

統合施工管理システムの導入による 土工事の自動化と生産性向上

株式会社大林組 西日本ロボティクスセンター 施工技術部 係長

おかもと くにひろ
岡本 邦宏
にし しょういち

土木本部 生産技術本部 企画部 部長

まつざき こう
西 彰一

技術本部 技術研究所 地盤技術研究部 主任

まつざき こう
松崎 晃

1. はじめに

国土交通省 中部地方整備局発注の新丸山ダム本体建設工事は、岐阜県加茂郡八百津町と同県可児郡御嵩町において、丸山ダムを 20.2 m かさ上げして機能アップを図るダム再開発工事である。本工事では、データとデジタル技術を活用した働き方改革を推進するとともに、安全・安心で豊かな生活を『建設 DX』によって実現するための各種取り組みを受発注者協働で行っている。

社会的課題として、生産年齢人口の減少により、技能労働者の確保が今後ますます困難になることが考えられる。一方で、人口減少下においても、将来にわたって持続的にインフラ整備・維持管理を実施する必要があり、単純な機械の自動・自律化だけでなく、生産プロセス全体の生産性向上が求められている。

今般、建設現場の生産性向上を実現するために、重機土工事の施工計画から、建設機械の自動・自律運転、品質管理までの一連の管理を行う「統合施工管理システム」を開発し、ダムコンクリート打設への適用を図っている。そのため、2023 年 9 ~ 12 月に統合施工管理システムの活用を目指し、盛土工事による自動化実証施工を実施した。本稿では、統合施工管理システムの概要、

実証施工の実施内容と本システムの生産性向上の評価について述べる。

2. 統合施工管理システムの概要

統合施工管理システムは、施工の全体計画、建設機械およびダンプトラック（以下、「建機」という）の作業管理、品質管理をシームレスで自動化し、統合管理するシステムである。

システムは、図-1 に示すように全体計画を行う Construction Management System（以下、「CMS」という）、建機の統合管理を行う建機 Fleet Management System（以下、「建機 FMS」という）と自動・有人建機、品質管理を行う AtlasX、受

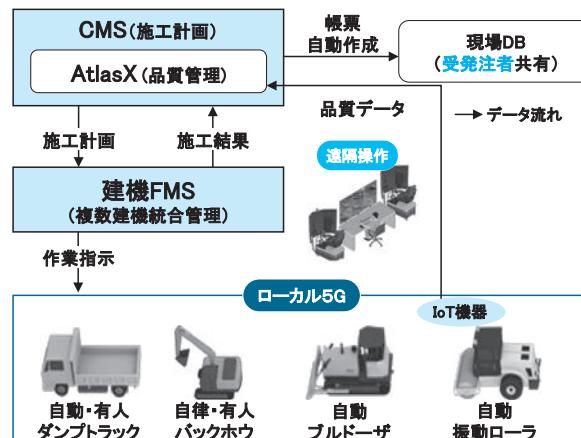


図-1 統合施工管理システム概要

発注者間で施工状況を共有する現場ダッシュボード（以下、「現場 DB」という）で構成される。

(1) CMS

CMS は、工程の制約条件を考慮しながら盛土工事の全工程をシミュレーションし、自動で施工計画を作成できるシステムである。また、後述する建機 FMS と連携しており、自動作成された施工計画は、自動・自律建機の作業指示に活用される。

施工後には、建機 FMS より施工結果を取得し、再度、残工程の施工シミュレーションを行うことで、施工結果を次施工計画に反映することが可能である。また、帳票作成機能を備えており、後述する AtlasX で取得した品質管理データを自動処理し、帳票を自動作成する。

(2) AtlasX

AtlasX^{1,2)}は盛土の品質管理を行うシステムで、図-2 で示すように α システム、自走式散乱型 RI ロボット、3D レーザースキャナの 3 種類の IoT 計測機器と、そのデータをクラウド上で処理・可視化を行うデータ統合解析システムで構成される。

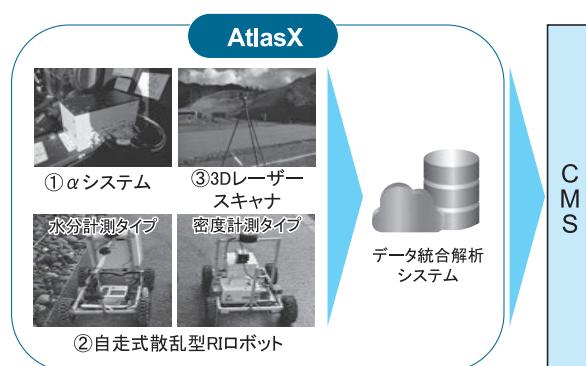


図-2 AtlasX 概要

α システムは振動ローラの加速度を計測し、その周波数特性から地盤剛性を推定する。また、算出される特性値である乱れ率と乾燥密度の相関を事前に取得しておくことで、その推定も可能である。自走式散乱型 RI ロボットは、散乱型 RI を

自走ロボットに搭載することで、自動で含水比および湿潤密度を計測する。3D レーザースキャナは、各転圧完了面の点群データを取得し、仕上がり厚さを算出することができる。

これらの計測データは位置情報を保持しており、データ統合解析システムへ送信することで、面的な分布として確認することができる。さらに取得したデータは CMS に送信され、自動で帳票が作成される。既存の自動施工技術の多くは、個々の建機の自動・自律運転を行うものや、それを統合管理するシステムであるが、統合施工管理システムは、建機の自動・自律施工の管理に加え、品質管理までの作業を含めて自動化が図られている。

(3) 建機 FMS

建機 FMS は、自動建機を含む複数の建機を連携させ、重機土工事に高度な自動運転の適用を可能とするシステムである。建機 FMS による自動施工の提供は、自動建機 1 台から可能で、連携可能台数の上限に制限がない。さらに、他社開発の自動建機や有人建機との連携が可能となっている。自動施工の操作管理は、パソコンやタブレットに表示した管理画面上で行うことができる。

建機 FMS の管理画面を図-3 に示す。建機 FMS の管理者は、CMS が自動作成した施工計画を基に、各建機の作業内容や車両の積込み・荷下ろし位置等を事前に設定する。その後、施工時には、管理画面上の連続運転開始ボタンの操作のみで、全ての自動・自律建機で施工を行うことが可

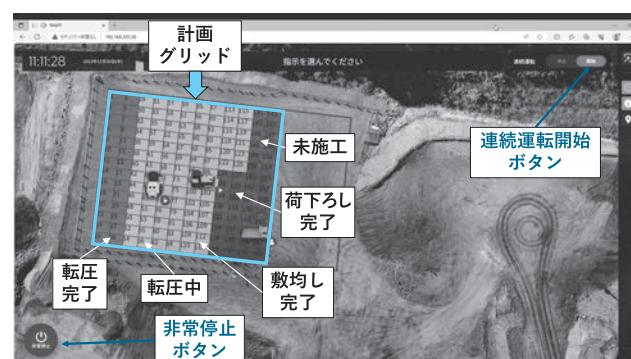


図-3 建機 FMS 管理画面

能であり、容易に操作・管理することができる。

また、本実証施工において、荷下ろしや敷均しの場所は格子状の計画グリッドに分割して管理する方式を採用しており、自動施工中は、管理画面上の建機アイコン位置と、各建機の作業状況に応じて色が変わる計画グリッドを視覚的に確認しながら、システム情報、監視カメラの映像等も参考に管理を行うことができる。

自動施工においては、建機の誤動作防止やフェールセーフなど安全対策が最重要課題となるが、統合施工管理システムでは、自動・自律建機自体の安全機能はもちろんのこと、建機FMSからは、建機同士の接近管理による優先施工機能、施工範囲の限定と逸走防止、非常時の全稼働建機停止が行える。さらに、各建機にシステムトラブルが発生した場合も想定して、自動運転を遠隔運転に切り替えることが可能である。また、建機の作業データは、隨時建機FMSのデータベースに集積され、任意のタイミングで施工結果データとして出力ができる、作業終了時に施工結果データをCMSに送信する。

(4) 自律バックホウ

土砂のダンプトラックへの積込み作業の自動化には、自律運転システムを搭載したバックホウを使用した。自律運転システムとは、自動の進化系システムであり、機械自らが判断して環境や状況に応じた運転をするものである。実証施工では、機体の姿勢制御には、写真-1に示すブーム・

アーム・バケット・旋回部に設置した慣性計測装置（以下、「IMU」という）、掘削ポイントや積込みポイントの判別にはステレオカメラ、自己位置の取得にはGNSS、油圧シリンダーの油圧の取得には圧力センサを使用した。これらのセンサ情報から制御装置により動作を判断し、レバー操作装置³⁾を介して、建機に掘削・積込み等の動作指令を伝えた。

さらに、掘削後、圧力センサおよびIMUの情報からバケット内の土砂重量を取得し、積載した土砂が規定重量に達しているかを判断し、ダンプトラックへの積込み作業を行った。積込み完了後、ダンプトラックに載せた積載重量と積込みが完了したことを建機FMSに通知した。

(5) 自動ブルドーザ

敷均し作業の自動化には、自動運転システムを搭載したブルドーザを使用した。自動運転プログラムによる目的座標への走行制御、ICT建機機能のマシンコントロールによるブレード制御を組み合わせることで、自動敷均しを実現した。自動ブルドーザの自動運転システム機器構成を写真-2に示す。

自動敷均しは、建機FMSの計画グリッド中心座標に基づき、ダンプトラックにより荷下ろしされた盛土材料の山を均一に敷き均す。実証施工では、ブレードの高さは、マシンコントロールを活用し、計画高どおりの敷均し厚さになるようにした。また、安全性向上の機能として、材料や障害

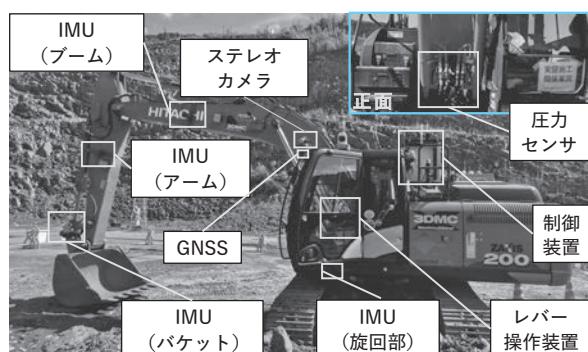


写真-1 自律バックホウ機器構成

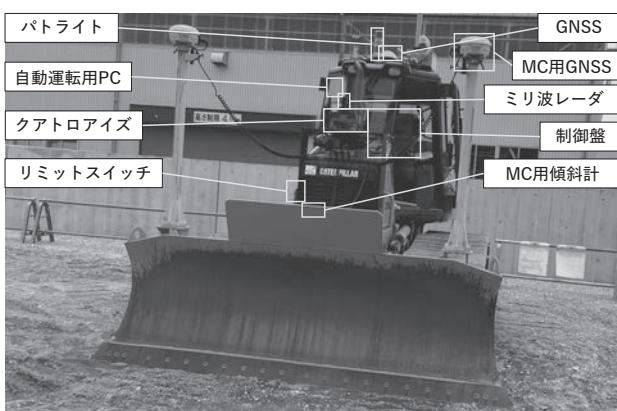


写真-2 自動ブルドーザ機器構成

物を検知するためのミリ波レーダと AI カメラを併用することで、自動運転時に作業性を損なうことなく安全を担保した。

3. ローカル 5G 通信網の構築

ローカル 5G は、企業や自治体などが専用の 5G 環境を構築・運用できる無線ネットワークである。利用に当たっては無線局免許が必要だが、電波の干渉がないため通信の安定性が高く、接続端末が移動しても通信が切れにくい上、広範囲かつ立体的に通信エリアを構築することができる。

(1) 実証施工の無線通信要件

本実証施工において、建機は建機 FMS から作業指示を受け取るとともに、自己位置やその他の施工情報を建機 FMS に送信する。したがって、複数台で同時に通信する必要があり、同時多接続の通信が求められた。加えて、建機の操縦は原則として自動・自律運転であるが、緊急時は遠隔操縦に切り替え、作業を継続する必要がある。

遠隔操縦を行う場合は、重機に取り付けられたカメラの映像および制御情報を伝送する必要があり、高速大容量、低遅延の通信が求められた。本実証の施工条件の場合、自動・自律運転時は位置情報等の伝送に最大 7 Mbps 程度、遠隔操縦時は建機周囲の状況を確認するカメラ（フル HD）× 3 台、建機座席のカメラ × 1 台の映像および建機の操作情報を伝送するため、最大 31 Mbps 程度の通信速度が必要であった。

(2) ローカル 5G の有効性検証

構築したローカル 5G 通信網の有効性の検証を目的として、ローカル 5G の通信品質試験を実施した。試験は実際の施工を模擬し、Wi-Fi およびローカル 5G 端末を車両に載せ、盛土施工現場を時速 5 km 程度で走行し、その際の通信速度を計測することで品質を確認した。

図-4 に通信品質確認結果を示す。Wi-Fi は、通信速度が 0 ~ 250 Mbps の間で大きくばらついている一方で、ローカル 5G は、30 ~ 180 Mbps の間で通信しており、ローカル 5G の方が数値の変動の幅が小さいことが分かる。また、ローカル 5G は、要求性能である 31 Mbps をおおむね上回っているのに対し、Wi-Fi は 0 Mbps を複数回にわたって記録している。

建機 FMS の運用に当たっては、通信が切れるとなれば位置管理ができなくなるため、接触事故等を防ぐ目的で全建機の自動運転を停止する仕様としている。したがって、通信安定性の高いローカル 5G が、通信品質面で有利であることが分かった。実際に、2023 年の運用開始から現在に至るまで、ローカル 5G が要因の通信途絶は発生しておらず、安定した通信品質を示している。

4. 盛土自動化実証施工

統合施工管理システムの適用性を検証するため、2023 年 9 ~ 12 月に盛土自動化実証施工を実施した。本実証施工で使用する建機は、運搬機械・敷均し機械・転圧機械で構成され、これらの

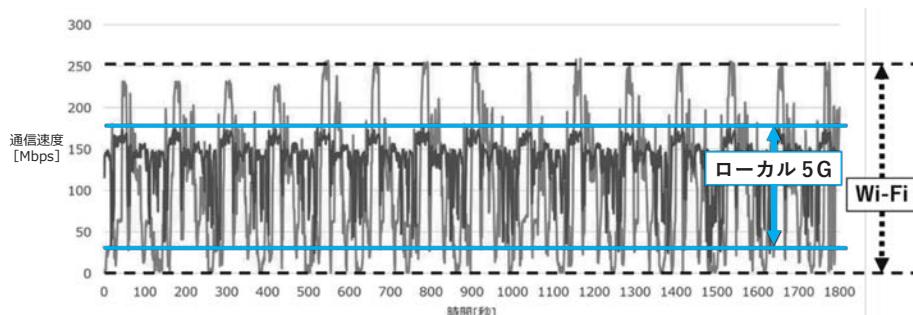


図-4 通信品質確認結果

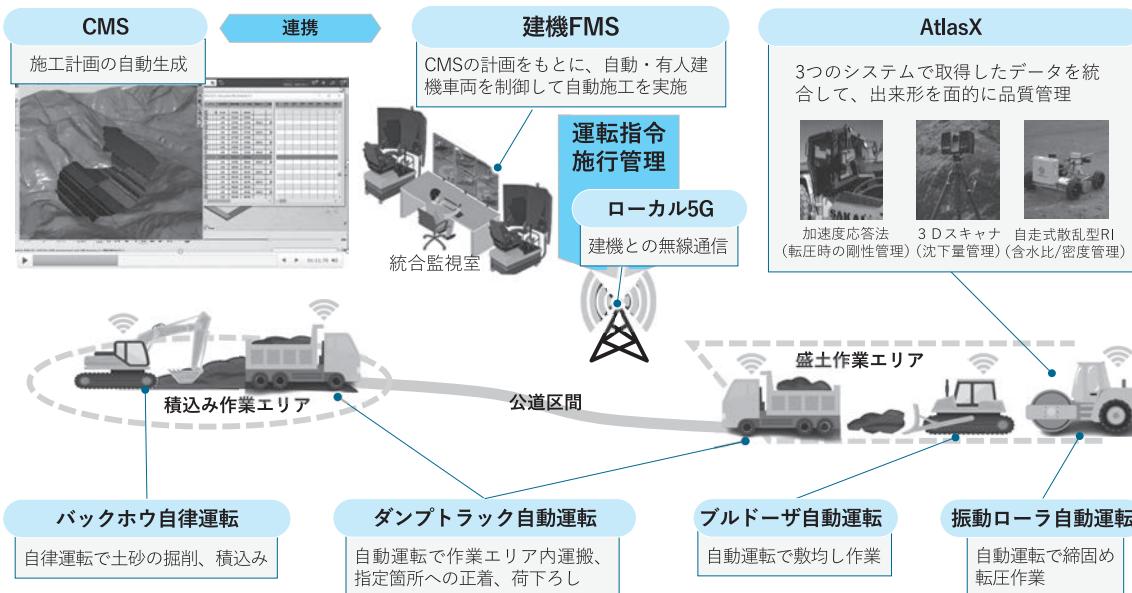


図-5 実証施工概要

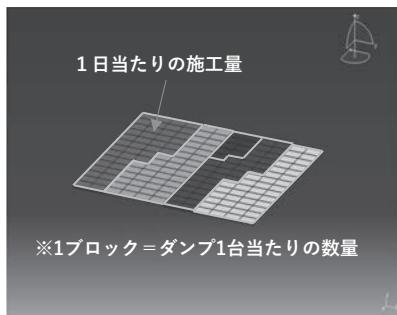


図-6 計画シミュレーション結果例

機種はダムコンクリート打設でも使用される。

(1) 実証施工概要

実証施工の概要を図-5に示す。本実証施工では、ダムコンクリートの重ね打ちを想定し、幅48m×長さ42m×高さ0.3mの盛土を4層構築した。CMSは、機械の施工能力、工程上の休止日を設定することで、図-6のように1日の施工量を自動算出した。シミュレーション結果は座標情報を持つておらず、ダンプの荷下ろし位置や順序を指示データとして建機FMSに送信した。施工後には、建機FMSから施工結果を取得、再度残工程の施工計画を立案し、工程を管理した。また、AtlasXにより転圧回数・地盤変形係数・締固め度・仕上がり厚さ・乾燥密度・含水比を算出し、CMSにより帳票の自動作成を行った。

表-1 使用建機一覧

建機・車両名	仕様	台数
自律バックホウ	ZX-200 (0.8 m ³)	1
自動ブルドーザ	D5K (10t級)	1
自動振動ローラ	SV514DAuto (10t級)	1
自動ダンプトラック	日野プロフィア (積載8t)	1
有人バックホウ	ZX-200 (0.8 m ³)	1
有人ダンプトラック	10,000 kg	5

使用した建機を表-1に示す。本実証施工では、自社開発の自律バックホウ・自動ブルドーザに加え、酒井重工業社製自動振動ローラ、日野自動車が開発した自動ダンプトラック計4台の自動・自律建機に加え、有人バックホウ1台および有人ダンプトラック5台の計10台の建機に対し、建機FMSから各作業指示を送り統合管理を行った。

積込み作業エリアでは、自律バックホウのみで積込みを行い、自動ダンプトラックまたは有人ダンプトラックに土砂を積載した。なお、有人バックホウは、材料の選別といった積込み作業の補助に使用した。実証施工現場は図-5に示すように、積込み作業エリアと盛土作業エリアの2カ所に分かれており、自動ダンプトラックの公道区間の走行はドライバーによる運転、場内運搬、盛土作業エリアでの荷下ろしは自律運転とした。

表-2 生産性向上の評価一覧

システム名称	機能	生産性向上効果	
		対象	内容
CMS	施工計画シミュレーション	施工管理者（元請）	・元請職員1名が20分程度で実施
	帳票自動作成	施工管理者（元請）	・労働時間ベースで日当たり約0.13人/日の省人化
AtlasX	盛土品質管理	施工管理者（元請）	・品質管理業務1回当たり1名削減
建機FMS	複数建機・車両の統合管理	施工管理者（元請）	・元請職員1名で建機・車両10台管理
現場DB	遠隔臨場・リアルタイム情報共有	施工管理者（受発注者）	・現場移動2カ所/日削減の場合、1人当たり22時間/月の業務時間削減

盛土作業エリアでは、運搬されてきた盛土材料を自動ブルドーザで敷き均した後、自動振動ローラにより締固めを行った。品質管理にはAtlasXを使用し、転圧中には、aシステムによる計測、転圧後には、自走式散乱型RIロボットおよび3Dレーザースキャナによる計測を行った。

(2) 自動化の効果

表-2に統合施工管理システムによる生産性向上の評価を示す。一般的に、土工における施工工程の検討に当たっては、元請職員、協力会社職員、職長と数名で調整をする必要があるが、CMSは条件入力から計画アウトプットまで、元請職員

1名が20分程度で実施することができた。

建機の統合管理に関しては、2カ所の現場における4台の自動建機・車両と6台の有人建機・車両を合わせた合計10台の建機・車両を、システム管理者1名で管理して自動施工を行った。3台の自動建機を使用した2022年度の無人化施工⁴⁾と比較して、1名で管制できる台数は3倍以上となった。また、自社開発機だけではなく他社開発の自動・自律建機や有人建機を建機FMSで連携させたことで、より実用的な自動施工技術による施工を行うことができた。

品質管理においては、精緻に品質管理を行うことができた。また、AtlasXで取得したデータは

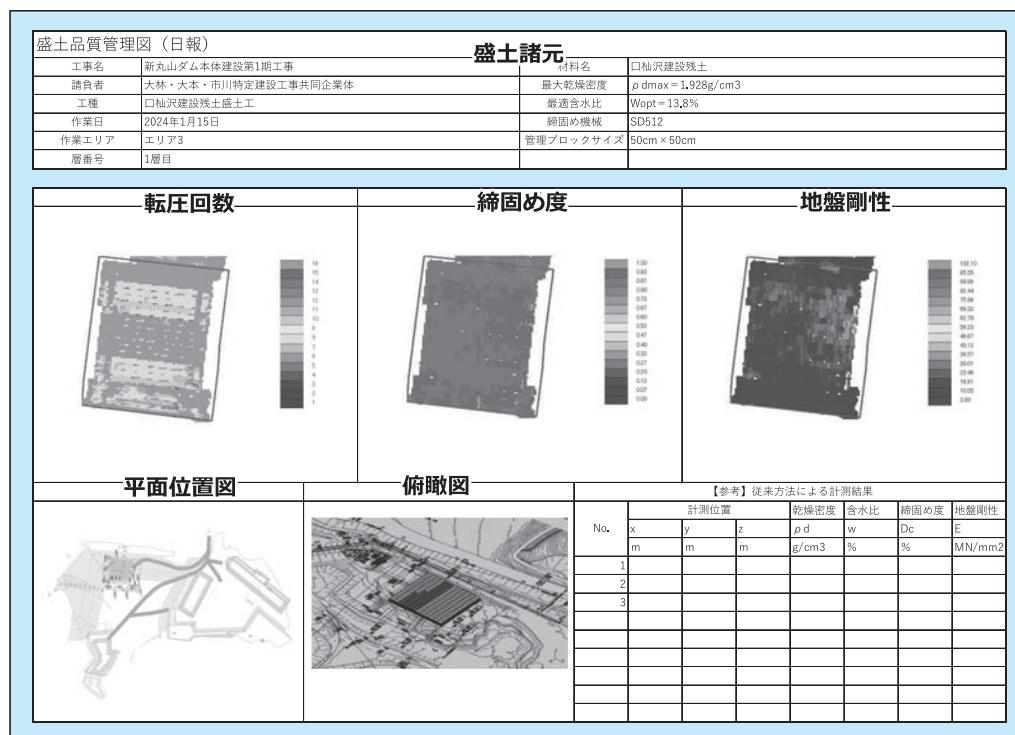


図-7 出力帳票例

リアルタイムかつ自動でデータ処理され、CMSが受け取り、図-7に示すように帳票として出力する。これにより、人的作業を0.13人/日程度削減できた。さらに、AtlasXを活用すれば、施工エリアに立ち入らずに品質管理業務を実施できることから、労働災害防止など安全性の向上に寄与することも実証できた。以上より、盛土の全体計画、品質管理の一連の作業における省人化が可能であることを確認した。

(3) 発注者の遠隔臨場

現場DBは、複数のWebカメラ映像や管理システムを一つの画面で一元的に管理することを可能とする。本実証施工では、写真-3に示すように、新丸山ダム工事事務所のDXルームにも統合施工管理システムを導入し、リアルタイムで盛土施工状況や品質管理・出来高管理帳票の確認を行った。



写真-3 新丸山ダム工事事務所のDXルーム

本現場では、新丸山ダム工事事務所（受発注者近接箇所に設置）と施工ヤード間の移動に車で片道15分程度かかるが、現場DBの活用により施工状況や品質確認を遠隔で行えるため、遠隔臨場による生産性向上につながると考えられる。仮に現場への移動が1日当たり2カ所減らせれば、60分/日・人、22時間/月・人の業務時間を削減でき、発注者および受注者双方の働き方改革への貢献が期待される。

(4) 長距離環境下での遠隔管理および遠隔操縦

自動・自律建機・車両を管理する建機FMSの活用においては、緊急で建機オペレーターを必要とした場合に、現地ではすぐに確保できないことが懸念される。そのため、建機の操作場所を現場だけでなく、自由に選択できる通信設備と管理システムを有していれば、今後の建設業界のさらなる生産性向上に寄与することができる。

そこで、本実証施工では、図-8に示すように実証現場から約150km離れた大阪府枚方市の大林組西日本ロボティクスセンター（以下、「WRC」という）から、建機FMSによる管理および緊急時を想定したバックホウおよびブルドーザの遠隔操縦も併せて実施した。

実証の結果、WRCの遠隔操縦席と建機の通信遅延は、過去に大林組が実施した遠隔施工⁵⁾における遅延目標値である、0.2秒以下（一般的に遠隔操縦に支障を与える遅延の閾値）で通信環境を

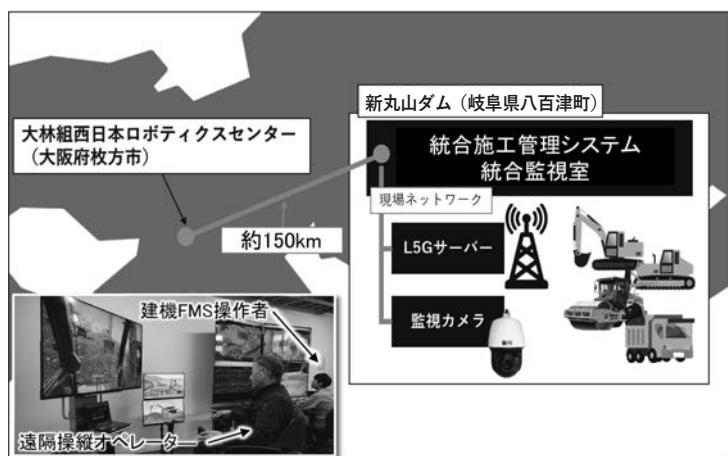


図-8 長距離環境下での遠隔操縦概要

構築した。以上により、長距離環境下での建機FMSによる作業指示の送受信やバックホウ、ブルドーザの遠隔操縦を実証することができた。

5. おわりに

本稿では、施工計画から建機の自動・自律運転管理、品質管理までを自動で行う統合施工管理システムの開発と生産性向上の評価に関して述べた。得られた知見を次に示す。

- (1) CMSにより、施工計画および工程の検討を、条件入力から計画アウトプットまで、元請1名が20分程度で実施することができた。
 - (2) 建機FMSにより、システム管理者1名で計10台の建機を統合管理することができた。また、自社開発機だけではなく他社開発の自動建機・車両や有人建機を連携させたことで、より実用的な自動施工を行うことができた。
 - (3) AtlasXを用いることにより、取得したデータはリアルタイムかつ自動でデータ処理され、CMSを介して帳票として出力することにより、人的作業を0.13人／日程度削減できた。
 - (4) 150km以上離れたWRCと新丸山ダム本体建設工事現場で、長距離環境下での建機FMSによる作業指示の送受信やバックホウ、ブルドーザの遠隔操縦が可能なことを確認した。
- 統合施工管理システムは、新丸山ダム本体建設工事で予定している自律型コンクリート打設工へ

の適用を目指し、さらなる生産性向上に向けた機能強化を図る予定である。2024年度からは、ダム堤体上部に設置したケーブルクレーンの自動運転化に着手し、コンクリート運搬作業の自動化を進めている。また、自動・自律建機も継続的に開発しており、自動・自律運転機能の向上による作業時間の短縮を果たしている。

本実証施工は、国土交通省 中部地方整備局 新丸山ダム工事事務所の関係者の皆さんに、多大なるご協力をいただきました。記してお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 松崎晃、稻川雄宣、古屋弘：新しい締固め品質管理システムの開発、大林組技術研究所報、No.86, 2022.12
- 2) 松崎晃、稻川雄宣、古屋弘：盛土工事における多点計測のロボット化とクラウドを用いた締固め統合管理手法の開発、大林組技術研究所報、No.87, 2023.12
- 3) 森直樹、古屋弘、宮内賢治：建設機械の改造が不要で着脱可能な装置による無人化施工技術の開発、熊本城崩落石撤去へ汎用遠隔操縦装置「サロゲート」の適用事例、建設機械施工、Vol.69, No.12, pp.58-63, 2017.12
- 4) 西本卓生ほか：建機フリートマネジメントシステムによる遠隔・自動・自律運転の取り組み、土木学会第78回年次学術講演会、VI-11 自動化システム(3), VI-790, 2023.9
- 5) 稲川雄宣ほか：堤体盛土でのローカル5Gを用いた複数重機連携の遠隔操縦実証実験、大林組技術研究所報、No.85, 2021