

削孔検層システムによる 坑口部補助工法適用範囲の検討

Decision of Auxiliary Method in Portal Zone by Drill-Logging System

中沢寿幸¹・矢萩俊二郎²・山田文孝³

Toshiyuki Nakazawa, Shunjiro Yahagi and Fumitaka Yamada

¹東日本高速道路株式会社 新潟支社 信越工事事務所 (〒943-0847 新潟県上越市南新町3-46)

²三井住友建設株式会社 東京土木支店 (〒103-0023 東京都中央区日本橋本町1-9-4)

³正会員 工博 三井住友建設株式会社 土木技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)

E-mail: FumitakaYamada@smcon.co.jp

An auxiliary method of tunnel construction is made after thoroughly studying its purpose and effectiveness. It is finished after it is confirmed that the condition improved enough, because of difficulty of decision of its ending. Drill-Logging System that estimates rock mass condition by recording and analyzing all the hydraulic data of the hydraulic drill has been applied for its decision in the portal zone of the samizu tunnel, construction of 2nd tube of Joshinetsu Expressway. Applicability examination of this system to weak rock around samizu tunnel has also been studied on this paper.

Key Words : *drill- logging system, steel pipe forepiling, geologic prediction ahead of face*

1. はじめに

山岳トンネルにおける補助工法は、切羽の安定性、トンネルの安全性確保ならびに周辺環境の保全のため、主に地山条件の改善を図る目的で適用される補助的または特殊な工法である¹⁾。補助工法は地山条件、立地条件などを考慮し、目的、効果、経済性、施工方法等について十分な検討を行い導入するが、補助工法終了の判断は難しく一般的には上記条件が十分に好転したことを確認して安全側に判断する場合が多い。

昨今のコスト縮減に配慮すると、補助工法にも経済的な施工が求められることは論を待たない。本報告では坑口部に採用した補助工法の施工範囲を決定するにあたり削孔検層システム²⁾を利用したので、その結果を報告する。

硬岩地山に対しては同システムを用いてトンネル周辺の地山状況を評価し、切羽評価点、支保パターンとの関係より定量的な前方地山評価の可能性が示されている²⁾。本報告では軟岩地山における同システムの適用可能性についても検討した。

2. 対象トンネルの概要

今回報告する「さみずトンネル」は、長野県飯綱町に位置する上信越自動車道(豊田飯山 IC～信濃町 IC) 四車線化工事における、延長 1,441m のⅡ期線トンネルである。地形は標高 600～700m の丘陵性の山地であり、比較的なだらかな山容を呈している。地質は新第三紀鮮新世の飯山累層大川層に属する泥岩、砂岩、礫岩、凝灰岩の互層からなり、一軸圧縮強度 5MPa 以下の軟岩地山である。地層の傾斜は 80°～90°と垂直に近く、走向はトンネルと鋭角に斜交する。トンネル区間全線にわたり周辺には崩壊地形と思われる等高線の乱れや谷地形を呈し、両坑口部には非常に多くの崩壊跡地が確認されている。

I 期線の施工時には部分的に切羽崩落や集中湧水、100mm を越える大きな内空変位が発生した。さらに供用中の I 期線トンネルが中心間隔約 30m で並行しており、Ⅱ期線施工で変位を許せば I 期線に悪影響を及ぼすおそれがあった。とくに施工基地側坑口は崩壊跡地に位置し、図-1 に示すように I 期線施工時に遭遇した不良地山(天端崩落、集中湧水)がⅡ期線の坑口付近に出現することが予想された。また坑口上部には遷緩線や窪みが確認さ

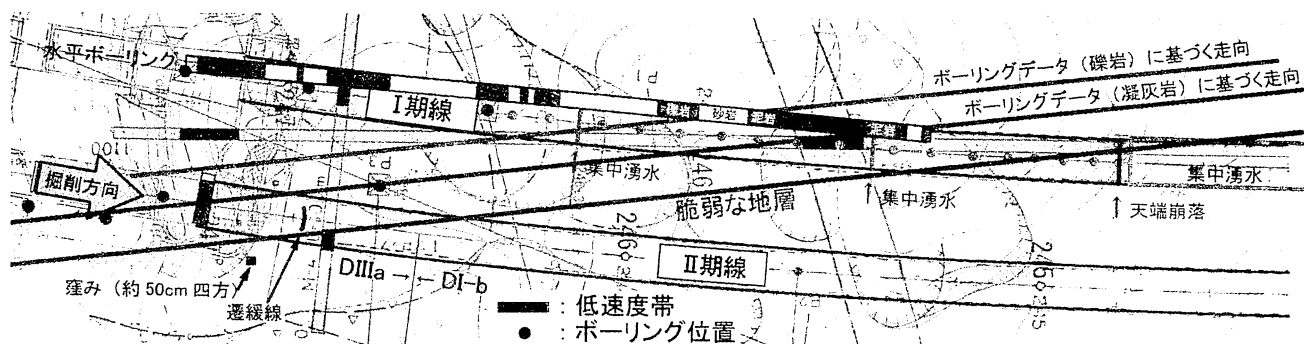


図-1 施工基地側坑口部地形地質状況平面図

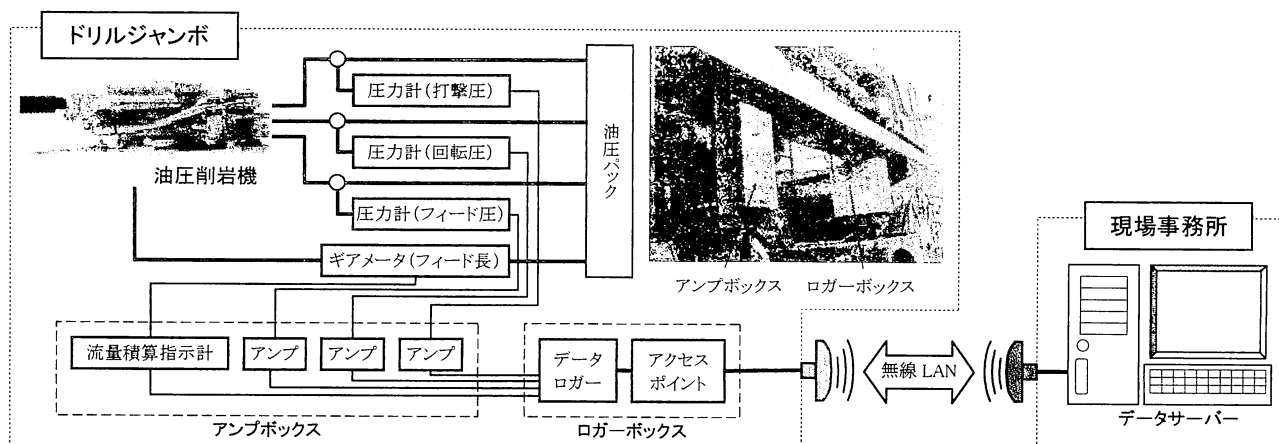


図-2 削孔検層システム概要

れており、トンネル掘削により地表面の崩落を惹起する危険性があった。このため補助工法として注入式長尺鋼管フォアパイリング（AGF、1シフト12.5m、120°範囲）を採用した。

しかし坑口部地山不良区間の範囲を事前に予測することが困難であったため、削孔検層システムによる探査と切羽地質を総合的に評価して AGF 施工の可否を判定することとした。

3. 削孔検層システム

(1) 削孔検層システムの概要

削孔検層システムとは、油圧削岩機（ドリルジャンボ）による探り削孔を行い、その機械量データを評価して切羽前方探査を行うシステムである。本システムは一般的な探り削孔とは異なり、前方探査に加えてロックボルト孔、発破孔といった施工サイクルに組み込まれた日常の削孔データを利用することで、切羽前方地山性状の定量的な予測、既施工区間の地山の安定性評価、支保パターン判定の支援を行うことが可能となっている。今回は前方探査と AGF 削孔データを利用して対象区間のトンネル周辺地山性状を評価し、切羽観察結果と合わせて補助工法の施工範囲を検討した。

本システムは、膨大な量の日常削孔データを効率的に処理するために、可能な限りシステムの自動化を進めており、ドリルジャンボの機械量データの取得からデータ処理、図化までを一貫して処理できるよう設計されている（図-2）。記録するデータは油圧削岩機の打撃圧、回転圧、フィード圧、フィード長で、ドリルジャンボ搭載のデータロガーで記録する。データの記録と無線 LAN を通じたデータサーバへの転送は自動化されており、現場事務所では生データから必要部分を切り出し削孔データベースへ登録する。切り出し、登録作業は一日 15 分程度の作業となる。

(2) 地山評価の指標

地山評価指標としては、式(1)に示す岩盤の硬軟の指標である削孔エネルギーを用いた。

$$E_d = \frac{\text{一定削孔長で岩盤に与えた打撃エネルギー}}{\text{一定削孔長で破壊した岩盤の体積}} = \frac{aP_s L_s N_d \Delta t}{A \ell_d} = \frac{aP_s L_s N_d}{AV_d} \quad (1)$$

ここに、

- E_d : 削孔エネルギー (MJ/m³ = MN・m/m³)
- V_d : 削孔速度 (m/min) = $\ell_d / \Delta t$
- P_s : 打撃圧 (MPa = MN/m²)
- A : 削孔面積 (m²)

ℓ_d : 削孔長 (m)
 Δt : 単位時間 (min)
 L_s : ピストンストローク (m)
 a : ピストン受圧面積 (m²)
 N_d : 単位時間あたりの打撃数 (回/min)

AGF 削孔と前方探査孔の削孔では、前者がφ114.3mmの鋼管による削孔、後者は通常のロッドを用いたφ75mmのビットによる削孔であり、削孔条件が異なる。しかし単位体積の岩盤を破碎するために要する打撃エネルギーである削孔エネルギーを用いることで、両者を直接比較することが可能となる。

4. AGFの施工状況

検討対象区間では AGF 削孔ならびに最大 30m 長の切羽前方探査に削孔検層システムを適用した。削孔検層の結果と切羽地質を比較することにより切羽前方地山の性状を詳細に予測し、AGF 施工範囲を決定した。図-3～図-10 に削孔検層結果、切羽観察結果を示し、以下にその詳細を述べる。

(1) AGF第1シフト施工後の評価

切羽観察（図-3）に示すように坑口部では天端～左肩部に崩積土が分布した。これは AGF 削孔結果において低削孔エネルギー領域として判別できた（図-4）。崩積土は 5m 程度で切羽進行に伴い天端上方に消失すると予測され、予測どおり掘削断面内から消失した。

地層の傾斜は鉛直～80度であり、切羽左から強風化砂岩、ごく薄い風化泥岩、両側に粘土化部を伴う凝灰岩、亀裂に粘土を挟在し鏡肌の発達した泥岩であった。施工前の調査から地層の走向はトンネル軸線と鋭角に斜交し、掘削するにつれて徐々に左方向に移動すると想定されていた（図-1）。AGF 削孔結果からは、天端付近に比べて削孔エネルギーが若干低く均質な領域が右から徐々に広がっており、坑口切羽に現れたものとは異なる地質が切羽右から出現するものと予測された。

(2) AGF第2シフトの施工範囲検討

図-5 に示す AGF 第 2 シフト打設予定切羽付近では中央部に粘土を挟在し鏡肌を伴う亀裂の発達した泥岩、右に褐色化した強風化礫岩が分布した。中央部の泥岩において天端の小崩落や肌落ちが生じており、この泥岩分布範囲を AGF で保護する必要があった。一方、前方探査では切羽中央～左側でジャミングが発生しており、亀裂質で安定性の悪い地山が続くことが予測された。

これらの調査結果より上記地質状況がしばらく継続す

ると判断されたため、第 2 シフトの AGF を施工することとした。

(3) AGF第3シフトの施工範囲検討

当該区間では、図-6 に示すように切羽中央部に亀裂に粘土を挟在し安定性の悪い泥岩が、その左には凝灰岩、右には比較的安定した強風化礫岩および砂質泥岩が分布した。

図-7 の AGF 削孔ならびに前方探査より得た削孔エネルギー分布で示されるように、上記泥岩は比較的硬質な部分（青色）と軟質な部分（黄緑～緑）が不規則に分布する領域として認識された。また(1)で予測された強度が低く均質な領域は強風化礫岩および砂質泥岩の分布域と一致した。

天端は引き続き崩落しやすい泥岩の分布が予測されたため、第 3 シフトの AGF を施工することとした。

(4) AGF第4シフトの施工範囲検討

図-8 に示す第 3 シフトまでの AGF 削孔検層結果ならびに前方探査の結果、第 4 シフト施工予定区間では比較的安定した礫岩、砂質泥岩（削孔エネルギー分布では強度は低いが均質な領域として区分）が右肩部まで広がると確実に予測されたため、この範囲の AGF を省略しても切羽の安定性を保つことができると判断し、右肩部の AGF を減じた（25 本→18 本）。

(5) AGF第5シフトの施工範囲検討

AGF 第 4 シフトの施工範囲では予測どおり安定した礫岩および砂質泥岩の範囲が拡大し、切羽の安定性を保つことができた。また図-9 に示すように AGF 削孔結果から安定範囲がさらに広がることが予測されたことから、第 5 シフトの AGF 本数をさらに減じることとした（18 本→13 本）。

(6) AGF終了の判断

第 5 シフト施工区間以降は礫岩および砂質泥岩の分布が増え、図-10 に示すように前方探査の結果中央部の泥岩の強度のばらつきが小さくなることが予測された。これは粘土化した部分が減少して切羽が安定化するものと解釈された。また切羽右側の安定した礫岩および砂質泥岩が想定される走向線どおりに徐々に分布範囲を広げると予測された。このため補助工法を注入式フォアボーリングに切り替え、切羽の状況を見ながら必要範囲のみ施工することとした。

実際の切羽地質も予測どおりに推移し、当初設計どおりに STA.246+50 より支保パターンを D I へと切り替え、補助工法の施工を終了した。

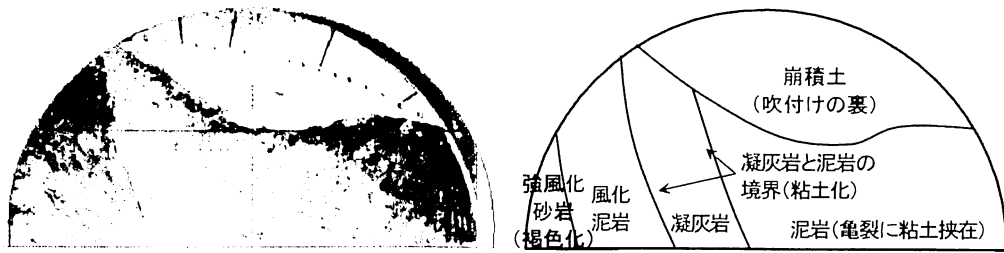


図-3 施工基地側坑口部の切羽状況

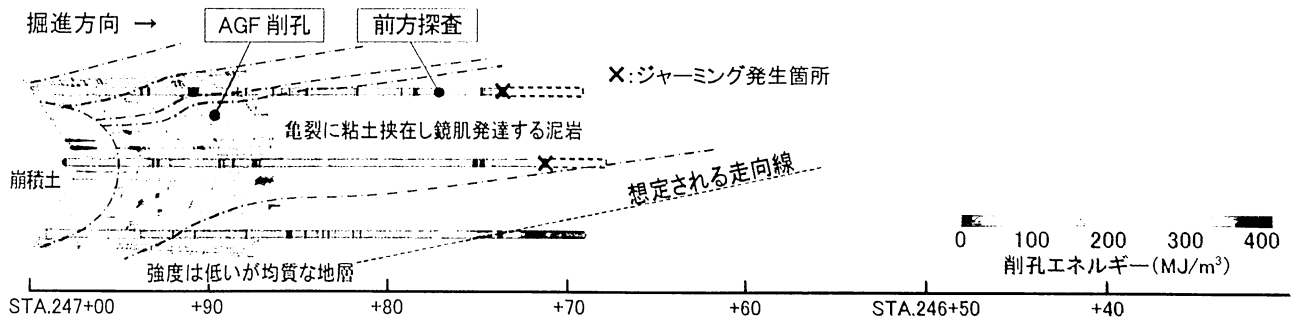


図-4 AGF 第1シフト施工後削孔検層結果 (削孔エネルギー分布)

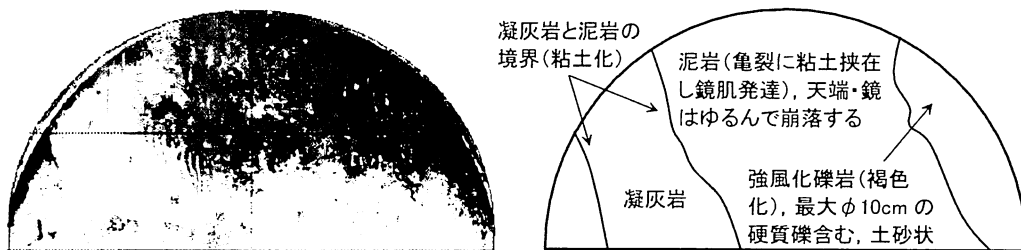


図-5 AGF 第2シフト施工切羽付近の切羽状況 (STA.246+88.2)

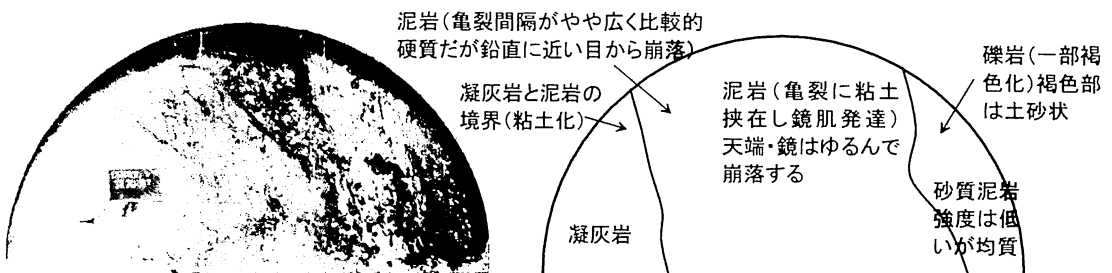


図-6 AGF 第3シフト施工切羽付近の切羽状況 (STA.246+78.2)

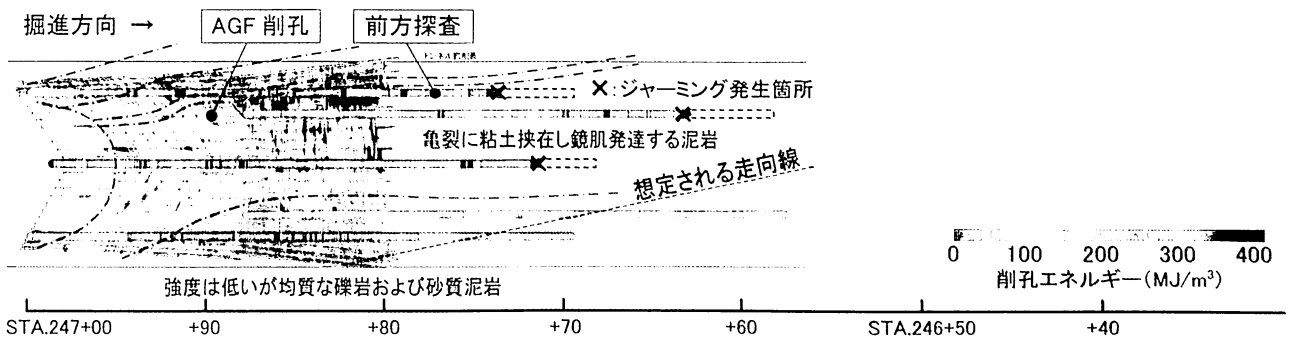


図-7 AGF 第2シフト施工後削孔検層結果 (削孔エネルギー分布)

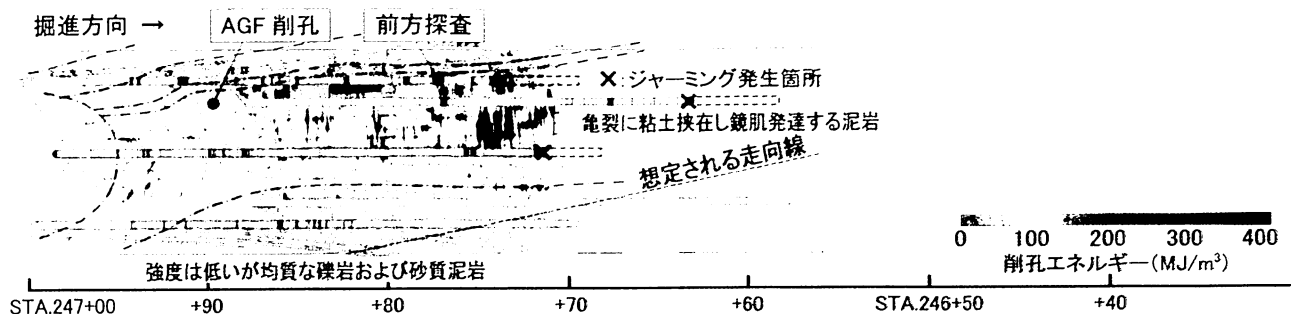


図-8 AGF 第3シフト施工後削孔検層結果 (削孔エネルギー分布)

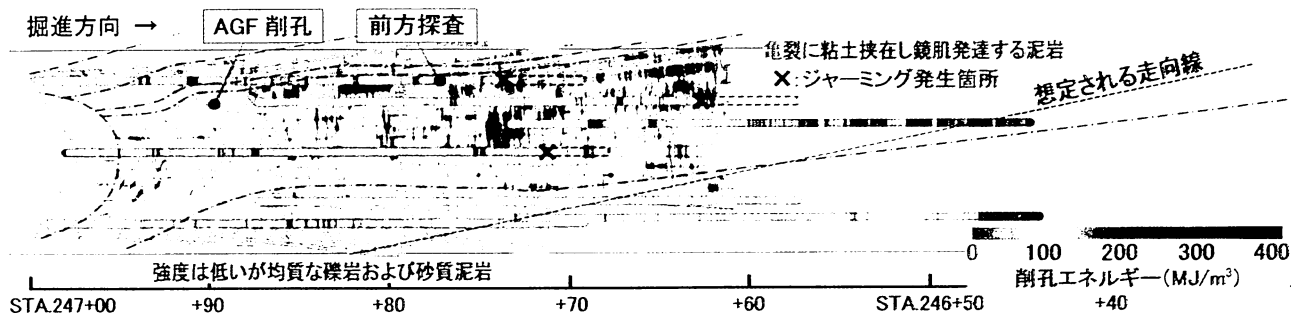


図-9 AGF 第4シフト施工後削孔検層結果 (削孔エネルギー分布)

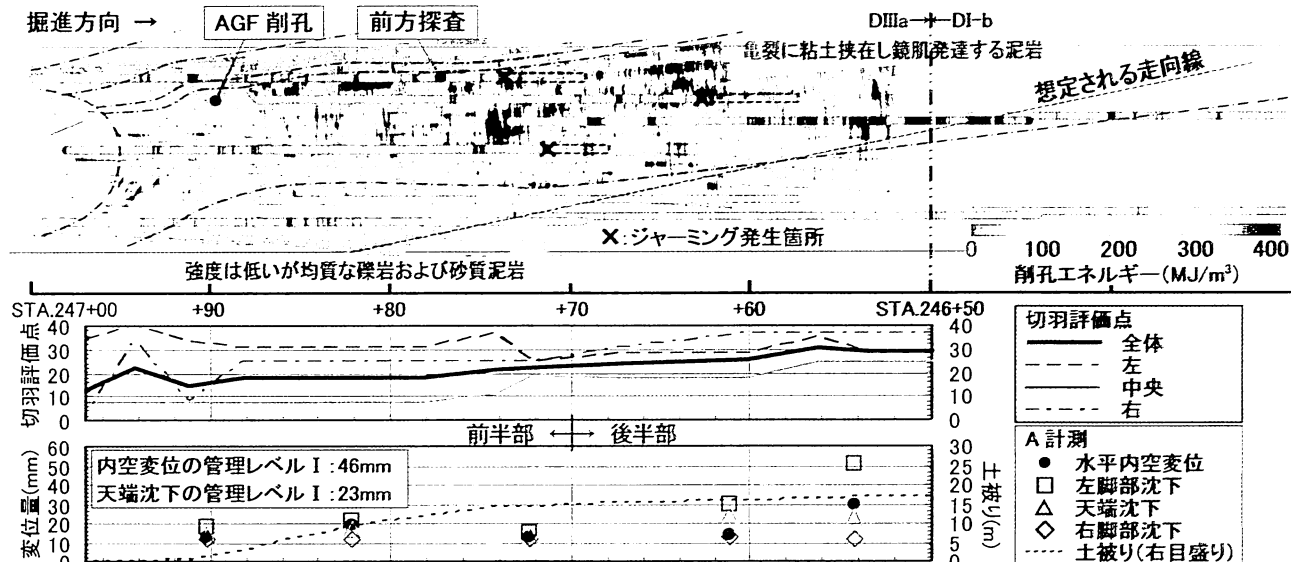


図-10 AGF 第5シフト施工後削孔検層結果 (削孔エネルギー分布) および切羽評価点とA計測結果

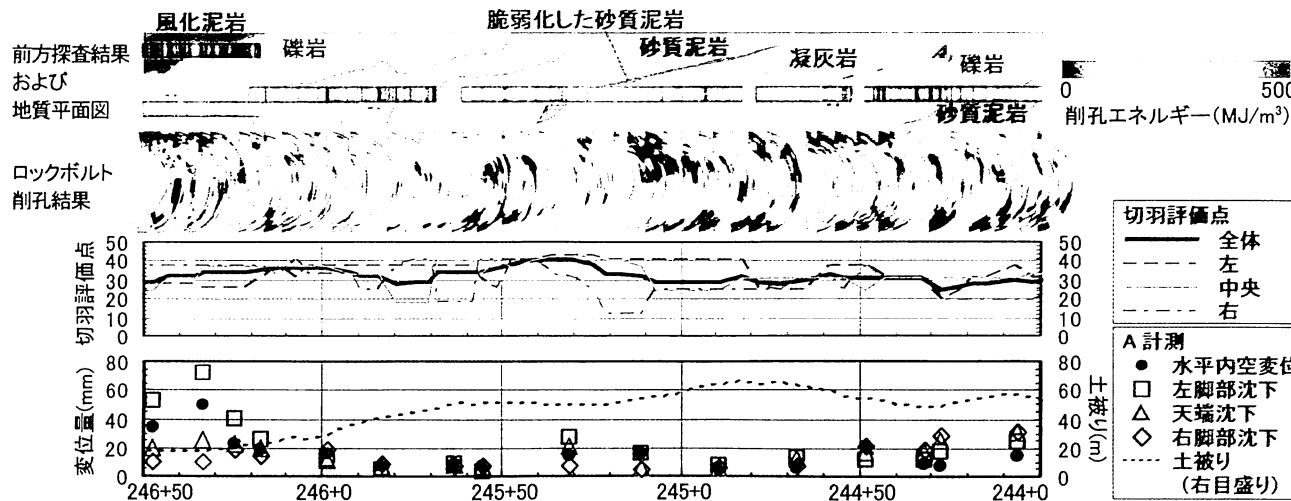


図-11 施工基地側 250m 区間における地質状況と削孔エネルギー分布

上: 地質平面図と前方探査における削孔エネルギー分布, 中: ロックボルト削孔による削孔エネルギー分布, 下: 切羽評価点とA計測結果

5. AGF施工範囲の妥当性検討

前章で経時的に述べた地質変化と AGF 施工状況の関係を切羽評価点および坑内の変位計測結果と比較し、補助工法の妥当性を改めて考察する。図-10 には削孔検層の結果に加えて対象区間の切羽評価点ならびに A 計測結果を示す。

切羽評価点は切羽全体の加重平均値とともに、中央部と左右それぞれの配点を個々に示す。図によると全体の評価点が徐々に増大し、D I へのパターン変更位置である STA.246+50 では 30 点まで向上している。ただし切羽中央部の評価点は低く、STA.246+75 までは 10 点以下、以降も 20 点前後を推移する。これは亀裂の発達した泥岩の分布を反映したものと考えられる。これに対して左右の評価点は坑口の 10m 程度を除き 30 点前後を示す。切羽地質との対応を見ると STA.246+70 までは切羽左に比較的硬質な凝灰岩が分布するため左側の評価点が高く、以降は右側の安定した礫岩および砂質泥岩により右側の評価点が高くなっている。上記傾向は前章で述べた削孔検層による予測と整合する。

A 計測結果によると、STA.246+70 までは全体の切羽評価点が低いにもかかわらず天端沈下、内空変位とも 10～20mm で推移している。以降、土被りは大差ないが左脚部沈下が顕著に増大し、これに伴い天端沈下、水平内空変位ともに増加している。ただし内空変位、天端沈下ともに I 期線への影響検討から設定した管理レベル I 以内であり、変形量としては問題ないレベルである。右脚部沈下は約 10mm で変化していない。また目視観察によると I 期線トンネルおよび地表への影響は極めて軽微であった。

AGF を採用した結果、大規模な崩落や変形を生じることなく、また地表や I 期線トンネルに悪影響を及ぼすことなく安全に施工を進めることができたことは、一部で数量を減じた今回の補助工法が十分な効果を発揮し得たものと考えられる。

今回の対象区間は STA.246+70 を境にふたつに区分できる。すなわち切羽中央部に脆弱な泥岩が分布するものの両脚部は安定した地質で変位の小さい前半部と、泥岩が次第に安定化しつつ切羽左に移動し左脚部沈下が増大した後半部である。前半部では 120° 範囲に打設された AGF のアーチが切羽中央部の泥岩の崩落を抑止しつつ、安定した両脚部に切羽前上方のゆりみ荷重を確実に伝達する機能を果たして変位を抑制したものと考えられる。一方、後半部では変位が大きくなるが、右側よりも左側の沈下量が増大していることから、補助工法を減じた影響ではなく地質状況に起因する変位の増加であると考えられる。むしろ、意図したものではないものの、AGF によるアーチ形成が不完全であったため、結果的に脆弱な

脚部への過大な負荷を避け得た可能性がある。変位量は前述のように管理レベル I 以内であったため問題とはならなかったが、沈下量が大きくなる場合は沈下抑制のための補助工法を別途導入する必要があったものとする。

6. 軟岩における地質予測への適用可能性

前章で述べたように、坑口部では AGF 削孔ならびに切羽前方探査より得た削孔エネルギー分布を事前地質調査、切羽観察結果と対比することで、強度コントラストの小さい軟岩地山においても削孔検層による岩種判定が行える可能性が示された。そこで、引き続き水抜きを兼ねて実施していた切羽前方探査のデータと、ロックボルト削孔データを再解析して実際の切羽地質および施工状況との対比を試み、地質予測への適用可能性について検討する。

図-11 に、図-10 に連続する 250m 区間 (D I) における削孔検層結果 (削孔エネルギー分布)、切羽の地質観察から作成した地質平面図、切羽評価点、および A 計測結果を合わせて示す。切羽前方探査結果は前方探査実施位置に地質平面図と重ねて示す。またロックボルト削孔結果は斜め上からの鳥瞰図として示す。切羽評価点は図-10 と同様全体の加重平均値と中央部、左、右それぞれの配点を個々に示す。なお新たな地層はトンネル右側から出現すると想定されたため、切羽前方探査は右踏前部において実施している。

削孔検層結果と地質平面図を比較すると、相対的に低強度と考えられる凝灰岩等の分布傾向や各岩種の概略的な特徴はある程度評価できる。すなわち、砂質泥岩は削孔エネルギー 300～500MJ/m³ で比較的均質であり、礫岩は削孔エネルギーが 100～300 MJ/m³ とやや低く局所的に削孔エネルギーの高い部分を含む。STA.245+70 付近から切羽に出現する凝灰岩は他の岩質に比べて削孔エネルギーが明瞭に低く 100～200MJ/m³ を示す。しかしながら岩種と削孔エネルギー分布が完全に 1 対 1 で対応するとは言えず、軟岩地山においては削孔エネルギー分布のみから直接岩種を判定することは難しい。

一方、切羽評価点ならびに A 計測結果と削孔検層結果、地質状況を対比すると、以下のような特徴を読み取ることができる。

- ・ 坑口部 DⅢ区間から続く風化泥岩分布域では削孔エネルギーが高いにもかかわらず左脚部沈下が大きい。これは 4、5 章で述べた泥岩の性状に起因する。
- ・ 砂質泥岩と凝灰岩の境界部は脆弱化しており、STA.245+70～STA.245+0 で右側の切羽評価点が明瞭に低下するとともに、同区間で内空変位、天端沈下が増加している。切羽前方探査においても脆弱部で削孔

エネルギーが低下している。

- ・凝灰岩と礫岩の境界付近（STA.244+70 付近）では切羽前方探査において削孔エネルギーが低下しているが切羽評価点に低下は見られず、変位量も小さい。
- ・STA.244+30 以降、沈下量がやや大きくなるが、切羽評価点、削孔検層結果ともに大きな変化は見られない。

以上を削孔エネルギーの観点からまとめると、前方探査において削孔エネルギーの低下を検知した場合には定性的にはあるが切羽地質の悪化、変形量の増大が危惧されるが、削孔エネルギーが高くても切羽の安定性が担保されているわけではない、と言うことができよう。

参考文献²⁾では、硬岩地山において削孔エネルギーと切羽評価点および支保パターンの相関が検討されている。本報告のように岩盤強度のコントラストが小さな軟岩地山に対しても、上述のように切羽観察結果や A 計測結果等、他の情報と組み合わせることである程度の地質予測や危険予知が行える可能性が示された。今後、同様の地山における施工事例を収集し、削孔検層結果と他の施工状況に関する情報について定量的な検討を行うことで、軟岩地山においてもより精度の高い切羽前方地質予測が可能となると考える。

7. まとめ

坑口の脆弱部に採用した補助工法（AGF）の施工範囲を決定するために削孔検層システムを導入した。AGF 削孔ならびに最大 30m 長の前方探査の削孔データを処理

し、これにより得られた削孔エネルギー分布を事前地質調査、切羽観察結果と対比することで切羽前方地山の三次元的な広がりを詳細に評価することができた。その結果に基づき、安全かつ経済的な補助工法の施工を実現できた。

また切羽評価点や A 計測結果と削孔検層結果を組み合わせることで、軟岩地山における切羽前方の地質予測や危険予知に削孔検層システムが利用できる可能性が示された。

今回報告した削孔検層システムにおいては、ドリルジヤンボによる全削孔データを自動取得するため、今回の事例以外にもあらゆる削孔データを利用してトンネル周辺地山の評価が可能である。今後も引き続きデータの蓄積と検討を進めていく所存であり、合理的な補助工法の施工や施工中のリスク管理等に活用していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006.
- 2) 山田文孝，山本信幸，山下高俊，山地宏志：削孔検層システムを用いたトンネル全長にわたる地山評価，トンネル工学報告集，第 15 巻，pp.121-128，2005.12.