

建設現場の省人化に向けた自動施工技術の適用実験

飛鳥馬 翼・北原成郎・竹下嘉人

建設業界では人手不足と働き方改革への対応が喫緊の課題である。国土交通省が掲げる「i-Construction 2.0」の目標に基づき、施工者側も抜本的な省人化対策を講じる必要がある。筆者らは自動施工技術を導入し、フィルダムの実施工現場で実証実験を行った。本実験では、フィルダムの堤体盛土作業における「積込作業」「運搬作業」「敷均し作業」「転圧作業」の一連のサイクルを有人施工・遠隔施工・自動施工の3パターンで実施し、歩掛を調査することで労働生産性を評価した。

キーワード：省人化、無人化施工、自動施工、遠隔操作、労働生産性、運行管理システム

1. はじめに

近年、建設業界では、生産年齢人口の減少と高齢化が顕著となり、働き手不足が重大な課題となっている。さらに、2024年4月より働き方改革関連法が建設業界にも適用され、時間外労働や休日出勤に関する規制が強化されたことから、業界全体で生産性向上および働き方改革が急務となっている。また、同年4月には国土交通省が「i-Construction 2.0」¹⁾を発表し、「建設現場のオートメーション化」を掲げ、2040年度までに少なくとも3割の省人化、すなわち生産性の1.5倍向上を目標としている。この目標を達成するため、我々施工者側も抜本的な省人化対策を講じる必要がある。

「建設現場のオートメーション化」の一環として「施工のオートメーション化」が進められており、1人のオペレータが複数の建設機械を管理することで省人化が図られている。また、2024年3月には「自動施工における安全ルール Ver.1.0」²⁾が策定され、建設現場における建設機械の自動化が加速すると予測される。

筆者らは、災害復旧現場での無人化施工技術を応用し、遠隔操作式建設機械および自動制御式建設機械を組み合わせてフィルダムの盛土施工に適用することで、作業員1人当たりの生産性向上を図った。本稿では、実施工現場で実施した実証実験の概要と、その適用による効果について報告する。

2. 自動施工のコンセプト

筆者らは、自動施工のコンセプトとして、無人化施

工技術を中心とした遠隔操作と自動制御が連携する施工システムの構築を提案する。このシステムでは、遠隔操作が自動制御の基盤となっているため、自動制御に不具合が生じた際でも遠隔操作によるバックアップが可能である。また、遠隔操作を基盤として、建設機械の管理はすべて遠隔操作室内で完結し、リアルタイムで施工データを取得することにより、施工状況の見える化³⁾が容易に実現できる。

さらに、自動施工システム全体の運用を簡易化することで、オペレータが単独で操作可能なシステムを構築し、建設現場への導入を容易にすることが可能である。

「1人のオペレータが複数の建設機械の動作を管理する」ことは「遠隔操作室」で「簡易なシステム」を運用することにより実現可能である。

3. 自動制御式建設機械の導入

本稿で扱う実証実験において、Caterpillar社が開発した「Cat® Command for Compaction」⁴⁾を搭載した13t級振動ローラ（写真-1）と筆者らが開発したシステムを搭載した11t積不整地運搬車（写真-2）を導入した。

Caterpillar社のシステムは、転圧エリアや転圧回数等のオペレータの入力に基づいて自動的に締固め施工を制御し、オペレータをアシストする半自律型のシステムである。

筆者らの開発したシステムは、単独の不整地運搬車に対する自動制御技術と、車両の運行管理技術を組み合わせたシステムであり、複数の不整地運搬車の効率



写真一 13t級振動ローラ



写真二 11t積不整地運搬車

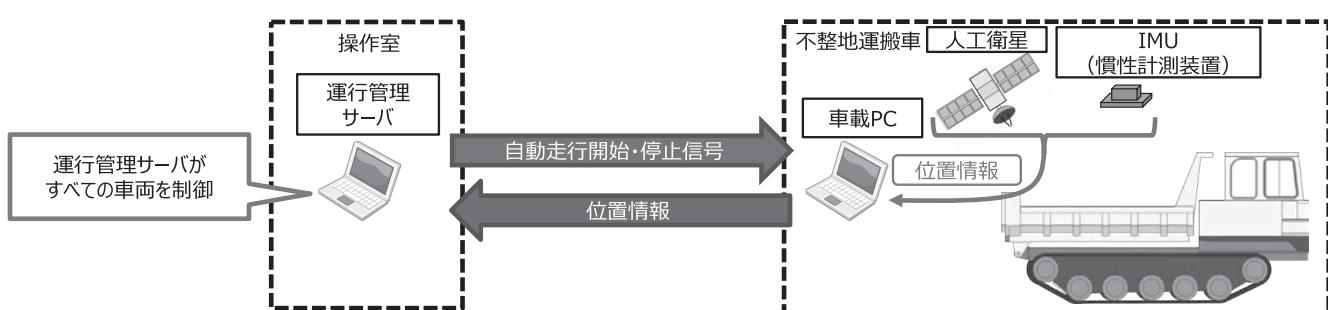
的な運行と省人化を実現する⁵⁾ (図一1)。本技術は仮想レールを用いた運行管理を行い、ティーチングプレイバック方式を採用することで、オペレータが仮想レールを自由に設定可能である。複雑に重なり合う複数の仮想レールにおいても、運行管理システムが自動的にレール切り替えを行う (図一2)。

筆者らは不整地運搬車の運行管理システムとして2つの手法を開発している。

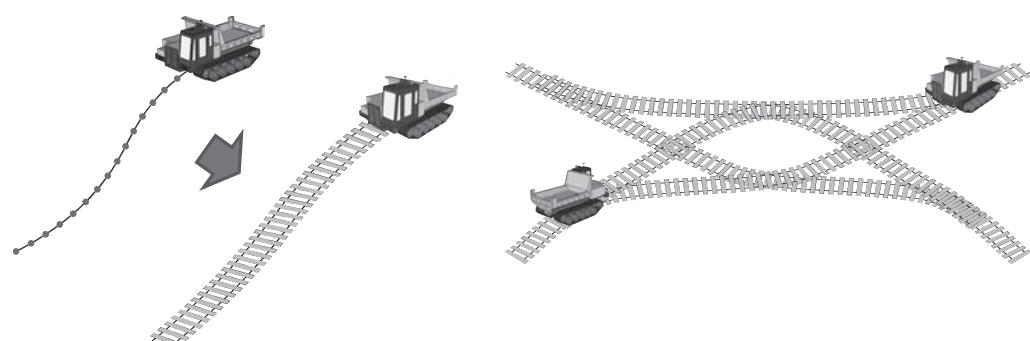
(1) AI制御システム⁵⁾

本システムでは、AI (Artificial Intelligence) が運行計画を生成することを基幹としている。AI制御システムのフローを図一3に示す。走行経路は単純な一方通行ではなく、対面通行もあれば片側交互通行も存在する。そのため、無人搬送車 (AGV = Automated Guided Vehicle) の経路計画で用いられる手法⁶⁾を応用し、すべての走行経路と車両位置をAIが解析することにより組み合わせ最適化を実装している。AIが走行経路を分析することによって、作業目標に対して時間的なトータルコストが最小となる効率的な運行計画パターンを生成し、かつ車両同士の位置情報を把握し衝突しないように安全な運行を制御する。

システム内部では走行経路と車両位置の組み合わせによる計算が行われているため、走行経路の複雑化や車両台数の増加に伴って計算量が膨大になるという課



図一1 自動制御式不整地運搬車の構成



経路保持制御は仮想レール

将来は複雑な制御が容易に実現

図二 仮想レール方式

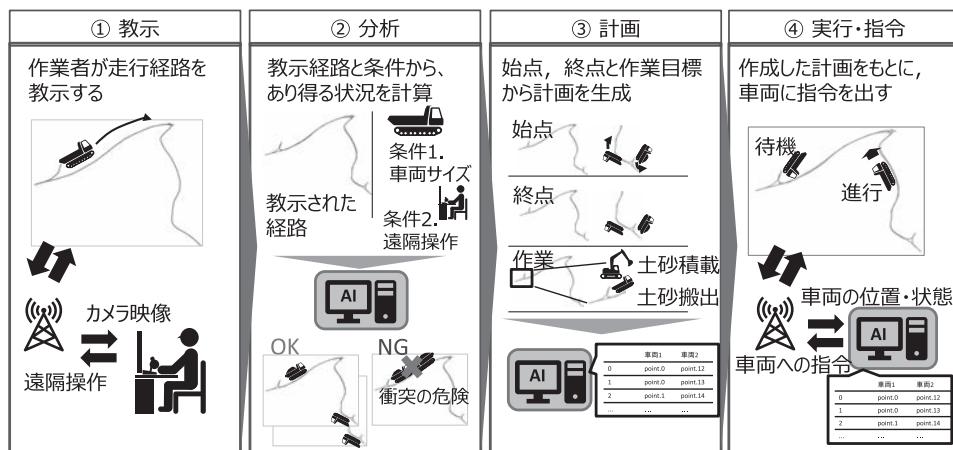


図-3 AI制御フロー

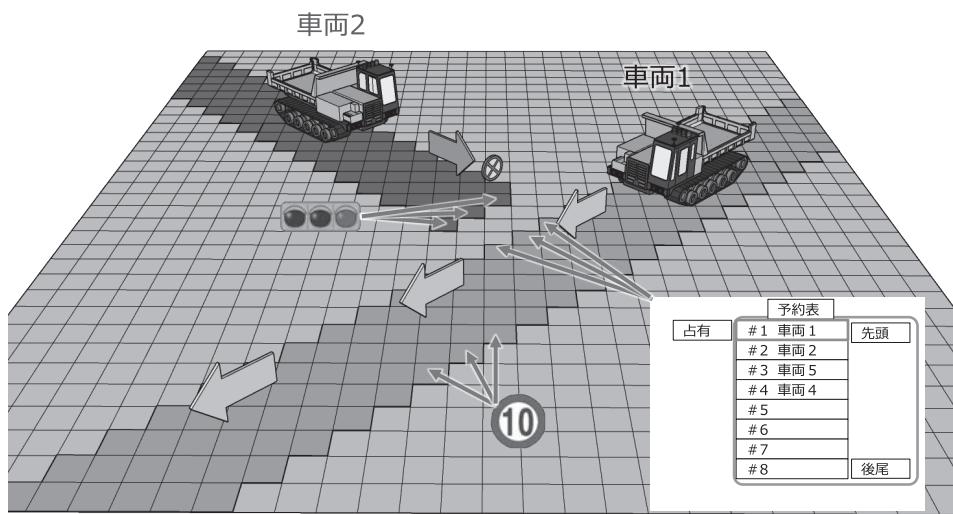


図-4 交通管理システム概念図

題がある。しかしながら、運行計画を生成するのは自動走行する前であるため、生成された運行計画パターンと実際の動作に大きな乖離が無ければ、AIが運行計画通りに車両を運行管理し、走行時の計算量を低減できる。

(2) 交通管理システム⁷⁾

本システムでは、人が信号機や道路標識を見て、認識して判断する交通システムのように、車両が仮想的な信号機や道路標識等を認識してから判断する。本システムの概念図を図-4に示す。本システムは実際の車両位置に基づいた仮想フィールド上で制御される。仮想フィールドをグリッドで離散化し、グリッド内に属性や走行指示等の情報を格納する。フィールド上を走行する車両は、グリッド内の情報を読み取り、車両自身が判断し走行する。例えば、グリッド内に信号機の属性を格納すれば進行・停止の判断となり、速度指示の属性を格納すれば速度制御が可能になる。

具体的な制御手法としては、交通管理サーバがグ

リッド内で予約表によって車両を管理している。個々の車両が進行したいグリッドに対し、交通管理サーバへグリッド情報の問合せを行う。交通管理サーバでは問合せのタイムスタンプにより、先着順に予約表を更新する。予約表の先頭にある車両がグリッド内を占有して進行が可能である。交通管理サーバは予約表を各車両へ配信し、各車両はその予約表を確認し、車両自身が進行・停止の判断をする。先頭車両の進行が完了すると、安全上の距離を考慮し予約表が更新され、次の車両が進行可能となる。

本システムは交通管理サーバがグリッド単位で属性管理をするため、グリッドの分割量によって計算量が膨大になるという課題がある。したがって、走行経路の線形性によって、効率的なグリッドの分割が求められる。

4. 実証実験の概要

本実験は、熊本県発注の大切畑地区県営農地等災害復

旧事業第1号工事にて実施された。工事の概要を表-1に示す。フィルダム堤体の盛土作業において、①バックホウ1台による積込作業、②不整地運搬車2台による運搬作業、③ブルドーザ1台による敷均し作業、④振動ローラ1台による転圧作業のサイクルを、「有人施工」「無人化施工(遠隔操作)」(以下、無人施工とする)、「無人化施工+自動施工」(以下、自動施工とする)の3パターンで実施し、歩掛を調査した。

実証実験エリアの平面図および斜め俯瞰図をそれぞれ図-5および図-6に示す。図-5において、不整地運搬車の走行経路は往復で約500mである。図-5の丸で示す①と②で車両が擦れ違えるように走行経路を拡幅している(以下、離合場所とする)。また、本

実験は2023年10月下旬から11月上旬にかけて実施されたため、2024年3月に策定された「自動施工における安全ルールVer.1.0」には準拠していないが、安全確保の観点から図-6のように無人化施工エリアを区分し、立入禁止措置を講じて実験を実施した。

実験における3パターンの作業内容と作業員の割り当てを表-2に示す。有人施工では、不整地運搬車の荷下ろし場所や振動ローラの転圧作業を誘導するため、誘導員1名が必要であった。一方、無人施工および自動施工では、建設機械の周囲状況を把握するため、現場に複数の固定カメラを設置し、カメラを制御するオペレータが求められた。無人施工では、敷均し作業を行うブルドーザの動きに合わせて固定カメラを制御するオペレータと、運搬作業を行う不整地運搬車の動きに合わせて固定カメラを制御するオペレータの合計2名が必要であった。これに対し、自動施工では不整地運搬車が自動制御となるため、ブルドーザの動きに合わせて固定カメラを制御するオペレータ1名に省人化することが可能となった。

5. 実証実験の結果

(1) 労働生産性

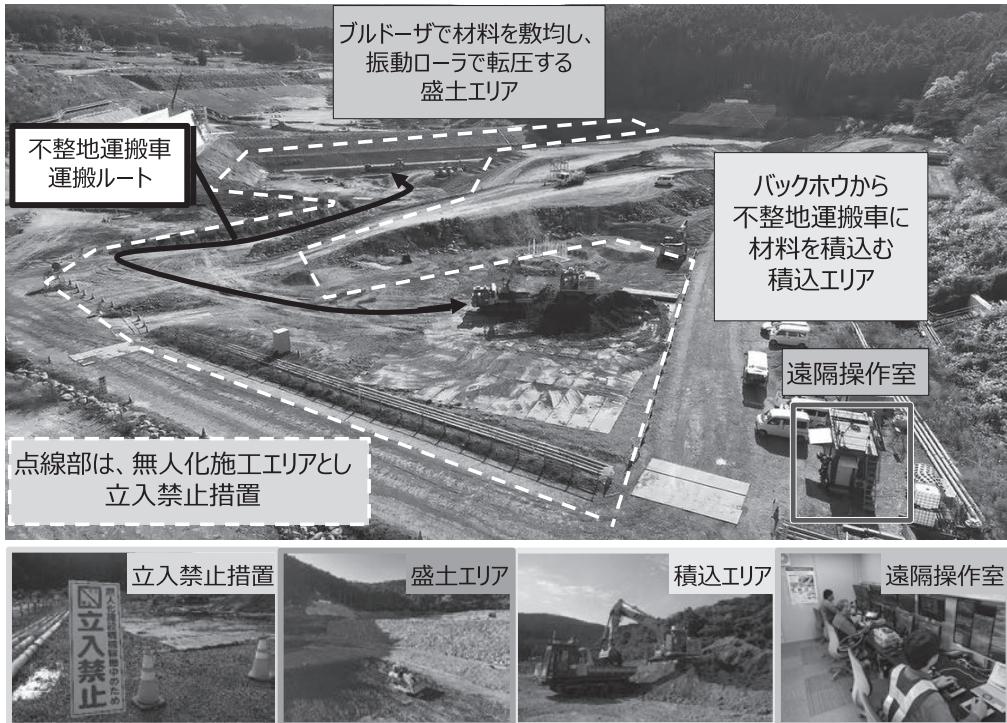
実験結果を表-3に示す。施工土量はドローンに

表-1 工事概要

工事名	大切畠地区県営農地等災害復旧事業第1号工事
発注者	熊本県農林水産部
工事場所	熊本県阿蘇郡西原村小森地内
ダム諸元	
型式	前面遮水ゾーン型フィルダム
堤高	28.5 m
堤長	237.7 m
堤体積	457,000 m ³
総貯水量	600,000 m ³



図-5 実験エリア平面図



図一六 実験エリア斜め俯瞰図

表一2 作業人員の割り当て

	有人施工	無人施工	自動施工
0.8 m ³ 級バックホウ操作	1人	1人	1人
11 t 積不整地運搬車操作 (2台)	2人	2人	0人 (自動)
16 t 級ブルドーザ操作	1人	1人	1人
13 t 級振動ローラ操作	1人	1人	0人 (自動)
誘導員	1人	0人	0人
カメラオペレータ	0人	2人	1人
合計人員	6人	7人	3人

表一3 実験結果

実験パターン	有人施工	無人施工	自動施工
作業人員 [人]	6	7	3
施工土量 [m ³] ※仕上土量	278.0	133.1	120.4
施工時間 [h]	7.86	5.45	5.92
歩掛 [m ³ /h]	35.4	24.4	20.3
労働生産性 [m ³ /人・h]	5.9	3.5	6.8

より空中写真測量を用いて算出し、施工時間はバックホウが1台目の不整地運搬車への積込作業を開始してから、振動ローラが転圧作業を終了するまでの時間とした。

施工土量に着目すると、有人施工が最も多く、自動施工が最も少ない結果となった。また、歩掛については、有人施工が $35.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、無人施工が $24.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、自

動施工が $20.3 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。この結果、無人施工は有人施工の約 0.69 倍、自動施工は約 0.57 倍の歩掛となった。一般的に無人化施工の施工能力は、有人施工の算定式に無人化施工係数 0.6 を掛けた値で算出されることが多い⁸⁾。本実験においても、無人施工および自動施工の歩掛が無人化施工係数に近い値となることが確認された。

次に労働生産性に着目すると、有人施工が $5.9 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{h}$ であるのに対し、自動施工は $6.8 \text{ m}^3/\text{人} \cdot \text{h}$ となり、自動施工は有人施工に対して約 1.15 倍の生産性向上を示した。一方、無人施工は作業人員が最も多く、施工土量も有人施工より少ないと、労働生産性は最も低い結果となった。

(2) 不整地運搬車の運行管理システムの比較

開発した2つの運行管理システムに関して評価した。なお、交通管理システムにおけるグリッド幅は

1 m として実施した。

両システムの課題として計算量が膨大になるという課題があったが、本実験では走行経路が複雑ではなかったため、どちらのシステムにおいてもスタッフが発生することなく制御が実現された。

不整地運搬車の作業能力について、車両1台が1時間に運搬できる土量を示した箱ひげ図を図-7に示す。AI制御システムと交通管理システムの作業能力の中央値はそれぞれ $21.4 \text{ m}^3/\text{h}$ および $21.6 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、中央値には差が認められなかった。一方、ばらつき幅は AI 制御システムが $6.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 、交通管理システムが $1.1 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、AI 制御システムの方がばらつきの大きい結果となった。ばらつきの要因として AI 制御システムはコストを最小限に抑えるように制御しており、バックホウやブルドーザの作業状況や段取り替えに合わせて制御した。一方、交通管理システムは車両の予約を入れるタイミングが毎回同様であったため、AI 制御システムの方がばらつきの大きい結果になったと考えられる。

図-5における離合場所①および②における離合比率の箱ひげ図を図-8および図-9に示す。図-8および図-9から、AI制御システムでは場所②での離合が多く、交通管理システムでは場所①での離合が多いことが確認された。ばらつき幅についても、AI制御システムは約 21%，交通管理システムは約 12% であり、AI制御システムの方がばらつきの大きい結果を示している。

以上のことから、交通管理システムは AI 制御システムよりも精度良く制御が行われていることがわかる。また、燃費についても、AI 制御システムは 109 m/L 、交通管理システムは 115 m/L を示し、交通管理システムによる精度の高い制御が燃費効率の向上に繋がったと考えられる。

(3) 転圧作業の効率性

振動ローラには転圧管理システムが搭載されており、転圧回数ごとに色分け表示されるため、転圧不足の発生を防ぐ管理が可能である。実験時に転圧した盛土材の規定転圧回数は6回とされ、6回以上の転圧については同色での表示が可能であるが、効率性の評価を目的として、6回以上の転圧回数についても色分け表示を行った。ただし、搭載システムの仕様上、色分けは最大9回までとし、9回以上の転圧は同色表示とした。

図-10に示す転圧回数比率のグラフにおいて、規定転圧回数が6回である本工事では、ラップ率を考慮

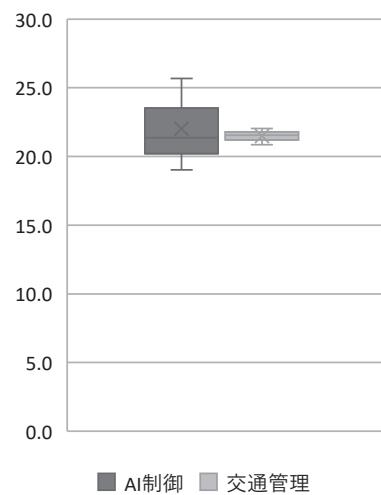


図-7 不整地運搬車の作業能力 [m^3/h]

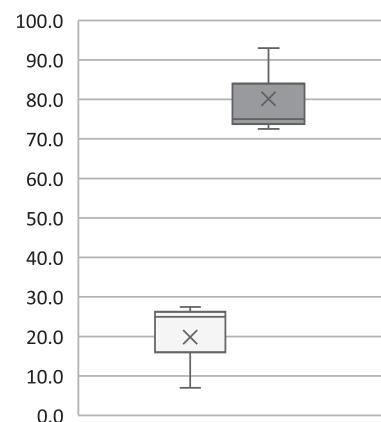


図-8 AI制御の離合比率 [%]

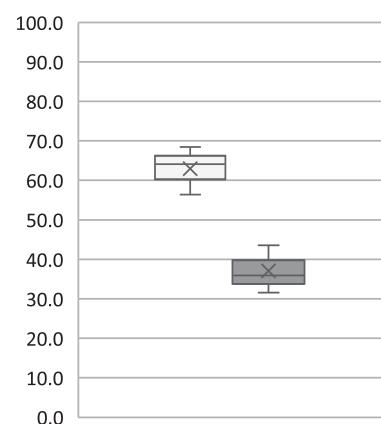


図-9 交通管理の離合比率 [%]

すると理想的には6回転圧と12回転圧が多く含まれることが望ましい。具体的には、「6回」および「9回以上」のカラーマップが多く、「7回」や「8回」のカラーマップが少なくなることが理想とされる。転圧回

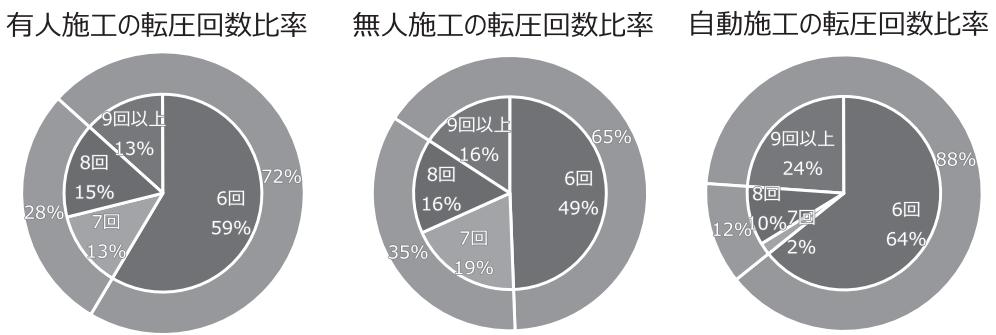


図-10 転圧回数比率

数の分布において「6回・9回以上」の割合は、有人施工で72%, 無人施工で65%, 自動施工で88%となり、自動施工は有人施工に対して約1.2倍、無人施工に対して約1.4倍の効率化が達成された。

6. 本実証実験のまとめ

- ・フィルダムの堤体盛土工事に無人施工および自動施工を導入した。
- ・施工土量は有人施工が最も多く、自動施工が最も少ない結果となった。
- ・無人施工と自動施工の歩掛が有人施工に対して無人化施工係数に近い値となっていることを確認できた。
- ・自動施工は有人施工に対して、約1.15倍の生産性向上となった。
- ・不整地運搬車の運行管理システムに関して、交通管理システムの方がAI制御システムより精度が良い結果となった。
- ・転圧作業に関して、自動施工は有人施工に対して、約1.2倍の効率化が達成された。

7. おわりに

本稿では、実施工現場における自動施工の適用とその効果について評価を行った。労働生産性については、有人施工に対して約1.15倍の向上が確認されたが、国土交通省が掲げる1.5倍の目標には達しなかった。この結果を踏まえ、今後は一層効率的な自動制御システムの開発を進めていく所存である。

最後に、現場実証をさせていただいた発注者の熊本県農林水産部、無人化施工のオペレータ支援をいただいた共栄機械工事㈱、技術支援をいただいた(株)ファテックと(同)エコボット、その他関係者の方々に深く御礼申し上げる。

《参考文献》

- 1) 国土交通省、「i-Construction 2.0」を策定しました、国土交通省 HP, https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html, 2024年10月18日参照
- 2) 建設機械施工の自動化・自律化協議会、建設機械施工の自動化・遠隔化技術、国土交通省 HP, https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/sosei_constplan_tk_000049.html, 2024年10月18日参照
- 3) 飛鳥馬翼・北原成郎・天下井哲生、無人化施工の発展の歴史と今後の展望、土木施工, Vol.63, No.6, pp.118-121, 2022
- 4) Caterpillar Inc., Command for Compaction, Caterpillar Inc. HP, https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/command-command/102740.html, 2024年10月18日参照
- 5) 飛鳥馬翼・北原成郎・畠本浩伸、AI制御による不整地運搬車の自動走行技術に関する研究-AIによる運行管理システムの評価-, 第20回建設ロボットシンポジウム論文集, 2022
- 6) Zheng Zhang・Peijiang Yuan, Conflict-free Route Planning of Automated Guided Vehicles Based on Conflict Classification, 2017 IEEE International Conference on SMC, 2017
- 7) 飛鳥馬翼・畠本浩伸・北原成郎、交通管理システムを適用した自動走行技術のF/S, 令和5年度土木学会全国大会, VI-11, 建設ロボット(2), 2023
- 8) (一財)先端建設技術センター、「遠隔操縦における作業効率向上に資する技術(無線通信技術、映像処理技術)」の要求性能に対する意見募集を行います 参考資料-2, (一財)先端建設技術センター HP, https://actec.or.jp/netis_qs_thema2018/pdf/08.pdf, 2024年10月18日参照

[筆者紹介]

飛鳥馬 翼 (あすま つばさ)

(株)熊谷組

土木事業本部 土木技術統括部 土木 DX 推進部
DX 推進グループ

副長



北原 成郎 (きたはら しげお)

(株)熊谷組

土木事業本部 土木技術統括部 土木 DX 推進部
部長



竹下 嘉人 (たけした よしと)

(株)熊谷組

九州支店 土木事業部土木部

