

花崗岩変質帯における水圧ハンマを用いた ノンコア前方探査技術の適用

伊原 泰之¹・久保嶋 悠太²・木野村 有亮³・長塚 渉⁴
・磐田 吾郎⁵・木梨 秀雄⁶・伊藤 哲⁷

¹中日本高速道路株式会社 名古屋支社 四日市工事事務所 鈴鹿亀山工事区 (〒510-0832 三重県四日市
市伊倉1丁目2番14号)

E-mail: y.ihara.aa@c-nexco.co.jp

²中日本高速道路株式会社 名古屋支社 四日市工事事務所 鈴鹿亀山工事区 (〒510-0832 三重県四日市
市伊倉1丁目2番14号)

E-mail: y.kuboshima.aa@c-nexco.co.jp

³株式会社大林組 名古屋支店 新名神野登JV工事事務所 (〒519-0222 三重県亀山市両尾町土打1759-1)

E-mail: kinomura.yusuke@obayashi.co.jp

⁴株式会社大林組 名古屋支店 新名神野登JV工事事務所 (〒519-0222 三重県亀山市両尾町土打1759-1)

E-mail: nagatsuka.wataru@obayashi.co.jp

⁵株式会社大林組 本社生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2号品川イン
ターシティ28F)

E-mail: iwata.goro@obayashi.co.jp

⁶株式会社大林組 本社生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2号品川イン
ターシティ28F)

E-mail: kinashi.hideo@obayashi.co.jp

⁷株式会社大林組 本社生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2号品川イン
ターシティ28F)

E-mail: ito.satoshi@obayashi.co.jp

トンネル切羽から行うノンコア前方探査の施工時間と頻度を削減するため、水圧ハンマを搭載したロング
フィードボーリングマシンによる高速ノンコア削孔システムを開発した。エネルギーロスが少ない先端駆
動型の水圧ハンマの採用と、ロングフィードによるロッド継足し回数の削減により、長距離を短時間で削
孔できる。地山状況は、水圧ハンマの削孔データから予測する。水圧ハンマの打撃数は、地山や削孔条件
により変化するため、得られる削孔データから打撃数を求め、地山評価を行う手法を考案した。

本稿においては、花崗岩の熱水変質帯において本システムを適用した結果について述べる。

Key Words : *non-core drilling, estimation for ahead of the face, middle length drilling*

1. はじめに

山岳トンネルの工事では、設計時の地質調査結果と掘削時の地質状況に大きな違いが出ることがしばしばある。したがって、トンネルの切羽前方を的確に予測することは安全で合理的な施工を行うために不可欠である。

トンネル掘削時には断層破碎帯などの脆弱区間や多き裂・多湧水区間などを対象にして、各種の前方探査を行うことが多い。切羽前方探査技術としては過去に様々な

手法が試みられてきたが、調査可能な深度や精度、現場計測やデータ解析に要する時間などに問題があった。

また、地山等級や支保パターンは、先進ボーリングによりコア採取を行い、切羽前方の地質を直接確認したうえで予測することが多い。しかし、先進ボーリングをトンネル全線で実施する場合、ボーリング費用の増加やトンネル掘削作業の長時間中断など問題が多い。このため作業時間の短縮とコストダウンを図ることができ、施工サイクルを乱さずに常時利用できる技術としては、油圧

ジャンボを利用したノンコア削孔検層が多く適用されている。

ノンコア削孔検層には、短尺から長尺までその削孔長に応じて区別されるが、延長に応じてトンネル掘削工程に影響を与えるため、1回の作業で切羽掘進を停止させる時間とその頻度が、少ない工法が望まれる。

そこで、我々は長距離削孔においてもエネルギーロスの少ない水圧ハンマを使用し、掘削停止日内に150m以上を削孔できる、高速ノンコア削孔検層技術を開発した。

本報文では、水圧ハンマの打撃機構に着目し、精度を向上させた地山評価を新名神高速道路野登トンネル西工事（発注者：中日本高速道路株式会社）で適用した事例について述べる。

2. 高速ノンコア削孔システムの概要

表-1 ベースマシン諸元(SM-401)

項目	単位	数値
最大フィード力（押込）	kN	45
最大トルク	kN・m	14
最大回転数	rpm	238
総重量	t	13.4



写真-1 ロングフィード式ボーリングマシン



写真-2 水圧ハンマ諸元一覽²⁾

高速ノンコア削孔システムは、新しく開発したロングフィード式の専用ボーリングマシン（表-1）に、長距離高速削孔性能に優れた水圧ハンマを搭載した前方探索システムである¹⁾。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。

(1) 高速削孔機構

a) 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低減し、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、ボーリングマシンに8mの長尺ガイドセルを搭載し（写真-1）、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。本システムでは、6mロッドを使用し、ロッド継ぎ足し回数を半分以下に低減し、その作業時間を大幅に削減した。

b) 水圧ハンマ

水圧ハンマ（写真-2）は削孔長延長に伴うエネルギーロスも小さいため、長距離削孔にも適したハンマである。高圧水でピストンを振動させることで打撃を発生させる。従来のトップハンマ式の油圧ハンマは、ロッド後端に与える打撃エネルギーがロッド継手等で減衰するため、削孔延長の増加に伴って削孔効率が低下する。それに対して、ロッド先端で打撃を発生する水圧ハンマはエネルギーロスが少ないため、長距離削孔においても速度低下なく削孔することができる（表-2）。

(2) 地山評価手法

当システムでは、削孔に要した水圧ハンマの打撃エネルギーを地山評価指標とすることとした。水圧ハンマは、削孔延長増加に伴うエネルギーロスが少ないため、エネルギーによる評価が妥当と考えた。

水圧ハンマの一回の打撃エネルギーは、図-1に示すSTEP3～4の間に、高水圧により加速されたピストンの運動エネルギーと考えられる。ピストンの加速力は高圧水の水圧に比例する（正確にはピストン前後の圧力差）ため、ビットを打撃する際に与えられるエネルギー e_d は送水圧をP、振幅をAとした時に、下記(1)が成り立つ。

$$e_d \propto P \times A \quad \dots \text{式(1)}$$

単位時間当りの打撃数をfとすると、単位時間当りに水圧ハンマが地山に与える打撃エネルギー E_d は下記(2)式が成り立つ。

$$E_d \propto P \times A \times f \quad \dots \text{式(2)}$$

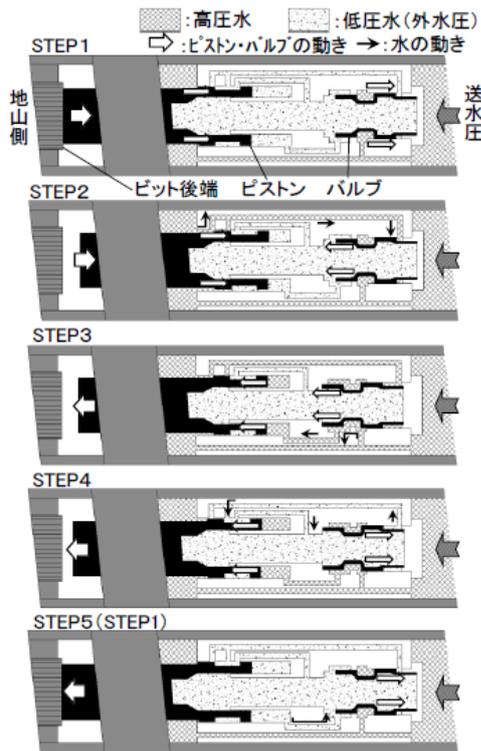


図-1 水圧ハンマ打撃サイクル概要³⁾

単位時間当りの削孔延長は削孔速度 V となるため、単位長さを削孔するのに要した打撃エネルギー $\overline{E_d}$ は、下記(3)式が成り立つ。

$$\overline{E_d} \propto P \times A \times f / V \quad \dots \text{式(3)}$$

当システムでは、単一の水圧ハンマを使用する (A : 一定) ため、式(3)よりエネルギー指標値 E を下記(4)式として、地山評価を行うこととした。

$$E = P \times f / V \quad \dots \text{式(4)}$$

3. 打撃数評価による地山評価精度向上

(4)式より、打撃数が地山評価を行う上で、重要なパラメータである。しかし打撃数は測定自体が困難であり、さらには、データ処理に多くの時間を要する。そこで当初は、削孔の際にフィード圧を調整することで打撃数を一定に保つように行った。ところが、実地山で実験を行ったところ、地山条件により打撃数が変動し、精度良く地山評価を行うためには、打撃数を評価する必要があった。

そこで、理論的推定および実計測による推定を行い、打撃数を評価する方法について述べる。

(1) 打撃数の理論的推定

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。よって、削孔試験で得られた16MPaで60Hzの関係から、送水圧と打撃数の関係は式(1)のように考えられる。

$$f = 60 \times \sqrt{P/16} \quad \dots \text{式(5)}$$

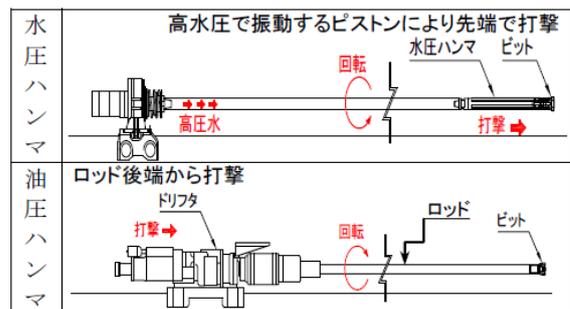
ところが、実地山で適応したところ⁴⁾、送水圧の低下は、フィード力の低下と同時に瞬間的に発生した。これは、き裂や脆弱部に到達した際に、ロッド先端の地山反力が不足して、高圧水がピストンを起動せず、そのまま放水されたためと考えられる。このようなき裂部における水圧の低下は、ピストンが駆動されずに放水されるため、式(5)に示す関係とは異なる事象が発生していると予想される。

高圧水がそのまま放水される場合の水圧は、ロッド先端を地山から離れた状態(反力なし)の計測で4.5MPa程度であった。ハンマの打撃機構に高圧水が流れる間は16MPaとなるが、放水される間は4.5MPaであったと仮定できる。1秒間の移動平均で計測していた送水圧 P は、その1秒間の間で反力不足の期間が発生すると、その割合分(x とする)だけ計測値が16MPaから4.5MPaに近づいて減少したと考えられる。よって、測定値 P と x の関係は式(6)で表される。



写真3 供試体削孔試験状況

表-2 水圧ハンマと油圧ハンマの違い



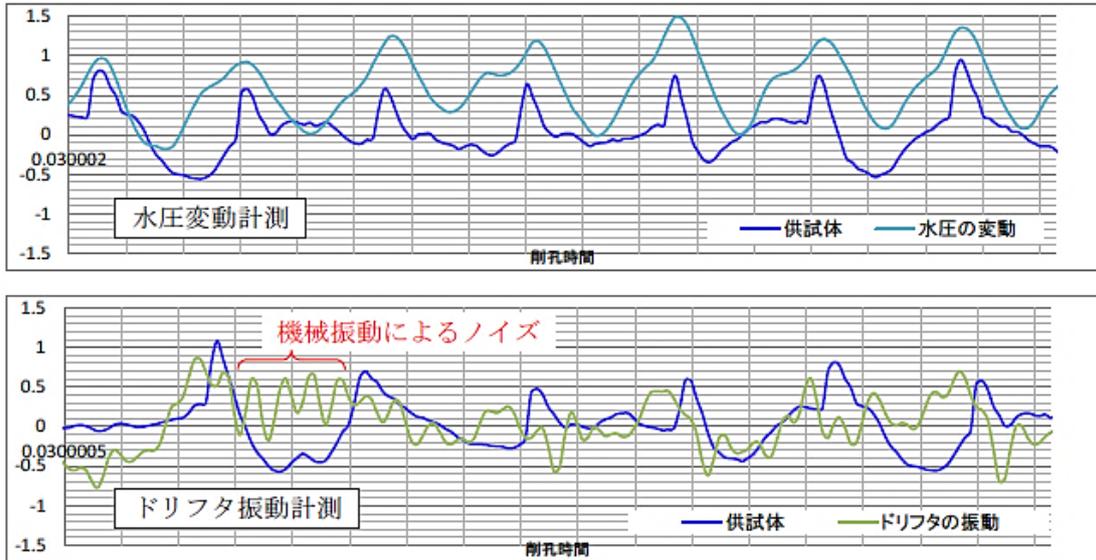


図-2 振動数計測結果（水圧微小振動とドリフタの振動比較）

$$P = 4.5MPa \times x + 16MPa \times (1-x) \quad \dots \text{式(6)}$$

また、打撃数 f (Hz) については、高圧水でピストンが駆動される時間のみの打撃となるため、式(7)で表される。

$$f = 60Hz \times (1-x) \quad \dots \text{式(7)}$$

以上を踏まえると、 f と P の関係は式(8)で表される。

$$f = \frac{P-4.5}{11.5} 60 \quad \dots \text{式(8)}$$

(2) 打撃数の実計測試験

上記の理論的推定方法の妥当性を検証するために、実計測試験を行った。まず、供試体での計測試験により、精度の高い打撃数計測手法を選定し、実地山での計測試験を行った。

a) 打撃数計測方法の選定

水圧ハンマによるボーリングでは、ロッド先端で打撃が発生されるため、その回数はロッドに伝わる振動や、水圧の変動から判断しなければならない。水圧ハンマは図-1に示すとおり、1回の打撃で水流経路が小刻みに切り替わるため、水圧の微小変動でも打撃が把握できる。ただし、実地山では、ロッドに伝わる振動や水圧の微小変動が実際の打撃数と等しいか確認できないため、コンクリート供試体の削孔試験（写真-3）によりその正当性・精度を確認した。供試体に取付けた加速度計で、実際の打撃数を計測し、ロッドからの振動および水圧の微小変動と比較した。

ロッドに伝わる振動は、ボーリングマシンのドリフタに取付けた加速度計で計測した。水圧の微小変動は、送水管に取付けた水圧計で計測した。60Hzの打撃を把握

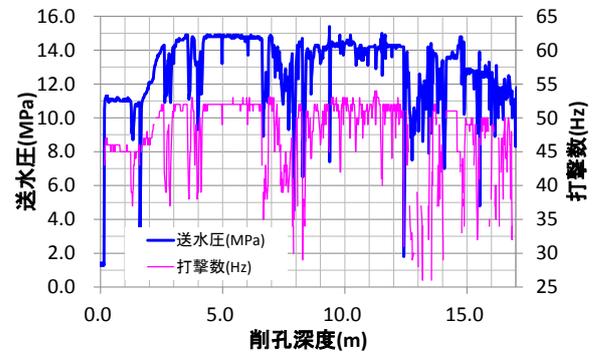


図-3 水圧ハンマと打撃数の変動

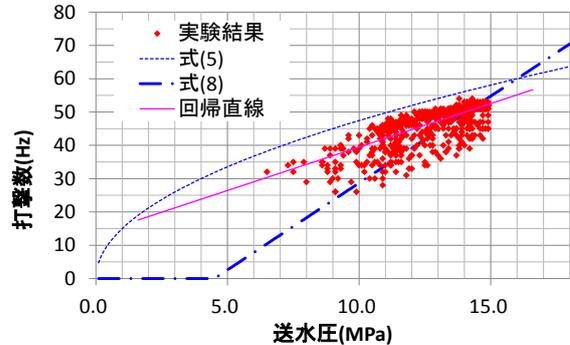


図-4 送水圧と打撃数の関係

するため、計測ピッチは、共に1/1000秒ピッチとした。

試験結果を図-2に示す。ロッドに伝わる振動・水圧の微小変動共に、実際の打撃と同周期で振動を繰り返していることがわかる。ただし、ロッドに伝わる振動には、ボーリングマシン自体の機械振動等のノイズも多く見られた。

以上より、ロッドからの振動と水圧の微小変動の周期が実際の打撃と等しいことを確認した。実際のボーリングでは、削孔長の増加でロッドからの振動が減衰し、ノイズの影響を受ける可能性が懸念されたため、水圧計に

よる打撃計測を選定することとした。

b) 実地山での打撃数計測

次に、実地山で、削孔を行い、水圧計による打撃数の計測を行った。

深度ごとの送水圧と打撃数の変動を図-3に示す。亀裂部分は、送水圧の低下が発生した。

送水圧と打撃数の関係を図-4に示す。式(5),(8)の関係もプロットする。殆どの計測値は、式(5),(8)の間となった。式(8)では、反力が不足すると、瞬間的に水圧が4.5Mpaに低下し、打撃が停止すると仮定している。ところが、実際は、送水圧の低下途中は、式(5)で表す関係で、打撃が継続されていると予想される。よって、送水圧の低下に伴う打撃数の低下(式(5))と、反力不足に起因する打撃停止の二つの事象が発生したと思われる。

(3) 打撃数低下を考慮した地山評価

実地山での打撃数計測で得られた送水圧と打撃数の関係を用いて、削孔試験における地山指標値を再計算した。送水圧の低下に伴う打撃数の低下と、反力不足に起因する打撃停止の双方を考慮するため、図-4に示す回帰直線から打撃数を推定した。

当初判定値と比較して、打撃数の低下が発生したと思われる区間(送水圧低下区間)を抜粋したものを図-5に示す。当初判定値は、エネルギー指標値が過大に評価(最大1.7倍)されていたことが分かる。水圧と打撃数の関係式を導入することで地山評価の精度は向上できたといえる。

4. 現場適用結果

新名神高速道路野登トンネル西工事において、切羽より本システムの適用を行った。その結果について述べる。

(1) 工事概要

当工事は、四日市JCTから亀山西JCTを結ぶ延長27.8km

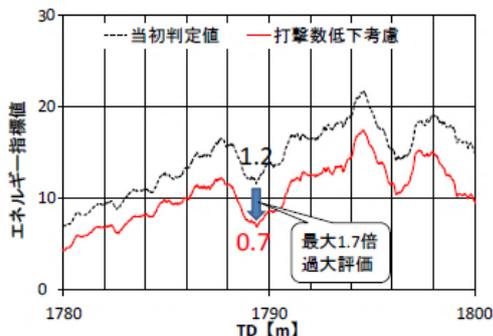


図-5 打撃数低下を考慮した地山評価

のうち、最も亀山西JCT側に位置する野登トンネルの西側工事である。現場位置を図-6に示す。

野登トンネル西工事のうち、トンネルは上り線2,368mと下り線2,391mの総延長が4,759mとなっており、NATMによる発破掘削補助ベンチ付全断面工法となっている。支保パターン図を図-7に示す。掘削断面は通常断面で75m²の2車線道路トンネルである。

これら事業により、四日市JCTから亀山西JCTが開通されると、東名阪道の渋滞緩和、時間短縮、交通事故減少や防災機能強化など様々な効果が期待されている。

(2) 地質概要および適用目的

地質縦断面図を図-8に示す。本トンネルの地質は、中生代白亜紀の領家花崗岩類であり、坑口部から100m区間が粗粒・斑状の加太花崗閃緑岩、その奥が細～中粒の黒雲母花崗閃緑岩を主体とする野登山花崗閃緑岩である。健岩部の一軸圧縮強度は100MPa程度である。

野登山花崗閃緑岩は、き裂の多い状態であるが、密着したものが多く、施工時には肌落ちやキーブロックの滑落が生じにくいと想定された。当初は風化も少なく、C I～C II相当の比較的安定した地山が想定されていた。一部、STA:443+0.0～442+0.0の区間で、地表の航空写真判読により直線谷と鞍部の連なりがあることから、リニアメントが想定されていたが、弾性波速度が2.4km/sと明



図-6 工事位置図

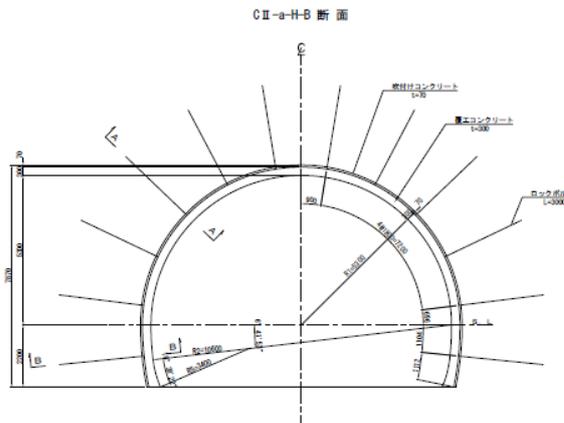


図-7 支保パターン図

らかな脆弱部を捉えられなかったため、地山区分でCII相当と考えられていた。

しかし、STA:445+97.9で湧水により崩落が発生したことから、水抜きボーリングによる切羽安定化が必要とされていた。そこで、本システムを適用し、削孔時のデータ解析によって地山評価を行った。ボーリング区間はSTA:445+4.6~439+27.4の探查延長L=570m(削孔総延長:676.2m)として行った。

(3) 地山評価適用結果

地山評価適用結果を図-9に示す。STA:444+60.0~444+30.0において、エネルギー指標値が低下し、切羽評価点も低くなっていることがわかる。この区間において、過去の実績³⁾から、エネルギー指標値がIを下回るD IからD II相当の脆弱な層が予測された。切羽観察から、全面に熱水変質を受けた粘土質な地山となっており、内空変位が最大135.0mmのため支保パターンも設計のC IからD IIに変更した。この区間は設計段階では想定されていなかった脆弱部であり、エネルギー指標値により事前に把握できたことがわかる。また、その周囲の区間においても、エネルギー指標値が低い値を推移しており、内

空変位の最大変位量が41.2mmとなっており未収束であったことから、増しロックボルトの打設や、ストラットの施工を行った。

また、STA:442+00.0においても、エネルギー指標値が低下している。切羽評価点は、やや高めで推移しているが、初期の内空変位が32.0mm大きく、切羽の進行とともに変位量が増大した。これは、切羽が変化の激しい地山であり、ロックボルト打設の際に粘土質な粉が出ていたことから、鏡面に表れていない脆弱部が、地山背面側に潜在し、それをノンコア削孔によってとらえていたことを示している。変形抑止工として増しロックボルトの打設を行った。これらの区間も予めエネルギー指標値を用いた地山評価を行っていたことによって、増しロックボルトなどの対策工の準備することができたために、早期に対策工を行え、変位が収束した。

一方、STA:441+40.0~440+60.0の区間において、エネルギー指標値が2~3のやや高い区間が80m程度表れており、切羽評価点も高くなっている。この区間の切羽観察では、一部粘土質な地山があるものの、全体的に安定した地山がみられた。また、点載荷試験結果より、一軸圧縮強度が80MPa程度のやや硬質な地山となっていた。

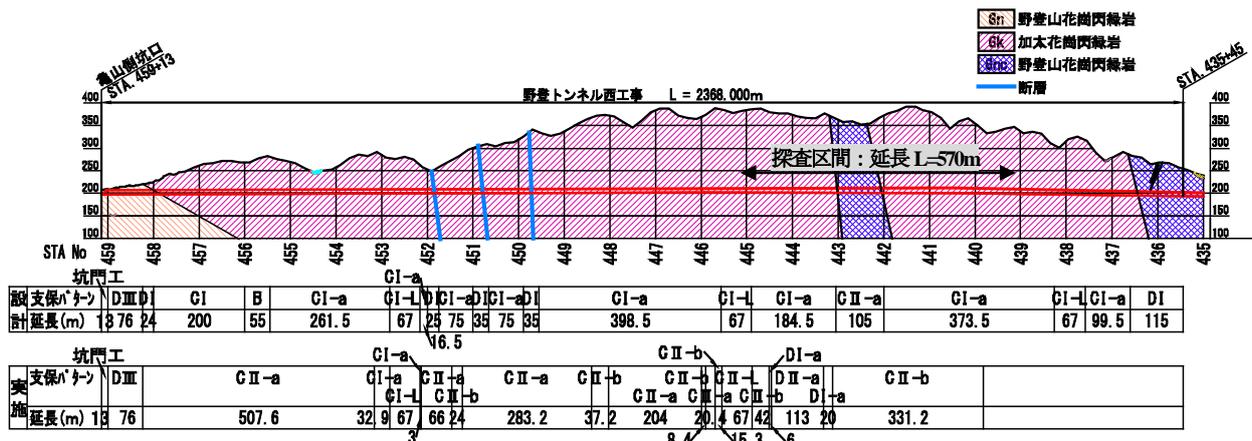


図-8 地質縦断図(花崗岩を主体とする熱水変質をした地山)

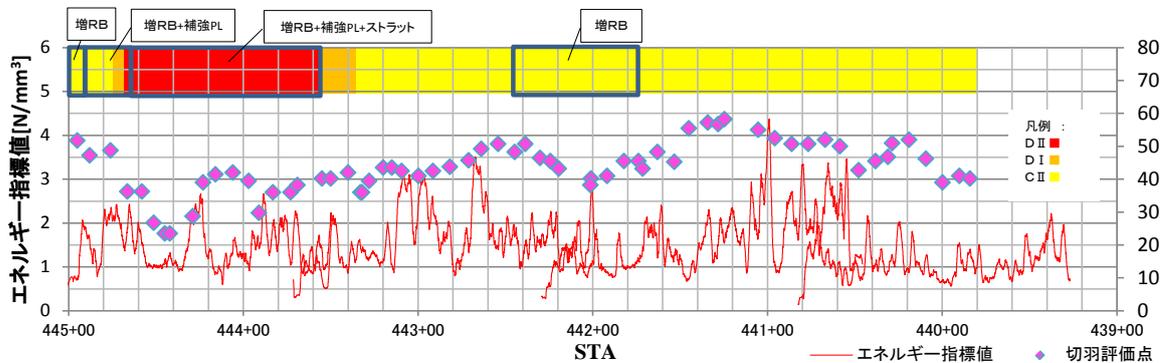


図-9 地山評価結果および実施掘削支保パターン

(4) 考察

地山評価結果から、熱水変質を受けた地山においてもエネルギー指標値と切羽評価点には相関性があり、脆弱部を把握することができた。また、エネルギー指標値は脆弱部の把握だけでなく、地山の強度を把握できる可能性があることが示された。

さらに、探査区間は切羽観察の結果から、非常に変化の激しい地山であった。しかし、局所的な脆弱部であっても、探査によって事前に地山性状の把握を行ったことで、脆弱部の切羽の安定に注意しながらトンネル掘削を行うことができた。

5. まとめ

本システムを熱水変質を受けて軟質化した地山において適用した。その結果、事前に脆弱部の位置を把握し、地山等級を定量的に予測した。それにより、岩判定を最適な時期で行うことができ、地山に適合した支保パターンを予め準備することができた。また、地山が硬質へ変化するに伴って、エネルギー指標値も上昇したことから、岩強度と相関性がある可能性が示された。これらはデータを蓄積していくことで、より一層、精度を向上したい。なお、過去に多き裂性の地山での事例⁹⁾があることから、エネルギー指標値は、地山の性状によらず、地山評価を行える可能性があることを示した。

また、単管削孔で最長L=185mを10時間で削孔することができた。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。つまり、湧水の多い地山において、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、打撃数評価による地山評価精度向上に関して、トンネル切羽前方探査は、早期掘削再開のため、地山評価を正確かつ迅速に行う必要がある。正確な判定に打撃数は必要であるが、細かいピッチでの打撃数の計測は地山判定の時間を大幅に増大させる。よって、打撃数推定手法の構築が、実用化に向けて必要な要素となる。

今後は、図-4で得られた関係を基に地山評価を行うが、地山状況による関係の変化も探求し、さらなる精度向上を図りたい。

参考文献

- 1) 斎藤有佐, 加藤直樹, 木梨秀雄, 高橋佳孝, 伊藤哲: 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, 2012.
- 2) テクノドリル株式会社 Wassara drilling system カタログ, <http://www.technoj.com/wassara.htm>
- 3) 磐田吾郎, 斎藤有佐, 伊藤哲, 泉水大輔, 木梨秀雄, 天野悟: 高速ノンコアボーリングシステムによる前方探査技術の開発, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, 2014.
- 4) 山崎貴之, 加藤建二, 後藤隆之, 黒川尚義, 桑原徹: 地すべり土塊を対象とした短尺・中尺ノンコア解析によるトンネル切羽前方探査, 土木学会トンネル工学委員会, トンネル工学報告集第 22 巻, 2012
- 5) 秋田伸治・木野村有亮・木梨秀雄・桑原徹・畑浩二・渡辺淳: 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

(2015.8.7 受付)

APPLICATION OF NON-CORE DRILLING EXPLORATION BY WATER HAMMER AHEAD OF THE FACE

Yasuyuki IHARA, Yuta KUBOSHIMA, Yusuke KINOMURA, Wataru NAGATUKA,
Goro IWATA, Hideo KINASHI and Satoshi ITO

We developed a new non-core drilling exploration system for ahead of the face to reduce the exploration time and exploration frequencies. A new system has long feed guide cell and water hammer that makes small energy loss compared with top-hammer. These feature can make rapid and long distances for drilling.

Water hammer is the type of down-the-hole. that is percussion on the tip of the hole. Its percussion condition make a transformation intricately by geology or drilling condition. We analyzed percussion condition by data of drilling, and devised method of estimating ground condition.

In this report, we applied new system in actual tunnel site.