

トンネル覆工の断面計測における TLS と MMS の適用性の検討

浅羽 絢介¹・坂井 一雄²・宮永 隼太郎³・Haitong Sui⁴・崔 瑛⁵

¹ 学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: asaba-kensuke-wv@ynu.jp

² 正会員 大成建設 (株) 技術センター 社会基盤技術研究部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: skikzo01@pub.taisei.co.jp

³ 正会員 大成建設 (株) 技術センター 社会基盤技術研究部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: mynsnt00@pub.taisei.co.jp

⁴ 学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: sui-haitong-fw@ynu.jp

⁵ 正会員 横浜国立大学准教授 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: sai-ei-mx@ynu.ac.jp

施工管理等に活用されている三次元レーザースキャナー(3DLS)をトンネル断面計測に適用することで、効率的な維持管理を実現できる可能性がある。そこで本研究では、地上設置型 3DLS(TLS)と移動型 3DLS(MMS)についてトンネルの断面計測に対する適用性を検討した。その結果、100m の計測区間に対する計測時間は、TLS で 140 分、MMS で 25 分となり、トンネル 1 スパンの範囲における点間ピッチは、TLS では最大 3mm、MMS では最大 13mm となった。また、変位算出の再現性では、本研究の計測環境において TLS で 1~4mm、MMS で 2~3mm 程度のばらつきが生じることを確認した。

Key Words: 3D laser scanner, point cloud, tunnel lining, deformation measurement, inspection

1. はじめに

近年、トンネルを含むインフラ構造物はその老朽化が進み、現状の調査や、維持・保守管理が喫緊の課題となっている。道路トンネル定期点検要領²⁾では、道路トンネルは5年に1度近接目視による定期点検を実施することが求められているが、対象となるトンネルは約 1.1 万箇所と施設量が膨大であり、効率的な点検技術の開発が急務となる。また同点検要領では、トンネルの変形・移動・沈下に対して、表-1 に示すような対策区分を示しており、対策区分 II a に相当する予防保全的な対策を行うには、1~3mm/年の変形速度を計測によって把握する必要がある、高精度な点検技術を要する。

一方、三次元レーザースキャナー(3DLS)は、短時間で高密度かつ面的な点群データが得られ、トンネルの三次元的な形状情報が取得できる。トンネルにおいては、施工中の覆工コンクリート打設量³⁾、巻厚の管理⁴⁾、および覆工の出来形計測^{5),6)}など、新設工事の施工管理への適

用事例が増えてきている。この技術を供用中のトンネルの点検に適用することで、覆工全体の変状状況を三次元的に把握でき、より効率的な維持管理が実現できると考えられる。

表-1 覆工の変形速度に対する対策区分の目安例²⁾

対象箇所	部位区分	変形速度				対策区分
		10mm/年以上 〔著しい〕	3~10mm/年 〔進行がみられる〕	1~3mm/年 〔進行がみられる〕 〔～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

補足) 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など)

現在トンネルで適用されている 3DLS は、地上にスキャナーを設置して計測する「地上設置型三次元レーザースキャナー(TLS)」と車両もしくは手押し車に搭載して移動しながら計測する「MMS (Mobile Mapping System)」に大別できる。前者は、測点ごとに機器を固定させてから計測を行うため機器によって高精度な計測データを取得でき、誤差 5mm 程度の実績が報告^{5,7)}されているが、測点の移動やそれに伴う測量の手間が増える。一方 MMS は、計測の速度を向上させるために開発されており、自動追尾トータルステーション⁸⁾や GNSS^{9), 10)} (Global Navigation Satellite System) など 3DLS の位置を追跡しながら計測を行うため、時間効率を向上させることができる。しかし、その計測精度はトータルステーションや GNSS により取得した 3DLS の位置精度に左右され、分解能の高い 3DLS を使用した場合でも、その計測精度は cm 単位に留まっている⁹⁾。

このように、3DLS を活用した計測機器である TLS と MMS には計測精度や計測時間などに特徴が見られるが、同一のトンネル構造物に対して両者を適用し、その特性を整理した検討は少ない。そこで本研究では、実トンネルに対する TLS と MMS の計測結果から、トンネル覆工の変位計測における両者の適用性について検討を実施した。具体的には、TLS と MMS の計測時間や、取得される点群の点間ピッチ、点群を用いた変位算出の再現性について計測結果から分析を実施した。なお、実構造物の断面形状の計測精度は、真値と言える断面形状データがないため、本研究では計測結果の再現性を評価する。

2. TLS と MMS の適用性の検討方法の概要

TLS および MMS の適用性の検証手順は、「現地計測 → 点群の処理 → 点間ピッチの測定 → 変位算出の再現性の検討」の流れで行った。以下にその詳細を示す。

(1) 現地計測

実トンネルにおける計測実験は、廃坑となった直線状の道路トンネル A (内空高さ約 6m, 内空幅 8m, 片側 1

車線)で行った。現地計測では、トータルステーション測量 (TS 測量) による絶対座標の取得、および 3DLS 計測として TLS および MMS による点群の取得を実施した。それぞれについて以下に記述する。

a) TS 測量について

3DLS 計測により取得した点群はそれぞれ異なるローカル座標系となっている。そこで、後述する方法により TLS および MMS で取得される点群に絶対座標を与えるため、TS 測量によって坑内基準点測量を実施した。図-1 に計測対象トンネルの概要を示す。不動点 (T0) をトンネル坑口に設置し、坑内の路盤にも 50m 間隔で基準点 (T1~T1200) を設置した。この基準点を用いることで、異なる時期に取得したすべての点群を、坑口を不動点とする同一の座標系に位置合わせすることができる。

b) TLS 計測について

計測機器には Z+F 社製の IMAGER 5016 (10m のレンジノイズ: 0.14 mm~0.19mm (rms))¹¹⁾ を使用した。また、TLS では計測点を固定するため、計測対象全体の点群を高精度に得るには、複数箇所から計測し、個々の点群を位置合わせする必要がある。そこで本研究では、トンネルの 100m 区間を計測するために、対象区間を覆工打設スパン (9m) ごとに分け、各スパンにて点群を取得した後、トンネル内に設置したマーカーにより個々の点群を位置合わせする方法を用いた。TLS 計測開始地点であるスパン 1 (S1)、スパン 2 (S2)、スパン 3 (S3) における計測のイメージを図-2 に示す。TLS の設置位置は各スパンの車道中央であり、9m 間隔で計測を実施した。また、位置合わせのマーカーには球体ターゲットや砂時計型のペーパーターゲットを使用した。球体ターゲットはスパンごとの点群を位置合わせするために使用し、ペーパーターゲットは後述の検討の目印として使用する。ペーパーターゲットはレーザー入射角が 45° を下回ると精度が低下することから、図-2 に示す配置でトンネルの側壁に貼り付けた。一方で球体ターゲットは、TLS から 14m の範囲内で利用することが推奨されているため、図に示す配置で路盤上に設置した。図のように配置することで、隣接するスパンで 4 つの球体ターゲットが共通し、点群の位置合わせが可能となる。例えば、S2 を S1 に位置合

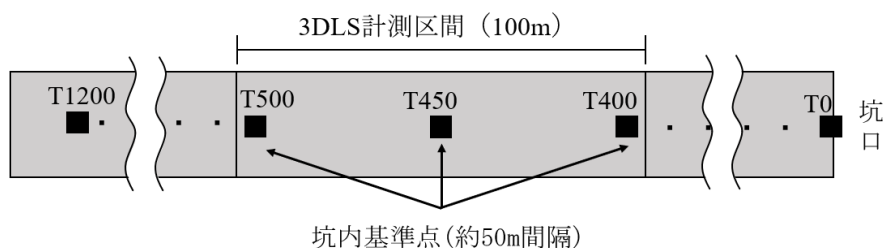


図-1 計測対象トンネルの概要

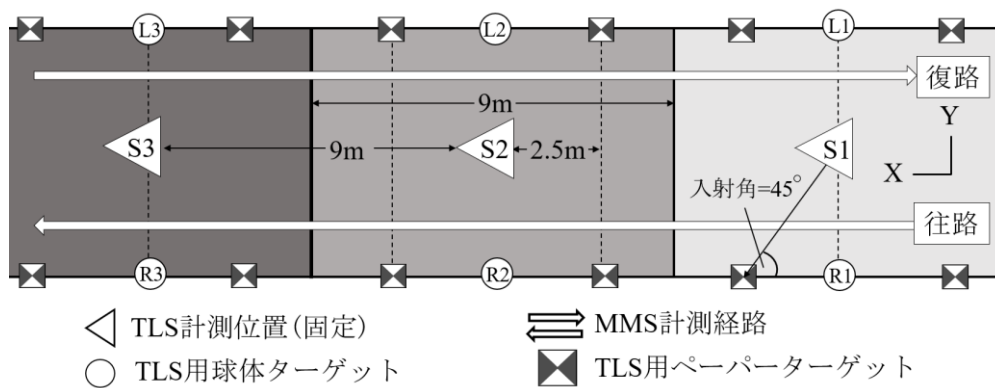


図-2 3DLS 計測のイメージ図(S1, S2, S3)

表-2 取得データの測量条件

取得データ	TLS1	TLS2	TLS3	MMS1	MMS2
霧の有無	有	無	無	有	有
計測位置	車線中央 (固定)			往路 (上り車線)	復路 (下り車線)
点間ピッチ	1.6 mm@5m			3 mm(スキャナ回転方向)@10m	
計測時間(100m)	100~140 分			25 分	
位置合わせ方法	ターゲット (球体とペーパー) と TS 座標を使用			TS の座標を使用	

せする場合には、L1, L2, R1, R2 が共通するターゲットとなる。なお、計測位置から遠方のターゲット (S2 から見た L1, R1 や L3, R3 など) までの距離は約 9.6m であり、近傍のターゲット (S2 から見た L2, R2 など) までの距離は約 3.5m である。また、計測開始地点の球体ターゲット (L1, L2, R1, R2) はプリズム内蔵型のターゲットであり、TS により中心座標を取得できる。上述の坑内基準点から TS により同ターゲットの座標を取得し、点群上の同箇所に座標を与えることで、点群に絶対座標を与えた。TLS 計測では、上記のような対象区間全体の点群を得る計測を 3 回実施した。また、一回当たりの計測では、100m を計測するために、計測モードに応じて 100~140 分を要した。

c) MMS 計測について

MMS では移動しながら計測を行うため、マーカー等による位置合わせをせずとも計測対象全体の点群を取得できるが、その他の計測機器を用いて 3DLS の位置を常に捕捉し続ける必要がある。これを行うためには、GNSS 測量や自動追尾 TS を用いる方法があるが、GNSS 測量はトンネル坑内で使用できない。そこで本研究では、自動追尾型 TS と MMS 搭載機器により 3DLS の位置や姿勢を捕捉する Leica 社製の ProScan を計測機器に採用した。ProScan は、3DLS の Leica ScanStation P40 を IMU (慣性計) とともに手押し式台車に搭載した MMS である。3DLS 上部に取付けた全周プリズムを自動追尾 TS で捕捉し続けることで移動しながら点群取得を行うことができる。図-2 に、MMS 計測のイメージを示す。MMS では

往路 (上り車線) を走行することにより 100m の区間を連続的に計測した後、復路 (下り車線) を走行して同様に点群を取得した。よって、MMS では対象区間の点群を往路計測と復路計測で合計 2 回取得している。また、MMS の計測区間 100m における一回当たりの計測時間は 25 分であった。

このように、3DLS 計測では、100m の計測対象に対して TLS で 3 回、MMS で 2 回の合計 5 回計測を実施した。よって、以降で行う検討は、5 つの計測データに対して行う。表-2 に、取得データの測量条件を示す。表-2 に示す点間ピッチは、3DLS 機器の仕様書に記載されている値であり、計測により得られる点間ピッチの目安である。また、計測時間は据置等を含む実際の計測時間である。ただし、これらの計測データのうち、TLS の一回目 (TLS1) および MMS の 2 回の計測時にはトンネル坑内に霧が発生し、側壁が湿潤状態にあったことに留意する必要がある。湿潤状態では、計測結果が変化する可能性があることから、霧や湿潤による取得点群への影響についても本研究にて考察する。

(2) 点群の処理

取得した点群に対して、ノイズの除去と、点群の位置合わせを実施した。点群の処理および差分計算等には、3D 点群処理ソフトウェアとして、TLS, MMS 付属ソフトウェアや、OPT cloud survey (以下 OCS) ¹²⁾ を使用した。

ノイズの除去は、点群に含まれる 3DLS 本体像や、トンネル肩部の付帯設備、それに乱反射して生成された点

群などをノイズと判断し、手動で実施した。また、TLS点群では位置合わせが必要になるため、処理ソフトにより各スパンの球体ターゲットやペーパーターゲットを自動検出して位置合わせに用いた。

(3) 点間ピッチ測定の概要

点間ピッチが狭く、点群密度が高いほど計測対象を緻密に表現できるため、点間ピッチは位置合わせの精度等に影響を与える重要なファクターである。一方で点間ピッチは計測対象へのレーザー照射距離やレーザー入射角度、色や凹凸といった対象表面の材質の影響を受けるため、一様な分布にはならない場合がある。そこで、本研究では実トンネルに対する TLS および MMS の計測結果から、実際に得られる点間ピッチについて検証を行った。

表-2に示すデータのうち、TLS2とTLS3, およびMMS1とMMS2はそれぞれ同じ計測手法、計測環境下で点群を取得していることから点間ピッチは等しくなる。よって、点間ピッチの測定データには TLS1 (霧がある時の TLS 点群), TLS2 (霧がない時の TLS 点群), MMS1 (霧がある時の MMS 点群) を用いた。測定断面は、TLS 設置位置と同じ横断面 (0m) と、設置位置からトンネル縦断方向に 2.5m, 5.0m, 7.5m, 10m 離れた 5 断面とし、各断面について、図-3に示す左側壁部(LW), 左肩部(LS), 天端部(C), 右肩部(RS), 右側壁部(RW)の 5 箇所にて点間ピッチを測定した。また、各測定箇所においてトンネル軸方向と円周方向でそれぞれ 5 回ずつ点間ピッチを測定し、計 10 回の測定値の平均を同箇所における点間ピッチとした。

(4) 覆工変位算出における再現性の検討方法の概要

覆工変位算出の再現性は、二つの点群の差分量を計算することで検証する。ここでいう差分とは、トンネル横断面における断面線法線方向の差分である。以下に、差分計算の流れについて述べる。また、差分計算方法のイ

メージを図-4に示す。

- (i) TS 座標や球体ターゲットを用いて、差分計算する 2 つの点群を同一の座標系に位置合わせする。
- (ii) 重ね合った 2 つの点群から、計算を行う断面のトンネル縦断方向座標と、その座標を中心とする断面の厚さ (2 cm) を指定し、厚さ内の点群を抽出する。
- (iii) 抽出した点群をトンネル横断平面に投影する。
- (iv) 計算の基準となるデータから抽出された点群を平均化し、それらを線で結ぶことで断面線を形成する。
- (v) 基準データの断面線と、比較データの抽出点群との断面線法線方向の距離を計算する。

このようにして計算される値を差分計算値とした。

上述の差分計算の妥当性を検証するため、TLS2 の点群を 1mm 鉛直方向に上昇させ、上昇前の点群を基準データとし、上昇後を比較データとして差分計算を実施した。その結果を図-3に示す。計算は断面全周にて行う。また、円周方向の計算間隔は任意に設定することができ、図-3の計算は 800 mm の間隔で行った。計算結果の単位は mm であり、“+” 符号は比較データが基準データに比べて地山側に変位したこと、“-” はトンネル内空側に変位したことを意味する。図-3より、天端部周辺および路盤で 1 mm の差異が確認でき、トンネル全体を上向きに 1 mm 移動させた結果が正確に計算できたと判断できる。よって、上述の差分計算の妥当性が検証できたと考えられる。

以後に示す差分は、上述の方法により計算するが、より詳細に差分を示すため、円周方向に 10mm の間隔で計算を実施する。また、それにあたって図-3の計算結果を図-5のように整理する。図-5の横軸は覆工上の差分計算を行った位置を、トンネル中心から天端方向を 0° とし、時計回りを正とする角度で示しており、縦軸に同箇所における計算値を示している。よって、0° が天端中央における差分計算値であり、180° が路盤中央での値となる。なお、図中の点が各位置における差分計算値を示してお

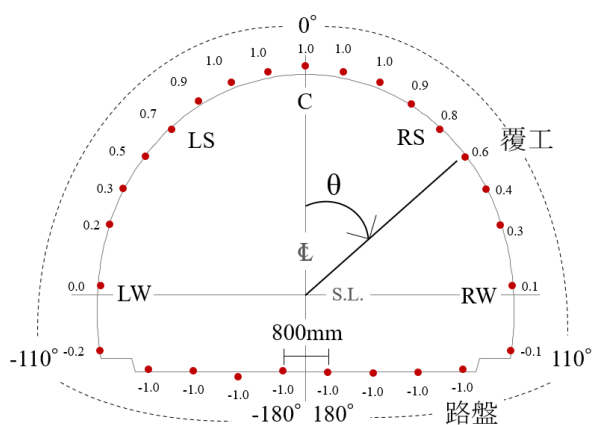


図-3 差分計算の検証

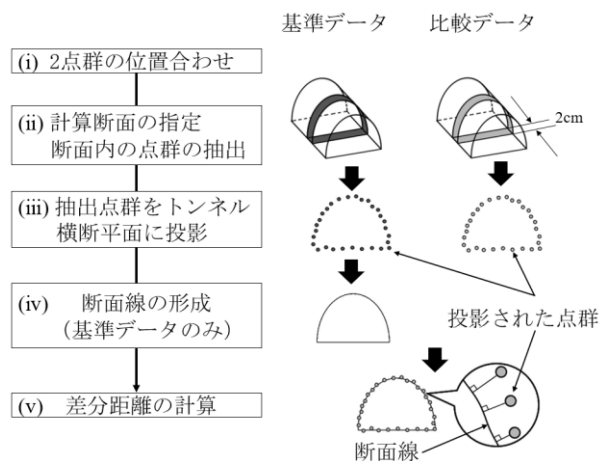


図-4 差分計算の流れ

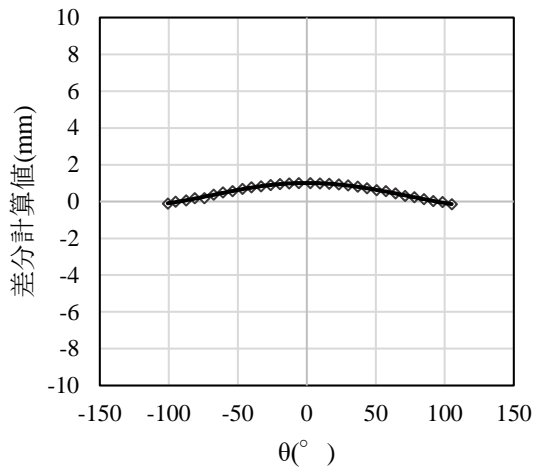


図-5 差分計算結果

り、実線は点から得られる近似曲線である。天端設備や側壁の段差などの除去しきれないノイズも含まれた状態で差分計算を行うため、計算結果にはノイズによる誤差が生じる可能性がある。そこで本研究では、計算値から得られた近似曲線の最大値と最小値で再現性を評価する。それにあたって、差分計算の結果から決定係数 0.8 以上の近似曲線を得るために、最小二乗法による 6 次式近似曲線を用いた。また、 $110^{\circ} \sim 180^{\circ}$ および $-110^{\circ} \sim -180^{\circ}$ の範囲は路盤における計算値になるが、路盤ではレーザー入射角度が壁面や天端より浅くなり、点群の精度が低下するため、結果は省略する。

差分計算を行う断面の位置の概略を図-6 に示す。本研究では計測対象区間(100 m)全体を TLS および MMS 機器用いて、それぞれ複数回計測しているが、再現性の検討は、TLS については計測開始地点 10m の区間で行い、MMS については折返し地点 10m の区間で行う。これは、TLS 点群と MMS 点群に与える TS 座標の取得精度が図-6 に示す検討区間でそれぞれ最も高くなるためである。また、計算断面は各検討区間における TLS 設置断面(区間中央)と設置位置からトンネル軸方向に 5m 離れた 2 断面である。断面の位置は、本トンネルの覆工コンクリートの打設 1 スパンが約 9m であることや TLS 点群のレーザー入射角を考慮して決定した。TLS をスパン中央に設置し、トンネル軸方向に前後 5m 離れた断面までを計測対象とすることで 1 スパンをカバーできる。また、本計測において、各断面における最小のレーザー入射角度は、2.5m 離れた断面で約 58° 、5m 離れた断面で約 39° 、7.5m 離れた断面で約 29° 、10m 離れた断面で約 22° となる。レーザー入射角が 45° より小さくなると点群の精度が低下するため、ここでは TLS 設置位置から 5m 離れた断面までの点群を再現性の検討に用いることとした。また、本計測では各計測間で覆工に変形はないと考えられる。よって、差分が小さいほど、計測の再現性が高く、

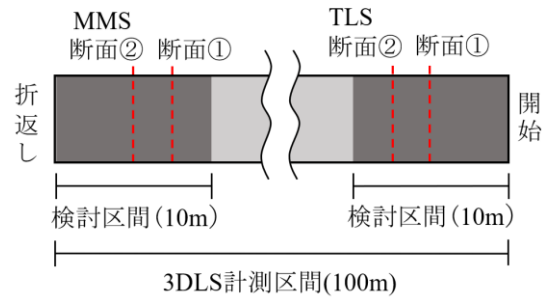


図-6 再現性検討断面の位置

表-3 差分計算の組合せ

検討する再現性の内容	基準データ	比較データ
a) 湿潤時における TLS	TLS1	TLS2
b) 湿潤時における MMS	MMS1	MMS2
c) 湿潤時における TLS	TLS1	TLS2
d) 湿潤がない時の TLS	TLS2	TLS3

変位計測への適用性が高いと判断した。

差分計算の組合せと、それにより検討する内容を表-3 に示す。TLS1, MMS1, MMS2 の計測時には霧により側壁が湿潤状態にあった。よって a) と b) では湿潤環境下における TLS, MMS の再現性を検証する。また、d) では、湿潤していない時期に取得したデータのみを用いて TLS の再現性を検討する。なお、a), b) と c), d) は座標系が異なるが、具体的な内容は後述する。

3. 点間ピッチの測定結果

点間ピッチの測定結果を図-7~図-9 に示す。図-7 は側壁が湿潤状態にない時に取得した TLS 点群を用いて測定した結果であり、図-8、図-9 は湿潤状態にある時に取得した TLS 点群および MMS 点群を用いて測定した結果を示している。グラフは、測定を行った断面の位置を横軸に示し、各断面における点間ピッチの値を縦軸に示している。なお、ここで示している距離は、TLS 設置から測定断面までのトンネル軸方向距離であり、側壁等に対するレーザー照射距離とは異なる。また、断面ごとに左側壁部(LW)、左肩部(LS)、天端部(C)、右肩部(RS)、右側壁部(RW)の 5 箇所測定している。実線は、断面ごとの 5 箇所の測定値をさらに平均し、それらを結んだ直線である。図-9 には MMS での測定結果に加えて、図-7、図-8 の平均線も併せて示している。

図-7 の結果より、湿潤がない場合の TLS で取得される点間ピッチは、トンネル軸方向の前後 5m の範囲内においては 1~2mm 程度となった。なお、本計測では 3DLS からレーザー照射距離として 5m 離れた位置で、1.6mm の

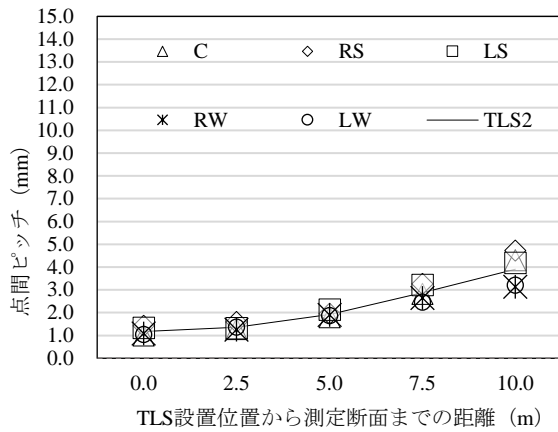


図-7 各断面における点間ピッチ (測定データ：TLS2)

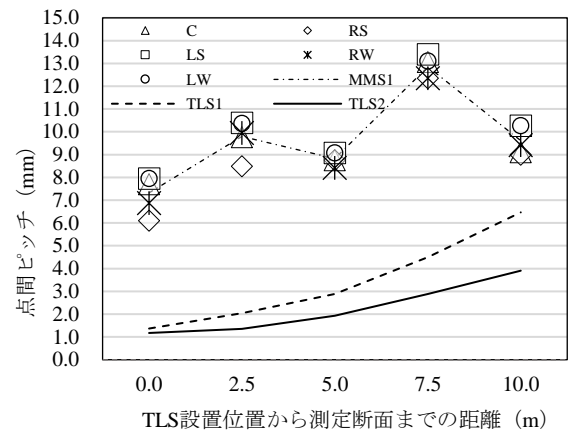


図-9 各断面における点間ピッチ (測定データ：MMS1)

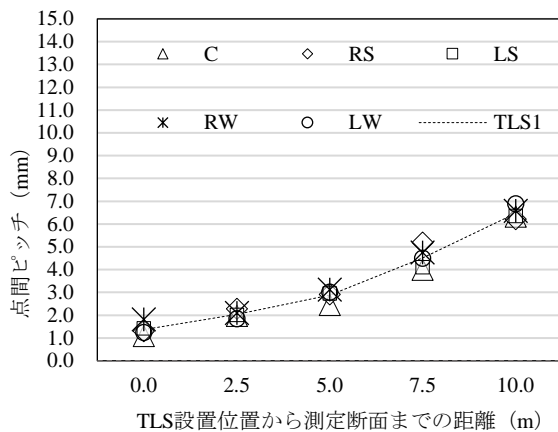


図-8 各断面における点間ピッチ (測定データ：TLS1)

点間ピッチを得る計測手法により点群を取得した。図-7に示す、5m離れた断面における側壁や天端等に対するレーザー照射距離は6.4mほどであるため、実データから測定した点間ピッチが同箇所でも2mm程度となったことは、整合性のある結果であると考えられる。

図-8の結果より、湿潤がある場合のTLSの点間ピッチは、湿潤がない場合よりも増加する結果が得られた。具体的には、3DLS設置位置から5m離れた断面において、湿潤がない場合と比較して点間ピッチが1mm増加した。よって、湿潤環境では、トンネルの1スパンを計測する場合に得られる実際の点間ピッチは、最大値3mm、最小値1mm程度となることが確認された。また、レーザー照射距離が長くなるほど、点間ピッチの増加幅も拡大する傾向が得られた。TLS1とTLS2の計測条件は湿潤の有無以外はすべて同じであるため、側壁の湿潤状態や霧の影響により点間ピッチが増大していると考えられる。具体的には、側壁の湿潤により覆工表面におけるレーザーの鏡面反射が強まり、3DLSに返ってくる光量が減少すること¹³⁾や、大気中の霧によりオクルージョンが生じ、覆工にレーザーが届かなくなること¹⁴⁾で、部分的に点群の欠損が生じていると考えられる。また、レーザー照射距離が大きいほど、霧によるオクルージョンの効果等が高

まるため、計測位置から離れるほど点間ピッチの増加幅が拡大しているものと推察する。

これまでの一連の検討のうち、点間ピッチをTLS2の二倍に設定して取得した点群を用いた検討¹⁵⁾では、TLS2のデータと比較して点群の位置合わせの精度が低下し、変位算出の再現性が1mm~0.5mm程度低下する結果が得られた。よって、湿潤による点間ピッチの増加も、点群の位置合わせの精度に影響を与える可能性があるため、湿潤環境下では所定の点間ピッチを得るために、想定よりも密に点群を取得する必要があると考える。

図-9より、湿潤環境下におけるMMSの点間ピッチは、最小で6mm、最大で13mm程度となる結果が得られた。また、TLSではトンネルの1スパンの範囲(5m離れた断面まで)における点間ピッチの変動幅は、トンネル軸方向と円周方向で同様に2mm程度であり、同一断面内の5箇所点間ピッチは同程度の値を示したが、MMSでは同一断面内や異なる断面間において点間ピッチの変動が大きくなった。具体的には、同一断面内にてトンネル円周方向の点間ピッチが最大2mm程度変動し、異なる断面間では軸方向の点間ピッチが最大25mm程度変動した。このうち、同一断面内における円周方向の点間ピッチの変動はMMSの計測位置が要因であると考えられる。本計測で用いたMMSのレーザー照射部はトンネル円周方向にのみ一定速度で回転しているが、計測位置はトンネル中央ではなく片方の車線上である。そのため、同一横断面内の左右の側壁等でレーザー照射距離が異なり、両側壁間で円周方向の点間ピッチに差を生じている。例えば、本計測データにおいてレーザー照射距離が左側壁で6m、右側壁で2.5mとなる断面では、両位置で測定した円周方向点間ピッチの差は2mm程度であった。また、軸方向の点間ピッチの変動はMMSの移動速度に影響を受けている。MMSの移動速度は厳密には一定でないことや、本計測では、自動追尾TSによるMMSの位置測定を精度良く行うために、6秒間移動するごとに4秒間台

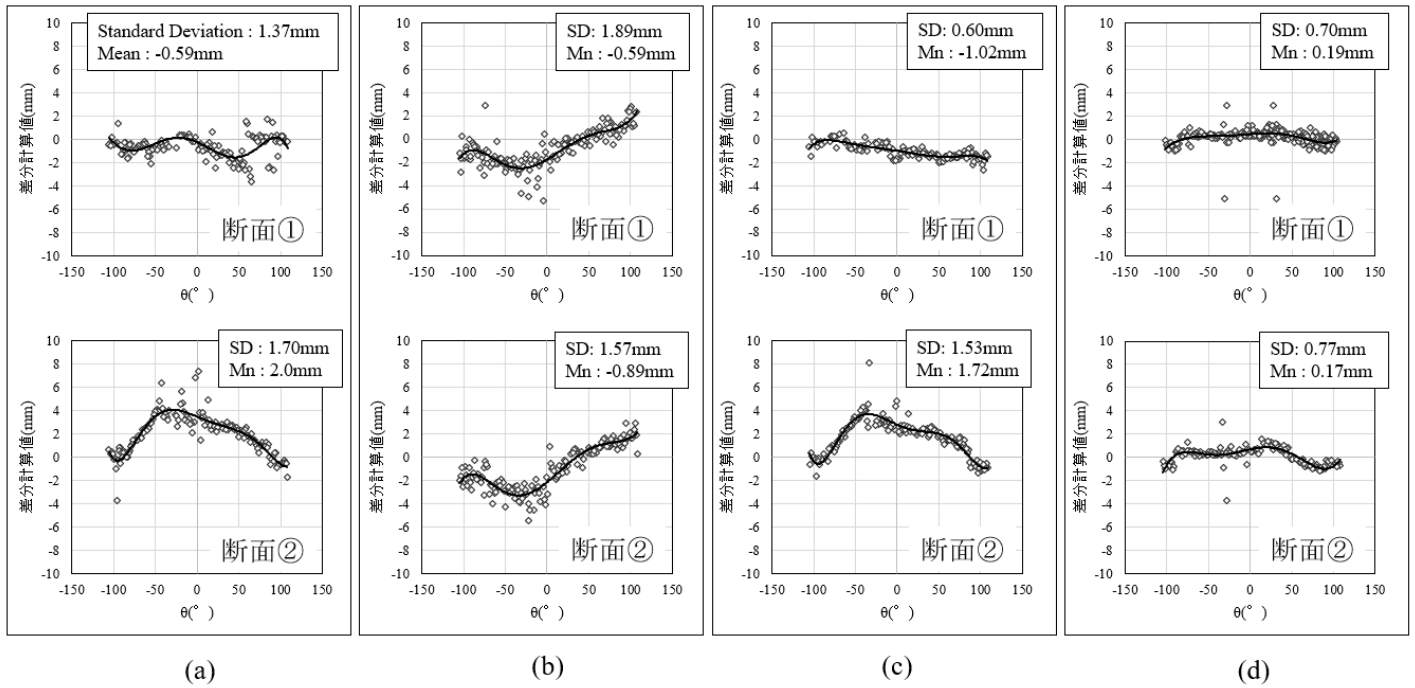


図-10 差分計算結果：(a) 湿潤時における TLS (TS 座標使用)，(b) 湿潤時における MMS (TS 座標使用)
(c) 湿潤時における TLS (ローカル座標使用)，(d) 湿潤がないときの TLS (ローカル座標使用)

車の移動を停止していることが軸方向点間ピッチの変動に影響していると考えられる。なお、本研究では、レーザ照射距離として 10m 離れた位置で 3mm の点間ピッチを得る手法により MMS 計測を実施した(表-2 参照)。

4. 変位算出における再現性の検証結果

図-10 に差分計算の結果を示す。各計算に用いた点群の組み合わせは表-3 の通りである。図-10(a)より、湿潤時における TLS の再現性は、近似曲線の最大値、最小値から、断面①では 2mm 程度となり、断面②では 4mm 程度となった。このように、TLS では断面①のように比較的再現性の高い断面と、断面②のように再現性の低い断面が現れる結果となった。これは、側壁の湿潤状態が影響を与えていると考えられる。本研究では TLS に位相差方式の 3DLS を用いているが、位相差方式は計測精度が高い一方で、色や凹凸といった対象表面の材質の影響を受けやすいことが知られている¹⁶⁾。よって、TLS は湿潤の影響を強く受け、本来よりも大きく再現性が低下している可能性がある。なお、他のスパンにおいても TLS では図-10(a)の断面①に示すような比較的再現性の高い断面と、断面②のように再現性が低い断面が交互に現れる傾向が確認された。一方で、MMS では図-10(b)に示す断面①と断面②のように、各断面が示す再現性の傾向は同様であった。また、MMS では断面の左半分(0° ~180°)にて地山側に、右半分(-0° ~-180°)にて内空側に点群

が分布する傾向が得られた。これは、MMS の計測位置が往路と復路で異なることが影響している可能性がある。計測位置の変更により点群の取得結果が変化する報告^{15), 17)}がされていることや、他の影響が少ないことからこのように推察する。結果として MMS では、近似曲線の最大・最小値を参照すると湿潤環境下において 3mm 程度の再現性が得られることを確認した。

図-10(c)，(d)では、湿潤による TLS の再現性を検討する。なお、ここでは湿潤の影響のみを考慮するため TS 座標による位置合わせではなく、基準データに含まれる球体・ペーパーターゲットの位置に比較データの球体・ペーパーターゲットの位置を重ね合わせることで位置合わせしている。よって図-10(c)，(d)ではいずれも基準データのローカル座標系に比較データを位置合わせしている。これにより、TS 測量誤差の影響を排除した。結果より、湿潤がない場合、TLS では近似曲線の最大値・最小値を参照すると 1mm 程度の再現性が得られることが確認された。トンネルの変状に予防保全的な対応を講ずるためには、3mm/年という変形速度を把握する事が目安となることから、湿潤のない環境下において TLS を用いることで、1~2mm 程度の変位量を評価できる可能性が示唆された。一方で湿潤がある場合には、断面①では 2mm 程度の再現性が得られているが、断面②では天端付近にて 2~4mm 程度の再現性となっており、断面により再現性の変動が生じている。よって、TLS では湿潤の影響を受け、特に天端付近にて最大 3mm 程度再現性が低下する可能性があることを確認した。

5. 結論

本研究では、トンネル覆工の断面計測に対する TLS および MMS の適応性として、計測時間、点群の点間ピッチ、点群を用いた覆工変位算出の再現性について、実トンネルに対する計測結果から分析した。その結果得られた知見を以下に示す。

(1) 計測時間について

- 100m の区間を計測するにあたって TLS では計測モードによって 100~140 分、MMS では 25 分を要した。

(2) 点間ピッチについて

- TLS 点群では、側壁の湿潤により点間ピッチが増加した。具体的には、TLS 設置位置から 5m 離れた断面では 1mm 程度点間ピッチが増加し、最大 3mm 程度となった。
- MMS 点群では、移動速度に応じてトンネル軸方向の点間ピッチが最大 25mm 変化し、軸方向と周方向点間ピッチを平均した際の最大値は 13mm、最小値は 6mm 程度となった。

(3) 変位算出の再現性について

- TLS 点群では、湿潤環境下で再現性が高い断面と低い断面が交互に現れ、2~4mm 程度の再現性が得られた。再現性の変動は、位相差方式 3DLS が計測対象表面の特性を受けやすいことが影響している可能性がある。
- MMS 点群では、湿潤環境下で 3mm 程度の再現性を得られた。MMS では往路と復路の計測点群で高さ方向に差が生じており、計測位置の違いが影響を与えている可能性がある。
- 湿潤がない場合、TLS 点群では 1mm 程度の再現性を得られ、1~2mm 程度の変位を評価できる可能性があるが、湿潤時には天端付近にて最大 4mm 程度まで再現性が低下することを確認した。

今後の課題として、本研究では特定の区間においてのみ各ケースでの断面比較を実施したが、今後はより多くの断面に対して同様な検討を実施し、より正確な傾向をまとめる必要がある。また、湿潤のない状態における MMS の再現性や計測位置の影響について検討を行う必要がある。

謝辞：本研究は北海道土木技術会トンネル研究委員会の活動の一環として道路トンネル A での計測機会を提供いただいたものである。最後に、本研究の実施にご協力を頂いた方々に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和 3 年版国土交通白書，<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html> (2021 年 7 月 25 日閲覧)
- 2) 国土交通省：道路トンネル定期点検要領，pp.42, 2019.
- 3) 塩崎正人，安藤文彦，岡本隆：情報化技術 3 次元レーザースキャナーのトンネル施工管理への適用事例，建設の施工企画，第 693 号，pp.20-25, 2007.
- 4) 小西 昭裕，織田 重和，櫻井 雄二郎，塩崎正人，佐田 達典：3 次元レーザースキャナーを用いたトンネル覆工巻き厚管理の現場適用，土木情報利用技術講演集，Vol.31, pp.61-64, 2006.
- 5) 国土交通省：レーザースキャナーを用いた出来形管理の試行要領(案) (トンネル編)，2017.
- 6) 笹嶋和彦，築地貴裕，木村厚之，谷村浩輔：低強度地山の出来形測量に 3D レーザースキャナーを試行，トンネルと地下，第 51 巻，第 5 号，pp.47-55, 2020.
- 7) 吉田貴保，岡本亮二，林訓裕：3 次元レーザースキャナーを用いたトンネル内空断面の変状管理計画，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.
- 8) 池田 直広，遠藤 健，柳原 好孝：移動式三次元形状計測システムの開発と運用，計測と制御，55 巻 6 号，pp.511-514, 2016.
- 9) 間野 耕司，石井 一徳，平尾 公孝，橋 菊生，吉村 充則，Devrim Akca, Armin Gruen：移動計測車両測量システム (MMS) により取得される点群の精度評価，写真測量とリモートセンシング，51 巻 4 号，pp.186-200, 2012.
- 10) 佐々木 公一：小特集「インフラ構造物のモニタリング」6. レーザースキャナーによるトンネルの変位計測，写真測量とリモートセンシング，55 巻 1 号 pp.23-26, 2016.
- 11) Z+F IMAGER® 5016 Preliminary Data Sheet: <https://positics.fr/wp-content/uploads/2020/07/5016-Spec-techniques.pdf> (2022 年 8 月 25 日閲覧)
- 12) OPT Cloud Survey HP: <https://www.opt-techno.com/opt-cs/> (2022 年 8 月 25 日閲覧)
- 13) J Lekner, M C Dorf : Why some things are darker when wet, 1988
- 14) Danielle Delaloye, Mark S. Diederichs, Gabriel Walton & Jean Hutchinson : Sensitivity Testing of the Newly Developed Elliptical Fitting Method for the Measurement of Convergence in Tunnels and Shafts, 2014
- 15) 浅羽 絢介，松永 拓望，坂井 一雄，宮永 隼太郎，谷 卓也，崔瑛：3DLS の測定方法がトンネル覆工の断面計測に与える影響の考察，トンネル工学研究発表会講演集 311-9, 2021
- 16) Suchocki C : Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings, Materials, 2020
- 17) 梅田 隼，金子 公一，塚本 真也：地上移動体搭載型レーザースキャナーを用いた舗装路面プロファイルの算出，東亜道路工業株式会社，ライカジオシステムズ株式会社

(2022. 8. 26 受付)

COMPARISON OF THE APPLICABILITY OF TLS AND MMS FOR CROSS-SECTION MEASUREMENT OF TUNNEL LINING

Kensuke ASABA, Kazuo SAKAI, Syuntaro MIYANAGA, Haitong SUI and Ying CUI

Terrestrial laser scanners (TLS) and mobile mapping systems (MMS) are widely used for tunnel construction management since they can obtain high-density and high-quality point clouds in a short time. Therefore, the possibility of using them in tunnel management has been discussed by conducting several actual tunnel cross-section measurements. Furthermore, the measurement time, the point-to-point pitch, and the reproducibility of deformation analysis using point clouds of tunnel lining were discussed here. As a result, in the 100 m measurement section, TLS takes 140 minutes to scan, and MMS takes 25 minutes. Furthermore, in the fog, the pitch of TLS point clouds was 1~3mm, and MMS was 7~13mm. On the other hand, the reproducibility of TLS point cloud analysis was 1~4mm, and MMS was 2~3mm in the fog.