

長距離・特殊岩盤シールドにおける施工報告について

Construction report on the long distance shield tunnel excavating special rock formations

内山 明日香*
Asuka Uchiyama
富迫 建太*
Kenta Tomisako

安村 秀樹*
Hideki Yasumura
高原 裕介**
Yusuke Takahara

要 約

本工事は、相互融通機能を有した全長約 3.7 km の水道連絡管を泥水式シールド工法にて新設する工事である。掘削対象地盤は、神戸層群の泥岩を主体とする互層岩盤と花崗岩の全線岩盤である。神戸層群岩盤は、水が混ざると高粘性化すること、花崗岩は、石英を含み研磨効果が高い特徴がある。さらに、当工事は長距離岩盤掘進であることから、ビットの異常摩耗や損傷による掘進不能や特殊岩盤層による掘進低下が課題であった。本稿では、掘削体積比エネルギーを用いた綿密なビット交換計画と施工実績について報告する。また、特殊岩盤での掘進低下対策についても報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. ビット交換計画と実績
- § 4. 掘進低下対策
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

本工事は、相互融通機能を有した連絡管を整備し、バックアップ機能を向上させることで給水の安定供給を図ることを目的に一次覆工を行うものである。路線上には高取山断層が横断しており、断層を境に神戸層群と花崗岩に分かれる。神戸層群は水が混ざると高粘性化し、花崗岩は石英を含み研磨効果が高い。

本稿では長距離岩盤シールドにおける綿密なビット交換の計画、実績と掘進低下対策について報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事内容

本工事の概要を表一に示す。

2-2 地質概要

本シールドの地質縦断図を図一に示す。掘削対象地

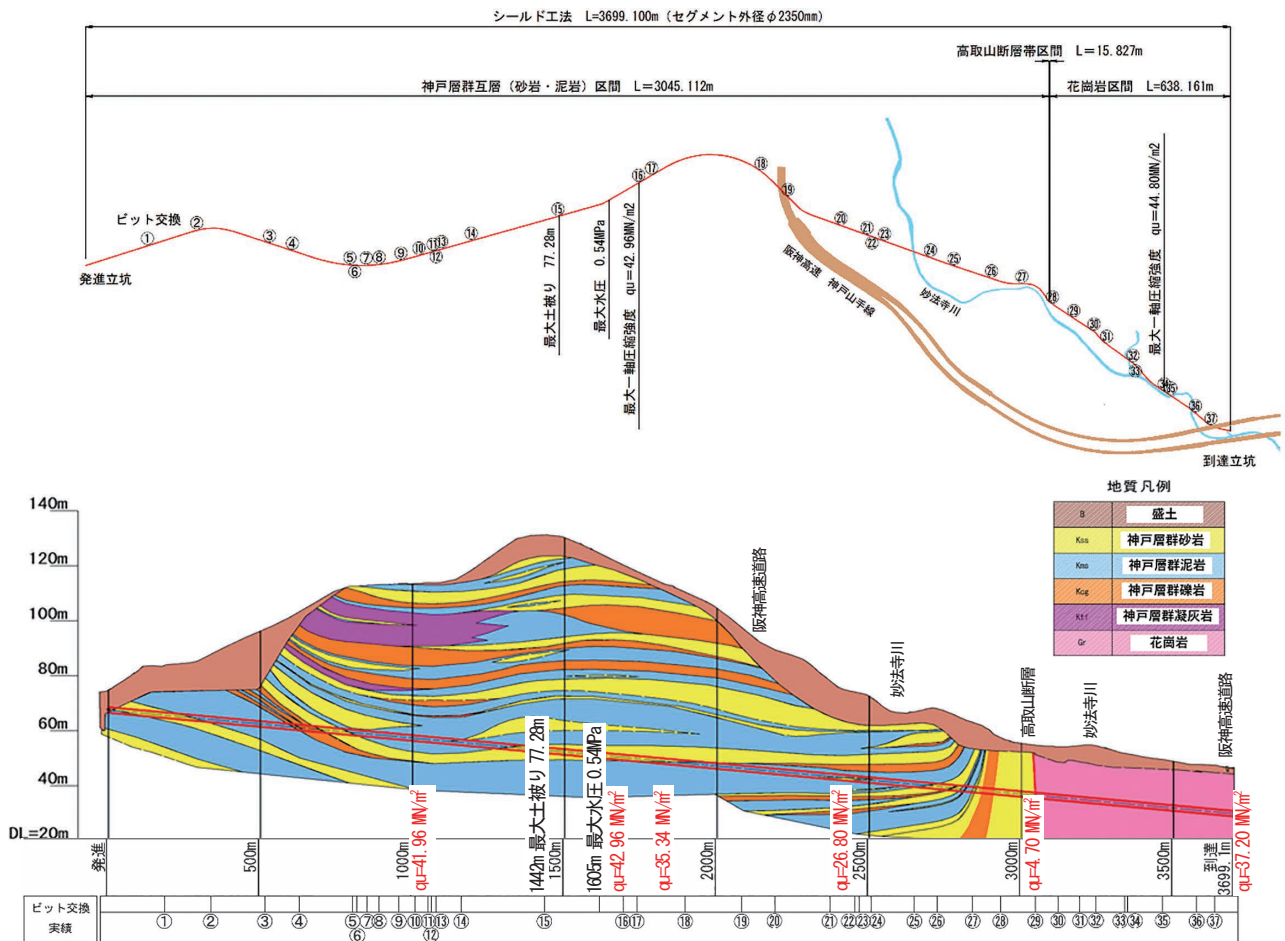
表一 工事概要

工 事 名 称	奥畑一妙法寺連絡管工事整備工事（その1）
発 注 者	神戸市水道局
施 工 者	西松・安場建設工事共同企業体
工 事 場 所	神戸市須磨区西落合～妙法寺字宮ノ下
工 期	令和2年6月27日～令和7年3月31日
工 事 内 容	泥水式シールド工法
	施工延長 3,699.1m
	シールド機外径 φ 2,480mm(掘削外径 φ 2,530mm)
	セグメント外径 φ 2,350mm(内径 φ 2,144mm)
	勾配 10.2‰（下り）最小曲率半径R=50m

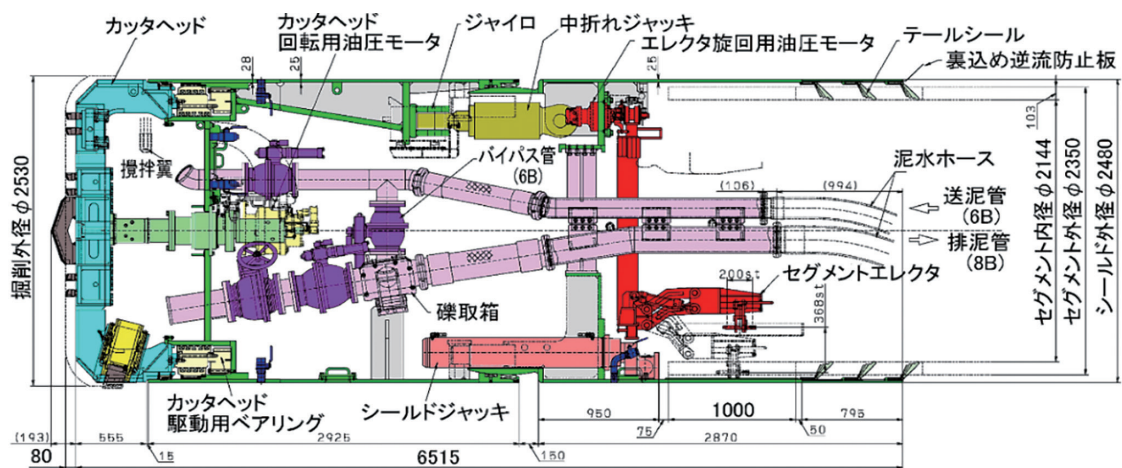
質は発進から約 3.0 km 地点までは神戸層群泥岩、砂岩、礫岩の互層であり、主に泥岩が主体である。約 3.0 km 地点から到達立坑までは花崗岩となり全線岩盤掘削である。また、約 3.0 km 地点で断層破碎帯を通過する。発進地点で最小土被り 6.34 m、1.4 km 地点で最大土被り 77.28 m である。発進から約 1.6 km 付近で最大地下水圧 0.54 MPa を観測している。事前調査による一軸圧縮強度は平均 6 MN/m²、最大 12 MN/m² である。しかし、掘進データの Cutter トルク値、推力値が想定より大きかったことから、岩盤シュミットハンマーを用いた計測を切羽地山点検時およびビット交換時に適宜行った結果、平均値 27 MN/m²、最大値 43 MN/m² と事前調査より大きな値となった。透水係数は 10⁻⁶～10⁻⁹ m/sec である。

* 西日本（支）神戸西シールド（出）

** 技術研究所先端技術グループ



図一 地質縦断面図



図二 シールド機概要図

2-3 シールド機概要

シールド機概要図を図-2に示す。シールド機のビットは一部交換可能な換装型を採用した。岩盤強度が 20 MN/m^2 未満の地質でティースビットを使用し、岩盤強度が 20 MN/m^2 以上の地質でディスクカッターを使用する計画とした。

使用したビット種別および配置を図-3に示す。

§ 3. ビット交換計画と実績

3-1 施工上の課題

本工事は土被りが大きく、全線岩盤の長距離掘進であることから、ビットの異常摩耗や損傷による掘進不能や工程遅延が課題であった。そのため、ビットの摩耗量を的確に把握し、許容ビット摩耗量以内かつ安全にビット交換できる位置を計画することが重要である。しかし、ビットの摩耗予測に関する定量的指標は確立されておらず、

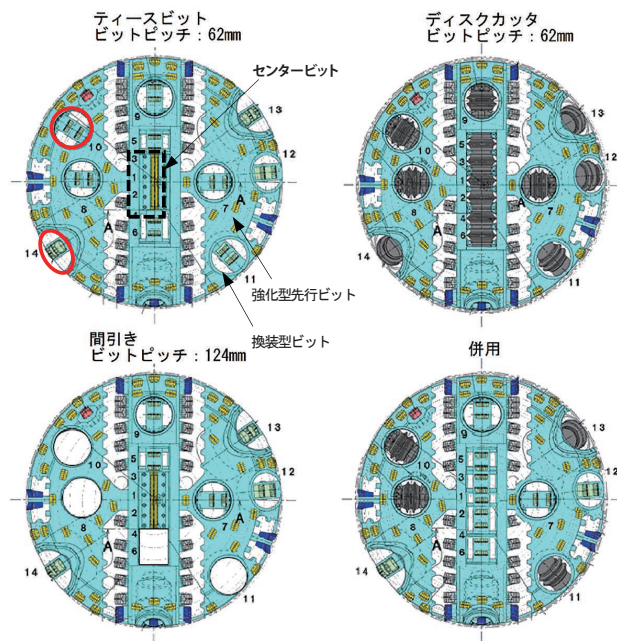


図-3 カッターヘッド概要

従来シールド機メーカーが設定した摩耗係数とビットの摺動距離より予測している。従来のビット摩耗量推定式を式(1)に示す。

$$T = K \times 2\pi \times R \times L \times N / V \quad (1)$$

T : 摩耗量 (mm)

K : 摩耗係数 (mm/km)

R : ビット取付半径 (m)

L : 掘進距離 (km)

V : 掘進速度 (m/min)

N : カッター回転速度 (rpm)

摩耗係数は過去の施工実績に基づき設定されるが、土質区分が大まかなため、互層地盤や特異的な地盤条件には反映しにくい。本工事のような特殊岩盤地山において、綿密なビット交換計画を行うためには、岩盤強度および特殊岩盤条件を考慮したビット摩耗予測が必要である。

3-2 施工上の対応

(1) 掘削体積比エネルギーを用いた摩耗量の推測

掘削体積比エネルギーとは単位体積の地山を掘削するために要したエネルギー量であり、主にTBMや削岩機等の掘削機械の能率を評価する指標とされ、地山の強度特性と相関があることが知られている。また、摩耗係数についても地山の強度特性と相関があることから、これらの関係性を試験的に仮定することで、リアルタイムでの摩耗量推定を試みた。なお、算出方法はカッターの種類および配置に関わらず共通とした。掘削体積比エネルギーを式(2)に、掘削体積比エネルギーとジャッキスピード(掘進速度)の関係を図-4に示す。

$$S_E = \{8 \times (Tr - Tr_{initial}) / (p \times D^2)\} \times 10^{-3} \quad (2)$$

S_E : 掘削抵抗から求めた掘削体積比エネルギー (MPa)

Tr : 計測されたカッタートルク (kN-m)

$Tr_{initial}$: 無負荷カッタートルク (kN-m)

p : 1回転当たりのカッター貫入量 (m)

D : シールド機直径 (m)

掘削体積比エネルギーの算出結果を、掘進管理システムのモニタにリアルタイムで表示し、ビット摩耗予測だけでなく、最適なビット種別および配置の判断基準にも利用した。

(2) 掘削体積比エネルギーと摩耗係数の関係式

掘削体積比エネルギーと摩耗係数の関係について、試験的に仮定し関係式(3)を構築した。

$$K = a \times e^{b \times S_E} \quad (3)$$

a, b : 現場係数(摩耗実測値により決定)

現場係数は、掘削体積比エネルギーと従来の方法で算出した摩耗係数等を参考に設定する。摩耗量の実測値と推定値に差が生じる場合は現場係数の補正を行う。式(3)を使用した現場係数算出の一例を図-5に示す。

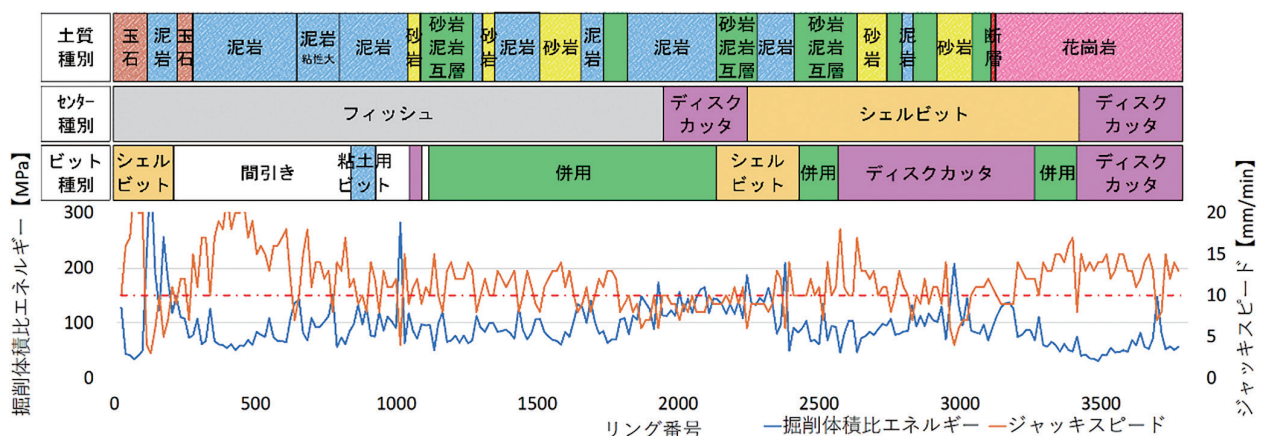


図-4 掘削体積比エネルギーと掘進速度

3-3 施工結果

(1) ビット摩耗量推定値と実測値について

図-6, 図-7 にビット摩耗量の推定値と実測値を示す。ビット摩耗量はカッターヘッドの内周と外周で異なるため図-3 に示す No.10 ビットと、最外周の No.14 ビット

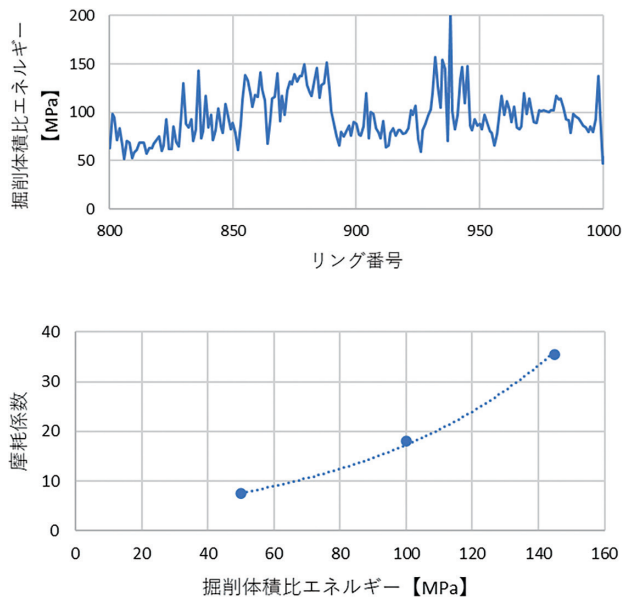


図-5 現場係数算出例

を対象とした。土質種別は地山点検および掘削土から判定した結果である。ビット種別は換装部で使用するビットの種別を示す。推定式は、初回ビット交換で摩耗量実測値より現場係数を設定し次の区間へ適用した。推定値と実測値の差がティースビットで6 mm、ディスクカッターで3 mmを超えた場合は現場係数を見直し、次の区間に適用することとした。グラフ上の点線が現場係数の設定・補正を行った区間である。No.10 ビットでは5か所で現場係数を設定し、摩耗量の推定を行った。また、No.14 ビットでは4か所で現場係数を設定し、摩耗量の推定を行った。

ビットの摩耗許容値はティースビットが30 mm、ディスクカッターが10 mmである。また、掘削掘削体積比エネルギーと同様に、掘削管理システムへビットの摩耗量を表示し、リアルタイムで監視した。掘削体積比エネルギーが大きく上昇および掘進速度が大きく低下した場合は、ビット点検を適宜行った。神戸層群区間(発進～3 km 地点迄)では実測値に近い摩耗量を推定することができ、最適なビット交換を行うことができた。花崗岩区間(3 km～到達)については、推定値と実測値で大きな差が生じた。差が生じた要因としては、地山点検時に確認した花崗岩の岩盤強度差が大きいこと、石英含有量のばらつきが大きいこと等による影響が考えられる。



図-6 摩耗量の推定値と実測値比較 (No. 10 ビット)

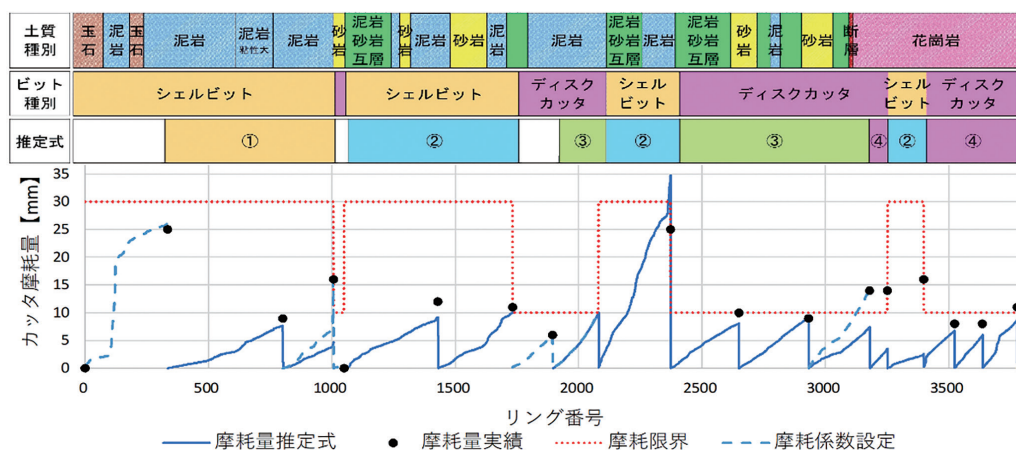


図-7 摩耗量の推定値と実測値比較 (No. 14 ビット)

また、推定式を使用する際の課題として、現場係数の設定を人力で行っているため、設定作業に時間を要したことが挙げられる。今後はビットの摩耗実測値を入力することで、推定式を自動で構築し、摩耗予測値を表示できるシステムの構築が必要であると考える。

(2) 交換不可の強化型先行ビットによる検証

強化型先行ビットはカッターヘッドに溶接しているビットである。到達時の摩耗量は図-8に示すとおり、取付半径が大きいほど摺動距離が増加するため、摩耗量も増加しているが、 $R=835\text{ mm}$ 以上のビットは4～6パス配置としているため、比例しておらず摩耗低減効果が確認できた。また、強化型先行ビットより出代の高い、ティースビットやディスクカッターでの先行掘削の影響もあり、当初計画よりも摩耗量が低減される結果となった。

§ 4. 掘進低下対策

4-1 施工上の課題

(1) 神戸層群岩盤区間

測定した泥水の粒子径分布図を図-9に示す。75 μm 以下の割合が97%以上と粒径が細かく、かつ粒度分布が悪いことがわかる。また、地盤はアルカリ性を呈しており、粘土分はベントナイトの主成分であるモンモリロナイトが主体である。そのため、シールド掘進時に切削土が送泥水に溶け込むと膨潤が進み泥水粘性が上昇する。さらに、泥水が裏込め材と接すると泥水のアルカリ化が助長され、凝集により粘性が一気に上昇する。神戸層群区間では、切削された土が高粘性の粘土となりカッターヘッドおよびカッタースリットへ付着し、排土不良が発生した。また、排泥水の粘性上昇によりチャンパー閉塞や排泥管閉塞も多発し掘進進捗が大きく低下した。

(2) 花崗岩区間

花崗岩は主成分鉱物を石英・カリ長石・斜長石・黒雲母とする六甲花崗岩であり、研磨効果が大きい。このような地質であるため、ビット摩耗によるビット交換回数の増加、排泥管や中継ポンプの摩耗・ケーシングの破損が多数発生した。また、外周ビットで切削した土砂がシールド機の下部へ堆積することで、シールド機後胴が拘束され、速度を落とす事態も発生した。

4-2 施工上の対応

(1) 注入による閉塞や拘束の抑制

シールド機のフィッシュ先端に装備した添加剤吐出口より滑剤および清水を初期掘進時80 L/min、本掘進時100 L/minで注入し、カッターヘッドへの高粘性土の付着を和らげた。また、チャンパー内へ清水を100 L/minで注入することで排泥水の粘性上昇を抑制した。装備したシールド機周面摩擦抵抗監視システムの周面摩擦力が通常時より20%上昇した段階で、シールド機の前胴部と後胴部の外周注入孔から注水を30～40 L/minで適宜行

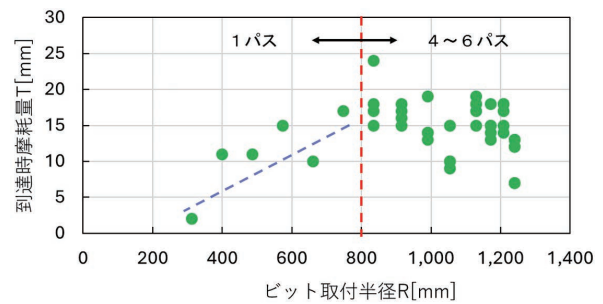


図-8 取付半径と到達時摩耗量実測値の関係

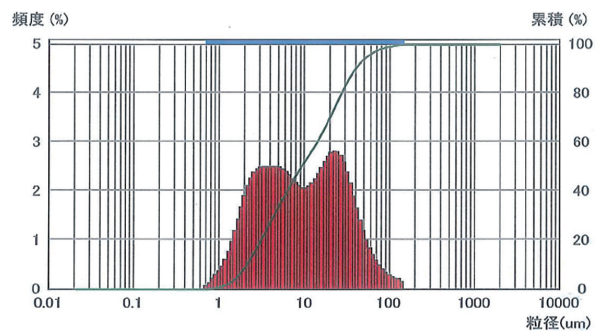


図-9 泥水の粒子径分布測定結果

い、シールド機の拘束を緩和した。

(2) 地質に応じたカッター回転速度への変更

装備しているカッター用油圧パワーユニット4台の範囲内で、地質に応じて最適なカッターヘッド回転速度・カッター圧力に適宜変更した。高粘性の泥岩時は低回転高トルク（カッター回転速度2.2 rpm、カッター油圧力28.0 MPa）、硬岩の砂岩・花崗岩時は、高回転低トルク（カッター回転速度2.8 rpm、カッター油圧力21.6 MPa）、神戸層群互層区間時は定常値（カッター回転速度2.4 rpm、カッター油圧力26.0 MPa）で施工し、カッターヘッドへの高粘性土付着・岩塊の大割れによる排泥管の閉塞およびビット異常摩耗を抑制した。

(3) 地山に応じたビット種別の選定

使用したビットの種別を図-10に示す。またそれぞれの特徴を下記に示す。

① シェルビット、センターフィッシュ

岩盤強度20 MN/m²未満の高粘性岩盤以外の岩盤に適している。泥岩では粉状に切削するため高粘性化を誘発する。

② 粘土用ビット

岩盤強度10 MN/m²以下の高粘性岩盤に適している。硬岩では破損しやすい。

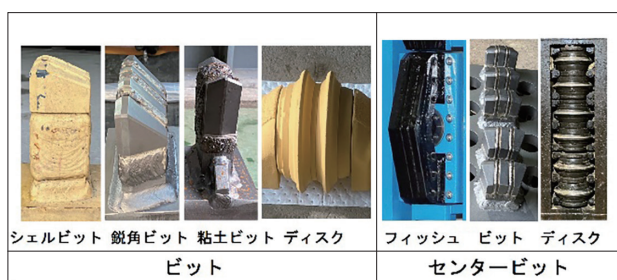
③ 鋭角シェルビット、センタービット

岩盤強度15 MN/m²以下の高粘性岩盤に適している。

④ ディスクカッター、センターディスクカッター

岩盤強度20 MN/m²以上に適している。しかし、高粘性土がディスクカッターの隙間に入りディスクの回転を阻害すると偏摩耗を起こす。

上記を適切に選定することで、掘進効率の低下を緩和



図ー10 ビット種別

した。また、高粘性化の強い区間においては、ビットの間引きを行い、開口率の向上とビットのピッチを大きくし、泥岩を大きく切削することで高粘性化を抑制した。互層区間においては、ビットとディスクの併用で施工した。

(4) シールド機チャンバー内循環流量の増加

切羽への循環用 P0 ポンプの能力を標準 $2.0 \text{ m}^3/\text{min}$ から $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$ に向上し、送泥側へのリターン流量を増加させ、標準管内流速 2.3 m/sec から 2.6 m/sec と流速を上げることでチャンバー内閉塞および排土不良を抑制した。

(5) クラッシャーと粘土破碎用ポンプの使い分け

地質に応じ礫破碎用クラッシャーと粘土破碎用ポンプの使い分けを行った。玉石、花崗岩区間では排泥ポンプ前にクラッシャーを設置し、ポンプを通過する岩塊を粒径 50 mm 以下に破碎した。神戸層群区間では礫破碎用クラッシャーにて高粘性土が付着し閉塞が多発したため、土丹や粘土を細かく破碎することを目的に開発された泥水シールド用のポンプである粘土破碎用ポンプを設置し粘土塊を細かく破碎した。

(6) 分流器の形状・構造変更

分流器を礫対応型から粘土対応型への改造を行った。神戸層群高粘性区間では、分流器での閉塞や循環流量の低下が多発した。そこで、流速を確保するため分流器のサイズを小型化した。分流器内部のさや管は礫対応より延長することで閉塞を防止する構造とし、閉塞時に早急に解除できるよう分割、接続部を分解しやすいようにフランジからハウジング型の継手へ変更した。また、分流器内の状態を容易に確認できるように点検窓を設置した。

4-3 施工結果

(1) シールド機先端への注入により神戸層群高粘性区間で上昇したシールド機カッター圧力が 1.0 MPa 程度低下した。また、チャンバー内へ清水を注入し排泥水の粘性上昇を抑制した結果、先端およびチャンバー内への注入で平均 2 mm/min 程度掘進速度の改善が図れた。

花崗岩区間でシールド機の拘束により掘進速度が 5 mm/min 以下と著しく低下したが、注水により 10 mm/min 程度まで回復できた。

(2) 神戸層群泥岩区間では、高粘性土がカッターヘッドへ付着し、カッタートルクが過大となり掘進速度が

5 mm/min 以下と著しく低下した。そのため、カッター回転数を低回転として泥岩の高粘性化を抑制することで、 10 mm/min 程度の安定した掘進速度を確保できた。また、神戸層群砂岩および花崗岩区間においては、高回転とすることで、岩塊の大割れによる排泥管閉塞を抑制でき、安定した掘進が可能となった。

(3) 掘削体積比エネルギー、掘進速度および推定摩耗量を総合的にリアルタイムで監視し、最適なビット交換およびビット選定を行った結果、ビット交換が全 37 回と増加したが、 10 mm/min 以上の掘進速度を確保できた。また、面板閉塞による掘進低下は間引きによる開口率を 26% から 29% へ増加させ、取り込みを向上させることにより改善が図れた。

(4) チャンバー内循環量の増加により、高粘性泥岩のチャンバー内付着や土砂沈降による管内閉塞を防止し、安定した掘進速度を確保できた。

(5) 礫破碎用クラッシャーと粘土破碎用ポンプの使い分けにより、礫での閉塞や粘土による閉塞が減少し、閉塞除去による掘進停止時間を抑制した。また粘土破碎用ポンプは同時にスラリーポンプとしての役割を持ち、P0 ポンプと排泥用ポンプを補完し、安定した排土を確保した。弱点となる摩耗に対しては、インペラとカッティングインペラに超硬合金チップ加工を施すことで、損傷や摩耗による交換を 1/2 程度に減少させた。加工状況を図ー11 に示す。

(6) 分流器の形状・構造を変更することで循環流量 $4.0 \text{ m}^3/\text{min}$ を安定して確保できるようになり、排土不良による掘進速度低下、および閉塞解除による掘進停止時間を抑制した。また、閉塞時には早急な解除が可能となった。



チップ加工有 加工無しの摩耗状況 加工有りの摩耗状況
図ー11 インペラ超硬合金チップ加工

§ 5. まとめ

本工事は、神戸層群の泥岩を主体とする互層岩盤と花崗岩の全線岩盤掘削であった。神戸層群区間では切削された土が高粘性となる特異地盤であり、花崗岩区間は研磨効果が非常に高いものであった。また、高水圧・長距離の厳しい掘進であったが、緻密なビット交換計画と掘進低下対策により、無事工期限内に施工を完了した。

最後に、本工事を施工するにあたり、貴重な指導助言をいただいた各位に深く感謝の意を表するとともに、本稿が同種工事の一助となれば幸いである。