

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

三条 肇¹・吉野 弘明²・松下 智昭³・河本 貴史⁴・横井 克典⁵・白鷺 卓⁶

¹正会員 (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: sanjo.haj-zs3v@jrtt.go.jp

²正会員 (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: yoshino.hir-34d2@jrtt.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

日本有数の活断層である阿寺断層を貫く当トンネルは、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、調査坑を施工することにした。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掘削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、破壊エネルギー係数と岩盤性状が概ね整合していることを確認するとともに、調査坑から本坑へ向けた削孔検層を一定間隔で実施することで、本坑の破壊エネルギー係数の予測分布の精度が向上することを確認した。また、本坑の予測結果から、大沢川周辺の地質状況が著しく悪いことが分かり、事前に支保のランクアップと補助工法を検討し、安全に掘削することができた。

Key Words: pilot tunnel, drilling data, main tunnel, prediction, geological 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、木曽山脈(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。

過去の阿寺断層帯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ある。そこで、本

坑の掘削に先立ち、阿寺断層帯の地質・地下水状況を把握するために、調査坑を施工することとした。一般的に、こうした調査坑を掘削する際は、詳細な切羽観察記録や先進ボーリング結果などをもとに地質平面図を作成し、本坑の地質状況を予測評価することが多い。しかしながら、調査坑と本坑の離隔が数十m程度であっても、複雑に発達した断層分布を予測評価することは困難であり、また、調査坑の施工実績を踏まえ、地山状況に応じた本坑の支保パターンを選定するためには、地質平面図による定性的な評価だけでなく、定量的な評価をすることが

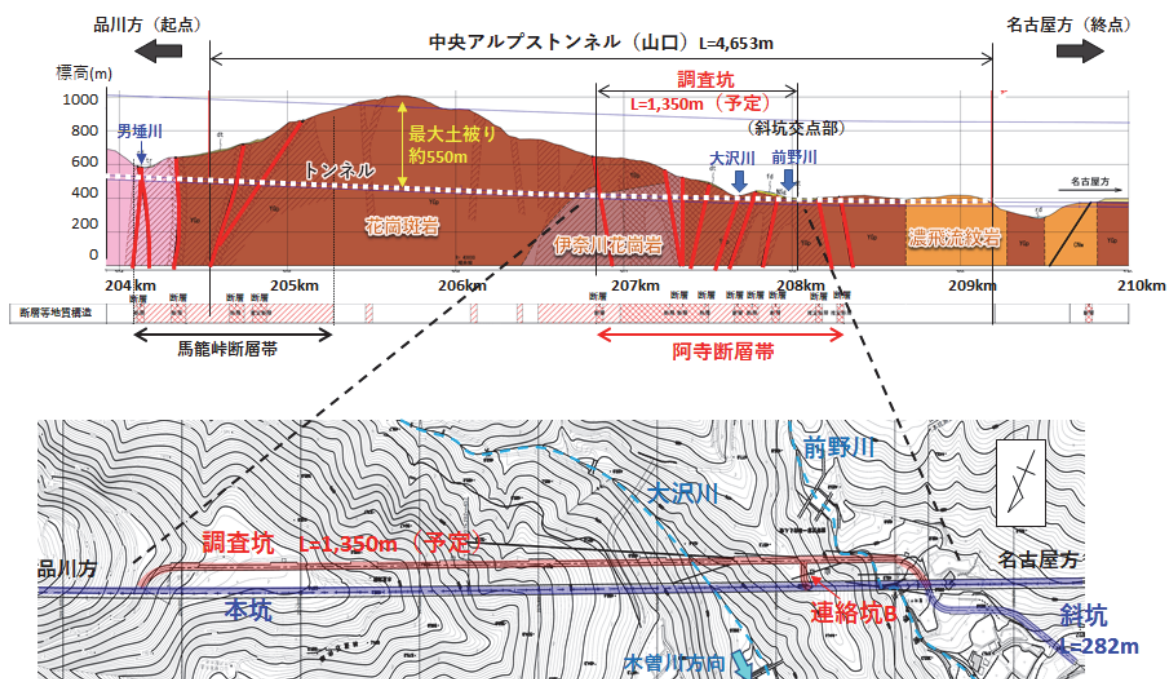


図-1 地質縦断面図（上）及び調査坑周辺の平面図（下）

重要であると考えられる。

近年の ICT 技術の発展により、コンピュータジャンボによるロックボルト孔や発破孔などの穿孔時の掘削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技術が開発されてきている⁵⁾。本稿では、調査坑におけるこれらの掘削データから、本坑の地質状況を 3 次元かつ定量的に予測評価し、事前に本坑の適切な支保パターンを選定することによる安全かつ合理的な施工結果を報告する。

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 100N/mm²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 1.5 km 区間（208k300m～206k840m）が阿寺断層帯と報告されている。

地形については、坑口（斜坑）の標高が約 350 m で、周辺に標高 1,000 m 程度の山地があり、トンネルの最大土被りは約 550 m 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、木曽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、阿寺断層帯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、本坑に先立つ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による掘削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⁵⁾⁶⁾。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、値が大きいほど硬い地山と評価できる。この技術を応用し、調査坑の掘削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。しかしながら、調査坑の掘削データは、調査坑周辺に集中するため、クリギングで出力される本坑周辺の破壊エネルギー係数の精度が低い可能性がある。そこで、調査坑から本坑へ向けた削孔検層を実施し、精度の向上を図った。

本坑向け削孔検層は、図-2 の断面図に示すように、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は、狭いほど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（25 m）に合わせて行うことにした（図-2 平面図）。なお、本坑へ向けた削孔検層は、調査坑の曲線区間、及び本坑への連絡坑を除く全線で実施する計画で、合計 45 本となる。

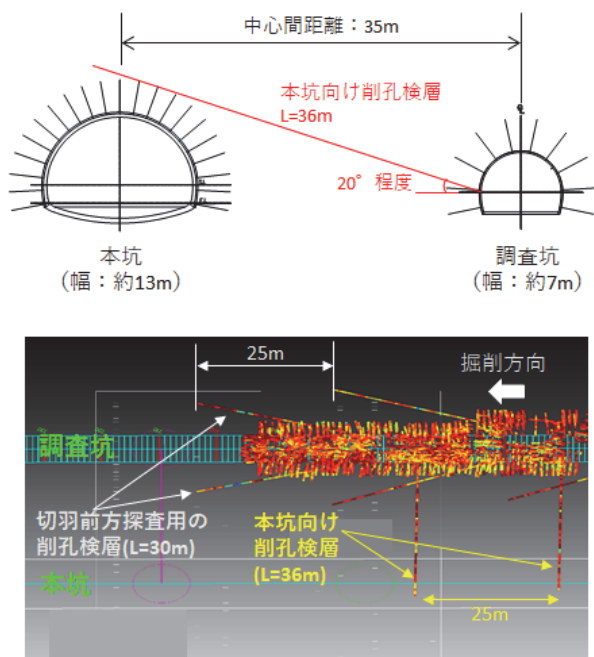


図-2 本坑へ向けた削孔検層レイアウト図
(上：断面図，下：平面図)

4. 予測結果と実績の比較

(1) 岩盤性状と破壊エネルギー係数の対比結果

破壊エネルギー係数によるトンネル周辺の地質状況の定量的な評価のため、破壊エネルギー係数と岩盤性状の比較を行った。当トンネルの岩種は花崗斑岩の1種類であるが、岩盤性状は新鮮硬質なものから、断層活動・風化作用の影響で砂状・粘土状を呈するものまで様々である。そこで、表-1に示すように、風化程度によって新鮮、弱風化、中風化、強風化・断層の4つに区分した。実際にジャンボで穿孔した位置の岩盤をこれらの地質区分で評価することで、破壊エネルギー係数と地質区分の対比を行った。一例を図-3に示す。長尺フォアパイリングを7本打設しており、この断面では、新鮮部の破壊エネルギー係数が370 J/cm³の1データ、中風化部が200 J/cm³、180 J/cm³、150 J/cm³ (2データ)の4データ、断層部(強風化部)が90 J/cm³、50 J/cm³の2データとなる。このような検討を調査坑0k013m～0k445.2m間の計21断面、全233データで行った。対比結果として、図-4に地質区分ごとの破壊エネルギー係数のヒストグラムを示す。長尺フォアパイリング打設時の掘削データを使っているため、強風化部のデータ数が多くなっているが、図-4から各地質区分の破壊エネルギー係数を新鮮部は240 J/cm³以上、弱風化部は135～240 J/cm³、中風化部は100～170 J/cm³、強風化部・断層部は135 J/cm³以下と判断した(図-5)。これらの値については、今後も検証が必要と考えているが、特に切羽の自立性が懸念される強風化部・断層部の値については、例えば、臨床トンネル工学研究所の報告⁷⁾で

表-1 地質区分

地質区分	岩盤性状	岩級区分※
新鮮	岩石は堅硬で、ハンマー打撃では割れにくい。切羽では灰色～黒色を呈する。	C _H 以上
弱風化	局所的に褐色変質した造岩鉱物がみられるが、岩片は比較的堅硬。ハンマー打撃で、割れ目に沿って割れる。	C _M ～C _L
中風化	岩芯まで褐色変質し、軟質化。ハンマー軽打で割れる。切羽では、黒色～褐色のブロック状を呈し、割れ目に沿って岩塊が抜け落ちやすい。	D _H
強風化断層	割れ目が網目状に細かく発達し、一部粘土化。ハンマー軽打～手で割れる程度に脆く、切羽の自立性が懸念される。	D _L

※表中の岩級区分は、電研式岩盤等級区分に比べ1ランク程度低い評価にしている。これは切羽での岩盤の緩みを考慮したためである。

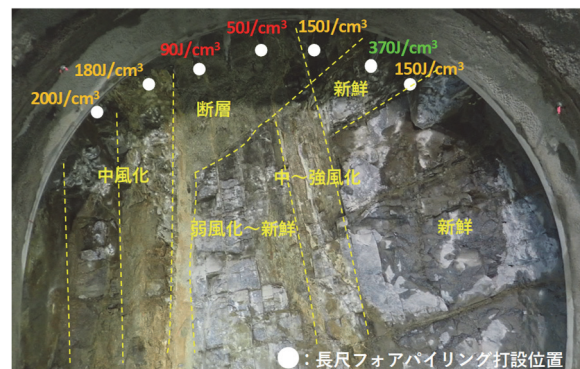


図-3 切羽での地質区分と破壊エネルギー係数の対比例

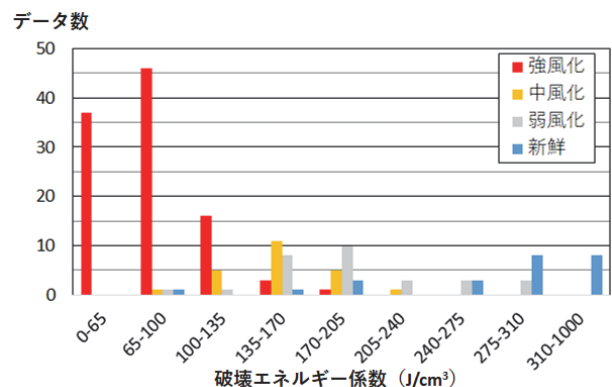


図-4 破壊エネルギー係数ヒストグラム

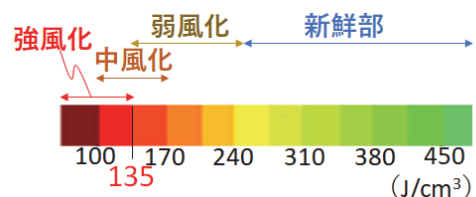


図-5 破壊エネルギー係数の凡例

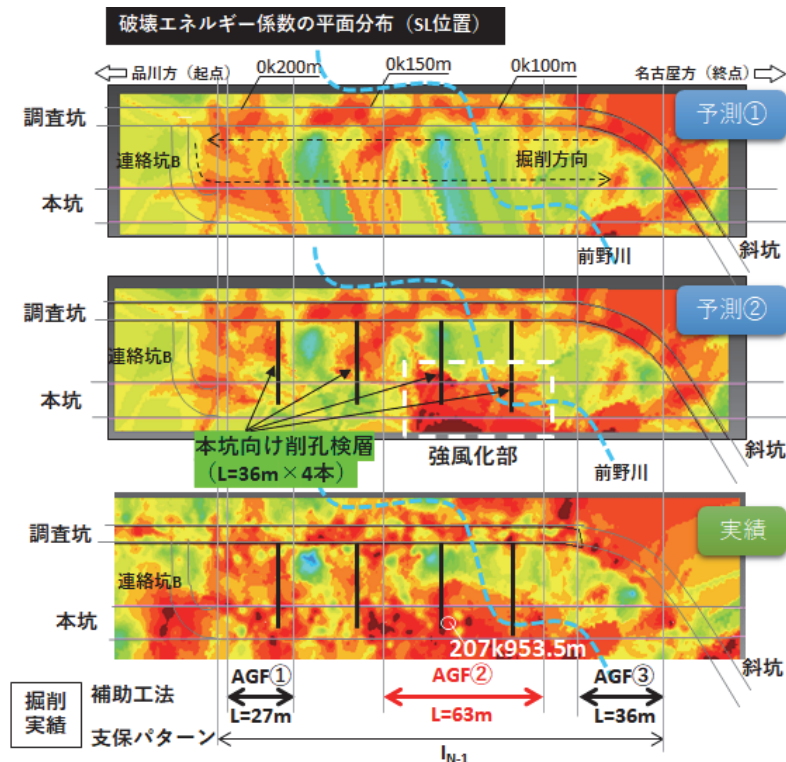


図-6 本坑の地質予測結果と実績の比較

は、補助工法要否の判断基準の目安として 150 J/cm^3 以下を提唱しており、また木村ら⁸⁾は、断層破碎帯を約 100 J/cm^3 以下と報告していることから、概ね妥当な値と考えている。

(2) 本坑向け削孔検層の有効性確認

調査坑の掘削データから本坑の破壊エネルギー係数の分布を精度良く得るために、本坑へ向けた削孔検層を実施した。ここでは、その有効性を確認するため、調査坑の掘削データ（発破孔、ロックボルト孔、削孔検層、補助工法施工時の掘削データ）のみで解析した場合（図-6 予測①）と、本坑向け削孔検層（ $L=36 \text{ m} \times 4$ 本、 30 m 間隔）を追加して解析した場合（図-6 予測②）の2つの結果を示す。なお、検討範囲は、調査坑の起点（斜坑と本坑の交差点）から連絡坑Bまでで、当区間の本坑は、連絡坑Bから斜坑へ向かって掘削している。

図-6 予測①で示される本坑の地質は、暖色系と寒色系が交互に分布しており、硬軟が繰り返す地山と予測できる。一方、予測②では、白色の四角で示した強風化部と書いた領域が全体的に赤くなっており、地山不良部が 50 m 以上続くと予測できる。以上の予測結果を踏まえて、実績（本坑の掘削データを追加して解析）をみると、予測②で示した強風化部は、実際に断層破碎部で地質が悪く（図-7）、補助工法を $L=63 \text{ m}$ の区間（AGF②）で施工しながら掘削した。このように、本坑向け削孔検層を一定間隔で実施することで、大局的な地山不良部を予測できることがわかった。なお、AGF①の区間は、予測①、

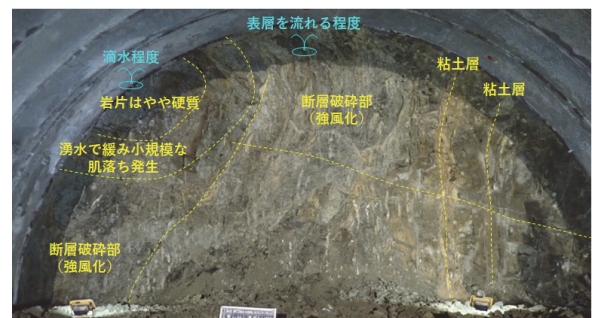


図-7 切羽状況（本坑 207k953.5m）

予測②とともに評価できていなかったが、これは本坑向け削孔検層を 30 m 間隔で実施したのに対して、地山不良部の範囲が短かったためと考えている。

(3) 本坑の地質予測結果の一例（大沢川周辺）

前節で本坑向け削孔検層の有効性が確認できたため、連絡坑Bから調査坑の終点（阿寺断層帯東縁）までは、 25 m 間隔で本坑向け削孔検層を実施している。図-8 上段は、調査坑の掘削データから、大沢川周辺の本坑の破壊エネルギー係数の分布を予測した結果である（予測時点での調査坑、本坑の切羽位置を図中に逆三角形で示している）。本坑側の大沢川前後の $207\text{k}699\text{m} \sim 207\text{k}649\text{m}$ ($L=50 \text{ m}$) 区間で、破壊エネルギー係数が 100 J/cm^3 以下と特に低い値が連続しており、この範囲を地山不良部と判断した（図中の四角内）。そのため、支保パターンを通常の I_{N1} に対して、鋼製支保工を H150 ヘランクアップ、インバート吹付コンクリートを追加した I_s パターンへ変

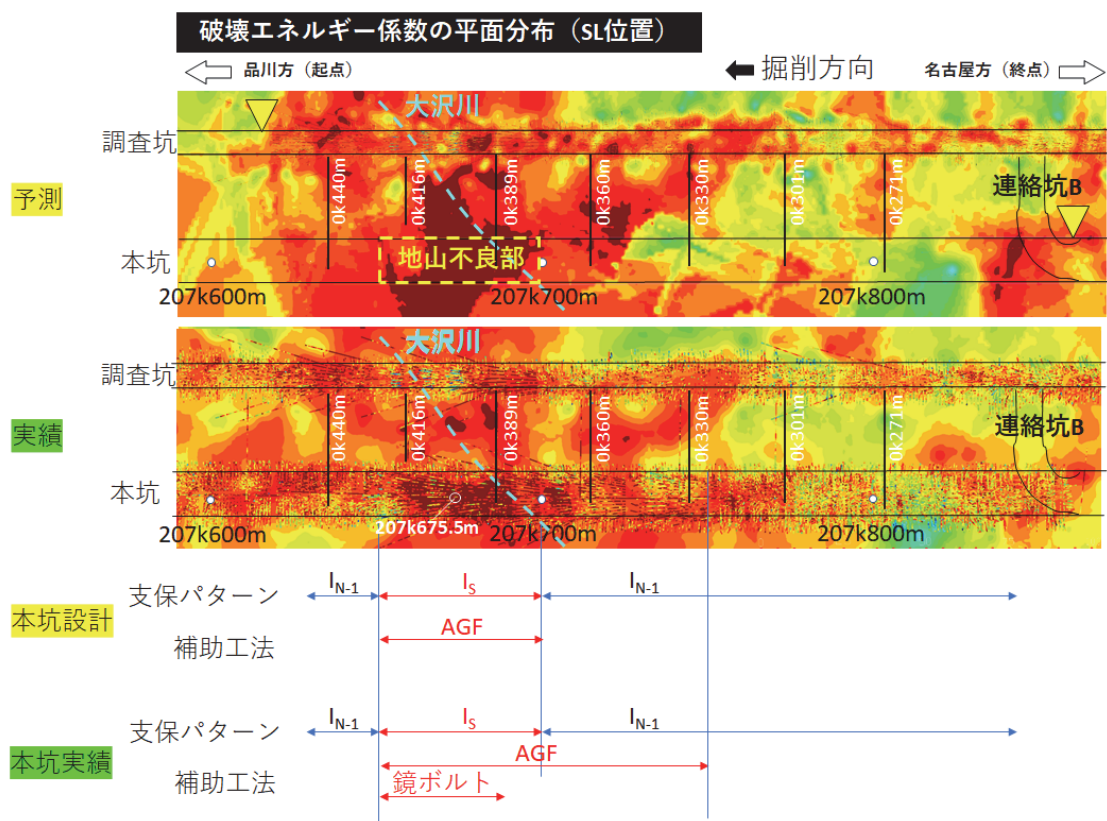


図-8 本坑大沢川周辺の予測結果と実績の比較

更することともに、補助工法（AGF）を追加した。

実績として、図-8 下段に本坑の掘削データを追加して解析した破壊エネルギー係数の分布を示す。大沢川手前（207k700m 程度）から破壊エネルギー係数の低い（100 J/cm³ 以下）区間が 50 m 程度連続している。切羽では、粘土混じりの強風化した地山であったため（図-9）、設計通りの区間で I_s パターンを採用した。補助工法に関しては、207k750m 付近から天端の抜け落ちが発生したため、設計よりも手前から AGF を採用し、また、大沢川直下では、切羽面の自立性が著しく悪かったため、鏡ボルトを併用した。その結果、掘削後の変位量は、最大で内空変位が 30mm 程度、沈下量が 25mm 程度と小さく、安全に施工をすることができたと考えている。

補助工法の要否判断について課題が残るものの、調査坑の掘削データから、本坑の大局的な地山状況を予測評価でき、事前に適切な支保パターンを検討することができた。今後もデータを蓄積し、予測結果と実績の比較検証を進めていきたいと考えている。

5. まとめ

本稿では、先進する調査坑の掘削データから、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。得られた主な知見を以下に記す。

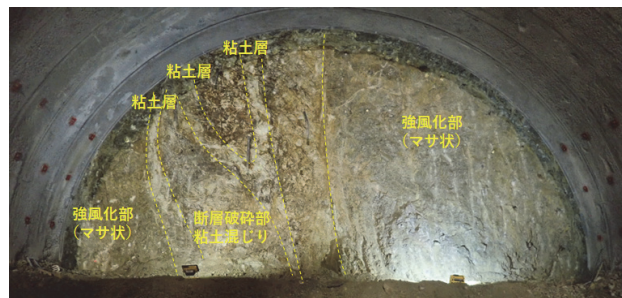


図-9 切羽状況（本坑 207k675.5m）

- 破壊エネルギー係数と岩盤性状は、概ね整合することを確認し、特にトンネル切羽の自立性が懸念される強風化部・断層部を 135 J/cm³ 以下に設定した。
- 調査坑から本坑へ向けた削孔検層を実施することで、大局的な地山不良部を定量的に予測することができ、本手法の有効性を確認した。
- 調査坑の掘削データから、本坑の大沢川周辺の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、安全に掘削できた。

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。今後は、データを蓄積しながら、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

も検証し、定量的な支保パターンの選定や補助工法要否判定について検討していきたいと考えている。

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ー恵那山トンネル中津川方ー, 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) 白鷺卓, 戸邊勇人, 福島大介, 宮嶋保幸, 西澤勇祐: ICT を活用した山岳トンネルの地質評価技術 (スマート切羽ウォッチャー) の開発, 鹿島技術研究所年報, Vol. 67, 2019.
- 7) NPO 法人 臨床トンネル工学研究所: 技術研究部会トンネル補助工法委員会平成 24~25 年度活動報告書, 2014.
- 8) 木村 哲, 山下雅之, 西山哲: ぜい弱地山における穿孔探査法の適用, 材料, Vol. 52, pp. 494-499, 2003.

(2021.8.6受付)

EVALUATION OF GEOLOGICAL CONDITIONS OF TUNNEL USING DRILLING DATA OF PILOT TUNNEL EXCAVATION

Hajime SANJO, Hiroaki YOSHINO, Tomoaki MATSUSHITA, Takafumi KAWAMOTO, Katsunori YOKOI and Suguru SHIRASAGI

It is a significant issue to select support pattern before the excavation of a tunnel from the achievement of a pilot tunnel. By using drilling data such as blasting and rock bolting of the pilot tunnel 35 m away from a main tunnel, we have attempted to evaluate the geological conditions of the tunnel. In this paper, it was found that drilling data was different between rock characteristics, and it may be possible to estimate the strength of rock using drilling data. Furthermore, the prediction result from the drilling data of the pilot tunnel showed that the geological condition under a river was extremely poor. Therefore, we modified the support pattern and applied AGF (all ground fasten) method for excavation safely.