

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

角田 隼輔¹・福井 駿也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)安藤・間 水海川トンネル作業所 工事係 (〒910-2556福井県今立郡池田町松ヶ谷22-11)

足羽川ダム建設事業では、足羽川下流域に位置する福井市街地等における洪水被害の軽減を目的として、洪水調整専用のダムと分水堰、導水トンネルで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の洪水を、同じく足羽川の支川である部子川に構築している足羽川ダムに導水するものである。

水海川導水トンネルは、現在2期工事を施工中であるが、脆弱な地山状況が続いている。令和4年10月には、温見断層の破碎帯と推定される区間に到達し、切羽の安定性を確保するために切羽前方に水抜きボーリングを施工しながら掘削するなど、安全に配慮して施工を進めている。本稿は、水海川導水トンネル2期工事の脆弱部における施工において、地質状況の変化や掘削状況、支保工や水抜きボーリング等の対策を報告するものである。

キーワード 導水路トンネル、山岳トンネル、自破碎状溶岩、断層破碎帯

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10kmほどの稜線を境に、嶺北・嶺南に分けられる。嶺北地方は、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、嶺北地方に降る雨の大部分は、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、唯一日本海に向けて開けた九頭竜川河口から流れ出る。嶺北地方を流れる三大河川の下流域は、過去に洪水被害に苦しんできた歴史があり、洪水の軽減を目的に足羽川ダム事業を進めている。

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、さらに、将来計画では足羽川本川の上流部などの3河川をトンネルで結び、洪水時にダムに導水する(図-1参照)。

水海川導水トンネルは、水海川の洪水をダムへ導水する全長4,717mの片押しの大トンネルである。水海川導水トンネルは、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トンネルである。この尾根は、足羽川支流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。

トンネルは、吐口側にあたる金見谷川側からの片押し施工で、呑口側にあたる水海川側に到達する延長4,717mの長距離トンネルである。

トンネル中央付近の尾根部の直下には脆弱な自破碎状溶岩地山が広がり、さらに吐口側坑口から3,200m付近



図-1 足羽川ダム事業全体平面図



写真-1 水海川導水トンネル全景

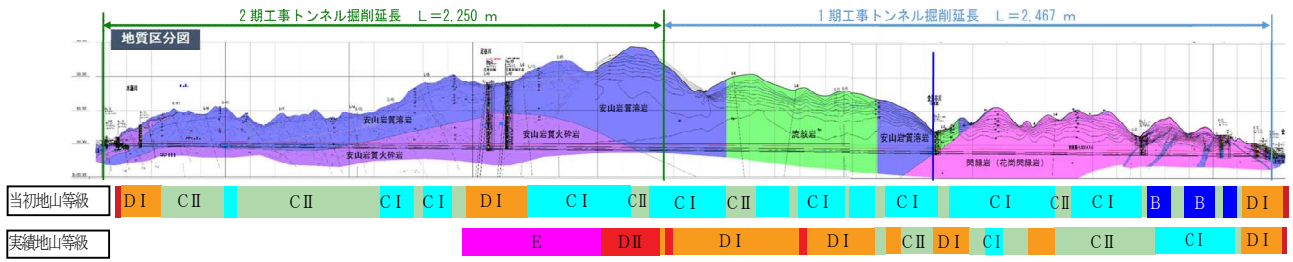


図-2 当初推定の地質縦断面

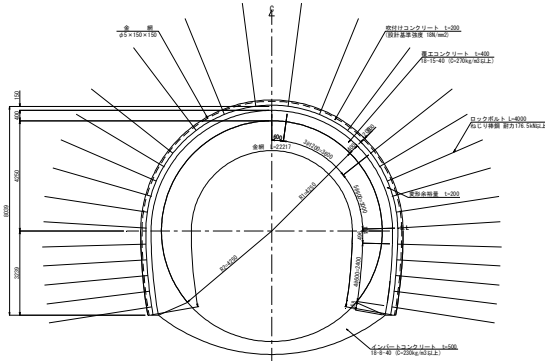


図-3 トンネルの標準断面

では、自破碎状溶岩地山が、大規模活断層である温見断層で破碎された状況が確認された。

本稿では、トンネル最難関箇所である温見断層の地山性状および断層区間でのトンネル対策工について述べる。

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、全長全長 4,717 m、内径 8.5 m、導水勾配 1/170 のトンネルである。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打設しフラット形状としている。図-2 に当初推定の地質縦断面を、図-3 にトンネルの標準断面を示す。トンネルは、吐口から呑口に向かって（図-2 の右から左に向かって）、片押しで掘削を行っている。

(2) 地形地質・地質概要

トンネル周辺の地質は、大きく 2 種類に分けられる。吐口側の約 1,400 m 間が船津花崗岩、呑口側の約 3,700 m が糸生累層で構成される。

船津花崗岩は、今から 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で覆われている。

糸生累層は、今から 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る。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する。

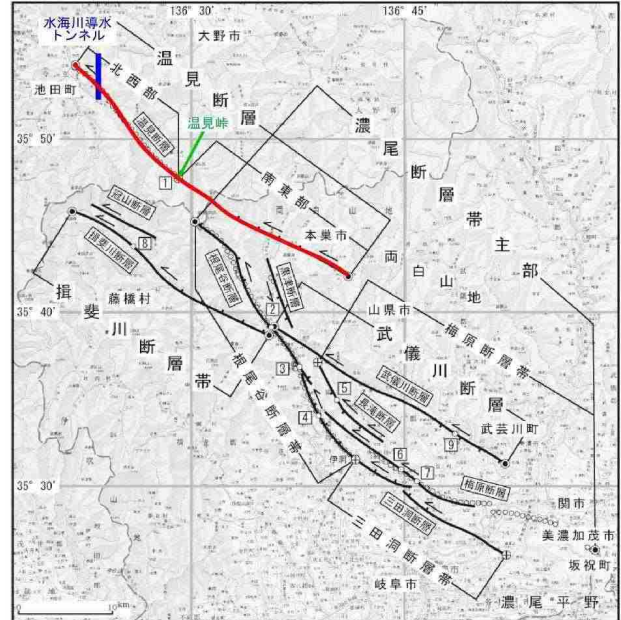


図-4 温見断層の概要

3. 温見断層の事前評価

(1) 温見断層概要

温見断層は、濃尾断層帯を構成する活断層のひとつであり、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とまなう長さ約 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考えられ、トレンチ調査などの調査から、断層の総変位量は最大約 3 km、活動間隔は 2200～2400 年と推定されている。

直近の活動である 1891 年の濃尾地震の際には、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) 断層の事前評価

水海川導水トンネルは、長さ 36 km の温見断層の端部付近に当たり、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など不明な点も多い。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な地形）が認められ、過去の文献においても、どのリニアメントが温見断層の主断層に該当するのか意見が分かれている。

トンネル設計時の事前調査において、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、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ゾーンが分布するものと想定した。

トンネルが貫く箇所の断層の性状は、弾性波探査およびボーリング調査結果などから、破碎による劣化幅は 50～100 m 程度であり、亀裂発達部 (CM, CL 級岩盤) を主体とし、幅数 cm～数 10 cm 程度の粘土化帯を不規則に含むものと予想していた。

断層周辺の地下水状況については、断層推定位置の調査ボーリング 2 孔の地下水が、地盤面より数 m の高さまで自噴していることや (写真-2)、断層推定位置付近の沢の比流量が増加する傾向などから、図-5 に示すように温見断層が地下水の流れを遮断し、吐口側の地下水をダムアップしているものと推定した。さらに、浸透流解析結果により、トンネル掘削時に最大 11 m³/h の湧水が発生することが予測された。

(3) 断層破碎を受ける前の岩盤の想定

温見断層部の断層破碎を受ける前の地質は、糸生累層の安山岩で、弾性波探査結果から、断層前後の岩盤は、CH～CM 級の比較的硬質な岩盤を想定していた。

(4) トンネルへの影響

断層破碎部は、高透水の角礫状の破碎された地質となっており、断層突破時の高圧・大量湧水対策が大いに懸念される状況であった。



写真-2 地下水が自噴するボーリング孔

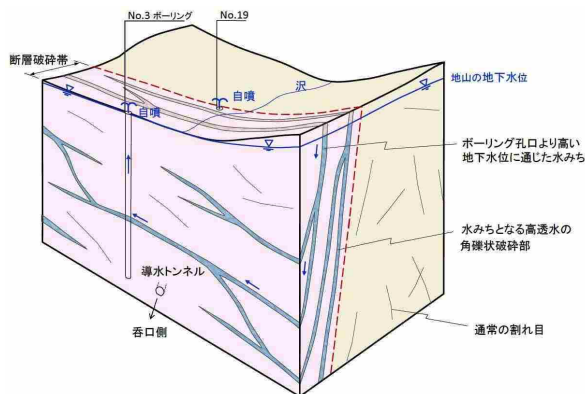


図-5 温見断層の模式図 (調査時の想定)

4. 施工時における温見断層の性状把握

(1) 温見断層到達前の地質¹⁾

調査時においては、断層周辺の地質は CH～CM 級の比較的硬質な安山岩を想定しており、トンネル中央部付近までの施工時の切羽においては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 2,500 m 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。参考に写真-3 に東北地方のダム現場で出現した安山岩と自破碎部の状況を示す。

特に TD 2,800 m 以降は、自破碎部がさらに熱水変質の影響を受けて脆弱化し、切羽の大半を占めて出現するようになった。図-6 に自破碎部が大半を占める切羽の代表的な写真とそのスケッチを示す。

自破碎部には、破碎部が形成された際にできたと思われる冷却節理を分断したり細分するような割れ目も認められることから、固化時の破碎 (一次破碎) に加えて、固化後に二次的な破碎を受けていることも推察できる。

図-6 では、一次破碎が優勢なものを自破碎部 (A)、二次的な破碎が優勢なものを自破碎部 (B) に分けて表現している。部分的に、破碎を受けず通常形で固結した安山岩が認められるが、これらは、二次的な破碎が優勢な自破碎部 (B) の中に、塊状で認められる。



写真-3 安山岩とその自破碎部

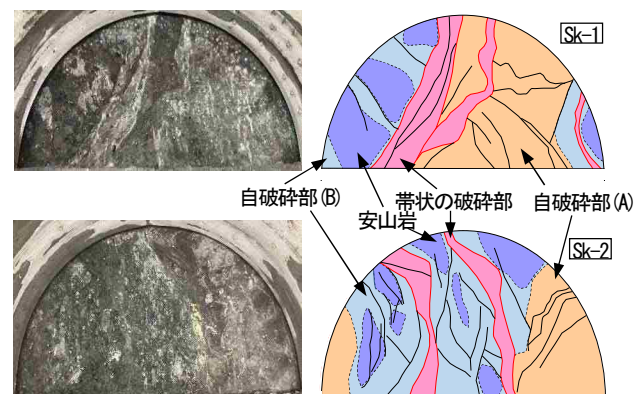


図-6 自破碎部卓越区間の代表箇所の切羽写真およびスケッチ

(2) 温見断層の出現予測

当初、断層手前の硬岩部でトンネル掘削を一旦停止して、①温見断層の分布の把握、②温見断層部での高圧・大量湧水状況の予測、③切羽前方の水抜きを3点を目的として、500 mの超長尺ボーリングを実施する予定としていた。しかしながら、断層手前から脆弱な地山状況が続いたため、500 mの長尺のボーリングを計画通り実施することができなかった。そこで、500 mの計画を変更して数10～100 m程度の長尺水平ボーリングを繰り返して、温見断層の出現を把握することとした。

切羽がTD 3,184 mに到達した時点で、5回目の長尺水平ボーリングを実施した。切羽に向かって右側でL=72.0 m、左側でL=90.0 mの延長で行った。図-7に長尺水平コアボーリングの平面図を、図-8にボーリングコアを示す。

左右のボーリングはともに全線に渡り、非常にもろい安山岩自破砕状の岩盤となっているが、右側のボーリングで深度33～54 m付近、左側のボーリングで73～85

m付近において、強く茶褐色化した礫混じりの粘土状区間が確認された。茶褐色の岩盤はこれまでの区間では確認されなかったもので、地表面と断層を通じて、つながった水の流れによる酸化反応と考えられる。また、左右のボーリングの茶褐色化した区間をつないだラインは、温見断層と想定されるリニアメントの向きと一致していることを確認した(図-7)。

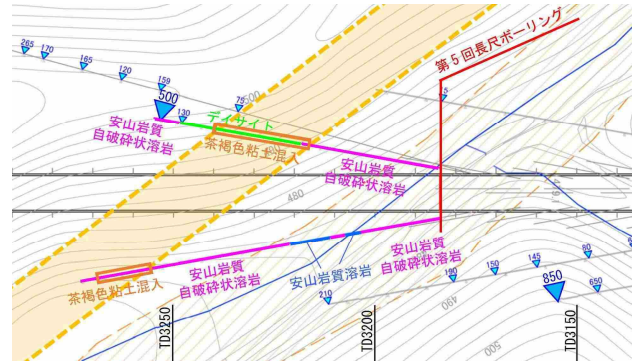


図-7 第5回ボーリング平面図

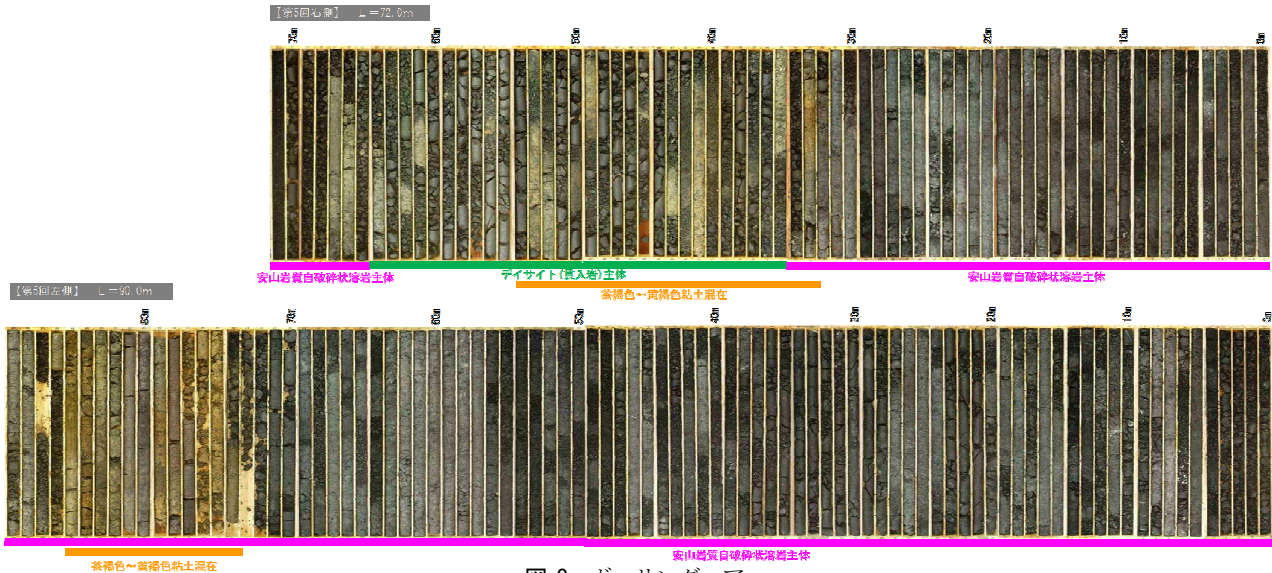


図-8 ボーリングコア

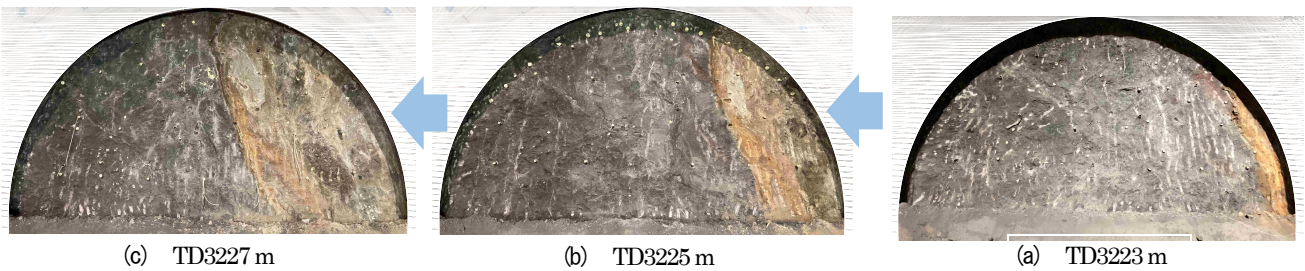


図-9 断層破碎帯の出現

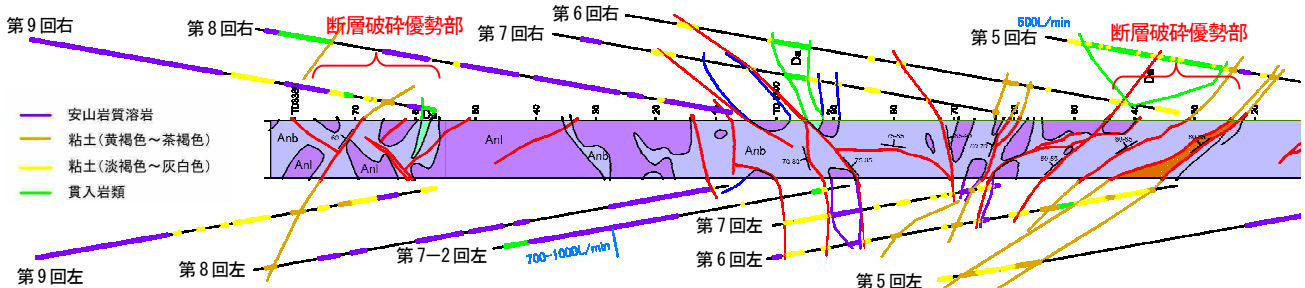


図-10 温見断層付近のトンネルSLの地質平面図

(3) トンネル切羽での確認

TD 3,220 m 付近より、切羽の右側から黄褐色を呈する強い粘性を持った粘土状の層が出現し、切羽の進行にともない左側へ広がって行った (図-9)。また、長尺水平ボーリングのコアでも、これまでに確認されなかった礫混じりの粘土層が確認され、トンネル切羽での出現位置と整合が取れることから、トンネルは温見断層の破碎帯に入ったものと判断した。図-10 にトンネル SL での地質平面図、写真-4 に TD 3,231 m の破碎状況を示す。

破碎帯は、出現当初 (TD 3,220 m 付近)、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 以降は、岩盤形成時の自破碎と、断層破碎が混在する状況となり、断層破碎の影響の評価が難しい地山となった。

その後、TD 3,370～3,375 m 付近において、再び黄褐色の粘土を伴う断層破碎が優勢な層が出現した。写真-5 に TD 3,374m の破碎状況を示す。



写真-4 断層破碎状況 (TD3231m)

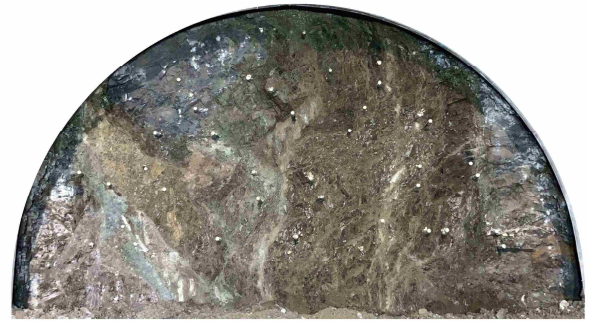


写真-5 断層破碎状況 (TD3374m)

(4) 温見断層部の岩盤の形成

温見断層付近の地質は、今から 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の糸生累層である。図-11 に本トンネル周辺の岩盤の形成概念図を示す。

トンネル掘削前は、切羽には、糸生累層の比較的硬質な安山岩質溶岩、安山岩質火砕岩が出現するものと想定していた。しかし、トンネル掘削時に確認した地質は、1800 万～2000 万年前に形成された安山岩が、形成時から自破碎を受けて脆弱化していることが確認された。さらに、この脆弱な自破碎層が、今から 200 万年前頃から始まった温見断層の断層活動により、二重に破碎されていることがわかった。

そのため、トンネル切羽に出現した地質は想定以上に脆弱な地山であった。一方で、脆弱地山が断層破碎を受けたことから、当初想定したような大量の帯水層は認められず、切羽における湧水に関しては、当初想定よりは少ない状況となっている。

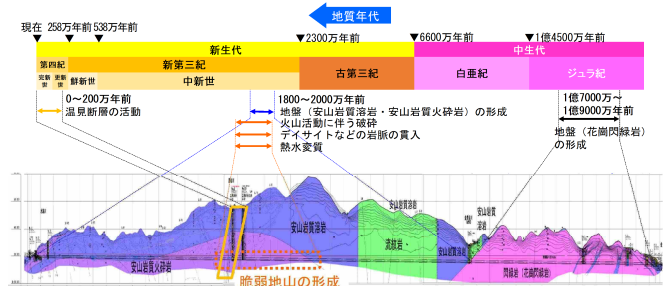


図-11 本トンネル周辺の岩盤の形成概念図

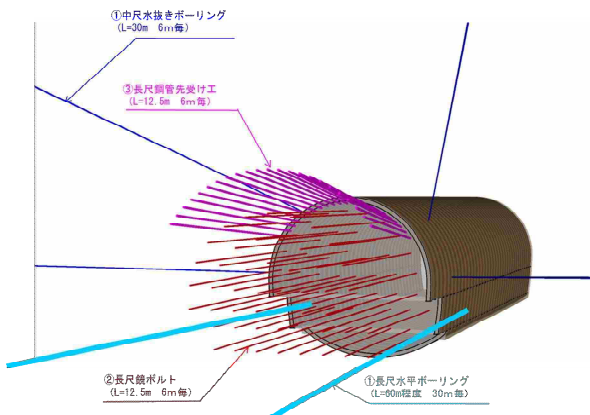


図-12 断層部対策工概要図

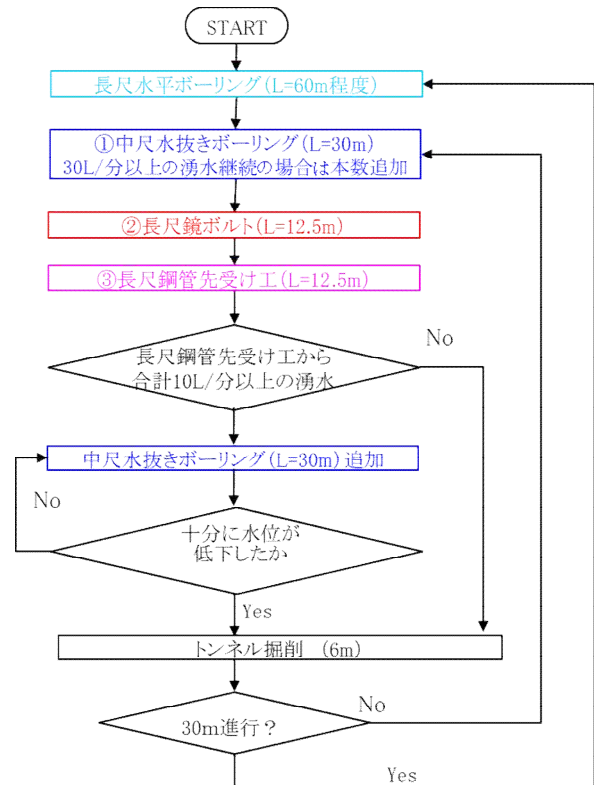


図-13 断層部施工フロー

表-1 脆弱地山区間における支保パターンの設定

	TD2887m 付近の自破砕状溶岩区間での変状発生箇所		温見断層破碎帯
	変状発生前	変状発生後の対策	
支保パターン			
吹付け	t=250 mm (18 N/mm ²)	t=300 mm (36 N/mm ²)	t=300 mm (36 N/mm ²)
鋼製支保工	H200	H250	H250
ロックボルト	天端部:ねじり棒鋼 4m×8 本(@1200) 側壁部:注入式 6m×10 本(@1200)	天端部:注入式 6m×20 本(@1200) 側壁部:注入式 6m×20 本(@600)	天端部:注入式 6m×20 本(@1200) 側壁部:注入式 6m×20 本(@600)
補助工法	鏡ボルト 12 本(上半のみ)	50 本(上半・下半)	50 本(上半・下半)
先受け	—	23 本	23 本
インバート一次閉合	上半切羽から 9m	上半切羽から 6m	上半切羽から 6m
支保内圧	合計	1.78	2.82
	吹付け	0.88	2.08
	鋼製支保工	0.31	0.45
	ロックボルト	0.59	0.29
地山強度比	土被り	250m	180m
	初期地圧	26 kN/m ³ ×250m=6500kN/m ² =6.5 N/mm ²	26 kN/m ³ ×250m=4700kN/m ² =4.7 N/mm ²
	地山強度(針貫入)	2.5~ 5MPa 程度	1.1~ 4.7 MPa 程度
	地山強度比	0.4 ~ 0.8	0.2 ~ 1.0
内空変位(mm) 左右片側最大値	153 + α (変位発生後部分的に縫い返し実施)	135 (TD2887~2917m)	80 (断層手前 2D 区間)

5. 温見断層区間の施工

(1) 前方探査・湧水対策

切羽で確認した温見断層は、脆弱な自破砕状溶岩が断層破碎を受けて粘土化した遮水層となっており、背面に被圧した大量高压の地下水が存在する可能性があった。また、断層破碎帯の地質は極めて脆弱で、大量湧水はおろか少量の水が切羽についていた場合でも切羽が不安定化し、トンネルが崩壊するリスクがあった。

そこで、湧水対策として、切羽と帯水層の離隔を十分に取り、長尺ボーリングで、帯水層を確認しつつ、水抜きを実施しながらトンネル掘削を行うものとした。ボーリングは、長尺・中尺・補助工法時の前方探査の 3 段階で実施し、切羽から遠方の大量湧水から近傍の亀裂の裂か水までしっかりと排水する計画とした。また、鏡面と切羽天端に注入式の補助工法を採用し、鏡面の安定を図るとともに、鏡面付近からの湧水を減少させる工法を行った。図-12 に断層部対策工概要図、図-13 に断層部施工フローを示す。

このような対策を取ることにより、断層区間で、長尺ボーリングから最大 1,200 L / 分の湧水が発生したが、鏡面にはほとんど湧水を発生させることなく、安全にトンネル掘削を行うことができていた。

(2) 支保パターン

温見断層区間の支保パターンは、TD 2,887 m 付近の自破砕状溶岩が卓越した区間で発生したトンネル変状時の対策を参考に設定した。表-1 に TD 2,887 m 付近の変状発生区間と温見断層破碎帯における支保パターン、

地山強度比、内空変位などの比較を示す。

TD 2,887 m 付近の変状区間では、先進導坑や多重支保、トンネルの真円化などの対策までは行わないこととし、H250 の鋼製支保工を採用するなどの対策を行った。TD 2,887 m の変状区間と温見断層区間においては地山強度、土被りに多少の違いがあるものの、両者のデータの類似性が高いことから、同等の対策を行うことで、トンネルの安定を確保できるものと判断した。

実施工では、坑内観察調査、天端沈下・内空変位測定等の A 計測と、支保工応力・地中変位測定等の B 計測によりトンネルの安定性を確認しながら掘削を行い、断層破碎帯の施工を進めることができた。

6. 終わりに

トンネル掘削時の前方探査や適切な対策工の選定により、温見断層破碎部の施工を安全に進めることができていた。今回確認した破碎帯からトンネル呑口にかけては、温見断層と平行する複数のリニアメントが確認されている。そのため、温見断層の影響ゾーンが今後も出現する可能性があると考えており、予断を許さない状況が続く。今後の区間も先進ボーリングを行っ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、安全にトンネル掘削を進めていきたい。

参考文献

- 1) 賣谷ら：トンネル掘削で出現した脆弱な安山岩自破砕部の成因に関する一考察，土木学会第 77 回年次学術講演会講演概要集 VI 部門 VI-774 2022.9
- 2) 上田，中西：水海川導水トンネルにおける脆弱地山及び湧水への対策・対応について，令和 3 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