

人工知能によるシールドマシン操作技術開発への取組み

清水建設株式会社 杉山 博一
 和田 健介
 大木 智明
 中谷 武彦
 安井 克豊

1. はじめに

都市部のトンネル工法のひとつであるシールド工事では、熟練のオペレータが様々なデータを監視しながらシールドマシンを操作してトンネルを掘り進めている。この操作行動を人工知能(AI)によって再現できるようになればシールドマシンの自動運転化により、生産性の向上、省人化が期待できる。現在、シールドの実工事(泥土圧シールド)で得られた施工時データを対象に、オペレータが監視するデータと操作行動を関連づける人工知能モデル(以下、AIモデルと記す)の作成に着手している。本報告では、数多くある操作行動のうちシールドマシンで掘削した土を排出するためのスクリーンコンベヤの操作を予測する AI モデルの構築方法の概要と、これを実際のシールド工事で稼働させた結果について報告する。

2. シールド工事の概要

(1) シールド工法

シールド工法は、図-1 に示すように、シールドと呼ばれる鋼殻で地山を支持し、掘削面(切羽)で泥水や泥土で地山からの土圧と水圧に対抗して切羽の安定を保ちながら安全に掘削を行う。次に、セグメントと呼ばれる覆工部材を鋼殻内でリング状に組み立てる。さらに、組み立てたセグメントリングに反力を取りながらシールドジャッキでシールドマシンを推進することによってトンネルを構築する工法である¹⁾。

シールド先端部(チャンバー内)の泥水や泥土に圧力を作用させて地山の土圧、水圧とバランスさせることでトンネル周辺地盤の変形を極力押えることができるため、軟弱地盤の多い都市部で用いられることが多い。

(2) シールドマシンの推進操作の概要

図-2 に土圧式シールドマシンの操作状況と操作盤の例を示す。シールドマシンは図-2 左に示すように運転台車内でオペレータが操作を行っている。運転台車には図-2 右に示すようなメインの操作盤の他、シールドマシンの位置・姿勢情報や各種計測データを表示するモニタ、泥土用添加材の注入や裏込め材注入用の操作パネル等が搭載されている。ちなみに、図-2 右に示した操作盤ではシールドジャッキの選択や、ジャッキの推進速度、スクリーンコンベヤの回転速度等がタッチパネル方式で調整できる。

オペレータは、掘進指示書と呼ばれる掘進管理デ

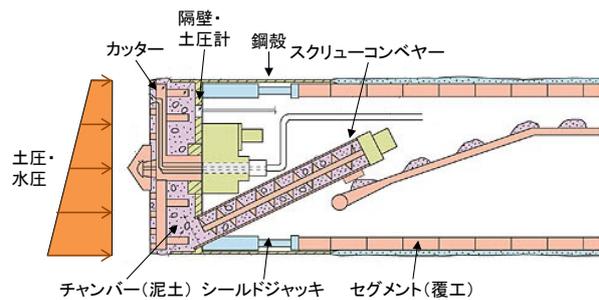


図-1 シールド工法(土圧式)の概要
 (※シールド工法協会 HP 掲載の図を編集)



図-2 シールドマシンの操作状況(左)と操作盤(右)の例

表-1 シールドマシンの主な操作項目

項目	操作頻度 多 (手動)	操作頻度 少 (半自動)	ON/OFF のみ
土圧制御	スクリーンコンベヤの回転速度	スクリーンゲート開度	
方向制御	シールドジャッキ選択、推進速度	マシン中折れ角、余掘り	カッター回転
注入制御		添加材、裏込め注入	

ータの管理目標値が書かれた資料に基づいて、計測データを監視しながらシールドマシンを操作している。表-1 にシールドマシンの操作項目例を示す。シールドマシンの操作は、計画線形通りにシールドマシンを推進させるという方向制御に関する操作と、土圧式シールドの場合には地山の土圧とバランスさせながら掘削した土砂を取り込むという土圧制御を目的とした操作、さらに添加材や裏込め材の注入操作に大別される。それぞれの操作項目の中にも ON/OFF だけのものや、一度設定してしまえば掘進中はほとんど操作しないものもあるが、スクリーコンベヤーの回転速度の調整や、シールドジャッキの選択、推進速度(シールドジャッキの伸びる速度)など比較的細かく調整、操作するものもある。

(3) 監視データ

シールド掘進時には多数のデータを取得、表示し、PC に保存している。それら監視データの項目は、例えばカッター回転時のカッタートルク、シールドジャッキの総推力やストローク、シールド機の姿勢、計画線形からのずれ、チャンバー内土圧、スクリーコンベヤーの回転速度、添加材や裏込め材の注入量・圧力等が主なものとして挙げられる。これらが操作盤やモニタに常に表示されており、オペレータはこれらと掘進指示書に記載されている管理値を比較、監視しながらシールドマシンを操作している。

3. 土圧制御AIモデルの開発²⁾

土圧式シールドでは、前述のように、オペレータがチャンバー内の土圧が指示された管理範囲内となるように推進速度とスクリーコンベヤーの回転速度(排土速度)を調整している。推進速度はカッタートルクやシールドジャッキの総推力等の多数の監視データとも密接に関係するため、操作にはオペレータの熟練度が要求される。

そこでまず、様々な監視データとスクリーコンベヤーの回転速度設定(操作)を関連づける AI モデルを作成することとした。

(1) 現場データの概要

本研究では、土圧式シールド工事で得られた施工時データを用いた。シールド外径は約 10m である。分析データの概要を表-2 に示す。分析に用いたデータは、路線途中の No.85 リングから最終 No.524 リングまでの 440 リング分のデータであり、保存可能なデータを1秒間隔で保存したものである。収集データ項目は、施工管理に必要な基本的データの他に、従来、データとし

表-2 分析用データの概要

期間	2014/12/01~2015/03/18
リング数	440 リング (No.85~524)
サンプリング速度	1Hz
データ行数	1,360,324 行
データ項目数	426 列

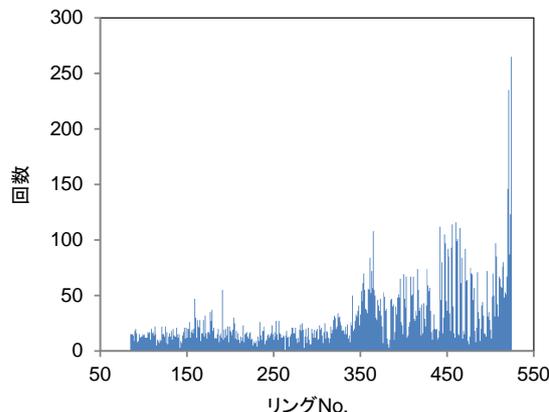


図-3 スクリュー手動速度設定の変更回数

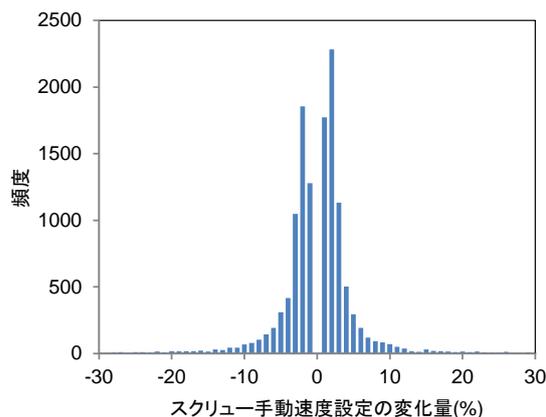


図-4 スクリュー手動速度変化量の頻度

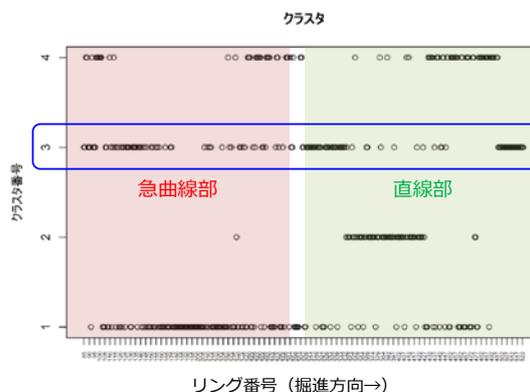


図-5 クラスタ分析結果

て保存されてこなかったオペレータの操作行動(スクリーコンベヤー回転速度の設定値、ジャッキ推進速度の設定値、シールドジャッキ選択等)も含まれている。

(2) 着目する操作行動

スクリーコンベヤーの回転速度やジャッキ推進速度は図-2 右に示したタッチパネル上で装備能力(100%)に対して1%刻みに調整して操作している。図-3は1リング毎のスクリーコンベヤー回転速度に関する操作回数であり、頻りに操作していることが分かる。図-4 は操作1回あたりに変更した量ごとに頻度を示したものであり、±1~3%程度の微調整が多いことも分かる。本研究では手始めにこれらスクリー手動速度設定の操作行動を再現するAIモデルの作成を試みた。

(3) 土圧制御 AI モデル作成方法の概要

AIモデルを機械学習により作成する際、全データを学習させるのではなく、良い運転操作を行ったリングだけを抽出するためにクラスター分析を行い、それを教師データとして選定することを行った。図-5 がクラスタ

表-3 機械学習に用いたデータ(特微量)

No.	説明変数	単位	データ取得単位
1	カッタートルク	%	1 秒間隔
2	推進速度	mm/min	
3	総推力	kN	
4	制御土圧	MPa	
5	制御土圧:誤差	MPa	
6	1次スクリー速度	rpm	
7	1次スクリー圧力	MPa	
8	1次ゲート開度	%	
9	加水流量	L/min	
10	加水注入圧力	kPa	
11	No1 高分子流量	L/min	
12	No2 高分子流量	L/min	
13	気泡注入率	%	リングごと
14	加水率	%	
15	分散剤注入率	%	
16	安定剤注入率	%	

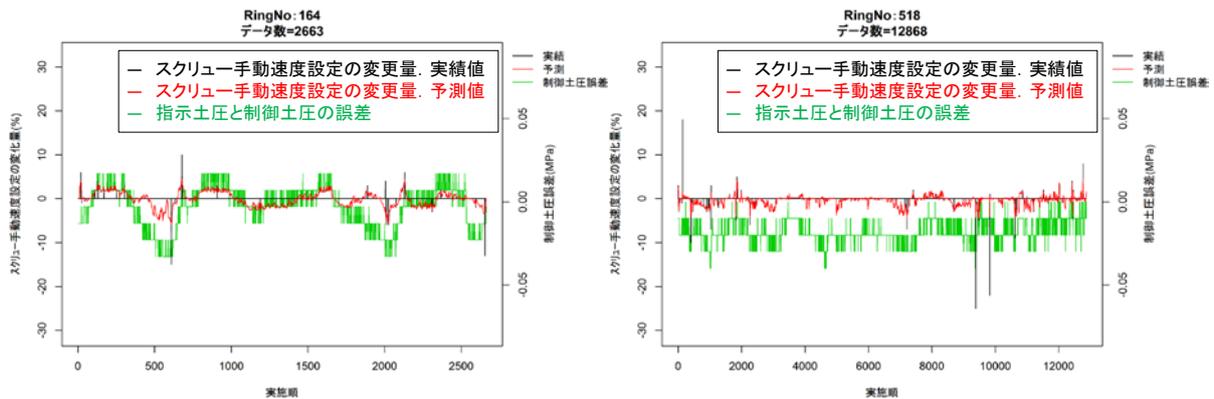


図-6 実績と予測の比較(左:急曲線部1リング分, 右:直線部1リング分)

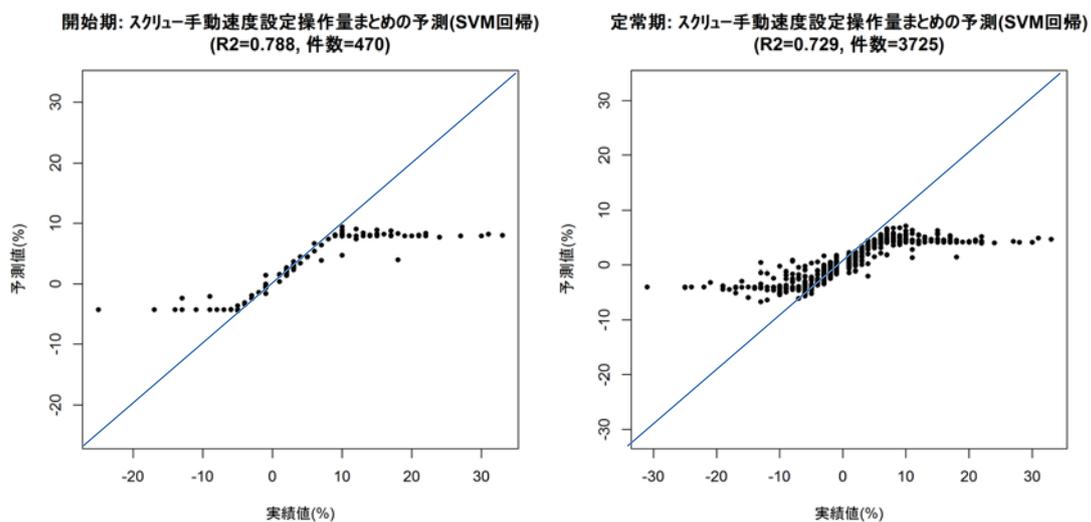


図-7 全操作時の実績と予測の比較(左:開始期 右:定常期)

一分析(K-means 法, クラスタ個数;4)の結果である。この中で無駄な操作が少なく、掘進指示値に記載された指示土圧と制御土圧(チャンバー内土圧の代表値)との差が小さかった等、良い運転操作だったと判断されたクラスタ(番号 3、計 133 リング分)のデータを機械学習用の教師データとして選定した。

次に、特徴量として表-3 に示すデータ項目を選定した。その際、時間的な変化を考慮するために、各データ項目の移動平均も特徴量として加えた。最後に教師データにおける「スクリー手動速度設定値変更量」を目的変数として機械学習(サポートベクター回帰)を行い、土圧制御 AI モデルを作成した。

(4) AI モデルの机上評価

図-6 にスクリー手動速度設定値変更量の実績と AI モデルの予測値を比較した結果を 2 例(2 リング分)示す。図-6 左は急曲線区間での 1 リング分の経時変化であり、図-6 右は直線区間でのそれである。図から明らかなように、いずれも概ね AI モデルの予測値とオペレータの操作タイミングや変更量が一致している。図-7 は全操作分のスクリー速度設定値変更量の実績値と AI モデルの予測値を比較したものである。変更操作の頻度が高い掘進開始期と、操作頻度の低い定常時を分けてプロットしたが、いずれも±10%以内の範囲では実績と予測値が一致している。一方で、±10%以上の領域では予測値が下回る結果となっているが、今後運用した時に急激な変更量の指示を出すよりも、次回ステップ以降と合せて変更できれば問題ないため、安全側の判定となっていると考えている。

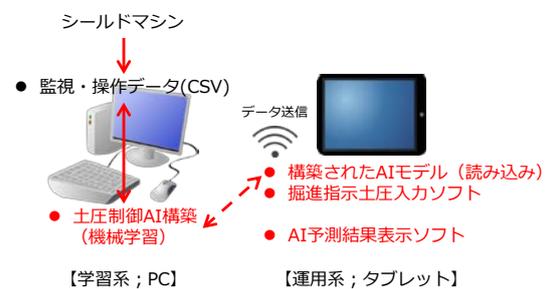


図-8 現場での検証システム

4. 土圧制御AIモデルの現場検証

開発した土圧制御 AI モデルを実際に掘進しているシールド工事でテスト運用し、AI モデルの適用の可否や、運用上の課題を洗い出した。

(1) 検証現場の概要

今回検証を行った現場は、前節で示したトンネルに隣接する別のシールドトンネルであり、施工条件やシールドマシンのスペックはほぼ同じである。

(2) システムの概要

図-8 に今回導入したシステムの概要図を示す。まず、シールド運転台車にメインとなるデスクトップ PC とオペレータの席近くにタブレット PC を設置した。デスクトップ PC は、シールドマシンから 1 秒ごとに送られてくる監視・操作データを逐次 CSV ファイルに保存する役割と、新たに得られたデータから追加学習を行う役割がある。一方、タブレット PC には図-9 に示した指示土圧を 1 リング毎に入力するソフトと、日々機械学習によって構築された土圧制御 AI モデルを読み込み、監視データ、指示土圧に基づいてスクリーコンベヤの回転速度を予測し、表示するソフトを導入した。図-10 は AI モデルが予測した結果を表示するソフトの画面であり、予測結果の他にオペレータが設定している回転速度設定値、さらに指示土圧と制御土圧が時系列に表示されている。

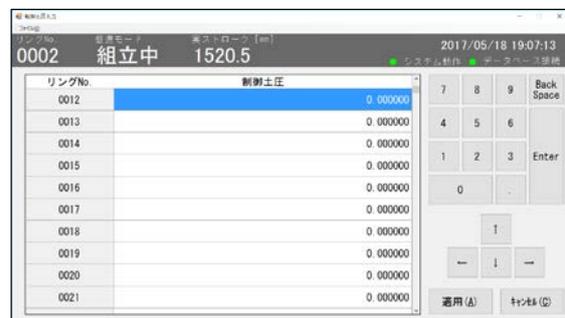


図-9 掘進指示土圧入力ソフトの画面

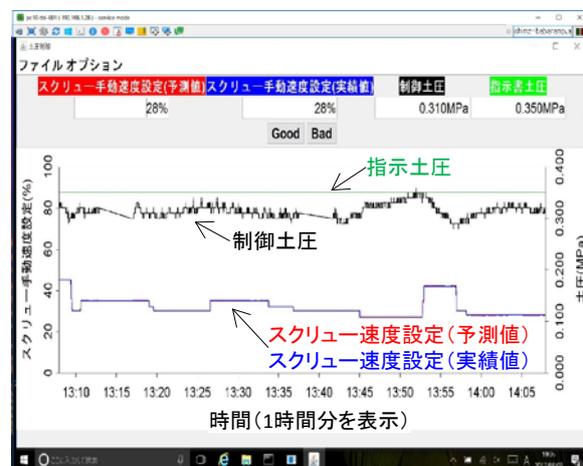


図-10 AIモデル予測結果表示ソフトの画面例

(3) 検証状況

検証開始直後は前節で作成した AI モデルをまず導入して予測を行ったところ、スクリー速度設定の予測値と、オペレータの実績値とが整合しなかった。その原因として、前回の現場と今回の現場で特徴量に選定した制御土圧が異なることが考えられた。図-11 は両現場の指示土圧を比較したものであるが、制御土圧としてもこの程度異なってくる。なお参考までに、指示土圧は基本的にはトンネル深度と土質、水圧等から計算したものであるが、推進時に生じた地表面変位や近接構造物への影響を考慮して微調整して決定されるものである。そこで、前現場(3 節)で作成した AI モデルは放棄し、今現場で得られたデータだけを利用して

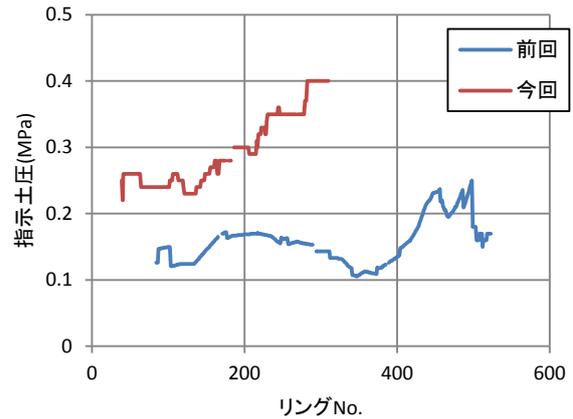


図-11 指示土圧(制御土圧)の違い

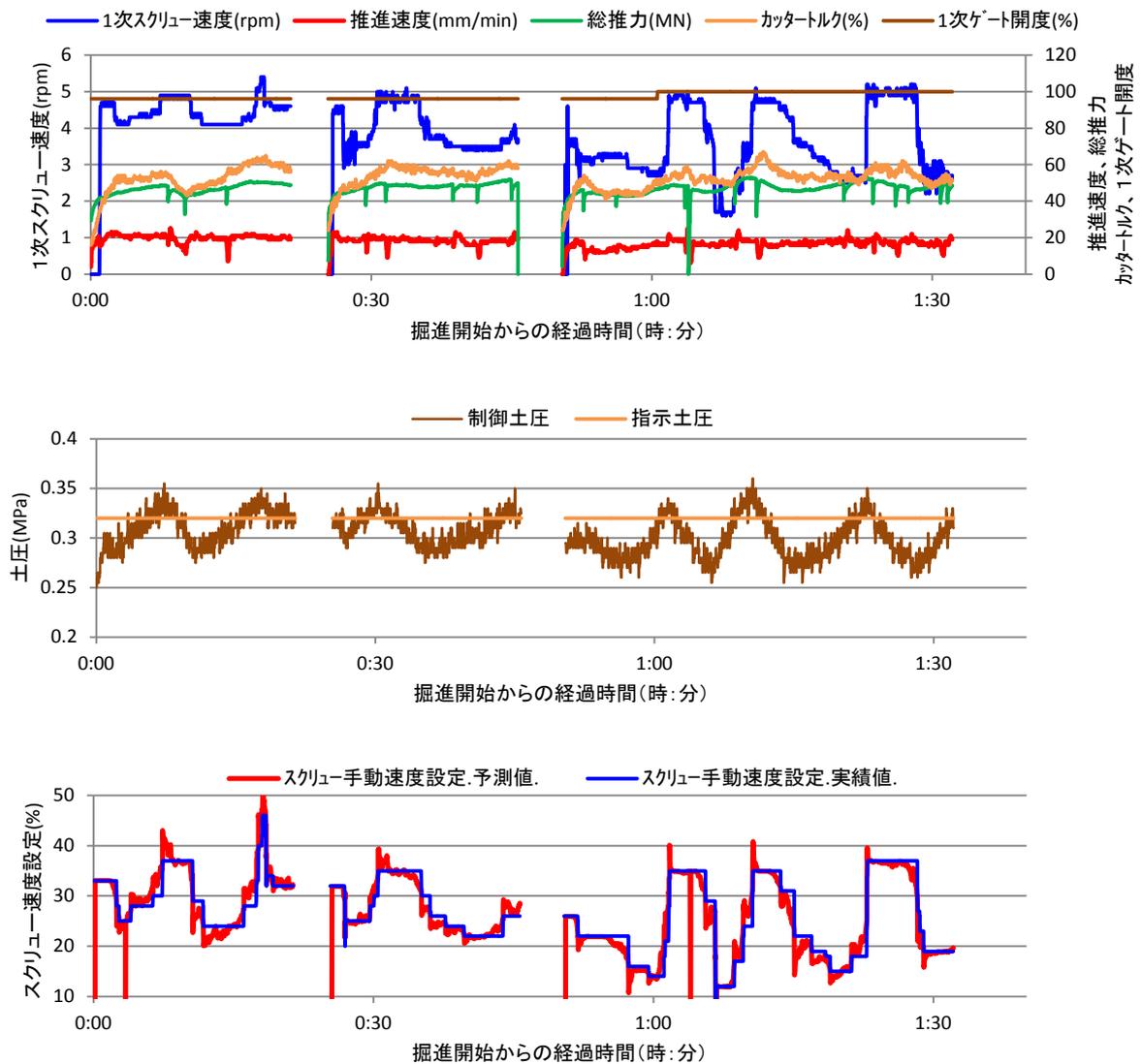


図-12 某 1 リングでの実績

※データが途切れている部分はシールドマシンが一時停止している状態

新たに AI モデルを作成して対応することとした。

本報告では新たに作成した AI モデルで予測した結果を示す。図-12 は 1 例として某 1 リング掘進時の各種データの実績を示す。上段の図は表-3 に示した特徴量(抜粋)の実績値であり、中段の図は指示土圧と制御土圧のデータ、下段の図はスクリー速度設定値の実績値と AI モデルが予測した結果を比較したものである。オペレータは主に指示土圧と制御土圧の差を見ながらスクリー速度設定を行っており、制御土圧が大きくなるとスクリー速度設定値を上げ、一方、制御土圧が低くなるとスクリー速度設定値を下げていることが分かる。それに対し図-12 下段の図から分かるように、AI モデルの予測値はオペレータの操作結果と概ね一致しており、適切な AI モデルであったと考えられる。

ちなみに、図-12 に示したリングでは他のリングに比べてスクリー速度設定の操作回数が多く、それに伴って制御土圧の上下動が大きく、良い操作だったとは言えない例を示した。3 節では良い操作をしたリングを選定して学習させたのに対し、今回は運用上の理由から全リングを対象に学習させたが、今後は良い操作をしたリングを選定した上で学習させていくことも課題と考えられる。

5. まとめ

土圧式シールドマシンの操作のうち、チャンバー内土圧の制御を目的としたスクリーコンベヤーの回転速度の操作に着目して、各種監視データと関連づけた土圧制御 AI モデルを作成し、現場で検証を行った。その結果、適切な監視データを特徴量として選定し、教師データとすれば、スクリーコンベヤーの回転速度設定値を予測する人工知能モデルを作成できることが確認できた。

今後は、シールドマシンの方向制御をするためのシールドジャッキの選択方法を予測する人工知能モデルを作成し、主なシールドマシンの操作を自動化できるようにしたいと考えている。その際、監視データに異常があった場合も考慮して、フェールセーフ機能を持たせて安全性を高めていく必要があると考えている。

謝辞: 本技術の開発推進にあたり、社内関係者、富士通グループ関係者、協立電機関係者にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ 29「シールド工法」, 2012.2
- 2) 杉山博一他: 人工知能によるシールドマシン操作に関する予備的検討, 土木学会年次学術講演会, VI-338, 2017.9