

(26) 岩盤穿孔能力に及ぼすビット摩耗の影響

愛媛大学工学部 正 会 員 室 達朗
愛媛大学工学部 正 会 員 ○河原莊一郎
愛媛大学大学院 学生会員 渡邊 公浩

1. まえがき 従来岩盤の爆破用穿孔やトンネル掘削のNATM工法におけるロックボルト穿孔のための穿孔機械として使用されてきている回転打撃式削岩機は、ビットに打撃力を与えて岩盤を破碎するとともに回転力によって岩石を切削するものであり、著者らは、前回押付力ならびに打撃エネルギーが大きくビット径が小さいものほど穿孔速度が増大することを明らかにした¹⁾。これら削岩機を使用するに当たり、その掘削工具であるドリルビットの摩耗はかなりのウェイトを持って穿孔能力に影響を及ぼし、同時に交換経費などの点から経済的問題となってきた。岩石の掘削には一般にWC-Co系超硬合金工具が使用されているが、その摩耗機構はそれぞれの掘削機構すなわち打撃破碎か切削かによって異なる。Larsen-Basse²⁾は、これを①表面打撃破碎、②表面衝撃疲労破碎、③熱疲労および、④アブレーションに分類している。①②は打撃掘削に、③④は切削に対応し、また回転打撃穿孔には2つの掘削機構に対応する摩耗機構が同時に、また独立に作用すると考えられる。高面圧下におけるドリルビット用超硬合金の種々の岩石に対するアブレーション摩耗特性についてはすでに明らかにした³⁾。

ここでは、5種類の硬岩盤と岩石（花崗岩、硬・軟砂岩、安山岩及び輝緑岩）に対してそれぞれ実機削岩機と手持式ハンマドリルを装備した室内穿孔実験機を使用し、種々の押付力、打撃エネルギー、ビット径に対するビット摩耗実験を実施し、種々の岩盤に対して回転打撃式削岩機のドリルビットの摩耗がその主たる穿孔能力である穿孔速度に及ぼす影響について明らかにし、また、ビットの摩耗寿命を摩耗に対する岩盤強度指数、穿孔機械の打撃エネルギー、回転エネルギー及びビット径によって推定する式を提案する。

2. 岩石および岩盤特性 実機削岩機と手持式ハンマドリルを用いたドリルビットの摩耗実験をそれぞれ、愛媛県内の採石場ならびに現地より採取した岩石に対し実施した。岩種は花崗岩、硬・軟砂岩、安山岩及び輝緑岩であり、それぞれの岩石物性ならびに岩盤特性は以下

の通りである。圧裂引張強度 σ_t は 9.3, 15.7, 14.6, 11.6及び15.9MPa, ショア硬さHsは 91.9, 84.0, 82.4, 74.0及び73.6, ロサンゼルスすり減り減量Uは14.7, 17.4, 14.7, 14.2及び21.0%, 一軸圧縮強度 σ_{co} は 97.9, 187.6, 254.3, 141.1及び186.2MPa, 見かけ比重 G' は 2.67, 2.61, 2.62, 2.57及び3.04, 吸水率Wsは 0.28, 0.49, 0.30, 0.15及び0.07, そして亀裂係数Crは 0, 0.845, 0.919, 0.426及び0.849である。また、岩盤掘削工具の摩耗に対する岩盤の強度を評価する指数として「摩耗に対する岩盤強度指数 σ_c 」を次式のように定義したものを用いてその値を算出した⁴⁾。

$$\sigma_c = K \cdot \sigma_{co} (1 - Cr) \quad (1)$$

$$K = K_0^2 (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) / 4$$

ここに、 $K_0 = (\text{石英含有量}) + (\text{長石類含有量}) \times 0.5$

$$K_1 = (\text{見かけ比重}) / 2.60$$

$$K_2 = 30.0 / (\text{ロサンゼルスすり減り減量})$$

$$K_3 = 2.00 / (\text{吸水率})$$

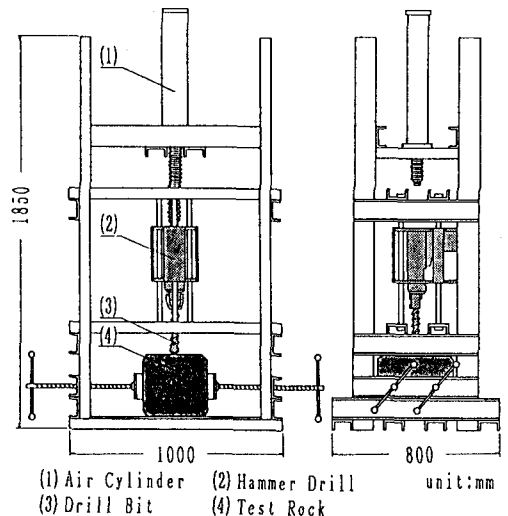


図1 室内穿孔実験機

$$K4 = (\text{シヨア硬さ}) / 60.0$$

である。その結果 σ_c (MPa)はそれぞれ 192.3, 11.0, 54.3, 0.722及び1499であり、輝緑岩、花崗岩の順で岩盤掘削工具を摩耗させやすい岩盤である。

3. 室内摩耗実験 回転打撃式削岩機のドリルビットの摩耗が穿孔能力に及ぼす影響及び、削岩機あるいは岩盤のどのような因子がビットの摩耗に影響を及ぼすかについて明らかにするために、室内穿孔実験機を自作し実験を行った。図1に示す室内穿孔実験機は、100V, 1050Wのモーターを動力とした回転打撃式の手持式ハンマドリルを3本のロッドを軸として鉛直方向に移動可能のようにフレームに取り付け、上方よりエアシリンダーで載荷可能としたものであり、下方では、4本のアームで岩石を固定する構造となっている。実験は、一定の穿孔長を一定の押付力のもとで穿孔し穿孔所要時間をストップウォッチで測定し、穿孔速度を求め、そして穿孔5回毎に、ドリルビットの摩耗量を測定した。摩耗量は、感量50mgの電子天秤を用いてウェイトロス W (g)を、ハイトゲージを用いてハイトロス H (mm)を、そしてマイクロメーターを用いてゲージロス G (mm)をそれぞれ測定した。前述の5種類の岩石に対してビット径16, 19, 22, 25, 28及び32(mm)、押付力0.21, 0.54, 0.73, 1.10及び1.47(kN)について実験を行った、まず、その結果を摩耗量 M と穿孔時間 T (min)の関係並びに穿孔速度 V (cm/min)と摩耗量 M の関係について整理した。図2, 図3に花崗岩で押付力 $P=0.21$ (kN)、ビット径 $D=16$ (mm)という条件下におけるウェイトロス W (g)に対するものを示す。穿孔時間と共に W は緩やかに直線的に増大するが $T=28$ (min), $W=0.25$ (g)の点からその割合が急増している。また、ウェイトロス W の増大と共に穿孔速度 V は一定の割合で減少し、 $W=0.25$ (g), $V=8.0$ (cm/min)を境にほとんど一定の値に落ち着いている。このように穿孔速度の変化の割合が突然変化する点を第一摩耗限界、穿孔速度が0となる点を第二摩耗限界とし、 $C1$, $C2$ なる添字でこれを表す。第一摩耗限界以後は穿孔速度の減少は極めて小さいが摩耗量が急増するためこの点を目安にエッジの研磨を行いビットを再生することが望ましいと考えられる。実験より V_{C1} の値を求めた結果(2)式なる関係が得られた。

$$V_{C1} = 0.4V_0 \quad (2)$$

すなわち、穿孔速度が初期穿孔速度の40%に達した時、それは第一摩耗限界に達したと言える。ここで、 V_0 は新品のドリルビットに対する初期穿孔速度である。同様な結果がゲージロス G (mm)及びハイトロス H (mm)についても得られた。但し、 H に対しては、以下で述べる補正を加えた。図2, 図3の直線部分をそれぞれ以下に示す(3), (4)式なる形で与えた。

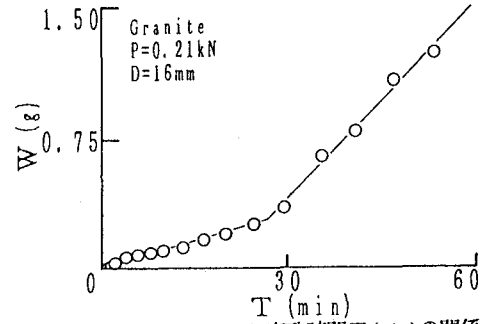


図2 ウェイトロス W (g)と穿孔時間 T (min)の関係

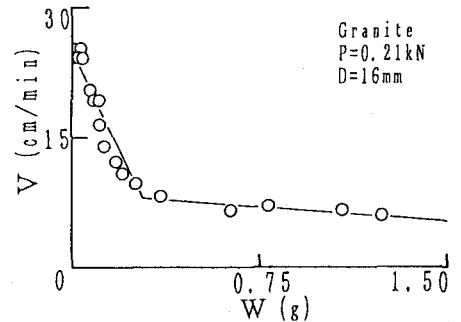


図3 穿孔速度 V (cm/min)とウェイトロス W (g)の関係

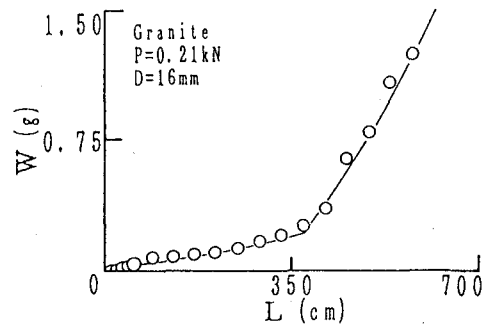


図4 ウェイトロス W (g)と穿孔距離 L (cm)の関係

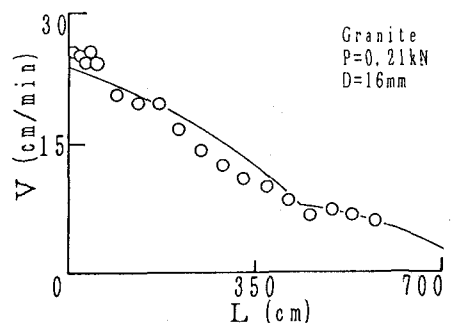


図5 穿孔速度 V (cm/min)と穿孔距離 L (cm)の関係

$$M = km \cdot T + C_m \quad (M=W \text{ or } G; m=w \text{ or } g) \quad (3)$$

$$V = V_o - b_m \cdot M \quad (4)$$

ここで、 km は摩耗速度、 b_m は穿孔速度低下率及び C_m は初期摩耗値である。(3)式を(4)式に代入し $C_m \approx 0$ と仮定すると

$$V = V_o - b_m \cdot km \cdot T \quad (5)$$

となる。次に(5)式を T について $0 \sim T$ まで積分し $T = M / km$ を代入する。

$$L = \int (V_o - b_m \cdot km \cdot T) dT \\ = V_o \cdot T - b_m \cdot km \cdot T^2 / 2 \quad (6)$$

$$= V_o \cdot M / km - b_m \cdot M^2 / 2 km \quad (7)$$

これは、穿孔長 L (cm)を摩耗量 M の関数として表したものである。図4に W と L の関係を示すが、ここでの曲線は、(7)式より得られたものであり実験値と解析値がよく一致していることがわかる。

(6)式に(5)式を代入し

$$V = (V_o^2 - 2 km \cdot b_m \cdot L)^{1/2} \quad (8)$$

が得られる。これは、 V を L の関数として表したものである。図5に V と L の関係を示す。そこで、(2)、(4)式から M_{c1} を求めこれを(3)、(7)式に代入するとドリルビットの第一摩耗寿命である T_{c1} (min)及び L_{c1} (cm)が明らかになる。

$$T_{c1} = 0.60 V_o / (km \cdot b_m) \quad (9)$$

$$L_{c1} = 0.42 V_o^2 / (km \cdot b_m) \quad (10)$$

これより、 V_o 、 km 及び b_m の値がわかれば T_{c1} 及び L_{c1} を予想することが可能となる。

また、摩耗量 H についてはドリルビットの先端の形状を三角柱を横に寝かせたテント型と仮定し、単位時間当りの摩耗体積を一定として(3)、(4)、(7)、(8)、(9)及び(10)を同様に誘導した結果、それぞれ以下の(3)'、(4)'、(7)'、(8)'、(9)'及び(10)'式が得られた。

$$M = km \cdot T^{1/2} + C_m \quad (M=H; m=h) \quad (3)'$$

$$V = V_o - b_m \cdot M^2 \quad (4)'$$

$$L = V_o \cdot M^2 / km^2 - b_m \cdot M^4 / 2 km^2 \quad (7)'$$

$$V = (V_o^2 - 2 km^2 \cdot b_m \cdot L)^{1/2} \quad (8)'$$

$$T_{c1} = 0.60 V_o / (km^2 \cdot b_m) \quad (9)'$$

$$L_{c1} = 0.42 V_o^2 / (km^2 \cdot b_m) \quad (10)'$$

4. 実機摩耗実験 同様に計4カ所の作業現場(硬・軟砂岩、輝緑岩及び珪岩)においてそれぞれ機種の異なる空気圧式及び油圧式回転打撃式削岩機を用いてビット摩耗実験を行った。但し、1回の穿孔長は1~3mとし穿孔5回毎にビットの摩耗量(W , H , G)を測定した。図6に W と T の関係を、図7に V と W の関係を、図8に W と L の関係を、そして図9に V と L の関係を示す。Site Iは軟砂岩岩盤であり油圧式回転打撃式

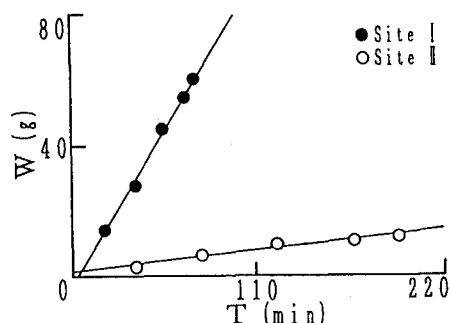


図6 ウェイトロス W (g)と穿孔時間 T (min)の関係

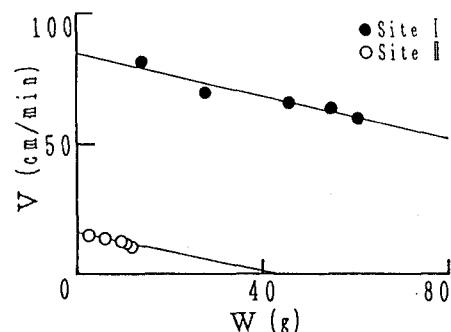


図7 穿孔速度 V (cm/min)とウェイトロス W (g)の関係

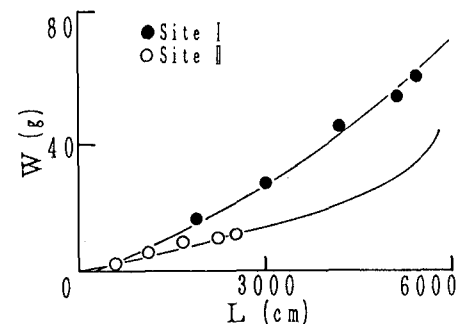


図8 ウェイトロス W (g)と穿孔距離 L (cm)の関係

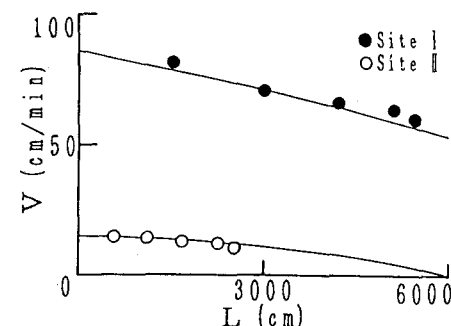


図9 穿孔速度 V (cm/min)と穿孔距離 L (cm)の関係

削岩機 (D=75mm, P=14kN, Ed=7.4x10⁵Nm/min) を使用した。また, Site II は輝緑岩岩盤であり油圧式回転打撃式削岩機 (D=65mm, P=11kN, Ed=4.1x10⁵Nm/min) を使用した。kw を比較すると Site I の方が大きい, bw はほとんど変わらないことがわかる。全穿孔長が短い第一摩耗限界となる折れ点まで達していないものと予想される。また, 図7及び図8から現場実験においても実測値と解析値がよく一致することがわかる。

次に, 室内及び現場摩耗実験から得られたデータを基に km, bm 及び Vo をビット径 D (mm), 押付力 P (kN), 打撃エネルギー Ed (Nm/min) 及び摩耗に対する岩盤強度指数 σc (MPa) または圧裂引張強度 σt (MPa) 及び亀裂係数 Cr で表現するためにこれらの間で重回帰分析を行った。その結果,

$$k_m = A_1 \cdot D^{A_2} \cdot P^{A_3} \cdot E_d^{A_4} \cdot \sigma_c^{A_5} \quad (11)$$

$$b_m = B_1 \cdot D^{B_2} \cdot P^{B_3} \cdot E_d^{B_4} \cdot \sigma_c^{B_5} \quad (12)$$

$$V_o = C_1 \cdot D^{C_2} \cdot P^{C_3} \cdot E_d^{C_4} \cdot \sigma_t^{C_5} (1 + 1.25 C_r^{2.32}) \quad (13)$$

なる関係が成立した。各係数, 指数の値及び重相関係数 r の値を表1に示す。D 及び P が大きく Ed 及び σc が小さいほど km は小さい。すなわち, 摩耗量が少なくなることがわかる。B.G.Fish 等も回転及び回転打撃穿孔においては押付力が大きいほど摩耗速度は小さいことを指摘している⁵⁾。bm については, D 及び Ed が大きく P および σc が小さいほどその値は大きくなる。初期穿孔速度 Vo は D の -1.8 乗に比例し P 及び Ed が大きく σt が小さいほど大きなものとなる。ここで, (11), (12) 及び (13) 式を (9) 及び (10) 式に代入すると

$$T_{c1} = D_1 \cdot D^{D_2} \cdot P^{D_3} \cdot E_d^{D_4} \cdot \sigma_c^{D_5} (1 + 1.25 C_r^{2.32}) \sigma_t^{D_6} \quad (14)$$

$$L_{c1} = E_1 \cdot D^{E_2} \cdot P^{E_3} \cdot E_d^{E_4} \cdot \sigma_c^{E_5} (1 + 1.25 C_r^{2.32}) \sigma_t^{E_6} \quad (15)$$

となり, これをもって摩耗寿命を予測することが可能である。なお, 穿孔時間に対する穿孔速度の低下率 α は,

$$\alpha = F_1 \cdot D^{F_2} \cdot P^{F_3} \cdot E_d^{F_4} \cdot \sigma_c^{F_5} (1 + 1.25 C_r^{2.32}) \sigma_t^{F_6} \quad (16)$$

で与えられる。(表1)

5. 結 論 ドリルビットの摩耗が急速に進行する第一摩耗限界は穿孔速度が初期穿孔速度の約40%になる点であり, この時点でドリルビットのエッジを研磨すべきである。ドリルビットの第一摩耗寿命である

Tc1 (min) 及び Lc1 (cm) を求める方法として, 現場において簡単な摩耗実験を行い bm, km 及び Vo を求め (9), (9)' 及び (10), (10)' 式より推測する方法と (14) 及び (15) 式より直接, 変数に数値を与えて算出する方法の2通りをここで提案することが可能となった。

なお, ビット摩耗が岩盤穿孔速度に及ぼす影響は, (4), (4)' 式より直接摩耗量より与えられ, また, (16) 式より穿孔時間に対する低下率 α で算定できることを示した。

参考文献 1) 室 達朗, 深川良一, 渡邊公浩: 回転打撃式削岩機のビット穿孔速度と岩盤特性, 第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 土木学会岩盤力学委員会, pp.471-475, 1987年2月。2) J.Larsen Basse: Power Metallurgy, Vol.16, No.31, p.9, 1973。3) 室 達朗, 河原荘一郎, 渡邊公浩: ドリルビット用超硬合金の岩石に対する摩耗特性, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.66-69, 1987。4) 畠 昭治郎: 建設機械学, 鹿島出版会, pp.102-113, 1987。5) Fish.B.G, Guppy.G.A. and Ruben.J. T: The Abrasive Wear Effect in Rotary Rock Drilling, Transaction of Mining and Metallurgy, Vol.68, pp.357-383, 1959。

表1 重回帰分析の結果

		A1	A2	A3	A4	A5	r
k	w	6.94E-16	-1.05	-0.68	2.93	0.03	0.89
	h	1.27E-11	-0.07	-0.66	1.80	0.07	0.80
	g	4.51E-11	-1.71	-0.58	2.08	-0.17	0.75
		B1	B2	B3	B4	B5	r
b	w	2.57E 10	-2.37	0.22	-1.18	0.02	0.89
	h	4.19E 7	-1.45	0.22	-0.75	-0.04	0.65
	g	3.95E 6	-2.96	0.43	-0.15	0.10	0.79
		C1	C2	C3	C4	C5	r
Vo		1.68E -1	-1.81	0.13	1.05	-0.56	0.92
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
T	w	5.65E 3	1.61	0.59	-0.70	-0.05	-0.56
	h	1.49E 13	-0.22	1.23	-1.80	-0.10	-0.56
	g	5.65E 2	2.86	0.28	-0.88	0.07	-0.56
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
L	w	6.65E 2	-0.20	0.72	0.35	-0.05	-1.12
	h	1.75E 12	-2.17	-0.40	-0.39	0.04	-1.12
	g	6.65E 1	1.05	0.41	0.17	0.07	-1.12
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
α	w	1.77E -4	-1.61	-0.59	0.70	0.05	0.56
	h	6.71E-14	0.22	-1.23	1.80	0.10	0.56
	g	1.77E -3	-2.86	-0.28	0.88	-0.07	0.56

(26) INFLUENCE OF BIT WEAR ON ROCK MASS DRILLABILITY OF ROTARY PERCUSSION DRILL

Tatsuro MURO

Soichiro KAWAHARA

and

Masahiro WATANABE

(Faculty of Eng., Ehime Univ.)

Abstract

This paper aims to clarify the influence of bit wear on rock mass drillability, mainly the drilling rate of rotary percussion drill and to predict the wear life of drill bit. Using a new laboratory apparatus equipped with a portable percussive-rotary rock drill, several drilling tests were executed for 5 kinds of rock specimen (granite, 2 sandstones, andesite and diabase), and each thrust and bit diameter were ranged for 0.21~1.47KN and 16~32mm, respectively. In-situ tests were also executed by use of full-scale rotary percussion drill for 4 kinds of rock mass.

The results of multiple regression analysis for drilling rate V of rotary percussion drill are as follows:

$$V = V_0 - b_w \cdot W, \quad W = k_w \cdot t$$

where V_0 : initial drilling rate of new drill bit (cm/min), W : amount of wear (g),
 t : penetration time (min).

Therefore, $V = V_0 - k_w \cdot b_w \cdot t$

$$V_0 = 0.168 \cdot D^{-1.81} \cdot P^{0.13} \cdot E_d^{1.05} \cdot \sigma_t^{-0.56} (1 + 1.25 Cr^{2.32})$$

$$k_w = 6.94 \times 10^{-16} \cdot D^{-1.05} \cdot P^{-0.68} \cdot E_d^{2.93} \cdot \sigma_c^{0.03}$$

$$b_w = 2.57 \times 10^{10} \cdot D^{-2.37} \cdot P^{0.22} \cdot E_d^{-1.18} \cdot \sigma_c^{0.02}$$

where D : bit diameter (mm), P : thrust (KN), E_d : impact energy (Nm/min),
 σ_t : radial compressive strength (MPa), Cr : coefficient of crack,
 σ_c : index of rock mass strength for wear (MPa).

There is a threshold point after which the amount of wear increases rapidly and the critical drilling rate V_c is 40% of the initial one V_0 , which we call "first critical wear life". As the results, the first critical wear life T_c and the first critical distance of penetration L_c ,

$$T_c = 0.60 V_0 / k_w \cdot b_w, \quad L_c = 0.42 V_0^2 / k_w \cdot b_w$$

could be obtained.