

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

山田 浩幸¹・山本 浩志²・北野 敬太³・藤田 浩史⁴

¹ 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

² (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

³ (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

⁴ (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)
fujita_hs@konoike.co.jp

中村宿毛道路 寺山トンネルの起点側坑口部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。

地山状況が想定より悪く, 掘削時には補助工法の穿孔データに基づく三次元切羽前方予測を行い, 追加対策を検討・実施した。実施工では, 補助工法として, 多段式長尺鋼管フォアパイリング, 長尺鏡ボルト, 吹付けインパートによる早期閉合を採用した。

本報告では, 三次元切羽前方地質予測の概要と予測結果に基づく補助工法の施工および計測管理手法について述べる。

Key Words: Mountain Tunnel, Probing ahead of face, Numerical analysis, Auxiliary method, Monitoring measurements

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 の山岳トンネルを建設するものである。

寺山トンネル起点側坑口部は 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。地質的にも砂岩の玉石 (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碎質で脆弱な状況であった。トンネル掘削時には, 天端の安定対策として採用した小口径注入式長尺鋼管フォアパイリング施工時データに基づく切羽前方予測を行い, 追加対策を検討・実施した (写真-1)。

本報告では, 起点側小土被り区間における切羽前方探査結果に基づく補助工法の施工について述べる。

2. 工事の概要

(1) 地形・地質概要

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, 起点側坑口部は約180mにわたり土被り1D程度の区間が連続している。



写真-1 切羽前方探査 実施状況

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、その結果に基づき補助工法を検討・実施した。

詳細は3章、4章で述べる。

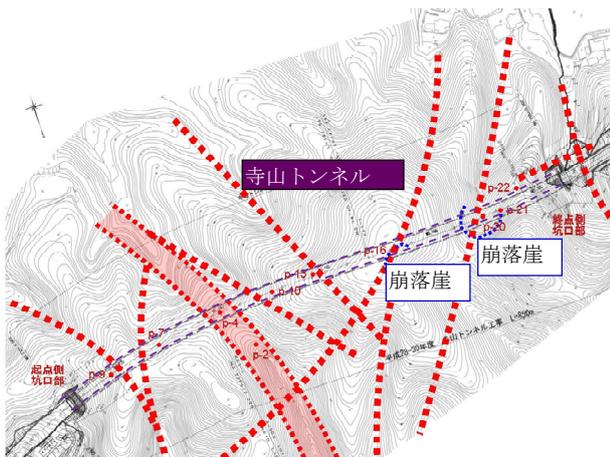


図-1 トンネル周辺リニアメント（赤破線）

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30年10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パターン、DIパターン（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ウィングコーン（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のような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）が見られた。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、切羽安定対策である長尺鋼管フォアパイリングを多段式に変更し、加え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。

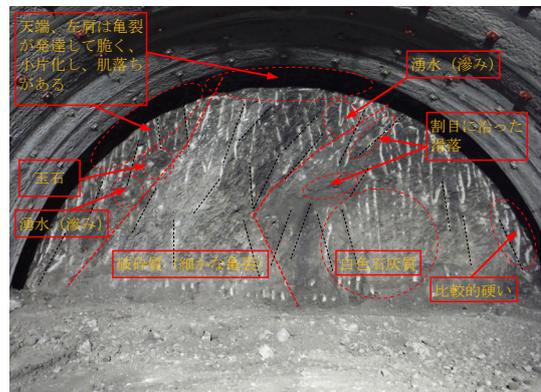


写真-2 切羽状況（支保 No. 295）



写真-3 鏡吹付滑落状況



写真-4 トンネル支保変状状況

3. 切羽前方探査による地質予測

(1) 切羽前方探査の概要

前述のとおり、事前地質踏査結果および事前の地質調査結果から判断すると、起点側坑口部は、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。また、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。

地山が破碎質で脆弱であり、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。

終点側では、トンネル切羽面で3箇所（天端、左右）L=30mの穿孔を行ったが、起点側では当初より補助工法が計画されていたため、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、10mごとにこまめな探査を実施することにより、詳細な地質予測を実施した。

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。

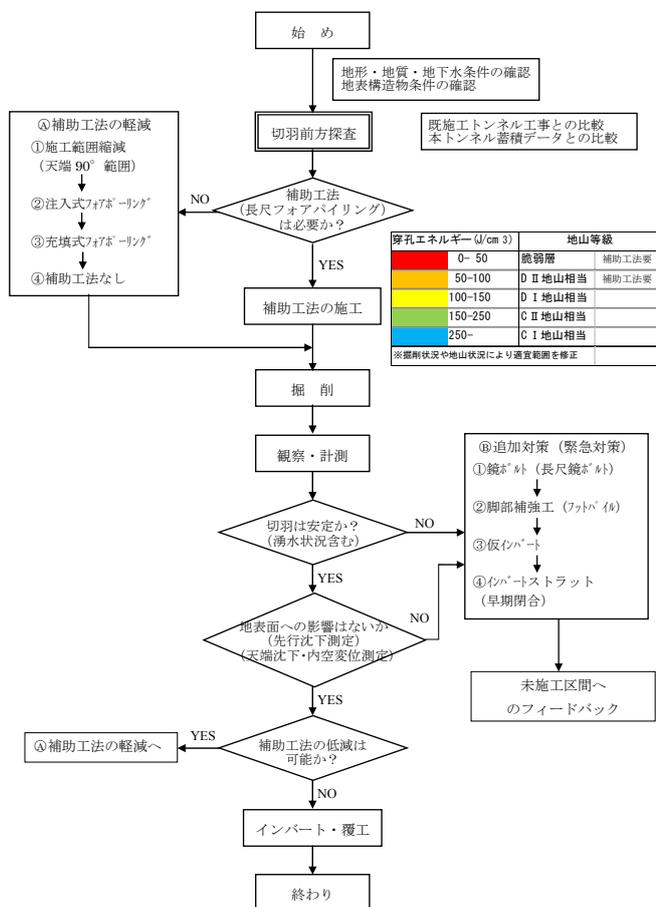


図-2 切羽前方探査に基づく補助工法採用フロー

また、探査の評価精度を高める目的で三次元ソリッド解析を実施した。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。

施工では、トンネル掘削時に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て対応した。

図-3に切羽前方探査の精度向上手順を示し、図-4に穿孔エネルギーの三次元分布の表示例を示す。

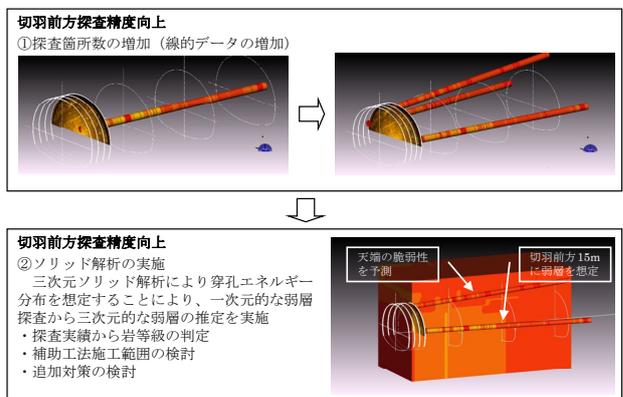


図-3 三次元ソリッド解析による精度向上手順

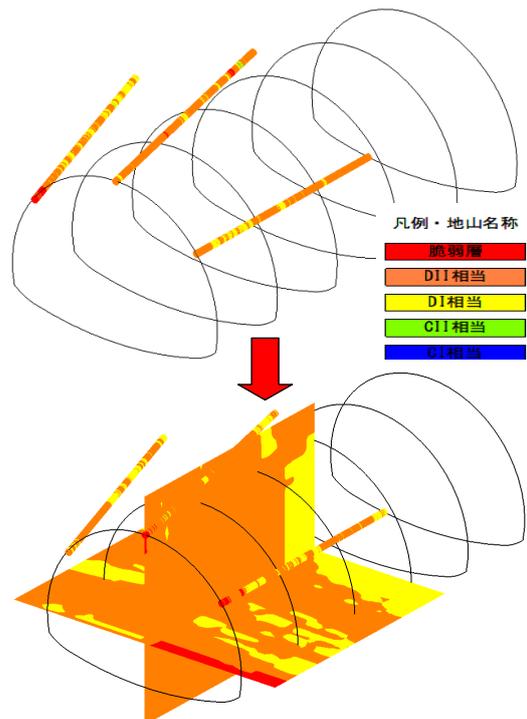


図-4 穿孔エネルギーの三次元分布の表示例

(2) 切羽前方探査の評価

図-5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/cm³に対して、TD305からの探査結果では、同じ地点で54.2J/cm³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/cm³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/cm³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。

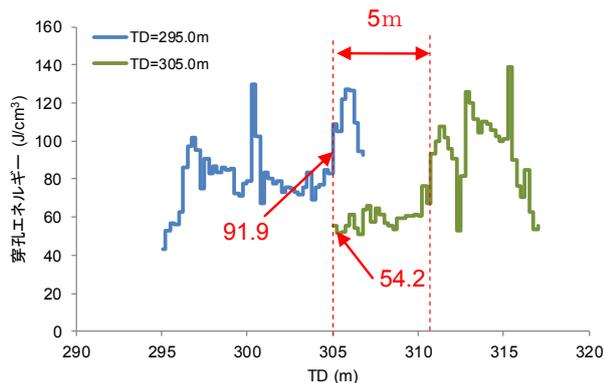


図-5 切羽前方探査結果 (TD295-TD317)

また、図-6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/cm³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) 探査結果のフィードバック

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。

また、切羽探査結果に基づく岩判定を実施し、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。

図-7にCIM（三次元地質モデル）における地層境界面と破碎帯の抽出結果の一例を示す。

CIMの導入により、トンネル周辺の破碎帯の状況を大局的に把握することができた。

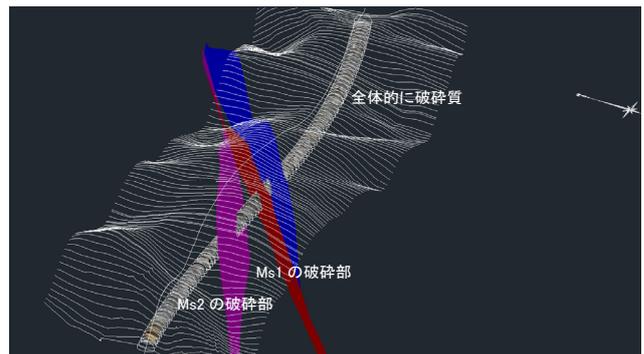


図-7 CIM（三次元地質モデル）と地層境界面

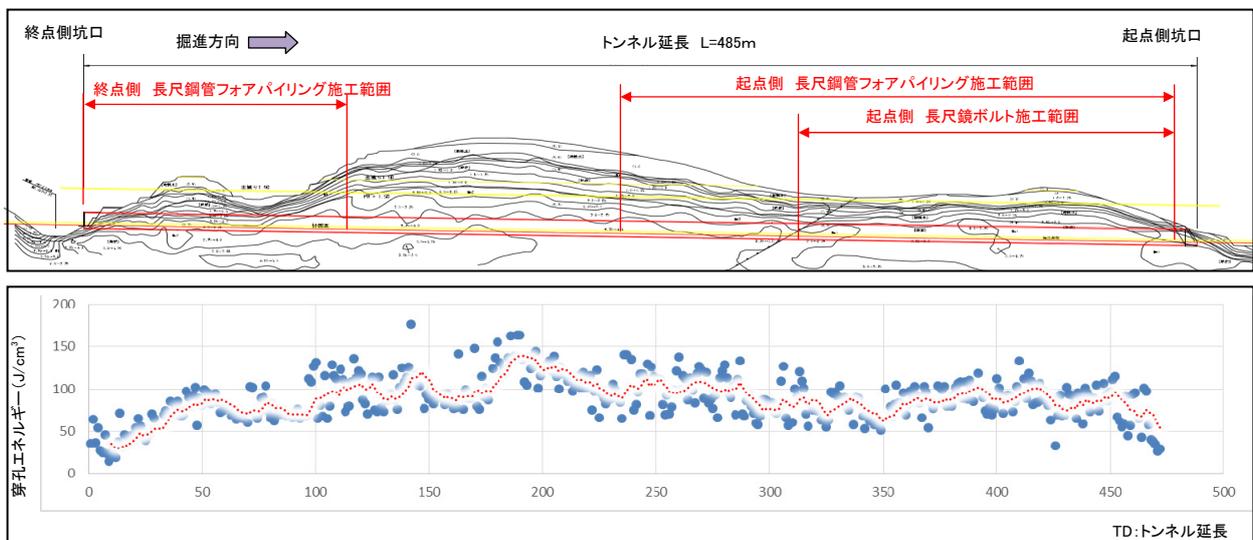


図-6 切羽前方探査結果

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の探査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%のつっこみであり、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なかったもの、写真-6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-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することができた。

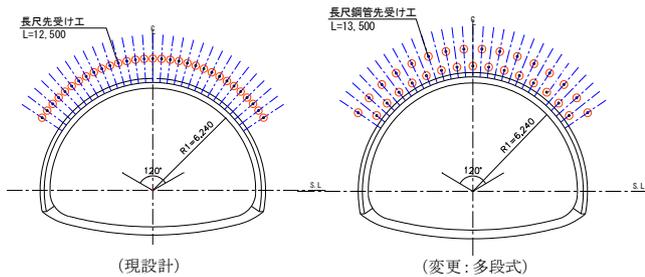


図-8 長尺鋼管打設パターン

起点側では、前述のとおり、補助工法穿孔データを利用した切羽前方探査を計画し、10mごとに12mの探査区間を設け、前方の地質予測を実施した。

探査結果に基づき、TD225mから多段式小口径長尺鋼管フォアパイリングを追加施工した。なお、当初設計でGFRPフォアパイリングが計画されていた起点側180mの小土被り区間についても、多段式小口径長尺鋼管フォアパイリングに変更して起点側坑口まで施工を継続した。



写真-6 鋼管下の肌落ち状況

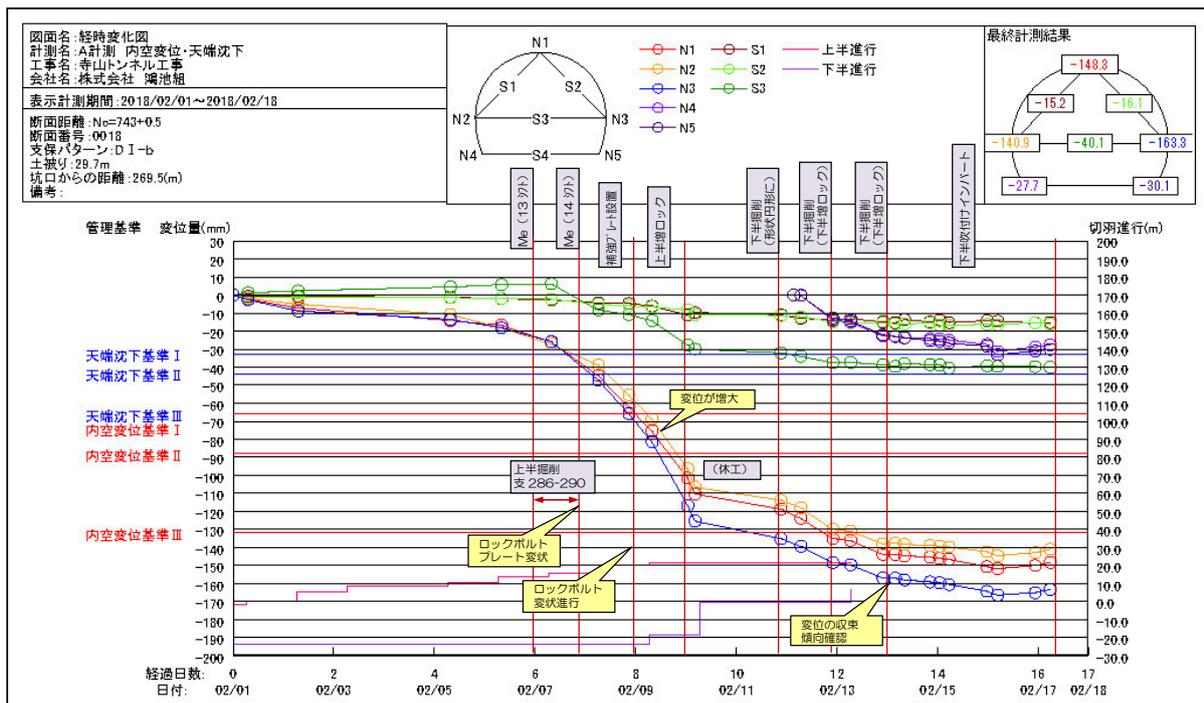


図-9 坑内計測結果

(2) 変状区間の対策

前述の変状箇所においては、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-7に補助工法の施工状況を示す。



写真-7 トンネル施工状況（補助工法）

5. おわりに

トンネルの施工は2018年8月10日現在、覆工コンクリートの施工中であり、L=41.5m完了している。

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を選定することができた。

また、綿密な計測管理を実施することで無事トンネルの掘削を完了した。

さらに、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。

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；小土被りの脆弱な地山における補助工法の設計と施工に関する一考察，第53回地盤工学研究発表会，pp.1571-1572，2018.
- 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回土木学会年次学術講演会，VI-069，pp.137-138，2018.

(2018. 8. 10受付)

A STUDY FOR CONSTRUCTION OF AUXILIARY METHOD BASED GEOLOGIC PREDICTION AHEAD OF FACE AT LOW OVERBURDEN AND FRAGILE GROUND

Hiroyuki YAMADA, Hiroshi YAMAMOTO, Keita KITANO and Hiroshi FUJITA

Low overburden and Fragile ground is receiving continued 180m in starting parts of tunnel at Terayama tunnel of Nakamura Sukumo road. The ground situation was worse than assumption, so 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. A highly precise geological feature prediction became possible in the ground with a lot of changes, and the long length face-volt and early closure was adopted as an additional measure. Excavation in a tunnel has been completed safely by using careful measurement management and appropriate supplementary construction method.