

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*

Akinori Okamoto

永田 豪*

Go Nagata

井上 洸也**

Koya Inoue

西尾 紀康*

Noriyasu Nishio

要 約

本工事では、押落としによる掘削工事を施工していたが、対象土質が火山系由来のものであり、風化の影響を受けやすく、ルーズな状態になると泥濘化しやすいという性質があった。施工中に崩落する恐れがあったため、上部の押落としによる掘削作業は中断し、泥濘化した土砂を遠隔操作した重機により搬出している。本稿は令和6年度の施工実績を報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 遠隔操作の概要
- § 3. 令和5年の課題と令和6年の工夫
- § 4. 施工実績
- § 5. まとめと今後の展望

§ 1. はじめに

本工事は、秋田県由利本荘市における地山の掘削工事である。対象地質は主に火山系由来のものであり、地質に含まれるスメクタイトという粘土鉱物は、掘削後に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があった。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、土砂崩落を起こす可能性があったため、有人機械での泥濘化土の搬出は危険であると判断し、当社でも施工実績の少ない、重機の遠隔操作による土砂の搬出を行った（図-1）。

本稿は、令和6年の施工実績と問題点について報告するものである。

§ 2. 遠隔操作の概要

2-1 遠隔施工範囲

重機の遠隔操作による土砂の搬出は、崩落が影響すると考えられる範囲の外まで行う必要があったため、最大



図-1 重機の遠隔施工状況



図-2 施工エリア

* 北日本（支）鳥海（出）

** 機材部機電課

影響距離 200 m を半径としたエリアを無人エリア、その外側を有人エリアとし、運搬計画を行った（図-2）。

2-2 使用機械

遠隔操作する機械は油圧ショベル（バックホウ：BH）、不整地運搬車（キャリアダンプ：CD）である。当現場条件では運搬走路が旧河床を含むということもあり、タイヤタイプのダンプトラックは走行することができない。そのため、キャタピラタイプの重機を採用した。

機械の運用は1台のBHに対して2台のCDを基本の1セットとし、それらを積込場所の広さを考慮し3セット用意。加えて、運路盤整備や転石除去用に1台のBHを用意し、令和6年はBH4台、CD6台の計10台の機械にて遠隔操作による施工を行った。キャリアダンプの台数の考え方及びサイズについては後述する。

2-3 遠隔操作設備

(1) 操作室

重機の遠隔操作は、有人エリアからの操作が必要となり、操縦者から重機までの距離が200 m以上となるため、目視での重機操作が困難となる。そのため、通信可能な距離を考慮して、遠隔操作室を有人エリアに2棟設置し、重機に設置したカメラ映像や全体の俯瞰カメラ映像を遠隔操作室内から見て行う方式とした（図-2、3）。

(2) 無線通信設備

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（ラジコン仕様）と、通常の機械に操作専用ロボットを搭乗させてロボットを遠隔で操作する機械（遠隔操作ロボット（後乗せ））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（図-4）

遠隔仕様に改造された（もしくは販売された）機械で、コントローラで入力された信号は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。今回は2種類の機械を使用した。1つ目は東京計器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）-422.2 2つ目はCAT 純正のCAT Command が搭載されており、2.4 GHz 帯の特定小電力無線を利用して通信を行っている。通信規格はCAN（Controller Area Network）。どちらも通信距離は障害物がない条件下で80～200 m 程度通信可能である。

② 遠隔操作ロボット（後乗せ）（図-5）

導入したCDのうち元々遠隔仕様ではない仕様のものについては、遠隔で操縦できるロボッ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。オペレータは遠隔操作したロボットを用いてアタッチメントを操作



図-3 遠隔操作室

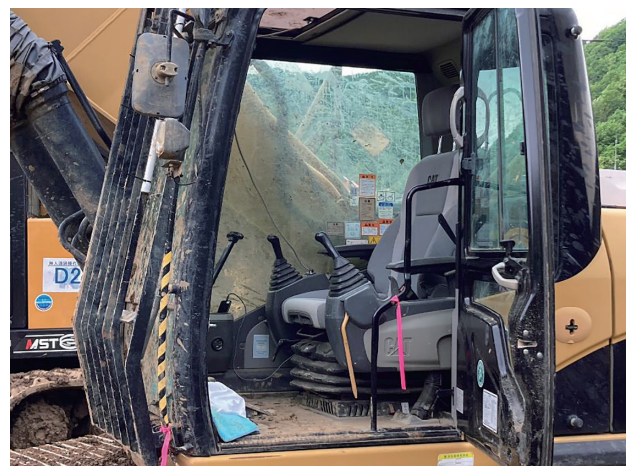


図-4 ラジコン仕様



図-5 遠隔操作ロボット（後乗せ）

することによって重機を操縦する。ロボットタイプのものはコーワテック社によって開発された「アクティプロボ SAM」を利用した。ゴム人工筋肉によって動作するロボットが、操作レバーを掴んで重機の操作をおこなう。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250 m 程度であった。

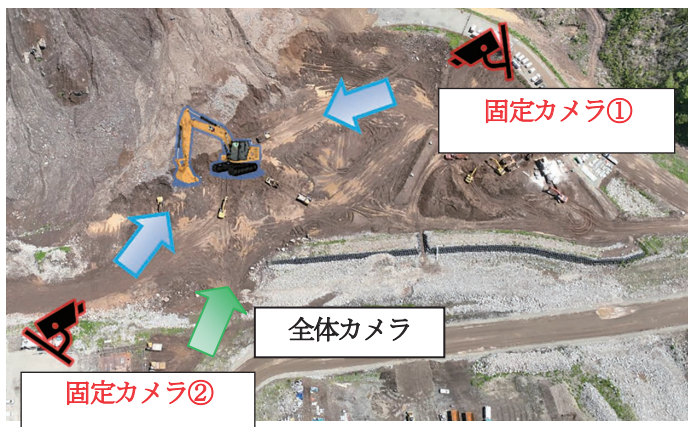


図-6 カメラ・モニターについて

2-4 通信/映像設備

本施工では、場内に設置された遠隔操作室からの操作であるがゆえ、施工箇所をオペレータが目視できない状態となるため、施工には複数のカメラ映像を要した。設置したカメラは各重機の子車カメラ、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で構成される。カメラはローカル通信を用いたネットワークカメラで遅延はほとんど発生しない（数ms程度）。

車載カメラはBHのキャビン上部およびキャビン下部に2か所、キャリアダンプはキャビン内に1か所搭載した。BHのキャビン上部のカメラは、ブームやアームの姿勢、掘削や積込の位置を確認するために、キャビン下部及びCDのカメラは走行時の周囲確認に利用する。

各施工部をズームアップしたカメラは、CDがBH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CD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、操作室内のモニターに映し出される。1人のオペレータに対し、モニターを4台用意し、車載カメラ、施工箇所カメラ（2画角）、全体俯瞰カメラの映像をみることができる設備とした（図-6、7）。

また、積込・運搬を行うBHとCDの合図等コミュニケーションは同一操作室内で口頭により行う。故障による重機の配置替えや作業状況に応じたカメラ映像の切り替えが行えるよう、マトリクススイッチャーを用いて各モニターに表示する映像を自由に切り替えられるようにした。



図-7 固定カメラ

§3. 令和5年の課題と令和6年の工夫

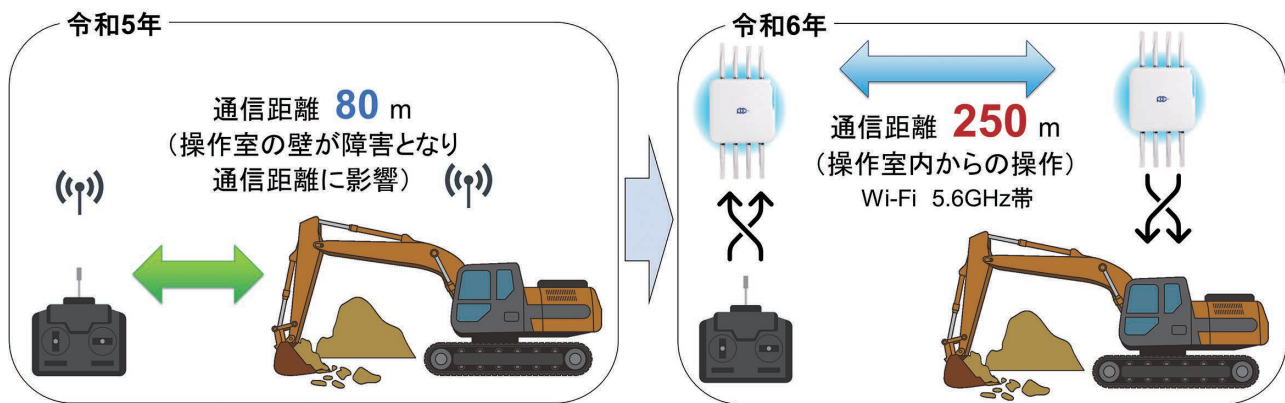
3-1 令和5年の課題

(1) 重機の施工能力不足

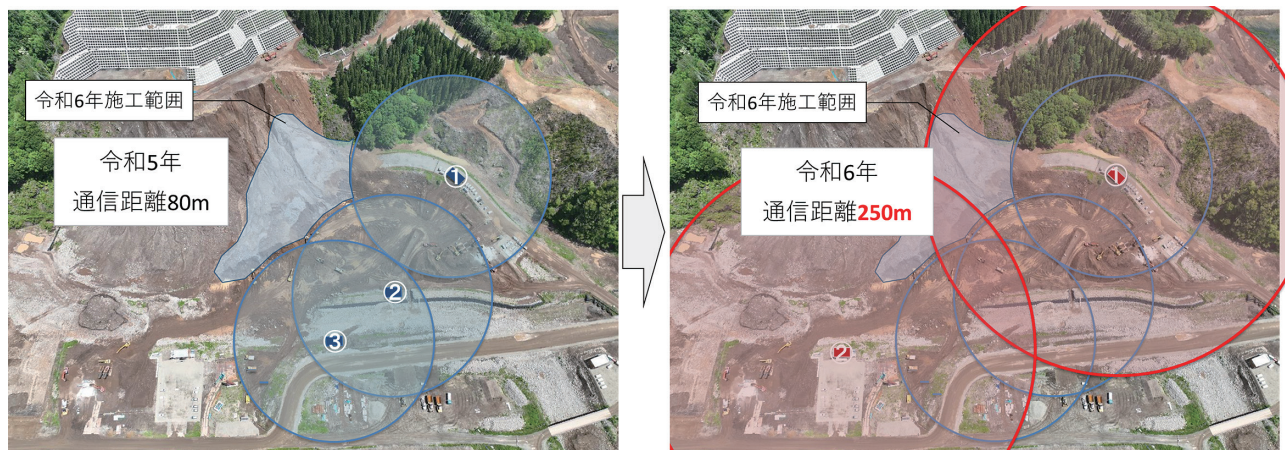
令和5年度は9月から施工を開始し、日平均運搬数量約500m³/日、約3ヵ月で27,300m³運搬を行ったが、令和6年度に目標数量の運搬を完了させるためには施工能力を倍増させる必要があった。

(2) 通信距離不足

使用したラジコン仕様の遠隔操作重機の通信はカタログスペックで200mまで可能なものであったが、実際には操作室の壁等の支障物が影響し、現場では80m程度の通信しか行うことができなかった。無人エリア全体で作業を行うためには通信距離を延長する必要があった。



図一八 通信距離の延伸化



図一九 通信規格変換による通信距離の延伸化

3-2 令和6年の工夫

(1) 運搬重機の大型化

施工エリアの広さを考慮するとBH及びCDの台数を増やすことはできない。令和5年の重機の遠隔操作による施工を行う中で、CDの運搬能力が不足したため、運搬重機の大型化を行うこととした。ただし、積込重機は令和5年性能で十分であったため同様とした。令和5年は11tCDを5台使用し合計55t分の車両で運搬していたのに対し、令和6年度は20tCDを4台、11tCDを2台使用し、合計102t分の車両で運搬した。その結果、日平均運搬数量を約1,000m³とし2倍程度に増大することができた。

(2) 通信規格変換による通信距離の延伸化

ラジコン仕様の無線通信は特定小電力を使用している。また、通信は重機を操作するリモコンと重機に搭載された受信機間で行われている。令和5年度は、操作室内からの操作では操作室の壁が支障となり、80m程度しか通信を行うことができなかった。令和6年は施工範囲全体で通信可能とするために、リモコンから発信する特定小電力無線をコンバータによってEthernetに変換し、映像

を送信しているWi-Fiを用いて重機まで伝送した。重機側にも同様のコンバータを搭載して特定小電力に戻し重機へ操作信号を伝達することにより、Wi-Fiが網羅されている半径250mのエリアでは操作信号を伝送することが可能となり、無人エリア全体で重機を遠隔で操作できるようになった(図一8、9)。

§4. 施工実績

4-1 施工数量

令和5年度の日平均運搬数量は500m³/日程度であったが、令和6年度は日平均運搬数量1,000m³/日程度まで向上した。増加の要因としては、重機を大型化したことや故障などのトラブルにより発生する不稼働時間の低減が考えられる。最終的な運搬土量は令和5年と令和6年合わせて、約14万m³となった(図一10)。

4-2 トラブル件数と不稼働率

令和5年度は、稼働日数54日に対してトラブル件数が76件と非常に多く、不稼働率も27%という結果となった。トラブルの内容としては、重機の振動による遠隔操作ロボットの故障や固定部分の外れやカメラの保護カバーの結露による視界不良などの無人化機械のトラブルが41件、機械のトラブルが29件であった。機械のトラブルは、リモコンによる遠隔操作が原因で、重機への負荷がオペレータに伝わらず発生したものが多かった。

令和6年度は、稼働日137日に対しトラブル件数109件とトラブル件数は相対的に減少した。令和5年度の対策として、遠隔操作ロボットの固定方法をより強固なものに変更したり、カメラの保護カバーに穴をあけ保護カバー内外の気温差を少なくしたりするなどの対策を行った。また、通信設備及び重機の予備部品を十分に確保したことでトラブルから復旧までの時間が短縮し、不稼働率は8%まで減少した（図-11、12）。

§5. まとめと今後の展望

5-1 まとめ

従前であれば有人作業による土砂搬出を行うが、本質安全化・工学的対策として、重機の遠隔操作による施工を採用した。その結果、崩落による人命リスクを負うことなく作業を行うことができたとともに、当社で施工実績が少ない無人化施工という分野での実績を得ることができた。現場条件に合わせた無人化設備の導入により、令和5年に比べ、令和6年は施工数量を増加させることができた。しかし、上記の通り、有人作業と比べるとトラブルが多く、重機の遠隔操作を安易に行うことができる段階ではない。今後様々な場面で無人化施工を普及させていくためには、まだまだ多くの改善が必要である。以下に今後の課題と展望を記す。

5-2 今後の展望

(1) 遠隔操作対応の重機の需要と供給のバランス

遠隔操作対応の重機は国内で手配できる台数が少ない。本施工においても、メンテナンスの観点から同一メーカーの遠隔操作対応の重機を複数台手配しようとしたが、ラジコン仕様の重機は必要台数手配することができず、遠隔操作ロボット（後乗せ）の重機と併用する形での手配となった。今後、災害復旧の現場などの遠隔操作重機が必要な状況で、重機が手に入らないという事態が考えられるため、国内の供給量の増加が必須となってくる。

(2) 遠隔操作ロボット（後乗せ）の操作の制限

当現場で使用している遠隔操作ロボット（後乗せ）「アクティブロボ SAM」はロボットの性能上、レバーを前後左右に動かすことはできるが、ハンドルやキーを回すような動作は行うことができない。そのため、汎用機に後

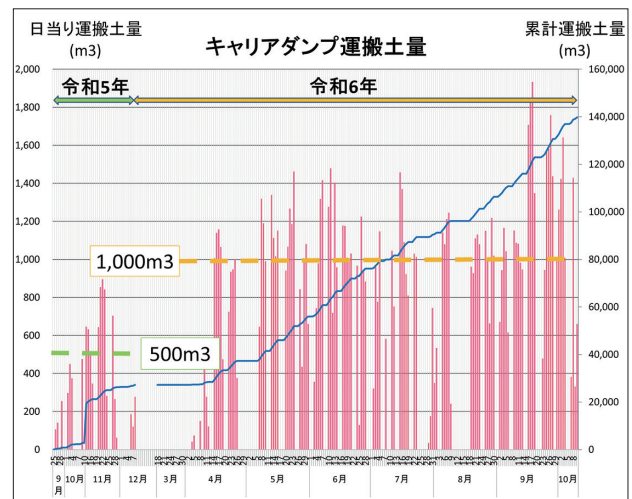


図-10 キャリアダンプ運搬土量グラフ

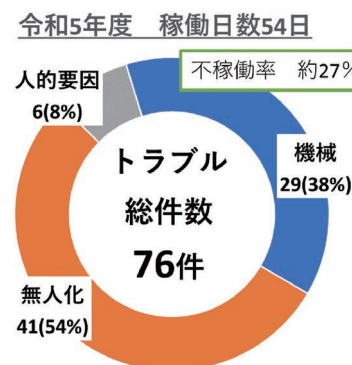


図-11 令和5年トラブル件数

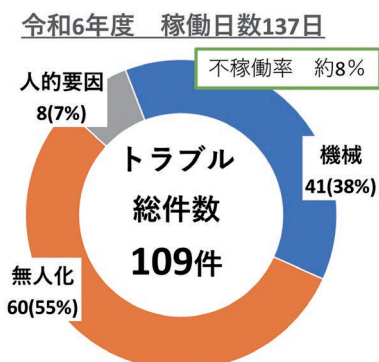


図-12 令和6年トラブル件数

付けできるというメリットはあるが、すべての種類の重機に使用することはできず、無人の状態で重機の機能を100%使用することはできない。他社の製品に、その問題をカバーできるものはあるが、複数台の手配が難しく、当現場では採用しなかった。

(3) 各メーカーの各種信号の情報開示

遠隔操作ロボット（後乗せ）のような物理的に重機のハンドル操作を行う機械ではなく、ラジコン仕様のような操作系の電気信号を直接受信している重機において、本施工で実施した通信距離の延伸化などの改造は、各メーカーの各種信号データが必要となってくる。しかし、電

気信号の情報開示を行っているメーカーはほとんどなく、現場に合わせた改造を行うことは困難を極める。そのような情報の開示が進むことで、重機の遠隔操作分野の技術向上につながると考えられる。

(4) 距離感が分かるカメラの開発

モニターの映像を見ながら重機を遠隔操作する上で、1方向からの映像だけでは施工場所の情報が平面的にしかわからず、奥行きを認識することが難しいため、少なくとも2つ以上の画角からの映像が必要となる。複数画面を見ながらの作業は通常の有人作業の視界とは異なるものがあり、重機オペレータにとって負担になっている。医療現場等では奥行きが認識できるカメラが開発されているが、建設現場に導入することは費用面においても、機能性においても実現に至っていない。実際に重機に乗った時と同じ視覚条件を遠隔操作時も再現することができれば、施工効率の向上につながると考えられる。

(5) 車載を想定した通信設備の開発

無人化施工専用ではない通信機器や映像機器は、車載

を想定しておらず、走行時の振動で故障する事態が多く発生した。また、遠隔操作ロボット（後乗せ）についても、これまでCDでの使用実績がないこともあり、固定箇所のずれや振動による損傷等で多くのトラブルが発生した。各種機器について、建設機械に適した仕様へ改造が必要となってくる。

(6) 遠隔施工オペレータの育成

重機の遠隔操作は通常の操作とは感覚が異なり、着工当初の施工量の低下や重機の故障等に繋がる。本施工においても、着手から1カ月程度はオペレータが重機の操作性になれず、日当たりの最大施工数量と比べると施工能力が大幅に低下した。災害復旧など短期的な施工に対応できるオペレータは現状少なく、遠隔施工を行うことができるオペレータの育成は、今後の無人化技術向上において不可欠であると感じる。

謝辞. 最後に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。