

ダム建設現場におけるi-Construction 2.0 ～足羽川ダムの挑戦～

糸 純司¹・長谷川 悦央²

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 建設監督官 (〒910-8239福井県福井市成和1-2111)

²清水建設株式会社 北陸支店 足羽川ダム建設所 (〒910-2513福井県今立郡池田町寺島21-41-1)

足羽川ダム建設事業においては、ダム本体コンクリート打設が最盛期を迎え、特にダム本体工事の施工にあたっては、発注者と施工者が一体となってデジタル技術を活用して省力化・効率化を図り、施工の生産性を向上させながら進捗を図っている。

ダムコンクリート工においては、i-Construction2.0の柱の一つとなる施工のオートメーション化として、製造～運搬～打設までの自動化を行っている。熟練の技能が不要な袋状ベルトコンベアを実装するとともに、最新のICT、AI等を活用した品質管理、基礎処理工のDX等に取り組んでいる。本発表では、これら新技術の紹介ならびにその効果や今後の展望について報告する。

キーワード コンクリートダム、コンクリート運搬設備、生産性向上、i-Construction2.0、働き方改革

1. はじめに

(1) 足羽川ダム本体建設工事の概要と課題

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）（図-1）に建設する高さ96m、総貯水容量28,700千 m^3 、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千 m^3 の重力式コンクリートダムである。下流域の洪水被害軽減を目的としており、平常時は水を貯留しない洪水調節専用の流水型ダムである。2025年7月末時点における堤体工の進捗は、打設量52万 m^3 、打設高さ55mと全体の約75%の進捗となっている。



図-1 足羽川ダム位置図

近年、建設業における働き方改革が進められ、2024年度より労働基準法において時間外労働に上限が定められた。一方で社会から早期効果発現が求められており、品質を確保したうえでいかに生産性を向上させるかが課題となっている。

また、ダム工事特有の工種である基礎処理工においては技能者不足が顕著で、ICT等を活用して遠隔かつ一元的に管理するシステムの開発が急がれている。

本稿では、以上のダム本体建設工事が抱える様々な課題を解決するための取組を紹介するとともに、その効果や今後の展望について報告する。

2. ダムコンクリート全自動打設システムの導入

(1) 導入の背景

ダム工事においては、従来バッチャープラントやトランスファーカならびにケーブルクレーンの自動化技術が個々に開発されていた。受注者である清水建設（株）では2021年にこれらの技術を統合し「材料の供給～コンクリート製造～コンクリート運搬・打設」を完全自動で行うシステムを築川ダム（岩手県）で開発、実装していた。足羽川ダムでは、この技術にICT活用による遠隔管理機能等を付加したうえで、打設当初から導入し生産性向上を目指した。

(2) 本システムの概要

本システムは、下記3項目から構成される(図-2)。

- ・自動運転連携システム(赤枠)
- ・打設状況リアルタイム確認システム(緑枠)
- ・コンクリート注文システム(水色枠)

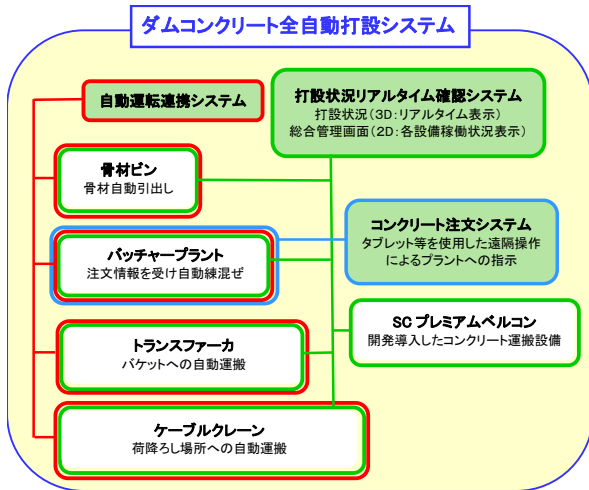


図-2 システム構成図

a) 自動運転連携システム

ケーブルクレーンの自動運転では、目標位置を設定して離床、コンクリート運搬、放出、その後バケットの制振制御を行いながら着床動作まで行う。本システムではトロリー及びフックブロックにGNSSを取付け、リアルタイムに位置情報を取得し、フックブロックの振れを計測している。この情報を分析・解析することで最適化したクレーン運転のアルゴリズムで制振制御を実施した。パッチャープラント他各機器には制御装置を付加したうえで、その自動運転の連携を構築した。

b) 打設状況リアルタイム確認システム

堤体の3次元モデルに各打設設備を追加し、上記のケーブルクレーンに取り付けたGNSSの位置信号をリアルタイムで取得、表示できるシステムとした。そこには、打設に関するさまざまな情報(打設量、打設時間、打設速度等)も表示される(図-3)。また、打設に関係する各設備の稼働状況、材料温度等をリアルタイムで確認、共有できる総合管理画面も有している(図-4)。

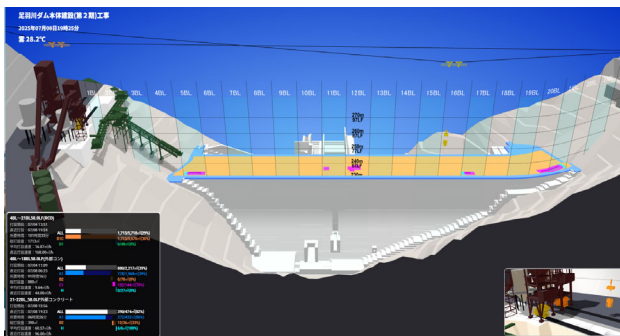


図-3 打設状況(3Dリアルタイム表示)

c) コンクリート注文システム

本システムでは、事前に注文計画(配合、数量、製造順序)を入力しておくことが可能となり、従来現場の担当者がパッチャープラントのオペレータと行っていた無線連絡手間が大幅に削減できる。さらに、担当者とオペレータとの無線の聞き間違いによる注文間違いの防止にも貢献している。追加、修正がある場合においても、現場でタブレットを操作し変更が可能である(図-5)。

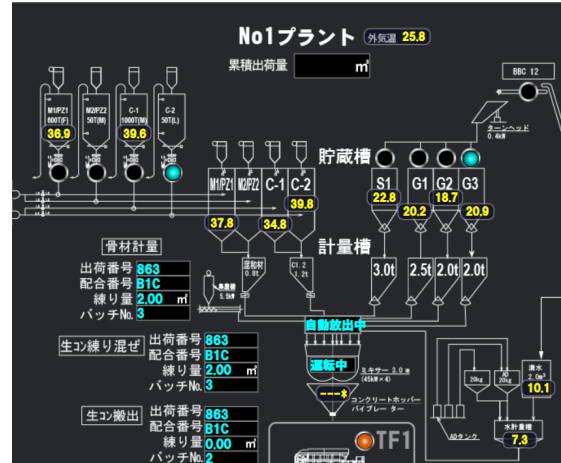


図-4 総合管理画面(2D:各設備稼働状況表示)



図-5 コンクリート注文システム画面

(3) 導入による効果

自動運転連携システムの導入により材料輸送設備の配置人員が減り、コンクリート製造設備や運搬設備では交代要員が不要となった。

打設状況リアルタイム確認システム、コンクリート注文システムの導入により受発注者誰でもネット環境さえ整えばこれらシステム画面をリアルタイムで共有でき、打設進捗状況の把握、設備トラブルの早期発見、早期対応等が可能となっている。さらにモニターカメラと併用することでその効果は向上した。また、コンクリート注文プロセスのスマート化が実現し、コンクリート製造に関する省人化が可能となり、生産性向上が図れた。

(4) 課題と今後の展望

ケーブルクレーンの自動化は、熟練運転手の技量の再現を目指しているが、特に「振れ止め」については課題が残っており、現時点においては再現速度に至っていない。本システムによって、その操作の分析、解析が可能となっていることから、現在地道な試行、改善を繰り返す、数秒ずつのサイクルタイム短縮を重ねているところである。

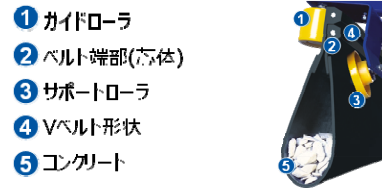


図-6 袋状ベルトコンベア

3. 熟練技能を不要とするダムコンクリート運搬設備の実装

(1) 開発の背景

コンクリートダム工事において、コンクリート工（製造～運搬～打設）はコスト・工期の大半を占めており、中でもコンクリート運搬はダム工事の生産性向上に特に重要である。清水建設(株)では2022年より、①熟練技能を不要としており、②ダムサイトの急傾斜面を直接運搬でき、③運搬能力が高く（200m³/h以上）、④材料分離等の品質への影響が少ないコンクリート運搬設備『SCプレミアムベルコン』の開発に取り組んでおり²⁾、これを足羽川ダムへ実装した（写真-1・図-6）。

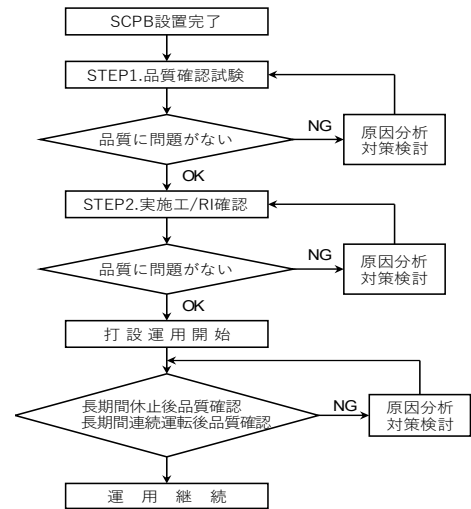


図-7 品質確認試験フロー

(2) 実装概要

2024年9月に設置完了し、試運転調整を開始した。その際、RCD コンクリート運搬前後の品質（ α^3 値、VC 値、空気量、単位容積質量、圧縮強度）ならびに、打設場所での締固め後密度を測定した結果（図-7、表-1）、いずれも規格値内であることを確認でき、コンクリート運搬を本格的に開始した。打設箇所へは、SC プレミアムベルコンから堤体上に配置したグラントホッパを介してダンプトラックに投入した後、堤体上を走行して運搬した（写真-2）。

表-1 運搬前後の品質確認結果の例

	運転日	試験時間	VC値	空気量	単位容積質量	CT	α
			20±10 (s)	1.5±1 (%)	2.3以上 (t/m³)	(°C)	10以下 (%)
実装開始時	9/27	16:00	19	1.0	2.470	25	5.6
		16:30	25	1.3	2.456	24	
長時間休止 後再開時	11/19	14:30	19	1.7	2.464	25	5.0
		15:30	28	1.4	2.486	24	

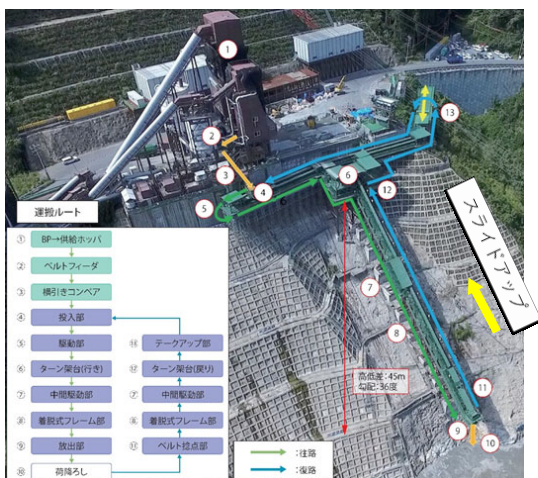


写真-1 SCプレミアムベルコン全景（足羽川ダム左岸）

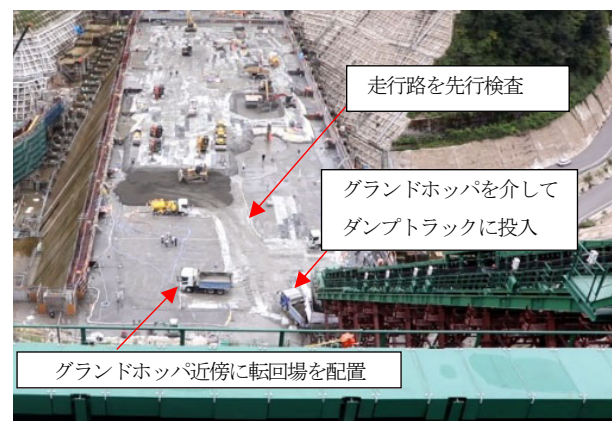


写真-2 ダンプトラックによる打設箇所への運搬状況

(3) コンクリート運搬実績とその効果

2024年10月の実装開始から12月冬期休止までに約1万m³を打設した。その際の運搬能力は最大180m³/h（バッチャープラント製造能力と同等）、平均約100m³/h（打設

の段取り替え等による停止時間含む)であった。SCプレミアムベルコンによる運搬時は2基あるケーブルクレーンをそれぞれ外部コンクリート打設と雑運搬に活用できるためコンクリート運搬だけでなく堤体工全体の効率化にも寄与した。

また、操作には資格が不要であり、熟練技能が無い担当者でもボタン一つで管理可能であったことから、施工のオートメーション化に寄与する技術であることが確認出来た。

(4) 今後の展望

本システムは乗継ぎなく角度を変更でき、上向き運搬試験も実施し品質変動がないことを確認している⁴⁾ことから、バッチャープラント等仮設備配置の自由度が高く、様々な条件の大型ダムへも展開も期待したい。

4. ICT・AI を活用したダムコンクリート製造 DX の導入

(1) 開発の背景

ダムコンクリートはマスコンクリートのため、夏期に打設したコンクリートの表面が秋冬に冷却されて表面と内部に温度差が生じ、温度応力によるひび割れが発生する。それを抑制する有効な方法のひとつが、夏期のコンクリート練上がり温度抑制である。現在まで、足羽川ダムにおいて、練上がり温度を制御、管理する技術を導入していたが、統合化されていなかった。そこで、近年急速に発達している、Big Data ならびに経験知の定量化に適している AI を活用して、各システムを連携、統合したダムコンクリート製造 DX の開発に取り組んだ。

(2) ダムコンクリート製造 DX (図-9)

a) 打設状況リアルタイム確認システムと AI を活用した練上がり温度予測システムの連携

前述の打設状況リアルタイム確認システム (図-2) で

収集、蓄積された1年分の Big Data を AI で学習するとともに、様々な予測手法を比較検証した結果、機械学習による予測精度が高いことが確認された。現場の担当者が容易に操作可能な GUI (図-8) も装備しており、収集データ増にとまなう再学習の繰返しも可能としている。

b) 定量的判断に基づくプレクーリングの運用

上記連携システムを活用した定量的判断に基づくプレクーリング稼働管理フローを図-10に示す。2024年度は6月1日から9月30日まで、練上がり温度が確実に管理値以下となるよう安全側の判断で、プレクーリング(粗骨材への冷水散水、骨材貯蔵ビンでの冷風冷却、バッチャープラントの冷風冷却)を全て稼働させていた。その状況を分析すると、6月は夏日でない日数が2週間程あり、その間プレクーリングを実施していなかった骨材温度等から AI 予測すると管理値内に収まる事が確認できた。さらに、2025年度は5月から練上がり温度の実測値と AI 予測値を比較検証し、ほとんどが $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 前後以内となった。これらをふまえ、警戒態勢から始まる3段階の稼働ステップで構成されるフローとした。

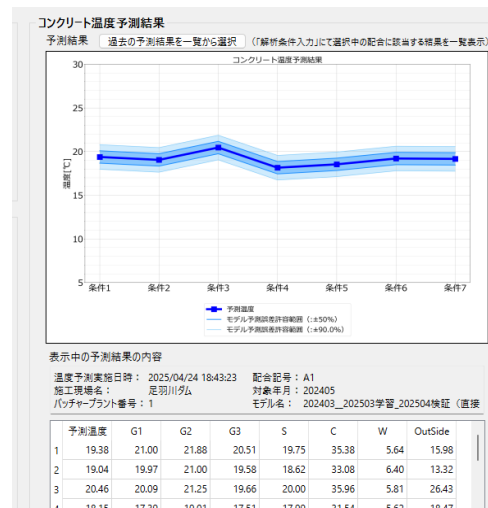


図-8 AIを活用したコンクリート練上がり温度予測システム画面 (GUI: GraphicUserInterface)

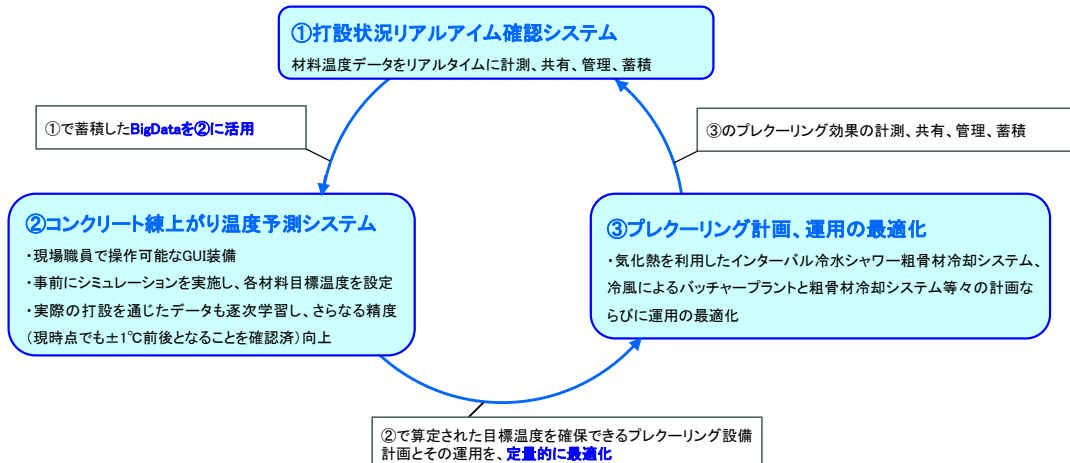


図-9 ダムコンクリート製造 DX のコンセプト

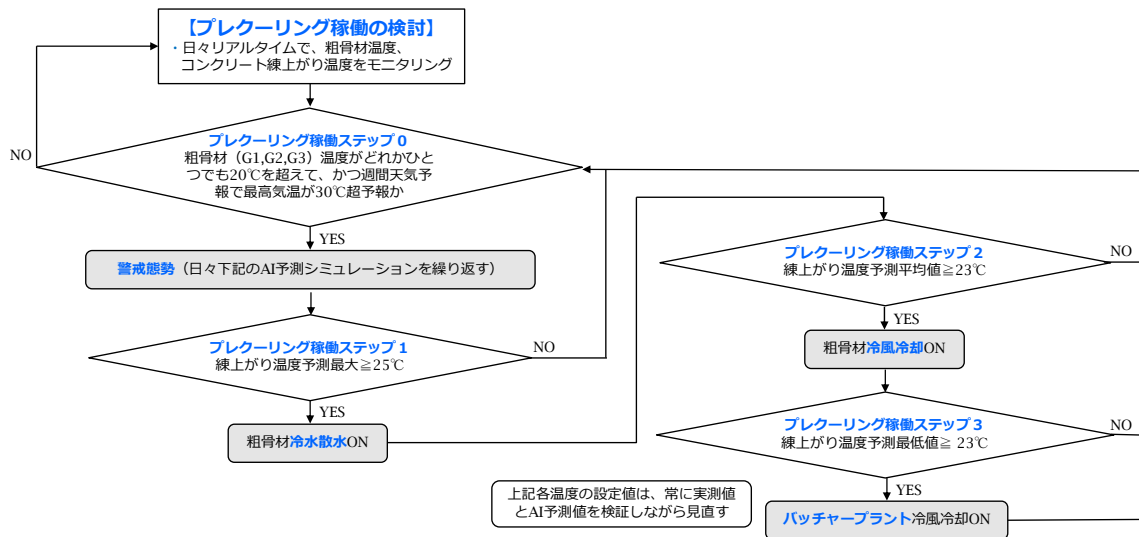


図-10 ブレーキング運用フロー

(3) 導入による効果

ブレーキングの稼働管理を定量的に判断することができるように、品質を確保したうえで確実に（練上がり温度管理値超えによる打設休止等なし）打設工程を進めることができています。

2025 年度 6 月に上記フローに基づき、日々管理した結果、6 月の 20 日間は冷水散水と骨材ビンへの冷風冷却の一時的使用で管理値以下とすることができた。これにより使用電力量は約 15 万 kWh 削減できた（一般家庭約 400 戸相当）。

(4) 課題と今後の展望

現時点では、AI を活用しているとはいえ、その操作ならびに各ブレーキング設備の ON/OFF は人が実施している。しかし、ブレーキング運用フローは定量的かつシンプルな判断基準となっている。将来的にはこれらを全てオートメーション化することも可能と考えられる。合理的かつ安定した暑中コンクリートの製造をカーボンニュートラルにも貢献しながら、自動制御できるシステムに発展させることを期待したい。

5. 基礎処理工における DX の導入

(1) 開発の背景

近年、基礎処理工における熟練技術者が不足しており、その構成も 60 歳以上が 30%超と高齢化が顕著である。特に注入管理（機器制御含む）ができる技術者は全体の 20%程度と少ない。一旦注入が始まると途中で中断することが困難な場合も多く昼夜連続作業となる。これらの基礎処理特有の課題がある中、働き方改革の推進が求められている。

昨今基礎処理工においても ICT を活用した省力化に資

するシステム開発が進んでおり、足羽川ダムにおいても遠隔グラウチング管理システムの導入した。

(2) 遠隔グラウチング管理システム

本システムは現場オペレーションと施工情報をシームレスに連携させ、熟練者のノウハウを若手に伝承し遠隔管理室で一括管理することを目指している。その特徴は「情報通信」「情報共有」「情報化施工」の 3 本柱に整理される。情報通信では、安定した LAN 環境を構築し、Ethernet・Wi-Fi 対応機材によるデータ通信を実現した。情報共有では、施工情報をウェブサイトでリアルタイム共有し、3 次元グラウチングマップを用いた可視化を行う（図-11、図-12）。

情報化施工の実現のためには、LAN 環境を活用した Web カメラによるリアルタイム監視ならびに注入の自動・遠隔制御システムを開発し、省力化と遠隔管理を可能とした。遠隔地から各種機材の制御画面を操作（写真-3）でき、注入材料の練り上げや注入プラントの管理、グラウトの流量・圧力調整までをタッチパネルで行うことができる。

(3) 導入による効果

a) 情報連携のスマート化、可視化と追加孔判断の効率化

これまで手渡しで行われていた作業予定や注入結果の報告を Web ブラウザでリアルタイムに確認可能となった。施工情報は管理室や現場で即時更新され、流量計の稼働状況と連動して自動更新される。施工状況マップは 2 次元ならびに 3 次元表示に対応し、クリックひとつで管理日報を即時確認可能である。これにより、関係者が迅速に施工結果を把握し、追加孔判断の効率化等に貢献できた。

b) 現場施工の一元管理

現在、右岸リムグラウチングに自動・遠隔制御システムを導入したことで、注入管理技術者を 4 名から 3 名

(1方施工)へ省力化が可能となった。2026年度高標高部(EL.250m程度以上)施工時には、全施工範囲に展開することを目指しており、その際2方施工となればさらに1名の省力化を図れる見込みである。

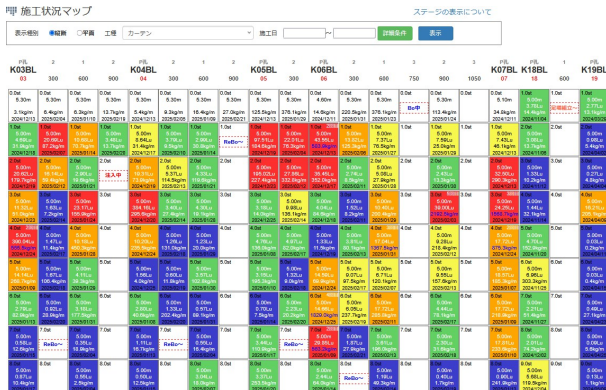


図-11 Web ブラウザでの平面管理マップ画面

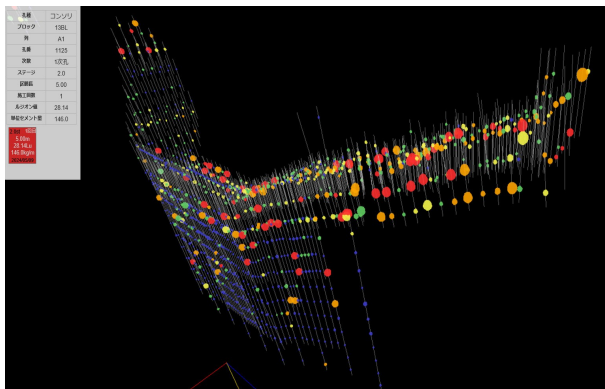


図-12 Web ブラウザでの3Dルジオンマップ画面

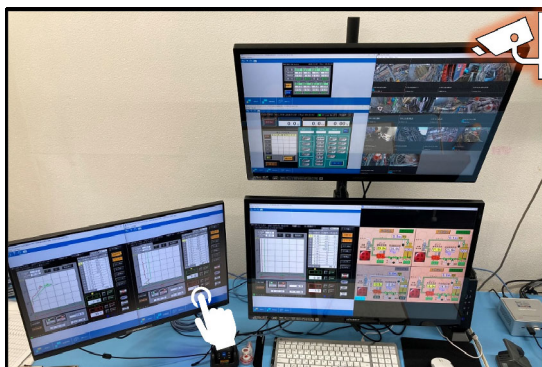


写真-3 遠隔注入管理システムの操作パネル

(4) 課題と今後の展望

a) 遠隔管理による現場管理室の無人化

配員不足により24時間連続作業できない場合にも遠隔操作、管理の活用で、柔軟な勤務体制と施工の安定性の両立が十分に見込まれる。

b) BIM/CIMへの対応

本システムでは、施工中リアルタイムで更新される

3次元マップを自動生成し、日報情報も同時に格納する。最新データはウェブブラウザでどこからでも閲覧可能である。納品時にはBIM/CIMフォーマットとの整合をとったうえで、工事完了後もオフライン環境で閲覧可能となる仕様を開発中である。

c) 若手技術者の育成

本システムの遠隔操作は、若手技術者にも違和感なく取り組んでいる。しかし、システムに依存することにより現場力が低減する恐れもあるため、熟練者による教育・技術伝承と併せて本システムを活用することで、技術者育成に期待したい。

6. おわりに

足羽川ダムでは、本稿で紹介した各技術の開発、実装を通じてi-Construction2.0の実現にむけた歩みを始めたところである。

今後は、各技術の課題解決に加え、ダム工事の特性である多岐にわたる工種全体を見据えた開発を進める必要がある。そのうえで、各技術についてマイルストーン(目標レベルの設定・スケジュールの可視化・リスク項目と対策等)を示したロードマップを整理し、官民一体となった取組が必要である。

最後に、本稿の作成にあたりご協力をいただきました清水建設株式会社の皆様に心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 立花すばる, 森山忍, 山下哲一, 森日出夫, 加瀬俊久: ダムコンクリート自動打設システム, 土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-712, 2019
- 2) 藤井攻, 三井智史, 長尾貴浩, 山下哲一: SC プレミアムベルコンの開発と実証(1), 土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-329, 2023
- 3) 田代民治, 大内斉, 坂田昇, 渡邊賢三: コンクリートダムの高速施工に対応する運搬方法, コンクリート工学, Vol.53, No.12, pp.1051~1057, 2015.12
- 4) 藤井攻, 山下哲一, 長尾貴浩: ダムコンクリート自動打設における ICT 技術の活用, 土木学会年次学術講演会概要集, VI-329, 2023
- 5) 荻野幹久, 樋川直樹, 山口浩, 山下哲一: SC プレミアムベルコンの開発と実証(2), 土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-329, 2023