

# 泥水式シールド工法による玉石を含む砂礫地盤の長距離掘進

## － 浦安 11 号幹線（1 工区）雨水管築造工事 －

### Long-distance Excavation of Slurry Shield Tunneling in Gravel Foundation Mixed Cobbel Stones

山本博之\*1 野村 剛\*2

#### 概 要

本工事は、岡山市南部浦安排排水区の浸水対策として、雨水を集水し流下させる雨水管渠を築造するものである。泥水式シールド工法を採用し、主に洪積砂礫層で玉石を含む区間を介在した地盤を施工延長 3,722m 掘削した。到達はφ6.0mのライナープレート式円形立坑であり、到達坑口部に FFU 製ライナープレートを使用し、SEW 直接到達工法を採用した。

本報では、逸泥・切羽崩壊の防止対策、SEW 直接到達の施工について報告する。

key words : 泥水式シールド工法、逸泥、切羽崩壊防止対策、SEW 工法直接到達

#### 1. はじめに

岡山市南部浦安排排水区は、平成 23 年 9 月の台風 12 号で 24 時間雨量が過去最大となる 197.5mm を記録し、床上・床下浸水約 1,000 棟と甚大な浸水被害が発生した。このことを受け、岡山市は『岡山市下水道浸水被害軽減総合計画（浦安排排水区）』を策定し、浸水対策施設の整備を進めている。

本工事は、当該地区の雨水を集水し流下させる雨水幹線管渠（仕上り内径φ3,750mm、延長3,722m）を泥水式シールド工法により築造するものである。

#### 2. 工事概要

- ・管きょ工（泥水式シールド工法）  
掘削外径：φ4,705mm、セグメント外径：φ4,550mm、  
二次覆工仕上がり内径：φ3,750mm  
施工延長：3,722.145m  
覆工形式：（直線部）RC セグメント  
（急曲線部）スチールセグメント

図-1 に本工事の全体平面図と断面図を示す。

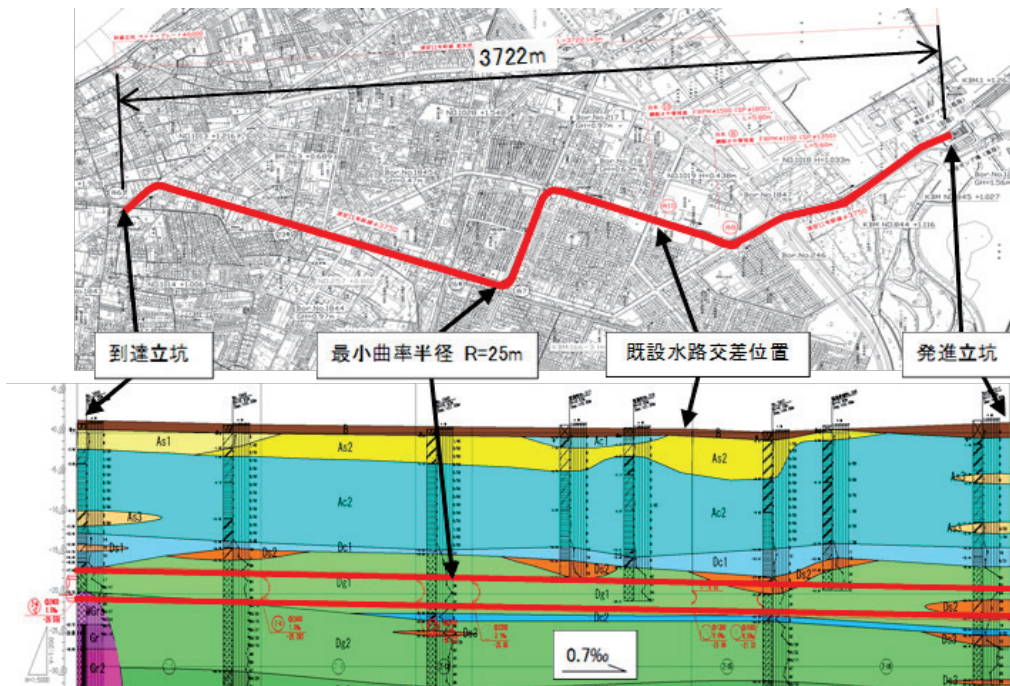


図-1 全体平面・縦断面図

\*1 Hiroyuki YAMAMOTO

広島支店工事事部

\*2 Tsuyoshi NOMURA

広島支店工事事部 作業所長

### 3. 掘削地盤の土質変化と対応

#### 3.1 土質概要

本工事場所は河川による堆積作用により形成された沖積平野上に位置し、上層部は17世紀以降の干拓事業により埋め立てられ、陸地化した土地である。

掘削対象地盤は、主に洪積第1砂礫層(Dg1)および洪積第2粘性土層(Dc2)であり、事前ボーリング調査の結果では最大礫径φ50mm程度であったことから、最大φ150mm程度の礫径を想定し、シールド機カッター面板のスリットを最大φ200mmの玉石が通過できる広さとした。また、排泥管径はφ250mmとし、排泥はクラッシャーを通し、礫径の大きなものはここで適切な大きさに破碎され、ポンプ輸送される機構とした。

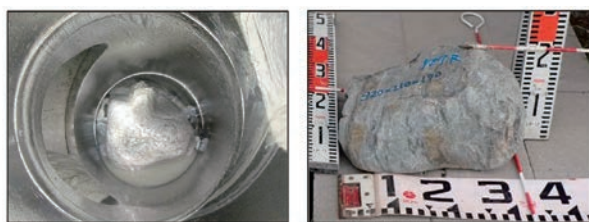
#### 3.2 玉石混り砂礫層への対応

##### (1) 玉石の出現による閉塞

掘進開始後から想定以上の玉石が局所的に出現し、排泥管内で玉石が閉塞するトラブルが発生した(写真-1)。玉石には扁平形のものやオーバル形のものがあり、それらは排泥管の曲部や僅かな段差に引掛り、閉塞を発生させた。

泥水式シールド工法は、地上の泥水プラントにて比重と粘性を調整した泥水を切羽へ送り、カッターチャンバー内で掘削土砂と攪拌混合し、排泥管を通して地上へ排出し、土砂と泥水に分離した後に再び泥水を循環させる工法である。掘削地山安定のため、切羽水圧が一定に保たれるよう、送泥管と排泥管内の水圧・流量を管理する必要がある。排泥管が閉塞すると、掘削土砂が適切に排出されないだけでなく、切羽水圧の変動が大きくなり、地山崩壊の危険性がある。

そのため、閉塞解除作業は、カッターチャンバー内にクレーショック(高粘性の可塑性充填材)を注入して安定を図ったうえで、閉塞箇所前後の排泥バルブを閉鎖し、配管を部分的に取り外して行った。



▲排泥管内に閉塞した状況 ▲閉塞した玉石の一例  
写真-1 玉石閉塞状況

##### (2) シールド機内排泥バルブ付近での閉塞

玉石による閉塞で最も厄介であったのが、シールド機内の排泥バルブ内およびその付近での閉塞であった。この部分で閉塞した玉石を除去するためには、排泥バルブを開放する必要があり、切羽地山の安定を確保した上で、閉塞解除作業を行う必要があった。

対応策として、カッターチャンバー内をクレーショッ

クで充填させたいうえで、不断水凍結工法により配管の一部を凍結・閉塞させることとした。

図-2に排泥バルブでの玉石閉塞概要図を、写真-2に凍結工法による閉塞解除状況を示す。

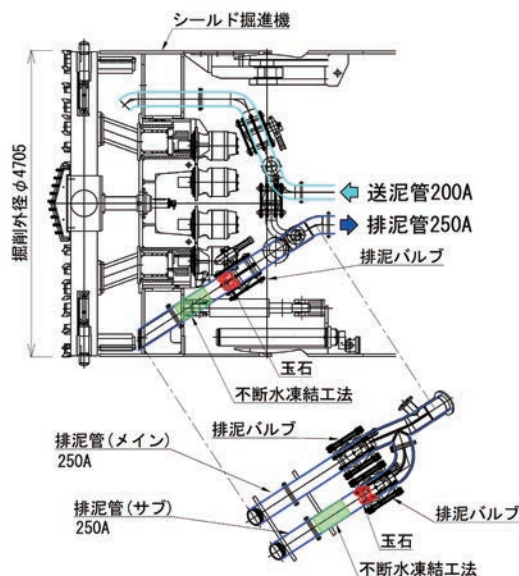


図-2 排泥バルブでの玉石閉塞概要図



▲排泥管凍結状況 ▲排泥バルブ閉塞  
写真-2 凍結工法による閉塞解除状況

##### (3) 流体設備の損耗と対応

掘削地盤は砂礫および砂質土が多く部分を締め、流体輸送設備の破損、輸送配管の摩耗が多く発生した(写真-3)。

排泥ポンプの外殻やインペラーは交換時期を推定し、予備品を準備した。輸送配管は超音波厚さ計にて管厚を定期的に点検し、定期的に管回しや配管の取り換えを行った。また、クラッシャー内部の点検を定期的に行い、摩耗したビットの補強、損傷したビットの交換を実施した。

#### 3.3 玉石を多く含む砂礫地盤の出現と対応

##### (1) 玉石を含む砂礫地盤掘削による切羽不安定化

No. 1+71 付近掘削中、掘削乾砂量の超過、切羽水圧の不安定化が発生した。到達立坑まで171mという距離であったが、危険性を考慮し、掘進を停止し、追加ボーリング調査を行った上で対策について検討した。

##### ① 掘削乾砂量

掘削乾砂量は下記の計算式によって算出され、掘進中に中央管理画面にてリアルタイム表示される(図-3、4)。乾砂量>0となった場合は、掘削土の取込み超過を示す。本工事では、管理値を平均値±5%として監視を実施した。なお、当該箇所の掘削時、乾砂量はこの管理値を大きく上回った。

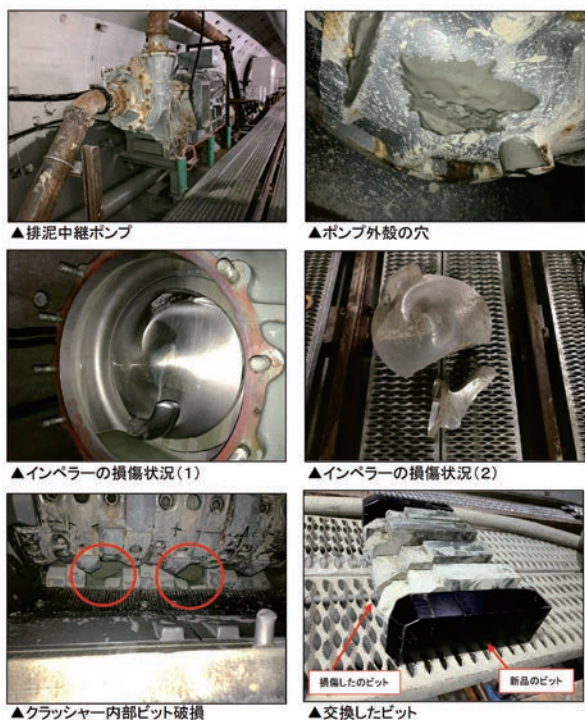


写真-3 流体設備の損傷状況

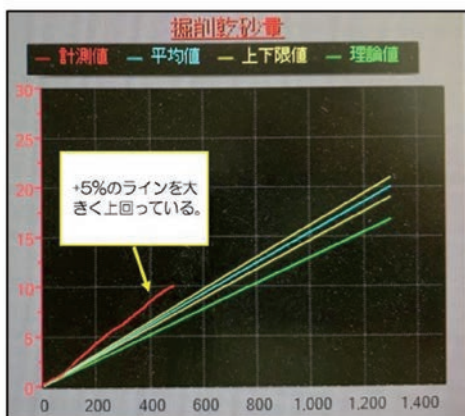


図-3 掘削乾砂量グラフ

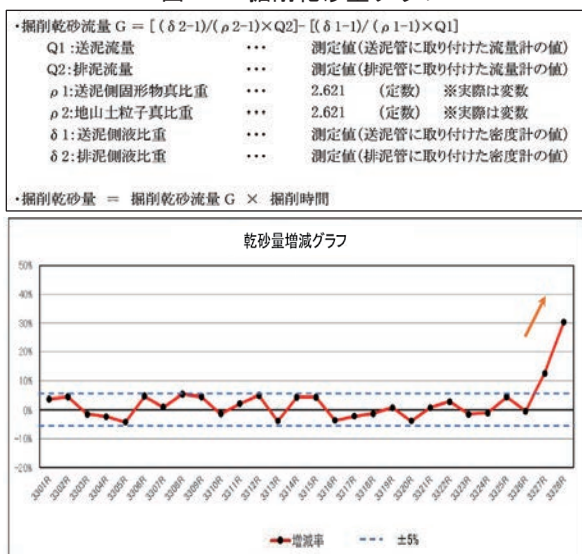


図-4 1リング毎の掘削乾砂量増減グラフ

②切羽水圧

掘削時の切羽水圧についても、リアルタイムで監視し

た(図-5)。切羽水圧が変動すると、切羽地山を緩め崩壊を招く危険性がある。排出土砂の状況から、地山に含まれる巨礫や玉石が増加し、それらが排泥管内を多数通過することで排泥流量および切羽水圧に乱れが生じたものと考えられた。

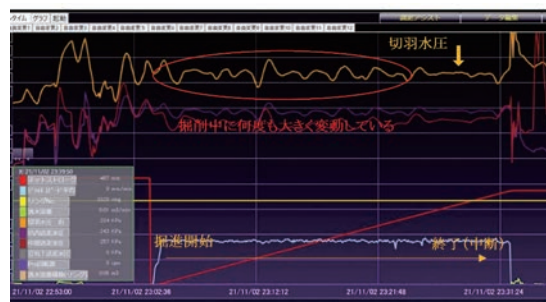


図-5 掘進時の切羽水圧(掘進管理画面)

(2) 土質調査結果と考察

追加ボーリング調査を3か所で行った(図-6)。図-7にボーリング縦断面図を示す。ボーリング調査の結果、掘削対象地盤にφ40~60mm程度の巨礫、φ80~100mm程度の玉石が含まれる砂礫層の存在が分かった。一方、透水係数は $1.72 \times 10^{-5}$ 以下、均等係数 $U_c$ は92.8以上、曲率係数 $U_c'$ は1.23以上であり、直接的に崩壊性に繋がる土質判定結果とはならなかった。しかしながら、以下3点について検討が必要とした。

①土層構成として、Dg1(洪積第1砂礫)層が主体であるが、層境が存在し、地下水が帯水している場合が多く、逸水しやすい。また、上部のDc1(洪積第1粘性土)層は薄く、Ac2(軟弱シルト)層を通過して地上へ噴出する場合も考えられる。

②到達立坑で計測された塩分濃度の高い地下水は泥水の凝集・劣化に直結するため、泥水品質の安定管理がより困難となる。

③φ100程度の玉石が確認されており、今後の掘削地山にも玉石が増加するものと考えられる。

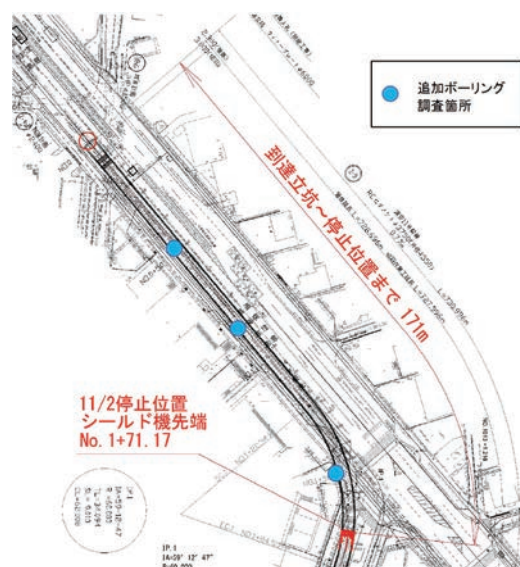


図-6 追加ボーリング調査位置

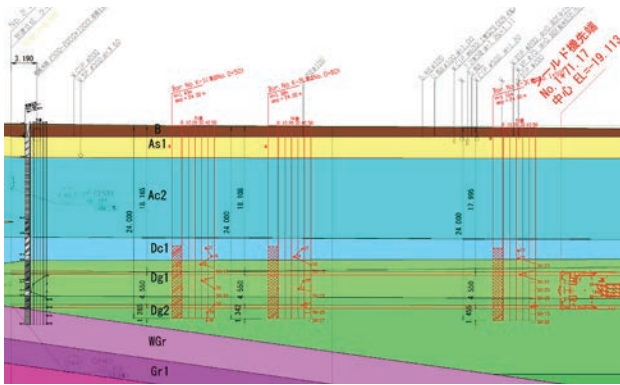


図-7 ボーリング縦断面図

(3) 問題点の整理

- ① 逸泥し、地上への噴出を起こしやすい土層構成である。
- ② 掘進停止中にチャンバー内泥水が分離する (図-8)。
- ③ 流体バルブ内部が摩耗し、流体停止中の水圧保持が困難になる (図-9)。

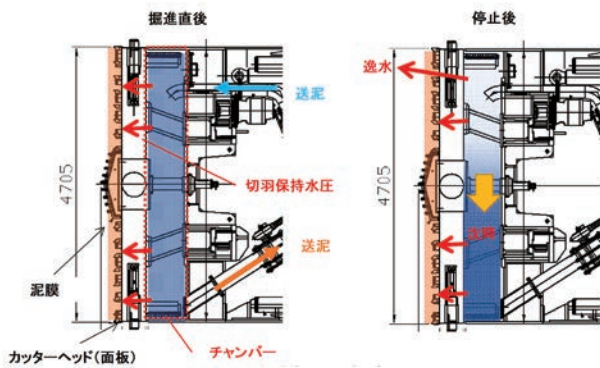


図-8 掘進停止中の逸泥概要図

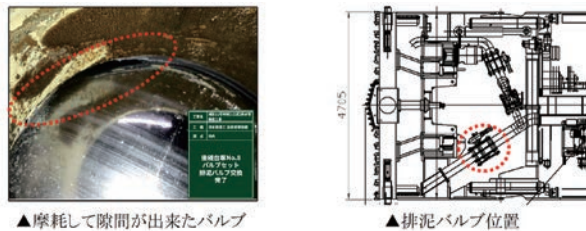


図-9 流体バルブの摩耗概要

(4) 対策の実施

- ① クレーショック (可塑状充填材) 注入設備の追加

比重・粘性の高いクレーショックをマシン前方より地山へ打ち込み、緩み部に充填、健全な泥膜形成を行い、切羽の安定化を改善した。クレーショック注入概要図を図-10に、クレーショック注入設備を写真-4に示す。



写真-4 クレーショック注入設備

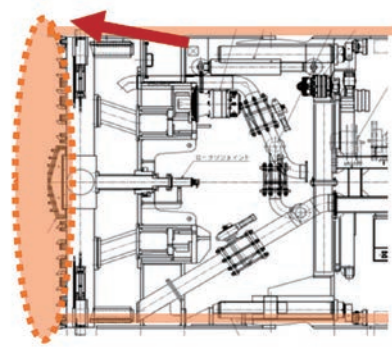


図-10 クレーショック注入概要図

- ② 泥水材料の変更

泥水比重を高くし、塩分濃度が高い地下水でも粘性を保持できる泥水材料を使用した。比重および粘性の高い作泥を調整槽 (100m<sup>3</sup>) に貯留し、効率的に泥水の比重・粘性の調整を可能とした (図-11)。

CMC (泥水の粘性を上げる材料) は、一般的なタイプのものでは塩分濃度の高い地下水で効果を発揮しにくいため、塩水対応の CMC (TG エーテル) を使用した。

- ③ チャンバー内への増粘剤を注入

チャンバー内に増粘剤を注入し、泥水のブリーディング・逸水を防止した。図-12に増粘剤注入概要図を示す。

増粘剤注入設備を増設 (写真-5) し、掘進停止直後に比重の軽い増粘剤 (TAC スルーG) をチャンバー内に注入・攪拌し、泥水の粘性が著しく高め、掘進停止中の泥水の分離、逸泥を防止し、切羽保持水圧を確保した。

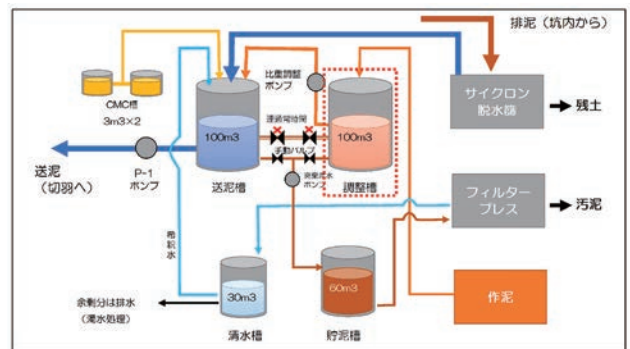


図-11 泥水プラント概要図

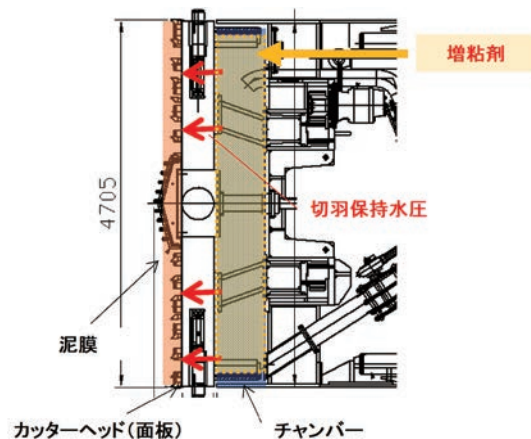


図-12 増粘剤注入概要図



▲TACスルーG注入設備 ▲チャンパー内注入状況

写真-5 増粘剤注入設備

④内部摩耗した排泥バルブ交換

砂礫土の掘削により内部が擦り減ったバルブを新しいものと交換し、掘進停止中のバルブからの漏水を解消し、切羽保持水圧を確保した。

以上の対策を実施し、掘進を再開した。再開後も玉石による閉塞トラブルは発生したが、掘進中の切羽水圧は安定し、著しい逸水や取込み過多は発生しなかった。掘進停止前に取込み過多となった区間については、直後にクレーショックを充填した後、取込量以上の裏込め注入を実施した。また、沈下測定、空洞調査を実施したが異常は見られなかった。

4. 到達時の対策

(1)到達施工の問題点

到達立坑はφ6.0m、深さ23.5mの円形ライナープレート式立坑、到達部は高圧噴射攪拌工法による地盤改良を実施する設計であった。しかし、到達立坑は交通量の多い4車線の幹線道路上に位置し、施工時間帯は夜間に限定され、昼間は道路の開放が求められた。また、到達側には用水路ボックスカルバートが横断する等、地下埋設物も多く存在した。

設計通りに高圧噴射攪拌工法を施工する場合、排泥回収量が多く、造成から硬化までに一定時間を必要とする。そのため、硬化前に道路解放した場合、道路の沈下および地下埋設物への影響が懸念された。

(2)SEW シールド直接到達用部材の採用

上記の解決策として、SEWについて検討した。SEWでは、到達部分にFFU素材のライナープレートを組み込み、鏡切断を行わず、シールドマシンにて直接切削して到達させる。また、立坑内は改良土で埋戻し、FFU切削時の反力とする他、到達時の地山崩壊を防止する。この場合、到達立坑口部の地山の自立性は必要とせず、高圧噴射攪拌工法から止水目的の薬液注入工法への変更が可能となった。

以上の工法について比較検討を実施し、SEWの採用を決定した。SEW直接到達概要図(縦断面図)を図-12に同(平面図)を図-13に示す。

なお、到達部付近のセグメントにEバッグセグメント(袋張りセグメント)を施工し、裏込め注入材の散逸を防止し、テールボイド・オーバーカット部の充填および止水を実施した。写真-6にFFUライナープレート組立状況を、写真-7にEバッグ施工状況を示す。

を、写真-7にEバッグ施工状況を示す。

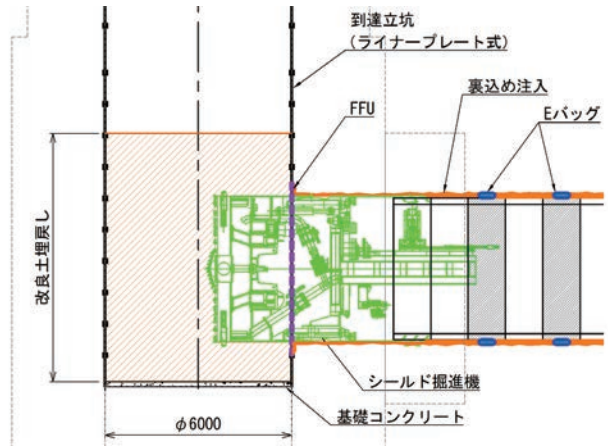


図-12 SEW 直接到達概要図(縦断面図)

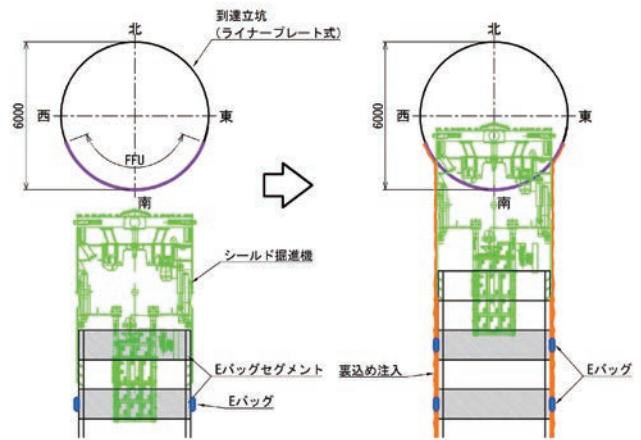


図-13 SEW 直接到達概要図(平面図)



写真-6 FFU ライナープレート組立状況



▲Eバッグセグメント ▲Eバッグ注入状況

写真-7 Eバッグ施工状況

(3) 到達時の状況

シールドマシンのカッターヘッド先端が立坑へ到達する直前より、掘進速度を 3mm/min (通常 30~40mm/min)、カッター回転速度を 2.7 回転/min (通常 1.0 回転/min) に設定して到達掘進を開始した。

切削屑は土砂とともに流体輸送されて排出した。大部分は先行ビットおよびカッタービットで細かく削られて排出された。大割れした切片の大きさは、概ね幅 50mm、長さ 30mm 程度以内であった。写真-8 に到達状況、FFU 切削屑を示す。



▲シールド機到達状況 ▲FFU切削屑

写真-8 到達状況、FFU 切削屑

(4) カッタービットの摩耗状況

シールドマシンのカッターヘッドに装備されたビットは図-14 の配置とした。カッタービットには耐摩耗ビット (当社特許技術) を採用し、ビット交換なしによる到達を実現した。先行ビットには 2 か所に 20mm、40mm の摩耗検知を可能とした摩耗検知ビットを配置した。

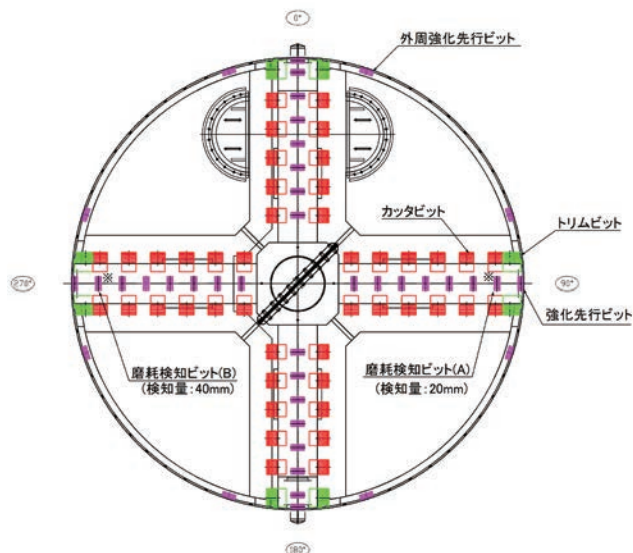


図-14 ビット配置図

ビットの摩耗状況は表-1 に示す値となった。先行ビットについては、推定摩耗量を上回る結果となったが、到達直前まで摩耗検知が反応しなかった。これは、到達掘削直前で転石を切削し、摩耗が急激に進行したものと考えられる。カッタービット実施摩耗量を写真-9 に示す。なお、カッタービットは推定摩耗量を下回る結果となった。到達時のビット摩耗状況を写真-10 に示す。

表-1 ビット摩耗状況一覧表

| ビット種類   | 許容摩耗量  | 推定摩耗量  | 実施摩耗量  |
|---------|--------|--------|--------|
| 先行ビット   | 50.0mm | 39.7mm | 44.3mm |
| カッタービット | 30.0mm | 20.0mm | 18.2mm |



写真-9 カッタービット実施摩耗量 写真-10 到達時のビット摩耗

5. おわりに

シールドトンネル工事の安全・安心な施工を実現するためには、異常の兆候を早期に把握する施工管理を実施した上で、異常やトラブルが発生した場合に予め定めた対応を取る考え方が重要である。万が一、事故が発生した場合の被害の影響は、シールドトンネルを施工する現場の条件によって大きく異なり、出水・陥没等の大きな被害に繋がる可能性がある。こうした大きな被害を発生させないためには、異常の兆候を早期に発見し、対策を講じる必要がある。

本シールド工事においても、計画段階では想定していなかった地層の変化に直面し、その都度施工を止めて速やかに適正な対策を講じたことにより、陥没等の大きな被害を回避することができた。また、泥水式シールド工法における泥水品質管理の重要性、土質に対応した流体設備の計画および維持管理の重要性について改めて認識した。

近年のシールド工法による事故事例を踏まえ、工法の安全性について世間からの注目が高まっていることを踏まえ、今後もさらなる技術開発が行われることを期待する。

【謝辞】

最後に、本工事の施工にあたり多大なるご協力をいただいている岡山市下水道河川局や関係各機関、地域にお住いの皆様、協力会社各社様に心より感謝を申し上げます。

【参考文献】

- 1) シールドトンネル施工技術検討会：シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン、p3-4、令和3年12月