軟弱地山トンネルにおける切羽前方探査の実施と効果に関する一考察

阪口　治[1]・山本　浩志[2]・山田　浩幸[3]・蒋　宇静[4]

[1]正会員　（株）鴻池組　技術本部　土木技術部（〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1）
E-mail:sakaguchi_om@konoike.co.jp

[2]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:yamamoto_hs@konoike.co.jp

[3]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

[4]フェロー　長崎大学　大学院　工学研究科　システム科学部門（〒852-8521 長崎市文教町1-14）
E-mail:jiang@nagasaki-u.ac.jp

山岳トンネル現場における補助工法の施工区間の検討に当たっては，事前の地質データ，掘削時の切羽状況を踏まえて検討することが一般的である．近年，切羽前方探査技術の進歩により，削岩機の穿孔データを用いて切羽前方の地質評価を行うことが可能となってきた．本報告では，低土被り区間が連続する寺山トンネル工事において，切羽前方探査を実施し，穿孔エネルギーを用いて，補助工法の選定と施工区間の検討を行った．また，三次元ソリット解析により切羽前方の地山予測を行い，比較的精度の高い切羽前方予測システムを適用し，その効果を検証した．

Key Words : *geologic prediction ahead of working face, auxiliary method, three-dimentional simulation*

1. はじめに

山岳トンネル建設時には，破砕帯や軟弱層などの不良地山で，掘削中に地山の崩落や変位の増大など地山の緩みを伴う変状が発生することがある．このような箇所では，トンネル完成後，地震などの大きな外力の発生や地下水などの影響で，供用後に不具合が発生することが懸念される．

施工時には，このような不良地山を事前に把握し，施工方法を工夫することで，地山の緩みを最小限に留め，完成後の地山の安定を保ち，トンネルの品質を保つことができる．そのために，事前に地山の地質や性状を把握することが重要視されている．しかしながら，工事着手前に行われる調査は，主に地表からの探査や数本のボーリング調査等であり，トンネル全体の地質や地山性状を把握することは困難である．

そこで，トンネル掘削中に，切羽から前方の探査を実施し，これから掘削しようとする地山の地質や性状を把握することで，支保パターンの選定や適切な補助工法を選択し，地山を緩めることなくトンネルを構築することが可能となる．そして，結果的に構築したトンネルを品質の高いトンネルとすることができる．

著者らは，不良地山が想定される寺山トンネル工事で，設計時に長尺先受け工が計画された180m区間において，前方探査を実施した．探査は補助工法である長尺先受け工の施工を利用して，穿孔時のエネルギーを取得し，三次元ソリッド解析を用いてトンネル周辺の地山性状の予測を行った．本稿では，対象トンネルの前方予測の方法と予測結果を用いた追加の補助工法の選定方法について述べる．

2. 工事概要

寺山トンネルは，現在建設中の中村宿毛道路の一部，延長 L=485m の山岳トンネル工事である．施工は終点側から開始し，2%の下り勾配で掘削を行った．

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 以下の区間が連続している．

事前の地質踏査の結果や終点側坑口付け時の切土面の地山状況から，当初より脆弱な地山であることが判明

し，掘削開始時から全線に渡り，前方探査を実施した．**図-1** に地質縦断図を**表-1** に工事概要一覧を示す．

3. 地形・地質概要

トンネルの掘削に先立ち，トンネル計画路線の直上付近の地表を踏査し，地質の分布状況や空中写真と地形図から抽出したリニアメントを**図-2** に示す．リニアメントとは線状の地形の特徴のことであり，断層・断層破砕帯・多亀裂帯などの弱層部を反映していることが多い．以下に地形・地質の特徴を示す．

・終点側坑口部から沢部にかけては，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．

・トンネル中間部から起点側坑口部にかけては，リニアメントに一致する沢地形が多く存在し，トンネルの地山は砂岩系の玉石を含む泥岩で亀裂が細かく破砕質な状態で掘削時の緩みの影響を受けやすい状況であった．

4. 切羽前方探査

事前地質踏査結果および坑口付け掘削時の地山状況の確認結果から判断すると，終点側坑口部は，起点側同様土被りも小さく地山が脆弱であり，湧水の発生も確認された．また，終点側坑口部上部にはブロック積み上に里道が存在しており，トンネル掘削時の緩みの影響が懸念された．

地山が脆弱であるため，トンネル掘削時に天端の崩落や肌落ちが想定されることから，危険予知および補助

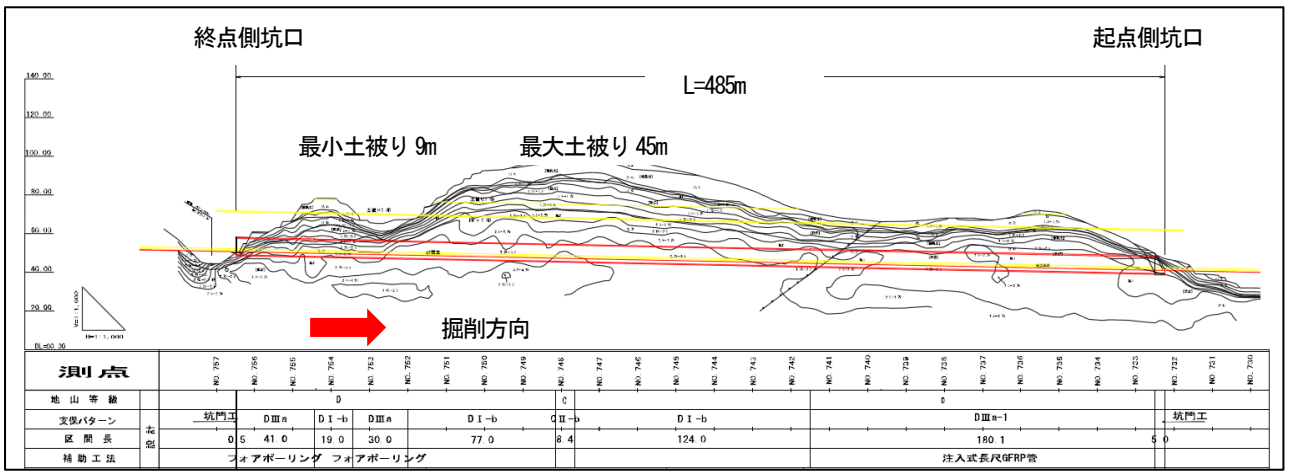

図-1 寺山トンネル地質縦断図

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ﾊﾟﾀｰﾝ、DⅠﾊﾟﾀｰﾝ（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、）

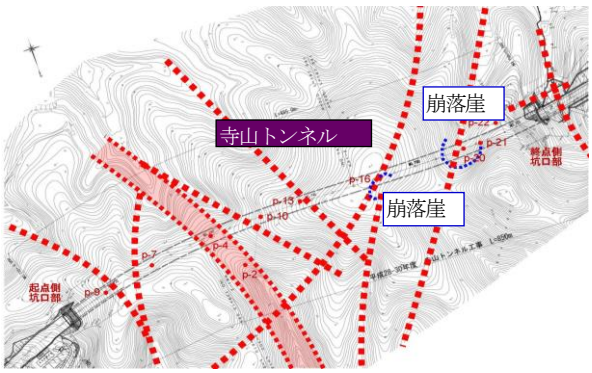

図-2 抽出したリニアメント図

写真-1 切羽前方探査実施状況

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前方探査を実施した．終点側に関しては，トンネル切羽面で 3 箇所（天端，左右）L=30m の穿孔を行い，実績の多い DRISS システムによる穿孔エネルギーによる評価を行った（**写真-1**）．

また，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表現した．

図-3 は切羽前方探査の精度向上手順を示す．また，

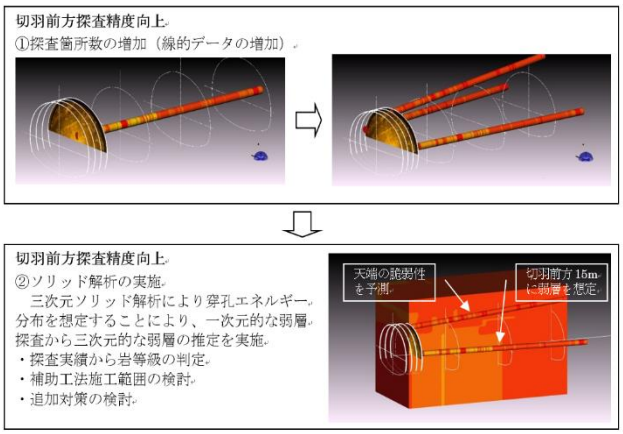

図-3　切羽前方探査の精度向上

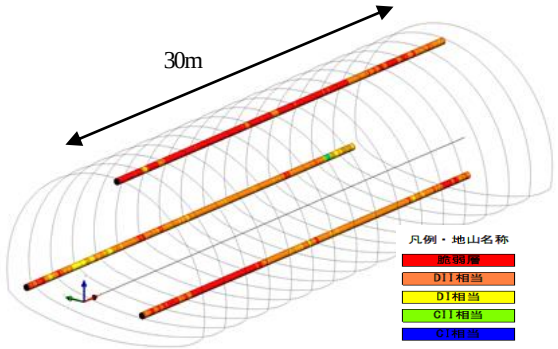

図-4　穿孔エネルギー図（0-30m）

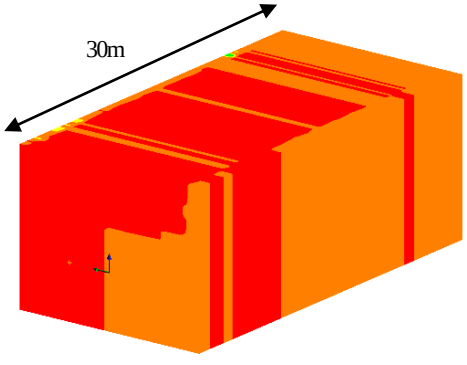

図-5　三次元解析結果図（0-30m）

切羽前方探査の効果については，以下に示す．

①長尺の探査（L=30m）により，補助工法必要区間の検討を事前に行い，工程遅延を防止できる．

②前方地山が良好な場合には補助工法の軽減が可能．

③前方地山の性状を事前に把握することで，地山の急変に対応ができる．

④地山が急に悪くなることを把握し，切羽の肌落ち等の危険予知ができる．

⑤前方地山の湧水状況を把握することにより効果的な湧水対策が取れる．

5.　穿孔エネルギーを用いた地山評価

穿孔エネルギーと地山等級の関係は，岩種や岩質によって様々であり，個々のトンネルで違いがあるが，判定の目安として，既施工トンネル工事の実績から，概ね 0～50 J /m^3 を脆弱層，50～100 J /m^3 をＤⅡ地山相当，100～150 J /m^3 をＤⅠ相当，150～250 J /m^3 をＣⅡ相当，250 以上 J /m^3 をＣⅠ相当とした．坑口部より 30m 区間で実施した 3 本（天端，両側壁部）の切羽前方探査結果では，穿孔エネルギーが 3 本全てで概ね 100 J /m^{3}以下となっていた．また，天端部の穿孔エネルギーは 50 J /m^3 以下となっており，天端部は脆弱な状態が続くことが予測された（**図-4**）．

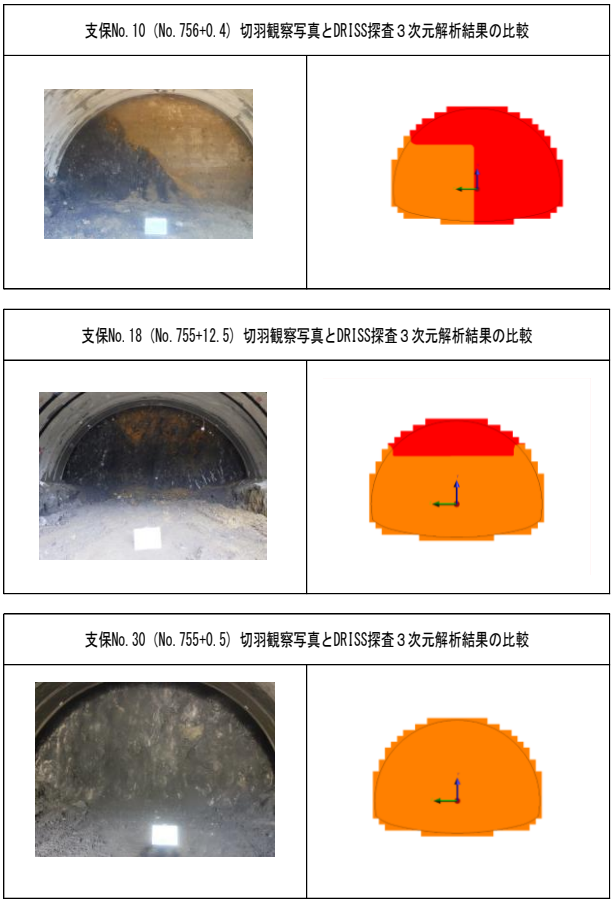

図-6　切羽観察と三次元解析結果との比較

次に 3 箇所の穿孔エネルギーデータを用いて三次元ソリッド解析を実施し，脆弱層を三次元的に推定した（**図-5**）．概ね天端付近が脆弱層であることが分かる．

これらの切羽前方探査の結果より，坑口部は脆弱な地山が連続していて，天端の崩落が予測されたため，注入式長尺鋼管先受け工を採用した．実際の切羽の状況と解析結果を検証するため，切羽と同じ測点の解析結果をニ次元で切り出し，切羽写真と比較した．支保工 No.10（坑口から 10m）の切羽は，切羽左下部分が泥岩を主体する地山であり，その他の部分はソイルセメントによる押え盛土部が出現している．支保工 No.18（坑口より 18m）の切羽では，泥岩を主体とする地山であるが，天端付近は風化により変色が見られる．支保工 No.30（坑口より 30m）の切羽では，全面が軟弱な泥岩を主体とする地山である（**図-6**）．3 箇所の切羽状況と解析結果の比較から概ね一致していることがわかる．

同様に，前方探査を 30m 毎に実施して切羽前方地山を予測しながら掘削を進めた．穿孔エネルギーの値が概ね 100 J /m^3 以上となった箇所から崩落や肌落ちなどの現象が少なくなり，安定した地山になったため先受け工の必要が無くなり，先受け工を中止した．その後，概ね穿孔エネルギーは 100 J /m^3 以上後で推移しており，100 J /m^3 以下の箇所に連続性がなく，切羽も大きな崩落や肌落ちもなく掘削が進行した．

6. 補助工法を利用した切羽前方探査と追加補助工法の採用

トンネル中間部から起点側坑口部（到達側）にかけては，砂岩の玉石（人頭大）を含む泥岩主体の混在岩（メ

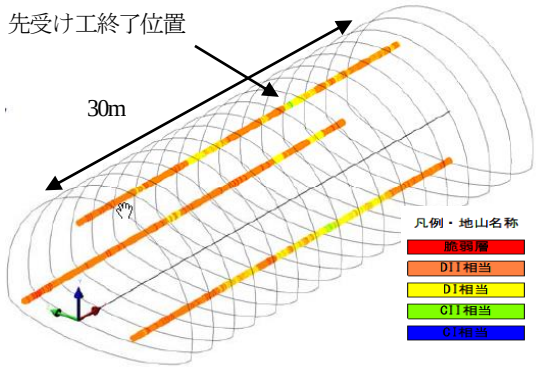

図-7 穿孔エネルギー分布（区間 87-117m ）

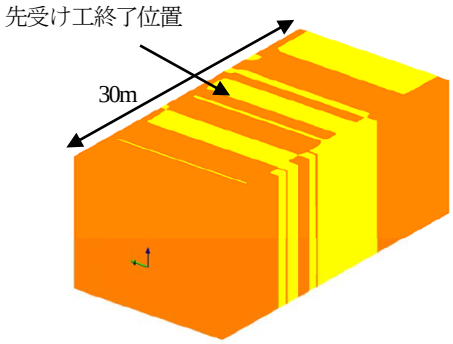

図-8 三次元解析結果（区間 87-117m）

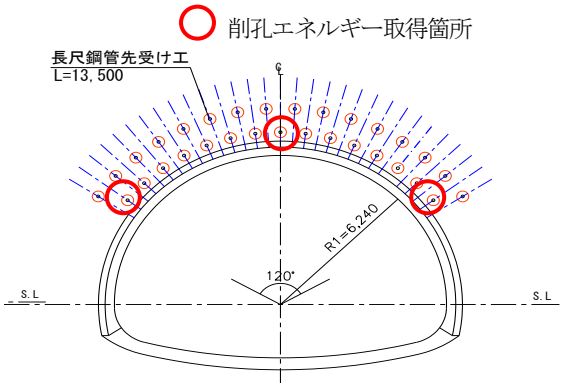

図-9 長尺鋼管打設パターンとエネルギー取得箇所

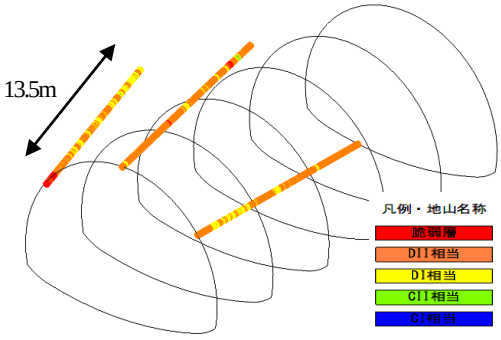

図-10 補助工法を利用した穿孔エネルギー分布（区間 286-297m）

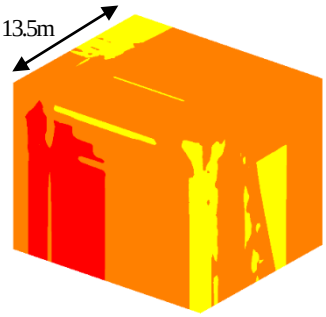

図-11 三次元解析結果（区間 286-297m）

写真-2 291m 地点鏡吹付け崩落状況

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．掘削を進めると，徐々に天端の崩落や肌落ちが見られるようになり，坑口より 225m 地点から小口径注入式長尺鋼管先受け工を実施した．先受け工は多段式とし，13.5m の鋼管を 5m 掘進毎に 16 本/断面と 15 本/断面の千鳥で打設した．先受け工を実施した区間の前方探査は，実施手間や作業時間の増加による費用の増加を軽減するため，先受け工施工時の穿孔を利用してエネルギーを取得した．エネルギーの取得は，10m 掘削毎に行い，先受け工の天端，両肩の計 3 本で実施した（**図-8**）．取得できる削孔エネルギーは，13.5m／回と短いが，切羽前方の 10m 程度を精度よく探査することができた．286m より実施した前方探査の結果より，切羽面の左側が脆弱であることが示されていた（**図-10, 11**）．掘削時には，291m の切羽面で，左側を中心に鏡吹付けコンクリートが崩落した（**写真-2**）．これにより，前方探査から得られた解析的予測は，ある程度実地山の状況を把握できたと思われる．291m 以降の掘削は，前方探査の結果をもとに，鏡ボルトを採用し，打設位置や本数を決定して掘削を行った．

7. 掘削時の地山のゆるみの推定

前述した掘削291m地点の前方探査では，前方の地山に対して，切羽面付近の地山の穿孔エネルギー値が極端に小さくなっている．これは掘削により地山が緩んでいることが原因であると思われる．補助工法を利用した前方探査では，3m程度の区間をラップしてエネルギー値を取得しているため，先に取得したエネルギー値と後に取得したエネルギーの値を比較した．後に取得したエネルギー値は切羽面近傍において，先に取得したエネルギー値の50%程度となっていることが分かった．また，切羽面より1m前方では先に取得した値と後に取得した値はほぼ同程度となっていたため，地山の緩みは1m以内に留まっていると思われる（**図-12**）．

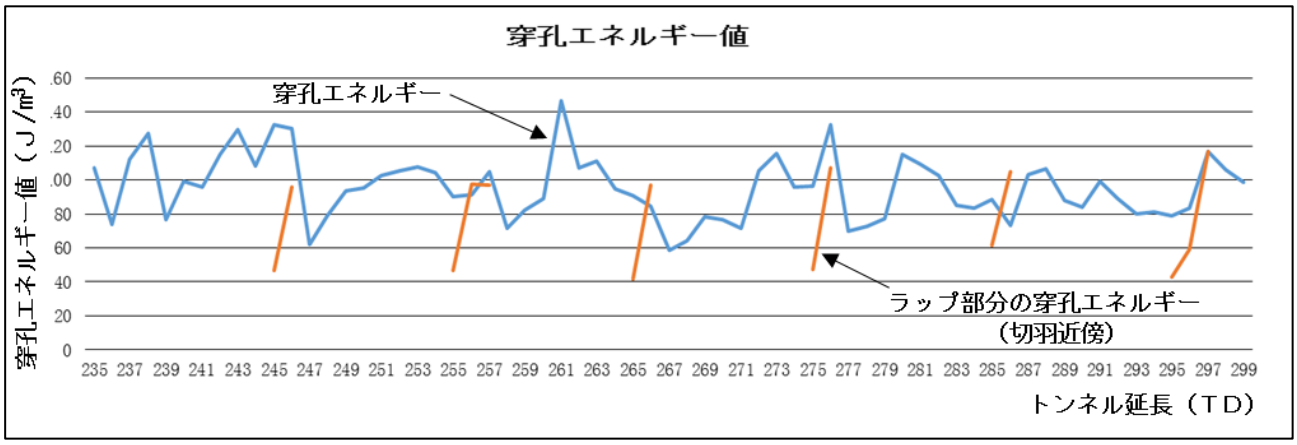

図-12 穿孔エネルギーとラップ部分の穿孔エネルギーとの比較

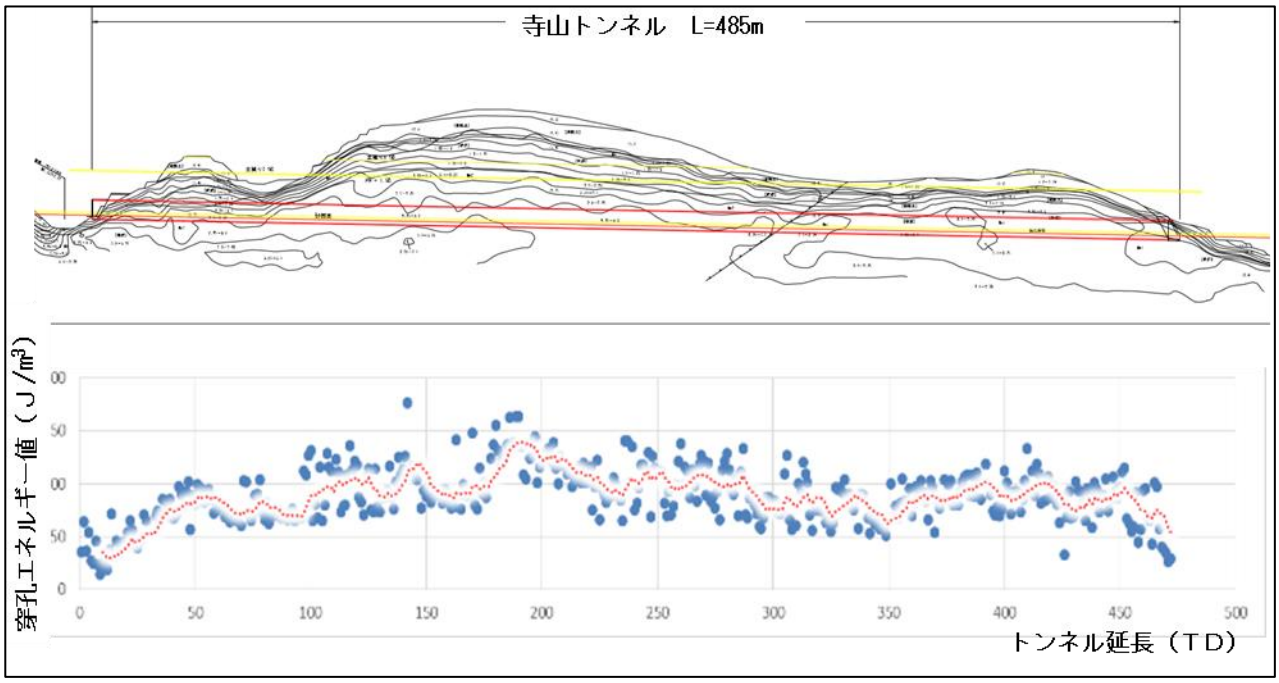

図-13 全線の穿孔エネルギーと地山形状との比較

8. 全線にわたる前方探査結果の考察

掘削完了後，全線にわたって取得したトンネルの天端部の穿孔エネルギーをプロットし，地山形状と比較し，その結果を**図-13** に示す．土被りが大きくなると穿孔エネルギーが増加するが，逆に小さくなると穿孔エネルギーも小さくなる傾向が見られ，地山形状に良く似たグラフとなっている．これは，今回の寺山トンネルは全線にわたり土被りが小さく，地表面からの風化の影響がトンネル近傍に達していることを示していると思われる．

9. おわりに

本報告は，小土被りの脆弱な地山におけるトンネル全線にわたり切羽前方探査を実施し，補助工法の採用や区間の決定において，指標とすることができた．また，補助工法の施工を利用して穿孔データを取得することで，新たな実施手間を省略することができた．更に，探査区間をラップすることで，掘削時の地山の緩みの程度を把握することもできた．今後は，前方探査を実施する上で，様々な工夫により，切羽前方の地山状況をより正確に予測できると思われる．今回の報告は，同様の地山条件におけるトンネルの前方探査を実施する際の参考になれば，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補助工法の設計と施工に関する一考察，第 53 回地盤工学会研究発表会概要集，pp.1571-1572，2018.7.
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概要集，pp.137-138，2018.8.

(2018. 8. 10 受付)

GEOLOGIC PREDICTION AHEAD OF WORKING FACE AND ITS EFFECT FOR TUNNEL IN SOFT GROUND

Osamu SAKAGUCHI, Hiroyuki YAMADA,
Hiroshi YAMAMOTO and Yujing JIANG

Preliminary geological data and cutting conditions during excavation are generally used to determine the construction section of applying the auxiliary method for NATM tunnels. Recent advances of the exploration technology, by using drilling data of rock drilling machine, made the geological assessment ahead of working face possible. In this report, the forward exploration was conducted for supporting the examination of the auxiliary construction method selection and judgment for a shallow tunnel. In addition, the ground prediction ahead of working face was performed by using the three-dimensional analysis and its effect was also verified.