

(22) ディスクカッタによる岩石の環状切削に関する基礎実験

焦作鉱業学院
室蘭工業大学工学部 ○ 佐藤 一彦
室蘭工業大学大学院 見内 伸彰

A study of disc cutting for developing a new ring cutter

GONG Fang Ming, Jia Zuo Institute of Mining Technology
Kazuhiko SATO and Nobuaki MIUCHI, Muroran Institute of Technology

Abstract

To establish the design criteria for ring cutters a laboratory experiment on disc cutting has been performed using a newly developed rock cutting rig. The testing rig facilitates rotary cutting of rock at various radii of cutting track and spacing in between of two adjacent tracks. Two kinds of hard rocks, a granite and an andesite, have been selected for the present work. The main results obtained from the experiment are as follows.

- (1) Thrust F_T which needs to crack through a spacing S between adjacent cutting tracks correlates with penetration P and spacing S , resulting in a power law of $F_T = k_T P^a S^b$, where k_T is a constant. The sum of powers a and b is determined to be 1.03 ± 0.08 in the selected rocks.
- (2) When the ratio of spacing and penetration, S/P is in the range from 6 to 9, specific energy E_s that needs to cut off a unit volume of rock fragment becomes minimum. E_s at the optimal cutting condition is 65 MJ/m^3 for the granite and 50 MJ/m^3 for the andesite, respectively.
- (3) The lateral component of tool force F_L is independent of radius of cutting track, but is controlled by the cutting groove being adjacent current track. Since lateral force F_L is comparable with rolling force F_R , the bearing assemblies housed in a disc cutter is subjected to not only the radial force by F_R and F_T , but also to the thrust force by F_L .

1. はじめに

口径 500~1500mm のボーリングを環状切削方式で行うためにリングカッタが開発され、炭鉱の通気孔等の掘削で有効性が実証されている¹⁾。このカッタは外周に自転式のドラッグビットを植込んだ構造となっており、夾炭層岩石には十分なビット寿命を発揮することができる。しかし、火成岩や変成岩の中の超硬岩ではビットの摩耗が激しいため、ドラッグビットの代わりにカッタヘッド外周にディスクカッタを配置する新しいリングカッタの開発が試みられている。本研究はディスクカッタを用いたリングカッタの設計を合理的に行うために、ディスクカッタによる円周軌道切削における切削条件と切削抵抗の関係を明らかにし、岩種に応じた最適な切削条件を見出すことを目的に行なわれた。本文では最初に実験装置と実験方法について述べ、ついで2岩種の実験結果を示し、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することにする。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

試作した実験装置は推力が200kN、回転力が50kNの載荷能力を有し、切削速度は最大95mm/sまで変化できる。推力には内径 140mm、ストローク 100mmの油圧シリンダを並列に2本用い、また回転力には内径 100mm

ストローク1000mmの油圧シリンダを1本充てている。図1に示すように、ディスクカッタはクロスヘッドに固定し、岩石ブロックは直線移動と回転が可能なテーブル上に固定される。テーブルは2段になっており、下段のテーブルは3本の直線レールに沿って移動できる。上段のテーブルは下段のテーブルに対して相対的に1/4周回転することができる。直線切削の場合は、上段テーブルを下段テーブルに対してロックしてテーブルを直線レールに沿って送る。また回転切削の場合には、下段テーブルをレールに対してロックして上段テーブルを回転させる。回転切削での切削軌道半径は100～400mmの範囲で変化できる。本研究では回転切削による実験のみを行った。実験に用いたディスクカッタはセキサク製のシールド用ローラビット SM-RB-150×50×1型で、直径150mm、刃角90°のディスク1個が回転軸両端で支持されるサドル型である。刃先は平坦となっており平坦部の幅は2.0mmである。

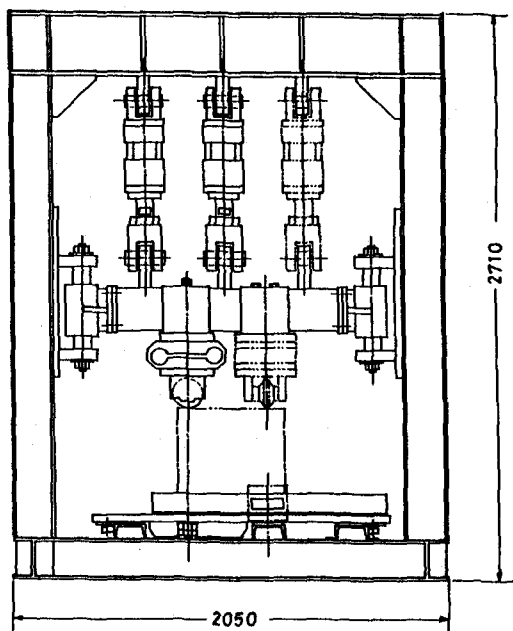


図1. 岩石切削実験装置

切削時にディスクカッタに加わる切削抵抗を測定するために、推力 F_T 、回転力 F_R 、これらに直交する横方向力（以下単に横方向力という） F_L を分離検出できる双八角環動力計を試作し、ディスクカッタとクロスヘッドの間に装着した。動力計は F_T 、 F_R 、 F_L についてそれぞれ200kN、100kN、100kNまで直線的に応答し、相互干渉も約1%程度にとどまり、しかもこれらの干渉は補正計算により排除することができる。ディスクカッタの圧入量 P の測定には共和電業DT-20D型ダイヤルゲージを用いた。さらに切削開始点から終了点までのテーブルの回転変位 θ は、回転力用油圧シリンダのピストンストローク d から算出した。ピストンストロークの検出には共和電業DTP-2MDS型変位計を用いた。切削実験時にはこれらの項目のほかに、推力および回転力油圧シリンダの作動圧力 P_T 、 P_R も検出した。これらのトランスデューサからの出力をストレインメータで増幅後、データレコーダで記録した。

2.2 実験方法

実験に用いた岩種は花崗岩、安山岩各1種である。それらの機械的・物理的性質を表2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、研磨はされていない。

表1. 供試岩石の性質

岩 種	産地	見掛 比重	単軸圧縮 強度 (MPa)	円盤圧裂 強度 (MPa)	弾性波 速度 (m/s)
花崗岩	韓国居昌	2.78	232	11.5	4780
安山岩	札幌川沿	2.58	139	26.5	3990

実験での制御変数は、軌道間隔 S および推力 F_T である。最初の実験シリーズでは軌道間隔 S を一定に保ち、隣接軌道間の溝底が完全に連結するまで推力 F_T を段階的に上昇させ切削条件と切削抵抗の関係を調べた。 S は30、40、50、60mmとした。次の実験シリーズでは S を一定に保ち、また最初の実験シリーズの結果にもとづいて F_T も S に見合った最適値に選定したうえで、軌道半径 R を最小半径から S づつ順次増加さ

せ、次いで逆に最大半径からSつつ減少させ、切削順序とF_Lの関係について調べた。この実験シリーズではSは30、40、50mmとした。これら2つの実験シリーズでは、いずれも比エネルギーを求めるために切屑を回収し、秤量するとともに、大きな切屑については代表寸法を測定した。

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成分および圧入深さは、各切削軌道ごとに根2乗平均値をとり、F_T、F_R、F_LおよびPのデータを代表させた。こうして得られた切削条件と切削抵抗の関係を図2に示す。図2ではPとF_T、F_R、F_Lの関係について整理し、軌道間隔Sはパラメータにとってある。この実験結果は切削抵抗の成分がいずれもPのべき乗に比例することを示唆している。さらに隣接溝底間が連結するときの切削力は軌道間隔Sのべき乗に比例すると予測されるので、切削条件S、Pと切削抵抗の成分F_T、F_R、F_Lの間にはいずれもつぎの関係式が成立することが期待できる。

$F = k P^a S^b$; k, a, b = 定数 (1)

2岩種の実験データに(1)式を適用し、指数a, bおよび係数kを求めた結果を表2に示す。表2には回帰式(1)の重相関係数もあわせて示してある。表2より、F_T、F_R、F_Lの指数a, bの和は2岩種についてほぼ同一の値をとり、推力については1.03±0.08、回転力については1.47±0.08、横方向力については1.10±0.10である。Sanio はディスクカッタを用いた切削実験と破壊力学にもとづく考察から、F_Rに関する(1)式の指数

表2 切削抵抗実験式

岩 種	切削抵抗成分	F = k P ^a S ^b			
		a	b	k	r
花崗岩	F _T	0.648	0.304	9.244	0.8498
	F _R	0.813	0.586	0.520	0.9692
	F _L	1.355	-0.355	6.815	0.7507
安山岩	F _T	0.118	0.994	1.505	0.9454
	F _R	0.794	1.419	0.003	0.8888
	F _L	0.289	0.916	0.336	0.7653

F (kN) , P (mm) , S (mm)

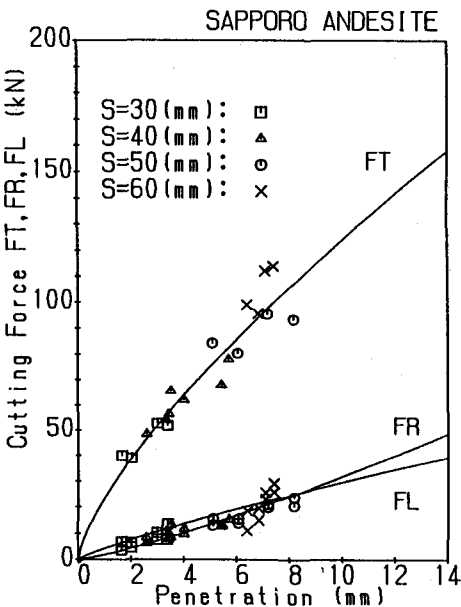
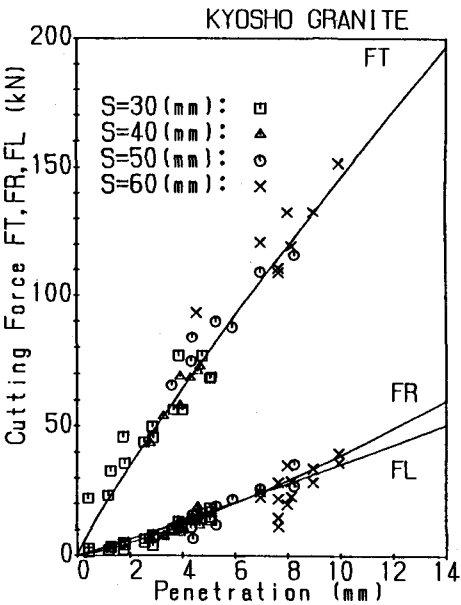


図2. 切削抵抗と圧入深さの関係

a, bについて $a=b=0.5$ を提案している²⁾。本実験の結果では、a, bの値は0.5と異なるがその和が1.0に近い点が注目される。係数kについてはディスク直径および刃先の幾何学的形状、ならびに岩石の切削に関する機械的・物理的性質が関与することが指摘されているが^{2, 3)}、本研究ではまだ詳細は判らない。

3.2 切削条件と比エネルギーの関係

比エネルギー E_s を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で定義し、 E_s と切削条件の関係について整理した。切削条件は単独の変数 S/P 比に還元した。 E_s の算出に必要な切屑の体積は、各切削軌道の切削によって生成した切屑の重量を比重で除して求めた。またディスクカッタが岩石にたいしてなした仕事 W は回転力の根2乗平均値 F_R と切削軌道長 L との積とした。2岩種の E_s と S/P の関係を図3に示す。図3より、花崗岩については S/P が1.8~6の範囲で E_s は単調減少し、また安山岩については S/P が8~9で E_s が極小となることがわかる。この結果はRoxborough and Phillips³⁾, Snowdon et al.^{4, 5)}で指摘されている結果とも一致する。また S/P が E_s の最小値をあたえる比にとられると、そのとき $S = (E_s)_{min} P$ により P に置き換るので、(1)式は P のべき乗式に還元される。このべき乗式を実験結果に適用すると F_R と F_T の比は、2岩種について P の0.44乗に比例する結果を得る。これは従来の研究結果^{2, 3)}とよく対応する。なお、 E_s の最小値をあたえる S/P 比と岩石の機械的・物理的性質との関連は、本研究ではまだ明らかにされていない。

3.3 横方向力の大きさと向き

横方向力の大きさと向きについて系統적으로おこなった実験の結果を図4に示す。この結果は横方向力の向きは既存の切削軌道のある側に向くことで一貫しており、また大きさは切削軌道半径にはほとんど独立であることを示している。ディスクカッタに関する従来の研究では F_L と F_T の比は1/10程度と報告されているが、本研究の実験結果では、図4にみるように、 F_L の大きさは F_R とほぼ同等であり、 $F_L/F_T \sim$

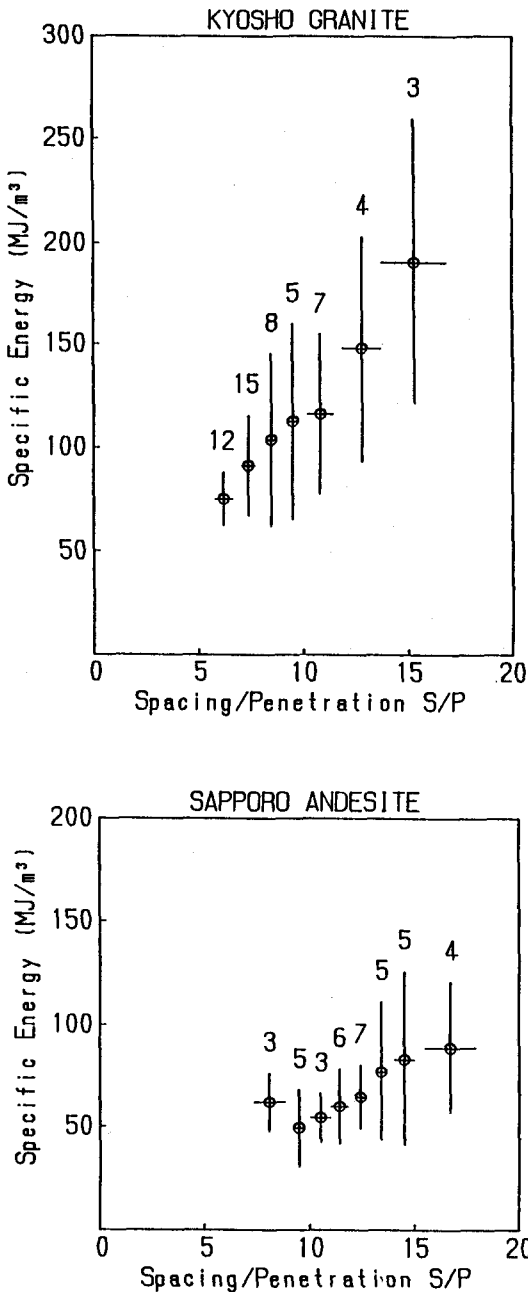


図3. 比エネルギーと S/P の関係

1/4 に達する。これはディスクカッタのベアリングの設計に考慮されるべき重要な点である。

4. むすび

以上本文では2種類の岩石の回転切削に関する実験について述べた。得られた主要な結果はディスクカッタによる岩石の切削に関して行なわれた従来の研究の結果と基本的には一致している。しかし、切削抵抗と切削条件を関連づける、いわゆる切削抵抗の予測式では、ベキ乗則の指数に差異が認められること、また横方向力が直線切削にもとづく従来の実験結果に比べて大きくなることなど、いくつか異なる結果も得られた。切削抵抗と岩石の性質の間の関係については今後の検討が必要である。本研究で製作した実験装置を用いてさらに多くの岩種について実験をおこない、優れた性能のリングカッタを開発するために、基礎的なデータの集積をはかっていきたい。

なお本研究をすすめるにあたり技術資料を提供して頂いた赤平ボーリングサービス株式会社に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 奥山徳男：赤平炭鉱におけるリングカッタの開発について。日本鉱業会誌。99巻 1146 号、pp. 638-641. 1983.
- 2) Sanio, H. P. : Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, pp.153-161, 1985.
- 3) Roxborough, F. F. and Phillips, H. R. : Rock excavation by disc cutter. ibid, 12, pp.361-366, 1975.
- 4) Snowdon, R. A., Ryley, M. D. and Temporal, J. : A study of disc cutting in selected British rock. ibid, 19, pp.107-121, 1982.
- 5) 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.

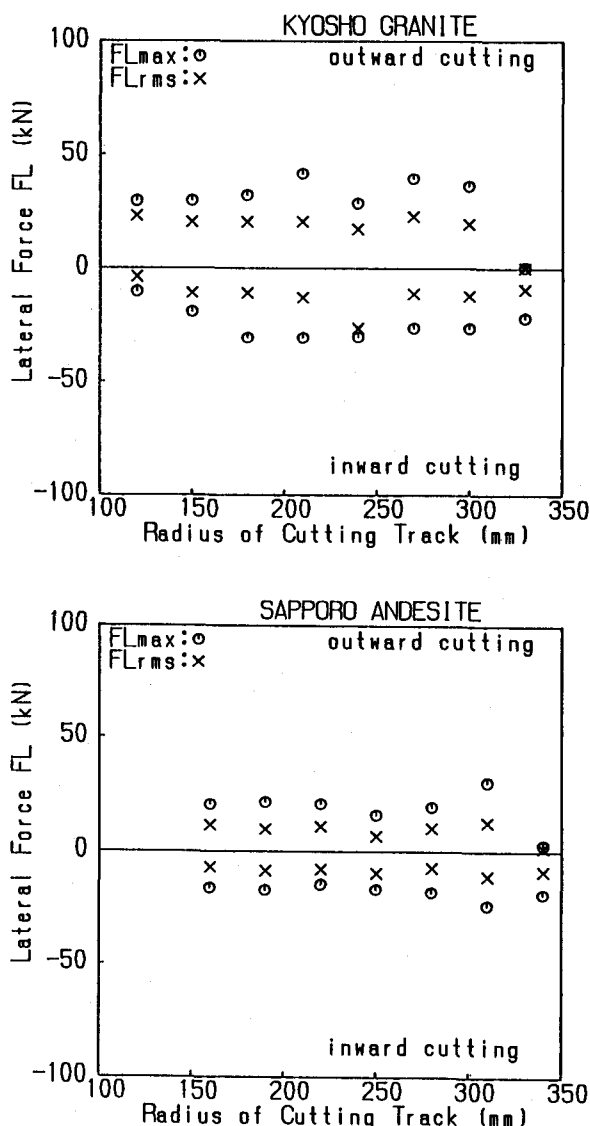


図4. 横方向力にたいする切削順序と切削軌道半径の影響