

花崗閃緑岩の熱水変質帯における水圧ハンマを用いた 高速ノンコア削孔による切羽前方探査の適用

中日本高速道路株式会社 室 充, 八木 翔吾
株式会社大林組 白旗 秀紀, ○伊藤 哲, 木梨 秀雄, 磐田 吾郎

1. はじめに

日本の地質は、硬軟、脆弱部が複雑に混じり、変化に富む。そのため切羽を開放して掘削する山岳トンネル工事では、図-1のように、切羽前方の予期せぬ脆弱地山や突発湧水の出現および地山に適合しない支保選定により構造的な品質が低下したり、最悪の場合は切羽崩落や大幅な工程遅延を招いたりする。



図-1 山岳トンネルにおける地山崩壊や突発湧水の概念

地上からの限られた事前調査のみでは、地山状況を詳細に把握することは困難である。しかしながら、トンネルを安全に掘進する上では地質情報の把握が必要であり、トンネル切羽から前方地山を探索することはなくてはならないものになっている。切羽から行う前方探査は、掘削作業を中断する必要があるため、できるだけ長距離を短時間で調査する必要があるが、既存の切羽前方探査技術は長さ、早さ、精度の全て満足するものがなかった。例えば、コアボーリングであれば、地山性状を精度良く把握できるが、調査に長時間を要したり、ジャンボによるノンコアボーリングであれば、調査は短時間だが、1回のボーリング長さが30~50m程度と短い。そこで、斎藤他¹⁾は1回のボーリング長を概ねトンネル掘削月進の150mとし、地山評価の精度向上と高速性能を持たせた探査手法を新たに開発した。以下に、本技術の概要と新名神高速道路野登トンネル工事で、花崗閃緑岩の熱水変質帯において本技術を適用した事例について述べる。

2. 高速ノンコア削孔による切羽前方探査システムの概要

本技術の全体概要を図-2に示す。ロングフィード式ボーリングマシンに、高水圧ポンプを接続し、先端打撃方式の水圧ハンマにより削孔する。削孔速度・送水圧等のデータは、センサで自動計測してレコーダに記録する。削孔完了後にデータをPCに転送し、エネルギー指標値から地山評価を行う。以下に、高速削孔機構および地山評価手法について述べる。

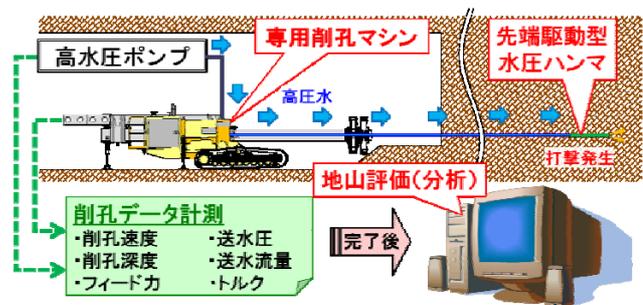


図-2 システム概要

2.1 高速削孔機構

2.1.1 ロングフィード式ボーリングマシン

削孔以外の作業時間を短縮し、水圧ハンマの優れた高速削孔性能を最大限に活用するため、写真-1に示す専用ボーリングマシンに8mの長尺ガイドセルを搭載し、長尺ロッドを使用可能とした。ボーリングの作業時間を構成するのは、主に削孔時間とロッドの継ぎ足し時間である。本システム



写真-1 ロングフィード式ボーリングマシン

では、6m ロッドを使用し、ロッドの継ぎ足し回数を一般的なボーリングの半分以下に低減し、その作業時間を短縮する。

2.1.2 水圧ハンマ

本技術では、写真-2の先端打撃方式の水圧ハンマ wassaraW80HD（ビットは外径φ90のものを使用）を採用している²⁾。先端のビットが地山に接触して反力を得ると、高圧水がハンマ内部のピストンを振動させて、打撃を発生させる。ピストンは高圧水で加速されてビットを打撃するため、その打撃エネルギーは送水圧に比例する。

従来のノンコアボーリング前方探査（油圧ジャンボ・RPD等）で採用される後端打撃方式と先端打撃方式の水圧ハンマとの違いを図-3に示す。水圧ハンマは、先端のハンマ本体に高圧水を供給して打撃を発生させるのに対し、従来型はロッド後端に打撃を与えて削孔する機構である。後端打撃方式では、ロッドの継手等でエネルギーロスが増大するため、長距離の削孔では速度が低下するが、水圧ハンマは先端で打撃するため、削孔長に関わらず効率的な削孔が可能である。また、水圧ハンマでは打撃によるロッドの振動が小さく孔壁が安定し、ロッドが孔壁に拘束されにくい利点もある。



写真-2 水圧ハンマ(wassaraW80HD)

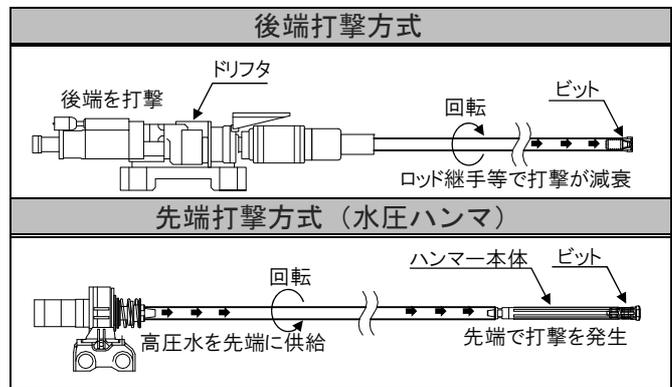


図-3 後端打撃方式と先端打撃方式水圧ハンマの比較

2.2 地山評価手法

2.2.1 エネルギー指標値

本技術では、削孔に要した水圧ハンマ先端の打撃エネルギーから地山の硬さを評価する。水圧ハンマの打撃エネルギーは送水圧に比例するため、単位時間当りに地山に与える打撃エネルギーは PfV に比例する。ここで、 P ：送水圧、 f ：単位時間当りの打撃数、 V ：削孔速度である。本システムでは、エネルギー指標値 E を以下に定義して地山評価を行う。

$$E = \frac{Pf}{V} \quad (1)$$

2.2.2 打撃数の評価

式(1)で P と V は計測ができるが、打撃数 f はボーリング削孔時に直接計測するのが困難なため、推定が必要である。もし、一定の送水圧で水圧ハンマが駆動される場合、ピストンが等加速度運動するため、打撃数は \sqrt{P} に比例すると考えられる。削孔試験では、送水圧 P が 16MPa の時は打撃数 f は 60Hz であったため、送水圧と打撃数の関係は式(2)のように考えられる。

$$f = \frac{60\sqrt{P}}{16} \quad (2)$$

一方で、実際の岩盤では、脆弱部や亀裂部で先端のハンマは反力が低下し、図-4の緑のハッチングで示すようにハンマ打撃数の低下が頻繁に発生する³⁾。

そのため、打撃数に式(2)の理論的な推定値を用いて地山を評価すると、実際よりも大きい打撃数でエネルギー指標値が高く算出される恐れがある。図-4ではハンマの打撃数の低下時はそれに連動して送水圧も同様に大きく低下していることがわかる。この送水圧と打撃数の関係は、図-5の赤線の回帰式(3)で求められる。

$$f = 2.6P + 13.4 \quad (3)$$

本システムでは式(1)のエネルギー指標値に式(3)を用いることとした。

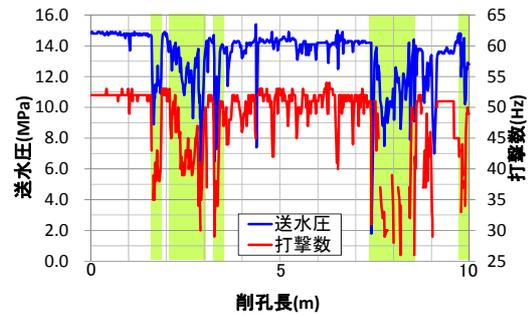


図-4 反力不足による打撃数低下の発生状況

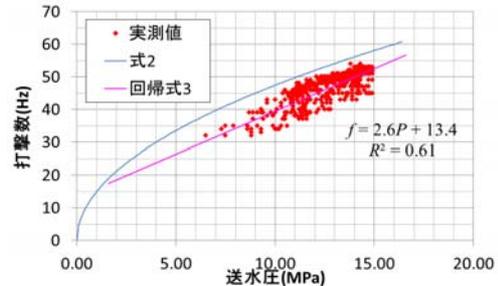


図-5 送水圧と打撃数の関係

2.2.3 エネルギー指標値と地山強度、地山等級との関係

写真-3のように強度の異なる複数の模擬地盤を使って削孔試験を行い、岩盤の強度とエネルギー指標値の関係を検証した⁴⁾。

図-6に示すように、エネルギー指標値が地盤強度の増加に伴って、高くなるため、エネルギー指標値により岩盤の硬さを推定できることがわかる。

本技術では、算出したエネルギー指標値 E から地山等級 (岩盤の硬さ) を判定する。表-1 にエネルギー指標値 E と地山等級の対応表を示す。これは事前の探査で得られた E ⁵⁾ と、トンネル掘削時の切羽観察等で決定した地山等級の実績を比較して決定した値である。なお、図-7に、日本と海外で用いられる岩盤分類の評価値の比較を示す⁶⁾。左3つは日本の、右の3つは海外の分類法である。日本の岩盤は海外に比べ、変化に富み、悪い傾向にある。



写真-3 模擬地盤での削孔試験状況

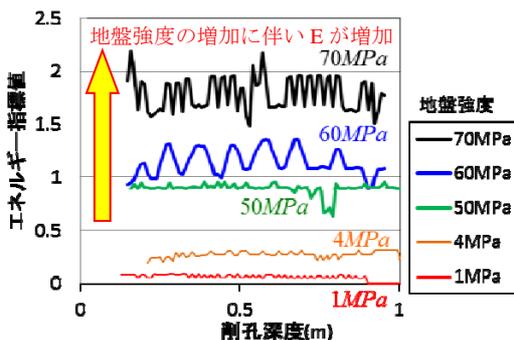


図-6 模擬地盤での削孔試験結果

表-1 エネルギー指標値 E と地山等級の対応

エネルギー指標値 E	地山等級
4.5以上	B
4.5~4.2	C I
4.2~2.5	C II
2.5~1.25	D I
1.25以下	D II

日本道路 公団*	電力中央研究所 (菊地・斉藤)**	鉄建公団	RSR*	RMR*	Q**
A	CH~B	VN	100~75	非常に良好 100~81	普通 10以上
B		IVN	75~59	良好 80~61	悪い 2.0~10
C I	CM	III N	58~44	普通 60~41	かなり悪い 0.1~2.0
C II		II N	43~29	悪い 40~21	
D I	CL	I L, I S		非常に悪い	非常に悪い 0.1~0.04
D II		特S, 特L	28以下	20以下	
E	D				極端に悪い 0.004以下

図-7 日本と海外の岩盤分類の評価値の比較

3. 花崗閃緑岩の熱水変質帯への適用

新名神高速道路野登トンネルで実施した、高速ノンコア削孔による切羽前方探査の適用事例を示す。

3.1 工事概要

新名神高速道路の三重県区間は、東名阪自動車道の渋滞緩和とともに供用中の名神高速道路とのダブルネットワーク機能が期待されている。平成 28 年 8 月に一部区間（四日市 JCT～新四日市 JCT）が開通をし、平成 30 年度の全線開通を目標に事業を進めている。

図-8 に高速道路の路線と野登トンネルの位置を示す。野登トンネルは、亀山西 JCT と菰野 IC（いずれも仮称）の間に位置し、三重県鈴鹿山脈の南端にある標高 851.6m の野登山を北東から南西方向に貫く延長約 4.1km の 2 車線双設トンネルである。当工事はそのうちの西側工区（上り線 2,368m、下り線 2,391m）を構築する。本トンネルは、NATM による発破掘削、補助ベンチ付全断面工法である。図-9 にトンネル標準断面図を示す。断面積は約 75m² である。



図-8 高速道路路線と野登トンネルの位置

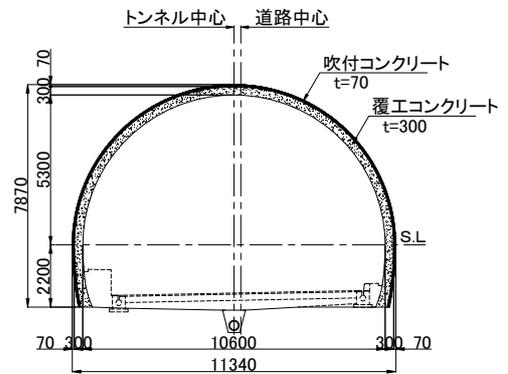


図-9 トンネル標準断面図

3.2 地形・地質概要

本トンネルの地質縦断図を図-10 に示す。地質は中生代白亜紀の領家花崗岩類に属し、坑口から約 100m の区間には加太花崗閃緑岩、それ以东には黒雲母花崗閃緑岩を主体とする野登山花崗閃緑岩が分布している。新鮮な花崗閃緑岩の一軸圧縮強度は 100MPa 程度である。当初の設計では、野登山花崗閃緑岩の一部区間では熱水変質作用を受けた小断層や多亀裂帯の存在が想定された。工事着工前の弾性波探査や空中写真による地層判読の結果から、地上の直線谷と鞍部の連なりからリニアメントの存在が確認でき、STA.442+00～443+00 にかけて野登山花崗閃緑岩中の小断層または多亀裂帯を形成した不良地山区間が想定された。

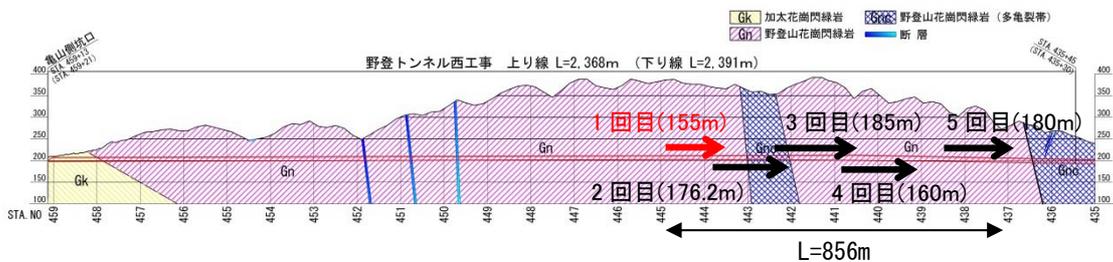


図-10 野登トンネル地質縦断図

3.3 前方探査システム適用区間の概要

実際にトンネルを掘り進めていくと多亀裂帯の想定位置から約 300m 手前で不良地山が出現した。細かい亀裂が多く、毎分 20 リットル程度の湧水も発生した。加えて、粘性土が介在していることで地山の緩みを

誘発し、湧水のついた粘性土に沿って部分崩落が生じた。その後のトンネル前方の地山状況の把握と、水抜きボーリングによる切羽の安定化を行うため、一度に 150m 以上の長距離削孔が可能な本技術を採用した。前方探査は図-10 の矢印に示す合計 5 回、施工延長は累計 L=856m を実施した。

3.4 適用結果

前方探査の計測結果を図-11 に示す。計測結果から、主にエネルギー指標値が低い区間を 4 か所確認できた。各区間の考察を以下に示す。切羽評価点との比較に加え、図中に実施した対策工も併せて示す。

また、トンネル掘削に先立ち前方探査を実施していたことで、不良地山の位置を事前に把握することができた。それに基づき、内空変位量の管理基準値を設定し、対策工を決めておくことができた。表-2 にその管理レベルⅠ～Ⅲに設定した。対策工は、レベルⅠを超えた場合は計測および監視頻度を増やし、レベルⅡ超で増しロックボルトの打設、レベルⅢを超えればインバート吹付けまたはインバートストラットを設置することとした。

表-2 内空変位量の管理基準値

支保パターン	レベルⅠ	レベルⅡ	レベルⅢ
CⅡ	25mm	35mm	45mm
DⅠ	35mm	50mm	65mm

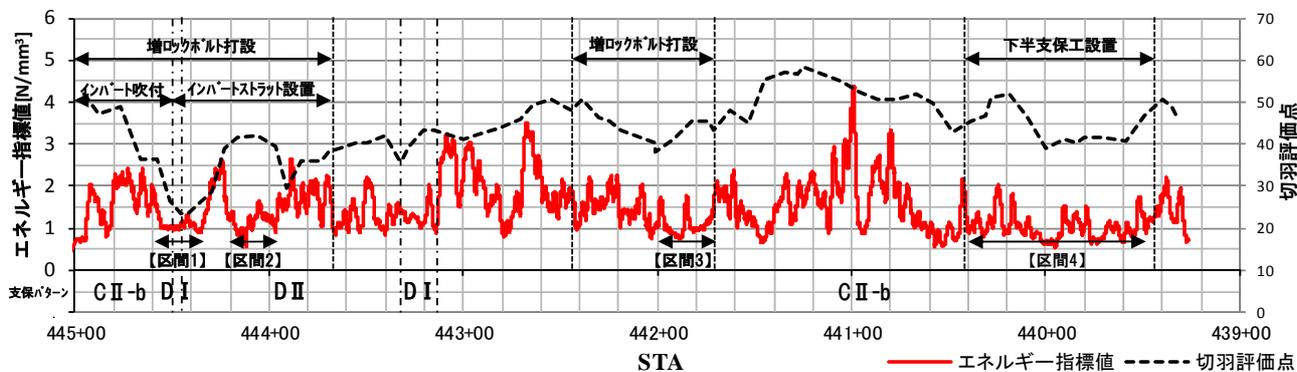


図-11 前方探査結果

3.4.1 区間 1 : STA.444+60~444+35

エネルギー指標値と同様に、掘削時の切羽評価点も低く判定されている。本技術のこれまでの蓄積データからも、エネルギー指標値が 1.25 を下回ると DⅡ相当の特に脆弱な地山に該当することが確認できており、当該地山もその判定方法を的確に反映している。切羽観察から、写真-4 のように切羽全面に熱水変質作用を受けた粘性土の地山であることが確認でき、内空変位はレベルⅢを超え最大 135mm 発生したことにより、支保パターンも設計の CⅠから図-12 の DⅡへと変更している。本前方探査で算出したエネルギー指標値により、設計段階では想定されていなかった脆弱部を事前に把握することができた。



写真-4 花崗閃緑岩の熱水変質帯

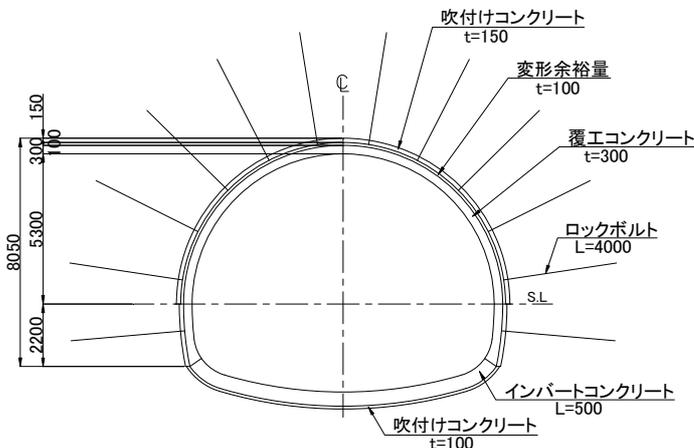


図-12 DⅡパターン断面図

3.4.2 区間 2 : STA.444+20~443+95

区間 1 と同様に、エネルギー指標値が低く推移しており、内空変位量がレベルⅡの 50mm を超えてもなお収束傾向を示さなかったため、増しロックボルトの打設とインバートストラットの設置を行っている。

3.4.3 区間 3 : STA : 442+00~441+70

この区間でもエネルギー指標値が低下している。切羽評価点はやや高めに判定されているが、初期の内空変位が 32mm（レベルⅠとⅡの間）発生し、切羽の進行とともに変位量が増加した。ロックボルト打設時に粘性土が出たことから、部分的に脆弱部があり、それを前方探査ボーリングによってとらえていたと推察される。事前にエネルギー指標値を用いた地山評価を行っていたことで、増しロックボルトなどの対策工を早期に取ることができたために、変位を最小限に抑えることが可能となった。

3.4.4 区間 4 : STA : 440+40~439+50

この区間でもエネルギー指標値にばらつきはあるが低い値で推移している。切羽評価点も同じく低く判定されており、掘削時において SL 付近に粘性土が介在しているのが確認されたため、支保パターンは CⅡ-b であったが下半支保工を追加設置して対応している。

4. まとめ

野登トンネルで本前方探査を合計 856m の区間で実施し、単管削孔で L=150m を 8 時間で削孔することができた。削孔長さは最大で L=185m であった。これはジャンボによるノンコア削孔検層と比較して、削孔延長が長く、削孔能力に優れているといえる。加えて、湧水の多い地山においては、水抜きボーリング兼用で行うことで、より効率的にトンネル掘削を行うことができる。

また、脆弱な地山で前方探査を実施し、エネルギー指標値により、事前に脆弱部の位置を把握し、地山等級を定量的に予測できた。特に熱水変質帯の非常に脆弱な箇所は、事前の予測により、岩判定を最適な時期で行うことができ、当初設計より 3 ランク剛性の高い支保パターンを適用した。エネルギー指標値と脆弱部出現箇所、切羽評価点に相関性があることを確認することができた。また、多き裂性の地山での本前方探査の実績から、エネルギー指標値は、岩種によらず、地山評価を行える可能性があることを示した。今後はデータを蓄積していくことで、より一層の予測精度を向上したい。

参考文献

- 1) 斎藤有佐・加藤直樹・木梨秀雄・高橋佳孝・伊藤哲 (2012) : トンネル切羽前方高速ノンコアボーリングシステムの開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp.59-pp.60.
- 2) テクノドリル : Wassara drilling system (<http://www.technoj.com/wassara.htm>), テクノドリル.
- 3) 磐田吾郎・伊藤哲・木野村有亮 (2015) : 水圧ハンマを用いた高速ボーリングによる切羽前方探査技術の開発, トンネルと地下第 46 巻 10 号, 土木工学社, pp.49-pp.58.
- 4) 磐田吾郎・天野悟・桑原徹・木梨秀雄 (2014) : 高速ノンコア切羽前方探査技術の開発, トンネル工学報告集第 24 巻, 土木学会トンネル工学委員会, pp.1-pp.7.
- 5) 秋田伸治・木野村有亮・木梨秀雄・桑原徹・畑浩二・渡辺淳 (2015) : 多湧水花崗岩地山における切羽前方探査技術の適用, 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会岩盤力学委員会, pp.81-pp.86.
- 6) 日本トンネル技術協会 (2000) : TBM ハンドブック, トンネル技術協会, p.65.