

多量湧水下でのトンネル掘削における 切羽安定化対策

玉井 達毅¹・高根 大輔²・中田 暁之³・大畑 雅義⁴

¹正会員 (独) 鉄道・運輸機構 北海道新幹線建設局 北斗鉄道建設所 (〒041-1251 北海道北斗市本郷344-2)
E-mail: tamai.tat-zv5i@jrtt.go.jp

²正会員 (独) 鉄道・運輸機構 北海道新幹線建設局 北斗鉄道建設所 (〒041-1251 北海道北斗市本郷344-2)
E-mail: takane.dai-2hg7@jrtt.go.jp

³正会員 岩田地崎・熊谷・不動産テトラ・相互 北海道新幹線, 村山トンネル他 特定建設工事共同企業体
(〒041-1242 北海道北斗市市渡631-1)
E-mail: a.nakata@iwata-gr.co.jp

⁴正会員 株式会社 熊谷組 土木事業本部トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)
E-mail: moohata@ku.kumagaigumi.co.jp

北海道新幹線, 新函館北斗～札幌間 (線路延長約211km) の渡島トンネルは新函館北斗駅からおよそ1km北西に位置し, トンネル延長は32,675mに及び, 完成すると国内最長の陸上山岳トンネルとなる. 本トンネルの最も起点方に位置する村山工区 (トンネル延長5,365m) では, 事前の調査の段階から地下水位が全線にわたってトンネル天端より上部にあることがわかっており, 施工時に多量の湧水の発生が想定され, 切羽の不安定化および突発的な湧水の発生が懸念されていた. そのため, 切羽前方への中尺ボーリングと短尺ボーリングを併用し, ボーリング孔からの湧水圧管理を実施することで, 切羽前方の地下水位の低下を図り, 切羽の安定化に努めた. 本稿では, これらの多量の湧水区間での切羽安定化対策および現在までの施工状況について報告する.

Key Words : mountain tunnel, drainage boring, measurements of water pressure

1. はじめに

渡島トンネルは, 北海道新幹線の新函館北斗駅～札幌駅間約211kmのうち最も起点方 (新函館北斗方) のトンネルであり, トンネル延長は32,675mに及び, 完成すれば東北新幹線八甲田トンネル (延長26,455m) を超え, 国内最長の陸上山岳トンネルとなる見込みである. 当トンネルは7工区に分けて工事の発注が行われ, 平成30年7月現在, すべての工区で工事の契約が完了している. このうち, 図-1に示す村山工区 (トンネル延長5,365m) は, 事前の調査の段階で, 地下水位がほぼ全線にわたってトンネル断面よりも高い位置に確認されており, 多量湧水による切羽の不安定化および突発的な湧水の発生が懸念されていた. このため, 水抜きボーリングとして, 切羽前方への中尺ボーリングと短尺ボーリングを実施し, ボーリング孔からの湧水圧管理を行うことで, 切羽の安定化を図った.



図-1 位置図

本稿では、これらの多量湧水区間でのトンネル掘削における湧水対策および現在までの施工状況を報告する。

約3,900mの掘削が完了している。

2. 工事概要

本工区の地質平面図および地質縦断面図を図-2に示す。本工区の最大土被りは167m、起点方から工区の終点方の縦断線形は、7～20‰の上り勾配である。平面線形は起点方からおよそ1kmはR=12,000mの緩やかな曲線、残りの約4kmは直線であり、起点方から本坑の掘削を施工中である。図-2の地質平面図および地質縦断面図にあるとおり、全線にわたって地下水位がトンネル断面より高く、さらに、当工区の終点方に2級河川の大野川が存在し、そこに流れ込む支流がトンネル上に多く存在することから、豊富な地下水がトンネル近傍にあることが予想された。

平成26年8月に起点方から掘削を開始し、地質縦断面図のとおり、起点方より富川層主部（細粒砂岩）、黒松内層上部（火山砕屑岩類）、富川層基底部（砂礫岩）の順で掘削を行い、現在（平成30年7月中旬の時点）までに

3. 湧水対策

(1) 概要

村山工区は調査段階から地下水位が高いことを想定しており、ボーリング孔内の地下水位を計測したところ、水頭はトンネル天端から50m以上上方に確認された。よって、継続した地下水位計測および切羽前方の地下水位の低下が必要と考えた。

これらの調査結果より、当初の計画から切羽前方の調査および坑内からの水抜きのための中尺ボーリング（L=120m@100m）の施工を全線にわたって行うこととし、また、観測孔の水位からもトンネル上部に地下水が存在することが考えられたため、ボーリングからの湧水圧についても測定することとした。

(2) 中尺ボーリング

富川層主部における中尺ボーリングは、当初は単管による120mの削孔を計画していたが、未固結の玉石混じ

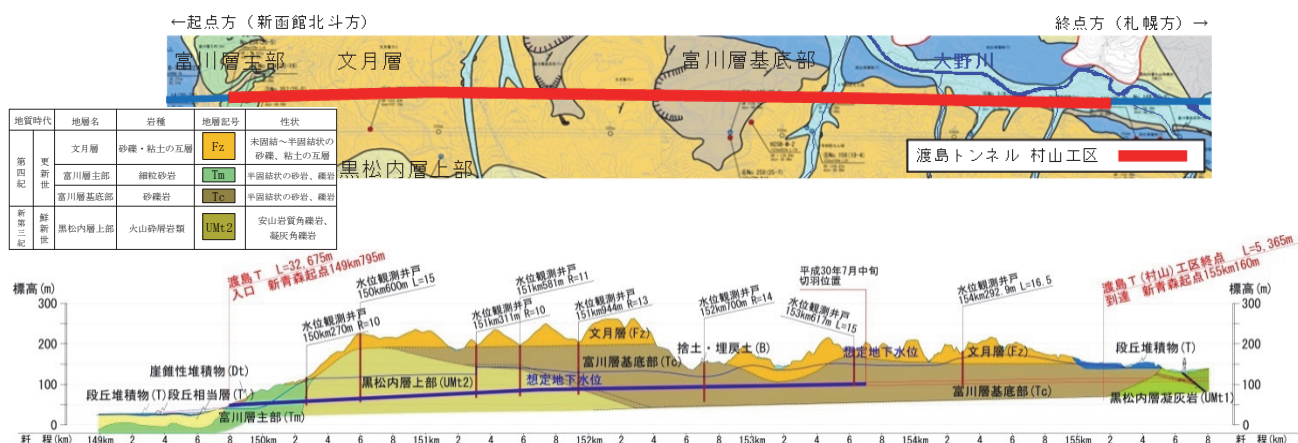


図-2 渡島トンネル（村山工区）地質平面図・縦断面図

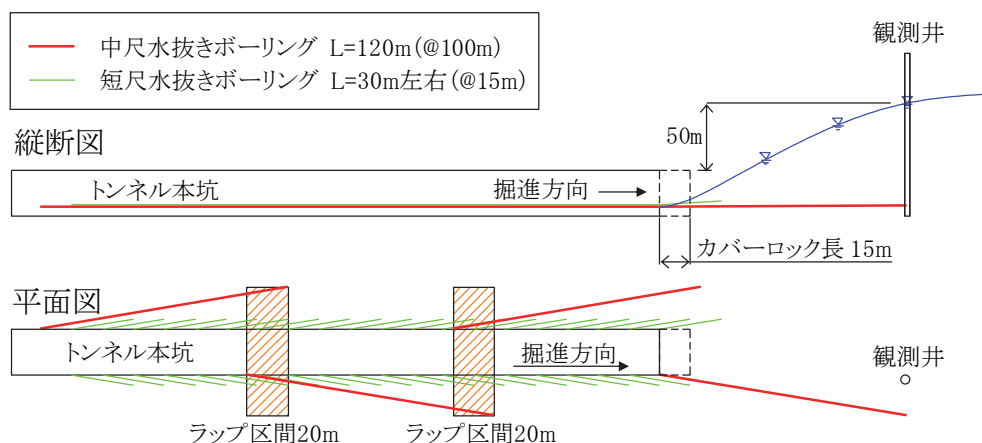


図-3 中尺・短尺ボーリング施工概念図

り砂礫層では孔壁の自立が難しく、ケーシングによる三段落し（φ152，φ125，φ80）とすることで削孔を可能にすることができた。

中尺ボーリングで確認された湧水圧は最大でも0.1MPa程度であり、観測孔で確認されていた水頭50m相当の湧水圧（0.5MPa）は確認できなかった。しかし、地層の状況から、切羽前方に遮水層が存在している可能性も考えられたため、突発湧水を防止する目的で、中尺ボーリングにより湧水圧を確認できた位置から水頭と同程度の50mのカバーロックを確保しながら掘削を進めることとした。

(3) 短尺ボーリング

中尺ボーリングでは高い湧水圧は確認できないものの、前方の観測孔の水位は依然高い値を示していたため、より切羽近傍の湧水圧を確実に低下させて、切羽の進行を図るため、中尺ボーリングに追加して、短尺の水抜き工（L=30m@15m）を行うこととした。

短尺水抜き工は、ドリルジャンボによって30m程度の削孔（φ86）を行うこととしたが、中尺ボーリングと同様に孔壁の崩壊が見られ、30mの削孔に数時間を要することもあり、また、目的の深度に到達する前に削孔が不能になる状況も発生した。

これらの問題を解決するために、鋼管（φ114，φ89）をケーシングとした短尺ボーリングを実施した。これにより、短尺ボーリングの施工が安定し、切羽前方の水位低下と、水圧管理による切羽の安定性を確保した掘削が可能となった。中尺・短尺ボーリングの施工の概念は図

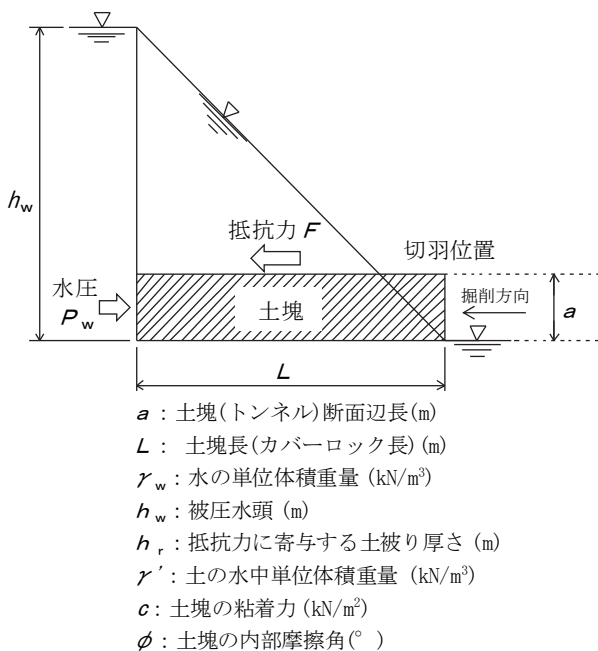


図-4 水圧と土塊の概念図

-3のとおりである。また、短尺ボーリングの特徴として、以下の点が挙げられる。

- ① ドリルジャンボによる打撃削孔のため、安定して30m程度の短尺削孔が可能。
- ② 鋼管が削孔時のケーシングとなるため、未固結の砂礫層においても孔壁崩壊を防止でき、削孔深度確保の信頼性が高い。
- ③ 鋼管を水抜き孔として利用するため、削孔後の孔壁崩壊を防止でき、安定した水位低下と水圧管理が可能である。
- ④ 鋼管に $L=200\text{mm}$ 程度のスリットを設けることで、ストレーナ機能を持たせることが可能。
- ⑤ 地山にケーシングを残置するため、正確な水圧の計測が可能。
- ⑥ 鋼管によるケーシングとなるため、施工後の清水として放流が可能。
- ⑦ 水圧測定治具の設置が容易であり、転用が可能。

(4) 短尺ボーリングの湧水圧による切羽管理手法

短尺ボーリングにおける湧水圧の管理は、飯山トンネル富倉工区で採用された限界動水勾配を用いた切羽の管理手法¹⁾を採用した。詳細を以下に示す。

切羽前方のカバーロックを土塊（幅 a ×高さ a ×奥行き L ）と見なした場合、土塊にかかる水圧（ P_w ）と抵抗力（ F ）の関係については図-4の模式図に示したとおりと考えられ、以下の計算式となる。

$$P_w = \gamma_w h_w a a \quad (1a)$$

$$F = \gamma' (4h_r + 2a) a L \tan \phi + 4a L c \quad (1b)$$

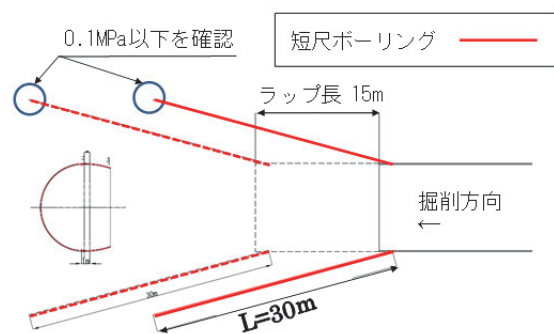


図-5 短尺ボーリング施工サイクル

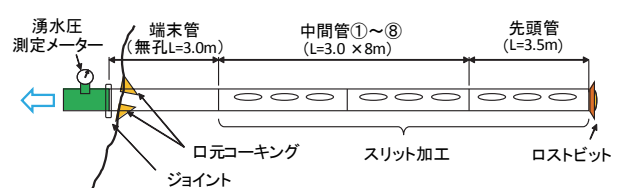


図-6 短尺ボーリング詳細図

安全側を考慮して抵抗力分の土被り厚さ h_t はゼロとし、土塊の自重分のみを考慮することとした。さらに未固結地山を想定し、 $c=0$ 、 $\phi=30^\circ$ として $P_w=F$ とすると、限界動水勾配($i_c=h_w/L$)は約1となるが、安全率1.5を適用し、 $L/h_w \geq 1.5$ (前方地山によるカバーロック長が水頭の1.5倍以上ある状態)を管理基準とした。

短尺ボーリング削孔長は、 $L=30\text{m}$ としている。短尺ボーリングは毎回湧水圧を測定しており、測定圧 0.1MPa 以下であれば、 15m 掘削可能と判断(30m の短尺ボーリングで 0.1MPa 以下を確認した箇所から 15m 先でカバーロックが 15m 残っていると判断)し、 15m 毎に左右で短尺ボーリングを施工し、切羽の安全性を確保しながら掘削を進めた。短尺ボーリングの施工サイクルおよび短尺ボーリングの詳細図を図-5および図-6に示す。

4. 施工結果

富川層主部での掘削時において確立した湧水圧管理フ

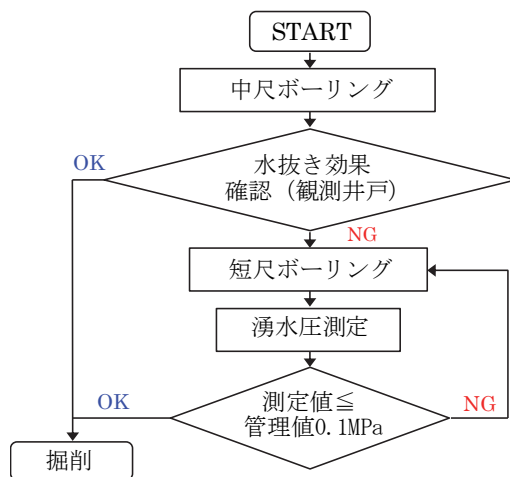


図-7 湧水圧管理フロー

ローを図-7に示す。本フローにより、切羽近傍の水位低下を確実なものとし、現在まで切羽の崩壊もなく、順調に掘削は進行している。トンネル断面の支保パターンについては、図-8に示すとおり I_N および I_L パターンを基本とした。

次節では、掘削時に特に慎重な施工を要した、富川層主部と黒松内層上部との層境、黒松内層上部と富川層基底部との層境、および現在の施工状況(富川層基底部)と坑内湧水量について述べる。

(1) 富川層主部と黒松内層上部との層境での施工

富川層主部と黒松内層上部の地層境界部の切羽の状況を写真-1に示す。

切羽では中尺ボーリング、短尺ボーリングの他に、掘削毎に左右の肩部に探り削孔($L=4.0\text{m}$)を行っているが、当該箇所では湧水は見られなかった。しかし右踏まえ部に出現した黒松内層に探り削孔を行ったところ、 4m 前方で約 0.1t/min の湧水を確認した。さらに、短尺ボーリングを追加施工し、その結果、左右の湧水量は合計で約

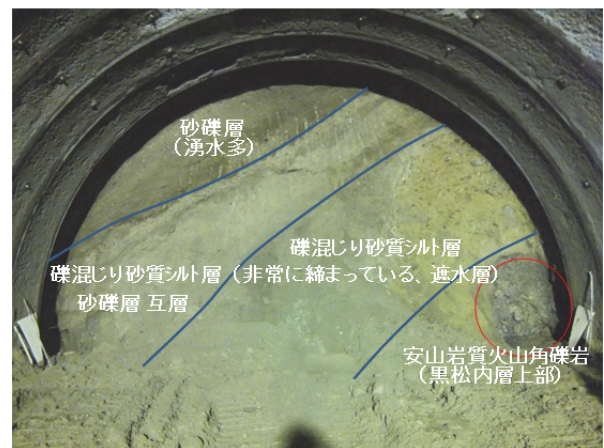


写真-1 黒松内層出現の切羽状況

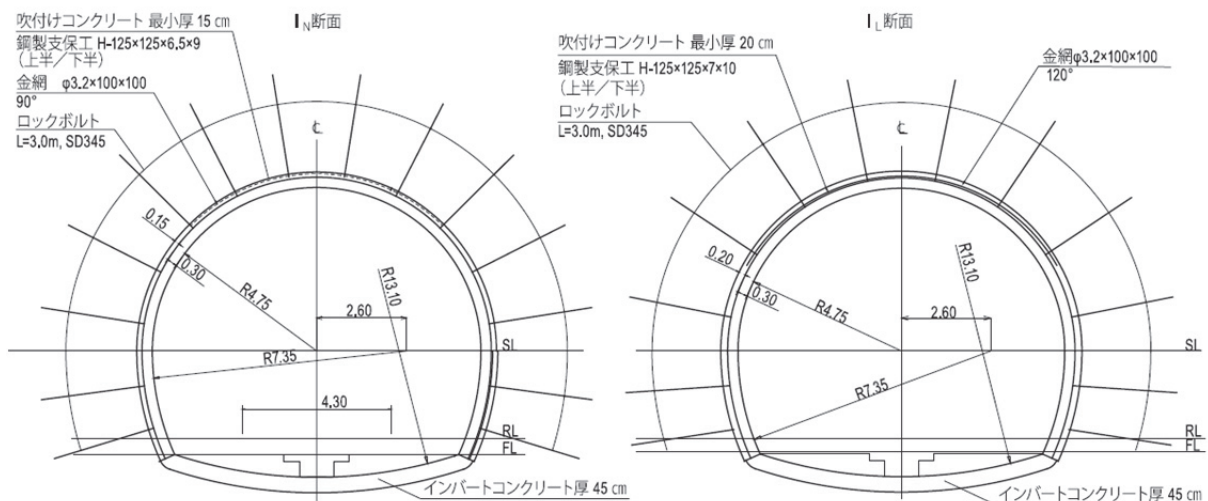


図-8 トンネル断面支保パターン

1t/min, 湧水圧は左右とも0.11MPaであった。

以上から、富川層主部と黒松内層上部の層境部には予想していたとおり、大量の湧水が存在することが判明したため、以降の掘削に関しては、次の対策を行うこととした。

- ① 下半を層境に可能な限り近づけて（ベンチ長約10m）、下半切羽から短尺ボーリングを施工し、上半の水位を下げる。
- ② 上半掘削に先立ち、天端防護のために長尺先受け工を施工する。
- ③ 層境部の掘削パターンを L_H （125H）から支保剛性の高い、 L_L （200H）へ変更する（図-9）。

以上の対策を講じ、既設の上半短尺ボーリングの湧水量・湧水圧を再測定し、前項の管理手法に則り、問題なければ掘削を進めることとした。

その後も100m毎に延長120mの中尺ボーリング（片側）と15m毎に延長30mの短尺ボーリング（左右）を継続して施工し、切羽前方の地質状況の確認および事前の水抜き（水位低下）と、中尺ボーリングでは捉えきれない地下水の確認と湧水圧の測定（切羽の安定性確保）を短尺ボーリングで確認を行うことで、安全に掘削を進

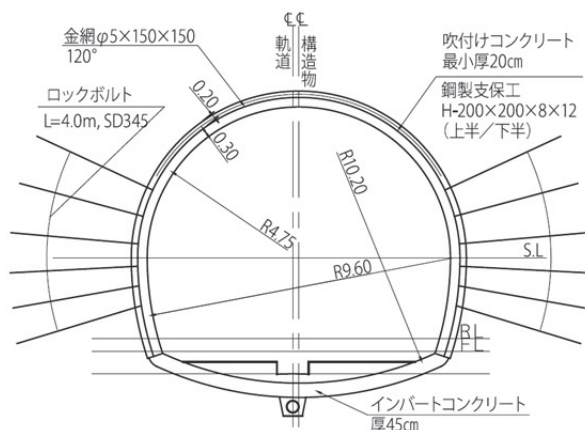


図-9 特 L 支保パターン

めることができた。

なお、黒松内層に入ってから湧水は増加傾向を示し、最終的にはトンネル全体で10t/minを記録した。地層は富川層とは幾分異なっており、火山角礫岩（凝灰角礫岩および安山岩質火山角礫岩）とその間隙を埋める基質（粗粒な砂）で構成されるようになった。火山角礫岩は200MPaを超える強度を持つものと推定される一方、基質部は脆い状態であったが、黒松内層においても中尺ボーリングおよび短尺ボーリングによる湧水圧管理によって切羽は滴水程度の状態を保ちながら施工を行うことができた。

(2) 黒松内層上部と富川層基底部との層境での施工

中尺ボーリングの結果から、想定よりも更に低角度で地層境界部が現れることが予測され、一旦地層境界が出現すると、長区間不良地山が連続する可能性が高いことが判明した。そのため、切羽前方の地下水位を確実に低下させるため、短尺ボーリングの打設間隔を狭くし、先進調査ボーリングを上向き15%で打設した。さらに、長い区間にわたり地層境界部が連続するため、長尺先受け工により天端崩落の防止を図った。ここで鋼管には、施工性、経済性により優れた $\phi 89.1\text{mm}$ の一般構造用炭素鋼鋼管（STK400）を施工し、注入材は水に強いシリカ

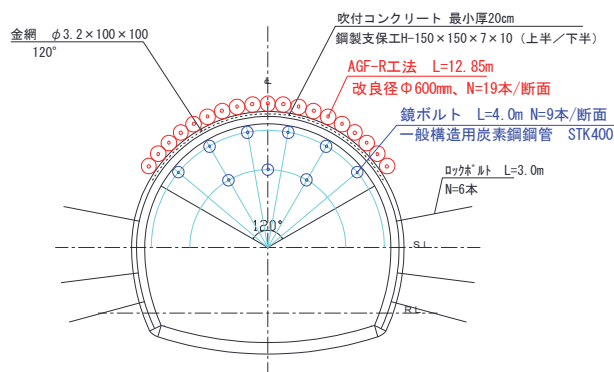


図-10 AGF-Rを併用した支保パターン

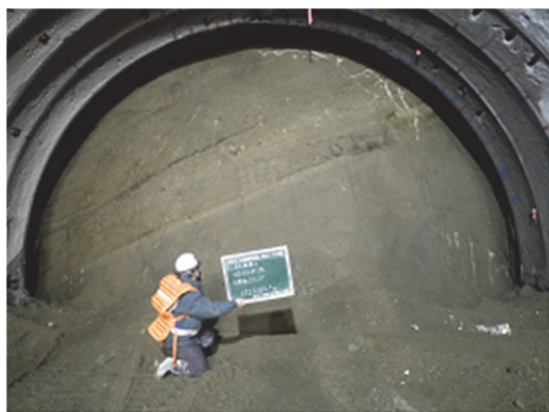


写真-2 フォアボーリング施工時の切羽状況



写真-3 AGF-R施工時の切羽状況

レジンをを用いた。

その後、地層境界部を通過してからは比較的安定した地山を掘削していたが、152km060m付近より、礫分およびシルト分が減少し、砂分が優勢となり、切羽右側壁部の小崩落が発生したため、弱部にシリカレジンによる注入式フォアポーリングを施工した(写真-2)。また、短尺ポーリングによる前方地質の想定結果から、引き続き長い区間で弱層部が連続することが予測されたことから、AGF-P工法による長尺先受け工を施工した。

ここで、これらの補助工法の注入材にはシリカレジンをを用いたが、設計数量に至る前に注入圧の上昇がみられる傾向があり、より砂質地山に適した補助工法を検討する必要がある。そこで、AGF工法の中でもダブルパッカー方式による水ガラス系溶液型薬液の浸透注入が可能なAGF-Rを実施した。この結果、天端付近の安定性は増したものの、依然として鏡の剥落が顕著にみられたことから、自穿孔型の注入式鏡ボルト(L=4m)を2基毎に施工することとした(図-10、写真-3)。

以上、これらの補助工法および湧水圧管理手法を駆使して、砂層優勢の低角度の地層境界部においても安全に掘削することができた。

(3) 現在の施工状況(富川層基底部)と坑内湧水量

現在(平成30年7月中旬の時点)までに約3,900mの掘削が完了しており、富川層基底部を掘削中である。当該地質は、細砂～粗砂主体砂礫層で構成されており、礫径2～30cm程度の円礫・亜円礫を含み、マトリックスは粗

砂分の比率が高く、比較的締まっている。掘削はN₂パターンの補助ベンチ付全断面工法を主として適用している。現在の切羽状況を写真-4に示す。

地下水位は依然トンネル断面より高い位置にあるものの、湧水圧管理に基づいた切羽管理手法を基本とすることで、着実に水位低下を図り、平均月進80m～100mを確保し、順調に掘削を行っているところである。

現在までのトンネル坑内からの全湧水量と掘削の事前設置した水位観測井の水頭を図-11に示す。なお、水位観測井の設置位置は図-2を参照されたい。坑内の総湧水量は最大13t/minを超える値となったが、余裕を持った濁水処理設備容量、水抜きポーリングによる確実な清濁分離、放流先の確保および路盤の泥濘化への対処を入念に行うことで、多量湧水を問題なく処理することができ



写真-4 現在の切羽(富川層基底部)

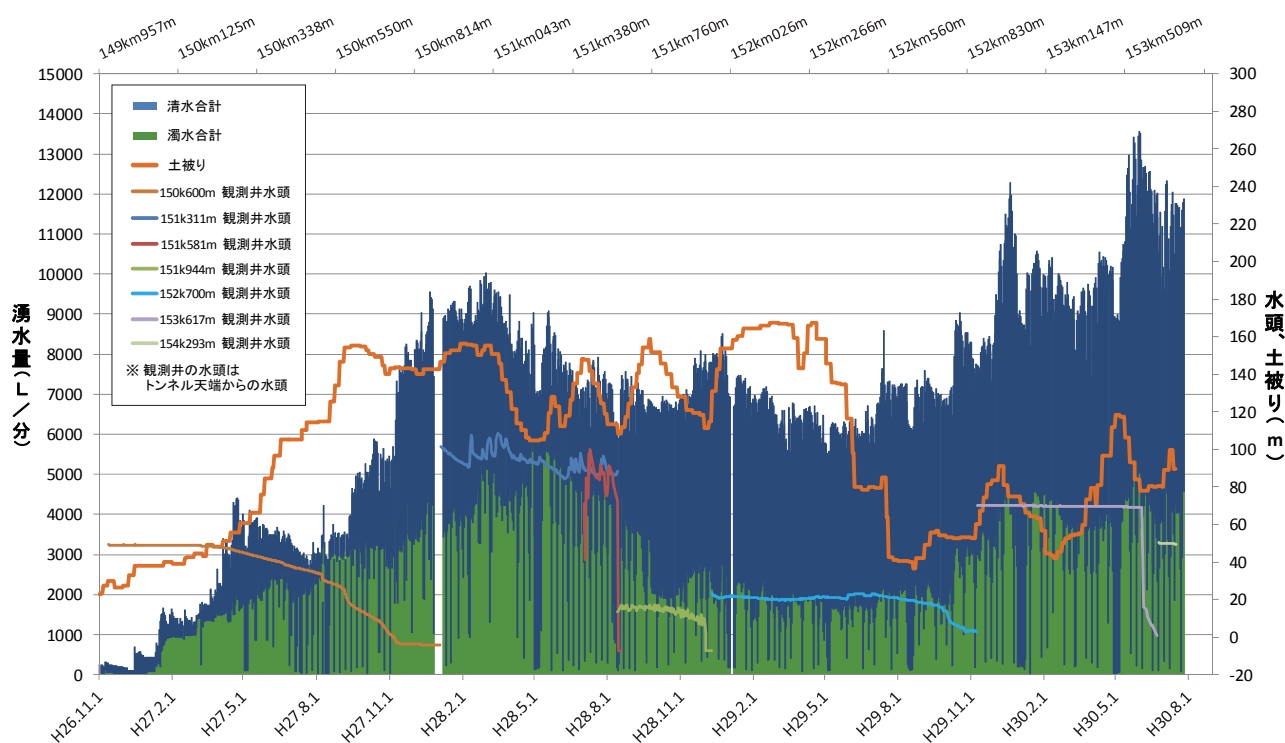


図-11 坑内全湧水量と水位観測井の水頭

ている。また、水位観測井の水頭は設置時はトンネル断面より高い位置にあるが、トンネルが近づくとトンネル天端付近まで水頭が下がり、本稿で述べた湧水対策により確実な水位低下の効果が得られていることがわかる。

5. まとめ

適切な湧水圧管理のもと、中尺ボーリングと短尺ボーリングを併用し切羽前方の地下水位の低下を確実に図ることで、多量湧水区間においても安定した掘削が可能となった。今後、同様の地山条件におけるトンネル掘削に

においても本手法を適用することにより、切羽の安定に寄与できるものと考ええる。

残り約1,400mの掘削においても、引き続き確実な安全管理のもと、着実に施工を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 高原英彰, 依田淳一, 川原一則: 偏在する高压帯水層の地山における湧水圧管理を用いたトンネル掘削, トンネル工学報告集第15巻, pp. 101-105, 2005.

(2018.8.10受付)

EFFECTIVE COUNTERMEASURES FOR THE STABILITY OF THE TUNNLE FACE UNDER LARGE WATER INFLOW

Tatsuki TAMAI, Daisuke TAKANE, Akiyoshi NAKATA
and Masayoshi OHATA

In the Murayama work section (tunnel length 5,365 m) located at the starting point of the Oshima Tunnel, the preliminary geological survey had revealed that the underground water level is above the top of the tunnel. Therefore, it was concerned that destabilization of the tunnel face and occurrence of sudden water inflow. Thus, the authors tried to lower the underground water level of the face ahead and stabilize it by using both the medium drainage and short drainage boring under the measurements of water pressure.

In this paper, the authors report effective countermeasures to ensure the stability of the tunnel face in these large water inflow sections and current consuruction status about tunnel excavation.