

シールドトンネル工事における水中到達工法

－ R4霞ヶ浦導水石岡トンネル（第4工区）新設工事 －

Underwater Receiving Method in Tunnel Construction

河内浩二*1

概 要

本工事は、霞ヶ浦導水事業として、堅倉立坑から美野里立坑に至る延長約4,100mの区間において、導水路トンネルを構築する工事である。トンネルの仕上がり内径はφ3,500mmで、地下約20～40m以深となる大深度・長距離のシールドトンネル工事である。また、掘進区間の地上部は、主に農耕地及び住宅地となっているため、土量管理や泥水圧管理及び地盤変形計測には特に留意する必要がある。本報告は、到達部でのNOMST工法を水中到達にて施工した実績について報告するものである。

key words : NOMST 工法、泥水式シールド、水中到達、大深度、高水圧

1. はじめに

1.1 工事概要と地理的条件

本工事は、掘進延長約4.1km、最大土被り42.8mの大深度・長距離泥水式シールドトンネル工事である。那珂導水路約4,100mの大規模地下インフラ整備の一環として実施され、発進立坑と到達立坑の位置関係は図-1に示すとおりである。到達立坑は隣接工区の到達立坑と共用するため、プロジェクト全体の工程管理上、隣接工区の到達前に当工区の施工を完了させることが必須条件であった。

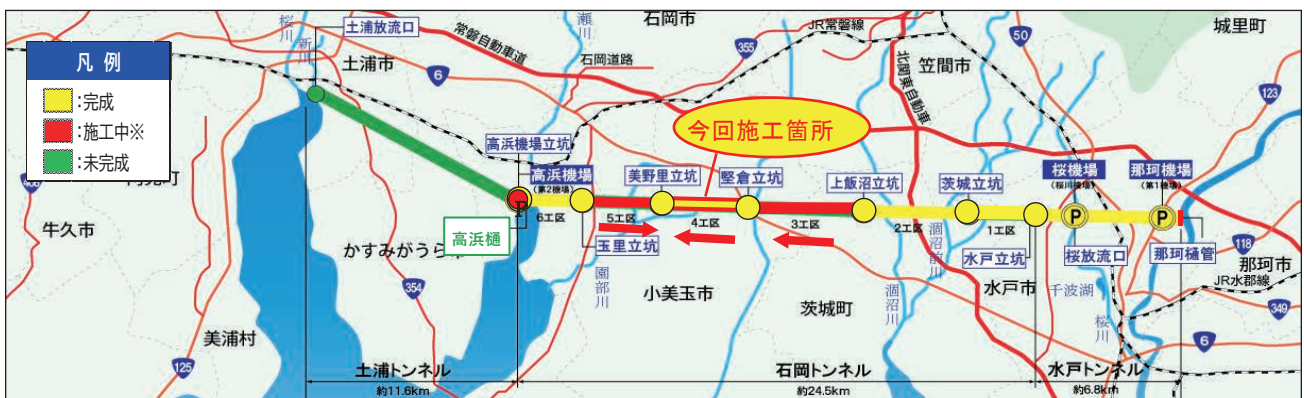
到達立坑周辺は住宅密集地、農耕地およびゴルフ場に囲まれており、周辺環境への影響を最小限に抑制する必要がある。また、到達立坑付近の地下水圧は0.4MPa以上の高水圧環境となっている。

1.2 技術的課題とその対応

このような長距離・大深度・高水圧環境下でのシールド到達作業において、以下の技術的課題が想定された。

- ①NOMST壁切削時の制御不能の湧水発生
- ②急激な水位低下による周辺地盤の沈下
- ③長距離掘削による到達精度の低下
- ④長距離掘削による掘削ビットの摩耗
- ⑤到達工の再施工による大幅な工期遅延

このような状況の中で、水中到達工法の採用により、水圧バランスの維持による突発的湧水の防止、地下水位の急激な変動抑制による周辺地盤への影響軽減等の効果が期待された。



R7.11 月末

図-1 霞ヶ浦導水事業の全体計画図

*1 Koji KAWAUCHI

東京支社土木支店土木部 作業所長

1.3 本論文の目的

本論文では、長距離・大深度・高水圧下における泥水式シールドの到達工について、事前検討から施工完了までの計画立案と実施結果を詳細に報告する。また、施工中に発生した課題とその対応策を整理し、今後の同様な工事における技術的知見の蓄積と共有を図ることを目的とする。

2. 工事概要

工事名：R4霞ヶ浦導水石岡トンネル（第4工区）
新設工事

発注者：国土交通省 関東地方整備局

工事場所：茨城県小美玉市堅倉地先～
小美玉市三箇地先

工期：2023年3月9日～2025年12月26日

工事延長：4,100m

工事数量：泥水式シールド工（掘削外径φ4050）4,100m
セグメント組立 3025R（RC 2848R、P&PC

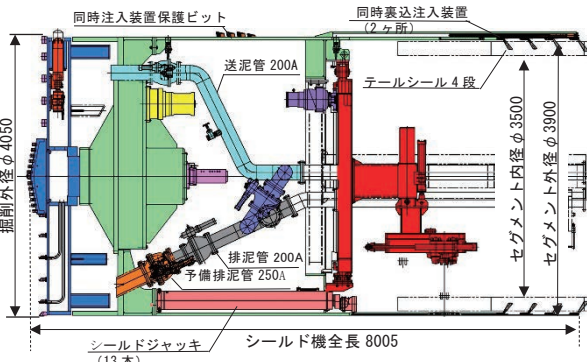


図-2 シールドマシン姿図

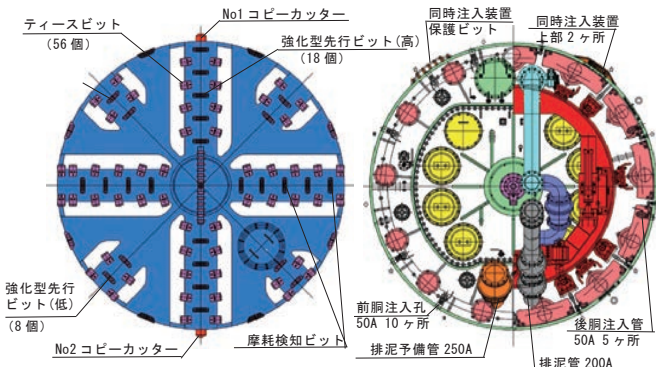


図-3 シールドマシン断面図

175R、可撓 2R) @1.35m L=4,083m

発生土処理工 一式

地盤改良工 一式

仮設工 一式

図-2、3に本工事で使用した泥水式シールドマシンの概要図を示す。事業の全体計画を図-4に示す。

3. 施工フロー

3.1 水中到達工の施工フロー

水中到達工の施工フローを図-5に示す。

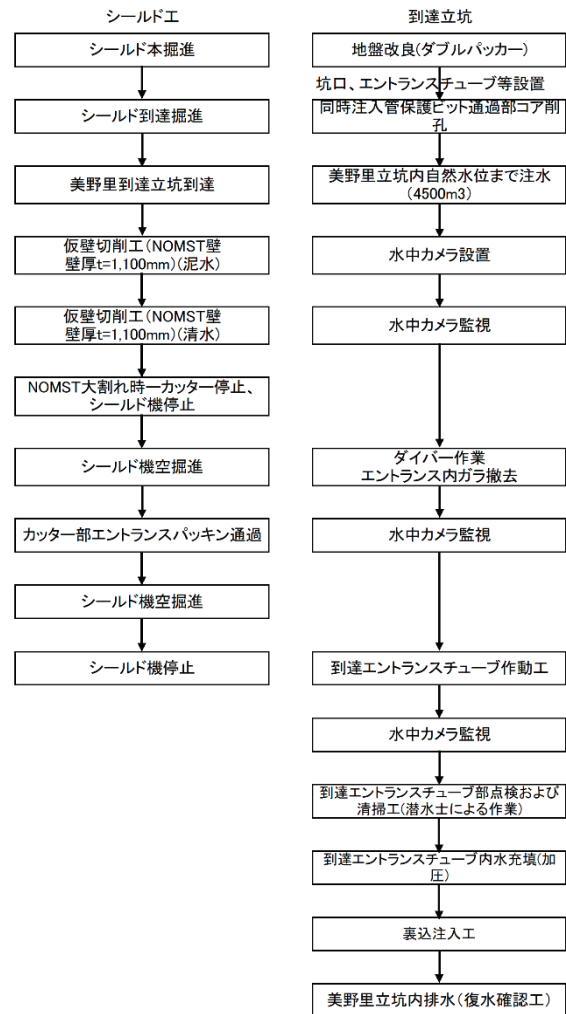


図-5 水中到達工施工フロー

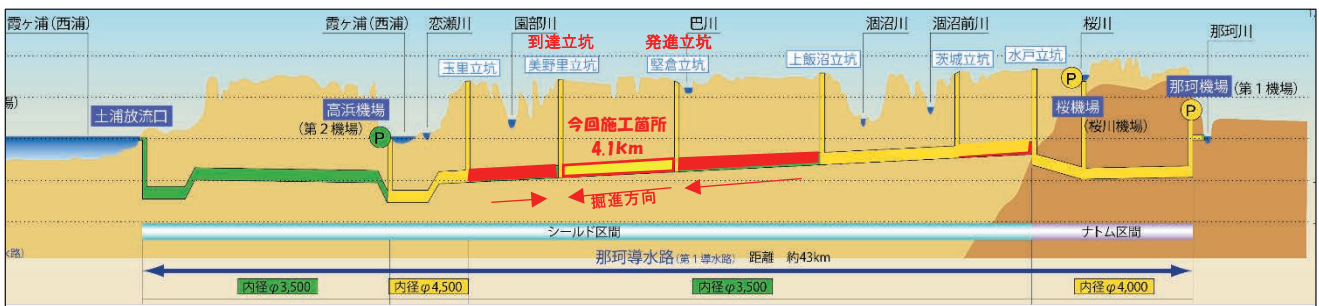


図-4 霞ヶ浦導水事業全体計画図（縦断）

3.2 地盤改良

到達工に先立ち、到達坑口（NOMST）背面に対して薬液注入工による地盤改良を実施した。到達坑口は GL-50m に位置するため、地上部からの二重管ダブルパッカー工法を採用した。また、到達立坑のケーソン施工時におけるフリクションカット部や周辺地盤の空隙発生を考慮し、これらの箇所にてセメントベントナイトを充填した（図-6 参照）。

二重管ダブルパッカーによる注入工が 4 本完了時点で透水試験を実施した結果、透水係数 $K=2.37 \times 10^{-5}$ cm/sec の良好な値が確認されたため、地盤改良を継続した。

地盤改良完了後、NOMST 切削面に対して水平ボーリングによる削孔を行い、出水量を測定して止水効果を確認した。その結果、止水状況に問題がないことを確認した。

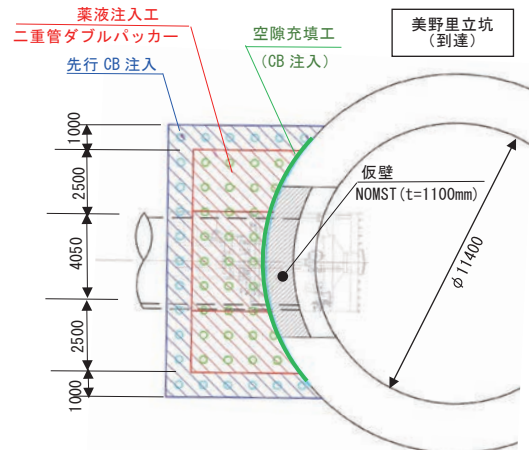


図-6 到達立坑地盤改良平面図

3.3 到達エントランス設置

エントラス概要図を図-7 に示す。到達部の土水圧が 0.4MPa 以上の高水圧環境であることから、設定圧力 0.6MPa の高水圧対応型到達エントランスを選定した。本エントランスは鋼板入り止水シールにより高水圧に対応し、チューブ加圧システムにより同時裏込め注入管等の突起物への追従性を確保している。

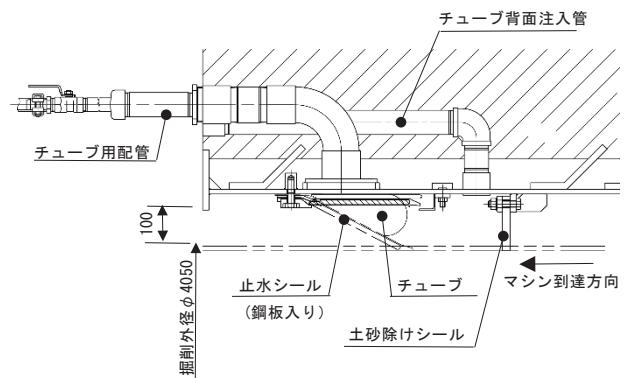


図-7 エントランス概要図

3.4 同時注入管保護ビット通過部コア削孔

シールドマシン到達断面図を図-8 に示す。同時注入管の保護ビットが NOMST 壁に干渉するため、スムーズな通過を確保する目的で、該当部分の NOMST を事前に撤去する必要があった。

コア削孔による撤去を実施し、削孔長は NOMST 壁厚 1,100mm に対して地山まで貫通する仕様とした。一般的には NOMST 壁を 100mm 程度残してマシンを到達させる場合もあるが、本工事では地盤改良後の湧水確認結果や土質条件を総合的に検討し、よりスムーズな到達を可能とする貫通削孔を採用した（図-9、10 参照）。

削孔前に当該箇所の止水状況確認を実施した。止水鉄板を設置後、φ45 でコア削孔を行い、懸濁型グラウト材

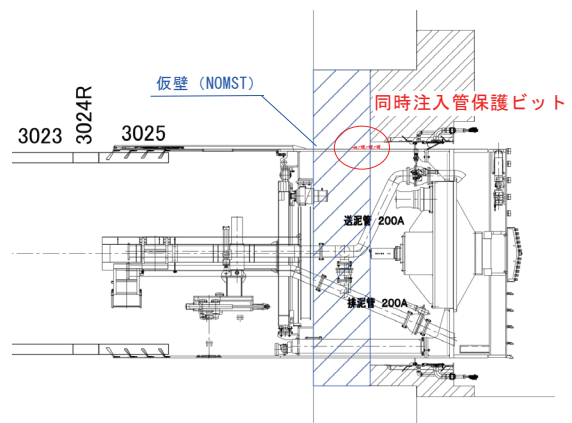


図-8 シールドマシン到達断面図

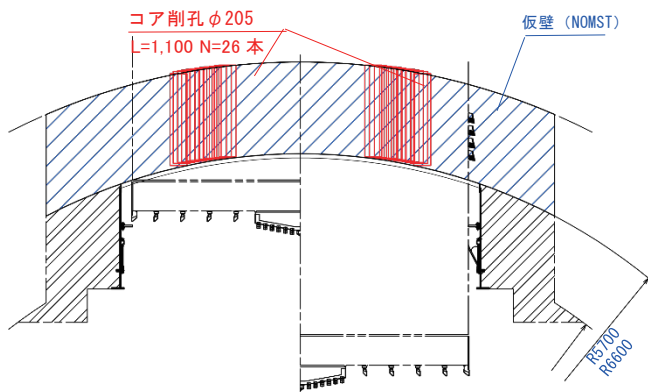


図-9 NOMST 壁削平面図

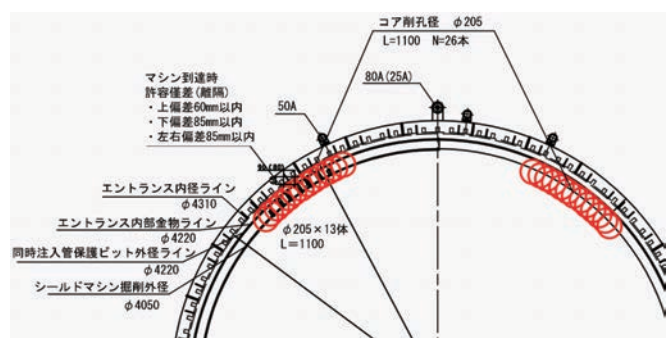


図-10 NOMST 壁削正面図

による止水注入を実施した。止水が確認できた段階で鉄板を撤去した。

次段階で、φ45の4箇所の削孔を追加して行い湧水量を確認した。ここまで問題がないことを確認してφ205の連続コアによる本削孔を実施した。削孔中の湧水はほぼ確認されなかったが、貫通後の出水リスクに備え、発泡ウレタン材の充填を実施し、カメラによる監視および昼夜交代での監視人配置による監視体制を構築した。保護ピット通過部削孔状況を写真-1に示す。

3.5 到達立坑注水

削孔完了後は速やかに立坑の注水作業を開始した。自然水位のH=43.9mまで立坑内を水で満たした。到達立坑は内径φ11.4mであり、自然水位まで水で満たすのに約4,500m³の水を必要とした。近隣から水道を引き込むことができなかったため、ヤード内に設置した井戸を使用して注水作業を実施した。また、工期短縮のため4t散水車4台によるピストン輸送で外部からの給水も併用し、作業の効率化を図った。到達立坑注水状況を写真-2に示す。

3.6 到達掘進

注水完了後にシールドマシンの到達掘進を開始し、地盤改良区間の掘削を開始した。地盤改良区間は掘進速度v=20mm/min程度で掘削した。この時点で立坑内に設置した水中カメラには坑内が軽微に濁る状況が確認された。これは削孔した部分からシールドマシンのカッター面板に押された土砂が貫通削孔部から立坑内に多少流入したものと考えられる。

NOMST壁外面にシールドマシンのフィッシュテールが到達した後は、シールドマシンへの過負荷防止、NOMST壁の大割れ防止の観点から、掘進速度をv=1mm/min以下に制御した。フィッシュテールNOMST貫通時の平面図を図-11に示す。

NOMST壁の厚さはt=1,100mmであったが、フィッシュテールが貫通するまでの掘削時間として26時間を要した。当初は掘削したNOMSTガラやCFRP筋（炭素繊維強化プラスチック筋）が流体設備の至るところで閉塞すると予想された。その閉塞状況を確認後、閉塞多発箇所の前方に礫取り箱を設置する準備を行っていた。しかし実際には、CFRP筋が坑内のポンプで一度閉塞したのみで、閉塞が多発することはなかった。これは、NOMSTを切削するビットが4.1km掘進後も健全に機能したことと、徹底した速度管理により、NOMST壁への貫入がスムーズに実施できたためと考えられる。また、発進立坑を施工する際にはガラとCFRP筋で度々閉塞が発生したことを考慮すると、円形立坑の場合、外側からの進入の方が有利である可能性も考えられる。地上に排出されたCFRP筋を写真-3に示す。



写真-1 保護ピット通過部削孔状況



写真-2 到達立坑注水状況

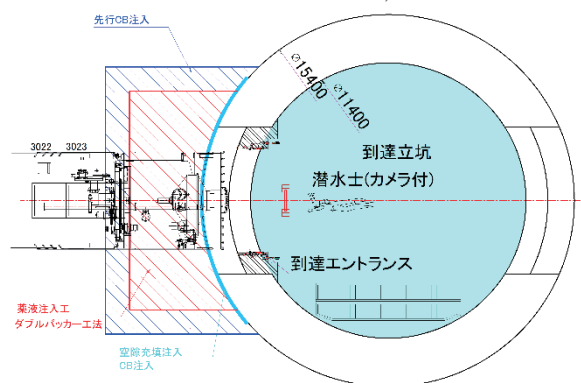


図-11 フィッシュテール NOMST 貫通時平面図



写真-3 地上に排出されたCFRP筋

カッター面板全体が NOMST 壁に接触してからは、泥水を清水に切り替えて NOMST 壁切削を継続した。これは、面板が立坑内に到達した際に泥水が立坑内に流入し、水が濁るのを防ぐためである。しかし、4.1km にわたる流体設備の泥水を完全に清水に切り替えることはできず、さらに NOMST 壁を削ったノロが到達立坑に流出したため、濁りを避けることはできなかった。

3.7 シールド機到達位置確認

シールドマシンの先端であるカッター面板が立坑内面に到達したと思われる時点で一旦掘進を停止し、潜水士による水中での確認作業を実施した。潜水状況を写真-4 に示す。これは万が一到達位置が許容値を超えている場合、エントランス部を破損し排水時に湧水等の発生が懸念され、到達作業が困難となるためである。

潜水士は水深が深くなればなるほど、作業可能時間が極端に限られるため、限られた時間でカッターフェイス位置を特定し、計測する必要があった。複数名で交代しながら測量した結果、おおよそエントランス部の中央に位置することが確認できた。

また、水中カメラや水中ドローンで水中の状態の把握を試みたが、水の濁りであまり状況を確認することができなかった。水中ドローンに装備されたソナーでかろうじてマシンの姿を捉えることができた。潜水士の目視距離も 1m 程度で一部手探り状態での作業であったと考えられる。水中ドローン投入の状況を写真-5 に示す。

3.8 シールド機最終到達

シールドマシンが中央に位置していることを確認した後、引き続き NOMST 切削を継続した。まず面板全体が立坑内に出た時点で、一旦シールドマシン及び流体を停止し、ダイバーによる再度の位置確認を行い、立坑内に落下している NOMST ガラの清掃を実施した。その後は流体を停止したまま、カッターヘッド全体が到達立坑に出現するまで掘進を実施した。潜水士は昼間の限られた時間のみの作業となるため、それ以外の時間は夜間も含めて全てシールドマシンによる NOMST 切削に費やした。カッターヘッドが出現した時点で再度潜水士によるガラ清掃を実施した。エントランス部とマシンとの隙間等を重点的に清掃し、エントランス内に異物を残さないよう注意した。その後、シールドマシンを最終到達位置まで移動させ、再度潜水士がガラ清掃を実施し、これからエントランスを作動させるのに支障となるものがないか最終確認を行った。シールドマシン最終到達位置図を図-12 に示す。

3.9 エントランス作動

エントランスチューブ内に地上からポンプで清水を注入してエントランスを作動させ、その背後をマシン内に



写真-4 潜水状況

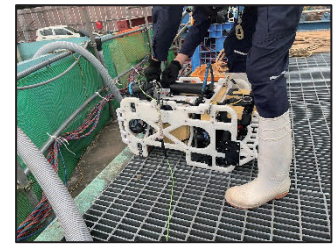


写真-5 水中ドローン投入

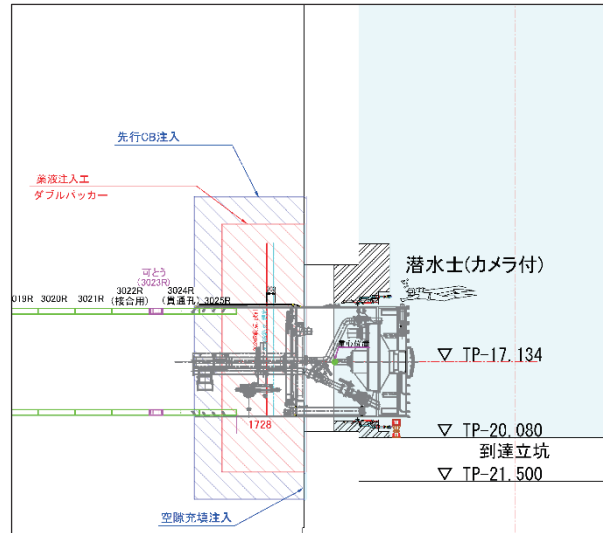


図-12 シールドマシン最終到達位置図



写真-6 エントランスチューブ圧力調整状況

あらかじめ準備していた注入孔より裏込め材を注入して、止水の第一段階を完了させた。チューブ圧は立坑上まで圧力調整用のホースを延長し、慎重に調整した。エントランスチューブの圧力調整状況を写真-6 に示す。

3.10 排水・清掃

止水完了後は立坑の水の排水作業を開始。排水は水中ポンプで到達側からの排水と流体設備を回して発進立坑側からの排水を実施。その間、24 時間排水するごとに 12 時間排水を中断して、覆水していないかどうかを確認

した。覆水が確認されなかった場合はそのまま排水を継続し、覆水が確認された場合はマシン内に準備していたφ50の注入孔からの薬液注入等を行って出水を止める計画であった。実際は覆水することはなく、7日間かけて排水を行い、シールドマシンが姿を見せた。この状況を写真-7に示す。

排水完了後にエントランスチューブ内を清水から裏込め材に置換えて到達工を完了とした。

また、排水後は立坑底板に切削ガラや泥土が溜まっていたため、パキューム車にて清掃を実施した。

清掃完了後にエントランスの漏水状況を改めて確認したが、漏水はほぼゼロであった。またビットの状況もほぼ健全であることがわかった。NOMST壁が健全に切削できた一因と言える。

4. 結果・評価

4.1 水中到達工の評価

到達掘進に要した時間を以下に示す。

NOMST 壁切削時間：38 時間

潜水工の作業時間：40 時間(二人一組で 20 時間)

立坑排水：7 日間

底板清掃：6 日間

面板先端が NOMST 壁に接触してから、面板全体が NOMST 壁を抜けるまで約 1,700mm であるため、平均掘削速度は 0.6mm/min という結果であった。当初の予定よりは時間を要したがこれはより慎重に施工を行った結果と言える。底板汚泥清掃状況を写真-8に、シールドマシン到達状況を写真-9に各々示す。

5. 今後の課題とまとめ

5.1 水中到達工の課題

今回の到達工は概ね計画通り順調に推移した。しかし、次回があれば以下のことに留意する必要がある。

一つ目は潜水士の確保の問題である。水深 30m 以上となると対応可能な潜水業者の数が少なく、必要な労務の確保が困難となる。今回は 3 パーティ×7日間の労務を手配できた。また、水中の活動時間が短くなるため(図-13参照)、潜水業務を連続して実施できず、潜水士の作業が翌日に持ち越されることも発生する。

次に水中の濁りに関する問題である。水中の濁りが発生することは予想していたが、想定していた程度を上回るものであった。今回は作業を完了できたが、底板付近の濁水を吸引し、清水と入れ替えるポンプ設備の必要性を感じた。

5.2 まとめ

今回の到達工は概ね順調に推移し、大きなトラブルなく施工を完了することができた。しかし、そのためには到

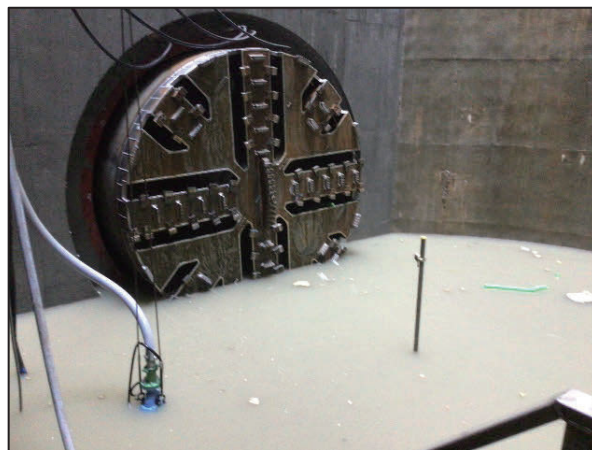


写真-7 姿をあらわしたシールドマシン



写真-8 底板汚泥清掃状況



写真-9 シールドマシン到達状況

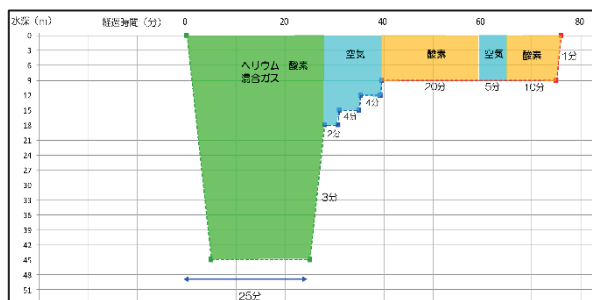


図-13 潜水タイムスケジュール

達に至るまでのビットの健全性や測量精度の確保、労務の確保等が必要である。また、潜水作業や排水に時間を要することから、工程を確保しておくこともと言える。

今回の成果は当社で 40m 以上の大深度での水中到達を行った希少な例であり、今後の類似工事への展開が期待される。