

# 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

上田 千尋<sup>1</sup>・中西 大介<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>(株)安藤・間 水海川トンネル作業所 工事主任 (〒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は、足羽川下流域に位置する福井市などにおける洪水被害の軽減を目的として、洪水調節専用のダムと分水施設(分水堰・導水トンネル)を整備するものである。本稿で紹介する水海川導水トンネルは、本事業の一環で整備を進めている山岳トンネルで、足羽川支川の水海川から、足羽川支川の部子川に洪水を導水することにより、部子川に建設する足羽川ダムに貯留するための施設である。

本稿では、水海川導水トンネルのこれまでの施工状況を概説し、今後の温見断層の突破に向けて検討しているトンネルの施工法について紹介する。

キーワード 導水トンネル, 山岳トンネル, 塑性押し出し地山, 水環境保全

## 1. はじめに

水海川導水トンネルは、足羽川ダム建設事業の一環で整備を進めているもので、足羽川支川水海川の洪水を、足羽川ダムに導水するものである(図-1, 図-2 参照)。

水海川導水トンネルは、福井県今立郡池田町と大野市の境界に位置する部子山(標高 1,464 m)から北西に延びる尾根(以下、部子山山稜という)を貫くトンネルである。この尾根は、池田町の野尻地区付近に位置する峰(標高 649 m)(以下、N山地という)まで続き、足羽川支流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掘削をはじめ、最初にN山地の山裾部分を掘削し、その後、部子山山稜の尾根部を貫き、呑口側にあたる水海川側に到達する予定である。トンネルは延長 4,717 m の長距離トンネルで、尾根部は標高 590 m ほどで、ここでの土被りは 293 m に達する。写真-1 に水海川導水トンネルの全景を示す。

本トンネルは、長距離かつ大土被りのトンネルである

ため、設計時点で、尾根部直下の地質を十分に把握するのが難しいという問題を抱えていた。また、吐口側坑口から(以下、TD という) 3,200 m 付近には、温見断層

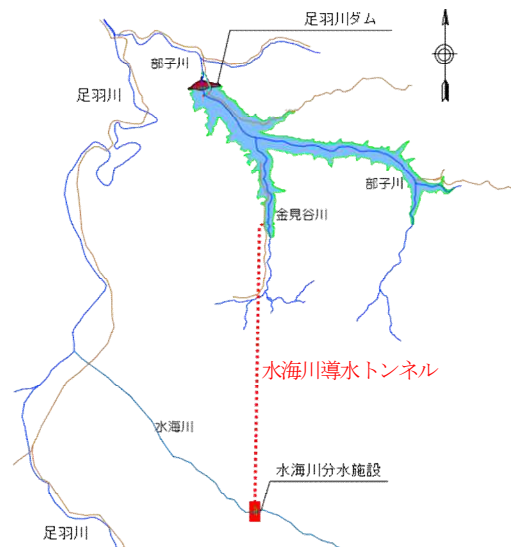


図-2 足羽川ダム事業全体平面図



図-1 足羽川ダム完成予想図



写真-1 水海川導水トンネル全景(トンネル呑口側より撮影)

が存在する。TD3,200 m 以奥の区間は、温見断層とその派生断層に起因する高透水ゾーンとなっている。

本トンネルは、2017年9月に吐口側からの片押し施工で掘削を開始し、2021年5月末日時点でTD2,890 mまで到達している。これまでの掘削作業では、大量湧水や押し出し性地山により、支保パターンの変更など、当初設計を変更しながらの掘削を余儀なくされている。

本論文では、これまでの施工を振り返り、大土被りの長大トンネルの施工上の対策を述べるとともに、今後迎える本トンネル最大の難関である温見断層の突破に向けた対策を述べる。

## 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、勾配 1/170 のトンネルである。

仕上がり内径は直径 8.5 m の円形で、底部は、フラット形状となる。山岳トンネルで、基本的なトンネル設計(支保パターン、覆工構造)は、道路トンネルに準じたものとなっている。ただし、覆工厚に関しては水路トンネルの摩耗代を考慮し、通常より 10 cm 厚い 40 cm となっている。

図-3 にトンネルの標準断面を、図-4 に地質縦断図を示す。

トンネルは、1 期工事と 2 期工事に分けて施工しており、現在 1 期工事が終わり、2 期工事の施工中である。

### (2) 地形および設計時の想定地質概要

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 の N 山地の山裾を掘削する区間は、船津花崗岩(中生代ジュラ紀花崗岩)で構成される。呑口側の約 3,700 m の部子山山稜を貫く区間は、糸生累層(新第三紀中新世の火山岩類)で構成される。

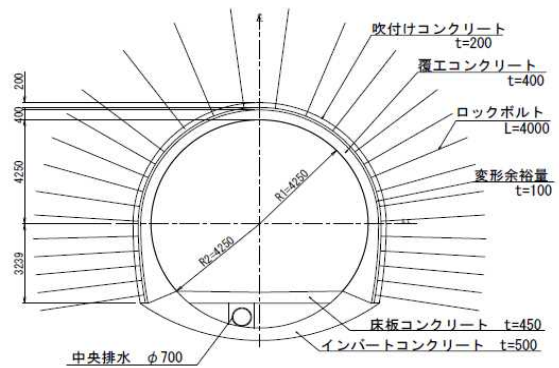


図-3 トンネルの標準断面 (DII-eパターン)

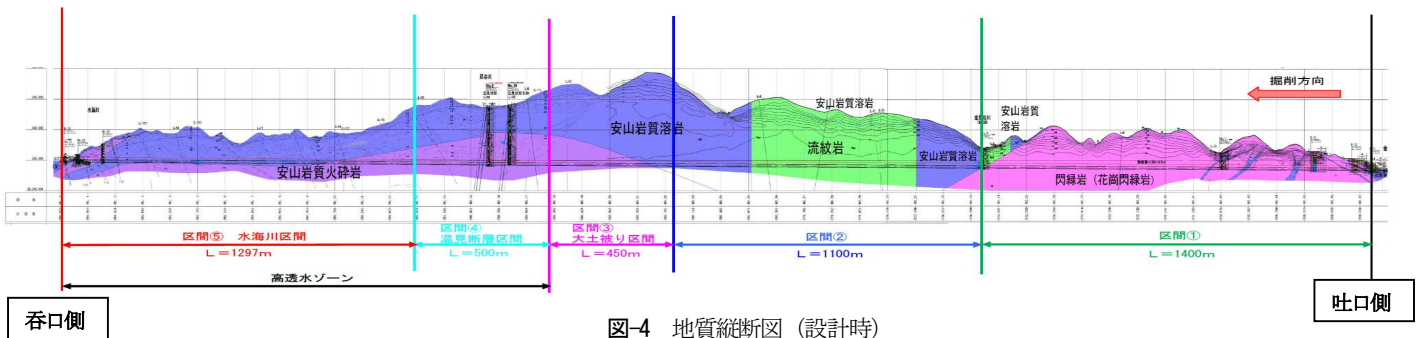


図-4 地質縦断図 (設計時)

表-1 トンネル区間ごとの特徴

区間	区間⑤	区間④	区間③	区間②	区間①
区間	TD4717~3450m (L=1297m)	TD3450~2950m (L=500m)	TD2950~2500m (L=450m)	TD2500m~1400m (L=1100m)	TD1400~0m (L=1400m)
最大土被り	185m	257m	293m	230m	124m
施工区分	今後施工	今後施工	施工中	施工完了	施工完了
地質年代/区分	新第三紀中新世/糸生累層				古生代ジュラ紀/船津花崗岩
主要地質	安山岩質火砕岩 (火成岩と堆積岩の性質)	温見断層区間 (安山岩質溶岩と安山岩質火砕岩の境界と想定)	安山岩質自破砕状溶岩、安山岩質溶岩(火山岩) (自破砕状溶岩+強変質部主体)	安山岩質溶岩(火山岩) (弱変質部主体)	閃緑岩(深成岩) 花崗閃緑岩(深成岩)
当初の想定地質	径 10cm 程度以下の安山岩礫を多含する火山礫凝灰岩～凝灰角礫岩。 地山深部のボーリングでは厚く連続的に把握されているが、地表露頭では断続的分布に限られる。 水海川分水施設付近では、細粒緻密な凝灰岩層も一部挟在する。	温見断層の影響区間。 断層近傍のボーリング孔 (No.19, No.3) では、細片化(角礫～粘土状)を呈する箇所と、短柱～柱状を呈する箇所が確認されており、断層周辺における岩盤は硬質部と劣化部とが混在した不均一な地山であると推定される。	暗灰色の緻密な岩相を有し、直径数 mm 程度の優白色鉱物の斑晶を伴う。岩相変化に富み、一部には青灰色～緑灰色を呈する流紋岩・凝灰角礫岩および自破砕部が混在する。塊状岩であるが、新鮮部においても割れ目間隔は 5～50cm である。	安山岩溶岩が主体をなすが、一部には安山岩質凝灰岩や流紋岩(岩脈)が分布すると推定される。当該区間における地形判読および露岩状況の確認結果から、断層等の劣化帯を示唆する状況は確認されていない。	灰色を呈する細粒の閃緑岩が主体。一部花崗閃緑岩の岩相を示すが境界は漸移的。割れ目間隔は数十 cm～1m。高標高部では風化が深く進行し深度 40m 程度までマサ化が進行している。 安山岩との境界部では熱水変質により軟質化・鉱化部分が見られる。
特徴的な施工内容			押し出し性地山対策	先進ボーリングの併用技術の確立	比較的良好な区間の施工

船津花崗岩は、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、新第三紀の早期に広範な火山活動によって形成された火山岩類で、グリーンタフと総称される。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。

**(3) トンネルの各区間の特徴**

トンネルの区間ごとの特徴を表-1 に示す。現在、区間③の掘削中である。以下に区間ごとの施工状況を示すとともに、表-2 に設計および実施の支保パターンの比率を示す。

**a) 閃緑岩を主体とする区間 (区間①)**

吐口側坑口から 1,400 m 付近の金見谷川の左側支流直下までは、N 山地の山裾を掘削する区間で、比較的硬質な閃緑岩主体の地山が続いた。閃緑岩は地山の深部でゆっくりと固結したものであり、比較的良好的な岩盤状況であった。ただし、亀裂が発達し、割れ目に粘土を挟在する箇所では、切羽の自立性が悪くなる場面もあった。本区間における支保パターンの乖離は 1 ランク程度であった。

**b) 安山岩質溶岩を主体とする区間 (区間②)**

吐口側坑口から 1,400 m 付近の金見谷川を横断する付近で、閃緑岩から安山岩質溶岩に地質が大きく変化した。予想では、測点 TD1,650~2,250 m にかけて流紋岩の出現を想定していたが、実際は、一部に貫入岩として出現した程度で、流紋岩はほとんど認められなかった。

安山岩は地表近くで急冷された火山岩に分類される。溶岩を起源としているため岩片は硬質であるが、急冷された影響により亀裂質で湧水も多く見られ、トンネルの切羽の安定性などが悪化する場面が増加した。本区間における設計および実施の支保パターンは 2 ランク程度乖離し、大きな違いが生じた。

**c) 安山岩質自破碎状溶岩・安山岩質溶岩を主体とする区間 (区間③)**

TD2,547 m 付近を過ぎると、部子山山稜直下区間に入り、安山岩質の溶岩と自破碎状溶岩が混在する状況が認められた。両岩種ともに、変質作用を受けている。特に安山岩質自破碎状溶岩は、強い熱水変質を受けた影響で粘土化した部分が多く、極めて脆弱な岩盤状況を呈した。本区間における設計および実施の支保パターンは 3 ランク程度乖離した。

表-2 設計・実施支保パターン延長比率

	設計支保パターン比率	実施支保パターン比率
閃緑岩を主体とする区間 (TD 0 ~ 1400 m)		
安山岩質溶岩を主体とする区間 (TD1400 ~ 2500 m)		
部子山稜直下区間 (TD2500 ~ 2887 m)		

**3. 水平コアボーリングの採用**

本トンネルは全線にわたり湧水量が多く、現切羽位置 (TD2,887 m) まで掘削した時点で、トンネル全線で約350 m<sup>3</sup>/hの湧水が発生している。

TD1,850 m の地点では、切羽から実施した水抜きボーリングで、50 m<sup>3</sup>/h 近い湧水が発生し (写真-2 参照)、その後、TD1,954 m 地点では、突発湧水とともに切羽が崩壊した。当該箇所は、設計で C I パターンのところを D I パターンで掘削していたが、D II パターンでの縫い返しを余儀なくされた。

このようなことから、TD1,954 m 以降の区間については、前方の地質調査を行うとともに、切羽での突発湧水を避ける目的で、切羽から 100 m 程度の水平コアボーリングを実施することを定常化した。水平コアボーリングは、パーカッションで穿孔し、ワイヤーラインにてコアを回収する。トンネル掘削を停止する土日の昼夜 4 方で 100m 程度を目標に実施した。

パーカッションで採取するコアは、ロータリーで採取するコアと比較し、細片化する傾向にあるが、特徴を理解して観察することにより、地山分類や岩盤等級の推定を行うことができる。

**4. 安山岩質自破碎状溶岩・安山岩質溶岩を主体とする区間 (区間③) の施工**

**(1) 山岳トンネルの事前調査・設計**

2021 年 5 月時点で、温見断層手前の部子山山稜直下の大土被り区間を施工している。本区間は、設計時点において、C I パターン主体で設計されていたが、実施支保パ



写真-2 TD1,850m 地点の集中湧水状況

ターンは DII～E パターンと 3 ランク程度の乖離が生じている。これは、大土被りの長大トンネルにおける事前調査の限界ともいえる。トンネルは地中に構築される線状構造物であることから、事前に全線に渡る精密な調査を行うことは難しく、設計段階での地質情報の質や量には限界がある。本区間のように土被りが大きい場合、地表からのボーリングには限界があり、弾性波探査に頼った調査・設計が行われるが、深度が深くなると弾性波も正確に把握するのは難しい。

このようなことから、トンネル工事においては、設計段階では、限られた調査資料に基づき目安の設計を行い、施工段階で、実際の地山状況や計測・観察結果を確認しながら修正設計を行うことが基本となる。

## (2) 地質状況

本区間は、トンネルの中央付近の土被りの大きい区間で、上位層が比較的良好な安山岩にカバーされる形で、トンネル断面付近に、熱水の影響により強く変質を受けた安山岩質の溶岩および自破碎状溶岩が分布していた。このような状況は、先述した水平コアボーリング結果とトンネル掘削時の切羽観察で、はじめて確認することができた。

自破碎状溶岩とは、溶岩の一部が固結した後に、他の部分の溶岩が流動したために、それに引きずられて、破碎された溶岩である。そのため、溶岩が良好な状態で固結した安山岩と比べ、細片状でもろくなりがちである。

岩盤中には、破碎や変質粘土を伴った連続性のある割れ目が含まれ、自破碎状溶岩の分布境界を確認できる。分布境界は溶岩を数 m～数 10 m サイズのブロックに分断する破断面となっている。分布境界には、明瞭な変位(ずれ)や系統的な方向性が認められないことから、後世の広域的な断層運動によるものではなく、自破碎部の形成に伴って生じたものと推測される。

図-5 に本区間の地質水平断面図(トンネルスプリングラインの高さ(以下、SL という))を、写真-3、4 に代表的な切羽写真を示す。図-5 では、安山岩質自破碎状溶岩をその性状により塊状部と細片状部の 2 つに区分している。

## (3) 塑性押し出し性地山の施工

本区間は、大部分が DII パターン以上での施工となっている。設計時で CI パターンとされた区間に対して、

事前の水平コアボーリングや穿孔検層などで地山状況を確認しながら施工を行っている。これらのボーリング等から地山等級が DII 級以下と想定されるなど貴重な情報を得ることができるが、事前の地質データのみで安山岩質溶岩や安山岩質自破碎状溶岩の分布を正確に把握して、事前に最適支保パターンを設定するのは難しい。運用面では、地質データ、計測データを確認しながら、岩判定委員会で事前に設定した判定フローに基づきながら、判定委員の合意で支保パターンを設定している。

強変質の安山岩質自破碎状溶岩がトンネル側方に分布すると、トンネルの左右片側だけ、想定以上の変位が発生する状況が認められた。このような場合には、トンネルの掘削を一旦停止し、増しロックボルトや一次インバートによる早期閉合などの対策を行っている。

図-6 に対策工の例を示す。



写真-3 切羽状況 (TD2,479 m)



写真-4 切羽状況 (TD2,711 m)

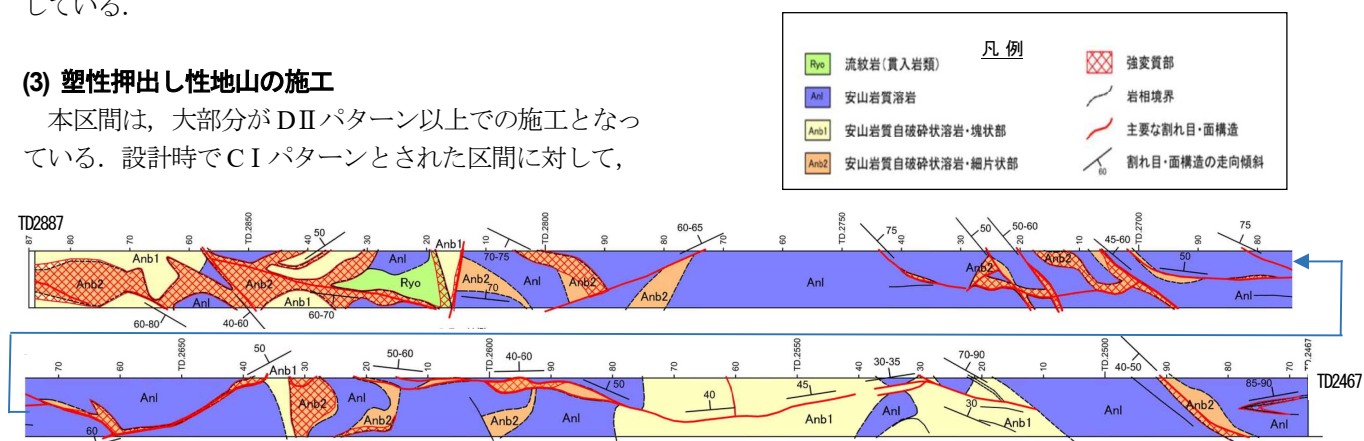


図-5 地質水平断面図 (SL) (TD2,467～2,887 m)

(4) TD2887m 地点でのトンネル変状

a) トンネル変状発生状況

TD2,870 m 以降は、E パターン(H200mm の鋼製支保工)を採用し、長尺鏡ボルト、インバート一次閉合を行いながら施工を実施していたが、TD2,887 m の施工中にトンネルの変状が生じた。変状の発生経緯を図-7 に示す。

最初の変状は、鋼製支保工建込み後の二次吹付け施工中に生じた。鏡吹付けコンクリートを押し割って鏡ボ

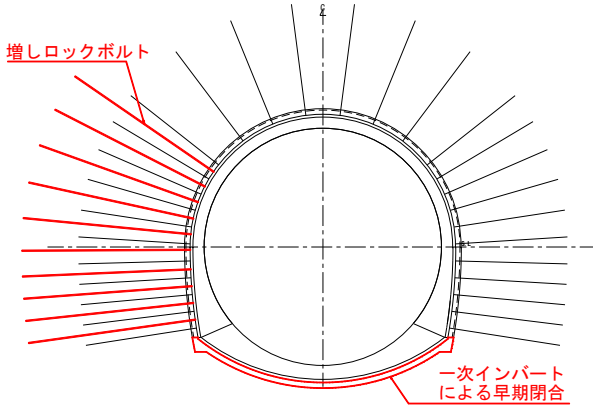


図-6 対策工例

4/21 22:50頃 鏡面にクラック発生		
22:50頃 天端の吹付けコンクリート剥離		
4/22 0:00頃 ロックボルト頭部プレート変状		
2:30頃 鏡吹付けコンクリートの一部崩落、クラック拡大		
3:35頃 鏡吹付けコンクリートの崩落拡大、左脚部を吹付けコンクリートで根固め、支保工座屈		
3:50頃 天端支保工座屈拡大		

図-7 トンネル変状の発生経緯

ト間の地山が小崩落したため鏡吹付けコンクリートを再施工した。その後、切羽後方6m地点の天端の吹付けコンクリートが曲げ圧縮破壊され剥離した。それとともにトンネル左側面の変状が進み、ロックボルトのプレート変状が発生し、プレートが若材齢の吹付けコンクリートにめり込んで行く状況が認められた。その後、鏡吹付けコンクリートが割れて、一部が崩落する状況となった。鏡吹付けコンクリートの変状とあわせて、トンネル左側壁部の変形が進み、切羽から4m間の鋼製支保工が座屈した。変状の進行過程では、鏡吹付けコンクリートを吹き続ける作業を実施し、最終的に4mの厚さの吹付けコンクリートを施工して、支保工の変形の進行を止めた。

b) トンネル変状発生要因と対策方針

図-8 に、支保工の変状が発生した TD2,887 m 付近の地質水平断面図 (SL) を示すとともに、当該箇所のコア写真および切羽写真を併せて示す。

変状発生箇所の地質は、変質によりブレーカーのノミ跡が残る程度に軟質化した安山岩質自破碎状溶岩を主体とし、強変質により粘土化した部分を脈状に含んでいる。

本区間では、安山岩質溶岩の自破碎部は、熱水変質を受けて、粘土化しており、著しく強度低下している。当該箇所で行った針貫入試験では、換算圧縮強度で 2.5MPa の値が得られており、地山強度比 (地山の軸圧縮強度と鉛直土被り圧の比) は 0.4 と 1 を大幅に下回る状況にある。変状の最も大きな要因は、地山強度比の低下によるものと考えられる。

表-4 にトンネルの変状発生要因と対策方針を示す。

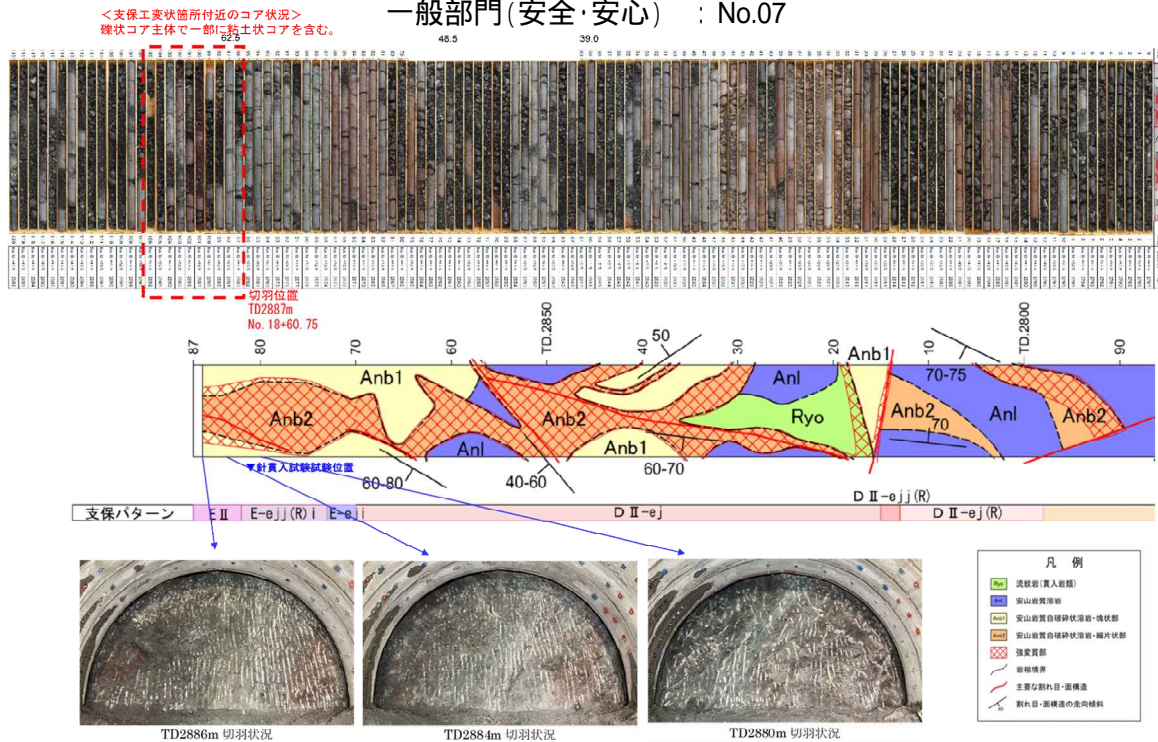
表-4 トンネルの変状発生要因と対策方針

	事象	要因	対策方針
変形モード	側壁の押しだしが顕著	側圧卓越 トンネル形状が縦長	側壁ロックボルト 一次インバートによる早期閉合
	天端沈下は小さいものの、内空変位が大きい場所では、天端付近の支保部材が損傷	側壁の押し出しにより、天端部に曲げが発生	トンネルの変形抑制 側壁ロックボルト 天端増しロックボルト 鋼製支保工・吹付けコンクリートの高剛性化
	局部的に、内空変位、脚部沈下が増大	部分的に極めて脆弱な地山が出現 安山岩質溶岩と安山岩質自破碎状溶岩の分布境界は、縦方向が卓越する傾向があるが、全体的には不規則	水平コアボーリング+穿孔検層で分布を予測 ゾーンで対策工を実施
変形発生位置	比較的切羽近傍で変位が発生	塑性押し出し性が強い地山 X線分析による膨張性の粘土鉱物の含有は少なく、膨張性は少ない トンネル掘削に伴い応力状態が変化する区間でのトンネル変形が顕著	切羽近傍で剛支保工を設置 長尺鋼管先受け工、長尺鏡ボルト工の採用
変形量	切羽から3m後方で片側押し出しが100mmを超過 切羽直前で、ロックボルト頭部プレートの変状、ボルトの破断が発生	地山強度比が著しく小さい(0.4) 土被りが250mと大きくγ・Hが大きいため、見かけのquを大きくするためには大規模な対策が必要。	剛性の高いH250の鋼製支保工 高強度吹付けコンクリートを採用

5 温見断層突破に向けた対策

(1) 温見断層の地質状況

温見断層は、濃尾断層帯を構成する約36kmの活断層である。1891年(明治24年)の濃尾地震の際には、北西部の約20kmが活動し、最大3mの左横ずれと北東側1.8mの隆起が生じたとされる。トレンチ調査結果などから、



平均 2,200~2,400 年間隔で活動していると推定され、トンネルに影響する断層幅は 300 m にも及ぶ可能性がある。

既往ボーリングから、温見断層の破碎帯の性状は、固結した破碎部（カタクレーサイト）を主体とし、未固結の断層粘土や断層角礫を一部に含む状況が推定される。

断層部では、現在掘削している部子山山稜直下区間の塑性押しに加え、破碎帯による切羽の不安定化が予測され、十分な注意が必要である。

### (2) 温見断層周辺の地下水状況

温見断層付近の地下水位は、既往ボーリングなどから、断層よりトンネル吐口側で地下水位が高くなっており、断層内の難透水層によりダムアップが生じているものと考えられる。浸透流解析では、トンネル掘削時に最大 11 m<sup>3</sup>/min の湧水が発生するものと予測されており、掘削時の突発湧水対策が重要である。

### (3) 温見断層区間の事前調査

2017 年 7 月に着手し、工事を進捗してきたが、脆弱な地山性状及び湧水による施工スピードの低下が生じ、適切な掘削・支保パターン及び補助工法等の選定が必要となってきた。このため、2020 年 10 月に水海川導水トンネル技術検討委員会を設置し、今後施工する温見断層区間の施工方法、構造及び地下水への影響について、技術的な指導、助言を得ながら施工を進めている。

図-9 に示すとおり、温見断層部のトンネル掘削については、通常の水平コアボーリングに先立ち、500m 程度の超長尺水平コントロールボーリングを実施し、突発湧水に備えるとともに、温見断層の性状把握を行うこととしている。

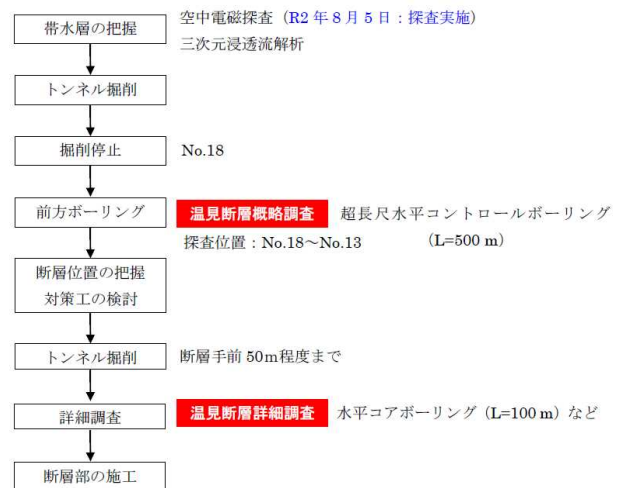


図-9 温見断層部のトンネル掘削フロー

## 6 終わりに

当初想定していなかった塑性押しに対して、苦戦しつつも、水平コアボーリング等の調査結果や観測結果を基に、適切にトンネルを掘り進めている。今後、本トンネルの最大の山場である温見断層に向かう。これまでの経験を科学的に分析して施工にフィードバックし、温見断層に備えていきたい。

**謝辞：** 本論文の執筆にあたり、水海川導水トンネル I 期工事施工業者の株式会社熊谷組から、施工状況に関するデータの提供を頂いた。ここに、深甚の謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 小高, 戌亥, 鈴木, 中澤: 物理探査による地山予測と水抜きを兼ねた前方探査で多量湧水地山を突破 足羽川ダム 水海川導水トンネル I 期工事, トンネルと地下, Vol. 51, No. 11, pp. 17-27, 202