

(83) 岩石の円周軌道切削における切削抵抗

室蘭工業大学研究生 ○ 荻 放鳴
室蘭工業大学工学部 佐藤 一彦
室蘭工業大学大学院 浅井 秀明

Tool force imposed on a TBM disc cutter in circular rock cutting

GONG Fangming, Muroran Institute of Technology
Kazuhiko SATO, Muroran Institute of Technology
Hideaki ASAI, Muroran Institute of Technology

Abstract

This paper describes a laboratory experiment of circular rock cutting using a TBM disc cutter. The experimental program resulted in establishing semi-empirical formulae that enable us to predict tool force exerted on a TBM disc cutter for a given condition. The formulae suggest that tool force should depend on stiffness of rock as well as its strength properties such as fracture toughness and uniaxial compressive strength. The present study also shows that there is the optimal ratio of tool space to disc penetration at which the specific energy for excavation with disc cutters might be minimum. Regression analyses indicate that the optimal ratio of tool space to penetration should be affected by the strength properties, and that the minimum specific energy correlate with the uniaxial compressive strength.

1. はじめに

ディスクカッタはTBMをはじめとする掘削機械の切削工具として広く用いられており、それに関する基礎研究も数多くなされている¹⁻⁴⁾。しかし、これらの研究のほとんどは直線軌道切削実験によるものであり、その結果がTBMなどの円周軌道切削にそのまま適用できるかどうかは実証されていない。また、直線軌道切削実験の結果そのものについても、意見の相違のある部分や未解決の問題が残されている。

そこで本研究では、円周軌道切削実験を行なえるディスクカッタ性能実験装置を設計・試作し、代表的な硬岩、中硬岩、軟岩について切削実験を行ない、その結果の一部についてはすでに発表した⁵⁾。本文では新たに追加した切削実験の結果も含め、切削条件と切削抵抗の関係ならびに最適な切削条件について考察した。

2. 実験方法

実験に使用した岩種は花崗岩4種、安山岩1種、熔結凝灰岩2種の計7種である。それらの物理的・機械的性質を表1に示す。岩石ブロックは一辺が420mmの立方体を標準とした。岩石ブロックの表面はダイヤモンドカッタで切断しただけで、研磨は施されていない。

計測項目は、ディスクカッタにかかる切削抵抗の直交3成分、推力 F_T 、回転力 F_R およびこれらに直交する横方向力 F_L 、ディスク圧入量 P 、テーブルの回転変位 θ である。実験における制御変数は、切削軌道

間隔Sおよび載荷圧力 P_T である。実験方法はすでに発表しているので割愛する。

3. 実験結果

3.1 切削条件と切削抵抗の関係

切削条件と切削抵抗の関係を実験的に定めるにあたっては、切削抵抗の3成分、 F_T 、 F_R 、 F_L および圧入量 P は、各切削軌道ごとの根2乗平均値で代表させた。こうして得られた切削抵抗と切削条件の関係の一例を図1に示す。図1は P と F_T 、 F_R 、 F_L の関係について整理し、 S をパラメータにとってある。この実験結果は、 F_T 、 F_R 、 F_L のいずれもが P と S のべき乗に比例することを示唆している。そこで切削条件と切削抵抗の3成分の間には次の関係式が成り立つものと仮定した。

$$F = k P^a S^b \quad ; k, a, b \text{ は定数} \quad (1)$$

7岩種の実験データに(1)式を適用し、指数 a 、 b を求めた結果を表2に示す。表2の r は重相関係数である。表2の結果より、 F_T 、 F_R においては、 a 、 b とも岩種によらずほぼ同一の値が得られていることがわかる。7岩種の指数 a 、 b の平均値は、 F_T の場合は、 $a=0.57 \pm 0.07$ 、 $b=0.49 \pm 0.14$ となり、 F_R の場合は $a=1.12 \pm 0.10$ 、 $b=0.45 \pm 0.17$ であった。また、 F_L の場合は、 $a=1.44 \pm 0.88$ となり、 S には独立である。

切削抵抗予測式に関してRoxborough & Phillipsは岩石力学にもとづく解析と直線軌道切削実験から F_T に関しては $a=1.5$ 、 $b=0$ 、 F_R に関しては、 F_R/F_T が $(P/D)^{0.5}$ に比例、そして F_L に関しては $a=1.5$ 、 $b=0$ であると提案している¹⁾。ただし D はディスクの直径である。またこれとは別に、Sanioは破壊力学にもとづく解析と直線軌道切削実験から、 F_T に関しては $a=b=0.5$ となり、 F_R に関しては F_R と F_T の比 F_R/F_T

表1. 岩石の物理的・機械的性質

岩 種	産 地	単軸圧縮 強度 (MPa)	円盤圧裂 強度 (MPa)	破壊靱性 (MN/m ^{3/2})	Young率 (GPa)
居昌花崗岩	韓国居昌	190.2	11.5	1.37	23.6
福建花崗岩	中国福建	164.2	17.2	1.08	55.1
元山花崗岩A	北朝鮮元山	180.0	19.1	1.51	49.1
元山花崗岩B	北朝鮮元山	209.4	26.6	1.15	46.9
札幌安山岩	北海道札幌	139.0	26.5	1.81	14.9
熔結凝灰岩A	北海道登別	18.0	1.5	0.27	1.37
熔結凝灰岩B	北海道登別	35.1	3.4	0.36	8.39

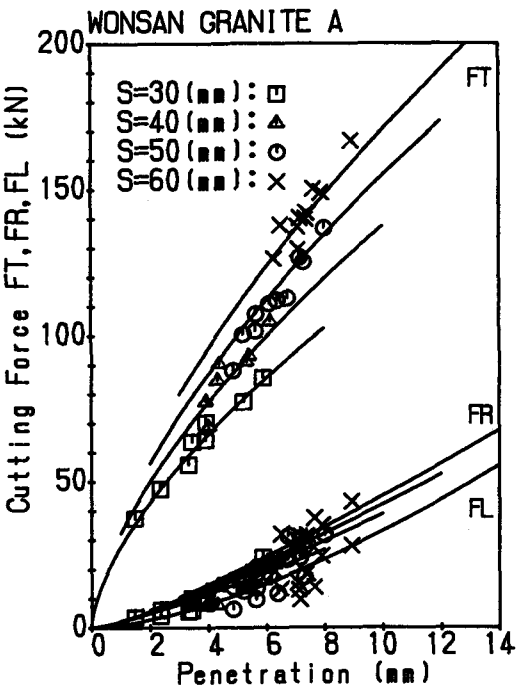


図1. 切削抵抗と圧入量の関係

が $(P/D)^{0.5}$ に比例すると提案している²⁾。

ここで本実験の結果と比較してみると Sanio の予測式と本実験式における F_T 、 F_R の指数の値はともに近い値となっていることがわかる。それゆえ、Sanio の提案した切削抵抗予測式は直線軌道切削のみならず回転軌道切削にも成立するものと思われる。また、 F_L に関しては、指数 a の値は少々ばらつくものの、Roxborough & Phillips の値にほぼ近い値となっている。そこで Roxborough & Phillips の予測式が回転軌道切削にも成立するものと考えられる。よって、(1) 式で表わした切削抵抗実験式は、以下の (2)、(3)、(4) 式で表わすことができるものとする。

$$F_T = K_T D^{0.5} P^{0.5} S^{0.5} \quad (2)$$

$$F_R = K_R P S^{0.5} \quad (3)$$

$$F_L = K_L P^{1.5} \quad (4)$$

ここで K_T 、 K_R 、 K_L は切削定数で単位は $kN/mm^{3/2}$ である。本研究の実験結果に (2) ~ (4) 式を適用して決定した切削定数を前出の表 2 の右端欄に示す。

表 2. 切削抵抗実験式

岩 種	切削抵抗成分	$F = k P^a S^b$			切削定数 K
		a	b	r	
居昌花崗岩	F_T	0.59	0.41	0.977	0.480
	F_R	1.02	0.47	0.988	0.497
	F_L	1.05	-	0.879	1.288
福建花崗岩	F_T	0.55	0.63	0.985	0.539
	F_R	1.13	0.62	0.984	0.531
	F_L	1.48	-	0.864	1.007
元山花崗岩 A	F_T	0.63	0.53	0.990	0.527
	F_R	1.21	0.37	0.975	0.539
	F_L	1.55	-	0.864	1.066
元山花崗岩 B	F_T	0.50	0.50	0.971	0.561
	F_R	1.20	0.39	0.992	0.577
	F_L	2.28	-	0.915	1.131
札幌安山岩	F_T	0.53	0.42	0.971	0.412
	F_R	1.04	0.36	0.974	0.389
	F_L	0.78	-	0.870	1.528
熔結凝灰岩 A	F_T	0.64	0.47	0.877	0.101
	F_R	1.13	0.42	0.931	0.085
	F_L	1.72	-	0.912	0.323
熔結凝灰岩 B	F_T	0.55	0.47	0.924	0.247
	F_R	1.12	0.50	0.892	0.214
	F_L	1.23	-	0.867	0.804

3.2 切削定数と岩石物性値の関連性

切削抵抗予測式における切削定数と岩石物性値との関係を調べるために回帰分析を行なった。その結果、切削定数と破壊靱性との間に次の回帰式が得られた。

$$K_T = 0.13 E^{0.36} K_{CB}^{0.23}, \quad r = 0.974 \quad (5)$$

$$K_R = 0.11 E^{0.40} K_{CB}^{0.28}, \quad r = 0.966 \quad (6)$$

$$K_L = 0.60 K_{CB} + 0.37, \quad r = 0.907 \quad (7)$$

ここで r はそれぞれの回帰式の重相関係数である。また、式中の Young 率、破壊靱性はそれぞれ表 1 に示されている単位、値を使用している。これによると、推力、回転力は岩石の破壊靱性のみならず、岩石の Young 率、すなわち剛性とも関連しているようである。また横方向力に関しては (7) 式から明らかなように岩石の破壊靱性のみに関連している。なお切削定数と単軸圧縮強度との関連を調べると以下のような回帰式が得られた。

$$K_T = 0.045 E^{0.27} C_o^{0.28}, \quad r = 0.986 \quad (8)$$

$$K_R = 0.029 E^{0.27} C_o^{0.37}, \quad r = 0.991 \quad (9)$$

式中の Young率、単軸圧縮強度の単位と値は表1のそれらを使用している。ただし、 K_L に関しては単軸圧縮強度との有意な相関は認められなかった。

以上のように K_T 、 K_R については (5)、(6) 式のように岩石の破壊靱性、もしくは (8)、(9) 式のように単軸圧縮強度のいずれかと関連するほか、岩石の剛性も関与することが明らかになった。一方 K_L に関しては (7) 式のように破壊靱性のみに関連する。しかし切削定数の理論的解明は今後の課題である。

3.3 切削条件と比エネルギーおよび岩石物性値との関連性

単位体積の切屑を生成するのにディスクカッタが岩石にたいしてなした仕事を比エネルギー E_s と定義し、 E_s と切削条件の関係について整理した。切削条件は切削軌道間隔 S とディスクの圧入量 P の比 S/P で表わした。図2は E_s と S/P の関係の一例を示したものである。図より、 E_s は S/P に関して下に凸という傾向が読み取れる。この E_s が最小となる S/P を最適比 $(S/P)_{op}$ と表わす。この $(S/P)_{op}$ は7岩種において5~11の範囲にある。これは直線切削実験で指摘されている結果とも一致する^{1, 3, 4)}。

そこで次に $(S/P)_{op}$ と岩石物性値の関連性を調べてみた。その結果、以下の回帰式が得られた。

$$(S/P)_{op} = 152 K_{CB}^{0.54} C_o^{-0.64}, \quad r = 0.951 \quad (10)$$

ただし r は重相関係数である。また、破壊靱性、単軸圧縮強度は表1のそれらを使用している。

さらに $(S/P)_{op}$ の時点における比エネルギー E_s の値、 $(E_s)_{min}$ と岩石物性値との関連についても調べてみた。その結果、次式の直線関係が得られた。

$$(E_s)_{min} = 0.38 C_o + 4.25, \quad r = 0.966 \quad (11)$$

ただし r は相関係数を表わしている。

Snowdon et al の直線軌道切削実験結果^{3, 4)} についても $(E_s)_{min}$ と C_o との間には次の直線関係が認められる。

$$(E_s)_{min} = 0.19 C_o - 1.34, \quad r = 0.931 \quad (12)$$

本研究で使用した7岩種、およびSnowdon et al が使用した5岩種における実験結果を (11)、(12) 式の回帰直線とともに図3に示す。(11)、(12) 式の係数が異なる原因は、実験に使用したディスクカッタの形状の違いによるものと思われる。ちなみにディスク直径と刃角は、本実験では150mm、90度であるのに対して、Snowdon et al の研究では200mm、80°である。これらの差異の解明についてはさらにディスク直

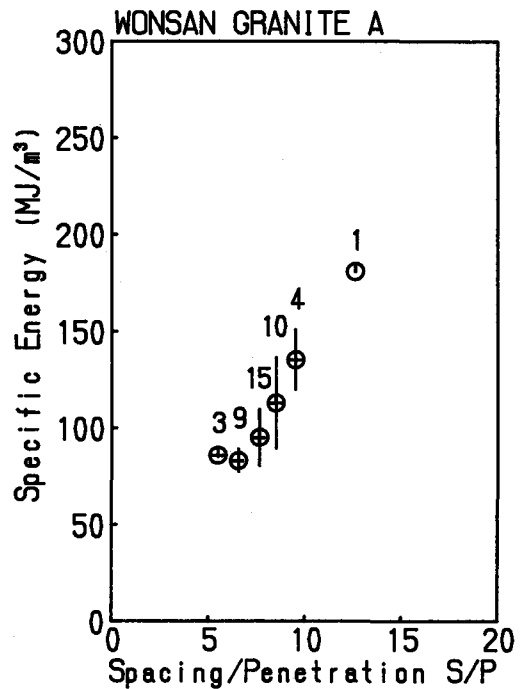


図2. 比エネルギー E_s と S/P の関係

径と刃角を変数にした実験が必要である。

4. むすび

以上本文では切削抵抗予測式、および切削定数、比エネルギーと岩石物性値に関する円周軌道切削実験の結果について述べた。得られた結果をまとめると以下のようである。

(1) ディスクカッタにかかる切削抵抗3成分、推力、回転力、横方向力と切削条件の関係は(2)～(4)の半実験式で表わすことができる。したがって、ディスク

カッタの切削抵抗と切削条件の関係は軌道が直線の場合でも円周の場合でも同型の予測式で表わされる。

(2) 切削定数と岩石物性値の間には、(5)～(9)の回帰式が見出され、したがって切削定数は岩石の破壊靱性もしくは単軸圧縮強度のみならず岩石の剛性とも関係する。

(3) おおのこの岩石において、比エネルギーを最小にする最適な軌道間隔と圧入量の比、 $(S/P)_{op}$ が存在する。また、 $(S/P)_{op}$ と岩石物性値の関係は(10)の実験式で表わすことができる。比エネルギーの最小値、 $(E_s)_{min}$ は(11)、(12)の実験式のように岩石の単軸圧縮強度と直線関係にある。またその係数にはディスクの幾何学的形状が関連することが予測される。

これらの実験結果はTBM用ディスクカッタの選定ならびにTBMカッタヘッド上のディスク配列に有用と考えられる。なお本研究では、TBMのゲージカッタのようにディスク円盤面が岩石面に斜交する場合の切削抵抗についても実験を計画している。

参考文献

- 1) Roxborough, F.F. and Phillips, H.R.: Rock excavation by disc cutter. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 12, pp. 361-366, (1975).
- 2) Sanio, H.P.: Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. *ibid.*, 22, pp. 153-161, (1985).
- 3) Snowdon, R.A., Ryley, M.D. and Temporal, J.: A study of disc cutting in selected British rock. *ibid.*, 19, pp. 107-121, (1982).
- 4) Snowdon, R.A., Ryley, M.D., Temporal, J. and Crabb, G.I.: The effect of hydraulic stiffness on tunnel boring machine performance. *ibid.*, 20, pp. 203-214, (1983).
- 5) K. Sato, Gong, F. and K. Itakura: Prediction of disc cutter performance using circular rock cutting rig. Proceedings of International Symposium on Mine Mechanization and Automation, vol. 1, 31-40, Colorado School of Mines (Golden), (1991).

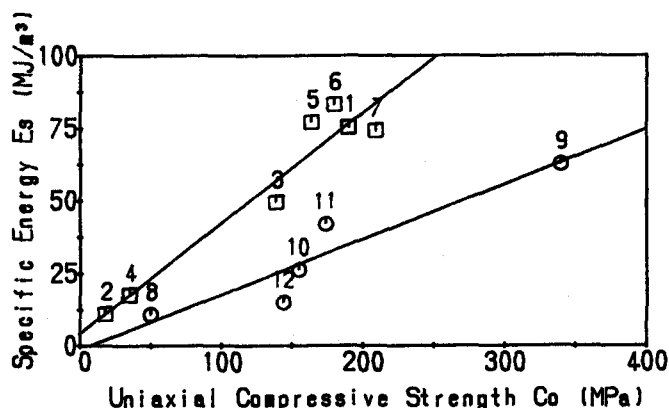


図3. $(E_s)_{min}$ と単軸圧縮強度の関係