

ダム建設現場における「自律型コンクリート打設システム」の開発

(株)大林組 正会員 ○阿部 留美子, 久保 貴士
佐々木 啓次, 稲川 雄宣
森 直樹, 岡本 邦宏
松崎 晃

1. まえがき

長きにわたり、建設業は「きつい」、「危険」、「汚い」上に休日が少ないというイメージを持たれており、若年層の入職者が減少している。ダム建設工事は工事規模が大きいため、多くの技能労働者を確保しなければならず、担い手不足が深刻化している。また、強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性など、ダムに求められる性能を確保するためには、高い施工技術が必要である。

特に、岐阜県加茂郡八百津町・同県可児郡御嵩町で施工中の新丸山ダムは、既存の丸山ダムの一部に重なる形で大規模な嵩上げを行う、難易度の高い工事である。また、新丸山ダム本体建設工事は、大河川、木曽川に築堤された丸山ダムで洪水調節をしながら施工するため、大雨、洪水時の安全対策も考慮しなければならない。

図-1 に新丸山ダム本体建設工事の施工ステップ図を示す。

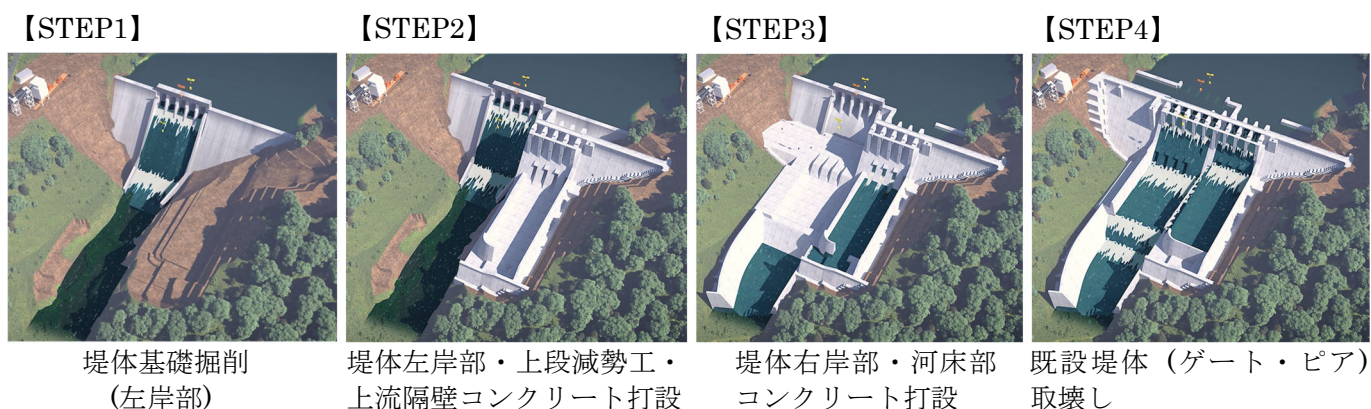


図-1 新丸山ダム施工ステップ図

少ない人数で、安全に、快適な環境で働くことができる生産性の高い建設現場の実現を目指し、国土交通省が2024年に策定したi-Construction 2.0のトップランナー施策として「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」が掲げられている。この方針に基づき、建設現場全体のオートメーション化の実現にむけて、「自律型コンクリート打設システム」の開発に取り組んだ。コンクリート骨材の製造から打設まで、一連の工程を自律化するため、「建設機械の自律化」、「複数の建設機械の連携」、「品質管理の自動化」という3つの取り組みを進めた。

本稿では、自律型コンクリート打設システムの中核を担う「ケーブルクレーン自律運転システム」と複数の建設機械の連携に必要な映像受信や運転指示を行うための安定した無線通信「ローカル5G技術」、締固め品質管理に用いる「自走式散乱型RIロボット」について報告する。

2. 開発概要

(1) ケーブルクレーン自律化

多くのダム建設工事では堤体コンクリートの運搬にケーブルクレーンを使用している。ケーブルクレーンには、両端が固定された固定式や両端または片側の塔がレール上を移動する走行式などがある。

キーワード ダム, i-Construction2.0, 自動化, 自律化, コンクリート打設

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 TEL 03-5769-1321

新丸山ダム本体建設工事で導入したケーブルクレーンは、主索を固定塔と移動塔に固定し、移動塔が固定塔側を中心に円弧状に移動する弧動式ケーブルクレーンである。走行装置が移動することにより、ダムの堤体全域にコンクリートを直接打設することが可能である。図-2 に新丸山ダムのケーブルクレーンを示す。

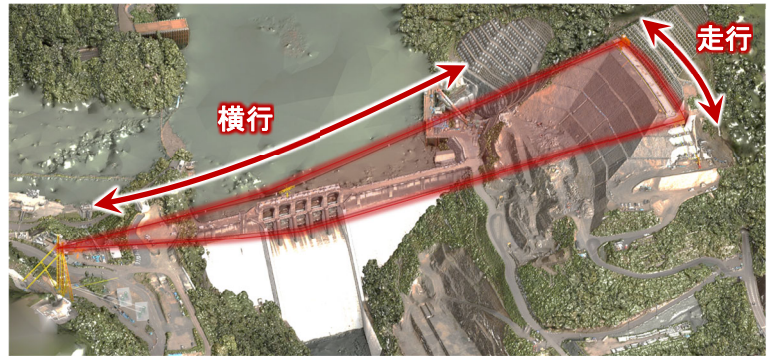


図-2 新丸山ダムで導入した弧動式ケーブルクレーン

ケーブルクレーン自律運転システムは、プログラムからの指令により GNSS 等のセンサを用いて最適な振れ止めを行いながら、バンカー線から打設位置へ正確に移動し、打設場所の安全を確認してコンクリートを放出する。放出完了後はバンカー線まで戻り、往路と同様に振れ止めを行いながらバケット台車に着床する。施工計画で決められたスケジュールに従い、放出場所を順次移動しながら、コンクリート打設作業を自律的に行う。実際の作業の状況に応じて放出箇所の修正や移動が必要になった場合は、システムを介して計画を修正し、自律打設を継続する。また、対人・対障害物検知や作業範囲規制・高さ検知装置などの安全機能を設け、異常を検知した際には自動停止することで安全を確保している。システムは、オペレータのレバー操作により、いつでも即座に手動運転に切り替えることも可能である。図-3 に弧動式ケーブルクレーン自律運転システム構成図を示す。



図-3 弧動式ケーブルクレーン自律運転システム構成図

(2) ローカル 5G 技術

ローカル 5G は、4.5GHz 帯および 28GHz 帯の 2 つの周波数帯を有し、通信事業者ではない企業や自治体が特定のエリア内で独自ネットワークを構築・運用できるものである。これにより、他の利用者の影響を受けず、高速かつ大容量の通信を安定的に利用することが可能である。

ケーブルクレーンの横行トロリとフックブロックは、構造上有線による通信が不可能であるため、従来の自動運転装置は、運転席と横行トロリやフックブロックとの無線通信に Wi-Fi を使用していた。しかし、Wi-Fi 通信は安定性に欠けるため、これまでの自動運転技術は通信に依存しない機能の開発にとどまっていた。新丸山ダム本体建設現場では、「接続安定性」、「広域通信エリア」、「高セキュリティ」の観点から、従来の無線通信技術より優れているローカル 5G 通信を導入し、右岸側のコンクリート製造設備から左岸側堤体施工部まで、

ケーブルクレーンの動線をカバーする広範囲かつ立体的な通信エリアを構築した。

ローカル 5G を使用することで、新丸山ダムのカブルクレーン自律運転システムは、これまで実現できなかった、大容量データ通信や即時性が必要な機能を開発することができた。

図-4 に新丸山ダム本体建設現場に構築したローカル 5G 通信エリアを示す。

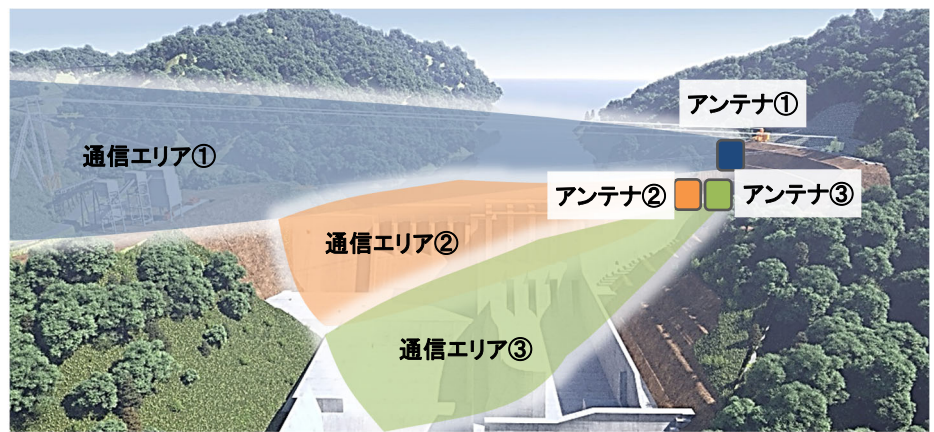


図-4 ローカル 5G 通信エリア

(3) 自走式散乱型 RI ロボット

新丸山ダム本体建設工事では、今後予定されている RCD 工法の品質管理の高度化を目指し、散乱型 RI を自走ロボットに搭載することで面的に含水比および湿潤密度を計測できる自走式散乱型 RI ロボットを開発した。自走式散乱型 RI ロボットは GNSS を搭載しているため、計測した含水比および湿潤密度と取得した座標を組み合わせることで締固め品質を施工面全面で把握することができる。図-5 に自走式散乱型 RI ロボットを示す。

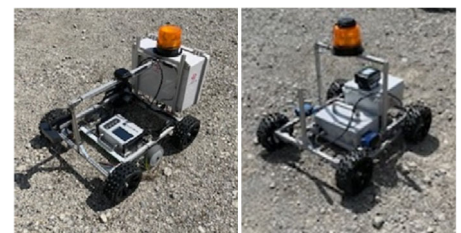


図-5 自走式散乱型 RI ロボット

取得した計測結果をクラウドサービスのデータベースに保存することで、別途取得した 3D レーザースキャナの点群データ等と合わせ、ヒートマップ、統計分析、転圧収斂分析、相関分析などを行うことが可能である。

3. 技術的課題および解決策

a) 水平方向の振れ止め制御機能

バンカー線を起点としたケーブルクレーンによるコンクリート運搬では、往路復路ともに、最高速度まで加速後、等速運転を行い、目標地点到達前に減速運転を行う。この水平方向の加速・減速運転の際、コンクリートバケットが振り子状となって水平方向の荷ぶれが発生し、安全性やコンクリートの品質に不具合が生じる。

そこで、本システムでは、横行トロリおよびフックブロックに GNSS 受信機を設置し、それぞれの絶対位置や相対角度を計測することで荷ぶれの状態を把握できるようにした。検知した振れに対し、適切な変位や加減速を加えることで、目標地点到達時には水平方向の荷ぶれを概ね収束させることができる。

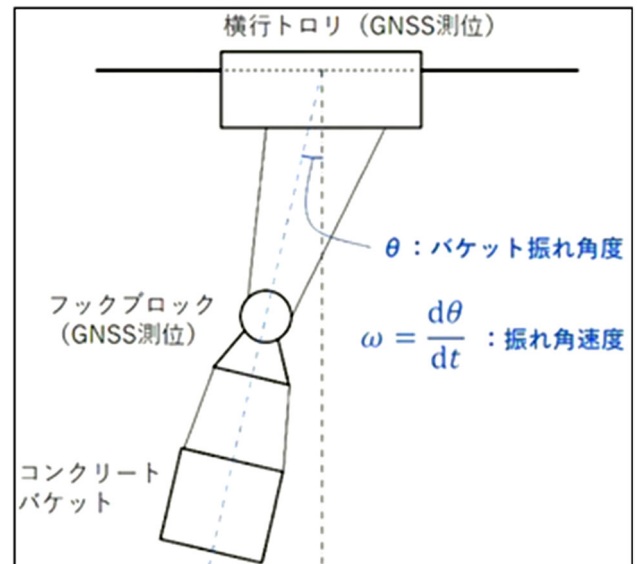


図-6 水平方向の荷ぶれ発生状況および GNSS 受信機取り付け位置図

また、目標地点までの運搬においては、巻上げ・巻き下げ動作、横行動作、走行動作を複合的に組み合わせることで、サイクルタイムの短縮が可能となった。水平方向の荷ぶれ発生状況および GNSS 受信機取り付け位置を図-6 に示す。

b) コンクリート放出時の垂直方向の跳ね上がり制御機能

コンクリート放出時は 6m^3 ものコンクリートの荷重が一気に抜け、クレーン主索に大きく張力がかかった状態から戻ろうとする。この力によって、コンクリートバケットが上方に大きく跳ね上がるため、コンクリート放出時には適切な巻下げ動作を行い、振れを抑える必要がある。バケットの跳ね上がり速度は、配合やスラ

ンプ、気温など、さまざまな要因によって異なる。そのため、バケット内のコンクリート残量およびバケットの位置をセンシングし、巻き下げ動作の速度を調整する機能を追加した。放出時における揺動制御の有無の比較を図-7に記す。

c) 任意点への自動打設機能

これまでに開発されていたケーブルクレーンの自動化は、両端固定式ケーブルクレーンが対象であることが多く、運搬先はグラントホップなどの固定点が一般的であった。しかし、今回、新丸山ダム本体建設現場に設置されたケーブルクレーンは弧動式であり、コンクリート運搬ごとに目的地が変化する。さらに、クレーンの特性により、走行動作に伴って主索張力が変化し、振れ止め制御の難易度が増すことになった。そのため、目的地ごとに異なる制御パラメータの調整が必要となり、実機で繰り返し検証を行った。その結果、最適な制御パラメータを算出することができるようになり、任意点への自律運転が可能となった。

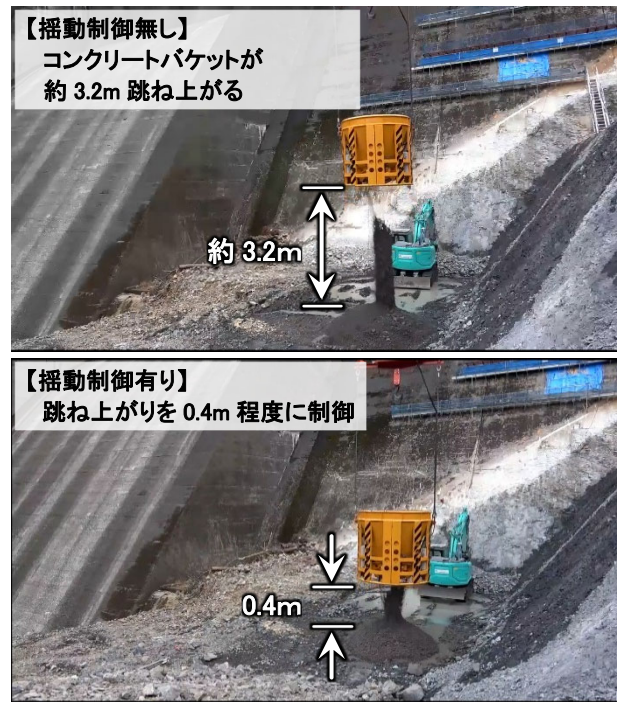


図-7 放出時における揺動抑制の有無の比較

4. 技術的評価

ローカル 5G と GNSS を活用したケーブルクレーンの自律運転により、打設位置の誤差を最小限に抑え、施工計画通りにコンクリートを打設することが可能となり、施工精度が向上した。また、対人・対障害物検知機能や振れ止め等の制御により、作業中の事故リスクが低減した。

ローカル 5G の導入により、従来の Wi-Fi 通信では困難だった、広域かつ高セキュリティな安定通信が実現した。その結果、複数機械の連携やリアルタイム制御技術が確立され、ケーブルクレーンの自律化が可能となった。

自走式散乱型 RI ロボットによる面的な締固め品質の計測は、従来の品質管理試験手法と比較して、施工管理の効率化に大きく貢献する。また、クラウドを活用したデータ連携による分析は、品質管理の高度化を促進するものである。

これらの技術は、今後の大規模インフラ整備において、施工の効率化、安全性の向上、品質管理の高度化を実現するための重要なステップであるといえる。

5. まとめ

新丸山ダム本体建設工事における「自律型コンクリート打設システム」の開発は、i-Construction 2.0 の理念に基づく建設現場の革新を象徴する取り組みであり、施工技術の自律化に向けて大きく前進したといえる。

ケーブルクレーンの自律化、ローカル 5G による安定した通信、自走式 RI ロボットによる品質管理は、それぞれが単独でも高い技術的価値を持つが、コンクリート製造設備や打設設備を含めて統合的に運用することで、省人化を図り、生産性を飛躍的に向上できる。

今後も、新丸山ダム本体建設工事における「自律型コンクリート打設システム」のさらなる進展を図るとともに、DX 技術の発展を目指して研究開発や実証、導入を進めていきたい。