

(98) 回転打撃削岩機のビット穿孔速度と岩盤特性

愛媛大学工学部 正会員 室 達朗

愛媛大学工学部 正会員 ○深川 良一

愛媛大学大学院 学生会員 渡邊 公浩

1. まえがき

回転打撃式削岩機はビットに打撃力を与えて岩盤を破砕するとともに回転力によって岩石を切削するもので、押付力が大きい程破砕効果も大きくなり、ビット穿孔速度は増加する。

その基礎的研究として、田中ら¹⁾²⁾は、所定の押付力でビットを石灰岩と砂岩に圧入した後回転打撃穿孔を行い、ビットの穿孔速度と穿孔能率に及ぼす打撃エネルギー、押付力および打撃間隔の影響について試験している。その結果、石灰岩に対するビット穿孔速度は押付力に比例し打撃エネルギーの1.5~2.0乗に比例して増加する一方、打撃間隔に反比例することを明らかにしている。すなわち、穿孔速度を上昇させるには、打撃エネルギーを大きくすることが効果的であり、押付力を高めるとともに打撃間隔を小さくして回転トルクと回転エネルギーを増大させるべく打撃数と回転速度を選定すべきことを示唆している。また、単位穿孔長当たりの所要エネルギーを低減させて穿孔能率を向上させるには、打撃エネルギー、穿孔速度一定の条件下において、押付力の増加とともに打撃間隔を増大させ1回転当たりの打撃数を減少させるべきことを提案している。

ここでは、回転打撃式削岩機のビット穿孔速度と岩盤特性との関係を把握するため、まず、手持式ハンマドリルを用いて、10種類の岩石および現地岩盤において穿孔試験を行い、穿孔速度とビット口径、岩石物性値との相関性について明らかにするとともに、岩盤の亀裂係数を考慮して岩盤に対する穿孔速度に及ぼす岩盤特性の影響因子について解析する。次に、実機削岩機として13種類の回転打撃式削岩機を用いて、それぞれの押付力、打撃力および回転トルクを測定するとともに、種々の岩盤に対する穿孔速度が削岩機の打撃エネルギー、押付力、ビット口径などの諸元および岩盤の亀裂係数、岩石物性によっていかに変化するかについて解析することを目的とし、現地穿孔試験を実施した。さらに、岩盤に対するビット穿孔速度を標準回転打撃式削岩機を用いて実測することにより、岩盤の諸性質を調査する方法についても検討した。

2. 岩石および岩盤特性

手持式ハンマドリルと実機削岩機による穿孔試験を愛媛、高知、香川および兵庫の4県に点在する碎石場、トンネルや道路などの岩盤掘削現場計20ヶ所において実施した。岩石試験として、見かけ比重、真比重、自然含水比、吸水率、ショア硬さ、無亀裂岩石に対する縦波超音波伝播速度、ロサンゼルスすり減り減量、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、静弾性係数、ポアソン比およびプロトジャコノフ指数を求め、さらに、岩盤試験として、岩盤の縦波弾性波伝播速度を種々の方向で計測し、無亀裂岩石に対する縦波伝播速度から岩盤の平均亀裂係数を算定した³⁾。岩盤の種類は、砂岩、流紋岩、頁岩、石灰岩、花崗岩、珪岩、安山岩、輝緑岩、および緑色片岩で構成され、亀裂係数は0.426~0.993の範囲にある。

3. 手持式ハンマドリル穿孔試験

回転打撃式削岩機のビット穿孔速度に及ぼす岩石と岩盤の特性を明らかにするため、基準となる穿孔機として100V、1050Wの電動モータによってビットに回転打撃力を与える小型手持式ハンマドリルを選定した。この穿孔機の打撃エネルギーは、回転動作を停止した場合、1打撃当たり22.4Nmで、ハンマーの打撃数は2800打撃/分、ハンマーを往復運動させてドリルビットのシャンクを打撃するものである。ビットの回転数は無負荷時350r.p.m.である。この手持式ハンマドリルを使用して、現場No.1~No.10より採取した無亀裂岩塊について穿孔試験を行った。ドリルビットは長さ50.5cm、口径16, 19, 22, 25, 28および32mmφの一字ビットを用い、押付力239Nにおいて深さ2cmから7cm位置までの5cm間の穿孔速度を計測した。

その結果、前述した岩石の諸物性値と穿孔速度との相関性において、口径32mmビットに対する穿孔速度

V_{32} (cm/min)とシヨア硬さ H_s ，ロサンゼルスすり減り減量 U (%)，圧裂引張強度 σ_t (MPa)との相関性が最も高い値を示すことが明らかとなった⁴⁾。すなわち、 H_s ， σ_t の増加とともに V_{32} は減少し、 U の増加とともに V_{32} は増加する傾向にある。 H_s は岩石の硬さを示し、従来より回転穿孔や打撃穿孔における穿孔速度に与える重要な要因として指摘されてきたものであり^{5) 6)}、 U は打撃力に対する岩石のもろさと破碎度を意味しており、 σ_t は回転切削時の岩石の引張破壊に対する抵抗力を表現している。

他の口径のビットについても同様な傾向を有しており、穿孔速度 V_R (cm/min)とビット口径 D (mm)の関係を、 H_s ， U および σ_t に対して重回帰分析すると、

$$V_R = 1.15 \times 10^4 H_s^{-0.483} D^{-1.82} \quad (\text{重相関係数 } 0.89) \quad (1)$$

$$V_R = 7.37 \times 10^2 U^{0.225} D^{-1.82} \quad (\text{重相関係数 } 0.86) \quad (2)$$

$$V_R = 3.83 \times 10^3 \sigma_t^{-0.477} D^{-1.82} \quad (\text{重相関係数 } 0.90) \quad (3)$$

なる関係が成立した。

次に、種々の亀裂係数を有する現地岩盤8ヶ所において各ドリルビット口径に対して穿孔長20cmにおいてそれぞれの穿孔速度 V_F を計測し、岩石に対する穿孔速度 V_R との比較を行った⁴⁾。いずれも V_F の方が V_R より増大しており、その程度は岩盤の亀裂の数に支配されている。図1は、 V_F と V_R の比と岩盤の亀裂係数 C_r との関係を種々のビット口径に対し示している。両者の間には、次式で示す関係が成立した。

$$V_F / V_R = 1 + 1.25 C_r^{2.32} \quad (4)$$

(相関係数 0.84)

前式(1)より

$$V_F = 1.15 \times 10^4 (1 + 1.25 C_r^{2.32}) H_s^{-0.483} D^{-1.82} \quad (5)$$

が成立し、手持式ハンマドリルの穿孔速度をドリルビット口径と岩石・岩盤特性によって表現することができる。 U および σ_t に対しても同様に整理することができる。

4. 実機削岩機穿孔試験

計14ヶ所の作業現場において、それぞれ機種異なる空気圧式および油圧式回転打撃式削岩機を用いて、ビット穿孔速度に及ぼす機械の穿孔力および岩盤特性の影響について調査した。写真1に、実機削岩機による穿孔試験の状況を示す。空気圧式の場合、1打撃当たりの打撃エネルギーは、各シリンダー断面積、ピストンストロークおよび空気圧の積⁷⁾として算定した。実際に、打撃、回転およびブローに使用される空気消費量の割合は平均 58，21および 21 %である。

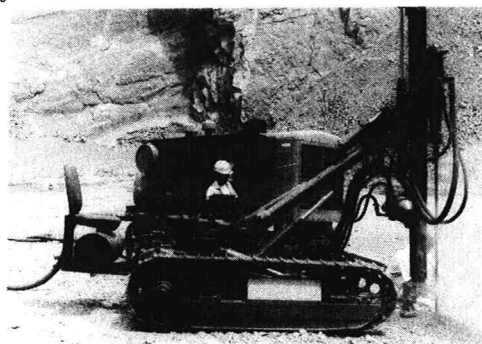


写真1 穿孔試験状況

ここではまず、機械の穿孔力としてビットに供給する押付力、打撃力および回転トルクを実測した。押付力と打撃力は、六角ロッドに作用する軸力を測定するためロッドの1対面に2枚の半導体ゲージを貼付し、ビット下方に設置した 500 kN 用ロードセルによってキャリブレーションを行った後、実際の岩盤穿孔時のロッ

ド軸力を計測した。回転トルクも同様に、ロッドに4枚の半導体ゲージを貼付し、100 Nm 用トルク計測器によってキャリブレーションを行った後、実際の岩盤穿孔時のロッドに作用する回転トルクを測定した。一例として砂岩で構成された岩盤において計測した押付力、打撃力および回転トルクの測定結果を図2に示す。押付力と回転トルクは初期立上がりを示すが、打撃開始とともに岩盤の口切り部分において若干減少し、その後穿孔が安定した段階で回復している。打撃力の大きさは、計測装置の追従能力が不足していたため正確な値を測定することが不可能であった。

各岩盤に対するビットの穿孔速度は、穿孔長3mに対し50cm 毎に計測し、穿孔回数5回以上の平均値を算定した。押付力は空気圧によって制御可能であり、現場No. 1においては、3段階の押付力に対応するビット穿孔速度を測定した。他の岩盤においては、通常使用されている空気圧の下で計測した。

5. 考察

回転打撃穿孔に関する田中ら²⁾の研究を整理すると、ある岩盤に対する穿孔速度 V' は、1回転当たりの打撃数 N (blows/min) / R (r. p. m.)、最大供給打撃エネルギー E_d および押付力 P の関数として次式で与えられる。

$$V' = K \frac{m (18R/N)^{-\alpha} + n}{f (2\pi R/N)} E_d^\beta P^\gamma \quad (6)$$

ここに、 m , n は、打撃エネルギー、静・動回転エネルギーに対する穿孔機の供給エネルギーの配分によって定まる係数である。また、 $f (2\pi R/N)$ は2次式で与えられ、この値を最小とする打撃間隔 $2\pi R/N$ は岩盤の種類によって異なる。なお、上式は、押付力 P の増加に伴って、打撃エネルギーの伝達効率が増加するとともに、静・動回転エネルギーも増加すると考えたものであり、指数 β と γ は、 E_d と P が独立変数となるので実験テストより重回帰分析して求めることができる。

指数 α の値は、砂岩と石灰岩について行った田中らの実験によると、 $\alpha = 1.17 \pm 0.31$ と与えられている。打撃エネルギーのピストンからシャンクへの伝達効率 K は、空気圧式と油圧式により、また、機械の構造、ロッド長によって変動するが、ここでは、式(6)の E_d , P に関する係数項は、岩盤特性や E_d , P の変動と比較してビット穿孔速度に与える影響は少ないとし、ほぼ一定であると仮定した。

なお、岩盤特性のビット穿孔速度に及ぼす影響については、岩盤の亀裂係数、岩石のショア硬さ、ロサンゼルスすり減り減量、圧裂引張強度およびドリルビット口径の関数として得られた前式(5)などが実験削岩機に対しても成立するとした。すなわち、実験削岩機のビット穿孔速度 V は次式で表されたとした。

$$V = K' \frac{m (18R/N)^{-\alpha} + n}{f (2\pi R/N)} E_d^\beta P^\gamma (1 + 1.25 C_r^{2.32}) \cdot \begin{bmatrix} H_s \\ U \\ \sigma_t \end{bmatrix} \cdot D^{-1.82} \quad (7)$$

上式を前述の E_d および P について重回帰分析した結果、

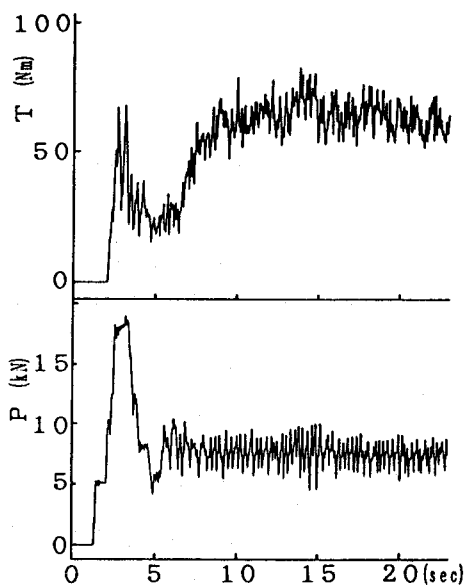


図2 ビットに作用する押付力 P と
回転トルク T の経時変化 (砂岩岩盤)

$$V = 2.36 \times 10^{-11} E_d^{2.80} P^{0.276} (1+1.25C_r)^{2.32} H_s^{-0.483} D^{-1.82} \quad (\text{重相関係数 } 0.707) \quad (8)$$

$$V = 1.12 \times 10^{-13} E_d^{2.98} P^{0.334} (1+1.25C_r)^{2.32} U^{0.225} D^{-1.82} \quad (\text{重相関係数 } 0.734) \quad (9)$$

$$V = 8.05 \times 10^{-16} E_d^{3.46} P^{0.516} (1+1.25C_r)^{2.32} \sigma_t^{-0.477} D^{-1.82} \quad (\text{重相関係数 } 0.841) \quad (10)$$

となり、穿孔速度に及ぼす打撃エネルギーは押付力より影響効果が高いことは明らかである。上式は、重相関係数も比較的高く、回転打撃式削岩機のビット穿孔速度が機械の穿孔力と岩盤特性によつて的確に表現されることを示している。また、標準削岩機を選定することにより、ビット穿孔速度を測定して岩盤特性を推定することも可能である。一方、手持式ハンマドリルの押付力 P は 0.239kN 、打撃エネルギー E_d は $0.627 \times 10^5 \text{ Nm/min}$ であるので、実機削岩機の穿孔速度 V は、同一岩盤に対する手持式ハンマドリルの穿孔速度 V_F を計測することにより伝達効率等が等しいと仮定すれば次式で推定することも可能である。

$$V = (E_d / 0.627 \times 10^5)^{3.46} (P / 0.239)^{0.516} (D / D_F)^{-1.82} V_F \quad (11)$$

上式は、最も重相関係数の高い式(10)より求めており、ハンマドリル径 D_F に対し、各削岩機の E_d 、 P および D を代入することにより算定することができる。

6. 結論

回転打撃式削岩機のビット穿孔速度 V (cm/min) は、機械の押付力 P (kN)、打撃エネルギー E_d (Nm/min)、クロスビットの口径 D (mm) および岩盤特性として亀裂係数 C_r 、岩石の圧裂引張強度 σ_t (Mpa) の関数として、次式で表されることが判明した。

$$V = 8.05 \times 10^{-16} E_d^{3.46} P^{0.516} (1+1.25C_r)^{2.32} \sigma_t^{-0.477} D^{-1.82}$$

したがって、穿孔速度を向上させる上で打撃エネルギーの大きな機種を選ぶことが効果的である。また、上式を用いて、標準削岩機を設定することにより、実測穿孔速度から岩盤の特性を推定することができる。さらに、小型手持式削岩機による穿孔速度から各種実機削岩機の同一岩盤に対する穿孔速度の推定も可能である。最後に、実機試験に当たり御協力賜った関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 田中正男、麻生和夫：回転—打撃穿孔に関する基礎研究（第2報）——推力、回転力、トルクと穿孔速度の関係について——，日本鉱業会誌，75巻 856号，pp. 892—898，1959年10月。
- 2) 田中正男、麻生和夫：回転—打撃穿孔に関する基礎研究（第3報），日本鉱業会誌，78巻 885号，pp. 189—198，1962年3月。
- 3) 室達朗，深川良一，渡邊公浩：回転打撃式ドリルの穿孔速度と岩盤特性，愛媛大学工学部紀要，第11巻第2号，1987年2月。
- 4) 室達朗，河原莊一郎，渡邊公浩：回転打撃式ドリルの穿孔速度と岩石物性の関係，第38回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 289—290，1986年5月。
- 5) 下村弥太郎，高多明：岩石の物理性とボーリング速度との関連に関する研究，日本鉱業会誌，74巻 844号，pp. 852—859，1958年10月。
- 6) 下村弥太郎，山口梅太郎：一打撃破碎試験による岩石の裂砕溝について，日本鉱業会誌，75巻 854号，pp. 508—512，1959年8月。
- 7) 速水博秀：最新さく岩機の諸元とせん孔能率，建設機械，第12巻第8号，pp. 76—81，1976年8月。

(98) A DRILLING RATE OF ROTARY PERCUSSION DRILL BIT
AND ROCK MASS PROPERTIES

Tatsuro MURO
Ryoichi FUKAGAWA
and
Masahiro WATANABE
(Faculty of Eng., Ehime Univ.)

Abstract

The drilling rate of rotary percussion drill bit depends on the impact energy and thrust as well as the characteristics of rock mass. Here, a handy type hammer drill test and 13 kinds of rotary percussion drill machine test were executed for 20 kinds of rock mass. As results, it is clarified that the drilling rate of bit $V(\text{cm/min})$ is expressed as a following function of impact energy $E_d(\text{Nm/min})$, thrust $P(\text{kN})$, bit diameter $D(\text{mm})$, coefficient of crack of rock mass C_r and radial compressive strength $\sigma_t(\text{MPa})$ of rock material :

$$V = 8.05 \times 10^{-16} E_d^{3.46} P^{0.516} (1 + 1.25 C_r^{2.32}) \sigma_t^{-0.477} D^{-1.82}$$

To increase the drilling rate of bit, it is more effective to drill a rock mass under a large impact energy rather than under a large thrust.

And, it is possible to estimate the characteristics of rock mass from the drilling rate of bit measured by using a standard rotary percussion drill machine. Furthermore, the actual drilling rate of bit in rotary percussion drilling could be estimated directly by measuring the drilling rate of handy type hammer drill executed on a same rock mass.