

ノンコア削孔による 切羽前方予測技術の基礎的研究 —大型花崗岩供試体を利用した削孔実験—

Fundamental Study for Evaluation of Geological Conditions Ahead of the Tunnel Face

—Experimental Study of the Non-Core Drilling Logging through the Granitic Block—

稲川雄宣¹・畑 浩二²・桑原 徹³・中岡健一⁴
Yusen Inagawa, Koji Hata, Toru Kuwahara, Kenichi Nakaoka

¹正会員 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目640)

E-mail: inagawa.yusen@obayashi.co.jp

²正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目640)

³正会員 理博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目640)

⁴正会員 工修 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4丁目640)

In recent year, non-core drilling logging has been used for the evaluation of geological conditions ahead of the mountain tunnel. This evaluation method has been generally calculated with energy in drilling volume unit. This evaluation, however, inheres hypothesis for the simplification of drilling theory, as transfer coefficient TR showing the proportion of longitudinal wave energy keeps constant.

We carried out the fundamental experiments and discussed the results in this paper to make clear the relationships among drilling parameters such as drilling rate, feed pressure, energy in drilling volume unit, drilling bit condition.

Key Words : Geological survey, drilling logging, drilling rate, energy in drilling volume unit

1. はじめに

山岳トンネルの施工に際し、トンネルの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上で重要である。従来トンネルを施工するにあたり、切羽前方の地質を推定するため、いわゆる「探り削孔」を行い、「ノミ下がり」と切屑から岩盤の硬さや断層の位置を推定してきた。また削孔時の機械情報を取得して、そのデータから切羽前方の地質性状を定量的に評価するノンコア削孔（削孔検層、穿孔検層、穿孔探査などを含む）手法もしばしば利用されている。

Hustruid et al.¹⁾は削孔に関するエネルギー量として、岩盤破碎体積比エネルギー E_v を提示している。これは、おおよそ岩盤内で消費されたエネルギーと考えられ、その算定には、岩盤破碎効率が必要であ

る。しかし、実際に岩盤破碎効率を求めることは難しいため、便宜上ピストンから岩盤に投入した打撃エネルギーである掘削体積比エネルギー E を、切羽前方予測評価に使用することが多い。岩盤破碎効率は、当然地質条件や岩盤物性と削孔条件との関連性で決定され、それを考慮した切羽前方予測を行うためには、削孔条件が削孔速度へ与える影響を考える必要がある。実際の計測に際しては、機械パラメーターであるフィード圧、回転圧、打撃圧、削孔深度、およびビット磨耗度が、影響因子と考えられる。したがって、これらの影響因子の相互関係十分解明しておく必要がある。

これらパラメーター相互の影響評価などは、すでに幾つか報告がなされている。原ら²⁾はフィード圧を補正した掘削体積比エネルギーの算出について提案し、室ら³⁾や大久保ら⁴⁾はビット磨耗に関しての現地

実験や室内で削孔検層を模擬した実験を行い、磨耗の影響を調べている。削孔深度については、福井ら⁵⁾が削孔深度の影響を、現場で実施した削孔検層のデータを分析し、検証を行った。また杉原ほか⁶⁾は削孔速度と回転圧からゆるみ領域の推定が可能であると述べている。

本研究では、削孔時の影響因子の相互関係あるいは影響度の大小を確認するために、試験条件が明確な大型花崗岩供試体を用いてノンコア削孔実験を行い、削孔速度と各パラメーターの比較検討を行った。

2. ノンコア削孔の岩盤評価

ノンコア削孔による切羽前方予測は、削孔速度と打撃圧を使用し、Hustruid et al¹⁾の岩盤破碎体積比エネルギーの式(1)に基づいた式(2)で評価が行われている。

$$E_v = \frac{E_l \times bpm \times T_R}{P_R \times A_H} \quad (1)$$

$$E = \frac{E_b \times bpm}{P_R \times A_H} = \frac{\text{油圧ドリルの総仕事量}}{\text{破碎した岩盤の容積}} \quad (2)$$

$$E_b = E_0 \frac{P_H}{P_{H0}} \quad (3)$$

E_l : ロッドに伝達された衝撃波エネルギー, bpm: ピストンがロッドに打撃する回数, T_R : 岩盤破碎効率, P_R : 削孔速度, A_H : 削孔面積, E_v : 単位削孔容積あたりに消費された岩盤破碎エネルギー, E_b : ピストンから岩盤に投入した打撃エネルギー, E_0 : 定格打撃圧の打撃エネルギー, P_H : 打撃圧, P_{H0} : 定格打撃圧である。

岩盤破碎効率 T_R は単位削孔容積あたりに消費された岩盤破碎エネルギーと単位削孔容積あたりにピストンが投入した打撃エネルギーの比であり、理想的な条件において60%~70%とされている。ただし、岩盤破碎効率の測定が困難であることから、簡易的に式(2)の単位削孔容積あたりにピストンが投入した打撃エネルギー(掘削体積比エネルギー) E で岩盤評価が行われている。すなわち、式(1)から(2)への単純化によって、岩盤破碎効率を排除したことが、実際の岩盤評価に影響を及ぼしていることが考えられる。一方、ノンコア削孔においては打撃回数の変動は小さく、打撃圧から求める打撃エネルギーの変動も小さいため、実態としては削孔速度で岩盤評価を行っていると言える。これらのことから、各パラメ

ーターの削孔速度に与える影響を検討し、考慮することにより、岩盤破碎効率の影響を軽減することが可能であると考えられる。

3. 実験概要

(1) 実験条件と実験方法

実験に用いた花崗岩供試体は長さ約2mと通常と比べると非常に大型であるが、削孔時間が極めて短いために、削孔深度の影響を調べることは困難であった。したがって、実験のパラメーターとしてフィード圧、回転数、打撃圧、ビット磨耗の4項目について比較削孔実験を行った。また、ビット磨耗度と切屑の関連性を確認するために、異なるビット磨耗条件下で、他の条件が同一である切屑の試料採取と分析を2ケースについて行った。

試験条件を以下に示す。

- ・花崗岩 1m×1m×2m
- ・削孔長 約2m
- ・データレート 0.3sec
- ・削孔ビット 未使用新品, 使用済みの中古品
- ・フィード圧 3, 4, 5, 6, 7MPa
- ・回転数 165, 195rpm
- ・打撃圧 15, 15.5, 16, 17MPa

実験に使用した花崗岩の物性試験結果を表-1に示す。実験は、写真-1に示すように、試験体を固定して、ドリルジャンボで削孔を行った。

表-1 花崗岩の物性試験結果

γ (g/cm ³)	V_p (km/sec)	σ (MN/m ²)	$E_{50} \times 10^3$ (MN/m ²)	ν
2.626	4.64	124.3	64.07	0.18

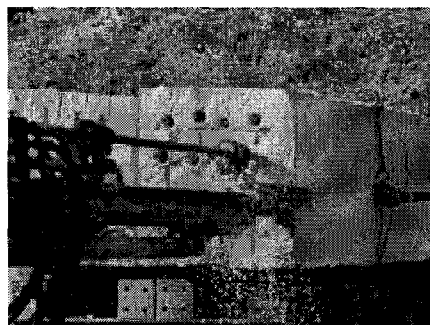


写真-1 実験状況

(2) ビットの磨耗度

実験で使用した新旧ビットの性状を確認するために、ビット先端部の形状計測を行った。使用済み中古品ビットの総削孔距離は約1kmである。計測方法は非接触レーザー変位計を用いて、縦横0.5mmずつ機械的に移動させながらビット断面までの距離を測定し、画像をCAD化し断面積から磨耗量を算定した。図-1に計測から捉えたビットの形状と2測線の断面図を示す。表-2には、ビットの測定結果を示す。断面の磨耗の状況は、大久保ら⁴⁾の指摘と類似しており、フェイスチップのハイトロス（天端磨耗量）がサイドチップのハイトロス、ゲージロス（側面磨耗量）に比べて卓越しているという特徴が認められる。また、チップ以外のビットのハイトロスが大きく、相対的にチップ高さが増加している。ビットの形状寸法および重量は、中古品の径が細くなり、表面積や重量においても10%以上の減少が認められた。また、ビット部のバインダーからの高さを測定し、新品の平均3.14mm、中古品の平均3.95mmと中古品のほうが26%高い結果であった。

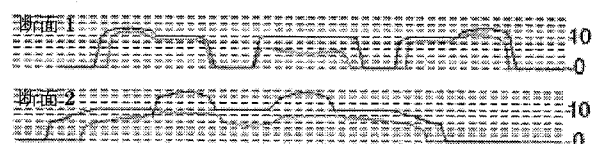
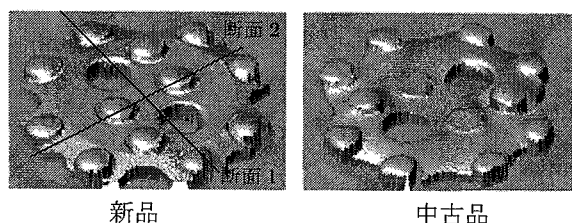


図-1 計測によるビット新品、中古品の形状

表-2 実験用ビットの測定結果

ビット	直径 (Max)	表面積 (cm ²)	重量 (g)	ビット 平均高さ (mm)
新品	64.9	97.34	1752.18	3.14
中古品	63.3	87.35	1567.20	3.95
磨耗率	2.5%	10.26%	10.56%	—

4. 実験結果

(1) フィード圧

a) フィード圧と削孔速度

図-2に新品ビットでの削孔速度とフィード圧の関係を示す。実験におけるフィード圧の条件設定は約3, 4, 5, 6, 7MPaの5ケースである。

5MPa付近を境に分布傾向が異なるため、プロットのシンボルを変えて表示した。5MPa以下の場合、フィード圧と削孔速度は線形な関係にあるが、5MPa以上のばらつきは大きい。5MPa以下の低フィード圧領域では、フィード圧を考慮した線形補正が必要である。一方削孔速度のフィード圧が高くなると、削孔速度は線形に増加せず収束する傾向にあり、したがって、削孔速度への影響が小さくなるといえる。これはフィード圧を上げることによる、削孔速度の上昇限界を示唆しているものと考えられる。

b) フィード圧と掘削体積比エネルギー

掘削体積比エネルギーも、削孔速度と同様に5MPa付近を境に分布傾向が異なるために、フィード圧に対するプロットのシンボルを変えて、図-3に示した。図-2と図-3から、掘削体積比エネルギーの方がばらつきが大きい。すなわち、フィード圧4MPa付近ではばらつきが生じ、フィード圧6MPa以上では一定値に集中している。これらの実験データには打撃圧が異なる実験ケースを含んでおり、この要因については打撃圧の節で述べる。

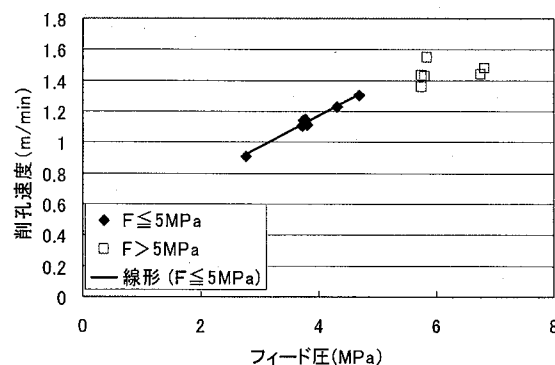


図-2 削孔速度とフィード圧の関係
(新品)

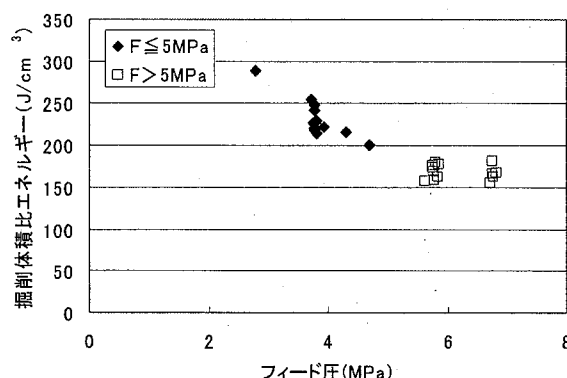


図-3 掘削体積比エネルギーとフィード圧の関係
(フィード圧分類)

(2) 回転数, 回転圧

a) 回転数と削孔速度

実験における回転数の条件設定は 195rpm と 165rpm の 2 ケースである。図-4 に回転数に対応した削孔速度とフィード圧の関係を示す。回転数による明確な差は認められない。回転数が削孔速度や掘削体積比エネルギーに及ぼす影響は小さいものと考えられる。

b) 回転圧と削孔速度

図-5 に回転圧とフィード圧の関係を示す。フィード圧を高く設定すると、回転圧も上昇し、両者には相関関係が認められる。図-6 に回転圧履歴を示す。フィード圧を高くすると、回転圧の乱れが大きくなることが確認できる。通常、ビットの回転によりビットチップが逐次移動し、その都度新鮮な岩盤表面への打撃が行われる。しかし、フィード圧上昇に伴う回転圧の上昇は、打撃の反動による岩盤とビットの非接触時間が短くなり、回転による負荷が増大する。結果としてビットチップの移動に支障を来し、新鮮な岩盤表面への打撃が行われなくなる可能性がある。したがって、ビットチップが新鮮な岩盤表面での打撃が行えない場合、破碎効率に影響を与えると考えられ、回転圧の振れ幅が大きくならないようにフィード圧を設定する必要があると考えられる。

(3) 打撃圧

a) 打撃圧と削孔速度

実験における打撃圧の設定条件は、約 15, 15.5, 16, 17MPa の 4 ケースである。図-7 に回転数 195rpm, 新品ビットでの削孔速度とフィード圧の関係を示す。フィード圧 4MPa においては打撃圧による削孔速度の差は生じないが、フィード圧 6MPa においては打撃圧の高い 17 MPa では削孔速度が速くなり、打撃圧の低い 15MPa では遅くなる。このことから、打撃圧の削孔速度への影響はフィード圧が高い場合に生じ、低い場合には小さい傾向にある。

b) 打撃圧と掘削体積比エネルギー

図-8 に打撃圧の違いによる掘削体積比エネルギーとフィード圧の関係を示す。打撃圧の設定は切羽前方予測において変動させることは通常ないために、取得する打撃圧のデータの変動幅は±1MPa 程度である。したがって実際の地山でも図-8 と同程度の誤差は生じるものと考えられる。

高フィード圧で打撃エネルギーが収集する要因であるが、打撃圧は式(3)に示すように掘削体積比エネルギーの算定式に組み込まれている。そのため、高フィード圧では、削孔速度も上昇することから、式(2)の打撃圧と削孔速度で打消し合い、一定値に収集すると考えられる。

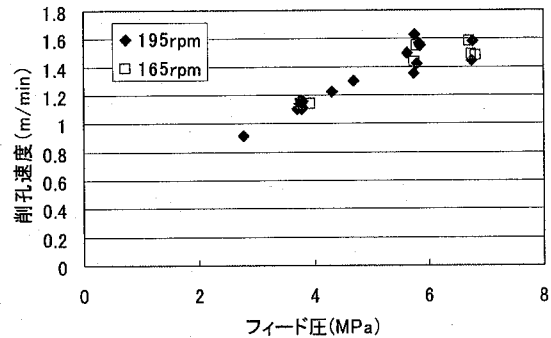


図-4 削孔速度とフィード圧の関係
(回転数分類)

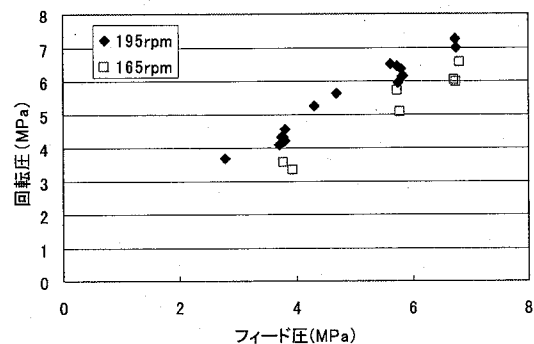


図-5 回転圧とフィード圧の関係

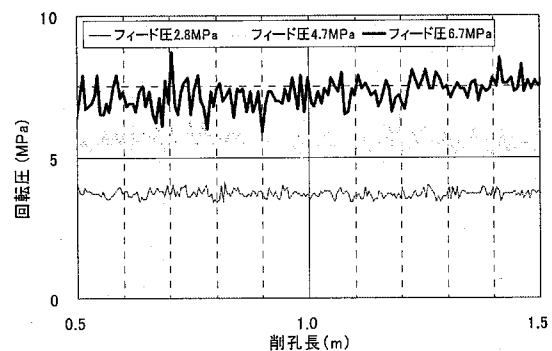


図-6 回転圧履歴

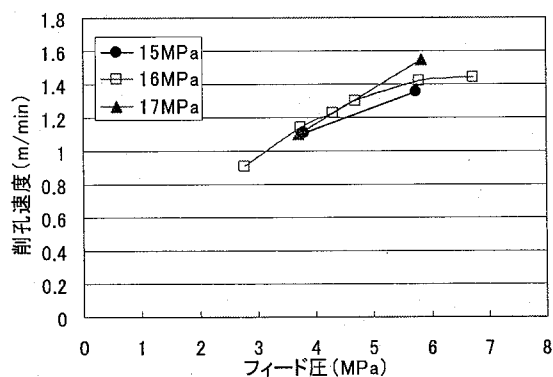


図-7 削孔速度とフィード圧の関係
(回転数195rpm-新品)

(4) ビット磨耗

a) 削孔速度、掘削体積比エネルギーとビット磨耗

図-9 にビットを新品および中古品に区分した削孔速度とフィード圧の関係を示す。削孔速度とフィード圧は全体として線形関係にあるが、フィード圧の上昇に伴い、新品よりも中古品のほうが削孔速度は速い。ビット寸法は、表-2 に示したように、中古品の径は細くなっており、磨耗による削孔径の減少により削孔速度が速くなったとする既往結果³⁾と調和的である。また、削孔速度とフィード圧の関係は6MPa 以上ではばらつきを生じており、中古品のほうが高フィード圧まで線形性を保持している。これは、磨耗によるビットチップ高さの増加が岩盤破砕片を大きくさせ、削孔速度の限界ラインを引き上げているものと推察される。すなわち、中古品の削孔速度が速くなった要因は、削孔径よりもビットチップ高さの増加による影響が大きいと考えられる。この事は、フィード圧を下げることににより、ビット磨耗の影響を低減できる可能性を示唆している。

b) 削孔における磨耗量

実験におけるビット磨耗量を表-3 に示す。新品ビットの1m 当りの磨耗量は中古品の2倍である。また、新品、中古品ビットの平均削孔速度は、いずれも約1.3mm/sec である。磨耗量と削孔時間との間に線形の関係が存在するとされている³⁾が、今回の結果はこれとは異なる結果となった。磨耗度合いが大きかった事が要因にあると推定される。

c) 磨耗ビットによる切屑の変化

本実験においても切屑の採取を新品、中古品各2 ケースずつ行っている。図-10 に切屑の粒径加積曲線を示す。新品-1、中古-1 はフィード圧 50MPa、回転数 195rpm、打撃圧 150MPa で、新品-2、中古-2 は打撃圧だけ 160MPa と異なる。図-10 から、中古品の切屑の粒径がより大きいことが確認できる。また、打撃圧の低い方がより大きくなる結果となった。

大久保ら⁴⁾は削孔による切屑が磨耗ビットの場合は粒径が大きくなる傾向があり、その要因は岩盤破砕が打撃1 回では生じないためとしている。本実験でも同様の結果となり、ビットの磨耗により、切屑の粒径は大きくなるといえる。ただし、その要因は大久保らが指摘するチップングの回数だけでなく、チップ高さの増加による影響も大きいと考えられる。

切屑から地山評価の際は以上の点を念頭に入れて評価する必要がある。

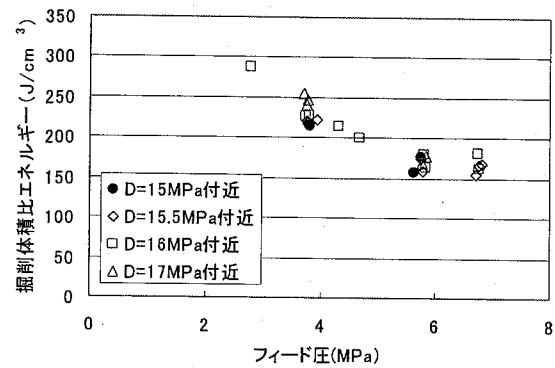


図-8 掘削体積比エネルギーとフィード圧の関係
(打撃圧分類)

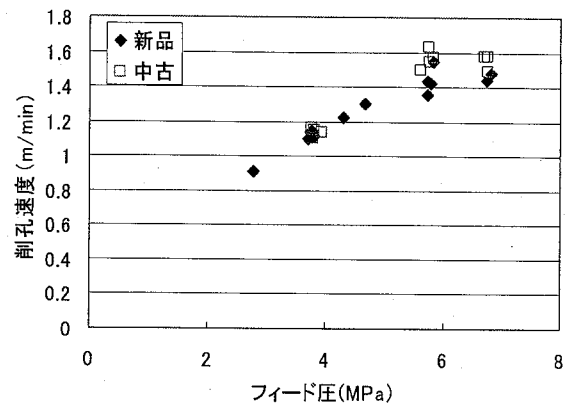


図-9 削孔速度とフィード圧の関係

表-3 実験に伴うビット磨耗量

ビット	磨耗重量 (g)	削孔延長 (m)	1m 当りの 磨耗量 (g)	削孔平均 速度 (m/s)
新品	7.04	31.255	0.225	1.30
中古品	2.74	24.815	0.110	1.31

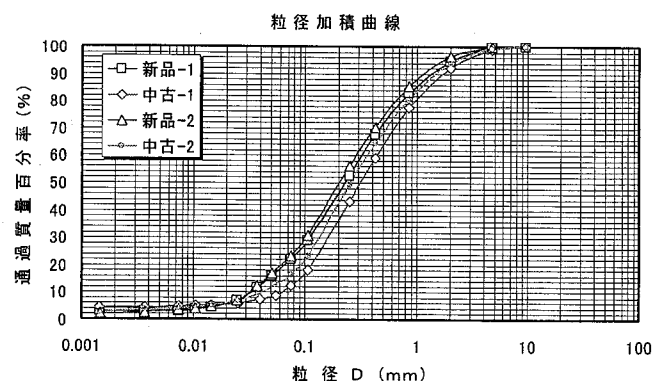


図-10 切屑の粒径加積曲線

5. まとめ

ノンコア削孔データによるトンネル切羽前方羽予測を行う場合、前方予測評価に使用する掘削体積比エネルギーは仮定条件のもとに実施されている。したがって、現場適用に際しては、課題を残していた。今回の実験は限定された試験条件、ケース数であるため、得られた結果をあらゆる岩盤に水平展開できるとは断言できないが、ノンコア削孔データを評価する上で重要な観点を明らかにしたものと考えられる。以下に知見を列記する。

①フィード圧の影響は顕著であるので、ノンコア削孔時においては一定のフィード圧で削孔を行うことが望ましい。しかし、岩盤の硬軟の程度によっては、作業工程やロッドの「ジャミング」防止等から、フィード圧を細かく調整しているのが現実である。したがって、フィード圧が異なるノンコア削孔においては、フィード圧と削孔速度の関連性を把握することにより、フィード圧の影響を低減した岩盤評価が可能になると考えられる。

②回転数の影響は小さいものと考えられる。また、フィード圧を高くすると回転圧も上昇し、回転圧の乱れが大きくなる。回転圧の乱れが大きくなることはチップの定位置（例えば1打撃ごとの20度回転）での新鮮な岩盤表面への打撃が行われていない可能性が高く、岩砕効率の低下、すなわち削孔速度の低下を招くと考えられる。精度の高いノンコア削孔を行う場合には、回転圧の乱れが大きくならないようにフィード圧を設定する必要がある。

③打撃圧の削孔速度への影響はフィード圧が高い場合に生じ、低い場合には生じない結果となった。そのため、フィード圧が低い場合は前方探査の評価に打撃圧を考慮すると、誤差が生じる可能性があり、削孔速度での評価を行うことが望ましい。

④ビット磨耗の影響は、削孔径やチップ高さの変

化により生ずるものと推察される。新品と中古品の各1種類での検討のため、磨耗度の詳細な検討は難しいが、削孔速度への影響は確認できた。また、フィード圧を下げることにより、ビット磨耗の影響を低減できる可能性があることが判明した。ノンコア削孔各1本（一般にL=30m~50m程度）ずつでの影響は小さいものと推察されるため、弱層面の把握等には問題はないが、トンネルの全長の統一した地山評価においては、削孔長の増大により影響が無視できないものとなるため、考慮する必要があると考えられる。

最後に本研究を行うにあたり御協力いただいた古河ロックドリル（株）の太田和行氏、小泉匡弘氏、芦澤 徹氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) W.A.Hustrulid, C.Fairhurst: A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock, *Int.J.Rock Mech.Min.Sci*, Vol.8, pp. 331-333, 1971
- 2) 原 敏昭, 熊谷成之, 石垣和明, 木村 哲, 平野 亨, 山下雅之: 穿孔探査システムでのフィード圧補正, 土木学会第58回年次学術講演会, pp. 315-316, 2003.
- 3) 室 達朗, 渡辺公浩: 岩盤に対する回転打撃穿孔能力に及ぼすビットの磨耗の影響, 土木学会論文集, 第397号/VI-9, pp. 115-122, 1988.
- 4) 大久保誠介, 太田彰則, 福井勝則: 磨耗したさく岩機用ボタンビットによる静的貫入試験, 資源と素材, vol. 113, pp. 663-668, 1997.
- 5) 福井勝則, 大久保誠介, 山下雅之: 長尺さく孔におけるさく孔深さの影響, 資源と素材, vol. 120, pp. 146-151, 2004.
- 6) 杉原義信, 栗秋 佳, 中野陽一, 山下高俊, 山本 信幸, 板倉賢一, 中田雅夫, 山地宏志: 削孔検層によるロックボルト打設長の評価, 三井建設技術研究報告, 第25号, pp. 29-34, 2000.