

長距離・大深度・高水圧下でのシールド 施工

霞ヶ浦導水事業 石岡トンネル第5工区

赤羽 浩・前田 卓見

本工事は長距離・大深度・高水圧下で、シールドトンネルを泥水式シールド工法にて施工するものである。掘進延長 4,442 m、最大土被り 42 m、シールド線形は直線であり、掘進路線上の大部分が民家直下の施工となる。また、トンネル内送水時期を 2026 年度に予定しており、供用が迫っているため平均日進量 20 m の高速施工が必要である。

このような条件下でシールドや掘進管理方法において様々な技術や工夫を駆使して施工を行っており、本報告ではその内容について述べる。

キーワード：長距離、大深度、高水圧、高速施工、シールド、掘進管理

1. はじめに

霞ヶ浦導水事業は、利根川下流部、霞ヶ浦及び那珂川下流部を結ぶ地下河川を建設し、相互に水をやり取りし、霞ヶ浦と桜川ほかの水質浄化、利根川下流部と那珂川下流部における流水の正常な機能維持（水不足の軽減）、新規都市用水の確保を図ることを目的とした、流況調整河川を整備する事業である（図-1）。本工事では那珂導水路の石岡トンネル第5工区（掘進延長 4,442 m）を泥水式シールド工法にて築造するのである。

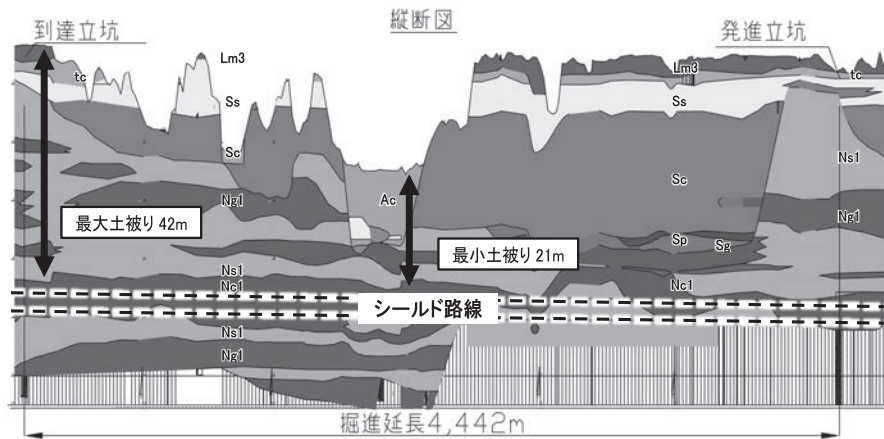
2. 本工事の特徴

本工事は、掘進延長 4,442 mm、最小土被りは 21 m、最大土被りは 42 m と長距離・大深度施工である（図-2）。掘削対象土質は、N 値 20 程度の成田層上部粘性土層（Nc1）と N 値 50 以上の成田層上部砂質土層（Ns1）であり、共に硬質地盤の掘削となる。

また、路線の大部分が民家直下の施工で、地盤変状を最小限に抑える必要があるため、切羽圧力管理、掘進・停止中の切羽保持対策が極めて重要である。



図-1 事業全体平面図



地質年代	地層名	地層記号	主な土質名
新生代 第四紀 沖積層	沖積層 粘性土	Ac	砂混じりシルト シルト
		Lm3	風化火山灰質 粘土
		tc	凝灰質粘土
	下未 吉層	Ss	シルト混じり細砂 シルト質細砂
		Sc	粘土質シルト シルト
		Sp	有機質土
		Sg	シルト混じり砂礫 砂礫
	成田層 上部	Nc1	砂混じりシルト 砂質シルト
		Ns1	細砂 礫混じり細砂
		Ns1	砂礫

図一 2 縦断面図

3. シールドマシンの概要

本工事に使用するシールドマシンは、外径 4.04 m、機長 7.9 m の泥水式シールドマシンである。長距離・大深度・高水圧下での高速施工を可能とするため以下の技術を採用している。

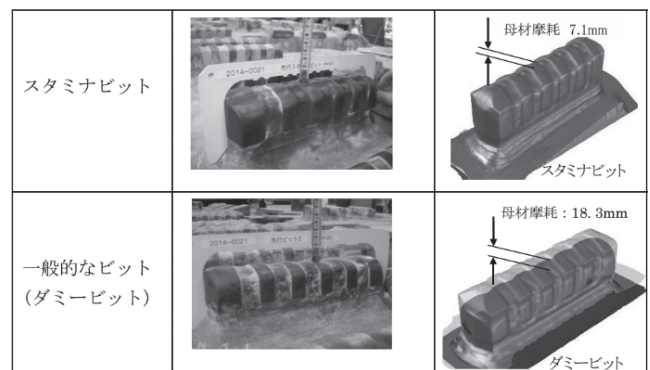
(1) 高耐久性ビット

長距離施工に伴いカッタービットの摩耗が懸念される。摩耗対策として、先行ビットに高耐久性ビット「スタミナビット」(以下、本ビット) (図一 3) を先行ビットに配置した。本ビットの材質は E3 種と E5 種の特徴を両有する新合金素材である SG30 種を採用している。

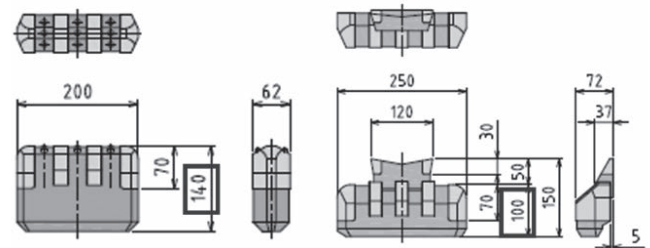
さらに、本ビットでは、シャンク部の摩耗対策として、シャンク部に円柱形状のチップを挿入し耐摩耗性を向上した。これにより、長距離施工や礫層地盤の掘削に対して優れた耐摩耗性を発揮できる。また、本ビットを段差ビット (140 mm・100 mm) として配置することで、4 km を超える長距離施工に対応する仕様とした (図一 4)。

(2) カッターモーター冷却装置

今回、3 交代施工が条件となっているため、シールドマシンのカッターを回転させるカッターモーターの冷却が重要となる。通常の昼夜施工の 2 交代の場合、作業時間の間が 3~4 時間程度あり、その間にカッターモーターほか使用機器の熱が放出される時間が確保で



図一 3 本ビットの摩耗耐性に関する比較図



図一 4 段差ビット詳細図

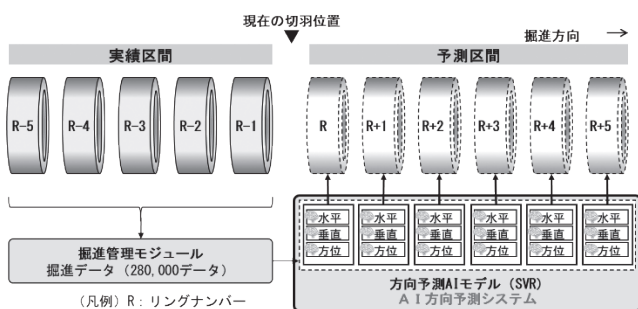
きた。しかし、今回は交代時のシールド休止時間がなくなるため、24 時間効率的に冷却する必要があった。通常カッターモーターはシールやオイルの耐久性から 80℃ までの温度に抑えるため、モーター自体に空冷式ファンを装備しており、稼働時もしくは停止時にもファンを稼働させて冷却させるのが一般的である。しかし、今回十分な冷却時間が取れないと判断し、水冷

ものである（図—6）。このシステムを用いて、1周回転毎に計測した土質の加速度特性から地盤判定し、地質変化に応じた切羽泥圧管理値を設定する。

(2) シールド方向予測 AI

長距離シールドにおける掘進管理の省力化、高精度化を目的として、開発した「シールド方向予測 AI」を導入した。本システムは、シールドの掘進過程で計測される多種多様なデータについて、AIに学習させることで、精度の高い方向予測を行うものである。また、シールドの操作を入力し、シミュレートすることで、熟練オペレータと同等以上の最適な方向制御を支援する機能も搭載している。方向予測 AI モデルは、一定区間の測定データ（主要なデータ 187 項目）を学習したうえで、直近の5リング分の測定データを入力し、将来6リング分（水平偏差、垂直偏差、方位偏差）を予測値として出力する構成となっている（図—7）。また、機械学習の方法は、サポートベクトルマシンによる回帰手法（Support Vector Regression, 以下 SVR）を採用している。

シールドの方向制御は、概ね1方（4～6リング）掘進毎に人為的な測量を実施し、その結果をもとに掘進管理者が掘進指示書を作成して、オペレータがその指示値に近づくように操作を行っている。このことを踏まえて、AIによる方向予測は、掘進管理者に代わっ



図—7 方向予測 AI モデル概念



図—8 方向予測 AI 画面

て、今から掘進する0～5リングでそれぞれ到達する位置（計画線形からの偏差）を予測値として算出する仕様となっている。また予測値は、リアルタイムに掘進管理室の予測画面に出力するシステムとしている（図—8）。

オペレータによるシールド掘進操作の中で、方向制御に寄与するものはジャッキのパターンや中折れ装置の折れ角などがあり、これらの組み合わせだけでも理論上は数億通りの操作方法が選択できることとなる。システムには、方向予測 AI を活用して、シールドの操作を仮想的に入力すると、直近の掘進データと入力操作データを用いて1～5リングの到達位置を予測するシミュレーター機能を搭載している（図—9）。

(3) 材料管理 BPO

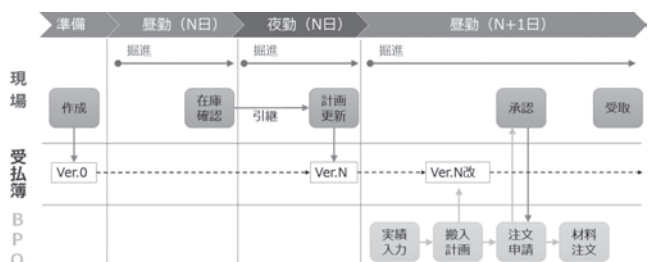
本工事では3交替で施工するため、材料管理は連続掘進を成立させるための重要な要素であり各所と連携しながら効率的かつ正確な管理を行う必要がある。そこで、現場における材料管理の一部をビジネス・プロセス・アウトソーシング（以下、BPO）で外部委託する取り組みを行っている。

シールド工事で使用する材料（セグメント、裏込材、配管・レール等）は進捗によって使用数量を把握しやすいことに着目し、材料管理業務の内、使用実績の記録と搬入計画、注文、受払簿作成をBPOに委託することにした（図—10）。

材料発注は掘進管理を基に計画・実行するが、日進量単位の材料管理では材料発注のタイミングを判断しづらいう課題があった。そこで、リング単位での



図—9 操作シミュレーション



図—10 受払簿を中心とした業務フロー

管理にすることで、この課題を解決し、BPOによる業務委託を可能にした。具体的には、材料受払簿をリング単位の記載に変更することで、掘進管理システムとの整合を取り、複数材料の使用状況を見える化し、誰でも材料管理ができる環境とした。

従来の業務を変えることなく、役割分担により工事所業務を確実に分散することができた。職員が現場管理や在庫確認をしている間に、業務委託先が使用数量の記録から搬入計画立案、注文連絡までを行うことで、職員の負担軽減や時間外労働の削減に繋がった。

(4) トライアル計測+SAR衛星測量

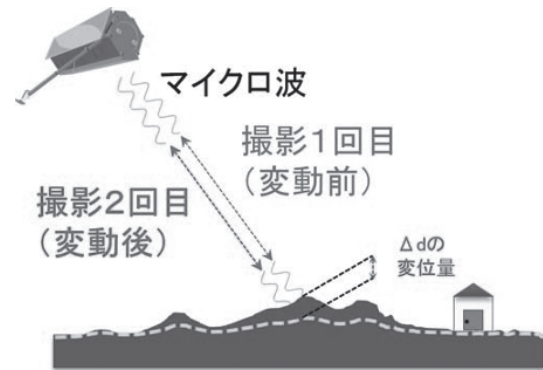
シールド路線上の道路・民家および周辺地域の地盤変状を最小限に抑制するためには、掘進による地盤変状の計測結果を逐次掘進管理に反映させることが重要である。本工事では計測対象が私有地を含む広範囲となるため、地上部全域を対象とした地盤変状の監視を実施し、掘進管理計画の妥当性を確認していく必要がある。

そこで、発進立坑から敷地境界までの範囲をトライアル区間として、重点計測（地表面常時計測・地中変位計測）を行い変状の傾向を把握して、掘進管理方法・管理値（切羽泥水圧、排土、裏込め）の妥当性を検証・改善した（写真－2）。

また、掘進時は路面上の変状計測に加え、衛星SARデータによる広域地盤変状監視により、変位を5日毎に把握して、掘進管理に反映した。衛星での計



写真－2 トライアル計測状況



図－11 SAR衛星測量概念図

測により、夜間でも私有地を含めた地表面の変位が把握でき、計測箇所が限定的な路面計測結果を補完して、掘進管理に反映させることができた（図－11）。

5. おわりに

本工事は2024年9月17日よりシールド掘進を開始し、2024年11月に、初期掘進230mの施工を完了した。

2024年12月より本掘進工に入り、現在665.9mを施工中である（2025年1月末）。2025年12月の到達に向けて、日々工事を進めている。

JCMA

【筆者紹介】

赤羽 浩（あかば ひろし）
国土交通省
関東地方整備局
霞ヶ浦導水工事事務所
建設専門官



前田 卓見（まえだ たくみ）
奥村組・大本組特定建設工事共同企業体
R5霞ヶ浦導水石岡トンネル（第5工区）新設工事

