

岩盤切削機の掘削能力とビット摩耗の 寿命予測

室 達朗*・竹垣喜勝**・丸山健一***・
藤本英樹****

本研究の目的は、新しく開発された岩盤切削機の掘削能力を明らかにし、回転ドラムに取り付けた切削用超硬ビットの摩耗寿命を予測することである。そのため、種々の岩盤の露呈する碎石場において、岩盤切削機を使用して、岩盤の掘削試験とビットの摩耗試験を実施した。その結果、掘削能力は岩盤の亀裂係数に支配され、超硬ビットの摩耗寿命は、主として、「摩耗に対する岩盤強度指数」の関数となることを明らかにしている。

Key Words : bit cutter, excavation, rock mass, wear life

1. まえがき

近年、環境に対する意識の高揚により、都市や市街地周辺での岩盤掘削工事において、振動、騒音および飛石を伴う発破作業は敬遠されるようになり、それに代わる油圧式岩盤破砕機や膨張セメントなどの薬剤を使用する静的破砕工法が採用されてきている。これらの工法は環境に優しい施工法ではあるが、その作業効率をかなり犠牲にしている事実は否めない。

本研究の目的は、これらの諸問題を解決し、環境に優しくかつ作業効率と精度を高めるべく道路建設やダム基盤建設のために新しく開発された岩盤切削機について、その掘削能力を明らかにし、回転ドラムに取り付けた切削用超硬ビットの摩耗寿命を予測することである。そのため、種々の岩盤の露呈する碎石場において、岩盤切削機を使用して花崗斑岩、流紋岩質凝灰岩からなる岩盤の掘削試験とビットの摩耗試験を実施した。その後、掘削能力は岩盤の亀裂係数に左右されること、および超硬ビットの耐摩耗性は、岩盤掘削用リッパチップの耐摩耗性^{1),2)}の場合と同様に、主として、「摩耗に対する岩盤強度指数」に支配されることを確認する。さらに、超硬ビットの最適な部品交換計画を樹立するために必要な超硬ビットの新しい摩耗寿命予測式を提案することとする。

2. 岩盤切削機と超硬ビット

使用した岩盤切削機は、道路の新設や拡幅工事、ダムや発電所の基盤掘削工事、およびトンネルの下半掘削工事等に使用されている。Photo.1 にその全景を示すよう

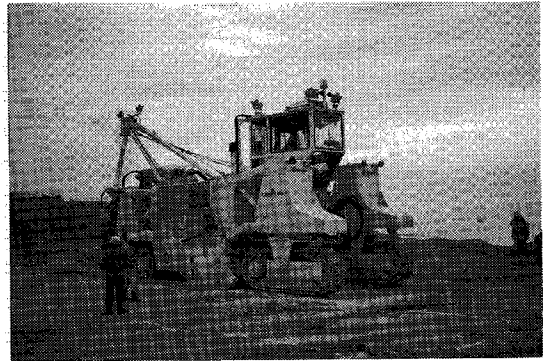


Photo.1 Rock mass surface excavator

に、車両本体は、4 履帯からなる走行装置によって支持され、中央部に位置する 1200 PS エンジンと直径 1400 mm、切削幅 3500 mm の切削回転ドラム、および 180 度旋回できる積み込み装置であるベルトコンベヤーを装備しており、岩盤切削からダンプトラックへの積み込み作業まで連続的に行うことができる。Table 1 にその車両諸元を示すように、岩盤表面切削機の総重量は作業時 1421 kN (145 tf) であり、機械本体の全長は 14.1 m、ベルトコンベヤーを入れると最大長 24.4 m にも達している。また、岩盤表面切削機は 4 履帯駆動方式で、その最大登坂能力は 20 度であり、前部 2 履帯の左右独立旋回機構により最小回転半径 15 m で旋回することができる。なお、本機は自動レベル制御システムにより、複雑な地形上にあっても機械本体を水平に維持することができ、2 枚のサイドプレートにより切削回転ドラムの位置を制御し、掘削深さを調整することができる。

切削回転ドラムには、Photo.2 に示すように、160 本の切削ビットが螺旋状に取り付けられており、散水装置によりビットの冷却と防塵を行っている。仕上がり精度は ±5 cm で、ピッチ 3 cm の条痕からなる平坦な岩盤

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科
(〒790 松山市文京町 3)

** 奥村組土木興業 (株) NF 開発本部技術開発部部长

*** 奥村組土木興業 (株) NF 開発本部技術開発部

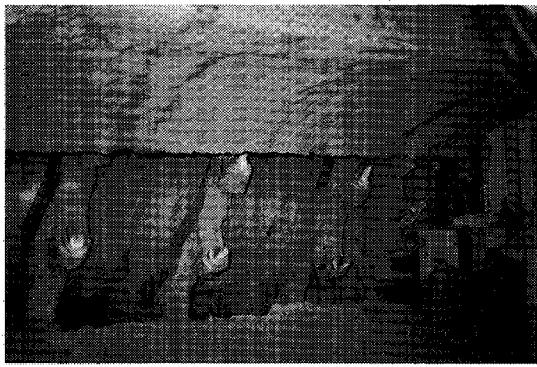


Photo.2 Roller drum and bit under cutting operation

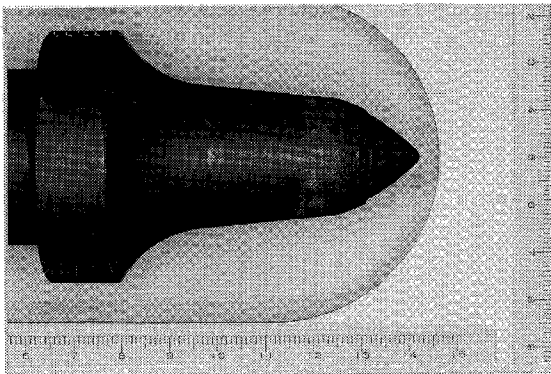


Photo.3 New cutter bit

表面を作成することができる。なお、岩屑の最大粒径は300 mm 以下であり、盛土材料としても使用することができる。

切削ビットは、Photo.3 に示すように、円錐型のタングステンカーバイド-コバルト系超硬合金チップを先端に埋め込んだ軸対称のコニカルビットである。このコニカルビットの特長は、部品交換が容易であること、およびビットの取り付け方向を垂直方向から横方向に多少傾斜させることにより、岩盤との衝突時にビット本体を回転させることである³⁾。このビットの回転により、摩耗形態はひっかけ摩耗からころがりによるラッピング摩耗へと転換され、摩耗量は大幅に軽減されるとともに、セルフシャープネス性が遺憾なく発揮されている。ここで使用したコニカルビットは、長さ139~152 mm、台座の直径50~54 mm であり、先端の超硬合金チップの高さが28.5, 30.5, および40.0 mm で、それぞれの直径が17.5, 19.5, および25.0 mm の3種類である。

Table 2 に、それぞれの超硬合金チップの抗折力、硬さおよび密度を示す。なお、超硬合金ビットをホルドするビットシャंक材の材質はSKC-24, SCM3またはS45Cであり、岩屑と接触する外周部分は、耐摩耗性を向上させるために、肉盛金属 HF800 相当品でハード

Table 1 Vehicle dimensions of rock mass surface excavator

Rock mass surface excavator	
Total weight (under operation)	1,421 kN
Total length	14,100 mm
Total width	4,900 mm
Total height	7,080 mm
Cutter drum	
Cutting width	3,500 mm
Maximum cutting depth	500 mm
Rotation speed	48 r.p.m.
Drum diameter	1,400 mm
Number of bit	160
Engine	
Output power	1,200 PS
Total exhaust gas	37,800 cc
Fuel tank	2,300 ℓ
Belt conveyer	
Loading capacity	1,900 m ³ /h
Width of belt	1,400 mm
Length of conveyer	10,300 mm
Height of loading	4,880~7,490 mm
Trafficability	
Operation speed	0~25 m/min
Running speed without load	0~3.9 km/h
Climbing capacity	$\pi/9$ rad
Minimum steering radius	15 m

Table 2 Physical properties of hard metal tip

Tip diameter (mm)	Breaking strength (N/mm ²)	Hardness H _{RA}	Density (g/cm ³)
φ 17.5	1950	85.5	14.60
φ 19.5	1842	85.2	14.57
φ 25.0	1950	85.5	14.62

フェーシングされている。

3. 供試岩盤

ある碎石場の平坦な部分に、長さ40.0 m、幅10.5 m の試験ヤードを設定し、当該岩盤切削機の掘削能力と超硬ビットの摩耗試験を実施した。供試岩盤は、流紋岩質凝灰岩からなる岩盤中に花崗斑岩の岩盤帯が貫入した地層構造であり、Fig.1 に示すように、それらの岩盤⁴⁾は、流紋岩質凝灰岩と花崗斑岩Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの計4種類の岩石で構成されている。流紋岩質凝灰岩には亀裂は大変多いが、個々の岩石の風化は余り進行していない。花崗斑岩Ⅲはほとんど風化していないが、他の花崗斑岩はⅡ、Ⅰの順に風化が進行し、亀裂の数は増加している。Table 3 はそれぞれの岩盤試験の結果として、岩の種類、岩盤

Table 3 Rock and rock mass properties

Name of rock and rock mass Classification of rock mass	Rhyorite Tuff	Grano-Porphry		
		I	II	III
Longitudinal elastic wave velocity of rock mass V_2 (m/s)	1779 ± 332	1250 ± 50	1650 ± 50	2044 ± 424
Schmidt hammer rebound value	40 ± 10	15 ± 5	38 ± 13	50 ± 10
Coefficient of crack C_r	0.873	0.894	0.851	0.811
Apparent specific gravity G	2.66 ± 0.02	2.50 ± 0.01	2.53 ± 0.01	2.52 ± 0.02
Absorption W' (%)	0.410	2.306	1.077	0.683
Shore hardness H_s	101 ± 8	67 ± 7	95 ± 8	100 ± 9
Uniaxial compressive strength σ_{c0} (MPa)	220.7 ± 85.2	65.2 ± 7.9	111.6 ± 12.3	154.0 ± 16.2
Longitudinal elastic wave velocity of non-fissured rock sample V_1 (m/s)	5002 ± 490	3843 ± 74	4271 ± 11	4698 ± 14
Amount of Los Angeles abrasion U (%)	4.13	19.54	9.85	6.54
Quartz content K_0	0.350	0.340	0.340	0.340
Apparent rock mass strength $\sigma_{c0}(1-C_r)$ (MPa)	27.9 ± 10.8	6.9 ± 0.8	16.6 ± 1.8	29.1 ± 3.1
Index of rock mass strength for wear of rippertip σ_c (MPa)	12.69	0.89	3.58	8.54
Index of rock mass strength for wear of cutter bit σ_b	1.556×10^{-2}	1.225×10^{-2}	1.722×10^{-2}	2.185×10^{-2}

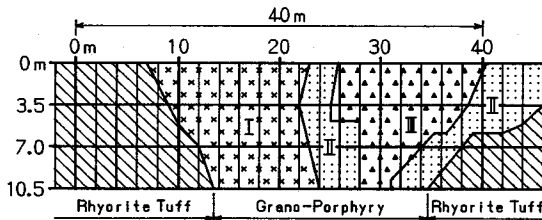


Fig.1 Excavation test site and classification of rock mass

の等級, 地山の弾性波伝播速度 V_2 , シュミットハンマー反発値⁵⁾, 亀裂係数 C_r ⁶⁾, および現地で採取した岩石の物性値として, 見掛け比重 G , 吸水率 W' , ショア硬さ H_s , 一軸圧縮強度 σ_{c0} , 無亀裂供試体の超音波伝播速度 V_1 , ロサンゼルスすりへり減量 U ⁷⁾, および石英類含有量 K_0 を列記したものである. さらに, これらの計測値より算定される見掛け岩盤強度 $\sigma_{c0}(1-C_r)$, 次式で与えられるリッパーチップの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_c および後述する切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b を同表に記した.

$$\sigma_c = K_0^2 K \sigma_{c0} (1 - C_r) \dots\dots\dots (1)$$

$$K = \frac{1}{4} \left(\frac{G}{2.60} + \frac{30.0}{U} + \frac{2.00}{W'} + \frac{H_s}{60.0} \right)$$

$$C_r = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

$$\sigma_b = K_0^2 (1 - C_r) \dots\dots\dots (2)$$

同表に示すように, 亀裂係数 C_r は, 花崗斑岩Ⅲ, 花崗斑岩Ⅱ, 流紋岩質凝灰岩, 及び花崗斑岩Ⅰの順に増加していることが明らかである.

4. 掘削能力試験

当該試験ヤードにセットした幅3.5mの3レーンにおいて, 岩盤切削機の掘削能力試験を実施した. 岩盤切削用超硬ビットは, 直径の異なる超硬チップ $\phi 17.5$, $\phi 19.5$, および $\phi 25.0$ mmからなる切削ビット160本をそれぞれ切削回転ドラムに取り付けて掘削能力試験に供した.

複数レーンの掘削中に遭遇する各種岩盤(等級)に対して, それぞれ掘削距離, 掘削深さ, 掘削所要時間, および切削ドラムに作用する掘削トルクを計測し, 掘削速度と掘削土量を算定した. **Table 4**は, 各岩盤に対する岩盤切削機の掘削能力を, 単位時間当たりの掘削土量 Q , 掘削深さ d , 掘削速度 V , および最大掘削トルク T として, 各超硬ビット径毎にまとめて示したものである. 単位時間当たりの掘削土量 Q は, どのビット径 ϕ に対しても, 花崗斑岩Ⅰが最大であり, ついで流紋岩質凝灰岩, 花崗斑岩Ⅱ, 花崗斑岩Ⅲと続いている. また, 亀裂のかなり発達した岩盤である花崗斑岩Ⅰ, 流紋岩質凝灰岩ではビット径 ϕ が小さいほど亀裂へのビット貫入量が大きく, 掘削作業量 Q は大きくなっている. 亀裂の比較的少ない花崗斑岩Ⅱでは最小のビット径 $\phi = 17.5$ mmで掘削作業量 Q が最大となっている. 一方, 亀裂の余り存在しない花崗斑岩Ⅲでは, 岩石破碎に必要な大きな衝撃力を発揮する最大のビット径 $\phi = 25.0$ mmで掘削作業量 Q が最大となっている.

掘削深さ d , 掘削速度 V は共に, 亀裂の少ない花崗斑岩Ⅲにおいて最小値となり, 岩盤の亀裂の発達とともに増加する傾向にある.

Table 4 Excavation test results

Name of rock and rock mass Classification of rock mass		Rhyorite Tuff	Grano-Porphry		
			I	II	III
Excavation Volume Q (m^3/hr)	ϕ 17.5	238.8 \pm 90.8	239.3 \pm 83.1	101.4 \pm 45.8	43.1 \pm 15.9
	ϕ 19.5	212.6 \pm 97.1	229.4 \pm 57.3	62.6 \pm 27.6	36.2 \pm 6.2
	ϕ 25.0	205.3 \pm 70.5	217.6 \pm 55.6	97.9 \pm 23.1	49.3 \pm 8.5
Depth of Excavation d (cm)	ϕ 17.5	21.9 \pm 8.7	20.1 \pm 6.8	14.4 \pm 5.7	8.4 \pm 2.5
	ϕ 19.5	18.3 \pm 4.6	20.2 \pm 1.7	14.4 \pm 3.9	11.1 \pm 2.1
	ϕ 25.0	19.7 \pm 4.6	17.8 \pm 2.2	12.4 \pm 2.0	8.2 \pm 1.7
Excavation Speed V (m/min)	ϕ 17.5	5.53 \pm 2.11	5.88 \pm 1.82	3.32 \pm 0.67	2.47 \pm 0.53
	ϕ 19.5	5.34 \pm 1.36	5.36 \pm 1.07	2.11 \pm 0.74	1.61 \pm 0.42
	ϕ 25.0	4.86 \pm 0.79	5.76 \pm 0.97	3.73 \pm 0.48	2.94 \pm 0.59
Maximum Excavation torque T (kN·m)	ϕ 17.5	71 \pm 23	80 \pm 21	122 \pm 24	139 \pm 12
	ϕ 19.5	74 \pm 15	89 \pm 22	124 \pm 18	131 \pm 17
	ϕ 25.0	77 \pm 20	93 \pm 23	141 \pm 15	160 \pm 6

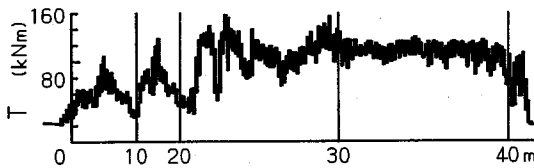


Fig.2 An example of torque variations applied on cutter drum during one lane excavation test

Fig.2は、切削ドラムに作用する掘削トルク T と掘削距離 X の関係を当該試験ヤード1レーンにわたって計測したものの一例である。掘削速度 V が変動するために掘削距離 X は等間隔ではないが、掘削トルクの変動をよく表している。各岩盤等級毎に最大掘削トルク T を読み取り、ビット径 $\phi=19.5$ mmのビット1本に作用する切削ドラムの回転方向の平均掘削力を算定すると、流紋岩質凝灰岩では $74 \text{ kNm}/0.852 \text{ m}/14 \text{ 本}=6.20 \text{ kN/本}$ となり、花崗斑岩Iでは $89 \text{ kNm}/0.852 \text{ m}/14 \text{ 本}=7.46 \text{ kN/本}$ 、花崗斑岩IIでは、 $124 \text{ kNm}/0.852 \text{ m}/12 \text{ 本}=12.12 \text{ kN/本}$ 、花崗斑岩IIIでは $131 \text{ kNm}/0.852 \text{ m}/10 \text{ 本}=15.38 \text{ kN/本}$ となることから推算される。各ビットは切削ドラムの周面に対して45度の方向に取り付けられているので、超硬ビットの中心軸に対して45度方向に上記平均掘削力以上の大きな衝撃力が作用していることが予測される。

つぎに、岩盤切削機の掘削能力は、ビット径 ϕ 、掘削トルク T のみならず岩盤の特性である見掛け岩盤強度 $\sigma_{c0}(1-C_r)$ 、地山弾性波伝播速度 V_2 または岩盤の亀裂係数 C_r に左右されると考えられる。ここでは、最も重要な単位時間当たりの掘削土量 Q を支配する要因分析を行うこととする。

各ビット径毎に、単位時間当たりの掘削土量 Q (m^3/hr) と見掛け岩盤強度 $\sigma_{c0}(1-C_r)$ (MPa) との関係を実回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\phi 17.5 \quad Q = -3.896 \sigma_{c0}(1-C_r) + 234.1 \quad (r = -0.411) \dots (3)$$

$$\phi 19.5 \quad Q = -3.887 \sigma_{c0}(1-C_r) + 213.4 \quad (r = -0.407) \dots (4)$$

$$\phi 25.0 \quad Q = -3.605 \sigma_{c0}(1-C_r) + 215.1 \quad (r = -0.459) \dots (5)$$

以上のように、相関係数 r はかなり低く、両者の間に直接的な相関性は存在しない。

また、各ビット径毎に、単位時間当たりの掘削土量 Q (m^3/hr) と地山弾性波速度 V_2 (m/s) との関係を実回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\phi 17.5 \quad Q = -0.204 V_2 + 499.3 \quad (r = -0.682) \dots (6)$$

$$\phi 19.5 \quad Q = -0.203 V_2 + 476.9 \quad (r = -0.364) \dots (7)$$

$$\phi 25.0 \quad Q = -0.179 V_2 + 442.9 \quad (r = -0.719) \dots (8)$$

この場合の相関係数 r はかなりばらついており、両者の間に直接的な相関性は存在しないと言える。

さらに、各ビット径毎に、単位時間当たりの掘削土量 Q (m^3/hr) と岩盤の亀裂係数 C_r との関係を実回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\phi 17.5 \quad Q = 2845 C_r - 2283 \quad (r = 0.978) \dots (9)$$

$$\phi 19.5 \quad Q = 2783 C_r - 2251 \quad (r = 0.950) \dots (10)$$

$$\phi 25.0 \quad Q = 2389 C_r - 1906 \quad (r = 0.992) \dots (11)$$

両者の相関係数 r はきわめて高く、 Q と C_r の間に強い相関関係があることが判明した。

以上の諸式は、切削回転ドラムに作用する最大掘削トルク T が岩盤の種類によって大差ないとして算定した近似式である。実際には、前表に見られるように、最大掘削トルク T は岩盤の種類によって変化する。従って、これより、さらにより正確に解析するために、単位時間当たりの掘削土量 Q を最大掘削トルク T で除した値について算定することとする。

各ビット径毎に、単位時間当たりの掘削土量 Q (m^3/hr) / 掘削トルク T (kN·m) と見掛け岩盤強度 σ_{c0} ·

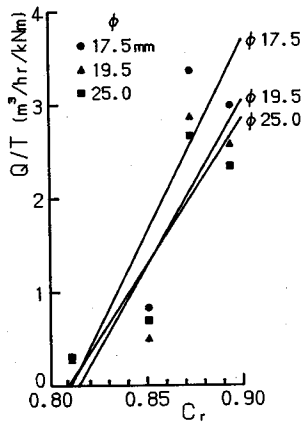


Fig.3 Relations between productivity per unit excavation torque Q/T and coefficient of crack of rock mass C_r

($1-C_r$)(MPa) との関係について単回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\phi 17.5 \quad Q/T = -0.0413 \sigma_{co}(1-C_r) + 2.71$$

$$(r = -0.283) \dots \dots \dots (12)$$

$$\phi 19.5 \quad Q/T = -0.0336 \sigma_{co}(1-C_r) + 2.24$$

$$(r = -0.259) \dots \dots \dots (13)$$

$$\phi 25.0 \quad Q/T = -0.0301 \sigma_{co}(1-C_r) + 2.11$$

$$(r = -0.269) \dots \dots \dots (14)$$

以上のように、相関係数 r は極めて低く、両者の相関性はほとんどないことが明らかである。

また、各ビット径毎に、単位時間当たりの掘削土量 Q (m^3/hr) / 掘削トルク T ($kN \cdot m$) と地山弾性波速度 V_2 (m/s) との関係について単回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\phi 17.5 \quad Q/T = -2.66 \times 10^{-3} V_2 + 6.34$$

$$(r = -0.575) \dots \dots \dots (15)$$

$$\phi 19.5 \quad Q/T = -2.26 \times 10^{-3} V_2 + 5.36$$

$$(r = -0.552) \dots \dots \dots (16)$$

$$\phi 25.0 \quad Q/T = -2.00 \times 10^{-3} V_2 + 4.86$$

$$(r = -0.563) \dots \dots \dots (17)$$

この場合の相関係数 r もかなり低く、両者の間に直接的な相関性は存在しないと言える。

さらに、各ビット径毎に、単位時間当たりの掘削土量 Q (m^3/hr) / 掘削トルク T ($kN \cdot m$) と岩盤の亀裂係数 C_r との関係について単回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$\phi 17.5 \quad Q/T = 41.1 C_r - 33.3$$

$$(r = 0.917) \dots \dots \dots (18)$$

$$\phi 19.5 \quad Q/T = 35.5 C_r - 28.9$$

$$(r = 0.893) \dots \dots \dots (19)$$

$$\phi 25.0 \quad Q/T = 31.4 C_r - 25.4$$

$$(r = 0.911) \dots \dots \dots (20)$$

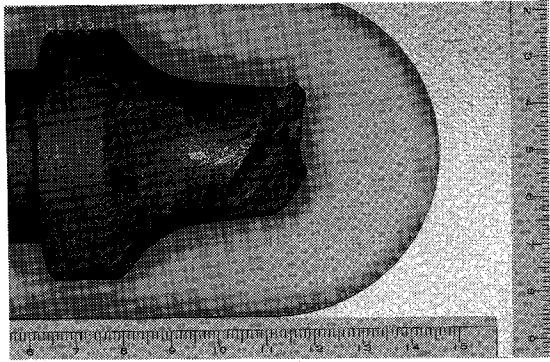


Photo.4 Worn cutter bit

両者の相関係数 r はかなり高く、 Q/T と C_r の間に強い相関関係があることが判明した。

Fig.3 は、3種類ビット径に対する単位時間、単位掘削トルク当たりの掘削土量 Q/T と岩盤の亀裂係数 C_r の関係を図示したものである。図より明らかに、亀裂係数 C_r が高く亀裂の多い岩盤では、コニカルビットのビット径が小さいほど亀裂への食い込みが容易となり岩盤の破碎能力が向上し掘削作業量 Q/T は増大している。一方、亀裂の少ない岩盤では、岩石自体を破碎する能力を必要とし、ビット径の大きなコニカルビットほど掘削作業量は増加すると予測される。

なお、この場合、切削ドラムの回転数 N は 48 r.p.m と一定であり、単位時間当たりの掘削仕事量は $2\pi NT \times 60 = 5760 \pi T$ ($kN \cdot m/hr$) となることを考慮すると、単位時間当たりの掘削仕事量に対する単位時間当たりの掘削土量 $Q/5760 \pi T$ (m^3/hr)/($kN \cdot m/hr$) と岩盤の亀裂係数 C_r の関係は各ビット径 ϕ に対して次式で表現することができる。

$$\phi 17.5 \quad Q/5760 \pi T = (2.27 C_r - 1.84) \times 10^{-3}$$

$$(r = 0.917) \dots \dots \dots (21)$$

$$\phi 19.5 \quad Q/5760 \pi T = (1.96 C_r - 1.60) \times 10^{-3}$$

$$(r = 0.893) \dots \dots \dots (22)$$

$$\phi 25.0 \quad Q/5760 \pi T = (1.74 C_r - 1.40) \times 10^{-3}$$

$$(r = 0.911) \dots \dots \dots (23)$$

上式のように、単位掘削仕事量当たりの掘削土量は岩盤の亀裂係数に比例して増大することが明らかとなった。

5. ビット摩耗試験

前節で述べた掘削土量の計測と同時に、切削ビットの摩耗試験を実施した。まず、切削用回転ドラムに新品の切削ビット 160 本を装着し、各試験レーンを平均 2~3 回掘削走行させ、掘削試験完了後すべての切削ビットを取り外し、洗浄後電子天秤で各ビットの重量を計測した。

Table 5 Amount of excavation and its distribution

No	Diameter of bit φ (mm)	Amount of Excavation (m ³)	Rhyorite Tuff				Grano-Porphry		
			(%)	I (%)	II (%)	III (%)			
1	17.5	37.52	7.8	35.0	20.4	36.9			
2	17.5	29.47	6.0	38.2	18.1	37.7			
3	17.5	34.51	17.2	23.9	47.2	11.8			
4	17.5	44.53	14.6	44.9	23.0	17.5			
5	17.5	70.32	32.5	30.9	16.1	20.5			
6	17.5	63.45	24.4	41.6	19.1	14.9			
7	17.5	49.92	25.6	46.6	15.5	12.3			
8	17.5	44.86	20.8	44.0	14.2	21.0			
9	17.5	38.70	17.9	55.2	8.6	18.3			
10	19.5	67.04	29.3	39.5	16.6	14.7			
11	25.0	54.28	33.7	40.1	13.6	12.5			
12	17.5	48.54	46.9	32.8	14.4	6.0			
13	17.5	112.23	53.0	29.5	10.8	6.8			
14	17.5	96.59	45.7	52.5	1.8	0.0			
15	17.5	10.10	16.3	0.0	45.8	37.9			
16	17.5	5.37	21.5	0.0	41.2	37.3			
17	17.5	33.48	100.0	0.0	0.0	0.0			

Table 6 Amount of wear and wear length of cutter bit

No	Number of cutter bit (pieces)	Total amount of wear (g)	Average amount of wear (g/piece)	Total wear length (mm)	Average wear length (mm/piece)
1	160	6369	39.81	1531	9.569
2	165	3893	23.59	1119	6.782
3	160	2241	14.01	763	4.769
4	160	3047	19.04	924	5.775
5	160	5799	36.24	1288	8.050
6	160	5452	34.08	1368	8.550
7	160	3327	20.79	1020	6.375
8	160	4277	26.73	881	5.506
9	177	3119	17.62	513	2.898
10	161	4467	27.75	819	5.087
11	160	2932	18.33	623	3.894
12	164	4414	26.91	1133	6.909
13	205	6979	34.04	1216	5.932
14	160	2821	17.63	318	1.988
15	160	2743	17.14	601	3.756
16	171	2356	13.78	415	2.427
17	160	3020	18.88	455	2.844

使用した切削ビット全部の摩耗量を集計し、総摩耗量を算定した。また、同時に、各超硬ビットの先端部分の摩耗によるビット軸方向の寸法変化を計測し、使用した切削ビット全部の摩耗長を総摩耗長として算定した。Photo.4 に示すように、掘削途中で折損したものも数パーセント発生したが、折損部分の摩耗量と摩耗長も同様に計測し、総摩耗量と総摩耗長に算入している。

当該供試岩盤に対して、ビット径φ17.5mmについては計15通り、ビット径φ19.5mmとφ25.0mmについては各1通りの掘削・摩耗試験を実施した。その試験結果は、各試験毎の掘削土量(m³)およびその掘削土量の各岩盤毎の内訳を百分率(%)としてTable 5に、ビットの総摩耗量(g)と総摩耗長(mm)、ビット本数、およびビット1本当たりの摩耗量(g/本)と摩耗長(mm/本)としてTable 6に示す。

さて、単位掘削土量当たりで算定したビット全体の摩耗量M(g/m³)と摩耗長L(mm/m³)を支配する岩盤特

性の要因分析を行うこととする。まず、リッパーチップの「摩耗に対する岩盤強度指数」σ_c(MPa)との相関性について解析する。当該試験レーンのσ_cの平均値は、各岩盤のσ_c値に対する岩盤の掘削土量の配分率を乗じた積和として算定した。Table 7に、単位掘削土量当たりの摩耗量Mと摩耗長L、および算定したリッパーチップの「摩耗に対する岩盤強度指数」σ_cを示した。両者の単回帰分析の結果は、次式に示す通りである。

$$M=17.17 \sigma_c \quad (r=0.755) \dots\dots\dots(24)$$

$$L=3.627 \sigma_c \quad (r=0.771) \dots\dots\dots(25)$$

両者の相関係数rはかなり低く、相当のばらつきが見られた。その原因としては、岩盤切削機の切削ビットによる掘削の機構がリッパーチップによる岩盤本体の掘削とはかなり異なることが考えられる。

つぎに、単位掘削土量当たりで算定したビット全体の摩耗量M(g/m³)、摩耗長L(mm/m³)と「岩盤の亀裂係数」C_rの相関性について解析する。同表に示す当該試

Table 7 Rock mass properties and amount of wear or wear length of cutter bit per one excavation volume

No	Index of rock mass strength for wear of ripper tip σ_c (MPa)	Coefficient of crack of rock mass C_r	Index of rock mass strength for wear of cutter bit σ_b	Amount of wear of bit per one excavation volume M (g/m^3)	Wear length of bit per one excavation volume L (mm/m^3)
1	5.183	0.8539	0.01708	169.8	40.8
2	4.969	0.8537	0.01697	132.1	38.0
3	5.093	0.8612	0.01631	64.9	22.1
4	4.570	0.8665	0.01556	68.4	20.7
5	6.726	0.8632	0.01609	82.5	18.3
6	5.423	0.8683	0.01544	85.9	21.6
7	5.269	0.8718	0.01505	66.6	20.4
8	5.333	0.8661	0.01566	95.3	19.6
9	4.633	0.8714	0.01503	80.6	13.3
10	5.919	0.8694	0.01547	66.6	12.2
11	6.188	0.8698	0.01523	54.0	11.5
12	7.271	0.8739	0.01511	90.9	23.3
13	7.956	0.8735	0.01521	62.2	10.8
14	6.331	0.8836	0.01385	29.2	3.3
15	6.945	0.8394	0.01870	271.5	59.5
16	7.389	0.8408	0.01859	439.2	77.4
17	12.690	0.8730	0.01556	90.2	13.6

験レーンの「岩盤の亀裂係数」 C_r の平均値は、同様に、各岩盤の C_r 値に対応する岩盤の掘削土量の配分率を乗じた積和として算定したものである。両者の単回帰分析の結果は、次式に示す通りである。

$$M = -7294 C_r + 6422 \quad (r = -0.855) \dots\dots(26)$$

$$L = -1509 C_r + 1330 \quad (r = -0.933) \dots\dots(27)$$

両者の相関係数 r はかなり高く、摩耗量 M と摩耗長 L は岩盤の亀裂係数 C_r の減少とともに直線的に低下することが明らかである。このことは、岩盤切削機による切削ビットの掘削機構が、リッパーチップの場合と異なり、岩盤の表面掘削に終始するために、岩盤の亀裂部分の破碎が主となり、岩盤を構成する岩石の破壊を要さないことによると解釈される。なお、この試験ヤードでは、石英類含有量が花崗斑岩と流紋質頁凝灰岩とではほぼ同じ値であるために、摩耗の主たる要因である石英含有量の影響は同程度であると考えられる。

さらに、より普遍的な切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b として次式を提案することとする。

$$\sigma_b = K_0^2(1 - C_r) \dots\dots(28)$$

K_0 : 石英類含有量

C_r : 岩盤の亀裂係数

ここで、石英類とは石英およびその硬さが石英以上の鉱物成分であり、金属材料の硬さを超過する鉱物を意味している。同表に示す当該試験レーンの切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b の平均値は、同様に、各岩盤の σ_b 値に対応する岩盤の掘削土量の配分率を乗じた積和として算定したものである。単位掘削土量当たりで算定したビット全体の摩耗量 $M(g/m^3)$ 、摩耗長 $L(mm/m^3)$ と切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b の単回帰分析の結果は、次式に示す通りである。

$$M = 3.081 \times 10^{15} \sigma_b^{7.519} \quad (r = 0.924) \dots\dots(29)$$

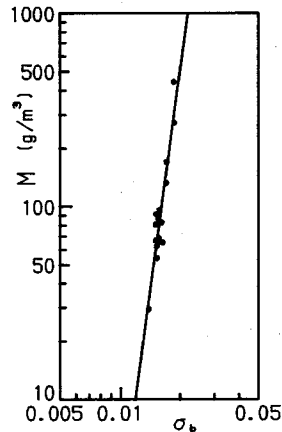


Fig.4 Relations between amount of wear per one excavation volume M and index of rock mass strength for wear of cutter bit σ_b

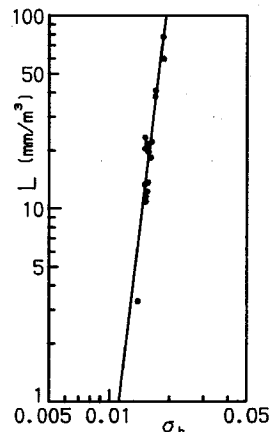


Fig.5 Relations between wear length per one excavation volume L and index of rock mass strength for wear of cutter bit σ_b

$$L = 4.543 \times 10^{16} \sigma_b^{8.539} \quad (r = 0.906) \dots\dots\dots (30)$$

両者の相関係数 r はかなり高く、Fig.4 と Fig.5 に示すように、 M 、 L と σ_b の間に強い相関関係があることが判明した。

以上の諸式は、当該岩盤切削機の切削回転ドラムに作用する掘削トルクがほぼ一定であるとし、岩盤の相違による最大掘削トルク T の変化を考慮せずに算定した近似式である。そのため、これより、さらに精度を向上させるとともに他の容量を有する岩盤切削機への汎用性を得る目的で、単位掘削土量当たりの摩耗量 M 、摩耗長 L を最大掘削トルク T で除した値について算定することとする。なお、各試験ヤードにおける最大掘削トルク T の平均値は、前述した通り、各岩盤での最大掘削トルク値 T に対応する岩盤の掘削土量の配分率を乗じた積和として算定した。

単位掘削土量当たりで算定したビット全体の摩耗量 M (g/m³)、摩耗長 L (mm/m³) を最大掘削トルク T (kN・m) で除した M/T 、 L/T と切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b の単回帰分析の結果は、次式に示す通りである。

$$M/T = 7.362 \times 10^{10} \sigma_b^{6.050} \quad (r = 0.858) \dots\dots\dots (31)$$

$$L/T = 1.179 \times 10^{12} \sigma_b^{7.085} \quad (r = 0.865) \dots\dots\dots (32)$$

両者の相関係数 r はかなり高く、 M/T 、 L/T と σ_b の間に比較的強い相関関係があることが判明した。

6. 摩耗寿命予測

種々の岩盤に対する岩盤切削機の切削ビットの摩耗寿命と限界掘削土量を予測することは、摩耗対策と機械のメンテナンスおよび部品交換計画を合理的に樹立する上で大変重要なことである。さて、切削ビット1本当たりの限界摩耗量を70g、その限界摩耗長を16mmとすると、切削回転ドラムに取り付けたビット160本全体の限界摩耗量は11,200g、限界摩耗長は2,560mmと算定される。

切削ビットが限界摩耗量に達するまでの時間を摩耗寿命 T_{MC} (hr) とし、掘削土量を限界掘削土量 Q_{MC} (m³) とすると、それぞれ前式(9)~(11)と(29)を用いて、次式のように算定することができる。

$$M = \frac{11200}{Q_{MC}} = 3.081 \times 10^{15} \sigma_b^{7.519}$$

$$Q_{MC} = 3.635 \times 10^{-12} \sigma_b^{-7.519} \dots\dots\dots (33)$$

$$T_{MC} = \frac{Q_{MC}}{Q}$$

$$= \frac{3.635 \times 10^{-12} \sigma_b^{-7.519}}{2845 C_r - 2283}$$

$$(\phi = 17.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (34)$$

$$= \frac{3.635 \times 10^{-12} \sigma_b^{-7.519}}{2783 C_r - 2251}$$

$$(\phi = 19.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (35)$$

$$= \frac{3.635 \times 10^{-12} \sigma_b^{-7.519}}{2389 C_r - 1906}$$

$$(\phi = 25.0 \text{ mm}) \dots\dots\dots (36)$$

つぎに、切削ビットが限界摩耗長に達するまでの時間を摩耗寿命 T_{LC} (hr) とし、掘削土量を限界掘削土量 Q_{LC} (m³) とすると、それぞれ前式(9)~(11)と(30)を用いて、次式のように算定することができる。

$$L = \frac{2560}{Q_{LC}} = 4.543 \times 10^{16} \sigma_b^{8.539}$$

$$Q_{LC} = 5.635 \times 10^{-14} \sigma_b^{-8.539} \dots\dots\dots (37)$$

$$T_{LC} = \frac{Q_{LC}}{Q}$$

$$= \frac{5.635 \times 10^{-14} \sigma_b^{-8.539}}{2845 C_r - 2283}$$

$$(\phi = 17.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (38)$$

$$= \frac{5.635 \times 10^{-14} \sigma_b^{-8.539}}{2783 C_r - 2251}$$

$$(\phi = 19.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (39)$$

$$= \frac{5.635 \times 10^{-14} \sigma_b^{-8.539}}{2389 C_r - 1906}$$

$$(\phi = 25.0 \text{ mm}) \dots\dots\dots (40)$$

以上の諸式は、種々の岩盤に対して当該岩盤切削機がほぼ一定の最大掘削トルクで作業すると仮定した式より誘導されたものであり、当該岩盤切削機のみに適応できる近似式である。さらに、岩盤切削機の最大掘削トルクが岩盤の種類によって変化することを考慮し、他の岩盤切削機への汎用性を得るために、単位掘削土量当たりの摩耗量 M 、摩耗長 L を最大掘削トルク T で除した値について算定することとする。

切削ビットが限界摩耗量に達するまでの時間を摩耗寿命 T_{MC}' (hr) とし、掘削土量を限界掘削土量 Q_{MC}' (m³) とすると、それぞれ前式(18)~(20)と(31)を用いて、次式のように算定することができる。

$$\frac{M}{T} = \frac{11200}{Q_{MC}' T} = 7.362 \times 10^{10} \sigma_b^{6.050}$$

$$Q_{MC}' = \frac{1.521 \times 10^{-7}}{\sigma_b^{6.050} T} \dots\dots\dots (41)$$

$$T_{MC}' = \frac{Q_{MC}'}{Q}$$

$$= \frac{1.521 \times 10^{-7}}{(41.1 C_r - 33.3) \sigma_b^{6.050} T^2}$$

$$(\phi = 17.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (42)$$

$$= \frac{1.521 \times 10^{-7}}{(35.5 C_r - 28.9) \sigma_b^{6.050} T^2}$$

$$(\phi = 19.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (43)$$

$$= \frac{1.521 \times 10^{-7}}{(31.4 C_r - 25.4) \sigma_b^{6.050} T^2} \quad (\phi = 25.0 \text{ mm}) \dots\dots\dots (44)$$

つぎに、切削ビットが限界摩耗長に達するまでの時間を摩耗寿命 T_{LC}' (hr) とし、掘削土量を限界掘削土量 Q_{LC}' (m³) とすると、それぞれ前式 (18)~(20) と (32) を用いて、次式のように算定することができる。

$$\frac{L}{T} = \frac{2560}{Q_{LC}' T} = 1.179 \times 10^{12} \sigma_b^{7.085}$$

$$Q_{LC}' = \frac{2.17 \times 10^{-9}}{\sigma_b^{7.085} T} \dots\dots\dots (45)$$

$$T_{LC}' = \frac{Q_{LC}'}{Q}$$

$$= \frac{2.17 \times 10^{-9}}{(41.1 C_r - 33.3) \sigma_b^{7.085} T^2} \quad (\phi = 17.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (46)$$

$$= \frac{2.17 \times 10^{-9}}{(35.5 C_r - 28.9) \sigma_b^{7.085} T^2} \quad (\phi = 19.5 \text{ mm}) \dots\dots\dots (47)$$

$$= \frac{2.17 \times 10^{-9}}{(31.4 C_r - 25.4) \sigma_b^{7.085} T^2} \quad (\phi = 25.0 \text{ mm}) \dots\dots\dots (48)$$

以上、切削ビットが完磨するまでの限界掘削土量 Q_{MC}' や Q_{LC}' は、切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b と岩盤切削機の作業時における最大掘削トルク T 、または単位時間当たりの掘削仕事量によって算定することができる。また、切削ビットの摩耗寿命 T_{MC}' や T_{LC}' は、切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_b 、岩盤の亀裂係数 C_r と岩盤切削機の作業時における最大掘削トルク T 、または単位時間当たりの掘削仕事量によって算定することができる。

従って、切削ビットの摩耗寿命を向上させるためには、超硬合金ビットおよびそのホールグーの金属材料を耐アブレーション、耐衝撃性の高い金属とすること、および最大掘削トルク T が過剰に作用して切削ビットの折損や重摩耗を引き起こさないようにすることが肝要である。なお、この最大掘削トルク T が一定値以上に作用しないように、負荷に応じて岩盤切削機の切り込み深さや掘進速度をファジー制御⁹⁾することが必要である。さらに、回転ドラムの左右両端部で切削ビットの摩耗速度が大きいため、端部でのビット配列についても今後検討を要する問題である。

7. 結 論

岩盤切削機の掘削能力と切削ビットの摩耗寿命を予測するために、花崗斑岩と流紋岩質凝灰岩で構成される岩盤において現地掘削・摩耗試験を実施した。得られた新しい知見を要約すると、以下の通りである。

(1) 当該岩盤切削機の単位時間当たりの掘削土量を支配する岩盤特性の主たる要因は、岩盤の亀裂係数であり、ついで地山弾性波速度、見掛け岩盤強度の順である。

(2) 単位時間当たりの掘削仕事量に対する単位時間当たりの掘削土量は、岩盤の亀裂係数に比例して増大することが判明し、両者の関係は式 (21)~(23) で与えられる。

(3) 単位掘削土量当たりの切削ビットの摩耗量および摩耗長に最も重要な影響を与える岩盤特性は、切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」であり、ついで岩盤の亀裂係数、リッパーチップの「摩耗に対する岩盤強度指数」の順である。これは、岩盤本体の掘削とは異なり、岩盤表面での切削機構が主流となり、岩盤の亀裂の発生状況と石英類含有量が重要な因子となるためである。

(4) 岩盤切削機の作業時に発生する最大掘削トルクに対する単位掘削土量当たりの切削ビットの摩耗量と摩耗長は、切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」の指数関数となり、両者の関係は式 (31)、(32) で与えられる。

(5) 切削ビットが完磨するまでの限界掘削土量は、式 (41)、(45) に示すように、切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」と岩盤切削機の作業時に作用する最大掘削トルク、または単位時間当たりの掘削仕事量が増加するとともに減少する。

(6) 切削ビットの摩耗寿命予測式は、式 (42)~(44) または式 (46)~(48) によって与えられ、単位時間当たりの掘削土量、切削ビットの「摩耗に対する岩盤強度指数」および岩盤切削機の作業時に作用する最大掘削トルクが増大するほど短命になる。摩耗寿命を向上させるためには、特に最大掘削トルクを小さくすることが肝要であり、掘削トルクが異常に増加することを防止するために、ファジー制御を用いた掘削深さと掘進速度の自動制御システムを導入する必要がある。

最後に、データの収集と整理に御尽力いただいた奥村組土木興業(株)吉原則秋氏を始め、御協力頂いた関係各位に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Hata, S., Muro, T. and Kaneko, Y. : Estimation of life of rippertip due to wear, Proc. of JSCE, No. 268, pp. 119~127, Dec., 1977.
- 2) 室達朗・深川良一：岩盤掘削刃の摩耗とハードフェーシング対策, 土木学会論文集, 第 364 号/Ⅲ-4, pp. 87~95, 1985 年 12 月.
- 3) Jacobson, S. and Hogmark, S. : Tribological testing of traditional road-grading steels leading to the evolution of new road preparation concepts, Wear, Vol. 130, pp. 151~

- 165, 1989.
- 4) 田中治雄著：土木技術者のための地質学入門，山海堂，pp. 28～36，1964年。
- 5) 山口梅太郎・西松裕一著：岩石力学入門，東京大学出版会，pp. 149～169，1969年。
- 6) 土質工学会編：岩の工学的性質と設計・施工への応用，pp. 361～378，1977年。
- 7) Muro, T. : Correlations between several properties of rock specimen, Memoirs of the Faculty of Engineering, Fukui University, Vol.24, No.1, pp.1～18, 1976.
- 8) Fukagawa, R. and Muro T. : Model tests on fuzzy control of bulldozer blade, Proc. of the 3rd Asian-Pacific Conf. of ISTVS, Changchun, Jilin, China, pp.427～431, Aug., 1992.

(1993. 9. 22 受付)

ESTIMATION OF THE PRODUCTIVITY OF A ROCK MASS EXCAVATOR AND THE WEAR LIFE OF CUTTER BITS

Tatsuro MURO, Yoshikatsu TAKEGAKI, Kenichi MARUYAMA and Hideki FUJIMOTO

This paper aims to estimate both the amount of excavation of a newly developed rock mass surface excavator and the wear life of cutter bits. Several excavation and wear tests of the cutter bits have been executed in-situ on the surface rock mass of grano-porphry and rhyorite tuff. As a result, it is clarified that the amount of rock mass excavation per hour depends on the coefficient of crack of rock mass and the wear life of cutter bits depends mainly on the index of rock mass strength for wear of cutter bit and the maximum excavation torque of the rotary cutter drum. To elongate the wear life of cutter bits, some fuzzy control system of the depth or the speed of excavation should be introduced to prevent the occurrence of an excessive excavation torque.