

山岳トンネル工事における遠隔支保工建込技術の開発状況

日比 康貴*
Yasutaka Hibi

山本 悟*
Satoru Yamamoto

1. はじめに

山岳トンネル工事において、掘削の最前線である切羽は、騒音・粉じん・振動等が多く発生する過酷な労働環境であり、特殊技能を要する作業が多いため、従事する労働者の安全性向上や省人化・省力化による生産性向上が求められている。そこで当社では、山岳トンネル施工で使用する各種建設機械の遠隔操作技術・自動運転技術を開発し、それらを効果的に組み合わせて施工全体の無人化を実現するための山岳トンネルの無人化・自動化施工システム「Tunnel RemOS (Tunnel Remote and automated Operation System)」¹⁾の開発を進めている(図-1)。

本稿では、Tunnel RemOSの要素技術であるエレクター一体型吹付機遠隔操作システム「Tunnel RemOS - Spray」における開発状況について報告する。

2. エレクター一体型吹付機遠隔操作システム「Tunnel RemOS - Spray」

山岳トンネル工事におけるエレクター一体型吹付機(写真-1)は、掘削後の切羽に対するコンクリート吹付け作

業や鋼製支保工(以下、支保工)の建込作業を行う建設機械である。吹付け機遠隔操作システム「Tunnel RemOS - Spray」の開発は2019年から進めている。Phase1(2019～2021年)ではガイダンスシステム(吹付けナビゲーションシステム)を開発、Phase2(2021～2023年)では重機の走行や吹付け作業を離隔地から操作できる遠隔操作システムを開発²⁾、そして、Phase3(2023～2025年)では吹付け自動運転システムを開発し³⁾、吹付機による吹付け作業の遠隔化および自動化技術を確立してきた。次のステップとしてPhase4(2025～2027年)では、吹付け機が行う支保工の建込作業について、遠隔化・自動化システムの開発を進めている。

3. 遠隔支保工建込技術の概要

本技術は、既開発技術である「吹付けナビゲーションシステム」に含まれるモーションキャプチャカメラ(以下、MC)を用いて、支保工に取付けたマーカ位置座標を計測し、リアルタイムでマーカ座標値と設計値差分を算出することで、エレクタで把持した支保工を適切な位置へ誘導することが可能である。本技術により、従来の支保工建込作業で実施していたトータルステーション(以下TS)による誘導や切羽直下での作業員による微調整作業が不要となる。さらに、MCで複数のマーカを計測した際、1つの剛体を形成し、支保工の姿勢を計測することで、支保工のロール角・ピッチ角・ヨー角の角度情報管理が可能となるため、座標管理に加えて支保工の姿勢管理を盛り込んだ最適な支保工建込を実現できる。

このように吹付けナビゲーションシステムとMCを用いた支保工建込技術を用いることで、吹付機が行うすべての作業について遠隔化・自動化が可能となる。

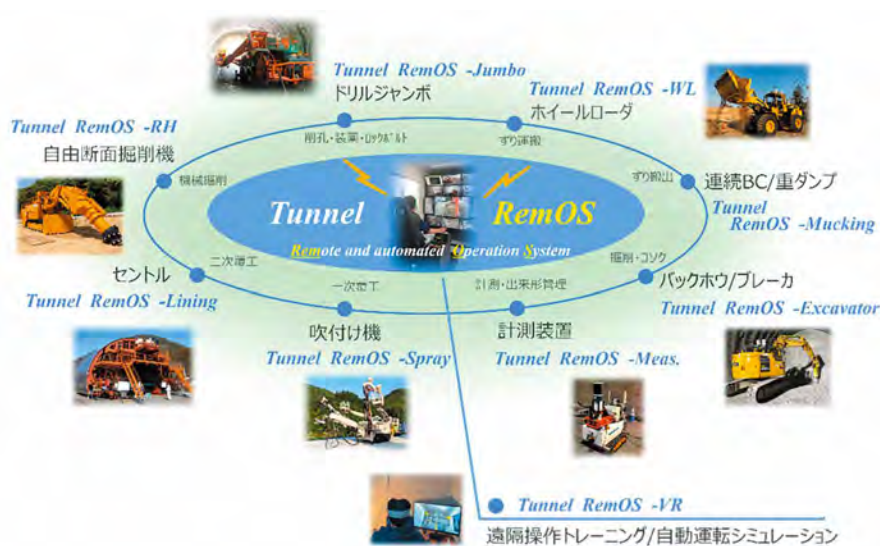


図-1 Tunnel RemOS 構成図



写真-1 吹付機全景

* 技術研究所 土木技術グループ

4. 検証結果

当社実験施設「N フィールド」模擬トンネル内にて2つの手法で精度検証を実施した。

(1) 2点間距離による精度検証

支保工両端に設置したマーカをMCとTSでそれぞれ計測し、2点間距離計測値の比較を3回行った。結果を表-1に示す。MCとTSによる値の差は、最大-12.0mm、最小-10.0mm、平均-11.3mmであった。

(2) 再現性および繰り返し精度

実施工を想定した誘導精度の検証として、再現性および繰り返し精度の確認を以下の手順で行った。

①支保工を所定の位置へ移動

②天端部と根脚部に設置したマーカとプリズム（写真-2）についてそれぞれMCとTSで計測し、初期値を取得

③一度支保工を格納し、MCによるリアルタイム計測値（図-2）を参考にしながら初期値と同じ値になるように支保工を移動

④設置した各マーカとプリズムをMCとTSで計測

⑤手順③④を繰り返し行い、各部の奥行・左右・高さ項目に関して初期値と計測値の比較を3回実施

結果を表-2に示す。初期値と計測値の差が0mmに近いほど、MCによる計測がTSと同等の精度であると評価できる。各方向（奥行、左右、高さ）について比較を行い、天端部において、最大5.4mm、最小0.1mm、平均0.8mm、根脚部において、最大4.4mm、最小0.2mm、平均1.0mmであることを確認した。

以上の2つ検証結果から、MCによる計測精度は実用レベルであり、繰り返し計測誤差の少ない安定した計測が可能であることを確認できた。

5. まとめ

支保工建込作業の遠隔化・自動化に向けてMCの計測精度に関して検証を実施した。TSと比較した結果、MCの計測精度はTSと同程度であることを確認し、支保工建込の遠隔化・自動化に向けた技術として活用できる可能性を見出した。今後は本技術を活用し、誘導方向をモニタ上で確認しながら遠隔で建込作業を行えるガイダンスシステムの開発に取り組み、実施工への適用を目指していく。さらに、将来的には、支保工建込から吹付けまでの一連作業の自動化技術を確立させ、施工の省人化に貢献する所存である。

現在、実施工現場において、ガイダンスシステムを用いた検証を進めており、早期の実用化を目指している。なお、本システムは西松建設（株）、清水建設（株）、戸田建設（株）、エフティーエス（株）の4社共同開発技術である。

表-1 MCとTSの計測による2点間距離値と差（mm）について

	1回目	2回目	3回目
TS	5683.1	5685.0	5683.0
MC	5695.0	5695.0	5695.0
差	-11.9	-10.0	-12.0
平均	-11.3		



写真-2 マーカおよびプリズム設置位置



図-2 MCによる計測の様子

表-2 MCとTSによる初期値と計測値の差分量の差（mm）について

回数	天端部マーカ			根脚部マーカ		
	奥行	左右	高さ	奥行	左右	高さ
1回目	0.1	-0.2	1.9	-1.3	0.3	4.1
2回目	-3.3	0.5	2.2	-0.7	0.2	4.4
3回目	-1.9	2.6	5.4	-1.9	-0.6	4.4
平均	-1.7	1.0	3.2	-1.3	0.0	4.3

参考文献

- 1) 山本悟、瀬瀬善孝：山岳トンネルにおける無人化施工への取り組み，土木施工，Vol.64，N0.4，pp.87-90，2023。
- 2) 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，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，VI-802，2022。
- 3) 四塚勝久ほか：山岳トンネルにおける吹付けロボットのノズル誘導制御を用いた自動化技術，令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会，VI-1222，2025。
- 4) 四塚勝久：吹付け厚さのリアルタイム測定と管理「吹付けナビゲーションシステム」を開発，日本建設機械施工，Vol.76，No.5，pp.70-74，2024。