

11. 山岳トンネルのインバート掘削に関する 出来形管理システムと現場検証結果

株式会社奥村組

○ 藤沼 花奈
松田 顕伍
川澄 悠馬

1. はじめに

我が国は、高齢者の大量退職や、少子化による若年層の減少によって、就労人口が減少することが想定されている。

特に、建設業は全産業と比較して、就労人口における 55 歳以上の人口割合が高い実態がある。労働人口不足が見込まれることから、生産性向上への対策として、ICT やロボット化の開発や現場導入を積極的に実施している。

山岳トンネル工事の出来形管理においては、ICT 施工の導入は増加傾向であるが、従来手法における管理が一般的である。インバート工の掘削工においては、掘削作業を中断してスタッフ等の測定器具を用いて、基準線からの下がりやを都度確認している。そのため、計測箇所が限定的となり、20 分程度の作業中断と計測人員が必要とされている。また、計測結果をエクセル等で取り纏める作業が別途発生するため、多くの時間を要している。

そこで計測時間の軽減、計測人員削減を目的とした「差分計測システム」(以下、本システム)を開発した。本稿では、本システムの概要と、上信越道高岩山トンネル(下り線)補強工事において、性能を検証するために、インバート掘削出来形管理に試験導入した結果を報告する。

2. システム概要

2.1 システム概要

本システムは、上下に首振りを行う回転機構を有した 2D-LiDAR により得られる、3 次元計測データ(以下、計測データ)と出来形設計データ(以下、設計データ)の差分を算出し、モニター画面に図示するシステムである。

本システムを油圧ショベルに取り付けた場合の機器構成を写真-1 に示す。油圧ショベルのキャビンの上に 2D-LiDAR を設置した。油圧ショベルの振動を軽減するため、回転装置の下部にショックアブソーバを実装している。また、キャビン内部に、計測機器を制御する PC(以下、制御 PC)と計

測結果評価画面を表示するモニタを設置した。制御 PC 内部は、本システムのソフトウェアや計測記録を保存するためのストレージを装備している。これらの電源は油圧ショベルより給電する。



写真-1 機器構成

測データはローカルな 2D-LiDAR 座標系での値であるため、設計データのワールド座標系に変換する必要がある。そのため、両者の座標を関連付ける基準としてリフレクタを使用する。リフレクタとは、2D-LiDAR のレーザーを反射するための反射板(□200 mm)を取り付けたものである。リフレクタと設置イメージを図-1 に示す。

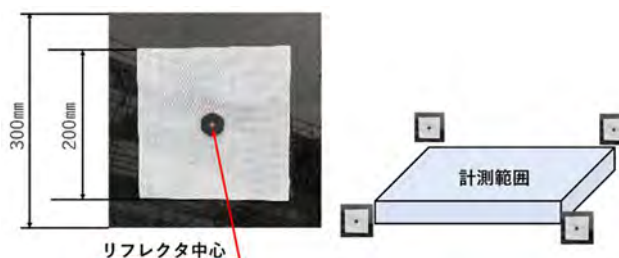


図-1 リフレクタと設置イメージ

2.2 システムフロー

本システムのフロー図を図-1 に示す。

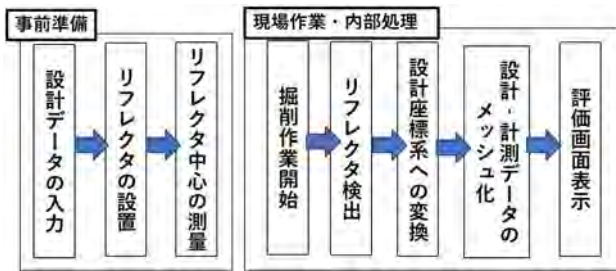


図-2 システムフロー図

事前準備として、ワールド座標系における、施工断面の形状を入力した設計データをシステムに取り込む。次に計測範囲の周辺を囲うようにリフレクタを設置する。ワールド座標系におけるリフレクタ中心の座標値をトータルステーション(以下、TS)で測量し、座標値をシステムへ入力する。

掘削作業は従来通り行い、出来高を確認する任意のタイミングで、本システムによる計測を開始する。計測では2D-LiDARにより計測範囲のリフレクタが自動で認識される。認識したリフレクタのローカル座標値と、事前に入力したワールド座標値が自動で関連付けされる。関連付けた座標値から、座標変換を行い設計データと計測データの差分値を計算して、評価画面をモニタに表示する。評価画面は2D-LiDARで取得した点群データと設計データの差分がヒートマップとして表示される。図-3に計測時のヒートマップの表示例を示す。画面はカラーで表示され、①暖色範囲(赤・桃色)は設計値未満、②中間色範囲(黄色、緑)は設計許容値内、③寒色範囲(水色、青)範囲は設計超過を意味する。何らかの原因で点群データを取得できなかった部分に関しては、黒色で表示される。施工条件に合わせ、メッシュサイズや、掘削深さを表す色の種類やスケールも変更することが可能である。

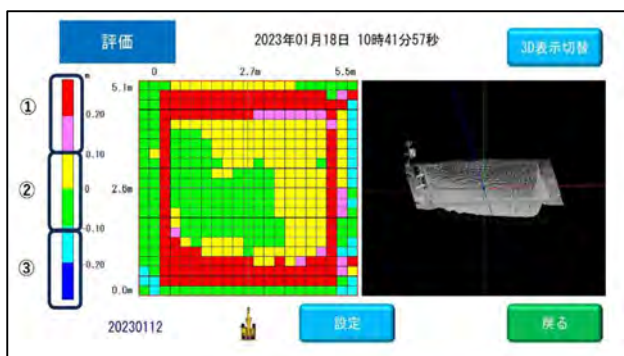


図-3 計測後の評価画面

3. システムの事前実験

3.1 事前実験概要

現場での試験導入前に事前実験として、本システムの動作確認および、3D スキャナ測量との精

度比較を行った。掘削範囲は、写真-2に示す、岩盤を模擬した無筋コンクリートの試験体(W4.0m×L4.5m×H1.0m)を設定した。掘削作業には0.45m³油圧ショベル(キャタピラー製、型式:CAT315)を使用し、多軸継手であるチルトローテータおよびドラムカッターを装備した。予めインバート形状を設計データとして、システムに取り込み、本システムを用いて掘削の出来形管理を行った。今回は、3D スキャナ測量結果を真値とした。

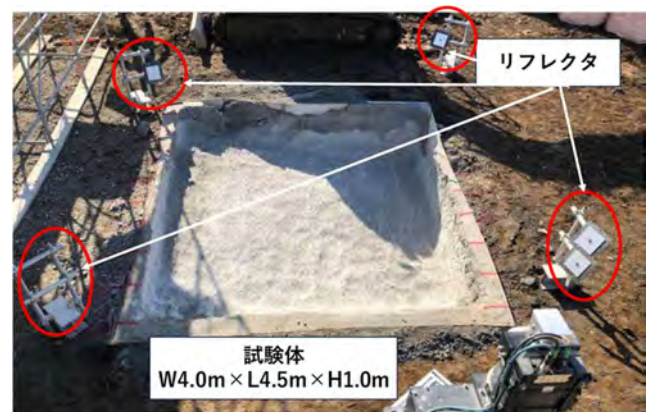


写真-2 予備実験試験体

3.1 事前実験結果

写真-3に予備実験状況を、図-4に、予備実験の結果の評価画面を示す。



写真-3 事前実験状況

図-5に本システムの結果と3D スキャナ測量との比較を示す。縦軸に高さ(Z軸)、横軸にX軸方向のメッシュ番号とした。なお、メッシュ間距離は0.1m、Z座標は点群50点を単純平均した。図-5より、3D スキャナ測量に対して、平均で約60mm高くなった。原因としては、設計データとの位置合わせを行う際に、測定したリフレクタの位置に誤差が生じ、全体的に高くなったと考えられる。

また、一部点群データが取れていない箇所があった。データが取れなかった原因としては、掘削端部であったため、日陰になり照度が足りなかったと思われる。

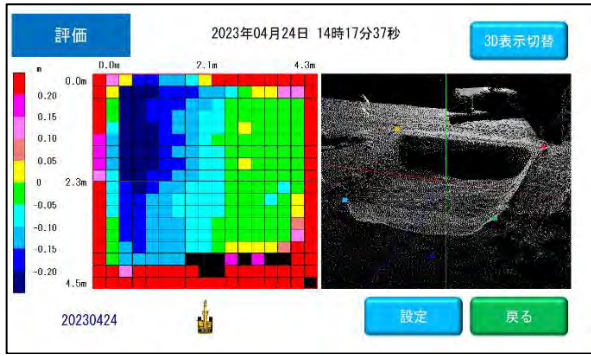


図-4 予備実験評価画面

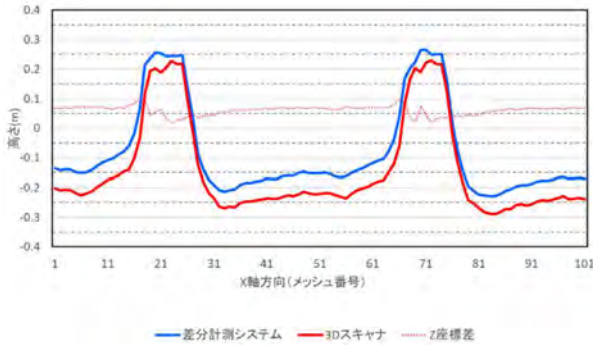


図-5 3D スキャナ測量との比較

以上の予備実験の結果より、本システムが正常に動くことを確認することができた。現場検証実験では、リフレクタの測量誤差に注意することと、十分な照度を確保することが課題である。

4. 本システムの現場検証概要

4.1 現場の概要

本システムを検証する上信越道高岩山トンネル(下り線)は、トンネルの盤ぶくれの影響により路面の隆起が発生している箇所において、インバートを構築する工事である。すでに供用されている区間であるため、2車線のうち1車線を規制しながら施工を行うため、車両の入替も容易ではない。また、週末には規制を解除する必要があり、インバートコンクリート打設から舗装復旧を考えると、インバート掘削に要する時間は20時間に限定されるため、出来形管理だけでなく、都度発生する機械配置など、効率的な施工管理が求められる。

現場のインバート出来形管理値として、覆工受台端部からの床付け面までの深さを設計値として管理している。現場での出来形管理方法は、栈木に床付け面までの深さをチェーンで示し、覆工受台端部に栈木を合わせて、設計値以上であるかを事前に確認してから、レベル測量にて出来形を管理している。通常の状態を写真-4に示す。



写真-4 通常の状態管理状況

4.2 現場検証実験の概要

本検証の目的として、本システムの出来形の計測精度の確認と現場での有用性を確認することを目的とした。

今回の検証実験において、インバート掘削出来形はTSによる測定結果を真値とし、TS測点近傍における点群データの平均を本システムの測定結果とし、計測精度の比較を行った。

掘削作業には0.45m³油圧ショベル(キャタピラー製、型式:CAT315)を使用し、多軸継手であるチルトローテータおよびドラムカッターを装備した。また、ドラムカッターの駆動用として、0.25m³油圧ブレイカー(ヤンマーホールディングス製、型式:ViO10-2D)を使用した。現場検証実験の位置図を図-6に示す。



図-6 検証実験位置図

4.2 計測精度の比較結果

現場検証状況を写真-5に示す。



写真-5 現場検証状況

出来形測量の TS の測量点を図-5 に示す。油圧ショベルから見て、横断方向を X 軸，縦断方向を Y 軸，掘削深さを Z 軸とした。TS の測量結果と本システムの測量結果の Z 軸の絶対値の差分比較を表 1 に示す。

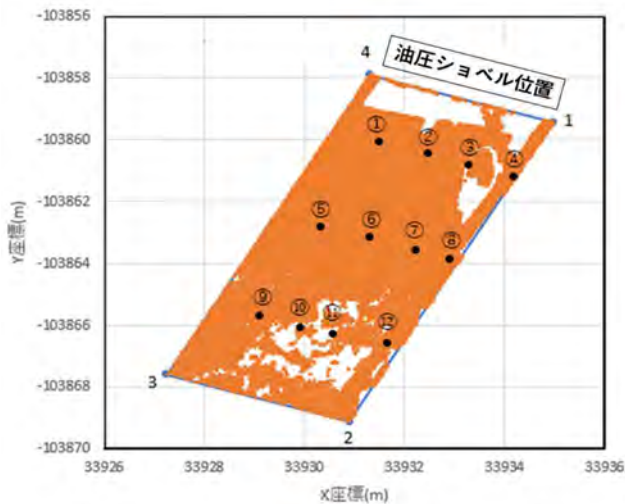


図-5 TS 測量点

表 1 測量結果比較

測定位置	差分	LID測定値Z	TS測定値Z
	(m)	(m)	(m)
①	3.997	749.12	745.12
②	0.053	745.26	745.21
③	0.074	745.39	745.32
④	0.038	745.61	745.58
⑤	0.058	745.27	745.22
⑥	0.083	745.35	745.26
⑦	0.055	745.43	745.38
⑧	0.081	745.62	745.54
⑨	0.100	745.33	745.23
⑩	0.034	745.30	745.27
⑪	0.212	745.53	745.31
⑫	0.152	745.72	745.57
平均	0.411	測定①～⑫平均	
平均	0.085	測定②～⑫平均	

結果としては今回の検証実験では約 0.4m の差が出た。比較した測点が少なく、ドラムカッターでの掘削を行ったため仕上げ面が局部的に凹凸であることが影響したと思われる。しかし、局所的な凹凸があったと思われる測定位置①を除くと、差分の平均値は 0.085 m となった。この結果より、評価画面でのスケールを 0.1m 以下の小さい値に設定することで、評価画面にて設計値以下で掘削するようにオペレータが管理を

行えば、誤差範囲 0.085m 内で掘削できるので、現場管理値の条件を満たした出来形でインバート掘削をすることができる。しかし設計値以下 0.1m で管理すると、余掘り量が増え、掘削土およびコンクリート打設量が増加する。今後、本システムをより合理的なシステムにすることが求められる。

また、通常の施工では、途中で掘削深さを確かめるために、人員を用いて深さを確認する必要があるが、本システムでは、途中の掘削深さの確認をオペレータ 1 名で行うことができた。そのため、施工時の出来形管理要員を少なくすることができ、人員削減に有効であるといえる。

5. まとめ

開発した本システムについて、まだ課題は残るが、今回の実証実験で現場での有用性を確認することができた。

今後の展望として、計測精度を向上させて掘削余掘り量を少なくできるように改善していく。

さらに、計測結果の帳票化や、立ち合い検査時への出来形確認時にも使用できるように、現場での有用性を高めるよう取り組んでいきたいと考える。

参考文献

- 1) 松田顕伍・松本清志・川澄悠馬・今泉克彦：供用中トンネルにおける ICT を活用したインバート掘削出来形管理システムの構築，第 78 回年次学術講演会講演概要集（令和 5 年度土木学会全国大会），VI - 117, 2023 年