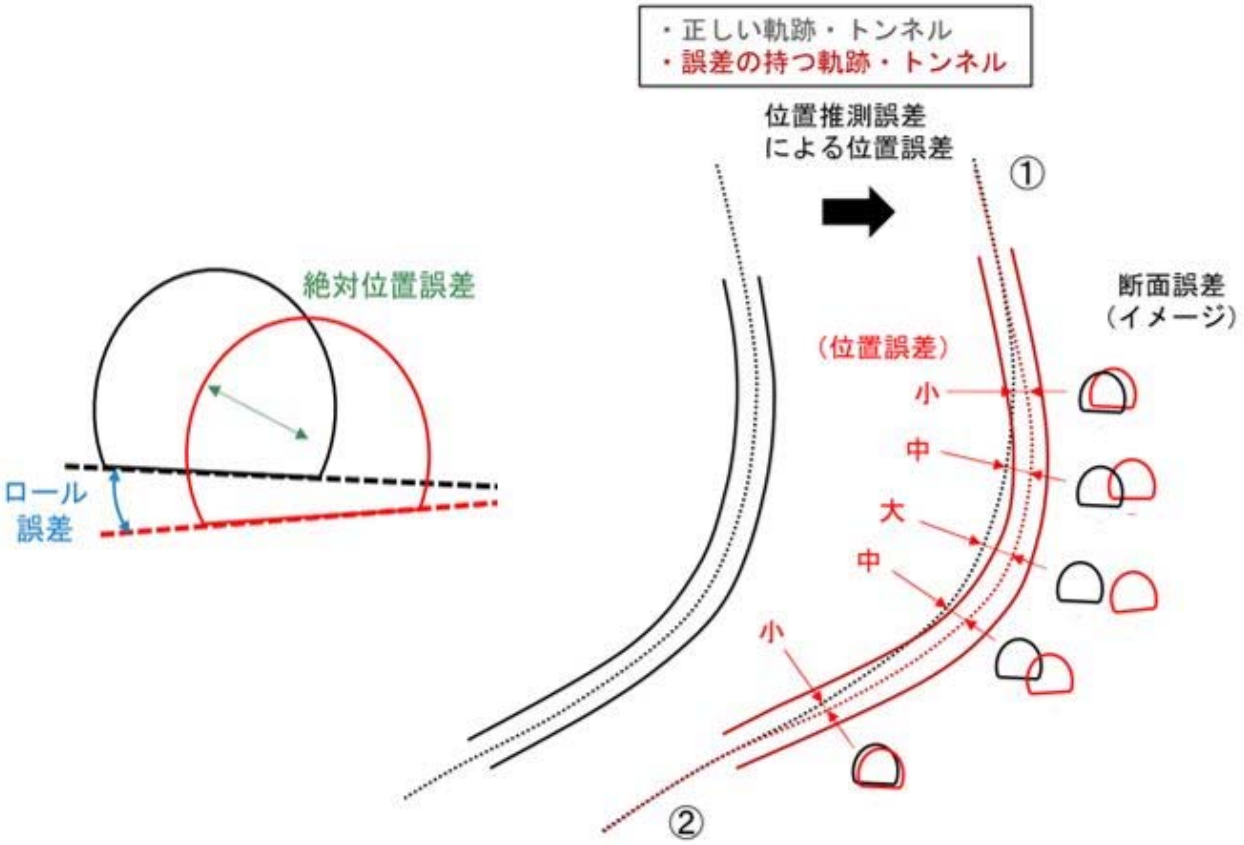


図 4.2.2　衛星不可視下での誤差の例（横断方向）

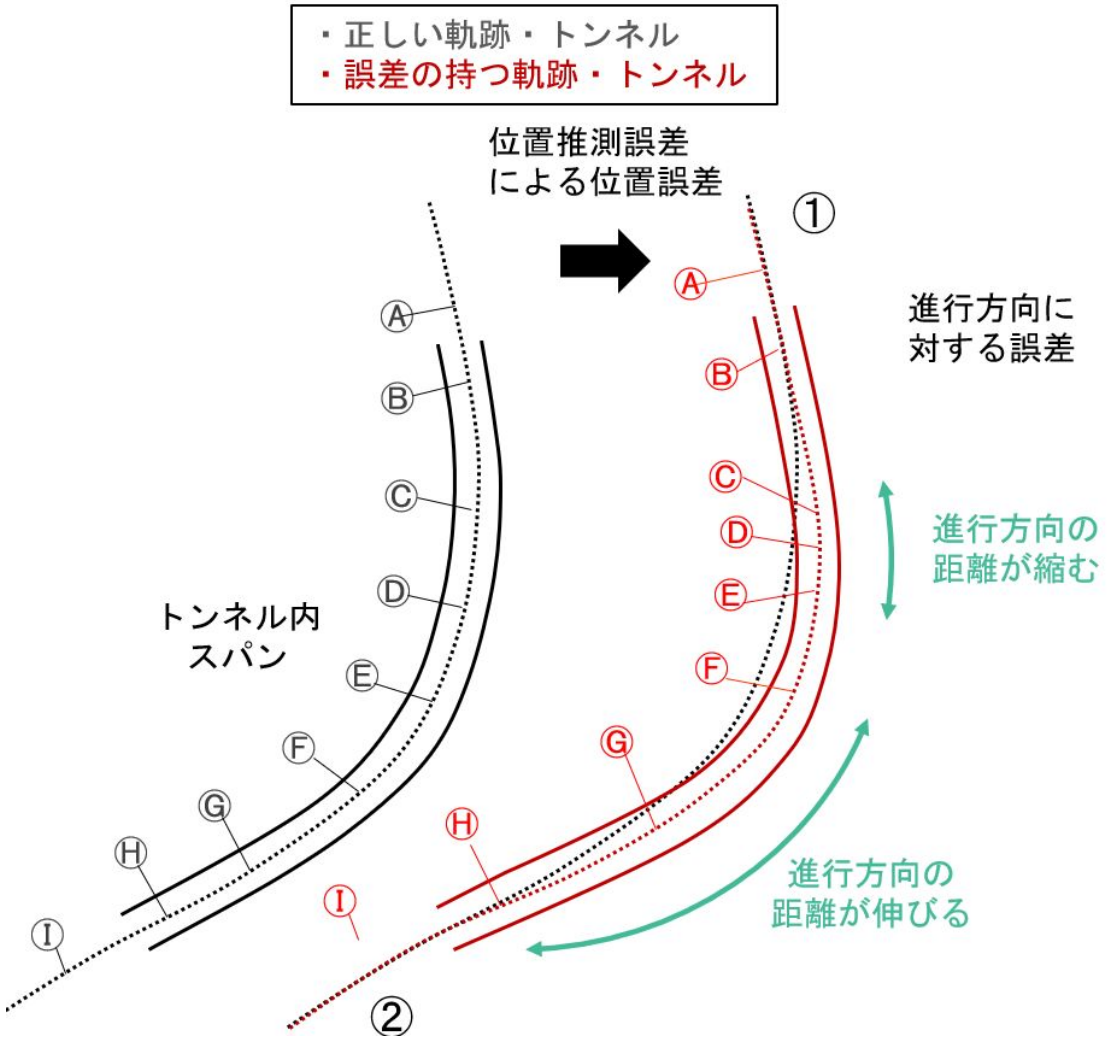


図 4.2.3　衛星不可視下での誤差の例（縦断方向）

各項を解説すると、以下のようになる。

① トンネルの総延長に対する中央部が、誤差の最も大きくなる部分となる。これは走行軌跡を計算する過程において順送方向と逆送方向の双方から計算を行い、その計算結果を比較して最終的な走行軌跡を計算するため、衛星可視下であった位置から最も遠くなる場所こそトンネルの総延長に対する中央部になるためである。

② カーブにおける位置および姿勢変化は IMU により計測されているものの、IMU 自身の持つ性能の限界により、誤差が発生する。

③ 姿勢誤差が発生すると、図のようにある 1 点に対する角度変化が生じるため、見かけ上トンネルの変形が発生したように見える。これも前項と同じく、IMU の性能の限界による。

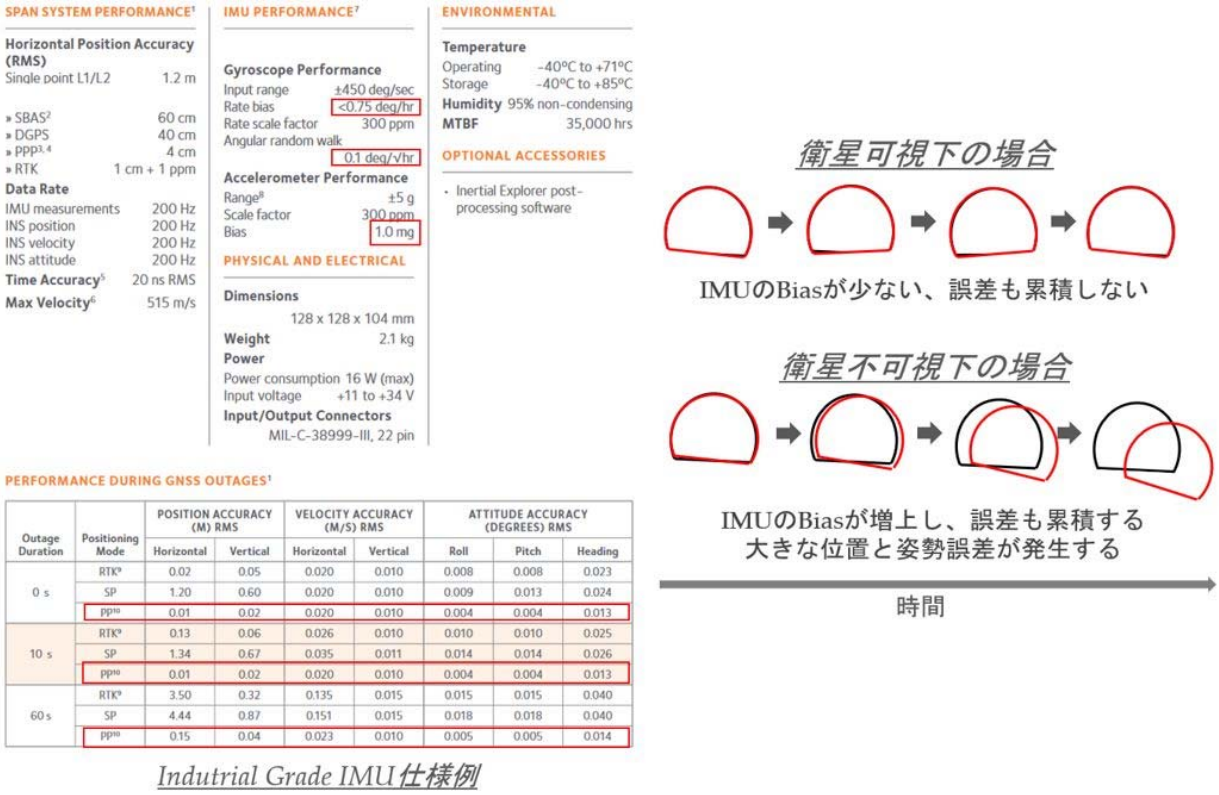
④ 進行方向に対する位置誤差の発生は、トンネル内部の進行方向に対する見かけ上の伸縮を発生させる。

そのため、MMS における計測を用いて正確な断面評価を行うには、トンネル内の進行方向に対する位置を付与し、自己位置精度をどれだけ向上することができるかが課題となる。

IMU により検出される姿勢および加速度情報には、常に誤差が含まれている。しかし衛星可視化

においてはGNSSによる測位信号を利用してこの誤差を修正するため、姿勢および加速度情報に誤差が発生しにくく、かつ累積もしない。
しかし衛星不可視下においては測位信号による誤差修正が行えないため、誤差が衛星可視化より大きく、また時間と共に累積してしまう。

また、衛星不可視となる環境下では図 4.2.4 のように、GNSSによる測位信号を受信することができない。そのため位置情報はIMUおよびDMIから得られた情報を元に計算で求めていくことになる。しかしながら衛星不可視となる環境下では絶対位置に誤差が生じるため、断面の比較方法が課題となる。



SPAN SYSTEM PERFORMANCE[1]

Horizontal Position Accuracy (RMS)	
Single point L1/L2	1.2 m
» SBAS[2]	60 cm
» DGPS	40 cm
» PPP[3,4]	4 cm
» RTK	1 cm + 1 ppm
Data Rate	
IMU measurements	200 Hz
INS position	200 Hz
INS velocity	200 Hz
INS attitude	200 Hz
Time Accuracy[5]	20 ns RMS
Max Velocity[6]	515 m/s

IMU PERFORMANCE[7]

Gyroscope Performance	
Input range	±450 deg/sec
Rate bias	<0.75 deg/hr
Rate scale factor	300 ppm
Angular random walk	0.1 deg/√hr
Accelerometer Performance	
Range[8]	±5 g
Scale factor	300 ppm
Bias	1.0 mg

PHYSICAL AND ELECTRICAL

Dimensions	128 x 128 x 104 mm
Weight	2.1 kg
Power	
Power consumption	16 W (max)
Input voltage	+11 to +34 V
Input/Output Connectors	MIL-C-38999-III, 22 pin

ENVIRONMENTAL

Temperature	
Operating	-40°C to +71°C
Storage	-40°C to +85°C
Humidity	95% non-condensing
MTBF	35,000 hrs

OPTIONAL ACCESSORIES

- Inertial Explorer post-processing software

PERFORMANCE DURING GNSS OUTAGES[1]

Outage Duration	Positioning Mode	POSITION ACCURACY (M) RMS		VELOCITY ACCURACY (M/S) RMS		ATTITUDE ACCURACY (DEGREES) RMS		
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Roll	Pitch	Heading
0 s	RTK[9]	0.02	0.05	0.020	0.010	0.008	0.008	0.023
	SP	1.20	0.60	0.020	0.010	0.009	0.013	0.024
	PP[10]	0.01	0.02	0.020	0.010	0.004	0.004	0.013
10 s	RTK[9]	0.13	0.06	0.026	0.010	0.010	0.010	0.025
	SP	1.34	0.67	0.035	0.011	0.014	0.014	0.026
	PP[10]	0.01	0.02	0.020	0.010	0.004	0.004	0.013
60 s	RTK[9]	3.50	0.32	0.135	0.015	0.015	0.015	0.040
	SP	4.44	0.87	0.151	0.015	0.018	0.018	0.040
	PP[10]	0.15	0.04	0.023	0.010	0.005	0.005	0.014

Indutrial Grade IMU仕様例

図 4.2.4 IMU仕様について

位置および姿勢誤差への対策としては図 4.2.5 のように衛星不可視となる環境下に対しGNSS以外の方法で座標を付与する方法が挙げられる。すなわち、トータルステーションと既存の基準点を用いて測量した座標を用いる絶対位置補正か、管理者がその衛星不可視環境に対し独自に決定した座標を用いて補正する相対的補正である。

具体的には

① 三次元点群データから特徴点（ターゲットマーカやトンネル内照明など）を抽出する
② 特徴点に対し座標を付与する
③ その座標を元に走行軌跡を再計算する

というものである。
この方法においては、概ね20秒の距離に対し補正点を1点用意すれば、絶対位置の誤差を大きく

改善することが可能である。一方で、姿勢情報についても改善が見込まれるが、絶対位置の誤差ほどのものではないため、異なる手法による改善が求められる。

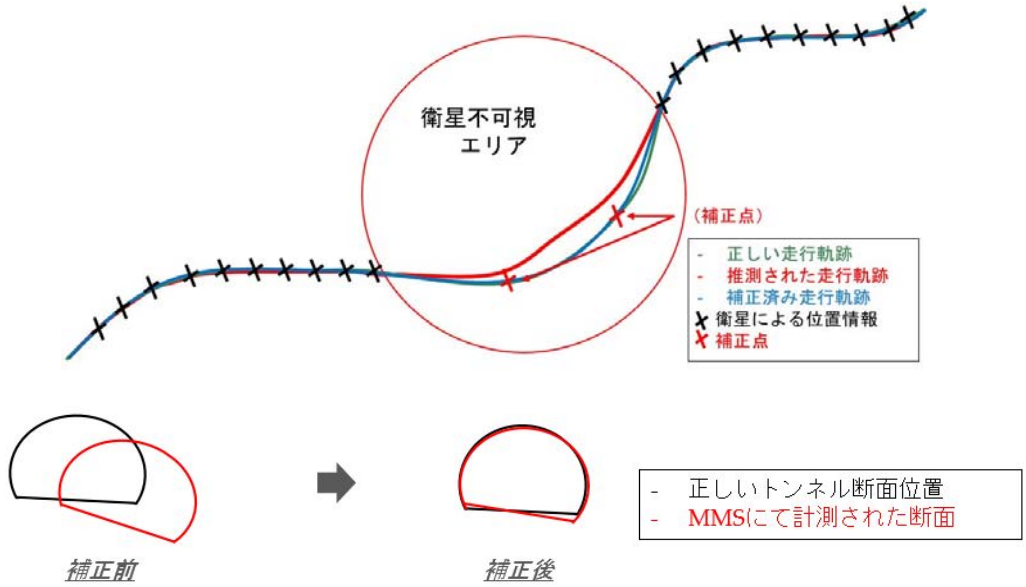


図 4.2.5　補正による位置と姿勢の改善

4.2.3　解析方法による要因

TLS（地上型レーザスキャナ）と MMS における計測の結果を相互に比較するには、断面の座標を同じにする必要がある。この作業において行程に起因する誤差の発生が見込まれる。（図 4.2.6 参照）

作業は以下の流れで行われる。

① 複数の機材で計測した三次元点群データの、同じ特徴点における断面データを抽出する
② 幅 20 ㎝の断面を二次元化する
③ 断面における基準となる点（例えばトンネルベースの中心など）を合わせることで断面を重ね合わせ、データを比較する

これにおいては各機材の誤差に加え、断面データの抽出や基準となる点の重ね合わせが手動で行われるため、1～2㎜ 程度の誤差が生じるものと想定される。

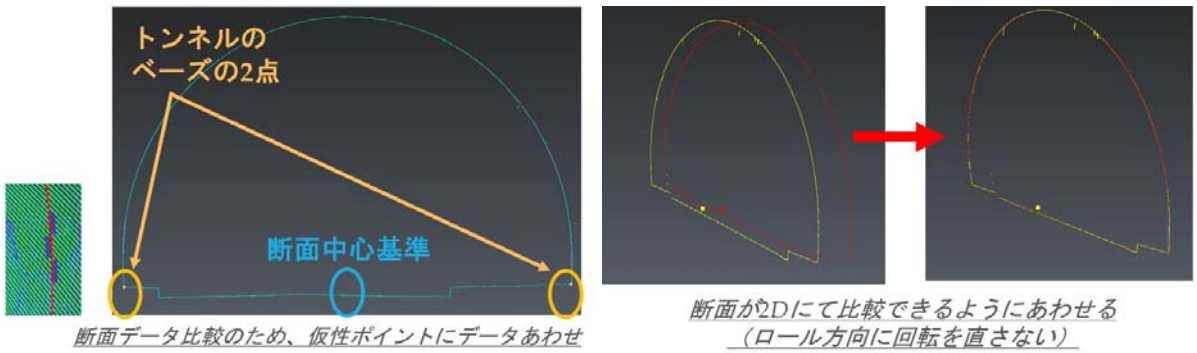


図 4.2.6　計測結果からの断面算出例

4.3 和知トンネルにおける検証実験

4.3.1　概要

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト（新都市社会技術融合創造研究会）では、道路トンネルの合理的かつ効率的に定期点検（点検作業～調書作成～診断）を実施するため、①非破壊検査技術の有効活用（支援による点検の実装化）、画像・レーザ計測から得られたデータに対する自動解析やAI技術の活用（支援）方法など点検支援技術の高度化に関する研究、②「i-Construction」の導入に向けて、道路トンネルにおける建設時からの正確な 3 次元形状データ、地山状況、施工法等を把握、③今後の点検～診断～対策のメンテナンスフローにおけるデータベースの保管や活用方法、について検討を行っている。

非破壊検査技術の代表格であるトンネル走行型計測車両は、カメラ、レーザ、レーダ等を搭載し、近接目視、打音検査の併用技術として支援することを目的として開発された機器であるが、衛星不可視下であるトンネル内においてはGPS信号が受信できないことから、測量レベルでの正確な位置情報を得ることが困難である。またより確実に診断を実施するためには、トンネルに発生する外力性変状の有無やその進行性をより的確に把握しなければならない。本研究目的が、効果的で有効に活用できる技術として社会実装を目指すものであり、そのためにはこれら位置情報の精度向上や変状把握が不可欠となっている。

1）目的

上記課題の解決と非破壊検査技術の有効活用・促進に向けて、近畿地方整備局管内の実トンネルを対象として、実証実験を実施する。今回の実証目的として必要な検証目的を以下に示す。

① 進行性評価のための差分解析を正しく評価するため、横断面計測を行い、回転、ゆがみの検証を行う。
② トンネル縦断方向の（相対）位置精度の検証を行う。
③ 衛星不可視下での位置精度の検証（上記①、②を裏付けるため）を行う。
④ 性能カタログ等に示される道路トンネルに関連する画像計測技術（複数例）のユースケースを明確にする。

2）対象トンネルについて

当該トンネルは 2 箇年において実証実験を行っており、これまでに定期点検および走行型計測の履歴が 3 回以上（前回からの変状の進行や変化を客観的に確認できる）あり、500m 以上の延長と平面曲線で両坑口が見通せない、歩道の作業スペースが比較的広いこと（3.0m 程度）等の実証実験に伴う好条件となっている。

① 路線：国道 27 号
② 住所：京都府船井郡京丹波町本庄
③ 名称：和知トンネル
④ 竣工：平成 10 年
⑤ 延長：740.0m
⑥ 施工法：NATM
⑦ 幅員：11.75m（歩道 3.0+路肩 0.5+車道 3.5+3.5+路肩 0.5+監査路 0.75）

3）位置図

和知トンネル位置図を図 4.2.7 に示す。



図 4.2.7　和知トンネル位置図 [1)]

4.3.2　令和元年の計測調査

1）計測時期

計測は下記日程にて実施した。

令和元年 11 月 21 日～22 日

2）使用機器

① MIMM：走行型計測車両（画像計測・レーザ計測（三菱製 MMS））
② トータルステーション（P40）：3 次元スキャナーを備えたトータルステーション
③ ProScan：レーザスキャング装置（三輪台車に搭載し移動計測を実施）
④ Pegasus Ⅱ ultimate（P2U）：走行型計測車両（レーザ計測）
⑤ Pegasus Backpack：レーザスキャング装置（バックパックに搭載し移動計測を実施）
⑥ OS1：小型レーザ（MIMM に搭載し、SLAM による精度検証を実施）
⑦ 反射鏡（プリズム）
⑧ カラーコーン
⑨ 移動、資材搬送用車両（3 台程度）
⑩ カメラ、ビデオ

3) 計測担当者

計測担当者を表 4.2.2 に示す。

表 4.2.2　計測担当者一覧表

役割	氏名	所属
P リーダー	石川貴一朗	日本工業大学　基幹工学部　機械工学科
P 幹事	水口尚司	㈱ニュージェック　道路グループ
現場責任者	中園康平	㈱ニュージェック　道路グループ
計測担当	安田亨	パシフィックコンサルタンツ㈱　交通基盤事業本部
計測担当	重田佳幸	パシフィックコンサルタンツ㈱　インフラマネジメント部
レーザ計測担当	Romain Sallenave	ライカジオシステムズ㈱リアリティキャプチャー事業部
MIMM 計測担当	有髙慎也	計測検査㈱　構造調査部

その他

※基準点設置者　　：測量担当 2 名（11/21）

※計測時見張り人　：1 名

※レーザ計測補助員：1 名

※MIMM 補助員　　：1 名

4) 実施フロー

計測の実施フローを図 4.2.8 に示す。

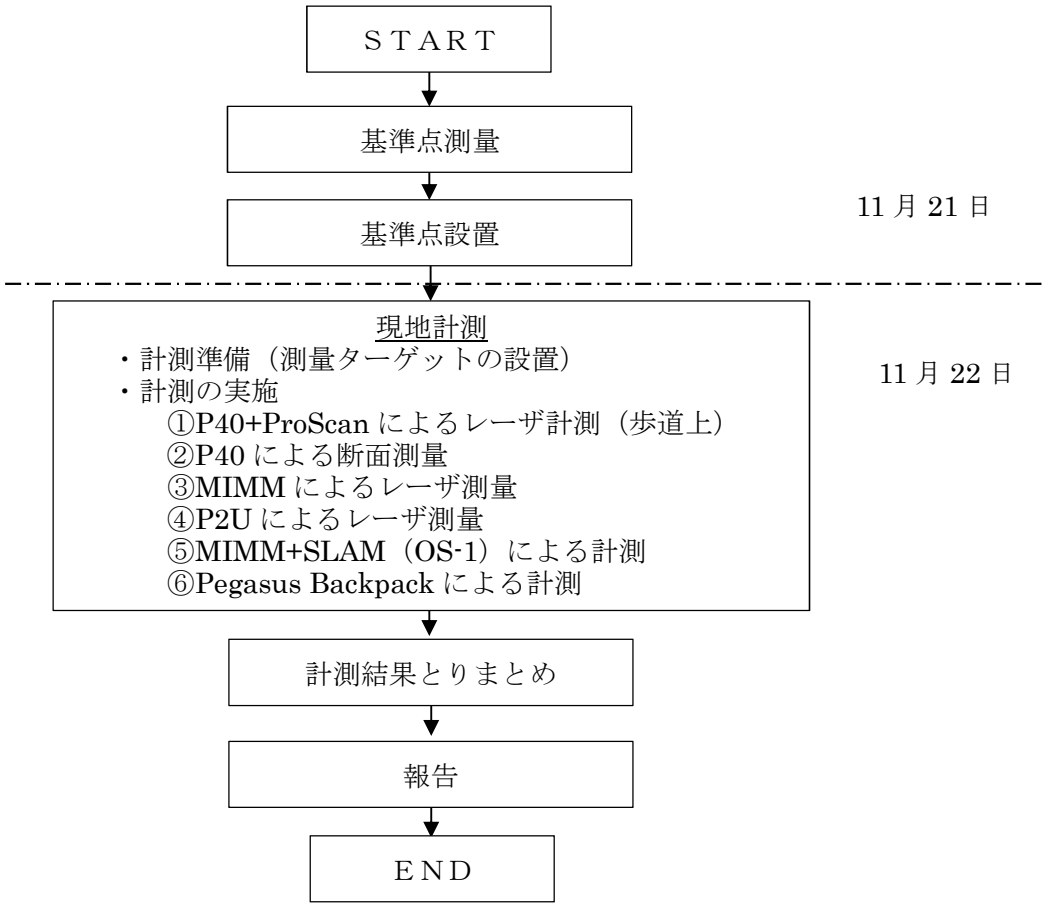


図 4.2.8　実施フロー

5) 実施方法

(1) 基準点測量

① 坑口、坑内に測量基準点（T-N6 点、K-N3 点）を設置（測量ピンは歩道端部とし、管理者の了承を得ること）する。（図 4.2.9 参照）

② 作業は、レーザ計測等の前日に行う。

③ 測量作業時に一般利用者の通行に支障しないこと。（見張り人を置く）

T-1：2 級基準点（既存）、T-5：3 級基準点（既存）

T-2、T-3、T-4：坑外基準点

T-6、T-7、T-8：坑内基準点、視準のための基準点 T2-2、T6-2、T7-2、T8-2

K-1、K-2、K-3：断面測定点（仮ベンチマーク）

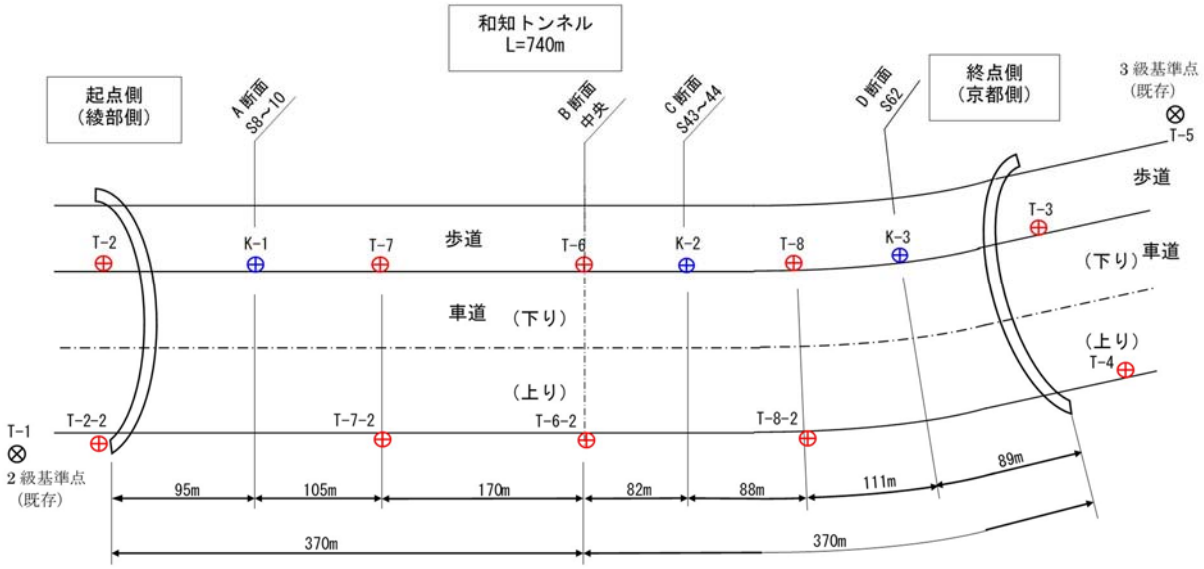


図 4.2.9　基準点図

(2) 坑内評定点の設置

① レーザ測量で視認できる測量ターゲット、坑口距離表示プレート・照明管理番号プレートなどの角を利用した標定点を定める。

② 設置は、レーザ測量当日とする。

③ 測量作業時に一般利用者の通行に支障しないこと。（見張り人を置く）。

(3) 基本となる点群データの取得

① 坑内基準点にトータルステーション（P40）を据え、常時トラッキングしながら、ProScan で坑内点群データを取得する （図 4.2.10 参照） 。

② 最も正しいと考えられるレーザ測量データ取得となる。

③ 作業は、坑内標定点設置後に行う。

④ 測量作業時に一般利用者の通行に支障しないこと（ProScan には見張り人を置く）。

⑤ P40 とプリズム箇所にはカラーコーンを配置する。

※計測パターン（作業時に一般利用者の通行に支障しないこと）

・計測スタートポイントにて 3 分静止

・進行方向に進歩しながらスキャン
・計測エンドポイントにて 3 分静止
・1 回あたり計測長が最大 400m であり、基準点を盛り変えながら進めていく
・トンネル全延長 2 往復実施

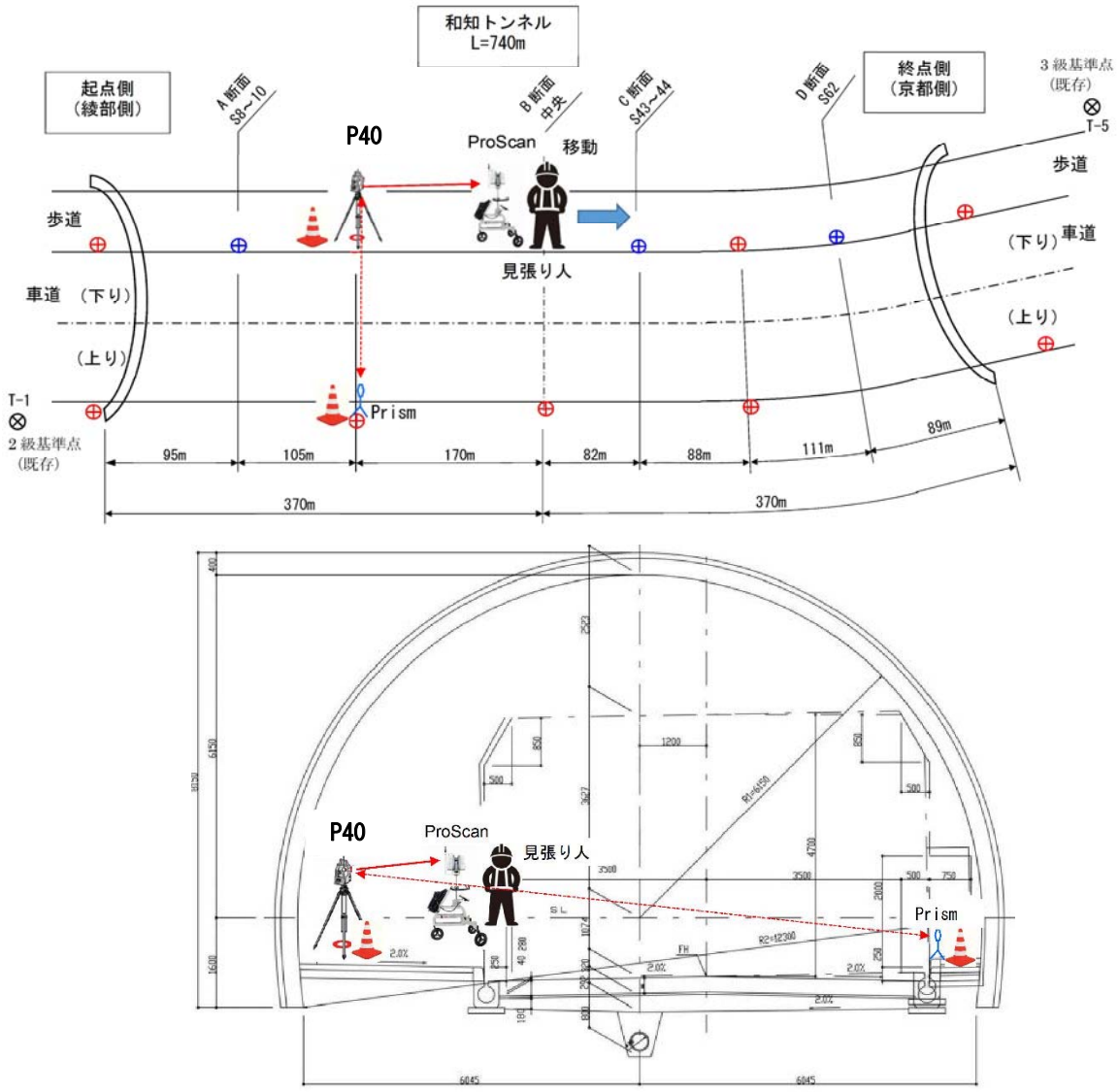


図 4.2.10　ProScan 計測状況図

(4) 定置式レーザ（P40）断面測量の実施

① 坑内基準点（T-6~8）、断面測定点（K-1~3）について、トータルステーション（P40）により定置式断面測量を実施する。

② 同様の断面付近の 3 次元測量（5m 延長程度に渡る点群取得）を行う。

③ 測量作業時に一般利用者の通行に支障しないこと（見張り人を置く）。

(5) MIMM によるレーザ計測

① 車両は道の駅にて待機しておく。

② 坑外にて準備（GPS 受信等）を行う。

③ 起点側より MIMM 計測（3 往復）する。

(6) 走行型計測車両 P2U（Pegasus Ⅱ ultimate）による計測

① 現行 MIMM に対する比較ケースとして P2U （Pegasus Ⅱ ultimate）による計測を実施する。

② 車両は道の駅にて待機しておく。

③ 起点側より P2U 計測（3 往復）する。

(7) MIMM+SLAM（OS-1）および Pegasus Backpack による計測

① 縦断方向位置精度向上検討のため SLAM 技術を導入し試行計測を行う。

② SLAM が導入されている Pegasus Backpack による検証を行う。

(8) 基本断面の比較検証の実施（以下室内検証）

① 坑内基準点（T-6~8）、断面測定点（K-1~3）を検討用の基本断面として選定する。

② P40、ProScan、BLK360 から基本断面として比較検証を行う。

(9) 計測結果断面比較検討

① 回転・ゆがみの検討、3 回計測再現性の検討：比較基本断面との差分計算）

② MIMM （電子基準点のみ、坑口基準点使用、坑内標定点使用）

③ P2U （電子基準点のみ、坑口基準点使用、坑内標定点使用）

④ MIMM+SLAM （基準点使用ケースは要検討）

⑤ Pegasus Backpack（基準点使用ケースは要検討）

(10) 取得点群位置座標のドリフト誤差の検討

① 比較ケースは同上とする。

② 電子基準点のみ、坑口基準点使用、坑内標定点使用の場合の水平・縦断方向のドリフト誤差を検討する。

③ 坑内基準点、坑内評定点のほか、非常設備・照明・目地などの同一点座標を求めて比較を行う。

(11) その他検証

① 坑内縦断位置精度検討：比較ケースは同上とする。

② 2 点間距離誤差の検討：SL 上 2 点間距離、天端スパン距離

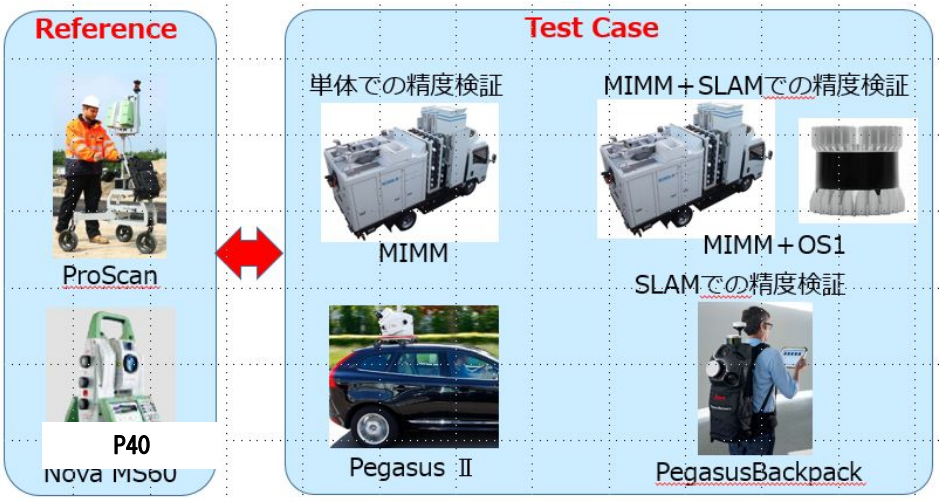


図 4.2.11 各種レーザ計測概要図



図 4.2.12　ProScan 概要図

6) 計測状況

(1) 計測の実施

計測の実施状況を図 4.2.13 に示す。

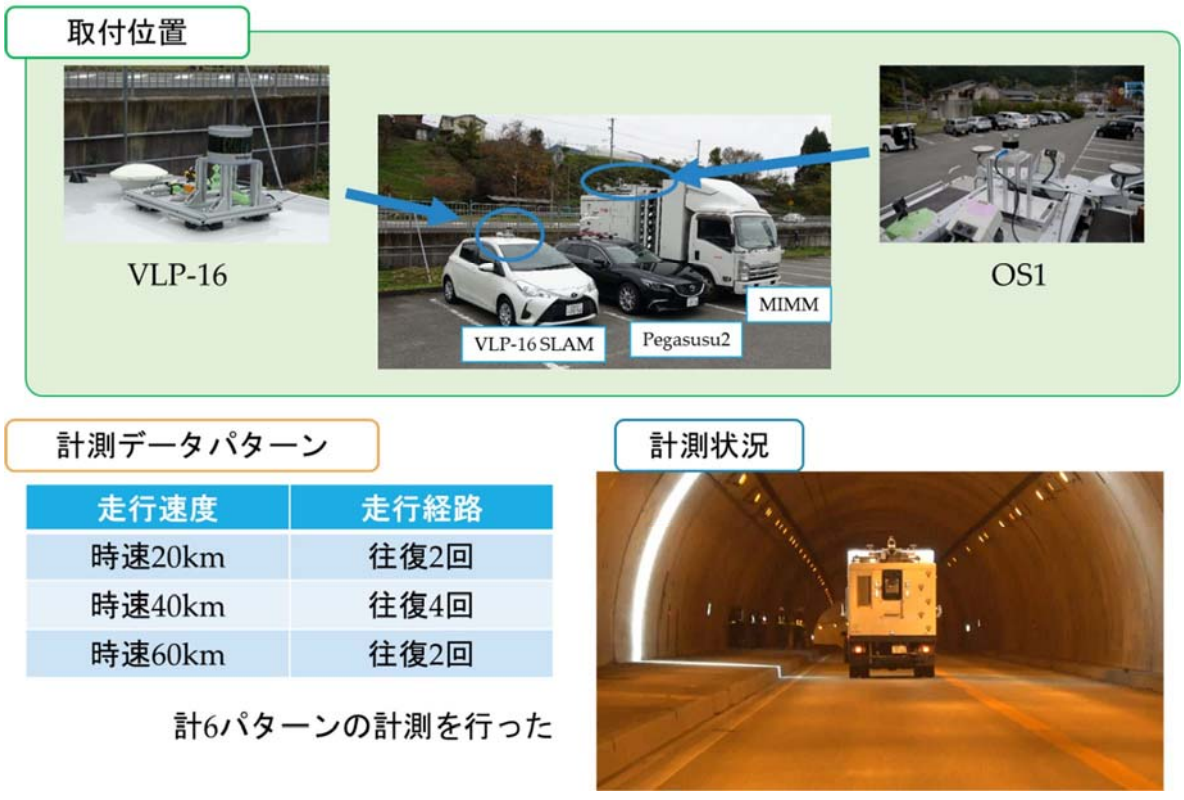


図 4.2.13　計測状況

(2) 計測状況写真

現地計測状況を図 4.2.11～図 4.2.21 に示す。



図 4.2.14　GNNS 電子基準点





図 4.2.15　坑外基準点設置（マーカー）



図 4.2.16　坑内基準点、検証断面位置（マーカー）



図 4.2.17　P40 による 3 次元断面計測



図 4.2.18　ProScan によるレーザ計測



図 4.2.19　MIMM 及び Pegasus2 によるレーザ計測



図 4.2.20　SLAM　複合技術（VLP-16,STIM300,GNSS）



図 4.2.21　計測時集合写真（プロジェクトメンバー、学生）

4.3.3　令和 2 年の計測調査

1）計測時期

計測は下記日程にて実施した。

令和 2 年 11 月 19 日～20 日

2）使用機器

① 走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R※1（走行型計測車両）：画像計測・レーザ計測・レーダ計測を行うため。性能カタログ掲載

② OS1（小型レーザ）：MIMM-R に搭載し、スキャンマッチングによる精度検証を実施するため。

③ Leica ScanStation P40（高精細空間測量 3D レーザスキャナ）：正となる断面形状を測量のため。

④ トンネル点検車：模擬変形設置のため（点検業務より借用）。

⑤　規制関係資材（カラーコーン、工事用看板等）：規制のため（点検業務より借用）。

⑥　車両（複数台）：移動、資材搬送用のため。

⑦　撮影機材（カメラ、ビデオ、三脚等）：実証実験状況撮影のため。

⑧　道路トンネル画像計測の走行型計測車両

・走行型高速 3D トンネル点検システム（MIMM-R）※：パシフィックコンサルタンツ（株）

・近赤外線画像撮影トンネル点検技術（近赤外撮影）：国際航業（株）

・社会インフラモニタリングシステム（MMSDⅡ）：三菱電機（株）

・一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）：（株）リコー

※： MIMM-R のレーザ装置については P2U（90°）



図 4.2.22　計測時集合写真　（プロジェクトメンバー等）

3）実証実験担当者

実施実験担当者一覧表を表 4.2.3 に示す。

表 4.2.3　実証実験担当者一覧表

作業版	リーダー	担当者		備考
プロジェクト責任者	石川貴一朗			日工大
総現場作業責任者	重田佳幸			PCKK
ターゲット設置	北澤隆一	野村、清野、重田、増田、山下		ウオールナット
模擬変形設置撤去	北澤隆一	野村、清野、重田、増田、山下		ウオールナット
レーザ計測 P40	重田佳幸	ローマン、新発田		ライカ
走行型計測	石村勝伸（メイン） 石川貴一朗（サブ） 安田亨（サブ）	MIMM-R OS1	増田、山下 佐藤、四宮、石崎	PCKK 日工大、早大
		近赤外撮影 MMSD 一般車両搭載型 サポート	平山、猪俣、丸山、武藤 野村、渡邉、中田、末武、中川 塩崎、菊地、高巣、山中、平井、志賀、渡辺 清野、松山	国際航業 建技、三菱電機 三井、リコー 建技、NJ、PCKK
官立会	増田課長	松原氏、富永氏		近畿道路 MC
点検業務、規制	村田純孝	業務管理技術者：重田		PCKK

※注意事項：今回の規制は、点検業務において、パシフィックコンサルタンツ（株）管理下での作業となる。相互連絡を図り安全には自己責任のもとで十分留意して調査を実施した。

4) 実施フロー

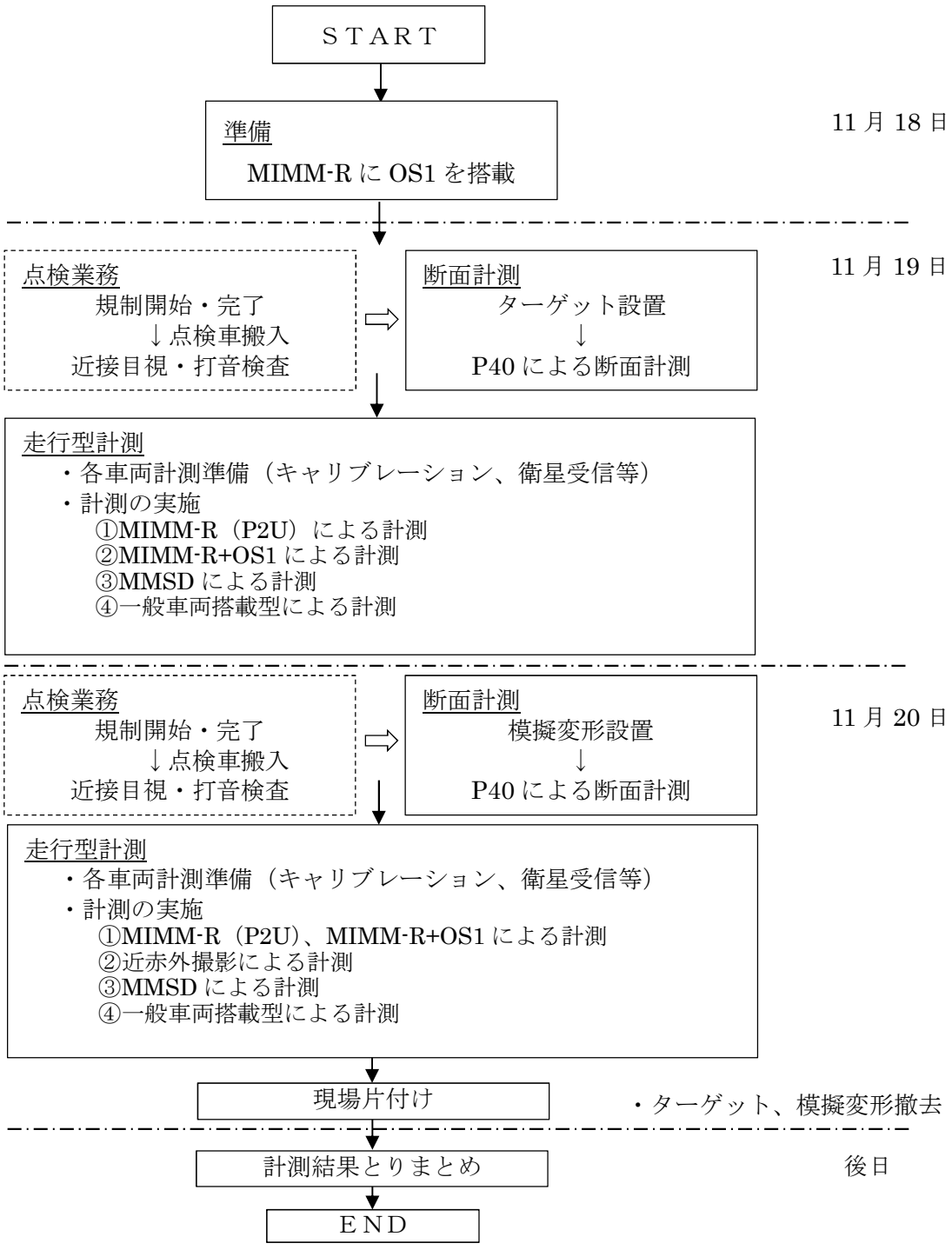


図 4.2.23　実施フロー

5) 実施方法

(1) ターゲット設置

① 今回断面計測を行う箇所に、ダーゲットを設置する。前回測量を行った基準点に該当するため、現地の測量ピンを確認後に設置を行う。

② 作業は 19 日規制完了後に実施する。

③ ターゲット箇所は、図 4.2.24 に示す A 断面（K1）、B 断面（T9）、C 断面（T6）、D 断面

（K3）、E 断面（K2）とする。

④　測量作業時に一般利用者の通行に支障しないこと（見張り人を置く）。

⑤　ターゲットは図 4.2.25 のようにゴム製のマーカーやガムテープを活用して現地に貼り付けを行う。

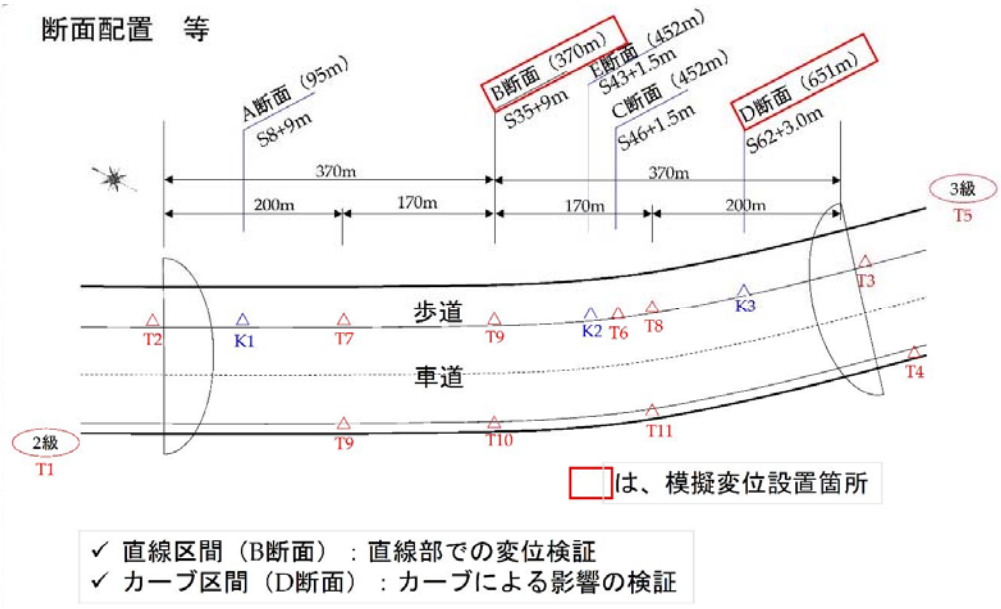


図 4.2.24　ターゲット位置図



図 4.2.25　ターゲットイメージ

(2) 定置式レーザ（P40）断面測量の実施

①　坑内基準点（K1,T7,T9,K2,K3）に P40 を据え付け、A~E 断面測量を実施する。

②　同様の断面付近の 3 次元測量（5m 延長程度に渡る点群取得）を行う。

③　測量作業時に一般利用者の通行に支障しないよう見張り人を置く。

(3) 規制解除

①　19 日の点検業務（近接目視、打音検査）が完了後に規制を解除する。

②　解除時に資機材等が現地に放置されないよう最終確認を行う。

(4) MIMM-R による計測

①　車両は道の駅にて待機しておく。

②　坑外にて準備（GPS 受信等）を行う。

③　規制解除を確認し、トンネル内に向けてスタートする。

④　起点側（綾部側～京都側）より MIMM 計測を行う（図 4.2.26 参照）。

⑤　走行速度は 40km/h とする。

(5) MIMM-R+SLAM（OS-1）による計測

①　MIMM-R に OS1（小型レーザ）を取り付ける（前日までに実施）。

②　縦断方向位置精度を検証するため SLAM 技術を活用し試行計測を行う。

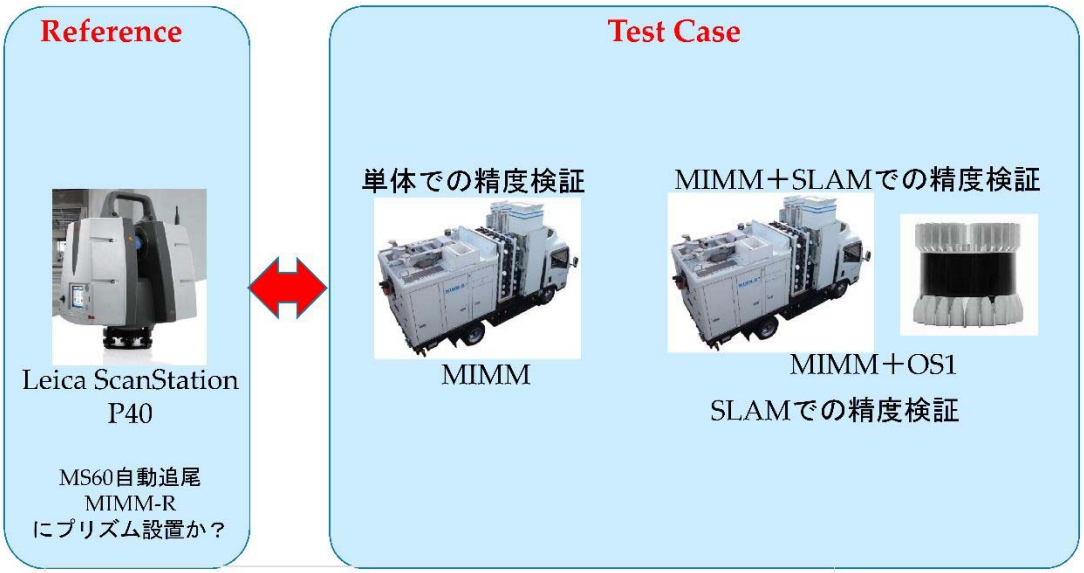


図 4.2.26　レーザ計測イメージ

(6) 画像計測技術の走行型計測（3.画像計測の評価に詳述）

①　今回参加する画像計測技術の検証（変状、位置情報等の把握、精度）を行う。

②　車両は道の駅にて待機し、坑外にて準備（GPS 受信等）を行う。

③　規制解除を確認し、トンネル内に向けてスタートする。

④　起点側（綾部側～京都側）より計測を行う。

⑤　走行速度は 40km/h とする。

⑥　参加者及び技術概要は、表 4.2.4 のとおりである。

表 4.2.4　画像計測技術参加者一覧

名　　称	会　社　名	技　術　概　要
走行型高速 3D トンネル点検システム（MIMM-R）	パシフィックコンサルタンツ株式会社	連続画像撮影システム、高精度 3 次元レーザ計測システムを搭載
近赤外線画像撮影による点検技術（近赤外撮影）	国際航業（株）	ハイビジョンカメラを搭載し、トンネル壁面を撮影する
社会インフラモニタリングシステム（MMSD Ⅱ）	三菱電機（株）	ラインセンサーカメラ、レーザスキャナを搭載し、トンネル壁面、形状を取得する
一般車両搭載型トンネル点検システム（一般車両搭載型）	（株）リコー	ラインセンサーカメラを搭載し、高画質な画像を撮影する

6) 模擬変形の設置

(1) 設置目的

トンネル点検において、外力性変状やその進行性を把握することは、診断を行う上で極めて重要な手段であり、定性的にその結果を示す必要がある。本実証実験では、非破壊検査技術で支援を行う際、外力性変状や進行性を有効に捉えることができるかについて、トンネル内に模擬変形箇所を設置し、その状況について検証を行うものである。

① 20 日に設置作業を行い、上り車線側（規制車線）内で作業を行う。

② 設置箇所は、B 断面と D 断面に合板（180×90cm）をステンレス製の機械式アンカーによりトンネル側壁部とアーチ肩部に設置する。

③ 広範囲な変形の模擬変形については、B 断面近傍に単管パイプ（2m×2 本の予定）を立て掛け上部をアンカーで固定する（図 4.2.27 参照）。

④ 実験終了後は、合板は撤去することとし、アンカーは残置することとする。

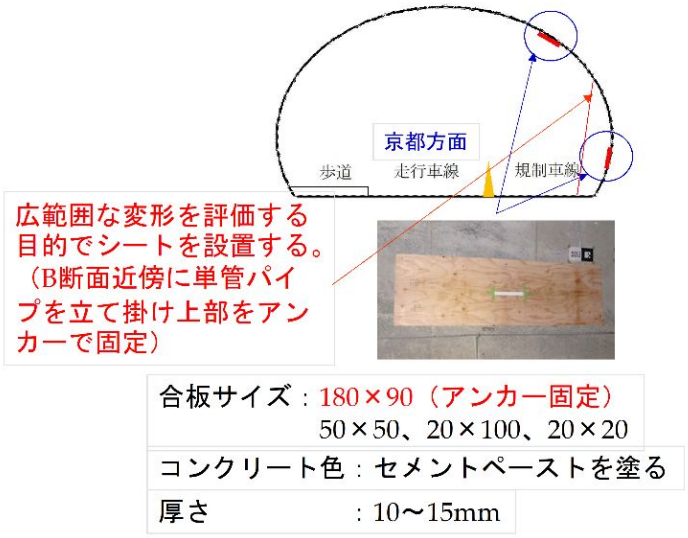


図 4.2.27　模擬変形設置箇所

(2) 模擬変形の設置手順（合板による局所変形）

和知トンネル検証断面、B 断面（370m）及び D 断面（651m）において、模擬変形を与えるため、 t =12mm の合板を設置する。合板のサイズを表 4.2.5 に示す。

表 4.2.5　設置合板形状及び位置一覧

	サイズ（m）※) 1	設置方法	設置場所	表面仕上げ ※) 2
①	0.5×0.5	壁面テープ接着	側壁部	なし
②	0.2×1.0	〃	目地横	〃
③	0.2×0.2	〃	側壁部	〃
④	1.8×0.9	アンカー６点留め	アーチ部	モルタル塗布

※）1：トンネル延長方向×横断方向

※）2：図 4.2.28 ならびに図 4.2.23 にモルタル塗布、塗布なしを示す。
また、現地設置状況を図 4.2.30 ならびに図 4.2.31 に示す。



図 4.2.28　モルタル塗布



図 4.2.29　モルタルなし

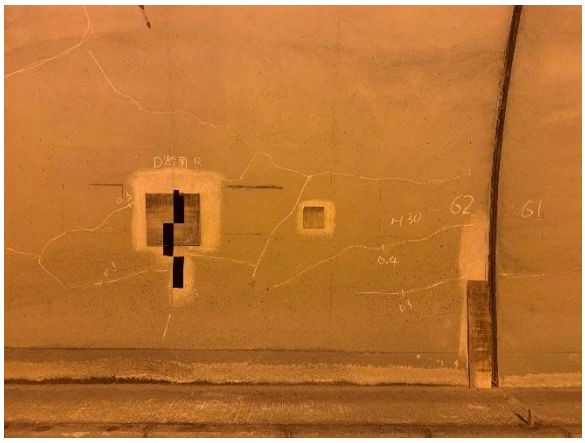


図 4.2.30　現地設置状況（その１）



図 4.2.31　現地設置状況（その２）

（手順）

①～③　合板設置

壁面に接着させる際には、コンクリート面のほこり・汚れを拭き取り、図 4.2.32 に示すような、コンクリート専用の両面テープを用いて、壁面に固定させる。



図 4.2.32　両面テープ

④　アンカー留め

高所作業車を用いて、1.8m×0.9m、（約 11ｋｇ）の合板をアーチ部に 3 人で保持し、6 点でアンカー留めを行う。

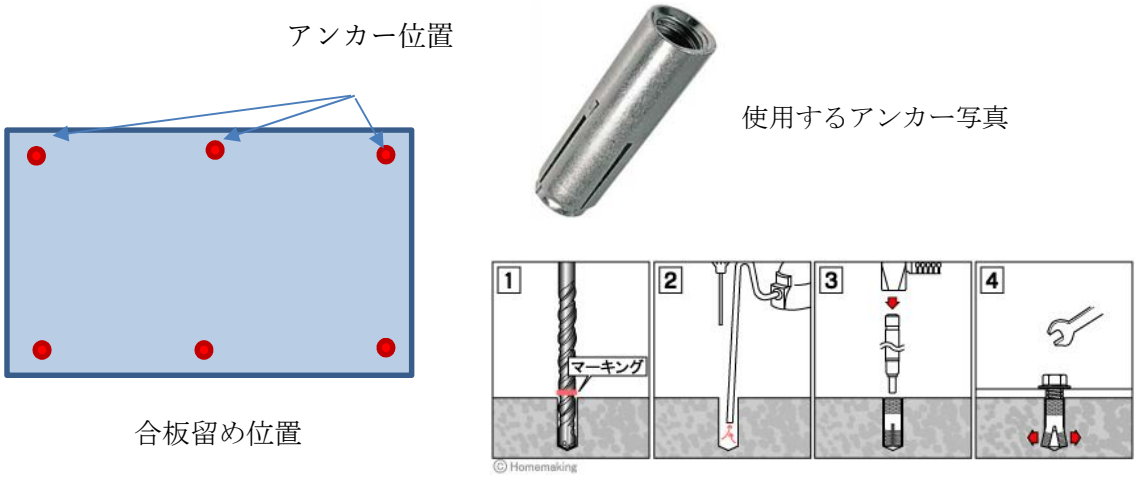


図 4.2.33　アンカー施工図

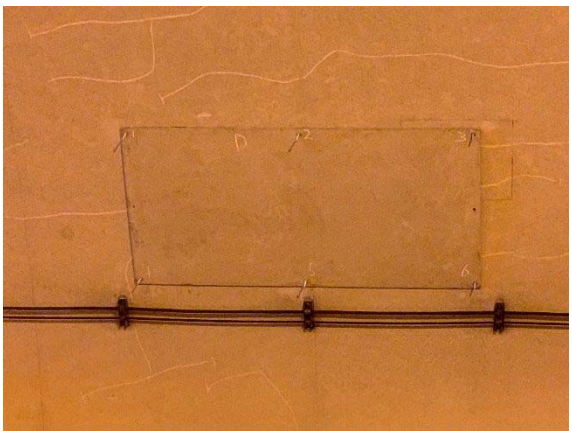


図 4.2.34　現地設置状況

⑤ 使用するアンカーボルトは図 4.2.33 のとおりとし、ねじ径はＭ８とし、最大荷重はそれぞれ、引張：4.9KN、剪断：10.1KN であり、十分な強度を有している。

⑥ アンカーボルトを設置する下穴は、10.5mm とする。

⑦ 今回設置するアンカーボルトは、内部コーン打ち込み式とし、撤去後に覆工表面から突起がでないものとする。

⑧ 撤去時は、設置時の逆の手順で行う。現地設置状況を図 4.2.34 に示す。

(3) 模擬変形の設置手順（シートによる広範囲な変形）

和知トンネル検証断面、B 断面（370m）に、高さ 4m×幅 4m の大型模擬変形を設置する。単管と、シルバーシートの組み合わせで、現地の規制帯にて組み立てを行う。組み立て手順を以下に示す。

① 道路進行方向に 4m 単管を配置して、2m の単管 3 本をクランプで固定する。また、4m の単管を側壁側に配置し、規制帯からはみ出ないよう作業を行う（図 4.2.35 参照）。

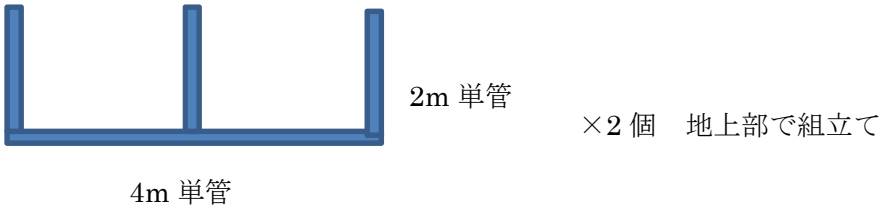


図 4.2.35　STEP1 単管枠組み

② 内 1 個を高所作業車に乗せ、連結材にて地上側に残置したフレームと合体させる。大型模擬変形が、万が一車道側に傾倒しても、対向車線の間には、高所作業車があるためはみ出す恐れはないが、十分注意して作業を行う（図 4.2.36 参照）。

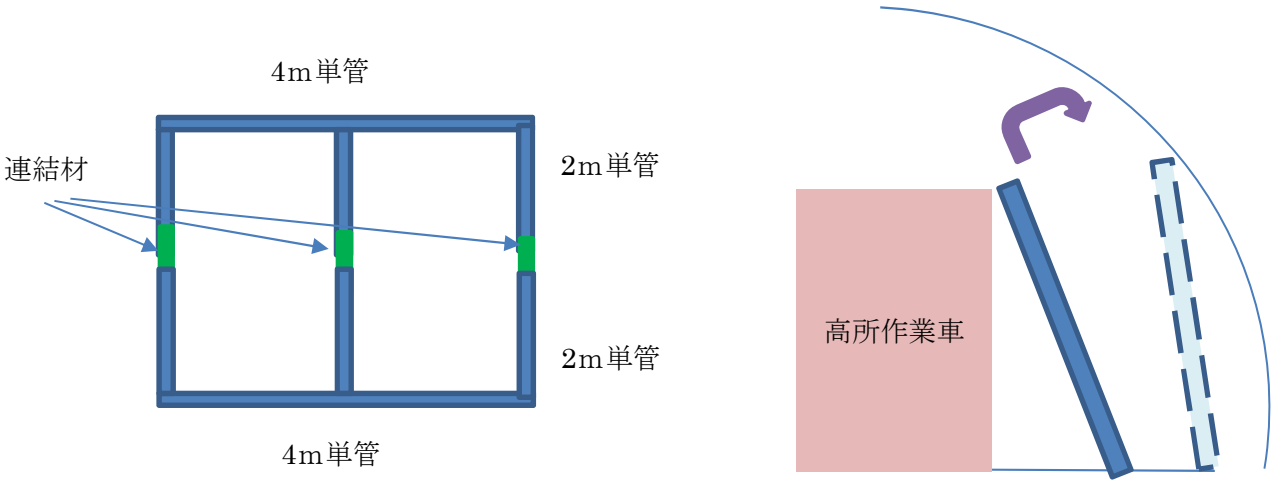


図 4.2.36　STEP2 枠組み完成と建て込み

③ 最上部には、図 4.2.37 に示す固定用治具を設置し、壁面にアンカー留めを行う。

④ 使用するアンカーボルトは、Type 1 の合板固定用と同じ物とする。



固定治具

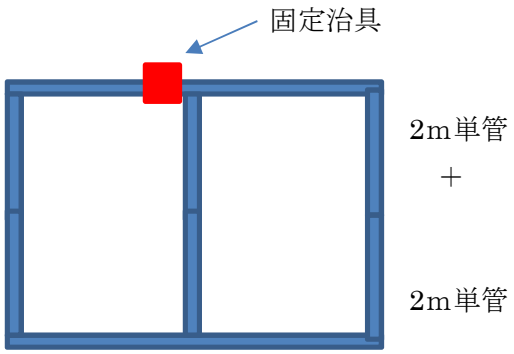


図 4.2.37　STEP3 枠組みの固定

⑤　固定が確認されたら、フレーム前面にシルバーシートを設置する（図 4.2.38 参照）。

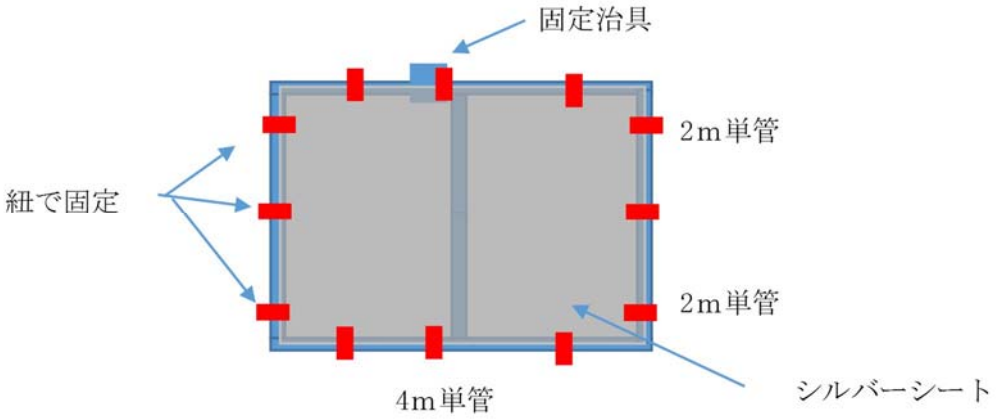


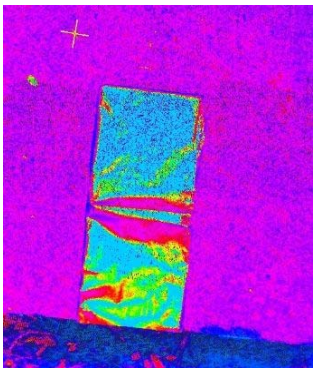
図 4.2.38　STEP4 シート設置

⑥　撤去時は、設置時の逆の手順で行う。

⑦　光沢度が大きいと点群データが欠落してしまう。よって今回使用する、シルバーシートを事前に計測を行い問題がないことを確認した（図 4.2.39 ならびに図 4.2.40 参照）。



シルバーシート写真



シートの点群試験結果

図 4.2.39　シルバーシートの状況




図 4.2.40　現地設置状況

(4) 計測結果断面比較検討（以下室内検証）

① 上記の計測結果を用いて以下の断面比較（P40 結果との検証）を行う。
② 基本断面との比較（回転、ゆがみ等）
③ 変形モード解析の妥当性の確認（疑似変位設置前後）
④ MIMM-R の妥当性（電子基準点のみ）
⑤ P2U の妥当性（電子基準点のみ）
⑥ MIMM-R+SLAM の妥当性（電子基準点のみ）

(5) 各非破壊検査技術の検証結果の整理

① 取りまとめ方式については、それぞれの項目について共通した整理を行った。
② 今回の計測結果と正値（近接目視等で得られた変状の種類、規模、位置情報等）との比較を行った。
③ それぞれの特徴、成果、課題等について整理を行った。

4.4 レーザによる断面計測および縦断位置精度（回転、捻じれ）

4.4.1 速度の違いによる断面計測精度

1）計測について

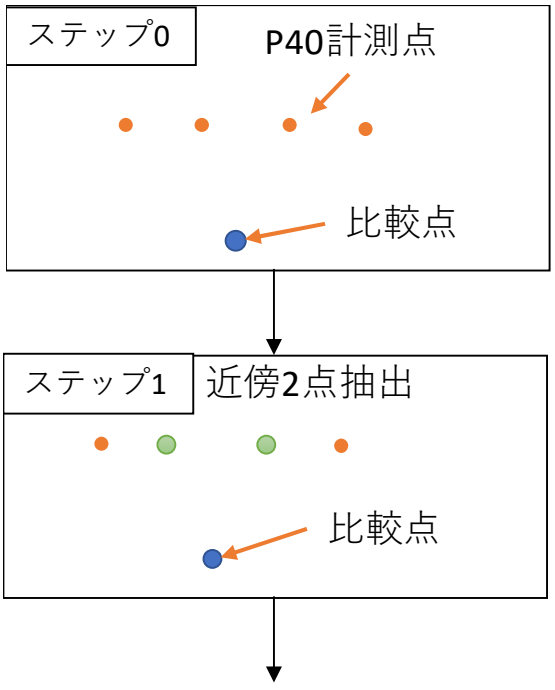
令和元年度の調査において、走行速度による計測誤差の発生状況について調査を行った。検討ケースを表 4.4.1 に示す。

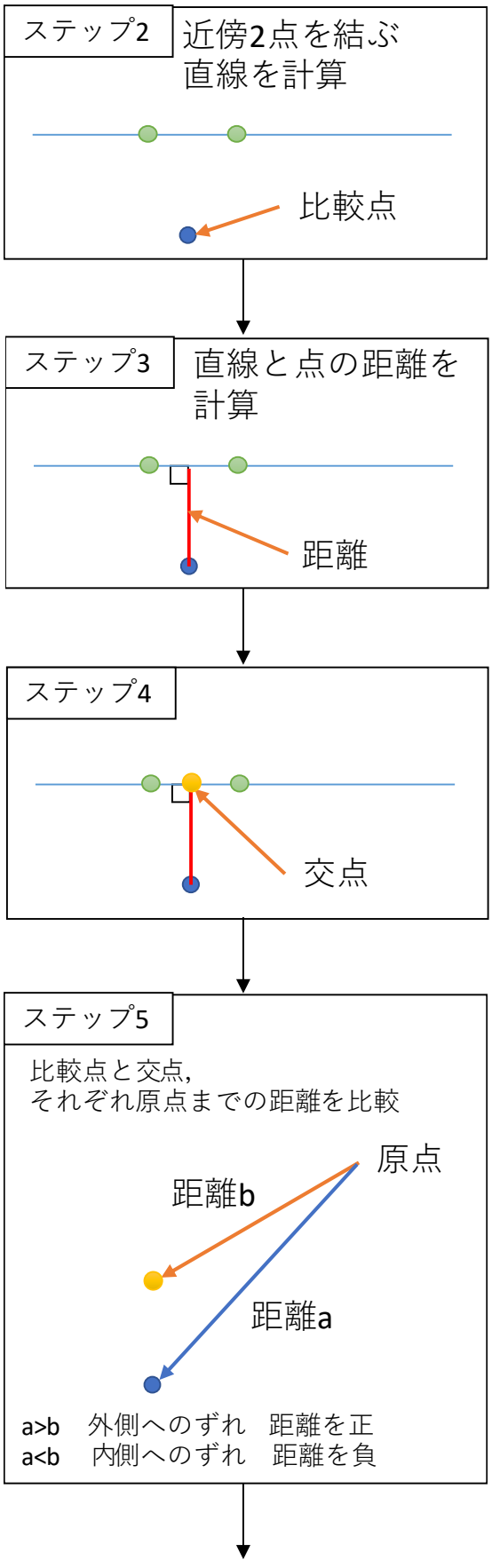
表 4.4.1　計測結果一覧表

計測機器	計測速度	計測方法			
		補正無	JENOBA による補正	坑口部のデータ補正	坑内部のデータ補正
MIMM	20km/h	○	－	○	○
	40km/h A	○	－	○	○
	40km/h B	○	－	○	○
	60km/h	○	－	○	○
Pegasus	20km/h	○	○	○	○
	40km/h A	○	○	○	○
	40km/h B	○	○	○	○
	40km/h C	○	○	○	○
	60km/h	○	○	○	○
MIMM	20km/h	ﾌｫﾜｰﾄﾞ処理	－	－	－
	20km/h	帰り(上り線)	－	－	－

2）計測誤差の算出方法

P40（固定レーザ計測）と走行型計測との計測誤差の算出は下記方法を用いて実施した。




ステップ2
近傍2点を結ぶ
直線を計算
比較点
ステップ3
直線と点の距離を
計算
距離
ステップ4
交点
ステップ5
比較点と交点,
それぞれ原点までの距離を比較
原点
距離b
距離a
a>b　外側へのずれ　距離を正
a<b　内側へのずれ　距離を負

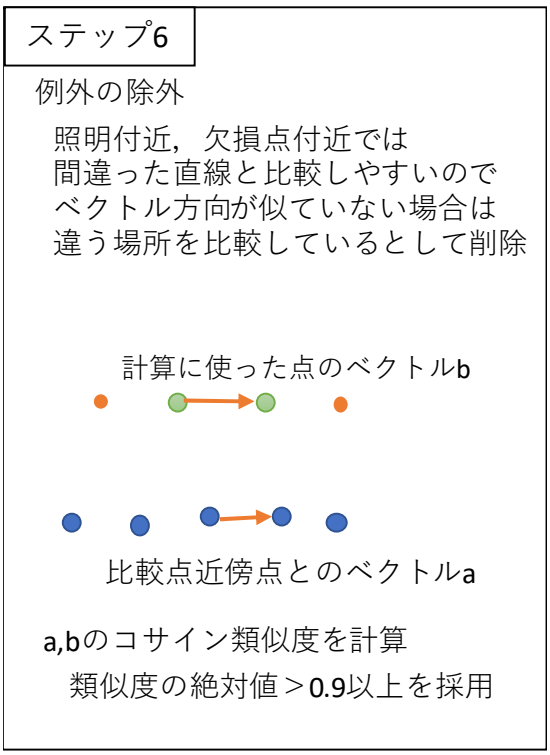


図 4.4.1　計測誤差の算出フロー

3）計測断面位置について

断面計測は図 4.4.2 に示す 6 箇所(K1,T9,K2,T6,K3)において実施している。

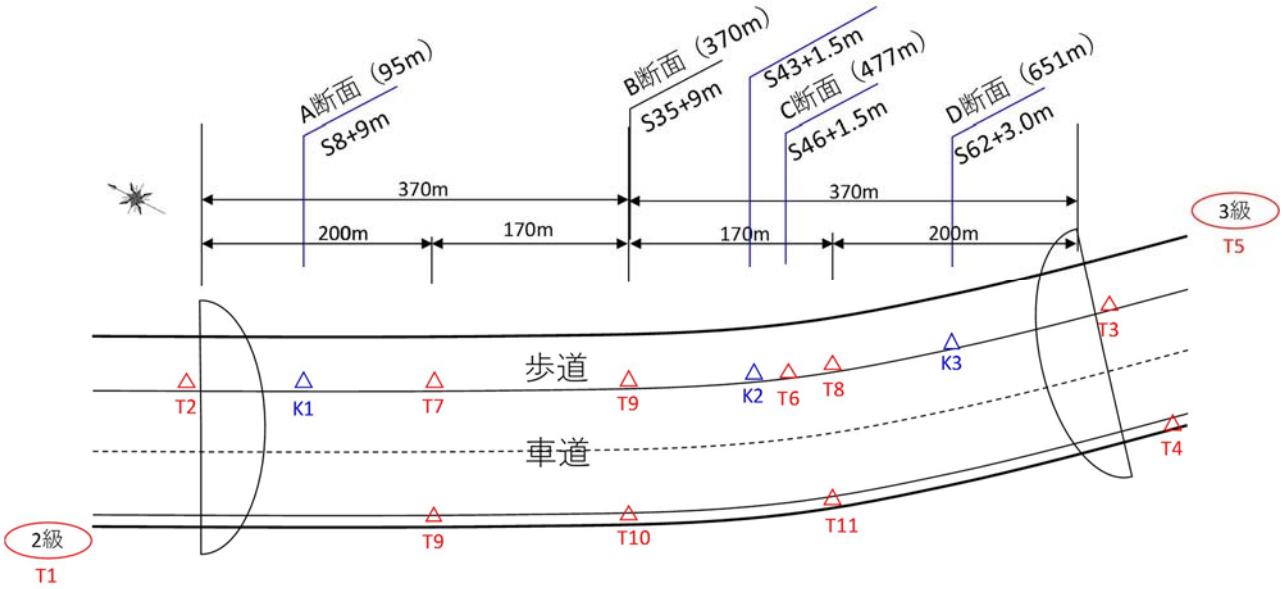


図 4.4.2　計測断面位置

4）断面精度一覧表

各計測断面における計測結果を表 4.4.2～表 4.4.11 に示す。計測の結果、回転誤差を生じていることが確認できた。これは、レーザ計測機器が保有している公差（回転誤差）の影響と想定される。回転誤差は速度が速くなると誤差は小さくなっている。これは不可視時間の長さによる影響が考えられる。

表 4.4.2　Ｋ１地点（補正なし）断面計測精度一覧表その１

計測機器	高さ	幅	備考
P40	7.238m	12.366m	参考値

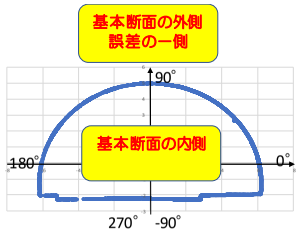


表 4.4.3　Ｋ１地点（補正なし）断面計測精度一覧表その２

計測機器	計測速度	誤差算出結果					備　考
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	45 度地点誤差 (m)	135 度地点誤差 (m)	路面回転誤差 (度)	
MIMM	20km/h	0.0028	-0.0017	-0.0003	-0.0017	-0.1252	
	40km/h A	-0.0026	-0.0001	-0.0026	-0.0022	0.0671	
	40km/h B	-0.0016	0.00245	-0.0053	-0.0030	0.0484	
	60km/h	0.0005	-0.0018	-0.0029	-0.0002	0.0058	
Pegasus	20km/h	-0.0008	0.0029	-0.0152	0.0133	0.0229	
	40km/h A	0.0002	0.0047	-0.0040	0.0028	0.0378	
	40km/h B	0.0036	-0.0002	-0.0010	0.0010	-0.0509	
	40km/h C	-0.0011	0.0044	-0.0030	0.0044	0.0356	
	60km/h	-0.0005	0.0002	-0.0034	0.0022	0.0282	

表 4.4.4　Ｋ２地点（補正なし）断面計測精度一覧表その１

計測機器	高さ	幅	備考
P40	7.236m	12.357m	参考値

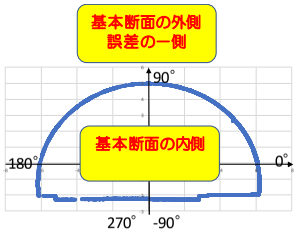


表 4.4.5　Ｋ２地点（補正なし）断面計測精度一覧表その２

計測機器	計測速度	誤差算出結果					備考
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	45 度地点誤差 (m)	135 度地点誤差 (m)	路面回転誤差 (度)	
MIMM	20km/h	-0.0002	0.0013	0.0007	-0.0028	-0.1302	
	40km/h A	-0.0009	0.0018	-0.0013	-0.0008	0.0347	
	40km/h B	0.0006	0.0026	-0.0027	0.0001	0.0351	
	60km/h	-0.0007	0.0010	-0.0046	-0.0029	-0.0085	
Pegasus	20km/h	-0.0006	0.0035	0.0067	-0.0088	0.0341	
	40km/h A	0.0048	0.0026	0.0033	0.0051	0.0423	
	40km/h B	-0.0007	0.0023	-0.0052	0.0019	-0.0419	
	40km/h C	-0.0020	0.0013	-0.0002	-0.0025	0.0371	
	60km/h	-0.0014	0.0016	-0.0007	0.0028	0.0336	

表 4.4.6　Ｋ３地点（補正なし）断面計測精度一覧表その１

計測機器	高さ	幅	備考
P40	7.240m	12.402m	参考値

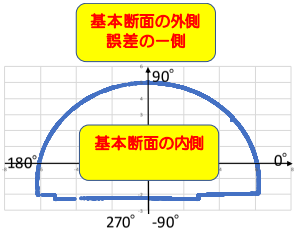


表 4.4.7　Ｋ３地点（補正なし）断面計測精度一覧表その２

計測機器	計測速度	誤差算出結果					備考
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	45 度地点誤差 (m)	135 度地点誤差 (m)	路面回転誤差 (度)	
MIMM	20km/h	-0.0007	0.0023	-0.0011	0.0024	-0.1056	
	40km/h A	-0.0007	0.0028	-0.0069	-0.0027	0.0642	
	40km/h B	-0.0009	0.0038	-0.0041	0.0016	0.0714	
	60km/h	0.0013	0.0046	-0.0050	0.0009	0.0156	
Pegasus	20km/h	-0.0015	0.0027	-0.0042	0.0137	0.0442	
	40km/h A	-0.0011	0.0016	-0.0036	0.0062	0.0473	
	40km/h B	0.0003	0.0037	-0.0040	-0.0039	-0.0321	
	40km/h C	-0.0014	-0.0004	-0.0021	-0.0012	0.0542	
	60km/h	0.0005	0.0042	0.0011	0.0038	0.0557	

表 4.4.8　Ｔ６地点（補正なし）断面計測精度一覧表その１

計測機器	高さ	幅	備考
P40	7.248m	12.385m	参考値

表 4.4.9　Ｔ６地点（補正なし）断面計測精度一覧表その２

計測機器	計測速度	誤差算出結果					備考
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	45 度地点誤差 (m)	135 度地点誤差 (m)	路面回転誤差 (度)	
MIMM	20km/h	0.0002	0.0019	-0.0034	-0.0009	-0.1162	
	40km/h A	-0.0007	0.0048	-0.0067	0.0005	0.0257	
	40km/h B	-0.0003	0.0010	-0.0083	-0.0030	0.0237	
	60km/h	-0.0003	0.0034	-0.0097	-0.0047	-0.0104	
Pegasus	20km/h	-0.0009	0.0059	0.0028	0.0017	0.0368	
	40km/h A	0.0010	0.0066	-0.0031	0.0098	0.0372	
	40km/h B	0.0006	0.0029	-0.0095	-0.0019	-0.0354	
	40km/h C	0.0001	0.0072	-0.0035	0.0014	0.0365	
	60km/h	-0.0005	0.0013	-0.0018	0.0063	0.0333	

表 4.4.10　Ｔ９地点（補正なし）断面計測精度一覧表その１

計測機器	高さ	幅	備考
P40	7.235m	12.375m	参考値

表 4.4.11　Ｔ９地点（補正なし）断面計測精度一覧表その２

計測機器	計測速度	誤差算出結果					備考
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	45 度地点誤差 (m)	135 度地点誤差 (m)	路面回転誤差 (度)	
MIMM	20km/h	-0.0006	-0.0014	0.0016	0.0041	-0.1031	
	40km/h A	0.0010	-0.0015	-0.0016	0.0020	0.0816	
	40km/h B	0.0017	-0.0018	-0.0031	0.0062	0.0692	
	60km/h	0.0028	-0.0001	0.0002	0.0041	0.0308	
Pegasus	20km/h	0.0004	0.0002	0.0120	-0.0021	0.0547	
	40km/h A	0.0008	0.0023	0.0010	0.0079	0.0669	
	40km/h B	0.0006	-0.0008	-0.0071	0.0047	-0.0176	
	40km/h C	-0.0023	0.0005	-0.0012	0.0035	0.0572	
	60km/h	-0.0026	0.0006	-0.0019	0.0102	0.0632	

5) MIMM 計測結果

(1) MIMM 計測結果（路面）：補正なし

MIMM を用いた計測結果（路面：補正なし）を図 4.4.3～図 4.4.7 に示す。計測の結果、回転誤差を生じていることが確認できた。これは、レーザ計測機器が保有している公差（回転誤差）の影響と想定される。回転誤差は速度が速くなると誤差は小さくなっている。これは不可視時間の長さによる影響が考えられる。また、計測 20km/h のみ回転誤差が反転しているが、速度の違いによる誤差よりもレーザ計測機器が保有している回転誤差の影響と想定される。なお、計測誤差 0.01m 以上は異常値として削除している。

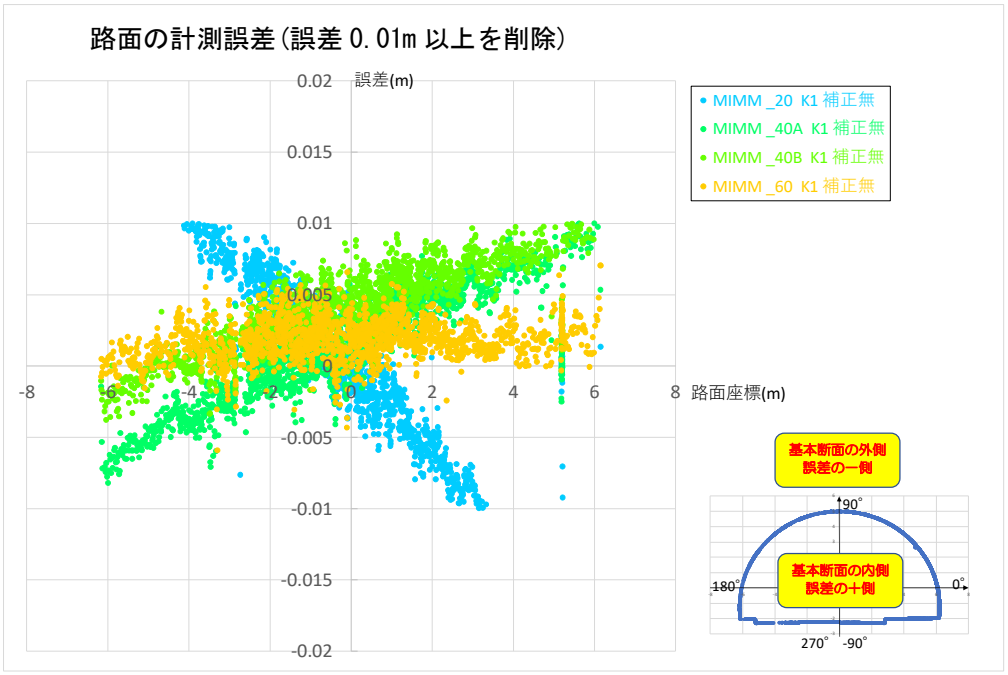


図 4.4.3 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）

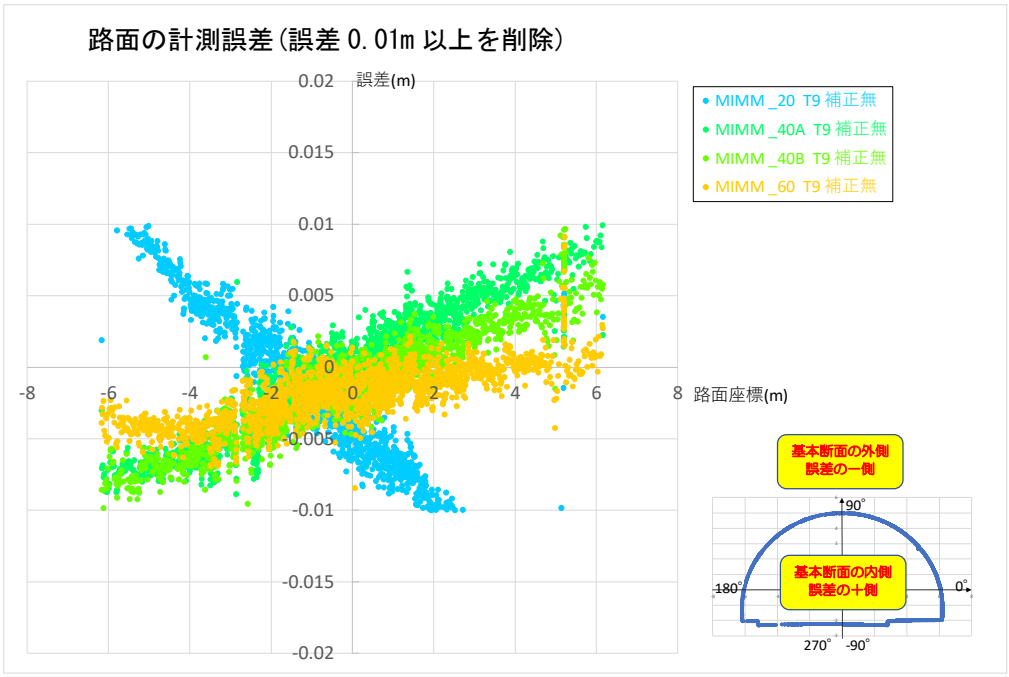


図 4.4.4 T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）

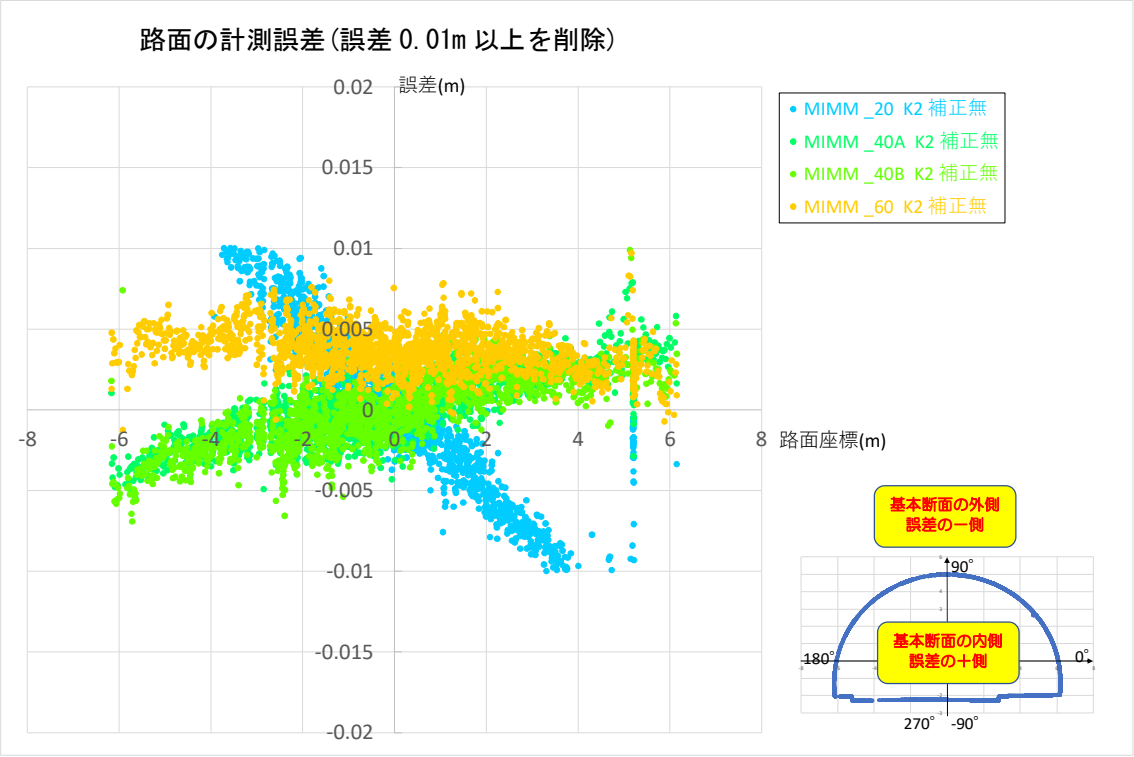


図 4.4.5　K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)

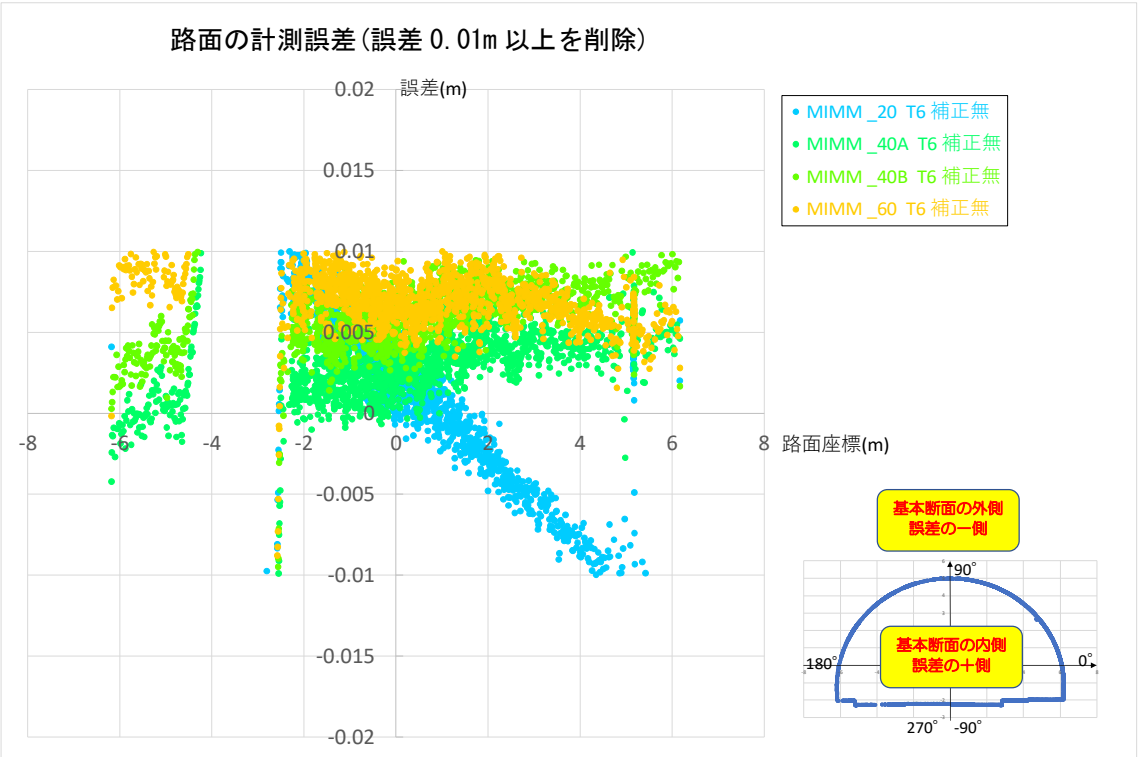


図 4.4.6　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)

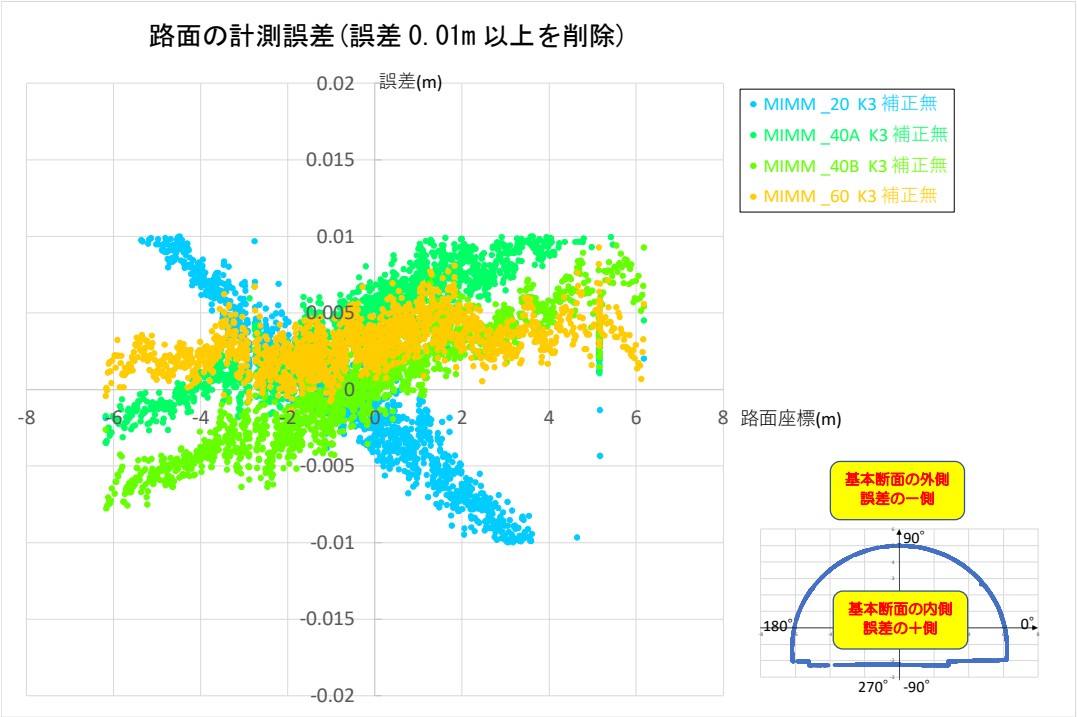


図 4.4.7　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)

(2)　MIMM 計測結果（アーチ）：補正なし

MIMM を用いた計測結果（アーチ部：補正なし）を図 4.4.8～図 4.4.12 に示す。補正なしの場合、速度が速くなると全体的な誤差は小さくなる傾向となった。また、計測速度 20km/h の計測値については、他の計測速度とは傾向は異なっており注意が必要である。なお、計測誤差 0.01m 以上は異常値として削除している。

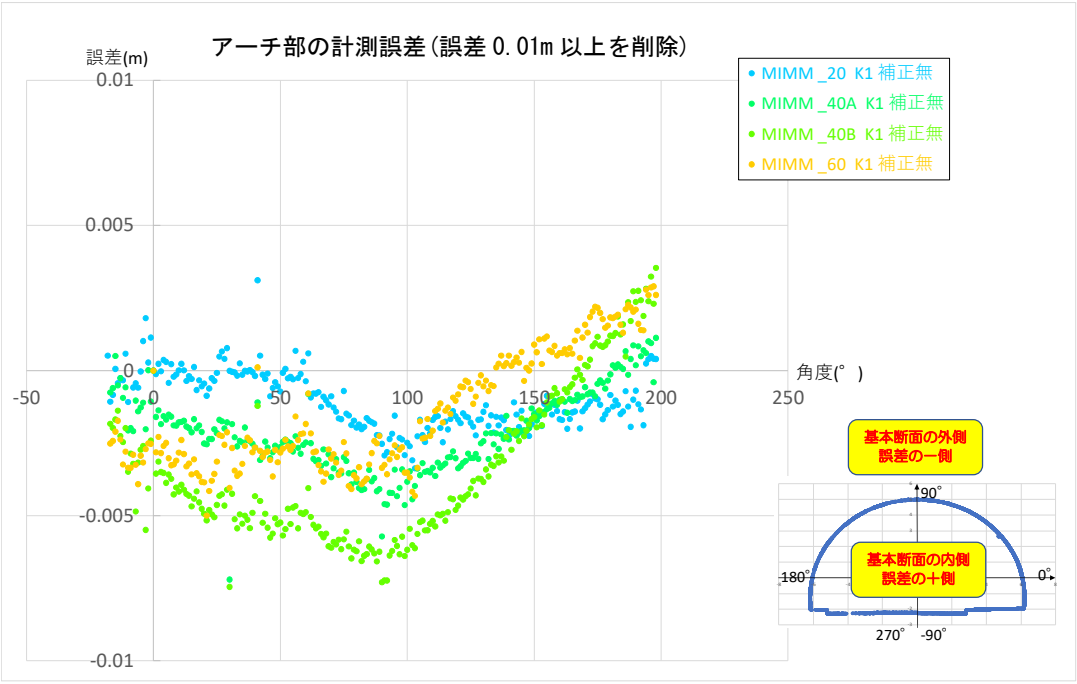


図 4.4.8　K1 地点計測結果(起点坑口から 90m)

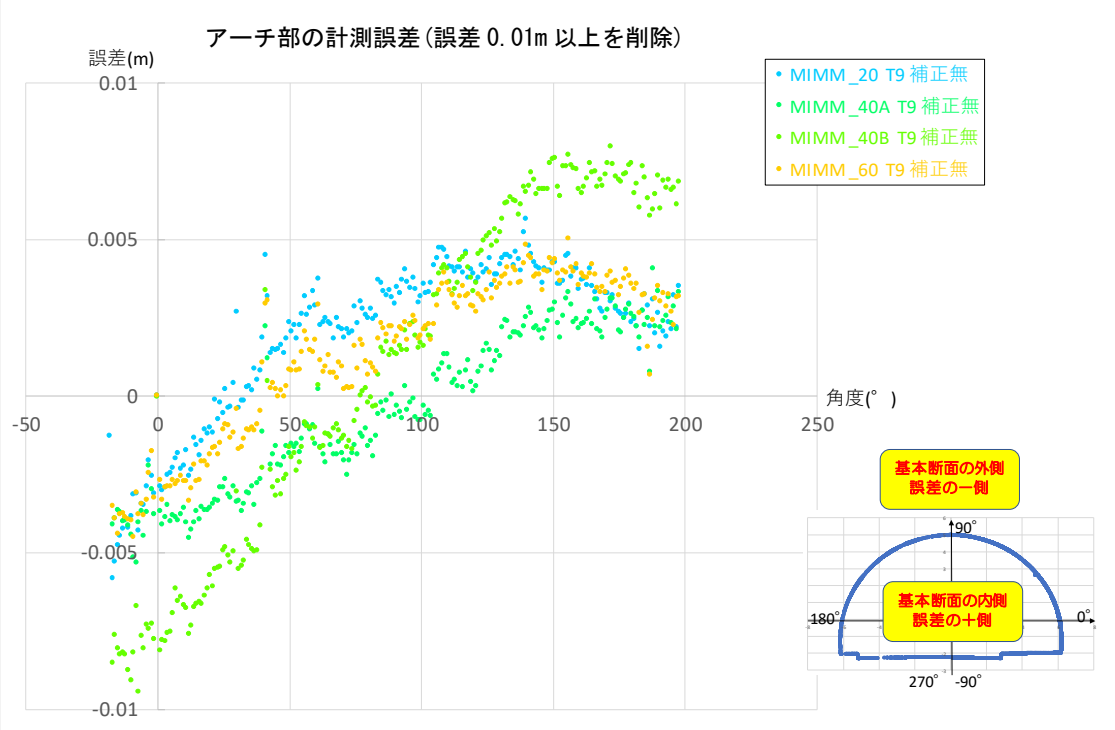


図 4.4.9　T9 地点計測結果(起点坑口から 370m)

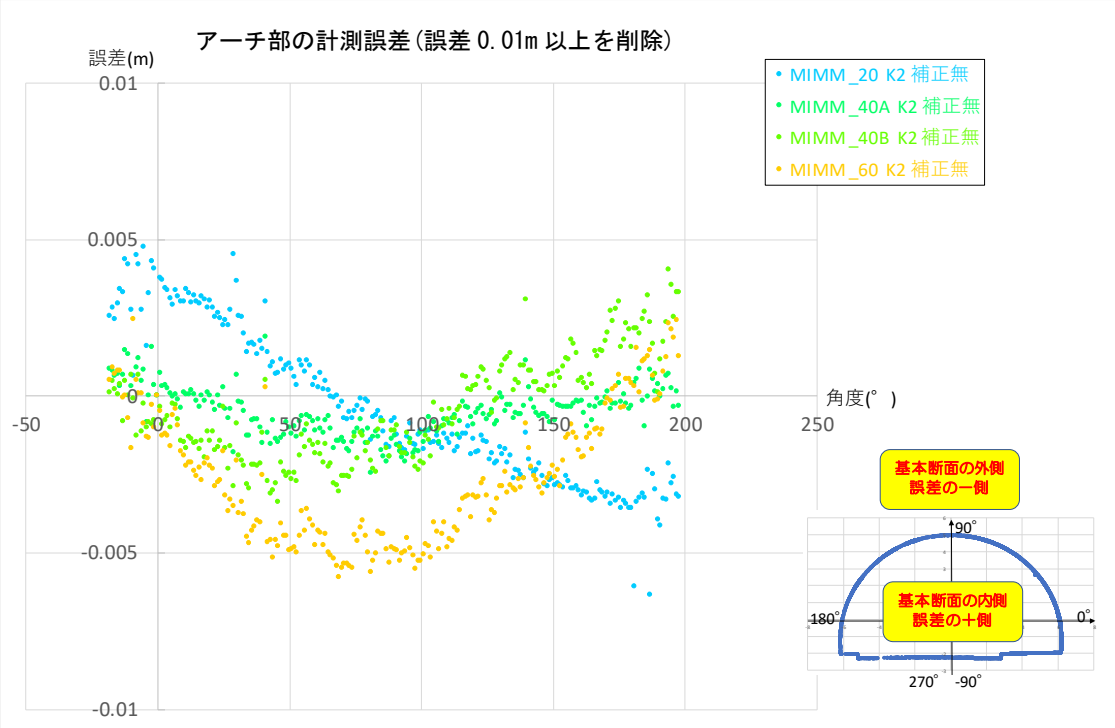


図 4.4.10　K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)

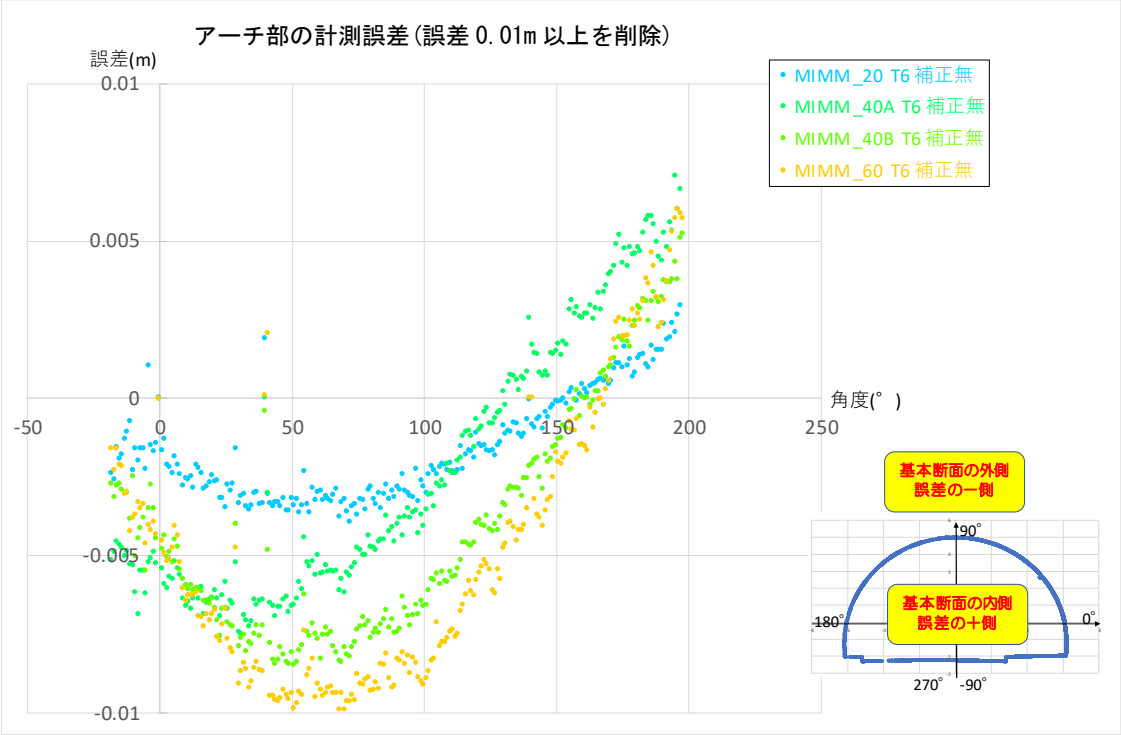


図 4.4.11　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)

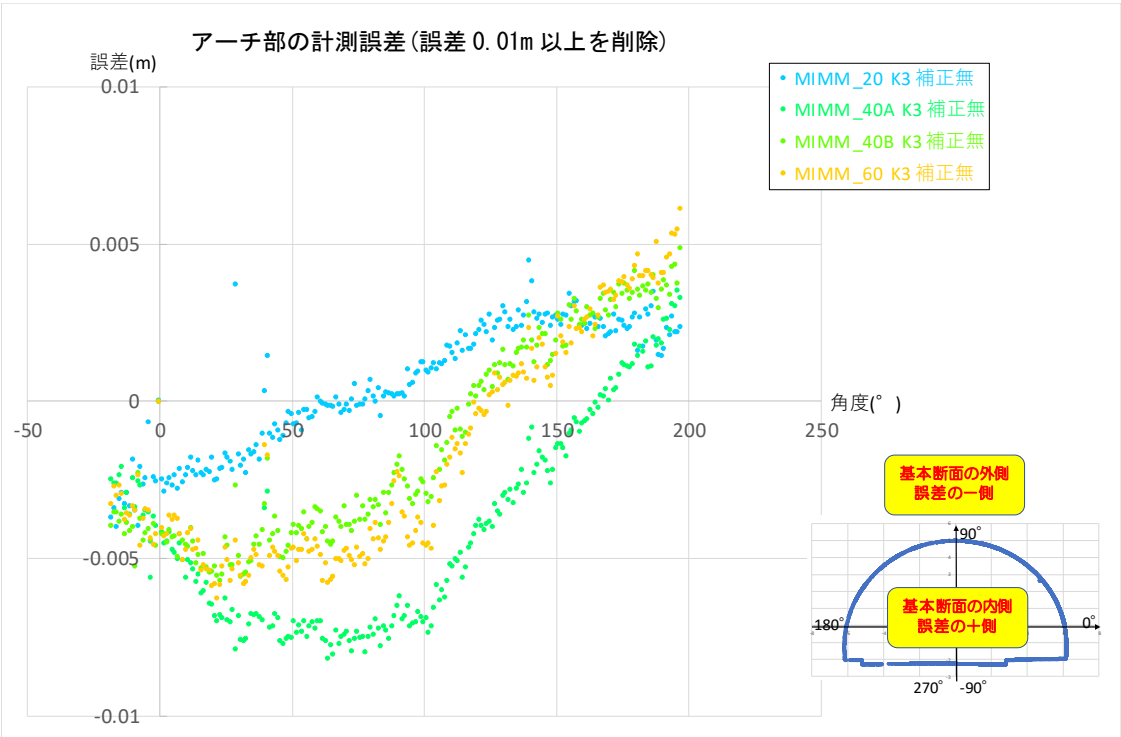
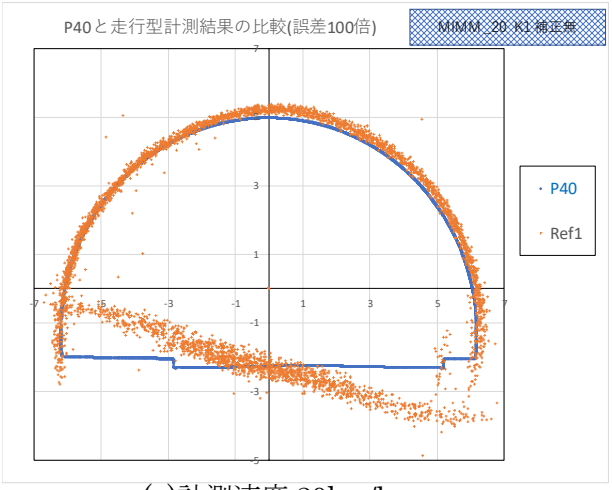


図 4.4.12　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)

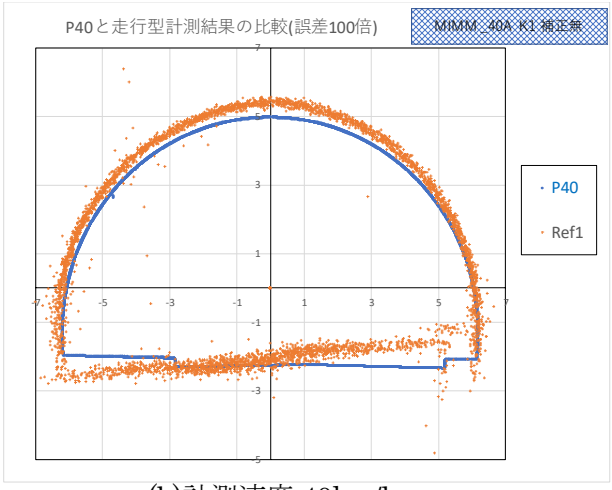
(3) MIMM 計測結果（全体）：補正なし

MIMM を用いた計測結果（全体：補正なし）を図 4.4.13～図 4.4.17 に示す。

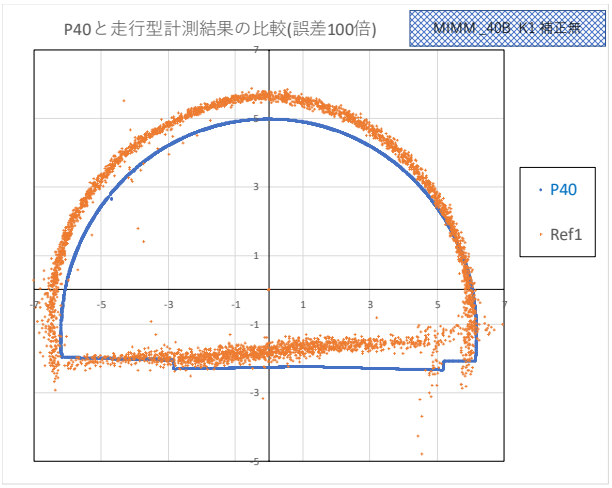
・K1 地点計測結果



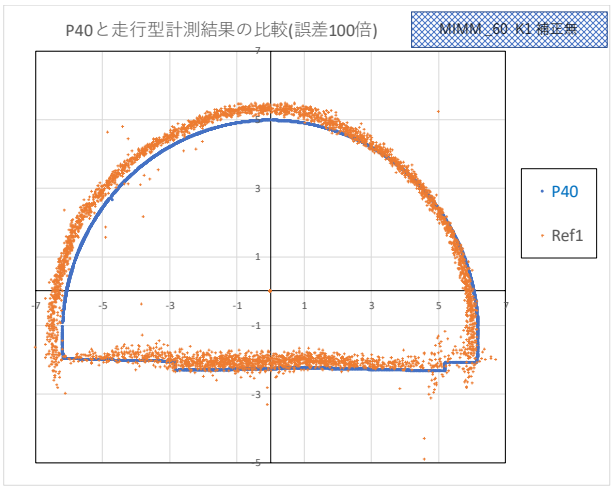
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

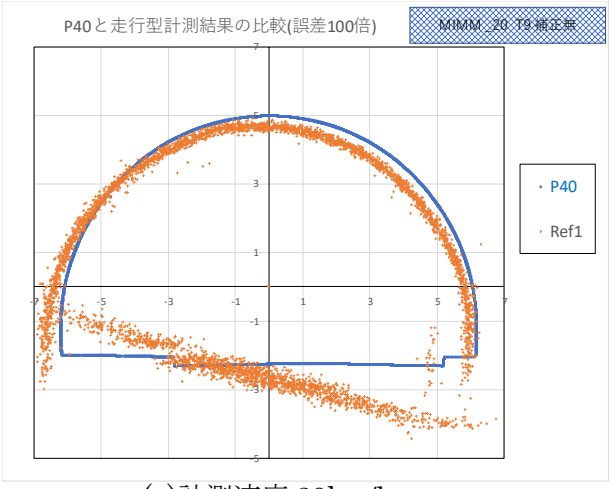


(d)計測速度 60km/h

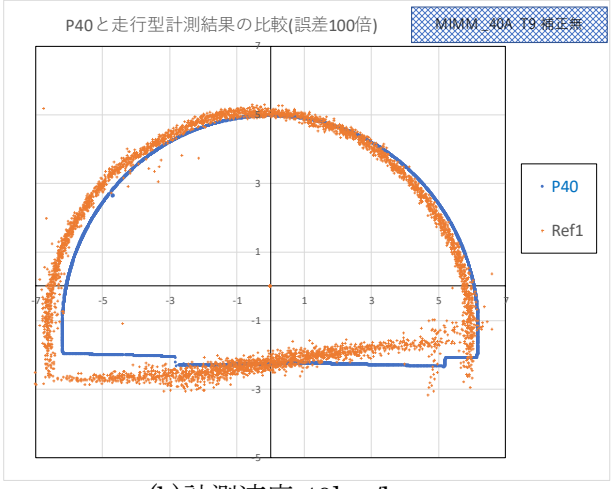
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.13 K1 地点計測結果(起点坑口から 90m)

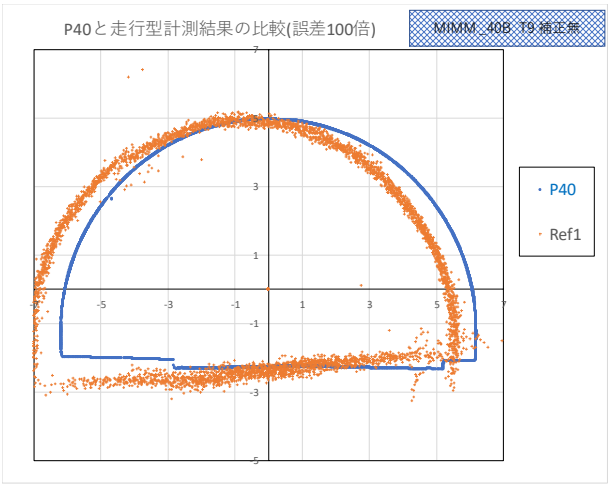
・T9 地点計測結果

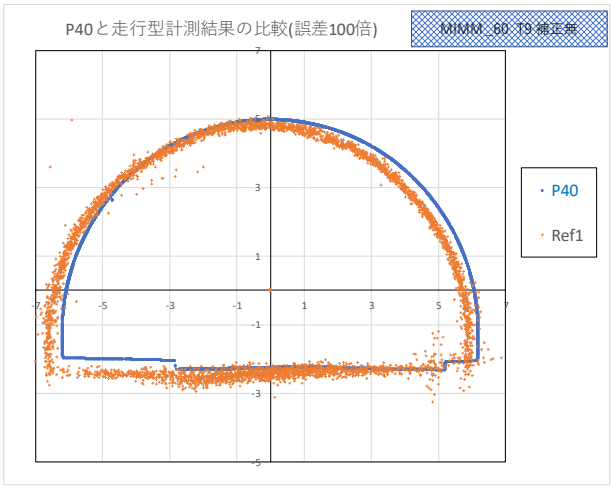


(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h

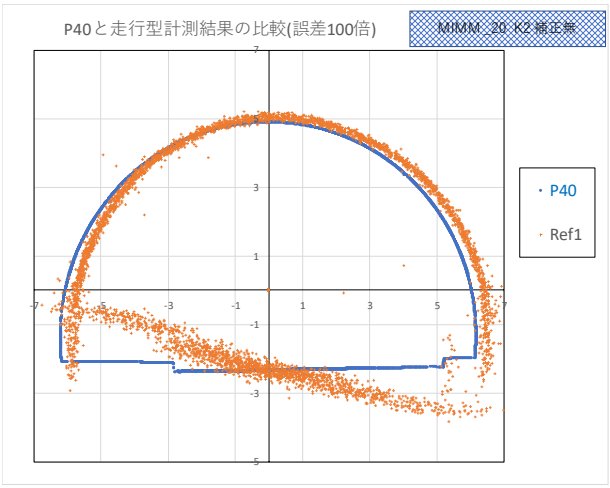




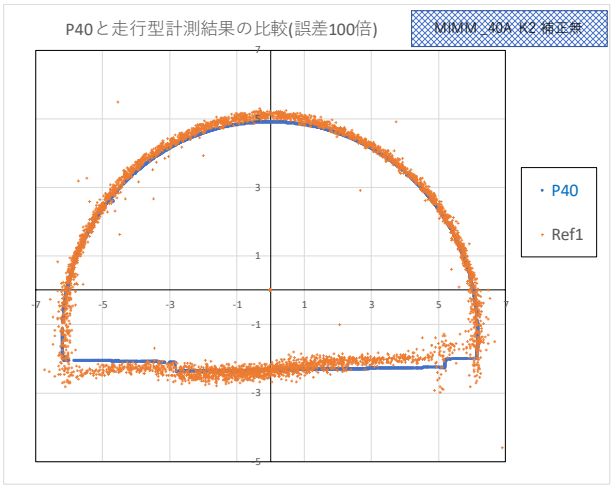
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.14　T9 地点計測結果(起点坑口から 370m)

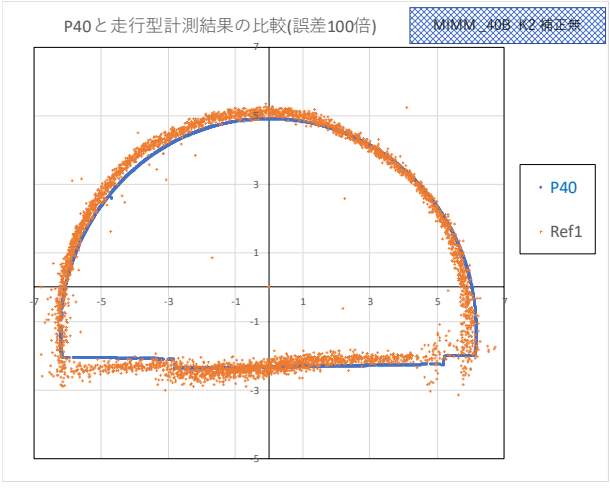
・K2 地点計測結果



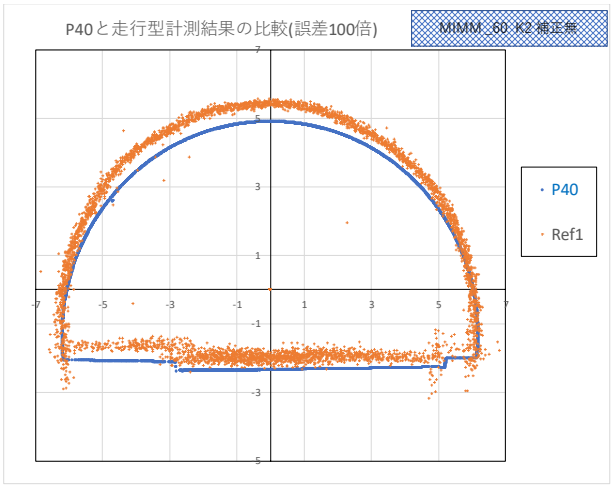
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

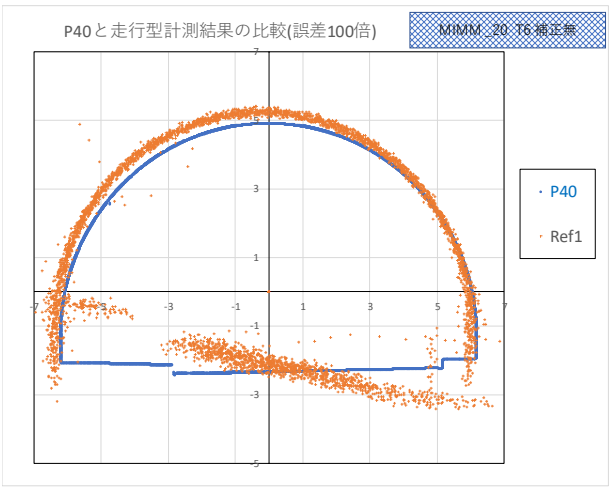


(d)計測速度 60km/h

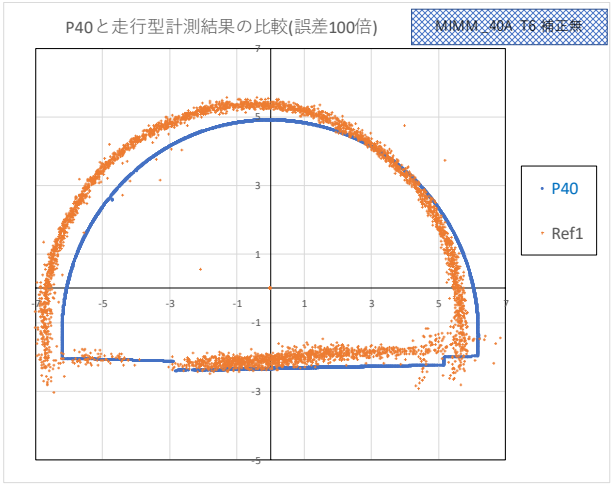
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.15　K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)

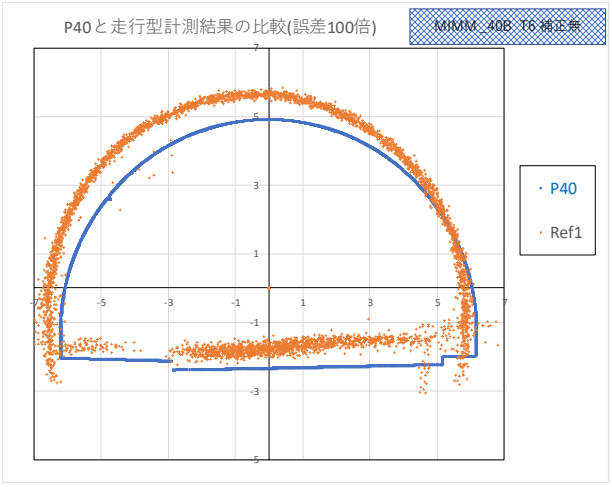
・T6 地点計測結果



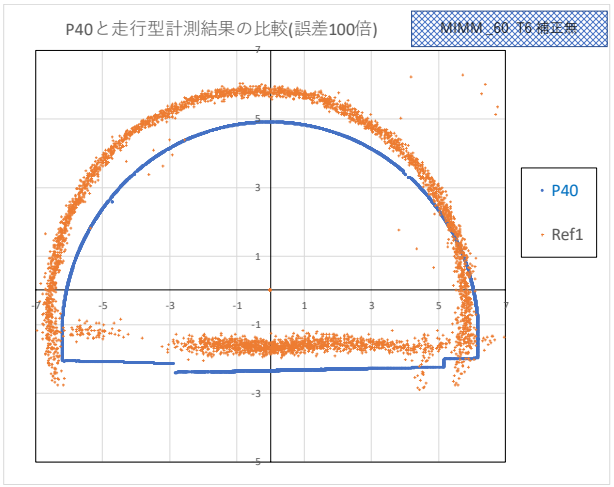
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

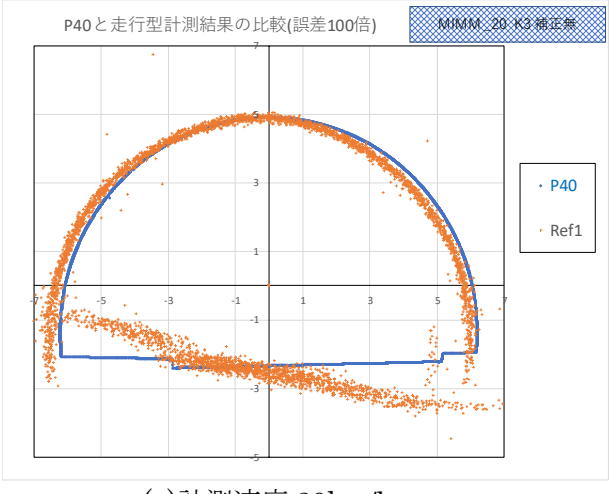


(d)計測速度 60km/h

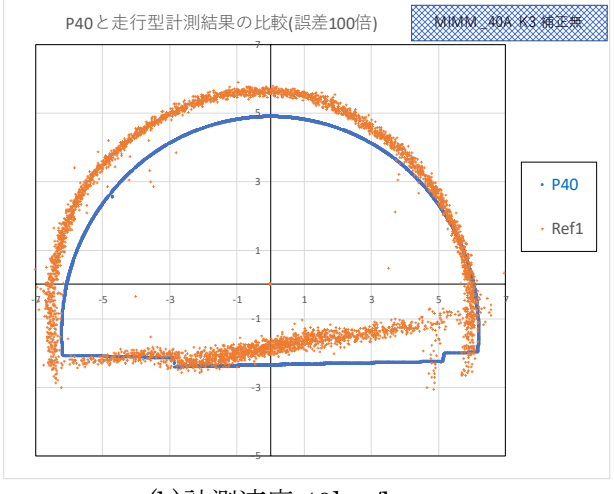
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.16　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)

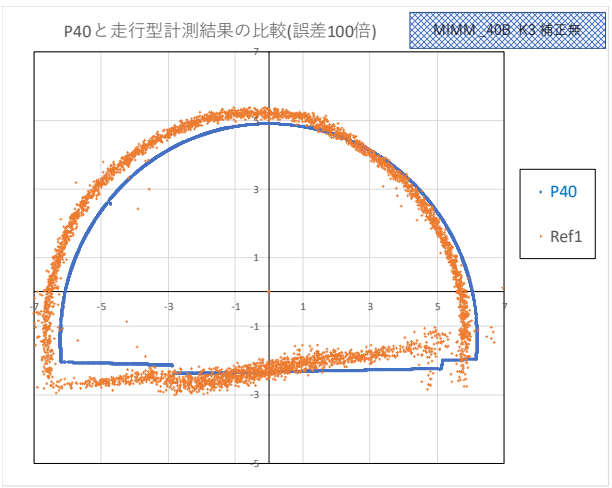
・K3 地点計測結果



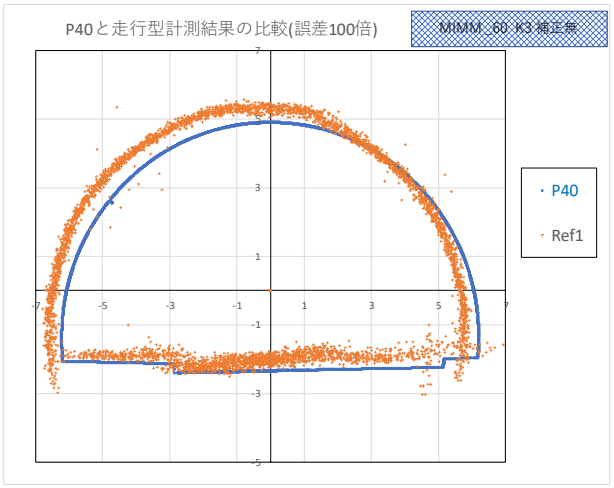
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h



(d)計測速度 60km/h

※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.17　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)

6) Pegasus 計測結果

各計測断面における計測結果を以下に示す。

(1) Pegasus 計測結果（路面）：補正なし

Pegasus を用いた計測結果（路面：補正なし）を図 4.4.18～図 4.4.22 に示す。MIMM と比較して速度差による誤差は小さい結果となったが、一部計測結果（K2 地点）はピッチング（前後方向の誤差）が発生している可能性はある。また、計測 40km/h のみ回転誤差が反転している。これは、速度の違いによる誤差よりもレーザ計測機器が保有している回転誤差の影響と想定される。なお、計測誤差 0.01m 以上は異常値として削除している。

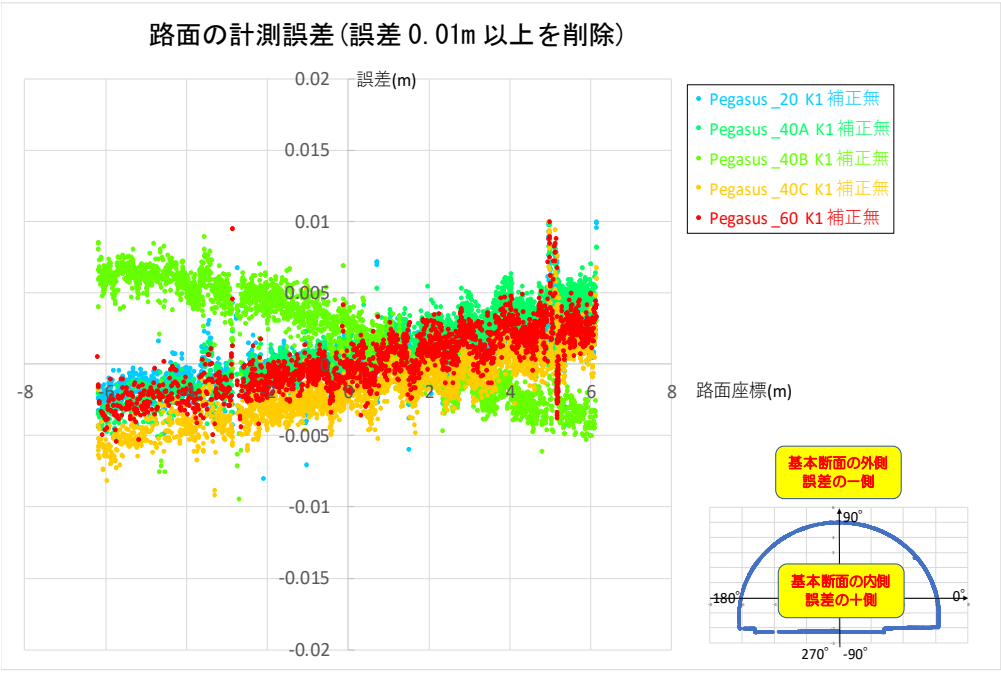


図 4.4.18　K1 地点計測結果(起点坑口から 90m)

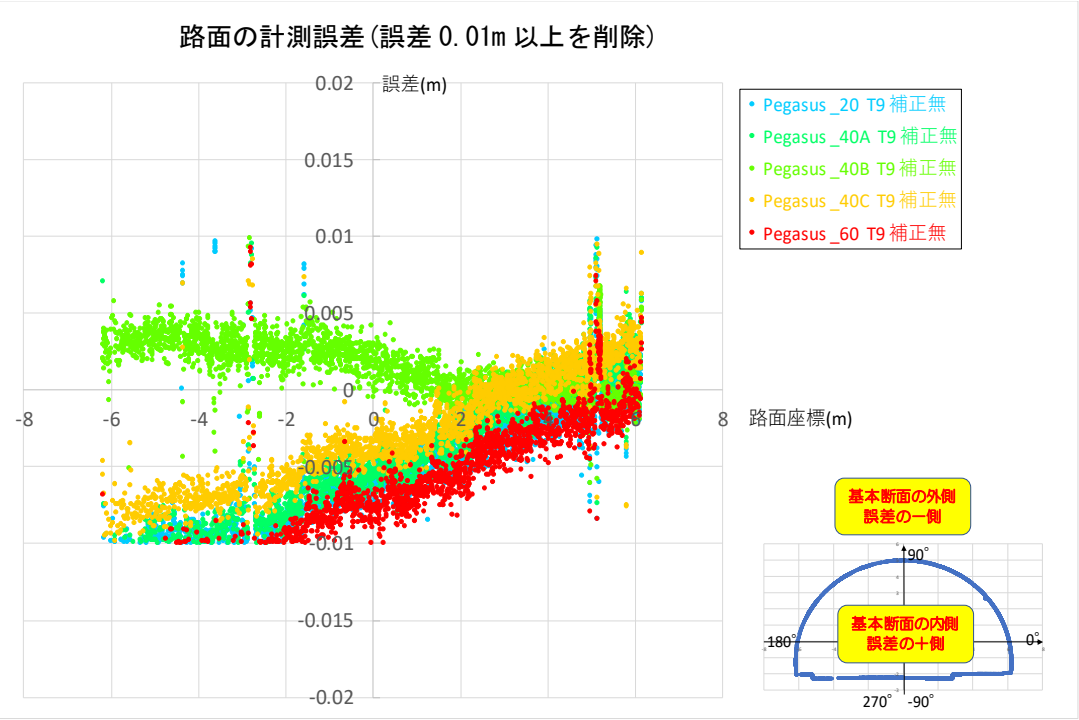


図 4.4.19　T9 地点計測結果(起点坑口から 370m)

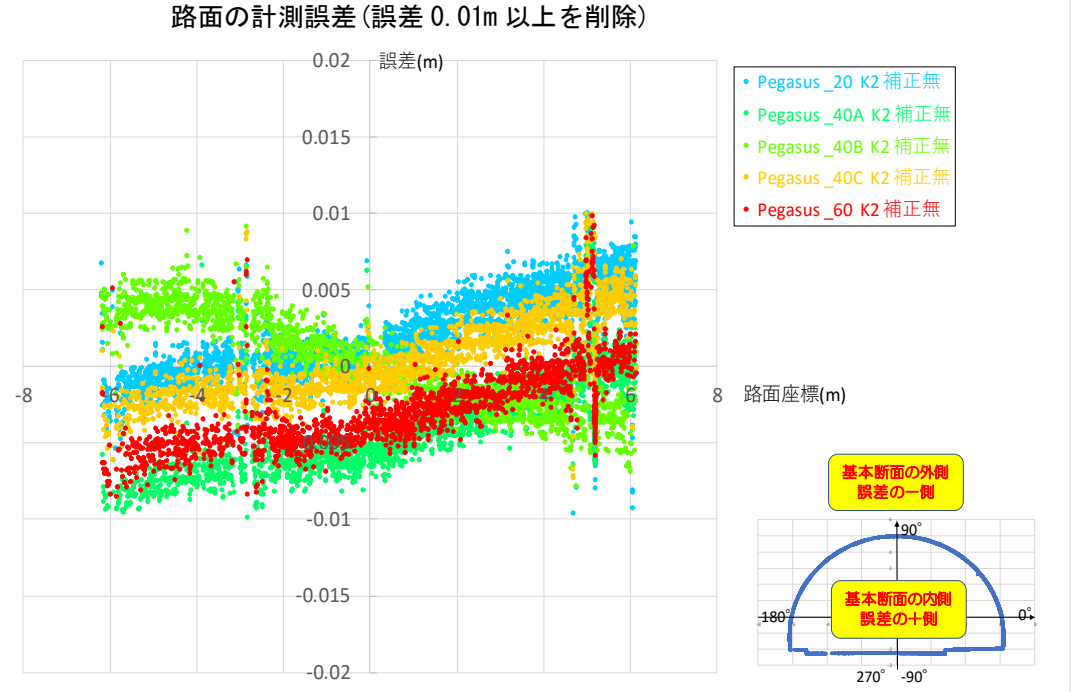


図 4.4.20　K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)

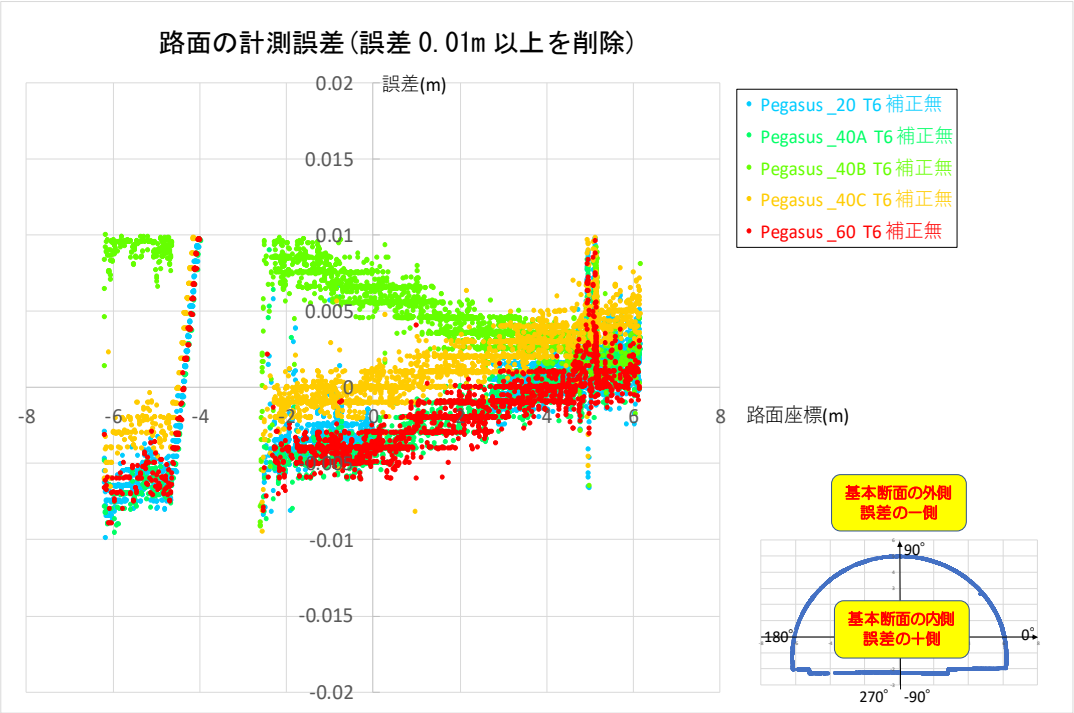


図 4.4.21　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)

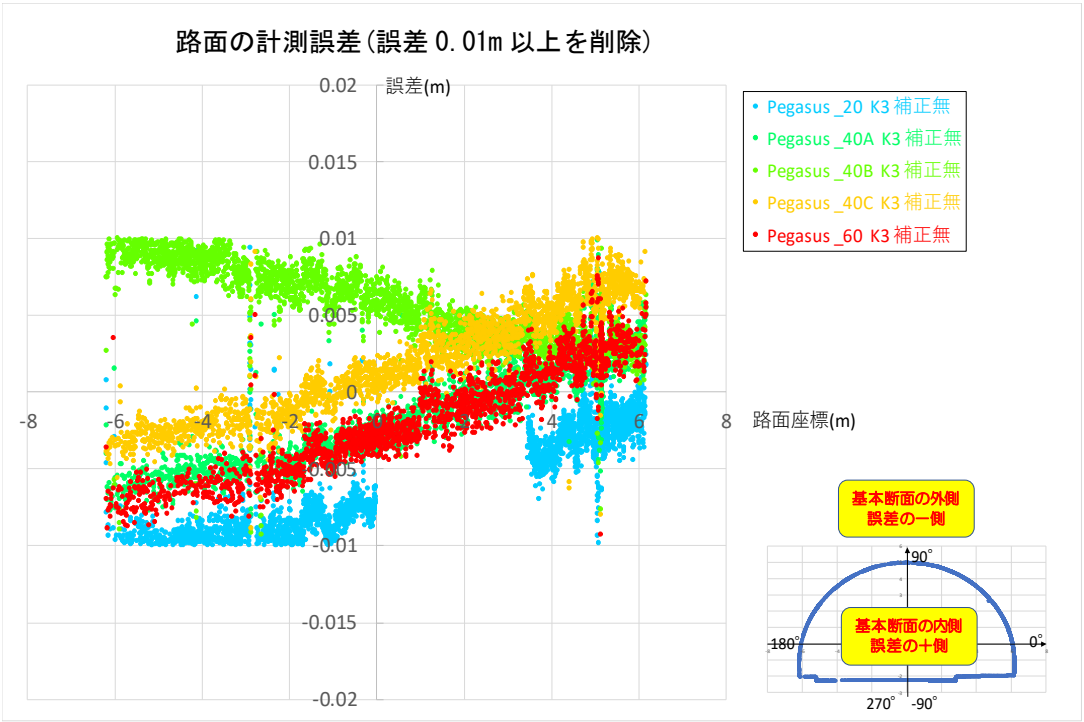


図 4.4.22　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)

(2) Pegasus 計測結果（アーチ）：補正なし

Pegasus を用いた計測結果（アーチ部：補正なし）を図 4.4.23～図 4.4.27 に示す。補正なしの場合、速度が速くなると全体的な誤差は小さくなる傾向となった。全体的な傾向として、ピッチング（前後方向の誤差）が発生している可能性はある。なお、計測誤差 0.01m 以上は異常値として削除している。

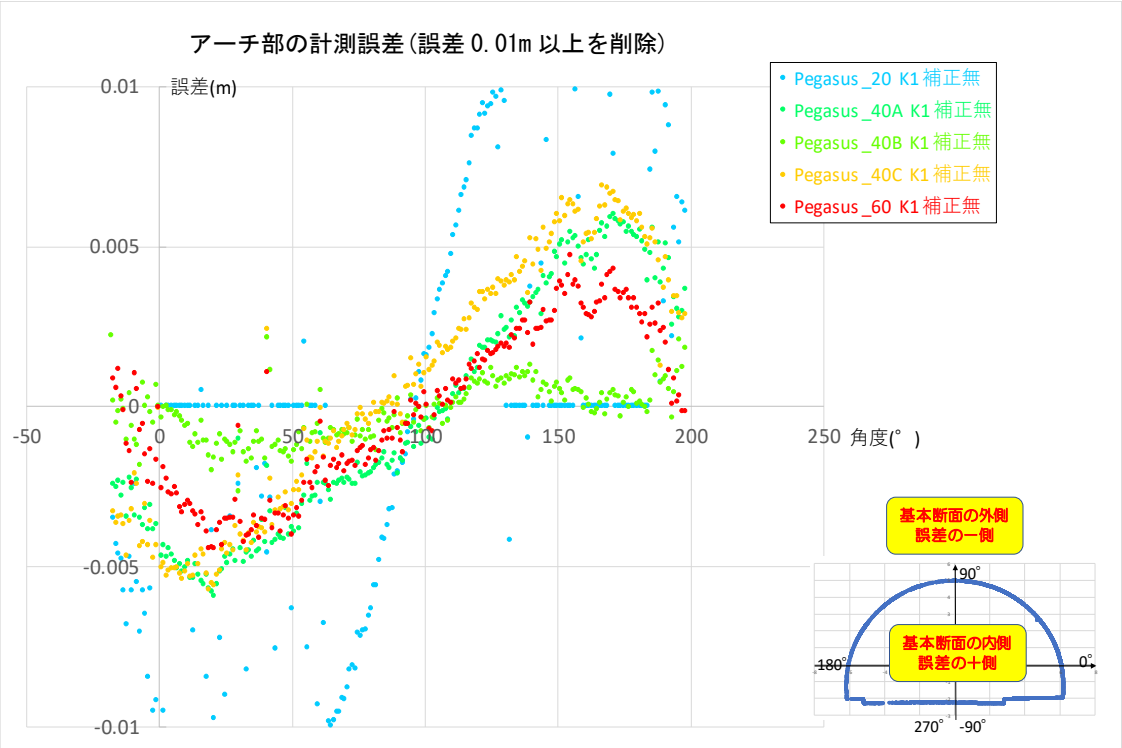


図 4.4.23　K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）

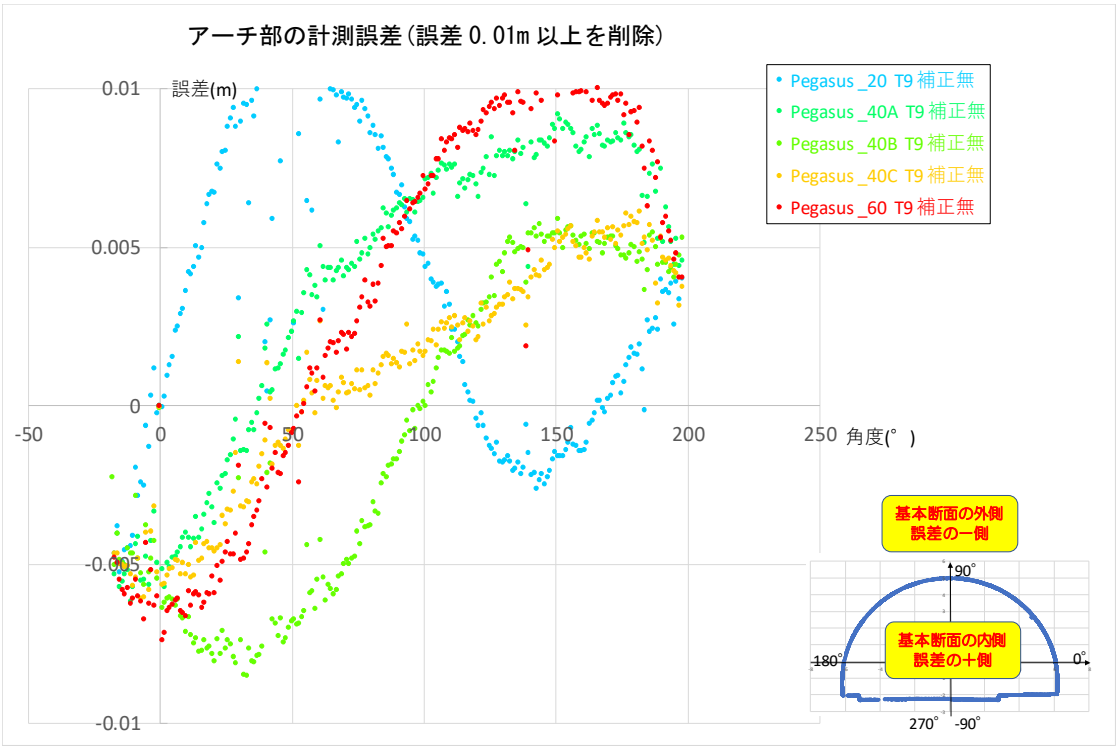


図 4.4.24　T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）

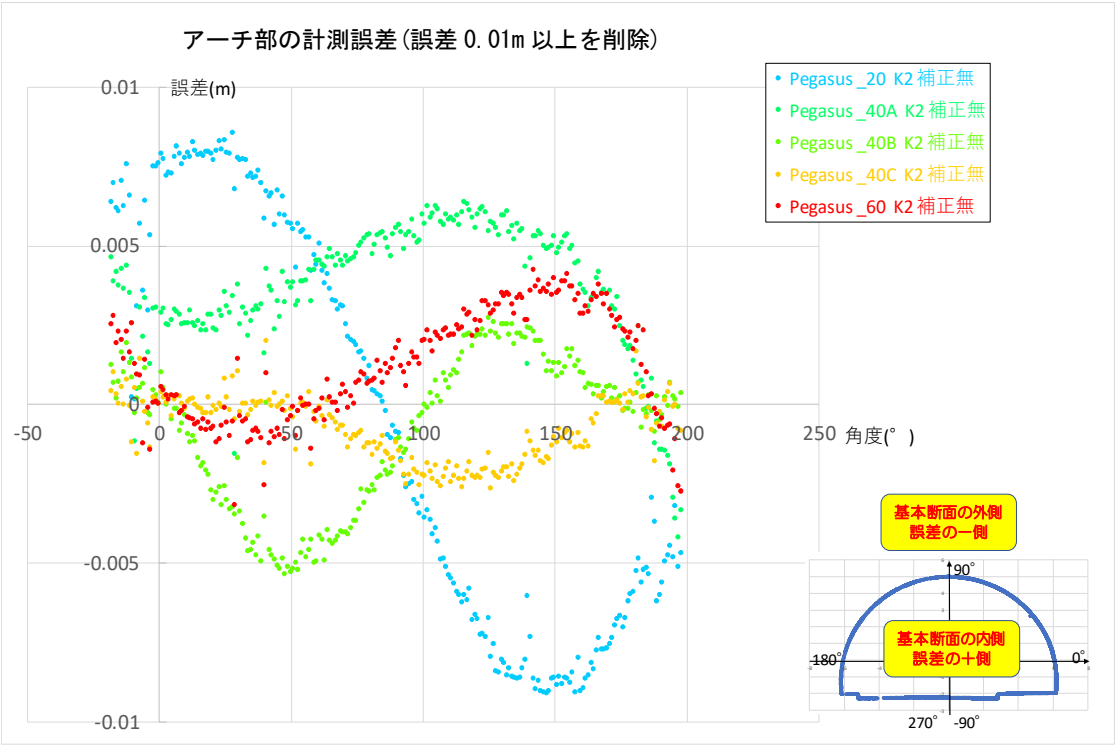


図 4.4.25　K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)

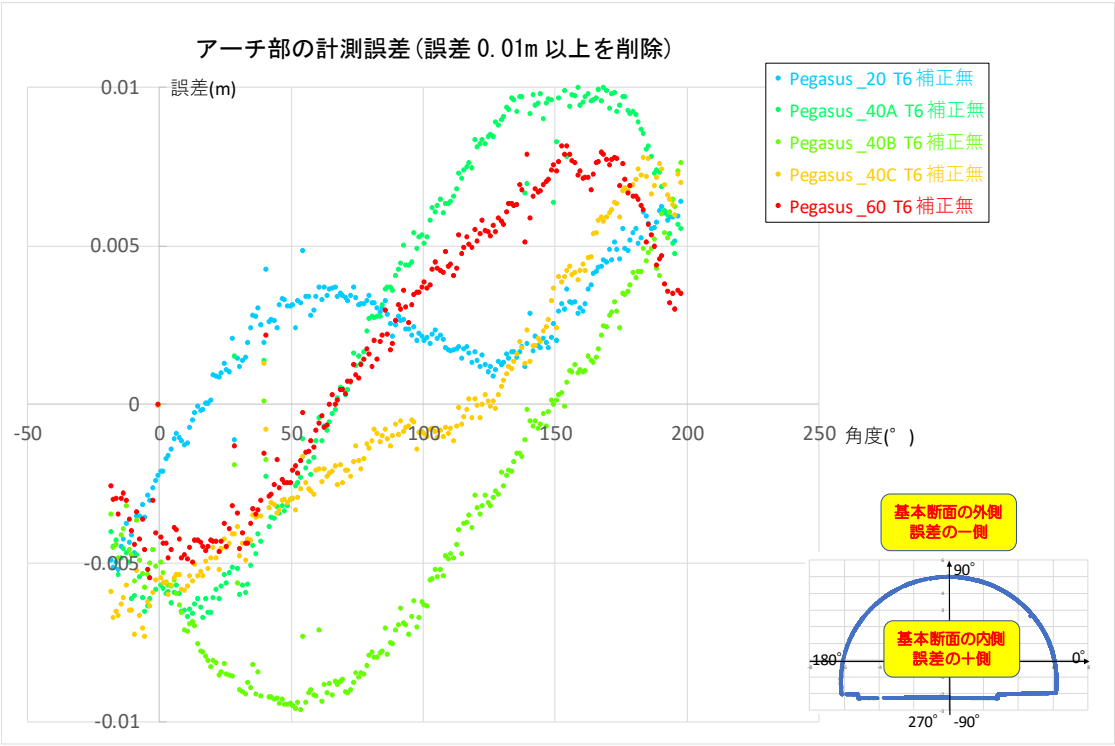


図 4.4.26　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)

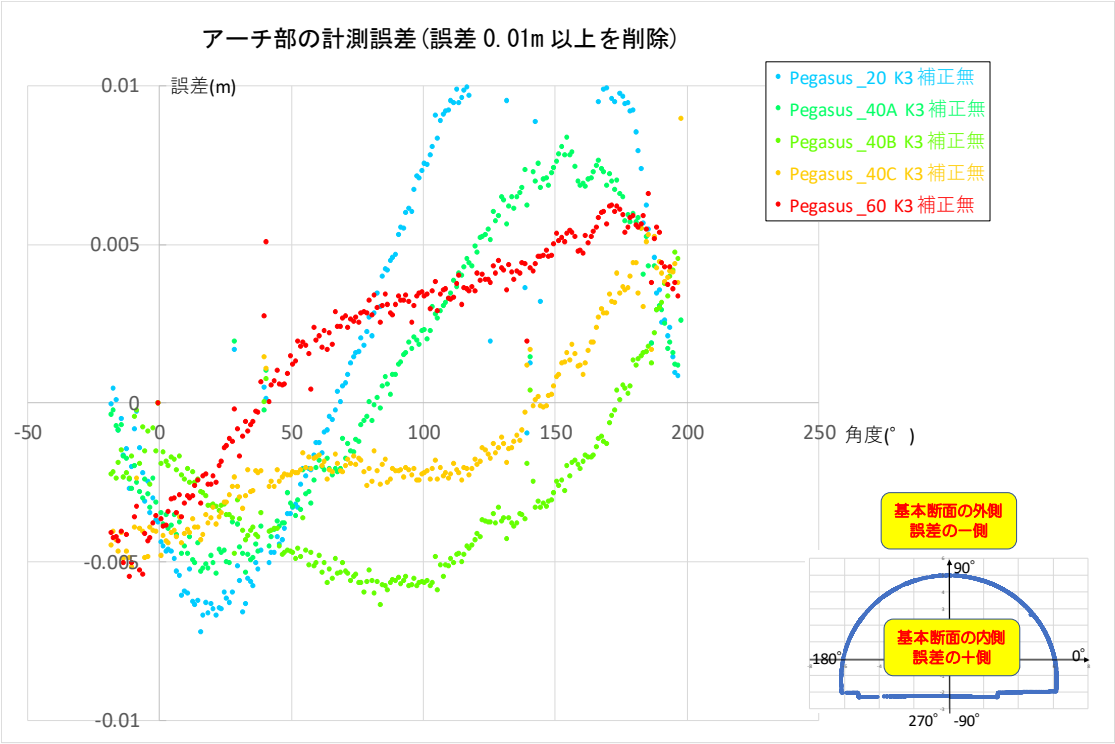
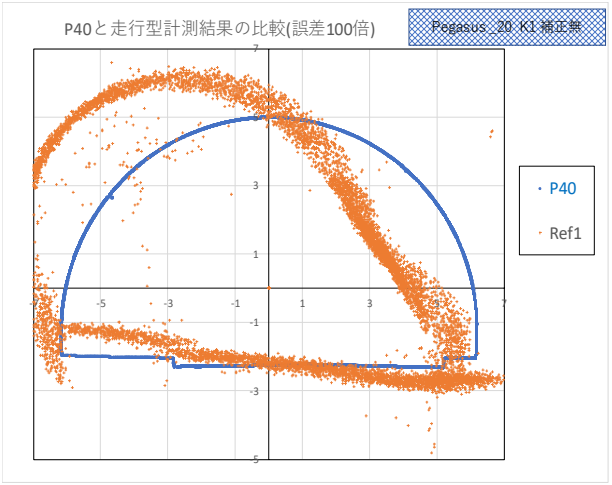


図 4.4.27　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)

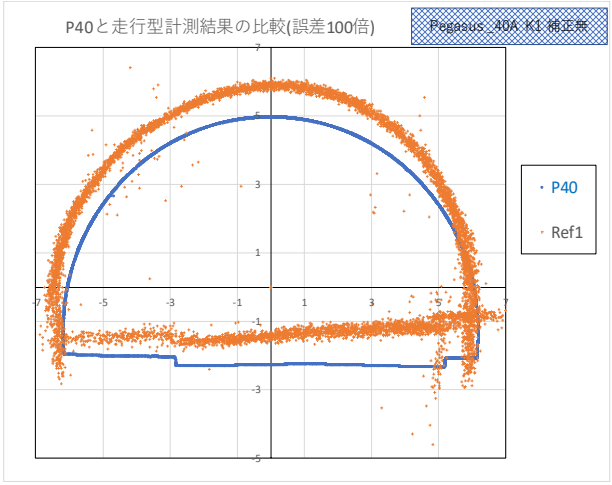
(3) Pegasus 計測結果（全体）：補正なし

Pegasus を用いた計測結果（全体：補正なし）を図 4.4.28～図 4.4.32 に示す。補正なしの場合、速度が速くなると回転誤差は小さくなる傾向となった。また、計測速度 20km/h の計測値については、他の計測速度とは傾向は異なっており注意が必要である。なお、計測誤差 0.01m 以上は異常値として削除している。

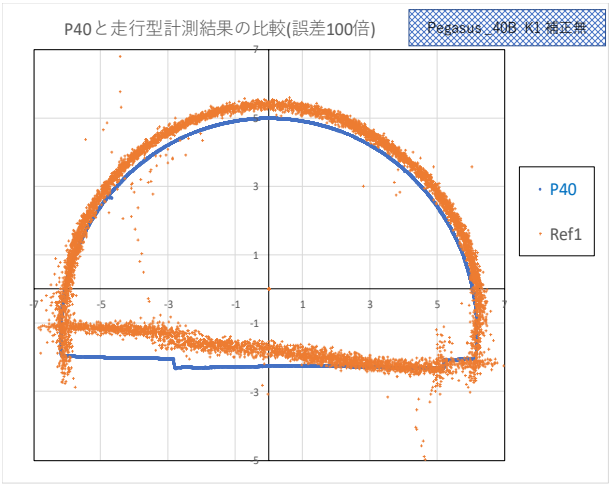
(4) K1 地点計測結果



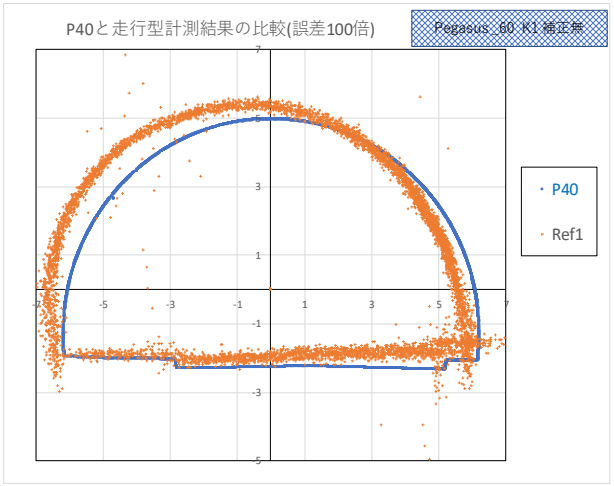
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

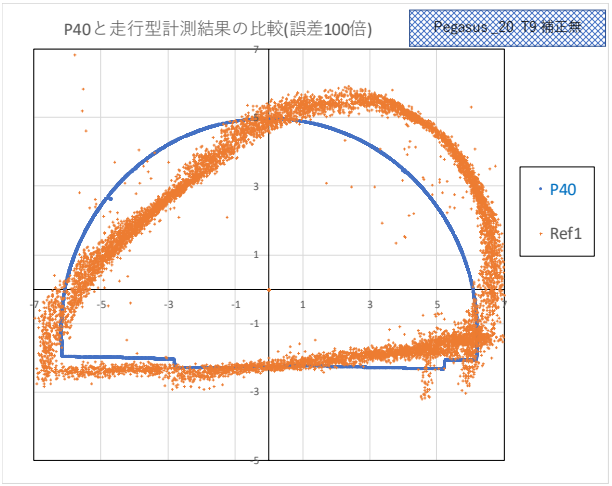


(d)計測速度 60km/h

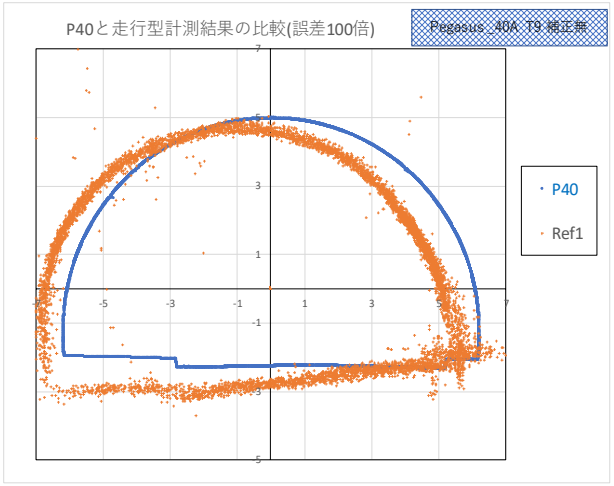
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.28　K1 地点計測結果(起点坑口から 90m)

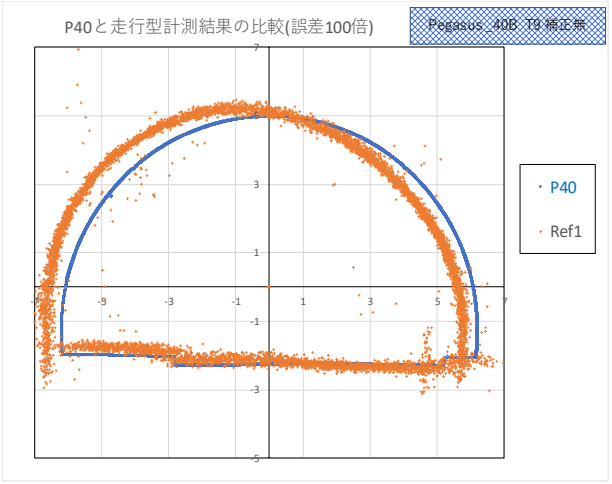
(5) T9 地点計測結果



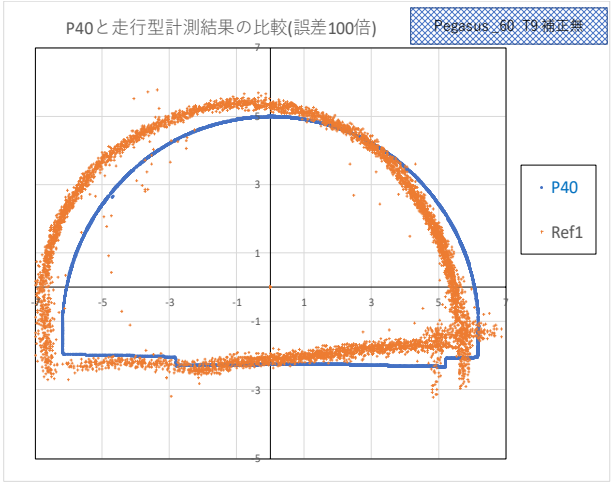
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

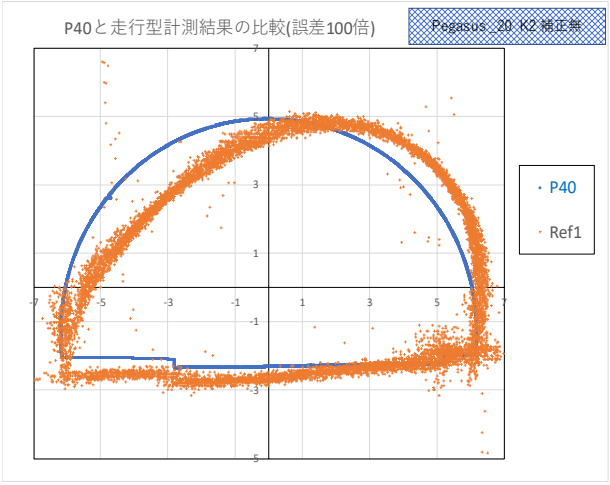


(d)計測速度 60km/h

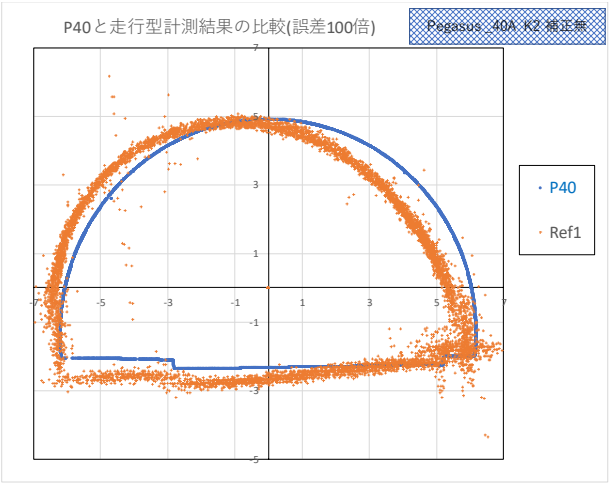
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.29　T9 地点計測結果(起点坑口から 370m)

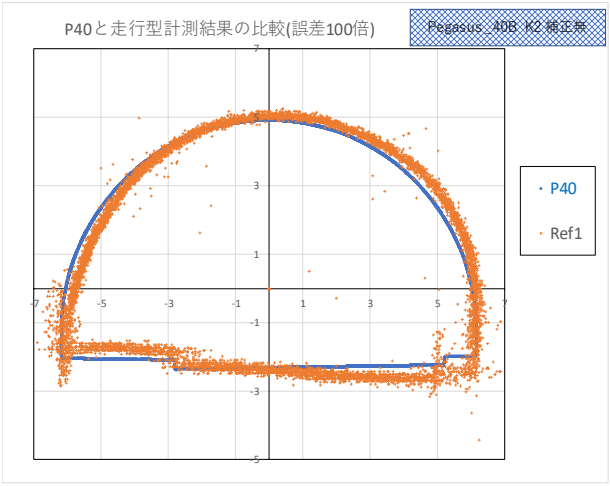
(6) K2 地点計測結果



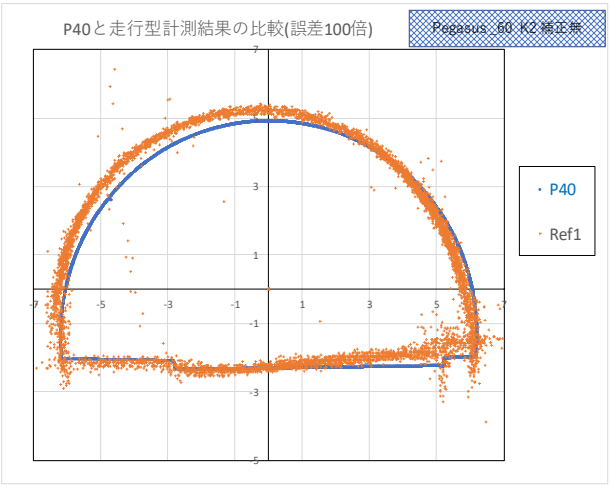
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

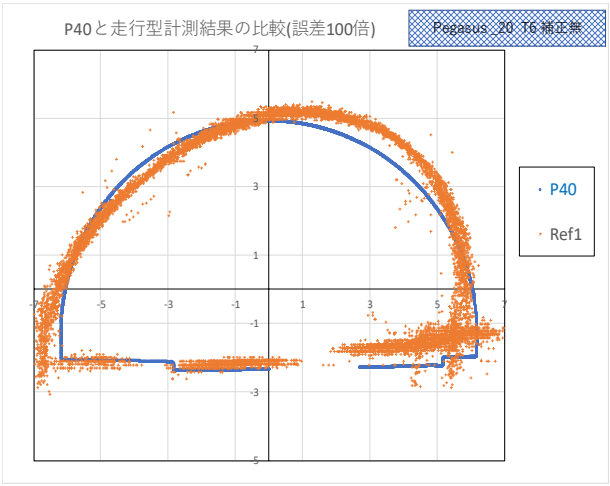


(d)計測速度 60km/h

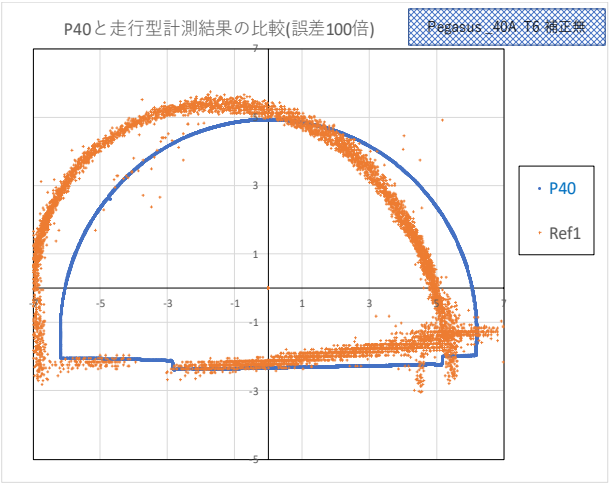
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.30 K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)

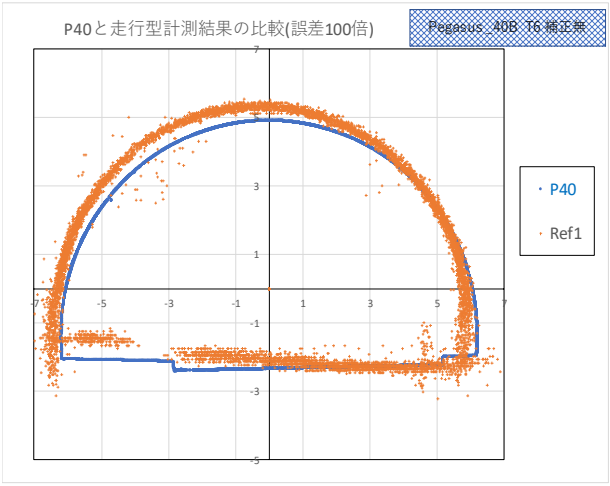
(7) T6 地点計測結果



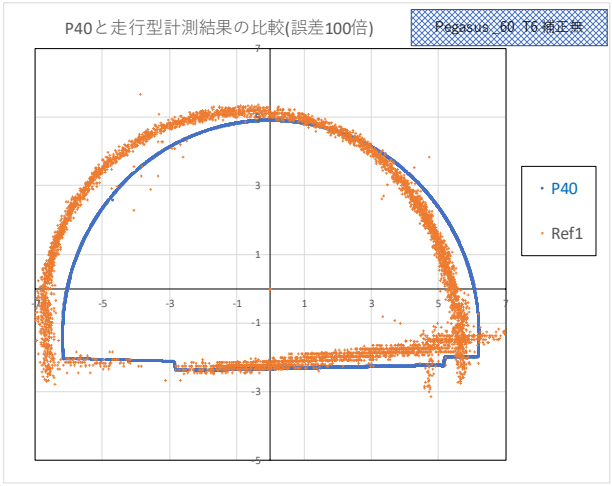
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h

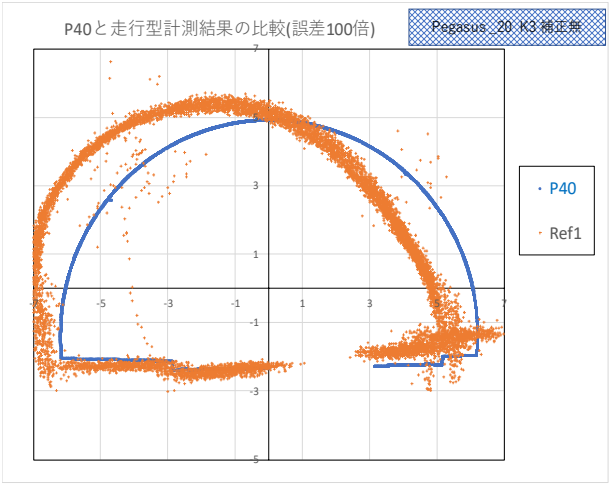


(d)計測速度 60km/h

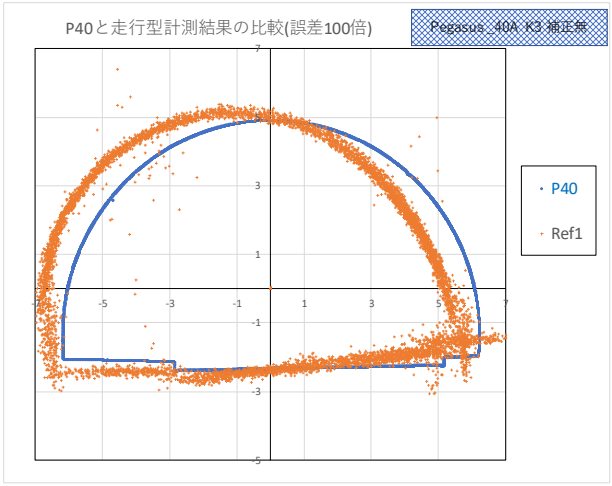
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.31　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)

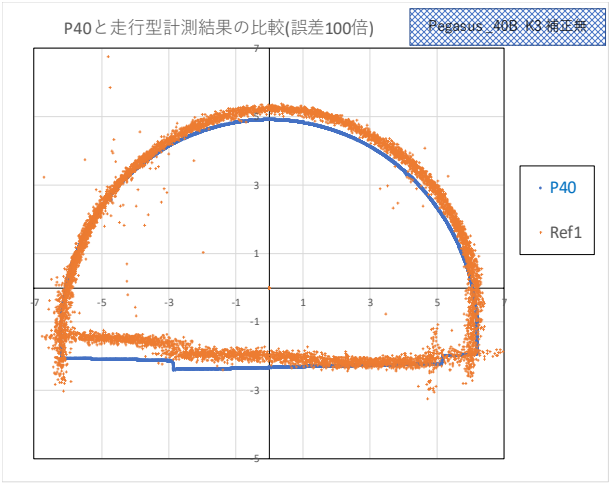
(8) K3 地点計測結果



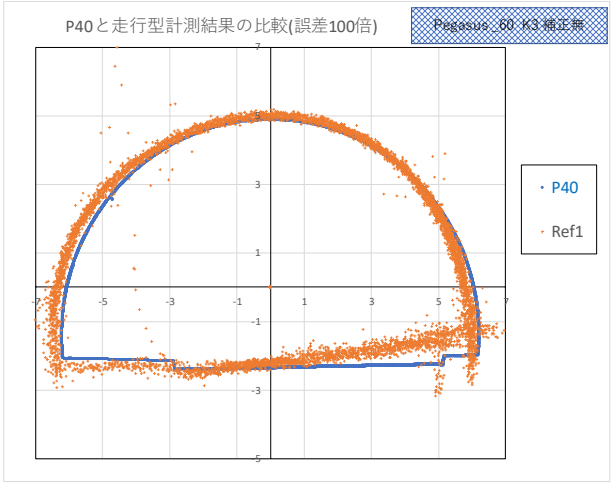
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h



(c)計測速度 40km/h



(d)計測速度 60km/h

※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.32　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)

7)計測上の留意点

計測速度に関する留意点を以下に示す。

① 計測速度が遅いと計測誤差は大きくなる傾向を示した。これは、衛星不可視時間が長くなったためと想定される。このことから、計測速度は 40km/h 以上が望ましい。

② 計測機器によっては、計測データに捻れ（ピッチング）を生じる恐れがあることから、注意が必要である。

③ 計測時期（衛星補足数）によっては、レーザ計測器が保有している公差により、回転誤差を生じる可能性がある。また、その回転誤差（回転方向）は一定しない。

④ 同一計測機器を用いて 2 時期を比較する場合、計測速度は同一とした方が計測誤差は近似する傾向にある。

4.4.2 再現性の検討

1) 再現性の検討について

計測時期が異なる場合の再現性の検討については、計測速度を一定とした場合の計測誤差について検証を行う。計測速度については、標準的な計測速度を想定し 40km/h を適用した。に検証ケース一覧表を**表 4.4.12** に示す。

表 4.4.12 検証ケース一覧表

計測機器	計測時期	ケース番号	計測速度
MIMM	R1.11.22	CASE①	40km/h①
		CASE②	40km/h②
Pegasus(斜角)	R1.11.22	CASE③	40km/h①
		CASE④	40km/h②
		CASE⑤	40km/h③
Pegasus(90°)	R2.11.19～20	CASE⑥	40km/h①
		CASE⑦	40km/h②
		CASE⑧	40km/h③

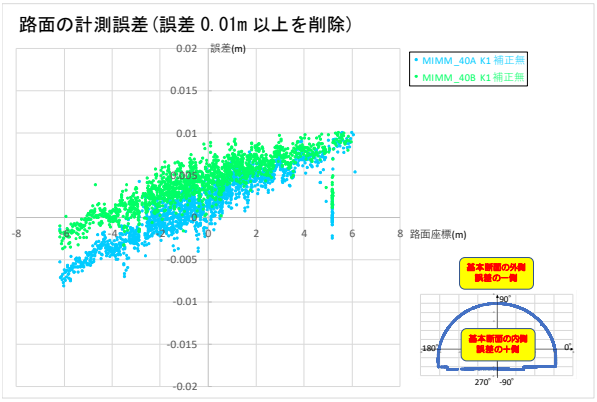
2) 再現性の検証結果

(1) 速度を一定とした場合の再現性について

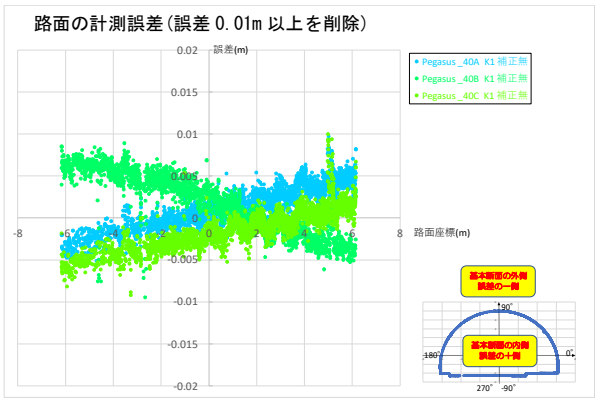
計測速度を一定（平均的な速度として 40km/h による比較）とした場合の計測器別の計測誤差を図 4.4.33～図 4.4.44 に示す。各計測装置の誤差傾向は類似しており、各計測装置の計測値の再現性は高いものと判断できる。なお、令和２年の計測結果は、令和元年と比較して回転誤差が小さくなっており、衛星受信状態が異なっていることが要因の一つと考えられる。

※令和２年度の Pegasus 計測誤差値は計測値の移動平均を用いて算出している。

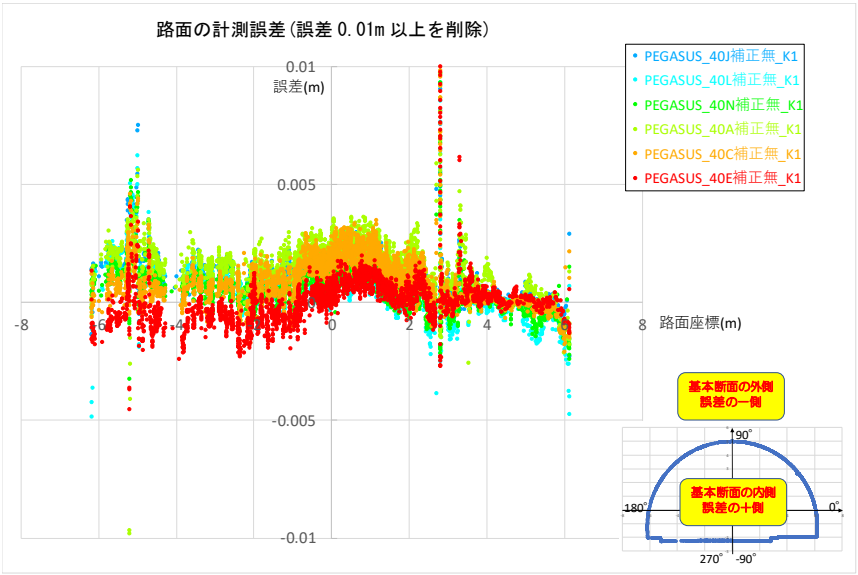
(2) K１地点計測結果



(a)MIMM 計測結果(令和元年)CASE ①～②

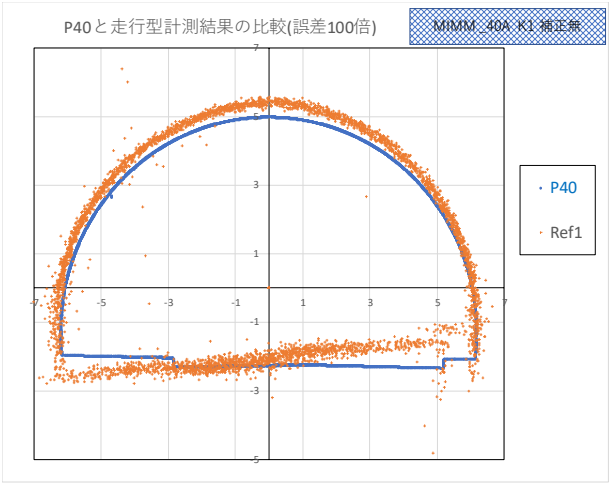


(b)Pegasus 計測結果(令和元年) CASE③～⑤

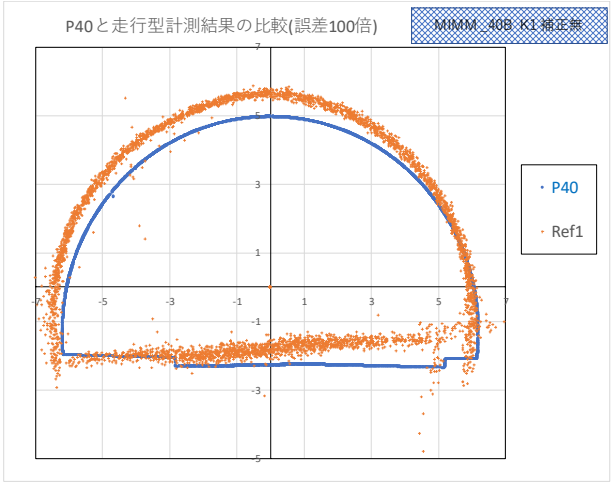


c)Pegasus 計測結果(令和２年) CASE⑥～⑧

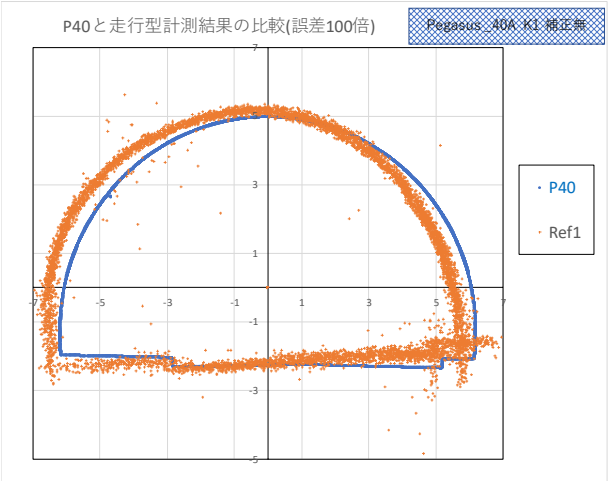
図 4.4.33 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その１



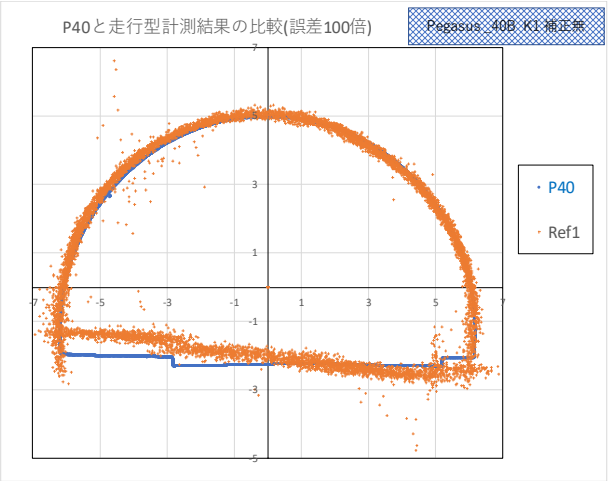
(a)MIMM 計測結果(R1.11.22)その１



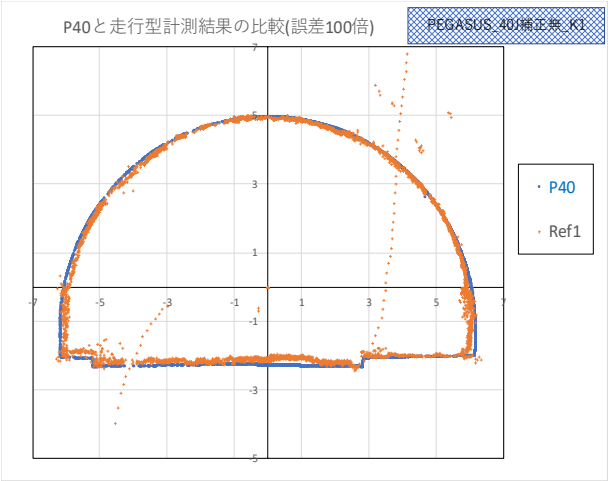
(b) MIMM 計測結果(R1.11.22)その２



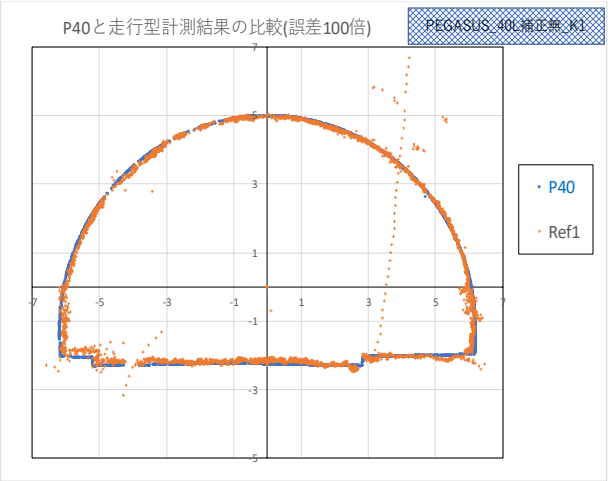
(c)Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 1



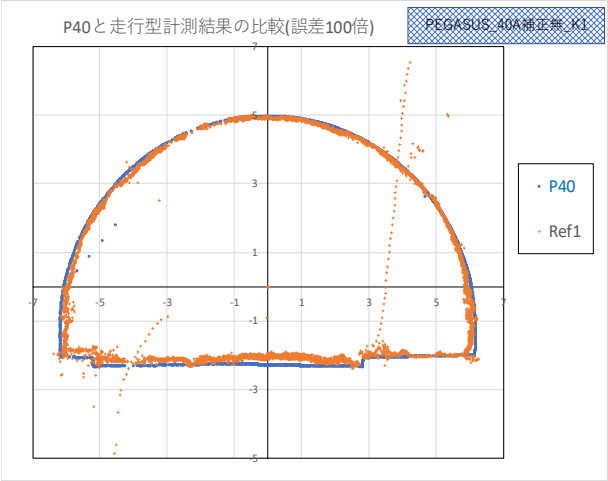
(d) Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 2



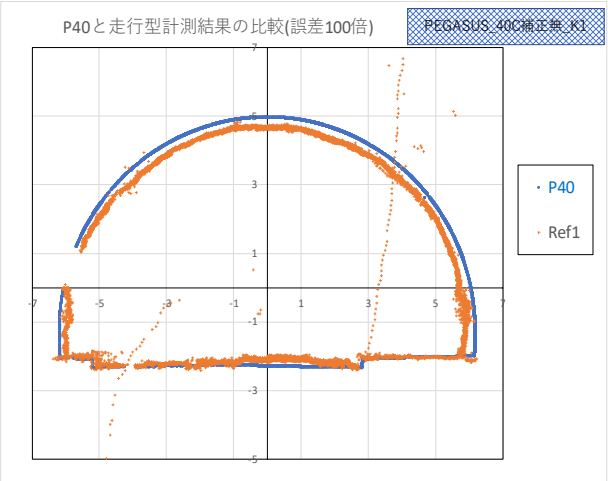
(e)Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 1



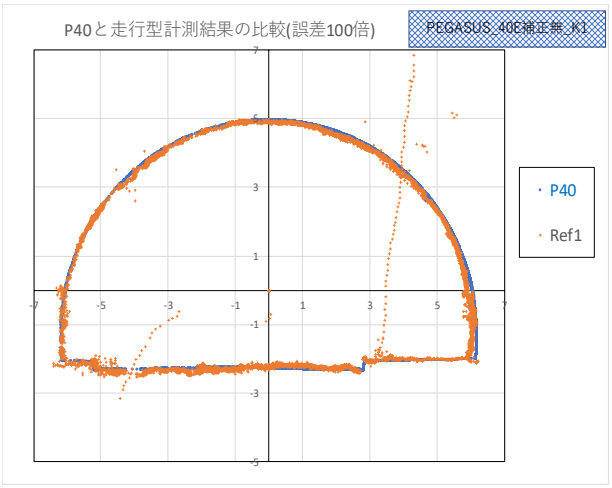
(f) Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 2



(g)Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 1



(h) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 2

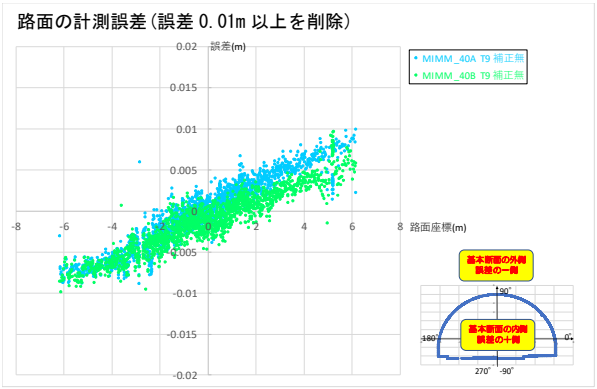


(i) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 3

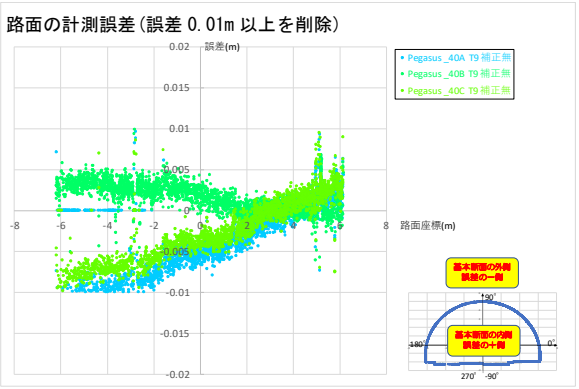
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.34　K1 地点計測結果(起点坑口から 90m)その 2

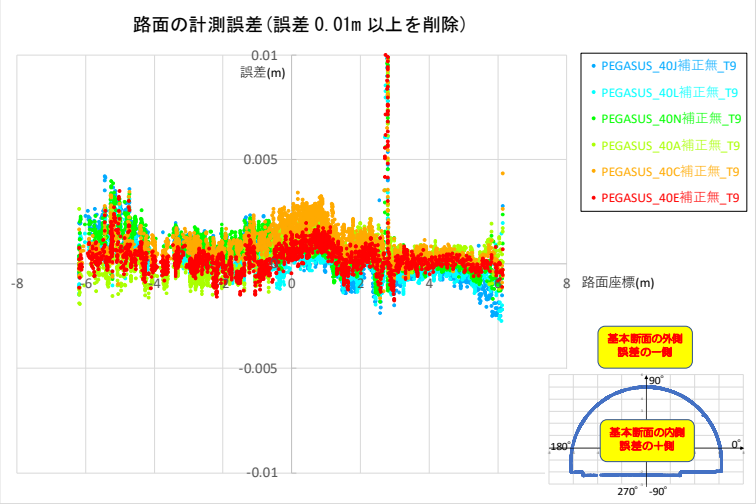
(3) T 9 地点計測結果



(a)MIMM 計測結果(令和元年)CASE ①～②

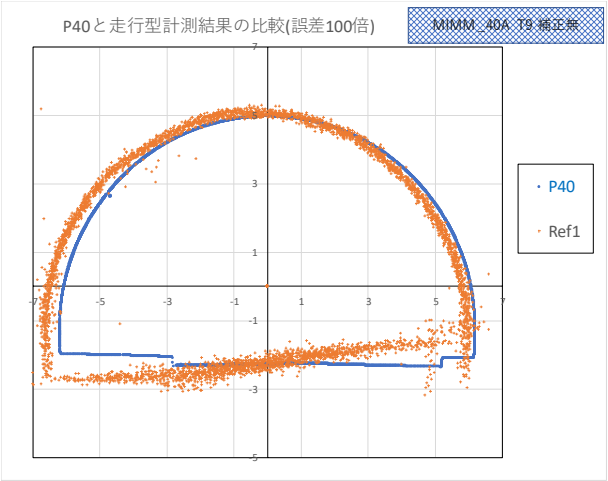


(b)Pegasus 計測結果(令和元年) CASE③～⑤

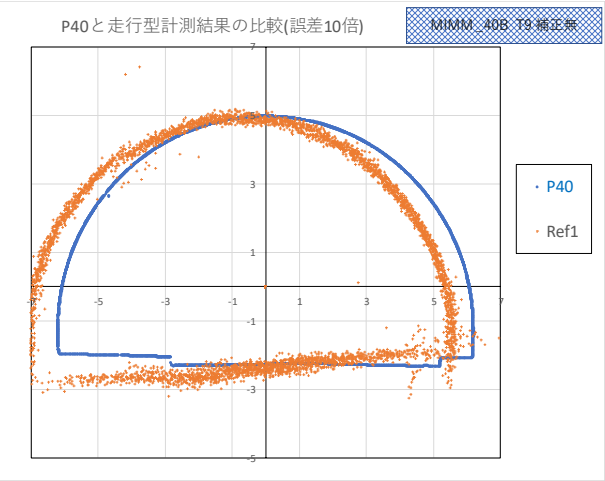


(c)Pegasus 計測結果(令和 2 年) CASE⑥～⑧

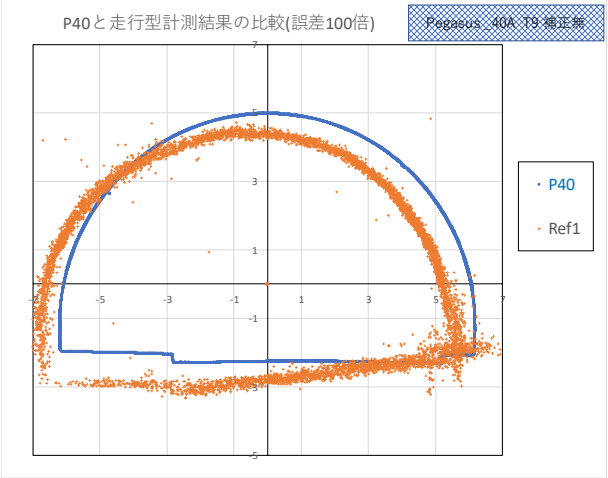
図 4.4.35　T9 地点計測結果(起点坑口から 370m)その 1



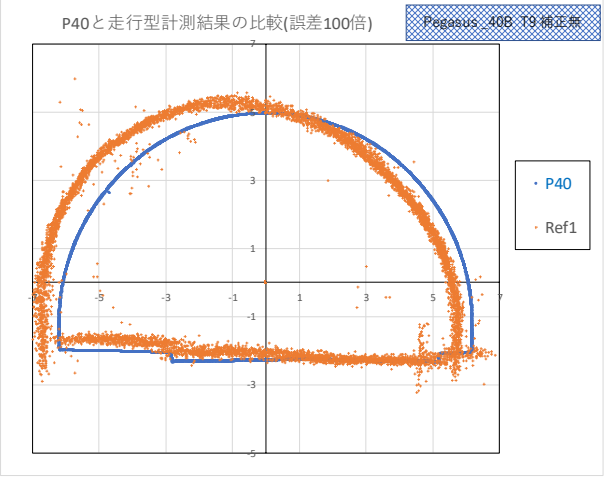
(a)MIMM 計測結果(R1.11.22)その 1



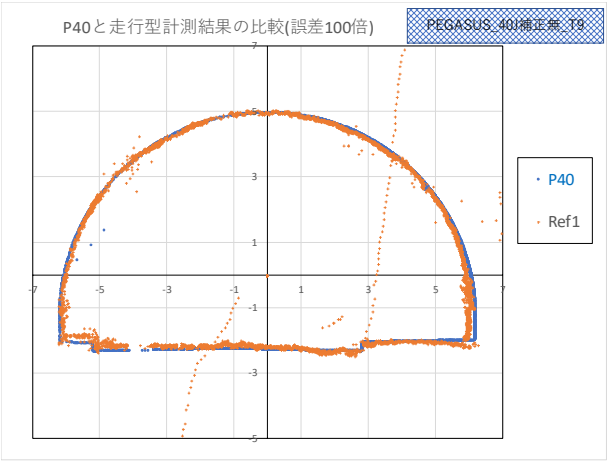
(b) MIMM 計測結果(R1.11.22)その 2



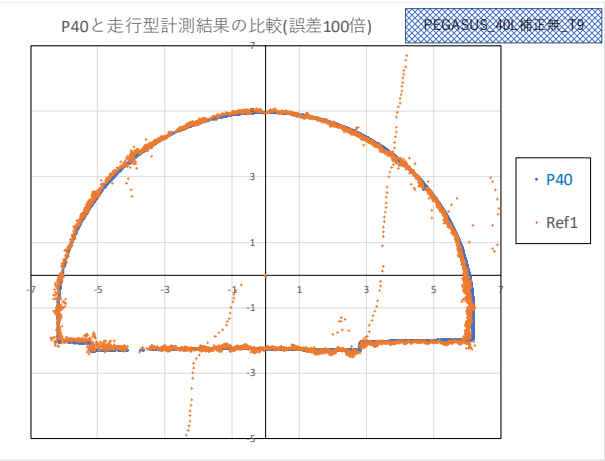
(c)Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 1



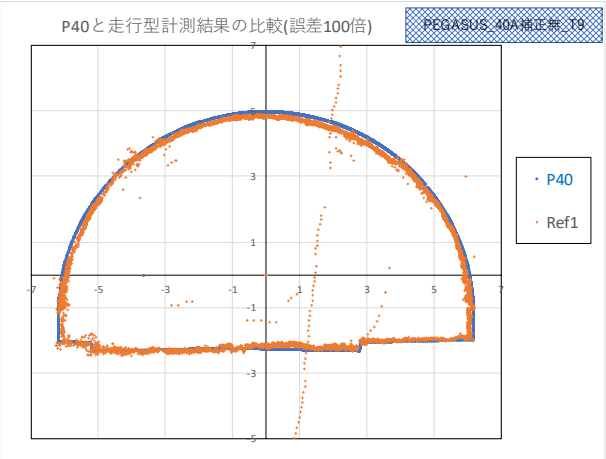
(d) Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 2



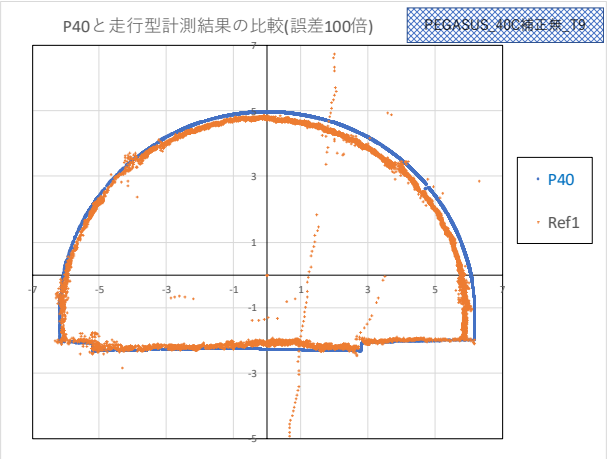
(e)Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 1



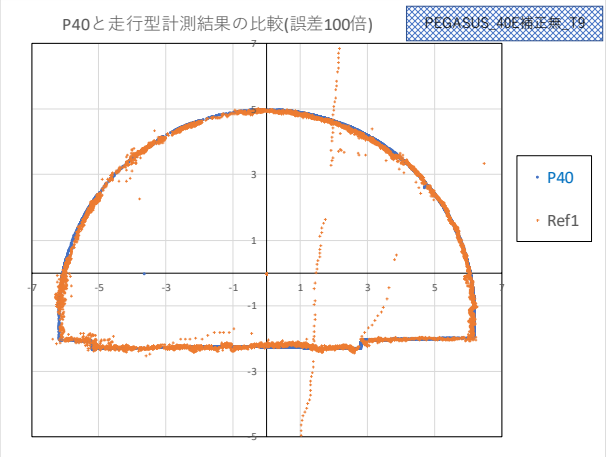
(f) Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 2



(g)Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 1



(h) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 2

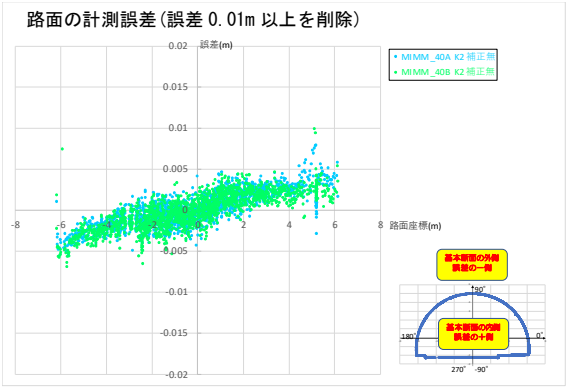


(i) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 3

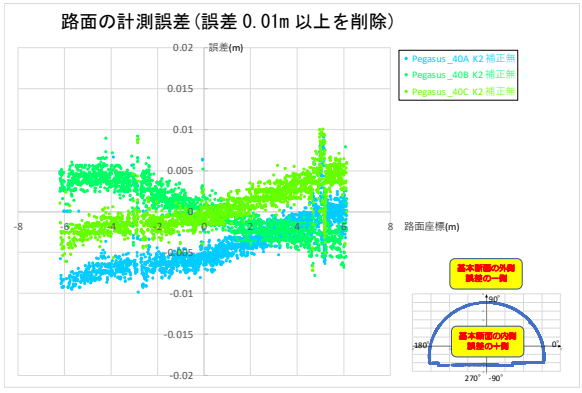
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.36　T9 地点計測結果(起点坑口から 370m)その 2

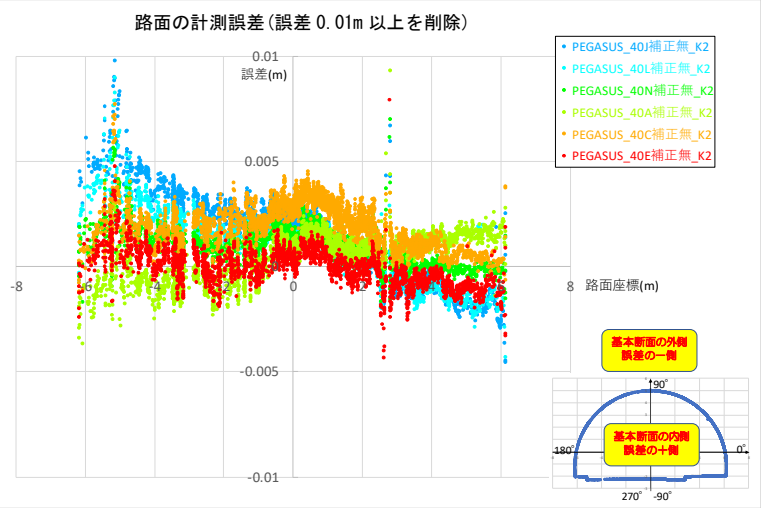
(4) K2 地点計測結果



(a)MIMM 計測結果(令和元年)CASE ①～②

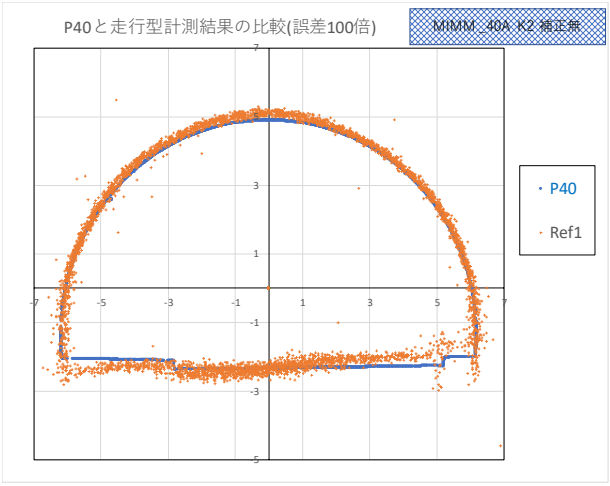


(b)Pegasus 計測結果(令和元年) CASE③～⑤

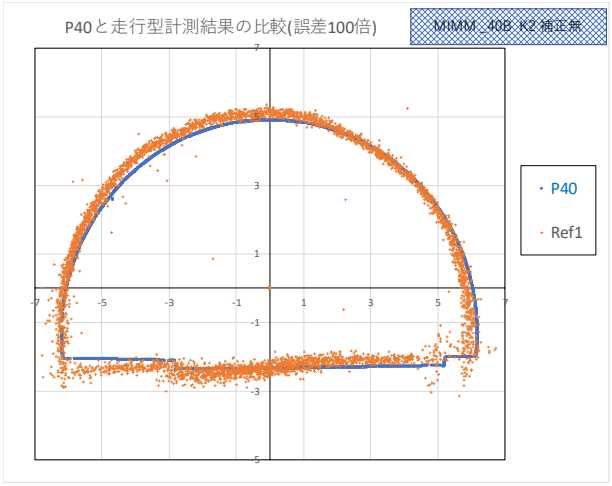


c)Pegasus 計測結果(令和 2 年) CASE⑥～⑧

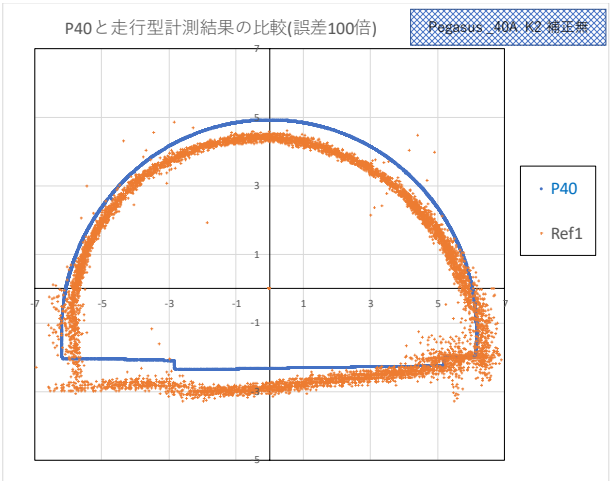
図 4.4.37　K2 地点計測結果（起点坑口から 452m）その 1



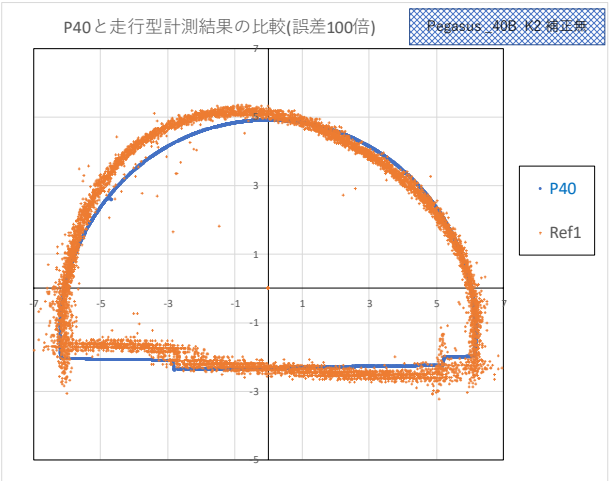
(a)MIMM 計測結果(R1.11.22)その 1



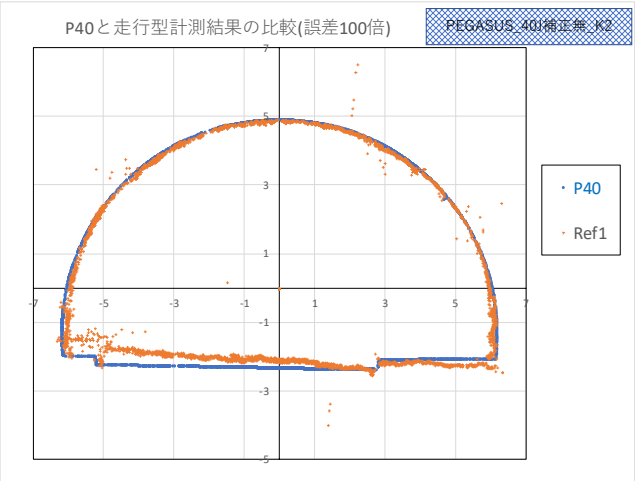
(b) MIMM 計測結果(R1.11.22)その 2



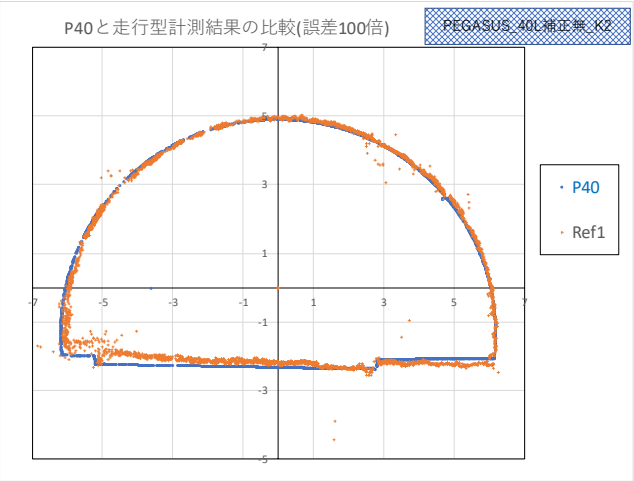
(c)Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 1



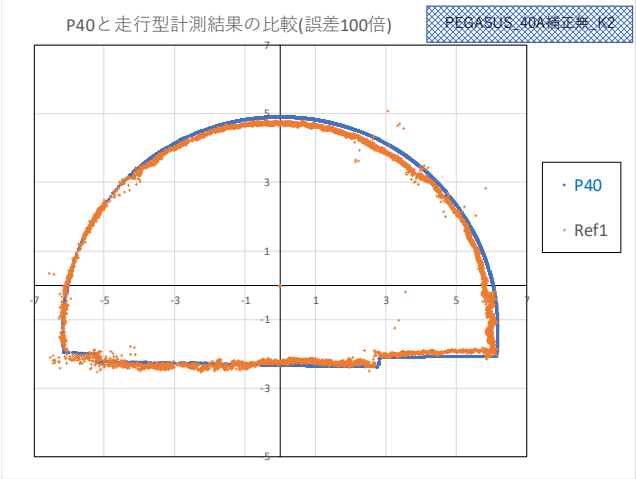
(d) Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 2



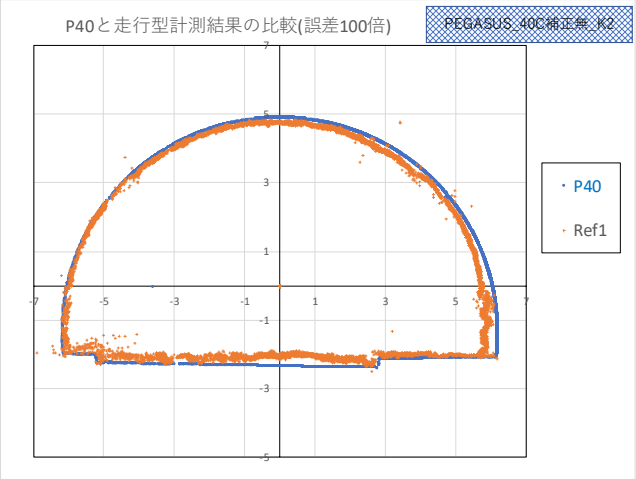
(e)Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 1



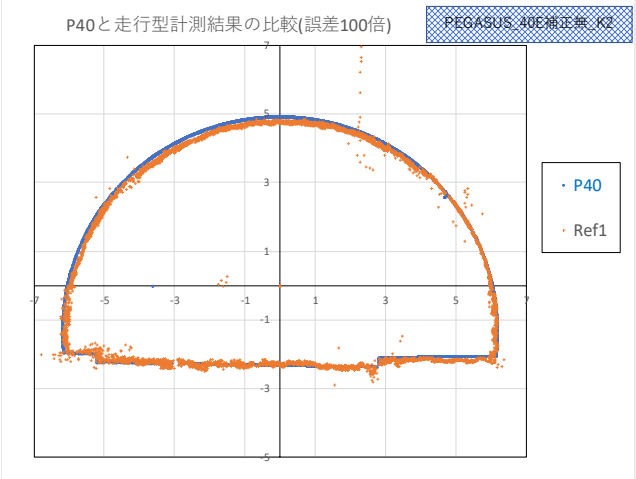
(f) Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 2



(g)Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 1



(h) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 2

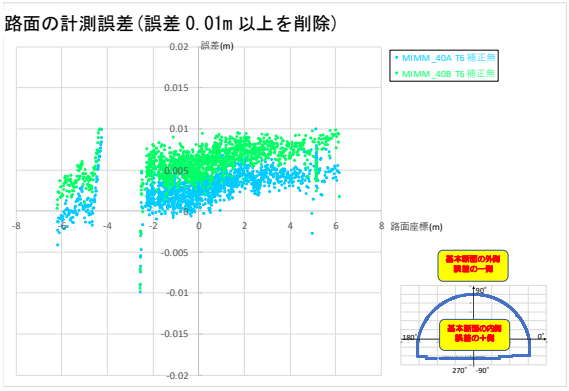


(i) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 3

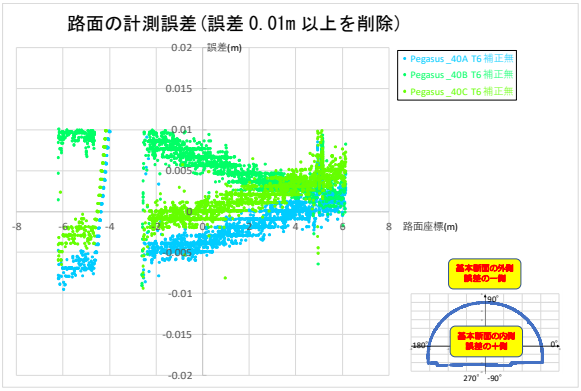
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.38　K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)その 2

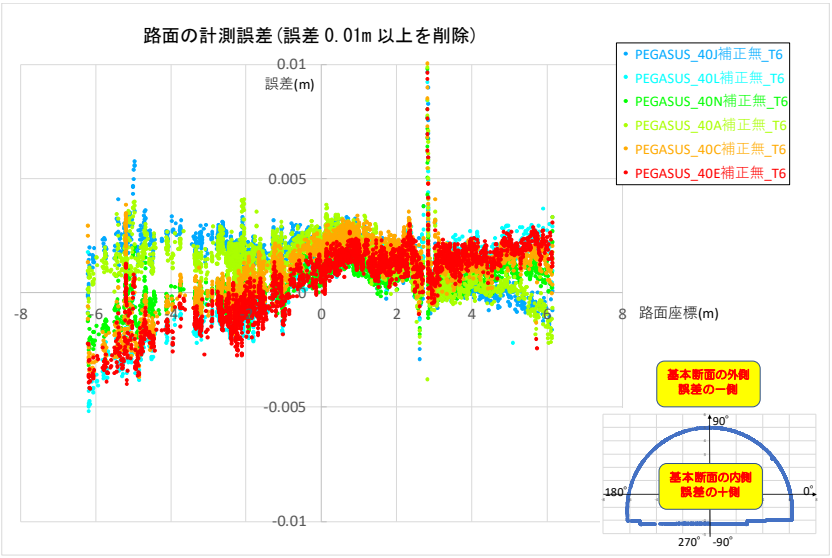
(5)Ｔ６地点計測結果



(a)MIMM 計測結果(令和元年)CASE ①～②

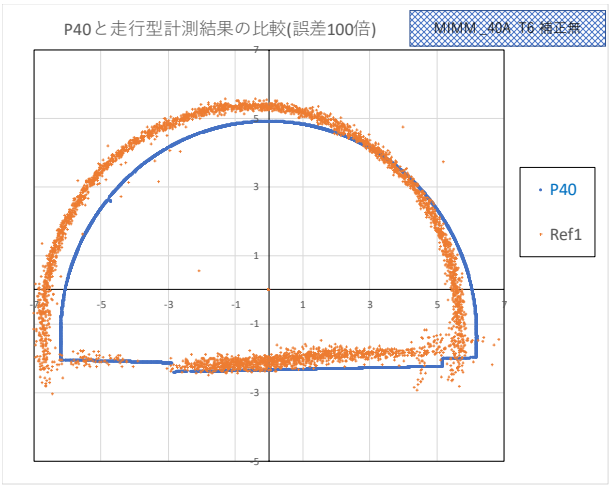


(b)Pegasus 計測結果(令和元年) CASE③～⑤

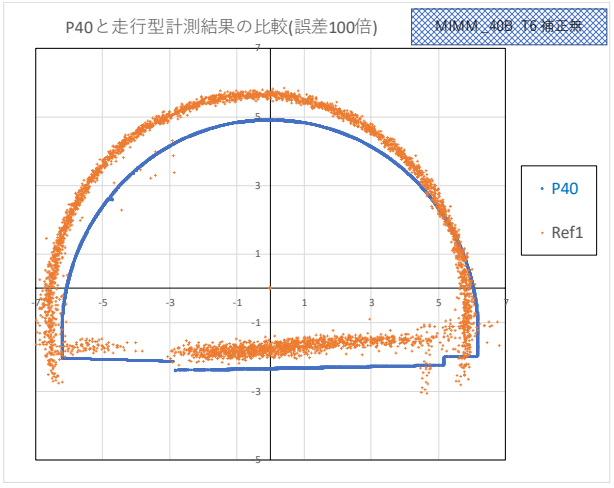


(c)Pegasus 計測結果(令和２年) CASE⑥～⑧

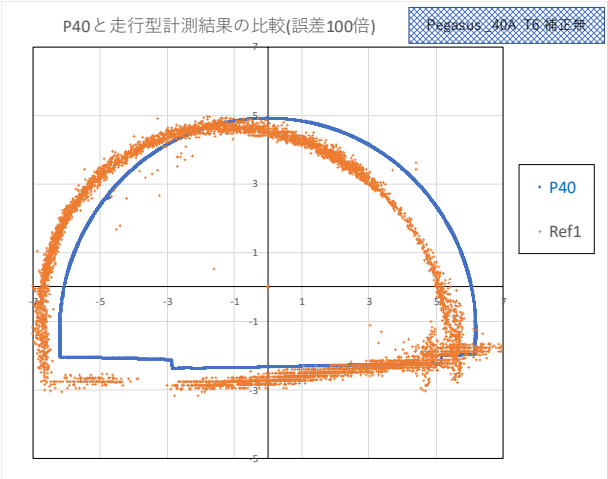
図 4.4.39　T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その１



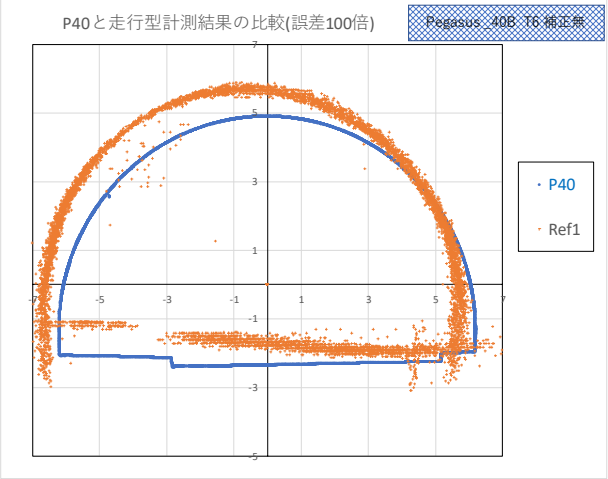
(a)MIMM 計測結果(R1.11.22)その１



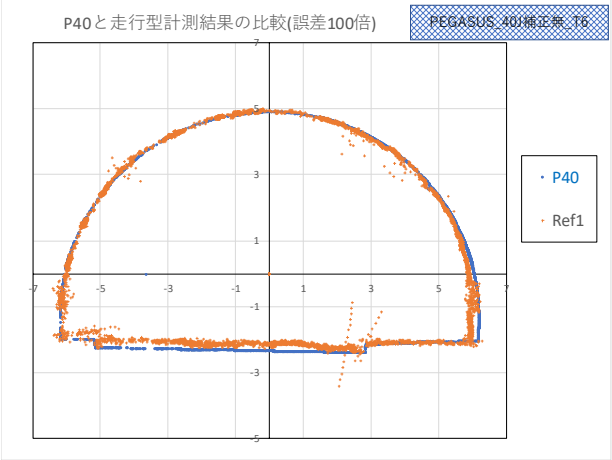
(b) MIMM 計測結果(R1.11.22)その２



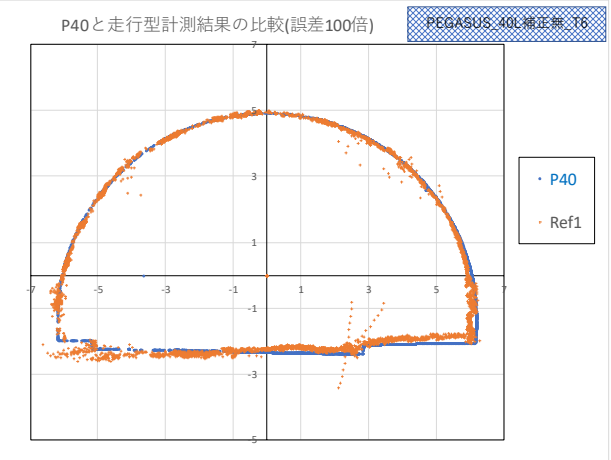
(c)Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 1



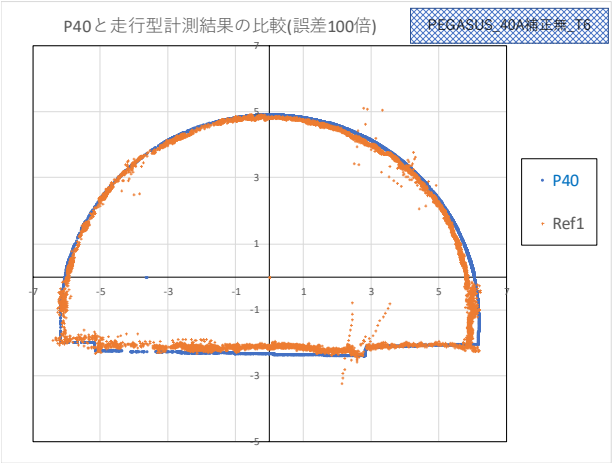
(d) Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 2



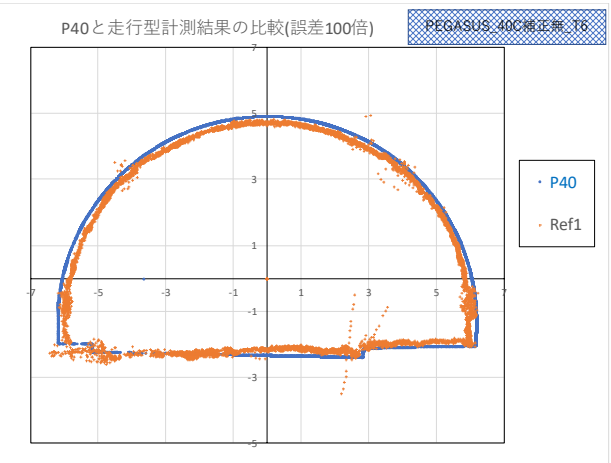
(e)Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 1



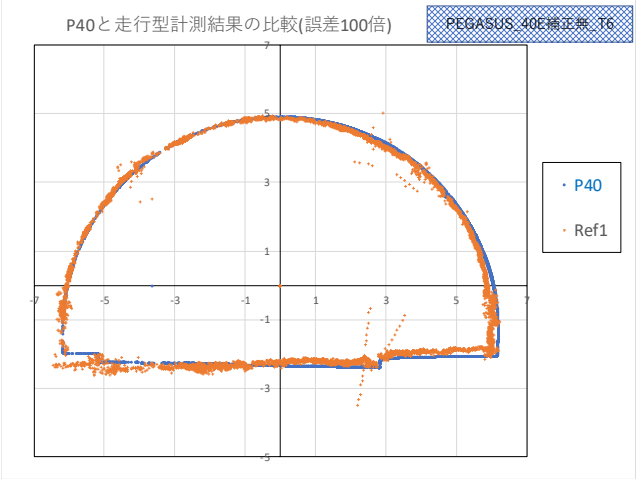
(f) Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 2



(g)Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 1



(h) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 2

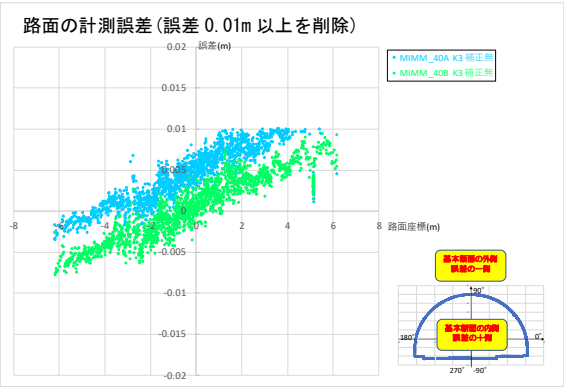


(i) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 3

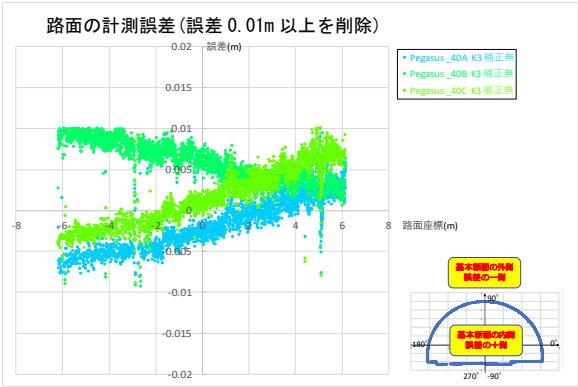
※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.40　T6 地点計測結果(起点坑口から 477m)その 2

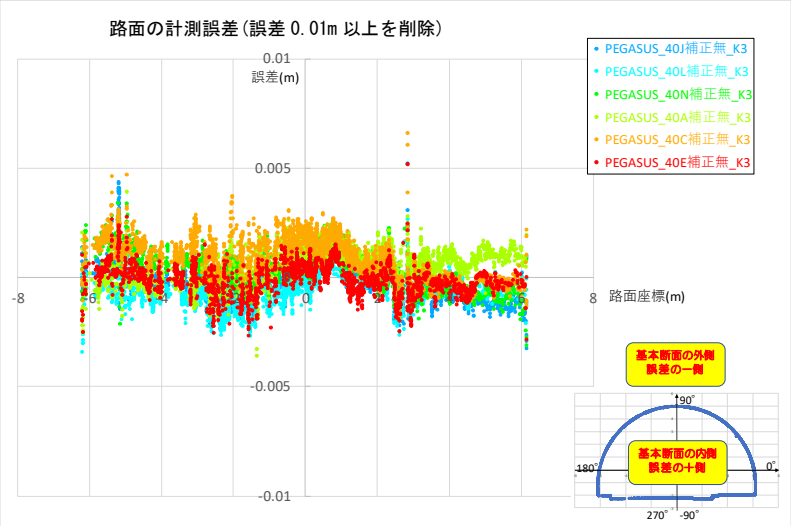
(6)K 3 地点計測結果



(a)MIMM 計測結果(令和元年)CASE ①～②

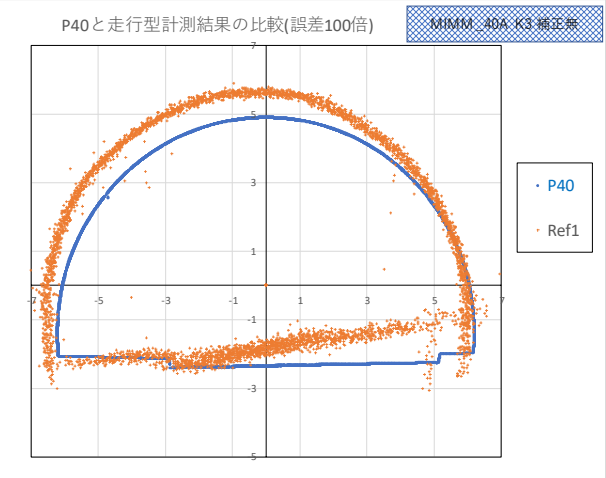


(b)Pegasus 計測結果(令和元年) CASE③～⑤

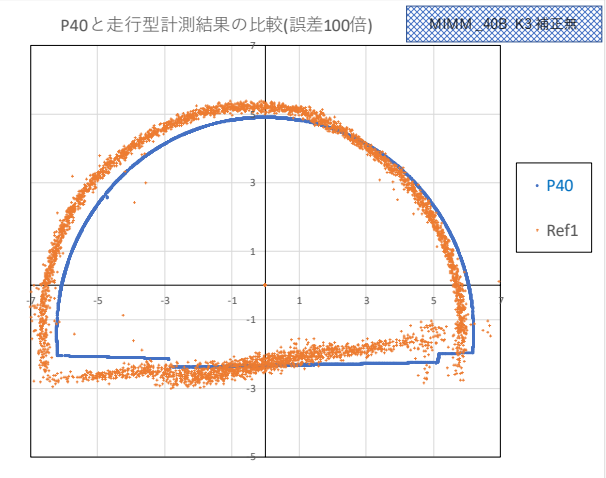


(c)Pegasus 計測結果(令和 2 年) CASE⑥～⑧

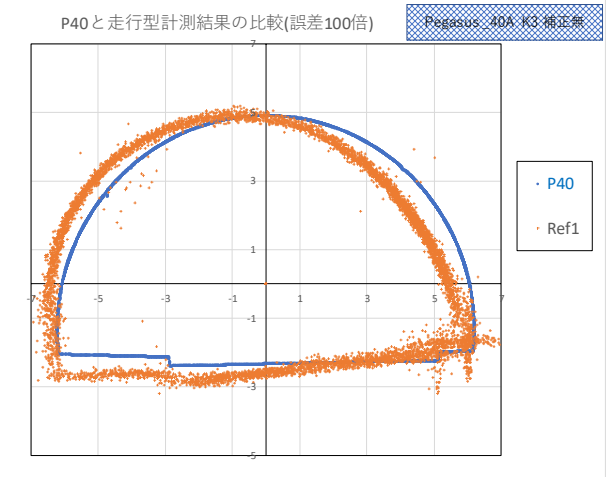
図 4.4.41　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)その 1



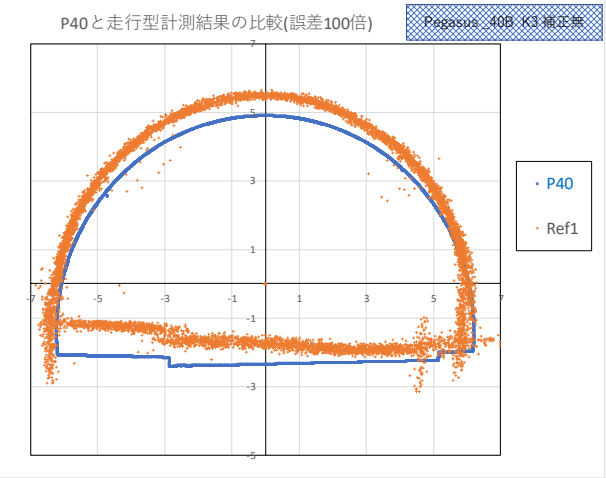
(a)MIMM 計測結果(R1.11.22)その 1



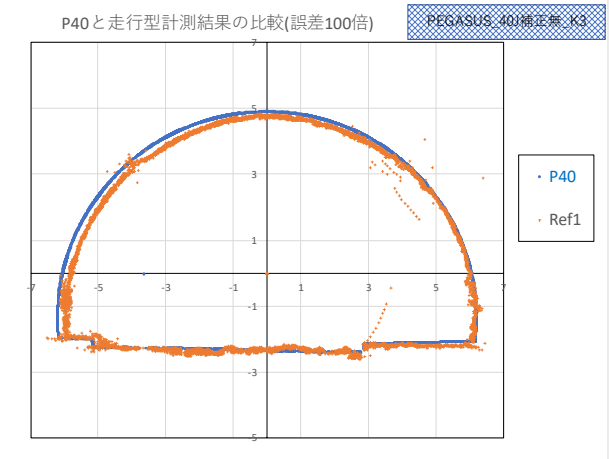
(b) MIMM 計測結果(R1.11.22)その 2



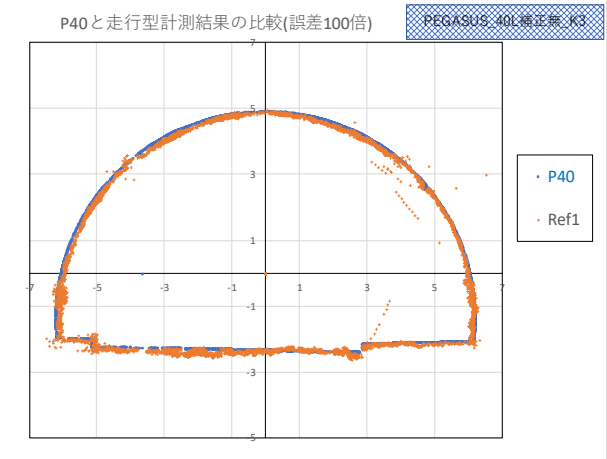
(c)Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 1



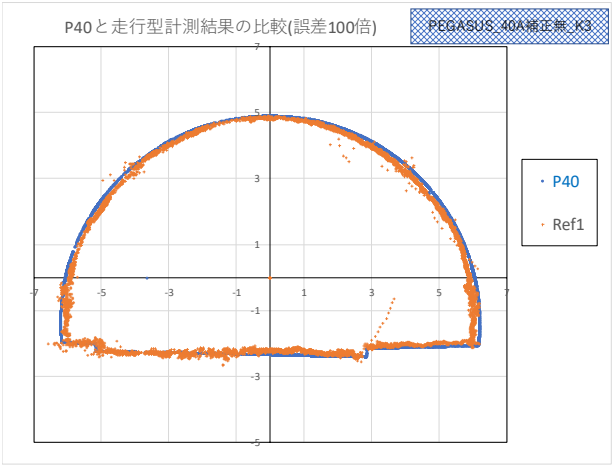
(d) Pegasus 計測結果(R1.11.22)その 2



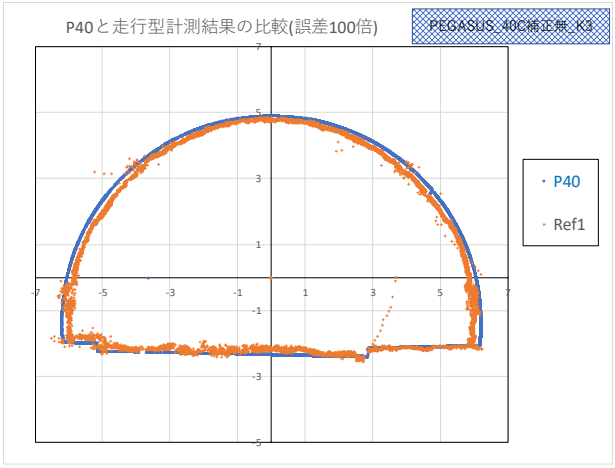
(e)Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 1



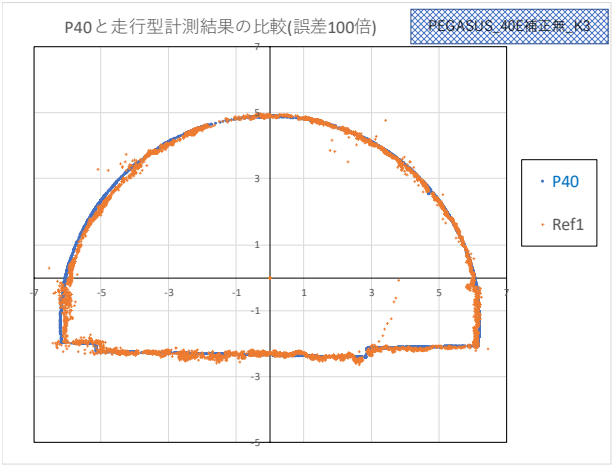
(f) Pegasus 計測結果(R2.11.19)その 2



(g)Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 1



(h) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 2



(i) Pegasus 計測結果(R2.11.20)その 3

※ここに P40(固定レーザ)、Ref1(走行型計測結果)

図 4.4.42　K3 地点計測結果(起点坑口から 651m)その 2

(7) 計測方法等の違いによる再現性について

逆走行時（下り線）の計測結果や FIX 処理方法の違いによる計測誤差について検証を行った。結果を以下に示す。検証の結果、データ処理方法や計測方向が異なる場合、計測誤差は類似しなかった。このことから、計測方向やデータ処理方法は一致させることが望ましい。

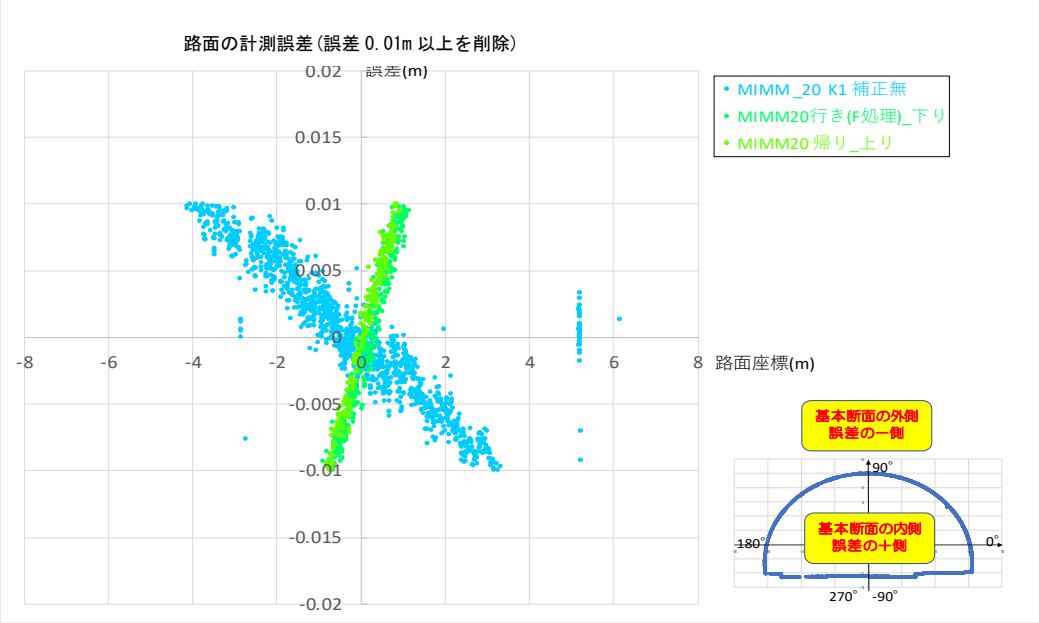
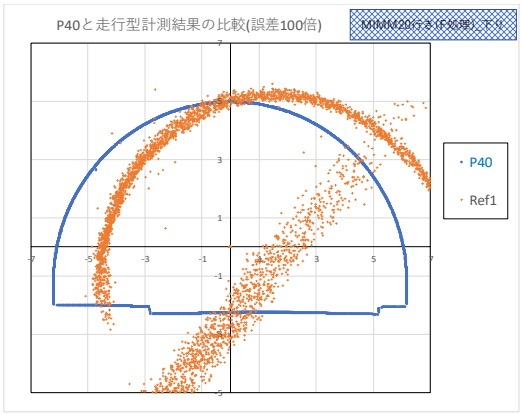
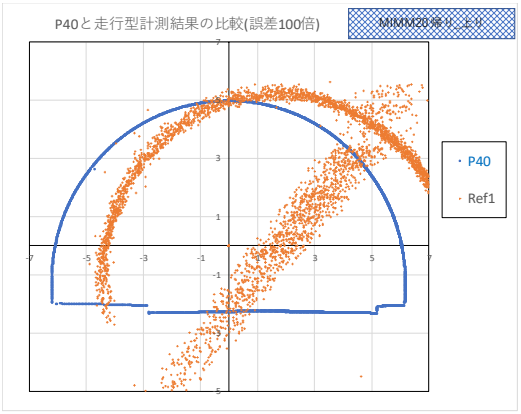


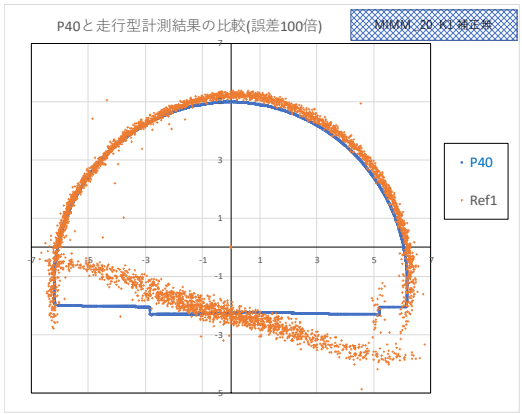
図 4.4.43　K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その１



(a) MIMM 計測結果(FIX 処理：開始のみ)



(b) MIMM 計測結果(下り線走行時：逆計測)



(c)MIMM 計測結果(上り線走行時：通常計測)

図 4.4.44　K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その２

3)計測上の留意点

走行型計測による計測を実施するに当たっての留意点を以下に示す。

① 計測方向（上り線または下り線）が異なる場合、回転誤差は大きく異なる可能性があることから、計測方向は一致させることが望ましい。

② 計測速度によって、回転誤差や誤差形状は異なることから、計測速度は一致させることが望ましい

③ 衛星受信状態により計測誤差は異なる可能性があることから、衛星受信状態の良い時間帯に計測を実施することが望ましい。

④ 上記より、次回計測に向けた対応として計測方向、計測速度、使用機器、補正の実施の有無等の記録を残しておくことが望ましい。

4.4.3 基準点による補正の検討

各種補正を実施した場合に計測精度がどの程度相違するのか検討を行った。比較した補正方法を表 4.4.13 に示す。

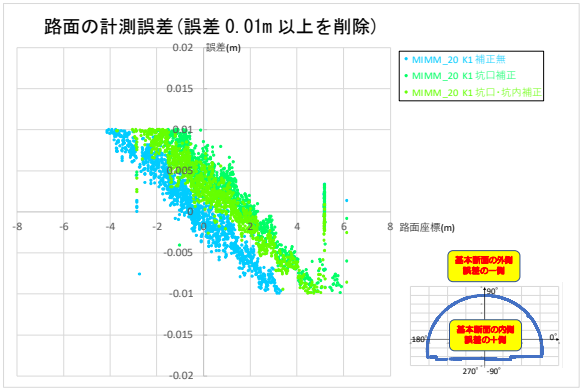
表 4.4.13　補正方法について

補正方法	補正内容	計測機器	計測時期
補正なし	GPS 計測を基準とし、トンネル内については IMU に基づき計測	MIMM Pegasus(斜角)	R1.11.22
JENOBA 補正	JENOBA 計測を基準とし、トンネル内については IMU に基づき計測	Pegasus(斜角)	
坑口基準点補正	補正なしの計測データについて、トンネル両坑口に設けた基準点を用いて計測データを補正	MIMM Pegasus(斜角)	
坑内基準点補正 (一部坑口補正含む)	補正なしの計測データについて、トンネル内に設けた基準点を用いて計測データを補正	MIMM Pegasus(斜角)	

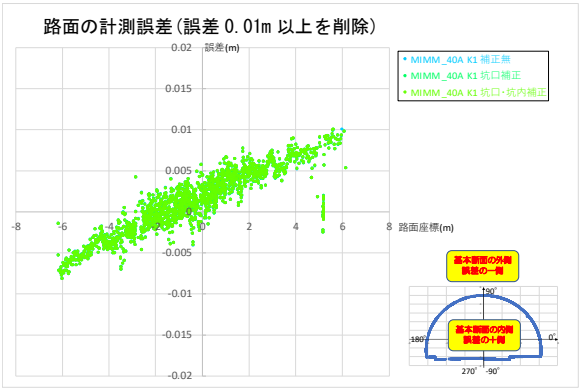
1) MIMM 計測結果

計測データの補正の結果、坑内補正を行った方が計測誤差は小さくなる傾向となった。結果を図 4.4.45～図 4.4.54 に示す。

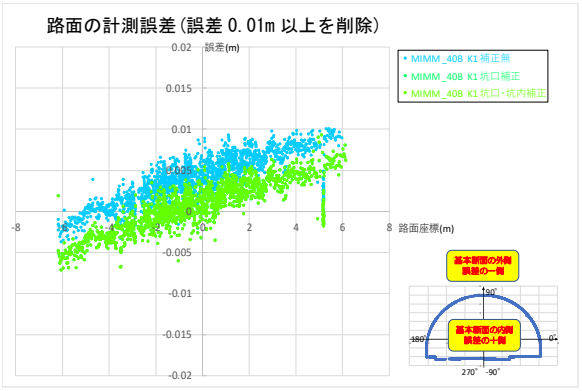
(1)K1 地点比較結果



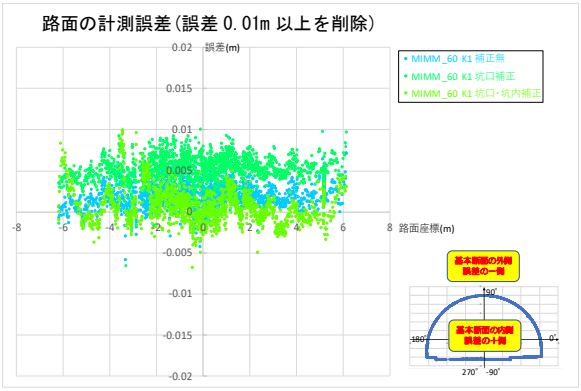
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

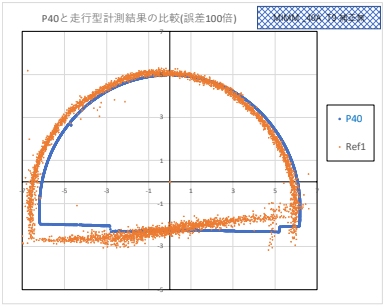


(c)計測速度 40km/h その 2

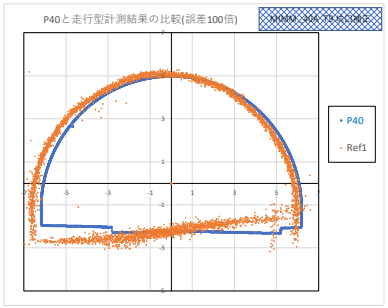


(d)計測速度 60km/h

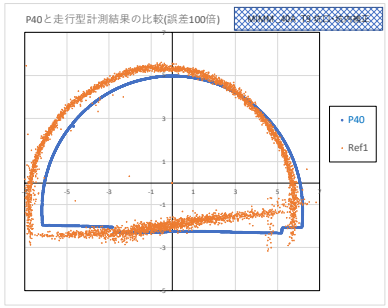
図 4.4.45 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その 1



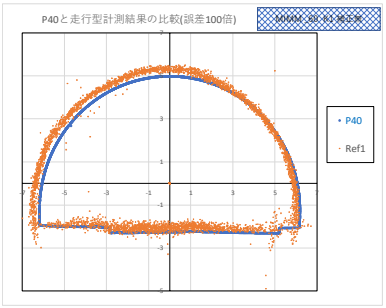
(a)40km(A)補正なし



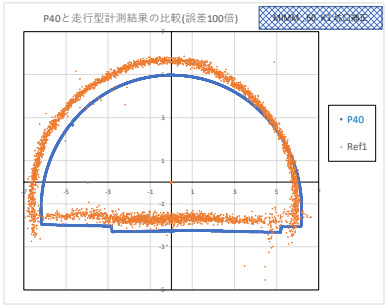
(b) 40km(A)坑口補正



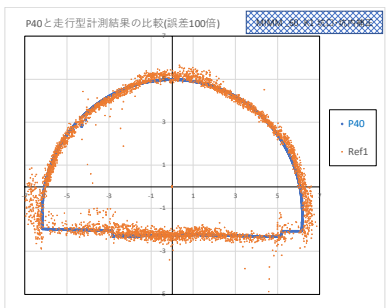
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



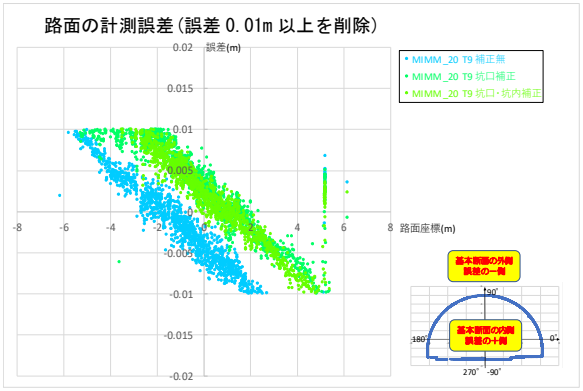
(e) 60km 坑口補正



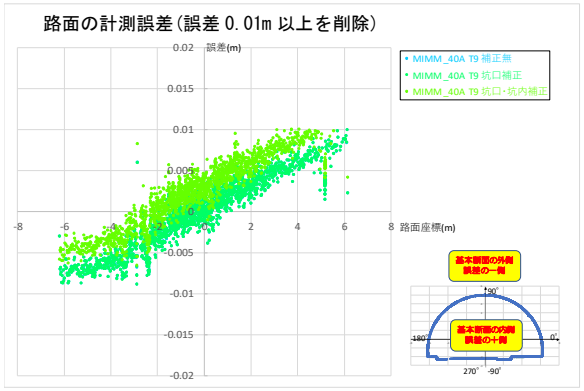
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.46 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その 2

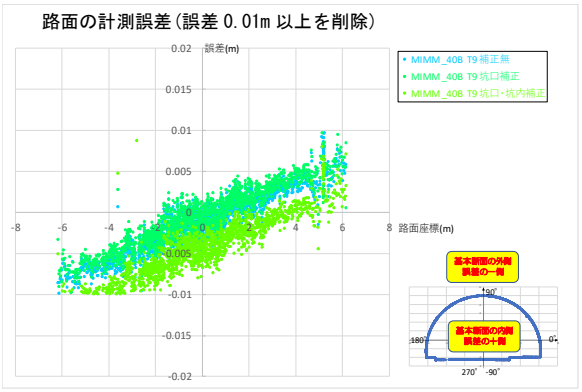
(2)T9 地点計測結果



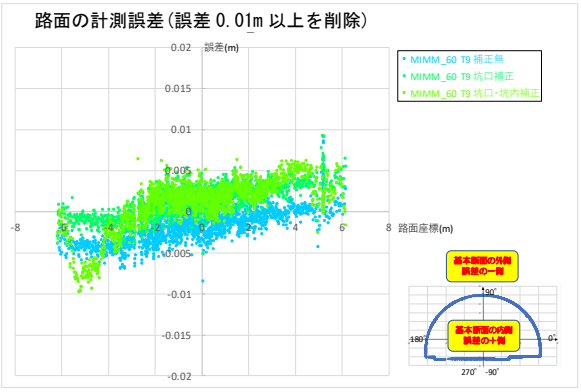
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

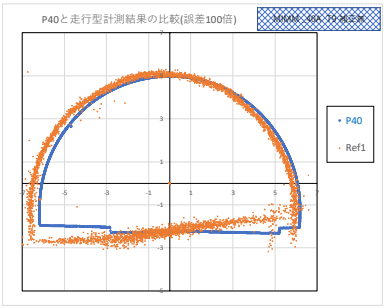


(c)計測速度 40km/h その 2

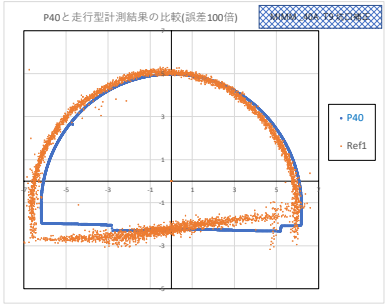


(d)計測速度 60km/h

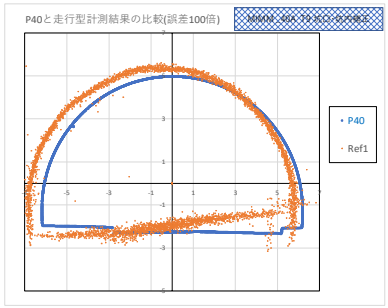
図 4.4.47　T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）その 1



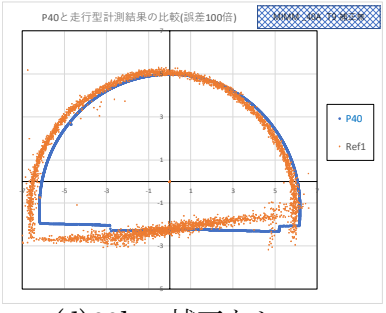
(a)40km(A)補正なし



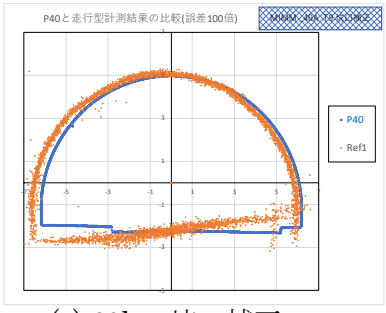
(b) 40km(A)坑口補正



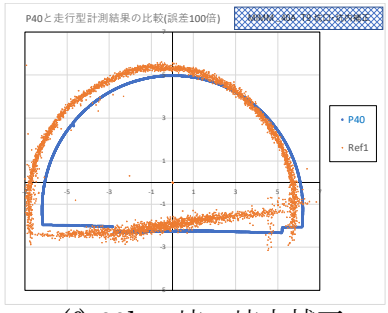
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



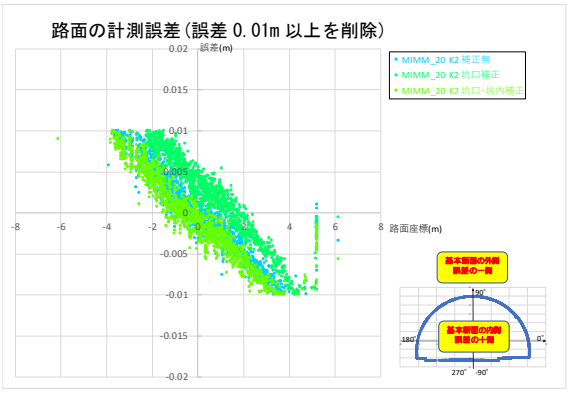
(e) 60km 坑口補正



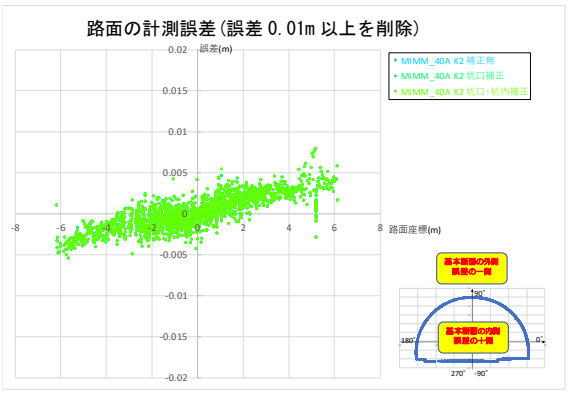
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.48　T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）その 2

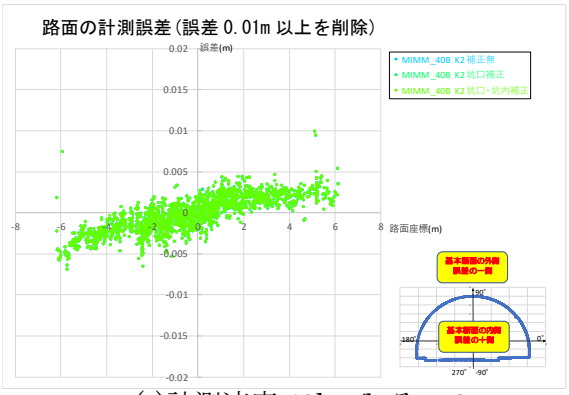
(3)K2 地点比較結果



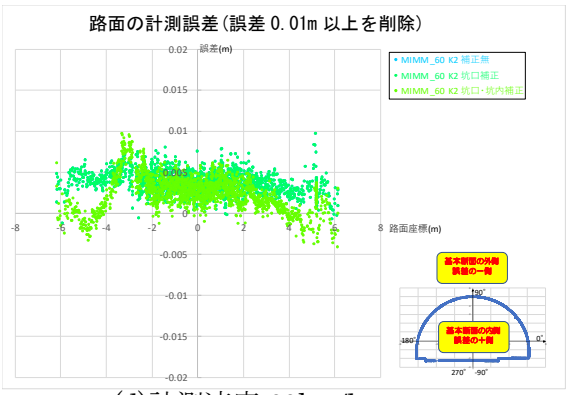
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

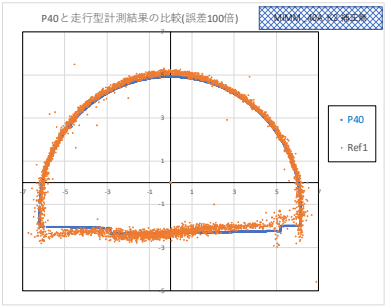


(c)計測速度 40km/h その 2

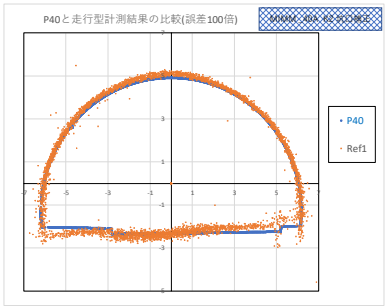


(d)計測速度 60km/h

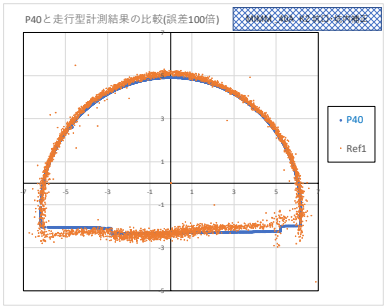
図 4.4.49　K2 地点計測結果（起点坑口から 452m）その 1



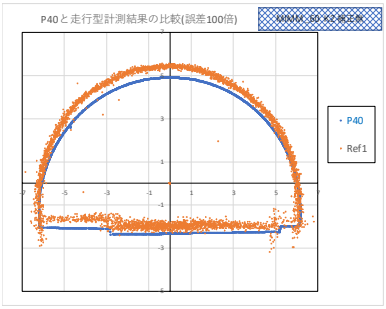
(a)40km(A)補正なし



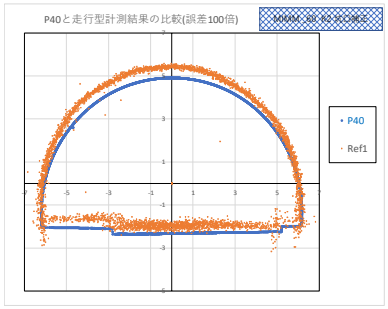
(b) 40km(A)坑口補正



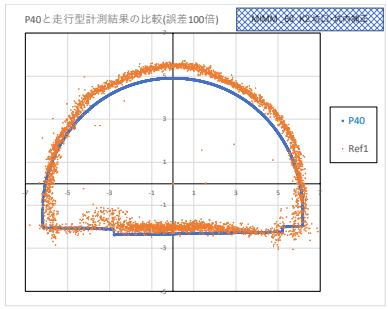
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



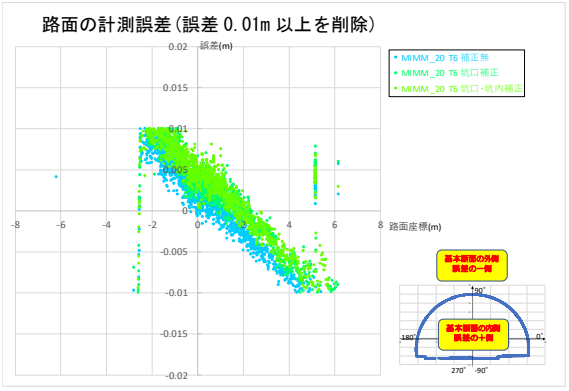
(e) 60km 坑口補正



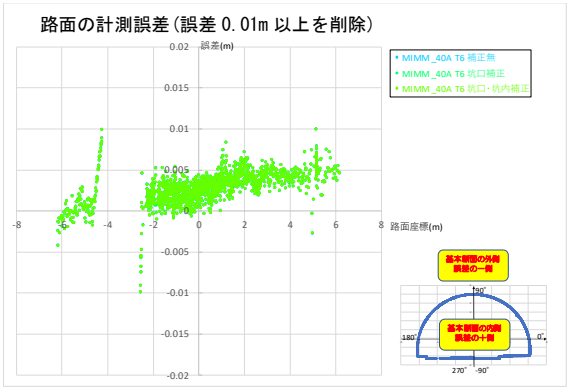
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.50　K2 地点計測結果（起点坑口から 452m）その 2

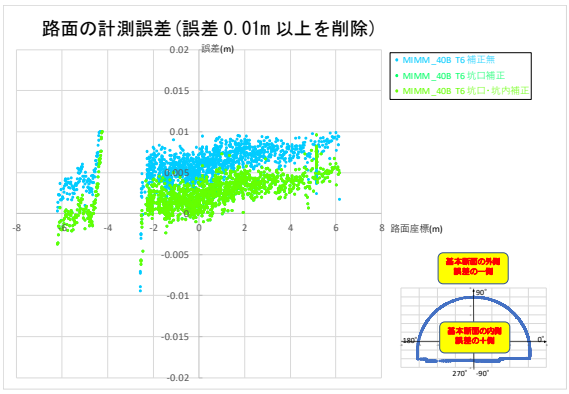
(4)T6 地点比較結果



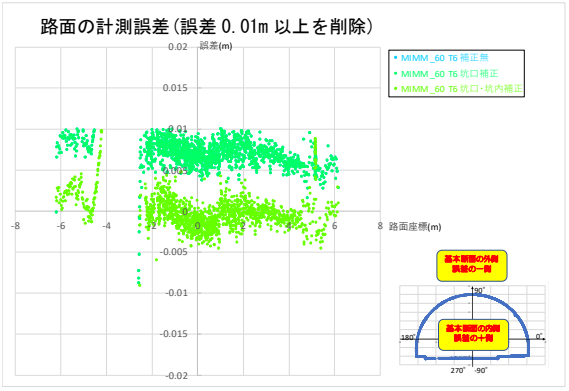
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

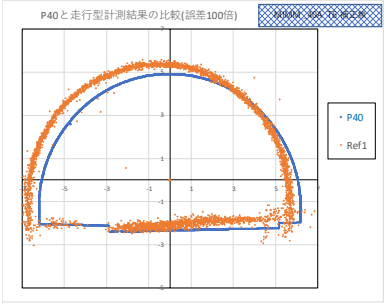


(c)計測速度 40km/h その 2

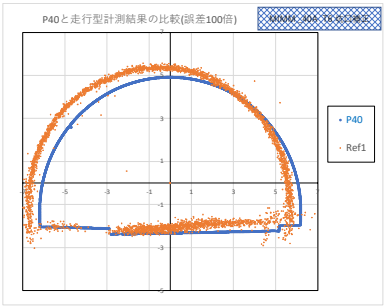


(d)計測速度 60km/h

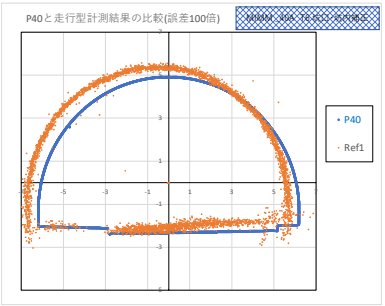
図 4.4.51　T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その 1



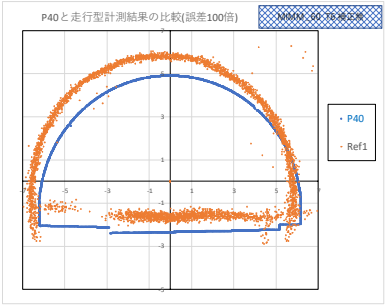
(a)40km(A)補正なし



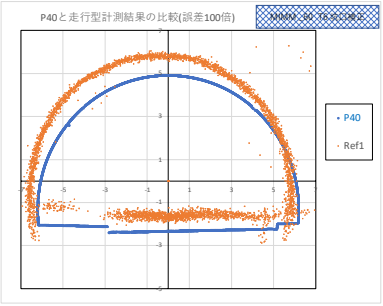
(b) 40km(A)坑口補正



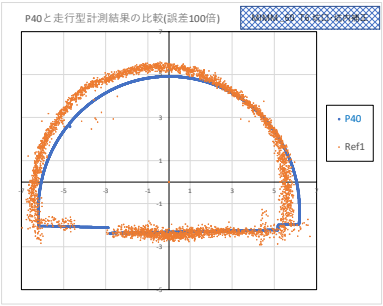
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



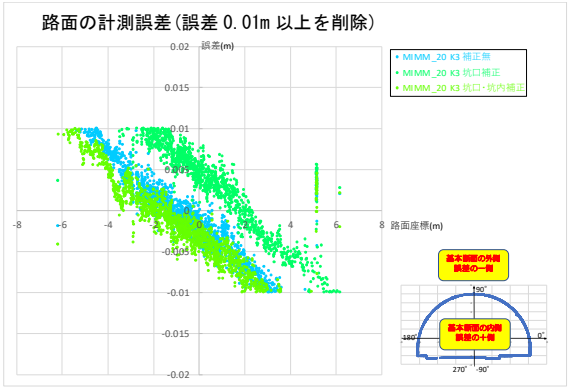
(e) 60km 坑口補正



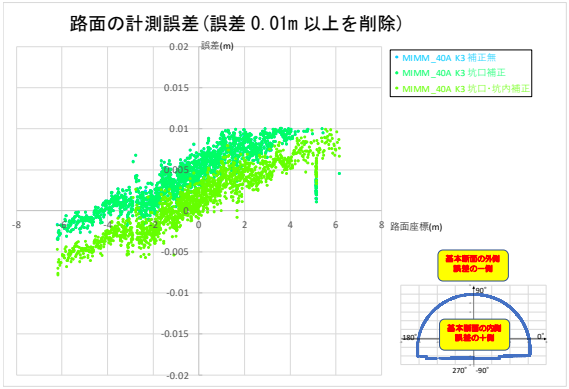
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.52　T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その 2

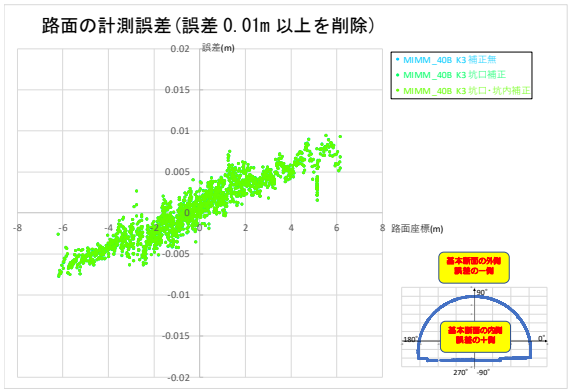
(5)K3 地点比較結果



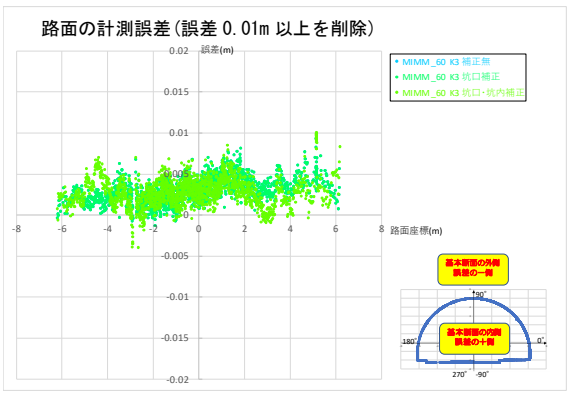
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

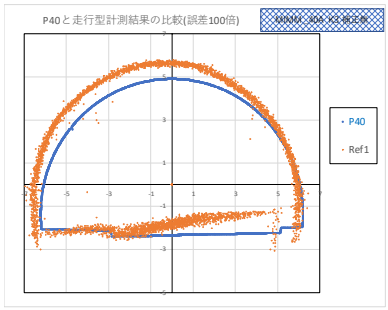


(c)計測速度 40km/h その 2

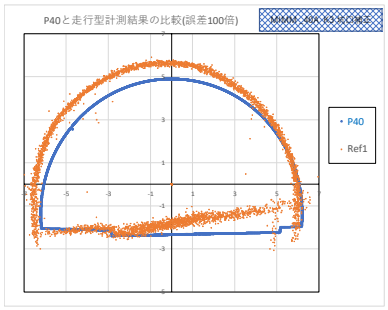


(d)計測速度 60km/h

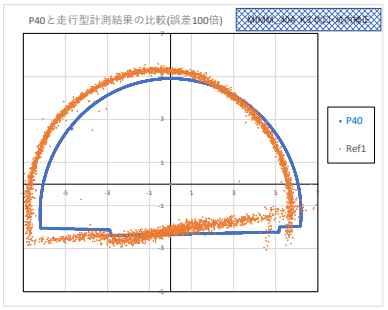
図 4.4.53　K3 地点計測結果（起点坑口から 651m）その 1



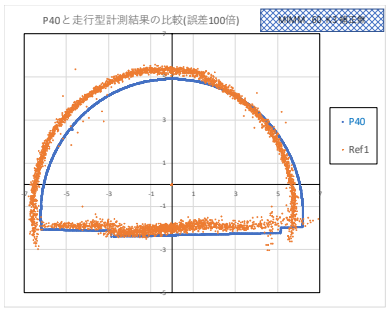
(a)40km(A)補正なし



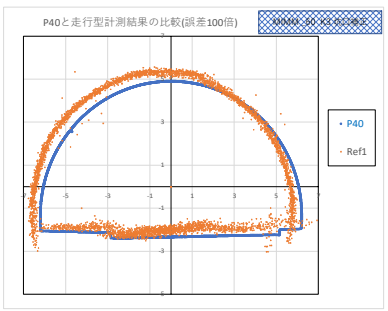
(b) 40km(A)坑口補正



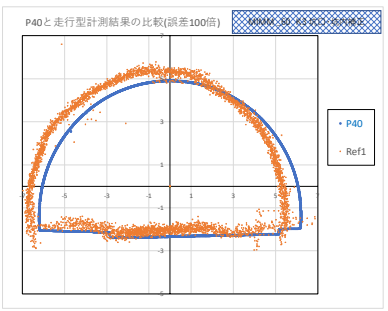
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



(e) 60km 坑口補正



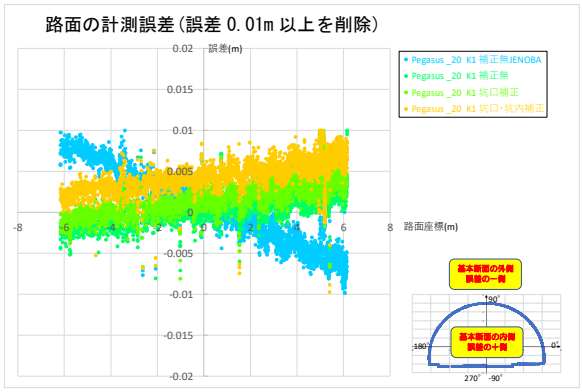
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.54　K3 地点計測結果（起点坑口から 651m）その 2

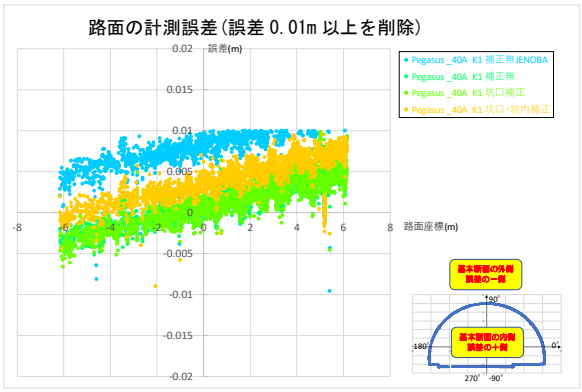
2) Pegasus(斜角)計測結果

計測データの補正の結果、坑内補正を行った方が計測誤差は小さくなる傾向となった。計測結果を図 4.4.55～図 4.4.64 に示す。

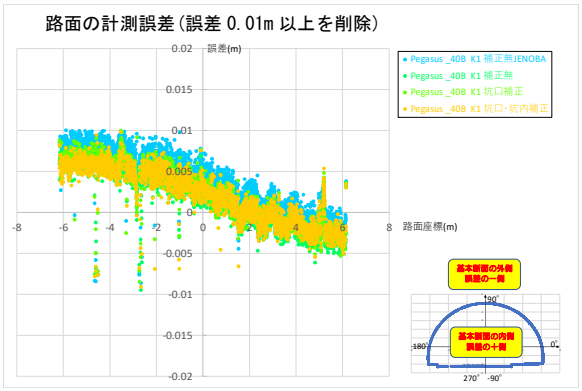
(1) K1 地点計測結果



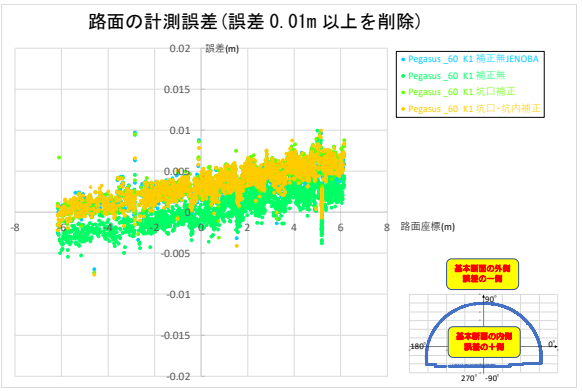
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

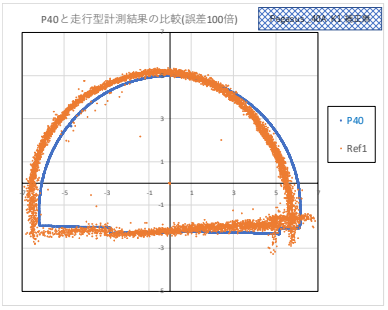


(c)計測速度 40km/h その 2

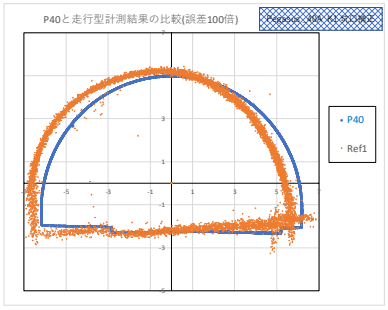


(d)計測速度 60km/h

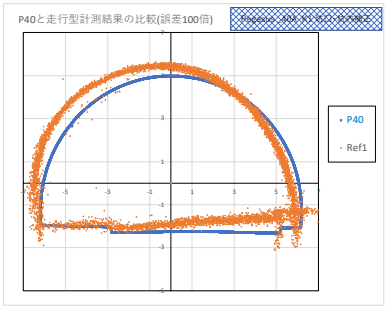
図 4.4.55 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その 1



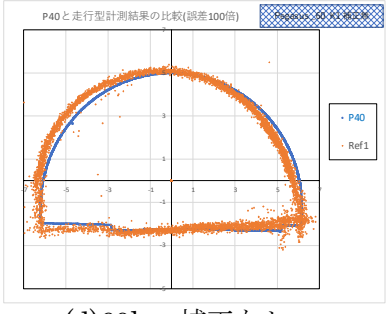
(a)40km(A)補正なし



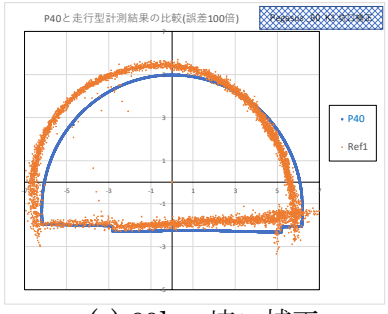
(b) 40km(A)坑口補正



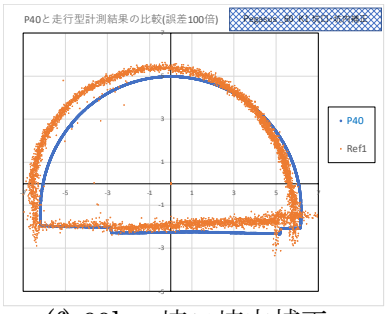
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



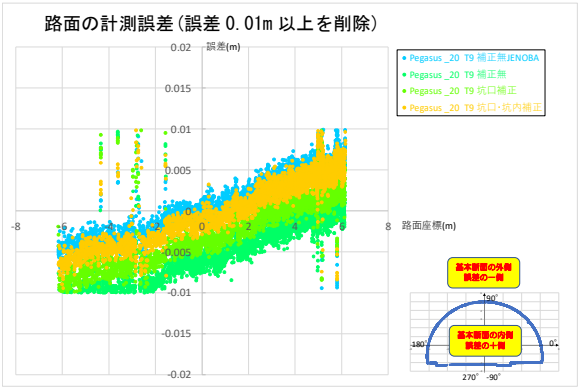
(e) 60km 坑口補正



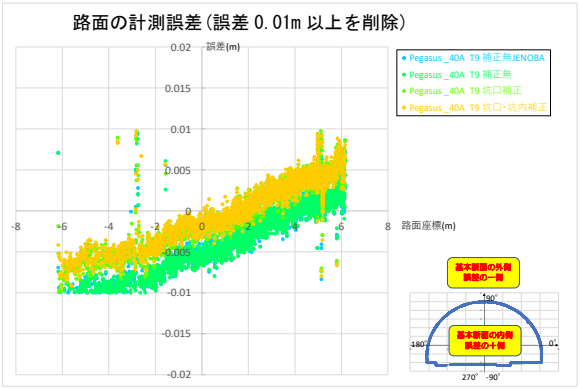
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.56 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その 2

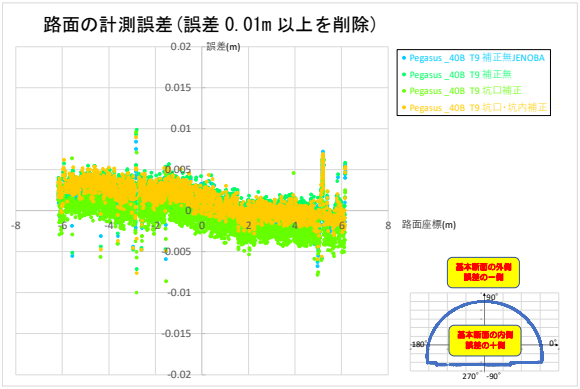
(2) T9 地点計測結果



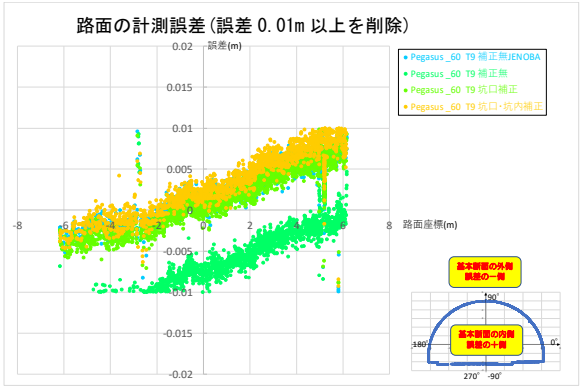
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

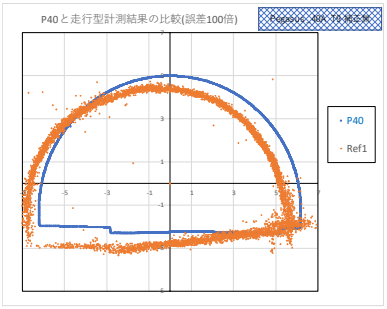


(c)計測速度 40km/h その 2

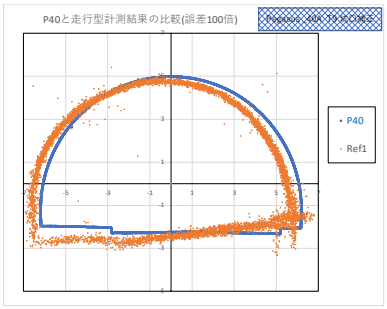


(d)計測速度 60km/h

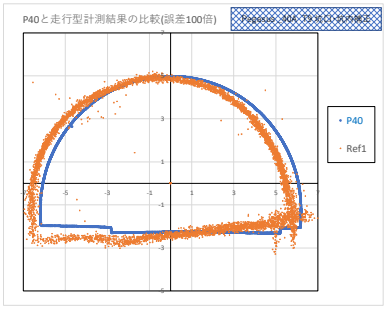
図 4.4.57 T9 地点計測結果（起点坑口から 370m） その 1



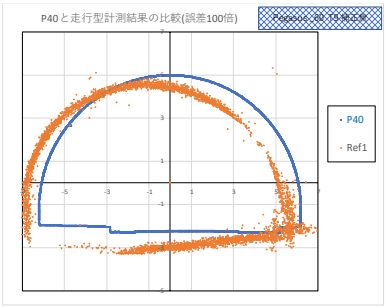
(a)40km(A)補正なし



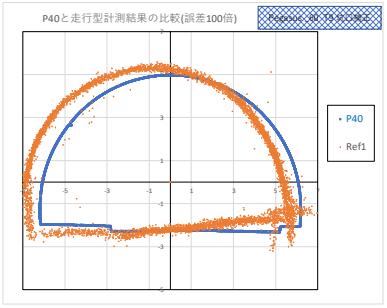
(b) 40km(A)坑口補正



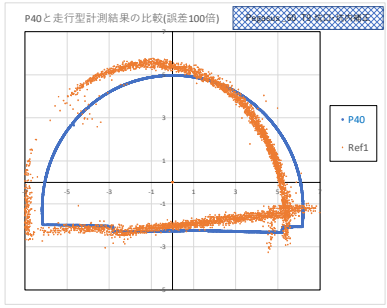
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



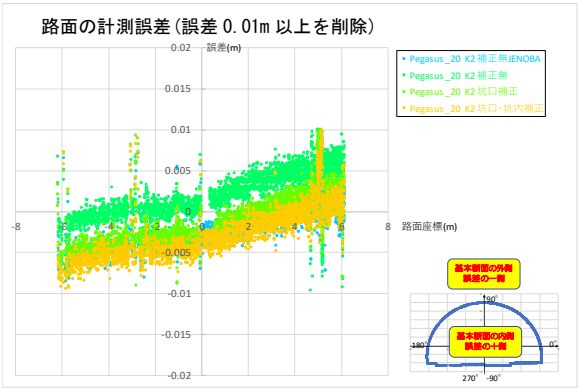
(e) 60km 坑口補正



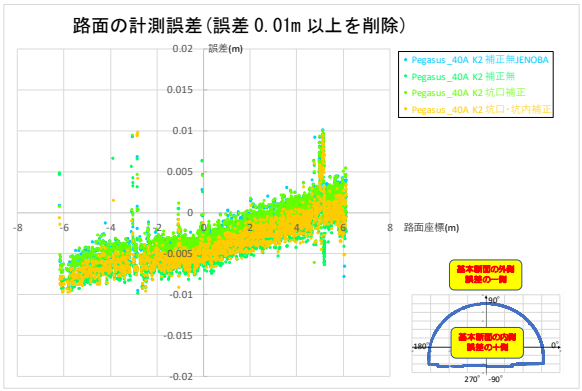
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.58 T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）その 2

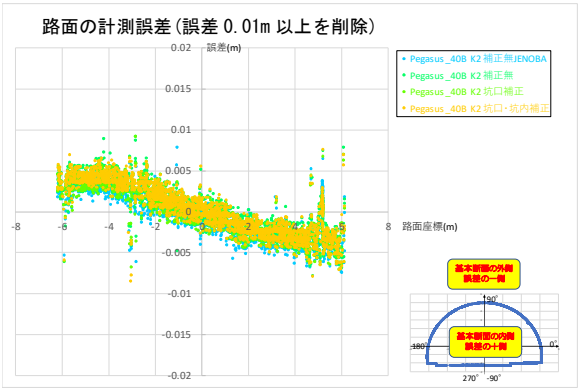
(3) K2 地点比較結果



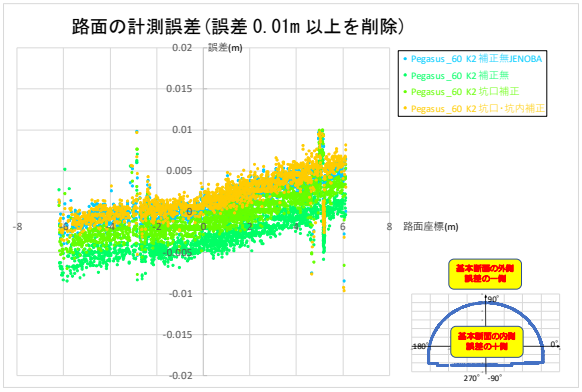
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

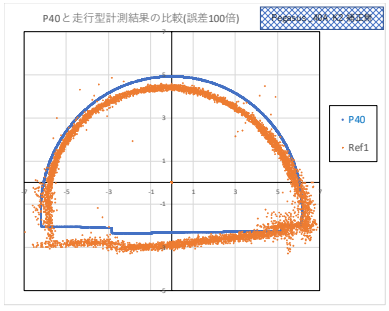


(c)計測速度 40km/h その 2

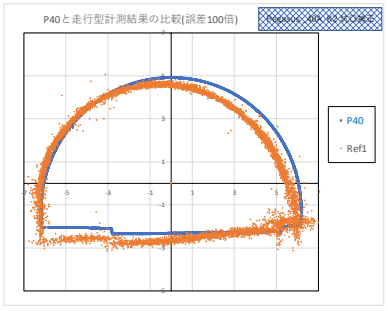


(d)計測速度 60km/h

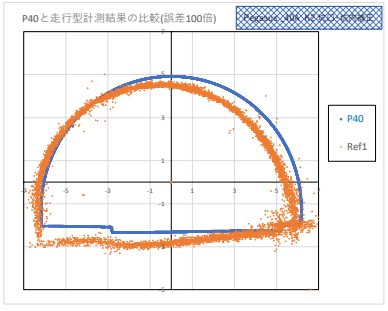
図 4.4.59 K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)その 1



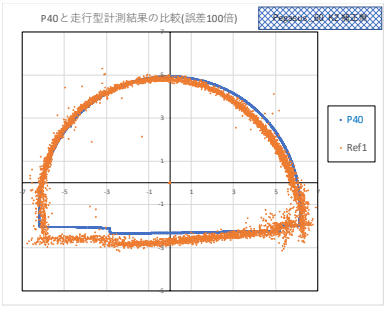
(a)40km(A)補正なし



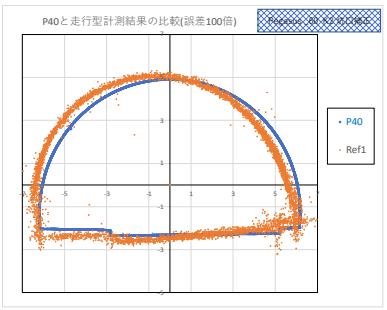
(b) 40km(A)坑口補正



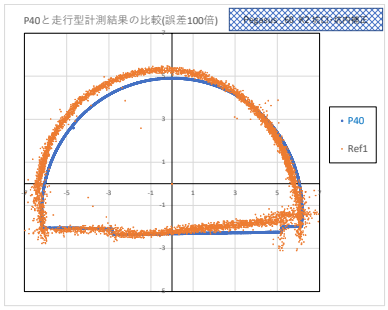
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



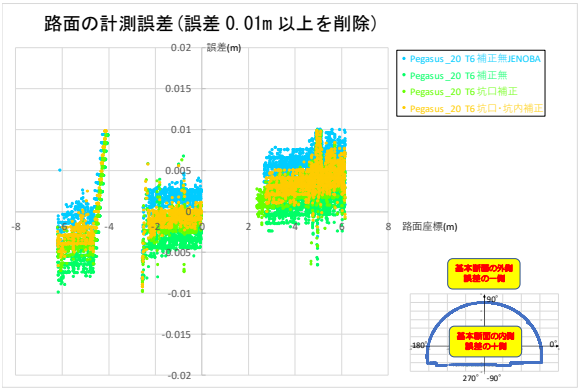
(e) 60km 坑口補正



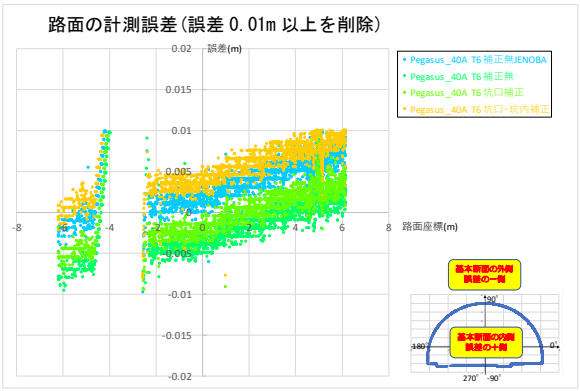
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.60 K2 地点計測結果(起点坑口から 452m)その 2

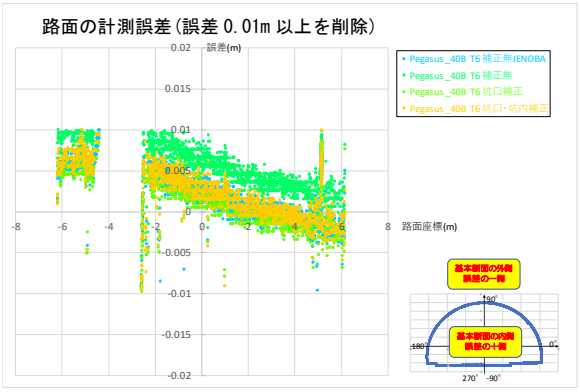
(4) T6 地点比較結果



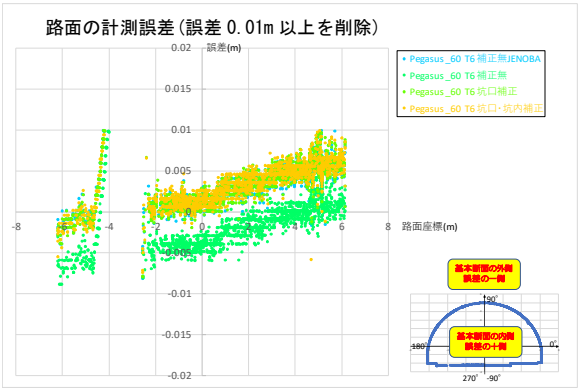
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

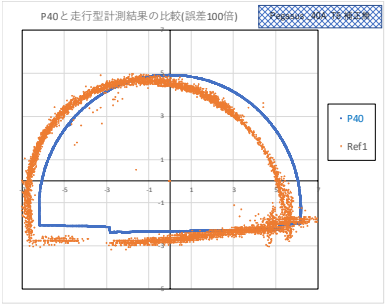


(c)計測速度 40km/h その 2

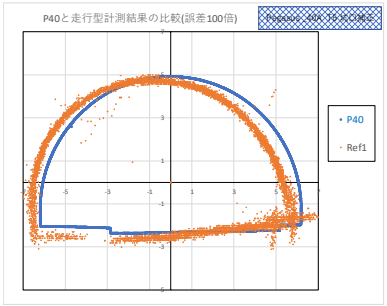


(d)計測速度 60km/h

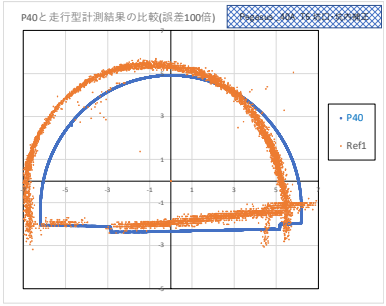
図 4.4.61　T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その 1



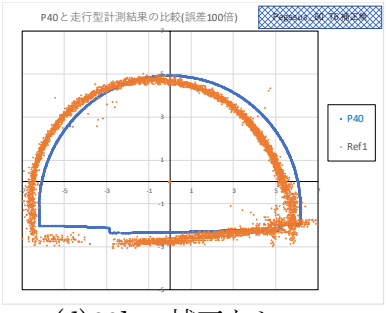
(a)40km(A)補正なし



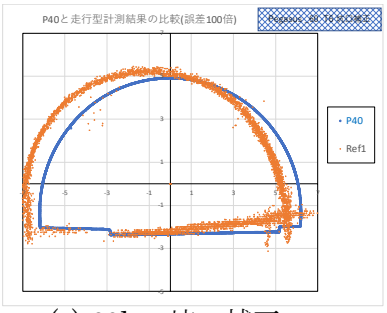
(b) 40km(A)坑口補正



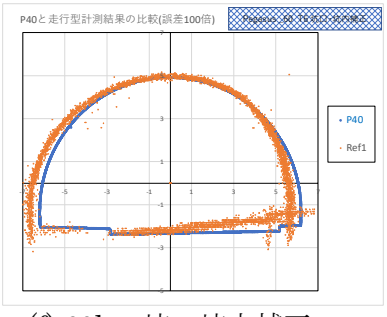
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



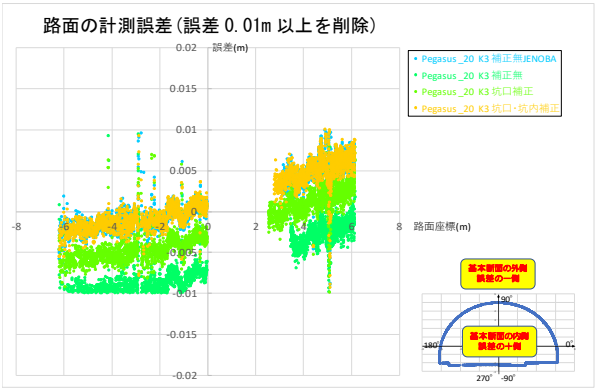
(e) 60km 坑口補正



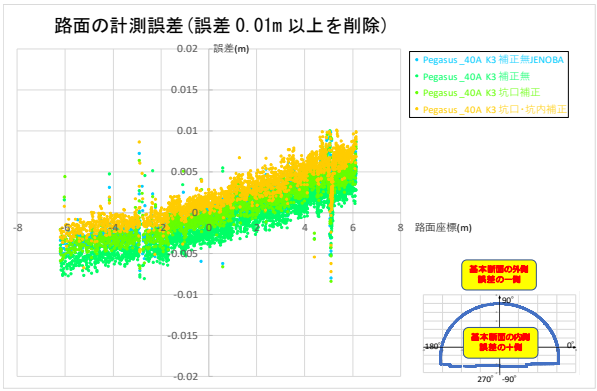
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.62　T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その 2

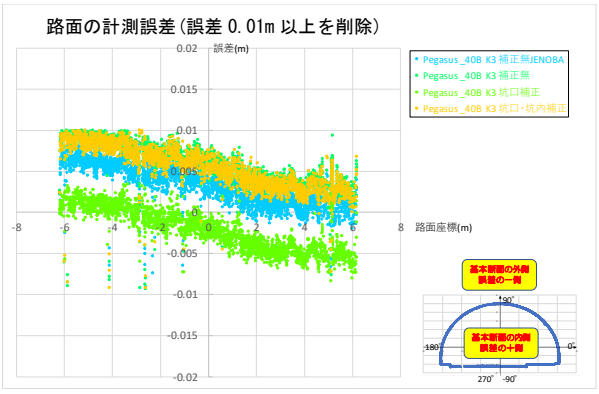
(5) K3 地点比較結果



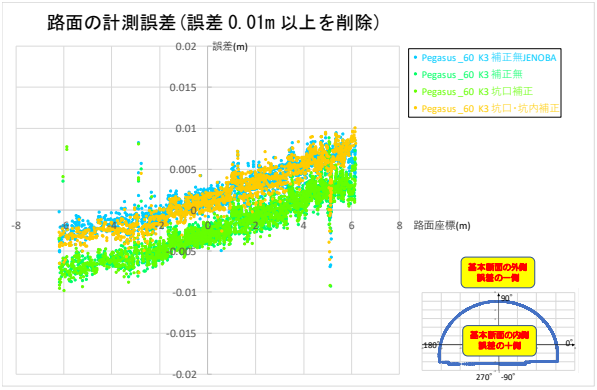
(a)計測速度 20km/h



(b)計測速度 40km/h その 1

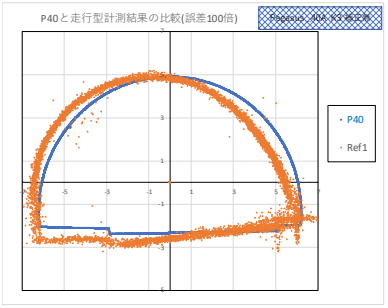


(c)計測速度 40km/h その 2

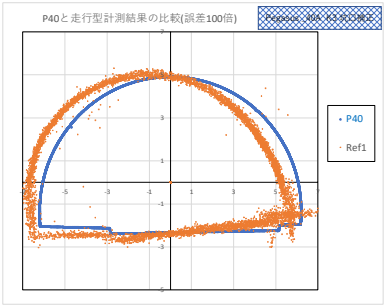


(d)計測速度 60km/h

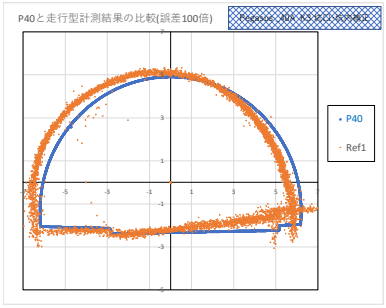
図 4.4.63 K3 地点計測結果（起点坑口から 651m）その 1



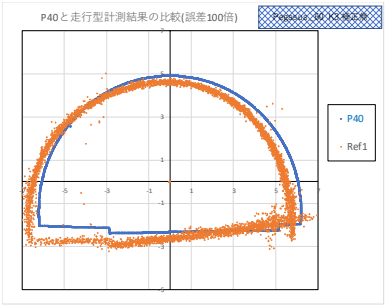
(a)40km(A)補正なし



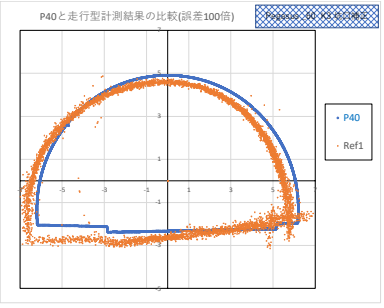
(b) 40km(A)坑口補正



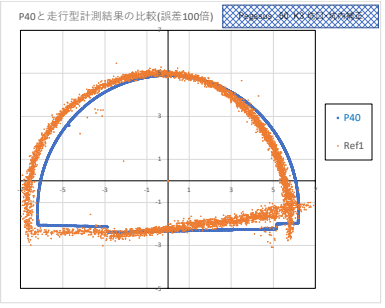
(c) 40km(A)坑口坑内補正



(d)60km 補正なし



(e) 60km 坑口補正



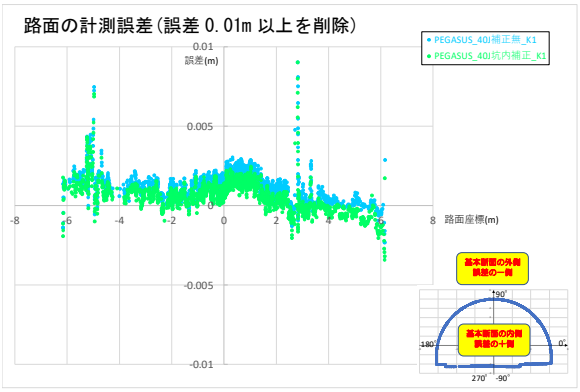
(f) 60km 坑口坑内補正

図 4.4.64 K3 地点計測結果（起点坑口から 651m）その 2

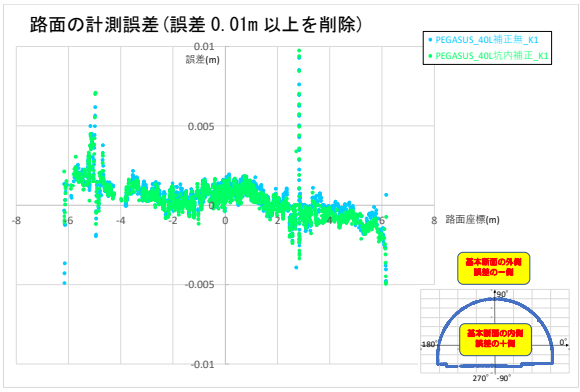
3) Pegasus（90°）計測結果

計測データの補正の結果、坑内補正を行った方が若干計測誤差は小さくなる傾向となった。計測結果を図 4.4.65～図 4.4.74 に示す。

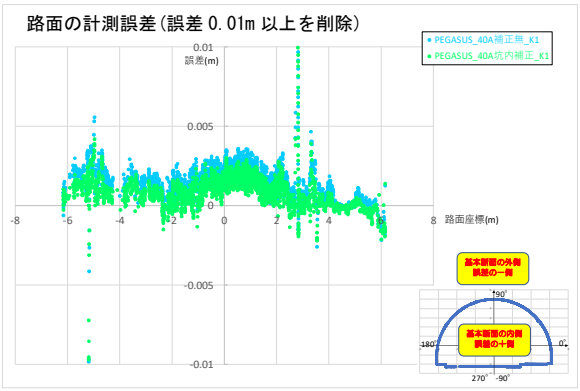
(1) K1 地点計測結果



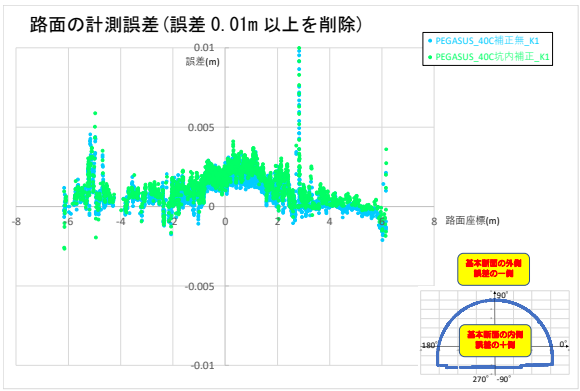
(a)計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 1



(b) 計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 2

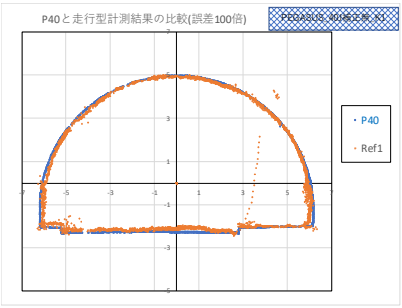


(c)計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 1

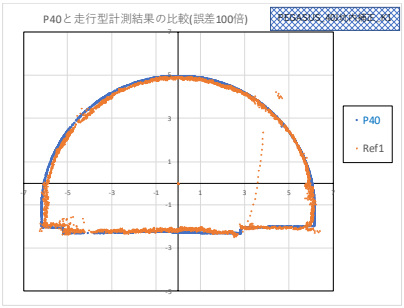


(d) 計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 2

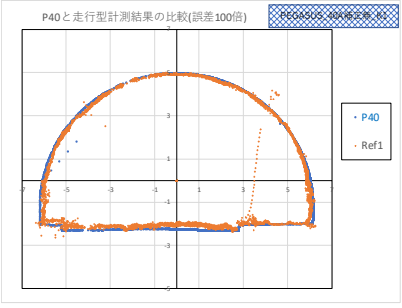
図 4.4.65 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その 1



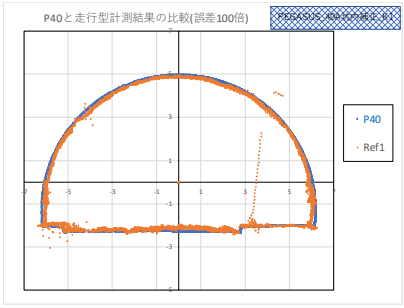
(a)40km(J)補正なし



(b) 40km(J)坑内補正



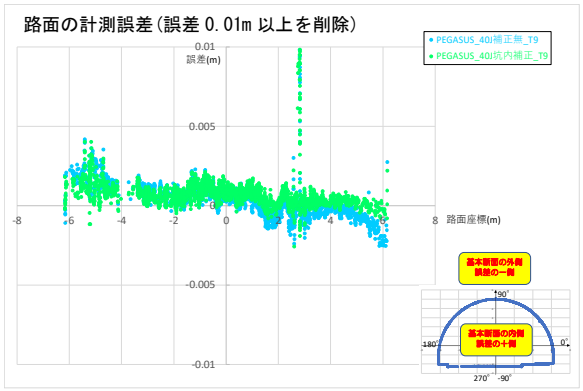
(c) 40km(A)補正なし



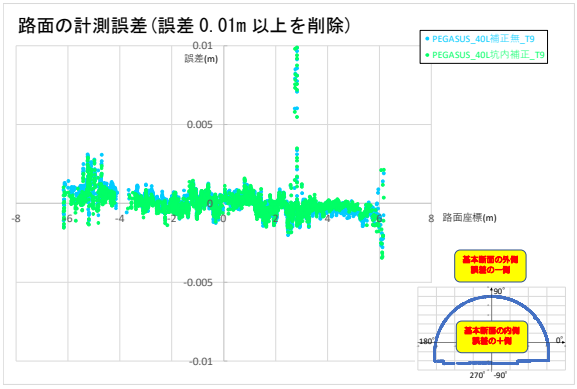
(d) 40km(A)坑内補正

図 4.4.66 K1 地点計測結果（起点坑口から 90m）その 2

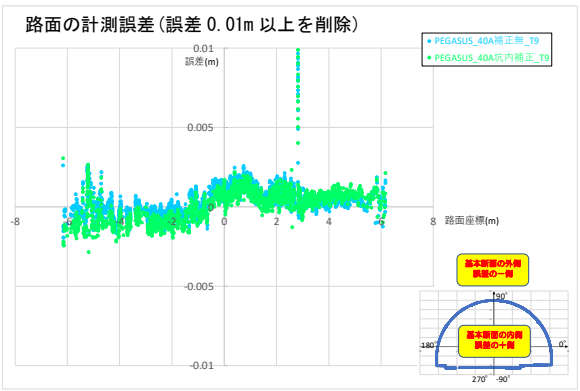
(2) T9 地点計測結果



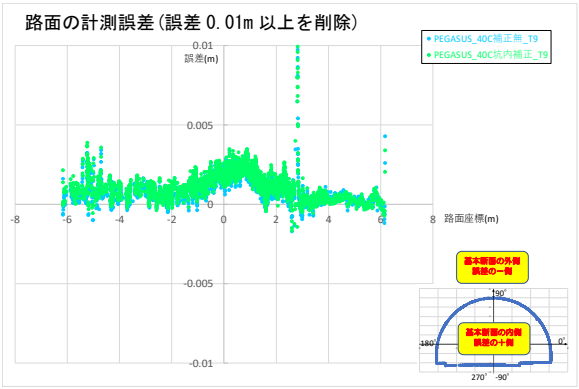
(a)計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 1



(b) 計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 2

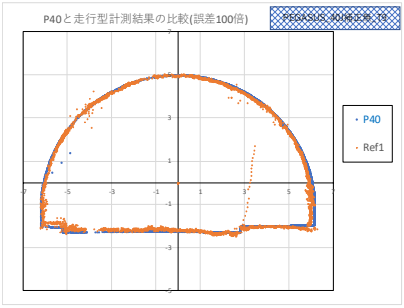


(c)計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 1

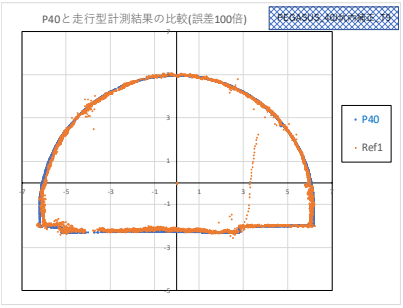


(d) 計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 2

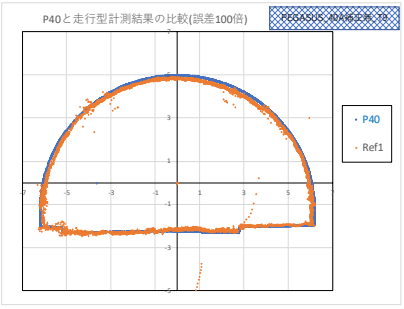
図 4.4.67 T9 地点計測結果（起点坑口から 370m） その 1



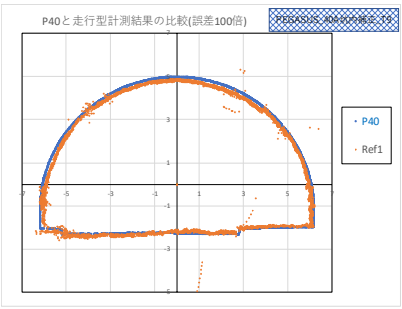
(a)40km(J)補正なし



(b) 40km(J) 坑内補正



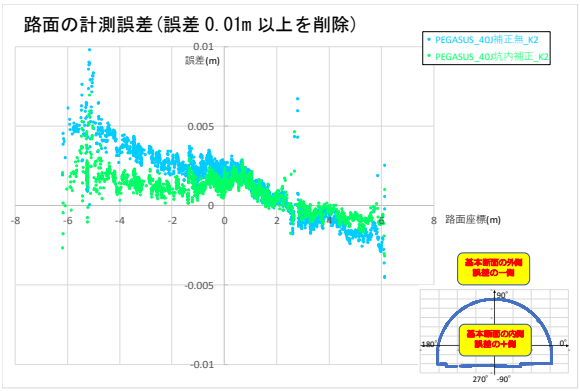
(c) 40km(A)補正なし



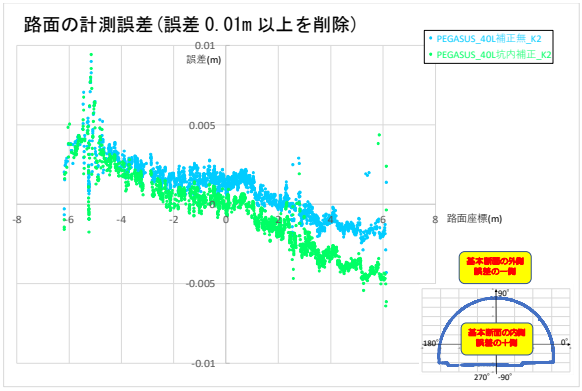
(d) 40km(A) 坑内補正

図 4.4.68 T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）その２

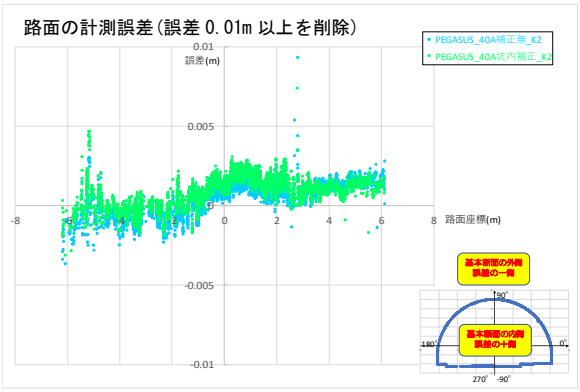
(3) K2 地点比較結果



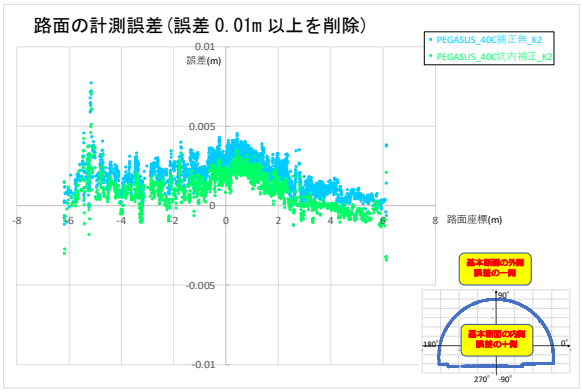
(a)計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 1



(b) 計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 2

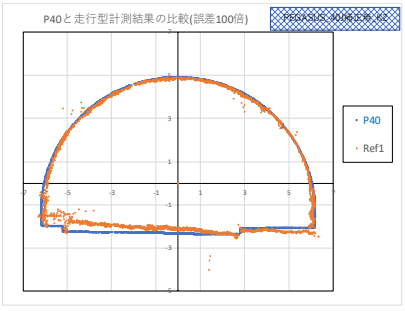


(c)計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 1

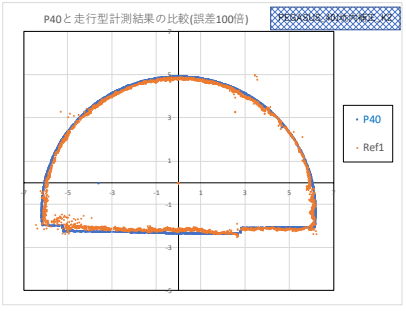


(d) 計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 2

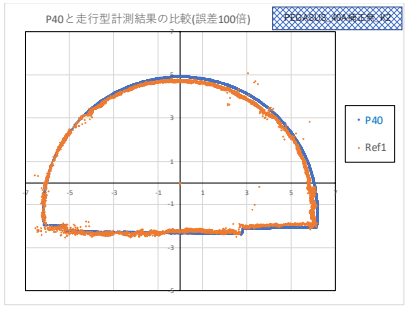
図 4.4.69　K2 地点計測結果（起点坑口から 452m）その 1



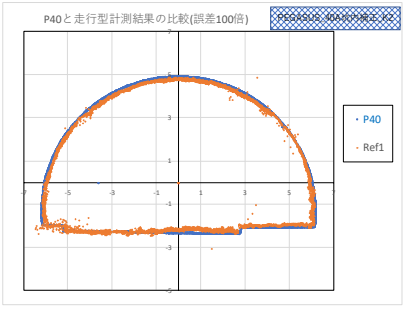
(a)40km(J)補正なし



(b) 40km(J) 坑内補正



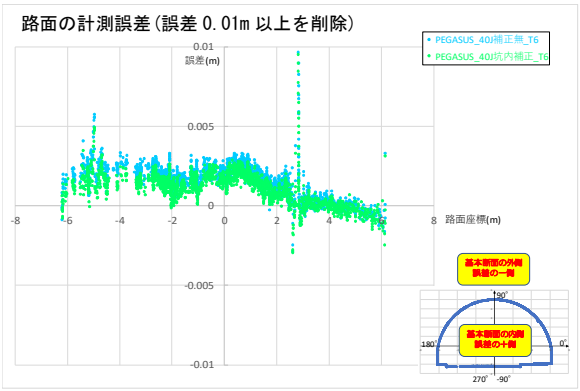
(c) 40km(A)補正なし



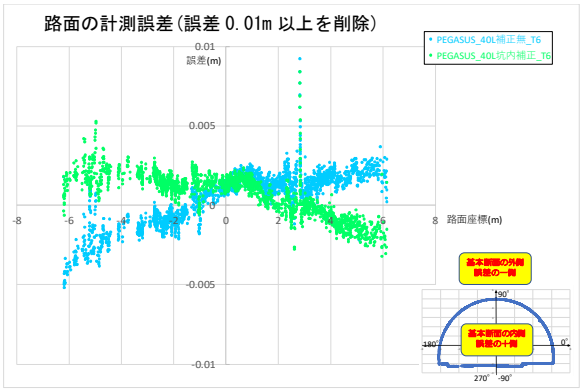
(d) 40km(A) 坑内補正

図 4.4.70　K2 地点計測結果（起点坑口から 452m）その２

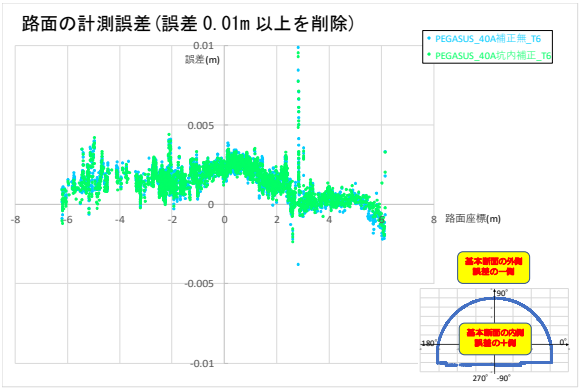
(4) T6 地点比較結果



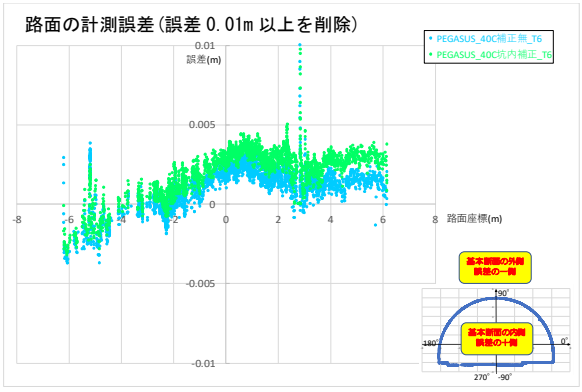
(a)計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 1



(b) 計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 2

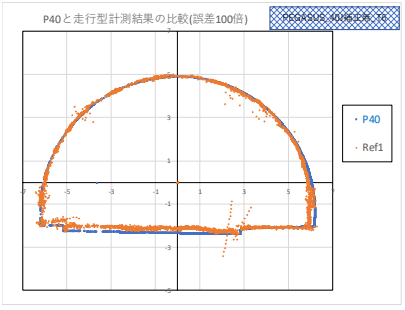


(c)計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 1

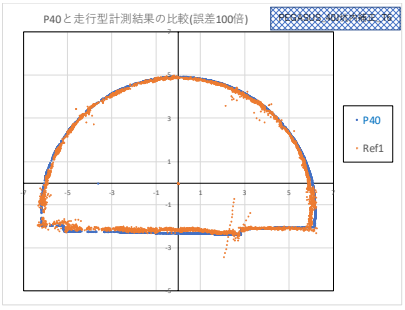


(d) 計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 2

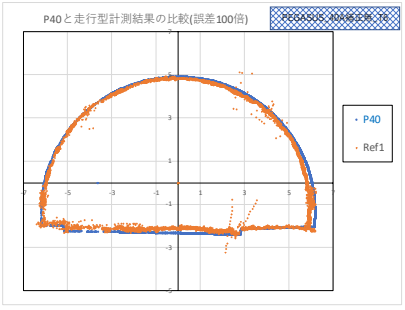
図 4.4.71 T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その 1



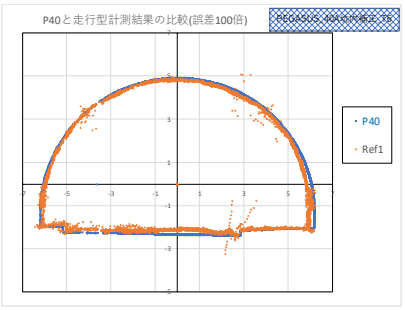
(a)40km(J)補正なし



(b) 40km(J) 坑内補正



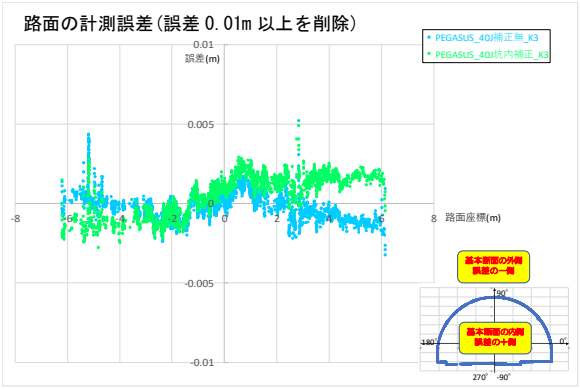
(c) 40km(A)補正なし



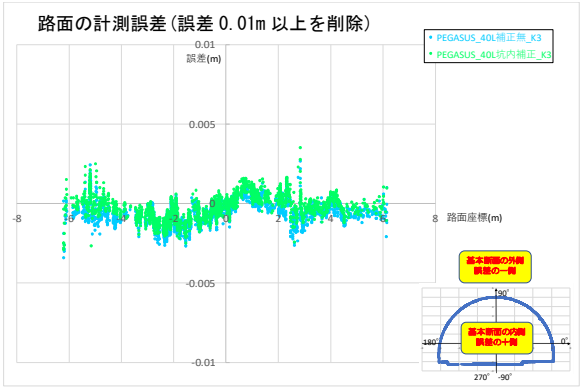
(d) 40km(A) 坑内補正

図 4.4.72 T6 地点計測結果（起点坑口から 477m）その２

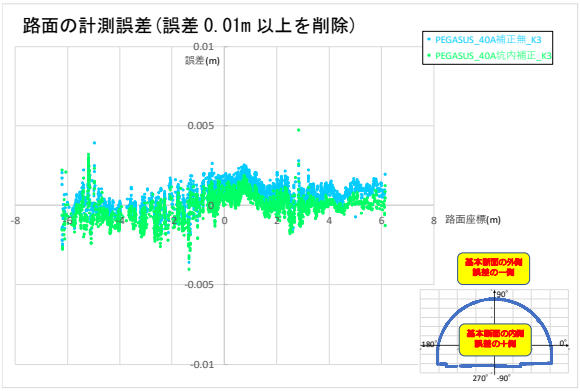
(5) K3 地点比較結果



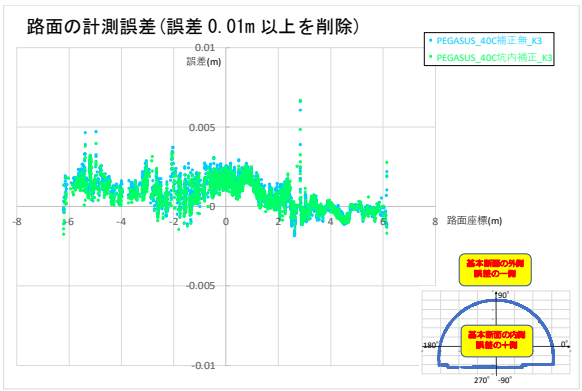
(a)計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 1



(b) 計測速度 40km/h(R2.11.19 計測)その 2

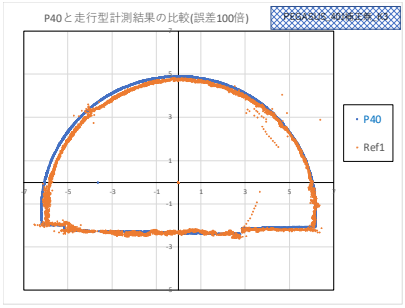


(c)計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 1

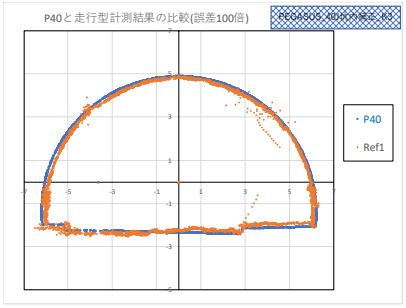


(d) 計測速度 40km/h(R2.11.20 計測)その 2

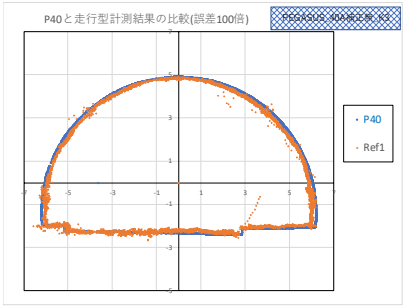
図 4.4.73 K3 地点計測結果（起点坑口から 651m）その 1



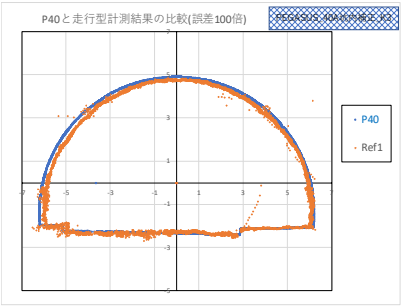
(a)40km(J)補正なし



(b) 40km(J) 坑内補正



(c) 40km(A)補正なし



(d) 40km(A) 坑内補正

図 4.4.74 K3 地点計測結果（起点坑口から 651m）その 2

4)まとめ

計測上の留意点は下記のとおりである。

① 基準点による補正を行えば、鉛直方向の計測誤差は減少傾向となる。

② 衛星不可視化時間が長いと、補正の効果は向上する傾向となる。

③ 補正を行っても回転誤差は解消されない。

4.5 位置補正および 2 時期比較を行う上での留意点

計測の結果、計測機器の保有している公差により回転誤差を生じていることから、2 時期比較を行う場合は計測データの補正を行う必要がある。その補正方法としては下記方法があり、各補正方法について検討する。

① 回転補正：路面を基準にして計測データの回転補正や位置補正を行う。

② 前回計測評定点によるランドマーク補正

：照明などの固定点を基準にして計測データの位置補正を行う

③ スキャンマッチング

：2 時期の点群データ全体をマッチングさせて、計測データの補正を行う。

4.5.1 2 時期比較のための補正方法の検討

1) 補正なしの場合

模擬変位箇所について、設置前後（R2.11.19 と R2.11.20）の計測結果の差分を算出した。

2) 算出結果

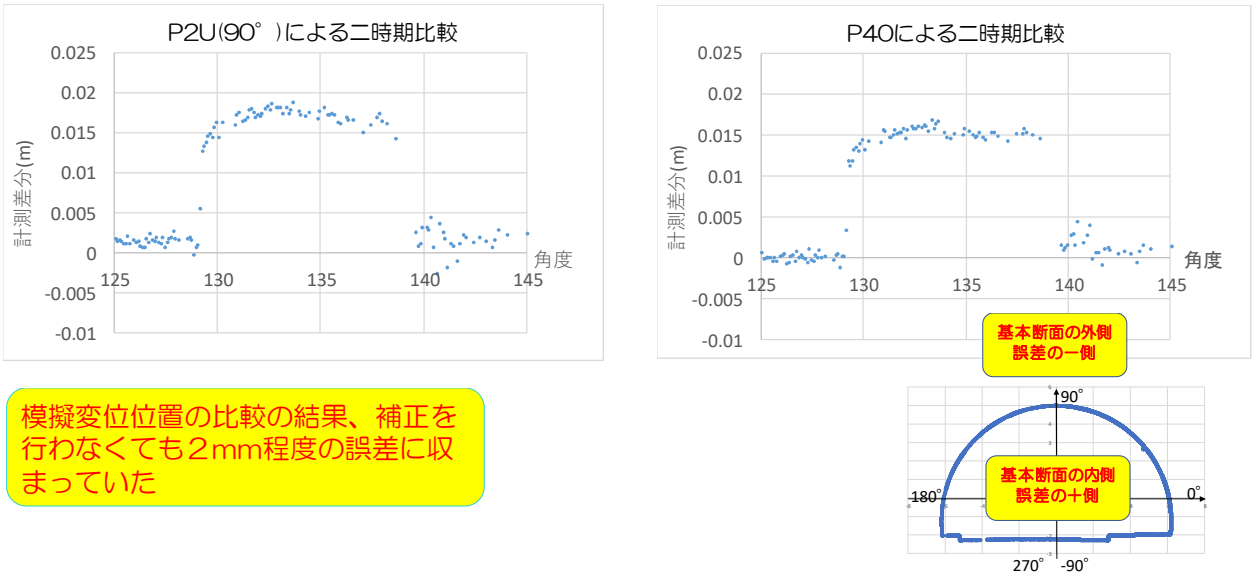
算出結果一覧表を表 4.4.14 に示す。差分算出の結果、誤差は 2mm 程度以内となり内空変形は評価できていると考えられる。

表 4.4.14 算出結果一覧表

計測断面	角度	P2U(90度)差分	P40差分	誤差
K3地点	134° 付近	17.7mm	15.7mm	2.0mm
	184° 付近	17.9mm	16.3mm	1.6mm
T9地点	133° 付近	22.0mm	22.5mm	0.5mm
	184° 付近	17.8mm	18.3mm	0.5mm

(1) K3 地点（134° 付近） ベニヤ板設置箇所

K3 地点（134° 付近）の二時期比較結果を図 4.5.1 に示す。

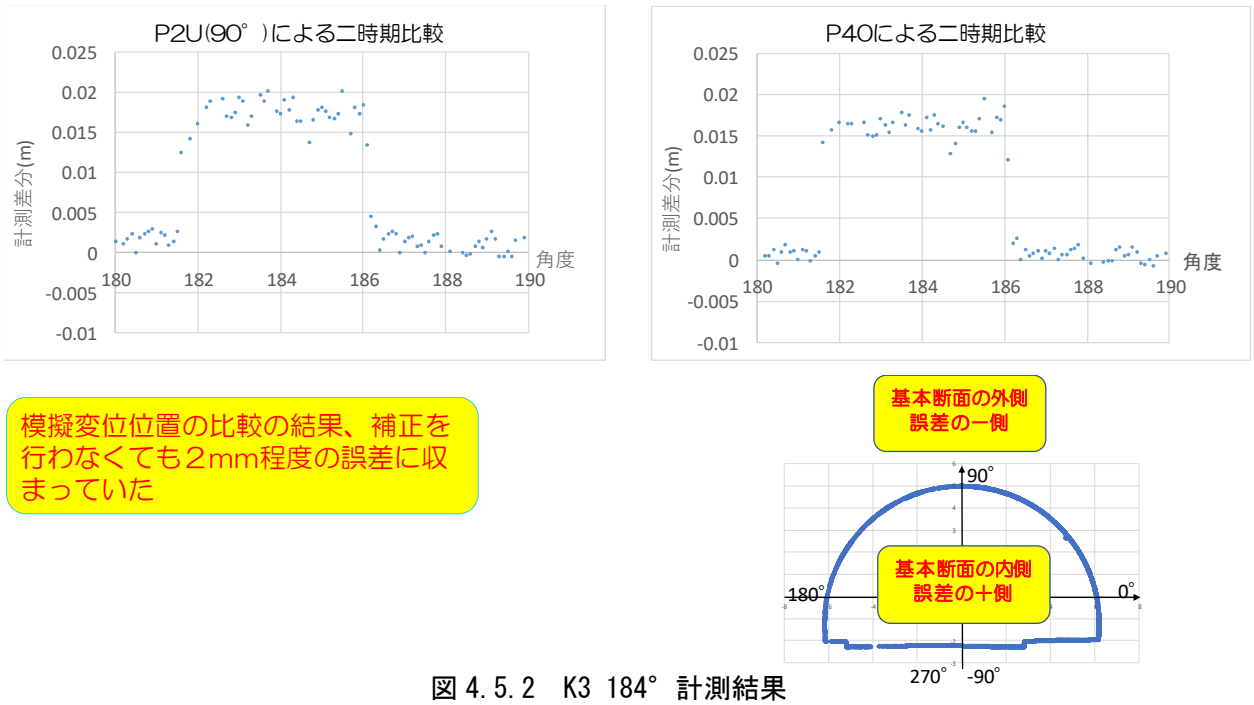


模擬変位位置の比較の結果、補正を行わなくても２mm程度の誤差に収まっていた

図 4.5.1 K3 134° 計測結果

(2) K3 地点（184° 付近） ベニヤ板設置箇所

K3 地点（184° 付近）の二時期比較結果を図 4.5.2 に示す。



模擬変位位置の比較の結果、補正を行わなくても２mm程度の誤差に収まっていた

図 4.5.2 K3 184° 計測結果

(3) T9 地点（133° 付近）　ベニヤ板設置箇所

T9 地点（133° 付近）の二時期比較結果を図 4.5.3 に示す。

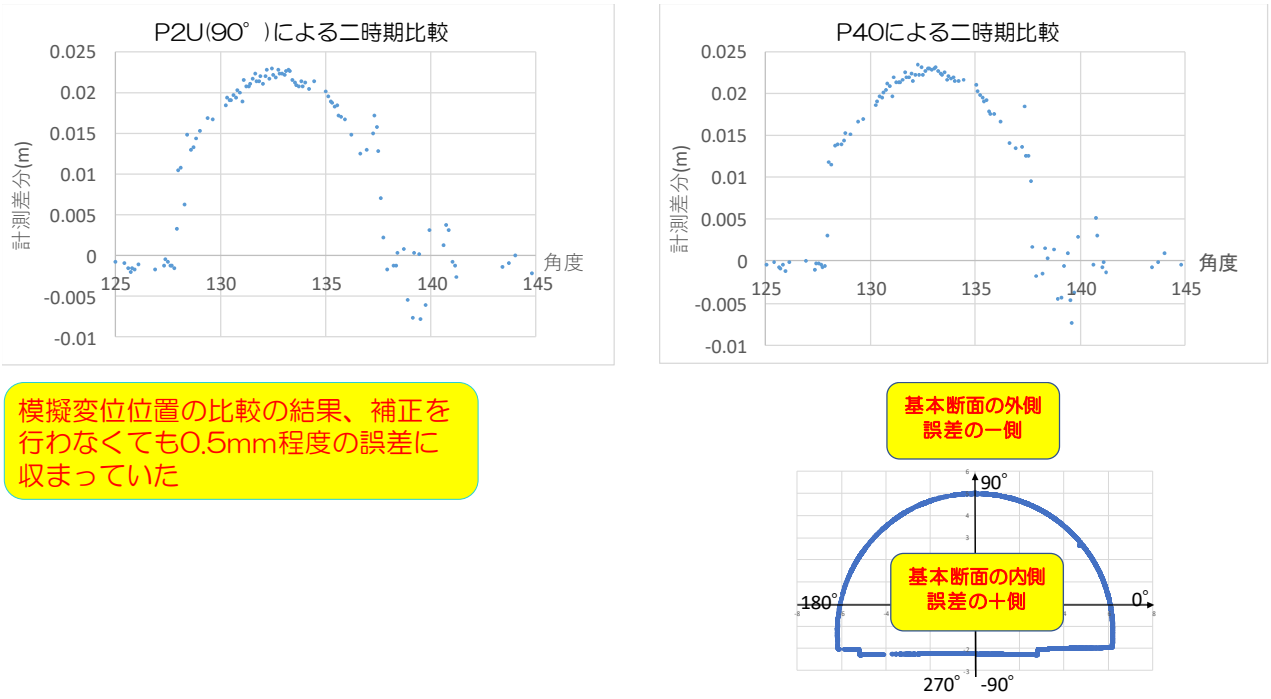


図 4.5.3　T9　133° 計測結果

(4) T9 地点（184° 付近）　ベニヤ板設置箇所

T9 地点（184° 付近）の二時期比較結果を図 4.5.4 に示す。

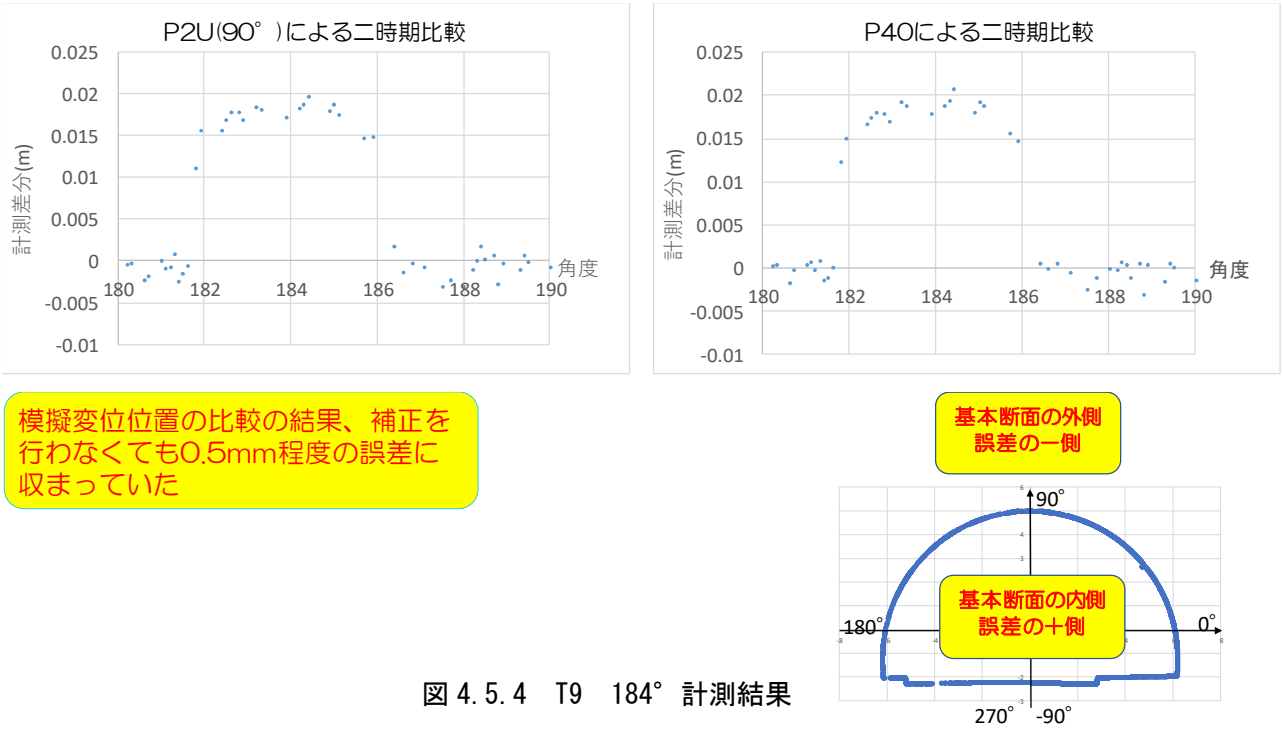


図 4.5.4　T9　184° 計測結果

(5) T9 地点（184° 付近）　シルバーシートによる大断面変形を想定

T9 地点（184° 付近）の二時期比較結果を図 4.5.5 に示す。

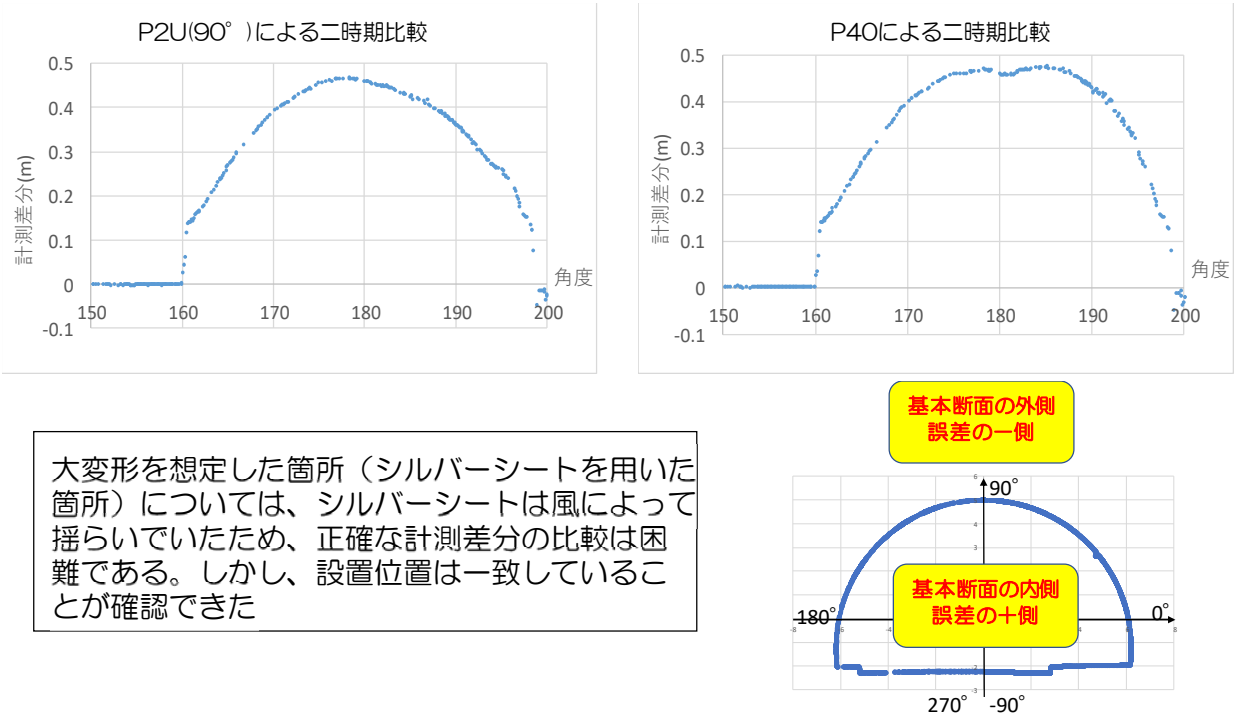


図 4.5.5　T9　184° 計測

4.5.2 回転補正

各種検討の結果、計測機器が保有している回転誤差が生じていることを確認できたため、2 時期の比較においてはその回転誤差を補正して比較を行う必要がある。ここでは、路面を基準にした補正方法を検討する。

1) 補正方法

補正方法は下記手順によるものとし、２時期比較の検証を行った。

① ２時期の各計測データについて路面の計測誤差の近似直線を算出

② その近似直線の水平面との角度を求める

③ 上記で求めた角度を補正角として路面中心を基準に計測データを補正

④ 路面中心を基準に２時期データの位置合わせをして計測データを比較

2) 検証

検証方法として、同じ計測機器の場合と異なる計測機器の場合とを検証した。検証ケース一覧表を表 4.4.15 に示す。

表 4.4.15　検証ケース一覧表

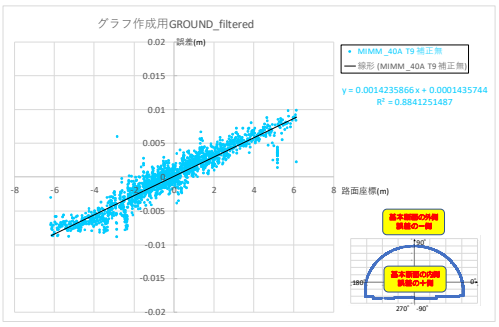
検証ケース	計測ケース１	計測ケース２	計測速度	備考
1	MIMM(R1.11.22)	MIMM(R1.11.22)	40km/h	2 走行データの比較
2	Pegasus(R1.11.22)	Pegasus(R1.11.22)	40km/h	2 走行データの比較

3) 検証方法

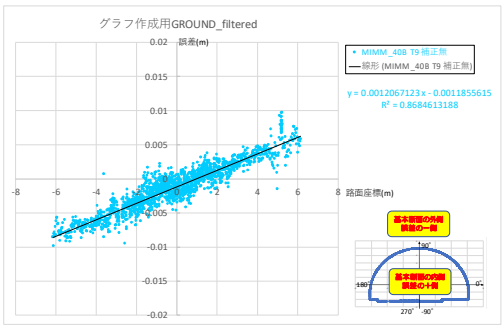
(1) 検証手順

検証は下記手順に従って進めた。

① ２時期の各計測データについて路面の計測誤差の近似直線を算出（図 4.5.6 参照）



(a)計測速度 40km/h(R1.11.19 計測)その１



(b) 計測速度 40km/h(R1.11.19 計測)その２

図 4.4.6 T9 地点計測結果（起点坑口から 370m）

② その近似直線の水平面との角度を求める

・その１の近似直線式より　Y=0.0014235866+0.0001435744　より 0.081565449 度

・その２の近似直線式より　Y=0.0012067123+0.00011855615　より 0.069139488 度

③ 上記で求めた角度を補正角として路面中心を基準に計測データを補正

(2) 検証結果（ケース１　MIMM） T9 地点

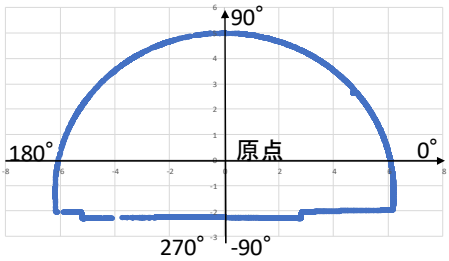
T9 地点検証結果を表 4.4.16 に示す。

表 4.4.16 T9 地点検証結果

検討箇所		回転補正無（原点からの距離）			回転補正有（原点からの距離）			備　考
		40A_T9	40B_T9	差分①	40A_T9	40B_T9	差分②	
アーチ天端	90度地点	4.9822	4.9840	−0.0018	4.9844	4.9840	0.0004	補正により差分は減少
アーチ肩	45度地点	5.2778	5.2765	0.0013	5.2772	5.2744	0.0028	補正により差分は増加
アーチ肩	225度地点	3.1939	3.1894	0.0046	3.1945	3.1915	0.0030	補正により差分は減少
側壁部	0度地点	6.0708	6.0670	0.0038	6.0679	6.0641	0.0038	補正による変動は少ない
側壁部	180度地点	6.0682	6.0728	−0.0046	6.0711	6.0757	−0.0046	補正による変動は少ない
トンネルセンター下部	270度地点	2.2518	2.2493	0.0025	2.2496	2.2493	0.0003	補正により差分は減少

※トンネル中心部の路面位置で高さ調整は行っている

※移動平均を実施している



回転補正を行った場合は最大5mm程度の誤差となった。

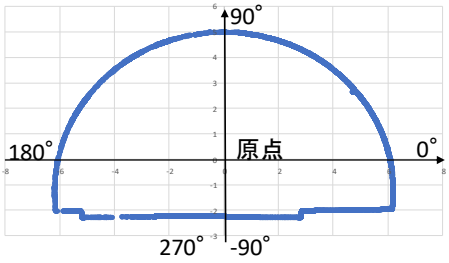
(3) 検証結果（ケース１　MIMM）　K1 地点

K1 地点検証結果を表 4.4.17 に示す。

表 4.4.17　K1 地点検証結果

検討箇所		回転補正無（原点からの距離）			回転補正有（原点からの距離）			備　考
		40A_K1	40B_K1	差分①	40A_K1	40B_K1	差分②	
アーチ天端	90度地点	4.9833	4.9812	0.0022	4.9853	4.9854	−0.0001	補正により差分は減少
アーチ肩	45度地点	5.2734	5.2705	0.0029	5.2732	5.2720	0.0012	補正により差分は減少
アーチ肩	225度地点	3.1931	3.1963	−0.0031	3.1933	3.1948	−0.0015	補正により差分は減少
側壁部	0度地点	6.0592	6.0569	0.0023	6.0570	6.0547	0.0023	補正による変動は少ない
側壁部	180度地点	6.0605	6.0619	−0.0014	6.0627	6.0641	−0.0014	補正による変動は少ない
トンネルセンター下部	270度地点	2.2517	2.2533	−0.0016	2.2497	2.2490	0.0007	補正により差分は減少

※トンネル中心部の路面位置で高さ調整は行っている
※移動平均により算出



回転補正を行った場合は2mm程度の誤差となった。

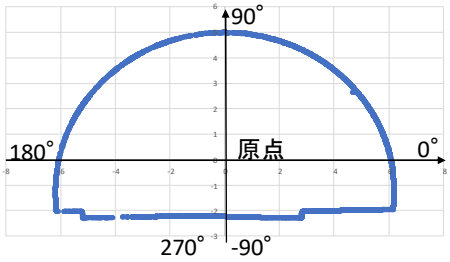
(4) 検証結果（ケース１　MIMM）　T９地点

T9 地点検証結果を表 4.4.18 に示す。

表 4.4.18　T9 地点検証結果

検討箇所		回転補正無（原点からの距離）			回転補正有（原点からの距離）			備　考
		40A_T9	40B_T9	差分①	40A_T9	40B_T9	差分②	
アーチ天端	90度地点	4.9795	4.9873	−0.0078	4.9873	4.9873	0.0000	
アーチ肩	45度地点	5.2745	5.2806	−0.0062	5.2822	5.2825	−0.0003	
アーチ肩	225度地点	3.1974	3.1848	0.0126	3.1897	3.1829	0.0067	
側壁部	0度地点	6.0684	6.0700	−0.0016	6.0715	6.0726	−0.0011	
側壁部	180度地点	6.0693	6.0709	−0.0015	6.0662	6.0682	−0.0021	
トンネルセンター下部	270度地点	2.2544	2.2461	0.0083	2.2466	2.2461	0.0005	

※トンネル中心部の路面位置で高さ調整は行っている
※移動平均を実施している



回転補正を行った場合は一部を除き2mm程度の誤差となった。

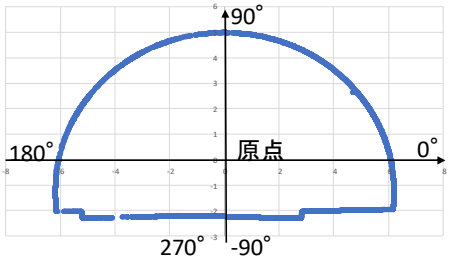
(5) 検証結果（ケース２　P2U（40°））　T９地点

T9 地点検証結果を表 4.4.19 に示す。

表 4.4.19　T9 地点検証結果

検討箇所		回転補正無（原点からの距離）			回転補正有（原点からの距離）			備　考
		40A_T9	40B_T9	差分①	40A_T9	40B_T9	差分②	
アーチ天端	90度地点	4.9889	4.9811	0.0077	4.9808	4.9811	−0.0003	補正により差分は減少
アーチ肩	45度地点	5.2808	5.2719	0.0089	5.2770	5.2714	0.0056	補正により差分は減少
アーチ肩	225度地点	3.1848	3.1962	−0.0114	3.1886	3.1967	−0.0081	補正により差分は減少
側壁部	0度地点	6.0693	6.0688	0.0005	6.0719	6.0681	0.0038	補正により差分は増加
側壁部	180度地点	6.0735	6.0702	0.0032	6.0708	6.0709	−0.0001	補正により差分は減少
トンネルセンター下部	270度地点	2.2454	2.2532	−0.0078	2.2534	2.2532	0.0002	補正により差分は減少

※トンネル中心部の路面位置で高さ調整は行っている
※移動平均を実施している



回転補正を行った場合は最大８mm程度の誤差となった。

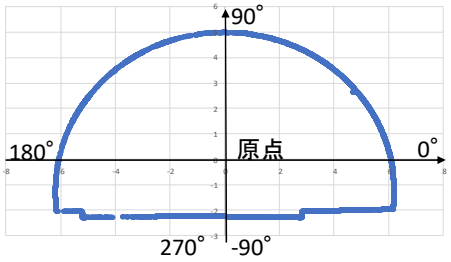
(6) 検証結果（ケース２　P2U（40°））　K1 地点

K1 地点検証結果を表 4.4.20 に示す。

表 4.4.20　K1 地点検証結果

検討箇所		回転補正無（原点からの距離）			回転補正有（原点からの距離）			備　考
		40A_K1	40B_K1	差分①	40A_K1	40B_K1	差分②	
アーチ天端	90度地点	4.9863	4.9874	−0.0010	4.9871	4.9874	−0.0003	補正により差分は減少
アーチ肩	45度地点	5.2722	5.2753	−0.0031	5.2738	5.2739	−0.0001	補正により差分は減少
アーチ肩	225度地点	3.1942	3.1896	0.0045	3.1926	3.1910	0.0016	補正により差分は減少
側壁部	0度地点	6.0569	6.0614	−0.0045	6.0584	6.0594	−0.0010	補正により差分は減少
側壁部	180度地点	6.0648	6.0605	0.0043	6.0633	6.0625	0.0009	補正により差分は減少
トンネルセンター下部	270度地点	2.2500	2.2516	−0.0016	2.2492	2.2516	−0.0024	補正により差分は増加

※トンネル中心部の路面位置で高さ調整は行っている
※移動平均を実施している



回転補正を行った場合は最大２mm程度の誤差となった。

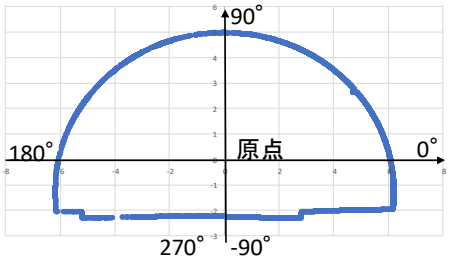
(7) 検証結果（ケース２P2U（40°））　T９地点

T9 地点検証結果を表 4.4.21 に示す。

表 4.4.21　T9 地点検証結果

検討箇所		回転補正無（原点からの距離）			回転補正有（原点からの距離）			備　考
		40A_K1	40B_K1	差分①	40A_K1	40B_K1	差分②	
アーチ天端	90度地点	4.9840	4.9834	0.0006	4.9823	4.9834	−0.0011	
アーチ肩	45度地点	5.2775	5.2763	0.0012	5.2779	5.2757	0.0022	
アーチ肩	225度地点	3.1885	3.1883	0.0002	3.1880	3.1888	−0.0008	
側壁部	0度地点	6.0701	6.0707	−0.0006	6.0724	6.0699	0.0025	
側壁部	180度地点	6.0705	6.0693	0.0012	6.0681	6.0701	−0.0019	
トンネルセンター下部	270度地点	2.2491	2.2524	−0.0033	2.2507	2.2524	−0.0016	

※トンネル中心部の路面位置で高さ調整は行っている
※移動平均を実施している



回転補正を行った場合は最大２mm程度の誤差となった。

4.5.3 ランドマーク補正

1）ランドマーク補正の概要

ランドマーク補正は、位置が既知の補正点に対し、車両からレーザにより計測した補正点までの相対距離と、自己位置推定装置により推定した位置と補正点の位置との距離を比較し、誤差を予測して自己位置推定を再計算することで位置を補正する手法である。

トンネルの断面変形の有無などの変状の進行性を把握するためには、回転補正の他、坑内にある既知の点を合わせることで 2 時期の比較精度を向上させることができる。

和知トンネルでは、両坑口と坑内に 200m 程度間隔で設置した補正点を用い、補正の有無について検討を行った。

その結果、断面の回転については補正の有無で大きな差異は見られない結果となった。しかし、トンネル中心位置のずれやトンネル縦断方向の位置は補正より改善されることがわかった。

2）補正方法

坑内にマーカーを設置して補正する場合は、レーザの反射輝度が判別できる程度の大きさとコントラストのあるものとする必要がある。

坑内の附属物等をランドマークとする場合は比較を行う期間で再設置など移動しないものを選定する必要がある。

4.5.4 スキャンマッチング

自動運転等の自己位置推定技術の一つに既存地図に対する位置推定であるスキャンマッチング

と呼ばれる方法がある。この方法は SLAM 技術の応用であり、時系列の形状比較を行い、マッチングポイントを探し地図と位置推定を同時に行う SLAM と異なり、スキャンマッチングは、すでに作成した 3D ないし 2D の地図に対して形状比較や形状特徴同士のマッチングを行い位置推定する方法である。本手法は SLAM 技術と同様の特徴を持ち、形状特徴のない場所での位置推定はできない。トンネルは本来 SLAM やスキャンマッチングが苦手とする同一形状が続く場所であるが、適切に特徴を抽出することができれば、スキャンマッチングによる位置推定、位置補正が可能となる。

本手法ではトンネル内の付帯設備に着目し、付帯設備をランドマークとした位置推定手法を開発した。また、今回は、過去の計測データとの比較を行う必要性から、SLAM ではなく、過去に計測した 3 次元点群データを環境地図としたレーザスキャンマッチングによる位置推定手法を開発した。

図 4.5.7 に本手法の流れを示す。本手法では、まず環境地図として使用する過去に計測したレーザ点群からトンネル照明と道路のみを抽出した点群地図を用意する。トンネル照明の抽出は、トンネル断面に対して楕円フィッティングを行い、フィッティング面から外れている点群の中でトンネル上部に存在するものを候補点として抽出する。この中には、トンネル縦断方向に延びるケーブルがあるが、トンネル縦断方向に連続するという特徴を使ってこれを除去する。またスキャンマッチングの際に使用する LiDAR は、Ouster OS-1-64 を用いた。OS-1-64 の性能諸元を表 4.4.22 に外観を図 4.5.8 に示す。

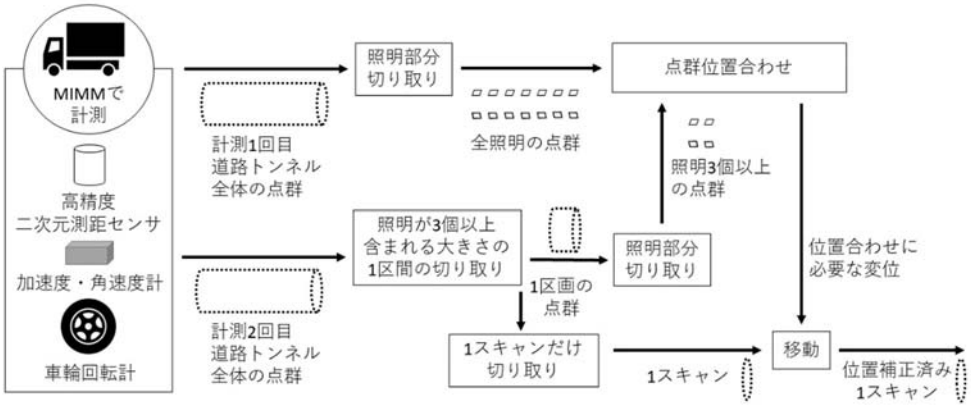


図 4.5.7　アルゴリズムフロー

表 4.4.22　OS1-64 性能諸元表.

解像度（鉛直）	64 channels
解像度（水平）	512、 1024、 or 2048
距離	120 m
視野角（鉛直）	33.2 deg (±16.6 deg)
角度分解能（鉛直）	0.53 deg
精度	±1.5 – 10 cm
速度（点群の取得数/秒）	1、310、720
回転速度	10 or 20 Hz
電源	14 – 20 W
質量	425 g
IP コード（防水防塵）	IP68、 IP69K



図 4.5.8　OS-1-64 3D LiDAR 外観

OS-1-64 は 64 ラインの LiDAR であり、図 4.5.8 に示すように高密度に計測を行うことができるため、1 回のスキャンの中で照明などの形状を目視確認できる程度に計測することができる。LiDAR によって取得した 1 スキャン分の点群データからも、環境地図作成時と同様の手法で、照明点群のみを候補点として抽出する（図 4.5.9 参照）。これらの抽出した照明点群同士を ICP によりマッチングする。

スキャンマッチングの有効性を確認するため実トンネルにおいて精度検証実験を行った。実験では図 4.5.10 に示すように MIMM 上部に OS-1 を取り付け実験した。MIMM との同期は GPS 受信機の PPS 信号を用いた。

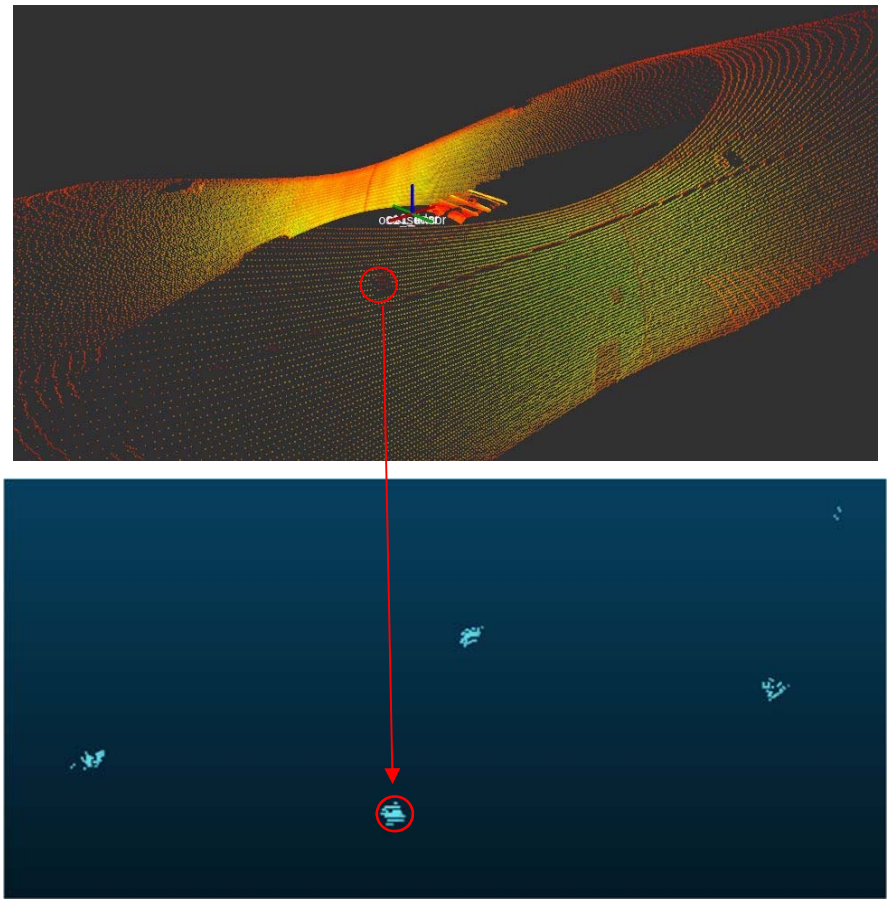


図 4.5.9 OS-1 LiDAR のデータと照明抽出結果



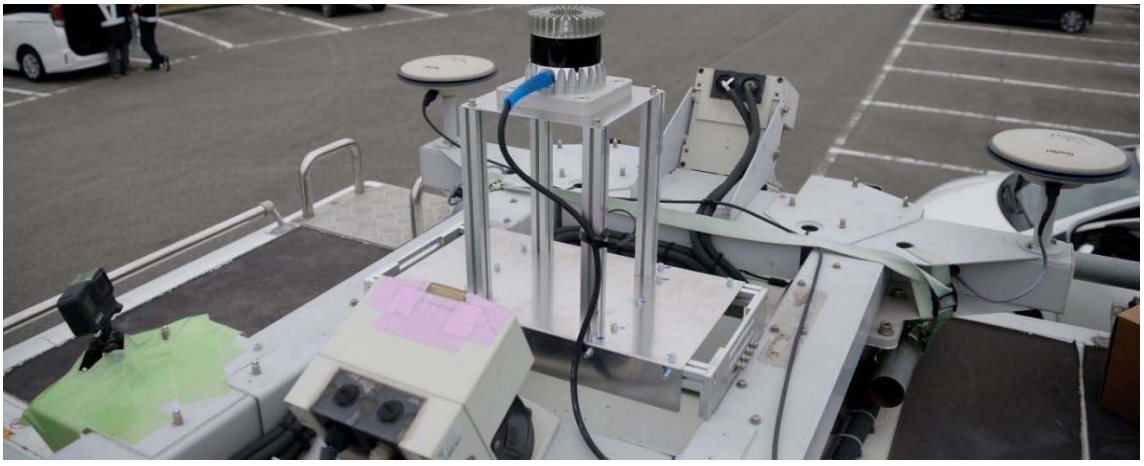


図 4.5.10 OS-1 の MIMM への取り付け

実験では、MIMM で時速 20Km、時速 60km で走行した。今回は 20Km/h 計測時における MIMM による GNSS/IMU 複合航法による位置推定結果と三次元計測結果を初回点検データと見なしリファレンスデータとし、これに対して 60km/h 計測時の GNSS/IMU 複合航法による位置推定、提案手法による位置推定結果を比較した。

図 4.5.11、図 4.5.12 に MIMM による位置推定結果を利用して三次元復元した結果を、リファレンスデータに重ねた結果の一部を示す。白い点はリファレンスデータ、青い点は MIMM による復元結果であり、白い点と大きくずれていることが見て取れる。つぎに図 4.5.12 に提案手法による三次元復元結果(赤点)を同様に重ねて表示したものを示す。図 4.5.11 に比べて白点と赤点が重なっていることが分かる。

次に図 4.5.13 に MIMM による位置推定結果および、提案手法による位置推定結果とリファレンスデータの位置推定結果との差分を比較した結果を示す。横軸はトンネル進行方向、縦軸は、

リファレンスデータからの差分を示す。

比較にあたっては、トンネル坑口を 0m 地点とし、そこから 1m 毎にポリラインを作成し、1m 毎の位置を比較した。点線は、MIMM の位置推定の 2 時期誤差結果、実線は提案手法の 2 時期誤差である。図 4.5.13 より、MIMM の位置推定結果は累積誤差により大きく誤差が乗っている一方で、提案手法は累積誤差が発生していないことが分かる。また高さ方向（z 軸）の誤差は水平面（xy 軸）に比べて小さいこともわかる。トンネル坑口付近で誤差が大きくなっているが、これはトンネル出口以降に照明が存在しないため、マッチング率が下がるためと思われる。提案手法では、誤差が xyz 軸方向に対してそれぞれ、0.183m (rms)、 0.153m(rms)、 0.027m(rms)となり、MIMM の誤差、0.612m(rms)、0.543m(rms)、 0.360m(rms)と比較して、高精度になることを確認した。

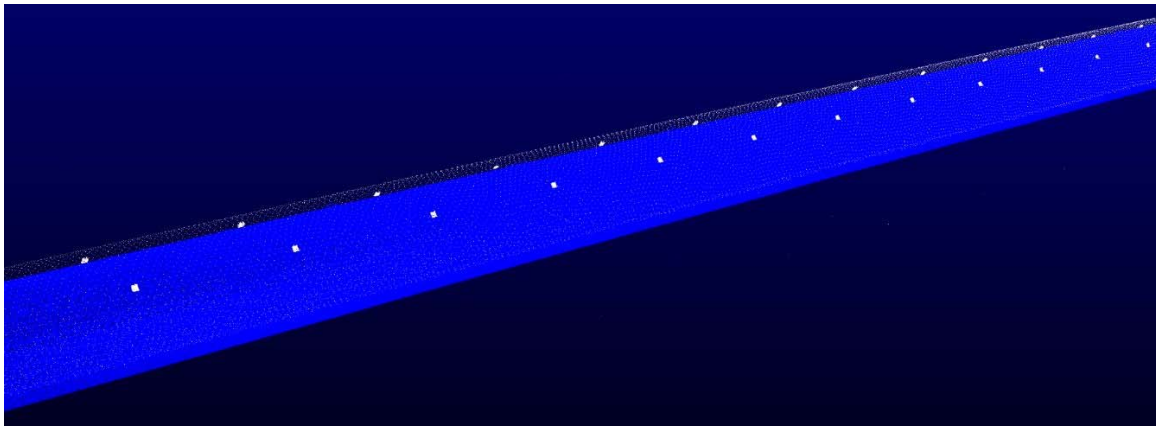


図 4.5.11　MIMM による計測結果の比較(白点 （MIMM） 時速 20km 青点 （MIMM） 時速 60km)

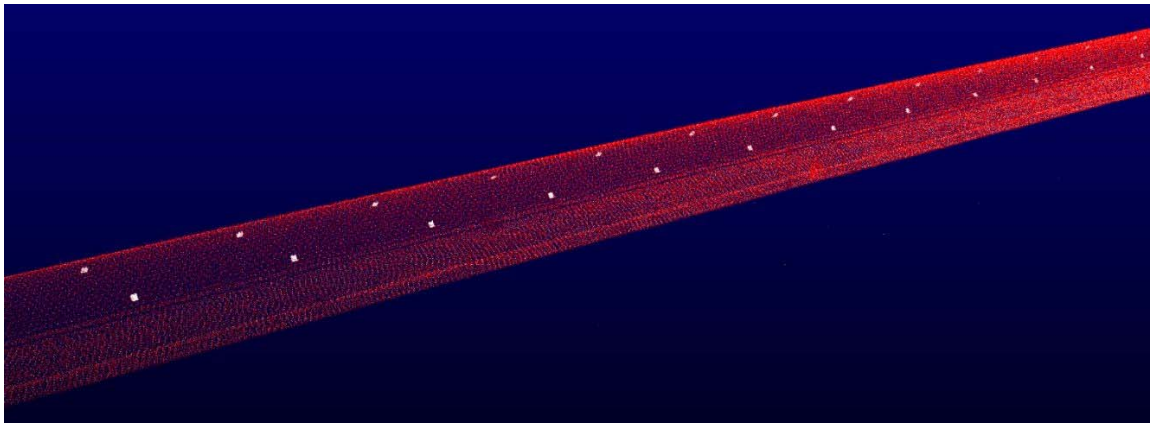


図 4.5.12 提案手法適用による結果(白点 （MIMM） 時速 20km 赤点(提案手法） 時速 60km)

スキャンマッチングでは、高さ方向の精度が劇的に改善しており、本手法を実装することによって、これまで手動で行っていた 2 時期の点群位置合わせを自動かつ高精度に行うことができるようになることが期待できる。従来 2 時期差分の位置合わせを行うために、場合によっては基準点測量と組み合わせたランドマークアップデートを行っていたが、本手法では既設トンネル内の付帯設備を利用することで、この基準点測量およびランドマークアップデートの処理を省略することが可能である。また、点群位置合わせも行う必要がないため、差分解析時の作業効率の大幅な向上が期待できる。

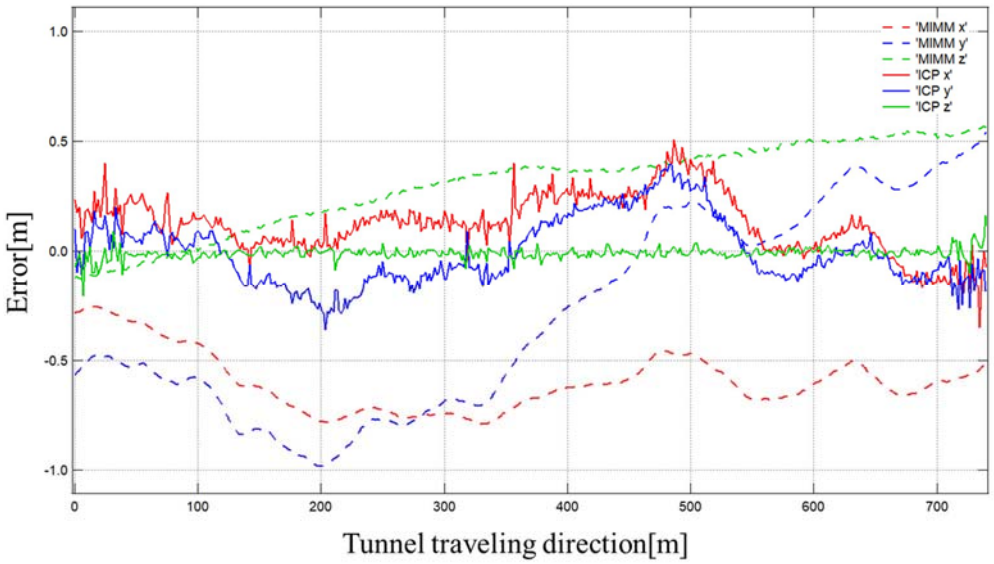


図 4.5.13 位置推定誤差

4.5.5 ユースケースに応じた補正方法

トンネル坑内等の衛星不可視下における MMS によるレーザ計測は、IMU の誤差の蓄積により回転や縦断位置の誤差が発生する。 1 回目の計測においては、横断方向の回転を生じていても一般に実施される測量と同程度の±2mm 程度の誤差で計測できることがわかった。縦断方向の誤差については、IMU やオドメーターの誤差が発生するため、トンネル内でカーブしている場合や延長が長い場合では誤差が大きくなることがわかった。一方、2 時期の比較を行うことでトンネル断面の変形の進行性を把握する場合においては、回転補正や縦断位置補正が必要となる場合がある。ここでは、レーザ計測の目的や必要な精度等のユースケースに応じた補正方法について整理する。想定されるユースケースと補正方法の対応を表 4.4.23 に示す。変状の進行性を評価するため 2 時期を比較する場合には、回転補正を実施することで適正に評価が可能である。また、ランドマーク補正やスキャンマッチングによる補正が困難な場合には、横断目地位置などを合わせて評価することが必要となる。さらに高精度で評価を行うためにはスキャンマッチングによる補正を実施することが望ましい。

表 4.4.23 ユースケースと補正方法

ユースケース	補正方法
トンネル断面形状、建築限界確認（断面のみの評価）	補正なし
変形モード解析（通常の精度、延長が短い場合、直線の場合）	補正なし
変形モード解析（高精度、延長が長い場合、カーブの場合）	ランドマーク補正
変形モードの差分解析（通常の精度、延長が短い場合、直線の場合）	回転補正
変形モードの差分解析（高精度、延長が長い場合、カーブの場合）	回転補正 ランドマーク補正 スキャンマッチング

4.6 まとめ

レーザ計測の特性を把握し、断面計測精度や 2 時期比較における精度および補正方法について検討を行った。

和知トンネルの試行では、速度による計測精度の違い、再現性、補正方法の検討および模擬変状を設置し外力性の変状に対する計測精度の検証を行った。

以下に検討結果をまとめる。

① MMS の変位計測精度　±2mm 程度
② 20km/h 程度の低速では回転誤差やデータのばらつきが大きくなるため、40km/h 以上での計測が望ましい。
③ 衛星の不可視時間が短いほど誤差が小さくなる傾向がる。
④ 40km/h での再現性の検証から±0.5mm 程度の誤差となった。
⑤ 道路トンネル定期点検要領の 1mm/年に対しては、5 年間隔での計測であれば 5mm となるため変位の進行を確認するとこは可能
⑥ 1mm/年未満か 1～3mm/年の判断は可能
⑦ 複数回の計測により変位の進行性のトレンドを確認して評価することが望ましい。
⑧ 外力による変状の評価や進行性の評価においては、コンター解析などにより面的な変形を確認することが重要であり、レーザ計測は有効な方法である。
⑨ 凹凸の計測相対的な精度は±1mm 程度
⑩ 2 時期を比較して変形の進行性を評価するためには回転補正、ランドマーク補正、スキャンマッチングによる補正等の補正を行うことでさらに高精度で評価が可能である。

【参考文献】

1）国土地理院ウェブサイトの地理院地図（https://maps.gsi.go.jp/）より抜粋
・国土地理院ウェブサイトの地理院地図（https://maps.gsi.go.jp/）をもとに和知トンネル位置を加筆

5　レーザ計測の評価法

5.1 概要

道路トンネルの健全性は、外力、材質劣化、漏水の変状区分で整理され、各変状区分に対応した変状種類の目安によって対策区分の判定が変わる。さらに外力はトンネルの構造安定性の評価項目であり、圧ざ・ひび割れ、うき・はく離、変形・移動・沈下等の変状種類に対し目安が設定されている。

MMS（Mobile Mapping System）は、車両に GPS、慣性航法装置（Inertial Measurement Unit）、レーザスキャナ、カメラ等のセンサを搭載し移動しながら車両周辺の環境情報を計測する移動計測車両である。

本章では、前「新都市社会融合創造研究会：走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用性研究」成果及び、4.位置情報の有効活用（以下、4 章という）で得られた知見から、上記の MMS を活用したレーザ計測の評価法について解説するものである。

5.2 変形モード解析方法

トンネル点検業務において、従来の人海戦術的な点検手法では、点検に時間を要し規制等による道路利用者への不便を強いてきた。この従来型点検の代替手法として、供用中の道路を規制することなく短時間で点検することが可能な走行型トンネル計測の活用が注目されている。

走行型計測は新しい技術であり、その計測結果をトンネルの健全度評価に活用するため、解析手法・評価方法を誤ることなく、適切な手法により妥当な評価・判定を行うことが重要である。

走行型トンネル計測車両による計測で得られる結果のうち、レーザ計測結果は 3 次元座標をもった点群（図 5.2.1）となり、従来の点検手法では得られなかった情報である。レーザ計測結果からは、覆工面の段差・うき（ブロック、目地、補修跡等）や路面の異常（盤ぶくれ、不陸、わだち等）を検出できるだけでなく、覆工の変形形状（凹凸変形モード）を推定して外力作用の有無を判定するなど、画像計測結果から得られたひび割れ等の変状原因を推定する判断材料とすることができる。以下、これらレーザ計測結果（点群）の解析方法・評価手法について説明する。

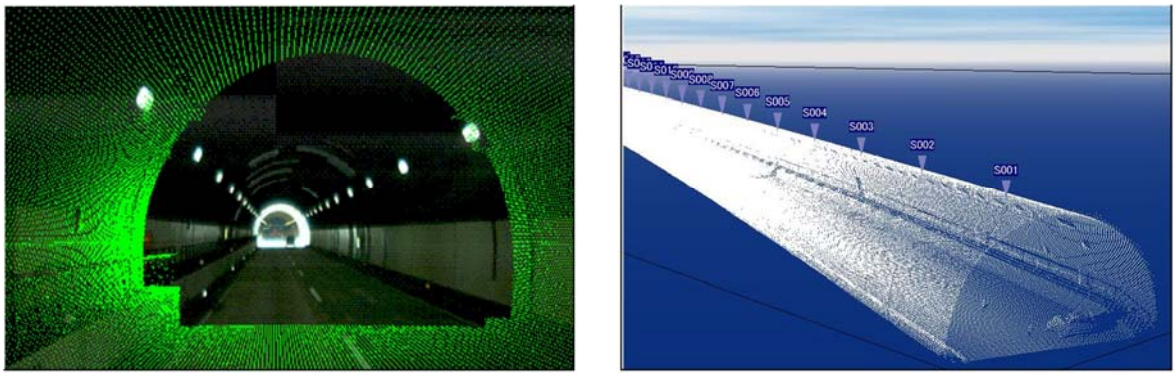


図 5.2.1　走行型レーザ計測点群 [1)]

レーザ計測で得られる点群データは単なる三次元の座標データでしかない。このため、トンネ

ルの変形状態を判断するためには、基準となるトンネル出来形断面を設定し、その面に対して点群データがどのような位置にあるかをコンターで示し視覚化する必要がある。

レーザ計測結果（点群データ）からコンターを作成するまでの大まかな流れを図 5.2.2 に示す。

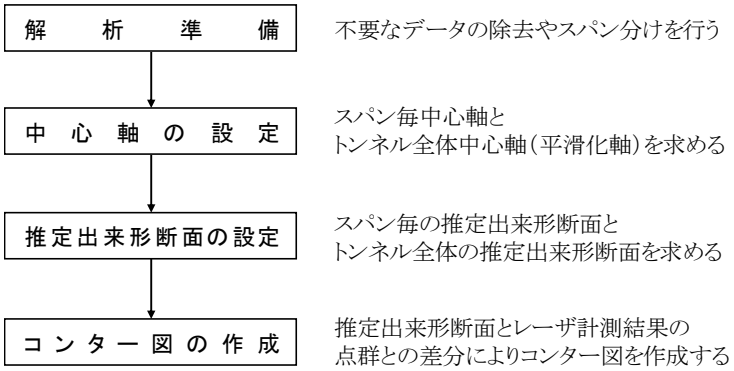


図 5.2.2　解析のフロー図 [1)]

なお、トンネル覆工が移動式型枠（セントル）で 1 スパン毎に構築されていることより、レーザ解析を行う上では以下を仮定している（図 5.2.3 参照）。

① スパン内の中心軸は直線である。

② トンネル全線の中心軸に対してスパン毎の中心軸は向きのズレ、不連続性を有する。

③ トンネル変形を判断するための基準となる推定出来形は、対象区間内（1 スパン毎、複数スパン毎）で同じ断面形状とする。（非常駐車帯等明らかに形状が異なる部分を除く）

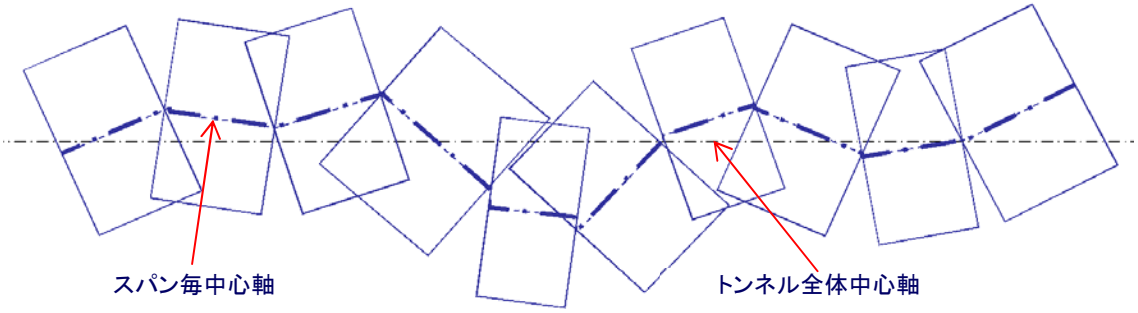


図 5.2.3　中心軸イメージ [1)]

以下、レーザ点群の解析方法について説明する。

1）解析準備

レーザ計測によって得られた点群データは、計測時の対向車や照明灯具、非常用設備等の坑内設備を含んでいる。中心軸や推定出来形断面を求める上で、これらのデータは解析結果に誤差を生じさせる要因となるため、確実に除外しなければならない。また、点群データはトンネル全体で連続したデータであるため、前述した仮定条件を反映させるため、実際の覆工打設に応じた施工目地（スパン境界）を認識させておくことが必要である。

(1) トンネル方向の仮軸A・B、施工目地

① トンネル中心に沿った軸、仮A軸（中心）の設定

道路面より一定の高さの左右レーザ点群の中点を仮 A 軸の構成点とし、この構成点を適当な区分で放物線近似したものを仮A軸とする（図 5.2.4 参照）。このとき対向車などを計測した場合に発生する極端に外れた構成点は除外する。

② 仮断面の作成

仮A軸からレーザ点までの距離を用いて仮断面（円）を作成する。この際、より高精度の中心軸を決定するため、この仮断面から大きく（5cm 程度以上）外れた点を照明灯具や非常用設備と見なして、仮断面の対象点群から除去しておく。

③ トンネル中心に沿った軸、仮B軸（天端）を求める。

仮 A 軸から鉛直上方の計測点群を構成要素とした軸を仮 B 軸とする（図 5.2.4 参照）。

④ スパン境界（施工目地）の認識

トンネル台帳や竣工図書等より得られるスパン長から、仮 B 軸上にスパン境界点を設定し、スパン境界点を通り仮B軸に直交する断面をスパン境界とする（図 5.2.4 参照）。

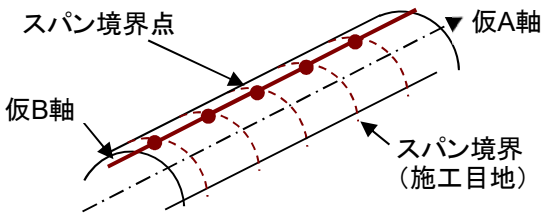


図 5.2.4　スパン境界の計算 [1)]

2) 中心軸の設定

中心軸にはスパン毎中心軸とトンネル全体中心軸（平滑化軸）とがあり（図 5.2.3 参照）、それぞれの中心軸は水平と垂直を別々の方法で求めている。まず１スパン毎の点群データから、正確な中心軸の位置を求めるための仮中心軸ベクトルとトンネルの縦断勾配を示す天端軸ベクトルとを求め、この２つのベクトルによりスパン毎の中心軸を求める。さらに、このスパン毎中心軸からトンネル全体中心軸を求める。

(1) スパン毎の仮中心軸ベクトルの計算

① 仮B軸に直交する平面を設定し、この平面から仮B軸方向±25cm（50cm 幅） の範囲に入る点群を平面に投影（射影）する（図 5.2.5 参照）。

② 投影された点を円近似または楕円近似して、このときの中心座標を求める。これをスパン内で順次繰り返し、中心点群を求める。

③ 求められた中心点群から最小二乗法で直線を求め、これをスパン毎の仮中心軸ベクトルとする。

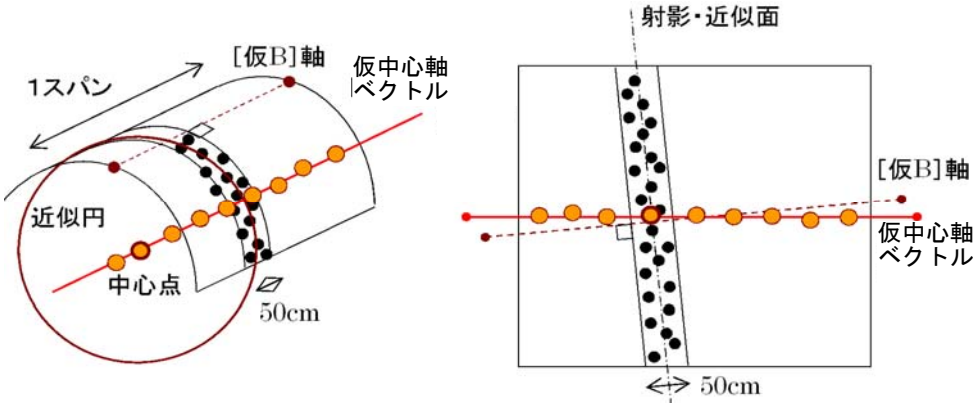


図 5.2.5　スパン毎の仮中心軸ベクトルの計算 [1)]

(2) スパン毎の天端軸ベクトルの計算

先に求めた仮中心軸ベクトルの上方の点群（50cm 幅）から直線近似により、トンネル縦断勾配を示すスパン毎の天端軸ベクトル求める（図 5.2.6 参照）。

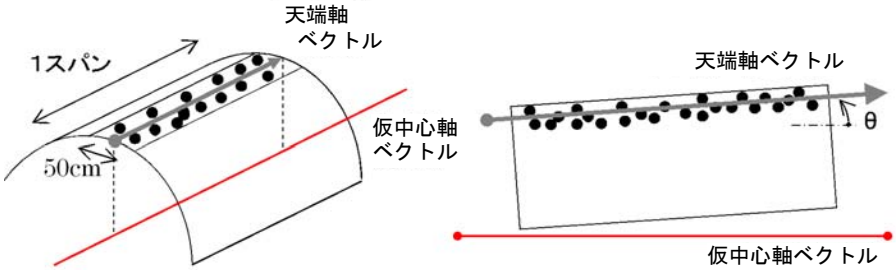


図 5.2.6　スパン毎の天端軸ベクトルの計算 [1)]

(3) スパン毎中心軸の決定

中心軸の位置を正確に求めるため、スパン内の全点群データを上記で求めた仮中心軸ベクトルに直交する断面に投影（射影）し、再度円近似により中心点を求める。この中心点に天端軸ベクトルを移動したものをスパン毎中心軸とする（図 5.2.7 参照）。

① 仮中心軸ベクトルに直交する面を設定し、この面にスパン内の全点群を投影する。
② 投影された点を用いて円近似を行い、その中心点を求める。
③ 求められた中心点に天端軸ベクトルをシフトしたものをスパン中心軸とする。

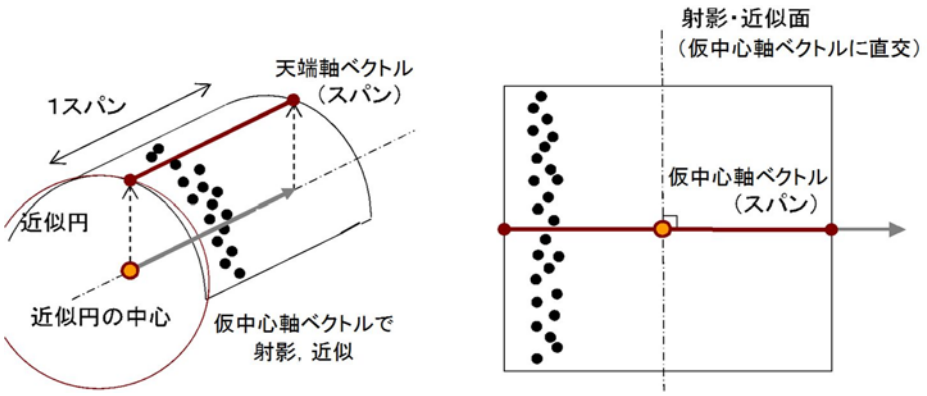


図 5.2.7　スパン毎中心軸の決定 [1)]

(4) 平滑化軸の決定

トンネル覆工の変形は、各スパン内で局所的に変形を起こしているものと、地山の緩みなどによる外力が、ある程度の範囲を持って作用し、数スパンにわたって覆工が変形・移動するものとがある。後者の変形を抽出するためにはトンネル全体の中心軸からの変形を求めることが必要であり、このトンネル全体中心軸のことを平滑化軸と呼ぶこととする（図 5.2.8 参照）。

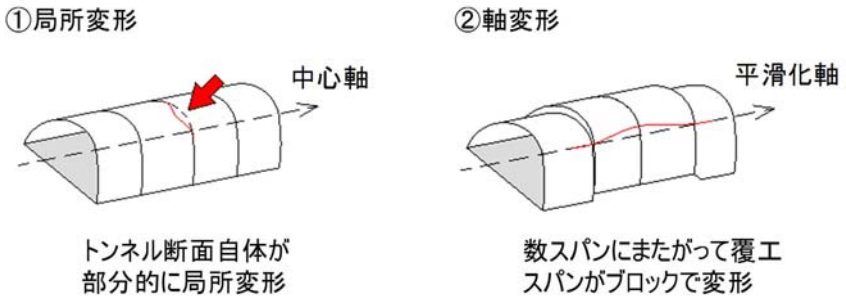


図 5.2.8　トンネルの変形モード [1)]

先に求められたスパン毎の中心軸から、平滑化軸を求める。

① 各スパン境界面におけるスパン中心軸の端点を求める。

② スパン境界にて、前後のスパン中心軸端点の中点を計算しこれを節点とする。

③ 前後 3 個の節点（計 7 個）にて、水平方向、垂直方向それぞれ別に放物線近似（平滑化）を行う（図 5.2.9 参照）。

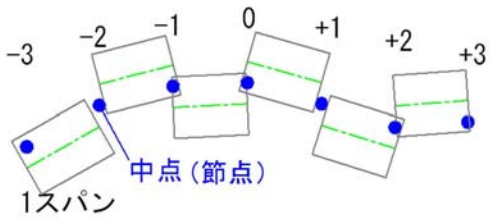
なお、放物線計算の条件は下記のとおりとする。

(ア) 端部の節点は、その節点を含む 7 個の節点で平滑化する

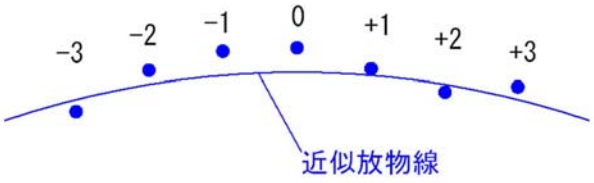
(イ) 節点が 6 個（スパンが 5 個）以下の場合、それら全てで平滑化する。

④ 近似放物線が設定された後、節点を放物線上に移動する。

⑤ この手法を境界全数で繰返し、移動した接点を直線で結んだものを平滑化軸と定義する（図 5.2.10 参照）。

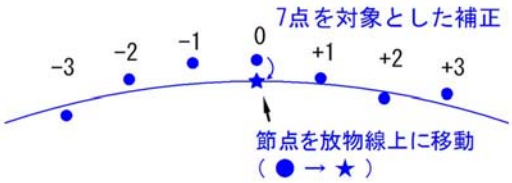


スパン境界の節点イメージ

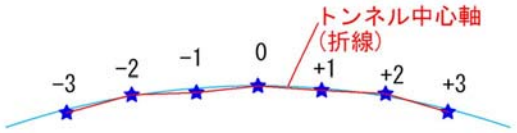


節点の近似放物線

図 5.2.9　スパンごとの中心軸から平滑化軸 [1)]



近似線への節点移動



平滑化軸の決定

図 5.2.10 平滑化軸の定義 [1)]

3）推定出来形断面の設定

スパン毎の中心軸及び平滑化軸の算出後にその軸を利用して推定出来形を計算する。

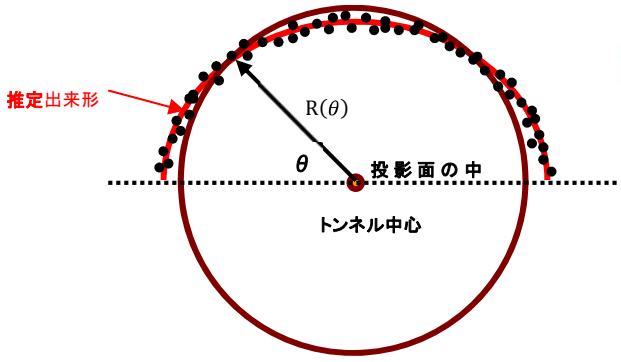
(1) 推定出来形断面の計算

求められた中心軸に垂直な面を投影面として点群を投影する。投影された点群を投影面の中心より見た角度方向に平均化処理を行い、出来た形状を推定出来形とする。

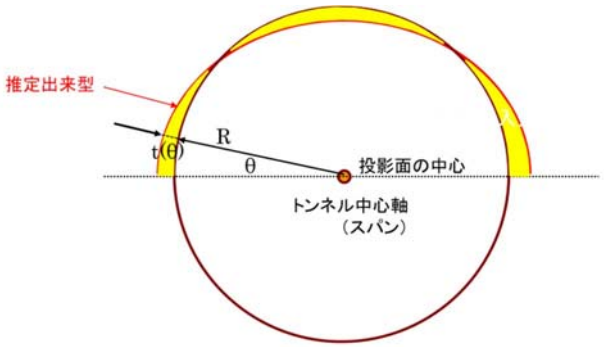
この時、推定出来形は、R(θ)、θ で表される。

$$R(\theta) = R + t(\theta)$$

ここで、R は近似円の半径、t(θ)は円弧の厚みを示している。すなわち、円柱に厚さを持った皮を被せたようなモデルで近似しているイメージに近い（図 5.2.11 参照）。



推定出来形の設定



円＋厚みでの表現

図 5.2.11 推定出来形断面の計算 [1)]

(2) 変状コンター図の作成

トンネル覆工面の凹凸状態（推定出来形と実測点群との差分）を等高線状に色分けして表示したものが変状コンター図（図 5.2.12 参照）である。すなわち推定出来形とレーザ計測点の離れを各点で色分けしたものであり、これにより覆工がどのように変形しているかを知ることができる。

変状コンター図には、以下の 3 種類がある。

① スパン毎平均断面

各スパンで推定出来形（2 次元）を求め、それをスパン中心軸に沿ってスライドさせてできる推定出来形（3 次元）から、レーザ計測結果を色分けしたものである。

推定出来形断面は各スパンの平均を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用する。

⇒ スパン内の局所的な変形を見るのに適する

② スパン毎軸合わせ

トンネル全体で推定出来形（２次元）を求め、それを各スパン中心軸に沿ってスライドさせた推定出来形（2 次元）から、レーザ計測結果を色分けしたものである。

推定出来形断面はトンネル全体の平均を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用する。

⇒ 各スパンでの差を見るのに適する

③ 平滑化軸合わせ

トンネル全体で求めた推定出来形（2 次元）を平滑化軸（トンネル全体中心軸）に沿ってスライドさせた推定出来形（3 次元）から、レーザ計測結果を色分けしたものである。

推定出来形断面はトンネル全体の平均を使用し、軸は平滑化軸を使用する。

⇒ トンネル全体の傾向を連続的に見るのに適する

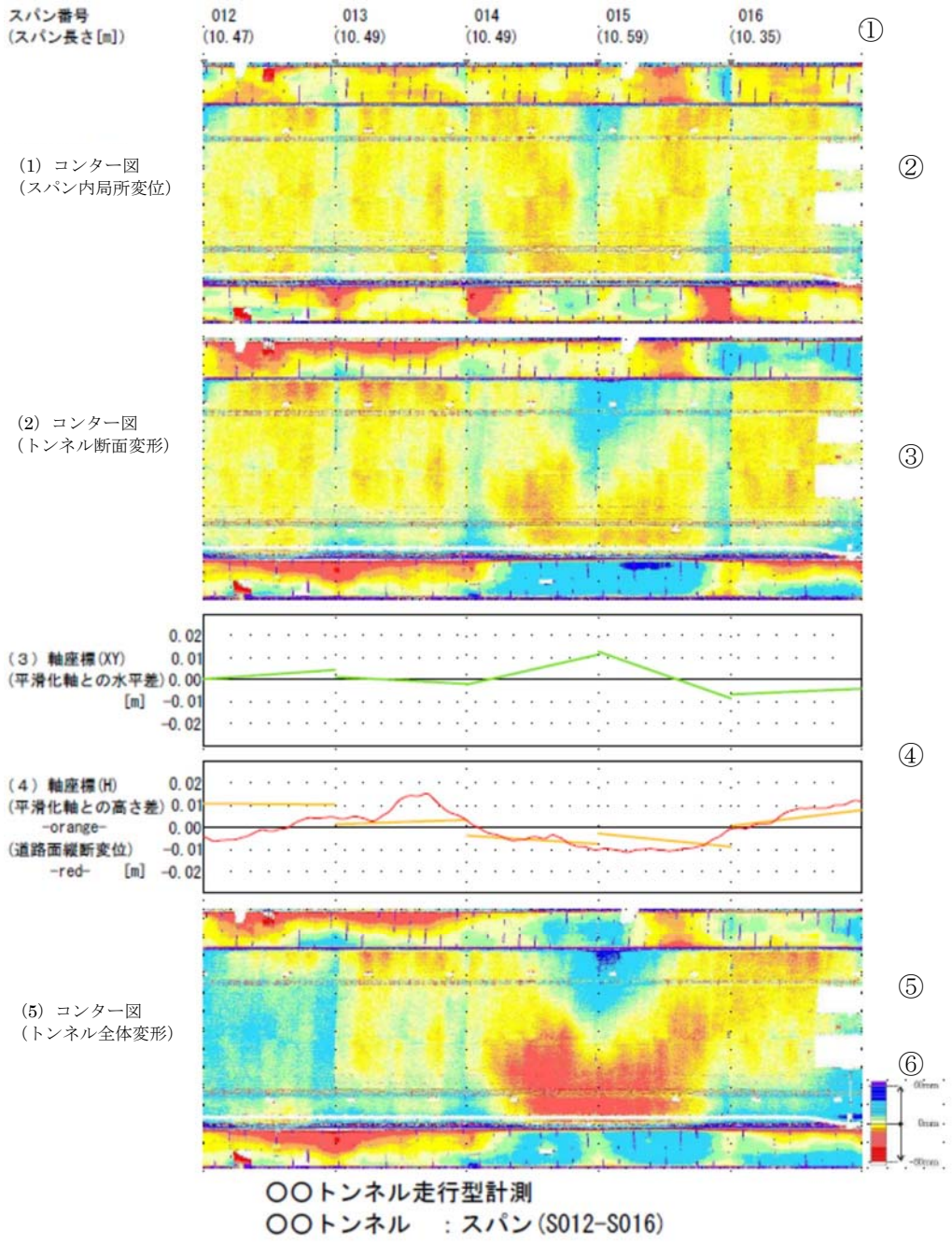
上記の内容を整理したものを表 5.2.1 に示す。

表 5.2.1 各コンター図の特徴･適用 [1)]

	出来形断面 算出手法	軸の設定	トンネル全体の 変化傾向	スパンの全体の 動き・変形傾向	スパン内の 局所的な変化傾向
スパン内 局所変位	スパン毎	各スパン	△	△	◎
トンネル 断面変形	全体平均	各スパン	○	◎	○
トンネル 全体変形	全体平均	全体平均	◎	○	△

解析により得られたコンター図の分析は、上記の各コンター図の特徴を踏まえながら、図 5.2.12 に示す④の軸座標（スパン軸と平滑化軸との差）を勘案し、総合的に判断する。

トンネルの変形モードを視覚的に把握することができるコンター図は、覆工に発生した変状の原因を推定する上で非常に有効な情報の一つとなる。しかし、トンネルの評価においてはコンター図のみではなく、画像計測結果、ひび割れ解析図、地形・地質、施工記録、点検・補修履歴等の情報を収集し、多面的かつ総合的に評価することが重要である。



成果物の項目

① トンネルのスパン番号，()の中はスパンの長さ(m)
② スパン毎軸平均断面で解析したコンター図
③ スパン毎軸合わせで解析したコンター図
④ 緑・・・・・各スパン軸と平滑化軸との水平差
黄・・・・・各スパンの軸と閉殻化軸との高さ差
赤・・・・・道路面縦断変位
⑤ 平滑化軸で解析したコンター図
⑥ コンター凡例・・・・・赤が内側の変位，青が外側への変位

図 5.2.12　レーザ計測解析結果の一例 [1)]

5.3 変状コンター図からの評価法

解析結果の解釈および評価のポイントを以下に示す。なお、最終的な判断は、ひび割れパターン（形状、幅、長さ）と変形モードとの整合性及び周辺地質や施工記録等を考慮して評価することが必要である。以下、コンター図の評価手順、手法、特徴、適用等について示す。

1）評価の手順、留意点

(1) 各コンター図の色調の観察

各コンター図からトンネルの形状（変形、凹凸）の傾向を読み取り、軸座標と平滑軸とのズレを加味して、変形の原因を推定する。

まず、図 5.3.1 (2)（5）のコンター図に着目し、色調の変化（凹凸モード）が同調しているか、していないかを判別する。

色調が同調している場合、トンネルの変形が示唆され、(3)（4）平滑化軸からの水平差・高低差や、ひび割れ展開図等の情報を加味して、外力作用の可能性を精査する。

今回の事例では（3）（4）に示される軸ズレが少なく、展開図から縦断方向の貫通ひび割れが確認されていることから、外力作用の可能性が高いと判断する。

一方、色調が同調していない場合、図 5.3.2 (5) のみに現れる色調の大きな変化は、施工時における型枠のずれに起因するケースが多い。(3)（4）平滑化軸からの水平差・高低差のうち、水平差に大きなズレが生じており、原因はトンネルの変形ではなく、竣功当時からの出来形のズレであると判断できる。

(2) うき・剥離 等の局所的な変形

局所的な変形は、図 5.3.1 (1) スパン毎平均断面のコンターで確認される色調変化により評価する。

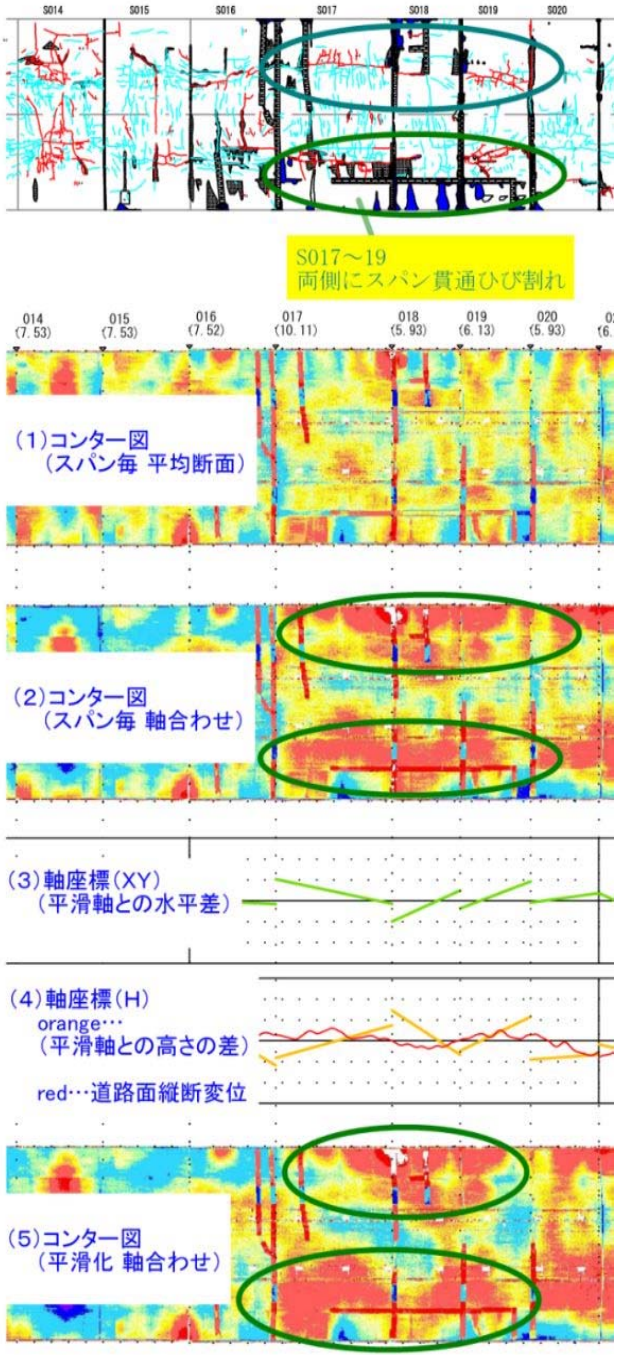


図 5.3.1 コンター図 の事例（1）[1)]

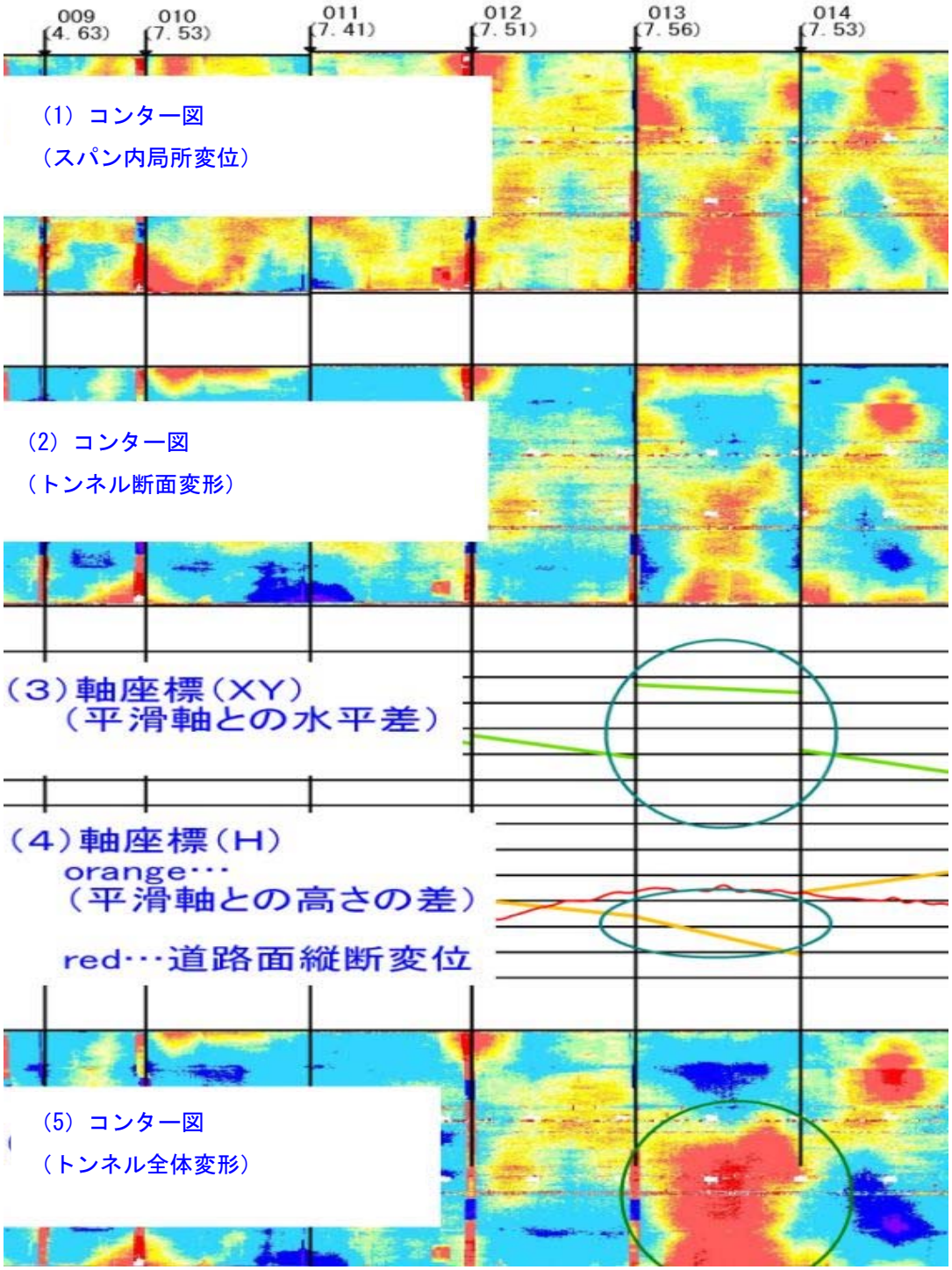


図 5.3.2　コンター図の事例（2）[1)]

2) 典型的な評価パターン事例

ここでは、表 5.3.1 に示すそれぞれの変状原因の特徴から、ひび割れ形状とコンター図の関係について解説する。

(1) 水平差、高低差が滑らかでトンネル断面変形とトンネル全体変形が同様のコンターの場合

【外力変状の可能性が高いパターン】

① 天端部がスパンにわたり赤色⇒天端沈下⇒緩み土圧の可能性

② 天端の一部が赤色⇒局所的な変形⇒緩み土圧（突発性崩壊）の可能性
（スパン毎平均断面コンター図もあわせて確認）

③ 両側壁部がスパンにわたり赤色⇒内空変位縮小⇒側圧（塑性圧、水圧等）の可能性

④ 片側がスパンにわたり赤色、反対側が青色⇒断面変形⇒偏圧の可能性

【施工起因の可能性が高いパターン】

① 天端部の一部が赤色で他スパンも同様な傾向⇒セントルの特性、早期脱型⇒施工起因

② 目地横が半月状に赤色（比較的広範囲）⇒せめ部の施工不良⇒打設圧不足

③ 目地横が狭い範囲でブロック閉合で赤色
⇒目地とひび割れに囲まれたブロック状に剥落の徴候

(2) 水平差、高低差が滑らかでなくてもスパン軸合せ、スパン平均断面コンターが下記の場合

【施工起因の可能性が高いパターン】

① 天端部の一部が赤色で他スパンも同様な傾向⇒セントルの特性、早期脱型⇒施工起因

② 目地横が半月状に赤色（比較的広範囲）⇒せめ部の施工不良⇒打設圧不足

③ 目地横が狭い範囲でブロック閉合で赤色
⇒目地とひび割れに囲まれたブロック状に剥落の徴候

(3) 水平差、高低差が滑らかでない場合

【水平差が大きい場合】

① 平滑化軸合せコンターが偏圧傾向を示すものの、スパン毎軸合せ、スパン平均断面に偏圧傾向が見られない場合⇒セントルセット時の誤差⇒施工起因

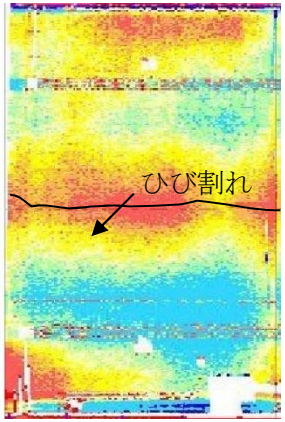
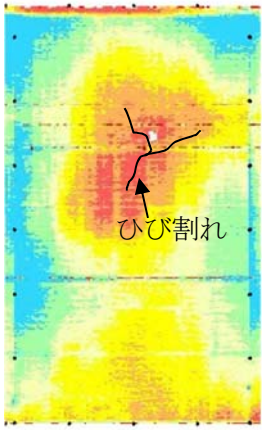
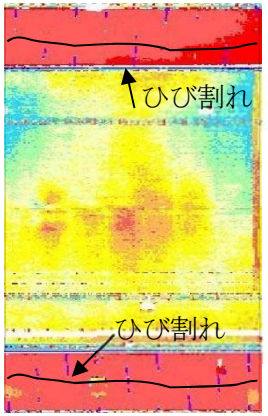
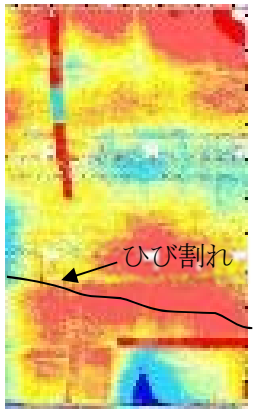
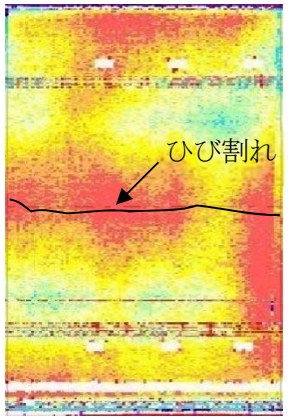
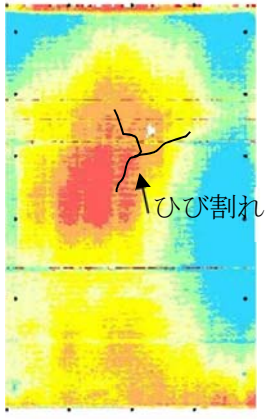
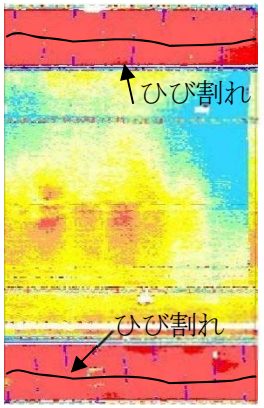
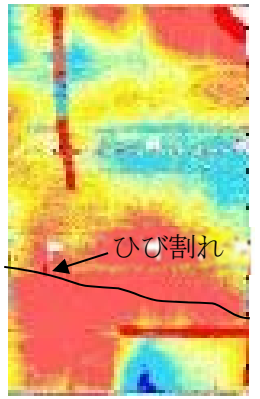
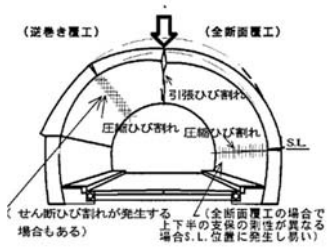
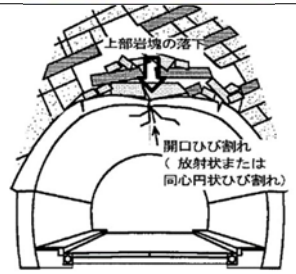
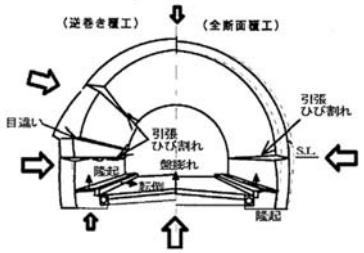
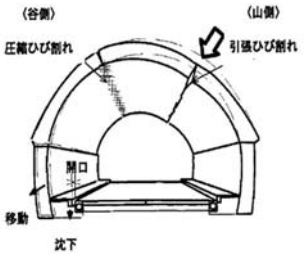
② 部分的に水平差が大きい（一部にズレ）⇒断層などの影響、坑口地すべりの可能性

【高低差が大きい場合】

① 平滑化軸合せコンターが偏圧傾向を示すものの、スパン毎軸合せ、スパン平均断面に偏圧傾向が見られない場合⇒セントルセット時の誤差⇒施工起因

② 部分的に水平差が大きい（一部にズレ）⇒断層などの影響、坑口地すべりの可能性

表 5.3.1　変状原因別コンター図の解析結果イメージ[1)]

		①緩み土圧１	②緩み土圧２	③側圧	④偏圧
コンター図のイメージ	スパン軸合わせ				
	平滑化軸合せ				
外力のイメージ※					

5.4 複数回計測の差分解析方法

ここでは、トンネルの変形の進行を評価するため変形モードの差分解析方法について解説する。変形モードの差分解析では、初回計測における変形モード解析結果を基本として実施することになるが、レーザ計測の点群の各点は同一の位置に照射されることは極めて少ない。そのため、変形モードの差分解析では、初回計測の変形モード解析の際に面を形成し、その面の比較から差分を取得することとした。図 5.4.1 に面の形成と差分解析の概念を示す。また、図 5.4.2 に差分解析の例を示す。

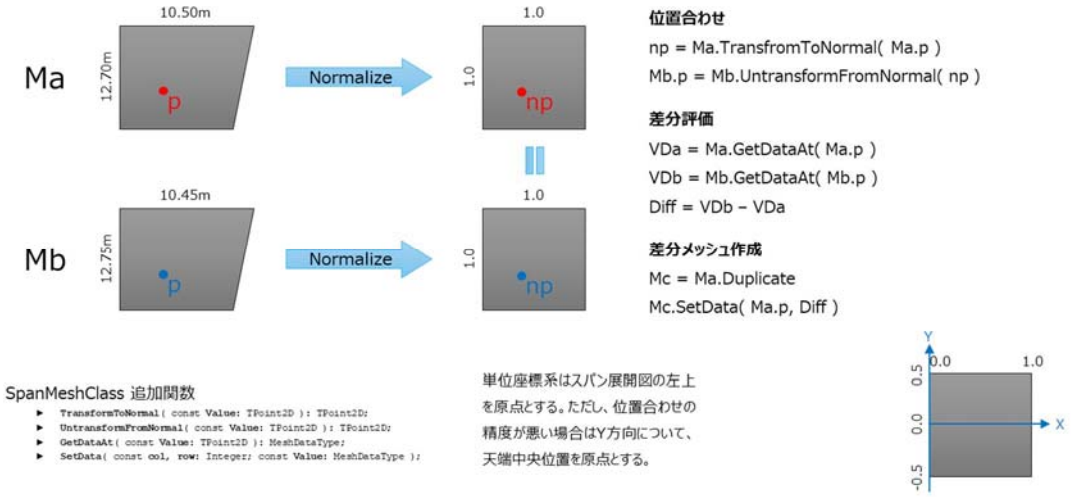


図 5.4.1　面の形成と差分解析の概念

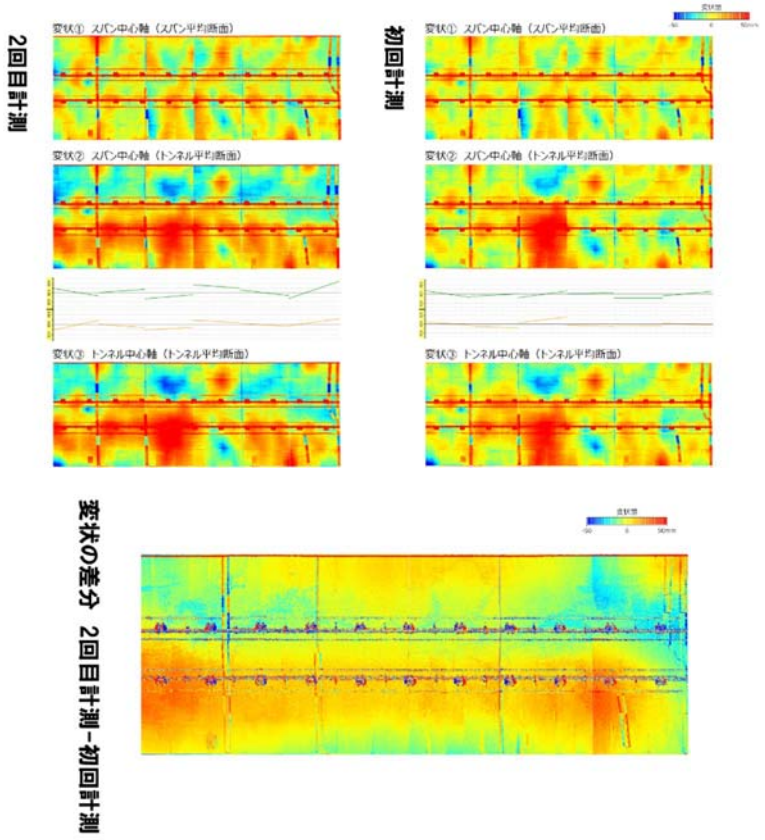


図 5.4.2　差分解析の例

5.5 運用方法

1)試行結果のまとめ

MMS によるトンネル内のレーザ計測は、竣工段階での断面計測や維持管理段階での外力性変状の評価や建築限界の確認などに利用される。本章では、MMS によりトンネルの三次元点群を取得し、変形モード解析を実施することで変状原因の推定方法や、複数回の計測結果から差分解析方法について解説したが、適正に評価するための運用方法について述べる。

トンネル内では衛星不可視下であるため、衛星の受信状態の良好な区間と比較して誤差が大きくなることが懸念される。これは、トンネル坑内では、IMU やオドメータなどにより車両奇跡を補完しているためである。4 章ではレーザ計測の特性を把握し、断面計測精度や 2 時期比較における精度および補正方法等について速度による計測精度の違い、再現性、補正方法の検討および模擬変状を設置し外力性の変状に対する計測精度の検証を行った。以下に結果をまとめる。

① MMS の変位計測精度　±2mm 程度
② 20km/h 程度の低速では回転誤差やデータのばらつきが大きくなるため、40km/h 以上での計測が望ましい。
③ 衛星の不可視時間が短いほど誤差が小さくなる傾向がる。
④ 40km/h での再現性の検証から±0.5mm 程度の誤差となった。
⑤ 道路トンネル定期点検要領の 1mm/年に対しては、5 年間隔での計測であれば 5mm となるため変位の進行を確認するとこは可能
⑥ 1mm/年未満か 1～3mm/年の判断は可能
⑦ 複数回の計測により変位の進行性のトレンドを確認して評価することが望ましい。
⑧ 外力による変状の評価や進行性の評価においては、コンター解析などにより面的な変形を確認することが重要であり、レーザ計測は有効な方法である。
⑨ 凹凸の計測相対的な精度は±1mm 程度
⑩ 2 時期を比較して変形の進行性を評価するためには回転補正、ランドマーク補正、スキャンマッチングによる補正等の補正を行うことでさらに高精度で評価が可能である。

2)計測方法等

検証結果から計測方法等に関する留意点を以下に示す。

① 走行速度　：40km/h 程度以上を推奨
② 点群密度　：1, 500 点/m² 以上を推奨
③ コンター解析により面的な変形を確認し、外力性の評価を行うことが有効である。
④ 複数回の計測により変位の進行性のトレンドを確認して評価することが望ましい。
⑤ 各解析において、トンネル内の中心軸や方向など正確な位置情報を把握する必要がある。
⑥ その手段として、回転補正、ランドマーク補正、スキャンマッチングによる補正等の位置補正が有効である。

3) 計測精度

検証の結果から得られた MMS によるトンネル計測の精度を以下に示す。

① 2 点間距離：±2mm 程度（移動平均等によりデータのばらつきを補正）

② 断面形状 ：±2mm 程度（移動平均等によりデータのばらつきを補正）

③ 変形進行性：±2mm 程度（上記に加え回転補正等によりデータを補正）

4) データ補正方法

複数回の計測結果から断面計測や変状の進行性等を把握するために必要な補正方法についてユースケース別に整理した。**表 5.5.1** にユースケースと補正方法を示す。

表 5.5.1 ユースケースと補正方法

ユースケース	補正方法
トンネル断面形状、建築限界確認（断面のみの評価）	補正なし
変形モード解析（通常の精度、延長が短い場合、直線の場合）	補正なし
変形モード解析（高精度、延長が長い場合、カーブの場合）	ランドマーク補正
変形モードの差分解析（通常の精度、延長が短い場合、直線の場合）	回転補正
変形モードの差分解析（高精度、延長が長い場合、カーブの場合）	回転補正 ランドマーク補正 スキャンマッチング

【参考文献】

1) 走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化検討に関する研究 :研究成果報告書、新都市社会技術融合創造研究会　走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究プロジェクト、平成 25 年 3 月

6　非破壊検査方法の有効活用

6.1 非破壊検査の適用

1)　非破壊検査の必要性

道路トンネル定期点検要領　平成 31 年 3 月において、「非破壊検査の手法を用いる場合、機器の性能や検査者の技量など様々な条件が検査精度に影響を及ぼすため、事前に適用範囲や検査方法の詳細について検討しておくことが必要である」と記載されている。

また表 6.1.1、表 6.1.2 に示す「⑤巻厚の不足または減少、背面空洞」の把握と調査方法に対して実施する非破壊検査の有効活用に関して取りまとめた。

表 6.1.1　変状種類及び変状区分との関係 [1) を加工]

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき・はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

表 6.1.2　調査の代表的な手法 [1) を加工]

構造物及び覆工背面の調査	漏水水質試験		水質試験は、覆工コンクリート等の劣化原因や漏水の流入経路の推定を行うことを目的としている。調査項目としては水温、ｐＨ及び電気伝導度である。 水温は温度計等によって測定される。水温の箇所ごとの季節的変動をみることによって、漏水が地下水に関係するものか、地表水に関係するものかの判別に利用できる。ｐＨの測定は、覆工コンクリートの劣化に及ぼす影響を把握するために行われる。
	覆工厚・背面空洞調査		覆工コンクリートの巻厚や背面の空洞及び背面の地山状況を調査し、変状原因の推定及び対策設計等に必要な資料を得ることを目的とした調査である。 調査方法には、局所破壊検査と非破壊検査に大別される。
		a)局所破壊検査による調査	局所破壊検査とは簡易ボーリングにより覆工コンクリートの一部を削孔し、採取したコアによる物性や劣化状況を調査するとともに削孔時のボーリング孔を利用して覆工コンクリートや背面空洞の有無、背面地山の状況を観察・把握する調査方法である。
		b)非破壊検査による調査	非破壊検査に使用されている手法として実用化されているのは電磁波法（地中レーダ）による覆工巻厚、空洞の有無や大きさの調査である。

2) 非破壊検査で求められる必要条件

道路トンネル定期点検要領[1)]用語説明によれば、「定期点検は、点検を行う者が、近接目視を基本として状態の把握（※1 点検）を行い、かつ道路トンネル毎の健全性を診断することの一連を言い、予め定める頻度で、道路トンネルの最新の状態を把握するとともに、次回の定期点検までの措置の必要性の判断を行う上で必要な情報を得るために行うものである」という。

※1 点検[1)]より

状態の把握は、「トンネル本体工の変状、附属物等の取付け状態の異常について近接目視を基本として行うことをいう。必要に応じて実施する近接目視に加えた打音検査、触診、その他の非破壊検査等による状態の把握や、応急措置を含む」と定められている。

さらに点検要領[1)]において、付録-2　変状種類と対策区分及び附属物の異常判定区分　5）巻厚の不足または減少、背面空洞において、表 6.1.3、表 6.1.4 の対策区分の目安例が示されている。

表 6.1.3　巻厚の不足または減少に対する対策区分の目安例（矢板工法の場合）[1)]を加工

箇所	主な原因	有効巻厚／設計巻厚			対策区分
		1/2 未満	1/2 ～2/3	2/3 以上	
アーチ・側壁	経年劣化　凍害アルカリ骨材反応施工の不適切など			○	Ⅱb
			○		Ⅱa、Ⅲ
		○			Ⅲ、Ⅳ

※有効巻厚の判定としては、コンクリート実厚の他に、強度の情報も必要である。

表 6.1.4　突発性の崩壊のおそれに対する対策区分の目安例[1)]を加工

背面空洞深さ 覆工巻厚（有効巻厚）	大 （30cm 以上程度）	小 （30cm 未満程度）
小 （30cm 未満程度）	Ⅲ、Ⅳ	－
大 （30cm 以上程度）	Ⅱa、Ⅲ	

※巻厚の不足または減少に対する対策区分の目安例としては、覆工厚さ、コンクリート強度
※突発性の崩壊のおそれに対する対策区分としては、覆工巻厚及び背面空洞厚の検出、コンクリート強度が必要である。

3) 適用可能な非破壊検査方法

非破壊検査で覆工巻厚・背面空洞の検知方法としては、電磁波、超音波、弾性波などの手法が一般的である。それぞれに特徴があり、状況に応じて使い分けている。その特徴を表 6.1.5 に示す。

また非破壊検査ではないが、小口径のドリル及び、コア抜きで削孔を行い、実測する方法も確認手法としては有効である。

ただし電磁波探査以外の調査方法は、実施した地点の情報しか得られず、トンネル全長に渡って状況を把握するには計測点を増やす必要がある。

短時間でトンネル全線の傾向を把握するには、ラインで調査できる電磁波探査が有効であり、多く用いられている。

本章では一般的に用いられている地中レーダ法を用いた調査方法に関して整理した。

表 6.1.5　覆工厚・背面空洞探査手法

	覆工	背面空洞	適　用
超音波探査	厚みの検出	厚み検出不可	覆工表面が被服されていても可能
衝撃弾性波探査	〃	厚みの検出	調査地点１点の情報
電磁波探査	〃	〃	使用周波数により分解能が異なる

6.2 地中レーダ法の原理

地中レーダ法の探査原理は、層厚を測定するという観点において、電磁波が異なる物質の境界で反射するという物理的性質を用いた間接調査法である。アンテナから放射された電磁波が地中に入射すると、物質（電気的性質）の異なる層境界で反射する。図 6.2.1 に示すようなトンネルがあると、第１層目は覆工コンクリート、2 層目は空洞、3 層目は地山と、物質の異なる 3 つの層がある。電磁波は図に示すように、各層境界で反射し、再びアンテナに戻って受信される。

電磁波は媒体中を伝搬するうちに、物質の減衰性能によってエネルギーが吸収され、振幅が小さくなる。そのため深部からの反射波は強度が十分に得られなくなり、レーダ記録上で認識できなくなる一般的性質がある。図 6.2.2 に示すように、この減衰効果は周波数と深い相関があり、周波数が高い程大きく、低い程小さい。したがって探査深度を大きくするには周波数を低くする必要がある。しかしその一方で、周波数が低いと分解能（解像度）が粗くなり、小さな構造が認識しにくくなる。つまり高分解能を維持するためには周波数を高く保ち、探査深度を大きくするためには低周波数を使用しなければならないというトレードオフ的な関係がある（表 6.2.1 参照）。このように電磁波は周波数によってその性質が大きく変化することから、調査目的や調査対象によって適切な周波数を選択することが望ましい。また得られる結果は、あくまでも電気的性質の異なる層境界であり、物性までは分からない。層構造が複雑になるほど、厚さの精度が低下することより、既存資料等を利用し、総合的な分析が必要である。

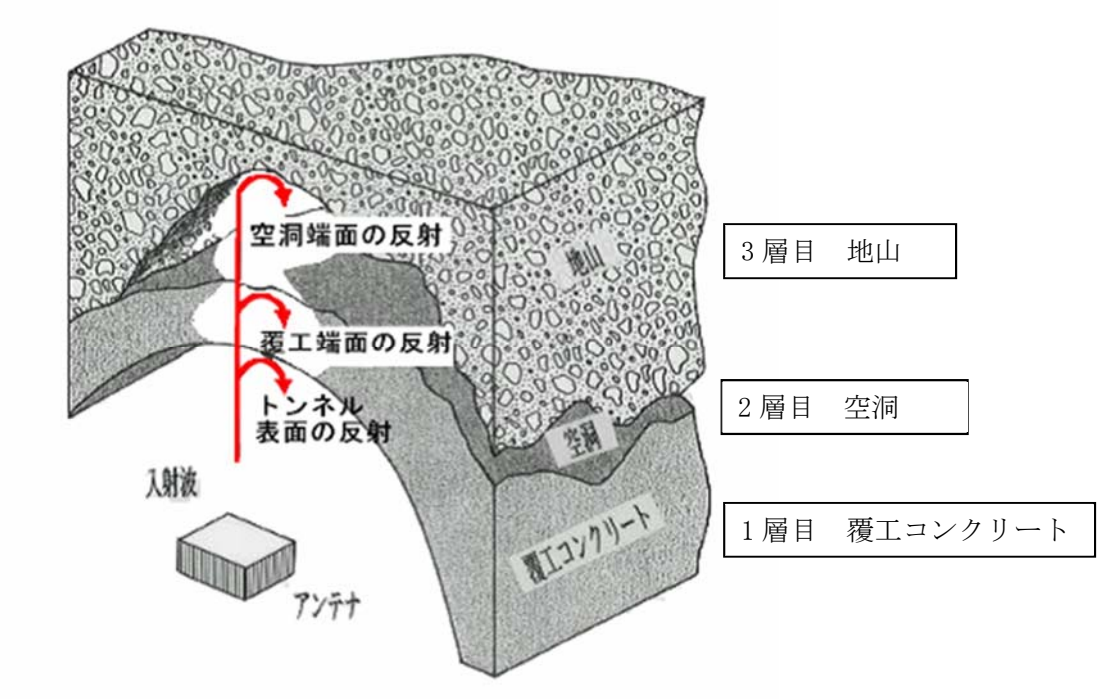


図 6.2.1　電磁波の反射状況 [2)]

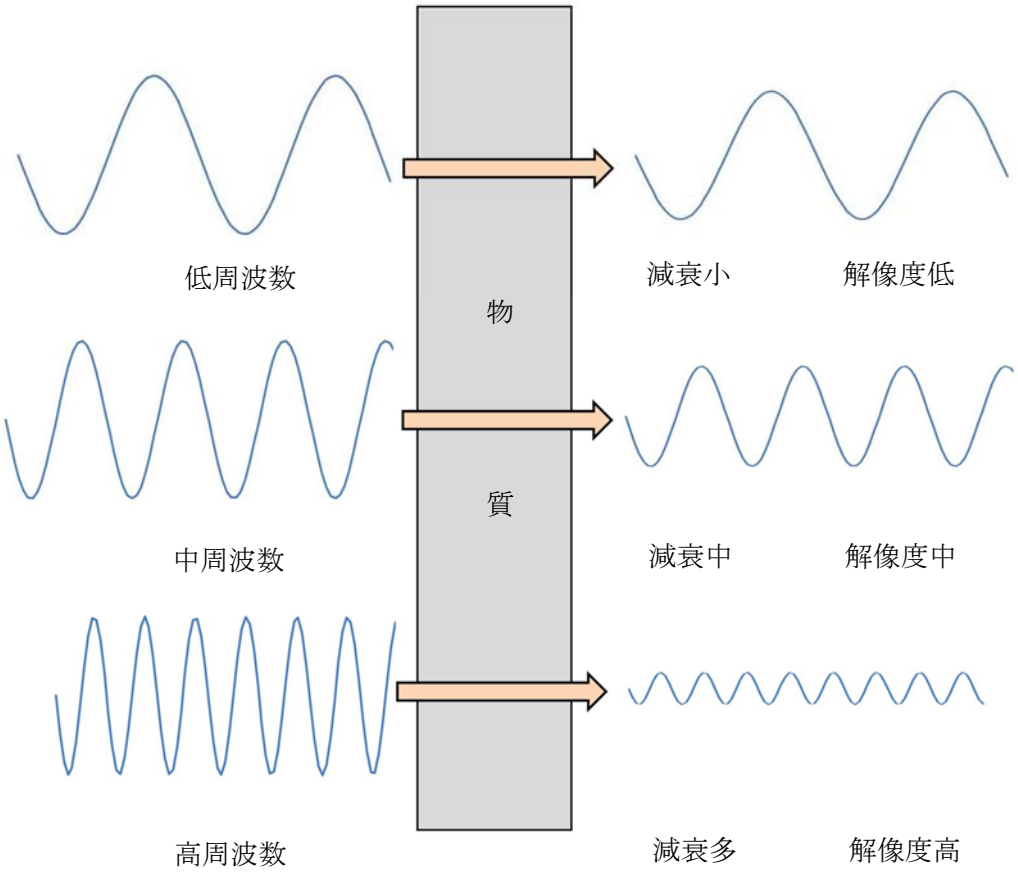


図 6.2.2　周波数の違いによる性質イメージ図（減衰量、分解能（解像度））[2)]

表 6.2.1　周波数と深度の関係 [2)]

	高周波帯	中周波帯	低周波帯
周波数	1000MHz 以上	900～300MHz	300MHz
探査深度 ※状態により異なる	～0.3m程度	～1.0m程度	～1.8m程度
鉄筋がある場合 ※周波数と鉄筋径による	100mm 以上の間隔であれば探査可能	300mm 程度の間隔であれば探査可能	500mm 以上の間隔であれば探査可能
深度イメージ	浅い → 深い		
分解能イメージ	細かい → 粗い		

6.3 巻厚・空洞調査

トンネル健全度判定のためのデータとして、以前から覆工コンクリートの強度試験結果が利用されていた。その後レーダ法の導入により、巻厚・背面空洞を確認することができるようになった。

現在は両方法の併用を軸とした調査法の適用により、健全度判定が可能となった。ここでは、レーダ法により支援可能となった内容について、作業効率の良い非接触型レーダ探査、従来方法の接触型探査、併用調査の順で支援可能な範囲を具体的に取りまとめる。

6.3.1 非接触レーダで支援可能な内容について

1)　非接触レーダの特徴

一般に使用される接触レーダと異なり、非接触レーダはアンテナを覆工から離した（最大離隔3m程度）状態で使用する。このため道路規制を必要としない 50～70km/h 程度の速度で走行しながら計測することが可能である。



図 6.3.1　非接触レーダ [2)]

非接触レーダは、接触レーダに比べて得られる電磁波反射強度は弱いが、コンクリート厚 45 ㎝までであれば十分解析可能なレーダ記録が得られ、結果にも遜色がない。図 6.3.2 に、両レーダによる結果の比較図を示す。

非接触レーダの性能確認の一つとして、福島ロボットテストフィールド※2 にあるトンネル構造が視認できる模擬トンネルを使用してトライアルを行った。厚さ 40 ㎝の模擬トンネル覆工の一部に、最小厚さを 20 ㎝とした三角形型の切り欠きを設け、巻厚不足箇所とした。この状態で取得した非接触レーダの記録と断面図を図 6.3.3 に示す。レーダ記録に設計図の構造を忠実に示す反射信号が現れているのが確認できる。

※2【福島ロボットテストフィールド】福島イノベーション・コースト構想に基づき整備されており陸・海・空のフィールドロボットの一大開発実証拠点である。インフラや災害現場など実際の使用環境を再現しており、ロボットの性能評価や操縦訓練等ができる世界に類を見ない施設。

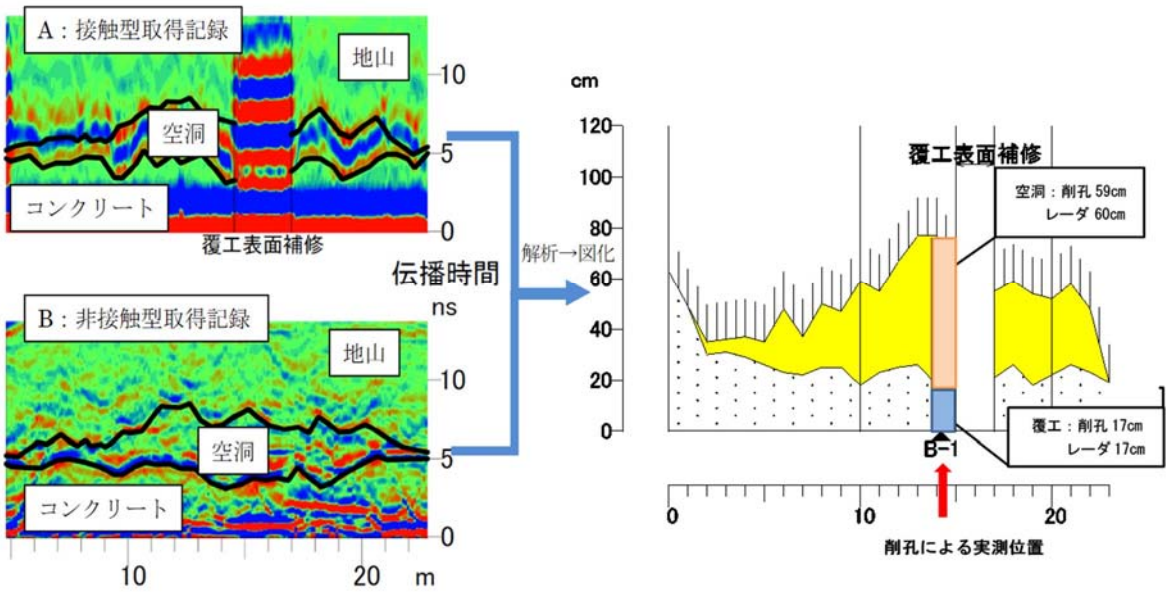


図 6.3.2　比較図 [2)]

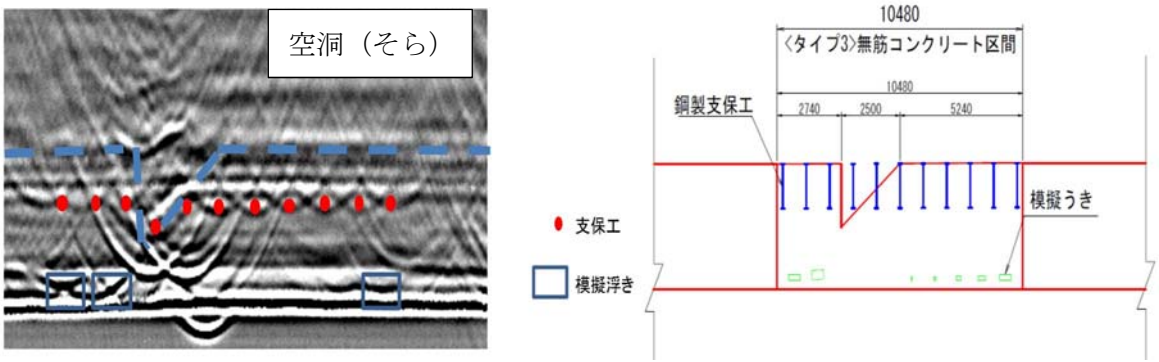


図 6.3.3　断面図及び取得記録 [2)]

2)　非接触レーダの性能分析

一般に接触レーダに比べ、非接触レーダの探査可能深度は小さい。これは機能上、非接触アンテナから放射されるエネルギーが小さいことと、コンクリート表面で反射波が発生し、内部に透過するエネルギーが 50%程度失われることに要因がある。

コンクリートは減衰性能が高く、空気に比べて探査深度への影響が支配的である。コンクリート中に入射した電磁波は徐々に減衰し、非接触レーダの場合 45 ㎝程度で探査可能な強度が限界となる。このため空洞の存在判定はなんとかできるものの、それ以深の状態を明確に知ることは困難になる。非接触レーダの探査可能限界をコンクリート厚 45 ㎝と規定したのは、この理由による。

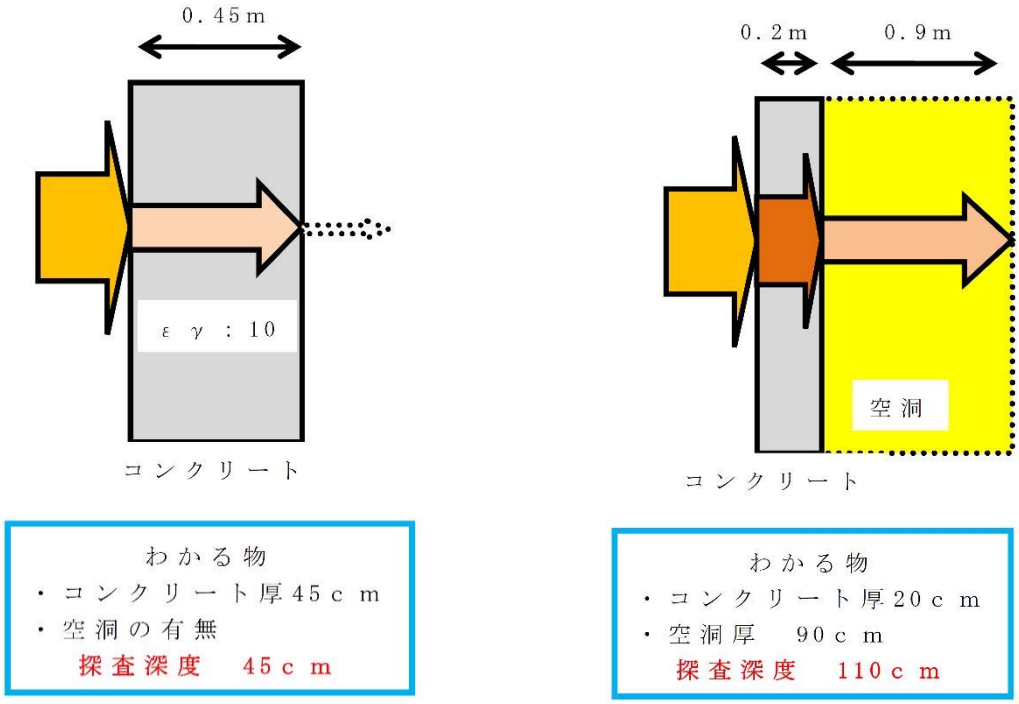


図 6.3.4　電磁波透過のイメージ [2)]

一方、コンクリートが薄ければ、背面空洞内に到達した電磁波は、その強度にまだ余力があり、さらに深部の情報を得ることができる。

図 6.3.5 の縦断図に示したトンネル調査では、非接触レーダが使用された。レーダ計測後、トンネル内 3 地点（⑨⑩⑪）で削孔を行い、巻厚と空洞厚の確認を行った（赤字で表記）。また、内視鏡で孔内撮影を行った（図 6.3.6、孔内部状況）。レーダと削孔による巻厚、空洞厚の値を比較すると、概ね一致していることが確認された。この中で覆工厚と空洞厚の合計が 70cm となる箇所（⑨）がある。ここは覆工厚が 3 ㎝と非常に薄い箇所であり、コンクリートによる電磁波の減衰が小さかった結果であることを示す。

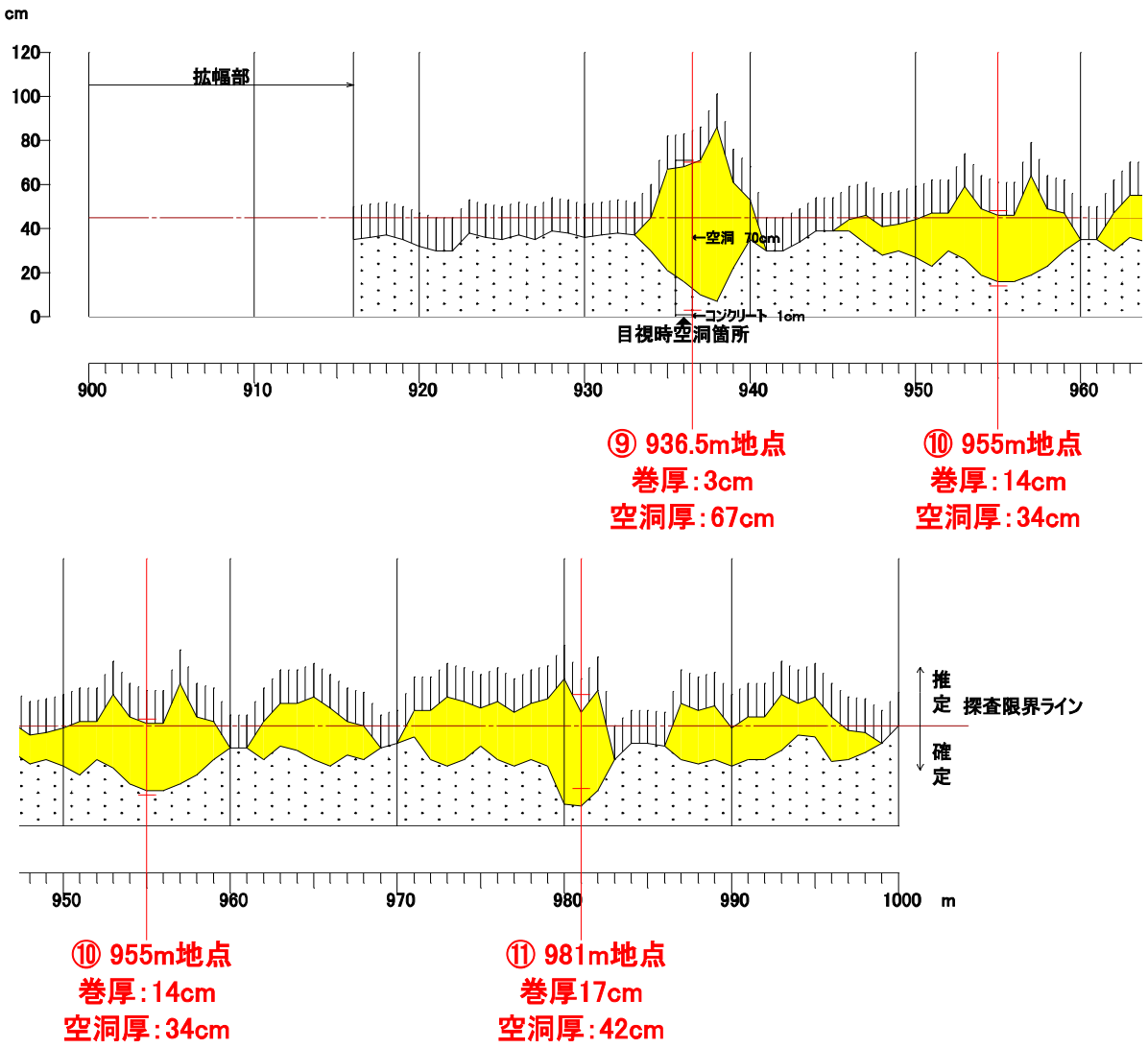


図 6.3.5　大空洞検出例 [2)]



⑩位置から起点側に向かって　　⑩位置から終点側に向かって

図 6.3.6　空洞内部写真 [2)]

3) 非接触レーダの支援内容

有効巻厚と突発性崩壊の判定に対して、非接触レーダが支援できる内容について表 6.3.1～表 6.3.2 にまとめる。

表 6.3.1 支援項目： 有効巻厚／設計巻厚

有効巻厚／設計巻厚	有効性	適 用
1/2 未満	○	設計巻厚 0.9m未満の場合
1/2～2/3	△	設計巻厚 0.7m未満は可能
2/3 以上	×	巻厚 45cm 以上は不明

※有効巻厚は設計基準強度以上の部分とする事より、別途コンクリートの強度試験を行わないとならない。

表 6.3.2 支援項目：突発性の崩壊

覆工巻厚、空洞厚	有効性	適 用
巻厚 30cm 未満かつ空洞 30cm 以上	○	支援可能
巻厚 30cm 以上かつ空洞 30cm 以上	△	覆工の厚さ 45cm まで支援可能
空洞 30cm 未満	判定なし	〃

※緊急性を要するⅢ、Ⅳ判定をする事は可能であるが、探査性能限界である巻厚 45cm より厚く、背面空洞が大きい場合の、Ⅱa、Ⅲ判定が出来ない。

4) まとめ

① 非接触レーダの探査が可能な深度は、45cm（コンクリートのみ）程度と限定されるが、設計巻き厚の 2/3 以上以下の判断及び、突発性の崩壊のおそれに対する巻厚 30cm 以下、空洞 30cm 以上の判断はおおむね可能である。

② 45cm 以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダを実施する必要があるが、緊急性を要する箇所の特定としては十分であると思われる。

③ エアモルタル、発泡ウレタン系の間隙率の高い注入材に関しては、空洞との区別が難しい。突発性の崩壊に関しては、裏込め材も有効巻厚に含まれる事から、過去の工事履歴等も参考に評価することによってより精度の向上につながる。

④ 注意点としては、接触型と共通ではあるが、導電体に関しては、電磁波が透過しないためその背面を検出する事が出来ない。

⑤ 測線上に附属物（管路・連続した照明・防音版等）が有る場合には干渉しない測線を設定する必要がある。

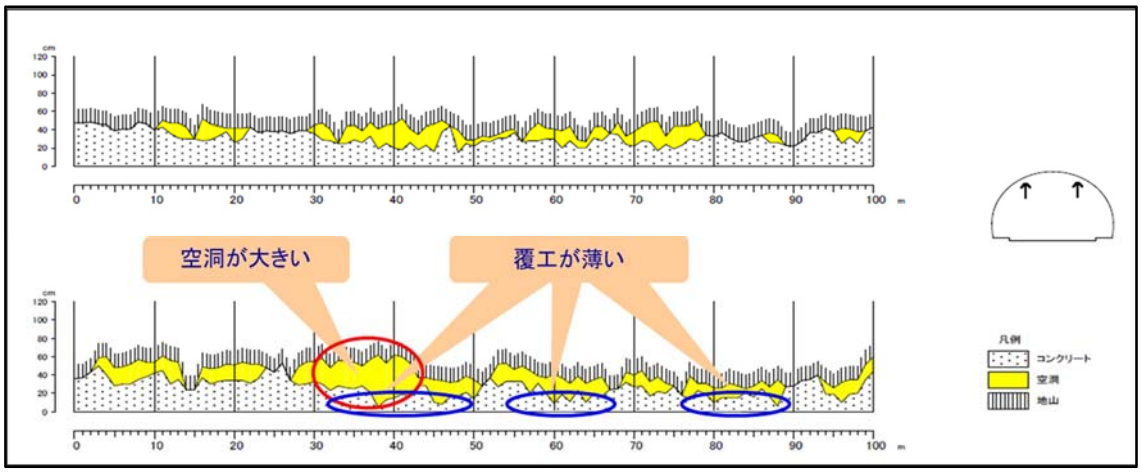


図 6.3.7　検出のイメージ [2)]

6.3.2 接触レーダでの支援可能な内容について

1)　接触レーダの特徴

接触レーダ探査は、高所作業車等の作業床に計測員自身が搭乗し、センサー（アンテナ）を直接覆工面に接触させて計測する。しかし、作業床を上げたままでの高所作業車の走行速度は著しく低速に制限されているため、計測の時間効率が悪いことと、高所作業を伴うため安全面の課題が大きい。

そこで、図 6.3.8 写真に示すような天秤方式移動型レーダ探査技術などの新技術や、計測を効率化するラビダスⅢなどのロボットを用いれば、トンネルの断面寸法やトンネルの種類を問わず、時速 2～5km で連続的にレーダ探査を実施することが可能である。また、探査対象（知りたい情報）によってセンサーを交換することもできる。これら図 6.3.8 に示す技術の内容は、「点検支援技術性能カタログ」に掲載されている。



天秤方式移動型レーダ探査技術



ラビダスⅢ

図 6.3.8　接触レーダ活用状況 [3)]

2)　接触レーダの支援内容

接触レーダは、一般的なレーダ探査装置として点検時に使用されており、非接触レーダとの比較確認のためその有効性をまとめた。

また覆工内部に発生している施工不良を起因とする、図 6.3.9～図 6.3.10 に示すような、内部欠陥（ジャンカ等）などを検出することも可能である。

覆工の有効巻厚に影響を与えるジャンカ部分に関しては、ジャンカの程度にもよるが、レーダによる検出は可能である。

表 6.3.3　支援項目：　有効巻厚／設計巻厚

有効巻厚／設計巻厚	有効性	適　用
1/2 未満	○	支援可能
1/2～2/3	○	〃
2/3 以上	○	〃

表 6.3.4　支援項目：突発性の崩壊

覆工巻厚、空洞厚	有効性	適　用
巻厚 30cm 未満かつ空洞 30cm 以上	○	支援可能
巻厚 30cm 以上かつ空洞 30cm 以上	○	〃
空洞 30cm 未満	－	－

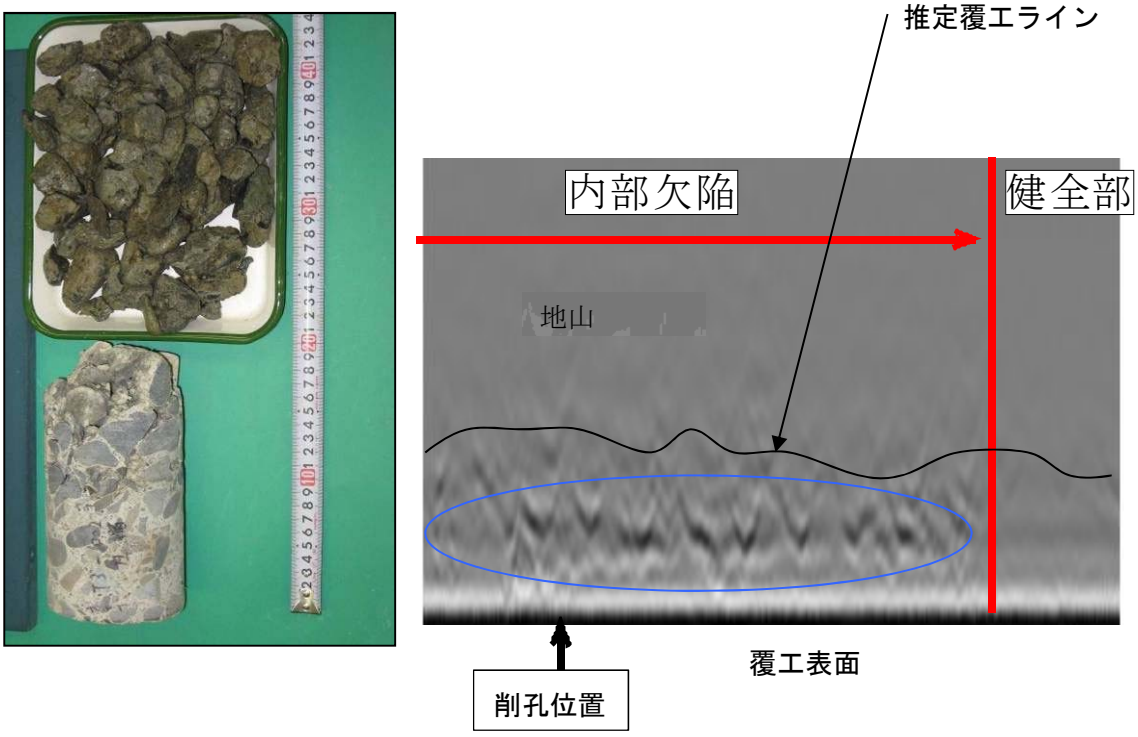


図 6.3.9　内部欠陥例（1）[2)]

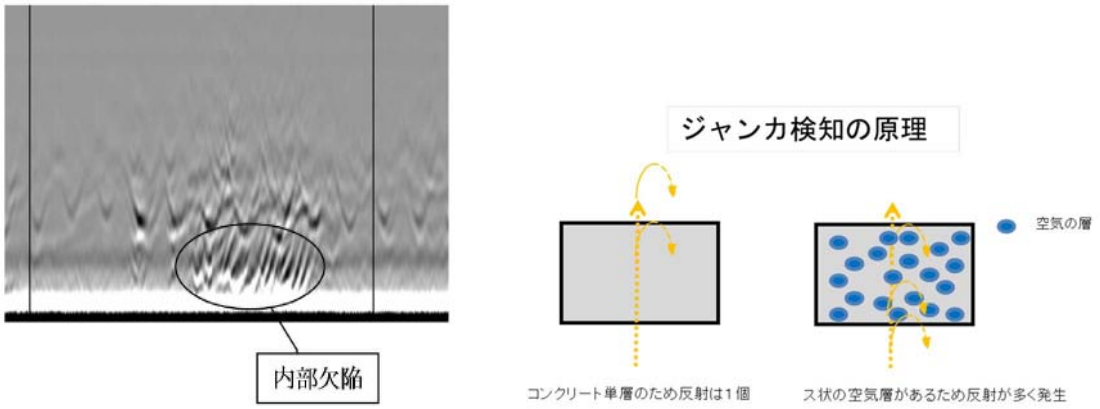


図 6.3.10　内部欠陥例（2）[2)]

3)　注意点

①　覆工巻厚が 0.8m以上で支保工間隔が１m未満の場合は、地中レーダでは覆工背面の状況は確認できない。

②　削孔等による破壊検査が必要である。

6.3.3 レーダと他非破壊検査併用について

地中レーダ探査法は、層境界反射を利用して覆工や空洞の層厚という幾何的情報を知るためのものであり、コンクリートの物性（圧縮強度等）を測定するものではない。従来から行われてきた削孔に対し、非破壊で連続的なデータを短時間で取得できるという長所がある一方で、直接目視で内部を観察することができないという弱点もある。

コンクリートの強度試験に関しては、反発強度試験などの非破壊検査でも確認することは可能ではあるが、従来通りのコア採取による圧縮強度試験を実施する事が望ましい。供試体採取後の削孔部から内視鏡カメラを挿入し、背面状況の直接観察（図 6.3.11）が可能となるからである。直接観察は、レーダ記録の解析を行う際に、視覚認識情報として有効に作用すると共に、現在の地山の状況を確認することが可能である。このように従来からの削孔とレーダ探査を併用することにより、相乗効果をもたらし、充実した調査結果を得ることが期待される。



図 6.3.11　覆工背面の状況写真 [2)]

6.4 AI を用いた非接触レーダ結果スクリーニングによる効率化について

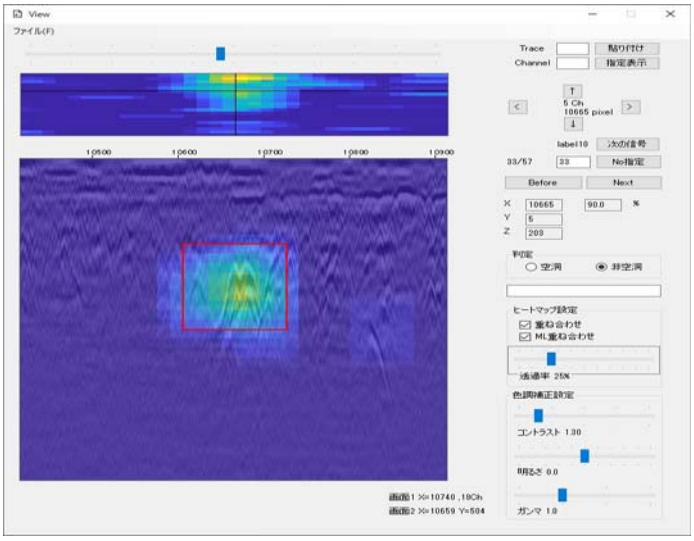
レーダデータ解析に AI を適用する場合、レーダ記録中に現れる反射信号の特徴を利用することになる。

例えば「空洞を発見すること」を目的とする路面下空洞探査では、空洞からの反射波が特徴的であることを利用して AI 学習を進めて行けば、空洞の自動解析が可能となるであろう。

路面下空洞探査結果を利用して AI 適用のトライアルを行った。実際の空洞探査結果から空洞信号約 5000 件、非空洞信号約 15000 件を選択し、AI 学習させた後、空洞抽出を行った(図 6.4.1)。その結果、AI と解析技師による空洞抽出箇所に約 86%の一致が確認された。しかし一方で、AI が抽出した異常箇所は解析技師の抽出した総数の数百倍にのぼり、スクリーニング効果はまだ不十分であることが確認された。AI 法は今後大いに期待される手法であり、更なる改良が望まれる。

「覆工や空洞の層構造を知ること」を目的とするトンネル覆工背面空洞調査では、少し状況が異なる。層境界反射の認識は空洞反射の認識同様、AI によって判断可能であり、層境界の相対的な変化を知ることができるであろう。しかしながら、記録上の層厚は物性によって異なる係数を用い、実際の層厚に換算しなければならない。物性はレーダ記録によって取得することができないため、最終的に計量の正しい層構造を AI 法のみで決定することはできない。実用上は、AI によって決定された相対層厚を実層厚に変換する機能を付加する方法が取られるであろう。

一方、トンネル管理上、「覆工の薄い箇所だけを異常として抽出する」という目的に従えば、相対層厚の状態であってもデータの有効な活用が可能である。図 6.4.2 に部分的な巻厚不足の箇所を特定した例を示す。設計巻厚や突発性崩壊に対する判断等のトンネル管理基準を与えておけば、AI による自動解析はさらに有用となる。



教師データ入力数
正解空洞　4839 個
非空洞　　14388 個
R2 年 3 月現在

図 6.4.1　路面下空洞用 AI[2)]

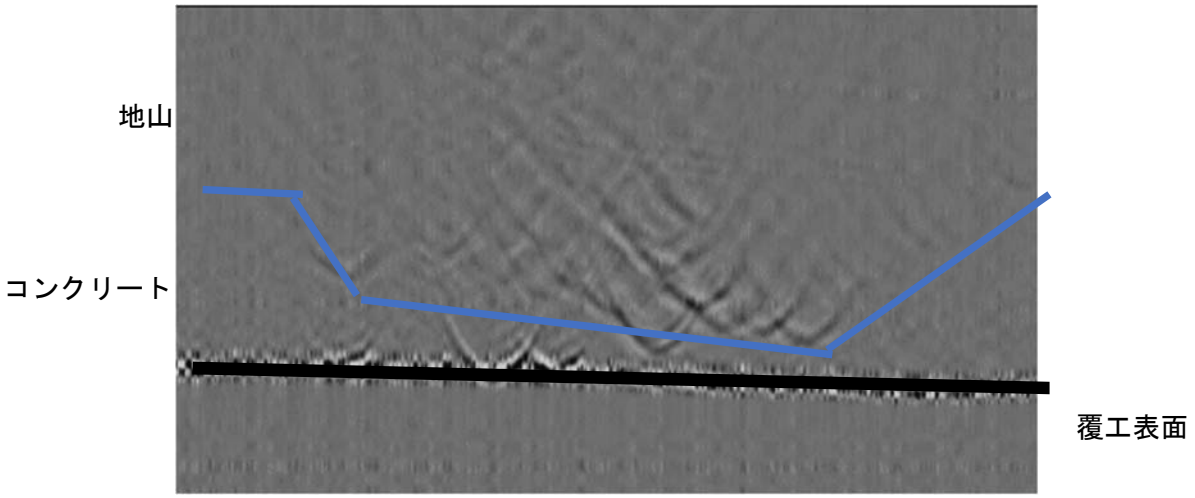


図 6.4.2　部分的な巻厚不足例 [2)]

6.5 うき検出調査

1）内部欠陥レーダの役割

「点検支援技術性能カタログ」に掲載されている、レーダによる欠陥の検出技術について取りまとめた。

覆工表面からごく浅い位置で発生している「うき」、「剥離」、「内部欠陥」の検出には、人力による打音調査を行っている。打音調査には、うき部分の状態把握・処置も含まれるため、現状で完全代替技術は難しく、そのほとんどは補完及び支援技術となっている。

人力による作業を効率化するために、内部欠陥レーダの活用が考えられた。このレーダは、縦断方向に 10cm、横断方向に１ｍ程度の規模で発生している比較的大きな欠陥を検出することを目的に開発された。その分析アルゴリズムは、技術者による解析作業を伴わないため、計測結果がそのまま判定結果となる。さらに他の計測（画像・点群・巻厚空洞探査）と同時に実施できるため、点検作業の効率化を図ることができる。

内部欠陥検出レーダは、一般的に用いられている地中レーダとは異なり、レーダの中でも航空レーダに近い検知方法を採る。まず反射波に対して合成開口処理を行う。これは弱い反射を１か所に集めて強調する処理である。次に取得した波形と、一つ前の波形を差分する。その結果、変化（反射）が無ければ全て消え、反射が新たに発生しているとその反射だけが残る。他との違いがある場所を異常点として無作為に検出するシステムである。このため検出されるのは欠陥のみではなく、変化のある部分全てとなる。つまりトンネル内にある導水工などの設備も検出されるので、選別が必要となる。

また差分により変化を抽出するため、縦断方向に長い変化は、始点と終点だけ信号が表れる。画像計測結果と対比することで、抽出精度の向上は望めるものの、補修箇所等の内部欠陥と反射波が複合化される場所に関しては注意が必要である。

内部欠陥レーダには、確実に異常が無いエリアを抽出し、打音検査の実施必要箇所をできるだけ狭い範囲に絞るスクリーニング効果を期待している。

2)　検証結果

近畿地整管内　6 トンネルにおいて、非接触内部欠陥レーダ計測を実施した。内部欠陥レーダで抽出された異常箇所は、663 箇所であった。内訳を図 6.5.1 に示す。

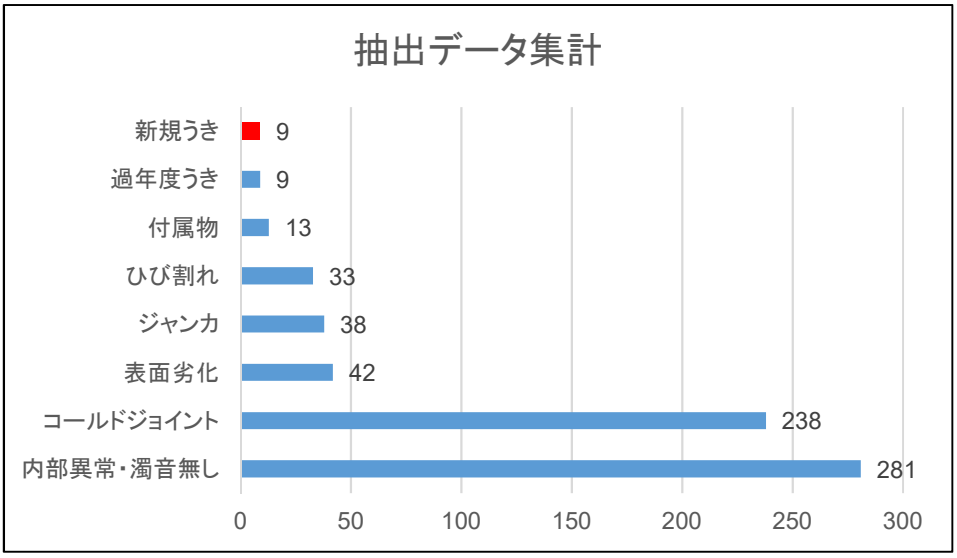
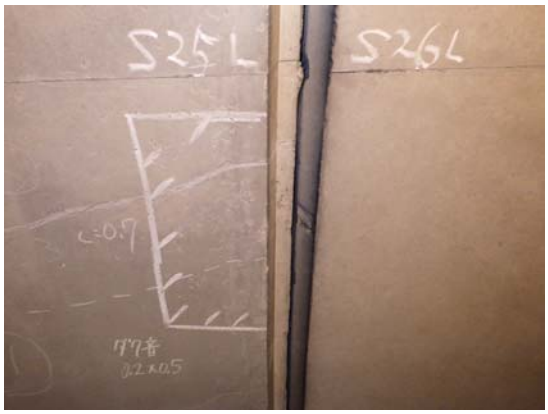


図 6.5.1　信号分析結果



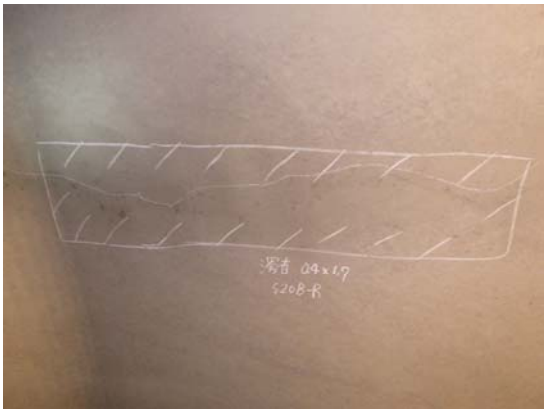
とがやま



釜窪東



新和田山



三谷

図 6.5.2　新規内部欠陥

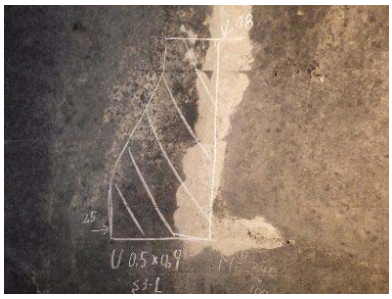
この中で、過年度点検時に検出されていない「うき」は、9 箇所（赤で表示）発見された。残りの 654 箇所（青で表示）の異常は、補修跡、ジャンカ及び過年度の点検で検出され、残置されているうきであった。検出された代表的なうきを図 6.5.2 に示す。

差分信号として検知された全 663 個の異常箇所うち、267 個は覆工表面に変化がなく、濁音も検知されなかった。これは覆工内部に電気的性質の異なる部分があり、それが差分信号として現れたものと推定する。

本検証検査の結果、近接打音検査時に検出された「うき」の中、内部欠陥レーダでは抽出されなかったものが 6 箇所確認された。未検出であった内部欠陥を表 6.5.1、図 6.5.3 に示す。内部欠陥の範囲は、いずれも最大範囲を示している。

表 6.5.1 未検出の内部欠陥

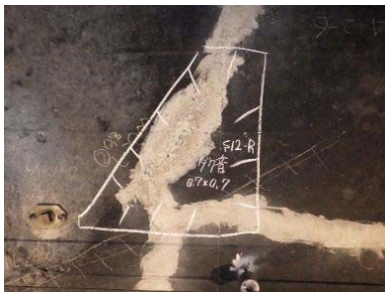
トンネル名	No.	スパン	内部欠陥範囲	
			縦（m）	横（m）
新和田山	1	S3	0.5	0.9
	2	S7	0.6	0.2
	3	S12	0.7	0.7
	4	S15	0.1	2.3
	5	S15	0.9	1.3
三谷	6	S203	0.85	4.5



No. 1



No. 2



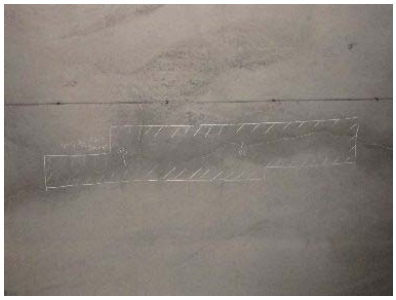
No. 3



No. 4



No. 5



No. 6

図 6.5.3　未検出内部欠陥

未検出であった内部欠陥箇所を調べると、以下の 3 種類であることが分かった。

① 横断方向、縦断方向の範囲が狭いもの（No.2、4）

② 補修跡の周辺にあるもの（No.1、3、5）

③ いずれにも該当しないもの（No.6）

原因は以下のように推定される。

① 横断方向に 1m の範囲での信号を検出するレーダの仕様により、変状規模が横断方向に 0.1m 程度の場合には、差分信号が弱くなり検出が難しくなった可能性がある。

② 補修箇所に存在する何らかの不規則構造から反射波が発生し、「うき」からの反射波を隠蔽あるいは妨害した可能性がある。

③ 巻厚不足による濁音のため、検出可能深度外と判断できる。

ここで、今までの内部欠陥レーダで検出した結果及び、未検出箇所を分析すると、その殆どが、要領に記載されている重点着目（横断目地、ひび割れ沿い）の箇所（図 6.5.4）であった。

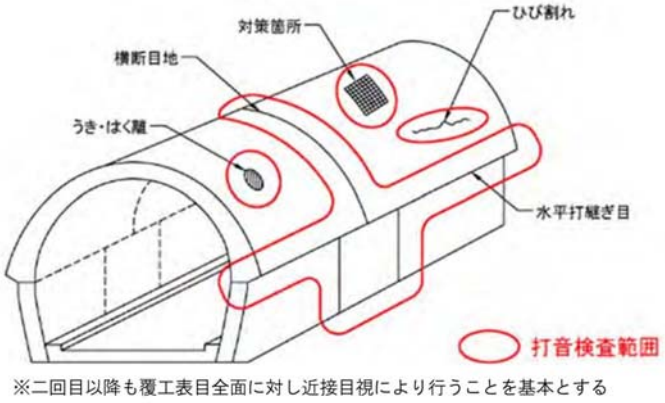


図 6.5.4　点検要領からの抜粋 [1)]

これらは、打音検査時に必ず打音を実施する場所であり、これ以外の健全部がスクリーニングできれば、作業向上につながるものと考える。

図 6.5.5 に示すような、内部欠陥レーダで検出した「うき」の予兆を感じさせない場所に関しては、技術者が点検時に見落とす可能性もあり、見落とし防止にも役立つものと思われる。



図 6.5.5　予兆の無いうき写真

【参考文献】

1）道路トンネル定期点検要領、国土交通省　道路局　国道・技術課、平成 31 年 3 月
2）株式会社ウォールナット提供
3）図左：株式会社ウォールナット、図右：応用地質株式会社提供

7 AIによるスクリーニング

7.1 概要

近年、様々な分野でAI化が進められている。土木構造物においても同様であり、さまざまなAIが開発されている。AIによるひび割れ検出などはその代表例であるが、トンネル点検においてひび割れイコール変状とはならず、最終的な健全性診断はひび割れの状況によって判断される。また、これらAI等に使用されるソフトウェアや分類器などはGitHub等でオープンソースとして公開されることも多く、特にひび割れといった素人にも分かりやすい特徴量については、AIの進歩が著しい。

一方で、AIから健全性を判別するようなオープンソースはほとんど見受けられない。これは、トンネル点検による健全性判断は、ある程度の習熟が必要であり、AI開発者では健全性の判断ができないこと、また逆に点検従事者はAI開発者ではないため、どのように開発すべきかといったノウハウを持っていないことが一因として考えられる。

本プロジェクトでは、点検支援の高度化においてAIによる事前スクリーニングの必要性、将来性を鑑み、スクリーニングを実施するAIを開発することとした。

なお、本章においては、道路管理者の同意のもと、佐田トンネル、旅籠山トンネル、和知トンネルの走行型計測画像データを借用した。

7.2 AI活用の目的

トンネル点検要領の改定に伴い、本研究で開発するAIはトンネル点検（主に近接目視結果）のスクリーニングを行うことを目的とする。

AIにおいて、100%の検出性能を持たせることは基本的に難しく、未検出や過検出が必ず存在する。トンネルの変状には多数の種類があり、一部のトンネルでしか発生しないような変状も考えられる。そのため、スクリーニングにおいて、トンネル変状を検出対象とした場合、すべての変状を学習させることは困難であり、珍しい変状は見落としもしくは検出不能の原因となる可能性が高い。

そこで、本検討で開発するAIは種類の少ない健全な箇所を抽出対象とする。健全な箇所を見落としたとしても、その箇所は要点検箇所として分類されるため、近接目視点検の対象となり、変状の見落としを軽減することが可能である。また、健全な箇所に対する感度を下げてパラメータ調整することで、変状箇所を健全箇所として分類することを防ぐことが可能となる。

よって本検討において開発するAIは正常な箇所のみを抽出するものとし、AIで抽出されなかった箇所を近接目視点検の対象とすることで、点検作業の効率化を図る。本年度の研究では、AI開発に向けた教師データ収集ツールの開発と、教師データ収集、およびその教師データを使ったAIの試作評価を目的とした。

7.3 AI 開発環境について

7.3.1 Neural Network Console

現在、AI 開発環境は多種多様なツール，フレームワークが用意されている。
本研究では、Windows で動作する GUI 環境で開発可能な Sony Neural Network Console を採用した。

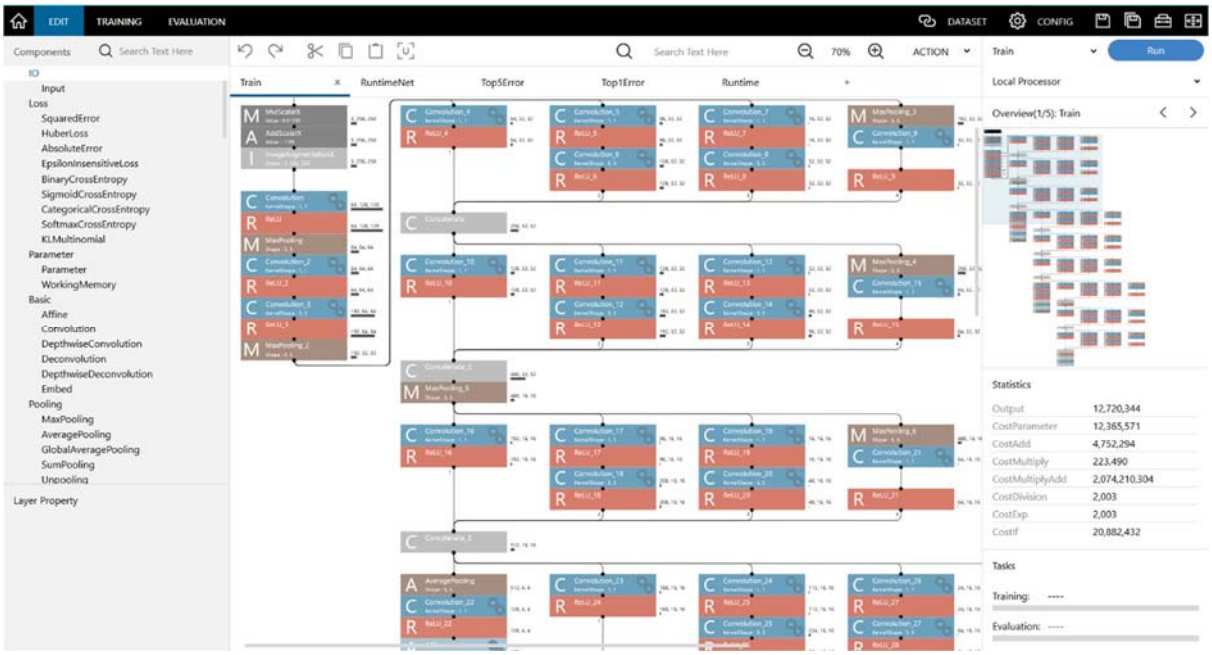


図 7.3.1 Sony Neural Network Console [1)]

7.3.2 ファインチューニング

一般的に、新たにネットワーク開発をする場合、10 万～数十万といった規模の大規模な学習データとそれを処理できる高性能な機器が必要となる。そのため、学習済みネットワークを利用し，層を追加する転移学習や、層の重みを調整するファインチューニングを行うことで、最小の調整で AI 開発することが頻繁に行われている。一般的にファインチューニングを利用することで効率的に AI が開発できる。

本研究でも、既存の学習済みネットワークを利用し、ファインチューニングを行うことで AI 開発を実施した。本試行では GoogLeNet、ResNet-18 を使用した。図 7.3.2 に GoogLeNet、図 7.3.3 に ResNet-18 のネットワーク構造を示す。

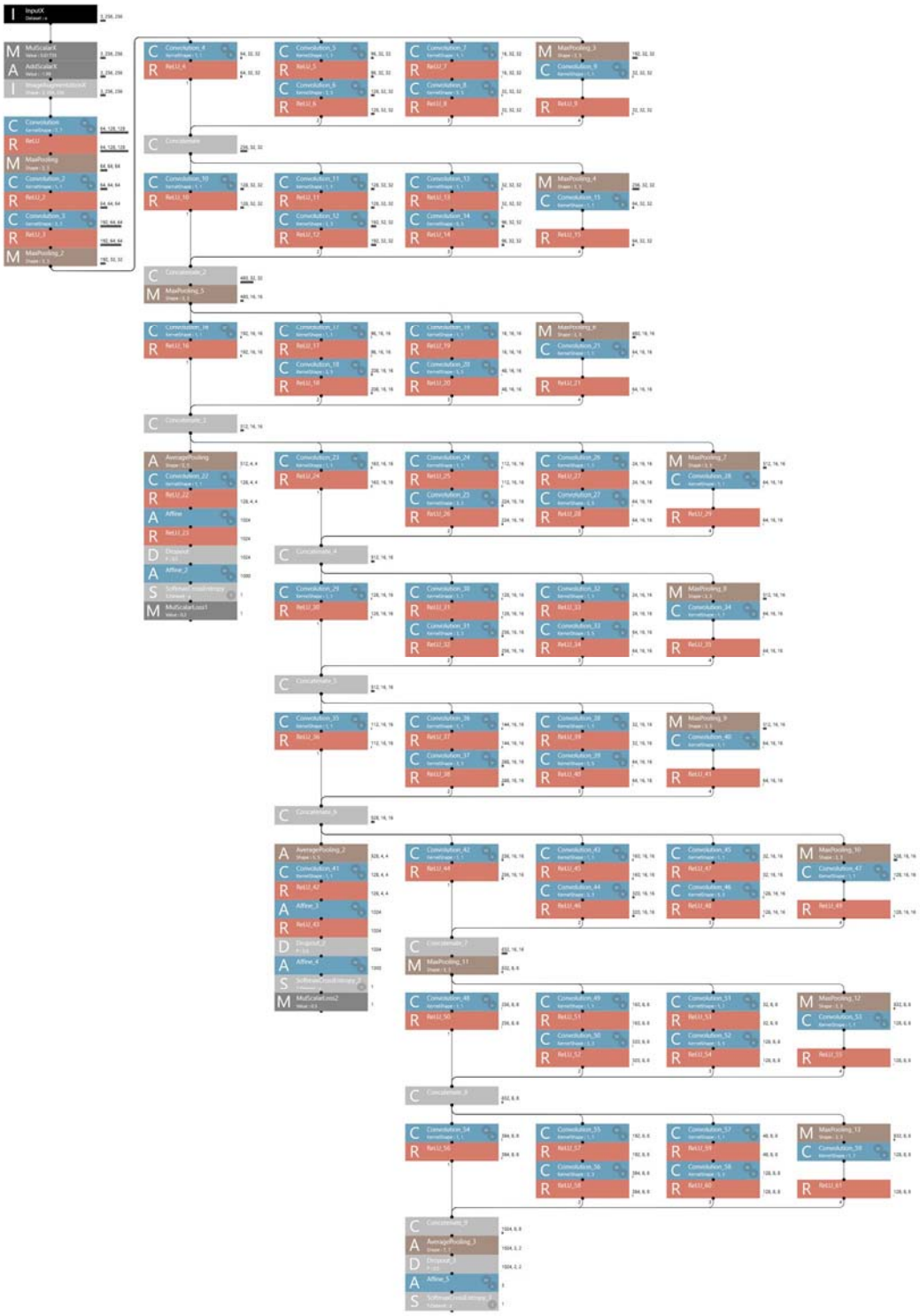


図 7.3.2　GoogLeNet [2)]

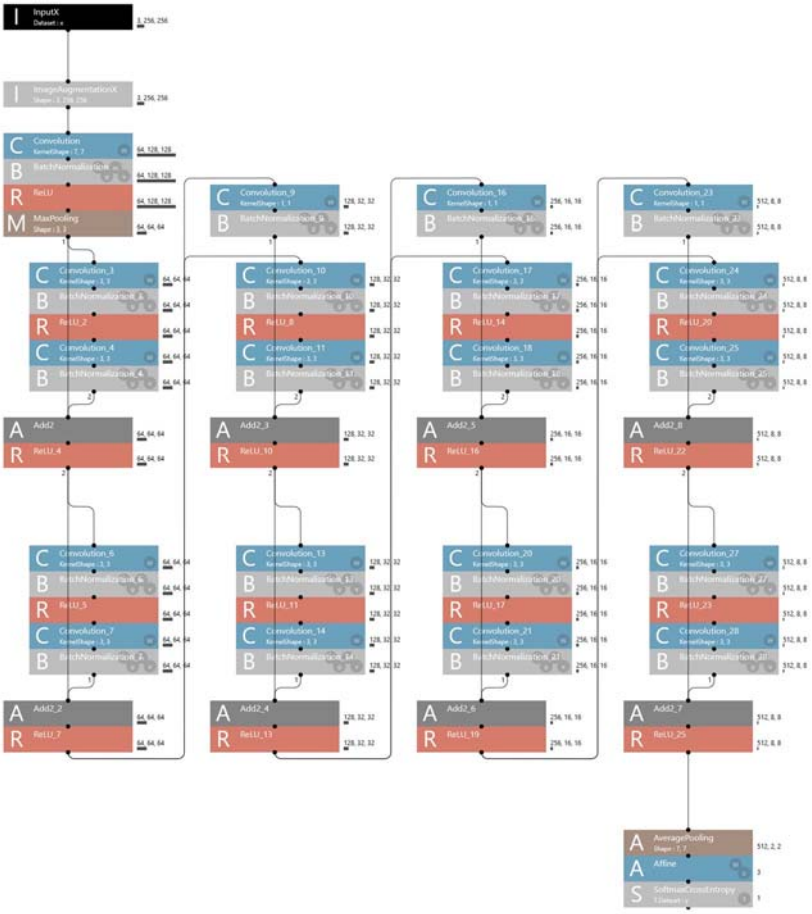


図 7.3.3　ResNet-18 [3)]

7.4 教師データの作成

7.4.1 概要

トンネル健全部スクリーニング AI 作成の工程を図 7.4.1 に示す。まず、最初に教師データをトンネル覆工展開画像より収集する。トンネル展開画像を 256×256pixel のグリッドに分けグリッドごとに、点検従事者により、「見ない」（健全）、「見る」（近接目視点検が必要）、「付帯設備」に分類する。

AI 開発において教師データ数が不十分な場合、未知データに適用できない過学習となることがある。そのため、前節でも述べたように、一般的には AI 開発には大量の教師データを用意する必要があるが、教師データを一人で収集するのは困難である。一方、大人数で協力して教師データを収集した場合は、分類基準を明確にする必要がある。

分類のための AI は、原則として特徴量の境界決定問題であるため、似たような特徴を持つ画像が双方の教師データに混ざっている場合、学習がうまくいかず誤分類が増える傾向がある。一般的な画像分類の場合、分類対象は文字や交通標識、人物、動物など、多くの人が簡単に分類できる知識を持つ物が対象とされることが多いが、トンネル点検の場合は、変状の分類に専門知識が必要とされ、さらにその基準は点検業者間、点検者の経験値でも微妙な違いがあるため、分類基

準の統一を行う必要がある。そのため、本試行では、教師データの分類基準については、あらかじめ点検従事者間で調整を行っている。しかし、一部の画像については分類に迷う箇所もあり、そういった箇所ではいかに基準を明確化しても、分類結果が個々人で異なってしまうことは避けられない。

そのため、収集した教師画像を確認し修正していく必要があるが、数万枚の画像を収集者全員で再度見直し、手動で再分類するのは現実的ではなく、より効率良く教師画像を修正収集する必要がある。

そこで、図 7.4.1 の手順により教師データの収集と修正を行いながら AI 開発を行った。

① 教師データを複数人の点検従事者により収集する。
② 収集した教師データを使って AI を調整する。
③ トンネル展開画像（教師データに使用していないトンネル）に AI を適用し、分類する。
④ 分類結果を一人の点検従事者により、確認し誤分類箇所のみを修正する。
⑤ 分類結果を新たな教師データとする。（初期の教師データは破棄する）
⑥ 新たな教師データで同様のことを繰り返す。

これらの手順により、教師データの収集効率を向上させることができる。また、AI の性能が向上するに従い教師データ作成の効率も向上する。

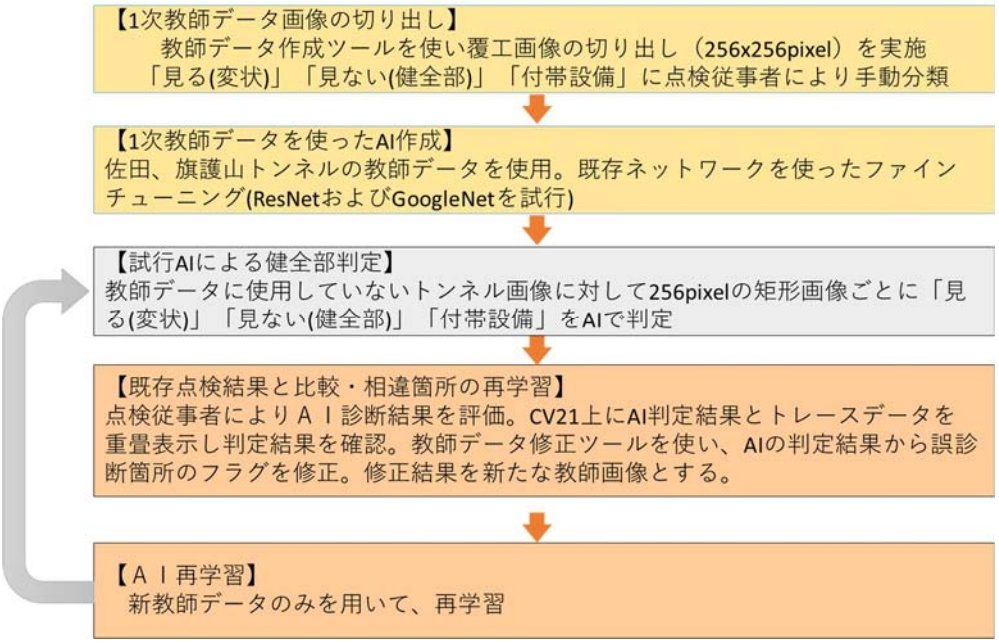


図 7.4.1　教師データ作成工程

7.4.2 教師データ作成ツール

トンネル点検従事者による教師データ作成のための簡易ツールの開発を行った。図 7.4.2 に開発したツール画面を示す。本ツールでは、画像を 256×256pixel（40cm 相当）のグリッドに区切り、選択したグリッドに対して入力者が、「健全部（見ない）」、「変状の可能性あり（要点検）」、「付帯設備」に分類する。分類はツール右下のボタンをクリックするだけで分類される。変状箇所は、グリッド中の一部であり、本来であれば、変状箇所のみを抽出した方が性能は高くなるが、

これ以上にグリッドを細かくすると作業効率が落ちるため、実験的に本サイズに決定した。

ツール左側は、トンネル全体画像が表示され、分類結果を色分けして表示する。またマウス操作により、拡大表示、縮小表示が可能である。またマウス操作によりグリッドを選択すると、選択中のグリッドは薄緑で枠が表示され、さらにツール右側の画面に拡大図が表示される。入力作業者は全体画像と拡大図および過去の点検調書を見ながら変状の有無の判定を行う。分類結果は、途中保存、途中作業データ読み込みが可能である。

初期の教師データとして用いたデータは佐田トンネルと旗護山トンネルであり、点検調書、展開図を見ながら入力を行う。入力はスパンごとに本プロジェクト参加の各社分担で行った。

本作業による収集画像枚数は、「健全部（見ない）」　18,499 枚、「変状の可能性あり（要点検）」8,155 枚、「付帯設備」7,375 枚を収集した。40cm のグリッド内に少しでも変状箇所が含まれる場合は、要点検箇所として分類している。

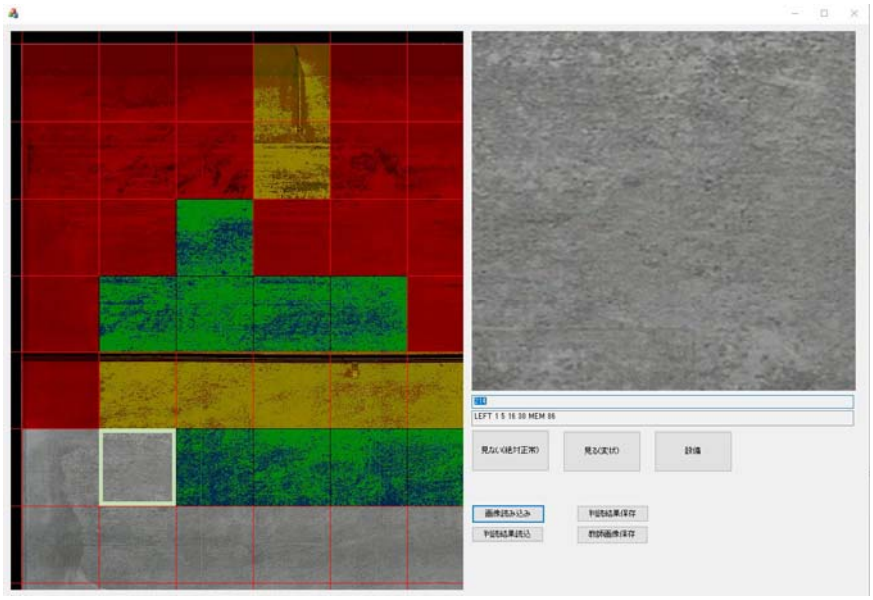


図 7.4.2　教師データ収集ツール

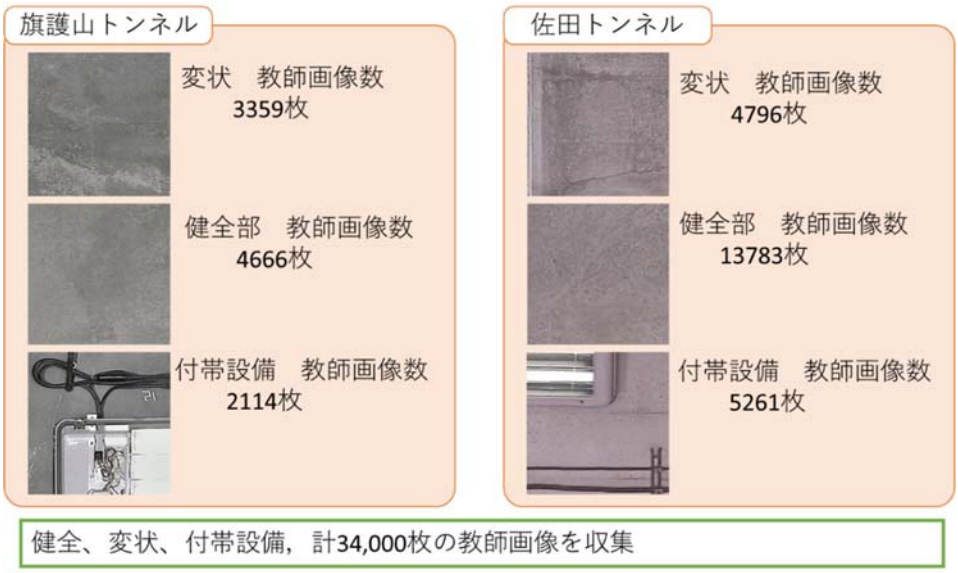
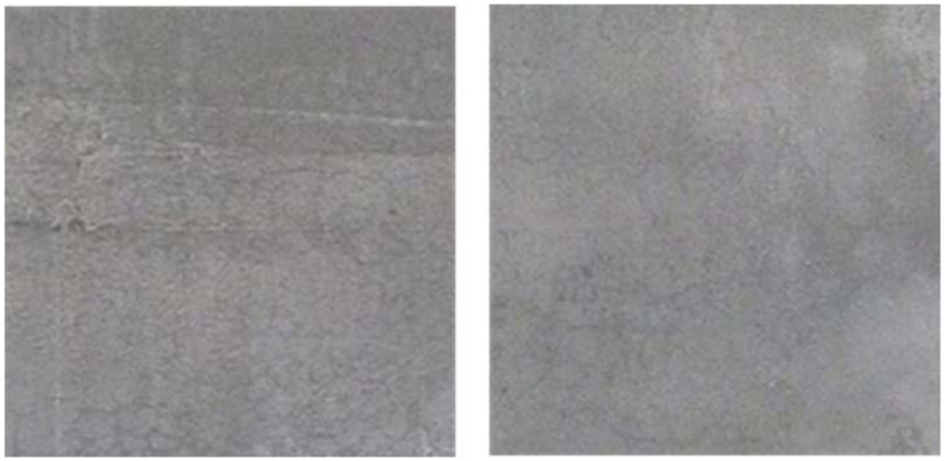


図 7.4.3　教師データ例

7.4.3 AI 判定結果を使った教師データの再収集

初期に収集した教師データ内には図 7.4.4 に示すように、似たような亀甲ひび割れの画像が健全部と変状どちらにも分類されており、この基準は画像収集者によって異なっている。このような画像が大量に含まれる場合 AI の調整に不都合を与える。そのため、これらの基準を見直し、教師データを修正する必要がある。



（健全部と分類）　　（変状と分類）

図 7.4.4　判断基準があいまいな教師データの例

教師データ修正には計測検査株式会社の CV21（画像トレースアプリケーション名称）と教師データ修正ツールを使った。AI により分類した結果を画像上に記録し、CV21 上でトレースデータと重ねた状態で表示する。修正者は、CV21 上で分類結果をトレース画像と比較しながら教師データ分類の修正を行う。

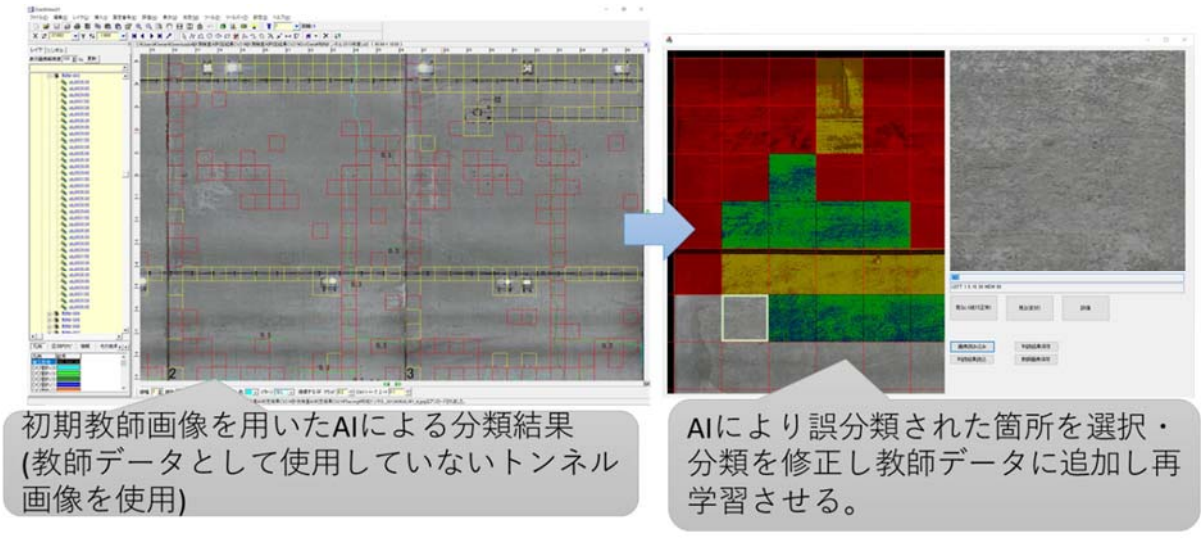


図 7.4.5　教師データの修正

7.4.4 教師データの判断基準

作成する教師データは、AI に読み込ませ変状の有無判断を行うために重要となることから、作成する教師データの判断基準について整理する必要がある。

AI は基本的に切り出した画像データのみから、対象のトンネル覆工画像データが健全かそうでないかを判定することとなり、現時点では隣り合った画像や連続する画像を見比べながら多面的な視点で健全性判断を行うまでには至っていない。

（技術的には可能ではあると考えられるが、より一層の教師データ母数が必要となることと、段階的な AI 学習が不可欠と考えられる）

一方、点検技術者が行う健全性診断は覆工展開図や現地での点検調書、対象画像とそれらのつながりや連続性等を俯瞰的に見たうえで行うことが一般的であり、上述する AI 判定結果とは必ずしもマッチしない可能性が高い。

それらの特性を踏まえ、下記の判断区分を設定し、対象画像の区分け処理を行うこととした。

基本的には該当する画像のみを見たうえで、下記の 3 種類の通り判断する。

① 見ない（正常である）
② 見る（変状がある、確認すべきところ）
③ 付帯設備（照明・ケーブル、非常用施設等がある）



図 7.4.6 教師データ判断基準により区分けした画像データ（左：見ない、中：見る、右：付帯設備）

トンネル各スパンから切り出された覆工画像データを用い、上記の 3 判定について以下の判断基準を設定し、区分けを行った。

1) 覆工の横断目地

定期点検において、変状の有無によらず原則見る箇所であり、画像診断においても「見る」判定とするのが望ましい。一方、目地部は漏水や遊離石灰等による表面の模様・汚れ等の差異が生じやすく、判断基準に悪影響を及ぼす可能性も有していることから、AI 判定においては対象から除外する（基本的に AI 判定によらず「見る」とするのが妥当である）。

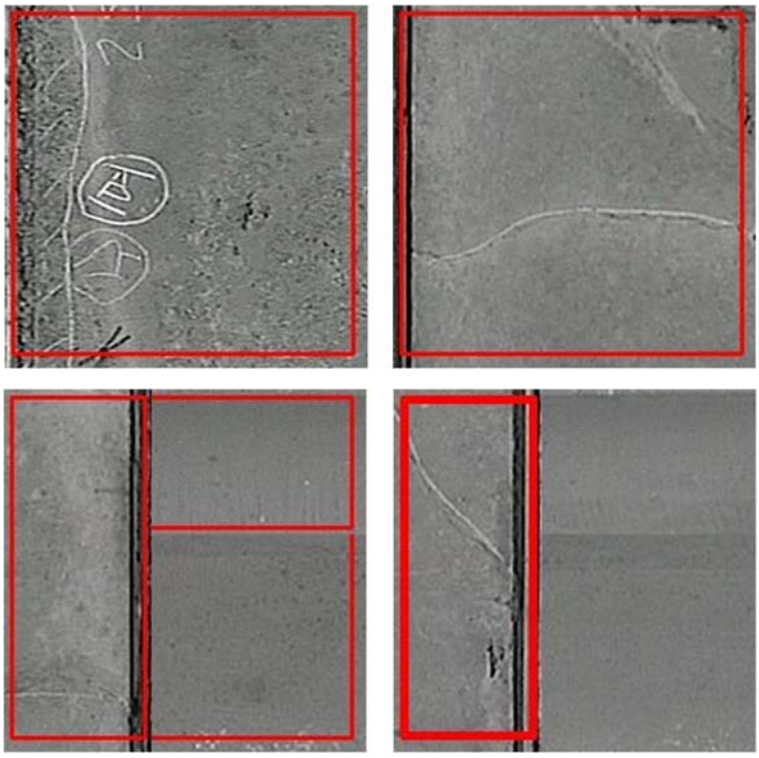


図 7.4.7　横断目地部の画像（抜粋）

2)　覆工の側壁下端目地（足付部）

定期点検において、変状の有無によらず原則見る箇所ではあるものの、当該箇所の変状による道路利用者への影響や支障（コンクリート片の落下等）は想定されないものであり、AI 学習における教師データ作成の観点からは、「見ない」変状とするのが適切と判断する。

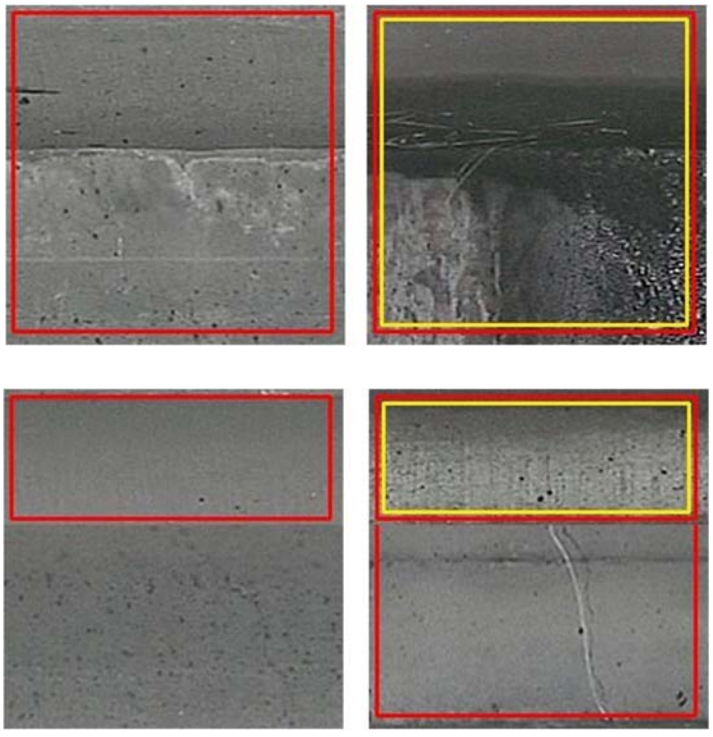


図 7.4.8　側壁下端目地部の画像（抜粋）

3) 非常用施設、照明、照明ケーブル、JF 等換気施設

非常用施設（非常電話、押ボタン通報機、ラジオ再放送設備等）、道路照明及びケーブル、換気施設（ジェットファン、VI、CO 測定機器等）については、原則「付帯設備」とする。

なお、当該画像にひび割れやうき・はく落等の変状が混在するケースも想定されるが、あくまでも画像のみでの判定を行い教師データとしての定義付けを行うことから、ひび割れやうき・はく落を含む画像であった場合でも原則「付帯設備」として判定する。

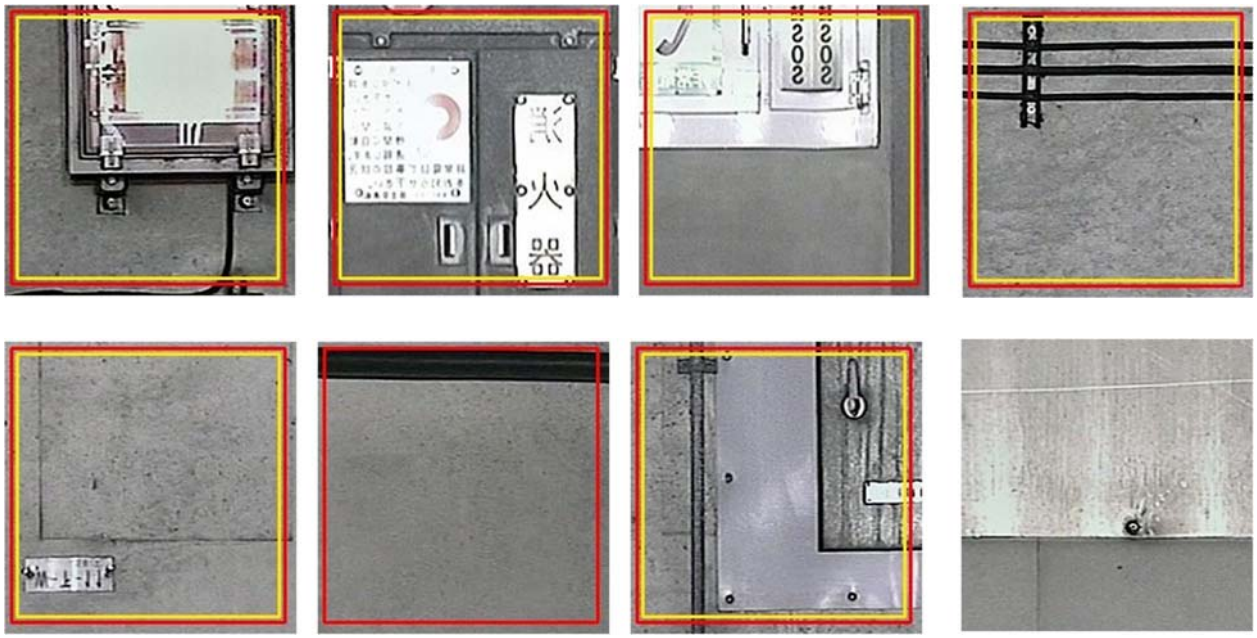


図 7.4.9　各種付帯設備部の画像（抜粋）

また、切り出し画像によっては上述の各種施設が画枠ぎりぎりに配置されているケースも想定される。ごくわずかな付帯設備の映り込みにより、判定結果が左右されることのないよう、「見ない」判定とする。

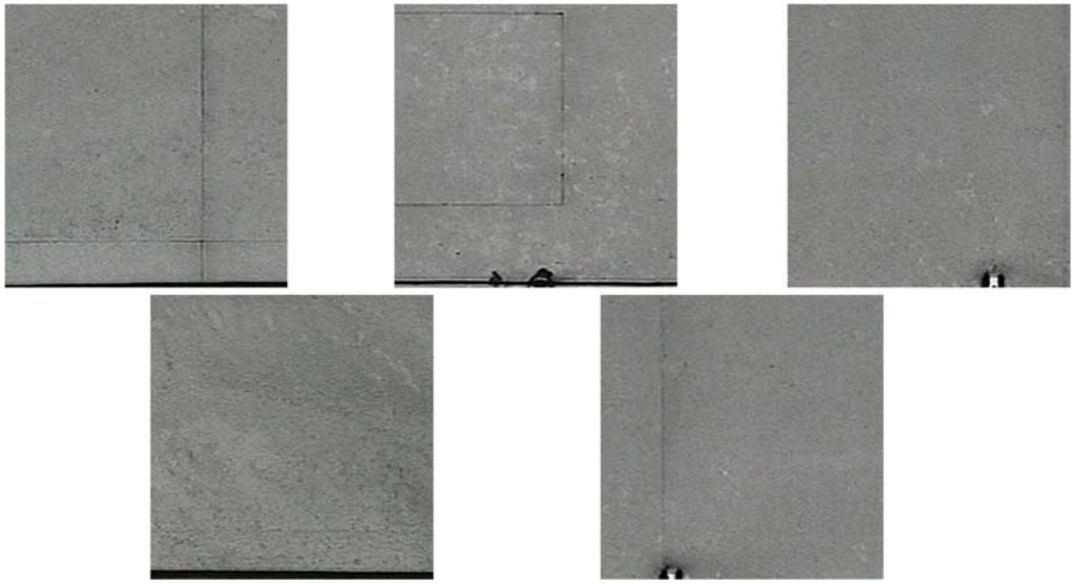


図 7.4.10　付帯設備が画枠境界に移りこんでいる画像の例（抜粋）

4)　覆工のひび割れについて

アーチ部の縦断連続するひび割れが「見ない」と検出されているケースもあったため、それらは「見る」に更新。なお、ひび割れについては、ひび割れ注入工法等による補修済み箇所も見受けられるケースがあるが、AI 判定では画像のみを見て補修済かそうでないかの判断までを行わせるにはさらなる検討を要することから、今回は原則「見る」としている。

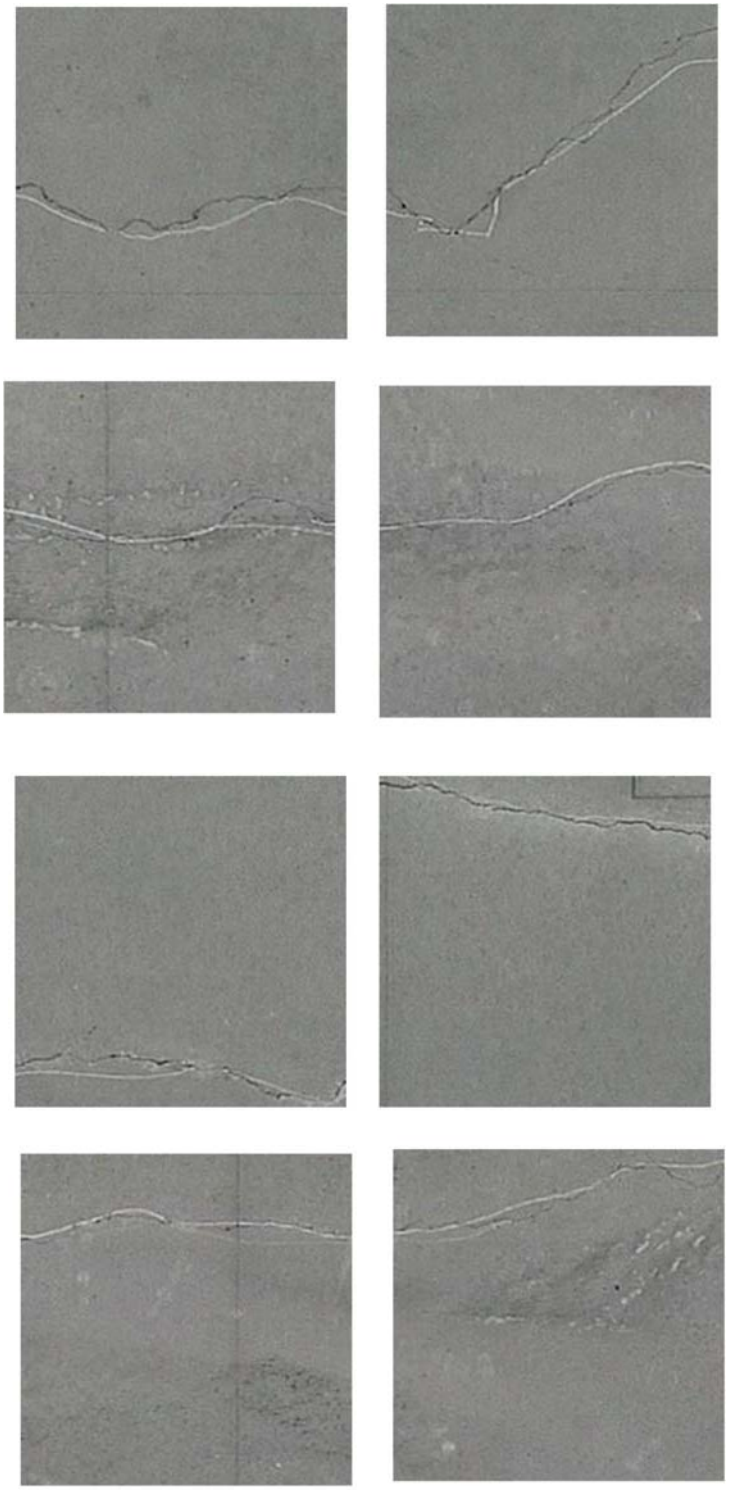


図 7.4.11　覆工ひび割れ箇所の画像（抜粋）

5)　覆工の模様や汚れ・黒ずみ等について

トンネル定期点検において、覆工のジャンカやコールドジョイント・施工時型枠跡等表面の凹凸についても注視すべき対象とするものの、これらが覆工表面の黒ずみや汚れ（排ガスや煤等）・側壁部の衝突・擦過痕等と同一視される可能性があり、ほとんどの覆工画像が「見る」として区分されることが想定される。

よって、今回判定においては、アーチ部の検測孔跡や、坑口部によく見受けられる蔓系植物などは「見る」判定とし、それら以外のものについては「見ない」変状とした。

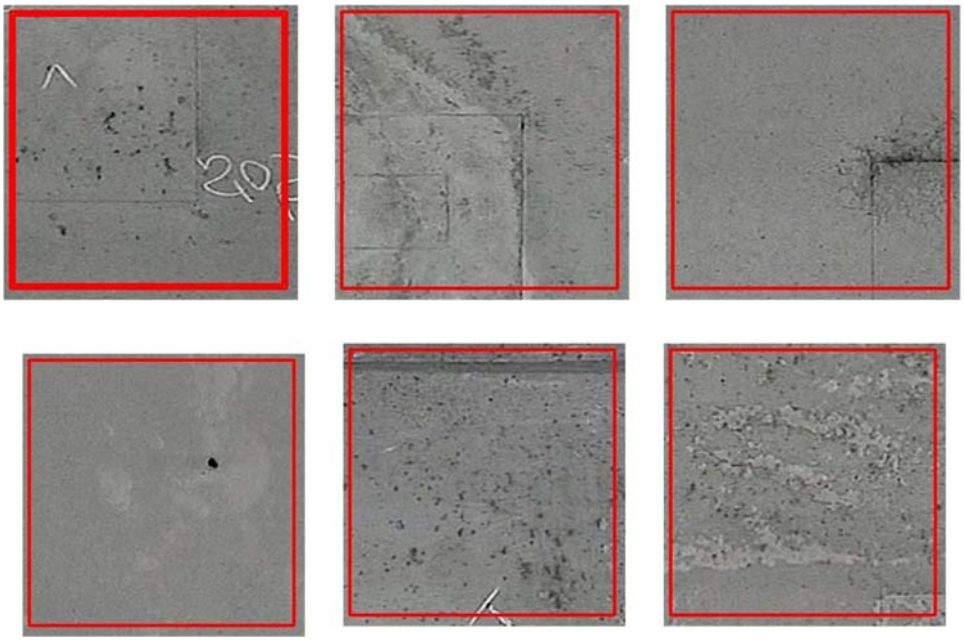


図 7.4.12　覆工表面の模様・凹凸状況（抜粋）

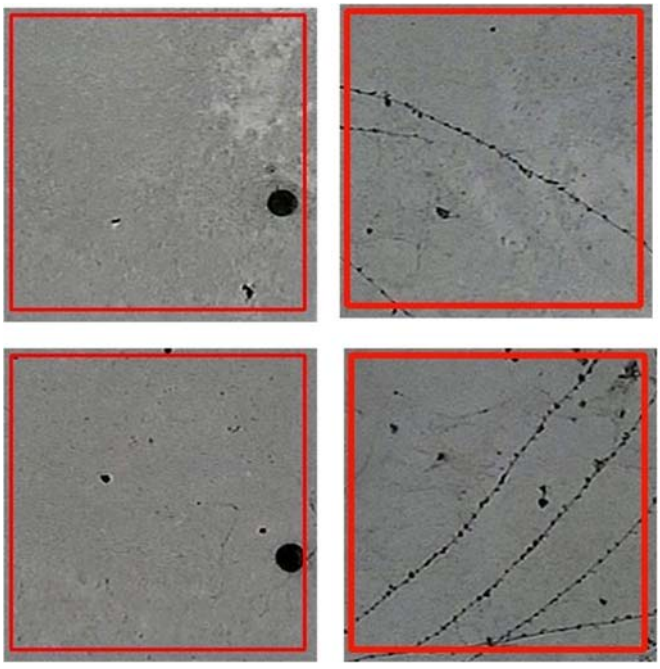


図 7.4.13　検測孔跡及び坑口部植物付着状況（抜粋）

7.5 評価結果

7.5.1 初期教師データ利用 AI による判定結果

手作業で収集した教師データにより学習を行った AI を使用し、和知トンネルへ AI を適用した結果を図 7.5.1～図 7.5.2 に示す。何も表示されていないグリッドは健全部として分類された箇所、黄色枠で囲われた箇所は付帯設備、赤枠は健全と判断されず要目視点検と分類された箇所である。

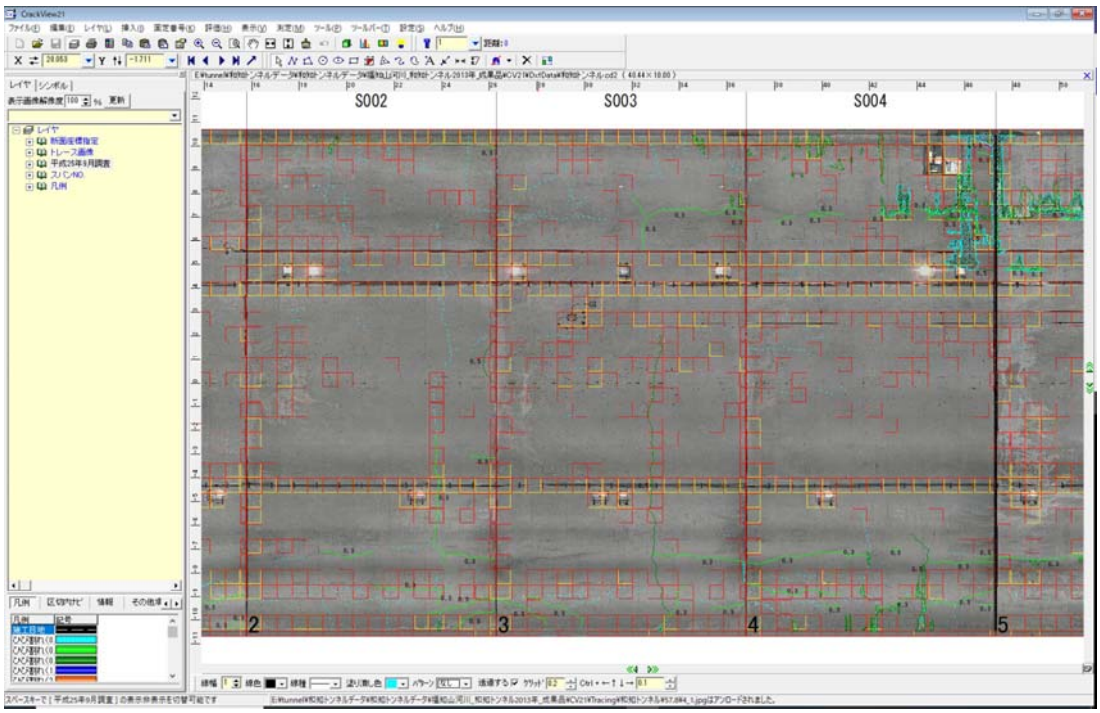


図 7.5.1　初期 AI による分類結果

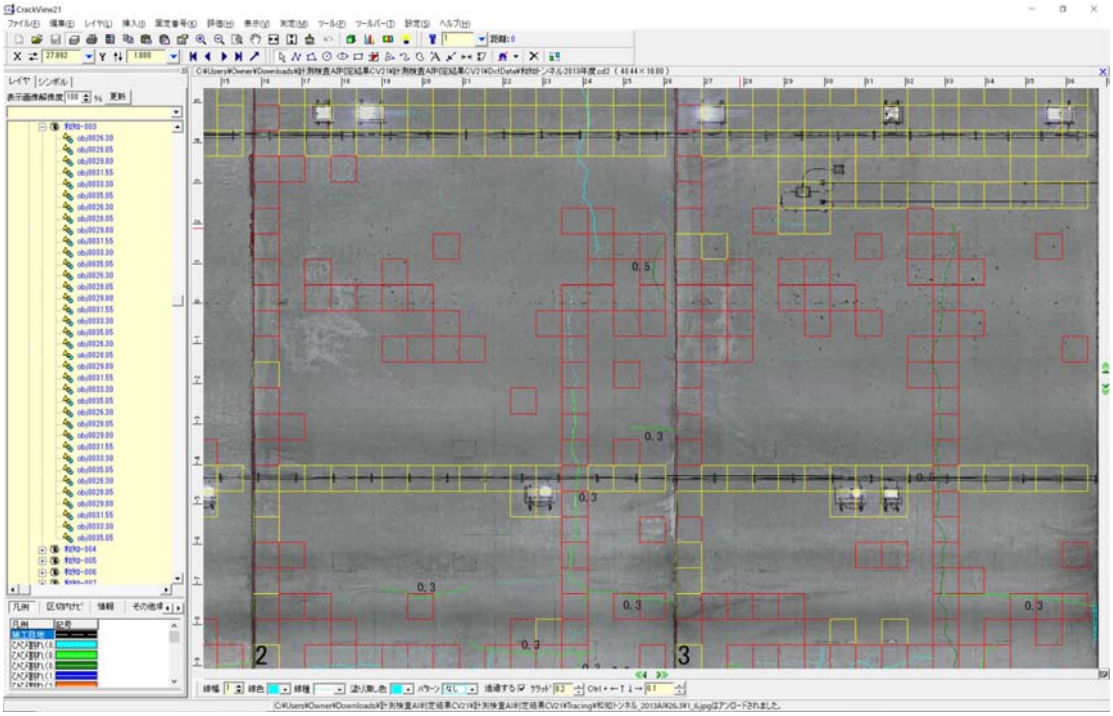


図 7.5.2　初期 AI による分類結果

7.5.2 修正教師データ利用 AI による判定結果

図 7.5.3~図 7.5.5 に修正教師データを用いて旗護山トンネルに適用した結果を示す。修正教師データでは、可能な限り健全部となるように調整しており、初期教師データと比べて健全部箇所が増える傾向が見て取れる。今回、教師データには壁面の汚れが少ない和知トンネルのデータのみを使ったためか、壁面の汚れに対し変状と分類する傾向が強い。今後、壁面の汚れが多いトンネル等のデータを増やしていく必要がある。

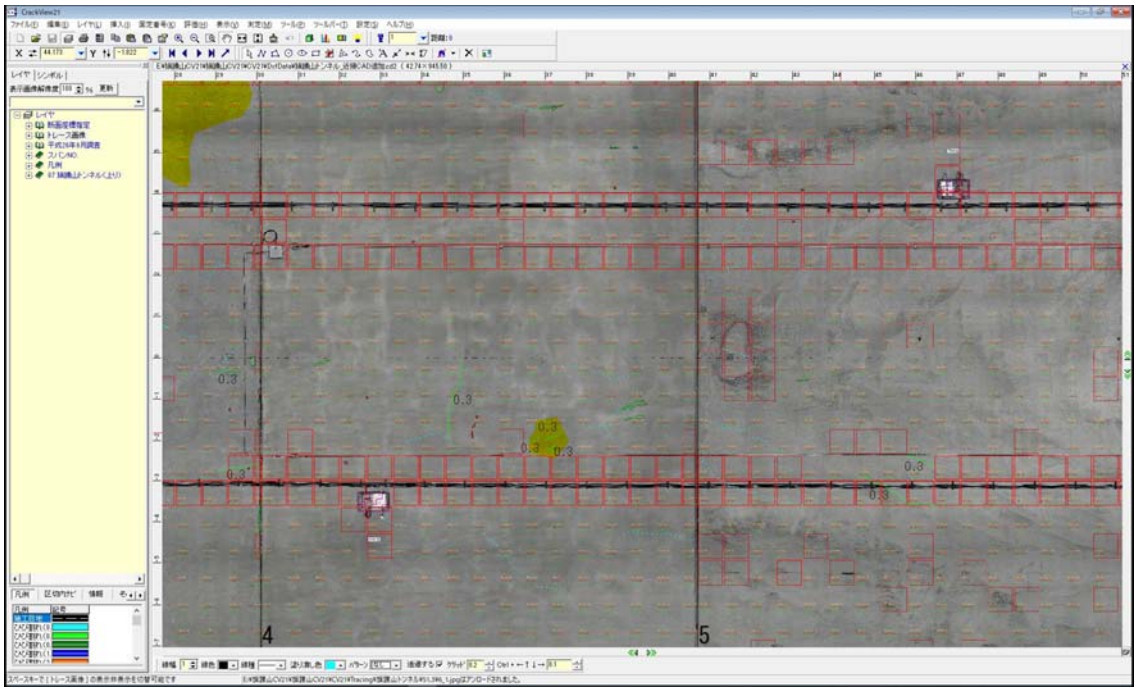


図 7.5.3　修正教師データを用いた AI による分類結果

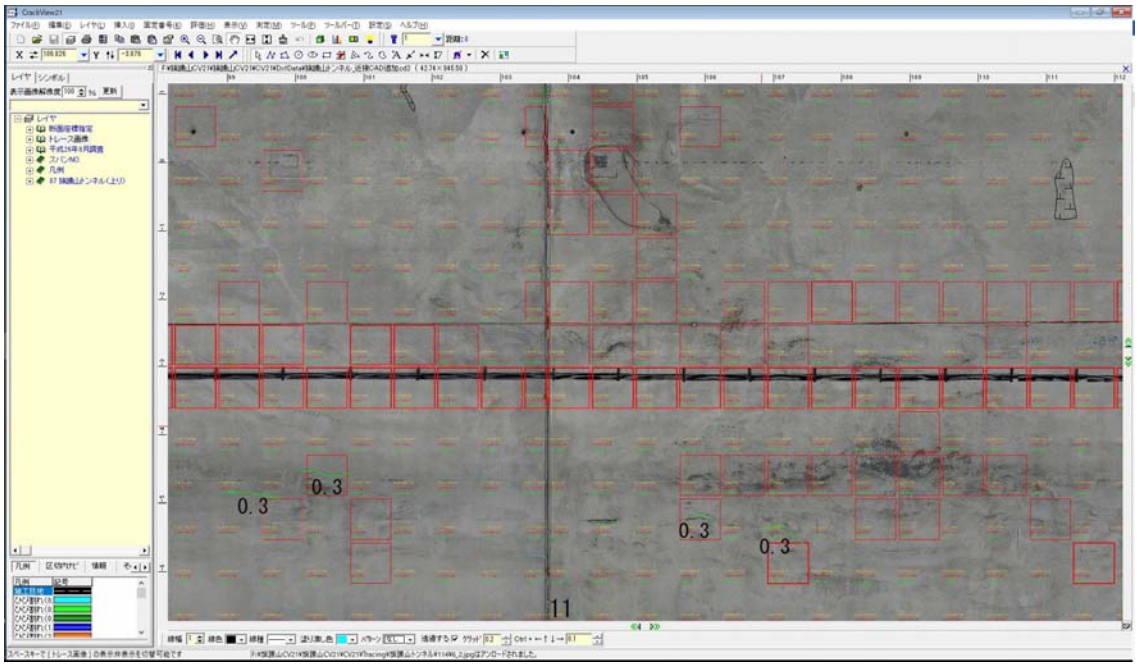


図 7.5.4　修正教師データを用いた AI による分類結果

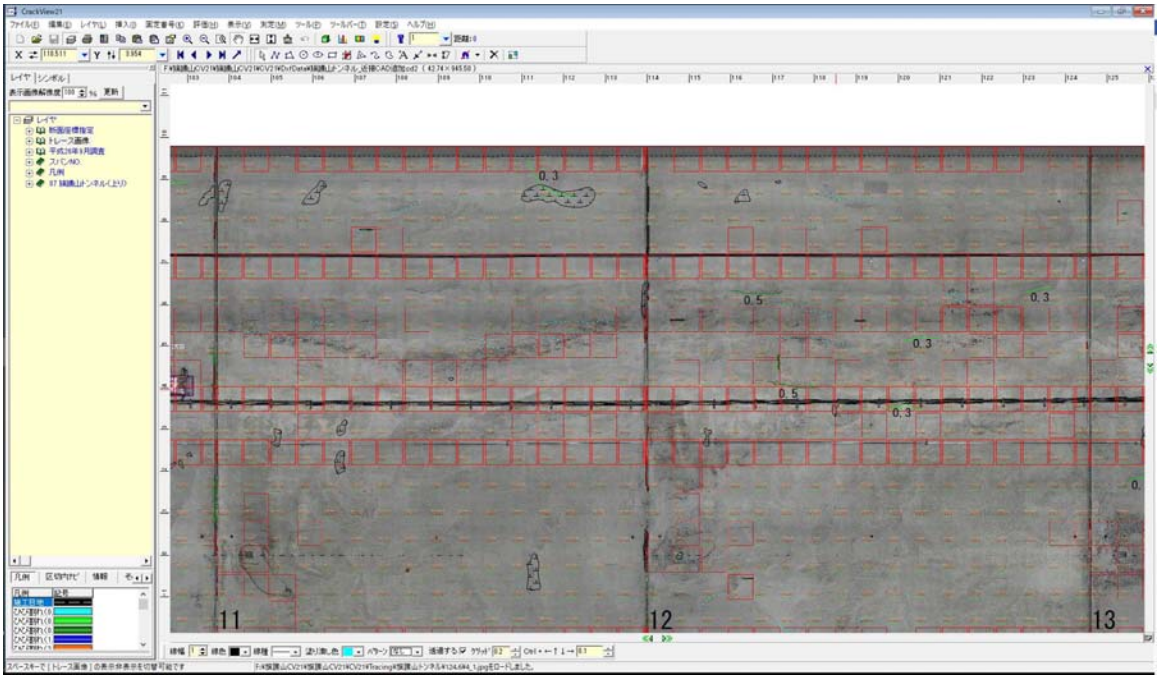


図 7.5.5　修正教師データを用いた AI による分類結果

7.5.3　計測機器による判定結果の違い

本節では、AI の適用性を確認するため異なる計測機器（画像取得装置）で取得した覆工展開画像に対して、本 AI を適用した結果について示す。まず図 7.5.6 に、リファレンスとして、教師データ収集に用いた機材と同じスペックの計測器 A で計測したデータに本 AI を適用した結果を示す。

次に、図 7.5.7 には、可視光のエリアカメラで、教師データ収集機材よりも高解像度なカメラを搭載した計測器 B で取得した画像に適用した結果を、図 7.5.8 には近赤外のラインカメラを搭載した計測器 C で取得した画像に対する結果を、図 7.5.9 には近赤外エリアカメラを搭載した計測器 D で取得した画像に適用した結果を、示す。画像は、同日に取得しており、対象としているスパンも同一箇所である。

まず、計測器 B では計測器 A と同じ可視画像で解像度が異なる点のみが画像としての違いに表れる。そのため、細かい点で差異があるものの、概ね同一の判定傾向が見られる。次に計測器 C では、展開画像作成時のカメラ間の接合部に輝度差が生じており、これらの箇所が付帯設備として判定されている。接合部以外では、計測器 A、B と同様の傾向が見受けられる。

次に、計測器 D では、天井アーチ部のほとんどが、変状として判定されている。これは、撮影画像の波長帯が可視画像と異なるため、撮像される画像には可視カメラでは写らない情報があり、このような情報は教師データ中には含まれていないことが原因として考えられる。

また、計測器 A~D において、付帯設備は同様に取得抽出されていることも明らかとなった。

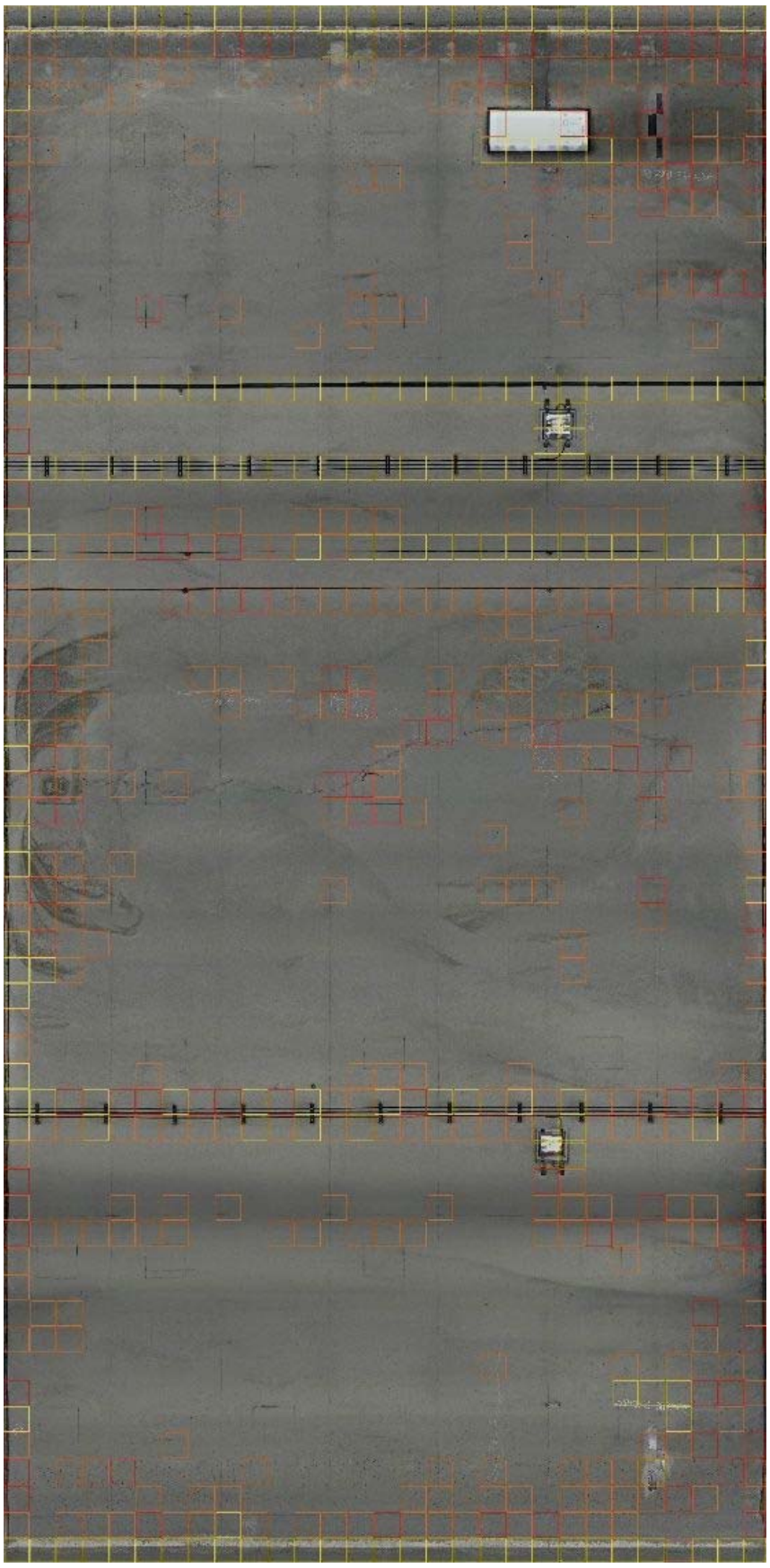


図 7.5.6　計測器 A（収集教師データと同一機材（可視エリアカメラ））

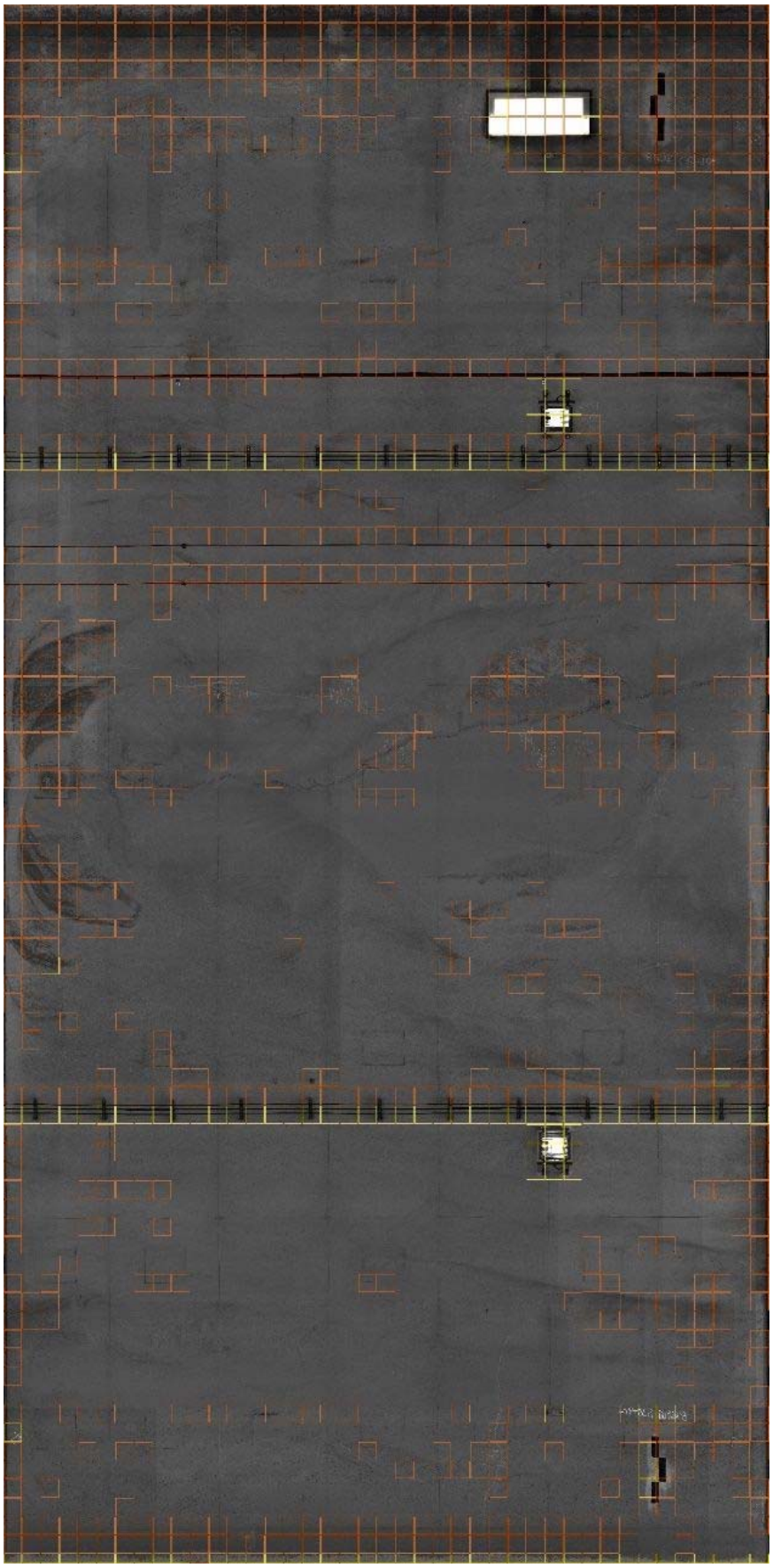


図 7.5.7　計測器 B（可視エリアカメラ（高解像度））

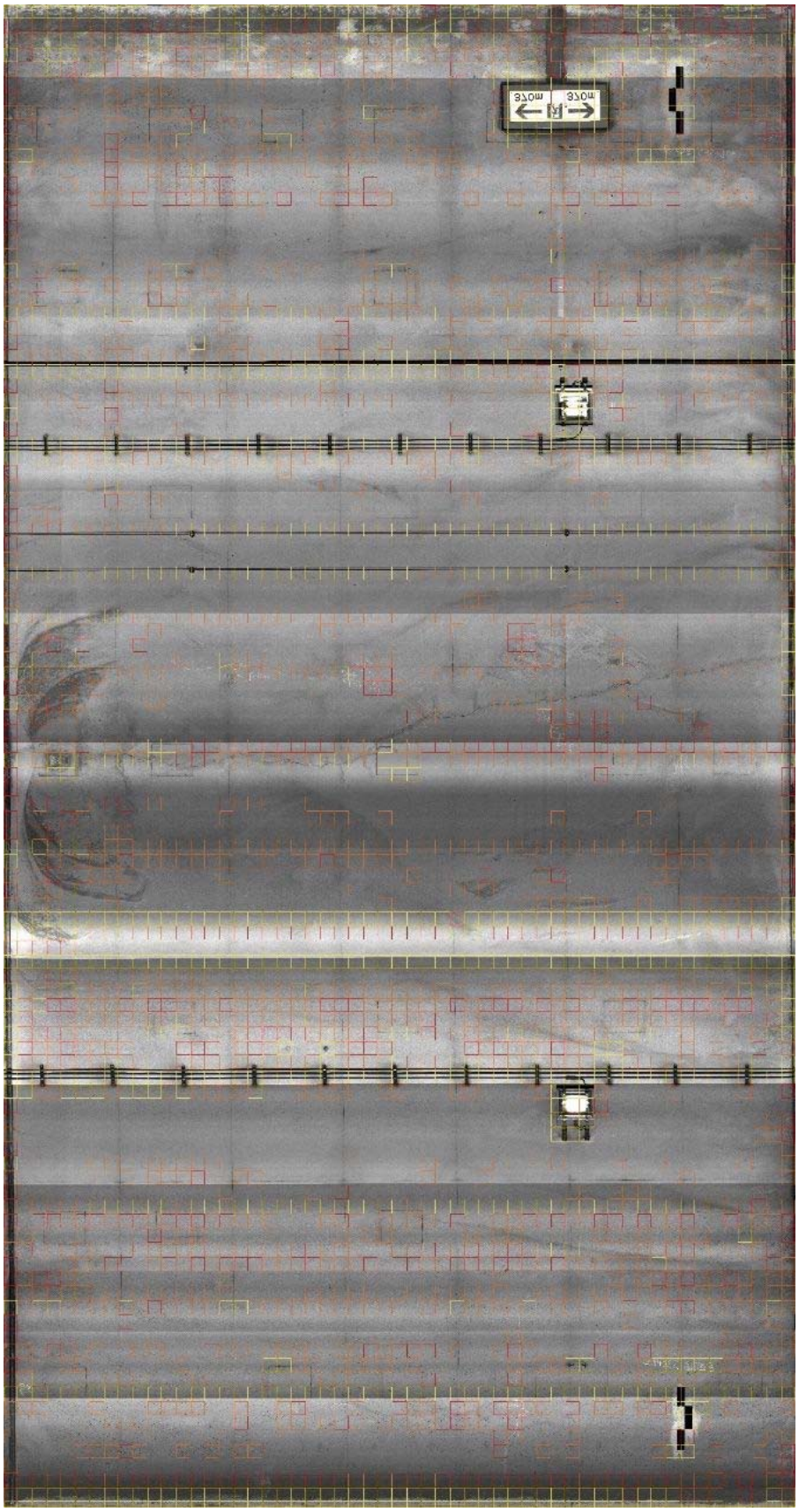


図 7.5.8　計測器 C （近赤外（805nm）ラインカメラ）

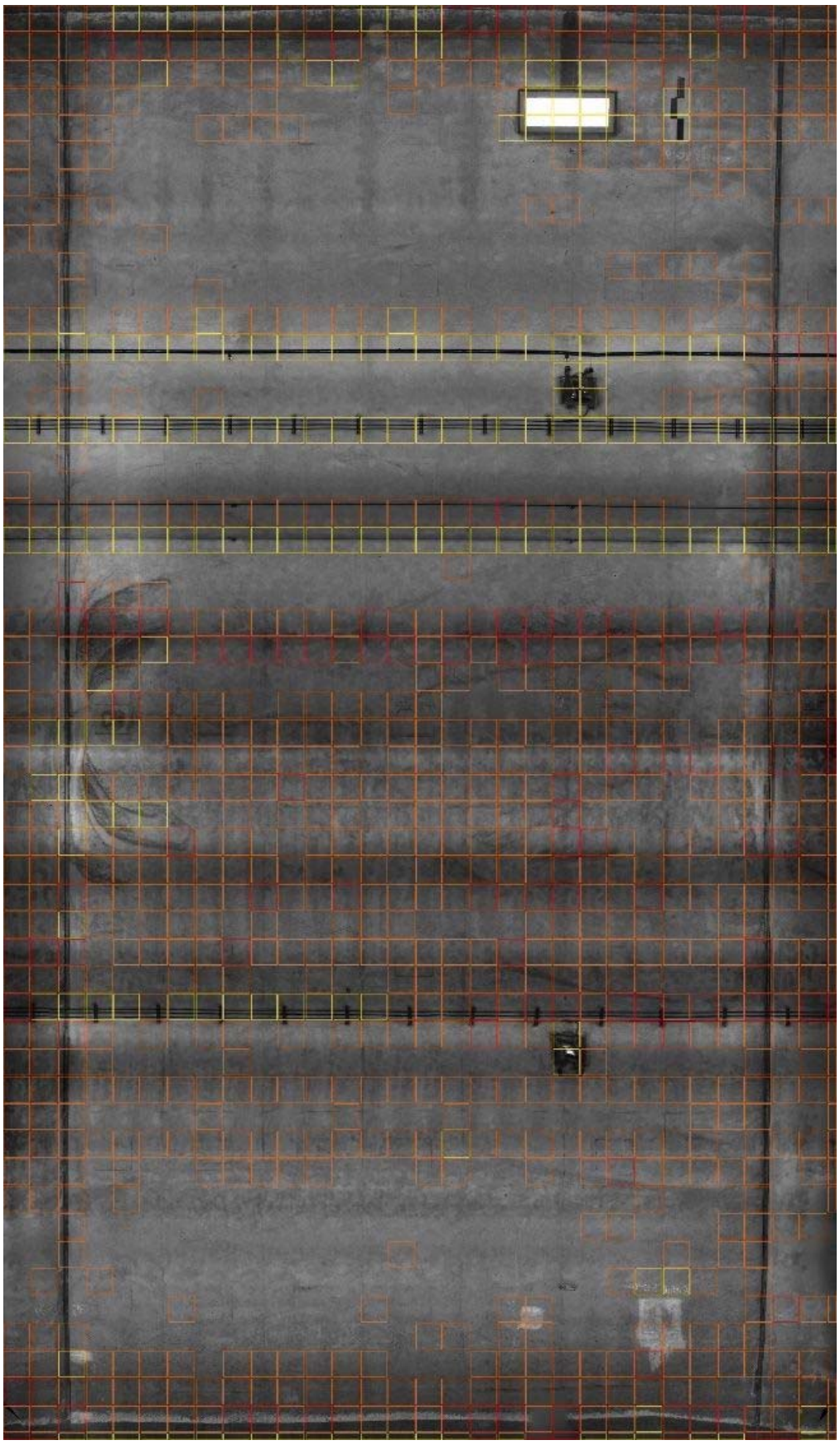


図 7.5.9　計測器 D（近赤外線エリアカメラ）

7.6 今後の運用方法

7.6.1 異なる計測機器間の教師データの共有

現在、運用されているトンネル点検機材は、他機種に渡るが、計測データは、画像、レーザ点群、車両位置姿勢など、一定の共通性が見られる。しかし、完全に同じではなく、例えば、複数のカメラ画像を繋げて作成する展開画像であっても、画像間の接合方法は各社に工夫がみられる。また、カメラそのものも、素子の解像度の違いやエリアスキャンやラインスキャンなどの撮像方式、可視領域や近赤外領域など取得波長帯も異なる。また照明も各社独自の工夫がみられるため、人間には同じように判断できるカメラ画像であっても、コンピュータにとっては特徴の全く異なるデータとなる。そのため、前節で述べたように特定の機種で収集した教師データをそのまま使用した場合、同一日に計測した同一箇所のトンネルデータであっても変状の分類結果は異なり、一方で付帯設備のような一般人が見ても判別できるような対象に関しては、画像間による違いはなく、認識ができている。このことからも特徴の出やすい物体については教師データの共有が可能であり、AI もそのまま適用できる可能性が高いが、今回試作した AI の場合、変状についてはそのままでは適用困難であり、機材毎に教師データ収集する必要がある。しかし、変状であっても教師データが共有できないようであっては、機材更新のたびに教師データの収集と調整が必要となってしまう。AI 開発にかかる労力、特に教師データ収集を要する手法を用いる場合の作業量は現時点の技術水準では膨大である。開発した AI や教師画像が特定の機材のみでしか使えないようでは汎用性が低く、機材変更の度に、新たに教師データを収集するのは非効率的である。そのため、教師データ収集のためのデータ共有の枠組みが必要である。

7.6.2 他センサへの画像 AI 開発技術の応用可能性について

変状のような判断に専門知識を要するような箇所については、機材による違いが生じ易く、他機材で収集した教師データをそのままで活用することは現時点で困難である。さらにレーザスキャナや、レーダなどのデータ内容が全く異なるデータに対しては、当然ながら画像のために収集した教師データは使用できない。一方で、移動体計測装置に搭載されるセンサは技術の進歩とともに交代が進み、現時点では開発されていないようなセンサが将来的に搭載されていくであろうことは簡単に予測できる。これらの新型センサなどへ対応した AI を速やかに開発するためには、教師データ収集をいち早く行うことができる仕組みが必要である。移動体計測における利点は計測箇所の位置姿勢が記録されている点にある。そのため、旧型センサである位置のデータ取得したとき、その AI 判定結果を新型センサに位置情報として教えることができる。現在の課題は、GNSS/IMU 複合航法主体の移動体計測ではトンネル内では位置に誤差が生じる点にあり、そのままでは単純に位置で比較することはできない。しかし、4 章で述べたランドマーク補正や、スキャンマッチング等の技術を用いることで GNSS/IMU 複合航法単体よりも高精度に位置合わせを行うことができるため、新型センサの教師データ収集の自動化が可能となる可能性が高い。

MIMM 等の現在の移動体計測機材であっても、カメラ画像の他にレーザスキャナによる 3 次元点群を取得している。レーザ点群は、xyz の座標データのほかに反射強度を持っており、反射強度におうじた画像を作成することで図 7.6.1 のようにカメラ画像と似た特徴を持つ画像も生成することができる。レーザ点群はカメラ画像よりも密度が低いため、細かいひび割れなどの検出には不向きであるが、漏水箇所や遊離石灰、付帯設備などについては十分に判別できる。

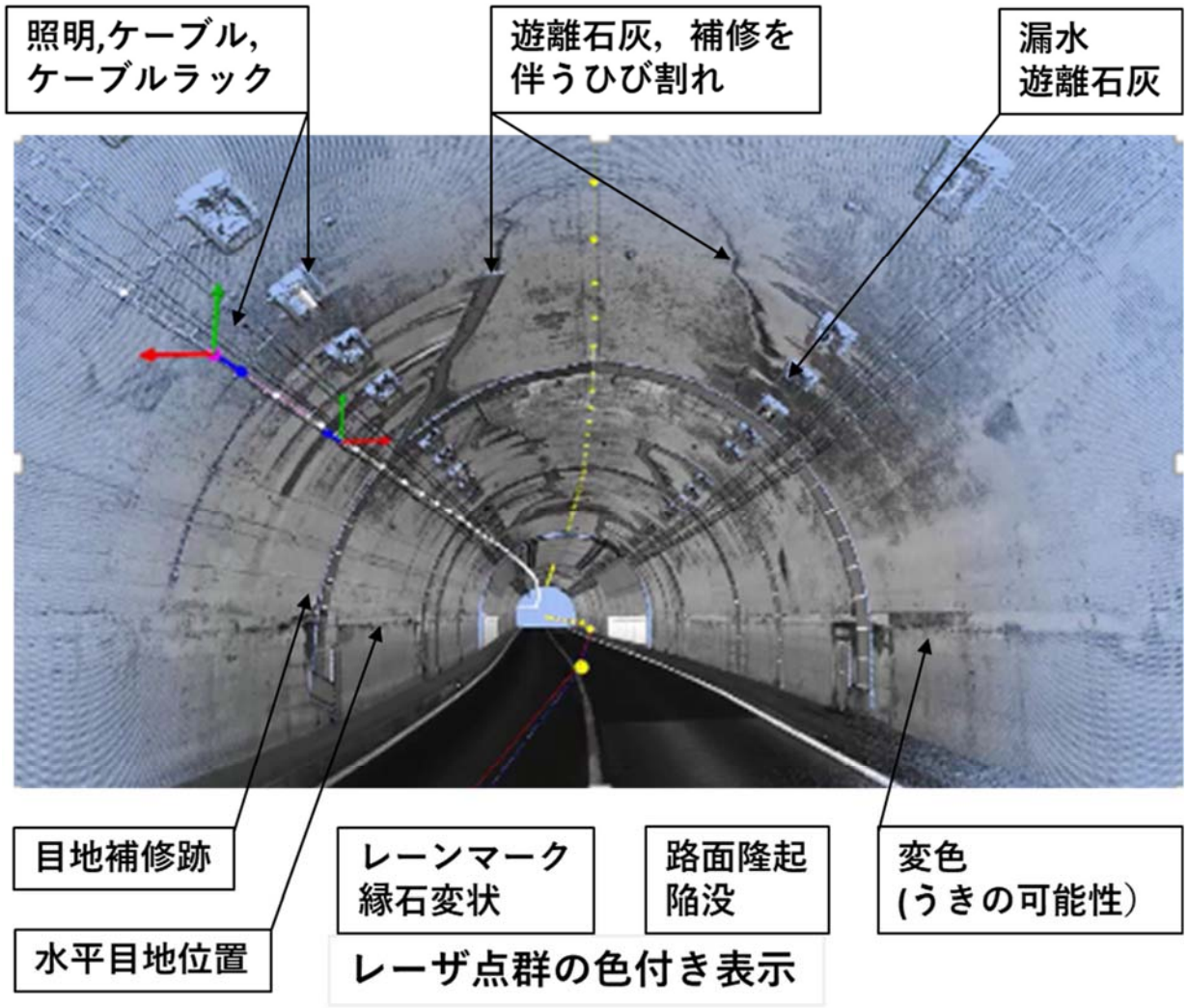


図 7.6.1　レーザ点群の反射強度表示

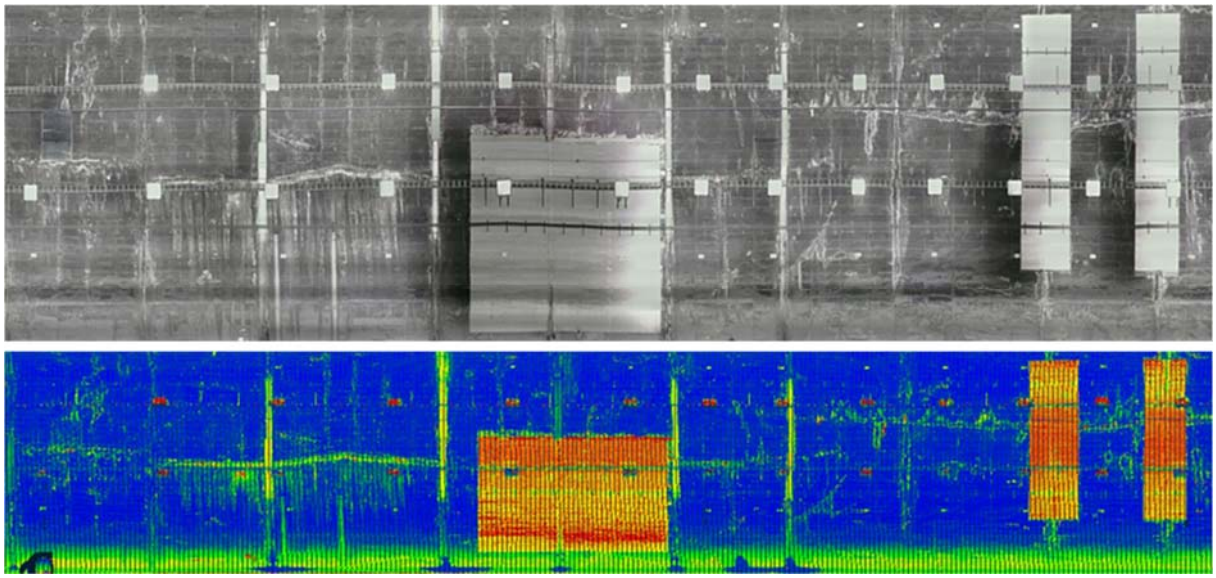


図 7.6.2　レーザ反射強度展開画像と、カメラ画像の比較

図 7.6.2 に同一箇所のカメラ画像とレーザ反射強度画像を示す。このカメラ画像とレーザ点群とを図 7.6.3 に示すような精密位置合わせを行えば、画像上の変状箇所と、レーザ点群の位置関係が明確になるため、レーザ点群を画像の教師データと同様に分類することができる。とくに画像用 AI で画像判別を自動化すれば、レーザ点群向けの教師データ作成の自動化ができる。この技術は、点群に限らず、計測位置が管理されていれば、画像対画像、画像対レーダなど他のセンサ技術間でも応用が可能である。

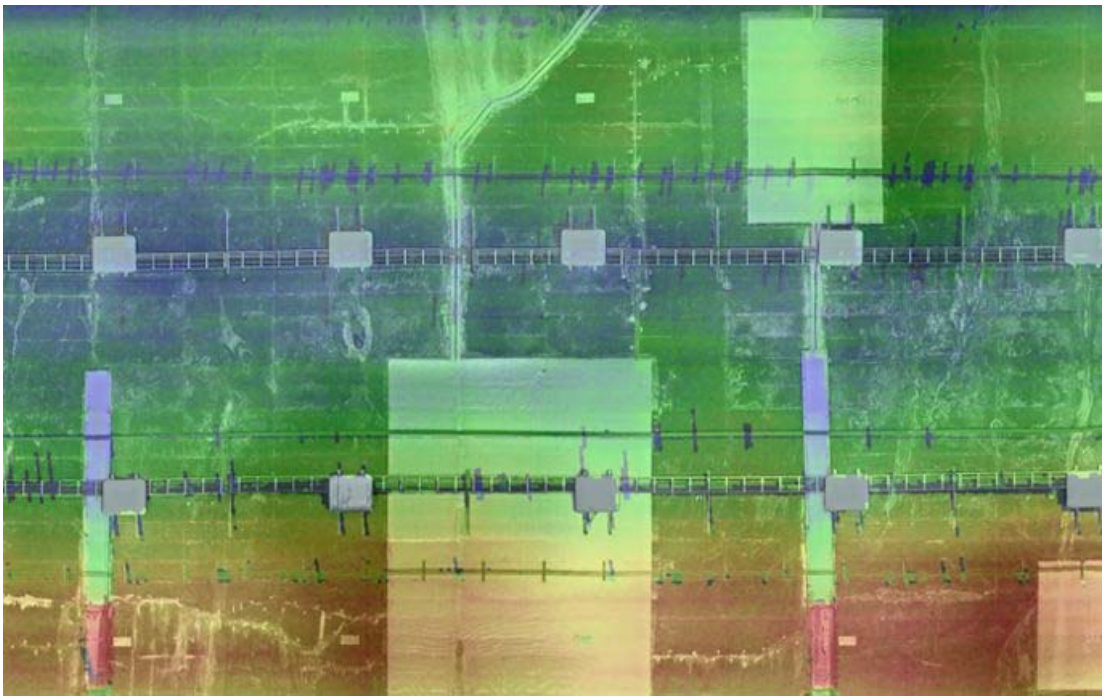


図 7.6.3　レーザ反射強度展開画像と、カメラ画像の位置合わせ

教師データを使用した AI 開発において、異機種間の協調のためには、位置情報によりこれらを管理し、データ取得時の情報を適切に残すことが重要である。一方で位置の匿名化が必要とされる場合もあるため、位置情報の共有化には工夫が必要であり、教師データ作成のための共用フィールドが必要と考える。

【参考文献】

1)　Sony NNC スクリーンショットより引用（参考 URL：https://dl.sony.com/ja/）

2)　GoogLeNet スクリーンショットより引用
（参考 URL：https://jp.mathworks.com/help/deeplearning/ref/googlenet.html）

3)　ResNet-18 スクリーンショットより引用
（参考 URL：https://jp.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet18.html）

8　実トンネルにおける支援内容の検証

8.1 H25 既往研究（5 トンネル）の再検証

8.1.1 概要

走行型計測技術は、「走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化検討に関する研究（平成 25 年 3 月）新都市社会技術融合創造研究会　走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究プロジェクト」（以下「H25 既往研究」という）において、実トンネルでの計測・評価を踏まえ、トンネル点検・調査時の安全性、交通規制の簡略化、評価を実施する際の平準化、維持管理予算の確保等を念頭に、その有用性が評価されている。

本章では、H25 既往研究にて実トンネル（5 トンネル：ここでは表 8.1.1 のとおり既往研究報告書に従いトンネル名をＡ～Ｅとしている。）を対象として得られた走行型計測に対する評価や課題を整理するとともに、現在における新技術（画像計測技術や非破壊検査技術等）により、過去の評価の見直しや新しい定期点検要領に対する支援の可能性について整理する。

8.1.2 H25 既往研究の概要

1)　対象トンネル

H25 既往研究での実トンネルにおける走行型計測と健全性評価の対象としたトンネルのうち、5 トンネルを対象としてその評価を整理した。

表 8.1.1　対象トンネル [1)]

名　称	種　別	竣工年	延長（m）	施工法
Ａトンネル	一般国道	平成 15 年	460	ＮＡＴＭ
Ｂトンネル	一般国道	昭和 31 年	291.5	在来工法
Ｃトンネル	一般国道	平成 4 年	1150	ＮＡＴＭ
Ｄトンネル	一般国道	昭和 38 年	228	在来工法
Ｅトンネル	一般国道	平成 2 年	1110	ＮＡＴＭ

2)　研究の概要

トンネル走行型計測技術を用いた道路トンネル健全性評価手法の研究として、実トンネルでの走行型計測と定期点検（従来の近接目視による点検）との整合性等を評価し、その適用性を検討した。

(1) 目的

走行型計測技術を深度化した道路トンネル健全性評価手法及び評価基準について検討し、道路トンネルの維持管理をより効率よく正確かつ安全に実施していくことを目的とし、走行型計測技術の特徴や利点、その実用性について評価し、道路トンネルにおいて必要となる走行型計測による維持管理方針について検討を行ったものである。

(2) 計測機械及び性能

トンネルの変状および変形をより効率的に、的確にかつ客観的に把握することを目的として走行型画像計測（MIS :Mobile Imaging Technology System）と走行型レーザ計測（MMS :Mobile Mapping System）を同一車両に搭載した　MIS&MMS（MIMM）を使用した。LED 照明とカメラ、背後に高精度レーザスキャナを搭載している。図 8.1.1 に MIMM の外観を示す。また、表 8.1.2 に MIMM の構成を、表 8.1.3 に MIMM の仕様を記載する。



図 8.1.1　MIMM [1)]

表 8.1.2　MIMM 構成 [1)]

	パーツ	台数	備考
MIS 部	LED照明	60台	70W
	カメラ	20台	38万画素
MMS 部	GPS	3台	2周波1台　1周波2台
	IMU	1台	3軸FOG/3軸加速度計
	オドメトリ	1台	右後輪
	レーザ	2台	13575点/秒
		1台	1000000点/秒
	カメラ	2台	500万画素
車両	いすず エルフ3トン		4WD　エアサス仕様

表 8.1.3　MIMM 仕様 [1)]

項目		仕様	条件
位置精度※	車両自己位置	0.06m(rms)	GPS受信が良好で FIX解が得られている場合
	レーザ点（5m）	0.10m(rms)	
高さ精度		0.15m(rms)	
方位精度		0.18°(rms)	5分間の良好なGPS受信状態が得られている場合（静止時）
ピッチ精度		0.36°(rms)	
ロール精度		0.72°(rms)	
標準計測速度		～50km/h	舗装道路走行時
最高計測速度		80km/h	
段差		最大10cm	5km/h以下での走行時

※ 公共座標との差異

(3) 計測方法

走行型計測車両（MIMM）を用いて、時速約 40km/h（一般道）で走行しながらトンネル覆工内面の画像撮影、レーザ計測を行う。

(4) 取得データ

① 画像計測　：覆工内面の連続撮影画像データ
② レーザ計測：覆工内面のレーザ計測点群データ

(5) 評価方法（走行型計測による健全性評価）

① 画像計測結果

取得した連続展開画像から変状（ひび割れ、漏水、遊離石灰、豆板、補修箇所等）を検出し、その変状規模、形状等から変状原因の推定、健全性を評価する。

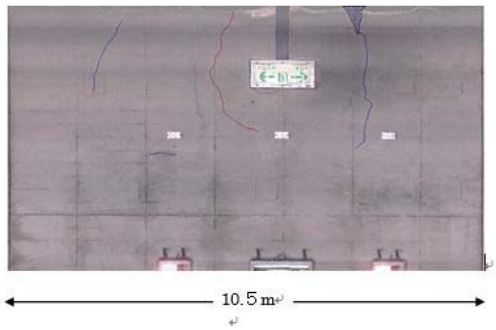


図 8.1.2　撮影画像の一例 [1)]

② レーザ計測結果

覆工面の段差（ブロック、目地、補修跡等）や路面の異常（盤ぶくれ、不陸、わだち等）を検出するとともに、覆工の変形形状（凹凸変形モード）を推定して外力作用の有無を判定する。

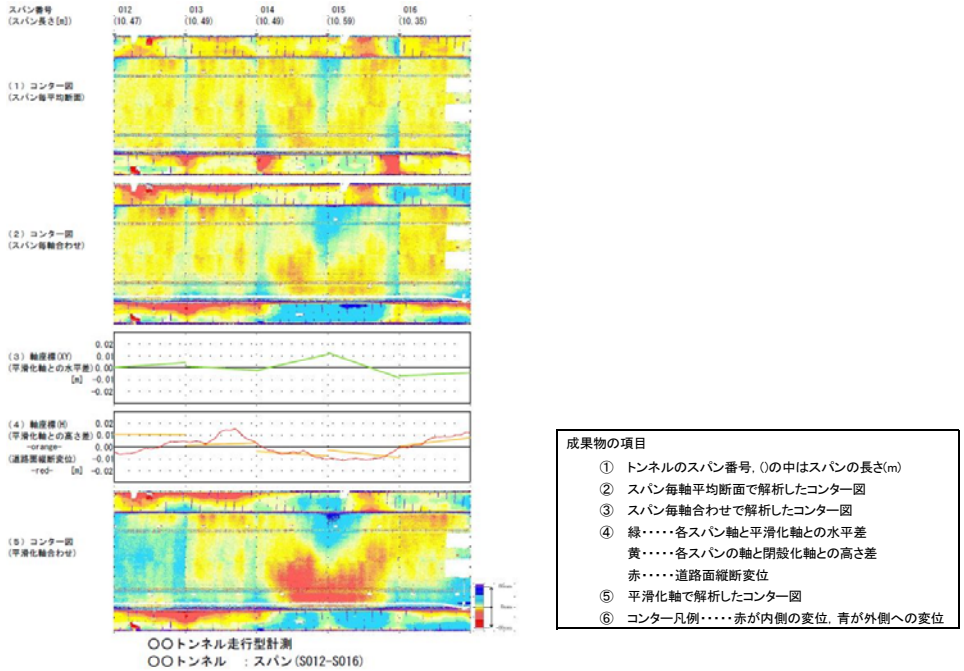


図 8.1.3　レーザ計測解析結果の一例 [1)]

3) 既往研究の成果と課題

(1) 研究の成果

既往研究では、走行型計測（画像計測およびレーザ計測）に対して、以下に示すような変状の検出、外力性の可能性の検出、それらを踏まえた走行型計測の評価が得られた。

H25 以前の従来の点検手法に対する既往研究での走行型計測の評価を表 8.1.4 に示す。

① 変状の検出（画像計測）

近接目視点検（定期点検結果）と走行型計測（画像計測による変状）との整合性を評価した。

(ア) 0.3mm 以上のひび割れ、漏水、遊離石灰、補修跡等は概ね検出し、定期点検結果と整合がとれている。

(イ) ひび割れ（幅 0.2mm、長さ、範囲、形状等）を把握できる。

(ウ) 0.1mm～0.2mm の微細なひび割れは、走行型計測では検出されない場合がある。

(エ) 漏水、遊離石灰、はく落、補修、目地、豆板、変色等を把握できる。

(オ) ひび割れの閉合、交差、密集を見つけることが重要（打音候補）。

(カ) 従来の点検よりも正確にひび割れを検出（位置や長さ等）することができる。

(キ) うきの検出は困難であるが、凹凸解析を実施することで段差の検出が可能である。

(ク) 目視点検に比べて見落としが少なくなる。

② 外力性の可能性の検出（レーザ計測）

外力性の変状が見られるトンネルで計測した覆工の変形モードとひび割れ発生状況との整合性を評価した。

(ア) ひび割れモードとコンター図の内空への凸モードを示す箇所が一致し、外力性の可能性を評価できる。

(イ) 構造的変状（外力作用）箇所の評価について

従来のひび割れパターン情報のみでは、外力作用箇所を特定することは困難であるが、走行型計測の凹凸解析（変形モード）により、外力作用箇所の抽出精度が向上する。このことから、適正かつ効率的・効果的な維持管理に寄与することが可能である。

③ 走行型計測結果の評価

走行型計測結果は、従来点検手法に対して以下のように評価できた。

(ア)「走行型計測」は遠望目視、近接目視、の代替が可能である。

(イ) 打音検査、叩き落としの代替とは成り難いが、打音検査の効率化に寄与する。

(ウ)「走行型計測」は、近接目視、打音検査の補完と位置づけられる「高度化技術」である。

(エ) 連続展開画像から変状（ひび割れ、はく落、漏水等）を抽出できる。

(オ) レーザ点群データからコンター解析を行い、外力性の有無を判定できる。

表 8.1.4　従来点検手法と走行型計測の比較（H25 既往研究）

	H25 以前の従来点検手法	H25 既往研究での走行型計測の評価
	＜従来点検手法の課題･問題点 等＞ ①点検に交通規制を必要とし、道路利用者へのサービス低下等、社会的影響が大きい ②点検者に起因する見落とし、バラツキ等、ヒューマンエラーが伴う ③変状を手書きスケッチにより記録するため、客観性に欠ける ④点検の作業環境が、高所、暗所、狭隘といった厳しい条件下にある上に、時間と労力を要する	凡例 従来点検手法と比較して、 ◎…代替可能(さらに、従来点検手法より品質が向上) ○…代替可能(従来点検 と 同等レベル) ▲…代替不可 ◇…従来手法では不可で、走行型計測での ＋α要素
現場作業　全般		
交通規制	交通規制が必要	⇒ 走行型車両による計測のため、交通規制を必要としない
点検環境 作業時間(効率化)	・高所、暗所、狭隘といった厳しい条件下にある上に、時間と労力を要する	⇒ 走行型車両による計測のため、大幅に改善されている 現場作業の時間短縮、効率化 が図られている
＜初回点検＞ 〔目的〕 近接目視による変状の把握、打音検査による「うき･はく離」の有無および範囲の確認		
近接目視点検	・高所作業車を利用して覆工面に近づいて、覆工全面を対象に点検実施 ・目視観察によるスケッチ	○ ・ひび割れ検出精度 0.2㎜(覆工表面状況による) ・漏水、遊離石灰、はく落跡、豆板、変色等を十分確認可能 ・ただし、画像が取得不可である箇所(ブラインドゾーン)が残存 (設備背面、非常駐車帯 棲部、坑門等) ⇒ 画像による高精度･客観的･定量的なデータ取得が可能
打音検査	・近接目視と同時に、必要箇所に対して打音検査を行う。(全面積打音ではない)	▲ 走行型車両による計測(非接触)のため代替不可 ・近接目視点検と同等の成果が得られるため、打音検査が必要な箇所（うき 懸念箇所）の抽出 が可能 ・事前に打音箇所が抽出可能なため、効率的な打音作業が可能
叩き落とし	・打音検査時、応急措置が必要となる変状(うき)をその場で処理	▲ 走行型車両による計測(非接触)のため代替不可
＜2回目以降点検＞ 〔目的〕前回点検で把握された変状を遠望目視で照合し、①変状の進行箇所 ②新規変状 ③直近の対策箇所 について、近接目視による変状の把握、打音検査による「うき･はく離」の有無および範囲の確認		
遠望目視点検	・路面(歩道、監査路)からの点検 ・現実的には、観察地点が遠く暗い、壁面の汚れ等の要因により、点検目的が達成することが困難	◎ ・安全かつ迅速な作業が可能 ・走行型車両により、高精度･客観的･定量的 なデータが取得可能なため、点検目的を効率良く達成可能
近接目視点検、打音検査、叩き落とし　＜初回点検＞ と同様		
点検成果(変状展開図)の精度	・トンネル変状を点検者が手書きスケッチにより記録するため、客観性に欠けるとともに、点検者に起因する見落とし、バラツキ等、ヒューマンエラーが伴なう	◎ ・正確な位置情報、客観的な進行性が把握できる ・点検者に起因する見落とし、バラツキ等、ヒューマンエラーがない ・従来のスケッチ展開図と比較して、高度化が図られている
点検成果(変形モード)	トンネルの変形に関して不明(判らない)	◇ ・レーザー計測による覆工凹凸解析により、トンネルの変形モードが把握でき、変状原因の特定(外力作用)が可能であるため、従来点検の後作業である「標準調査」の一部を代替可能
まとめ	・「走行型計測」は、遠望目視、近接目視 の代替が可能 ・打音検査、叩き落とし の代替とは成り難いが、打音検査の効率化に寄与できる ・「走行型計測」は、近接目視、打音検査 の補完と位置づけられる『高度化技術』	

(2) H25 既往研究時点での課題

① 画像から展開図作成時において、人間による判断が伴うため、検出の結果がばらつくことも考えられることから、一定水準以上の精度向上（作成に伴う技能）と画像から展開図までの一連作業の自動化技術を確立させる必要がある。

② ひび割れの有害、無害の判断やうきが発見できることが望ましい。そのためには、原因を明確にする必要がある。

③ 古いトンネルは、時代背景等で変状特性が異なることも考えられるため、今後データを蓄積し、新しいものとは違った観点での評価が必要である。

④ 構造上の要因（吹付け、段差、付帯物の裏、補強工、導水工等）により変状の判断が困難な場合がある。

⑤ 古いトンネルは、汚れ等により誤差が生じる恐れがあるため、より慎重な判断が必要であり、機器類のキャリブレーションを入念に実施する必要がある。

⑥ 走行型計測が使えるところと使えないところを、明確にする必要がある。

⑦ 解析結果をもとに、変形とひび割れの関連を分析することで、どの程度外力の影響を受けているか判断する必要がある。

⑧ カメラやレーザの機能を向上させることによってひび割れ検出の精度や損傷の検出機能をさらに向上させることが重要である。

8.1.3 現在の新技術による H25 既往研究の再検証

1) 道路トンネル定期点検要領の改訂

H25 既往研究においては、従来の定期点検に対する代替を視野に研究を進めたが、H26.6 道路トンネル定期点検要領の改訂により、初回点検の「トンネル全延長に対する近接目視及び打音検査」、２回目以降の点検においては、「トンネル全延長に対する近接目視」が規定された。また、H31.3 に再度改訂された道路トンネル定期点検要領においても、初回点検時の「トンネル全延長に対する近接目視及び覆工表面の全面的な打音検査」、２回目以降点検時の「覆工表面全面に対する近接目視」が規定されている。

このため、走行型計測技術を用いたトンネル一部区間の近接目視の代替等による点検作業の効率化は困難となった。H26.6 及び H31.3 に改訂された道路トンネル定期点検要領からの抜粋を以下に示す。

ここでは上記を踏まえ、H25 既往研究による評価・課題に対する現在での新技術について整理した。

表 8.1.5　H26.6 道路トンネル定期点検要領による定期点検の方法 [2] を加工

1)トンネル本体工

定期点検は，基本としてトンネル本体工の変状を近接目視により観察する．また，覆工表面のうき・はく離等が懸念される箇所に対し，うき・はく離の有無及び範囲等を把握する打音検査を行うとともに，利用者被害の可能性のあるコンクリートのうき・はく離部を撤去するなどの応急措置を講じる．

点検のうち，初回の点検においては，トンネルの全延長に対して近接目視により状況を観察すること，覆工表面を全面的に打音検査することを基本とする．また，二回目以降の点検においては，トンネル全延長に対して近接目視を行うとともに，必要に応じて打音検査を併用することを基本とする．なお，近接目視とは，肉眼により部材の変状等の状態を把握し評価が行える距離まで接近して目視を行うことを想定している．

今後，調査技術者が近接目視によって行う評価と同等の評価が行えると判断できる新技術が開発された場合は，新技術の併用を妨げるものではない．

また，近接目視による変状の把握には限界がある場合もあるため，必要に応じて触診や打音検査を含む非破壊検査技術等を適用する．

表 8.1.6　H31.3 道路トンネル定期点検要領による定期点検の方法 [3] を加工

状態の把握は、基本としてトンネル本体工の変状を近接目視により観察する。また、覆工表面のうき・はく離等が懸念される箇所に対し、うき・はく離の有無及び範囲等を把握する打音検査を行うとともに、利用者被害の可能性のあるコンクリートのうき・はく離部を撤去するなどの応急措置を講じる。ここで、近接すべき程度や打音検査や触診などのその他の方法を併用する必要性については、構造や工法の特性、想定される変状の要因や現象、環境条件、周辺条件などによっても異なる。したがって、一概にこれを定めることはできず、調査技術者が道路トンネル毎に判断することとなるものの、覆工に対する打音検査に関してはこれまでの損傷実態等を踏まえ、以下に示す方法により行うことを基本とする。

初回の点検においては、道路トンネルの全延長に対して、近接目視のみならず覆工表面を全面的に打音検査することを基本とする。また、二回目以降の点検においては、覆工表面全面に対し近接目視により行うことを基本とするとともに、前回の定期点検で確認されている変状箇所、新たに変状が確認された箇所、対策工が施されている箇所およびその周辺、水平打継ぎ目・横断目地部およびその周辺に対して打音検査することを基本とする（図-解 6.1）。

2) 実トンネルの H25 既往研究時の課題と新技術による対応

(1) 現在での主な新技術

表 8.1.7　現在での主な新技術

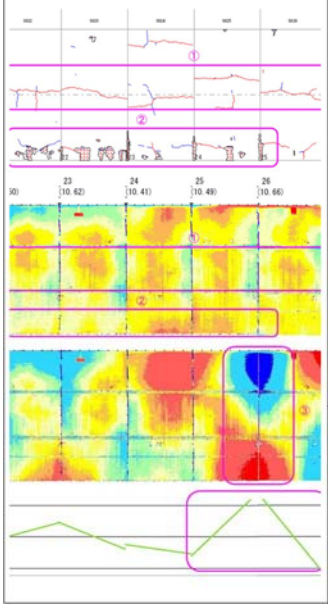
画像計測技術	客観的変状位置（変状の位置精度）、高精細画像、色識別性能の向上
非破壊検査技術	レーダ探査（うき、はく落に対する重点打音箇所の抽出、健全部の把握、巻厚不足・背面空洞の検出） 内部欠陥レーダ計測（覆工表面のごく浅い位置のうき、はく離、内部欠陥の検出）
計測・モニタリング技術	レーザ計測（覆工変状の監視）
ＡＩ技術	変状箇所のスクリーニング

(2) 実トンネルでの課題と対応

H25 既往研究での計測した実トンネルについて、トンネル毎の課題と現在の新技術による対応の可能性について整理した。

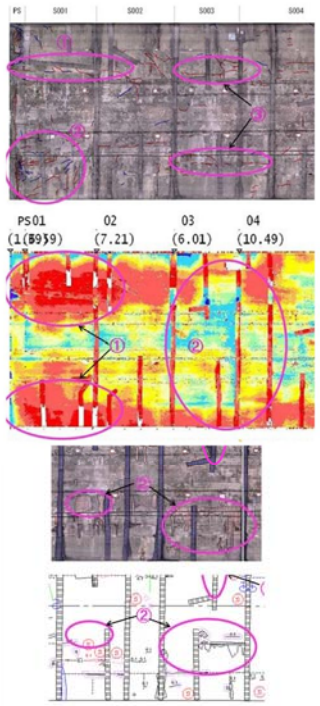
① A トンネル（NATM）

表 8.1.8　A トンネル新技術対応の可能性

H25走行型計測により確認できた内容 [1)]		対象技術	課題	新技術による対応
	・無筋区間全体に0.3㎜以上の天端縦断方向のひび割れを確認。 ・有筋区間ではトンネル全体に0.3㎜以下の細かなひび割れを確認。 ・全体的に0.3㎜以上のひび割れや遊離石灰，漏水に関して，定期点検結果とよく整合がとれていた。 ・側壁部において縦断方向のひび割れからの漏水，遊離石灰を確認。 ・正確な位置にひび割れをプロットすることができ、より正確な変状展開図が作成可能。 ・画像データの記録により、後日見直しや検証が可能。 ・目視点検に比べ、損傷箇所の見落としが少なくなる。	画像計測	・0.1㎜程度の微細なひび割れについては，すべては検出できていない。	・高精細画像 ・色識別性能の向上。 ・ＡＩによるスクリーニング ・画像データの過去との比較
	・コンター図では全線において，外力を示す変形モードはなかった．	レーザ計測	－	２回目以降のレーザ解析の回転軸の補正により、より正確に外力性の評価が可能。

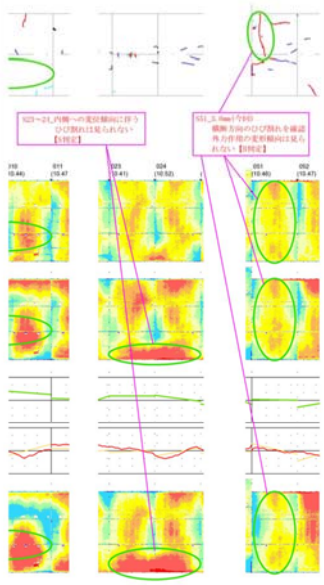
② B トンネル（在来工法）

表 8.1.9　B トンネル新技術対応の可能性

H25走行型計測により確認できた内容 [1)]		対象技術	課題	新技術による対応
	・0.3mm以上のひび割れ、漏水、遊離石灰、豆板、補修箇所等を確実に検出が可能。 ・覆工表面の凹凸が激しく，導水工も多数あるが、画像により変状を精度よく検出できた。 ・変状の正確な位置・範囲を検出可能。 ・後日再度検証することが可能。 ・新たな漏水，遊離石灰の析出を確認。	画像計測	・抽出できていないひび割れあり。画像からの見落とし、処理技術者の判断等が原因。 ・進行性の確認	・高精細画像 ・色識別性能の向上。 ・ＡＩによるスクリーニング ・画像データの過去との比較
	・コンター図で外力性の変形モードを確認（①部側壁の押出し、②部は外力性無） ⇒ひび割れの進行性により外力性を判断 進行が見られず、過去の外力性変形の可能性あり。	レーザ計測 近接目視と画像計測を比較	・変形モードの検証	２回目以降のレーザ解析の回転軸の補正により、より正確に外力性の評価が可能。
	－	－	うきは検出できなかった。（遊離石灰多数）	・非破壊検査技術 ・ＡＩによるスクリーニング

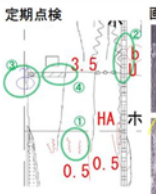
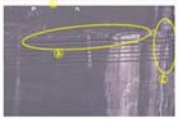
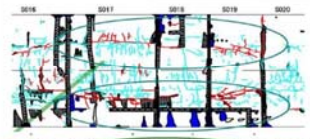
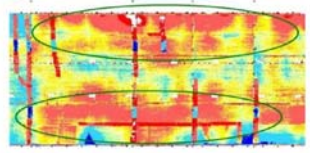
③ C トンネル（NATM）

表 8.1.10　C トンネル新技術対応の可能性

Ｈ２５走行型計測により確認できた内容 [1)]		対象技術	課題	新技術による対応
	・定期点検で検出できなかったひび割れを検出できている。 ・豆板および漏水、遊離石灰，補修跡は検出できた。 ・縦断方向のひび割れからの漏水，遊離石灰が確認できた。 ・正確な位置にひび割れをプロットすることができ，より正確な変状展開図を作成できる。 ・後日見直しや検証が可能になり，目視点検に比べ，損傷箇所の見落としが少なくなる。	画像計測	・ひび割れ幅が0.1～0.2mm程度の微細なひび割れは走行型計測で検出されないケースもある。 ・はく落跡は検出できる。 ・ひび割れ幅に差が見られ，走行型計測の値が大きい傾向がある。	・高精細画像 ・色識別性能の向上。 ・ＡＩによるスクリーニング ・画像データの過去との比較
	・ひび割れ幅の進行が見られるが，外力作用の変形傾向は見られない。 ・内側への変形傾向が見られるが，これに伴うひび割れは確認できなかった。 ・3.0mmのひび割れが確認されたが，外力作用の変形は見られなかった。	レーザ計測 近接目視と画像計測を比較	変形モードの検証	２回目以降の回転軸の補正によるレーザ解析により、より正確に外力性な評価が可能。
	－	－	・うきの検出は困難	・非破壊検査技術 ・ＡＩによるスクリーニング

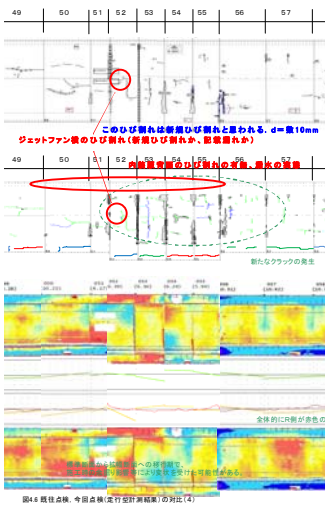
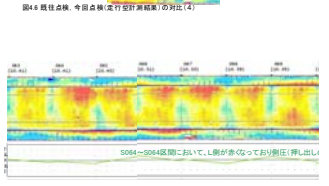
④ D トンネル（在来工法）

表 8.1.11　D トンネル新技術対応の可能性

H25走行型計測により確認できた内容 [1)]	対象技術	課題	新技術による対応
 ・定期点検でのひび割れを、確実に検出。 ・定期点検での未確認ひび割れを検出。 ・漏水、遊離石灰を確実に検出。 ・はく離、はく落を検出。	画像計測	・築50年で、ひび割れ、打ち継ぎ目、析出物、汚れの識別に注意か必要。 ・進行性の確認	・高精細画像 ・色識別性能の向上。 ・ＡＩによるスクリーニング ・画像データの過去との比較
 ・ひび割れ部の段差を確認	レーザ計測	－	H25と同様
 ・コンター図で外力性の変形モードを確認。 ・外力性のひび割れモードと合致。 （側壁の押出し） ⇒外力性の可能性が高い。	レーザ計測	変形モードの検証	２回目以降のレーザ解析の回転軸の補正により、より正確に外力性の評価が可能。
 ・うきを疑いありのレベルで検出。	画像計測	うきの特定は困難。	・非破壊検査技術 ・ＡＩによるスクリーニング

⑤ E トンネル（NATM）

表 8.1.12　E トンネル新技術対応の可能性

H25走行型計測により確認できた内容 [1)]	対象技術	課題	新技術による対応
 ・定期点検にないひび割れを検出。 ・非常に正確にひび割れの有無、位置を計測可能。 ・見落とし、記載漏れを防止でき、進行の有無等を客観的に判定可能。 ・覆工表面の状態がよければ、0.3㎜以下の検出精度を有している。	画像計測	・非開口のひび割れ、濃淡がひび割れに酷似した模様等は判定に注意が必要。 ・表面の特徴がなく、ひび割れのない浮きは検出困難。	・高精細画像 ・色識別性能の向上。 ・ＡＩによるスクリーニング ・画像データの過去との比較
 ・コンター図では新たなひび割れ部は、外力傾向はなかった。 ・側壁部からの押し出し傾向が見られた。	レーザ計測 近接目視と画像計測を比較	変形モードの検証	２回目以降のレーザ解析の回転軸の補正により、より正確に外力性の評価が可能。
 ・うきは、黒色等の変色した箇所、白く表面劣化した箇所、豆板状でバインダーが砂状に流出している場合等が抽出対象となる。	画像計測	うきの特定は困難。	・非破壊検査技術 ・ＡＩによるスクリーニング

3)　現在の新技術による再検証

表 8.1.11　検証のまとめ

項目		H25既往研究での評価		H31 点検要領	現在の技術 による再評価
		従来点検手法	走行型計測		
現場作業全般	交通規制	交通規制が必要	交通規制が不要。	―	H25評価から変更なし
	点検環境（効率化）	高所部等厳しい条件下では時間と労力が必要。	作業時間が大幅に短縮。	―	H25評価から変更なし
＜初回点検＞	近接目視点検	・高所作業車により覆工面に近づき全面を点検。 ・目視によるスケッチ	**○（代替可能）** ・ひび割れ検出精度0.2㎜ ・変状（漏水、はく落等の確認可能。 ・画像取得不可の箇所あり。	近接目視	**画像計測技術（高精細画像）、計測・モニタリング技術（レーザ計測）、AI等により近接目視を支援**
	打音検査	近接目視と同時に必要箇所を打音。	**▲（代替不可）** ・非接触のため代替不可。 ・打音必要箇所抽出可能。	全面的な打音検査	**非破壊計測技術（レーダ計測）による支援**
	叩き落とし	応急措置が必要となる「うき」をその場で処理。	**▲（代替不可）** ・非接触のため代替不可。	―	H25評価から変更なし
＜2回目以降点検＞	遠望目視点検	・路面からの点検 ・現実的には明るさ、汚れ等により目的達成困難	**◎（代替可能、品質向上）** ・安全迅速な作業が可能 ・高精度、定量的データを取得し、効率的。	全延長に対して近接目視	**画像計測技術（高精細画像）、計測・モニタリング技術（レーザ計測）、AI等により近接目視を支援**
点検成果（変状展開図）の精度		・手書きスケッチ ・客観性に欠け、バラツキあり	**◎（代替可能、品質向上）** ・正確な位置情報、客観的な進行性を把握。 ・ヒューマンエラー少ない。	―	**画像計測技術（高精細画像）による支援**
点検成果（変形モード）		トンネルの変形に関しては不明。	**◇（従来不可、＋α要素）** ・レーザー計測により変形モードを把握。 ・外力作用の特定が可能 ・標準調査の一部を代替可能。	―	H25評価から変更なし
まとめ		―	**・近接目視の代替が可能。 ・打音検査の効率化に寄与。 ・近接目視・打音検査を補完。**	―	**近接目視、打音検査を支援**

8.1.4 まとめ

最新の道路トンネル定期点検要領の判定項目（6 項目）に対する支援としての評価

1) 圧ざ・ひび割れ

画像計測の高精細化によりひび割れの幅や長さの検出精度が向上（高機能化）することでひび割れ計測に有効であり、レーザ計測によるコンター解析の併用により進行性や外力性判定の代替が可能となる。

2) うき・はく離

既往研究では、画像計測で確認できるひび割れやジャンカ等のはく落が懸念される箇所から、打音が必要な場所の抽出が可能としていたが、レーダ探査による巻厚不足・背面空洞の検出、内部欠陥レーダ計測による覆工表面付近のうき・はく離・内部欠陥の検出や AI によるスクリーニングにより、より効率的な打音範囲の抽出の補完が可能となる。

3) 変形・移動・沈下

既往研究では、1 回目の走行型計測によるレーザ計測でのコンター解析により、覆工の変形や回転の有無を評価していたが、今後、画像計測の高精細化や複数回の走行型計測（変位計測）によるレーザ解析により、より正確な外力性判定の代替が可能となる。

4) 鋼材腐食

画像計測の高精細化により検出精度の向上が可能（高機能化）となる。

5) 巻厚不足または減少、背面空洞

既往研究の走行型計測では評価できていない．非破壊検査技術（非接触型レーダ）により近接目視前に事前に探査することで、巻厚不足、突発性崩壊の判定を補完できる。

画像計測による覆工面の状況確認（覆工のはく落等）や非破壊検査技術（非接触型レーダ）により有効巻厚の減少の判定を補完できる。

6) 漏水等による変状

画像計測の高精細化によりにじみや遊離石灰の検出精度を補完できる。

8.2 近畿地整管内６トンネル計測・解析結果

8.2.1 概要

近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務[6)]（令和３年３月、国土交通省　近畿地方整備局）にて実施された近畿地方整備局管内６トンネルの点検・診断結果を本研究プロジェクトに提供いただいた。以下に計測・解析結果の概要をとりまとめる。

対象トンネル及び位置図を表 8.2.1、図 8.2.1 に示す。

表 8.2.1 対象トンネル箇所一覧[6)]

No	号線	事務所	トンネル名	点検内容	施工方法	竣工年度	ﾄﾝﾈﾙ延長	点検面積（㎡）	ひび割れ密度（m/㎡）
1	国道 27 号	福知山	和知(わち)TN※	監視点検	NATM	1998 年	L=740m	1.195	0.08
2	国道 9 号	豊岡	新和田山(しんわだやま)TN	定期点検	矢板工法	1971 年	L=330m	6.022	0.14
3	国道 9 号	豊岡	城山(しろやま)TN	定期点検	矢板工法	1971 年	L=38m	841	0.55
4	国道 483 号	豊岡	とがやま TN	定期点検	NATM	2017 年	L=1,420m	29.652	0.14
5	国道 483 号	豊岡	三谷(みたに)TN	定期点検	NATM	2017 年	L=2,810m	59.249	0.14
6	国道 24 号	奈良	釜窪東(かまのくぼひがし)TN	定期点検	NATM	2006 年	L=389m	8.376	0.19

※和知 TN については、H30 年度点検結果に基づく監視。

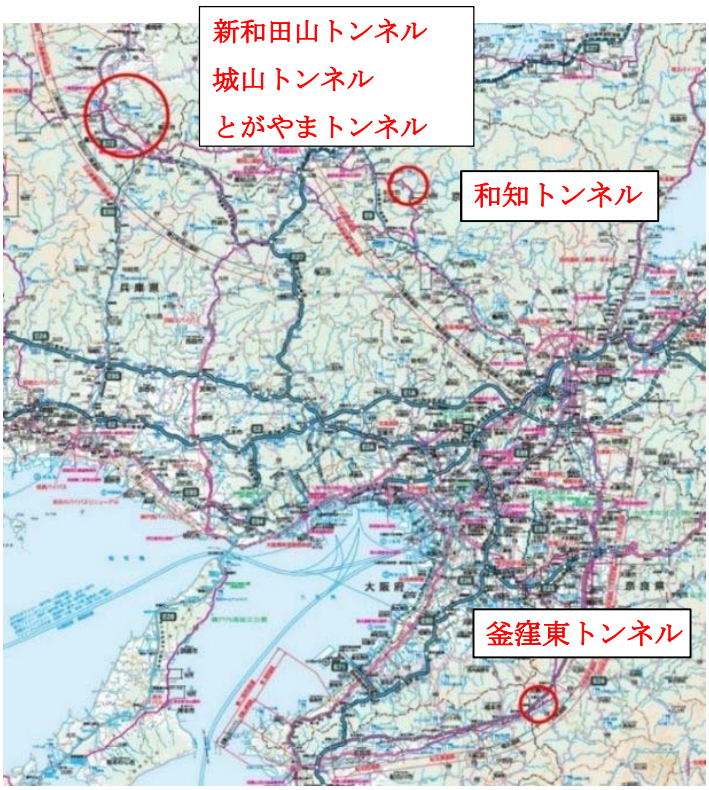


図 8.2.1 対象トンネル位置図[6)]

表 8.2.2 に新技術の活用内容の概要を記載する。

表 8.2.2 支援技術の活用内容概要[6)]

活用項目	目的	得られた結果	備考
画像撮影 （MIS）	作成した展開画像をもとに正確な変状展開図を作成する。 事前の変状確認を行い、点検箇所の抽出をすることで現地点検作業の省力化を図る。	展開画像をもとに正確な変状展開図を作成できた。 現地点検箇所を事前抽出することで、現地作業の省力化を図ることができた（国の積算基準にて従来点検で試算した場合、約 6 割程度できた）。	
3 次元点群 レーザ計測 （MMS）	変形モード解析を行うことで、トンネル覆工の変形傾向を確認し、外力性診断に役立てる。	変形モード解析により、現時点ではトンネル覆工コンクリートに変形傾向は特段見られないことが確認できた。	
非接触 レーダ探査 （MRS）	覆工背面状況を探査し、巻厚や空洞状況の異常箇所の有無を確認する。	新和田山トンネルでは、背面空洞の反応が確認されたため、追加の詳細調査を提案し実施した。 ⇒詳細調査の結果、背面空洞箇所は裏込め注入工にて対策済であることが確認できた 城山トンネルでは、全線で鉄筋の反応があったため、解析不可であった。	対象 TN ・新和田山 TN ・城山 TN
内部欠陥 レーダ探査 （SIP）	覆工コンクリート表面の異常箇所の有無を確認し、現地点検時に確認する箇所として抽出を行う。	下記 4 トンネルにて、現地点検時に、前回点検時から新規で打音異常の箇所を確認することができた。 ・釜窪東トンネル ・新和田山トンネル ・とがやまトンネル ・三谷トンネル	

8.2.2 点検、計測、解析、診断結果のまとめ

1) 走行型計測

(1) 目　的

データ提供いただいた業務は、トンネル点検（走行型計測機器）により、対象トンネルの変状展開画像、3 次元点群データ、覆工巻厚・背面情報、内部欠陥情報を取得している。画像計測により、位置ずれが小さく精度の高い展開図面の作成でき、3 次元データを確認することで、内空変位の変化から変形モード解析を実施する。また、覆工巻厚・空洞レーダ計測により覆工厚情報、背面空洞の有無を確認、内部欠陥レーダによりうき、ジャンカを探査、各データを総合的に解析することで、効率的なトンネル維持管理のためのデータとして用いることを目的とされている。

(2) 調査項目

表 8.2.3 に、走行型計測による調査項目を示す。

表 8.2.3 走行型計測による調査項目 [6)]

号線	事務所	トンネル名	工法	トンネル延長	MMS	MIS	MRS	内部欠陥レーダ
国道 27 号	福知山	和知TN	NATM	L=740m	○	○	-	○
国道 9 号	豊岡	新和田山TN	矢板	L=330m	○	○	○	○
国道 9 号	豊岡	城山TN	矢板	L=38m	○	○	○	○
国道 483 号	豊岡	とがやまTN	NATM	L=1,420m	○	○	-	○
国道 483 号	豊岡	三谷TN	NATM	L=2,810m	○	○	-	○
国道 24 号	奈良	釜窪東TN	NATM	L=389m	○	○	-	○

※MRS（非接触レーダ探査）は、巻厚不足や背面空洞の可能性が比較的高いと考えられる矢板工法の 2 トンネルを対象とし実施した。

(3) 計測システム

① 計測フローチャート

走行型計測の MMS/MIS フローチャートを図 8.2.2 に示す。レーダのフローチャートを図 8.2.3 に示す。

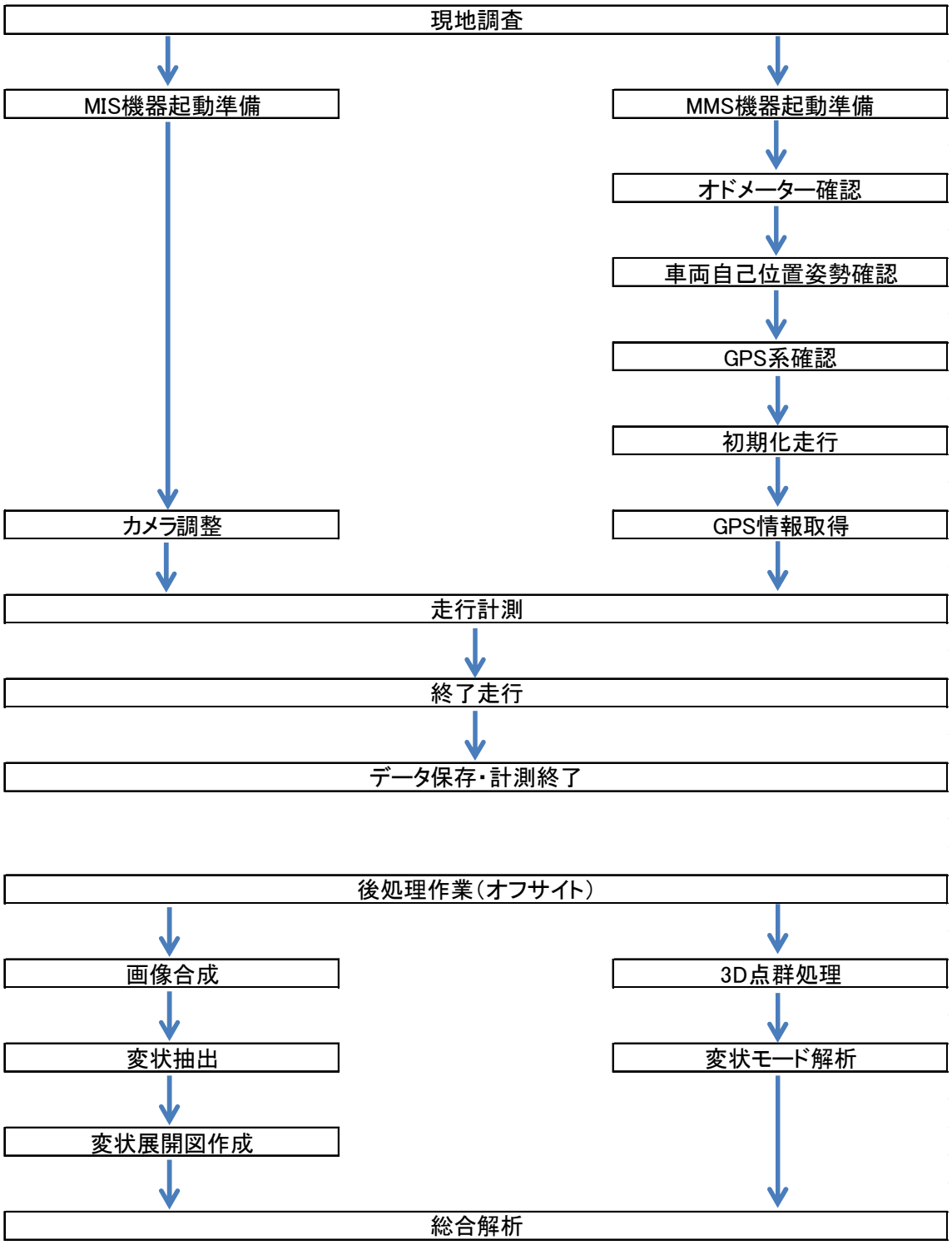


図 8.2.2 走行型 MMS/MIS 計測フローチャート [6)]

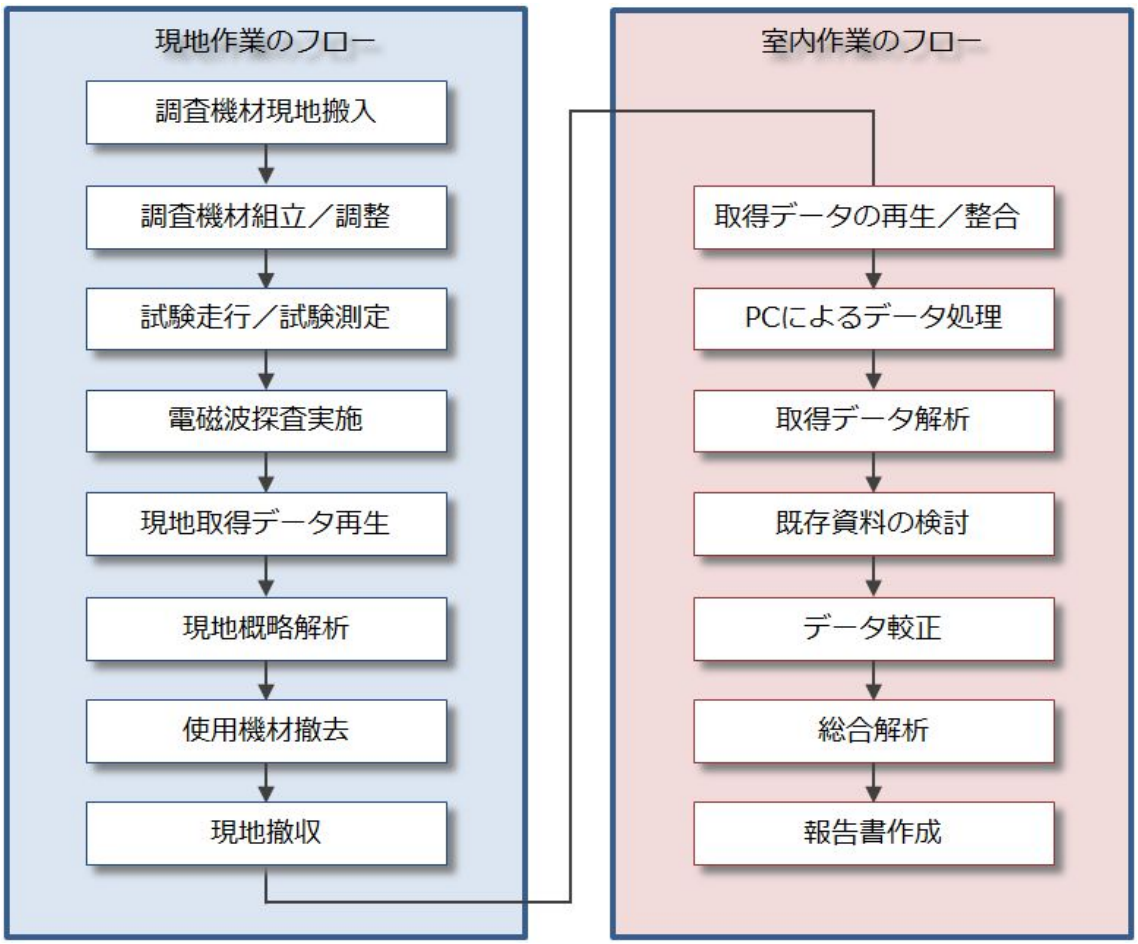


図 8.2.3　走行型レーダ計測フローチャート [6)]

(4)　走行型計測の概要

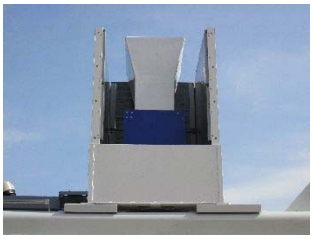
走行型計測は 20 台の CCD デジタルビデオカメラと LED 照明器ならびに高性能レーザ、電磁波レーダを測定車両に搭載して、走行しながら片側ごとに覆工表面の動画撮影とレーザ計測、レーダ計測を実施する方法である。

CCD カメラによる画像計測（MIS：Mobile Imaging Technology System） は得られた動画をコマごとに静止画に変換し、振動などの歪みを除するための幾何補正などの処理を施し、再度合成することで覆工表面の展開画像を取得するシステムである。

レーザ計測（MMS：Mobile Mapping System）は覆工コンクリート表面の凹凸や変形モードを把握するため、3 次元レーザ計測を行い覆工内面の形状を 3 次元座標としてデータを取得する方法である。

電磁波レーダによる計測は、非接触レーダシステムにより、覆工コンクリート表面にアンテナから電磁波を射出し、走行しながら覆工内部の情報（データ）を連続的に取得するシステムと、内部欠陥（うき、ジャンカ）を探査する。車両に搭載している機器を表 8.2.4 に示す。

表 8.2.4　機能概要 [6)]

	概　要　説　明（機能）
走行型画像計測法（MIS） 	複数台の CCD カメラ・照明を自走式車両に搭載し、トンネル壁面を撮影する手法。 交通規制を必要とせず、一般走行を妨げない速度で計測可能。
ペガサス 2U（MMS） 	衛星から発する電波を受信するアンテナ。現在の緯度、経度、高度を算定することができ、IMU（慣性計測装置）と合わせて正確な位置情報を検出。高精度レーザを搭載。
高精度レーザ（MMS） 	1 秒間に最大 100 万点の点群データを取得可能な装置。 1 台で横断方向 360 度の範囲を取得可能であり、追加スキャナーでより高精度な計測を行う。
巻厚・空洞レーダ（MRS） 	交通規制を行うことなく、一般車両と同程度のスピードで、走行しながらトンネルの巻厚・覆工背面を探査する。
内部欠陥レーダ（MRS） 	交通規制を行うことなく、一般車両と同程度のスピードで、走行しながらトンネルの内部欠陥を探査する

① 現地調査

現地計測は、計測員、運転員、交尾警戒車運転員の 3 名 1 班で計測を実施した。計測はトンネル上下線ごとに行い、法定速度を遵守し、壁面状況に応じ複数回計測を行った。

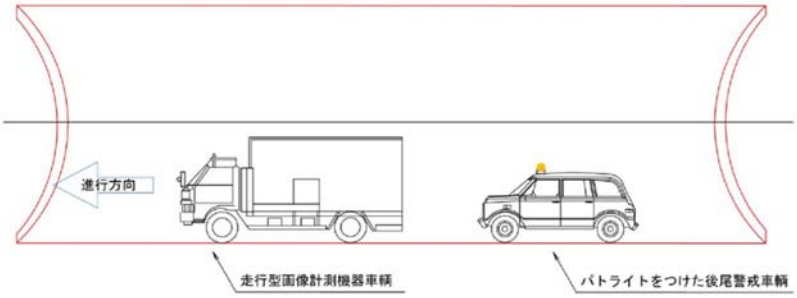


図 8.2.4 後尾警戒車配置図 [6)]



図 8.2.5 走行型計測車両写真 [6)]

2) 解析

(1) 解析方法

① 壁面画像作成

取得した複数台の CCD カメラデータの接合、補正を行い、展開画像データを作成する。画像データに、ひび割れ、漏水、はく落等の変状情報を入力した。

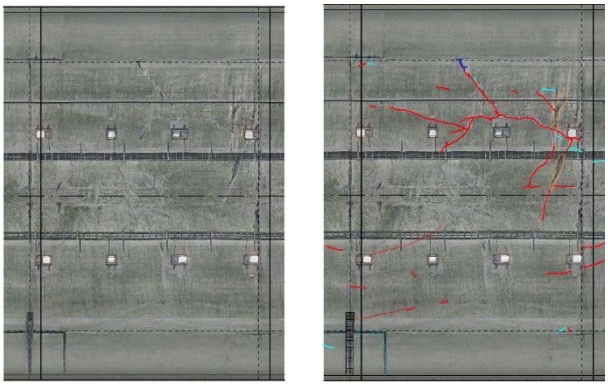


図 8.2.6 展開画像（左：展開図、右：変状展開図）[6)]

② 3 次元点群データ作成（変形コンター解析）

高精度レーザで得られた点群データを世界座標系での座標定義に変換する。データは 500 分の 1（国土地理院認定）の地図レベル精度である。また 3 次元点群データより、変形コンターを作成した。

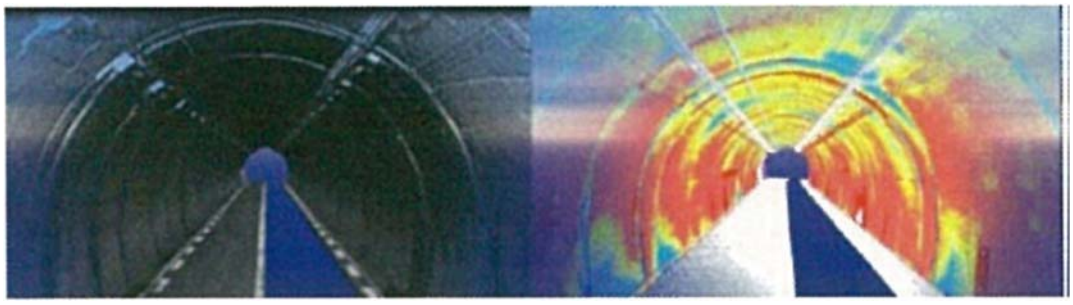


図 8.2.7 レーザ計測による覆工形状（左：点群データ　右：変形コンター）[6)]

(2) 解析結果

表 8.2.5 走行型計測結果概要 [6)]

	展開画像・ 変状展開図	変形モード 解析結果	非接触レーダ探査	内部欠陥 レーダ	備考
和知 TN	・前回とひび割れ幅の異なる箇所あり ・起点側坑口付近の覆われた計測不能箇所は確認（除草済み）	・変形傾向は概ね見られない ・差分解析結果においても、変形傾向は概ね見られない	—	28 箇所の異常反応あり ⇒打音異常の箇所は確認されなった	差分解析実施
新和田山 TN	・補修規模に変更あり ・追加の補修箇所あり ・鋼板の腐食箇所あり（S025～S044 は帯状の鋼板が設置されている）	・一部変形傾向の反応が見られるが、変状との相関性は見られない ・S025～S044、鋼板の影響を受けていると考えられる	・**巻厚不足と背面空洞の異常反応が見られた箇所あり** 【巻厚不足及び背面空洞の範囲】 ・S004～S005 ・S013~S015 ・S017～S018 【巻厚不足の範囲】 ・S016 ・S019～S021	26 箇所の異常反応箇所あり ⇒打音異常箇所が 4 箇所確認された	詳細調査の追加提案あり 覆工面に裏込めの施工跡あり
城山 TN	・新規のひび割れあり（細かなひび割れ）	・変形傾向は概ね見られない	・鉄筋の反応により解析不可	15 箇所の異常反応あり ⇒打音異常の箇所は確認されなった	
とがやま TN	・前回とひび割れ幅の異なる箇所あり ・新規のひび割れあり	・変形傾向は概ね見られない ・差分解析結果においても、変形傾向は概ね見られない	—	208 箇所の異常反応箇所あり ⇒打音異常箇所が 6 箇所確認された	差分解析実施
三谷 TN	・新規のひび割れあり	・変形傾向は概ね見られない ・差分解析結果においても、変形傾向は概ね見られない	—	374 箇所の異常反応箇所あり ⇒打音異常箇所が 7 箇所確認された	差分解析実施
釜窪東 TN	・補修箇所あり ・追加の漏水あり	・変形傾向は概ね見られない	—	12 箇所の異常反応箇所あり ⇒打音異常箇所が 1 箇所確認された	

定期点検要領（国交省、H31.3）と走行型計測結果を用いて、点検作業時の確認箇所の整理を行った。

表 8.2.6　点検作業時の着目　(1/2) [3] を加工

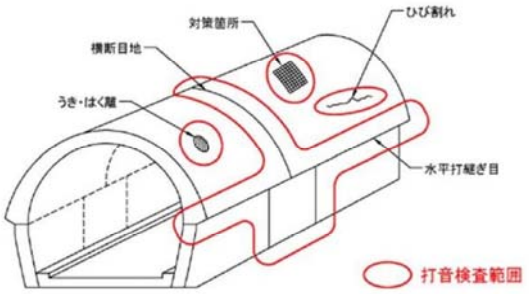
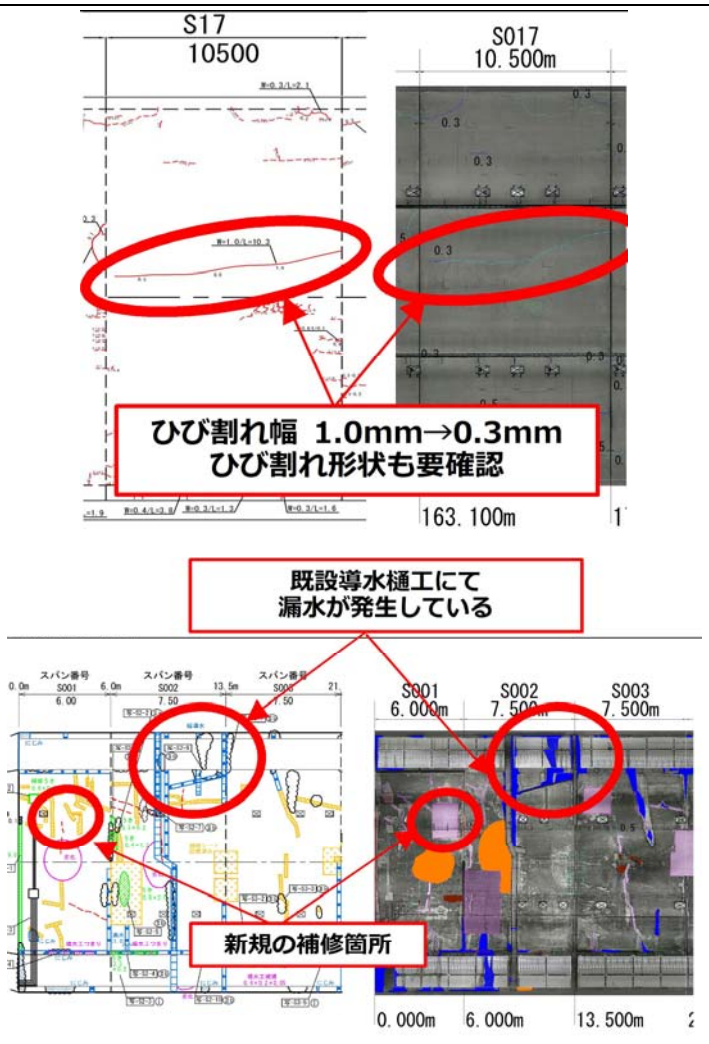
項目	定期点検要領 （国交省 H31.3　より確認すべき箇所）	走行型計測結果により確認すべき箇所	
		変形モード解析	内部欠陥レーダ
点検作業時の着目点	・過年度点検時でⅡ判定以上の変状 ・対策箇所（補修対策箇所） ・ひび割れ箇所 ・横断目地部沿い ・水平打ち継ぎ目 ・附属物（取付金具含む） ・その他（内装板など）	・外力性の疑いの傾向が確認された箇所	・内部欠陥レーダにて、異常反応が確認され、うき等の疑いのある個所
補足説明等	 ※二回目以降も覆工表目全面に対し近接目視により行うことを基本とする 図-解 6.1　二回目以降の打音検査範囲イメージ ※出典：「定期点検要領(国交省、H31.3)」の P.9 より抜粋	・過年度に点群データの計測結果があるトンネルについては差分解析の実施	・アーチ部を対象として調査を実施
補足	和知トンネルは、監視作業であるため、監視スパンのみ対象となる。	本業務では該当箇所なし	

表 8.2.7　点検作業時の着目　(2/2)

項目	走行型計測結果により確認すべき箇所 展開画像
点検作業時の着目点	・ひび割れ形状（ひび割れ幅や延長）に顕著な変化が見られた箇所 （前回点検時から、ひび割れ幅 0.5mm 程度の差があった箇所など） ・新規の変状箇所（漏水や鋼板の腐食等） ・新規の補修箇所 ・既存の補修箇所の対策範囲に変更があった箇所 （対策範囲が広がっている箇所等） ・展開画像にて撮影できない箇所 （面壁部や非常駐車体の擁壁等）
補足説明等	
補足	

① 変状展開図

②の変形モード解析結果とともに、変状展開図を示す。

② 変形モード解析結果

【各コンター図の説明】

・スパン毎平均断面

推定出来形断面は**各スパンの平均**を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用。

⇒ **スパン内の局所的な変形**を見るのに適する。

・スパン毎軸合わせ

推定出来形断面は**トンネル全体の平均**を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用。

⇒ **各スパンでの差**を見るのに適する。

・平滑化軸合わせ

推定出来形断面は**トンネル全体の平均**を使用し、軸は平滑化軸（トンネル全体の軸）を使用。

⇒ **トンネル全体の傾向を連続的に見る**のに適する。

上記内容を整理したものを表 8.2.8 に示す。

表 8.2.8 各コンター図の特徴･適用 [1)]

	算出方法		特徴･適用（評価）		
	出来形断面	軸の設定	トンネル全体の変化傾向	スパンの全体の動き･変形傾向	スパン内の局所的な変形傾向
スパン毎平均断面	スパン毎	各スパン	△	△	◎
スパン毎軸合わせ	全体平均	各スパン	○	◎	○
平滑化軸合わせ	全体平均	全体	◎	○	△

解析により得られたコンター図の分析は、上記の各コンター図の特徴を踏まえながら、総合的に判断する。

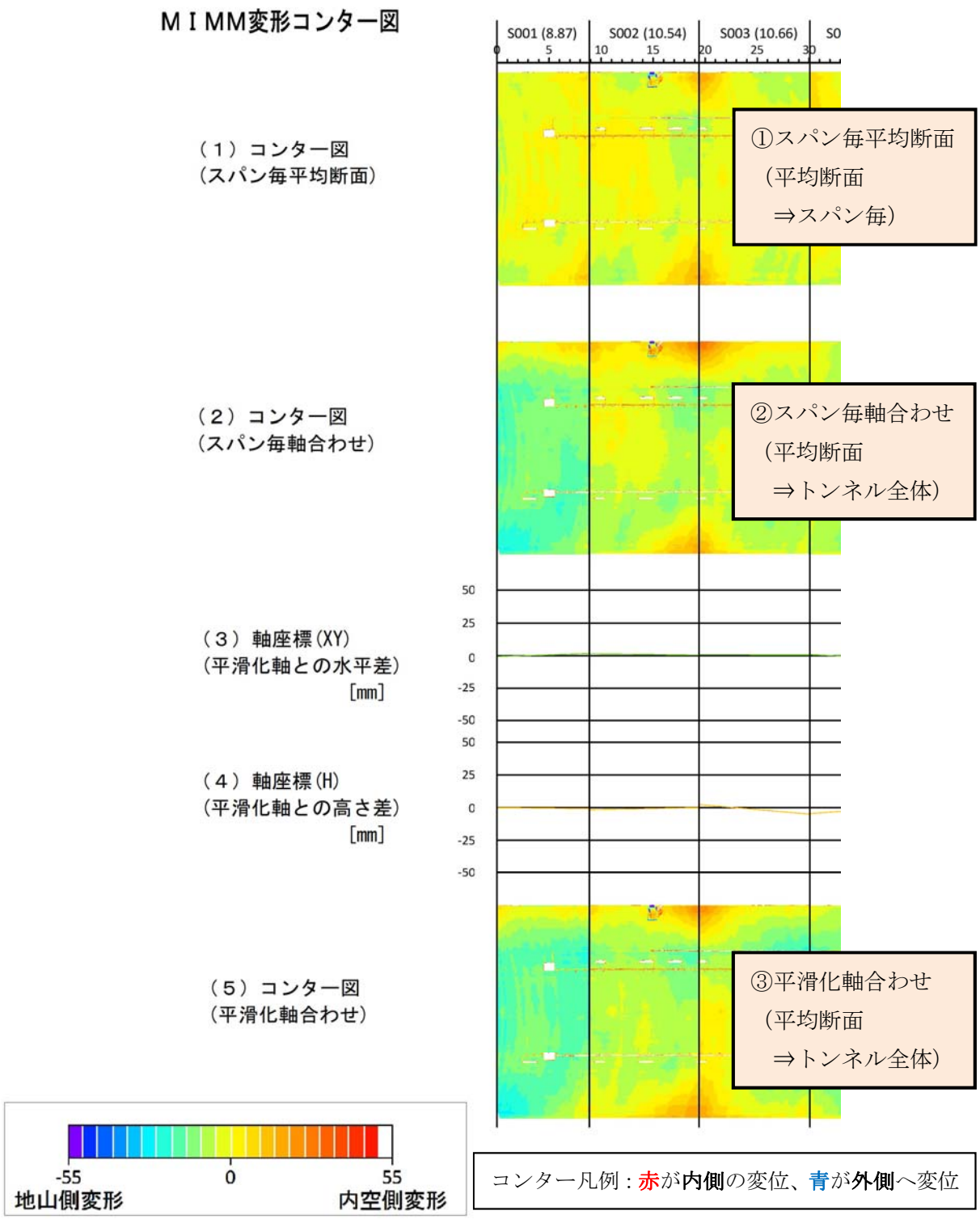
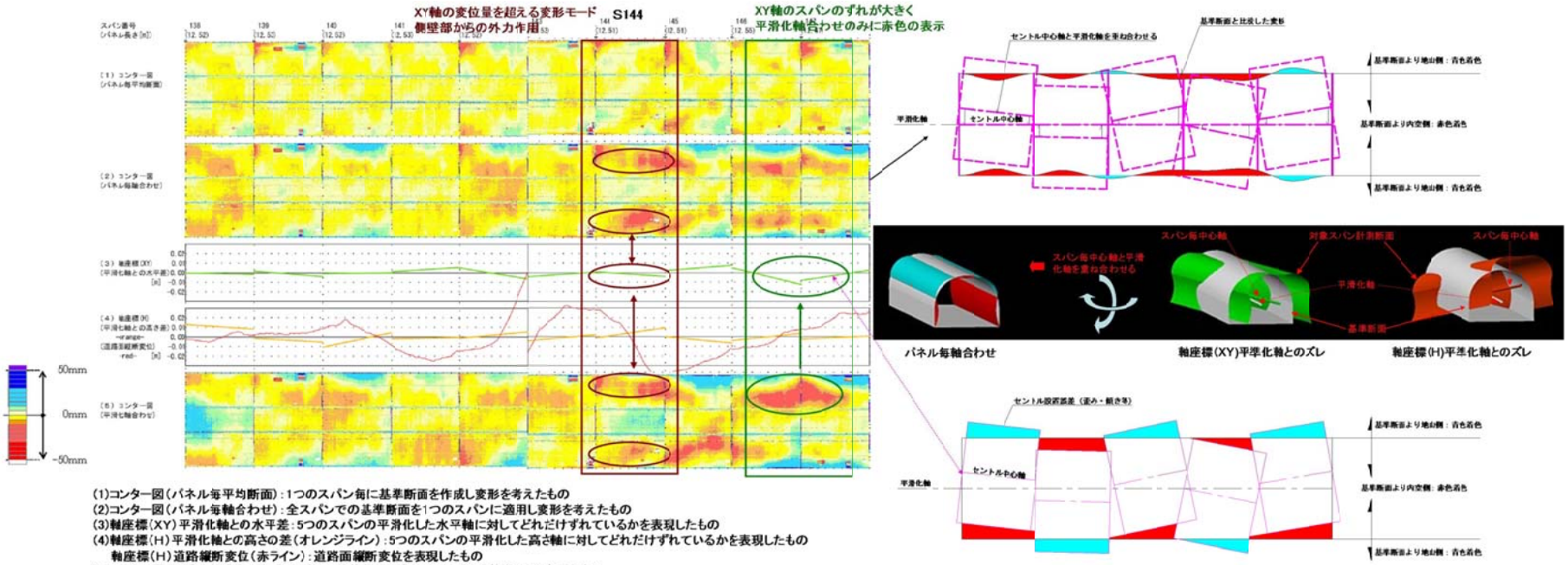
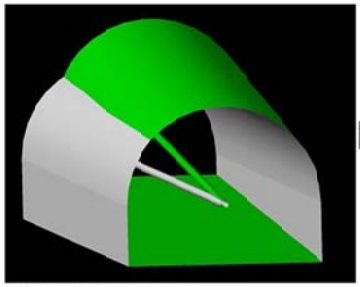


図 8.2.8　コンター図の説明 [1)]



(1)コンター図(パネル毎平均断面):1つのスパン毎に基準断面を作成し変形を考えたもの
(2)コンター図(パネル毎軸合わせ):全スパンでの基準断面を1つのスパンに適用し変形を考えたもの
(3)軸座標(XY)平滑化軸との水平差:5つのスパンの平滑化した水平軸に対してどれだけずれているかを表現したもの
(4)軸座標(H)平滑化軸との高さの差(オレンジライン):5つのスパンの平滑化した高さ軸に対してどれだけずれているかを表現したもの
軸座標(H)道路縦断変位(赤ライン):道路面縦断変位を表現したもの
(5)コンター図(平滑化軸合わせ):全スパンでの基準断面を5つのスパンを基準として考えたもの

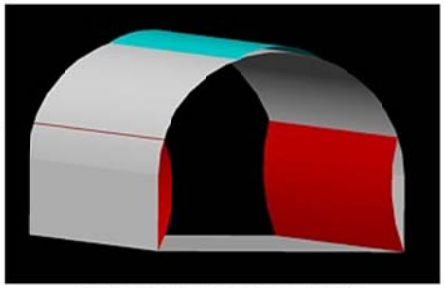
【外力作用判定方法】
1.(5)平滑化軸合わせコンター図で、赤色・青色着色部に注目する。
2.(3)XY軸座標・(4)H軸座標でパネル毎(セントル毎)の中心軸とのズレを確認する。
3.(2)パネル毎軸合わせコンター図の赤色・青色着色部に注目し、(3)・(4)差分量と着色変位量を比較する。
4.(3)・(4)軸座標の差分量とコンター図着色変位量が同等であれば外力作用はなく覆工自身がもつ変形と判断されるが、軸差分量を越える変形量が見られる場合は、外力作用による変形と判断することができる。
5.(1)コンター図(パネル毎平均断面)の赤・青着色は、局所的な変形を示す(セントルのたわみ等)。



S144の軸座標ズレ模式図
起点側に軸ズレはなく、終点側で右へ1cm、上へ1cmのズレがある。

模式図の緑色部分が地山側へ出ているため、(5)平滑化軸合わせコンター図では、青色着色となり、左側壁は内空側へ出るため赤色着色となる。

(2)パネル毎軸合わせでは、平滑化軸とパネル毎の中心軸を重ねるため基準断面との凹凸差異が明確に表示することができる。



S144の(2)パネル毎軸合わせコンター図模式図
XY軸座標の水平差分量を越える赤色着色を示すため、外力作用と推定できる。

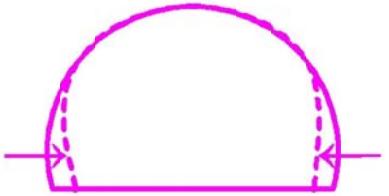


図 8.2.9　変形モードコンターの説[6)]

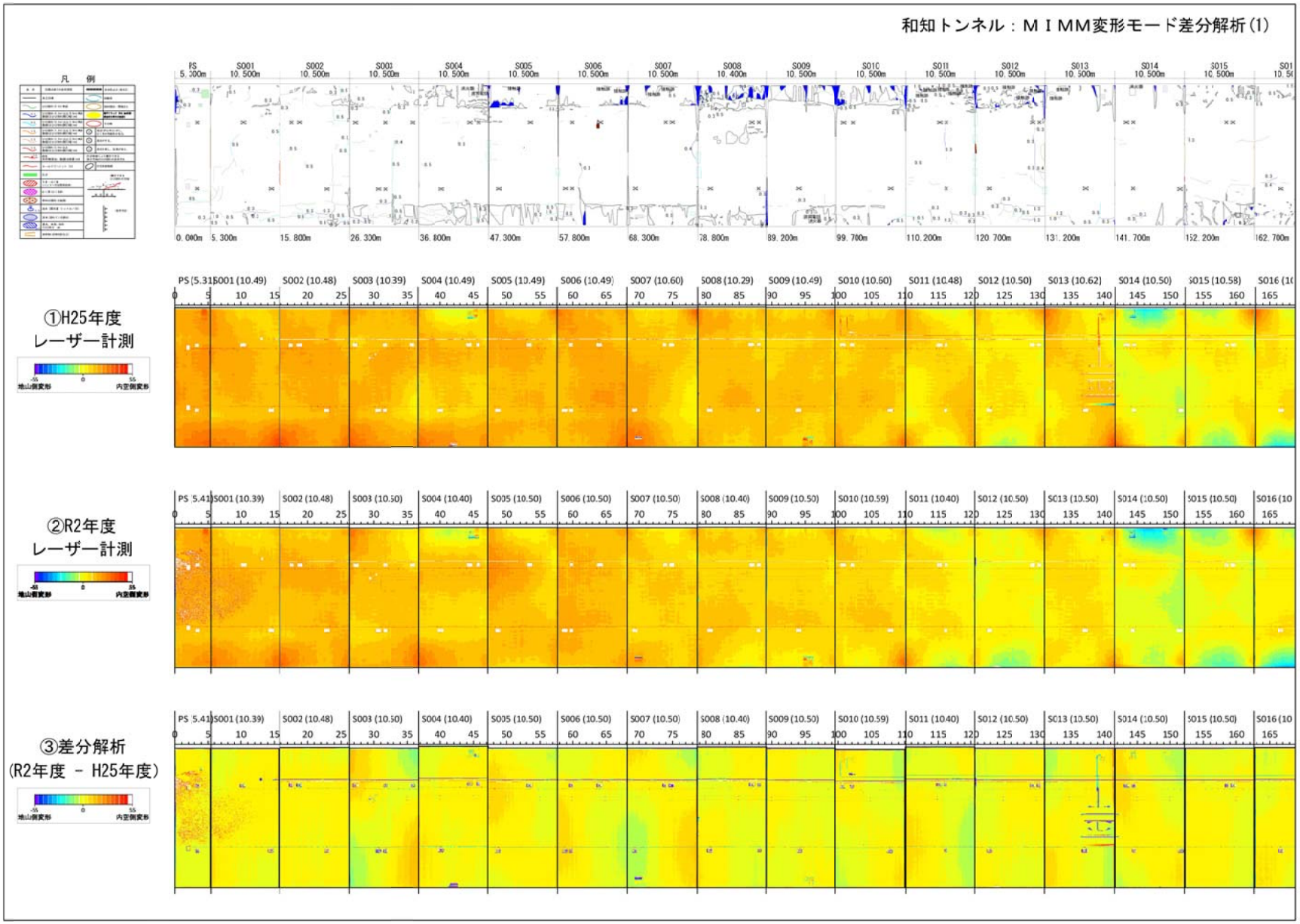


図 8.2.10　和知トンネル変形モード差分解析結果 [6)]

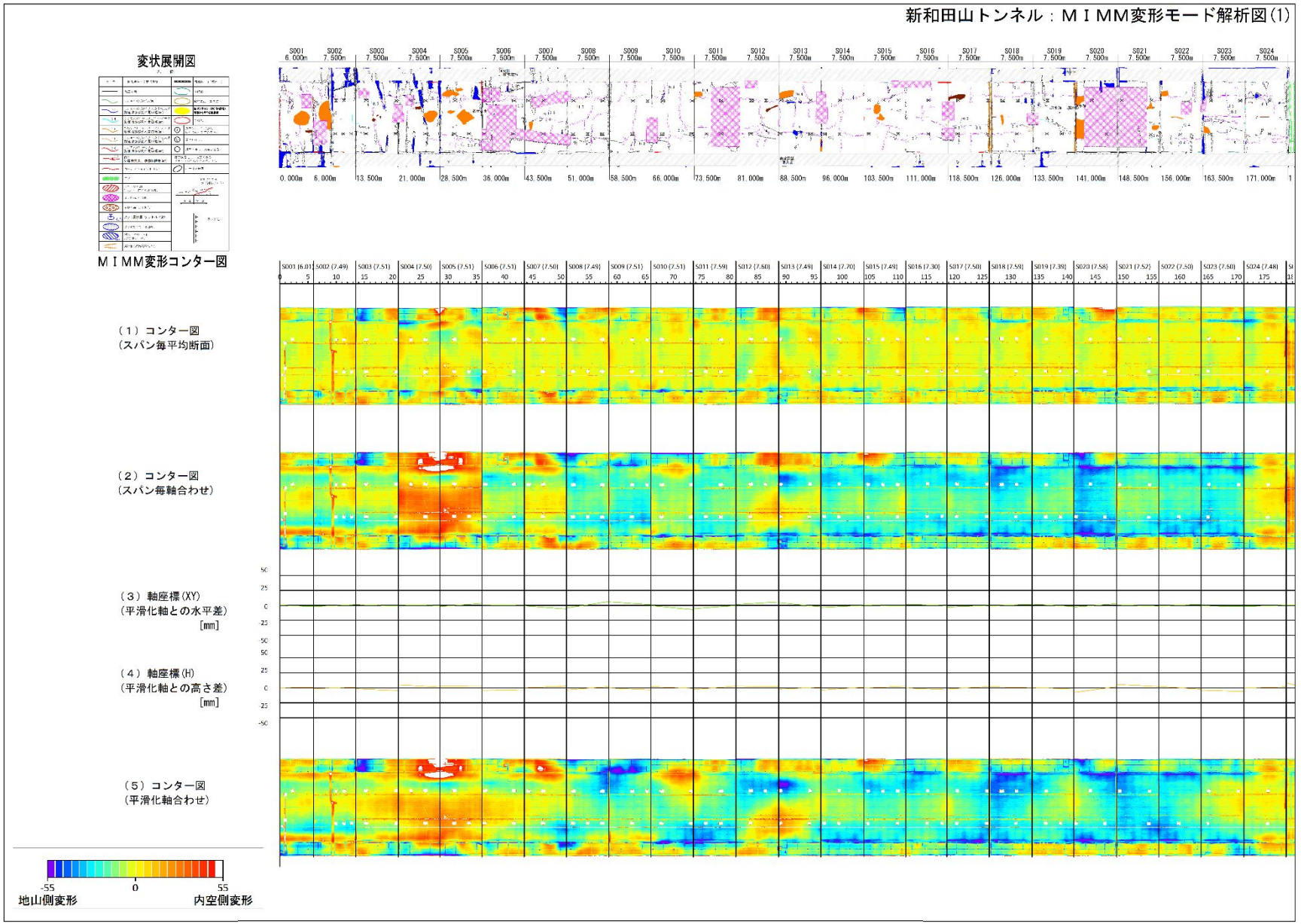


図 8.2.11　新和田山トンネル変形モード解析結果（１）[6)]

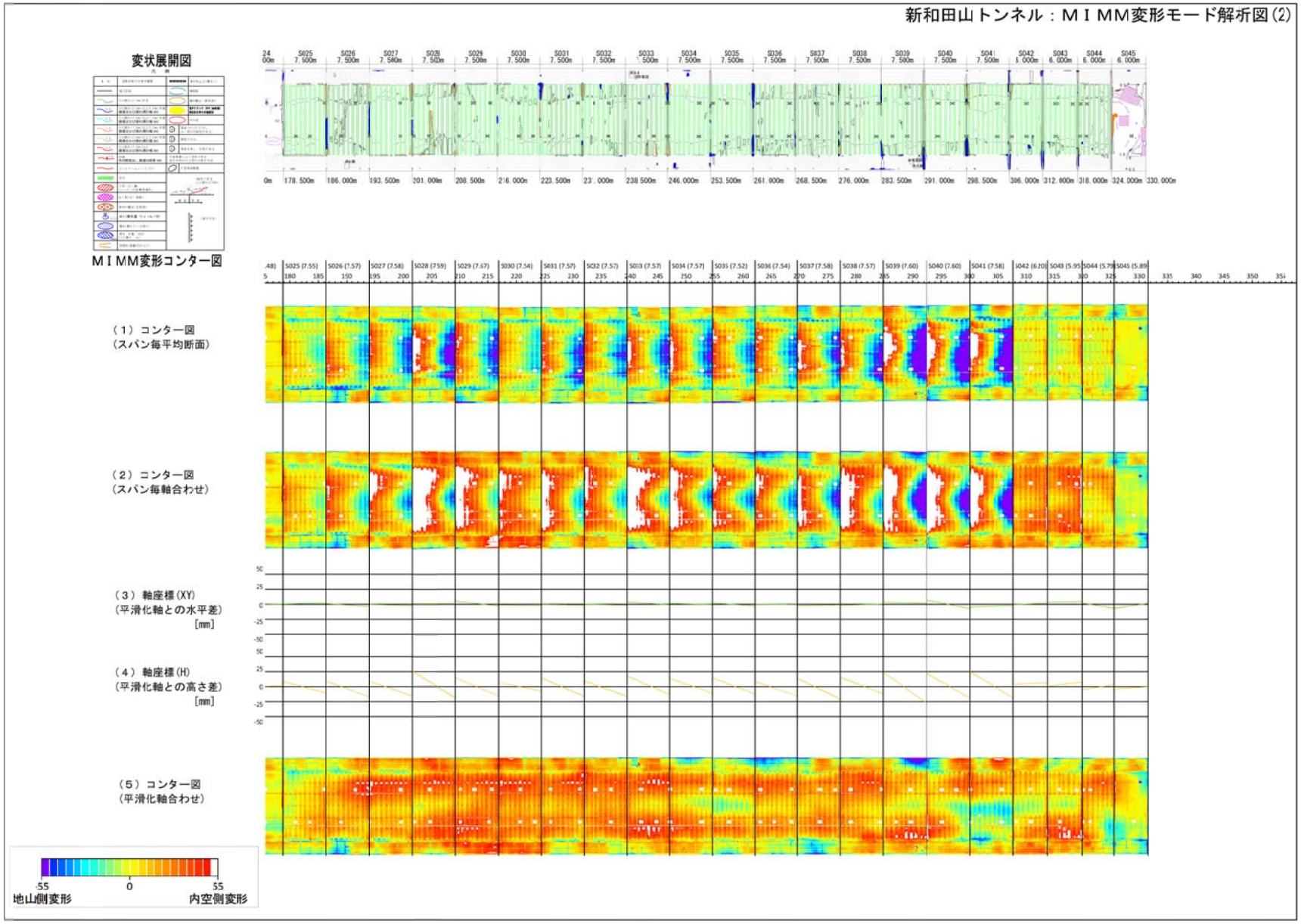


図 8.2.12　新和田山トンネル変形モード解析結果（２）[6)]

③　非接触レーダ探査結果

(ア) 診断方法

非接触レーダ探査結果に対して、「道路トンネル定期点検要領 H31.3（国交省)」に基づき、診断を行う。

・有効巻厚の減少に対する判定

有効巻厚の減少に関しては、表 8.2.9、表 8.2.10 を参考に判定を行う。

表 8.2.9　有効巻厚の減少に対する対策区分 [3) を加工]

判定区分		変状の状態
Ⅰ		材質劣化等が見られないか、みられても、有効巻厚の減少がないため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	材質劣化等が見られ、断面強度への影響がほとんどないが、監視を必要とする状態
	Ⅱa	材質劣化等により有効巻厚が減少し、構造物の機能が損なわれる可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		材質劣化等により有効巻厚が減少し、構造物の機能が損なわれたため、早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		材質劣化等により有効巻厚が著しく減少し、構造物の機能が著しく損なわれたため、緊急に対策を講じる必要がある状態

表 8.2.10　有効巻厚の減少に対する判定の目安例（矢板工法の場合） [3) を加工]

箇所	主な原因	有効巻厚/設計巻厚			判定区分
		1/2 未満	1/2～2/3	2/3 以上	
アーチ・側壁	経年劣化,凍害,ｱﾙｶﾘ骨材反応			○	Ⅱb
			○		Ⅱa,Ⅲ
		○			Ⅲ,Ⅳ

補足）　有効巻厚/設計巻厚が 1/2 未満は判定区分Ⅲ、1/2～2/3 は判定区分Ⅱa を基本とするが、巻厚不足に起因するひび割れや変形の発生が認められる場合、判定区分をそれぞれⅣ,Ⅲへ 1 ランク上げることが望ましい。なお、有効巻厚としてはコンクリートの設計基準強度以上の部分とし、設計基準強度が不明な場合は 15N/mm² 以上の部分とする。

(イ) 突発性崩壊の原因・現象

施工時に残存した覆工背面の大規模な空洞、もしくは地下水の流れにともなう土砂の流出等により覆工の上部に比較的大きい空洞が形成された場合、空洞上部の岩塊が地山と分離して突然落下する場合がある。その場合、覆工に岩塊が衝突し、覆工が十分な巻厚を有する場合は（b）に示すように覆工上部に堆積するが、覆工巻厚が十分でなければ（c）に示すように覆工を破壊し岩塊もろとも落下する危険性がある。

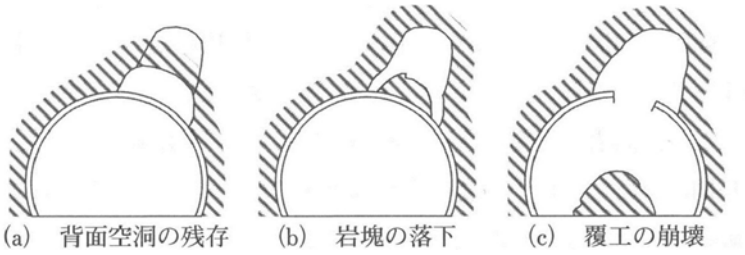


図 8.2.13 突発性崩壊 [4)]

(ウ) 突発性崩壊の可能性に対する判定

巻厚不足と背面空洞の双方が確認された場合には、突発性の崩壊のおそれがあるため、表 8.2.11、表 8.2.12 を参考に判定を行う。

表 8.2.11 突発性の崩壊のおそれに対する対策区分 [3)] を加工

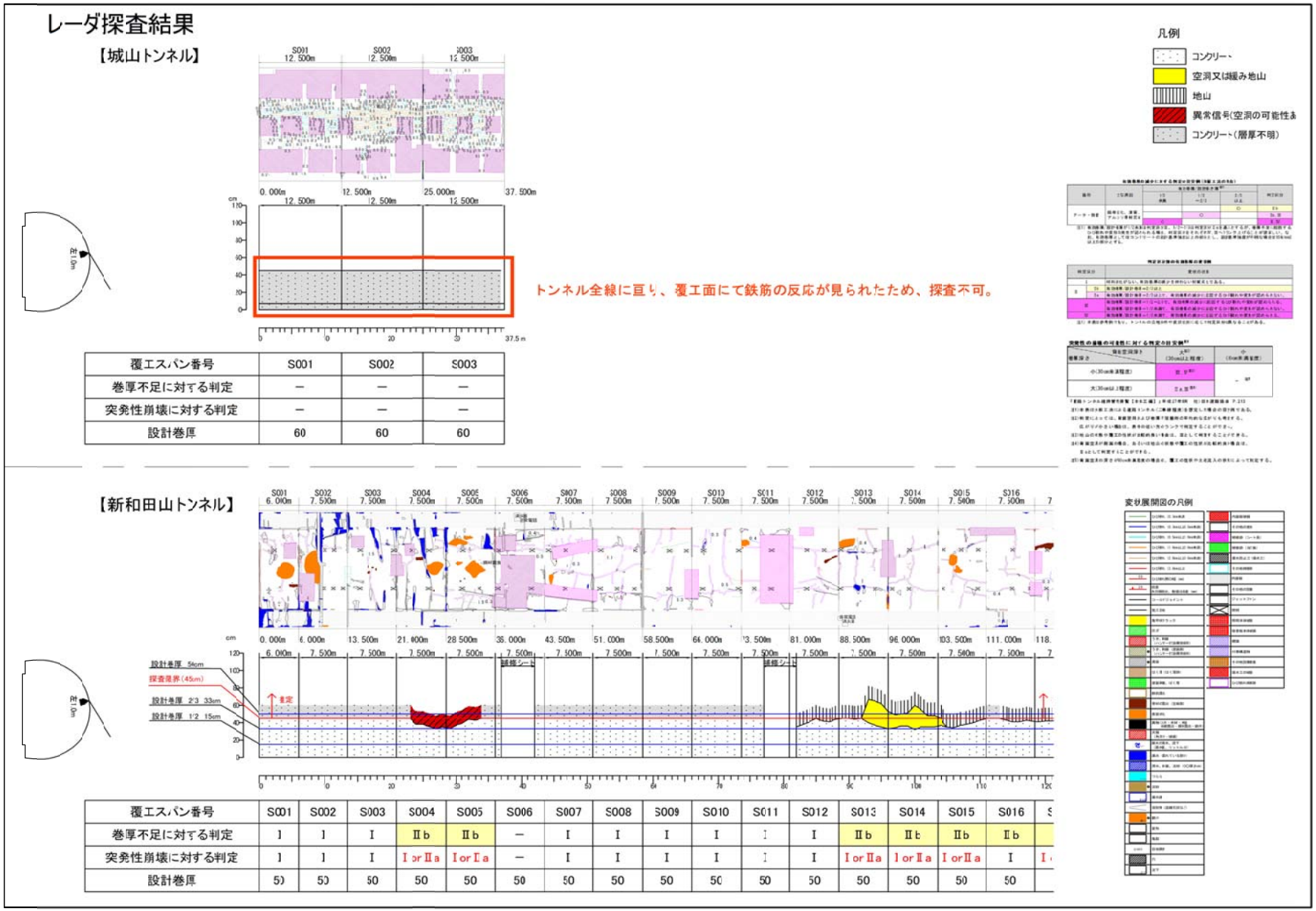
判定区分		変状の状態
Ⅰ		覆工背面の空洞が小さいもしくはない状態で、巻厚が確保され、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	—[注)]
	Ⅱa	アーチ部または側面の覆工背面に空洞が存在し、今後、湧水による地山の劣化等により背面の空洞が拡大し、構造物の機能が損なわれる可能性があり、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		アーチ部の覆工背面に大きな空洞が存在し、背面の地山の落下により構造物の機能が損なわれる可能性が高いため、早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		アーチ部の覆工背面に大きな空洞が存在し、有効な巻厚が少なく、背面の地山の落下により構造物の機能が損なわれる可能性が極めて高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態

注意）突発性の崩壊のおそれに対しては、Ⅱb の対策区分はない。

表 8.2.12 突発性の崩壊の可能性に対する判定の目安案 [1) 3)] を加工

背面空洞深さ ／ 覆工巻厚	大[補足 2)]（30cm 以上程度）	小（30cm 未満程度）
小（30cm 未満程度）	Ⅲ,Ⅳ[補足 3)]	—[補足 5)]
大（30cm 以上程度）	Ⅱa,Ⅲ[補足 4)]	

補足 1）本表は矢板工法による道路トンネル（二車線程度）を想定した場合の目安例である。
補足 2）判定にあたっては、背面空洞および巻厚不足箇所の平面的な広がりも考慮する。
補足 3）地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は、Ⅲとして判定することができる。
補足 4）背面空洞が側面の場合、あるいは地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は、Ⅱa として判定することができる。
補足 5）背面空洞の深さが 30cm 未満程度の場合は、覆工の性状、覆工背面の土砂等の堆積、漏水状態を考慮して判定する。



覆工スパン番号	S001	S002	S003
巻厚不足に対する判定	−	−	−
突発性崩壊に対する判定	−	−	−
設計巻厚	60	60	60

覆工スパン番号	S001	S002	S003	S004	S005	S006	S007	S008	S009	S010	S011	S012	S013	S014	S015	S016
巻厚不足に対する判定	I	I	I	IIb	IIb	−	I	I	I	I	I	I	IIb	IIb	IIb	IIb
突発性崩壊に対する判定	I	I	I	I or IIa	I or I a	−	I	I	I	I	I	I	I or IIa	I or IIa	I or IIa	I
設計巻厚	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

図 8.2.14　城山トンネル空洞レーダ探査結果 [6)]



図 8.2.15　新和田山トンネル空洞レーダ探査結果 [6)]

④　内部欠陥レーダ探査結果

内部欠陥レーダの検出リストを添付する。

【釜窪東トンネル】

検出数は 12 であった。検出位置では、補修跡、うき、濁音が確認されている。**過年度点検結果にない、新たなうき・濁音が 1 箇所判明**した。濁音なし、覆工表面に変化が無い箇所については、覆工内部で電気的性質の異なる変化があり、差分信号が確認されたと推定する。

【和知トンネル】

検出数は 28 であった。検出位置では、補修跡、はく落跡が確認されている。打音調査で覆工表面の濁音やうきは確認されなかった。濁音なし、覆工表面に変化が無い箇所については、覆工内部で電気的性質の異なる変化があり、差分信号が確認されたと推定する。

【城山トンネル】

検出数は 15 であった。検出位置では、表面劣化、ジャンカが確認されている。1 箇所で補修シートがあり、表面の観察が困難であった。打音調査で覆工表面の濁音やうきは確認されなかったが、表面にひび割れや細かなジャンカがある。

【新和田山トンネル】

検出数は 26 であった。検出位置では、ジャンカ、うき、濁音が確認されている。7 箇所で補修シートがあり、表面の観察が困難であった。測線上にある過年度点検結果にあるうき、濁音が検出できている。また、**過年度点検結果にない、新たなうき・濁音が 1 箇所判明**した。

【とがやまトンネル】

検出数は 208 であった。検出位置では、コールドジョイント、表面劣化、補修跡、ジャンカ、うき、濁音、はく落跡が確認されている。**過年度点検結果にない、新たなうきや濁音が 5 箇所判明**した。覆工内部で電気的性質の異なる変化があり、差分信号が確認されたと推定する。

【三谷トンネル】

検出数は 374 であった。検出位置では、コールドジョイント、ジャンカ、うき、が確認されている。その他ジェットファンによる付属物の検出も含まれる。**過年度点検結果にない、新たなうきや濁音が 2 箇所判明**した。濁音なし、覆工内部で電気的性質の異なる変化があり、差分信号が確認されたと推定する。

表 8.2.13 内部欠陥レーダの検出リスト [6)]

トンネル名	検証結果	備考
和知トンネル	新規のうきなし	内部欠陥レーダでは異常反応箇所あり
新和田山トンネル	**新規でうきを 1 箇所確認**	
城山トンネル	新規のうきなし	内部欠陥レーダでは異常反応箇所あり
とがやまトンネル	**新規のうきを 5 箇所確認**	
三谷トンネル	**新規のうきを 2 箇所確認**	
釜窪東トンネル	**新規でうきを 1 箇所確認**	

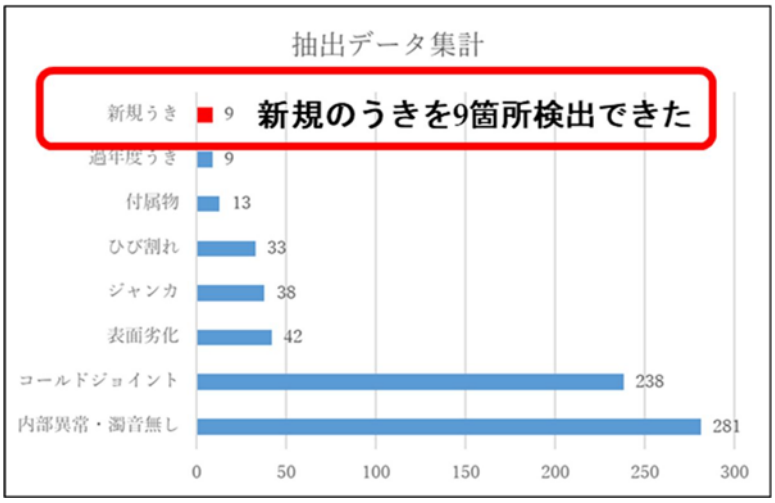
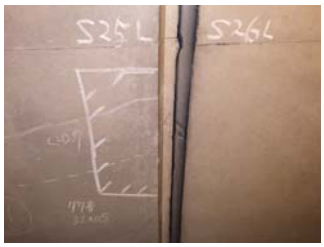


図 8.2.16　内部欠陥レーダ抽出結果 [6)]



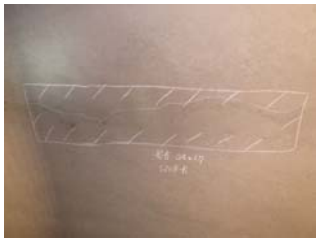
とがやまトンネル
横断目地付近のうき（0.6m×0.1m）



釜窪東トンネル
横断目地付近のうき（0.2m×0.5m）



新和田山トンネル
アーチ部のうき（0.6m×0.7m）
（ケーブルの背面を検出）



三谷トンネル
アーチ部のうき（0.4m×1.7m）
⇒比較的大きなうきを検出

図 8.2.17　うき部分の変状状況 [6)]

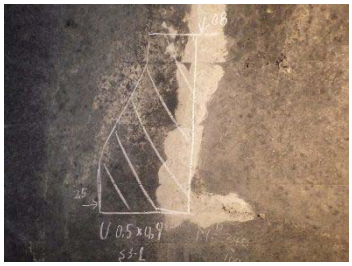
【未検出の内部欠陥】

未検出であった内部欠陥については表 8.2.14となる。

表 8.2.14　未検出の内部欠陥 [6)]

トンネル名	No.	スパン	内部欠陥範囲	
			縦 (m)	横 (m)
新和田山	1	S3	0.5	0.9
	2	S7	0.6	0.2
	3	S12	0.7	0.7
	4	S15	0.2	3.2
	5	S15	0.9	1.3
三谷	6	S203	0.85	4.5

未検出であった内部欠陥の例を図 8.2.18に示す。内部欠陥範囲は、いずれも最大範囲を示している。No.5の場合、内部欠陥範囲は縦断方向に0.9m、横断方向に1.3mであるが、レーダ測線は青位置であり、補修部分の濁音であったため、縦断方向の範囲が狭い。変状規模が0.1m以下の場合、レーダのスペックにより、検出困難である。補修やひび割れ沿いの内部欠陥は打音点検で必ず確認するため、併用することで網羅する。



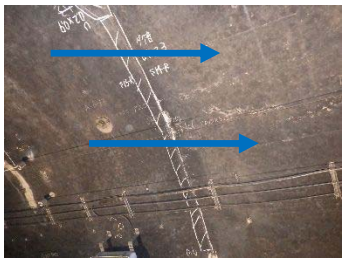
No. 1



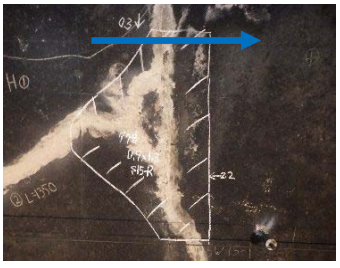
No. 2



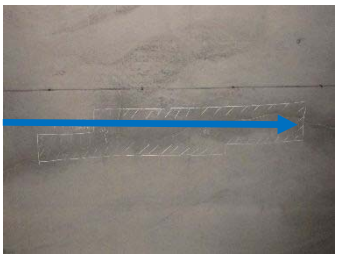
No. 3



No. 4



No. 5



No. 6

図 8.2.18　内部欠陥の状況 [6)]

3) 点検

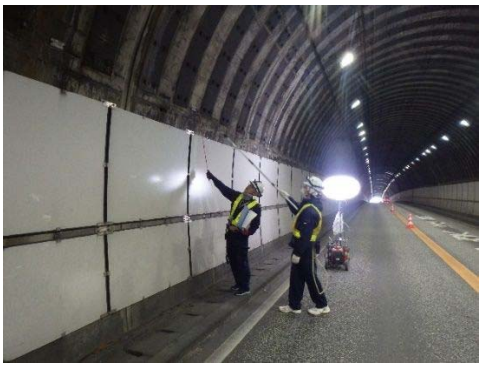
(1) 点検方法

「道路トンネル定期点検要領」に基づき、高所作業車（トンネル点検車）や照明等を用いて、近接目視、打音検査、触診の作業を実施した。

打音検査については、必要に応じて点検ハンマー等により叩き落としをし、叩き落しを実施した箇所に対してエポキシ樹脂等の含浸補強材の塗布を実施した。



高所作業車を用いた点検状況



側壁の点検状況



叩き落し状況



照明の触診状況

図 8.2.19　点検状況写真 [6)]

(2) 健全性の診断

トンネル本体工は「道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月　国土交通省　道路局国道・技術課」に基づき整理し、健全度の判定を行った。

① 点検結果の判定区分

「道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月　国土交通省　道路局国道・技術課)」の判定区分を表 8.2.15 に示す。

表 8.2.15　判定区分の対比の目安 3) を加工

判定区分 「道路トンネル定期点検要領（H31 国交省）」	
Ⅰ　：健　　全	※利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、 措置を必要としない状態。
Ⅱb：予防保全段階	※将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、 監視※1 を必要とする状態。
Ⅱa：予防保全段階	※将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、 重点的な監視※2 を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態。
Ⅲ　：早期措置段階	※早晩、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、 早期に対策を講じる必要がある状態。
Ⅳ　：緊急措置段階	※利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、 緊急※3 に対策を講じる必要がある状態。

注 1.「Ⅱb」における監視とは、日常巡視等で状況を把握することに努めることを基本とする。
注 2.**「Ⅱa」における重点的な監視とは、前回の定期点検または監視から 2 年程度以内を目安に近接目視を行うこと**を基本とする。
注 3. 判定区分Ⅳにおける「緊急」とは早期に措置を講じる必要がある状態から、交通解放できない状態までを言う。

※「道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月 国土交通省 道路局国道・技術課）」に一部追記

② 変状種類及び変状区分との関係

変状種類及び変状区分との関係を表 8.2.16 に示す。下記、変状に対して「道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月 国土交通省 道路局国道・技術課）」を参考にⅠ～Ⅳの健全度判定を行う。また、附属物の取付状態については異常判定（○、×）を行う。

表 8.2.16　変状種類及び変状区分との関係 3)

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき・はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

③　各変状に対する健全度の判断基準

(ア) 圧ざ・ひび割れ（外力）

圧ざ・ひび割れの判定区分および判定の目安例を以下に示す。

表 8.2.17　圧ざ・ひび割れに対する判定区分 3)

Ⅰ		ひび割れが生じていない，または生じていても軽微で，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	ひび割れがあり，その進行が認められないが，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，監視を必要とする状態
	Ⅱa	ひび割れがあり，その進行が認められ，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		ひび割れが密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が低下しているため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		ひび割れが大きく密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が著しく低下している，または圧ざがあり，緊急に対策を講じる必要がある状態

表 8.2.18　点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の判定の目安例（矢板工法）

3）を加工

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ 幅(補足1) 5mm以上	幅 3～5mm	幅 3mm未満	長さ(補足2) 10m以上	長さ 5～10m	長さ 5m未満	対策区分
覆工	断面内			○	○	○	○	Ⅰ、Ⅱb、Ⅱa (補足3)
			○				○	Ⅱb、Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ (補足4)
		○				○		Ⅲ
		○			○			Ⅳ

補足 1)連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。

補足 2)覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする(覆工スパン単位のひび割れ長さでは評価しない)。

補足 3)3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。

Ⅰ、Ⅱb:ひび割れが軽微で、外力か材質劣化か判断が難しい場合

Ⅱa: 地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合

なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。

補足 4)ひび割れ幅が 5mm 以上でひび割れ長さが 5m 未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生原因を考慮して、判定を行う。

判定区分補足
Ⅰ　：幅 3mm 未満長さ 5m未満
Ⅱb：幅 3mm 未満長さ 5m以上
Ⅱa：現場の状況に応じて判断する

判定区分補足
Ⅱb：ひび割れが軽微で、外力が作用している可能性の低いもの。
Ⅱa：外力の作用の可能性が疑われ、将来的に機能低下が懸念される。
Ⅲ　：外力の作用の可能性が疑われ、せん断ひび割れ等が確認される。

表 8.2.19　調査の結果、ひび割れの進行の有無が確認された場合の判定の目安例（矢板工法）

3）を加工

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ 幅 3mm以上	幅 3mm未満	長さ 5m以上	長さ 5m未満	対策区分
覆工	断面内		○	○	○	Ⅱa、Ⅲ
		○			○	Ⅲ
		○		○		Ⅳ

判定区分補足
Ⅱa：幅 3mm 未満　長さ 5m未満
Ⅲ：現場の状況に応じて判断する

なお、表-解 8.5 及び表-解 8.6 は判定の目安例として示したものである。機械的に適用するのではなく、現場の状況に応じて判定を行う。

不規則なひび割れ等が確認された箇所は、集中的な緩み土圧が作用している可能性があり、有効巻厚の不足または減少が伴う場合、突発性崩壊につながる可能性が懸念される。

従って、上記のような変状が確認された箇所については必要に応じて調査を実施した上で、判定を行う。

【NATM に対する外力性のひび割れの判定の目安】

表 8.2.20　山岳トンネル工法（NATM）の判定目安例 3) を加工

変状状況	対策区分	備考
外力に起因したひび割れの進行性が認められる場合	Ⅲまたは Ⅳ	少なくとも前回の定期点検結果等と比較して進行性がある
外力に起因したひび割れの進行性は認められないが、重点的な監視が望ましい	Ⅱa	
ひび割れの程度は軽微で要因が外力か材質劣化か判別し難しい状況	Ⅱb	和知トンネルで該当変状あり

一方、山岳トンネル工法においては、一般部の覆工は、他の支保構造部材とともにトンネルの安定性を確保する支保構造の一部を構成しているものの，原則として地山からの外力を想定して構造設計されているものではない。そのため、当該覆工スパンに外力によるものと考えられるひび割れが確認された場合は、必要な調査を実施して変状の原因と進行の度合い等を把握した上で判定を行うことが望ましいが、少なくとも前回の定期点検結果等と比較して外力に起因したひび割れの進行性が認められる場合にはⅢまたはⅣとするのがよいと考えられる。外力に起因したひび割れの進行性が認められない場合にも、Ⅱa として重点的な監視を行っていくことが望ましいが、ひび割れの程度が軽微で要因が外力か材質劣化か判別し難しい状況であればⅡb とすることが考えられる。

(イ) うき・はく離に対する判定区分

うき・はく離に対する判定区分および判定の目安例を以下に示す。

表 8.2.21　うき・はく離に対する判定区分 3) を加工

Ⅰ		ひび割れ等によるうき，はく離の兆候がないもの，またはたたき落としにより除去できたため，落下する可能性がなく，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき，はく離の兆候があり，将来的に落下する可能性があるため，監視を必要とする状態
	Ⅱa	ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき，はく離の兆候があり，将来的に落下する可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき，はく離等がみられ，落下する可能性があるため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		ひび割れ等により覆工コンクリート等のうき，はく離等が顕著にみられ，早期に落下する可能性があるため，緊急に対策を講じる必要がある状態

表 8.2.22　うき・はく離等に対する判定の目安例 3) を加工

対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況[補足1)]	打音異常[補足4)]	
			有	無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合のおそれがない	Ⅱb	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱb
		ひび割れ等が閉合しブロック化[補足2)]している	Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化[補足3)]している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ

補足1）ひび割れ等が外力による場合は変状区分の外力として、材質劣化による場合は変状区分の材質劣化として判定する。
補足2)ブロック化とは、ひび割れ等が単独またはひび割れと目地、コールドジョイント等で閉合し、覆工が分離した 状態をいう。
補足3)補修材等のうき・はく離については、本体工に生じるうきに比べてその厚さが薄いことが多いため、発生位置等を考慮し、判定することが考えられる。
補足4)打音異常が認められない場合、一般的には対策区分Ⅱb と考えられるが、下記の場合は対策区分Ⅱa または Ⅲとするなどを検討することが考えられる。
・ブロック化の面積が大きい場合　・ブロック化が進行している場合
・ひび割れの発生状況から落下の危険性が考えられる場合　・劣化要因が明確な場合や寒冷地等の厳しい環境条件下にある場合

判定区分補足
Ⅱb：側壁部に変状が有りはく落による支障が少ない場合。
Ⅱa：アーチ部に変状が有り、はく落による支障が大きいと懸念される場合。
Ⅲ　：変状が大きい、ひび割れが密集している場合等で、はく落による支障が大きいと判断される場合。
Ⅳ　：顕著な変状があり、早期に落下する可能性がある状態で、緊急に対策を講じる必要がある場合。
※アーチ部と側壁部の境界は、「スプリングライン（SL）」で分けている。

【うき・はく離の判定に対する補足】

前述した「道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月国土交通省 道路局国道・技術課）」の判定区分ではⅡａは計画的に対策を必要とする状態、Ⅱｂは監視を必要とする状態となっている。

トンネルの判定区分の考え方としては利用者被害の観点に重点が置かれており、うき・はく離についても以下の通り利用者被害の可能性の高低によってⅡａとⅡｂの区分を実施した。

◇完全に除去できた箇所→「判定区分Ⅰ」

◇残置したうきが利用者被害の可能性の低い箇所→「判定区分Ⅱb」

◇残置したうきが利用者被害の可能性の高い箇所→「判定区分Ⅱa」

（ウ）変形、移動、沈下に対する判定区分

変形、移動、沈下に対する判定区分および判定の目安例を以下に示す。

表 8.2.23　変形、移動、沈下に対する判定区分 [3)]

Ⅰ		変形，移動，沈下等が生じていない，またはあっても軽微で，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	変形，移動，沈下等しており，その進行が停止しているが，監視を必要とする状態
	Ⅱa	変形，移動，沈下等しており，その進行が緩慢であるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		変形，移動，沈下等しており，その進行が見られ，構造物の機能低下が予想されるため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		変形，移動，沈下等しており，その進行が著しく，構造物の機能が著しく低下しているため，緊急に対策を講じる必要がある状態

表 8.2.24　変形速度に対する判定の目安例 [3)] を加工

対象箇所	部位区分	変形速度 10mm/年以上 著しい	3～10 mm/年 進行がみられる	1～3 mm/年 進行がみられる～緩 慢	1mm/年未満 緩 慢	対策区分
覆工 路面 路肩	断面内				○	Ⅱb、Ⅱa
				○		Ⅱa
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

判定区分補足
Ⅱb：変状が見られるが、その進行が認められない。
Ⅱa：変状があり、緩慢な変状の進行が認められる。

補足）変形速度 1～3mm の場合の判定例を下記に示す。

Ⅱa：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が低い場合
・変形量自体が小さい場合
・変形の外的要因が明確でないまたは進行も収束しつつある場合　等

Ⅲ：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が高い状態
・変形量自体が大きい場合
・地山からの荷重作用が想定される場合（変形の方向が斜面方向と一致するなど）

（エ）鋼材腐食に対する判定区分

鋼材腐食に対する判定区分および判定の目安例を以下に示す。

表 8.2.25　鋼材腐食に対する判定区分 [3)]

Ⅰ		鋼材腐食が生じてない，またはあっても軽微なため，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	表面的あるいは小面積の腐食があるため，監視を必要とする状態
	Ⅱa	孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		腐食により，鋼材の断面欠損がみられ，構造用鋼材として機能が損なわれているため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		腐食により，鋼材の断面欠損がみられ，構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため，緊急に対策を講じる必要がある状態

(オ) 漏水等による変状に対する判定区分

漏水等による変状に対する判定区分および判定の目安例を以下に示す。

表 8.2.26　漏水等による変状に対する判定区分 [3)]

Ⅰ		漏水がみられないもの，または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており，利用者の安全性にはほとんど影響がないが，監視を必要とする状態
	Ⅱa	コンクリートのひび割れ等から漏水の滴水があり，将来的に利用者の安全性を損なう可能性のあるもの，または，排水不良により，舗装面に滞水を生じるおそれのあるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		コンクリートのひび割れ等から漏水の流下があり，または，排水不良により舗装面に滞水があり，利用者の安全性を損なう可能性のあるため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり，または，漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり，寒冷地において漏水等により，つららや側氷等が生じ，利用者の安全性を損なうため，緊急に対策を講じる必要がある状態

表 8.2.27　漏水等による変状に対する判定の目安例 [3)]

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		対策区分[補足2)]
		噴出	流下	滴水	浸出(にじみ)	有	無[補足1)]	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ

補足 1)「無」は、安全性にほとんど影響がないことを表す(安全性に影響がない場合の対策区分は一般的にⅠとなる)。

補足 2) 土砂流入等による排水機能の低下が著しい場合、路面・路肩の滞水による車両の走行障害が生じている場合、路床路盤の支持力低下が顕著な場合、舗装の劣化，氷盤の発生、つらら、側氷等による道路利用者への影響が大きい場合は対策区分を1ランク上げて判定することが考えられる。
また、判定にあたっては、降雨の履歴や規模、及び部位区分の影響を考慮し判定することが望ましい。

判定区分補足
走行障害が生じている場合は、Ⅲ⇒Ⅳへランクアップし、緊急対策を講じる必要がある。

4)　診断結果のまとめ

表 8.2.28 に、トンネル点検結果の概要を示す。

表 8.2.28　トンネル点検結果概要 [6)]

構造物名	変状毎の対策区分（今回の点検結果）			TN 健全性	備考
和知 TN ※監視	外力	Ⅱb	アーチ部のひび割れ	※1	
	材質劣化	Ⅱb	アーチ部の豆板		
	漏水	Ⅱa	既設導水工の破損		
新和田山 TN	外力	Ⅰ	該当する変状なし	Ⅱ	
	材質劣化	Ⅱb	アーチ部のうき		
	漏水	Ⅱa	アーチ部の滴水		
城山 TN	外力	Ⅱa	アーチ部のひび割れ ⇒**前回点検時より変状の進行性の可能性あり**	Ⅱ	変形モード解析では変形傾向は確認されていない
	材質劣化	Ⅱb	側壁部のひび割れ		
	漏水	Ⅱb	にじみ		
とがやま TN	外力	Ⅰ	該当する変状なし	Ⅱ	
	材質劣化	Ⅱa	アーチ部のうき		
	漏水	Ⅱb	側壁部のにじみ		
三谷 TN	外力	Ⅰ	該当する変状なし	Ⅱ	
	材質劣化	Ⅱa	巻厚不足・打音異常 ⇒**ドリル削孔にて、覆工厚 10cm であることを確認**		
	漏水	Ⅱb	目地沿いのにじみ		
釜窪東 TN	外力	Ⅰ	顕著な変状なし	Ⅱ	
	材質劣化	Ⅱa	アーチ部のうき		
	漏水	Ⅱa	目地沿いからの錆汁		路面に滞砂があり、背面からの土砂流出の懸念がある

※1：監視対象スパンに対するトンネル健全度の変更に変更なし。監視点検であるため、トンネル全体の健全度の更新はしないものとしている。

顕著な変状が見られた下記３トンネルについて、要点を記載する。（和知トンネル：参考掲載）

① 城山トンネル

前回点検時と比較してアーチ部のひび割れが増加しており、外力性の疑いの可能性が示唆された。現時点で錆汁や打音異常等の変状が見られないこと、供用開始から 50 年以上経過していることを考慮し、次回点検時に外力性の判断を行うこととしⅡa 判定とすることとした。

② 三谷トンネル

S203 のアーチ部の打音異常箇所にて、**ドリル削孔により覆工厚が 10cm で巻厚不足であることを確認**した。NATM で施工されたトンネルであり、覆工コンクリートの機能を考慮するとⅡa 判定とし、次回の監視点検に合わせて調査を実施することが妥当であるとした。

③ 釜窪東トンネル

過年度より目地部の漏水が進行している。また、沈砂と併せて錆汁のような変状が確認されている。沈砂については、覆工背面の砂礫層が出てきている可能性がある。**変状の進行性が確認されてことから、重点的に監視する必要があると判断し、Ⅱa 判定としている。**



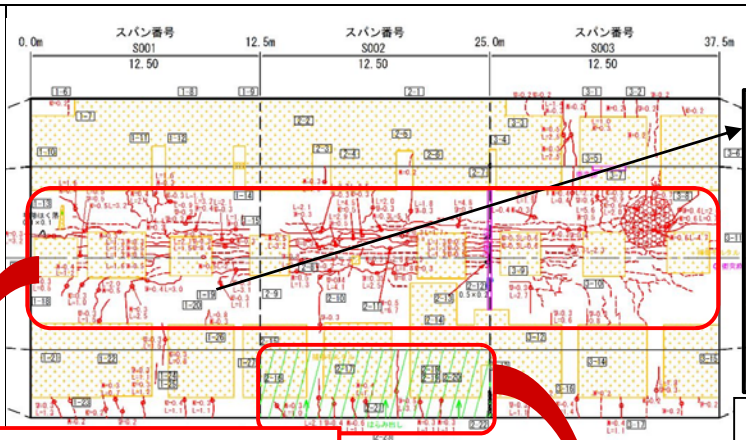
図 8.2.20　和知トンネル点検結果概要 [6)]



図 8.2.21　城山トンネル点検結果概要 [6)]

表 8.2.29　城山トンネル評価 [6)]

変状展開図



H29 点検時

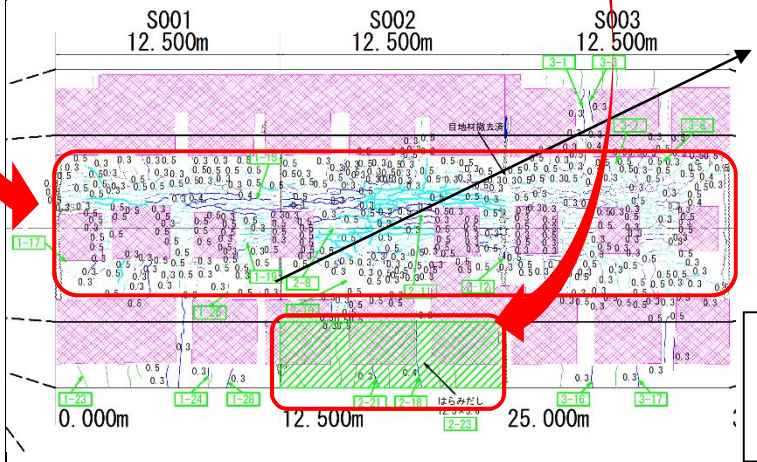


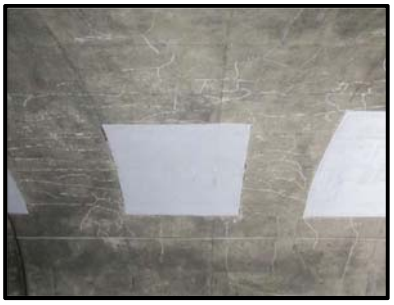
S001-19 材質劣化　Ⅱb 判定
ひび割れ幅　0.5mm

全体的にひび割れが増えている

はらみだしの範囲に変化はないが、天端のひび割れは進行している可能性あり

今回点検時





S001-19 **外力　Ⅱa 判定**
ひび割れ幅　0.5mm
⇒ひび割れ幅に変化はないが、周辺に新たな変状あり

評価

天端のひび割れに対する判定

ひび割れについて、過年度はⅡb 判定となっている。

今回の点検では、天端付近に新たなひび割れが全体的に確認されたため、変状が進行している可能性がある。

城山トンネルは、鉄筋コンクリートだと考えられるため、ひび割れの評価について「道路トンネル維持管理便覧」をもとに評価すると、ひび割れ幅が 0.5mm であるため、Ⅲ判定相当となるが、**現時点で錆汁や打音異常がないこと、供用開始から 50 年程度経過していること**を踏まえ、**監視点検時に変状状況の確認をした上で計画的に対策することし、Ⅱa 判定とした**。

側壁部のはらみだし

側壁部のはらみだしは、過年度Ⅱb 判定となっている。なお、はらみだしの範囲のみの記録である。
今回の点検時は、特段はらみだしが顕著に出ている傾向は見られなかったが、
はらみだしのあるスパン⇒天端で新たなひび割れあり⇒進行性のあるスパンと変状位置一致
となっており、**進行性の可能性のあるスパンと相関性の可能性があるため、Ⅱa 判定とした**。
なお、監視点検時に覆工面の変状の進行状況等を踏まて、再診断が必要と考えている。

6． 評価

評価は，対象とするひび割れが部材（構造物）の要求性能に与える影響の程度を客観的に求めるもので，影響の程度は「大」，「中」，「小」で表現される。これらの影響の程度は，**第２編　表-4.2.1** の対策区分の内容とおおむね**付表-1.2** のような関係にあると考えられる。ここでは，鉄筋コンクリート構造の健全度を**付表-1.2** に基づいて**第２編　表-4.2.1** に示すⅠ，Ⅱb，Ⅱa，Ⅲ，Ⅳの５段階で区分する方法を示す。以下に，鉄筋コンクリートに対する評価の種類ごとに区分の方法を述べる。

付表-1.2　ひび割れの影響の程度と対策区分の関係の目安

ひび割れの影響の程度		対策区分
大	ひび割れによる性能低下が顕著であり，部材が要求性能を満足していない	Ⅲ，Ⅳ
中	ひび割れが性能低下の原因となるが，軽微（簡易）な対策により対処が可能	Ⅱb，Ⅱa，Ⅲ
小	ひび割れが性能低下の原因となっておらず，部材が要求性能を満足する	Ⅰ

6-1　評価１（乾燥収縮ひび割れ等に適用）の方法

評価１は，**付表-1.3** により行う。ひび割れ幅は，表面におけるものを対象とする。

付表-1.3　評価１の評価基準（文献[1]を加筆修正）

環境条件		塩害・腐食環境下[注1),注2),注3)]	一般屋外環境下[注1),注2)]
ひび割れ幅：w（mm）	0.5 ＜ w	大（20 年耐久性）	大（20 年耐久性）
	0.4 ＜ w ≦ 0.5	大（20 年耐久性）	大（20 年耐久性）
	0.3 ＜ w ≦ 0.4	大（20 年耐久性）	中（20 年耐久性）
	0.2 ＜ w ≦ 0.3	中（20 年耐久性）	小（20 年耐久性）
	w ≦ 0.2	小（20 年耐久性）	小（20 年耐久性）

城山 TN での対象箇所

注１）評価結果「小」，「中」，「大」の意味は下記のとおり。
　　小：ひび割れが性能低下の原因となっておらず，部材が要求性能を満足する。
　　中：ひび割れが性能低下の原因となるが，軽微（簡易）な対策により対処が可能
　　大：ひび割れによる性能低下が顕著であり，部材が要求性能を満足していない。

注２）カッコ内の数値は耐久性評価結果を保証できる期間の目安としての年数を示しており，（20 年耐久性）はひび割れの評価時点から 15 ～ 25 年後程度の耐久性評価結果を保証できる期間の目安として設定したものであり，15 ～ 25 年の平均をとって示したものである。

注３）塩害環境としては，**第２編 図-2.2.36**，**表-2.2.6**，**表-2.2.7** に示す地域がある。

図 8.2.22　評価の考え方[4]を加工

【参考資料】

下記に、「シェッド、大型カルバート等定期点検要領（平成31年3月）国交省」のひび割れに関する対策区分と変状程度の評価要領を示す。

変状の特徴等と対策区分判定

⑤ ひびわれ

【一般的性状・変状の特徴】
コンクリート部材の表面にひびわれが生じている状態をいう。

【他の変状との関係】
- ひびわれ以外に、コンクリートの剥落や鉄筋の露出などその他の変状が生じている場合には、別途それらの変状としても扱う。
- ＰＣ定着部においては当該部位でのみ扱い、当該部位を含む主桁等においては当該部位を除いた要素において評価する。（以下、各変状において同じ。）

【対策区分判定】
○判定区分Ｅ1：シェッド、大型カルバート等の構造の安全性の観点から、緊急対応が必要な変状
塩害地域においてコンクリート内部鉄筋が腐食にまで至っている場合、下部構造の沈下等に伴う主梁の支点付近にひびわれが発生している場合で、今後も変状進行が早いと判断され、構造安全性を著しく損なう危険性が高い状況などにおいては、緊急対応が妥当と判断できる場合がある。

○判定区分Ｅ２：その他、緊急対応が必要な変状
早期にうきに進行する状況などにおいては、通行車両、歩行者の交通障害や利用者への被害防止の観点から、緊急対応が妥当と判断できる場合がある。

○判定区分Ｓ１、Ｓ２：詳細調査又は追跡調査が必要な変状
同一の路線における同年代に設置されたシェッド、型カルバート等の施設と比べて変状の程度に大きな差があり、環境や地域の状況など一般的な変状要因だけでは原因が説明できない状況などにおいては、詳細調査を実施することが妥当と判断できる場合がある。
なお、次に示すような特定の事象については、基本的に詳細調査を行う必要がある。
［アルカリ骨材反応のおそれがある事象］
- コンクリート表面に網目状のひびわれが生じている。
- 主鉄筋やＰＣ鋼材の方向に沿ったひびわれが生じている。
- 微細なひびわれ等に白色のゲル状物質の析出が生じている。

［塩害のおそれがある条件］
- 道路橋示方書等で塩害対策を必要とする地域に設置されている。
- 凍結防止剤が散布される道路区間に設置されている。
- 建設時の資料で、海砂の使用が確認されている。
- 半径 100m 以内に、塩害変状構造物が確認されている。
- 点検等によって、錆汁など塩害特有の変状が現れている。

ひびわれ原因が乾燥収縮と明らかで、今後の進行状況を見極めた後に補修等の要否を判断することで足りる状況などにおいては、追跡調査が妥当と判断できる場合がある。

○判定区分Ｍ；維持工事で対応が必要な変状
全体的な変状はなく、ひびわれが部分的で変状の規模が小さく、ひび割れ原因が明らかで、今後の進行がないと認められる状況などにおいては、維持工事で対応することが妥当と判断できる場合がある。

○判定区分Ｅ、Ｃ１、Ｃ２；補修等が必要な変状

○所見を記載する上での参考

変状箇所	代表的な変状原因の例	懸念される構造物への影響の例
コンクリート部材全般	・設計耐力不足 ・支承部の機能不全 ・地震 ・凍結融解 ・プレストレス不足 ・締固め不足 ・養生の不良 ・温度応力 ・乾燥収縮 ・コンクリート品質不良 ・後打ちによるコールドジョイント ・支保工の沈下 ・早期脱型 ・不同沈下 ・コンクリートの中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食 ・落石・雪崩荷重等の作用	・応力超過によるひびわれの進行、耐荷力の低下 ・ひびわれによる鉄筋の腐食 ・漏水、遊離石灰の発生
コンクリート頂版	・設計耐力不足 ・乾燥収縮 ・配力鉄筋不足 ・不同沈下 ・落石・雪崩荷重等の作用	・漏水や遊離石灰の進行等 ・頂版機能の損失

付録-2 変状程度の評価要領

⑥ ひびわれ

城山トンネルでの該当箇所

【変状程度の評価と記録】
（１） 変状程度の評価区分
変状程度の評価は、次の区分によるものとする。
なお、区分にあたっては、変状程度に関係する次の要因毎に、その一般的状況から判断した規模の大小の組合せによることを基本とする。
1）変状程度の区分

区分	最大ひびわれ幅に着目した程度	最小ひびわれ間隔に着目した程度
a	変状なし	
b	小	小
c	小	大
	中	小
d	中	大
	大	小
e	大	大

2）変状の程度
a）最大ひびわれ幅に着目した程度

程度	一般的状況
大	ひびわれ幅が大きい（ＲＣ構造物 0.3mm 以上、ＰＣ構造物 0.2mm 以上）。
中	ひびわれ幅が中位（ＲＣ構造物 0.2mm 以上 0.3mm 未満、ＰＣ構造物 0.1mm 以上 0.2mm 未満）。
小	ひびわれ幅が小さい（ＲＣ構造物 0.2mm 未満、ＰＣ構造物 0.1mm 未満）。

b）最小ひびわれ間隔に着目した程度

程度	一般的状況
大	ひびわれ間隔が小さい（最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 未満）。
小	ひびわれ間隔が大きい（最小ひびわれ間隔が概ね 0.5m 以上）。

（２） その他の記録
ひびわれの発生位置やその範囲・状況をスケッチや写真で記録するとともに、代表的な変状の主要寸法を変状図に記載するものとする。

図 8.2.23 シェッド、大型カルバート等定期点検要領[5)] を加工

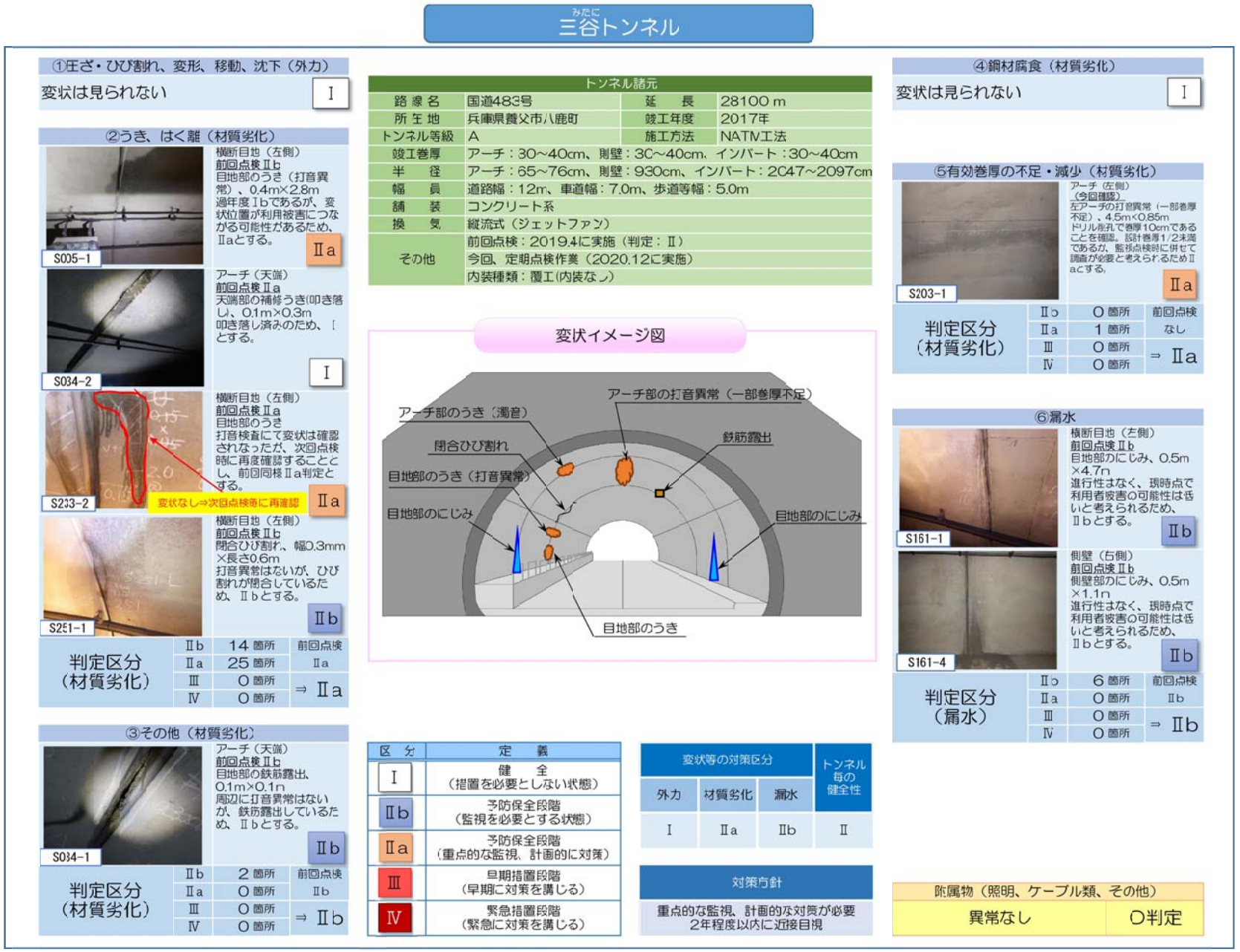
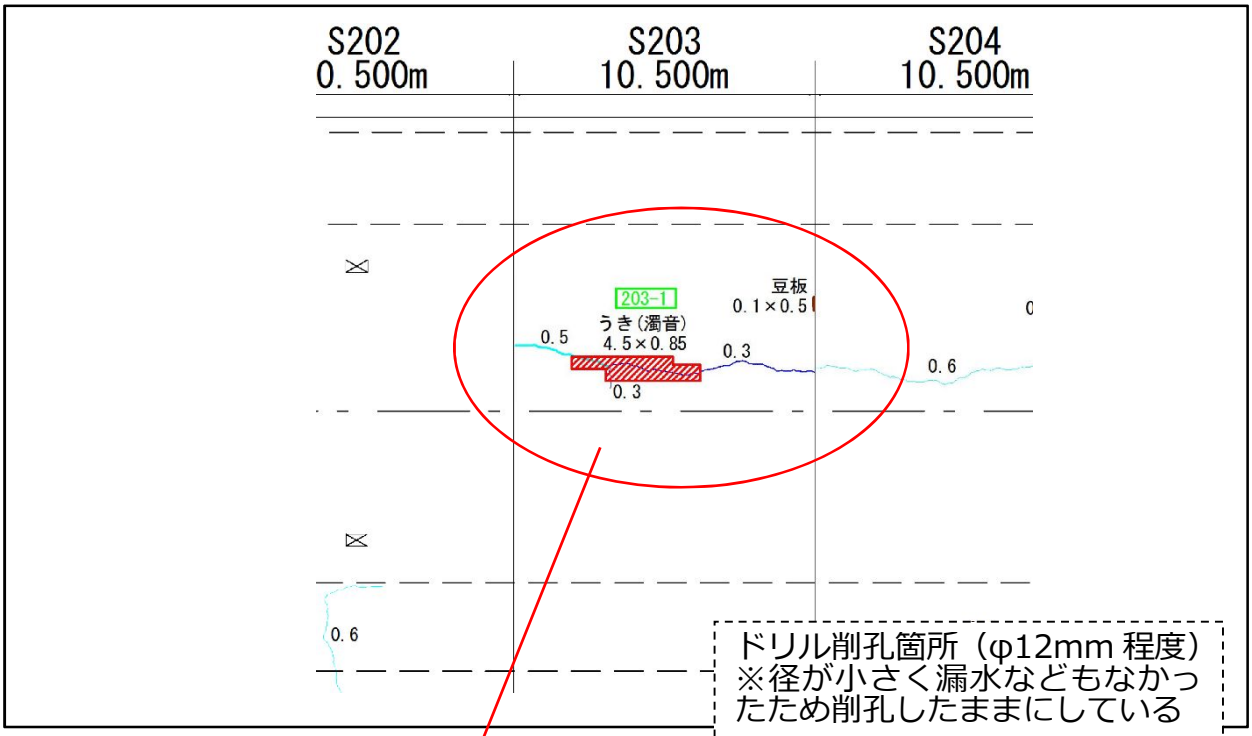
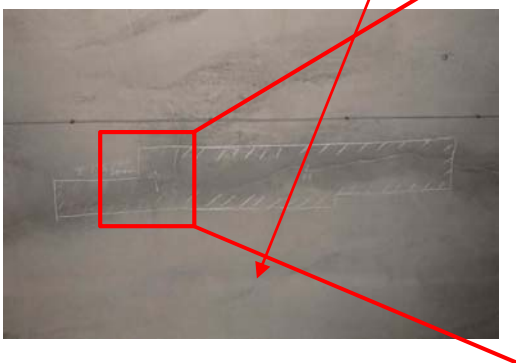
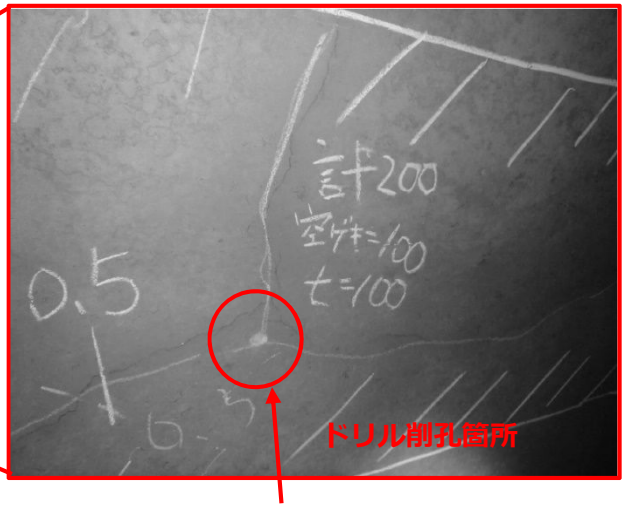


図 8.2.24　三谷トンネル点検結果概要 [6)]

【三谷トンネル　巻厚不足に対する判定補足】







打音状況で一部巻厚が薄いと思われる箇所を確認
↓
ドリル削孔（φ12mm 程度）を実施
↓
巻厚：10cm、空隙：10cm を確認

評価：ドリル削孔にて確認した結果、**巻厚不足（設計巻厚の 1/2 以下）**であることが確認された。
周辺に打音異常が確認されているが、**打音検査状況からから早期に落下する状況でない**と考えられる。**監視点検時に追加調査を行い、今後計画的に対策が必要**であると考えている。

図 8.2.25　三谷トンネル巻厚不足の判定 [6)]



図 8.2.26　釜窪東トンネル点検結果概要 [6)]

【釜窪東トンネル　目地沿いの錆汁、沈砂に対する判定補足】

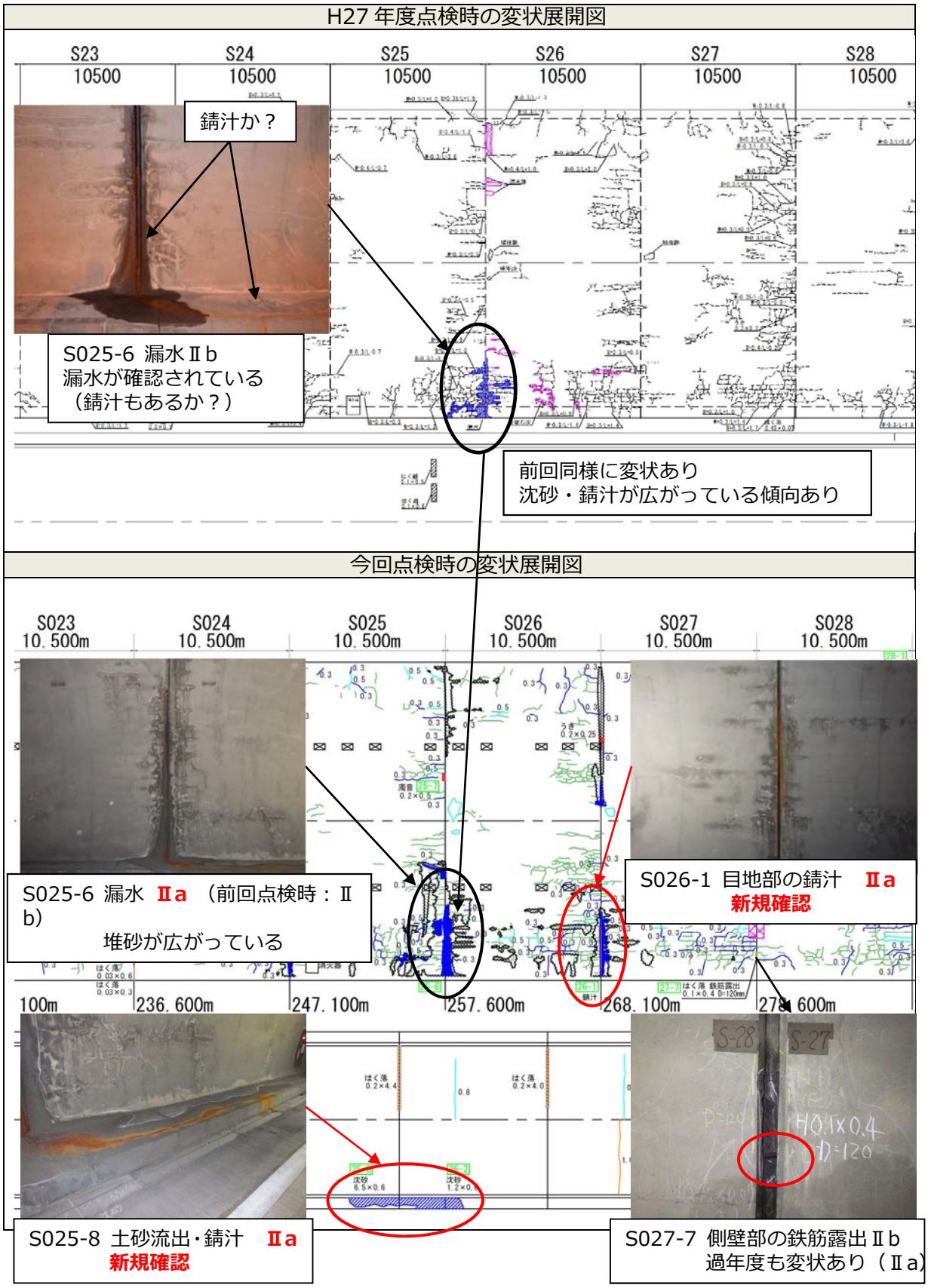


図 8.2.27　釜窪東トンネル　目地沿いの錆汁、沈砂に対する判定補足 [6)]

●釜窪東トンネルの地質縦断図（点検調書より）

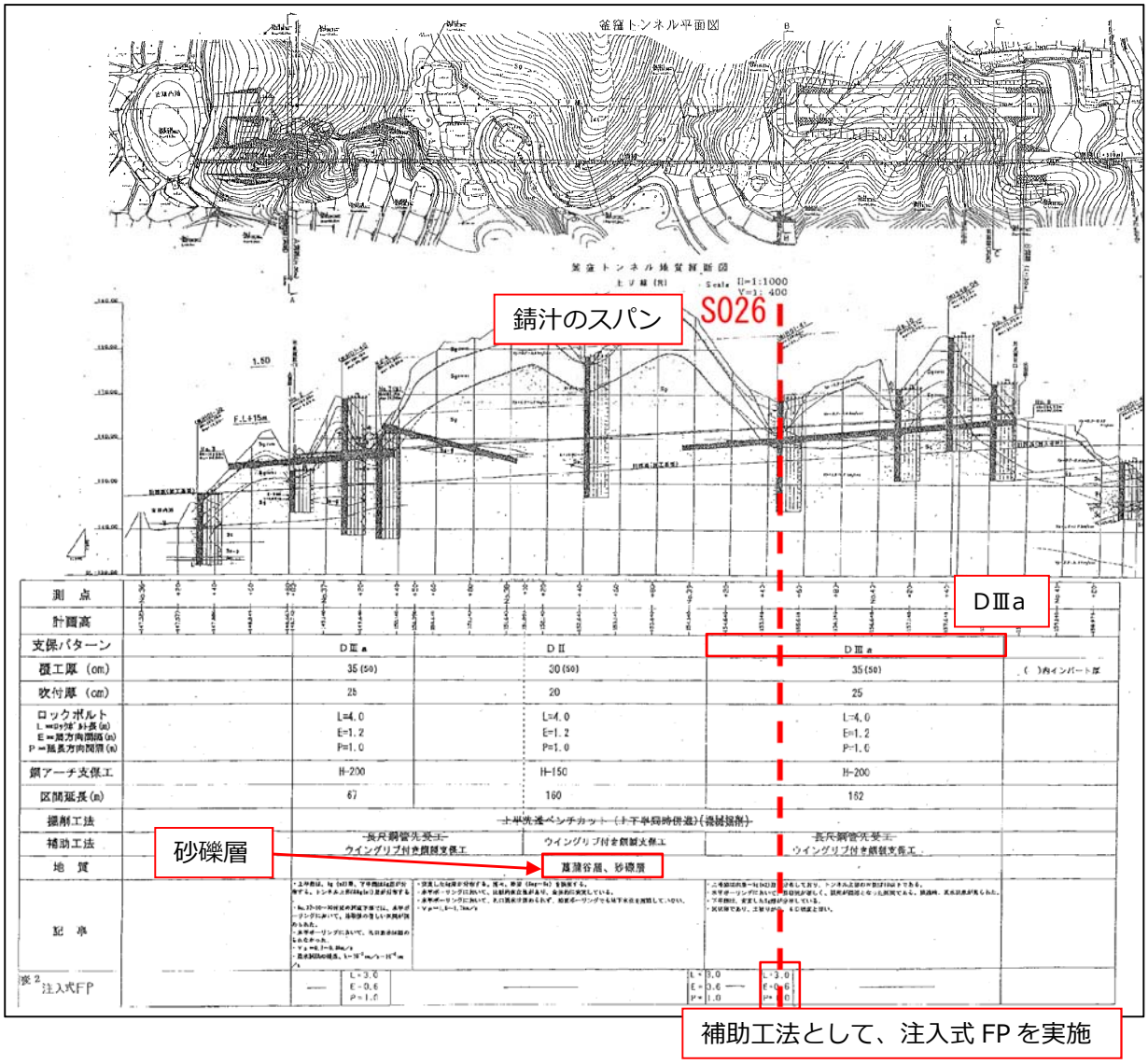


図 8.2.28　釜窪東トンネル地質縦断図 [6)]

●評価

過年度より目地部の漏水が進行している。また、沈砂と併せて錆汁のような変状が確認されている。

沈砂については、覆工背面の砂礫層（地質縦断図より）が出てきている可能性がある。

錆汁については、周辺に打音異常はないものの、側壁部に鉄筋露出も確認されていることから、何かしら鉄筋が腐食している可能性がある。

今回の点検で、**変状の進行性が確認されてことから、重点的に監視する必要があると判断し、Ⅱa 判定としている。**

8.2.3 点検要領に対する支援評価

1) トンネル点検への適用性

MIMM-R が有する 4 つの機能と、トンネル点検において着目される変状との関係を下表に示す。トンネルに生じる変状は、大別すると表 8.2.30 の 6 種類に分類される。

表 8.2.30 トンネルの変状と MIMM-R の機能と対応

変状の種類	変状区分			対応する MIMM-R の機能
	外力	材質劣化	漏水	
①圧ざ，ひび割れ	○	○		MIS（画像解析）／MRS（巻厚･空洞調査）
②うき,はく離	○	○		SIP（内部欠陥レーダ）※
③変形，移動，沈下	○			MMS（変形モード解析）
④鋼材腐食		○		MIS（画像解析）
⑤有効巻厚の不足		○		MRS（巻厚･空洞調査）
⑥漏水等による変状			○	MIS（画像解析）

※覆工表面の要注意箇所を検出するものであるため、現地点検時に確認が必要となる。

したがって、これらの機能を組み合わせて活用することにより、近接目視を基本とした点検従来の点検手法に対する支援を行うことが可能だと考えられる。

2) 定期点検要領の各判定と走行型計測の適用性

近畿地方整備局管内の 6 トンネルに対して、トンネル計測を行いトンネルの変状の有無やその位置・範囲などを記録するとともに、断面形状を測定した。

これにより、「道路トンネル定期点検要領　平成 31 年 3 月　国土交通省道路局国道・防災課」（以下、点検要領という）に示される点検結果の判定の目安に基づき、判定を行うことが可能である。

走行型計測技術は、近接目視点検の一部として活用が可能であり、走行型計測結果を活用することによりおおよその判定を行うができる。

次ページ以降に、点検要領に示される判定の目安と、その判定に活用できる走行型計測技術の結果をとりまとめた。

なお、近畿地方整備局管内の 6 トンネルに対して、これに基づき下記の各判定項目の判定を行っている。

- 外力
- 材質劣化
- 漏水
- 附属物
- 覆工スパン毎の健全性の診断

表 8.2.31　「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安に対する評価（１）[3] を加工

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性

①圧ざ・ひび割れ（外力）

【矢板工法の判定の目安】

付表-2.2 点検時(ひび割れの進行の有無が確認できない場合)の対策区分の目安例(矢板工法)

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ 幅[補足1] 5mm以上	幅 3～5mm	幅 3mm未満	長さ[補足2] 10m以上	長さ 5～10m	長さ 5m未満	対策区分
覆工	断面内			○	○	○	○	Ⅰ、Ⅱb、Ⅱa[補足3]
			○				○	Ⅱb、Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ[補足4]
		○				○		Ⅲ
		○			○			Ⅳ

【山岳工法の判定の目安】

変状状況	対策区分	備考
外力に起因したひび割れの進行性が認められる場合	Ⅲ or Ⅳ	少なくとも前回の定期点検結果等と比較して進行性がある
外力に起因したひび割れの進行性はないが、重点的な監視が望ましい	Ⅱa	
ひび割れの程度は軽微で、外力か材質劣化か判別が難しい状況	Ⅱb	

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	○
外力性判定	レーザ計測	○

・画像解析により、ひび割れ幅（0.3mm以上）、長さ、進行性、ひび割れ密度を判定可能

・コンタ解析により、外力影響の有無を判断。

②うき，はく離（材質劣化）

付表-2.6 うき・はく離等に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況[補足1]	打音異常[補足4] 有	打音異常 無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合のおそれがない	Ⅱb	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱb
		ひび割れ等が閉合しブロック化[補足2]している	Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化[補足3]している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
うき・はく離	レーザ計測	△※1
	内部欠陥レーダ	△※2
ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	○～△※3

※1：段差を伴う場合はさらにうき・はく離である可能性が高い。

※2：うきが懸念される箇所の抽出は可能であるが、現地にて打音検査等による確認が必要となる（幾分多めに抽出する設定）。

※3；ひび割れの形状や変色状況からうき，はく離が疑われる箇所として検出できる。

③変形，移動，沈下

付表-2.9 変形速度に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	変形速度 10mm/年以上 著しい	3～10mm/年 進行がみられる	1～3mm/年 進行がみられる～緩慢	1mm/年未満 緩慢	対策区分
覆工 路面 路肩	断面内				○	Ⅱb、Ⅱa
				○		Ⅱa
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
変形速度	レーザー計測	○

・1 回の計測で変形速度自体は検出できないが、推定は可能。変形の有無や変形モードは判定可能。

表 8.2.32　「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安に対する評価（２）[3] を加工

点検要領に示される変状の判定の目安	走行型計測の適用性

④鋼材腐食

付表-2.11　鋼材腐食に対する対策区分

Ⅰ		鋼材腐食が生じてない，またはあっても軽微なため，措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	表面的あるいは小面積の腐食があるため，監視を必要とする状態
	Ⅱa	孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため，重点的な対策を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		腐食により，鋼材の断面欠損がみられ，構造用鋼材として機能が損なわれているため，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ		腐食により，鋼材の断面欠損がみられ，構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため，緊急に対策を講じる必要がある状態

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
腐食面積	画像計測	○
断面欠損	内部欠陥レーダ	△※1

・鉄筋かぶりが薄い箇所や錆汁の有無を画像により検出可能。

※1；要注意箇所として抽出できる場合がある。

⑤巻厚の不足または減少、背面空洞

【有効巻厚の不足また減少に対する対策区分】

付表-2.15 巻厚の不足または減少に対する対策区分の目安例(矢板工法の場合)※1

箇所	主な原因	有効巻厚／設計巻厚※2 1/2 未満	1/2 ～2/3	2/3 以上	対策区分
アーチ･側壁	経年劣化 凍害 アルカリ骨材反応 施工の不適切など			○	Ⅱb
			○		Ⅱa、Ⅲ
		○			Ⅲ、Ⅳ

※1;点検要領では矢板工法の場合について、判定の目安例を示しているが、ＮＡＴＭも同様と考える。

※2；有効巻厚は、コンクリートの設計基準強度以上の部分とし、設計基準強度が不明な場合は 15N/㎟以上の部分とする。

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
覆工巻厚	非接触 レーダ計測	△~×※1
圧縮強度	―	×

※1；探査深度 45 ㎝程度までは巻厚不足が疑われる箇所の抽出することができる。45cm 以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダ探査が必要となる。

【突発性崩壊のおそれに対する対策区分】

付表-2.16 突発性の崩壊のおそれに対する対策分の判定例

覆工巻厚＼背面空洞深さ	大（30cm 以上程度）	小（30cm 未満程度）
小（30cm 未満程度）	Ⅲ，Ⅳ	―
大（30cm 以上程度）	Ⅱa，Ⅲ	

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
背面空洞深さ	非接触 レーダ計測	△～×※1

有効巻厚の不足・減少については定期点検（近接目視，打音検査）だけでは把握できなく、次の調査が必要となる。

地中レーダ探査，削孔調査，圧縮強度試験

※1；探査深度 45 ㎝程度までは背面空洞が疑われる箇所の抽出することができる。45cm 以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダ探査が必要となる。

表 8.2.33　「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安に対する評価（３）[3] を加工

点検要領に示される変状の判定の目安	走行型計測の適用性

⑥漏水による変状

付表-2.19 漏水等による変状に対する対策区分の目安例

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		対策区分[補足2]
		噴出	流下	滴水	浸出（にじみ）	有	無[補足1]	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
漏水・遊離石灰、つらら、側氷	画像計測	○
漏水量	—	×
滞水・土砂流出・凍結		△※1

・画像により漏水・遊離石灰、つらら、側氷の確認が可能。

※1；路面の画像撮影はできないため、漏水の度合い、変状箇所からの推定となる。

⑦附属物

表-解 7.2　附属物等に対する異常判定区分

異常判定区分	異常判定の内容
×	附属物等の取付状態に異常がある場合
○	附属物等の取付状態に異常がないか、あっても軽微な場合

付表-2.22　定期点検による異常判定区分一覧表

異常の種類	異常判定区分×	附属物本体	取付部材	ボルト・ナットアンカー類
破断	破断が認められ、落下するおそれがある場合		●	●
緩み、脱落	緩みや脱落があり、落下するおそれがある場合			●
亀裂	亀裂が確認され、落下するおそれがある場合	●	●	●
腐食	腐食が著しく、損傷が進行するおそれがある場合	●	●	●
変形、欠損	変形や欠損が著しく、損傷が進行するおそれがある場合	●	●	
がたつき	がたつきがあり、変形や欠損が著しく、落下するおそれがある場合	●	●	

●：該当箇所

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
異常の有無	画像計測	△※1

※1；附属物本体の亀裂、腐食、欠損は画像にて確認することができるが、附属物本体や取付部材等の緩みやがたつきなどは現地点検時の触診等で確認をする必要がある。
可視範囲の合いマークの確認は画像により確認可能。

表 8.2.34　判定の目安に対する評価の根拠（１）[6)]

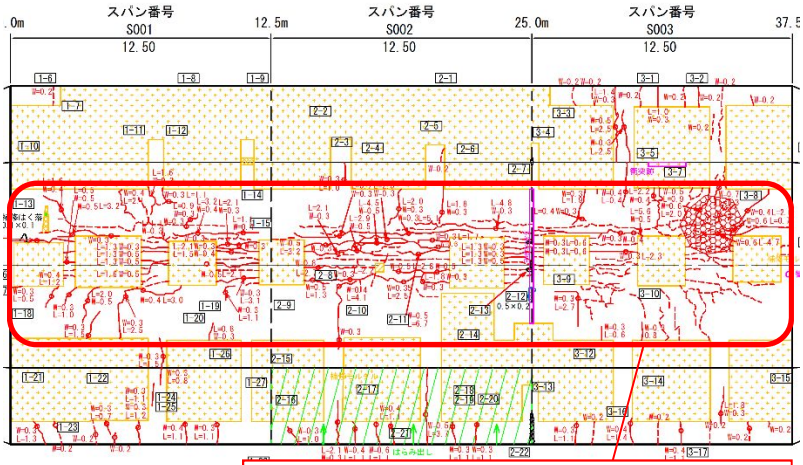
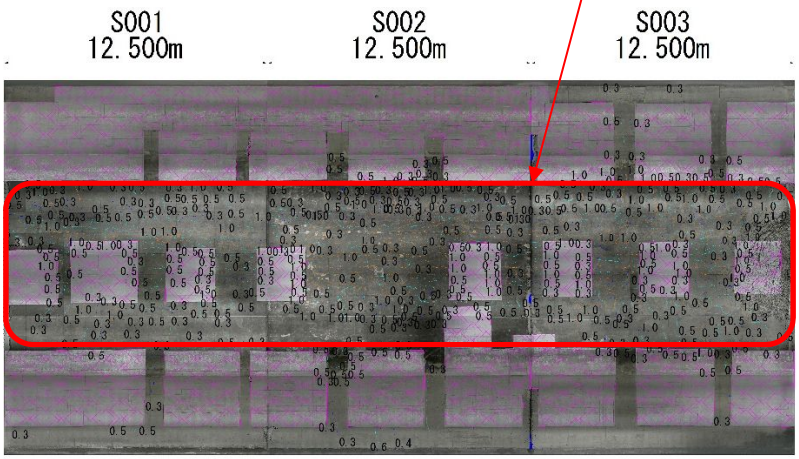
活用項目	支援技術による活用結果	備考
圧ざ・ ひび割れ	前回点検時（H29 年度）の変状展開図  天端部のひび割れが多数増えていることを確認 今回の走行型計測後の展開画像＋変状展開図  ・走行型計測後の展開画像＋変状展開図により、**前回点検時よりも天端部のひび割れが増えていることを確認**（現地点検時でもひび割れが増えていることを確認済） ・ひび割れが増えている結果を踏まえて、**外力性の変状である可能性があるため**、下記通り診断を実施することができた。 ①変状区分：材質劣化⇒外力に変更 ②対策区分；Ⅱb⇒Ⅱa に変更（次回点検時に進行状況を確認し対応を判断することとした）	城山 TN

表 8.2.35　判定の目安に対する評価の根拠（２）[6)]

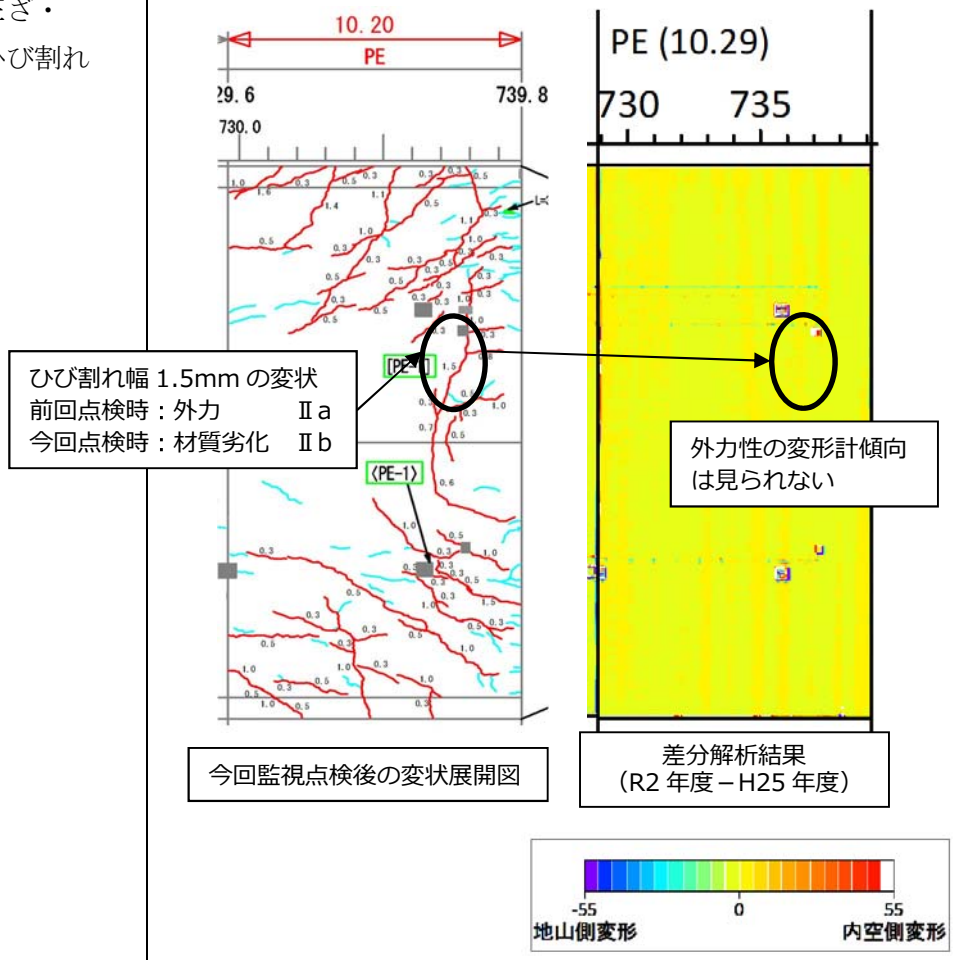
活用項目	支援技術による活用結果	備考
圧ざ・ ひび割れ	 ・前回点検時に、ひび割れ幅 1.5mm の変状が外力：Ⅱa と診断されていた。 ・今回点検時にて変状の進行性は確認されず、変形モード解析結果にて変形傾向が見られないことから、材質劣化：Ⅱb と診断を行った。 ・**変形モード解析結果を活用して外力性の有無の適切な判断**をすることができた。	和知 TN

表 8.2.36　判定の目安に対する評価の根拠（３）[6)]

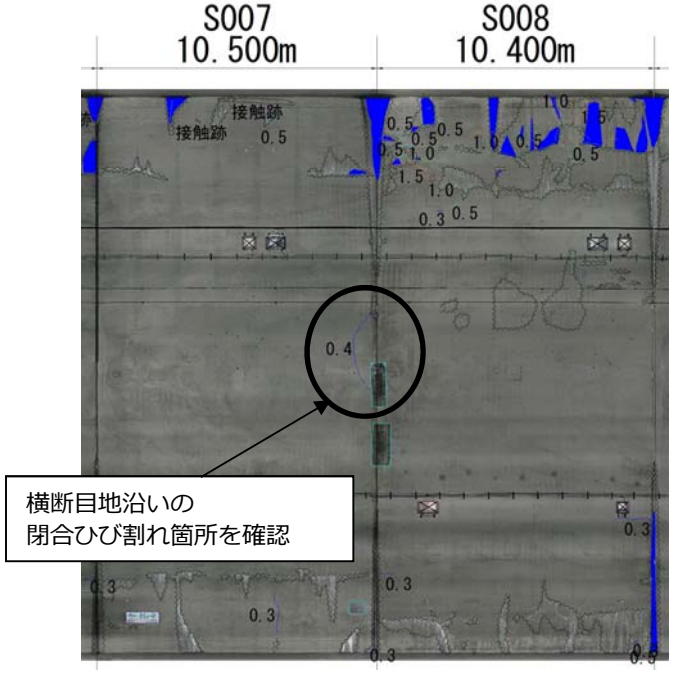
活用項目	支援技術による活用結果	備考
うき・はく離	今回の走行型計測後の展開画像＋変状展開図  	和知 TN
	・横断目地沿いの閉合ひび割れの変状を、展開画像＋変状展開図により確認することができた。	
	レーザ計測にてうき・はく離の懸念がある箇所は、本業務では確認されなかった。	

表 8.2.37　判定の目安に対する評価の根拠（４）[6)]

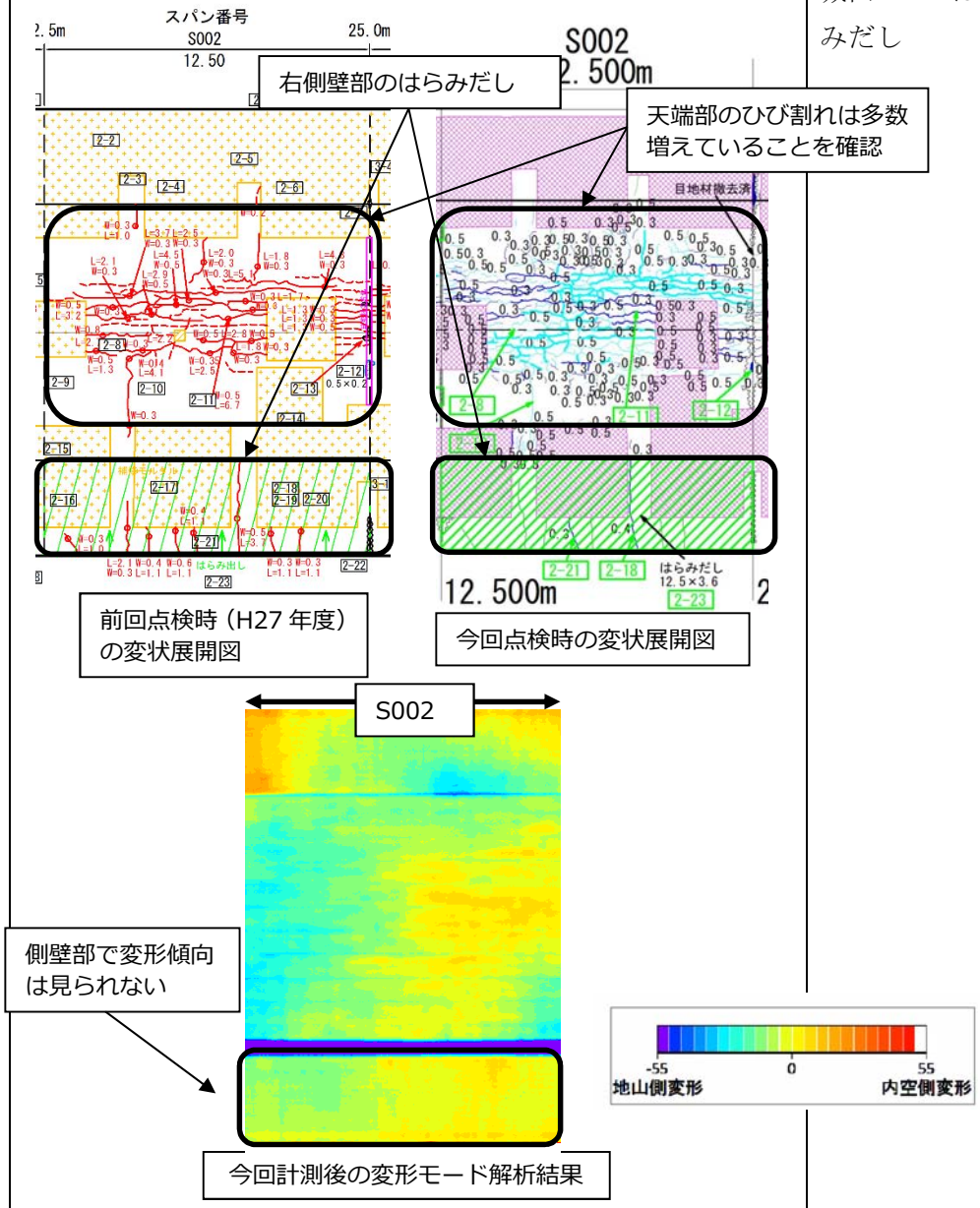
活用項目	支援技術による活用結果	備考
変形、移動、沈下		城山 TN のはらみだし
	・城山トンネルにて、右側壁部にて外力：はらみだしの変状が前回点検時に記録をされていた（変位の記録はなく変状範囲のみの定性的な記録のみ）。 ・変形モード解析結果では特段変形傾向は見られなかったが、**天端部のひび割れが多数増えており変状位置との相関性があることから、今回点検時の診断も外力：はらみだしとして診断**を行った。	

表 8.2.38　判定の目安に対する評価の根拠（５）[6)]

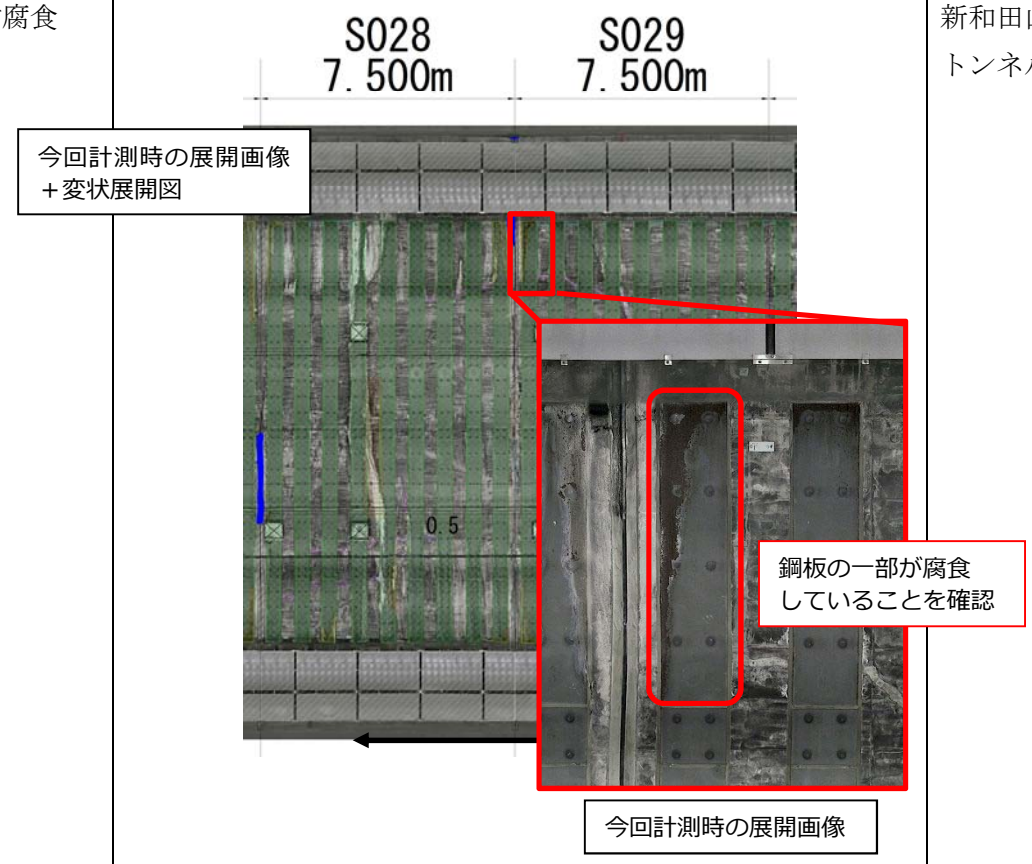
活用項目	支援技術による活用結果	備考
鋼材腐食	 ・展開画像にて事前に**補修・補強材である鋼板が一部腐食していることが確認**できた。 ・一部の腐食であるため、鋼板の機能としての機能に支障ないと判断し、Ⅱb 判定とした。	新和田山 トンネル

表 8.2.39　判定の目安に対する評価の根拠（６）[6)]

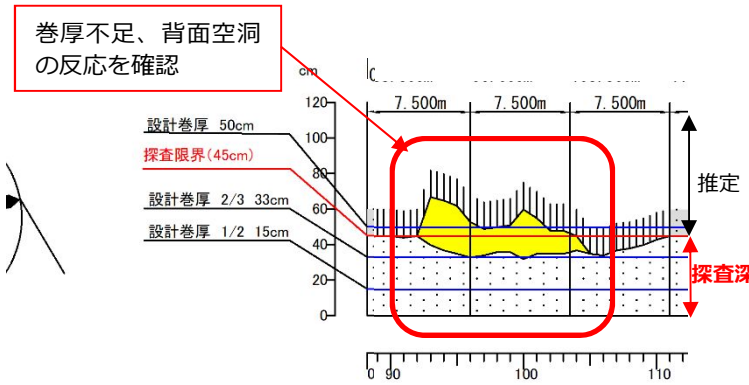
活用項目	支援技術による活用結果	備考
巻厚の不足または減少、背面空洞	 覆工スパン番号 / 巻厚不足に対する判定 / 突発性崩壊に対する判定 / 設計巻厚 S013: Ⅱb / Ⅰ or Ⅱa / 50 S014: Ⅱb / Ⅰ or Ⅱa / 50 S015: Ⅱb / Ⅰ or Ⅱa / 50 非接触レーダ探査の結果をもとに診断を実施 ・非接触レーダ探査にて、巻厚および背面空洞の反応が確認された。 ・非接触レーダ探査の解析結果をもとに巻厚不足に対する判定、突発性崩壊に対する判定について、診断を行うことができた。 ⇒非接触レーダ探査結果をもとに、覆工背面空洞調査を追加提案し本業務内で実施した。	新和田山トンネル

表 8.2.40　判定の目安に対する評価の根拠（７）[6)]

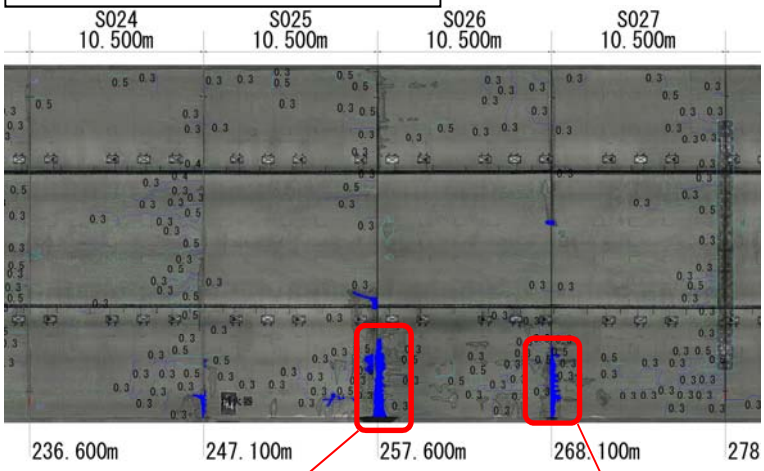
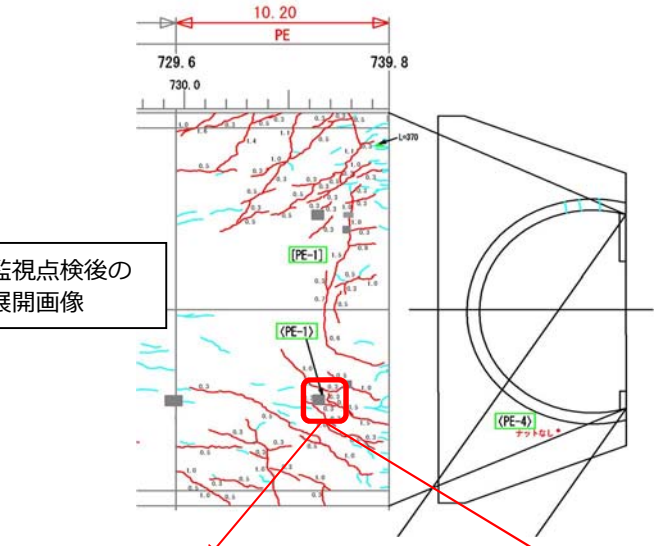
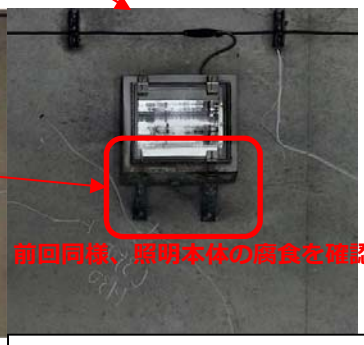
活用項目	支援技術による活用結果	備考
漏水	今回計測時の展開画像＋変状展開図  今回計測時の展開画像  ・展開画像にて事前に**目地沿いからの漏水を確認**できた。 ・また、錆汁のような変状も伴っていることも画像から確認することができた。 ・現地確認の結果、監査歩廊に滞砂があることが確認された。背面の地山の土砂流出の可能性も考慮して、Ⅱａ判定とした。	釜窪東 トンネル

表 8.2.41　判定の目安に対する評価の根拠（８）[6)]

活用項目	支援技術による活用結果	備考
附属物	 今回監視点検後の 変状展開画像  前回点検時（H30 年度）の写真 照明本体の腐食：×判定  今回計測時の展開画像 照明本体の腐食：×判定 ⇒未対策であることを確認できた ・展開画像にて事前に、**前回点検時にて照明本体の腐食：×判定となっている箇所を確認**することができた。	和知トンネル

8.2.4 まとめ

1) 走行型計測（画像、レーザに関して）を活用した効果について

(1) 延長の比較的長いとがやま TN と三谷 TN では、①事前の確認箇所の抽出⇒現地点検箇所の絞り込み、②事前の変状展開図の作成⇒スケッチの現地作業省力効果、により現地点検作業を早く終わらせることができた。

(2) 事前の変状展開図等による確認で、現地点検時の確認漏れ防止ができた。

(3) 「走行計測→変状抽出（着目点整理）→現地確認→展開図修正」の運用で効率化や精度の向上が図れた。

(4) 2 回目計測のトンネルについては、変形モード解析の差分解析によって断面の変形の進行性がないこと、ひび割れの進行がないことから変状の進行性を客観的に評価できた。

2) 今後の課題と展望（画像、レーザに関して）

(1) 初回点検においては、画像計測のみではコンクリートの模様とひび割れを見誤る恐れがあるので、現地での確認が必要である。

(2) 通常の点検作業と比べて、MIMM+点検は計測から変状展開図の作成が結構バタバタで現地までの準備まであまり余裕がない。少なくとも現地まで 2 か月くらいの余裕は必要と思われる（トンネル延長にもよる）。

(3) 変状の事前抽出作業について、前回の変状展開図と今回の変状展開図の差分を取るなどして、前回から変化があった箇所＝点検時の確認箇所、の整理について AI 等を活用して自動化ができると、事前の変状確認作業が簡略化できるため効果的である。

3) 走行型計測（レーダに関して）を活用した効果について

(1) SIP レーダは過検出設定にしており、打音しなくても良い健全部を除外するスクリーニングには有効である。

(2) SIP レーダで、過去にうきがみつかっていなかった箇所を検出することができた。

4) 今後の課題と展望（レーダに関して）

(1) SIP レーダは、10cm 以下のうきは検出できないので、打音でうきが見つかった場所でも、小さなうきの場合は検出が困難であった。

(2) 天端の縦断ひび割れに沿う小さいうきは検出できないが、そのようなうきは打音することになっているので、最終的に見落としはない。

(3) レーダは横断 1 m範囲程度を見ているので、1m をはずれた箇所については検出できない。何走行もすれば良いが精緻な検出を目的にしていないので、第三者被害が想定される天端付近を重点的にみている（空洞、SIP とも）

(4) 空洞レーダは、45cm が限界であるが、30 ㎝未満巻厚の場合、背面空洞を検出できる。空洞が 30 ㎝以上あることが検出できれば突発性崩壊の診断ができるといえる

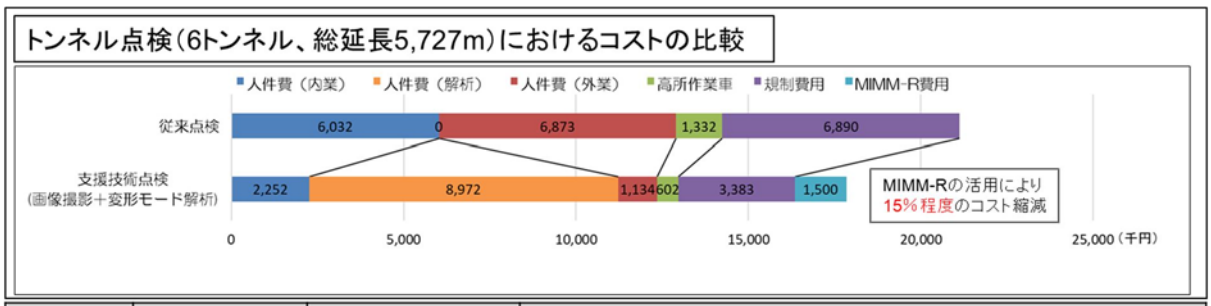
(5) 有効巻厚の検討は、強度がわからない以上、代替手法にはならない。

(6) 表層劣化の変色、ジャンカ有無、断面欠損、目地部などの低品質材質劣化状況などと総合して考えると、まったく×ではない可能性はある。

5)　総括



図 8.2.29　新技術活用のまとめ [6)]



項目	従来技術	点検支援技術活用時	具体的な効果および活用にあたっての課題
外業	近接目視 打音検査 スケッチ	走行型画像計測 走行型変形計測 近接目視 打音検査 展開図修正 空洞レーダ 内部欠陥レーダ	・詳細な覆工全面画像展開図を作成しているため、**変状の見落とし防止効果**とともに、**正確な変状位置情報を持った変状展開図**作成が可能となる。 ・近接目視、打音検査の際に現地点検箇所を省力化するために、事前の準備作業（重点着目箇所の抽出及び周知）が重要となる。 ・走行型で点検前に非接触レーダを実施することで、巻厚不足・空洞箇所の事前把握、および打音検査を除外できる**健全部スクリーニングが可能**。 ・打音検査の**省力化技術**、打音診断結果評価システム開発が求められる。
内業	診断，調書作成 変状展開図作成	診断，調書作成 画像展開図作成 変状展開図作成 変形モード解析 レーダ探査結果解析	・画像による正確な展開図の事前作成により、**帳票の効率化、省力化**に有効。 ・変形モード解析結果により**外力性の有無を適切に診断**することができる。 ・空洞レーダにより、**覆工厚、空洞の情報による客観的な診断**が可能。 ・補修設計を行う際に、設計者が覆工状況を画像で確認できるため、支障物との取り合い確認などが容易であり、正確な変状展開図が得られるため補修工事に際しての数量変更リスクも軽減される。
合計金額	21,126千円	17,844千円	・直接人件費＋直接経費 ・解析費用の人件費がコスト増となるが、**現場作業日数の大幅削減**による外業および交通規制費のコスト減により、トータルコスト削減が可能。
工程（外業）	16日	8日	・交通規制を伴う現場作業時間を大幅に短縮することが可能

図 8.2.30　コスト比較 [6)]

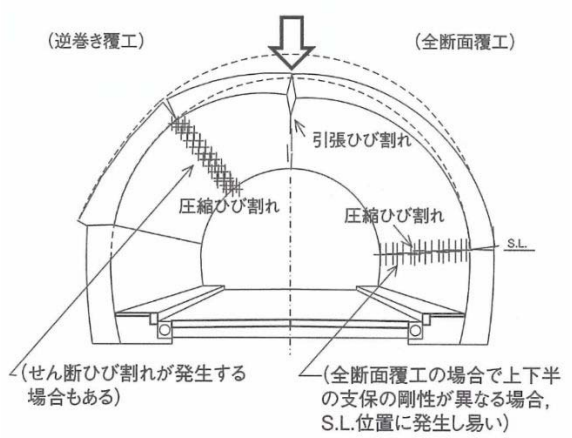
8.3 外力性変状の評価（検出）方法

本節では外力変状に着目して、これまでに研究した事例と R2 年度に近畿地方整備局で評価した事例を対象として、外力性変状の評価（検出）方法について述べる。

8.3.1 外力性変状の事例

外力性の変状、材質劣化の変状については、複数の基準書･図書類に外力作用模式図、ひび割れパターン等の事例が提示されている。外力性変状の評価を行うに際し、既存資料を整理･把握しておく必要性が高く、図 8.3.1～図 8.3.12 にその内容を抜粋する。

1) 緩み土圧



【特徴】
地山が緩み、覆工に荷重として作用する鉛直圧を主体とするものであり、天端に**縦断方向**のひび割れが生じるものが多い。

図 8.3.1 緩み土圧の例 [4] を加工

【変状の事例】

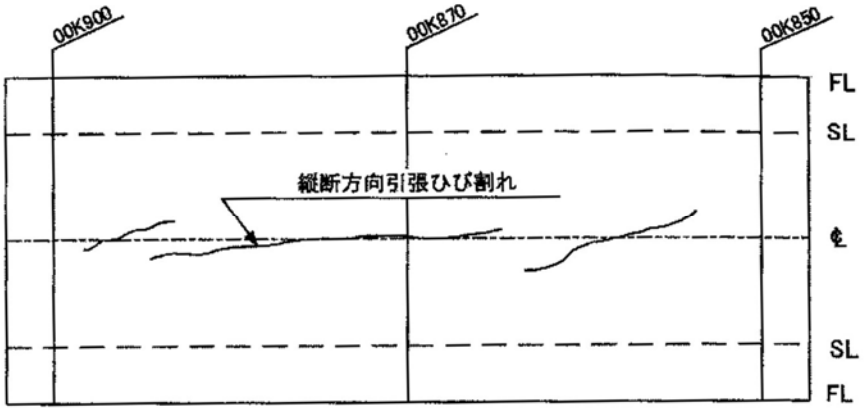

縦断ひび割れ


水平ひび割れ


斜めひび割れ（せん断）

図 8.3.2 緩み土圧の変状事例 [7] を加工

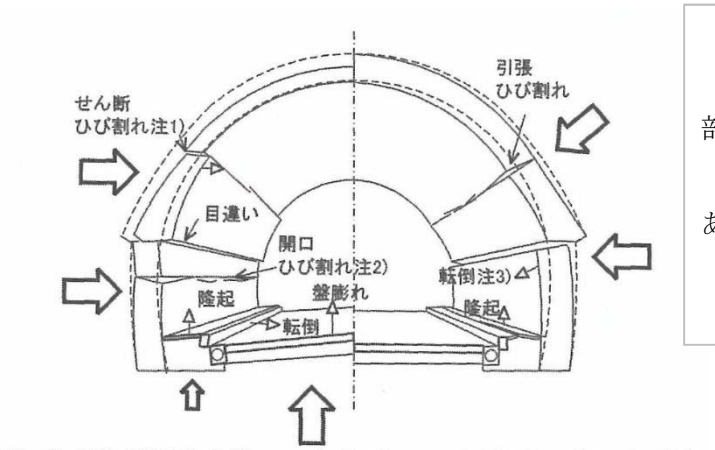
【ひび割れパターン】



(a)　緩み土圧の変状展開図の例[6)]

図 8.3.3　緩み土圧の展開図例 [4)]

2)　膨張性土圧



注 1)　覆工巻厚が薄い，またはコールドジョイントがある場合に発生しやすい。
注 2)　直壁に発生しやすい。
注 3)　水平打継ぎ目部の充填が不十分な場合に発生しやすい。

【特徴】

左右の側壁、あるいはアーチ左右の肩部に**複雑な水平ひび割れ**が生じやすい。

アーチと側壁の間に水平打ち継ぎ目がある場合には**段差が生じる**ことがある。

図 8.3.4　膨張性土圧の例 [4)] を加工

【変状の事例】



図 8.3.5　膨張性土圧の変状事例 [7] を加工

【ひび割れパターン】

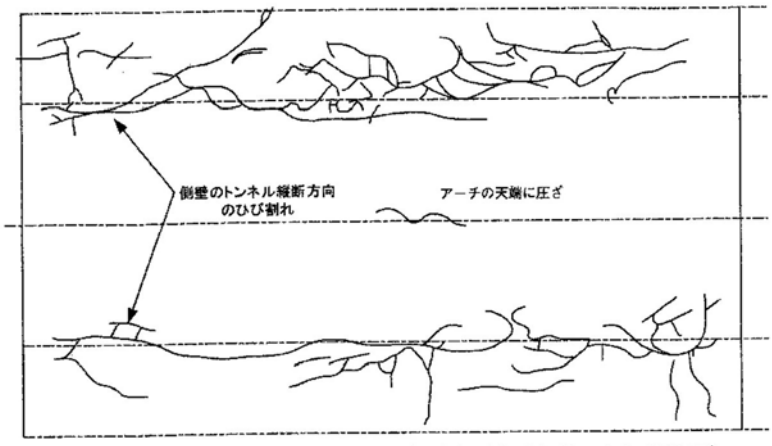
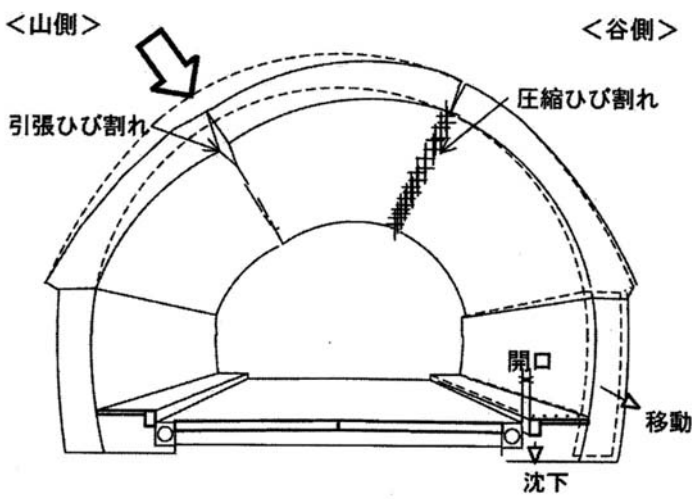


図-2.2.9　膨張性土圧による変状展開図の例（文献[6]を加筆修正）

図 8.3.6　膨張性土圧の展開図例 [4]

3)　偏土圧



【特徴】

偏土圧は斜面下や傾斜した層理の直交方向に緩みが生じる場合や、トンネルの支持地盤が左右不均質な場合、近接施工に起因する場合などに発生する。

偏土圧の作用によって覆工の**アーチ部**にひび割れが生じるとともに、覆工の変形が進行すると**反対車線側にひび割れが生じる**ようになる。

図 8.3.7　偏土圧の例 [4] を加工

【変状の事例】



ひび割れの密集



段差を伴うせん断ひび割れ

図 8.3.8　偏土圧の変状事例 [7] を加工

【ひび割れパターン】

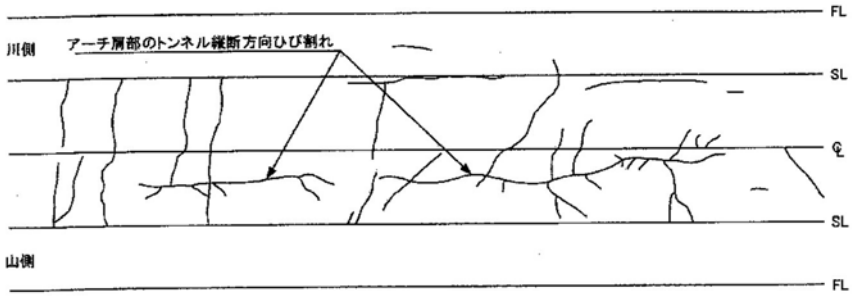


図-2.2.17　偏土圧による変状展開図の例（文献[6]を加筆修正）

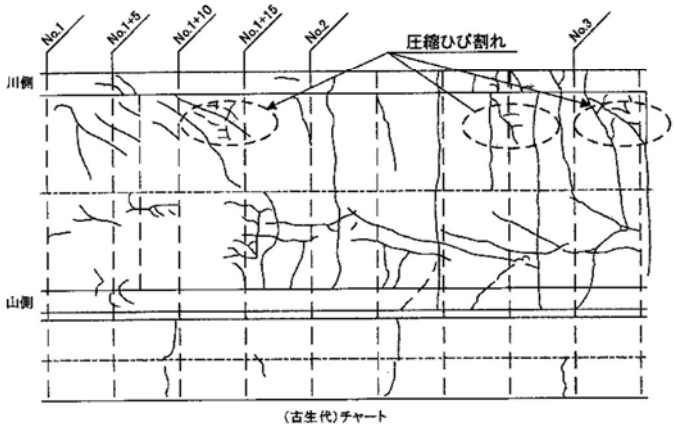
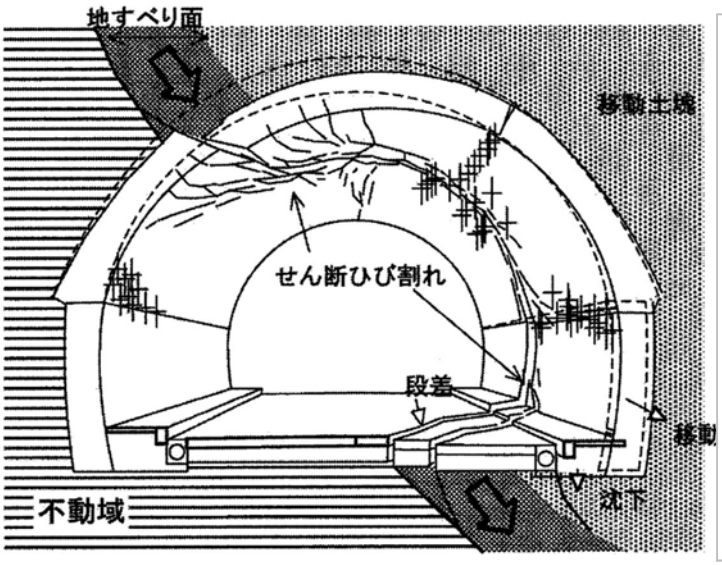


図-2.2.18　偏土圧と支持力不足の複合作用による変状展開図の例

図 8.3.9　偏土圧の展開図例[4)]

4)　地すべり



【特徴】

地すべりを横断する場合や、地すべりを縦断する場合に土圧が作用する。

覆工には**段差を伴う縦断方向、横断方向、斜め方向等、複雑なひび割れ**が発生し、**覆工コンクリート片がはく落**する。

さらにトンネル断面方向で中心線の水平移動や沈下等が加わり、変状の規模としては大きなものとなる。

図 8.3.10　地すべりの例[4)]を加工

【変状の事例】

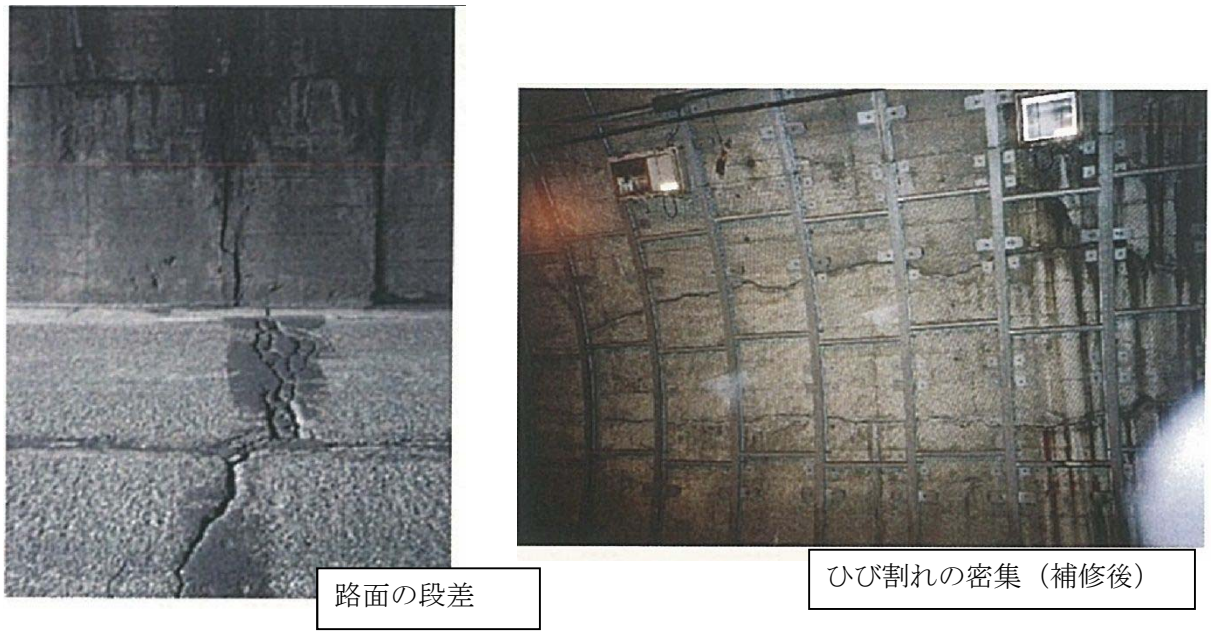


図 8.3.11　地すべりの変状事例 [7] を加工

【ひび割れパターン】

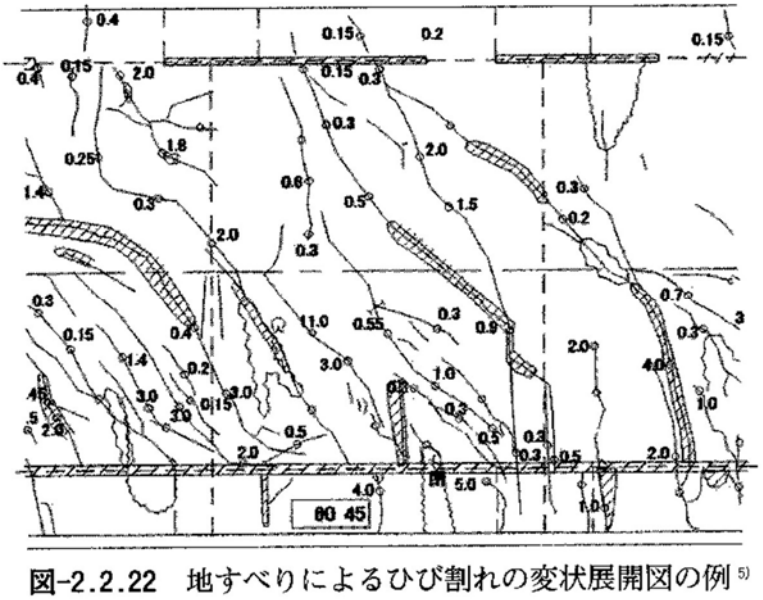


図 8.3.12　地すべりの展開図例 [4]

5)　ひび割れの種類

土木研究所資料にひび割れの方向、発生位置･形態に着目した変状発生原因の考察がなされており、以下に紹介する。

① 縦断方向 ひび割れ（図 8.3.13 参照）
② 斜め方向 ひび割れ（図 8.3.14 参照）
③ 横断方向 ひび割れ（図 8.3.15 参照）

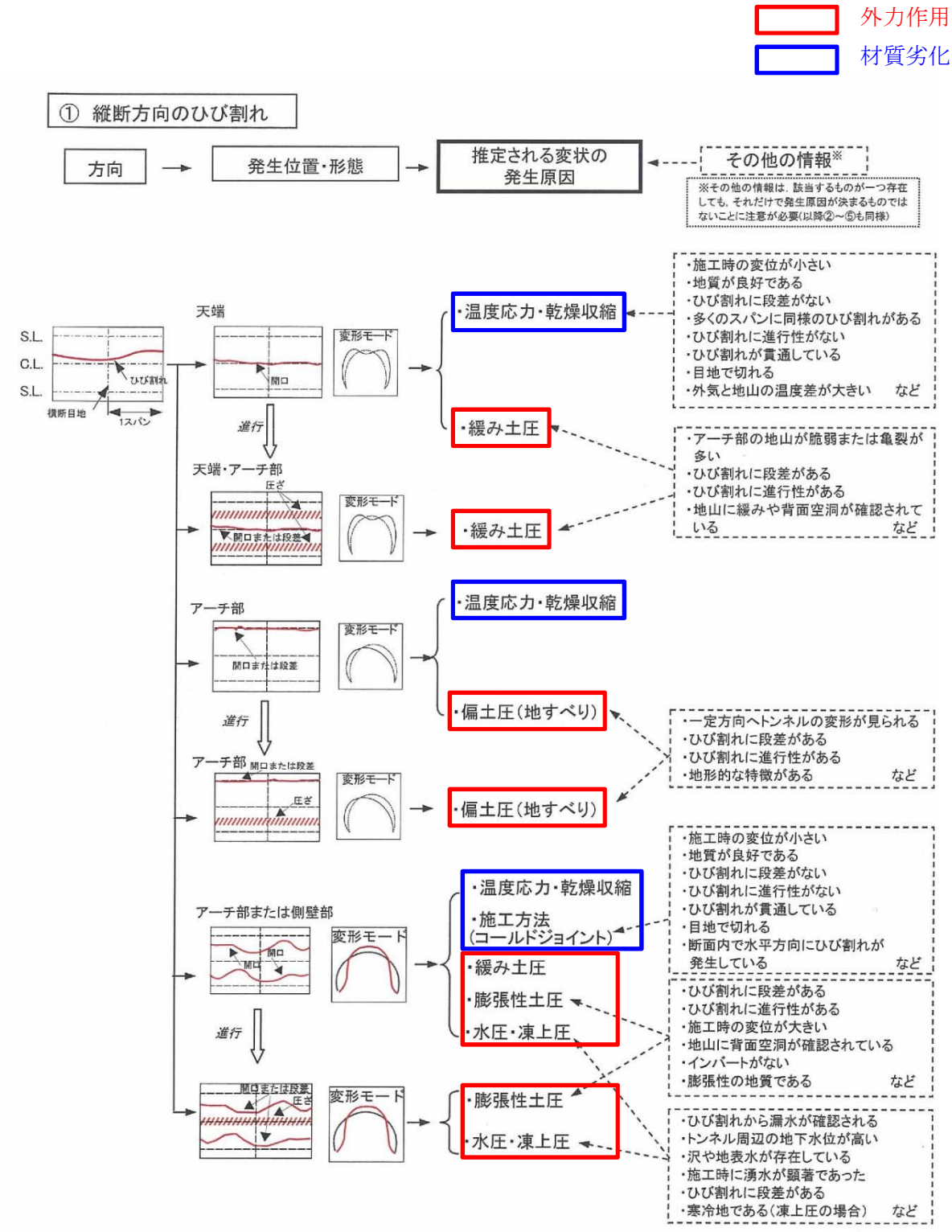


図 8.3.13 縦断方向のひび割れの特徴[4]を加工

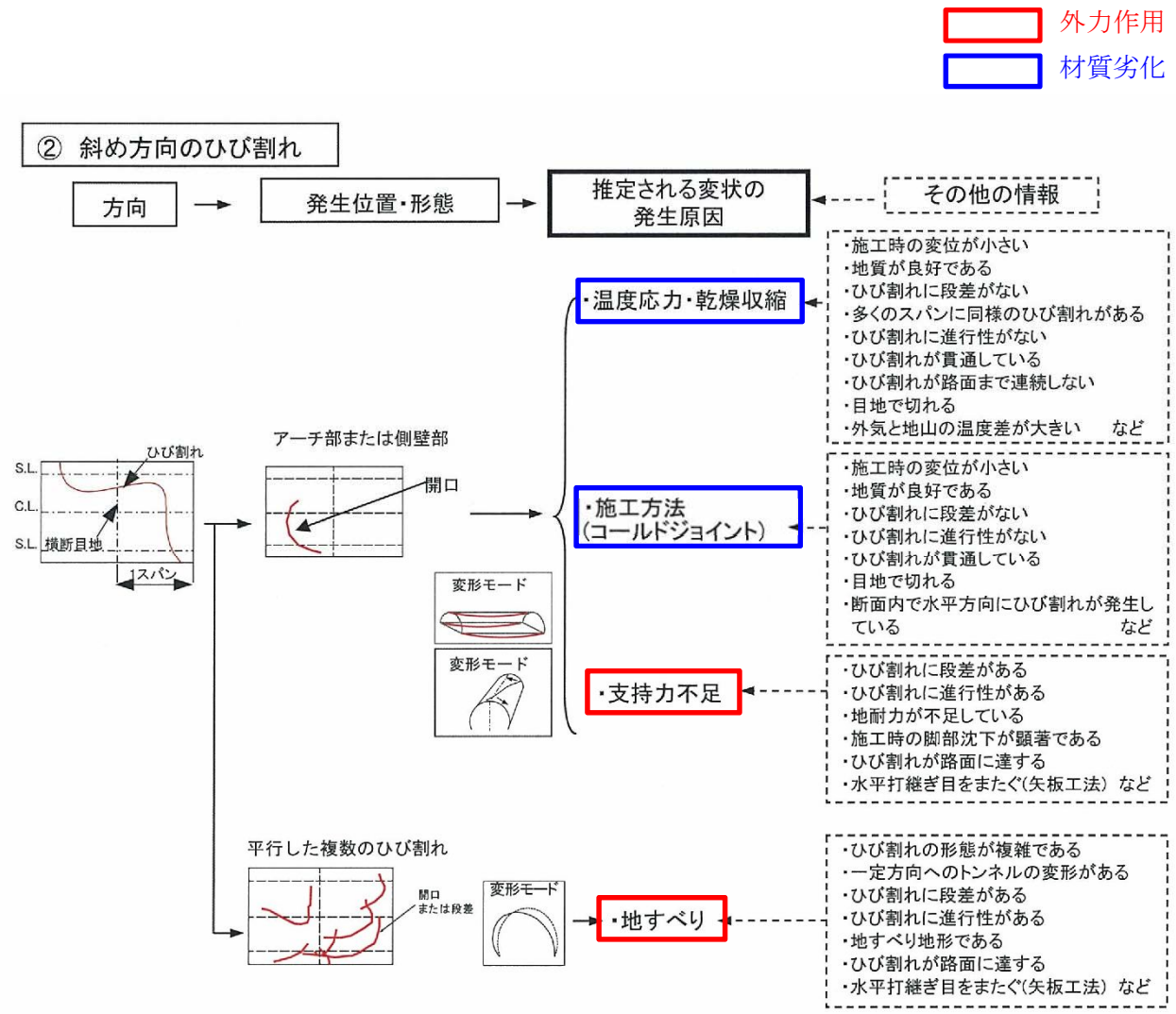


図 8.3.14　斜め方向のひび割れの特徴[4] を加工

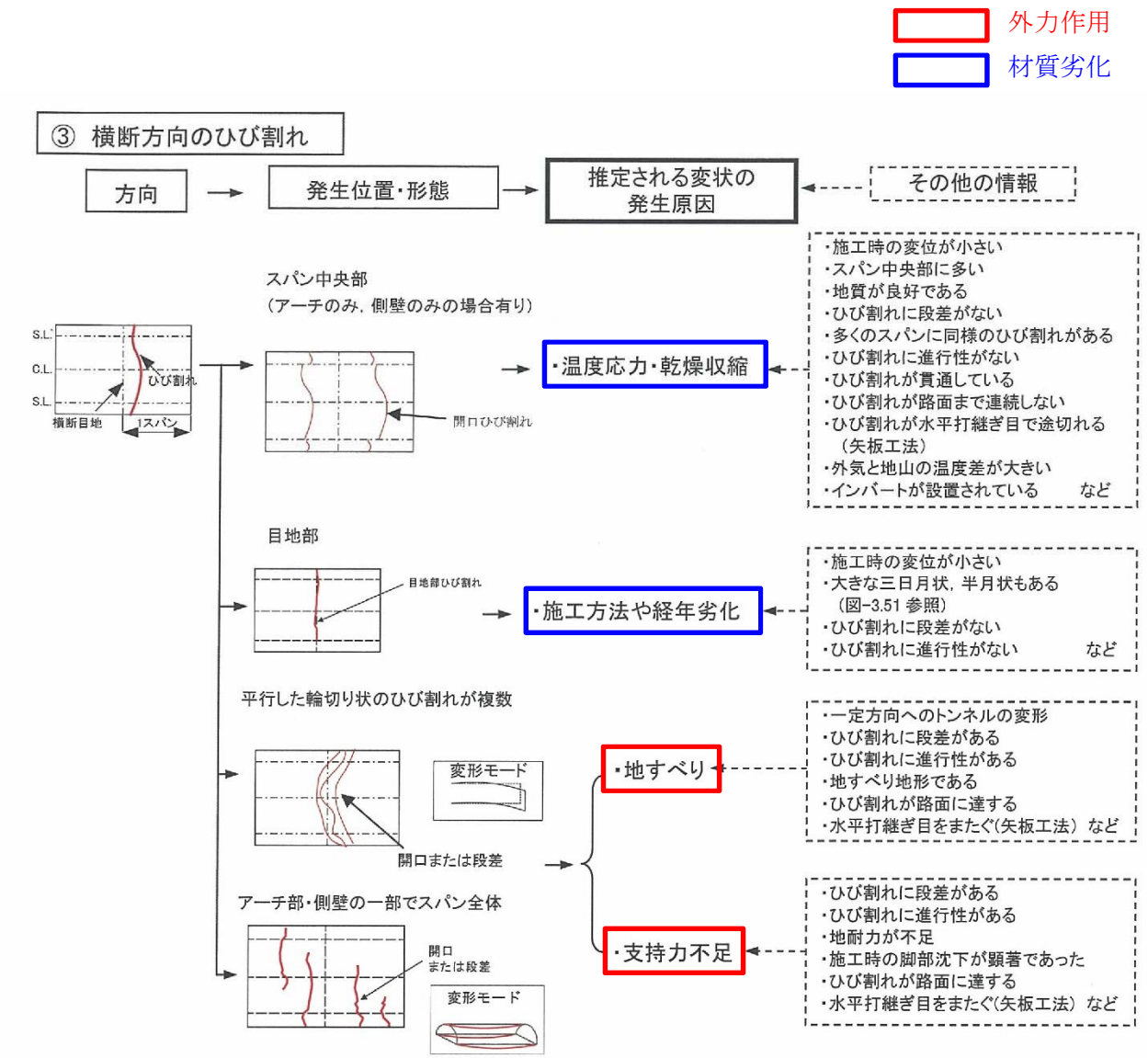
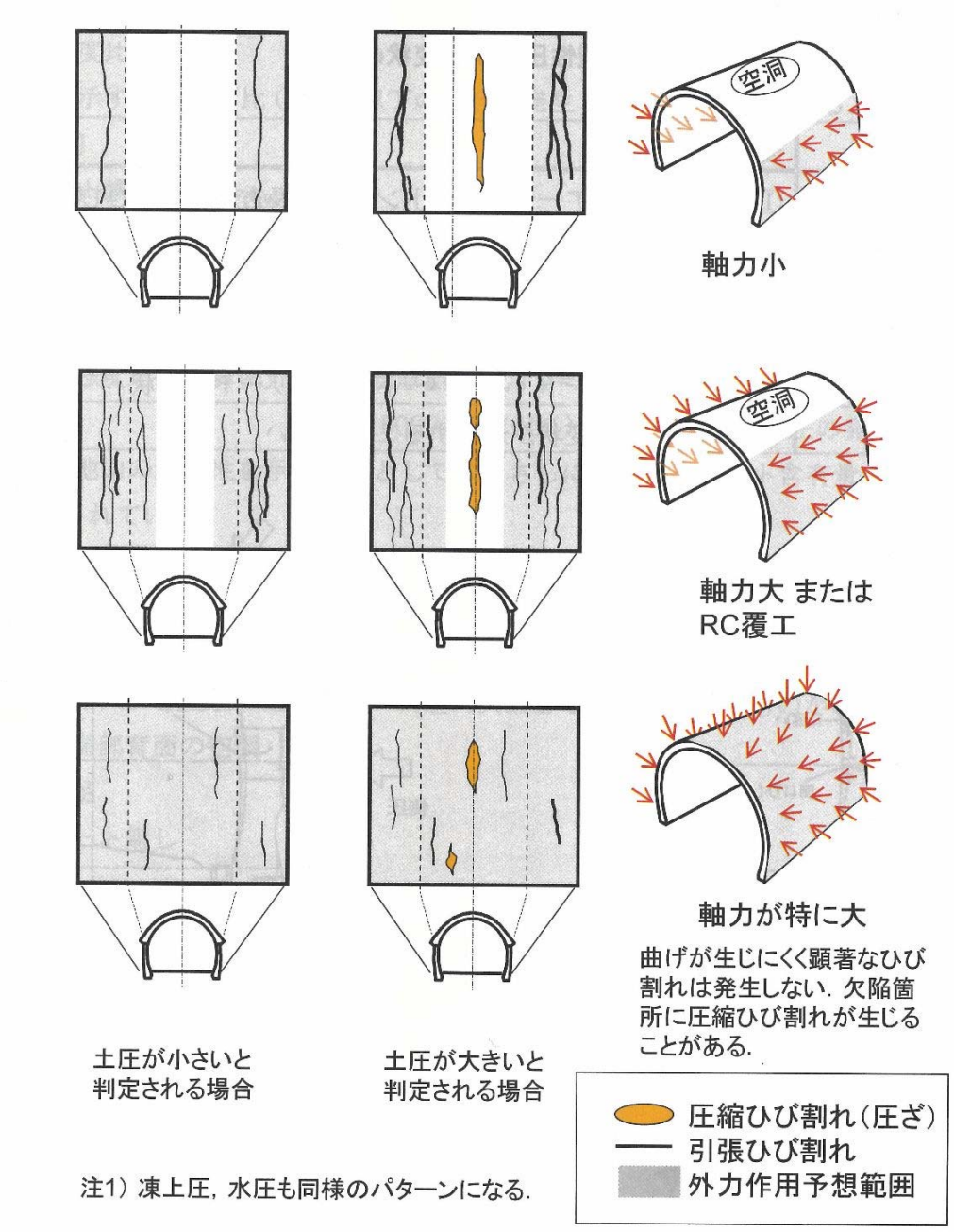


図 8.3.15　横断方向のひび割れの特徴 [4] を加工

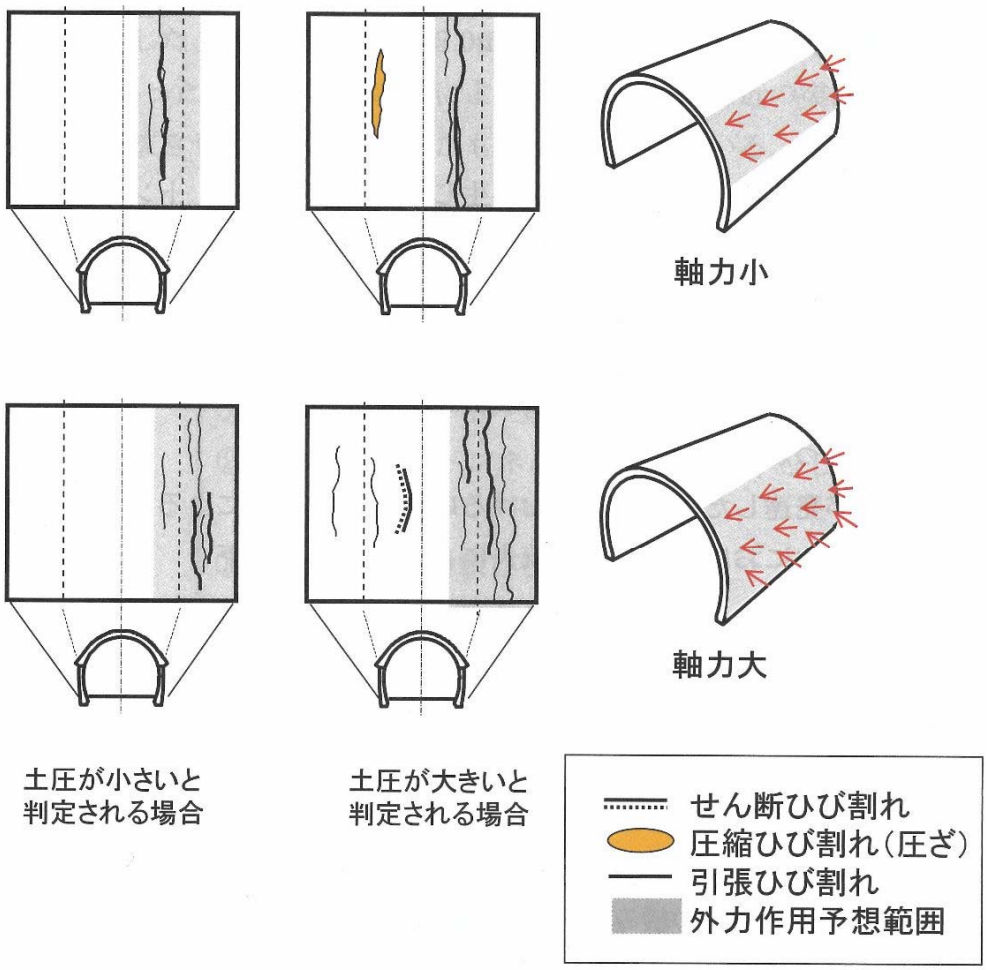
6) 鉄道トンネルの例

鉄道総合技術研究所の資料 ① 塑性圧、② 偏圧、③緩み土圧　作用時の <ひび割れ>パターン、外力作用模式図を図 8.3.16～図 8.3.18 に示す。



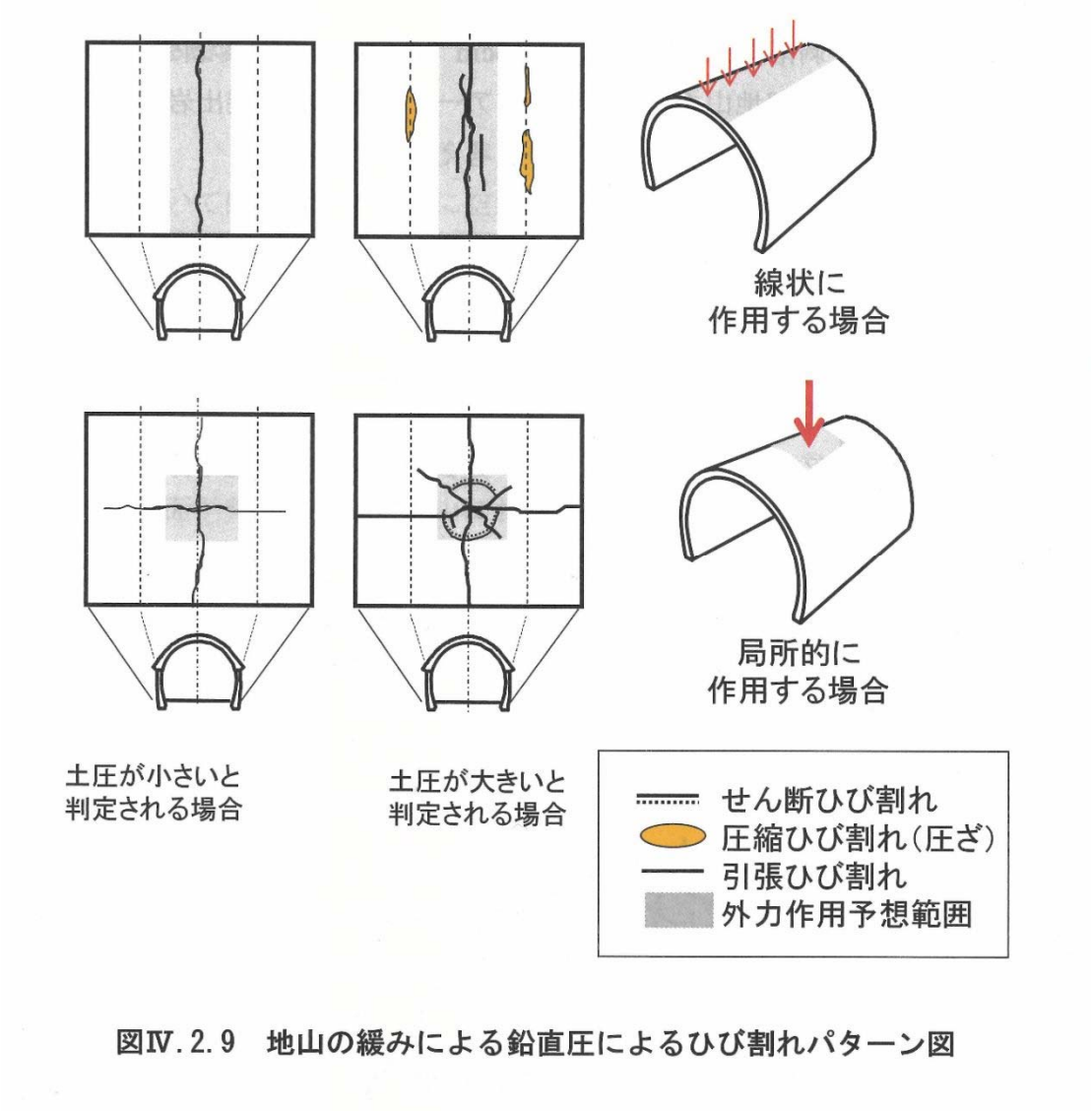
図Ⅳ.2.5　塑性圧によるひび割れパターン図

図 8.3.16　塑性圧のひび割れの特徴 [8)]



図Ⅳ.2.7　偏圧・斜面クリープによるひび割れパターン図

図 8.3.17　偏圧・斜面クリープのひび割れの特徴 [8)]



図Ⅳ.2.9　地山の緩みによる鉛直圧によるひび割れパターン図

図 8.3.18　鉛直圧のひび割れの特徴 [8)]

7)　高速道路、土木研究所資料

以下、「NEXCO 設計要領」、「土木研究所変状対策工マニュアル」からのそれぞれのひび割れの特徴を、図 8.3.19～図 8.3.21 に示す。

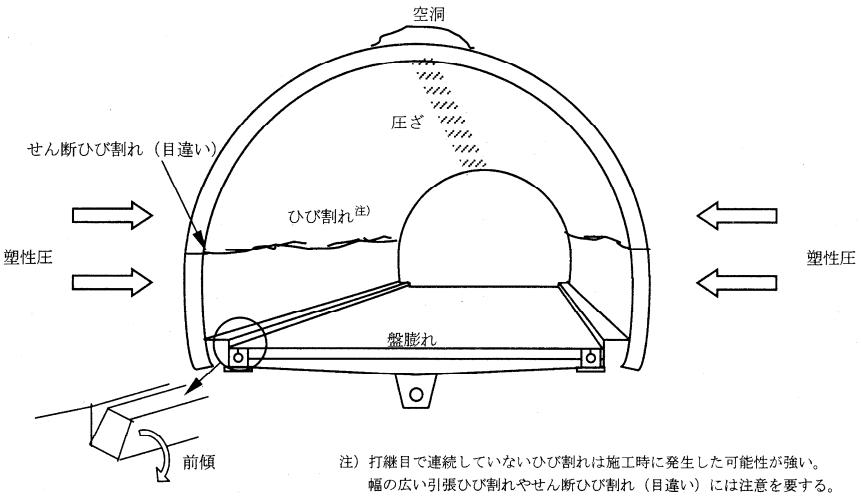


図 2-2.1　塑性圧による変状

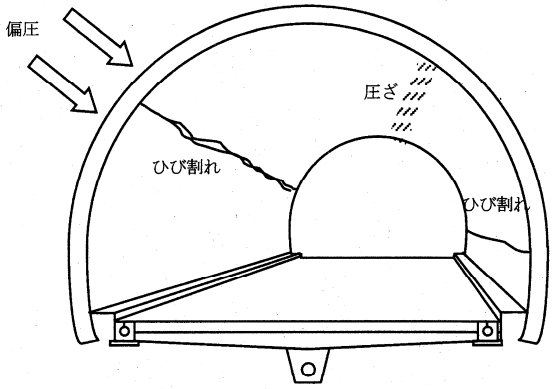


図 2-2.2　偏圧による変状

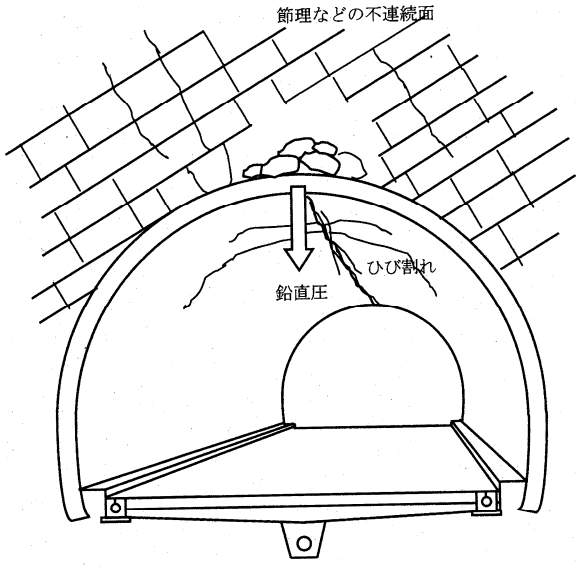
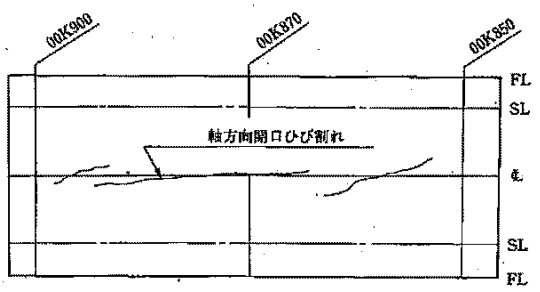


図 2-2.3 **地山の緩みによる鉛直圧による変状**

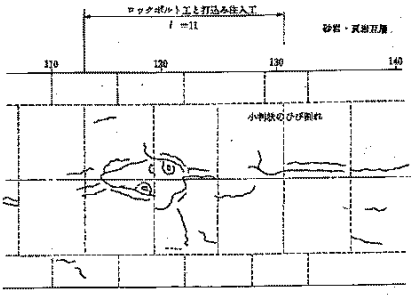
図 8.3.19　高速道路会社資料に示されるひび割れの特徴 [9)]

(1)緩み土圧

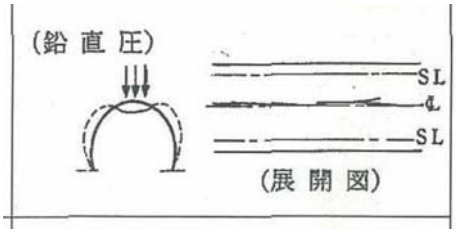
緩み土圧は、地山が自然に緩み、自重を支えられなくなり、覆工に荷重として作用する鉛直圧を主体とするものである。このため、アーチの天端にトンネル縦断方向の開口性ひび割れを生じるものが多い。



変状展開図の例１

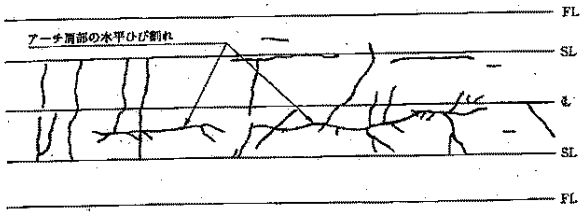


変状展開図の例２（局所的に作用する場合）

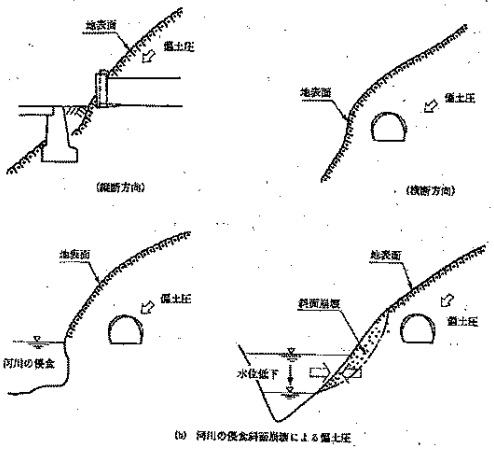


(3)偏土圧、斜面葡行（しゃめんほこう）

斜面下や、傾斜した片理や直交方向に緩みが生じて偏土圧が作用し、トンネルが変状するものである。山側アーチ肩部に水平開口ひび割れ、段差が生じることが多い。



変状展開図の例



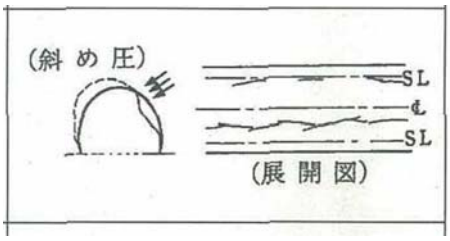
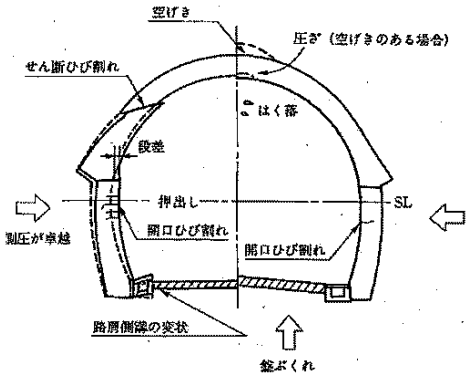


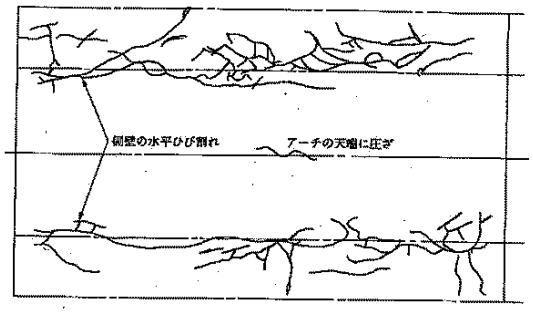
図 8.3.20　土木研究所資料が示すひび割れの特徴（1）[10)]

(4)膨張性土圧（側壁、盤ぶくれ）

膨張性土圧による変状では、左右の側壁あるいはアーチの両肩に、複雑な水平ひび割れが生じやすく、アーチと側壁間に打継目がある場合には段差が生じることがある。



標式断面図



変状展開図の例

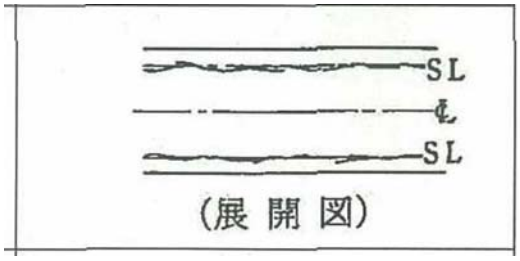


図 8.3.21　土木研究所資料が示すひび割れの特徴（2）[10)]

8)　外力性以外のひび割れの特徴

外力性以外に起因するひび割れの事例とその特徴を図 8.3.22 に示す。

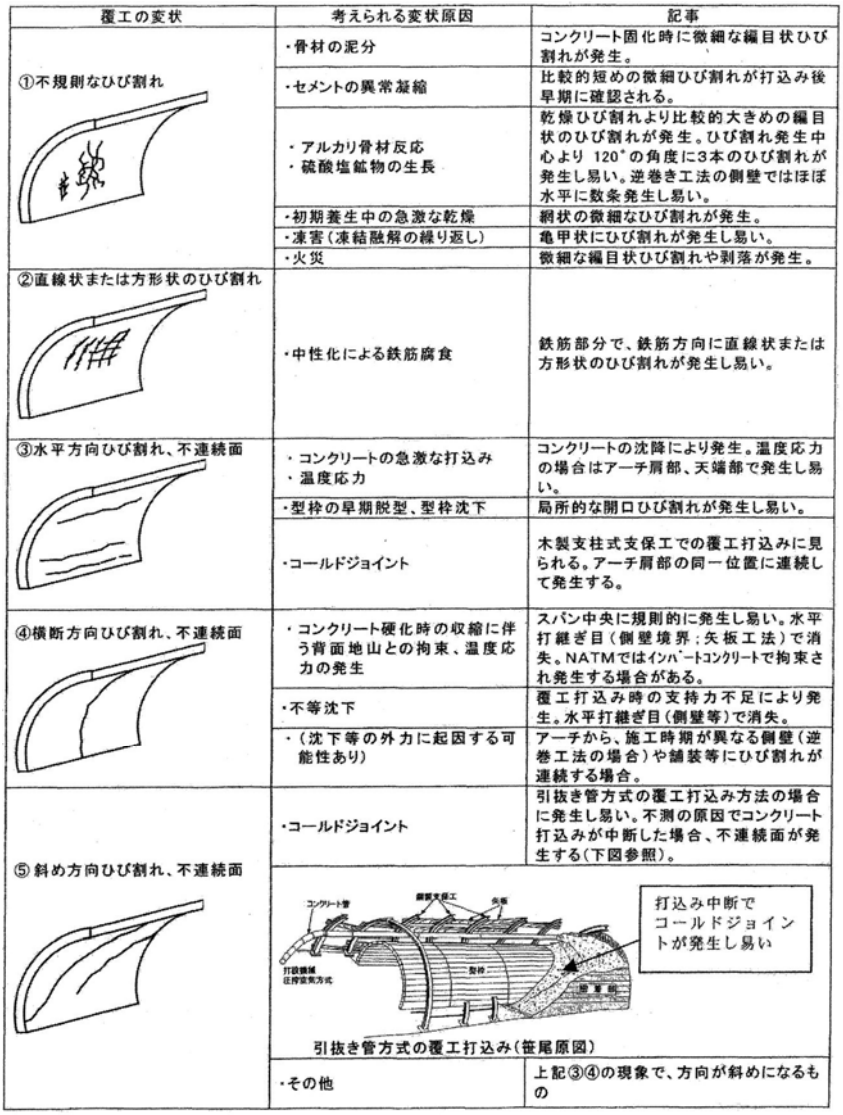


図 8.3.22　外力性以外のひび割れの特徴 [11)]

8.3.2 過年度の研究内容、外力性変状の評価

H25 既往研究において、外力性変状の評価手法が整理されており、その内容を以下に示す。

1)　レーザ計測の評価方法

(1) コンター図の扱い

本研究プロジェクトでは、レーザ計測の解析結果の標準的なアウトプットを図 5.2.15 に示すものと定めている。これは、過去の検討においてレーザ解析方法によっては判断を誤ることがあり、多面的な評価が重要であると認識しているためである。さらに、局所的な変形が評価できるようにスパン毎の推定出来形に対してコンター図（図 5.3.1）を追加している。

2) 評価事例　1

図 8.3.23 の変状評価事例を以下に示す。

(1) スパン毎平均断面コンターの評価

① スパン c の①-1 は、段差発生箇所である。コンター図では、赤色と青色が帯状に分布している。

② スパン d の①-2 は、①ほど顕著ではないが赤色と青色が帯状に分布している。段差の発生はみられないものの、局所的に変形しているものと評価できる。

(2) スパン毎軸合せコンターの評価

① スパン毎平均断面と比較してコンター図の色相が異なることから、スパン b とスパン c 間において、偏圧もしくは横ずれが生じている可能性がある。

(3) 平滑化軸合せコンターの評価

① スパン毎軸合わせと同様にスパン b とスパン c 間において色相が異なることから、偏圧もしくは横ずれを生じている可能性がある（②-1）。

② スパン c とスパン d の肩部において、スパン毎平均断面と同様の赤色の色相が見られることから、偏圧を受けている可能性がある（②-2）。

③ 平滑化軸合せコンター図でみられる③-1 の赤色部分は、スパン毎平均断面、スパン毎軸合せの両コンター図にはみられない。このような場合は、スパン c～スパン e の変位の影響により覆工に水平差が生じたか、あるいは、セントルのズレに起因するものと考えられる。セントルのズレについては、評価事例 2 で例を示す。

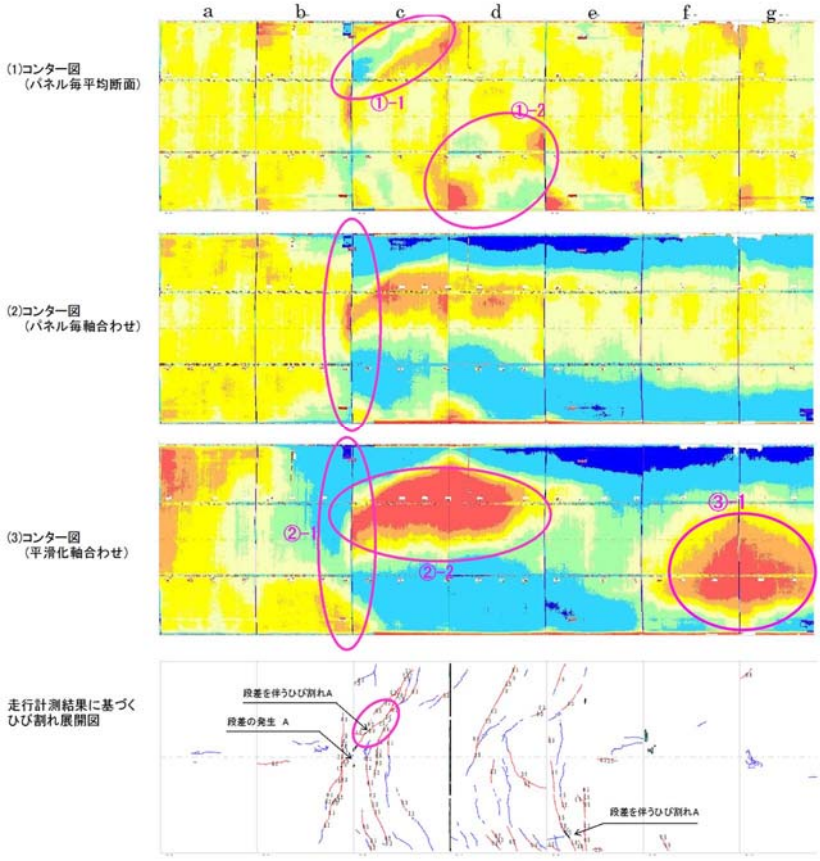


図 8.3.23　変状評価事例 [1)]

3) 評価事例　2

図 8.3.24 に示す事例は、スパン毎軸合わせコンター図において、大きな色調の変化が認められないのに対し、平滑化軸合わせコンター図においては赤色、青色の部分が広く確認される。

図中の（2）軸座標（平滑化軸との水平差）に着目すると、スパン軸が平滑化軸から大きくずれており、施工時のセントルセットのズレが平滑化軸合わせコンター図の色の変化の原因であることがわかる。このように、コンター図を評価･分析する際は、平滑化軸とスパン軸のズレにも注意する必要がある。

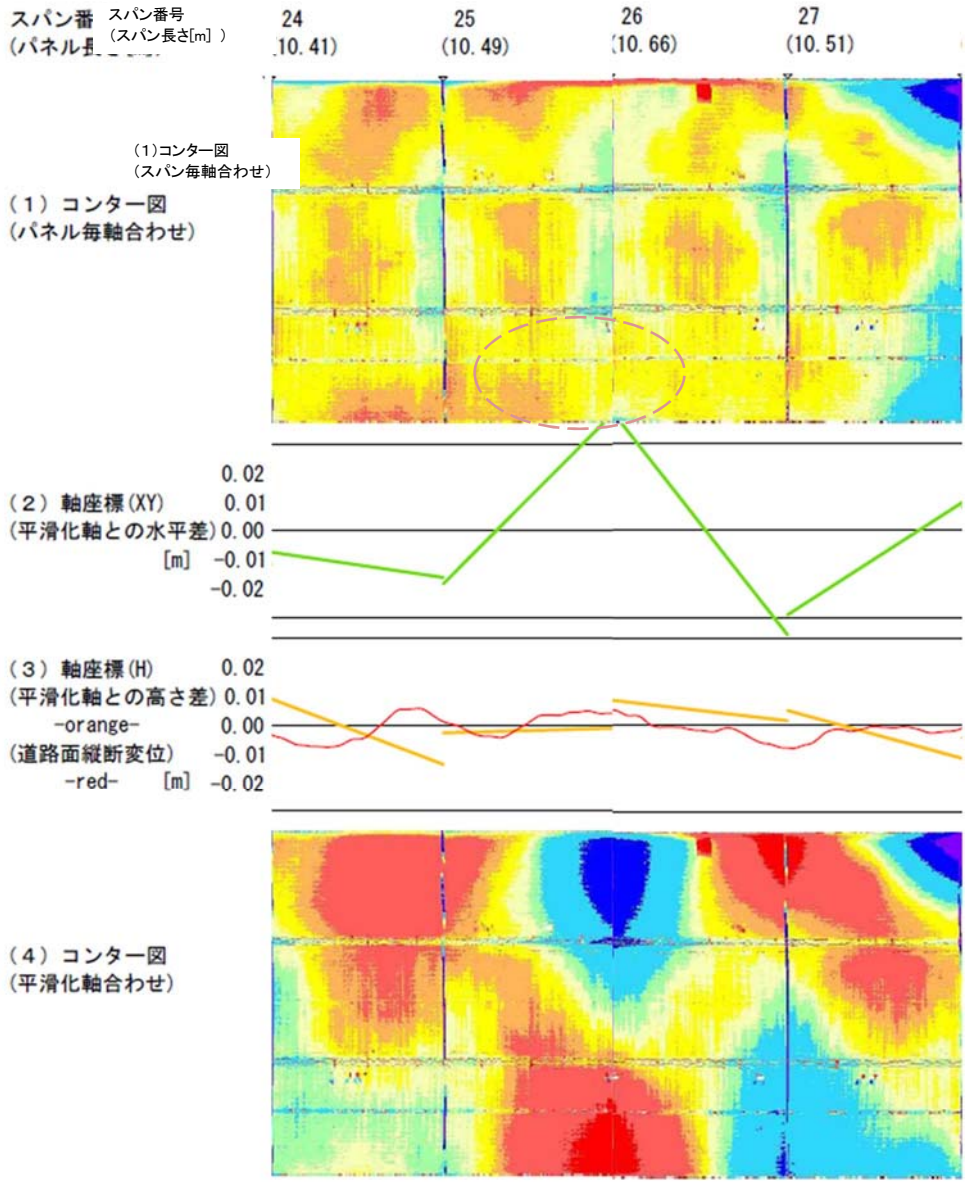


図 8.3.24　平滑化軸ズレ（セントルのズレ）によるコンター図の例 [1)]

4) レーザ計測評価のまとめ

これまでの検討結果に基づき、本研究で得られた成果を以下に示す。

(1) レーザ計測のコンター図から、外力の影響やひび割れの原因を把握することが可能

① 3 種類のコンター図を総合的に判断することにより、覆工面の凹凸変形モード、外力作用の懸念箇所が把握できる。

② なお、最終的な判断は、画像、ひび割れパターン（形状、幅、長さ）と変形モードとの整合性（調和）、及びトンネル周辺の地形・地質、施工記録、点検・補修履歴等の情報を収集し、多面的かつ総合的に評価することが重要である。

③ 外力影響の可能性が高い箇所、怪しい場所を特定し、凹凸解析をすることにより、段差等の検出が可能であり、分解能を細かくした場合、0.5～1.0 ㎜の段差が検出できる。

(2) レーザ計測解析により、変状進行性の判定が可能

① 外力による変状の健全度判定においては、変形速度が一つの目安となる。

② レーザ計測を複数回実施することによって、初回を初期値としたある期間での変形量（変形モード）を定量的に差分評価することができ、変状の進行性を判定することが可能となり、健全度評価の精度が向上し、効率的な維持管理の方針決定（点検頻度、モニタリング、放置 or 対策実施 等）につながる。

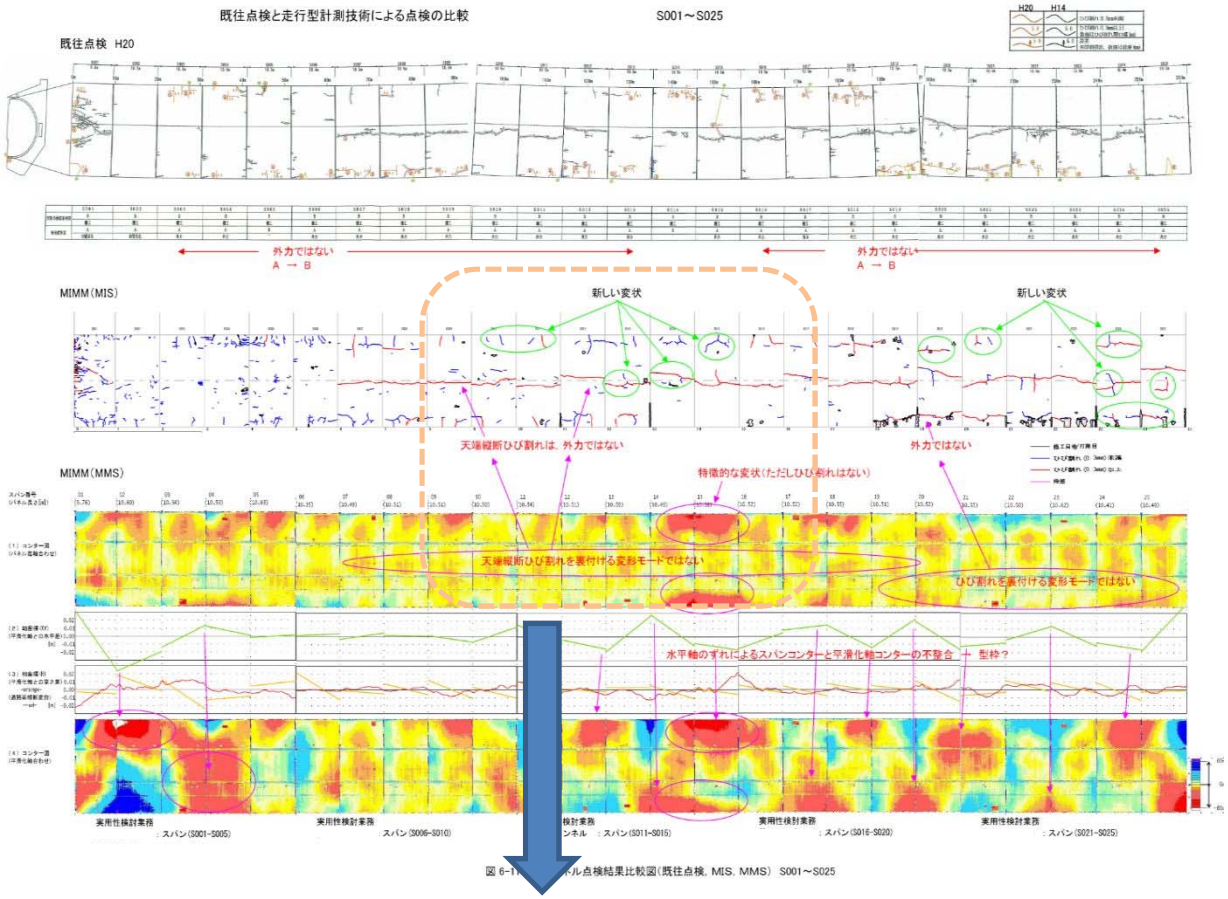
5) 実トンネルにおける外力性変状評価事例 [1)]

H25 既往研究において調査を行ったトンネル（表 8.3.1、A~F トンネル）のうち、外力性変状を評価した事例（A,B,D,E の 4 トンネル）を、図 8.3.25～図 8.3.29 に示す。

表 8.3.1 調査・計測 対象トンネル

名称	種別	竣工年	延長（m）	施工法
Aトンネル	一般国道	平成 15 年	460	ＮＡＴＭ
Bトンネル	一般国道	昭和 31 年	291.5	在来工法
Cトンネル	一般国道	平成 4 年	1150	ＮＡＴＭ
Dトンネル	一般国道	昭和 38 年	228	在来工法
Eトンネル	一般国道	平成 2 年	1110	ＮＡＴＭ
Fトンネル	一般国道	平成 17 年	970	ＮＡＴＭ

(1) A トンネル



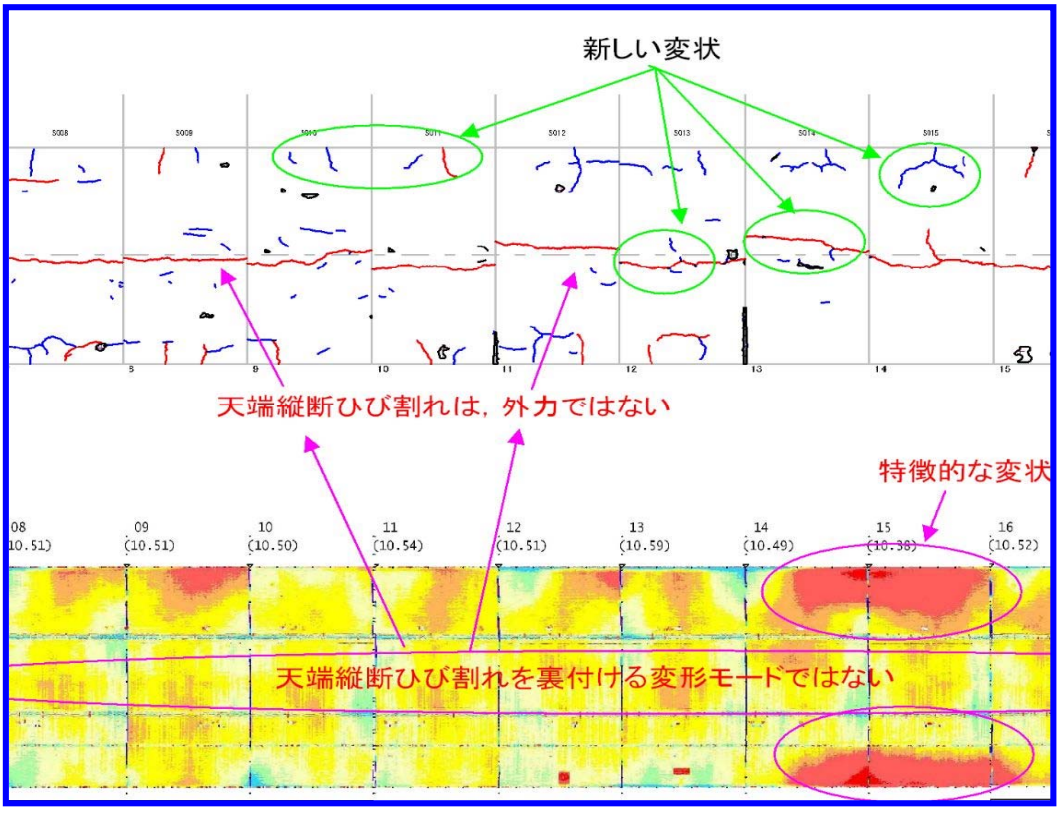


図 8.3.25　A トンネルの外力性変状の評価事例 [1)]

(2) B トンネル

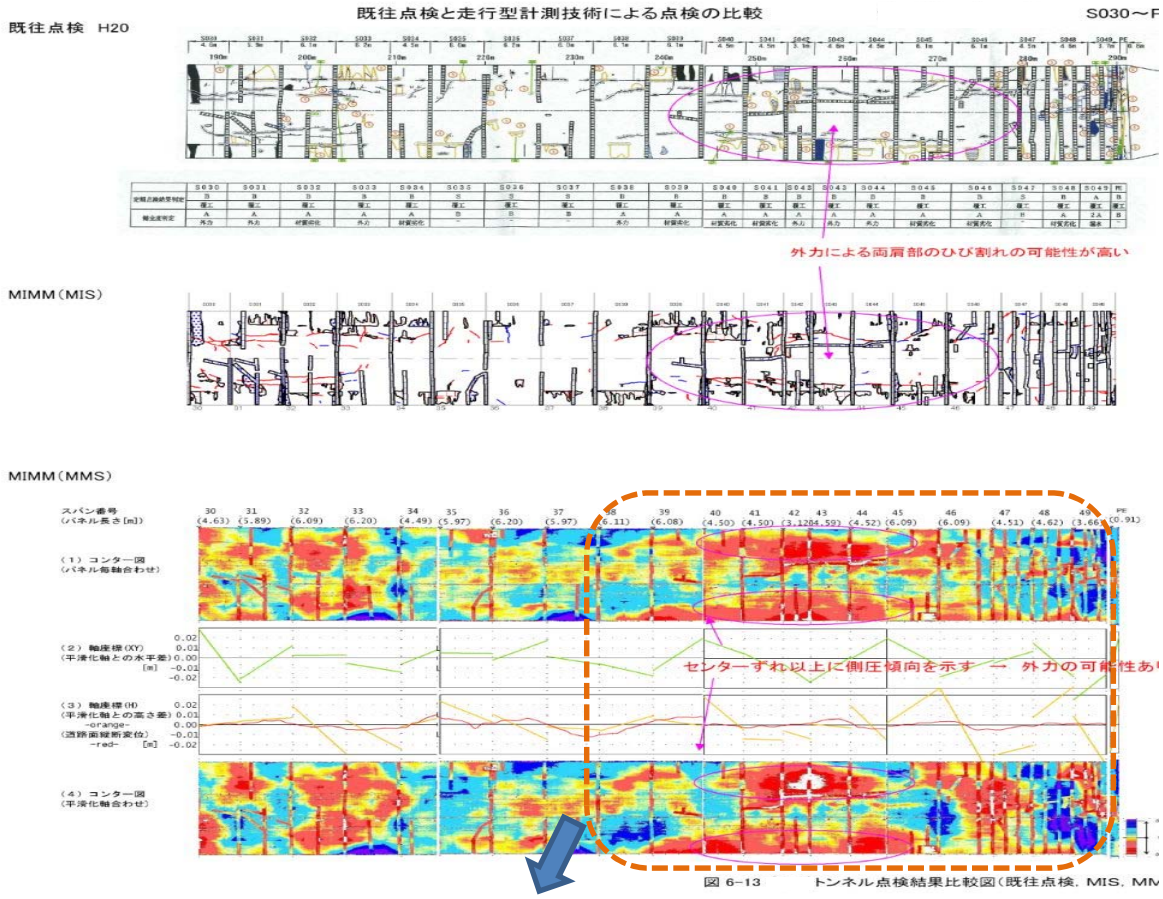


図 6-13 トンネル点検結果比較図（既往点検，MIS，MM

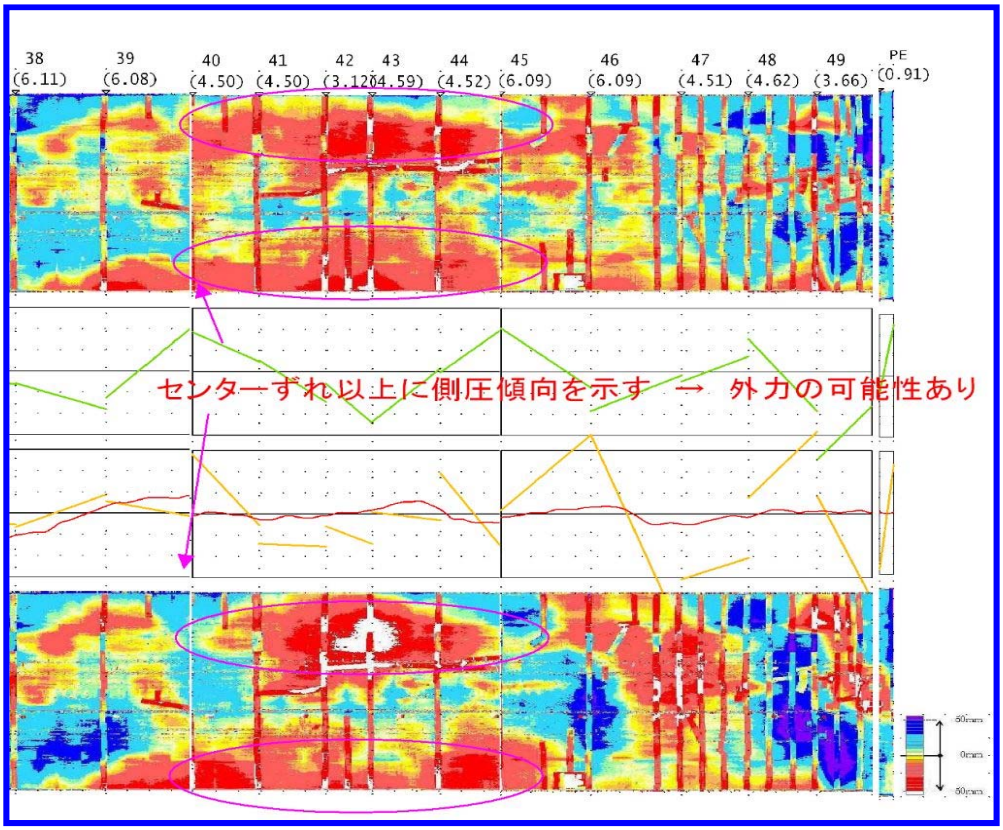


図 8.3.26 B トンネルの外力性変状の評価事例 [1)]

(3) D トンネル（その 1）

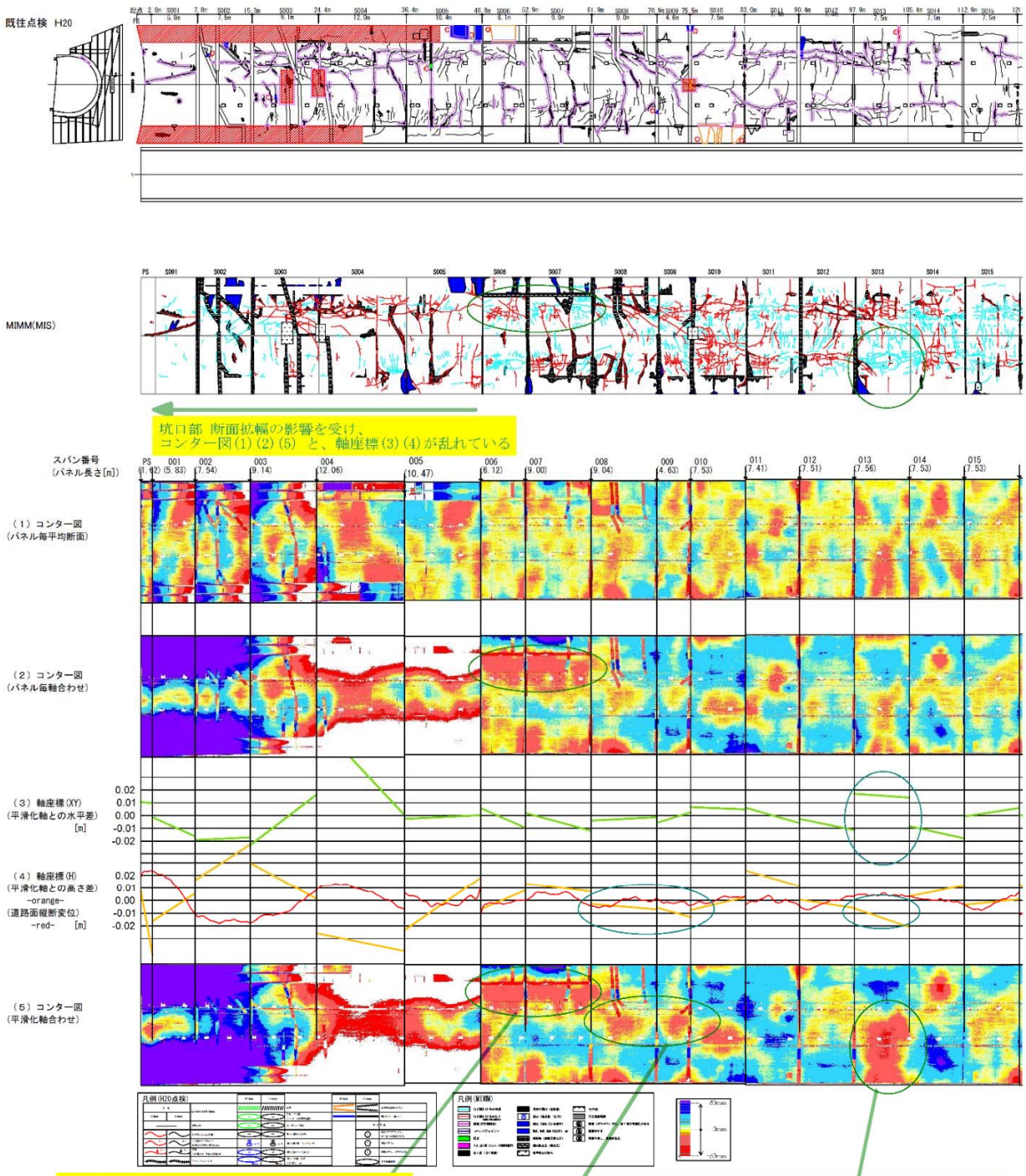


図 8.3.27 D トンネルの外力性変状の評価事例（1）[1)]

D トンネル（その 2）

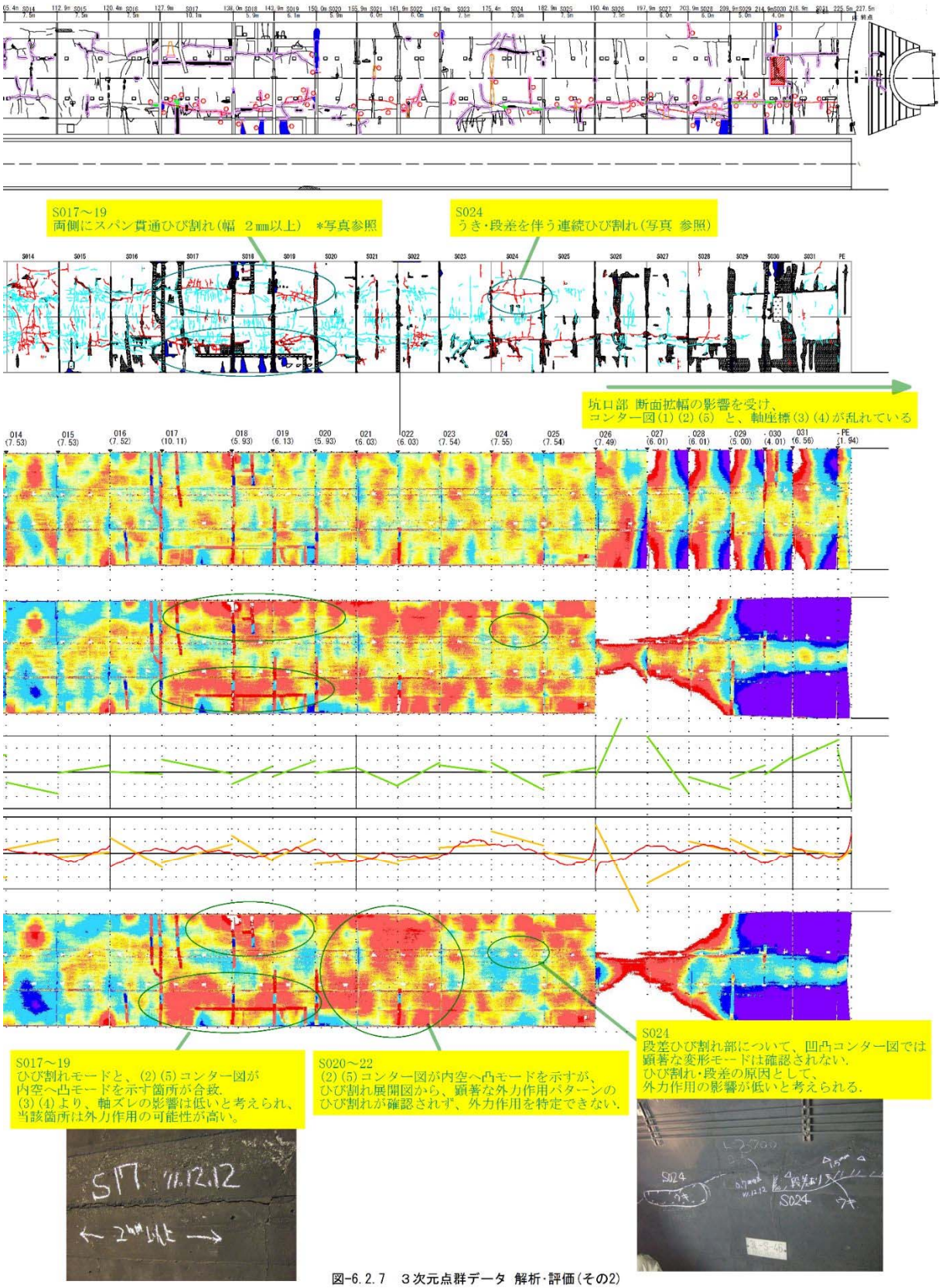


図-6.2.7 ３次元点群データ 解析･評価（その2）

図 8.3.28 D トンネルの外力性変状の評価事例（2）[1)]

(4) E トンネル

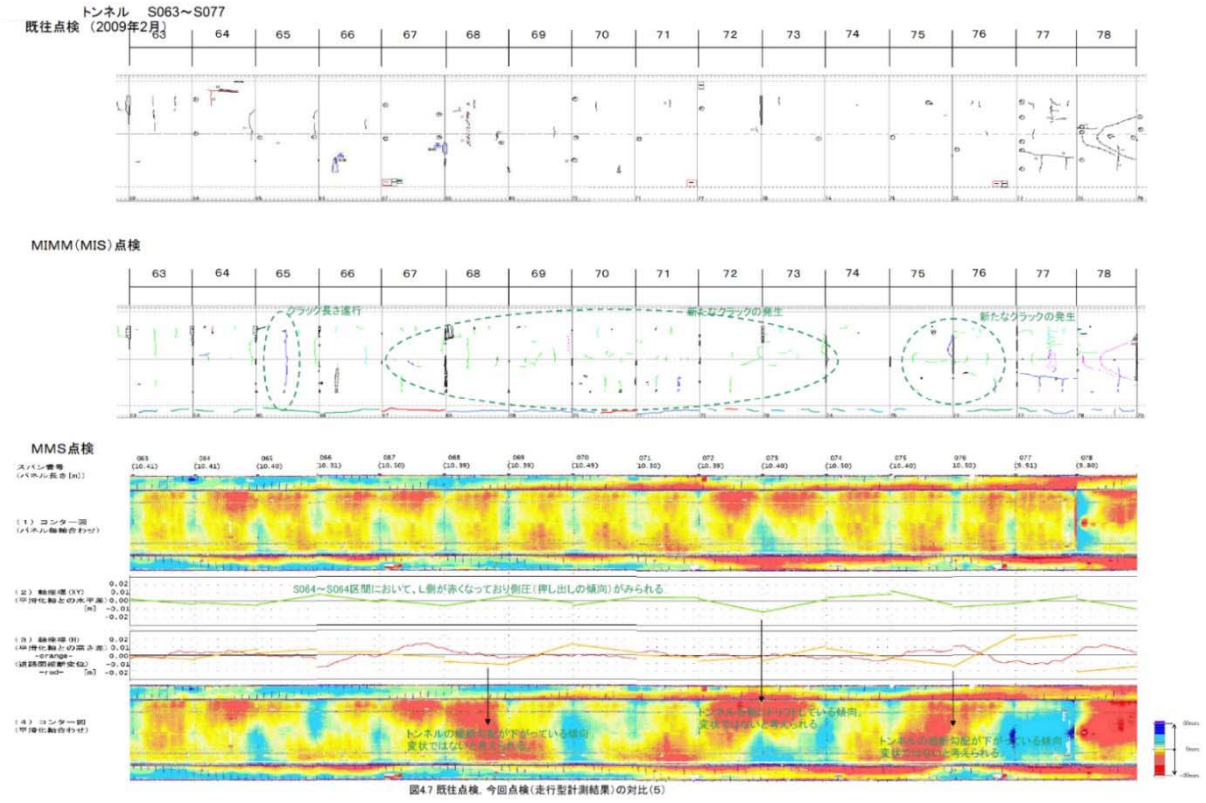


図4.7 既往点検、今回点検（走行型計測結果）の対比(5)

図 8.3.29　E トンネルの外力性変状の評価事例 [1)]

8.3.3　R2 年度　近畿地整６トンネルの評価

『近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務（令和３年３月、国土交通省　近畿地方整備局)』[6] において、整理された事例の内容を以下に示す。

変形モード解析結果と現地点検結果を踏まえ、外力性変状の有無に関する診断結果を**表 8.3.2** に示す。

表 8.3.2　外力性の有無に対する診断の総括 [6] を加工

	施工方法	竣工年度	ﾄﾝﾈﾙ延長	外力性診断の対象変状	変形ﾓｰﾄﾞ解析結果	現地点検結果	診断の総括	備考
和知トンネル	NATM	1998 年	740m	側壁 縦断方向 ひび割れ	変形傾向 ナシ	変状の進行性 ナシ	現時点では有害なひび割れでないと診断	差分解析実施 監視点検 （S006、PE の 2 スパンが対象）
				アーチ部 横断方向 ひび割れ	変形傾向 ナシ	変状の進行性 ナシ	外力性の変状でないと判断し、材料劣化Ⅱb と診断	
新和田山トンネル	矢板工法	1971 年	330m	—	一部 変形傾向を確認	外力作用が懸念されるひび割れ等の変状 ナシ	変形傾向と覆工面の変状に相関性がないため、外力性の傾向はないと診断	
とがやまトンネル	NATM	2017 年	1,420m	—	変形傾向 ナシ	外力作用が懸念されるひび割れ等の変状 ナシ	変形モード解析結果、覆工面の変状状況ともに、外力性と思われる変状はないと診断	差分解析実施
三谷トンネル	NATM	2017 年	2,810m	—	変形傾向 ナシ	外力作用が懸念されるひび割れ等の変状 ナシ	変形モード解析結果、覆工面の変状状況ともに、外力性と思われる変状はないと診断	差分解析実施

前述の評価手順・留意点により、外力性評価を行った変形モード解析結果を図 8.3.30～図 8.3.34 に示す。

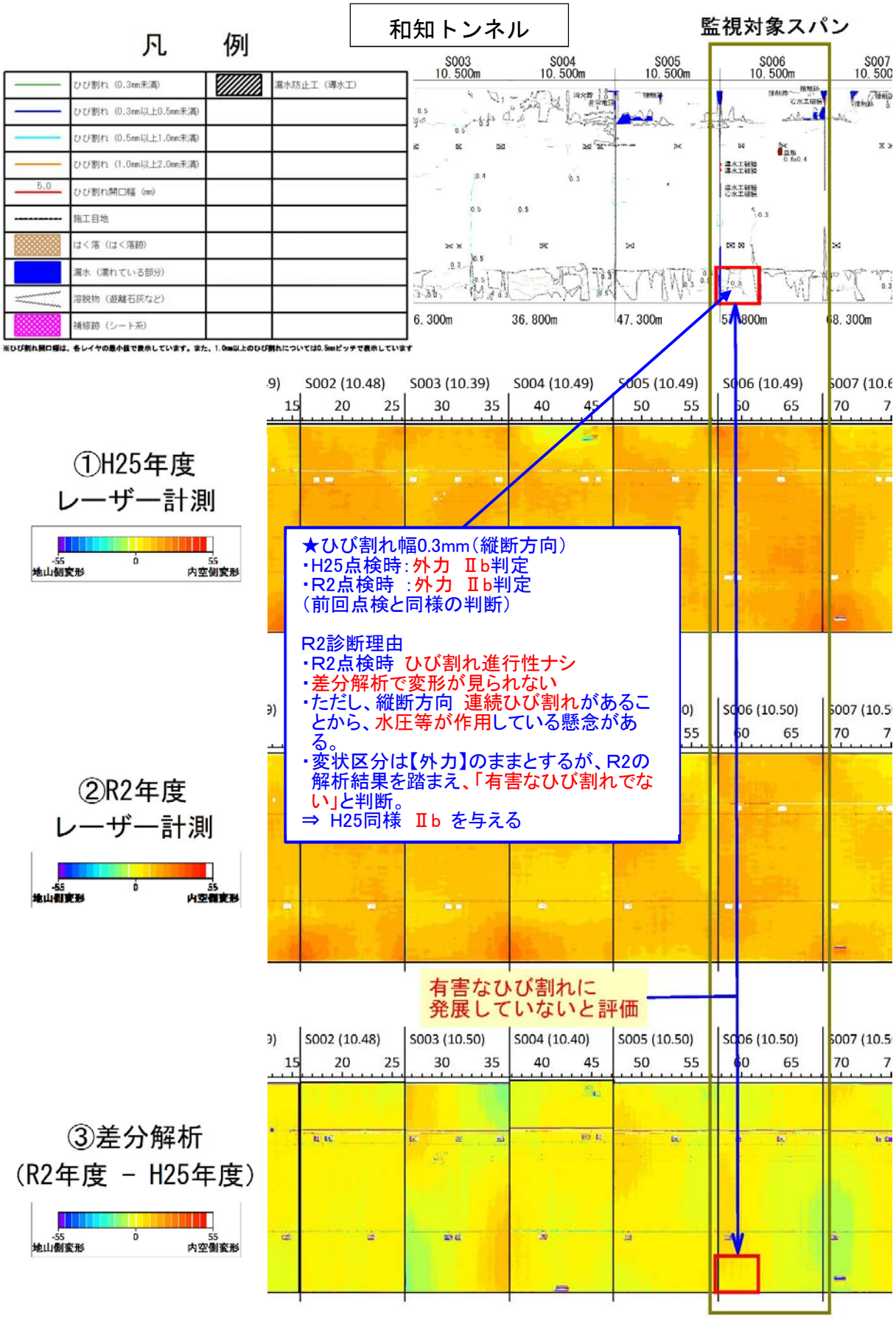


図 8.3.30　和知トンネル変形モード解析図（1）[6] を加工

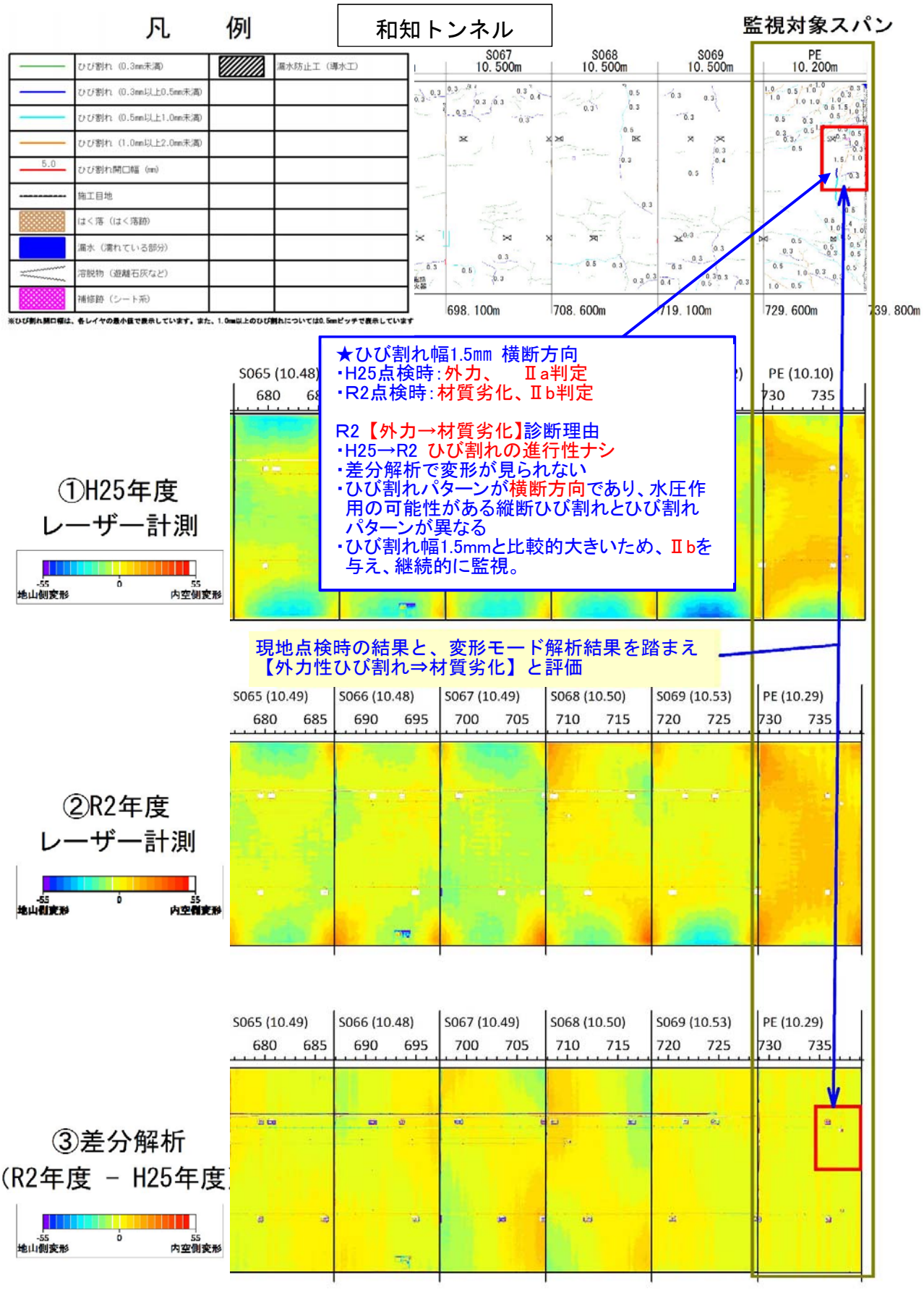


図 8.3.31　和知トンネル変形モード解析図（2）[6] を加工

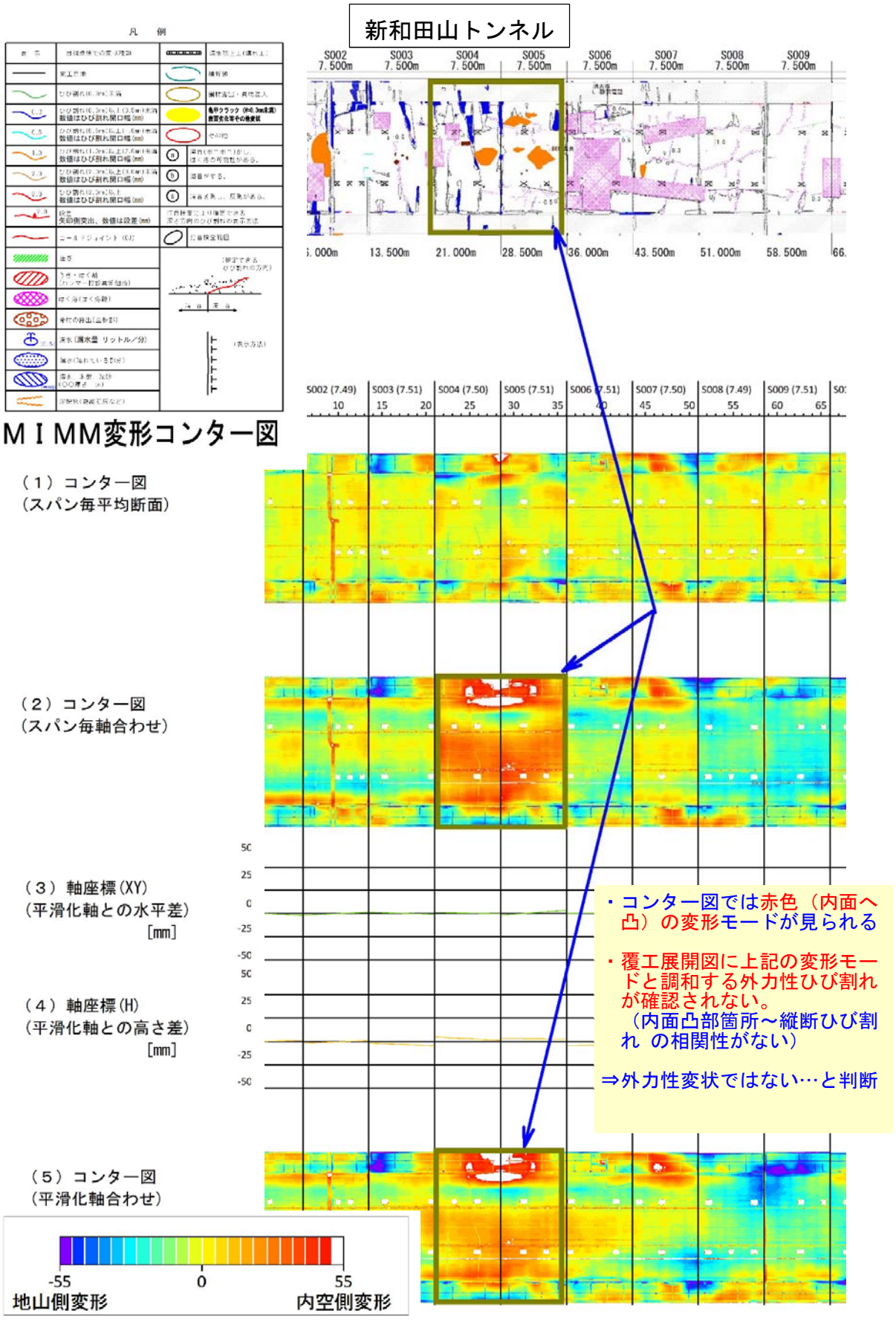


図 8.3.32　新和田山トンネル変形モード解析図[6]を加工

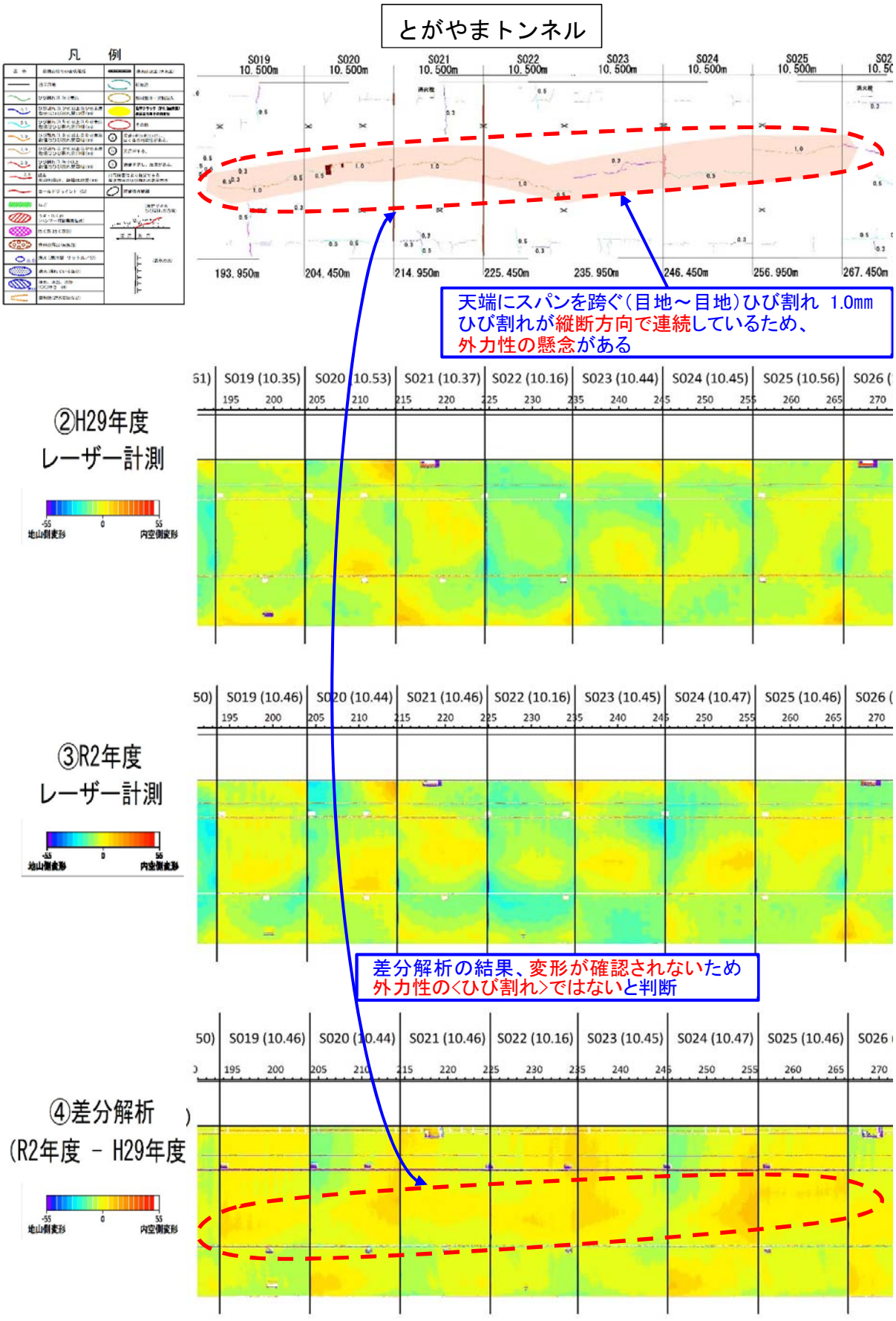


図 8.3.33　とがやまトンネル変形モード解析図 [6] を加工

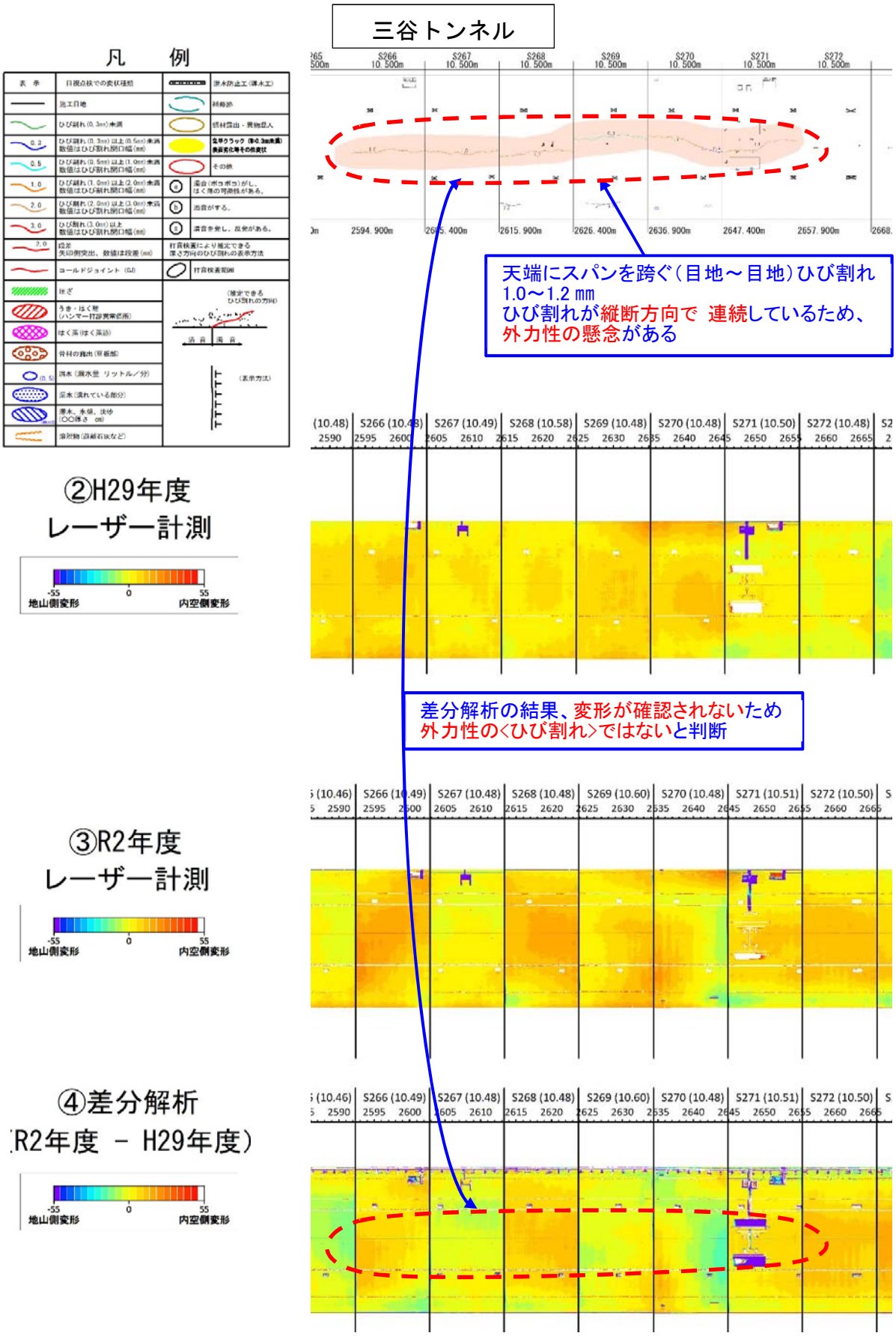


図 8.3.34　三谷トンネル変形モード解析図 [6] を加工

8.3.4　まとめ、考察

本節では、外力性変状に着目して、8.3.2 に示す評価事例（H25 年度走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化研究事例）と 8.3.3 に示す評価事例（8.2 近畿地整管内 6 トンネル計測・解析で評価した事例）を対象として検証を行った。ここではその検証結果を踏まえ、外力性変状の評価（検出）について、それぞれの特性及び留意点を以下に示す。

1)　レーザ計測評価

(1) 外力変状の適用

①　3 種類のコンター図を総合的に判断し、凹凸変形モードから外力作用の懸念箇所を把握する。

②　最終的な判断は、地形・地質、施工記録等の情報から多面的・総合評価により決定する。

③　外力影響は、凹凸解析により、段差の有無を把握することが重要である。

(2) 変状進行性判定の適用

①　外力による変状の健全度判定においては、変形速度が一つの目安となる。

②　レーザ計測を複数回実施することによって、ある期間での変形量（変形モード）を定量的に差分評価することが重要である。

2)　事例[6]における外力性変状の診断

①　いくつかトンネルで発生しているひび割れは、現時点において、変形モード、段差、進行性が認められず外力性変状ではないことが判明した。⇒診断結果：Ⅱb 判定

②　ただし今後の差分解析において経時変化を確認する必要はある。

3)　総括

①　H25 評価事例では、外力作用が懸念される箇所の検出、天端ひび割れが確認されたが外力作用の懸念が低い箇所 等々、複数の現場を紹介した。

②　近畿地整管内 6 トンネル評価事例では、結果的には外力性変状は確認されなかったが、コンター解析を実施することにより、外力性でなく材質劣化と判定できたことの有用性が高い。

③　コンター解析の評価時は、複数のコンター図、展開図によるひび割れ発生方向･パターン、セントルの基準軸からのズレ有無（水平、鉛直） など複数の情報を勘案し、多面的に総合的な判断を下すことが重要であり、この考え方は H25 年から一貫したものである。

④　判断情報として、地形・地質（切羽）情報があれば、もう一歩踏み込んだ評価が可能となる。

⑤　トンネルに精通した経験豊富な専門技術者の知識を介することなく、コンター解析により外力作用なのか、材質劣化なのかを概略の判定が出来ることに大きな意義がある。

⑥　点検判定の精度向上にも大きく寄与すると考えられる。

8.4 点検支援技術の評価

8.4.1 トンネル走行型計測による支援の検証

1) 検討目的

本節では、従来の定期点検によって検出されるひび割れやうき・はく落などの変状に対して、トンネル走行型計測によってどこまでの支援が可能であるか、検出能力、精度について検証を行ったものである。ここでは過去の道路トンネルの定期点検時に実施された近接目視結果、走行型計測結果（画像、レーザデータ）をもとに、それぞれの検証と課題について精査を行った。

2) 検討方法

(1) 検討方針

検討は、図 8.4.1 に示すように、従来の定期点検を診断 A、走行型計測による画像データを用いた従来型定期点検を診断 B と定義付け、モデルトンネルに対し段階的に画像のみからの診断（診断 C）、画像展開図からの診断（診断 D）、レーザコンター図を用いた診断（診断 E）、近接目視結果を加えた診断（診断 F）において、同じ箇所のトンネルを複数の技術者によって検証を行った。

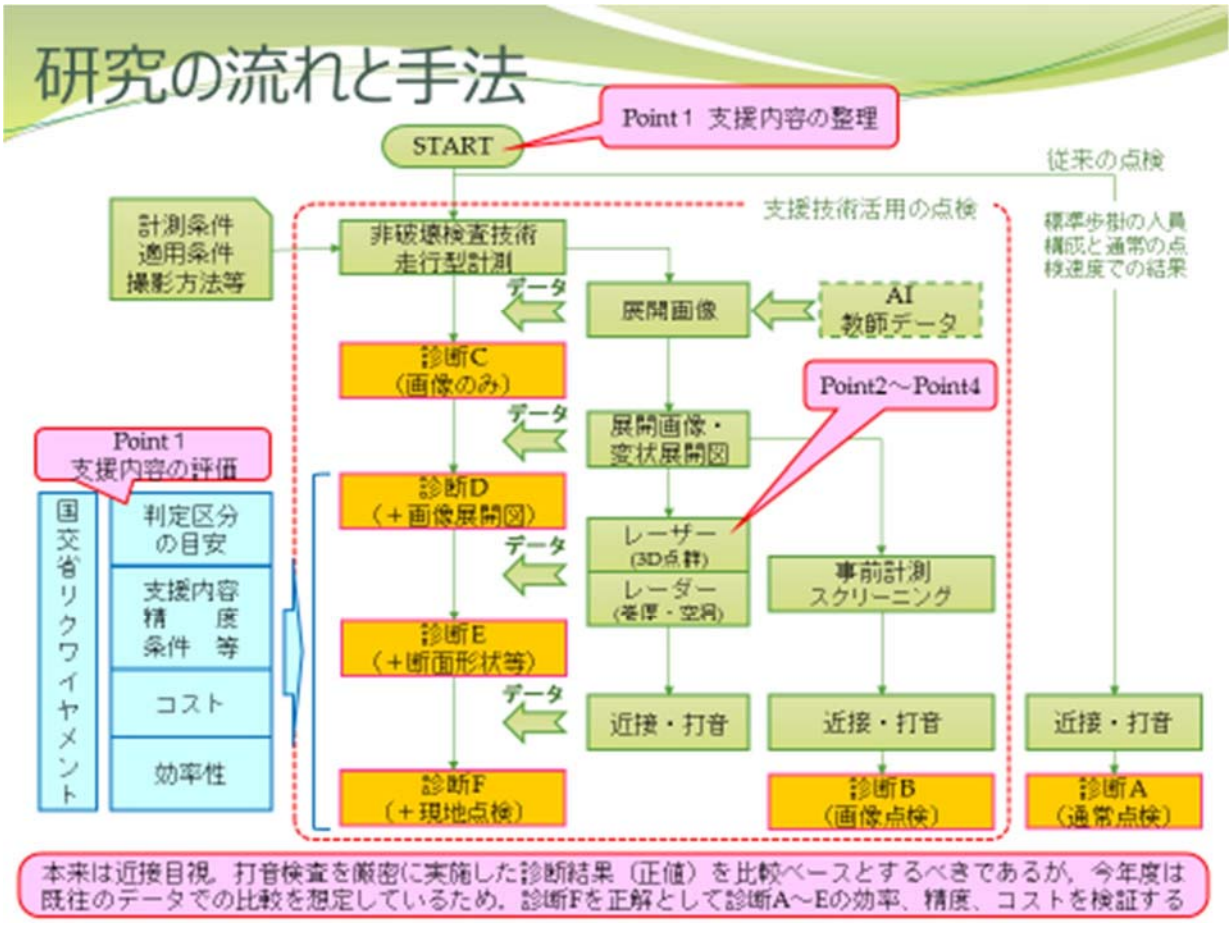


図 8.4.1　検討フロー

(2) 作業手順

診断の個人差やばらつきを少しでも解消するため、図 8.4.2 のように診断の手順を統一した。

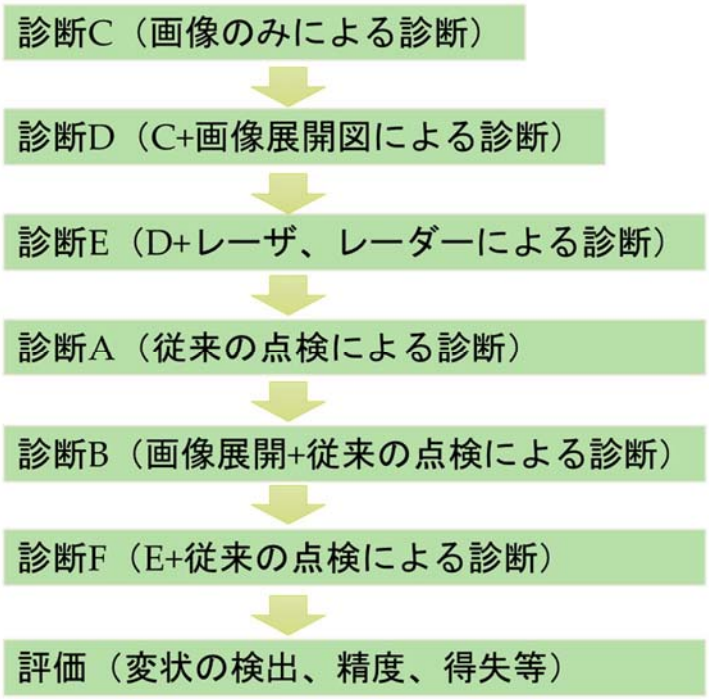


図 8.4.2　診断の手順

(3) それぞれの診断イメージ

図 8.4.3～図 8.4.7 に段階毎の診断方法を示す。



図 8.4.3　診断 A のイメージ

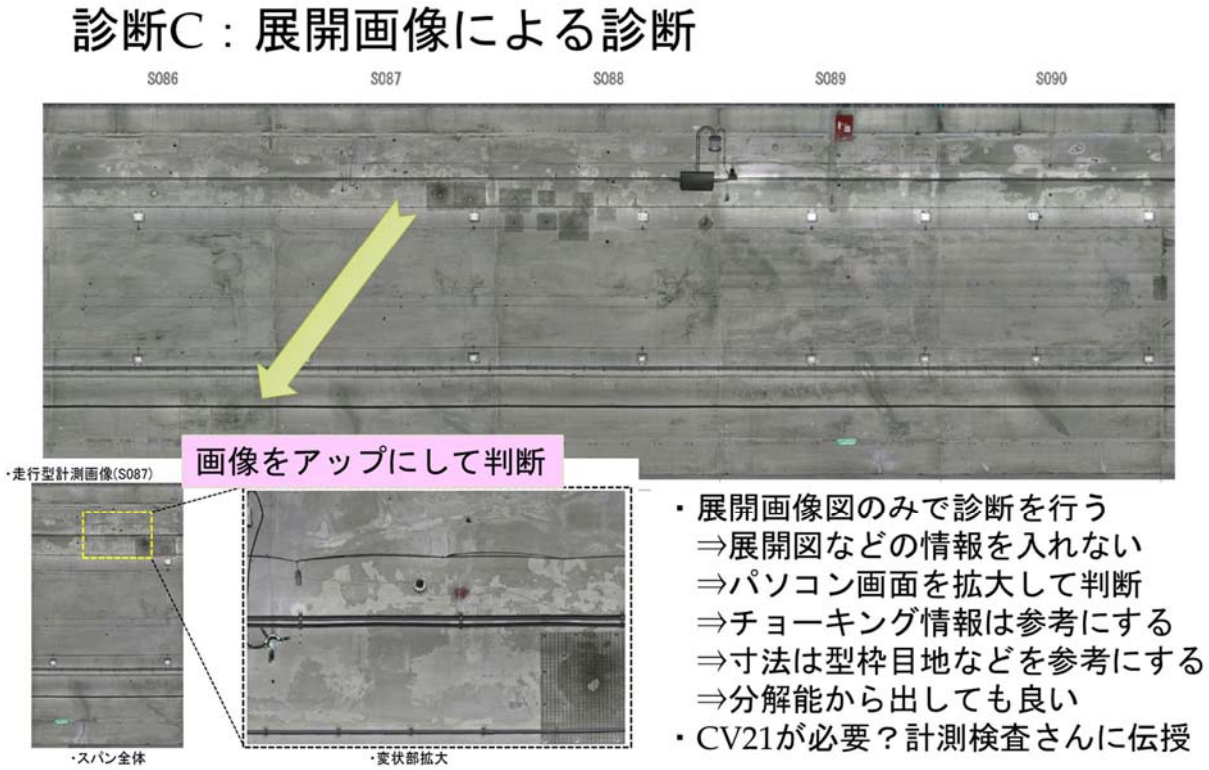


図 8.4.4　診断 C のイメージ

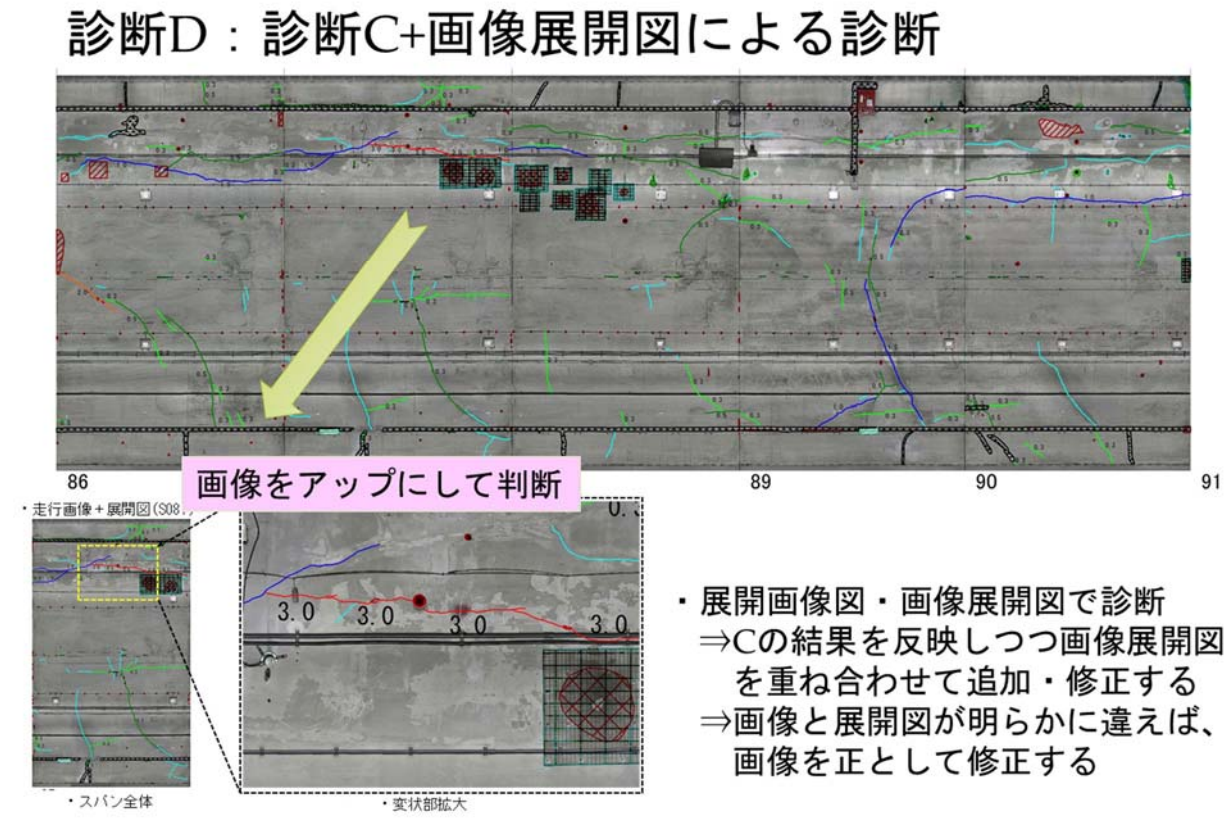
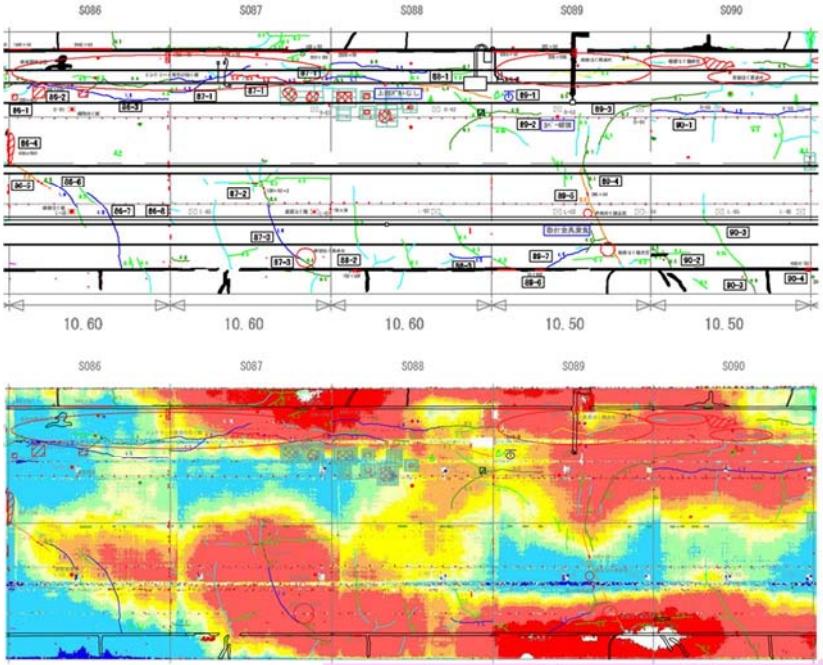


図 8.4.5　診断 D のイメージ

診断E：診断D+レーザ,レーダー図等による診断

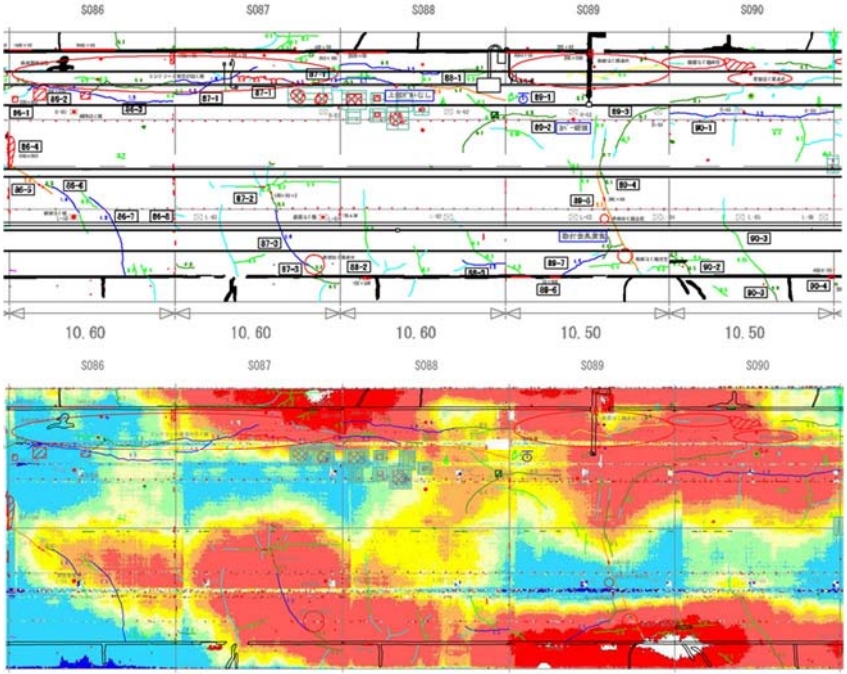


・診断Dにレーザ,レーダー図を加えた診断
⇒Dの結果にレーザ,レーダー図を重ねて、診断結果に反映させる
⇒外力影響の有無
⇒空洞の有無
⇒沈下などの変形の有無
⇒変状の原因に言及

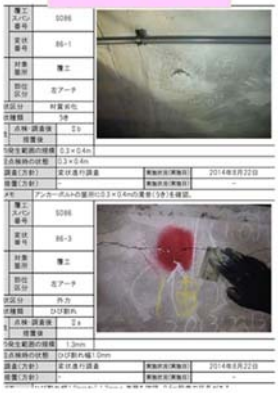
レーザ図は3種類の図で評価する

図 8.4.6　診断 E のイメージ

診断F：診断E+診断Aによる診断



近接写真



・診断Eに近接結果Aを加えた診断
⇒Eの結果を反映しつつ近接結果Aを見ながら追加・修正する
⇒Eの結果と近接写真が明らかに違えば、近接を正として修正する

この診断が最終の診断結果となる

図 8.4.7　診断 F のイメージ

3) 対象トンネル

検証を行う対象トンネルは、過去に走行型計測の実績がある表 8.4.1 に示すとおりとし、道路管理者より、定期点検資料及び走行型計測データを借用した。

表 8.4.1 対象トンネル

名称	延長	完成年次	工法	対象スパン
佐田トンネル（上り）	460m	2003 年	NATM	S017~026（10 スパン）
旗護山トンネル	1832m	2011 年	NATM	S123~127（5 スパン）

4) 検討結果

(1) 検証実施技術者

本検証は、表 8.4.2 のように、佐田トンネルと旗護山トンネルにおいて、習熟技術者 7 名、若手技術者 3 名、計 10 名により行った。

表 8.4.2 検証実施技術者一覧表

技術者名	経験年数（年）	年代（歳代）	検証実施トンネル	
			佐田TN	旗護山TN
A	10	50	○	○
B	10	50	○	○
C	15	50	○	○
D	28	50	－	○
E	20	50	○	○
F	4	20	○	○
G	20	40	○	○
H	10	40	○	○
I	5	30	－	○
J	1	30	○	○

経験年数　5 年以上　7 名
5 年未満　3 名

(2) 結果整理

① 技術者別健全性評価の分布

診断 F を正解として、診断 C~E を行った。図 8.4.8～図 8.4.10 のように技術者全体の分布、若年技術者層の分布、習熟技術者層の分布別にまとめる。

(ア) 経験年数 5 年以上の技術者では、検証 D 以降の健全性診断結果に大きな違いはみられない傾向であった。

（イ）経験の乏しい技術者の判断には、段階別にばらつく傾向がみられる。

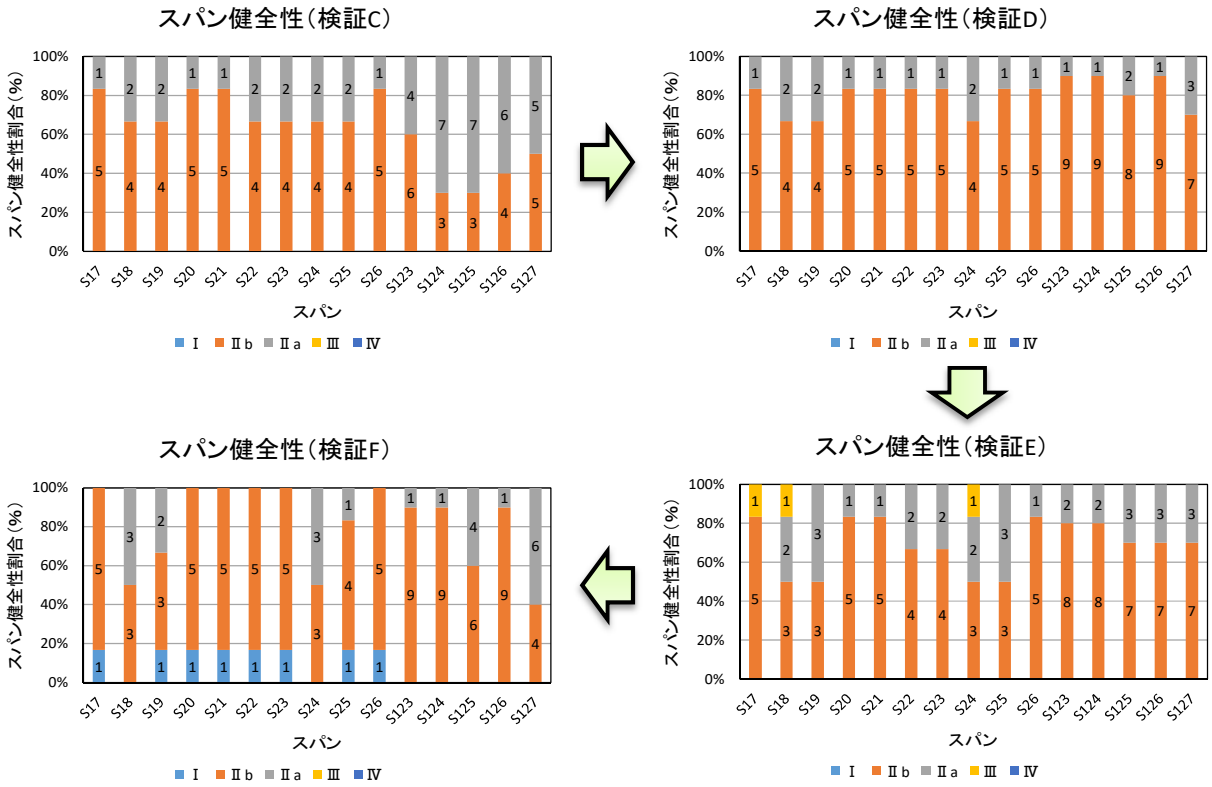


図 8.4.8　対策区分の判定の割合分布（全体）

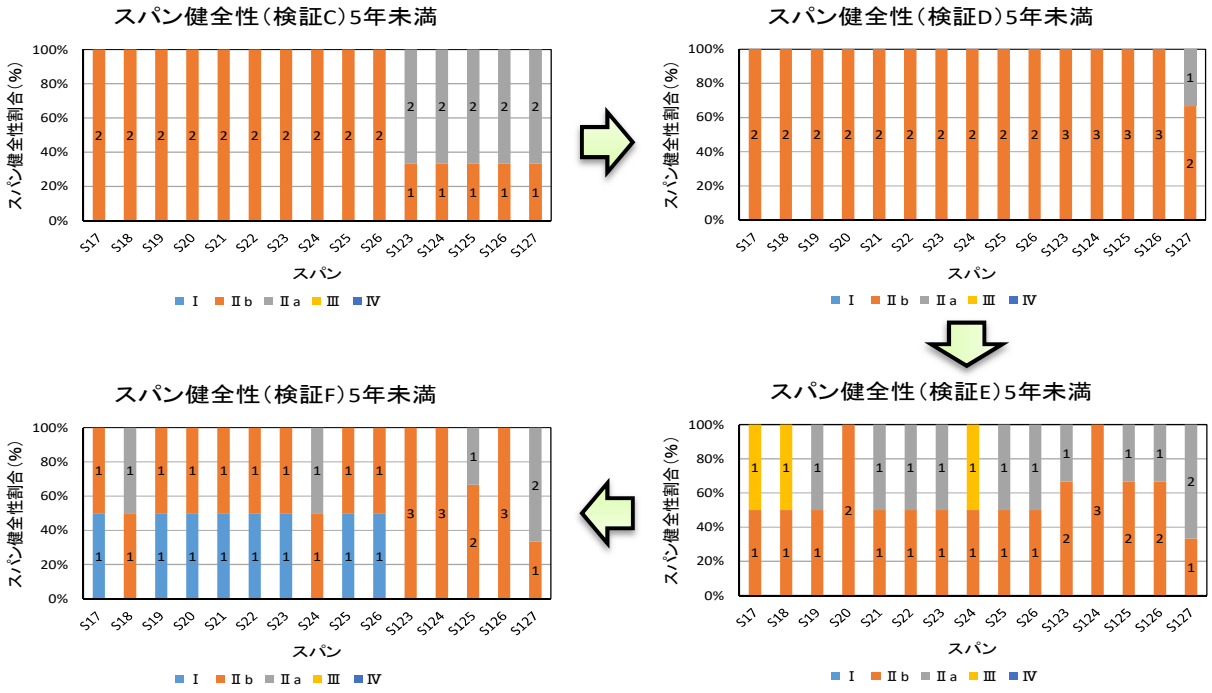


図 8.4.9　対策区分の判定の割合分布（経験年数 5 年未満）

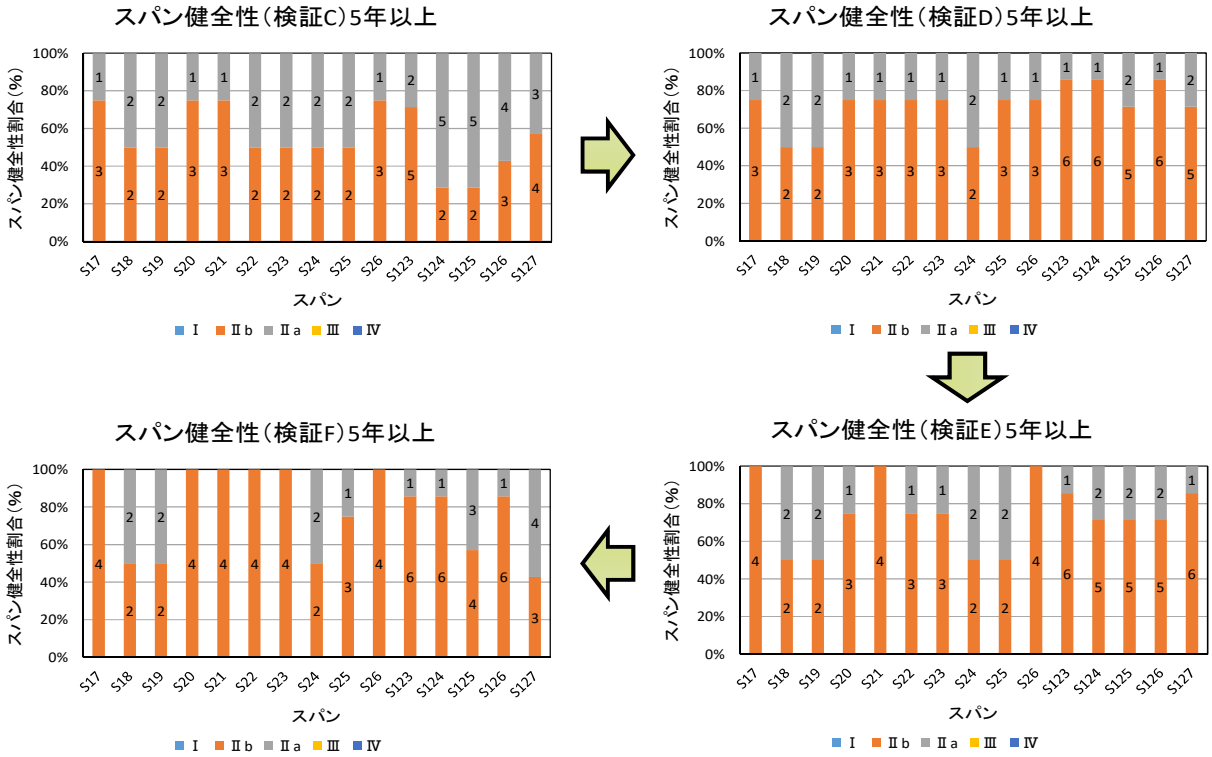


図 8.4.10　対策区分の判定の割合分布（経験年数 5 年以上）

(3)　変状検出における検証結果

①　ひび割れ本数の検証

検証 F によって得られたひび割れ本数を正値として、それぞれの段階毎にひび割れの検出がどのように変化したかを、全体、若年、習熟技術者層別に各分布別に図 8.4.11 と表 8.4.3 のように整理する。

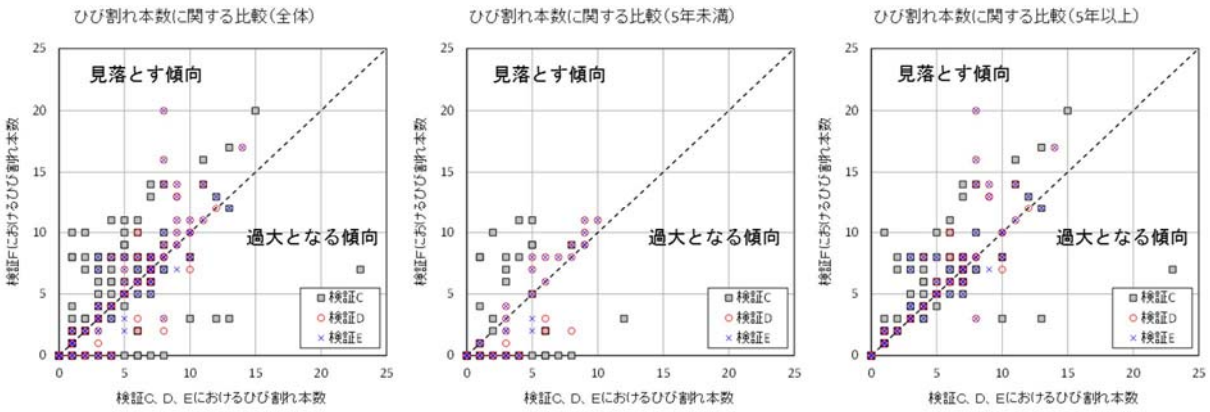


図 8.4.11　検証 F に対する各ひび割れ検出本数分布（検証 C, D, E）

表 8.4.3　検証 F との相関（ひび割れ）

評価項目	経験年数	検証C	検証D	検証 E
検証Fとの相関係数(一次)	全体	0.62	0.88	0.89
	5年未満	0.25	0.86	0.91
	5年以上	0.70	0.88	0.87
検証Fとの差分の標準偏差	全体	3.55	2.11	2.04
	5年未満	4.06	1.94	1.63
	5年以上	3.20	2.04	2.12

分析結果をまとめると、以下のとおりとなる。

(ア) ひび割れの検出は、段階が増すごとに精度が上がっていく。

(イ) 実際の点検において、展開画像があると点検精度が向上する。

(ウ) 展開画像によるスクリーニング効果が高いことが判明した。

当結果を踏まえ、今後の課題について以下のように整理する。

(ア) 外力性のひび割れを対象とした検証データを追加する必要がある。

(イ) ひび割れや変形の進行性を対象とした差分評価を検証する必要がある。

(ウ) 若年者のバラツキを減らすためにも運用マニュアルや AI 活用が重要となる。

② うき箇所数の検証

検証 F によって得られたうき箇所数を正値として、それぞれの段階毎にうきの検出がどのように変化して行ったかを、全体、若年、習熟技術者層別に各分布別に**図 8.4.12** と**表 8.4.4** のように整理する。

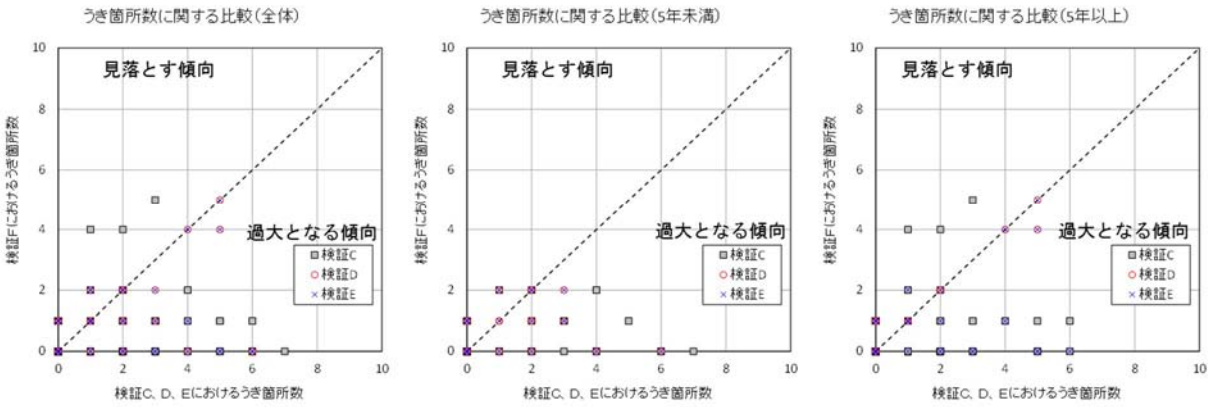


図 8.4.12　検証 F に対する各うき検出本数分布（検証 C,D,E）

表 8.4.4　検証 F との相関（うき）

評価項目	経験年数	検証C	検証D	検証 E
検証Fとの相関係数(一次)	全体	0.23	0.69	0.45
	5年未満	0.27	0.39	0.34
	5年以上	0.25	0.91	0.49
検証Fとの差分の標準偏差	全体	1.68	0.78	1.23
	5年未満	1.91	1.19	1.21
	5年以上	1.52	0.37	1.23

分析結果をまとめると、以下のとおりとなる。

(ア) 事前に展開画像があれば、健全箇所のスクリーニングができる。

(イ) 熟練者であれば、あらかじめうき候補を予測することができる。

(ウ) 展開画像のみによるうきの検出はバラツキがあり、実際よりも過検出の傾向がある。

当結果を踏まえ、今後の課題について以下のように整理する。

(ア) 明瞭なうきや打音記録を含めた検証データを追加する必要がある。

(イ) 外力作用を受けたトンネルやレーダデータを含めた検証が必要である。

③　各判定の目安に対する支援内容の検証結果と課題

今回、走行型計測を採用した過去のデータをもとに、それぞれの変状別に支援が可能なもの、課題が残るもの、今後の取組方針別に本研究の成果として、これまでの見解も含め、**表 8.4.5** のように取りまとめを行った。

表 8.4.5　検証結果と課題

	評価のポイント	検証結果と課題	取組方針
ひび割れ	・外力性が判定できるか ・幅，長さが抽出できるか ・進行性がわかるか（客観的位置） ・ひび割れ密度 ・微細ひび割れが必要か ・遊離石灰，漏水で視認不可の場合	・△ 画像のみでは困難 ・〇 0.3mm程度以上可能 ・〇 前回との比較で可能 ・〇 抽出可能 ・△ 議論が必要 ・△ 画像のみでは困難 経験的に可能か？	・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針① ・健全性診断:　方針⑥ ・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針② ・AI活用:　　方針⑤
うき	・画像からどの程度まで判定可能か ・閉合ひび割れ，交差・分岐内側 ・目地沿いのうきに繋がるひびわれ ・ジャンカ，はく落，欠け ・変色，劣化，漏水 ・打音との併用が必要	・△ 画像のみは限界あり ・〇～△ 親指大程度可能 ・〇～△ ひび伴うものは可 ・〇～△ ある程度可能 ・〇～△ 一部有効では？ ・△ 最終評価は打音が必要	・ﾚｰﾀﾞ計測活用:方針④ （表面うき、ｼﾞｬﾝｶ） ・健全性診断:　方針⑥ ・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針③
変形	・ﾚｰｻﾞ点群活用の有効性 ・外力性か否かの判定	・〇 変形には有効 ・〇 有効　ルール必要	・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針① ・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針②
鋼材腐食	・付属施設の判定（重要度ｱｯﾌﾟ）	・〇～△視認できれば可能	・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針③ AI活用:　　方針⑤
巻厚不足 背面空洞 有効巻厚	・覆工巻厚不足、背面空洞の判定 ・有効巻厚の判定	・×～△ 画像・MMSだけでは困難 ・×～△ 打音検査だけでも 困難	・ﾚｰﾀﾞ計測活用:方針④ 健全性診断:　方針⑥ ・ﾚｰﾀﾞ計測活用:方針④
漏水	・漏水・遊離石灰　規模・位置判定 ・漏水量の判定	・〇～△ 画像/点群輝度 可 ・△～× 量は困難	・ﾚｰｻﾞ点群活用:方針③ AI活用:　　方針⑤

※取組方針にある方針①～⑥は別添資料で述べる

5) 道路トンネル定期点検要領改訂を受けた方向性について

平成 31 年 2 月に道路トンネル定期点検要領が改訂された。この対応における方向性について、見解を以下に述べる。

(1) 巡目の点検を踏まえた効率化・合理化

① 損傷，構造特性に応じた点検の着目箇所の特定化による点検の合理化

(ア) 支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化

② 適切な健全性診断の実施

(ア) 点検支援新技術の利活用、健全性診断に資する情報の明確化

(イ) 変状原因（外力 or 材質劣化、進行性）の評価法の確立とマニュアル化

(ウ) 覆工巻厚変状に背面空洞も考慮

(エ) 附属物診断の重要性（落下に繋がる可能性、取付部材の腐食）

(2) 点検支援技術の積極的な活用

① 近接目視の補完・代替・充実する技術の活用

(ア) 活用範囲、精度、運用方法の明確化

(イ) 定期点検の質の確保、向上

8.4.2 非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化検討の再評価

1) 概要

本節では、3 章に示す画像計測の検証結果、8.1～8.3 に示すそれぞれの検証結果、8.4.1 に示すトンネル走行型計測による支援の検証結果をもとに、総括的な再評価を行ったものである。

評価にあたっては、点検要領に基づいた支援を行うことを念頭におき、代替可能なもの、代替までは至らないが補完可能なもの、代替・補完が難しいものと、現状の点検方法に対して高機能化が期待できるものの 4 つに分類した。また、対象の点検支援技術を用いることで、近接目視点検や打音検査を省略できるかどうかについても評価した。

2) 検証の条件

8.4.1 おいては、トンネル走行型計測「MIMM」に搭載された機器を中心に点検支援について評価を行っているが、本節では、上記「MIMM」の他、3 章に示す 4 種類の走行型計測技術（走行型高速 3D トンネル点検システム「MIMM-R」、社会インフラモニタリングシステム「MMSDⅡ」、一般車両搭載型トンネル点検システム「一般車両搭載型」、近赤外線画像撮影による点検技術「近赤外撮影」）を含めた評価を行った。

検証にあたっては、道路トンネル定期点検要領に記載されている 6 つの変状種類（①圧ざ・ひび割れ、②うき・はく離、③変形・移動・沈下、④鋼材腐食・鉄筋腐食、⑤巻厚不足・背面空洞、⑥漏水など）に対して、レーザ計測、画像計測、レーダ探査による点検支援の可能性と従来の近接目視、打音検査の要・否について検証を行った。

3) 検証の流れ

図 8.4.13 に検証の流れを示す。また表 8.4.6 には、再評価結果を示し、次節以降に、評価の内容を示す。

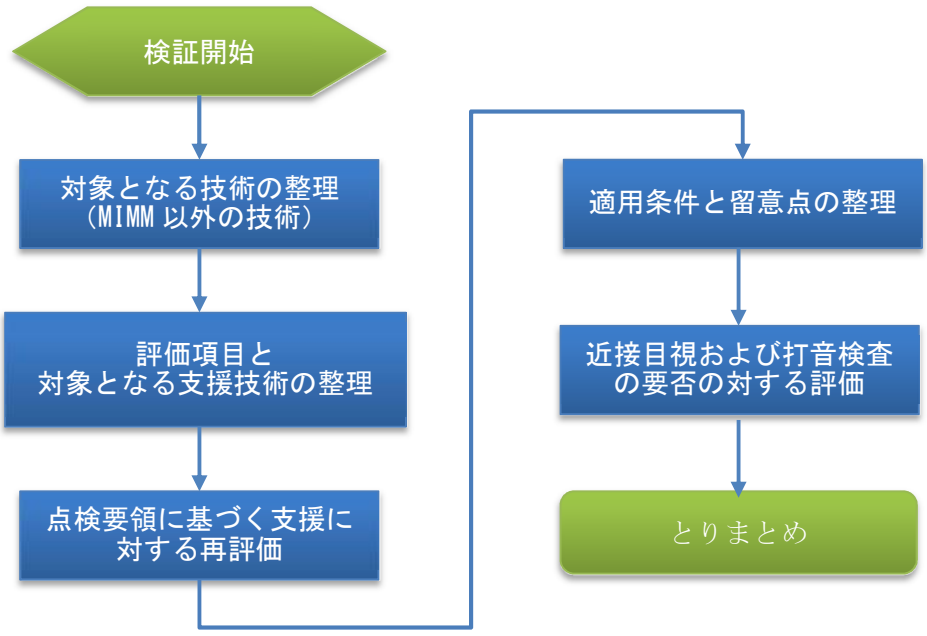


図 8.4.13　検証の流れ

表 8.4.6　点検支援技術の評価結果

項　　目		使用する技術	8.4.1 による検証	3 章、8.1～8.3 による検証※1	適用条件 留意点 など	近接目視の要否およびレベル	打音検査の要否
変状種類	評価のポイント						
①圧ざ・ひび割れ	1.外力性判定 外力､材質劣化の変状分類	レーザ計測	△	○	レーザ性能・仕様 ポジショニング精度	否※2	否
	2.幅・長さ抽出 3.進行性 4.ひび割れ密度	画像計測	○	◎	画像解像度・性能	可	否
	5.微細ひび割れ	画像計測	△	○	画像解像度・性能	否	否
	6.遊離石灰・漏水	画像計測	△	△	画像解像度・性能	要※3	否
②うき・はく離	1.うきはく離	レーダ探査	△	△	※変化箇所として抽出	要	要
	2.閉合ひび割れ、交差、分岐	画像計測	○～△	○～△	画像解像度・性能	否	要
	3.目地沿いのうきに繋がるひび割れ	画像計測	○～△	○～△	画像解像度・性能	否	要
	4.ジャンカ・はく離・かけ	画像計測	○～△	○	画像解像度・性能	確認程度	要
	5.変色・劣化・漏水	画像計測	○～△	○	画像解像度・性能	否	要
③変形・移動・沈下	1.レーザ計測の活用	レーザ計測	○	◎	レーザ性能・仕様	否	否
	2.外力か否かの判定	レーザ計測	○	◎	レーザ性能・仕様 ポジショニング精度	否	否
④鋼材腐食・鉄筋腐食	1.表面に変状が見える場合の判定	画像計測	○～△	◎	画像解像度・性能	確認程度	否
⑤巻厚不足・背面空洞	1.覆工巻厚不足・背面空洞の判定	レーダ探査	△～×	◎※4	探査深度（周波数）	否※5	否
	2.有効巻厚の判定	レーダ探査	△～×	◎※4	探査深度（周波数）		
⑥漏水など	1.漏水・遊離石灰の位置や規模	画像計測	○～△	○	画像解像度・性能	否	否
	2.漏水量の判定	－	△～×	×	－	－	－

※1：◎：高機能化，○：代替，△：補完，×：現状の技術では代替・補完が難しい

※2：必要に応じて近接目視が必要な場合もある

※3：遊離石灰でひび割れが見えない場合目視による確認が必要

※4：非破壊検査であるため、最終確認（コア削孔・カメラなど）は必要

※5：近接目視点検に併せて接触型を使用するなどの対応が有効

4) 各項目に対する検証結果

(1) 圧ざ・ひび割れ

外力性の判定には、レーザ計測による代替が可能である。レーザコンター解析により、変形があるかどうかを定量的に明らかにすることができ、この結果により対象となるひび割れなどが外力性かどうかを判断することが可能となる。これにより、基本的には近接目視や打音検査による判定は不要になると考えられる。ただし、初回点検時やレーザ計測を初めて実施するトンネルでは、近接目視により段差の有無などの確認や、地質情報、施工情報、変状位置・方向・部位・連続性などを考慮した判定が必要となる場合もある。なお、レーザ計測においては、設計図書や複数回計測時の比較などを行うために、正確なポジショニングを行う必要があり、留意が必要である。

ひび割れ（微細ひび割れを除く）については、画像計測による代替と高機能化が可能である。点検要領では、3mm が対策区分の最小のしきい値であり、進行性の有無が確認できない場合には 3mm と 5mm がしきい値となる。そのため、計測の分解能は 0.3～0.5mm 程度より小さいことが望ましく、0.5mm 以下の刻みで判定できる必要がある。また、進行性については、複数回の計測結果を比較することで、進行性も確認できる。また、ひび割れ等の状況に基づく対策区分の目安では、ひび割れなどの閉合（ブロック化）も着目点であり、これらは、現在の画像計測技術で十分に捉えることができると判断できる。ただし、技術の利用にあたっては、必要な分解能を有した機器を用いる必要がある。

微細ひび割れについては、現状で実用化されている、0.5mm 以下の高分解能を有する画像計測技術を活用することで代替が可能である。微細ひび割れのみで対策区分を判定することはないが、画像計測により十分に検出することができるため、近接目視や打音検査による確認の必要はない。

また、遊離石灰を伴うひび割れについては、ひび割れを直接撮影することができないため、これまで述べてきているようなひび割れを確認・判定することができない。したがって、画像計測はあくまでも補完技術であり、近接目視による確認が必要である。

(2) うき・はく離

うき・はく離そのもの（ひび割れの状況など、目視で確認できる状況から判断できる場合を除く）については、現状の計測技術では、確実に捉えることは難しく、打音検査により確認が必要である。一方で、レーダ探査は、うき・はく離をコンクリートの内部欠陥としてある程度は捉えることができ、補完技術として活用することができる。レーダ探査をうき・はく離の補完技術として活用する場合には、高周波のアンテナを使用する必要がある。また、実用化されている技術は、覆工背面の空洞とは異なり、波形データの差分などを解析し、相対的に周囲とは異なる範囲を抽出するものである。そのため、うき・はく離以外の“異なる範囲”も抽出される。したがって、相対的な変化の検出されていない範囲を抽出し、打音を必要としない（うき・はく離の可能性がない）箇所を抽出し、抽出された箇所を打音により確認する手順が必要となり、補完技術の位置付けとなる。しかし、ひび割れなどの目視や画像解析で確認できる事象を伴わないうき・はく離は、現在の点検方法では見逃し易い。このようなうき・はく離の検出（見逃し防止）には、レーダ探査は非常に有効な技術である。

ひび割れの閉合・交差・分岐や目地沿いのひび割れについては、(1) でも述べたとおり画像

計測により抽出することが可能であり、ひび割れそのものの抽出は代替可能である。しかし、最終的には打音検査によって濁音をチェックした上で判定をする必要があり、補完技術の位置付けとなる。

ジャンカ・はく離・かけ、変色・劣化・漏水については、画像計測により確認することができるため、代替技術としての活用が可能である。

最終的な、うき・はく離判定には、近接目視時の打音検査により、濁音をチェックすることが必須であるが、レーダ探査や画像計測を、一部代替や支援技術として活用可能である。

(3) 変形・移動・沈下

レーザ計測では、トンネル内空の形状を正確に捉えることが可能となっているため、変形・移動・沈下を判定する際の代替技術として活用することができる。ただし、対策区分の判定には変形速度が必要となる。そのため、複数回計測により差分を取る必要がある。変形速度は、1mm／年が最小のしきい値、3mm、10mm が区分の目安となるため、レーザ計測とポジショニングの性能を併せて、1mm 以下の分解能で計測できる性能が必須である。機器の最小分解能としては、0.3～0.5mm 以下であることが望ましい。レーザ計測を活用することで、近接目視などは不要である。

(4) 鋼材腐食・鉄筋腐食

鋼材腐食による対策区分の判定は、目視により確認できる変状が対象となる。そのため、画像計測により判定が可能である。当然、目視でも確認できないような腐食については支援できない。全面の画像データから抽出することで、近接目視のみによる点検に比べて、見逃しなどを防止できることから、高機能化が可能である。画像計測を活用することで、近接目視は、画像計測結果を確認する程度の対応で十分である。

(5) 巻厚不足・背面空洞

覆工巻厚や背面空洞の調査については、通常の点検手順では、対策区分の判定はできない。背面空洞についても、同様である。巻厚不足や背面空洞を確認するためには、コア削孔とカメラ撮影により確認する必要があるが、調査位置の選定が難しい。そのため、非破壊で面的に覆工厚や空洞を調査できることができるレーダ探査による補完が有効である。レーダ探査には、大きく分けて非接触で計測ができる非接触のタイプ（ホーンアンテナ）と接触型のタイプがあり、それぞれ、複数のメーカーから様々な仕様・周波数の機器が実用化・販売されている。

走行型計測では、非接触のタイプを用いることになるが、探査可能な覆工厚は 45cm 程度までとなる（メーカーなどにより異なる）。ただし、空洞内（空気中）はコンクリート中とは異なり電磁波の伝播速度が速く（コンクリート中はおおむね 10cm/ns 程度なのに対し、空気中は高速にほぼ等しく 30cm/ns 程度）、減衰も少ないため、空洞が存在する場合はより深くまで探査可能である。

接触させるタイプのアンテナでは、適切な周波数のアンテナを採用することで、覆工厚がより厚い場合でも探査可能である。現場条件などによっても異なるが、80cm 程度までの探査も可能である。したがって、走行型計測による全体的な調査とは別に、近接目視の実施に併せて、追加で

詳細にレーダ探査を実施する手順も有効である。

ただし、巻厚不足に関しては、コンクリートの厚さだけではなく、有効な強度を有しているかどうかの確認も必要となる。レーダ探査では、ジャンカなどを捉えて強度不足を推定することはできるが、強度そのものを定量的に評価することはできない。また、非破壊の調査手法であるため、最終的には、コア削孔やカメラ観察などによる確認調査は必要である。確認調査の位置を適切に選定するための情報として活用できることも含めて、レーダ探査は、非常に有効な補完技術となる。

(6) 漏水など

漏水や遊離の位置や規模は、計測された画像で十分に判定可能であり漏水による対策区分の判定に対する補完技術として、活用可能である。

しかし、漏水量の判定は、漏水量そのものの観測が必須であり、画像計測等では判断できない。

なお、これらの計測技術は、組合せて活用することが有効な場合もある。圧ざ・ひび割れを伴う場合では、レーザ計測と画像計測、うき・はく離が伴う場合では、レーダ探査と画像計測を組合せることで、より高度な支援が可能となる。

5) 検証結果のまとめ

今回の検証結果全体を整理すると、以下のようになる。

① 多くの項目で、代替や補完による点検支援が可能となる。

② 変形・移動・沈下，鋼材腐食・鉄筋腐食，巻厚不足・背面空洞の 3 項目については、目視などによる点検よりもさらに高機能化が図れる技術であると判断できる。

③ ただし、各計測技術には、適用限界や一定の性能があるため、活用にあたってはそれらに留意して適切に使用する必要がある。

④ 画像計測やレーザ計測を取入れることで、多くの場合、目視が不要、または確認程度の実施で十分となる。

⑤ しかし、うき・はく離の評価に対して打音検査を省略することは困難である。

⑥ 点検においては、これらの計測技術を活用して省力化や効率化を図ると同時に、必要な目視点検や打音検査を実施した上で、診断を行うことが望ましい。

6) 今後の展開について

本章では、道路トンネル定期点検要領に則って状態把握および対策区分の判定を行うことを念頭に、画像計測、レーザ計測、レーダ探査により 6 つの変状を調査・評価するための支援の可能性について評価を行った。それぞれ可否の特徴は存在するものの、すべての変状においてその適用性が立証された。

一方で、例えば、近接目視を超越した、微細なひび割れ検出が可能な画像計測技術やコンクリート内部や、構造物の位置情報をより正確に把握できるレーザ計測技術、覆工背面の状況を捉えることができるレーダ探査技術などは、状態の把握においてさらなる高度な検出が可能となる。また、今後、AI 技術の活用により、計測結果を客観的・定量的に、技術者の判定や経験に頼らずに評価できることで、自動化に伴う省力化が可能となりうる。

したがって、今後の定期点検においては、点検要領に示す状態把握や対策区分の判定において、代替・補完することが可能なこれらの支援技術を活用することにより、さらに高度なトンネルの健全性評価が実現でき、コスト縮減や効率化に向けた実装化が可能となることを期待する。これらの結果を踏まえ、次章以降に支援技術を活用した診断方法や効果、これらの運用方法について述べる。

【参考文献】

1）走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化検討に関する研究 :研究成果報告書、新都市社会技術融合創造研究会　走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究プロジェクト、平成 25 年 3 月

2）道路トンネル定期点検要領、国土交通省　道路局　国道・防災課、平成 26 年 6 月

3）道路トンネル定期点検要領、国土交通省　道路局　国道・技術課、平成 31 年 3 月

4）道路トンネル維持管理便覧【本体工編】、日本道路協会、令和 2 年 8 月

5）シェッド、大型カルバート等定期点検要領、国道交通省、平成 31 年 3 月

6）近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務、国土交通省　近畿地方整備局、令和 3 年 3 月

7）道路トンネル変状に関する研究報告書　-判定・診断の考え方と変状事例、土木研究所、平成 29 年 3 月

8）トンネル補修・補強マニュアル、鉄道総合技術研究所、平成 19 年 1 月

9）設計要領第三集 トンネル保全編、東・中・西日本高速道路（株)、令和 2 年 7 月

10）トンネル変状対策工マニュアル、土木研究所、平成 15 年 2 月

11）トンネル補修・改築マニュアル（案)、ジェオフロンテ研究会、平成 20 年 3 月

9　支援技術を活用した診断

9.1 概要

画像計測、レーザ計測、レーダ探査技術等を活用し、従来点検に対してどこまでの支援ができるか、これまでの検証結果を踏まえ、外力性・材質劣化の判定、定期点検要領の判定目安、健全性診断への支援方法など点検要領に対する支援内容と支援レベル（補完・代替・高機能化）を整理することを目的とする。

従来点検において外力性・材質劣化の判定は、覆工に発生するひび割れをどのように評価するのか、判定者が保有する専門技術によって異なるため難易度が高いとされている。ここでは支援技術を活用することでどの程度の支援ができるのかを取りまとめる。

定期点検要領の判定目安は、診断をする上で重要な指標である。従来点検において判定目安の理解不足に起因する判定誤差が発生することもあるため、支援技術を活用することで従来点検をどこまで支援できるのかを 9.2.2 で取りまとめる。

健全性診断は、点検内容以外に維持管理資料やこれまでの研究成果なども活用し専門技術が最も必要な内容である。支援技術並びにその他の技術等を活用することで専門技術を保有する人材にどこまで近づく判定ができるのかを 9.2.3 で整理する。

従来点検と支援技術を活用した点検において、支援レベルを検討するために必要な閾値についても 9.1.1 で取りまとめる。

9.1.1 閾値（しきいち）の考え方

8.実トンネルにおける支援内容の検証（以下、8 章という）における計測精度に関する閾値に対し、道路トンネル定期点検要領で診断するための必要な閾値について、以下の基準類を参考に表 9.1.1 に整理した。

・道路トンネル定期点検要領、国土交通省　道路局　国道・技術課、平成 31 年 3 月
・道路トンネル維持管理便覧【本体工】、公益社団法人　日本道路協会、令和 2 年 8 月
・設計要領 第三集 トンネル保全編、東・中・西日本高速道路（株）、令和 2 年 7 月

表 9.1.1　閾値[1) 2) 3)] を参考に作成

変状種類	閾値（しきいち）			診断時の留意事項
	要素	計測精度（3～6章）	対策区分判定・診断（9章）	
①圧ざ・ひび割れ	幅	ひび割れ幅1.0mmを検出 （状態の把握における対策区分の判定可能）	ひび割れ幅3.0mm程度（目安例／0.3mm以上[※1)]） **⇒ひび割れ幅1.0mm程度** （NEXCOより／変位等確認が必要）	左記要素含め、ひび割れ密度、進行性（③参照）なども考慮する必要がある（はく落に繋がるものにも注意が必要）。 また、左記要素に追加し、ひび割れ最小分解能：0.3～0.5mm、ひび割れ幅の検出：0.5mm刻みとする。
	長さ	ひび割れの長さ及び、進行の有無	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 （維持管理便覧/付属資料）のひび割れ形態が分かるレベル	
	位置	ひび割れの位置及び、ひび割れ状況 （密集、外力性の有無）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 （維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
	色識別	変色箇所、豆板、漏水箇所のひび割れの有無	コンクリートに入ったひび割れが確認できるレベル （断面修復箇所、豆板などの材質劣化が確認できるレベル）	
②うき・はく離	大きさ	長さが0.05m以上の規模[※2)]が分かるレベル （近接目視と同等と想定）	**長さが0.05m以上の規模[※)]**が分かるレベル （近接目視と同等と想定）	左記要素含め、うき・はく離に繋がる外力性ひび割れ（①参照）、変形・移動・沈下（③参照）に伴うう き・はく離などにも配慮する必要がある
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	位置	ひび割れの位置（目地、コールドジョイント）及び、ひび割れ状況 （密集、外力性の有無）	アーチ、側壁並びに横断目地・水平打ち継ぎ目・ひび割れ沿いなどの見分けができるレベル	
③変形・移動・沈下	変形・移動・沈下量	誤差2mm程度	**1mm以上／年**	進行時期、停滞時期も存在する可能性が高いため、複数年での監視が必要
	位置	覆工、路面、歩道、監視員通路、監査廊など （坑門工は不可）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
④鋼材腐食	位置	範囲の検出	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	山岳トンネルにあるひび割れ防止筋なのか、RC構造なのかに留意が必要
	色識別	鋼材腐食の色判別 （鋼材の断面欠損やうき錆の100%検出は困難）	コンクリートと鋼材並びに鋼材腐食が分かるレベル	
⑤巻厚不足または減少、背面空洞	大きさ	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	巻厚は設計巻厚と有効巻厚が必要で、巻厚不足は巻厚のみ、突発性崩壊は巻厚と背面空洞で判定することに留意が必要
	形状	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	
	位置	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど （診断にはあまり影響ないと思われる）	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	強度[※3)]	（コンクリート強度試験で確認）	コンクリート設計基準強度との対比ができるレベル	
⑥漏水等による変状	位置	噴出、流下、滴水の検出 （にじみは、壁面の汚れなどの関係で100%検出は困難）	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	利用者への影響度合いで判定し、路面に発生する滞水状態についても留意が必要
	色識別	漏水、遊離石灰、凍害（つらら、側氷）の有無	にじみ、滴水、流下、噴出などの漏水と遊離石灰、つらら、側氷などが見分けられるレベル	

※1）ひび割れ幅0.3mm以上（維持管理便覧/凡例より）
※2）現場点検作業において、ううきを変状展開図に記載する大きさであり、経験に基づく規模
※3）強度は支援技術以外での対応

9.2 点検要領に対する支援内容

道路トンネル定期点検要領における図 9.2.1 に示す①～⑥の変状種類に対し、対策区分判定並びに健全度診断の支援内容を検討する。

表-解 7.1　変状種類及び変状区分との関係

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき・はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

補足１）変状種類は変状として現れる事象であり、変状区分は基本的には変状の要因を区分したものである。したがって、ここでの変状区分は、必要となる対策の区分とは異なることに注意する必要がある。例えば、材質劣化による巻厚不足や減少が生じている場合にも、必要に応じて外力への対策が必要となるなど。

補足２）変状区分とは、変状現象の要因を３つに区分（外力、材質劣化、漏水）したものをいう。

- 外力とは、トンネルの外部から作用する力であり、緩み土圧、偏土圧、地すべりによる土圧、膨張性土圧、水圧、凍上圧等の総称をいう。
- 材質劣化とは、使用材料の品質や性能が低下するものであり、コンクリートの中性化、アルカリ骨材反応、鋼材の腐食、凍害、塩害、温度収縮、乾燥収縮等の総称をいう。なお、施工に起因する不具合もこれに含む。
- 漏水とは、覆工背面地山等からの水が、トンネル坑内に流出することであり、覆工や路面の目地部、ひび割れ箇所等の水流出の総称をいう。なお、漏水等による変状には、冬期におけるつららや側氷が生じる場合も含む。

図 9.2.1　変状種類及び変状区分との関係 [1)]

道路トンネル定期点検要領の対策区分の定義を図 9.2.2 に示す。

定期点検では、道路トンネルの変状の状況から、変状毎に表-7.1の対策区分による判定を行う。

表-7.1　対策区分

区分		定　　義
Ⅰ		利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態。
Ⅱ	Ⅱb	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態。
	Ⅱa	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態。
Ⅲ		早晩、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に措置を講じる必要がある状態。
Ⅳ		利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態。

※1 判定区分Ⅳにおける「緊急」とは、早期に措置を講じる必要がある状態から、交通開放できない状態までを言う.

図 9.2.2　対策区分の定義 [1)]

道路トンネル定期点検要領の健全性診断の判定区分の定義を図 9.2.3 に示す。

覆工スパン毎及び道路トンネル毎の健全性の診断は、表-8.2 の判定区分により行う。

表-8.2　判定区分

区分		定義
Ⅰ	健全	道路トンネルの機能に支障が生じていない状態。
Ⅱ	予防保全段階	道路トンネルの機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
Ⅲ	早期措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
Ⅳ	緊急措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

図 9.2.3　判定区分の定義 [1)]

9.2.1 外力性、材質劣化の判定への支援

定期点検要領におけるひび割れ、うき･はく離、変形・移動・沈下に対し、画像計測（変状内容・進行性）、レーザ計測（変位・進行性）、レーダ探査（うき・はく離、巻厚・空洞）技術を活用し、外力性のひび割れ（うき･はく離、変形・移動・沈下）、材質劣化のひび割れ（うき･はく離）に対し、支援内容と支援レベル（補完・代替・高機能化）を判定する。

1)　点検要領やその他情報による判定への支援

外力診断では、現場で確認した変状（ひび割れ等）以外に、維持管理記録、地質情報、施工情報、変状位置・方向・部位・連続性などの基本情報が必要である。その基本情報と各種研究成果などを加え、外力性影響と判断されれば外力、判断できなければ材質劣化もしくは外力の可能性ありとなる（進行性の確認も必要）。

これらを判定するために必要な技術がひび割れ変状を見極めるということである。点検初見では発生したひび割れに対し、研究成果などを活用し、外力の可能性があるものか、材質劣化かを見極めることが重要である。これは従来点検、支援技術であってもかわらない。点検初見で外力の可能性があると判断されたひび割れに対し、地質情報・施工情報・維持管理記録などの維持管理情報を付加することで、整合性や進行性などを確認後、外力性か材質劣化かの判定を実施する。

外力性のひび割れと診断された場合、地山応力等によりひび割れ箇所にうきが発生する場合は、外力性のうきと診断する。ひび割れを外力性と診断するためには、継続的な変形・移動・沈下などの計測が必要となる。

支援技術を活用することで、画像計測によりひび割れが正確に確認できることから、研究成果を活用した判定が支援可能となる。従来点検で作成した変状展開図よりも正確で、視覚的にも変

状をとらえることが可能であり、研究成果との整合性を確認しやすくなる。さらに、レーザ計測データをもとにコンター解析を実施することで外力影響が発生しているのか確認もできることから、高度な専門技術が必要となる外力性か材質劣化かの判定の難易度が若干下がることが期待される。

図 9.2.4 に上記の外力性診断の判定の流れを示す。

外力診断に用いる各種研究成果として、図 9.2.5～図 9.2.9 にひび割れ形態から変状原因を推定し、外力性か材質劣化かを診断する資料①、図 9.2.10 にスパン内に発生したひび割れのうち、材質劣化と推定されるひび割れの発生位置、原因などが分かる資料②を示す。

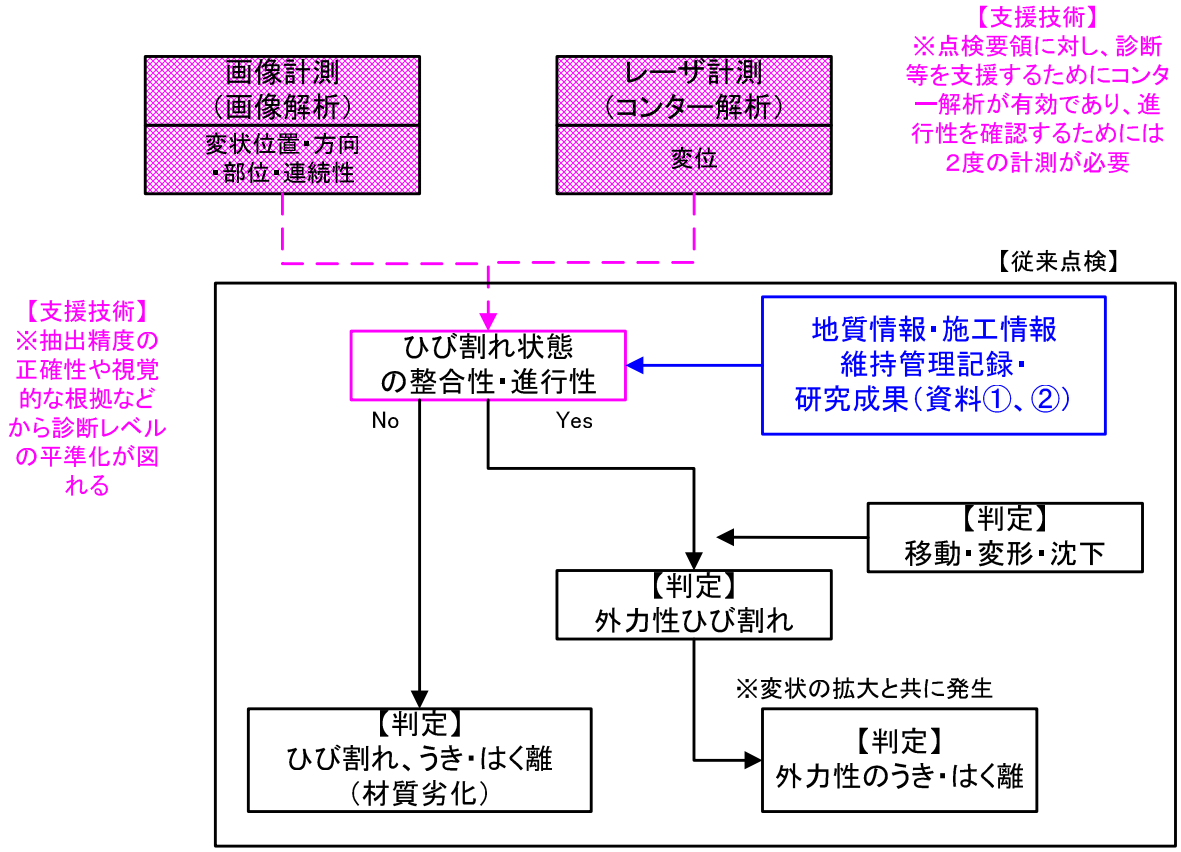


図 9.2.4　外力性診断の判定の流れ

資料①：研究成果（道路トンネル維持管理便覧【本体工編】R2.8　参考資料からの抜粋）

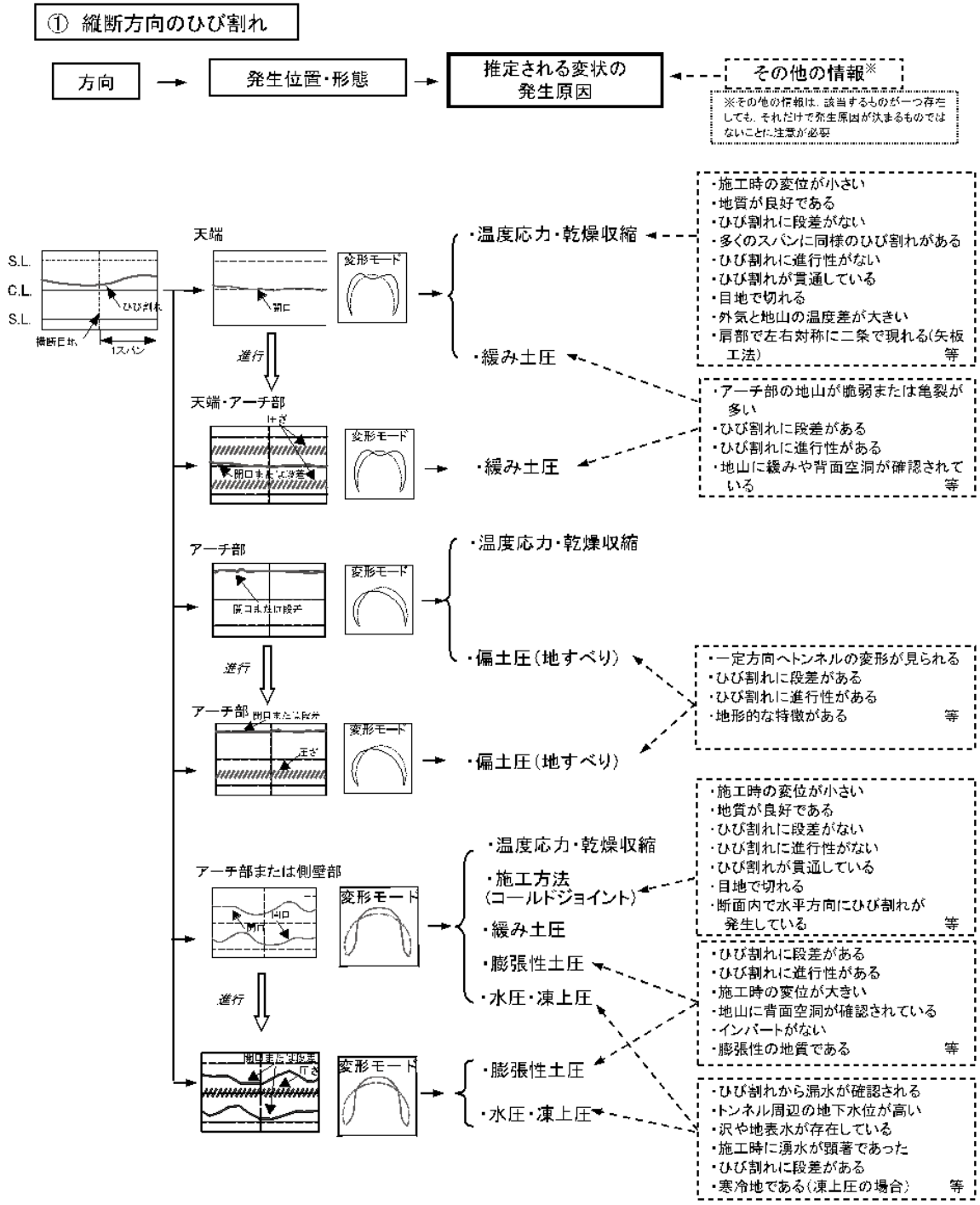


図 9.2.5　縦断方向のひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 [2)]

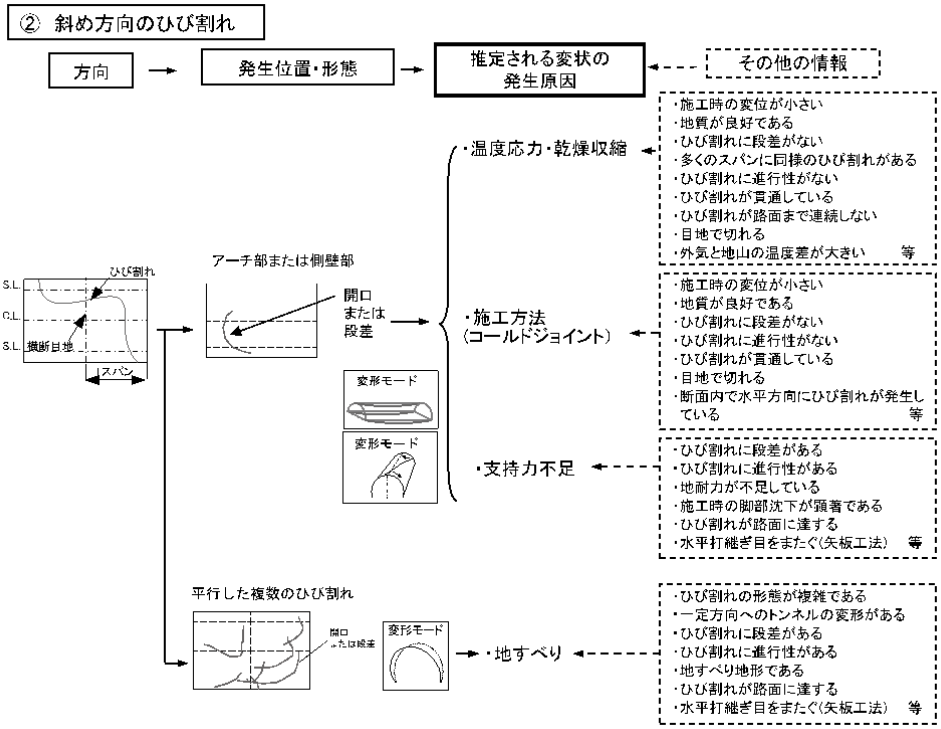


図 9.2.6　斜め方向のひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 [2)]

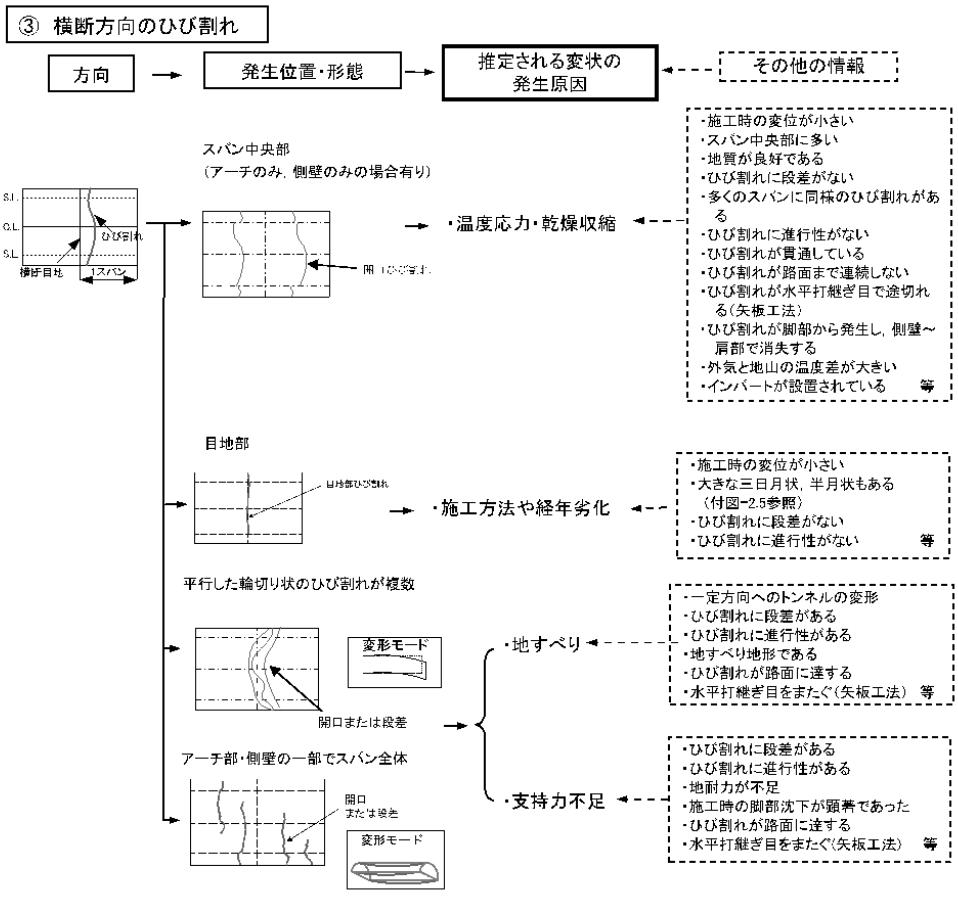


図 9.2.7　横断方向のひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 [2)]

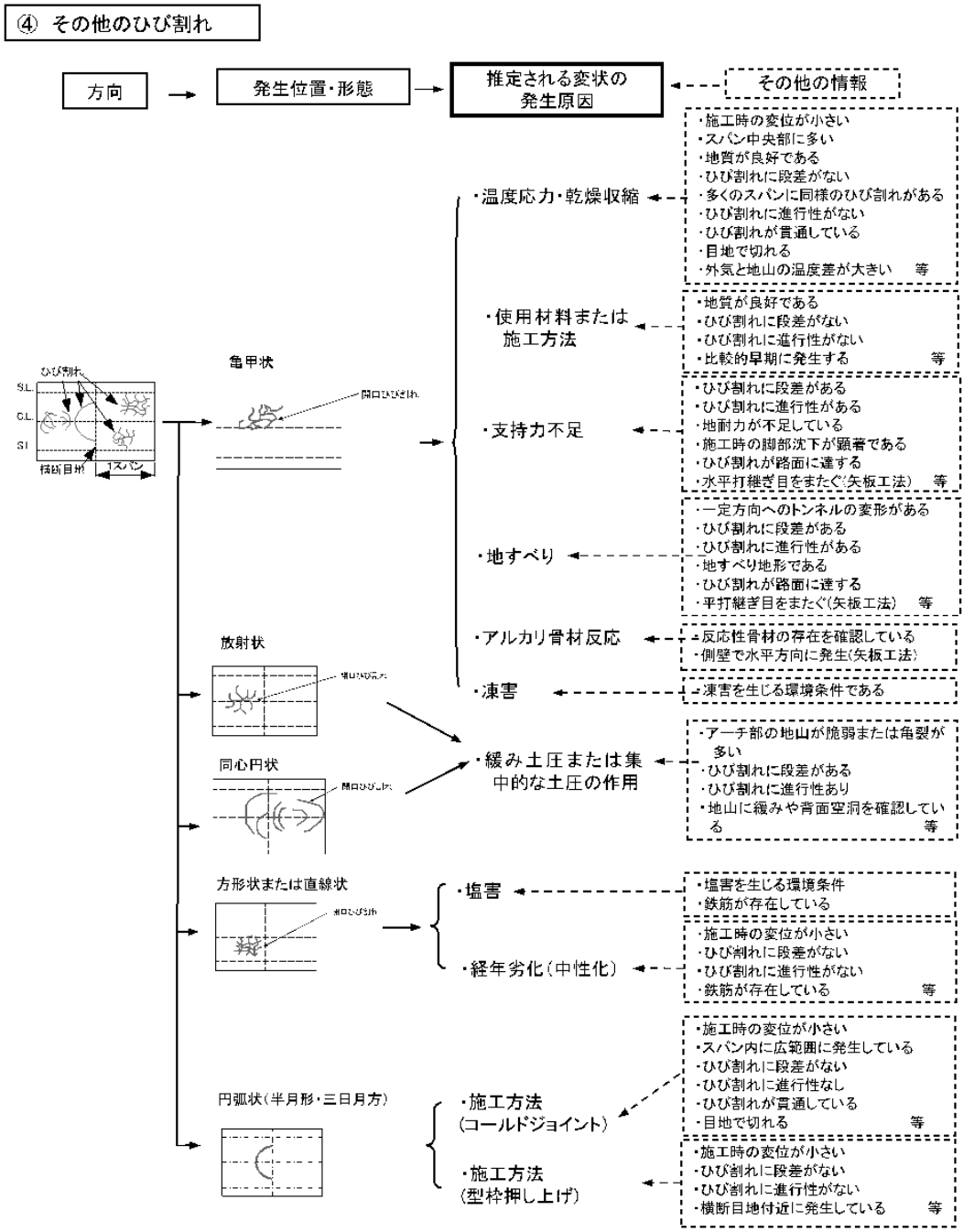


図 9.2.8　その他のひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 [2)]

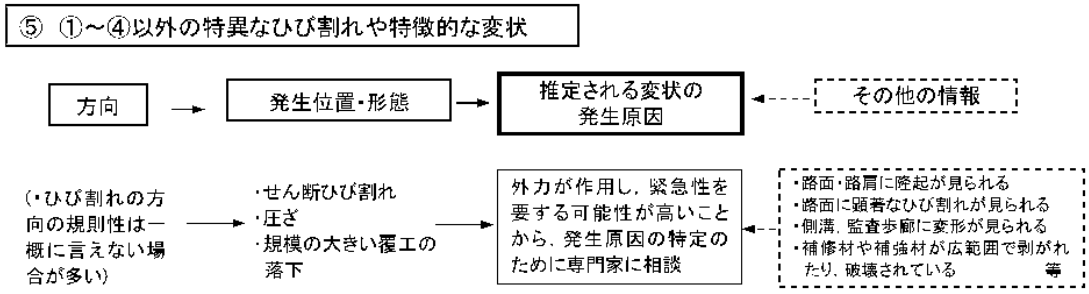


図 9.2.9　特異なひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 [2)]

2)　まとめ

(1)　従来点検と支援技術の整理

前記した内容について、どのように判断するのかを整理した。

表 9.2.1　従来点検と支援技術の違い

変状	判定に至る手順							従来点検と支援技術の違い
ひび割れ	ひび割れ（方向、位置、場所）	→	進行性未確認 発生形態確認（研究成果）	⇒	材質劣化	進行		【従来】近接目視＋**専門技術：大** 【支援】画像計測＋コンタ解析＋**専門技術：中～小**
				⇒	外力性の疑い	⇒	外力性	
うき・はく離	ひび割れ沿い、目地・打ち継ぎ目	外力進行後 →	うき	⇒	外力性			【従来】=【支援】 ※近接目視（計測）や打音検査との組み合わせ必要
		外力性なし →	うき	⇒	材質劣化			
変形・移動・沈下	ひび割れ	進行 →	変形・移動・沈下	⇒	外力性			
	段差・沈下	進行 →	変形・移動・沈下	⇒	外力性			

(2)　支援内容

画像計測（正確）、レーザ計測（視覚的）結果から、事前情報を踏まえ、正確で視覚的に分かりやすい外力影響位置や状態が確認できるため、前記した基本情報、研究成果を活用し外力判断の有無が確認できると考えられる。

①　外力の可能性がないスパンは抽出可能（外力性の疑いのあるスパン含む）である。

②　従来点検では、近接目視により外力の疑わしい変状箇所に対し、維持管理資料の確認や計測により外力判定を行ったことに対し、支援技術により正確な位置で、視覚的な変位量などから、外力影響の判定が可能（ただし、専門技術は必要）である。

③　定期点検毎の画像計測（正確）、レーザ計測（視覚的）が必要。（外力影響が疑わしいトンネルが対象）なお、従来点検で作成した変状展開図との対比は難しい（計測レベルの差が大きい）。

④　外力影響がないと判断されるトンネルでの計測頻度（レーザ計測）は今後の課題である。

(3)　支援レベル

画像計測による外力性・材質劣化の判定ができる変状展開図作成は代替可能である。それに加えレーザ計測によるコンター解析を追加することで高機能化すると考えられる。

9.2.2 判定の目安に対する支援

3 章（画像計測）、5 章（レーダ計測）、6 章（レーザ計測）の支援技術の検証、8 章における支援内容の検証を踏まえ、ひび割れ、うき・はく離、変形・移動・沈下、巻厚の不足または減少、突発性の崩壊、漏水の判定の目安値について、どの技術（画像計測、レーザ計測、レーダ探査）で支援可能かの整理と支援レベル（補完・代替・高機能化）を整理する。

特に判定の目安値に着目し、現状ではどこまでの支援が可能か、他技術との組み合わせで支援可能なのか、支援が困難かなど具体的な支援内容について検討する。

(1)　各変状区分に対する判定の目安に対する支援内容の検討

次頁以降に変状区分毎の検討結果を表 9.2.2～表 9.2.9 に示す。

表 9.2.2　判定の目安に対する支援内容（1）[1)を加工]

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性

①圧ざ・ひび割れ（外力）

付表-2.2 点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の対策区分の目安例（矢板工法）

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ 幅[補足1)] 5mm以上	幅 3～5mm	幅 3mm未満	長さ[補足2)] 10m以上	長さ 5～10m	長さ 5m未満	対策区分
覆工	断面内			○	○	○	○	Ⅰ、Ⅱb、Ⅱa[補足3)]
			○				○	Ⅱb、Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ[補足4)]
		○				○		Ⅲ
		○			○			Ⅳ

補足1）　連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。

補足2）　覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする（覆工スパン単位のひび割れ長さでは評価しない）。

補足3）　3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。

Ⅰ、Ⅱb：ひび割れが軽微で、外力か材質劣化か判断が難しい場合
Ⅱa：地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合
なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。

補足4）　ひび割れ幅が5mm 以上でひび割れ長さが5m 未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生原因を考慮して、判定を行う。

付表-2.3 調査の結果、ひび割れの進行が確認された場合の対策区分の目安例（矢板工法）

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ 幅 3mm以上	幅 3mm未満	長さ 5m以上	長さ 5m未満	対策区分
覆工	断面内		○	○	○	Ⅱa、Ⅲ
		○			○	Ⅲ
		○		○		Ⅳ

ひび割れ

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
ひび割れ幅，長さ，進行性，ひび割れ密度	画像計測	○
外力性判定	レーザ計測	○

・画像解析により、ひび割れ幅（0.3mm以上）、長さ、進行性、ひび割れ密度を判定可能
・コンタ解析により、外力影響の有無を判定可能

上記のとおり代替可能である。
・ひび割れ幅、長さが確認できる。
・進行性の確認は、変形・移動・沈下を参照。

診断に向けた判定方法（案）
【付表-2.2】
・補足3)のⅠ、Ⅱb判定の見分け方
⇒監視が必要：Ⅱb、監視不要：Ⅰ
・補足4)のⅡb、Ⅱa、Ⅲ判定の見分け方
⇒外力の可能性があり幅が極端に大きい（せん断ひび割れが確認されている）：Ⅲ、
外力の可能性がある：Ⅱa、
外力の可能性がない：Ⅱb（監視必要）
【付表-2.3】
・幅3mm未満のⅡa、Ⅲ判定の見分け方
⇒長さ5m以上（現場状況に応じて判断）：Ⅲ、長さ5m未満：Ⅱa
・ひび割れ計測ではなく、走行型計測で2回以上の測定しても確認可能
・コンタ解析を付加することが充実につながり、専門技術は必要となるが、外力性の診断は可能。

※AI導入によって効率化が図れる可能性が高い

表 9.2.3　判定の目安に対する支援内容（2）[1)を加工]

<table>
<tr><th>「道路トンネル維持管理便覧」に示される判定の目安</th><th>走行型計測の適用性</th></tr>
<tr><td>

①ひび割れ（材質劣化）

乾燥収縮等を原因とする材質劣化によるひび割れの対策区分の判定は，監視の要否に着目し，表-4.2.16を参考に行う。

表-4.2.16　乾燥収縮等を原因とする材質劣化によるひび割れに対する対策区分

<table>
<tr><th>対策区分</th><th>変状の状態[注1)，注2)]</th></tr>
<tr><td>Ⅰ</td><td>ひび割れが生じていても，措置を必要としない状態</td></tr>
<tr><td>Ⅱb</td><td>ひび割れがあり，将来的に構造物の機能に影響を及ぼす可能性があるため，監視を必要とする状態</td></tr>
</table>

注1)　ここでいうひび割れは，乾燥収縮等によるひび割れを対象とする。塩害，アルカリ骨材反応，凍害といった乾燥収縮等以外を原因とするひび割れについては，別途調査を実施して判定する。

注2)　ひび割れ幅が著しく大きく，外力による変状が助長されることが懸念される場合は，措置の要否を個別に検討する。

</td><td>

ひび割れ

<table>
<tr><th>変状の判定項目</th><th>対応技術</th><th>適用の判定</th></tr>
<tr><td>ひび割れ幅，長さ，進行性，ひび割れ密度</td><td>画像計測</td><td>○</td></tr>
</table>

・画像解析により、ひび割れ幅（0.3mm以上）、長さ、進行性、ひび割れ密度を判定可能

上記のとおり代替可能である。
・ひび割れ幅、長さが確認できる。

診断に向けた判定方法（案）
【Ⅰ、Ⅱb判定の見分け方】
・塩害、アルカリ骨材反応、凍害による材質劣化をどう判定するか。
⇒道路トンネル維持管理便覧【本体工編】の付属資料参照

※AI導入によって効率化が図れる可能性が高い

</td></tr>
</table>

表 9.2.4　判定の目安に対する支援内容（3）[1)を加工]

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安

②うき・はく離

付表-2.6 うき・はく離等に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況[補足1)]	異常打音[補足4)] 有	異常打音[補足4)] 無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合のおそれがない	Ⅱb ⇒確認可能	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱb
		ひび割れ等が閉合しブロック化[補足2)]している	Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化[補足3)]している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ

⇒これで判定し、打音検査を併用

補足1）　ひび割れ等が外力による場合は変状区分の外力として、材質劣化による場合は変状区分の材質劣化として判定する。

補足2）　ブロック化とは、ひび割れ等が単独またはひび割れと目地、コールドジョイント等で閉合し、覆工が分離した状態をいう。

補足3）　補修材等のうき・はく離については、本体工に生じるうきに比べてその厚さが薄いことが多いため、発生位置等を考慮し、判定することが考えられる。

補足4）　打音異常が認められない場合、一般的には対策区分Ⅱbと考えられるが、下記の場合は対策区分Ⅱaまた
- ブロック化の面積が大きい場合
- ひび割れの発生状況から落下の危険性が考えられる場合
- ブロック化が進行している場合
- 劣化要因が明確な場合や寒冷地等の厳しい環境条件下にある場合

⇒Ⅲ、Ⅱa判定とするための専門技術が必要

走行型計測の適用性

うき・はく離

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
うき・はく離	レーダ探査	△
ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	○～△

上記のとおり代替は難しく、他の技術と併用することで補完は可能である。
- ひび割れ、ひび割れ閉合、ブロック化、材質劣化などは画像計測で確認は可能。
- 異常打音が無の場合を活用した判定は可能。
- ひび割れを伴わないうきは目安例にないことから、Ⅱb判定とする。

診断に向けた判定方法（案）
- 画像計測によって、うき・はく離がないスパンの抽出ができることからスクリーニングとして実施。
- うき・はく離の可能性のあるスパンを対象に打音検査を実施し、診断する。
- ただし、判定する場合も補足4)のような定量的に判断できない部分があり、従来点検同様に専門技術が必要。

※AI導入によって効率化が図れる可能性が高い

表 9.2.5　判定の目安に対する支援内容（4）[1)を加工]

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性

③変形，移動，沈下

付表-2.9 変形速度に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	変形速度 10mm/年以上（著しい）	変形速度 3～10 mm/年（進行がみられる）	変形速度 1～3 mm/年（進行がみられる～緩慢）	変形速度 1mm/年未満（緩慢）	対策区分
覆工 路面 路肩	断面内				○	Ⅱb、Ⅱa
				○		Ⅱa
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

補足）　変形速度1～3mm の場合の判定例を下記に示す。
Ⅱa：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が低い場合
・変形量自体が小さい場合
・変形の外的要因が明確でないまたは進行も収束しつつある場合 等
Ⅲ：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が高い状態
・変形量自体が大きい場合
・地山からの荷重作用が想定される場合（変形の方向が斜面方向と一致するなど）

変形

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
変形速度	レーザ計測	○
変状位置	画像計測	○

変状の位置は画像計測で確認可能。
1回の計測で変形速度自体は検出できないが、推定は可能。変形の有無や変形モードは判定可能。

上記のとおり代替可能である。

診断に向けた判定方法（案）
・1年毎の変位を確認する必要があり、変形速度を確認し、診断するためにはレーザ計測の頻度の検討が必要。
・定期点検のサイクルが5年毎に対し、計測頻度が多くなるため、レーザ計測の活用は現実的ではない。

・定期点検時に変状進行の可能性があれば別の計測に移行。
・特に異常が確認されないトンネルであれば、定期点検毎の計測で対応。（従来点検と同等）
・コンタ解析を付加することが充実につながり、専門技術は必要となるが、外力性の診断は可能。

・5年毎に実施することになると計測頻度に関するルール化が必要。

※AI導入によって効率化が図れる可能性が高い

表 9.2.6　判定の目安に対する支援内容（5）[1)を加工]

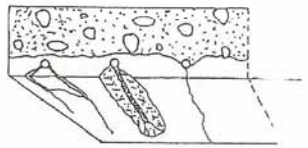
「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性
④鋼材腐食 ［ひび割れ、はく落がみられ鉄筋が露出している。］  はく落している周囲の打音検査  ういている箇所はできるだけたたき落としたが、残存しており、ひび割れも伴う。コンクリートも全体に劣化しておりはく落した場合は交通の支障となる。 付図-2.2　鋼材腐食の例  付写真-2.2　鋼材腐食の例	鋼材腐食 変状の判定項目 / 対応技術 / 適用の判定 鋼材腐食 / 画像計測 / ○ ・鋼材の状態が確認できれば判定可能 **上記のとおり代替可能。** **診断に向けた判定方法（案）** **ひび割れ防止筋・RC構造部材か、それ以外の鉄筋混入かを判断する必要があるため、ひび割れと同様に施工情報、維持管理記録による構造確認が必要。** **※AI導入によって効率化が図れる可能性が高い**

表 9.2.7　判定の目安に対する支援内容（6）[1)を加工]

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性

⑤巻厚の不足または減少、背面空洞

付表-2.15 巻厚の不足または減少に対する対策区分の目安例（矢板工法の場合）

箇所	主な原因	有効巻厚/設計巻厚			対策区分
		1/2 未満	1/2 ～2/3	2/3 以上	
アーチ・側壁	経年劣化 凍害 アルカリ骨材反応 施工の不適切など			○	Ⅱb
			○		Ⅱa、Ⅲ
		○			Ⅲ、Ⅳ

補足）有効巻厚／設計巻厚が1/2 未満は対策区分Ⅲ、1/2～2/3 は対策区分Ⅱa を基本とするが、巻厚不足に起因するひび割れや変形の発生が認められる場合、対策区分をそれぞれⅣ、Ⅲへ1ランク上げて判定することが考えられる。なお、有効巻厚としてはコンクリートの設計基準強度以上の部分とし、設計基準強度が不明な場合は15N/mm2 以上の部分とする。

有効巻厚

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
覆工巻厚	非接触 レーダ探査	△

・巻厚30cm以下なら確認できる。
・判定目安から逆算すると巻厚45cm以下しか判定できないことになる。巻厚45cm以上が確認される場合は、極端に薄い箇所がないかのスクリーニングと考える。
・コンクリート強度が確認できないことから巻厚が薄い箇所のスクリーニングで活用可能。

⇩

・上記のとおり代替は難しいが補完は可能。

診断に向けた判定方法（案）
・スクリーニングとしての活用は、NATMなどの巻厚が薄い場合には、十分対応可能。
・矢板工法においても巻厚が薄い箇所を抽出後、打音検査などの規制時に接触レーダ探査やコア削孔を行い診断を実施することで代替可能。

表 9.2.8　判定の目安に対する支援内容（7）[1)を加工]

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞	突発性崩壊

付表-2.16 突発性の崩壊のおそれに対する対策区分の目安例[補足1)]

覆工巻厚（有効巻厚）＼背面空洞深さ	大[補足2)]（30cm 以上程度）	小（30cm 未満程度）
小（30cm 未満程度）	Ⅲ、Ⅳ[補足3)]	－[補足5)]
大（30cm 以上程度）	Ⅱa、Ⅲ[補足4)]	

⇒判定が難しい

補足1）本表は矢板工法による道路トンネル（二車線程度）を想定した場合の目安例である。
補足2）判定にあたっては、背面空洞および巻厚不足箇所の平面的な広がりも考慮する。
補足3）地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は、Ⅲとして判定することができる。
補足4）背面空洞が側面の場合、あるいは地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は、Ⅱa として判定することができる。
補足5）背面空洞の深さが30cm 程度未満の場合は、覆工の性状、覆工背面の土砂等の堆積、漏水の状態を考慮して判定する。

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
背面空洞深さ	非接触レーダ探査	△

・巻厚30cm程度なら背面空洞として約1.0m程度まで確認が可能。
・覆工巻厚30cm以上で背面空洞深さ30cm以上の場合の判定は特に難しい。
・上記以外で、覆工変状や維持管理履歴などから疑わしい箇所はレーダ計測での確認が必要（スクリーニングでの活用は可能）
・アーチ天端のみしか情報がないため診断するためには接触レーダ探査との併用が必要。

・上記のとおり代替は難しいが補完は可能。

診断に向けた判定方法（案）
・巻厚が薄くない箇所のスクリーニングとしての活用は可能。
・背面空洞がある箇所を抽出後、打音検査などの規制時に接触レーダ探査やコア削孔を行い診断を実施することで代替可能。

表 9.2.9　判定の目安に対する支援内容（8）[1)を加工]

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安	走行型計測の適用性

⑥漏水等による変状

付表-2.19 漏水等による変状に対する対策区分の目安例

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		対策区分[補足2)]
		噴出	流下	滴水	浸出（にじみ）	有	無[補足1)]	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ

補足1）「無」は、安全性にほとんど影響がないことを表す（安全性に影響がない場合の対策区分は一般的にⅠとなる）。

補足2）土砂流入等による排水機能の低下が著しい場合、路面・路肩の滞水による車両の走行障害が生じている場合、路床路盤の支持力低下が顕著な場合、舗装の劣化，氷盤の発生、つらら、側氷等による道路利用者への影響が大きい場合は対策区分を1ランク上げて判定することが考えられる。
また、判定にあたっては、降雨の履歴や規模、及び部位区分の影響を考慮し判定することが望ましい。

漏水

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
漏水・遊離石灰・つらら、側氷	画像計測	○～△
漏水量	－	×
滞水・土砂流出・凍結	画像計測	○～△

上記のとおり代替は難しいが補完は可能。
・計測中に漏水がカメラ等に影響すると計測不可能となるので注意が必要。
・アーチ、側壁については、にじみ（遊離石灰）のみは画像にて確認可能であるが、噴出、流下、滴水の順番で確認するのが難しくなる。一方で、変状としては滴水、流下、噴出の順番で確認頻度が低くなる。一番発生の可能性の高い滴水が最も確認するのが難しい。
・従来点検でも、天候に左右される変状であり、同等レベルかそれ以下となる。

診断に向けた判定方法（案）
・滴水、流下、噴出の場合は、路面の滞水などで確認できるため、路面滞水が確認された段階で現地確認が必要。
・現地確認することで従来点検と同定レベルとなることから代替可能。

※AI導入によって効率化が図れる可能性が高い

9.2.3 健全性診断に対する支援

8 章、9.2.1～9.2.2 からを踏まえ、画像計測、レーザ計測、レーダ探査技術を使った場合の、対策区分の判定の目安や対策区分別変状例などへの各評価基準との整合性、各項目毎の判定に関する支援内容と健全度評価するための支援レベル（補完・代替・高機能化）を整理する

1) 項目

整理項目は、①圧ざ･ひび割れ（9.2.1 で取りまとめ）、②うき･はく離、③変形・移動・沈下、④鋼材腐食、⑤巻厚の不足または減少、背面空洞、⑥漏水等による変状

2) 変状毎の検討

上記の変状項目ごとに支援技術の適用性について、図 9.2.11～図 9.2.22 に示す。

【圧ざ、ひび割れ】ひび割れの進行の有無が確認できない場合　**⇒診断に至る導き方について表 9.2.2 で整理**

※画像計測で作成した変状展開図により代替可能

付表-2.2　点検時(ひび割れの進行の有無が確認できない場合)の対策区分の目安例(矢板工法)

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ 幅[補足1] 5mm以上	幅 3～5mm	幅 3mm未満	長さ[補足2] 10m以上	長さ 5～10m	長さ 5m未満	対策区分
覆工	断面内			○	○	○	○	Ⅰ、Ⅱb、Ⅱa[補足3]
			○				○	Ⅱb、Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ[補足4]
		○				○		Ⅲ
		○			○			Ⅳ

補足 1)連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。

補足 2)覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする(覆工スパン単位のひび割れ長さでは評価しない)。

補足 3)3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。

Ⅰ、Ⅱb:ひび割れが軽微で、外力か材質劣化か判断が難しい場合

Ⅱa:地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合

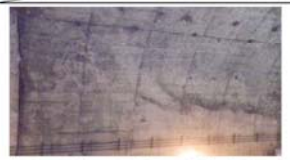
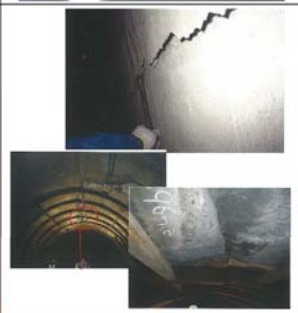
なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。

補足 4)ひび割れ幅が 5mm 以上でひび割れ長さが 5m 未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生原因を考慮して、判定を行う。

付表-2.1　圧ざ、ひび割れに対する対策区分

Ⅰ		ひび割れが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa	ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態

付表-2.4　圧ざ、外力によるひび割れに対する対策区分別変状例

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			ひび割れが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa		ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ			ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態
備考			
ひび割れについては将来的な進行を考慮の上、判定することが考えられる。			

従来点検の代替は可能。画像計測による正確性向上、コンター解析の外力影響判定により高度な専門技術が若干軽減される。

図 9.2.11　変状ごとの支援技術の適用性（1）[1)を加工]

【圧ざ、ひび割れ】ひび割れの進行の有無が確認できない場合　**⇒診断に至る導き方について表 9.2.2 で整理**

※画像計測で作成した変状展開図により代替可能

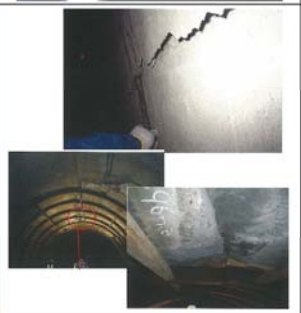
付表-2.3　調査の結果、ひび割れの進行が確認された場合の対策区分の目安例(矢板工法)

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ				対策区分
		幅		長さ		
		3mm 以上	3mm 未満	5m以上	5m未満	
覆工	断面内		○	○	○	Ⅱa、Ⅲ
		○			○	Ⅲ
		○		○		Ⅳ

付表-2.1　圧ざ、ひび割れに対する対策区分

Ⅰ		ひび割れが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa	ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態

付表-2.4　圧ざ、外力によるひび割れに対する対策区分別変状例

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			ひび割れが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa		ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			ひび割れが密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ			ひび割れが大きく密集している、またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している、または圧ざがあり、緊急に対策を講じる必要がある状態
備考			
ひび割れについては将来的な進行を考慮の上、判定することが考えられる。			

従来点検の代替は可能。画像計測による正確性向上、コンタ解析の外力影響判定により高度な専門技術が若干軽減される。

図 9.2.12　変状ごとの支援技術の適用性（2）[1)を加工]

【ひび割れ】材質劣化　**⇒診断に至る導き方について表 9.2.3 で整理**

※画像計測で作成した変状展開図により代替可能

乾燥収縮等を原因とする材質劣化によるひび割れの対策区分の判定は，監視の要否に着目し，**表-4.2.16** を参考に行う。

表-4.2.16　乾燥収縮等を原因とする材質劣化によるひび割れに対する対策区分 [1)]

対策区分	変状の状態[注1)，注2)]
Ⅰ	ひび割れが生じていても，措置を必要としない状態
Ⅱb	ひび割れがあり，将来的に構造物の機能に影響を及ぼす可能性があるため，監視を必要とする状態

注 1）ここでいうひび割れは，乾燥収縮等によるひび割れを対象とする。塩害，アルカリ骨材反応，凍害といった乾燥収縮等以外を原因とするひび割れについては，別途調査を実施して判定する。

注 2）ひび割れ幅が著しく大きく，外力による変状が助長されることが懸念される場合は，措置の要否を個別に検討する。

従来点検の代替は可能。画像計測による正確性向上、コンタ解析の外力影響判定により高度な専門技術が若干軽減される。

図 9.2.13　変状ごとの支援技術の適用性（3）[1)を加工]

3) 診断方法

(1) 診断方法

具体的な診断方法を図 9.2.14 に示す。

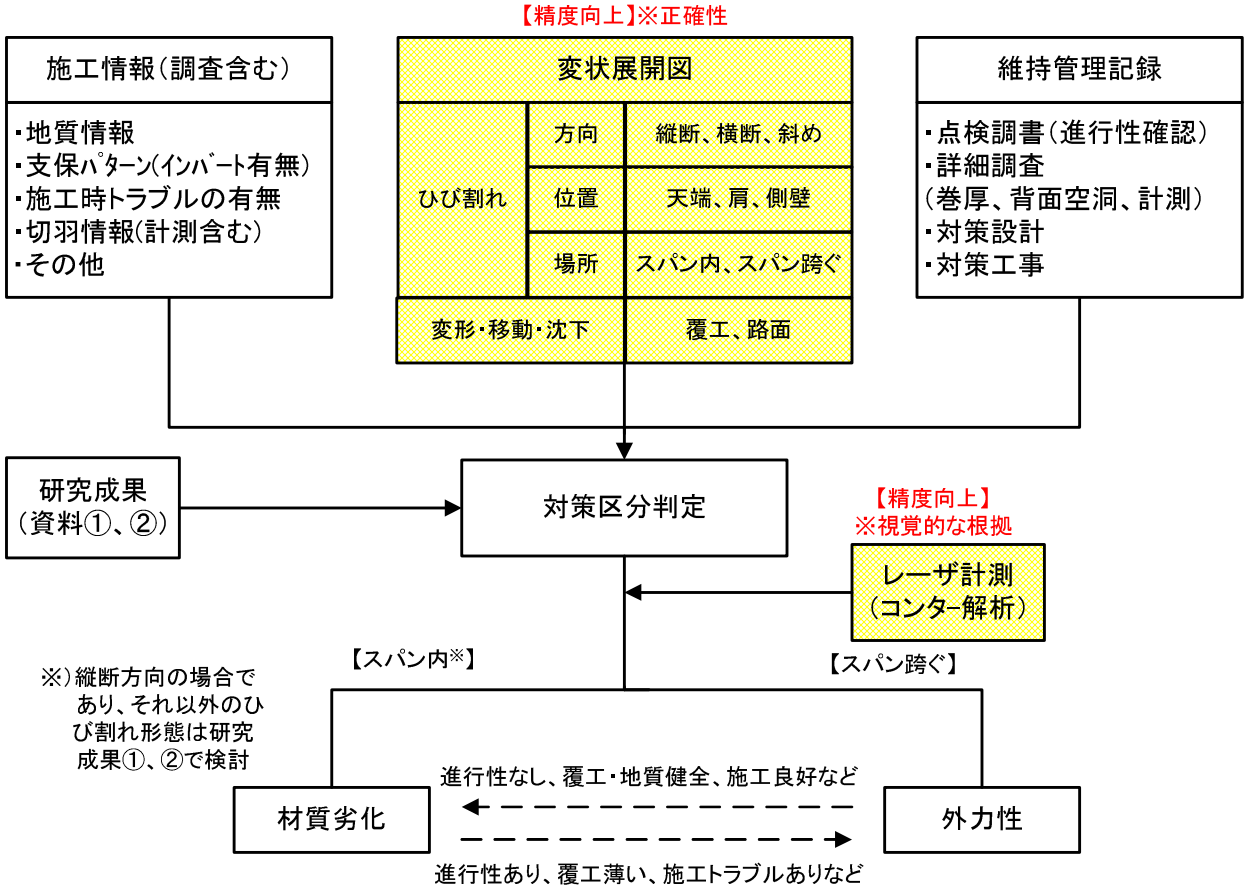


図 9.2.14 研究フローチャート

① 図 9.2.14 から分かるように外力性診断は変状展開図の精度に大きく影響する。

② それに加え、施工情報（調査含む）、維持管理記録の情報量にも影響する。

③ 上記２つを参考に、これまでの研究成果（資料①、②／図 9.2.5～図 9.2.10）を踏まえて対策区分の判定を行う。

④ 変状進行性の確認では、維持管理記録による確認も重要である。しかし、ひび割れなどは幅が大きくなったり、小さくなったりすることが多く、進行性が確認できないケースが多い。

⑤ これにレーザ計測結果によるコンター解析を追加することで、覆工への地山応力影響度合いを確認することが可能である。ただし、２回の計測が必要となるため、定期点検毎の確認は必要である。

(2) 診断検討手順（図 9.2.15 の説明）

① 対策区分判定では、変状展開図から、スパン内の変状は材質劣化、スパンを跨ぐ変状は外力と仮判定（縦断方向ひび割れの場合）し、施工情報、維持管理記録、コンター解析などから外力影響、材質劣化影響のどちらか判定する。

② スパン内であっても外力、スパンを跨ぐ場合であっても材質劣化となるケースもあるため、正確な変状状態を把握し、様々な情報を分析し、判定することが重要である。

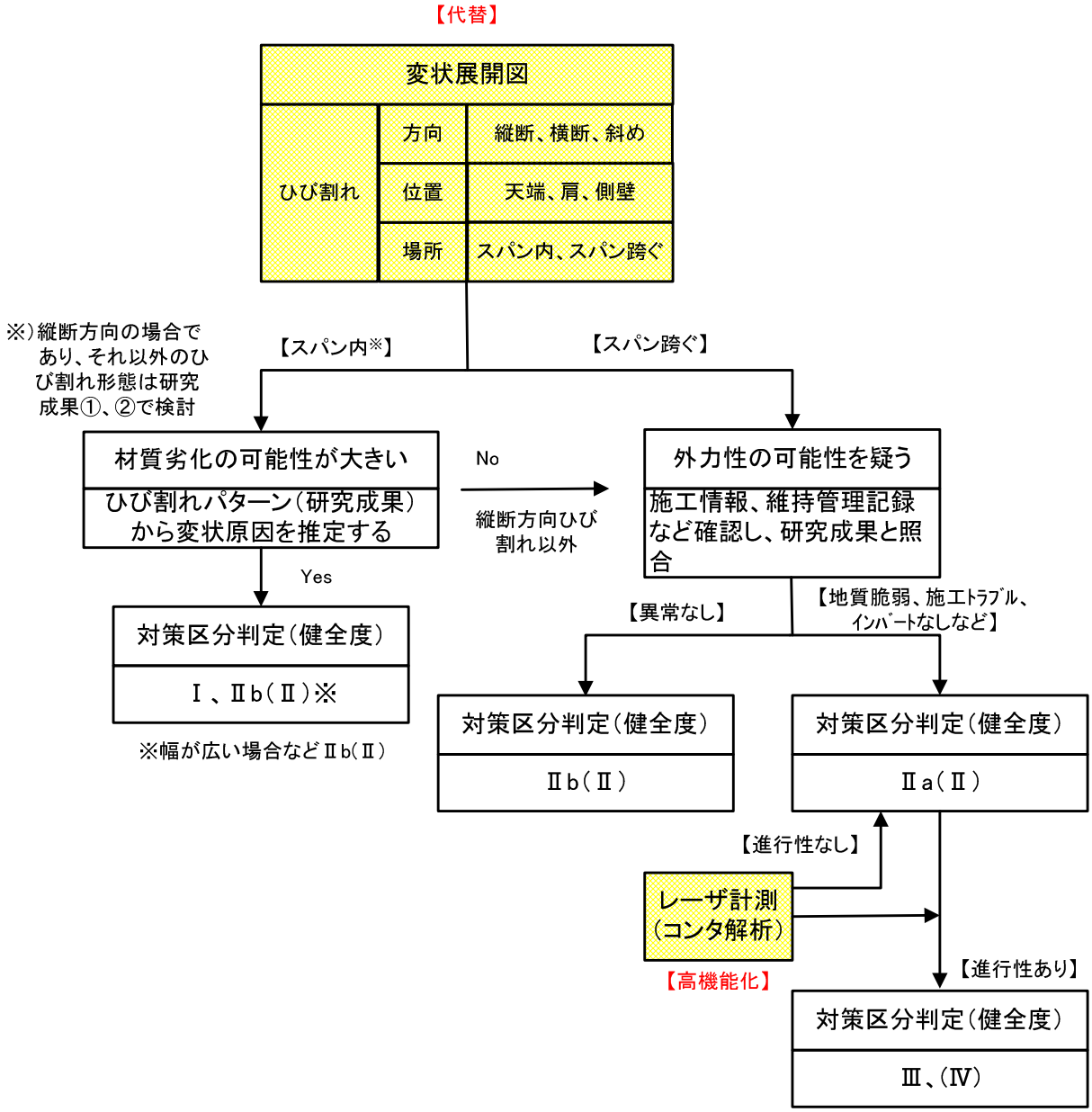


図 9.2.15　ひび割れ箇所に対する診断への導き方（案）

【うき・はく離】**⇒診断に至る導き方について表 9.2.4 で整理**

※打音異常無のみの判定となり補完となる

付表-2.6 うき・はく離等に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況[補足1]	打音異常[補足4] 有	打音異常[補足4] 無
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても閉合のおそれがない	Ⅱb	
		ひび割れ等は閉合してはいないものの、ひび割れの進行により閉合が懸念される	Ⅲ	Ⅱb
		ひび割れ等が閉合しブロック化[補足2]している	Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化[補足3]している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ
		覆工コンクリートや骨材が細片化している、あるいは豆板等があり材質劣化している	Ⅲ、Ⅳ	Ⅱb、Ⅱa、Ⅲ

補足1）ひび割れ等が外力による場合は変状区分の外力として、材質劣化による場合は変状区分の材質劣化として判定する。

補足2）ブロック化とは、ひび割れ等が単独またはひび割れと目地、コールドジョイント等で閉合し、覆工が分離した状態をいう。

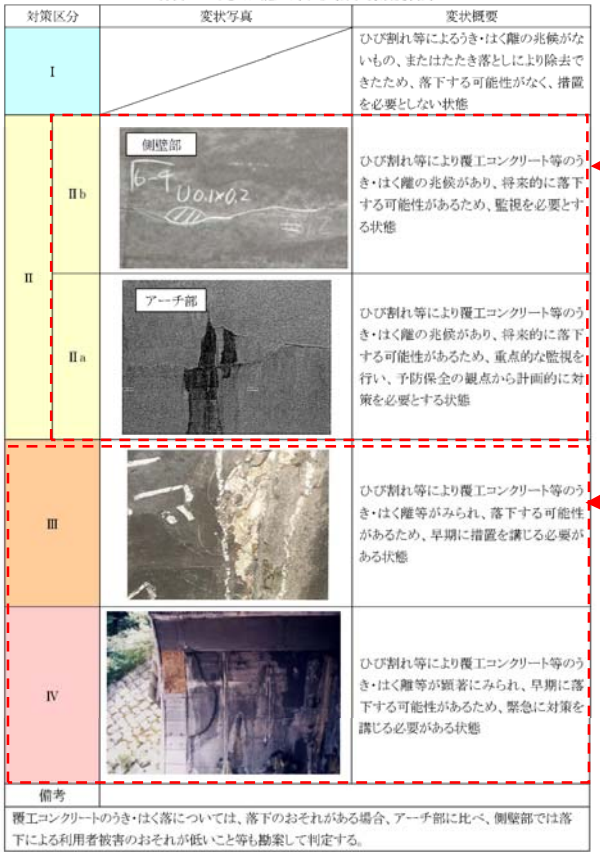
補足3）補修材等のうき・はく離については、本体工に生じるうきに比べてその厚さが薄いことが多いため、発生位置等を考慮し、判定することが考えられる。

補足4）打音異常が認められない場合、一般的には対策区分Ⅱb と考えられるが、下記の場合は対策区分Ⅱa またはⅢとするなどを検討することが考えられる。

- ブロック化の面積が大きい場合
- ひび割れの発生状況から落下の危険性が考えられる場合
- ブロック化が進行している場合
- 劣化要因が明確な場合や寒冷地等の厳しい環境条件下にある場合

支援技術のみでは従来点検の補完となる。支援技術をスクリーニングに活用し、必要な箇所のみを打音検査することで代替可能である。現場作業の軽減につながる。

付表-2.7 うき・はく離に対する対策区分別変状例



ひび割れ閉合など従来点検同様に画像計測で位置は確認可能。しかし、打音異常箇所は確認できないので打音検査との併用が必要

Ⅱ判定に比べ、Ⅲ、Ⅳ判定は変状進行もあるため画像やレーダ探査での確認ができる可能性もある。ただし、スクリーニング程度であり、打音検査との併用が必要

図 9.2.16　変状ごとの支援技術の適用性（4）[1)を加工]

【変形・移動・沈下】⇒診断に至る導き方について表 9.2.5 で整理

※レーザ計測、画像計測で計測できることから代替可能

付表-2.9 変形速度に対する対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	変形速度 10mm/年以上 著しい	変形速度 3～10 mm/年 進行がみられる	変形速度 1～3 mm/年 進行がみられる～緩 慢	変形速度 1mm/年未満 緩 慢	対策区分
覆工 路面 路肩	断面内				○	Ⅱb、Ⅱa
				○		Ⅱa
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

補足）変形速度 1～3mm の場合の判定例を下記に示す。

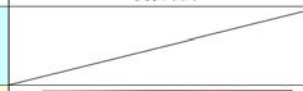
Ⅱa：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が低い場合
- ・変形量自体が小さい場合
- ・変形の外的要因が明確でないまたは進行も収束しつつある場合 等

Ⅲ：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が高い状態
- ・変形量自体が大きい場合
- ・地山からの荷重作用が想定される場合（変形の方向が斜面方向と一致するなど）

付表-2.8 変形、移動、沈下に対する対策区分

Ⅰ		変形、移動、沈下等が生じていない、またはあっても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	変形、移動、沈下等しており、その進行が停止しているが、監視を必要とする状態
	Ⅱa	変形、移動、沈下等しており、その進行が緩慢であるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		変形、移動、沈下等しており、その進行が見られ、構造物の機能低下が予想されるため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		変形、移動、沈下等しており、その進行が著しく、構造物の機能が著しく低下しているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

付表-2.10 変形、移動、沈下に対する対策区分別変状例

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			変形、移動、沈下等が生じていない、またはあっても軽微で、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		変形、移動、沈下等しており、その進行が停止しているが、監視を必要とする状態
Ⅱ	Ⅱa		変形、移動、沈下等しており、その進行が緩慢であるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			変形、移動、沈下等しており、その進行が見られ、構造物の機能低下が予想されるため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ			変形、移動、沈下等しており、その進行が著しく、構造物の機能が著しく低下しているため、緊急に対策を講じる必要がある状態
備考			
変形、移動、沈下に対する判定は個々のトンネルのおかれている状態や特徴を理解した上で、総合的な観点から判定する。 変形等の進行性は、必要に応じて地山挙動等も調べた上で評価する。			

従来点検の代替は可能。計測頻度が多くなった場合、別の計測方法を検討する必要がある。

図 9.2.17 変状ごとの支援技術の適用性（5）[1)を加工]

【鋼材腐食】**⇒診断に至る導き方について表 9.2.6 で整理**

※画像計測で作成した変状展開図により代替可能

付表-2.11　鋼材腐食に対する対策区分

Ⅰ		鋼材腐食が生じてない、またはあっても軽微なため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	表面的あるいは小面積の腐食があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa	孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が損なわれているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため、緊急に対策を講じる必要がある状態

補足）鉄筋コンクリート構造で、鉄筋が露出している箇所を含む。

従来点検の代替は可能。画像計測による正確性向上で専門技術が若干軽減される。

付表-2.12　鋼材腐食に対する対策区分別変状例

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			鋼材腐食が生じてない、またはあっても軽微なため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		表面的あるいは小面積の腐食があるため、監視を必要とする状態
	Ⅱa		孔食あるいは鋼材全周のうき錆がみられるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が損なわれているため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ			腐食により、鋼材の断面欠損がみられ、構造用鋼材として機能が著しく損なわれているため、緊急に対策を講じる必要がある状態
備考			
坑門コンクリートのように、構造部材として鋼材が計算に基づき使用されている場合、また、坑口部で鉄筋が使用されている場合は、その影響を考慮して判定する必要がある。			

図 9.2.18　変状ごとの支援技術の適用性（6）[1)を加工]

【巻厚の不足または減少、背面空洞】**⇒診断に至る導き方について**
表 9.2.7 で整理

※計測精度の限界から補完となる

付表-2.15 巻厚の不足または減少に対する対策区分の目安例(矢板工法の場合)

箇所	主な原因	有効巻厚／設計巻厚 1/2未満	1/2～2/3	2/3以上	対策区分
アーチ・側壁	経年劣化　凍害 アルカリ骨材反応 施工の不適切など			○	Ⅱb
			○		Ⅱa、Ⅲ
		○			Ⅲ、Ⅳ

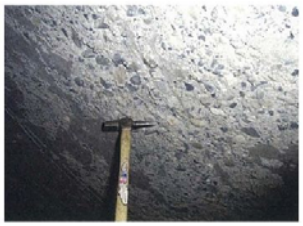
補足）有効巻厚／設計巻厚が 1/2 未満は対策区分Ⅲ、1/2～2/3 は対策区分Ⅱa を基本とするが、巻厚不足に起因するひび割れや変形の発生が認められる場合、対策区分をそれぞれⅣ、Ⅲへ1ランク上げて判定することが考えられる。なお、有効巻厚としてはコンクリートの設計基準強度以上の部分とし、設計基準強度が不明な場合は 15N/mm^2 以上の部分とする。

付表-2.13　有効巻厚の不足または減少に対する対策区分

Ⅰ		材質劣化等がみられないか、みられても、巻厚の不足または減少がないため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	材質劣化等がみられ、断面強度への影響がほとんどないが、監視を必要とする状態
	Ⅱa	材質劣化等により巻厚が不足または減少し、構造物の機能が損なわれる可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		材質劣化等により巻厚が不足または減少し、構造物の機能が損なわれたため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		材質劣化等により巻厚が著しく不足または減少し、構造物の機能が著しく損なわれたため、緊急に対策を講じる必要がある状態

支援技術のみでは従来点検の補完となる。支援技術をスクリーニングに活用し、必要な箇所のみを接触レーダ探査、圧縮強度試験等を実施することで代替可能である。

付表-2.17　巻厚の不足または減少に対する対策区分別変状例

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			材質劣化がない。 巻厚の減少を伴わない材質劣化である。
Ⅱ	Ⅱb	 凍害による巻厚減少	巻厚/設計巻厚＝2/3 以上
	Ⅱa	—	巻厚/設計巻厚＝1/2～2/3 で、巻厚の減少に起因するひび割れや変形が認められない。
Ⅲ		 ひび割れ沿いの凍害によるはく離での巻厚減少	巻厚/設計巻厚＝1/2～2/3 で、巻厚の減少に起因するひび割れや変形が認められる。 巻厚/設計巻厚＝1/2 未満で、巻厚の減少に起因するひび割れや変形が認められない。
Ⅳ		—	巻厚/設計巻厚＝1/2 未満で、巻厚の減少によるひび割れや変形が認められる。
備考			

本表は参考例であり、トンネルの立地条件や変状状況に応じて対策区分は異なることがある。
たとえば、設計巻厚 50cm 実巻厚 60cm で、設計基準強度以下の部分が 20cm の場合には巻厚は 40cm であり、このときの劣化度合いは 2/3 以上となる。ただし巻厚として 30cm を確保できない場合は、対策区分Ⅲについては他の要因も考慮して判定する。

図 9.2.19　変状ごとの支援技術の適用性（7）[1)を加工]

【巻厚の不足または減少、背面空洞（突発性の崩壊）】**⇒診断に至る導き方について表 9.2.8 で整理**

※計測精度の限界から補完となる

付表-2.16　突発性の崩壊のおそれに対する対策区分の目安例[補足 1)]

背面空洞深さ / 覆工巻厚(有効巻厚)	大[補足 2)] (30cm 以上程度)	小 (30cm 未満程度)
小 (30cm 未満程度)	Ⅲ、Ⅳ[補足 3)]	—[補足 5)]
大 (30cm 以上程度)	Ⅱa、Ⅲ[補足 4)]	

補足 1)本表は矢板工法による道路トンネル(二車線程度)を想定した場合の目安例である。

補足 2)判定にあたっては、背面空洞および巻厚不足箇所の平面的な広がりも考慮する。

補足 3)地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は、Ⅲとして判定することができる。

補足 4)背面空洞が側面の場合、あるいは地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は、Ⅱaとして判定することができる。

補足 5)背面空洞の深さが 30cm 程度未満の場合は、覆工の性状、覆工背面の土砂等の堆積、漏水の状態を考慮して判定する。

付表-2.14　突発性の崩壊のおそれに対する対策区分

Ⅰ		覆工背面の空洞が小さいもしくはない状態で、巻厚が確保され、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	—[注)]
	Ⅱa	アーチ部または側面の覆工背面に空洞が存在し、今後、湧水による地山の劣化等により背面の空洞が拡大し、構造物の機能が損なわれる可能性があり、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		アーチ部の覆工背面に大きな空洞が存在し、背面の地山の落下により構造物の機能が損なわれる可能性が高いため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		アーチ部の覆工背面に大きな空洞が存在し、有効な巻厚が少なく、背面の地山の落下により構造物の機能が損なわれる可能性が極めて高いため、緊急に措置を講じる必要がある状態

注)突発性の崩壊のおそれに対しては、Ⅱbの対策区分はない。

支援技術のみでは従来点検の補完となる。支援技術をスクリーニングに活用し、必要な箇所のみを接触レーダ探査、圧縮強度試験等を実施することで代替可能である。

図 9.2.20　変状ごとの支援技術の適用性（8）[1)を加工]

【漏水】その①　**⇒診断に至る導き方について表 9.2.9 で整理**

※画像計測の限界から補完となる

付表-2.19 漏水等による変状に対する対策区分の目安例

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		対策区分[補足2]
		噴出	流下	滴水	浸出(にじみ)	有	無[補足1]	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ、Ⅳ

補足1)「無」は、安全性にほとんど影響がないことを表す(安全性に影響がない場合の対策区分は一般的にⅠとなる)。

補足2)土砂流入等による排水機能の低下が著しい場合、路面・路肩の滞水による市両の走行障害が生じている場合、路床路盤の支持力低下が顕著な場合、舗装の劣化、氷盤の発生、つらら、側氷等による道路利用者への影響が大きい場合は対策区分を1ランク上げて判定することが考えられる。
また、判定にあたっては、降雨の履歴や規模、及び部位区分の影響を考慮し判定することが望ましい。

付表-2.18　漏水等による変状に対する対策区分

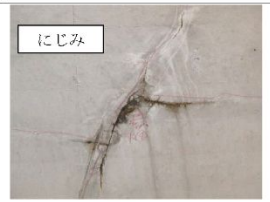
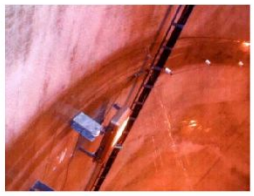
Ⅰ		漏水がみられないもの、または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb	コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており、利用者の安全性にはほとんど影響がないが、監視を必要とする状態
	Ⅱa	コンクリートのひび割れ等から漏水の滴水があり、将来的に利用者の安全性を損なう可能性のあるもの、または、排水不良により、舗装面に滞水を生じるおそれのあるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ		コンクリートのひび割れ等から漏水の流下があり、または、排水不良により舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性のあるため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり、または、漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり、寒冷地において漏水等により、つららや側氷等が生じ、利用者の安全性を損なうため、緊急に対策を講じる必要がある状態

支援技術のみでは従来点検の補完となる。支援技術をスクリーニングに活用し、必要な箇所のみを現地確認することで代替可能である。

図 9.2.21　変状ごとの支援技術の適用性（9）[1)を加工]

【漏水】その②　⇒診断に至る導き方について表 9.2.9 で整理

付表-2.20　漏水等による変状に対する対策区分別変状例

対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			漏水がみられないもの、または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており、利用者の安全性にはほとんど影響がないが、監視を必要とする状態
	Ⅱa		コンクリートのひび割れ等から漏水の滴水があり、将来的に利用者の安全性を損なう可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			コンクリートのひび割れ等から漏水の流下があり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ		―	コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり、利用者の安全性を損なうため、緊急に対策を講じる必要がある状態
備考			
漏水範囲の拡大や漏水量の増加は、背面の地山の緩みや降水量の増加と関連がある。特に前者の場合は地山の緩みの増加によって透水のしやすさが促進したり、地山が浸食されたりするケースがあるので、突発性の崩壊の防止をはかる観点から検討及び判定する。			

付表-2.21　側氷、土砂流出に対する対策区分別変状例

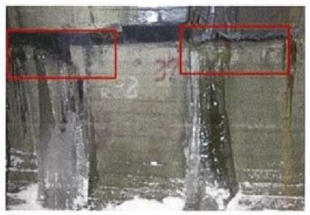
対策区分		変状写真	変状概要
Ⅰ			漏水がみられないもの、または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態
Ⅱ	Ⅱb		コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており、利用者の安全性にはほとんど影響がないが、監視を必要とする状態
	Ⅱa		排水不良により、舗装面に滞水を生じるおそれがあるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ			排水不良により、舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性があるため、早期に措置を講じる必要がある状態
Ⅳ			漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり、寒冷地において漏水等によりつららや側氷等が生じ、利用者の安全性を損なうため、緊急に対策を講じる必要がある状態
備考			
路面の滞水は単に車両走行の障害を招くのみでなく、路床路盤の支持力を低下させ、舗装そのものの破壊を招いたり、寒冷地では冬期に氷盤を発生させやすいことを踏まえ判定する。			

図 9.2.22　変状ごとの支援技術の適用性（10）[1)を加工]

9.3 まとめ

9.2 の 2）を含め、検証した結果を下記に整理した。

1） 圧ざ・ひび割れ

(1) 外力

① 代替可能（高機能化も可能）※コンター解析の追加
② 従来点検と同様に維持管理履歴、研究成果などを活用し判定が可能
③ 従来点検と同様に専門技術が必要（コンター解析併用で難易度低減）
④ 視覚的な変状や定量的な数値から正確な情報を取得可能
⑤ AI 導入により効率化可能

(2) 材質劣化

① 代替可能
② 従来点検と同様に維持管理履歴、研究成果などを活用し判定が可能
③ 従来点検と同様に専門技術が必要（コンター解析併用で難易度低減）
④ AI 導入により効率化可能

2） うき・はく離

① 補完可能（代替は難しい）
② 画像計測で確認できるひび割れ、ひび割れ閉合、ブロック化、材質劣化などから異常打音が無い場合の判定は可能
③ 変状がないスパンの抽出を行い、それ以外のスパン（変状箇所）に対し打音検査を実施し、判定することで代替可能
④ 従来点検と同様に専門技術が必要
⑤ 併用技術：打音検査
⑥ AI 導入により効率化可能（変状がないスパンの抽出）

3） 変形・移動・沈下

① 代替可能（高機能化も可能）※コンター解析の追加
② 従来点検と同様に維持管理履歴、研究成果などを活用し判定が可能
③ 従来点検と同様に専門技術が必要（コンター解析併用で難易度低減）
④ 走行型計測を実施するか他の計測にするのか検討が必要（走行型計測を定期点検毎に実施するにはルール化が必要）
⑤ 変状可能性のあるトンネルとないトンネルで計測方法を分ける必要がある（変状可能性のあるトンネル：レーザ計測、画像計測、変状可能性のないトンネル：画像計測のみ等）

4) 鋼材腐食

① 代替可能

② 従来点検と同様に維持管理履歴、研究成果などを活用し判定が可能

③ AI 導入により効率化可能

5) 巻厚の不足または減少、背面空洞

(1) 巻厚不足または減少

① 補完可能（代替は難しい）

② NATM などの設計巻厚が薄い場合には対応可能であるが、有効巻厚での評価となるため、コンクリート強度の確認が必要となる。

③ スクリーニングで薄い箇所を抽出し、打音検査などの規制時に接触レーダ探査やコア削孔を行い判定する必要がある。

④ 併用技術：接触レーダ探査、圧縮強度試験

(2) 突発性崩壊

① 補完可能（代替は難しい）

② 巻厚 30cm 程度に限定して、巻厚と背面空洞の確認は可能であるが、コンクリート強度の確認が必要となる。

③ スクリーニングで覆工が薄く、背面空洞がある箇所を抽出し、打音検査などの規制時に接触レーダ探査やコア削孔を行い判定する必要がある。

④ 併用技術：接触レーダ探査、圧縮強度試験

6) 漏水等による変状

① 補完可能（代替は難しい）

② にじみ（遊離石灰）のみの確認は可能であるが、滴水、流下、噴出の確認が難しい。（路面滞水から推定する方法もある）

③ 従来点検でも天候に左右され確認できないこともあるため、同等レベルかそれ以下となる。

④ 併用技術：遠望目視

⑤ AI 導入により効率化可能

7) 各変状種類毎のまとめ

各変状種類毎に支援技術単独での支援レベルについて表 9.3.1 に取りまとめた。特に代替よりも低いレベルの場合、それに付加する技術等により、さらに支援レベルが向上するものについては、併用技術と複合評価レベルを整理した。

表 9.3.1 健全度診断に対する検討結果（各変状種類毎）

変状区分	支援内容	単独評価レベル	課　　題	解決策（併用技術）	複合評価レベル
圧ざ・ひび割れ（外力）☆	画像計測 レーザ計測	代替（高機能化）※コンター解析活用	専門技術が必要	ー	単独評価と同等
圧ざ・ひび割れ（材質劣化）☆	画像計測	代替 ※コンター解析活用	専門技術が必要	ー	単独評価と同等
うき・はく離☆	画像計測 レーザ計測	補完	専門技術が必要 異常打音「有」が分からない	スクリーニング（打音検査）	代替
変形・移動・沈下	レーザ計測	代替（高機能化）※コンター解析活用	専門技術が必要 他の計測との比較必要	ー	単独評価と同等
鋼材腐食☆	画像計測	代替	ー	ー	ー
巻厚の不足または減少、背面空洞	レーダ探査	補完	精度に限界あり 有効巻厚が分からない	スクリーニング（接触レーダ探査、圧縮強度）	代替
漏水等による変状☆	画像計測	補完	にじみ（遊離石灰）以外分からない	スクリーニング（遠望目視）	代替 ※記録が残らない

☆：AI 導入等で効率化も可能

8) 変状区分毎のまとめ

各変状種類に対する評価レベルに対し、変状区分毎で整理したものを表 9.3.2 に示す。

表 9.3.2 健全度診断に対する検討結果（各変状区分毎）

変状区分		変状種類	要素技術	従来技術	検討結果
外力	材質劣化	圧ざ・ひび割れ	画像計測 レーザ計測 <コンター解析>	施工情報 維持管理記録	外力：代替（高機能化） 材質劣化：補完 ⇒＋α（打音、接触レーダ探査、圧縮強度等）で代替
		うき・はく離	レーダ探査 画像計測 （レーザ計測）	打音検査 （叩き落とし）	
外力		変形・移動・沈下	レーザ計測 <コンター解析>	測量 機器計測	外力：代替（高機能化）
材質劣化		鋼材腐食	画像計測	（近接目視）	材質劣化：補完 ⇒＋α（打音、接触レーダ探査、圧縮強度等）で代替
材質劣化		巻厚不足または減少、背面空洞	レーダ探査 （非接触）	レーダ探査 （接触） コンクリート強度試験	
漏水		漏水等による変状	画像計測	（遠望目視）	漏水：補完 ⇒＋α（遠望目視等）で代替

【検討結果】

① 外　　力：代替（高機能化※）)

② 材質劣化：補完　⇒　＋α（打音、接触レーダ探査、圧縮強度等）で代替

③ 漏　　水：補完　⇒　＋α（遠望目視等）で代替

※）画像による外力性診断方法の整理、コンター解析による外力影響の検証などから従来点検よりも付加価値化が実現可能

9) 考察

画像計測では、従来点検の近接目視をするレベルで覆工変状が確認できるのであれば、従来点検と同じレベルで判定ができる。（画像レベルが従来点検の近接目視と同じレベルまで確認できるほど鮮明であるという条件付き）

画像計測で従来点検と同じレベルで誰もが判定ができるような点検要領の整理が重要であり、画像から変状として判定するのが「人」であれば、画像を見て「人」が判定できるような支援内容が必要である。

画像計測後に変状展開図を作成するため少しでも作業効率を上げる必要があることからAI技術を活用することが望ましい。特に支援技術により代替となる項目については積極的な活用が期待される。

一方で、健全性の診断をするためには専門技術力が必要である。レーザ計測後に実施するコンター解析は、高度な専門技術がなくても、ある程度のレベルまでであれば外力影響の有無が確認できるツールである。レーザ計測並びにコンター解析の実施頻度は今後の課題であるが、うまく活用することで外力影響を伴う変状の診断は可能となる。

巻厚不足や突発性崩壊などについても診断するためには専門技術が必要である。レーダ探査を用いることで従来点検においても診断を実施している。従来点検においても巻厚不足や突発性崩壊の診断は単独調査のみでは診断ができない。覆工コンクリート強度の確認による有効巻厚の確認が必要となるからである。走行型計測に搭載される非接触レーダ探査については、接触レーダ探査と性能が異なることもあり、全ての事象で巻厚の薄い箇所や背面空洞を確認することが難しいが、画像計測と同時に巻厚や空洞確認ができることは効果的である。しかしながら、従来点検においても有効巻厚を確認する必要があり、支援技術においても同様なことから、支援技術を活用しスクリーニングをすることで危険な区間の抽出が早期に確認することができる。

うき・はく離、漏水による変状については、従来点検との併用が必要であり、支援技術を活用したスクリーニングによって、変状の可能性がある区間のみの従来点検等となり、規制期間の短縮など効率的な現場作業が可能となる。

【参考文献】

1）道路トンネル定期点検要領、国土交通省　道路局　国道・技術課、平成31年3月
2）道路トンネル維持管理便覧【本体工】、公益社団法人　日本道路協会、令和2年8月
3）設計要領 第三集 トンネル保全編、東・中・西日本高速道路（株）、令和2年7月
4）JTA保守管理小委員会（大西委員長ら），トンネル保守管理におけるQ&A(5)，トンネルと地下，Vol.50,No.5，p75（表-3，図-1），2019年5月

10 施工時の活用

10.1 概要

トンネル建設の施工段階において、将来の維持管理や点検、変状の診断などに有用なデジタルデータを取得、記録できる技術はあまり多くはなく、それら技術の導入や活用もなかなか進んでいないのが現状である。また、施工段階で行われる様々な測定・計測データも工事竣工時に廃棄もしくは施工会社で保管され、維持管理段階に積極的に活用されることはなかった。近年、BIM/CIM の導入が進められ、施工段階での 3 次元モデルやそれに紐づけされる施工記録を維持管理段階まで一連で活用できるようになってきている。

本章では、施工時において維持管理段階にも有用な情報を取得、記録できる現有技術について紹介し、今後求められる新技術と新技術の導入や活用をより促進するための課題を示す。

10.2 施工時における現有技術の活用

点検・診断業務において、覆工のひび割れなど変状の原因を特定するのに有用である情報をデジタルデータで残せる技術を国土交通省の NETIS と点検支援技術性能カタログに登録されている技術から抜粋して、施工時の品質管理、出来形管理、施工管理に活用できる技術として紹介する。

10.2.1 品質管理への活用

トンネル建設工事の施工時における品質管理で、試験区分が必須となる品質管理基準を表 10.2.1 に示す。

表 10.2.1 品質管理基準（試験区分：必須）[1)]

工　種	種 別	試　験　項　目
覆工コンクリート（NATM）	施工	スランプ試験 / 単位水量測定 / 圧縮強度試験 / 塩化物総量規制 / 空気量測定
	施工後試験	ひび割れ調査 / テストハンマーによる強度推定調査
吹付けコンクリート（NATM）	施工	塩化物総量規制 / 圧縮強度試験 / 吹付けコンクリートの初期強度（引抜きせん断試験）
ロックボルト（NATM）	施工	モルタルの圧縮強度試験 / モルタルのフロー値試験 / ロックボルトの引抜き試験

表 10.2.1 の品質管理基準のうち、覆工コンクリートの施工後試験であるひび割れ調査に活用が可能な技術を表 10.2.2 に示す。従来のひび割れ調査は、近接目視によりひび割れ等の変状をスケッチして調書を作成していた。このひび割れ調査で新たに活用されている技術は、主にカメラで覆工表面を撮影して画像を記録するものである。ひびわれ調査は覆工コンクリートの完成後に実施することから、トンネル全線の画像撮影を効率的に行うことが可能な走行型の技術を抽出した。また、これらの技術は画像のみを撮影する技術と、画像撮影と同時にレーザ計測を行い覆工コンクリートの 3 次元形状を点群データで取得できる技術とがある。

表 10.2.2　品質管理項目_施工後試験：ひび割れ調査で活用可能な技術

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ 登録番号	画像撮影	レーザ 計測
走行型高精細画像計測システム トンネルトレーサー	CB-180027-A	TN010003-V0120	○	－
一般車両搭載型トンネル点検システム	KT-190062-VR	TN010007-V0020	○	－
トンネル覆工表面撮影システム	KT-190037-VR	TN010008-V0120	○	－
トンネル覆工点検システム eQ ドクターT	QS-170015-VR	－	○	－
道路性状測定車両イーグル L&L システム	SK-160013-A	TN010004-V0120	○	○
社会インフラモニタリングシステム MMSD	HR-180004-VR	TN010005-V0020	○	○
走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）	KK-130026-VR	TN010006-V0120	○	○

10.2.2　出来形管理への活用

トンネル建設工事の施工時における出来形管理で、主要な工種の出来形管理基準を表 10.2.3 に示す。

表 10.2.3　出来形管理基準 [1)]

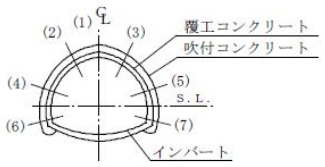
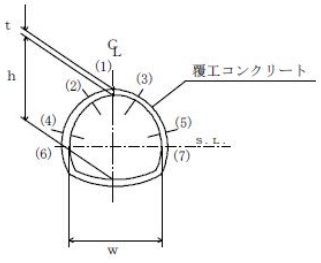
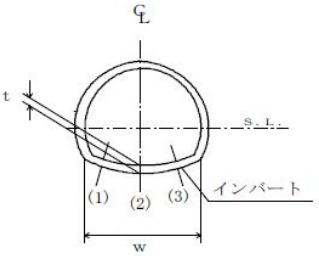
工　　種	測　定　項　目	測　定　箇　所
吹付工	吹付け厚さ	
ロックボルト工	位置間隔 / 角度 / 穿孔深さ / 孔径 / 突出量	
覆工 コンクリート工	基準高 / 幅 / 高さ / 厚さ / 延長	
インバート 本体工	幅 / 厚さ / 延長	

表 10.2.3 の出来形管理基準のうち、吹付工、覆工コンクリート工、インバート本体工の出来形測定に活用が可能な技術を表 10.2.4 に示す。これらの技術はレーザにより対象構造物の 3 次元形状を計測する技術であり、部材の厚さは施工前後で対象構造物の形状を計測し、点群データの差分により求める。吹付工とインバート本体工においては、一掘進作業毎に地山形状を計測する必要があるため、設置型レーザの使用が望ましい。覆工コンクリートの出来形計測には、設置型レーザで吹付コンクリート表面の出来形を計測したうえで、覆工コンクリート表面を走行型で全線もしくはある程度の距離を一度に計測し、差分を出す方法も有効である。

表 10.2.4　出来形管理で活用可能な技術

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ 登録番号	計測 方式	吹付工 ｲﾝﾊﾞｰﾄ工	覆工 ｺﾝｸﾘｰﾄ
3D-TUBE	SK-120005-VR	－	設置型	○	○
3D スキャン計測システム 3D サーフェス	KT-180118-A	－	設置型	○	○
3D トンネルレーザ計測システム	KT-170093-A	－	設置型	○	○
モバイルスキャニングシステム	QS-160019-A		走行型	△	○
高精度 MMS でスイスイ 3D 現況測量	KT-150010-VE	－	走行型	△	○
道路性状測定車両イーグル （L&L システム）	SK-160013-A	TN010004－V0120	走行型	△	○
社会インフラモニタリングシステム MMSD	HR-180004-VR	TN010005－V0020	走行型	△	○
走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）	KK-130026-VR	TN010006－V0120	走行型	△	○

10.2.3　施工管理への活用

点検で確認された変状が外力に起因するものか経年劣化によるものなのか、原因を特定するために地山の地質や掘削時の切羽の状態、湧水の発生状況などの施工記録は重要な情報となる。近年、BIM/CIM の導入が進められ、施工時に得られる様々なデータをトンネルの 3 次元モデルに紐づけて記録を残し、維持管理段階で活用できるようになりつつある。

トンネル施工時に得られる施工管理データのうち、点検・診断において有効な情報となる切羽観察記録と穿孔エネルギーを記録する技術について紹介する。

切羽観察記録には、掘削時の切羽の地質や地山性状、湧水の有無などが記録される。通常、トンネル工事の経験者や地質に対する有識者が岩の圧縮強度や風化変質、割目の頻度や状態などの項目を評価して切羽の評価区分を決定する。平成 30 年に、国土交通省が工事の発注にあたり現場での生産性向上を目的とした新技術導入促進（Ⅱ）型のテーマに「AI 等を活用したトンネル切羽等の地山判定手法」を選定したことから、建設会社各社が AI による切羽評価の開発に着手した。NETIS に登録されている技術に「AI による山岳トンネル切羽評価」（KT-200050-A）がある。

AI モデルの構築には膨大な枚数の切羽写真と評価区分の教師データが必要となる。また、切羽写真と評価区分とを蓄積していくことで AI の評価精度の向上を図ることができる。このため、建

設会社が共有でデータを蓄積していくためのプラットフォームを発注者や民間サービスにおいて構築されることが望まれる。

穿孔エネルギーを記録する技術としては、コンピュータジャンボの活用も有効である。トンネル掘削における装薬やロックボルトの削孔時に、削岩機の油圧データ等から穿孔エネルギーを取得できる。従来は定性的にしか評価できなかった地山の硬軟の情報を数値化して記録しておくことができる。こちらも建設会社各社で開発や機械の採用が進められている。NETIS 登録技術としては、「ドリル NAVI」（KK-160012-A）や「削孔パターン最適化コンピュータジャンボ：ブラストマスタ」（KT-200127-A）などがある。

10.3 今後求められる技術と活用

現状の施工段階においても、施工を円滑に進めるため各種の計測を行っており、計測機器の進化と共にデジタルデータを取得・保存できるようになったが、印刷物がデジタルデータに変わっただけに止まっているケースが多い。また、多くの計測データは、竣工に至って不要となり廃棄されてしまうため、維持管理段階へのデータ連携が進んでいない。ここでは、維持管理に向けた初期データとしての役割を持つ施工段階での計測データについて、今後求められる技術と活用について提言を行う。

10.3.1 デジタルデータと 3 次元モデルによる管理

コンピュータや計測デバイスが進化したことで、大容量のデータを表示・解析することが可能となった。デジタルカメラによる高精細画像やデジタルビデオカメラによるシームレスなデジタル動画に加え、3 次元レーザスキャナが導入（図 10.3.1 参照）されることで、取得できるデータが 2 次元断面から 3 次元立体へと進化している。



図 10.3.1 進化した計測デバイス [2)]

また、BIM/CIM といった新しいプラットフォームが開発されたことで、3 次元モデルに計測データ（図 10.3.2 参照）を取り込み、状態を可視化することが容易となった。加えて、複数の計測データを重畳することで、精度良く経時変化を捉えることが可能になると考えられる。

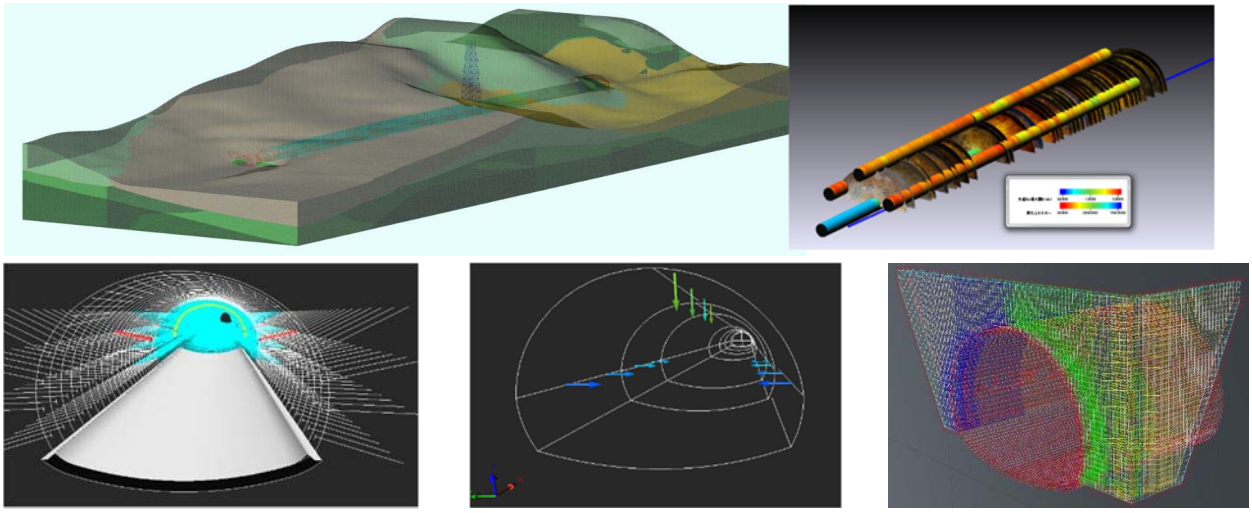


図 10.3.2　BIM/CIM のトンネル施工への活用 [3)]

一方、高解像度デジタル画像の活用も始まっている。高解像度デジタルカメラと望遠レンズを併用した撮影を行うことで、遠隔から非接触でひび割れの有無を計測することが可能となる。加えて、経年的に撮影を実施することで、変状の進展といった経時変化を把握できる可能性も高い。近年では、高解像度デジタルビデオカメラを車載化した走行型計測の運用が始まっている。これらの技術と現在研究開発が進む機械学習・深層学習とを組み合わせることで、ひび割れ抽出の高速化・効率化が進むと考えられる。

施工段階における 3 次元計測データや高解像度デジタル画像を用いることで、BIM/CIM の導入が容易となることから、施工から維持管理へと繋がる効率的な管理を図ることが可能となる。

10.3.2　望ましい技術

前節で述べたように、施工段階から維持管理へデータを繋げるため、3 次元データと高解像度デジタル画像の活用を推進することが望ましい。これらは非破壊・非接触の計測技術であることから、構造物への負荷なく状態を把握することが可能となる。一方で、内部空洞の把握など、現在の非接触計測では完全に代替することが難しいケースもある。

ここでは今後導入が望ましい技術を挙げていく。

1)　3 次元計測の車載化

施工段階では、出来形管理において設置型レーザスキャナを用いた 3 次元計測が一般化すると考えられる。設置型レーザスキャナは、高精度化、軽量化が進んで、パソコンを使用せず単体で計測が可能な機種も一般化していることから、以前より現場での運用が容易となっている。

設置型レーザスキャナの導入当初は、計測を行う際に機器本体・三脚および発電機を複数の作

業員で設置・移動する作業を繰り返していたため、計測時間より設置・移動に時間や労力を要するというケースもあった。



図 10.3.3　設置型レーザスキャナのよる計測 [4)]

その後、課題解決のため、これら機材を台車に搭載することで 1 人でも計測・移動させる試行も行われたが、いずれの方法にしてもトンネル中心付近に機器を設置する必要があるため、掘削作業中は工事車両の通行を妨げることとなり、原則として休工日に計測を行う必要があった。

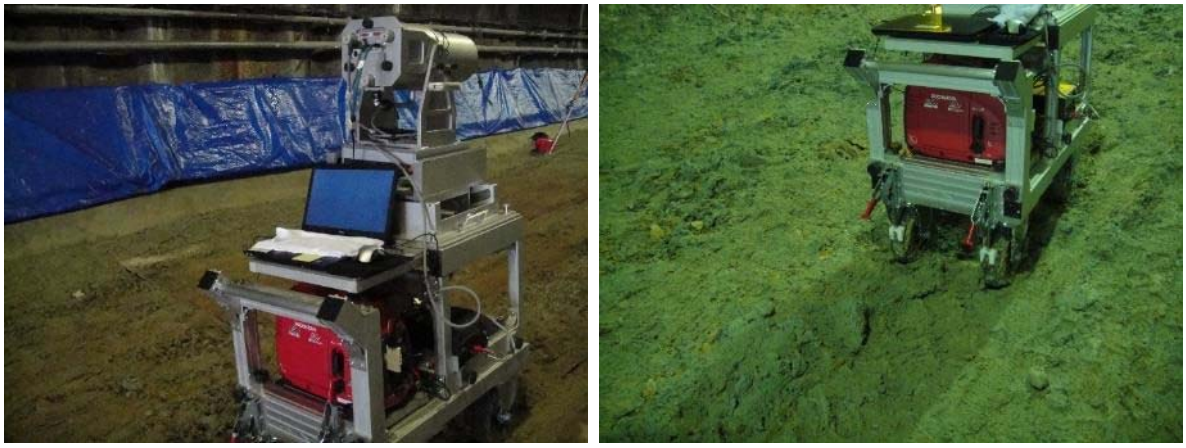


図 10.3.4　設置型レーザスキャナ台車を用いた計測 [4)]

このように、設置型レーザスキャナを使用する場合、休工日の運用が前提となるため、求められる計測距離に対して計測に必要な時間の確保が難しいケースも発生することから、現場工程との調整が必要となる。

前述の課題を解決する技術として、計測機材を車載化した走行型計測が挙げられる。車両に登載することで連続的に 3 次元計測が行えることに加え、短時間で計測を完了させることが可能となる。稼働中の現場においては、坑内を走行するだけで計測ができるため、休工日に限定しない運用が可能となる。3 次元計測が可能な走行型計測システム（図 10.3.5 参照）は、既に様々な分野で運用されており、施工段階のトンネルに適用することで、管理の効率化を図ることができ、

そのデータを維持管理へと繋ぐことも可能となる。

また、4 章で紹介したバックパック式のレーザスキャニング装置も有効である。単独での作業が可能であることから省人化を図ることができ、設置場所に制約が少ない利点があることから、走行型計測と同様、休工日に限定されない運用が可能であるといえる。



図 10.3.5　走行型 3 次元計測システム（MMS）[5)]

最後に、施工時においては現場が使用する座標系（公共座標系）との整合が重要となる。特に走行型計測を導入する場合には、坑内に計測車両が認識可能な位置に公共座標と紐付いた基準点（ターゲット）を設けて測位精度を向上させる必要があるが、坑内では重機や配管、風管などの仮設物が多く基準点が死角に入る可能性がある。掘削前の段階から天端など見通しが利く位置に基準点を設置するなど走行型計測導入を支援する仕組みができることが望ましい。

2)　高解像度デジタル計測機器を用いた走行型計測

1980 年代後半に登場したデジタルカメラによって、簡単にデジタル画像を記録することが可能となった。デジタルカメラの登場以前は、銀塩フィルムカメラで撮影・現像した画像をスキャンすることでデータ化していたが、色情報を映像素子にデジタルで記録することが可能となった。当初は解像度が低く計測用途で使用することは困難であったが、近年では 1 億画素を越える高解像度のデジタルカメラ（参照図 10.3.6）が開発・販売されており、計測用途もひび割れ抽出をはじめ形状計測など広がりをみせている。



図 10.3.6　高解像度デジタルカメラ（PhaseOne_IQ4）[6)]

また、デジタルカメラの進化と合わせてデジタルビデオカメラも進化したことで、高解像度のデジタル動画を記録することが可能となった。記録媒体が大容量化し高速記録へと進化したことで、連続した画像を記録できることに加え、デジタルビデオカメラは小型化しており、様々な移動体に搭載する形での適用が増えている。

建設分野においては、トンネル点検および法面防災点検等の維持管理分野で、撮影用に改造した専用車両あるいは一般車両の屋根上やトラックの荷台に撮影機器を搭載した走行型計測システムが運用されている。しかし、施工段階においては導入事例が少なく、高所作業車による人力でのひび割れスケッチが一般的であり、常に上を向いた状態でスケッチする苦渋作業となることから省力化が望まれている。走行型計測システムの場合、現場作業は坑内を走行撮影するだけの短時間で完了することから、図 10.3.7 に示すように主に覆工コンクリートの表面変状を記録する手段として、竣工検査に導入が期待されている。

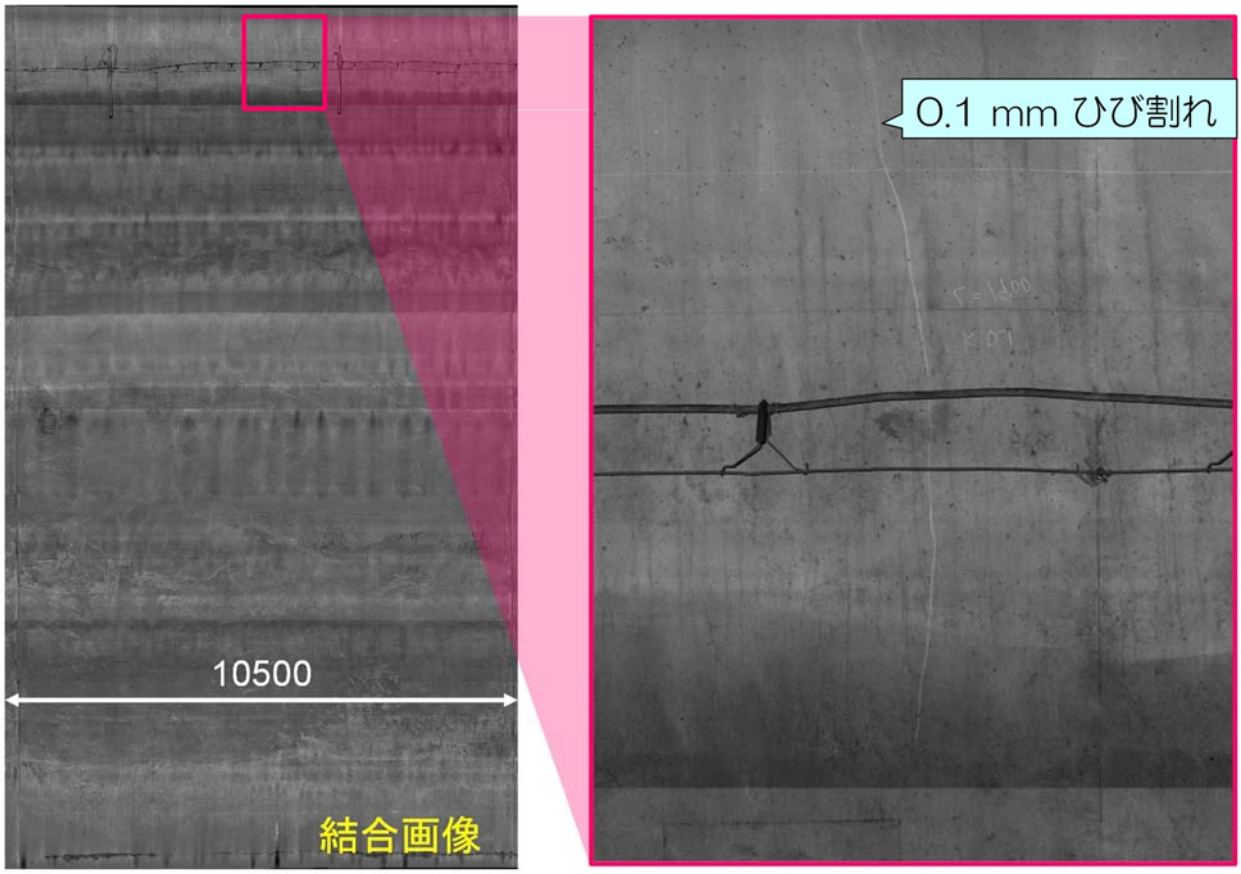


図 10.3.7　竣工検査における走行型計測の適用事例 [4)]

3)　非接触計測による内部空洞探査

遠望からの非接触計測では検出することが困難な変状として、覆工コンクリートの内部空洞が挙げられる。初期点検時に空洞調査を実施することで、供用後の不具合や規制下での補修・補強などの発生を防止できることから重要な計測であるといえる。この変状は、内部空洞の近傍にひび割れが発生している場合は、ひび割れを抽出することで内部空洞の存在を推定することが可能

であるが、コンクリート表面に特徴が乏しい場合は抽出が困難である。現状は、竣工検査の際に作業員による打音検査を実施することが一般的な点検方法となる。打音検査では、高所作業車を低速走行あるいは断続的に移動させ、点検者がハンマー等でコンクリート表面を叩く上向き作業となるため、ひび割れスケッチと同様の苦渋作業となる。



図 10.3.8　内部空洞点検と覆工コンクリートの状態 [4) 7)]

また、内部空洞の把握は点検者の技量に左右され、点検結果にバラツキが発生することも考えられることから、定量的に把握する技術が必要とされる。苦渋作業の軽減と一定水準での検出という観点から、遠隔からの非接触計測で内部空洞を検出する技術が望まれる。



図 10.3.9　車載化した遠隔レーダ探査（MIMM-R） [7)]

なお、走行型計測システムの一部では、走行しながら遠隔でレーダ探査が可能な機種も存在するが、大多数のトンネル工事においては導入されておらず、今後の技術開発に期待するものである。

10.3.3　新技術導入への課題

前節までに、今後導入が期待される技術について紹介したが、本節では施工段階での導入についての課題を挙げていく。デジタル化や 3 次元化については、建設会社においても研究開発が進

められているが、試行に止まっている技術も多いことから、建設会社で運用が進まない現状についても併せて挙げていく。

1) 品質管理での課題

品質管理では、走行型計測システムの導入が期待されている。走行型計測システムでは、走行しながら各種計測が実施できることから、短時間で作業を完了させることができる。現場への時間的負担も少なく、デジタル記録を残せるという利点もあるため、維持管理との連携も期待できる。ただし、走行型計測システムは図 10.3.10 のようにトンネル竣工時にみられる未舗装の不陸路盤においては、走行速度も制限されるため、同等精度の運用は困難であるといえる。

特に、撮影機器を搭載した走行型計測システムは、高倍率のレンズを使用し撮影を行うことから、被写界深度が浅くなりピンボケとなりやすい。計測車両の挙動を抑えることができれば、不陸路盤においても高精度な撮影は可能と考えるが、現場ごとに路盤の状態は異なっており、一様な品質でデータを取得することは困難であると思われる。



図 10.3.10 竣工時の未舗装路盤 [4)]

2) 出来形管理での課題

出来形管理では、3 次元計測技術の導入が期待されている。一方で、施工段階で 3 次元計測を実施するためにはいくつか課題があるため、導入が進まないと考えられる。

まず、計測機器の価格が挙げられる。品質管理に用いられる設置型レーザスキャナは、比較的安価な機種でも 8,000 千円程度と高額である。加えて、レーザスキャナは精密機器であるため、本来高湿度環境での運用は保証対象外となるケースがある。掘削中のトンネルのような高湿度環境は、レーザスキャナにとって故障が発生しやすい環境であるというリスクも、現場において導入が進まない要因だと考えられる。

次に、現場での計測条件に制約があることが挙げられる。掘削中の現場では、工事車両が常時坑内を通行している。レーザ計測を行う場合は、トンネル中心付近に機器を設置する必要があり、1 測点で 4～5 分の時間を要する。また、計測区間で複数回の計測が必要となることから、計測中は工事車両の通行を止めなければならず、工程に影響を与えることとなる。更に、インバート施工区間においては、図 10.3.11 のようにトンネル中心付近にレーザスキャナを設置することが困

難なケースもあり、データ密度にバラツキが生じることもある。



図 10.3.11　レーザスキャナ設置場所の課題 [4)]

最後に、レーザ計測への習熟度が挙げられる。レーザ計測では取得した点群データを基に出来形判定を行うが、アプリケーションを用いた点群処理（ノイズ処理）に加え、座標変換や差分解析を行うことで出来型の良否判定が可能となる。ノイズ処理やターゲットの座標変換精度が計測結果に直接的な影響を及ぼすことから、レーザスキャナの特性を把握し適切な計測と解析結果を判断できる熟練度が必要とされる。掘削中の現場においては、計測のやり直しができないケースが多いことから、１回の計測でミス無く適切に計測を実施することが要求される。計測機器の進化に合わせて作業従事者のスキルアップが求められるため、各種業務の多い現場においてレーザ計測を拡充させることは容易でないと思われる。

3)　施工管理での課題

施工管理では、3 次元モデルの活用や AI の活用が期待されている。断続的に切り取られた断面である 2 次元データに対して、連続的に形状を捉える 3 次元データを活用することで、切れ目なく状態を把握することが可能となる。また、BIM/CIM といった新しいプラットフォームと連携することで、複数の計測データを融合した施工管理を実施することも可能となる。近年は計測デバイスも多様化しており、それらを効率的に活用するため、機械学習・深層学習といった AI 手法の研究も進んでおり、状態の判定・管理を自動化できる可能性も高い。しかし、BIM/CIM や AI の活用にも課題がある。BIM/CIM では高機能なアプリケーションが開発されているが、高額であることや操作習熟に時間を要することから、大規模工事の現場など運用は限定されている。また、3 次元データは大容量となるため、そのデータを取り込んで活用するにはハイスペックなコンピュータが必要となる。今後 BIM/CIM を普及させるためには、低価格化とアプリケーションに精通した技術者の育成が不可欠である。近年、AI 手法の研究は大学・企業において進んでいるが、使用用途に合わせたアプリケーションを開発する場合には、開発期間が必要となる。教師データの精度が AI の精度に直結するため、精度の低いデータは誤検出となる可能性が高いことから、高精度なデータを準備する必要がある。また、現場の条件に合わせてカスタマイズする必要があるため、AI に精通した技術者を育成する必要もあり、短時間で普及させることは困難といえる。

4) 課題解決に向けて

施工段階において、これらの新しい技術を活かすためには、既存の管理項目にある測定・計測を代替することで、管理項目へ対応するための労力を省人化・省力化できること、既存技術より有益な情報が得られることが重要である。前節までに挙げた技術は、紙媒体で保管してきた過去の工事記録をデジタルデータとして記録することが可能となるため、適切な管理・保存を行うことで、将来に至り活用の場が広がる可能性が高い。

しかし、現状の工事において、計画・設計・施工および維持管理の各段階においてデータ連携が図られるケースは皆無であるといえる。特に施工段階には、工事前から竣工まで様々な測定・計測を実施しているが、それらは工事完了とともに廃棄・死蔵されているのが現状である。これらのデータの中に施工時に発生した変形、落盤事故または特殊地盤との遭遇に関する記録などがあれば、供用後の発生しうる変状が外力に起因するものなのかを判断する材料となる。適切な判断を下すことで、その後の補修、補強の選定にも寄与することから、施工時の記録がその後の維持管理の効率化へと繋がっていくと考えている。

ただし、この課題を解決するためには、新しい技術を導入することで大きく負担が増えないことが重要である。負担が増えずより良い結果が得られる技術であれば導入は進むと考えている。また、データに価値を持たせることも重要である。施工時に取得したデータが竣工後も価値を持ち、ビジネスとなるような仕組みを構築することで、データに対する価値観が変わり、施工段階から新しい価値を生み出すような技術の導入が進むものと考えている。

Society 5.0 では、データの利活用について提言を行っている。様々な分野・階層から得られるビッグデータをビジネスやサービスに発展させることで、複合的に利活用が進む可能性を挙げている。建設業界においてもデジタルデータを連携させることで、設計から維持管理および更新の効率化を図ることが可能になると期待している。

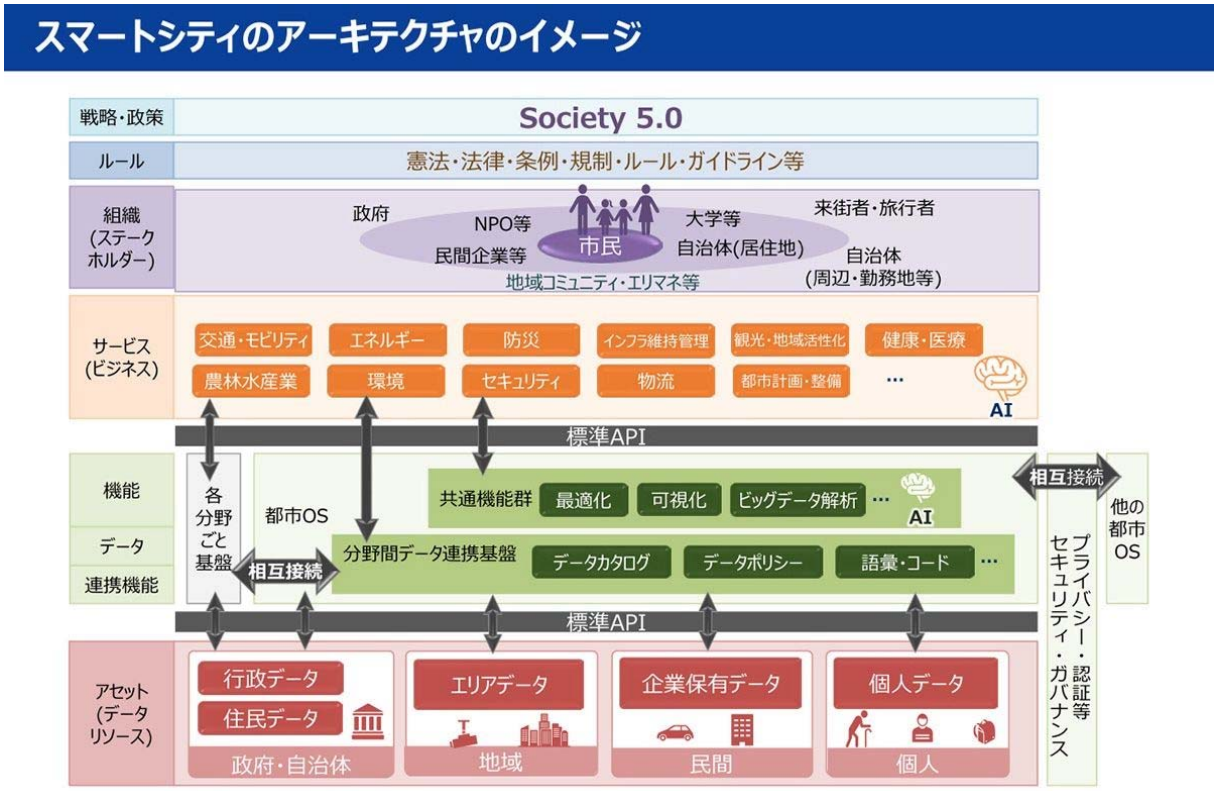


図 10.3.12　Society 5.0 でのデータ活用 [8)]

最後に、これらの仕組みを発展させるためには発注者の協力が不可欠であるといえる。特に、公共事業における技術提案では、データ連携に資する技術を積極的に採用し、そのデータ管理・保存についても発注者が関与することで、施工会社の意識改革が進み、維持管理・更新に繋がるデータの蓄積が可能となる。3 次元データを活用し高度な施工管理を行うことで、余堀の低減や材料のコスト削減、人材不足の中で業務の効率化を図り、より良いものを造っていきたい。

【参考文献】

1）土木工事施工管理基準及び規格値（案）、国土交通省近畿地方整備局、令和 2 年 4 月
2）Velodyne LIDAR、Leica Geosystems
3）株式会社鴻池組提供
4）三井住友建設株式会社提供
5）三菱電機株式会社 HP
6）PhaseOne 社 HP
7）株式会社ウォールナット社提供
8）COCN2018 年度プロジェクト最終報告「デジタルスマートシティの構築」を基に内閣府作成

11 運用マニュアル

11.1 概要

本章では、9.支援技術を活用した診断（以下 9 章という）において検討した内容を用いて、H25 既往研究において作成したマニュアルを改訂する。

H25 既往研究では走行型画像計測について、評価方法、評価基準を整理し、走行型計測による望ましいトンネルマネジメント像を提案したが、その後、定期点検要領の改訂、国土交通省による点検支援技術性能カタログの発行など支援技術活用のテーブルが拡大したことを受け、本研究ではカタログに示す点検支援技術の分類（画像計測技術、非破壊検査技術、計測・モニタリング技術）に基づく現行の主要技術について着目し、これらを現場で運用するにあたり考慮しておくべき事項を中心に運用マニュアルとして取りまとめた。さらに今後も支援技術において、諸データの取得技術と分析・解析技術の開発、分業化が進むことを考慮し、性能規定化の必要性とその考え方の提案を行う。

トンネルの定期点検要領は、平成 26 年に道路法改正を受け現行要領の基本となる改訂が行われ、近接目視点検と打音検査を主要な点検手法としてⅠ～Ⅳの 4 段階で評価する方法が導入された。その点検要領に規定する、すべての道路施設に対する 5 年以内の点検が 1 巡する平成 31 年に改訂が行われ、新要領にしたがい 2 巡目の定期点検が各管理者において実施されている。

平成 31 年制定の定期点検要領では、覆工表面の状態把握の方法として、全面を近接目視によることとしつつも、知識と技能を有するものが定期点検を行うにあたって、自らの近接目視によるときと同等の診断ができると判断した場合には、その他の方法についても近接目視を基本とする範囲と考えてよいと解され、支援技術活用に大きく道が開かれた。

しかし技術的裏付けをもって近接目視と同等の診断が可能であることを示すことは容易でなく、実態としてロボット点検とも称される支援技術活用が進展しているとは言えない状況であり、近接目視点検と支援技術である走行画像計測が並行実施されている。また、打音検査については、その他の方法が許容されてはいない状況である。

一方で、i-Construction の拡大、点検実務就業者の減少・高齢化など支援技術に対する潜在ニーズは高まっており、管理者、点検受託者ともに運用マニュアルが必要とされる背景となっている。これらの動向を考慮し、本研究では開発途上の技術であっても積極的に適用し、技術的蓄積を高めていくことができるようにすることを重視した。

11.2 高度なトンネル点検支援技術を活用する際の運用マニュアル

11.2.1 高度なトンネル点検支援技術の定義と分類

1） 作成するマニュアルの範囲

本研究で着目する支援技術は、点検支援技術カタログに掲載された技術および定期点検要領の主旨に沿った萌芽的技術とし、カタログに示す点検支援技術の項目にしたがって分類し、それぞれマニュアルとして取りまとめる。

ここで作成するマニュアルの位置付けについて整理する。技術導入と普及促進にあたり必要となるマニュアルは一般的に「導入マニュアル（試用マニュアル）」「運用マニュアル」「技術マニュ

アル」である。「導入マニュアル」は新技術で評価が定まっていないものを適用するにあたり留意しなければならない事項や第三者影響を含むリスクアセスメントを行うために必要なもの、「運用マニュアル」はある程度技術評価が定まった技術について、社会実装を行うための共通のルールを定めたもの、「技術マニュアル」は個別技術または共通事項の取扱いについての技術詳細事項を取りまとめたものである。

本研究では、点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術を取り扱うこととし、「運用マニュアル」としての位置付けを目指す。したがって、個別技術についての詳細事項については本マニュアル対象外としている。

また、本研究では、画像計測技術により取得した画像を用いた AI によるスクリーニングについてアプリケーション開発を含め研究・開発したが、現段階では運用マニュアルを策定する段階にはないものとして、対象から除外している。

2) 対象とする変状と支援技術の関係

本マニュアルで対象とする変状と支援技術の関係は、8 章および 9 章において実証的に検討しており、表 11.2.1 のとおりである。

表 11.2.1 本マニュアルで対象とする変状と支援技術の関係

変状の判定項目		使用する技術分類	技術分野	適用性（9 章）
①圧ざ・ひび割れ（外力）	外力性判定	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
	ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	画像計測	○
	微細ひび割れ	画像計測	画像計測	－
	遊離石灰・漏水	画像計測	画像計測	－
②うき・はく離（材質劣化）	うき・はく離	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
		計測・モニタリング	レーザ計測	△
	ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	画像計測	○～△
	ジャンカ、はく離、かけ	画像計測	画像計測	－
	変色、劣化、漏水	画像計測	画像計測	－
③変形、移動、沈下	変形速度	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
④鋼材腐食、鉄筋腐食	腐食面積	画像計測	画像計測	○
	断面欠損	非破壊検査	内部欠陥レーダ	△
⑤巻厚不足、背面空洞	覆工巻厚	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
	圧縮強度	－	－	×
	背面空洞深さ	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
⑥漏水	漏水、遊離石灰、つらら、側氷	画像計測	画像計測	○
	漏水量の判定	－	－	×
	滞水、土砂流出、凍結	画像計測	画像計測	△
⑦附属物	異常の有無	画像計測	画像計測	△

◎：高機能化、○：代替、△：補完、×：現状の技術では代替・補完が難しい

これらの適用性判断に用いられた技術と点検支援技術カタログ掲載の関係は、表 11.2.2 のとおりである。

表 11.2.2　対象とする点検支援技術の枠組み

点検支援技術の分類	技術名称	開発者	点検支援技術カタログ掲載	本研究で確認
画像計測技術	画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ定量評価技術	大成建設株式会社	○	
	社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」	富士フイルム株式会社	○	
	走行型高精細画像計測システム（トンネルトレーサー）	内外テクノス株式会社	○	
	道路性状測定車両イーグル（L&L システム）	西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社	○	
	社会インフラモニタリングシステム（ MMSD®Ⅱ）	三菱電機株式会社	○	○
	走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R（ミーム・アール）／MIMM（ミーム）	パシフィックコンサルタンツ株式会社/計測検査株式会社	○	○
	一般車両搭載型トンネル点検システム	株式会社リコー	○	○
	トンネル覆工表面撮影システム	株式会社三井 E&S マシナリー、株式会社トノックス	○	
	走行型近赤外線撮影による SfM 三次元画像解析システム	国際航業株式会社		○
非破壊検査技術	デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	原子燃料工業株式会社	○	
	道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社	○	
	レーザ打音検査装置	株式会社フォトンラボ	○	
	天秤方式移動型レーダ探査技術	株式会社ウォールナット	○	
	打音検査ユニット	東急建設株式会社	○	
	走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R（ミーム・アール） －レーダ探査技術－	パシフィックコンサルタンツ株式会社	○	○
計測・モニタリング	OSV を活用したトンネル附属物の監視技術	パシフィックコンサルタンツ株式会社、OSV 研究会	○	
	3 軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物（照明器具・標識等）の傾斜角度変位モニタリングシステム	株式会社ザイマックス	○	
	MIMM-R（ミーム・アール）のレーザスキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術	パシフィックコンサルタンツ株式会社	○	
	社会インフラモニタリングシステム（ MMSD®Ⅱ）	三菱電機株式会社		○

11.2.2 適用効果が期待されるトンネルの条件

運用マニュアルを策定するにあたり、支援技術の適用効果が期待されるトンネルについて整理する。支援技術を適用することにより得られる情報には、画像情報や覆工表面の三次元点群座標のほか非破壊検査技術を活用することによる覆工の内部欠陥や空洞の情報があり、その多くは従来点検では得られないものである。トンネルの劣化が経年的進行であるとするならば、前回点検時のこれら情報と新規に取得した情報を比較し、多様な着目項目について経年変化を客観的に提示できる支援技術はすべてのトンネルに適用価値があるといえる。

一方で支援技術には省力化、コスト縮減の指向もあり、非常に短いトンネルや変状が極端に少ないトンネルにおいては、支援技術を投入することが省力化に繋がらない場合も生じる。

なお、トンネル覆工の変状進行速度に大きなばらつきがあることはこれまでの定期点検結果の分析から明らかであり、経年している矢板工法によるトンネルだけでなく NATM によるトンネルも同様の傾向がある。さほど経年していないにも関わらず変状が進行しているトンネルは、外力による作用を受けているか覆工コンクリートの材質劣化の可能性があり、将来的にひび割れの進行、うき・はく離の多発に繋がることから、経年変化を把握可能な支援技術の適用が強く推奨される。

12. コスト縮減、効率化検討（以下 12 章という）ではさまざまなユースケースが報告されており、点検延長 1km 未満よりも 1km 以上に適用した場合の所要日数低減効果が大きいことが報告されているが、全国の道路トンネルの平均延長は約 500m であり、500m～1km 未満での適用性についても評価を加え、表 11.2.3 に取りまとめた。

なお本節では経年変化を把握することを目的として支援技術の活用を想定している。支援技術には従来点検では把握が困難な空洞や断面欠損、覆工巻厚の不足など物理的な異常をある程度の精度で可視化することが可能である。一方、レーザ打音のように将来、亀裂やうきに繋がる可能性のある内部欠陥を可視化しその情報を点検情報として保存できる点など大きな優位性を有しているので、すべてのトンネルにおいて初期において基本情報取得を目的として活用することが推奨される。

表 11.2.3　トンネル変状、諸元と支援技術の適用効果の関係

トンネル点検延長	トンネル変状からの適用性	点検延長に伴う省力化	摘　要
100m 未満	小規模トンネルは低土被りで変状が発生しやすく適用性は高い	支援技術による省力化は期待できない	トンネル延長に関わらず、若経年で変状が進行している場合には、支援技術活用が推奨される
100～500m 未満	同上	変状が少ない場合には支援技術による省力化が期待できる	
500m～1km 未満	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待できる	
1km 以上	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待でき適用性は高い	

※ここで延長とは、1 点検ロットでの点検総延長であり、個別トンネル延長の総和を意味する

11.2.3 高度なトンネル点検支援技術運用マニュアル（案）

本節では過年度実施した研究において作成した運用マニュアルの改訂案を作成する。これまで述べたように前回のマニュアル作成時から点検支援技術を取り巻く状況は大きく変化しており、部分改訂では現場のニーズに応えきれないのは明白である。したがって今回作成では全体構成を大きく見直すこととし、表 11.2.4 の構成とした。

また、画像計測技術により取得した画像を用いた AI によるスクリーニングや点検成果品のロボット作成などは対象から除外している。

表 11.2.4　運用マニュアルの全体構成

章	項	備考
1.　高度なトンネル点検支援技術運用マニュアルについて	1.1　本マニュアルの目的	
	1.2　本マニュアルの構成	
	1.3　本マニュアルの使用方法	
2.　適用条件	2.1　本マニュアルが取り扱う支援技術と支援内容	
	2.2　支援技術の要求性能	
	2.3　支援技術の使用環境	
	2.4　支援技術の適用が推奨される条件	
3.　画像計測技術	3.1　画像計測技術の枠組み	
	3.2　画像計測技術の計画	
	3.3　画像計測技術の精度管理	
	3.4　画像計測技術の成果物	
	3.5　画像計測技術の品質管理	
	3.6　施工時データの取扱い	
	3.7　特殊な状況下での技術適用	被災後の画像計測など
4.　非破壊検査技術	4.1　非破壊検査技術の枠組み	
	4.2　非破壊検査技術の計画	
	4.3　非破壊検査技術の精度管理	
	4.4　非破壊検査技術の成果物	
	4.5　非破壊検査技術の品質管理	
	4.6　施工時データの取扱い	
	4.7　特殊な状況下での技術適用	
5.　計測・モニタリング	5.1　計測・モニタリングの枠組み	レーザ計測について
	5.2　計測・モニタリングの計画	
	5.3　計測・モニタリングの精度管理	
	5.4　計測・モニタリングの成果物	
	5.5　計測・モニタリングの品質管理	
	5.6　施工時データの取扱い	
	5.7　特殊な状況下での技術適用	
6.　成果物管理	6.1　成果物の仕様	
	6.2　成果物管理	
	6.3　BIM/CIM の活用	
	6.4　i-Construction の適用	

「トンネル点検支援技術の高度化に関する研究」成果に基づく

高度なトンネル点検支援技術運用マニュアル（案）

2021 年 3 月

新都市社会技術融合創造研究会

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト

1. 高度なトンネル点検支援技術運用マニュアルについて

1.1 本マニュアルの目的

本マニュアルは、道路管理者、点検実施者が道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月）に基づき定期点検を実施するにあたり、高度なトンネル点検支援技術の適用妥当性を評価するとともに正しく運用し社会実装を促進するために作成された。

本マニュアルは、道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月）に基づき定期点検が計画、実施されるにあたり、高度なトンネル点検支援技術の採用・適用、運用の参考となることを目的として作成された。

該当定期点検要領では、覆工表面の状態把握の方法として、全面を近接目視によることしつつも、知識と技能を有するものが定期点検を行うにあたって、自らの近接目視によるときと同等の診断ができると判断した場合には、その他の方法についても近接目視を基本とする範囲と考えてよいと解され、支援技術活用に大きく道が開かれた。

しかし技術的裏付けをもって近接目視と同等の診断が可能であることを示すことは容易でなく、実態としてロボット点検とも称される支援技術活用が進展しているとは言えない状況であり、近接目視点検と支援技術である走行画像計測が並行実施されている。また、打音検査については、その他の方法が許容されてはいない状況である。

一方でさまざまなロボット技術の本分野への参加、国土交通省による点検支援技術性能カタログの発行など、支援技術活用のテーブルは拡大しつつある。さらに、i-Construction の拡大、点検実務就業者の減少・高齢化など支援技術に対する潜在ニーズは高まっており、管理者、点検受託者ともに運用マニュアルが必要とされる背景となっている。

これらを背景として、トンネル点検支援技術が正しく運用され社会実装が促進されることを本マニュアルの目的とする。

1.2 本マニュアルの構成

本マニュアルは、点検支援技術カタログにおける支援技術の分類に基づき運用マニュアルとして構成する。

本マニュアルは、点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術を取り扱うこととし、運用マニュアルとしての位置付けとする。令和 2 年度段階での点検支援技術カタログの大分類は、「画像計測技術」「非破壊検査技術」「計測・モニタリング」であり、この構成との連携を行う。

1.3　本マニュアルの使用方法

本マニュアルは、道路管理者、点検実施者において、支援技術の適用および現場での運用を行う際に適用の妥当性を判断するとともに、適正な使用を促進するために使用する。

本マニュアルは、運用マニュアルとして道路管理者、点検実施者の双方において、支援技術の適用および現場での運用を支援するものとして作成する。支援技術はその特性、適用範囲がそれぞれの技術により異なる。そのため、適用を誤ると期待した支援効果が得られない可能性があるとともに、その成果を引き継ぎ、経年変化を分析する際の支障ともなるため、適正な使用は重要である。

2.　適用条件

2.1　本マニュアルが取り扱う支援技術と支援内容

本マニュアルが取り扱う支援技術は、令和 2 年度点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術を取り扱うこととし、運用マニュアルとしての位置付けを目指す。

本マニュアルは、点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術を取り扱うこととし、運用マニュアルとしての位置付けを目指す。したがって、個別技術における詳細事項については本マニュアル対象外としている。

また、萌芽的技術のパイロット運用や実験活用は対象としていない。

2.2　支援技術の要求性能

本マニュアルが取り扱う支援技術の要求性能は、道路トンネル定期点検要領が定める点検と診断が実用範囲おいて十分可能であることが確認できることにより定める。

それぞれの支援技術の要求性能は、項目ごとに取りまとめ本マニュアルにおいて規定する。

本マニュアルは支援技術の社会実装を促進することを目的としているので、必要以上の性能をそれぞれの技術に求めない。ここで「必要」とは、道路トンネル定期点検要領が定める手法により点検と診断が実用的な範囲おいて十分に可能であることを意味し、その範疇に従来点検においても誤診断や検出未達が発生している可能性を否定できないことを考慮する。すなわち、本マニュアルにより高度な支援技術を導入、運用したことにより誤診断や検出未達が皆無になることはなく、完全性を保証するものではない点を認識する必要がある。

一方で、本マニュアルはそれぞれの技術の高性能化を阻害するものではなく、点検と診断が十

分に可能であることを要求性能として規定することで、技術の互換性や新規参入を加速する狙いがある。

技術が高性能化することでこれまで以上の分析、解析が可能になることは想像され、診断技術や異常検出が現在より高度化することは十分に想像可能で、その結果、維持管理の合理化や道路利用者の利便性、安全性向上が図られることには大きな意味がある。それと十分条件を規定すべき運用マニュアルの位置付けは異なり、本マニュアルの企図するところを正しく理解し、運用していく必要がある。

2.3 支援技術の使用環境

本マニュアルが取り扱う支援技術は、その技術が本来の性能を発揮できる環境条件において使用しなければならない。

それぞれの支援技術の使用環境は、点検実施者において確立されなければならず、それを可能とするよう個別技術の技術マニュアルに明記されなければならない。

支援技術の多くは、その性能が発揮されるために環境条件を整える必要がある。とくに計測・モニタリング技術であるレーザ計測による三次元点群取得では、トンネル内での GPS 衛星捕捉が困難なため、複数回あるいは経年して実施した計測結果が軸ずれや平面移動を起こすことが本研究成果において報告されている。

本研究成果ではその補正の可能性と方法論についても報告されているが、それを可能とする環境条件を整えなければ計画する精度は得られない。しかし計測データは得られるので、それを検証、補正なしに使用すると診断を誤ることになる。

そのため、点検支援技術の使用環境を整えるのは、点検計画を実施する点検実施者の重要な責務である。また、点検の発注者、結果受領者である道路管理者は、支援技術が使用環境により精度左右される性格をもつことを理解し、より品質の高い点検、診断結果を得るために、可能な範囲で点検実施者による使用環境整備に協力する必要がある。また、個別技術を提供する点検支援技術開発者、技術サプライヤーは点検実施者が合理的な点検計画を立案し、使用環境を整えることができるようにするため、個別技術の技術マニュアルを充実させることが重要である。

2.4 支援技術の適用が推奨される条件

点検支援技術は、該当点検対象が支援技術に適用により効果が得られるかを検討して適用されなければならない。

本研究では、点検支援技術についてさまざまなユースケースがあり、点検延長 1km 未満よりも 1km 以上に適用した場合の所要日数低減効果が大きいことが報告されている。

さらに、点検支援技術は経年変化を把握することを主要な目的とした活用を想定しているが、支援技術には人力点検では把握が困難な空洞や断面欠損、覆工巻厚の不足など物理的な異常をある程度の精度で可視化することが可能である点、レーザ打音のように将来、亀裂やうきに繋がる可能性のある内部界面を可視化しその情報を点検情報として保存できる点などの優位性も有しているので、それらを考慮して支援技術の適用が推奨される条件を取りまとめた。

表 1.　トンネル変状、諸元と支援技術の適用効果の関係

トンネル点検延長	トンネル変状からの適用性	点検延長からの適用性	摘　要
100m 未満	小規模トンネルは低土被りで変状が発生しやすく適用性は高い	支援技術による省力化は期待できない	トンネル延長に関わらず、若経年で変状が進行している場合には、支援技術活用が推奨される
100～500m 未満	同上	変状が少ない場合には支援技術による省力化が期待できる	
500m～1km 未満	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待できる	
1km 以上	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待でき適用性は高い	

※ここで延長とは、1 点検ロットでの点検総延長であり、個別トンネル延長の総和を意味する

3.　画像計測技術

3.1　画像計測技術の枠組み

本マニュアルで画像計測技術とは、令和 2 年度点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術で、表 2 に記載する技術である。

本研究では、令和 2 年度点検支援技術カタログに記載された画像計測技術および研究参画者において開発された技術により実験を行った。それらの技術は表 2 に示すものである。本研究で未確認の点検支援技術カタログ掲載技術については、カタログ要求性能が本マニュアルに規定する性能に勝るので同様に適用可能であると考えてよい。

表 2.　本研究において評価、確認した画像計測技術の一覧

点検支援技術の分類	技術名称	開発者	点検支援技術カタログ掲載	本研究で確認
画像計測技術	画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ定量評価技術	大成建設株式会社	○	
	社会インフラ画像診断サービス「ひびみっけ」	富士フイルム株式会社	○	
	走行型高精細画像計測システム（トンネルトレーサー)	内外テクノス株式会社	○	
	道路性状測定車両イーグル（L&L システム)	西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社	○	
	社会インフラモニタリングシステム（ MMSD®Ⅱ）	三菱電機株式会社	○	○

画像計測技術	走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R（ミーム・アール）／MIMM（ミーム）	パシフィックコンサルタンツ株式会社/計測検査株式会社	○	○
	一般車両搭載型トンネル点検システム	株式会社リコー	○	○
	トンネル覆工表面撮影システム	株式会社三井 E&S マシナリー、株式会社トノックス	○	
	走行型近赤外線撮影による SfM 三次元画像解析システム	国際航業株式会社		○

3.2 画像計測技術の計画

点検支援技術として画像計測技術を適用するのは、以下の各段階である。

① 初期点検（竣工時点検）への活用

② 緊急時点検への活用

③ 定期点検への活用

④ 標準調査の代替としての活用

計画にあたっては、それぞれの活用目的と機能、性能を把握し、所定の性能を発揮できるようにしなければならない。

本研究では支援技術を活用した診断および支援レベルについて 9 章において整理した。道路トンネル定期点検要領における①～⑥の変状種類に対し、対策区分判定並びに健全度、診断の支援内容は以下のとおりである。

表 3. 変状種類及び変状区分との関係

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき・はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

支援技術を活用することで、画像計測によりひび割れが正確に確認できることから、研究成果を活用した判定を支援可能である。従来点検で作成した変状展開図よりも正確で、視覚的にも変状をとらえることが可能であり、研究成果との整合性を確認しやすくなる。さらに、レーザ計測データをもとにコンタ解析を実施することで外力影響が発生しているのか確認もできることから、高度な専門技術が必要となる外力性か材質劣化かの判定の難易度が若干下がることが期待される。

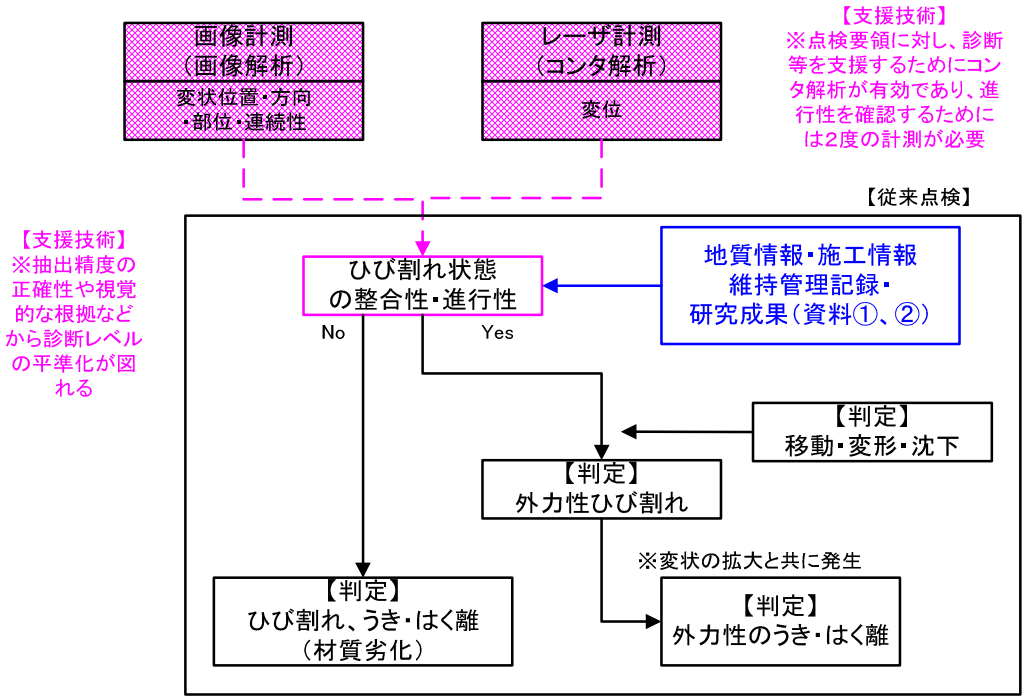


図 1.　外力性変状とひび割れ、うち・はく離への支援技術活用フロー

表 4.　本マニュアルで対象とする変状と支援技術の関係

変状の判定項目		使用する技術分類	技術分野	適用性
①圧ざ・ひび割れ（外力）	外力性判定	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
	ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	画像計測	○
	微細ひび割れ	画像計測	画像計測	－
	遊離石灰・漏水	画像計測	画像計測	－
②うき・はく離（材質劣化）	うき・はく離	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
		計測・モニタリング	レーザ計測	△
	ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	画像計測	○～△
	ジャンカ、はく離、かけ	画像計測	画像計測	－
	変色、劣化、漏水	画像計測	画像計測	－
③変形、移動、沈下	変形速度	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
④鋼材腐食、鉄筋腐食	腐食面積	画像計測	画像計測	○
	断面欠損	非破壊検査	内部欠陥レーダ	△
⑤巻厚不足、背面空洞	覆工巻厚	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
	圧縮強度	－	－	×
	背面空洞深さ	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
⑥漏水	漏水、遊離石灰、つらら、側氷	画像計測	画像計測	○
	漏水量の判定	－	－	×
	滞水、土砂流出、凍結	画像計測	画像計測	△
⑦附属物	異常の有無	画像計測	画像計測	△

◎：高機能化、○：代替、△：補完、×：現状の技術では代替・補完が難しい

3.3　画像計測技術の精度管理

点検支援技術として画像計測技術を適用するにあたっては、目的を達成するための精度管理を行わなければならない。

本研究では支援技術を活用した診断および支援レベルについて第８章､9 章において整理した。道路トンネル定期点検要領における①～⑥の変状種類に対し、提案する閾値および診断時の留意事項は以下の通りである。

表 5.　画像計測技術に要求する精度性能および診断時の留意事項

変状種類	閾値（しきいち）			診断時の留意事項
	要素	計測精度	対策区分判定・診断	
①圧ざ・ひび割れ	幅	【矢板工法】ひび割れ幅1.0mmを検出（状態の把握における対策区分の判定可能） 【山岳トンネル工法】	ひび割れ幅3.0mm程度（目安例／0.3mm以上※） ※ひび割れ幅0.3mm以上（維持管理便覧／凡例より） **⇒ひび割れ幅1.0mm程度**（NEXCOより／変位等確認が必要）	左記要素含め、ひび割れ密度、進行性（③参照）なども考慮する必要がある（はく落に繋がるものにも注意が必要）。また、左記要素に追加し、ひび割れ最小分解能：0.3～0.5mm、ひび割れ幅の検出：0.5mm刻みとする。
	長さ	ひび割れの長さ及び、進行の有無	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）のひび割れ形態が分かるレベル	
	位置	ひび割れの位置及び、ひび割れ状況（密集、外力性の有無）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
	色識別	変色箇所、豆板、漏水箇所のひび割れの有無	コンクリートに入ったひび割れが確認できるレベル（断面修復箇所、豆板などの材質劣化が確認できるレベル）	
②うき・はく離	大きさ	長さが0.05m以上の規模※）が分かるレベル（近接目視と同等と想定）	**長さが0.05m以上の規模※）**が分かるレベル（近接目視と同等と想定）	左記要素含め、うき・はく離に繋がる外力性ひび割れ（①参照）、変形・移動・沈下（③参照）に伴ううき・はく離などにも配慮する必要がある
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	位置	ひび割れの位置（目地、コールドジョイント）及び、ひび割れ状況（密集、外力性の有無）	アーチ、側壁並びに横断目地・水平打ち継ぎ目・ひび割れ沿いなどの見分けができるレベル	
③変形・移動・沈下	変形・移動・沈下量	誤差2mm程度	**1mm以上／年**	進行時期、停滞時期も存在する可能性が高いため、複数年での監視が必要
	位置	覆工、路面、歩道、監視員通路、監査廊など（坑門工は不可）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
④鋼材腐食	位置	範囲の検出	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	山岳トンネルにあるひび割れ防止筋なのか、RC構造なのかに留意が必要
	色識別	鋼材腐食の色判別（鋼材の断面欠損やうき錆の100%検出は困難）	コンクリートと鋼材並びに鋼材腐食が分かるレベル	
⑤巻厚不足または減少、背面空洞	大きさ	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	巻厚は設計巻厚と有効巻厚が必要で、巻厚不足は巻厚のみ、突発性崩壊は巻厚と背面空洞で判定することに留意が必要 ※強度は支援技術以外での対応
	形状	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	
	位置	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	強度※	（コンクリート強度試験で確認）	コンクリート設計基準強度との対比ができるレベル	
⑥漏水等による変状	位置	噴出、流下、滴水の検出（にじみは、壁面の汚れなどの関係で100%検出は困難）	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	利用者への影響度合いで判定し、路面に発生する滞水状態についても留意が必要
	色識別	漏水、遊離石灰、凍害（つらら、側氷）の有無	にじみ、滴水、流下、噴出などの漏水と遊離石灰、つらら、側氷などが見分けられるレベル	
	※）現場点検作業において、うきを変状展開図に記載する大きさであり、経験値に基づく規模			

3.4　画像計測技術の成果物

点検支援技術として画像計測技術を適用するにあたっては、後続の定期点検あるいは被災時などに前回、それ以前の画像情報をすみやかに取り出し、経時変化を観察できるように成果物管理を行わなければならない。

本研究では、さまざまなステージでの画像計測技術活用について提案してきた。その多くは初回あるいは前回点検時との比較により経時変化を把握することが診断に寄与することから、成果物管理は重要である。

画像計測結果の成果物管理方法については、点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル（トンネル編）（案）（令和 2 年 3 月/国土交通省）があり、撮影条件が下記の通り規定されている。

ここでは、レイヤ構造図画ファイルについても例示されており、本方式が適用されることが望ましい。

表 6.　3 次元成果品納品マニュアルによる撮影条件規定

＜4K カメラ，高画質ビデオカメラを使用する場合＞
幅 0.3mm のひび割れを検出する場合、1.5mm/画素以下とする。
使用するカメラに応じて、撮影範囲(視野サイズ)を決定する必要がある。
長手方向の視野サイズ(mm)　＝　長手方向のカメラ画素数　×　1.5mm
縦方向の視野サイズ(mm)　＝　縦方向のカメラ画素数　×　1.5mm
＜ラインカメラを使用する場合＞
幅 0.3mm のひび割れを推奨検出する場合、0.3mm/画素以下とする。
使用するカメラに応じて、撮影範囲(視野サイズ)を決定する必要がある。
長手方向についてはラインカメラであることから視野サイズの規定は除外する。
縦方向の視野サイズ(mm)　＝　縦方向のカメラ画素数　×　0.3mm
※現場では、設定された撮影範囲(視野サイズ)を維持した撮影とする。
※トンネル全周の二次元展開図を作成することから実寸法に合わせた適正なアスペクト比を確保する。

	仕様	留意点
カメラ機種	手持ち：4K カメラ以上 走行型：高画質ビデオカメラ（エリア，グローバルシャッター）およびラインカメラ	安定した高画質を確保するために必要
		センサーサイズは、APS-C 以上
		コントラスト AF は使用しないこと
撮影設定	トンネル内部の環境・現場条件に応じ、絞り・シャッタースピード・ISO 感度等の調整を行う	トンネル内の環境によって、任意に設定する必要がある
ラップ率	任意設定	二次元平面展開の合成可能なラップ率を設定
画質	最高画質モード	使用するカメラ機種のなかで高画質モード以上
画像フォーマット	任意とする	高精細以上
その他	試撮を行い、現場状況応じて設定値を確認・調整し撮影記録する 鮮明な画像を取得するため、十分な照明を当てて撮影する	手ブレ等を起こさないように安定した撮影が必要
		現場状況に応じて光源を使用・調整したうえで撮影すること

3.5　画像計測技術の品質管理

点検支援技術として画像計測技術を適用するにあたっては、成果物管理に定める撮影条件規定を全区間において満足するように行わなければならない。また、撮影条件規定を満足することのエビデンスについて付録することが望ましい。

本研究では、さまざまなステージでの画像計測技術活用について提案してきた。成果品については、点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル（トンネル編）（案）（令和 2 年 3 月/国土交通省）が尊重されることを述べたが、本マニュアルはトンネル全区間において同品質での画像が入手されることを前提としており、画像計測技術の品質管理規定にはなっていない。

将来の変状あるいは被災損傷は、トンネル全線のどこで起きるか予測できないので、取得画像が全線で安定した品質となっていることは重要である。画像計測技術を活用するためには、成果品を他者が継承することを前提とする必要があり、画像品質に関してエビデンスを構築することが望まれる。

3.6　施工時データの取扱い

施工時記録として点検支援技術で用いられる画像計測技術を適用するにあたっては、維持管理への継続性を考慮した成果物管理、品質管理を行うことが望ましい。

本研究では、施工時を含めたさまざまなステージでの画像計測技術活用について提案するとともに、施工時の路盤状況など成果品管理、品質管理に課題が多いことについて説明した。

表 7.　品質管理項目_施工後試験：ひび割れ調査で活用可能な技術

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ 登録番号	画像撮影	レーザ 計測
走行型高精細画像計測システム トンネルトレーサー	CB-180027-A	TN010003-V0120	○	－
一般車両搭載型トンネル点検システム	KT-190062-VR	TN010007-V0020	○	－
トンネル覆工表面撮影システム	KT-190037-VR	TN010008-V0120	○	－
トンネル覆工点検システム eQ ドクターT	QS-170015-VR	－	○	－
道路性状測定車両イーグル L&L システム	SK-160013-A	TN010004-V0120	○	○
社会インフラモニタリングシステム MMSD	HR-180004-VR	TN010005-V0020	○	○
走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）	KK-130026-VR	TN010006-V0120	○	○

表 8.　出来形管理で活用可能な技術

技術名称	NETIS 登録番号	性能カタログ 登録番号	計測 方式	吹付 ｲﾝﾊﾞｰﾄ	覆工 ｺﾝｸﾘｰﾄ
3D-TUBE	SK-120005-VR	－	設置型	○	○
3D スキャン計測システム 3D サーフェス	KT-180118-A	－	設置型	○	○
3D トンネルレーザ計測システム	KT-170093-A	－	設置型	○	○
モバイルスキャニングシステム	QS-160019-A		走行型	△	○
高精度 MMS でスイスイ 3D 現況測量	KT-150010-VE	－	走行型	△	○
道路性状測定車両イーグル （L&L システム）	SK-160013-A	TN010004－V0120	走行型	△	○
社会インフラモニタリングシステム MMSD	HR-180004-VR	TN010005－V0020	走行型	△	○
走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）	KK-130026-VR	TN010006－V0120	走行型	△	○

これら点検支援技術に加え、トンネル掘削における装薬やロックボルトの削孔時に、削岩機の油圧データ等から穿孔エネルギーを取得できることから、従来は定性的にしか評価できなかった地山の硬軟の情報を数値化して記録しておくことができるので、活用が期待されている。

現段階でこれら取得データの成果品としての納品方法やその品質については規定がなく、維持管理過程にシームレスな情報連携が確保されているとは言えないので、点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル（トンネル編）（案）（令和 2 年 3 月/国土交通省）に準拠する納品が推奨されるように努めていく必要がある。

3.7　特殊な状況下での技術適用

トンネルが地震や地すべり等により被災した場合には、緊急的に時点記録を取得し変状分析に用いるとともに、短期、長期での経時変化を把握するため、可能な範囲で速やかに点検支援技術による画像計測を行うことが望ましい。

地震や地すべり等による変状を受けたトンネルにおいて、被災前に走行画像が取得されていて被災後との比較が行われた事例がある。また、地すべりにより進行性変状が疑われた被災において、時点記録として被災後直ちに点検支援技術を用いて走行画像が取得された事例もある。

これら緊急時点検は、定期点検とは異なり、現場での安全管理や行動制約などがあり、支援技術の適用による十分な情報取得に繋がらない可能性がある。しかし、進行性の変状によるトンネルの構造安全性の把握やセントル等を介しての暫定開放の判断に有用な資料となるので、可能な限り点検支援技術による画像計測を行うことが望ましい。

4. 非破壊検査技術

4.1 非破壊検査計測技術の枠組み

本マニュアルで非破壊検査技術とは、令和 2 年度点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術で、別表に記載する技術である。

本研究では、令和 2 年度点検支援技術カタログに記載された非破壊検査技術および研究参画者において開発された技術により実験を行った。それらの技術は表 9 に示すものである。本研究で未確認の点検支援技術カタログ掲載技術については、カタログ要求性能が本マニュアルに規定する性能に勝るので同様に適用可能であると考えてよい。

表 9. 対象とする点検支援技術の枠組み

点検支援技術の分類	技術名称	開発者	点検支援技術カタログ掲載	本研究で確認
非破壊検査技術	デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	原子燃料工業株式会社	○	
	道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社	○	
	レーザ打音検査装置	株式会社フォトンラボ	○	
	天秤方式移動型レーダ探査技術	株式会社ウォールナット	○	
	打音検査ユニット	東急建設株式会社	○	
	走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R（ミーム・アール） －レーダ探査技術－	パシフィックコンサルタンツ株式会社	○	○

4.2 非破壊検査技術の計画

点検支援技術として非破壊検査技術を適用するのは、覆工巻厚・背面空洞の検知についてであり、以下の各段階である。

① 初期点検（竣工時点検）への活用

② 定期点検への活用

③ 標準調査の代替としての活用

計画にあたっては、それぞれの活用目的と機能、性能を把握し、所定の性能を発揮できるようにしなければならない。

本研究では支援技術を活用した診断および支援レベルについて整理した。道路トンネル定期点検要領における①～⑥の変状種類に対し、対策区分判定並びに健全度、診断の支援内容は以下のとおりである。

表 10.　本マニュアルで対象とする変状と支援技術の関係

変状の判定項目		使用する技術分類	技術分野	適用性
①圧ざ・ひび割れ（外力）	外力性判定	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
	ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	画像計測	○
	微細ひび割れ	画像計測	画像計測	－
	遊離石灰・漏水	画像計測	画像計測	－
②うき・はく離（材質劣化）	うき・はく離	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
		計測・モニタリング	レーザ計測	△
	ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	画像計測	○～△
	ジャンカ、はく離、かけ	画像計測	画像計測	－
	変色、劣化、漏水	画像計測	画像計測	－
③変形、移動、沈下	変形速度	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
④鋼材腐食、鉄筋腐食	腐食面積	画像計測	画像計測	○
	断面欠損	非破壊検査	内部欠陥レーダ	△
⑤巻厚不足、背面空洞	覆工巻厚	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
	圧縮強度	－	－	×
	背面空洞深さ	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
⑥漏水	漏水、遊離石灰、つらら、側氷	画像計測	画像計測	○
	漏水量の判定	－	－	×
	滞水、土砂流出、凍結	画像計測	画像計測	△
⑦附属物	異常の有無	画像計測	画像計測	△

◎：高機能化、○：代替、△：補完、×：現状の技術では代替・補完が難しい

非破壊検査で覆工巻厚・背面空洞の検知方法としては、電磁波、超音波、弾性波、などの手法が一般的である。それぞれに特徴があり、状況に応じて使い分けている。それぞれの特徴を表 11 に示す。

表 11.　覆工厚・背面空洞探査手法

	覆工	背面空洞	適　用
超音波探査	厚みの検出	厚み検出不可	覆工表面が被服されていても可能
衝撃弾性波探査	〃	厚みの検出	調査地点１点の情報
レーダー探査	〃	〃	使用周波数により分解能が異なる

代表的な技術である非接触レーダ、接触レーダともに、推奨探査深度、限界値が探査機性能として規定されるので、その範囲以外は別な方法を講じるなどして調査結果を誤認しないように留意する必要がある。

【非接触レーダの支援内容】

有効巻厚と突発性崩壊の判定に対して、非接触レーダが支援できる内容について以下にまとめる。

表 12.　非接触レーダの支援可能内容

項目：　有効巻厚／設計巻厚

有効巻厚／設計巻厚	有効性	適　用
1/2未満	○	設計巻厚0.9m未満の場合
1/2～2/3	△	設計巻厚0.7m未満は可能
2/3以上	×	巻厚45cm以上は不明

※）有効巻厚は、設計基準強度以上の部分とする事より、別途コンクリートの強度試験を行わないとならない。

項目：突発性の崩壊

覆工巻厚、空洞厚	有効性	適　用
巻厚30cm未満かつ空洞30cm以上	○	支援可能
巻厚30cm以上かつ空洞30cm以上	△	覆工の厚さ45cmまで支援可能
空洞30cm未満	判定なし	〃

※）緊急性を要する、Ⅲ、Ⅳ判定をする事は可能であるが、探査性能限界である巻厚45cmより厚く、背面空洞が大きい場合の、Ⅱa、Ⅲ判定が出来ない。

【接触レーダの支援内容】

接触レーダは、一般的なレーダ探査装置として点検時に使用されており、非接触レーダとの比較確認のためその有効性をまとめた。

表 13.　接触レーダの支援可能内容

項目：　有効巻厚／設計巻厚

有効巻厚／設計巻厚	有効性	適　用
1/2未満	○	
1/2～2/3	○	
2/3以上	○	

項目：突発性の崩壊

覆工巻厚、空洞厚	有効性	適　用
巻厚30cm未満かつ空洞30cm以上	○	支援可能
巻厚30cm以上かつ空洞30cm以上	○	〃
空洞30cm未満	－	－

4.3　非破壊検査技術の精度管理

点検支援技術として非破壊検査技術を適用するにあたっては、目的を達成するための精度管理を行わなければならない。

本研究では支援技術を活用した診断および支援レベルについて整理した。道路トンネル定期点検要領における①～⑥の変状種類に対し、提案する閾値および診断時の留意事項は以下の通りである。

表 14.　画像計測技術に要求する精度性能および診断時の留意事項

変状種類	閾値（しきいち）			診断時の留意事項
	要素	計測精度	対策区分判定・診断	
①圧ざ・ひび割れ	幅	【矢板工法】ひび割れ幅1.0mmを検出（状態の把握における対策区分の判定可能） 【山岳トンネル工法】	ひび割れ幅3.0mm程度（目安例／0.3mm以上※） ※ひび割れ幅0.3mm以上（維持管理便覧／凡例より） **⇒ひび割れ幅1.0mm程度**（NEXCOより／変位等確認が必要）	左記要素含め、ひび割れ密度、進行性（③参照）なども考慮する必要がある（はく落に繋がるものにも注意が必要）。また、左記要素に追加し、ひび割れ最小分解能：0.3～0.5mm、ひび割れ幅の検出：0.5mm刻みとする。
	長さ	ひび割れの長さ及び、進行の有無	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）のひび割れ形態が分かるレベル	
	位置	ひび割れの位置及び、ひび割れ状況（密集、外力性の有無）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
	色識別	変色箇所、豆板、漏水箇所のひび割れの有無	コンクリートに入ったひび割れが確認できるレベル（断面修復箇所、豆板などの材質劣化が確認できるレベル）	
②うき・はく離	大きさ	長さが0.05m以上の規模※）が分かるレベル（近接目視と同等と想定）	**長さが0.05m以上の規模※）**が分かるレベル（近接目視と同等と想定）	左記要素含め、うき・はく離に繋がる外力性ひび割れ（①参照）、変形・移動・沈下（③参照）に伴ううき・はく離などにも配慮する必要がある
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	位置	ひび割れの位置（目地、コールドジョイント）及び、ひび割れ状況（密集、外力性の有無）	アーチ、側壁並びに横断目地・水平打ち継ぎ目・ひび割れ沿いなどの見分けができるレベル	
③変形・移動・沈下	変形・移動・沈下量	誤差2mm程度	**1mm以上／年**	進行時期、停滞時期も存在する可能性が高いため、複数年での監視が必要
	位置	覆工、路面、歩道、監視員通路、監査廊など（坑門工は不可）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
④鋼材腐食	位置	範囲の検出	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	山岳トンネルにあるひび割れ防止筋なのか、RC構造なのかに留意が必要
	色識別	鋼材腐食の色判別（鋼材の断面欠損やうき錆の100%検出は困難）	コンクリートと鋼材並びに鋼材腐食が分かるレベル	
⑤巻厚不足または減少、背面空洞	大きさ	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	巻厚は設計巻厚と有効巻厚が必要で、巻厚不足は巻厚のみ、突発性崩壊は巻厚と背面空洞で判定することに留意が必要 ※強度は支援技術以外での対応
	形状	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	
	位置	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	強度※	（コンクリート強度試験で確認）	コンクリート設計基準強度との対比ができるレベル	
⑥漏水等による変状	位置	噴出、流下、滴水の検出（にじみは、壁面の汚れなどの関係で100%検出は困難）	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	利用者への影響度合いで判定し、路面に発生する滞水状態についても留意が必要
	色識別	漏水、遊離石灰、凍害（つらら、側氷）の有無	にじみ、滴水、流下、噴出などの漏水と遊離石灰、つらら、側氷などが見分けられるレベル	
	※）現場点検作業において、うきを変状展開図に記載する大きさであり、経験値に基づく規模			

4.4　非破壊検査技術の成果物

点検支援技術として非破壊検査技術を適用するにあたっては、後続の定期点検あるいは被災時などに前回、それ以前の画像情報をすみやかに取り出し、経時変化を観察できるように成果物管理を行わなければならない。

本研究では、さまざまなステージでの画像計測技術活用について提案してきた。その多くは初回あるいは前回点検時との比較により経時変化を把握することが診断に寄与することから、成果物管理は重要である。

非破壊検査技術における画像計測技術のような成果品納品マニュアルは未整備のため、成果物を取りまとめる際には、データ形式やデータ密度などについて道路管理者と協議により決定する必要がある。

4.5 非破壊検査技術の品質管理

点検支援技術として非破壊検査技術を適用するにあたっては、探査条件規定を全区間において満足するように行わなければならない。また、探査条件規定を満足することのエビデンスについて付録することが望ましい。

将来の変状あるいは被災損傷は、トンネル全線のどこで起きるか予測できないので、取得情報が全線で安定した品質となっていることは重要である。非破壊検査技術を活用するためには、成果品を他者が継承することを前提とする必要があり、情報品質に関してエビデンスを構築することが望まれる。

4.6 施工時データの取扱い

施工時記録として点検支援技術で用いられる非破壊検査技術を適用するにあたっては、維持管理への継続性を考慮した成果物管理、品質管理を行うことが望ましい。

本研究では、施工時を含めたさまざまなステージでの画像計測技術活用について提案するとともに、施工時の路盤状況など成果品管理、品質管理に課題が多いことについて説明した。

施工段階で竣工事に実施する初期点検時に空洞調査を実施することで、供用後の不具合や規制下での補修・補強などの発生を防止できる可能性がある。この変状は、内部空洞の近傍にひび割れが発生している場合は、ひび割れを抽出することで内部空洞の存在を推定することが可能であるが、コンクリート表面に特徴が乏しい場合は抽出が困難である。現状は、竣工検査の際に作業員による打音検査を実施することが一般的な点検方法となる。打音検査では、高所作業車を低速走行あるいは断続的に移動させ、点検者がハンマー等でコンクリート表面を叩く上向き作業となるため、ひび割れスケッチと同様の苦渋作業となる。

データ連携の観点からは、初期点検時にレーダ探査を行うことで、竣工後のひび割れ発生について、外力であればそれを証明することができるため、長期保証制度（竣工 3 年後の検査）での瑕疵を防げる可能性が高い。更に、BIM/CIM においては、レーダ探査データを 3 次元モデルに重層することで状態把握が容易となり、維持管理への活用も容易となる。

4.7　特殊な状況下での技術適用

トンネルが地震や地すべり等により被災した場合には、緊急的に時点記録を取得し損傷分析に用いるとともに、短期、長期での経時変化を把握するため、可能な範囲で非破壊検査技術による情報収集を行うことが望ましい。

地震や地すべり等による変状を受けたトンネルにおいて、残存構造耐力を想定するためには、巻厚や空洞に関する情報が不可欠である。

これら緊急時点検は、定期点検とは異なり、現場での安全管理や行動制約などがあり、支援技術の適用による十分な情報取得に繋がらない可能性がある。しかし、進行性の変状によるトンネルの構造安全性の把握やセントル等を介しての暫定開放の判断に有用な資料となるので、可能な限り点検支援技術による計測を行うことが望ましい。

5.　計測・モニタリング

5.1　計測・モニタリングの枠組み

本マニュアルで計測・モニタリングとは、令和 2 年度点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術で、表 15 に記載する技術である。

本研究では、令和 2 年度点検支援技術カタログに記載された計測・モニタリングおよび研究参画者において開発された技術により実験を行った。それらの技術は表 15 に示すものである。本研究で未確認の点検支援技術カタログ掲載技術については、カタログ要求性能が本マニュアルに規定する性能に勝るので同様に適用可能であると考えてよい。

表 15.　対象とする点検支援技術の枠組み

点検支援技術の分類	技術名称	開発者	点検支援技術カタログ掲載	本研究で確認
計測・モニタリング	OSV を活用したトンネル附属物の監視技術	パシフィックコンサルタンツ株式会社、OSV 研究会	○	
	3 軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物（照明器具・標識等）の傾斜角度変位モニタリングシステム	株式会社ザイマックス	○	
	MIMM-R（ミーム・アール）のレーザスキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術	パシフィックコンサルタンツ株式会社	○	
	社会インフラモニタリングシステム（ MMSD®Ⅱ）	三菱電機株式会社		○

5.2 計測・モニタリングの計画

点検支援技術として計測・モニタリングを適用するのは、以下の各段階である。

① 初期点検（竣工時点検）への活用

② 緊急時点検への活用

③ 定期点検への活用

④ 標準調査の代替としての活用

計画にあたっては、それぞれの活用目的と機能、性能を把握し、所定の性能を発揮できるようにしなければならない。

本研究では支援技術を活用した診断および支援レベルについて整理した。道路トンネル定期点検要領における①～⑥の変状種類に対し、対策区分判定並びに健全度、診断の支援内容は以下のとおりである。

表 16. 変状種類及び変状区分との関係

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき・はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

支援技術を活用することで、覆工内面形状および前回取得データとの差分解析により変状が正確に確認できることから、研究成果を活用した判定を支援可能である。従来点検で作成した変状展開図よりも正確で、視覚的にも変状をとらえることが可能であり、研究成果との整合性を確認しやすくなる。さらに、差分解析を実施することで外力影響が発生しているのか確認もできることから、高度な専門技術が必要となる外力性か材質劣化かの判定の難易度が若干下がることが期待される。

レーザ計測による差分解析（コンタ解析）を取り入れた診断方法は以下のようになる。

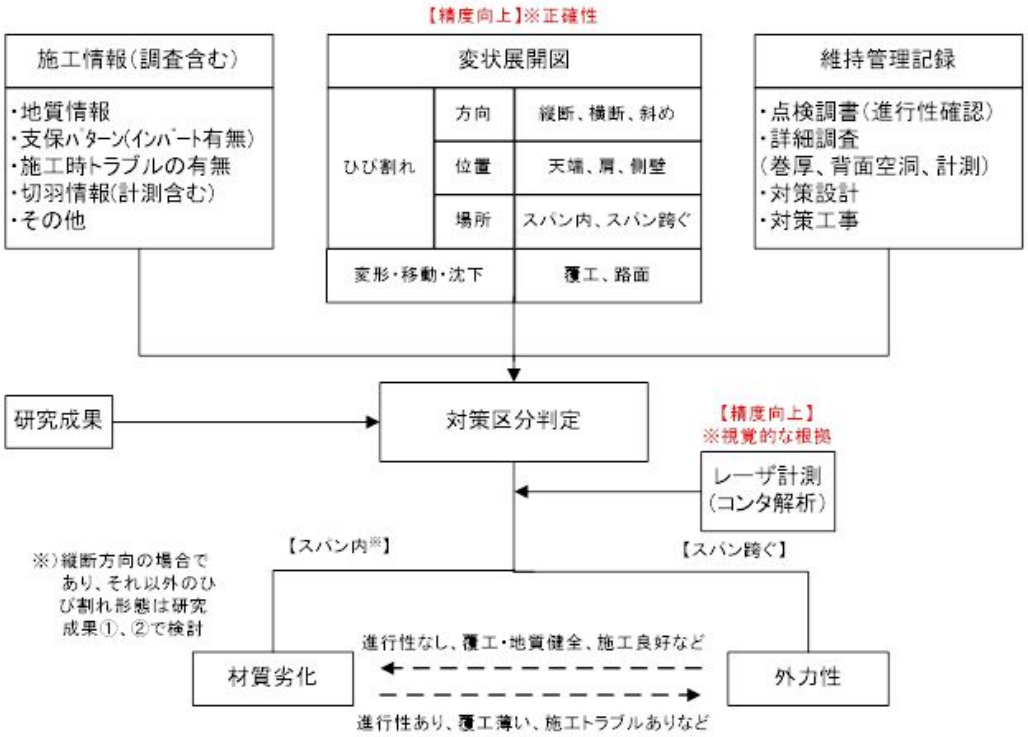


図 2.　外力性変状とひび割れ、うち・はく離への支援技術活用フロー

表 17.　本マニュアルで対象とする変状と支援技術の関係

変状の判定項目		使用する技術分類	技術分野	適用性
①圧ざ・ひび割れ（外力）	外力性判定	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
	ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	画像計測	○
	微細ひび割れ	画像計測	画像計測	－
	遊離石灰・漏水	画像計測	画像計測	－
②うき・はく離（材質劣化）	うき・はく離	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
		計測・モニタリング	レーザ計測	△
	ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	画像計測	○～△
	ジャンカ、はく離、かけ	画像計測	画像計測	－
	変色、劣化、漏水	画像計測	画像計測	－
③変形、移動、沈下	変形速度	計測・モニタリング	レーザ計測	◎
④鋼材腐食、鉄筋腐食	腐食面積	画像計測	画像計測	○
	断面欠損	非破壊検査	内部欠陥レーダ	△
⑤巻厚不足、背面空洞	覆工巻厚	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
	圧縮強度	－	－	×
	背面空洞深さ	非破壊検査	非接触レーダ探査	△
⑥漏水	漏水、遊離石灰、つらら、側氷	画像計測	画像計測	○
	漏水量の判定	－	－	×
	滞水、土砂流出、凍結	画像計測	画像計測	△
⑦附属物	異常の有無	画像計測	画像計測	△

◎：高機能化、○：代替、△：補完、×：現状の技術では代替・補完が難しい

5.3　計測・モニタリングの精度管理

点検支援技術として計測・モニタリングを適用するにあたっては、目的を達成するための精度管理を行わなければならない。

本研究では支援技術を活用した診断および支援レベルについて整理した。道路トンネル定期点検要領における①～⑥の変状種類に対し、提案する閾値および診断時の留意事項は以下のとおりである。

表 5.　画像計測技術に要求する精度性能および診断時の留意事項

変状種類	閾値（しきいち）			診断時の留意事項
	要素	計測精度	対策区分判定・診断	
①圧ざ・ひび割れ	幅	【矢板工法】ひび割れ幅1.0mmを検出（状態の把握における対策区分の判定可能） 【山岳トンネル工法】	ひび割れ幅3.0mm程度（目安例／0.3mm以上※） ※ひび割れ幅0.3mm以上（維持管理便覧／凡例より） **⇒ひび割れ幅1.0mm程度**（NEXCOより／変位等確認が必要）	左記要素含め、ひび割れ密度、進行性（③参照）なども考慮する必要がある（はく落に繋がるものにも注意が必要）。また、左記要素に追加し、ひび割れ最小分解能：0.3～0.5mm、ひび割れ幅の検出：0.5mm刻みとする。
	長さ	ひび割れの長さ及び、進行の有無	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）のひび割れ形態が分かるレベル	
	位置	ひび割れの位置及び、ひび割れ状況（密集、外力性の有無）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
	色識別	変色箇所、豆板、漏水箇所のひび割れの有無	コンクリートに入ったひび割れが確認できるレベル（断面修復箇所、豆板などの材質劣化が確認できるレベル）	
②うき・はく離	大きさ	長さが0.05m以上の規模※）が分かるレベル（近接目視と同等と想定）	**長さが0.05m以上の規模※）**が分かるレベル（近接目視と同等と想定）	左記要素含め、うき・はく離に繋がる外力性ひび割れ（①参照）、変形・移動・沈下（③参照）に伴ううき・はく離などにも配慮する必要がある
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	位置	ひび割れの位置（目地、コールドジョイント）及び、ひび割れ状況（密集、外力性の有無）	アーチ、側壁並びに横断目地・水平打ち継ぎ目・ひび割れ沿いなどの見分けができるレベル	
③変形・移動・沈下	変形・移動・沈下量	誤差2mm程度	**1mm以上/年**	進行時期、停滞時期も存在する可能性が高いため、複数年での監視が必要
	位置	覆工、路面、歩道、監視員通路、監査廊など（坑門工は不可）	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図（維持管理便覧/付属資料）の発生位置が分かるレベル	
④鋼材腐食	位置	範囲の検出	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	山岳トンネルにあるひび割れ防止筋なのか、RC構造なのかに留意が必要
	色識別	鋼材腐食の色判別（鋼材の断面欠損やうき錆の100%検出は困難）	コンクリートと鋼材並びに鋼材腐食が分かるレベル	
⑤巻厚不足または減少、背面空洞	大きさ	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	巻厚は設計巻厚と有効巻厚が必要で、巻厚不足は巻厚のみ、突発性崩壊は巻厚と背面空洞で判定することに留意が必要 ※強度は支援技術以外での対応
	形状	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合は空洞100cm程度が確認できるレベル	**巻厚30cm以上**もしくは**30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上**が確認できるレベル	
	位置	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	強度※	（コンクリート強度試験で確認）	コンクリート設計基準強度との対比ができるレベル	
⑥漏水等による変状	位置	噴出、流下、滴水の検出（にじみは、壁面の汚れなどの関係で100%検出は困難）	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	利用者への影響度合いで判定し、路面に発生する滞水状態についても留意が必要
	色識別	漏水、遊離石灰、凍害（つらら、側氷）の有無	にじみ、滴水、流下、噴出などの漏水と遊離石灰、つらら、側氷などが見分けられるレベル	

※）現場点検作業において、うきを変状展開図に記載する大きさであり、経験値に基づく規模

なお、ここで③変形・移動・沈下の診断閾値として、1mm 以上/年と示されるが、これはこの解像度が必要とされるという意味ではなく、1mm/年程度の継続的な変位を定期点検スパンにより検出可能であることを要求性能と考える。すなわち、2 年間隔で監視を行っている場合、通常の 5 年間隔で点検を行っている場合において、2mm あるいは 5mm の差分を解析できれば十分ということである。

5.4　計測・モニタリングの成果物

点検支援技術として計測・モニタリングを適用するにあたっては、後続の定期点検あるいは被災時などに前回、それ以前の情報をすみやかに取り出し、経時変化を観察できるように成果物管理を行わなければならない。

本研究では、さまざまなステージでの計測・モニタリング活用について提案してきた。その多くは初生あるいは前回点検時との比較により経時変化を把握することが診断に寄与することから、成果物管理は重要である。また、経時変化の可視化として差分解析をコンタ表示することにより外力変状の特徴でもある特定範囲での変位進行を明示可能である。

差分解析および補正方法とその表示方法については、本研究において検討しているので、成果物の取りまとめ方法として同様の方法が適用されることが望ましい。

5.5　計測・モニタリングの品質管理

点検支援技術として計測・モニタリングを適用するにあたっては、精度管理に定める条件規定を全区間において満足するように行わなければならない。また、条件規定を満足することのエビデンスについて付録することが望ましい。

将来の変状あるいは被災損傷は、トンネル全線のどこで起きるか予測できないので、取得情報が全線で安定した品質となっていることは重要である。計測･モニタリングを活用するためには、成果品を他者が継承することを前提とする必要があり、情報品質に関してエビデンスを構築することが望まれる。

5.6　施工時データの取扱い

施工時記録として点検支援技術で用いられる計測・モニタリングを適用するにあたっては、維持管理への継続性を考慮した成果物管理、品質管理を行うことが望ましい。

本研究では、施工時を含めたさまざまなステージでの画像計測技術活用について提案するとともに、施工時の路盤状況など成果品管理、品質管理に課題が多いことについて説明した。

レーザ計測による点群取得は施工時（竣工時）を初期値としてスタートさせれば、総変位量の把握などにおいて有利であるとともに、さまざまな条件により初生から急速に変状が進展するトンネルを早期に把握することにつながる。

このような利点を活かすべく、施工時データは維持管理ステージの手法、フォーマットにより取得され、維持管理に引き継ぎされることが望ましい。

5.7　特殊な状況下での技術適用

トンネルが地震や地すべり等により被災した場合には、緊急的に時点記録を取得し損傷分析に用いるとともに、短期、長期での経時変化を把握するため、可能な範囲で速やかに点検支援技術による計測・モニタリングを行うことが望ましい。

地震や地すべり等による変状を受けたトンネルにおいて、被災前にレーザ計測による点群データが取得されていて被災後との比較が行われた事例がある。また、地すべりにより進行性変状が疑われた被災において、時点記録として被災後直ちに点検支援技術を用いて点群データが取得された事例もある。

これら緊急時点検は、定期点検とは異なり、現場での安全管理や行動制約などがあり、支援技術の適用による十分な情報取得に繋がらない可能性がある。しかし、進行性の変状によるトンネルの構造安全性の把握やセントル等を介しての暫定開放の判断に有用な資料となるので、可能な限り点検支援技術によるレーザ計測を行うことが望ましい。

6.　成果物管理

6.1　成果物の仕様

支援技術を活用した成果物は、経年変化を把握するための情報継承を前提として、記述内容を決めなければならない。

本マニュアルは、道路トンネル定期点検要領（平成 31 年 3 月）に基づき定期点検が計画、実施されるにあたり、高度なトンネル点検支援技術の採用・適用、運用の参考となることを目的として作成された。

画像計測技術の成果品については、点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル（トンネル編）（案）（令和 2 年 3 月/国土交通省）が尊重されることを述べたが、本マニュアルはトンネル全区間において同品質での画像が入手されることを前提としており、画像計測技術の品質管理規定にはなっていない。

将来の変状あるいは被災損傷は、トンネル全線のどこで起きるか予測できないので、取得画像が全線で安定した品質となっていることは重要である。画像計測技術を活用するためには、成果品を他者が継承することを前提とする必要があり、画像品質に関してエビデンスを構築することが望まれる。

また、非破壊検査技術、計測・モニタリングについては、共通して使用可能な成果品仕様が未だない状況であるが、情報継承の主旨を尊重してフォーマットを検討することが望ましい。

6.2 成果物管理

支援技術を活用した成果物は、経年変化を把握するための情報継承を前提として、道路管理者において適正に管理されなければならない。

点検支援技術を用いて取りまとめられた成果物は、次回点検時あるいは緊急点検時に画像比較や差分解析を実施するための資源である。定期点検、緊急点検は現在の調達管理方法のなかでは、常に新規担当者が実施することを前提とする必要がある。

6.3 BIM/CIM の活用

支援技術を活用した成果物は、BIM/CIM を活用して調査設計から施工、維持管理の各ステージにシームレスに活用されることを最終形として、成果品管理されなければならない。

点検支援技術を用いて取りまとめられた成果物は、点検ステージだけでなく補修設計とその施工管理、出来形管理にもシームレスで使用される。さらに劣化予測などの分析を行うためにBIM/CIM 活用を前提としてフォーマットを構築していく必要がある。

現在は調査設計、施工からシームレスに点検、維持管理ステージにデータが受け渡しされる事例が多いとは言えないが、点検調査ステージから補修・補強設計、施工、継続的管理は今後、BIM/CIM によるデータプラットフォーム活用が効率化に寄与することが期待されている。

6.4 i-Construction の適用

点検支援技術はロボティクス技術であり、点検作業効率化、熟練技術者不足・減少に対する先進的な取り組みである。

ロボティクスは、点検作業の効率化だけでなく、データの可視化やコンタ解析に代表される経年変化の可視化につながり、維持管理の点検・診断プロセスの高度化に大きく寄与する。

さらに、現在は従来点検の結果として、結果のみ記録される診断プロセスについて、プロセス可視化の可能性を拡げるものである。非接触・非破壊検査技術のひとつであるレーザ打音は、波形分析によりうき・はく離の検出を行うものであり、打音検査の診断を可視化するとともに、AI 導入などへの基礎資料を蓄積することに繋がっている。本分野への i-Construction 導入効果は省力化、コスト縮減に留まるものではなく、当面はコスト縮減効果は小さいかあるいはコスト増となっても、長期視点で取り組みを継続することが必要である。



図 3.　I-Construction による先進的なインフラ点検支援技術の利用 [1)]

11.3 これまでの運用マニュアルの課題

本項では、運用マニュアルをさらに高度化していくための課題分析と提案を行う。これまでおよび本運用マニュアルの課題は、以下のとおりである。

① これまでの性能カタログ、仕様書は、走行画像のアウトプットとして、ひび割れ検出（ひび割れ幅）を採用している。
② しかし、ひび割れ幅は、取得した画像の解析結果である。
③ 支援技術を正しく評価し、画像などデータ取得と解析の分業化を促進するには、プロセスごとの性能で規定化することが必要（図 11.3.1 参照）である。
④ 2 回目以降の点検において、前回点検時の画像データなど継承して経時変化を可視化する際、受領データの画像（座標）品質が低いと成果品としての経時変化（経時変化図、コンター図）の精度も悪くなる。
⑤ 後継作業を担当するコンサルタント等の業務品質を確保するためにも、プロセスごとの性能規定が必要である。



図 11.3.1　トンネル点検から成果物作成までのプロセス

定期点検は、現行の契約システムでは毎回、実施者が変わることを前提としておく必要がある。その際、継承する情報（データ）の品質が悪いと後継業務担当者の成果品品質は低レベルなものにならざるを得ない。このような事情で期待されるコンタ解析や画像分析成果が得られないことは、さらに後継業務において品質改善することが期待できないため、継続的な維持管理ステージにおいて致命的である。

11.4　性能規定に基づく運用マニュアル案

11.4.1 性能規定に基づく支援技術運用マニュアルの考え方

前節を踏まえ、性能規定に基づく支援技術運用マニュアルについて考察する。

道路トンネルの持つべき性能については、土木学会において定義されているほか、さまざまな研究成果が存在する。点検と診断、維持管理プロセスは、道路トンネルの保有すべき性能が維持されることを確実化する行為であり、現行の定期点検要領や本研究成果によるマニュアルはその保有すべき性能について考察していない。

そこで、本考察では以下の手順により性能規定に基づく支援技術運用マニュアルの考え方を整理する。ここで②～④は定期点検と維持管理活動が持つべき機能（図 11.4.1 参照）である。

① 道路トンネルの性能規定に立ち返り、定期点検の持つ意味を定義する。
② 道路トンネルが保有しなければならない性能に対して、最適に資する点検活動の提案、設

計を可能にする。

③ 現行の仕様規定型点検活動も価値があり重要であるが、効率的で効果の高い点検に裏付けられた中・長期維持管理が望まれている。

④ 現行点検により点検記録やデータが蓄積されるなかで、運用マニュアルや点検支援技術カタログも性能規定型に成長させていくことが望ましい。

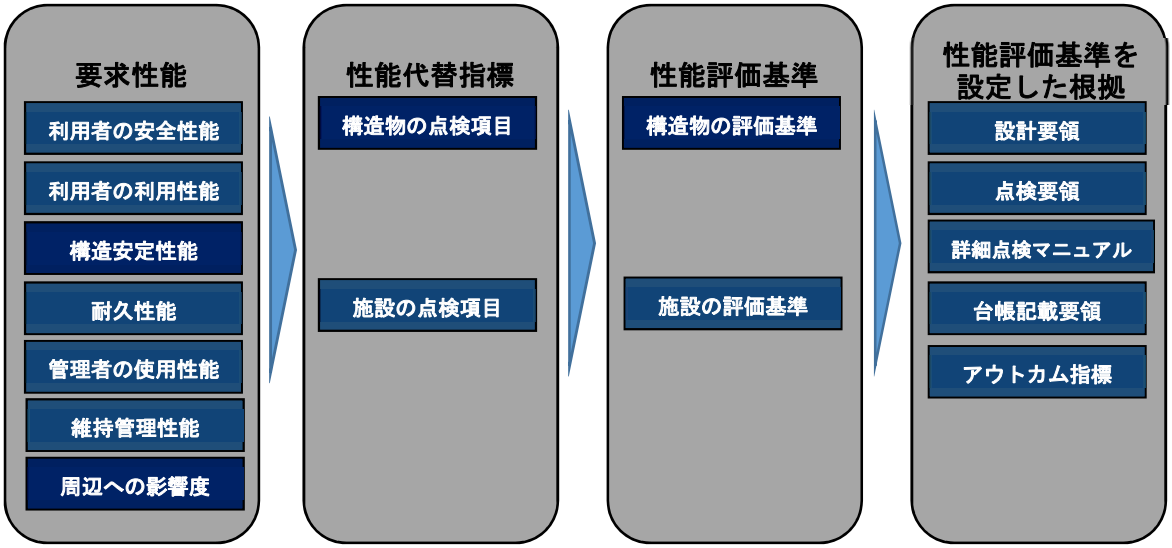


図 11.4.1　道路トンネルの要求性能からマニュアル類への要求項目 [2)]

ここで、山岳道路トンネルの健全度と保有すべき性能の関係は、篠田らにより整理されており、表 11.4.1 に示すとおりである。

11.4.2 点検支援技術のデータ活用案

前項を踏まえ、点検支援技術の分類に従い、性能記述項目を表 11.4.2 のとおり整理する。ここで、図 11.3.1 に示すデータ採取、加工プロセスにおいて、これらのプロセスが不可分な技術と分解可能である技術について整理する。

プロセス不可分とは、データ採取する場合に、そのデータが他の分析方法では参照できないなど後続プロセスを制約するものを意味する。

一般的に、定期点検は契約システムに基づき、毎回担当者が変わることが前提であるので、点検実施者において可視化、ひび割れ検出や差分解析プロセスのツールを保有していれば、自社のものを使用することになる。また、可視化や解析ツールは技術提案などによりメリットを引き出すことが道路管理者の利益につながるので、画像や点群データについて互換性担保が必要である。

さらに、互換性担保を求める技術については、プラットフォームとなる成果品取りまとめ要領が必要で、現在は画像計測技術についてのみ規定されているルールについて拡張していく必要がある。

表 11.4.1　山岳道路トンネルの健全度と保有すべき性能の関係

大項目	中項目	小項目	性能代替指標
利用者の安全性能	安全に走行できる	良好な線形が確保されている	設計速度，車輌の種類（登坂車線時），最少曲線半径，曲線長，緩和曲線長，縦断勾配，最少縦断曲線半径，登坂車線，平面線形設計の留意事項，縦断線形設計の留意事項，避けることが望ましい組合せ
		なめらかに走行できる	わだち掘れ量，ひび割れ率（総合），すべり抵抗，IRI（国際ラフネス指数）（平坦性），段差，ポットホール，クレーム
		必要な視認性を確保できる	平均路面輝度，照明器具の間隔とちらつき，視機能低下グレア，クレーム
		建築限界を確保できる	内装工健全性，内空輝度，照明照度，区画線，視線誘導
	非常時に利用者が安全に避難できる	防災設備を適切に配置できる	トンネル等級に応じた諸設備の種類，諸設備の設置間隔
		非常時に防災設備が確実に機能する	
	利用者の安全を直接脅かさない	必要な換気能力を確保できる	換気施設の有無，煤煙濃度（100m 透過率）（対面通行，2 車線，3 車線トンネル），CO 濃度，クレーム
		はく落が生じない（材料劣化）	豆板，スケール，ひび割れ（材料劣化），ブロック状（閉合），補修材劣化，打継目の目地切れ・段差目地のずれ･開き
		漏水が生じない・少ない	漏水（アーチ，側壁），遊離石灰（アーチ），漏水防止樋，はく落対策施設（樋・はく落対策網（ネット），ボルト・ナット（取付金具））
利用者の使用性能	快適に走行できる	快適に走行できる	わだち掘れ量，ひび割れ率（総合），すべり抵抗，IRI（国際ラフネス指数）（平坦性），段差，ポットホール，クレーム，平均路面輝度，照明器具の間隔とちらつき，視機能低下グレア，クレーム
	通行規制を最小限とすることができる	通行規制を最小限とすることができる	点検・補修頻度・期間，クレーム
	乗り心地が良い	乗り心地に影響する変形・損耗を生じない	
	利用者に不快感･不安感を与えない	利用者が不快感・不安感を持つような漏水，ひび割れが見られない	クレーム
		必要な視認性を確保できる	路面表示，視線誘導標，クレーム
構造安定性能	常時作用する荷重に対して安定する	覆工が安定する	外力による変状（最大ひび割れ幅，最大ひび割れ幅の長さ（連続している箇所），方向性，ひび割れ幅の分布，パターン（亀甲状），パターン（閉合型），パターン（交差・分離），エフロレッセンス，漏水），中央排水溝の湧水の流れの有無
		地山が安定する	内空変位速度（塑性圧，偏圧，緩み圧），塑性圧による変状現象，偏圧による変状現象，緩み圧による変状現象，変状原因が不明の場合，ひび割れ幅，ひび割れ幅変位速度の目安
	想定される荷重変化に対して安定する	供用期間中に想定される近接施工による影響や周辺環境の変化など，荷重条件の変化に対して必要な耐荷性能を有する	覆工コンクリートの変形，移動，沈下，覆工コンクリートのひび割れ，食い違い，覆工コンクリートのうき，はく落，覆工コンクリートなどの断面強度の低下，覆工コンクリートのうき，はく落，漏水，滞水・土砂流出
		地すべりなどによる荷重変動	外力による変状（最大ひび割れ幅，最大ひび割れ幅の長さ（連続している箇所），方向性，ひび割れ幅の分布，パターン（亀甲状），パターン（閉合型），パターン（交差・分離），エフロレッセンス，漏水），中央排水溝の湧水の流れの有無
	必要な耐震性能を有する	供用期間中に想定される地震変動に対して覆工が必要な耐荷性能を有する	外力による変状（最大ひび割れ幅，最大ひび割れ幅の長さ（連続している箇所），方向性，ひび割れ幅の分布，パターン（亀甲状），パターン（閉合型），パターン（交差・分離），エフロレッセンス，漏水），中央排水溝の湧水の流れの有無，内空変位速度（塑性圧，偏圧，緩み圧），塑性圧による変状現象，偏圧による変状現象，緩み圧による変状現象，変状原因が不明の場合，ひび割れ幅，ひび割れ幅変位速度の目安，断層帯の有無
耐久性能	防水性がよい	覆工・諸設備の劣化原因となる漏水が生じない	漏水
	覆工材が劣化しない	覆工材が劣化しない	漏水による酸・塩類（硫酸・塩酸・酢酸）の流入の有無，漏水による水酸化カルシウムの溶脱
管理者の使用性能	必要な需要を満足するためのトンネル諸設備を設置できる	必要な需要を満足するためのトンネル諸設備を設置できる	トンネル等級に応じた諸設備能力（トンネル等級に応じた諸設備の種類，諸設備の設置間隔，換気施設の有無，煤煙濃度（100m 透過率）（対面通行，2 車線，3 車線トンネル），CO 濃度，クレーム）
管理者の維持管理性能	安全･容易に点検・清掃できる	日常の巡回・点検・清掃が安全・容易にできる	監視員通路の有無，通路の高さ，通路の幅員，歩行空間の高さ，手摺の高さ
	安全･容易に補修・補強できる	内空断面に補修・補強余裕が確保されている	覆工から監視員通路歩行空間までの距離
周辺への影響度	地下水への影響が少ない	地下水位変動が許容範囲内である 周辺の地下水汚濁影響が許容範囲内である	クレーム
	周辺地盤への影響が少ない	地表面の沈下・隆起が許容範囲内である	クレーム
	周辺での振動･騒音が少ない	周辺での振動・騒音が許容範囲内である	環境基準により評価，クレーム
	周辺地域の大気環境への影響が少ない	周辺での大気環境への影響が許容範囲内である	環境基準により評価，クレーム

篠田ら：山岳トンネルの健全度と保有性能の定量的評価に関する一考察 [3)]　に野村らが加筆

表 11.4.2　点検支援技術分類に基づく性能記述と互換性の関係

点検支援技術の分類	プロセス技術名称	性能記述	互換性
画像計測技術	走行画像取得技術、画像成形技術	画像分解能、画像ひずみ、連続性	○
	変状抽出・診断技術（AI 抽出含む）	的中率、スクリーニング分類性能	―
	資料作成技術	効率性、作業性	○
非破壊検査技術	変状抽出技術（入力および検出）	効率性、正確性、作業性	―
	波形分析・診断技術	的中率、スクリーニング分類性能	
	資料作成技術	効率性、作業性	○
計測・モニタリング	位置・姿勢情報取得技術	効率性、正確性、作業性	○
	位置・姿勢情報補正技術	前後データの姿勢一致性	○
	経時差分解析技術	効率性、正確性、作業性	―
	資料作成技術	効率性、作業性	○

11.4.3 さまざまな維持管理ステージでの活用案

今後の維持管理活動では、i-Construction を強く意識していくことが不可欠である。i-Construction にはさまざまなステージが想定され、開発と導入が進んでいるが、長期視点に立ち維持管理ステージの合理性を高めるには、定期点検やその後の措置検討において道路トンネルの性能規定を導入すること、すなわち定期点検の目的と要求性能に合致したカスタマイズが可能になるように進化させていくことが望ましい。

これらの活動は定期点検時期の最適化や点検項目、点検範囲の最適化として、10 年以上にわたり研究と提案が行われている分野であるが、未だに本格的な導入に至っていない。むしろ定期点検要領が定着したことを受けて、必ずしも最適化に到達できていないのは残念で、本分野の展開が単なるロボティクス導入に終始するのではないことを意識し続けることが必要であろう。

また、調査・設計、施工段階での支援技術からの連続性を担保する効果を高める工夫やそのための運用ルールを逐次、本研究成果である運用マニュアルに追加して行くことが必要であるとともに、コンター図や変状展開図・画像の重ね合わせによる経時変化の可視化、図 11.4.2 のように、BIM/CIM との連動による活用ステージを提案し続けていくことが重要である。



図 11.4.2　ロボティクスを意識した i-Construction のイメージ（国土交通省）[1)]

11.5　まとめ

① 画像計測技術、非破壊検査技術の道路トンネル分野への適用には、異業種参入も含め、多様なプレイヤーと検出・可視化アプローチが存在する。

② 道路管理者、維持管理業務参画企業ともに多様な技術分野に精通する必要が生じており、ベーシックブックとしての点検支援技術カタログおよび運用マニュアルの存在は重要である。

③ 現時点での技術到達点を確認し、運用マニュアル（案）として取りまとめた。

④ 一方で、仕様書規定に基づく定期点検業務契約が自由な技術開発、活用の敷居を高くしていることを意識、性能規定型への転換を推奨した。

⑤ さらに Society5.0 の進展や i-Construction の拡大に伴い、今後も急速に技術開発が進むことを認識、本研究による成果は現時点の取りまとめに過ぎず急速に陳腐化していくこと、それを意識した運用マニュアル更新のための研究開発が必須であることを申し送りとする。

【参考文献】

1）維持管理での ICT 導入の現状と課題：ICT 導入協議会（第 5 回）配付資料-3、国土交通省公共事業企画調整課、技術調査課、公共事業調査室、平成 29 年 7 月

2）野村貢，戸本悟史，西條敦志，木村定雄，芥川真一：MEMS 技術によるトンネル内付属物保全モニタリングシステムの研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学），vol.71，No.3，p.l_63-l_79 ，2015.

3）篠田将希，木村定雄，白子哲夫，山田浩幸；山岳トンネルの健全度と保有性能の定量的評価に関する一考察，地下空間シンポジウム論文・報告集第 16 巻，pp.55-62，2011.

12 コスト縮減、効率化評価

12.1 コスト縮減検討

12.1.1 概要

非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化検討を行う上で、適用技術の有効性、有用性を評価する基準として、コスト縮減効果、および効率化効果を評価する必要性がある。従来点検に比べて高付加価値を付与する技術について、必ずしもコスト低減と等価で評価する必要はないが、一方で新技術適用の主要目的として、どうしてもコスト低減効果を期待する要素は拭えないため、本章では実際の点検業務に本研究で扱っている技術を活用した事例を基本として、可能な限り実務ベースの実績値を使ってコスト縮減効果を検討することを試みる。

8.2 に述べたとおり、近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務（令和 3 年 3 月、国土交通省　近畿地方整備局）にて実施された近畿地方整備局管内 6 トンネルの点検・診断結果を本研究会に提供いただいた [1)]。以下に同 6 トンネルにおける実績に基づく試算を行った結果を報告する。また過去に実施した試算結果に基づいたコスト縮減効果についても、ユースケースに応じた報告を行う。

12.1.2 比較条件、ユースケース

近畿 6 トンネルの概要を表 12.1.1 に示す。各トンネルについて、延長、点検面積、ひび割れ密度、および過去の従来点検において実際の点検に要した実績日数をまとめた。また表 12.1.2 に、ひび割れ密度ごとに整理した 6 トンネルの分布を示す。

今回のコスト比較の条件は表 12.1.3 のとおりとなっている。このうち、ユースケース 1 の従来点検は国の積算基準および過去に実施された定期点検を基本としている。またユースケース 4 の支援技術（画像、レーザ、レーダ）については、今回の業務実績に基づいている。ユースケース 2 の画像のみ、ユースケース 3 の画像とレーザの場合については、表 12.1.3 の点検人工、点検面積、点検日数などの設定条件で試算したものである。

従来点検に対する点検員数は、表 12.1.4 の点検作業内容項目別の構成比率に示すとおり、画像撮影により近接目視面積がスクリーニングで低減できること、またスケッチ、写真撮影の労力が低減できることから、人工比で従来の 70%とした。表 12.1.5 に示すとおり、ユースケース 3,4 の点検対象面積は、実績であるユースケース 4 をベースとして点検面積は 15%としたこと、およびユースケース 3 ではレーダによるスクリーニング効果が見込めないことを考慮して 30%とした。

12.1.3 縮減効果のまとめ

上記の比較条件に応じて試算した結果を図 12.1.1 に示す。

これによると支援技術（画像、レーザ、レーダ）については 16%程度の縮減になっている。画像＋レーザと、画像＋レーザ＋レーダのコストが逆転しているのは、レーダによるスクリーニング効果と点検日数低減によるものである。

走行型解析結果の解析や展開画像作成にかかる人件費（解析）のため総内業分のコストは高くなったが、点検調書作成作業の内業や現地作業の効率化により、総額ではコスト縮減を図ること

ができた。

表 12.1.1　トンネル概要、および既往の従来点検での点検日数実績 [1)]

本業務での点検実績を踏まえた従来点検時の点検日数

号線	事務所	トンネル名	点検内容	トンネル延長(m)	点検面積 (m^2)	ひび割れ密度 (m/m^2)※1	点検日数(日)	作業班※2	高所作業車の台数	備考
国道27号	福知山	和知トンネル	監視点検	740	1,195	0.08	1	2	2	監視対象スパン：S006、PE　追加スパン有 2班体制
国道9号	豊岡	新和田山トンネル	定期点検	330	6,022	0.14	1	2	2	2班体制
国道9号	豊岡	城山トンネル	定期点検	38	841	0.55	1	1	1	1班体制
国道483号	豊岡	とがやまトンネル	定期点検	1,420	29,652	0.14	4	3	12	誘導員の人数は実績で計上 ３班体制
国道483号	豊岡	三谷トンネル	定期点検	2,810	59,249	0.14	7	3	21	誘導員の人数は実績で計上 3班体制
国道24号	奈良	釜窪東トンネル	定期点検	389	8,376	0.19	2	2	4	誘導員の人数は実績で計上 2班体制
			合計	5,727	105,335	1km未満	5		42	
						1km以上	11			
						合計	16			

※1：ひび割れ密度は、ひび割れ幅0.3m以上のひび割れが対象
※2：今回点検時の作業班と同様で想定

表 12.1.2　ひび割れ密度分布 [1)]

トンネル延長(m)	点検面積(m^2)	ひび割れ密度
740	1,195	0≦C≦0.1
4,949	103,300	0.1 <C≦0.2
38	841	0.4 <C
合計 5,727	105,335	

表 12.1.3　比較種別と試算の前提条件 [1)]

ユースケース	項目	試算概要	点検人工	点検面積	点検日数	
1	従来点検	・国の積算基準をベースに試算 ・誘導員の人数、作業班数は業務実績を考慮	・従来通り100%で設定。	・従来通り100%で設定。	16日	・積算基準より ・作業班数は、実績を考慮
2	支援技術 （画像撮影）	・業務実績をベースに、画像撮影を活用ケースを試算	・画像撮影による効果を踏まて、70%とした。	・新和田山TN、釜窪東TN、とがやまTN、三谷TNの点検面積は画像計測による事前確認効果を期待して30%で設定。 ・和知トンネルは監視点検のため100%とした。 ・城山トンネルは延長が短く、ひび割れ密度が0.4>Cのため100%とした。	10日	・とがやまTN、三谷TNを合計6日と想定
3	支援技術 （画像撮影＋変形モード解析）	・業務実績をベースに、画像撮影＋変形モード解析を活用ケースを試算	・画像撮影により効果と同程度と評価。	・点検箇所に概ね差異ないと想定し、支援技術（画像撮影）と同様の設定とした。	9日	・とがやまTN、三谷TNを合計5日と想定
4	支援技術 （画像撮影＋変形モード＋レーダ解析）	・業務実績より算出	・画像撮影により効果と同程度と評価。	・新和田山TN、釜窪東TN、とがやまTN、三谷TNの点検面積はレーダ解析によりスクリーン効果により15%とした。 ・和知トンネルは監視点検のため100%とした。 ・城山トンネルは延長が短く、ひび割れ密度が0.4>Cのため100%とした。	8日	・業務実績より ・とがやまTN、三谷TNを合計4日で実施

※従来点検（既往の実績）と支援技術（画像撮影＋変形モード＋レーダ解析）は今回業務の実績
　支援技術（画像撮影）、支援技術（画像撮影＋変形モード）は、比較条件による試算結果

表 12.1.4　点検作業内容項目別の構成比率 [1)]

点検作業内容	構成比率	
近接目視点検	30%	⇒20%
打音検査（たたき落とし含む）	35%	⇒35%
変状箇所スケッチ	20%	⇒15%
変状箇所写真撮影	15%	⇒10%
計	100%	⇒70%

※道路トンネル定期点検業務積算基準（暫定版）

表 12.1.5　点検対象面積の前提条件 [1)]

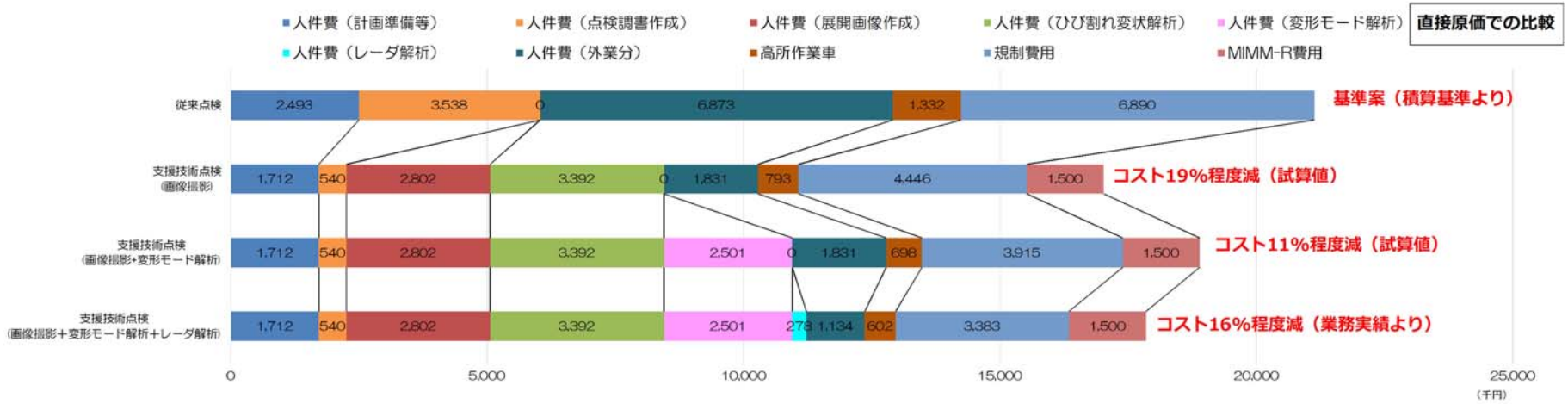
号線	事務所	トンネル名	点検内容	トンネル延長(m)	点検面積 (m^2)	ひび割れ密度 (m/m^2)※1
国道27号	福知山	和知トンネル	監視点検	740	1,195	0.08
国道9号	豊岡	新和田山トンネル	定期点検	330	6,022	0.14
国道9号	豊岡	城山トンネル	定期点検	38	841	0.55
国道483号	豊岡	とがやまトンネル	定期点検	1,420	29,652	0.14
国道483号	豊岡	三谷トンネル	定期点検	2,810	59,249	0.14
国道24号	奈良	釜窪東トンネル	定期点検	389	8,376	0.19
			合計	5,727	105,335	

⇒点検面積100%

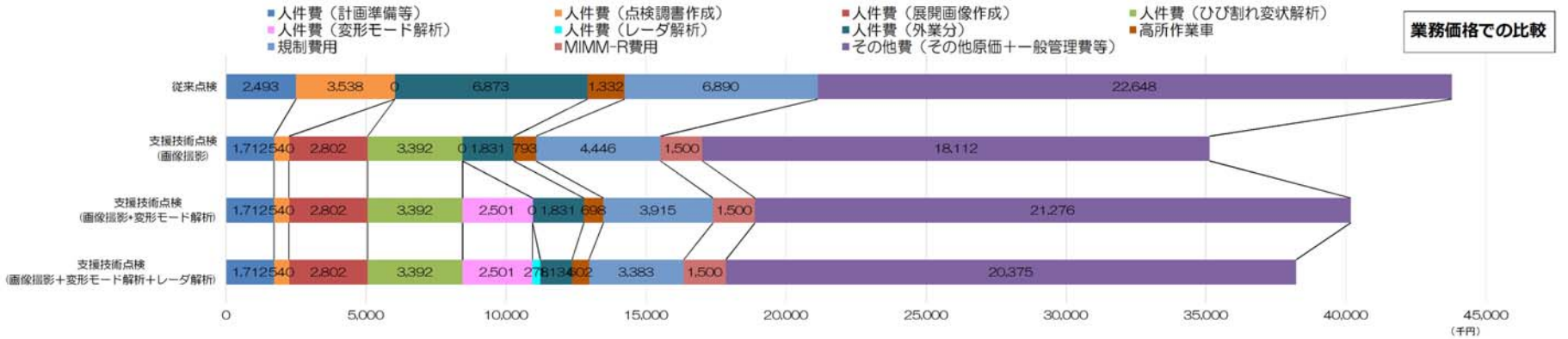
⇒点検面積100%

・支援技術（画像撮影）
・支援技術（画像撮影＋変形モード解析）
⇒点検面積30%

・支援技術（画像撮影＋変形モード解析＋レーダ解析）
⇒点検面積15%



6トンネル、総延長5,727mでにおけるコスト比較



6トンネル、総延長5,727mでにおけるコスト比較

図 12.1.2　コスト比較[1)]

12.1.4 過去に実施した事例

画像計測技術、変状自動抽出および写真台帳自動整理技術を活用した場合の走行型計測技術（MIMM-R）の活用によるコスト試算結果を以下に示す。

1)　試算条件

①　トンネル延長 500m（覆工周長 17m）

②　トンネル本数 1 本の場合と、10 本の場合をそれぞれ比較　※走行型計測車両の機械損料の関係から、複数トンネルを同時（同日）に計測することで、コストメリットを出すことができる。

③　覆工壁面のひび割れ密度 C は 0.1＜ c ＜0.2 とする。

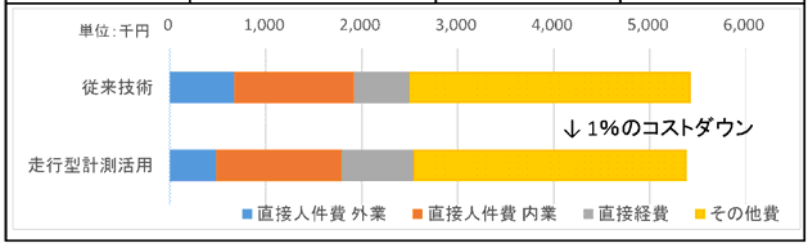
2)　走行型計測活用による効率化

①　事前に画像展開図による変状抽出および変状確認を行うため、近接目視点検時には変状の目視確認と打音検査だけに集中できる（スケッチ作業等は不要）ことから、現地点検作業を 50%効率化することができる。

②　上記により近接目視歩掛の低減化および点検時の交通規制時間の短縮ができる。

単位：円

			従来技術	走行型計測活用
1トンネルの場合（L＝500m）（ΣL＝500m）	直接人件費	外業	671,500	485,800
		内業	1,247,830	1,307,330
	直接経費		577,903	745,826
	その他費		2,932,767	2,851,044
	業務価格		5,430,000	5,390,000



単位：円

			従来技術	走行型計測活用
10トンネルの場合（L＝500m）（ΣL＝5 000m）	直接人件費	外業	6,715,000	3,545,800
		内業	14,710,150	11,225,159
	直接経費		5,199,226	3,486,060
	その他費		32,075,624	22,062,981
	業務価格		58,700,000	40,320,000

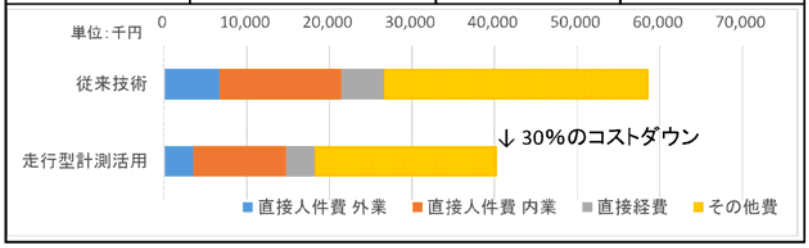


図 12.1.3　コスト試算結果

本試算においては、トンネル 1 本のみでは従来技術とほぼ同等であるが、10 本とスケールメリットがある場合は、30%程度のコストダウンできる可能性がある。

12.2 効率化評価

12.2.1 概要

8.2 節に述べたとおり、近畿 6 トンネルにおける実績に基づく試算、および過去に実施した試算結果に基づいた効率化効果について以下に報告する。

12.2.2 近畿 6 トンネルの結果

今回点検時と前回点検時の点検日数を比較した結果を表 12.2.1 に示す。

下記の 3 トンネルについては、支援技術点検を行うことで、前回点検時より現地作業が効率化し点検日数を削減でき、交通規制による周辺環境への負荷を低減し安全性確保に努められたと考えられる。

1) 国道 27 号　和知トンネル

和知トンネルは、前回点検時よりも 1 日短縮できたと考えられる。

※今回点検は監視点検であったが、画像撮影による一次点検を全線実施しているため定期点検相当と位置付けた。なお、附属物は前回点検時に×判定の箇所のみ確認をしている。

2) 国道 483 号　とがやまトンネル、三谷トンネル

国道 483 号の 2 トンネルについては、現地作業の効率化により前回点検時に対して 6 日短縮できたため、点検日数を 6 割削減することができた。

表 12.2.1　点検日数の比較（前回点検（過年度）と今回点検）[1)]

号線	事務所	トンネル名	本業務での点検内容	トンネル延長(m)	現地点検日数（日）		備考
					過年度	今回	
国道27号	福知山	和知トンネル	監視点検	740	2	1	・過年度点検班数は不明。 ・今回の点検班数は2班。 ・展開画像による事前確認＋現地確認により定期点検相当としている。なお、附属物は×判定以外確認をしていない。
国道9号	豊岡	新和田山トンネル	定期点検	330	1	1	
国道9号	豊岡	城山トンネル	定期点検	38	?	1	・過年度の点検日数等の情報は不明。
国道483号	豊岡	とがやまトンネル	定期点検	1,420	5	1	・過年度の点検班数は、1.5班と推定。 ・今回の点検班数は、３班相当（覆工点検班2班、附属物点検班1班）
国道483号	豊岡	三谷トンネル	定期点検	2,810	5	3.0	・過年度の点検班数は、2.5班と推定。 ・今回の点検班数は、３班相当（覆工点検班2班、附属物点検班1班⇒1km程度覆工点検を実施）
国道24号	奈良	釜窪東トンネル	定期点検	389	?	1	・過年度の点検日数等の情報は不明。

表 12.2.2 に、各トンネルの作業日数をまとめた。各表の上段には既往点検業務において実際の現地点検作業日数を記載し、下段には今回業務での日数を記載した、摘要欄に、点検項目、縮減要因などをまとめた。

表 12.2.2　各トンネルの作業日数[1)]

和知トンネル　NATM 740m

項目	現地点検日数		項目	概要	備考
H30年度の現地点検作業	2	日	現地点検作業	・定期点検 ・点検業者：中央復建コンサル ・ひび割れ密度(0.3＜C≦0.4)、点検日数は実績より ・作業班体制は、不明。	・過年度の現地点検点検の実績
本業務の現地点検作業 （定期点検相当と想定） ※契約上は、監視点検	1	日	変状の事前確認	・展開画像等を用いてトンネル覆工面の変状状況を事前確認を実施 ⇒トンネル全線の1次点検を実施 ・うき等の変状については、内部欠陥レーダ結果を用いて異常箇所の事前抽出を実施	・面壁は展開画像にて確認できないため、現地点検時に確認を行う。
			現地点検作業	・監視対象スパンを含めて、現地点検時に事前抽出箇所の確認を実施 ・現地作業は、合計6時間程度※で実施⇒1日の現地作業と想定 ※研究会の関係で2日間の現地作業であるが、点検の実作業時間は6時間程度である ・作業班数は、2班体制にて実施。	・附属物について、×判定以外の箇所は確認していない。 ・本業務での契約は、監視点検作業。

作業時間は、1日の点検作業時間は9:30～16:30の7時間-1時間(昼休憩)=6時間と想定。

釜窪東トンネル　NATM 389m

項目	現地点検日数		項目	概要	備考
H27年度の現地点検作業	?	日	現地点検作業	・点検作業：H25年度にB判定の変状（8箇所）を確認 ・点検業者：株式会社 長大 ・点検日数、作業班体制は不明。	・過年度の現地点検点検の実績
本業務の現地点検作業 （定期点検）	1	日	変状の事前確認	・展開画像等を用いてトンネル覆工面の変状状況を事前確認を実施 ⇒トンネル全線の1次点検を実施 ・うき等の変状については、内部欠陥レーダ結果を用いて異常箇所の事前抽出を実施	・面壁は展開画像にて確認できないため、現地点検時に確認を行う。
			現地点検作業	・事前確認した箇所や2回目以降の点検で打音検査すべき箇所等について、 現地点検時に確認を実施 ・維持工事による集中工事の中で点検を実施⇒夜間作業 ・作業班数は、2班体制にて実施	・2回目以降の定期点検として実施。

新和田山TN　矢板 330m

項目	現地点検日数		項目	概要	備考
令和元年度の現地点検作業	1	日	現地点検作業	・定期点検 ・点検業者：株式会社CPC ・作業班体制は不明。	・過年度の現地点検点検の実績
本業務の現地点検作業 （定期点検）	1	日	変状の事前確認	・展開画像等を用いてトンネル覆工面の変状状況を事前確認を実施 ⇒トンネル全線の1次点検を実施 ・うき等の変状については、内部欠陥レーダ結果を用いて異常箇所の事前抽出を実施	・面壁は展開画像にて確認できないため、現地点検時に確認を行う。
			現地点検作業	・事前確認した箇所や2回目以降の点検で打音検査すべき箇所等について、 現地点検時に確認を実施 ・当社にて交通規制を行い、点検を実施。昼間作業。 ・作業班数は、2班体制にて実施	・2回目以降の定期点検として実施。

城山TN　矢板 38m

項目	現地点検日数		項目	概要	備考
平成31年度の現地点検作業	?	日	現地点検作業	・定期点検 ・点検業者：国際航業株式会社 ・作業日数、作業班体制は不明。	・過年度の現地点検点検の実績
本業務の現地点検作業 （定期点検）	1	日	変状の事前確認	・展開画像等を用いてトンネル覆工面の変状状況を事前確認を実施 ⇒トンネル全線の1次点検を実施 ・うき等の変状については、内部欠陥レーダ結果を用いて異常箇所の事前抽出を実施	・面壁は展開画像にて確認できないため、現地点検時に確認を行う。
			現地点検作業	・事前確認した箇所や2回目以降の点検で打音検査すべき箇所等について、現地点検時に確認を実施 ・当社にて交通規制を行い、点検を実施。昼間作業。 ・作業班数は、1班体制にて実施	・2回目以降の定期点検として実施。

とがやまTN　NATM 1420m

項目	現地点検日数		項目	概要	備考
平成31年度の現地点検作業	5	日	現地点検作業	・定期点検 ・点検業者：株式会社CPC ・作業日数は、上り2.5日、下り2.5日にて実施 ・作業班数は、1.5班にて実施だと推定(B班-1：5日、C班-1：1日の作業内訳	・過年度の現地点検点検の実績
本業務の現地点検作業 （定期点検）	1	日	変状の事前確認	・展開画像等を用いてトンネル覆工面の変状状況を事前確認を実施 ⇒トンネル全線の1次点検を実施 ・うき等の変状については、内部欠陥レーダ結果を用いて異常箇所の事前抽出を実施	・面壁は展開画像にて確認できないため、現地点検時に確認を行う。
			現地点検作業	・事前確認した箇所や2回目以降の点検で打音検査すべき箇所等について、現地点検時に確認を実施 ・当社にて交通規制を行い、点検を実施。夜間作業。 ・作業班数は、3班体制にて実施（高所作業班2班、附属物班1班）	・2回目以降の定期点検として実施。

三谷TN　NATM 2810m

項目	現地点検日数		項目	概要	備考
平成31年度の現地点検作業	5	日	現地点検作業	・定期点検 ・点検業者：株式会社CPC ・作業日数は、上り2.5日、下り2.5日にて実施 ・作業班数は、2.5班にて実施だと推定(A班-1、2：5日、C班-1：2日の作業内訳) ・とがやまTNと同一日程にて作業を実施	・過年度の現地点検点検の実績
本業務の現地点検作業 （定期点検）	3	日	変状の事前確認	・展開画像等を用いてトンネル覆工面の変状状況を事前確認を実施 ⇒トンネル全線の1次点検を実施 ・うき等の変状については、内部欠陥レーダ結果を用いて異常箇所の事前抽出を実施	・面壁は展開画像にて確認できないため、現地点検時に確認を行う。
			現地点検作業	・事前確認した箇所や2回目以降の点検で打音検査すべき箇所等について、現地点検時に確認を実施 ・当社にて交通規制を行い、点検を実施。夜間作業。 ・作業班数は、3班体制にて実施（高所作業班2班、附属物班1班）	・2回目以降の定期点検として実施。

今回の効率化検討における比較結果は、表 12.2.3 のとおりである。
低減率は、平均的に 50%程度である。延長によって効率は異なり、1km 未満の場合は 20%程度、1km 以上の場合は 60%程度であった。

効率化の要因は、以下のとおりと考えられる。

① 事前に画像から展開図を作成しており、近接目視点検のスクリーニングを行うことによる効率化効果

② 打音検査の実施について、事前にレーダ等でスクリーニングを行い、健全部除外スクリーニングや目地部等の要注意箇所を設けて効率化を図った効果

③ スケッチ、記録写真などに時間を要することがないことによる効率化効果

④ 延長が長い場合は、よりシステマティックに点検を進めることができるため、より高速化が図れる

⑤ ひび割れ密度が低いと、打音検査に要する制約がなくなるため、効率化が図れる

⑥ 延長が短く、ひび割れ密度が高いと、作業効率が低下し、打音とたたき落としに相当の時間を要するため効率化効果が薄れてしまう。

表 12.2.3　従来点検と今回業務での実績日数比較 [1)]

※1：ひび割れ密度は、ひび割れ幅0.3mm以上のひび割れが対象
※2：今回点検時の作業班と同様で想定

本業務での点検実績を踏まえた従来点検時の点検日数と今回業務での実績日数

							従来点検			本業務（新技術活用）			効率化低減率
号線	事務所	トンネル名	点検内容	トンネル延長(m)	点検面積(m^2)	ひび割れ密度(m/m^2)※1	点検日数（日）	作業班※2	高所作業車の台数	点検日数（日）	作業班※2	高所作業車の台数	
国道27号	福知山	和知トンネル	監視点検	740	1,195	0.08	1	2	2	1	2	2	0
国道9号	豊岡	新和田山トンネル	定期点検	330	6,022	0.14	1	2	2	1	2	2	0
国道9号	豊岡	城山トンネル	定期点検	38	841	0.55	1	1	1	1	1	1	0
国道483号	豊岡	とがやまトンネル	定期点検	1,420	29,652	0.14	4	3	12	1	3	3	75%
国道483号	豊岡	三谷トンネル	定期点検	2,810	59,249	0.14	7	3	21	3	3	9	57%
国道24号	奈良	釜窪東トンネル	定期点検	389	8,376	0.19	2	2	4	1	2	2	50%
			合計	5,727	105,335	1km未満	5		9	4		7	20%
						1km以上	11		33	4		12	64%
						合計	16		42	8		19	50%

	従来点検日数	今回点検日数	日数比率	低減率
1km未満	5	4	80%	20%
1km以上	11	4	36%	64%
合計	16	8	50%	50%

12.2.3 過去に実施した事例に基づく効率化検討結果

12.1.4 に述べた過去の事例において、効率化については以下の結果を得ている。

比較条件は、下記のような想定で行っており、延長、ひび割れ密度、工法などによって結果が

異なることに留意されたい。また、まとめて計測、点検を行うことでスケールメリットが生まれることがわかる。また一般に、延長が長いほど低減率が高く、効率化に有効となる。

1) **トンネル状況**

地域性、施工法（矢板・NATM）、経年、健全度、ひび割れ密度など

2) **点検数量**

トンネル本数、延長、連続・分散

3) **新設トンネル　or　既設トンネル**

初回点検 or2 回目以降、初期不良除去済み、打音検査数量、補修数量

表 12.2.4　走行型画像計測を併用した現地点検作業日数の効率化の試算結果

トンネル名	工法	延長(m)	覆工点検面積 (m^2)	ひび割れ密度 (m/m^2)	①暫定歩掛による点検日数（日）	②実績による点検日数（日）	③補正点検日数※（日）	低減率 100-③/①(%)	備考
Aトンネル	矢板工法	1922.2	31011.4	0.29	16	3	4.5	71.9%	3班(12名)+1名
Bトンネル	NATM	499.0	4116.6	0.15	2	2	2	0.0%	2班(7名)+1名
Cトンネル	NATM	2151.0	39919.5	0.22	20	2	3	85.0%	3班(12名)+1名
Dトンネル	NATM	2447.0	43273.9	0.17	17	2	3	82.4%	〃
Eトンネル	矢板工法	2510.9	31153.4	0.21	12	4	6	50.0%	〃
Fトンネル	矢板工法	239.6	3939.6	0.17	2	1	1	50.0%	2班(6名)+1名
Gトンネル	矢板工法	559.0	10,403.3	0.04	6	2	2	66.7%	2班(6名) +1名
Hトンネル	NATM	165.0	3,372.6	0.05	1	1	1	0.0%	〃
Iトンネル	NATM	165.0	3,412.6	0.04	1	1	1	0.0%	〃
Jトンネル	NATM	1171.0	21,426.0	0.01	11	4	4	63.6%	〃（夜間作業）

※2班を基準として補正

低減率（%）＝1－補正点検日数÷暫定歩掛りによる点検日数

表 12.2.5　走行型画像計測を併用した現地点検作業員数の効率化の試算結果

トンネル名	工法	延長(m)	覆工点検面積 (m^2)	ひび割れ密度 (m/m^2)	暫定歩掛による点検日数（日）	①暫定歩掛によるのべ点検員数（人）	②実績によるのべ点検員数（人）	低減率 100-②/①(%)
Aトンネル	矢板工法	1922.2	31011.4	0.29	16	128	39	69.5%
Bトンネル	NATM	499.0	4116.6	0.15	2	16	16	0.0%
Cトンネル	NATM	2151.0	39919.5	0.22	20	160	26	83.8%
Dトンネル	NATM	2447.0	43273.9	0.17	17	136	26	80.9%
Eトンネル	矢板工法	2510.9	31153.4	0.21	12	96	52	45.8%
Fトンネル	矢板工法	239.6	3939.6	0.17	2	16	7	56.3%
Gトンネル	矢板工法	559.0	10,403.3	0.04	6	48	14	70.8%
Hトンネル	NATM	165.0	3,372.6	0.05	1	8	7	12.5%
Iトンネル	NATM	165.0	3,412.6	0.04	1	8	7	12.5%
Jトンネル	NATM	1171.0	21,426.0	0.01	11	88	28	68.2%

低減率（%）＝1－補正点検員数÷暫定歩掛りによる点検員数

【参考文献】

1）近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務、国土交通省　近畿地方整備局、令和 3 年 3 月

13 今後の展望

13.1 研究成果のまとめ

走行型計測技術などによるトンネル点検支援技術の高度的活用により、以下の高品質化、効率化、省力化を図ることを目的として活動してきた。

特に、合理的かつ効率的に定期点検（点検作業～調書作成～診断）を実施するため、走行型計測技術の有効活用（支援）、画像・計測から得られたデータに対する自動解析や AI 技術の活用・支援方法など点検支援技術の高度化に関する研究を行った。

13.1.1 研究成果

研究により得られた具体的な成果は以下のとおりである。

① 非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化
⇒専門技術者不足の改善、変状原因の特定力の向上

② 画像・計測データへの AI 技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上
⇒点検調書等の作成時間の短縮、診断の確実性とコスト、全体時間短縮

③ i-Construction 推進に向けたトンネルデータベースの有効活用検討
⇒変状原因の特定が早期に可能となり、より確実な診断と精度向上、時間短縮が可能

13.1.2 研究成果に伴う効果

研究成果の要旨として、主要な効果を下記にまとめる。

1) 点検の効率化

① 近接目視点検における作業効率化（目視点検人員削減、点検日数縮小）

② 事前に展開図を作成しておき、スクリーニングしておくことで、近接目視時の点検作業（接近目視確認、打音検査）の効率化が図れる

③ 現地での記録は修正作業となり、時間短縮を図れる

④ 点検表や調書作成作業の効率化が図れる

2) 診断の効率化

① 変状展開図と同スケールで作成する覆工壁面展開画像による目視点検に先立つ画像診断（変状抽出、変状展開図作成）による効率化が図れる

② 変状展開図の高品質化（変状位置精度の正確性）が図れる

③ 机上点検後に現地点検を行うことによる変状抽出漏れ防止が図れる

④ 複数技術者による点検および診断の品質向上が図れる

⑤ 判定の目安に対する判断情報付加による適正な健全度診断が図れる

13.2 現況の支援レベルの整理

本報告書で取りまとめた支援技術の性能レベルについて述べる。

13.2.1 点検支援

1) 画像技術

(1) 変状抽出の評価

① 計測値として、ひび割れ（幅 0.3mm、長さ、範囲、形状）を把握できる
ただし矢板工法において、幅 1ｍｍのひび割れが確実に検出できれば、ひび割れの対策区分を行うことは可能であり、重要なのはひび割れの微細な幅ではなく、ひび割れの状況である

② 漏水、遊離石灰、はく落、目地、変色を把握できる

③ 付属物や補修工において、範囲や形状を把握できる

④ ひび割れの閉合や交差、密集なども把握でき、うきにつながる変状を予測できる

⑤ 従来のスケッチと比較し、正確に変状位置を把握できる

(2) 画像計測による変状抽出の課題 [1)]

① うきの打音異常は、検出困難である

② ひび割れは、外力か、材質劣化によるものか、判断することは困難である
ただしひび割れ状況より、目地部の半月状のひび割れ、ブロック化したひび割れ、亀甲状のひび割れで等は材質劣化と、推定は可能である

③ 覆工の段差箇所を検出することは困難である

④ 漏水の量は検出できない

⑤ 巻厚不足、背面空洞を検知することは不可能である

(3) 画像計測の留意点 [1)]

走行型計測をより実用化させ精度・機能等を向上させていくための留意点を以下に示す。

① 広範囲にわたる漏水、結露または光沢のある（タイル等）内装板は照明の反射光がカメラレンズに入射し、後の画像目視検査に悪影響を及ぼす場合がある。その場合は照明の配置、照度等を考慮し反射光が直接入射しないように工夫する

② トンネル内において霜、霧（モヤ、キリ）が発生する揚合、照射光が屈折するため、画像の品質に悪影響を及ぼす場合がある。季節、時間帯等を選定する事が必要である

③ 雪や雨天またはトンネル内の漏水・湧水等、水滴がカメラレンズに付着する可能性がある場合、モニタで常に監視し撮影画像の品質を確認する必要がある

④ 構造上の要因（吹付け、段差、付帯物の裏、補強工、導水工等）により変状の判断が困難な場合がある

⑤ 画像から展開図作成時において、人間による判断が伴うため、検出の結果がばらつくことも考えられることから、一定水準以上の精度向上（作成に伴う技能）と画像から展開図までの一連作業の自動化技術を確立させる必要がある

⑥ 照明や非常用設備などの付帯設備の健全性も重要であることから、画像解析により、不良箇所をあらかじめ抽出できるシステム開発が有効である

2) レーザ技術 [1)]

本研究では、MMS を用いたトンネル内のレーザ計測における特性を把握するとともに、2 時

期比較のための補正方法について検討した。4.2 では衛星不可視下でのレーザ計測の位置精度に影響を与える要因を検討した。4.3 では和知トンネルにおいて高精度の定置型のレーザスキャナによる断面計測結果と MMS の計測結果を比較することで断面の計測精度や模擬変位を与えた際の変形の比較精度等の検証の方法をまとめた。4.4 では和知トンネルにおける計測結果から、計測速度の違い、再現性、模擬変位計測誤差等の特徴を整理した。4.5 では回転補正、ランドマーク補正、スキャンマッチングによる補正等についてとりまとめた。

本項では外力変状に着目して、今まで研究した事例[1)]と R2 年度に近畿地方整備局で評価した事例を対象として、外力性変状の評価（検出）方法について記述した。

近畿地方整備局 6 トンネル評価事例では、結果的には外力性変状は確認されなかったが、コンター解析を実施することにより、外力性でなく材質劣化と判定できたことは有用性が高い。

コンター解析の評価時は、複数のコンター図、展開図によるひび割れ発生方向･パターン、セントルの基準軸からのズレ有無（水平、鉛直） など複数の情報を勘案し、多面的に総合的な判断を下すことが重要であり、この考え方は H25 年から一貫したものである。判断情報として、地形・地質（切羽）情報があれば、もう一歩踏み込んだ評価が可能となる。

トンネルに精通した経験豊富な専門技術者の知識を介することなく、コンター解析により外力作用なのか、材質劣化なのかを概略の判定が出来ることに大きな意義がある。点検判定の精度向上にも大きく寄与すると考えられる。

3) レーダ技術

(1) 走行型計測を活用した効果について（レーダに関して）

① 内部欠陥レーダは過検出設定にしており、打音しなくても良い健全部を除外するスクリーニングには有効

② 内部欠陥レーダで、過去にうきがみつかっていなかった箇所を検出することができた

(2) 今後の課題点

① 内部欠陥レーダは、10cm 以下のうきは検出できないので、打音でうきが見つかった場所で、小さなうきの場合はとれない

② 天端の縦断ひび割れに沿う小さいうきは検出できないが、そのようなうきは打音することになっているので、最終的に見落としはない

③ レーダは横断 1 m範囲程度を見ているので、1m をはずれた箇所については検出できない。何走行もすれば良いが精緻な検出を目的にしていないので、第三者被害が想定される天端付近を重点的にみている（空洞、内部欠陥とも）

④ 空洞レーダは、45cm が限界であるが、30 ㎝未満巻厚の場合、背面空洞を検出できる

⑤ 空洞が 30 ㎝以上あることが検出できれば突発性崩壊の診断ができるといえる

(3) 今後の要望

① 有効巻厚の検討は、強度がわからない以上、代替手法にはならない

② 表層劣化の変色、ジャンカ有無、断面欠損、目地部などの低品質材質劣化状況などと総合して考えると、総合的判断による適用できる可能性はある

13.2.2　診断支援

画像計測では、従来点検の近接目視を行うレベルで覆工変状が確認できるのであれば、従来点検と同じレベルで判定ができる。

画像計測後に変状展開図を作成するため少しでも作業効率を上げる必要があることから AI 技術を活用することが望ましい。特に支援技術により代替となる項目については積極的な活用が期待される。

一方で、健全性の診断をするためには専門技術力が必要である。レーザ計測後に実施するコンター解析は、高度な専門技術がなくても、ある程度のレベルまででであれば外力影響の有無が確認できるツールである。レーザ計測並びにコンター解析を効果的に活用することで外力影響を伴う変状の診断は可能となる。

巻厚不足や突発性崩壊などについて診断するためには、専門技術が必要である。従来は、レーダ探査を用いることで従来点検においても診断を実施している。しかし巻厚不足や突発性崩壊の診断は単独調査のみでは診断ができない。覆工コンクリート強度の確認による有効巻厚の確認が必要となるからである。走行型計測に搭載される非接触レーダ探査については、接触レーダ探査と性能が異なることもあり、全ての事象で巻厚の薄い箇所や背面空洞を確認することは困難であるが、画像計測と同時に巻厚や空洞確認ができることは効果的である。なぜなら、従来点検においても有効巻厚を確認する必要があり、支援技術においても同様なことから、支援技術を活用しスクリーニングをすることで危険な区間の抽出が早期に確認することができるからである。

うき・はく離、漏水による変状については、従来点検との併用が必要であり、支援技術を活用したスクリーニングによって、変状の可能性がある区間のみの従来点検となり、規制期間の短縮など効率的な現場作業が可能となる。

13.2.3　内業の効率化

今回の検討では、近畿 6 トンネルにおいて、内業の効率化の検討も含めて総合的な効率化検討を行った [3)]。事前に変状展開図を作成し、近接目視時には展開図の修正を行うのみとなるため、内業としての帳票作成時間は従来の 1/7 程度となった。

ただし、レーザ点群処理、コンター解析など作業増となる項目もあるため、結果として内業にかかる人件費は増となる。一方で、外業は相当の効率化が図れることから、内業、外業を合計した人件費は縮減することができる。

その結果として、内業、外業を総合して効率化を図ることが可能となることを確認した。

13.2.4　支援レベル（補完、代替、高機能化）

1)　変状種類毎のまとめ

各変状種類に対する評価レベルに対し、変状種類毎で整理したものを表 13.2.1 に示す。

表 13.2.1　健全度診断対する検討結果（各変状種類毎）

変状種類	支援内容	単独評価レベル	課　　題	解決策（併用技術）	複合評価レベル
圧ざ・ひび割れ（外力）☆	画像計測 レーザ計測	代替（高機能化）※コンター解析活用	専門技術が必要	ー	単独評価と同等
圧ざ・ひび割れ(材質劣化)☆	画像計測	代替 ※コンター解析活用	専門技術が必要	ー	単独評価と同等
うき・はく離☆	画像計測 レーザ計測	補完	専門技術が必要 異常打音「有」が分からない	スクリーニング(打音検査)	代替
変形･移動･沈下	レーザ計測	代替（高機能化）※コンター解析活用	専門技術が必要 他の計測との比較必要	ー	単独評価と同等
鋼材腐食☆	画像計測	代替	ー	ー	ー
巻厚の不足または減少、背面空洞	レーダ探査	補完	精度に限界あり 有効巻厚が分からない	スクリーニング（接触レーダ探査、圧縮強度）	代替
漏水等による変状☆	画像計測	補完	にじみ（遊離石灰）以外分からない	スクリーニング(遠望目視)	代替 ※記録が残らない

☆：AI 導入等で効率化も可能

2) 変状区分毎のまとめ

各変状種類に対する評価レベルに対し、変状区分毎で整理したものを表 13.2.2 に示す。

表 13.2.2 健全度診断に対する検討結果（各変状区分毎）

変状区分		変状種類	要素技術	従来技術	検討結果
外力	材質劣化	圧ざ･ひび割れ	画像計測 レーザ計測 （コンター解析）	施工情報 維持管理記録	外力：代替（高機能化） 材質劣化：補完 ⇒＋αで代替
		うき・はく離	レーダ探査 画像計測 （レーザ計測）	打音検査 （叩き落とし）	
外力		変形・移動・沈下	レーザ計測 （コンター解析）	測量 機器計測	外力：代替（高機能化）
材質劣化		鋼材腐食	画像計測	（近接目視）	材質劣化：補完 ⇒＋αで代替
材質劣化		巻厚不足または減少、背面空洞	レーダ探査 （非接触）	レーダ探査 （接触） コンクリート圧縮強度試験	
漏水		漏水等による変状	画像計測	（遠望目視）	漏水：補完 ⇒＋αで代替

【検討結果】

① 外　　力：代替（高機能化）

② 材質劣化：補完　⇒　＋α（打音、接触レーダ探査、圧縮強度等）で代替

③ 漏　　水：補完　⇒　＋α（遠望目視等）で代替

13.3 高度化技術の有効活用

13.3.1 データ取得の重要性

適切なマネジメントサイクルで維持管理するためには、帳票に点検記録を残すだけではなく、画像や形状などの計測データを取得し、保管管理することが重要である。データは状態情報のほか、位置、時刻情報を保持しており、数量化データとしての価値が高い。またデータ化することで、複合利用ができることから、確実にデータを取得することがマネジメントの基本である。

これまではデータを取得することが優先事項であったが、10 年程度のデータ蓄積が進んできた現在、データを活用する目的で、適切かつ確実に残すことが重要である。

13.3.2 初期値取得

初期状態がわかることによって、その後の変状進展の初期値を規定することができる。正確な変状状態把握や進行性の有無を定量的に評価することを目的として、初期計測の重要性を認識されたい（図 13.3.1 参照）。

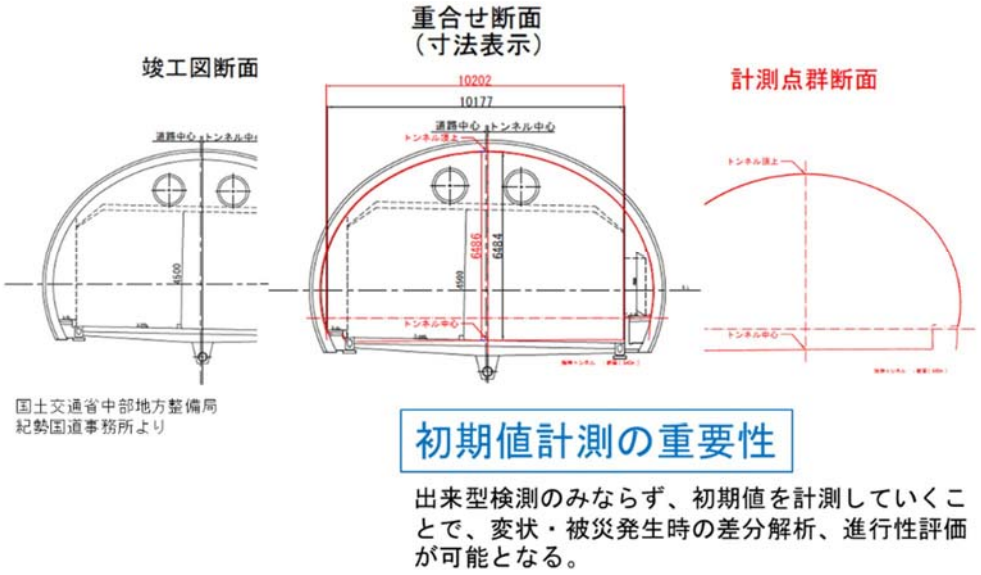


図 13.3.1　初期値計測の重要性

13.3.3　進行性、有害な損傷早期発見

高度化技術導入の目的として、日常的な人のパトロールや 5 年に一度の定期点検では状態把握や診断が十分ではないという課題を、高度化技術導入によって支援することに価値がある。上記のデータの定量情報を活用し、外力性進行性を正確、かつ早期に発見できることが、第三者影響の未然防止につながる。

外力性診断の事例を図 13.3.2 に、進行性差分解析の事例を図 13.3.3 に示す。

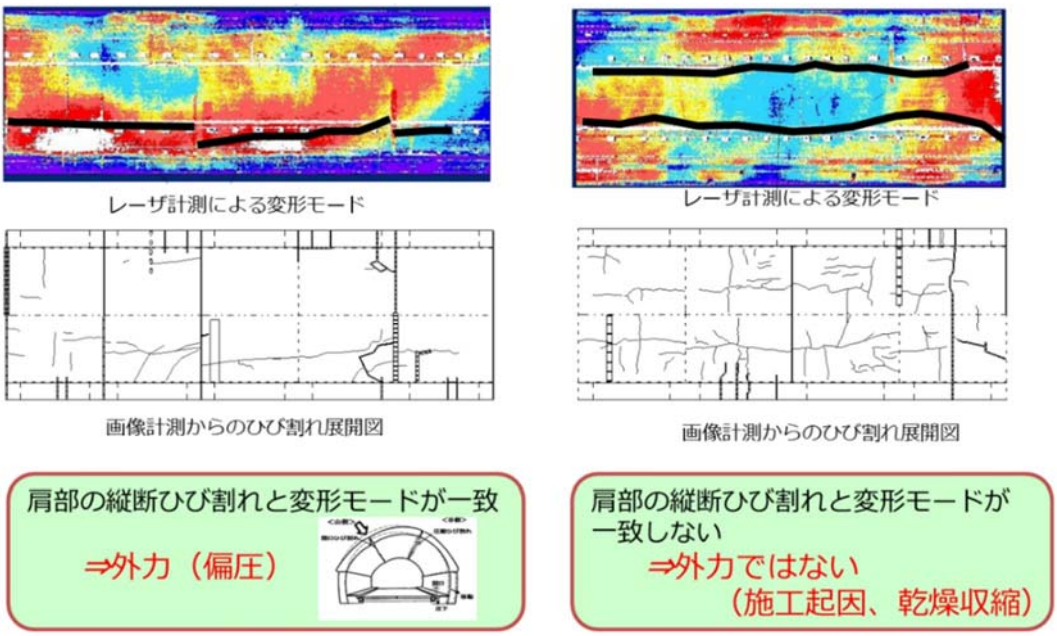


図 13.3.2　外力性診断の事例

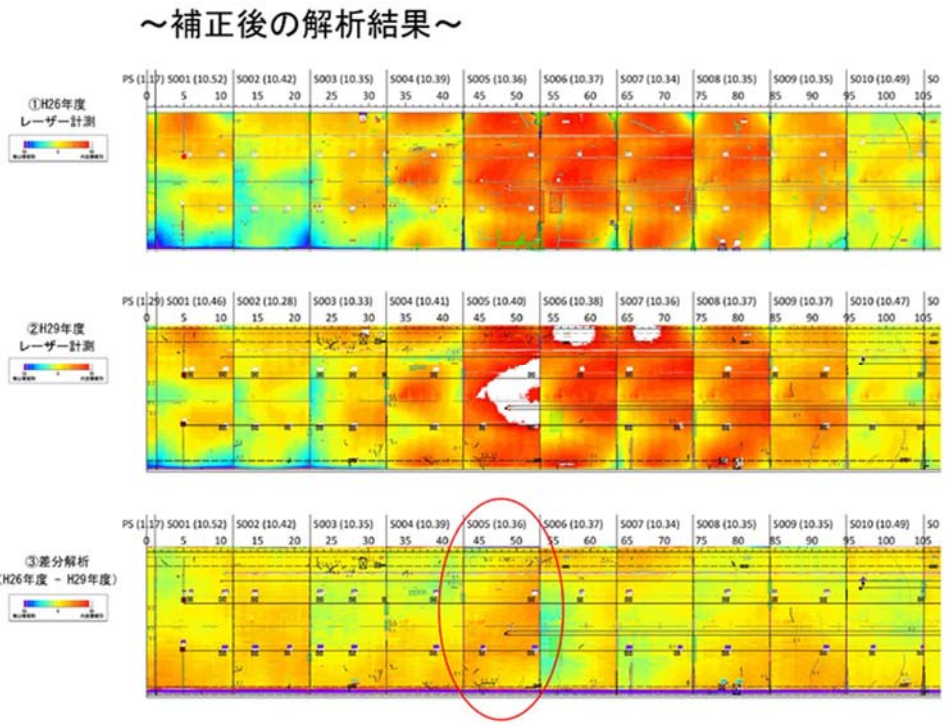


図 13.3.3　進行性差分解析

13.3.4　人とロボットのベストミックス

打音検査のみでしか判断できない場合や、最終的な診断は人が判定するという場合は人が確実に行い、ロボットの特性から、人が行うよりも迅速に、客観的に実施できる内容はロボットに任せるという棲み分けが重要である。将来的には人が関与しない、完全な自動監視、自動診断が実現する時期がくるかもしれないが、図 13.3.4 に示すように、当面は人とロボットのベストミックスによって進めていくことが望ましい。

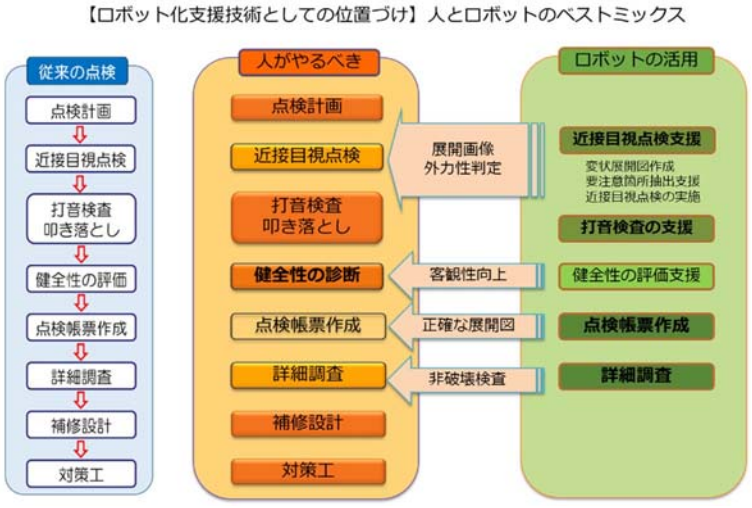


図 13.3.4　人とロボットのベストミックス

13.3.5　総合的な診断

新技術の高度化技術による診断は、単独技術のみの適用で品質が向上することもあるが、技術の組合せにより、客観的で適正な判断に基づく総合的な診断を行う必要がある。例えば、走行型

計測手法についても、画像と点群、画像と非破壊検査など有効な技術を組み合わせて診断を行うことが重要である（図 13.3.5 参照）。



図 13.3.5　技術の組合せ

13.4 BIM/CIM、i-Construction への活用

13.4.1　設計から維持管理段階で一貫したデータ活用、汎用性

設計時に作成した 3D データに基づき施工し、初期計測として実施した覆工壁面初期状態と断面計測データにより、3D データを再構成し、以降は維持管理に同じデータをベースとして一貫したデータ活用を行っていることが重要である（図 13.4.1 参照）。

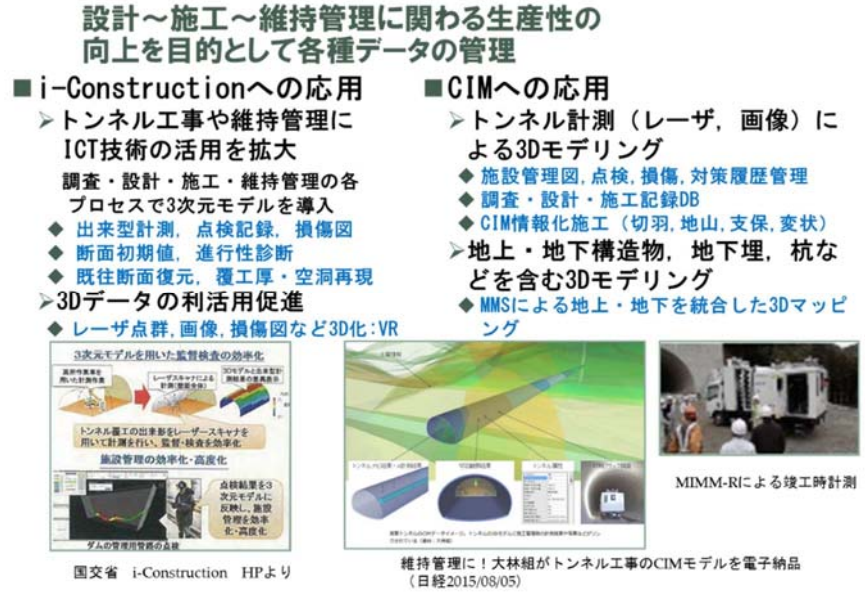


図 13.4.1　i-Construction への活用

13.4.2　データベース

1)　点検記録、帳票

記録、帳票の課題は下記のとおりである。

① 近接目視点検の記録は人のスケッチによるものであり、変状の記録、位置などに誤差や記録漏れが生じる。

② 帳票は EXCEL ベースであり、維持管理計画への有効活用に限界がある。

③ 帳票は記録に留まっており、マネジメントに有効活用されていない。

2)　データベースの課題

① 状態の把握に活用できるデータベースが整備されていない。

② 診断、分析に活用できるデータベースが整備されていない。

③ 事務所単位で EXCEL 管理されていることが多く、何らかの事故が発生した場合の緊急的な確認に活用する以外は、次回点検時まで効果的に活用されることは稀である。

④ 措置、対策の計画的な立案、履歴管理に活用するための十分なシステムにはなっていない。

3)　望ましい対応方針

以下のような観点の改良が必要と考えられる。

① 技術者の経験不足や見落としをサポートし適切な診断が行えるシステムの開発

② 客観的なデータに基づく診断システムの構築

③ 状態の把握で得られたデータを統合的に評価

④ 診断理由がブラックボックスとならないシステム

13.5 高度化技術活用の留意点

13.5.1 高度化技術有効活用の条件

1)　目的に応じて活用

新技術はむやみに適用することは得策ではない。効率化、省力化、低コスト化など目的に応じて採用を検討する必要がある。

2)　ユースケースの明示

新技術に応じて、適するユースケースが想定される。ユースケースに対応する画像のみ、画像＋レーザ、画像＋レーダ、レーダのみなどの組合せを考えて、効果的に適用することが重要である。

3)　適用性について

高度化技術を適用する際は、対象の特性を考慮し適正に活用することが重要である。11,12 章で述べたように、トンネル延長、トンネル数ロット、トンネル工法、老朽度、変状進行性、ひび割れ密度などに応じて、効率化、低コスト化の効果が異なるため、これらを考慮して適用することが重要である。

4)　計測時の留意点

計測する際は、環境条件（温度、降雨、靄）、坑内条件（煤、結露）、坑内路盤条件（舗装不陸、未舗装路盤、施工未完の場合は障害物）などに配慮することが重要である。それらの条件に配慮し、適切な計測機器設定にて計測することが必要である。また計測時の条件、設定は記録に残

し、継続的に保管する必要がある。

5) **データの品質**

画像データ、点群データなどは、用途に応じて必要とされる所要の品質を確保することが重要である。計測時のマニュアル化、データ規格などを統一し、標準規格として汎用性を保持することが重要である。

6) **診断の品質**

人が行ってきた診断を高度化技術で補完、代替するためには、一定の診断品質を確保する必要がある。そのためには各適用技術の性能を制度的に保障する認証制度が制定されることが望ましいが、成立には時間を要し、現実的ではない。したがって一定の品質を確認できるようなベンチマークリファレンスを準備しておくことが重要である。

13.5.2 従来点検との位置づけ

1) **性能カタログと新技術活用ガイドライン**

新技術の採用には、新技術活用ガイドラインに従うこととされており、この制度を支えているのが性能カタログである。性能カタログは性能・品質を保証するものではないが、国交省による検証を経て、一定のルールかつ、現時点で整理が可能なリクワイヤメントに基づいて整理されている。

現時点では試行が続けられているが、いずれ整備が進んでいけば、採用が促進していくことになると考えられる。

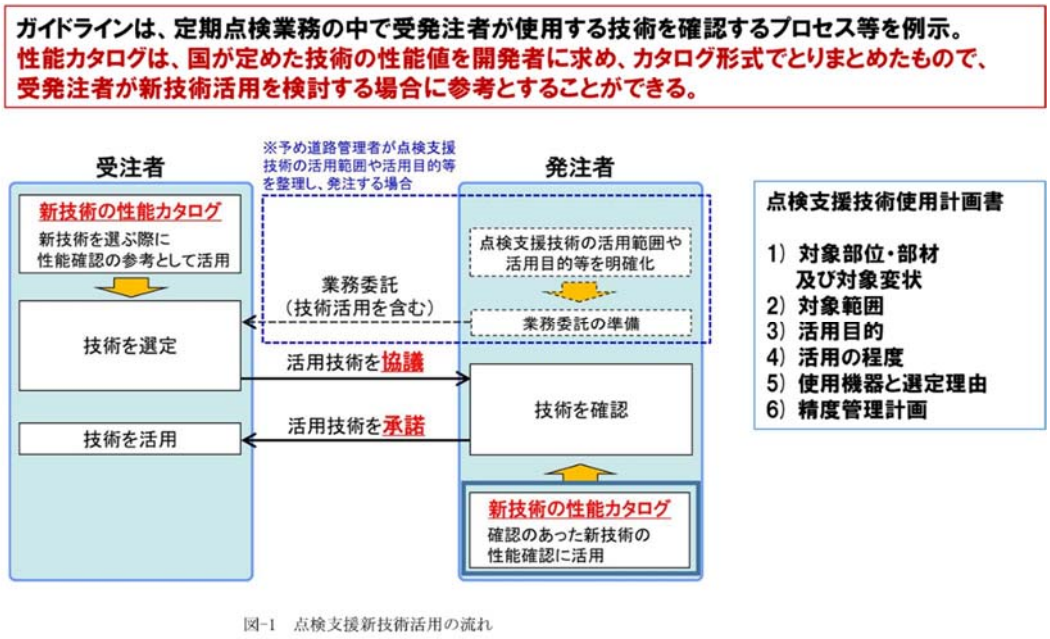


図 13.5.1 新技術活用ガイドライン [4)]

2) **次期点検要領**

現行の 2 巡目点検要領 [2)] では、下記の主旨の改訂がされた。この改訂の方向性を図 13.5.1 に示す。改訂のポイントは、①1 巡目の点検を踏まえた効率化・合理化、②点検支援技術の積極的

な活用である。国交省としても、点検支援技術活用に大きく舵をきった。

新しい点検要領において、特に効率化、合理化のため、技術支援によるスクリーニングを推進することが明確化されたことが非常に重要である。点検要領に定められた対策工判定区分の判定の目安においては、外力性と進行性の有無により判定区分が変わることから、これらがスクリーニングを行ううえでポイントとなる。

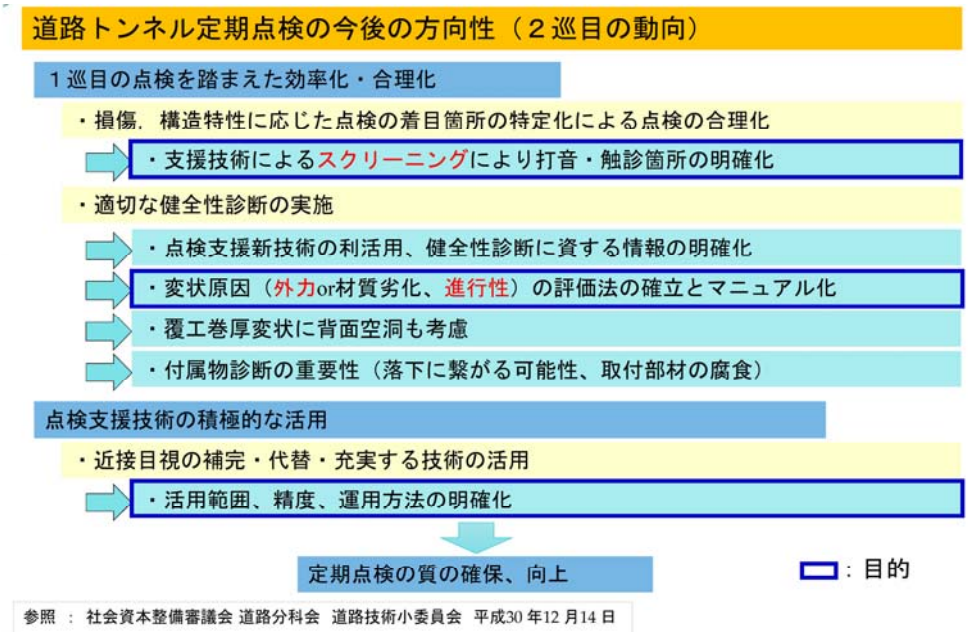


図 13.5.2　現行点検要領の骨子

3)　点検要領改訂のポイント

３巡目となる次期点検要領には、下記のような改訂が望まれる。

① 要求性能を明確化し、判定、診断を性能規定に基づき確認、評価できること。
② 所要の品質として、近接目視と同等の診断ができることを評価した認証制度を充実させる。
③ 外力性要因か材質劣化要因かを判断できる方法を確立する。
④ 外力性診断のうち、山岳工法の判定、診断のルールを明確化する。
⑤ 外力性以外のひび割れについて、幅、長さなどの検出性能を明確化する。
⑥ トンネルでは、外力性ではない場合の、幅などの規定が曖昧となっている。
⑦ ひび割れを伴わないうきの規定を明確にする。
⑧ 新規変状、進行性変状などの診断のためには、位置情報、変形などの計測情報が重要である。
⑨ 初期値を計測しておくことが、継続的な診断のためには重要である。
⑩ 巻厚不足、背面空洞の診断を調査なしに近接目視点検で行っていることに無理があり、新技術活用を前提とした診断に切り替える、判定の目安を見直すなどが必要である。
⑪ 打音検査のスクリーニングルールの策定、打音検査の代替法の検討が必要である。
⑫ チョークの省略、点検記録・帳票の簡便化など、グレードが変えられる柔軟さが必要であ

る。

⑬ 附属物の点検、診断を○×から見直し、段階的な判定に切り替え、また落下検知の措置を追加する。

⑭ 3 次元、4 次元化納品、BIM/CIM による一貫管理などへ移行する。

⑮ データ保存、有効活用のため、共通プラットフォームを構築する。

⑯ 画像画質規定、3 次元モデル規定など含め、データの汎用化、共通フォーマットが重要である。

⑰ 人とロボットのベストミックスとなる点検、診断法の方向性を示唆する。

4) レベル 1 からレベル 4

R2 年度性能カタログは、リクワイヤメントの考え方および、レベル 1 から 4 のロードマップが示された。

改訂のポイントは、これまで画像技術、非破壊検査技術、計測・モニタリングという分類で整理されているが、今年度は「状態の把握」、「附属物落下」「外業効率化」「内業省人化、省力化」とされている。これまで技術ベースであったが、診断対象事象に代わっている。

現時点では、便宜上従来の技術区分で整理される可能性もあるが、新技術適用の考え方として、状態把握、診断というユースケースで整理されようとしたことは、ユーザ目線で技術を選定でき、良い方法であると考えられる。

本研究においても、健全性診断にいかに活用できるかという意味では同じ志向で活動してきたことから、正しい動向といえよう。

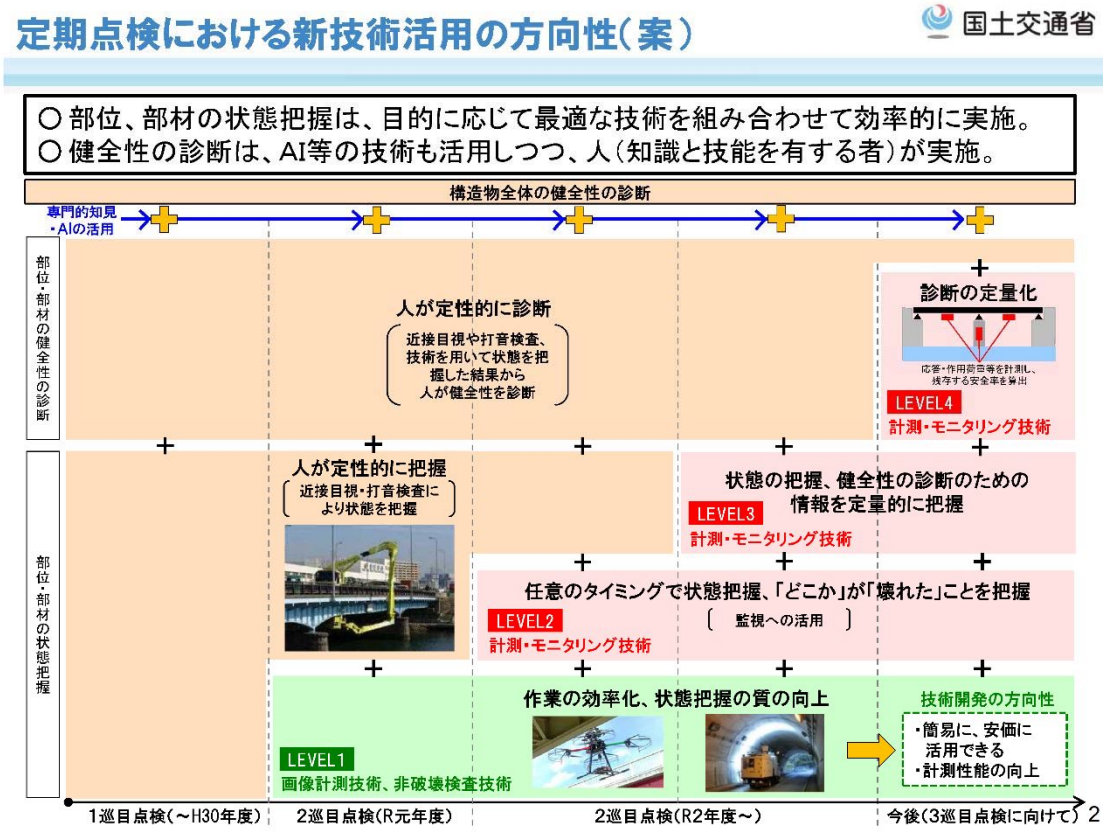


図 13.5.3 R2 性能カタログ [5)]



リクワイヤメント一覧

国土交通省

	リクワイヤメント	想定される利用シーン	掲載ページ
橋梁	PC上部工や吊材の状態把握	LEVEL2 LEVEL3	P. 2
	支承の機能障害	LEVEL2 LEVEL3	P. 3
	基礎の洗掘等	LEVEL2 LEVEL3	P. 4
トンネル	覆工の状態把握 外力性 うき、はく離 空洞、内部欠陥	LEVEL1 LEVEL2 LEVEL3	P. 5
	附属物等の取付状態の把握	LEVEL1 LEVEL2 LEVEL3	P. 6
共通（橋梁・トンネル）	点検に係る現場作業の効率化等に資する技術	LEVEL1	P. 7
	点検結果のとりまとめ（内業）の省人化・省力化が可能な技術	LEVEL1	P. 8

LEVEL1 ：作業の効率化、状態把握の質の向上　LEVEL2 ：任意のタイミングでの状態把握

LEVEL3 ：構造物の状態把握や健全性の診断のための情報を定量的に把握

1

覆工の状態把握　LEVEL1 LEVEL2 LEVEL3　国土交通省

○ 利用者被害防止の観点から、トンネル覆工のはく落に至るうき・はく離を効率的かつ精度よく把握する必要。
○ ひび割れ等への措置を行うにあたっては、変状の要因を的確に把握する必要があるものの、近接目視のみでは要因の特定（材質劣化によるのか、外力の影響なのか等）が困難な場合があることから、ひび割れの進展や、覆工の変形を把握する技術が必要である。
○ 覆工の健全性評価にあたっては、覆工厚・背面空洞を精度よく把握する必要がある。

想定する技術(例)
・ひび割れ等覆工表面の状態を把握する技術
・うき・はく離を把握する技術
・覆工厚・背面空洞を把握する技術
・覆工の変形を計測する技術

▲覆工表面のひび割れ　▲打継ぎ目の化粧モルタルがういている状態　▲覆工の背面空洞により生じる変状の模式図　▲偏土圧により生じる変状の模式図

【状態把握のための計測項目の例】

・ひび割れの位置，幅，長さ
・鋼材腐食の位置，規模
・漏水の位置，規模

・うき・はく離の位置，規模

・覆工の厚さ
・背面空洞の位置，規模

・覆工の形状，変形（変位）

※計測したい物理量に対して、直接計測するのではなく、別途計測した値を用いて換算（推計）する手法も対象とする。

5

点検に係る現場作業の効率化等に資する技術　LEVEL1　国土交通省

○ 橋梁の点検を近接目視にて行う際は、部位によっては作業の際に仮足場などを設置している。構造が単純・小規模な橋梁であっても、その数が多いことから、作業の効率化やコストの低減が課題。

想定する技術(例)
・ 新技術の活用により、点検に係る現場作業の効率化やコスト低減が可能な技術

点検に係る現場作業の例

近接目視　たたき落とし　点検のための交通規制　車線規制　仮足場の設置　高所作業車による近接目視

※ 点検に係る現場作業コスト：人件費（目視・打音検査）、機械経費（高所作業車・台船）、仮設費（仮足場）、安全費（交通規制に係る費用）

作業効率化 低コスト化

新技術の例

ドローン　アーム型カメラ　打音点検　ポール型カメラ　レーザースキャナによる変状把握

7

図 13.5.4　リクワイヤメント例 [6)]

13.5.3 汎用化について（データ、手法）

1） 属性,施工記録取り込み

維持管理段階において、点検記録だけではなく、地質情報、断層・低速度帯情報、切羽観察記録、計測データなどの施工記録を参考として、現在状態の把握、健全性診断を行うことが望ましい。そのためには施工記録を点検記録と同じプラットフォームでデータ管理していくことが重要であり、その意味でも BIM/CIM をプラットフォームとするのが望ましい。

2） データ標準化

データ標準化、汎用化を進めるには、以下の観点の整理が重要である。

① 公共調達を踏まえ、具体的なデータ標準化、汎用化の内容（共通規格、データフォーマットなど）を整理する

② 画像は、データ規格の他、分解能、アスペクト比、位置情報との同期、AI への活用など含めて整理する

③ 従来のような低分解能の PDF は不十分であり、将来的な 3D 可視化や AI への活用も想定して整理する

3） 時系列管理（差分、進行性）

過去の点検記録を含め、時系列でデータ管理する必要がある。設計時、施工時、点検履歴を一括でデータベース化し、外力性・進行性、画像・展開図記録の差分把握、対策履歴管理、対策必要の緊急度、対策タイミング最適化などを進めていく必要がある。

4） 共通プラットフォーム

データ標準化、汎用化を進めるには、以下の観点の整理が重要である。

① 公共調達を踏まえ、具体的なデータ標準化、汎用化の内容（共通規格、データフォーマットなど）を整理する

② 画像は、データ規格の他、分解能、アスペクト比、位置情報との同期、AI への活用など含めて整理する

③ 従来のような低分解能の PDF は不十分であり、将来的な 3D 可視化や AI への活用も想定して整理する

13.6 今後の方向性

13.6.1 今後求められる新技術

1） 省力化、効率化技術（補完、代替技術）

① 近接目視、打音検査を除外できる健全部のスクリーニング技術

② 近接目視を基本とする点検を代替する技術

③ チョーキングを省略し、効率化、省力化する技術

④ うき、はく離を定量的に評価できる技術

⑤ 打音検査を代替する技術

⑥ 重要な変状、明確な進行性、補修跡の進行、画像・レーダなどで検出できない

⑦ うきなどに絞ったマーキング

⑧ 外力性判定のための変形解析、進行性解析

⑨　画像解析に同期し、変形計測技術を用いた外力性変状解析、→路面変状計測
⑩　路面画像、レーザ計測（路面隆起・沈下計測）、解析技術
⑪　画像、変形、非破壊など、物理モデルを含め総合的に変状原因、健全性診断を行う技術
⑥　ひび割れや漏水等の覆工の表面の情報だけではなく、変形・移動・沈下、巻厚や背面空洞、
⑫　覆工コンクリート内部欠陥などの情報を考慮し、総合的に健全性診断を支援する技術
⑦　トンネル点検・調査・補修補強工事の一連の記録のデータベース化（BIM/CIM 対応）
⑧　日常点検で要注意箇所の変化を検知するシステム
⑨　措置の提案や実施時期を支援する技術

2)　AI、自動化、遠隔化（高機能化）

(1)　AI 技術

①　変状抽出、点検支援 AI（漏水や遊離石灰で不可視ひび割れを検出する技術）
　　対策工区分判定に必要な、外力性か材質劣化かを判定する技術
②　外力性診断の AI
③　外力性・進行性診断 AI
④　定量的診断、診断 AI

外力性診断 AI の事例を図 13.6.1 に示す

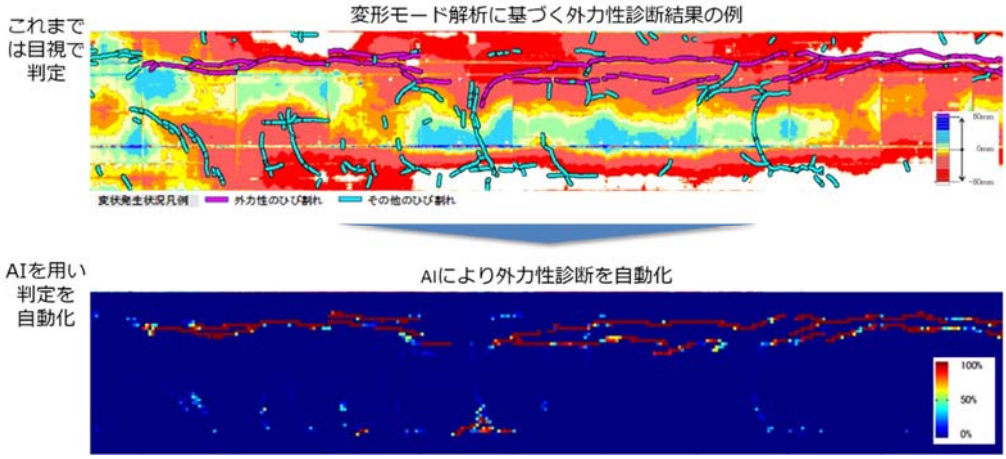


図 13.6.1　外力性診断 AI の事例

(2)　自動化技術

①　進行性自動把握、前回との比較・差分を自動で把握する技術
②　自動診断システム（状態把握、進行性、措置必要性、履歴管理の一連を自動で処理、診断する技術）
③　センサーによる自動監視技術

(3)　遠隔化技術

①　AR,VR,MR を活用し、遠隔診断ができる技術
②　点検を遠隔支援する技術社会実装促進のあり方

3) オープンイノベーション

性能カタログなどに登録されている技術は、単独あるいは共同開発されたものが多い。大半は民間技術であるが、大学、研究機関と共同開発された技術もある。

新技術の活用においては、類似技術を開かれた組織でオープンイノベーションとして開発しているものも見受けられる。特にAIなどの早期導入、促進のためには、土木研究所を始めとする公的機関に共通開発プラットフォームを組織して進めることが有効である。ただし、協調領域と競争領域を明確にしておくことが必要である。

4) デジタルツイン

画像計測を中心とした点検ロボットに対し、レーザ計測を導入することの価値は大きい。画像と点群の双方の特徴を生かし、複合データセットにすることに意義がある。画像であればRGB情報だけであり、客観的、正確な位置情報を与えることも容易ではない。レーザ点群の場合、3D位置情報に加え、反射輝度、時刻情報、複数時期の時間差情報、色付き（RGB）点群などを付与することができ、4D、5Dへとデータの次元をメタ化することができる。このように画像情報に加え、いかに有効な複合データをカップリングするかが重要である。

図 13.6.2 に、デジタルツイン構造とAI活用による統合型健全度診断システムを示す。走行型計測車両に搭載した、カメラ、レーザ、レーダを活用した点検情報を取得する部分は、まさしくフィジカル空間でのインフラ状態に関する物理情報を取得している。その後、レーザ、レーダはサーバー空間でのシミュレーションにより、2次元情報、3次元情報へと情報を集積していき、3D位置情報を基本として解析結果を複合化、統合化することで、サイバー空間での情報構築を行う。その結果を活用してインフラ構造物の健全性診断を実施し、再度フィジカル空間で実構造物の対策工を実施する。以上の流れを、フィジカル空間、サイバー区間でサイクルを回し、統合化した診断システムの全貌を同図に示している。

同図に示すように、画像解析やレーザ、レーダの解析にAIを活用することを計画しているが、レーザ点群の 3D 座標のように物理量を基本として、データセットを準備しシステム設計を行うことが特に重要である。レーザの他にもレーダ探査のように、反射強度、極性、電波速度などインフラ構造物の健全性を評価できる物理量を複合化させることが、デジタルツイン展開の鍵となる。

以上のように、フィジカル空間で取得する物理量を基本として、3Dセットに物理量を複合化したデータセットによって、サイバー空間でAIを活用した健全性診断シミュレーションを実施し、結果をフィジカル空間の対策工にフィードバックさせるという一連の流れを標準化することが今後の課題である。

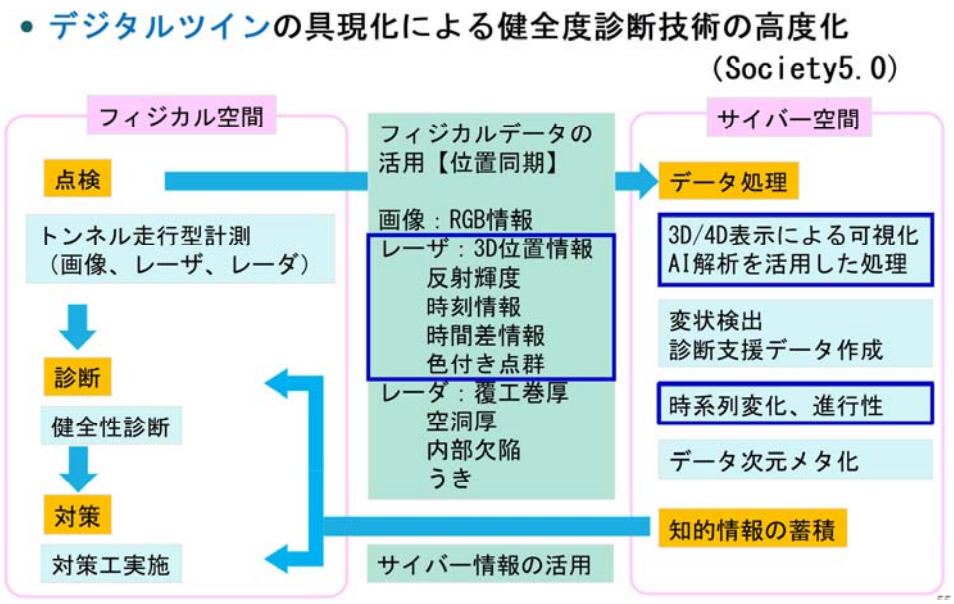


図 13.6.2　デジタルツイン

5)　道路管理者への細やかな支援

本研究では、これまでに数々の検討課題をクリアし、点検支援技術をいかに高度化して健全性診断に活用するかを第一の研究ポイントにしたうえで、AI、デジタルツインなど新技術の活用も踏まえ、一層効果的で合理的なスマートインフラマネジメント手法の確立に向け取り組んできた。

本研究の究極のターゲットゴールは、研究成果によって点検マネジメントサイクルを支援し、社会実装を具現化することである。新型コロナウィルスの甚大な影響で、特に体制・財政的に困窮を極めている管理者に向けて社会貢献することができれば、本研究を進めてきた本研究プロジェクトにとって望外の喜びである。

【参考文献】

1）走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化検討に関する研究 :研究成果報告書、新都市社会技術融合創造研究会　走行型計測技術による道路トンネル健全性評価の実用化研究プロジェクト、平成 25 年 3 月
2）道路トンネル定期点検要領、国土交通省　道路局　国道・技術課、平成 31 年 3 月
3）近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務、国土交通省　近畿地方整備局、令和 3 年 3 月
4）新技術利用のガイドライン（案）、国土交通省、平成 31 年 2 月
5）点検支援技術の開発の方向性について、国土交通省、令和 2 年 12 月

あとがき

本研究は、トンネル定期点検を合理的かつ効率的に実施するため、移動体計測技術による支援項目、支援レベルの整理を行い、その上で、計測データに対する自動解析や AI 技術の活用・支援方法について検討してきた。また実トンネルの実証試験を通して支援技術による効率化についても検討を行った。

平成 26 年からの定期点検 1 巡目から、多くのトンネルで移動体計測による計測データが蓄積されてきたが、これらのデータの共通アーカイブ化はほとんどされておらず、データを十分には活かし切れていないのが現状である。本研究で検討した支援技術の基盤となっている移動体計測技術は、センサ複合システムであるがゆえに、それぞれのセンサの特性により、計測時の環境、条件によって取得される計測データの品質が異なってくる。今後さらにデータが蓄積され、トンネル毎の時系列データを比較することが重要となってくるが、過去のデータの誤差や計測品質など特性が分かっていなければ正しい診断が困難になる。

また、移動体計測技術は、移動ロボットのマッピング技術を基礎としており、同じセンサ群で構成されていても、使用するアルゴリズムによって、計測データの品質が異なる。この分野のアルゴリズムは日進月歩で開発が進められているため、今後、同じセンサデータを使用して、さらに品質の良いデータを得ることも可能になることも考えられる。AI 開発においても、点群や画像といった最終結果のみを使う場合よりも、生データから直接解析を行った場合のほうがより良い性能を得ることもある。

そのため、これらの支援技術を今後より効果的に活用するためには、データアーカイブについても、計測の最終データだけでなく、データの由来をはっきりと残しておくことが重要であると考える。どのようにデータベース化するかという議論は残されているが、移動体計測の最終結果のみを残すのではなく、計測時の環境、計測条件、計測システムとしての特性、各センサの性能および生データをともに適切に保管しておくことが重要で、それが実現できれば、計測データの価値が増していくと考えられる。

本研究を実施するにあたり、トンネルの専門家ではなく、移動体計測を専門とするロボット研究者として参画させていただいた。研究開始当初には、ロボット技術者と、点検従事者の認識の違いを改めて感じた。もともと、MMS はトンネル点検を意図して開発はしておらず、トンネル点検におけるニーズの表層だけを受け取って、現場を十分に理解することなくトンネル点検従事者がどのような解析を行うのか見ることなく開発

を進めてきた。一方で、これら計測技術の使用者側も、MMS の技術背景を理解することなく使用していたように感じた。MMS の性能を十分に発揮し、データ解析を正しく行うためには、技術に対する相互理解は必須であると考えており、プロジェクト内で様々に検討し議論を重ねる中で相互理解が深まったと感じている。そういった意味で、本プロジェクトでは、トンネル点検に対する従事者と、機器開発側の意見を十分に交換できる貴重な場として作用したと感じる。今後、人材が不足していくなかで、効果的な点検支援を実施していくには、点検の直接従事者だけでなく、支援技術を開発する技術者との十分なコミュニケーションの場を絶やさず、分野横断可能な技術者を育成していくが重要であると考える。

最後に、本プロジェクトの遂行および貴重な成果を得ることができたのは、過去の研究から継続してこられた方々、本プロジェクトに参画いただいた方々、全員のご協力とたゆまぬ努力のおかげであり、改めて御礼申し上げたい。

令和 3 年 10 月

日本工業大学　基幹工学部　機械工学科　准教授
新都市社会技術融合創造研究会
トンネル点検支援の高度化に関する研究プロジェクトリーダー

石川　貴一朗

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究　研究成果報告書

2021 年 10 月発行

編集　　新都市社会技術融合創造研究会
　　トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト
発行所　新都市社会技術融合創造研究会
　　トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト
代表　　日本工業大学 基幹工学部 機械工学科 准教授 石川 貴一朗
　　〒345-8501　埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

本書の一部または全部で無断の複写・転写することは禁止します。