

山岳トンネルにおけるコンクリート吹付けナビゲーションシステムの開発

前田建設工業(株) 正会員○水谷和彦 清水建設(株) 正会員 小島英郷
戸田建設(株) 正会員 関根一郎 西松建設(株) 正会員 山本 悟
エフティーエス(株) 正会員 四塚勝久

1. はじめに

山岳トンネル工事におけるコンクリート吹付け作業は、吹付けノズルのオペレータが切羽直下に立入り、吹付け出来形を目視にて確認しながら作業を行っている。しかし、切羽直下では肌落ちの危険や粉じんの飛散など、過酷な労働環境となっている。厚生労働省より発令された「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係るガイドライン（平成30年改正）」および「ずい道等建設工事における粉塵対策に関するガイドライン（令和2年）」において、切羽立入を不要にする機械化・遠隔化技術の導入が求められている。そこで我々は、コンクリート吹付け作業の機械化・遠隔化を実現する、コンクリート吹付けナビゲーションシステムの開発を進めている¹⁾²⁾。本稿では、システム概要および模擬トンネルで実施した、測定精度検証結果を報告する。

2. 開発技術の概要

本システムの測定技術は「ミリ波レーダ技術」、「モーションキャプチャ技術」、「吹付けロボット技術」および「機体位置測定技術」で構成されている。これら技術の測定データを合成計算することにより、リアルタイム測定・可視化が可能となり、タブレット画面を見ながらコンクリート吹付けのナビゲーション操作を実現する。

① ミリ波レーダ技術（写真-1, 図-1）

吹付けノズル周囲に取付けた6台のレーダセンサからミリ波レーダを照射し、その反射波を捕捉してノズルから吹付け面までの距離を計測できる。ミリ波レーダは周波数が76.5GHz帯の高周波であるため、吹付け時の粉塵等の影響を受けにくい。



写真-1 ミリ波レーダ

図-1 吹付け厚さ算出イメージ

② モーションキャプチャ技術（写真-2, 3）

吹付け機に搭載したモーションキャプチャカメラによって、ノズル部に設置した自発光LEDマーカの中心位置を算出することで、吹付け時の揺動等に起因するブームのたわみを考慮したノズルの位置座標をリアルタイムで計測することができる。



写真-2 モーションキャプチャカメラ

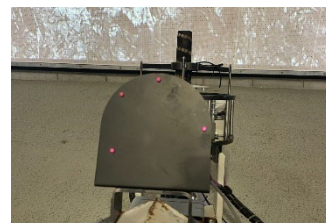


写真-3 LED マーカ

③ 吹付けロボット技術（図-2, 3）

3段式伸縮ブームおよび回転モータで構成され、伸縮ブームには伸縮計、回転部は回転角を計測するロータリエンコーダを内蔵。伸縮計とエンコーダのデータから吹付けノズルやミリ波レーダの位置座標および方向を特定することができる。

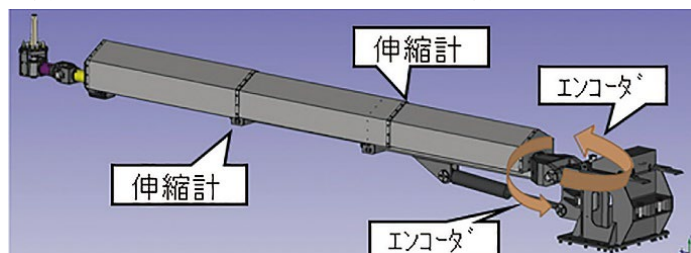


図-2 吹付けロボットブーム部

④ 機体位置測定技術（写真-4）

吹付け機後方に設置したシャッタープリズム3点を、坑内固定のトータルステーションで自動測定することにより、機体およびモーションキャプチャカメラの位置座標を特定することができる。

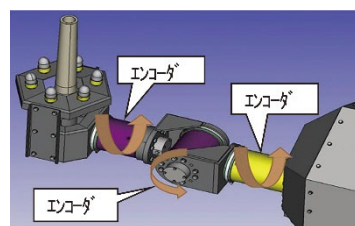


図-3 吹付けロボットノズル部

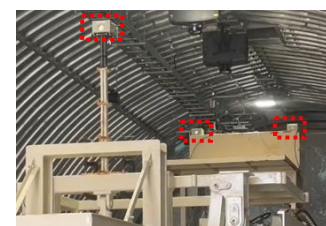


写真-4 シャッタープリズム

キーワード ミリ波レーダ、モーションキャプチャカメラ、吹付けロボット、ナビゲーション

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見2丁目10-2 前田建設工業株式会社 土木技術部 TEL 080-1694-7369

3. 技術検証

前田建設工業(株)ICI 総合センター模擬トンネル内に、本システムを搭載した吹付け機実機を配備した（写真-5）。模擬トンネル壁面には地山と吹付面を模擬したモルタル塗布板を設置し（写真-6）、モーションキャプチャ（前章技術②+④）および全体システム（前章技術①+②+③+④）の測定精度を検証した（写真-7, 8）。



写真-5 試験状況全景

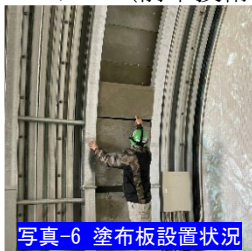


写真-6 塗布板設置状況



写真-7 モーションキャプチャ精度確認状況



写真-8 全体システム精度確認状況

4. 検証結果

4. 1 モーションキャプチャ精度検証結果

本検証時の計測位置およびロボットブーム姿勢を図-4～6に示す。また、ロボットブームのたわみ計測例を図-7に示し、モーションキャプチャ精度検証結果を表-1に示す。モーションキャプチャ誤差（平均1.7mm）はロボットブーム静止時たわみ（鉛直33mm）よりも小さく、本技術導入による精度向上が確認できた。

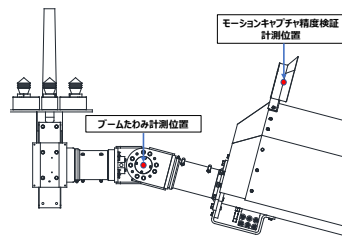


図-4 精度検証計測位置

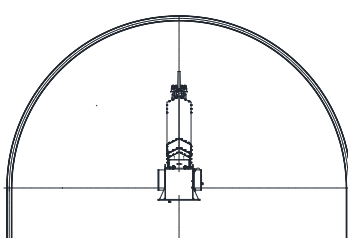


図-5 ロボットブーム先端位置

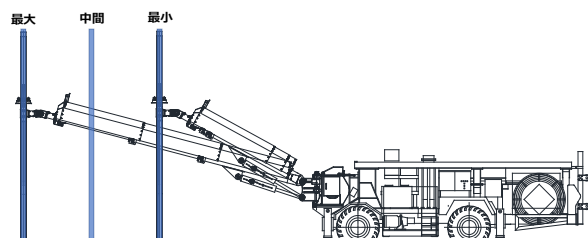


図-6 ロボットブーム伸縮位置

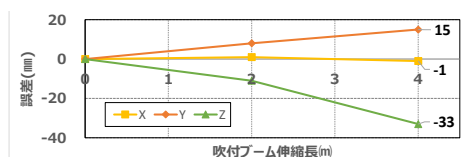


図-7 ロボットブームたわみ計測結果(①, 最大)

モーションキャプチャ測定値 - トータルステーション測定値																	MAX 13.9	MIN -13.0	AVE -1.7	単位mm
測点	①			②			③			④			⑤							
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z					
最小	-	-	-	-0.8	-13.0	2.9	-5.2	-10.1	-6.4	-8.7	-8.4	8.9	-10.9	-2.5	-6.0	-11.4	-0.5	8.7		
中間	-4.0	-4.5	1.7	5.5	-11.6	7.2	6.1	-12.3	-3.5	-9.7	-8.9	12.3	0.7	-4.5	-7.6	-5.3	-3.4	13.9		
最大	-2.9	-2.2	3.2	5.4	-10.5	3.9	13.5	-11.2	-1.3	-7.8	-5.6	10.0	6.4	-3.3	-5.9	-1.8	5.5	9.4		

X:進行方向（+切羽、-坑口）、Y:水平（+右、-左）、Z:鉛直（+上、-下）

4. 2 全体システム精度検証結果

吹付完了ラインを想定したモルタル塗布板を左S.L.～左肩部まで設置し（図-8）、本システムにより上半180度範囲を自動計測した（写真-9）。ナビゲーション画面には計測結果がリアルタイムで表示され、モルタル塗布板設置範囲は設計ラインのマゼンダ色で大部分描画された（写真-10）。3Dレーザスキャナによる精度検証の結果、計測範囲中央部の平均誤差は16.5mmであり、数センチ程度の精度が得られることを確認した。

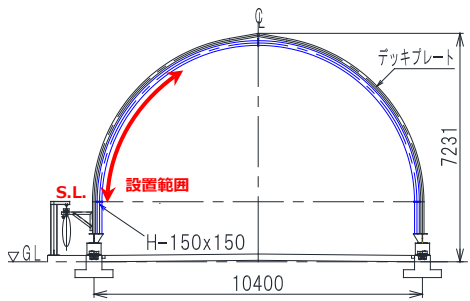


図-8 モルタル塗布板設置範囲

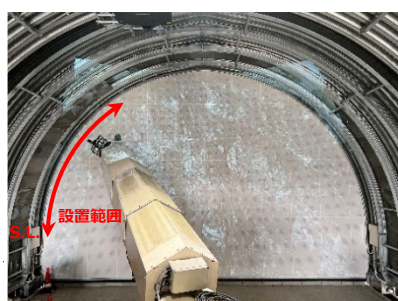


写真-9 自動測定状況

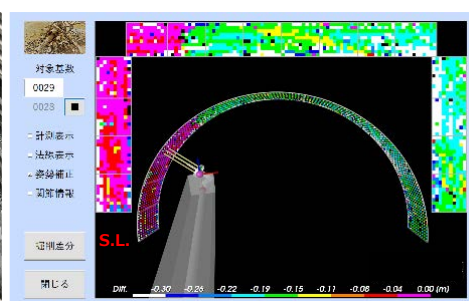


写真-10 ナビゲーション画面

5. おわりに

本試験と並行で現場導入も完了しており、リバウンド対策の回転式レーダカバーや粉塵対策のカメラ洗浄装置、遠隔操作システムも実装している。今後、吹付けコンクリート作業の全自動化を推進する計画である。

参考文献

- 1) 清水建設(株) 小島英郷ほか：山岳トンネル吹付けロボットのリアルタイム厚さ測定システムの開発，土木学会 第76回年次講演会，2021
- 2) 西松建設(株) 山下雅之ほか：山岳トンネルコンクリート吹付けの遠隔操作システムの開発，土木学会 第77回年次講演会，2022