

自律型コンクリート打設システムに挑戦した DX実証実験 ～生産性向上・負担軽減・安全性強化に向けた 建設現場の取り組み～

荒木 琉我¹

¹中部地方整備局 新丸山ダム工事事務所 工務第一課 (〒505-0301 岐阜県加茂郡八百津町八百津 3351)

新丸山ダム建設事業は、既設丸山ダムを嵩上げすることによって機能アップを図るという前例がなく難易度の高いダム再生事業である。本事業では、先進技術の活用を通じて建設業界の動向を踏まえたDX推進を図り、生産性向上・負担軽減・安全性強化を目指している。特に、「自律型コンクリート打設システム」の実現に向け、段階的なDX実証実験を進めている。本稿では、これらの取り組みから得られた成果と課題を整理し、本事業における建設DXの取り組みの現状と今後の展望を紹介する。

キーワード DX, 自律型コンクリート打設システム, DX実証実験,
生産性向上, 負担軽減, 安全性強化

1. はじめに

(1) 事業概要

新丸山ダム建設事業は、既設丸山ダムの下流47.5mの位置において、既設ダムと一部が重なる構造で、ダム堤体を20.2m嵩上げる再開発事業である。(図1-1) 本事業では、既設ダムの洪水調節機能および発電能力の強化に加え、新たに流水の正常な機能の維持を目的に加えた新丸山ダムを建設する。既設ダムの洪水調節機能を確保しながら、その直下流で新丸山ダムを建設する必要があるため、既設ダムの放流に影響を及ぼさない左岸側から先行してコンクリートを打設し、先にダム堤体左岸部と転流工と呼ばれる排水トンネルで洪水調節を行う。この施工方法を本事業では「左岸活用」と呼ぶ。(図1-2) その後、左岸活用を行いながら河床部、右岸部と順に施工するという特殊な施工方法を採用している。

(2) 建設業界を取り巻く課題

建設業界を取り巻く課題としては、生産年齢人口の減少や技能労働者の高齢化に伴う担い手不足、さらに災害の激甚化・頻発化への対応などが挙げられる。これらの課題は、令和6年4月に国土交通省が策定した「i-



図 1-1 事業概要



図 1-2 左岸活用イメージ図

Construction2.0」において整理されており、建設現場の生産性向上の取り組みの強化が求められている。具体的には、「施工のオートメーション化」「データ連携のオートメーション化」「施工管理のオートメーション化」を三本柱とし、建設生産システム全体のデジタル化および高度化をととして、建設現場のオートメーション化を実現させることで、課題解決を目指す。

2. 本事業におけるDXの取り組みについて

(1) 概要

新丸山ダム工事事務所はi-Constructionモデル事務所に認定されており、本事業は他に類を見ない難易度の高い工事を行うことから、調査・設計から維持管理まで、3次元データの活用やICT等の新技術を積極的に導入し、事業の効率化を図っている。

特に、現在施工中である新丸山ダム本体工事においては、受発注者が連携し、コンクリートに使用する骨材の製造からコンクリート打設までの一連の工程を集中監視室で制御し、全工程を自動・自律化する「自律型コンクリート打設システム」（図2-1）の構築に取り組んでいる。

(2) 自律型コンクリート打設システムについて

ダム本体工事の全体配置を（図2-2）に示す。まず、原石山で採取した碎石をダンプトラックを用いて、骨材製造設備に運搬する。骨材製造設備では骨材の製造・ふるい分け・貯蔵を行い、現場右岸のコンクリート製造設備まではベルトコンベアで運搬する。そして、コンクリート製造設備で練り上げられたコンクリートは、バケットに入れられ、ケーブルクレーンを用いて打設箇所へ運搬される。堤体コンクリートはELCM（拡張レア）工法およびRCD工法で施工するため、ケーブルクレーンや複数の建設機械を連動させて、各工法に対応したコンクリートの打設を行う必要がある。これら一連の工程を統合的に制御するシステムを開発することで、自律型コンクリート打設システムの確立に取り組む。

本取り組みは国内初の試みであり、i-Construction2.0で掲げられている三本柱を具現化するものである。さらに、自律型コンクリート打設システムの実現により、建設現場の生産性の向上を図るとともに、建設労働者の負担軽減および安全性の向上を実現し、魅力ある職場環境の構築を目指すものである。

(3) 用語の定義

遠隔操作：建設機械から離れた場所からスイッチやスティック等を使い、有線または無線通信で建設機械に伝達して建設機械を操作すること。

自動運転：事前に用意したプログラムやアルゴリズムに

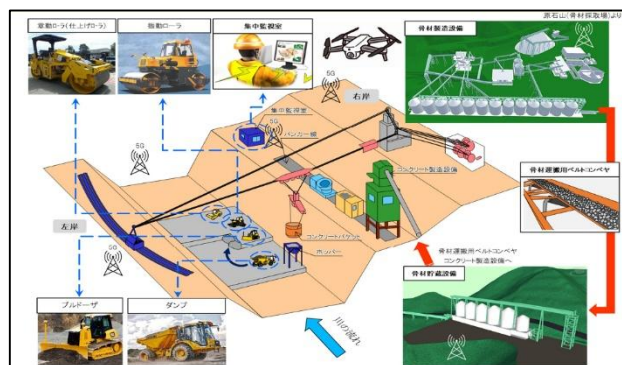


図2-1 自律型コンクリート打設システム概要図



図2-2 ダム本体工事全体配置図

従い、単体または複数の建設機械がオペレータに操作されることなく作業する機能を有するもの。

自律運転：周辺環境や目的物の情報等をカメラやセンサから取得し、次の行動を最適になるように判断して行える機能を有するもの。

CMS(Construction Management System)：諸条件を入力することで、最適な施工計画を作成し、建機FMSに動作を指示する工事管理システム。施工で取得した品質・出来形管理データを施工計画にフィードバックすることも可能。

建機FMS(Fleet Management System)：CMSの計画に沿って複数の建設機械を制御し、稼働させるシステム。

3. DX実証実験

(1) DX実証試験の概要

本工事では、自律型コンクリート打設システムの実現に向け、コンクリート打設開始前の段階から実証実験を段階的に実施しており、課題の解決に取り組んでいる。CMSおよび建機FMSを中核とした統合システムの開発・改修を進めるとともに、実証実験を通じて建設機械の自動・自律運転の実現可能性および性能の検証を行う

ている。施工の自動・自律化を実現するためには、建設機械に搭載された各種センサ情報や映像データをリアルタイムに伝送し、相互に連携可能な通信環境が不可欠である。本工事では、高速大容量・低遅延・同時多接続性に優れ、広域において安定した通信品質と高いセキュリティ性を有するローカル5Gを採用している。そして、実証段階の進展に応じて現場内の通信環境を段階的に整備してきた。

実証実験は令和4年度から令和7年度にかけて計4回実施している。初期段階では通信・データ基盤の構築、建設機械単体の自動化検証を行い、システム連携による自動・自律化技術の開発へと発展させる。さらに、最終段階では実施工における自動・自律でのコンクリート打設の適用目指した検証を行う。以下に、これまでに実施した、各実証実験の概要および得られた結果について整理する。

(2) 第1回実証実験

a) 概要

RCD工法による施工のブルドーザ敷均し作業の自律化に向けては、以下の技術的課題がある。

- ・荷卸し後の材料形状および大粒径材の分布を把握する手法が確立されていない
- ・材料配置に応じた最適な押土方法を判断する機能が存在しない
- ・敷均し後の出来形を評価・判定する機能が確立されていない

これらの課題は、従来、熟練オペレータの経験に依存して解決されてきたものであり、自動・自律化の実現に向けた大きな制約要因となっている。

そこで、第1回実証実験では、RCD工法への展開を見据えた、盛土施工における技術について検証を行った。盛土施工におけるブルドーザの敷均し作業を対象として、ダンプトラックによる土砂の荷卸し位置および施工範囲（グリッド寸法：縦×横×高さ）の最適条件を明らかにするとともに、自動運転ブルドーザによる敷均し動作の実現可能性を検証した。なお、土砂は10tダンプトラックの標準積載量である約5m³を基準とし、ブレード幅3mのブルドーザを用いて、一方向敷均しを前提とした。

b) 実験条件と結果

敷均し動作の検証において、横方向に並べて荷卸しした複数の土砂山を対象とし、搭乗操作によるブルドーザで各山の頂点へ向かう一方向敷均しを行ったところ、山の間で敷均しが不十分となることが確認された。これに対し、頂点方向の敷均しに加え、山と山の間に向かう敷均し動作を組み合わせることで、均一な敷均しが可能となることが確認された。このため、本検証ではこれらの動作を組み合わせた敷均し方法を最適動作と定義した。（図3-1）

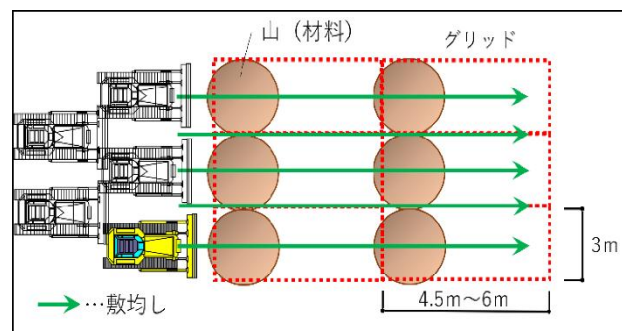


図 3-1 敷均し動作のイメージ

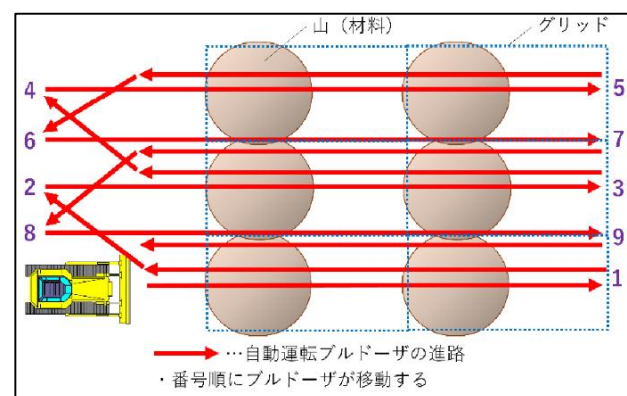


図 3-2 自動運転の敷均し動作のイメージ

次に、グリッド寸法の検討では、ブルドーザのブレード幅を超過する場合にはブレードが作用しない領域が生じるため、1回の敷均しで処理可能な幅として3mが適切であると判断された。縦寸法については複数条件で検証を行った結果、寸法が小さい場合には押土時の土量増加によりブルドーザの出力限界を超過し、寸法が大きい場合には材料不足が発生することが確認された。これらの結果を踏まえ、均一に敷均し可能な条件として、以下の条件を最適条件とした。

- ・グリッド寸法：3m × 5m × 0.35m
- ・荷卸し位置：グリッド端部から1m

さらに、自動運転敷均しについては、一方向敷均しと退避動作を基本単位とした運転プログラムを構築し、これらの動作を組み合わせることで、単一指令により複数の山を連続的に敷均し可能なシステムを開発した。（図3-2）空走状態での動作確認およびプログラム修正を経て、実材料を用いた試験では、最終的に3×3配置（計9山）の土砂を対象に自動運転による敷均しが可能かつ全体を均一に施工できることを確認した。

c) まとめ

以上より、盛土施工におけるCMSでの施工計画に適用可能なグリッド寸法および敷均し動作の最適条件が明確となり、建機FMSと連携したブルドーザの自動運転による敷均し施工が実現可能であることを確認した。さらに、材料特性や施工条件に応じたパラメータ調整を行うことで、RCD工法による施工の敷均し作業の自律化

技術へ展開可能であり、将来的な自動・自律施工システム構築に向けた技術として有効である。

(3) 第2回実証実験

a) 概要

第2回実証実験では、ダム本体工事における施工の自動・自律化を目的として、複数の自動・自律化建設機械を用いた自動施工について検証を行った。具体的には、土砂の掘削、ダンプトラックによる運搬、ブルドーザによる敷均し、ならびに振動ローラによる転圧までの一連の工程を対象とし、建機FMSによる作業指示・状態管理・施工実績管理を行うことで、各建設機械の連携と連続施工の実現可能性を検証した。

実証実験には、自律バックホウ1台、自動ブルドーザ1台、自動振動ローラ1台、自動ダンプトラック1台に加え、有人バックホウおよび有人ダンプトラック（最大5台）を含む、約10台の建設機械を用いた。また、施工計画はCMSにより作成し、その計画データに基づき建機FMSが各建設機械へ作業指示を行い、施工中に取得される位置情報や作業状況データをリアルタイムに収集・管理する構成とした。（図3-3）

b) 実験条件と結果

本実証では、建機FMSを用いて各自動・自律化機械との通信確認、作業指示および正しい座標への移動指示等を行った。また、各建設機械から位置情報および作業状態のフィードバックを受信することで、複数の建設機械の協調制御を実施した。これにより、掘削・積込、運搬、敷均し、転圧の一連の工程において、自動・自律化機械と有人機械を含む複数の建設機械の連携施工が成立することを確認した。特に、建機FMSによる管理により、各機械の作業内容、位置および進捗を統合的に把握しながら施工を進めることが可能であり、建機FMS管理者1名が監視・操作を行うことで、約10台の建設機械の統合管理が可能であることを確認した。

c) まとめ

以上より、複数の建設機械の統合制御による自動施工が実現可能であり、施工管理の省人化が達成可能であることを確認した。これらの結果は、ダム工事における自律型施工システムの実用化に向けた重要な知見であり、今後の完全自動化施工への展開に資するものである。

(4) 第3回実証実験

a) 概要

コンクリート運搬に用いられるケーブルクレーンの自律運転においては、横行動作で発生するバケットの水平方向の揺動および、コンクリート放出時に生じる垂直方向の跳ね上がりの制御が主要な技術課題である。（図3-4）

第3回実証実験では、これらの課題の解決を目的として、ケーブルクレーンの自動・自律運転システムを構築した。本システムでは、プログラムによる指令のもと、

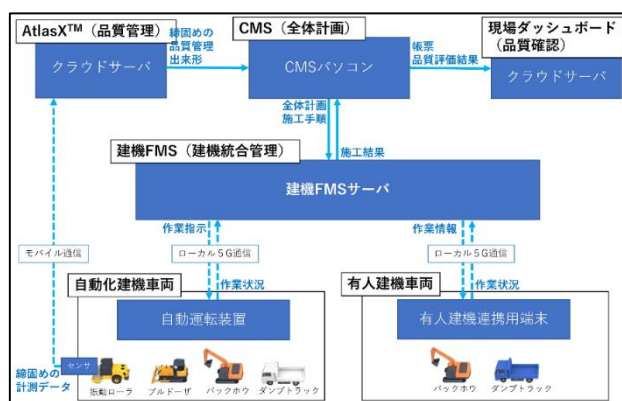


図3-3 自動施工のイメージ

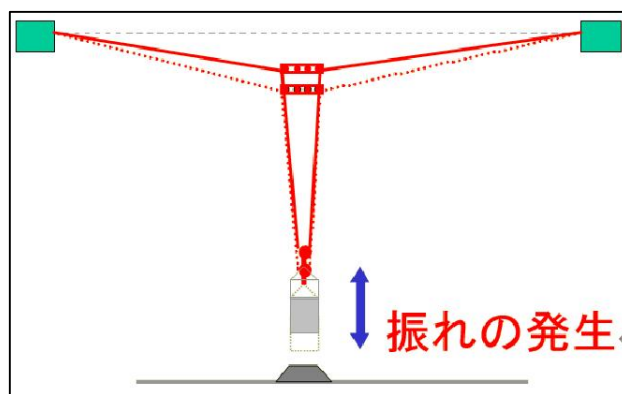


図3-4 垂直方向の荷ぶれ状況のイメージ



図3-5 ケーブルクレーンの動作イメージ

GNSS等のセンサを用いてバケットの位置および挙動をリアルタイムに把握し、最適な振れ止め制御を行うものである。そして、ケーブルクレーンおよびバケットのコンクリート打設位置までの自動運搬と適切なタイミングおよび高さでのコンクリートの放出といった、一連の作業の自律化の実現可能性を検証した。（図3-5）

b) 実験条件と結果

本実証では、ケーブルクレーンの横行トロリおよびフックブロックにGNSS受信機を設置し、絶対位置および相対角度を計測することでバケットの揺動状態を把握した。そして、検知した揺動に対して、加減速や微小変位を付与することで水平方向の揺れを相殺する制御を行った。（図3-6）これにより、目的地到達時におけるバケットの水平方向の揺動、約4.6mを約0.3mまで収束させることができた。

垂直方向の揺動抑制については、コンクリート放出時におけるバケット内残量および位置情報をセンシングし、巻き下げ動作の速度を制御することで跳ね上がりを抑制した。6m³のコンクリートバケットに砕石を充填し、コンクリート放出を模擬した試験において、振れ止め制御を行わない場合には約 3m の跳ね上がりが確認されたのに対し、制御を適用した場合には、跳ね上がりを約 0.3m まで低減することができた。これにより、コンクリート放出時における垂直方向の揺動抑制技術の有効性を確認した。

c) まとめ

以上より、従来は熟練オペレータに大きく依存していたケーブルクレーンの操作において、コンクリートの運搬・放出における、自動・自律運転に向けた基本機能の有効性を確認した。

(5) 第4回実証実験

a) 概要

ELCM工法において、バイバックによるコンクリート締固めは堤体コンクリートの品質に直結する極めて重要な工程である。締固め作業はコンクリートの流動性や堆積形状に応じた複雑な操作が必要であり、熟練オペレータの技能に大きく依存しているため、これらの作業を外部信号により遠隔・自動運転可能とすることが課題である。バイバックはバックホウをベースとし、先端に大型バイブレータを装着した施工機械である。(図3-7) 本実証では、既存のバックホウ自律運転技術を適用し、バイバック特有の締固め動作に対応するため、機器の小型化および特殊アタッチメントの制御機能を付加した。また、遠隔操縦装置を改良し、外部信号による操作指示に基づいて走行および締固め動作を制御可能なシステムを構築した。

第4回実証実験では、バイバック自動運転技術に加え、第3回実証実験で確認したケーブルクレーン自律運転技術を活用したコンクリートの運搬・放出と、バイバックによるコンクリートの締固めにおける定型動作の遠隔・自動運転について、実施工の環境下で確認した。(図3-8) あわせて、将来的なケーブルクレーンとバイバックの連携施工に向けた課題を整理した。

b) 実験条件と結果

ケーブルクレーンの自律運転では、第3回実証実験で確認した技術に加え、ケーブルクレーンへの運搬の目標点の指示、状態更新、運転開始確認など、CMSおよび建機FMSとの連携に必要な基本機能を確認した。

バイバックについては、コンクリート放出位置まで遠隔操作により移動し、その後、事前に設定した定型動作に基づくコンクリートの締固めを自動運転により実施した。このとき、締固め後のコンクリートは、品質管理基準として設定した高さ75cm程度の層厚を満足することを確認した。

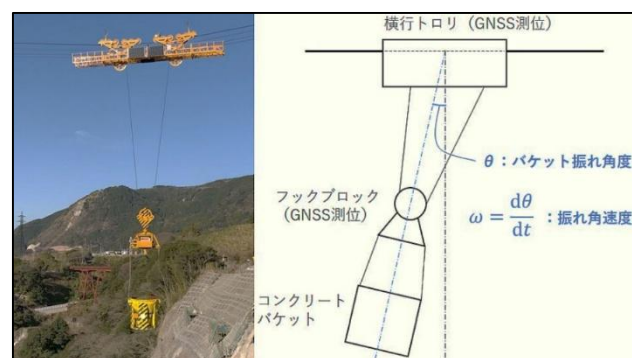


図 3-6 水平方向の揺動制御のイメージ



図 3-7 バイバック



図 3-8 第4回実証実験の様子

これにより、実施工の環境下において、コンクリートの放出位置が適切かつバイバックが所定の位置にあるといった条件のもと、バイバックによるコンクリートの自動締固めが有効であることを示した。

c) まとめ

以上より、バイバックによるコンクリート締固め作業は、コンクリートの放出位置が適切かつバイバックが所定の位置にあるといった条件下において自動化が可能であり、将来的に省人化に寄与できることを確認した。そして、ELCM工法の自動・自律化を実現するためには、「運搬－放出－締固め」の各作業を同一の施工サイクルとして、ケーブルクレーンとバイバックを連携させて制

御することが課題である。

(6) 今後の実証実験の予定

ダム本体の施工状況に応じてシステムの開発・更新を継続し、段階的な検証を継続していく。また、施工の自動・自律化には、毎回異なる条件下で最適な判断を行うことが求められる。そのため、これまで取得した複数の建設機械における施工データを条件ごとに整理・分類し、効率的な分析手法の確立に取り組んでいく。また、CMSおよび建機FMSとの連携により施工計画から実施工までのデータの一元管理が実現されることで、品質管理および施工管理の高度化も可能となる。

さらに、令和8年度には、バイバックに自律運転装置および締固め判定装置を搭載し、バイバックの自律運転について現場実証を行う予定である。本実証では、施工結果と品質評価データを一体的に蓄積し、施工指示から締固め結果までを追跡可能なデータ基盤の整備を進める。そして、蓄積したデータを活用し、締固め結果や出来形に応じてケーブルクレーンの放出位置等を調整する仕組みを検討する。これにより、施工精度の上昇と品質管理情報の集約・可視化の実装を進めることが目的である。

4. 終わりに

本事業におけるDXの取り組みについて、第1回から第4回の実証実験の結果に基づき整理した。本工事で取り組む「自律型コンクリート打設システム」は、従来の施工体系を変革する革新的な技術であり、施工の効率化および省人化を可能とするとともに、作業員の安全性の向上にも寄与するものと考えられる。かつて、既設丸山ダムは国内初の全面的な機械化施工を導入し、その後のダム建設における施工技術の発展と普及に大きく貢献した。これに対し本工事で取り組んでいる施工の自動・自律化の技術も、同様に施工体系の変革をもたらす技術である。そして、本事業において蓄積される建設機械の施工データや、新たに開発されたシステムおよび関連技術は、今後のダム建設のみならず、他の土木工事へも展開されることにより、建設分野全体への波及効果が期待される。

謝辞： 本論文の作成にあたり、ご指導いただいた株式会社大林組および本事務所の皆様ならびに、実証実験の実施にご協力いただいた大林・大本・市川特定建設工事共同企業体および現場関係者の皆様に、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～(2024.4)