

26. ニューマチックケーソン工法における施工管理システムの開発

施工管理補助機能とケーソンショベルの自動化

オリエンタル白石株式会社
オリエンタル白石株式会社
株式会社 DeepX

○ 根岸 直人
岩崎 晃久
片岡 知泰

1. はじめに

建設業においては少子高齢化による労働力不足や後進育成に十分な人員を割けないなどの課題に加え、時間外労働の上限規制への対応を迫られている。この状況への対応策の1つとして建設機械の自動化が昨今盛んに進められている^{1) 2)}。ニューマチックケーソン工法においても上記の状況に加え、本工法特有の高気圧環境下での掘削作業や進捗管理を行う必要があり、減圧症の発症可能性の低減や生産性向上が求められている。掘削作業は高気圧環境下に入らずとも地上からケーソンショベル（以下、ショベル）を遠隔操縦化することで安全性の確保と生産性を向上させた。掘削作業と進捗管理における安全性や生産性を多方面から向上させるため、著者らは本工法における日々の進捗管理の簡便化と、ショベルの自動運転を行うデジタルツインシステムを開発した。

本論文では、開発したシステムの機能を施工管理補助機能と自動運転機能に分けて紹介し、それら機能の性能を実験施設と実現場にて評価した結果を報告する。

2. 施工管理システム

本システムは図-1 のようにショベルに搭載したLiDAR と各関節のセンサの情報からケーソン作業室内の地盤高低状況と各ショベルの位置姿勢をリアルタイムに3D 可視化して現場職員に提示するデジタルツインシステムである。本章では、本システムが有する施工管理補助機能と自動運転機能についてそれぞれ述べる。

2.1 施工管理補助機能

施工管理補助機能は現場職員の日々の進捗管理の簡便化や、日毎の掘削作業を周知する際に作業員との意識共有を視覚的に可能とする機能である。

施工管理補助機能として下記の機能を有す。

- ・ ケーソン作業室内の地盤高低状況とセンサ搭載ショベルの位置姿勢を3D で可視化。
- ・ 再現した地盤は等高線によって色分け、または設定した標高以上の地盤をハイライト表示。
- ・ ケーソン作業室を俯瞰した地盤高低画像を出力。
- ・ 掘り残し土の面積とケーソン断面積の比である開口率³⁾の算出。

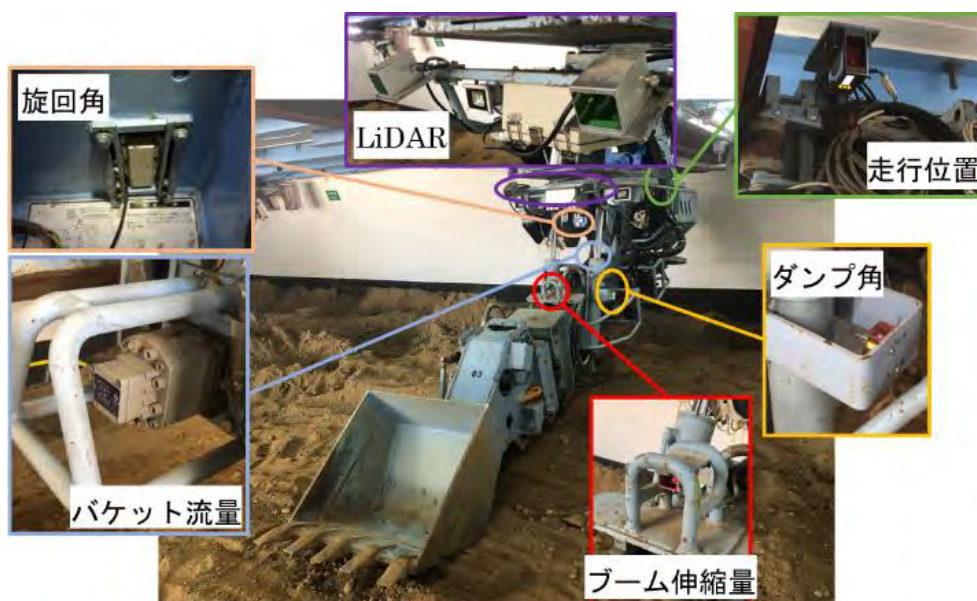


図-1 各種センサを搭載したショベル

上記機能により、現場職員は日報の管理項目である掘り残し土の計測と開口率の算出のためケーソン作業室内に入室し計測することや作業室天井に設置されたカメラ画像から推定することなくこれら数値の算出が可能となる。また、日毎の掘削作業を作業員と打ち合わせをする際、高低状況を含めた地盤状況が 3D で可視化されていることにより、具体的な指示出しや、作業内容の共有が容易となる。(図-2、3)

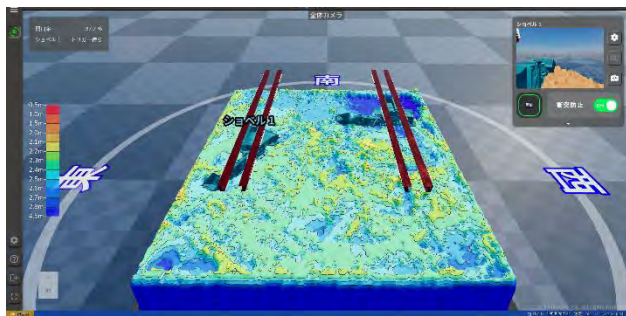


図-2 3D可視化画面：地盤を色分け等高線表示



図-3 3D可視化画面：指定標高以上の地盤をハイライト表示

2.2 自動運転機能

自動運転機能は、現場職員が任意のショベルに掘削領域・排土領域を設定することで、掘削・運搬・排土作業を自動化する機能である。掘削の難易度が高い箇所は人間が担当することにより、現場で使用するショベル台数に対し操縦する人間の数を減らせることで、現場生産性の向上を企図した機能である。

自動運転機能として下記の機能を有す。

- ・ ショベルごとの掘削領域・排土領域の指定。
- ・ 指定した領域を設定深度まで自動掘削。
- ・ 指定した領域への自動排土。
- ・ 自動運転中のショベル同士やケーソン作業室内構造物との衝突検知・自動停止。

現場職員は図-4 のように 3D 可視化画面から自

動運転をさせたい任意のショベルを選択し、個別に掘削領域と排土領域を設定することができる。

自動運転中のショベルは設定された掘削領域を掘削し、設定された排土領域へ移動して排土するという一連の動作を繰り返し実行する。掘削動作では、LiDAR で計測した点群をもとに、掘削土量が多くなるようにブームやバケットの動作を計画する。締め固まった原地盤でショベルの出力が不足する（油圧のリリーフが立つ）場合は、より浅く地盤に貫入するように自動で掘削動作が再計画される。掘削領域内の盤高さが一定の割合で設定深度を満たす場合、もしくは排土領域内の標高が一定の割合でしきい値を超える（自動排土が困難）場合は自動運転を一時停止して動作保留状態に移行する。

衝突検知・自動停止機能は、自動運転による事故・破損を防ぐために、各自動運転ショベルの位置・姿勢を管理する機能である。予め設定するしきい値を下回る距離まで自動運転中のショベルが接近すると、3D 可視化画面上に警告アラートが表示され、そこから更に接近を続けた場合はショベルが自動で停止する。停止後は現場職員の手動操作で作業に復帰する。

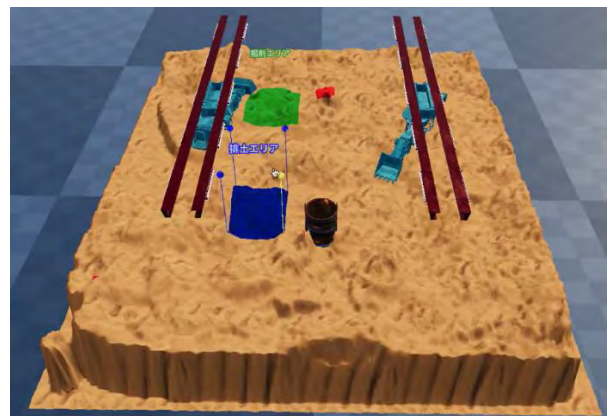


図-4 掘削・排土領域指定操作

3. システムの実証実験

本システムの施工管理補助機能と自動運転機能の性能評価を実験施設と圧気環境下である実現場の 2 拠点にて実施した。本章では、実験施設における施工管理補助機能・自動運転機能の実験、実現場における施工管理補助機能の実験について、それぞれ結果を述べる。

3.1 実験施設での実証実験

3.1.1 施工管理補助機能の性能評価

施工管理補助機能では地盤の計測精度と開口率の算出精度の性能評価を行った。

地盤の計測評価では図-5 のように実験施設の地盤に穴と残土山を形成し、再現された 3D 可視化画

面にて算出された地盤標高と比較した。穴と残土山の実測標高と 3D 可視化画面の計測標高の誤差は平均して 10cm 以内であった。

次に、開口率の算出精度の性能評価では実験施設内にブルーシートを設置することで掘り残し土を模擬し、開口率 100%, 50%, 25% の 3 ケースを評価した。このうち開口率 25% のケース試験時の様子を写真-1 に示す。上記 3 ケースにおいて算出された開口率はそれぞれ 95%, 48.4%, 27.4% であり、最大 5% 程度の誤差を含む精度で開口率を算出できた。

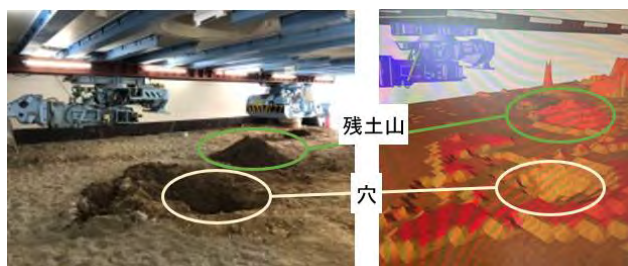


図-5 残土山と穴を実験施設（左）に形成した際に再現された3D（右）



写真-1 開口率 25%試験環境

3.1.2 自動運転機能の性能評価

自動運転機能の評価試験における項目を下記に 4 点示す。これらの項目の組合せにより計 13 ケースの試験において、自動運転後の実際に掘削された掘削実績領域と掘削実績深度の精度を検証した。

- ・ 自動運転ショベル台数: 1 台 or 2 台
- ・ ショベルごとの掘削領域と排土領域の位置 (面積は $1.5 \times 1.5 \text{m}^2$)
- ・ 掘削深度の設定値
- ・ 掘削対象: ケーソン作業室天井から 2.0m 高さの地盤 or 1.5m 高さの残土山

試験結果として、13 ケースの掘削実績領域と掘削実績深度および掘削完了を判断しショベルが停止するまでの時間のそれぞれの平均を表-1 に総括

する。

結果として、ケーソン作業室天井から 2.0m の地盤においては指定の掘削深度 2.3m に対して平均 2.38m, 1.5m の残土山においては指定の掘削深度 2.3m に対して平均 2.32m での掘削をそれぞれ達成した。図-6 に自動運転による掘削後の地盤状況の 1 例を示す。本例では、 $1.5 \times 1.5 \text{m}^2$ の掘削領域に高さ 2.0m の地盤が形成された環境に対して $1.8 \times 2.59 \text{m}^2$ の掘削実績領域であり、指定の掘削深度 2.3m に対して 2.29m の掘削深度であった。また、本試験中は衝突検知・自動停止機能を実行しており、試験中に 2 台の自動運転ショベルが停止した際は衝突せずに自動で停止した。

表-1 自動掘削結果

	2.0m 地盤	1.5m 残土山
掘削実績領域	$2.31 \times 2.31 \text{m}^2$	$2.14 \times 2.14 \text{m}^2$
掘削実績深度	2.38m	2.32m
平均時間	28min	29min

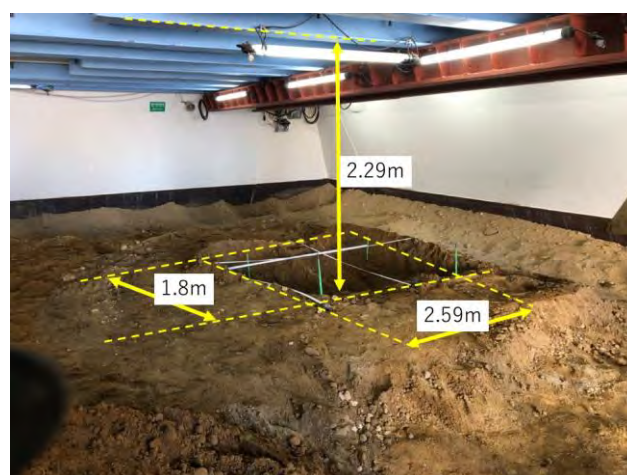


図-6 自動運転後の実験施設地盤

3.2 実現場での実証実験

実現場では、円形ケーソン内部に設置されたショベル 8 台の内 2 台にセンサ類を搭載し、周辺地盤の計測・可視化を行った。図-7 に、地盤形状を計測・再現した 3D 可視化画面とケーソン作業室天井に設置したカメラによる同じ位置の様子をそれぞれ示す。センサを搭載していないショベルを地盤として表示している箇所が一部あるが、概ね実際の地盤と同様の計測ができていることがわかる。地盤の実測と本システムによる計測では数 cm 程度の誤差精度であった。また、試験時の計画開口率 80% に対して、システムで算出された開口率は 74% であった。



図-7 現場環境における地盤計測(左)と 3D 可視化画面(右)

4. 洗い出された課題・今後の展望

ニューマチックケーソン工法における安全性と生産性の向上を目的に、施工管理補助および自動運転機能を有する施工管理システムを開発した。

実験施設と実現場の両環境において地盤の高低計測と開口率の算出機能を試行し、地盤高さ±10cm 程度、開口率 5%程度の精度で計測することができた。また自動運転機能の試行を実験施設において実施し、指定した盤高さに対して 10cm 以下の精度での掘削を達成した。このようにショベルによる土砂の掘削と仮置場への排土という土砂の定点間移動が自動化できた。

今後の施工管理システムにおける自動運転機能への追加機能として、掘削した土砂の排土先として土砂を集積する機器であるアースバケットも含めた、アースバケットへの自動積み込みの開発に取り組む予定である。また、衝突検知機能についても対象を人間による遠隔操縦中のショベルにも広げる他、自動停止後のショベルが作業復帰可能な位置まで自動で移動する機能の開発に取り組む予定である。

自動運転による掘削の作業時間について、今後は生産性の向上のため作業時間の短縮を図る。改善項目として、ショベルの動作速度の向上と動作計画の処理時間の短縮が挙げられる。システム開発中である現在は、アースバケットへの自動積み込みや遠隔操縦中のショベルとの衝突検知・自動停止といった追加機能の実装を優先すべく、自動運転中の動作速度の向上は長期的な対応課題とする。また動作計画の処理時間についてはプログラムの最適化による改善余地があるため、今後の開発の中で適宜高速化される。

実現場環境での実証実験の際に発生した課題として、遠隔操縦に与えるネットワーク負荷が挙げられる。現場作業員による遠隔掘削中に本システムを起動したところ、数分でセンサを搭載したショベル 2 台の円滑な遠隔操縦が困難になった。システムを停止することで通信状況が改善されたことから、点群情報などシステムが扱うデータの通

信負荷が原因であると考えられる。本課題については、システム導入時に使用する無線機材の性能に留意したい。

本システムの開発と実験施設・実現場での実証実験にあたっては多方面の関係者各位の協力を得た。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Hiroshi YAMAMOTO, et al. : Development of the Autonomous Hydraulic Excavator Prototype Using 3-D Information for Motion Planning and Control, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.48 No.8, pp488-497, 2012
- 2) Akira KAMEI, et al. : A Study on Autonomous Operation System of Caisson Shovels in High Air Pressure and Narrow Underground Space, The 4th ICDES, September 17-19, 2017
- 3) 日本圧気技術協会 : 大型・大深度地下構造物ケーソン設計マニュアル