

レーザースキャナを用いたトンネル内空計測における計測時間短縮への取り組み

須佐見 朱加¹・京免 継彦²・宇野 洋志城³

¹正会員 佐藤工業株式会社 技術センター ICT 推進部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4 丁目 12-19)
E-mail: a.susami@satokogyo.co.jp

²正会員 佐藤工業株式会社 技術センター ICT 推進部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4 丁目 12-19)
E-mail: kyoumen@satokogyo.co.jp

³正会員 佐藤工業株式会社 技術センター 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)
E-mail: Uno@satokogyo.co.jp

近年, 山岳トンネルでは出来形管理手法のひとつとしてレーザースキャナの活用が盛んである. 当社においてもレーザースキャナを用いた施工管理を行っているが, 器械据付～計測完了まで 20 分程度の時間を要するため, 掘削直後の坑内計測は安全上の観点から困難であった.

そこで, 本報では, 施工中のトンネル現場においてリアルタイム計測を試行したので, その結果について述べる. 試行技術では, レーザースキャナの水平を取る必要がなく, ターゲットの視準も不要であることから, 現行の計測方法に比べ計測時間を 1/4 に短縮可能であることを確認した. これにより, 非接触で掘削範囲全体の形状を取得できるだけでなく, 余掘りの把握や吹付けコンクリートの厚さ評価も可能であることから施工の効率化に寄与する技術であると期待できる.

Key Words: tunnel, lase scanner, point cloud, sprayed concrete thickness

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」を推進しており, 山岳トンネル工事では, 作業の効率化と安全性向上を目的としてレーザースキャナ (以下, LS) の活用^{1,2)}が盛んである. 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できるためである.

当社においても新幹線トンネル工事を中心に LS を導入しており, 計測点群を積極的に施工管理へ活用している. 計測点群を処理する際には, 自社開発のトンネル 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)」を使用し, 出来形評価等で良好な結果を得ている³⁾.

しかしながら, 現行の LS を用いた坑内計測は, 器械据付～基準点の視準～計測完了まで 20 分程度要するため, 掘削直後に計測を実施することは安全上の観点から困難であった. また, 計測データも一度事務所に持ち帰ってから処理を行う必要があるため, その場で確認を行うことができない.

国土交通省では, 「ICT 等を活用したトンネル (NATM) の出来形計測の効率化手法³⁾」として, レーザ計測等を活用したリアルタイム可視化技術の提案を求めている. このような背景から, 「計測の高速化とリアルタイムでの評価」を目指し, まずは「計測の高速化」に取り組むこととした. 新たな計測方法として, LS の水平設置と後方交会在が不要な計測方法を試行することで計測時間の短縮を試みた結果, 従来の計測時間に比べ 1/4 に短縮でき, 掘削直後の計測が可能となった.

本報では, LS の新たな坑内計測方法を紹介するとともに, 従来は困難であった, ① アタリ判定, ② 吹付けコンクリートの厚さ評価の結果についても報告する.

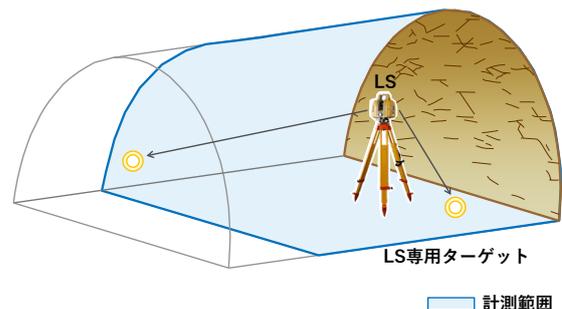


図-1 坑内計測の概略図 (現行)

2. LS を用いた坑内計測

(1) 現行の坑内計測方法と課題

図-1 に従来の LS 計測の概略図を示す。まず、LS をトンネルの中心付近に、LS 専用のターゲット（以下、ターゲット）を坑内基準点にそれぞれ設置する。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を行う。その後、ターゲットを視準し、後方交会により器械設置位置を算出する。この作業は、計測した点群を座標変換したり、合成する際に必要となる。最後にトンネル壁面の形状を取得し、計測は完了となる。

表-1 は、現行の LS 計測の課題をまとめたものである。

LS は水平に据え付ける必要があり、職員の経験値によって据付時間にバラツキが生じる。また、使用する LS によっては、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なものもあるが、基本的には LS 計測専用 2～3 点の基準点を新設する必要があり、手間が増える。計測時間については、計測密度との兼ね合いもあるが、一般的に詳細に計測（計測密度を小さく）するほど時間がかかる。そのため器械据付～計測終了までの時間を考慮すると、おのずと測定対象物が限られる。特に発破直後の素掘り状態だと浮石の落下等の危険性があることから、短時間で計測する必要があり、現行の計測では 20 分程度かかるため計測を実施することは困難である。

以上のことから、現行の計測方法では、計測の作業性や安全性において解決すべき課題が残っている。

(2) 新たな坑内計測方法

新たな計測方法（以下、リアルタイム計測）では、表-2 に示す Leica 社製の LS (P40) と Fieldworks を使用する。

計測の概略は図-1 と同じであるが、ターゲットが 3 個必要となる。Fieldworks では、3 個のターゲット位置とそれらの測量成果との相関関係により、現場の座標系への変換パラメータを算出するので、LS を正確に水平設置する必要はない。ターゲットを含んで計測を行うことでターゲット形状を自動認識し、その中心座標を自動で算出する。それに事前測量しておいたターゲットの中心座標 (X, Y, Z) を付与することで、現場の座標系に自動変換し、点群を出力する。ただし、ターゲットを自動認識するには、ターゲット上での点群密度が縦・横ともに 15 点以上必要であることから、4.5 インチのターゲットを使用する場合は、LS 設置位置から 10m 以内に、6 インチのそれを使用する場合には 20m 以内に設置する。

また、計測の際、LS と PC を専用ケーブルで接続することでリアルタイムに計測点群を確認できるだけでなく、計測データを直接 PC に保存することができる。

3. 実施工現場でのリアルタイム計測

(1) 計測概要

今回、施工中の新幹線トンネル現場にてリアルタイム計測の試行をした。LS は切羽から 5m 程度離れたトンネルの中心付近に設置し、4.5 インチのターゲットを使用した（図-2）。ターゲットの背面にはプリズムをつけており、基準点計測の際にターゲットを取り外し、プリズムに取りかえる必要はない。なお、計測は、① 掘削完了後、② 吹付けコンクリート施工後の 2 回、計測密度 6mm@10m で実施した。

表-1 現行の LS 計測の課題

| 項目 | 課題 |
|-------|------------------------------------|
| 器械据付 | 水平に据え付ける必要があり、職員によって作業時間にバラツキが生じる。 |
| ターゲット | LS 計測専用の基準点を新設する必要があり、手間が増える。 |
| 計測時間 | 時間的制約により測定対象が限られる。 |

表-2 P40 の性能

| 項目 | 仕様 |
|--------|-------------------|
| 計測スピード | 最大 1,000,000 点/秒 |
| 計測範囲 | 水平 360°/鉛直 270° |
| 距離精度 | 1.2mm+10ppm |
| 測角精度 | 水平 8"/鉛直 8" |
| 座標精度 | 3mm@50m, 6mm@100m |



図-2 リアルタイム計測状況（掘削直後）

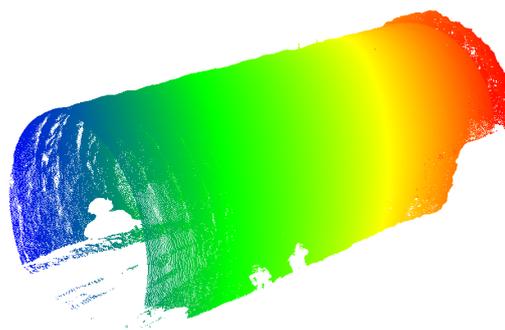


図-3 計測データの一例（掘削直後）

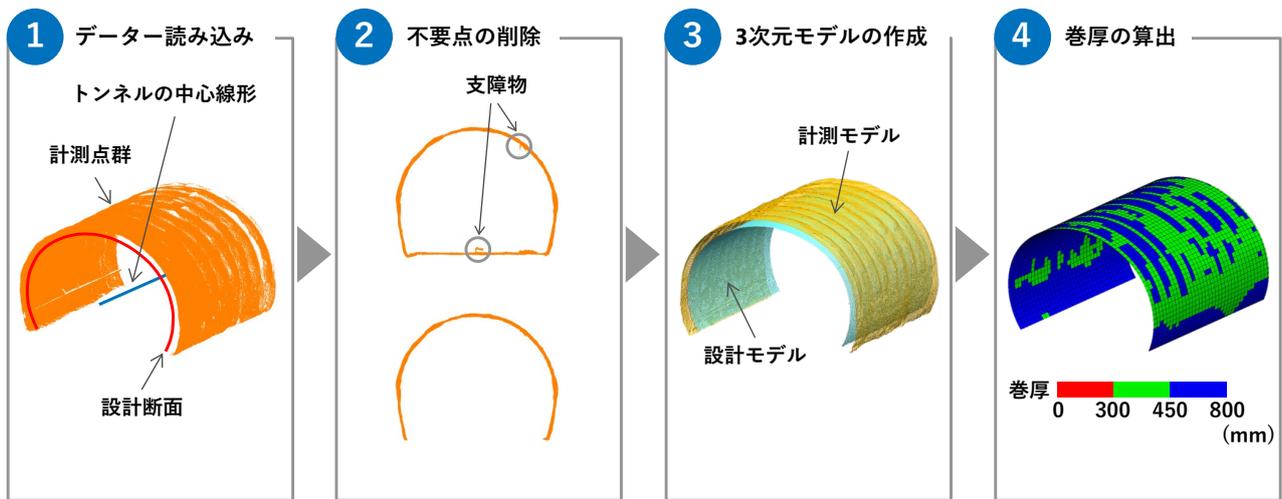


図-4 計測データの処理フロー（巻厚）

計測データの一例を図-3に示す。連続した3Dの面形状取得により、施工箇所形状を視覚的に把握することができる。

(2) 処理方法

図-4は、システムを用いた計測データの処理フローであり、ここでは基本的な巻厚（厚さ）算出を示す。

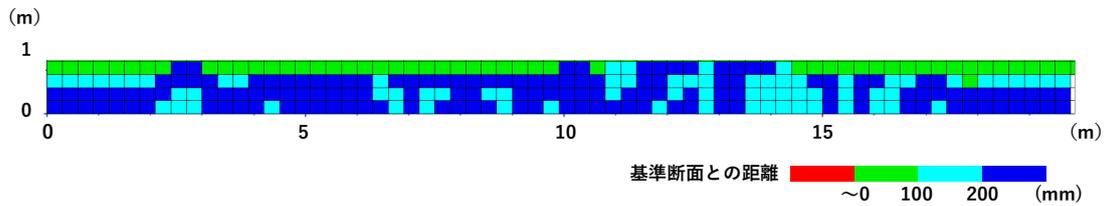
処理フローは4ステップに分かれており、ステップ1では、①トンネルの設計断面、②トンネルの中心線形、③内空計測点群の3種類のデータを読み込む。計測点群には、出来形評価に必要な支障物等も含まれているため、ステップ2では、設計データを参照し、点群を残す範囲を指定することでトンネル壁面みの点群を抽出する。ステップ3は、トンネルの設計断面と中心線形によって定義される理論的なトンネル形状のメッシュ（以下、設計モデル）を作成し、それをメッシュ化対象

の計測点群に押し付けるように変形し、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。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。

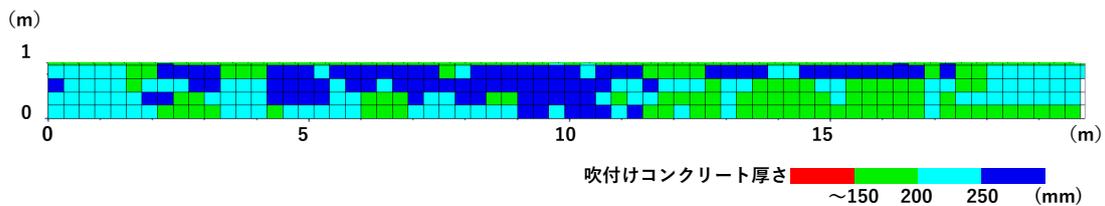
(3) 処理結果

今回、アタリ（地山の掘り残し）判定と吹付けコンクリートの厚さについて評価した。その結果を図-5に示す。この図は、縦軸が延長方向、横軸が周方向であり、中心がトンネル天端である。

図-5(a)のアタリ判定は、掘削完了後の計測モデルと基準モデルを比較したものである。掘削断面が基準断



(a) 余掘り



(b) 吹付けコンクリートの厚さ

図-5 処理結果（掘削長分=1.2m）

面を侵している場合は赤色で表示されるため、アタリ箇所を一目で把握することができる。また、一般的にはアタリを回避するため、より安全側に掘削する（余掘りが大きくなる）傾向がある。過度な余掘りを防ぐためにもこのように掘削面を評価し、次の掘削に生かすことができれば、余掘りの低減につながると考えられる。

図-5 (b) は、吹付けコンクリートの厚さを評価したものであり、掘削完了後の計測モデルと吹付け施工後の計測モデルを比較することで算出した。規定値である150mmを下回ると赤色で表示される。継続的に面評価を行うことで、どの部分の吹付け厚が大きくなりやすいのか、施工のクセを把握することが容易となる。

以上のことから、施工箇所をヒートマップ表示することは、視覚的な把握や施工品質の向上だけでなく、次工程をスムーズに進める上で重要であるといえる。

計測時間に注目すると、現行の計測方法では、器械据付～ターゲット視準～計測完了まで約20分程度かかる。一方、リアルタイム計測では、ターゲットを3個設置する必要があるものの、LSの水平設置が不要であるため5分以内で計測が完了し、計測時間を大幅に短縮可能であることを確認した。また、作業員の経験値によらず容易にLSを設置できることも利点である。

4. まとめ

本報では、施工中のトンネル現場において、LSの水平設置と後方交会在が不要なリアルタイム計測を試行し、その計測データをもとに、①アタリ判定、②吹付けコンクリートの厚さについて評価を行った。

現行の計測方法では、掘削直後の壁面形状を取得することが困難であったが、試行したリアルタイム計測では、

掘削直後や吹付けコンクリート施工後も5分以内に計測可能であることを確認した。これは、現行の計測方法に比べ、計測時間を1/4に削減することが可能である。また、各工程においてヒートマップで評価することは、それ以降の工程をスムーズに進める上で重要である。

今回、計測時間の短縮を目的としてリアルタイム計測を実施したが、現状、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。不具合があった場合でもその場で対処することができない。試行した計測方法では、現場の座標系に変換された計測点群が出力されることから、クラウド等で管理・連携してリアルタイムにそのデータを評価できるよう、システムの改良を行う予定である。

今後も引き続きLSの計測データを施工へ活用するとともに、現場職員にヒアリングを行いながら、さらなる施工の効率化を図っていく。

謝辞：現場計測では現場職員の皆様に、計測データを評価するにあたってはユニアデックス株式会社と日本ユニシス・エクセリュージョンズ株式会社の皆様にご協力を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本悟, 三井善孝: 車載式トンネル3Dスキャンシステムの開発, 平成30年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, VI-052, 2018.
- 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, VI-053, 2018.
- 3) 国土交通省: 新技術導入促進型 (<https://www.mlit.go.jp/tec/shingijyutudounyu.html>)

AN APPROACH TO SHORTEN THE MEASUREMENT TIME FOR TUNNEL CONVERGENCE USING LASER SCANNERS

Ayaka SUSAMI, Tsuguhiko KYOMEN and Yoshiki UNO

In recent years, laser scanners have been widely used in mountain tunnels as one of the methods for managing work progress. At our company, we also use laser scanners for construction management, however, it takes about 20 minutes from installation to the completion of measurement, so it is difficult to take measurements in the pit immediately after excavation from a safety point of view.

This paper describes the results of a trial of real-time measurement at a tunnel site during construction. It was confirmed that the measurement time could be reduced to a quarter of the time of the conventional measurement method because it was not necessary to level the laser scanner and to sight the target. It is expected that this technology will contribute to improve the efficiency of construction since it can not only obtain the shape of the entire excavation area without contact, but also ascertain the outbreak and evaluate the thickness of the shotcrete.