

(9) トンネル覆工マーカースの利用による 座標補正効果の検証

榎本 真美¹・新田 恭士²・安井 成豊³・寺戸 秀和⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: enomoto-m574bs@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail: nitta-y573bs@pwri.go.jp

³正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

E-mail: yasui@cmi.or.jp

⁴正会員 一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

E-mail: terato@cmi.or.jp

トンネル維持管理の効率化を目的とし、覆工マーカース設置による座標補正の効果を検証した。走行型計測車両によるトンネル形状計測において、GNSS が不可視となるトンネル内での座標補正に覆工マーカースの座標情報を利用することで、計測誤差を低減することが考えられる。覆工マーカースは、中心位置が把握可能なデザインとし、スパン番号と QR コードを表記した。トンネル直線区間および曲線区間において、覆工マーカースの補正数による誤差量を比較したところ、いずれも覆工マーカースの補正数を増やすほど誤差量が減少する傾向を確認することができた。特に曲線区間において、覆工マーカースを活用して座標補正することによる効果が高い。

Key Words: tunnel inspection, mobile mapping system, robot inspection, tunnel marker

1. はじめに

我国では、インフラの高齢化が進む中で、重大な事故リスクの顕在化や、維持修繕費の急激な高まりが懸念されている。インフラ維持管理の重要性が高まり、国民が安全・安心に利用するためには、確実なメンテナンスが必要である。平成 26 年度の道路法改正により 5 年に 1 回の近接目視による定期点検が義務化され、平成 30 年度末で 5 年が経過し、一巡したところである。

現在の道路トンネルにおける点検作業は、近接目視や打音検査、人によるスケッチ等の人力作業が中心であり、作業効率や記録精度の面等いくつかの課題がある。今後、走行型計測車両など各種ロボット技術を活用することにより、大幅な点検効率の向上が期待される。さらに、平成 31 年 3 月に出された「点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル【トンネル編】（案）」（以下、「3 次元納品マニュアル案」と呼ぶ）

¹⁾においても、点検支援技術を用いて高品質な画像取得と 3 次元的に損傷位置を記録・蓄積することが求めら

れる。

一般的なトンネル管理では、トンネル形状の変化を計測する場合、相対座標での変化量を求めれば実務上問題なく、現行の走行型計測車両においてもその前提で活用されている。²⁾ 現行の走行型レーザー計測技術による精度を表-1に示す。相対座標の 2 点間距離の誤差は 2.0mm 程度で、通常の測量による測距精度と大きな違いはない。一方で、GNSS 等が利用できない山間部においては、衛星測位によって容易に位置情報を得られず、累積する誤差の位置情報をいかに補正するかが課題となっている。

表-1 レーザー計測技術の精度

項目	精度
測量機器(レーザー) の誤差	プロファイラー Z+F9012 代表値: ±1.68mm
相対座標誤差 (2点間)	±2mm 程度
絶対座標系 (世界測地系) 誤差	10cm 程度
衛星不可視下	不可視時間、距離により 数 10cm～数 m 誤差

三次元納品の際に世界測地系での絶対座標が必要となる場合、あるいは、衛星不可視下で誤差が拡大していく場合、マーカーによる絶対座標精度の補正が必要とされる。その一つとして、測量座標の測点位置を示す覆工マーカー（以下、マーカーという）をトンネル内に設置する事が提案されている。³⁾

本研究では、走行型計測車両によるトンネル形状計測において、計測誤差を低減することが考えられることから、マーカー設置による座標補正の効果を検証した。

2. 研究方法

(1) 検証フィールド

現場検証は、相模原市管理の北岸林道青山トンネル（神奈川県相模原市緑区青山）にて実施した。本トンネルは、拡幅区間 49m と曲線区間 178.5m、直線区間 178.5m の計 406m のトンネルである。トンネルの概要を表-2 に、トンネル平面図を図-1 に示す。

(2) 覆工マーカーの設置

マーカーの形状は、人による目視や測量、撮影画像やレーザ計測等において、マーカー中心位置が把握可能と

表-2 トンネル概要

トンネル名	青山トンネル
延長	406m
内宮断面積	45 m ² （拡幅部以外）
完成年次	1987 年
幅員	1.8+2.55+2.55+1.8 =8.75m（拡幅部以外）

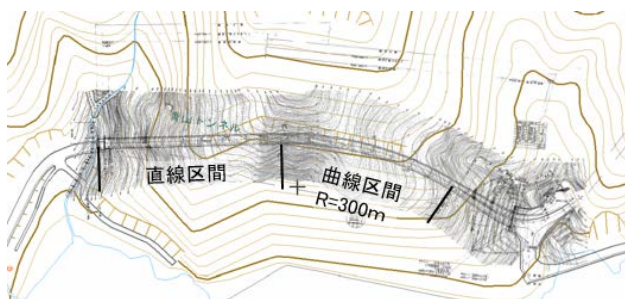


図-1 青山トンネル平面図

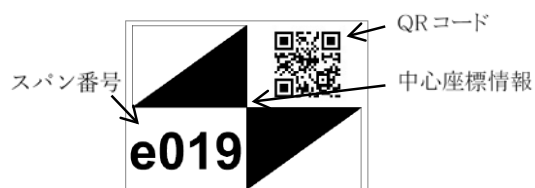


図-2 覆工マーカー(A4 用紙サイズ)

なる図-2 に示すデザインを基本とし、覆工スパン番号と、10cm 四方の QR コードを表記した。

QR コードは、トンネル名及びスパン番号を示す。検証では、このマーカーを約 100m 間隔に配置するとともに、精度検証区間とした曲線区間と直線区間それぞれについては、約 10m 間隔にてマーカーを設置した。

(3) 計測ロボット技術

本検証で使用した走行型計測車両は、車両の位置姿勢を特定するための GPS や IMU、覆工表面を撮影するためのカメラ、坑内形状を三次元情報として得るための高密度レーザを搭載したものである。

3. 検証方法

青山トンネルに設置したマーカーを利用し、「曲線区間」（検証断面Ⅰ）と「直線区間」（検証断面Ⅱ）の 2 区間における座標補正効果について検証した。2 箇所の検証断面には、トンネル横断面内の左右に高さ 1 m および 3.5m の計 4 点の精度検証用マーカーを設置した。試験は次の手順にて実施した。



図-3 覆工マーカー設置



図-4 走行型計測車両

検証前の準備作業として、トータルステーションを用いて測量を実施し、検証用マーカを含む全てのマーカの中心座標を計測した。その上で、通常実施される計測走行の手順にて実施した。計測走行時の速度は当該道路の走行規制値内の時速 40km を基本とした。走行条件に伴う影響や坑外での GPS 補足条件に伴う誤差が考えられるため、1 往復での走行を基本単位 1 回とし、計 3 回の走行計測を実施した。

事後処理となる補正作業では、検証用マーカを除く 10m 間隔で設置済みの全てのマーカの中心座標データを渡すが、データ処理において、下記に示す 4 ケースにて検証断面の各マーカ中心座標について演算処理を行った。また、検証断面の辺 01~06 の各距離を計測した。

case 0 : マーカ未使用

case 1 : トンネル中央部のマーカ使用 (約 200m 間隔)

case 2 : 100m 間隔でマーカ使用

case 3 : 10m 間隔でマーカ使用 (全マーカ)

4. 研究結果

(1) 覆工マーカの判読性

走行型計測車両を使用して走行しながら撮影記録された画像を用いて、10cm 四方の QR コードを判読可能か確

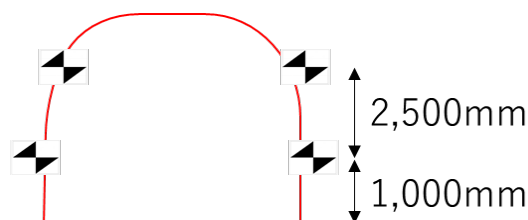


図-5 検証断面のマーカ配置

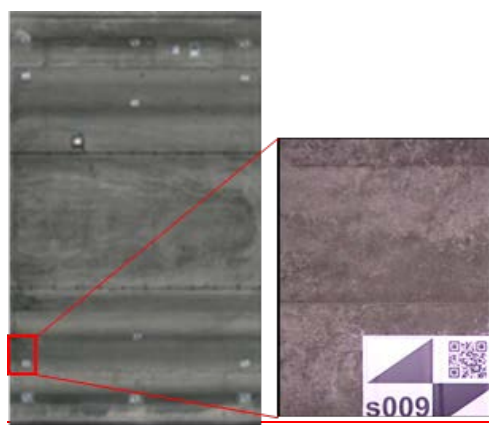


図-6 走行型計測車両によって取得した画像

認を行った。走行型計測車両に搭載されたカメラで撮影された画像を図-6 に示す。

図にて確認されるように、走行型計測車両で取得した画像にてマーカの中心座標地点やスパン番号、QR コードが鮮明に映っている。手持ちのスマートフォン等で QR コードの読み取ることができ、埋め込まれた URL リンク先をブラウザで表示することができた。

(2) 座標補正効果による絶対座標誤差検証

図-7 は、曲線区間と直線区間において各ケースそれぞれ 3 回の計測を行った結果 (最大値, 最小値, 平均値) を示している。なお、データでは、検証断面内に設置した 4 点の検証用マーカの誤差量に有意な差が見られないことから、全ての点および走行回数の x, y, z 座標データを用いて平均値等を算出した。

同図に示すように、マーカによる補正を行わない場合 (case0), 曲線区間での誤差量が 300mm~500mm であったのに対し、直線区間での誤差量は 100mm~250mm 程度であった。曲線区間は直線区間に比べて誤差量が大きくなる傾向がみられた。この誤差量の違いは、マーカによる補正数を増やすと減少した。マーカによる補正数を増やすほど、誤差量が減少する傾向が確認された。10m 間隔でマーカによる補正を行った場合 (case3), 曲線区間・直線区間共に誤差量は 100mm 未満に減少した。

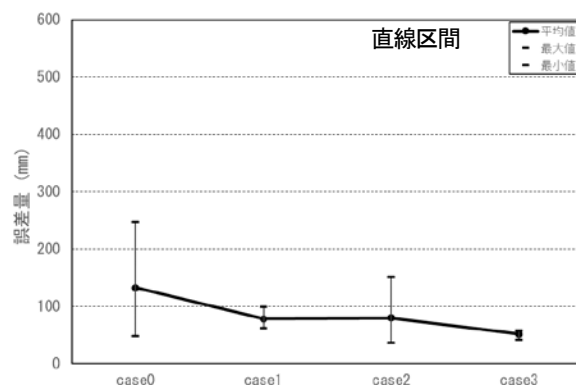
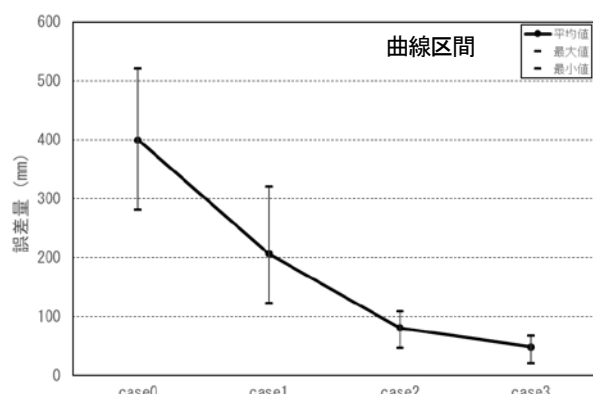


図-7 曲線・直線区間の補正ケースに伴う誤差量 (平均, 最大, 最小)

曲線区間・直線区間に係わらず、マーカースを使用することによって計測精度を向上させることが可能となった。本検証では、マーカースを 10m 間隔で補正に活用することによって、50mm 程度まで真値との誤差が小さくなるとともに、3 回走行時に得られた計測結果のばらつきも小さくなることが確認できた。

5. 結論

各種ロボット技術や ICT 機器を利用した効率的かつ高精度なトンネル点検を実現するため、トンネルそのものに何等かの簡易な対策を講じ、ロボット技術を導入しやすい環境を整備することが考えられる。

マーカースの補正数を増やすほど絶対座標の誤差量が減少する傾向を確認することができた。特に曲線区間において、マーカースを活用して座標補正することによる効果が高い。

覆工マーカースを整備することにより、GNSS 不可視下におけるトンネル内において走行型計測車両を用いた精度の高い点群計測が可能になると考えられる。そのデータは、3 次元納品マニュアル案にて求められる損傷位置の測地座標取得が可能となる。さらに、自己の周囲に視認されるマーカースを利用して自己位置を把握可能⁴⁾となり、点検のみならず、維持管理のためのロボット利用につながる。また、単純に展開画像における特徴点を把握し易くなるとともに、QR コードとデータベースを関連付けすることで施工・維持管理の情報を AR 技術や MR 技術を活用して入手可能になるなど多くの効果が期待される。トンネルの延長や形状、維持管理状況に応じて、マーカースを利用した効率的なロボット点検が可能となる。

6. おわりに

本研究の結果を踏まえ、マーカースの設置方法等を取りまとめた「トンネルマーカース活用ガイドライン（素案）」を作成した。今後とも、効率的なトンネル点検作業に向けてガイドラインの普及に努めるとともに、トンネル点検の効率化と高度化のため、ロボット技術を用いた画像取得や AI を活用した損傷個所のスクリーニングへと発展させていくとともに、各種技術で得られたデータの有効な活用を促すための納品方法について検討を進めていく所存である。

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理人：国土交通省）によるものであり、国土技術政策総合研究所の委託研究として実施したものである。ここに記して謝意を表す。また、計測作業にご協力頂いた相模原市の皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：点検支援技術（画像計測技術）を用いた 3 次元成果品納品マニュアル【トンネル編】（案），2019.
- 2) 重田佳幸，寺戸秀和，前田洸樹，山本秀樹，安田亨：トンネル走行型レーザー計測技術の精度検証，トンネル工学報告集，2017.
- 3) 寺戸秀和，安井成豊，林利行：トンネル点検の効率化を目的とした覆工マーカースの提案，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-234，2018.
- 4) 伊吹真一，安井成豊，寺戸秀和：カメラを利用したトンネル内での自己位置特定について，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-403，2018.