

ダム基礎掘削作業における安全性や生産性向上に向けた取組

(株)大林組 正会員 ○山中 哲志 正会員 太田 親
独立行政法人水資源機構 徳永 倫一 (株)大林組 堀尾 訓之
大林・佐藤・日本国土特定建設工事共同企業体 正会員 小俣 光弘 正会員 齋藤 孝文
日立建機(株) 泉 枝穂

1. はじめに

重力式コンクリートダムの工事において、基礎掘削作業は堤体を堅固な岩盤に確実に定着させるために必要不可欠な作業である。通常は、バックホウ等の掘削機械を用い必要に応じてブレイカーなどの削岩機械を併用して掘削を行う。

ダムの掘削法面は鉛直面から 1:1.0 と急傾斜箇所が多く、掘削高さは 100m 以上に及び、掘削中は重機の登坂能力を上回るため出入りが不可能な状態となる。そして、設計合理化のために複雑な掘削形状となり、重機の足元が十分に確保できない掘削幅が多い。掘削中には重機の法面からの転落や法面崩壊などの危険性が存在するため、操縦するオペレータは、重機周辺状況を確認しつつ作業を行う必要がある。また、設計通り掘削するためには丁張等の設置が必要だが、測量員が複雑な形状に対応して多くの箇所に丁張を設置、検測を行い、勾配が急な箇所や大型重機が動く中で注意しながら測量作業をしなければならない。これまでは、作業従事者の努力により円滑で安全に配慮した施工が実施されてきたが、潜在的な危険と隣り合わせの状況が残っており、施工の進捗を確保しながらも作業の安全性を向上する方法が求められる。

本稿では、ダムの基礎掘削作業において施工と測量を省人化する方策をとり、作業従事者の危機回避および、工程短縮を図ることで安全性と生産性向上を実現できるよう取り組んだ内容について報告する。

2. 既往の技術

作業従事者の安全性確保のためには、当該箇所に進入しないことが一番の対策である。この対策を実行するには、重機のオペレータや測量員が作業をしに行かずとも施工と測量を行う術が必要となる。手法としては、重機自体が測量できるシステム、そして、無人化施工で使う遠隔操縦技術の活用が挙げられる¹⁾。

重機自体で測量する手法として近年は、情報通信技術（以下、ICT）と測量技術の進歩により全球測位衛星システム（以下、GNSS）やトータルステーション（以下、TS）が容易に利用できるようになり、生産性向上や省力化を目的として ICT を利用しながら施工できる建設機械（以下、ICT 建機）の導入が進んでいる。当該機械は、常時位置情報を取得しながら施工することが可能であり、例えばバックホウのバケットの先端やブルドーザの排土板先端部が計測機器として利用できる。

遠隔操縦技術は、従来、災害発生現場の復旧作業に多く使われており、通常の掘削作業には用いられてこなかったが、潜在的に危険を伴う状況は掘削作業でも存在する。前述した通りダムの基礎掘削作業はそれに該当する。そして、重機の遠隔操縦には、機械の油圧系統へ大がかりな改造を行い、専用ラジコン機械として利用することが主流であったが、近年は既存の重機に遠隔操縦用のロボットを後付して大がかりな改造をせずとも導入できる方式が採用されるケースもみられる²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。ICT 建機と遠隔操縦技術は相性がよく、これまでも無人測量システムとして活用されてきた⁶⁾。

キーワード ダム、基礎掘削、安全性向上、生産性向上、遠隔操縦、ICT

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 株式会社大林組

土木本部生産技術本部先端技術企画部 Tel:03-5769-1253

3. 測定の省人化と工程短縮に向けた取り組み

(1) マシンガイダンスシステムの導入

掘削の設置や検測をする測量員の安全確保には、掘削時の作業を省略できるよう重機自体が測量および、丁張の二役を果たし、3次元設計データを基にオペレータの操作を補助する仕組みを有する ICT 建機のマシンガイダンスシステム（以下、MG）を利用することとした（図-1）。これにより、測量員が作業場所に行かずとも施工を進めることができるようになる。機械が設計面を目標に一部自動で動作し、過掘りを防止できるマシンコントロールシステム（以下、MC）も導入したが、今回の作業では硬質な岩盤を掘削するために自動制御機能が誤作動を起こす可能性があったためガイダンス機能を中心に利用することとした。

(2) 現況に合わせた 3 次元設計データの作成

掘削作業では、設計時と現況に差異が生じていることもあるため、詳細な把握を目的に現況測量を行う。対象法面が急傾斜であることから今回は、無人航空機（以下、UAV）を用いて空中写真測量を行った。国土交通省が作成した「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」に基づいて作業を実施し、現況に即した 3 次元設計データ（図-2）を作成して MG に取込み作業を実施することとした。

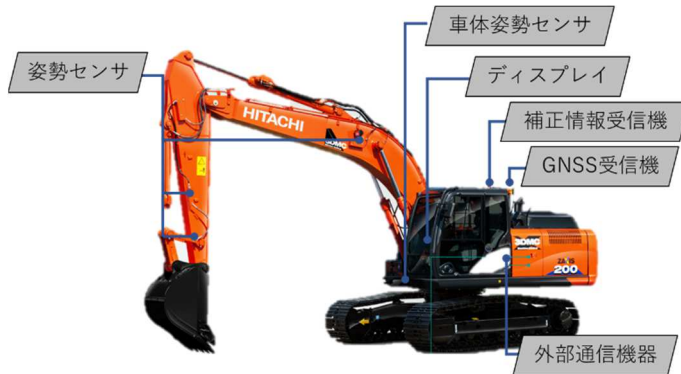


図 - 1 MG に利用する機器の構成

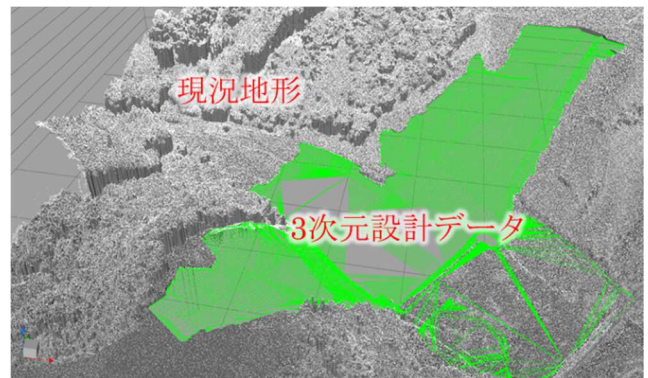


図 - 2 現況地形を反映した 3 次元設計データ

4. オペレータの安全確保に向けた取組（遠隔操縦システムの適用）

オペレータの安全確保には、重機の遠隔操縦システムの「サロゲート」を導入することとした。

(1) システム構成

本システムは、操作レバー用アクチュエータ、フットペダル用アクチュエータ、操縦リモコン、無線受信器兼制御盤で構成されており、二つのアクチュエータを一般的なバックホウの操縦席に取り付けることによって、安全な場所からの操縦を可能とする。システムの概要を図-3、操作レバーにアクチュエータを設置した状況を図-4、システムで利用する使用機器の諸元を表 1 に示す。

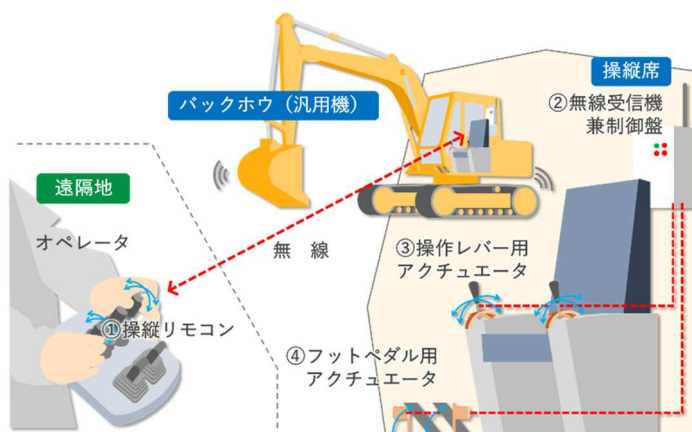


図 - 3 サロゲートの概要



図 - 4 操作レバー用アクチュエータ

表-1 使用機器の諸元

項目	仕様
操作レバー用アクチュエータ	電動シリンダ方式 重量：13kg×2 式
フットペダル用アクチュエータ	サーボモータ方式 重量：8kg×2 式
操縦用リモコン	特定小電力無線（429MHz）

(2) 技術の概要

本システムは、災害復旧に代表される危険作業での無人化施工を行うために開発され、大がかりな改造を伴う遠隔操縦機械を容易な装着方法で行えるようにしたことに特長がある。これまで、熊本城の石垣復旧作業など、崩壊の危険性がある環境下での導入実績がある。

a) 機械の改造をすることなく装置の装着が可能

遠隔操縦を行うシステムでは、専用機としての改造を施したものや操縦ロボットを座席に設置する方法が一般的であったが、当システムは、操縦レバーとペダル部に装置を装着することによって市販の重機のメーカーを問わずに装着できることが特徴である。また、重機のサイズにも幅広く対応できる。

b) 操縦方法の切り替えが容易

オペレータが搭乗して操縦する必要がある際は、取り付けた装置の固定ピンの着脱のみで容易に遠隔操縦から搭乗操縦に切り替えることができる。

c) 高い操作性

普段の操縦に近い三次元的な操作レバーの挙動を実現し、またオペレータの好みに合わせた各動作の繊細な設定が可能であり、高い操作性を有する。

d) 持ち運びや組立が容易

資材の構成を持ち運び可能なサイズにユニット化し、さらにボルト締めや配線ケーブルの接続のみで重機に装着できるようにすることで短時間での組み立てを可能にしている。

(3) MG と遠隔操縦を連携した利用の検討

基礎掘削作業へ MG と遠隔操縦を利用できるよう検討を行った。ここでのガイダンスの役割は、丁張が無くなったことによる施工の出来栄確認および、現在の機械位置、目標までの施工量把握といった遠隔になったことにより定量的に確認しづらくなる情報を明示することである。重要な要素として普段はオペレータが運転席で確認している画面を遠隔操縦する場所で同期して閲覧することとした。

(4) 施工進捗確認の工夫（ヒートマップ）

重機の遠隔操縦では、施工性を確保するために重機前方だけでなく周辺環境や進捗を確認する数機のカメラが必要になる。臨場感や遠近感をつかむためにもその配置は操作性に並び問題となる⁷⁾⁸⁾。その設置やメンテナンスには多くの手間を要するため、この作業を削減しながら施工性を確保する方法が必要である。ここでは、カメラの用途の一つである進捗確認の方法に、重機の位置把握と設計面に対して掘削の前後を比較でき出来形を確実に確保できるよう図-5のようなヒートマップ表示を採用した。本手法では、MG で取得したバックホウのバケットおよび、ブレイカーの先端部位置情報をもとに専用のアプリケーションにてデータを表示画面へ 2 次元のメッシュで表示し、設計と現在の掘削深度との差異を表示できるようにしたものである。1 つのメッシュサイズは 20cm とし、データの更新頻度は、最大 1 秒とリアルタイムに状況を把握することが可能である。この表示方法により施工の完了箇所と未完了箇所が一目でわかるようになり、検測の必要が無く次に施工すべき場所へ迅速に移動し作業ができる。また、適用するヒートマップの表示項目は、MG が併用されているために水平方向（X,Y 方向）を除いた高さ方向だけ表示することでオペレータが理解しやすいよう工夫している。

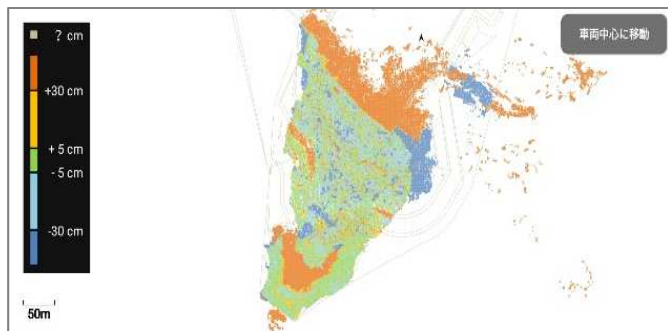


図 - 5 施工結果が反映されたヒートマップ



図 - 6 MG 検証に利用したバックホウ
(ブレーカー使用時)

5. 現場での検証

MG, サロゲート, ヒートマップを搭載したバックホウ（図-6）を現場にて適用し検証した。詳細を以下に示す。

- ・適用現場名称：川上ダム本体建設工事
- ・使用機械：①0.7m³ 級バックホウ （日立 ZX200X-5 ICT 仕様）1 台
 ②油圧ブレーカー（サロゲート導入時） 打撃数 500~670（b.p.m）1 台
 ※MG で設定するバックホウの刃先は、ブレーカーのサイズに合わせて前方へオフセットした
- ・遠隔操縦を検証した距離：10m~200m

(1) 検証事項

検証事項として、3つの事項について確認した。

- a) MG を導入したことによる効果を作業効率と工程および、精度の面から確認した。精度は、掘削した法面の法肩および法尻の位置が設計に対して高さが±50mm の範囲で施工できているか、GNSS ローバーを用いて確認した。
- b) 遠隔操縦が可能な通信距離とデータ更新時の表示画面遅延状況と操縦への影響を確認した。図-7 のように近距離からリモコンによって重機の操縦を検証した。ガイダンスやヒートマップの画面に関しては、インターネット通信を利用したため、距離の検証からは除外した。データ更新に関しては、ガイダンスシステムの表示画面およびヒートマップの更新が操縦に対してどれほどの遅延が生じているか確認した。
- c) 遠隔操縦時の MG の施工精度を確認した。ブレーカーで掘削した法面および法尻の位置が設計に対して高さが±50mm の範囲で施工できているか、GNSS ローバーを用いて確認した。

(2) MG の検証結果

MG を利用して作業することで以下の結果を得ることができた。

- a) 作業の効率は、20%向上した。2018 年の 9 月より施工を開始し、当初の計画設定した 1 ヶ月あたり 10m の切土高さを 12m で実施した。
- b) 工程も計画の 8 ヶ月から 7 ヶ月と約 10%短縮した。
- c) 施工時の機械設定および精度確認を行うために、掘削の開始箇所には、検測用の丁張を 1 か所設置することが望ましい。
- d) 従来は、掘削形状が変更になると切り直しに測量と施工ともに大きな手間がかかり、迅速な対応ができなかったが、MG を利用することで柔軟な対応ができるという効果を確認した。

上記により、システムを利用することで掘削時の丁張の設置を省略することができ、測量員の安全を確保した効率の良い施工ができると確認できた。

(3) サロゲートを搭載した MG バックホウの検証結果

MG に加えてサロゲートを利用した結果、以下のことが分かった。

- a) 操作は 200m まで遠隔から操縦できることが分かった。高低差が 85m ある中でも安定した通信および制御をすることができた。操作状況を図-8 に示す。
- b) コントローラで重機を操作する際の遅延は最大 1 秒程度となった。画面更新のタイムラグが大きい理由としてインターネットを介してデータの送受信を行ったため、その通信速度に影響を受けたと考えられる。
- c) 上記遅延の影響でオペレータは、操作を待たなければならない感覚を持ったとの感想を得ており、施工の進捗には悪影響をおよぼしていることがわかる。
- d) 従来、オペレータはブレーカーによる過掘りを防ぐために設計面より少し上面を目標に打撃する。これは、操作時の感覚で微調整を行っているが、遠隔操縦では触感まで伝えることができず、よって、ガイダンス機能だけではなく MC で行う土工のように機械的にバケットの動きを制御するコントロールの機能が必要である。
- e) 施工精度は、 $\pm 50\text{mm}$ 以内と要求した精度を確保した。



図 - 7 近距離での動作確認状況

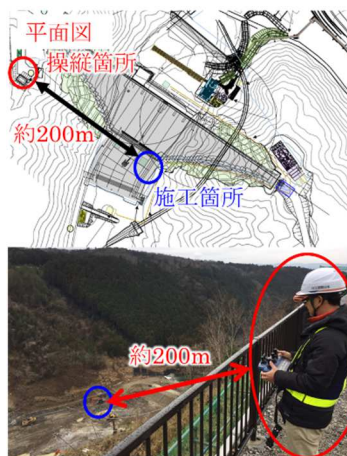


図 - 8 200m 地点での操作状況

6. まとめ

ダムの基礎掘削作業において作業の省人化による安全性と生産性の向上を目指し、MG、遠隔操縦システムのサロゲートを活用して施工に取り組んだ。MG は、丁張を設置せずに施工を進めることができるため、安全かつ効率的に施工ができることが分かった。サロゲートは、約 200m 離れたところから目視でオペレータが危険な場所へ行くことなく作業を行えるようになり、MG と進捗管理にヒートマップを用いることで施工の安全性向上に寄与できると分かった。また、遠隔操縦で施工を行ったが、施工精度はいずれも許容範囲に収まっており施工システムとして十分活用できることも確認できた。しかし、通信の遅延の発生など課題もあり、今後改善が必要である。

今回の施工は、オペレータから重機自体を目視できる環境下での施工であったが、今後は更なる作業環境の改善を進めるには、数 km 離れた工事事務所等からの遠隔操縦をできるよう例えば 5G など高速で大容量な通信手段¹⁰⁾を用いた円滑な数値および動画データ配信技術と連携した仕組みを構築することが重要である¹¹⁾。

今後は、ダムの基礎掘削作業に加えて様々な工種の重機作業を労働者の負荷が少ない状況下で安全に従事できるよう開発に努める。

参考文献

- 1) 神崎 正, 社会基盤整備における建設用ロボットの役割と展望, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.633-648,

2006

- 2) 古屋 弘, 森 直樹, 小林 和彦, 土工用建設ロボットの開発における新たな挑戦, 建設機械施工, Vol.68, No.11, pp.38-45, 2016
- 3) 森 直樹, 古屋 弘, 宮内 賢治, 建設機械の改造が不要で脱着可能な装置による無人化施工技術の開発, 建設機械施工, Vol.69, No.12, pp.58-63, 2017
- 4) 三村 洋一, 遠隔操縦ロボット (ロボ QII), 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.9, pp.601-602, 2016
- 5) 豊田 晃央, 災害復旧用無線遠隔操縦ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.9, pp.603-604, 2016
- 6) 橋詰 亮, 浅沼 廉樹, 三鬼 尚臣, 無人化施工における無人測量システムの開発, 建設の施工企画, 747 号, 45-49, 2012
- 7) 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, Alessandro Moro, 杉本 和也, 野末 晃, 三村 洋一, 小幡 克実, 山下 淳, 浅間 一, 無人化施工用俯瞰映像提示システムの開発, 日本機械学会論文集, Vol.81, NO.823, pp.1-13, 2015
- 8) 伊藤 禎宣, 坂野 雄一, 藤野 健一, 安藤 広志, 無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.73, No.1, pp.15-24, 2017
- 9) 茂木 正晴, 山元 弘, 無人化施工による災害への迅速・安全な復旧活動, 計測と制御, 第 55 巻, 第 6 号, pp.495-500, 2016
- 10) 総務省, 5G 実現に向けた進捗状況について, 情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会 (第 11 回), 資料 11-1, http://www.soumu.go.jp/main_content/000587659.pdf, 2018
- 11) 古屋 弘, 森 直樹, 永嶋 充, 次世代高速通信 5G を用いた重機の遠隔操縦試験, 大林組技術研究所報, No.82, 2018