

山岳トンネル工事における ホイールローダ遠隔操作システム トンネル切羽近傍の掘削ずり運搬作業を無人化

山下 雅之・吉田 道信・塚田 純一

山岳トンネル工事の生産性向上を目指した建設機械の遠隔操作技術確立に向けた取り組みを進める中で、掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業において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。ホイールローダは、トンネル掘削で使用される建設機械の中でも走行速度が速く、さらに複雑なステアリングやアーム・バケット操作が必要であるため、遠隔操作を適用する建設機械としては難度が高いと言える。その一方で、この遠隔操作技術を確立させることで、他作業において使用される建設機械への応用が期待できる。本稿では、本システムの概要について述べるとともに、屋外ヤードやトンネル現場への適用実験状況を紹介する。

キーワード：山岳トンネル，ホイールローダ，遠隔操作，無人化施工，生産性向上

1. はじめに

我が国における高齢化に伴う労働人口減少の流れは今後さらに加速し、それに伴う建設業就業者の減少・高齢化も着実に進むものと予測されている。そのような状況の中、とく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、開発を優先すべき建設機械の選定にあたっては、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。また、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される建設機械へ

の応用も期待できる。

本稿では、開発技術の概要を述べるとともに、屋外ヤードにおける遠隔操作実験およびトンネル施工现场における試行状況を紹介する。

2. システムの概要

ホイールローダ遠隔操作システムの概要図を図—1に示す。本システムは、切羽近傍におけ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。

(1) 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（写真—1）。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



図一 システム概要



写真一 遠隔運転制御装置



写真二 遠隔操作室および運転コクピット

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できる。

遠隔操作室内には、実機と同じ仕様の操作コクピットおよび9画面モニタが設置されており、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クピットにおいて走行・バケット操作を遠隔で行う（写真一2）。さらに、運転時の実機振動や作動音をコ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。

(2) 映像・操作信号通信システム

ホイールローダには、7台のFHDカメラおよび5

台の送受信機が「ホイールローダ（WL）搭載ユニット」として設置されている（写真一3）。また、切羽後方約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、3台の固定送受信機、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（写真一4）。車載カメラの映像データは、WL搭載ユニットの送受信機から無線で坑内固定ユニットの送受信装置へ伝送され、そこから光ファイバケーブルを介して遠隔操作室へ有線伝送される。同時に、走行速度や走行経路、バケット稼働圧等の運転データも遠隔操作室に伝送されて専用PCに蓄積されるとともに、その情報の一部はコクピットモニタに表示される（写真一5）。一方、操作信号は同様の通信設備を使用して遠隔操作室からホイールローダに伝送される。主要通信設備の仕様を表一に示す。



写真一3 映像・制御信号通信システム（WL搭載ユニット）



写真一4 映像・制御信号通信システム（坑内固定ユニット）

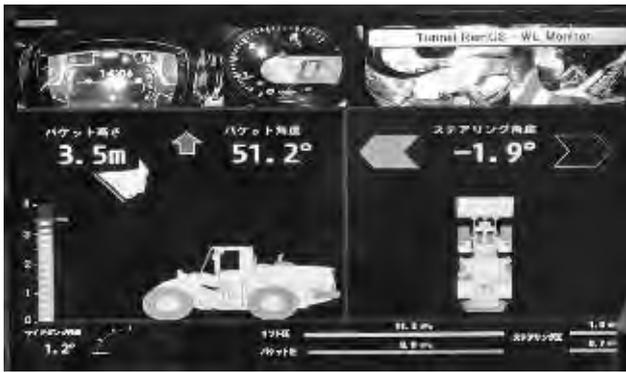


写真-5 走行データ表示例

表-1 主要通信設備の仕様

機器	仕様
映像・制御信号 伝送装置 (小電力無線)	フォーマット：HD-SDI/HDMI1.4(映像信号) RS-232/422 (制御信号) 周波数：5 GHz 帯 無線 LAN：IEEE802.11ac (W52/W56) 伝送遅延：95-140 msec (実測値)
カメラ	1/2.8 型 CMOS, 有効画素：約 200 万
光ファイバ	4 芯 SC, CL コネクター

(3) 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）させるシステムを備えている。これらの緊急停止は、写真-6 に示すようにホイールローダへの人の異常接近を AI が認識した場合や無線通信にトラブルが発生した際に自動的に作動するが、コックピットや携帯式のスイッチ BOX から強制的に作動させ

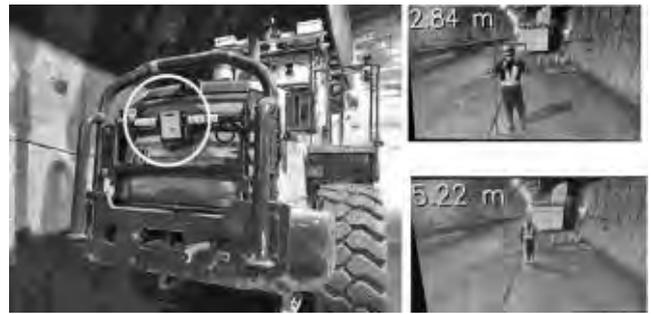


写真-6 AI 接触防止システム

ることができる。また、ホイールローダ周辺の安全状況や坑内設備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による合成映像を遠隔操作室の操作コックピットにおいて確認することができる。

3. 開発システムの適用

(1) 屋外ヤード実験

トンネル現場へのシステム適用に先立ち、屋外ヤードにおける遠隔操作実験を実施した（写真-7）。実験ヤードにはトンネル断面を模擬したフレームを 1.5 m 間隔で組上げて約 15 m 区間のトンネル空間を構築し、そこにクラッシャの代用として 10 t ダンプを配置して仮想のホイールローダによるずり投入位置とした。さらに、模擬トンネル区間を含めて約 50 m のずり運搬走路を確保してその端部を仮想切羽とし、遠隔操作室は模擬トンネルから約 50 m 離れた位置に設置した。実験では、φ 0～80 程度の再生砕石を掘

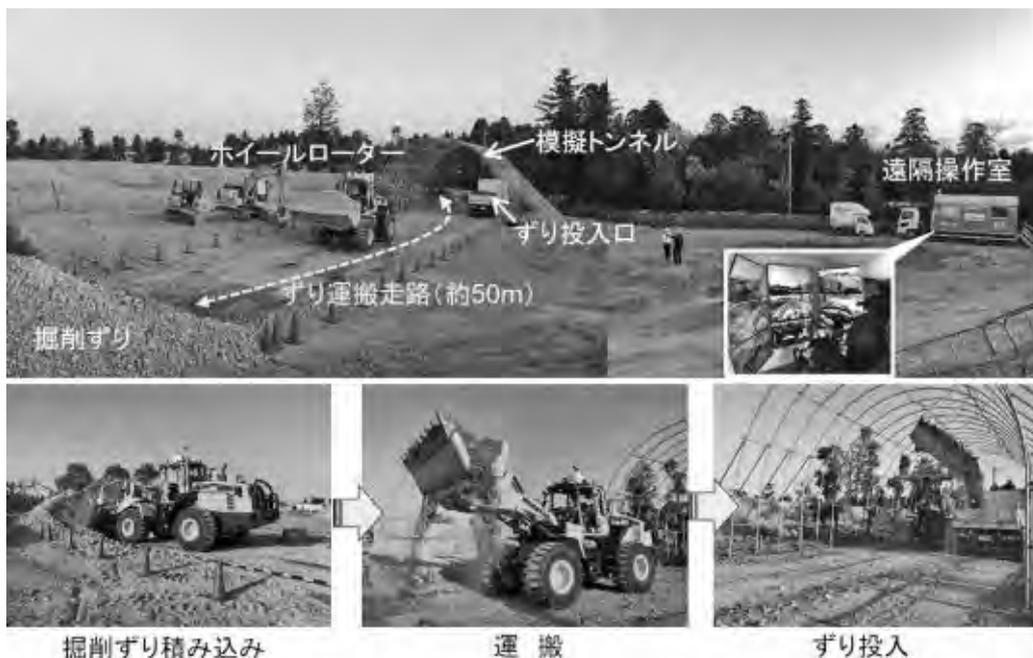


写真-7 屋外ヤードにおける遠隔操作実験状況

削ずりとして仮想切羽の位置に置き、ホイールローダによる掘削ずりの積み込みや10tダンプへのずり運搬・投入を遠隔操作によって繰り返し行った。

実験当初は遠隔操作装置の作動や映像・通信状況の不具合が発生したが、実験を進める過程でシステム改良や車載カメラ・通信機器の配置等の調整を繰り返した結果、最終的には遠隔操作に大きく影響を及ぼすような映像・操作遅延もなく一連の遠隔運転動作を概ね円滑に行うことができた。

(2) トンネル施工現場への試験導入

屋外ヤードの試験により遠隔操作の基本システムの動作性が確認できたため、続いてトンネル現場への試験導入を開始した。今回導入したトンネルは、北海道開発局小樽開発建設部発注の「一般国道5号 仁木町外 新稲穂トンネルR側仁木工区工事」である。本試験では図-1で示したような配置で坑内にシステムを設置し、切羽から約200m後方に配置した遠隔操作室において切羽〜クラッシュ間のホイールローダによるずり運搬作業の遠隔操作を実施した。

現在は、システムの調整・改良を続けながら写真-8に示すようなホイールローダの坑内無人走行やずり投入時のバケット操作といった基本動作試験を実施しているところであるが、この実験により坑内において



写真-8 トンネル坑内における遠隔操作実験状況

表-2 導入初期段階の運転効率比較

	ずり運搬 片道距離 (m)	平均往復時間 (sec)	平均作業速度 (m/sec)
実施工 (有人運転)	34	34	2.0
遠隔操作実験 (無人運転)	29	59	1.0

も基本的な遠隔運転動作に問題がないことが確認された。ただし、本システム導入初期段階の運転実験においては、表-2に示すように遠隔操作によるずり運搬作業の効率が実施工時（有人運転）の50%程度であった。これについては、遠隔操作に合わせた運転方法（走行経路など）の確立や運転オペレータの経験の蓄積、さらなる操作システムの改良等を継続的に行うことで、遠隔操作による作業効率のさらなる改善が可能であると考えている。

4. おわりに

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た。現在、坑内における無人運転試験を実施しながらシステム改良・調整を重ねており、早期の実掘削作業への適用を目指している。なお、本技術は国土交通省の「2020年度 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（追加公募）」に採用されており、本システムの映像・操作信号の伝送に5G通信技術を導入する試みも開始している。

これら遠隔操作技術の早期確立を目指すとともに他作業で使用する建設機械への展開も図ることで、山岳トンネル施工の労働生産性向上に役立てていきたいと考えている。

JICMA

【筆者紹介】

山下 雅之（やました まさゆき）
西松建設(株)
技術研究所
主席研究員



吉田 道信（よしだ みちのぶ）
(株)カナモト
ニュープロダクツ室
室長



塚田 純一（つかだ じゅんいち）
ジオマシンエンジニアリング(株)
代表取締役社長

