

## (44) 山岳トンネルにおけるホイールローダ 遠隔操作システムの開発

田口 毅<sup>1</sup>・山下 雅之<sup>2</sup>・山本 悟<sup>3</sup>・清水 亮<sup>4</sup>・石井 孝佳<sup>5</sup>  
塚田 純一<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目2番1号)  
E-mail: takeshi\_taguchi@nishimatsu.co.jp

<sup>2</sup>正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目2番1号)  
E-mail: masayuki\_yamashita@nishimatsu.co.jp

<sup>3</sup>正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目2番1号)  
E-mail: satoru\_yamamoto@nishimatsu.co.jp

<sup>4</sup>非会員 株式会社カナモト 広域特需営業部 (〒105-0012 東京都港区芝大門1-7-7)  
E-mail: shimizu@kanamoto.co.jp

<sup>5</sup>非会員 有限会社浅草ギ研 (〒229-4503 千葉県いすみ市岬町和泉2363-28)  
E-mail: ishii@robotsfx.com

<sup>6</sup>非会員 ジオマシンエンジニアリング株式会社 (〒116-0001 東京都荒川区町屋1-19-1-904)  
E-mail: junichi\_tsukada@geomachine.co.jp

山岳トンネル工事の生産性向上、安全性向上を目指し、掘削作業等で使用する各種建設機械の遠隔操作に関する技術確立に向けた取り組みを拡大・推進するため、掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業に使用されるホイールローダの遠隔操作システムを開発した。システムの現場適用性を確認するため、トンネル現場において遠隔操作試験を実施し、遠隔操作のホイールローダを用いたずり出し作業を概ね円滑に実施できることを確認した。また、画像信号、制御信号の伝送にローカル 5G(L5G)通信システムを適用し、通信システムの基本性能を把握することができた。

**Key Words:** wheel loader, unmanned construction system, local5g, rock tunnel

### 1. はじめに

山岳トンネル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、技能労働者の確保や高齢化対策が喫緊の課題となっている。このような課題に対して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、それを解決する方策の1つとしてトンネル掘削の無人化(遠隔操作)・自動化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作業が必要とされており、自動化・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、現在、トンネル施工に使用する個別の建設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て施工全体の無人化・自動化を実現する取り組みを進めている。その中でトンネル掘削時の施工サイクルの約30%を占めるずり出し作業に着目し、その作業に使用されるホイールローダの遠隔操作システムの開発を進めた。とくにホイールローダによるずり運搬作業では狭隘な坑内での高速移動や複雑なバケット操作が必要であり、この遠隔操作技術を確立させることにより他作業で使用する建設機械への応用も期待できる。

### 2. システム概要

#### (1) システム構成

ホイールローダ遠隔操作システムは、切羽近傍におけ

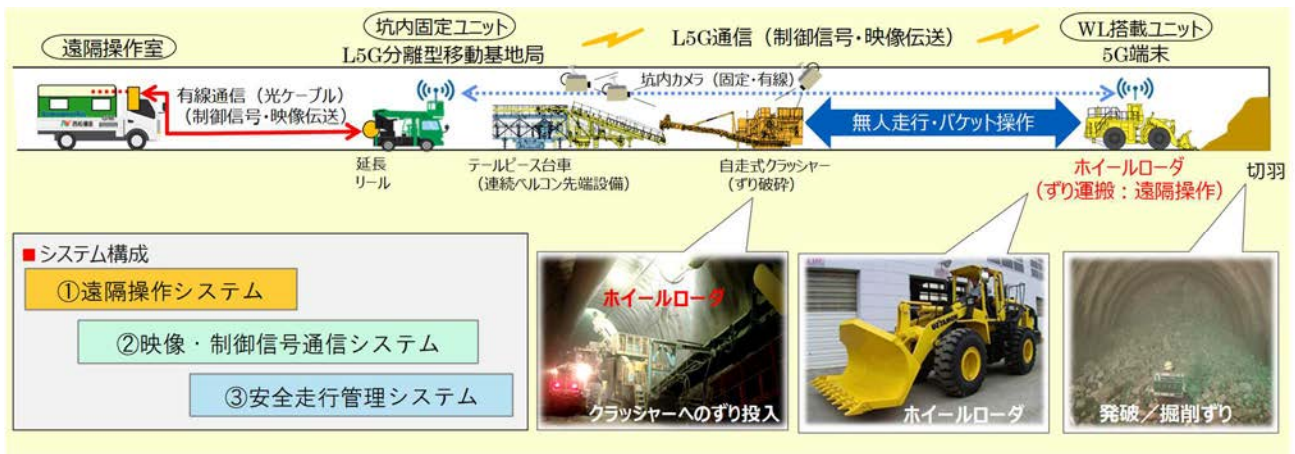


図-1 ホイールローダ遠隔操作システム概要図

るずり運搬作業に使用されるホイールローダの運転操作を遠隔で行うものであり、「遠隔操作システム」、「映像・操作信号通信システム」および「安全走行システム」で構成される。また、遠隔操作システムと合わせて、ホイールローダの稼働状況を把握し、オペレータに教示するための「モニタリングシステム」を搭載している。システム概要図を図-1に示すとともに、各システムの概要を以下に示す。

## (2) 遠隔操作システム

本システムは運転操作に必要な遠隔操作装置で構成される。ホイールローダには、ステアリングやペダル操作等を無線受信により機械的に作動させる遠隔運転制御装置が取り付けられている(図-2)。ステアリング操作については、ステアリングホイールに円形ガイドギアを固定し、このギアを電動モータで駆動させてステアリングの操作を図った。ブレーキやアクセル等のペダル操作については、ペダル背面から電動モータでチェーンを介してペダル操作する手法を導入した。アーム・バケット操作は、レバーに操作ロッドを設置し、その操作ロッドを電動モータにより往復運動させてレバーの操作を図った。また、これらの装置を設置した状態で通常の有人運転も可能な構造としており、有人運転および無人(遠隔)運転の切り替えを容易に行うことが可能である。遠隔操作室内には、実機と同じ仕様の操作コックピットと9画面のモニタ等が設置(図-3)されており、このモニタに表示される映像や走行データを見ながら操作コックピットにおいて走行・バケット操作を遠隔で行う。さらに、運転時の実機振動や作動音をコックピットに伝える装置も備えており、実機運転とほぼ同じ環境下での遠隔運転が可能となっている。



図-2 遠隔運転制御装置



図-3 遠隔操作室・運転コックピット



図-4 ホイールローダ搭載ユニット設置状況

### (3) 映像・操作信号通信システム

#### a) ホイールローダ搭載ユニット

ホイールローダ本体に7台の車載カメラ（FHDカメラ）と、2台の送受信用のL5G端末ルータ（CPE：Customer Premises Equipment）を搭載している。カメラおよび通信端末の設置状況を図-4に示す。ホイールローダには、走行時や掘削ずりの積み込み作業時において、大きな振動や衝撃が発生するが、キャビン上部に強固なフレームを取り付け、このフレームにカメラや送受信機を設置・固定することにより、耐振性の向上を図っている。

#### b) 坑内固定ユニット

切羽後方50～100mに配置された連続ベルトコンベア先端設備（テールピース台車）およびその周辺には、複数の固定カメラおよび通信ケーブル変換（SDI/HDMI変換、HDMI・RS232/光ファイバ変換）BOX等で構成される「坑内固定ユニット」が設置されている。また、2種の送受信アンテナ（L5G、BWA）を高所作業車に設置したL5G分離型移動基地局（図-5）を切羽後方に配置し、車載カメラの映像信号および操作信号を伝送している。

#### c) 遠隔操作室

遠隔操作室内には、L5G通信の無線基地局（BBU）を設置するとともに、L5G通信による映像出力・保存や遠隔操作システム制御信号伝送に必要な機器類も併せて設置した（図-6）。

### (4) 安全走行システム

無人運転時の安全を確保するため、ホイールローダの運転操作を自動的に緊急停止（ブレーキ作動・エンジン停止）させるシステムを設置した。これらの緊急停止は、複数の安全機構から構成されており、安全機構を多重化することにより、遠隔操作に対する安全性を確保した。ホイールローダ後部に、距離検出も可能な特殊カメラを設置し、このカメラ画像をAIを用いたシステムで高速解析することにより、車輻後方5m以内に接近した人のみを検出して瞬時にホイールローダを自動停止させる。また、遠隔操作の無線通信状況を常時監視することにより、通信が不通になるなど通信が不安定になった場合も、自動的に緊急停止が作動する。また、自動停止だけでなく、運転コクピットや携帯式のスイッチBOXに非常停止ボタンを設けることで、強制的に停止させることができる。ホイールローダ周囲の安全状況や坑内設備、同時作業中の他重機との接近については、ホイールローダに設置された全周囲カメラ（または前方左右カメラ）による合成映像を遠隔操作室の操作コクピットにおいて確認することもできる。システムの設置状況および検知状況を図-7に示す。



図-5 坑内固定ユニット(L5G)設置状況

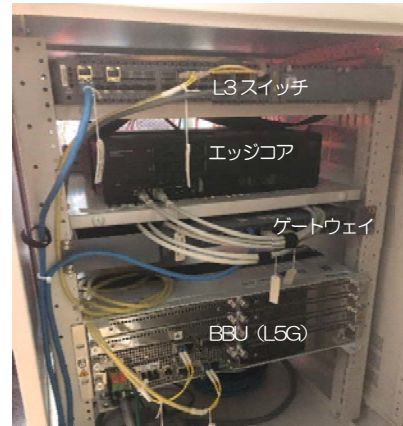


図-6 L5G機器設置状況



図-7 L5G安全走行システム設置状況



図-8 モニタリングシステム表示画面

### (5) モニタリングシステム

遠隔操作システムと合わせて、ホイールローダの稼働状況をリアルタイムで把握し、オペレータに教示するためのシステムを設置した。ホイールローダ稼働時の走行速度、走行ギア、ステアリング角度やバケット稼働状況

等の運転情報は、コクピットのモニタ（図-8）に表示し、オペレータは、ホイールローダに搭載されたカメラ画像や坑内カメラの画像と合わせて、アーム、バケット角度といったホイールローダの姿勢をリアルタイムで確認しながら操作することが可能である。これらの情報のうち、走行速度、エンジン回転数、走行ギア等の情報については、ホイールローダ本体の運転パネル映像を遠隔操作コクピットのモニタに直接表示させている。ステアリング角度やバケット稼働状況については、油圧センサや回転センサ、油量計を設置して、その計測データをもとに把握した。上述の運転情報や走行経路は数値データとして遠隔操作室に伝送されPCに保存されるが、車輛本体の運転パネルの映像情報についてもOCR機器を介して数値情報に変換し、データとして保存される。これらの数値データは、ホイールローダの走行・積み込み作業における車輛本体の位置・姿勢・動作状況をモニタリングしたもので、今後の自動・自律運転に向けた車輛制御の基礎データとして蓄積・活用する。

### 3. 現場適用試験

山岳トンネルの施工現場においてホイールローダ遠隔操作システムの適用試験を実施した。ホイールローダ遠隔操作システムを構成する映像・制御信号通信システムでは、これまで、通信設備として小電力無線（5GHz帯）を使用していたが、今回の試験では、L5G（28GHz帯）にも対応可能な通信システムを構築し、トンネル坑内における通信状況を確認した。試験では図-1で示したような配置で、切羽から約50～200m後方にL5G基地局を搭載した高所作業車を設置し、遠隔操作室において切羽～クラッシャ間のホイールローダによるずり運搬作業の遠隔操作（図-9）を実施した。

L5G通信システムは、「高速・大容量」「超低遅延」「多接続」が特徴とされており、今回の試験においても、理論値程の実測値は確認できなかったが、通信性能の高さは確認できた。小電力無線を使用した通信システムでは、FHDカメラ1台に対して無線機(送信機)が1台必要となるが、L5Gの場合では、ホイールローダに搭載した5台のFHDカメラの映像信号を1台のCPEで送信することが可能であることを確認した。小電力無線では、同一エリアで使用できるチャンネル数も限られるが、L5Gでは、1基の基地局で複数台の端末を接続できることから、トンネル坑内で稼働する様々な建設機械の遠隔操作システムを複数台で同時に運用することが可能となる。今回適用した28GHz帯のL5G通信システムは、基地局とL5G端末（CPE）の見通しが無い状況においても、直ちに通信が切れるようなことはなかったが、



図-9 遠隔運転状況

転送速度が低下する事象が確認されたことから、基地局とL5G端末の見通しを確保することが重要であることが把握できた。また、運転操作に大きく影響するような映像伝送遅延や通信上の不具合は生じず、狭隘な坑内においても有人運転に近い高速走行（時速20km/h程度）や掘削ずりの積み込みやクラッシャ投入時の微妙なバケット操作を遠隔で実施可能であることを確認できた。

### 4. まとめ

トンネル掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業の無人化を目指して、ホイールローダ遠隔操作システムを開発し、遠隔操作でずり出し作業を実施できることを確認した。また、トンネル坑内においてL5G通信システムを適用できることを確認した。

今後も、システム改良・調整を重ねて早期の実掘削作業への適用を図り、山岳トンネル施工のさらなる労働生産性向上に取り組むと考えている。

**謝辞：**L5G通信システムの導入・試験については、国土交通省「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」の採用、助成を受け推進した。ここに記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 山下雅之, 吉田道信, 塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システム, 建設機械施工, Vol.72, No.11, pp.36-39, 2020
- 2) 山下雅之, 田口毅, 山本悟, 原圭太, 清水亮, 吉田道信, 石井孝佳, 塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システムの開発と現場試行, 第76回土木学会年次学術講演会, VI-916, 2021
- 3) 上條宏明, 陣内英二, 岩下正剛, 岡本邦宏, 古屋弘, 永江敦：次世代高速通信技術5Gを用いた重機の遠隔操縦, 第75回土木学会年次学術講演会, VI-1104, 2020