

道路トンネルにおける画像及びレーザデータを用いたマネジメント手法の研究

水口 尚司¹・大西 有三²・西山 哲³・西川 啓一⁴・下澤 正道⁵・石村 勝伸⁶

¹正会員 (株)ニュージェック道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2丁目3番20号)
E-mail: mizuguchitk@newjec.co.jp

²正会員 関西大学特任教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3丁目3番35号)
E-mail: yohnishi@kansai-u.ac.jp

³正会員 岡山大学教授 大学院環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)
E-mail: nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp

⁴正会員 iシステムリサーチ(株) (〒604-8106 京都市中京区御池通堺町南角エクレーヌ御池707号)
E-mail: nishi-k1@isrc.jp

⁵非会員 計測検査(株) (〒807-0821 北九州市八幡西町陣原1丁目8番3号)
E-mail: m-shimozawa@keisokukensa.co.jp

⁶正会員 (株)ニュージェック道路グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2丁目3番20号)
E-mail: ishimurakt@newjec.co.jp

平成24年12月に発生した山梨県の中央自動車道・笹子トンネル天井板崩落事故は、記憶に新しく道路利用者を巻き込む大惨事となった。これまでに多くの社会インフラが整備され経済発展を遂げてきた我が国にとって大きな社会問題となった。このような背景を踏まえ、本研究ではトンネルマネジメントの課題解決に向けて、トンネル走行型計測技術の適用性、本技術を活用したマネジメント手法について考察し、今後の実現性に向けた課題や将来展望について述べるものである。こうした新技術の活用によって、いかに今後の道路トンネルのマネジメントをより効率よく正確かつ安全に実施していくことが重要と考える。

Key Words : road tunnel, tunnel maintenance, mobile imaging technology, mobile mapping system

1. 研究背景と目的

道路トンネルは、上部がコンクリートに覆われ、その形状は概ねアーチ型で形成されている。道路利用者はその下を通過するが、経年劣化などでひたたびコンクリート片が路面に落下すると重大な人身事故につながる。今から約2年前に発生した山梨県の中央自動車道・笹子トンネル崩落事故は、記憶に新しく、道路利用者を巻き込む大惨事となった。こうした事故を背景に平成26年6月道路法一部改正に伴い、道路トンネル定期点検要領¹⁾(以下点検要領という)が新たに改訂された。

本研究では、改訂に伴う最新のトンネルマネジメントの課題解決を目的として、トンネル走行型計測技術²⁾を適用するものである。内容は、本技術のデータ解析・評価方法、実測に伴う適用性、本技術を活用したマネジメント手法について考察し、今後の実現性に向けた課題や

将来展望について述べるものである。

2. 道路トンネルマネジメント手法の概要

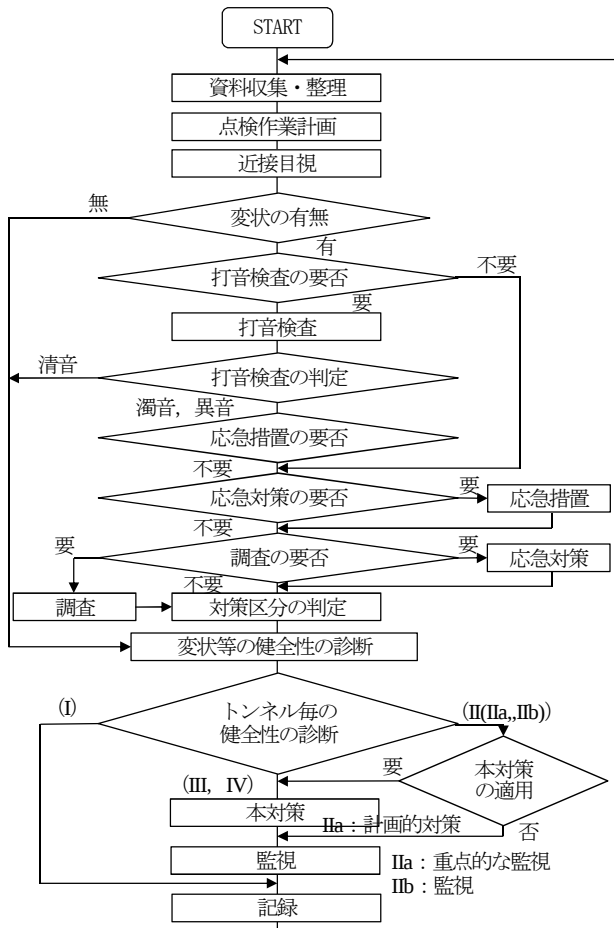
新たな点検要領の主な内容・判定区分を表-1に、マネジメントサイクルフローを図-1に示す。

表-1及び図-1から、トンネルマネジメントの課題を抽出する。

- 1) トンネル点検は、5年に1回の頻度となり技術者の人材不足や質の低下、判断のバラツキが懸念される。
- 2) 点検及び調査の作業が集中することが予想され、道路規制に伴う交通渋滞や事故発生などが懸念される。(社会的損失の増大)
- 3) マネジメントの一連のサイクルの中で、応急対策や調査の判断が必要となり、健全性の診断が困難となるケースが考えられる。(調査を行わないと外力による変

表-1 点検要領の内容・判定区分¹⁾

項目	内容
適用	国、自治体等を含めた全ての道路トンネル
頻度	最長5年に1回
体制	必要な知識、技能を有するものが実施 (実務経験、有資格者)
対象物	トンネル本体、附属物の取付状況や取付金具類
点検の方法	変状や異常箇所を近接目視で観察(道路規制が必要) 必要に応じて触診、打音等非破壊検査を併用 漏水：メスシリンダーで測定 打音：所定のハンマーで確認(初回は全面)
着目箇所	目地及び打ち継ぎ目、覆工の天端・スパンの中央付近、ひび割れ箇所、覆工の変色箇所、漏水箇所、覆工の段差箇所、補修箇所、コールドジョイント付近、附属物の取付金具等
判定区分	状態
I 健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II 予防保全段階	構造物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	構造物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	構造物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
×	附属物の取付状態に異常がある場合
○	附属物の取付状態に異常がない、または軽微な場合


図-1 トンネルマネジメントサイクルフロー¹⁾

形なのか、材質劣化等による原因かがわかりにくい)

- 4)調査は、対策検討ありきで実施されることが多いため、予算などの都合で健全性の診断が遅れてしまう可能性がある。(点検結果→予算承認→調査の実施→診断)


図-2 走行型計測車両(MIMM)写真²⁾

3. トンネル走行型計測車両の概要

今回、上記の課題に対応する点検ロボット技術として、トンネル走行型計測車両 MIMM (Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System) を開発した。MIMM は、図-2 のようにトラックにカメラなどを搭載した車両であり、一定の速度で走行しながら必要なデータを取得する機能を備えている。

以下に MIMM の特徴を示す。

(1) 画像 : 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(豆板等)箇所を客観的に把握するため、デジタルビデオカメラにより壁面画像を撮影・計測する。画像計測に欠かさない光源は、LED照明であり、カメラは38万画素のものが20台搭載されている。図-3に画像のアウトプットイメージ(トンネル壁面画像+ひび割れ展開図)を示す。

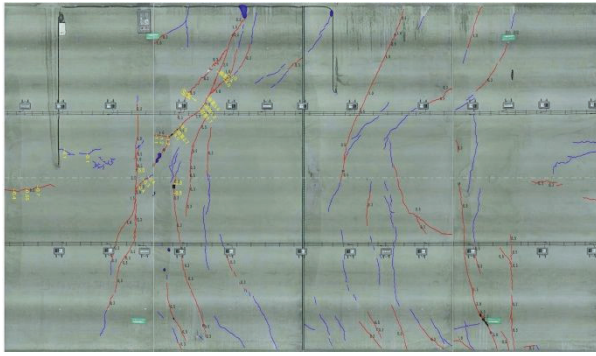


図-3 画像アウトプットイメージ²⁾

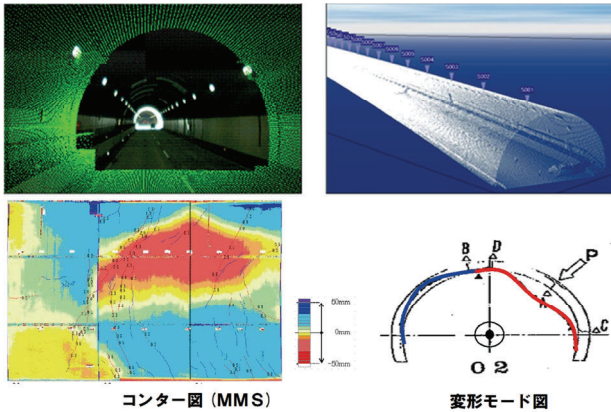


図-4 画像アウトプットイメージ²⁾

(2) レーザ : MMS (Mobile Mapping System)

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次元レーザ計測により覆工内面の形状を3次元の点座標としてデータ取得を行う。なお、車両には、後部に設置した高精度レーザ装置(100万点/秒)と補助的なレーザ装置(1.35万点/秒:2台)が搭載され、正確な位置情報を得るためのGPS装置が3台、IMU装置1台等が搭載されている。図-4にレーザ点群データのアウトプットイメージ^{2),3)}(点群の3D表示とコンター図)を示す。

(3) MIMMの要求性能について²⁾

定期点検の課題を踏まえ、MIMMに要求される性能を以下のように整理する。

- 1) 一般交通への影響を与えない速度(40km/h程度以上)での計測が可能であること。(交通規制が不要)
- 2) 特殊車両としての車検を有していること。
- 3) MISによりトンネル覆工の精細な連続画像が撮影できること。(0.3mm以上のひび割れや漏水等の変状が判別できること)
- 4) GPS, IMU等の測位装置により、トンネル覆工の正確な位置情報(世界測地系座標等)が把握できること。
- 5) MMSによりトンネル覆工の3次元内空形状を把握できること。(点群は1500点/m²以上、段差は1.0mm以下)
- 6) 取得したデータから、トンネル覆工画像や内空形状を

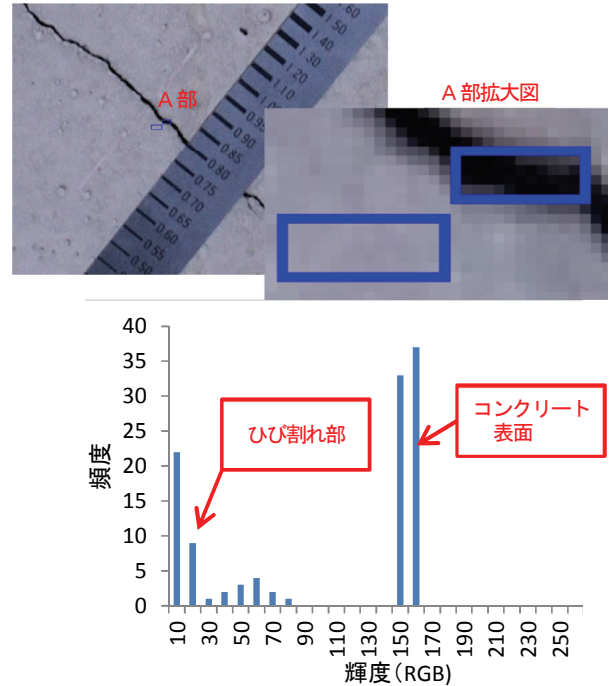


図-5 ひび割れ画像と輝度ヒストグラム

示すアウトプットの編集が比較的容易であること。(ある程度、画一的な作業が可能である)

7) これらのアウトプットから、通常使用する点検様式(展開図、写真等)の代用が可能であり、近接目視や打音検査の絞り込みに活用できること。

8) MMSデータを、中心軸と推定出来形断面と重ね、その差分から求める変形モード解析が行えること。

4. MIMMの解析・評価方法

(1) 画像解析・評価方法⁴⁾

ひび割れの検出は、デジタル画像から読み取った輝度(RGB)を0~255の256階調で表現し、その輝度分布をもとに行っている。ひび割れを有する覆工コンクリートの実際に撮影した画像を用いて、ひび割れ部とコンクリート表面の輝度分布の比較を図-5に示す。ひび割れ部とコンクリート表面部の輝度分布パターンが、明らかに相違する結果となる。ただし、実際には覆工表面の漏水や汚れなどにより分布がばらつくケースもある。

図-6は同じ画像でひび割れ周辺をまとめた(画像中の青枠の範囲で約6800pix)輝度分布のヒストグラムを示す。またひび割れを断面的に輝度分布で示したグラフを示す。V字型の凹みの範囲がひび割れであり、輝度の閾値を決めることで、ひび割れの存在が認識可能となる。

次に、ひび割れ幅については、図-7に示すようにクラックスケール等で一定幅当たりのピクセル数を認識し、1ピクセル当たりの寸法から、ひび割れ幅を決定する。

しかし、MIMMにおいては、被写体距離とカメラ性能

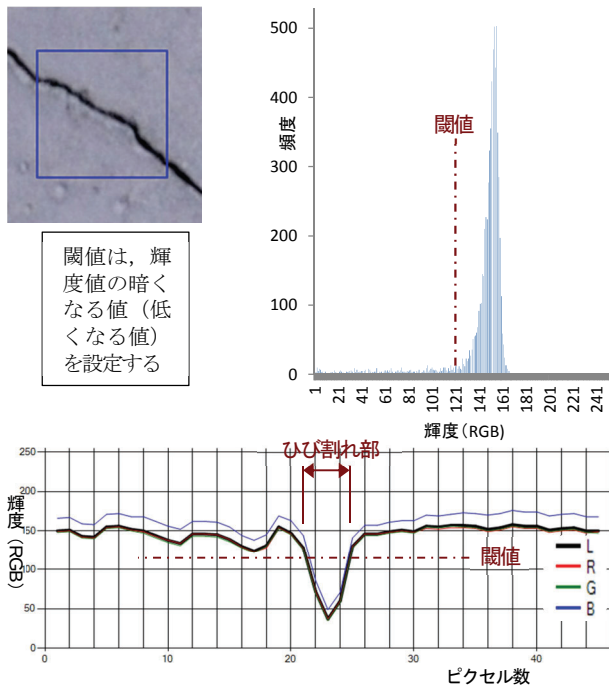


図-6 ひび割れ範囲における区分の考え方

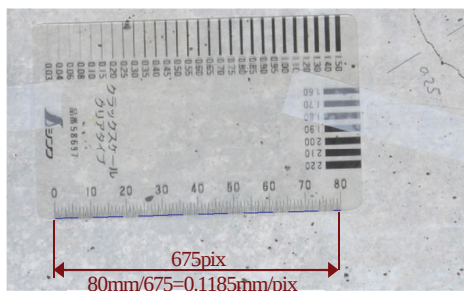


図-7 ひび割れ幅の算出根拠

から1.5mm/pix程度となることから、0.3mmのひび割れを上記の方法では検出ができない。図-8は、MIMMにより撮影した0.3mmのひび割れである。

青線のA部、B部の詳細画像とそれぞれの輝度分布を示す。輝度分布及び詳細画像から、コントラストが低いため、明確にひび割れ幅を判定することは困難といえる。しかし、輝度分布の凹みからひび割れ位置の検出は可能である。現在、幅の決定においては、事前に手の届く位置でひび割れスケールを貼り付けたり、ひび割れを測定して解析時に反映させる方法を用いている。(キャリブレーション方式)

その他、漏水や遊離石灰、補修箇所などについては、図-9のように画像から特徴的な色調や形状を事前に把握しておき、画像からトレーシングを行っている。なお、浮きについては、ひび割れの閉合及び交差箇所、コンクリート表面の変色箇所、豆板箇所、補修箇所などを浮きの候補箇所として抽出を行う。さらに後述するレーザ計測から段差の有無を確認し、浮きを検出することもある。

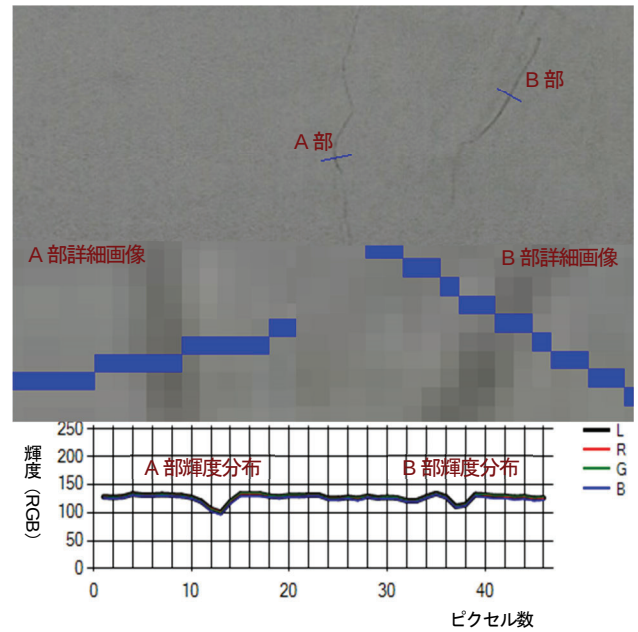


図-8 MIMMによる0.3mmのひび割れ画像

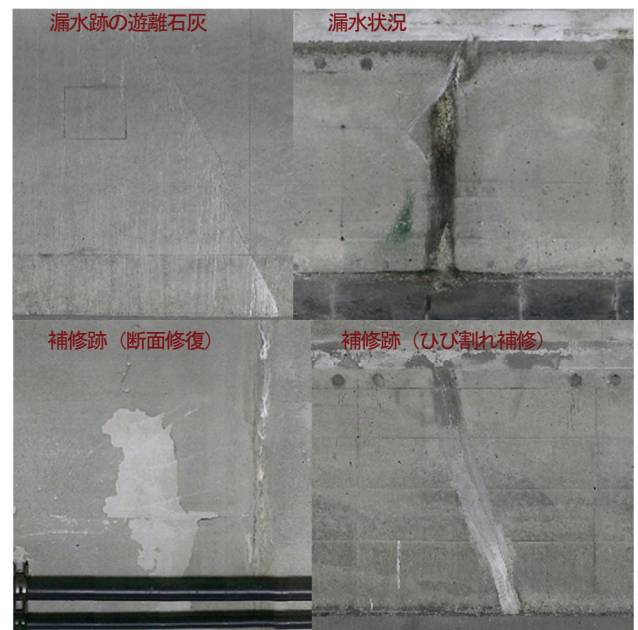


図-9 各変状写真 (MIMM 画像より)

(2) レーザ解析・評価方法²⁾

レーザ計測で得られる点群データは、三次元の座標データである。トンネルの変形状態を判断するためには、基準となる推定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解析フローを図-10に示す。

a) 解析条件

1) スパン内の中心軸は直線とする。

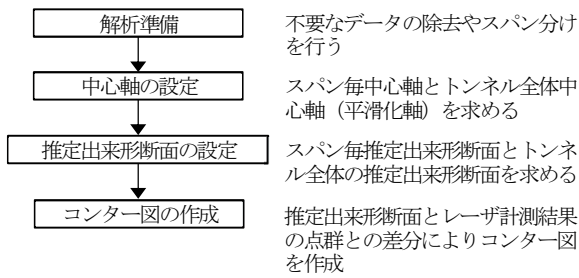


図-10 レーザ解析フロー

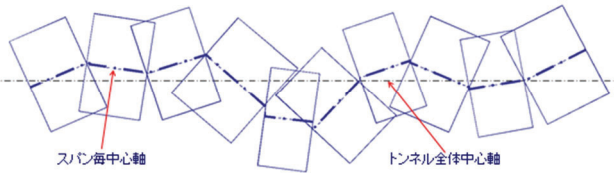


図-11 中心軸のイメージ

- 2) トンネル全線の中心軸に対してスパン毎の中心軸は、図-11 のように向きのズレ、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断面は、評価を行う同一区間の平均断面とする。

b) 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、確実に除外する。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、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。

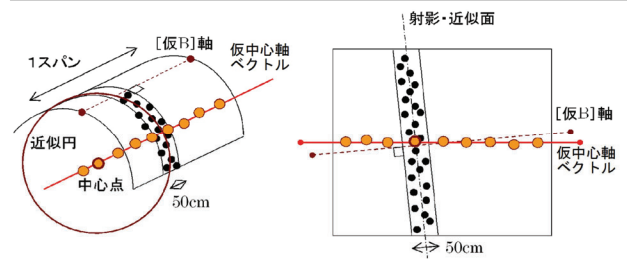
c) 中心軸の設定

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) とがある。それぞれの中心軸は水平と垂直を別々の方法で求める。

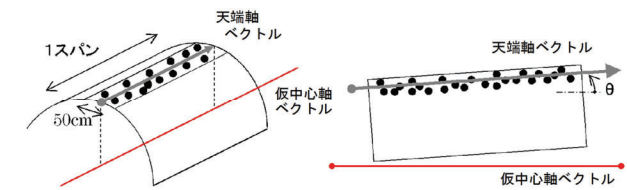
- 1) スパン毎の点群データから、正確な中心軸の位置を求めるための仮中心軸ベクトルとトンネルの縦断勾配を示す天端軸ベクトルとを求め、この2つのベクトルによりスパン毎の中心軸を求める。図-12 にスパン毎の中心軸の設定方法を示す。

- 2) トンネル覆工の変形は、図-13 により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。図-14 に全体中心軸 (平滑化軸) の設定方法を示す。

仮 B 軸に直交する平面を設定し、50cm 幅の範囲に入る点群を平面に投影 (射影) し、円近似または楕円近似による中心座標を求める。この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。



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を求める



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。

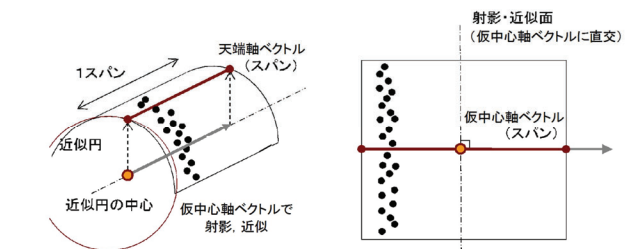
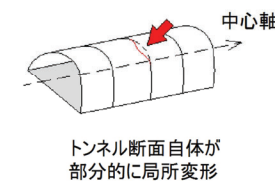


図-12 スパン毎中心軸の設定方法

(1) 局所変形



(2) 軸変形

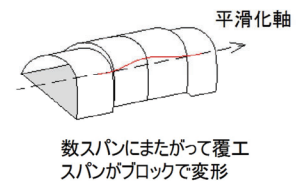


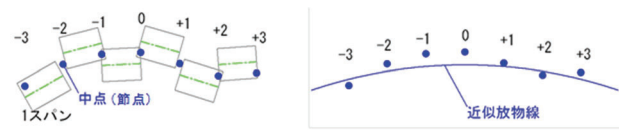
図-13 トンネルの変形モード

d) 推定出来形断面の設定

設定方法は、測定された点群データを中心位置に合わせ、トンネルの軸方向にデータを投影させ、中心から見た角度方向 (θ) に平均化処理した断面とする。その形状は、図-15 のように、 $R(\theta)$, θ で表される。

$R(\theta)$ は、式(1)のとおりである。

各スパン境界面におけるスパン中心軸の端点を求め、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。さらに、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。



近似放物線が設定された後、節点を放物線上に移動する。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。

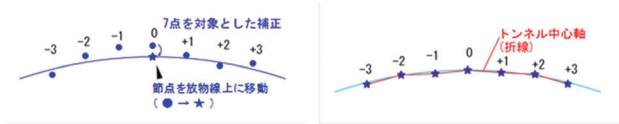


図-14 全体中心軸の設定方法

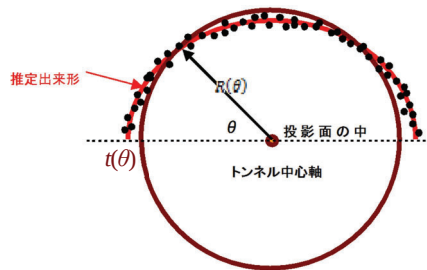


図-15 推定出来形の計算

$$R(\theta) = R + t(\theta) \quad (1)$$

ここで、 R は近似円の半径、 $t(\theta)$ 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に近似している。

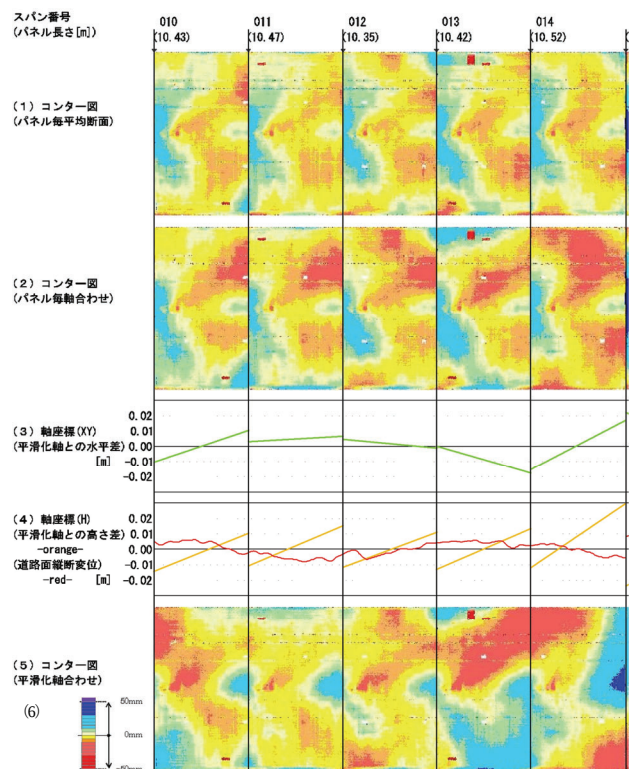
なお、この推定出来形は、初回計測の形状を評価するための基準であり、2回目以降の評価はその差分(n 回目-前回)から変形の進行状況を確認することができる。

e) 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、図-16に示すコンター図である。

コンター図は、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、推定出来形や中心軸の特徴から、周辺との連続性や相違を確認するもので、図-16の(1)(2)(5)に示す、以下の3種類がある。

- 1) スパン毎平均断面は、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。
- 2) スパン毎軸合わせは、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(3次元)から、レーザ計測結果



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・・・各スパン軸と平滑化軸との高さ差
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、青が外側の変位

図-16 コンター図の事例

を色分けしたものである。

- 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。

5. MIMMの適用性の検討

ここではこれまでに計測したあるトンネルのMIMMの結果を基にMISとMMSの適用性について検討する。

MISの撮影によって検出された変状結果と同じ箇所を検証を行った近接目視及び打音検査の結果を表-2に示す。定期点検要領¹⁾で着目する目地及び打ち継ぎ目、漏水箇所、ひび割れ箇所、覆工の変色箇所、補修箇所、段差箇所、附属物の取付金具の変状を対象とした。またMMSによって検出された点群データに基づくコンター図と同じ箇所を検証を行った近接目視及び打音検査の結果を表-3に示す。

表-2 MISの適用性検討

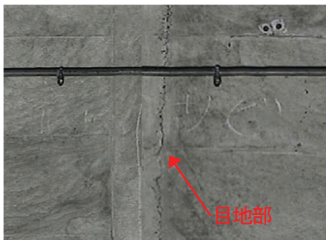
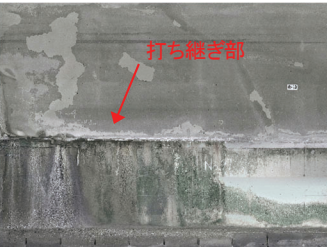
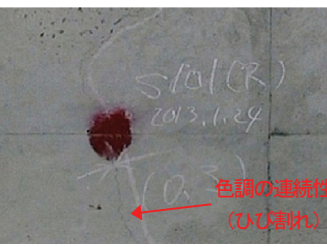
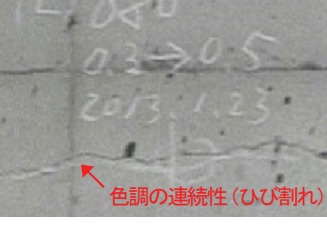
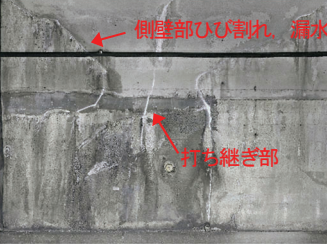
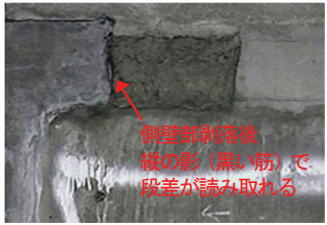
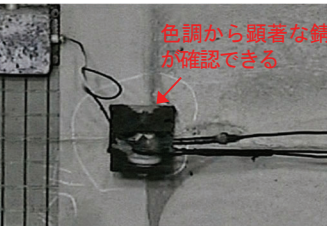
種別・箇所	MIS(画像データ)	近接目視・打音検査の画像	結果
目地部のはく離箇所			MISから、目地部の位置と細い筋（色調の相違）の部分が剥がれやすくなっていると読み取れる。近接目視時に、目地部の該当箇所（接続部分）の不良箇所が発見されたことから、ハンマーでたたき落とした。
打ち継ぎの漏水箇所			MISから、打ち継ぎ部の漏水や遊離石灰箇所が読み取れる。近接目視時に、浸み出し程度の漏水とその周辺の遊離石灰が確認された。なお、この画像はトンネル照明の影響を受けて、黄色くなっているものに対し、MISは現実的な色調になっている。
覆工アーチ部のひび割れ箇所 (0.3mm)			MISから、黒い連続性の筋状のひび割れが読み取れる。近接目視時にひび割れが確認された。ひび割れスケールで計測を行った結果、0.3mmであった。MISでは、数カ所で事前に計測しておき比較を行うことで幅を決めている。
覆工アーチ部のひび割れ箇所 (0.5mm)			MISから、黒い連続性の筋状のひび割れが読み取れる。近接目視時にひび割れが確認された。ひび割れスケールで計測を行った結果、0.5mmであった。ひび割れ位置の起終点位置が明確に把握することができた。
打ち継ぎ部の変色と側壁部の漏水と遊離石灰箇所			MISから、打ち継ぎ部の補修箇所、側壁部のひび割れからの漏水等による変色が読み取れる。近接目視時に変色箇所を認識し、補修箇所、漏水箇所を確認した。
側壁部の補修材の剥落後箇所			MISから、側壁部の補修材の剥落後が読み取れた。近接目視時に補修材の剥がれた後の段差を確認した。MISでは正面からの撮影であることから段差はわかりにくい、縦の影から想定することができる。
付属施設の変状箇所(腐食)			MISから、付属施設の取付金具の色調が際立って黒くなっていることから顕著な錆と判断した。近接目視時に確認し、腐食がかなり進行していることが判明した。特に付属施設の場合、近接目視、触診は重要である。

表-3 MMSの適用性検討

種別・箇所	MMSコンター図	近接目視・打音検査の画像	結果
目地部の段差箇所（こ こでのコン ター図は全 て、スパン 毎軸合わせ コンター図 を採用して いる）			目地部の5mmの段 差をコンター図よ り読み取ることが できる。（淡い黄 緑と黄色の境界面 ：1/10 階調× 50mm）
			目地部10mmの段 差をコンター図よ り読み取ることが できる。（水色と 黄色の境界面： 2/10階調×50mm）
	形状の特徴 ・N054 側の覆工形状が全体的に若干大きく出来ている。 ・この差が段差として色調に現れている。 ・N054 一般部側壁付近の色調の相違（水色、黄色）はスプリングラインの段差とみられる。		目地部20mmの段 差をコンター図よ り読み取ることが できる。（水色と オレンジの境界面 が鮮明：4/10階調 ×50mm）
外力の影響 を受けてい るトンネル のある区間 の変位箇所	(1)スパン毎平均断面のコンター図 	(4)近接目視結果（展開図） 	◆スパン毎平均断面のコンター図より ・(1)A スパンの傾向と(4)A スパンのひび割れ形状から、局所的な変形が考えられる。 ・同じく(1)Cスパンの傾向と(4)Cスパンのひび割れ形状も同様局所的な変形が考えられる。 ◆スパン毎軸合わせのコンター図及び平滑化軸合わせのコンター図より ・(2), (3)全スパンの傾向と(4)全スパンのひび割れ形状から、側方からの変形が考えられる。 ・(2), (3)スパンの傾向はほぼ同じであることから、スパン全体の移動やずれは生じていないと考えられる。 ・形状が違っておれば水平軸がずれている可能性が高い ◆全てのコンター図より ・(1), (2), (3)Bスパン中央部は、(4)Bスパンのひび割れ形状から、斜め方向からの変形が考えられる。 ・付属施設（防災施設、照明、ケーブル等）の形状や位置についても把握することができる。（白抜き箇所）
	(2)スパン毎軸合わせのコンター図 		
	(3)平滑化軸合わせのコンター図 		

(1) MISの適用性

表-2からMISで得られる知見を以下に整理する。

- 1) 目地部は、鉛直方向の細い筋（色調）が連続性を呈していることから、位置の確認は容易である。その筋が凸凹状になると一部剥がれたり、剥がれやすくなっていることで、不良箇所の可能性が高い。
- 2) 打ち継ぎ部や補修箇所も、一定の色調（輝度分布）の連続性で位置の確認は容易である。また漏水や遊離石灰箇所も色調から十分が読み取ることができる。
- 3) ひび割れ箇所は0.3mm程度⁹⁾であれば、色調（輝度分布）の連続性で位置の確認は可能である⁵⁾。ひび割れ幅は、事前のキャリブレーションにより検出が可能である。
- 4) 段差箇所は、色調（輝度分布）の連続性や影から想定することができる。

(2) MMSの適用性

表-3からMMSで得られる知見を以下に整理する。

- 1) 目地部の段差は、スパン毎軸合わせのコンター図から把握することができる。（共通した平均断面との相違によるため）
- 2) 現状では5mmの段差は十分に把握できるが、コンター図の色階調幅を細分化することで、さらに小さな段差も把握することが可能と考えられる。
- 3) 局所的な変形については、その周辺のひび割れやずれ等の有無によって判断できるが、ひび割れなど変状がないケースは、型枠の変形が大きな原因と考えられる。
- 4) スパン毎軸合わせ、平滑化軸合わせコンター図の傾向が一致している場合、スパン全体のずれや移動は生じていないものと判断できる。
- 5) スパン軸合わせコンター図の傾向（内面への変形）とひび割れ形状から、外圧が原因した変形であると判断できる。
- 6) コンター図の傾向とひび割れ形状から、変形モードを推定することができる。

6. MIMMを活用したトンネルマネジメント

(1) トンネルマネジメントの方法

表-2～表-3に示すように、MIMMの活用に伴い、ひび割れ、漏水、補修材跡、附属施設の錆等、変状箇所の正確な位置、形状、寸法、段差や内空形状からの変形モード有無などを、事前に把握できることが判明した。

現状の道路トンネルは、2. 道路トンネルマネジメント手法の概要で述べたとおり、全てを対象とした5年毎の点検の実施や、全延長の近接目視と異常箇所の打音検査が基本である。近接目視の前の段階で、MIMMを採用することで、マネジメントにおいて抱える多くの課題（人材不足、品質の低下、個人差、交通渋滞、詳細調査に伴う

遅れ等）に対応できるものであると考える。

(2) MIMMの役割について⁷⁾

図-1をもとにMIMMの果たす役割とトンネルマネジメントにおける関係を図-17に示す。以下にその内容を示す。

- 1) 近接目視の前にMIMM計測を行い、展開図、コンター図を作成することで、事前に変状箇所や外力の影響状況を把握することができる。
- 2) 対策区分の判定時において、変形モードを推定することによって、外力影響の有無や変状原因を把握することができる。
- 3) 監視が必要となった際に、MIMM計測を行うことで、ひび割れ等の進行を確認することができる。

(3) MIMMの効果について

MIMMによって得られる効果⁹⁾を以下に示す。

- 1) 近接目視、打音検査では、見落としや誤差が少なくなる。（人材確保、品質向上、個人差解消）
- 2) 浮きは、MISから候補箇所を見つけ、MMSから段差箇所を見つけることで判定することができる。ただし表面上の変化が見られないものは困難である。
- 3) 外力影響の有無や変状原因を把握することで、調査の実施前に対策区分を判定し、その必要性を判断することができる。（調査に伴う遅れ対策）
- 4) MIMM計測により、ひび割れ進行等の監視を行うことができる。（交通規制の省略、交通渋滞の解消）
- 5) 調査や監視の簡略化により、維持管理コストを低減することができる。

7. 結論

現状のトンネルマネジメントでは、近接目視と打音検査に伴い、応急措置や応急対策、調査の必要性の判定を行い、トンネル毎の健全性の診断を実施している。概ねのトンネルは、この打音検査を的確に実施することでリスクを回避し、道路利用者の安全・安心を確保している。

しかし変状状況が深刻であり、原因が不明なものは調査を行い、本対策を行う際には詳細設計が必要となる。また補修・補強工事に伴う予算化や議会承認などに多大な時間が必要となる。深刻な変状は上記の応急対策によって一定期間は担保されるものの健全性が向上し、安全性を保証できるものとはいえない。適正なマネジメントを実施するためには、いかに早く・正確に現状を把握し、迅速に健全性を診断し対策を講じることである。

今回提案したMIMMは、画像とレーザによる、いわゆる3Dスキャナーによりさまざまな変状状況をいち早く正確に再現することが可能である。従来抱える人材不足やヒューマンエラー等に加え、上記に示す早期の対応に

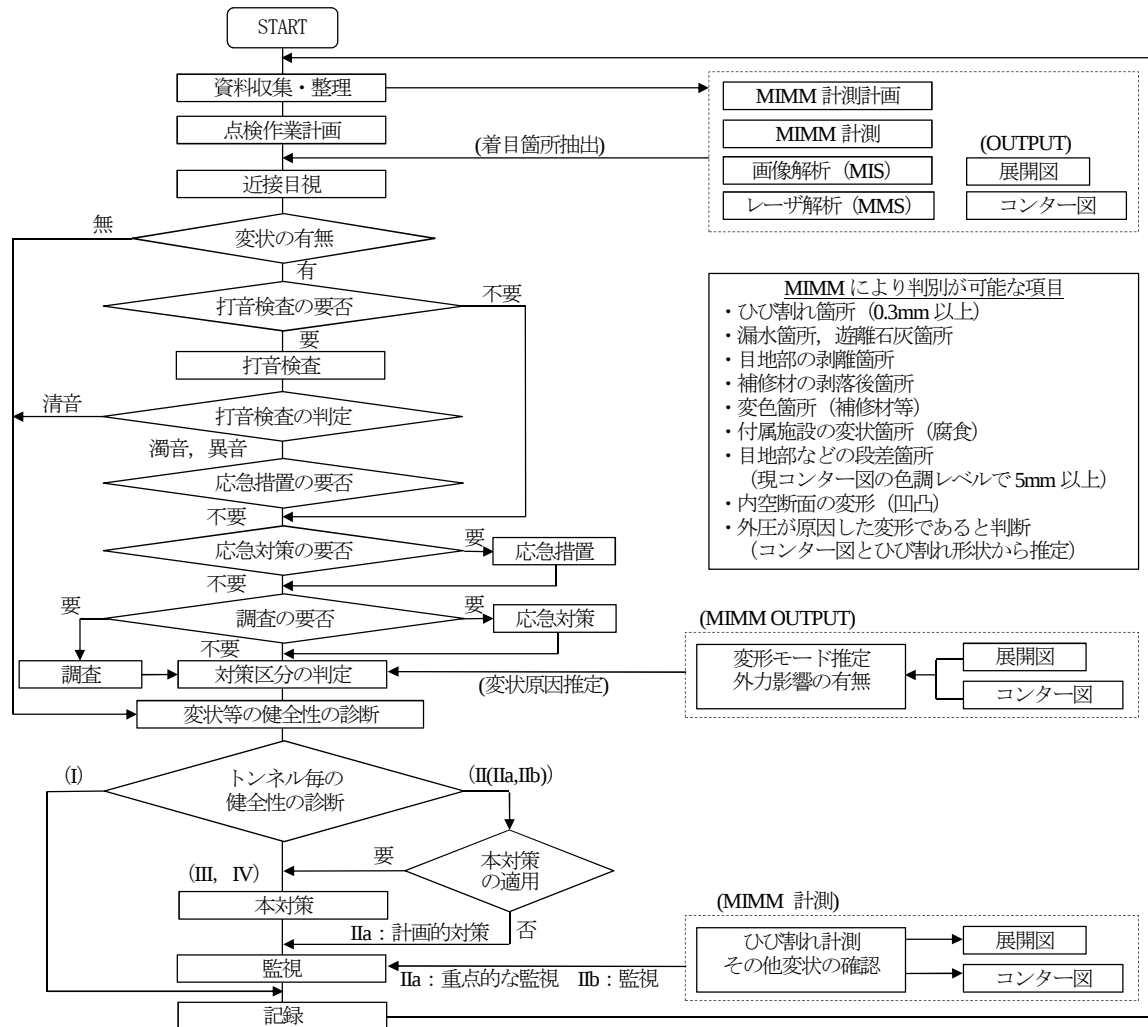


図-17 MIMMを踏まえたトンネルマネジメントサイクルフロー

においても MIMMは有効であり、道路利用者の安全・安心確保に寄与できる技術と考える。

8. 今後の課題

これまでのMIMM計測を実施した上で、最新のトンネルマネジメント手法を踏まえ、さらなる実用化に向けた今後の課題を以下に示す。

- 1) 応急措置、応急対策、調査の要否は、打音検査に委ねられており、優秀な点検者により、十分な時間をかけて判断する必要がある。
- 2) したがって人材不足や点検期間に制約があると適切なマネジメントが困難となる場合がある。
- 3) MIMM結果や点検・補修履歴を事前に把握し、これらの情報を見落とすことなく、現地において打音検査の範囲や箇所を決定する必要がある。
- 4) MIMMの最大の課題は、見えない浮きの検出であり、

赤外線カメラ等、他の非破壊検査技術との融合などを図り、新たな技術開発が必要である。

- 5) 浮きや附属物のボルトの緩みは、打音検査や触診でしか確認できないため、MIMM結果から異常箇所を抽出し補完することで見落としをなくすることが重要である。
- 6) MIMMは、現在38万画素のデジタルビデオカメラを搭載しているが、撮影条件によって精度が悪くなり、変状などの判別が困難となる場合もあるため、デジタルビデオカメラの解像度を向上させた画像解析の検証が必要である。
- 7) トンネル内の汚れ、結露、光沢のあるタイル、内装板は、照明の反射光の影響により、画像解析時に変状の認識が困難となる場合があるため、撮影条件（照明の方向や種類、絞り、感度等）の最適化検討を行う必要がある。
- 8) 画像データから変状展開図（CAD化）までの時間短縮を図るため、画像解析の自動化技術（二値化解析）の

開発が必要である。

- 9) トンネル壁面に存在する浮き・剥落箇所を見つけるために、レーザデータから異常な突起物や凹みをその周辺の形状から検出できるシステム開発が必要である。
- 10) コンター図の色階調幅を細分化することによって、1mm以下の段差を確認することはできるが、トンネル壁面全体の中でその箇所を自動的に検出できるシステム開発が必要である。

9. 将来展望

昨年、点検要領が改訂^りされ、現在、国や地方自治体等多くの道路トンネル定期点検業務が発注されている。近接目視～打音検査～調査のプロセスに基づき、トンネル毎の健全性の診断・応急対策・本対策・監視を行い、道路利用者の安全・安心を確保している。今回MIMMを適用したトンネルマネジメントの手法について述べてきたが、上記の課題を解決すべく、機器のスペック向上、それぞれの要素技術のシステム開発、他の非破壊検査技術との融合を図っていくことが重要と考える。

トンネルの変状は、外力、材質劣化が大きな要因と考えられる。変状の規模、形状、建設時・補修時の履歴、本体コンクリートの性状、地形・地質の性状、環境条件などから推定することができる。今後、速やかな診断が要求される中で、変状要因を点検など初期の段階で把握できれば効率的なマネジメントが実現できる。その方策として、トンネル完成時及び継続的なMIMMデータの取得、所定の書式に沿ったデータベース化、MIMMを活用したマネジメントマニュアルの策定が考えられる。こうしたトンネルマネジメント手法への取組みが重要と考える。

謝辞：これまでに7年間にわたり、「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」に参画された委員各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道防災課：道路トンネル定期点検要領, pp. 8-56, 2014.
- 2) 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, 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報告書, pp. 2-8～5-11, 2013.
- 3) 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 滝口純一, 清水聡：モービルマッピングシステムによる都市空間モデリング, 計測自動制御学会産業論文集, Vol. 8, No. 17, pp. 132-139, 2009.
- 4) 半田兼一, 大西有三, 西山哲, 小山倫史, 西川啓一, 下澤正道：デジタル画像計測を用いた道路トンネル健全性評価に関する研究, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 184-189, 2009.
- 5) 佐野信夫, 伊藤哲男, 馬場弘二, 西本和夫, 吉武勇, 中川浩二：連続印刷画像を用いたトンネル覆工コンクリートのひび割れ評価におよぼす技術者資格の影響, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 3, pp. 558-566, 2006.
- 6) 西川啓一, 富樫健司：MMS の最新動向, 建設の施工企画, pp. 58-64, 2011.
- 7) 佐野信夫, 馬場弘二, 山田隆昭, 吉武勇, 中川浩二, 西村和夫：高速道路トンネルの合理的な点検システムの提案, 土木学会論文集 D, Vol. 63, No. 3, pp. 391-400, 2007.
- 8) 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, トンネル工学報告集, 第21巻, pp. 209-214, 2011.

(2015. 4. 17 受付)

RESEARCH OF MAINTENANCE OF ROAD TUNNEL BY MIMM

Takashi MIZUGUCHI, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA, Keiichi NISHIKAWA, Masamichi SHIMOZAWA and Katsunobu ISHIMURA

A catastrophic accident involving road users occurred at Sasago tunnel built in Yamanashi prefecture in December 2012. In Japan, many infrastructures have been constructed have contributed to economic growth, but recently one of the most challenging issues is to know whether these old infrastructures are safe or not, and the inspection to evaluate their soundness will play an important role. Considering these situations, this study proposes a new mobile inspection method using a vehicle with laser scanners and image photographing units as a robot technique introduced to the inspection work. In this paper, the authors discuss the latest management criteria and problems about maintenance for road tunnel, and consider the feasibility of our proposed inspection method. We present the importance of maintenance work by utilizing the robot technique to make maintenance work more efficient, more accurate and safer.