

深層強化学習を用いたブルドーザまき出し作業の現場適用

鹿島建設(株) 正会員 ○田島大輔 黒沼 出 小熊 正 中川和歩
竹内章浩 石津諒太 浜本研一 出石陽一 三浦 悟

1. はじめに

当社は施工現場の省人化，生産性，安全性の課題を解決するために，建設機械の自動化技術を核とした次世代の自動化施工システム¹⁾（図-1）の研究開発を進めており，2020年から成瀬ダム（台形CSGダム）の堤体CSG打設で本施工システムを全面的に適用している²⁾（写真-1）。本施工システムでは，自動ブルドーザ（以下，自動BDとする）は，ダンプトラック（以下，DTとする）によって荷下ろしされた材料を設定された領域内にまき出し作業（写真-2）を実施している。これまでに，自動BDにおいて，まき出し作業の自動化の機能・性能向上を目的として，AI技術の1つである深層強化学習（以下，DRLとする）を用いて自動BDの最適経路（最少押土数で，まき出し領域内への材料量が最大になる経路）を自律的に探索する研究開発^{3) 4) 5)}を実施し，材料の位置や形状に応じた最適経路を生成できる機能を開発した。今回，成瀬ダムの堤体CSG打設に向けて，DRLを用いた自動BDまき出し作業を開発し，現場適用した。本稿では，その内容について報告する。



図-1 次世代の自動化施工システムの概念図



写真-1 成瀬ダムでの施工状況

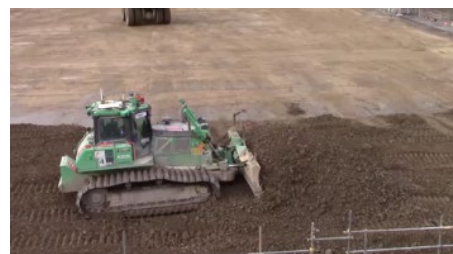


写真-2 ブルドーザのまき出し作業

2. 成瀬ダムの堤体CSG打設

成瀬ダムの堤体CSG打設では，1リフト75cmに対して，1層25cmを3回に分けて施工する（図-2）。図-2からもわかるように1層目から2層目，3層目になるにしたがってDT経路の段差が高くなるとともに，CSG材（以下，材料とする）上の轍の深さが大きくなる。このため，計画された荷下ろし位置にDTを精度よく位置決めすることは非常に難しい作業となる。このような条件下で材料の荷下ろし位置精度を確保する方法としては，荷下ろし位置の範囲にDTが入れるまで位置決めを繰り返すことが考えられるが，作業時間が大きくなるなどの問題が生じてしまう。そこで，荷下ろし位置が多少外れても次の工程に影響しない作業方法を検討した。今回，DRLを適用し，材料の荷下ろし位置誤差（計画された荷下ろし位置からの誤差）に応じたまき出し作業を可能とする自動運転方法を開発し，成瀬ダムで適用した。3章以下は，その内容について報告する。

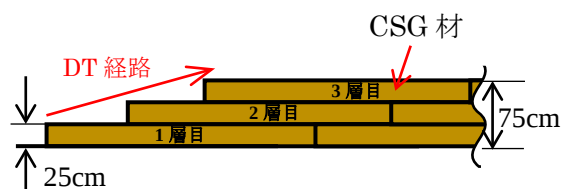


図-2 成瀬ダム堤体での1リフト分のCSG打設

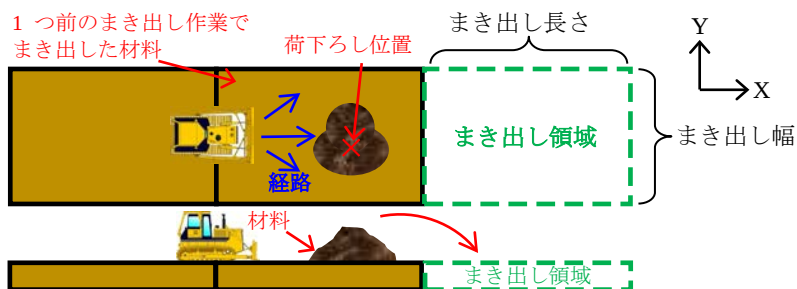


図-3 強化学習に適用したまき出し作業

3. 成瀬ダムでのまき出し作業へのDRLの適用

図-3に成瀬ダムで実施している自動BDによる材料のまき出し作業の模式図を示す。図-3より，自動BD
キーワード 自動化建設機械，ブルドーザ，まき出し作業，AI，深層強化学習，シミュレータ

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-485-1111

は、まき出された材料上に荷下ろしされた材料を所定のまき出し領域にまき出す作業を実施している。今回、このまき出し作業に対して DRL を適用した。DRL は行動の結果の良さを表す値である報酬の合計を最大化するように、行動の方策を学習していく。そのため、今回適用する DRL では、行動を自動 BD の動作（経路）とし、報酬を自動 BD が所定の領域内へまき出した材料量としてそれぞれ設定した。

4. DRL モデルの構築

DRL モデルを構築するための計算には、まき出し作業をコンピュータ上で再現できるシミュレータ⁶⁾を用いた。高い汎化性能を持った DRL モデルを構築するために、実際のまき出し作業では変化すると想定される荷下ろし位置をパラメータとして、DRL の計算を実施した。その際、計算に用いた DRL のアルゴリズムは、米国 OpenAI が考案した PPO (Proximal Policy Optimization)⁷⁾ である。最終的に、構築した DRL モデルは、現場適用できるように既存の自動化施工マネジメントシステムに組み込んだ（図-4）。

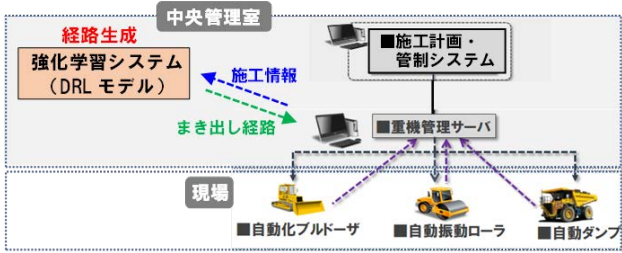


図-4 自動化施工マネジメントシステムと DRL モデル



写真-3 DT によって荷下ろしされた材料

5. 実施内容と結果

本章では、成瀬ダムで実施した DRL を用いたまき出し作業の内容と結果について報告する。今回、3 章で述べたようにまき出された材料上に DT によって荷下ろしされた材料（写真-3）を所定のまき出し領域にまき出す作業に DRL を適用した。この時に実施した材料の荷下ろし位置誤差を表-1 に示す。DRL によるまき出し作業では、表-1 に示した材料の荷下ろし位置誤差（最大約 100cm）に対しても、高い充填率（まき出し領域に対するまき出された材料の割合）での材料のまき出しを実現し、それまでの出来形と同等の品質であることを確認した（写真-4）。さらに、経路の最適化を実施したことでまき出し作業（押土数）の削減を図り、まき出し作業時間を約 20%削減した。

表-1 材料の荷下ろし位置誤差

荷下ろし位置誤差 (計画値から) X 方向(m)	-0.62～0.92
荷下ろし位置誤差 (計画値から) Y 方向(m)	-0.57～0.70



写真-4 DRL によるまき出し作業

6. まとめ

本稿では、DRL を用いた材料の荷下ろし位置誤差に応じたまき出し作業を可能とする自動運転方法の開発内容と現場適用した結果について報告した。DRL を用いてまき出し作業を最適化したことで、材料の荷下ろし位置誤差に対しても、それまでの出来形と同等の品質とまき出し作業の生産性向上を確認した。今後は、DRL を用いたまき出し作業システムの適用範囲の拡大を成瀬ダムにおいて進め、自動化施工システムの更なる省人化、生産性、安全性の向上に貢献していく。

参考文献

1)三浦悟:次世代建設生産システム A⁴CSEL[®]の適用, 土木施工, VOL62 No.1, 2021 Jan. 2)菅井貴洋ほか:自動化施工システムの台形 CSG ダム工事への適用(その 2), 土木学会第 75 回年次講演会, VI-53, 2022. 3)田島大輔ほか:深層強化学習を用いたブルドーザのまき出し作業における最適経路の探索, 土木学会第 74 回年次講演会, VI-345, 2019. 4) 田島大輔ほか:ブルドーザのまき出し作業における深層強化学習の適用, 土木学会第 75 回年次講演会, VI-1134, 2020. 5) 田島大輔ほか:作業の効率化と安全性の向上を目的としたブルドーザまき出し作業への深層強化学習の適用, 土木学会第 76 回年次講演会, VI-207, 2021. 6) 浜本研一ほか:ブルドーザ撒出し自動化における作業シミュレータの開発, 土木学第 71 回年次講演会, VI-080, 2016. 7) <https://openai.com/blog/openai-baselines-ppo/> (2023 年 3 月現在)