シールド工事全体を自動化する技術(OGENTS)の開発と実施工への適用

(株)大林組　正会員　○河口　琢哉　正会員　林　成卓
(株)大林組　正会員　相馬佳奈美　正会員　岩田　朋也
(株)大林組　森野　弘之　中本　淳

１．はじめに

近年，建設業では少子化や若年労働者の建設業離れに加えて高齢者の退職などに起因する労働力や熟練技能者の不足が課題となっている．その中でもシールド工事は専門性の高い作業が多く，近年では長距離，大断面，大深度，小土被り，高速施工など難度の高い工事が増加していることから，安全・品質を確保しながら省力化できる自動化技術が強く求められている．

本稿では，当社が開発を進めるシールド工事全体を自動化する「大林インテリジェントシールド:OGENTS」の内容を紹介するとともに，実施工へ適用した事例について報告する．

２．シールド自動化技術の概要

シールド工事は，(1)坑内での測量・計測，(2)シールド機の運転，(3)掘進に伴う掘削土砂の搬出，(4)セグメント背面への裏込め注入，(5)シールド設備の点検，(6)セグメントの組立など多くの作業から構成されている．これら複数の作業を一度に自動化することは非常に難度が高いため，まずは個別の自動化技術の開発・適用を推進して，これらを連携させることとした．シールド工事自動化システム「大林インテリジェントシールド：OGENTS」は，シールド工事に係る 6 つの作業の自動化技術から構成され，それらを連携して運用することで，シールド工事全体の自動化を達成するものである（**図-1**）．



図-1 OGENTS 概要

３．OGENTS で自動化する６つの作業

(1) シールド自動測量

シールド工事では，トンネルの出来形や品質を確保するために，シールド機とセグメントの測量や，セグメントの真円度やテールクリアランスの計測を行っている．シールド機とセグメントの測量は，測量時間が掘進の停止する昼勤と夜勤の交代時に限られており，働き方改革で労働時間短縮が求められる昨今では，作業の効率化が強く求められている．また，測量には正確性が求められ，限られた時間内で迅速に実施するには多くの経験が必要であった．セグメントの真円度やテールクリアランスの確認は，掘進・組立中のセグメントの損傷を防止するために重要であるが，輻輳した坑内において人為計測できる頻度やタイミングは限られており，計測作業の負担も大きいのが実状である．これらの状況をうけて，坑内での測量・計測作業について，主に以下の自動化技術を開発し実施工への適用を推進している．

a) 坑内自動測量システム

坑内自動測量システムは（**図-2・写真-1**）は，自動視準機能を有するトータルステーションをタブレット端末で遠隔操作してシールド機やセグメントの測量を行うものである．測量結果はタブレット端末にて坑内で確認できるとともに，ワイヤレス通信を使って後述の「自動掘進指示システム」にも自動転送できる．従来は，2 人以上で実施していた坑内測量を 1 人で対応でき，作業時間も 30%短縮できる．

キーワード　シールド，自動運転，方向制御，機械学習，省力化
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　㈱大林組　ＴＥＬ：03-5769-1318

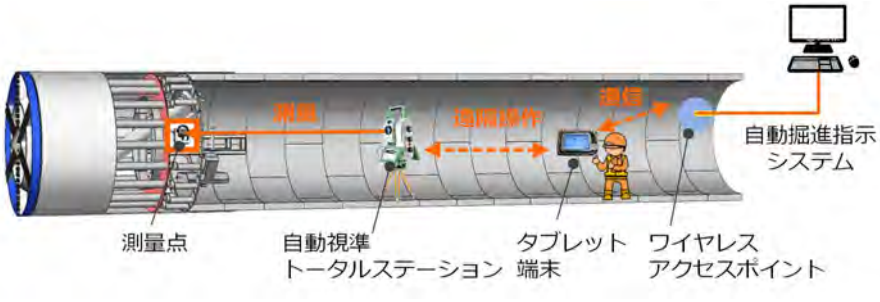


図-2 坑内自動測量システム概要図



写真-1　坑内自動測量システム

b) セグメント真円度自動計測システム

セグメント真円度計測システムは，汎用型の 3D-全方位センサーを用いることで，組立後からテールブラシにかかるまでのセグメントの真円度を連続的に計測するものである（**写真-2**）. 真円度の状態は, 数値とグラフで確認できるとともに, 掘進中の変化傾向も把握できる．計測結果をセグメント組立や形状保持装置等の管理に反映させることで，真円度を精度良く保つことができるため，ひび割れや欠けの発生を防止できる．また，このシステムを用いることで高所や狭隘箇所での人為計測が不要になり，安全性も向上する．

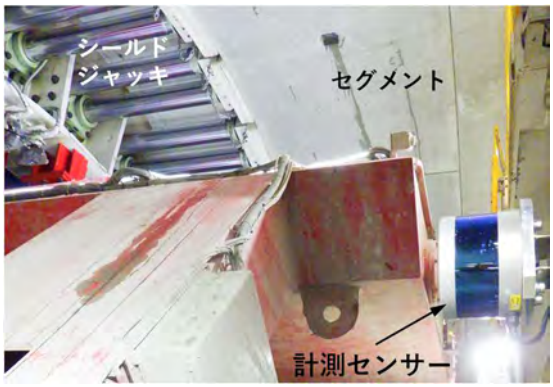


写真-2 真円度計測センサー設置状況

c) テールクリアランス自動計測システム

テールクリアランス自動計測システムは，点群センサーを用いて，掘進中のテールクリアランスの変化をリアルタイムに計測するものである（**写真-3**）. 計測値の変化を正確に把握しながらシールド機を操作することで，テールクリアランスを適正に保った掘進が可能となり，競りによるセグメントの損傷を防止できる．



写真-3 テールクリアランス計測センサー設置状況

(2) シールド自動運転

シールド運転には，方向制御，添加材注入制御，切羽圧制御などがあり、主にひとりのオペレータによって操作されている．これらの運転操作を安全・確実に実施するには多くの経験が必要となるが，先述の社会的背景により対応できるオペレータの不足が危惧されている．さらに，シールド機の運転操作にあたっては，掘進指示値が必要だが，最適な掘進指示値を算出するには専門知識にもとづいた多くの計算が求められる．これらの状況をうけて開発したシールド自動運転にかかわる主な技術を以下に示す．

a) 自動掘進指示システム

自動掘進指示システムは，シールド機とセグメントの現在位置を考慮して，線形修正計画を自動で立案し，それに見合ったシールド機の方向制御の掘進指示値（ストローク差，ジャイロ方位，水レベル値，ピッチング等）やセグメント割付を出力するものである．最適な掘進指示を素早く自動で出力できるため，時間と労力を要していた業務の省力化が期待できる．

b) シールド AI 自動方向制御システム

熟練オペレータは，掘進指示値に沿って運転するために，その時の掘進状況に関する様々なデータを参照しながら方向制御を行っている．シールド AI 自動方向制御システム（**図-3**）は，AI を用いてオペレータの操作を学習することで，オペレータの操作と同様の方向制御を自動で実施するものである．このシステムは，テー

ルクリアランスを考慮してセグメントとの競りを防止する等、熟練オペレータのシールド方向制御を AI で再現することができ，セグメントのひび割れや線形の逸脱を確実に防止できる．



図-3 シールド AI 自動方向制御システム

c) 添加材自動制御システム

添加材自動制御システムは，チャンバー内に設置したフラッパー（**写真-4**）の回転トルクによって得られる粘度をもちいて，土砂の塑性流動状態を判断し，最適な状態となる添加材の注入量を自動調整するものである（**図-4**）．経験が必要な土砂の塑性流動状態の評価を定量的に行い，土砂の変化を素早く察知・対応することで安定掘進を維持できる．

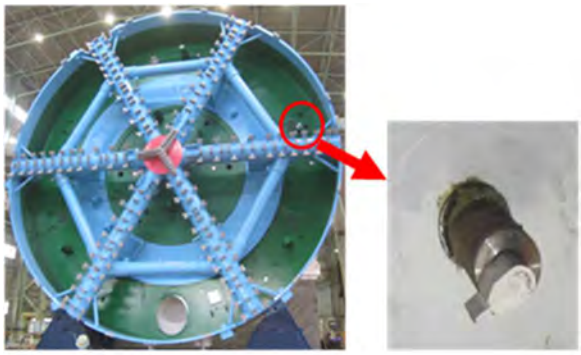


写真-4 フラッパー

d) 切羽圧自動制御システム

切羽圧自動制御システムは，設定した切羽圧となるようにスクリューコンベヤーの回転速度を自動制御するものである．このシステムは，高水圧への対応等のためにスクリューコンベヤーを 2 段配置するシールド機にも対応している．人為操作では難しいきめ細かなスクリューコンベヤー回転速度の調整を自動で行うことで，切羽圧の変動を抑制した掘進が可能となる．

(3) 掘削土砂自動搬出

シールド工事で円滑・安全に工事進捗を確保するためには，掘進に伴い大量に発生する掘削土砂の管理を適正に行うことが極めて重要である．以下に排土量管理，土砂性状評価，土砂の場外搬出にかかわる自動化技術を示す．

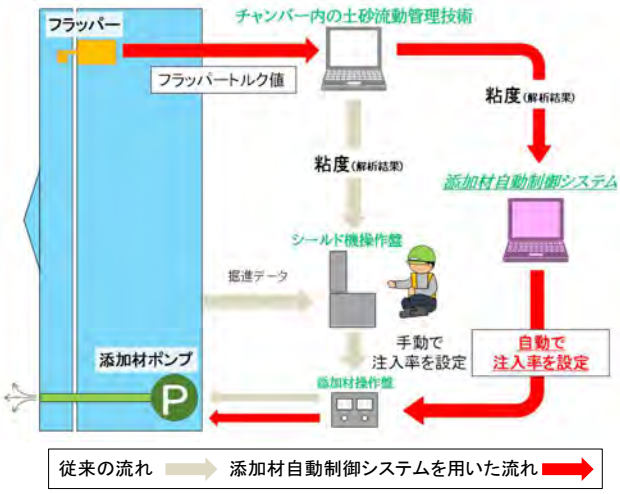


図-4 添加材の注入率の制御フロー

a) 排土量管理システム

地盤変状を防止するためには，排土量管理が重要あり，近年ではより高精度な管理が求められている．排土量管理システムは，ベルトコンベヤー上の掘削土砂の量をリアルタイムに計測するシステムである．従来より，ベルトコンベヤー上の土砂の体積や重量を連続的に計測する技術は運用されているが，掘削土のふけや，排土に含まれる地下水や添加材の評価をより厳密に行うことが課題であった．本システムは，ハイパースペクトルカメラを用いて掘削土砂の含水比を連続計測する技術を新たに組み込んでいる（**図-5**）．従来技術で計測した重量とハイパースペクトルカメラによる含水比をあわせて評価することで，乾砂重量による土量管理ができるため，ふけや排土に含まれる地下水等に左右されずにより高精度な排土量管理を実施して，地表面への影響を防止できる．

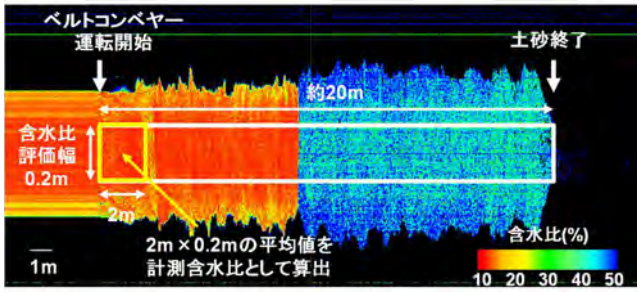


図-5 土砂含水比の解析結果

b) 掘削土砂連続評価技術

泥土圧シールドにおいて掘削土砂を適切に処分するためには，シールド機から排出された土砂の性状をただちに評価することが重要である．掘削土砂連続評価技術は，ベルトコンベヤー上部に設置したスキャナ装置で連続的に計測した掘削土砂の高さのコンター画像から土砂性状を評価するものである（**図-6**）．本技術により，土砂性状の評価・記録が連続的にできるため，掘削土砂の変化を改質材の添加量に反映する等，掘削土砂搬出管理の効率化ができる．

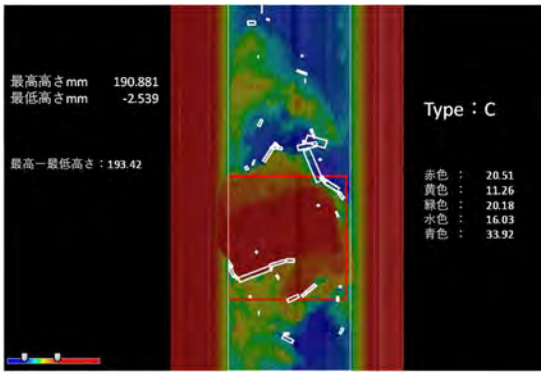


図-6 掘削土砂性状の推定結果

c) バックホウ自律運転システム

バックホウ自律運転システムは，土砂ピット内の掘削土砂の形状を 3DLiDAR で確認し，1 回に積み込む土砂の量が最大になるポイントを判断して掘削，さらに待機しているダンプトラックのベッセル内の状況もデプスカメラで確認しながら自動で積み込みを繰り返すものである（**図-7**）．本システムにより，バックホウオペレータの省人化ができ，作業員の近接を検知して重機が自動停止するため，接触災害も防止できる．



図-7 バックホウ自律運転システム

(4) 裏込め自動注入

シールド機とセグメント外面との隙間（テールボイド）を充填する裏込め注入作業においては，地上プラントでの材料の混錬および坑内タンクへの移送，注入時の圧力上限値の設定による注入停止など，現時点においても各作業の自動化はある程度進んでいる．一方で，裏込め注入はリング毎の合計注入量と上限注入圧の両面から管理されることが多く，注入状況に応じた吐出流量の調整はオペレータによるところが大きい．

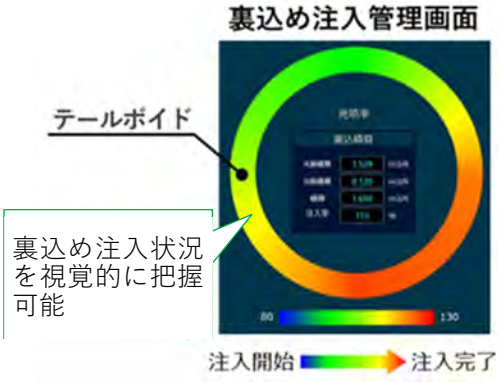


図-8 裏込め注入管理システム

開発した自動裏込め注入管理システムは，裏込め材の充填状況をコンターで視覚的に表示するとともに，圧力分布や注入量に応じて各注入ラインの吐出流量の増減を自動調整する技術である（**図-8**）．一部の注入ラインの圧力が上昇しても，圧力が小さいラインの吐出流量を増やして対応することで，テールボイド全体を均一かつ確実に充填できる．この技術により，オペレータが省力化できるとともに，操作ミスによる注入の過不足リスクを排除することにより，地表面や周辺地盤の変状を防止できる．

(5) シールド設備自動化

シールド掘進作業では，シールド機をはじめ，坑内・坑外の広範囲に多くの機械・電気設備が稼働しており，これらが故障した場合には，地中や限られた作業空間での修理作業が必要となるため，掘進停止が長期間におよぶリスクがある．

開発したシールド設備統合管理システムは，各設備の稼働データを一元管理して，あらかじめ設定したアルゴリズムにしたがって，異常の兆候を検知・警告する技術である（**図-9**）．異常の兆候段階で対処する予防保全となっており，システムを用いることで多くの設備に対しても見落としがなくなるためトラブルを未然に防止できる．

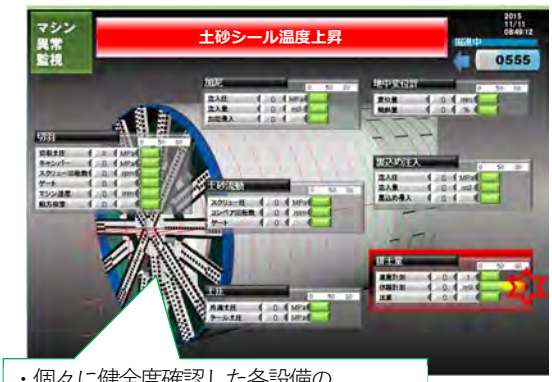


図-9 シールド機設備統合管理画面

(6)セグメント自動組立

セグメントは地上ストックヤードから切羽まで繰り返し供給されるが，特に長距離，大深度，大断面シールドではセグメントの搬送に関する作業量が多い．また，セグメント組立作業は，高速で旋回するエレクター―との近接作業となり，大断面シールドでは高所での作業も伴うため労働災害リスクが高い．これらの状況をうけて開発したセグメント自動組立にかかわる主な技術について以下に示す．

a)セグメント自動坑内搬送システム

セグメント自動坑内搬送システムは，セグメントリフターやバッテリー機関車の無人走行システムを利用して，地上ストックヤードから切羽までのセグメント搬送を自動化するものである．立坑部で繰り返すセグメント揚重作業に対して，玉掛け作業が不要なセグメントリフターを用いることでセグメントの落下リスクを排除できる．また，バッテリー機関車にはセンサーによる自動停止機能があり，坑内での長距離セグメント搬送作業における作業員との接触災害を防止できる．

b)セグメント遠隔組立システム

セグメント遠隔組立システムは，地上の中央制御室等の切羽以外の場所からセグメントを遠隔操作で組立てる技術である．3D カメラを用いた位置計測技術により，組立てるピース同士の接合面位置関係を画像処理モニターで数値化して把握することで，遠隔でも正確に組立て作業ができるとともに，今後の自動化も容易となる．本技術を用いると目視確認していた相番者が不要となり，セグメント組立作業時の切羽への人の立ち入りがなくなることで労働者の転落や挟まれ災害のリスクを排除できる（**図-10**）．

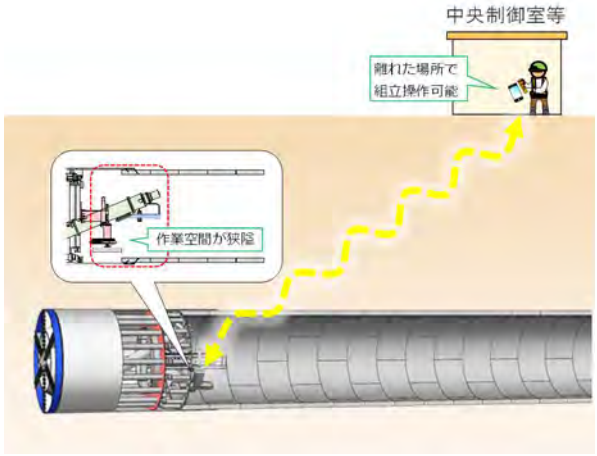


図-10 セグメント遠隔組立システム

4．OGENTS の自動化要素技術の連携

シールドでは，作業員が複数の作業を担っているので，自動化要素技術を個別に適用するだけでは省人化の十分な効果は得られない．

シールド工事は，それぞれの作業を連携しながら進めているのと同様に，OGENTS についても，それぞれの自動化要素技術を連携させることで，自動化の効果を最大限に発揮させることができる．自動化要素技術の連携運用例を**図-11** に示す．

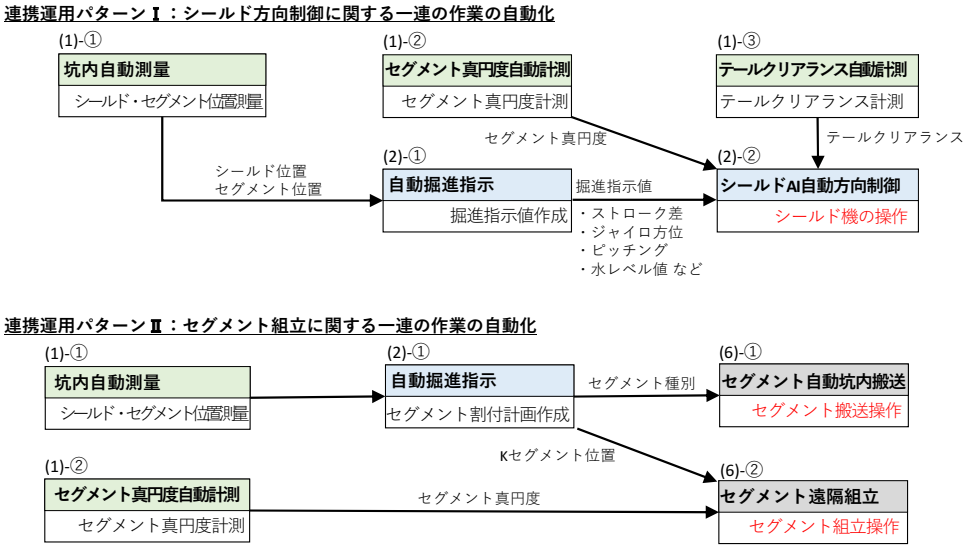


図-11 自動化要素技術の連携運用例

5．実施工への適用事例

OGENTS の各要素技術の精度や効果は，現場適用等により確認している．とくにシールド方向制御については，土質，シールド径，線形などの現場条件の違いによって操作方法が大きく異なることから，小断面から大断面、直線から急曲線など，様々な条件の工事に自動化技術を適用して，データを蓄積している．そのうち

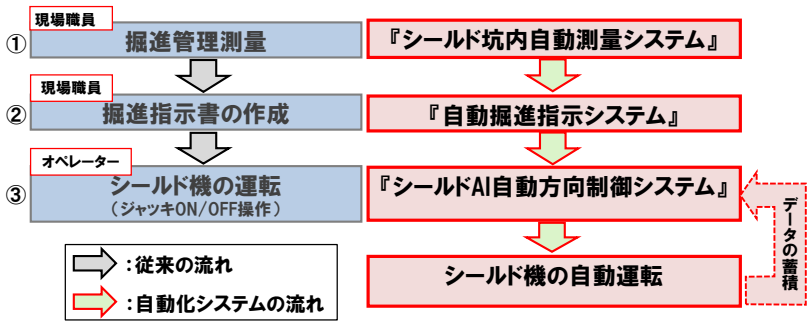


図-12 シールド方向制御の流れ



写真-5 シールド坑内自動測量システム

本稿では，掘削外径約 2.7m，最小曲線半径 15m のシールド工事に対して，シールド方向制御に関する自動化要素技術を連携して適用した事例を報告する．

従来工事と本工事におけるシールド方向制御作業の流れを**図-12** に示す．従来は，現場職員が①シールド坑内測量の結果にもとづき②掘進指示書を作成し，オペレータは，記載された掘進指示値を満足するように③シールド機の運転を行っている．これらに対して本工事では，「坑内自動測量システム」，「自動掘進指示システム」，「シールド AI 自動方向制御システム」をそれぞれ適用して連携させることで，一連のシールド方向制御を自動化した．**写真-5** にシールド坑内自動測量システムの適用状況，**図-13** に AI 方向制御システムのモニター表示画面を示す．モニターの掘進指示表示画面には，シールド坑内自動測量システムと自動掘進指示システムを連携して出力した「掘進指示値」が転送・表示されている．

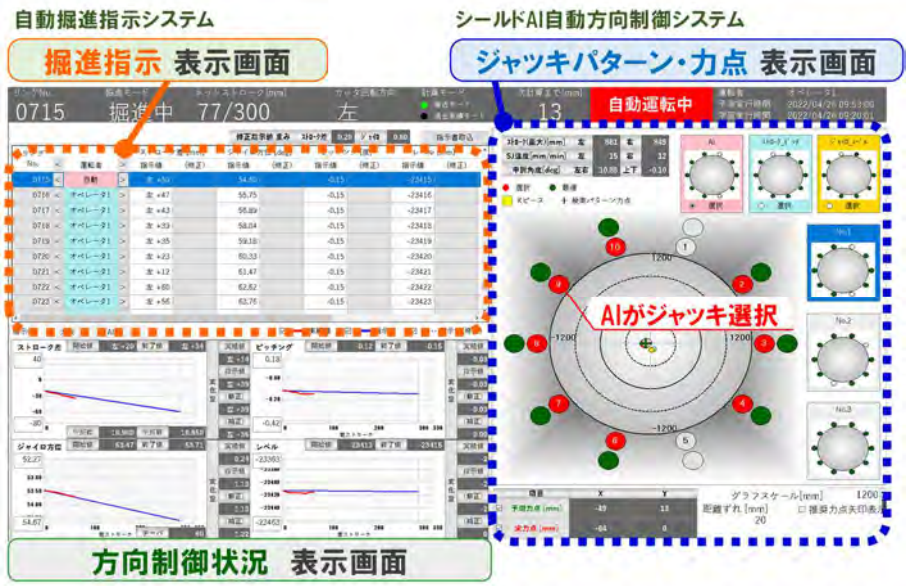


図-13 シールド AI 自動方向制御システム画面

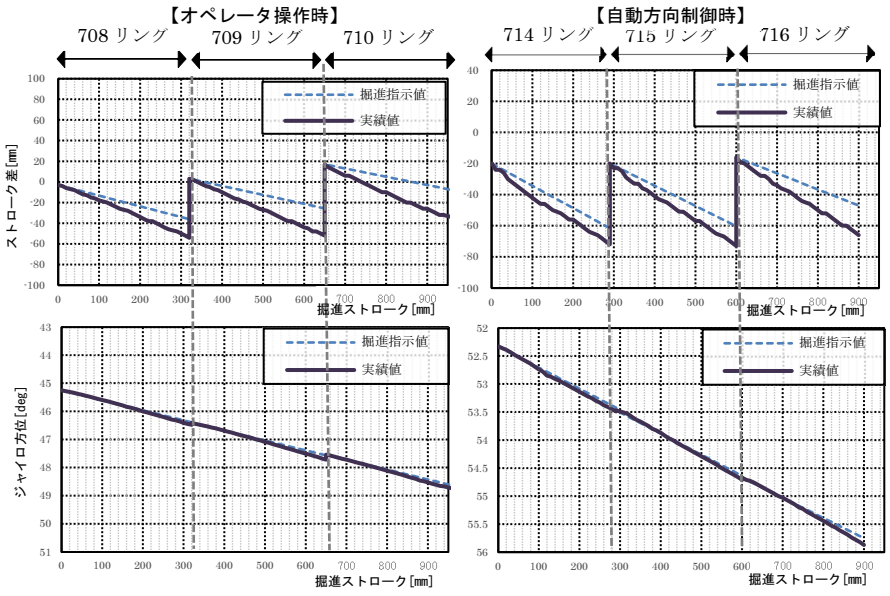


図-14 方向制御結果

シールド方向制御に関する上述の技術を曲線部（R=15）において適用して，実際にシールド機を運転した結果について以下に述べる．シールド AI 自動方向制御システムによる AI 予測力点に従ったシールドジャッキ選択にて，自動方向制御を行った．**図-14** に，自動方向制御時（714～716R）の方向制御結果（ストローク差・ジャイロ方位の推移）と比較のためにオペレータ操作時（708～710R）の結果を併記する．掘進終了時のストローク差はオペレータ操作時も自動方向制御時もともに掘進指示値よりも大きくなっている．熟練オペレータは，急曲線施工時にシールド

推力の偏荷重によってセグメント位置が曲線の外側へ若干押し出されることを考慮して，ストローク差よりもジャイロ方位を重視して掘進しているが，AI もこの傾向を学習して同様の運転操作をしていることがわかる．**図-15** に，左曲線部（R=30）における AI 予測力点とテールクリアランス（右側）の関係を示す．右側のテールクリアランスが小さくなり過ぎると，力点を左側にシフトしてシールド機を右向きに方向制御してテールクリアランスを確保した後に，力点位置を右側にシフトして方向を調整する状況が確認できた．その後の直線区間では，テールクリアランスが確保できており，AI 予測力点も安定している．これらの AI 予測力点の推移は，線形の許容偏差量を確保しながらテールクリアランスを考慮したジャッキパターンを選択する熟練オペレータの操作と同じであり，AI 自動方向制御システムの有効性を示す結果となった．今回のテールクリアランスは手動計測値であったが，テールクリアランスの自動計測技術と連携することで，よりきめ細やかな方向制御が期待できる．

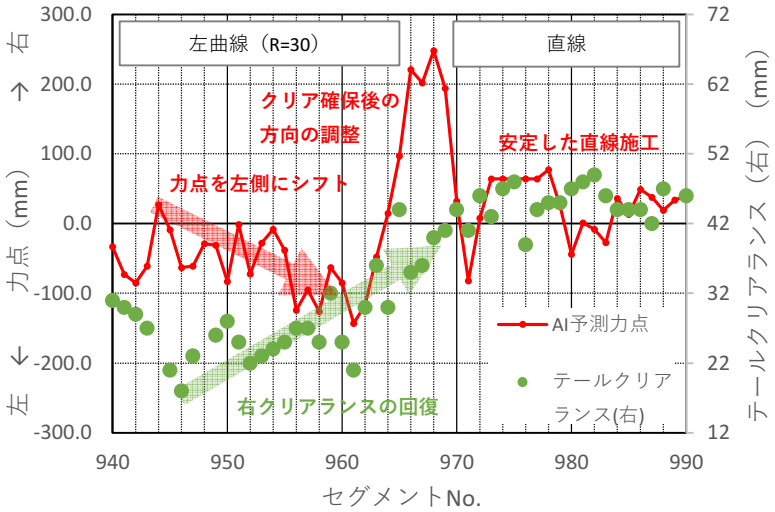


図-15 AI 予測力点とテールクリアランス

6．まとめ

シールド工事全体を自動化する OGENTS の 6 つの作業について，これまでの取り組みと自動化要素技術を連携して実際の工事に適用した事例を報告した．

現在，OGENTS の各自動化要素技術については適用事例を増やしながら精度の向上を進めている．さらに，全ての自動化技術をあわせて現場適用することを計画しており，シールド工事全体の省力化・品質確保・安全性の向上については，あらためて報告する．

【参考文献】

1) 西森昭博他：シールドトンネルにおける ICT を活用した真円度計測システムの開発（その 2），土木学会，第 78 回年次学術講演会，VI-171，2023

2) 山崎啓三他：コンター画像を用いたシールド掘削土砂の連続評価技術，土木学会，第 78 回年次学術講演会，VI-868，2023

3) 山田祐樹他：土砂含水比の連続計測技術の開発，土木学会，第 78 回年次学術講演会，VI-850，2023

4) 相馬佳奈美他：シールド機の線形管理に関する自動化システムを連携した急曲線施工実績の報告，土木学会，第 78 回年次学術講演会，VI-192，2023

5) 林成卓他：シールド AI 自動方向制御システムによる掘進実績の報告，土木学会，第 77 回年次学術講演会，VI-89，2022