

破壊エネルギー係数による 本坑の地山状況の予測と施工実績

小関 敏史¹・福山 拓郎²・松下 智昭³・河本 貴史⁴・横井 克典⁵・白鷺 卓⁶

¹(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 関東甲信工事事務所 中津川鉄道建設所
(〒508-0005 岐阜県中津川市日の出町 1-45)
E-mail: koseki.tos-t88z@jrtr.go.jp

²(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 関東甲信工事事務所 中津川鉄道建設所
(〒508-0005 岐阜県中津川市日の出町 1-45)
E-mail: fukuyama.tak-v4ft@jrtr.go.jp

³正会員 鹿島・日本国土開発・吉川特定建設工事共同企業体 中央アルプストンネル(山口)JV 工事事務所
(〒508-0501 岐阜県中津川市山口 1605-1)
E-mail: mattomoa@kajima.com

⁴正会員 鹿島・日本国土開発・吉川特定建設工事共同企業体 中央アルプストンネル(山口)JV 工事事務所
(〒508-0501 岐阜県中津川市山口 1605-1)
E-mail: yatakafu@kajima.com

⁵正会員 鹿島・日本国土開発・吉川特定建設工事共同企業体 中央アルプストンネル(山口)JV 工事事務所
(〒508-0501 岐阜県中津川市山口 1605-1)
E-mail: yokoik@kajima.com

⁶正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 岩盤・地下水グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
E-mail: shirasag@kajima.com

リニア中央新幹線中央アルプストンネルは、日本有数の活断層である阿寺断層を貫くことから、本坑掘削に先立ち、地質・地下水状況を把握することを目的に、調査坑を施工している。本坑掘削にあたっては、調査坑の施工実績を本坑の掘削へフィードバックすることが重要な課題であり、筆者らは、調査坑におけるコンピュータジャンボの削孔データから得られる破壊エネルギー係数の分布によって、本坑の地質状況を定量的に予測評価している。本稿では、調査坑掘削時の破壊エネルギー係数から本坑の地質状況を予測し、事前に本坑の適切な支保パターンを選定することによって安全かつ合理的に施工した結果を報告する。また、当トンネルでは土被りが最大 550m 程度になることから、土被りを考慮した支保パターン選定が妥当であることについての考察を示す。

Key Words: pilot tunnel, drilling energy coefficient, main tunnel, prediction, ground conditions

1. はじめに

リニア中央新幹線中央アルプストンネルは、品川～名古屋間のうち、木曾山脈(中央アルプス)を貫く延長約 23.3 km のトンネルである。このうち、岐阜県側の山口工区は、延長約 4.6 km で、日本有数の活断層である阿寺断層と交差する位置関係にある。

過去の阿寺断層におけるトンネル工事^{1)~4)}では、大量高圧湧水や塑性地圧による変状などが報告されており、当工事においても同様な地質リスクが想定された。そこ

で、当工事では、本坑の掘削に先立ち、阿寺断層の地質・地下水状況を把握するために、調査坑の施工を行った。本坑の地質状況を予測するにあたり、調査坑における切羽観察記録や先進ボーリング結果などを基に定量的に評価するだけでなく、コンピュータジャンボによりロックボルト孔や発破孔など削孔時に得られる削孔データからトンネル周辺の地山状況を3次元かつ定量的に評価することで、合理的な支保パターンの選定を行いながら本坑の掘削を進めている⁵⁾⁶⁾。本坑交差箇所の土被りが約 20m となる大沢川周辺においては、調査坑での削孔デ

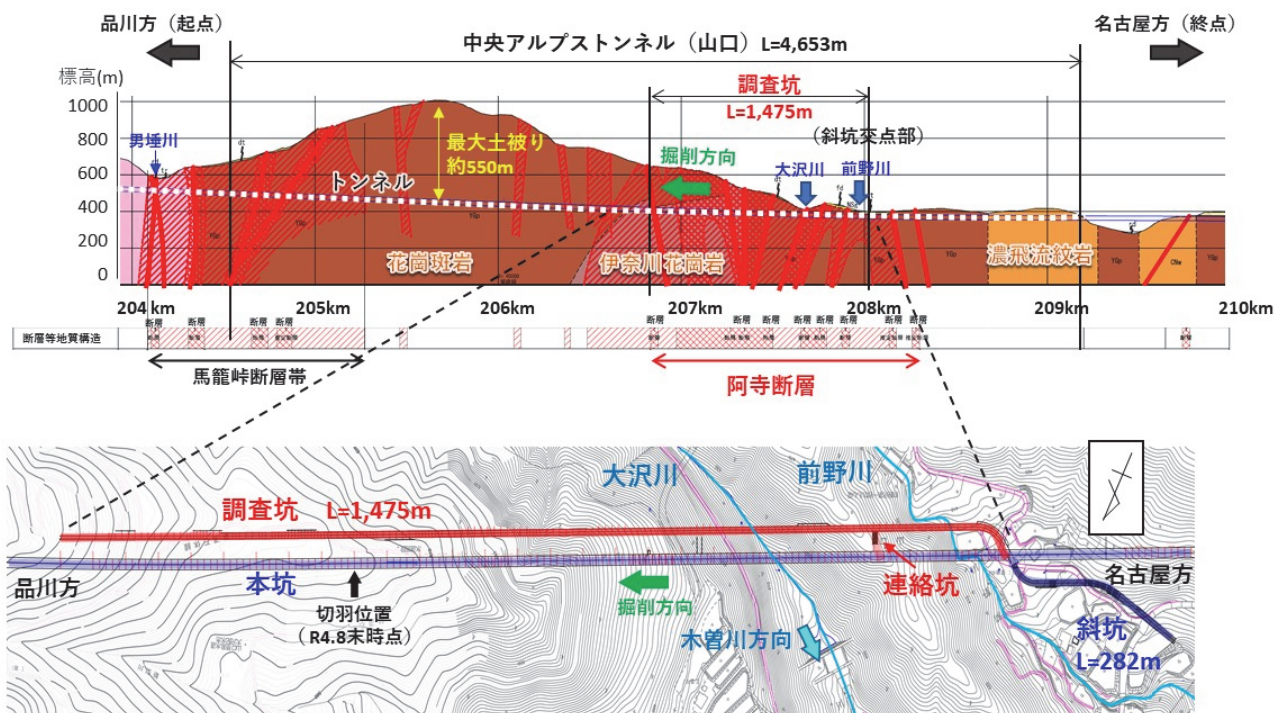


図-1 地質縦断図（上）及び調査坑周辺の平面図（下）

ータを基に地山不良部を予測し、事前に適切な支保パターン、補助工法を検討することができ、安全に掘削を行った⁹⁾。

令和4年8月末現在、品川方への本坑掘削を進めている。なお、阿寺断層における調査坑については令和4年6月に掘削を完了している。

本稿では、調査坑掘削時の破壊エネルギー係数から本坑の地質状況を予測し、事前に本坑の適切な支保パターンを選定することによって安全かつ合理的に施工した結果を報告する。

また、当トンネルでは土被りが最大 550m 程度になることや、これまでの当トンネルにおける施工実績で土被りが大きくなるほど変位量が大きくなることから、土被りを考慮した支保パターン選定が有効であることについての考察を示す。

2. 地質・地形概要

地質は、中生代白亜紀の花崗斑岩を主体とする（図-1）。新鮮な花崗斑岩は一軸圧縮強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の硬質な岩盤であるが、断層活動の影響で破碎質、粘土質な箇所もあり、硬軟の激しい地山である。事前の地質調査結果では、14本の主断層が推定され、約1.5km区間（208k300m～206k840m）が阿寺断層と報告されている。

地形については、坑口（斜坑）の標高が約350mで、周辺に標高1,000m程度の山地があり、トンネルの最大土被りは約550mである（図-1）。また、トンネルは前

野川、大沢川の2本の河川と小土被りで交差する位置関係にあり、両河川は、木曾川へ向かって流下している（図-1）。

調査坑は、斜坑と本坑の交差部から本坑の南側を離隔35mで並進し、阿寺断層の東縁まで掘削する計画である（図-1）。調査坑のルートの本坑の南側に設定した理由は、本坑の南側が山側で、調査坑を掘削することにより、本坑に先立った水抜き効果を期待したものである。

3. 本坑の地質状況の予測手法

コンピュータジャンボを用いたロックボルト孔や発破孔などの削孔により得られる破壊エネルギー係数は、単位体積の地山を削孔するために削孔機が要したエネルギーと定義され、値が大きいくほど硬い地山と評価できる。削孔検層については、掘削方向だけでなく、本坑側の地質情報を得るために、図-2に示すように、調査坑から本坑へ向けた削孔検層を実施している。本坑向け削孔検層は、切羽の自立性が懸念される天端付近の地質を調べるために、調査坑の側壁から上向き約 20° で実施した。削孔検層の実施間隔が狭いほど、得られる地質情報の精度向上が期待できるが、一方で、調査坑の掘削サイクルへの負担をできるだけ小さくするため、前方探査用に実施している削孔検層の間隔（25m）に合わせて行うことにした。

これら調査坑掘削時の削孔（ロックボルト孔や発破孔）と調査坑からの削孔検層（調査坑掘削方向、本坑方向）

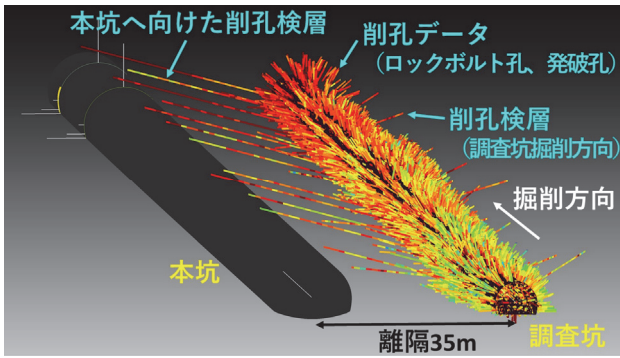


図-2 調査坑施工時の削孔データと本坑へ向けた削孔検層

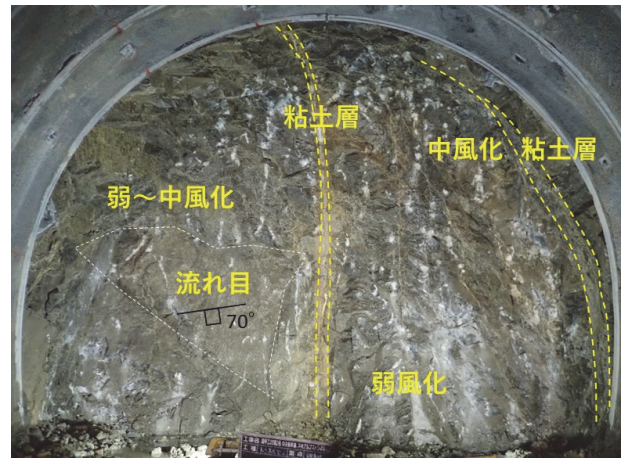


図-4 調査坑切羽状況 (本坑キロ程 207k560m 付近)

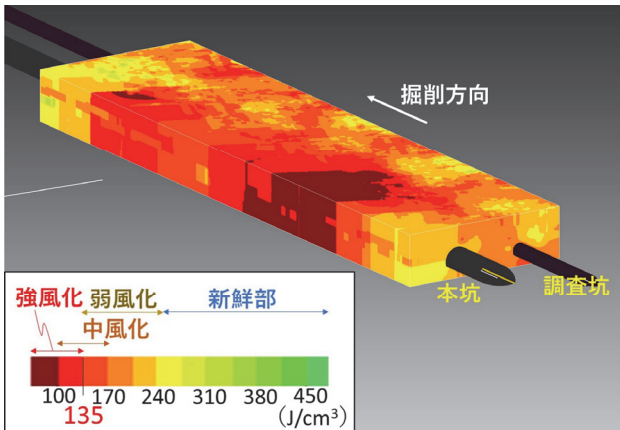


図-3 クリギングによる地球統計学処理の例

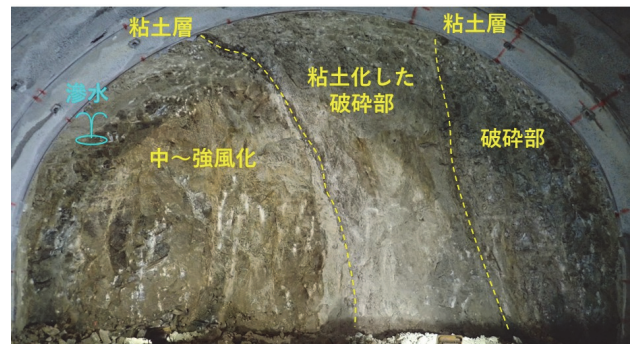


図-5 調査坑切羽状況 (本坑キロ程 207k450m 付近)

において収集した破壊エネルギー係数の点群データをクリギング処理 (地球統計学処理) することで、トンネル周辺の破壊エネルギー係数の3次元分布が得られる (図-3)⁵⁾。この技術を応用し、調査坑の削孔データから本坑の地質状況を破壊エネルギー係数の分布により評価することとした。

4. 調査坑掘削を踏まえた本坑施工実績

本章では、調査坑での施工実績を踏まえ本坑を施工した事例として、207k600m から 207k400m までの掘削実績を示す。

(1) 調査坑施工実績を踏まえた本坑地山状況の予測

当該区間の調査坑は、支保パターン I_{N1} (鋼製支保工 H125, 縦断間隔 1.0m) で掘削を行った。天端沈下は概ね 10mm 未満、内空変位は 20mm 未満だった。図-4 および図-5 に調査坑の切羽状況を示す。図-4 のように、粘土層が介在するものの、全体的に弱～中風化程度の地山状況であったが、207k500m 付近から起点方は風化の度合いが強くなり、粘土質の断層破碎部が多く占めるようになった。切羽からの湧水はほとんど見られず、湧水が確

認される箇所においても滲水程度であった。調査坑から実施した本坑向け削孔検層では、207k600m 前後の区間において、本坑断面付近で概ね $200\text{J}/\text{cm}^3$ 以上の高い破壊エネルギー係数が確認され、排出されるくり粉は新鮮な粒子であった。また、207k500m 付近から起点方にかけては破壊エネルギー係数が $135\text{J}/\text{cm}^3$ 以下の箇所が多く確認された。

図-6 上段に、調査坑の削孔データから、本坑の破壊エネルギー係数の分布を予測した結果を示す。

207k600m から 207k500m 手前にかけては弱風化程度、それ以降では強風化地山が予測された。

(2) 本坑の施工実績

弱風化が予測された区間について、特に破壊エネルギー係数の予測値が大きい値を示した 207k560m 付近において、本坑における削孔検層の結果に加え、切羽面に新鮮な岩盤部及び弱風化の部分が多く占めてきたことから、調査坑の支保パターンよりも1段階落とした I_{N2} パターン (鋼製支保工 H125, 縦断間隔 1.2m) で掘削を行った。

強風化が予測された 207k500m 付近から起点方については、掘削を進めるにつれ徐々に切羽面に粘土混じりの強風化した部分が増え大半となり (図-7)、内空変位量が限界ひずみ法⁷⁾により設定した管理レベルⅢ (80mm)

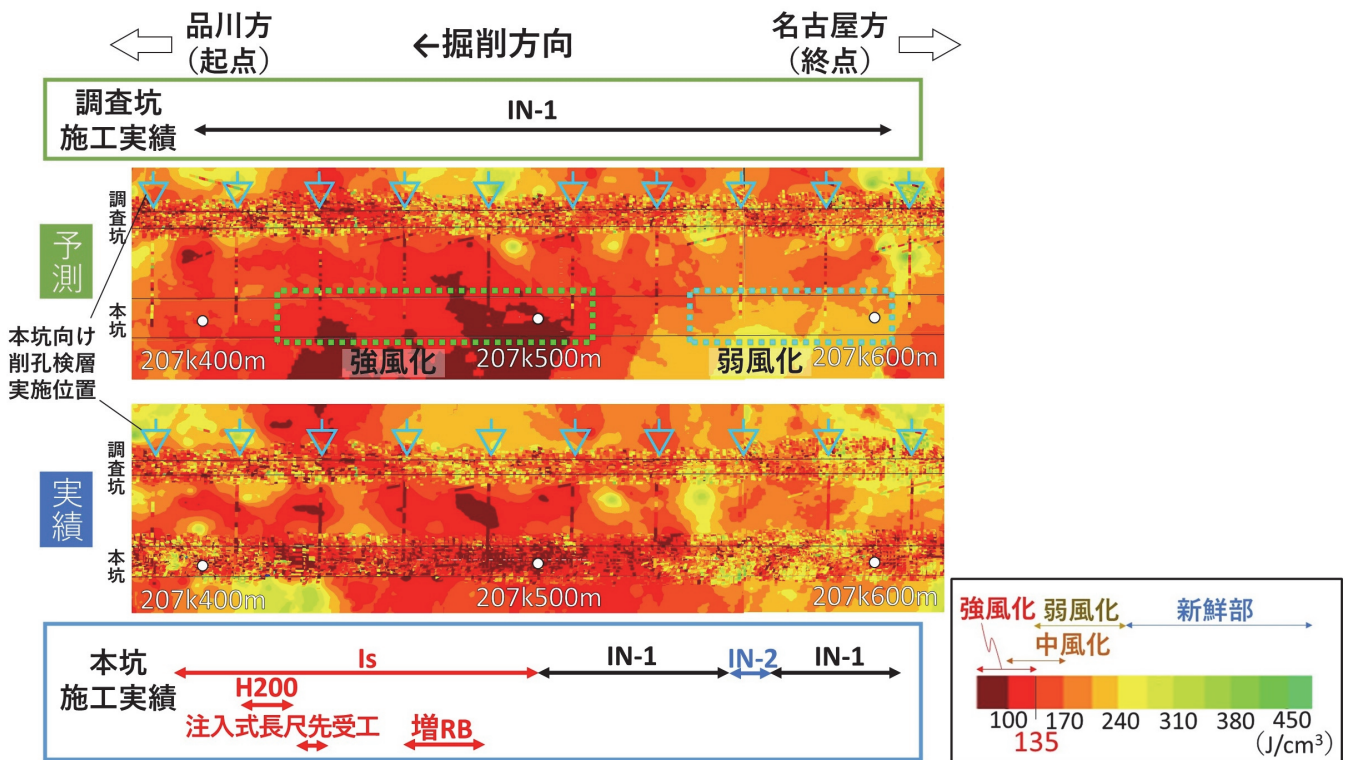


図-6 本坑地山状況の予測結果と実績の比較

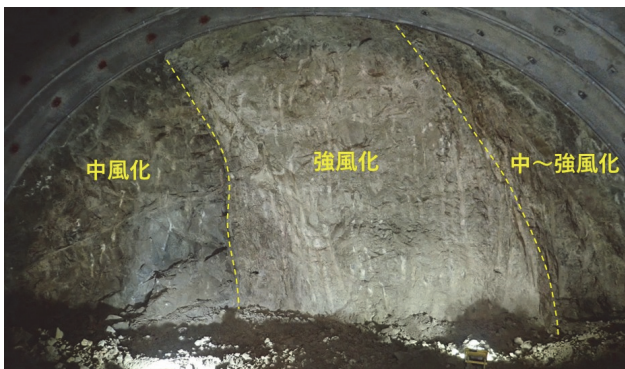


図-7 本坑切羽状況 (207k500m 付近)

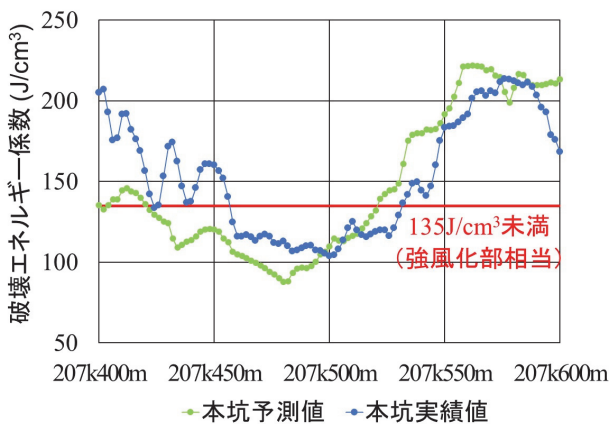


図-8 破壊エネルギー係数の予測と実績の比較

を超過したことから、あらかじめ計画していた Is パターン（鋼製支保工 H150、縦断間隔 1.0m、インバート吹付有り）を採用した。特に強風化が予測された箇所においては、Is パターンの施工でも内空変位が収束しなかったため、補助工法の実施（増ロックボルト、注入式長尺先受工）や、支保パターンの変更（鋼製支保工を H200 にランクアップ、支保工ピッチを 0.8m に変更など）を行った。

(3) 本坑の予測結果と施工実績の比較

本坑掘削後の実績を図-6 下段に示す。これは、調査坑の削孔データに加え、本坑掘削時の削孔データ（ロックボルト孔や発破孔）と本坑からの削孔検層（本坑掘削方向）を追加して再度クリギング処理（地球統計学処理）したものである。概ね、予測結果通りの分布となっている。また、本坑における破壊エネルギー係数の予測値と実績値を各断面の平均で比較した結果を図-8 に示す。大局的に地山状況を予測評価できている一方、部分的な乖離に関しては、本坑向け削孔検層において、地質の不均質性により局所的に硬い、または軟い地山にあたったものと推察される。

調査坑の削孔データから、本坑の大局的な地山状況を予測評価できた一方で、強風化区間については、坑内計測結果及び削孔検層結果、地山状況に応じて、調査坑の支保パターンよりもランクを上げた支保パターンへの変

更や補助工法の採用が必要であった。その要因としては、本坑断面と調査坑断面の位置で地質が異なるだけではなく、調査坑断面積（約 30m²）に対し、本坑断面は約 100m² と大断面であり、調査坑と比較して本坑形状が扁平であるために、緩み荷重や側圧の影響が相対的に大きくなっていることが考えられる。

今後も断面の大きい本坑では、調査坑で確認されたものよりも大きな変位や支保の変状が懸念される。調査坑での実績データを分析し、予測結果と実績の比較検証を進め、予測精度の向上を図りたいと考えている。

5. 土被りを考慮した支保パターン選定について

(1) 支保パターンの選定指標について

前章の結果より、破壊エネルギー係数の3次元分布から、定量的に地山の硬軟を評価できているものの、現状では、適切な支保パターン選定手法が確立されていない。

当トンネルの地形地質状況に即した支保パターン選定手法を検討するにあたり、当トンネルの特徴として、土被りが最大 550m 程度になること、また、これまでの当トンネルにおける施工実績で、土被りが大きくなるほど変位量が大きくなることから、土被りを考慮した支保パターン選定が適切ではないかと考えた。

一般的に、支保パターンを決める際は、地山の弾性波速度や地山強度比などの指標が使われることが多い。地山強度比 G_n は、軟岩地山におけるトンネル掘削時の押し出し性の判定指標で用いられ、以下式で示される。

$$G_n = \frac{\sigma_c}{\gamma H} \quad (1)$$

(σ_c : 地山の一軸圧縮強度 [kN/m²], γ : 地山の単位体積重量 [kN/m³], H : 土被り高さ [m])

地山強度比は、地山の一軸圧縮強度に対するトンネル土被り荷重の比で表され、破壊エネルギー係数と一軸圧縮強度の相関性や、地山強度比と変位量の相関性について分析を行った。

(2) 破壊エネルギー係数と一軸圧縮強度の相関性

削孔検層など、コンピュータージャンボで削孔した際に得られる本坑の破壊エネルギー係数と一軸圧縮強度の相関性について、分析を行った。

一軸圧縮強度に関しては、ジャンボで削孔した位置と同程度の地山性状の掘削ずりに対して、打球探査試験⁸⁾により取得した。これにより、実際の地山性状に近い、割れ目を含んだ岩盤の物性値が取得できると考えている。

図-9 に破壊エネルギー係数と一軸圧縮強度の関係を

示す。正の相関があることが分かり、記載の近似式によって破壊エネルギー係数から一軸圧縮強度へ換算を行うことが妥当であると判断した。なお、図-9には点載荷試験により得られる一軸圧縮強度との関係も示しているが、同様の相関性が認められる。

(3) 地山強度比と変位量の相関性

近似式により、本坑における破壊エネルギー係数から一軸圧縮強度を推定し、式(1)により得られる地山強度比と内空変位量、天端沈下量との関係を図-10 に示す。補助工法を実施した場合は例外とすると、地山強度比が小さくなるほど、支保パターンが重くなり、また変位量

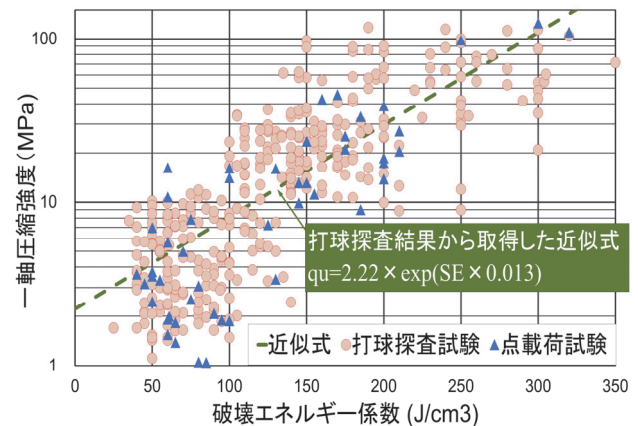


図-9 破壊エネルギー係数と一軸圧縮強度の関係

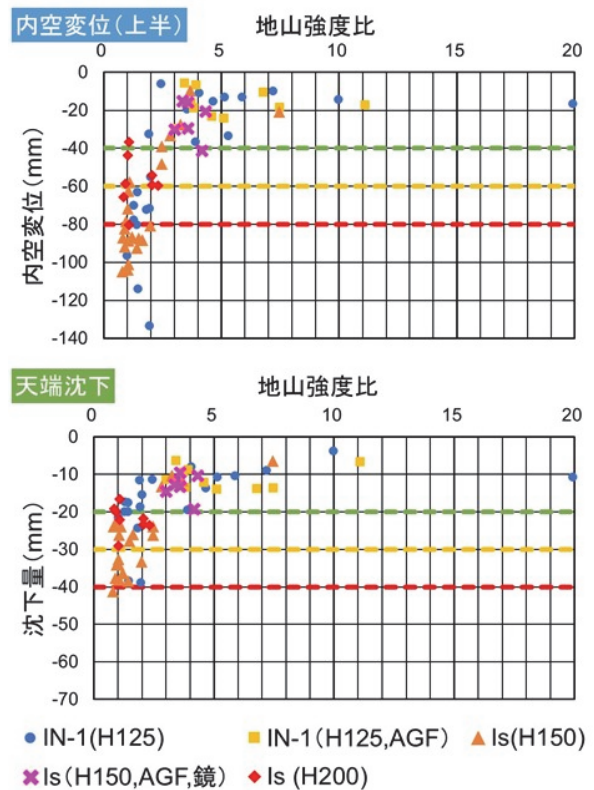


図-10 地山強度比と変位量の関係

が大きくなる傾向が確認できた。

以上により、土被りを考慮した支保パターン選定の妥当性が確認できたことから、今後、破壊エネルギー係数と一軸圧縮強度や変形係数などの物性値との相関性の分析を深度化し、土被りや断面形状を考慮した定量的な支保パターンの選定手法や補助工法要否判定基準を確立し、調査坑の削孔データにより予測される本坑の破壊エネルギー係数を用いて、適切な支保パターン選定を行っていききたいと考えている。

6. まとめ

本稿では、先進する調査坑の削孔データから、本坑の地山状況を破壊エネルギー係数の分布として予測評価した事例を報告した。調査坑の実績から得られる本坑の予測結果から、事前に本坑の地山状況を大局的に把握し、合理的な支保の選定と補助工法を実施し、安全な掘削を行った。

次に、予測と実績の検証を行い、破壊エネルギー係数は、地山の硬軟を表す指標として非常に有効であるが、トンネルの変位量や支保耐力の観点では、土被りの影響や断面形状の影響を考慮する必要があることが分かった。

また、地山の一軸圧縮強度に対するトンネル土被り荷重の比で表される地山強度比と、変位量や支保パターンに相関関係があることを確認し、土被りを考慮した支保パターン選定が有効であると推察した。

今後、阿寺断層主断層において本坑掘削を行う予定である。また、土被りも大きくなることから、土圧が大きくなり地山の変形量の増大が懸念される。本坑地山状況を3次元的に予測評価する精度の向上を図るとともに、

土被りや断面形状を考慮した定量的な支保パターン選定手法を確立し、破壊エネルギー係数の予測値を用いて適切な支保パターン選定を行い、安全に掘削を行っていききたいと考えている。

謝辞：当トンネルにおける課題に対して、貴重なご助言とご指導をいただいた関係各位に厚くお礼申し上げたい。

参考文献

- 1) 長友成樹, 玉川清, 政谷二三男, 原田史也: 山鳴りと大湧水に挑む—恵那山トンネル中津川方—, トンネルと地下, Vol. 2, pp. 1089-1103, 1972.
- 2) 今西誠也: 中央道恵那山トンネルの応用地質, 応用地質, Vol. 16, pp. 27-35, 1975.
- 3) 彦坂六男, 吉田和夫: 阿寺断層を抜く中呂発電所放水路トンネル, トンネルと地下, Vol. 9, pp. 481-487, 1978.
- 4) 立石俊一, 畑中博文: 中部山岳地方の道路トンネルにおける断層破碎帯の処理, 土と基礎, Vol. 25, pp. 35-40, 1977.
- 5) 白鷺卓, 宮嶋保幸, 山本拓治, 西川幸一, 福田博之: トンネルの施工穿孔データを利用したオンタイム切羽評価と前方予測, トンネル工学報告集, Vol. 27, I-19, 2017.
- 6) 三条肇, 吉野弘明, 松下智昭, 河本貴史, 横井克典, 白鷺卓: 先進する調査坑の掘削データを活用した本坑掘削の合理化, トンネル工学報告集, Vol. 31, I-5, 2021.
- 7) 日本道路協会: 道路トンネル観察・計測指針, pp. 151-154, 2009.
- 8) 小泉悠, 吉田輝, 山本拓治, 池尻健: 打球探査による安全迅速なトンネルの切羽評価, 第47回地盤工学研究発表会, C-08, pp. 121-122, 2012.

(2022.8.26受付)

PREDICTION OF GROUND CONDITIONS OF A MAIN TUNNEL USING DRILLING ENERGY COEFFICIENT AND EXCAVATION ACHIEVEMENTS

Toshifumi KOSEKI, Takuro FUKUYAMA, Tomoaki MATSUSHITA,
Takafumi KAWAMOTO, Katsunori YOKOI and Suguru SHIRASAGI

Since the Central Alps Tunnel of the Chuo Shinkansen project using superconducting Maglev system passes through the Atera Fault, one of the most active faults in Japan, a pilot tunnel is being constructed for the purpose of grasping the geological and groundwater conditions prior to the excavation of a main tunnel. In the excavation of a main tunnel, it is important to feed back the excavation achievements of a pilot tunnel to the excavation of a main tunnel. By estimating the distribution of the drilling energy coefficient using drilling data such as blasting and rock bolting of a pilot tunnel, we have attempted to predict the geological conditions of a main tunnel quantitatively. In this paper, we report the results of safe and rational construction by predicting the geological conditions of a main tunnel from the drilling energy coefficient of the excavation of a pilot tunnel and selecting an appropriate tunnel support for a main tunnel in advance. In addition, we consider the validity of tunnel support selection in consideration of overburden thickness because the maximum thickness of the overburden in this tunnel is about 550m.