

# ロボット技術等によるトンネル点検を支援する 覆工マーカの研究

林 利行・藤野健一・安井成豊・大石龍太郎

## 1. はじめに

国民の安全・安心な生活を確保するためには、老朽化するインフラの確実なメンテナンスが必要である。一方、トンネルは全国で約1万本が設置されており、将来に向け、少子高齢化などによる建設産業における労働力不足や技術者不足等の懸念が有り、これらを解決するため、ロボット技術のインフラメンテナンスへの活用が望まれる。

これに対し、現行のインフラメンテナンスにおいては、点検は点検者（人）が行うことを前提としており、ロボット技術の活用を支援するための取組みが必要である。

そこで、（国研）土木研究所では、（一財）橋梁調査会、（一社）日本建設機械施工協会と共同で、現状のトンネル点検における課題等を調査し、従来の管理基準や手法を前提に、ロボット技術等を活用した「トンネルメンテナンスの支援・効率化」の早期実現を図るための研究に取り組んでいる。

トンネル内は、通常、同一の断面形状が連続している。また、表面には凹凸等の特徴点がほとんどないため、トンネル内で作業を行う点検者は、現地における近接目視や写真撮影等の位置把握が困難である。この対策として、トンネル壁面にチョークを用いて覆工のスパン番号を手書きし（図-1）、その情報を基に必要な情報を損傷写真に写しこんでいる。

ロボット技術による計測においても同様の課題がある。SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）において、レーザー光を用いて道路上か



図-1 トンネル内とチョークにより手書きされた覆工スパン番号

らひび割れ幅等を計測する技術、音響解析技術を用いた打音検査ロボット技術、レーザー光を用いて非接触にて打音検査を行う技術などが研究開発されている。しかし、全てのロボット技術に共通する課題として、自己位置（座標など）が不明であるために、検査が必要とされる変状箇所や調査計測した位置を特定することが困難な点が挙げられる。個々の技術では、IMU（慣性計測装置）を利用する等の工夫を行う場合もあるが、コストがかかることに加え、誤差が累積するため正確性を欠く懸念がある。

このような課題に対し、覆工面に位置特定の支援技術「覆工マーカー」を設置し、本マーカーを用いて、自己位置（座標など）やスパン番号等に関する情報を得られるようにすることで、点検者やロボット技術によるトンネル点検の支援および活用促進につながるものと考えられる。

本報においては、その検討状況について報告する。

## 2. トンネル点検を支援する覆工マーカの試作と検証

人とロボットによるトンネル点検を支援する覆工マーカの仕様、含むべき情報等について検討するため、類似事例の調査、ロボット技術開発者および点検業者へのアンケート調査を実施し、数字と16進法によるコードを含むARマークにてスパン番号（sは起点側、eは終点側）を示す覆工マーカー案（図-2）を試作した。



図-2 覆工マーカー

覆工マーカース案として、3種類の材質（普通反射、高輝度反射、無反射）と3種類のサイズ（250×500、200×400、150×300：単位mm）の計9種類を試作し、検証試験を行った。

### 3. 覆工マーカ－検知性の検証

覆工マーカ－の仕様検討を目的として、「可視画像の検知性」および「MMSレーザ－計測（Mobile Mapping System、レーザ－計測により構造物の3次元の点群座標データを得る）の検知性」について検証を行った。

#### 3.1 可視画像の検知性

##### 3.1.1 検証目的

ロボット技術等によって撮影した画像をつなぎ合わせる（展開画像作成）際の支援情報として、可視画像による覆工マーカ－の利用可否と検知しやすい仕様について検討することを目的に、以下の検証を行った。

##### 3.1.2 検証方法

車両に搭載したデジタルビデオカメラにて、走行しながら覆工面を撮影するロボット技術（以下「技術A」という。）を使用して撮影した画像において、覆工マーカ－の画像がどのように検知可能となるかを確認した。

##### 3.1.3 検証結果

###### (1) 覆工マーカ－の表面材質

表面材質（3種類）の反射仕様の違いが覆工マーカ－の検知性に与える影響について確認した（サイズ250mm×500mm、40km/hのケース）。

いずれの材質においてもスパン番号は視認できるが、覆工マーカ－の右側に設けた十字の線が視認できるのは無反射のみであった（図-3）。普通反射、高輝度反射では、画像撮影時のLED照明により白飛び（画像で明るい部分の階調が失われ

真っ白に表示されること）が発生し、十字の線の視認が困難であった。

###### (2) 覆工マーカ－のサイズ

覆工マーカ－のサイズ（3種類）が覆工マーカ－の検知性に与える影響について確認した（普通反射、時速40km/hのケースを以下に示す）。

サイズが最も大きい250mm×500mmでは、スパン番号等が比較的明瞭となるが、サイズが小さくなるとスパン番号の明瞭さが低下した。

###### (3) 走行速度

走行速度（3種類、10km/h、30km/h、40km/h）が覆工マーカ－（普通反射、サイズ250mm×500mm）の検知性に与える影響について確認した。

画像の検知性は、いずれの速度においても同程度であり、40km/hまでの走行速度においては覆工マーカ－の画像の検知性に大きく影響しない結果であった。

#### 3.2 MMSレーザ－計測の検知性

##### 3.2.1 検証目的

トンネル内では、GNSS（全球測位衛星システム）による座標特定ができないため、トンネル内面3次元計測を可能とするMMSの適用について計測精度の点で懸念がある。

本検証では、中心位置座標情報が与えられた覆工マーカ－を利用した計測データ補正検証を行うに際して、覆工マーカ－仕様の違いがMMSによるレーザ－計測にてマーカ－形状およびその中心位置の検知性に与える影響について確認した。

##### 3.2.2 検証方法

MMSを搭載した2つのロボット技術（「技術B」、「技術C」）を用いて、覆工マーカ－表面材質・サイズ、ならびにロボット技術の走行速度による座標特定における影響について検証を行った。



(a)普通反射仕様



(b)高輝度反射仕様



(c)無反射仕様

図-3 覆工マーカ－撮影結果

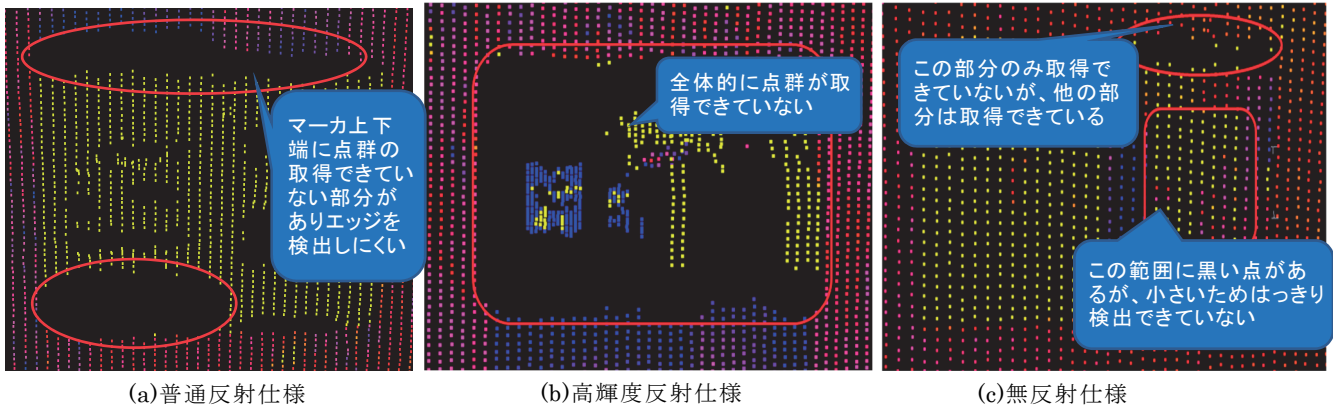


図-4 覆工マーカ一点群取得結果

### 3.2.3 検証結果

#### (1) 覆工マーカの表面材質

異なる表面材質（3種類）の反射仕様が覆工マーカの検知性に与える影響について確認した（技術C、サイズ250mm×500mm、時速10km/hのケース）。「普通反射」と「高輝度反射」については、一部点群が取得できない箇所（反射情報が得られなく、黒くなった部分）が生じた（図-4）。一方、「無反射」については、マーカのほぼ全面に点群が生成された。

#### (2) 覆工マーカのサイズ

覆工マーカのサイズ（3種類）が覆工マーカの検知性に与える影響について確認した。

走行速度が40km/hになると走行方向の点群間隔が40mm程度に離れ、覆工マーカのサイズが小さいほど中心位置の特定がしにくい結果となった。ただし、開発者からは、今回の検証に用いたサイズ（最小150mm×300mm）であれば、覆工マーカそのものの概略位置は特定可能との回答は得られた。

#### (3) 走行速度

走行速度（3種類）の違いが取得される点群データに与える影響について確認した（技術B）。

走行速度が速くなれば点群データのトンネル軸（走行）方向のピッチも広くなり、40km/hの速度では、マーカ端部の位置推定誤差が50mm以上となった。

なお、位置推定誤差の要因として、覆工マーカ形状が長方形であった点が挙げられ、走行速度上昇に伴う走行方向の点群ピッチの広がり、覆工マーカ中心位置特定時の誤差に直結することが確認された。

## 4. 3次元計測精度向上効果の検証

### 4.1 検証目的

MMSレーザー計測にて検知可能とされた覆工マーカの位置情報を活用することにより、GNSSの利用が困難なトンネル内においてMMSによって取得された計測データの補正が可能となるかを確認した。また、利用可能となる覆工マーカ配置の違いによって、MMS計測データの補正精度に差が発生するのかを確認した。

### 4.2 検証方法

検証は、下記に示す4種類の覆工マーカ設置条件に対して3種類の走行速度（10km/h、30km/h、40km/h）にて、それぞれ3回ずつMMSによる計測を行った。

<覆工マーカ設置条件>

CASE1:覆工マーカなし

CASE2:トンネルの片側のみ、1枚/スパンの間隔で覆工マーカを設置

CASE3:トンネルの両側、1枚/スパンの間隔で覆工マーカを設置

CASE4:トンネルの両側、2枚/スパンの間隔で覆工マーカを設置

計測検証断面のトンネル天端、および両肩部に設けた点（図-5）の座標計測結果について、別途

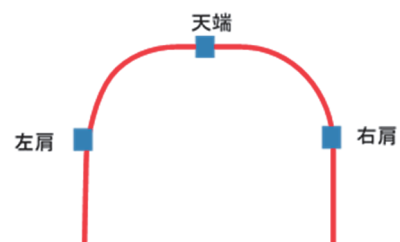


図-5 トンネル内に設置した精度検証点

計測したトータルステーションによる計測値と比較することで誤差量の評価を行った。

#### 4.3 検証結果

検証結果の一例として、x、y、z方向それぞれの誤差、およびx、y、z座標から求められる測定点間の距離誤差(L)を図-6、図-7に示し、確認された主な点を以下に示す。

- ① CASE1（覆工マーカーなし）の計測誤差に対して、CASE2～CASE4（覆工マーカーあり）

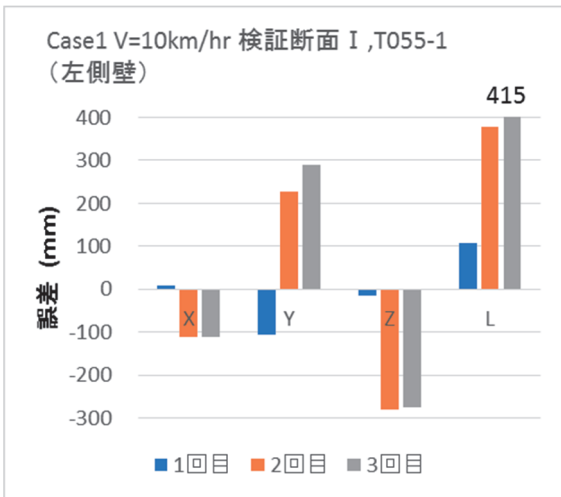


図-6 CASE1（マーカーなし）における計測結果

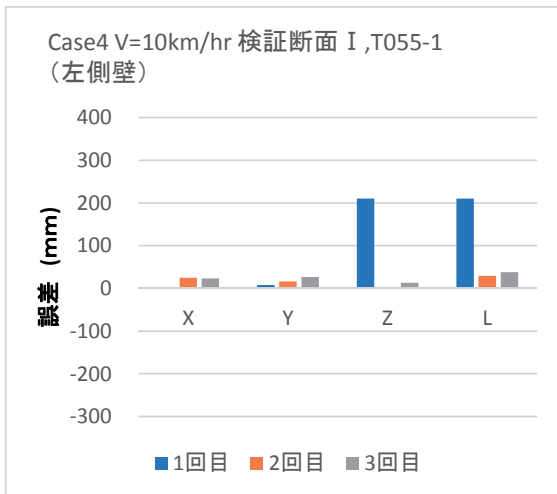


図-7 CASE4（マーカーあり）における計測結果

のいずれの速度条件においても、補正情報を得ることにより計測誤差が小さくなった（覆工マーカーによる精度向上効果を確認）。

- ② 覆工マーカーの設置数を多くすることによる精度向上（誤差低減）効果は顕著でなかった。  
 ③ 走行速度40km/hの計測時において、他の走行速度に比べ精度が大きく低下（誤差大）した。

#### 5. まとめ

本研究では、トンネル点検において、現行の点検者による点検の効率化、点検におけるICTの利用、ロボット技術の活用促進を図るため、トンネル覆工マーカーの仕様や設置方法等の詳細な仕様を検討するための基礎検証を行った。

今後は、本研究結果を踏まえ、覆工マーカーの仕様（サイズ・形状・材質など）の最適化について改良と検証を進めるとともに、覆工マーカーに含むべき情報と表記方法等について検討を行う予定である。その後、確定した仕様等に基づき、覆工マーカーの導入効果について検証する予定である。

#### おわりに

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」（管理法人：国土交通省）によるものである。

#### 参考文献

- 1) 道路トンネル定期点検要領、平成26年6月、国土交通省道路局 国道・防災課
- 2) 道路トンネル維持管理便覧、平成27年6月、公益社団法人日本道路協会
- 3) 道路トンネル技術基準（構造編）・同解説、平成15年11月、公益社団法人日本道路協会

林 利行



土木研究所技術推進本部  
先端技術チーム 主任研究員  
Toshiyuki HAYASHI

藤野健一



土木研究所技術推進本部  
先端技術チーム 主席研究員  
Kenichi FUJINO

安井成豊



(一社)日本建設機械施工  
協会研究第一部部長  
Shigetoyo YASUI

大石龍太郎



前 (一財)橋梁調査会常務理事(兼)企画部長、現 オリエンタル白石(株)取締役  
Ryutaroo OOISHI