

層境にて発生した突発湧水と切羽崩落対策に関する報告

井内 厚志*

Atsushi Iuchi

永田 謙一郎**

Kenichiro Nagata

田中 義晴*

Yoshiharu Tanaka

大谷 達彦***

Tatsuhiko Ootani

1. はじめに

本工事は、日田市と中津市を結ぶ地域高規格道路（日田山国道路 L=8.8 km）のうち、延長 1,558 m の避難坑を NATM 工法により施工するものである。

地質は凝灰角礫岩（D 級）を主体としており、一部地下水を豊富に賦存した風化安山岩（C 級）が貫入している。当初より凝灰角礫岩と風化安山岩の層境では湧水の発生が懸念されていたため、穿孔検層（DRISS）と電磁波探査（FDEM 探査）による切羽前方探査を実施しながら慎重に施工を行った。凝灰角礫岩の掘削を進めていたところ、湧水の発生と切羽天端部の小崩落が発生した。層境が近くに存在していると判断し、掘削補助工 A（小口径鋼管先受け工・鏡ボルト工 $\phi 76.3$ mm, L=9.5 m, シリカレジンと止水系ウレタン注入材の併用）と掘削補助工 B（水抜きボーリング）を適用した。ところが、さらに L=24.0 m 掘進した地点にて、再び突発湧水と切羽の崩落が発生したため、対策工を追加した。

本稿では、突発湧水と切羽の崩落に対する対策工の施工結果について報告する。

2. 工事概要

工 事 名 令和 3 年度道改国第 2—2 号道路改良工事
 発 注 者 大分県 土木建築部
 工事場所 大分県日田市大字花月地先
 工 期 令和 4 年 3 月 26 日～令和 9 年 9 月 22 日
 工事内容 トンネル（小断面 NATM）工事 発破掘削
 掘削延長：L=1,567 m（トンネル部 1,558 m）
 掘削断面 標準部：18 m² 拡幅部：39 m²
 インポートコンクリート：1,138 m
 覆工コンクリート：1,558 m

3. 突発湧水と切羽崩落の状況と施工上の課題

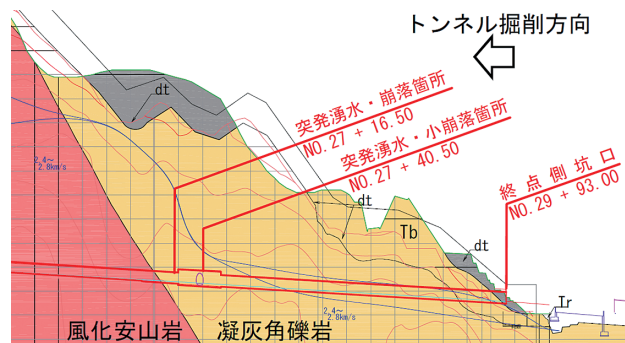
図一1 に当初の地質縦断面図を示す。当初では測点

* 九州（支）日田 1 号トンネル（出）

** 土木部

*** 土木設計部

No. 27+15.0～No. 26+90.0 にて層境の出現が想定されていた。しかし、実施工においては想定より L=25.5 m 手前の No. 27+40.5 にて突発湧水と切羽の小崩落が発生した。そのため、当初設計にて層境で採用されていた支保パターン D I i-PF（図一2）に変更した。切羽前方探査と掘削補助工 A・B を実施しながら掘削を進めたところ、No. 27+18.5 にて切羽下半から左肩部にかけて白く粘土化した安山岩が出現した（写真一1 左側）。その後、No. 27+16.5 の施工時に再び突発湧水と切羽の崩落が発生した（写真一1 右側）。

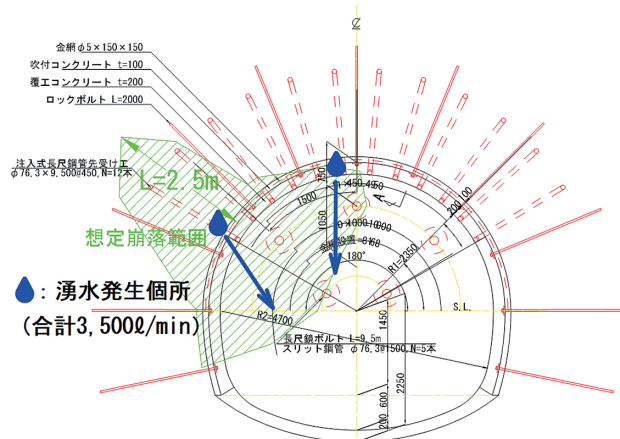


図一1 地質縦断面図



写真一1 崩落前の切羽状況と突発湧水・切羽崩落状況

崩落箇所に出現した白く粘土化した安山岩は、粘土と細かな礫が入り混じった土砂状を呈しており、多量の湧水に伴い容易に流出する状態であった。切羽は天端から左側脚部にかけて崩落しており、左肩部にはおよそ V=10 m³ 近くの空洞部が形成されていた。また、湧水は切羽天端部と左肩部から多く出水しており、切羽からの湧水量は 3,500 l/min であった（図一2）。



図一2 崩落時の支保パターン（DIi-PF）と崩落範囲

さらなる切羽の崩落発生や、吹付けコンクリートの施工性、作業員の安全や作業環境に対して大きな影響が懸念された。そのため、切羽へ流入している湧水を切羽外へ導水することを目的に、湧水発生箇所に向けて3.0 m手前の拡幅部面壁より水抜きボーリング ($\phi 76.3$ mm, $L = 12.5 \sim 15.5$ m, $n = 8$ 本) を実施した (図-3 ①～⑧の箇所)。水抜きボーリングにより1,800 l/minの湧水を排水することができたが、切羽からの湧水は減少しなかった。

このような状況から、切羽の湧水対策と天端崩落・鏡面の自立性対策を「特別対策工」として、抜本的に検討を行った。

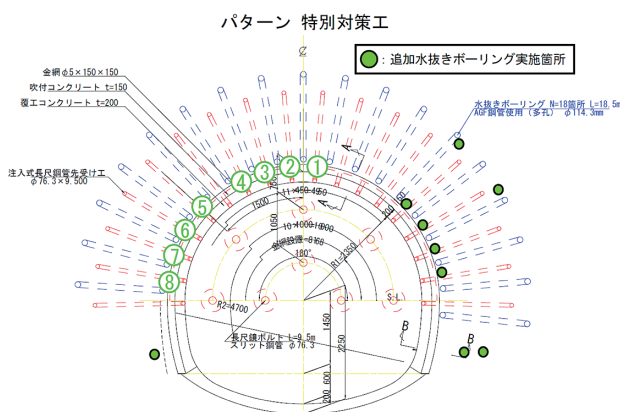


図-3 特別対策工支保パターンと水抜きボーリング施工箇所

4. 湧水に対する特別対策工の検討

湧水対策工の選定にあたり比較検討を行った結果、水抜きボーリングを採用した。水抜きボーリングの施工範囲・延長を計画するために、穿孔検層を行った。その結果、崩落が発生していない切羽右側からも多量の湧水が存在することが確認できた。また、穿孔検層やこれまでに実施した水抜きボーリングの実績を整理して、切羽前方12.0～15.0 m付近まで白い粘土化した安山岩が分布し、それ以降は、比較的新鮮な安山岩が出現することが判明した。

これらのことから、水抜きボーリングの実施範囲を切羽の外周180°、施工延長は切羽前方 $L = 18.5$ mとした。水抜きボーリングは管剛性の高い $\phi 114.3$ mmの鋼管を使用しトンネル外周の補強を図りつつ、より多くの湧水を集水できるように計画した。さらに、掘削再開時にロックボルトを施工することで湧水を引き込み、吹付けコンクリートの施工不良や作業環境の悪化を懸念した。また、避難坑であるため覆工コンクリートの省略が検討されていることから湧水を引き込んだ場合、供用後の維持管理の面でもデメリットとなると考えた。そのため、Hoek-Brownの支保内圧算定式を元に、ロックボルトを省略し鋼製支保工と吹付けコンクリート厚のランクアップにて、ロックボルトと同等の支保耐力を確保した。

5. 天端崩落・鏡面の自立性に対する特別対策工の検討

崩落時の切羽状況を観察すると掘削補助工A実施箇所 (No. 27+19.5) から $L = 3.0$ m掘進した地点にて崩落が発生しており、有効長 $L = 6.0$ m (9.5 m-ラップ長3.5 m) のうち奥側4.0～6.0 m地点での改良が不十分であると考えた。また、掘削補助工Aの改良範囲120°の外側に崩落が顕著に見られたことから改良範囲が不十分であると判断した。そのため、掘削補助工Aの有効長を $L = 6.0$ mから $L = 3.0$ mに短くし (ダブルラップ: ラップ長6.5 m)、改良範囲を120°から180°に広げた。施工延長は穿孔検層やこれまでに実施した水抜きボーリングの実績から $L = 18.0$ mとした。また、より確実な改良を行うために、注入材は鋼管1本当たりの湧水量が20 l/minを超える場合は湧水対策を目的に開発された止水系ウレタン注入材 (KOD-M) を採用した。注入管理はKOD-Mを使用する箇所では限界注入圧を3.0 MPaから10.0 MPaに変更し、偶数孔での注入量の増量は設計注入量の2倍から3倍に増やした。湧水量が1本あたり100 l/minを超える場合には湧水とともに注入材がリークすることを防止するため、導水式複合パッカーを使用しリークを抑えることで、より確実な地山改良を可能とした。

6. 特別対策工の施工結果

特別対策工は、水抜きボーリングの施工から行った。湧水が多い箇所に対しては水抜き効果が不十分であると考えられるため、追加の水抜きボーリングを実施した。水抜きボーリングの施工本数が増加するに伴い、坑内湧水量が多くなったため、濁水処理設備の処理能力を超過しないように、適宜清水処理を実施した。切羽からの湧水が作業可能な状態まで減少したことが確認できたため、掘削補助工を実施した。掘削再開後、特別対策工により、適切に地山が改良されていたため崩落や変状は発生しなかった。一部湧水により吹付けが困難な箇所が発生したが、鋼製支保工の背面にキーストンプレートを設置し、湧水を躲し吹付けコンクリートの施工を行うことによって、当該区間を突破することができた。最終的な坑内湧水量は最大で9,000 l/minに達した。

7. まとめ

穿孔検層や水抜きボーリングの実績、崩落時の切羽状況や崩落状況を観察し、地山性状を把握することによって大量湧水箇所に対して適切な対策工を計画することができた。さらに、施工中も、湧水状況や切羽状況を踏まえて適宜、追加水抜きボーリングの実施や施工方法の工夫を行うことで当該区間を安全に突破することができた。最後に、本稿が今後の工事の一助になれば幸いである。