

高速ノンコア削孔システムの開発と適用

(株)大林組 正会員 ○磐田 吾郎, 正会員 天野 悟
同 上 正会員 伊藤 哲, 正会員 斎藤 有佐
同 上 正会員 木野村 有亮, 正会員 木梨 秀雄

1. はじめに

山岳トンネルを安全に施工するためには、切羽前方の地質を事前に把握することが重要となる。また、帯水層の存在が予想される場合は、先行して水抜きを行い、突発湧水の発生を未然に防止する必要がある。そのため、通常、トンネル切羽からノンコア前方探査ボーリングや水抜きボーリングを行う。しかし、切羽からのボーリングは、掘削作業を中断して行われるため、その作業時間と頻度をできるだけ削減し、掘削工程への影響を小さくすることが重要となる。そこで、長距離を短時間で削孔できる高速ノンコア削孔システムを開発した。

本報文では、まずシステムの特徴と、地山評価手法を説明する。そして、実地山での施工結果から、その削孔性能と地山評価の妥当性について報告する。

2. 高速ノンコア削孔システムの概要

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に、先端駆動型の水圧ハンマを搭載した前方探査システムである¹⁾。以下に、ロングフィード式の専用ボーリングマシンの概要と、水圧ハンマの特徴について述べる。

(1) ロングフィード式ボーリングマシン

高速削孔を実現するため、ボーリングマシンに8mのガイドセルを搭載し(図-1)、長尺ロッドの使用を可能とした。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が、長尺ロッドの使用でロッド継ぎ足し回数を削減することで、その作業時間を削減した。通常、1.5mもしくは3.0mのロッドを使用するのに対して、本システムでは、6.0mロッドを使用するため、ロッド継ぎ足し回数は半分以下に低減できる。



図-1 ロングフィード式ボーリングマシン

表-1 水圧ハンマ wassaraW80HD 諸元²⁾

項目	W80HD諸元
削孔径	88-105 mm
高圧水消費量	130-200 L/min
出力	14 kW
打撃エネルギー	210J
打撃数	65 Hz
フィード力	7-10 kN
回転数	50-90 rpm
回転トルク	0.8-1.5 kNm
ドリルロッド径	76 mm

(2) 水圧ハンマの特徴

ボーリングマシンに搭載する水圧ハンマ(wassaraW80HD)の詳細を表-1に示す²⁾。水圧ハンマは、供給される高圧水によりピストンを振動させてビットに打撃力を与える。この水圧ハンマ機構をロッド先端に配し、ロッド後端から高圧水を供給することで、ボーリングを行う。供給された高圧水は、ハンマ先端から排水され、孔内のくり粉を孔外へ洗い流す。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加える水圧ハンマは、エネルギーロスが少なく、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。



キーワード NATM, 前方探査, ノンコア削孔, 高速施工, 水圧ハンマ

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組生産技術本部トンネル技術部 03-5769-1319

3. 地山評価方法

(1) エネルギー地山評価指標値

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指標として、地山評価を行う。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ためである。水圧ハンマには、ピストンと水流の向きを切り替えるバルブが搭載されており、これらが連動して打撃を発生させる。ロッド先端が地山に接触して反力が得られると、ピストンとバルブの前後に水圧差が発生し、ハンマが起動する³⁾。ピストンは高圧水の水圧で加速されるため、ビットを打撃する際に与えられるエネルギーは送水圧 P ×振幅 A に比例する。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は $P \times A \times f$ に比例する。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は、 $P \times A \times f / V$ に比例する。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、 $P \times f / V$ をエネルギー指標値として、地山評価を行うこととした。

(2) 模擬地盤削孔試験⁴⁾による評価精度確認

地山評価手法の検証を行うため、強度の分かる模擬地盤供試体を当システムで削孔し、その削孔速度、送水圧、打撃数から算出したエネルギー指標値と地山強度の相関を確認した。

供試体はヒューム管φ500mm、 $L=2.4$ mの中に、模擬地盤材料（セメントベントナイト：強度1・4MPa、モルタル：強度50・60・70MPa）を打設して作成した。模擬地盤材料の配合および削孔時の圧縮強度（材令7日）を表-2に示す。なお、打撃数は供試体の内外に設置した加速度ピックアップで計測した（図-2）。

図-3に供試体強度ごとの各測定データを示す。なお、削孔時のフィード力は10kN、送水量は150L/min一定とした。

この結果、供試体強度が大きいほど削孔速度は小さくなった。送水圧は、供試体No.①（1MPa）の場合を除いて、16MPa程度で一定となった。単位長さ削孔するのに要した打撃回数は、供試体強度の増加に伴って、大きな値となった。なお、水圧ハンマの単位時間当りの打撃数 f は、供試体No.①を除き、すべての供試体で約60Hzであった。No.①は、20～30Hzであった。これは、送水圧の低下による影響と考えられる。

エネルギー指標値については、強度が大きいほど高い値となり、地山の硬軟を顕著に表す結果となった。実施工では、振動数測定が困難となるが、試験結果より4MPa以上の地盤であれば、送水圧を保つことで、振動数を一定に維持できると考えられる。よって、送水圧を16MPaに維持するように削孔することを基本として、地山評価を行うこととした。

表-2 模擬地盤材料配合・強度

供試体No.	普通セメント	ベントナイト	水	7日強度
①	150kg	400kg	813kg	1.3MPa
②	150kg	500kg	781kg	4.3MPa
供試体No.	早強セメント	高性能減水剤	水	7日強度
③	1,230kg	24.6L	615kg	53.3MPa
④	1,344kg	26.9L	578kg	59.5MPa
供試体No.	W/(C+T)	プレミックス材	水	7日強度
⑤	32.00%	25kg	4kg	72.0MPa

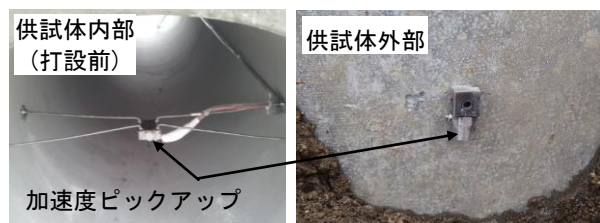


図-2 圧電式加速度ピックアップ設置状況

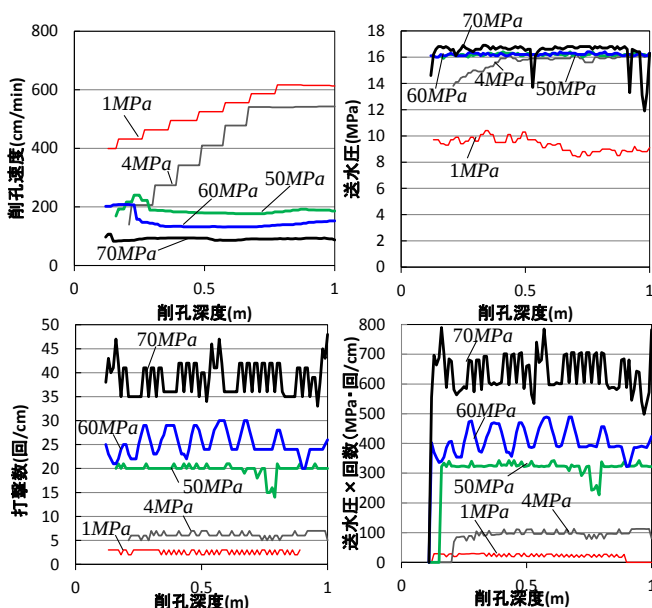


図-3 模擬岩盤削孔試験結果

4. 現場実証試験

高速ノンコア削孔システムの性能および地山評価の妥当性を検証するため、道路トンネル現場 2 箇所を実証試験を行った。1 箇所は比較的均質な地山、もう 1 箇所は脆弱層が介在する地山である。前者では施工速度、後者では地山評価の妥当性および脆弱層での削孔性能を確認した。

(1) 施工速度確認試験

トンネルの切羽から高速ノンコア削孔システムを用いて単管削孔を行った。比較のため、従来のロータリーパーカッションドリル（以下、RPD）による単管削孔も同じ切羽位置から行った。RPDの削孔径は80mm、ロッドは $L=1.5\text{m}$ を使用した。当該地山は、領家変成岩類 砂質片麻岩：平均 $qu=68.1\text{MN/m}^2$ （100m程度）を主体として、領家変成岩類 砂質片麻岩CL級岩：平均 $qu=15.3\text{MN/m}^2$ （20m程度）、その後は領家花崗岩類 新城石英閃緑岩：平均 $qu=2.1\text{MN/m}^2$ へと変化する（中硬岩～軟岩～マサ土）地質であった。

高速ノンコア削孔システムの削孔は、約130mのマサ土区間に入った地点まで行った。マサ土区間は、削孔水による地山の緩みがトンネル掘削時に支障を与えることや、単管削孔でのジャミングを懸念して、削孔を終了とした。RPDについては、約40mまでを削孔した。

それぞれの削孔およびロッド回収（抜管）作業に要した時間を表-3、4に示す。高速ノンコア削孔システムは、平均削孔速度 57.4cm/min と、RPD（ 46.5cm/min ）を上回る結果となった。エネルギーロスが少ないため、削孔長の短いRPDと比べても、高い速度を維持した。ロッド継ぎ足し時間+抜管時間で比較すると、高速ノンコア削孔システム（ 58sec/m ）では、約20%短縮された（RPD： 72sec/m ）。

施工速度を比較するため、150mの削孔に必要な施工時間を推定したグラフを図-4に示す。150mを選定した基準としては、高速施工で想定されるトンネル月進長であり、切羽からの前方探査を月1回施工する場合に必要な削孔長である。RPDの削孔長延長に伴う速度減衰は、既往の研究⁵⁾より距離減衰係数を -0.225cm/min/m として算出した。推定値では、高速ノンコア削孔システムが150mを約7時間、RPDは約13時間で削孔する結果となった。高速ノンコア削孔システムであれば、休日等のトンネル掘削停止日のみでもボーリングを完了することができるため、掘削工程に影響なく地山探査や水抜きを施工可能となる。

(2) 脆弱部地山削孔・探査試験

施工速度確認試験と同様にトンネル切羽より単管削孔を行った。当該地山は、宮津花崗岩類 粗粒黒雲母花崗岩を主体とし、部分的に多亀裂な脆弱部や破碎質で低抵抗帯であるひん岩の貫入ゾーンが存在していた。そのため、水抜き兼用として脆弱部を把握するためのボーリングを約100m×4本行った。

ボーリングは4本いずれも、脆弱部が削孔途中に出現したが、単管で削孔できた。施工速度は、100mのボーリングを、抜管まで約8時間で施工した。ドリルジャンボでは、10mも削孔できない地山であったことから判断すると、脆弱地山での高い削孔性能が確認できた。

1箇所のボーリングについて、深度ごとの削孔速度・フィード力・送水圧の結果を図-5に示す。送水量は、送水圧が模擬地盤削孔試験と同等になるように、 150L/min 程度とした。この削孔データから算出したエネルギー指標値とトンネル掘削後の切羽観察で得た地山評価点を比較したグラフを図-6に示す。地山状況の変化にある程度即した相関関係が得られた。

表-3 高速ノンコア削孔システム施工時間(128.65m)

項	目	時間	備考
削孔作業	純削孔	13,448sec	平均速度 57.4cm/min
	その他	705sec	主にフラッシング作業
	ロッド継足	5,160sec	$246\text{sec} \times 21\text{回}$ 41sec/m
	小計	19,313sec	
抜管作業		2,222sec	$101\text{sec} \times 22\text{回}$ 17sec/m
総施工時間		21,535sec	=5.98時間

表-4 比較用 RPD 施工時間(40.23m)

項	目	時間	備考
削孔作業	純削孔	5,191sec	平均速度 46.5cm/min
	その他	1,325sec	主にフラッシング作業
	ロッド継足	1,842sec	$70.8\text{sec} \times 26\text{回}$ 47sec/m
	小計	8,358sec	
抜管作業		1,029sec	$38.1\text{sec} \times 27\text{回}$ 25sec/m
総施工時間		9,387sec	=2.61時間

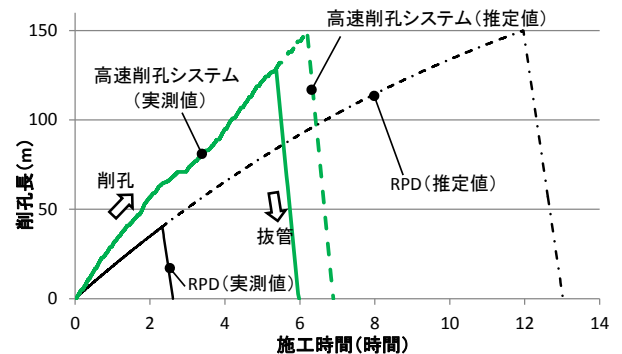


図-4 施工時間の比較

ところが、今回の実験では、送水圧を16MPaに維持するよう削孔を進めたが、実際には送水圧は安定しない区間が多々発生した（図-5）。とくに、亀裂が多い区間では、瞬間的に送水圧が低下する部分が多発した。3章で述べた通り、エネルギー指標値による地山評価では、測定困難な打撃数の影響を排除するため、送水圧を一定に維持し、一定の打撃数で削孔する必要がある。亀裂等で送水圧が低下する部分では、打撃数も低下していると考えられるため、エネルギー指標値が過大に算出されることとなる。地山判定精度を向上させるために、送水圧低下箇所の打撃数を判断できる手法が必要と考えた。

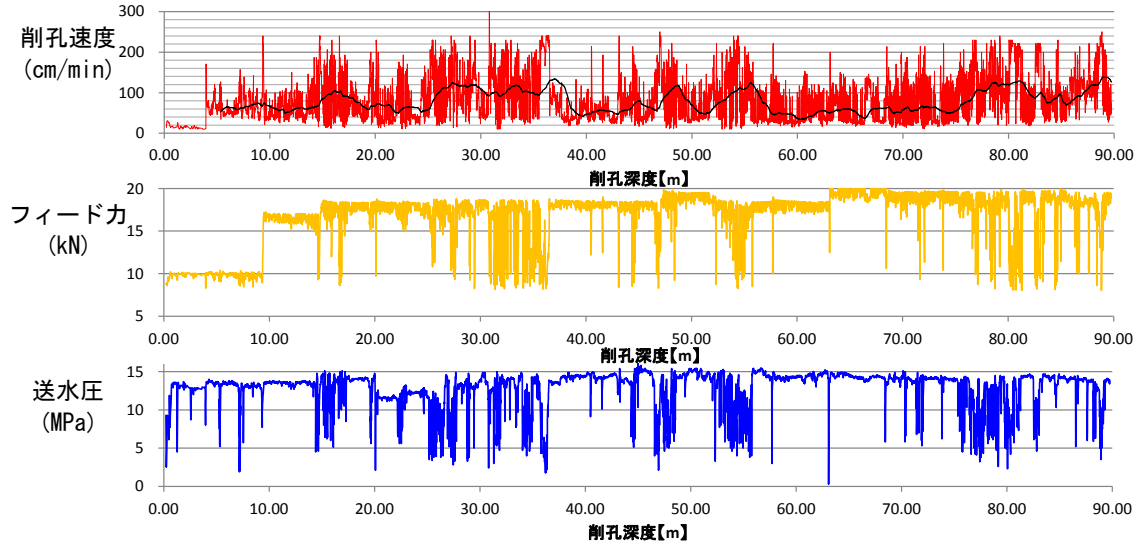


図-5 削孔データ（削孔速度・フィード力・送水圧）

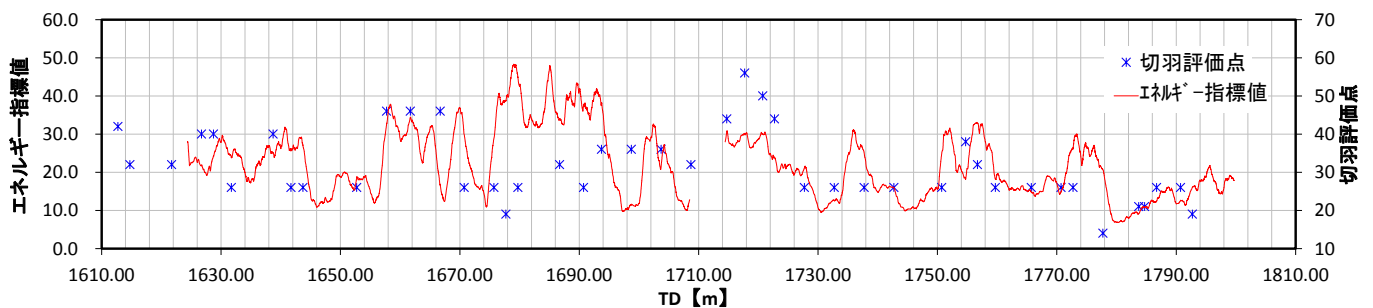


図-6 エネルギー指標値と切羽評価点比較

5. 打撃数評価による地山判定精度向上

地山判定精度向上を目的に考案した送水圧の低下箇所の打撃数を適切に評価する手法について、実験による確認を行い、打撃数の推定方法を確立した。

（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、振動数は $\sqrt{P}$ に比例すると考えられる。よって、3-(2)で述べた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)考えられる。

$$f = 60 \times \sqrt{P/16} \quad \dots \text{式(1)}$$

ところが、4-(2)で述べた削孔試験では、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（図-5）。これは、亀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、高压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。このような亀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(1)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。

高压水がハンマ先端からそのまま放水される場合、送水圧は4.5MPa程度であった（ロッド先端を地山から離して計測）。打撃中の送水圧が16MPa、停止中が4.5MPaと仮定すると、1秒間の移動平均で計測した送水圧 P は、その1秒間に反力不足の期間が発生すると、その割合分（ x とする）だけ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(2)で表される（切り替え時間は0と仮定）．

$$P = 4.5\text{MPa} \times x + 16\text{MPa} \times (1 - x) \quad \cdots \text{式(2)}$$

また，打撃数 f (Hz) は，高压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(3)で表される．

$$f = 60\text{Hz} \times (1 - x) \quad \cdots \text{式(3)}$$

以上を踏まえると， f と P の関係は式(4)で表される．

$$f = \frac{P - 4.5}{11.5} \times 60 \quad \cdots \text{式(4)}$$

(2) 打撃数の実測定

次に，実地山で，水压計による打撃数の計測を行った．送水压の低下と打撃数の関係をプロットしたグラフを図-7に示す．式(1), (4)の関係もプロットする．式(1)を上回る値はなく，殆どの計測値は，式(1), (4)の中間値となった．これは，送水压低下による打撃数減（式(1)）と，反力不足による打撃停止（式(4)）が共に発生しているためと考えられる．式(4)では，反力が不足する箇所で，瞬時に打撃が停止すると仮定している．ところが，送水压の低下は瞬間的ではなく，低下する過程でも打撃が発生すると思われる．小さな亀裂が集中する箇所や脆弱部では，反力が徐々に不足していくため，その過程では水压が低下するものの式(1)の関係で，打撃が発生していると考えられる．

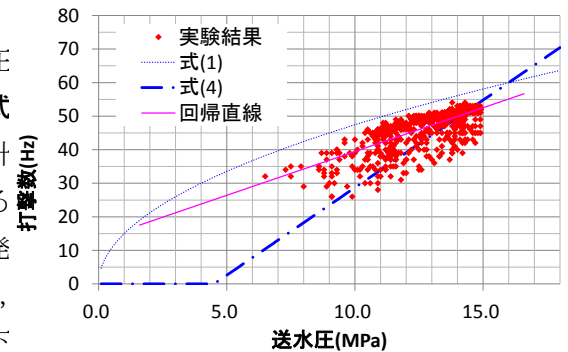


図-7 送水压と打撃数の関係

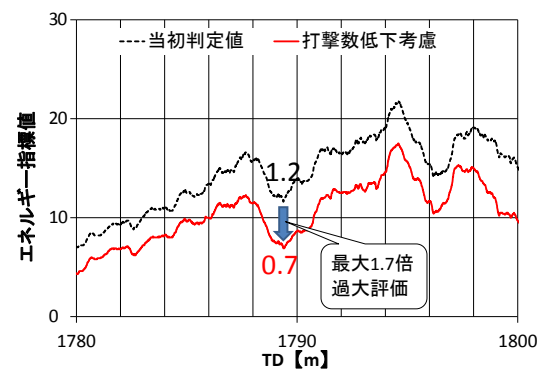


図-8 打撃数低下を考慮した地山評価

(3) 打撃数低下を考慮した地山判定

上記実験結果で得た打撃数と送水压の関係（回帰直線）を用いて，図-6に示すエネルギー指標値を再計算した．打撃数低下が発生したと思われる区間（TD1780～1800m）を抜粋したものを図-8に示す．当初判定値は，エネルギー指標値が過大評価（最大1.7倍）されていたことが分かる．水压低下に伴う打撃数低下を反映することで，不良地山部の評価精度を向上できたといえる．

6. まとめ

高速ノンコア削孔システムは，長距離削孔に伴うエネルギーロスの低減と，ロッド接続・解体作業時間の削減（約20%）で，150mを1方で削孔できることを確認した．地山判定では，エネルギー指標値が，地山の硬軟と関係があることを確認した．脆弱部では，打撃数の低下を送水压から推定することで，判定精度を向上した．

今後は，削孔データを蓄積して，地山判定精度をさらに向上する手法の検討や，エネルギー指標値と地山等級の関係を明確にし，削孔データから地山等級を精度よく予測できるようにしたいと考えている．

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) Jörg Riechers: Impact of Drilling in Embankment Dams, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, 2012.
- 4) 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.
- 5) 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