

シールド掘進自動化に向けたシステムの開発

(株)大林組 正会員 ○東野 弘幸 正会員 松原 健太
(株)大林組 正会員 西森 昭博 正会員 上田 潤
(株)大林組 正会員 星野 智紀

1. はじめに

近年、人口減少や少子高齢化に伴い、シールド技術者や熟練の技能労働者が不足しており、ひとりにかかる仕事量を減少するため工事にかかる省力化が求められている。この課題に対応するために、より一層の生産性向上を実現する自動化技術の開発と普及が必要である。また、シールド工事においては他工種に比べて機械化が進んでいるが、未だにシールドの自動化には至っていない。このような状況下において、あらゆるシールドトンネルの現場で運用可能なシールド自動化システムの開発に取り組んでいる。

シールド自動化システムは、シールド掘進に係る作業を分解し、次の要素技術から構成される。シールド自動測量、セグメント自動組立、シールド自動運転、シールド設備自動化、掘削土砂自動搬出、裏込め自動注入の6つである(図-1)。

これらの要素技術について個別に開発を進め、後に統合してシールド掘進作業を自動化することを目指している。シールド自動測量は日々の管理にかかる測量を省力化する技術であり、シールド自動運転はシールドトンネルの線形管理や品質管理を容易にする技術である。6つの要素技術をさらに細分化し、個別技術の開発を進めており、本稿では、細分化した個別技術のうち、シールド自動測量からは「セグメントの真円度自動計測」について、シールド自動運転からは「シールド三次元線形管理システム」および「シールド方向制御学習システム」について開発状況を報告するものである。

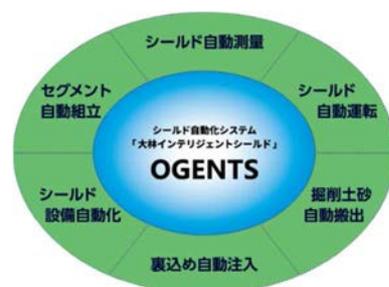


図-1 シールド自動化システム

2. セグメント真円度自動計測システム

(1) これまでの課題と開発の経緯

シールド工事では、セグメントの品質管理の観点から、目開き、目違いをなくし、真円を確保しながらセグメントの組立て作業を行うことが肝要である。しかし、組立位置付近には様々な後方設備が配置されているため、直接内空を測定することが難しい。その対策として、計測リングとレーザー距離計を用いてセグメントの縦横斜め方向の内空を間接的に計測する真円度計測装置(図-2)を用いる場合があり、真円度の計測結果を元に、セグメントの組立て作業に微修正をくわえながらトンネルの真円を確保していた。しかし、計測するポイントが限られているため大断面シールドでは変形モードを正確に把握することができず、施工にフィードバックすることが難しくなる場合がある。また、計測位置が切羽付近に限定されているためテール通過後の真円度の変化を計測することが難しいことや、セグメント組立時に作業員に接触し故障しやすいことや、メンテナンスに手間が掛かることなどが課題となっていた。

そこで、真円度を周方向に連続的に計測することができ、メンテナンスが容易で、テール通過後の計測も可能な計測装置の開発に取り組んでいる。2D-RGB赤外線センサーと3D-全方位センサーの2種類の点群センサーを使用した真円度計測装置を試作し、施工中のシールドトンネルで計測実験を実施した。



図-2 従来の真円度計測装置の例

キーワード シールド, 真円度, 点群センサー, 線形管理, 三次元モデル, 方向制御

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組

(2) 真円度計測装置の概要

a) 2D-RGB 赤外線センサーの概要

2D-RGB 赤外線センサーは、固定型の点群センサーで、RGB 解像度 1920×1080、点群解像度 512×424、深度の取得範囲 0.5～8.0m、水平 70°、垂直 60° の RGB 画像と点群データを取得可能なタイプを使用している。フレームレートが 30fps、1 秒間に約 650 万か所の点群データを取得できる。

セグメントの内面を見渡せる任意の位置にセンサーを設置し、専用の計測ケーブルとアダプターを介し USB ケーブルで計測用 PC に接続する(図-3)。取得した RGB 画像から PC 上で計測断面を特定し、そのピクセル座標に対応する点群座標を抽出し内空を計算する方式を採用している。

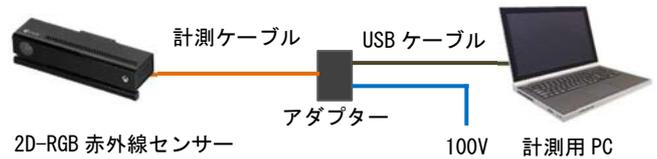


図-3 2D-RGB 赤外線センサーを用いた真円度計測装置

b) 3D-全方位センサーの概要

3D-全方位センサーは、360°方向に回転するレーザー照射機を用いて全方位の物体までの距離を測定し、3次元点群データを取得する点群センサーであり、360°の水平方向の解像度が約 1800 で点群取得ピッチは約 0.2°、垂直方向の点群取得角度は約 30°、レーザーライン 16 か所、点群取得ピッチは約 2.0°のタイプを使用している。センサーの周波数は 5～20Hz であり、1 秒間に約 30 万か所の点群データを取得できる。

セグメントの内面を 360°方向に見渡せる任意の位置において、トンネル軸と 3D-全方位センサーの回転軸を正確に合わせて固定し、専用の計測ケーブルとインターフェース BOX を介しイーサネットケーブルで計測用 PC に接続する(図-4)。取得した全点群データから、セグメント内面の点群データだけを抽出するアルゴリズムを使用し、内空を計算する方式を採用している。

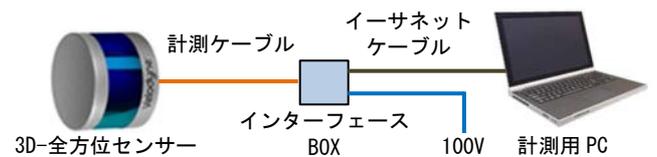


図-4 3D-全方位センサーを用いた真円度計測装置

(3) 真円度計測実験の結果

a) 2D-RGB 赤外線センサーの計測実験結果

2D-RGB 赤外線センサーを使用した真円度計測装置を用いて、テール通過後のセグメントの真円度の計測実験を実施した。セグメントの組立やハンドリング、裏込め注入、枕木設置等、シールドの掘進作業に支障しない位置として運転席前の架台を選定し、テール通過後のセグメントの内面が見渡せる任意の角度にセンサーを設置している(図-5)。

本計測実験では、RGB 画像上のセグメントの目地を利用して計測断面を設定し、1 断面あたり 1280 か所の測点を設けている。そして、計測断面を全周で 16 分割し、22.5° の範囲の内空計測値から真円度を算出する方式を採用している。

一部、後続台車の設備等の影響によりセグメント内面が視準できない位置や、インバート付近で水の影響でデータが取得できない測点もあったが、22.5° の範囲内に少しでもデータ取得可能な測点があれば計測できるため、1 台のセンサーで円周方向に連続的に真円度を計測することが可能となった(図-6)。また、従来計測できなかったテール通過後の真円度の計測が可能となった。

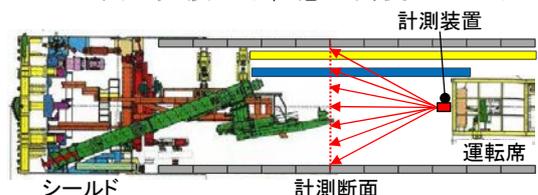


図-5 2D-RGB 赤外線センサーを用いた計測断面

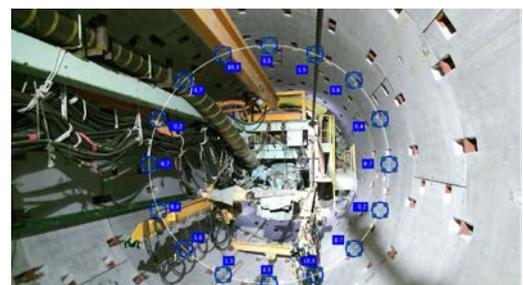


図-6 2D-RGB 赤外線センサーによる真円度計測結果

b) 3D-全方位センサーの計測実験結果

3D-全方位センサーを利用した真円度計測装置を用いて、シールドテール内におけるセグメントの真円度の計測実験を実施した。切羽側 1 リング目のエレクターと作業台車の隙間を計測断面として選定したが、この位

置ではスクリーコンベヤーとエレクターの一部に支障するため、1台のセンサーで全断面を計測することができない。そこで、計測器を2か所に設置し、計測データを重ね合わせる方式を採用している（図-7）。

本計測では、3D-全方位センサーの回転軸をトンネル軸に合わせ、計測断面を設定している。1断面あたり約1800か所の測点を設け、最小二乗法でセグメントの中心座標を推定し、全周を16分割し22.5°の範囲の各測点までの距離を元に真円度を算出する方式を採用している。なお、計測にかかる時間は1断面あたり約30秒である。

3D-全方位センサーは計測面に対し360°方向に直角にレーザーを照射することができるため、2D-RGB赤外線センサーに比べデータの欠損が少なくデータのばらつきも小さい傾向がみられた。また、上記の方法により計測データを重ね合わせることでデータ欠損部を補完することができ、円周方向に連続的に真円度を計測することが可能である（図-8）。

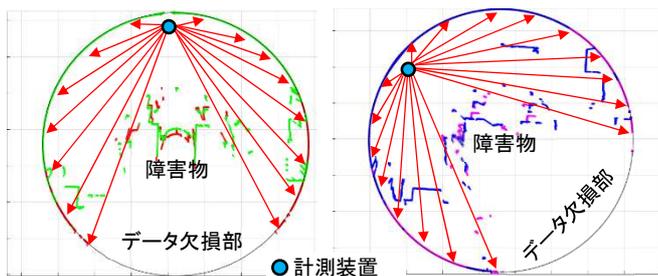


図-7 3D-全方位センサー計測データの重ね合わせ

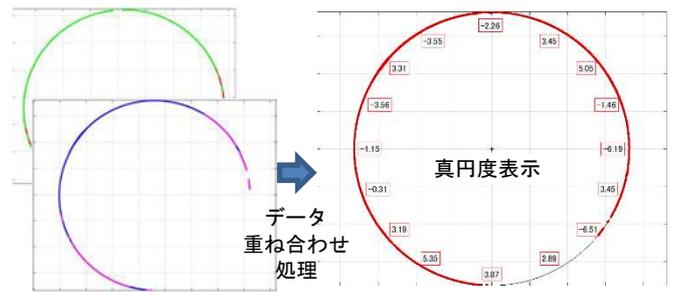


図-8 3D-全方位センサーによる真円度計測結果

2D-RGB赤外線センサー、3D-全方位センサーのいずれも、セグメントの変形モードをより詳細に把握することができるようになり、従来よりも施工にフィードバックしやすい。また、センサーの台数が減ることでメンテナンスが容易となり、計測位置が作業エリアから離れているため故障のリスクも低減できる。

3. シールド三次元線形管理システム

(1) これまでの課題と開発の経緯

トンネルの大深度化にともない、土丹などの硬質地盤を掘削するシールドが増加している。硬質地盤において、掘進中のセグメントの損傷を防止するには、計画線路上にセグメントを正確に組み立て、シールドとのクリアランスを確保するとともに、無理なジャッキ操作によるセグメントへの偏荷重の作用を防止しながらシールドの方向を制御する。そのためには、シールドが通過する断面を確実に掘削する必要がある。とくに蛇行修正や曲線施工する場合には連続的に余掘りすることになるが、その軌跡は複雑な立体構造となる。そこで、3Dモデルにより余掘りとクリアランスを立体的に管理できるシールド三次元線形管理システム（以下、本システム）を開発した。

(2) シールド線形管理フロー

シールドの線形管理では、作業終了後に測量を行い、シールドとセグメントの現在位置・向きや計画線形からの偏差を確認する。そして、現状のセグメント割付計画にもとづき、切羽先端のセグメントを起点にセグメントの組立を幾何学的にシミュレーションし、目標とする将来位置での計画線形からの偏差を確認する（セグメント将来位置予測）。蛇行修正が必要な場合には、セグメント種別（ストレート、テーパー）やKセグメント位置（テーパーの効き位置）の変更など、セグメント割付計画を修正する。そのあと、修正したセグメント割付計画に対してシールドの進行計画を立てる（シールド将来位置予測）。このとき、セグメントとのクリアランスを確認するとともに、曲線区間では余掘り量を算出する。そして、これらの計画を反映した掘進指示書を作成する（図-9）。本システムでは同様の線形管理フローを基本とし、セグメントとシールドの将来位置、クリアランス、および余掘りを三次元でシミュレーションする（図-10）。

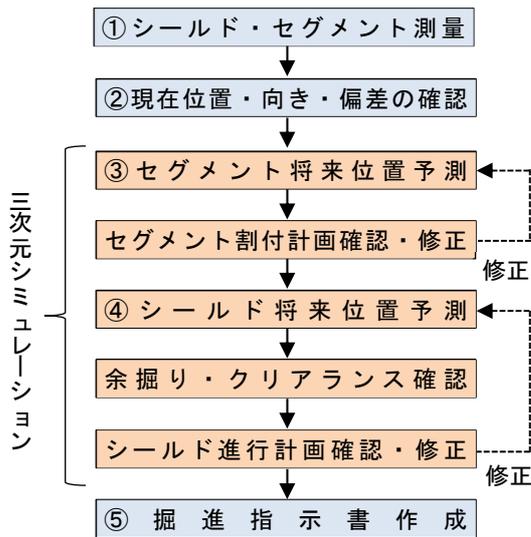


図-9 シールド線形管理フロー

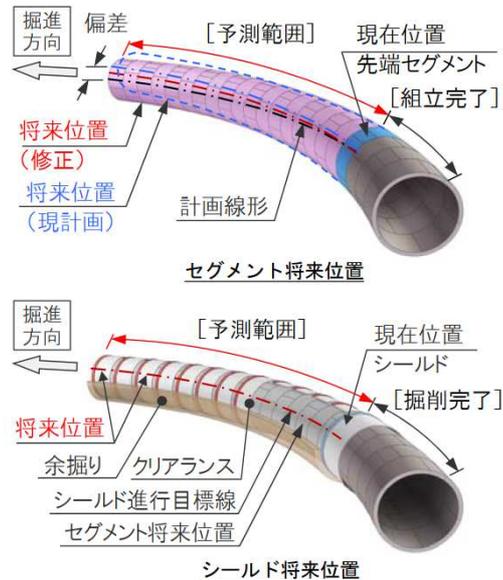


図-10 三次元シミュレーションイメージ

(3) シールド三次元線形管理システム

a) システム概要

本システムは、将来位置予測システムと三次元表示システムで構成される。将来位置予測システムでは、三次元でシールドとセグメントの将来位置をシミュレーションし、その中心座標値を三次元表示システムに送信する。三次元表示システムでは、将来位置の中心座標値からシールドとセグメントの 3D モデルを生成し、余掘りとクリアランスを算出し表示する。

b) 将来位置予測システム

将来位置予測システムは、各メーカーが保有する掘進管理システムのうち、セグメント組立計画とシールド進行計画の部分で、施工経験を反映し、カスタマイズしたものである。

・セグメント将来位置予測（セグメント割付計画修正）

現状のセグメント割付計画に対し、蛇行修正する場合は、セグメント割付の修正方法（手動・半自動・自動）、修正位置までの距離と目標偏差（水平・鉛直）を設定し、セグメント割付計画を修正する。今回、テーパセグメント数量の制約を考慮し、テーパセグメント配置位置や K セグメント位置の変更のみを許容する半自動の修正方法を設定した。また、シールドがすでに掘削した区間（シールド現在位置）では、セグメントの割付変更ができないため、その区間に組み立てるセグメントが掘削された断面内に配置されていることを確認する機能を追加した。フローを図-11 示す。

・シールド将来位置予測（シールド進行計画）

セグメント割付計画から設定される目標線上をシールド管理点が進むようにシミュレーションする。今回、シールド管理点を現場ごとに任意に設定できるようにするとともに、クリアランスの偏りからシールドとセグメントの相対位置関係を改善したい場合には、目標線を調整できるようにした。また、シールドがすでに掘削した区間では、シールド胴体が通過する断面が掘削されていることを確認する機能を追加した。フローを

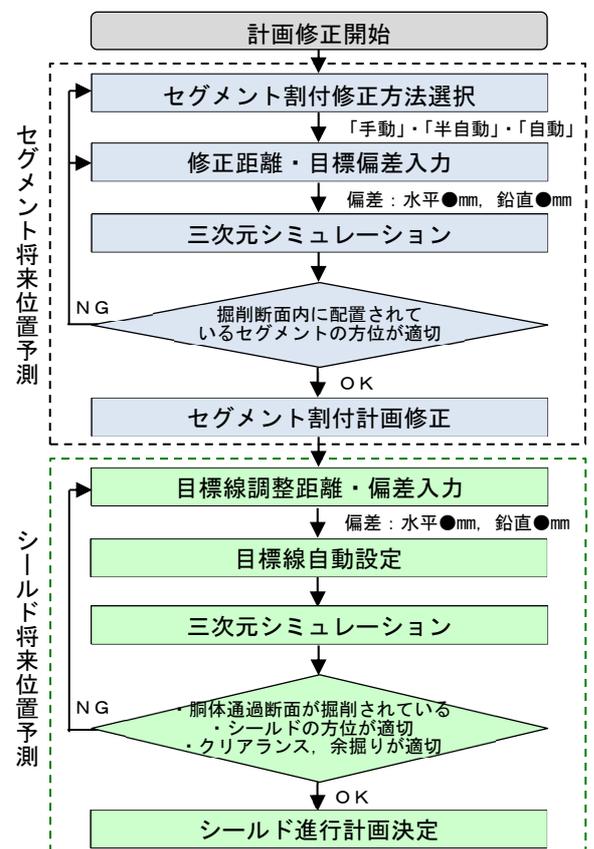


図-11 将来位置予測フロー

図-11 に示す。なお、将来位置予測は、シールド進行計画、セグメント割付計画修正の順に実施することも可能である。

c) 三次元表示システム

三次元表示システムは、CIM に用いられるソフト「Navisworks」のアドオンである「Navis+」をカスタマイズしたシステムである。余掘り・クリアランスを算出するための 3D モデルの生成は、「AutoCAD」のプラグインで自動処理する。余掘り・クリアランスの表示は、判別しやすいメッシュによるコンター表示とした。

・余掘りの算出

将来位置（10cm ごと）の中心座標値をもとにシールドを 3D モデル化する。カッターヘッドに格子点を生成し、その格子点が通過する軌跡とシールド胴体が通過する軌跡との最大離隔を必要余掘り量として、コピーカッターの出代とその範囲を算出する。

・クリアランスの算出

将来位置（1 リングごと）の中心座標値をもとにセグメントを 3D モデル化し、その外周面に格子点を生成する。シールドテール部内面の通過軌跡とセグメントの最小離隔を各格子点でのテールクリアランス・テールエンドクリアランスとして算出する。なお、クリアランスは 1 リング掘進ごとの押上り、組上り時の値も算出する。

・余掘り・クリアランス表示

余掘り・クリアランスは、メッシュごとにその値に応じて色別するコンターにより表示する。メッシュの大きさは格子点の数を指定することにより任意に変更可能である。表示は任意の将来位置（リング単位）を指定可能であり、マウス操作によりあらゆる方向から余掘りやクリアランスを立体的に確認できる（図-12、図-13）。

本システムではセグメントとシールドの将来位置予測機能および余掘り・クリアランスの計算・表示機能により、これまで方向修正計画に要していた時間を 30%短縮することが可能となる。また、クリアランスを適切に管理することが容易となり、セグメントの割れ欠けなどの発生の頻度を低減することができる。

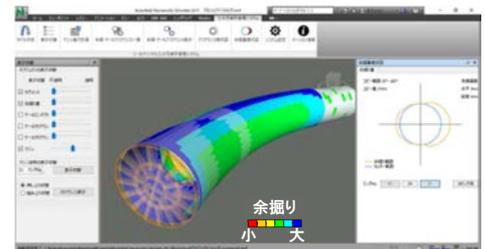


図-12 余掘り表示画面

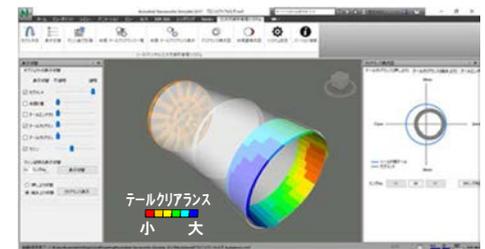


図-13 クリアランス表示画面

4. シールド方向制御学習システム

(1) これまでの課題と開発の経緯

シールドの方向制御を行う際、シールド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。オペレーターは、シールドが計画線形から逸脱しないよう方向を制御するため、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、技量や癖の違いにより、シールドの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、これまでにシールド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」（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）」（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。

(2) 方向制御学習システムの概要と課題

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-14 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の

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の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。

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。

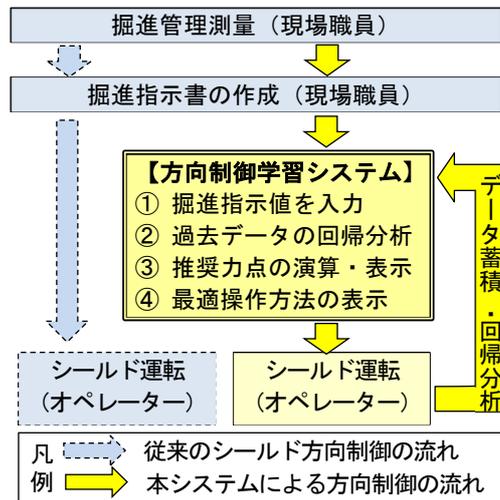


図-14 方向制御学習システムの概要

(3) 新たな改良点

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、実際のシールドの操作においてはクラッ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、シールドジャッキが同数である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。

- ①オペレーターが掘進指示値（水平・鉛直方向）を入力する。
- 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（ $Fr-x, Fr-y$ ）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（ $Fj-xn, Fj-yn$ ）を求める。
- ④推奨力点（ $Fr-x, Fr-y$ ）とシールドジャッキ力点（ $Fj-xn, Fj-yn$ ）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-15に示す。

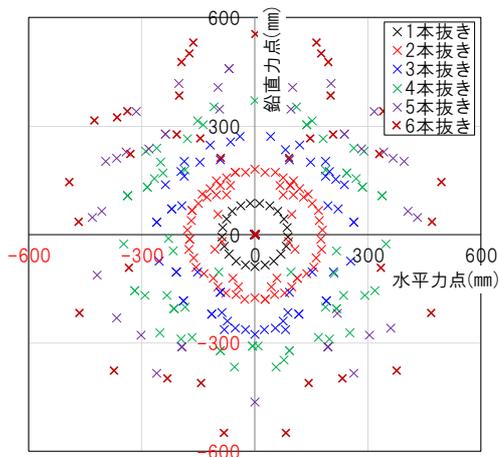


図-15 カ点分布（初期導入ジャッキパターン）
※所定のシールドジャッキ圧・同調圧におけるカ点分布

(4) 実現場適用の結果

新たな改良点の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-16、運用状況を図-17に示す。

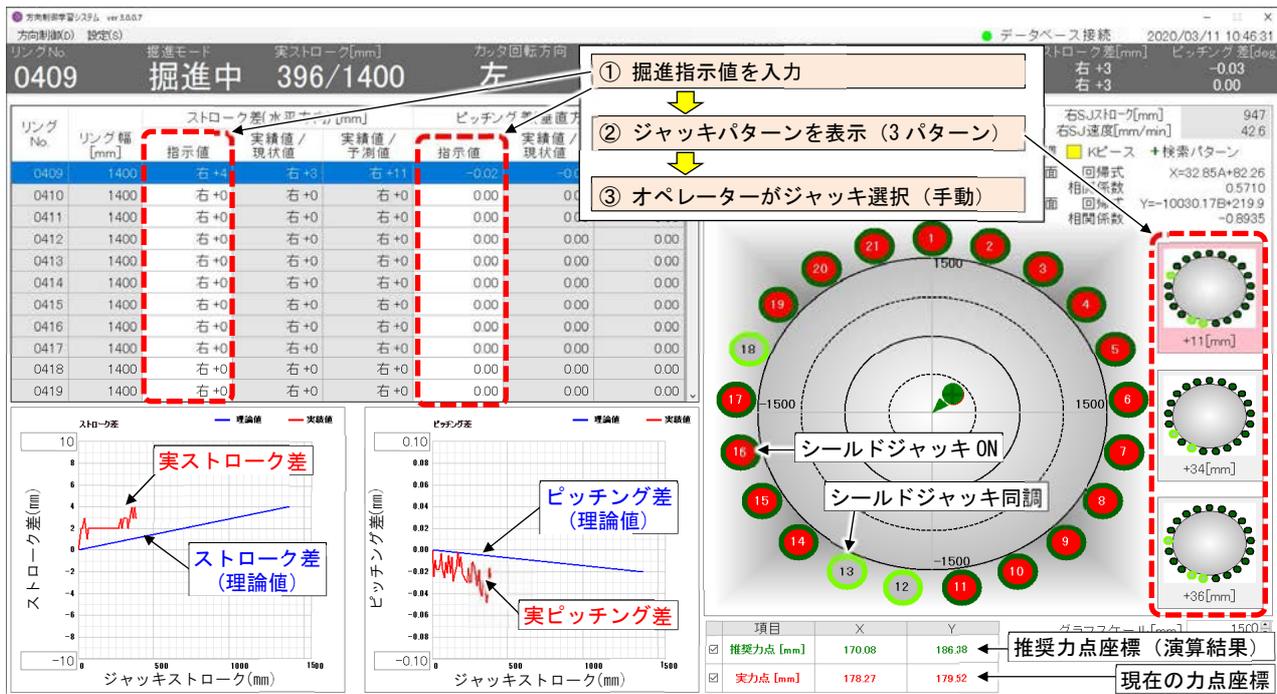


図-16 方向制御学習システム画面

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の方向制御を行う。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-18)、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 cutter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-19)。具体的には、cutter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



図-17 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

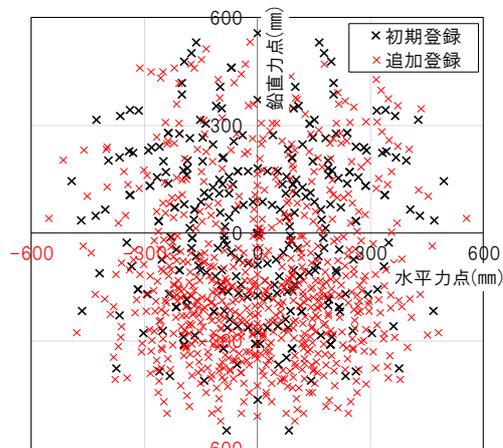


図-18 力点分布(蓄積後ジャッキパターン)

※所定のシールドジャッキ圧・同調圧における力点分布

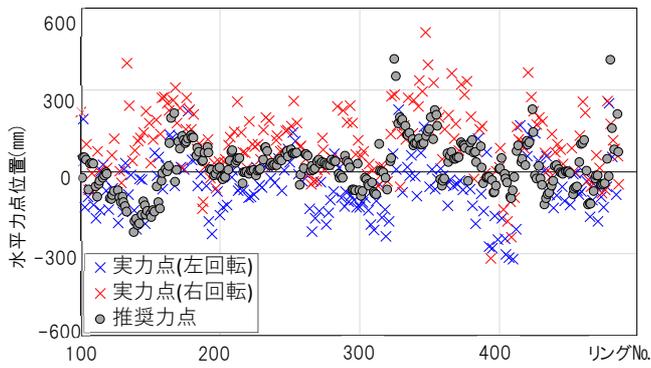


図-19 推奨力点と実力点 (1号機, 水平方向)

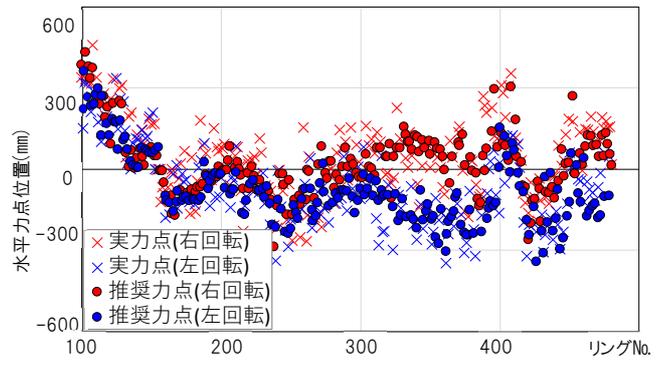


図-20 推奨力点と実力点 (2号機, 水平方向)

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。以上を考慮し、2号機への導入に際して、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改良をくわえた。

この改良を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-20、表-2)。

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

5. おわりに

シールド掘進の自動化に向けた3つの個別技術について開発状況を報告した。セグメント真円度自動計測においては、2種類の真円度計測装置を試作し、いずれのタイプも円周方向に連続的に真円度を計測することが可能となった。シールド三次元線形管理システムにおいては、三次元モデルを用いることで平面曲線と縦断曲線が複合する複雑な線形の管理に活用できる。シールド方向制御学習システムにおいては、従来システムに改良をくわえることで、方向制御学習システムの汎用性向上を図ることができる。また、AIとの連携によりシールドを自動で方向制御できるよう目指す。これらの個別技術を組み合わせることで、最適な線形計画に基づいて掘進でき、線形計画立案にかかる時間を削減できるとともに、シールドトンネルの品質向上に寄与できるものとする。なお、残りの要素技術についても個別技術の開発を進めているが、別の機会に報告することとする。

【参考文献】

- 1) 西森他：点群センサーを使用したシールドトンネルの真円度計測装置の開発，土木学会，第75回年次学術講演会，VI-939，2020
- 2) 上田他：3Dモデルシミュレーションによる三次元シールド線形管理システムの開発，土木学会，第73回年次学術講演会，VI-154，2018
- 3) 星野他：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，土木学会，トンネル工学報告集，第30巻，II-7，2020