

遠隔操作技術を用いた土砂の運搬

Transporting earth and sand using unmanned construction technology

岡本 哲典*

井上 洸也**

Akinori Okamoto

Koya Inoue

永田 豪*

西尾 紀康*

Go Nagata

Noriyasu Nishio

要 約

押落としによる掘削工事において、押し落とした土砂が水を吸収して泥濘化し崩落する可能性があったことから、土砂の搬出においては、安全性を考慮し、重機の遠隔操作技術を導入して実施した。遠隔操作対応重機・設備の準備期間は、約3週間という短期間であったが、令和5年度の施工では、最大で日平均約600m³の土砂を運搬することができた。また、遠隔操作可能距離は最大で約130mであった。さらに、施工中に発生したトラブル要因から今後の施工における留意事項を提示した。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 施工条件
- §3. 遠隔操作設備の概要
- §4. 遠隔操作における施工トラブル事例
- §5. まとめ

§1. はじめに

本工事は、秋田県由利本荘市内の掘削工事である。掘削した地山の主な地質は火山系由来のものであり、地質にはスメクタイトという粘土鉱物が含まれる。また掘削後の本地質は風化の影響を受けやすく、ルーズな状態になると水を吸収し泥濘化しやすいという特徴を有する。令和5年7月の秋田豪雨の発生や、度重なる降雨により、掘削土が泥濘化し、押し落とした堆積土が崩落する可能性があった。そこで有人機械での泥濘化土の搬出は危険であると判断し、遠隔操作した重機による土砂の搬出を行った。本稿は、遠隔操作技術を用いた積込・運搬の令和5年度分の施工実績について報告するものである。

§2. 施工条件

遠隔操作による施工の対象範囲については、押し落とし土の中心点から半径200mの範囲とした。また、境界部には高さ2mの土堰堤を設置し近傍で有人作業を行う上での安全対策とした。(図-1)



図-1 遠隔操作による施工エリア



図-2 操作室からの遠隔操作

* 北日本(支)鳥海(出)

** 機材部機電課

遠隔操作による施工は、作業員から重機までの距離が最大 200 m となり目視での機械操作が困難であることを考慮し、目視ではなく遠隔操作室を設けカメラ映像を見ながら行う方式とした。(図-2)

§3. 遠隔操作設備の概要

3-1 使用機械

施工に使用した機械の一覧を表-1 に示す。

遠隔で操縦する機械は油圧ショベル(以下「バックホウ」という)、不整地運搬車(以下「キャリアダンプ」という)及びタイヤ式トラクタショベル(以下「ホイールローダ」という)を対象とした。機械の運用は1台のバックホウに対して2台のキャリアダンプを基本セットとし、それらを3セット用意した。加えて、運搬能力の補填のため1台のホイールローダと路盤整備や転石除去用で1台のバックホウを用意し、合計10台の機械にて遠隔操作による施工を行った。

3-2 無線遠隔操作技術

本施工にて使用した機械は、もともと遠隔操作に対応している機械と、通常の機械に操作専用ロボットを搭載させて遠隔で操作する機械の2つの方式を採用している。それぞれの特徴について述べる。

(1) ラジコン仕様機

遠隔仕様に改造された(もしくは販売された)機械で、コントローラから入力した信号により重機に搭載されている受信機を介してアクチュエータを操作する(図-3)。今回使用した機械は東京計器(株)製の遠隔装置が搭載されており、429 MHz 帯の特定小電力無線を利用し通信を行っている。通信規格はRS (Recommended Standard)-422である。通信距離は障害物がない条件下で約80~200 mである。

(2) 後付け遠隔装置

今回導入したキャリアダンプ5台のうち4台と、路盤整備用バックホウは遠隔仕様ではなかったため、遠隔で操縦できるロボット、もしくはアタッチメントを運転席に搭載することによって遠隔操作を実現させた(図-4)。オペレータは、搭載したロボットやアタッチメントを遠隔で操作することによって重機を操縦することができる。キャリアダンプにはロボットタイプ、バックホウにはアタッチメントタイプのものを搭載した。ロボットタイプのものはコーワテック(株)によって開発された「アクティブロボ SAM」を利用し、これはゴム製の人工筋肉によって動作するロボットが操作レバーを操作する(図-5)。通信は920 MHz 帯の特定小電力無線を用いており、通信距離は約200~250 mであった。アタッチメントタイプは(株)カナモト製の「KanaTouch (カナタッチ)」を利用し、これは各操作レバーにアタッチメントを装着し、Wi-Fi もしくはキャリア通信を利用して遠隔操作を行う。

表-1 主要機械一覧表

番号	機械名	型式・機能	数量
1	バックホウ	0.8 m ³ / CAT320D / 遠隔操作式	1台
2	バックホウ	1.4 m ³ / CAT336D / 遠隔操作式	1台
3	バックホウ	0.8 m ³ / SK200 / 遠隔操作式	1台
4	バックホウ	0.8 m ³ / PC200 / 遠隔操作式	1台
5	キャリアダンプ	11t積 / CD110R-1 / 遠隔操作式	1台
6	キャリアダンプ	11t積 / MST-2200VDR / 搭載型	4台
7	ホイールローダ	4.0 m ³ / CAT966 / 遠隔操作式	1台



図-3 0.8 m³ 級油圧ショベル (R/C 遠隔仕様)



図-4 11t 級キャリアダンプ (ロボット搭載)

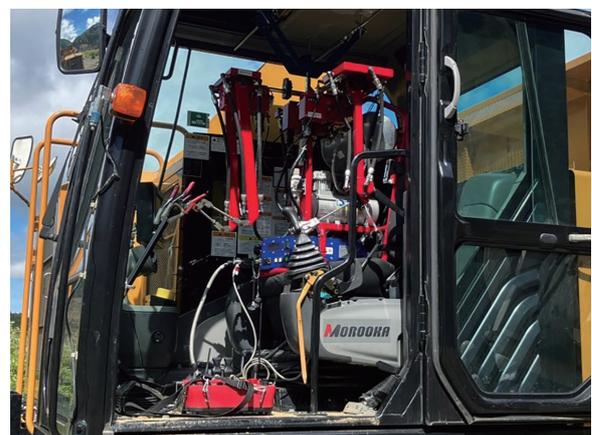


図-5 アクティブロボ SAM

(3) RS-422-Ethernet (LAN) 変換仕様

本施工では操作室から重機の作業場所まで最大 200 m を要する。一部のラジコン仕様機は室内からの操作を行うと約 80 m しか電波が届かないことが判明したため、通信距離を延長する必要がある。そこでリモコンから発信する RS-422 信号を、コンバータを介し Ethernet に変換、映像を伝送している Wi-Fi を用いて重機まで伝送した。受信した信号は、重機側にも同様のコンバータを搭載して RS-422 形式に戻し操作信号を伝達した。本方法により、Wi-Fi が網羅されているエリアでは操作信号を伝送することが可能となり、重機の遠隔操作が可能になった。

(4) Tunnel RemOS 搭載ホイールローダ

図-6 に示したホイールローダは弊社で開発を進めている「Tunnel RemOS (トンネル施工機械の遠隔操作システム)」を搭載しているものを使用した。本重機には前方、側方および後方に計 9 つのカメラと遠隔操作が可能な機器が搭載されている。場内に設置されている遠隔操作用コクピットにリアルタイムでカメラ映像が伝送され、その映像を用いて遠隔操作を行う(図-7)。操作席は、実機の振動や作動音が再現され、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-6 4.0 m³ 級ホイールローダ (RemOS 搭載)



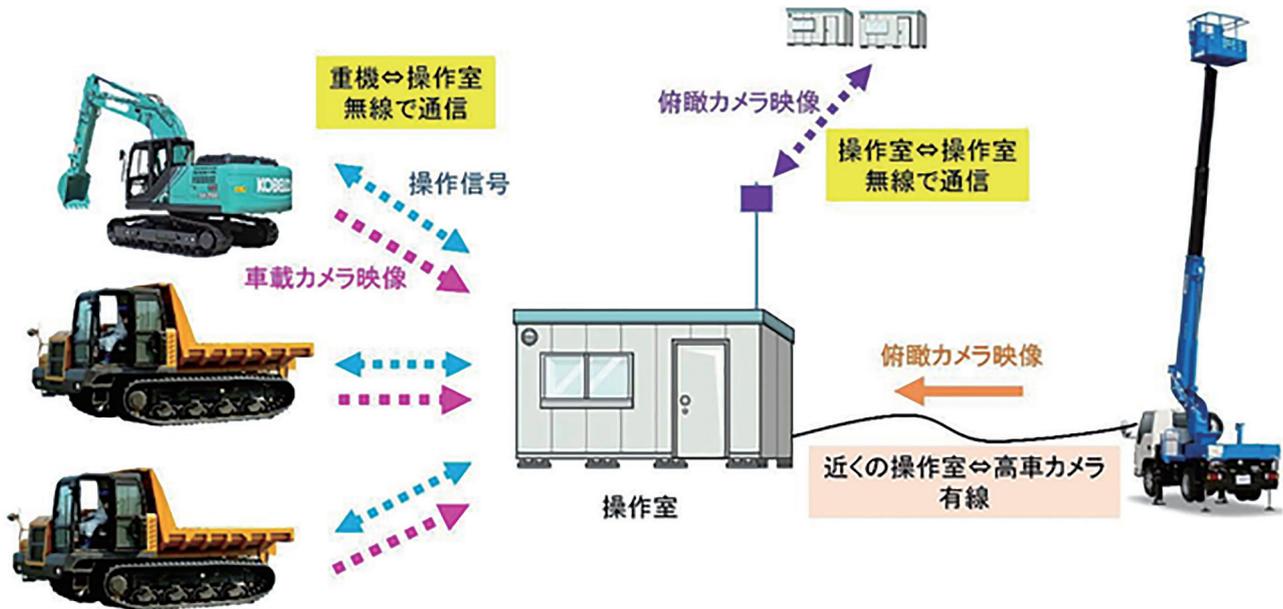
図-7 Tunnel RemOS 操作室

3-3 通信/映像設備

通信系統図を図-8, 通信概略図を図-9 に示す。



図-8 通信系統図



図一9 通信概略図

(1) 映像設備

場内に設置されている操作室から遠隔操作を行う本施工では、オペレータが施工箇所を目視できない状態にあるため、施工には複数のカメラ映像が必要となる。そこで今回、各重機の車載カメラ、各施工部にズームアップしたカメラを2機、全体を俯瞰するカメラ（図一10）を設置した。使用したカメラはローカル通信を用いたネットワークカメラであり、映像の伝送遅延は数ms程度でほとんど発生しない。重機及び俯瞰カメラの配置を図一11に示す。施工部及び俯瞰カメラは高所作業車（12m）のバスケットに設置して、より高い位置からの映像となるようにした。

バックホウの車載カメラはキャビンの上部および下部に2か所に設置し、上部のカメラはブームとアームの姿勢や掘削の位置確認に使用、下部のカメラは走行時の周囲確認に利用した。またキャリアダンプの車載カメラはキャビン内の1か所に搭載し、走行時の周囲確認に利用した。

各施工部をズームアップで確認できる施工箇所カメラは、キャリアダンプがバックホウに近づく際の距離感や積み込み状況を確認するために用いる。施工エリアの両側2か所に設置することにより、施工箇所を起点に90度の角度で映像を見ることができ、オペレータは距離感を容易につかむことができ、接触のリスクを低減することができる。カメラはドーム型のPTZカメラを選定し、画角やズームは操作室内のモニター上から容易に操作可能である。

全体俯瞰カメラは、重機の作業位置およびキャリアダンプの走行時に利用し、運搬経路全体を把握しながら走行可能となる。

これらの映像は各重機から各操作室へ無線通信によって伝送され、操作室内の設置モニターに映し出される。1



図一10 俯瞰カメラ台車（高所作業車）



図一11 カメラ及び機械位置図

人のオペレータに対し、車載カメラ、施工箇所カメラ（2か所）、全体俯瞰カメラの映像を4台の23インチモニターに表示できる設備とした。

(2) 通信設備

前述の映像信号及び LAN に変換した操作信号は、施工エリアに構築したメッシュ Wi-Fi(PicoCELA：ピコセラ)を用いて通信を行った。通信系統は図-8 の通りである。半径 250 m の通信可能なアンテナを重機および各操作室に配置した。またすべての操作室で各カメラの映像を見ることができるよう、マルチホール無線 (60 GHz) にて各操作室間の伝送を行った。

3-4 施工実績

施工開始当初は、オペレータの遠隔操作の習熟のため有視界にて重機操作に慣れさせた。その後、操作室にてカメラ映像を使用した遠隔操作を開始した。

施工実績を表-2、重機の遠隔操作状況を図-12 に示す。遠隔操作による施工の開始月では日平均約 100 m³ の土砂運搬量であったが、翌月以降は夜勤を開始したことや、オペレータの運転操作の慣れもあり、日平均約 600 m³ の土砂運搬量まで増加した。令和 5 年度の施工数量は 2 か月半で 27,260 m³ であった。通信は、施工中に接続が途切れることはあったものの、全ての重機で約 130 m の遠隔操作を行うことができた。

表-2 施工実績

月	稼働日	施工数量	日平均施工数量
9月	4日間	404m ³	101m ³ /日
10月	22日間	13,096m ³	595m ³ /日
11月	22日間	13,109m ³	596m ³ /日
12月	6日間	651m ³	109m ³ /日



図-12 遠隔操作機による施工状況

§4. 遠隔操作による施工トラブル事例

重機の遠隔操作に伴い多くの施工トラブルが発生し、大きな遅延に繋がった。令和 5 年時点で発生件数は 75 件となり、内容としては遠隔操作に関する通信や機器に関するものが 39 件 (52%)、重機に関するものが 30 件 (40%)、人為的ミスによるものが 6 件 (8%) であった (図-13)。以下に代表的なトラブル事例を示す。

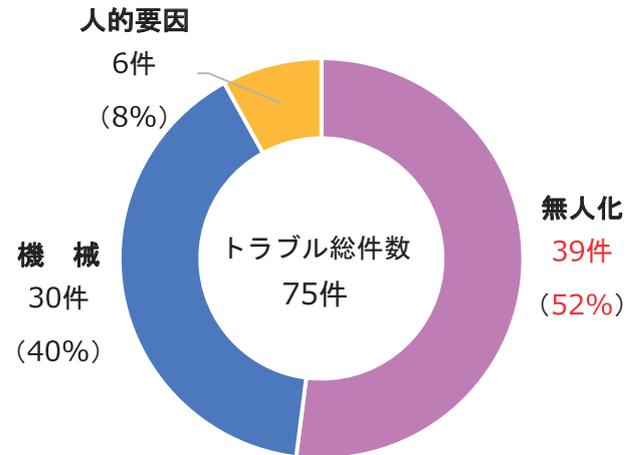


図-13 トラブル要因の割合図

4-1 遠隔操作による不具合

リモコンによる遠隔操作では、重機から伝わる振動や現地の細かい情報が把握できず、重機に無理な力がかかってしまうことが原因で、バックホウのポイントの破損やキャリアダンプの履帯の破損・脱落が多く発生した (図-14)。またモニターを通して重機を操作するため、バックホウのバケットとダンプのベッセルとの距離感覚や重機走路の凹凸等の 3 次元的な現場状況把握が難しい場面があり、重機の破損や部品の脱落、作業効率の低下につながった。

4-2 遠隔操作の無線装置

遠隔操作の課題として第一に列挙される事項は無線通信のトラブルである。本工事で行った遠隔操作に関する通信は、先に述べたように重機操作と映像の 2 種類があり、施工中にどちらの通信にも問題が発生した。特に注意したい問題として、支障物があることで伝送距離が短くなり、映像のフリーズや操作不能になる事象が確認された。無線機のカatalog記載の伝送距離は、支障物が存



図-14 遠隔操作機による施工状況

在しない状況での値であることから、施工場所に対する操作室の配置検討は、伝送距離だけでなく支障物の存在も考慮に入れて行う必要がある。

4-3 アクティブロボ SAM

図-13 に示したトラブル要因の中で比較的多い事象に後付けロボットのトラブルが挙げられる。内容としては、本体の故障や重機への固定部分の外れ、ロッドの湾曲などが発生した。施工中の振動による接続部品のゆるみが大きな要因として考えられるため、より強固な固定方法の検討が必要である。また、人工筋肉を動作させるためのエア系統において、エアバルブの誤作動により、予期せぬ動作をする事象も発生し、エアバルブの動作点検が必須であった。

§ 5. まとめ

今回、土砂の搬出施工の遠隔操作化の準備期間は約3週間と非常に短い期間であった。重機及び遠隔操作に関する設備を緊急で手配したため、仕様の異なる重機が多くなり、複数種の通信設備が必要となった。令和5年度の施工は先に述べたように、多くのトラブルが発生したため重機の稼働率が低下し、想定よりも施工量が増えなかった。今後の遠隔操作技術を使用した工事においては、トラブルの改善に加えて、オペレータの遠隔操作技術の向上、重機の大型化等も検討する必要がある。

謝辞. 施工に際してご指導、助言をいただいた関係各位に感謝の意を表します。