博士論文

走行型計測技術を活用した
道路トンネル点検方法の合理化研究

平成 29 年 3 月

水口　尚司

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目　次

1　緒論 ····· 1-1
1.1 背景 ····· 1-1
1.2 関連する既往研究 ····· 1-5
1.2.1 研究概要 ····· 1-5
1.2.2 道路トンネルの健全性評価技術の研究 ····· 1-5
1.2.3 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 ····· 1-7
1.3 本論文の位置づけ ····· 1-9
1.4 研究目的 ····· 1-10
1.5 論文の構成 ····· 1-10
参考文献 ····· 1-12

2 道路トンネル点検の現状 ····· 2-1
2.1 これまでのトンネル点検方法 ····· 2-1
2.2 最新のトンネル点検方法 ····· 2-3
2.2.1 概説 ····· 2-3
2.2.2 点検の目的 ····· 2-5
2.2.3 点検の頻度 ····· 2-6
2.2.4 点検の体制 ····· 2-6
2.2.5 点検の方法 ····· 2-6
2.2.6 調査の方法 ····· 2-8
2.2.7 対策区分の判定 ····· 2-9
2.2.8 健全性の診断 ····· 2-21
2.2.9 措置 ····· 2-24
2.2.10 記録 ····· 2-26
2.3 トンネル点検の課題 ····· 2-27
2.3.1 概説 ····· 2-27
2.3.2 点検の要求事項に対する方策 ····· 2-28
2.3.3 点検の合理化に向けた改善策 ····· 2-29
参考文献 ····· 2-32

3　トンネル走行型計測の適用 ····· 3-1
3.1 目的 ····· 3-1
3.2 トンネル走行型計測車両の概要 ····· 3-1
3.2.1 トンネル走行型計測車両の選定 ····· 3-1
3.2.2 トンネル走行型車両の概要 ····· 3-2
3.3 走行型計測の要求性能について ····· 3-5
3.4 計測方法の例 ····· 3-6
3.5 解析および評価方法 ····· 3-7
3.5.1 画像解析および評価方法 ····· 3-7
3.5.2 レーザ解析および評価方法 ····· 3-10
3.6 実トンネルの適用性の検討 ····· 3-18
3.6.1 概説 ····· 3-18
3.6.2 画像の適用性について ····· 3-19
3.6.3 レーザの適用性について ····· 3-23
3.6.4 外力の影響を受けているトンネルの事例 ····· 3-26
3.6.5 画像の適用性 ····· 3-30
3.6.6 レーザの適用性 ····· 3-30
3.6.7 外力の影響を受けているトンネル事例の見解 ····· 3-30
3.7 適用性の評価 ····· 3-31
3.8 走行型計測の効果 ····· 3-31
参考文献 ····· 3-32

4　走行型計測におけるひび割れ精度検証 ····· 4-1
4.1 目的 ····· 4-1
4.2 対象トンネルの概要 ····· 4-1
4.3 検証方法 ····· 4-1
4.3.1 計測車両 ····· 4-1
4.3.2 撮影および画像処理 ····· 4-1
4.3.3 近接目視によるひび割れ測定 ····· 4-2
4.3.4 検証 ····· 4-2
4.3.5 数値評価方法 ····· 4-2
4.4 計測結果 ····· 4-10
4.5 検証結果 ····· 4-10
4.5.1 ひび割れ検出率について ····· 4-10
4.5.2 ひび割れ実測率（測定精度）について ····· 4-13

4.5.3 ひび割れ長さについて ……4-15
4.6 まとめ ……4-15
4.7 精度向上に向けた今後の取り組み ……4-16
参考文献 ……4-17

5 実トンネルにおける事例検証 …… 5-1
5.1 目的 ……5-1
5.2 対象トンネルの一覧 ……5-1
5.3 点検年次 ……5-1
5.4 B トンネルの事例 ……5-2
5.5 C トンネルの事例 ……5-5
5.6 D トンネルの事例 ……5-9
5.7 E トンネルの事例 ……5-14
5.8 F トンネルの事例 ……5-17
5.9 事例検証 ……5-21
参考文献 ……5-22

6 走行型計測技術を活用した点検方法の合理化検証 …… 6-1
6.1 目的 ……6-1
6.2 研究経緯の整理 ……6-1
6.3 最新の点検方法における走行型計測の適用と実用性 ……6-2
6.4 走行型計測を活用した合理的トンネル点検方法 ……6-2
6.5 結論 ……6-10
6.6 今後の課題 ……6-10
6.7 将来展望 ……6-11
参考文献 ……6-13

謝辞 …… 謝-1

参考資料 …… 参考-1
参考資料-1 本論分に関する著者の発表論文 ……参考-2
参考資料 2 実トンネルの点検記録様式事例 ……参考-32

1　緒論

1.1 背景

我が国では，戦後の荒廃した国土を復興し先進欧米諸国に追いつくことを目標として目覚ましい経済発展を遂げてきた．この時期を通して，多くの社会資本が短期間の内に整備されてきた．しかし近年これらの多くが建設後 50 年以上を経過し老朽化が大きな問題となっている．平成 24 年 12 月に発生した山梨県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，社会資本を取り巻く衝撃的な事故であった．これまでメンテナンスフリーで安全と考えられていた社会資本の事故・欠陥の顕在化が契機となり，社会資本の適切な維持管理の必要性が強く叫ばれている．高度成長期に大量に建設された社会資本の多くが，その寿命を迎える時期の到来を迎え，これまでのような社会資本整備の時代から，維持管理・更新の時代への変化の必要性を示唆しているものである．

社会資本の中で最も代表的な施設が道路である．我が国の道路は，平成 26 年 4 月 1 日現在で実延長 1,218,772km 存在する[1.1]．道路の種別は，**表 1-1** に示すとおりであり，都道府県道や市町村道が多くを占めている（約 95%）ことから，幹線から放射状に伸びた平面街路の延長が影響していることがわかる．道路利用者や地域住民が，生活面で最も接する機会が多く，維持管理の重要性が求められる施設といえる．

表 1-1　道路種別毎の道路延長[1.1]

道路種別	高速自動車国道	一般国道	都道府県道	市町村道	合計
延長(km)	8,428	55,626	129,301	1,025,416	1,218,772
割合(%)	0.7	4.6	10.6	84.1	100.0

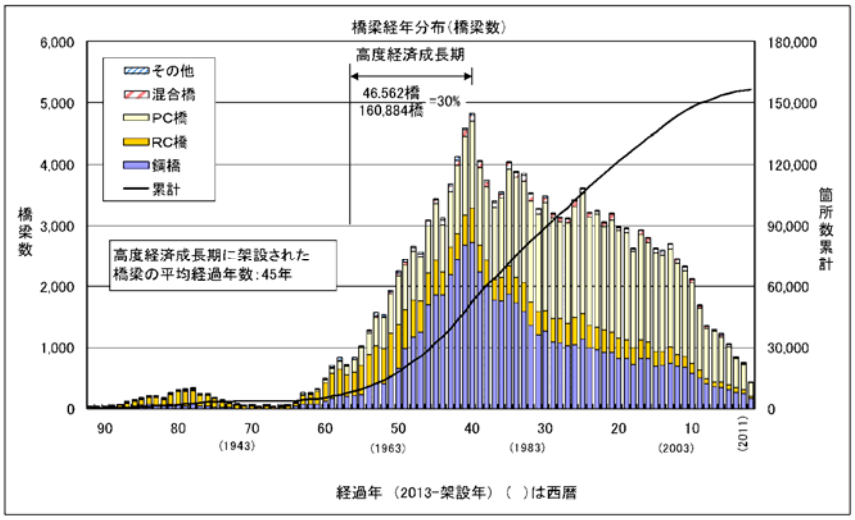


図 1-1　橋梁数の経年分布[1.2]

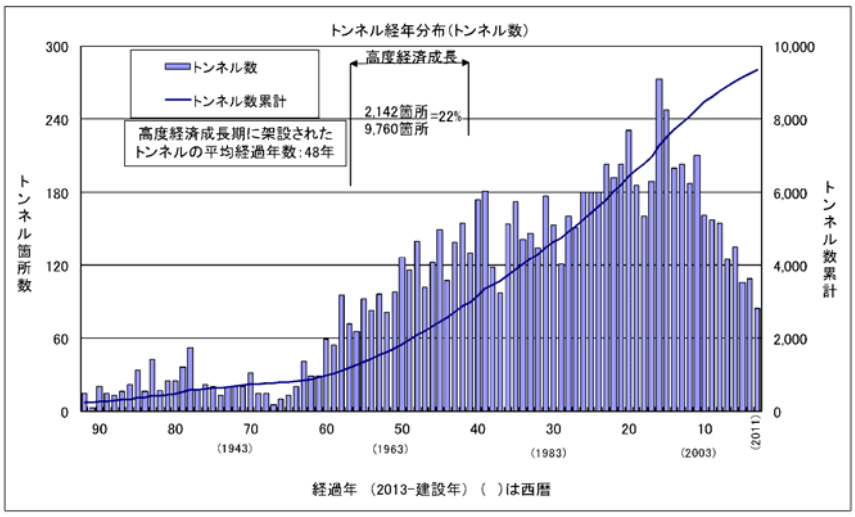
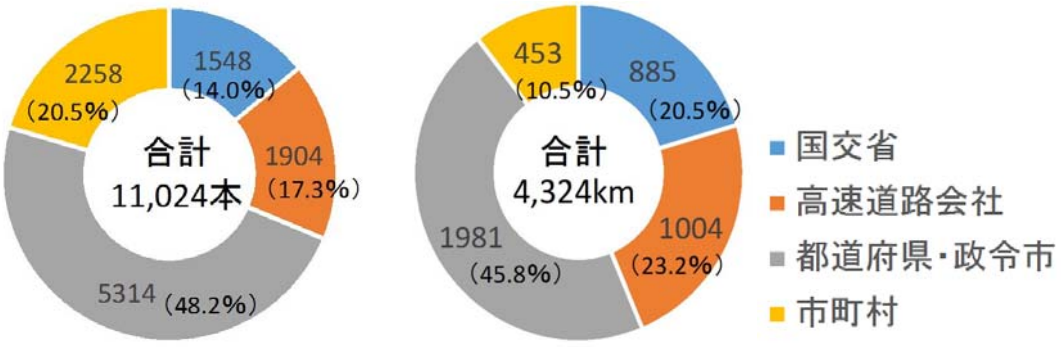


図 1-2 トンネル数の経年分布[1.2]



トンネル本数[1.3]　　トンネル延長[1.4]

図 1-3　道路トンネル数および延長の内訳

道路構造物は，橋梁，トンネル，舗装，および付属施設等によって構成されているが，このうち橋脚・トンネルに着目すれば，その多くが高度成長期に建設されたものであり，**図 1-1～図 1-2** のように，橋脚では全橋脚数の約 30%，トンネルでは全トンネル数の約 22%が同時期に建設されている[1.2]．また，建設後 50 年以上経過した橋梁は，2011 年を基準として，10 年後には現在の 4.0 倍，20 年後には約 6.0 倍に，30 年後には 8.0 倍に達し，建設後 50 年以上経過したトンネルは，同じく 10 年後には現在の約 2 倍，20 年後には約 2.4 倍に，30 年後には約 3.3 倍に達するなど，今後の高齢化が集中的に進むことになる[1.2]．

さらに道路トンネルに着目すると，**図 1-3** のとおりであり，平成 28 年 3 月末現在で約 11,000 本の道路トンネルが存在し，管理者別では地方自治体（都道府県と市町村）が，約 70%を占めている[1.4]．またその延長は約 4324km であり，管理者別では，地方自治体で，約 60%を占めている[1.5]．この違いは，高規格幹線道路や高速道路を抱える国土交通省や高速道路会社の管理するトンネル延長が長いことによる結果と予測できる．

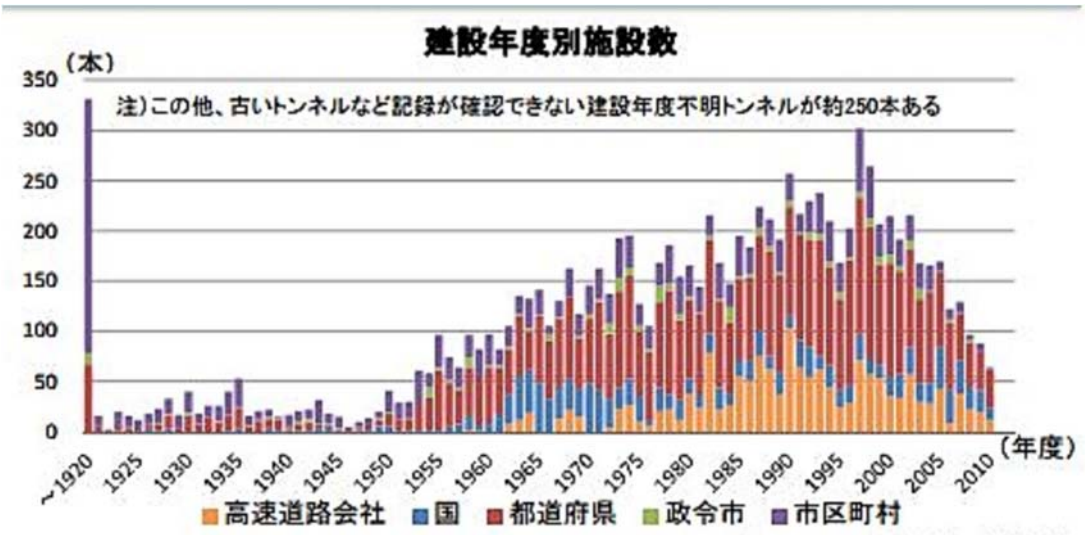


図 1-4　道路トンネルの建設年度別施設数[1.6]

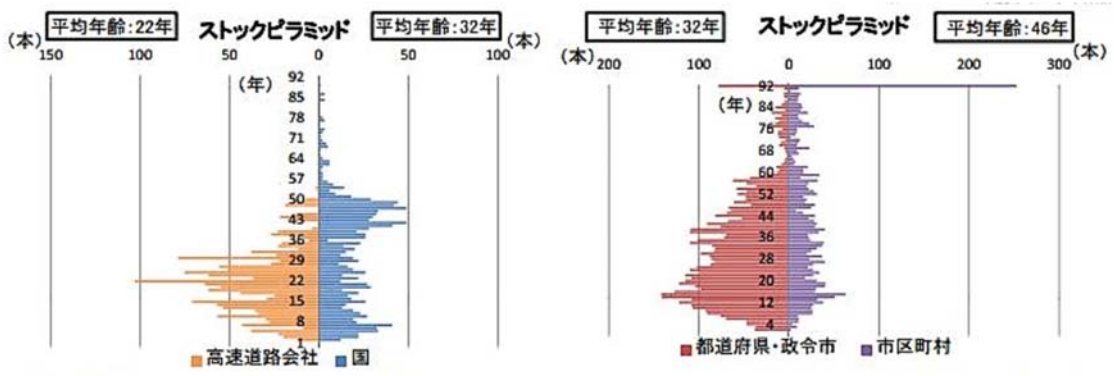


図 1-5　管理者別のトンネルストックピラミッド[1.6]

年代別の整理を図 1-4～図 1-5 に示す．建設年度では 1960 年までが，概ね一律に地方自治体を中心として年間 50 本以下のペースで建設され，それ以降高度成長期と重なり，1995～2000 年をピークとして年間約 150 本のペースで建設されてきた[1.6]. 1960 年以前が 50 年経過しているとすると，ほとんどが地方自治体の管理であり，ストックピラミッド図から市町村が管理するトンネルの平均年齢が 46 年と最も高くなっている[1.6]．しかし今後 10 年ごとに 50 年を経過するトンネルは，前述したとおり，倍増していくペースであり，特に高速道路会社，都道府県管理のトンネルが多くなっていく[1.6].

こうした背景の中で，2012 年 12 月に中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故が発生した．笹子トンネルは，1977 年 12 月の完成で事故時 35 年が経過していた[1.7]．天井板を支える支持金具が原因とされているが，トンネル本体や設備全体を含めた適切な維持管理・更新の重要性が指摘され，道路構造物（橋梁，トンネル，舗装，および付属施設等）の健全性評価のための点検手法が再検討され，2014 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[1.8]（以下点検要領という）が改訂された．さらに 2015 年 6 月点検要領の改

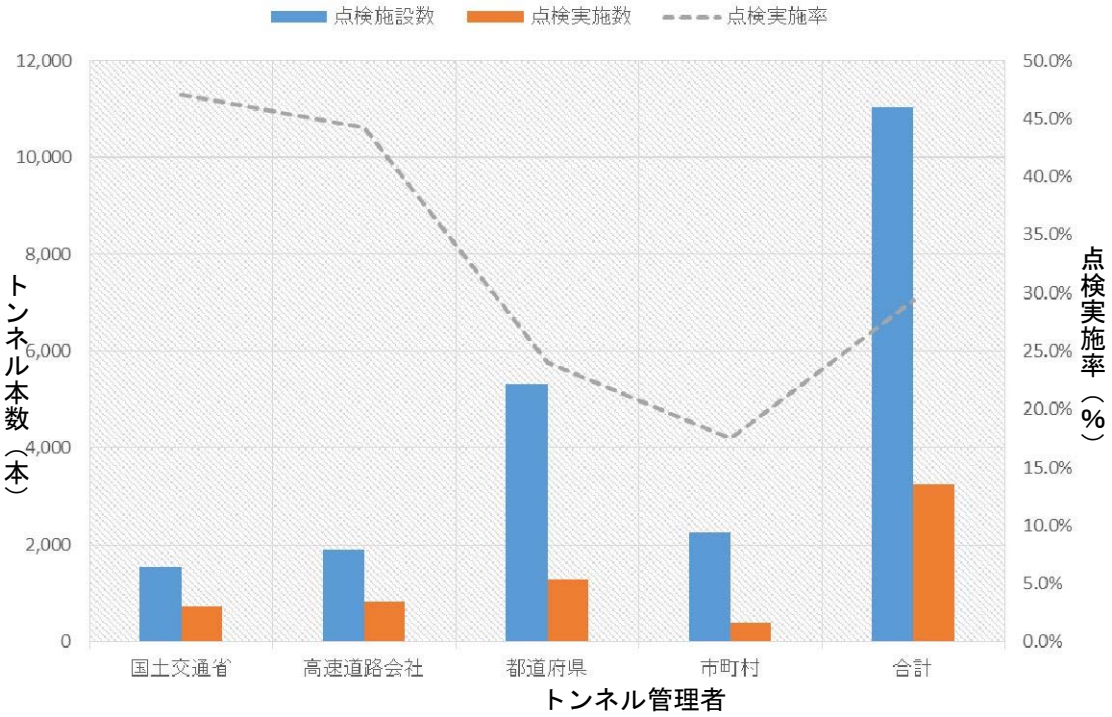


図 1-6　トンネル点検実施状況[1.3],[1.4]

訂内容に伴い道路トンネル維持管理便覧[1.9]（以下維持管理便覧という）も同様に改訂された．

点検要領では，5 年に 1 回の定期点検が義務づけられた．現在（2016 年 3 月末）全国に 11,000 本存在[1.4]する道路トンネルは，**図 1-6** のとおり約 30%の定期点検が完了[1.3], [1.4]している状況である．改訂からこれまでに約 2 年経過し，年間あたりで換算すると約 1,600 本が完了している．したがってこのまま全体を完了させるのに 7 年を要すこととなり，5 年に 1 回の基準を満たすためには，これまでの 1.6 倍のスピードで実行していく必要がある．特に地方自治他の点検の実施が少なくなっている．定期点検は，トンネル本体工，附属物に対して，近接目視，打音検査，触診することが基本[1.8] [1.9]である．その条件として，交通規制が必要，昼夜間を問わない，排気ガスの多い環境，高所作業車が必要，しかるべく熟練技術者による適切な判断が必要となっており，工期短縮，コスト縮減，安全性・労働環境改善，精度向上，適任者の確保が基準を満たす上での大きな課題となっている．

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，経年劣化などでひと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．また岩盤構造物の代表であるトンネルは，周辺が岩盤に覆われ，その性状が複雑であり，損傷の原因を特定することが困難であること，また劣化過程の推定には相当の不確実性が伴うことから，突発的な要因に伴う損傷が多いことが特徴となっている[1.10].

こうした特徴を踏まえ，継続的に安全性を確保するためには，現状で発生している損傷や

変状をいち早く把握し，その原因を究明することが重要である．

こうした点検の特性や構造的な特徴を踏まえた合理的な道路トンネルの点検方法を明確にし，道路利用者の安全・安心を確保していく必要がある．

1.2 関連する既往研究[1.10], [1.11]

1.2.1 研究概要

上記のような道路トンネルの持つ維持管理の困難さを背景において，これまでに国土交通省 近畿地方整備局が運営する「新都市社会技術融合創造研究会」（委員長：関西大学環境都市工学部　客員教授　京都大学名誉教授　大西有三）のもとで，2005 年度～2013 年度までの 8 年間に渡り「道路トンネルの健全性評価技術の研究」[1.10],「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」[1.11]（研究プロジェクトリーダー：大西有三）を中心として，産・学・官の連携により研究を進めた．

1.2.2 道路トンネルの健全性評価技術の研究[1.10]

道路トンネルの健全性評価技術の研究では，2005 年～2010 年にわたり道路トンネルの健全性のおいて求められるニーズや劣化特性，現状の課題，適切な健全性評価手法についての研究を行った．その内容は，これまでに実施されていた道路トンネルの維持管理手法・健全性評価手法について実態調査を行い，維持管理上の重要となる知見を以下のように整理した．

1)　道路管理者の健全性評価手法に対する知見

① 現状の維持管理手順で中心となるプロセスは定期点検であり，健全性評価を行うための調査が行われることは困難である．この理由として，調査にかかる予算がないこと，調査しなくとも点検段階である程度の判断が可能であるとされていることなどが挙げられる．

② トンネルに生じる変状のうち，ひび割れ，うき・はく離に着目した健全性評価手法が重要である．

③ ひび割れの幅，本数，漏水の有無，場所などに着目する必要がある．

④ 変状の大部分が第三者影響に関係するものであり，構造上の問題があるとされる場合は稀である．

⑤ 点検に対する課題として点検費用が高く，交通規制が必要なことが挙げられる．

⑥ 交通規制の期間は，極力短縮した方法が望ましい．

⑦ 目視・打音検査などの検査手法に対して，より客観的なデータが取得できることが望ましい．

2)　第三者影響に関する変状に対する健全性評価の知見

① 第三者影響に関する変状としてはく落，漏水などが特に重要といえる．

② はく落のメカニズムとして，ひび割れの発生，拡大により覆工に複数方向から囲まれた

箇所に浮き領域が作られることである．

③ 漏水についてもひび割れに関係して発生する機構が示されており[1.14]，第三者影響に関する変状を評価する場合にはひび割れの評価が重要である．

④ 第三者影響に関する変状では，ひび割れに着目した評価が重要であり，ひび割れの閉合性（ひび割れで囲われているかどうか）と密度を指標として評価する必要がある．

⑤ 明らかに第三者影響を与えると判断できる変状事例については即対応するなど，ひび割れ等の評価以前に処置を行う必要がある．

3) 構造的な変状に対する健全性評価の知見

① トンネル覆工にかかる地圧（外力）は通常，塑性圧，緩み圧，偏圧に分類される．

② トンネル掘削によって周辺地山が塑性化し，支保工で変形を抑止できない場合，トンネル内空側に地山が押し出すことで，覆工に荷重として作用する地圧を塑性圧という．

③ トンネル掘削により，トンネル上方の地山が緩んで，ある高さ相当の地山重量がトンネル覆工に直接，鉛直方向へ作用するものを緩み圧という．

④ トンネルの土被りが小さく，地表面が傾斜している場合に発生しやすい左右非対称の地圧を偏圧という[1.15].

⑤ 一般的に，塑性圧が作用した場合は，側壁やアーチ両側部分に，トンネル軸方向の開口ひび割れが発生し，変状が進行すると天端に圧ざ（圧縮破壊）や，盤ぶくれが発生することが知られている．

⑥ 緩み圧が作用した場合には天端付近にトンネル軸方向の開口ひび割れが発生し，変状が進行すると両側のアーチ肩部に圧ざが発生する．

⑦ 偏圧が発生した場合には，偏圧が作用する側のアーチ部に軸方向の開口性のひび割れが発生し，進行すると反対側のアーチに圧ざが発生することなどが知られている．

4) 実トンネルのモニタリングの実施

近畿地方整備局管内における地すべりの影響を受けている道路トンネルをモデルケースとして複数年にわたり，当該トンネルに発生しているひび割れや内空変位についてモニタリングを行った．その結果を以下のように整理した．

(1) 内空変位（内空変位計）

夏季は，水平(Max0.4mm)，垂直（Max1.0mm）とも伸び傾向を示し，冬季は，水平，鉛直(Max0.3mm)ともに縮む傾向へとシフトした．年間を通じて，元に戻る傾向を示しており，夏季の覆工コンクリートの膨張，冬季の覆工コンクリートの収縮に起因しているものと推察される．

(2) ひび割れ幅（π ゲージ）

夏季は，ひび割れが閉じる（Max0.3mm）傾向を示し，冬季に向かって，開く（Max0.1mm）傾向へとシフトし，年間を通じて，元に戻る傾向にある．これは，夏季の覆工コンクリートの膨張，冬季の覆工コンクリートの収縮に起因しているものと推察された．

(3) ひび割れ進行（ひび割れ進行ゲージ）

ひび割れの延長方向の成長を計測した結果，夏季，冬季による傾向変化はみられなかった．

(4)まとめ

温度変化による内空変位,ひび割れ幅の変化が見られ，概ね通常のトンネルにおいても同様の傾向は見られるものと判断された.

従来手法（近接目視点検＋打音検査）における健全性の評価を行った．その中で，上記の維持管理上の課題（①トンネル点検・調査時の安全性，②交通規制の簡略化，③評価を実施する際の平準化，④維持管理予算の確保等）に着目し，走行型計測（画像計測：MIS，レーザ計測：MMS）を用いた健全性評価手法について提案し，モデルトンネルで検証を行った．その結果，従来手法で評価した結果よりも繊細な状況（新規ひび割れや進行状況の検出，正確な変状箇所の位置の把握，変形モードに一致した内空変状の検出等）を把握することができ，走行型計測の有用性が認められた.

5) 研究の知見

(1)第三者影響に関する変状に対する健全性評価（画像より判定）

① ひび割れの閉合領域が確認されたスパンにおいて従来手法に比べてより安全側の判定（=より危険だという判定区分に分類される）ができた.

② 閉合があると判定された箇所，閉合はしていないが，閉合に発展しそうな箇所，を分類して評価を行った.

③ ひび割れ密度が大きいスパンにおいてもより安全側の判定ができ，従来手法と同一程度の判定となっているが，その要因は密度の大きさで判定を行った.

(2)構造的な変状に対する健全性評価（画像およびレーザより判定）

① 画像によるひび割れの方向とレーザによる変形方向が，文献に示す地すべりの方向と一致しており，構造的な変状と判定できた.

② 従来手法であれば，軽微であるとの評価（S）となるが，今回は，構造的な影響が生じており,さらに詳細調査が必要であるとの判定（B）となり安全側の評価となった.

1.2.3 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[1.11]

本研究は，これまでの研究成果に基づき，さらに実現性を高めるため，トンネル走行型計測技術の深度化を目指した道路トンネル健全性評価手法および評価基準について検討を行った．複数の道路トンネルで走行型計測を実施し，得られた計測データをもとに従来の点検結果との比較や検証を実施した．その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が検出できることを実証した．本研究成果報告書[1.11]では，走行型計測技術の特徴や利点またその実用性について評価を行い，道路トンネルにおいて必要となる走行型計測による維持管理方針（走行型計測の各種機器の基本スペック，計測データの解析手法，計測結果の評価基準，健全性評価を実施するうえでの着目点，データベースのあり方等）について検討を行った．以下に走行型計測を使用した望ましいトンネルマネジメントのあり方について述べる.

1) 初回点検の活用

① 初回点検時に走行型計測を実施し，画像計測により初期変状状況，レーザ計測により変

形を伴った変状が生じる前の初期値を計測しておけば，2 回目以降の点検時に差分をとり，客観的に進行性を評価することができる．

② 覆工打設後，開通までの間に舗装工事，設備工事などが行われることから，覆工打設後 1 年以上経過して開通する場合が多い．この間に乾燥収縮などの初期変状が発生することが多いため，初期状態把握として適切といえる．走行計測は舗装まで完成している場合が望ましいが，路盤,中間層の状態であっても問題なく計測できる．

③ 開通までの間に，必要となる対策工を実施することができる．基本的には開通までの間に初期変状を除去し，健全な状態で開通を迎えることが望ましい．

④ 竣工時の品質保証ができる．

2) 緊急点検への活用

① 初回点検データ，あるいは前回計測データが存在する場合，地震，津波，豪雨などの被災を受けた直後に現地計測を行うことによって，早期に被災実態を把握することができる．

② トンネルが崩壊して通行不可となる場合は走行計測困難となるが，トンネルでそのような事態になることは稀であるため，大概のケースでは被災把握が可能となるであろう．計測対象としては，ひび割れ，湧水，設備落下，灯具不具合などの画像情報取得，およびレーザによる変状，移動量把握などが計測可能である．

③ トンネル，斜面など多数の被災実態がある場合に，差分による被災査定を行い，優先度を策定して復旧にあたることができる．

3) 定期点検への活用

① 遠望目視を行う代わりに，走行型計測によって，交通規制を行わず状況を把握し，画像・レーザデータから近接目視，打音点検するべき箇所を抽出することができれば，効率化が促進され，規制に伴う時間とコストを圧縮できる．

② 走行計測手法によって打音箇所を抽出することにより点検の効率化が図れる．

③ 特に 2 回目以降の点検が効率的となり，点検コストの低廉化が図れる．

④ 近接目視点検において，ひび割れ幅，段差，漏水箇所など，近接目視と同等レベル以上の成果を走行計測手法によって得ることができる．

⑤ 走行計測手法の客観性，迅速性，高精度化，見落とし防止などの優位性から，従来点検法に対して高度化技術と位置づけることができる．

4) 標準調査の代替

① 標準調査，詳細調査，対策工の実施には，相当のコストと現地通行規制が伴うことになるため，必要性は認めていても実施できていないのが実情である．

② この標準調査の代替として走行型計測結果を活用することで，画像からのひび割れと形状とレーザからの変形モードとの同調性から外力性か否かの判断を行うことができる．

③ 同じ方法で発生しているひび割れが乾燥収縮，早期脱型などの判定を行うことができる．

5) 研究課題

① 走行型計測の実用化に向けてのマネジメントに関する課題として，走行型計測技術のさ

らなる実用化やデータ蓄積，トンネル点検要領（現行マニュアル）の枠組みの中にどのように位置づけるかを明確化する必要がある．

② 走行型計測車両や機器の課題として，使用されている機器（デジタルビデオカメラ等）の性能向上を図り，精度が伴う最適化検討や，結果に伴う検証試験を実施する必要がある．

③ データ解析等に関する課題として，画像から展開図作成時における検出の結果がばらつきや作業効率の改善が必要であり，画像解析による一定水準以上の精度向上策を検討する必要がある．

6) 今後に向けての方針

道路トンネルの維持管理を実施する上で，道路管理者からのニーズは，①交通規制の最小化，②変状の把握と危険要因の除去，③対策工要否の判断，点検者によるバラツキの解消，④より有効な維持管理予算の確保及び執行等であった．これらに適応しうる手法として，走行型計測の実用化は必要不可欠である．維持管理の重要性が高まる中，交通規制が伴わず，早期に健全性を評価することは，最重要課題である．今後，こうした課題を解決し，さらなる実用性を高め，トンネル維持管理の充実化に寄与できることが，社会全般に向けた本研究プロジェクトの総意としてまとめている．

1.3 本論文の位置づけ

上記研究活動の終焉を迎えた時期（2013 年 12 月）に笹子トンネル天井版崩落事故が発生した．その後の点検要領の改訂に至る変遷は，前述のとおりである．当時は事故発生原因の審議が問われ，維持管理の重要性が注視される中で，橋梁，トンネル，道路付属物の整合や新規維持管理方針の策定などが図られていた．研究のまとめにおいて，基準となる点検要領は，従来の 2002 年度版[1.12]をもとに検討を重ねていた．したがって本論文では，これまでに研究成果である道路トンネルの健全性の評価手法をもとに新たに改訂された点検要領[1.8]と維持管理便覧[1.9]との照合を図る必要がある．新しい点検要領は，今回の事故原因を踏まえ，附属物（照明，ジェットファン，警報表示板，吸音板等）の取り付け状態やボルトの緩み等の項目が追加された．また遠望目視点検が廃止され，毎回近接目視点検と打音検査を行うことが義務づけられた．診断方法も見直され，Ⅰ～Ⅳの判定区分に基づき，変状ごと，スパンごと，トンネルごとに定められた基準や方針に従って診断および記録を行うこととなった．応急措置や応急対策，本対策，監視についても明確化され，それぞれの手法，対応方法，記録等について追加された．本論文では，新しい点検要領および維持管理便覧において，それぞれの変状に適応した判定区分について解説し，実際のトンネル点検における課題を整理する．さらにこれまでの研究成果である「トンネル走行型計測」の活用において，新しい点検要領との照合を図る観点から，①トンネル走行型計測の適用と効果，②走行型計測における精度検証，③実際の点検に伴う実用性の評価，④これらの課題に対応した合理的なトンネル点検方法について研究を行い，取りまとめるものである．

昨今，前述のとおり，社会資本に対する維持管理の関心が高まり，「産」「学」「官」それぞれの立場の技術者がさまざまな課題に直面し，多くの悩みを抱えている．上記の内容を取りまとめることにより，道路トンネルの健全性の評価を合理的に行い，どのように全体のマネジメントに反映すべきか，非破壊検査やモニタリング技術に代表される走行型計測との融合・調和を踏まえ，適した基本方針を示すことにより，「合理的かつ現実的なトンネルマネジメントの教本」を目指した論文と位置づけるものである．

1.4 研究目的

本研究は，こうした背景をもとに今回改訂された点検要領[1.7]および維持管理便覧[1.8]の基本的手法を解説し，現状で抱える課題を整理し，解決に向けた対策の検討に基づく道路トンネルの適切な健全性評価行うための点検方法について検討を行うものである．

現在道路トンネルを効率的に点検するためにトンネル走行型計測が注目されている[1.13]. 本研究において，計測車両に MIMM（Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System）を採用する．この技術は，車両にカメラおよびレーザを搭載し，覆工コンクリート表面のひび割れ，漏水，材質不良（豆板等）箇所の画像撮影し，覆工内面の形状を座標データとして取得するものである[1.13]．この計測車両によって点検を代替および支援し，上記の課題を解決し，さらなる効率化が可能となり合理性が高まるか，活用することによる適用性，信頼性，実現性，効果について考察するものである．なお，計測車両から得られる画像データは，走行しながらデジタルビデオカメラによって撮影しており，静止した高精細デジタルカメラの撮影精度は有していない．よって現状で所有する計測車両のデジタルビデオカメラによるひび割れ検出やひび割れ幅の精度検証を行い，上記の信頼性・実現性を向上することを目的とするものである．

さらに実際の道路トンネルの点検業務において走行型計測を採用し，健全性評価を行った事例から，走行型計測の適用性，点検方法の具体的な方法（現地踏査，近接目視，打音検査の補助，著しいひび割れが発見された場合，変形，移動，沈下が発見された場合，変状の継続的監視，トンネル点検におけるリスクヘッジ，異常時点検・臨時点検時の活用，建設時における走行型計測の活用）について考察し，今後の走行型計測の合理性をより効果的に高めていくための課題，将来展望について述べるものである．

1.5 論文の構成

本論文のフローを**図 1-7** に示す．本論文は 6 章から構成しており，各章の内容を要約すると，以下のとおりである．

第 1 章では，本論文の背景および関連する既往研究について述べ，本論文の位置づけと目的を明らかにするとともに，本論文の構成をまとめている．

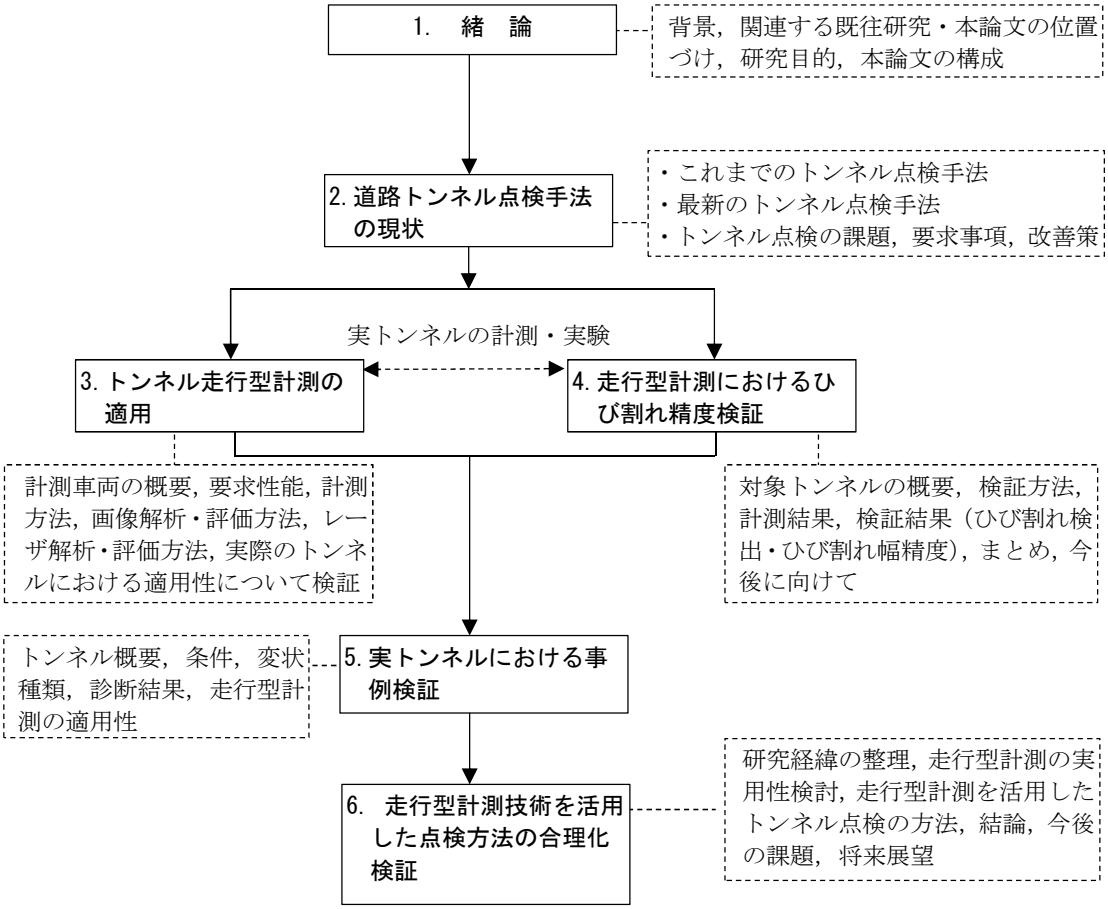


図 1-7　論文構成のフローチャート

第 2 章では，2014 年に改定された点検要領[1.8]，2015 年に改訂された道路トンネル維持管理便覧[1.9]について，その方法や対策区分の判定，健全性の診断，措置，記録について解説し，現状の道路トンネル点検における課題を整理し，点検要領や維持管理便覧が示す要求事項を整理し，点検の効率化に向けた改善策について提案するものである．

第 3 章では，トンネル走行型計測の適用について取りまとめており，これまでに開発されてきた計測車両の種類，性能，特徴，維持管理を実施していく上で，計測車両に求められる要求性能，実際に計測する方法について取りまとめる．さらに計測車両の画像・レーザデータの解析および評価方法について取りまとめ，実際のトンネルで取得した最新の解析結果に基づく適用性の評価・検証を行う．

第 4 章では，計測車両による画像データから得られたひび割れと近接目視による実際のひび割れを比較し，ひび割れ検出能力およびひび割れ幅の精度検証を行う．

第 5 章では，実際のトンネル点検業務で走行型計測を用いた事例を紹介し，トンネル概要，条件，主な変状種類，診断結果等を整理し，走行型計測を用いた適用性について検討を行う．

第 6 章では，これまで研究を行ったそれぞれの経緯を総括し，最新の点検方法における走行型計測の適用と実用性について検討を行う．さらに個別の点検プロセスにおける道路トンネル点検方法について考察し，ここまで研究を行った結論，今後の課題，将来展望について述べる．

参考文献

[1.1] 国土交通省：道路統計年報 2015　道路の現況，2015.

[1.2] 国土技術政策総合研究所：平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集，2015.

[1.3] 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2015.

[1.4] 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2016.

[1.5] 国土交通省：道路統計年報 2015　トンネルの現況，2015.

[1.6] 国土交通省：社会インフラの維持管理の現状，第 5 回社会資本メンテナンス戦略小委員会，2013.

[1.7] 国土交通省：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会 報告書，2013.

[1.8] 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，2014.

[1.9] 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編）．2015.

[1.10] 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，道路トンネルの健全性評価技術の研究成果報告書，2010.

[1.11] 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，2013.

[1.12] 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案），2002.

[1.13] 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究） 71(1), 20-30, 2015.

[1.14] 松岡茂，福原輝幸，柳博文 : コンクリートひび割れからの漏水メカニズムと漏水量予測，土木学会論文集，No.523/Ⅲ-32, pp.83-90, 1995.

[1.15] 土木学会：トンネルの変状メカニズム，2003.

2　道路トンネル点検の現状

2.1 これまでのトンネル点検方法

現在トンネル点検は，トンネル構造物を有する事業者ごとに行われている．トンネル構造物を有する事業者は，国道を含めた一般道路を管理する国土交通省・地方自治体，高速道路を管理する NEXCO をはじめとする高速道路各社，鉄道トンネルを管理する JR をはじめとする鉄道各社，電力・水路トンネルを管理する電力会社，通信トンネルを管理する NTT など多数挙げられる．しかしこれらの事業者間に統一された基準はなく，各事業者において個別の基準が採用されている．これは同じトンネル構造物であっても，その用途や置かれる環境などにより特性が異なっていることや，劣化の状態が変わってくるためであると考えられる．

本研究では，道路トンネルの定期点検を対象としていることから，上記の内，一般国道の道路トンネル（国土交通省）の管理方法について整理を行う．

これまで一般国道のトンネルを管理する国土交通省の場合，そのマニュアルは、『道路トンネル維持管理便覧』[2.1]（1993 年）および『道路トンネル定期点検要領（案）』[2.2]（2002 年）が用いられてきた．『道路トンネル維持管理便覧』は、維持管理の最も基本となるものであり，その中には以下のように，「点検」・「調査」・「対策」の 3 段階の管理手法が示されている．

① まず「点検」によって異常個所を発見し，調査の必要性を判断する
② 次に異常個所を「調査」によって詳細に調べその健全性を判定する
③ 健全性に基づき「対策」を実施する

よって道路トンネルの健全性は，調査の段階で初めて判定されるものとされている．それぞれのマニュアルによれば，点検では，覆工に生じるひび割れ，はく落などに対して**表 2-1** に示すように A,B,S の 3 段階による判定が行われ，その区分の基準が**表 2-2** のように定められている．調査では，外力による変状，材料劣化による変状，および漏水などによる変状に対して**表 2-3** のように，それぞれ 3A,2A,A,B の 4 段階による判定が行われており，この 4 段階の判定が健全性評価に当たるといえる．なお同じく**表 2-3** にひび割れの判定基準を示しているが，ひび割れの進行性が調査によって判断する重要な要素であることがわかる．

表 2-1　点検に対する判定区分[2.1]

判定区分	判定内容
A	変状が著しく，通行車両の安全を確保することができないものと判断され，応急措置や対策を必要とするもの
B	変状があり，補修や補強をするかどうかの検討にために異常時点検あるいは標準調査を必要とするもの
S	健全なもの（変状がないか，あっても軽微）

表 2-2　点検に対する判定基準[2.1]

変状の種類	判定区分 A	判定区分 B
ひび割れ，段差	急激にひび割れが進行し，ブロック化して落下する恐れがあるもの	天端，肩部で幅 3mm 以上，延長方向に 5m 以上の規模を有するもの
うき，はく離，はく落	コンクリートのはく離がある場合，うきの部分がはく落する恐れのあるもの	はく落に結びつく，うき（圧ざ）があるもの
傾き，沈下，変形	目視により明らかに傾き，沈下，変形があるもの	左記の場合で交通に支障のない場合
打継目の目地切れ，段差	止水板や目地モルタルが落下する恐れのあるもの	左記の場合で交通に支障のない場合
漏水，つらら，遊離石灰	大規模な漏水，つらら，側氷があるもの	左記の場合で交通に支障のない場合

表 2-3　調査に対する判定区分および判定基準[2.1]

判定区分	判定内容	覆工コンクリートひび割れの判定基準
3A	変状が大きく，通行者・通行車両に対して危険があるため，直ちに何らかの対策を必要とするもの	ひび割れが大きく密集している．また，せん断ひび割れが生じ，進行が大きいと認められるもの
2A	変状があり，それらが進行して，早晩，通行者・通行車両に対して危険を与えるため，早急に対策を必要とするもの	ひび割れが大きく密集している．また，せん断ひび割れが生じ，進行が認められるもの
A	変状があり，将来，通行者・通行車両に対して危険を与えるため，重点的に監視をし，計画的に対策を必要とするもの	ひび割れがあり，進行が認められるもの
B	変状がないか，あっても軽微な変状で，現状では通行者・通行車両に対して影響は無いが，監視を必要とするもの	ひび割れがあるが，進行が認められないもの

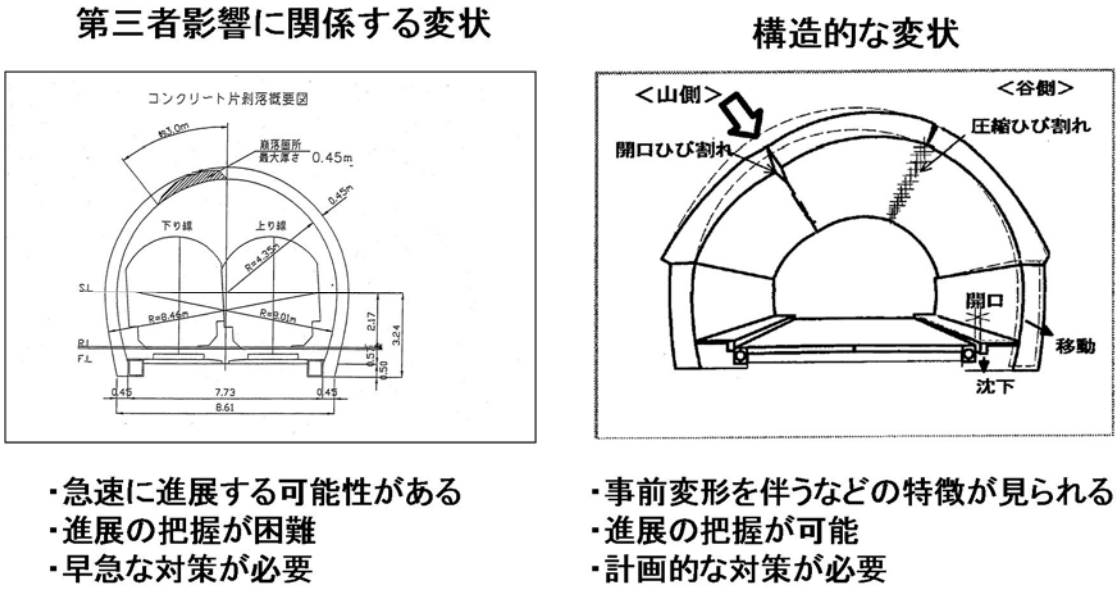


図 2-1　第三者影響に関係する変状と構造的な変状の特徴[2.3]

他方，『道路トンネル定期点検要領（案）』では『道路トンネル維持管理便覧』の「点検」の計測すべき事項などに関して，より詳細な検討が行われている．また，初回点検の必要性が示され，点検を初回点検と 2 回目点検以降に分けて考える必要性が示されている．初回点

検ではその後の管理の基本データを取得するため，近接目視や打音などの詳細な点検が，2回目以降では遠望目視点検が中心となる．

健全性評価のためには，維持管理における最も初期の段階で近接目視・打音検査が必須である．これはトンネルに生じる変状の経時変化を客観的に捉えることが健全性評価に必要不可欠であり，このためには初期値の取得が重要であるからである．健全性評価においては，直ちに第三者（利用者）への被害に繋がる可能性のある変状（覆工コンクリートの剥落や漏水など）とトンネルの構造的な安定性に関連する変状（外力の作用により覆工表面に生じるひび割れなど）に分けて評価することが必要となる．これは，両変状の特徴として**図 2-1** の対比が可能であり，その対策に違いが生じるためである．点検と調査を実施することで，それぞれの変状の原因を明らかにして，健全性評価のレベルを向上させる（判定区分をより詳細に行える）評価が望まれる．

2.2 最新のトンネル点検方法

2.2.1 概説

2012 年 12 月に中央自動車道笹子トンネルの天井板崩落事故を機に，道路構造物（橋梁，トンネル，舗装，および付属施設等）の健全性評価のための点検手法が再検討され，2014 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：国土交通省道路局国道防災課』（以下点検要領という）が改訂された[2.4]．さらに 2015 年 6 月に『道路トンネル維持管理便覧（本体工編）：日本道路協会』．（以下維持管理便覧という）が改訂された[2.5]．それぞれのマニュアルには，トンネル本体工およびトンネル内に設置されている照明やジェットファン等の附属物を取り付けるための金属類や，アンカー等を対象とされており，道路トンネルの点検～調査～診断～記録に関して標準的な内容や現時点の知見で予見できる注意事項等について規定されたものである．以下にそれぞれの用語について解説する．

1） 点検

トンネル本体工の変状やトンネル内附属物の取付状態の異常を発見し，その程度を把握することを目的に，定められた方法により，必要な機器を用いてトンネル本体工の状態やトンネル内附属物の取付け状態を確認することをいう．

2） 調査

点検により発見された変状の状況や原因等をより詳しく把握し，対策の必要性およびその緊急性を判定するとともに，対策を実施するための設計・施工に関する情報を得ることをいう．

3） 診断

点検または調査結果により把握された変状・異常の程度を判定区分に分類することをいう．定期点検では，変状等の健全性の診断と，トンネル毎の健全性の診断を行う．

4) 記録

点検結果，調査結果，健全性の診断，措置または措置後の確認結果は適時，点検結果の記録様式に記録する．

5) 応急措置

点検作業時に，利用者被害の可能性のあるコンクリートのうき・はく離部を撤去したり，附属物の取付け状態の改善等を行うことをいう．

6) 応急対策

定期点検等で，利用者被害が生じる可能性が高い変状が確認された場合，調査や本対策を実施するまでの期間に限定し，短期的にトンネルの機能を維持することを目的として適用する対策をいう．

7) 本対策

点検・調査の結果に基づいて，トンネルの機能や耐久性等を回復させることを目的に，中～長期的にトンネルの機能を回復・維持することを目的として適用する対策をいう．

8) 監視

応急対策を実施した箇所，もしくは健全性の診断の結果，当面は応急対策または本対策の適用を見送ると判断された箇所に対し，変状の挙動を追跡的に把握することをいう．

9) トンネル本体工

覆工，坑門，内装板，天井板，路面，路肩，排水施設および補修・補強材をいう．（**図 2-2** 参照）

10) 付属物の取付金具

天井板や内装板，トンネル内附属物を取り付けるための金具類をいい，吊り金具，ターンバックル，固定金具，アンカーボルト・ナット，継手等をいう．（**図 2-2** 参照）

11) 点検員

点検員は，点検作業に臨場して点検作業班の統括および安全管理を行う．また，利用者被害の可能性がある変状・異常を把握し，応急措置や応急対策，調査の必要性等を判定する．

12) 点検補助員

点検補助員は，点検員の指示により変状・異常箇所の状況を具体的に記録するとともに，写真撮影を行う．

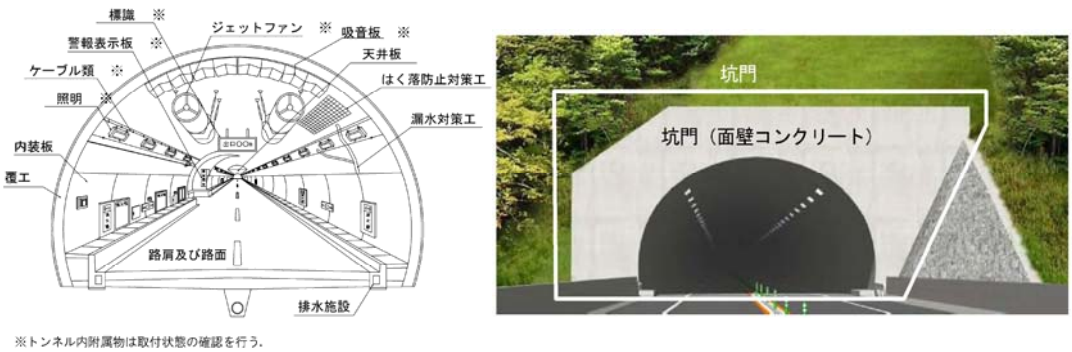


図 2-2 トンネル本体および付属物概要図[2.4]

13) 調査技術者

調査技術者は，点検結果から調査が必要と判断された場合，変状の原因，進行を推定し，適切な調査計画を立案する．また，調査結果から利用者被害の発生の可能性や本対策の方針，実施時期および健全性の診断結果を提案する．

2.2.2 点検の目的

定期点検は，道路トンネルの変状・異常を把握，診断し，当該道路トンネルに必要な措置を特定するために必要な情報を得るものであり，安全で円滑な交通の確保や第三者への被害の防止を図るなど，トンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施する．定期点検は，メンテナンスサイクル（点検，診断，措置，記録）のうち，巡回等の日常的な維持管理や事故，災害時の緊急的な維持管理と区別し，定められた頻度や方法で点検を実施し，その結果を定量的・定性的に診断し，点検表に記録を残す一連の行為を指す．**図 2-3** に定期点検を対象としたメンテナンスサイクルの基本的なフローを示す．

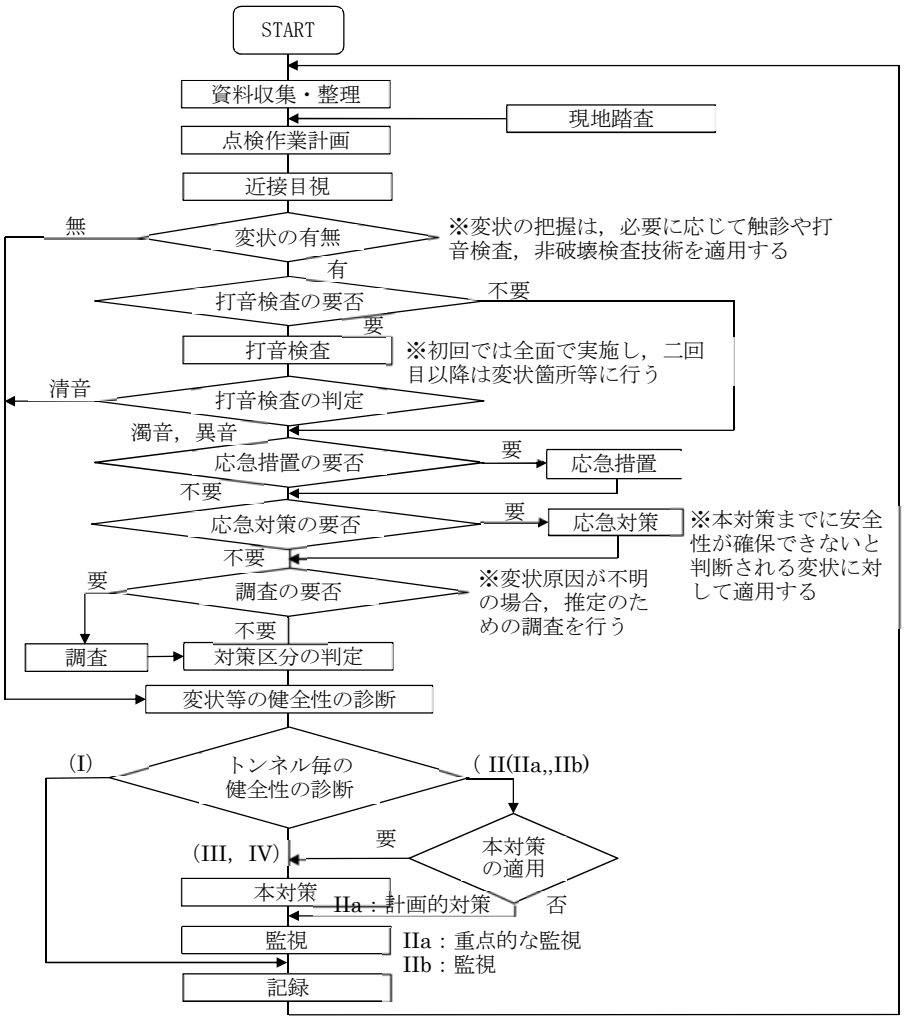


図 2-3 道路トンネルメンテナンスサイクルフロー[2.5 を加筆修正]

2.2.3　点検の頻度

定期点検は，トンネルの最新の状態を把握するとともに，次回の定期点検までに必要な措置等の判断を行う上で必要な情報を得るために行うものである．一定の期間ごとに定められた方法で点検を実施し，必要に応じて調査を行い，その結果をもとにトンネルごとでの健全性を診断し，記録を残すことである．

定期点検は，上記目的に合わせて，5 年に 1 回の頻度で実施することを基本とする．なお，トンネルの状態によっては 5 年より短い間隔で点検する必要がある． また，初回の定期点検は，トンネル建設後 1 年から 2 年の間に実施するのが望ましい．ここでいう建設後とは，覆工打設完了後のことを指す．これは，初期の段階に発生したトンネルの変状・異常を正確に把握した記録が，以後の維持管理に有効な資料となるためである． なお，トンネルの機能を良好に保つため，定期点検に加え，日常的なトンネルの状態の把握や，事故や災害等によるトンネルの変状・異常の把握等を適宜実施することが望ましい．

附属物定期点検では，トンネル本体工と同時にトンネル内の附属物の取付け状態を確認する．なお，附属物の機能に係る点検は別途実施することが望ましい．

2.2.4　点検の体制

道路トンネルの定期点検を適正に行うために必要な知識および技能を有する者がこれを行う必要がある．**表 2-4** にその内容を示す．

2.2.5　点検の方法

1)　トンネル本体工の点検

定期点検は，基本としてトンネル本体工の変状を近接目視により観察する．また，覆工表面のうき・はく離等が懸念される箇所に対し，うき・はく離の有無及び範囲等を把握する打

表 2-4　トンネル点検に必要な知識・技能・資格

役職	職務内容	必要知識・技能	必要資格
点検員	トンネルの変状・異常を確実に抽出し，利用者被害を防止するための応急措置および調査の必要性等を判断する	トンネルに関する一定の知識（設計，施工や維持管理等）および技能を有する	トンネルに関する一定の実務経験を有するもの 管理者が認めた専門的資格を有するもの
点検補助員	点検員の指示により変状・異常箇所の状況を具体的に記録するとともに，写真撮影を行う	トンネルに関する基礎知識や写真撮影等の技能を有する	－
調査技術者	点検結果に基づき変状の要因，進行性を把握するための調査を計画，実施し，変状等の健全性の診断を行い，本対策の必要性およびその緊急性の判定を行うとともに，覆工スパン毎の健全性を診断し，その結果を総合してトンネル毎の健全性の診断を行う	トンネルの変状に関する必要な専門的知識および技能を有する	技術士（トンネル） RCCM（トンネル）

音検査を行うとともに，利用者被害の可能性のあるコンクリートのうき・はく離部を撤去するなどの応急措置を講じる．

点検のうち，初回の点検においては，トンネルの全延長に対して近接目視により状況を観察すること，覆工表面を全面的に打音検査することを基本とする．また，2 回目以降の点検においては，トンネル全延長に対して近接目視を行うとともに，必要に応じて打音検査を併用することを基本とする．なお，近接目視とは，肉眼により部材の変状等の状態を把握し評価が行える距離まで接近して目視を行うことである．今後，調査技術者が近接目視によって行う評価と同等の評価が行えると判断できる新技術が開発された場合は，新技術の併用を妨げるものではない．また，近接目視による変状の把握には限界がある場合もあるため，必要に応じて触診や打音検査を含む非破壊検査技術等を適用する．

点検の結果，変状の状況をより詳細に把握し，推定される変状原因を確認することが必要となる場合には，変状の状況に見合った調査を実施する．なお，点検により変状原因が既に明らかになっている場合等においては，調査を省略することができる．

2) 附属物の点検

トンネル内附属物の取付状態や取付金具類等の異常を確認することを目的に，近接目視やハンマー等による打音検査，手による触診を行うことを基本とする．この場合は別途示されている要領等を参考とする．また，利用者被害の可能性のある附属物の取付状態の改善を行うなどの応急措置を講じる．定期点検の現地作業の実施に先立ち，点検対象トンネルに関する資料収集・整理を行う．すなわち，点検対象トンネルの点検記録や，補修・補強記録等を収集し，過去に発生した変状を把握する．また，点検対象トンネルの建設時の設計図書や地質関係資料・施工記録等を収集する．さらに，点検の実施体制を整え，現地踏査を行い，交通状況等の現地状況を把握し，効果的・効率的な点検作業計画を立案する．

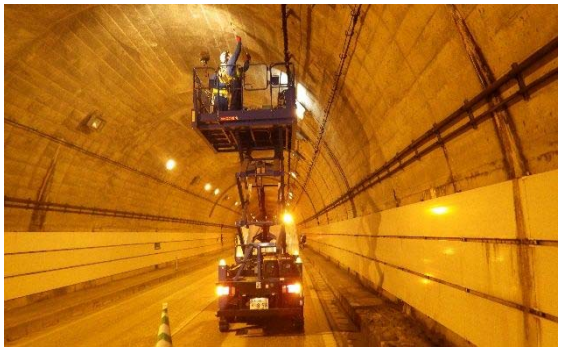
3) 近接目視

日常的な施設の状態把握では発見しづらい変状・異常がある覆工アーチの上部や，坑門の上部等に対して，トンネル点検車等を用いて肉眼により部材の変状等の状態を把握し評価が行える距離まで接近し，ひび割れ，うき，はく離，漏水の状況，トンネル内附属物の取付状態を観察する．　（**図 2-4** 参照）

ひび割れについては，必要に応じてその位置，長さ，幅，段差等を目盛り付きルーペまたはクラックスケール等を用いて計測する．また，ひび割れの形態を開口，圧ざ，段差等に分類して整理し，点検表に記載する．なお，覆工表面は排気ガス等で汚れている場合があり，必要に応じて清掃し，変状・異常の把握に努めることが望ましい．

4) 打音検査

打音検査にあたっては，頭部重量 100～300g 程度の点検用ハンマーを用いて，初回点検では，変状がなくても全面において行う．また，二回目以降の点検においては，前回の定期点検で確認されている変状箇所，新たに変状が確認された箇所，対策工が施されている箇所およびその周辺，水平打継ぎ目・横断目地部およびその周辺に対して打診することを基本とし，コンクリートのうき，はく離の有無とその範囲等を確認する．打音による判定の目安は，



アーチ部打音検査状況

アーチ部近接目視状況

側壁部近接目視状況

附属物（照明）触診状況

図 2-4　点検状況写真

表 2-5　打音による判定の目安[2.5]

打音区分	状態	判定
清音	キンキン，コンコンといった清音を発し，反発感がある．	健全
濁音	ドンドン，ドスドスなど鈍い音がする	劣化，表面近くに空洞がある
	ボコボコ，ペコペコなど薄さを感じる音がする	うき・はく離している

表 2-5 のとおりである．

附属物に対しては取付ボルト，ナット等に対して実施する．なお，内装板、路面は打音検査の対象としない．

5)　触診

トンネル内附属物の取付状態等については，トンネル点検車等により点検対象物に接近し，直接手で触れて固定状況や損傷の有無を確認する．（**図 2-4** 参照）

2.2.6　調査の方法

点検結果からある変状が確認され，判定を行う場合，変状原因を推定するための調査を行う必要がある．調査は変状の状態に応じて，調査項目を適宜選定する．　調査の代表的な手法を**表 2-6** に示す．調査は既往資料，気象，地表面・地山及び覆工等のトンネルの構造物を対象として実施する．調査項目は調査対象物や推定される変状原因に応じて，適宜選定する．

表 2-6　代表的な調査方法[2.5]

種別	調査方法	
ひび割れ進行性調査	ひび割れ進行性調査は変状の進行の有無とその進行状況を確認する目的で行われる．ひび割れは，温度変化によるコンクリートの膨張，収縮にともない，開閉を繰り返す．したがって，ひび割れの測定と併せて坑内温度も測定することが望ましい．また，ひび割れ進行の有無を判断するためには通常の場合１年以上継続して測定を継続することが望ましい． 具体的には，ひび割れゲージなどを壁面に貼りつけ継続的に測定を行う．	
漏水調査	漏水の調査は，位置，量，濁りの有無，凍結及び既設漏水防止工の機能の状況等について実施する．	
	位置	漏水位置が車両運転，坑内設備の機能を阻害する位置にあるか否かについて調べる．
	漏水量	トンネル内の漏水量や漏水状態及び側溝等の排水状態を調べる．
	濁り	漏水が透明なものであるか，濁ったものであるかによって，土砂が漏水とともに流出しているかについて調べる．
	凍結	凍結については次の項目について調査する． 位置…トンネル延長方向・断面方向の分布 程度…つらら・側氷，路面凍結の発生時期，大きさ，成長速度 気温…積算寒度，最低気温，トンネルが長い場合には坑内気温分布
	既設漏水防止工の機能調査	既に行った漏水防止工事の種類，箇所及び排水設備の状況を明らかにし，それらの効果と機能状況について調査する．
漏水水質調査	水質試験は，覆工コンクリート等の劣化原因や漏水の流入経路の推定を行うことを目的としている．調査項目としては水温，pH 及び電気伝導度である． 水温は温度計等によって測定される．水温の箇所ごとの季節的変動をみることによって，漏水が地下水に関係するものか，地表水に関係するものかの判別に利用できる．pH の測定は，覆工コンクリートの劣化に及ぼす影響を把握するために行われる．	
覆工厚・背面空洞調査	覆工コンクリートの巻厚や背面の空洞及び背面の地山状況を調査し，変状原因の推定及び対策設計等に必要な資料を得ることを目的とした調査である． 調査方法には，局所破壊検査と非破壊検査に大別される．	
	a) 局所破壊検査による調査	局所破壊検査とは簡易ボーリングにより覆工コンクリートの一部を削孔し，採取したコアによる物性や劣化状況を調査するとともに削孔時のボーリング孔を利用して覆工コンクリートや背面空洞の有無，背面地山の状況を観察・把握する調査方法である．併せて採取したコアから，コンクリートの圧縮強度や中性化深さを確認する場合もある．
	b) 非破壊検査による調査	非破壊検査に使用されている手法として実用化されているのは電磁波法（地中レーダ）による覆工巻厚，空洞の有無や大きさの調査である．

2.2.7　対策区分の判定

1)　概説

対策区分とは，利用者への影響の可能性と措置の必要性の観点から変状の状態を表すものであり，その判定区分は本体工に対してはⅠ，$\mathrm{Ⅱ_b}$,$\mathrm{Ⅱ_a}$,Ⅲ,Ⅳの 5 段階，附属物の取付状態に対しては，「○」,「×」で区分される．対策区分の判定は，本体工の変状あるいは附属物の取付状態の異常が利用者に及ぼす影響を詳細に把握し，適切な措置を計画するために行うものである．判定は，点検あるいは調査によって把握した本体工の変状および附属物の取付状態の異常の状況に基づいて，本体工と附属物のそれぞれについて行う．なお，判定においては，利用者に対して影響を及ぼす可能性，必要な措置の緊急性に着目する．

なお，対策区分の判定後は，その判定結果を参考に，Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳの 4 段階で健全性の診断

を行う.

2) 本体工

(1)対策区分の考え方

本体工を対象とした対策区分の判定は，点検・調査より把握した変状状況にもとづき，**表 2-7** により判定を行うもので，この結果は健全性の診断に用いるもので，構造物の機能と措置の必要性から区分している．ここでいうトンネルにおける構造物の機能とは，利用者が安全にトンネル内を通行できることであり，大別すると以下の 2 種類が考えられる．

① 「トンネルの構造安定性の確保」：トンネルが構造的に安定し，トンネル内の通行等に必要な空間が確保されていること

② 「利用者の安全性の確保」：落下物や漏水等によってトンネル内の通行等が阻害されておらず，安全が確保されていること

対策区分の判定は，上記の構造物の機能に加えて，**表 2-8** のように措置の実施に対する緊急性および変状の程度も考慮する必要がある．

表 2-7 判定区分[2.5]

判定区分		定義
Ⅰ		利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため，措置を必要としない状態.
Ⅱ	$Ⅱ_b$	将来的に，利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため，監視を必要とする状態.
	$Ⅱ_a$	将来的に，利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態.
Ⅲ		早晩，利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため，早期に対策を講じる必要がある状態.
Ⅳ		利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため，緊急に対策を講じる必要がある状態.
※1 判定区分Ⅳにおける「緊急」とは，早期に措置を講じる必要がある状態から，交通開放できない状態までを言う.		

表 2-8 本体工に対する対策区分と構造物の機能への影響[2.5]

判定区分		トンネルの構造物の機能に対する影響		措置の緊急性	変状の程度
		トンネルの構造安定性に及ぼす影響	利用者の安全性に及ぼす影響		
Ⅰ		支障がない	支障がない	必要としない	変状がない，もしくは軽微である
Ⅱ	$Ⅱ_b$	支障はないが措置を要する	支障はないが措置を要する	監視を必要とする	変状が軽微であるが将来的に顕在化する可能性がある
	$Ⅱ_a$	支障はないが措置を要する	支障はないが措置を要する	重点的に監視をし，計画的な対策を必要とする	変状があり，将来的に顕在化する可能性がある
Ⅲ		支障を生ずる可能性があり，措置を要する	支障を生ずる可能性があり，措置を要する	早期に対策を講じる必要がある	変状が顕在化している
Ⅳ		支障がある，または支所を生ずる可能性が著しく高く，措置を要する	支障がある，または支所を生ずる可能性が著しく高く，措置を要する	緊急に対策を講じる必要がある	変状が顕著である

トンネルにおける変状の区分は，変状対策の目的や対応から，以下，①外力による変状に対する対策区分，②材質劣化による変状に対する対策区分，③漏水による変状に対する対策区分の 3 種類に分類する．

対策区分の判定の単位は，外力による変状については覆工スパン毎（外力は覆工に対して通常面的に作用するものであるため，その影響は覆工の構造単位である 1 スパン全体に及ぶものと考えられるため）に行い，材質劣化，漏水については個々の変状ごとに行う． **表 2-9** に示す変状区分ごとに対応する変状種類に関して、対策区分の判定を行う．ここでいう変状種類とは，対策区分の判定を行うための変状現象のカテゴリーである．

ここでたとえば，変状現象としてひび割れが確認された場合，その変状原因を調査等により明確にする．その結果外力が変状原因であると判断された場合，変状種類のうち，「圧ざ，ひび割れ」によって対策区分の判定を行うこととなる．変状原因が材料劣化であると判断された場合は，**表 2-8** に示す利用者の安全性が懸念されることから，そのひび割れによって誘発される「うき，はく離」，鋼材腐食が原因の場合は「鋼材腐食（鉄筋腐食含む）」で判定を行う．

なお，ひび割れには，その発生原因に外力と材質劣化が想定され，その原因を特定することが困難な場合が多い．ひび割れについては発生原因に関わらず変状展開図に記録するが，点検結果総括表や写真台帳には外力によるひび割れを記録することとなる．このため，点検結果のみから変状原因を特定することができないものの外力の作用が疑われるひび割れについては，点検結果総括表ならびに写真台帳に記録し，外力の作用が疑われることを暫定的な判定結果として特記事項あるいはメモ欄に記録する．これらの記録は，その後の点検等によって変状原因が明らかになった段階で更新する必要がある．

点検により把握した変状の原因が明らかな場合は，調査を省略して，本対策を実施することも認められるが，巻厚不足，背面空洞，有効巻厚の減少などは，基本的には調査を行った結果からでないと対策区分の判定は不可能と考えられる．

表 2-9　変状区分に対応する変状種類[2.5]

変状種類	変状区分			
	外力		材料劣化	漏水
	通常の外力	突発性の崩壊		
① 圧ざ※，ひび割れ	○			
② うき，はく離	○		○	
③ 変形，移動，沈下	○			
④ 巻厚不足，背面空洞		○		
⑤ 鋼材腐食（鉄筋腐食含む）			○	
⑥ 有効巻厚の減少			○	
⑦ 漏水等による変状				○

※圧ざ：断面内で圧縮による軸力と曲げモーメントの影響が顕著に現れ，トンネルの内側が圧縮によりつぶされるような状態で変状等を生じる状態をいう．

表 2-10 圧ざ，ひび割れに対する判定区分[2.5]

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

表 2-11　点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の判定の目安例[2.5]

対象箇所	部位区分	ひび割れ						判定区分
		幅			長さ			
		5mm 以上	3~5mm	3mm 未満	10m 以上	5~10m	5m 未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	Ⅰ～Ⅱa
			○				○	Ⅱa
			○			○		Ⅲ
			○		○			Ⅲ
		○					○	Ⅱb～Ⅲ
		○				○		Ⅲ
		○			○			Ⅳ

表 2-12　点検時（ひび割れの進行が確認された場合）の判定の目安例[2.5]

対象箇所	部位区分	ひび割れ				判定区分
		幅		長さ		
		3mm 以上	3mm 未満	5m 以上	5m 未満	
覆工	断面内		○	○	○	Ⅱa，Ⅲ
		○			○	Ⅲ
		○		○		Ⅳ

以下にそれぞれの変状種類における判定区分の解説と留意点を述べる．

(2)圧ざ，ひび割れ

圧ざ，ひび割れに対しては，それらの進行性に着目し，その有無によってひび割れ規模（幅や長さ）等に着目した判定となっている．その判定区分を**表 2-10** に，進行性が確認できない判定の目安例を**表 2-11** に，進行性が確認された判定の目安例を**表 2-12** に示す．なお，ひび割れの進行の有無の判断は，過去の点検記録や調査結果等を参考とする．

以下に判定のための留意点を示す．

① 連続したひび割れ内で幅が変化する場合は，最大幅を当該ひび割れの幅とすることが望ましい．

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

③ 3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す．

Ⅰ,Ⅱb：ひび割れが軽微で，継続的に外力が作用している可能性が低く，ひび割れに進行が確認できないもの．

Ⅱa：地山条件や周辺のひび割れ発生状況等から，継続的な外力の作用の可能性がある場合または外力の作用が明らかに認められる場合は，その影響を考慮して判定を行う．

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

⑤ アーチ・側壁間における水平打継ぎ目の段差，あるいは段差のあるひび割れ，不等沈下による変状等は，トンネルの構造安定性を低下させる前兆である．

⑥ ひび割れが複数ある場合は，最大の幅を有するひび割れの最大長を対象とする．

⑦ ひび割れが密集している場合で，幅 0.3mm 以上のひび割れ密度が 20cm/m^2 以上の場合，変状の原因を考慮しながら，1 ランク上げるものとする．

⑧ ひび割れ密度が 20cm/m^2 未満の場合でも局所的に密集している場合も同様とする．

⑨ 引張ひび割れの延長が 10m 以上で，かつ段差が 5mm 以上の場合も同様とする．

⑩ アーチ部に不規則なひび割れや放射状のひび割れ等が確認された箇所は，集中的な緩み土圧が作用している可能性があり，有効巻厚の不足または減少が伴う場合，突発性崩壊（巻厚不足・背面空洞）につながる可能性が懸念される．

⑪ 圧ざが確認された箇所は過大な外力が作用していると考えられ，このような変状が確認された箇所については緊急に対策を講じる必要がある．

(3) うき，はく離

外力に起因する覆工の変形，または材質劣化等でひび割れが発生し，それが閉合することでうき，はく離が生じることがある．これらに対する対策区分の判定は，覆工コンクリートの落下に着目しておりその内容は，**表 2-13** に示すとおりである．うき，はく離部の落下の危険性は，ひび割れ等の状況や打音異常で判断することから，判定の目安は，**表 2-14** に示すとおりである．なお，うき，はく離の判定は，打音検査時にたたき落としを行ったあとに実施する．

表 2-13　うき，はく落に対する判定区分[2.5]

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

表 2-14 うき・はく離等に対する判定の目安例[2.5]

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

以下に判定のための留意点を示す．

① 一般に外力に起因するひび割れの周辺部には，うきが生じやすい．特に圧ざや，せん断ひび割れの周辺にあるうきについて，早急の対応が必要である．

② ひび割れのブロック化，閉合化，交差によってうき，はく離が発生することが多い．

③ ブロック化とは，ひび割れ等が単独またはひび割れと目地，コールドジョイント等で閉合し，覆工が分離した状態をいう．

④ 打音異常が認められる場合は，Ⅲ～Ⅳとなる．

⑤ 打音異常が認められない場合，判定区分Ⅱb によることを基本とするが，下記の場合は判定区分Ⅱa またはⅢとする等を検討する．

・ブロック化の面積が大きい場合

・ひび割れの発生状況から落下の危険性が考えられる場合

・ブロック化が進行している場合

・劣化要因が明確な場合や寒冷地等の厳しい環境条件下にある場合

⑥ 補修材等のうき・はく離については，本体工に生じるうきに比べてその厚さが薄いことが多いため，発生位置等を考慮し，判定することが望ましい．

(4) 変形，移動，沈下

覆工の変形，移動，沈下は，一般的には徐々に進行するが，地震，地すべり，大雨等により急激に進行することもある．また，寒冷地における凍上圧による変形のように，変動を繰り返しながら進行するものもある．

表 2-15　変形，移動，沈下に対する判定区分[2.5]

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

表 2-16　変形速度に対する判定の目安例[2.5]

対象箇所	部位区分	変形速度				判定区分
		10mm/年以上（著しい）	3mm/年以上10mm/年未満（進行が見られる）	1mm/年以上3mm/年未満（進行が見られる～緩慢）	1mm/年未満（緩慢）	
覆工 路面 路肩	断面内				○	II_b, II_a
				○		II_a
			○	○		Ⅲ
		○				Ⅳ

これらによる対策区分の判定を**表 2-15** に示す．トンネルの変形，移動，沈下については変形速度が目安となる．変形速度の判定の目安例を**表 2-16** に示す。

以下に判定のための留意点を示す．

① 路面・路肩の変形，移動，沈下については，建築眼界への影響，車両通行および歩行の安全性の観点から，変形速度に加えて変形量も測定する必要がある．

② 進行の傾向が加速度的と考えられる場合については，判定区分をランクアップする必要がある．

③ 両側壁が内空側に変位する場合は，トンネルとしては両側壁の変位を合わせた変位量を対象とする．

④ 坑口付近の土被りの小さい場所では，斜面の不安定化，漏水，背面空洞など複合することがあるので，注意する必要がある．

⑤ 断面変形の場合，路面，側溝等の変状が先行することがあるので，その形状にも着目する必要がある．

⑥ 地すべり地域などでは，広範囲に覆工が移動，変形することがあるため，地すべり対策の中で対策を講じる必要がある．

⑦ 変形速度 1～3mm の場合の判定例を下記に示す．

II_a：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が低い場合

・変形量自体が小さい場合

・変形の外的要因が明確でないまたは進行も収束しつつある場合等

Ⅲ：将来的に構造物の機能低下につながる可能性が高い状態

・変形量自体が大きい場合

・地山からの荷重作用が想定される場合（変形の方向が斜面方向と一致する等）

(5)巻厚不足・背面空洞

巻厚不足および背面空洞が確認されるトンネルでは，突発性の崩壊の可能性が懸念される．突発性の崩壊とは，見かけ上の変状が小さい状況で，覆工が突然に崩壊することで，覆工の背面空洞に土砂や岩塊が崩落する現象である．突発性の崩壊の可能性は,背面の位置と規模，ならびに巻厚不足に着目し，**表 2-17** の判定区分を参考に判定を行う．なお，判定の目安を**表 2-18** に示す．

表 2-17　突発性の崩壊の可能性に対する判定区分[2.5]

判定区分	変状の状態
Ⅰ	覆工背面の空洞が小さいもしくはない状態で，有効な覆工厚が確保され，措置を必要としない状態
Ⅱa	覆工アーチ部または側面の覆工背面に空洞が存在し，今後湧水による地山の劣化等により背面の空洞が拡大する可能性があり，予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
Ⅲ	アーチ部の覆工背面に大きな空洞が存在し，背面の地山が岩塊となって落下する可能性があり，早期に対策を講じる必要がある状態
Ⅳ	アーチ部の覆工背面に大きな空洞が存在し，有効な覆工厚が少なく，背面の地山が岩塊となって落下する可能性があり，緊急に対策を講じる必要がある状態

表 2-18　突発性の崩壊の可能性に対する判定の目安例[2.5]

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

以下に判定のための留意点を示す.

① 巻厚不足が施工上の不具合によって生じた場合，近接目視点検や打音検査みでは不足箇所の有無や範囲を把握することは困難である.（空洞，巻厚調査が必要）

② 矢板工法で建設されたトンネルでは,施工上の不具合に起因する巻厚不足が生じやすい.

③ 不規則なひび割れや放射状のひび割れ等が確認された箇所においては，突発性の崩壊につながる可能性がある.

④ 建設時にトラブルが発生している場合や，漏水が多く層理面に沿って地山が分離しやすい地質構造は，背面空洞を生じやすい.

⑤ 小規模でも背面空洞や巻厚不足の面的な広がりによって崩壊が生じる可能性が高まることがある.

⑥ 背面空洞が側面の場合，あるいは地山の状態や覆工の性状が比較的良い場合は，Ⅱa として判定する

⑦ 背面空洞の深さが 30cm 未満程度の場合は，覆工の性状や土砂流入の状態によって判定する.

(6)鋼材腐食

内巻補強工等の覆工補修・補強対策等で用いられている鋼材腐食，有筋の覆工コンクリートの鉄筋が露出している箇所について表 2-19 にように判定を行う。

以下に判定のための留意点を示す.

① 今後の進行具合も考慮し，腐食原因も把握すべきである.

② 坑門のように，構造材として鋼材が設計計算される場合は，鉄筋コンクリート構造物として健全性を検討する必要がある.

表 2-19　鋼材腐食に対する判定区分[2.5]

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

③ 側壁部の鉄筋の一部が露出しているが，断面欠損が軽微な場合は，Ⅱbである．

④ アーチ部の鉄筋の一部が露出しているが，断面欠損が軽微な場合は，Ⅱaである．

⑤ 鉄筋が錆びて鉄筋の被り部分のコンクリートが一部欠落し，多数の鉄筋露出が認められる場合は，Ⅲである．

⑥ 鉄筋腐食に伴い覆工コンクリートが大規模に欠落し，構造的な安定性が著しく低下している場合は，Ⅳである．

⑦ 補強用の鋼材の断面欠損も著しく，落下の可能性の高い場合は，Ⅳである．

(7)有効巻厚の減少

有効巻厚の減少は，おもに覆工コンクリートの材質劣化の進行に伴って生じると考えられる．ここでいう有効巻厚とは，残存する覆工コンクリートのうち，強度が設計基準強度以上の部分をいい，設計基準強度が不明な場合は 15N/mm^2 以上の部分をいう．覆工コンクリートの表面に不規則なひび割れがみられている場合，打音検査により異音が確認された場合，比較的規模が大きな豆板等が見られる場合等においては，材質劣化や凍害により有効巻厚が減少していると想定される覆工スパンや箇所を対象に，表 2-20 のように判定を行う。なお，判定の目安例を**表 2-21** に示す．以下に判定のための留意点を示す．

① 有効巻厚／設計巻厚が 1/2 未満は判定区分Ⅲ，1/2～2/3 は判定区分Ⅱaを基本とするが，巻厚不足に起因するひび割れや変形の発生が認められる場合，判定区分をそれぞれⅣ，Ⅲへ１ランク上げることが望ましい．

表 2-20　有効巻厚の不足または減少に対する判定区分[2.5]

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

表 2-21 有効巻厚の不足または減少に対する判定の目安例（矢板工法の場合）[2.5]

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

② 矢板工法によって建設されたトンネルには特に留意する必要がある．

③ 山岳トンネル工法について，水圧を考慮した設計のトンネルは，覆工の仕様が異なるため，別途要求性能に適合した検討が必要となる．

④ 点検だけでこの原因を把握するのは困難であり，調査が必要となる．

(8)漏水による変状に対する判定

漏水等による変状は，**表 2-22** を参考として判定を行う．漏水の場合は，度合（**表 2-23**）がどの程度か，利用者に影響があるか，監視が必要か，アーチか，側壁か，によって決められる．その判定の目安を**表 2-24** に示す．

表 2-22 漏水等による変状に対する判定区分[2.5]

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

表 2-23 漏水の度合[2.5]

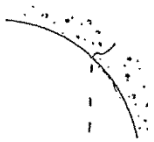
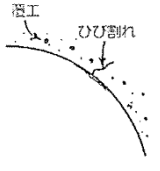
項目	漏水の度合			
	噴出	流下	滴水	浸出（にじみ）
漏水状況	水圧の作用により水が噴き出している	自然流下のような状態で，連続的に水が流出している	ポタポタと落ちるような状態で，断続的に水が流出している	表面がぬれている状態で，滴水等はない
模式図				

表 2-24　漏水等による変状に対する判定の目安例[2.5]

箇所	主な現象	漏水の度合				利用者への影響		判定区分
		噴出	流下	滴水	浸出	有	無	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa※
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ，Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ，Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ，Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ，Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ，Ⅳ

※：利用者への影響がない場合は，Ⅱb とする

以下に判定のための留意点を示す.

① 土砂流入等による排水機能の低下が著しい場合，路面・路肩の滞水による車両の走行障害が生じている場合，路床路盤の支持力低下が顕著な場合，舗装の劣化，氷盤の発生，つらら，側氷等による道路利用者への影響が大きい場合は判定区分を１ランク上げて判定することが望ましい.

② 判定にあたっては，降雨の履歴や規模，部位区分の影響を考慮し判定することが望ましい.

③ 土砂を伴う漏水の判定はⅣであり，路面に堆積した土砂が漏水によるものか，外部から流れ込んだものか，その見極めが大切である.

④ 塩害と複合する漏水，凍害と複合する漏水，あるいは有害水の漏水等の場合，覆工の材質劣化や覆工の浸食が促進することに留意しなければならない.（水質調査が必要となる）

⑤ エフロレッセンス等による美観への影響や，坑内に上砂が流入することによる排水機能の低下について注意する必要がある.

⑥ 漏水範囲の拡大や漏水量の増加は，背面の地山の緩みに起因する場合と，降水量等の増加に起因する場合がある.

⑦ 地山の緩みの増加によって透水性が促進したり，地山が浸食されたりするケースがあるので，突発性の崩落の防止を図る観点から調査によって原因やメカニズムを検討してお

く必要がある。

⑧ 寒冷地では，裏面排水の不良が漏水の原因となる場合があるので，十分留意する必要がある．

⑨ つららや側氷は，日常点検時においても注視し，必要に応じて除去する必要がある．

⑩ 排水不良による路面の滞水が発生している場合，早急に排水機能の回復に努めなければならない．

⑪ 場合によっては，排水不良による水圧の上昇も考えられるため，計測による水位，水圧調査が必要となる．

⑫ インバートが設けられていない箇所において，路肩側溝からの漏水による地山劣化により路肩変状や盤ぶくれに発展することがあるので，その際には調査による確認が必要となる．

3) 附属物の取付状況

附属物の取付状態の異常の判定は，附属物本体，取付金具，ボルト・ナット，アンカー類ごとに，点検により把握したこれらの取付状態に基づいて，**表 2-25** に示す異常判定の区分により行う．取付状態の異常は，利用者被害につながる可能性があるため，異常箇所に対しては再固定，交換，撤去する方法や設備全体を更新するなどの方法による対策を早期に実施する必要がある．以上を踏まえ，判定区分は「×」（早期に対策を要するもの）と，「○」（対策を要さないもの）の 2 区分に大別する．また，利用者被害を与えるような異常が発見された場合には，被害を未然に防ぐための応急措置として，ボルト・ナットの緩みの締め直し等を行うものとし，異常判定は応急措置を行ったあとの状態で行うものとする．附属物の取付状態の異常に関しては，**表 2-26** を参考に判定する．

以下に判定のための留意点を示す．

① 附属物の取付状態の判定は，対象となる附属物の落下が懸念される事象となる．

・照明灯具など小規模な附属物は，附属物単位での判定が適切である（ボルト，アンカー，灯具などと分けて判定結果を整理する必要はない）

表 2-25　附属物の取付状況に対する異常判定区分[2.5]

異常判定の区分	異常判定の内容	附属物の取付状態
×	附属物の取付状態に異常がある場合	・利用者被害の可能性がある場合 ・ボルトの緩みを締め直したりする応急措置が講じられたりしても，今後も利用者被害の可能性が高く，再固定，交換，撤去や設備全体を更新するなどの方法による対策が早期に必要な場合
○	附属物の取付状態に異常がないか，あっても軽微な場合	・異常はなく，特に問題のない場合 ・軽微な変状で進行性や利用者被害の可能性はなく、特に問題がないため，対策が必要ない場合 ・ボルトの緩みを締め直しする応急措置が講じられたため，利用者被害の可能性はなく，特に問題がないため，対策が必要ない場合 ・異常箇所に対策が適用されてその対策の効果が確認されている場合

表 2-26　定期点検による附属物の取付状態の異常判定区分一覧表[2.5]

異常の種類	異常判定区分「×」	附属物本体	取付金具	ボルト・ナット，アンカー類
破断	取付金具類に破断が認められ，落下する可能性がある場合		○	○
緩み，脱落	ボルト・ナットに緩みや脱落があり，落下する可能性がある場合			○
亀裂	亀裂が確認され,落下する可能性がある場合	○	○	○
腐食	取付金具類の腐食が著しく，損傷が進行する可能性がある場合	○	○	○
変形，欠陥	取付金具類の変形や欠損が著しく，損傷が進行する可能性がある場合	○	○	
がたつき	取付金具類のがたつきがあり，変形や欠損が著しく，落下する可能性がある場合	○	○	

・ジェットファンなど大型の附属物については，取付部材単位での判定結果の整理が望ましい（取付金具，ボルト，金具等）

② 定期点検の際には，現地にて前回の定期点検時の点検結果を携行し，前回定期点検の異常と照合しながら，異常の進行性を把握する必要がある．

③ 異常の状態（例えば照明灯具の多くに取付状態の異常が確認され，灯具本体の腐食や機能低下も発生している場合）によっては,設備全体を更新するなどの方法も含め，個別に対応を検討することが望ましい．

2.2.8　健全性の診断

1)　概説

健全性の診断は，トンネルの機能に対する支障の有無ならびに措置の緊急度を判定することである．定期点検における健全性の診断は，本体工および附属物の点検または調査の結果により把握された変状・異常の状態に基づいて，変状単位に行う「変状等の健全性の診断」と，構造物単位に行う「トンネル毎の健全性の診断」の 2 段階により行う．なお，健全性の診断と対策区分の関係を**図 2-5** に示す。また健全性の診断の流れ（変状状況の把握～対策区分の判定～変状等の健全性の診断～覆工スパン毎の健全性の診断，トンネル毎の健全性の診断）を**図 2-6** に示す．

健全性の診断は，**表 2-27** のように 4 段階で行う．また附属物の取付状態の異常判定区分については，**表 2-28** のように「○」，「×」により行う．

2)　変状等の健全性の診断方法

(1) トンネル本体工

トンネル本体工に対する健全性の診断は，「**2.2.7 対策区分の判定**」の判定結果に基づき，**表 2-27** の判定区分により行う．対策区分の判定では，各変状に対して 5 段階の判定が行わ

れているのに対し，「変状等の健全性の診断」においては.対策区分ⅡbとⅡaを併せて健全性の診断の判定区分Ⅱとして取り扱う．なお，材質劣化または漏水に起因する変状はそれぞれの変状単位に，外力に起因する変状は覆工スパン単位に行う．また本対策の必要性およびその緊急性の判定を行う．

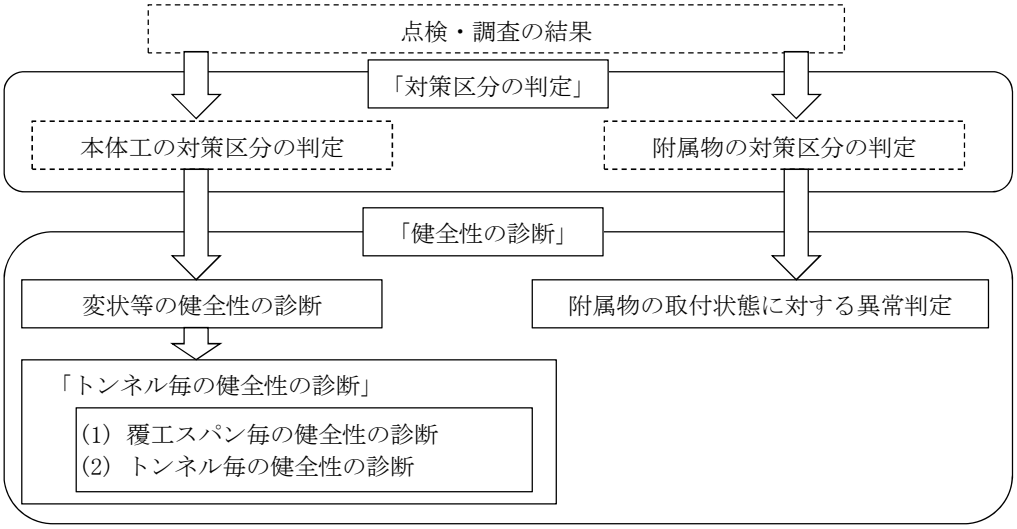


図 2-5　健全性の診断と対策区分の関係[2.5]

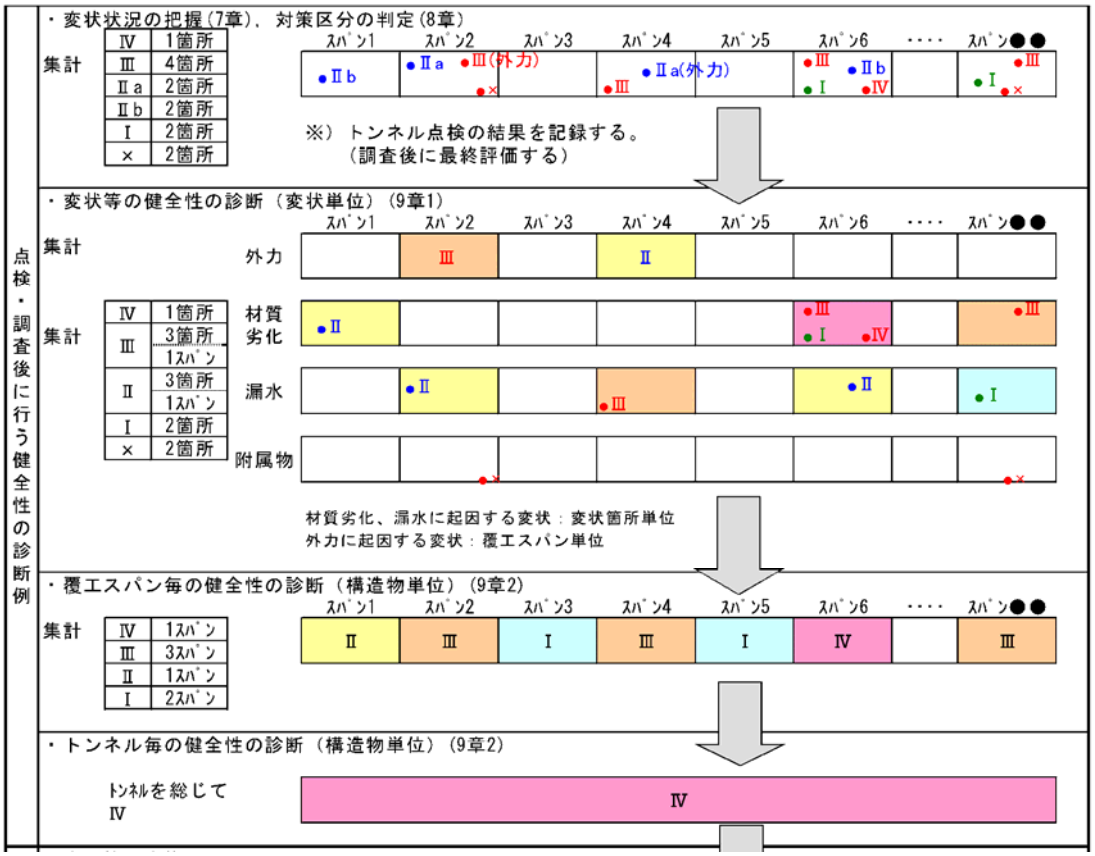


図 2-6　健全性診断の流れの例[2.4]

表 2-27　健全性の判定区分[2.5]

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る可能性があり，早期に措置を講ずべき状態

表 2-28　附属物の取付状況に対する異常判定区分[2.5]

異常判定区分	異常判定の内容
×	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か，あっても軽微な場合

(2) 附属物

附属物の取付状態に対する変状等の健全性の診断は,「**2.2.7 対策区分の判定**」の判定結果に基づき，**表 2-28** の判定区分により行う．附属物の取付状態に対する異常は，外力に起因するものが少ないと考えられ，原因推定のための調査を要さない場合が多い．また，附属物の取付状態の異常は,利用者被害につながる可能性があるため，異常箇所に対しては個別に再固定，交換，撤去や設備全体を更新するなどの方法による対策を早期に実施する必要がある．

3)　トンネル毎の健全性の診断方法

(1) 覆工スパン毎の健全性の診断

覆工スパン毎の健全性の診断は，**表 2-27** の判定区分により行う．診断方法は,「変状等の健全性の診断の方法」で判定した変状単位あるいは覆工スパン単位の材質劣化，漏水，外力に関する各変状のうち，判定対象とする覆工スパンの中で最も評価の厳しい健全性を採用し，その覆工スパンの健全性とする．なお，健全性の診断の判定区分がⅡ～Ⅳに該当する変状がないスパンはⅠと判定する．また，附属物については，覆工スパン毎での健全性の診断は行わない．

(2) トンネル毎の健全性の診断

トンネル毎の健全性の診断は，**表 2-27** の判定区分によりトンネル毎で総合的な判定を行うもので，道路管理者が保有するトンネルを含む全体の状況を把握するなどを目的とする．「変状等の健全性」がトンネル全体の健全性に及ぼす影響は，環境条件や当該トンネルの重要度等によっても異なるため,「変状等の健全性の診断の方法」ならびに「覆工スパン毎の健全性の診断」の結果を踏まえて．トンネル毎で総合的に判断することが必要である．「トンネル毎の健全性の診断」は，本体工に関する健全性の診断の結果に基づいて行うものとし，一般には，利用者や構造物の機能に影響をおよぼす変状等に着目して，各覆工スパンの健全

表 2-29　健全性の診断の判定区分に基づく措置の例[2.5]

健全性診断の判定区分	対策区分の判定区分	措置	
		対策	監視
Ⅰ	Ⅰ	実施しない	実施しない
Ⅱ	$Ⅱ_a$	実施しない	実施する
	$Ⅱ_b$	計画的に実施する	本対策を行わない場合に実施する
Ⅲ	Ⅲ	早期に実施する	本対策を行わない場合に実施する
Ⅳ	Ⅳ	緊急に実施する	本対策を行わない場合に実施する

性の診断結果の中で，最も厳しい診断結果で代表させる．

4)　健全性の診断後の対応

健全性の診断を行った後は，**図 2-3** に示すように「トンネル毎の健全性の診断」の結果に応じて，それぞれ適切な対応をとる必要がある．健全性の診断に対する判定区分と対策区分の判定区分に基づく措置の例を**表 2-29** 示す．（2.2.9**「措置」**参照）

2.2.9　措置

1)　概説

措置は，利用者の安全性の確保とトンネルの構造安定性確保の両方の目的がある．措置にあたっては，点検，調査の結果に基づいて，トンネルの機能や耐久性等を回復・維持させるため最適な対応を道路管理者が総合的に検討する．なお，措置は適用する対策の効果と持続性，即応性，点検後に行われる調査の容易性等から，応急措置，応急対策，本対策，監視に区分して取り扱うものとする．本論文では，トンネル点検方法の解説という観点からそれぞれの概説程度に留めるものとする．

2)　応急措置

(1) トンネル本体工

トンネル本体工の応急措置は，定期点検等における変状状況の把握の段階において，利用者被害を与えるような覆工コンクリートのうき・はく離等の変状が発見された場合に，被害を未然に防ぐために，点検作業の範囲内で行うことができる程度の応急的に講じられる措置をいう．また，うき・はく離以外にも外力や漏水等による変状が発生する場合がある．**表 2-30** に主な応急処置の例を示す．

表 2-30　トンネル本体工の変状に対する主な応急措置の例[2.5]

変状区分	変状の種類	応急措置
外力・材料劣化	うき，はく離	うき・はく離箇所等のハンマーでの撤去
外力	路面の変状	交通規制
漏水	大規模な湧水，路面滞水	交通規制，排水溝の清掃等
漏水	つらら，側氷，氷盤	交通規制，凍結防止剤散布 危険物の除去（たたき落とし等）

表 2-31　附属物の異常に対する主な応急措置の例[2.5]

変状の種類	応急措置
附属物の固定アンカーボルトの緩み	ボルトの締直し
照明灯具のカバーのがたつき	番線による固定（番線固定した灯具等は対策を行うことを基本とする）

(2)附属物

附属物の応急措置の具体例を**表 2-31** に示す.

3)　応急対策

応急対策とは，定期点検等で利用者被害が生じる可能性が高い変状が確認された場合，調査や本対策を実施するまでの期間に限定し，短期的にトンネルの機能を維持することを目的として適用する対策であり，点検後速やかに実施することが重要である．また，応急対策は，即応性があると共に，後の調査・監視をできるだけ妨げない工種を選定する必要がある．ただし，利用者被害の危険性が高く，応急対策を実施するよりも更に速やかに対応が求められる場合は，交通規制等の応急措置を必要に応じて適用する必要があることに留意する．なお，応急対策を実施した変状に対しては，健全性の診断の判定区分は変更しない．はく落防止ならびに漏水に対する応急対策の代表例を**表 2-32** に示す.

4)　本対策

本対策とは，中～長期的にトンネルの機能を回復・維持することを目的として適用する対策である．トンネル本体工の本対策は変状の種類により分類できる．**表 2-33** にトンネル内部から施工する工法の代表例を示す.

また，本対策の実施から 2 年程度以内に，措置後の確認として，本対策を実施した箇所に対して近接目視等を行い，本対策の効果が確実に発揮されているかを確認する必要がある．なお，本対策を実施した変状箇所に対しては，健全度の診断区分をⅠとすることを基本とする.

5)　監視

監視は，応急対策を実施した箇所，もしくは健全性の診断の結果，当面は応急対策や本対策の適用を見送ると判断された箇所に対し，変状の挙動を追跡的に把握するために行う．覆工スパン毎の健全性の診断で「Ⅱ」判定の覆工スパンは，調査結果や変状等の健全性の診断

表 2-32　応急対策の代表例[2.5]

変状区分	対策区分	応急対策の代表例
材料劣化による変状	はく落防止対策	はつり落とし工
		金網，ネット工
		当て板工
		補強セントル工
漏水による変状	漏水対策	線状の漏水対策工
		面状の漏水対策工

表 2-33　本対策の代表例[2.5]

変状区分	対策区分	本対策の代表例
外力による変状	外力対策	内面補強工
		内巻補強工
		ロックボルト工
材料劣化による変状	はく落防止対策	はつり落とし工
		断面修復工
		金網・ネット工
		当て板工
漏水による変状	漏水対策	線状の漏水対策工
		面状の漏水対策工
		地下水低下工
		断熱工

結果を踏まえ，適切な方法にて監視を行うものとする．変状等の健全性の診断結果がⅡa の箇所における重点的な監視とは，前回の定期点検または監視から 2 年後を目安に近接目視を行うことを基本とする．また，Ⅱb の箇所における監視とは，日常巡視等で状況を把握することに努めることを基本とする．また，覆工スパン毎の健全性の診断で「Ⅲ」判定の覆工スパンは，前回の定期点検または監視から 2 年程度以内に近接目視等を実施する．なお，本対策を行わない場合は，判定区分は変更しない．さらに，覆工スパン毎の健全性の診断で「Ⅳ」判定の応急対策を実施した覆工スパンで，やむを得ず早急に本対策までの措置ができない場合は，前回の定期点検から 2 年程度以内に近接目視等を実施する．なお，本対策を行わない場合は，判定区分は変更しない．

2.2.10 記録

記録とは，点検結果，調査結果，健全性の診断結果，措置後の確認結果を適時，定められた様式に記録，記載することをいう．定期点検および診断の結果ならびに措置の結果についてはその内容等を記録し，当該道路トンネルが利用されている期間中は，これを保存する必要がある．点検表記録様式リストを**表 2-34** に示す．なお巻末に実際に行った点検用記録リストの事例を示す．

表 2-34　点検表記録様式リスト[2.5]

様式番号		記載内容
トンネル台帳	様式 A-1	トンネル諸元，非常用施設諸元
	様式 A-2	トンネル情報一覧表
	様式 A-3	トンネル記録（位置図，断面図，施工実績他）
点検調書	様式 B	トンネル変状・異常箇所写真位置図
	様式 C-1-1	点検結果総括表（トンネル本体工）
	様式 C-1-2	点検結果総括表（トンネル内附属物の取付状態）
	様式 C-2	調査・措置の履歴
	様式 D-1-1	変状写真台帳（トンネル本体工）
	様式 D-1-2	変状写真台帳（トンネル内附属物の取付状況）
	様式 D-2	トンネル全体変状展開図
	様式 D-3	覆工スパン別変状詳細展開図
診断調書	様式 E-1	診断結果（変状単位）
	様式 E-2	診断結果（覆工スパン毎，トンネル毎）

点検記録の留意点を以下に示す.

① トンネル台帳は，トンネル完成後に作成され，維持管理の段階で引き継がれるが，関係資料等を確認の上，工事の地盤情報等必要に応じて保存することが望ましい.

② 交差物件が存在する場合は，位置，種類，規模等の情報を記載する.

③ 施工記録をもとに施工時に不良地山が出現した箇所，特殊な工法等を用いた箇所，検討した対応策の内容や採用した工法等をわかる範囲で具体的に記載する.

④ 1 枚に収まらない場合は複数枚に分けて作成する.

2.3 トンネル点検の課題

2.3.1　概説

社会インフラの維持管理の重要性が唱えられ，2014 年点検要領が改訂されてから 2 年以上経過した中で，道路トンネルの定期点検は，全体の 30％しか完了[2.6]していない．5 年に 1 回（年間あたり 20％必要）の定期点検の義務づけに対して，7 年に 1 回のペースとなっており，今後これまでの 1.6 倍のスピードが要求されることとなる．**図 1-6** の実施状況をみると自治体の点検実施率が特に低く，今後の点検実施に向けた実施体制や予算確保に向けた新たな取り組みに期待が持たれる．トンネル点検・調査は，現道交通での作業が伴うことから，交通規制が必要，昼夜間を問わない，排気ガスの多い環境，高所作業車が必要，さらに，しかるべく熟練技術者による適切な判断が必要となっている．点検を実施する上で，コスト縮減，工期短縮，安全性向上・労働環境改善，精度向上，人材（適任者）の確保を実現し，さらに効率化を図っていく必要がある.

本節では，前節で解説した最新のトンネル点検方法に対して，それぞれの変状や措置に対して要求される内容を取りまとめ，その対応における留意点を整理する．さらに上記の課題に対して具体的にどの要素を改善することによって合理化につながっていくかについて検討を行うものである．なお，検討における判断基準として，**第 1 章**で示した **1.2 関連する既**

往研究[2.7]に示される道路管理者の知見等を今後のニーズとして扱うものとする.

2.3.2　点検の要求事項に対する方策

2.2.7～2.2.9 で解説したそれぞれの変状種類の判定区分および措置の方法から，点検に要求される内容とその対応する上での方策および留意点を**表 2-36～表 2-37** に示す.

その内容をまとめると以下のとおりとなる.

① ひび割れは，ほとんどの変状に関連し，二次的な変状も含め点検時においてその把握は非常に重要である.

② ひび割れ幅 0.3mm 以上を正確に測定することが，点検において重要である.

③ ひび割れの進行性の把握は重要であるが，基本的には点検時において幅や長さの確認を行い，圧ざやせん断ひび割れが伴う特に重視すべきひび割れを対象として，モニタリング等を実施するのが望ましい.

④ ひび割れの発生原因については，すべてのひび割れに対して調査やモニタリングを行うのは不可能であるため，文献などよりパターン化された変状の形状を参考に検討するのが望ましい．なお，圧ざやせん断ひび割れなど特に重視すべきものは，調査の必要性も考えなければならない.

⑤ うき，はく離は，打音検査が最も重要であり，初回点検では，確実に全断面に対して実施することを徹底する.

⑥ うき，はく離が発見された際には，確実にたたき落としを行い，落とせない場合は応急対策の提案を行う．（はつりやネット工）

⑦ 点検で，「変形，移動，沈下」，「巻厚不足・背面空洞」，「巻厚不足の減少」を把握することは困難であり，その進行や原因の把握においては，調査が必要となる.

⑧ 変形，移動，沈下においては，周辺に発生しているひび割れなどとの関連性も考慮し，目視によって明らかに変形が生じていることを認識し，管理者に報告を行った後に，調査・測量の実施について検討すべきである.

⑨ 漏水の状況を把握するのは点検で十分であるが，季節変動等も考えられるため，滴水以上の漏水に対しては，流量を測定するのが望ましい.

⑩ 豪雨が発生し，土被りが比較的薄いトンネルは，その後で漏水状況を確認するのが望ましい．利用者の通行の安全にもつながることから，その状態で対策を講じるべきである.

⑪ トンネルに設置されている排水施設（路面，中央）は，路面の滞水や地下水上昇にも影響することから，常に正常な状態を確保する必要がある．日常的な巡視時に加え，点検時においても排水管や桝を確認する必要がある.

⑫ 漏水がコンクリートへ悪影響を及ぼす可能性がある際には，水質調査などによる検証が必要である.

⑬ ひび割れからの漏水があった際には，水圧の影響も考えられることから，地下水位や水圧測定により現状を把握する必要がある.

⑭ 外力が伴う変状（ひび割れ，うき，はく離，変形，移動，沈下，巻厚不足・背面空洞，

巻厚不足の減少，漏水）はそれぞれが関連することが多く，地域，地形，地質などの条件が複合的に作用している可能性も考えられることから，専門技術者による総合的な知見に基づいた高度な判断が必要と考えられる．

⑮ 附属物は，ジェットファンなどの大型の施設においては，特に注意が必要であり，個別の部材毎に記録を残すのが望ましい

⑯ ボルトの緩みにはアイマークが効果的であり，前回からの進行がないかについて点検結果（写真など）を携行した点検が望ましい．

⑰ 応急措置については，点検時にハンマーによるたたき落とし，ボルトの締め直し，番線固定が有力であるが，管理者に報告を行い，応急対策の必要性について早期に検討することが重要である．

⑱ 監視においては，$\mathrm{II_b}$ の巡視以外においては，2 年以内の近接目視が原則である．この記録を明確にし，別業務において追加で近接目視を行う必要がある．

2.3.3 点検の合理化に向けた改善策

1.2.2 の関連する既往研究によれば，道路管理者がトンネル点検に求める内容として，①変状を正確に把握する　②点検・調査費用の削減　③できる限り点検からの判定に委ねる　④交通規制期間の短縮　とある．それぞれの対応方法に管理者ニーズを適用させると**表 2-35** のようになる．

この中で，⑦，⑫，⑬，⑭は，外力の影響を受けた比較的に稀なケースであり，調査や特殊な検討や判断が必要であり，管理者ニーズには合致しないものと考える．⑩も同様降雨の特殊な例であり，その必要性も高いためやむを得ないと考えられる．①，②，③，④，⑧，⑪，⑮，⑱については，近接目視による対応であり，画像技術を支援する（表面上の視覚的

表 2-35　点検の対応方法と管理者ニーズの関係

点検要領に要求される内容に対応する方法		管理者ニーズ				評価
		変状を正確に把握する	点検・調査費用の削減	点検からの判定に委ねる	交通規制期間の短縮	
①	ひび割れの確実な把握（見落としがないこと）	○	△	○	△	確実になるが費用と期間が若干上がる
②	ひび割れの正確な測定	○	△	○	△	正確になるが費用と期間が若干上がる
③	ひび割れの正確な測定	○	△	○	△	正確になるが費用と期間が若干上がる
④	ひび割れの発生原因の簡素化（点検で判断）	△	○	○	○	概ね達成が可能となる
⑤	打音検査の確実性	○	△	○	△	確実になるが費用と期間が若干上がる
⑥	たたき落としの確実性	○	△	○	△	確実になるが費用と期間が若干上がる
⑦	変形等は調査が必要	○	×	×	×	調査であり費用，判定，期間が× 大きな変形の際には，調査を行う
⑧	変形等は目視で状況確認	△	○	○	○	概ね達成が可能となる
⑨	漏水量の測定	○	△	○	△	点検の中であり，問題はない
⑩	降雨後の漏水確認	○	△	△	△	確実になるが費用と期間が若干上がる
⑪	排水施設の確認	○	△	○	△	点検の中であり，問題はない
⑫	コンクリート悪影響は水質調査	○	×	×	×	調査であり費用，判定，期間が× 明らかに出ている場合は，調査を行う
⑬	水圧の影響は，水圧調査	○	×	×	×	調査であり費用，判定，期間が× 影響が認められる際は，調査を行う
⑭	外力の根本原因は専門技術者による判断	○	×	×	×	調査であり費用，判定，期間が× 深刻な場合は，調査や検討会を実施
⑮	ジェットファンの個別部材毎での確認	○	△	○	△	点検の中であり，問題はない
⑯	ボルトにはアイマーク，過去の点検記録携行	○	△	○	△	点検の中であり，問題はない
⑰	ハンマーによるたたき落とし，ボルト締め直し重要	○	△	○	△	点検の中であり，問題はない
⑱	監視は，2年以内に近接目視	○	△	○	△	点検の中であり，問題はない

表 2-36　点検の要求内容に対する対応（1）

項目		要求事項		手段			課題の適用性						対応する上での留意点
種別	細目	要求項目	具体的要求内容	点検	調査	工事	コスト	工期	安全	労働環境	精度	人材	
対策区分の判定	圧ざ，ひび割れ	ひび割れ幅の測定	0.3mm以上のひび割れの把握，展開図には記録する必要がある	○							○		幅0.3mm以上のひび割れを正確に測定する必要がある
		ひび割れ長さの測定	5m未満，5m以上～10m未満，10m以上で区分	○							○		連続性を確認しながら，正確に測定する必要がある
		ひび割れ密度の測定	幅0.3mm以上で20cm/m^{2}以上かでランクが上がる	○							○		幅0.3mm以上のひび割れを正確に測定し，長さも合わせて測定する必要がある
		段差量の測定	引張ひび割れで段差が5mm以上はランクアップ	○							○		スケールで正確に測定する必要がある 進行性を考慮して，小さい段差も記録に残すのが望ましい
		ひび割れの進行性の把握	進行性があるかの判断	○	○		○	○			○		前回点検時からの進行や，モニタリングにより測定を行う
		ひび割れの発生原因の把握	外力が作用しているかの判断	○	○		○	○				○	モニタリング結果を踏まえ，地質学や力学の専門的知見に伴い判断する必要がある 総合的な判断が必要である
		圧ざ，せん断ひび割れの把握	ひび割れ形状から判断	○					○			○	ひび割れ形状を踏まえ，地質学や力学の専門的知見に伴い判断する必要がある 総合的な判断が必要である
	うき，はく離	ひび割れ形状の把握	ブロック化，閉合化，交差に注目	○							○		幅0.3mm以上のひび割れを正確に測定する必要がある
		ひび割れの発生原因の把握	外力が作用しているかの判断	○	○		○	○				○	モニタリング結果を踏まえ，地質学や力学の専門的知見に伴い判断する必要がある 総合的な判断が必要である
		打音異常の把握	異常音を見落としなく抽出	○							○		初回点検では全断面を打音検査する必要がある
		うき，はく離の発生原因の把握	外力か，材料劣化かの判断	○	○		○	○				○	モニタリング結果を踏まえ，地質学や力学の専門的知見に伴い判断する必要がある 総合的な判断が必要である
	変形，移動，沈下	変形速度の測定	年間あたり，10mm，3mm，1mmの変形速度で区分	○	○		○	○					前回点検からの進行や，測量結果を踏まえて判断する
		変形，移動，沈下量の測定	変形しているかを目視で確認し，変形量は正確に測定		○		○	○	○	○	○		測量で形状を測定する 変状が著しいと，危険性も高まり時間がかかるため，労働環境も悪くなる 初期値を図っておくのが望ましい
	巻厚不足・背面空洞	背面空洞深さの測定	30cmが区切りとなっており，背面空洞の規模を把握		○		○				○		基本はレーダー探査で測定を行う 点検時には実施されることは少ない
		覆工巻厚の測定	30cmが区切りとなっており，コンクリートの厚さを把握		○		○				○		基本はレーダー探査で測定を行う 点検時には実施されることは少ない
		ひび割れ形状の把握	不規則，放射状のひび割れに注目	○									パターン化したものを抽出し，必要に応じて検査を行う場合が多い
		原因推定	周辺のひび割れ形状や施工時期（矢板工法かどうか），工事記録，地質調査資料などからも判断		○		○	○				○	検査結果を踏まえ，地質学や力学の専門的知見に伴い判断する必要がある 総合的な判断が必要である
	鋼材腐食	腐食程度の把握	うき錆び，断面欠損の程度の把握	○									目視により把握している
		構造部材の耐久性の把握	RC構造としての検証				○						特殊なケースであり，試設計を行い検証する
		原因推定	被り不足，塩害，中性化，凍結防止剤等がある	○	○		○	○					著しい場合は必要となる 試験結果を踏まえ，総合的な判断が必要である
	有効巻厚の減少	覆工巻厚の測定	覆工コンクリートの厚さを把握する必要がある		○		○				○		基本はレーダー探査で測定を行う 点検時には実施されることは少ない
		コンクリート強度の測定	設計強度を満たしているかを把握する必要がある		○		○	○			○		基本は圧縮強度試験，反発度試験で測定を行う 点検時には実施されることは少ない

表 2-37　点検の要求内容に対する対応（2）

項目		要求事項		手段			課題の適用性						対応する上での留意点
種別	細目	要求項目	具体的要求内容	点検	調査	工事	コスト	工期	安全	労働環境	精度	人材	
対策区分の判定	有効巻厚の減少	設計巻厚の把握	劣化状況を把握する上で，当初の巻厚を把握する必要がある	○							○		設計巻厚は工事記録や設計図書などから把握する
		有効巻厚/設計巻厚の把握	1/2未満，1/2～2/3，2/3以上で区分		○		○	○					それぞれの数値が把握できれば，判定は用意である
		原因推定	周辺のひび割れ形状や施工時期（矢板工法かどうか），工事記録，地質調査資料，地域性などからも判断		○		○	○				○	検査結果を踏まえ，地質学や力学の専門的知見に伴い判断する必要がある 総合的な判断が必要である
	漏水	漏水度合の判断	噴出，流下，滴水，浸出の区分	○									目視により確認は可能である 季節変動もあるため，流量も測定するのが良い
		漏水箇所の把握	アーチ，側壁，路面	○									目視により確認は可能である
		状態の把握	土砂流出，滞水，凍結，つららの有無	○									目視により確認は可能である
		降雨との関係	降雨時の漏水量	○									豪雨時に確認するのが望ましい 土被りの薄いトンネルでは，影響が大きい場合もある
		コンクリートへの影響の把握	漏水によってその水質が覆工コンクリートに悪影響を及ぼさないか		○		○	○					温泉地，火山地帯などにおいて水質調査（Ph，電気伝導度，水温など）が必要となる場合がある
		排水状況の把握	流末確認や排水施設の劣化状況の確認，滞水状況の確認	○									目視により確認は可能である 流末の確認が重要となる
		水圧の影響の有無	設計上水圧の影響は，構造上見込んでいないため，悪影響を及ぼすことがある		○		○	○					流末確認や排水施設の劣化状況の確認，滞水状況の確認，ひび割れ形状，水位，水圧調査を実施する必要がある
	附属物の取付状況	破断の把握	○×の判断が必要となる	○									目視，触診，打音による判断
		緩み，脱落の把握	○×の判断が必要となる	○									目視，触診，打音による判断
		亀裂の把握	○×の判断が必要となる	○									目視，触診，打音による判断
		腐食の把握	○×の判断が必要となる	○									目視，触診，打音による判断
		変形，欠損の把握	○×の判断が必要となる	○									目視，触診，打音による判断
		がたつきの把握	○×の判断が必要となる	○									目視，触診，打音による判断
		異常の進行具合の把握	前回からの進行を把握する必要がある	○									前回の点検結果を携行しながら把握，ボルトにはアイマークをつける
措置	応急措置	うき，はく離	ハンマーでの撤去，樹脂材による固め	○									点検時にできる限り撤去を行うが，出来ないときには記録に残し，早々に管理者に報告を行う
		路面変状	交通規制										管理者への報告
		漏水	交通規制，排水溝清掃，危険物除去										管理者への報告
		附属物ボルトの緩み	ボルト締め直し	○									管理者への報告
		照明灯具のがたつき	番線固定	○									番線固定を行い，管理者へ報告
	応急対策	はく落防止対策	維持工事で実施 はつり落とし，ネット工，			○			○	○			点検業務の中で，提案することもある
		漏水対策	維持工事で実施 簡易型導水工の設置			○			○	○			点検業務の中で，提案することもある
	本対策	外力対策	土木工事として実施 内面補強工，ロックボルト工等			○			○	○			点検・調査結果を踏まえて，別途設計を実施し，工事発注へと至る
		はく落対策	土木工事として実施 断面修復工，ネット工等			○			○	○			点検・調査結果を踏まえて，別途設計を実施し，工事発注へと至る
		漏水対策	土木工事として実施 導水工，地下水低下工，断熱工等			○			○	○			点検・調査結果を踏まえて，別途設計を実施し，工事発注へと至る
	監視	判定区分Ⅱ$_b$の監視	日常巡視等で実施	○									管理者によるの日常巡視
		判定区分Ⅱaの監視	2年後を目安に近接目視	○									覆エスパンを対象として，近接目視を実施
		判定区分Ⅲの監視	前回から2年程度以内に近接目視	○									覆エスパンを対象として，近接目視を実施
		判定区分Ⅳの監視	前回から2年程度以内に近接目視，応急対策は完了している	○									覆エスパンを対象として，近接目視を実施

判断）ことにより，見落としを防いだり，個人差をなくしたり，精度を向上させることができる．また，⑧の変形，移動，沈下においては，近接目視からは，変形の著しいものに対しては，異常箇所を見つけることは可能である．しかし具体的な数値は得られないことから，レーザ技術を支援する（凹凸形状の把握）ことによって，精度を向上させることが可能となる．この方法は，面的にそれぞれの形状を測ることの出来るレーザスキャナーによる計測である．目地や坑口など端点だけでなく，すべての形状を事前に把握できていれば，それぞれの変形量や速度を容易に測定することができる．なお，⑤，⑥，⑨，⑯，⑰は，打音，計測，ボルトの締め直しであり，直接手に触れて行う作業であるため，従来どおりの手法が中心となるものと考えられる．

上記の改善策をまとめると，以下のようになる．

① 近接目視による変状の把握には限界がある場合もあるため，必要に応じて非破壊検査技術等を適用することが望ましい[2.1].

② 近接目視対象となるひび割れなどの変状箇所をより正確に把握するため，画像技術で支援することが望ましい．

③ 変形，移動，沈下に対して，数値的に形状を測定するため，レーザ技術で支援することが望ましい．

④ この画像およびレーザの 2 つの機能を備えた走行型計測を活用することで，性能および精度の検証，工期短縮，コスト縮減などについて検証を行う必要がある．

⑤ 今回，計測車両には，MIMM（Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System）[2.8]を採用し，**第３章**以降において，トンネル走行型計測の適用性について検討を行う．

参考文献

[2.1] 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編），1993.

[2.2] 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案），2002.

[2.3] 土木学会：山岳トンネルの覆工の現状と対策，2002.

[2.4] 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，2014.

[2.5] 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編）．2015.

[2.6] 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2016.

[2.7] 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，2013.

[2.8] 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究） 71(1), 20-30, 2015.

3　トンネル走行型計測の適用

3.1 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，経年劣化などでひと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 2014 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[3.1]が新たに改訂され，2015 年 6 月，に道路トンネル維持管理便覧（本体工編）が改訂された[3.2]．　本章では，改訂に伴い前章で検討を行った最新のトンネル点検における留意点の解決を目的として，トンネル走行型計測技術[3.4], [3.5]を適用するものである．内容は，本技術の概要，データ解析・評価方法，実測に伴う適用性について述べるものである．

3.2 トンネル走行型計測車両の概要

3.2.1 トンネル走行型計測車両の選定

現在（2017 年 1 月）新技術情報提供システム（NETIS : New Technology Information System）において，「トンネル点検」で検索を行うと，以下の技術がヒットする．

① トンネル覆工レーダ探査装置：KT-980444-V

本技術は，トンネル覆工厚さと背面空洞の調査方法で，従来は，覆工のボーリングコアの目視確認と，実測する方法で対応していました．本技術の活用により，調査結果の品質が向上し，調査速度が向上する．

② 走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）：KK-130026-V

本技術は道路トンネル定期点検を車両の高速走行で覆工面カラー画像と 3 次元空間位置データを計測するシステムで，従来は近接目視点検で対応していた．本技術の活用により，経済性・安全性・点検精度の向上，効率化，正確・客観的な変状展開図作成が可能となる．

③ 走行式トンネル壁面うき・はく離疑義箇所点検システム：　KK-080021-V

トンネル覆工点検において，従来技術である打音検査では交通規制，高所作業が必要であった．本技術では高感度高速応答赤外線検知技術により，走行での赤外線撮影が実現した．交通規制，高所作業が不要で，側壁上部から天頂のうき・はく離の疑義箇所抽出が可能である．

④ 動画撮影データを用いた道路トンネル点検システム ロードビューワ：HK-160015-A

本技術は道路トンネル点検において複数台のカメラによりトンネル内の動画を撮影し連続展開画像を作成する工法で，従来は人力で写真撮影やスケッチを行う工法で対応していた．本技術の活用により品質向上・コスト縮減が期待できる．

⑤ 移動式垂直昇降型トラックマウント高所作業車：HR-140011-A

本技術は，作業床上の操作装置から車両の移動操作が可能なトラック架装の高所作業車で，従来は定置ジャッキ式のトラック架装の高所作業車で，作業ポイント毎にジャッキと作業床昇降の操作を行っていた．本技術の活用により，高所連続作業の施工性，経済性が向上する．

⑥ トンネル覆工表面レ-ザ計測システム：KT-140074-A

本技術は車載型のレ-ザ光線で走行しながらトンネル覆工面を走査し，覆工面全体の連続画像及びひび割れ展開図を作成するシステムである．従来は交通規制が必要な目視点検で対応していたが，本技術の活用により交通規制が不要で，客観的な覆工面情報の取得が可能となった．

⑦ トンネル覆工表面の高速走行撮影システム：QS-120010-A

最高時速 80km という高速走行でトンネル覆工表面を撮影し，覆工目地部表面の画像を作成するシステムである．鮮明なカラー画像から，専門技術者がパソコンの画面上で観察する事により，はく落の危険性がある損傷個所の特定が可能である．

⑧ 道路性状測定車両イーグル（L&L システム）：SK-160013-A

本技術は，コンクリート表面や路面，道路付属物の変状を事前に把握する技術で，従来は人力による直接点検で対応していた．本技術の活用により，点検箇所の確認が容易となり，交通規制時間の短縮による安全性や，点検と報告書作成の効率化により経済性が向上する．

本研究においては，関連する既往研究「道路トンネルの健全性評価技術の研究」[3.3],「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」[3.4] からの継続性を考慮して，これらのうち，②走行型高速 3D トンネル点検システム MIMM（ミーム）：KK-130026-V を対象とする．

3.2.2 トンネル走行型計測車両の概要

本研究で採用するトンネル走行型計測車両 MIMM（Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System）の概要を示す．MIMM は，**図 3-1** 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．MIMM に搭載されている機器類の諸元を**表 3-1～表 3-2** に示す．なお，以下 MIMM は「計測車両」と述べ，トンネル走行型計測は，「走行型計測」と述べる．

1) 画像：MIS（Mobile Imaging Technology System）[3.5]

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．画像計測に欠かせない光源は，LED 照明であり，カメラは 38 万画素のものが 20 台搭載（最新型のものでは 100 万画素のものが 12 台搭載）されている．**図 3-2** 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 3-1　計測車両写真[3.5]

表 3-1　計測車両機器類の構成[3.4]

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

表 3-2　計測車両機器類の使用[3.4]

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

※ 公共座標との差異

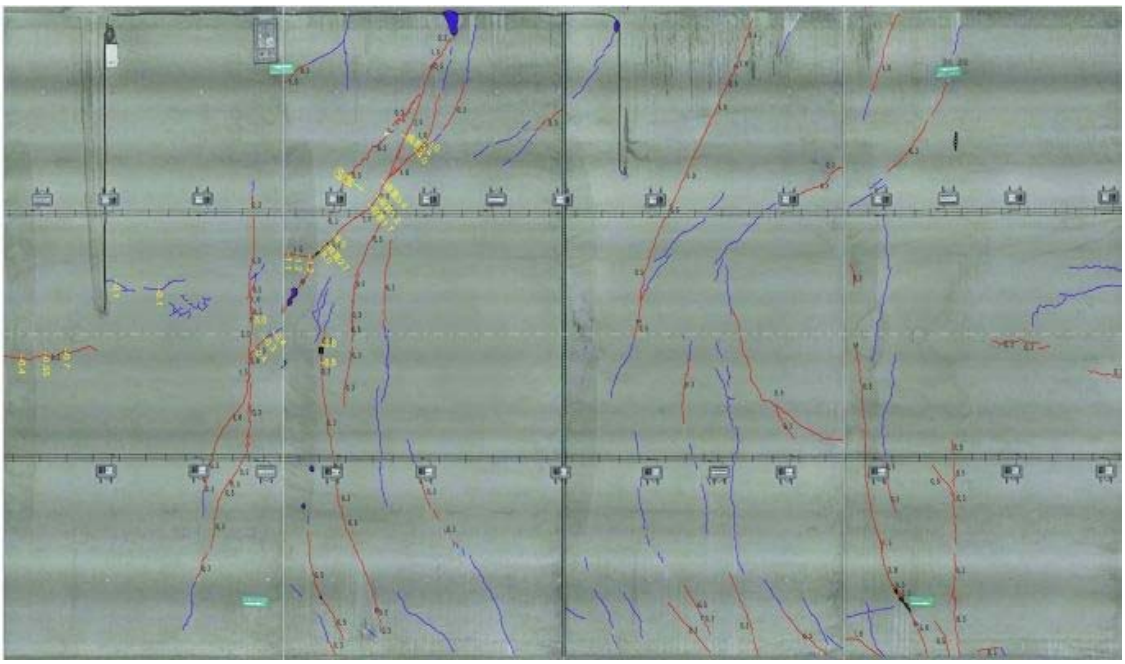


図 3-2　画像のアウトプットイメージ[3.5]

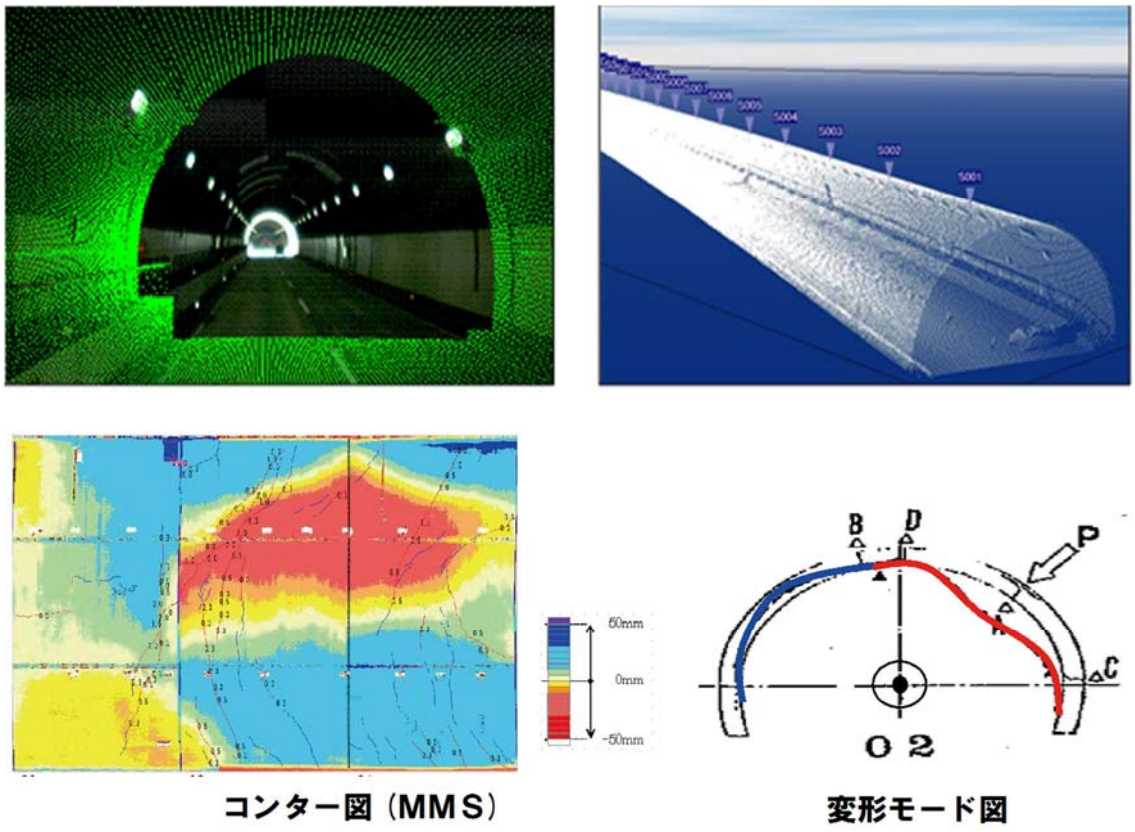


図 3-3　レーザアウトプットイメージ[3.5]

2)　**レーザ**：MMS（Mobile Mapping System）[3.4]

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．トンネル内の位置情報については，上記のGPS，IMUの他オドメトリによる変位システムを用いて精度を向上させている．**図 3-3**にレーザ点群データのアウトプットイメージ（点群の3D表示とコンター図）を示す．

3.3 走行型計測の要求性能について[3.5]

定期点検の課題を踏まえ，計測車両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 画像データ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 レーザ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/m^2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 レーザデータを，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．

3.4 計測方法の例

現地において実施する走行計測のフローチャートを**図 3-4** に示す．

以下に計測時の留意事項[3.4]を示す．

① 外観チェックは車体およびセンサ類に歪みや凹みがないか確認する．特にオドメトリ周辺に異物の挟み込みやネジの緩み，アームの曲がりがないかを確認する．

② カメラやレーザスキャナのカバーが開いていることを確認し，窓を清掃する．合せて

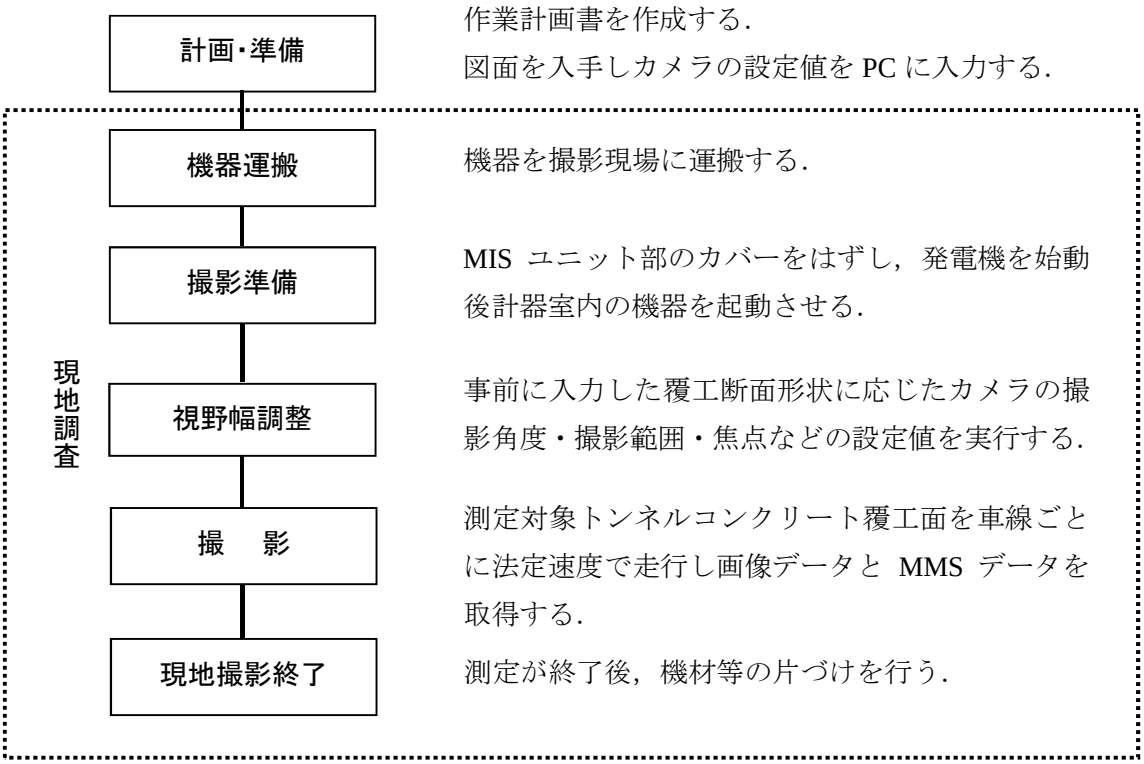


図 3-4　計測フローチャート[3.4]

HDD の残容量もチェックする．

③ MMS を上空が充分開けていて且つ，10 分程度停車できる場所に停止し GPS 状態の確認を行う．

④ 方向角検定は 3 つの GPS を用いて車体がどちらの方向を向いているかを計算する．

⑤ 充分に衛星を捕捉できる場所に移動し方向角検定を開始する．（概ね 2 分）

⑥ 初期化走行とは GPS，IMU およびオドメトリを初期化・学習するために行う．

⑦ 約 6 分間の静止と左右 5 回以上のターンおよび 2km 以上の走行を行う．

⑧ 現場計測を行い，終了走行として，初期化走行と同様の走行を行う．

⑨ インターネットが使える環境において，記録データの後処理作業を行う．

3.5 解析および評価方法

3.5.1 画像解析および評価方法[3.5]

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 3-5** 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 3-6 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 3-7** 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，計測車両においては，被写体距離とカメラ性能から 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 3-8** は，計測車両により撮影した 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）

なお，計測車両におけるひび割れの検出とひび割れ幅の精度について，実証実験を行っており，詳述は**第 4 章**で述べる．

その他，漏水や遊離石灰，補修箇所などについては，**図 3-9** 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．

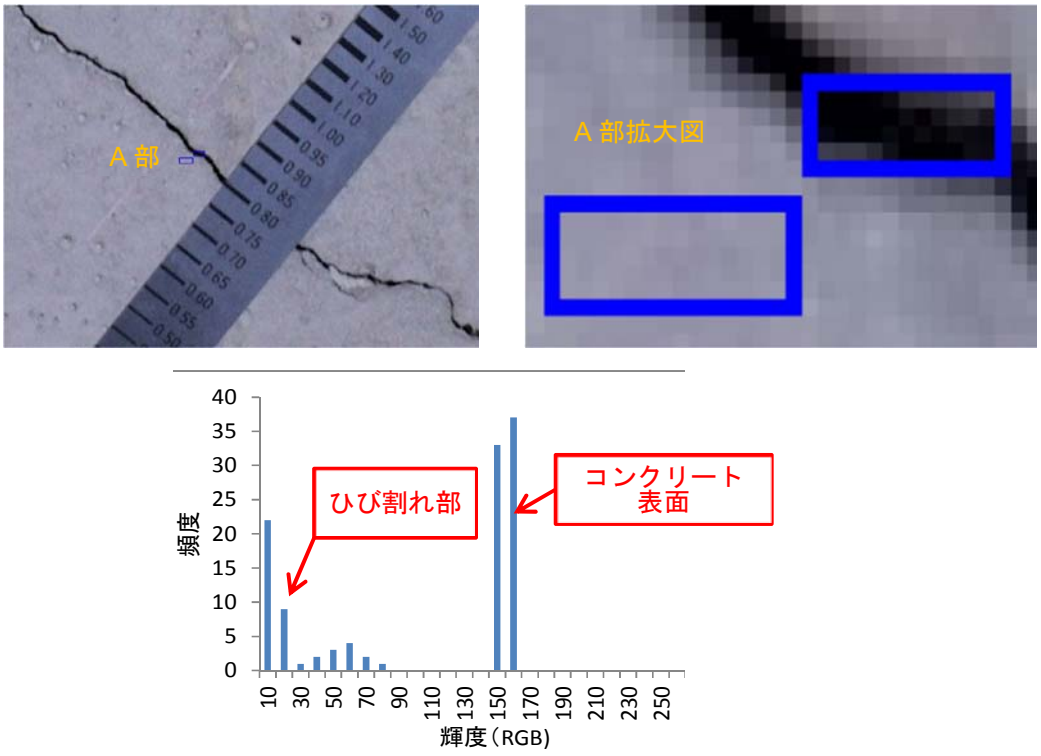


図 3-5　ひび割れ画像と輝度ヒストグラム

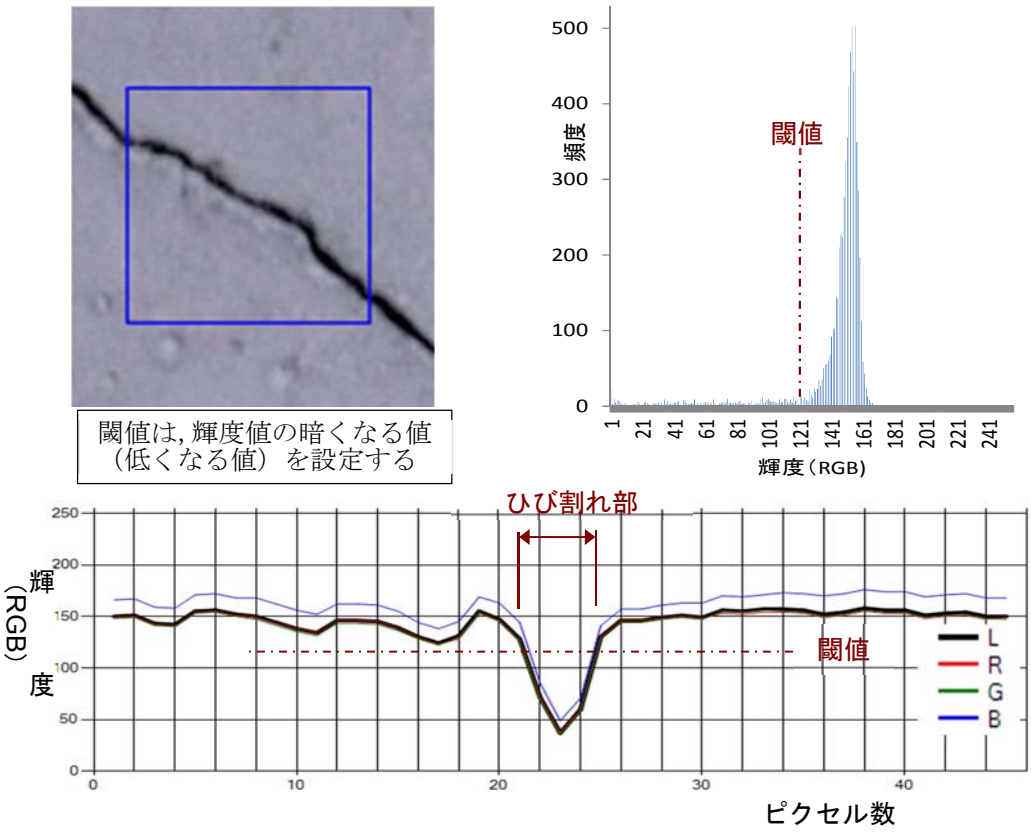


図 3-6　ひび割れ範囲における区分の考え方[3.4]

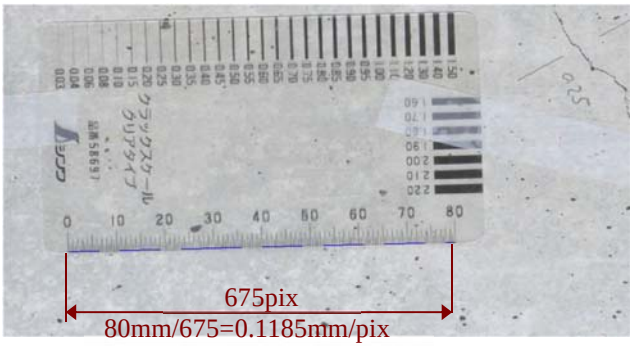


図 3-7　ひび割れ幅の算出根拠

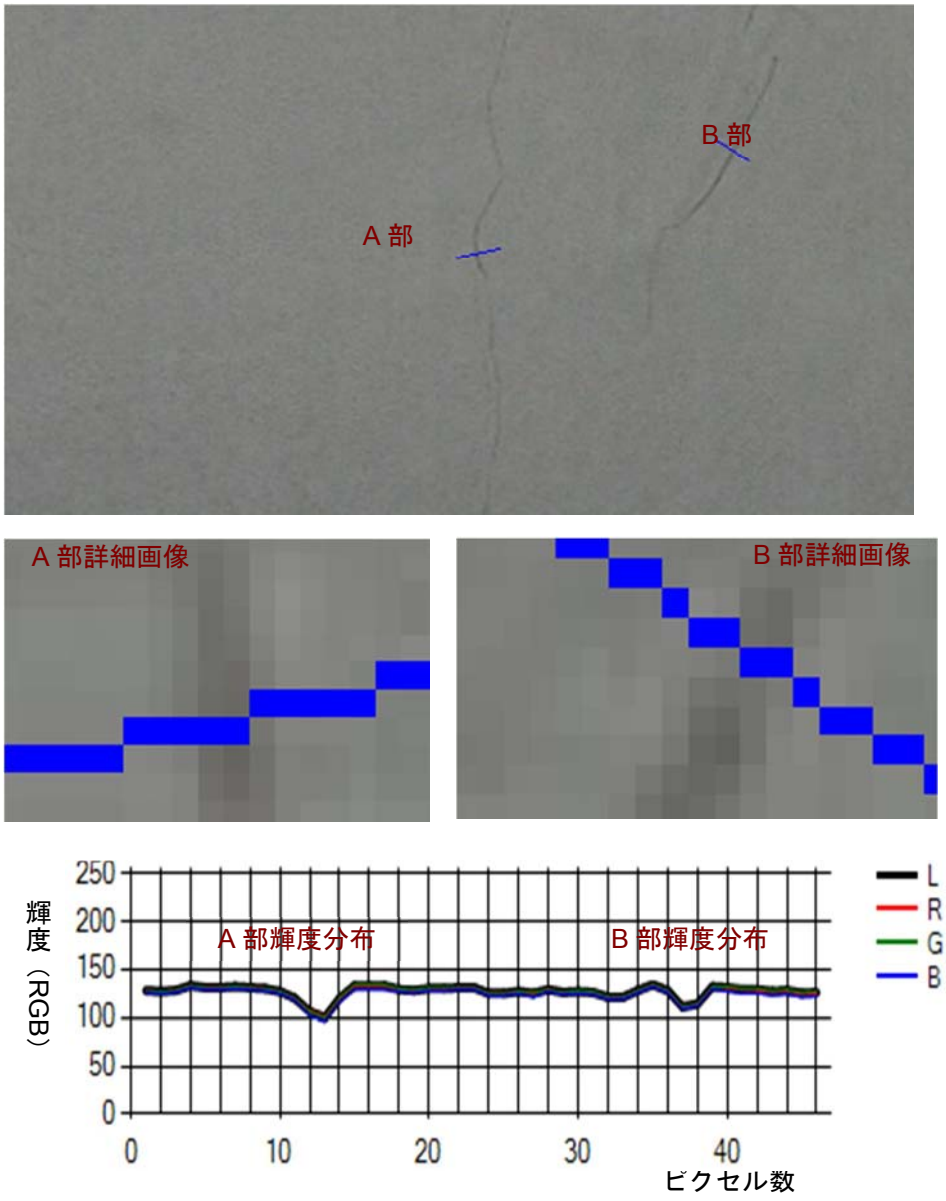


図 3-8　走行型計測 0.3mm のひび割れ画像[3.4]

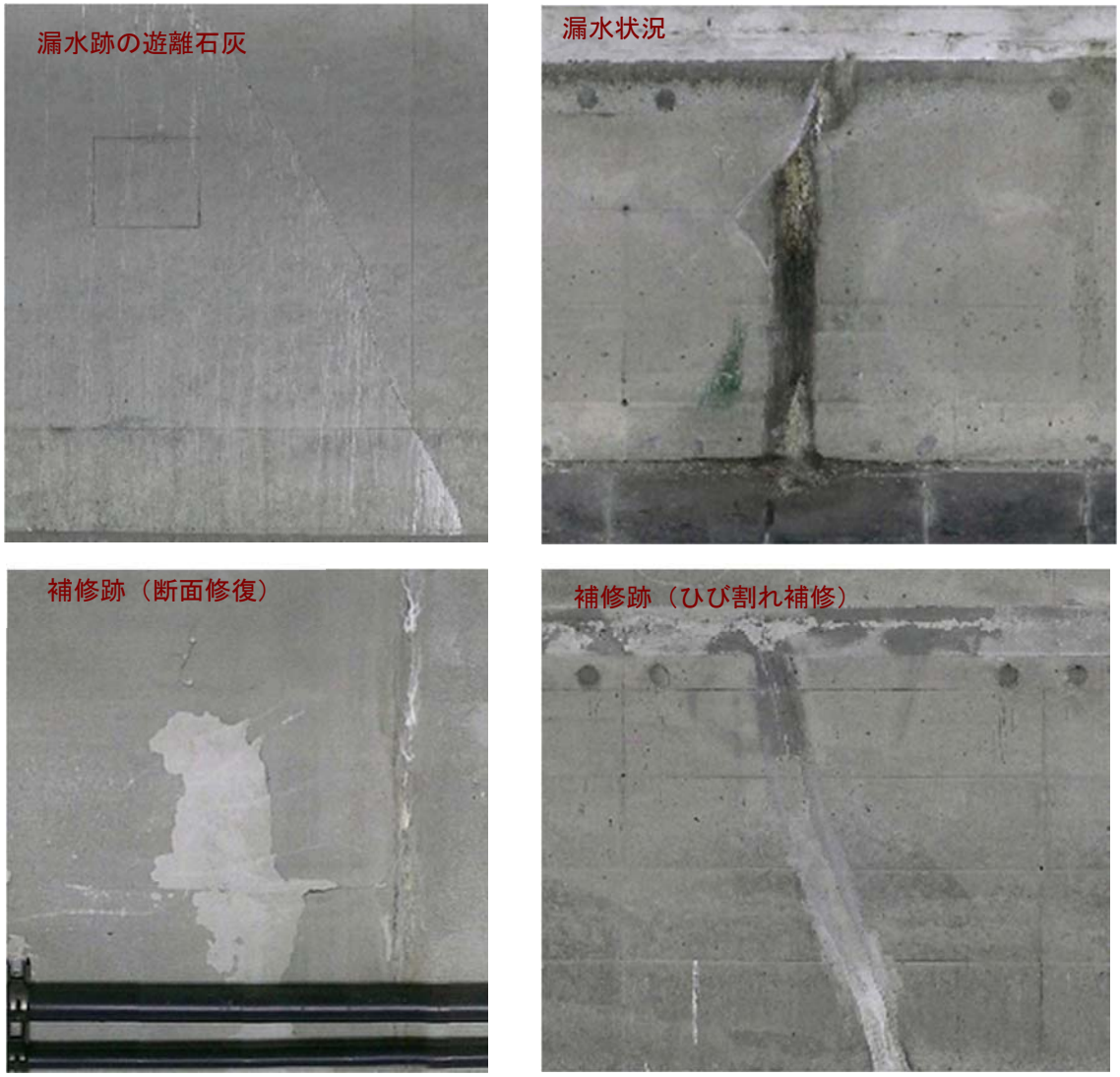


図 3-9　各変状写真（計測画像より）[3.5]

3.5.2 レーザ解析および評価方法

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 3-10 に示す．

1)　解析条件

① スパン内の中心軸は直線とする．

② トンネル全線の中心軸に対してスパン毎の中心軸は，図 3-11 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．

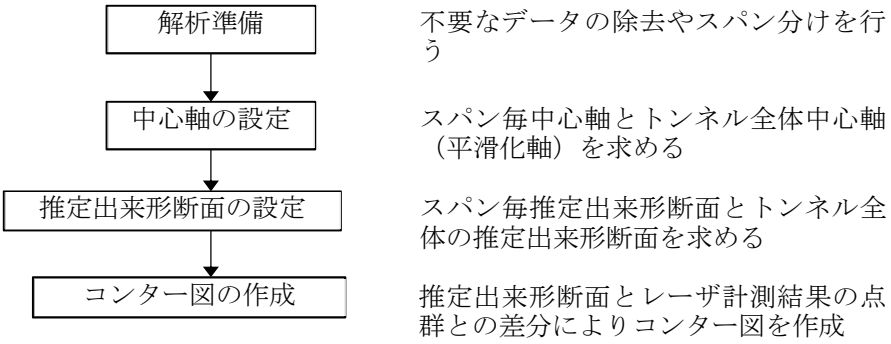


図 3-10　レーザ解析フロー[3.5]

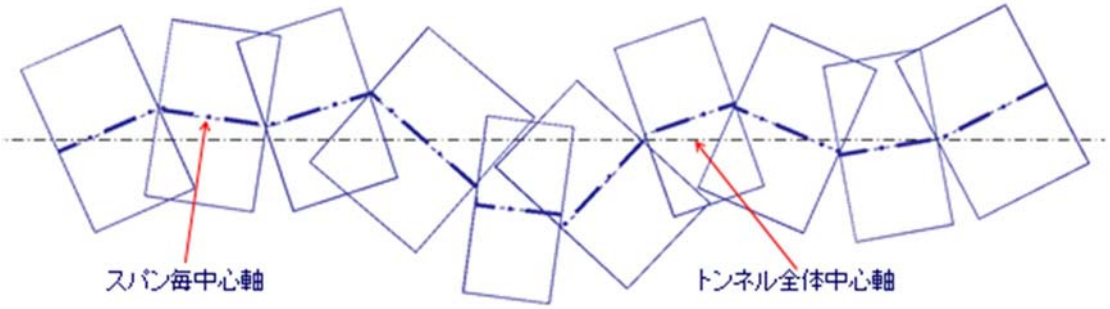


図 3-11　中心軸のイメージ[3.5]

2)　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．

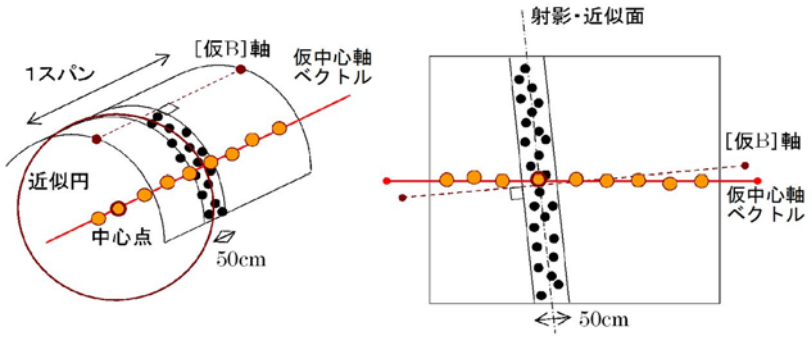
3)　中心軸の設定

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．

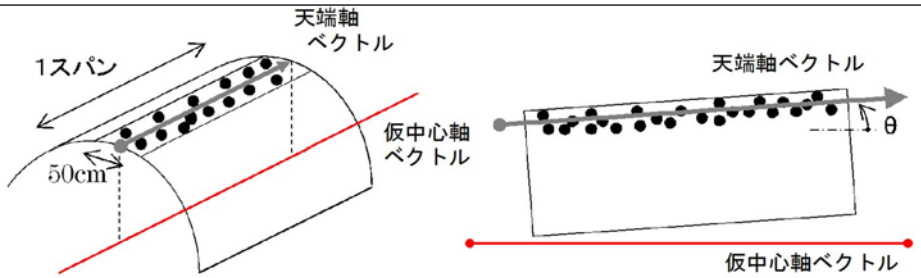
① スパン毎の点群データから，正確な中心軸の位置を求めるための仮中心軸ベクトルとトンネルの縦断勾配を示す天端軸ベクトルとを求め，この 2 つのベクトルによりスパン毎の中心軸を求める．**図 3-12** にスパン毎の中心軸の設定方法を示す．

② トンネル覆工の変形は，**図 3-13** にように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，数スパンに渡た

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．

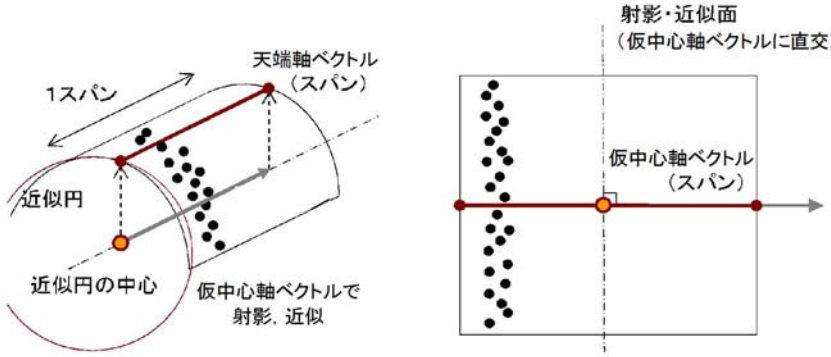


図 3-12　スパン毎中心軸の設定方法[3.5]

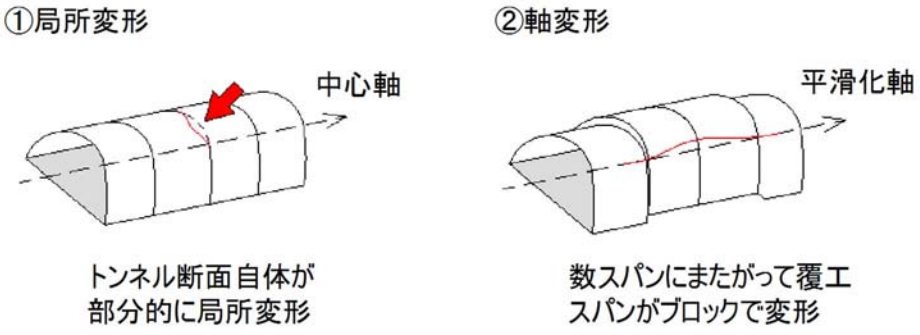
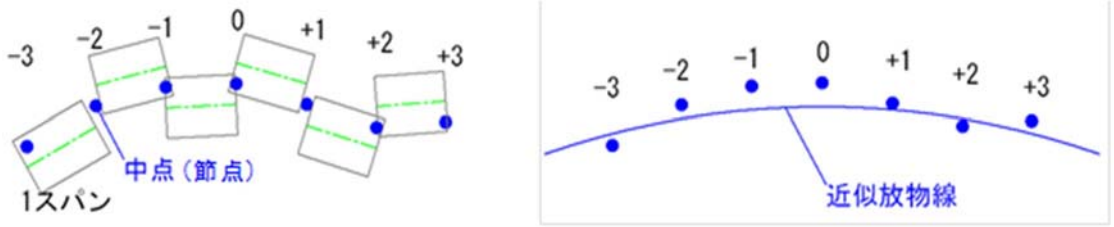


図 3-13　トンネルの変形モード[3.5]

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．

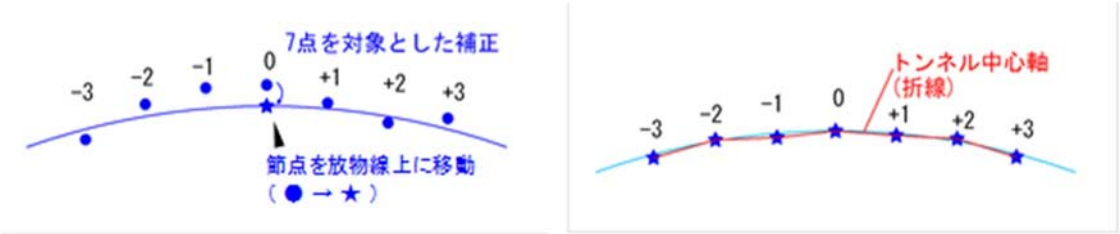


図 3-14　全体中心軸の設定方法[3.5]

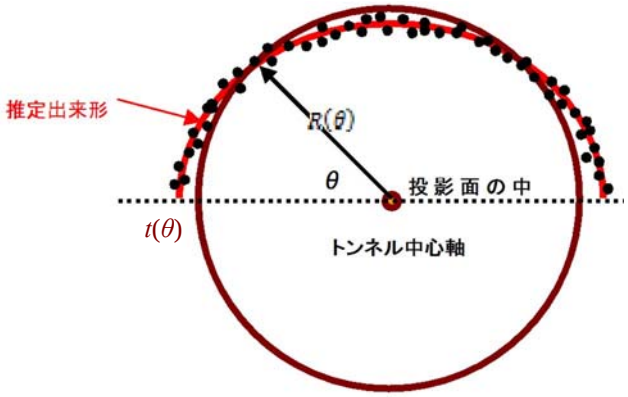


図 3-15　推定出来形の計算[3.5]

って覆工が変形・移動するものがある．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 3-14 に全体中心軸（平滑化軸）の設定方法を示す．

4)　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 3-15 のように，　$R(\theta)$，　θ で表される．

$R(\theta)$は，式(1)のとおりである．

$$R(\theta) = R + t(\theta) \tag{1}$$

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．

5) 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 3-16** 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 3-16** の(1) (2)(5)に示す，以下の 3 種類がある．なおその内容を**表 3-3** に整理する．

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．

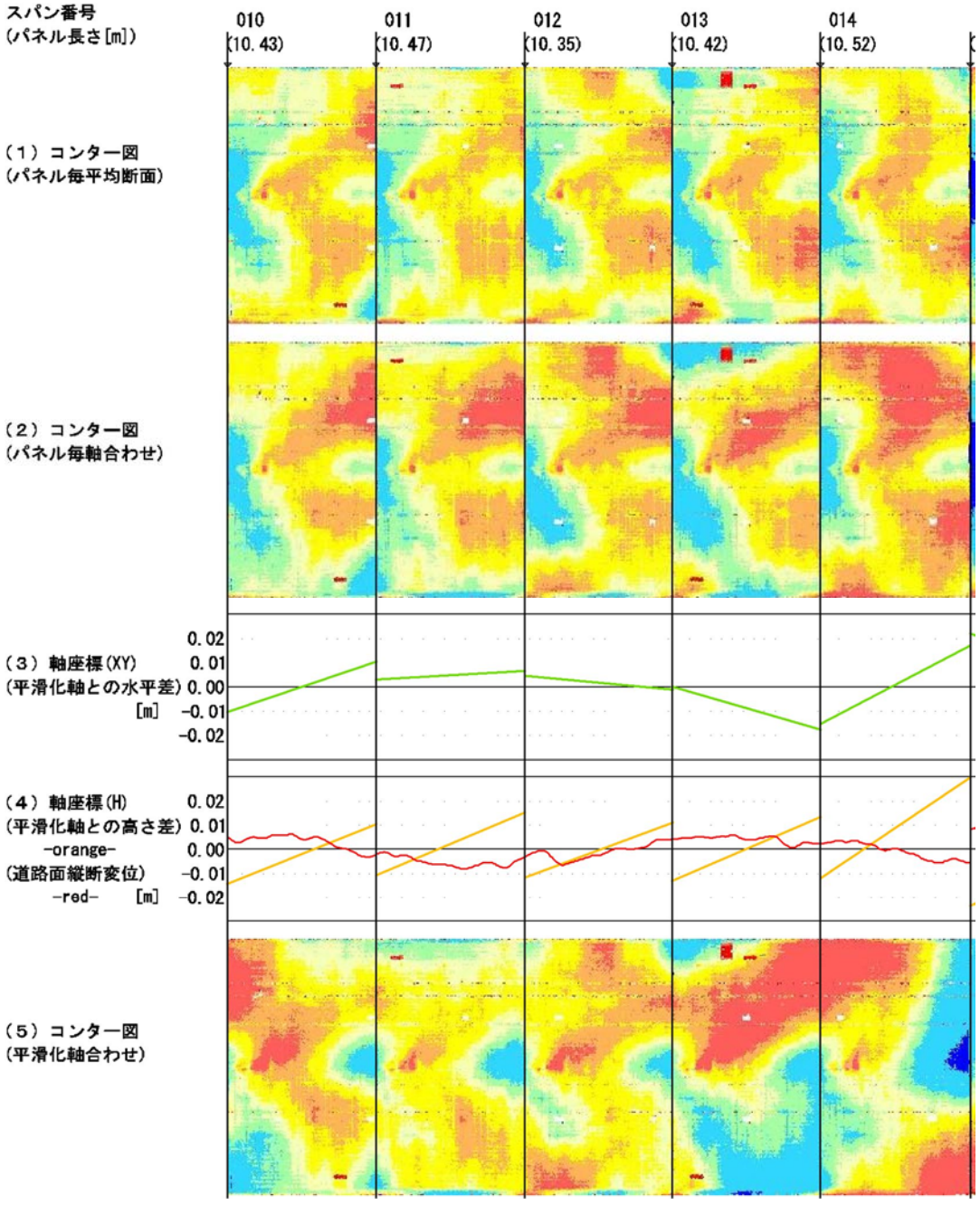
② スパン毎軸合わせは，トンネル全体で推定出来形（2 次元）を求め，それを各スパン中心軸に沿ってスライドさせた推定出来形（3 次元）から，レーザ計測結果を色分けしたものである．

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．

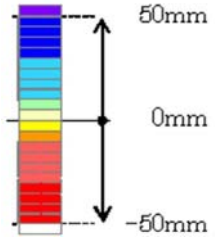
④ 解析により得られたコンター図の分析は，**図 3-16** の各コンター図の特徴を踏まえながら，(4)の軸座標（スパン軸と平滑化軸との差）を勘案し，総合的に判断する．トンネルの変形モードを視覚的に把握することができるコンター図は，覆工に発生した変状の原因を推定する上で非常に有効な情報の一つとなる．

表 3-3　各コンター図の特徴･適用[3.4]

種類	出来形断面 算出手法	軸の設定	トンネル全体の 変化傾向	スパンの全体の 動き・変形傾向	スパン内の 局所的な変化傾向
スパン毎 平均断面	スパン毎	各スパン	△	△	◎
スパン毎 軸合わせ	全体平均	各スパン	○	◎	○
平滑化 軸合わせ	全体平均	全体平均	◎	○	△



(6)



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，青が外側への変位

図 3-16　コンター図の事例[3.5]

しかし，トンネルの評価においてはコンター図のみではなく，画像計測結果，ひび割れ解析図，地形・地質，施工記録，点検・補修履歴等の情報を収集し，多面的かつ総合的に評価することが重要である．

6) コンター図による評価方法と留意点

(1)各コンター図の色調の観察

各コンター図からトンネルの形状（変形，凹凸）の傾向を読み取り，軸座標と平滑軸とのズレを加味して，変形の原因を推定する．まず，**図 3-17** 左の（2），(5）のコンター図に着目し，色調の変化（凹凸モード）が同調しているか，していないかを判別する．今回，色調が同調しており，トンネルの変形が示唆される・同じく，(3），(4）平滑化軸からの水平差・高低差や，ひび割れ展開図等の情報を加味して，外力作用の可能性を精査する．この事例では（3），(4）に示される軸ズレが少なく，展開図から縦断方向の貫通ひび割れが確認されていることから，外力作用の可能性が高いと判断する．一方，右図は，色調が同調していないため，(5）のみに現れる色調の大きな変化は，施工時における型枠のずれに起因するケースと考えられる．**図 3-17** 右図では，（3），(4）平滑化軸からの水平差･高低差のうち，水平差

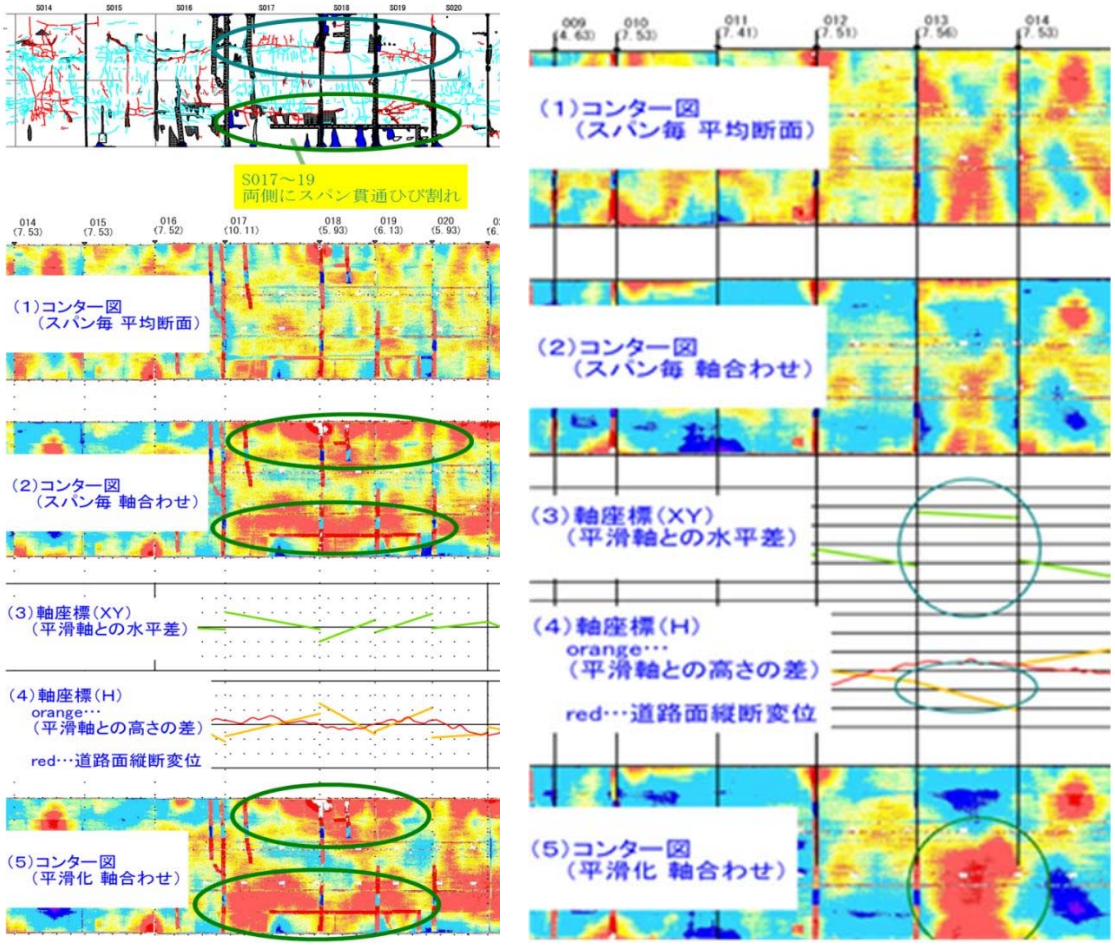
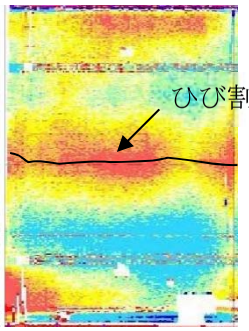
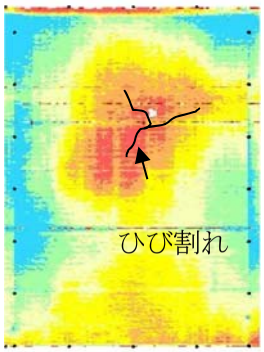
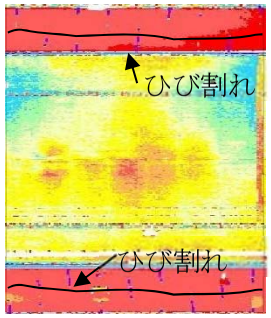
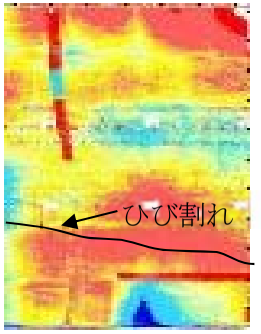
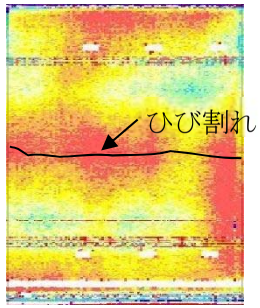
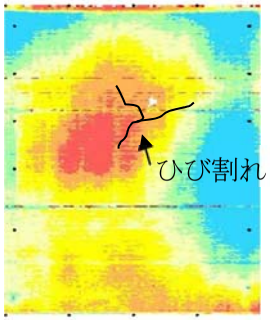
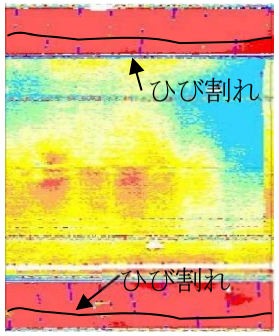
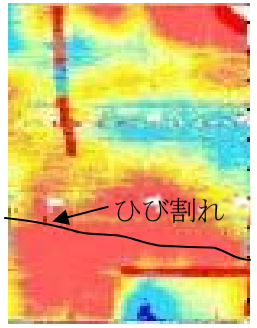
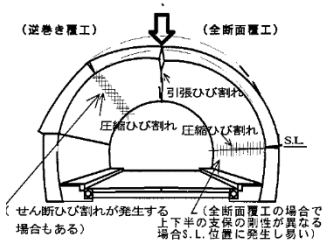
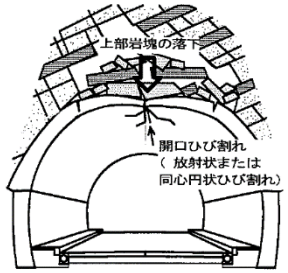
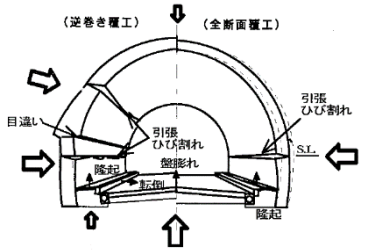
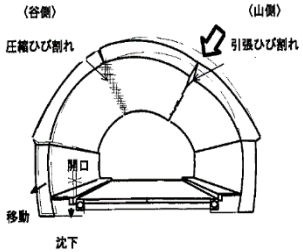


図 3-17 サンプルコンター図[3.4]

表 3-4　変状原因コンター図の解析結果イメージ[3.4]

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

に大きなズレが生じており，原因はトンネルの変形ではなく，竣功当時からの出来形のズレであると判断できる．

(2) 局所的変形の可能性の高いパターン

局所的な変形は，**図 3-17** (1) スパン毎平均断面のコンターで確認される色調変化により評価する．外力変状の可能性が高いパターンは，**表 3-4** に代表され，以下の特徴がある．

① 天端部がスパンにわたり赤色⇒天端沈下⇒緩み土圧の可能性
② 天端の一部が赤色⇒局所的な変形⇒緩み土圧（突発性崩壊）の可能性
③ 両側壁部がスパンにわたり赤色⇒内空変位縮小⇒側圧（塑性圧，水圧等）の可能性
④ 片側がスパンにわたり赤色，反対側が青色⇒断面変形⇒偏圧の可能性

(3) 施工起因の可能性が高いパターン

施工時に起因する可能性の高いコンター図の特徴を以下に示す．

① 天端部の一部が赤色で他スパンも同様な傾向⇒セントルの特性，早期脱型⇒施工起因
② 目地横が半月状に赤色（比較的広範囲）⇒迫め部※の施工不良⇒打設圧不足
③ 目地横が狭い範囲でブロック閉合し赤色⇒目地とひび割れに囲まれたブロック状に剥落の徴候

※：覆工コンクリートの１回の打設の中で最後に打設する部分、あるいはその打設作業をいう。

(4) 水平差，高低差が滑らかではないパターン

① 平滑化軸合せコンターが偏圧傾向を示すものの，スパン毎軸合せ，スパン平均断面に偏圧傾向が見られない場合⇒セントルセット時の誤差⇒施工起因
② 部分的に水平差が大きい（一部にズレ）⇒断層などの影響，坑口地すべりの可能性

3.6 実トンネルの適用性の検討

3.6.1 概説

ここではこれまでに計測したあるトンネルの走行計測の結果を基に画像とレーザの適用性について検討する．画像の撮影によって検出された変状結果と同じ箇所で検証を行った近接目視及び打音検査の結果を**表 3-5**～**表 3-8** に示す．定期点検要領[3.1]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等を対象とした．またレーザ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で検証を行った近接目視及び打音検査の結果を**表 3-9**～**表 3-11** に示す．なお，特に外力の影響を受けているトンネルについて，**表 3-12** のように事例紹介し，実際の変状と比べどのような傾向を示しているかについて検証を行う．

3.6.2 画像の適用性について

表 3-5　画像の検証（1）[3.5]

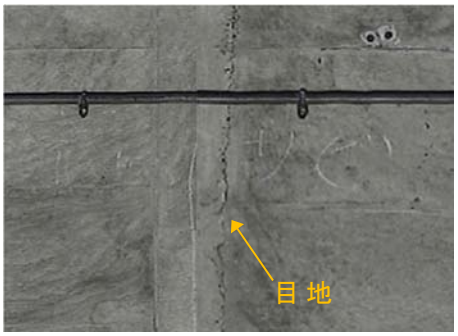
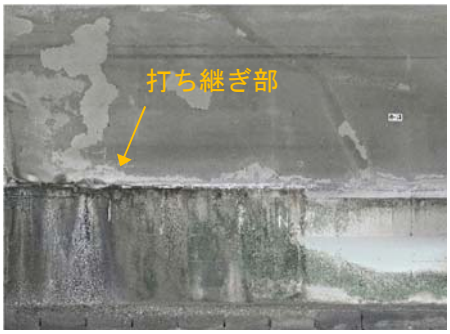
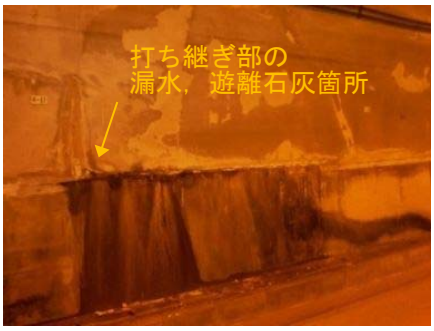
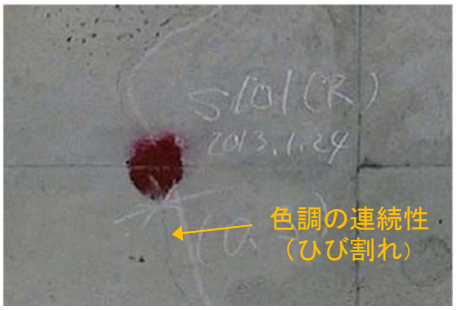
<table>
<tr><th>種別</th><th>走行計測画像データ</th><th>近接目視・打音検査の画像</th></tr>
<tr><td rowspan="2">目地部のはく離箇所</td><td> 
</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">MISから，目地部の位置と細い筋（色調の相違）の部分が剥がれやすくなっていると読み取れる．近接目視時に，目地部の該当箇所（接続部分）の不良箇所が発見されたことから，ハンマーでたたき落とした．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">打ち継ぎの漏水箇所</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">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．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">覆工アーチ部のひび割れ箇所
(0.3mm)</td><td> 
</td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">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．</td></tr>
</table>

表 3-6　画像の検証（2）[3.5]

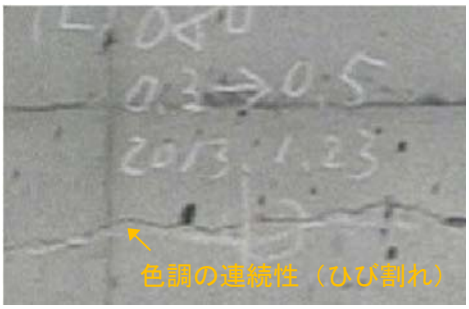
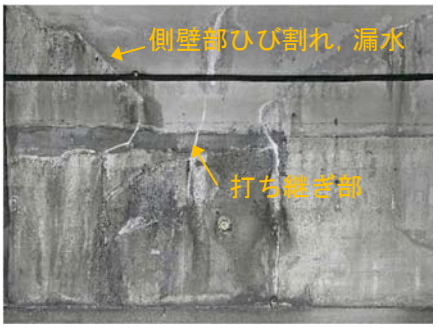
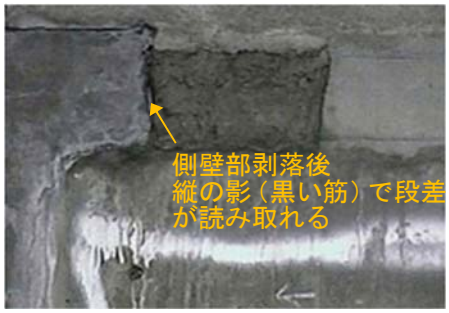
<table>
<tr><th>種別</th><th>走行計測画像データ</th><th>近接目視・打音検査の画像</th></tr>
<tr><td rowspan="2">覆工アーチ部のひび割れ箇所
(0.5mm)</td><td> 
</td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">MISから，黒い連続性の筋状のひび割れが読み取れる．近接目視時にひび割れが確認された．ひび割れスケールで計測を行った結果，0.5mmであった．
ひび割れ位置の起終点位置が明確に把握することができた．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">打ち継ぎ部の変色と側壁部の漏水と遊離石灰箇所</td><td> 
</td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">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．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">側壁部の補修材の剥落後箇所</td><td> 
</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">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が，縦の影から想定することができる．</td></tr>
</table>

表 3-7 画像の検証（3）[3.5]

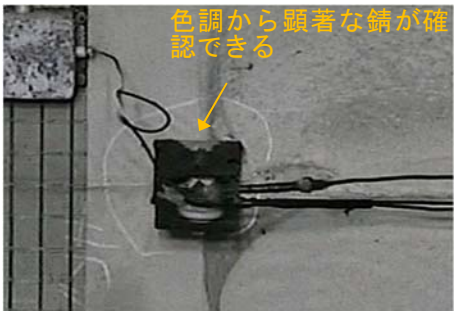
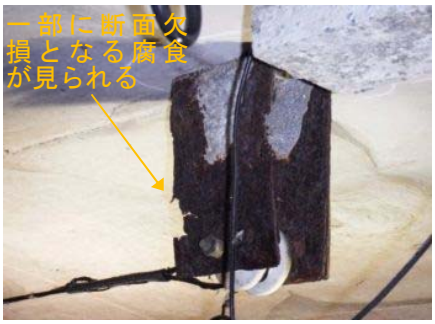
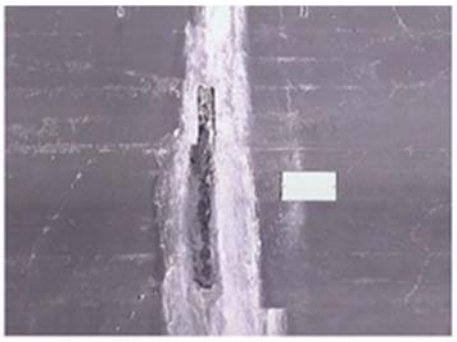
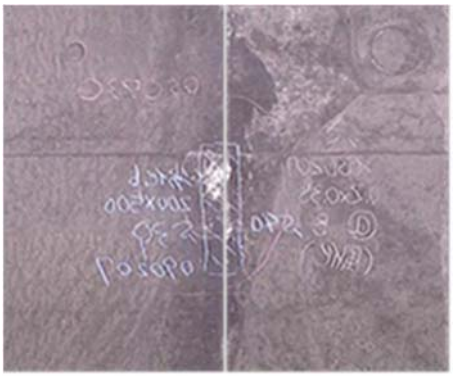
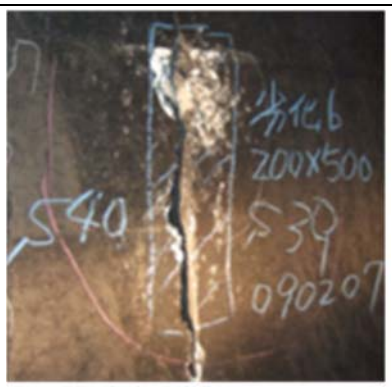
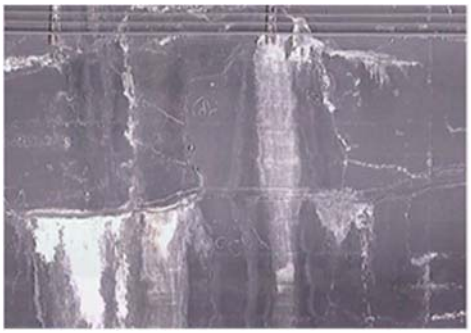
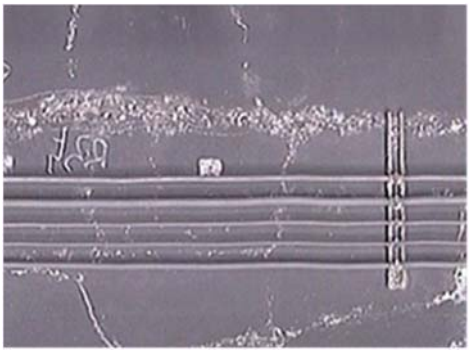
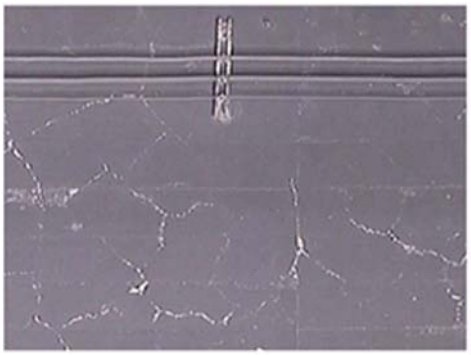
<table>
<tr><th>種別</th><th>走行計測画像データ</th><th>近接目視・打音検査の画像</th></tr>
<tr><td rowspan="2">付属施設の変状箇所（腐食）</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">MISから，付属施設の取付金具の色調が際立って黒くなっていることから顕著な錆と判断した．近接目視時に確認し，腐食がかなり進行していることが判明した．特に付属施設の場合，近接目視，触診は重要である．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">はく落跡からうきの発見</td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">覆工画像より，はく落跡の可能性が高いこと，および周辺のうきを懸念し，現地目視調査及び打音検査を実施した結果，導水工の部分的な欠落と，その周辺のうきが判明した．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">目地部の色調の違いからうきの発見</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">覆工画像より，目地部の色調の違いを発見し，現地目視調査及び打音検査を実施した結果，その周辺が，浮いていることが判明した．</td></tr>
</table>

表 3-8　画像の検証（4）[3.4], [3.5]

<table>
<tr><th>種別</th><th>走行計測画像データ</th><th>近接目視・打音検査の画像</th></tr>
<tr><td rowspan="2">漏水跡からのうきの発見</td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">覆工画像より，漏水跡が見られるため，ひび割れが貫通している可能性があることから，現地目視調査及び打音検査を実施した結果，漏水跡およびその周辺のうきが確認された.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">豆板･ひび割れからのうきの発見</td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">覆工画像より，水平方向に豆板とその周辺にひび割れが見られ，欠陥の可能性があることから，現地目視調査及び打音検査を実施した結果，豆板箇所とその周辺がういていることが判明した.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">漏水跡から,ひび割れを推測</td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">覆工画像より，漏水跡から閉合クラックと推測した．うき･はく離はなく，縦断方向 ひび割れ幅　1.5㎜は，現地計測では0.2㎜程度であった.</td></tr>
</table>

3.6.3 レーザの適用性について

表 3-9　レーザの検証（1）[3.5]

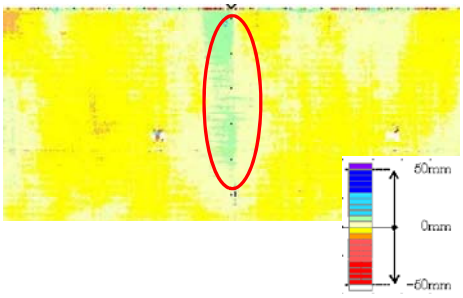
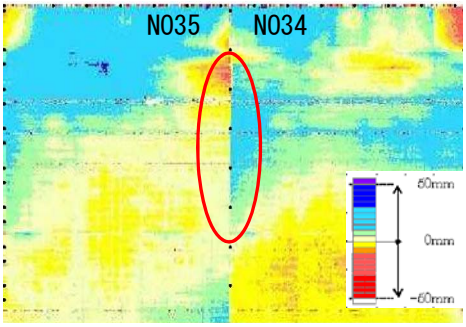
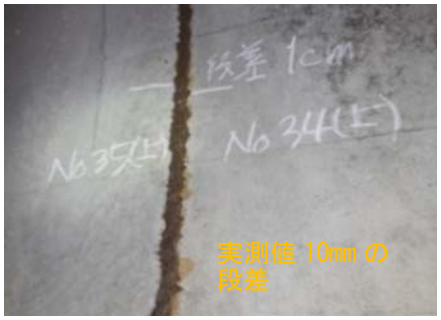
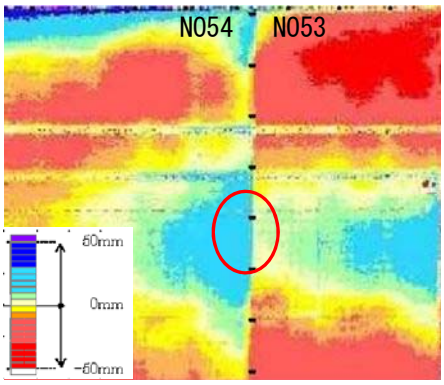
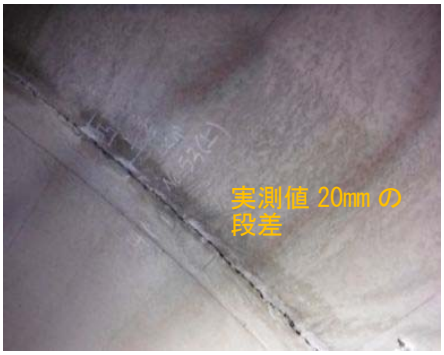
<table>
<tr><th>種別</th><th>コンター図</th><th>近接目視・打音検査の画像</th></tr>
<tr><td rowspan="6">目地部の段差箇所（ここでのコンター図は全て，スパン毎軸合わせコンター図を採用している）</td><td> 
</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">目地部の5mmの段差をコンター図より読み取ることができる．（淡い黄緑と黄色の境界面：1/10階調×50mm）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">目地部10mm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）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">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）
形状の特徴
・NO54 側の覆工形状が全体的に若干大きく出来ている．
・この差分が段差として色調に現れている．
・NO54 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．</td></tr>
</table>

表 3-10　レーザの検証（2）[3.5]

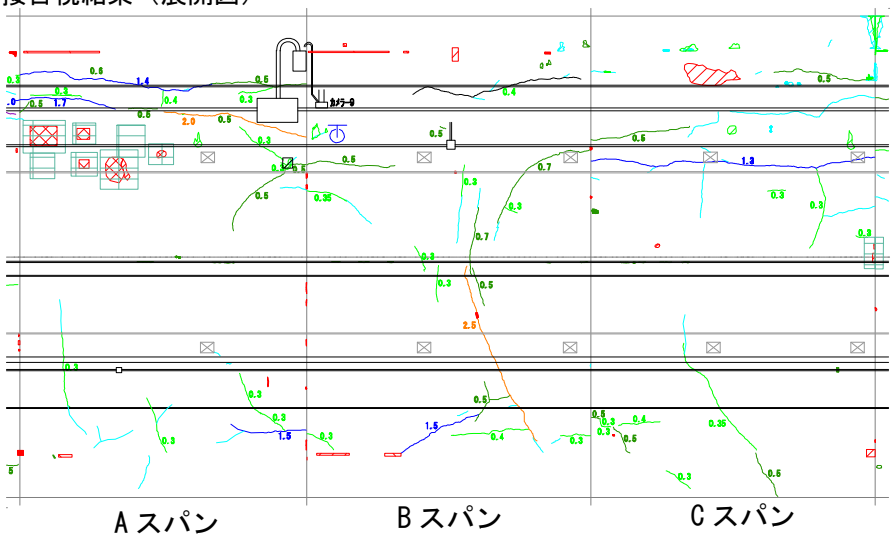
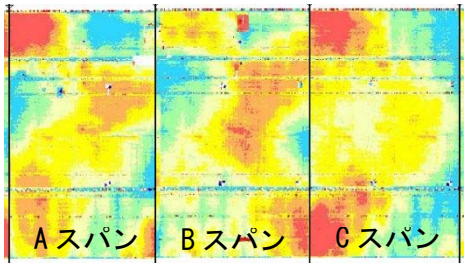
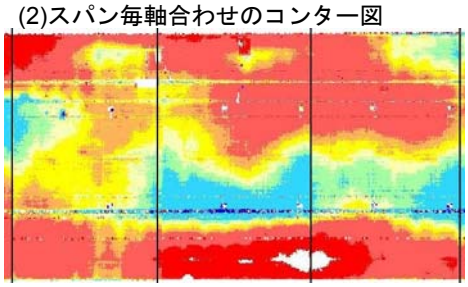
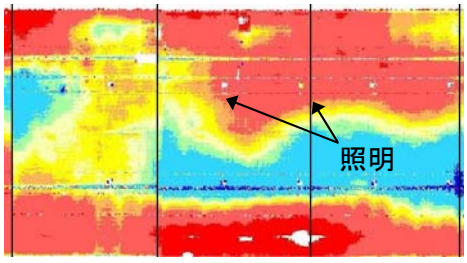
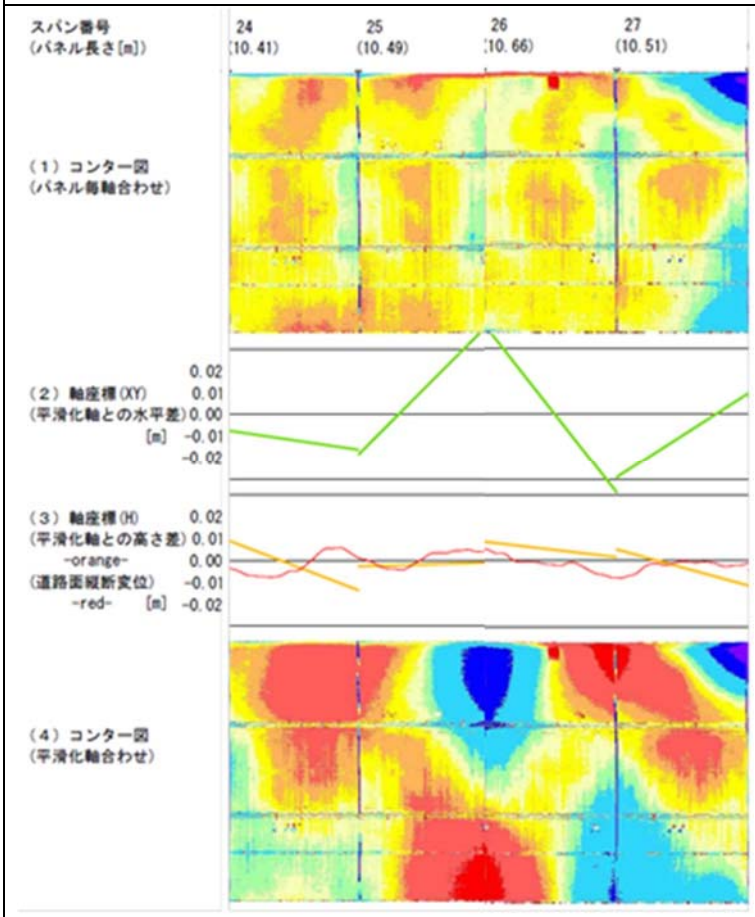
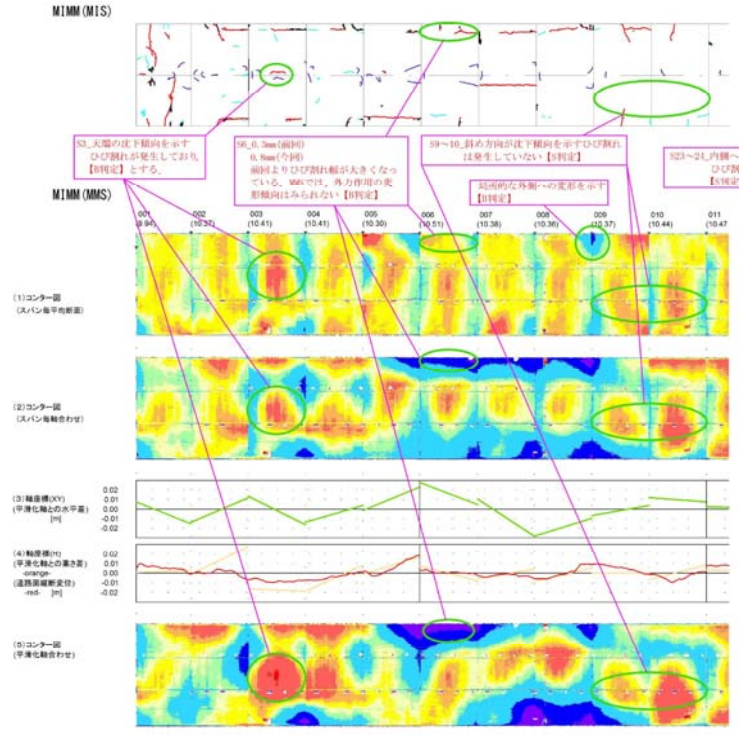
<table>
<tr><th>種別</th><th>コンター図</th><th>近接目視・打音検査の画像</th></tr>
<tr><td>外力の影響を受けているトンネルのある区間の変位箇所</td><td>近接目視結果（展開図）
 
</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">外力の影響を受けているトンネルのある区間の変位箇所</td><td>(1)スパン毎平均断面のコンター図
 
</td><td>◆スパン毎平均断面のコンター図より
・(1)A スパンの傾向と(4)A スパンのひび割れ形状から，局所的な変形が考えられる．
・同じく(1)Cスパンの傾向と(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．</td></tr>
<tr><td>(2)スパン毎軸合わせのコンター図
  </td><td>◆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．</td></tr>
<tr><td>(3)平滑化軸合わせのコンター図
 
</td><td>◆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）</td></tr>
</table>

表 3-11 レーザの検証（3）[3.4]

コンター図	評価
	スパン毎軸合わせコンター図において，大きな色調の変化が認められないのに対し，平滑化軸合わせコンター図においては赤色，青色の部分が広く確認される． 図中の(2)座標軸（平滑化軸との水平差）に着目すると，スパン軸が平滑化軸から大きくずれており，施工時のセントルセットのズレが平滑化軸合わせコンター図の色の変化の原因であることがわかる． このように，コンター図を評価･分析する際は，平滑化軸とスパン軸のズレにも注意する必要がある．
	それぞれのコンター図で内部への変形が同じ傾向を示している箇所が見受けられるが，大きなひび割れとの関連性は低いため，外力の影響ではないと判断されている．

3.6.4 外力の影響を受けているトンネルの事例[3.4]

表 3-12　外力の影響を受けているトンネル（1）

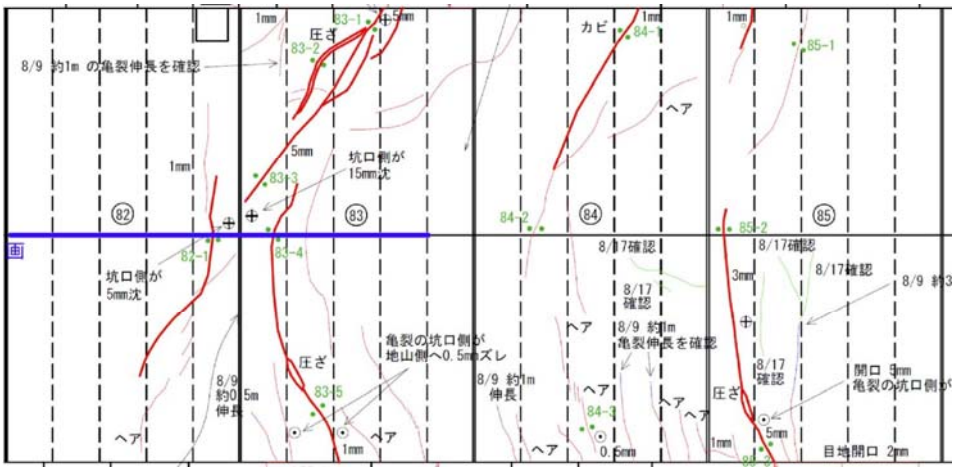
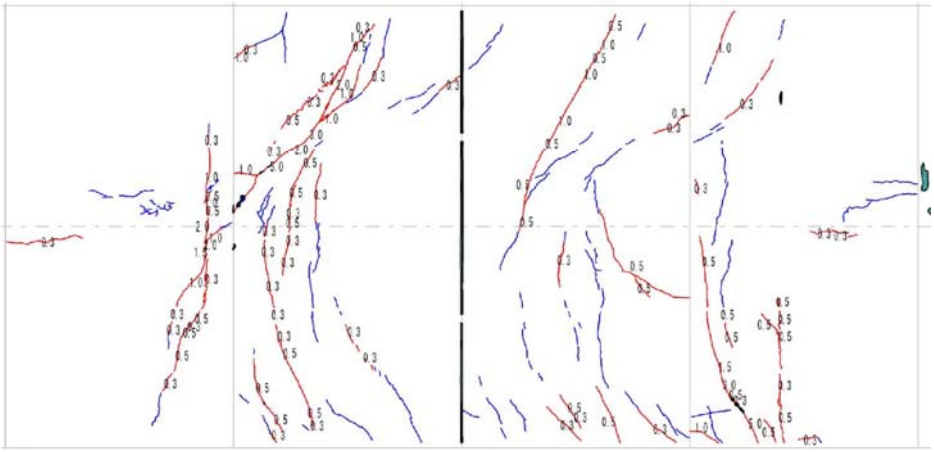
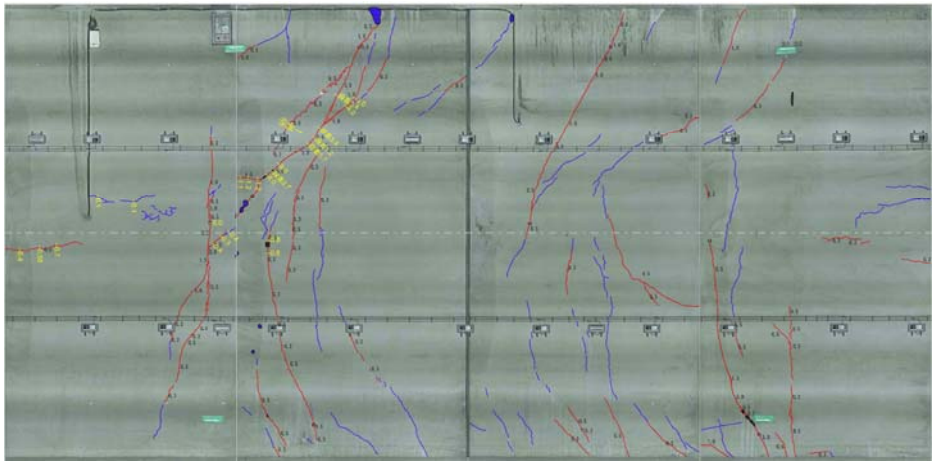
画像によるデータ
近接目視による展開図 
MIMM による展開図 
MIMM 画像 

表 3-13　外力の影響を受けているトンネル（2）[3.5]

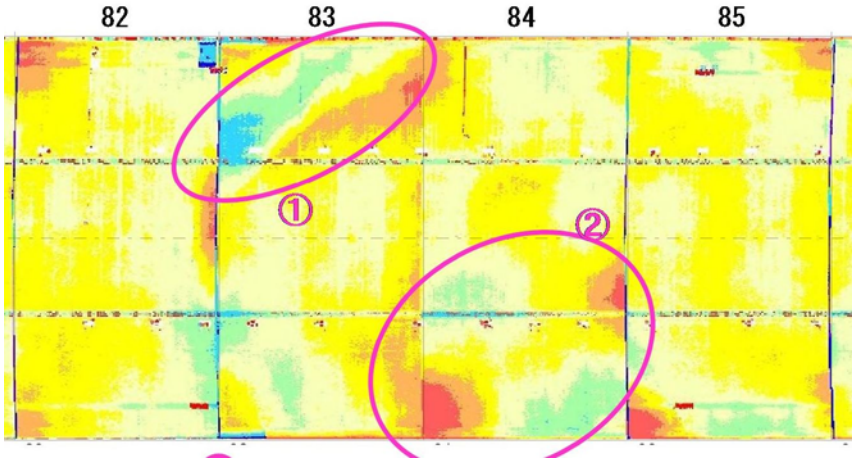
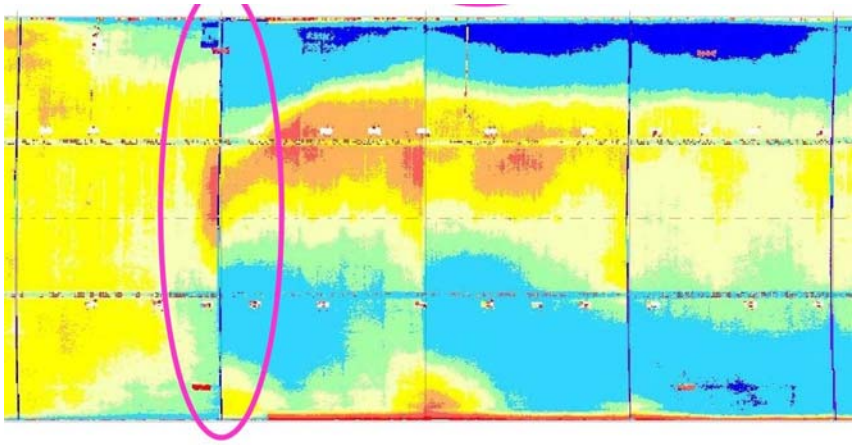
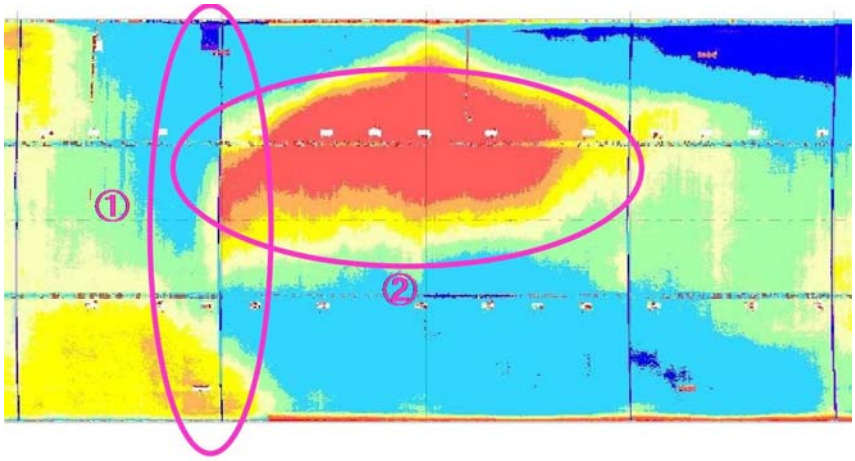
レーザによるデータ
コンター図（スパン毎平均断面）    コンター図（スパン毎軸合わせ）  コンター図（平滑化軸合わせ） 

表 3-14　外力の影響を受けているトンネル（3）[3.5]

コメント

画像からの情報

・最大で 5mm のひび割れが確認され，斜め方向に発生しており，段差も伴っていることから，明らかに外力の影響であることがわかる．画像から得られた結果をもとに現地で確認を行った結果，以下の写真のとおりであった．

・0.3mm 程度の小さなひび割れも確認することができ，このような進行性が伴うトンネルであれば，より有用であると判断できる．

コンター図からの情報

・スパン毎平均断面から，①，②においてスパン内部で赤，青の違いが見られることから，局所的（段差）な変形が見られる（展開図で示すとおりである）．

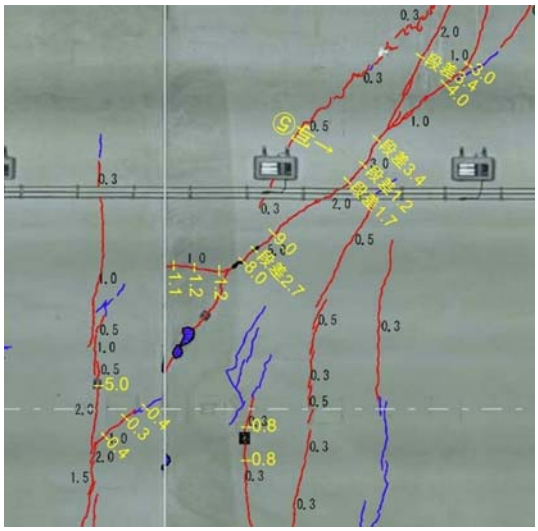
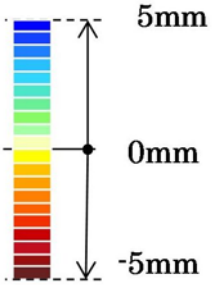
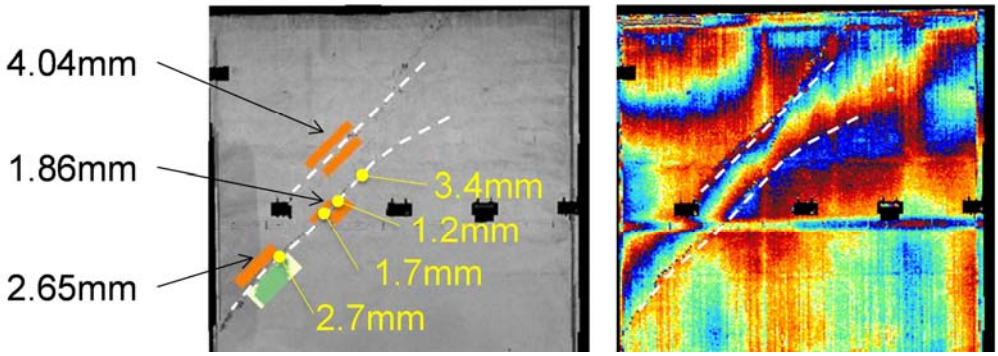
・スパン毎軸合わせコンター図とスパン毎平均断面の図が異なることから，82 と 83 スパンで偏圧の影響を受け，ずれている可能性がある．

・平滑化軸合わせコンター図から，①において，82 と 83 で傾向が異なることから，偏圧によるずれの可能性がある．

・同様に②において，パネル毎平均断面，スパン毎軸合わせコンター図と同様に内部への変形が確認されることから，偏圧の影響が顕著であることがわかる．

・判定区分としては，進行性の伴うひび割れであり，5mm のひび割れで 5m以上であることから，Ⅳ判定となるものと考えられる．

表 3-15　外力の影響を受けているトンネル（4）[3.5]

コメント
段差の検出 ・斜めひび割れの箇所に集中して段差が見られたことから，下記の写真のように現地にてひび割れ幅，段差を測定した．（黄文字）       
段差の検出 ・急激な色調の違いにおいて段差が発生していることがわかる． ・レーザのコンター図の色階調を 10 倍（0.5mm/階調）にすることで，該当部分のその違いを読み取ると，それぞれが黒文字のとおりとなり，2mm 程度の段差は検出ができることがわかる． ・現地調査により明らかに段差の存在が確認できたため，レーザで検出することができたが，レーザデータからこの存在を抽出するには再検討が必要である．

3.6.5 画像の適用性

これまでの実トンネルの画像データから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．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 ただし条件によっては，異なる可能性もあるため，通常の走行によってどこまで検出が可能か，精度はどの程度か，についての検証が必要である．

⑤ 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．

⑥ 附属物の錆び・腐食も色調から読み取ることができる．

⑦ はく落跡，目地部の色調の違いを抽出することによって，うきの候補箇所としてあらかじめ認識しておくことができる．

⑧ 画像から漏水跡，豆板箇所を抽出することは容易であり，うきの可能性として認識しておくことができる．

3.6.6 レーザの適用性

これまでの実トンネルのレーザデータから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．

3.6.7 外力の影響を受けているトンネル事例の見解

大規模な地すべりの影響を受けたトンネルの走行型計測結果を踏まえた知見を以下に整理する．

① 大きく外力の影響を受けているトンネルは，ひび割れに段差が伴い，進行性もあるため，割れ目も新鮮であり，ある程度画像からも判断できる．

② 段差も大きく出ていることから，目地部やひび割れに沿ってコンター図にもはっきりと現れていることがわかる．
③ コンター図の色階調幅を細分化することで，2mm 程度の段差も把握できた．
④ ひび割れ幅や長さを的確に把握できることから，このような進行性のあるトンネルでは継続的に計測するのが望ましいといえる．

3.7 適用性の評価

今回，走行型計測により画像データ，レーザデータをそれぞれの実トンネルで取得し，解析した結果，現状で発生している変状を的確に捉えることが可能であることがわかった．画像およびレーザの活用に伴い，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，**第 2 章**でも述べたとおり，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，走行型計測を採用することで，トンネル点検の抱える多くの課題（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．

3.8 走行型計測の効果

今後の実用性に向けて，走行型計測の効果についてまとめると，近接目視の前に走行型計測を行い，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．また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．監視が必要となった際に，走行型計測を行うことで，ひび割れ等の進行を確認することができる．

これらの走行型計測の効果をまとめると，以下のとおりとなる．

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，画像データから候補箇所を見つけ，レーザデータ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 走行型計測により，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．

これらの能力を最大限活かしながら，今後の道路トンネル点検のあり方について検討する必要がある．

参考文献

[3.1] 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，2014.
[3.2] 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編），2015.
[3.3] 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，道路トンネルの健全性評価技術の研究成果報告書，2010.
[3.4] 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，2013.
[3.5] 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究） 71(1), 20-30, 2015.

4　走行型計測におけるひび割れ精度検証[4.13]

4.1 目的

走行型計測は，これまでにも多数トンネルの定期点検の支援技術として採用されてきた．このうち画像から得られるひび割れは，幅 0.3mm 以上を検出することが基準[4.1], [4.10]とされてきた．これは点検時に，ひび割れの判定を行う際，幅 0.3mm 以上のひび割れが密集した場合において，ランクを上げる基準[4.12]となっていることからもひび割れ幅 0.3mm が一つの区切りとして認められているからである．しかしこれまでに，微細なひび割れを検出する能力や幅の精度はどれくらいか，これらの性能を具体的に検証した例は少なく，詳細に規定化もされていないのが現状であった．本研究では，ある高規格道路事務所が管理する道路トンネルをフィールドとして，計測車両による画像データから得られたひび割れと近接目視による実際のひび割れを比較し，ひび割れ検出能力およびひび割れ幅の精度検証を行ったものである．なお，ひび割れ検出は 0.3mm を基準としていることから，今回は 0.2mm 以上を検出対象とした． なお，本論文では，今回検証対象としたトンネル名称，地名、路線名，管理者名について非公表とさせていただく．

4.2 対象トンネルの概要

① 路線名：A自動車道（高規格道路）
② トンネル名：Aトンネル（**図 4-1**参照）
③ トンネル延長：497m
④ 完成年度：平成20年5月
⑤ 検証区間：4スパン（S038～S041）

図 4-1　対象トンネル（A トンネル）

4.3 検証方法

4.3.1 計測車両

MIMM（Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System）
画像設備：デジタルビデオカメラ 100 万画素×12 台搭載（**図 4-2** 参照）

4.3.2 撮影および画像処理

計測車両は，事前（検証日 15 日前）に，A トンネルを対象として撮影を行い，その後，該当スパン（SO38～SO41）の画像データから展開図を作成した．画像によるひび割れの検出方法は，画像データを平面的に見下げ方向で展開させ，パソコン画面よりひび割れと想定されるランダムな連続性を呈した黒線を抽出（目地，型枠線，汚れなどと分別した判断）した[4.1]. ひび割れ幅の計測については，後述する画像の輝度分布と分解能から推定を行った．

4.3.3 近接目視によるひび割れ測定

目視を行うスパンは，SO38～SO41 に限定し，アーチ部および側壁部において熟練技術者により近接目視[4.8], [4.12], [4.13]を行った．アーチ部については，高所作業車を用いて，従来の点検要領に基づいてスケッチを行った．近接目視で対象とする変状は，ひび割れを対象とし，点検員（2 名）が，該当スパンの白図（スパンの枠をを入れた展開図）に幅 0.2mm 程度以上を対象としたひび割れのスケッチ（幅，位置，長さ）を行った．なおこれらの一連の作業は学識者，道路管理者の立会の下で行った．

4.3.4 検証

現地において，立会者（学識者，道路管理者）が，数箇所を絞り込み， 画像からの展開図と近接目視で作成した展開図について，ひび割れ幅，長さ，位置の確認（**図 4-2** 参照）を行った．さらに計測車両に設置したパソコン画面上から，幅 0.2mm 以上のひび割れが，画像から得られているかの検証を行った．

4.3.5 数値評価方法

数値的な検証方法として，以下の 1)～3)のように目標を定め，それぞれを数値評価した．基本的には近接目視と計測車両による結果を整理し，それぞれの目標値との比較を行った．

図 4-2　近接目視，検証状況，カメラ写真

なお，ひび割れ幅は，該当する 1 本のひび割れの最大値とした．

1） ひび割れ検出率による検証

ひび割れ検出率は，式(1)をもとに幅 0.2mm 以上を対象とし，検出目標は 100％とした．

$$\text{ひび割れ検出率} = \frac{\text{計測車両によるひび割れ本数}}{\text{近接目視によるひび割れ本数}} \tag{1}$$

2）ひび割れ実測率（測定精度）による検証

ひび割れ実測率は，式(2)のようにそれぞれのひび割れ計測を行った際の誤差が指定した許容値を上回っているものを異常値として，全測定数に対する正常値数の比率を表した．ここでいう誤差とは，画像から得られたひび割れと近接目視によって計測したひび割れ幅の差とした．なお，許容値はひび割れ計測時に発生しうる誤差範囲として，正規分布の特性から許容される範囲[4.3], [4.4]と仮定した．

$$\text{ひび割れ実測率} = \frac{N-\delta}{N} \tag{2}$$

N：全体数，δ：異常値数

ひび割れ実測率の目標値は，後述する室内試験結果を踏まえた正規分布の特性値から設定した．

3） ひび割れ誤差の許容値の考え方

ある計測を実施する際，誤差には系統誤差（理論値の誤りや測定器固有の特性等）と偶発誤差（測定者の過失やランダムな測定むら等）がある[4.4]．ひび割れ測定は，従来測定者が，ひび割れスケールで測定したときに発生する誤差であり，測定者の過失が大きな原因となることから，偶発誤差のみを対象として検討を行った．

ひび割れ測定は，スケールに印刷された 0.1mm ごとの黒線と実際の割れ幅を合わせて，最も近いとされる寸法を選んで決定している．人間の視覚能に伴う画像解析から判別している．よってこの視覚能の限界が通常目視点検で発生している誤差とすると，今回のひび割れ測定における許容値と仮定することができる．

今回は，室内においてひび割れを故意に可動させる装置を使用し，幅ごとに測定した結果から発生する誤差を読み取ることで許容値を決定した．なおここでいう誤差は，各測定値と平均値との差である．

複数名の測定者（若年層～高年層延べ 32 名）に，可動式ひび割れ発生装置（**図 4-3**）を用いて，指定したひび割れスケール幅（0.1～2.2mm）の値にマイクロメータを合わせ，その時の計測値（レーザによるデジタル値）を読み取った．

可動ひび割れ発生装置は，コンクリートのテストピースに割れ目を入れ，アルミ板で製作した台座に固定し，レーザとマイクロメータで距離を測ることで，所定幅のひび割れを発生

図 4-3 可動式ひび割れ発生装置および測定状況写真

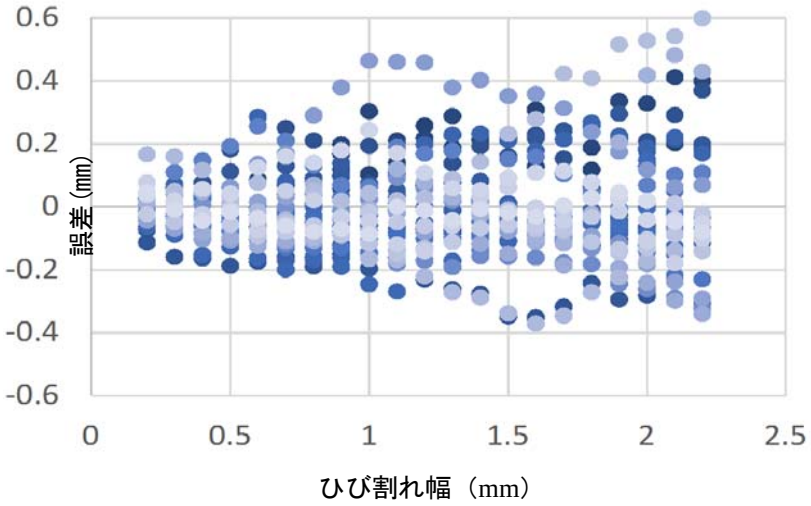
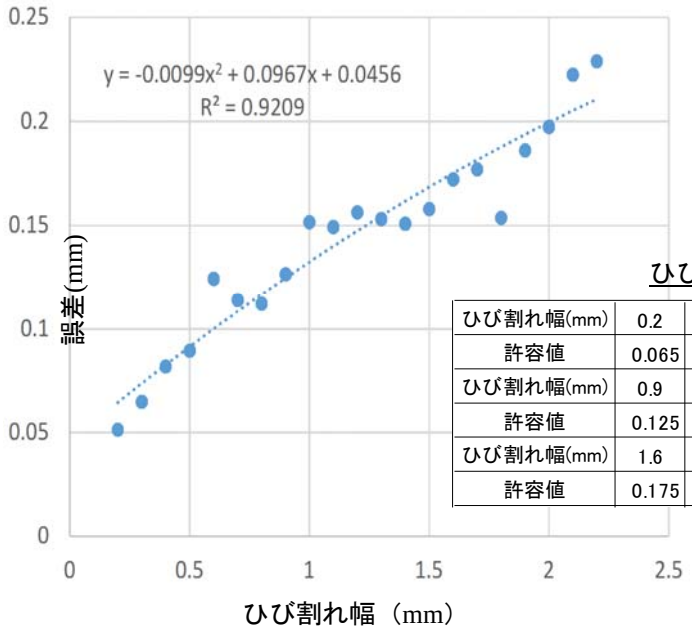


図 4-4　誤差分布図（測定値-平均値）



ひび割れ幅ごとの許容値

ひび割れ幅(mm)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
許容値	0.065	0.074	0.083	0.091	0.100	0.108	0.117
ひび割れ幅(mm)	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
許容値	0.125	0.132	0.140	0.147	0.155	0.162	0.168
ひび割れ幅(mm)	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
許容値	0.175	0.181	0.188	0.194	0.199	0.205	0.210

図 4-5　標準誤差近似式

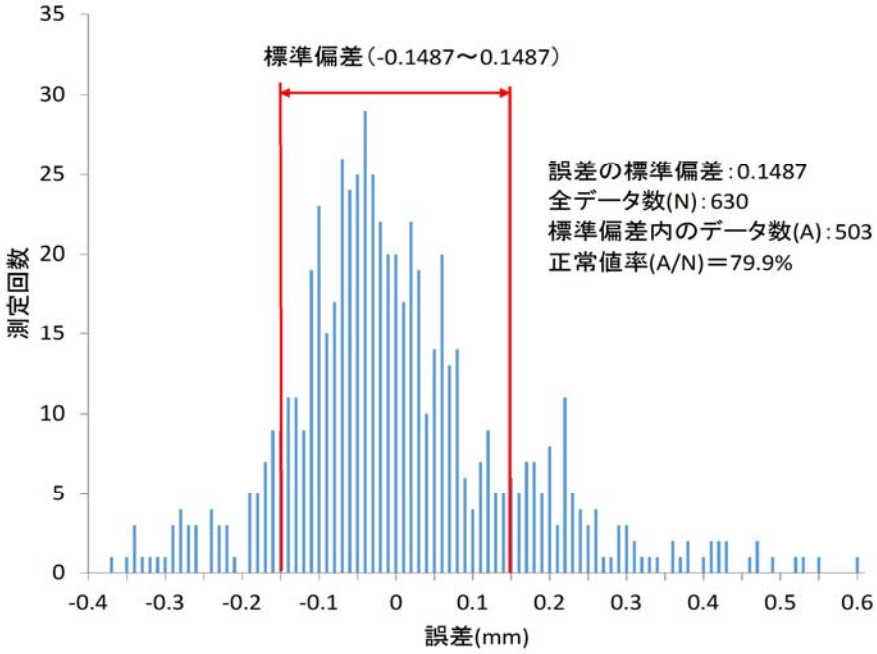


図 4-6　全体データヒストグラム

させる器具（関西大学製作）である．

室内試験の結果として，ひび割れ幅ごとに生じる誤差分布（測定値-平均値）を**図 4-4** のように示す．ひび割れ幅の小から大に伴って誤差分布も大きくなっていることから，一律の許容値ではなくひび割れ幅ごとに許容値を定める必要がある．

それぞれの誤差から，式(3)のように標準誤差[4.4]を算出し，**図 4-5** に示す近似式により許容値を設定した．

$$\text{標準誤差} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}} \tag{3}$$

x_i：測定値，$\bar{x}$：平均値

結果として図 **4-5** のとおり，それぞれのひび割れ幅に対し概ね 0.07mm～0.21mm の許容値を与えるものとした．

今回室内試験の誤差データをすべてヒストグラムに表したのが**図 4-6** である．この結果をまとめると，全データ数 630 のうち誤差の標準偏差を算出すると 0.1487 となり，標準偏差内のデータ数は 503 となった．通常正規分布で示される標準偏差の正値が含まれる確率は，68.3%とされるが[4.3], [4.4]，今回の結果は，79.9%となる．よって冒頭で述べたひび割れ実測率における目標値は，今回の室内試験結果から得られた 79.9%を採用した．

4)　ひび割れ長さの精度

画像データでは，ひび割れと想定されるランダムな黒線を抽出して判別しており，ひび割れ幅別に検出された 1 本のひび割れを形状の変化に沿って座標値から長さを算出している．

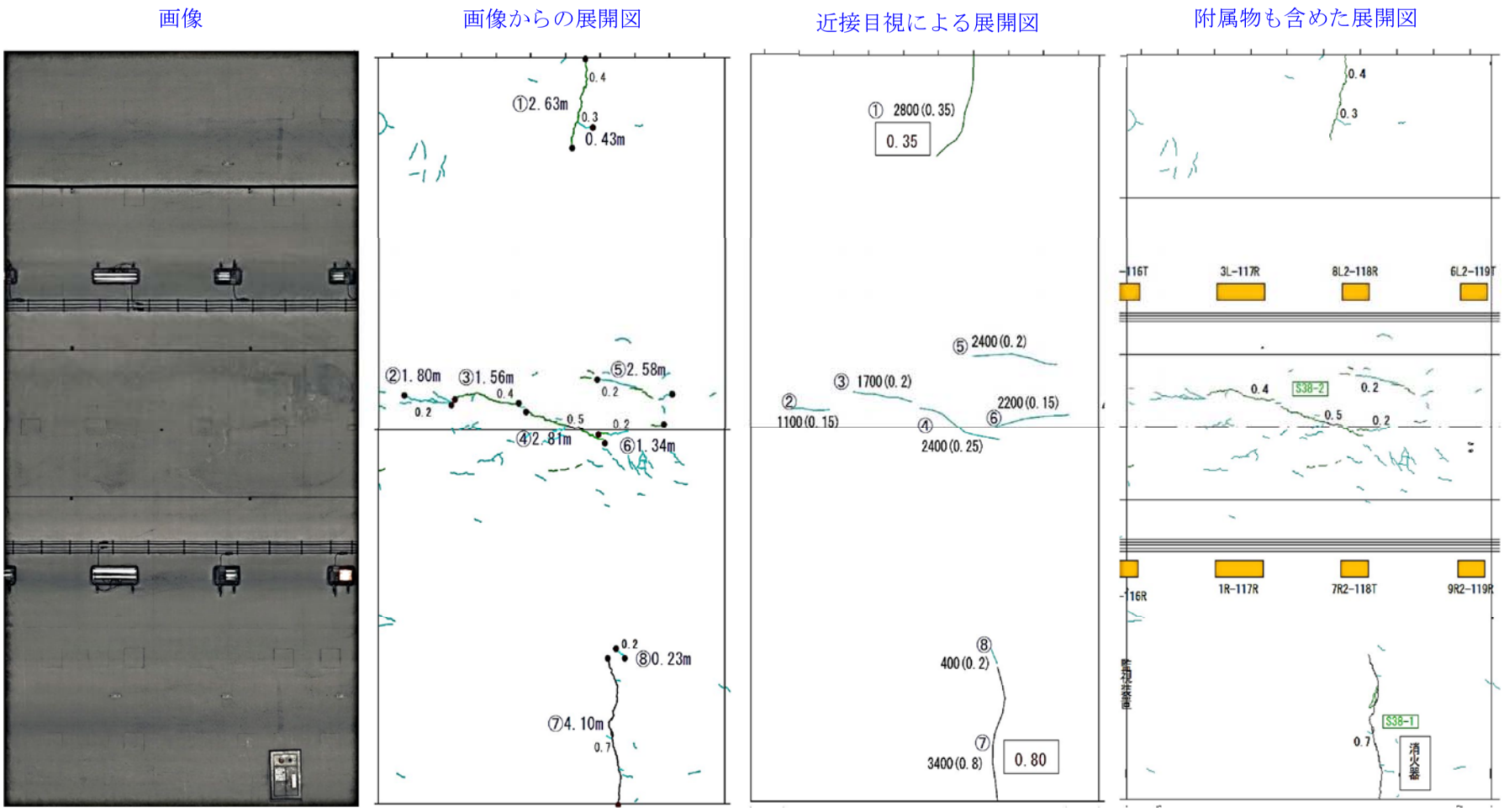


図 4-7　S038 画像およびひび割れ展開図

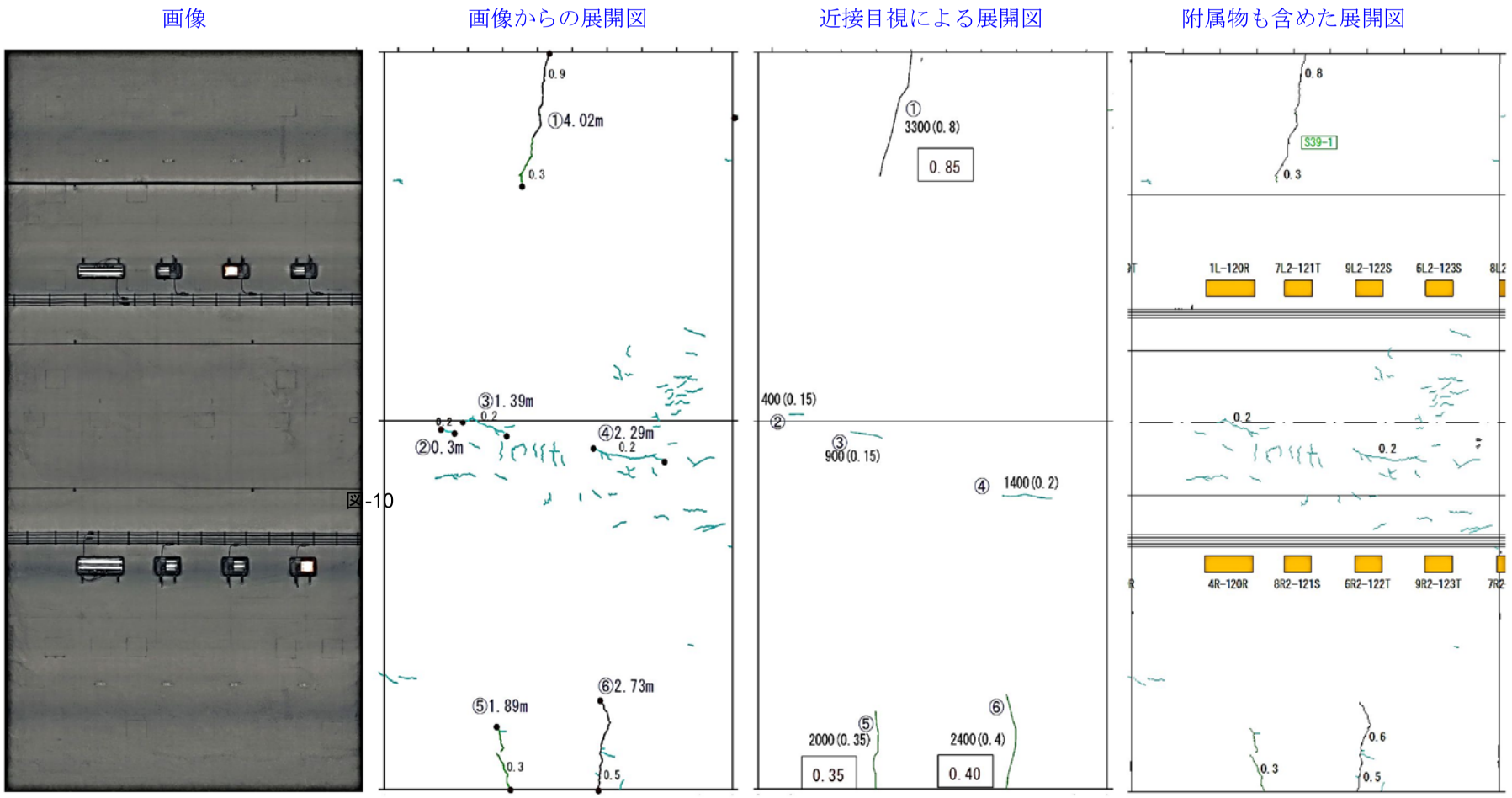


図 4-8　SO39 画像およびひび割れ展開図

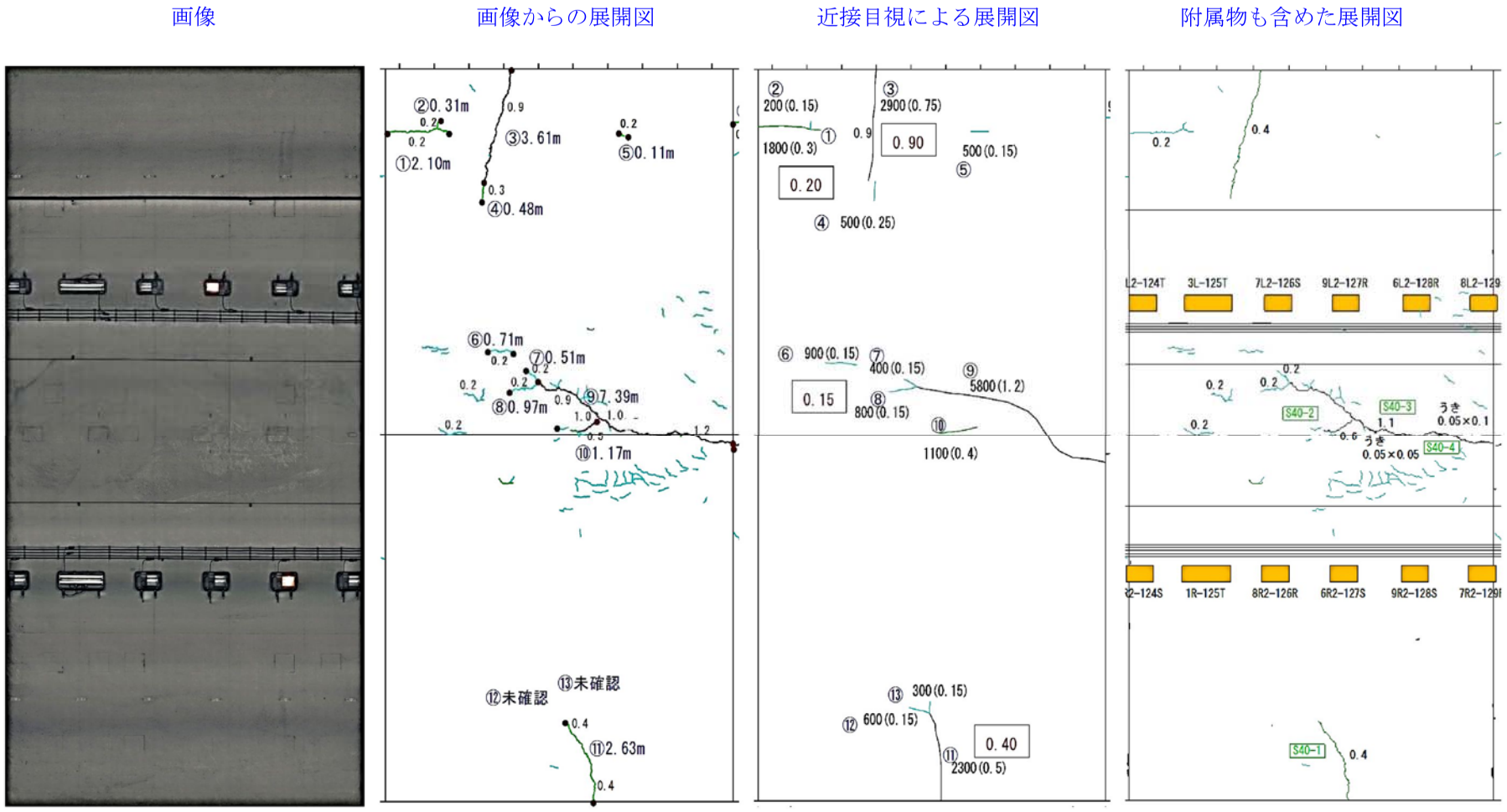


図 4-9　S40 画像およびひび割れ展開図

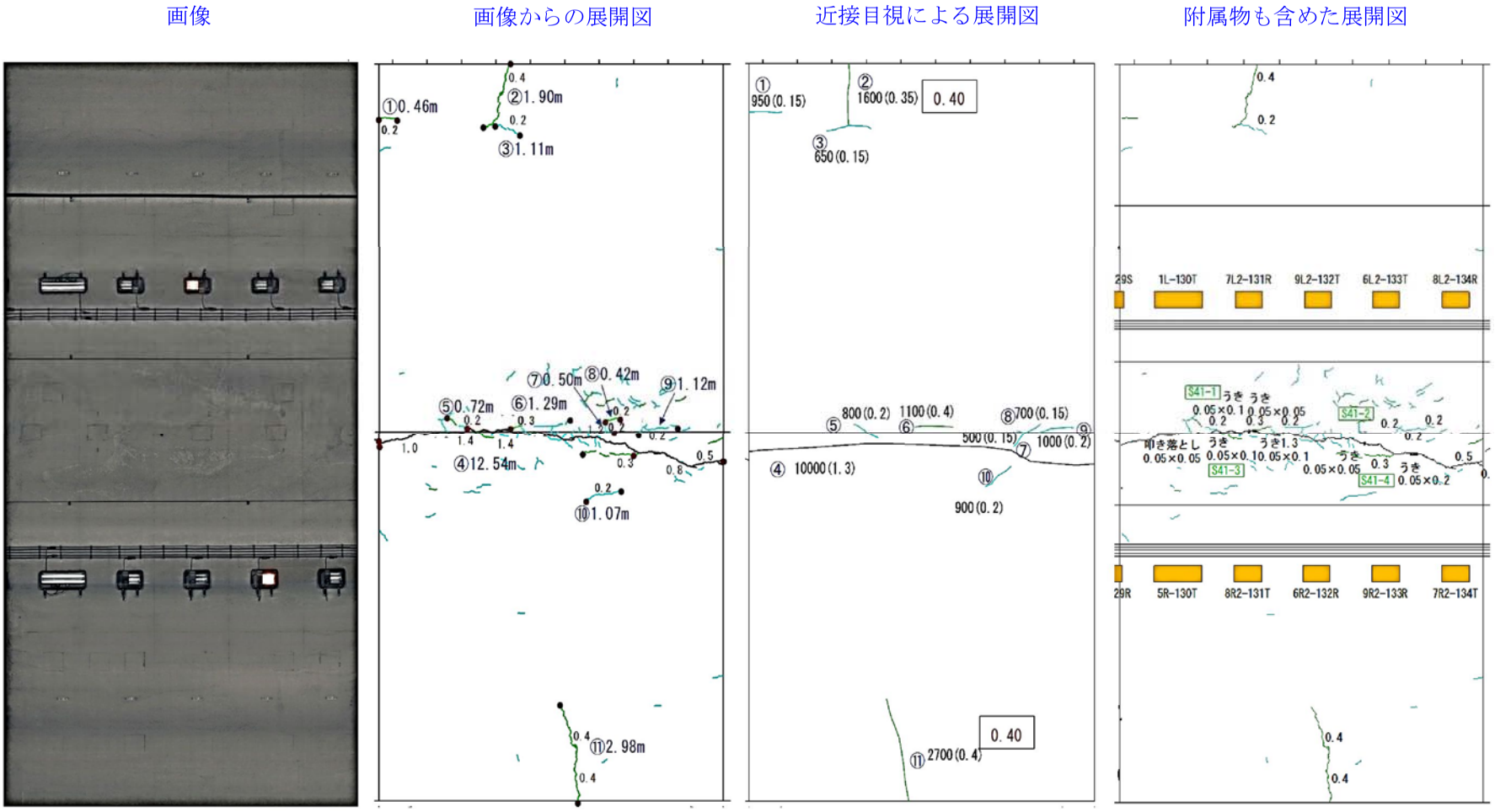


図 4-10　S041 画像およびひび割れ展開図

一方目視点検では，スケール等を用いて，目視で 1 本と確認した全延長分を測定している．よって両者の測定プロセスが異なるため，今回は，目視で認識された 1 本の全延長分と画像データからの個々のひび割れ長さの累積長さを比較するものとする．測定プロセスの違いから，ひび割れ長さの評価については，比較に留め，誤差の許容値は定めないこととした．

4.4 計測結果

計測車両から得られた画像および展開図，検証時の近接目視における展開図，参考として画像から得られた照明など附属物を含めた展開図（今回は検証の対象ではないが，業務の最終成果となった展開図）を，それぞれ SO38~41 スパンごとに**図 4-7～図 4-10** に示す．なお，近接目視による展開図の中で四角枠の数値は，学識者，道路管理者によるひび割れ幅の検証値を示している．今回検証時に発見したひび割れの集計は，**表 4-1** のとおりである．**表 4-2** に計測車両による結果と近接目視による検証結果を示す．

4.5 検証結果

4.5.1 ひび割れ検出率について

近接目視では，**表 4-1** のように全体で 38 本のひび割れを計測した．今回対象とする幅 0.2mm 以上のひび割れは**表 4-2** のように 23 本であり，残りは 0.15mm という結果であった．画像からは，全体で幅 0.2mm 以上が 36 本のひび割れを検出できた．したがって合計で，2 本のひび割れが検出できなかったことから，ひび割れ検出率は，以下のとおりとなる．

$$\text{ひび割れ検出率（全体）} = \frac{\text{計測車両によるひび割れ本数}}{\text{近接目視によるひび割れ本数}} = \frac{36}{38} = 94.7\%$$

しかし，今回検出できなかったひび割れは，すべて幅 0.15mm のひび割れであることから，0.2mm 以上を対象とすると，以下のとおりとなる．

$$\text{ひび割れ検出率（幅 0.2mm 以上）} = \frac{\text{計測車両によるひび割れ本数}}{\text{近接目視によるひび割れ本数}} = \frac{23}{23} = 100\%$$

表 4-1 計測結果表

スパン	ひび割れ幅範囲	本数
S038	0.15～0.80mm	8
S039	0.15~0.85mm	6
S040	0.15~1.2mm	13
S041	0.15~1.3mm	11
計	0.15~1.3mm	38

表 4-2　画像との検証結果

スパン	番号	場所	計測車両(画像)		検証結果(正値)		誤差		評価	
			幅(mm)	長さ	幅(mm)	長さ	幅(mm)	長さ	許容値	σ以下
S038	1	下り側	0.40	2.63	0.35	2.80	0.050	−0.170	0.078	○
	2	中央	0.20	1.80	0.15	1.10	0.050	0.700	0.060	○
	3		0.40	1.56	0.20	1.70	0.200	−0.140	0.065	△
	4		0.50	2.81	0.25	2.40	0.250	0.410	0.069	△
	5		0.20	2.58	0.20	2.40	0.000	0.180	0.065	○
	6		0.20	0.99	0.15	2.20	0.050	−1.210	0.060	○
	7	上り側	0.70	4.10	0.80	3.40	−0.100	0.700	0.117	○
	8		0.20	0.23	0.20	0.40	0.000	−0.170	0.065	○
S039	1	下り側	0.90	4.02	0.85	3.30	0.050	0.720	0.121	○
	2	中央	0.20	0.30	0.15	0.40	0.050	−0.100	0.060	○
	3		0.20	1.39	0.15	0.90	0.050	0.490	0.060	○
	4		0.20	2.29	0.20	1.40	0.000	0.890	0.065	○
	5	上り側	0.30	1.89	0.35	2.00	−0.050	−0.110	0.078	○
	6		0.50	2.73	0.40	2.40	0.100	0.330	0.083	△
S040	1	下り側	0.20	2.10	0.20	1.80	0.000	0.300	0.065	○
	2		0.20	0.31	0.15	0.20	0.050	0.110	0.060	○
	3		0.90	3.61	0.90	2.90	0.000	0.710	0.125	○
	4		0.30	0.48	0.25	0.50	0.050	−0.020	0.069	○
	5		0.20	0.11	0.15	0.50	0.050	−0.390	0.060	○
	6	中央	0.20	0.71	0.15	0.90	0.050	−0.190	0.060	○
	7		0.20	0.51	0.15	0.40	0.050	0.110	0.060	○
	8		0.20	0.97	0.15	0.80	0.050	0.170	0.060	○
	9		1.20	7.39	1.20	5.80	0.000	1.590	0.147	○
	10		0.50	1.17	0.40	1.10	0.100	0.070	0.083	△
	11	上り側	0.40	2.63	0.40	2.30	0.000	0.330	0.083	○
	12				0.15	0.60			0.060	−
	13				0.15	0.30			0.060	−
S041	1	下り側	0.20	0.46	0.15	0.95	0.050	−0.490	0.060	○
	2		0.40	1.90	0.40	1.60	0.000	0.300	0.083	○
	3		0.20	1.11	0.15	0.65	0.050	0.460	0.060	○
	4	中央	1.40	12.54	1.30	10.00	0.100	2.540	0.155	○
	5		0.20	0.72	0.20	0.80	0.000	−0.080	0.065	○
	6		0.30	1.29	0.40	1.10	−0.100	0.190	0.083	△
	7		0.20	0.50	0.15	0.50	0.050	0.000	0.060	○
	8		0.20	0.42	0.15	0.70	0.050	−0.280	0.060	○
	9		0.20	1.12	0.20	1.00	0.000	0.120	0.065	○
	10		0.20	1.07	0.20	0.90	0.000	0.170	0.065	○
	11	上り側	0.40	2.98	0.40	2.70	0.000	0.280	0.083	○
合計(Σ)				73.42		65.80			△の個数	5
平均(A)			0.38	2.04	0.33	1.73	0.036	0.237	○の個数	31
すべてのひび割れ本数			36		38				実測率	86.1%
0.2mm以上のひび割れ本数			36		23				目標値	79.9%
0.2mm未満のひび割れ本数			0		15					

結果として，幅 0.2mm を下回るひび割れを含んでも 95%程度の検出が可能であり，幅 0.2mm 以上のひび割れでは，すべてが検出できることが証明された．なお，図 4-7~図 4-10 に示すとおり，画像展開図は，検証時には捕らえきれていない微細なひび割れ（幅 0.2mm 未満）も多く検出できており，将来的にこうしたひびわれ割れが進行した際に当初の状況として記録に残ることは計測車両における大きなメリットといえる．

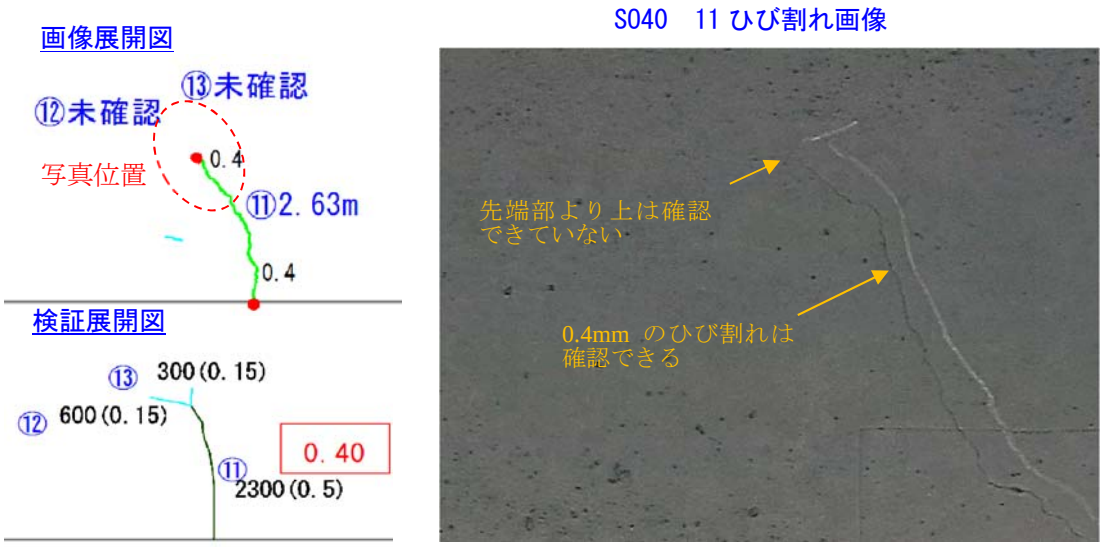


図 4-11 11 ひび割れクローズアップ

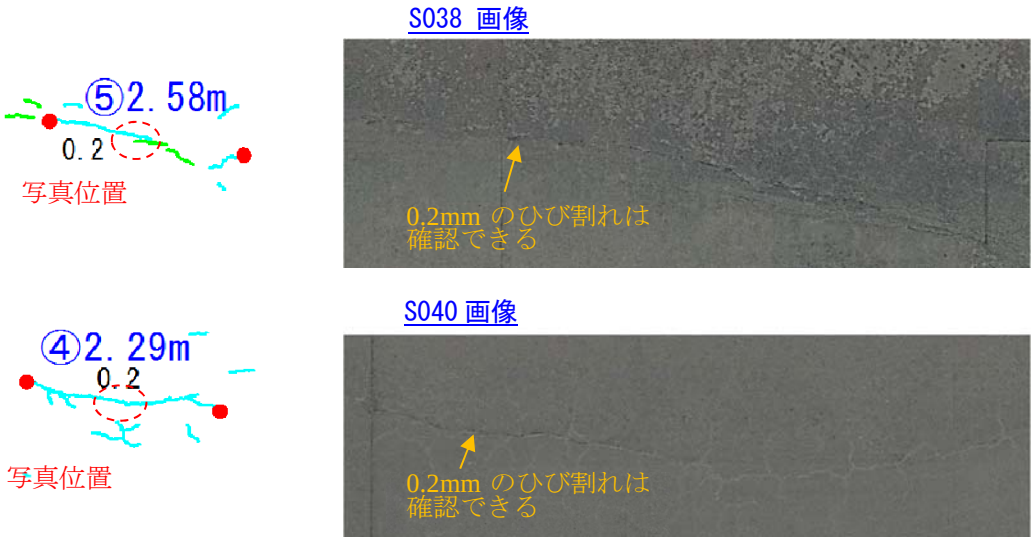


図 4-12 0.2mm ひび割れクローズアップ

なお, 図 4-9 の近接目視による展開図, 表 4-2 に示す SO40 の 12~13 ひび割れ（幅 0.15mm: 長さ 0.6m，0.3m）は，画像からは検出できなかった．画像を先端部分にクローズアップすると図 4-11 のとおりとなる．幅 0.4mm のひび割れは，くっきりと黒線の連続性が判別しやすくなっているが，その先端部（0.15mm）については捕らえることはできなかった．

図 4-12 に SO38，SO40 に発生した幅 0.2mm の検出できたひび割れを示す．明らかに黒線の連続性が確認でき，ひび割れとして認識することができる．したがって幅 0.2mm 以下の微細なひび割れは，トンネル内の明るさであったり，覆工表面の汚れなどにより，条件の違いで，検出する精度が異なってくるものと判断される．

4.5.2 ひび割れ実測率（測定精度）について

通常近接目視におけるひび割れ幅は，スチール製やプラスチック製のひび割れスケールにより，実際のひび割れに重ねて最も近似したスケール幅を読み込んでいく．点検員の視覚能による判断に委ねられていることから，個人的なバラツキやヒューマンエラーも伴い，若干の誤差は許容されている．一方，計測車両からのひび割れ幅は，**図 4-13**に示すように得られた画像データから，コンクリート面とひび割れの輝度を読み取り，その細部のピクセル数，分解能（ピクセル寸法），輝度の特性（平均値，レンジ，コントラスト，判別分析による閾値等）から想定[4.2], [4.5], [4.6], [4.7], [4.11]している．どちらも視覚的な情報を処理し，アウトプットを得るプロセスとなる．

今回は画像による結果と近接目視による検証結果との誤差を分析することで，ひび割れ実測率の評価を行った．**表 4-2**のとおり計測車両と近接目視の誤差を評価する上で，ひび割れ幅ごとに室内試験結果から発生しうる標準誤差から許容値を定めた．

標準誤差を逸脱する個数をカウントし，ひび割れ実測率を計算すると以下のように目標値を満足できる結果となった．

$$\text{ひび割れ実測率} = \frac{N-\delta}{N} = 86.1\% > 79.9\% \quad \text{OK}$$

N：全体数（画像により検出できたひび割れ本数）

表 4-2より，全体数（○+△の個数）36個

δ：異常値数（標準誤差を逸脱するひび割れ本数）

表 4-2より，異常値数（△の個数）5個

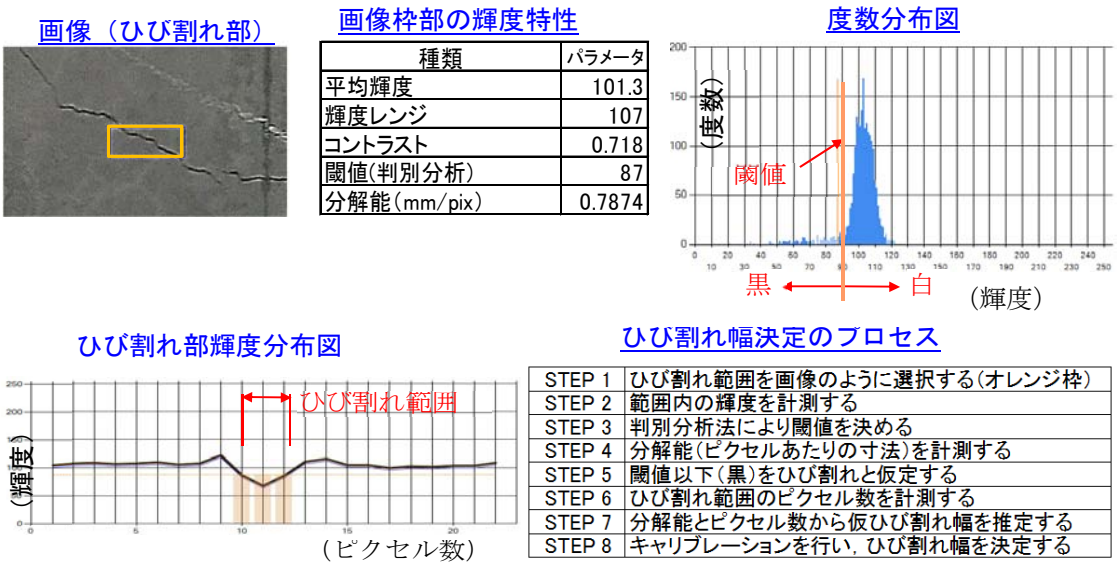
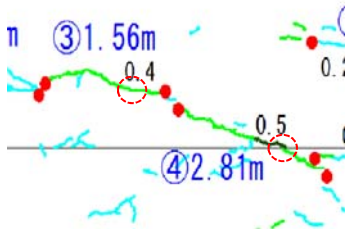


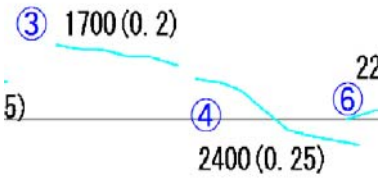
図 4-13　ひび割れ幅決定のためのプロセス

画像展開図



画像（3 ひび割れ）

検証展開図



画像（4 ひび割れ）

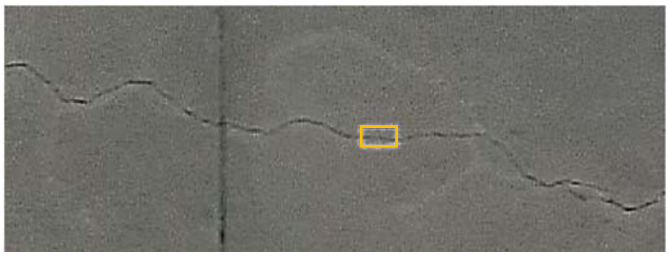
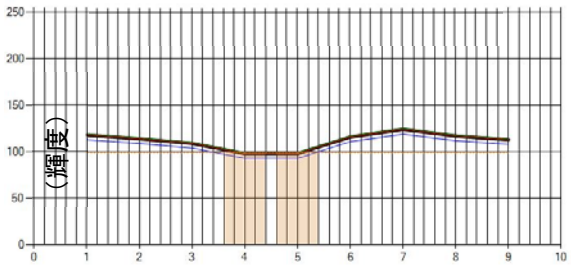


図 4-14　SO38　3~4 ひび割れ画像

3 ひび割れ輝度分布図

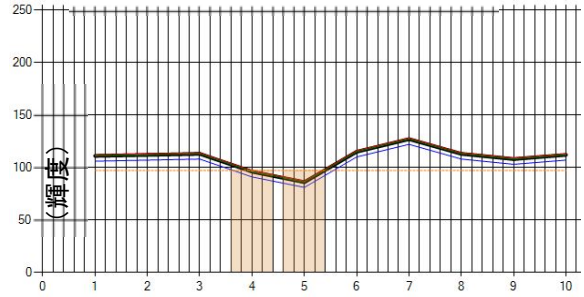


（ピクセル数）

3 ひび割れ輝度特性

種類	パラメータ
平均輝度	112.5
輝度レンジ	35
コントラスト	0.158
閾値(判別分析)	110
分解能(mm/pix)	0.7762

4 ひび割れ輝度分布図



（ピクセル数）

4 ひび割れ輝度特性

種類	パラメータ
平均輝度	113.1
輝度レンジ	40
コントラスト	0.187
閾値(判別分析)	111
分解能(mm/pix)	0.7762

図 4-15　SO38　3~4 ひび割れ部輝度特性

なお，S038 の 3,4 ひび割れ幅については，0.2～0.25mm の誤差が発生した．画像をクローズアップすると**図 4-14** のとおりである．コンクリートのグレー面を背景に一定のランダムな連続化した黒線のひび割れを認識することができる．それぞれの輝度分布と特性値を見ると**図 4-15** のとおりである．どちらも 4 ひび割れの方がくっきりと見えており，その黒線

を認識することは可能である．ひび割れ輝度の特性値も同様であり，輝度レンジおよびコントラストは，4 ひび割れの方が大きくなっている．今回の誤差については，この計測箇所がアーチ天井部であることから，キャリブレーション[4.2]（車両計測前に側壁部等で実測したひび割れ幅を正値として最終調整を行うこと）箇所が側壁部であり，双方の撮影した際の環境的条件（被写体距離・照明・日光の影響）の違いが原因と考えられる．ただし，検証後の点検時においては，該当するひび割れの一部分において，最大幅が画像展開図に示す幅と一致する箇所が発見されたことから，最終のひび割れ展開図にはこの値を採用した．

通常のトンネルは，コンクリート表面の色調や汚れなど撮影条件が悪いことが予想されることから，キャリブレーションの方法や撮影時の照明方法などによって大きく左右され，ひび割れ幅を認識するのに誤差の要因となることがわかった．

4.5.3 ひび割れ長さについて

ひび割れ長さは，画像と目視では前述したとおり，測定プロセスの違いによりそれぞれが異なった数値となっている．全体的には 10%程度画像が長く検出され，1 本あたりの平均値においても 20%程度長く検出されている．こうした結果は，画像の再現により，ひび割れの変曲点を細かく追随していること，トンネルアーチ部の曲線長を正確に検出していることであり，画像処理による的確な再現性がもたらしたものとされ，計測車両におけるひとつのメリットとして評価できる．

なお，点検要領によればひび割れの判定区分は，進行性の有無によって分けられており，長さは，10.0m と 5.0m が区分の目安となり，場合によっては過大な評価につながる可能性もある．この長さは，トンネル縦断方向であれば，1 スパン全長に渡って広がったのか，その半分程度の規模か，横断方向であれば，アーチ部全域に渡って広がったのか，その半分程度の規模かの区分である．判定を行う際は，まずひび割れの進行性の有無，ひび割れの方向や長さ，幅，密集度等からある程度の原因も想定し，総合的に判断すべきと考える．したがってひび割れ長さの計測は，変曲点を追随した正確な長さおよび先端の位置を把握し，今後の進行性の可能性について着目することが，健全性の評価において非常に重要な手段といえる．

4.6 まとめ

全体のひび割れ幅の誤差平均は，**表 4-2**のとおり+0.036mmであった．これは，室内試験結果において最小のひび割れ幅0.2mmの時の標準誤差0.065mm（**図 4-5**参照）を下回るものであり，精度の高い結果が得られたことと，プラス側（安全側）の傾向で検出できたことは評価できる．また計測車両では，幅0.2mm以下の小さなひび割れについては，すべて一律に0.2mmの表記（通常は0.3mm未満として区分）にしているため，検証値0.15mmと比較すると一見誤差として評価されているが，維持管理を実施していく上で同等と見て差し支えないものと判断できる．したがって，幅0.2mm以上のひび割れを的確に検出という当初目的は達

成できたものと考える．

ひび割れ実測率については，異常値を除く正常値率が86.1%となり，目標値79.9%を上回る結果となった．

なお，検証後に点検を実施した際，同じひび割れにおいても，部分的に計測車両の結果に該当するひび割れ幅もいくつか確認されたことから，最終のひび割れ展開図（**図 4-7～図 4-10**参照）には，その結果を反映させた．

また画像から得られた照明など附属物を含めた展開図を見ると，照明，ケーブル，消火栓などの主要な附属物の位置や大きさも正確に再現されており，図面にも管理番号等を表記できることから，今後の日常的な維持管理において活用することが可能となる．こうした図面化の精度やわかりやすさの向上も計測車両の持つ大きなメリットとして評価できる．

4.7 精度向上に向けた今後の取り組み

計測車両は，これまでに近接目視点検の支援技術として多く採用されてきたが，その品質性能を証明できたことは大きな進歩といえる．しかし，今回の検証箇所は比較的新しいトンネルにもかかわらず，覆工表面の色調や汚れ，照度環境のばらつきに伴う誤差が発生することが判明した．ほとんどのトンネルが，今回以上長期に供用されていることや，今後の経年変化や劣化に伴い計測条件が悪化することが想定される．この中で，必要となる精度を確保し，点検の効率化を図っていくことが今後の課題である．

そのためには，計測実績を重ね，さらに多くのデータを蓄積しながら，性能向上を図っていくことが重要と考えられる．その取り組みの手段を以下のように整理する．

① 計測車両のデジタルビデオカメラの性能を向上させ，最適な照明装置の機材の選定や設定方法の再検証を行う．

② 計測実績を重ね，さらに多くのデータを蓄積しながら，新たな画像解析技術の取り組みが必要である．

⇒人工知能ソフトを用いたひび割れの自動判別やひび割れ幅の検出

⇒データ蓄積に伴う学習機能やパラメータの最適化

③ ひび割れ等に関連するレーザ技術の活用として，覆工表面上の段差の自動抽出方法の検討が必要である．

⇒ひび割れと段差の検出を画像とレーザ技術によって，自動抽出

⇒走行型計測によるうき箇所の抽出につながる

④ トンネル覆工に発生しているひび割れなどの変状箇所を．画像データ，レーザデータとの融合を図った 3 次元可視化技術の取り組みなどが必要と考えられる．

⇒精度を向上させることによって，3 次元データ（タブレット等）を現地に持ち込んで，変状の進行などをリアルタイムで把握する（合理的な維持管理の実現）

参考文献

[4.1] 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. 2-1～6-13, 2013.

[4.2] 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究），Vol. 71, No. 1, pp. 20-30, 2015.

[4.3] 大村平：統計解析のはなし，pp. 16-52，日科技連出版社，1996.

[4.4] 平山宏之：計測と誤差，電学論 A, 110 巻 5 号，pp. 295-301, 1990.

[4.5] 田嶋和樹，白井伸明，渡部憲：コンクリートのひび割れ幅の計測と予測，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26, No. 2, pp. 145-150, 2004.

[4.6] 庄野昭, 齋藤淳 : コンクリート表面のひび割れ評価方法, ハザマ研究年報, pp. 1-6, 2009.

[4.7] 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の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.

[4.8] 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.

[4.9] 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.

[4.10] 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.

[4.11] 小山哲，丸屋剛，堀口賢一，澤建男：カーボンウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発，土木学会論文集 E2, Vol. 68, No. 3, pp. 178-194, 2012.

[4.12] 公益社団法人日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編）, 2015.

[4.13] 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, 2014.

[4.14] 水口尚司，大西有三，徳田浩一郎，西山哲，石村勝伸：道路トンネル走行型計測車両におけるひび割れ精度検証の報告，土木学会論文集 F2（地下空間研究） Vol. 73, No. 1, pp. 1-10, 2017.

5　実トンネルにおける事例検証

5.1 目的

本章では，これまでに最近の走行型計測を用いたトンネル点検業務の実績から，特徴的なトンネルを抽出し，それぞれのトンネルの概要，点検の条件，変状の特徴，走行型計測および近接目視による結果，**第 2 章～第 4 章**までの検討結果を踏まえ，事例に基づく検証を行ったものである．なお，本論文では，今回紹介する事例の対象となるトンネル名称，地名，路線名，管理者名等について非公表とさせていただく．

5.2 対象トンネルの一覧

今回の走行型計測を用いたトンネル点検の事例の一覧を，**表 5-1** に示す．計 5 トンネルとし，それぞれ完成年度や形式の違うものを抽出して，変状の特徴や点検結果，診断結果を示している． なお，トンネル名を B トンネル～としているのは，**第 4 章**で A トンネルの事例について述べていることから，その差別化を図るためである．**表 5-2～表 5-20** にそれぞれのトンネルの事例を示す．

5.3 点検年次

今回の点検要領等[5.1],[5.2]の改訂後のものが，後々の検証においても望ましいと判断し，それぞれが 2014 年以降のものを抽出した．なお，F トンネルにおいては，道路トンネルであるが，構造が 2 連の箱形函渠であることから，「国土交通省　道路局：シェッド，大型カルバート等定期点検要領，2014.」[5.3]に基づき診断を行っているため，診断の適正については詳細に述べず，走行型計測の適用性を中心に考察している．

表 5-1　対象トンネル一覧表

トンネル名	道路種別	トンネル延長（m）	車線数	完成年度	構造形式	点検年次
B	一般国道	1,570	対 2※	1964	矢板工法	2015
C	自専道	2,909	対 2	2008	NATM	2015
D	一般国道	1,045	対 2	1981	矢板工法	2014
E	一般国道	559	対 2	1995	NATM	2014
F	都道府県道	157	4	1992	箱形函渠	2015

※：対 2 は，対面 2 車線を示す

5.4　B トンネルの事例

図 5-1　B トンネル点検結果表（1）

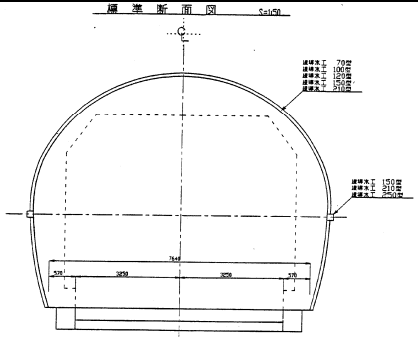
<table>
<tr><td>項目</td><td>延長</td><td>1,570m</td><td colspan="2">トンネル断面</td></tr>
<tr><td rowspan="7">トンネル諸元</td><td>完成年次</td><td>1964 年</td><td colspan="2" rowspan="7">  </td></tr>
<tr><td>内空断面積</td><td>43.3m^2</td></tr>
<tr><td>交通量</td><td>15,157 台/日</td></tr>
<tr><td>幅員</td><td>7.6m</td></tr>
<tr><td>高さ</td><td>6.2m</td></tr>
<tr><td>トンネル等級</td><td>A</td></tr>
<tr><td>スパン数</td><td>167</td></tr>
<tr><td rowspan="3">点検状況</td><td colspan="2">走行型計測</td><td colspan="2">近接目視</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="2">所要日数：1 日（昼間）
カメラ：100 万画素
レーザ：100 万点/秒</td><td colspan="2">所要日数：6 日（夜間），片側交互通行規制
主な変状は，ひび割れ，うき，漏水であった.
天端部に乾燥収縮と思われるひび割れが確認された.
3.0mm の横断方向のひび割れが見られた.
附属物はボルトの緩みが見られ、締め直しを行った.</td></tr>
</table>

図 5-2　B トンネル点検結果表（2）

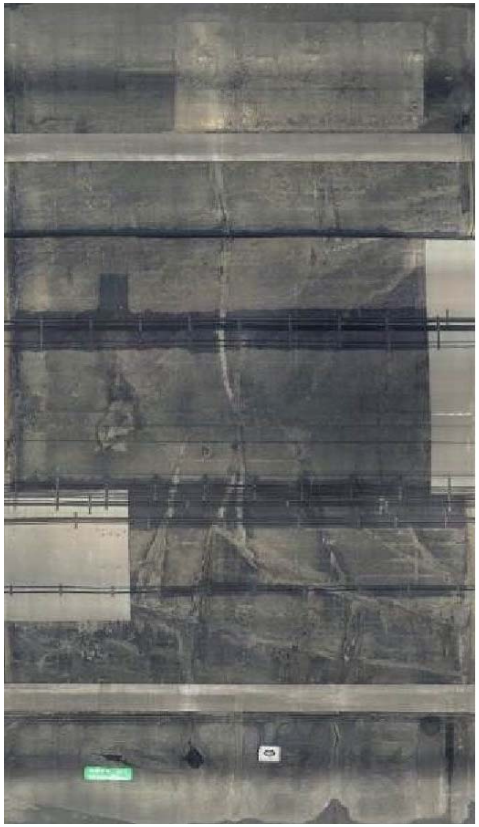
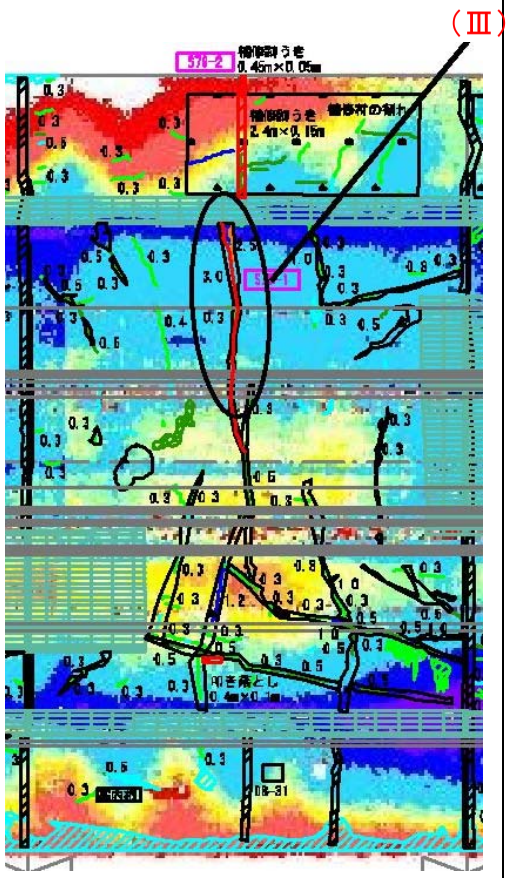
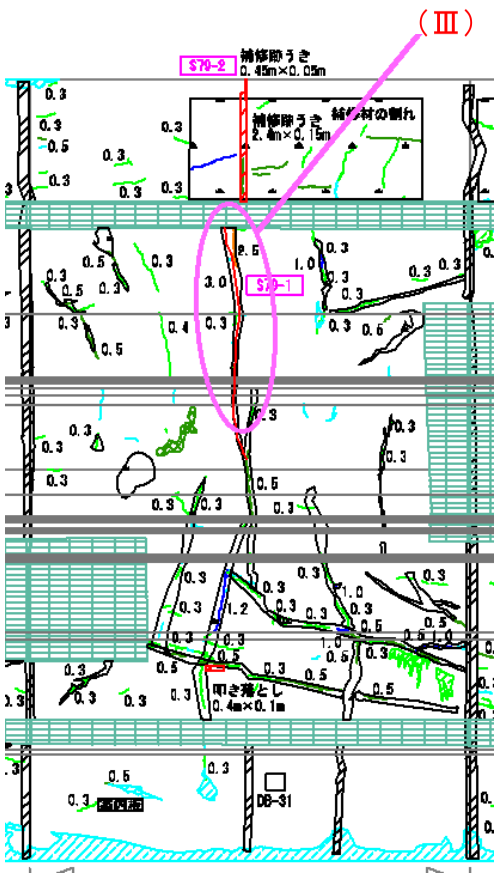
項目	走行型計測結果（画像解析結果）	走行型計測結果（レーザ解析結果）	近接目視結果
変状状況 診断 Ⅲ判定 (ひび割れ・幅 3mm×長さ 5.2m)となり、早期に対策を講ずべき状態			
発生原因．考察	・ひび割れ発生箇所周辺の覆工の変形モードについては，外力作用傾向は認められないことから，乾燥収縮や温度収縮などによる影響が想定される． ・変状対策工は、ひび割れ注入工が想定される．		

図 5-3　B トンネル点検結果表（3）

走行型計測結果（画像解析結果）

5.5　C トンネルの事例

図 5-4　C トンネル点検結果表（1）

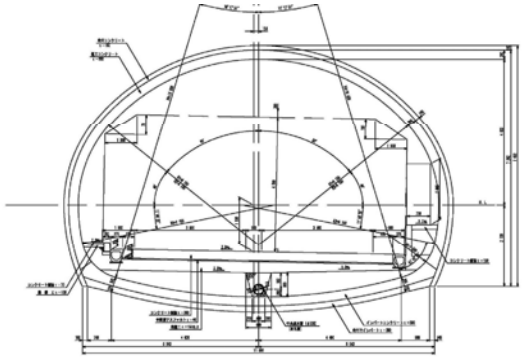
<table>
<tr><td>項目</td><td>延長</td><td>2,919m</td><td colspan="2">トンネル断面</td></tr>
<tr><td rowspan="7">トンネル諸元</td><td>完成年次</td><td>2008 年</td><td colspan="2" rowspan="7">  </td></tr>
<tr><td>内空断面積</td><td>70.2m^2</td></tr>
<tr><td>交通量</td><td>20,700 台/日</td></tr>
<tr><td>幅員</td><td>9.5m</td></tr>
<tr><td>高さ</td><td>6.38m</td></tr>
<tr><td>トンネル等級</td><td>AA</td></tr>
<tr><td>スパン数</td><td>275</td></tr>
<tr><td rowspan="3">点検状況</td><td colspan="4">近接目視点検状況</td></tr>
<tr><td colspan="4"> </td></tr>
<tr><td><u>走行型計測</u>
所要日数：1 日（昼間）
カメラ：100 万画素
レーザ：100 万点/秒</td><td colspan="3">所要日数：3 日（昼夜間），全面通行止め
主な変状は，ひび割れ，うき，漏水であった．
天端部に乾燥収縮と思われるひび割れが確認された．
3.0mm の横断方向のひび割れが見られた．（非常駐車帯接続部）</td></tr>
</table>

図 5-5　C トンネル点検結果表（2）

走行型計測結果（画像解析結果）

図 5-6　C トンネル点検結果表（3）

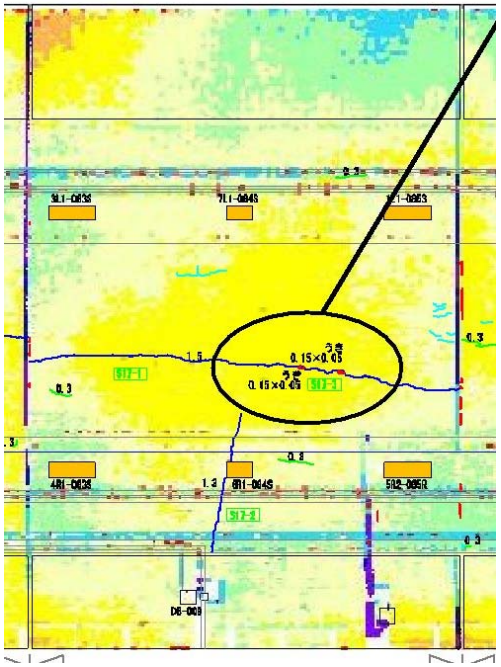
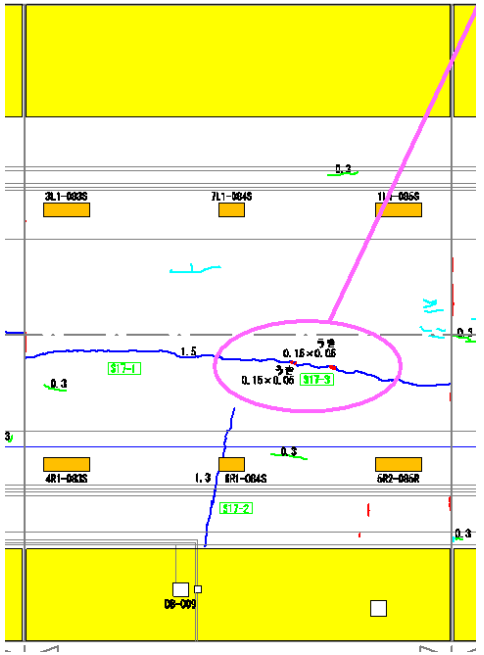
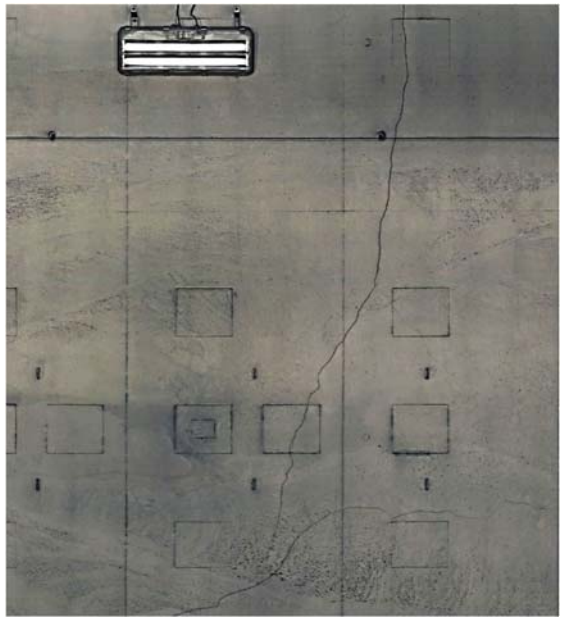
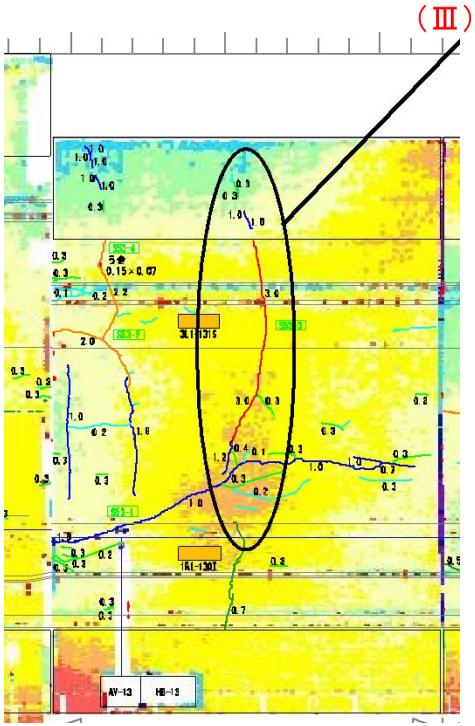
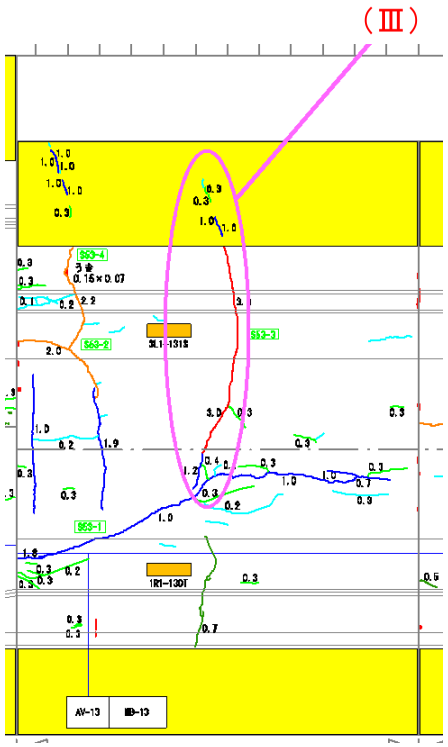
項目	走行型計測結果（レーザ解析結果）	近接目視結果
変状状況 診断 Ⅲ判定 (うき, はく離)となり、早期に対策を講ずべき状態		
発生原因・考察	・ひび割れに沿ってうき（0.15m×0.05m，0.15m×0.05）が発生している． （前ページ画像参照） ・うき発生箇所周辺の覆工の変形モードについては，外力作用傾向は認められないことから，乾燥収縮や温度収縮などによる影響が想定される． ・ひび割れが 1.5mm の大きなものであり，その周辺にはうき，はく離が発生しやすいことがわかる． ・ただし，ひび割れ幅が 1.5mm と大きいことから，今後はその進行性について注視する必要がある． ・変状対策工は、ネット工やひび割れ注入工が想定される．	

図 5-7　C トンネル点検結果表（4）

項目	走行型計測結果（画像解析結果）	走行型計測結果（レーザ解析結果）	近接目視結果
変状状況 診断 Ⅲ判定 (ひび割れ・幅 3mm×長さ 6.9m)となり、早期に対策を講ずべき状態	クローズアップ画像 		
発生原因．考察	・ひび割れ発生箇所周辺の覆工の変形モードについては，若干の外力作用傾向が見られることから，外力の可能性も考えられる． ・縦断方向ひび割れとのクロス部分に外力傾向が見られており，周辺の打音確認が必要不可欠である．（実際にはうきは見られなかった）⇒今後，進行性について確認することが重要であり，再度走行性計測で撮影することが望ましい． ・画像からもくっきりとひび割れを確認することができる． ・変状対策工は、ネット工やひび割れ注入工が想定される．		

5.6　D トンネルの事例

図 5-8　D トンネル点検結果表（1）

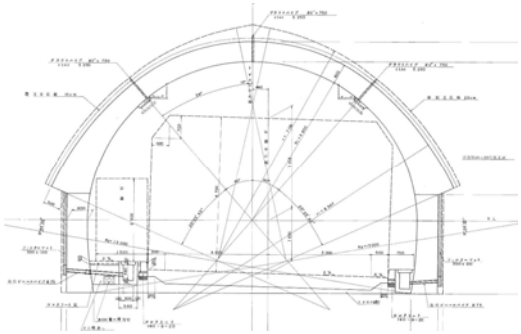
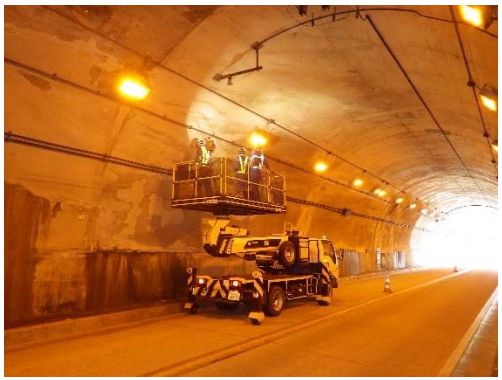
<table>
<tr><td>項目</td><td>延長</td><td>1,045m</td><td colspan="2">トンネル断面</td></tr>
<tr><td rowspan="7">トンネル諸元</td><td>完成年次</td><td>1981 年</td><td colspan="2" rowspan="7">  </td></tr>
<tr><td>内空断面積</td><td>57.3m^2</td></tr>
<tr><td>交通量</td><td>1,479 台/日</td></tr>
<tr><td>幅員</td><td>9.25m</td></tr>
<tr><td>高さ</td><td>6.4m</td></tr>
<tr><td>トンネル等級</td><td>B</td></tr>
<tr><td>スパン数</td><td>101</td></tr>
<tr><td rowspan="3">点検状況</td><td colspan="2">走行型計測</td><td colspan="2">近接目視</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="2">所要日数：1 日（昼間）
カメラ：38 万画素
レーザ：100 万点/秒</td><td colspan="2">所要日数：4 日（昼間），片側交互通行規制
主な変状は，ひび割れ，うき，であった．
側壁部に外力と思われる 3.0mm の縦断方向のひび割れが見られた．（進行性はなし）
腐食の進行が著しい附属物が見られた．</td></tr>
</table>

図 5-9　D トンネル点検結果表（2）

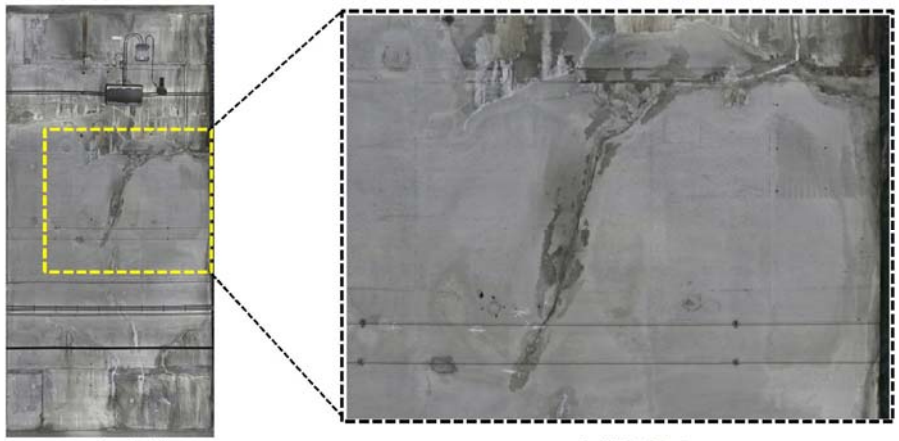
画像による損傷の確認	発生原因・考察
・走行型計測画像(S050)  ・スパン全体　　・変状部拡大 近接目視点検時の画像 S050：ひび割れ変状写真 S050：ひび割れ変状写真 	この周辺部に多くのひび割れが確認され，特にこのひび割れは，3.5mm と大きく，斜め方向に入っていた．違うスパンにおいても，同じ方向の斜め方向のひび割れが確認されており，外力の可能性が高いひび割れであると判断された．次ページのひび割れ展開図およびレーザコンター図においても側壁部の外部から内側に変形したモードとなっており，明らかに外力の影響が確認される． 近接目視でひび割れを確認したが，動きによって周辺が欠けた跡とか，新鮮なコンクリート面などは確認できなかったことから，進行性の可能性は少ないものと判断した． ただし，継続的に進行性について確認することは重要であり，再度走行性計測で撮影することが望ましい． 変状対策工は、ネット工やひび割れ注入工が想定される．

図 5-10　D トンネル点検結果表（2）

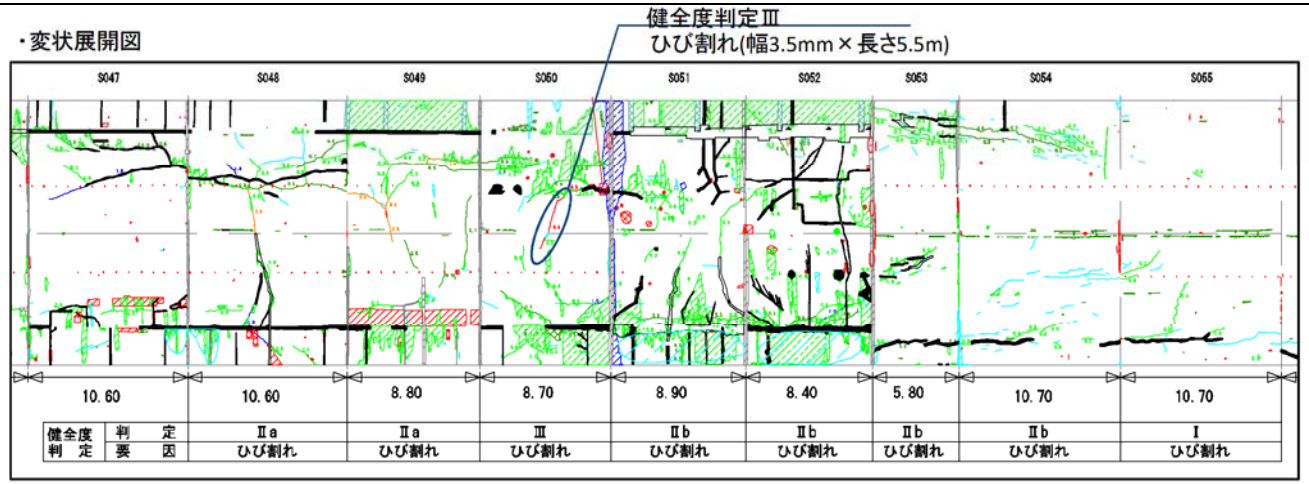
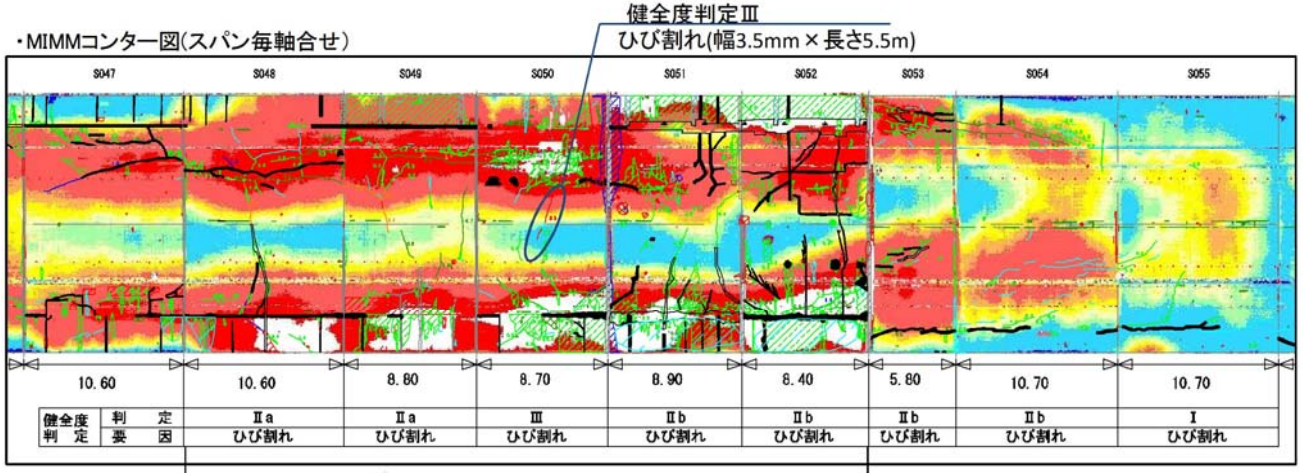
近接目視結果・走行型計測結果（レーザ解析結果）	診断
・変状展開図  ・MIMMコンター図(スパン毎軸合せ)  	Ⅲ判定 (ひび割れ・幅 3mm×長さ 5.5m)となり、早期に対策を講ずべき状態

図 5-11　D トンネル点検結果表（2）

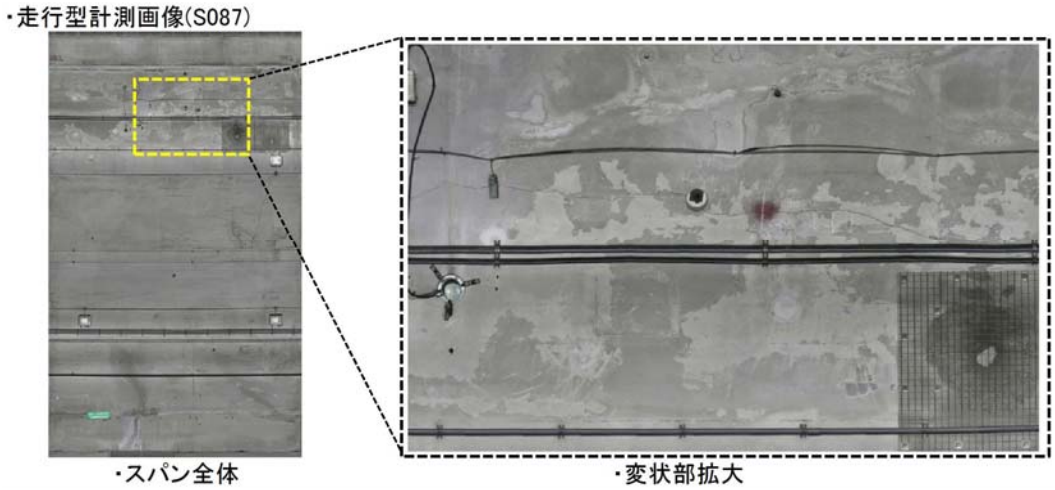
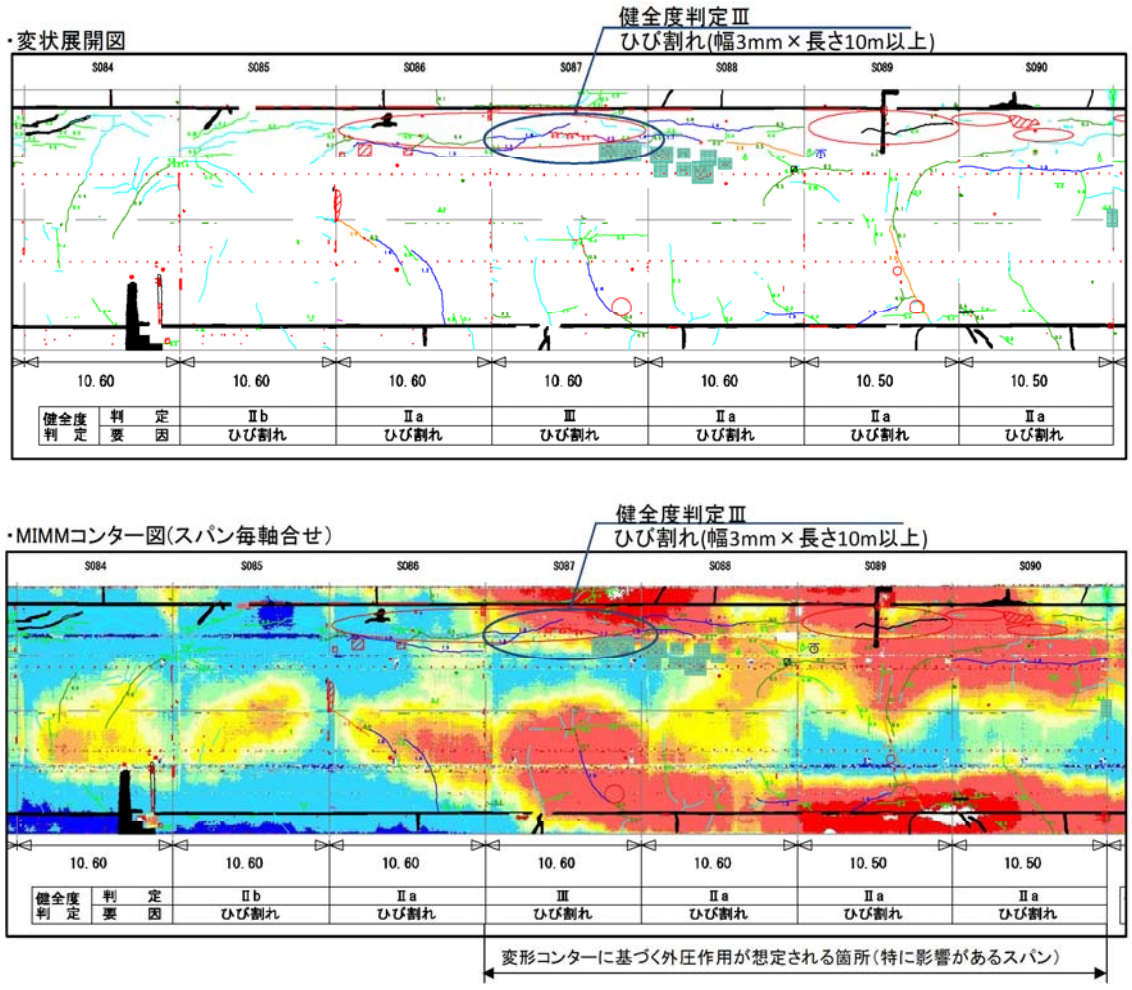
画像による損傷の確認	発生原因・考察
 近接目視点検時の画像 	側壁部の水平方向に 3 スパン以上にわたって，連続化したひび割れが見られ，該当箇所は幅 3.0mm となっており，長さも 10m を超えるものである． 次ページのひび割れ展開図およびレーザコンター図においても側壁部の外部から内側に変形したモードとなっており，明らかに外力の影響が確認される． 近接目視でひび割れを確認したが，変動に伴う動きによって周辺が欠けた跡とか，新鮮なコンクリート面などは確認できなかったことから，進行性の可能性は少ないものと判断した． 過去に計測を実施して形跡は見られたがデータは残っていなかった． 継続的に進行性について確認することは重要であり，再度走行性計測で撮影することが望ましい． 変状対策工は、ネット工やひび割れ注入工が想定される．

図 5-12　D トンネル点検結果表（2）

近接目視結果・走行型計測結果（レーザ解析結果）	診断
	Ⅲ判定 (ひび割れ・幅 3mm×長さ 10m 以上)となり、早期に対策を講ずべき状態

5.7　E トンネルの事例

図 5-13　E トンネル点検結果表（1）

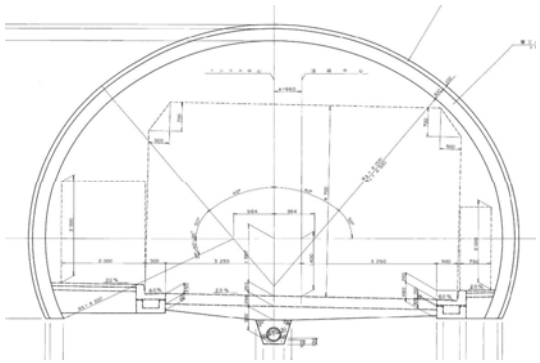
<table>
<tr><td>項目</td><td>延長</td><td>559m</td><td>トンネル断面</td></tr>
<tr><td rowspan="7">トンネル諸元</td><td>完成年次</td><td>1995 年</td><td rowspan="7">  </td></tr>
<tr><td>内空断面積</td><td>-　m^2</td></tr>
<tr><td>交通量</td><td>1,479 台/日</td></tr>
<tr><td>幅員</td><td>10.35m</td></tr>
<tr><td>高さ</td><td>6.25m</td></tr>
<tr><td>トンネル等級</td><td>C</td></tr>
<tr><td>スパン数</td><td>54</td></tr>
<tr><td rowspan="2">点検状況</td><td>走行型計測</td><td colspan="2">近接目視</td></tr>
<tr><td>所要日数：1 日（昼間）
カメラ：38 万画素
レーザ：100 万点/秒</td><td colspan="2">
所要日数：3 日（昼間），片側交互通行規制
主な変状は，ひび割れ，うき，はく落，遊離石灰，漏水であった．
補修跡のうき，覆工の劣化を確認した．
附属物のボルトの緩みが見られた．</td></tr>
</table>

図 5-14　E トンネル点検結果表（2）

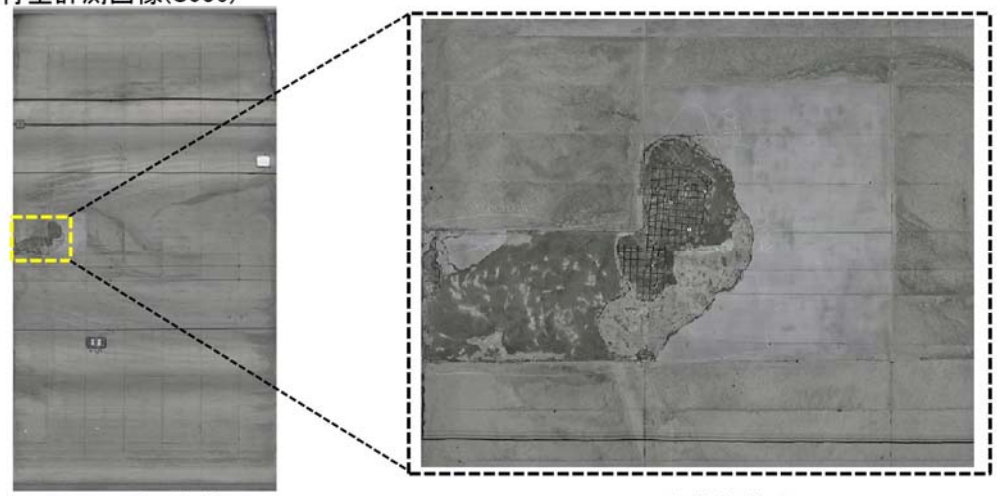
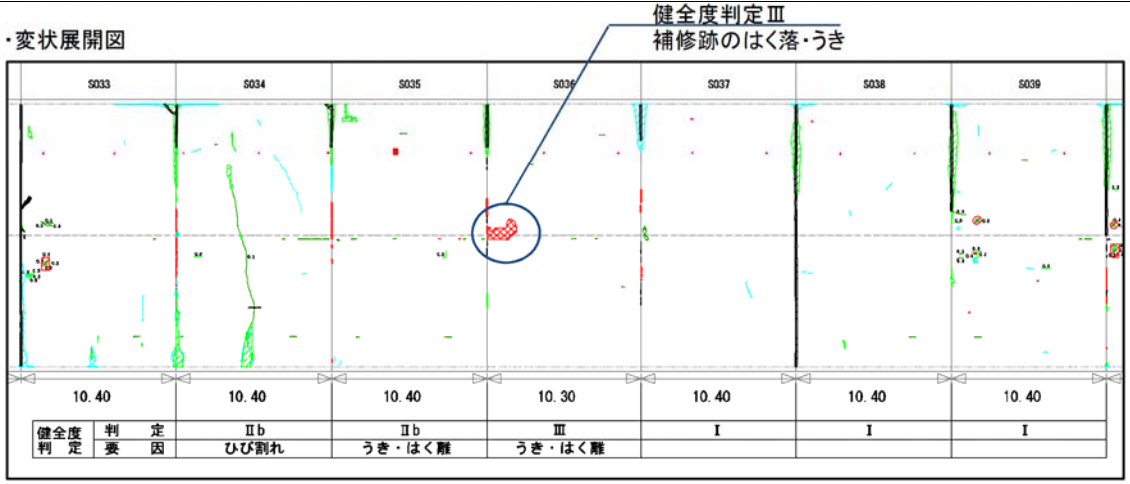
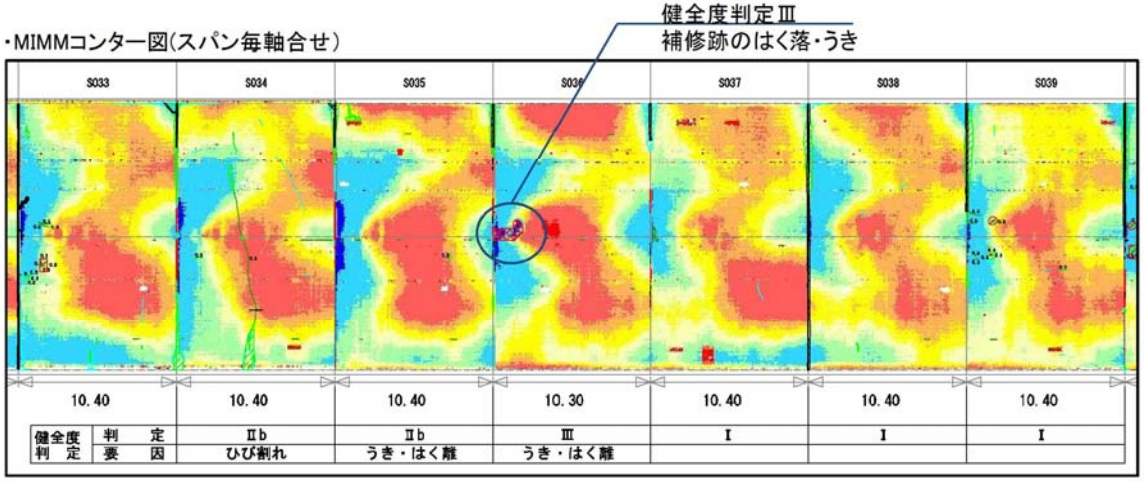
画像による損傷の確認	発生原因・考察
・走行型計測画像(S036)  ・スパン全体　　・変状部拡大 近接目視点検時の画像 S036：補修跡のはく落・うき状況写真 S036：補修跡のはく落・うき状況写真 	元々の補修されていた箇所（補強用のラス網が見えている）において，はく落と，その周辺のうきを確認した． 走行計測画像からも明らかなようにはく落跡が確認されたため，近接目視点検時には，見落としがないよう十分に注意を払った． 近接目視時にはできる限りハンマーでコンクリート片をたたき落とし，応急措置を施した． 対策工法は，はつり，断面修復工，ネット工が望ましい．

図 5-15　E トンネル点検結果表（2）

近接目視結果・走行型計測結果（レーザ解析結果）	診断
・変状展開図  ・MIMMコンター図(スパン毎軸合せ)  	Ⅲ判定 (覆工劣化に伴ううき)となり、 早期に対策を講ずべき状態

5.8　Ｆトンネルの事例

図 5-16　Ｆトンネル点検結果表（1）

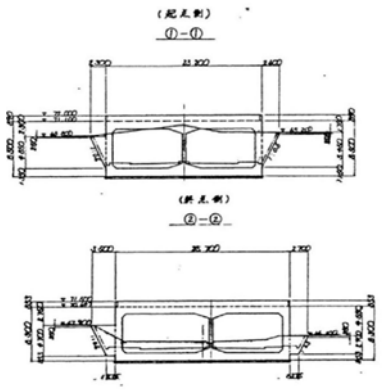
<table>
<tr><td>項目</td><td>延長</td><td>157m</td><td>トンネル断面</td></tr>
<tr><td rowspan="7">トンネル諸元</td><td>完成年次</td><td>1992 年</td><td rowspan="7">  </td></tr>
<tr><td>内空断面積</td><td>-　m^2</td></tr>
<tr><td>交通量</td><td>15,622 台/日</td></tr>
<tr><td>幅員</td><td>23.2m(4 車線)</td></tr>
<tr><td>高さ</td><td>4.7m</td></tr>
<tr><td>トンネル等級</td><td>-</td></tr>
<tr><td>スパン数</td><td>13</td></tr>
<tr><td rowspan="3">点検状況</td><td colspan="2">走行型計測</td><td colspan="2">近接目視</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="2">所要日数：1 日（夜間）
カメラ：38 万画素
レーザ：100 万点/秒</td><td colspan="2">所要日数：4 日（昼間），片側交互通行規制
主な変状は，ひび割れ，軽微なうきであった．
側壁部および天井部に非常に多く（密集した）のひび割れが見られた．
側壁部に 1.0mm を超えるひび割れが確認された</td></tr>
</table>

図 5-17　F トンネル点検結果表（2）

走行型計測結果（画像解析結果）

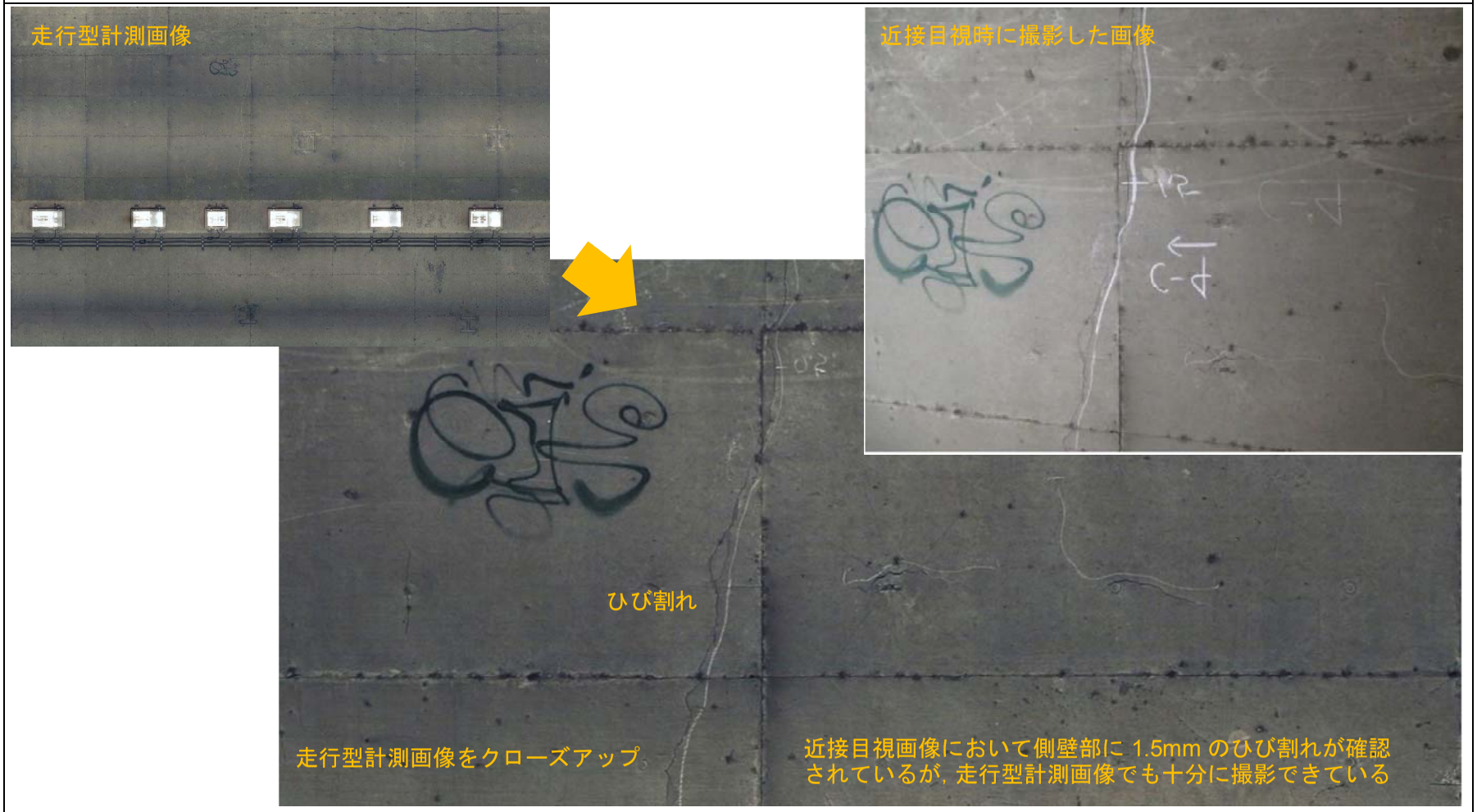
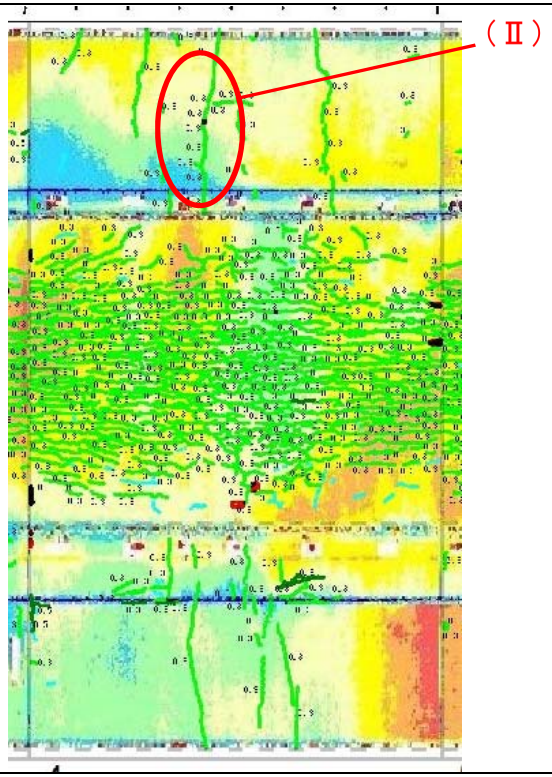
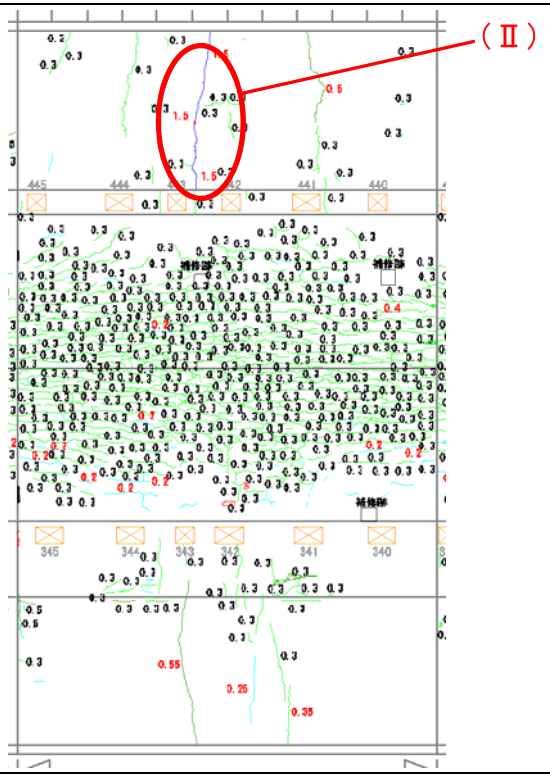


図 5-18　F トンネル点検結果表（2）

走行型計測結果（画像解析結果）

図 5-19　F トンネル点検結果表（3）

項目	走行型計測結果（レーザ解析結果）	近接目視結果
変状状況		
診断 Ⅱ判定 (うき，はく離，ひび割れ 3.0mm 未満)となり、予防保全の観点から措置を講ずべき状態		
発生原因・考察	・側壁部を中心に 0.3mm 程度のひび割れが密集している． ・構造的な影響はコンター図からも確認されなかった． ・うき，はく落も若干見られたが，早期に落下する可能性にものはなかった． ・構造物の機能に支障は生じていないが，予防保全の観点から措置を講じることが望ましい． ・変状対策工は、ネット工やひび割れ注入工が想定される． ・ひび割れがかなり密集しており，画像からの展開図をもとに近接目視，打音検査を行った．仮に画像なしでスケッチを行っていたら，4 日間では到底完了できなかったものと考えられる．	

5.9 事例検証

1) B トンネル

B トンネルは，完成後 52 年経過しており，矢板工法で施工されたトンネルである．交通量の多い中で，年数も経ちこれまでにも複数回補修が施されており，ひび割れや漏水，補修材のうきなど多くの変状が見られる．今回着目した箇所は，3.0mm 以上のひび割れであり，走行型計測の画像からは，はっきりとひび割れの黒線が確認できる．前回点検時のチョーキングが 3.0mm であり，今回も同様であったこと．レーザコンター図からも外力傾向は見られていないことから原因は，乾燥収縮や温度収縮とされ，進行性はないもの判断した．これらの結果を踏まえ，健全性はⅢの診断を行ったものである．

進行性については，近接目視によって判断することが可能であったが，外力の影響については判断が難しく，やはり走行型計測を実施することにより適正な診断が可能となったといえる．また画像からひび割れや遊離石灰，補修跡，照明などの附属物等を正確に再現し，展開図に反映していることから，成果品の精度が高まり，今後の点検においてもより有効に活用することができる．

2) C トンネル

C トンネルは，完成後 8 年と比較的新しく，NATM で施工されたトンネルである．延長が長く交通量が多いことから，比較的壁面の汚れが目立つ状態であった．アーチ天端の縦断方向に最大で 1.5mm 程度のひび割れが発生し，観測工からの漏水も見られたことから，水圧の影響も考懸念されたが，レーザコンター図からは，その影響を示す変形は見られなかった．ただしそのひび割れに沿って，小さなうきが発見されたことから，早期の補修が必要と言うことで健全性をⅢとした．また横断方向に，幅 3.0mm，長さ 7m のひび割れが見られたため点検要領[5.1]に沿って，健全性をⅢとした．なお本ひび割れは，縦断方向ひび割れとクロスしている箇所で，若干コンター図からの外力影響が認めらたため，うきに発展することが懸念される．どちらも今後進行性の可能性もあることから，経年的に早期に走行型計測で撮影することが望ましい．

走行型計測画像から，0.2mm 程度の小さなひび割れも多く検出されているが，このようなひび割れがクロスする箇所においては，それぞれのひび割れやうき，はく離などの進行をより早く把握する手段として，走行型計測の活用が望ましいと判断できる．なお，はく落においては，事前に危険箇所を察知しておき，前回のデータと重ねることによって容易に変化箇所を抽出することが可能であるため，経時変化を確認するのに有効であると判断する．

3) D トンネル

D トンネルは，完成後 35 年経過し，矢板工法で施工されたトンネルである．交通量は少ないが海岸に近いことから，附属物の腐食が進行している箇所が多く見受けられる．ひび割れ展開図とレーザコンター図を重ねてみると，幅 3.0mm 程度のひび割れと関連づく箇所が

随所に見られる．文献や工事記録などから地質や地形的な条件により，側圧の影響を受けたトンネルと推定される．ただし近接目視の結果から，漏水やひび割れの新鮮なコンクリート面（変化に伴い欠けたような跡）は認められず，前回のチョーキングからの変化もないことから，進行性はないものと判断した．しかし継続的に進行性について確認することは重要であり，再度走行性計測で撮影することが望ましいと判断する．

なお，これらのひび割れは，点検要領[5.1]より，Ⅲと診断した．

4） E トンネル

E トンネルは，完成後 21 年経過し，NATM で施工されたトンネルである．このトンネルの変状は過去に補修されたモルタルが一部落下し，その残りの部分も浮いている状態である．点検時においてたたき落としは入念に行ったが，早期の対策が必要とし，健全性をⅢと診断した．

この状況は走行型計測の画像からも明らかであり，近接目視時に事前に着目するよう注意を払っていた．レーザコンター図から特に外力の影響は認められなかったことから，補修材の劣化が原因と考えられる．

過去の補修履歴は残っていなかったが，経緯や原因などがわかれば対策工の設計にも役立つことから，データベースにあらゆる情報を蓄積していくことが重要と考えられる．

5） F トンネル

F トンネルは，完成後 24 年経過し，現場打ちコンクリートとして施工された 2 連の箱形函渠である．トンネルとした目的であるが，構造的には大型カルバートであり，点検要領はシェッド，大型カルバート等定期点検要領[5.3]を使用した．本構造物の変状は，0.3mm 程度のひび割れが密集しており，有筋であることから予防保全段階の対策が必要な状態といえる．健全性は要領に基づきⅡと診断している．ひび割れがかなり密集しており，画像からの展開図をもとに，近接目視，打音検査を行ったが，画像なしでスケッチを行っていたら，短期間での完了は不可能であり，ひび割れ位置を正確に再現することも同様であると考えられる．

走行型計測による箱形函渠の実績も多く存在するが，事前のカメラのキャリブレーションやレーザ解析の工夫が必要であり，実績を重ね作業の標準化を図っていくことも必要である．

参考文献

[5.1] 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，2014.
[5.2] 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編），2015.
[5.3] 国土交通省道路局国道防災課：シェッド，大型カルバート等定期点検要領，2014.

6　走行型計測技術を活用した点検方法の合理化検証

6.1 目的

これまで本論文では，**第 2 章**においては，最新の道路トンネル点検の方法，留意点，効率化に向けた改善策について述べ，**第 3 章**においては，トンネル走行型計測の適用として，計測車両の概要，解析・評価方法，実トンネルへの適用性，走行型計測の効果について述べ，**第 4 章**においては，走行型計測の画像能力を確認するため，ひび割れ検出能力およびひび割れ幅の精度検証を行い，**第 5 章**においては，走行型計測を採用した実際のトンネル点検業務での健全性評価における見解について述べた．

本章では，これまでの研究経緯を整理し，最新の点検手法における走行型計測技術の適用性について取りまとめを行い，走行型計測を活用した点検方法の実用性について考察し，今後の道路トンネルの健全性評価を，より効果的に実施していくための合理的な点検方法，課題，将来展望について述べるものである．

6.2 研究経緯の整理

1)　新しいトンネル点検手法の合理化に向けた改善策

① 近接目視による変状の把握には限界がある場合もあるため，必要に応じて非破壊検査技術等を適用することが望ましい．

② 近接目視対象となるひび割れなどの変状箇所をより正確に把握するため，画像技術で支援するのが望ましい．

③ 変形，移動，沈下に対して，数値的に形状を測定するため，レーザ技術で支援するのが望ましい．

④ 画像およびレーザの 2 つの機能を備えた走行型計測を活用することで，性能および精度の検証，工期短縮，コスト縮減などについて検証を行う必要がある．

2)　走行型計測の効果[6.1]

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，画像データから候補箇所を見つけ，レーザデータ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 走行型計測により，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．

3) 走行型計測の能力評価[6.2]

① 0.3mm 以上のひび割れは，検出が可能である．
② ひび割れ幅についても 80%以上の精度が得られる．
③ ひび割れ長さについてもより現実的に延長を再現できる．
④ 画像から得られた照明など附属物を含めた展開図を見ると，照明，ケーブル，消火栓などの主要な附属物の位置や大きさも正確に再現ができる．

6.3 最新の点検方法における走行型計測の適用と実用性

これまでの研究経緯から，点検要領[6.3]や維持管理便覧[6.4]に要求される変状ごとの判定区分や，監視方法に対して，現状の走行型計測の能力を踏まえ，代替および支援が可能と考えられる適用性を**表 6-1** に示す．基本的には近接目視に要求されるひび割れ幅（幅 0.3mm 以上），ひび割れ長さの測定や各変状の状態（漏水，錆び，変色，その他材料不良箇所）の確認は代替可能[6.2]であり，変形，移動，沈下の状態の確認や形状の把握（初期値からの変位量も含め）もレーザ解析で代替可能である．また外力が伴う変状（ひび割れ，うき，はく離，変形，移動，沈下，漏水，巻厚不足・背面空洞等）の原因は，ひび割れ形状とコンター図の特徴から変形モードを割り出し，推定することが可能である[6.5]．打音や触診により判断される，うき，はく離，ボルトの緩み，器具のがたつきの把握は困難である．空洞，強度，水質，流量など具体的な数値による判断が必要なものについても詳細調査による対応となる．監視においては，判定区分の違いがあるものの，2 年後を目安に再度近接目視を行うこととなっていることから，走行型計測で定期的に監視を行い，その変状箇所の確認を行うことは可能である．

これらの適用性から，定期点検に対応したメンテナンスサイクルフローにおける走行型計測の位置づけおよびその実用性を，**図 6-1** に示す．それぞれ段階別に実施し，個別の情報提供を行うことによって，近接目視の精度向上，見落としなどミスの低減，調査費用の削減など上記 2)の走行型の効果が明確になってくる．

6.4 走行型計測技術を活用した合理的トンネル点検方法

ここでは，表 6-1 の走行型計測の適用性から判断される具体的な実施方法（走行型計測で実施可能な能力）を勘案しながら，図 6-1 における走行型計測の位置づけを理解し，走行型計測技術を活用した合理的なトンネル点検方法について述べる．

1) 現地踏査

現地踏査は，点検の実施体制を整え，交通状況等の現地状況を把握し効果的・効率的な点検計画を立案するために行うものである．具体的には点検担当者が，複数名で現地の周辺の地理・地形状況，キロポスト，トンネル名称の照合，交通状況，作業基地，進入路，排水工

表 6-1　点検要領の要求事項と走行型計測の適用性

※有効性　A:代替が可能，B:支援が可能，C:すべての対応は困難

項目		マネジメントの要求事項		走行型計測の適用性	
種別	細目	要求項目	具体的要求内容	有効性	具体的な実施方法
対策区分の判定	圧ざ，ひび割れ	ひび割れ幅の測定	0.3mm以上のひび割れの把握，展開図には記録する必要がある	A	ひび割れ幅0.3mm以上の把握は可能である
		ひび割れ長さの測定	5m未満，5m以上～10m未満，10m以上で区分	A	ひび割れ長さについてもデータで管理されており可能である
		ひび割れ密度の測定	幅0.3mm以上で20cm/m^2以上かでランクが上がる	A	幅0.3mm以上を把握できるため，その集計によって密度も求まる
		段差量の測定	引張ひび割れで段差が5mm以上はランクアップ	A	コンター図の色階調を細分化することにより，2mm程度の段差は把握が可能である
		ひび割れの進行性の把握	進行性があるかの判断	A	2回目以降の計測を行うことで差分から，判断することができる
		ひび割れの発生原因の把握	外力が作用しているかの判断	A	ひび割れ位置，コンター図から，変形モードを推測して，判断できる
		圧ざ，せん断ひび割れの把握	ひび割れ形状から判断	A	画像からひび割れ形状を判断できる
	うき，はく離	ひび割れ形状の把握	ブロック化，閉合化，交差に注目	A	画像からひび割れ形状を判断できる
		ひび割れの発生原因の把握	外力が作用しているかの判断	B	ひび割れ形状からの推定は可能である
		打音異常の把握	異常音を見落としなく抽出	C	異常打音の確認は困難である
		うき，はく離の発生原因の把握	外力か，材料劣化かの判断	B	外力は概ね可能であるが，材料劣化は困難である
	変形，移動，沈下	変形速度の測定	年間あたり，10mm，3mm，1mmの変形速度で区分	B	レーザで覆工形状を面的に計測すれば，その挙動から推定が可能である ただし初期値では困難である
		変形，移動，沈下量の測定	変形しているかを目視で確認し，変形量は正確に測定	A	レーザで覆工形状を面的に計測すれば，把握は可能である
	巻厚不足・背面空洞	背面空洞深さの測定	30cmが区切りとなっており，背面空洞の規模を把握	C	背面空洞の把握は困難である
		覆工巻厚の測定	30cmが区切りとなっており，コンクリートの厚さを把握	C	覆工巻厚の把握は困難である
		ひび割れ形状の把握	不規則，放射状のひび割れに注目	A	画像からひび割れ形状を判断できる
		原因推定	周辺のひび割れ形状や施工時期（矢板工法かどうか），工事記録，地質調査資料などからも判断	B	走行型計測からだけでは困難であるが，ひび割れ形状から推定することは可能である
	鋼材腐食	腐食程度の把握	うき錆び，断面欠損の程度の把握	A	画像から腐食程度の把握は可能である
		構造部材の耐久性の把握	RC構造としての検証	C	走行型計測からだけでは困難である
		原因推定	被り不足，塩害，中性化，凍結防止剤等がある	C	走行型計測からだけでは困難である
	有効巻厚の減少	覆工巻厚の測定	覆工コンクリートの厚さを把握する必要がある	C	覆工巻厚の把握は困難である
		コンクリート強度の測定	設計強度を満たしているかを把握する必要がある	C	コンクリート強度の把握は困難である
		設計巻厚の把握	劣化状況を把握する上で，当初の巻厚を把握する必要がある	C	走行型計測からだけでは困難である
		有効巻厚/設計巻厚の把握	1/2未満，1/2～2/3，2/3以上で区分	C	走行型計測からだけでは困難である
		原因推定	周辺のひび割れ形状や施工時期（矢板工法かどうか），工事記録，地質調査資料，地域性などからも判断	C	走行型計測からだけでは困難である
	漏水	漏水度合の判断	噴出，流下，滴水，浸出の区分	A	現地踏査+画像データから，把握することは可能である
		漏水箇所の把握	アーチ，側壁，路面	A	現地踏査+画像データから，把握することは可能である
		状態の把握	土砂流出，滞水，凍結，つららの有無	A	現地踏査+画像データから，把握することは可能である
		降雨との関係	降雨時の漏水量	C	走行型計測からだけでは困難である
		コンクリートへの影響の把握	漏水によってその水質が覆工コンクリートに悪影響を及ぼさないか	C	走行型計測からだけでは困難である
		排水状況の把握	流末確認や排水施設の劣化状況の確認，滞水状況の確認	C	走行型計測からだけでは困難である
		水圧の影響の有無	設計上水圧の影響は，構造上見込んでいないため，悪影響を及ぼすことがある	C	走行型計測からだけでは困難である
	附属物の取付状況	破断の把握	○×の判断が必要となる	B	画像から破断状態は確認できるが機器の背面側の場合は困難となる
		緩み，脱落の把握	○×の判断が必要となる	C	画像から脱落状態は確認できるが機器の背面側の場合は困難となる 緩みは把握できない
		亀裂の把握	○×の判断が必要となる	B	画像から亀裂状態は確認できるが機器の背面側の場合は困難となる
		腐食の把握	○×の判断が必要となる	B	画像から破断状態は確認できるが機器の背面側の場合は困難となる
		変形，欠損の把握	○×の判断が必要となる	B	画像から破断状態は確認できるが機器の背面側の場合は困難となる
		がたつきの把握	○×の判断が必要となる	C	がたつきは把握できない
		異常の進行具合の把握	前回からの進行を把握する必要がある	B	画像から状態の進行の確認はできるが，機器の背面側の場合は困難となる
措置	応急措置	うき，はく離	ハンマーでの撤去，樹脂材による固め	C	走行型計測からだけでは困難である
		路面変状	交通規制	C	走行型計測からだけでは困難である
		漏水	交通規制，排水溝清掃，危険物除去	C	走行型計測からだけでは困難である
		附属物ボルトの緩み	ボルト締め直し	C	走行型計測からだけでは困難である
		照明灯具のがたつき	番線固定	C	走行型計測からだけでは困難である
	応急対策	はく落防止対策	維持工事で実施 はつり落とし，ネット工，	C	走行型計測からだけでは困難である
		漏水対策	維持工事で実施 簡易型導水工の設置	C	走行型計測からだけでは困難である
	本対策	外力対策	土木工事として実施 内面補強工，ロックボルト工等	C	走行型計測からだけでは困難である
		はく落対策	土木工事として実施 断面修復工，ネット工等	C	走行型計測からだけでは困難である
		漏水対策	土木工事として実施 導水工，地下水低下工，断熱工等	C	走行型計測からだけでは困難である
	監視	判定区分Ⅱ$_b$の監視	日常巡視等で実施	A	日常巡視であれば十分に可能である
		判定区分Ⅱaの監視	2年後を目安に近接目視	B	近接目視に伴う確認は可能であるが，打音，触診は困難である 変状の種類によって使い分けが必要である
		判定区分Ⅲの監視	前回から2年程度以内に近接目視	B	近接目視に伴う確認は可能であるが，打音，触診は困難である 変状の種類によって使い分けが必要である
		判定区分Ⅳの監視	前回から2年程度以内に近接目視，応急対策は完了している	B	近接目視に伴う確認は可能であるが，打音，触診は困難である 変状の種類によって使い分けが必要である

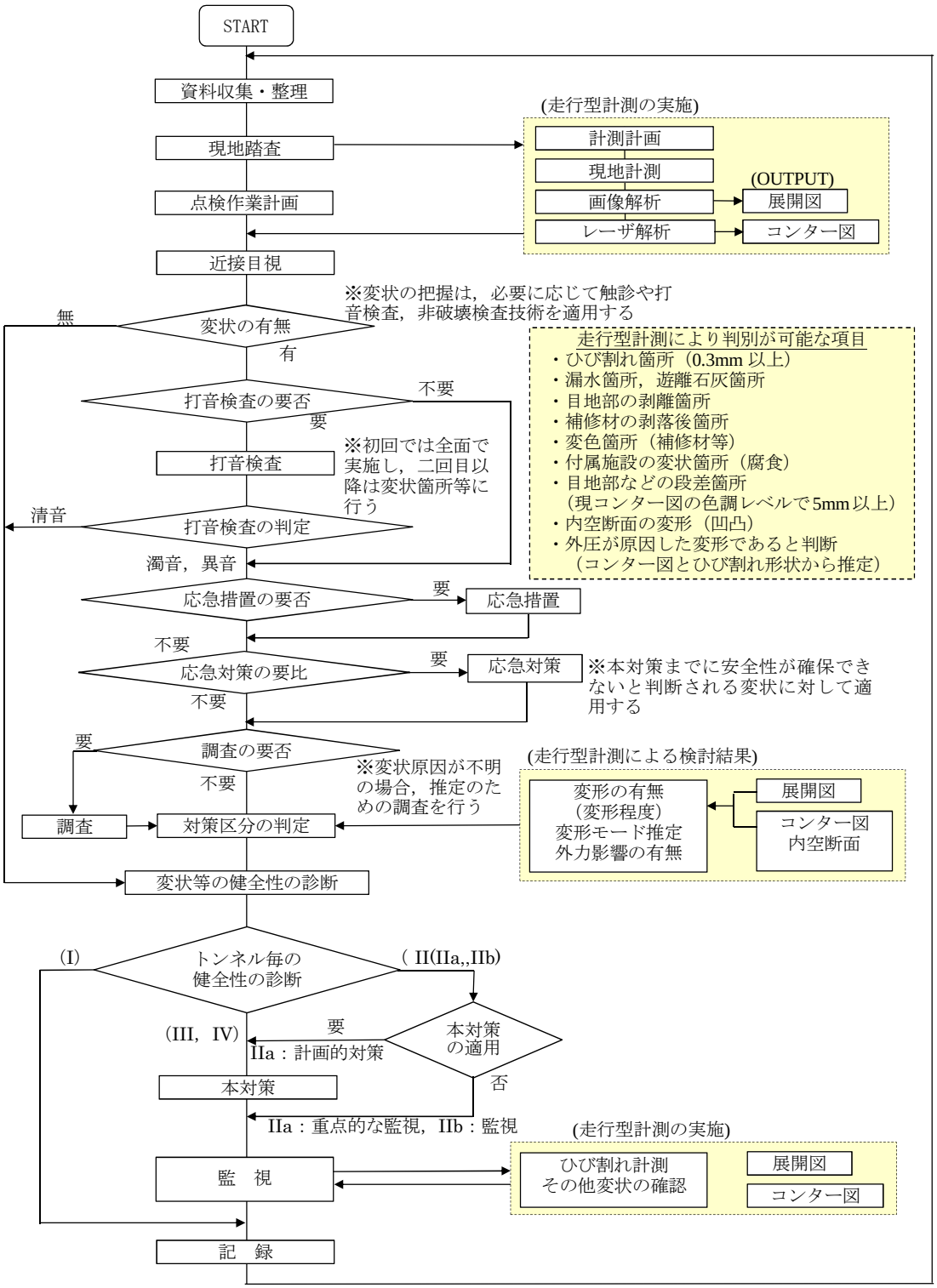


図 6-1　走行型計測を活用した定期点検のメンテナンスサイクルフロー
[6.3 を加筆修正]

図 6-2　現地踏査時におけるキャリブレーション状況

の流末など外部の状況を確認する．さらに大まかに覆工コンクリートの代表的な変状の種類や状況，内部の明るさ，附属物の状態，車道，路肩，監査路の状態などを確認する．

走行型計測を実施する際には，ひび割れ幅のキャリブレーションが必要であることから，図 6-2 のように，手の届く位置（側壁部）でひび割れスケールを貼付けたり，ひび割れを測定してチョーキングを行うなどして，画像解析時に反映させる必要がある．またカメラの焦点距離補正のため事前に対象トンネルの形状（設計図面等）を入手しておく必要がある．走行型計測は 2～3 回往復走行することから，U ターン箇所や，車両の待避場所なども事前に決めておく必要がある．また非常駐車帯やランプの有無などによって幅員が異なることもあるので，現地踏査時に形状を確認するとともに，事前に設計図面等を入手する必要がある．

2)　近接目視

定期点検は，トンネル本体工・附属物の変状を近接目視により観察する．また，覆工表面のうき・はく離等が懸念される箇所に対し，うき・はく離の有無及び範囲等を把握する打音検査を行うものである．また手による触診によって取付状態や金具の異常を確認するものである．従来方法であれば，打音や触診の後，白図や点検表に変状，特徴，寸法などをスケッチし，写真を撮影する．なお，ひび割れにおいては，その位置，長さ，幅，段差等を目盛り付きルーペまたはクラックスケールを用いて計測する．また，ひび割れの形態を開口，圧ざ，段差等に分類して整理し，点検表に記載する．

走行型計測を行う場合は，事前情報（画像からの展開図面）が明確になっており，位置関係の把握が容易である．従来点検においては，これまで初回点検者の CAD 図面を更新していくケースが多いため，変状が多いとどの箇所を示しているのかがわかりにくいことがある．走行型計測では，画像で作成していることから，距離関係が正確であり，例えば照明など附属物からの距離であったり，目地や天端部などの位置も明確になっていることから，変状位置の特定がわかりやすいのである．よって変状箇所を間違ったり，その進行程度を誤ったりという人為ミスは大幅に低減できると考えられる．またひび割れ幅や長さの確認は，現

地でも行うが，現地のスケッチ時間が大幅に縮減され，規制日数や工期短縮にも有効となり，回数を重ねることによって，全体のコストも安くなっていく．

近接目視では，画像では捉えられていない変状も考えられることから，画像からの情報をもとに見落としのないように入念に目視を行う．

3) 打音検査の補助

打音検査は，初回点検では，変状がなくても全面において行う．また，2 回目以降の点検においては，前回の定期点検で確認されている変状箇所，新たに変状が確認された箇所，対策工が施されている箇所およびその周辺，水平打継ぎ目・横断目地部およびその周辺に対して打診することを基本とし，コンクリートのうき，はく離の有無とその範囲等を確認する．

走行型計測を行う場合は，その代替は困難である．しかし事前にひび割れが多く集中している箇所，漏水，変色，補修跡等を情報としてインプットしておくことで，人為ミスが低減できる．またレーザからの変形モードとの関係から，うき，はく離箇所を候補として上げておくことによって，点検精度も向上していくことから，支援も可能といえる．

基本的にはこうしたうき，はく離箇所は現地では，チョーキングが施されているが，場所が曖昧な場合も多いため，画像によって正確に図面にプロットすることも重要である．

4) 著しいひび割れが発見された場合

現地踏査や走行型計測で著しいひび割れを発見した場合は，段差，圧ざ，せん断ひび割れが発生し，外力の影響を受けている可能性が高い．これまでの点検記録，施工時記録，補修履歴，地質調査資料などを事前に収集し，条件として整理しておく必要がある．

走行型計測においては，ひび割れ位置とレーザコンター図における変形モードとの関連性を考慮しておく必要がある．このような傾向が見られた場合，近接目視時において，段差，圧ざ，せん断ひび割れに着目し，管理者に報告を行うとともに，今後の調査の必要性や応急措置，応急対策の必要性について検討を行う必要がある．こうしたひび割れと変形モードとの照合によって，外力による概ねの変状原因が把握できるのも走行型計測の特徴である．

5) 変形，移動，沈下が発見された場合

現地踏査や走行型計測で明らかに路面や覆工に著しい変形を発見した場合は，周辺のひび割れなどとの関連も含め，外力の影響を受けた，変形，移動，沈下の可能性が高い．この際には上記同様，必要な資料収集を行うことが重要である．変形，移動，沈下は，それぞれの年間あたりの変状速度で判定が決定されることから，その状況を測量する必要がある．

走行型計測は，面的にそれぞれの形状を測ることのできるレーザによって，目地や坑口など端点だけでなく，すべての形状を事前に把握できるため，それぞれの変形量や速度を容易に測定することができる．この特性から，変形，移動，沈下に対するモニタリングとして活用することも可能である．

6） 変状の継続的監視

定期点検時において，Ⅱa 以上の変状が発見され，本対策を実施しない場合は，監視が必要であり，その手段として，2 年程度を目安として変状が発生しているスパンに対して，近接目視を行う必要がある．近接目視においては，当節 2)に示すとおりであり，打音や触診が伴う変状においては従来の方法によるが，ひび割れ幅や漏水の確認だけであれば，走行型計測による代替も可能と判断できる．ただし変状が複合しており，うき，はく離への発展やゆるみやがたつきによる落下が懸念されるものについては，従来の近接目視や打音検査，触診を行う必要がある．

なお，その代替の方法としては，現地踏査時に遠望から進行状態を確認し，著しい変化が見られなかった場合には，前回と今回の画像，レーザコンター図の比較から評価を行うこともできる．

また，ひび割れ幅の監視においては，**図 6-3** のような高精細なデジタルビデオカメラで反射ターゲットを覆工壁面に貼りつけて撮影する技術[6.6]（現在，岡山大学西山研究室において継続研究中）や**図 6-4** のような従来型のプラスチック製のひび割れゲージを読み取るものがあり，監視規模においては，走行型計測と併用した対応が望ましい．

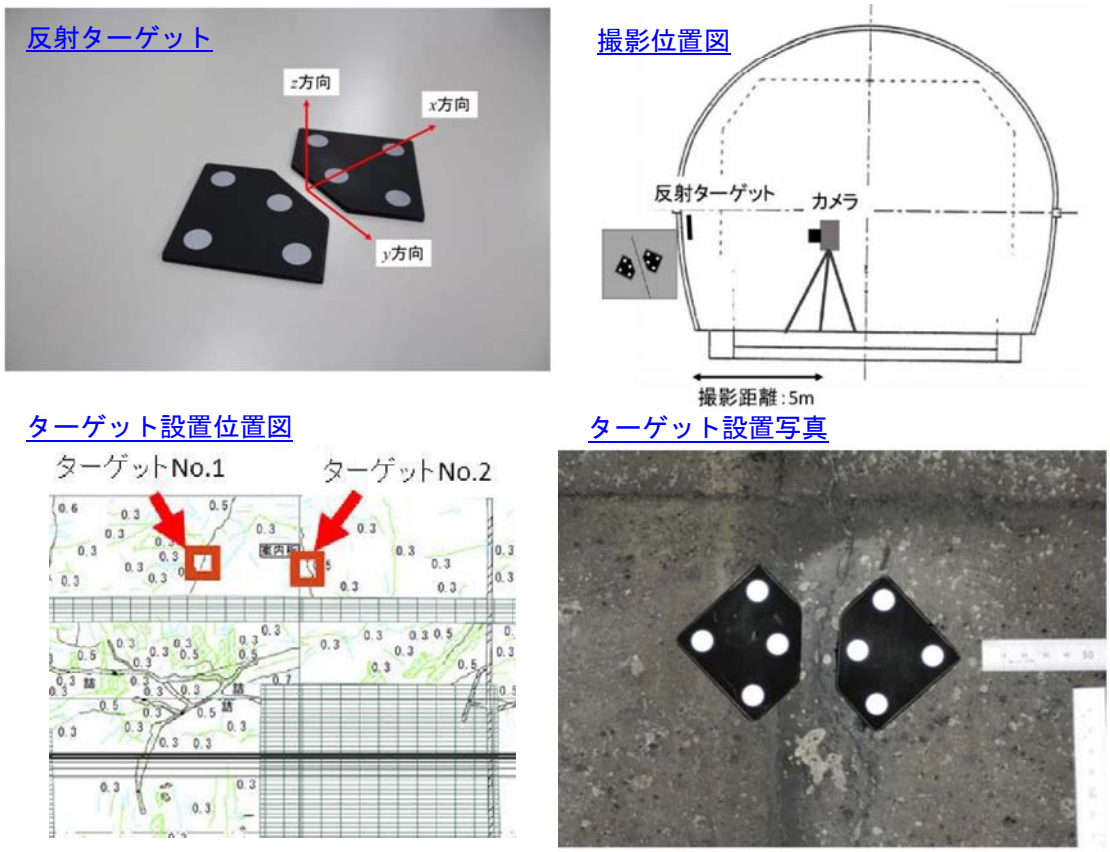


図 6-3 デジタル画像を用いた反射ターゲットによるひび割れ幅測定状況[6.6]

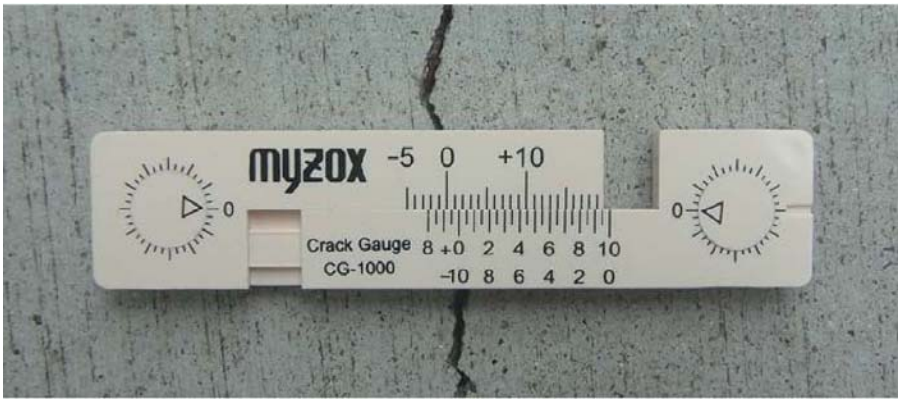


図 6-4　従来型ひび割れゲージ写真[6.10]

7)　トンネル点検におけるリスクヘッジ

定期点検は，道路トンネルの変状・異常を把握，診断し，当該道路トンネルに必要な措置を特定するために必要な情報を得るものであり，安全で円滑な交通の確保や第三者への被害の防止を図るなど，トンネルに係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施するものである[6.4]．定期点検の実施は，基本的には民間企業（建設コンサルタントなど）に委ねられ，限られた期間と予算の中で，上記の目的を第一前提として実施している．道路トンネルは，現在全国に約 11,000 本存在し，年代の幅，構造形式，地域性，環境，地質や地形など条件も様々であり，すべてのトンネルにおいて特徴がある．よって画一的な判定区分による点検の実施だけでは，その安全性が確保されないケースも生じる．

2012 年の笹子トンネル事故は最たるものであるが，コンクリート片や附属物の小片などの落下は，年間においても複数件発生しているのが現状である．

今回提案したいのは，こうしたリスクに対して民間企業としてきちんとヘッジができているかということである．走行型計測によってトンネル全体の画像やレーザデータを所有することができれば，少なくともその点検時あるいは点検直後の状態を記録として残すことが可能となる．たとえば，点検業務を受注して，現地踏査を行い，比較的健全であり，走行型計測も必要ないという判断があった際に，費用を抑えるために解析は行わず，現地計測（画像撮影とレーザ計測）だけ実施する．点検後～数年後に落下事故が発生した場合，必要な箇所を全画像データから抽出することで，その時点での安全性を確認することができる．また災害時（大規模地震や豪雨による地すべりなど）における被害原因を究明する際においても有効な活用と言え，こうしたリスクヘッジを目的とした用途も走行型計測の新しい活用方法といえる．

8)　異常時点検・臨時点検時の活用

道路トンネルの異常時点検は，日常点検（通常巡回）において変状が発見された場合に実施するものであり，臨時点検は，集中豪雨や地震およびトンネル内の事故等が発生した場合

に実施する点検である[6.4]．また他のトンネルにおいて特定の部位（コンクリート片や附属物等）の社会的影響（人的被害，長時間通行止め等）に伴う規模の落下事故等が発生した場合に実施する点検もある．いずれも道路利用者の安全が確保されているかを緊急的に把握することが目的である．

基本的には対象トンネルに通行規制を行い，近接目視と打音検査によって判定することが望ましいが，延長が長く，対象物がすべての覆工面を対象とするケースでは，多大な時間が必要となる．こうした際には走行型計測を活用することで，計測直後に画像展開図を作成し，着目箇所，異常箇所を確認することで，現地に近接目視の箇所を絞り込むことが有効と考えられる．こうした画像確認～近接目視～レーザ確認～異常箇所の現地確認を流れ作業で実施すれば，短期間に異常箇所の判定を行うことができる．走行型計測の活用は，それぞれの原因や状況によって，その必要性は限られるが，異常箇所を絞り込むことによって合理的に異常時点検・臨時点検を実施することは可能と考えられる．

なお，走行型計測による前回データが存在する場合は，その差分を確認したり，附属物の有無などを容易に確認できることから，走行型計測が普及することによってデータベース化していくことは，非常に有効な手段であると判断できる．

9） 建設時における走行型計測の活用

走行型計測から得られるレーザデータは，トンネル壁面の面的な位置座標（X,Y,Z）を記録しデータ化したものである．したがって現状のトンネル形状を全延長で正確に測量された状態といえる．

現在，国土交通省では，建設産業の生産性向上を目指して「i-Construction」の取り組みが実施されている．具体的には，「ICT 技術の全面的な活用」，「規格の標準化」，「施工時期の平準化」等の施策を建設現場に導入することによって，建設現場のプロセス全体の最適化を図るというものである[6.7]．ICT 技術の全面的な活用では，情報化施工の全面的な活用を進めるため，測量・設計から，施工・検査，さらに管理に至る全プロセスにおいて，3 次元データの活用等の情報化を導入する考えである．**図 6-5** はその活用に向けたイメージ図であり，建設時の 3 次元データを取得しておくことは，今後の i-Construction の維持管理・更新の位置づけでは必要となるプロセスである．トンネル構造物は，周辺地山の影響を受け，施工時から異常な圧力により，変状が生じることが多いため，レーザによる初期データを取得し，3 次元データとして CAD 化しておくことが重要と考える．こうした施工時における走行型計測の活用も将来的なマネジメントとして重要な位置づけであると判断する．

走行型計測では，画像データも実在することから，CAD 化した 3 次元データに画像データを貼り合わせることも可能であり，将来的には建設時や前回点検のデータをモバイルパソコンやタブレットを現地に持ち運びながら比較を行い，その場で作図や変状の状況を直接記録するなど，より高度で合理的なトンネル点検の実現が可能になると考えられる．また施工時に知り得た切羽状況（地質）を同じ断面上の基本条件として入力しておけば，生じている変状の原因推定においても十分な手がかりとなり，調査費用の低減にもつながる．

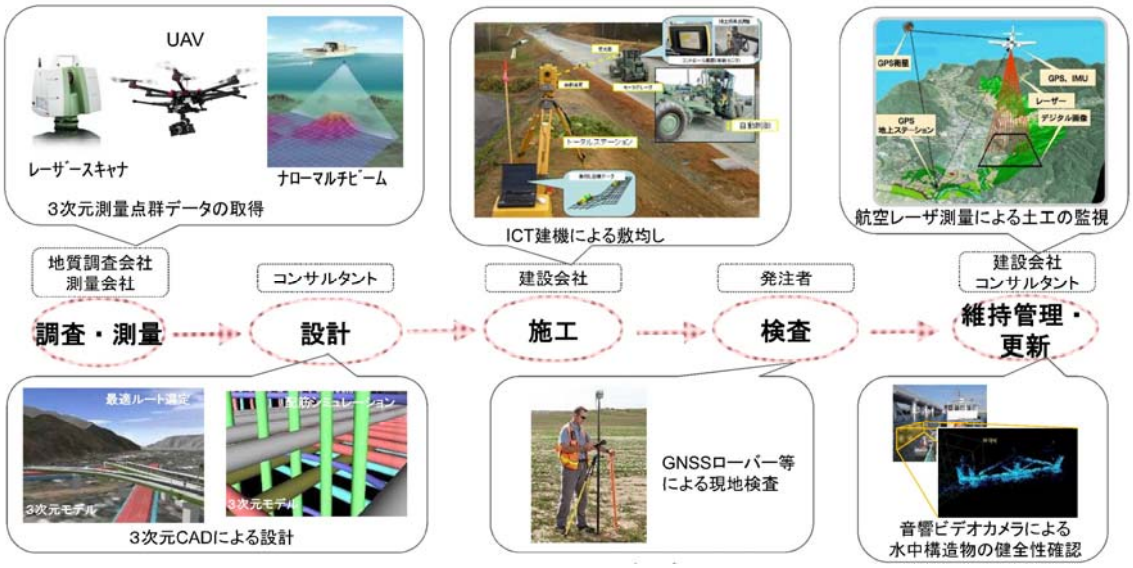


図 6-5　3 次元データの活用イメージ図[6.7]

6.5 結論

現状のトンネル点検では，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，走行型計測を適用した際の点検方法として，現地踏査，近接目視，打音検査の具体的手法，著しいひび割れや変形，移動，沈下が発見された場合の対応方法，変状の継続的な監視方法，トンネル点検におけるリスクヘッジ，異常時点検・臨時点検時の活用，建設時における走行型計測の活用について述べた．

それぞれ提案した走行型計測は，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おいても走行型計測は有効であり，道路利用者の安全・安心確保に寄与できる技術と考える．

6.6 今後の課題

これまでの走行型計測を実施した上で，最新のトンネル点検方法を踏まえ，さらなる合理

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点検が困難となる場合がある.

③ 走行型計測結果や点検・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 走行型計測を実施することで従来の近接目視点検費プラス, 別途計測・解析費が必要となるため, コスト増となってしまう.

⑤ 走行型計測の最大の課題は, 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.

⑥ 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, 走行型計測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ことが重要である.

⑦ 計測車両は, 現在 38 万～100 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.

⑧ 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.

⑨ 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・人工知能の活用）の開発が必要である.

⑩ 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. コンター図の色階調幅を細分化することによって, 2mm 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.

6.7 将来展望

今回, 点検要領[6.3], 維持管理便覧[6.4]が改訂され, 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. 今回走行型計測を適用した道路トンネルの点検方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合理的なマネジメントが実現できる. その方策として, トンネル完成時および

継続的な走行型計測データの取得，所定の書式に沿ったデータベース化，走行型計測を活用したマネジメントマニュアルの策定が考えられ，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．

今回の点検要領[6.3]中に，「今後調査技術者が近接目視によって行う評価と同等の評価が行えると判断できる新技術が開発された場合は，新技術の併用を妨げるものではないとし，さらに近接目視による変状の把握には限界がある場合もあるため，必要に応じて触診や打音検査を含む非破壊検査等を適用する．」との但し書きが記されている．計測車両は，画像とレーザを備えた非破壊検査技術であり，こうした条件の下，品質性能を明確にすることは，今後の点検技術の精度向上や効率化に向けて，非常に重要な位置づけであると考える．また近年レーダーを搭載した計測車両も開発されており，こうした技術との融合により浮き・はく落や背面空洞などの検出にも期待が持たれている．

現在，点検の実施状況は，前述したとおり全体数のわずか 30%[6.8]である．今後これまでの 1.6 倍以上のスピードで点検を効率的に実施していく必要がある中で，交通事故・渋滞など社会的影響，予算不足，人材不足は深刻であり，精度向上，工期短縮，コスト縮減は喫緊の課題である．

点検業務に計測車両を採用することは，機械損料や解析費などが加算されるため初期コストは上がって(10～20%程度[6.9]) しまうが，画像やレーザデータを用いることによって，損傷の正確な位置情報や形状を早期に把握することで応急措置などへの対応が可能となる．またデータを蓄積することで将来的な点検において，近接目視や打音検査の効率化(無駄なく見落としがなくなる)が図られ，工期短縮，交通規制費，間接費等の抑制[6.9]にもつながり，回数を重ねるごとに定着化し，トータルコストも減少し，より合理化につながっていくものと期待できる．

参考文献

[6.1] 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究）Vol. 71(1), 20-30, 2015.
[6.2] 水口尚司，大西有三，徳田浩一郎，西山哲，石村勝伸：道路トンネル走行型計測車両におけるひび割れ精度検証の報告，土木学会論文集 F2（地下空間研究） 掲載予定, 2017.
[6.3] 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，2014.
[6.4] 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編），2015.
[6.5] 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，2013.
[6.6] 廣田彰久，西山哲，水口尚司，石村勝伸：トンネル維持管理のためのひびわれ幅の画像計測手法の研究，土木学会論文集 F1（地下空間研究） 掲載予定, 2017.
[6.7] 国土交通省：i-Construction～建設現場の生産性革命～参考資料，2016.
[6.8] 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2016.
[6.9] 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.
[6.10] 株式会社マイゾックス：クラック計測ツール，パンフレット

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました，岡山大学大学院環境生命科学研究科 西山哲教授には衷心より謝意を表します．岡山大学大学院環境生命科学研究科 河村雄行教授，ならびに岡山大学大学院環境生命科学研究科 大久保賢治教授には，本論文をまとめるにあたり，種々の貴重なご助言を賜りましたことに，厚く御礼を申し上げます．また，入学時から多数ご指導いただいた，岡山大学大学院環境生命科学研究科 木本和志准教授には，お忙しい中，本研究の進め方等に関しまして，昼夜を問わず，親切なるご助言とご支援を賜りました，心より感謝申し上げます．

関西大学客員教授，京都大学名誉教授 大西有三先生には，博士後期課程入学を勧めていただき，著者の研究活動においても，大変貴重なご教示とご助言を賜りました．ここに記して，心より感謝の意を表します．

安田亨氏（現パシフィックコンサルタンツ株式会社），安川郁夫氏，西川啓一氏（現 i システムリサーチ株式会社），下澤正道氏（現計測検査株式会社），奥野正富氏（現株式会社 NTEC），服部明彦氏（現株式会社ウエスコ），中井卓巳氏（現株式会社アーステック東洋）はじめ，「新都市社会技術融合想像研究会：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」の皆様には多大なるご指導を賜りました．ここに記して心より感謝申し上げます．

関西大学 大西研究室の皆様，画像撮影に伴う実験や解析にあたり，ご支援いただきました．ここに記して，感謝の意を示します．

岡山大学大学院環境生命科学研究科 西山研究室 博士後期課程の菊地輝行氏（現株式会社開発設計コンサルタント），藤木三智成氏，井上浩一氏（現国際航業株式会社），平手克治氏（現有限会社丸重屋），笹井友司氏（現中電技術コンサルタント株式会社），はじめ社会人博士後期課程の方々，ならびに大学院生諸氏，学部生諸君をはじめ多くの方々には，多大なるご協力をいただきました．ここに感謝いたします．

博士後期課程入学にあたりご支援いただきました，株式会社ニュージェック森本浩社長，湯浅佳昭国内事業本部長，繁田彰企画総務本部長，石井秀紀国内事業本部長代理，石濱賢二国内事業本部長代理，前川太企画総務本部長代理，寺尾敏男氏，山﨑裕之氏，義永茂司氏，石村勝伸氏，中園康平氏，松山彰宏氏，菅野敬太氏および同社の方々には心より感謝いたします．また，本研究を進めるにあたり，暖かく見守ってくださいました，道路グループの皆様には多大なるご協力いただきましたことに，深く感謝いたします．

最後に，心身とも丈夫で健全な体を授けていただきました両親，そして論文の作成にあたり，わがままな時間の使い方を許し，優しく支えてくれた妻 恵美に深く感謝します．

2017 年 3 月

参考資料

参考資料-1　本論文に関する著者の発表論文

1）　水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木学会論文集 F2（地下空間研究）Vol. 71(1), 20-30, 2015.

2）　水口尚司，大西有三，徳田浩一郎，西山哲，石村勝伸：道路トンネル走行型計測車両におけるひび割れ精度検証の報告，土木学会論文集 F2（地下空間研究） Vol. 73, No. 1, pp. 1-10, 2017.

3）　廣田彰久，西山哲，水口尚司，石村勝伸：トンネル維持管理のためのひびわれ幅の画像計測手法の研究，土木学会論文集 F1（地下空間研究） 掲載予定, 2017.

参考資料-2　実トンネルの点検記録様式事例

1）　トンネル台帳（様式 A-1，A-2）

2）　点検調書（様式 B，C-1-1，C-1-2，C-1-3，C-2，D-1，D-1-2，D-2，D-2-2，D-2-3，D-2-4，D-3）

3）　診断調書（様式 E-1，E-2）

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，経年劣化などでひと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

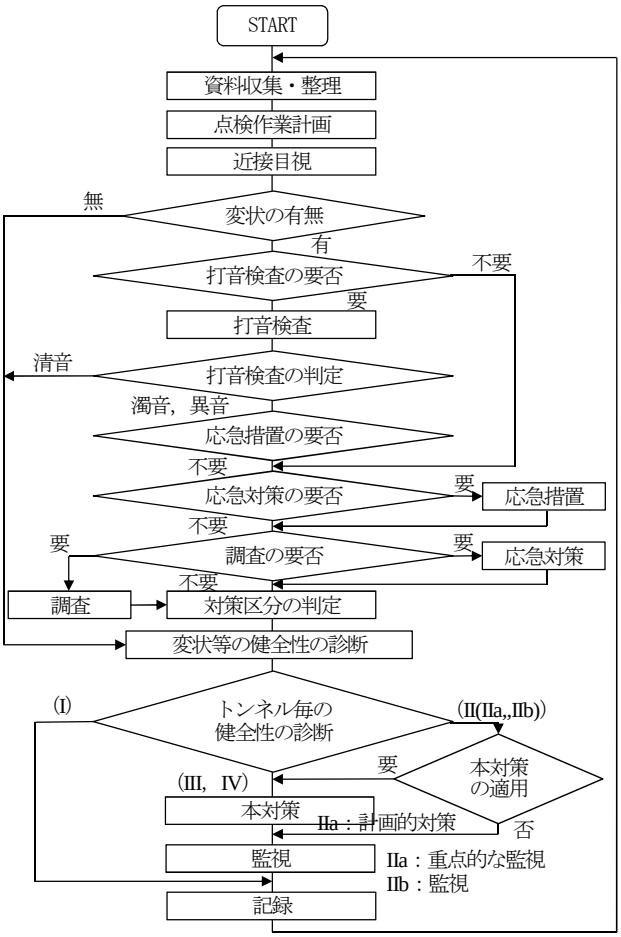


図-1　トンネルマネジメントサイクルフロー[1)]

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．画像計測に欠かせない光源は，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．

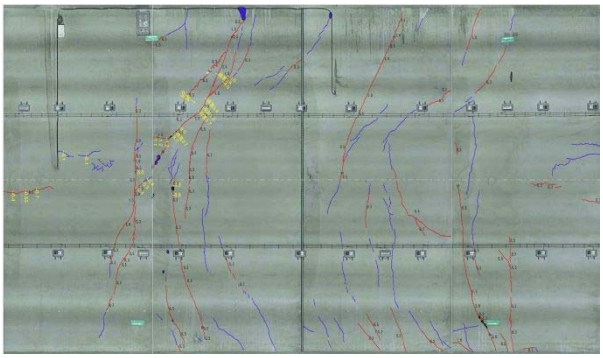


図-3　画像アウトプットイメージ[2)]

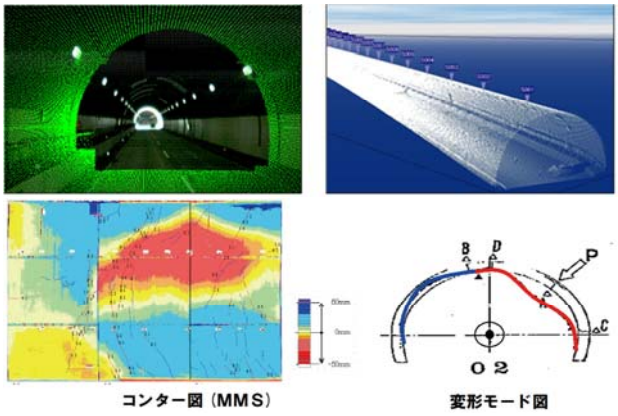


図-4　レーザアウトプットイメージ[2)]

(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/m^{2}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．

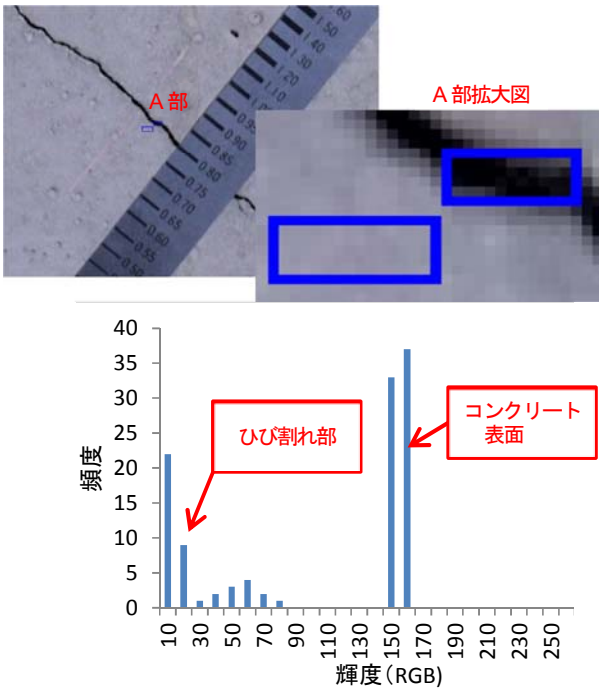


図-5　ひび割れ画像と輝度ヒストグラム

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

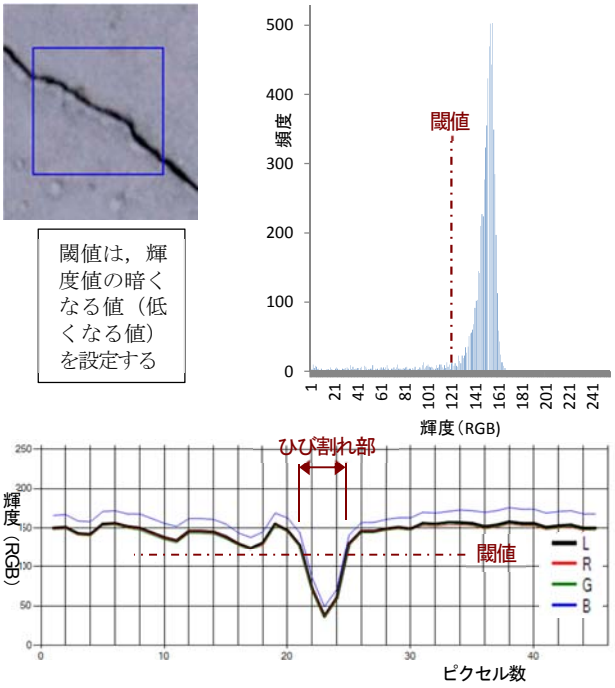


図-6　ひび割れ範囲における区分の考え方

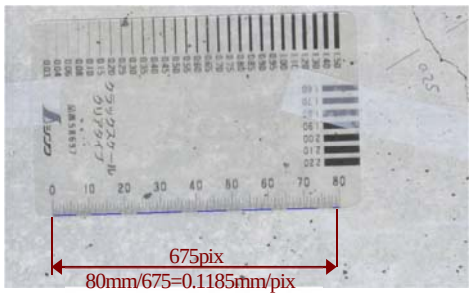


図-7　ひび割れ幅の算出根拠

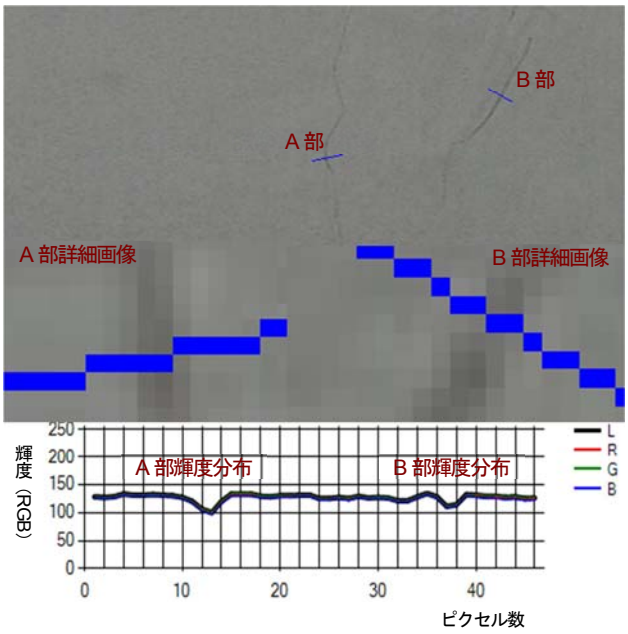


図-8　MIMM による 0.3mm のひび割れ画像

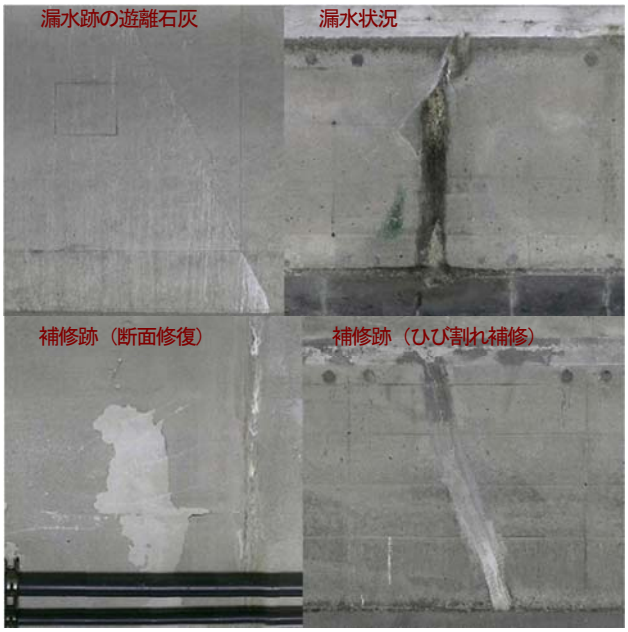


図-9　各変状写真（MIMM 画像より）

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．

(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．

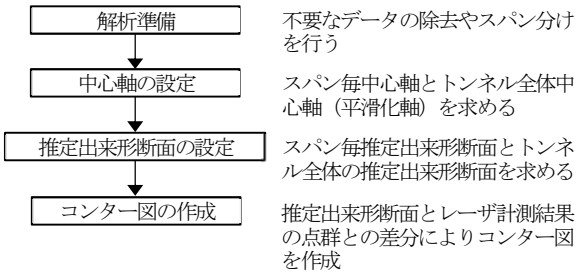


図-10　レーザ解析フロー

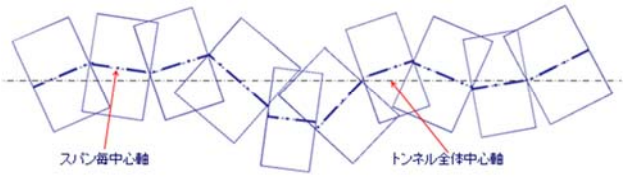


図-11　中心軸のイメージ

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．

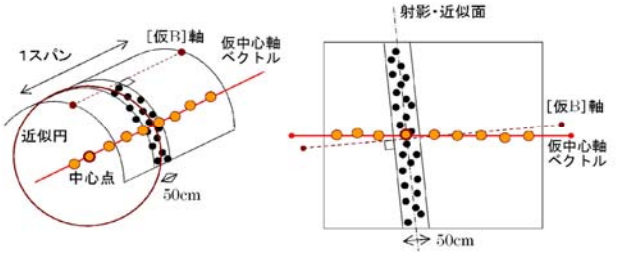
c)　中心軸の設定

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．

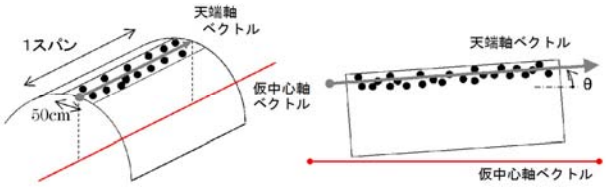
1)スパン毎の点群データから，正確な中心軸の位置を求めるための仮中心軸ベクトルとトンネルの縦断勾配を示す天端軸ベクトルとを求め，この 2 つのベクトルによりスパン毎の中心軸を求める．図-12 にスパン毎の中心軸の設定方法を示す．

2)トンネル覆工の変形は，図-13 にように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．

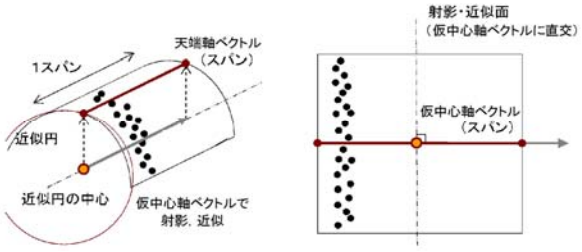


図-12　スパン毎中心軸の設定方法

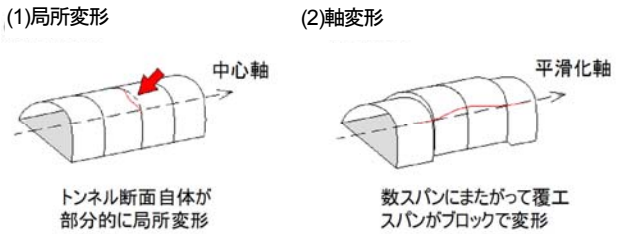


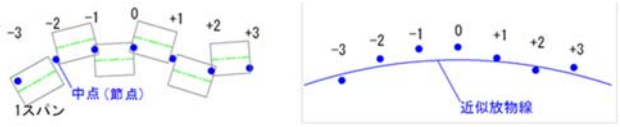
図-13　トンネルの変形モード

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．

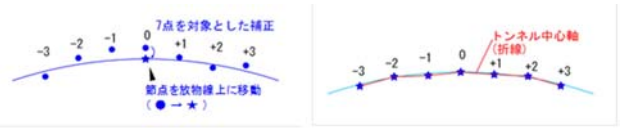


図-14　全体中心軸の設定方法

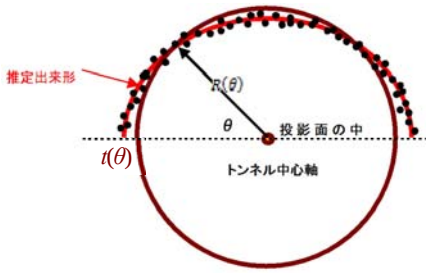


図-15　推定出来形の計算

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

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 回目ー前回）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

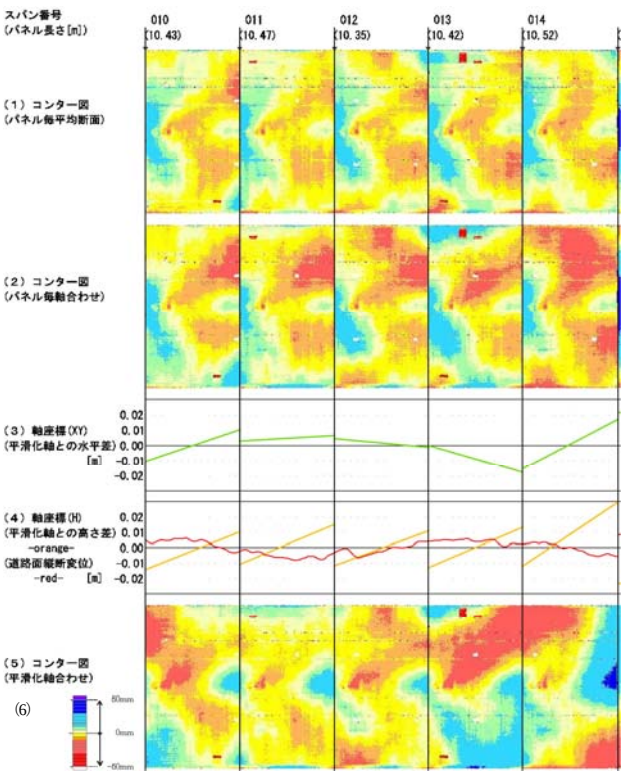
トンネル覆工面の凹凸状態（推定出来形と実測点群との差分）を等高線状に色分けして表示したものが，**図-16** に示すコンター図である．

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．



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，青が外側への変位

図-16　コンター図の事例

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で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で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

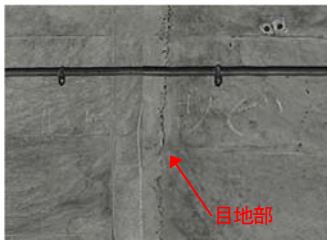
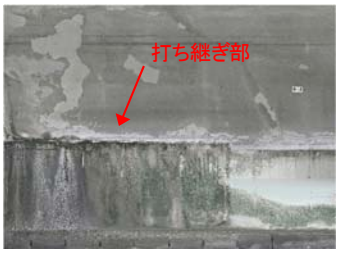
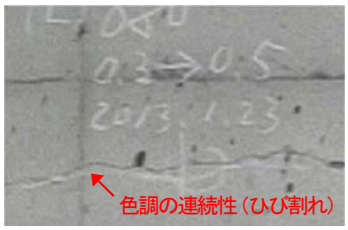
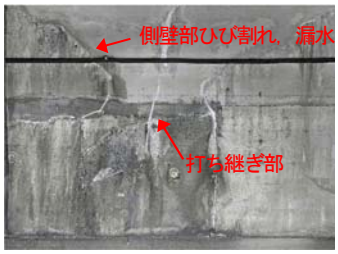
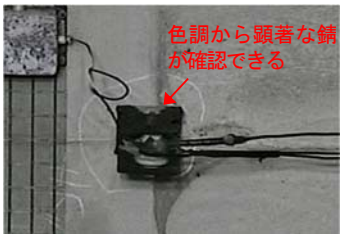
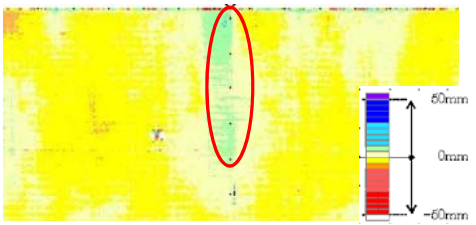
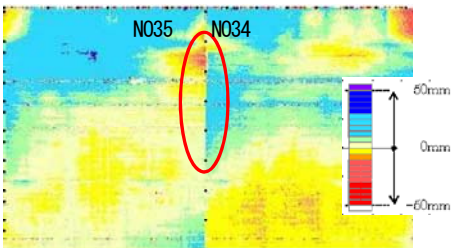
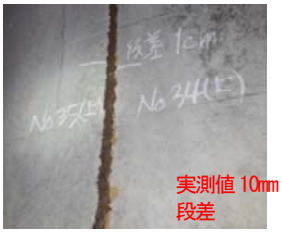
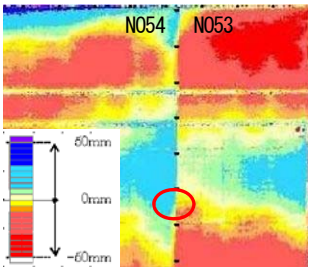
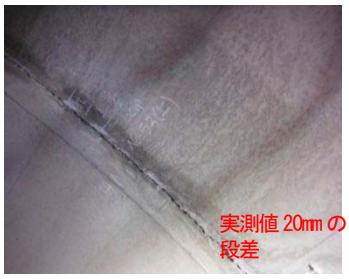
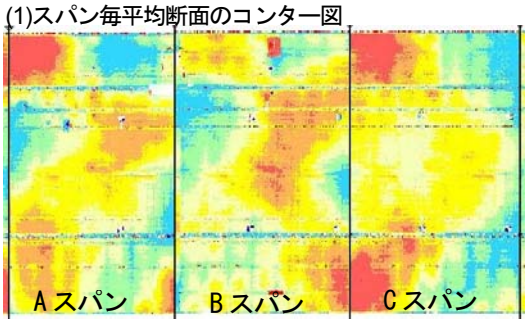
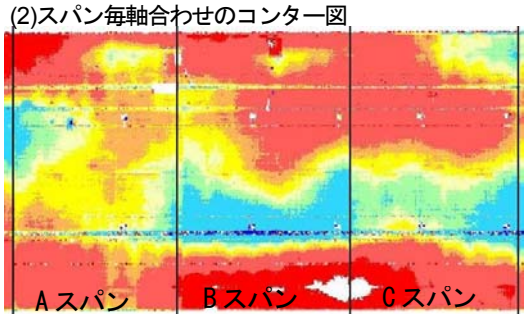
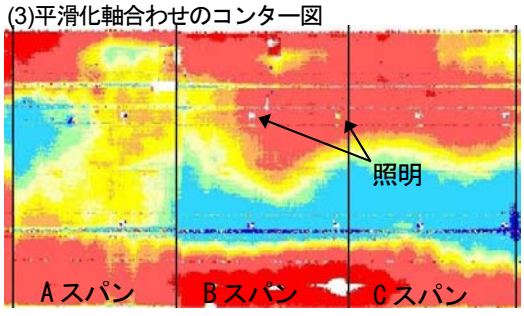
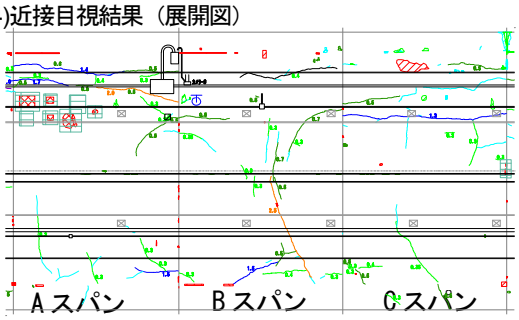
種別・箇所	MIS（画像データ）	近接目視・打音検査の画像	結果
目地部のはく離箇所			MISから，目地部の位置と細い筋（色調の相違）の部分が剥がれやすくなっていると読み取れる．近接目視時に，目地部の該当箇所（接続部分）の不良箇所が発見されたことから，ハンマーでたたき落とした．
打ち継ぎの漏水箇所			MISから，打ち継ぎ部の漏水や遊離石灰箇所が読み取れる．近接目視時に，浸み出し程度の漏水とその周辺の遊離石灰が確認された．なお，この画像はトンネル照明の影響を受けて，黄色くなっているものに対し，MISは現実的な色調になっている．
覆工アーチ部のひび割れ箇所（0.3mm）			MISから，黒い連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が，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

<table>
<tr><th>種別・箇所</th><th>MMSコンター図</th><th>近接目視・打音検査の画像</th><th>結果</th></tr>
<tr><td rowspan="3">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）</td><td> 
</td><td>
</td><td>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）</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td><td>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）</td></tr>
<tr><td> 

形状の特徴
・NO54 側の覆工形状が全体的に若干大きく出来ている．
・この差分が段差として色調に現れている．
・NO54 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．</td><td> 
</td><td>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）</td></tr>
<tr><td>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</td><td>(1)スパン毎平均断面のコンター図
 

(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
 
</td><td>(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）</td><td></td></tr>
</table>

(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[6]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[8]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

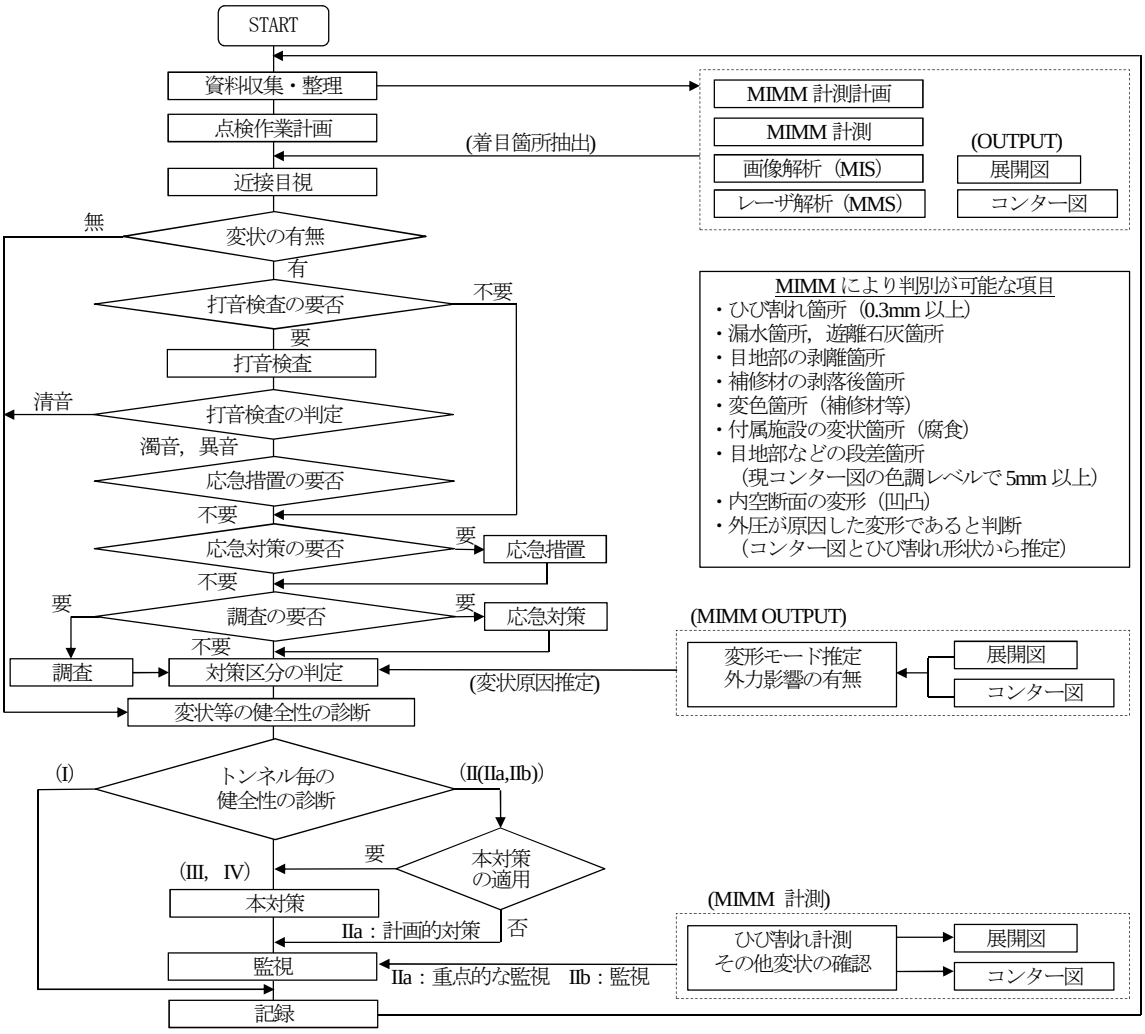


図-17　MIMM を踏まえたトンネルマネジメントサイクルフロー

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[1)]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) 石川貴一朗, 天野嘉春, 橘詰匠, 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.

道路トンネル走行型計測車両における ひび割れ精度検証の報告

水口　尚司[1]・大西　有三[2]・徳田　浩一郎[3]・西山　哲[4]・石村　勝伸[5]

[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　関西大学客員教授　環境都市工学部（〒564-8680 吹田市山手町3丁目3番35号）
E-mail: o-yuzo@gaia.eonet.ne.jp

[3]正会員　国土交通省　九州地方整備局　熊本河川国道事務所（〒861-8029 熊本市東区西原1丁目12番1号）
E-mail: tokuda-k8910@qsr.mlit.go.jp

[4]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

[5]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

2014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．道路トンネルは全国で約1.1万本存在[2]する中で5年に1回の定期点検を行う必要があり，適切な点検技術の開発や人員体制の確保が急務となっている．現在点検ロボット技術としてトンネル走行型計測車両が注目されており，得られる精度の検証が大きな課題となっている．本研究では，実際のトンネルにおいて，熟練技術者による近接目視結果とトンネル走行型計測車両による計測結果を比較検討し，ひび割れ検出に伴う精度検証を実施したものである．

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

1. 背景

2014年6月点検要領[1]が改訂され，5年に1回の定期点検が義務づけられた．現在（2016年3月末）全国に約1.1万本存在[2]する道路トンネルは，約30％の定期点検が完了[2]している．改訂からこれまでに約2年経過し，年間あたりで換算すると約16百本のペースである．したがってこのまま全体を完了させるのに7年を要すこととなり5年に1回の基準を満たすためには，これまでの1.6倍のスピードで実施していく必要がある．定期点検は，トンネル本体工，附属物に対して，近接目視，打音検査，触診することが基本[1]である．その条件として昼夜間を問わない，交通規制が必要，排気ガスの多い環境，高所作業車が必要，しかるべく熟練技術者による適切な判断が必要となっており，工期短縮，コスト縮減，安全性・労働環境改善，精度向上，適任者の確保が基準を満たす上での大きな課題となっている．効率的な点検を実施するためにトンネル走行型計測車両（以下計測車両という）が注目されている．本研究においては，計測車両にMIMM（Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System）を採用した（**図-1**参照）．この技術は，車両にカメラおよびレーザを搭載し，覆工コンクリート表面のひび割れ，漏水，材質不良，はく離・はく落箇所等を画像撮影し，覆工内面の形状を座標データとして取得するものである．

2. 研究目的

計測車両は，これまでにも多数トンネルの定期点検の補足技術として採用されてきた．このうち画像から得られるひび割れは，幅0.3mm以上を検出することが基準[3),12)]とされてきた．これは点検時に，ひび割れの判定を行う際，幅0.3mm以上のひび割れが密集した場合において，ランクを上げる基準[14)]となっていることからもひび割れ幅0.3mmが一つの区切りとして認められているからである．しかしこれまでに，微細なひび割れを検出する能力や幅の精度はどれくらいか，これらの性能を具

図-1　走行型計測車両（MIMM）写真[4]

図-2　対象トンネル（花岡トンネル）

体的に検証した例は少なく，詳細に規定化もされていないのが現状であった．本研究では，国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所が管理する道路トンネルをフィールドとして，計測車両による画像データから得られたひび割れと近接目視による実際のひび割れを比較し，ひび割れ検出能力およびひび割れ幅の精度検証を行ったものである．なお，ひび割れ検出は0.3mmを基準として

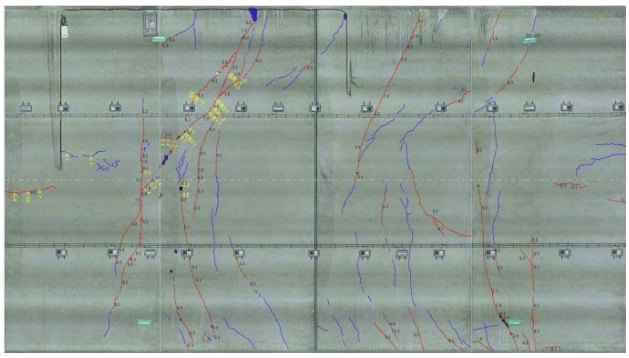


図-3　画像アウトプットイメージ[4]

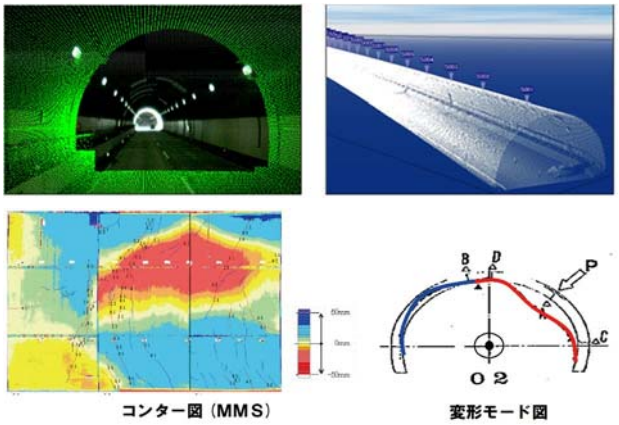


図-4　レーザアウトプットイメージ[4]

いることから，今回は0.2mm以上を検出対象とした．

3.　検証概要

(1)　対象トンネルの概要

1）路線名：国道3号南九州西回り自動車道
2）トンネル名：花岡トンネル（**図-2**参照）
3）トンネル延長：497m
4）完成年度：平成20年5月
5）検証区間：4スパン（S038～S041）

(2)　計測車両機器概要[3),4)]

a)　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）箇所等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．画像計測に欠かせない光源は，LED照明であり，カメラは100万画素のものが12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．

b)　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．トンネル内の位置情報については，上記のGPS, IMUの他オドメトリによる変位システム[3]を用いて精度を向上させている．**図-4**にレーザ点群データのアウトプットイメージ[3),4)]（点群の3D表示とコンター図）を示す．

4. 検証方法

(1) 撮影および画像処理[4)]

計測車両は，事前（検証日 15 日前）に，花岡トンネルを対象として撮影を行い，その後，該当スパン（SO38～SO41）の画像データから展開図を作成した．画像によるひび割れの検出方法は，画像データを平面的に見下げ方向で展開させ，パソコン画面よりひび割れと想定されるランダムな連続性を呈した黒線を抽出（目地，型枠線，汚れなどと分別した判断）した[3)]．ひび割れ幅の計測については，後述する画像の輝度分布と分解能から推定を行った．

(2) 近接目視によるひび割れ測定

目視を行うスパンは，SO38～SO41 に限定し，アーチ部および側壁部において熟練技術者により近接目視[1),10)]を行った．アーチ部については，高所作業車を用いて，従来の点検要領に基づいてスケッチを行った．なおこれらの一連の作業は学識者，トンネル管理者の立会の下で行った．

近接目視で対象とする損傷は，ひび割れを対象とし，点検員（2 名）が，該当スパンの白図（スパンの枠をを入れた展開図）に幅 0.2mm 程度以上を対象としたひび割れのスケッチ（幅，位置，長さ）を行った．

(3) 検証

現地において，立会者（学識者，トンネル管理者）が，数箇所を絞り込み，画像からの展開図と近接目視で作成した展開図について，ひび割れ幅，長さ，位置の確認を行った. さらに計測車両に設置したパソコン画面上から，幅 0.2mm 以上のひび割れが，画像から得られているかの検証を行った．

数値的な検証方法として，以下の a)～c)のように目標を定め，それぞれを数値評価した．基本的には近接目視と計測車両による結果を整理し，それぞれの目標値との比較を行った．なおひび割れ幅は，該当する 1 本のひび割れの最大値とした．

a) ひび割れ検出率による検証

ひび割れ検出率は，式(1)をもとに幅 0.2mm 以上を対象とし，検出目標は 100%とした．

$$\text{ひび割れ検出率} = \frac{\text{計測車両によるひび割れ本数}}{\text{近接目視によるひび割れ本数}} \quad (1)$$

b) ひび割れ実測率（測定精度）による検証

ひび割れ実測率は，式(2)のようにそれぞれのひび割れ計測を行った際の誤差が指定した許容値を上回っているものを異常値として，全測定数に対する正常値数の比率を表した．ここでいう誤差とは，画像から得られたひび割れと近接目視によって計測したひび割れ幅の差とした．なお，許容値はひび割れ計測時に発生しうる誤差範囲として，正規分布の特性から許容される範囲[5),6)]と仮定した．

$$\text{ひび割れ実測率} = \frac{N-\delta}{N} \quad (2)$$

N : 全体数，δ : 異常値数

ひび割れ実測率の目標値は，後述する室内試験結果を踏まえた正規分布の特性値から設定した．

c) ひび割れ誤差の許容値の考え方

ある計測を実施する際，誤差には系統誤差（理論値の誤りや測定器固有の特性等）と偶発誤差（測定者の過失やランダムな測定むら等）がある[6)]．ひび割れ測定は，従来測定者が，ひび割れスケールで測定したときに発生する誤差であり，測定者の過失が大きな原因となることから，偶発誤差のみを対象として検討を行った[6)]．

ひび割れ測定は，スケールに印刷された 0.1mm ごとの黒線と実際の割れ幅を合わせて，最も近いとされる寸法を選んで決定している．人間の視覚能に伴う画像解析から判別している．よってこの視覚能の限界が通常目視点検で発生している誤差とすると，今回のひび割れ測定における許容値と仮定することができる．

今回は，室内においてひび割れを故意に可動させる装置を使用し，幅ごとに測定した結果から発生する誤差を読み取ることで許容値を決定した．なおここでいう誤差は，各測定値と平均値との差である．

複数名の測定者（若年層～高年層延べ 32 名）に，可動式ひび割れ発生装置（**図-5**）を用いて，指定したひび割れスケール幅（0.1～2.2mm）の値にマイクロメータを合わせ，その時の計測値（レーザによるデジタル値）を読み取った．

可動ひび割れ発生装置（**図-5**）は，コンクリートのテストピースに割れ目を入れ，アルミ板で製作した台座に固定し，レーザとマイクロメータで距離を測ることで，所定幅のひび割れを発生させる器具（関西大学製作）である．

室内試験の結果として，ひび割れ幅ごとに生じる誤差分布（測定値-平均値）を**図-6** のように示す．ひび割れ幅の小から大に伴って誤差分布も大きくなっていることか

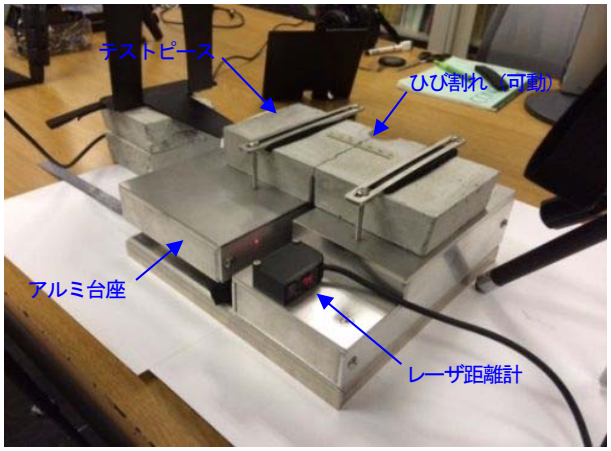


図-5　可動式ひび割れ発生装置

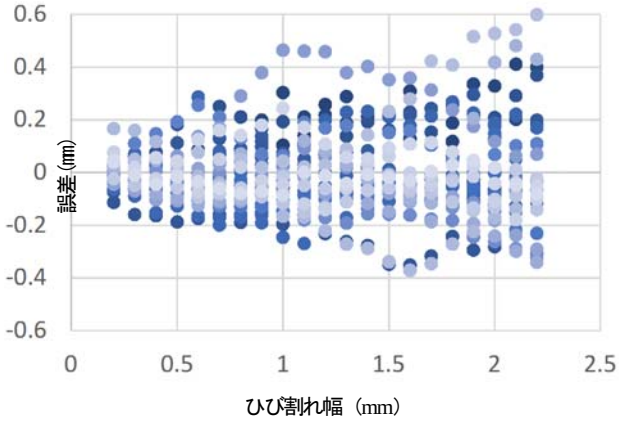


図-6　誤差分布図（測定値-平均値）

ら，一律の許容値ではなくひび割れ幅ごとに許容値を定める必要がある．

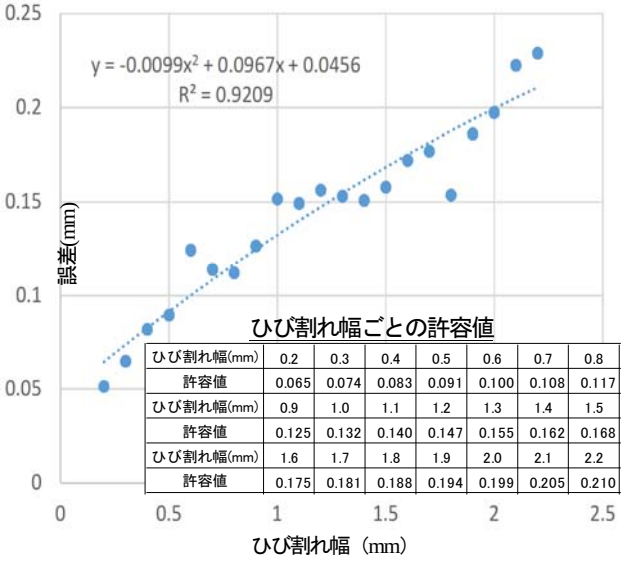
それぞれの誤差から，式(3)のように標準誤差[6]を算出し，図-7 に示す近似式により許容値を設定した．

$$\text{標準誤差} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}} \qquad (3)$$

x_i：測定値，$\bar{x}$：平均値

結果として図-7 のとおり，それぞれのひび割れ幅に対し概ね 0.07mm～0.21mm の許容値を与えるものとした．

今回室内試験の誤差データをすべてヒストグラムに表したのが図-8 である．この結果をまとめると，全データ数 630 のうち誤差の標準偏差を算出すると 0.1487 となり，標準偏差内のデータ数は 503 となった．通常正規分布で示される標準偏差の正値が含まれる確率は，68.3%



ひび割れ幅(mm)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
許容値	0.065	0.074	0.083	0.091	0.100	0.108	0.117
ひび割れ幅(mm)	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
許容値	0.125	0.132	0.140	0.147	0.155	0.162	0.168
ひび割れ幅(mm)	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
許容値	0.175	0.181	0.188	0.194	0.199	0.205	0.210

図-7　標準誤差近似式

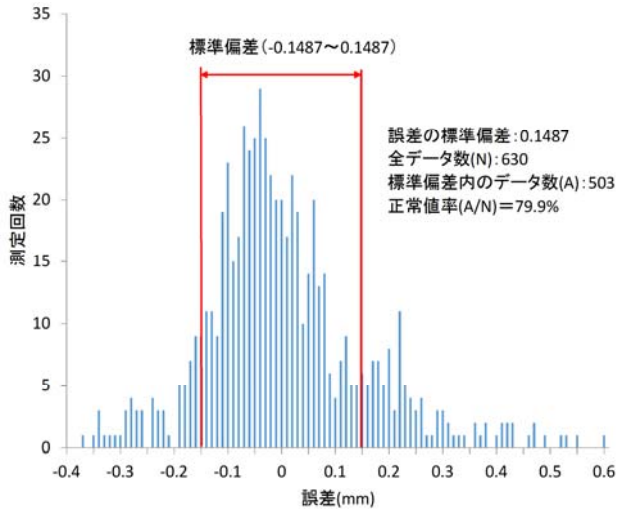


図-8　全体データヒストグラム

とされるが[5),6)]，今回の結果は，79.9%となる．よって冒頭で述べたひび割れ実測率における目標値は，今回の室内試験結果から得られた 79.9%を採用した．

d)　ひび割れ長さの精度

画像データでは，ひび割れと想定されるランダムな黒線を抽出して判別しており，ひび割れ幅別に検出された 1 本のひび割れを形状の変化に沿って座標値から長さを算出している．一方目視点検では，スケール等を用いて，目視で 1 本と確認した全延長分を測定している．よって両者の測定プロセスが異なるため，今回は，目視で認識された 1 本の全延長分と画像データからの個々のひび割れ長さの累積長さを比較するものとする．測定プロセスの違いから，ひび割れ長さの評価については，比較に留め，誤差の許容値は定めないこととした．

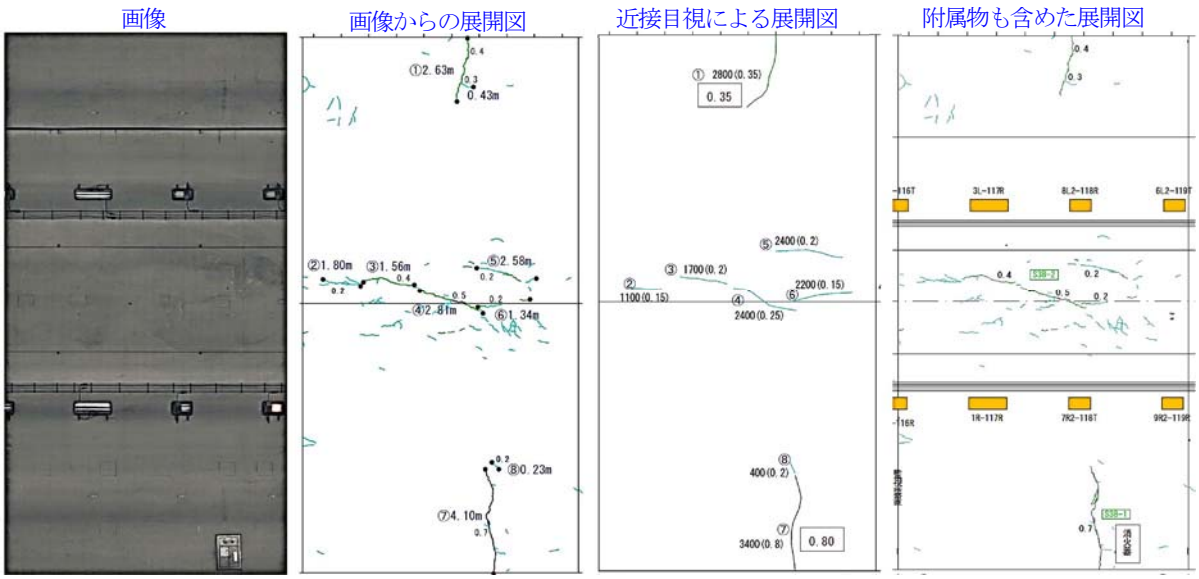


図-9　SO38　画像およびひび割れ展開図

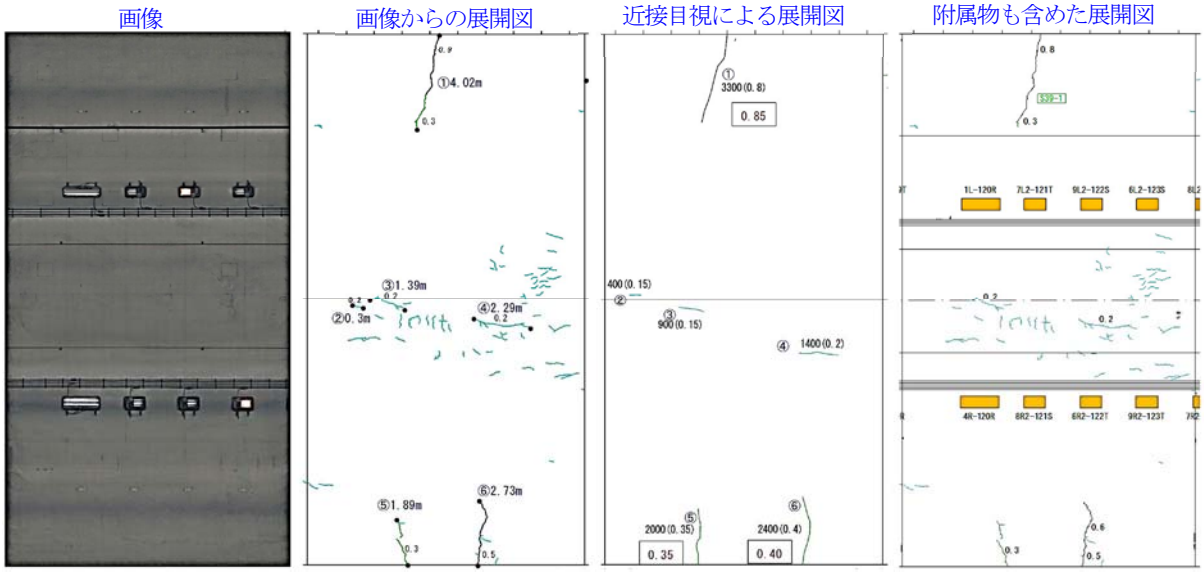


図-10　SO39　画像およびひび割れ展開図

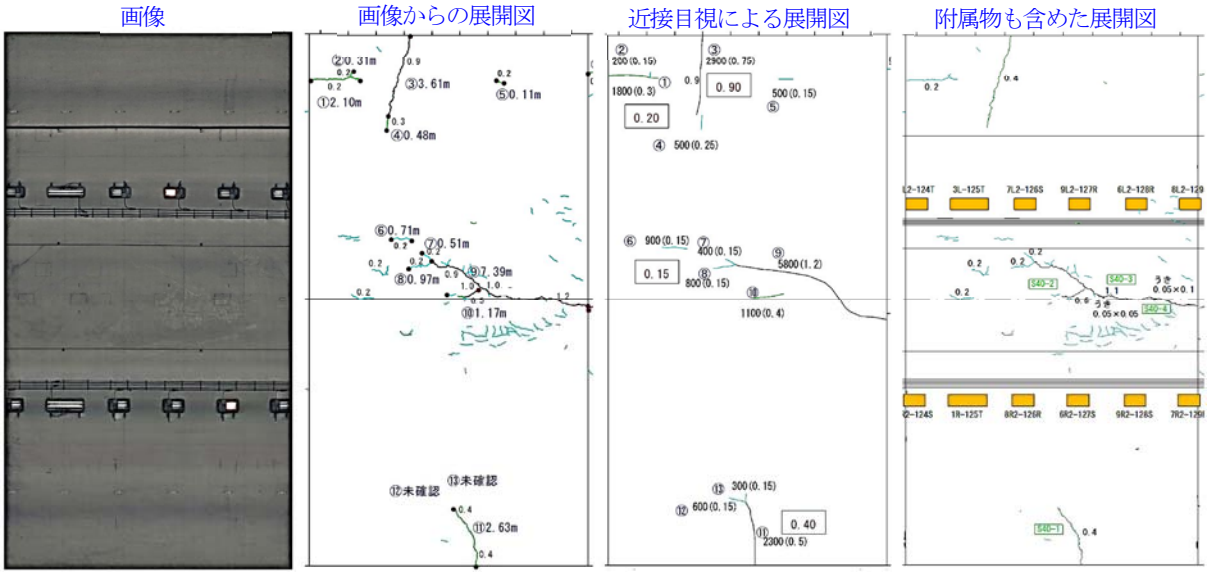


図-11　SO40　画像およびひび割れ展開図

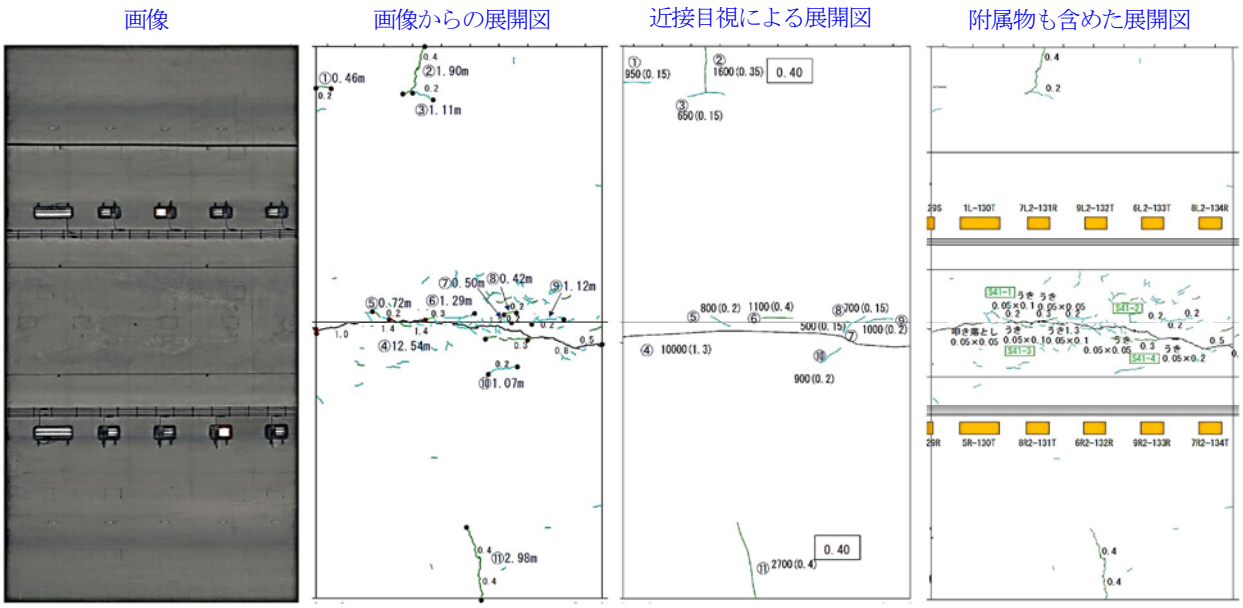


図-12　SO41　画像およびひび割れ展開図

表-1　計測結果表

スパン	ひび割れ幅範囲	本数
S038	**0.1**5～0.80mm	8
S039	0.15～0.85mm	6
S040	0.15～1.2mm	13
S041	0.15～1.3mm	11
計	0.15～1.3mm	38

表-2　画像との検証結果

スパン	番号	場所	計測車両（画像）		検証結果(正値)		誤差		評価	
			幅(mm)	長さ	幅(mm)	長さ	幅(mm)	長さ	許容値	σ以下
S038	1	下り側	0.40	2.63	0.35	2.80	0.050	−0.170	0.078	○
	2	中央	0.20	1.80	0.15	1.10	0.050	0.700	0.060	○
	3		0.40	1.56	0.20	1.70	0.200	−0.140	0.065	△
	4		0.50	2.81	0.25	2.40	0.250	0.410	0.069	△
	5		0.20	2.58	0.20	2.40	0.000	0.180	0.065	○
	6		0.20	0.99	0.15	2.20	0.050	−1.210	0.060	○
	7	上り側	0.70	4.10	0.80	3.40	−0.100	0.700	0.117	○
	8		0.20	0.23	0.20	0.40	0.000	−0.170	0.065	○
S039	1	下り側	0.90	4.02	0.85	3.30	0.050	0.720	0.121	○
	2	中央	0.20	0.30	0.15	0.40	0.050	−0.100	0.060	○
	3		0.20	1.39	0.15	0.90	0.050	0.490	0.060	○
	4		0.20	2.29	0.20	1.40	0.000	0.890	0.065	○
	5	上り側	0.30	1.89	0.35	2.00	−0.050	−0.110	0.078	○
	6		0.50	2.73	0.40	2.40	0.100	0.330	0.083	△
S040	1	下り側	0.20	2.10	0.20	1.80	0.000	0.300	0.065	○
	2		0.20	0.31	0.15	0.20	0.050	0.110	0.060	○
	3		0.90	3.61	0.90	2.90	0.000	0.710	0.125	○
	4		0.30	0.48	0.25	0.50	0.050	−0.020	0.069	○
	5		0.20	0.11	0.15	0.50	0.050	−0.390	0.060	○
	6	中央	0.20	0.71	0.15	0.90	0.050	−0.190	0.060	○
	7		0.20	0.51	0.15	0.40	0.050	0.110	0.060	○
	8		0.20	0.97	0.15	0.80	0.050	0.170	0.060	○
	9		1.20	7.39	1.20	5.80	0.000	1.590	0.147	○
	10		0.50	1.17	0.40	1.10	0.100	0.070	0.083	△
	11	上り側	0.40	2.63	0.40	2.30	0.000	0.330	0.083	○
	12				0.15	0.60			0.060	−
	13				0.15	0.30			0.060	−
S041	1	下り側	0.20	0.46	0.15	0.95	0.050	−0.490	0.060	○
	2		0.40	1.90	0.40	1.60	0.000	0.300	0.083	○
	3		0.20	1.11	0.15	0.65	0.050	0.460	0.060	○
	4	中央	1.40	12.54	1.30	10.00	0.100	2.540	0.155	○
	5		0.20	0.72	0.20	0.80	0.000	−0.080	0.065	○
	6		0.30	1.29	0.40	1.10	−0.100	0.190	0.083	△
	7		0.20	0.50	0.15	0.50	0.050	0.000	0.060	○
	8		0.20	0.42	0.15	0.70	0.050	−0.280	0.060	○
	9		0.20	1.12	0.20	1.00	0.000	0.120	0.065	○
	10		0.20	1.07	0.20	0.90	0.000	0.170	0.065	○
	11	上り側	0.40	2.98	0.40	2.70	0.000	0.280	0.083	○
合計(Σ)				73.42		65.80			△の個数	5
平均(A)			0.38	2.04	0.33	1.73	0.036	0.237	○の個数	31
すべてのひび割れ本数			36		38				実測率	86.1%
0.2mm以上のひび割れ本数			36		23				目標値	79.9%
0.2mm未満のひび割れ本数			0		15					

5.　計測結果

計測車両から得られた画像および展開図，検証時の近接目視における展開図，参考として画像から得られた照明など附属物を含めた展開図（今回は検証の対象ではないが，業務の最終成果となった展開図）を，それぞれSO38~41 スパンごとに**図-9～12** に示す．なお，近接目視による展開図の中で四角枠の数値は，学識者，道路管理者によるひび割れ幅の検証値を示している．今回検証時に発見したひび割れの集計は，**表-1** のとおりである．**表-2** に計測車両による結果と近接目視による検証結果を示す．

6.　検証結果

(1)　ひび割れ検出率について

近接目視では，**表-1** 全体で 38 本のひび割れを計測した．今回対象とする幅 0.2mm 以上のひび割れは**表-2** のように 23 本であり，残りは 0.15mm という結果であった．画像からは，全体で幅 0.2mm 以上で 36 本のひび割れが検出できた．したがって合計で，2 本のひび割れが検出できなかったことから，ひび割れ検出率は，以下のとおりとなる．

$$\text{ひび割れ検出率（全体）} = \frac{\text{計測車両によるひび割れ本数}}{\text{近接目視によるひび割れ本数}} = \frac{36}{38} = 94.7\%$$

しかし，今回検出できなかったひび割れは，すべて幅

0.15mmのひび割れであることから，0.2mm以上を対象とすると，以下のとおりとなる．

$$\text{ひび割れ検出率（幅 0.2mm 以上）} = \frac{\text{計測車両によるひび割れ本数}}{\text{近接目視によるひび割れ本数}} = \frac{23}{23} = 100\%$$

結果として，幅0.2mmを下回るひび割れを含んでも95%程度の検出が可能であり，幅0.2mm以上のひび割れでは，すべてが検出できることが証明された．なお，**図-9~12**に示すとおり，画像展開図は，検証時には捕らえきれていない微細なひび割れ（幅0.2mm未満）も多く検出できており，将来的にこうしたひび割れが進行した際に当初の状況として記録に残ることは計測車両における大きなメリットといえる．

なお，**図-11**の近接目視による展開図，**表-2**に示すSO40の 12~13 ひび割れ（幅 0.15mm：長さ 0.6m，0.3m）は，画像からは検出できなかった．画像を先端部分にクローズアップすると**図-13** のとおりとなる．幅 0.4mm のひび割れは，くっきりと黒線の連続性が判別しやすくなっているが，その先端部（0.15mm）については捕らえることはできなかった．

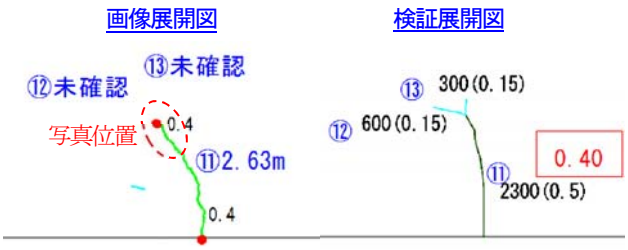
図-14にSO38，SO40に発生した幅0.2mmの検出できたひび割れを示す．明らかに黒線の連続性が確認でき，ひび割れとして認識することができる．したがって幅0.2mm以下の微細なひび割れは，トンネル内の明るさであったり，覆工表面の汚れなどにより，条件の違いで，検出する精度が異なってくるものと判断される．

(2) ひび割れ実測率（測定精度）について

通常近接目視におけるひび割れ幅は，スチール製やプラスチック製のひび割れスケールにより，実際のひび割れに重ねて最も近似したスケール幅を読み込んでいく．点検員の視覚能による判断に委ねられていることから，個人的なバラツキやヒューマンエラーも伴い，若干の誤差は許容されている．一方，計測車両からのひび割れ幅は，**図-15**に示すように得られた画像データから，コンクリート面とひび割れの輝度を読み取り，その細部のピクセル数，分解能（ピクセル寸法），輝度の特性（平均値，レンジ，コントラスト，判別分析による閾値等）から想定[4),7),8),9),13)]している．どちらも視覚的な情報を処理し，アウトプットを得るプロセスとなる．

今回は画像による結果と近接目視による検証結果との誤差を分析することで，ひび割れ実測率の評価を行った．**表-2**のとおり計測車両と近接目視の誤差を評価する上で，ひび割れ幅ごとに室内試験結果から発生しうる標準誤差から許容値を定めた．

標準誤差を逸脱する個数をカウントし，ひび割れ実測



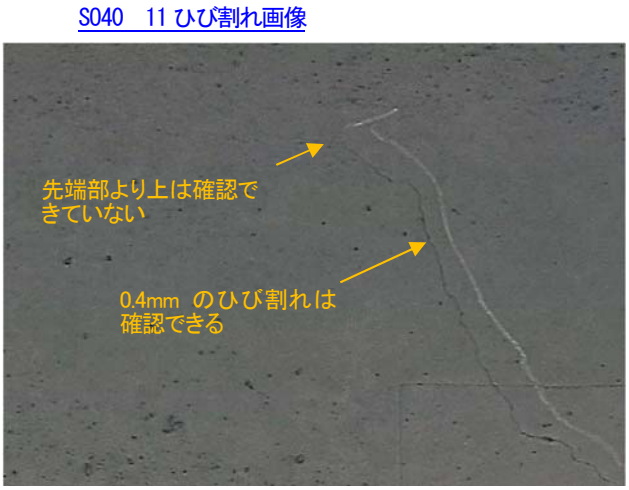


図-13 11 ひび割れクローズアップ

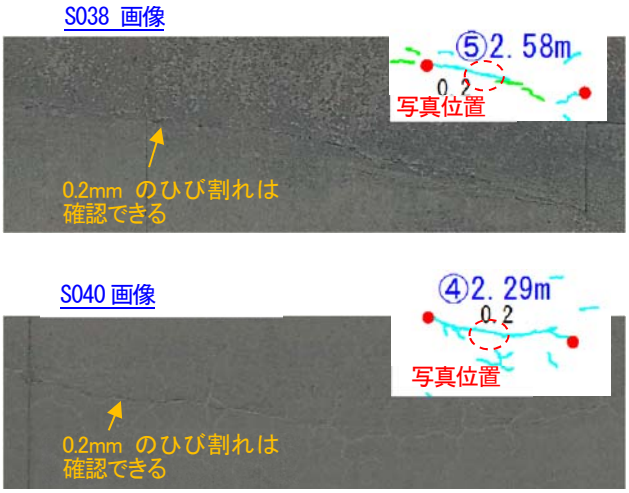


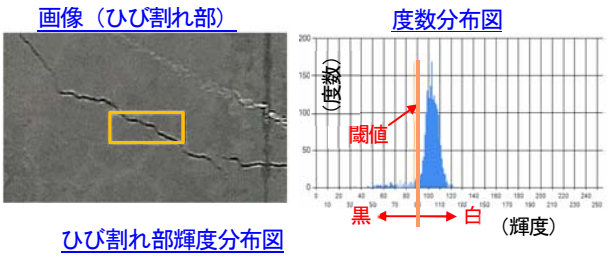
図-14 0.2mm ひび割れクローズアップ

率を計算すると以下のように目標値を満足できる結果となった．

$$\text{ひび割れ実測率} = \frac{N-\delta}{N} = 86.1\% > 79.9\% \quad \text{OK}$$

N：全体数（画像により検出できたひび割れ本数）
表-2より，全体数（○+△の個数）36個
δ：異常値数（標準誤差を逸脱するひび割れ本数）
表-2より，異常値数（△の個数）5個

なお，S038の3,4ひび割れ幅については，0.2～0.25mmの誤差が発生した．画像をクローズアップすると**図-16**のとおりである．コンクリートのグレー面を背景に一定の



種類	パラメータ
平均輝度	101.3
輝度レンジ	107
コントラスト	0.718
閾値(判別分析)	87
分解能(mm/pix)	0.7874

ひび割れ幅決定のプロセス

STEP 1	ひび割れ範囲を画像のように選択する(青枠)
STEP 2	範囲内の輝度を計測する
STEP 3	判別分析法により閾値を決める
STEP 4	分解能(ピクセルあたりの寸法)を計測する
STEP 5	閾値以下(黒)をひび割れと仮定する
STEP 6	ひび割れ範囲のピクセル数を計測する
STEP 7	分解能とピクセル数から仮ひび割れ幅を推定する
STEP 8	キャリブレーションを行い，ひび割れ幅を決定する

図-15　ひび割れ幅決定のためのプロセス

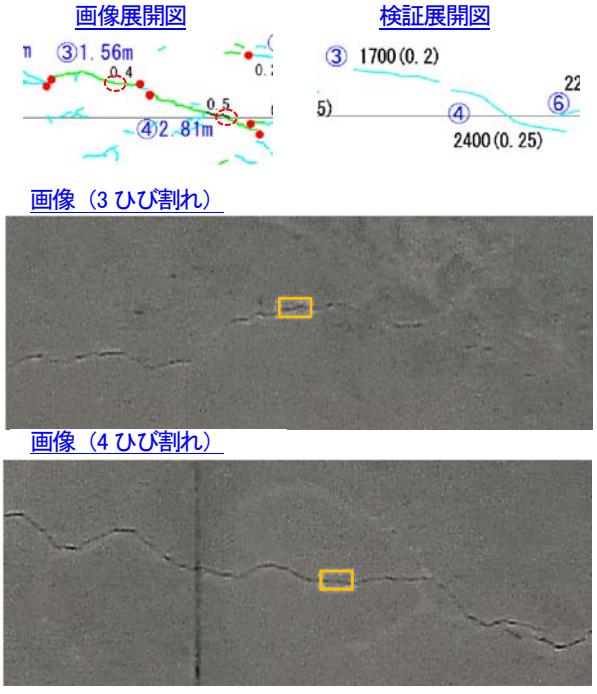
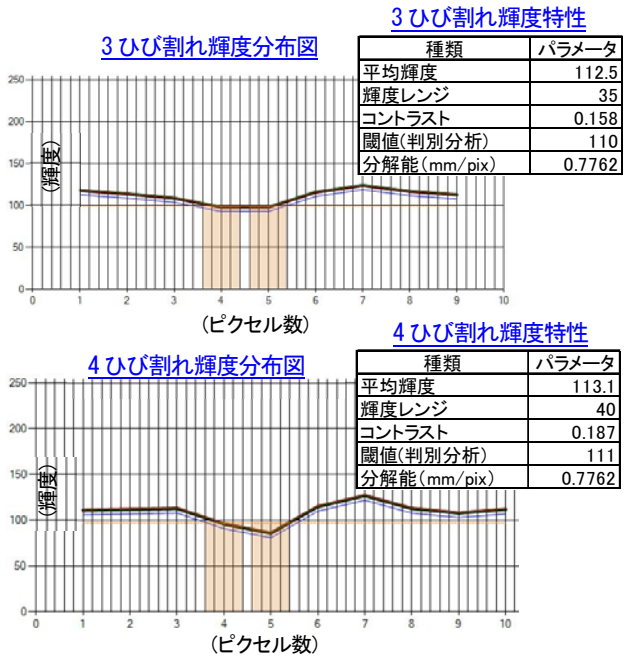


図-16　SO38　3~4 ひび割れ画像

ランダムな連続化した黒線のひび割れを認識することができる．それぞれの輝度分布と特性値を見ると図-17のとおりである．どちらも4ひび割れの方がくっきりと見えており，その差分を認識することは可能である．ひび割れ輝度の特性値も同様であり，輝度レンジおよびコントラストは，4ひび割れの方が大きくなっている．今回の誤差については，この計測箇所がアーチ天井部であることから，キャリブレーション[4]（車両計測前に側壁部等で実測したひび割れ幅を正値として最終調整を行うこと）箇所が側壁部であり，双方の撮影した際の環境的条件（被写体距離・照明・日光の影響）の違いが原因と考えられる．ただし，検証後の点検時においては，該当するひび割れの一部分において，最大幅が画像展開図に示す幅と一致する箇所が発見されたことから，最終のひび割れ展開図にはこの値を採用した．



種類	パラメータ
平均輝度	112.5
輝度レンジ	35
コントラスト	0.158
閾値(判別分析)	110
分解能(mm/pix)	0.7762

種類	パラメータ
平均輝度	113.1
輝度レンジ	40
コントラスト	0.187
閾値(判別分析)	111
分解能(mm/pix)	0.7762

図-17　SO38　3~4 ひび割れ部輝度特性

通常のトンネルは，コンクリート表面の色調や汚れなど撮影条件が悪いことが予想されることから，キャリブレーションの方法や撮影時の照明方法などによって大きく左右され，ひび割れ幅を認識するのに誤差の要因となることがわかった．

(3) ひび割れ長さについて

ひび割れ長さは，画像と目視では前述したとおり，測定プロセスの違いによりそれぞれが異なった数値となっている．全体的には10%程度画像が長く検出され，1本あたりの平均値においても20%程度長く検出されている．こうした結果は，画像の再現により，ひび割れの変曲点を細かく追随していること，トンネルアーチ部の曲線長を正確に検出していることであり，画像処理による的確な再現性がもたらしたものとされ，計測車両におけるひとつのメリットとして評価できる．なお，点検要領によればひび割れの判定区分は，進行性の有無によって分けられており，長さは，10.0m と5.0mが区分の目安となり，場合によっては過大な評価につながる可能性もある．この長さは，トンネル縦断方向であれば，1スパン全長に渡って広がったのか，その半分程度の規模か，横断方向で

あれば，アーチ部全域に渡って広がったのか，その半分程度の規模かの区分である．判定を行う際は，まずひび割れの進行性の有無，ひび割れの方向や長さ，幅，密集度等からある程度の原因も想定し，総合的に判断すべきと考える．したがってひび割れ長さの計測は，変曲点を追随した正確な長さおよび先端の位置を把握し，今後の進行性の可能性について着目することが，健全性の評価において非常に重要な手段といえる．

7. 結論

全体のひび割れ幅の誤差平均は，**表-2**のとおり+0.036mmであった．これは，室内試験結果において最小のひび割れ幅0.2mmの時の標準誤差0.065mm（**図-7**参照）を下回るものであり，精度の高い結果が得られたことと，プラス側（安全側）の傾向で検出できたことは評価できる．また計測車両では，幅0.2mm以下の小さなひび割れについては，すべて一律に0.2mmの表記（通常は0.3mm未満として区分）にしているため，検証値0.15mmと比較すると一見誤差として評価されているが，維持管理を実施していく上で同等と見て差し支えないものと判断できる．したがって，幅0.2mm以上のひび割れを的確に検出という当初目的は達成できたものと考える．

ひび割れ実測率については，異常値を除く正常値率が86.1%となり，目標値79.9%を上回る結果となった．

なお，検証後に点検を実施した際，同じひび割れにおいても，部分的に計測車両の結果に該当するひび割れ幅もいくつか確認されたことから，最終のひび割れ展開図（**図-9～12**参照）には，その結果を反映させた．

また画像から得られた照明など附属物を含めた展開図を見ると，照明，ケーブル，消火栓などの主要な附属物の位置や大きさも正確に再現されており，図面にも管理番号等を表記できることから，今後の日常的な維持管理において活用することが可能となる．こうした図面化の精度やわかりやすさの向上も計測車両の持つ大きなメリットとして評価できる．

8. 今後の課題および展望

計測車両は，これまでに近接目視点検の補足技術として多く採用されてきたが，その品質性能を証明できたことは大きな進歩といえる．しかし，今回の検証箇所は比較的新しいトンネルにもかかわらず，覆工表面の色調や汚れ，照度環境のばらつきに伴う誤差が発生することが判明した．ほとんどのトンネルが，今回以上長期に供用されていることや，今後の経年変化や劣化に伴い計測条件が悪化することが想定される．この中で，必要となる精度を確保し，点検の効率化を図っていくことが今後の課題である．

そのためには，計測実績を重ね，さらに多くのデータを蓄積しながら，性能向上を図っていくことが重要と考えられる．その手段として，計測車両のデジタルビデオカメラの性能を向上させ，最適な照明装置の機材の選定や設定方法の再検証を行うこと．さらに現状では画像を輝度分布からランダムな黒色の連続性などからひび割れを読み取っているが，数値解析ソフトを改良し，さらなるデータ蓄積に伴う学習機能や各パラメータの最適化などを図り，画像からの自動判別に伴う新たな取り組みが必要と考えられる．またひび割れ等に関連するレーザ技術の活用として，覆工表面上の段差の自動抽出方法の検討や，今後のi-Construction導入に向けて，トンネル覆工に発生しているひび割れなどの損傷箇所を．画像データとの融合を図った3次元による維持管理方針の取り組みなどが必要と考えられる．

2014年6月に点検要領[1]が改訂され，その中に，「今後調査技術者が近接目視によって行う評価と同等の評価が行えると判断できる新技術が開発された場合は，新技術の併用を妨げるものではないとし，さらに近接目視による変状の把握には限界がある場合もあるため，必要に応じて触診や打音検査を含む非破壊検査等を適用する．」との但し書きが記されている．計測車両は，画像とレーザを備えた非破壊検査技術であり，こうした条件の下，品質性能を明確にすることは，今後の点検技術の精度向上や効率化に向けて，非常に重要な位置づけであると考える．また近年レーダーを搭載した計測車両も開発されており，こうした技術との融合により浮き・はく落や背面空洞などの検出にも期待が持たれている．

現在，点検の実施状況は，前述したとおり全体数のわずか30％である．今後これまでの1.6倍以上のスピードで点検を効率的に実施していく必要がある中で，交通事故・渋滞など社会的影響，予算不足，人材不足は深刻であり，精度向上，工期短縮，コスト縮減は喫緊の課題である．

点検業務に計測車両を採用することは，機械損料や解析費などが加算されるため初期コストは上がって（10～20%程度[11]）しまうが，画像やレーザデータを用いることによって，損傷の正確な位置情報や形状を早期に把握することで応急措置などへの対応が可能となる．またデータを蓄積することで将来的な点検において，近接目視や打音検査の効率化(無駄なく見落としがなくなる)が図られ，工期短縮，交通規制費，間接費等の抑制[11]にもつながり，回数を重ねるごとに定着化し，トータルコストも減少していくものと期待できる．

謝辞：今回のトンネル走行型計測の検証にあたり，フィールド提供および検証の協力をいただいた国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所，並びに画像撮影，第

三者による近接目視，室内試験の実施に協力いただいた計測検査(株)，日本ミクニヤ(株)，関西大学環境都市工学部大西研究室の皆様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) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報 2015, 2015.
3) 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. 2-1～6-13, 2013.
4) 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究，土木学会論文集 F2（地下空間研究），Vol. 71, No. 1, pp. 20-30, 2015.
5) 大村平：統計解析のはなし，pp. 16-52，日科技連出版社，1996.
6) 平山宏之：計測と誤差，電学論 A, 110 巻 5 号，pp. 295-301, 1990.
7) 田嶋和樹，白井伸明，渡部憲：コンクリートのひび割れ幅の計測と予測, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 145-150, 2004.
8) 庄野昭，齋藤淳：コンクリート表面のひび割れ評価方法，ハザマ研究年報，pp. 1-6, 2009.
9) 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の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.
10) 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.
11) 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.
12) 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.
13) 小山哲，丸屋剛，堀口賢一，澤建男：カーボンウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発，土木学会論文集 E2, Vol. 68, No. 3, pp. 178-194, 2012.
14) 公益社団法人日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧（本体工編）pp. 201-204, 2015.

(2016. 10.17 受付)

INSPECTION OF THE CRACK MEASUREMENT OF THE ROAD TUNNEL BY MOBILE IMAGING TECHNOLOGY

Takashi MIZUGUCHI, Yuzo OHNISHI, Koichiro TOKUDA, Satoshi NISHIYAMA and Katsunobu ISHIMURA

Because road tunnel inspection manual was revised in June, 2014, the periodic inspection once in five years was required. There are many road tunnels of 11,000 in Japan, development of inspection technology, and securing of talented person becomes important. As an inspection robot technology, MIMM (Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System) attracts attention now. In this research, we weighed MIMM measurement result against a proximity viewing result in a real tunnel and carried out the quality inspection of the crack.

トンネル維持管理のための ひびわれ幅の画像計測手法の研究

廣田　彰久[1]・西山　哲[2]・水口　尚司[3]・石村　勝伸[4]

[1]学生会員　岡山大学大学院　環境生命科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1）
E-mail:pxhy5vnf@s.okayama-u.ac.jp

[2]正会員　岡山大学教授　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

[3]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

[4]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

本研究は，トンネルの覆工コンクリート表面に生じたひびわれ幅の変化を写真撮影という簡便な方法によって計測しようというものである．計測においては，反射ターゲットをトンネル壁面に発生したひびわれ両側に基準尺として2枚設置した．そしてひびわれとともに1枚の画像として撮影し，ターゲットの2次元座標を計算することにより，ひびわれ幅の変化を計測することを可能とした．本研究では反射ターゲットを用いたひびわれ幅計測手法の研究成果を報告する．さらに，実際の道路トンネルに対して本計測手法を適用し，その計測結果についても示す．

Key Words : *tunnel maintenance, digital photogrammetry, crack, image processing*

1. 緒言

道路トンネル定期点検要領[1]（以下点検要領という）が平成 26 年 6 月に道路法の一部改正によって改訂された．道路トンネルは全国で約 10 878 本存在している[2]が，これらを 5 年に 1 度の頻度で定期点検を実施する必要があり，適切な点検技術の開発や人員体制の確保等が急務となっている．改訂された点検要領の主な内容と判定区分をそれぞれ**表-1** と**表-2** に示す．これらの情報から現在のトンネルマネジメント手法の問題点として，次のようなことが挙げられる．

1)現在の定期点検は 5 年に 1 度の頻度で近接目視により実施されており，技術者の人材不足や質の低下，また技術者による判断のばらつきといった問題
2)点検および調査の作業が集中的に実施されることもあり，道路規制に伴う交通渋滞やそれに伴った事故の発生といった問題
3)点検作業による点検費用や道路規制による社会的損失費用が生じること[3]
4)トンネルの変状は外力や材質劣化など様々な要因が重なって発生しているが，現状ではこれら変状要因を把握することに時間がかかり，効率的で速やかな診断，マネジメントを実施することができていない

また，現在実施されている目視点検はひびわれ，浮き，はく離，漏水などの変状を確認しているが，特にひびわれの幅は，直接クラックスケールを当てて目盛りを読み取り，記録，変位量を確認することとなっている．その他，ひびわれ両側にピンなどを打ち，その間隔をノギス等で計測するなどの方法がある．しかし，これら近接目視点検の問題点は上記に加え，次のようなものがある．

1)暗い坑内で汚れた壁面の点検作業のため，変状を見落とす可能性があること[3]
2)点検者の経験的な判断に依存するところが大きいため，判定結果に人的誤差が生じる可能性があること[3), 4]
3)コンクリートの温度変化による熱膨張の影響を変位したと読み取る可能性がある

これらの課題に対応する点検技術として，トンネル走行型計測技術が提案されている[5), 6]．この技術は**図-1**に示すように，トラックにデジタルビデオカメラおよびレーザを搭載し，一定の速度で走行する．そしてデジタル

表-1　点検要領の主な項目とその内容

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	最長で5年に1回
体制	定期点検の適正な実施のために必要な知識及び技能を有する者が実施（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
点検方法	基本として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：メスシリンダー等により測定 打音：所定のハンマーで確認（初回は全面検査）
着網箇所	目地および打ち継ぎ目，覆工の天端・スパンの中央付近，ひびわれ箇所，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

表-2　点検要領の主な項目とその内容

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

ビデオカメラにより覆工コンクリート表面のひびわれ，漏水，材質不良箇所を画像撮影によって把握，また3次元レーザ計測により覆工コンクリート表面の凹凸や覆工内面形状の座標データを取得する，といったものである．**図-2**に走行型計測技術の計測データの例を示す．画像計測により，ひびわれを抽出し（灰色部分），ひびわれ幅の大きさ毎に色分けする（代表例として赤と青で塗った部分を示した）．またレーザ計測によりトンネルの変形パターンを推測している．赤色が内側へ，青色が外側への変形を表している．これにより，ひびわれ箇所のスクリーニングを画像から行うことができ，またレーザデータから外力作用が発生している点等を推定できることから，随時モニタリングが必要なひびわれ箇所を抽出できる．

図-1　走行型計測車両の概要

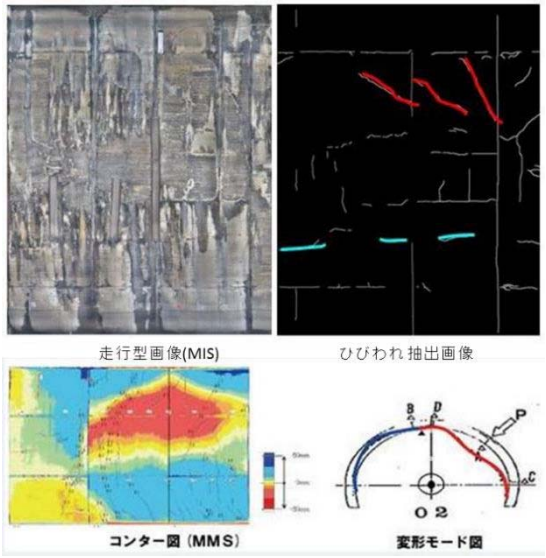


図-2　走行型計測技術の計測データの例

次にひびわれの進行性をモニタリングするにあたり重要なのは，その変化量をいかに高精度に計測するかである．現在，ひびわれの変化量を計測する手法はいくつか存在するが，最も一般的なのは目視点検である．しかし，目視点検には先述したような課題を有している．これらの背景を踏まえ，ひび割れ幅のモニタリング技術として本研究では，反射ターゲットを利用したひびわれ幅の変化を定量的に計測する画像計測手法について記述する．単写真測量の一種である本計測手法は，任意の撮影位置から撮影した1枚のデジタル画像を用いて計測を行う．また写真撮影という簡便な方法で計測が可能であるため，技術の導入が容易，さらにデジタルデータのため客観性，再現性に優れているなどの利点を有する[7]．

本計測手法は，画像上のひびわれ幅の変化を計測するものである．そのため，ひびわれの両側に基準尺としてガラスビーズ製の反射材を用いた反射ターゲットを2枚設置する．そして任意の撮影位置から，ターゲットを写しこむように撮影し，得られた画像上のターゲットの座

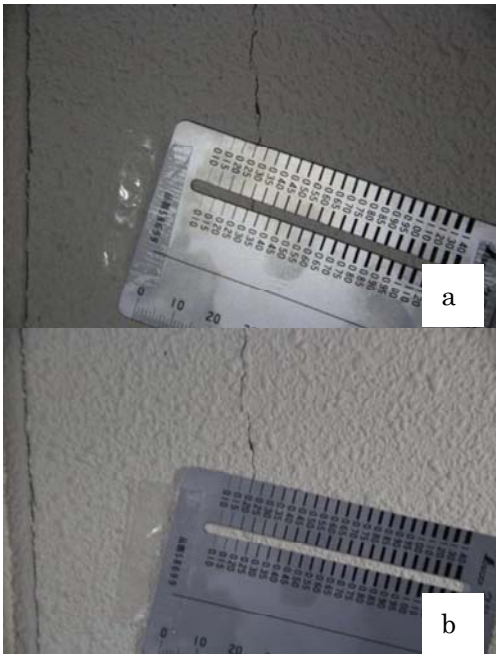


図-3 ひかりの当て方によるひびわれ幅の計測誤差
a)は正面から，b)は斜めから光を当てた

標を計算することで，ひびわれ幅の変化量を計測する．

走行型計測技術を用いることでひびわれ発生箇所を抽出し，随時モニタリング対象となるひびわれを本計測手法により効率的にモニタリングすることで，効率的なトンネル点検の実施が可能となる．本論文では，実際のトンネルのひびわれ幅計測に適用する際の計測精度に関係すると考えられるパラメータに関して検証実験を実施し，実トンネルへの適用事例を紹介する．

2. 計測手順と基本理論

本章では，計測手法の手順およびその基本理論について記述する．先述したとおり，現在のひびわれ幅の計測には近接目視によりクラックスケールやノギス等を用いて計測するが，点検員の経験に基づいた判断に委ねられているため，読取誤差が発生する．**図-3**に個人的誤差の例を示す．同一のひびわれに対して光を正面から当てて計測を行った場合と，斜めから光を当てて計測を行った場合において計測を行った．光を正面から当てた場合，計測値は0.25mmを示しているが，斜めから光を当てた場合には0.20mmを示している．このように同じひびわれに対して計測を実施しても，照明の角度によってひびわれの見え方が変わってしまうために，その計測値は異なってしまう．これらの個人的誤差を低減するために，本計測手法では反射ターゲットを用いる．まずターゲットを2枚一組で計測対象となるひびわれ両側に設置する．このターゲット上には4つの真円が正確な間隔で配置さ

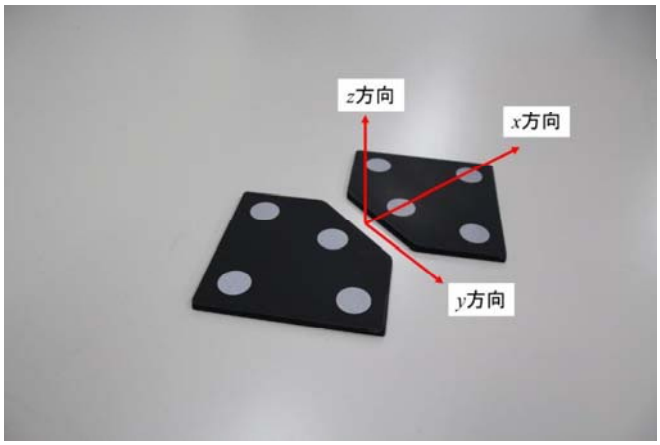


図-4 本計測手法に用いる反射ターゲット

れており，基準尺としての役割の他，後述する射影変換式の未知パラメータを決定する際の既知座標としての役割を果たす．ひびわれの両側に設置された当ターゲット上の円の重心間距離を計測することにより，ひびわれ幅の変化を評価する．

(1) 計測手順

本計測手法の計測手順は以下のとおりである．

1)ひびわれを挟んで反射ターゲットを設置する．反射ターゲットはガラス製で，トンネル等の暗所においてもカメラのフラッシュ光により計測を可能とした．

2)射影変換処理により任意の位置から撮影した画像を正対位置から撮影した画像に変換する．

3)変換後の画像を用いてひびわれ両側のターゲット円上の2次元重心座標を算出する．

4)重心間距離を計測し，前回計測時の重心間距離からのひびわれ幅の変化量を計算し，その変化量について評価する．

(2) 基本理論

本手法においてターゲット円の重心座標が唯一の観測値であるため，高精度で計測するには円の2次元重心座標の読取精度をいかに高めるかが重要となる[8]．円の重心計算はカメラのフラッシュ光を反射する強度である明度分布より算出する．円の重心計算は，この明度分布を用いて2値化処理の後に算出される．256段階ある明度から適当な閾値を定め，閾値以下の明度は0，閾値以上の明度については明度を重みとして，以下の式（1）および式（2）を用いて面積重心計算を行う．

$$x = x_0 + a_x \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(q(i,j)\times x_{ij})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} q(i,j)} \quad (1)$$

$$y = y_0 + a_y \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(q(i,j)\times y_{ij})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} q(i,j)} \quad (2)$$

ここで，(x_0,y_0)は重心計算範囲の原点，(a_x,a_y)はそれぞれの画素サイズ，$q(i,j)$は画素(i,j)の明度である．

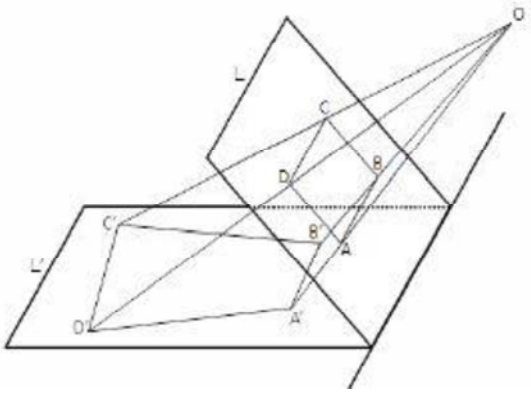


図-5　射影変換の概念

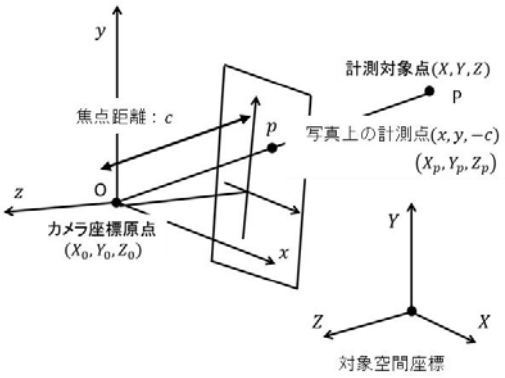


図-6　共線条件の概念

続いて射影変換により元画像を修正，変換する．射影変換とは図-5に示すように，ある平面L上にある点(x,y)が投影中心Oに関して，他の平面L'上の点(x',y')に投影されるような変換をいう．本計測手法においては「任意の位置から撮影した画像を正対した位置からとらえた画像に変換する」技術を指す．計測対象点，その画像上の点およびカメラレンズ中心の幾何学的関係を図-6に示す．像の反転をなくすため，画像面は対象物側に描いている．計測対象点$\mathrm{P}(\mathrm{X}, Y, \mathrm{Z})$から出た光は，レンズ中心であるカメラ座標の原点を通ることとなる．そして画像面上に像pを作る．そして，これらは一直線上に存在する．このとき，対象空間座標系からみた画像上の像pの座標(X_p, Y_p, Z_p)とカメラ座標系からみた像pの座標$(x, y, -c)$の関係は次のように表せる．

$$x = -\frac{\mathrm{c}}{Z_p} X_p \tag{3}$$

ここで，cはカメラレンズの焦点距離を表す．次にカメラ座標系と対象空間座標系の関係について述べる．カメラ座標系での座標X_pと対象空間座標系での座標Xは座標軸の回転を表すMとレンズ中心を対象空間座標系で表した座標X_0を用いて次のようにできる．

$$MX_p = (X - X_0) \tag{4}$$

座標系の回転は，傾いていないカメラ座標系を基準として，y軸をα，x軸をβ，z軸をγだけ右回りに回転させた任意に傾いたカメラ座標軸をとったとすると，回転行列Mは次のようになる．

$$M = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

この行列は直行行列なので次のようにできる．

$$x = M^t(X - X_0) \tag{6}$$

回転行列の成分を$\mathrm{m_{ij}}$とすると次のように書き下せる．

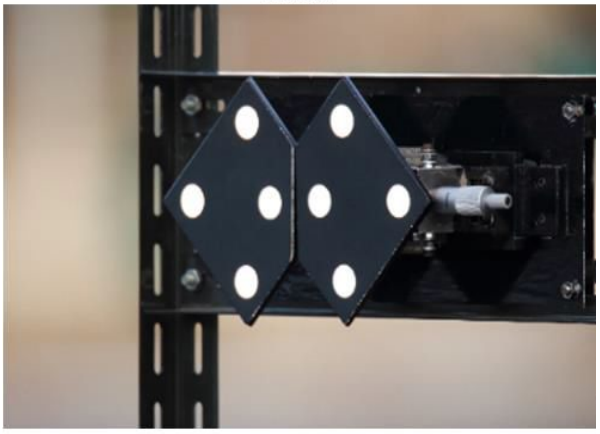
$$x = -c\frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \tag{7}$$

$$y = -c\frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \tag{8}$$

これより，測定対象面が平面であると仮定すれば，次のような射影変換式が得られ[9]，図-7のように画像を正対化し計測する．

$$x = \frac{h_1 X + h_2 Y + h_3}{h_7 X + h_8 Y + 1} \tag{9}$$

変換前



変換後

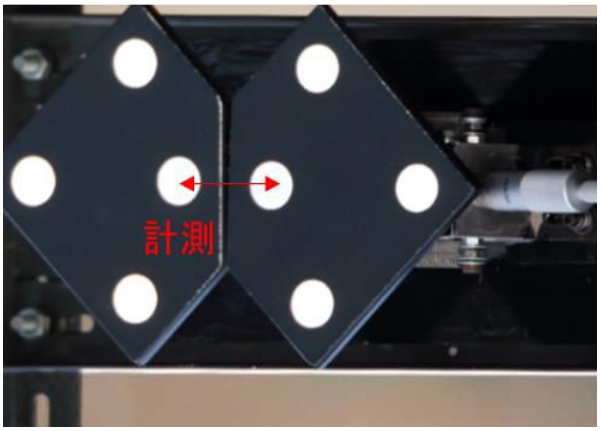


図-7　射影変換技術による画像の正対化と計測部分

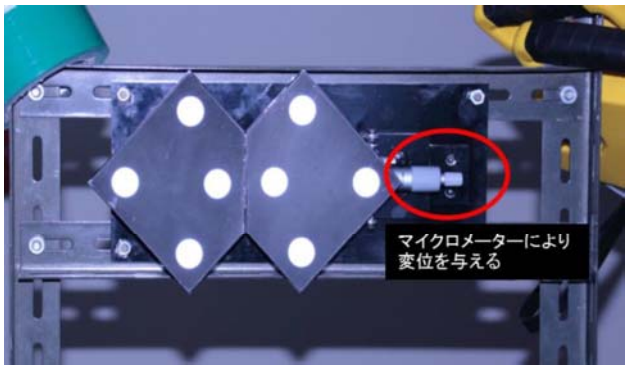


図-8　マイクロメーター付き変位装置

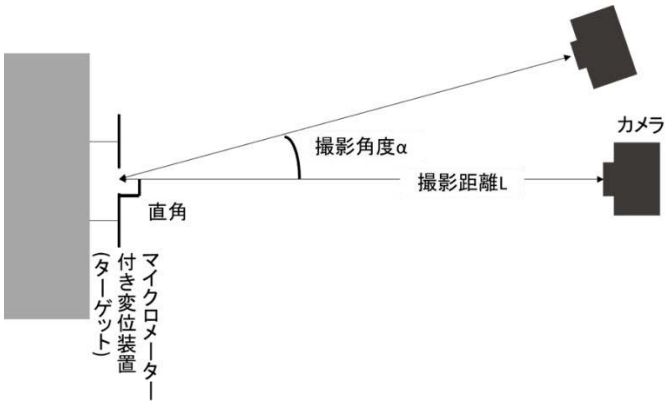


図-9　撮影距離および撮影角度の定義

$$y = \frac{h_4 X + h_5 Y + h_6}{h_7 X + h_8 Y + 1} \tag{10}$$

この射影変換式には8つの未知係数が存在し，それらに対して4点の基準点の測定値の組(X_i,Y_i) $(i=1\sim4)$と変換後の写真座標(x,y)から連立方程式を立てて，それを解くことにより求められる．したがって本研究では，ターゲットには4つの真円が正確な間隔で配置されている．

最後に，ひびわれの両側のターゲット円の重心間距離を計算し，前回計測時からの重心間距離の変化を計算することによりひびわれ幅の変化を評価する．

3.　精度の検証実験

計測精度に影響を与える要因としては，撮影距離および撮影角度が考えられる[10]．各要因と計測精度の関係性を明確にすることで本手法の実用性を検討し，計測現場での撮影条件により計測精度が予測可能となる．そこで検証実験として室内実験を実施し，各要因と精度の検証を行った．

実験方法は，2枚の反射ターゲットのうち1枚は固定し，もう一方を0.2mm単位で1.0mmまでマイクロメーターを用いて変位させる（図-8参照）．撮影距離および撮影角度は図-9に示すように定義した．また本研究の計測精度の評価には，「系統誤差」と「偶然誤差」を定義した．マイクロメーター変位量を真値とみなすと，解析変位量とマイクロメーター変位量の差を誤差と定義できる．系統誤差はこの誤差の平均値を表しており，系統誤差が小さいほど計測の「正確性」が高いことを表す．一方，偶然誤差はこの誤差のばらつき度合いを表し，偶然誤差が小さいほど計測の「精密性」が高いことを表す．この2種類をもって計測精度とした．

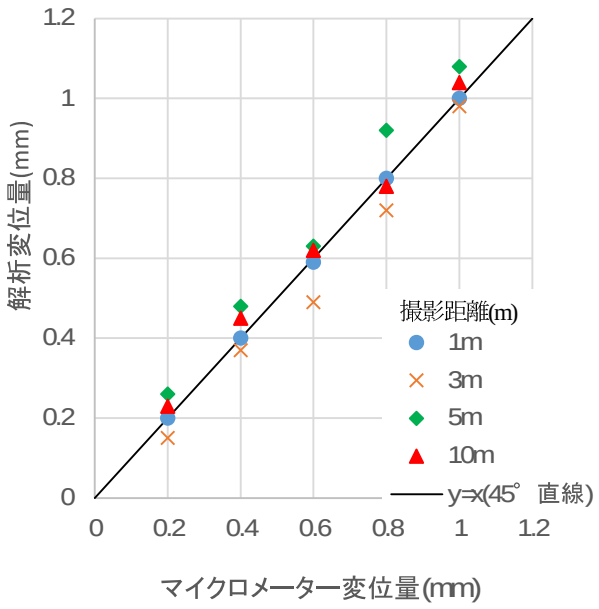


図-10　撮影距離における計測結果

表-3　撮影距離と計測精度

撮影距離	1m	3m	5m	10m
直径ピクセル数(pixel)	124	45	24	48
系統誤差(mm)	0.00	0.06	0.07	0.03
偶然誤差(mm)	0.00	0.04	0.03	0.01

(1)　撮影距離

撮影距離が大きくなると画像上のターゲット円は小さくなるため，画像上のターゲット円のスケール，つまりターゲット円の直径のピクセル数が減少する．したがって，本節では撮影距離と計測精度の関係を室内実験により検証する．撮影角度は0°　（正対位置）で一定とした．計測対象部分までの撮影距離は10mを上限として実験を実施した．実験機器として使用したカメラは，1800万画素デジタル一眼レフカメラ，カメラレンズは焦点距離が50mm（撮影距離が1~5m時に使用），250mm（撮影距離が10m時に使用）の2種類を用意し，ターゲットのサイズは55mm×55mmのものを使用した．変位量は，初期値取りをした後，0.2mmずつ1.0mmまで変位を与えた．与

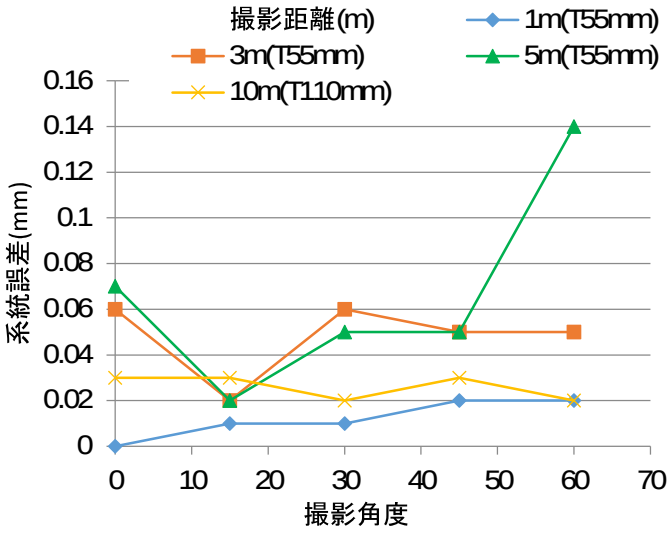


図-11　撮影角度と系統誤差の関係

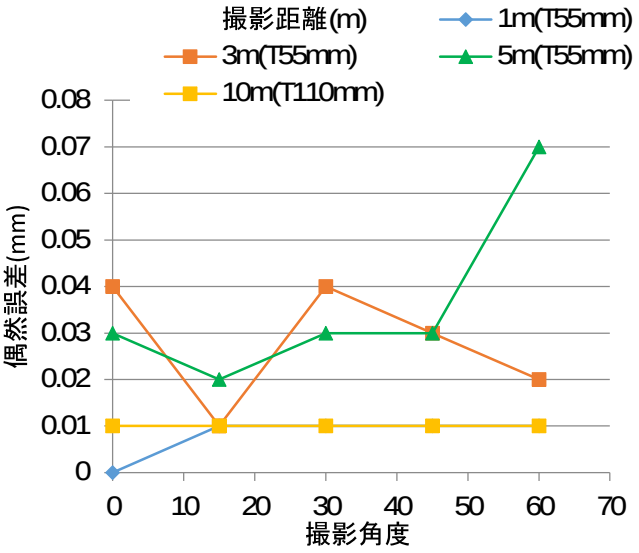


図-12　撮影角度と偶然誤差の関係

表-4　撮影距離1m時の撮影角度と計測精度

撮影角度	0°	15°	30°	45°	60°
系統誤差(mm)	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
偶然誤差(mm)	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01

えた変位量とそれに対する計測値の関係を図-10に，撮影距離別に誤差をまとめたものを表-3に示す．この結果，計測精度は撮影距離に依存することがわかる．また撮影距離が1mでは計測精度が0.00mmと高精度での計測が可能であることがわかった．また撮影距離が大きくなった場合は，カメラレンズの焦点距離を大きくすることで撮影距離が10mにおいて計測精度が向上している．精度低下要因と計測精度の向上については(3)節において記述する．

(2)　撮影角度

次に，撮影角度と精度の関係性について検証を行った．撮影角度が大きくなると計測精度は低下する．本研究で用いている画像処理技術の 1 つである射影変換は，任意の撮影角度から撮影された画像を正対した画像に変換する技術であり，これによって撮影精度の低下を防ぐことを目的としている．本節では，この射影変換の有用性を室内試験より検証した．

実験の概要であるが，1800 万画素デジタル一眼レフカメラと焦点距離 50mm（撮影距離が 1m，3m，5m 時に使用），250mm（撮影距離が 10m 時に使用）のレンズを使用し，撮影角度を 0°（正対位置）から 15°ずつ 60°まで変化させた．なお，ターゲットサイズは焦点距離 50mm レンズで 55mm×55mm（T55mm）のものを，焦点距離 250mm レンズで 110mm×110mm（T110mm）のものを使用した．変位量は初期値取りをした後，0.2mm ずつ 1.0mm まで与えた．その結果を図-11 および図-12 に，また撮影距離 1m における撮影角度別の計測精度を表-4 に示す．撮影距離および撮影角度が大きくなるにつれ，計測精度は低下する．撮影距離 1m においては，撮影角度 60°においても正面から計測した場合と比較しても，ほとんど精度の低下は見られない．撮影距離が 5m 時において精度は低下していくが，カメラレンズの焦点距離が 50mm であったことから，焦点距離を 250mm に大きくする，ターゲットサイズを大きくすることにより，撮影距離が 10m においても計測精度が向上している．以上の結果を鑑みると，撮影角度に依存することなく計測を可能とする射影変換技術は，一定の効果を示しているといえる．精度低下要因については，次節で記述する．

(3)　精度低下要因と実験結果のまとめ

以上の実験結果から，撮影距離が10mまでの計測において0.1mm以内の計測精度という結果が得られた．また射影変換技術を用いることにより，撮影距離1m，撮影角度が60°においてもほとんど精度は低下せず，射影変換技術の有用性が示された．また撮影距離・角度が大きくなると計測精度は低下していく．これには表-3で示したとおり，撮影距離が大きくなると直径ピクセル数が少なくなる．直径ピクセル数の減少により，画像上のターゲット円の解像度は低下する（図-13参照）．そのため，ターゲット円の重心の読み取り誤差が大きくなり，誤差が拡大したと考えられる．この影響を低減するには，ターゲットサイズ，カメラレンズの焦点距離を大きくすることやカメラの画素数を増やし画像上のターゲットを細かいピクセルで表現すること，などが挙げられる．これ

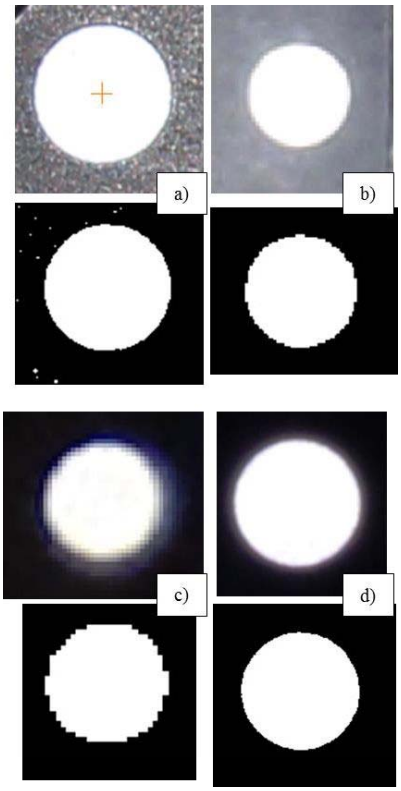


図-13　ターゲット円の解像度の違いとその2値化画像. a)は撮影距離1m，b)は撮影距離3m，c)は撮影距離5m，d)は撮影距離10mである

により画像上のターゲット円を大きく写すことができ，解像度の低下を抑え，計測精度は向上すると考えられる．

(4)　本計測手法と既存手法の比較[11)]

次に，目視点検と本計測手法の比較を行った．今回はひびわれを跨いでその幅を計測するノギスを用いたひびわれ幅を計測する手法と本計測手法の計測精度について検証を行った．その結果を**図-14**に示す．横軸にノギスにより計測した変位量を，縦軸に本計測手法により計測した変異量をとっている．

この結果から，両計測手法により計測した変位量は強い相関を持っていることから，本計測手法は既存の計測手法の代替として活用できると考える．

4.　現場適用例

本計測手法を実際のトンネルに適用した具体例を示す．今回本手法を適用したトンネルは，片側1車線の道路トンネルである．矢板工法により建設され，完成年度は昭和39年である．最初にMIMMによりひびわれの発生箇所，変状箇所を確認した後，ひびわれの進展性について確認するため，モニタリングとなる対象ひびわれを2箇所選

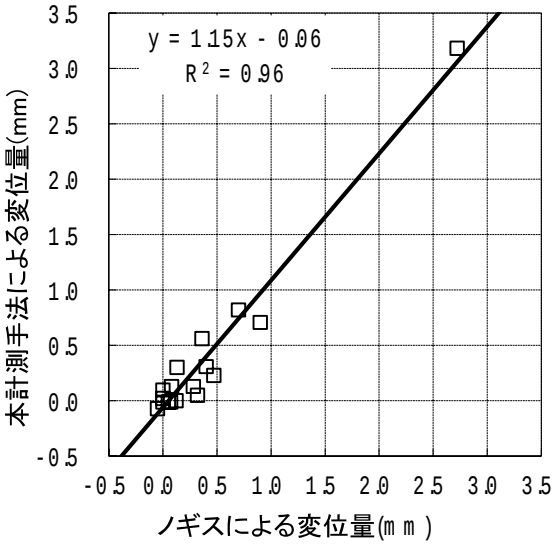


図-14　ノギスと本計測手法による相関

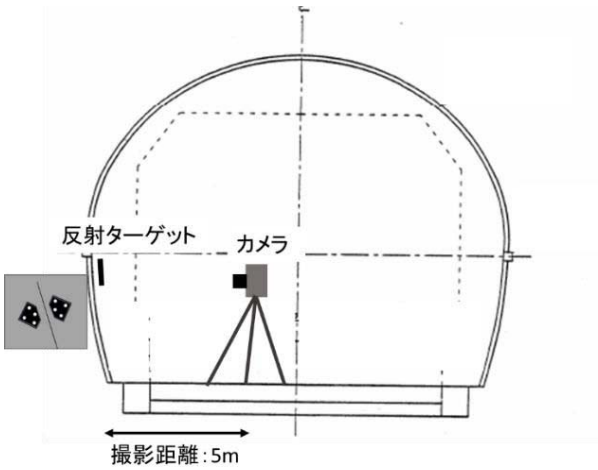


図-15　撮影位置のイメージ図

定し反射ターゲットを設置した．これらの情報を**図-15**に示す．本現場では，走行型計測による計測結果に基づき，近接目視点検を実施している．計測対象ひびわれは，ともにトンネル中央部側壁に発生しており，設置以前に実施されていた目視点検での顕著な進展は見受けられなかった．また計測対象点では，湧水等は確認されていない．

まず走行型計測および目視点検を実施した．これにより得られたコンター図を**図-16**に，変状展開図を**図-17**に示す．コンター図から側方部から局所的な変形が見られた．またスパン内において走行型計測および目視点検結果からひびわれ幅が最大であったことより，**図-17**の変状展開図に示す位置にターゲットを設置し，それぞれNo.1，No.2とした．そして本計測手法を適用し，モニタリングを実施した．計測は2015年10月と2016年1月の2回である．**図-18**および**図-19**に実際のトンネル現場に設置したターゲットを示す．計測では，撮影距離が5mにお

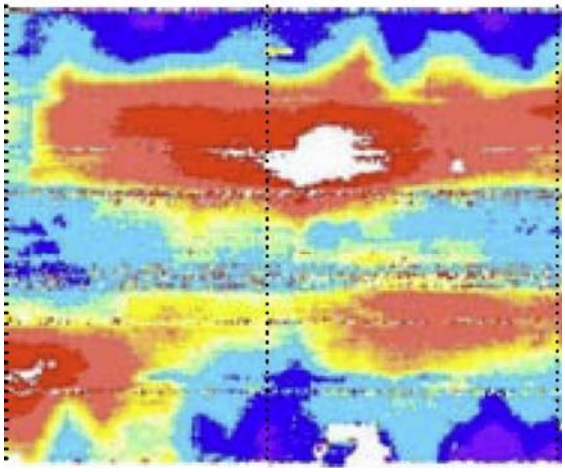


図-16　計測現場におけるコンター図

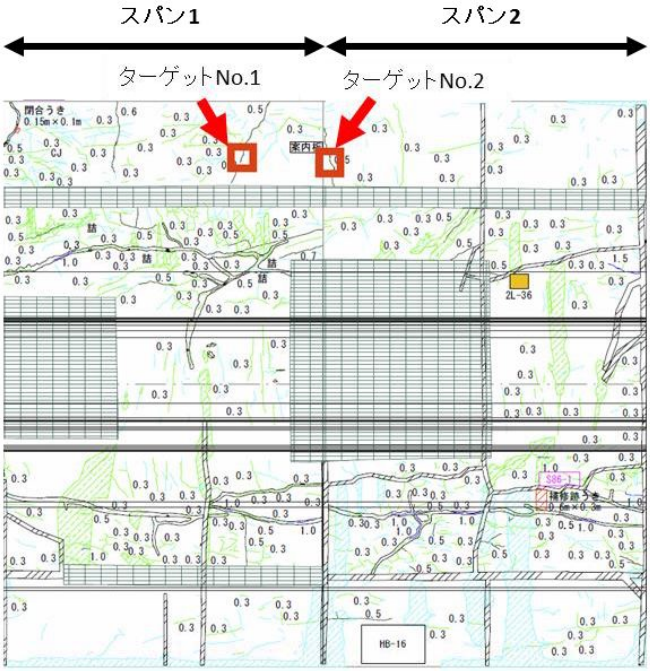


図-17　ターゲット設置場所の変状展開図

いて直径ピクセル数を30pixel以上確保するため，ターゲットサイズ55mm×55mm，カメラの画素数は2400万画素，カメラレンズの焦点距離を300mmの条件で計測した．**表-5**に過去の計測結果を示す．2015年10月計測時は初期値取りを行ったため，目視点検結果より0.5mmと記述している．撮影距離は5m以内であったことから，計測精度は0.1mm以内の高精度での計測となっている．このように我々の計測手法を用いて，ひびわれ幅の変化を定量的に確認することが可能であることが示された．計測回数が少ないことから，今後，継続して計測を行う予定である．

5.　結論

本研究は，デジタル画像を用いたひびわれ幅の変化を

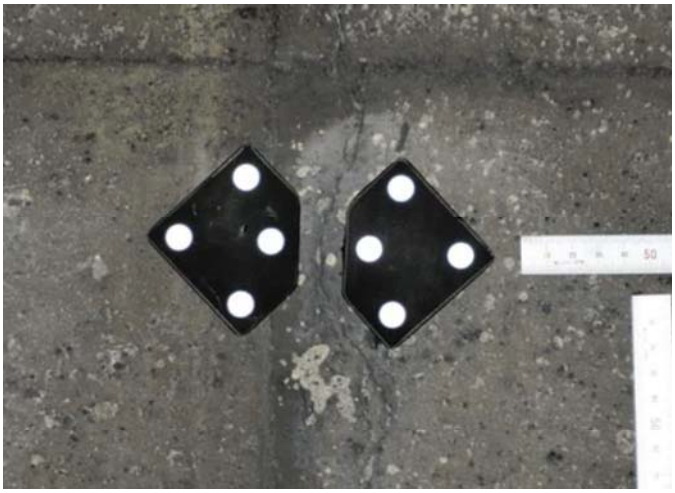


図-18　現場に設置した反射ターゲット（No.1）

図-19　現場に設置した反射ターゲット（No.2）

表-5　実トンネルにおける計測対象点の本手法計測結果（単位：mm），2015年10月計測時は初期値取りのため，目視点検結果を表示している

	2015年10月	2016年1月
No.1	0.5	0.62
No.2	0.5	0.79

モニタリングするための技術を開発し，その実用性を検証し，実際のトンネルに適用した結果を記述したものである．本手法の特徴は，反射ターゲットを計測対象となるひびわれ箇所に設置し，任意の撮影位置から計測を行うことができる点である．以下に検証実験および実トンネルを対象とした計測結果によって得られた知見を示す．

1)走行型計測技術（MIMM）との組み合わせにより，効率的なひびわれ計測技術の確立を図った．

2)撮影距離が10m以内であれば，1800万画素のデジタルカメラを用いることで0.1mm以内の精度でひびわれ幅

の変化を検出することが可能である.

3)画像処理技術の一つである射影変換を用いることにより，ターゲットの正対位置から角度が60°ある場合においても計測を十分に行うことができる.

4)走行型計測技術によりひびわれ箇所および変状箇所を抽出することで変状状況をいち早く正確に把握し，本計測手法を用いることで随時モニタリングができる.

5)実際のトンネルにおいても，ひびわれ幅の変化を高精度で確認することができた.

本計測手法により，近接目視計測における問題点を解決し，簡易ながらも高精度に定量的なひびわれ幅の変化量を計測する技術として期待できる．また走行型計測技術と本手法を組み合わせることにより，トンネル点検を効率的に実施し，長期的な監視を簡便で定量的に実施することができ，走行型計測技術により外力が作用しているかなどを推定することができることから，健全性評価を行うことが可能になると考える.

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) 国土交通省：道路メンテナンス年報 2015，p.3，2015.
3) 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.391-400，2007.9
4) 佐野信夫，伊藤哲男，馬場弘二，西村和夫，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.558-566，2006.9.
5) 水口尚司，大西有三，西山哲，西川啓一，下澤正道，石村勝伸：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，土木学会論文集 F2（地下空間研究）71(1)，pp.20-30，2015
6) 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～pp.5-11，2013.
7) 龍明治，大西有三，西山哲，中井卓巳：デジタル画像計測による斜面モニタリングシステムの研究，地盤工学ジャーナル，Vol.3，No.2，pp.109-119，2008
8) Franklin，J.A. and Dusseault，M.B.：*Rock Engineering*，p.296，Mc Graw Hill，1989
9) 日本写真測量学会，動体計測研究会：デジタル写真測量の理論と実践，pp.34-43，2004
10) 壺阪知広，西山哲，矢野隆夫，菊地輝行：デジタル画像を用いたひびわれ幅計測システムの研究，土木学会第 69 回年次学術講演会論文集，VI-502，2014.
11) 菊地輝行，秦野輝儀：画像計測法のクラック幅計測への適用，日本応用地質学会研究発表会後援論文集，p.18，2012.

(2016. 5. 16 受付)

MEASUREMENT OF CRACK WIDTH USING DIGITAL PHOTOGRAMMETRY FOR EVALUATION OF THE STABILITY OF TUNNEL

Akihisa HIROTA, Satoshi NISHIYAMA, Takashi MIZUGUCHI and Katsunobu ISHIMURA

The objective of the study is to measure the displacement of the crack by using a digital camera image. In this measurement technique proposed here, the reflective targets are installed at the measurement point around the crack as gauges and the digital image of reflective targets is subjected to process which consists of image processing and photogrammetry, and the two dimensional displacement of the crack is calculated based on the coordinates of reflective targets. In this paper, experiments were performed to verify the accuracy and precision of the measurement. This paper also showed the actual tunnel measurement results to demonstrate that the cracks on the tunnel wall by using this method.

参考資料-2　実トンネルの点検記録様式事例

従来リスト

点検表記録様式リスト

様式番号	記録内容	
様式Ａ－１	トンネル台帳	トンネル諸元，非常用施設諸元
様式Ａ－２		トンネル情報一覧表
様式Ａ－３		トンネル記録（位置図，断面図，施工実績他）
様式Ｂ	点検調書	トンネル変状・異常箇所写真位置図
様式Ｃ－１－１		点検結果総括表（トンネル本体工）
様式Ｃ－１－２		点検結果総括表（トンネル内附属物の取付状態）
様式Ｃ－２		調査・措置の履歴
様式Ｄ－１		変状写真台帳
様式Ｄ－２		トンネル全体変状展開図
様式Ｄ－３		覆工スパン別変状詳細展開図
様式Ｅ－１	診断調書	診断結果（変状単位）
様式Ｅ－２		診断結果（覆工スパン毎，トンネル毎）

走行型計測車両を活用したリスト

点検表記録様式リスト

様式番号	記録内容	
様式Ａ－１	トンネル台帳	トンネル諸元，非常用施設諸元
様式Ａ－２		トンネル情報一覧表
様式Ａ－３		トンネル記録（位置図，断面図，施工実績他）
様式Ｂ	点検調書	トンネル変状・異常箇所写真位置図
様式Ｃ－１－１		点検結果総括表（トンネル本体工）
様式Ｃ－１－２		点検結果総括表（トンネル内附属物の取付状態）
様式Ｃ－１－３		点検結果一覧表（トンネル内附属物の取付状態）
様式Ｃ－２		調査・措置の履歴
様式Ｄ－１－１		変状写真台帳（トンネル本体工）
様式Ｄ－１－２		変状写真台帳（トンネル附属物）
様式Ｄ－２－１		トンネル全体変状展開図
様式Ｄ－２－２		トンネル全体コンター図
様式Ｄ－２－３		トンネル全体変状コンター図(パネル毎コンター図)
様式Ｄ－３		覆工スパン別変状詳細展開図
様式Ｅ－１	診断調書	診断結果（変状単位）
様式Ｅ－２		診断結果（覆工スパン毎，トンネル毎）

■トンネル台帳　【様式Ａ－１】

フリガナ / 名　称		路線名		管理者名		緊急輸送道路	一次
						代替路の有無	有り
所在地 自		作成者		作成年月日		トンネル延長	L=　m
所在地 至						ﾄﾝﾈﾙの分類	陸上【山岳(ＮＡＴＭ)】

起点	緯度		
	経度		
終点	緯度		
	経度		
一般有料区分		一般（無料）	
土かぶり			m
内空断面積		70.2	m2
交 通 量		20,700	台/日
幅員	道 路 幅	9.5	m
	車 道 幅	7.0	m
		2.5	m
	歩道等幅		m
高さ	建築限界高	4.5	m
	中央高	6.38	m
	有効高	5.3	m
線形	縦断勾配	1.4%(上り)	
	直線区間長	600m	
	曲線区間 区間長	580m	
	曲線区間 起点側ｸﾛｿｲﾄﾞ	1100m	
	曲線区間 曲線半径	2500m	
	曲線区間 終点側ｸﾛｿｲﾄﾞ	1100m	
トンネル工法		全断面ショートベンチカット工法	

完成年月日			平成　年	
供用年月日			平成　年	
トンネル等級			AA	
内装種類			吹付（内装なし）	
天井板種類			吹付（内装なし）	
坑門	起点	形式	面壁+突出型	
		延長	16	m
	終点	形式	面壁+突出型	
		延長	14	m
竣工巻厚	アーチ		30	cm
	側　壁		30	cm
				cm
	インバート		50	cm
半径	アーチ		615	cm
	側　壁		615	cm
	インバート		1600	cm

占用物件 種　類	寸　法	管理者名	更新年次

舗装	種　別	コンクリート系
	厚　さ	0.4　m
	面　積	11950 ㎡
	更新年次	
排水	種　別	
	更新年次	

施設		種別・方式	個数	更新年次
	照明	ナトリウム灯		
	換気	縦流式（ジェットファン）	9	
道路附属物等	標識		*	
	警報表示板		*	
	吸音板		*	
	誘導表示板		*	

トンネル非常用施設	施設の内訳	個数	型式	更新年度
通報装置	非常電話	16		
	押ボタン式通報装置	59		
	火災検知器	126		
非常警報装置	警報表示板	8	NHL1形	
	点 滅 灯	8		
	音信号発生器	2		
消火設備	消 火 器	59	ABC	
	消 火 栓	59	AB	
避難誘導設備	誘導表示板	32	KA-0.4×1.2	
	排煙設備	*		
	避難通路	*		
その他の設備	給 水 栓	2	16K	
	無線通信補助設備	2	NZK-103	
	ラジオ再放送設備	1	SNS-400-0083	
	拡声放送設備	*		
	水噴霧設備	*		
	監視装置(ＣＣＴＶ)	23	ND-7379	
	非常用電源設備	*		
その他	非常駐車帯	6		
	方向転換所	*		

※緯度・経度については0.1″単位まで記入することとする。

■トンネル台帳　トンネル情報一覧表　【様式Ａ－2】

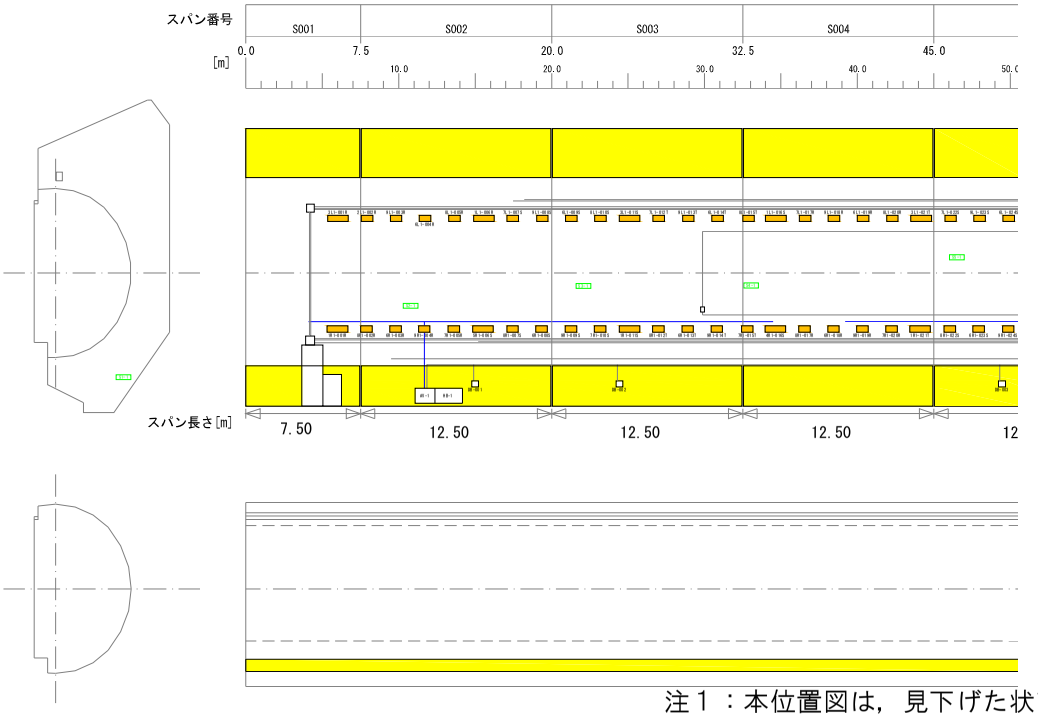
フリガナ 名　称		路線名 管理者名		作成者		作成年月日	

覆工スパン番号	スパン長 (m)	追加距離		トンネル本体工			照明施設			非常用施設								換気施設						その他附属物等
		起点側 (m)	終点側 (m)	特記事項	内装板	天井板	基本照明	入口出口照明	特記事項	非常電話	押ボタン通報装置	消火器	消火栓	警報表示板	誘導表示板	監視装置	特記事項	JF	VI計	CO計	風向風速計	特記事項	
S001	7.50	0.0	7.5	坑門（面壁型）			○																
S002	12.50	7.5	20.0				○				○	○	○										
S003	12.50	20.0	32.5				○																
S004	12.50	32.5	45.0				○																
S005	12.50	45.0	57.5				○																
S006	12.40	57.5	69.9				○				○	○	○										
S007	12.40	69.9	82.3				○																
S008	12.50	82.3	94.8				○																
S009	12.50	94.8	107.3				○																
S010	12.50	107.3	119.8				○				○	○	○										
S011	12.50	119.8	132.3				○																
S012	12.50	132.3	144.8				○											○					
S013	12.50	144.8	157.3				○																
S014	12.50	157.3	169.8				○				○	○	○										
S015	12.60	169.8	182.4				○			○													
S016	12.50	182.4	194.9				○																
S017	12.50	194.9	207.4				○																
S018	12.50	207.4	219.9				○				○	○	○										
S019	12.40	219.9	232.3				○																
S020	12.50	232.3	244.8				○																
S021	12.50	244.8	257.3				○																
S022	12.50	257.3	269.8				○				○	○	○										
S023	12.50	269.8	282.3				○											○					
S024	12.50	282.3	294.8				○																
S025	12.50	294.8	307.3				○																
S026	12.50	307.3	319.8				○				○	○	○										
S027	12.50	319.8	332.3				○																
S028	12.50	332.3	344.8				○																
S029	12.50	344.8	357.3				○			○													
S030	12.50	357.3	369.8				○				○	○	○										
S031	12.50	369.8	382.3				○																
S032	12.50	382.3	394.8				○																
S033	12.50	394.8	407.3				○																
S034	12.50	407.3	419.8				○				○	○	○										
S035	12.50	419.8	432.3				○											○					
S036	12.50	432.3	444.8				○																

■点検調書　トンネル変状・異常箇所写真位置図　【様式Ｂ】

フリガナ			路線名		管理者名								緊急輸送道路	一次			
名　称													代替路の有無	有り			
所在地	自		点検業者・点検者名				点検年月日						トンネル延長	m			
	至		調査業者・調査技術者名				調査年月日						ﾄﾝﾈﾙの分類	陸上【山岳(ＮＡＴＭ)】			
起点	緯度		変状・異常箇所数合計	トンネル本体工	材質劣化	Ⅱ	63箇所	Ⅲ	1箇所	Ⅳ	0箇所	トンネル毎の健全性	Ⅲ	附属物の取付状態	○		
	経度				漏水	Ⅱ	0箇所	Ⅲ	0箇所	Ⅳ	0箇所						
終点	緯度				外力	Ⅱ	69スパン	Ⅲ	1スパン	Ⅳ	0スパン				0箇所		
	経度																

トンネル変状・異常箇所写真位置図



注１：本位置図は，見下げた状態で記載すること．
注２：覆工スパン番号は横断方向目地毎(矢板工法の場合は上半アーチの横断方向目地毎)に設定すること．
注３：写真番号に付する変状番号は，各覆工スパンの変状に対して新たに確認された場合は順次追加していくこと．
注４：横断方向目地の変状は前の覆工スパン番号で計上すること．
注５：１枚に収まらない場合は，複数枚に分けて作成すること．

※1　トンネル本体工の変状数は，材質劣化，漏水に起因するものは変状単位で，外力に起因するものはスパン単位で計上すること．
※2　本体工の変状に対しては，判定区分Ⅱ～Ⅳ（対策実施後のⅠを含む）について記載すること．
※3　附属物の異常に対しては，判定区分×（対策実施後の○を含む）について記載すること．

■点検調書　点検結果総括表（トンネル本体工）　【様式Ｃ－１－１】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

	覆工スパン番号	変状番号	距離(m)	変状部位		変状の内容				前回点検時の状態		点検・調査履歴				措置履歴		対応方針・特記事項
				対象箇所	部位区分	変状区分	変状種類	変状の発生範囲の規模	前回点検時との比較	状態	健全性	調査の要否	実施	対策区分の判定	措置の要否	実施	健全性（措置後）	
点検結果	S1(PS)	1	7.5	覆工	面壁	漏水	遊離石灰	-	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S1	2	7.5	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	0.3～0.5mm	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S2	1	20	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.2～0.3mm	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S3	1	32.5	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.2～0.5mm	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S4	1	45	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.3～0.5mm	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S5	1	57.5	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	0.1～0.4mm	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S6	1	69.9	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.3～1.8mm	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S7	1	82.3	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	0.3～1.2mm	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S8	1	94.8	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	1.5mm×10.3m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S8	2	94.8	覆工	右側壁	材質劣化	うき	1.1m×0.3m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S9	1	107.3	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.5mm×14.0m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S10	1	119.8	覆工	右アーチ	材質劣化	ジャンカ	2.1m×0..05m、2.2m×0.05m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S11	1	132.3	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	0.8mm×6.3m	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S12	1	144.8	覆工	アーチ	材質劣化	うき	4.1m×1.4m	—	—	—	要・非		Ⅱa	要・非	継続		繊維シート系張工
	S13	1	157.3	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.0mm×3.6m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S14	1	169.8	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.0mm×5.6m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S15	1	182.4	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.3mm×4.7m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S15	2	182.4	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	1.2mm×4.1m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S15	3	182.4	路面	車道	材質劣化	その他	-	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S16	1	194.9	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.2mm×13.5m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S17	1	207.4	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.5mm×13.4m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S17	2	207.4	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.3mm×3.8m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S17	3	207.4	覆工	右アーチ	材質劣化	うき	0.15m×0.05m、0.15m×0.05m	—	—	—	要・非		Ⅲ	要・非	継続		ネット系張工
	S18	1	219.9	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.3～0.5mm	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S18	2	219.9	覆工	右アーチ	材質劣化	うき	0.05m×0.1m	—	—	—	要・非		Ⅱa	要・非	継続		ネット系張工
	S19	1	232.3	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	1.5mm×10.3m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S20	1	244.8	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	1.2mm×8.8m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S20	2	244.8	覆工	右アーチ	材質劣化	うき	0.1m×0.05m	—	—	—	要・非		Ⅱa	要・非	継続		ネット系張工
	S20	3	244.8	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	1.0mm×3.0m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S21	1	257.3	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	1.5mm×13.5m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S22	1	269.8	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.8mm×3.9m	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S23	1	282.3	覆工	左アーチ	外力	ひび割れ	0.6mm×7.3m	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-
	S23	2	282.3	覆工	アーチ	外力	ひび割れ	0.3～0.5mm	—	—	—	要・非		Ⅱa	要・非	継続		ひび割れ注入工
	S23	3	282.3	覆工	左側壁	材質劣化	うき	1.6m×0.3m	—	—	—	要・非		Ⅱb	要・非	継続		-
	S24	1	294.8	覆工	右アーチ	外力	ひび割れ	0.6mm×10.6m	—	—	—	要・非		Ⅰ	要・非	継続		-

■点検調書　点検結果総括表（トンネル内附属物の取付状態）　【様式Ｃ－１－２】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

点検結果	覆工スパン番号	異常番号	距離（m）	異常部位		異　常　の　内　容		前回点検時の状態		点検・調査履歴				措置履歴		対応方針・特記事項
				対象箇所	部位区分	異常種類	異常の発生範囲の規模	状態	健全性	調査の要否	実施	健全性（点検後）	措置の内容	実施	健全性（措置後）	

※　異常の除去が不完全で，緊急対応が必要な場合は対応方針欄に記入すること．

※　１スパンの覆工に複数の異常がある場合は，異常箇所毎に記入すること．

■点検調書　点検結果一覧表（トンネル内附属物の取付状態）　【様式Ｃ－１－３】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

点検部位	名称	番号	スパン番号	機能低下状況及び応急措置後状況														取付状態と措置		対策要否	備考
				き裂		ゆるみ・脱落		破断		腐食		変形・欠損		滞水		その他					
				損傷	措置	損傷	措置	損傷	措置	損傷	措置	損傷	措置	損傷	措置	損傷	措置	判定	措置		
照明施設	電気BOX1	（左）	S001	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	3L1-001R	S001	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	2L1-002R	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-003R	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	6L1-004R	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	8L1-005R	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	1L1-006R	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	7L1-007S	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-008S	S002	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	6L1-009S	S003	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	8L1-010S	S003	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	3L1-011S	S003	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	7L1-012T	S003	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-013T	S003	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	6L1-014T	S003	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	8L1-015T	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	1L1-016S	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	7L1-017R	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-018R	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	6L1-019R	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	8L1-020R	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	3L1-021T	S004	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	7L1-022S	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-023S	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	6L1-024S	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	8L1-025S	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	1L1-026T	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	2L1-027T	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-028T	S005	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	6L1-029T	S006	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	8L1-030T	S006	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	蛍光灯	3L1-031R	S006	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	7L1-032R	S006	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		
照明施設	高圧ナトリウム灯	9L1-033R	S006	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－	○	－			○	－		

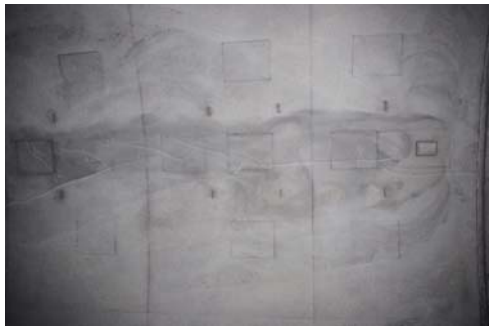
■点検調書　調査・措置の履歴　【様式Ｃ－２】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

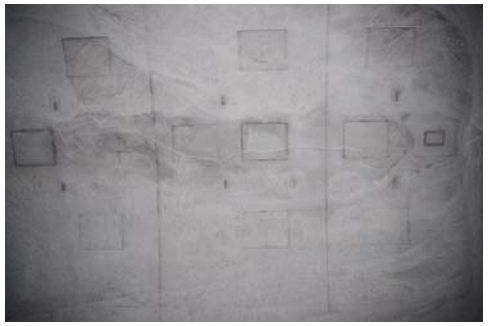
	覆工スパン番号	変状番号	調査履歴					措置履歴		
			調査年月日	調査内容	調査結果	対策区分の判定	健全性（調査後）	措置年月日	措置内容	健全性（措置後）
調査・措置履歴	S87								樋型導水工の設置	Ⅰ
	S87								樋型導水工の設置	Ⅰ
	S87/88	S87-1							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S88/89	S88-1			滴水	Ⅱa	Ⅱ		樋型導水工の設置	Ⅰ
	S89/90	S89-1							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S90/91	S90-1							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S91								樋型導水工の設置	Ⅰ
	S92/93	S92-2							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S95/96	S95-1							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S96/97	S96-2							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S102/103	S102-1～3			滴水	Ⅱa	Ⅱ		樋型導水工の設置	Ⅰ
	S104								樋型導水工の設置	Ⅰ
	S105/106	S105-1							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S106/107	S106-1～2							樋型導水工の設置	Ⅰ
	S111/112	S111-1							樋型導水工の設置	Ⅰ

■点検調書　変状写真台帳　【様式D－1】

フリガナ		路線名		点検業者･点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者･調査技術者名		調査年月日	

写真番号	覆工スパン番号	S42	
	変状番号	1	
変状部位	対象箇所	覆工	
	部位区分	右アーチ	
変状区分		外力	
変状種類		ひび割れ	
健全性	点検･調査後	Ⅱ	
	措置後		
変状の発生範囲の規模		0.3～1.2mm	
前回点検時の状態			
調査（方針）		―	実施状況（実施日）
措置（方針）		-	実施状況（実施日）
メモ		幅0.3～1.2mmの複数のひび割れ	

写真番号	覆工スパン番号	S42	
	変状番号	2	
変状部位	対象箇所	覆工	
	部位区分	右アーチ	
変状区分		材質劣化	
変状種類		うき	
健全性	点検･調査後	Ⅱ	
	措置後		
変状の発生範囲の規模		0.25m×0.05m	
前回点検時の状態			
調査（方針）		―	実施状況（実施日）
措置（方針）		ネット系張工	実施状況（実施日）
メモ		0.25m×0.05mのうき	

写真番号	覆工スパン番号	S43	
	変状番号	1	
変状部位	対象箇所	覆工	
	部位区分	右アーチ	
変状区分		外力	
変状種類		ひび割れ	
健全性	点検･調査後	Ⅱ	
	措置後		
変状の発生範囲の規模		0.3～1.0mm	
前回点検時の状態			
調査（方針）		―	実施状況（実施日）
措置（方針）		-	実施状況（実施日）
メモ		幅0.3～1.0mmの複数のひび割れ	

写真番号	覆工スパン番号	S44	
	変状番号	1	
変状部位	対象箇所	覆工	
	部位区分	左アーチ	
変状区分		外力	
変状種類		ひび割れ	
健全性	点検･調査後	Ⅱ	
	措置後		
変状の発生範囲の規模		0.3～1.0mm	
前回点検時の状態			
調査（方針）		―	実施状況（実施日）
措置（方針）		-	実施状況（実施日）
メモ		幅0.3～1.0mmの複数のひび割れ	

※　たたき落とし、締直しを実施した場合は、実施後の写真を添付すること。
※　附属物の取付状態に関する異常写真は別途、任意の書式でとりまとめること。
※　応急対策を実施した場合は、その実施状況が分かる写真を添付すること。
※　変状の発生範囲の規模とは、対策を行う際に参考となる変状の長さや面積をいう

■点検調書　変状写真台帳(トンネル附属物)　【様式D－1－2】

フリガナ 名　称		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

写真番号	覆工スパン番号	S002		写真番号	覆工スパン番号	S002	
	照明番号	(左)			照明番号	7R1-005R	
変状部位	対象箇所	その他設備		変状部位	対象箇所	照明施設	
	部位区分	通信施設1			部位区分	支持金具	
変状区分		－		変状区分		－	
変状種類		－		変状種類		－	
健全性	点検・調査後	○		健全性	点検・調査後	○	
	措置後	－			措置後	－	
変状の発生範囲の規模		－		変状の発生範囲の規模		－	
前回点検時の状態		－		前回点検時の状態		－	
調査(方針)		－	実施状況(実施日)：－	調査(方針)		－	実施状況(実施日)：－
措置(方針)		－	実施状況(実施日)：－	措置(方針)		－	実施状況(実施日)：－
メモ		点検状況。異常なし。		メモ		状況写真。異常なし。	

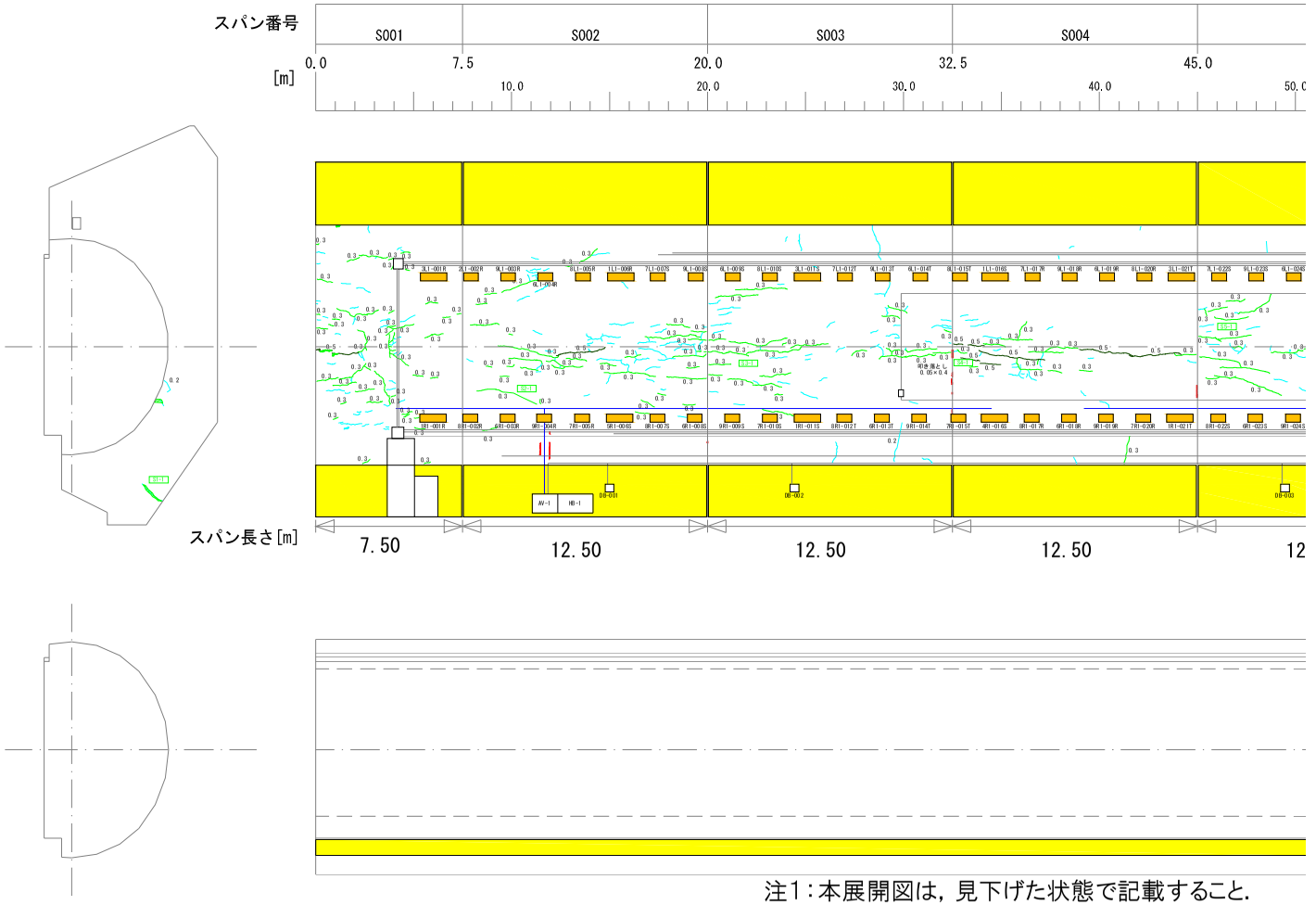
写真番号	覆工スパン番号	S003		写真番号	覆工スパン番号	S003	
	照明番号	(右)			照明番号	8R1-012T	
変状部位	対象箇所	その他設備		変状部位	対象箇所	照明施設	
	部位区分	ラジオケーブル支持金具2			部位区分	支持金具	
変状区分		－		変状区分		ゆるみ	
変状種類		－		変状種類		－	
健全性	点検・調査後	○		健全性	点検・調査後	○	
	措置後	－			措置後	○	
変状の発生範囲の規模		－		変状の発生範囲の規模		－	
前回点検時の状態		－		前回点検時の状態		－	
調査(方針)		－	実施状況(実施日)：－	調査(方針)		－	実施状況(実施日)：－
措置(方針)		－	実施状況(実施日)：－	措置(方針)		－	実施状況(実施日)：－
メモ		点検状況。異常なし。		メモ		ボルトゆるみ(3箇所)→増し締め済み。	

■点検調書　トンネル全体変状展開図　【様式D－2】

フリガナ		路線名		点検業者･点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者･調査技術者名		調査年月日	

参考42 トンネル変状展開図

トンネル全体変状展開図



注1：本展開図は，見下げた状態で記載すること.
注2：覆工スパン番号は横断方向目地毎(矢板工法の場合は上半アーチの横断方向目地毎)に設定すること.
注3：横断方向目地の変状は前の覆工スパン番号で計上すること.
注4：1枚に収まらない場合は，複数枚に分けて作成すること,

■点検調書　トンネル全体画像展開図　【様式D－2－2】

フリガナ		路線名		点検業者･点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者･調査技術者名	－	調査年月日	－

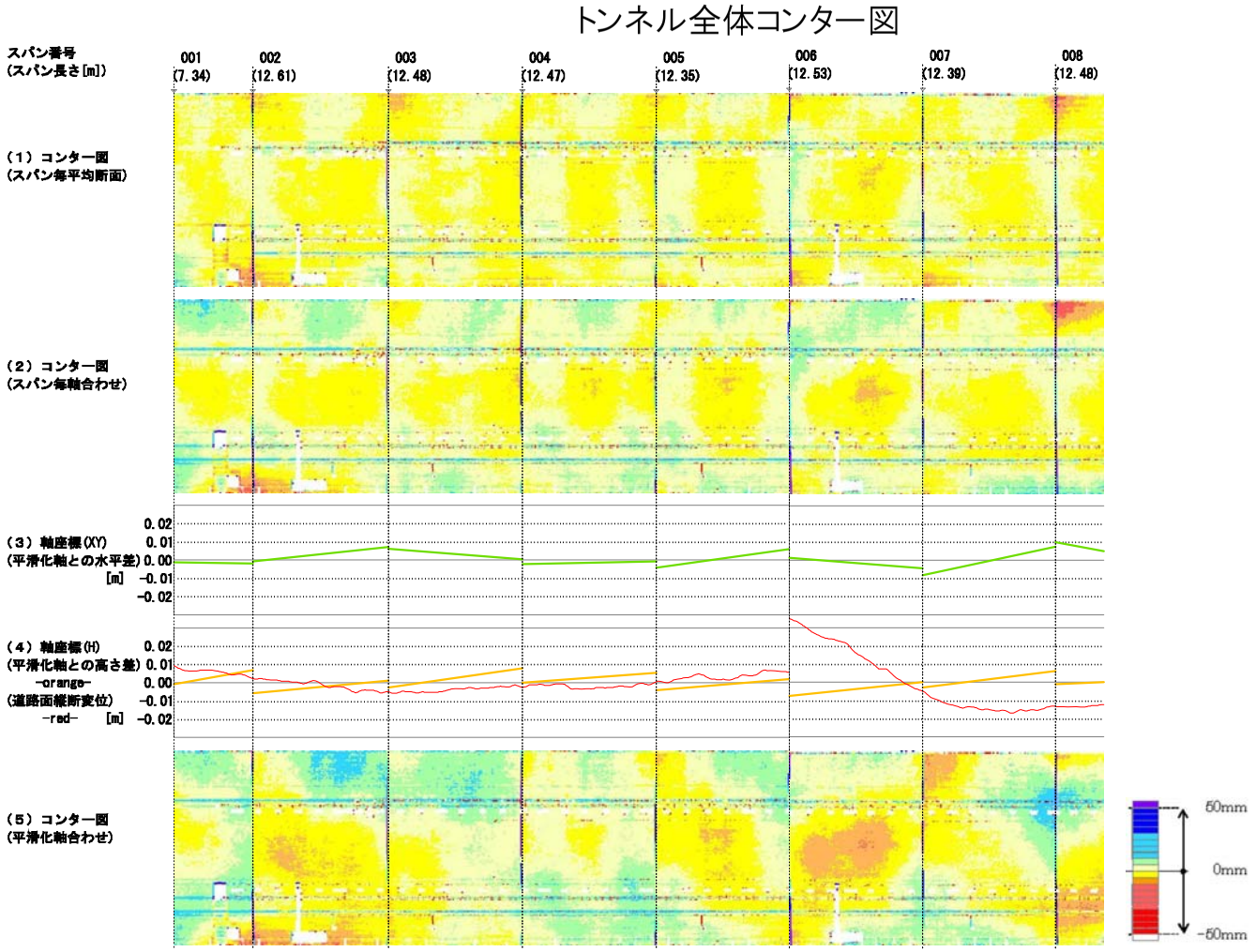
トンネル変状展開図

トンネル全体画像展開図

■点検調書　トンネル全体コンター図　【様式D－2－3】

フリガナ		路線名		点検業者･点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者･調査技術者名	－	調査年月日	－

トンネル変状展開図

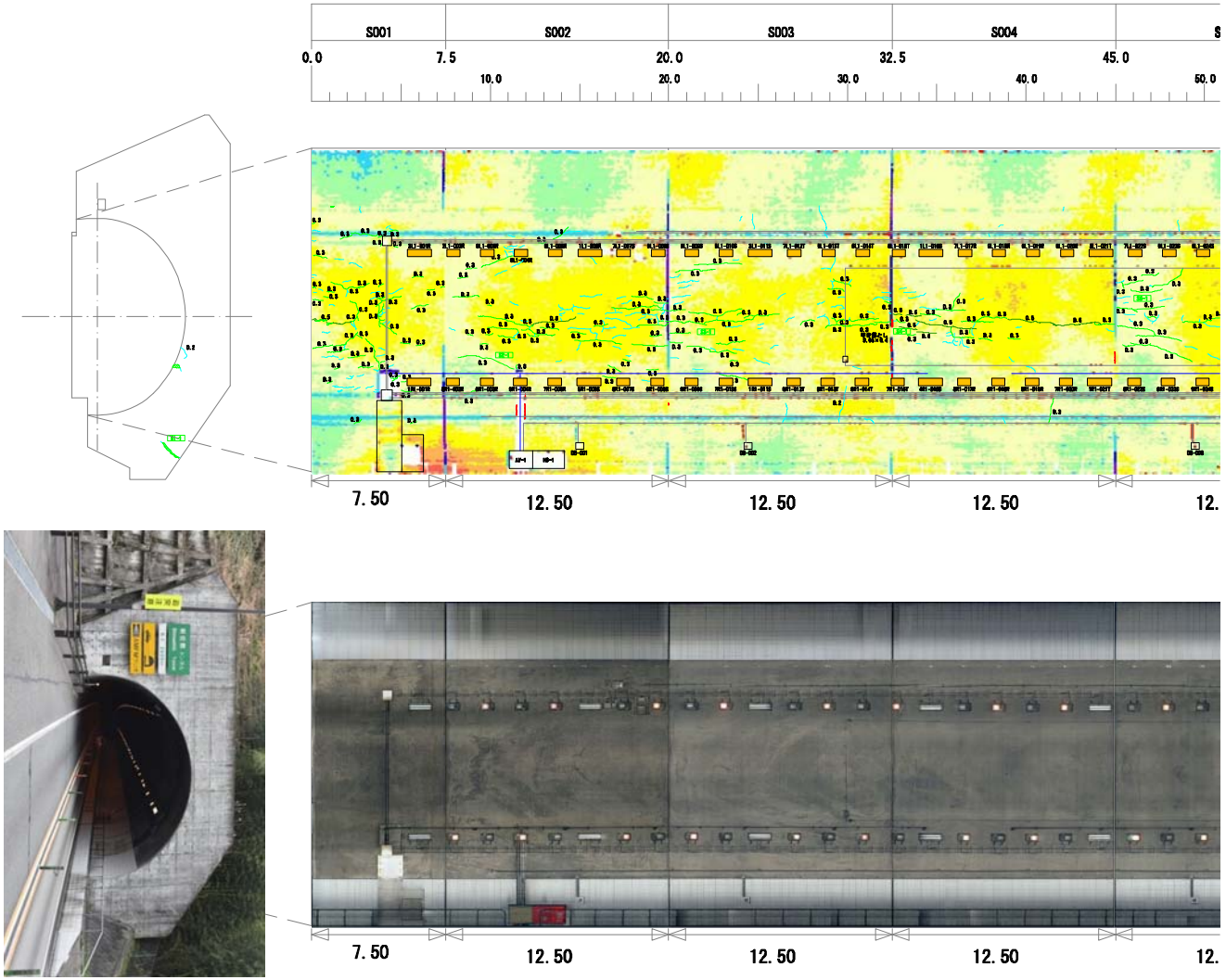


■点検調書　トンネル全体コンター図　【様式D－2－4】

フリガナ		路線名		点検業者･点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者･調査技術者名	－	調査年月日	－

トンネル変状展開図

トンネル全体コンター図(パネル毎コンター図)

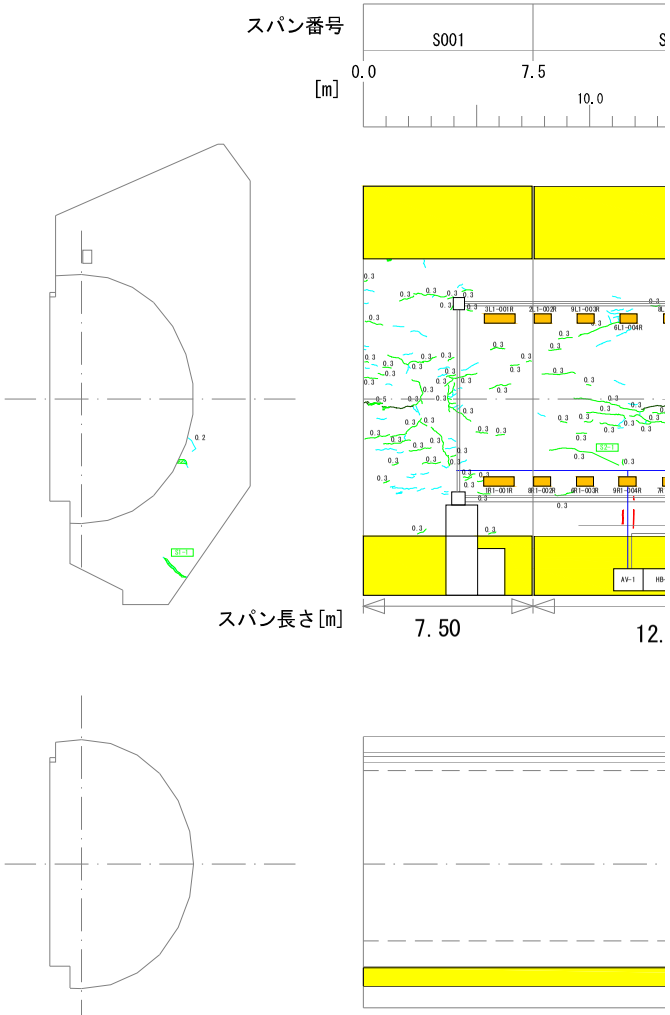


■点検調書　覆工スパン別変状詳細展開図　【様式Ｄ－３】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

様式D-3 スパン別変状展開図

覆工スパン別変状詳細展開図



健全性判定集計表

外力	材質劣化						漏水					
	変状番号	対策区分の判定					変状番号	対策区分の判定				
		Ⅰ	Ⅱb	Ⅱa	Ⅲ	Ⅳ		Ⅰ	Ⅱb	Ⅱa	Ⅲ	Ⅳ
スパン毎健全性							1	1				
	スパン毎健全性						スパン毎健全性					
Ⅰ	Ⅰ						Ⅰ					

（特記事項）

注1：本展開図は，見下げた状態で記載すること．
注2：覆工スパン番号は横断方向目地毎（矢板工法の場合は上半アーチの横断方向目地毎）に設定すること．
注3：横断方向目地の変状は前の覆工スパン番号で計上すること．
注4：1枚に収まらない場合は，複数枚に分けて作成すること，

■診断調書　診断結果（変状単位）　【様式Ｅ－１】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

変状箇所数・変状単位の健全性の判定

覆工スパン番号		外力		材質劣化		漏水	
本体工	S1	Ⅰ	1	Ⅰ		Ⅰ	1
		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1				1	
	健全性	Ⅰ				Ⅰ	
	S2	Ⅰ	1	Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅰ					
	S3	Ⅰ	1	Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅰ					
	S4	Ⅰ	1	Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅰ					
	S5	Ⅰ	1	Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ		Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅰ					

覆工スパン番号		外力		材質劣化		漏水	
本体工	S6	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ	1	Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅱ					
	S7	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ	1	Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅱ					
	S8	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ	1	Ⅱ	1	Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1		1			
	健全性	Ⅱ		Ⅱ			
	S9	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ	1	Ⅱ		Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数	1					
	健全性	Ⅱ					
	S10	Ⅰ		Ⅰ		Ⅰ	
		Ⅱ		Ⅱ	1	Ⅱ	
		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
		Ⅳ		Ⅳ		Ⅳ	
	箇所数			1			
	健全性			Ⅱ			

※　外力に起因する変状は変状の種類毎に覆工スパン単位で計上し，材質劣化，漏水に起因する変状は変状単位で計上すること．

■診断調書　診断結果（覆工スパン毎，トンネル毎）　【様式Ｅ－２】

フリガナ		路線名		点検業者・点検者名		点検年月日	
名　称		管理者名		調査業者・調査技術者名		調査年月日	

覆工スパン毎・トンネル毎の健全性の判定	健全性Ⅰ～Ⅳを覆工スパン毎に記入する															
		S1	Ⅰ	S25	Ⅱ	S49	Ⅱ	S73	Ⅰ	S97	Ⅰ	S121	Ⅰ	S145	Ⅰ
		S2	Ⅰ	S26	Ⅱ	S50	Ⅰ	S74	Ⅰ	S98	Ⅰ	S122	Ⅱ	S146	Ⅰ
		S3	Ⅰ	S27	Ⅱ	S51	Ⅱ	S75	Ⅰ	S99	Ⅰ	S123	Ⅰ	S147	Ⅰ
		S4	Ⅰ	S28	Ⅱ	S52	Ⅰ	S76	Ⅱ	S100	Ⅰ	S124	Ⅱ	S148	Ⅰ
		S5	Ⅰ	S29	Ⅱ	S53	Ⅲ	S77	Ⅰ	S101	Ⅰ	S125	Ⅰ	S149	Ⅰ
		S6	Ⅱ	S30	Ⅱ	S54	Ⅱ	S78	Ⅰ	S102	Ⅰ	S126	Ⅰ	S150	Ⅰ
		S7	Ⅱ	S31	Ⅱ	S55	Ⅱ	S79	Ⅰ	S103	Ⅰ	S127	Ⅰ	S151	Ⅰ
		S8	Ⅱ	S32	Ⅱ	S56	Ⅱ	S80	Ⅰ	S104	Ⅰ	S128	Ⅰ	S152	Ⅰ
		S9	Ⅱ	S33	Ⅱ	S57	Ⅱ	S81	Ⅰ	S105	Ⅰ	S129	Ⅱ	S153	Ⅰ
		S10	Ⅱ	S34	Ⅰ	S58	Ⅰ	S82	Ⅱ	S106	Ⅰ	S130	Ⅱ	S154	Ⅰ
		S11	Ⅰ	S35	Ⅱ	S59	Ⅰ	S83	Ⅱ	S107	Ⅰ	S131	Ⅰ	S155	Ⅰ
		S12	Ⅱ	S36	Ⅱ	S60	Ⅱ	S84	Ⅰ	S108	Ⅰ	S132	Ⅰ	S156	Ⅰ
		S13	Ⅱ	S37	Ⅰ	S61	Ⅰ	S85	Ⅰ	S109	Ⅰ	S133	Ⅰ	S157	Ⅰ
		S14	Ⅱ	S38	Ⅱ	S62	Ⅱ	S86	Ⅰ	S110	Ⅰ	S134	Ⅱ	S158	Ⅰ
		S15	Ⅱ	S39	Ⅱ	S63	Ⅱ	S87	Ⅰ	S111	Ⅰ	S135	Ⅰ	S159	Ⅰ
		S16	Ⅱ	S40	Ⅱ	S64	Ⅱ	S88	Ⅰ	S112	Ⅰ	S136	Ⅰ	S160	Ⅰ
		S17	Ⅲ	S41	Ⅱ	S65	Ⅱ	S89	Ⅰ	S113	Ⅰ	S137	Ⅰ	S161	Ⅰ
		S18	Ⅱ	S42	Ⅱ	S66	Ⅱ	S90	Ⅰ	S114	Ⅰ	S138	Ⅰ	S162	Ⅰ
		S19	Ⅱ	S43	Ⅱ	S67	Ⅰ	S91	Ⅰ	S115	Ⅰ	S139	Ⅰ	S163	Ⅰ
		S20	Ⅱ	S44	Ⅱ	S68	Ⅰ	S92	Ⅱ	S116	Ⅰ	S140	Ⅱ	S164	Ⅰ
		S21	Ⅱ	S45	Ⅱ	S69	Ⅱ	S93	Ⅰ	S117	Ⅰ	S141	Ⅰ	S165	Ⅰ
		S22	Ⅰ	S46	Ⅱ	S70	Ⅱ	S94	Ⅱ	S118	Ⅰ	S142	Ⅰ	S166	Ⅰ
		S23	Ⅱ	S47	Ⅱ	S71	Ⅰ	S95	Ⅰ	S119	Ⅰ	S143	Ⅰ	S167	Ⅱ
		S24	Ⅰ	S48	Ⅱ	S72	Ⅰ	S96	Ⅰ	S120	Ⅰ	S144	Ⅰ	S168	Ⅰ

	健全性Ⅰ	健全性Ⅱ	健全性Ⅲ	健全性Ⅳ	トンネルの健全性
集　計	185	88	2		Ⅲ