

トンネル点検支援技術の高度化に 関する研究

【高度なトンネル点検支援技術
運用マニュアル(案)】



令和3年3月

新都市社会技術融合創造研究会

■参考資料（研究成果）の位置づけ

新都市社会技術融合創造研究会では、社会資本の整備、維持・管理に関わる産・学・官の連携・協力による新しい技術の研究、普及等に関する事業を行い、もって都市再生と地域連携による経済活力の回復に貢献し、国民生活の質の向上、安全で安心できる暮らしの確保、環境の保全・創造に寄与することを目的とし、研究をしています。

そのなかで、技術基準に定められた図書等を補完するものとして、本研究会での調査・研究活動を通じて得られた成果の一部を取りまとめ、公開しております。

現地条件や各管理者のご判断により、参考資料として、ご活用頂けると幸いです。

新都市社会技術融合創造研究会

■研究概要

①研究プロジェクト名

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

②研究期間

平成 30 年 7 月～令和 3 年 3 月

③プロジェクトリーダー（所属・役職は研究当時）

石川 貴一郎（日本工業大学 基幹工学部 准教授）

④プロジェクトの概要

道路トンネル点検は、厳しい環境条件の中で、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、適任者の確保等が課題となっている。本研究は、合理的かつ効率的に定期点検（点検作業～調書作成～健全性診断）を実施するため、点検支援技術を高度化（得られたデータに対する適正活用や AI 技術による支援等）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。

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るとされ、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、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に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において十分に可能であることを意味し、その範疇に人力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ない、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。

本検討 12 章では、点検支援技術について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。

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、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「ひびみつけ」	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)	○	
	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	パシフィックコンサル	○	○

	ム MIMM-R (ミーム・アール) / MIMM (ミーム)	タンツ(株)/計測検査(株)		
	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)三井 E&S マシナリー、(株)トノックス	○	
	近赤外線画像撮影による点検技術	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第 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通りである。

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。

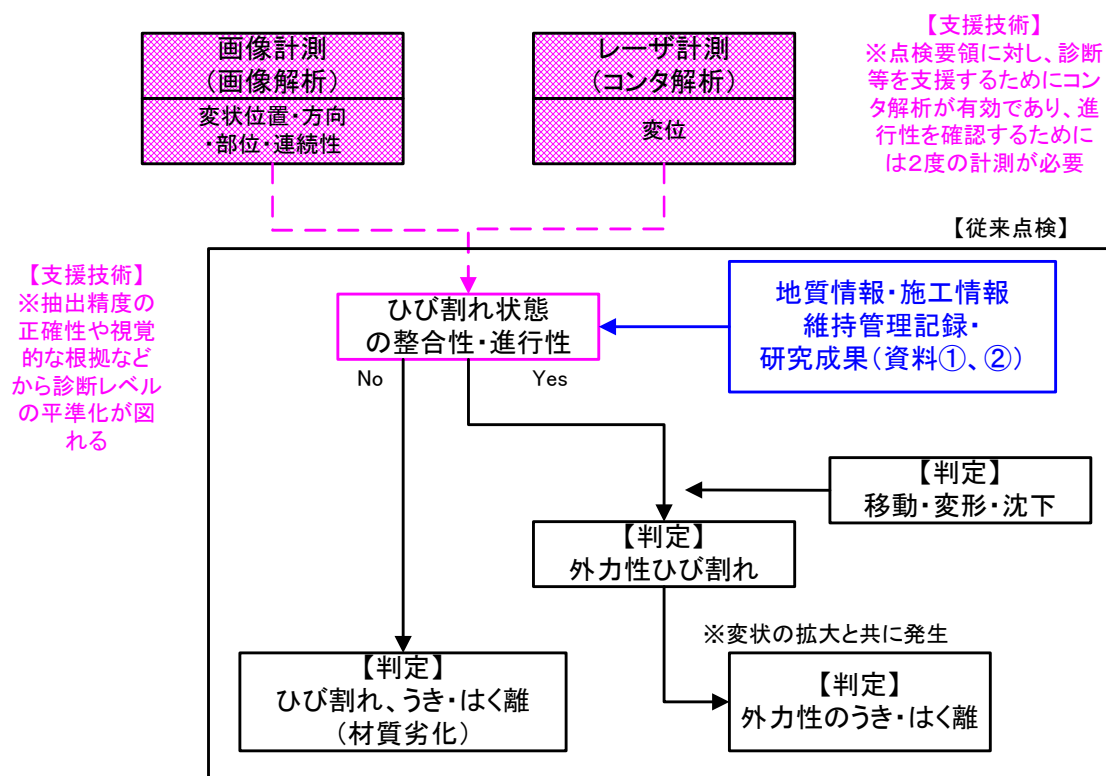


図 1. 外力性変状とひび割れ、うち・はく離への支援技術活用フロー

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（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

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(3～6章)	対策区分判定・診断(9章)	
①圧さ・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※ ³⁾ 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※ ³⁾ 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。

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。

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、現場状況に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

また、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。

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 インバート	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により被災した場合には、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画像計測を行うことが望ましい。

地震や地すべり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)	○	
	レーザ打音検査装置	(株)フォトンラボ	○	
	天秤方式移動型レーダ探査技術	(株)ウォールナット	○	
	打音検査ユニット	東急建設(株)	○	
	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)	○	○

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第6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通りである。

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 (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
電磁波探査	〃	〃	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	判定無し	〃

※) 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第6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 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(3～6章)	対策区分判定・診断(9章)	
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、漏水箇所等のひび割れの有無	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※ ³⁾ 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※ ³⁾ 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す錆の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、側水)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、側水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。

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。

施工段階で駿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叩き点検を実施することが一般的な点検方法となる。叩き点検では、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計測を行うことで、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、レーダ計測データを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により被災した場合には、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、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)、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)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)	○	
	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第 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通りである。

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、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）を採り入れた診断方法は以下のようなになる。

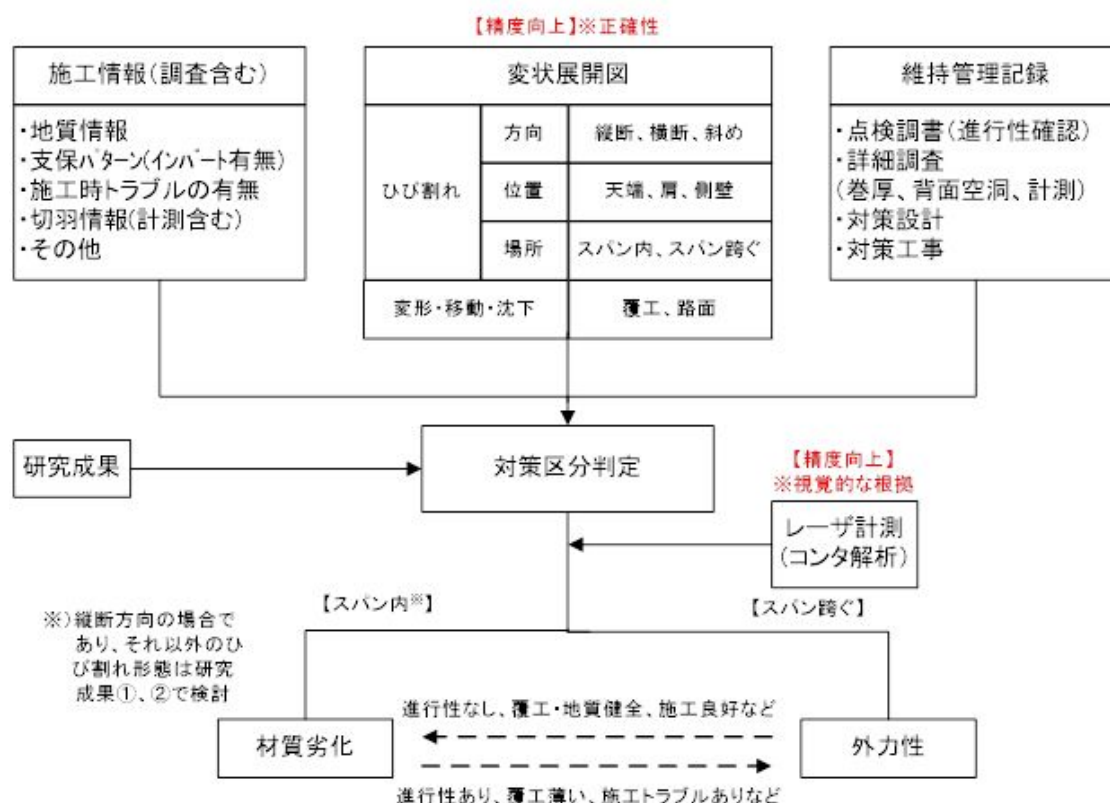


図 2. 外力性変状とひび割れ、うち・はく離への支援技術活用フロー

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 (9 章)
①圧ざ・ひび割れ (外力)	外力性判定	計測・モニタリング	○
	ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	○
	微細ひび割れ	画像計測	—
	遊離石灰・漏水	画像計測	—
②うき・はく離 (材質劣化)	うき・はく離	非破壊検査	△
		計測・モニタリング	△
	ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	○～△
	ジャンカ、はく離、かけ変色、劣化、漏水	画像計測	—
③変形、移動、沈下	変形速度	計測・モニタリング	○
④鋼材腐食、鉄筋腐食	腐食面積	画像計測	○
	断面欠損	非破壊検査	△
⑤巻厚不足、背面空洞	覆工巻厚	非破壊検査	△
	圧縮強度	—	×
	背面空洞深さ	非破壊検査	△
⑥漏水	漏水、遊離石灰、つらら、側水	画像計測	○
	漏水量の判定	—	×
	滞水、土砂流出、凍結	画像計測	△
⑦附属物	異常の有無	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(3～6章)	対策区分判定・診断(9章)	
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※ ³⁾ 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※ ³⁾ 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、側水)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、側水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、本研究第4章、5章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。

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により被災した場合には、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 の適用

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、現在は人力点検の結果として、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拓げるものである。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。

3-3: 個別分野①先進的なインフラ点検支援技術等の利用

□-ロボティクス等による点検作業効率化

調査・測量から維持管理・更新までの全てのプロセスでICT等を活用する「i-Construction」の取組の一環として、ロボット等の先進的なインフラ点検支援技術等の試行を進める。



図3. i-constructionによる先進的なインフラ点検支援技術の利用

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
- 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
- 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



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

前項を踏まえ、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

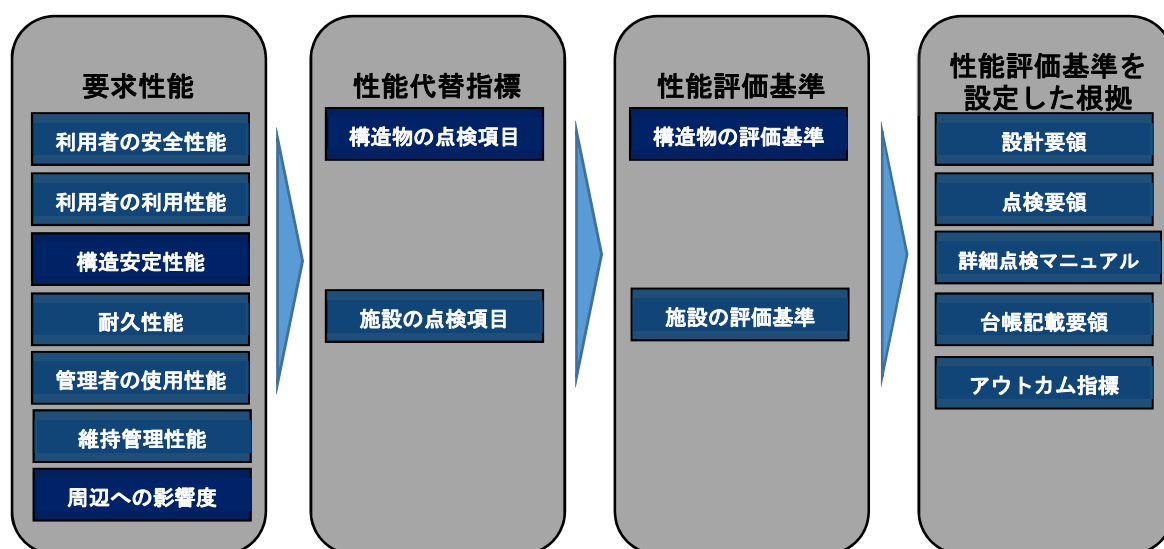


図 11.4.1 道路トンネルの要求性能からマニュアル類への要求項目

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いて、表 11.4.1 のとおりである。

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、車輛の種類（登坂車線時）、最少曲線半径、曲線長、緩急曲線長、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
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浮き、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
	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（2011）に野村らが加筆

11.4.2 さまざまな支援技術への活用案

前項を踏まえ、点検支援技術の分類にしたがい、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プロセスに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、定期点検は契約プロセスに基づき、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 11.4.2 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詳細化したことを受けて、最適化という観点が脱落しつつあるのは残念で、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確保の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、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。

3-3:個別分野①先進的なインフラ点検支援技術等の利用

国土交通省

□-ロボティクス等による点検作業効率化

調査・測量から維持管理・更新までの全てのプロセスでICT等を活用する「i-Construction」の取組の一環として、ロボット等の先進的なインフラ点検支援技術等の試行を進める。



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）

11.5 まとめ

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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した

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

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きコスト縮減効果について、ユースケースに応じて報告する。

12.1.2 比較条件、ユースケース

近畿6トンネルにおける比較条件は表12.1.2のとおりとなっている、このうち、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。画像のみ、画像とレーザの場合のユースケースについては、表12.1.2の条件で試算したものである。

点検日数については、既往点検を参考にして表12.1.1のとおりとした。

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、レーダによるすくりクリーニング効果と点検日数減等によるものである。

走行型解析結果の人件費（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 点検日数

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 1km以上 合計	5 11 16	42		

※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

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 12.1.2 比較条件

項目	試験概要	点検人工	点検面積	点検日数
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
支援技術 (画像撮影)	・業務実績を考慮 ・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えて、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結果を期待して30%で設定。 ・和知トンネルは監視点後のため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。 ・点検箇所には概ね差異ない想定し、支援技術(画像撮影)と同様の設定とした。	10日 ・とがやまTN、三谷TNを合計6日と想定
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 ・業務実績より算出	・画像撮影により効果と評価。 ・画像撮影により効果と評価。	・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後のため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。	9日 ・とがやまTN、三谷TNを合計5日と想定
支援技術 (画像撮影+変形モード+レーダ解析)		・画像撮影により効果と評価。		8日 ・業務実績より ・とがやまTN、三谷TNを合計4日で実施

表 1.3 点検作業内容項目別の構成比率

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) H31.2より

路線	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	740	1,195	0.08
国道9号	豊岡	新和田山トンネル	点検	330	6,022	0.14
国道9号	豊岡	城山トンネル	点検	38	841	0.55
国道483号	豊岡	とがやまトンネル	点検	1,420	29,652	0.14
国道483号	豊岡	三谷トンネル	点検	2,810	59,249	0.14
国道24号	奈良	釜窪東トンネル	点検	389	8,376	0.19
		合計		5,727	105,335	1km未満 1km以上 合計

⇒点検面積100%

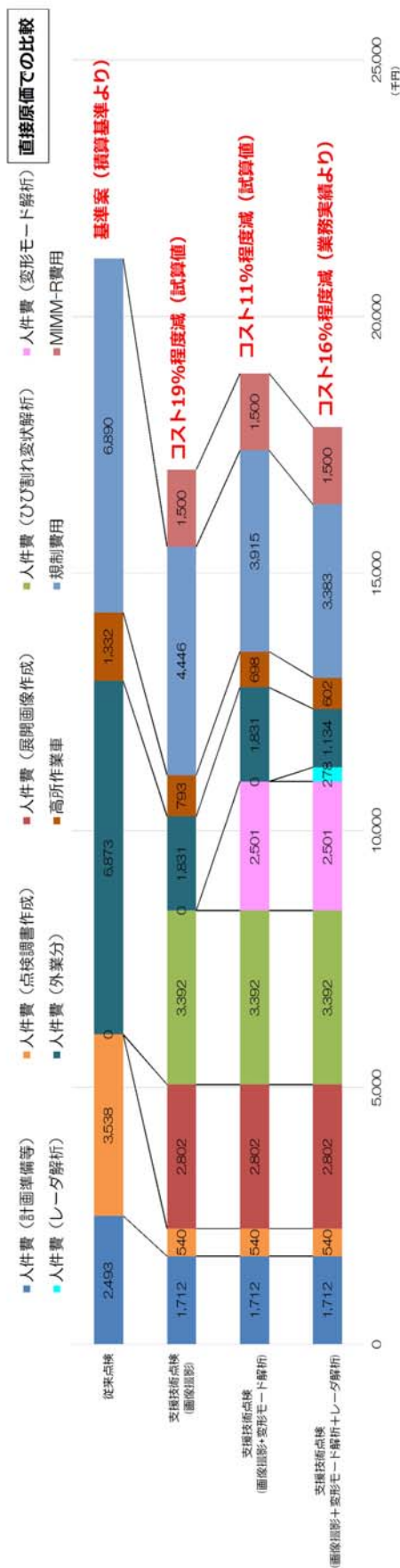
⇒点検面積100%

・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%

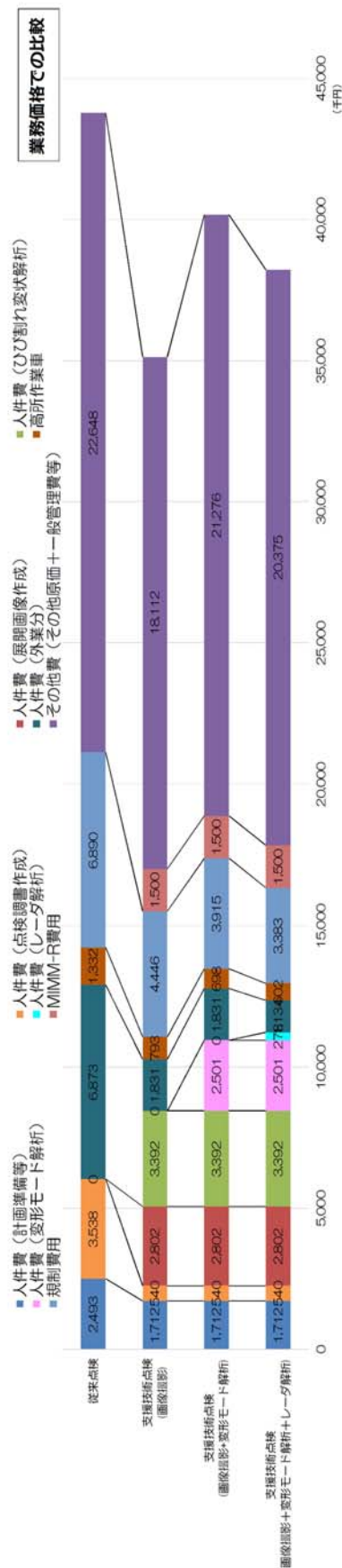
※1：ひび割れ密度は、ひび割れ幅0.3mm以上のひび割れが対象

※2：今回点検時の作業班と同様で想定

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



6トンネル、総延長5,727mにおけるコスト比較



6トンネル、総延長5,727mにおけるコスト比較

12.1.4 過去に実施した事例

走行型計測技術(MIMM-R)の活用についてのコスト試算結果を以下に示す。

(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)

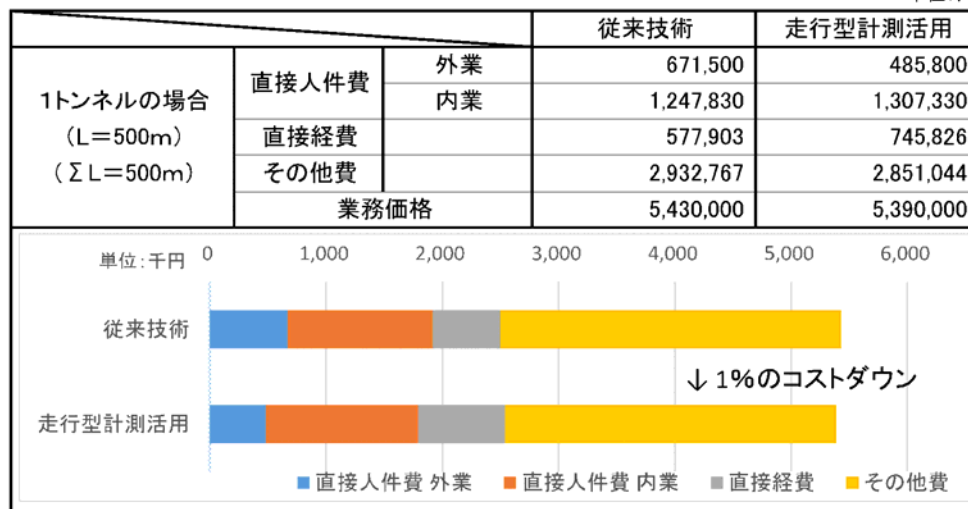
【試算条件】

- 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ため。
- ③ 覆工壁面のひび割れ密度 c は、 $0.1 < c \leq 0.2$ とする。

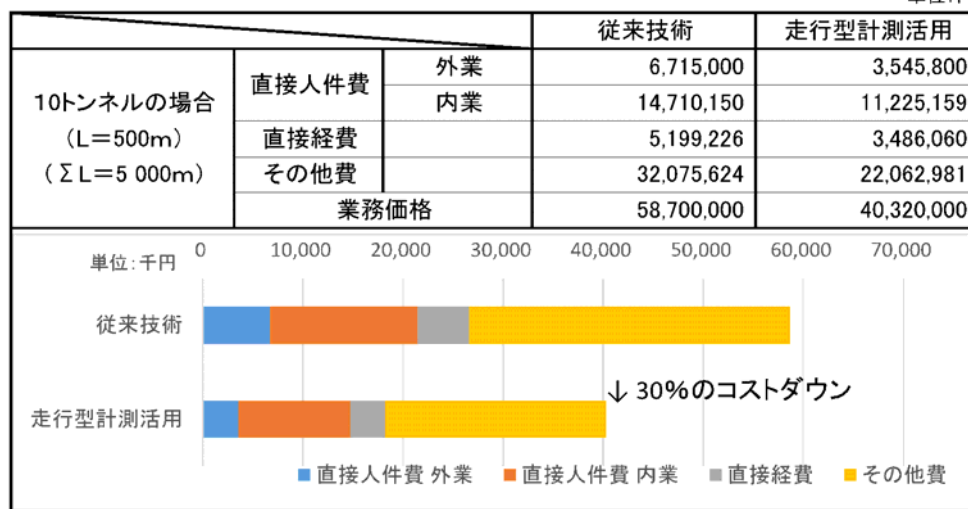
【走行型計測活用による効率化】

- 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ものとした。(SIPによる技術開発現場検証実績より)
- 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ものとした。

単位:円



単位:円



12.2 効率化評価

12.2.1 概要

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きコスト縮減効果について、ユースケースに応じて報告する。

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示す。

下記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の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、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と考えられる。

表 12.2.1 点検日数の比較（前回点検（過年度）と今回点検）

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。

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	7	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	7	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結果は下表のとおりである。

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。

※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。

- 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

- 点検数量

トンネル本数、延長、連続・分散

- 新設トンネル or 既設トンネル

初回点検 or 2 回目以降、初期不良除去済み、打音検査数量、補修数量

表-1 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暫定歩掛りによる点検日数(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

$$\text{低減率 (\%)} = 1 - \frac{\text{補正点検日数}}{\text{暫定歩掛りによる点検日数}}$$

表-2 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)	暫定歩掛りによる点検日数(日)	①暫定歩掛りによる点検員数(人)	②実績による点検員数(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%

$$\text{低減率 (\%)} = 1 - \frac{\text{補正点検員数}}{\text{暫定歩掛りによる点検員数}}$$

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。

研究により期待される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
⇒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 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
⇒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

研究成果の要旨として、主要な効果を下記にまとめる。

- 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）の効率化を図る。
- ③ 現地での記録は修正作業となり、時間短縮を図る。
- ④ 点検表作成作業の効率化
- ⑤ 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）による効率化を図る。
- ⑥ 変状展開図の高品質化（変状位置精度の正確性）
- ⑦ 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
- ⑧ 複数技術者による点検による品質向上
- ⑨ 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

13.2 現況の支援レベルの整理

本報告書で取り纏めた各章のまとめから抜粋し、現況の支援レベルの整理結果を述べる。

1) 点検支援

(1) 画像技術

- ① 変状抽出の評価
 - 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。
 - （但し、矢板工法において、幅 1 mm 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）
 - 漏水、遊離石灰、はく落、目地、変色を把握できる。

- 付属物や補修工において、範囲や形状を把握できる。
 - 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。
 - 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
- うきの打音異常は、検出できない。
 - ひび割れは、外力か、材質劣化によるものか、判断ができない。
(但し、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)
 - 覆工の段差箇所は検出できない。
 - 漏水の量は検出できない。
 - 巻厚不足、背面空洞は検出できない。
- ③ 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。
- 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。
 - トンネル内において霜，霧(モヤ，キリ)が発生する場合，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。
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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。
 - 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

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

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、もう一步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)

- 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
- 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

② 今後の課題点(レーダに関して)

- 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、小さなうきの場合はとれない
- 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しない
- 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)
- 空洞レーダは、45cm が限界であるが、30 cm 未満巻厚の場合、背面空洞を検出できる。空洞が 30 cm 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(レーダに関して)

- 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。ただし、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。

2) 診断支援

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ことなることもあり、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るため、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、変状の可能性の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。

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を行った。事前に計測し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 程度となる。

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。

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 13.1.1 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）※コンタ一解析活用	専門技術が必要	—	単独評価と同等
圧ざ・ひび割れ（材質劣化）☆	画像計測	代替 ※コンタ一解析活用	専門技術が必要	—	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）※コンタ一解析活用	専門技術が必要 他の計測との比較必要	—	単独評価と同等
鋼材腐食☆	画像計測	代替	—	—	—
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 13.1.2 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 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

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。

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。

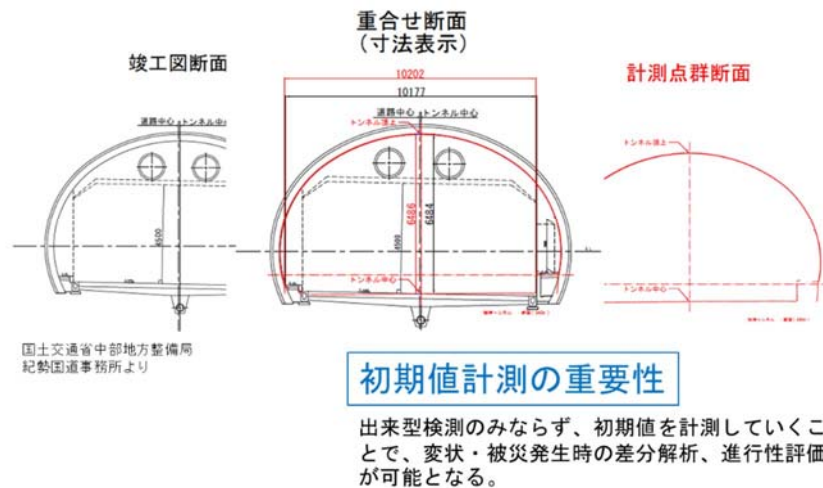


図 13.3.1 初期値計測の重要性

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

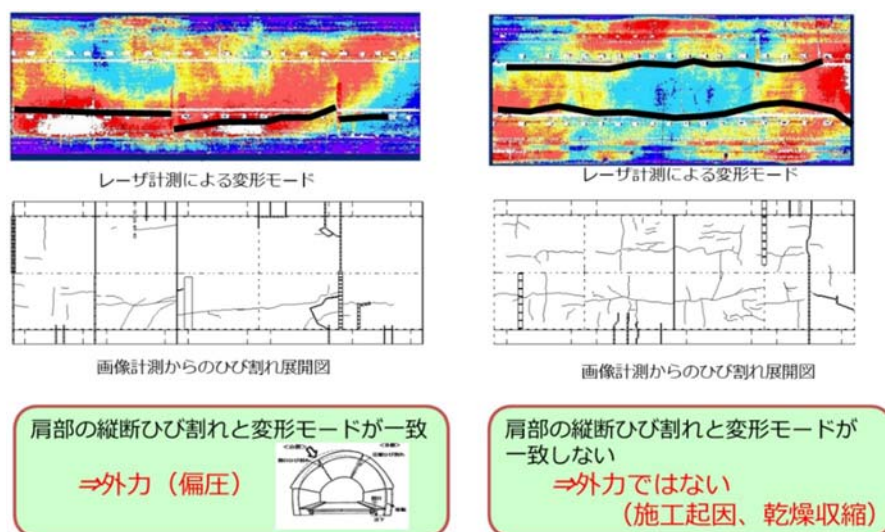


図 13.3.2 外力性診断の事例

～補正後の解析結果～

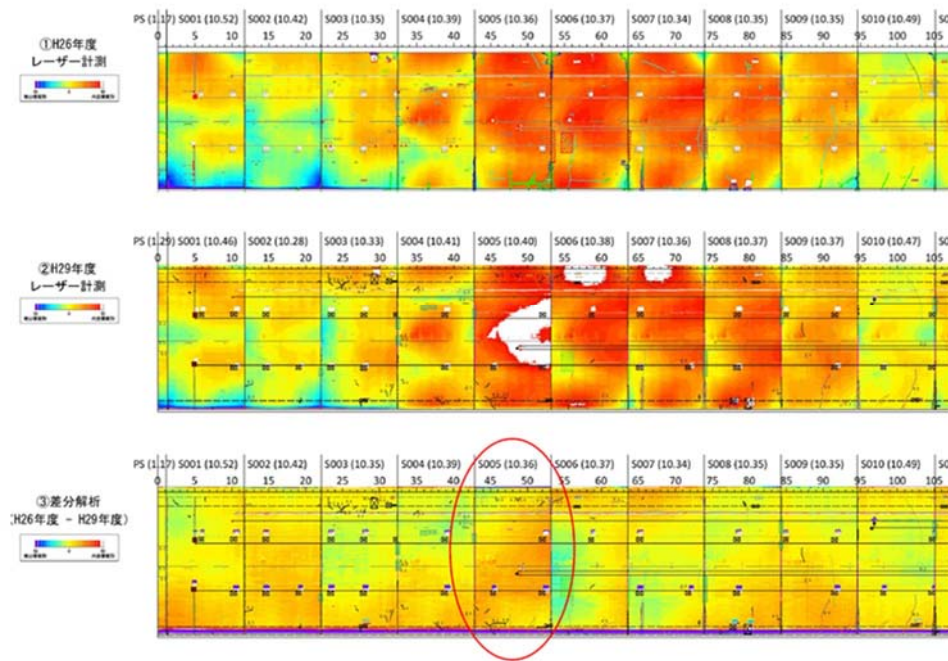


図 13.3.3 進行性差分解析

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、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。

【ロボット化支援技術としての位置づけ】人とロボットのベストミックス

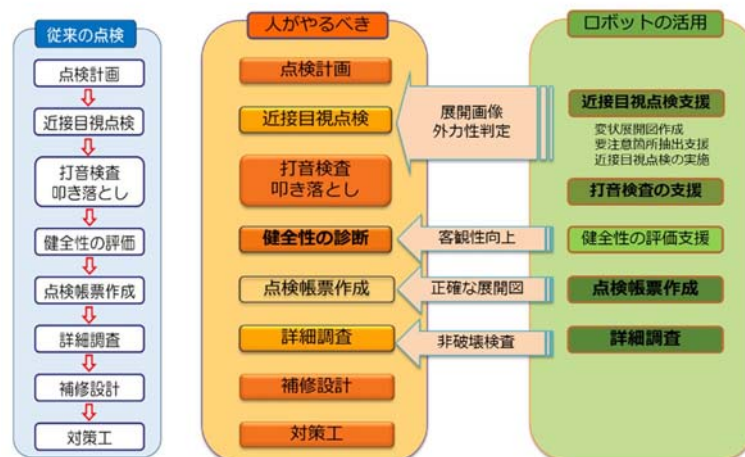


図 13.3.4 人とロボットのベストミックス

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合わせて診断を行うことが重要である。



図 13.3.5 技術の組合せ

13.4 BIM/CIM、i-Construction への活用

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 13.6 i-Construction への活用

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。

③ 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。

④ 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 新技術活用の留意点

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) 適した対象

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りクワイア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思われる。

ガイドラインは、定期点検業務の中で受発注者が使用する技術を確認するプロセス等を例示。
性能カタログは、国が定めた技術の性能値を開発者に求め、カタログ形式でとりまとめたもので、
受発注者が新技術活用を検討する場合に参考とすることができる。

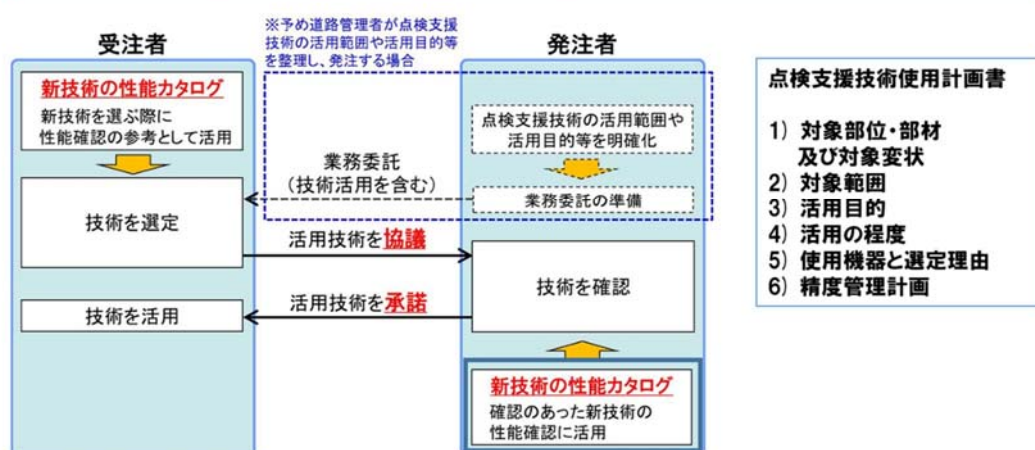


図-1 点検支援新技術活用の流れ

図 13.5.1 新技術活用ガイドライン

2) 次期点検要領

現行の2巡目点検要領では、下記の主旨の改訂がされた。この改訂の方向性を図13.5.2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。

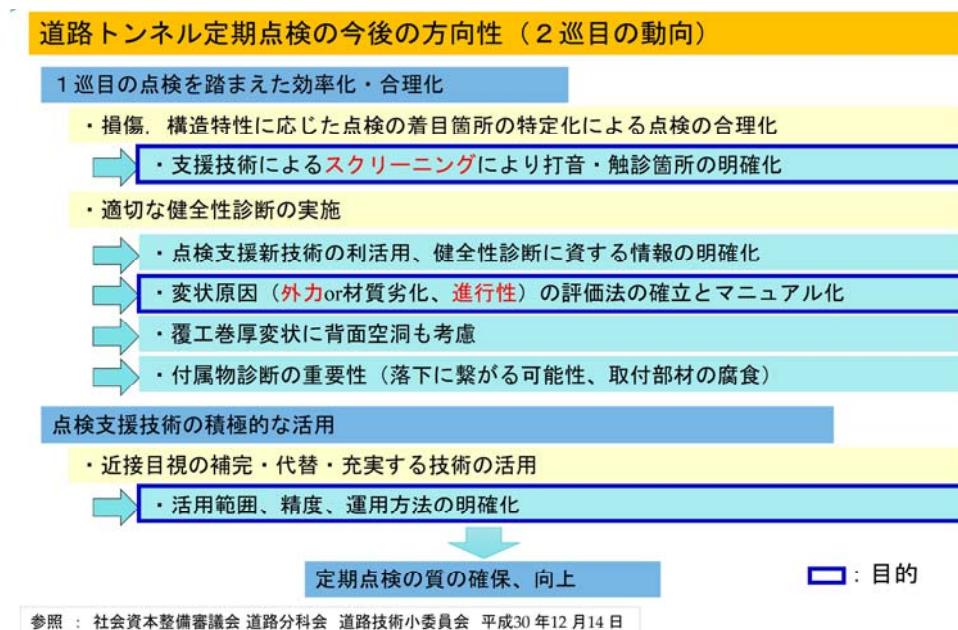


図 13.5.2 現行点検要領の骨子

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

3) L1からL4

R2年度性能カタログは、リクワイア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関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。

定期点検における新技術活用の方角性(案)

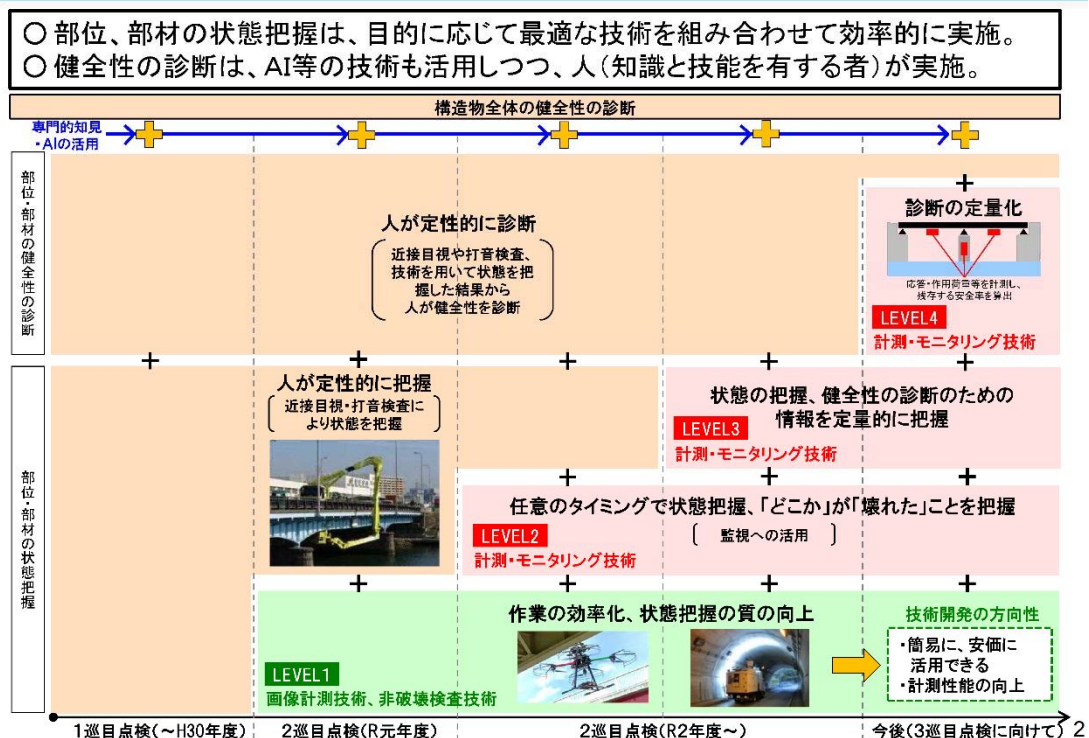


図 13.5.3 R2 性能カタログ

	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

- 利用者被害防止の観点から、トンネル覆工のはく離に至るうき・はく離を効率的かつ精度よく把握する必要がある。
- 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)

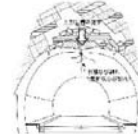
- ・ひび割れ等覆工表面の状態を把握する技術
- ・うき・はく離を把握する技術
- ・覆工厚・背面空洞を把握する技術
- ・覆工の変形を計測する技術



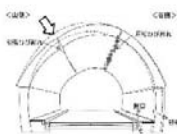
▲覆工表面のひび割れ



▲打抜き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



▲覆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

- 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



※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)

新技術の例



作業効率化
低コスト化

7

図 13.5.4 リクワイヤメント例

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
- ⑩ 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
- ⑪ 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）
- ⑫ 日常点検で要注意箇所の変化を検知するシステム
- ⑬ 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 13.5.5 に示す

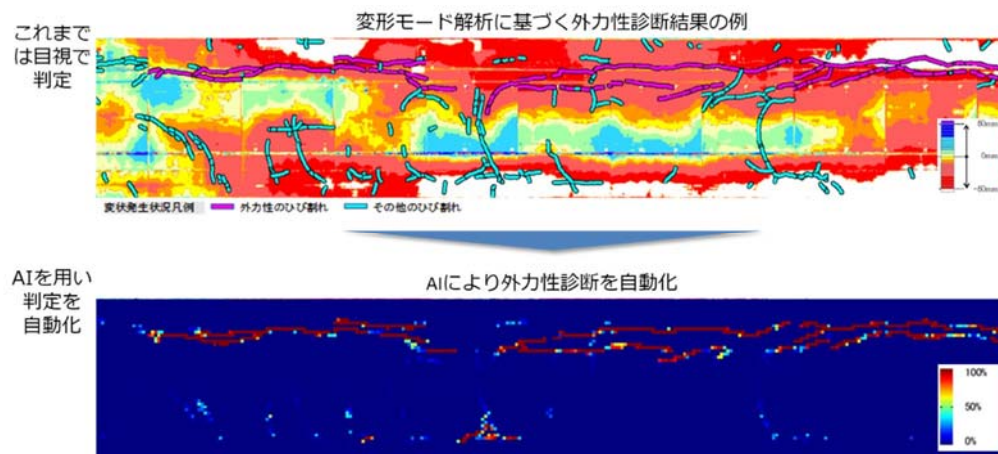


図 13.5.5 外力性診断 AI の事例

(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 13.11 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、サイバー空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。

• 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
(Society5.0)

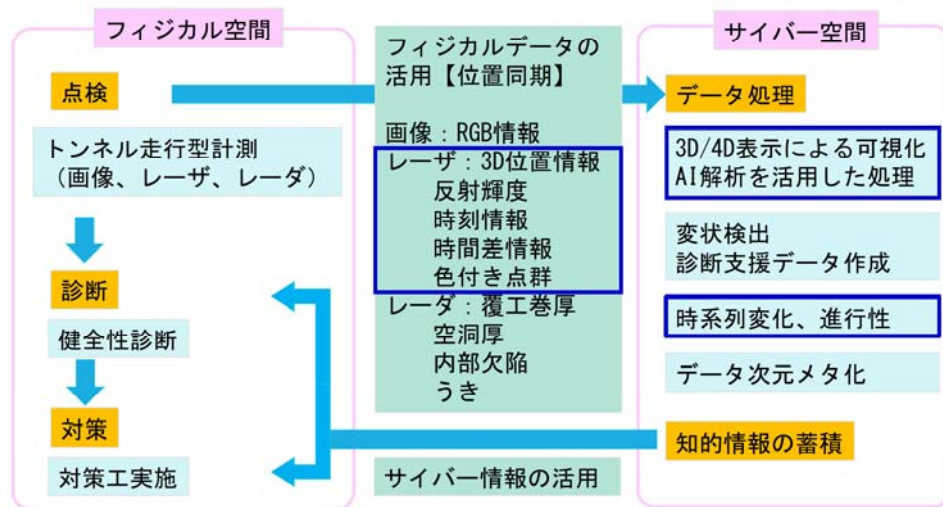


図 13.5.6 デジタルツイン

5) 自治体の支援

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。新型コロナウイ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自治体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。