

# 小土被りの脆弱地山における補助工法の設計と施工に関する一考察

山田 浩幸<sup>1</sup>・山本 浩志<sup>2</sup>・北野 敬太<sup>3</sup>・平松 丈<sup>4</sup>・東條 眞吾<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 正会員 (株) 鴻池組 大阪本店 寺山トンネル工事 (〒788-0784 高知県宿毛市山奈町山田 1325-1)  
E-mail:yamada\_hy@konoike.co.jp

<sup>2</sup> (株) 鴻池組 大阪本店 寺山トンネル工事 (〒788-0784 高知県宿毛市山奈町山田 1325-1)  
yamamoto\_hs@konoike.co.jp

<sup>3</sup> (株) 鴻池組 大阪本店 寺山トンネル工事 (〒788-0784 高知県宿毛市山奈町山田 1325-1)  
kitano\_kt@konoike.co.jp

<sup>4</sup> (株) 鴻池組 大阪本店 寺山トンネル工事 (〒788-0784 高知県宿毛市山奈町山田 1325-1)  
hiramatsu\_jo@konoike.co.jp

<sup>5</sup> 四国地方整備局 中村河川国道事務所 (〒787-0015 高知県四万十市右山 2033-14)  
toujou-s8811@mlit.go.jp

中村宿毛道路 寺山トンネルの起点側坑口部 (工事終点側) は小土被りの脆弱な地山が180m続き、当初設計では切羽安定対策として長尺GFRPフォアパイリングが計画されていた。

掘削時の地山状況は当初想定より悪く脆弱な状態で地質の変化が著しかった。掘削時には三次元切羽前方探査に基づく地質予測を行い、適切な補助工法の選定・実施を行った。小口径多段式長尺鋼管フォアパイリング、長尺鏡ボルト、吹付けインバートによる早期閉合といった補助工法を駆使して施工を無事完了した。本報告では、掘削時に採用した補助工法の選定と施工時の効果について述べる。

**Key Words:** Mountain Tunnel, Probing ahead of face, Numerical analysis, Auxiliary method, Construction Information Modeling

## 1. はじめに

中村宿毛道路は、四万十市 (旧中村市) ~ 宿毛市間の円滑な交通確保と道路冠水による通行止めの解消、四万十市の渋滞の解消を目的とした延長 23.2 km の道路である。寺山トンネル工事は、宿毛市平田町中山地先において、延長 L=485m の山岳トンネルを NATM により建設するものである (写真-1)。

工事終点にあたる起点側坑口部は 1D 程度 (D: トンネル幅 14m) の小土被りが 180m も続き、地表面は一部、沢地形や偏圧地形を呈していた。地質的には当初設計よりも悪く、砂岩の玉石 (人頭大) を含む泥岩主体の混在岩 (メランジェ) であり、スレーキング性が高く破砕質で脆弱な状況であった。トンネル掘削時には、小口径多段式長尺鋼管フォアパイリング、長尺鏡ボルト、吹付けインバートによる早期閉合といった補助工法を駆使し施工を完了した。

## 2. 工事の概要

### (1) 地形・地質概要

工事始点の終点側坑口から約75m付近に土被り9m (0.7D : Dは掘削幅) 程度の沢部 (区間長L=30m) があり、工事終点の起点側坑口部には約180mにわたり土被り1D程度の区間が連続していた。



写真-1 トンネル掘削状況<sup>1)</sup>

本トンネルの地形・地質の特徴を以下にまとめた。

- ① 終点側坑口部からトンネル延長70m付近の沢部にかけて地表に崩落地形が多く存在し、土被りも小さく、地質は石灰質混じりの泥岩地山で亀裂が発達し、脆弱な状態で部分的に50L/min程度の湧水があった。
- ② トンネル中間部から起点側坑口部にかけては、リニアメント（線状の地形の特徴）に一致する沢地形が多く存在し、トンネルの地山は砂岩の玉石を含む泥岩で亀裂が細かく、破碎質な状態で掘削時の緩みの影響を受けやすい地質であった（図-1）。

**(2) 施工概要**

本トンネルの工事概要を表-1に示す。

事前の地質踏査の結果や終点側掘削時の地山状況から、起点側坑口部も当初より脆弱な地山であることが想定されたため、補助工法の穿孔データを用いた切羽前方探査を行い、その結果に基づき天端安定のための補助工法として、多段式小口径長尺フォアパイリングを検討・実施した。

詳細は3章、4章で述べる。

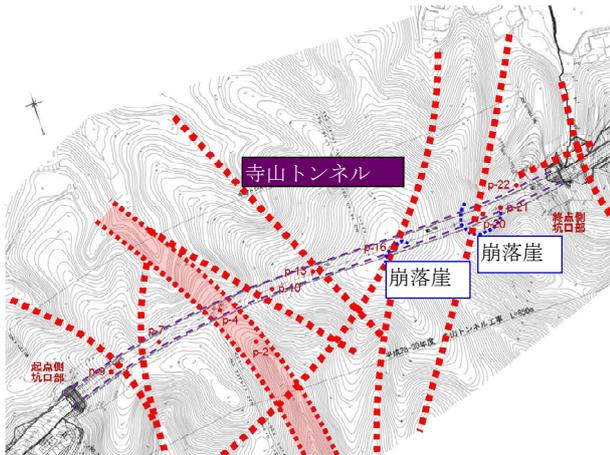


図-1 トンネル周辺リニアメント（赤破線）<sup>2)</sup>

表-1 工事概要

工事名称	中村宿毛道路 寺山トンネル工事
工事場所	高知県宿毛市平田町中山地先
工期	平成29年3月～平成31年5月
発注者	国土交通省 四国地方整備局
施工者	株式会社 鴻池組
工事内容	延長 L=485m
	断面 掘削断面積A=105.7㎡（盤下げ含む） 2車線道路トンネル
	施工法 NATM
	掘削方式 機械掘削（ロードヘッダ）
	掘削工法 DIIIバターン、DIバターン（補助工法併用）
	補助工法 天端安定対策：小口径長尺鋼管フォアパイリング (L=12.5m, φ76.3mm, @450mm, 打設間隔9m) 小口径長尺鋼管フォアパイリング（多段式） (L=13.5m, φ76.3mm, @450mm, 打設間隔5m) 鏡面の安定対策：鏡吹付（t=50mm） 長尺鏡ボルト (L=13.5m, φ76.3mm, @1.5m, n=6本/断面) 脚部の安定対策：YMウイングコーン（φ485mm） 吹付けインバート（t=200mm,）

トンネルの土被りが30m（2.2D：Dはトンネル幅）をきったあたりから、写真-2に示す破碎質な地山となり、天端および脚部の沈下が大きく、写真-3に示す鏡吹付の滑落や写真-4に示すトンネル支保の変状（ロックボルトプレート変形、吹付けひび割れ）を生じた。応急対策として増しロックボルトや支保工連結を行ったが、収束傾向が見られず、結果的には吹付けインバートによる閉合により変位を収束させた。以降も沈下卓越の変位が続き、鏡面の安定対策として長尺鏡ボルトを施工するとともに、吹付けインバートによる早期閉合（切羽離れ5mで閉合）のサイクルにより掘削を継続した。

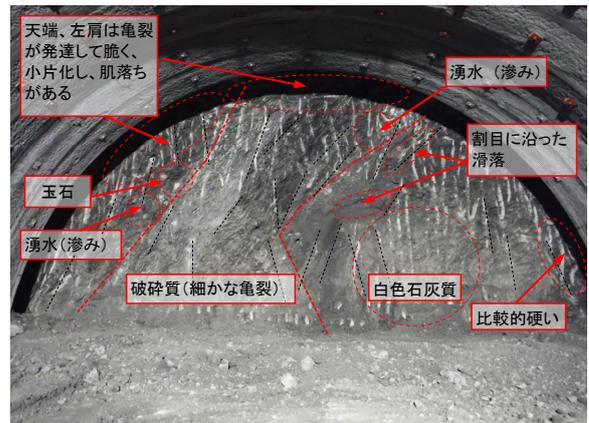


写真-2 切羽状況（支保 No. 295）<sup>2)</sup>



写真-3 鏡吹付滑落状況<sup>2)</sup>



写真-4 トンネル支保変状状況<sup>2)</sup>

### 3. 切羽前方探査による地質予測

#### (1)切羽前方探査の概要

終点側では、通常の切羽前方探査の仕様で、トンネル切羽面の3箇所(天端、左右) L=30mの穿孔を行い前方地山の地質予測を行ったが、起点側では、事前地質踏査結果および事前の地質調査結果から、土被りも小さく地山自体が脆弱であり、湧水の発生も懸念されたこと、1D程度の小土被りが長く続き、上部には沢地形や偏圧地形が存在していることから、トンネル掘削時の緩みの影響が懸念された。

実際の地山が破砕質で脆弱であり、トンネル掘削時に不測の切羽(鏡面)の肌落ち等も見られたため、危険予知および補助工法の事前検討(採用区間等)・妥当性確認のため、トンネル掘削に先行して切羽前方探査を実施した(写真-5)。

また、起点側坑口部は、当初より補助工法(長尺フォアパイリング)が計画されていたことから、削孔費用とサイクルの低減といった観点から補助工法施工時の穿孔データを用いた切羽前方探査を行い、より詳細な地質予測を実施した(写真-6)。なお、削孔径はφ76.3mmの小口径鋼管打設用のユニットビットφ90mmを使用した。トンネル掘削時には、速やかに追加対策が行えるよう図-2に示した切羽前方探査に基づく補助工法採用フローを作成して、事前に施主と協議を行い、切羽状況や計測結果を参考にし対応した。



写真-5 切羽前方探査 実施状況 (終点側)



写真-6 切羽前方探査 実施状況 (起点側)<sup>2)</sup>

また、探査の評価精度を高める目的で、切羽前方探査により得られた穿孔エネルギーを指標にして、穿孔エネルギーから三次元クリギング法を用いて穿孔エネルギーの空間予測を行い、次に、指定した領域に対してボクセルモデル(三次元解析メッシュ)を生成し、穿孔エネルギーの空間予測結果から各節点(座標)に該当する穿孔エネルギー値を付与する。最終的に、三次元統合可視化ソフトのポスト機能を用いて、解析結果として穿孔エネルギー分布を三次元で表現した。図-3に切羽前方探査の精度向上手順と穿孔エネルギーの三次元分布の表示例を示す。

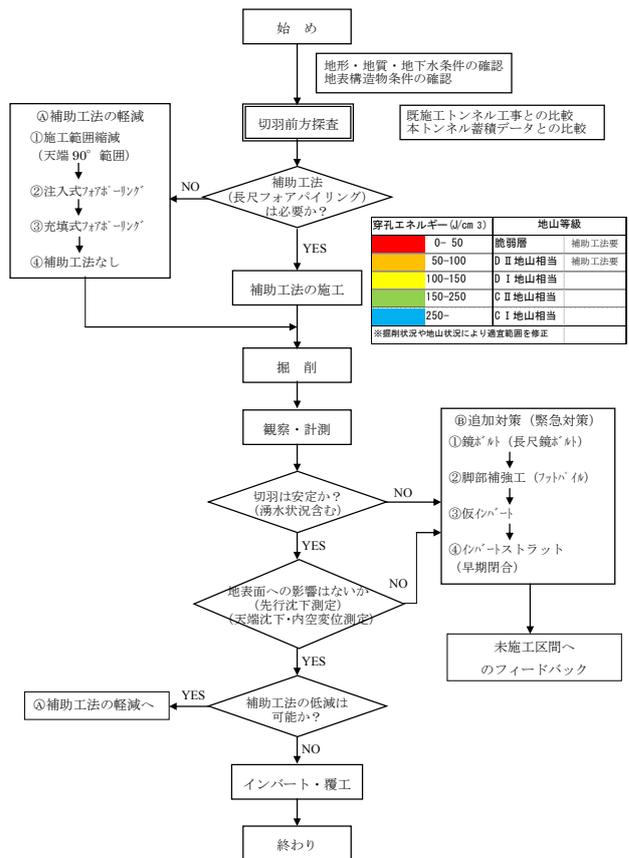


図-2 切羽前方探査に基づく補助工法採用フロー<sup>2)</sup>

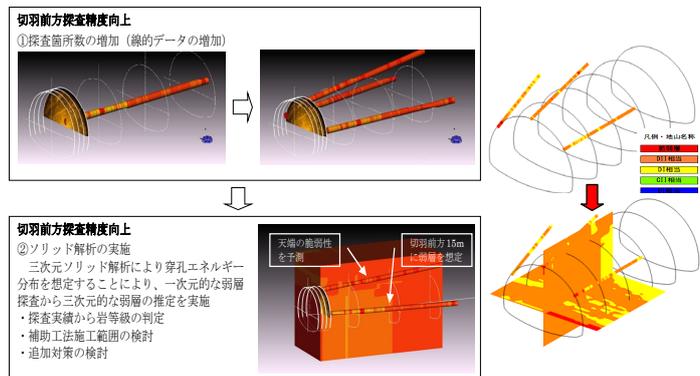


図-3 三次元解析による精度向上手順および表示例<sup>1)</sup>

## (2)切羽前方探査の評価

図-4に切羽前方探査結果の一例を示す

横軸にTD：トンネル延長を、縦軸に穿孔エネルギーを示し、図中にはTD295で実施した12m間の探査延長における穿孔エネルギーの変化とTD305mで実施した12m間の探査延長における穿孔エネルギーを併記している。

これらの探査結果に対する考察を以下に示す。

- ① 図-4のTD305に着目すると、TD295からの探査結果では平均の穿孔エネルギーが91.9J/cm<sup>3</sup>に対して、TD305からの探査結果では、同じ地点で54.2J/cm<sup>3</sup>に低下している。
- ② また、穿孔エネルギーの低下の範囲は約5m範囲であり、トンネル掘削の影響で切羽前方5mの範囲が緩んでいることが推察される。
- ③ 探査区間の穿孔エネルギーは全体的に100J/cm<sup>3</sup>程度であり、前述の補助工法採用フローで補助工法が必要となる地山等級と判断される。  
なお、部分的に130 J/cm<sup>3</sup>の箇所もあるが、これは切羽に点在する玉石層の影響と考えられる。

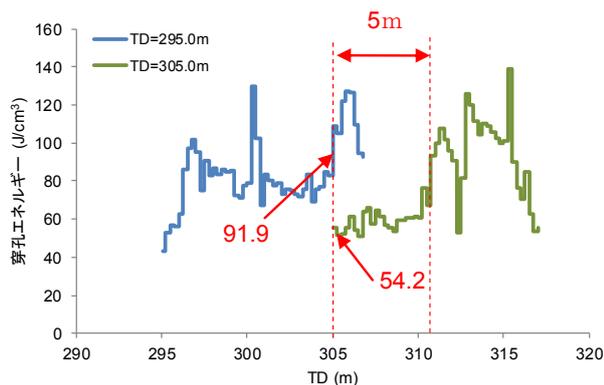


図-4 切羽前方探査結果 (TD295-TD317) 2)

また、図-5に補助工法施工範囲とトンネル全線の穿孔エネルギーの分布を示す。トンネル切羽は全体的に脆弱な状態であったが、中間部のD I - b 区間では比較的高い穿孔エネルギーを示し、土被りの小さい終点側の沢部や起点側の補助工法区間では、概ね100J/cm<sup>3</sup>以下の穿孔エネルギーであった。探査結果について大局的に見ると、トンネル全体の地形を反映し、土被りと穿孔エネルギーの相関が見られた。

## (3)CIMの導入と施工へのフィードバック

施工では、図-6に示すようなCIM (Construction Information Modeling) による三次元地質モデルを構築し、掘削時の切羽観察結果による修正を行いながら、切羽前方探査の結果や施工情報との関連づけにより施工管理に活用した。また、1スパン12mごとの切羽前方探査結果に基づく岩判定をこまめに実施し、補助工法の必要性について検討するとともに、切羽状況や計測結果を参考にして、長尺鏡ボルトや吹付けインバートによる早期閉合を実施した。現場ではCIMによる地山モデルを構築し、切羽観察結果に基づき修正しながら切羽前方探査の結果と関連づけを行い、切羽前方地質予測に活用した。

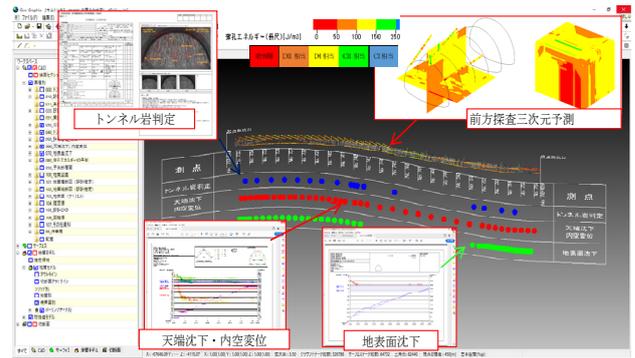


図-6 CIMによる施工データ管理イメージ 3)

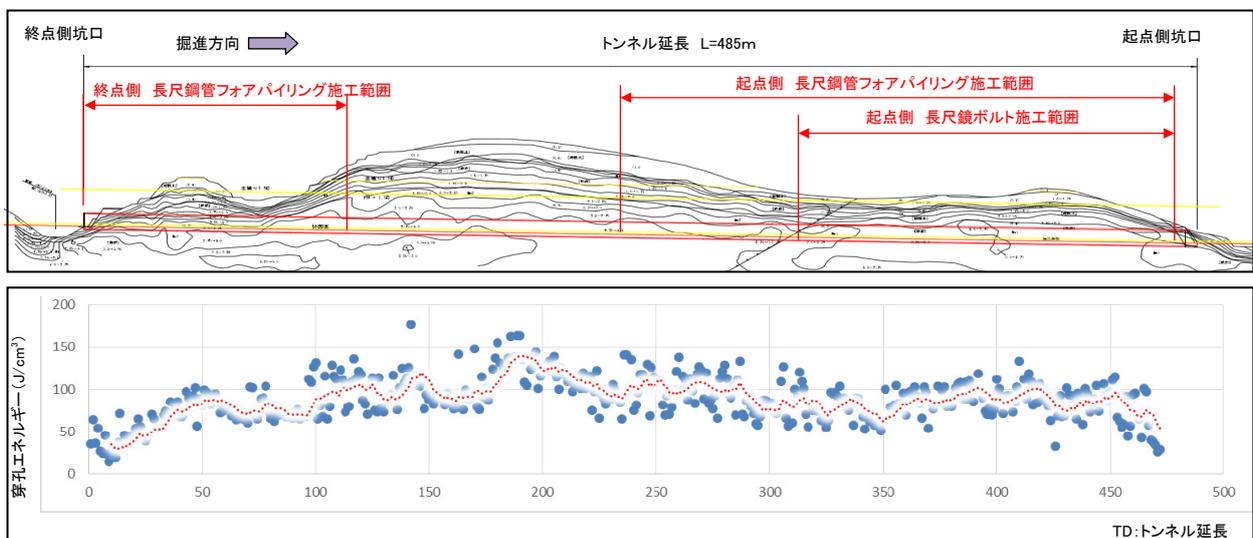


図-5 切羽前方探査結果

## 4. 補助工法の施工

### (1)天端安定対策

終点側坑口部では1シフト30mの探查区間の地質予測に基づき、天端安定対策として小口径長尺鋼管フォアパイリングを追加施工した。補助工法の施工は、1シフト9m、31本/断面（起点側設計）のパターンで実施したが、本トンネルの縦断勾配が2%のつこみであり、鋼管打設のための削孔は上向き7度で施工する必要があるため、天端の安定は確保できたが、写真-7に示すとおり先受け鋼管下の地山が肌落ちし、結果的に余掘りとなり、緩みが大きくなる要因となった。そこで、この課題を改善するため、起点側では、図-7、図-8に示すように、鋼管長を1m長くしてラップ長3.5mを確保した上で、1シフト5mとし、15本/断面と16本/断面を交互に施工する多段式に変更し、余掘りの低減を図った。また、鋼管の配置を多段式とすることで、注入による改良ゾーンが拡がりトンネル周辺地山の改良を確実に実施できた。

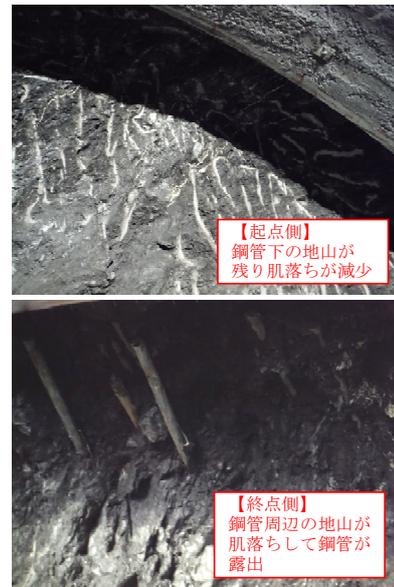


写真-7 鋼管下の肌落ち状況<sup>2)</sup>

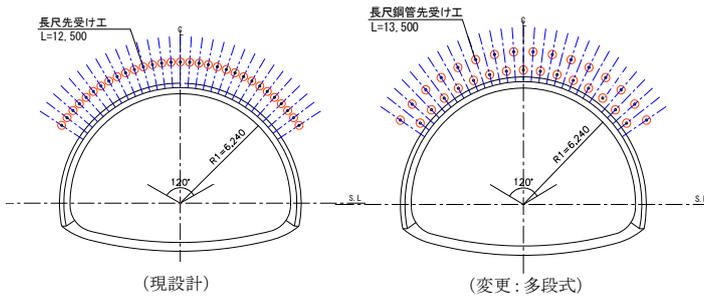


図-7 長尺鋼管打設パターン<sup>1)</sup>

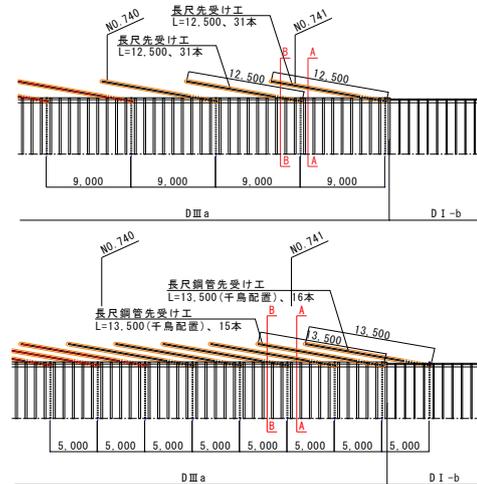


図-8 長尺鋼管打設パターン（縦断面）<sup>3)</sup>

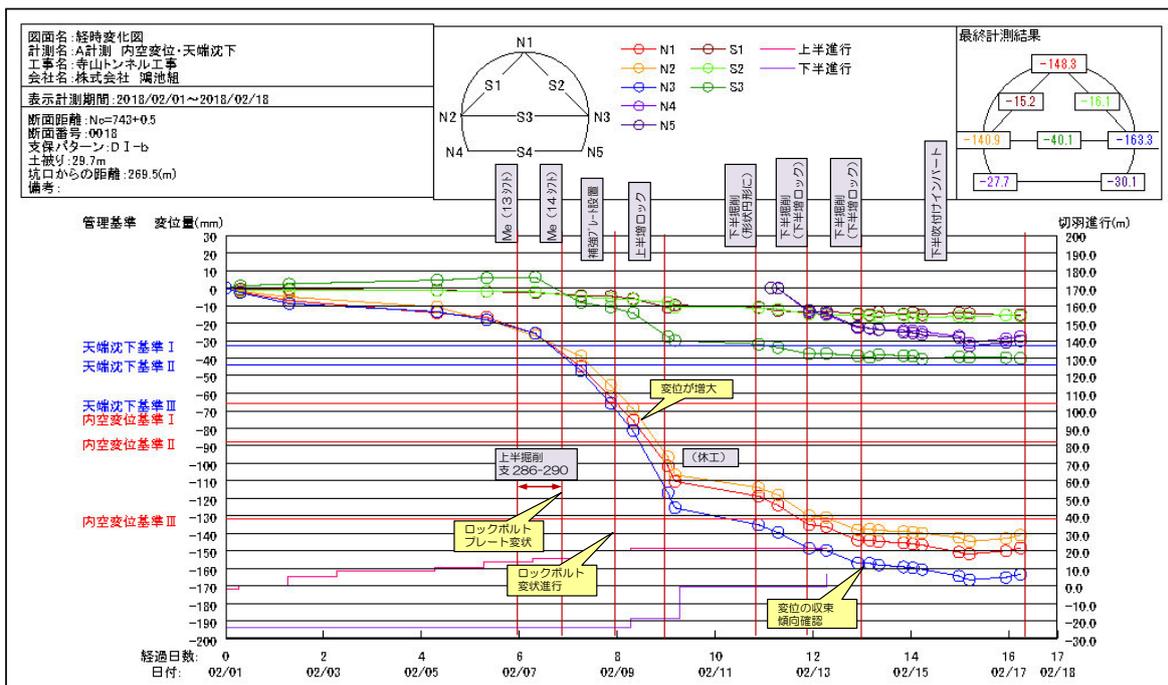


図-9 坑内計測結果<sup>1)</sup>

## (2)変状区間の対策

前述の変状箇所においては、前頁の図-9に示す計測結果に基づき地山の挙動を確認しながら、以下の手順で応急対策を実施した。

- ①上半増しロックボルト
- ②支保工連結（プレート設置）
- ③下半掘削＋下半増しロックボルト
- ④下半吹付けインバートによる閉合

結果的には、①～③では変位の増加傾向が見られ、吹付けインバートによる閉合により収束させた。

## (3)起点側坑口部の施工

変状区間の応急対策後も沈下卓越の変位傾向が見られ、変位量が注意レベルⅢを超える大きな値であったため、支保パターンをDⅢaへ変更し、支保剛性を高めるとともに吹付けインバートによる早期閉合（切羽離れ5mで閉合）による掘削サイクルに変更した。写真-8に補助工法の施工状況を示す。

## (4)縫返しの施工

D I パターンで施工した支保No.230(No.745+0.4)～支保No.296(No.741+14.4)L=66m区間にかけて、大きな変位の発生により必要内空を侵す状況となった。その要因を以下に示す。トンネル掘削時の状況から全体的に脆弱な地山状況の中で、

- ① トンネル切羽右側(支保No.250)から左側(支保No.290)にかけ破碎帯が出現したこと。
- ② 土かぶりが小さく十分なアーチアクションが得られなかったこと。
- ③ 支保工足元の地耐力不足に伴う大きな沈下を生じたこと。
- ④ 施工時の支保パターンのD I (H125)では結果的に支保の剛性が不足したこと。

これらの要因が重なりあって支保の変状を伴う大きな変位を生じた。

変状区間の一部では、縫返しにより内空の確保が必要となった（写真-9）。

縫返し区間としては、出来形管理基準の規格値である幅w（全幅）-50mm、高さh（内法）-50mmを考慮して、縫返し必要区間を定めた。

縫返し工の方針としては、支保構造を強化するためDⅢパターン（坑口部支保構造）に変更し、天端に関しては既設の小口径長尺鋼管フォアパイリングの撤去が必要となるため、天端の地山安定を確保する目的で写真-10に示す注入式フォアポーリング（ピッチ1.0m）を採用した。

また、縫返し作業に伴い縫返し必要区間の拡大を抑止する目的から、支保No.230（No.745+0.4）～

支保No.254（No.743+16.4）のL=24m区間に関しては、吹付けインバートによる早期閉合を追加実施し、支保No.215（No.745+15.4）～支保No.235（No.744+15.4）については変位抑制対策として、増しロックボルトと補強プレートによる支保工連結を実施した。

これらの追加対策工の実施により、縫返し工の施工を無事完了した。



写真-8 トンネル施工状況（補助工法）<sup>1)</sup>



写真-9 縫返し掘削状況



写真-10 注入式フォアポーリング施工状況

## 5. 新技術の導入

トンネル施工に伴う上部斜面の挙動や既施工区間の支保工の安定性に関して、リアルタイムで監視し、作業員の安全を確保する目的から、計測結果を現地で見える化した。なお、作業員に計測値とその表示色との関係に基づく安全性の確認方法を説明し、作業員自ら安全性を確認できるよう指導した。また、トンネル坑内では、大変位箇所切羽監視やインバート片側施工時に変位を直接光の変化で把握できるよう光る変位計を設置した。さらに、覆工コンクリートの確実な充填を確認する目的で光ファイバーによる充填管理を実施した。

以下にそれぞれの概要を示す。

### (1)トンネル坑口部上部斜面監視

終点側坑口部は沢地形を呈しており、ソイルセメントによる盛土により土被りを確保したが、盛土作業時に大雨に伴い、写真-11に示すように上部崖錐層の表層すべりが発生した。

トンネル掘削時には写真-12に示すとおり法面用光る変位計を設置し、常時監視を行った。

また、起点側坑口部においても坑口付け切土時に大雨に伴い法面吹付けが滑落する事態が生じた。

坑門工（明り巻き）施工時およびセントル解体時の上部法面の安定性を確認する目的で終点側の法面用光る変位計を移設し、同様に常時監視を行った。

### (2)トンネル切羽周辺および縫返し時の安全監視

起点側の大変形箇所におけるトンネルの安定性について図-10に示すように光る変位計を設置し、リアルタイムで常時監視した。既施工の支保工の変形に応じて光の色の変化（緑から黄色、赤色へ変化）により、作業員自ら安全性を確認して作業できることから安全性の向上に寄与したと考えられる。また、お盆や年末年始、ゴールデンウィークのように長期の切羽休止時には写真-13に示すように、上半、下半にそれぞれ光る変位計を設置し、休暇中の安定性確認を行うとともに、切羽再開時には安全を確認した上で作業を進めることができた。

### (3)インバート施工時の安全監視

次頁の写真-14に示すように、終点側坑口部のインバートに関しては、工程短縮を目的に片側交互施工を実施したが、インバート掘削後のトンネルの安定性を確認するために、箱抜き用拡幅部に光る変位計を設置し、インバート施工時の安定性を常時監視した。また、起点側の大変形箇所における吹付けインバートによる早期閉合時にも常時監視を行った。



写真-11 終点側坑口部 表層すべり状況



写真-12 終点側坑口部 斜面監視状況

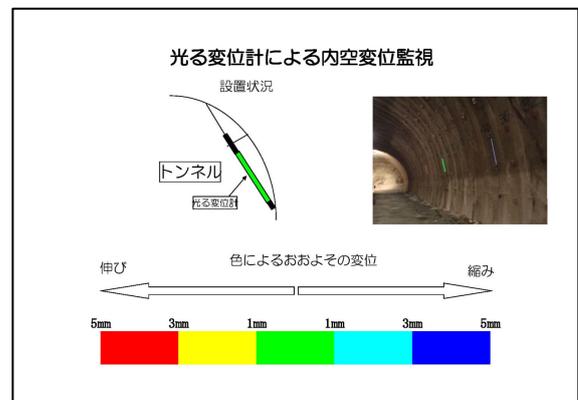


図-10 坑内変位監視看板



写真-13 切羽休止時監視状況

#### (4)覆工コンクリート充填確認

充填状況を確認するために、LS3（光ファイバーセンサー）による充填確認を実施した。充填管理システムは、1対の光ファイバーセンサーに光を送り、コンクリートの充填によりセンサー部分の光が遮断したことを確認することで充填を容易に確認できる装置である。毎回実施する圧力管理に加え、光ファイバーによる充填管理を行うことで、覆工コンクリートの確実な充填が検証できた。なお、縫返し箇所においても光ファイバーによる充填管理を実施し、覆工コンクリートの充填状況を確認した（写真-15）。



写真-14 インバート片側施工時監視状況

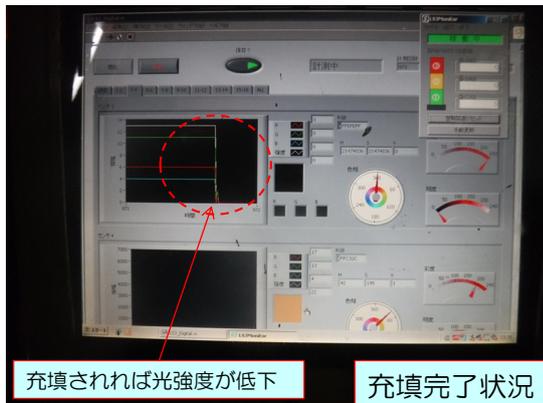


写真-15 覆工コンクリート充填圧力管理状況

#### 6. おわりに

トンネルの施工は2019年5月末現在で無事完了した。今回、小土被りの脆弱な地山において、切羽前方探査を全線で行い、その探査結果を三次元ソリッド解析により精度を高めることで地山挙動に応じた適切な補助工法の検討・施工が可能となった。

また、地山変化の著しい状況の中で補助工法の穿孔データを利用した三次元的な切羽前方地質予測の効果の検証ができ、探査結果の評価から、地山の緩みの程度や範囲を穿孔エネルギーの低下量といった定量的なデータとして確認することができた。

さらに施工では、新技術の安全の見える化に取組み、様々な場面でトンネルの安定性を確認できた。

今回の報告が今後の同種地山条件における工事の参考になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 山田浩幸, 山本浩志, 北野敬太, 藤田浩史: 小土被りの脆弱地山における切羽前方探査に基づく補助工法の施工に関する一考察, 第73回国土学会年次学術講演会, VI-069, pp.137-138, 2018.
- 2) 山田浩幸, 山本浩志, 北野敬太, 藤田浩史: 小土被りの脆弱地山における補助工法の施工と効果に関する一考察, トンネル工学報告集 第28巻, I-38, pp.1-8, 2018.
- 3) 山本浩志, 山田浩幸, 北野敬太, 平松丈, 東條眞吾: 小土被りの脆弱地山における変位抑制対策の検討と施工に関する一考察, 第84回(山岳)施工体験発表会論文集 pp.25-32, 2019.

(2019. 8. 9 受付)

### A STUDY ON DESIGN AND CONSTRUCTION OF AUXILIARY METHOD AT LOW OVERBURDEN AND FRAGILE GROUND

Hiroyuki YAMADA, Hiroshi YAMAMOTO, Keita KITANO, Joh HIRAMATSU and Shingo TOUJOU

Low overburden and Fragile ground is receiving continued 180m in starting parts of tunnel, therefore long length GFRP for-piling was planned as a face stable measure in a design at first. The ground situation was worse than assumption at first and was in the fragile state, and a change in the geological feature was remarkable. When excavating, a probing ahead of the three-dimensional face based on drilling data of auxiliary method was performed, and an additional measure was considered and it was put into effect.

Excavation in a tunnel has been completed safely by introduction of a new technology and appropriate auxiliary method (the multistep long length steel fore-piling, the long length face-volt, and early closure).