

シールド自動掘進に向けた 方向制御学習システムの開発

星野 智紀¹・松原 健太²・小澤 勇介³・田中 善広⁴

¹正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail:hoshino.tomonori@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail:matsubara.kenta@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社大林組 土木本部生産技術本部シールド技術部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）
E-mail:ozawa.yusuke@obayashi.co.jp

⁴正会員 株式会社大林組 南部幹線シールド工事事務所（〒441-1334 愛知県高浜市春日町5-170）
E-mail:tanaka.yoshihiro@obayashi.co.jp

シールド工において、計画線形から逸脱せずに、シールド機の掘進方向を制御するためには熟練技能が必要とされる。昨今の建設業において、熟年労働者の離職・若年労働者の入職減少の問題が取り沙汰される中、シールド工においても、熟練オペレーターの減少の問題が表面化しており、オペレーターの経験に左右されないシールド機の自動方向制御技術の確立が求められている。このような状況下で、われわれは過去にシールドジャッキ同調圧制御システムと連動した『シールド方向制御学習システム』を開発し、複数のシールド現場にて適用してきたが、自動方向制御への適用に向けて複数の課題があった。本報告では、システムの改良と実現場適用の結果、さらにAIとの連携による、より高精度な方向制御方法の適用状況について報告する。

Key Words: attitude control of shield machine, retirement of the aged skilled operators, automatic-operation system of shield machine, load point of thrust jacks, ASC-OM

1. はじめに

シールド機の方方向制御を行う際には、シールド機に装備している複数のシールドジャッキの総推力の重心（以下、力点）の位置を調整する必要がある。

シールド機のオペレーターは、シールド機が計画線形から逸脱しないよう方向制御をするため、複数のシールドジャッキのON/OFFを操作して力点位置を調整する。この作業にはオペレーターの経験に基づいた熟練技能が要求されると同時に、複数のオペレーターの技量や癖の違いにより、シールド機の方方向制御の精度に差が生じる。そのため、オペレーターの熟練度が低い場合はシールド機が計画線形から逸脱する可能性もある。

この問題を解決するため、これまでにわれわれは、シールド機を計画線形に沿って掘進するための最適な力点位置をオペレーターに提示する「シールド方向制御学習システム¹⁾」（以下、方向制御学習システム）を開発し、シールドジャッキのON/OFF操作ではなく、力点位置の指

示によりシールドジャッキの自動操作が可能な「シールドジャッキ同調圧制御システム（ASC-OM）²⁾」（以下、ASC-OM）と連動して複数のシールド現場で適用してきた^{3),4),5)}。適用の結果、今後の課題として、ASC-OMが導入されていない現場でも適用できるように汎用性を向上させること、また、掘進途中の状況に応じた修正を適宜行い、信頼性をさらに向上させることが、挙げられていた。

本報告では、これらの課題を解決すべく実施したシステムの改良と、改良したシステムの実現場適用の結果、さらには自動運転を見越したAIとの連携による、より高精度なシールド機の方方向制御方法について述べる。

2. 従来の方向制御学習システムの概要

従来の方向制御学習システム（以下、従来システム）の概要を図-1に示す。シールド現場では、現場職員が日々の掘進管理測量でシールド機の現況位置（水平方向

および鉛直方向の計画線形からの逸脱量)を把握し、その結果に基づいて掘進指示書を作成する。掘進指示は、水平方向はジャッキストローク差およびジャイロ方位角、鉛直方向はピッチング角度および水レベル計の値により行うのが一般的である。これまでのシールド機方向制御は、掘進指示書に記載された指示値を満足するために、オペレーターが複数のシールドジャッキのON/OFFを操作して行なってきた。それに対し、方向制御学習システムでは、過去のシールド掘進実績データ（水平方向は実ジャッキストローク差と実水平力点位置、鉛直方向はシールド機の実ピッチング差と実鉛直力点位置）を回帰分析し、求めた回帰式から掘進指示値を満足するための推奨力点を演算して表示する。

表示された推奨力点を参照しながら、ASC-OMに指示力点として入力すると、ASC-OMがシールドジャッキを自動選択してシールドジャッキ同調圧を自動制御することでシールド機方向制御をおこなう。以上の繰り返しにより実績データは蓄積され、将来の回帰分析の対象となる。

3. 従来システムにおける課題

従来システムでは、演算した推奨力点を参照してオペレーターが入力した指示力点に合わせて、ASC-OMが自動的にシールドジャッキを選択していた。そのため、シールドジャッキの本数が多く、ASC-OMの導入が可能となる中口径から大口径シールド現場での適用に限られていた。また、演算の回数を掘進開始時の1回のみとしていたため、掘進中にシールド機が掘進指示値を逸脱する傾向に陥った際の修正機能を備えておらず、1リングの掘進完了時に、掘進指示値を満足しないケースが散見された。

以上の状況を踏まえ、汎用性の向上と、信頼性のさらなる向上が課題であった。

4. 課題の解決策

上記の課題を解決すべく改良を加えた方向制御学習システム（以下、新システム）について述べる。

(1) 汎用性の向上策

システムの汎用性を向上するため、ASC-OMが導入されていない現場でも適用を可能とする改良を目指した。ASC-OMが導入されていないシールド現場で適用するためには、オペレーターにジャッキパターンを提示しなければならない。ジャッキパターンはシールドジャッキのON/OFFの組み合わせにより多くの力点をカバーすることができるが、実際のシールド機の操作においてはクラッ

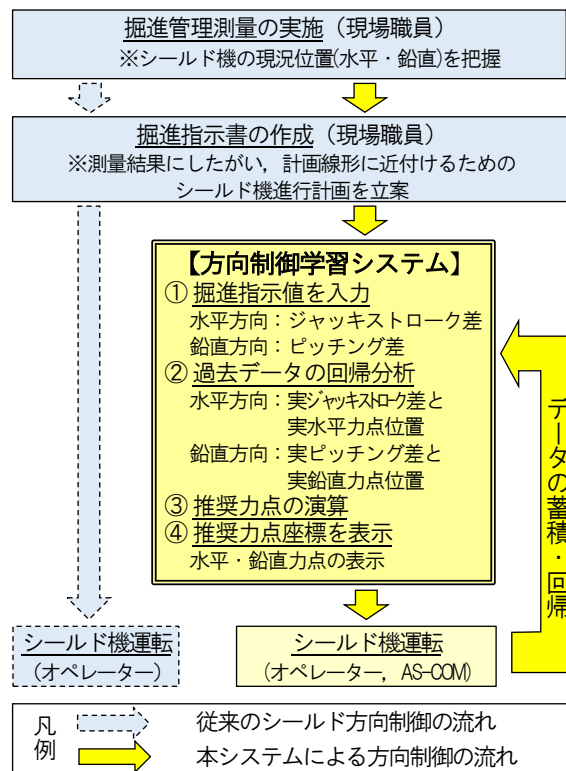


図-1 従来の方向制御学習システムの概要

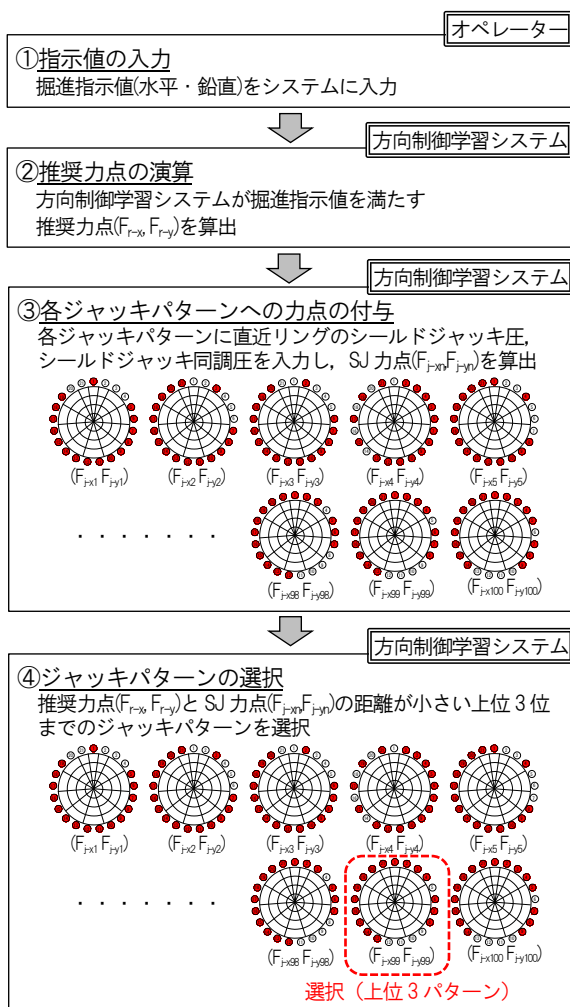


図-2 ジャッキパターンの選択フロー

クや目開きなどセグメントの品質への影響や、水圧やテールブラシの拘束圧によるKセグメントの抜け出しなどを考慮してジャッキパターンを選択しているため、これらのノウハウを反映したジャッキパターンとしなければならない。この事情を考慮した上で、想定されるジャッキパターンをシステムにあらかじめ登録し、その中からジャッキパターンを選択することとした。登録するジャッキパターンは、対象現場と同等の径で、シールド機のシールドジャッキ本数が同じ現場の実績から引用し、さらに掘進中にオペレーターが新たに任意選択したジャッキパターンを追加パターンとして随時蓄積するシステムとした。これにより、掘進の進行と同時にオペレーターのノウハウを随時取り入れながらジャッキパターンの選択肢が増えるため、力点の再現性を向上できると考えた。

方向制御学習システムが演算した力点からジャッキパターンを選択する際のフローを図-2に示す。①オペレーターが掘進指示値（水平・鉛直方向）を入力すると、②方向制御学習システムが掘進指示値を満たすために最適な推奨力点（ F_{x-y} 、 F_{z-y} ）を演算する。③登録されているすべてのジャッキパターンに直近リングのシールドジャッキ圧と同調圧の実績平均値を参照して各ジャッキパターンのシールドジャッキ力点（ F_{j-x-y} 、 F_{j-z-y} ）を求める。④推奨力点（ F_{x-y} 、 F_{z-y} ）とシールドジャッキ力点（ F_{j-x-y} 、 F_{j-z-y} ）の距離が小さい上位3位のジャッキパターンを選択し、各ジャッキパターンを画面表示する。初期に登録した300種類のジャッキパターンに所定のシールドジャッキ圧と同調圧を適用した場合の力点分布を図-3に示す。

(2) 信頼性の向上策

従来システムと同様に、過去の掘進実績（水平方向は実ジャッキストローク差と実水平力点、鉛直方向は実ピッチング差と実鉛直力点）より回帰式を求める。回帰分析は分析対象のリング数を任意の3パターン（例えば10リング、20リング、30リング）にわたり実施し、最も相関係数が高いパターンを選択することとした（図-4）。

さらに、新システムでは信頼性を向上するため、掘進途中にチェックポイントを設け、状況に応じて推奨力点に強弱をつけることとした。図-5に従来システムに対する信頼性の向上策（水平方向の例）を示す。セグメント幅1mの現場で水平方向の掘進指示が右+8mm/Rの場合、理論上のジャッキストローク差は、掘進開始時を0mmとして250mm毎に右+2mm、右+4mm、右+6mm、右+8mmとなる。

従来システムでは掘進開始時に指示値を入力して推奨力点を1回演算するのみであり、掘進指示値を満たさずに掘進を終了するケースが散見された。そこで、新システムでは、チェックポイントで実ストローク差と理論上のストローク差を比較し、入力値に強弱をつけて推奨力点を更新し、信頼性の向上を図った。

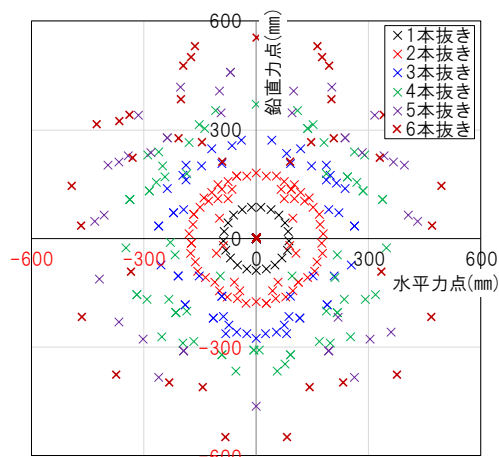


図-3 力点分布（初期導入ジャッキパターン）

※所定のシールドジャッキ圧・同調圧における力点分布

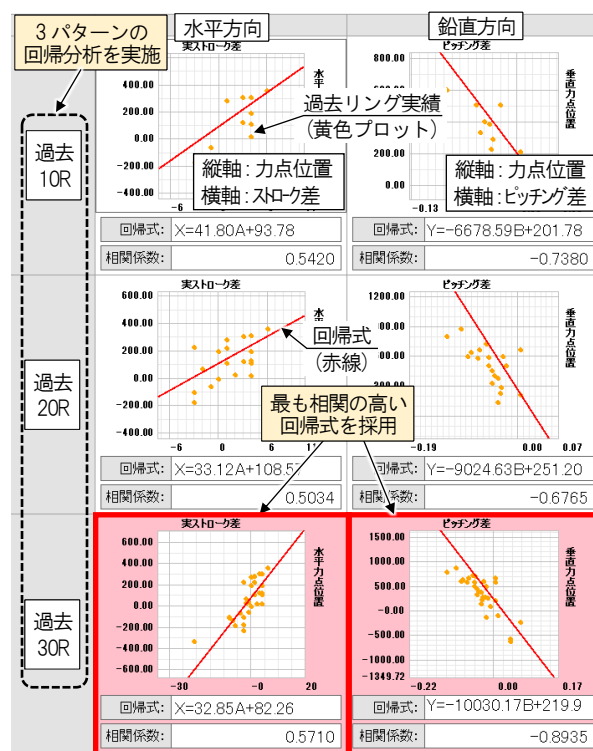


図-4 回帰分析と回帰式の選択方法

※掘進指示値=右+8mm/リングの場合

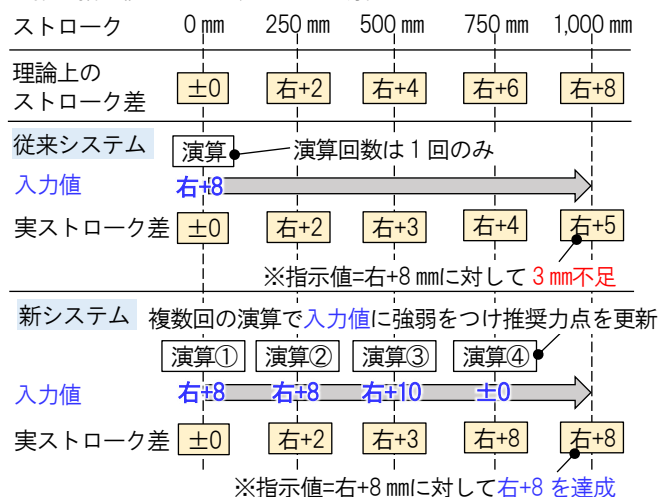


図-5 従来システムに対する信頼性の向上策（水平方向の例）

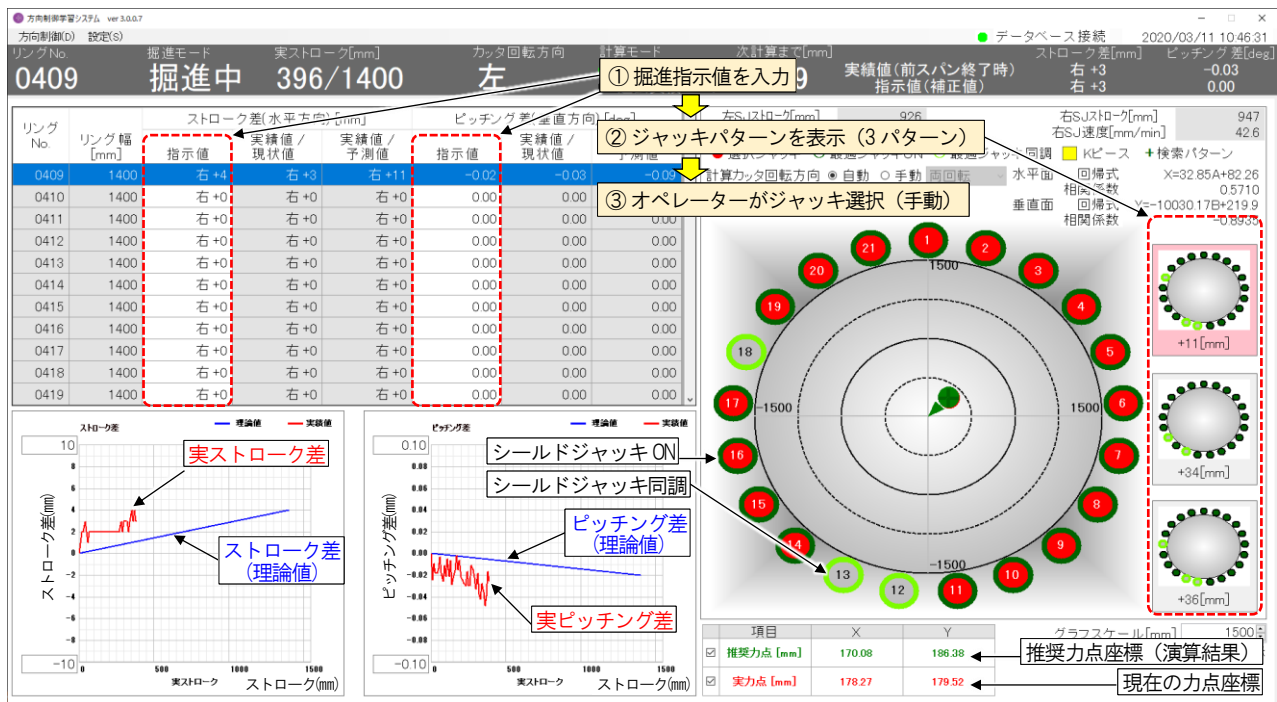


図6 方向制御学習システム画面

5. 実現場適用の結果

上述の向上策による効果を確認するため、実現場において方向制御学習システムを適用した。適用現場はシールド外径が約5.4mの泥土圧シールドの現場で、2本の併設路線をそれぞれ別のシールド機で時期をずらして掘進する。方向制御学習システムの画面を図-6、運用状況を図-7に示す。

改良点として挙げた汎用性の向上については、指示値を入力すると、推奨力点との距離が小さい上位3位のジャッキパターンを表示する。オペレーターはその中から自らの意思に近いジャッキパターンを任意選択してシールド機の方方向制御を行う。ただし、表示されたいずれのジャッキパターンも、自らの意思にそぐわない場合は、自らが判断したジャッキパターンで方向制御を行うこともできる。その場合、このジャッキパターンは新たなジャッキパターンとしてシステムに取り込み、次回以降はシステムがオペレーターに提示するジャッキパターンの候補として登録される。表-1に、実現場適用の結果、システムが演算した推奨力点とシステムが表示した最上位のジャッキパターンの力点との平均偏差を示す。

1号機の掘進開始後には、水平方向の平均偏差が52mm、鉛直方向の平均偏差が66mmであったのに対し、2号機の到達直前には、平均偏差が半分以下に向上している。これは、1号機の掘進開始後は300パターンだったジャッキパターンが、オペレーターの判断により追加され、2号機の到達時には877パターンにまで増加しており（図-8）、力点分布が密になることで、ジャッキパターンの選択肢が増えたことを意味する。これにより2号機の推



図-7 方向制御学習システム運用状況

表-1 推奨力点と最上位ジャッキパターンの力点の平均偏差

運転方法	平均偏差	
	水平方向	鉛直方向
1号機(掘進開始後)※	52 mm	66 mm
2号機(到達直前)※	20 mm	27 mm

※『推奨力点』と『ジャッキパターンの力点位置』の平均偏差

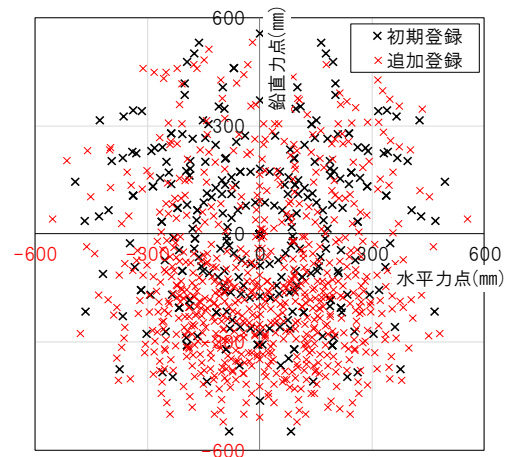


図-8 力点分布(蓄積後ジャッキパターン)

※所定のシールドジャッキ圧・同調圧における力点分布

奨力点と最上位ジャッキパターンの力点の平均偏差が大幅に改善されたものと思われる。

1号機での適用の際に、シールド機のカッターヘッドの回転方向の違いにより、掘進時の力点特性が異なることが判明した（図-9）。具体的には、カッターヘッドが右回転の際にはシールド機が右方向に行く傾向となり、これを打ち消すために、左シールドジャッキを抜いて水平力点が正の値になる傾向となった。反対に、左回転の際にはシールド機が左方向に行く傾向となり、これを打ち消すために右シールドジャッキを抜いて力点が負の値になる傾向が見られた。オペレーターは、この傾向を理解してカッターヘッドの回転方向に応じた修正を加えて操作していたため、シールド機の方方向制御に問題は生じなかったが、従来の方向制御学習システムはこれらの現象を考慮していないため、さらなる改良が必要となった。また、推奨力点を更新するために掘進途中に設けたチェックポイントが3ポイントでは不足し、最終的に掘進指示値を満足せずに掘進を終えるケースが散見された。以上を考慮し、2号機への導入に際して以下の改良をくわえた。

- カッタ回転方向を考慮しない従来の分析方法にくわえ、カッタ回転方向に応じた回帰分析を実行し、任意設定した過去リング数における推奨力点と実力点の絶対偏差が小さい分析方法を自動で採用する。
- 掘進指示値と実績値を比較し、その時点での指示値との差分に応じて推奨力点を更新することで力点の強弱を付けるチェックポイントの数を任意に設定可能とする。

上記の改良を2号機の実現場適用において施した結果、1号機で障害となったカッタ回転方向による力点特性を踏まえた解析が可能となり、実力点と推奨力点の平均偏差が水平方向で30%、鉛直方向で9%向上し、推奨力点の信頼性が高まった（図-10、表-2）。

また、2号機ではチェックポイントの増設により、実ストローク差と実ピッチング差が指示値に従い推移しているか確認し、修正が必要な場合にはその都度力点位置を更新し、システムの信頼性の向上を実現した。信頼性を確認するため、新システムの画面左下にはストローク差とピッチング差の推移を理論上の値と比較するグラフを表示し、チェックポイントでの修正指示の効果を画面上で確認しながら掘進を進めた（図-6）。

現状のシステムでは、ジャッキパターンをオペレーターに提示し、シールドジャッキの選択はオペレーターの手動操作によるため、チェックポイントの増設によりオペレーターの作業が増えて負荷が大きくなり、チェックポイントの増設には限界がある。一方で、シールドジャッキの自動選択を採用した場合、チェックポイント数を極限まで増やすことで、信頼性のさらなる向上が見込ま

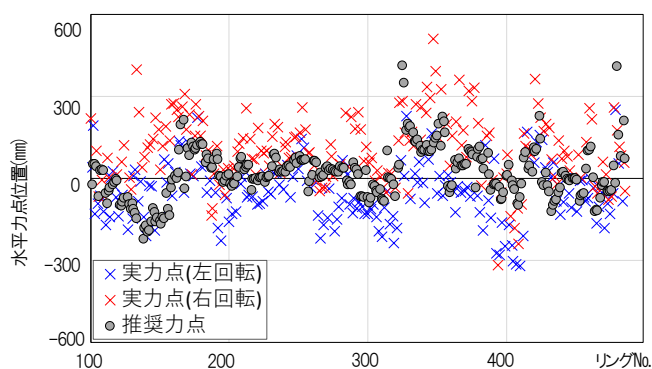


図-9 推奨力点と実力点（1号機，水平方向）

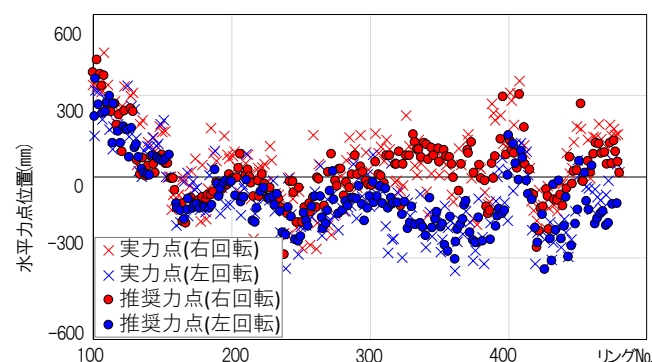


図-10 推奨力点と実力点（2号機，水平方向）

表-2 実力点と推奨力点の平均偏差

項 目	平均偏差（推奨力点・実力点）	
	水平方向	鉛直方向
1号機の実績	115 mm	113 mm
2号機の実績	81 mm	103 mm

30%向上
9%向上

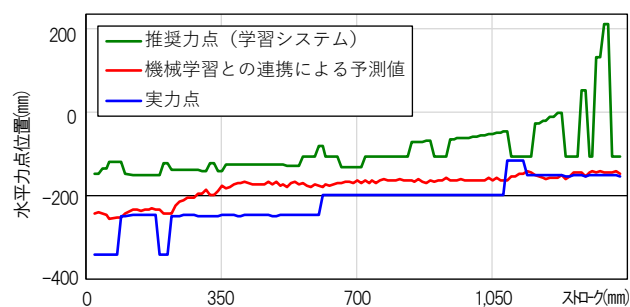


図-11 AI 自動方向制御システムによる力点予測(水平方向)

れる。したがって、この改良はシールドジャッキの自動選択を装備した自動運転を見据えた場合、将来的に重要な要素技術になると考える。

6. AI自動方向制御システムの構築

方向制御学習システムでは、シールド機の実ストローク差と実ピッチング差、および力点位置を回帰分析することで、シールド機の方方向制御を行うことを目指し、所定の効果を確認した。一方で、オペレーターは、掘進時にこれらの数値以外のパラメーター（例としてテールクリアランス、ジャイロ方位角、水レベル値、ローリング値、指示値と実ストローク差および実ピッチング差の偏差、コピーカッター切削範囲と切削量など）にも配慮しながらシールド機の方方向制御を行っている。

これらの多数のパラメーターと、方向制御学習システムが演算した推奨力点を、AIにより機械学習することで、さらに信頼性の高い力点を割り出し、シールド機に適用することで、自動方向制御が可能となることを確認し、『AI自動方向制御システム』として実現場で適用し、効果を確認している（図-11）。この技術の詳細については、別途、改めて報告する予定である。

7. まとめ

今回加えた改良の結果、方向制御学習システムの汎用性、さらには信頼性の向上を図ることができた。

また、当システムとAIを連携させたAI自動方向制御システムによって、シールド機の自動方向制御が可能となった。

今後は、これらの技術と自動切羽圧管理技術や自動測量技術と連携することで、将来のシールド自動掘進技術に結び付けることを今後の課題として、本稿の結びとする。

参考文献

- 1) 伊藤透, 服部鋭啓, 谷口智洋：シールド方向制御学習システムの構築と現場適用事例, 土木学会 年次学術講演会, 2013
- 2) 西岳 茂, 土屋 幸三郎, 今倉 和彦, 田中 淳一：シールドのアクティブ推進システムの開発(その2)ーシールドジャッキ油圧制御技術ー, 土木学会 年次学術講演会, 1994
- 3) 三井仁哉, 服部鋭啓, 田中善広, 羽鳥哲夫, 星野智紀：シールド方向制御学習システムの改善とその結果, 土木学会 年次学術講演会, 2018
- 4) 星野智紀, 服部鋭啓, 田中善広, 羽鳥哲夫：シールド方向制御学習システムの開発と改善および運用報告, 土木学会 第28回トンネル工学研究発表会, 2018
- 5) 星野智紀, 松原健太, 小澤勇介, 田中善広：シールド方向制御に向けた方向制御学習システムの開発, 土木学会年次学術講演会, 2020

(2020. 8. 7 受付)

DEVELOPMENT OF LEARNING SYSTEM OF SHIELD MACHINE ATTITUDE FOR AUTOMATIC OPERATION OF SHIELD MACHINE

Tomonori HOSHINO, Kenta MATSUBARA, Yusuke OZAWA and Yoshihiro TANAKA

Attitude control of shield machine is carried out by turning the thrust jacks on and off, and the special skill is required for the operation. Recently, the number of the skilled operator for shield machine has been decreased due to advancement of the retirement of the aged skilled operators and the decrement of the employment of the young miner workers, therefore the development of the automatic-operation system of shield machine is desired. Learning system for shield machine attitude had been developed and adopted on-site by us in the past. However, the improvement was necessary in the aspect of the versatility and the reliability of the system. We have established the new method to improve the versatility and the reliability of the system, and confirmed the effectivity by adopting the method on-site. Additionally, the status of cooperation with the automatic directional control by artificial intelligence is described.