

水海川導水トンネル 2 期工事の温見断層及びその影響区間における施工状況に関する報告

渡邊 吉晃¹・栗田 将和²

¹近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工事課 (〒918-8239福井県福井市成和1-2111)

²株式会社安藤・間 水海川トンネル作業所 (〒910-2556福井県今立郡池田町松ヶ谷22字-11)

足羽川ダム建設事業では、足羽川下流域における洪水被害軽減を目的として、洪水調節専用のダム及び分水堰と導水トンネルから構成される水海川分水施設の整備を進めている。水海川導水トンネルは、足羽川の支川である水海川から、同じく足羽川支川の部子川に構築される足羽川ダムへ導水するためのトンネルであり、2017(平成29)年2月より1期工事が開始され、2024(令和6)年3月に2期工事を完了、2024(令和6)年7月現在は3期工事を施工中である。2期工事で降は脆弱な地山状況が続き、特に温見断層の破碎帯区間に到達してからは、切羽の安定性を確保するため前方に水抜きボーリングを実施する等の対策を行った。本稿では、水海川導水トンネル工事の温見断層及びその影響区間における地質状況や掘削方法、水抜きボーリング等による対策について報告する。

キーワード 導水トンネル、自破碎状溶岩、断層破碎帯、長尺ボーリング

1. はじめに

福井県は滋賀県の最北端から日本海に抜ける約10kmの稜線を境に嶺北と嶺南に分けられ、嶺北地方はさらに、北東を石川県境の加越山地、南を岐阜県境の越美山地、西を日本海に接する丹南山地と、三方を山に囲まれた大きな盆地地形をしている。このような地形上の特徴から、嶺北地方における降雨の大部分は、九頭竜川・足羽川・日野川で集積されたのちに福井市の市街地付近で合流し、九頭竜川河口から日本海へ向けて流れ出る。嶺北地方を流れる三大河川の下流域は過去、洪水被害に見舞われてきた歴史があり、洪水による被害の軽減を目的とする足羽川ダム建設事業が今立郡池田町で進められている。

本事業では、ダム本体を足羽川支川の部子川に構築するとともに、足羽川支川の水海川からダムへトンネルで結び導水する。将来計画では、さらに足羽川本川上流部等の3河川からも導水する予定である(図-1参照)。

水海川導水トンネルは、洪水時に水海川からダムへ導水するための全長4,717mの長大トンネルであり、福井県今立郡池田町と福井県大野市の境界に位置する部子山(標高1,464m)から北西に延びる尾根を貫く。この尾根は、足羽川支川の部子川流域と水海川流域を分ける分水嶺となっている。水海川導水トンネル工事においては、吐口にあたる金見谷川側から呑口にあたる水海川側へ全長4,717mの長距離を片押しによって施工していく。

トンネル中央付近の尾根部の直下においては、脆弱な自破碎状溶岩地山が広がっている。このうち吐口側坑口

から約3,200m付近では、自破碎状溶岩地山が、大規模活断層である「温見断層」によって破碎されていることが確認された。

本稿では、水海川導水トンネル2期工事における最難関施工箇所である温見断層の地山性状及び断層区間でのトンネル対策工、また温見断層の主要部通過後に続いた温見断層の影響区間における施工状況について述べる。

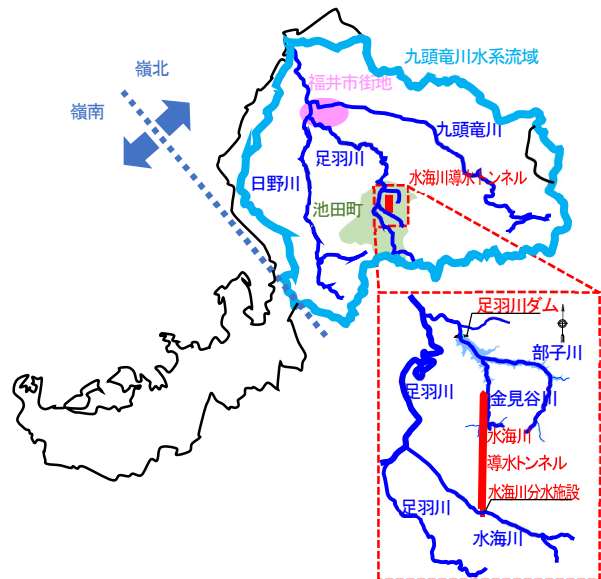


図-1 足羽川ダム事業全体平面図

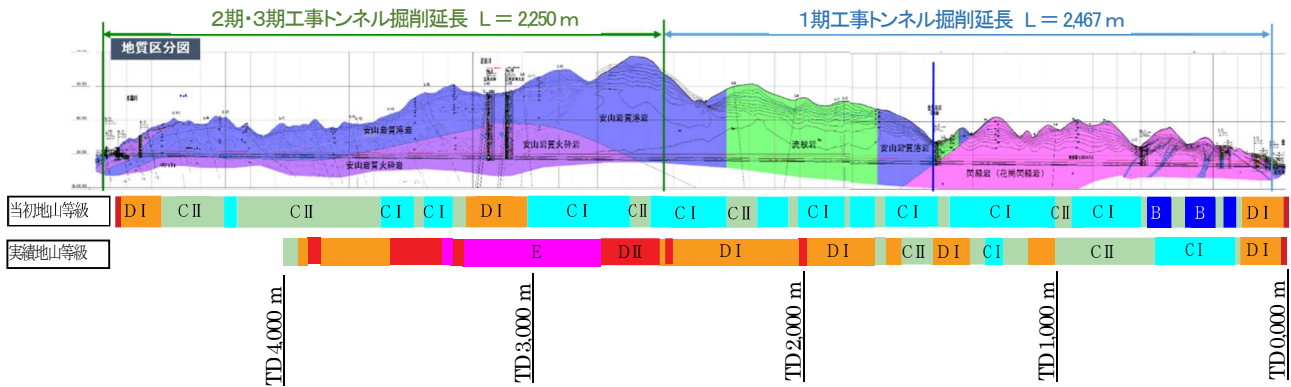


図-2 地質区分及び当初・実績の地山等級

2. 水海川導水トンネルの概要

(1) 導水トンネル概要

水海川導水トンネルは、全長 4,717 m、内径 8.5 m、縦断勾配 1/170 のトンネルであり、仕上がり内径は直径 8.5 m の円形、底部は管理車両が通行できるように床板コンクリートを設置する。図-2 に地質縦断図及び当初設計と工事实績による地山等級、図-3 にトンネルの標準断面図を示す。ここで、トンネルの掘削は、吐口側（図-2 右側）から呑口側（図-2 左側）に向かって片押しで行っている。

(2) 地形地質・地質概要

トンネル部の地質は大きく 2 種類に分けられ、吐口側より約 1,500 m が船津花崗岩（花崗閃緑岩）、呑口側より約 3,200 m が糸生累層（安山岩溶岩、火砕岩類）を主として構成される。船津花崗岩は、1 億 7000 万～1 億 9000 万年前の中生代ジュラ紀に形成された花崗岩層で、糸生累層によって広く不整合に覆われている。糸生累層は、1800 万～2000 万年前の第三紀の早期に広範な火山活動によって形成されたグリーンタフと総称される火山岩類であり、下部は主に安山岩、上部は主にデイサイト（石英安山岩）からなる。

部子山山稜の尾根の呑口側には、尾根と並行して、北西—南東方向に伸びる温見断層が分布している。

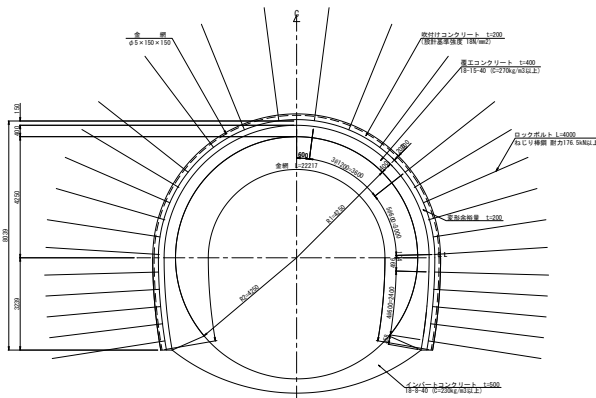


図-3 トンネル標準断面

3. 温見断層の概要

(1) 温見断層概要

温見断層は、濃尾断層帯（福井県～岐阜県）を構成する活断層のひとつであり、福井県今立郡池田町から大野市を経て岐阜県に本巣市北部に至る。左横ずれを主体とし、北西部では北東側隆起成分、南東部では南西側隆起成分を伴う、長さ約 36 km の断層である（図-4）。

断層活動は約 200 万年前に始まったとされ、トレンチ調査等から、活動間隔は 2200～2400 年と推定されている。直近の活動は 1891 年の濃尾地震で、北西部の約 20 km 区間が活動し、最大 3 m の左横ずれと北東側 1.8 m の隆起が記録されている。

(2) 温見断層の事前評価

水海川導水トンネルは、温見断層の端部付近にあたり、大規模断層が末端付近でどのような形態で分布しているか等、不明な点も多い。当該箇所付近には、温見断層と平行する複数のリニアメント（地表に現れた直線的地形）が認められ、どのリニアメントが温見断層の主断層に該当するのか文献においても意見が分かれている。

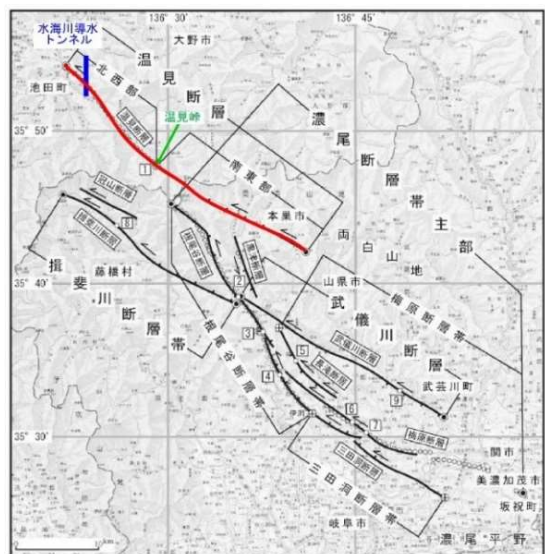


図-4 濃尾断層帯の構成断層¹⁾に加筆

トンネル設計時の事前調査においては、文献調査、地表踏査、ボーリング調査などから、トンネル吐口より3.1~3.2 km 地点を横切る最も明瞭なリニアメントが主断層にあたるものと判断した(図-5)。さらに、これより呑口側には、幅 500~1,000 m にわたる派生断層をともなった影響区間が続くものと想定した。

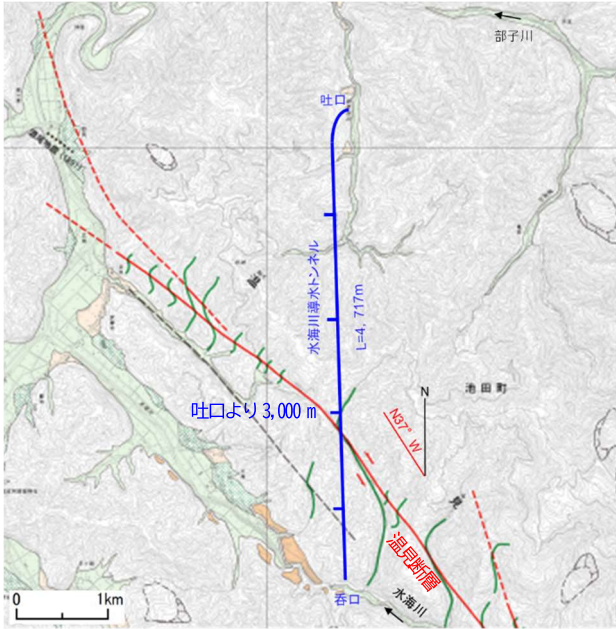


図-5 水海川導水トンネルと温見断層の位置関係²⁾に加筆

4. 温見断層の出現と分布状況

(1) 温見断層到達前の地質

当初、断層周辺の地質は比較的硬質な安山岩を想定しており、トンネル切羽も想定ほど硬質ではないものの、通常の安山岩が出現していた。

しかし、TD (トンネル吐口からの距離) 2,500m 付近から安山岩に脆弱な自破碎部が混在するようになった。自破碎部は、安山岩中の溶岩が自らの流動作用で破碎されながら固化したのものである。固化した溶岩片の間を埋める細粒物質の固結度が高いものは堅固な岩盤になることもあるが、溶岩片間の固結が弱いと、本区間のように脆弱で細片化しやすい岩盤となる。

さらに、TD2,800 m 以降は、自破碎部が熱水の影響を受けて脆弱化し、切羽の大半を占めて出現することもあった。

自破碎状溶岩出現区間では、最大土被りが約 300mの強土圧と脆弱な地山により、トンネルの大きな変形が発生し、H200 のトンネル支保工が大きく座屈する場面もあった^{3,4)}。写真-1 に TD2,887m 付近で自破碎状溶岩地山の施工中に発生した支保工の座屈状況を示す。

図-6 に自破碎状溶岩出現区間から温見断層にかけての地質状況、破碎帯の分布とその地山等級を示す。

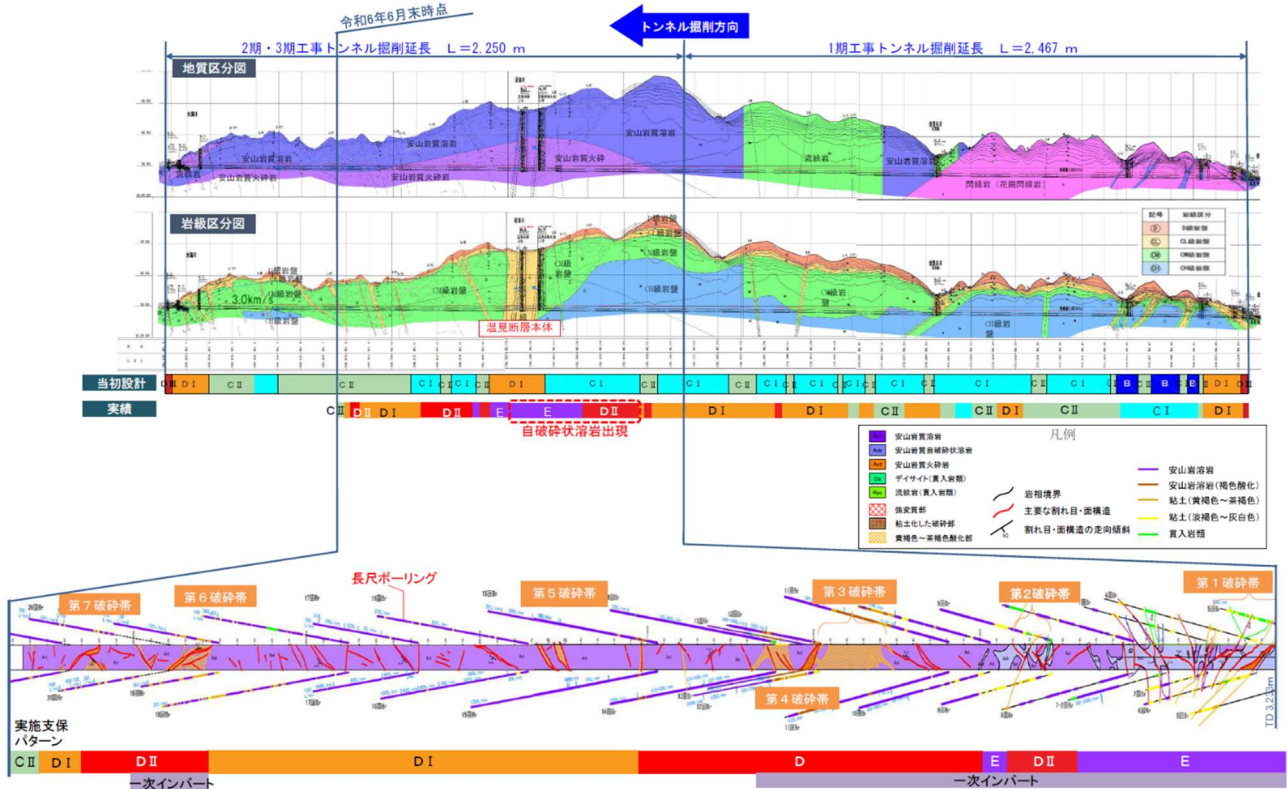


図-6 温見断層及びその影響区間における地質状況、破碎帯の分布及び地山等級

(2) 温見断層の主要部 (第1 破碎帯)

2022 (令和 4) 年 10 月時点でトンネルの掘削長は TD3,220m 地点に達したが、この辺りから破碎帯が出現し、温見断層の主要部 (第1 破碎帯) に達したと考えられる (写真-2 参照)。



写真-1 自破碎状溶岩区間における支保工の変状と切羽状況 (TD2,887m)

この破碎帯は、突入した直後の TD 3,220 m 付近では粘土が主体であったが、次第に砂状～細片状へと変化し、TD 3,265 m 付近までは、断層破碎の影響が強く認められた。TD 3,265 m 以降も、岩盤形成時の自破碎と断層破碎が混在する状況が続いたが、断層破碎による影響は小さくなり、破碎の程度が最も激しい第1 破碎帯を突破したものと判断している。

(3) 温見断層の影響区間 (第2～7 破碎帯)

第1 破碎帯突破後、100mほど、断層破碎の影響が認められるものの比較的破碎の影響が小さい地山が続いたが、TD3,370m付近で、再び脆弱な破碎帯が出現した。その後も、繰り返し破碎が明瞭な破碎帯が出現し、TD4,000mまでに、第1 破碎帯から第7 破碎帯までを定義している。

比較的規模の小さい第2 破碎帯に続いて出現した第3 破碎帯 (写真-3 参照) は、破碎の程度も大きく、区間長も 40m 程度に達した。図-7 に第1 破碎帯～第7 破碎帯の分布について示す。



写真-2 第1 破碎帯の切羽状況 (TD3,231m)



写真-3 第3 破碎帯の切羽状況 (TD3,461m)

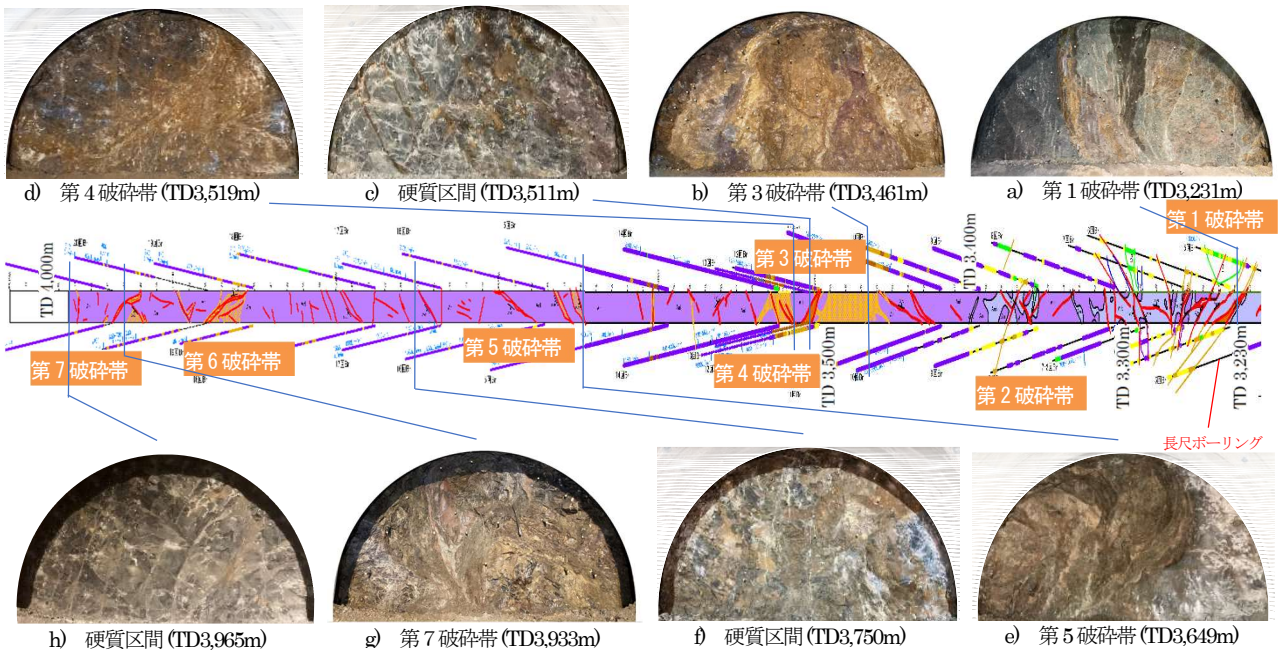


図-7 第1 破碎帯～第7 破碎帯の分布

5. 温見断層及びその影響区間の施工

(1) 施工手順

温見断層区間については、破碎が著しく粘土化が進んで遮水ゾーンとなっている区間と、破碎の程度が比較的小さく、一定の岩盤強度を有しつつ、発達した割れ目に高压の大量湧水を賦存した透水性の高い区間が繰り返し出現した。

施工に当たっては、軟弱で遮水ゾーンとなっている破碎帯を掘削する際に、背面に帯水している高压大量湧水を切羽に回さないことを目的に、長尺水平ボーリング及び中尺水抜きボーリングにより、遮水層背面の湧水を事前に抜くことを基本とした。その上で、鏡面の安定状況等を確認して、適宜補助工法を採用した。

図-8に断層区間での対策工概要図、図-9に断層区間の施工フローを示す。

(2) 地質等の評価と支保パターン

温見断層到達後の地質等の評価として、①土被り、②自破碎状溶岩の出現状況、③断層破碎帯の出現状況、④長尺ボーリングの湧水量で判断した。また、切羽等の状況を⑤地質平面図、評価結果を⑥切羽評価点、⑦実施支保パターンとして図-10に整理した。

2024(令和6)年7月現在の評価について以下に述べる。

①土被りについては、断層突入直後は200m程度あり、大きな地圧がトンネル支保工にかかっていたが、掘削が進むにつれて低下傾向にあり、地圧も低減している。

②自破碎状溶岩の出現頻度は徐々に低下し、風化・変質した劣悪な自破碎状溶岩の出現は見られない。

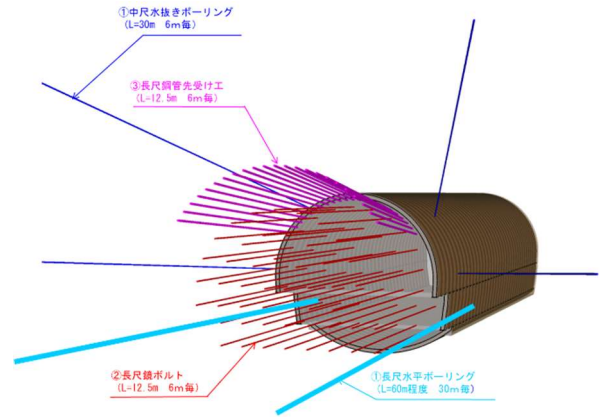


図-8 断層区間での対策工概要図

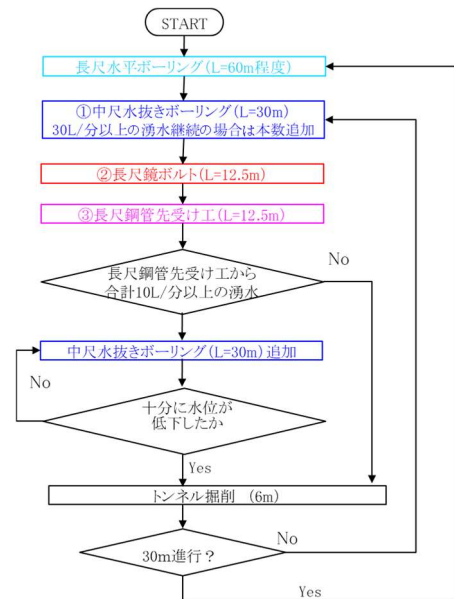


図-9 断層区間の施工フロー

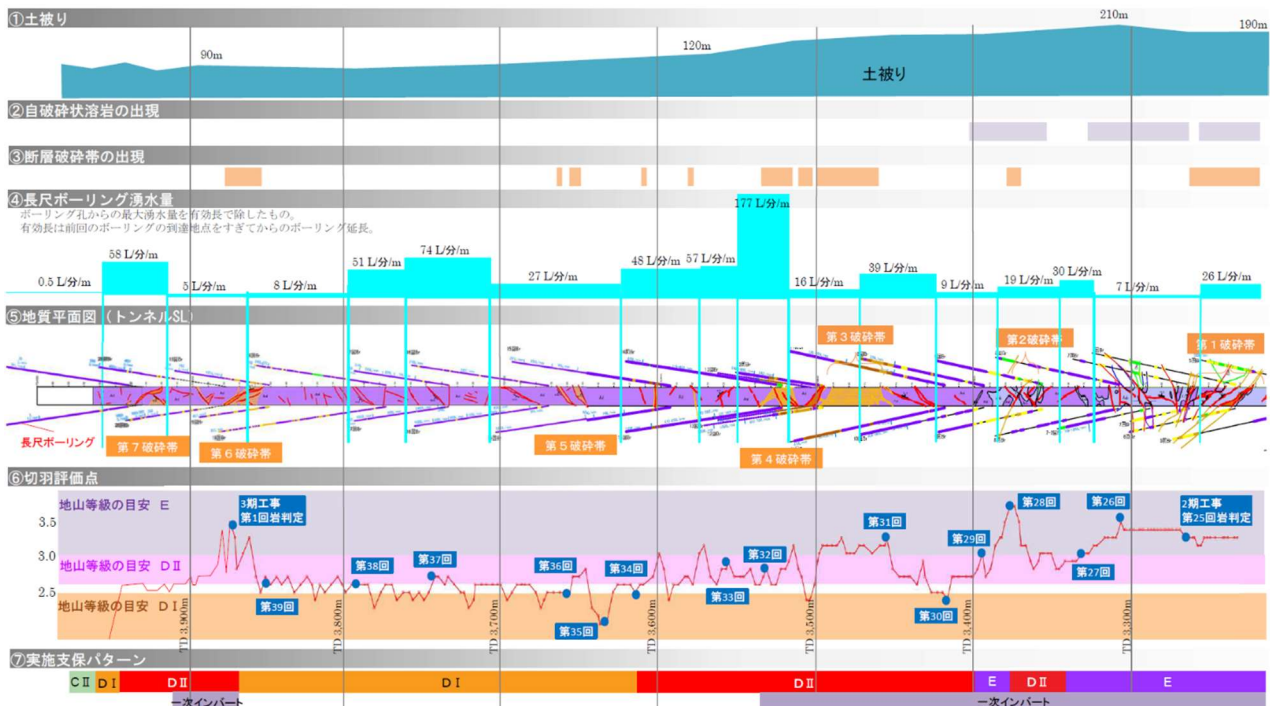


図-10 断層区間における湧水量、地質状況と評価、対策支保工のまとめ

表-1 断層区間での主な支保パターン

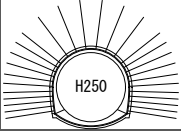


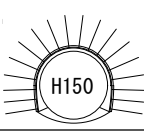

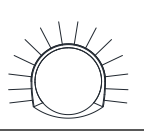
地山等級	E		DII	DI		C II
支保パターン	EII-h' 	En 	DII-hmi 	DII-h 	DI-h 	C II-h 
吹付け	t=300 mm (36 N/mm ²)	t=250 mm (36 N/mm ²)	t=200 mm (36 N/mm ²)	t=200 mm (36 N/mm ²)	t=150 mm (36 N/mm ²)	t=100 mm (18 N/mm ²)
鋼製支保工	H250@1.0m	H200@1.0m	H150@1.0m	H125@1.0m	H125@1.0m	H125@1.2m (上半のみ)
ロックボルト	注入式 6m×28本	ねじり棒鋼 4m×18本	ねじり棒鋼 4m×18本	ねじり棒鋼 4m×18本	ねじり棒鋼 4m×18本	異形棒鋼 3m×14本
一次インバート	切羽から 6m 程度で閉合	切羽から 1D 程度で閉合	切羽から 1D 程度で閉合	なし	なし	なし
支保内圧 (Hoek Brown)	2.8	2.2	1.8	1.4	1.4	0.6
吹付け	2.1	1.8	1.4	1.1	1.1	0.4
鋼製支保工	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1
ロックボルト	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
補助 工法	φ114.3mm 23本 6m シフト	—	φ76.3mm 23本 6m シフト	—	—	—
	φ76.3mm 50本 6m シフト	φ76.3mm 36本 6m シフト	φ76.3mm 36本 6m シフト	φ76.3mm 14本 9m シフト	—	—



写真-4 長尺ボーリング湧水状況 (TD3,497m)

③断層破碎帯は繰り返し出現しているものの、頻度は低下傾向であり、破碎帯間の地山状況は改善傾向にある。

④長尺ボーリングの湧水量は、各ボーリング孔からの最大湧水量をボーリングの有効長で除したもので表している。ここに、ボーリングの有効長は、ひとつ前のボーリングの到達地点を過ぎてからのボーリング延長としている。ボーリング湧水量は、破碎帯を突破し、岩盤が比較的硬く透水性の高い区間に到達した際に、大量に発生する傾向がある。特に第4破碎帯に到達した際には、ボーリング1本当たり 2,000 L/min を超える大量湧水が発生した (写真-4)。

以上の情報に加え、⑥切羽判定時の切羽評価点、計測データ等を用いて⑦支保パターンを選定している。表-1に断層区間での主な支保パターンを示す。

上記の評価指標を用いて適切に支保パターン、補助工法を選定することで、安全かつ経済的なトンネル構造を選定できているものと考えている。

6. 今後の地山状況と施工方針

第7破碎帯突破後、約60mに渡り破碎の程度が小さく、風化や変質の少ない良好な地山区間が出現している。そ

のため、TD3,964mからは、C II パターンの支保工を実施している。ただし、直近の長尺ボーリング結果からは、新たな破碎帯の出現も予想されており、今後も予断を許さない地山状況が続く。引き続き、長尺ボーリングによる前方地山の状況予測と水抜きを行い、切羽の状況を見極めながら適切な対策をとり施工を行っていく。

7. 終わりに

トンネル掘削の事前調査や施工中に長尺及び中尺ボーリングによる水抜きを行い、必要に応じて補助工法を実施し、切羽の安定性を確認しながら施工を行うことにより、温見断層及びその影響区間における破碎部の施工を安全に進めることができた。温見断層の影響区間を抜けた今後の施工区間においても、安全に掘削を進めるため、長尺ボーリングを実施して切羽前方の地質状況を予測しつつ、適切な工法を選定していくことが必要である。

謝辞：本稿の作成にあたり、本工事関係者の方々から様々なご助言、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 地震調査研究推進本部：ホームページ
https://www.static.jishin.go.jp/resource/regional_seismicity/katsudanso/f060_ichi.jpg (2024年7月20日に利用)
- 金田, 杉戸, 田力, 中田：1:25,000活断層図「大野」, 国土地理院, 2018
- 角田, 福井：水海川導水トンネル2期工事の脆弱部施工に関する報告について, 令和5年度近畿地方整備局研究発表会論文集一般部門(安全・安心) I
- 川端, 堀, 多宝, 河合：大規模活断層を先進ボーリングと高剛性支保工で突破 -足羽川ダム 水海川導水トンネル2期工事-, トンネルと地下, Vol. 55, No. 1, pp. 7-18, 2024