第 9 回新都市社会技術セミナー

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　概　要

平成 24 年 10 月

道路トンネル健全性評価研究プロジェクト
プロジェクト代表者　京都大学副学長　大西有三

目　　次

第１章 研究概要 ･･ 1
第２章 計測箇所検討 ･･ 2
第３章 走行型計測 ･･ 3
第４章 現地近接目視・打音確認調査 ･･ 4
第５章 ３次元データベースシステムの検討 ･･ 5
第６章 走行型計測の実用性評価及び課題 ･･ 7
第７章 トンネル詳細調査の適用性検討 ･･ 15
第８章 トンネル対策工法の検討 ･･ 16
第９章 今後の課題 ･･ 19

第１章 研究概要

1-1 研究目的

これまでの研究において，佐田トンネル，金ヶ崎トンネルで走行型計測を実施し，健全性評価を行った結果，トンネル覆工の変形モードやひび割れ形状などから，発生原因の推定や，新規に発生したひび割れの検出を行うことができた．また MIMM の採用により，これまでよりもさらに精度の高いデータ取得が可能となった．課題としては，ひび割れの検出精度をさらに高めていくことや，既往の打音検査箇所の絞り込み方法（浮き，剥落箇所の特定），走行型計測による健全性評価方法の確立などが考えられた．

平成 23 年度の研究では，こうした課題を踏まえ，福井河川国道事務所が管理する越坂トンネル，大谷第５トンネルをモデルケースとしてフィールド検証を実施したものである．その内容としては，①走行型計測技術のさらなる実用化検討（点検判定方法，健全度判定方法，データベース化）の実施，②損傷の進行が伴うようなトンネルを対象とした調査方法，モニタリング方法の検討，③必要となる対策工法の選定手法　などを行ったものである．

1-2 研究項目

表 1-2-1　研究項目

種　　別	細　　別	単位	数量	摘要
研究計画		式	1	
計測箇所検討		式	1	
現地踏査		式	1	
走行型計測調査	走行型画像・レーザ計測	(箇所) 式	(2) 1	MIMM 採用
	データ解析	(箇所) 式	(2) 1	
	図面作成	(箇所) 式	(2) 1	
近接目視確認	ひび割れ目視確認	(箇所) 式	(2) 1	高所作業車
	打音確認	(箇所) 式	(2) 1	高所作業車
点検判定方法検討		式	1	
健全性判定方法検討		式	1	
データベース化検討		式	1	
調査方法検討	調査方法	式	1	
	モニタリング方法	式	1	
対策工法検討	対策工法選定手法	式	1	

1-3 研究のフローチャート

本研究におけるフローチャートを下図に示す．

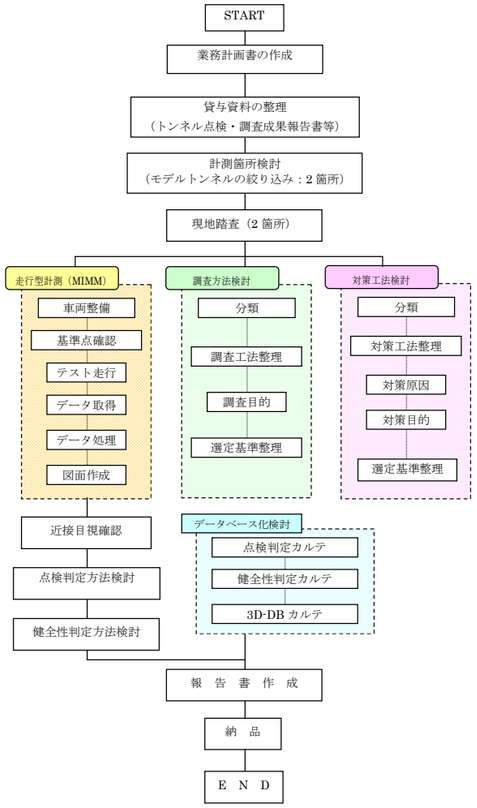

図 1-3-1　研究フロー

1-4　研究の実施体制

本研究は，受注者である「京都大学大学院　工学研究科　都市環境工学専攻　ジオフロント環境講座」西山准教授を代表契約者とし，研究の取りまとめを行う．なお，研究の遂行において，近畿地方整備局が進める「新都市社会技術融合創造研究会」（産学官連携による研究プロジェクト）に所属する「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」（プロジェクトリーダー：京都大学理事大西副学長）の研究メンバーを，実施体制として位置づける．

表 1-4-1　研究項目

リーダー	京都大学　理事　大西有三副学長
産	㈱アーステック東洋，㈱ウエスコ， エヌ・ティ・ティインフラネット㈱，大林道路㈱， 応用地質㈱，鹿島建設㈱，関西工事測量㈱， 計測検査㈱，鴻池組㈱，綜合計測㈱， 中電技術コンサルタント㈱，㈱ニュージェック， パシフィックコンサルタンツ，㈱三井住友建設㈱， 三菱電機㈱
学	京都大学大学院工学研究科，金沢工業大学
官	国土交通省　近畿地方整備局 道路部　道路管理課 近畿技術事務所 福井河川国道事務所

第２章 計測箇所検討

2-1 道路トンネルの選定

福井河川国道管内におけるこれまでの道路トンネル点検・調査成果報告書や新規トンネルの施工データ等をもとに本研究の目的・主旨に沿ったトンネルを２箇所選定し，調査・計測対象トンネルとした．

2-2 福井河川国道管内における道路トンネル

福井河川国道管内において，管理されているトンネルから以下のように条件設定を行った．

①新しいトンネルと古いトンネルをそれぞれ計測する（在来工法，ＮＡＴＭ工法）
②新しいトンネルにおいては施工時のデータが残っていること
③点検結果による外力の影響を受けている可能性があるトンネルであること
④両者とも比較的損傷の多いトンネルであること
⑤計測の効率性を考慮し，両者が比較的近傍であること

こうした条件を踏まえ，発注者との協議・意向に沿い，以下のトンネルに対し，調査・計測を行うこととした．

表 2-2-1 調査・計測　対象トンネル

名称	路線	竣工年	延長（m）	施工法	総合判定（定期点検）
越坂トンネル	国道 158 号	平成 4 年	1150	ＮＡＴＭ	A
大谷第 5 トンネル	国道 8 号	昭和 38 年	228	在来工法	A

2-3 福井河川国道事務所管内の対象トンネルの概要

(1) 越坂トンネル

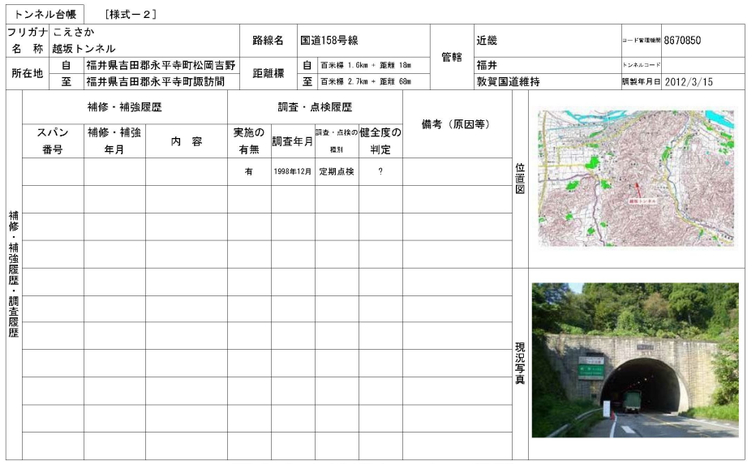

図 2-2-1 越坂トンネル概要

(2) 大谷第 5 トンネル

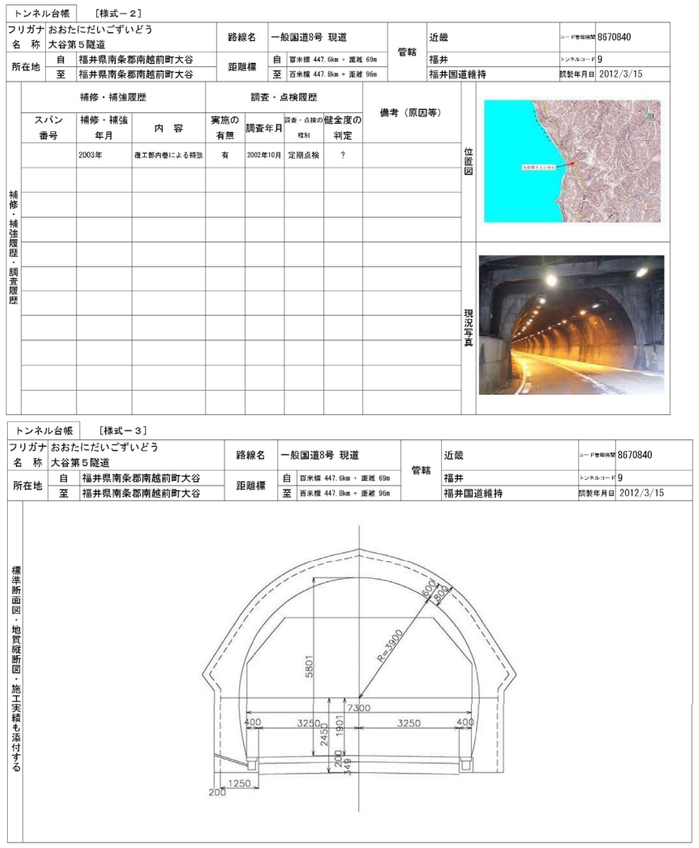

図 2-2-2 大谷第 5 トンネル概要

第３章　走行型計測

3-1 走行型計測の目的と計測項目

対象トンネルの変状現象を的確にかつ客観的に把握することを目的として交通規制が不要な走行型計測を実施する．走行型計測の計測項目は，下記のとおりである．

①走行型画像計測（MIS:Mobile　Imaging　Technology　System）

覆工コンクリート表面のひび割れ，漏水，材質不良(豆板）箇所を客観的に把握するため，ビデオカメラにより壁面画像を撮影・計測した．

②走行型レーザ計測（MMS:Mobile　Mapping　System）

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．合わせて，予め厚さの分かっているターゲット板をトンネル付近に設置し，レーザ計測値より板厚を計測し精度を求める．

本研究では，これらのシステムを同一車両に搭載した　MIS&MMS（MIMM）により計測を行った．

3-2 走行型計測システム概要

走行型計測車両（MIMM）は MIS と MMS の機能を 1 台の車両に搭載したもので，1 回の走行で，画像とレーザによる 3D 計測が同時に行えるものである．外観を図 3-1 に示す．

図 3-2-1　MIMM 車両

3-3 計測方法

MIMM による計測は下記のように行う．

- 40km/h～50km/h（制限速度以内）で 2～3 回往復走行し計測する．
- 車線規制・交通規制等は行わない．

3-4 走行計測工程

作業手順として，以下のフローに従って処理を進めた．

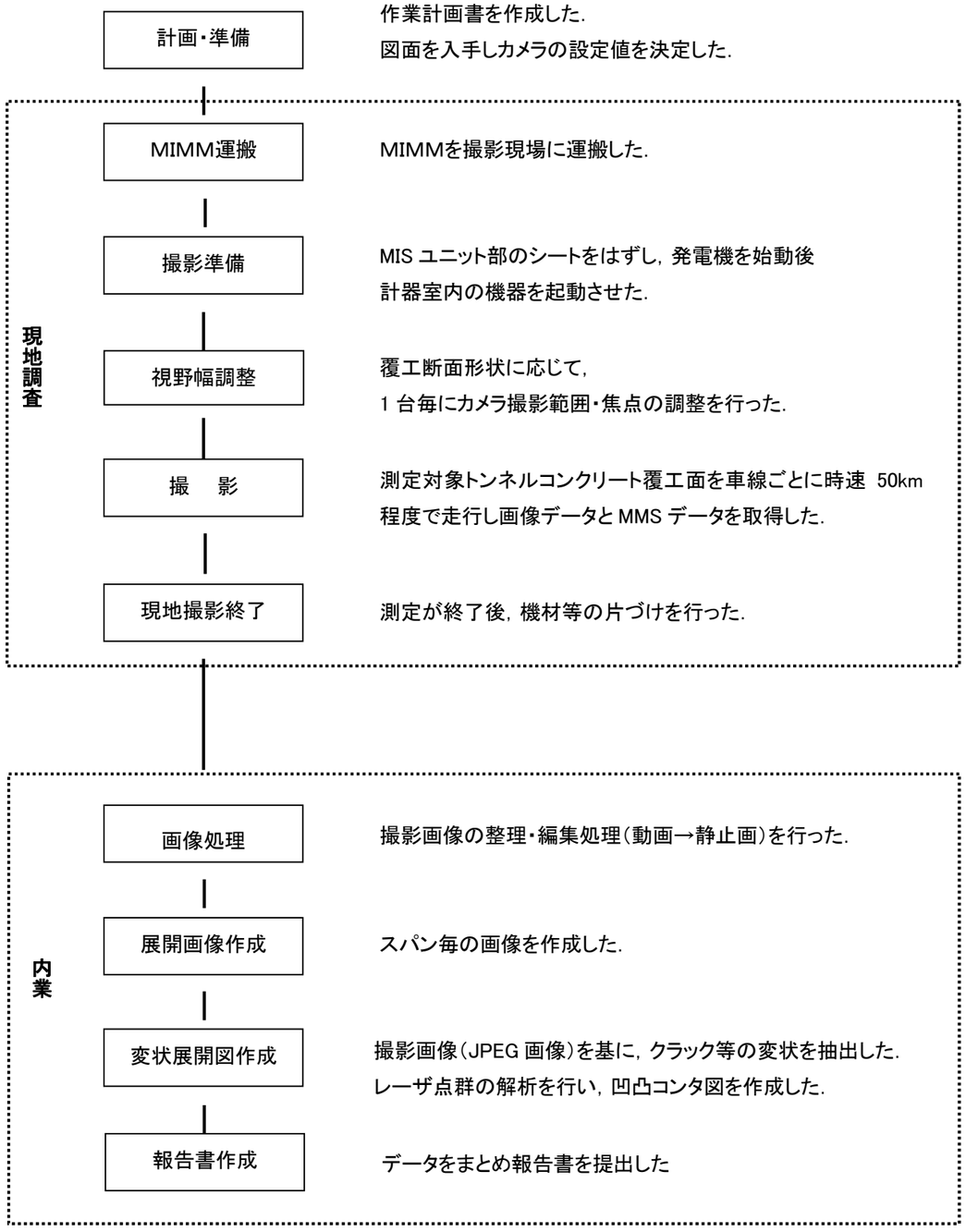

図 3-4-1 調査手順（フロー）

第 4 章 現地近接目視・打音確認調査

4-1 調査目的

今回実施された MIMM により得られた展開画像（図面データ）及び変形モード図（コンタ図）を確認し，主要な損傷（ひび割れ，浮き，剥落，漏水，遊離石灰等）に着目し，高所作業車により，目視確認および打音確認を行った．特に外力の影響が予想される箇所，内面への変形が著しい箇所，ひび割れが集中している箇所，コールドジョイント箇所等に着目した．なお，本章での調査対象は，福井河川国道管内の２トンネルを対象として，調査概要，方法，結果について述べるものとする．

4-2 調査箇所

（1）越坂（こえざか）トンネル：延長 1150m，完成年次平成 4 年，補修履歴なし

前回点検時のコメント（H20 年度）

・主な変状は，ひび割れ，補修材のうきであり，漏水，遊離石灰はほとんど見られない．

・Ｓ077，Ｓ084 の横断目地部において半円状に閉じたひび割れが見られるが，打音検査による異常は認められなかった．

・Ｓ080 の側壁部において，前回点検時（H11 年）に確認されていた防水材露出箇所を打音検査した結果，側壁厚の薄い範囲が広いことが判明した．施工不良が原因と推定されるが，点検作業の体制では範囲を確定することが困難であり，打音検査により，かえって側壁部を痛めることになると判断し，打音検査を続行せず，応急対策必要箇所として維持出張所へ報告を行った．

（2）大谷第5（おおたにだい） トンネル：延長 228m，完成年次昭和 38 年，補修履歴あり

前回点検時のコメント（H20 年度）

・主な変状は，ひび割れ，補修モルタルのうき，漏水，遊離石灰である．

・起点側坑口～中央部に一部開口を伴うひび割れが見られていたが，特に進行は見られず，濁音も聞かれなかった．

・起点側坑口～Ｓ005 の側壁部において新たに内装板が施されている．

・Ｓ003，Ｓ004，Ｓ009，Ｓ030 の天端付近に見られていたひび割れによるブロック化は対策が施されていた．

・Ｓ024～終点側坑口にかけて，アーチ部のひび割れに進行，及びうきが見られたがはく落の恐れがある箇所は見受けられなかった．

4-3 調査日時

（1）越坂（こえざか）トンネル

1）MIMM 計測

平成 23 年 11 月 25 日（金）昼間

2）打音・目視確認調査

平成 23 年 12 月 6 日（火）22：00～6：00（このうち 23：00～3：00）

調査時間：4 時間程度

（2）大谷第5（おおたにだい） トンネル

1）MIMM 計測

平成 23 年 11 月 25 日（金）夜間

2）打音・目視確認調査

平成 23 年 12 月 12 日（月）9：00～17：00（このうち 10：00～14：00）

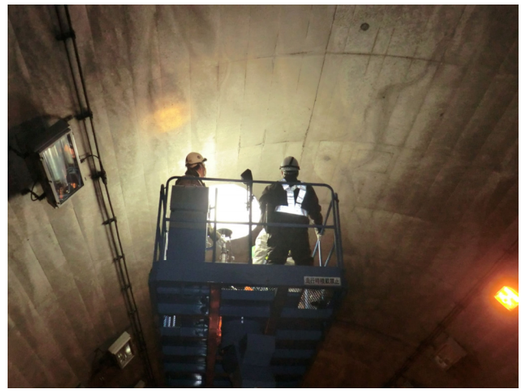

写真 4-3-1 越坂トンネル調査状況

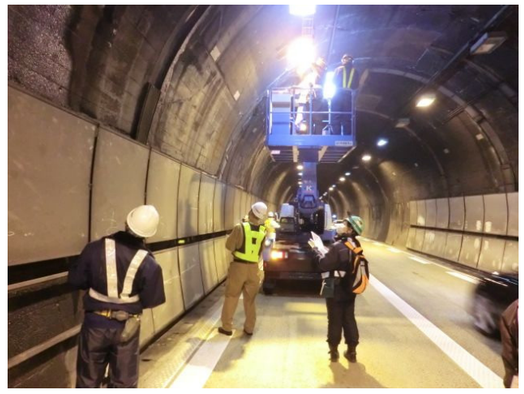

写真 4-3-2 大谷第 5 トンネル調査状況

第５章　３次元データベースシステムの検討

5-1 システム概要

本システムは，道路トンネルの健全性評価に必要となる地質調査結果を始め，施工時の工事記録や供用後の点検結果・維持管理等の履歴などをより効率的・効果的に活用できるように，トンネルの全てのデータをビジュアル化できるツールである．

本システムの特徴は以下に挙げられる．

①既存資料の再利用
②現地での点検記録
③データの３次元可視化
③携帯ＰＣを用いたデータの３次元可視化
④健全性評価の利用
⑤他ファイルへの変換利用

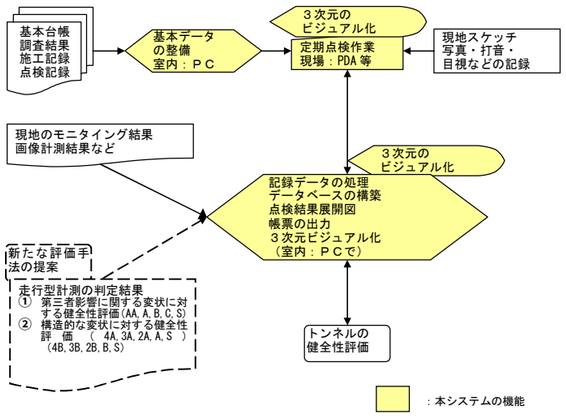

図 5-1　システムの運用形態

5-2 運 用 方 法

システムの運用は以下の手順で行う．

1) トンネル諸元データ（トンネル台帳），各種点検・調査結果など現地情報及び補修・補強などの対策履歴などの既存のトンネルデータのデジタル化を始め，時系的にトンネルの履歴を整備する．
2) 必要に応じていつでも何処でも検索可能となるように，情報の集約統合を行い，データの共有化を実現する．
3) これらのデータを三次元ビジュアル化することで，従来の紙ベースに比べて飛躍的に閲覧性が向上し，トンネルの状態を客観的に把握することによって，健全性評価に利用できる．

5-3 システムの適用

ここでは，大谷第５トンネル及び越坂トンネルの２トンネルの既存点検結果を３次元データベースに適用した結果をまとめる．

5-3-1 基本台帳の適用結果

基本台帳の適用は，紙ベースとして提出されたものをデジタル化した上で，図 5-2～図 5-3 に示すように，トンネル台帳，トンネル施設，設計及び施工資料，スパン番号，トンネル線形資料の５つの画面（５タブ）に分けて入力を実施した．

5-3-2 点検データの適用結果

点検データの整備入力は，紙ベースとして提出されたデータや CAD ファイルに基づいて，図 5-3-2 に示す画面で変状のスケッチや点検・調査結果を適用した．その特徴としては，それぞれの損傷・変状毎にデータベース化として管理コードが自動的に付加され，その損傷・変状の状態などの情報やその評価を記入することができる．また，次回の点検作業に備えて，既に入力されたデータを呼び出して，修正変更などを簡単な作業で行える．

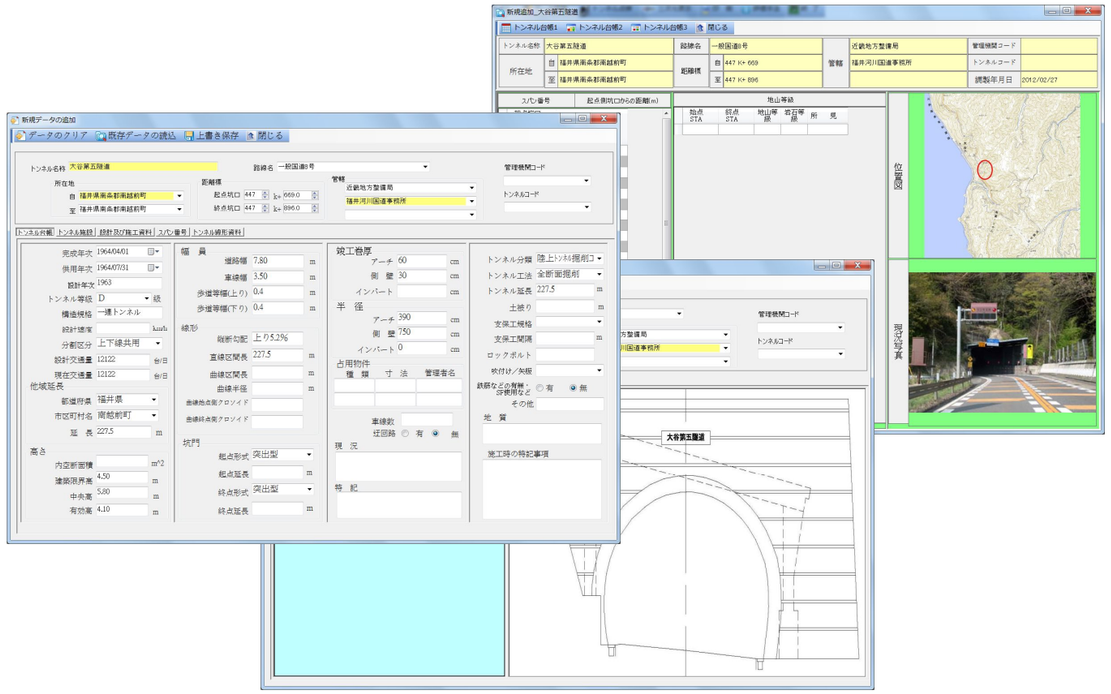

図 5-2　基本台帳の適用結果（大谷第５トンネル）

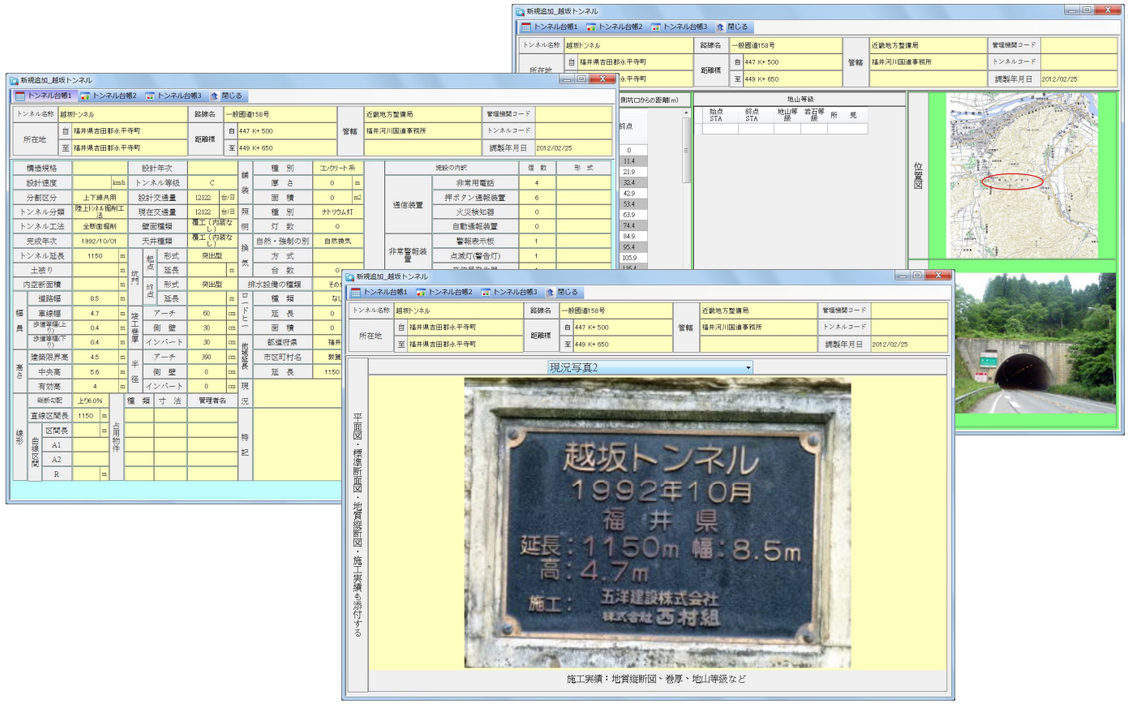

図 5-3　基本台帳の適用結果（越坂トンネル）

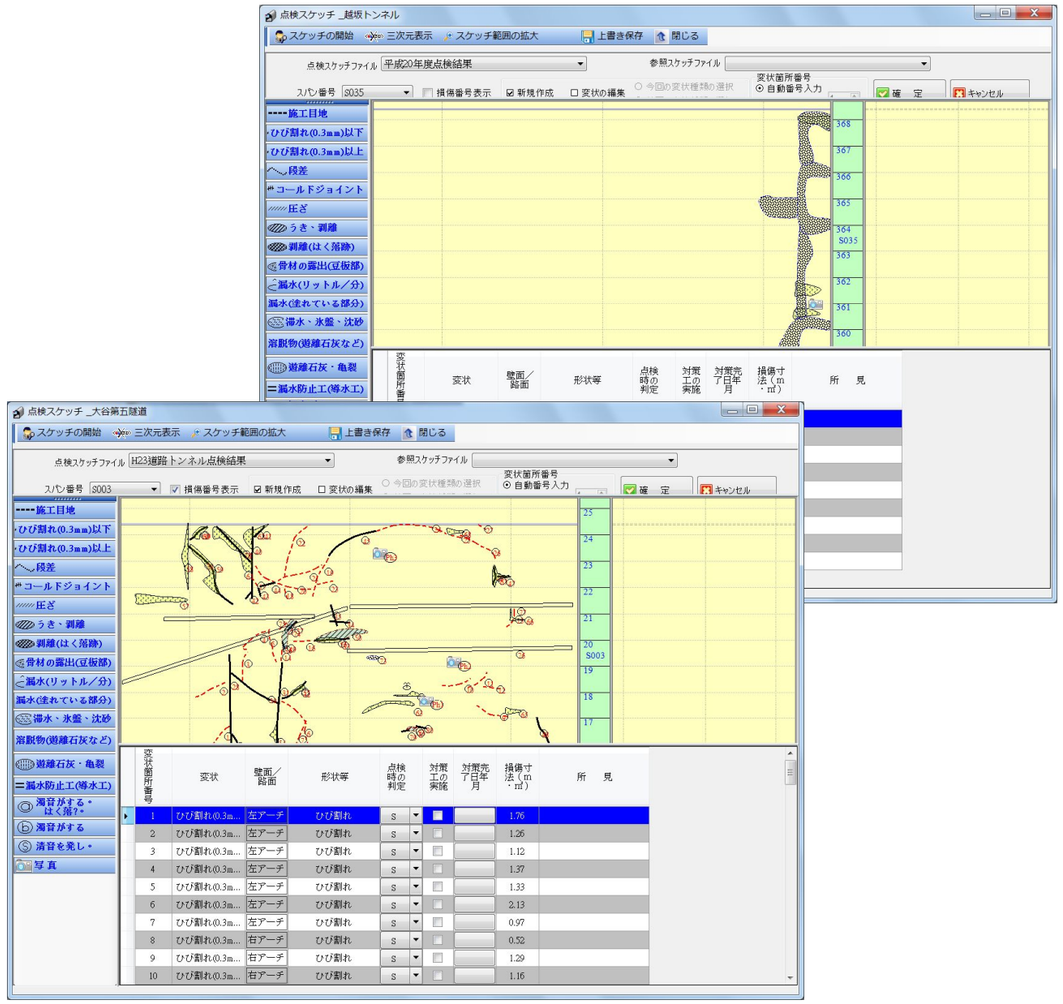

図 5-4　既存紙データからの転写画面例(大谷第 5 トンネル・越坂トンネル)

5-3-3 健全性評価判定への適用

本システムでは，変状毎に管理コードを付加してデータベース化しているため，データの集計や分析に効率的に利用できる．また，スパン別の評価判定においては，図 5-4 に示すように，変状種類別の集計や線形変状の長さ，面的な変状の面積変化などスパン別に自動集計されているため，効率的かつ効果的な活用が可能である．

5-3-4 三次元ビジュアル化への適用

本システムの特徴としては，健全性評価に必要となるトンネル管理情報をより効率的・効果的に活用するため，コンピュータグラフィック（ＣＧ）技術を利用し，トンネルの情報データの継続性・再現性・客観性・ハンドリングの良い三次元ビジュアル機能である．

適用例としては，図 5-5～図 5-6 に示すように，入力された点検結果のスケッチや写真の撮影位置など現地で得られた情報に基づいてシミュレーションした三次元ビジュアル化したトンネルであり，パソコン上で擬似走行しながら内部の損傷状況を確認しながら，健全性評価に活用できる．

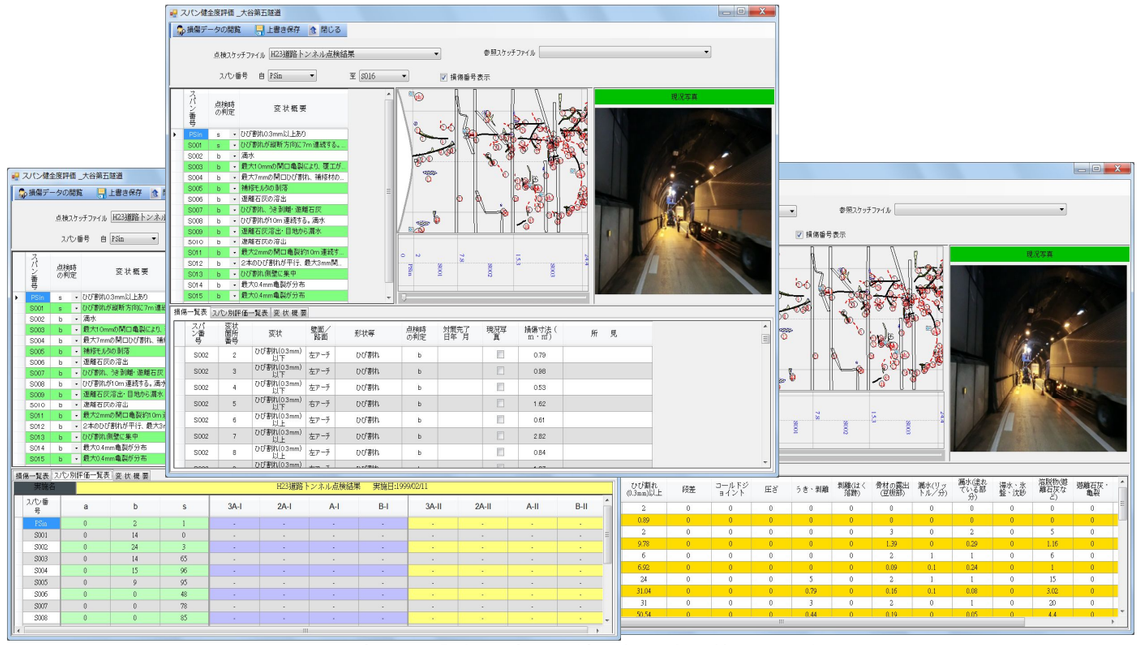

図 5-5　スパン別の評価判定への適用例（大谷第五トンネル）

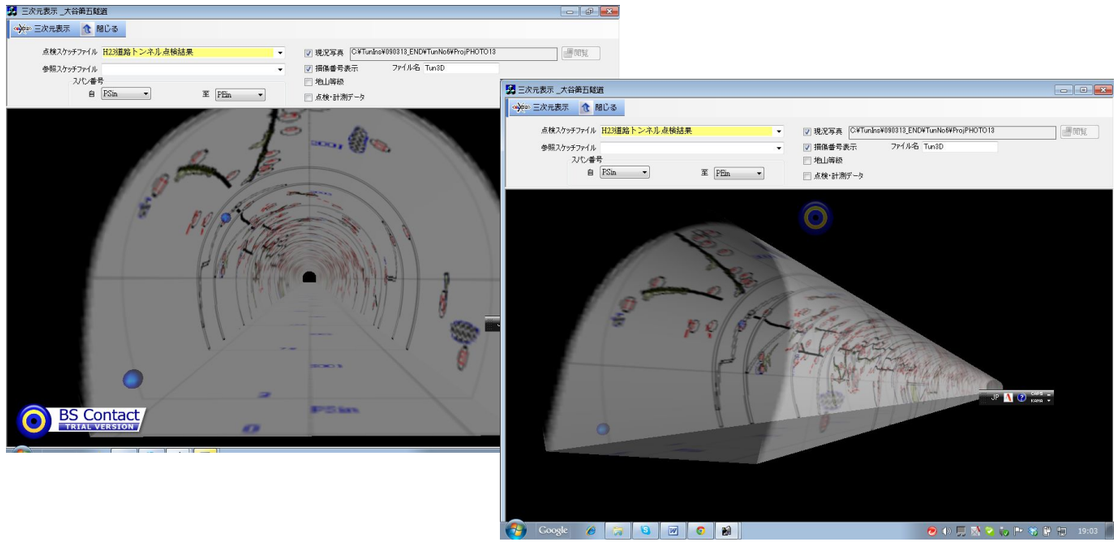

図 5-6　三次元ビジュアル化の適用例（大谷第 5 トンネル）

5-3 まとめ

本研究では，トンネル健全性評価にトンネルの経時的な劣化状態をコンピューターでシミュレーションした空間で疑似体験を可能にするツールを開発してきた．今回の適用検証は，研究会で選定された大谷第 5 トンネル及び越坂トンネルの２トンネルを対象に，基本台帳を始め，施工記録，点検記録，変状展開図など既存の紙データをデジタル化して，本ステムに適用した．

今後の課題としては，本３次元データベースシステムを取り入れた道路トンネルの点検・調査・補修から健全性評価の手引きの改訂整備が望まれる．

第 6 章　走行型計測の実用性評価及び課題

6-1　越坂トンネル

(1)　着目箇所

今回点検データを使って計測走行計測評価手法の検討することになるが，特に着目するポイントを以下にまとめて示す.

1）今回点検に対して，相違か認められるスパン（ひび割れ幅　or　有無）

左側壁縦断クラック：S2，S3，S6，S7，S58，S60，S88

天端縦断クラック：S7，S70，S75

天端亀甲状クラック：S26，S30，S37，S39，S40，S58

左側壁横断クラック　：S51

2）MIMM より天端沈下傾向を示す：S3，S7　→　外力の影響か否か？

3）MIMM より内側変形傾向を示す：

S9，S10，S23，S24，S79，S80，S84，S97，S98，S100，S101　→　外力の影響か否か？

4）MIMM より外側変形傾向を示す：S8

5）半月状クラック：S35，S36，S84　→　はく落の危険性はないか？

6）右側壁縦断クラック：S32～S37 補修跡全体にわたって濁音を確認

7）非常駐車帯境界スパン（断面変化スパン）で同一パターンのひび割れ（横断方向）を確認：S51，S70

(2)　着目箇所に対する評価

1）ひび割れ幅が増大している個所の MIMM 解析結果から外力性の変形傾向はみられなかった.

2）S70 を境に異なるセントルで覆工コンクリートを打設していることが施工情報より判明した.よって,MIMM の解析は平均断面を 2 ケースに分けた.

3）S3：ひび割れ幅は 0.6mm であり，打音確認を行ったが異常は見られなかった.

4）S8-9 左側：目視で変位を確認．打音確認を行ったが異常は見られなかった.

5）S23-24 右側：内側への変形傾向が見られるが，それに伴う特徴的なひび割れは見られない．天端部の破損は応急対策の必要はないと考えられる.

6）S26,39,40,58：打音確認を行ったが全てにおいて浮きは見られなかった．S30 は乾燥収縮によると思われる網目状の非開口ひび割れが見られ，S37 では MIMM（MIS）画像にあるようなひび割れは見られなかった.

7）S32-40：　側壁にひび割れが見られたが，MIMM（MMS）コンター図から外力の影響はないと思われる.

8）S35,36,84：半月状のクラック部の打音確認を行ったが，はく落の危険性はないと考えられる.

9）S70：ひび割れ幅は 1.5mm ではなく，0.8mm．打音確認を行ったが浮きは生じていなかった.

10）S75：　MIMM（MIS）画像では最大 2.5mm のひび割れが見られたが，近接目視および打音確認の結果，幅は 0.7mm～1mm 程度であり，浮きは生じていなかった.

11）S97-98，100-101：内側への変形傾向が見られるが，特徴的なひび割れは見られない.

12）S6，S7，S88：0.2mm 程度以下の微細ひび割れは，捉えられないものもあり，測定精度面について明らかにする必要があるものと思われる．測定精度は，測定時の環境条件，すなわち壁面までの距離や壁面の汚れ，測定器の移動速度などにより精度が異なると思われるため，導入にあたっては一定の整理が必要と考える.

13）コンター図の内側変形箇所について確認したが，目視では変形状態は確認できなかった.

14）一部でコンクリートの段差 10mm が確認され（S79-80：写真 6-2-1，S84：写真 6-2-2），これらは覆工コンクリート打設時の型枠のズレや変形によるものと思われるが，S79-80 左側壁の縦断ひび割れと，コンター図による内側への変形傾向が一致している．変形箇所が外力の作用による変形であるかどうかについては，周辺地山の地形・地質状況やひび割れの発生状況などを精査することにより総合的に判断する必要があると思われる.

写真 6-2-1　S79-80（左側壁）段差 10mm

写真 6-2-2　S84（天端付近）段差 10mm

既往点検と走行型計測技術による点検の比較　　越坂トンネル（1）　S001～S023

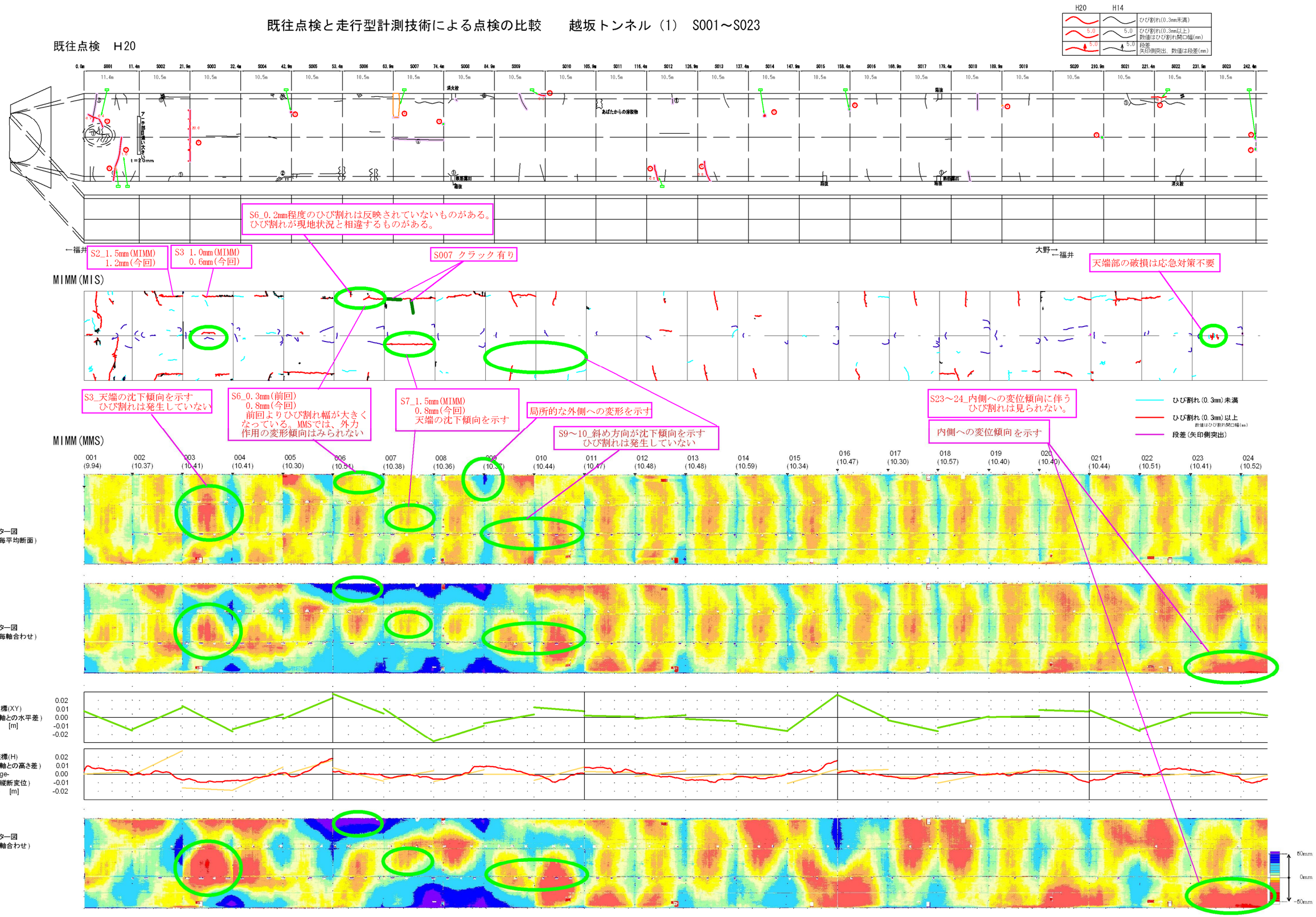

図 6-1-1　越坂トンネル点検結果比較図(既往点検，MIS,MMS)S001～S023

既往点検と走行型計測技術による点検の比較　　越坂トンネル（2）　S024～S047

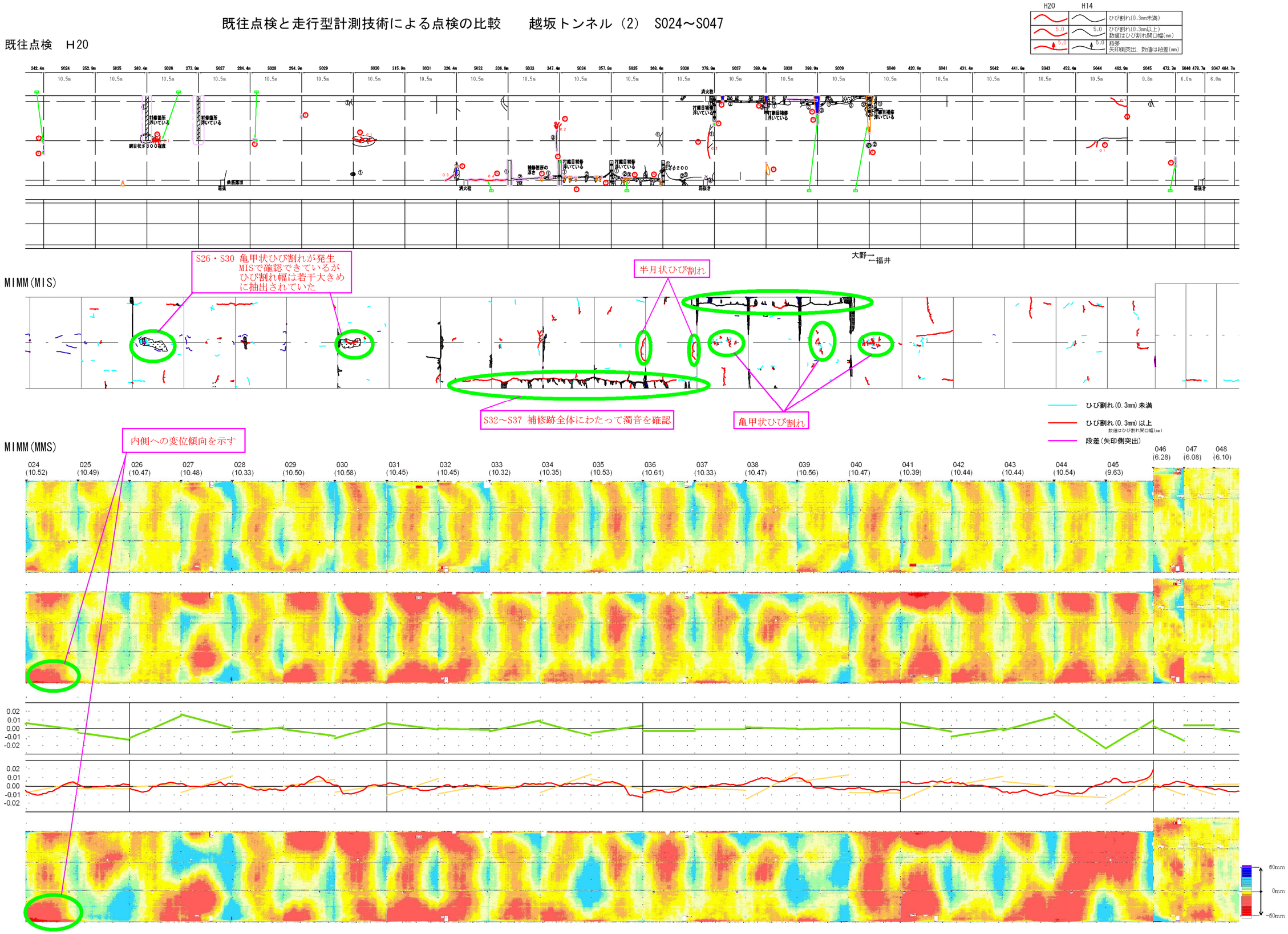

図 6-1-2　越坂トンネル点検結果比較図(既往点検，MIS,MMS)S024～S047

既往点検と走行型計測技術による点検の比較　　越坂トンネル（3）　S048～S074

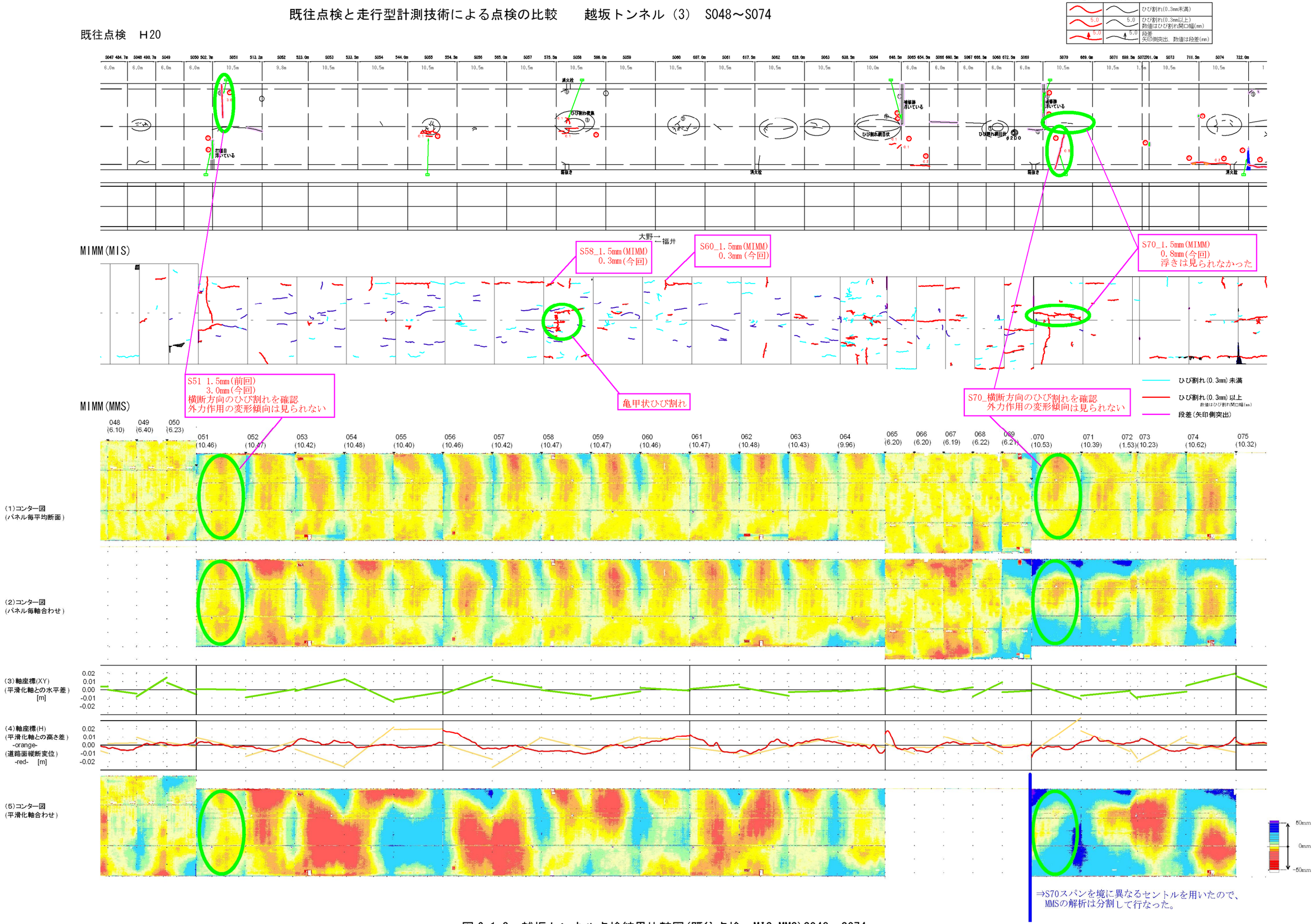

図 6-1-3　越坂トンネル点検結果比較図(既往点検，MIS,MMS)S048～S074

既往点検と走行型計測技術による点検の比較　　越坂トンネル（4）　S075～S097

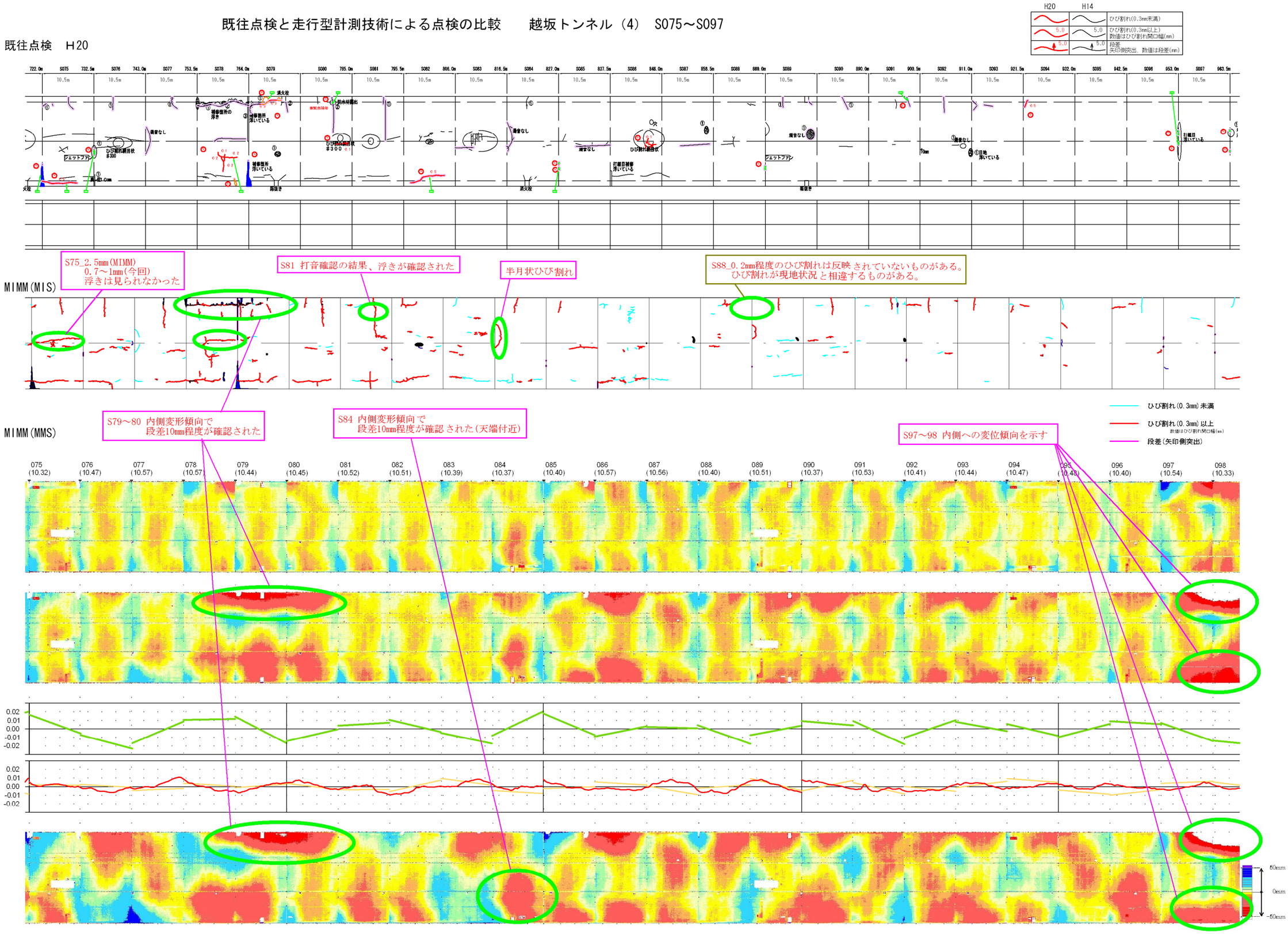

図 6-1-4　越坂トンネル点検結果比較図(既往点検，MIS,MMS)S075～S097

既往点検と走行型計測技術による点検の比較　　越坂トンネル（5）　S098～S113

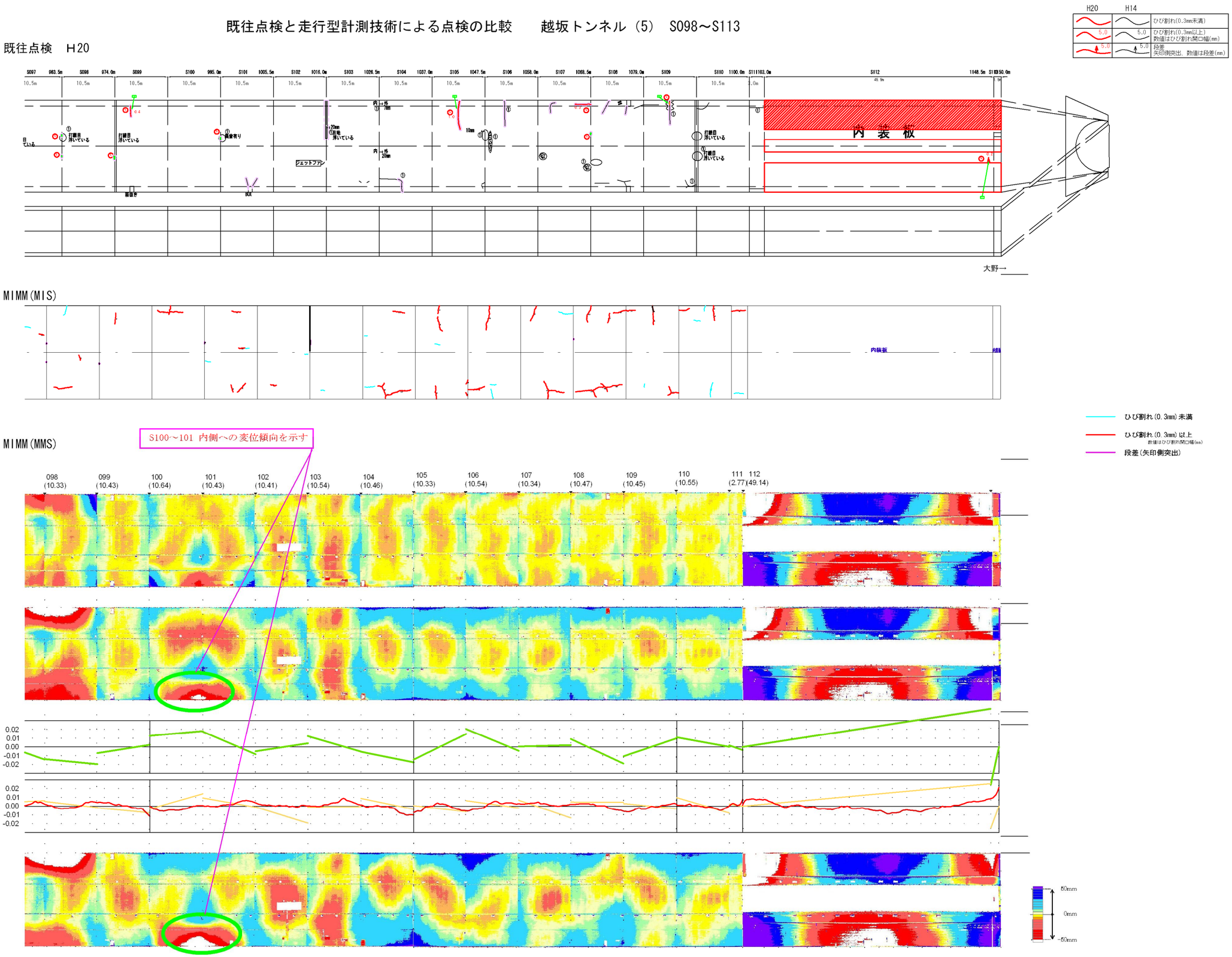

図 6-1-5　越坂トンネル点検結果比較図(既往点検，MIS,MMS)S098～S113

6-2 大谷第 5 トンネルの評価

走行型計測と現地踏査（近接目視点検）を実施し，以下の着目点に基づいた評価を行う．

（1）ひび割れの検出精度

（2）利用者被害につながる近接目視箇所の抽出

（3）構造的変状（外力作用）箇所の検出

（1）ひび割れの検出精度

現地点検にて実際のひび割れと照合作業を行い，以下の事項を確認した．

1）照明の影や漏水，汚れ（すす）の影響を受け，実際のひび割れ幅と異なる箇所があった．
（画像上では，照明の影によりひび割れを過大評価，漏水･すす等でひび割れを確認できない）
また，段差を有するひび割れは影が生じるため，実際のひび割れ幅より過大に評価する傾向がある．

2）築年数の経った漏水が多い矢板工法では，打継目，漏水痕，析出物の汚れとひび割れとの識別が困難な箇所が出現する．

3）本現場ではひび割れが白色化している（析出物，もしくは煤が付着していない）箇所が多く点在し，ひび割れ解析の方が実際よりひび割れ幅を大きめに評価する傾向が見られた．

◆検出精度の向上

ひび割れ幅の解析精度を向上させるため，定量的なキャリブレーション作業が必要であり，以下の 1）2）の手法を現場で実証し，有効性を確認することが望まれる．

1）覆工面にクラックゲージの添付（画像で読み取れるもの）

2）画像計測前に代表的なひび割れを現地で計測チョーキングし（数パターン：　例えば，0.3 ㎜，0.5 ㎜，１㎜，２㎜，３㎜），画像に記録する．

（2）利用者被害につながる近接目視箇所の抽出

走行型画像計測は非接触計測のため「うき･はく離」の検出は困難であるが，計測結果を有益に活用することで，近接目視点検（打音）の範囲限定が可能となり，現場作業の効率化，省力化，規制日数の短縮につながる．ここでは，走行型計測から得られた「画像＋変状展開図」と，実際の現地点検結果を対比し，近接目視箇所の抽出精度や抽出可否のパターン（変状）について記述する．

◆現地点検で損傷を確認し，走行型計測（画像＋ひび割れ展開図）から確認が困難であった変状パターン

1）導水工の破損，　　2）補修モルタルのウキ，　3）ハンマー軽打ではく落する遊離石灰

現地点検時に，密集・閉合のひび割れパターンの箇所を 10 箇所程度，打音検査を実施した．本現場では全て健全であり，「うき･はく離」の懸念はなかった．しかしながら，当該箇所は一般部と比較して「うき･はく離」の可能性が高いことは明白であり，近接目視点検の抽出範囲から外すことはできないと考えられる．

以上より，走行型計測（画像＋ひび割れ展開図）から近接目視（打音）する範囲を抽出する変状パターンとして，下記を提案する．

1）特殊なひび割れパターン…密集，閉合(目地との三日月 含む)，交差　等

2）ジャンカ，豆板 箇所

3）遊離石灰，漏水 箇所

4）施設〔ジェットファン，標識　等〕周辺の放射状ひび割れ

5）補修箇所

今後，実際の点検結果と走行型計測の検証を重ねることにより，点検範囲を限定するための抽出パターン設定について，精度向上を図ることが必要である．

（3）構造的変状（外力作用）箇所の検出

ひび割れ画像，ひび割れトレース図，覆工面 3 次元点群データ解析等の相関性について，多面的に評価し，構造的変状（外力作用）懸念箇所の検出を行った．この結果により，要対策 ～ モニタリング ～ 放置 等の対応区分が明確となり，適正かつ効果的な維持管理へ寄与することが可能となる．

外力作用箇所の特定は，以下の情報を総合的に勘案することが必要である．

① ひび割れ画像

② ひび割れ展開図

③ 覆工面 3 次元点群データ解析

・３種類の解析コンター図（1）（2）（5）があり，各々が特徴（メリット）を有している．

（1）パネル毎 平均断面…パネルの局所的変形を捉える

（2）パネル毎 軸合わせ…各パネル間の差異を捉える

（5）平滑化 軸合わせ …数パネルにまたがる変形挙動を連続的に捉える

・(3)（4）は，パネル軸と平滑化軸とのズレを示しており，解析コンター図（5）に対して，軸ズレの影響有無を評価する．

④ 地質データ（切羽観察記録，地山パターン，支保パターン等）

⑤ 地形データ（偏圧地形，地すべり地形，鞍部･低土被り等）

大谷第 5 トンネルでは上記の①~③を総合的に評価した結果,外力作用の懸念箇所を以下の２箇所と推定した．

1)　S006~S007

2)　S017~S019

次ページに 3 次元点群データ解析と評価コメントを示す（図 6-2-1 参照）．

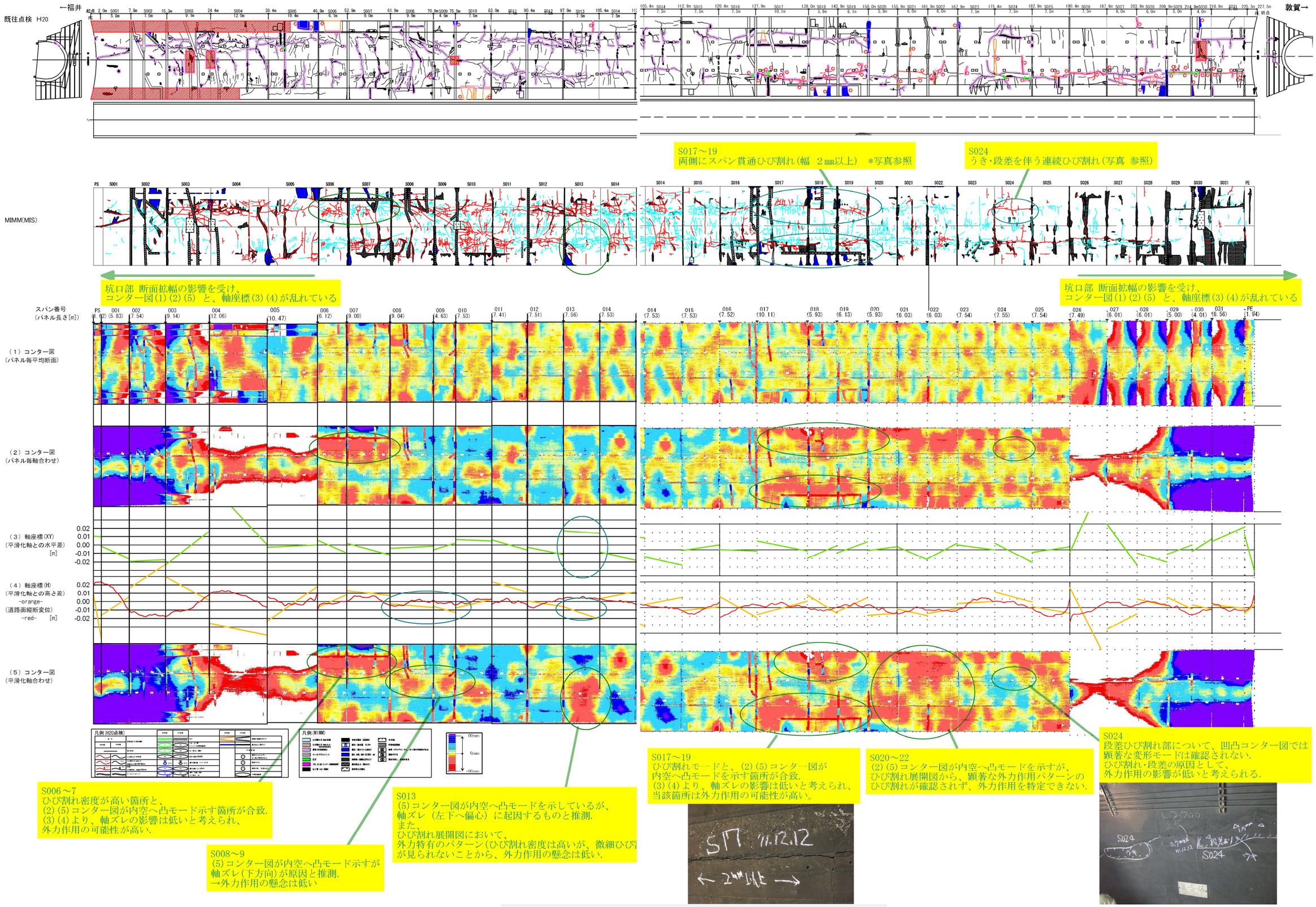

図 6-2-1 走行型計測 解析データ(コンター図), 評価

第７章トンネル詳細調査の適用性検討

7-1　トンネル詳細調査の概要

トンネル詳細調査では，計測が必要な箇所について，計測センサをトンネルに設置し遠隔モニタリングする方法が主流となりつつある．

(1) 電気式センサを利用したトンネル詳細調査

電圧，電流あるいは電気抵抗のような電気量を利用するものが電気式センサである．電気式センサを利用した代表的な調査項目の概要を紹介する．

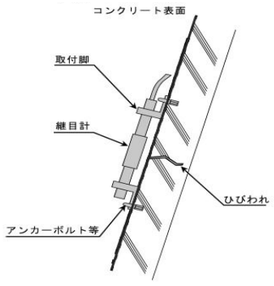

図 7-1　ひびわれ変位計設置概要図

① ひびわれ幅

トンネル覆工に発生したひびわれや亀裂は，異常を示唆する有効な情報である．図 7-1 にコンクリート表面のひびわれの両側のアンカー等を用いて継目計を取付けた例を示す．

② 内空変位

トンネル内空断面の垂直，水平変位を把握するもので，トンネル内部に変位計を設置し，測定箇所に設けた固定点との間をインバー線で結び，水平方向の場合は，ドラムあるいは，プーリーを介して一定の張力を保つためのウェイトが取り付けられている．また，インバー線保護のための塩化ビニルパイプを設置する．

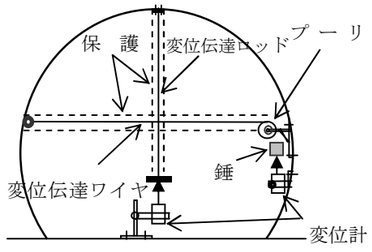

図 7-2 内空変位計測（例）

(2) 光ファイバを利用した調査手法

光ファイバは，光を伝送するための伝送路であり，コア（中心部）に入射した光は屈折率の違いでコア/クラッド（周縁部）境界面で全反射を繰り返し，光ファイバ内に閉じ込められて前方へ進む．材質は石英ガラスを主成分とするものが多い．センシングで用いる光ファイバには，光ファイバそのものをセンサとするものと，光ファイバを加工した部分をセンサとして用いるものがある．

① OTDR方式

OTDR測定法（Optical TimeDomain Reflectometry）は，光伝送損失測定や光ケーブル接続点の損失測定などの光線路試験技術として広く用いられている技術である．パルス光を光ファイバに入射した際のレーリー散乱光を受光したもので，過度の曲げが発生すると散乱光のパワーが低下し，パワーが不連続となる．図7-3に測定原理を示す．ある外力が発生すると光ファイバに過度の曲げが発生する機構を作製することにより，変位等の一定の物理量が発生したか検知することが可能となる．

図 7-3　OTDR の測定原理

② FBG方式

FBG(Fiber Bragg Grating)方式は，光ファイバ本体を計測センサとして利用する方法である．この方式では，光ファイバ途中の特定部分のコア部にグレーティングと呼ばれる屈折率が違う部分を間隔Λで格子状に並べ，この部分をセンサ（FBGセンサ）として利用するものである．図7-4に測定原理を示す．わが国では2000年頃から落石検知に適用され始めその後さまざまな計測センサの開発が進められている．

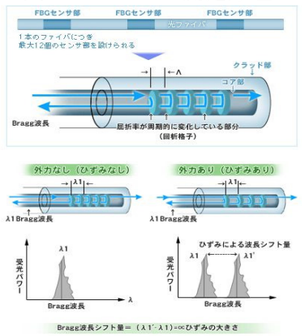

図 7-4　FBG の測定原理

(3) 光ファイバセンサ設置例

道路トンネルにおける光ファイバセンサ設置例を図 7-5 に示す．

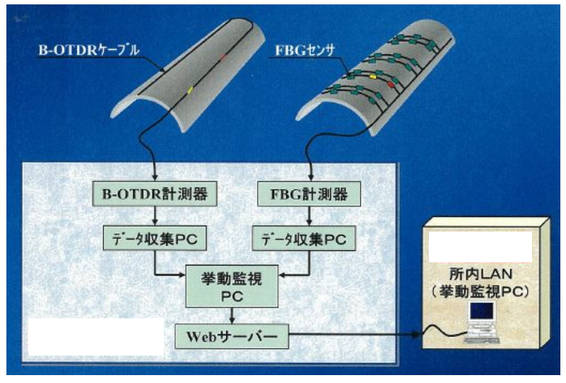

図 7-5　道路トンネルにおける光ファイバセンサ設置例

(4) 計測システム

トンネル計測を行う場合，計測器やパソコンなどの精密機器をトンネル近傍に設置し，配線を行うが，計測小屋や電源を設置する必要があり，用地確保や交通規制を生じさせるなどの問題の要因となる．トンネル計測にあたっては，交通規制や第三者への影響を回避，抑制し，且つ，ハンドリングやメンテナンスのよい計測方法とする必要がある．インターネットを利用した計測システム例を図7-6に示す．

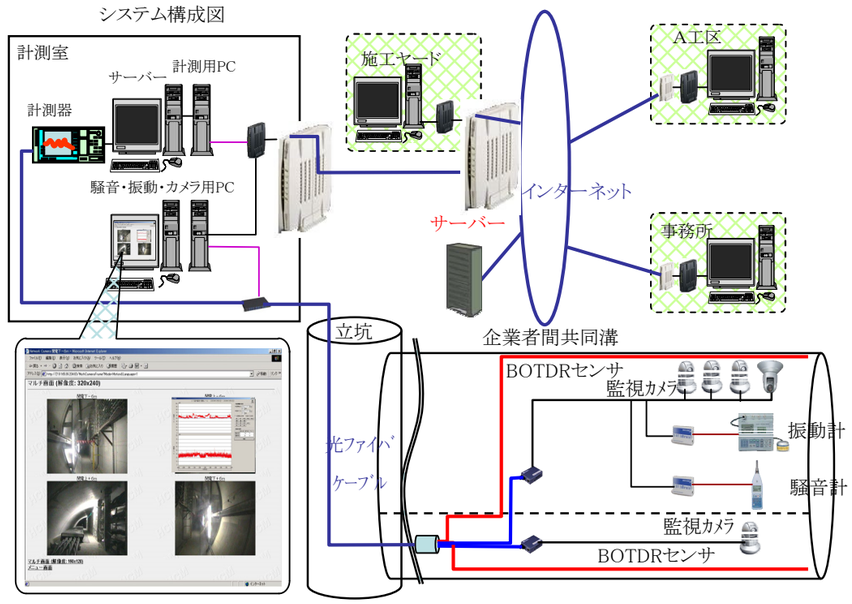

図 7-6　インターネットを利用した計測システム例

7-2　調査トンネルへの適用性

これらの技術を利用すれば調査トンネルへの詳細調査は可能である．光ファイバを利用した詳細調査を実施する場合の留意点としては，そのシステム構成上，光センサ，測定器，施工，ソフトの 4 要素があり，これらの 4 要素を連動させ複合管理していく必要がある．

第 8 章 トンネル対策工法の検討

8-1 対策工法の概要

(1) 対策工の目的

道路トンネルにおける対策工の目的は，

・変状による損傷部分の補修，補強

・変状原因に対して抵抗，抑制，排除

等の方法により，低下した機能や耐久性を最適な方法により回復させることである．

(2) 対策工の分類

道路トンネルの対策工は，その効果により「補修」と「補強」に分類される．

・「補修」とは，漏水などトンネル構造の安定性に直接的に影響がないが歩行者及び通行車両の安全に支障となる要員を取り除くために行う対策工

・「補強」とは，トンネル構造の耐荷力低下を抑制，または耐荷力を向上させるために行う対策工

(3) 対策工の種類

標準的な対策工法を表 8-1 に示す．

表 8-1 標準的な対策工法の分類

標準的な対策工法(手引きより)		
補修工	1 はつり･防護ネット	→ 1 は補修に該当するが，点検時の応急対策として行うものであり，恒久対策はないため個別のものとして分類する．
	2 漏水防止工	
	3 断面修復工	
	4 断熱工	
補強工	5 吹付けコンクリート工※	→5 吹付けコンクリートエは近年補修としての採用がほとんど無く，実施後の吹付けコンクリート自体のはく落等も問題となっている現状があり本書では取り扱わないものとした．
	6 内面補強工※	→ 6 内面補強工は，使用する材料は同じであるが，対策の目的によって補修工・補強工となる．ここでは対策目的を明確にするため，補修の場合を内面張工，補強の場合を内面補強工として扱う．
	7 裏込め注入工	
	8 ロックボルト	
	9 内巻コンクリート	
	10 斜面安定工	
	11 地山注入工	
	12 グランドアンカー工	
	13 インバート工	
	14 部分改築工	
	5 6 は実施目的により補修・補強双方の場合がある．	補修工の場合－内面張工・対策目的：はく落対策 覆工面に対して，部分的な箇所に施す場合が多い 補強工の場合－内面補強工・対策目的：覆工補強 覆工を補強することが目的であるため，連続的(面的)に施す場合が多い

(4) 変状の主な原因と対策目的

道路トンネルにおける対策工については，変状および変状原因に対して対策の目的を明確にするべきである．道路トンネルにおける対策目的は図 8-1 の 7 項目に大きく分類される．

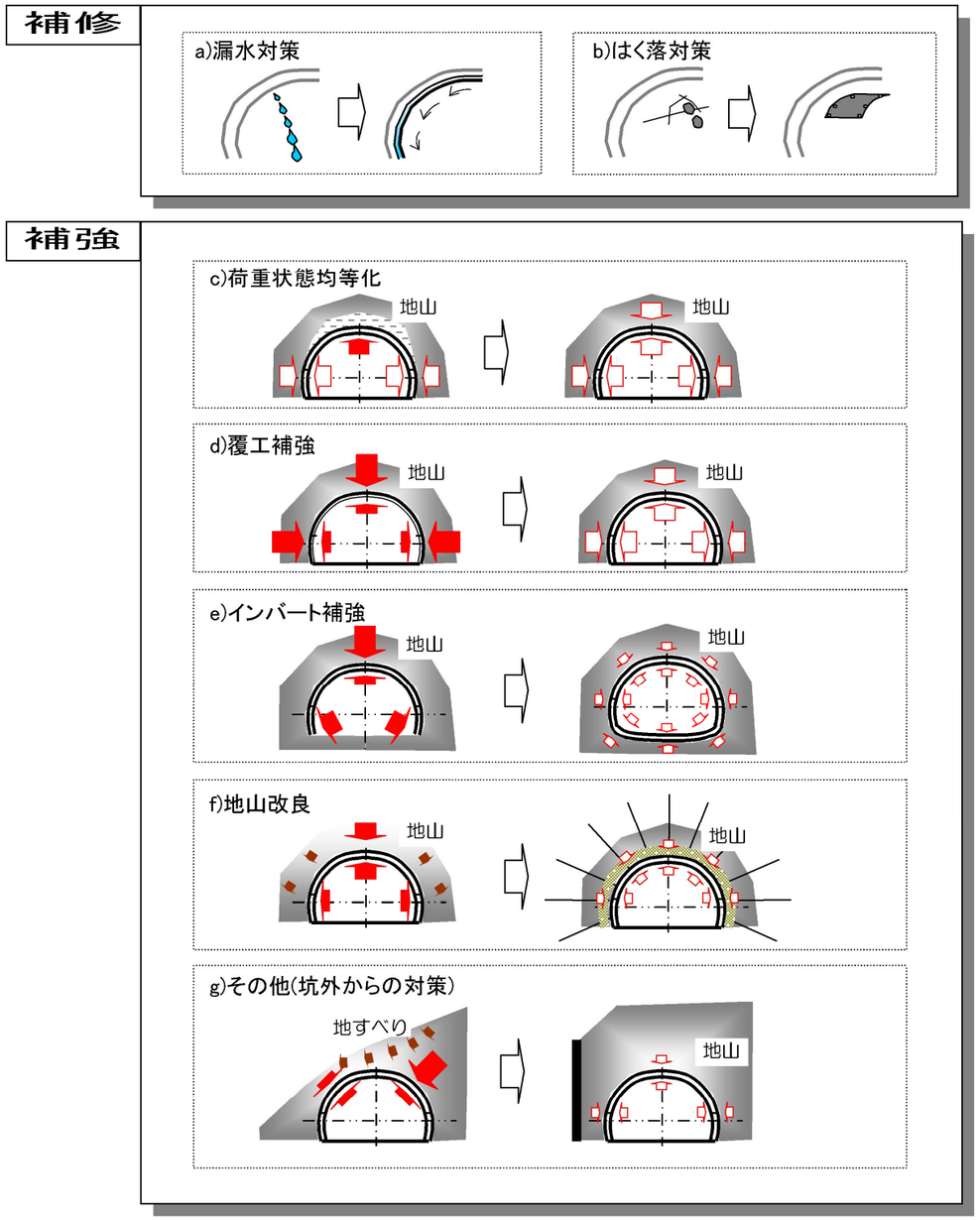

図 8-2 変状の原因と対策目的の関係

8-2 対策工法の体系化および分類

道路トンネルの主な対策目的別に対策工を分類したものを以下に示す.

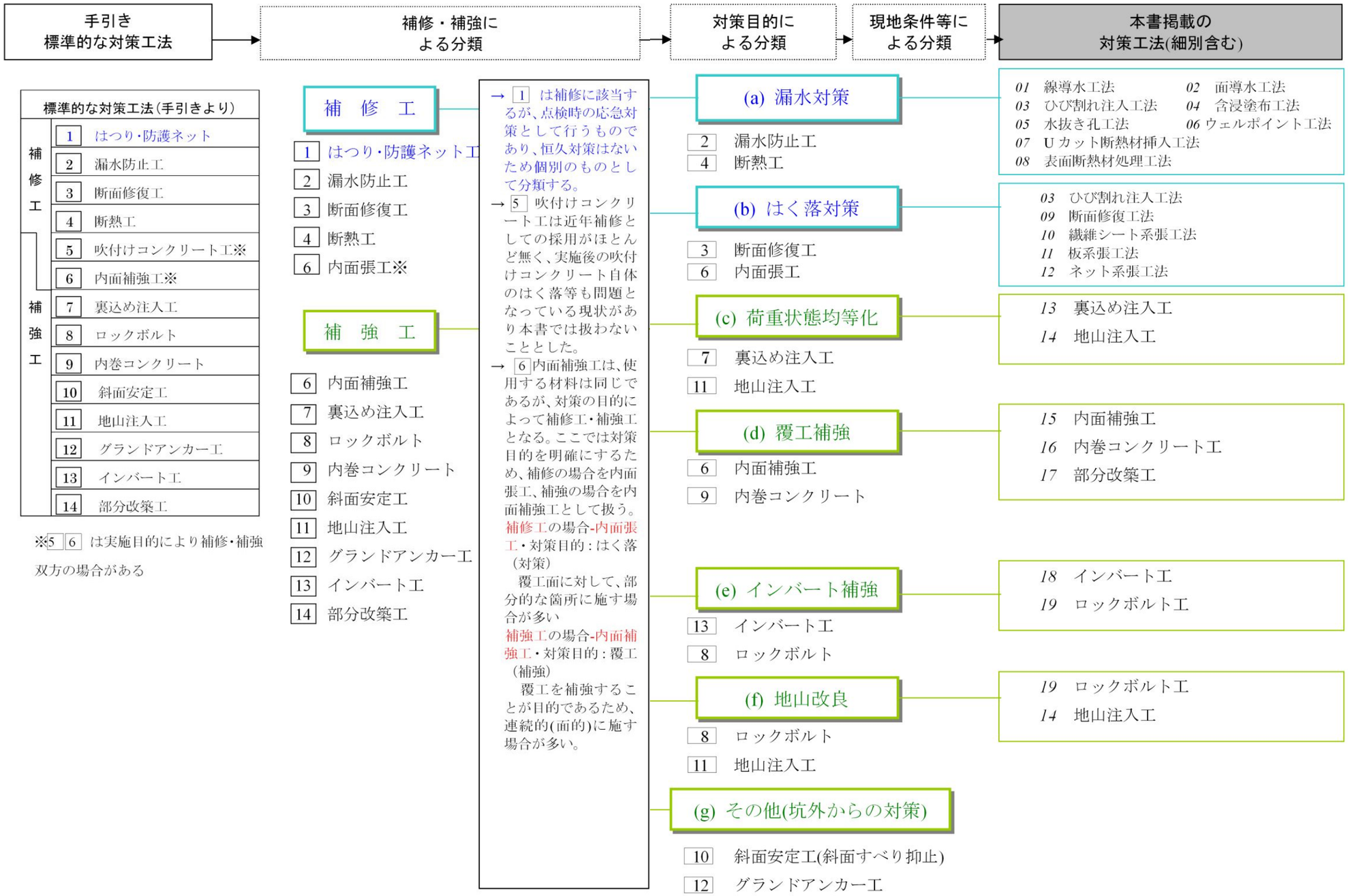

図 8-2 標準的な対策工法の体系

対策工法の事例収集を行った．以下に対策工法の収集結果の抜粋を示す．

01 線導水工法

1．工法の概要

線導水工法は、覆工打継目やひび割れに沿って生じる漏水に対して、平型の樋を取付けて導水する方法と覆工面に溝切りを施し半割パイプや合成ゴム等の成形材料を取付けて導水路を確保する方法がある。

寒冷地での漏水に伴う氷結による排水詰り、つらら等の凍害対策として断熱性のあるゴムの使用や樋の中に断熱材を設置することがある。

□漏水対策　の分類

- ・導水工
  - 目地部からの漏水がある
    - 線導水工法
      - 溝切工法
      - 導水樋設置工法
  - ひび割れ・目地部からの漏水が面状で広範囲に及んでいる
    - 面導水工法
      - 防水板工法
      - 防水シート工法
- ・止水工
  - ひび割れ注入工法
  - 含浸塗布工法
- ・水位低下工
  - 水抜き孔工法
  - ウェルポイント工法

□工法・材料選定のポイント

☞ 漏水個所（目地部・ひびわれ）、漏水範囲および漏水量
☞ 内空断面の余裕はあるか
☞ 凍結は考慮するべきか
☞ 耐久性のある材料を用いるか
☞ 遊離石灰、土砂流出など目詰まり要因はないか
☞ 導水箇所は曲線部か、直線部か

※漏水は放置しておくと、覆工材料の劣化につながる場合がある

2．施工写真（施工順序）（溝切工法　B4）

設置箇所位置出し → コンクリート切断 → 取付け面整形 コンクリートはつり → 側溝面清掃 → 接着剤塗布工 導水ゴム設置工 → プライマー塗布 → 外装材仕上げ → 出来形等確認 → 完　了

①線導水位置出し

②コンクリート切断

③はつり

④清掃

⑤導水ゴム取付

⑥プライマー塗布

⑦エポキシパテ充填

⑧出来形確認

⑨ゴム設置確認

⑩線導水完了

第 9 章 今後の課題

9-1　これまでの成果

(1)　走行型レーザ計測について

1) トンネル断面の変形モードの把握，壁面形状の計測，変位量

・変形モードの把握は，十分に実用レベルである．

・壁面形状，変形量の把握は，MIMM に登載している 50 万点/秒のレーザでは，検出精度，再現性において，十分に実用レベルである．

・規定（出来型）断面がない場合，前回の計測を行っていない場合は，正確な変位の差分を求めることは困難である．

2) ひび割れ，目地部，補修材などの段差・浮き・剥落などの検知

・凹凸検出実験において，相対変位での検出はかなり精度が良いことがわかった．目地の段差，補修材の段差などは十分に実用レベルといえる．ただし，目標としている 10cm□の 0.5mm 程度の浮き，剥離の検出は，走行速度が速い場合など，さらなる改良の余地が必要である．

(2)　走行型画像計測について

1) トンネル壁面のひび割れ，ひび割れパターン，密度などの計測

・一般に走行型壁面画像取得器機のひび割れ検出能は，50km/h で 0.3～0.5mm と言われており，大半のトンネルでは実用レベルであるといえる．（状況によっては誤差が発生する）

・固結した煤が付着した場合や，ひび割れそのものが相当に古く，汚れのために境界が不鮮明である場合は，精度良くひび割れを検出することには課題が残されている

・相当に煤が付着している場合でも，最低限必要な，1～3mm のひび割れは，十分に検出可能である．

2) ひび割れ検出精度の検討

・画像から，ひび割れ幅は画像を拡大し画面上で判定している．

・展開図作成は，手作業（ＣＡＤ）で実施している．

・1mm 以上のひび割れは検出が可能である．

(3) 健全性評価について（図 9-1 参照）

・レーザ計測と画像計測の重ね併せにより，概ね損傷原因を予測することができる．

・同様に外力による影響かそうでない原因かを予測することができる．

・変状位置を正確に捉えられることから，客観的な評価が可能となる．

・新しい変状をより正確に捉えることが可能となる．

9-2 今後の課題及び展望

(1) ひび割れ検出精度の検討

・ひび割れ幅の精度を上げるための補足的な手法（ゲージ，目視との連携等）を確立する必要がある．

・画像の貼合わせやひび割れの自動抽出技術を確立する必要がある．

（ひび割れ判定や寸法を極力自動で行うことにより業務の効率化とコスト縮減を目指す）

(2) 走行型計測技術による点検法の検討

・既往の点検に対して，走行型計測技術を活用する要求が高いのは，完成直後に初期データを計測しておくことであるため，遠望目視の代替として活用し近接打音箇所を絞り込む必要がある．

・画像，変形モードなどから近接打音箇所をいかに適切に選定するかについての検討が必要である．

（極力従来の打音検査や目視確認数量を減らすことにより，コスト縮減を目指す）

(3) 走行型計測技術による健全性評価に関して

・走行型計測手法による新しい健全性評価手法を確立する必要がある．（マニュアル化）

・走行型計測技術による健全性評価手法と，関連づけされる継続的なモニタリング方法や調査方法を選定するための基準や枠組みを検討する必要がある．（マニュアル化）

・走行型計測技術による健全性評価手法より，対策工法を選定するための基準や枠組みを検討する必要がある．（マニュアル化）

・走行型計測技術による健全性評価手法より，継続的なモニタリングや調査方法を選定するための基準や枠組みを検討する必要がある．（マニュアル化）

・それぞれのデータが，逸散しないように，実際にデータを現場で活用できるようなデータベースシステムの検討が必要である．

・これまでの点検にデータを保管していると思われるが，過去の点検記録を瞬時に検索し，客観的なデータを確実に保管していく枠組みを考える必要がある．

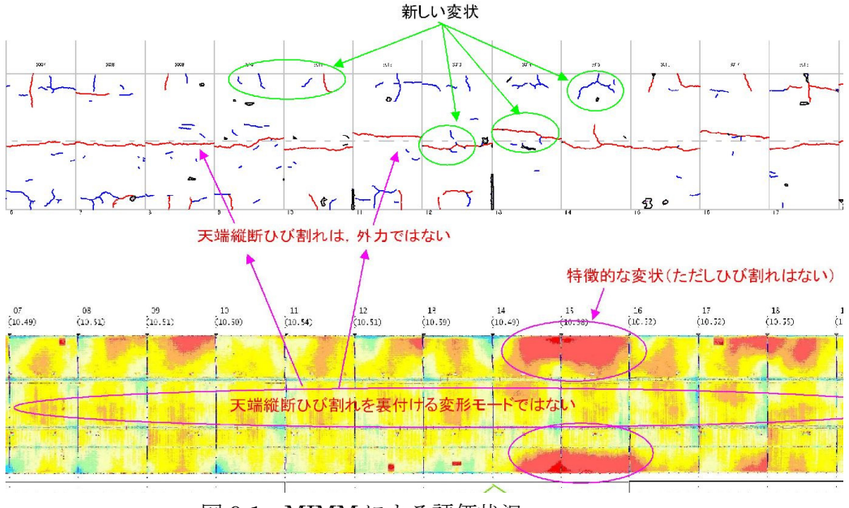

図 9-1　MIMM による評価状況