

盛土施工現場における自動施工の評価

株式会社熊谷組
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組

○ 飛鳥馬 翼
北原 成郎
竹下 嘉人

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、業界全体にとって重大な課題となっている。加えて、2024年4月から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対する規制が強化されたことから、生産性向上および働き方改革が急務となっている。さらに、2024年4月に国土交通省が発表した「i-Construction 2.0」⁽¹⁾においては、「建設現場のオートメーション化」が掲げられ、2040年度までに省人化を少なくとも3割、すなわち生産性の1.5倍向上を目標とされている。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の動作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ことが予想される。

筆者らは、災害復旧現場で活用されている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複合的に活用することで、フィルダムの盛土施工に適用し、作業員1人当たりの生産性向上を図った。本稿では、実施工現場における実証実験概要とその適用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核に据え、遠隔操作と自動制御が連携した施工システムを構築することを提案する。自動制御のベースが遠隔操作にあるため、自動制御に不具合が発生した場合でも、遠隔操作によるバックアップが可能である。また、遠隔操作をベースとすることで、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で、施工状況の見える化⁽³⁾も容易となる。

さらに、自動施工のシステム全体の運用を簡素化することで、オペレータのみで操作可能なシステムを構築し、建設現場への導入をより容易に実現できると考える。

「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「簡素なシステム」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

本稿における実証実験では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-1)と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-2)を導入した。筆者らが開発したシステムは3-1節で説明する。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締固め施工を自動制御し、オペレータをアシストする半自律型のシステムである。

3.1 自動制御式不整地運搬車

本技術は、単独の不整地運搬車に対する自動制御技術と、AIによる制御を組み合わせたものであり、複数台の不整地運搬車の効率的な運行と省人化を実現する。⁽⁵⁾(図-1)



写真-1 11t 積不整地運搬車



写真-2 13t 級振動ローラ

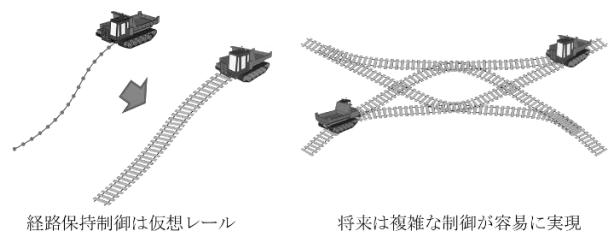


図-2 仮想レール方式

整したり、障害物を回避したりすることがティーチングデータとなり、そのデータに基づいてプレイバック制御が行われる。この方式により、センサに依存することなく安全な自動制御を実現する。また、熟練オペレータがティーチングすることによって、走行精度が向上し、生産性の向上も期待できる。

(2)自動制御と AI 制御の独立システム

本技術では、自動制御車両群を AI が制御するが、自動制御と AI 制御はそれぞれが独立したシステムとなっている。本技術では自動走行する不整地運搬車を使用しているが、同様の制御システムを持つ他の車両群でも、本技術の AI による制御を適用することが可能である。

(3)安全監視の重層化

自動制御と AI 制御の各システムによる安全監視を利用することで、いずれかの安全監視に不具合が発生した場合でも、もう一方の安全監視で確実に車両を停止させることが可能である。

4. 実証実験概要

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 号工事において実施された。工事概要を表-1 に示す。フィルダムの堤体盛土作業において、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 台による敷均作業、④振動ローラ 1 台による転圧作業の一連のサイクルを実施し、「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 パターンにおいて歩掛を調査した。

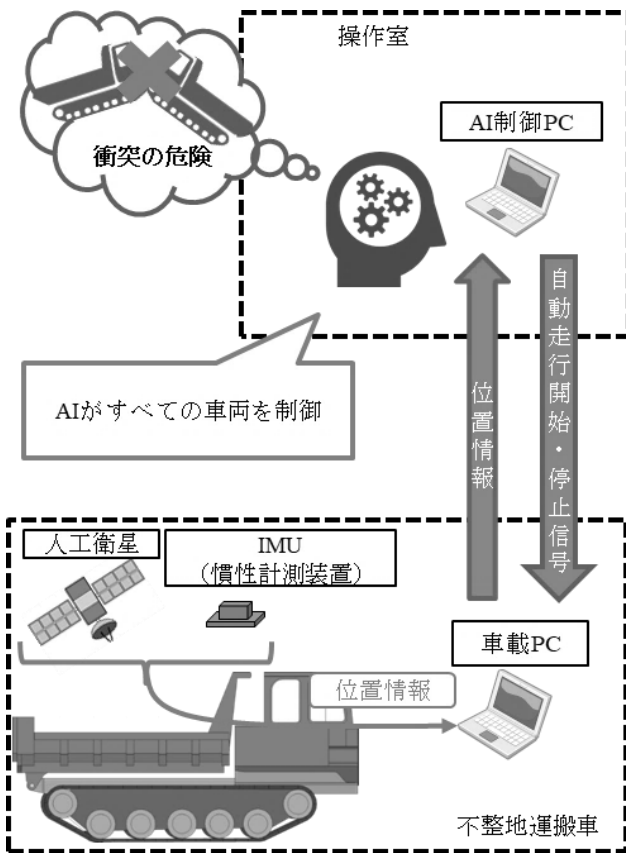


図-1 自動制御式不整地運搬車の構成

仮想レールによる運行管理を実施しており、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することが可能である。複数の仮想レールが複雑に重なり合っている場合でも、AI が運行管理を行い、レールの切り替えも自動的に行われる。(図-2)

本技術の特長を下記に示す。

(1)ティーチングプレイバック方式の採用

本技術は、車両にティーチングさせることにより、現場環境に適応した経路生成が容易に可能である。自動制御を行う前に、走行させたい経路を遠隔操作することで、地面の凹凸に応じて速度を調

表-1 工事概要

工事名	大切畑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	28.5m
堤長	237.7m
堤体積	457,000m ³
総貯水量	600,000m ³



図-3 実験エリア平面図



図-4 実験エリア斜め俯瞰図

実証実験エリアの平面図と斜め俯瞰図をそれぞれ図-3、図-4に示す。図-3において不整地運搬車の走行経路延長は往復で約500mである。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」に準拠していないが、無人化施工を実施するにあたり、安全確保の観点から図-4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た上で実験を実施した。

実験の3パターンにおける作業内容と作業人員の割り当てを表-2に示す。有人施工においては、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に、誘導員が1名必要であった。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に、現場に複数の固定カメラを配置し、それを制御するカメラオペレータが求められる。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

表-2 作業人員の割り当て

	有人施工	無人施工	自動施工
0.8m ³ 級 バックホウ 操作	1人	1人	1人
11t積 不整地運搬車 操作(2台)	2人	2人	0人(自動)
16t級 ブルドーザ 操作	1人	1人	1人
13t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-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

動施工では、不整地運搬車が自動制御となるため、カメラオペレータは不要となり、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. 実証実験結果

5.1 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よる空中写真測量を用いて算出した。施工時間は、バックホウが1台目の不整地運搬車に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、歩掛に関しては、有人施工が35.4m³/h、無人施工が24.4m³/h、自動施工が20.3m³/hであった。これにより、無人施工は有人施工に対して約0.69倍、自動施工は約0.57倍となった。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。⁶⁾したがって、本実験において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に落ち込んでいることが確認された。

次に、労働生産性に着目すると、有人施工は5.9 m³/人・h、自動施工は6.8 m³/人・hであり、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、無人施工の労働生産性は、作業人員が最も多く、施工土量も有人施工より少ないため、最も低い結果となった。

5.2 転圧作業の効率性

振動ローラには転圧管理システムを搭載しており、各転圧回数を色分け表示することで、転圧不足が発生しないよう管理している。本工事における規定転圧回数は6回となっており、6回以上の転圧についてはすべて同色とすることができるが、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を行い表示した。ただし、導入している転圧管理システムの仕様により、色分けは最大9回までとし、9回以上の転圧はすべて同色で表示した。

実験パターンにおける転圧回数比率のグラフを図-5に示す。本工事における規定転圧回数が6回であることから、理想的な転圧分布としては、ラップ率を考慮すると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」と「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である。転圧回数の分布において、「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。

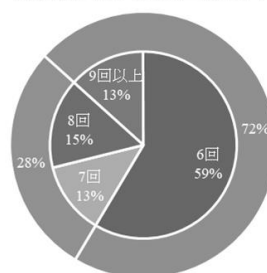
6. 本実験のまとめ

- ・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に落ち込んで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。
- ・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。

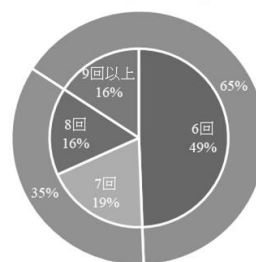
7. おわりに

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を評価した。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ものの、国土交通省が目標とする1.5倍には達していない。この結果を踏まえ、今後はさらなる効率的な自

有人施工の転圧回数比率



無人施工の転圧回数比率



自動施工の転圧回数比率

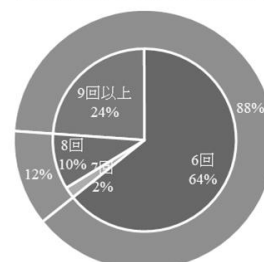


図-5 転圧回数比率

動制御システムを開発していく所存である。

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戴いた共栄機械工事(株)、技術支援を戴いた(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ます。

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8月30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8月30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8月30日参照
- 5) 飛鳥馬翼・北原成郎・畑本浩伸：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) (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8月30日参照