

「シミズ・シールド AI」によるシールド機自動運転の実証

増田 湖一

清水建設では AI を用いたシールド工事の施工合理化技術の開発を進めている。この技術は計画線形に対し自動的にセグメントの掘進計画を支援する「計画支援 AI システム」とシールド掘進機の位置情報等に基づき、操作方法を提示し自動運転も可能な「操作支援 AI システム」の2つの AI システムで構成されている。2つの AI システムを現場にて検証を行い「計画支援 AI システム」は線形誤差などの制約条件を満足する掘進計画を短時間で提案できること、「操作支援 AI システム」によるシールド機の自動機運転で精度よく掘進ができることを確認した。本稿ではこれら2つのシステムの内容と、現場実での検証結果について紹介をする。

キーワード：AI, シールド掘進機自動運転, 掘進計画, シールド機操作, 現場実装

1. はじめに

清水建設では、今後想定される熟練技能労働者の大量離職を見据え、生産性の向上と一層の安全性確保を目的とした、ICT, IoT, 人工知能 (AI) などの最新技術を活用した次世代型トンネル構築システム「シミズ・スマート・トンネル」の開発に取り組んでいる。

その中で、シールドトンネル工事を対象として AI を用いた施工合理化技術「シミズ・シールド AI」の開発を進めている (図-1)。



図-1 シミズ・シールド AI のイメージ

本システムは、施工前の掘進計画業務を支援する「計画支援 AI システム」と、シールド掘進機の自動運転を行う「操作支援 AI システム」の2種類の AI を基幹システムとして構成されている。

本稿では、これらのシステムの開発内容と実装検証について紹介する。

2. 計画支援 AI システム

(1) 計画支援 AI システムの役割

シールド工事では曲線を含むトンネル線形に対して標準セグメントと異形セグメントを組み合わせることでトンネルを構築する。また、曲線部のトンネル掘進はシールド機のシールドジャッキストロークを調節し、中折れ機構と余掘り装置を併用して行われる。

上記内容の検討は工事着手前に実施するが、施工時にトンネル線形の計画値と実測値との間にわずかではあるが誤差が発生するため、日常的に坑内測量を実施して再度計画する必要がある。これらの計画は従来、シールド機の形状や計画線形に基づいて三角関数を用いた理論計算によって算出し、「掘進指示書」としてトンネル作業員に周知していた。

「計画支援 AI システム」は上記計画を AI が担う。AI はセグメント種別とシールド機制御量を制約条件として機械学習と遺伝的アルゴリズムにより解を最適化することで、「掘進指示書」の内容を提案する。

(2) AI の試行内容

掘進指示書内容を提案するにあたって、AI は以下の項目について試行を行う。

(a) セグメントスケジュール

シールドトンネルは RC セグメントや鋼製セグメント、合成セグメントなど多種類のセグメントで構築される。また、それぞれに直線用や曲線用のセグメント

が存在し、施工時に蛇行が発生した場合に、蛇行修正のため曲線用セグメントのテーパ量を調節するため、Kピースの組立位置（角度）を個別に設定する。

本システムでは最適なセグメント種別の選択とKピース組立位置の組合せを探索する。

(b) シールド機の操作量設定

シールド機とセグメントの相互位置関係は一定でなく、掘進やセグメント組立を行うごとに変化する。本システムではセグメントスケジュールを実現可能とするシールドジャッキや中折れジャッキの制御量と必要に応じて余掘り量の組合せを探索する

(3) 計画支援 AI プログラムの開発

計画支援 AI システムの開発は、当社が保有するシールド工事の経験と、名古屋工業大学大学院工学研究科・加藤昇平教授の AI アルゴリズムのノウハウを融合した AI シミュレーションプログラムとして構築した。

完成したトンネルは平面線形に加えて縦断勾配の変化があるため、「計画支援 AI システム」は三次元での計画を提案する必要がある。しかしながら、最適解を探索するにあたって解の組合せ総数が膨大となり、従来の直接探索法による求解は現実的な時間では困難であるため、短時間で最適解を導くプログラム作成が課題となった。

そこで、本開発では生命進化に着想を得た特許技術である共進化的組合せ最適化（εCCICPSO）計算システムを活用した AI シミュレーションプログラムを作成した（図-2）。

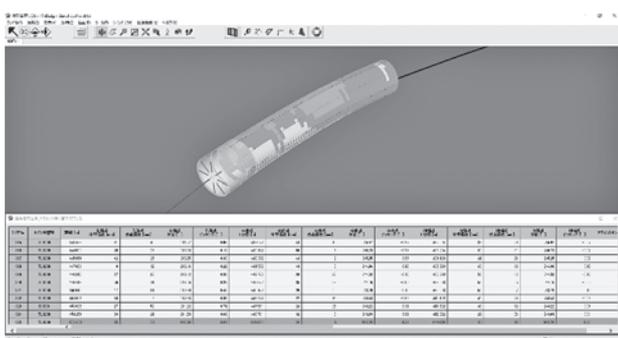


図-2 シミュレーション画面

AI は与えられた計画線形に対して、自ら設定した曲線部でのシールド機の運転制御方法、セグメントの割り付けといった試行条件に基づき模擬掘進を行い、その結果をトンネル線形に対する掘進軌跡の誤差や、シールド機とセグメント・掘削地山との干渉度合等を評価指標として得点化する。試行中に掘進誤差の許容値を上回った場合や、シールド機とセグメントが干渉

する可能性が出てきた場合には、その時点で試行終了となり、試行条件を再設定して新たなシミュレーションを実行する。AI は膨大な試行を重ねる中で、どのような条件を選択すれば高得点が獲得できるかを進化・学習していき、最終的にそれ以上は上積みができない最高得点を示したプランを解とし、掘進計画に展開する。

(4) 期待される効果

従来、人間が行っていた演算及び計画を AI が担うことで省力化に繋がる他、以下の効果が期待できる。

(a) セグメントへの過大な荷重作用回避

本システム最大の特徴ともいえるのが、将来のシールド機外面と掘削地山、及びシールド機内面とセグメントとのクリアランスまで考慮できることである。

従来の計画方法では上記2種類のクリアランスまで予測することは困難を極め、実施工時においてシールド機と地山もしくはセグメントに“せり”を発生させてしまうことがあった。その結果、セグメントへ作用する施工時荷重が過大となり、セグメントの損傷に至るケースがあった。

本システムでは、両クリアランスを確保できる計画を提案するため、安定した品質確保が可能となる。

(b) 周辺地盤への影響低減

曲線施工時には、コピーカッタを使用して掘削断面を拡張（余掘り）しつつシールド機を通過させる。掘削断面が大きくなるほど応力開放による地盤のゆるみなどの周辺地盤影響も大きくなる。

本システムでは、拡張量の過不足が無い計画を提案できる。そのため、シールド機通過に伴う周辺地盤への影響を低減できるほか、掘削土量が最小化されることによる建設廃棄物の減容化への寄与も期待できる。

3. 操作支援 AI システム

(1) 操作支援 AI システムの役割

シールド施工現場では、日常の測量結果を元に「掘進指示書」が作成され、それに基づきシールド機の操作が行われる。

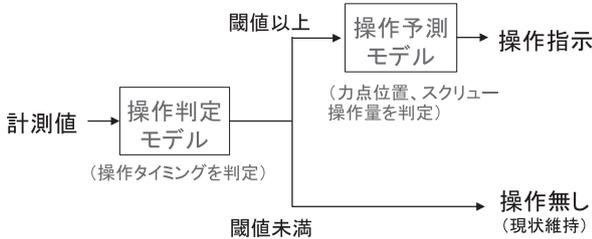
この時、オペレーターはシールド機のピッチング値やローリング値、ジャイロコンパスから得ることができる姿勢・方向の情報や、総推力やカッタトルク及び各種ジャッキストローク値など様々な情報を監視し操作内容に反映する必要がある。

このような膨大な情報を瞬時に判断し、計画線形通りの掘進を実現するため、シールド機操作方法の最適

解を提供するのが「操作支援 AI システム」である。

(2) 実際の操作特性を考慮した AI モデル作成

施工時にはシールド機から得られるデータ情報（特微量）は時々刻々と変化するため、それに伴い AI モデルの予測値も変動する。しかしながら、AI モデルの予測値に合わせて常に操作することは現実的ではない。そこで、図—3 に示すように、操作の必要性の有無を判定する「操作判定モデル」と、操作の設定値を判定する「操作予測モデル」の2種類で構成することとした。すなわち、時々刻々のデータで操作が必要な状態か否かについても AI で判定し、操作が必要な状態であれば操作量を予測して指示するという方式とした。



図—3 操作支援 AI モデルの構成

(a) 操作判定モデル

操作判定 AI モデルの学習方法について図—4 に示す。

① 操作有無の判定

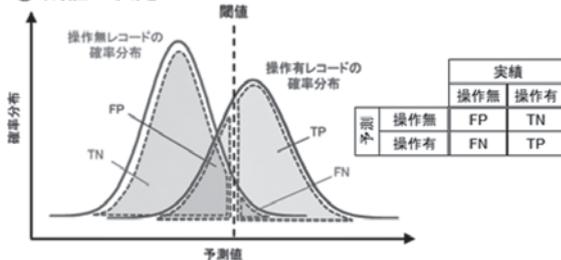
② データの重みづけ

操作無レコード			操作有レコード		
レコード番号	操作判定値	重み	レコード番号	操作判定値	重み
1	0	1	1	1	n_0/n_1
2	0	1	2	1	n_0/n_1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n_0	0	1	n_1	1	n_0/n_1

③ 操作判定モデルの作成



④ 閾値の決定



図—4 操作判定 AI モデルの学習

まず、①オペレーターが操作したときのレコードと操作しなかったレコードを区別する。基本的には操作しなかったときのレコード数が多いため、両者のバランスをとるため、②に示すようにデータの重みづけを行う。③操作判定値を目的変数とする教師あり学習によって操作判定モデルを作成する。④学習済みの操作判定モデルより出力された予測値から確率分布を求め、操作必要の有無を判定するための閾値を決定する。

(b) 操作予測モデル

操作の設定値を予測するモデルは、その設定値を目的変数とする教師あり学習によって作成する。教師データは図—4 の④における TP と FN とする。これは、操作判定 AI モデルで閾値以上と判定されたレコード、すなわちオペレーターが必要に応じて操作したときのレコードと、操作する必要があったにもかかわらず操作しなかったときのレコードである。これにより、操作変更が必要であると判定されたデータのみを用いた学習となり、常に操作しないことを良しとする AI モデルになることを避けることが可能となる。

(3) データチェック機能

本システムは、前述の AI モデルの適切な学習および良質な予測を目的としてデータチェック機能を装備している。以下にこの機能を3つの部分に分かれており、これらの全てが正常であれば AI モデルにデータを渡して予測を行わせる。

(a) データチェック部

まず、特徴量となるデータを読み込み、データの欠損、あるいは計測器の測定範囲外となるようなデータがないかを確認する。そのような状態が継続する時間に応じて異常もしくは緊急性を判定し、エラーを表示してオペレーターに判断を仰ぐ。

(b) 方向チェック部

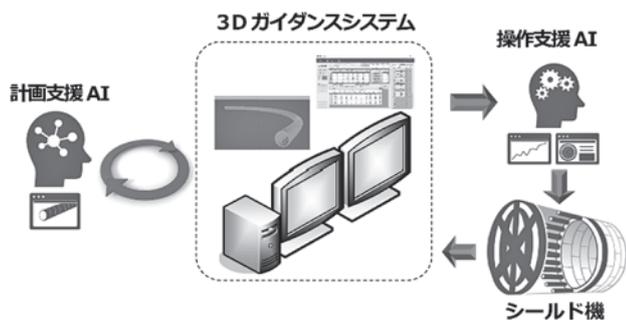
シールド機の計画線形からのずれ量（水平偏差、鉛直偏差）や、指示した方位やピッチングとの偏差が管理値・限界値を超えていないかを確認する。管理値を超えた場合は異常時と判定し、限界値を超えた場合は緊急時と判定する。これらの判定機構は自動運転の安全管理に必要なものである。

(c) 未学習チェック部

データが AI モデルの学習範囲内であることを確認する。

4. シミズ・シールド AI システム

清水建設では、施工合理化の加速を目的として、前述の2つの AI システムを統合運用する「シミズ・シー



図一五 シミズ・シールド AI 構成

シールド AI」を今回開発した（図一五）。

シールド機の現在位置など各種の掘進管理情報は 3D ガイダンスシステムに取り込まれ、それぞれの AI が要求する情報をガイダンスシステムが提供する。また、計画支援 AI から提案された掘進計画をもとに 3D シミュレーションを行い「掘進指示書」として展開、操作支援 AI へ指示値を伝送する。

これにより、作業所職員のアクションはシステム実行と結果確認・承認操作のみで良く、煩雑な検討や書類作成業務から解放される。

5. 現場実装によるシステム検証

これまで、操作支援 AI は複数のシールド工事現場に実装し、検証を繰り返してきた。また、計画支援 AI は操作支援 AI を実装した工事現場の線形モデルを使用して試行を繰り返してきた（表一1、図一6）。

表一1 これまでの実装検証現場

シールド形式	シールド機外径	トンネル延長	施工場所
泥土圧	3.48 m	580 m	九州
泥水式	11.93 m	1,854 m	関東圏
泥土圧	16.10 m	6,986 m	関東圏
泥土圧	4.08 m	1,526 m	関西圏



図一六 現場実装状況

ここでは、令和3年度から令和4年度にかけて関西圏で施工された工事現場（泥土圧シールド工法、シールド機外径：φ4.08 m）において2つの AI システム

を「シミズ・シールド AI」として、データリンク機能を含めて実施した運用検証について報告する。

(1) 検証の着目点

各 AI プログラムの実効性はこれまでの試行により確認できていたため、今回の現場実装では以下の点に着目して検証を実施した。

(a) シールド AI システムとのフィッティング

これまでの試行は単体での試行であり、今回初めて工事現場に実装した「シミズ・シールド AI」システムを運用し、システム全体の操作性と実効性の確認を実施した。

(b) リモート運用

本システムの運用については、将来的には複数の工事現場の統合遠隔管理を視野に入れている。このため、シールド AI システム本体は工事現場に設置するが、計画支援 AI モデルは共同開発者である名古屋工業大学の研究室に設置し、クラウドサーバーを利用してデータリンクする形態とした。本検証では、このような形態でのリモート運用の実行性について検証を実施した。

(c) シールド機自動運転

これまでの操作支援 AI 実装検証は、AI が提案したジャッキパターンに従ってオペレーターがシールド機の操作を実施してきた。本検証では事前にシールド機製作メーカーと打合せを行い、インターフェースを介して AI が直接シールドジャッキの操作を行える仕様を構築した。

(2) 検証結果

(a) シールド AI システムとのフィッティング

シールド AI システムを介してそれぞれ2つの AI が要求する各種データの受渡しを問題なく行えることが確認できた。本検証では計画支援 AI に与える制約条件を、線形誤差±35 mm 以内、テールクリアランス5 mm 上確保として試行させたが、40 リング分の計画を約5分で提案できた。操作支援 AI への指示値の受渡しについては、システム内の掘進指示書作成機能を利用すれば、ダイレクトに行えることを確認した。

(b) リモート運用

今回は、ガイダンスシステムと計画支援 AI モデルはデータを DLL 化してクラウド経由で数万回のやり取りを実施させた。これについては、共有する DLL ファイルに2つのシステムが同時にアクセスした場合、クラウド上のドライブが同期できないという不具合が発生することが確認された。

リモート運用による計画結果の不良がない事は確認できたが、今後は異なるアプローチでの運用を試行したいと考えている。

(c) シールド機自動運転

従来のシールド機操作パネルに「自動／手動」切替SWとAIが考えたジャッキパターンの表示を追加して検証に臨んだ(図-7)。

自動運転時にはAIがタイムリーに直接シールドジャッキ選択をし、指示書に対して方位角 ± 0.05 deg, 鉛直誤差 ± 5 mm 以内で掘進できた。

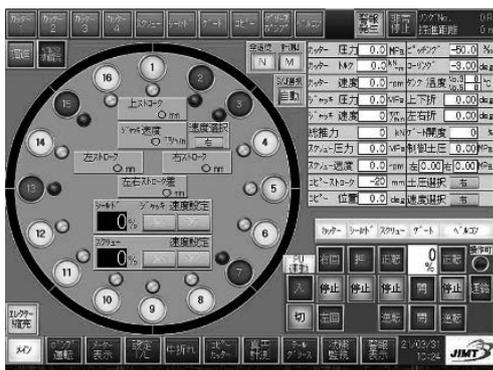


図-7 シールド機操作パネル

6. おわりに

本稿で紹介した関西圏のシールド工事現場は令和4年6月9日に無事到達することができた。

今回の実装検証を通じて得られた課題を反映したシステムチューニングを行い、令和5年には新たな工事現場に実装し、今後もシールドトンネル現場の生産性・安全性の向上を図り、国民の生活と安全を守る良質な社会インフラの整備の一助となるべく「シールドAIシステム」の開発を推進してゆく所存である。

最後に、本システムの開発にあたり現場における検証を快諾いただいた発注者の皆様をはじめ、関係者各位に心から感謝の意を表明します。

JCMA

[筆者紹介]

増田 湖一 (ますだ ひろいち)
清水建設(株) 関西支店
新名神枚方トンネル建設所
工事長

