

山岳トンネルにおけるレーザースキャナの活用事例

佐藤工業(株) 正会員 ○須佐見 朱加
正会員 京 免 継彦

1. はじめに

国土交通省は、建設現場の生産性向上を目的とした取り組みとして「i-Construction」を推進している。特に山岳トンネル工事では、出来形管理手法の一つとしてレーザースキャナ（以下、LS）の活用が盛んであり¹⁾、作業の効率化と安全性向上の両面から期待されている。これはLSがトンネルのように明るさが十分でない場所においても、短時間で高精度かつ高密度な形状データを取得することができるためである。当社においても、新幹線トンネル現場を中心にLSを導入しており、その結果を積極的に施工管理へ活用している。

本稿では、LSを活用したトンネル坑内の計測方法と自社開発の3次元出来形管理システム「出来形マイスター・トンネルPKG（以下、システム）²⁾」の活用事例として、① アタリ判定、② 覆工コンクリートの打設数量の算出、を紹介する。



図-1 坑内の計測状況

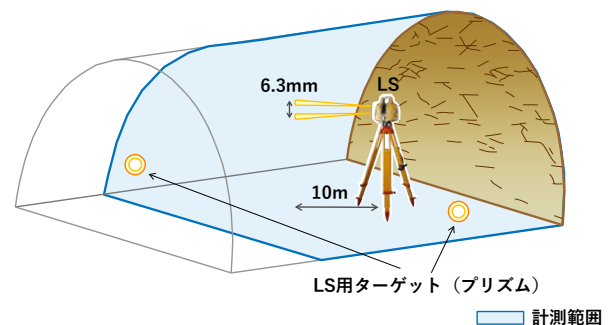


図-2 計測の概略

2. LSを用いたトンネルの施工管理

(1) 坑内計測

図-1は、坑内の計測状況を示したものである。

坑内計測は、LSをトンネル中心付近に設置して実施する。計測データは、LSの器械中心を原点とする座標系であるため、複数のターゲットを配置し、後方交会によりLS設置位置を算出することで現場座標への関連付けや点群同士の合成が可能となる（図-2）。計測は見通しがきく範囲のみ有効であるため、レーザー照射の障害となる資機材は事前に撤去し、1回の計測で計測範囲を網羅できない場合には、異なる位置から複数回に分けて計測を行う必要がある。

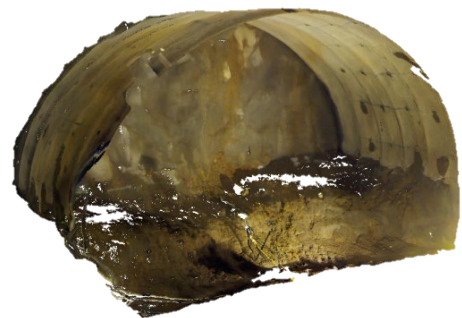


図-3 計測データの一部

図-3は、計測データの一部を示したものである。連続した3Dの面形状取得により、従来の単点測量では難しかったトンネル全体の形状を視覚的に把握することが容易となる。

(2) 計測データの処理方法

計測データは、LSの器械点を原点とする座標系であるため、LS専用のソフトウェアで現場座標に変換する。

キーワード 山岳トンネル、レーザースキャナ、点群、施工管理、効率化

連絡先 〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 4-12-19 佐藤工業(株) 技術センター ICT 推進部 TEL 03-3661-2932

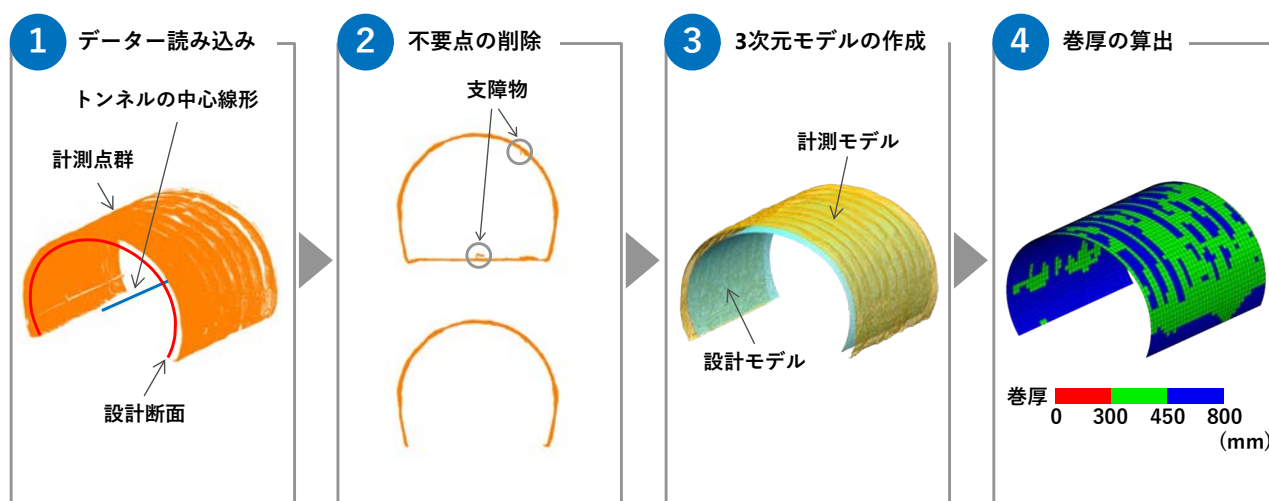


図-4 計測データの処理フロー

図-4 は、システムを用いた計測点群の処理フローである。処理工程は4ステップに分かれており、ステップ1では、① トンネルの設計断面、② トンネルの中心線形、③ 内空計測点群の3種類のデータを読み込む。計測点群には、出来形評価に必要なない支障物等も含まれているため、ステップ2では、設計データを参照し、点群を残す範囲を指定することでトンネル壁面のみの点群を抽出する。ステップ3は、トンネルの設計断面と中心線形によって定義される理論的なトンネル形状のメッシュ（以下、設計モデル）を作成し、それを計測点群に接するように変換して3次元モデル（以下、計測モデル）を作成する。そのため、不要点除去により、点群に欠損が生じた場合でも、計測モデルの押し付け効果により自然なトンネル形状を得ることができる（図-5）。最後のステップでは、計測モデルを設計モデルと比較することで、その差分から厚さを算出する。その値は、数十 cm 四方の区画ごとに色分けしたヒートマップにし、設計モデルに沿って表示する。

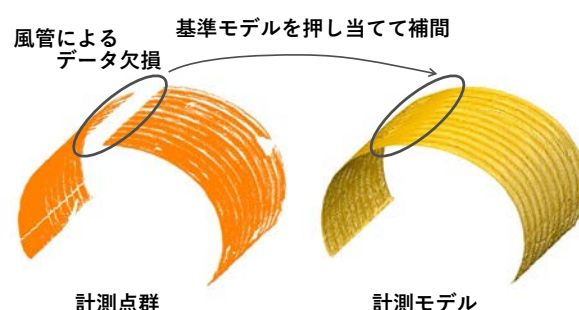


図-5 欠損部

表-1 GLS の仕様

項目	仕様
測定距離	130m
スキャンスピード	最大 120,000 点/秒
測定範囲	鉛直：270°，水平：360°
角度精度	鉛直：6″，水平：6″
距離精度	3.5mm (σ) 1～110m
面精度	2.0mm (σ) 1～110m

3. 施工現場でのLS活用事例

(1) 施工現場での坑内計測

実施工現場での計測は、TOPCON 社製のLS (GLS-2000) を使用する（表-1）。計測は、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）に準拠し、吹付けコンクリート施工後、10m 先で 0.01m² あたり 50 点以上になるよう計測密度 6.3mm@10m で実施する。なお、このLSは、掘削時に使用するアンカープリズムをLSのターゲットとして利用可能であることから、LS計測専用に基準点を設置する必要はない。

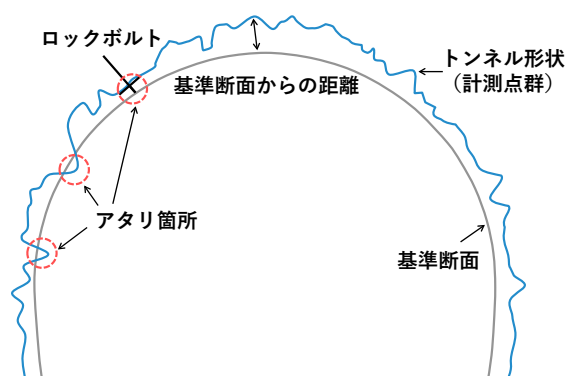


図-6 アタリ判定の概略

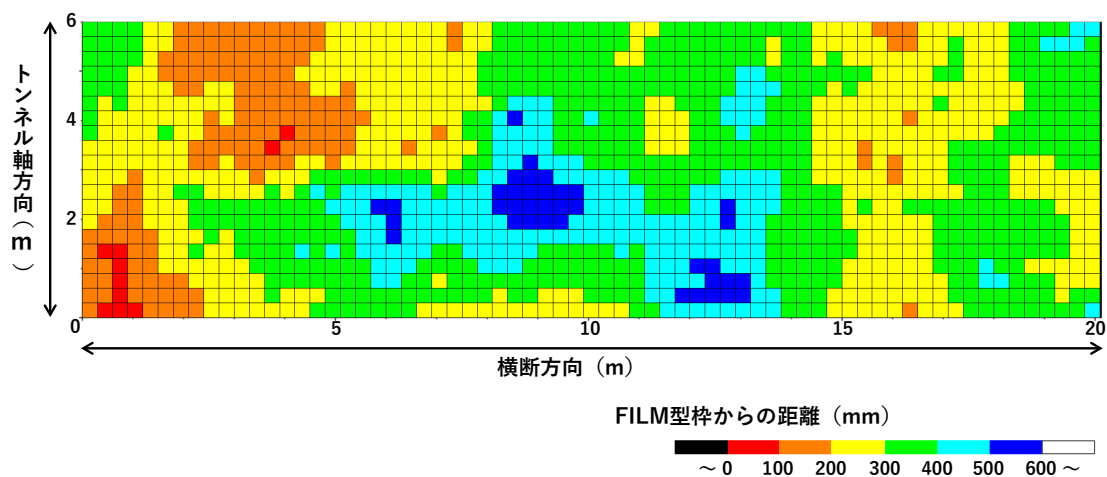


図-7 処理結果の一例 (FILM 型枠設置区間=6m)

(2) アタリ判定

山岳トンネルは発破掘削が主流であり、その断面には大小様々な凹凸が存在し、掘削断面が設計断面よりも内側に存在する（アタリ箇所）場合、ブレイカーで除去する必要がある。新幹線トンネルでは、吹付けコンクリート施工後に FILM 工法（背面平滑型トンネルライニング工法）による防水シートを施工するため、掘削量が小さいと吹付けコンクリートやロックボルトの頭部が FILM 型枠に接触し、設置できないことが懸念される。さらに掘削が大きくなると充填モルタル量が増え、打設に時間がかかるだけでなく、次工程に影響を及ぼすことから、掘削時における内空断面の管理は重要である。そこで、吹付けコンクリート施工後にトンネル壁面を LS で計測し、その計測データに FILM 型枠の断面を重ね合わせることで、アタリ箇所がないか確認を行った（図-6）。なお、処理の際、FILM 型枠断面を基準とした。

図-7 は、FILM 型枠設置区間 (=6m) を処理した結果の一例である。アタリ箇所は黒色、余掘り部は余掘り量が小さいと暖色（赤・橙色）に、大きいと寒色（青・水色）で表示される。そのため従来の「点」での計測とは異なり、型枠設置箇所全体の余掘り量およびアタリの有無を一目で把握することができる。

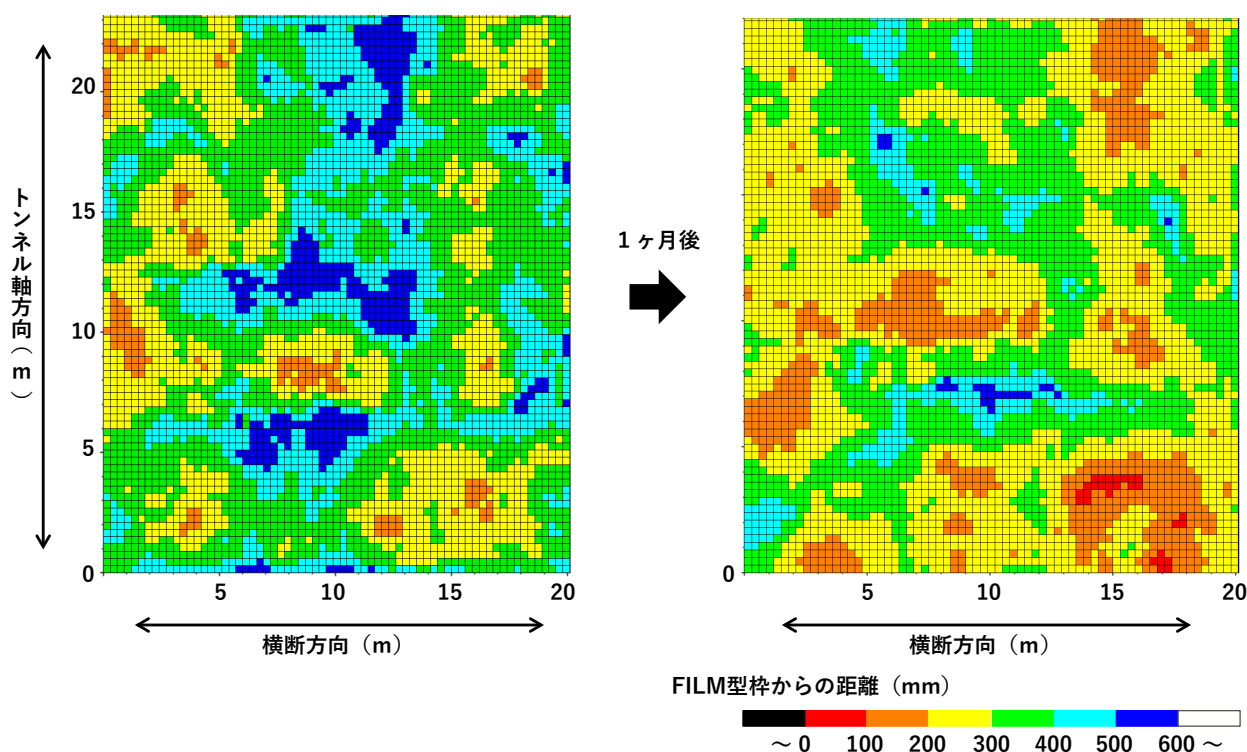


図-8 余掘り量の変化（週間掘削長分）

余掘りに着目してみると、巻厚不足を回避するためより安全側に掘削する（余掘り量が大きくなる）傾向があり、特に天端付近が顕著である。この傾向は他の区間においても同様であることから、掘削時のクセ（機械の操作性や目視による凹凸の判断）であると推測される。

図-8 は、1 週間の掘削長分をヒートマップ表示したものである。当初のヒートマップ（左図）に対し、1 ヶ月後のヒートマップ（右図）は余掘り量 400mm 以上の寒色が大きく減少しており、平均余掘り量も約 20% 低減したことを確認した。



図-9 セントル内での計測状況

LS を用いた内空断面の管理は、従来の方法では困難であったロックボルトの頭部や吹付けコンクリートのわずかな突出等もすばやく把握することができ、限られた時間の中で確認作業を行わなければいけない状況下では効率的な方法であるといえる。

（３） 巻厚管理と打設数量の算出

現行の出来形管理は、一定区間毎に設定した管理断面において、内空高さや幅、巻厚を検尺やレベルを用いて計測し、その値が基準値を満たしているか確認を行う。特に覆工コンクリート打設前の巻厚確認は、狭隘なセントル（覆工型枠）内において、検査窓から吹付けコンクリート面とセントルまでの距離を計測する必要がある、若手職員の作業負担が大きい（図-9）。

そのため、打設前に LS 計測を実施し、1 打設長（=10.5m）毎に巻厚を算出した。ヒートマップの区画毎の値を積算することで、覆工コンクリート打設前に必要なコンクリート数量を推定することができる。そこで箱抜きがなく、打設長内で断面種別が変化しない 20 区間において、実際に打設したコンクリート量と解析値の比較を行った結果、解析値は、打設量に対して全体的に小さい値を示し、その差は 3.2% であった。これより、ロスのないコンクリート打設が可能であることを確認した。

また、作業時間に着目すると、現行の出来形管理は、全検査窓の計測とデータ処理に 90 分かかるのに対し、LS を用いた出来形管理は計測～処理を含めて 30 分で完了することができ、職員の経験による作業時間のバラツキをなくすることができる。これより現行の出来形管理に比べ、計測に要する時間と労力を大幅に削減することができ、生産性を最大 3 倍に向上可能であることを確認した。

4. おわりに

今回、LS を用いた坑内の計測方法と自社開発のシステムを利用した施工活用事例を紹介した。LS を用いた坑内計測の実施により施工箇所全体を面評価し、一目でアタリや余掘りを把握することが可能である。また、職員の経験年数の違いによる作業時間のバラツキを縮小し、生産性向上に寄与するため、今後も積極的に坑内計測点群を活用し、トンネル施工管理の効率化を図る。

現状の課題として、リアルタイムでの確認が挙げられる。各種結果を確認するには、計測したデータを現場事務所に持ち帰ってから処理を行う必要があるため、今後、簡易かつ迅速な計測方法の確立や処理の高速化の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 山本悟，三井善孝：車載式トンネル 3D スキャニングシステムの開発，平成 30 年度土木学会全国大会 第 74 回年次学術講演会，2019.
- 2) 須佐見朱加，京免継彦，石井誠，辻本剛士：レーザースキャナを用いたトンネル出来形管理による生産性向上の効果，平成 30 年度土木学会全国大会 74 回年次学術講演会，2019.