

(63) T B M ゲージカッタに作用する切削抵抗について

室蘭工業大学大学院 襄 放鳴
室蘭工業大学工学部 ○ 佐藤 一彦
室蘭工業大学工学部 内海 千尋

Tool Force and Twist Exerted on TBM Gauge Cutters

GONG Fangming, Graduate School, Muroran Institute of Technology
Kazuhiko SATO and Chihiro Uchiumi, Muroran Institute of Technology

Abstract

A laboratory experiment on disc cutting has been carried out to establish rational design criteria of TBM gauge cutters which are arranged at the periphery on the cutter head. The gauge cutters sustain greater cutting resistance than the inner and centre cutters do. The inclination angle of a disc toward surface of rock is chosen as a control variable and varied from 0 to 30 degrees with an increment of 5 degrees. The present study provided experimental formulae which enable us to estimate tool force to be applied to TBM gauge cutters :

$$(1) \text{ Thrust } F_T = K_T \tan(\phi/2 + \alpha) D^{1/2} S^{1/2} P^{1/2}$$

$$(2) \text{ Rolling Force } F_R = K_R \tan(\phi/2 + \alpha) S^{1/2} P$$

where ϕ is the edge angle of disc, α is the inclination angle of disc, D is the disc diameter, P is the disc penetration and S is the tool space. The coefficient K_T and K_R are constants and they are determined from the mechanical propertise of rock. Moreover, the experiment has shown that the lateral force F_L and the induced moment M_T about thrust axis vary in both magnitude and direction with the variation of inclination angle of disc.

1. はじめに

トンネル掘進機 (TBM) のカッタは、カッタヘッド上の位置によって掘進面に対する圧入角度が異なっている。一般にカッタヘッド中央部に配置されるセンターカッタおよびインナーカッタは、刃先が岩石面に対して垂直に圧入するように取付けられる。一方、カッタヘッド周縁部に配置されるゲージカッタおよびこれに隣接する外周部のカッタは、掘進面に対して刃先が垂直から傾斜した角度で圧入される。

TBMの掘進工程で、カッタ交換頻度が高いのはゲージカッタおよびこれに隣接した外周部のカッタである。単位切削延長距離あたりの交換回数で比較しても、この事情は変わらない。TBM稼働率を向上させるには、ゲージカッタおよび外周部のカッタの寿命が短いことの原因を解明し、有効な対策を講じる必要がある。そこで本研究では、ディスクカッタ性能試験装置¹⁾を用いて、ゲージカッタによる岩石の円周軌道切削実験を行い、ゲージカッタに作用する切削抵抗とカッタ取付角度の関係を調べた。以下、本文では実験方法と主要な実験結果について述べる。

2. 実験方法

実験に用いた切削工具は、セキサク製のディスクカッタ SM-RB-170×50×1 型で、カッタの直径は170mm、刃先角度は70° で、先端の曲率半径はmmである。

ディスクカッタを岩石面に対して垂直から傾斜した角度で圧入するために、所定の取付角度をもった鋼製のブロックを製作した。ディスクカッタは図1に示すように、この鋼製ブロックおよび動力計とボルト締結したうえで、性能試験装置のクロスヘッドに装着した。

動力計は図1に示すよう双八角環型で、切削抵抗の力の3成分、推力 F_T 、回転力 F_R 、横方向力 F_L のほかに推力軸まわりのモーメント M_T を検出できる。また、ディスク圧入深さはダイヤルゲージ型変位計で検出した。

実験に用いた岩石は中国福建省産の花崗岩である。主な力学的性質は、一軸圧縮強度164MPa、円盤圧裂強度17.2MPa、破壊靱性1.08MN/m^{3/2}、Young率55.1GPaである。岩石は500mm×500mm×390mmの直方体ブロックで、試験装置の回転テーブルに固定されている。切削される岩石表面はダイヤモンドカッタで切断されたままで、特別な表面加工は施されていない。

実験での制御変数は2つである。1つはカッタの取付角度で、0°から30°まで5°刻みで7段階変化させた。2番目の制御変数は試験装置が発生する推力用油圧シリンダの圧力 P_T で、 P_T と2本の油圧シリンダのラム断面積の積が公称推力 L をあたえる。実験では L を30kNから10kN刻みで隣接軌道間の岩石が完全に切除されるまで増加した。ディスクカッタの性能試験ではこのほかに切削軌道間隔 S が重要な制御変数であるが、本実験では S は30mmに固定した。

実験では一つのカッタ取付角度について、最小切削軌道半径110mmから30mmずつ半径を増加させ、それに応じて公称推力も30kNから10kN間隔で増加して円周軌道切削を行った。一つのカッタ取付角度での切削軌道数は8～9本、すなわち公称推力は8～9段階である。

3. 実験結果および考察

一本の円周軌道に沿った切削過程での切削抵抗4成分と圧入深さの測定例を図2に示す。切削抵抗の4成分と圧入深さは切削過程で変動する。そこでカッタ取付角度をパラメータとして圧入深さと切削抵抗の実験式を定めるに当たっては、一本の切削軌道ごとに切削抵抗の4成分と圧入深さを平均値で代表させた。こうして得られた実験結果を図3から図6に示す。

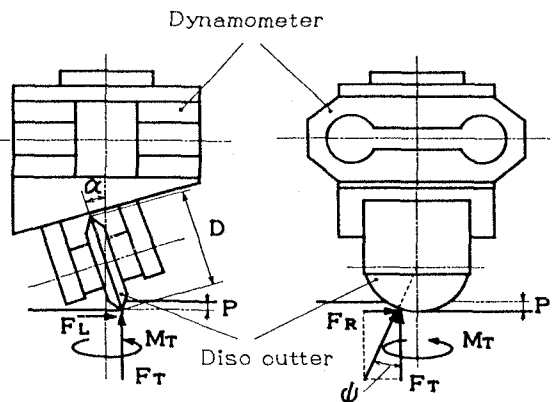


図1. ディスクカッタの取り付け方法

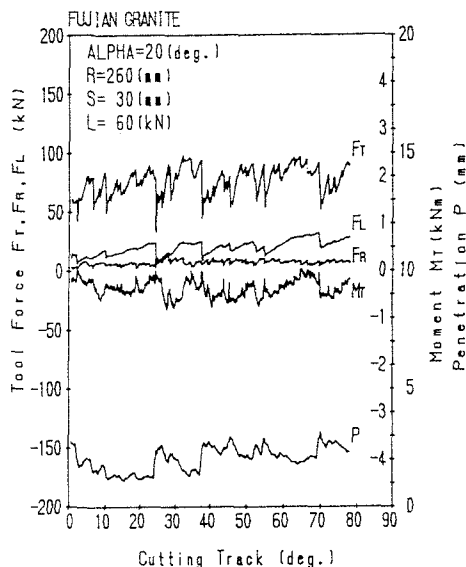


図2. 円周軌道切削の測定例

3.1 推力 F_T について

図2の実験結果について、ディスク傾斜角 α をパラメータとして、 F_T と P の関係を回帰分析した結果、両者の間に次の関係が見出された。

$$F_T = K_T \tan(\phi/2 + \alpha) D^{1/2} S^{1/2} P^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 D はディスク直径、 S は軌道間隔、また K_T は岩石の破壊靱性と Young 率から定まる定数である。

(1) 式はディスクが岩石表面にたいして垂直から α の傾斜角で圧入される場合、見掛けのディスク刃先半角は α だけ増加し、推力がノーマルカットの場合に比べて $\tan(\phi/2 + \alpha) \cdot \cot(\phi/2)$ となることを示している。 $\phi = 70^\circ$ の場合、 $\alpha = 0$ のノーマルカットと $\alpha = 30^\circ$ と $\alpha = 45^\circ$ のゲージカットの推力比はそれぞれ約 3.1、8.1 と算出される。

3.2 回転力 F_R について

回転力の実験結果は、図4に見るようにディスク傾斜角 α をパラメータとして圧入深さとの間のべき乗の関係を示唆している。そこで推力の場合と同様に両者の関係を回帰分析した結果、次の実験式を得た。

$$F_R = K_R \tan(\phi/2 + \alpha) S^{1/2} P \quad (2)$$

ここで、 K_R は (1) 式の K_T と同様に岩石の物性によって定まる定数である。

(2) 式は推力と同様に、回転力もノーマルカットにくらべてゲージカットでは傾斜角に応じて大きな値を要することを示している。これは TBM の所要トルクを増大させるだけでなく、カットのディスクおよびベアリングにとっても大きな負荷となる。

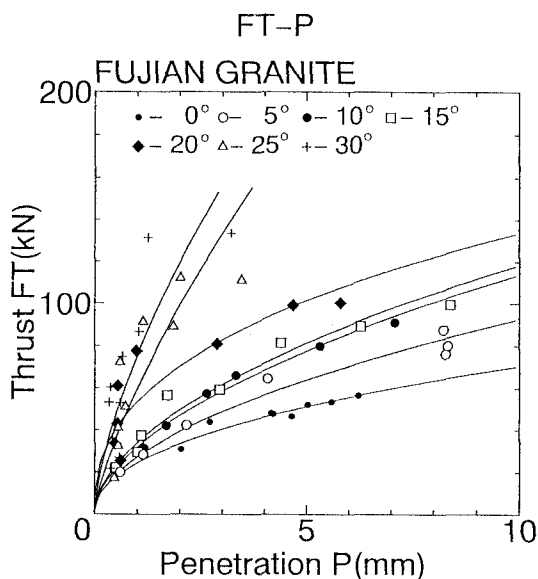


図3. 推力と圧入深さ、ディスク傾斜角度の関係

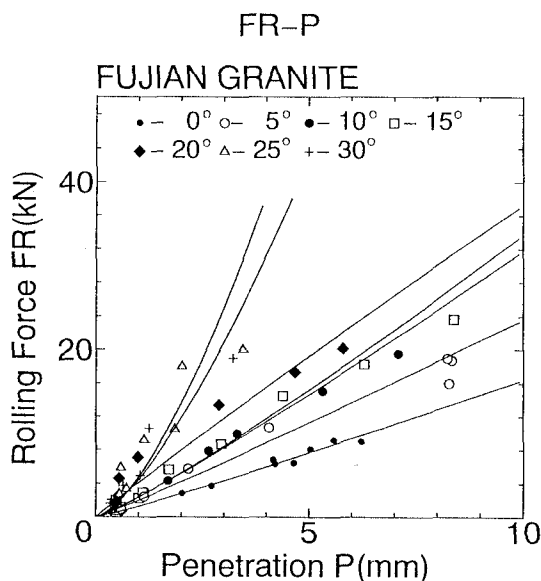


図4. 回転力と圧入深さ、ディスク傾斜角度の関係

3.3 横方向力 F_L について

図5に示すように、横方向力と圧入深さの関係は単純な指数関係では説明できない。 $\alpha=0^\circ$ のノーマルカットの場合には F_L の符号は負、すなわち F_L は既存の隣接軌道に向き、その大きさは P の1.5乗に比例することがすでに見出されている¹⁾。本実験でもこの関係は再確認された。しかし単純なべき関係は $\alpha=0^\circ$ の場合のみにとどまり、 α が増すと F_L と P の関係は複雑となる。すなわち $\alpha=5^\circ, 10^\circ$ の場合には P の増加とともに F_L の符号は正から負に変わる。また $\alpha \geq 15^\circ$ では実験の範囲内の P では正であるが、大きさはある圧入深さで極大となる傾向をうかがわせる。これらはノーマルカットでは観察されなかった新しい事実であり、ゲージカットによる岩石の切削機構と関連しているようである。しかし現在のところ α をパラメータとする F_L と P の関係はまだ説明できない。したがって詳細な説明は今後の課題である。

3.4 推力軸まわりのモーメント M_T について

推力軸まわりのモーメント成分と圧入深さの関係も、図6にみるように複雑である。 M_T と P の関係も、 F_L と P のそれと同様に、ディスク傾斜角 α をパラメータとして符号と大きさが変動する。すなわち $\alpha=0^\circ$ と 5° の場合では $M_T > 0$ 、 $\alpha \geq 10^\circ$ では $M_T < 0$ で、 M_T の大きさは α の値にかかわらず、 P とともに増加している。

力学的解析によれば、 M_T に関与する力の成分は M_T 軸に垂直な成分 F_L および F_R で、その関係は次式で表わされる。

$$M_T = F_L R \sin \psi - F_R R \cos \psi \sin \alpha \tag{3}$$

ただし、 R はディスクカットの半径である。また、 ψ は F_R と F_T の合力と F_T 軸のなす角で、

$$\tan \psi = F_R / F_T \tag{4}$$

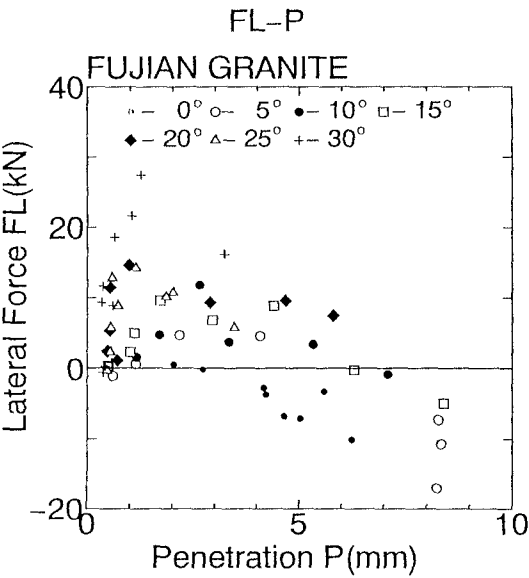


図5. 横方向力と圧入深さ、ディスク傾斜角度の関係

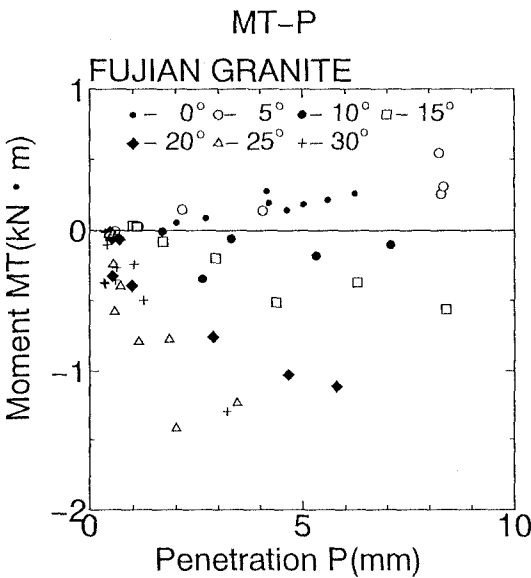


図6. 推力軸まわりのモーメントと圧入深さ、ディスク傾斜角度の関係

の関係を満たす(図1参照)。

(3)式により F_L 、 F_R 、 ψ の測定値を用いて計算すると M_T の計算値が得られる。この M_T の計算値と図6の測定値の組をプロットしたのが図7である。図7のデータを直線回帰した結果、傾きは0.896で、原点でのオフセットは0.041 kN・m、相関係数は0.936である。これより測定値は(3)式により説明できることがわかる。したがって M_T を直接測定することが困難な場合には、切削抵抗の力の3成分を測定すれば、(3)、(4)式により M_T を間接的に求めることができる。

M_T を測定した研究はこれまで見当たらない。本研究では M_T が存在することを実証すると同時に、これが F_T 軸と直交する力の成分 F_L 、 F_R によって生み出されることを示した。(4)式を導いたのと同様に、理論的には F_R 軸まわりにもこれと直交する力の成分 F_T 、 F_L によってモーメントが生じることが予測される。これら2つのモーメント成分はTBMの所要トルクの積算と、ディスクカッタの回転軸およびベアリングの設計に考慮すべき要素となる。

4. むすび

本研究ではTBM用ゲージカッタについて円周軌道切削実験を行い、切削抵抗と圧入深さおよびディスク傾斜角との関係を調べた。その結果、切削抵抗4成分の中、推力と回転力についてはそれぞれ(1)式、(2)式にしたがってディスク傾斜角の増加とともに増大することが見出された。また推力軸の周りにはモーメント成分が発生し、その値は(3)、(4)式により力の直交3成分から間接的に求めることができることも明らかにした。しかし横方向力に関しては、ノーマルカッタでは観察されなかった新しい事実が見出されたが、その合理的な説明は今後の課題である。

なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金(試験研究B-04555145)の交付を受けて行われたことを付記する。また西松建設㈱稲葉 力氏からはTBMゲージカッタの使用実績について貴重な御助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 荻放鳴、佐藤一彦、浅井秀明：資源・素材学会誌，Vol.108，No.7，pp552-561，1992.

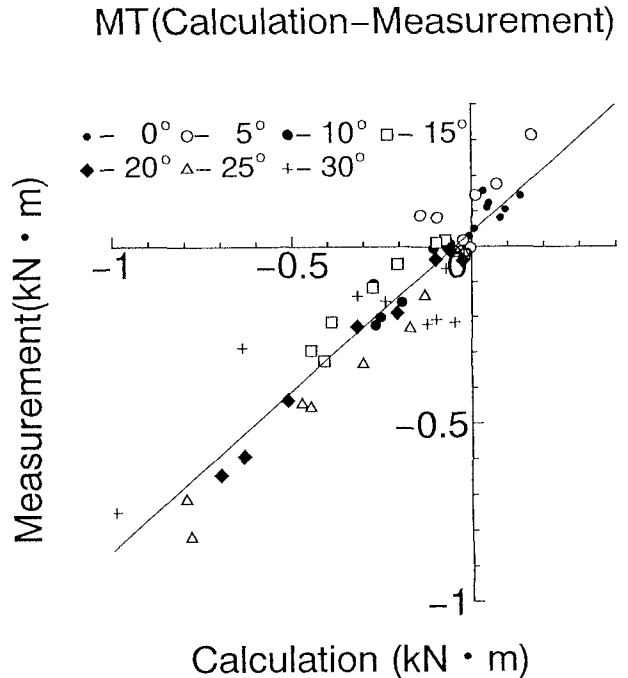


図7. 推力軸まわりのモーメント測定値と計算値の関係