

トンネルの長期的な変位監視手法への 3D レーザスキャナの適用性検討

坂井 一雄*¹・宮永 隼太郎*¹・崔 瑛*²・浅羽 絢介*²

Keywords : mountain tunnel, operation and maintenance, concrete lining, 3D laser scanner, displacement measurement

山岳トンネル, 維持管理, 覆工コンクリート, 3D レーザスキャナ, 変位計測

1. はじめに

道路および鉄道に供されるトンネルのうち、山岳工法にて施工された山岳トンネルは、供用時に覆工コンクリートのひび割れや圧ざといった変状を呈し、剥落や漏水として使用者に影響や被害を与える場合がある。山岳トンネルが変状をきたす原因は、大きく外因（外力や環境等の外的な要因）と内因（材料や設計、施工等に起因する構造的な要因）に分けられ、図-1 のように実際には各種の要因が複合的に作用するケースもある¹⁾。

これら覆工コンクリートが生じる変状のうち、ひび割れや圧ざ、うき、漏水といった現象は目視や画像にて観察されるため、日常点検や定期点検時の近接目視や打音検査で発見されることが多い。一方で、変形・移動・沈下に該当する変状は、微小な挙動であるがゆえ、高精度な変位計測が必要とされ、表-1 に示すような変形速度が対策を講ずる規模や時期の目安例とされている²⁾。対策区分 IIa（変形・移動・沈下等をしており、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）に相当する予防保全的な対応を講じるためには、1～3mm/年の変形速度を計測で把握する必要がある。

長期的な覆工の変形挙動を把握する手法は、コンパージュンスメジャー計測、レーザ変位計測、写真測量、トータルステーションによる測量などが代表的である。しかしこれらの従来手法は、任意の 1 点の変位、もしくは 2 点間の相対変位を測定する手法である。このた

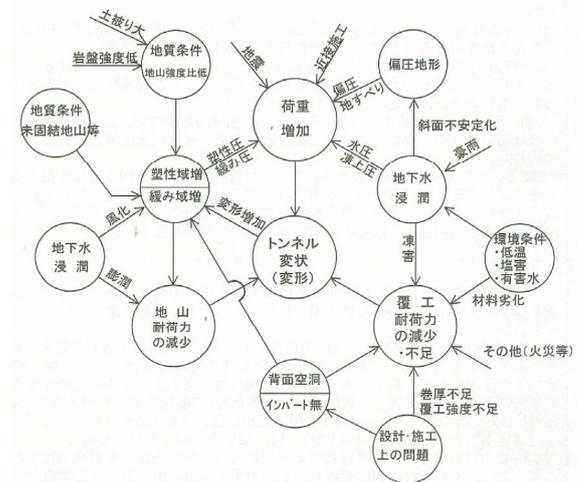


図-1 トンネル変状原因¹⁾

Fig.1 Reasons of tunnel defect after construction

表-1 変形速度に対する対策区分の目安例²⁾

Table 1 Example of countermeasures criteria by deformation velocity of concrete lining

| 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 路面 | 断面内 | | | ○ | ○ | IIb, IIa |
| | | | ○ | ○ | | III |
| | | ○ | | | | IV |

補足) 変形速度 1~3mm の場合の判定例を下記に示す。

- IIa: 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)

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室
* 2 横浜国立大学大学院

表-2 3DLS のスペック比較

Table 2 Specification comparison among 3DLSs in market

| メーカー | Z+F | FARO | Leica | RIEGL | TOPCON | ニコン・トリニプル |
|-------------------|---|---|---|--|---|---|
| 製品名 | Imager 5016 | Focus Premium | ScanStation P50 | RIEGL VZ-400i | GLS-2200 | Trimble SX12 |
| 外観 |  |  |  |  |  |  TS機能付き |
| 測定レート | 最大100万点/秒 | 最大200万点/秒 | 最大100万点/秒 | 最大50万点/秒 | 最大12万点/秒 | 最大26,600点/秒 |
| 点間距離@10m (解像度) | 0.7mm (最密) | 1.6mm | 記載なし | 7mm | 3.1mm | 6.25 ~50mm @50m |
| 3次元位置精度 | 1mm+10ppm/m | 2mm+10ppm/m | 1.2mm+10ppm/m | 5mm | 3.1mm | 2.5mm |
| 測角精度 | 14" | 19" | 8" | 記載なし | 6" | 記載なし |
| ノイズ | 0.14mm rms @10m (White) | 0.1mm rms @10m (White) | 0.4mm rms @ 10m | 記載なし | 記載なし | 1.5mm rms @50m |
| 重量 | 7.5kg | 4.4kg | 12.3kg | 9.7kg | 10kg | 7.5kg |
| 防塵・防水機能 | IP54 | IP54 | IP54 | IP64 | IP54 | IP55 |

め、既知の注視範囲を継続監視する場合には有効であるが、未知の要対策範囲を効率的に抽出することは難しいという課題がある。一方で、昨今土木建築分野での適用が活発に進んでいる、3D レーザスキャナ（以下、3DLS と称す）計測手法では、多数の点座標（点群データ）を高速に取得することができ、面や立体の形状を測定することができる。山岳トンネルでも施工時の吹付けコンクリートや覆工コンクリートの出来形計測に対して使われている（例えば 3),4)。本手法を長期的な覆工変位計測にも適用することができれば、多点かつ面的な計測により、トンネル全長のうち変形量や変形速度が顕著で対策を講ずべき範囲を効率的に抽出することが可能であると考えられる。そこで、筆者らは矢板工法にて施工されたトンネルで据置型3DLSを使った現場計測試験を実施し、3DLS による覆工変位評価方法、計測作業性、計測精度、ならびに効率的な点群処理方法に関する検討を進めてきた^{5),6)}。なお、本研究は大成建設株式会社と国立大学法人横浜国立大学が包括連携協定を締結したことに端を発する共同研究である。本論文では、一連の研究成果を抜粋して報告する。

2. 3DLS による覆工変位評価手法

2.1 3DLS の選定

表-2 に土木工事や測量作業で使用例が多く見受けら

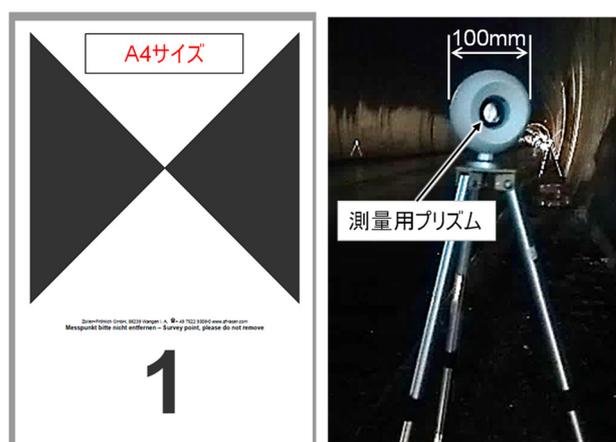


図-2 3DLS 用ターゲット

(左：ペーパーターゲット，右：球体ターゲット)

Fig.2 Targets for 3DLS

(Left: Paper target, Right: Sphere target with mirror prism)

れる3DLSのカタログスペックの比較表を示す。本研究では、完成後のトンネルのわずかな変位挙動を把握する必要があることから、測定精度や測定ノイズにおいて優位性のある Z+F 社の Imager 5016⁷⁾を用いるものとした。

2.2 点群データへの座標付与

3DLS によって取得した点群データは機械据付位置と測定対象物の相対座標である。Imager 5016 は光波測距儀やトータルステーションのように既知点への器械据

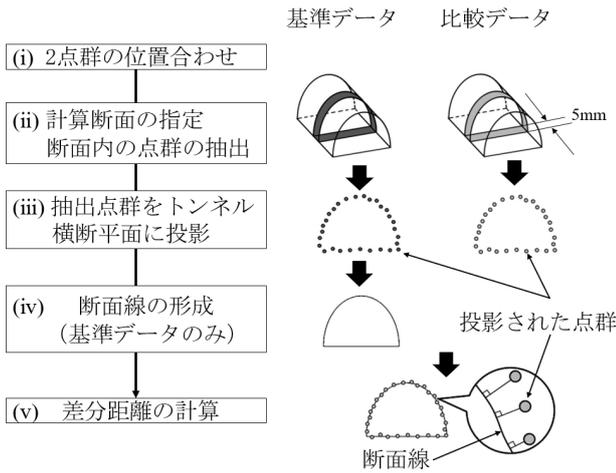


図-3 任意断面での変位量算出⁶⁾

Fig.3 Displacement calculation at an arbitrary cross-section⁶⁾

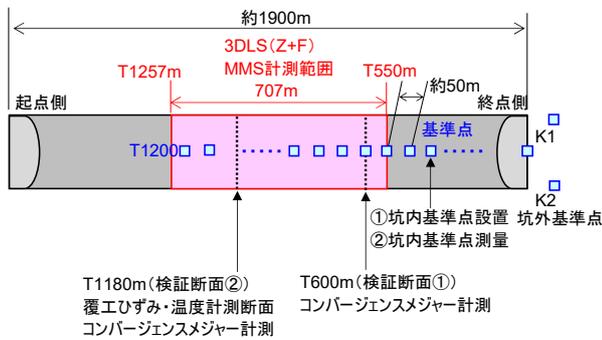


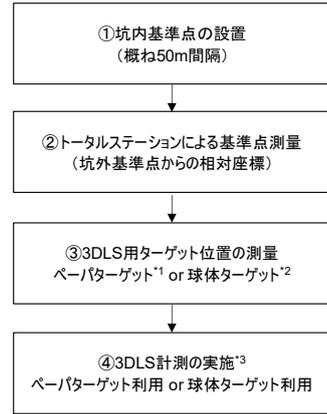
図-4 現場計測試験での実施項目と計測範囲

Fig.4 Measurement items and range on the field test

付機能がないため、複数回測定した点群データの合成を目的とした3DLS用ターゲットの位置を予め光波測距儀により測量し、これをもとにトンネル坑口等を基準点とした絶対座標に変換するものとした。3DLS用のターゲットは図-2に示すようにペーパーターゲットおよび球体ターゲット(プリズム内蔵)を使用した。

2.3 覆工変位評価手法

初期値計測時における点群データを3D点群処理ソフトの一つであるOPT Cloud Survey⁸⁾を用いて、ポリゴン化(メッシュ化)して、覆工表面形状を面として記録する。次回以降の3DLS計測によって得られた点群データから初期値計測時の覆工表面までの法線距離を覆工変位として評価して変位分布図を描画するものとした。また、任意断面での変位量を分析するために、トンネル軸方向は計測期間中に不変であると仮定して、計算断面を抽出する方法も実施した⁶⁾(図-3)。



*1:ペーパーターゲットは覆工壁面に貼付け。25m間隔でTSにより座標を付与
*2:球体ターゲットは計測毎に移動。100m間隔でTSにより座標を付与
*3:ペーパーターゲットの場合、計測は5m毎に実施。
球体ターゲットの場合、計測は9m毎に実施

図-5 据置型3DLSの計測手順

Fig.5 3DLS measurement flow on the field test

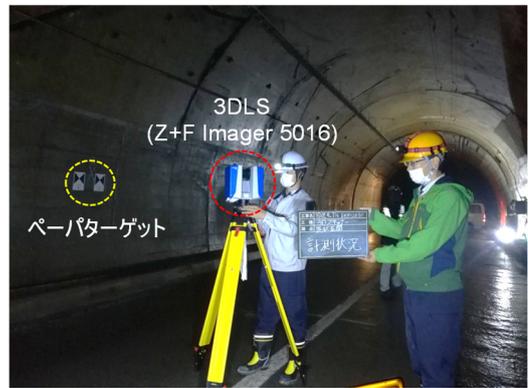


図-6 据置型3DLSの実施状況

Fig.6 3DLS measurement with paper target

3. 道路トンネルでの現場計測試験

3.1 計測条件

現場計測試験は廃坑となった道路トンネルで実施した。断面形状は馬蹄形で、内空高さは約6m、内空幅は8mである。トンネルは矢板工法で施工された。寒冷地のトンネルであるため、季節ごとの温度変化が大きく、寒暖差による覆工変位が計測される可能性が考えられた。

約1.9kmのトンネル全長のうち、トンネル中央区間の700m程度の範囲で3DLS計測を実施した(図-4)。3DLSによる変位計測は図-5に示すフローにて実施した。3DLS本体は、専用の三脚上に固定し、概ね本体高さが路盤面から1.8m程度となるように据え付けた(図-6)。ペーパーターゲットを用いた計測の場合には、ターゲット中心座標の視認精度を確保するために、計測器械の据え付け位置から45°以内にターゲットが存在するように、トンネル延長方向に5m間隔で計測を実施するもの



図-7 MMS (Leica ProScan)の実施状況
Fig.7 MMS (Leica ProScan)

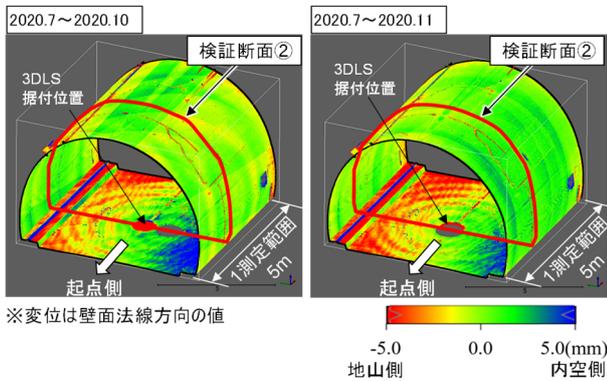


図-8 覆工変位コンター図
(左：2020年10月，右：2020年11月)
Fig.8 Displacement contour
(Left: Oct. 2020, Right: Nov. 2020)

とした。一方、球体ターゲットを用いる場合には、据え付け位置からの角度によらず円として視認できるため、視準距離を延長できる。そこで、覆工コンクリートの1打設スパン長である9mを計測間隔とした。また、測定解像度は精度の高いポリゴン化を実現するために、実用的な計測時間で密度の高い解像度(点群間隔3.1mm@10m)を採用した。

3.2 検証項目

3DLS計測による変位評価結果の妥当性検証と精度把握を目的として、計測範囲内で検証断面を2断面設け、コンバージェンスメジャーによる内空変位計測とコンクリートひずみ計測を実施するものとした。また、覆工コンクリートの出来形計測として実績のある手押し台車式 Mobile Mapping System (以下、MMS と称す)の一つである Leica ProScan, (以下 ProScan と称す)を実施して、精度や作業性を比較するものとした。

ProScanは3DLSのLeica ScanStation P40をIMU(慣

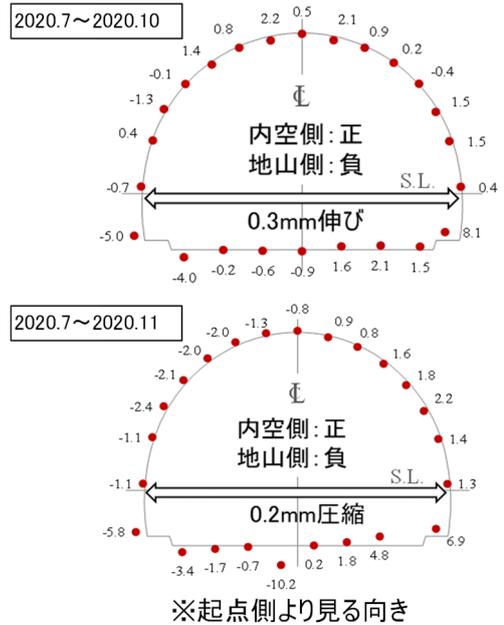


図-9 覆工変位断面図(検証断面②)
(左：2020年10月，右：2020年11月)

Fig.9 Displacement profile at the verification cross-section
No.2 (Left: Oct. 2020, Right: Nov. 2020)

性計)を装具した手押し式台車に乗せたMMSである。トンネル坑内などの衛星信号(GNSS)が捉えられない空間では、3DLS上部に付加した全周プリズムを後方の自動追尾トータルステーションでトラッキング(常時位置捕捉)をして、移動しながら3DLSの測定を行うことができる。現場計測試験では、2021年6月に図-4に示した範囲で往復の測定を実施し、その差分を計算することで計測再現性の確認した(図-7)。

4. 考察

4.1 計測精度

3DLSによる計測は、ペーパーターゲットを用いた測定を2020年度に実施した。具体的には、2020年7月に初期値を取得し、2020年の10月と11月に計測を実施した。それぞれの計測結果として、検証断面②を含む変位コンター図を図-8に示す。覆工コンクリート表面は10月および11月の両計測時において、概ね黄緑色であり、顕著な変位量が観測されていない。一方、路盤面は据付位置から離れるに従って、地山側と内空側の変位が出現している。この原因は、レーザ発出高さ(約1.8m)と路盤面の角度が浅くなることで、覆工表面からのレーザの反射が適切にとらえられず、測定毎のバラつきが非常に大きいことであると考えられる。した

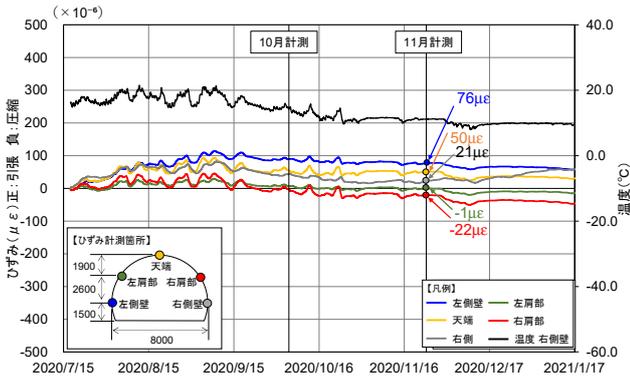


図-10 覆工ひずみ測定結果(検証断面②)

Fig.10 Strain distribution versus time on concrete lining at the verification cross-section No.2

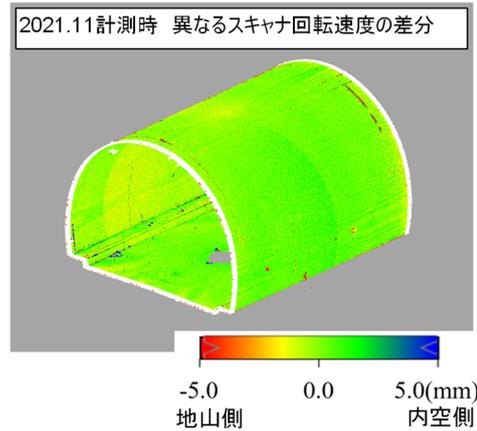


図-12 異なる計測モードでの点群データの再現性

Fig.12 Repeatability of data in different measurement mode

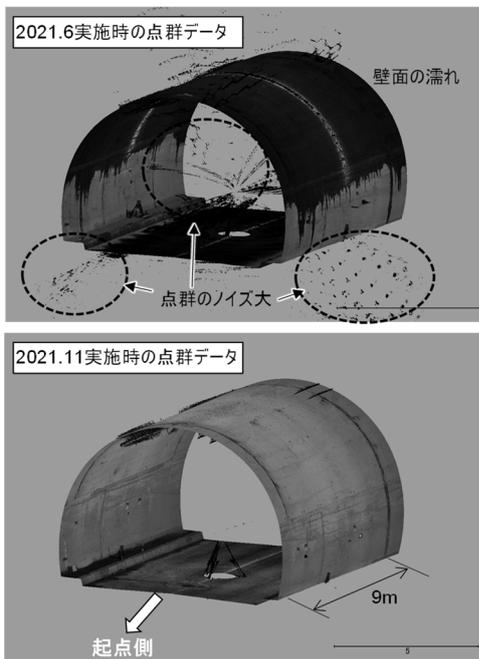


図-11 2021年6月と11月の点群データの相違

Fig.11 Noise difference of point crowd data between measurements in June and November 2021

がって、路盤面の盤膨れや陥没現象が計測対象である場合には、今回採用した方法では評価が難しく、高所据付用治具を用いて計測器の高さを上げるなどの対策が必要であると考えられる。

覆工コンクリート表面の変位量を検証する目的で、検証断面②の変位量を図-3 に示す方法で算出した(図-9)。コンバージェンスメジャーの計測を実施した側壁間の内空変位は、11月の3DLS計測時点で0.2mmの圧縮である。

図-10は、検証断面②にて実施した覆工コンクリート表面のトンネル周方向ひずみの測定結果である。11月

の3DLS計測時点に着目すると、天端および側壁間に内空側引張が生じ、肩部では若干圧縮側のひずみが計測された。すなわち、わずかではあるが天端と側壁で内空側に押し出されるような変形モードである。

コンバージェンスメジャーの計測結果(左側壁および右側壁の高さで実施)では、11月時点での計測結果は1.1mmの内空変位の圧縮であり、3DLSや覆工ひずみ測定結果から考えられる変形モードと整合的であった。このことから、3DLS計測によって、概ね1mm程度の精度で覆工コンクリートに大きな変状が無い事を評価できる可能性があると考えられる。

球体ターゲットを用いた測定は2021年の6月と11月に実施した。ただし、6月の計測時にはトンネル内外の温度差に起因する坑内の霧と覆工コンクリート表面の湿潤状態で、計測した点群にバラつきが大きく正確な壁面形状を取得することができなかった(図-11)。

そこで、11月に計測モードを変化(スキャナ本体の回転速度を25rpsから50rpsに高速化)させて、点群を取得した際の変位量を計算し、その再現性を確認した(図-12)。なお、スキャナ本体の回転速度を上昇させると、取得した点群のノイズは拡大するが、点群密度を変えない場合、ポリゴン化を実施することで平均化処理されるため、変位評価に大きな影響を与えないことを確認した⁹⁾。図-12より、球体ターゲットを用いた場合、変位量は概ね0mm近傍であり、良好な再現結果を得られていることがわかる。しかしながら、一般的な球体ターゲットの製作誤差と中心位置補正精度として2mm程度が知られているため⁹⁾、その程度の測定誤差を考慮しうるべきと考えられる。

据置型3DLSとProScanの計測精度を比較するために、

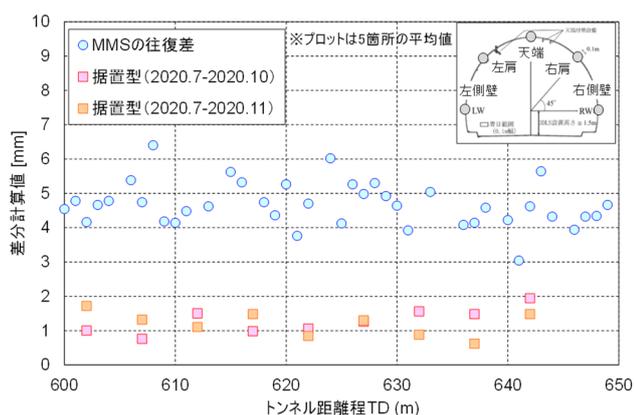


図-13 MMS と据置型 3DLS の計測再現性の違い

Fig.13 Repeatability of MMS and 3DLS (placed on tripod) measurement

2020年7月から10月まで、および2020年7月から11月までの据置型3DLSによって計測した変位量と、ProScanで測定した往復の点群位置の差分を天端、左右肩部、左右側壁部の位置で計算した。図-13は、TD600mからTD650mの範囲で各位置の変位または差分量の平均を示したものである。3DLSによって計測された変位量は、コンバージェンスメジャーによる計測結果から概ね計測誤差程度と評価されるが、その値は1-2mm程度に分布する。一方でProScanでの計測結果では、往復の差分として4-5mm程度にばらついている。したがって、ProScanによる手法を長期的な覆工変位計測に適用して、表-1に示した変形速度(1-3mm/年)を評価することは難しいと判断される。

4.2 計測作業性

現場計測時における作業効率を検証する目的で、据置型3DLSによる計測で、①ペーパーターゲットを用いて、スキャナ回転速度を25rpsとした場合、②球体ターゲットを用いて、スキャナ回転速度を25rpsとした場合、③球体ターゲットを用いて、スキャナ回転速度を50rpsとした場合、および④ProScanの場合について、100m区間毎の計測時間を比較した(表-3)。なお、ペーパーターゲットを利用する場合の作業時間に、覆工表面へのターゲット貼付け時間は含んでいない。

ペーパーターゲットの代わりに球体ターゲットを使うことで、1回あたりの計測区間長を伸ばすことができるため、計測回数を削減でき、計測速度を大幅に改善することができる。また、変位評価を行う上では平均処理をするため、ある程度のノイズを許容することができる。そのため、回転速度を増加させ、1回あたりの測定時間の短縮し、最終的に100分/100mまで計測効率

表-3 計測所要時間

Table 3 Time required for 3DLS and MMS measurement

| 計測器械 | ターゲット | スキャナ回転速度(rps) | 測定区間長(m) | 計測速度(分/100m) |
|-----------------------|-----------|---------------|----------|--------------|
| 据置型3DLS (imager 5016) | ペーパーターゲット | 25rps | 5 | 250 |
| | 球体ターゲット | 25rps | 9 | 140 |
| | | 50rps | | 100 |
| ProScan | なし | - | - | 20-25 |

*rps: revolutions per second 1秒間あたりの回転数

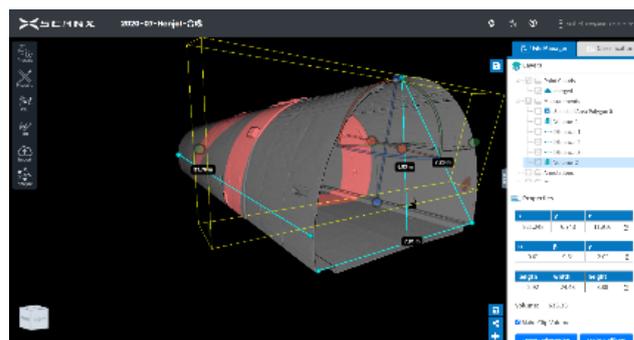


図-14 ScanXでの点群描画例

Fig.14 Point data representation on ScanX

を改善してきた。しかし、ProScanの計測効率である20-25分/100mには及ばない状況である。このため、本研究で採用した据置型3DLSを使った手法は、現時点ではトンネル施工時に確認された断層破碎帯部や多量湧水区間などの長期的な変状に留意すべき区間に限定的に採用されうると考えられる。

4.3 点群処理方法

点群の処理および変位評価を行うための差分計算はソフトのデフォルト機能として、曲面の変位算出機能を持つOPT Cloud Surveyを用いて実施した。点群の規模は約1億点/測定で、ファイル容量は3DLS本体内では700MBであり、OPT Cloud Surveyへ取り込むために点群データの標準フォーマットであるLAS形式とすると3GBとなった。このため、ノイズ処理や点群データの合成や分析、描画にワークステーションであっても多大な時間を要する状況であった。そこで、オンライン点群処理ソフトであるScanX¹⁰⁾の試行を行った(図-14)。この結果、一旦アップロードさえ完了すれば、ノイズの除去や描画、点群合成を簡易に実施できるようになった。具体的にはOPT Cloud Surveyで30分以上かかっていたノイズ除去を数分で実施できるようになった。しかし、現時点では変位算出機能が無いため、今後ソフトのカスタマイズ等の可能性を検討したい。

5. まとめ

本研究では、昨今土木分野での適用が進められている3DLS計測をトンネルの長期的な変位監視手法へ適用することの可能性を検討するために、現場計測試験を実施し据置型3DLSの計測精度、計測作業性および点群処理方法に関する検証を行った。維持管理段階における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。現場計測試験の結果、据置型3DLSを用いた場合には、1-2mm程度の変位量を評価できる可能性が示唆された。しかし、一般的なMMSと比較して計測作業性が劣るため、現状では監視対象を限定的な範囲とするなどの工夫が必要であると考えられる。また、精度の高いポリゴン化や平均処理を実施するためには、高密度な点群データを取得する必要があるが、同時に増大するファイル容量の適切な処理方法も課題である。本研究では、オンライン点群処理ソフトを試行して、迅速な点群処理ができる可能性を確認した。今後、更なる現地計測作業および変位評価までのポスト処理の効率化を進め、実務展開へとつなげていきたい。また、トンネル施工時における変位計測や支保応力推定に対する3DLS計測適用の可能性についても検討を進めたいと考えている。

謝辞

本研究では、北海道土木技術会トンネル研究委員会から廃坑となった道路トンネルでの現場計測試験を行う機会を与えていただきました。末筆ながら、現場計測試験の実施にご協力を頂いた方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 岩盤力学委員会 トンネル変状メカニズム研究小委員会：トンネルの変状メカニズム，p.45，2003.
- 2) 国土交通省道路局国道・技術課：道路トンネル定期点検要領，pp.52-53，2019.
- 3) 塩崎正人，安藤文彦，岡本隆：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) 浅羽絢介，坂井一雄，宮永隼太郎，谷卓也，崔瑛：3DLS点群データの合成におけるターゲット選定方法の検討，令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会，VI-849，2021.
- 6) 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，トンネル工学報告集，第31巻，I-33，pp.1-9，2021.
- 7) Z+F Imager ® 5016 Preliminary Data Sheet: <https://positics.fr/wp-content/uploads/2020/07/5016-Spec-techniques.pdf>, (2022/06/24 アクセス)
- 8) OPT Cloud Survey HP: <https://www.opt-techno.com/opt-cs/>, (2022/06/24 アクセス)
- 9) 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計測技術の精度検証，トンネル工学報告集，第32巻，I-4，pp.1-9，2017.
- 10) ScanX HP: <https://scanx.jp/>, (2022/06/24 アクセス)