

高水圧下における泥水式岩盤シールドの 長距離施工

稲積 教彦¹・安藤 秀幸²

¹ 正会員 大成建設株式会社 土木本部土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目 25-1)

E-mail: inazumi@ce.taisei.co.jp

² 正会員 大成建設株式会社 土木本部機械部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目 25-1)

E-mail: andhdy00@pub.taisei.co.jp

小石原川ダム事業は、筑後川水系佐田川の寺内ダム上流と同じく筑後川水系小石原川の江川ダム上流を約 5km の導水路トンネルで繋ぎ、新設された小石原川ダムと既設の江川ダム・寺内ダムとともに、流域の洪水被害の軽減、農業・工業・上水道用水の安定供給、異常渇水時の緊急水の確保を図るものである。導水路トンネルは、大深度・高水圧下での長距離掘進で、工事区間の近傍では生活用水として地下水等を利用している集落が存在しているため地下水利用に極力影響を与えない掘削が必須となる。本稿では、これらの課題の解決に向けた泥水式岩盤シールド工法に関する掘削方法の工夫について報告する。

Key Words: Deep underground, High groundwater pressure, Long distance, Hard rock Slurry TBM

1. はじめに

福岡県朝倉市を流れる筑後川水系の小石原川には昭和 50 年に江川ダムが、同じく筑後川水系の佐田川には昭和 53 年に寺内ダムが完成し、農業用水や都市用水を供給している。(図-1 参照)

寺内ダムは、江川ダムと比較して貯水容量が小さく流域面積が広いいため、ダムが満水している時が多く、年間約 3,700 万 m^3 の水が有効利用されずに放流されている。また江川ダムからも年間約 1,500 万 m^3 の水が利用されずに放流されている。(図-2 参照)

小石原川ダム建設事業は、江川ダム上流に新設される小石原川ダムに貯水することで、江川ダム貯水池に空き

容量を確保する。そこに寺内ダム上流の佐田川から水の豊富な時に取水した水を導水し、貯水することで限られた水資源の有効活用を図るものである。(図-3 参照)



図-1 導水路トンネル位置図

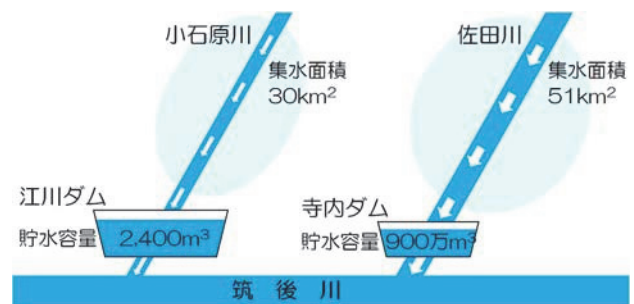


図-2 事業開始前状況

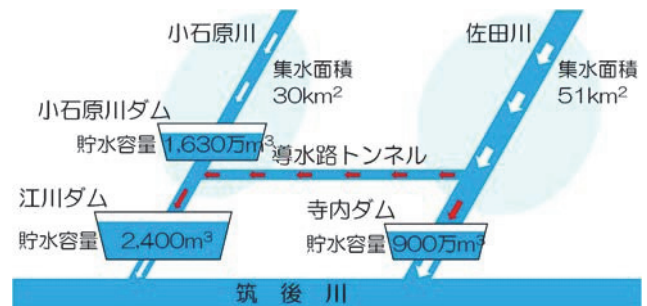


図-3 事業完成後状況

2. 導水路トンネルの概要

今回の工事は、小石原川ダム事業のうち導水路トンネルを築造するもので、図-4に導水路トンネルの平面図、図-5に導水路トンネルの地質縦断面図、図-6にトンネル標準断面図、表-1に施設諸元を示す。

地質はトンネル坑口付近、断層部周辺の脆弱部を除き、概ね CM 級程度の片状ホルンフェルスで露頭やボーリングにより大きな破碎帯を伴う断層部が存在することが確認されている。

地山の透水性は全体として $10^{-6} \sim 10^{-4}$ cm/s程度、破碎帯

の周辺で 10^{-3} cm/s程度で、地下水位は地表面より-30m～-60m程度と想定されており、比較的地下水位が高いという特徴がある。

また、導水路ルート周辺では地下水・沢水が生活用水として利用されており、トンネル掘進時および供用時においてこれらに対する影響を極力低減させる必要があった。このため、総延長 5,040m のうち取水工側の 1,020m を水密覆工区間（覆工構造に水密性が要求される区間）および放流工側の 4,020m を通常覆工区間（覆工に水密性を求めず、山岳工法のトンネルと同様に覆工背面の水を排水できる区間）に区分した。

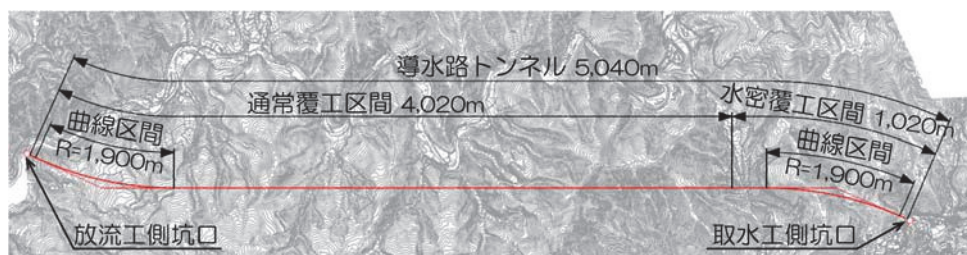


図-4 導水路トンネル平面図

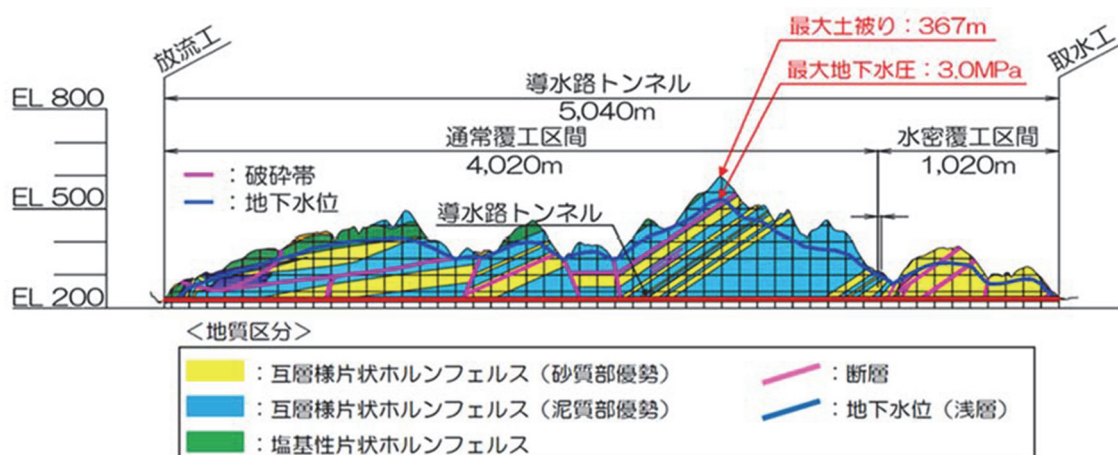


図-5 導水路トンネル地質縦断面図

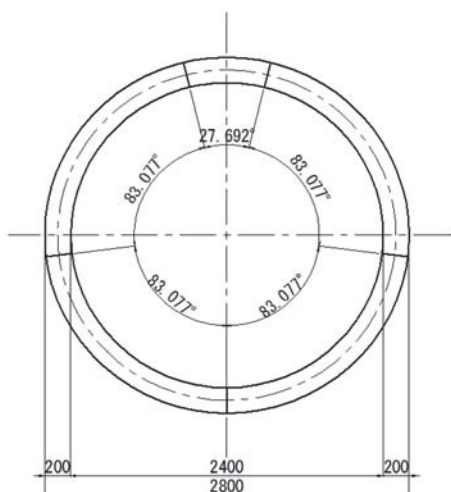


図-6 トンネル標準断面図

表-1 導水路トンネル施設諸元

トンネル型式	無圧トンネル
最大導水量	3m ³ /s
仕上内径	φ 2,400mm
掘削外径（シールド区間）	φ 3,060mm
延長	水密覆工区間 1,020m 通常覆工区間 4,020m 合 計 5,040m
縦断勾配	1/1,680
最小曲線半径	R=1,900m
最大土被り	水密覆工区間 154m 通常覆工区間 367m
河川横断部の最小土被り	約46m（水密覆工区間）
最大地下水位（想定）	水密覆工区間 110m 通常覆工区間 296m

工法については、上記の条件に加え通常覆工区間の最大土被りが 367m、最大地下水位は 296m、水密覆工区間の最大土被りが 154m、最大地下水位は 110m と大深度・高水圧であること、断層破碎帯での異常出水、地山の崩落等のリスクが高いことから、地下水位の変動や異常出水に対する対応能力が NATM 工法や TBM 工法等と比較して高いこと、掘削後直ちにセグメントで覆工することで、坑内への地山の崩落や地下水の流入を防止できることから、泥水式岩盤シールド工法を採用した。また、工期短縮の観点から覆工には二次覆工省略型セグメントを採用し、放流工、取水工の両坑口から 2 台のシールド機で施工を行い、地中接合によりトンネルを接続させた。

また、水密覆工区間と通常覆工区間の境界には、通常覆工区間での水位低下の影響がトンネル軸方向を通じて水密覆工区間に影響を及ぼさないように、トンネル内から同心円状に 5m の厚みの止水注入を延長 20m の区間で実施した。（図-7 参照）

3. 技術的な問題点

導水路トンネルは前述した通り、大部分が地下水圧 1.0MPa を越える高水圧下での掘削であること、取水工側から約1km の水密覆工区間については地下水への影響を極力低減させなければならないこと、またボーリング調査等により断層破碎帯の存在が確認されていたことから、泥水式岩盤シールドでの施工にあたり以下に 記す2 点の技術的な課題を解決しなければならなかった。

(1) 高水圧下での掘進

従来のシールド機では耐水圧性能が 1.0MPa 程度であるため、これを越える区間については水抜きボーリン

グ等の補助工法が必要となる。

今回、通常覆工区間では全長 4,020m のうち 3,440m の区間において地下水圧が 1.0MPa を超えることが想定された。また、水密覆工区間についても 137m の区間で 1.0MPa を超えると想定された。（図-8 参照）

このため従来のシールド機では、通常覆工区間においてはほとんどの区間で補助工法が必要となり、補助工法の作業量が掘削の進捗を大きく低下させることから、事業工期内での導水路トンネル完成が難しくなること、また水密覆工区間においては水抜きによる地下水位の低下が近隣住民の生活用水に影響を与えることから、補助工法を極力省略することが解決すべき一つの技術的な課題となった。

(2) 断層破碎帯の存在

露頭や事前のボーリング調査により9か所の破碎帯を伴う大きな断層部の存在が確認されていた。（図-8参照）

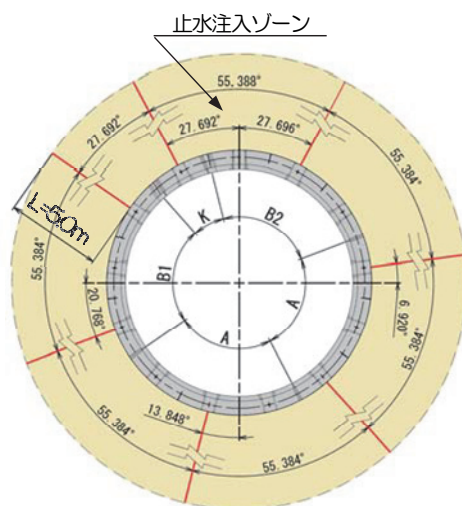


図-7 止水注入断面図

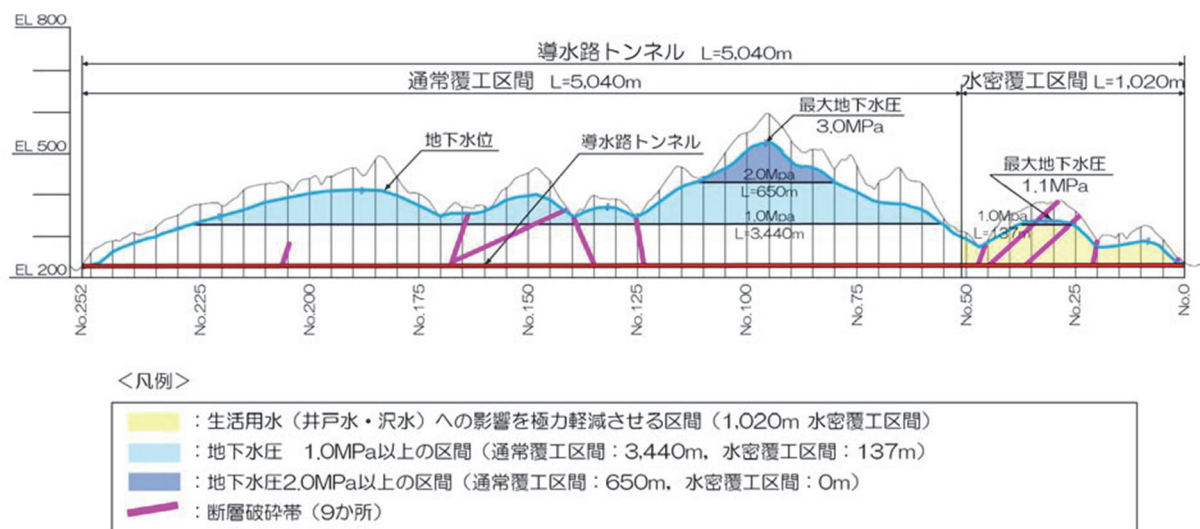


図-8 地下水位及び破碎帯想定縦断面図

破碎帯を有する岩盤掘削では、礫状化した地山の出現により切羽や坑壁が崩壊し、崩れた地山によるシールド機の拘束や異常出水といったトラブルが生じやすく、これらにより掘進不能となり工程が遅延するリスクが高い。またボーリング調査だけでは全線に渡る破碎帯等の脆弱部の把握が困難であるため、未確認の破碎帯の出現により上記のリスクはさらに高くなる。

これらのリスクを回避するため、脆弱な地山の兆候をいち早く察知し、状況に応じた適切な掘進管理を行うことが必要となる。このためリアルタイムに地山の状態を把握することが二つ目の技術的な課題となった。

4. 解決の方策

上述した2つの技術的な課題を解決するために以下の方策を実施した。

(1) 高耐水圧性能のシールド機の開発

通常覆工区間の地下水圧は全長 4,020m のうち約 3,400m、水密覆工区間ではすべての区間が 2.0MPa 以下と想定されたため、大成建設と川崎重工業で最大耐水圧 2.0MPa の土砂シールドを共同で開発し、これに合わせて本体機構、中折れシールド、テールシールド、ディスクカッタに同等の耐水圧性能を持たせることで、高耐水圧性能 (2.0MPa) の泥水式岩盤シールド機を製作した。

(図-9、写真-1 参照)

これにより 2.0MPa 以下の区間については補助工法なしでの掘削することが可能となった。

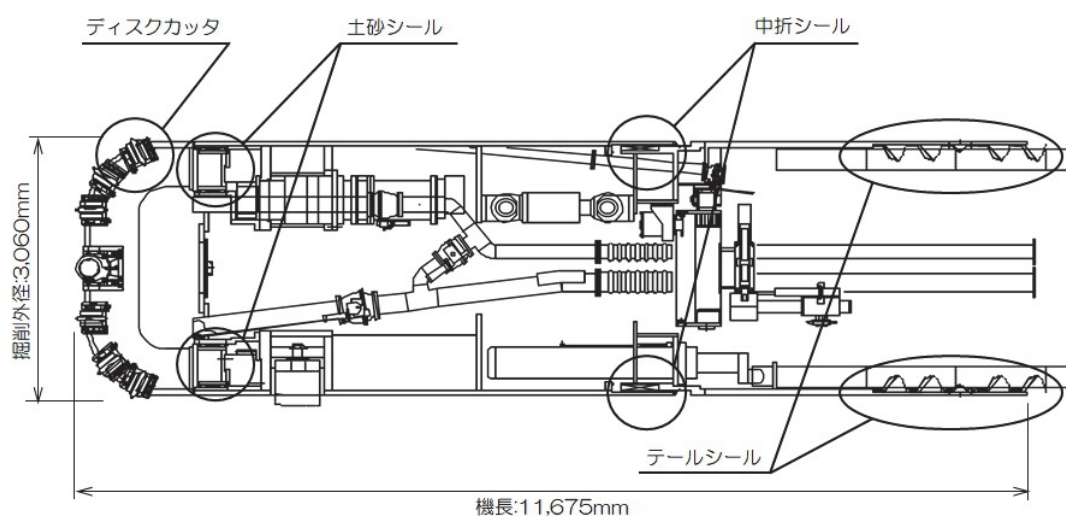


図-9 シールド機概要図



写真-1 φ2.970 泥水式岩盤シールド

通常覆工区間の 2.0MPa を超えると想定された区間については、補助工法として機内から水抜きボーリングが行えるよう、また不測の事態に対応できる地盤改良等の補助工法が施工できるように、シールド機に7本の挿入孔を設けた。（図-10、11 参照）

a) 土砂シールの概要

高水圧下で長距離掘削を行うためには、シールドのカッタ回転部への地下水、土砂の浸入を防止し、カッタのメインベアリングを守る高い止水性・耐久性を有した土砂シールが必要となる。

今回 2.0MPa に対応できるシールド機とするため、止水性・耐久性の高い土砂シールを新たに開発した。開発した土砂シールの概要を図-12 に示す。

開発した土砂シールの特徴として、①負荷の大きい3、4段目のシールに耐久性の高いフッ素ゴムを採用、②熱に弱いゴムの耐久性向上のため土砂シール部に冷却水を常時供給するとともに、シール部の温度をモニタリングするシステムを採用、③シール摺動面の部材の耐磨耗性向上のため高張力鋼を採用、④給脂方式にオイルバックアップ方式の採用の4点があげられる。

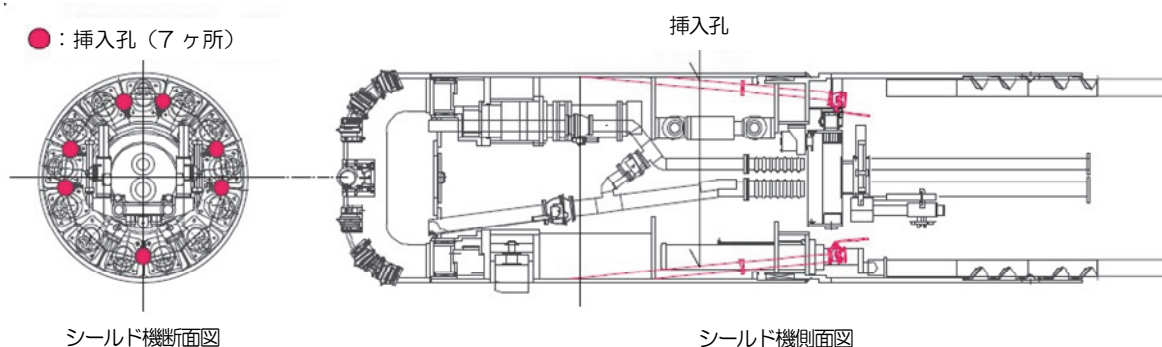


図-10 挿入孔配置図

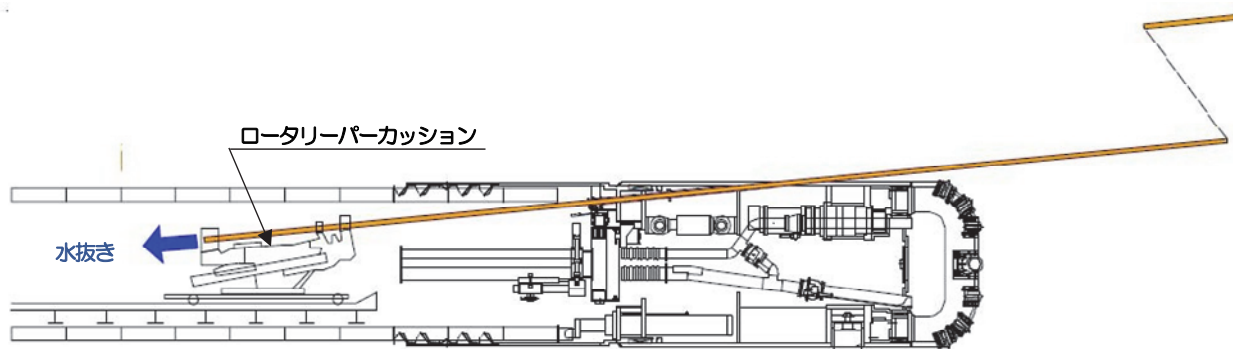


図-11 水抜きボーリング図

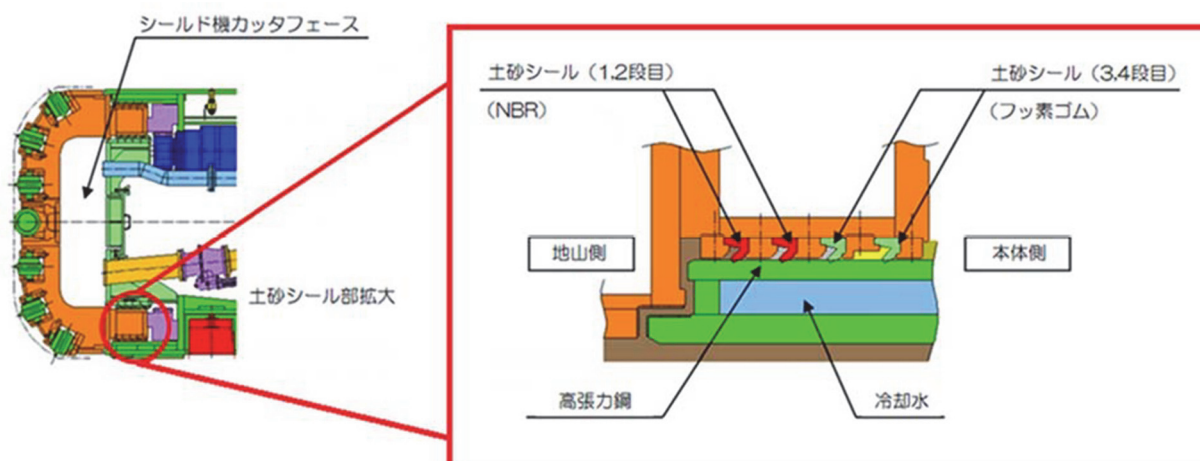


図-12 土砂シール概要図

④に関して、図-13に従来の給脂方式、図-14に本工事で採用したオイルバックアップ方式の概念図を示す。

従来方式の場合、土砂シール間のすべての空隙にグリスが充填されており、切羽水圧がグリスを介してすべてのシールに一樣に加わる。4段目の土砂シール背面は大気解放されているため、すべての圧力差を4段目の土砂シールが受け持つことになり、4段目の土砂シールの負担が大きくなる。オイルバックアップ方式の場合、3段目と4段目の土砂シール間にオイルを充填し、オイルの圧力を切羽水圧に応じてコントロールすることができ、オイルの圧力を切羽水圧の50%に設定することで3段目と4段目の土砂シールで圧力差を分担し、従来方式の半分の負担とすることができるため、耐久性が向上し、長距離掘進が可能となる。

(2) 地山評価システムの開発

断層破碎帯への対応策として、2つのシステムを開発した。

a) 地山評価システム

岩盤評価システムは、シールド掘進中に得られる機械データ（掘進推力、カットトルク、カット回転速度、掘進速度等）から岩盤強度と掘進中のシールド周辺地山の状態を判定するものである。

掘進中の推力とカットトルクから、シールド機の掘進速度、カット回転速度の影響を取り除いた修正推力と修正トルクは、岩盤の強度を示すパラメータとなっている。

岩盤評価システムは、この特性を利用して、過去の掘削データを統計処理して求めた管理値と掘進中のデータから算出された修正推力と修正トルクをモニター上へプロットすることで、地山の状態をリアルタイムに把握することができるシステムである。図-15に示したように、プロットが管理値を超える場合、シールドが掘削を行っている地山に崩落や変形等の異常が生じていると判定する。

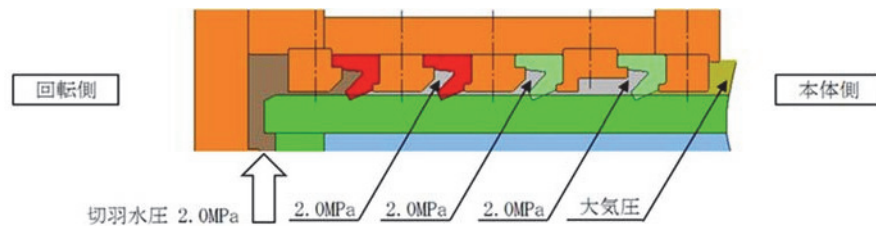


図-13 従来の給脂方式

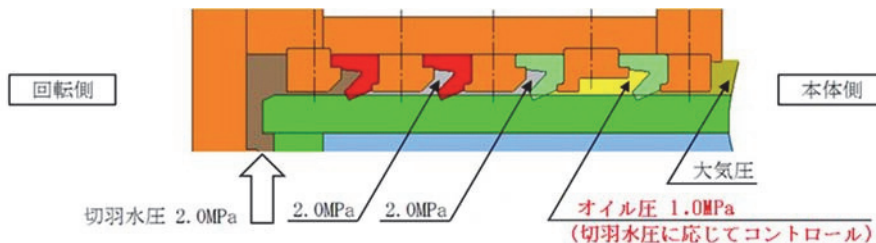


図-14 オイルバックアップ方式

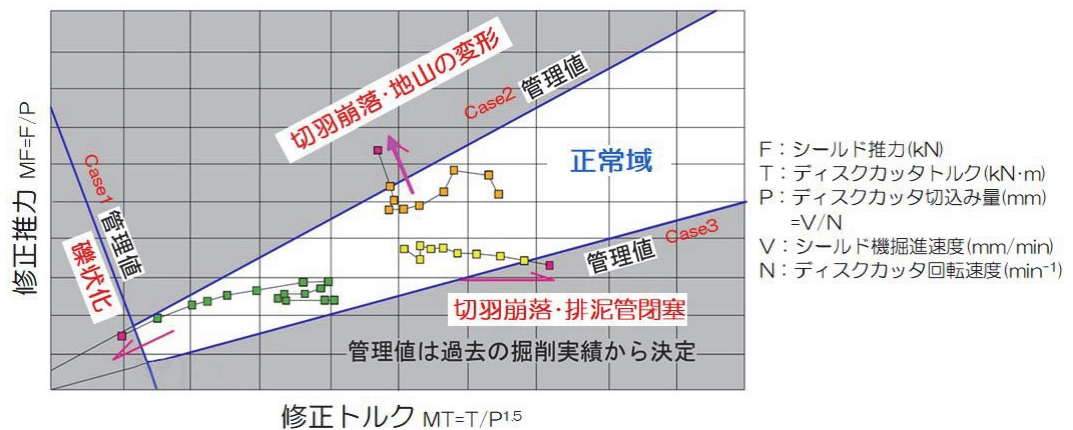


図-15 岩盤評価システムによる地山評価

Case1 は、修正推力と修正トルクがともに低下し管理値を超えた場合で、地山の岩盤強度が低下していると判断し、地山が礫状化していると判定、Case2 は、修正推力のみが上昇し管理値を超えた場合で、シールド機と地山の摩擦抵抗が増加していると判断し、切羽・坑壁の崩落ないしは地山の变形が発生していると判定、Case3 は修正トルクのみが上昇し管理値を超えた場合で、カッタの抵抗が増加していると判断し、切羽の崩落ないしは排泥管の閉塞が発生していると判定した。

b) フロントグリッパ計測システム

フロントグリッパ計測システムは、シールド機左右上部のフロントグリッパを坑壁に押当て、この時の圧力とジャッキシリンダの変位計測から坑壁岩盤の变形性・弾性を機内より計測し、評価するシステムである。

フロントグリッパの位置を写真-2に、フロントグリッパ試験システムの概要を図-16に示す。

計測は、毎リング掘削完了後に実施し、グリッパのストロークとグリッパシューの圧力のグラフとしてモニターに出力される。図-17のように所定のストローク

まで圧力が上昇せず、その後急激に圧力が立ち上がる場合は坑壁とシールド機の間に空隙があり坑壁が自立していると判断できるため健全な地山と判定し、図-18のようにストロークの伸びとともに圧力が上昇する場合は坑壁とシールド機の間に空隙がなく、掘削後に坑壁が崩落していると判断し、脆弱な地山と判定した。

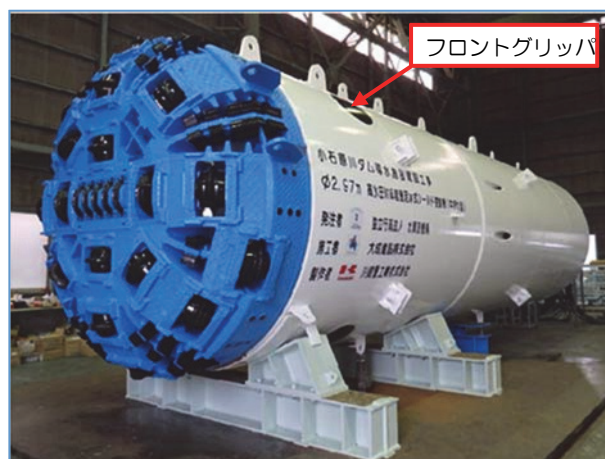


写真-2 フロントグリッパ

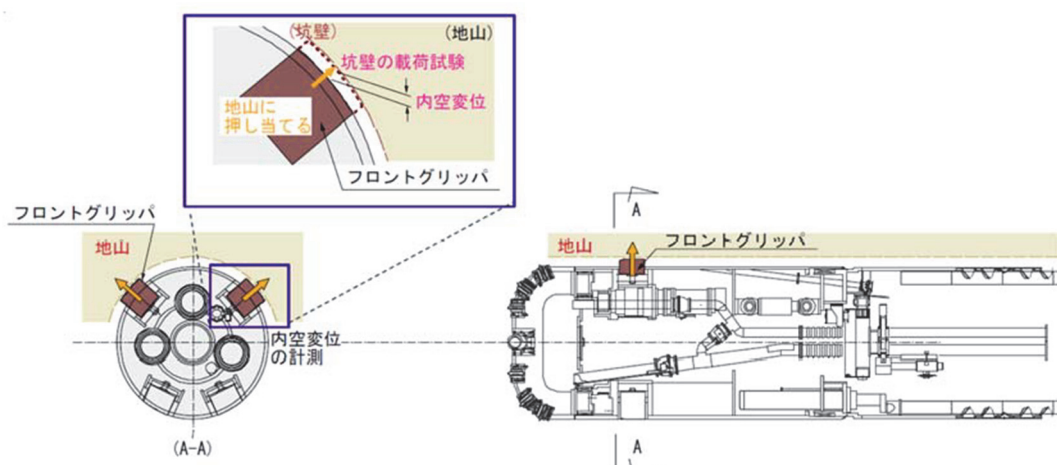


図-16 フロントグリッパ試験システム概要図

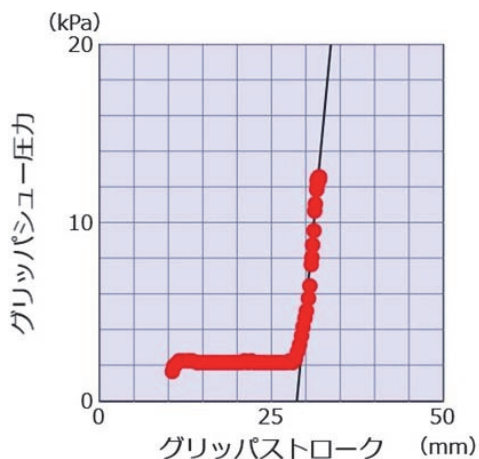


図-17 フロントグリッパ計測結果1

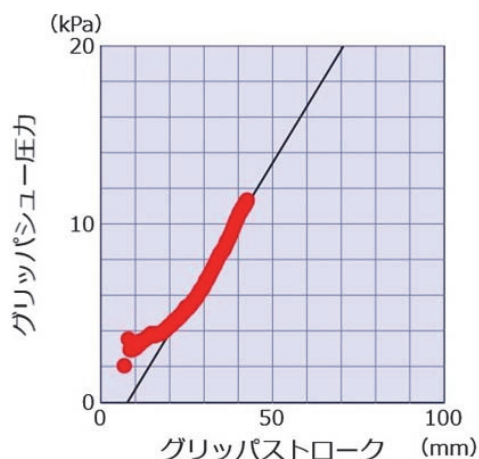


図-18 フロントグリッパ計測結果2



写真-3 地中接合部覆工完了

5. 得られた結果と技術的知見

耐水圧性能 2.0MPa のシールド機を使用したことで、水密覆工区間では地下水位圧が 1.0MPa 以上の区間でも通常の掘進で地下水位を低下させず施工することができ、通常覆工区間では、実施工時の最大地下水位圧が 1.5MPa だったため、全線補助工法なしで施工することができた。

また岩盤評価システムとフロントグリッパ計測システムを併用したことで、地山の状態に応じて切羽水圧・泥水性状・掘進速度・トルクを適切に管理することができたため、未確認の破碎帯でもトラブルなく施工することができた。

世界初の最大耐水圧 2.0MPa の土砂シールドの開発したことで高水圧下でも補助工法無しの掘進を可能とした点、岩盤評価システムとフロントグリッパ計測システム

の開発したことで、地山崩壊等のリスクを低減し、安全で確実な長距離施工を可能とした点が、今後ますます大深度・高水圧下・長距離でのシールド技術が要求されていく中で、他のプロジェクトにも大きく寄与できる技術だと考える。

6. おわりに

2017 年の九州北部豪雨および 2018 年の西日本豪雨により 2 度の被災を受けたが、放流工側の掘削が 2018 年 12 月、取水工側の掘削が 2019 年 4 月に終了し、6 月に地中接合部の二次覆工が完了したことで、トンネルが無事開通した。（写真-3 参照）

導水路トンネルの完成で水資源を有効活用できるようになり、流域の社会生活、経済活動、河川環境等へ大きく貢献できれば幸いである。

謝辞：本工事の設計・施工に関して、ご指導をいただいた方々ならびに工事の実施にご理解とご協力いただいた地元住民の皆様に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松永 徹, 稲積 教彦, 安藤 秀幸, 関 康太: 地下水利利用への影響を配慮した高水圧下での泥水式岩盤シールドの施工—小石原川ダム導水路トンネル—, トンネルと地下, Vol50, No.12, pp25～30, 2019.12.

(2020. 8. 7 受付)

LONG-DISTANCE EXCAVATION OF SLURRY TYPE HARD ROCK TBM UNDER HIGH GROUNDWATER PRESSURE

Norihiko INAZUMI and Hideyuki ANDO

The Koishiwara River dam project is located upstream of the Chikugo river system which connects the newly built Koishiwara River dam and the existing Egawa dam/Terauchi dam. Upstream of the Egawa dam's Chikugo river and upstream of the Terauchi dam's Sagawa river is connected with a 5km headrace tunnel. This project aims to reduce flood damage in the basin, to provide a stable supply of water for agriculture, industry, and to secure emergency water in the event of an abnormal drought. The headrace tunnel is a long-distance, deep underground excavation with high groundwater pressure. As there is a village that uses groundwater as domestic water near the construction section, it is required not to affect groundwater use as much as possible during the tunnel excavation work. In this paper, we report the improvement of the Hard rock Slurry TBM excavation method to solve these problems.