

重機搭載レーザー計測システム（トンネル版）の開発

ICT 技術を使ったインバート掘削の出来形計測検証

株式会社フジタ

○ 中村 多聞

浅沼 廉樹

ジオサーフ CS 株式会社

浮田 真樹

1. はじめに

トンネル工事では、GNSS（全球測位衛星システム）を使えないことや狭隘な作業環境であることから、日常の施工管理は専門員による測量が主流となっている。しかし、この測量作業は作業エリア内に重機と人が混在するため、接触事故防止に十分配慮する必要がある。また施工機械を止めて計測作業をするサイクルは、施工効率の向上を妨げていた。

近年では、3Dレーザースキャナを用いた計測が行われているが、精密機器かつ操作に専門的な知識が必要なことや、盛り替えに時間を要するという難点があった。そのため、簡易に自己位置を計測でき、移動しながら測量できる技術の開発が望まれていた。

重機搭載レーザー計測システム トンネル版（以下 重機LS-TS）は、トンネル重機に計測ユニットを搭載して、移動しながらトンネル内の任意の位置で、面的な出来形座標を取得するシステムである。この技術を、国土交通省関東地方整備局発注の国道17号（仮称）新三国トンネル工事のインバート掘削工にて、検証した結果を報告する。

2. システムの概要

2.1 技術の概要

本システムは、トンネル内で運用可能なマシンガイダンス、重機LS-TS、自動追尾TSで構成され、トンネル内インバート部の計測を行う。システム構成を図-1に示す。

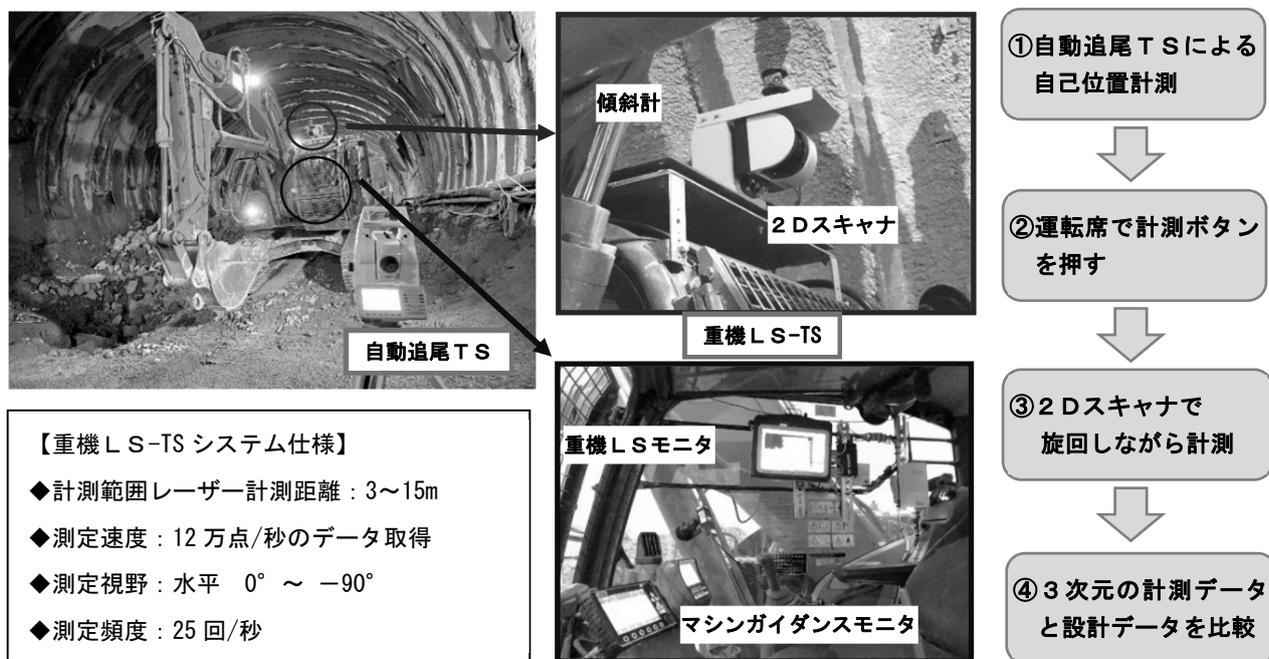


図-1 重機LS-TSシステム構成及び計測フロー

2.2 システムの特徴

本システムの特徴を以下に示す。

- ・GNSSが利用できないトンネル空間においても、明かり工事と同様にICT施工が適用できる。
- ・計測器に屋外用の安価な2Dのレーザースキャナを使い、重機を回転させて計測することで容易に3Dデータを取得できる。
- ・高価かつ耐久面で課題のある3Dレーザースキャナと比べて、汎用性と普及性が高い。
- ・重機に後付で搭載が可能である。
- ・計測結果は、重機運転席の重機LSモニタで閲覧ができる。
- ・重機が回転スキャンする事で取得したインバート施工面の現状データを、3D設計データと重ね合わせ、差分を色分けしたヒートマップで運転席のモニタに表示される。
- ・バックホウの爪先位置が重機LSモニタ上に表示され、計測後に掘削箇所のガイダンスができる。
- ・計測から解析までを短時間で行い、測量作業が大幅に省力化され、生産性向上が可能となる。

3. トンネル現場における試行プロジェクト

3.1 現場試行の概要

本技術は、内閣府が推進している官民研究開発投資拡大プログラム(PRI SM)を活用した国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」に選定された試行業務である。トンネルのインバート工事における日常の計測時間を、3D計測データ等を活用することで施工の労働生産性の向上を図り、従来工法と比較して作業時間20%短縮を目標とした。以下に試行業務の概要を示す。

<試行現場>

- ・工事名：国道17号(仮称)新三国トンネル工事
- ・概要：全長1283.8m, 内空断面積約58.5m²
インバート工の延長987m
- ・発注者：国土交通省関東地方整備局
- ・工期：2016年2月～2021年2月

<試行業務>

- ・概要：データを活用して土木工事における施工の労働生産性を図る技術
- ・検証範囲：図-2 参照(全22BL)
- ・委託者：国土交通省関東地方整備局
- ・コンソーシアム：(株)フジタ、ジオサーフCS(株)
- ・試行期間：2019年9月～2020年3月

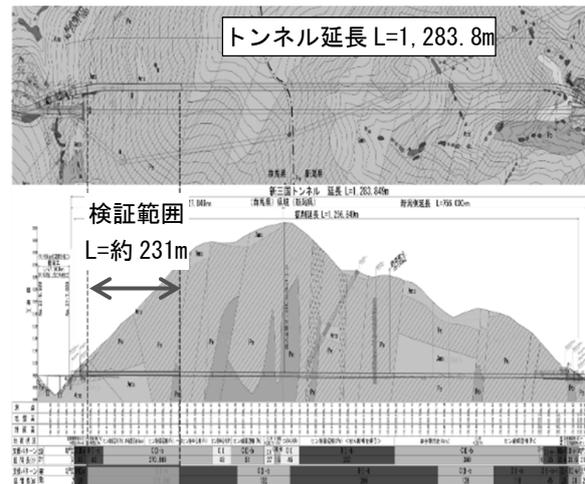


図-2 計測箇所平面図・縦断面

3.2 事前の精度確認

試行業務は、事前に機械工場の平地で精度検証を行った。精度確認状況を図-3に示す。重機LS-TSの精度確認は、「国土交通省 地上移動体搭載型レーザースキャナを用いた出来形管理要領(土工編)(案)」に準じた。検証点において、TSの計測値と、重機LS-TSの計測値の差分が基準値50mm以内であることを確認した。検証点は標高差を付けて2箇所設置した。計測結果を表-1及び表-2に示す。これにより、重機LS-TSが要求精度を満たすことを確認した。



図-3 機械工場における精度確認状況

表-1 機械工場における精度確認計測結果(左パネル)

左パネル	X	Y	Z
TS計測値	-16770.655	-46352.618	106.101
重機LS-TS計測値	-16770.643	-46352.631	106.082
Δ差分	0.012	-0.013	-0.019
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

表-2 機械工場における精度確認計測結果(右パネル)

右パネル	X	Y	Z
TS 計測値	-16777.126	-46343.543	107.784
重機 L S-TS 計測値	-16777.146	-46343.522	107.769
Δ差分	-0.020	0.021	-0.015
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

3.3 トンネル現場での検証結果

(1) 精度確認

重機 L S-TS は現場搬入後に計測機器やセンサーの固定の確認を行った。また事前キャリブレーションの結果、異常がないことを確認してから検証を開始した。トンネル現場で行った精度検証状況と結果を図-4、表-3 及び表-4 に示す。



図-4 検証点設置状況(左)と3D点群データ(右)

表-3 トンネル現場における精度確認計測結果

左パネル	X	Y	Z
TS 計測値	85883.930	-90900.399	1078.755
重機 L S-TS 計測値	85883.955	-90900.405	1078.747
Δ差分	0.025	-0.006	-0.008
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

表-4 トンネル現場における精度確認計測結果

右パネル	X	Y	Z
TS 計測値	85888.920	-90891.436	1078.459
重機 L S-TS 計測値	85888.953	-90891.440	1078.486
Δ差分	0.033	-0.004	0.027
判定	合格	合格	合格

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

(2) 出来形計測結果

重機 L S-TS で取得した点群データと設計面の TIN サーフェスを合成し、標高較差を比較した。比較結果をヒートマップで示したものを図-5 に示す。白く表示されているところは、設計高さよりマイナスであることを示し、インバートの掘削状況を設計面と比較が可能となった。

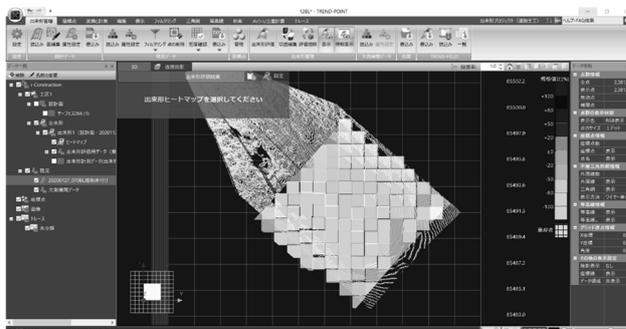


図-5 インバート掘削床付け完了時

インバート掘削工は、次工程の吹付け工・インバート工で施工するコンクリート巻厚確保のため、設計面よりマイナス側で掘削管理がされる。今回計測した範囲を従来工法で掘削出来形を確認したが、図-5 と同様に標高が設計面から 50~100mm 程度マイナス側で管理されていることを確認した(図-6 参照)。



図-6 従来工法による掘削出来形管理(水系からの下がりによる確認)

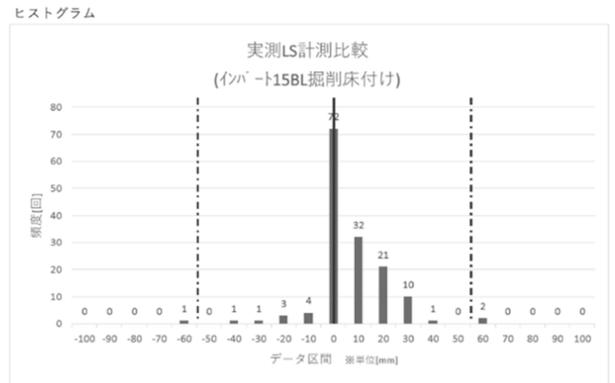
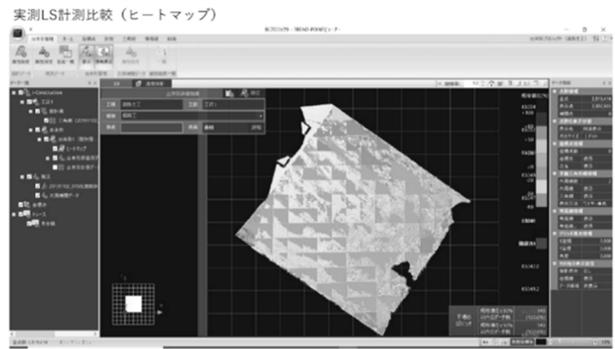
先のデータ合成では、重機 L S-TS で取得した点群データが計測断面において相違がないことを確認した。しかし、計測したデータが施工面全体で精度が確保できるかは判定できない。そのため、次節で 3 次元データとしての精度検証方法とその結果を述べる。

3.4 3次元データとしての精度検証

重機LS-TSで計測した施工面を、定置式3Dレーザースキャナ(Leica社製MS50)で計測を行い、標高較差を確認した。なお、3Dスキャナで計測した点をTINサーフェスに変換したものを設計面、重機LS-TSで取得した点群を評価対象とした。インバート掘削の計測状況を図-7に、結果の一覧表と評価シートを表-5、図-8に示す。



図-7 重機LS-TS及び定置式3Dレーザースキャナにおける掘削面の計測状況



全データ数	148
平均値 [mm]	3.5
標準偏差 [mm]	13.6
最大値 [mm]	60
最小値 [mm]	-64

図-8 精度評価シート

表-5 3次元データとしての精度評価一覧

番号	計測日時	施工箇所	評価データ数 [個]	平均値 [mm]	標準偏差 [mm]
1	10月31日	14BL	132	-1.6	18.3
2	11月2日	15BL	148	3.5	13.6
3	11月6日	16BL	144	-8.2	22.1
4	11月7日	17BL	138	0.3	14.8
5	11月11日	18BL	142	-17.0	19.3
6	11月13日	19BL	141	4.8	14.2
7	11月14日	20BL	142	-13.4	17.5
8	11月18日	21BL	148	-2.6	21.5
9	11月19日	22BL	153	2.1	21.6
10	11月21日	23BL	122	-3.0	16.3
11	11月22日	24BL	140	1.4	22.5
12	11月30日	25BL	132	5.0	31.1
13	12月13日	13BL	138	2.4	17.7
14	12月16日	12BL	144	-13.3	17.8
15	12月18日	11BL	141	-4.8	15.8
16	12月20日	10BL	141	-10.5	19.2
17	12月23日	9BL	141	-0.2	13.8
18	12月25日	4BL	145	1.5	18.0
19	12月26日	5BL	148	6.0	27.7
20	1月8日	6BL	134	-0.8	22.7
21	1月9日	7BL	144	-4.5	27.5
22	1月10日	8BL	143	3.8	17.5

表-5より施工箇所毎の標準偏差が20mm前後で推移していることを確認した。また、図-8のヒストグラムでは、重機LS-TSの計測値と定置式3Dレーザースキャナの計測値の差は、全体の半数近くが誤差0~10mmに収まっていることを確認できる。以上の結果から本試行業務で計測したデータは、任意の点だけでなく施工面全体において精度が確保されていると判定できる。

4. 試行の成果

4.1 サイクルタイムの短縮

計測で取得した3次元点群データは、トンネルの3次元設計データと重ね合わせ、ヒートマップで表示される(図-9参照)。重機オペレータは、画面上のバックホウの爪先位置を確認しながら、設計面まで達していない箇所を確認し、ガイダンス機能により掘削する。また爪先位置は、設計面からの高さに合わせて色が変わるため、数値よりも瞬間的に認識しやすい表示となっている。

トンネル断面方向に張った水系から掘削面までの下がり計測する従来の確認方法から、重機オペレータが自ら作業しながら出来形の良否を確認できるようになり、インバート掘削工全体のサイクルタイムが約20%短縮された(表-6及び図-10参照)。

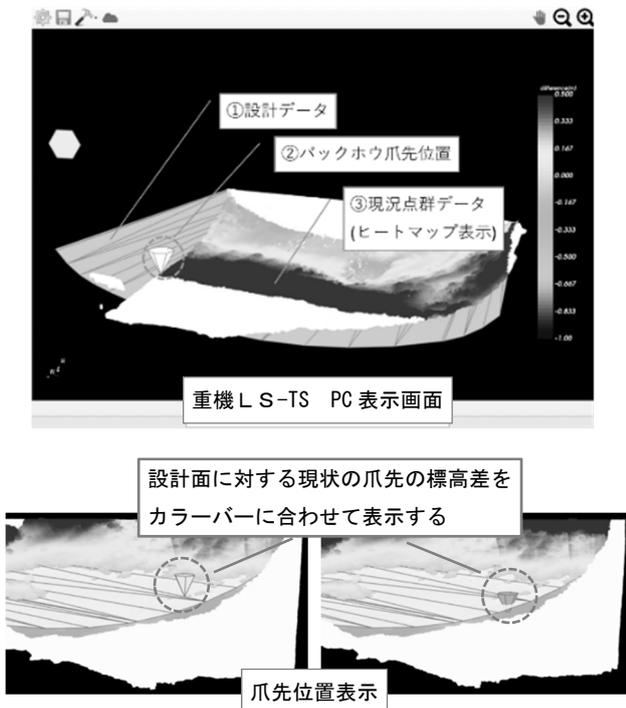


図-9 計測結果表示画面

表-6 1BLあたりの平均施工時間(全22BLの平均)

作業内容	従来工法	重機LS-TS
岩掘削・ずり積み	8.58	8.58
確認測量	1.33	0.00
出来形測量	1.09	0.15
合計時間	11.00	8.73

(単位[h])

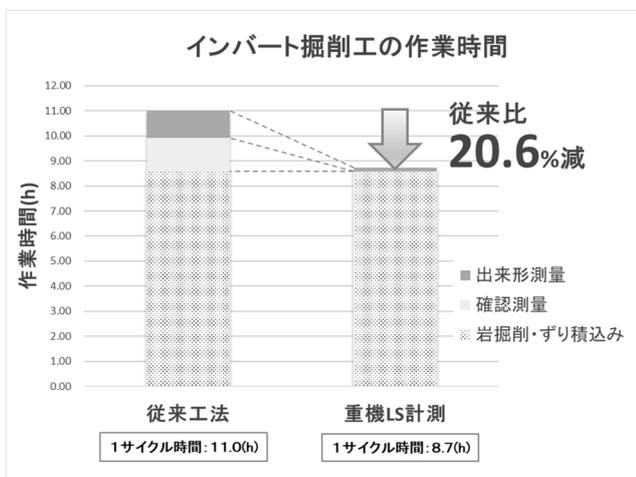


図-10 サイクルタイム比較

4.2 出来形計測における人工の低減

従来のインバート掘削では、掘削時の床付け確認として出来形計測時に専門の測量員が作業ヤードに入り計測作業を行っていた。重機オペレータは、この計測結果を専門の計測員から確認し再掘削等の判断を行っていた。重機LS-TSでは、重機オペレータが自ら作業しながら出来形の良否を判定できるため、床付け確認の専門の測量員が不要となった(図-11参照)。

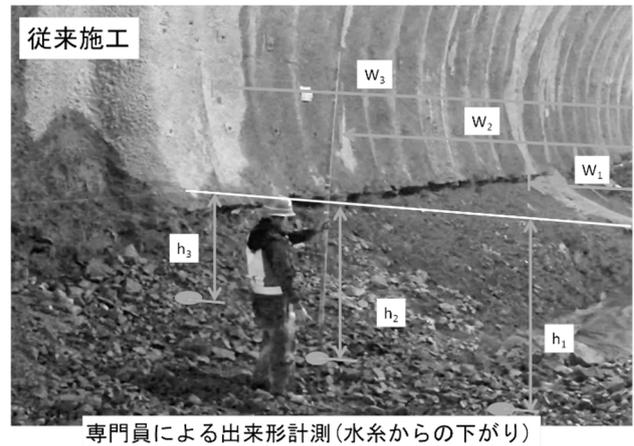


図-11 出来形計測方法の違い

これによりインバートの掘削確認や出来形計測時には、専門の測量員を配置することなく重機オペレータのみで施工可能となり、従来の2人工から1人工での施工を可能とした(図-12, 図-13参照)。

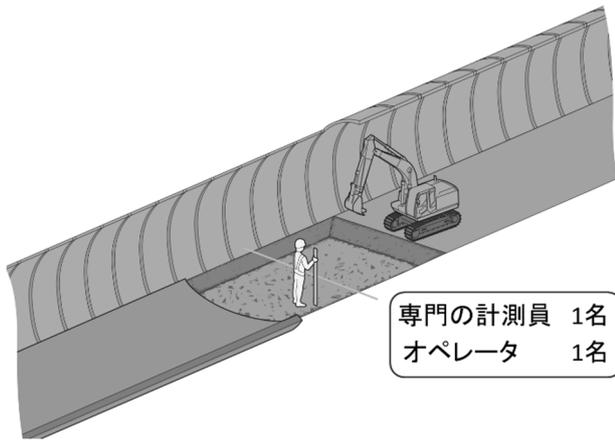


図-12 従来工法による計測時の必要人工(2 人工)

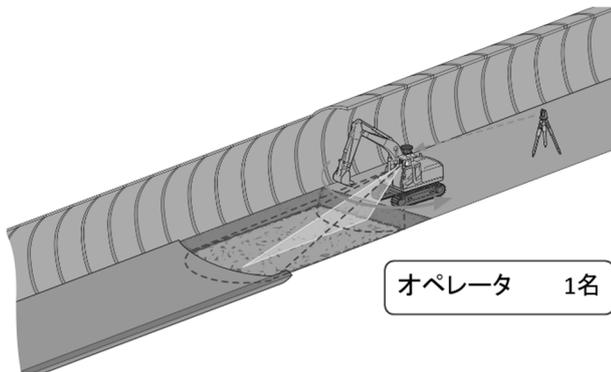


図-13 試行技術による計測時の必要人工(1 人工)

4.3 安全性の向上

今回の試行により、従来のインバート掘削での掘削や床付け確認の計測作業に対し、以下の事が確認された。

- ・重機オペレータが掘削毎に確認の為の重機運転席への昇降動作が不要となり、転倒によるケガの危険性がなくなりオペレータの安全性が確保される（図-14 参照）。
- ・インバート掘削面確認時に専門の測定者が重機近傍まで近づく為、作業エリア内に重機と人が混在することになり、重機と人の接触事故防止に十分配慮する必要があったが、本システムでは測定時に専門の測定者が不要となった（図-15 参照）。

5. おわりに

重機LS-TSによるインバート掘削工の出来形計測を実現することで、従来の人力作業と比較して省人化と生産性向上が図れたことを確認した。

安全面において、重機旋回範囲内に計測の専門員が立入ることがなくなったため、重機と人が接触する危険要因が排除された。また床付け確認作業で、オペレータが運転席から頻繁に乗り降りする必要が無くなった。

今回の検証は、インバートの全断面掘削で行ったが、今後はその他のトンネル工の出来形計測にも展開が可能であると考え。本技術が建設現場へのICT導入に対する更なる普及促進につながれば幸いである。

本技術の開発と現場試行にあたり、多岐にわたりご指導を賜りました関係者各位に深く感謝を申し上げます。



図-14 従来インバート掘削(重機足場状況)



図-15 従来インバート掘削(掘削高さ確認)

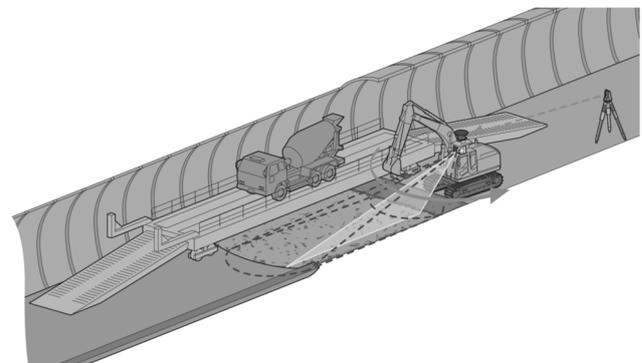


図-16 トンネルインバート栈橋での計測イメージ