

走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM-R (ミーム・アール)

画像・レーザー・レーダー技術による点検・調査・診断支援技術

山 本 秀 樹・重 田 佳 幸・安 田 亨

走行型高速 3D トンネル点検システム (MIMM-R) は、トンネル用に開発された走行型画像計測 (MIS: Mobile Imaging Technology System), 走行型レーザー計測 (MMS: Mobile Mapping System), 走行型レーダー計測 (MRS: Mobile Rader System) の一体型計測システムである。70 km/h 程度で走行しながら計測できるため、交通規制を必要としない効率的な点検・調査を行うことが可能である。

目視主体による点検と比較して正確かつ客観的なデータが得られ、画像計測による損傷度 (変状) 評価技術, レーザー計測を用いたトンネル変形モード解析による外力性変状評価技術, レーダー計測による覆工巻厚・背面空洞探査技術を用いることで、人力による定期点検や詳細調査の支援および代替技術として活用することが可能である。

キーワード: トンネル点検, 走行型計測, 画像処理, 3D マッピング, 巻厚・空洞探査

1. はじめに

平成 26 年 6 月に道路法の改定により道路トンネル定期点検要領が制定され、5 年に 1 回の間隔で近接目視により定期点検を実施することが義務化された。しかし、多くの地方自治体においては 5 年毎にトンネル定期点検を実施することは予算上の制約が厳しく、また対象構造物に対する相応の技術を有する点検技術者や調査技術者の不足も懸念されている。

また、従来の点検技術においては、①スケッチによる変状の記録, ②点検者の主観による打音判定 (うき, 剥離判定), ③暗所で狭隘での作業であるなどの理由により、安全性や客観性に乏しく、見落としの発生や変状の進行性を適正に評価できないなどの課題が指摘されている。

上述の課題に対する解決策として、MMS (共同開発者: 三菱電機株) と MIS (共同開発者: 計測検査株) および MRS (共同開発者: 株ウォールナット) の 3 つのロボット化技術を搭載した走行型トンネル点検車「MIMM-R (ミーム・アール)」を開発した。また、同時に国土交通省近畿地方整備局の産官学連携プロジェクト「新都市社会技術融合創造研究会: プロジェクトリーダー大西有三京都大学名誉教授」が、走行型計測技術によるトンネル健全性評価の実用化を検証¹⁾し、その後多数のトンネルにおける点検調査に活用されている。

また、本システムは、平成 27 年度に国土交通省にて実施された「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入に向けた現場検証」において、トンネルの覆工、坑門等に発生した変状 (ひび割れ, うき, はく離, はく落, 変形, 漏水など) の全てまたは一部に対して、近接目視の支援ができる技術・システムとしての検証を受け、「試行的導入に向けた検証を推奨する」との評価を受けた²⁾。

さらには SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) インフラ維持管理・更新・マネジメント技術において「高速走行型非接触レーダーによるトンネル覆工の内部欠陥点検技術と統合型診断システムの開発」というテーマで技術開発を進め、打音検査の支援としての内部欠陥用レーダー開発についても良好な成果を上げているところである。

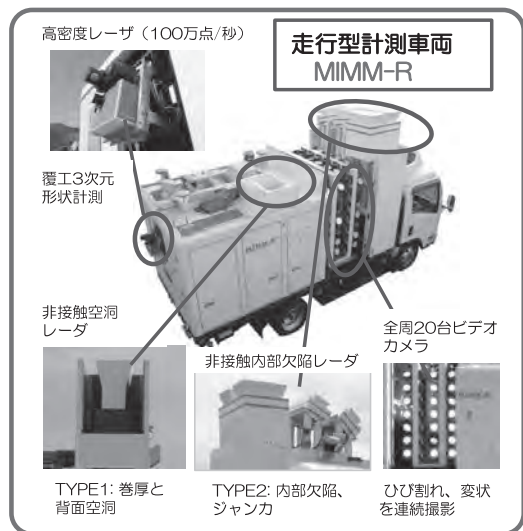
これらの走行型画像計測技術, 走行型レーザー計測技術および走行型レーダー計測技術を有する走行型高速 3D 計測システムによるロボット技術を活用し、これまで行われていた目視点検を主体とした人力による点検と融合させることにより、トンネル点検の効率化・高精度・低コスト化を図ることが可能となる。

本稿では、走行型高速 3D 計測システムの機能について報告するとともに、トンネル定期点検の支援技術としての活用方法, 診断方法について提案するものである。

2. 走行型 3D 計測システムの技術概要

走行型計測車両（MIMM-R）は、交通規制を必要とせずに一般車と同様の速度（70 km/h まで対応可能）で走行しながら、トンネル覆工表面の画像撮影、三次元レーザ計測、電磁波レーダー探査（覆工巻厚・背面空洞調査）を行うことが可能である。

走行型計測車両（MIMM-R）の計測システムを図—1に示す。



図—1 走行型 3D 計測車両の計測システム

また、計測結果を用いて、

- ①トンネル画像計測による損傷度（変状）評価
- ②三次元レーザ計測を用いたトンネル変形モード解析による外力性変状評価
- ③レーダー計測による覆工巻厚・背面空洞評価を行うことができる。

なお、次世代社会インフラ用ロボット開発・導入に向けた現場検証では、近接目視の支援技術としての検証項目に対し「Ⅰ．試行的導入に向けた検証を推奨する」として、従来点検前にロボットによる計測を行うことにより、近接目視の効率化、作業の省力化が図れることが期待されるとして評価された。検証結果のまとめを表—1に示す。

表—1 検証結果のまとめ

変状検出	ひび割れ、漏水などを概ね正確に抽出
ひび割れ幅	0.3 mm 以上のひび割れを概ね正確に抽出
閉合ひび割れ	はく落が懸念される閉合ひび割れを検出可能
レーザ活用	外力性か乾燥収縮かの変状原因を推定可能
レーダー活用※	非接触（離隔 3 m）で覆工巻厚、背面空洞を探査可能

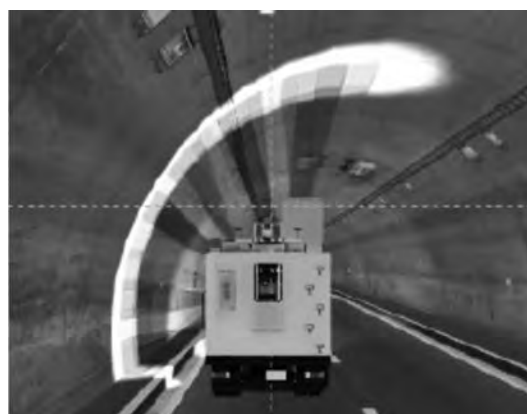
※自主的検証（国土交通省が実施した検証では評価をしていない）

3. 走行型 3D 計測システム技術の活用方法

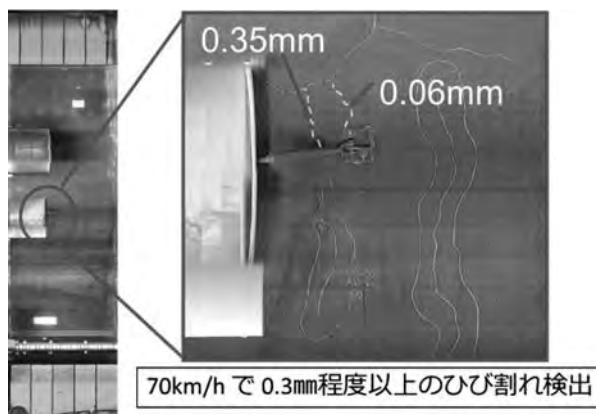
(1) トンネル画像計測による損傷度（変状）評価技術

トンネル覆工表面を画像撮影する画像計測により、覆工壁面展開画像を作成し、画像解析を行うことにより正確な位置情報を有する変状展開図を作成することができる。これにより、変状進行性の把握や変状原因を継続して管理することが可能になる。

画像計測状況イメージを図—2に、画像計測結果例を図—3に示す。



図—2 画像計測状況イメージ

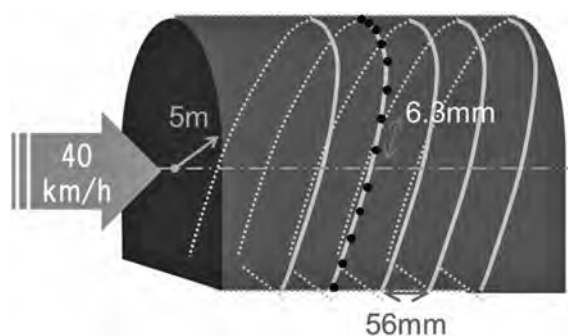


図—3 画像計測結果例

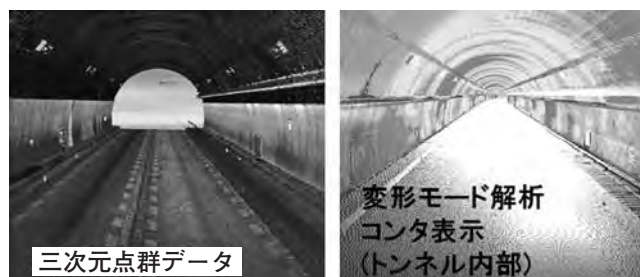
(2) 三次元レーザ計測を用いたトンネル変形モード解析による外力性変状評価技術

三次元レーザ計測では、100 万点／秒の高精度レーザスキャナにより高密度な点群データを取得することで、覆工の形状、覆工の変形（変形モード、目地・ひび割れの段差）、舗装の段差などを客観的に把握することが可能である。三次元点群データの取得密度イメージを図—4に示し、三次元データ取得状況と変形モードコンター図を図—5に示す。

三次元レーザ計測結果を用いることで、出来形断



図—4 三次元点群データの取得密度イメージ



図—5 三次元データ取得状況と変形モードコンター図

面の検証，車両限界（建築限界）に対するクリアランス量の把握，変形モードとひび割れ変状との相関性による現状原因の推定，経年変化を捉えた複数回計測の結果を用いた差分解析による変状進行性評価，地震等の災害後の被災査定などに活用することが可能である。

また，複数回の計測結果がない場合であっても計測した三次元点群を用いて行う変形モード解析では，当該トンネルの平均断面を推定し，各断面形状と比較することで各断面の変形状態を把握することができるため，施工誤差やトンネル建設後のトンネル断面変形を捉えることができる。走行型レーザー計測の三次元点群データを用いて変形モード解析を行い，覆工の変形モードをコンター図に示し，走行型画像計測から得ら

れた変状展開図と重ねたものを図—6に示す。このように変形モードとひび割れ変状を重ねて評価することで，ひび割れ発生位置と内空側への変形発生箇所が一致する場合には外力性の変状が発生しているものと評価でき，変形モードとひび割れ変状が一致しない場合には外力以外の原因（乾燥収縮等の施工要因）と評価（推定）することが可能となる。

(3) レーダー計測による覆工巻厚・背面空洞探査技術

走行型非接触レーダーにより，一般車と同様の走行速度にて覆工巻厚・背面空洞を探査することが可能である。レーダー計測イメージを図—7に示す。

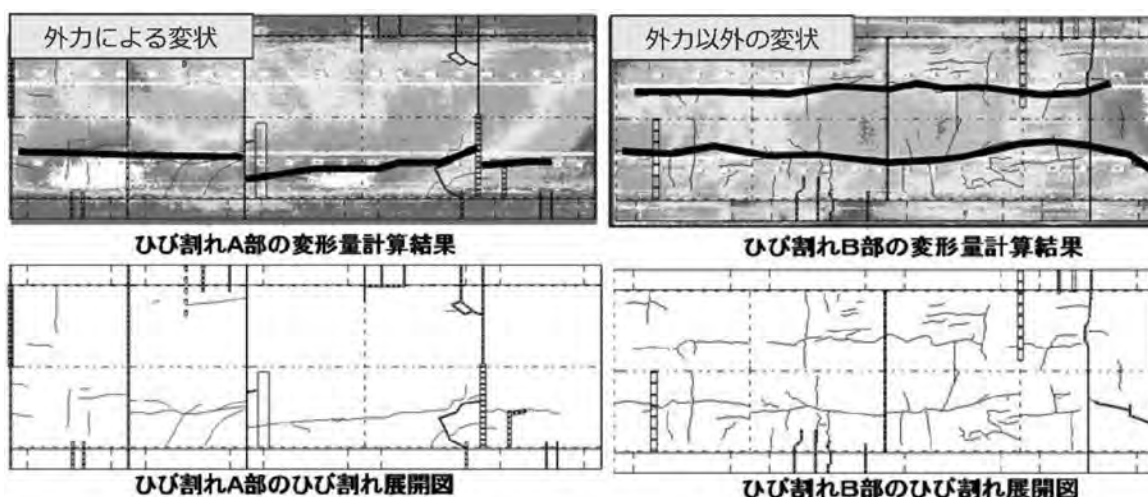
探査可能な深度は覆工巻厚で変化し，40～80 cm程度であり，覆工巻厚が不足し，しかも空洞がある危険箇所を迅速に検出することが可能である。

従来技術（接触型レーダー＋削孔調査）による調査結果との検証結果を図—8に示す。

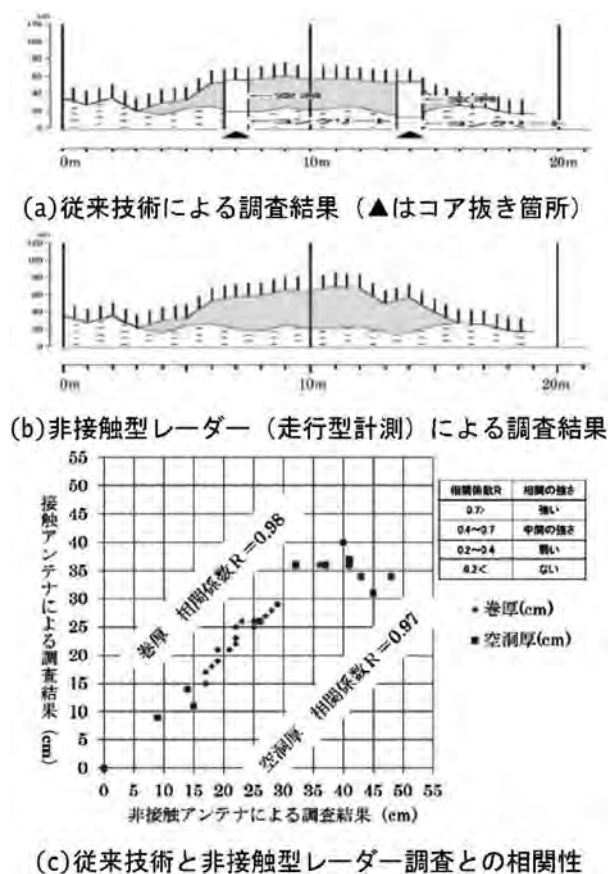
このように，覆工巻厚が薄い箇所の検出および突発性崩壊のおそれがある空洞検出については従来技術と



図—7 レーダー計測イメージ



図—6 変形モードとひび割れとの相関



図—8 走行型レーダー技術の検証結果

同程度の精度を有している。

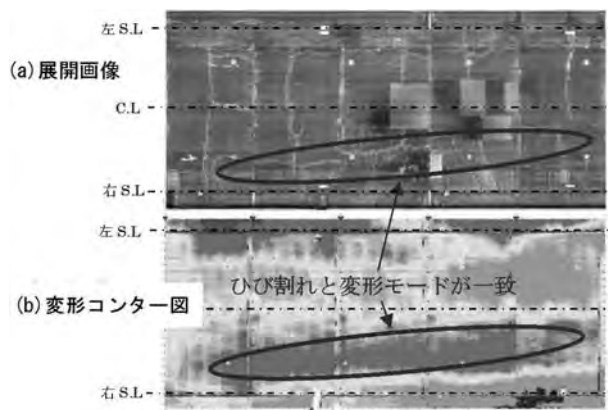
(4) 走行型 3D 計測システムの活用事例

走行型 3D 計測システムでの活用事例について、A トンネルと B トンネルの例を紹介する。

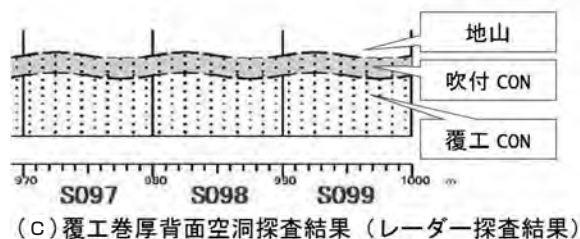
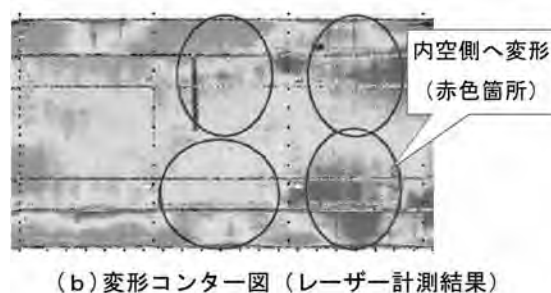
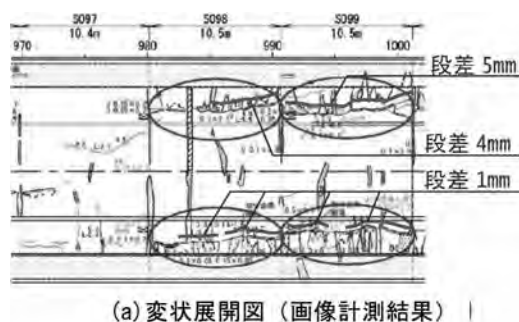
A トンネルは、塑性圧により変状し過年度に対策が実施され現在は安定した状態にあるトンネルである。図—9 に示した走行型計測により作成した展開画像と変形コンター図を見ると、トンネルの変形モードとひび割れ発生箇所が一致するため、変状原因が外力によるものと判断できる。このように複数回の計測結果がなくても、変形モード解析を行うことで変状原因を推定することが可能である。

B トンネルは、複数スパンに連続した縦断方向ひび割れがあり、かつひび割れ沿いに 1～5 mm 程度の段差が見られたトンネルである。図—10 に変状展開図（画像計測結果）、変形モード解析結果および覆工巻厚背面空洞探査（レーダー計測結果）を示す。この結果から覆工巻厚や覆工背面空洞はないものの、ひび割れ位置とトンネル内空側への変形モードの相関性が見られることから外力性の変状が発生しているものと推定される。

これらの事例に示すように、走行型計測を従来技術



図—9 A トンネルでの調査結果例



図—10 B トンネルでの調査結果例

である目視点検と組み合わせることで、目視のみの点検手法では得られなかったトンネルの変形状態や覆工巻厚不足および背面空洞の有無を定量的に把握した上での健全性評価を行うことが可能となるため、より工学的かつ効率的に変状原因を推定することができる。

4. トンネル定期点検の支援技術としての活用

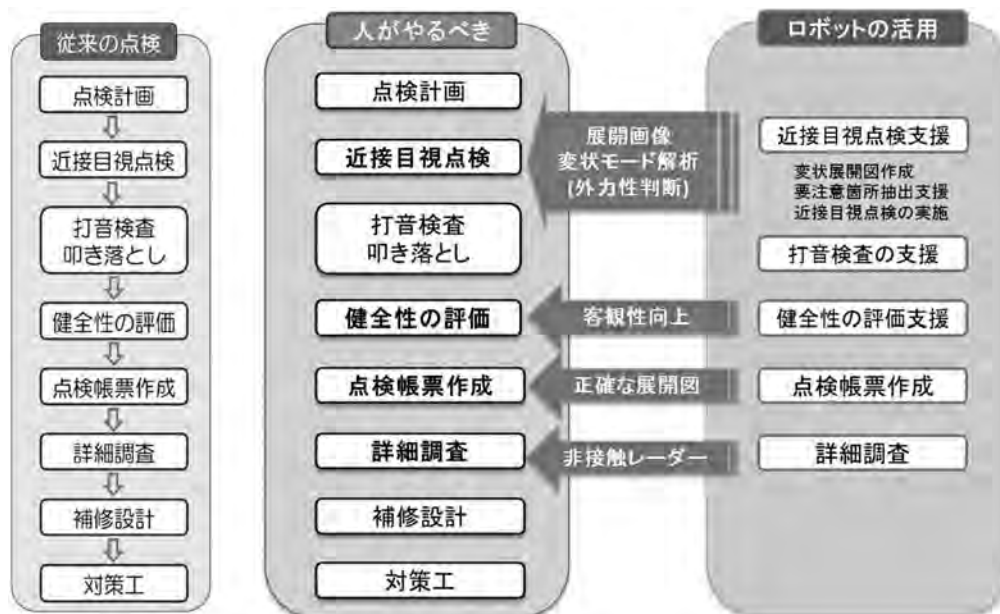
道路トンネル定期点検要領（平成 26 年 6 月制定）によれば、道路トンネルでは 5 年に 1 回の近接目視点

検を行う義務があり、近接目視・打音検査の完全な代替技術として走行型計測システムを活用することはできない。すなわち、従来の近接目視・打音検査を支援・補完することに本技術適用の意義がある。

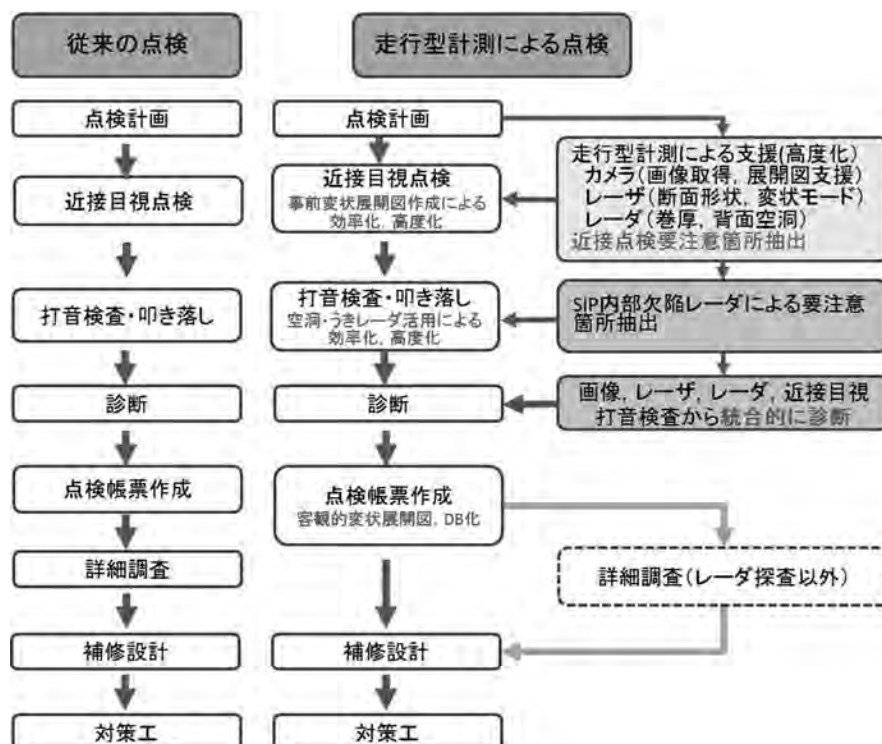
トンネルの変状状況を正確かつ客観的に記録することにおいては、本システムのようなロボット技術が人力よりも優れている。筆者らが考えるロボット化支援技術としての位置づけを図—11に示す。このようにロボットが得意な領域はロボットが支援し、人力で行

うべき内容は従来通り人力で行うという役割分担が重要であると考え。特に、最終的な打音検査や打音検査に伴う叩き落としといった即時対応措置、加えて健全度の最終判定は責任ある技術者が行うべきと考える。

このような観点からトンネル定期点検における走行型計測システムの活用方法（走行型3D計測システムを用いた維持管理手法（定期点検フロー））を図—12に示す。



図—11 ロボット化支援技術としての位置づけ



図—12 走行型3D計測システムを用いた維持管理手法（定期点検フロー）の提案

5. おわりに

以下に、走行型高速 3D 計測システムの活用効果をまとめ、将来的な展望を述べる。

- ①一般車と同様の速度（70 km/h 程度以下）で計測可能であり、走行型計測時の交通規制が不要となる（低コスト化）。
- ②覆工壁面展開画像を活用することで正確な位置情報を得ることができるため、変状展開図や点検帳票作成の支援ができる（高精度化、低コスト化）。
- ③覆工壁面展開画像により現地での目視点検前に机上にて近接目視相当の点検作業を複数の技術者に行うことができるため、点検員による品質のばらつき防止や現地作業時の点検漏れなどのミス防止を図ることが可能となる（高品質化）。
- ④現地点検前に正確な変状展開図を作成した上で現地点検（近接目視）を行うことから、現地点検作業時間の短縮を図ることが可能となる（低コスト化）。
- ⑤覆工巻厚不足箇所や背面空洞の有無、うきなどの内部欠陥箇所、覆工形状（変形モード）を把握し、ひび割れ発生状況との同調性を評価することで、トンネル構造上問題となる箇所（外力性変状箇所や突発性崩壊のおそれがある箇所）を適切に検出することが可能（高精度化）。

これまでの点検では、覆工表面の情報から人力で変状展開図を作成し、健全度判定を行ってきた。今後は、近接目視・打音検査と、画像解析技術・三次元レーダー計測技術・レーダー探査技術を総合的に融合させ、適切な判定を実施することで、トンネル点検・診断全般の効率化・省力化・低コスト化を図りながら、より効果的かつ精度の高い維持管理手法（点検手法）の確立に向けて貢献していきたいと考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト：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 研究成果報告書, 2013.2
- 2) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証結果 現場実証ポータルサイト <http://www.mlit.go.jp/common/001125339.pdf>
- 3) 稲垣正晴, 齋藤豊：電磁波による地中検査技術, 検査技術 (No.9)
- 4) 谷川征嗣, 安田亨, 田近宏則：変状トンネルにおける新たな調査手法に関する検討, 土木学会トンネル工学研究発表会, 2010
- 5) 重田佳幸, 田近宏則, 西川啓一, 下澤正道, 安田亨：トンネル維持管理における走行型計測の適用, 土木学会トンネル工学研究発表会, 2011
- 6) 重田佳幸, 田近宏則, 駒村一弥, 下澤正道, 西川啓一, 安田亨：走行型計測車両のトンネル点検・調査への適用性, 土木学会年次学術講演会, 2011
- 7) 駒村一弥, 山本秀樹, 重田佳幸, 加賀田敬：走行型計測技術を用いたトンネル点検の効率化の検討, 土木学会年次学術講演会, 2014
- 8) 山本秀樹, 重田佳幸, 小平哲也, 安田亨, 北沢隆一, 成澤行雄：走行型計測によるトンネル覆工巻厚・空洞探査技術について 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号, 2015
- 9) 安田亨, 山本秀樹, 重田佳幸, 北沢隆一：走行型 3D 計測システムによるインフラ点検・診断技術 建設ロボットシンポジウム, 2016

【筆者紹介】

山本 秀樹（やまもと ひでき）
パシフィックコンサルタンツ(株)
交通基盤事業本部 インフラマネジメント部
地下構造室長



重田 佳幸（しげた よしゆき）
パシフィックコンサルタンツ(株)
交通基盤事業本部 インフラマネジメント部
技術部長



安田 亨（やすだ とおる）
パシフィックコンサルタンツ(株)
技術研究センター
技術理事

