

# スコリア地山におけるトンネル掘削の施工実績 Construction results of tunnel excavation in scoria rocks

平野 太一\*                      吉永 浩二\*  
Taichi Hirano                      Kouji Yoshinaga  
原島 大\*\*                      山田 宏道\*\*\*  
Masaru Harashima              Hiromichi Yamada

## 要 約

湯船原トンネル工事では、富士山からの噴出物（スコリア）が堆積した未固結地山に対して、トンネル掘削を実施した。湧水量が当初想定より多く、掘削時には地山崩落・空洞発生が発生し、トンネル施工に大きな影響を与えた。そのため、湧水対策として長尺鋼管先受け工、注入式フォアポーリング、長尺鏡ボルト、注入式脚部補強パイルを実施した。本稿では、大量湧水に起因して発生した課題とその対策結果について報告する。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 地質概要
- § 4. 地山崩落・空洞発生に伴う課題と対策
- § 5. 下り線変状
- § 6. まとめ

### § 1. はじめに

新東名高速道路湯船原トンネル工事は、静岡県駿東郡小山町から御殿場市の区間（図一）における工事であり、上下線の2本のトンネル各約1,600mを施工した。本トンネルは、施工事例の少ないスコリアと称する火山砕屑物が堆積した未固結の地山を掘削することが特徴である。

また、本トンネルの湧水量は、既往の調査結果より上下線合計で最大250 L/min（15 m<sup>3</sup>/h）、濁水処理設備の規模は発注時においては30 m<sup>3</sup>/hで設計されていた。しかし、実施工（上下線各1,000m掘削時点）では想定を超えて、最大約660 m<sup>3</sup>/hとなり、濁水を合計460 m<sup>3</sup>/h、清水（pH調整のみ）を280 m<sup>3</sup>/h処理できる設備に増設した。多量湧水に伴う地山崩落・空洞発生で、トンネル貫通に約5年間を要した。

本稿では、スコリア地山におけるトンネル掘削時の崩

落・空洞発生に対する対応、湧水対策の施工実績について報告する。

### § 2. 工事概要

- ・工事名：新東名高速道路 湯船原トンネル工事
- ・発注者：中日本高速道路株式会社 東京支社 沼津工事事務所
- ・工事場所：静岡県駿東郡小山町湯船～御殿場市神場
- ・工期：2015年10月30日～2023年11月16日
- ・トンネル延長：上り線：1,598m，下り線：1,604m  
内空断面積：A=73m<sup>2</sup>（片側2車線）  
掘削方式：機械掘削工法（NATM）  
掘削工法：上半先進工法，早期閉合工法（坑口部）



図一 湯船原トンネル位置図

\* 関東土木支社湯船原（工）

\*\* 関東土木支社湯船原（工）

（現：土木設計部設計二課）

\*\*\* 中日本高速道路株式会社東京支社沼津工事事務所

§3. 地質概要

本トンネルの地質は、新富士火山碎屑物（YFL：約1100年前～300年前）と古富士火山碎屑物（OFL1～OFL4：約10～8万年前）が分布し、江戸時代の富士宝永噴火により堆積した宝永スコリア（Ho）が表面を覆い、これらはいずれもスコリアと呼ばれている（図-2）。

スコリアとは火山碎屑物の一種で、主に玄武岩や有色鉱物の多い苦鉄質の安山岩などが揮発成分の発泡で多孔質となったコークス状（粒径2～64mm）をなす。富士山周辺地域に特有の地質であり、全体的に地山強度比は2以下である。スコリアのトンネル掘削の施工実績は全国的にも少ない。

トンネル掘削は、主にOFL3-2と呼ばれるスコリア層（泥流堆積物）を対象とした。事前の調査ボーリングでは、N値が50以上あり、当初設計には先受け工や鏡補強工等の補助工法は採用されていなかった。

しかし、掘削により開放された切羽は、バックホウのツメで容易に掘削できるほど未固結で、地山と吹付けコンクリートとの付着強度が弱く、吹付け中に剥がれ落ちるような肌落ちが頻繁に発生し、最大余吹きが800%を超えることもあった。また、トンネル地表に崖錐堆積物（dt）が分布する箇所は、谷地形で採まれた脆弱層が堆積し、最大60m<sup>3</sup>の天端崩落が発生したため（写真-1）、長尺先受け工+注入式フォアボーリングの併用、長尺鏡補強工、注入式脚部補強工（図-3）を採用した。



写真-1 天端崩落状況



写真-2 切羽崩落状況

§4. 地山崩落・空洞発生に伴う課題と対策

先行して掘削していた下り線にて、約900m地点より湧水量の増加に伴い切羽の崩壊、地山の流出による空洞発生、土圧の増大、脚部地耐力の低下による変状などが起こった。また、下半盤からの湧水（湧き出し）により作業効率が低下し、トンネル施工に大きな影響を与えた。

上記の事象に起因して遭遇した課題と、本トンネルで検討・実施した湧水対策を以下に示す。



写真-3 シリカレジン未反応状況

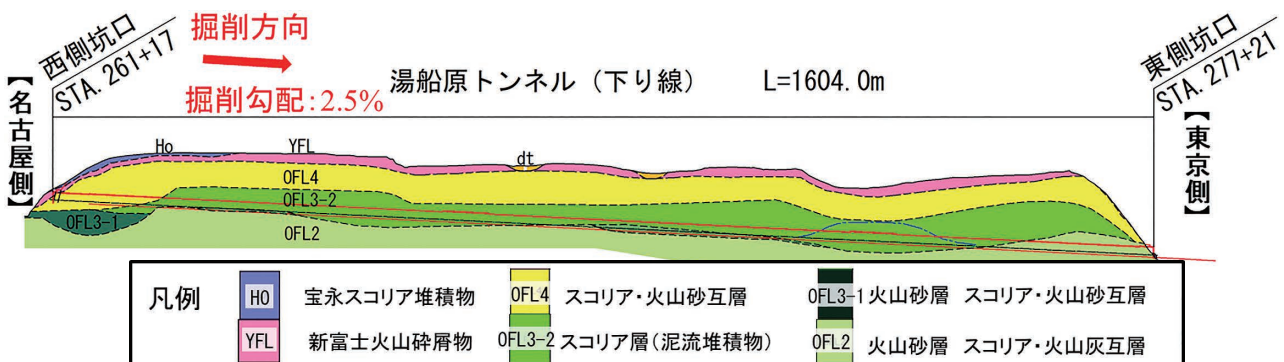


図-2 地質縦断面図

(1) 課題及びその対策①

多量湧水条件下において地山改良不足による地山崩落が発生した(写真-2)。注入箇所に湧水が多い(20 L/min以上)と通常の注入材(シリカレジ)では硬化前に流出してしまい、地山を改良できなくなった(写真-3)。対策として、注入材をシリカレジから湧水抑制材(水発泡ウレタン)による止水注入工法に変更した。

切羽の天端・鏡・側壁の崩落に対して採用している補助工法(長尺鋼管先受け工・長尺鏡補強工・脚部補強パイル)の注入材をシリカレジから水発泡ウレタンに変更することで、湧水による地山の劣化・緩みを最小限にすることができた(図-3)。水発泡ウレタンは、A液とB液の混合により反応固結し、水と接触せずに反応した場合は気泡のない高強度な固結体を形成し、水と接触反応した場合は発泡固結する特徴を有する(写真-4)。

シリカレジと水発泡ウレタンの選定の湧水量閾値を明確にするために、切羽で試験施工を実施した。その結果、水発泡ウレタンを採用する湧水量の閾値を20 L/minとした。このように、湧水状況に応じて注入材を選定しながら掘削し、最大180 L/minの湧水(先受け鋼管での湧水)を止水することができた。しかし、湧水が多量に発生した箇所では、未固結のスコリアがトンネル下半盤から湧き出したり、場所によっては切羽面からの土砂流出に伴う空洞が連続的に発生した。通常の空洞充填(注入終了条件:初期圧+0.2 Mpa)では充填不足となって変状が発生し、トンネル掘削が困難になる状況が繰り返し発生した(写真-5)。そこで、注入圧力を増強(注入終了条件:シリカレジ;初期圧+2.5 Mpa,水発泡ウレタン;初期圧+5 Mpa or リーク)し、地山の変位を監視しながら管理した。

(2) 課題及びその対策②

下半盤からの湧き出しにより路盤の泥濁化が発生し、坑内重機・車両の走行に支障をきたした(写真-6)。

また、地下水水位低下を目的として水抜きボーリングを実施して、集水を行った。しかし、削孔時にくり粉が集水管の口元に返って来ず、削孔が困難になり、また湧水が集水管から地山の脆弱部に逸走して、地山の流出や側壁背面に空洞や変状が発生した(写真-7)。

対策として、横断側溝による釜場排水を施工した。下半切羽から後方20 m以内に、インバートコンクリート下面より500 mm下(深さ約2 m・幅1 m)まで掘削し、横断部は割栗石に置き換え、両土平に釜場を約20 m毎に設置した(図-4)。トンネル掘削が突っ込み(2.5%の下り勾配)施工であったため、坑口側から切羽側に流れてくる湧水を遮断することで路盤の泥濁化を防止することができ、かつ切羽側の地下水水位を低下させることで作業効率や安全性が向上した。さらに、下半切羽から30 m以上離れると濁度が低下し、清濁分離も可能となった。

(3) 課題及びその対策③

インバート掘削時の湧水処理によるサイクルタイムの

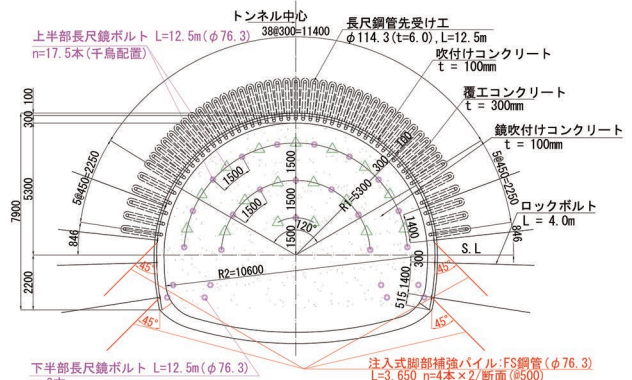


図-3 支保パターン図



写真-4 湧水抑制材(水発泡ウレタン)固結状況



写真-5 下半切羽崩落・空洞状況



写真-6 路盤泥濁化状況



写真一七 水抜きボーリングによる側壁崩落状況

増大やインバート切羽面の崩落、インバート栈橋支持地盤の沈下による安全性の低下が懸念された。インバート掘削前に湧水把握のための試掘を実施した結果、坑口から900m~1,300mには、富士山の伏流水による湧水が恒常的に発生していた。

上下半掘削時は、対策②の横断側溝にて下半盤（施工基盤）より約1m下まで地下水位を低下させ、対策①の止水注入工法にてトンネル外周を止水することで安全に掘削することができた。しかし、インバート掘削時は掘削底面よりさらに深く地下水位を低下させる必要が生じた。

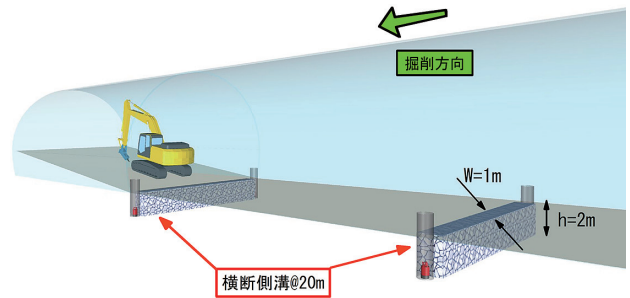
対策として、インバートコンクリート下面より500mm下に仮中央排水工を実施した（図一五）。トンネルセンターに幅600mmで掘削し、シングルプレスト管（Φ150有孔管）を設置し、深さ500mmのフィルター層（割栗石40-80）を形成し、湧き出た湧水をインバート施工箇所より最大50m前方へ導水し、強制排水した。

これにより、施工当初は、インバート施工1サイクル（10.5m/BL）毎に特別な湧水処理することなく、掘削箇所より前方へ湧水を導水することができた。しかし、湧水が多量にあると仮中央排水工を伝ってインバート掘削面に逆流し、インバート切羽側の地山の崩壊を招く事態が発生したため、仮中央排水工を中断した。

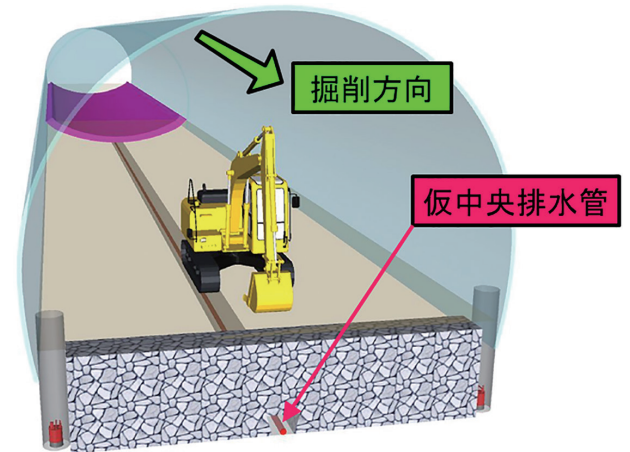
そこで、1サイクル（10.5m/BL）毎にインバート下面にシングルプレスト管（Φ150有孔管）を設置し、地下水位を低下させて湧水処理する方法（最大6時11kwポンプ2系統設置）に変更した。仮中央排水管は先行した上り線で最大4条、後行の下り線で最大1条設置し、切羽面の崩落やインバート栈橋支持地盤の沈下を防止することができ、安全に掘削することができた（写真一八、図一六）。

§5. 下り線変状

第4章に示した対策を実施しているにもかかわらず、地下水位上昇により、トンネル掘削前の地山に空洞や緩み領域が広範囲に拡がり、切羽から20m後方の約30m区間で上半左側の支保工が最大80cm沈下し、50cm内



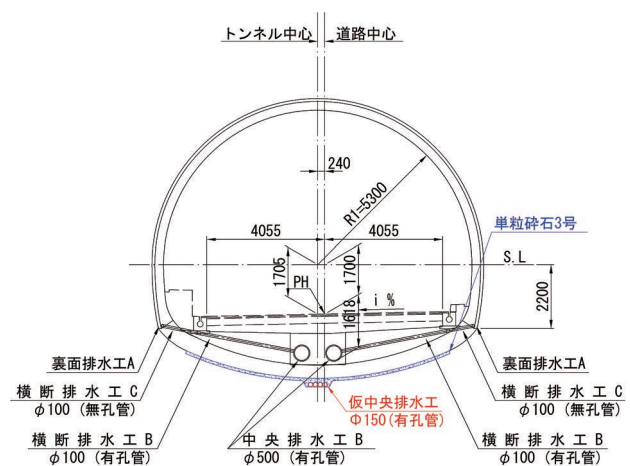
図一四 横断側溝設置全景



図一五 仮中央排水施工全景



写真一八 仮中央排水管設置状況



図一六 インバート下面排水管断面図

側へ押し出される変状が発生した（写真-9）。

そこで、変状対策工として、上半の増し吹付コンクリート、サイドパイル、脚部パイル、坑壁背面の空洞充填を実施した。想定していた以上にトンネル背面地山のゆるみ領域の拡がりが生じていたため、注入作業に5か月を要し、掘削再開までに合計約8ヶ月を要した（写真-10、表-1）。縫返し掘削は、変状から想定される作用荷重に耐えうるDIIパターン（HH-154、吹付け厚200mm）に一次インバートを採用し、閉合構造とした。将来の維持管理段階において、多量湧水箇所での復水により地下水位が上昇し、舗装路面やトンネル本体の機能に影響することがないように、インバート形状も含めて以下の構造変更を行った（図-7）。

- ・横断排水工の増設（当初設計設置間隔50m→25m）
- ・中央排水工の断面拡大（当初Φ300 1条⇒Φ500 2条）

縫返し中、梅雨時期を迎え、トンネル天端からの湧水の増加で地山内の水みちが変わり、土砂混じりの泥水が流出し、新たな空洞が発生したため、再度空洞充填しながら縫返し掘削を行い約4ヶ月要した（写真-11、図-8）。

§6. まとめ

本トンネルで検討・実施した湧水対策工比較表を表-

2にまとめる。各課題に対して共通していえることは、地下水位が高いとトンネルの施工が困難になるということであった。その課題に対して、横断側溝や仮中央排水工



写真-10 変状対策完了

表-1 変状対策工数量一覧

項目	本数	シリカレジン 注入量 (kg)	水発砲性ウレタン 注入量 (kg)	摘要
サイドパイル	112	72,756.9	47,965.9	STK400 Φ76.3 L=6000
空洞充填工	309	451,687.4	86,885.4	中空式鋼管 Φ27.2 L=3000
脚部補強工	112	207,469.6	51,228.5	STK400 Φ76.3 L=3650



写真-9 下り線支保工変状状況



写真-11 縫返し完了

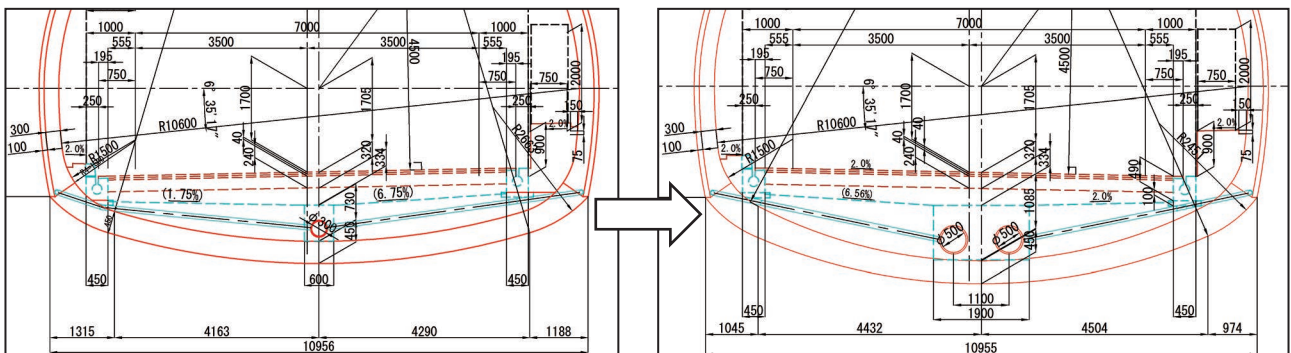
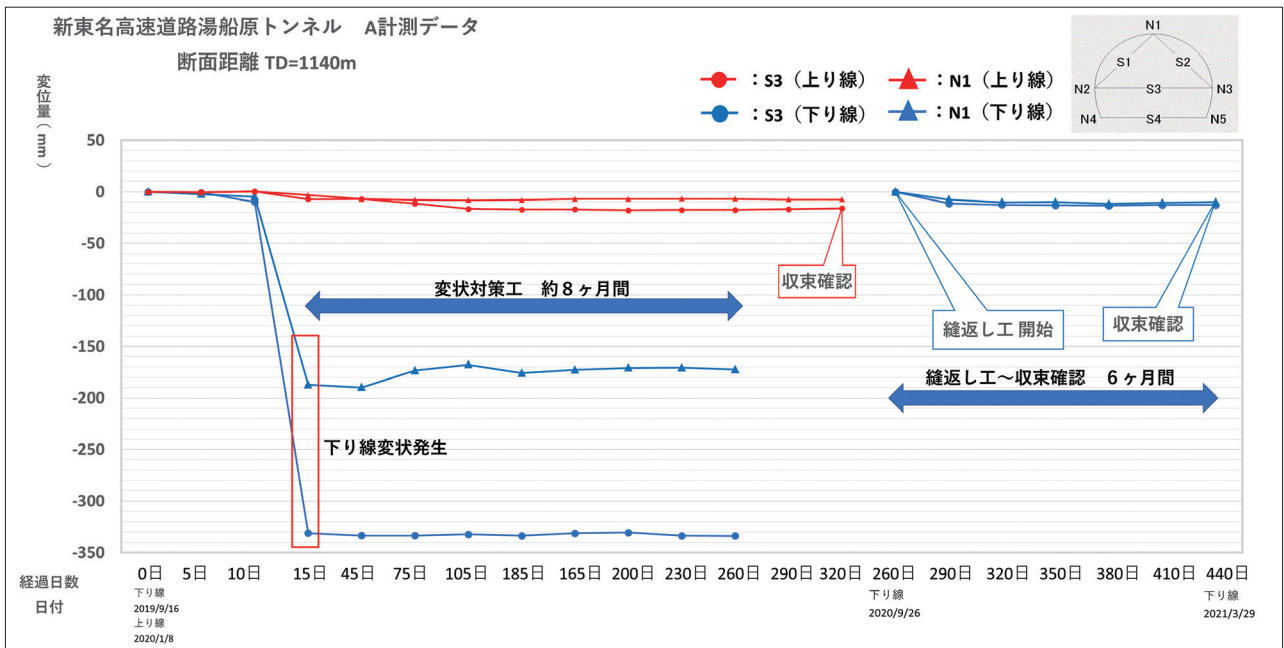


図-7 変状部構造変更図 (左: 変更前, 右変更後)



図—8 先行した下り線変状箇所と同一断面の上り線の経時変化図

表—2 湧水対策工比較表

湧水対策工	排水工法							止水工法	
	水抜きボーリング	坑内水平水抜き調査ボーリング	水抜き坑	横断側溝による釜場排水	ウェルポイント	ディーブウェル	仮中央排水工	注入材をシリカレジンから水発泡ウレタンに変更による止水注入工法	インバート早期施工
比較的良好に採用される対象地山	硬岩、軟岩、未固結	硬岩、軟岩、未固結	硬岩、軟岩、未固結	脆裂性硬岩、軟岩、砂質性地盤	未固結	未固結	硬岩、軟岩、未固結	硬岩、軟岩、未固結	硬岩、軟岩、未固結
施工設備	通常のトンネル機械・設備で施工可能	専用機械・設備が必要 ロータリーバーカッションによる二重管削孔	別途小断面トンネル施工機械が必要	通常のトンネル機械・設備で施工可能	専用機械・設備が必要	専用機械・設備が必要	通常のトンネル機械・設備で施工可能	通常のトンネル機械・設備で施工可能	通常のトンネル機械・設備で施工可能
概算工費	○	○	×	○	△	△	○	△	○
概算工期 (500mあたり)	2.3日(55時間) 3~4時間/回(左右2箇所) FS鋼管(STK400, φ76.3)@12m/箇所 (500m/9m=56箇所)	18日(432時間) 72時間/回(1箇所) 集水保孔管(SGP40A L=100m/回)	約10ヶ月 (50m/月連)	5日 6時間/箇所 (@30m/箇所) (500m/30m=17箇所)	約10ヶ月・@0.5m	約1ヶ月 5箇所 (@100m/箇所)	約24日 48箇所 (@10.5m/箇所)	0日 (追加工期延伸なし)	約6ヶ月 (@10.5m/BL:3日) 全線鉄筋区間
当該トンネルでの施工の有無	○	○	×	○	×	△	○	○	×
当該地山における効果	・集水出来る時もあつたが、削孔時にくり粉が鋼管の口元に返って来ず削孔が困難となった。 ・削孔することで、地山を傷めてしまい、削孔水と混じり砂となって地山が流出した。それにより、鋼管内に集水することができず、坑壁背面に空洞も発生した。	・集水は出来る時もあつたが、削孔時にくり粉が鋼管の口元に返って来ず削孔が困難となった。 ・湧水が集水管から地山の脆弱部に滲走して地山の流出や坑壁背面に空洞や変状が発生した。	-	・下半切羽から約20m以内に下半盤からインバート下面より500mm程(深さ約2m)掘削し、釜場を設置。施工間隔は@20~30m。 ・トンネル掘削が突っ込み施工であつた為、坑口から切羽に流れてくる湧水を遮断することで、路盤の泥準化を防止することができ、且つ切羽側の地下水位を低下させることで、作業効率や安全性が向上した。 ・下半切羽から30m以上離れることで清濁分離も可能となった。	・実際の湧水量から算出した透水係数Kは解析モデルより、 $K=6.7 \times 10^{-2} (m/s)$ となる。 ・トンネル延長20m区間で1箇所あたりポンプで排出している湧水量60m <sup>3</sup> /hに対してウェルポイント1本あたり1.2~1.5m <sup>3</sup> /hの集水能力しか無い為、施工数量が膨大となり、作業効率が悪い、湧水量が多い為、地下水位低下が困難と判断し不採用。	・地表からの施工(アクセスや排水処理設備の設置ができなかった為、不採用。	・1サイクル毎に湧水処理することでサイクルタイムは増大したが、インバート切羽面の崩落やインバート棧橋支持地盤の沈下を防止することができ、安全に掘削することができた。 ・コンクリートの品質も確保できた。	・切羽の天端・鏡・側壁の崩落に対して長尺鋼管先受工や長尺鏡補強工・脚部補強パイルの注入材を、シリカレジンから水発泡ウレタンに変更することで、湧水による地山の劣化・緩みを最小限にすることができた。 ・当該切羽でモデル施工を実施し、削孔後の湧水量20L/min以上だとシリカレジンが未反応で流れてしまった為、20L/minを基準にして注入材を選定した。	・湧水箇所において本設のインバートを施工することで、湧水を遮断することができ、且つ早期にトンネル変位抑制・地山の劣化防止効果も期待できる。
総合評価	△	△	×	○	×	×	○	○	○

による強制排水にて施工箇所の地下水位を下げることは効果的であった。多量湧水条件下の注入作業においては、湧水抑制材(水発泡ウレタン)を使用することで地山を確実に改良することができた。試験施工をすることで、湧水抑制材使用の閾値を20 L/minとし、注入材の選定を早期にすることができた。

2027年、新東名(秦野IC(仮称)~新御殿場IC)開通に向けて、全線25kmにて工事最盛期を迎えており、さまざまな現場課題を克服しながら鋭意工事を進めている。本稿が今後施工される同様の地形・地質条件のトンネル設計・施工を行ううえでの一助となれば幸いです。