

山岳トンネル坑内にて油圧ショベルを無線で遠隔操作 無人化施工システム「Tunnel RemOS-Excavator（トンネルリモスー エクスカベータ）」を開発

山本 悟

山岳トンネルの建設工事におけるトンネル切羽は地山の崩落や肌落ちなどの災害が発生する恐れがあり、作業員は粉じん、振動・騒音などに晒される過酷な環境下となる場合が多い。トンネル建設に従事する作業員の安全性の向上、作業環境の改善のために、バックホウやブレイカ等の油圧ショベルを遠隔操作する無人化施工システム「Tunnel RemOS-Excavator（トンネルリモスーエクスカベータ）」を開発し、ブレイカの遠隔操作を現場適用した。本稿では、当該システムの概要と実施工における適用状況および課題解決のための工夫について報告する。

キーワード：山岳トンネル、油圧ショベル、遠隔操作、無人化、無線通信

1. はじめに

山岳トンネルの建設工事においては、坑内の過酷な環境下にて特殊技能を要する作業が多く、これに従事する技能労働者の安定確保や高齢化対策が喫緊の課題となっている。また、山岳トンネル工事の最先端部である切羽は地山の崩落や肌落ち災害がたびたび発生しており、労働者の生命を脅かす恐れもあり、切羽への立入りを削減することが求められている（切羽作業の無人化）。

このような課題の解決には労働環境の大幅な改善や労働生産性の向上が不可欠であり、その方策の1つと

してICT技術を駆使した無人化（遠隔操作）施工技術の導入が望まれている。しかしながら、山岳トンネルの施工では狭隘な坑内において多種にわたる特殊機械を使用する複雑な作業が必要とされるため、無人化技術の導入が進んでいないのが現状である。

このような背景から、トンネル工事に使用する個別の施工機械に対する遠隔操作技術を開発し、それらを効果的に組み合わせることで施工全体の無人化を実現するための山岳トンネル無人化施工システム「Tunnel RemOS（Tunnel Remote and automated Operation System）」（以下、本施工システム）^{1), 2)}の構築を現在進めている（図-1）。

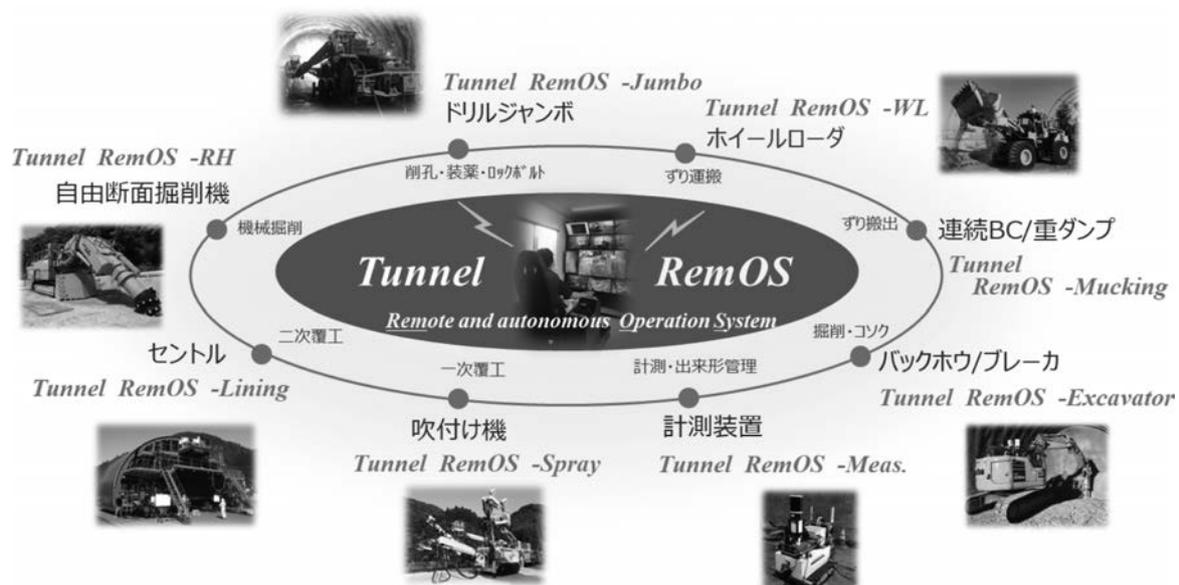


図-1 本施工システム

2. 油圧ショベル無人化施工システム

山岳トンネル掘削の最先端部である切羽においては、発破後に掘削設計断面線よりも内空側に残った地山を掘削する整形作業（以下、あたり取り）が行われている。これまで、あたり取りの際は作業員が切羽直下に立入り、目視にて整形が必要な箇所（以下、あたり箇所）を判断してレーザーポインタ等で重機オペレータに指示を出していた。しかし、切羽は地山が露出しており、岩塊の抜け落ち（肌落ち）がひとたび発生すると、死傷災害につながる可能性が高い危険な場所であり、厚生労働省からも「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」において、切羽への原則立入禁止が示されている。そこで、あたり取り作業に使用される油圧ブレイカのオペレータの安全性の向上、作業環境の改善のために、ブレイカやバックホウ等の油圧ショベルを遠隔操作する無人化施工システム「Tunnel RemOS-Excavator（トンネルリモスーエクスカベータ）」（以下、本システム）を開発した。

(1) システム概要

今回開発した本システムは遠隔操作室、映像・制御信号伝送システム、機体制御システムおよびガイダンスシステムである「切羽掘削形状モニタリングシステム」で構成されており（図-2）、油圧ブレイカの走行から切羽でのコソクやあたり取りなどの一連の作業を無線で遠隔操作することが可能である。重機オペレータは切羽から離れた位置に配置された遠隔操作室内のモニタの切羽映像を見ながら油圧ブレイカを操作するため、切羽近傍の無人化や作業環境の改善が期待される。

(a) 遠隔操作室

遠隔操作室は4tトラック荷台に補強済みユニットハウスを設置し、電源台車後方（切羽から150m程度後方）に駐機させた（写真-1）。室内には運転席、操作レバー、スイッチおよびフットペダルを配置した運転コクピットと油圧ブレイカの前後左右側方に搭載したFHDカメラ映像、俯瞰カメラ映像および機体情報を映す12個のモニタと後述する「切羽掘削形状モニタリングシステム」の計測モニタが配置されている（写真-2）。オペレータは運転コクピットに搭乗して



写真-1 遠隔操作室



写真-2 運転コクピットおよびモニタ

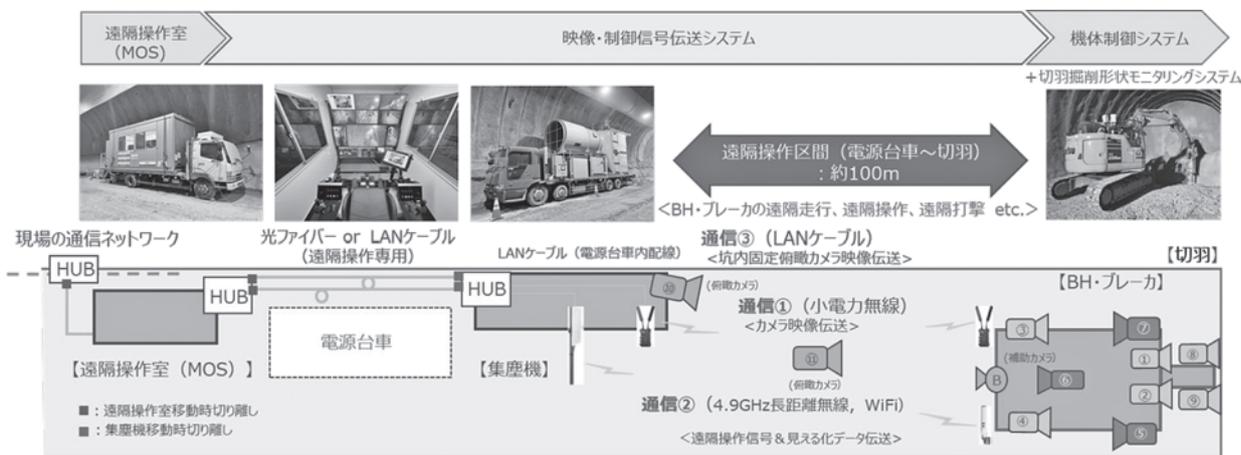


図-2 本システム構成例

モニタ画面を見ながら機体走行やブーム・アーム操作、チゼルの打撃等を遠隔で行う。なお、掘削時の音や振動もセンサにより取得し、コクピット上で再現することによって、機体上での実機操作に近い作業環境を実現する工夫がされている。また、運転コクピットは、トンネル掘削に使用されるドリルジャンボや吹付け機、ホイールローダなどの大型重機をセレクトスイッチで選択することによって、操作レバーやスイッチ、フットペダルなどの設定が変更され、一つのコクピットから各大型重機の遠隔操作が可能なマルチオペレーションシステムとなっている。

(b) 映像・制御信号伝送システム

重機を安定的に遠隔操作するためには映像・制御信号を有線接続にて伝送する方法が確実である。しかし、複数の重機が輻輳して作業を行うトンネル切羽においては有線接続では切断等の恐れがあるため、映像・制御信号の伝送については5GHz帯の小電力無線および4.9GHz長距離無線の2種類の無線伝送方式を使用したシステムを構築している。油圧ブレーカには9台のFHDカメラと、各無線送受信のアンテナが設置されている。さらに、移動基地局として送受信のアンテナが集塵機上部に設置されている。カメラの映像データは変換・合成を経て、小電力無線により移動基地局に無線伝送され、そこからLANケーブルを介して遠隔操作室へ有線伝送される。また、俯瞰カメラ映像は小電力無線により直接無線伝送される。一方、制御信号、機体情報（音、振動等）、ガイダンスシステムのデータ等は4.9GHz長距離無線を使用して送受信され、情報の一部はモニタに表示されるとともに、専用PCに運転データとして蓄積される。

(c) 機体制御システム

遠隔操作室からの制御信号は、先述の映像・制御信号伝送システムを介して油圧ブレーカのキャビン上に設置された機体制御システムに伝送され、その信号をもとに機体の油圧ユニットに取り付けた作動油の比例制御電磁弁を操作することで、機体の走行、ブーム・アーム操作、ブレーカ打撃といった掘削作業に直接関係する動作を遠隔操作で実施することができる。また、それ以外のクラクション合図や「切羽掘削形状モニタリングシステム」の操作等有人作業時に可能な動作についても、すべて遠隔制御することができる。

(d) 切羽掘削形状モニタリングシステム

油圧ブレーカの遠隔操作にてあたり取りを行う場合、遠隔操作室からあたり箇所を認識しづらいという問題がある。切羽にて有人搭乗する際は、作業員が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を判断してレー

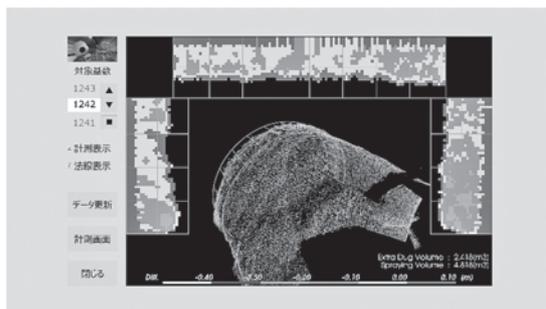
ザーポイント等で重機オペレータに指示を出していたが、遠隔操作ではその判断に代わる「計測・ガイダンス」技術が必要となる。そこで、あたり取りを行う油圧ブレーカに搭載した高速3Dスキャナ（写真—3）で切羽の掘削形状を計測して、掘削形状の点群データと設計断面を比較し、設計断面線よりも内空側に残ったあたり箇所をモニタにヒートマップ表示させる「切羽掘削形状モニタリングシステム」³⁾を遠隔操作室から操作可能とした（図—3）。本システムにより、崩落等危険な切羽に近づくことなく遠隔操作室からあたり箇所を確認できるため、効率的にあたり取りを実施することが可能である。

3. 現場試行結果

本システムを複数人のオペレータに協力していただき、数回にわたって実施工サイクルの中で発破、ズリ出し完了後の切羽にて、遠隔操作による駐機場所からの移動～あたり取り完了までの一連の作業にて試行した。本来の切羽は、油圧ブレーカとともに油圧バックホウ、ホイールローダおよびダンプトラックが輻輳しながら作業を行うが、試行段階では安全性を考慮して油圧ブレーカ単独での試行とした。



写真—3 高速3Dスキャナ（キャビン上）



図—3 切羽掘削形状モニタリングシステム計測結果例

(1) 試行成果と課題

(a) 掘削箇所の認識不良

現場試行当初、遠隔操作室内の運転コクピットに搭乗し、モニタ画面を見ながら遠隔操作によるあたり取り作業を実施した際は、中央の大画面の映像を頼りにブーム・アーム操作を行い、あたり箇所の掘削を行っていた。しかし、中央のカメラ映像は掘削箇所から遠く、映像も不鮮明なため「切羽掘削形状モニタリングシステム」のコンター図を確認しながらでもあたり取りを行うのは困難であった。そこで、写真—4に示すように、油圧ブレーカのチゼル部分にブラケットを新設し、そこにカメラを設置することで掘削箇所に近い、より鮮明な映像を取得することに成功した。

写真—5は改良したカメラ位置での遠隔操作によるあたり取りの状況である。黄色破線部分に新設したカメラ映像を映すことで、あたり箇所が認識でき効率的にあたり取りを行うことが可能となった。

(b) サイクルタイムの遅れ

遠隔操作によるあたり取りのサイクルタイムは実機にオペレータが搭乗した場合と比較して、30%程度増加した。これはモニタ画面と「切羽掘削形状モニタリングシステム」の計測画面のみでは遠近感が掴みにく



写真—4 チゼルブラケット, カメラ



写真—5 遠隔操作によるあたり取り (改良後)

く、あたり取り作業に時間が掛かってしまうことに起因する。遠近感が掴みにくいという意見は現在開発に取り組んでいる本施工システム全体で出てきているため改善が急務である。また、遠隔操作の現場試行が断続的かつ短期間であったため、オペレータが運転コクピットの操作に慣れていないという問題も考えられる。さらに、オペレータの年齢や遠隔操作に対する適正も関係してくると考えられる。これら諸問題を解決するために、現在チゼルの自動誘導システムおよび、運転コクピット操作練習用のシミュレーターを開発中であり、将来的にはあたり取りの自動化に繋げていく考えである。

(2) 導入効果

本施工システムの導入効果について、以下に示す。

(a) 安全性の向上

遠隔操作室から油圧ブレーカのすべての操作を行うことで切羽が無人となり、飛び石や切羽崩落による人的被害が無くなる。また、「切羽掘削形状モニタリングシステム」を搭載することで、あたり箇所の確認に切羽直下に立入ることも無くなるため安全性が向上する。

(b) 作業環境の改善

油圧ブレーカによる掘削作業は振動、騒音、粉じんおよび飛び石の飛来等オペレータにとって苦渋な環境であるが、遠隔操作室は切羽から離れている上に空調が完備されており、快適な作業環境でトンネル掘削を施工することが可能であり、作業環境が改善される。

(c) 操作性の向上

オペレータがより実機に搭乗している時の間隔で操作できるように、操作コクピットにおいて実機の音と振動を再現している。また、現場試行を通じて、カメラの台数や配置の工夫、無線伝送技術の選定を行うことで、遠隔操作をするために必要な高い視認性と低遅延を実現している。

(d) 高い汎用性

本システムは重機メーカー問わず後付けが可能のため、汎用性の高いシステムとなっている。

4. おわりに

今回、山岳トンネル工事における油圧ショベル無人化施工システムである「Tunnel RemOS-Excavator」を開発し、現場試行を行った。現場試行では油圧ブレーカの切羽への移動や切羽作業（コソク作業やあたり取り）といった一連の作業を遠隔操作にて実施すること

ができたが、サイクルタイムの増加等課題を残している。今後は、油圧ショベル無人化施工システムのさらなる改良を進めるとともに、油圧バックホウやホイールローダとの共同作業を遠隔・自動化させたトンネル掘削作業の完全無人化への取り組みを続け、更なる安全性向上・省人化を目指していく。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 山下雅之・山本悟・田口毅：山岳トンネルにおける無人化施工への取り組み 施工機械の遠隔操作システムの実用化を目指して，土木施工，Vol.62，No.1，pp.135-139，2021
- 2) 山下雅之・山本悟・田口毅：山岳トンネルにおける切羽近傍作業の無人化を目指した取り組み，建設機械施工，Vol.73，No.7，pp.43-48，2021
- 3) 山本悟・三井善孝・高橋将史：切羽掘削形状モニタリングシステムの開発，令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会，VI-281，2019

【筆者紹介】

山本 悟（やまもと さとる）
西松建設株式会社
技術研究所 土木技術グループ
上席研究員

