

統合管理システムによる盛土工事自動化実証施工

統合施工管理システムの開発および生産性向上の評価

岡本邦宏・西彰一・松崎晃

建設現場の生産性向上を実現するために、施工計画から、建機の自動・自律運転および品質管理の一連の管理を行う「統合施工管理システム」を開発した。統合施工管理システムの新丸山ダム本体建設工事での活用を目指し、盛土工事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。

キーワード：統合施工管理システム、CMS、建機FMS、自動施工、自動運転、省人化、生産性向上

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昭和31年に完成した丸山ダムを20.2mかさ上げして機能アップを図るダム再開発工事である。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組みを受発注者協働で行っている。

さて、生産年齢人口の減少により、技能労働者の確保が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、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、コンクリート打設において施工計画から、建機の自動・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」を開発し今後の運用を図る。そのため2023年12月には、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）の作業管理、品質管理を一気通貫で自動化し、統合管理するシステ

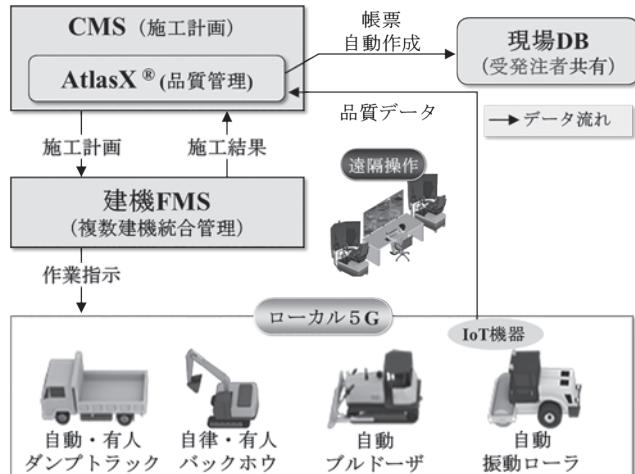


図-1 統合施工管理システム概要

ムである。システム構成は図-1に示すように全体計画を行う Construction Management System（以下、CMS）、建機の統合管理をする建機 Fleet Management System（以下、建機 FMS）と自動・有人建機、品質管理を行う AtlasX®、受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）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、CMSは、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、残工程の施工計画のシミュレーションを行うことで、施工結果を施工計画にフィードバックすることが

可能である。また、CMS は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、図一2 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。

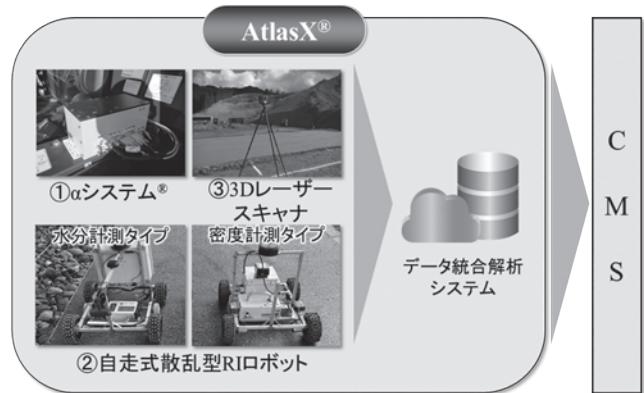
α システムは振動ローラの加速度を計測し、その周波数特性から地盤剛性を推定する。また、算出される特性値である乱れ率と乾燥密度の相関を事前に取得しておくことで、乾燥密度の推定も可能である。自走式散乱型 RI ロボットは、散乱型 RI を自走ロボットに搭載することで、自動で含水比および湿潤密度を計測する。3D レーザースキャナは、各転圧完了面の点群を取得し、仕上がり厚さを算出することができる。

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 へ送信され、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・自律運転をするものや、それを統合管理するシステムである。一方、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、自動化している。

(3) 建機 FMS

建機 FMS は、複数の建機・車両を高度に連携させ、安全対策も含めて自動施工を管理するシステムである。また、建機 FMS の特長は、接続台数に制限が無く、他社開発の自動・自律建機や有人建機も連携できるため、計画に合わせて建機の種類や数を柔軟に変更できることである。

建機 FMS の管理画面を図一3 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・自律建機の施工を行うことが可能であり、容易に操作・管理することができる。また、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、



図一2 AtlasX 概要



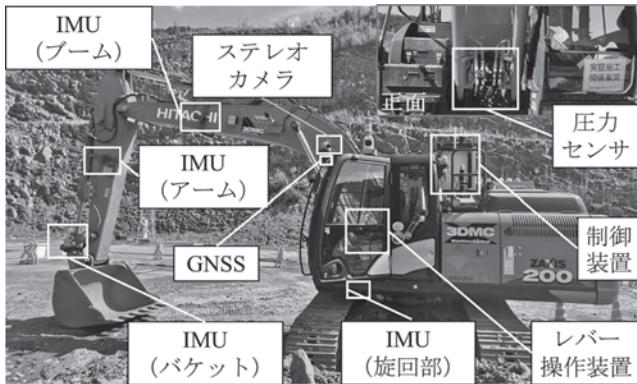
図一3 建機 FMS 管理画面

監視カメラの映像等も参考に管理を行うことができる。

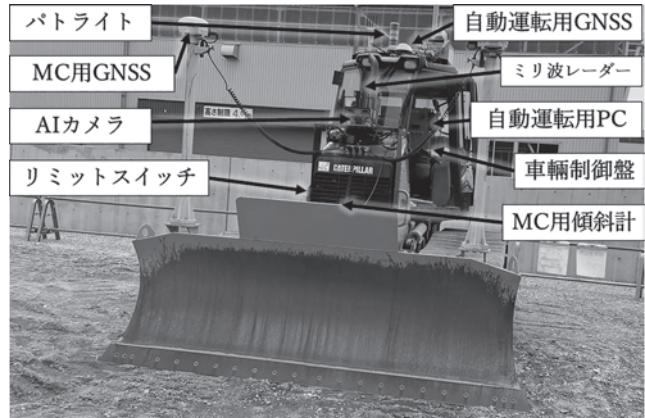
自動施工において建機の誤動作防止やフェールセーフなど安全対策が最重要課題となるが、統合施工管理システムでは、自動・自律建機自体の安全機能はもちろんのこと、図一3 に示すように建機 FMS からも非常停止ボタンひとつで、全稼働建機を停止することができる。さらに、各建機にシステムトラブルが発生した場合も想定して、自動運転を遠隔運転に切り替え得ることが可能である。また、建機の作業データは、隨時建機 FMS に集積され、任意のタイミングで施工結果データとして出力が可能であり、作業終了時に施工結果データを CMS に送信する。

(4) 自律バックホウ

自律バックホウは、土砂のダンプトラックへの積込み作業に利用した。自律運転システムは、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て運転するシステムである。機体の姿勢制御には、写真一1 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）を、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を、自己位置の取得には GNSS を、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



写真一 自律バックホウ機器構成



写真二 自動ブルドーザ機器構成

ンサの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・積込等の動作指令を伝えた。機械の制御は、シミュレーションモデル上で、事前に熟練オペレーターの掘削動作から得た操作ノウハウを、制御アルゴリズムに落とし込み、動作検証を行った。また、実証中もシミュレーションモデルを活用して、制御アルゴリズムの修正を行うことで、積込み作業を止めることなく、効率的に動作の改善を行った。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自律的に判断し、ダンプトラックへの積込み作業を行った。積込完了後、ダンプトラックに載せた積載重量と積込が完了したことを建機FMSに通知した。

(5) 自動ブルドーザ

自動ブルドーザによる敷均しは、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一に示す。建機FMSの計画グリッド中心座標に基づき、ダンプにより荷下ろしされた盛土材料の山を均一に敷き均す。ブレードの高さは、マシンコントロールを活用し、計画高通りの敷均し厚さになるようにした。また、対象の盛土材料の種類により、重機が材料を押しきれない場合がある。これに対処するために、押土時の排土板に大きな負荷がかかっただけの場合、押土中の土砂の上部を押し出して負荷を低減してから再度、押土をする動作を実装した。さらに、安全性向上の機能として、材料や障害物を検知するためのミリ波レーダーと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。利用にあ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い、接続端末が移動しても通信が切れにくい、広範囲をカバーすることができる、などの特長を活かした高速通信が可能になる。

(1) ローカル5G通信網の構築

本実証で建機は、建機FMSから作業指示を受けるとともに、自己位置やその他の施工情報を建機FMSにフィードバックする。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。遠隔操縦をする場合は、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7Mbps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必要があり最大31Mbps程度の通信速度が必要であった。

(2) ローカル5Gの有効性の検証

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5km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。

図一4に通信品質確認結果を示す。Wi-Fiは、通信速度が0～250Mbpsの間で大きくばらついている

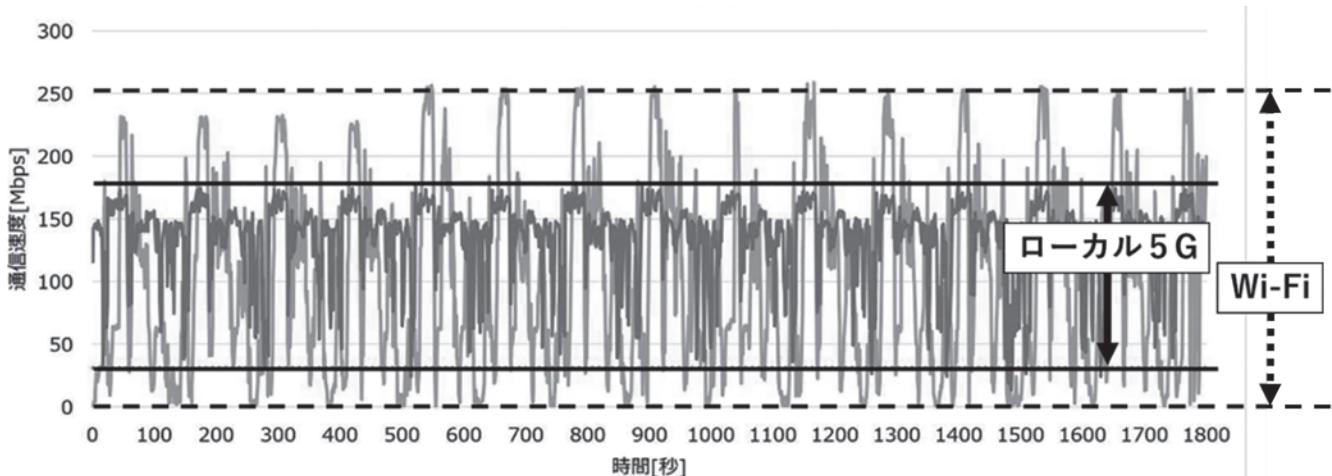


図-4 通信品質確認結果

方で、ローカル5Gは、30～180Mbpsの間で通信しております。ローカル5Gの方が、数値の変動の幅が小さいことがわかる。また、ローカル5Gは、要求性能である31Mbpsを概ね上回っているのに対し、Wi-Fiは0Mbpsを複数回にわたって記録している。建機FMSの運用にあたっては、通信が切れると建機等の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一時停止する仕様としている。したがって、通信の切れないローカル5Gでの運用が、機能面で有利であることがわかった。実際に、実証期間を通して、建機との無線通信が一度も途切れることは無く、安定した通信品質を示した。

4. 盛土自動化実証施工

統合施工管理システムは、ダムコンクリート打設への適用を目的としており、ダムコンクリート打設と同様の運搬機械・敷均し機械・転圧機械で構成される盛土工事で実証施工を実施した。

(1) 実証施工概要

統合施工管理システムの適用性を検証するために、2023年9月～12月に実証施工を実施した。実証施工の概要を図-5に示す。本実証施工では、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

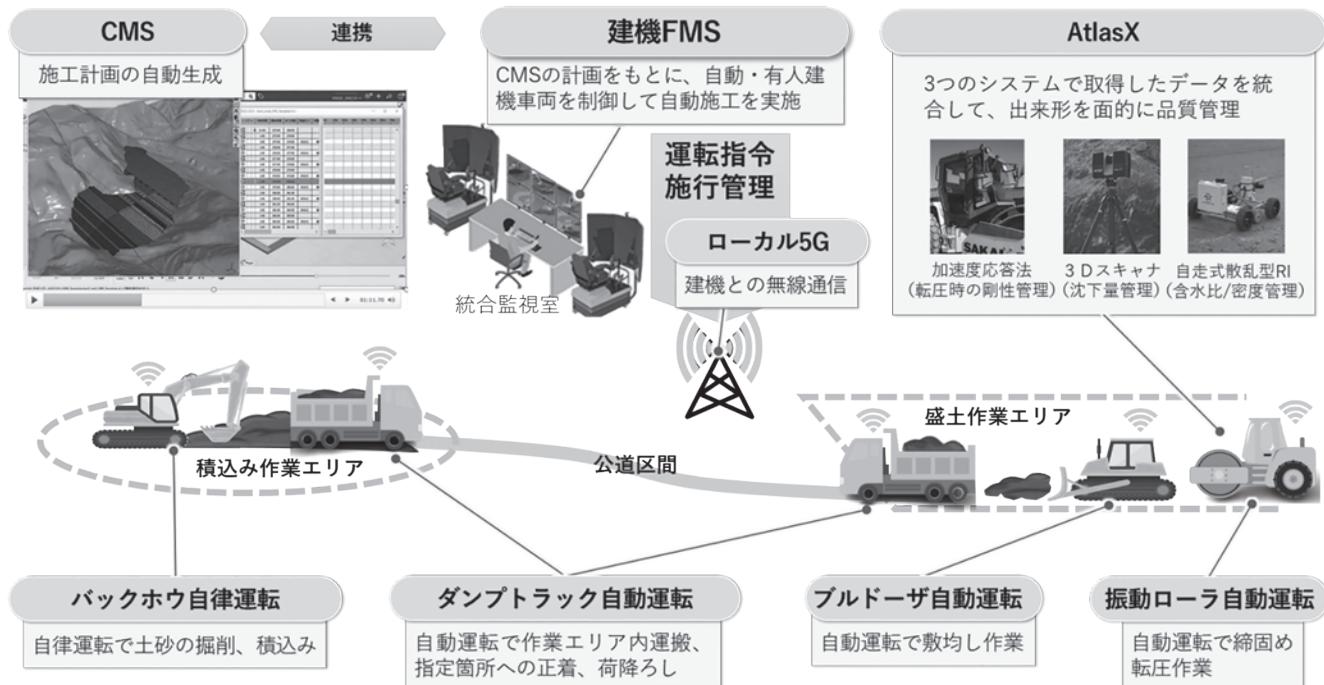


図-5 実証施工概要

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、座標情報を持つおり、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し、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。

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、日野自動車の開発品である自動ダンプトラック計4台の自動・自律建機に

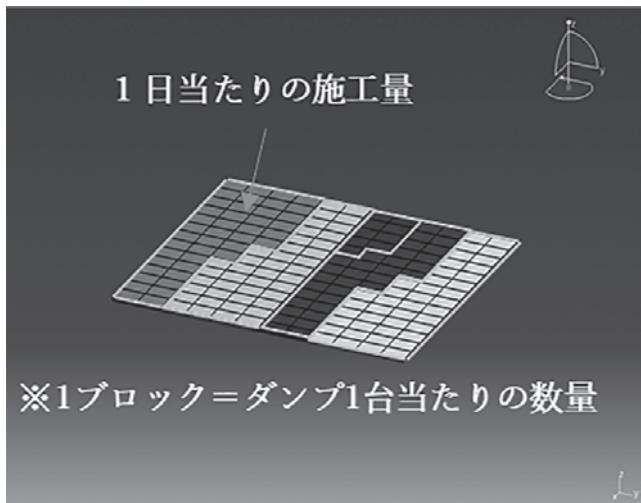


図-6 計画シミュレーション結果例

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 (10 t 級)	1
自動振動ローラ	SV514DAuto (10 t 級)	1
自動ダンプトラック	日野プロフィア (積載 8 t)	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

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。

積込み現場では、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、有人バックホウは自律バックホウを補助した。実証施工現場は図-5に示すように、盛土施工現場と積込み現場の2カ所に分かれており、自動ダンプの公道区間の走行はドライバーによる運転とした。一方、場内運搬、盛土施工現場での荷下ろしは自律運転とした。

盛土施工現場では、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。一方、CMSは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。

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で連携させて自動施工を実施できたことで、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。

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1名で建機・車両10台管理
現場ダッシュボード	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往復/日削減の場合、1人当たり22時間/月の業務時間削減*

*試算

図—7 出力帳票例

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ることなく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の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な管理を可能とする。本実証施工では、写真-3に示すように、発注者事務所の DX ルームにも同システムを導入し、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。本現場では、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確認できるため、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カ所削減できれば、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) 長距離環境下での建機 FMS による管理および遠隔操縦

自動・自律型の建機・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



写真一3 監視カメラ画面

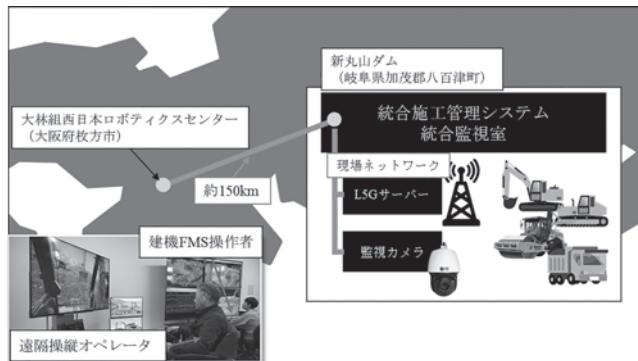


図-8 長距離環境下での遠隔操縦概要

た場合に、現地ではすぐに確保できないという懸念がある。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）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200 msec（一般的に遠隔操縦に支障を与える遅延の閾値）を下回る結果となった。以上より、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、自動・自律施工管理から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。得られた知見を以下に示す。

- 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・車両や有人建機を建機FMSで連携させて自動施工を実施できたことで、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。

③AtlasX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。

④150km以上離れた西日本ロボティクスセンター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検証を繰り返し、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。

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様に、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。

J|C|M|A

《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:2023年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、大林組研究所報、No.85、2021

【筆者紹介】

岡本 邦宏（おかもと くにひろ）
(株)大林組
西日本ロボティクスセンター
施工技術部 技術開発課
副課長



西 彰一（にし しょういち）
(株)大林組
土木本部
生産技術本部 企画部
担当部長



松崎 晃（まつざき こう）
(株)大林組
技術本部
技術研究所 地盤技術研究部
主任

