

走行型計測による既設トンネル覆工の 外力変状評価

重田 佳幸¹・前田 佳克²・水野 希典³・海瀬 忍⁴・前田 洸樹⁵
山本 秀樹⁶・安田 亨⁷

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)
E-mail:yoshiyuki.shigeta@tk.pacific.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:y.maeda.aa@ri-nexco.co.jp

³正会員 西日本高速道路株式会社 関西支社 建設事業部 (〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13)
E-mail:m.mizuno.aa@w-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)
E-mail:kouki.maeda@tk.pacific.co.jp

⁶正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)
E-mail:hideki.yamamoto@tk.pacific.co.jp

⁷正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) 品質・技術統括センター (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)
E-mail:tooru.yasuda@os.pacific.co.jp

走行型画像計測 (MIS : Mobile Imaging Technology System) と走行型レーザー計測 (MMS : Mobile Mapping System) を同一車両に搭載した走行型トンネル計測システム「MIMM (ミーム)」は2010年に開発され、走行型計測技術によるトンネル健全性評価の実用化を検証し、その後多数のトンネルに対し実用レベルで活用されている。この車両は交通規制を必要とせず、高速走行しながら覆工壁面の連続画像計測やレーザー計測を実施し、精度の良い客観的な変状把握が可能である。

本報告では、外力変状に対する評価について、より一層の客観性向上を目的として、外力変状の疑いのあるトンネルについて走行型計測を実施し、レーザー計測による断面計測結果の活用と適用性について検討結果を報告するものである。

Key Words : Tunnel inspection, Measurement vehicle system, Laser measurement, Tunnel deformation

1. はじめに

トンネル点検は近接目視で行うことが基本であるが、従来の点検技術は、①スケッチによる変状の記録、②点検者の主観による打音の判定、③暗所で狭隘の作業であるなどの理由で、安全性や客観性が乏しく、見落としの発生や変状進行の適正評価ができないなどの課題が指摘されている。

上述の課題に対する解決策として、MMS (共同開発者：三菱電機(株)) とMIS (共同開発者：計測検査(株)) を搭載した走行型トンネル計測システム「MIMM (ミー

ム)」を2010年に開発した(図-1)。これは、国土交通省近畿地方整備局の産官学連携プロジェクト「新都市社会技術融合創造研究会：プロジェクトリーダー大西有三京都大学名誉教授」の研究成果から走行型計測システムを具現化したものであり、同研究会で走行型計測技術によるトンネル健全性評価の実用化を検証し¹⁾、その後多数のトンネルに対し実用レベルで活用されている。

この車両は交通規制を必要とせず、高速走行しながら覆工壁面の連続画像計測やレーザー計測を実施し、精度の良い客観的な変状把握が可能である。

一方、高速道路における変状評価は、既に走行型画像計測技術を導入した点検、調査が実施され、外力およびはく落についてひびわれの発生状況等から評価を実施している。

本報告では、外力変状に対する評価について、より一層の客観性向上を目的として、外力変状の疑いのあるトンネルについて走行型計測を実施し、レーザー計測による断面計測結果の活用と適用性について検討結果を報告するものである。

2. 走行型計測システムの概要

トンネル定期点検の支援技術としては、覆工表面の変状を把握するための走行型画像計測やトンネル断面形状、変形モードを把握するための走行型レーザー計測などがある。特に走行型画像計測は、NEXCO、国土交通省、地方自治体で適用事例が多くみられる手法である。さらに進んだ走行型計測システムとして近畿地方整備局が主体となり実施している新都市社会技術融合創造セミナー（委員長：大西有三 京都大学副学長）「トンネル健全性評価プロジェクト（H18年度～H20年度）」¹⁾の成果からトンネル点検に有用と評価されていた走行型画像計測（MIS：Mobil Imaging Technology System）、走行型レーザー計測（MMS：Mobile Mapping System）の一体型車両（MIMM）がある。また、そのMIMMにトンネル覆工コンクリートの巻厚不足箇所、背面空洞箇所の把握を目的として走行型レーダー探査装置を搭載したMIMM-Rが開発され、トンネルの定期点検、調査の効率化、省力化、低コスト化に寄与している（図-1）。MIMM-Rは、画像計測装置とレーザー計測装置、非接触レーダー探査装置およびGPS、オドメトリ等から構成されている。レーザー計測装置は、分解能0.1mm、レーザー照射能力100万点/秒で高精度の点群データを取得することが可能である。画像装置は、20台のCCDカメラ（38万画素）と60台のLED照明から構成され、走行速度70km/hで0.3mm程度のひびわれを認識できる。

3. 変形モード算出方法

変形モード算出は、はじめに、解析を行うため、不要なデータの除去やスパン分けを行う。次に、トンネル中心軸を設定し、その中心軸に対してトンネルの推定出来形断面を求め、推定出来形断面とレーザー計測結果の点群との差分によりコンター図を作成する。

(1) 平均断面（推定出来形断面）の設定

レーザー計測で得られる点群データは単なる三次元の座標データでしかない。このため、トンネルの変形状態を判断するためには、基準となるトンネル平均断面を設定し、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図で示し視覚化する必要がある。



図-1 走行型計測システムの概要（MIMM-R）²⁾³⁾⁴⁾

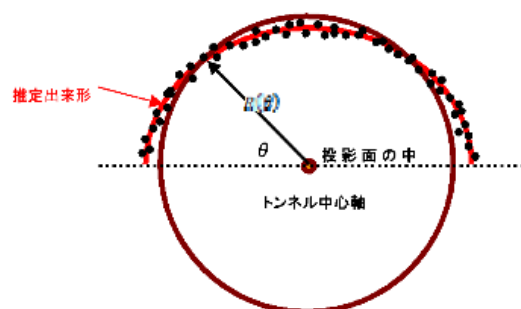


図-2 推定出来形の計算

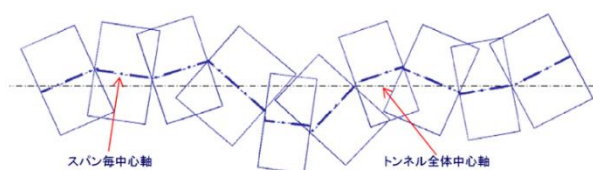


図-3 中心軸イメージ

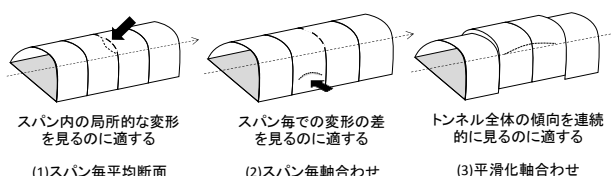


図-4 変形モード

はじめに、トンネル断面の中心軸を算出する。求められた中心軸に垂直な面を投影面として点群を投影する。投影された点群を投影面の中心より見た角度方向に平均化処理を行い、できた形状を推定出来形とする（図-2）。

(2) 中心軸の設定

トンネル覆工の変形は、各スパン内で局所的に変形を起こしているものと、数スパンにわたって覆工が変形、移動するものがある。これらの変形を抽出するためには、トンネル中心軸を2種類設定する必要がある、スパン毎中心軸とトンネル全体中心軸（平滑化面）とがある（図-3）。

(3) 変形モード算出

トンネル覆工面の凹凸状態（平均断面と実測点群との

差分)を等高線上に色分けして表示したコンター図から、覆工がどのように変形しているかを知ることができる。コンター図は、図-4の変形モード毎に作成し、以降にそれぞれの特徴を示す。

a) スパン毎平均断面

スパン毎平均断面は、各スパンで求めた平均断面を、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から、レーザー計測結果を色分けしたものである。これにより、スパン内の局所的な変形を見ることができる。

b) スパン毎軸合わせ

スパン毎軸合わせは、トンネル全体で求めた平均断面を、各スパン中心軸に沿ってスライドさせた推定出来形から、レーザー計測結果を色分けしたものである。これにより、各スパンでの差を見ることができる。

c) 平滑化軸合わせ

平滑化軸合わせは、トンネル全体で求めた平均断面を、平滑化軸に沿ってスライドさせた推定出来形から、レーザー計測結果を色分けしたものである。これにより、トンネル全体の傾向を連続的に見ることができる。

4. 対象トンネルの変状概要

対象トンネルは、供用された3年後(平成8年)より路面隆起が確認された。図-5に地質縦断面図を示す。トンネル周辺地質は、火山岩や火山砕屑岩からなり、粘土鉱物を含んでいる。本報告で対象とする路盤変状区間は、トンネル延長およそ3,000mのうち起点側から1,000m付近のスパンA～Dであり、既往調査等により、地質境界部と断層破碎帯が確認されている。

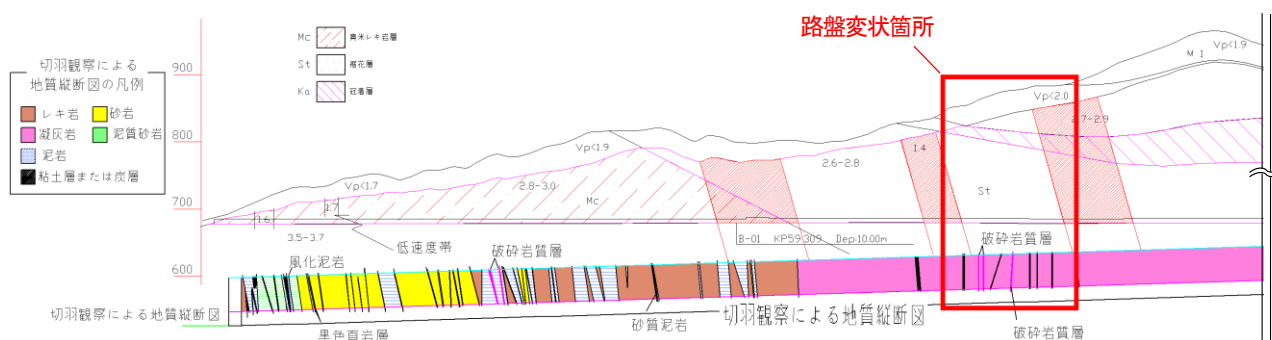


図-5 地質縦断面図

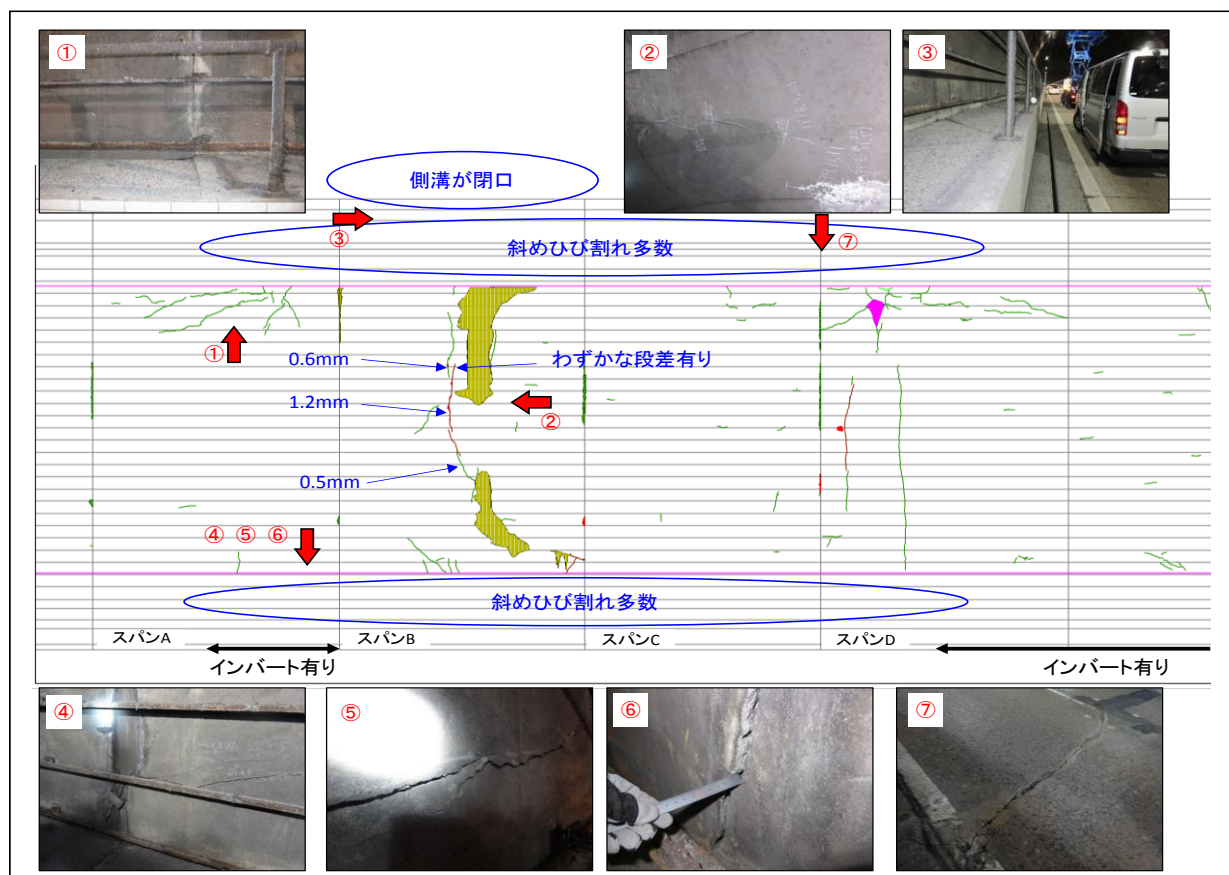


図-6 変状状況

本区間のインバートが設置されていない区間において、路面隆起やトンネル横断方向のひびわれが確認されている。さらに、側壁部に多数の縦断方向、斜め方向ひびわれを確認し、側溝が閉口している箇所が確認されている。図-6にトンネルの変状状況を示す。

変状状況および既往調査資料より、トンネル側方からの塑性圧による外力変状の可能性が考えられる。

5. 走行型計測による変状評価結果

数力所にわたり確認されている路面隆起箇所について画像計測と断面計測を実施した。断面計測で得られた点群データを用いて「走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化研究 報告書」に基づく変形モード解析を実施し、その結果を図-7に示す。

(1) 走行型計測結果

変形コンタ図の色は、赤色であるほど内空側へ変位しており、青色であるほど地山側へ変位していることを示す。また、断面変形箇所とひびわれ発生箇所が一致した場合、その変状は外力性変状である可能性が高いと判断できる。

(1)コンター図がスパン毎平均断面を示しており、スパン内の局所的な変形を見ることに適する。(2)コンター図がスパン毎軸合わせを示しており、スパン毎の変形の差を見るのに適する。(3)軸座標が平滑化軸との水平差を示しており、水平方向の断面のズレを示している。(4)軸座標が平滑化軸との高さ差、すなわち、縦断方向の断面のズレと、道路面縦断変位を示している。(5)コンター図は平滑化軸合わせを示しており、トンネル全体の傾向を連続的に見ることに適する。

路盤隆起が確認されたスパンBでは、縦断、斜めひびわれが多く確認されたが、(2)コンター図を見ると、側壁部に変形が見られ、ひびわれ発生箇所と変形箇所が一致することから、本スパンでは外力性変状の可能性が高いと判断できる。

(2) 変状原因推定

スパンBでは、変形モード解析の結果、側壁部で内空側への変形が確認されたことから、本スパンでは側方地山から塑性圧により押し出されたと考えられる。このとき、塑性圧により、側壁部が内空側へ変形し、縦断方向ひびわれが発生したと考えられる。

さらに、スパンBはインバートが施工されていないため、側方から塑性圧を受けると、図-8の変状パターンその1のように、応力の逃げ道はインバートが施工されていない路盤部へ向かうと考えられる。その影響で、スパンBで路盤が隆起したと考えられる。

スパンA～Dでは、側壁付近に多数のひびわれ、スパンBでは、天端部に横断ひびわれ、わずかな段差を確

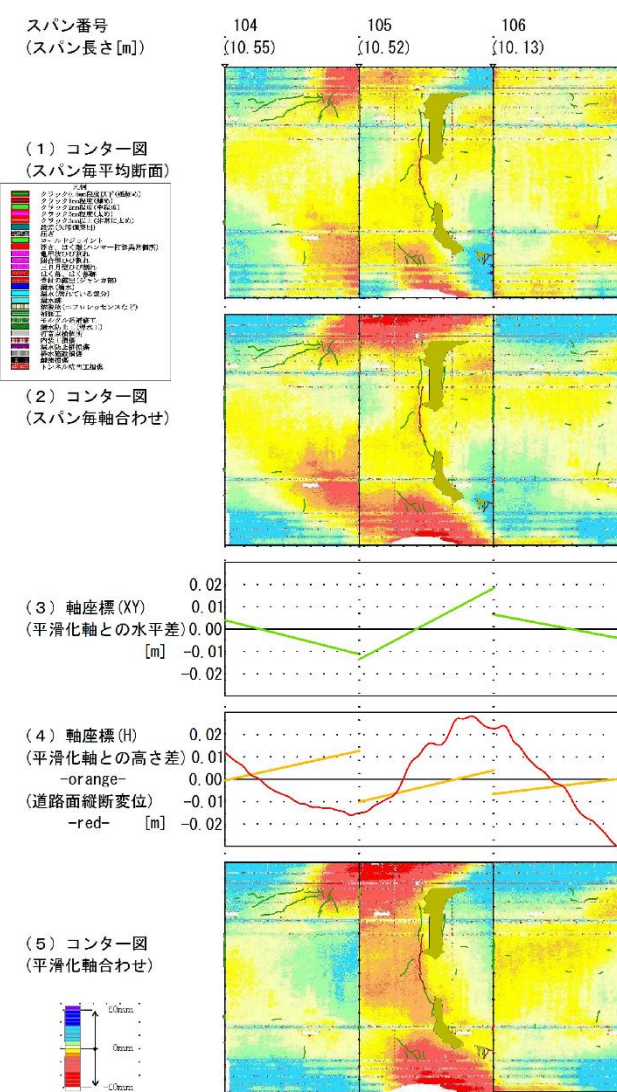


図-7 走行型計測結果

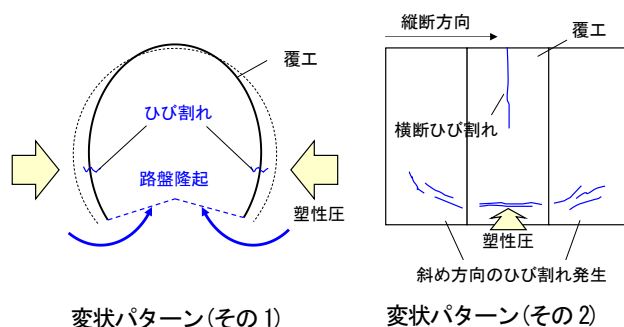


図-8 変状原因推定

認した。これは、図-8の変状パターンその2のように、側方から塑性圧がかかると、インバートが施工されていないスパンが構造的に不利になり、変状しやすくなる。そのスパンが先行的に内空側へ変位すると、隣接するスパンはそれに引っ張られるように変位すると考えられ、このときに、側壁部に斜めひびわれが発生すると考えられる。

さらに、路盤の押し上げにより覆工自体が上方へ変位す

ると、中央スパンは隣接するスパンに覆工全体で引っ張られ、天端に横断ひびわれが発生すると考えられる。

以上のように、トンネルの変状状況に加え、変形モード解析を行うことで、外力性変状の可能性を判定できると考えられ、変状原因を推定することに非常に有効であると考えられる。

6. まとめ

トンネルの外力変状の評価は、これまで、ひびわれの幅や長さ、発生パターン等のひびわれに着目して実施してきた。しかし、トンネル覆工コンクリートに発生するひびわれは、コンクリートの材質に起因する収縮ひずみや背面拘束によるものなどトンネル構造として大きな問題とならないひびわれがほとんどである。多数のトンネルについて適切な対策を講じるためには、トンネルの変状原因推定の確立が必要である。

本報では、走行型計測による変形モード解析を活用することで外力によるひびわれ抽出が可能となった。ただし、現在の変形モード解析では、断面変形量および路盤隆起量等は、絶対量ではなく、相対量である。外力変状を適切に評価するためには、絶対量を求めることが必要であると考えられるため、更なる技術開発が必要である。

さらに、走行型計測技術の更なる活用のためには、計測結果の再現性、進行性把握に関する精度向上が必要であると考えられ、様々な測量機器の精度検証も合わせて、検証実験等を実施していきたい。

参考文献

- 1) 新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト：走行型計測技術による道路トンネルの健全性評価の実用化研究 研究成果報告書, 2013.2.
- 2) 重田佳幸, 海瀬忍, 水野希典, 倉持秀明, 前田洸樹, 走行型計測による外力性変状の評価例, III-405, 2016.9.
- 3) 重田佳幸, 齋藤優貴, 田近宏則, 石井博規, 下澤正道：トンネル定期点検の支援技術としての走行型計測システムの活用, 土木学会第 70 回年次講演会, III-092, p183-184, 2015.9.
- 4) 山本秀樹, 重田佳幸, 北澤隆一, 小平哲也・名古屋淳, 走行型計測による覆工巻厚・空洞探査技術の開発, 土木学会第 70 回年次講演会, III-093, p185-186, 2015.9.
- 5) 駒村一弥, 山本秀樹, 重田佳幸, 加賀田敬, 走行型計測技術を用いたトンネル点検の効率化の検討, 土木学会第 70 回年次講演会, III-094, p187-188, 2015.9.

(2016. 8. 5 受付)

EVALUATION OF THE DEFORMATION CAUSED BY AN EXTERNAL FORCE OF THE LINING BY THE MEASUREMENT VEHICLE SYSTEM

Yoshiyuki SHIGETA, Yoshikatsu MAEDA, Maresuke MIZUNO, Shinobu KAISE, Koki MAEDA, Hideki YAMAMOTO, and Tooru YASUDA

Measurement vehicle system MIMM is developed in 2010, examined the practicability of soundness evaluation of the tunnel by the measurement, has been used at a practical level for many of the tunnel. MIMM is a tunnel deformation investigation system which uses a high speed vehicle to take photographs of the surface of the lining and to take measurements of the tunnel cross section while in motion, to infer the cause of the deformation, and does not require a traffic regulation.

The purpose of this report is to take hold of a deformation more correctly, about the value of a deformation caused by external geologic forces. This paper sets out reports on a study into the measurement result of the tunnel cross section by the laser applicability to tunnel there is a possibility of external geologic forces