

シールド工場の施工自動化技術「AI Transform Shield®」の開発

センシング技術と連携した管理システムの概要

DEVELOPMENT OF THE AI Transform shield®,
A CONSTRUCTION AUTOMATION TECHNIQUE FOR SHIELDING WORK

Summary of the management system linked with sensing technology

山崎 友誉*¹, 田中 宏典*²

Tomotaka YAMAZAKI, Hirofumi TANAKA

In recent years, the development of AI technology has been promoted for the purpose of improving work efficiency, reducing labor, and quality and safety management in shield construction. Construction management for shield construction requires the know-how of skilled engineers to make appropriate decisions based on vast amounts of digitized data in accordance with changing conditions. In order to solve this problem, we have developed a management system that achieves automatic operation of shielding machines using AI.

In this paper, we describe this management system and each elemental technology that is indispensable for practical application.

Keywords: AI, Shield Method, Excavation Management, Automatic Surveying, Tail Clearance

AI, シールド, 掘進管理, 自動測量, テールクリアランス

1. はじめに

社会課題である労働人口の減少を背景に、ICT等を活用した生産性の向上が加速度的に進むなか、シールド工事においても作業の効率化や省人化、品質・安全管理の向上を目的として、AI (Artificial Intelligence: 人工知能)を導入した技術の開発が進められている。

従来の施工では既に機械化が進んでいるため、省人化を進めることは容易ではない。またシールド工事は、掘進中の推力や切羽土圧等の掘進データのほかに、坑内測量データ、セグメント計測データ、裏込め材注入データ等の数値化されたデータが数多くあり、全てのデータを網羅して状況に応じた適切な管理を行うには熟練技術者のノウハウが必要となってくる。そのため単なる省人化だけでなく、熟練技術者不足にも対応した技術が求められる。

そこで当社は、上記課題に対応するためAIを用いてシールド機の自動運転を実現するAI Transform Shield®(以下、本システムと記述)を開発した。

2. 本システムの概要

本システムは、過去の掘進管理データと土質データをひも付け、蓄積して、AIを用いて現地の条件や状況に合わせた最適な掘進方法を導き出し、シールド機に指示を送り運転制御までを自動化するものである。自動測量等の様々なセンシング技術と合わせることで、状況の変化にもリアルタイムに対応が可能となる。

本システムを導入することで、膨大な情報の処理を短時間で正確に行い、熟練技術者に頼らず施工条件や状況

に応じた最適な掘進管理及び線形管理を実行できる。

本システムの特徴を以下に示す(図1)。

- ① 測量データや機械データ等を土質データと紐付けて、教師データとして蓄積する。
- ② AIにより現在の掘削対象断面と適合する過去データを検索し、そのときのジャッキ選択、切羽圧、カッタートルク等の掘進管理データを抽出する。
- ③ 自動測量データからシールド機の位置や姿勢の情報を常に把握し、②の抽出データを参照してAIが最適な掘進指示(ジャッキ選択等)をシールド機に送る。
- ④ 全国の稼働中および過去のシールド現場の膨大な掘進管理データを一元管理してクラウド上に蓄積し、教師データとして効率よく学習させることで、AIの精度向上を促進する。

3. 要素技術の開発

本システムを活かすには、リアルタイムにシールド機の位置・姿勢を把握することが前提であり、自動測量等のセンシング技術の活用が不可欠である。そのため、これまでに以下の要素技術の開発を行っている。

3.1 坑内自動測量システム

既往の自動測量技術は、坑内のセグメントに自動追尾トータルステーションを設置し、後方の基準点と前方のシールド機内に設けた複数のターゲットを測量する。その結果を専用のプログラムで処理し、掘進中のシールド機の位置を把握しながら掘進を行っている。しかしこの方法では、例えば曲線掘進時は徐々にシールド機内のターゲットが視準できなくなるため、ト

* 1 戸田建設(株)土木メカテック部

* 2 戸田建設(株)技術研究所

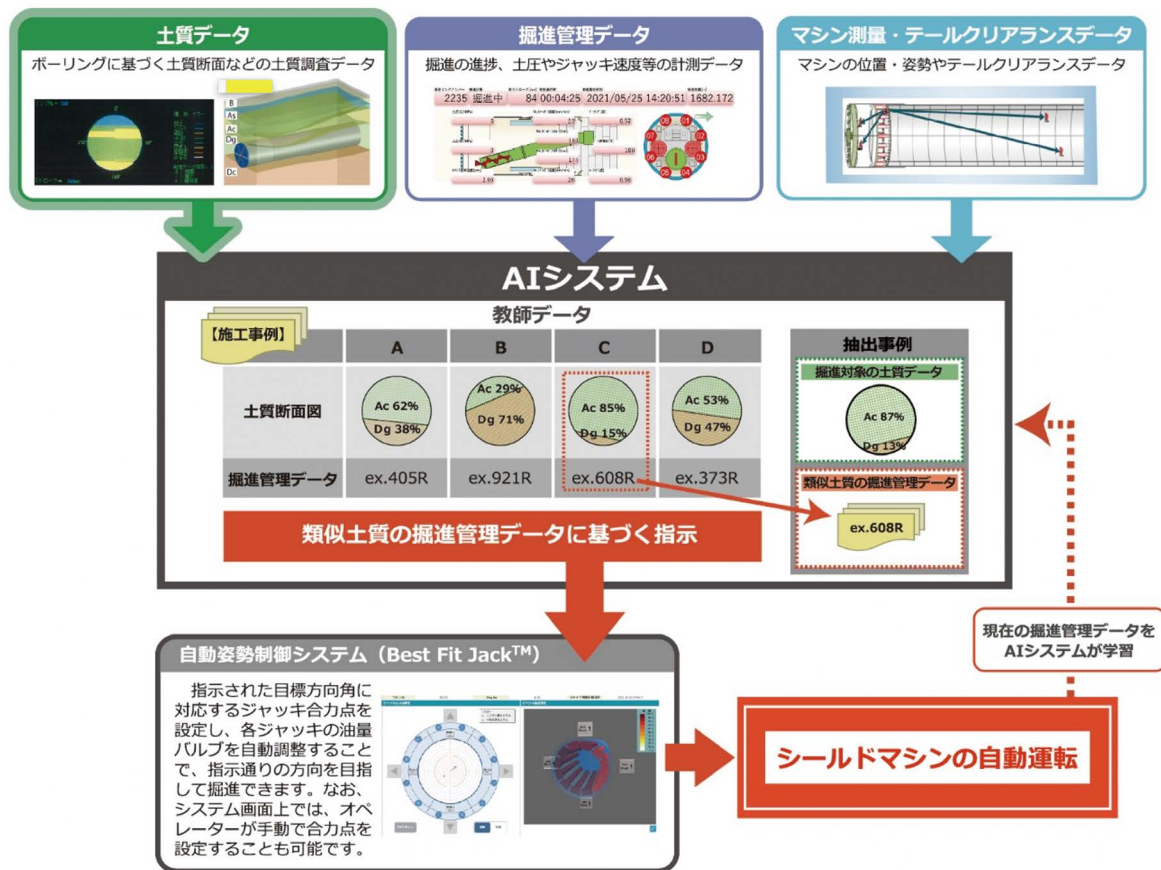


図1 AI Transform Shield®のイメージ

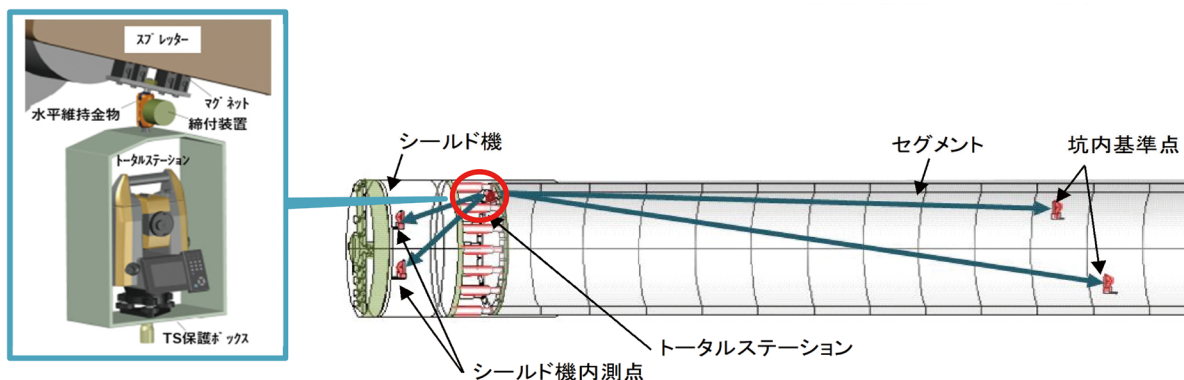


図2 シールド坑内自動測量システムイメージ図

タルステーションを都度移設しなければならない。また、トンネル坑内が狭い場合は、運搬台車の走行に支障となるためトータルステーションの設置ができない等の課題があった。

そこでこれらの課題を解決するため、シールド断面の大きさに応じて大口径用と中小口径用の新たな自動測量システムを開発した。

(1) 大口径シールドへの対応

大口径シールドに対応した自動測量システムでは、

自動追尾トータルステーションをシールド機内に配置して測量する方法を採用することにより、前述の課題を解決した。掘進中セグメントと密着して動かないシールドジャッキ端部のスプレッダーに注目し、このスプレッダーにトータルステーションを設置して測量可能な技術を開発した(図2)。

本技術の特徴は、以下のとおりである。

- ①トータルステーションは、専用の台座を用いてシールドジャッキ端部のスプレッダーにぶら下げた状態で取



写真1 坑内自動測量システム



写真2 自動測量状況

り付ける(写真1)。これにより、施工中に盛り替える必要がない。

- ②トータルステーションを収納する保護ボックスは、水平維持金物により水平を維持し、シールド機のローリング、ピッチングによる傾きの影響を抑制する。
- ③掘進開始時、スプレッダーとセグメントが密着して一定の圧力がかかった状態で締付装置をロックし、トータルステーションによる測量を自動で開始する。
- ④掘進中は、一定頻度で坑内基準点とシールド機内のターゲットを測量し、シールド機の位置を測定する。
- ⑤シールド掘進完了後、セグメント組立時はトータルステーションの測量を停止する。

この大口径対応型は、現場での実証にて所定の計測精度を確認しており、課題への対応を見据えて既に実用化レベルに至っている。適用条件は、セグメント内径6m以上のシールド工事を想定している。

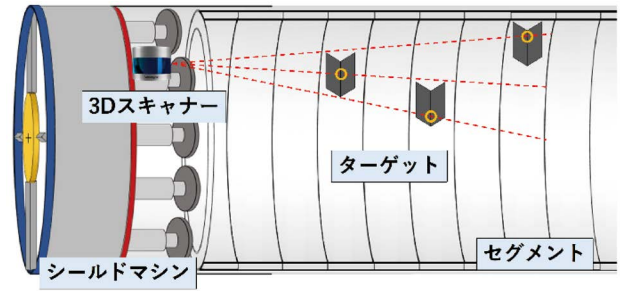


図3 3Dスキャナーによる自動測量

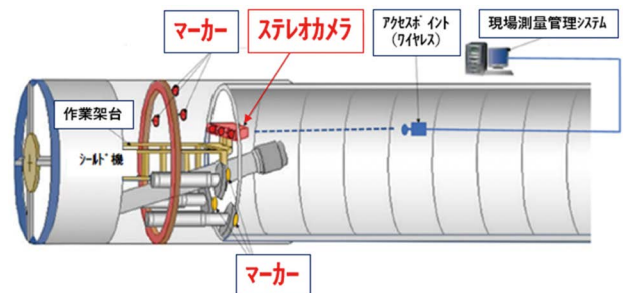


図4 ステレオカメラによる自動測量

(2) 中小口径シールドへの対応

自動追尾型トータルステーションが使用できる条件は、比較的トンネル断面が大きい場合(6m以上)に限られる。それよりも小さい断面ではトータルステーションの設置自体が難しいため、既往の自動測量技術が適用できない。

そのため、中小口径シールド工事においても適用可能な自動測量技術として、3Dスキャナーやステレオカメラを活用した新たな方法の開発を進めている(図3, 4)。

これらの技術は、現在、現場での実証段階にあり、計測精度の向上を図っている(写真3)。

3.2 自動テールクリアランス計測システム

シールド工事では、特に急曲線施工においてシールドテール部とセグメントとの接触を防ぐために、適正なテールクリアランス(図5)を確保することが重要となる。このテールクリアランスの計測は鋼製巻尺を用いて行うことが一般的で、1リング施工するごとに複数個所を測定する必要があり、手間を要している。既往の計測技術としては、角度センサーによる接触型などがあるが、セグメントとの衝突による破損や装置の汚れにより計測不能となることがあり、実用性に課題があった。

そこで、カメラとレーザー光を利用した非接触型の自動計測装置を開発した。接触や汚れを受けにくい場所に設置が可能で、シールド掘進中でも安定した計測が可能となる。

本計測装置は、高さ150mm、幅100mm、奥行き150mm

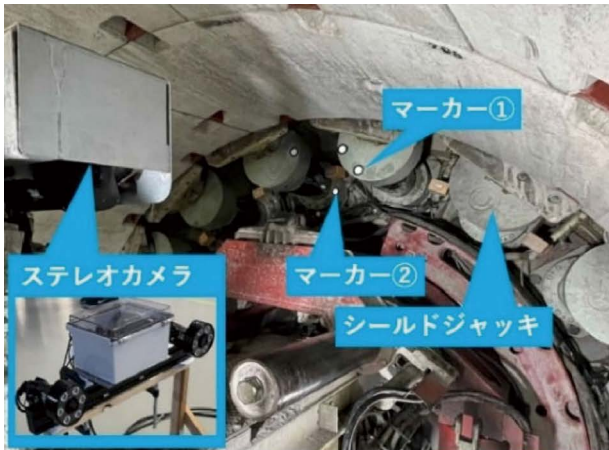


写真3 ステレオカメラ自動測量状況

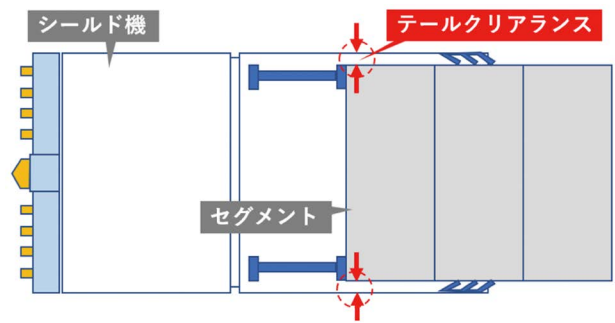


図5 テールクリアランス



図6 テールクリアランス計測イメージ図

であり、テールクリアランス部を撮影するカメラとレーザー照射装置で構成される。カメラには一般的なWEBカメラ（有効画素数：約200万画素，撮影距離：30cm～無限遠）を，レーザー照射装置には小型レーザーモジュール（LD 素子波長：635nm，出力：クラス2相当，1mW 以下）を使用した。図6に本計測装置の計測イメージを示す。

本計測装置の測量方法は以下のとおりである。

- ①レーザー照射装置から，測定対象となる箇所（切羽側テールクリアランス部）にレーザー光を照射し，レーザーが照射された状態をカメラで撮影する。
- ②画像処理により，シールド機のスキンプレート内側とセグメント端部に映し出したレーザー光が途切れた空間から，切羽側テールクリアランス部の隙間（クリアランス量）を算出する。
- ③計測装置は3箇所を設置し，それぞれの算出結果を演算処理することにより，1リングあたり8箇所のテールクリアランスを算出する。

本技術は，既に当社のシールド工事現場に導入しており，±3mmの計測精度で連続した計測が実施できている（写真4，5）。現在はキャリブレーションを繰り返しながら

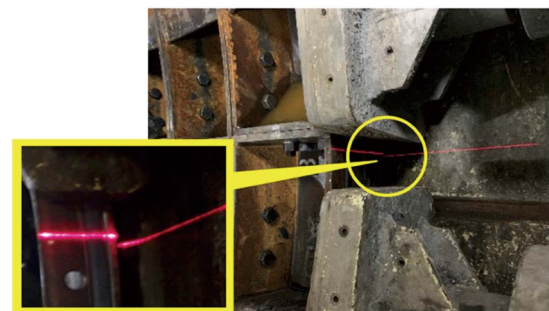


写真4 テールクリアランス計測状況

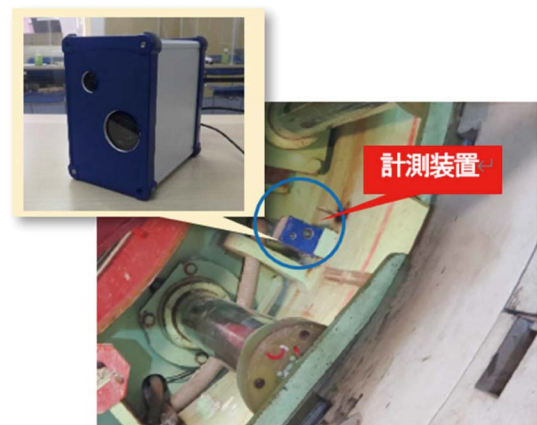


写真5 テールクリアランス計測器設置状況

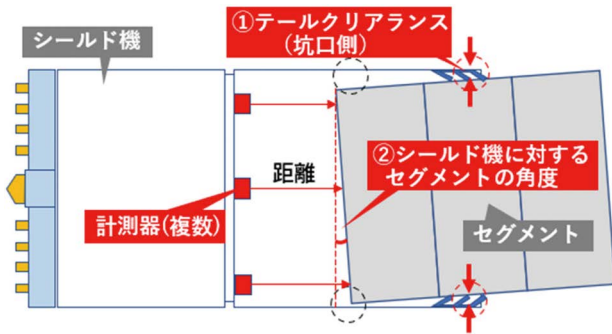


図7 セグメント位置管理システムイメージ図

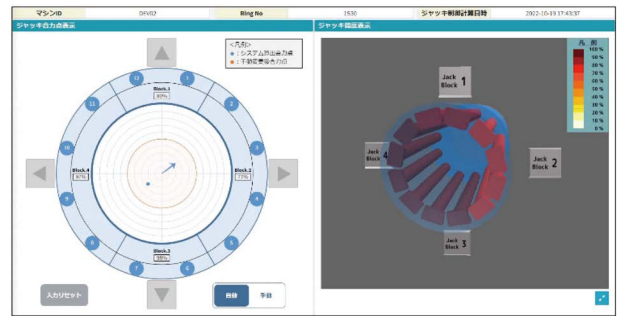


図9 BestFitJack™ 表示画面

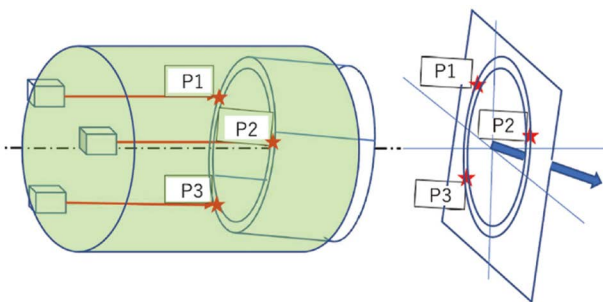


図8 距離計，テールクリアランス計を用いた演算処理の概念

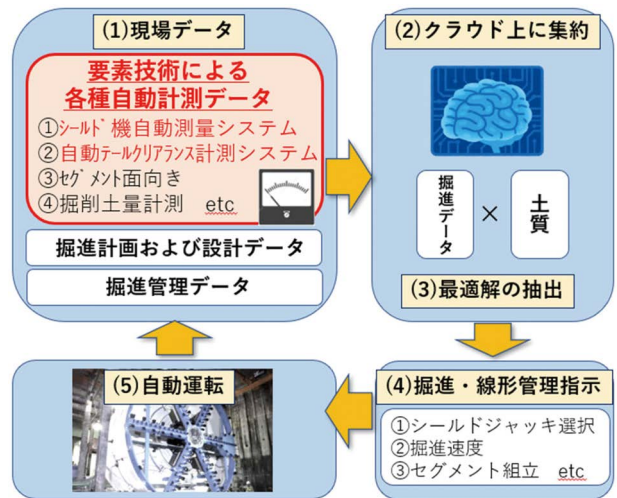


図10 各システムとの連携イメージ

ら更なる精度向上を図っている。

3.3 セグメント位置管理システム

自動テールクリアランス計測装置の次の段階として、セグメントに対するシールド機の面向きと、シールド後端部（テールエンド）のクリアランス量を算出できるシステムを開発した。

まず自動テールクリアランス計測装置にレーザー距離計を追加装備することにより、計測装置からセグメントまでの距離を計測できるようにした。そして距離計の計測値とセグメント切羽側のテールクリアランス量を用いて演算処理することにより、シールド機に対するセグメントの位置や傾き、本来直接確認することができないテールエンドのクリアランス量を算出する（図7，8）。

従来は下げ振りやシールドジャッキのストローク差の実測値を用いて、簡易計算により都度現場で算出しているため手間を要し、正確さにも課題があったが、本技術により省力化と精度向上を図ることができる。

3.4 シールドジャッキ自動制御システム

AI Transform Shield®では基準線とシールド機の偏差量を判断し、シールド機の位置を座標で表示するとともに偏差量を少なくするための方位角の提示をしている。現在はその提示を基に熟練オペレーターがシールドジャッキを選択して経験で掘進を行っている。

しかしながらジャッキの選択は難しく、オペレーターの判断では上下左右のシールド機姿勢を維持して基線に

近づけていくのは難しく、行き過ぎや戻しなどのオペレーションとなり蛇行が発生する。

このため、自動測量システムから算出したシールド機の位置データと、想定土質ごとに蓄積したシールド各種のデータから、どのシールドジャッキにどの程度の推力をかければ効率的かつ精度の高い掘進ができるかAIシステムが判断し、自動でシールドジャッキを制御するシステム（Best Fit Jack™）を開発した。

今後のこの自動制御システムを現場にて実証実験を重ね制御の精度を高めていく。

4. 本システムと各要素技術の連携

本システムと各要素技術の連携イメージを図10に示す。シールド機自動測量システム、自動テールクリアランス計測システム等から出力された計測・測量データと、掘進管理システムから出力された掘進管理データ等を、インターネットを介してクラウド上に集約させる。

現在の掘削対象断面や施工状況と類似している過去の現場データをAIプログラムが検索・抽出し、今後の予測をし、最適な掘進指示をシールドジャッキ自動制御システムに送る。これによりシールド機の姿勢が制御さ

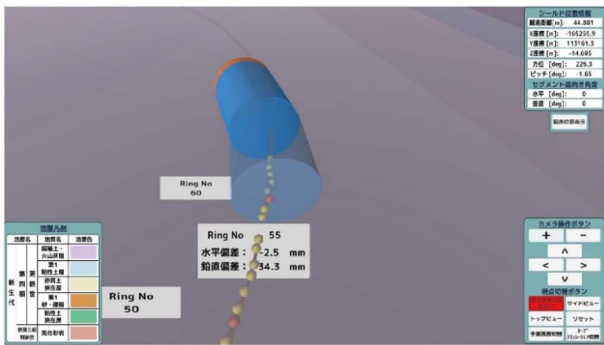


図 11 管理表示画面

れ、シールド機の運転が行われる。

従来のように現場の中央監視室の PC で処理するのではなく、クラウド上で処理することにより、全国のシールド工事現場のデータの一括管理・集約を可能とした。

図11は本システムの管理画面である。計画基線からの偏心量やクリアランス量、土質情報等の計測データをリアルタイムで表示する。また AI により抽出された最適な掘進指示として、シールド機の位置・姿勢の制御値や、セグメントの割付や組み方なども画面上に提案して、既往の掘進管理をサポートする。

- | |
|-------------------------------------|
| フェーズ 1. 直線掘進時のシールド機自動位置・姿勢制御 |
| フェーズ 2. 曲線掘進時のシールド機自動位置・姿勢制御 |
| フェーズ 3. 想定土質に対するシールド機の自動運転 |
| フェーズ 4. 排土量・裏込注入量等の自動管理，事故予防診断技術の開発 |
| フェーズ 5. 実際の掘削対象土質に対するシールド機の自動運転 |

5. おわりに

本システムの開発工程を以下に示す。

本システムの本格的な開発は2020年度から始まり、現在はフェーズ 2・3 の開発を進めている。

本システムは上記で示したフェーズ 1～5 の開発工程を経て、実際の掘削対象土質に合わせた最適な掘進指示の現場への提供および自動運転の実現を目標の第一段階として掲げている。そのために必要な土質判定技術や土量計測技術などの新たな要素技術の開発を進めながら、継続して現場でのフィールド試験を繰り返して精度を検証し、実用化を目指している。

将来的には、シールド工事現場の更に多様な情報（裏込め注入管理データ，加泥材添加管理データ，中折れ・コピーカッター制御データ等）を取り込めるようにして、AI を活用した一元管理により掘進管理だけでなく工事全体の施工管理の自動化と、それに伴う省力化・省人

化を目指し、本システムを進化させていきたい。

参考文献

- 1) 山崎友誉「シールド自動化への挑戦」, 土木施工 No.5, p.94-97, 2022.5.
- 2) 中村太三, “シールド工法の AI 化技術の開発 その 3 (セグメント面向き計測と最後端部クリアランス計測システム)”, VI -87, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, 2022.