

# 差分計測システムによるインバート掘削の出来形管理

## Differential Measurement System for Invert Excavation Control

川澄悠馬\* 今泉克彦\* 松田顕伍\*\* 松本清志\*\*

### 要旨

山岳トンネル工事のインバート掘削における出来形管理では、従来、掘削作業を中断して基準線からの下がりやを複数断面について、1断面当たり数点を確認していた。そのため、計測箇所が限定的となるほか、計測人員が必要とされていた。そこで、面的な計測と計測時間の削減、計測人員の負担軽減を目的とした「差分計測システム」を適用した。このシステムにより、施工範囲における3次元設計データと掘削面の差分寸法を面的に簡易に可視化できる。今回、供用中トンネルの盤ぶくれ対策工事に適用し、本システムが計測の効率化および出来形の面的な評価に有効であることを確認した。

キーワード：LiDAR、出来形管理、インバート掘削、効率化

### 1. はじめに

山岳トンネル工事のインバート掘削における出来形管理では、従来、掘削作業を中断して基準線からの下がりやを複数断面について、1断面当たり数点を確認していた。そのため、計測箇所が限定的となるほか、作業の中断と計測人員が必要とされていた。

そこで筆者らは、計測時間の削減、計測人員の負担軽減、面的な出来形管理を目的として、計画断面と現状の出来形の差分を算出する「差分計測システム<sup>1)</sup>」(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道路トンネルの実現場でのインバート掘削出来形管理への適用結果について報告する。

### 2. システム概要

#### 2.1 システムの概要と機器構成

本システムは、事前に入力した計測範囲の3次元設計データ(以下、設計データ)と2D-LiDARをモータにより回転させることで得られる3次元計測データ(以下、計測データ)の差分を算出し、モニタに図示する。

本システムをバックホウに取り付けた場合の機器構成を図-1に示す。計測機器(2D-LiDAR、モータ、カメラ)はバックホウのキャビン上部に取り付けられる。また、計測機器を制御するPC(以下、制御PC)内部に本システムのソフトウェアや計測記録を保持する外部ストレージ、計測後の評価画面を可視化するモニタはバックホウのキャビン内に取り付けられる。これらの電源はバックホウより給電する。

計測データはローカルな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、リフレクタを用いる。リフレクタとは、LiDARのレーザーを強く反射する反射板(□200mm)を取り付けたものである。

なお、本システムは三脚での運用も可能である。

#### 2.2 システムによる計測手順

本システムによる出来形計測の手順を図-2に示す。最初に、事務所等での事前準備として、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作成する。

現場での事前準備として、掘削範囲の周辺にリフレクタ4枚の設置を行う。設置方法は、現場での取り扱いが容易で作業中にリフレクタが動かないように、単管と雲台を組み合わせたものを用いる。設置後に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で測量し、その座標値をシステムへ入力する。

掘削作業では、従来通りバックホウにより掘削を行う。掘削の進捗に伴い、掘削を一度停止し、本システムによる計測を開始する。計測ではLiDARにより掘削範囲の点群データを得る。次に、得られた点群データから4枚のリフレクタを認識させる。設定した反射強度以上、かつ設定した大きさの範囲内の点群をリフレクタとして自動抽出する。自動抽出した各リフレクタを表す点群の中心のローカル座標値と、事前に測量したワールド座標値を自動で関連付ける。関連付けた座標値から座標変換し、設計データと計測データの差分値を算出して、その結果をモニタ上にヒートマップ(以下、評価画面)として表

\*技術本部技術研究所土木研究グループ \*\*東日本支社機電部

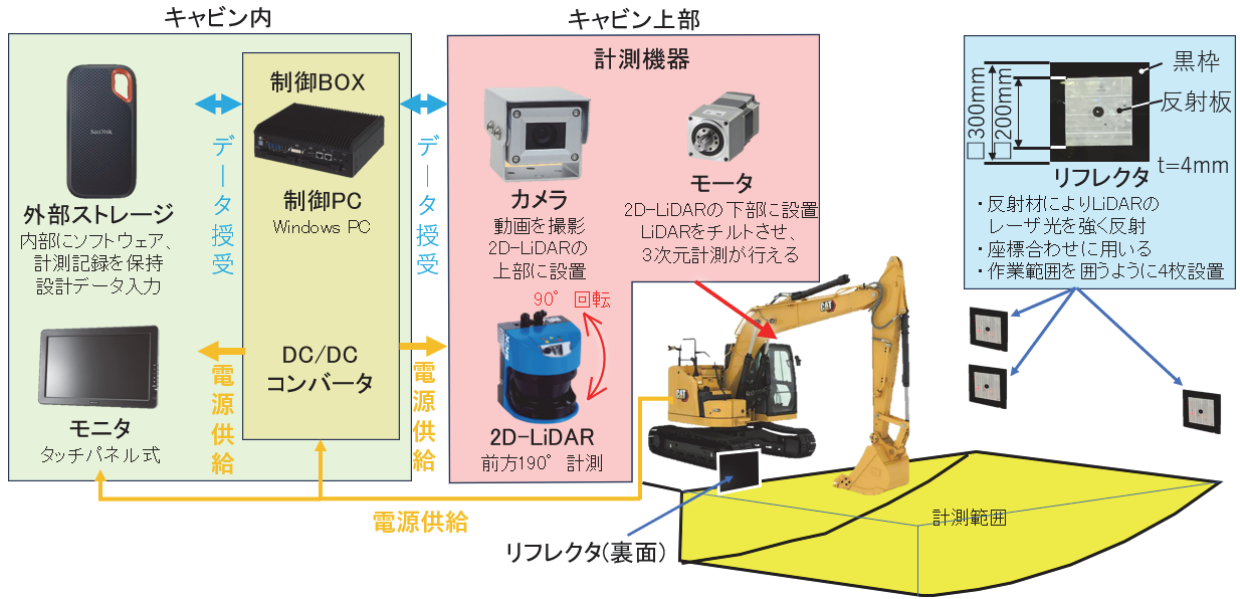


図-1 システムの機器構成

示する。この評価画面を基に、オペレータは掘削不足の箇所を面的に把握することができる。

### 2.3 ファイル構成

本システムのファイル構成を図-3に示す。本システムは外部ストレージ内に格納されており、制御・計測を行うソフト・データ類をまとめた実行フォルダ (LS)、計測記録を自動生成・保存する記録フォルダ (DATA) から構成される。実行フォルダは、本システムのソフトウェア、掘削計画となる設計データ、ワールド座標系におけるリフレクタの中心座標と掘削範囲の四隅の座標を入力した入力データ、モータなどを制御するパラメータを定義するシステム設定データ 1、計測ごとに調整が可能なパラメータを定義するシステム設定データ 2、および操作ログを記録するログファイルを有する。記録フォルダには、LiDAR による計測の開始操作を行った時点で、その日時のファイル名が自動生成され、計測時のパラメータ情報、カメラ画像、計測データ、内部で計算した結果、計測時に読み込んだシステム設計データのコピー、および表示した計算後のヒートマップが保存される。

## 3. 実現場での試行

### 3.1 試行現場の概要

本システムを試行した対象現場は、トンネル内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。施工条件として、片側2車線のうち1車線を規制して工事を行っている。車両の入替が容易ではないため、掘削においては、1台のバックホウのアタッチメントを交換して用いた。また、週末には道路規制を解除する必要があり、インバートコ

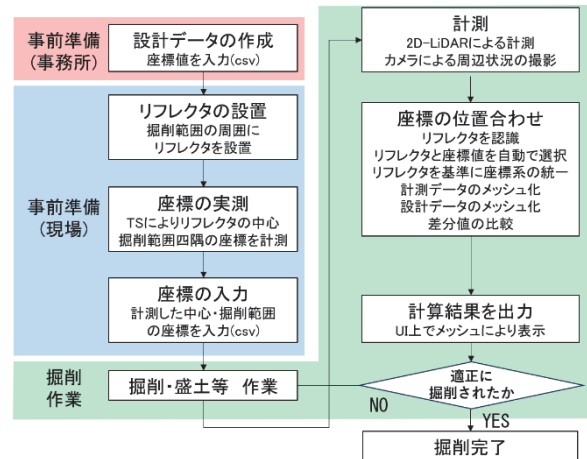


図-2 本システムの計測手順

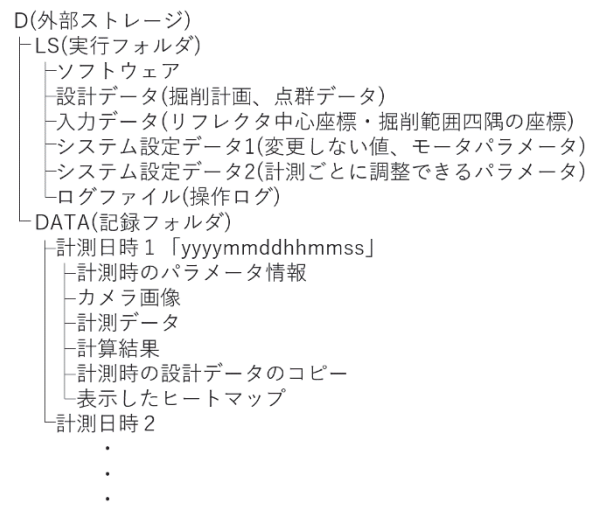


図-3 本システムのファイル構成

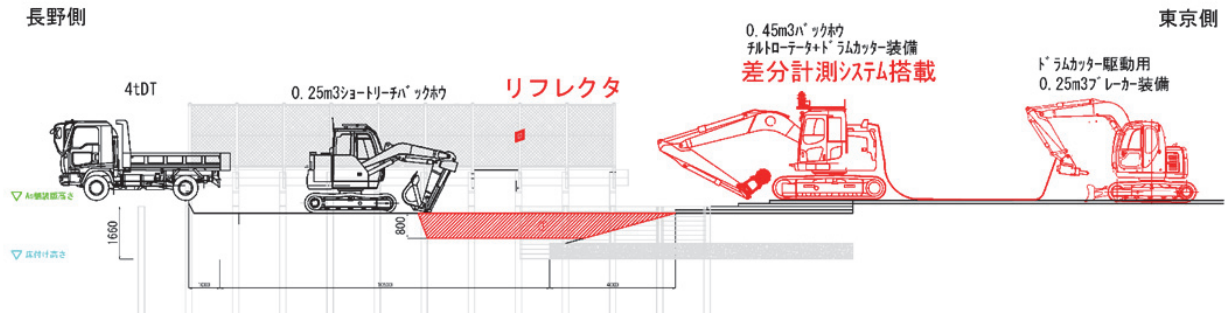


図-4 現場での機械配置

ンクリート打設から舗装復旧までを考慮すると、インバート掘削に要する時間は約 20 時間に限定される。このため、出来形管理だけでなく、機械配置の変更など、効率的な施工管理が求められる。1 度の道路規制の期間内に行う施工範囲は 10.5m を基本としている。

図-4 に機械配置を示す。今回はバックホウ（0.45m<sup>3</sup> 級、チルトローテータ付）を掘削作業のベース機とし、アタッチメントはバケットと油圧切削機であるドラムカッターを採用した。また、ドラムカッターの駆動用として、油圧ブレイカー（0.25m<sup>3</sup> 級）を採用した。この油圧ブレイカーはドラムカッターの動力であるとともに、バックホウでの施工では計画の施工サイクルに合わない場合に、油圧ブレイカーで作業を行う可能性も考慮したものである。

本試行では、本システムの有効性を確認するのに加え、チルトローテータとドラムカッターによるインバート掘削の適用性についても検証した。

図-5 にチルトローテータ（傾斜角範囲：±40° 左/右、旋回角範囲：360°）を用いたインバート掘削状況を示す。狭隘な空間のため、バックホウ本体の旋回はほとんどできない。通常は、油圧ブレイカーで掘削し、端部においては、機体を入れ替えて施工するが（図-6）、チルトローテータを装備したことによって先端の自由度が高まり、1 台で端部の掘削まで可能となることを確認した。

掘削には、チルトローテータおよびドラムカッターを使用していたが、事前に実施していた室内岩石試験結果以上の強度を有する地盤が点在した影響により、ドラムカッターの使用は一部にとどめ、油圧ブレイカーによる施工を行った。

### 3.2 本システムによる計測精度

図-7 にリフレクタの自動認識状況を示す。現場においてもリフレクタを自動で検出できることを確認した。

図-8 に評価画面例を示す。オペレータは得られた評価画面を基に掘削の過不足を判断する。暖色系（赤）は設計値未滿、緑は設計値（許容範囲内）、寒色系（青）は設計値超過、黒色は点群が取得できていないことを意



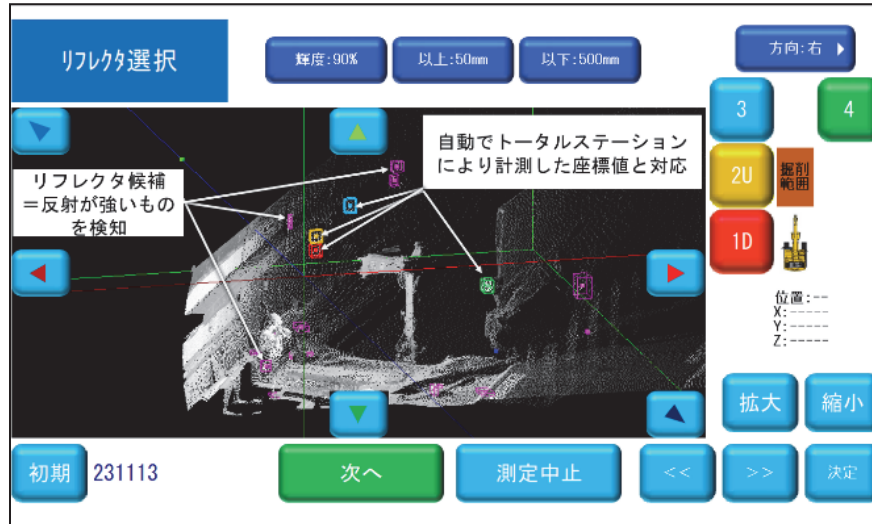
図-5 ドラムカッターによるインバート掘削状況



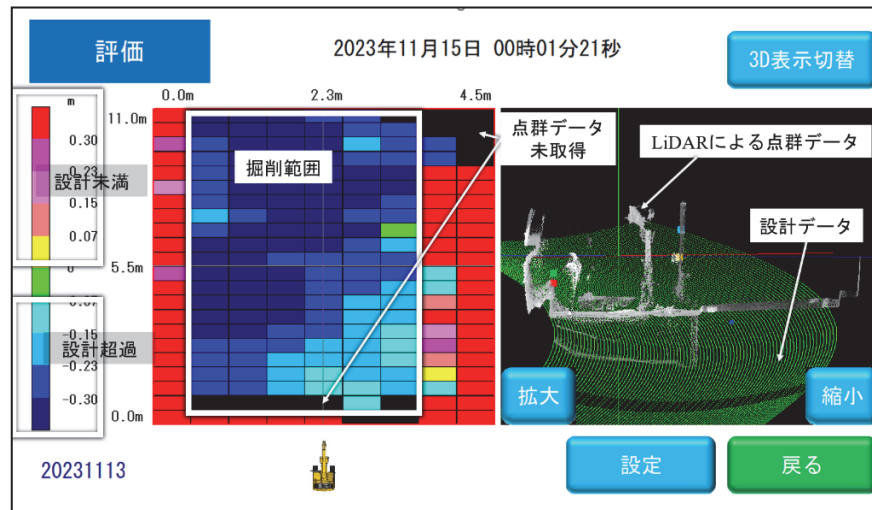
図-6 油圧ブレイカーによるインバート掘削状況

味する。点群が取得できない理由としては、乱反射などによりレーザーの反射光が得られない、もしくは遮蔽物によりレーザーが届かないことが考えられる。

トータルステーションによる測定結果（6 測点×7 回）を真値として、本システムの計測精度を確認した。なお、トータルステーションの測点近傍における点群データの平均値を本システムの計測値とした。これらを比較した結果、鉛直方向における差の絶対平均は約



図ー7 リフレクタの自動認識状況



図ー8 出来形評価画面例

80mmであった。理由としては、比較した測点が少なく、かつブレーカーを使用したために仕上げ面が局部的に凹凸であることが影響したと考えられる。

計測時間については、事前の準備作業で約 15 分、掘削を止めて行う計測で約 5 分を要したものの、掘削作業をほとんど止めることなく、効率的に計測ができた。また、掘削範囲全体を計測することで、設計に対し、余掘り量を適切に把握できた。加えて、現場試行における本システムの計測精度は、出来形管理基準<sup>2) 3)</sup>を満足している。ただし、掘削管理において、この計測精度を考慮して管理すると、余掘り量が増えることになり、掘削土およびコンクリートの数量の増大に繋がるため、さらなる精度向上が課題である。

#### 4. おわりに

今回の実現場での試行により、面的な出来形計測が可能であること、また、従来の出来形計測と比べ、計測に

かかる時間が短縮されることも確認できた。今後は、計測精度の更なる向上を目指して、システムの完成度を向上させていきたい。

#### 【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」、土木学会第 78 回年次学術講演会、VI-117、2023
- 2) 国土交通省、「地上型レーザーキャナーを用いた出来形管理の監督・検査要領（土工編）（案）」、2022.3
- 3) 東日本高速道路㈱、中日本高速道路㈱、西日本高速道路㈱、「トンネル施工管理要領」、2020