岩石およびセメントモルタルの切削抵抗について* (第2報)

正 会 員 鈴 木 光**
正 会 員 西 松 裕 一***

On the Cutting Force of Rock and Cement Mortar (2nd Report)

Kō SUZUKI and Yūichi NISHIMATSU

In the first report, the authors reported some results of the cutting experiments of a tuffaceous sandstone and a cement mortar. The authors show that the relations of the cutting force and the cutting depth are given by the equations,

$$\left. \begin{aligned} P &= a_1 + b_1 t \\ Q &= a_2 + b_2 t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

and discussed on the second term of these equations.

In this second report, the authors discuss on the first term of the equation (1), and deduce the presence of the over-cutting, as sometimes observed in the metal cutting.

Finally it is concluded that the cutting force with the blunted cutting tool is represented by the following equations

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot \sin k \cdot \left\{ \frac{\cos(\delta+\phi) \cdot (d+d_0)}{1-\cos(k-\delta-\phi)} + \frac{\cos(\alpha-\phi) \cdot (t-d)}{1-\cos(k+\alpha-\phi)} \right\} \\ Q &= \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot \sin k \cdot \left\{ \frac{\sin(\delta+\phi) \cdot (d+d_0)}{1-\cos(k-\delta-\phi)} + \frac{\sin(\phi-\alpha) \cdot (t-d)}{1-\cos(k+\alpha-\phi)} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

where d : the height of blunt end

d_0 : the depth of over-cutting

δ : the rake angle of blunt end

Some results of this cutting experiment suggest the presence of the "built-up wedge" of the cutting tool, though this phenomenon could not be approved.

1. 緒 言

鈍い刃先を有する直刃ビットで岩石およびセメントモルタルの二次元切削実験を行ない、このような場合の破壊機構について考察した結果、刃先付近に圧砕帯が発生すること、切削抵抗の主分力 P および背分力 Q と切込深さ t との間の関係式として、縦軸(P 軸または Q 軸)を+側で切る直線の式

$$\left. \begin{aligned} P &= a_1 + b_1 t \\ Q &= a_2 + b_2 t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

が成立することなどについては、第1報¹⁾で述べた。

(1)式の定数部分 a の値は、かなり大きく、切込深さが数mm程度の場合、全切削抵抗の50%前後に達する場合もある。したがって定数部分 a の値に影響する要因を解明することは、切削機構を解明する上からばかりでなく、実用的にも重要であると考えられる。鈍い刃先を有する刃物の切削抵抗については、I. EVANS²⁾が考察

しているが、本報では特に切込深さが小さい場合について二次元実験を行ない、第1報の実験結果と合わせて、この定数部分 a の値に影響する要因について考察し、鈍い刃先を有する刃物の切削抵抗を求める計算式についてべる。

2. 刃先の圧砕帯の影響

すでにのべたように砂岩及びセメントモルタルを直刃ビットで切削した場合、刃先付近に圧砕帯が発生する。

第1報でのべたように(1)式の比例部分すなわち第2項が、大きな切屑の発生に関係する項であるとなると、第1項すなわち定数部分 a は、刃先の圧砕帯に関する項であると考えられる。このように考えるとまず問題になるのは圧砕帯の上端の位置である。圧砕帯の上端の位置は、肉眼観察によつては正確に知ることができなかったが、刃先の削り落し部分の上端(第1図のB点)付近にあることが認められた。

ここでは圧砕帯の上端と刃先の削り落し部分の上端が一致し、大きな切屑を生成する割れ目もこの点から出発すると考えることにする。

* 昭和43年3月5日受理

** 工博 東京大学教授 工学部資源開発工学科

*** 東京大学助教授 工学部資源開発工学科

第1図 刃物の形状と記号

そして(1)式を少し変形して

$$\left. \begin{aligned} P &= (a_1 + b_1 d) + b_1 (t - d) \\ Q &= (a_2 + b_2 d) + b_2 (t - d) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

と書き直し、(2)式の第1項は、第1図B点より下方の領域での破壊に関する項であり、第2項は同じくB点より上方の領域での破壊に関する項であると仮定する。

第1報の第3表に示した各定数の値を用いて、(2)式の第1項

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= a_1 + b_1 d \\ Q_0 &= a_2 + b_2 d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

の値を計算した結果を第1表に示す。これから刃物すくい角 α が、 P_0 および Q_0 にほとんど影響を及ぼさないことがわかるであろう。

第1表に示した通り、実験に使用した刃物の刃先削り落し角 δ (第1図参照)は、いろいろであるがその大部分は $13^\circ \sim 14^\circ$ であるので、このような刃先削り落し角を有するもののみについて、削り落し高さ d と第1表に示した P_0 および Q_0 の関係を図示したのが、第2図および第3図である。

これからわかる通り刃先削り落し高さ d と P_0 あるいは Q_0 の関係は、ばらつきが大きいあまり明瞭でないが、一応直線関係があると考えて最小自乗法³⁾によって係数を決定すると、

第1表 刃先削り落し部の寸法と切削抵抗の定数部分の値

刃物形状				青石		セメントモルタル	
α°	d mm	f mm	δ°	P_0 kg/cm	Q_0 kg/cm	P_0 kg/cm	Q_0 kg/cm
10°	0.15	0.11	36°12'	28.2	14.9	32.2	13.1
	0.57	0.13	13°08'	36.8	21.8	35.3	18.2
	0.69	0.17	13°43'	39.4	25.2	38.4	24.8
	1.13	0.29	14°18'	44.1	—	43.3	—
20°	0.17	0.14	38°45'	26.5	16.0	27.9	12.4
	0.38	0.09	12°42'	26.6	18.4	11.1	8.3
	0.71	0.17	13°16'	40.8	—	43.7	22.5
	1.10	0.28	14°10'	42.9	29.8	38.8	21.8
30°	0.17	0.14	38°00'	21.2	14.7	26.1	17.4
40°	0.21	0.08	19°22'	17.8	14.1	27.3	15.2
	0.46	0.11	14°02'	28.5	27.2	25.5	18.0
	0.56	0.13	13°11'	42.9	—	32.4	—
	0.92	0.23	13°54'	44.8	—	37.6	20.7

第2図 刃先削り落し角 $\delta=13 \sim 14^\circ$ の場合の定数部分 P_0 および Q_0 と刃先削り落し高さ d との関係——青石

第3図 刃先削り落し角 $\delta=13 \sim 14^\circ$ の場合の定数部分 P_0 および Q_0 と刃先削り落し高さ d との関係——セメントモルタル

青石については*

$$\left. \begin{aligned} P_0 (\text{kg/cm}) &= 21.1 + 22.5d (\text{mm}) \\ Q_0 (\text{kg/cm}) &= 13.1 + 15.7d (\text{mm}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

セメントモルタルについては

$$\left. \begin{aligned} P_0 (\text{kg/cm}) &= 16.2 + 26.0d (\text{mm}) \\ Q_0 (\text{kg/cm}) &= 9.7 + 13.7d (\text{mm}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

が得られて**、いずれも $d=0$ の場合、すなわち完全に鋭い刃先を有する刃物でも(2)式の第1項が0にならない。このことは鋭い刃先を有する刃物でも刃先の圧碎部が消滅しないことを推測させる。

3. 過切削現象の存在

前に(2)式の第1項、すなわち P_0 および Q_0 は刃先の圧碎帯に関係する切削抵抗であり、刃先の圧碎帯の上端は刃先の削り落し部分の上端(第1図のB点)であると考へた。他方(4)式および(5)式から、鋭い刃先を有する刃物でも圧碎帯が存在すると推測されるとのべた。そしてこのような現象は肉眼観察の結果から考えても大い

* 片寄りの特に著しい($d=0.56$, $P_0=42.7$)および($d=0.46$, $Q_0=27.2$)はあてはめの計算から除外した。

** (3)式と(4)および(5)式は形式的には同じであるが全く別の式である。すなわち(3)式は実験結果から P_0 および Q_0 を算出するための式であつて、 P_0 あるいは Q_0 と刃先削り落し高さ d の関係を表わす式ではない。

にあり得べきことのように思われる。また切削によつて作られた新しい自由面には一種の擦過痕が顕著に観察される。

いま、刃先の圧砕帯が切込深さ t の線より下方、すなわち第1図のA点より下方にまで延びていて、いわゆる過切削現象が存在すると仮定すると、これらを矛盾なく説明することができる。

またもし過切削現象が存在すれば、(4)式および(5)式で P_0 および Q_0 が0になる深さが、真の切込み深さであり、したがってまた圧砕帯の下端であろう。その場合、第1図のA点を基準にして測つたこの深さ d_0 を仮に過切削深さと名付けることにすれば、 $d = -d_0$ で P_0 も Q_0 も0になるはずである。換言すれば、(4)式および(5)式で P_0 を表わす直線が横軸を切る点と、 Q_0 を表わす直線が横軸を切る点とが一致し、一般に

$$\begin{aligned} P_0 &= b_p(d+d_0) \\ Q_0 &= b_q(d+d_0) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

が成立するはずである。

(4)式および(5)式をそれぞれ第2図および第3図に記入すると、 P_0 を表わす直線(実線)と Q_0 を表わす直線(破線)とがほぼ同じ位置で横軸を切ること、すなわち(6)式がほぼ成立することがわかる。この過切削深さ d_0 の値は、第2表に示すとおりである。

第2表 過切削深さ d_0 の値

	青 石	セメントモルタル
主分力 P_0 より算出	0.94mm	0.62mm
背分力 Q_0 より算出	0.84	0.71
平 均	0.88	0.67

4. 切込深さが小さい場合の切削抵抗

以上は第1報で報告した実験、すなわち切込深さ2mm以上で行なつた実験の結果からの推論であつて、いわば外挿的な推論であつた。またこれまでの結果から

は、(6)式の比例定数 b_p および b_q の値を決定する要因については、なにも知ることができない。

このような問題点を明らかにするため、種々の刃先削り落し角 δ と削り落し高さ d とを有する刃物を用いて、切込深さが2mm以下の範囲で、第1報で報告したと同様な二次元切削実験を行なつた。

この実験に使用した刃物の諸元を第3表に、被切削材料の強度特性を第4表に示す*。

第3表 刃物の形状

α°	d mm	f mm	δ°
10	1.13	0.29	14
	1.17	0.54	25
	1.83	0.80	24
	1.73	1.83	46
40	0.92	0.23	14
	0.89	0.42	25
	1.85	0.78	23
	1.69	1.76	46

第4表 被切削材料の強度特性

ブロック番号	セメントモルタル (C:S:W=1:4:1)	
	B4	B5
圧縮強度 S_c kg/cm ²	373	124
引張強度 S_t kg/cm ²	51.8	12.4
ぜい性度 B_r	7.2	10.0

実験結果は、第4図および第5図に示すとおりである。

いま、このように切込深さが小さく、すくい角が負の場合についても**筆者らの切削抵抗計算式、すなわち

$$\left. \begin{aligned} P &= C_1 + \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot t \cdot \frac{\sin k}{1 - \cos(k + \alpha - \phi)} \cos(\alpha - \phi) \\ Q &= C_2 - \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot t \cdot \frac{\sin k}{1 - \cos(k + \alpha - \phi)} \sin(\alpha - \phi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

が成立し、さらに前節でのべた過切削現象がつねに存在すると考える。

このように考えると、第4図および第5図に示した実験結果に、(6)式と同じ形の式

$$\left. \begin{aligned} P &= b_p(t+d_0) \\ Q &= b_q(t+d_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

第4図 切削抵抗と切込深さの関係——青石

* 青石は第1報に使用したのと同じブロックから作製した試料を用いている。

** この場合は刃先削り落し面が刃物すくい面となるから $\alpha = -\delta$ である。

第5図 切削抵抗と切込深さの関係——セメントモルタル

をあてはめて、第1報と同様に

$$b_q/b_p = -\tan(\alpha - \phi) \quad (9)$$

$$b_p = \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot \frac{\sin k}{1 - \cos(k + \alpha - \phi)} \cos(\alpha - \phi) \quad (10)$$

を用いて、摩擦角 ϕ と応力分布指数 n を求めることができる。この場合刃先削り落し角 δ が異なれば、過切削深さ d_0 も異なる可能性があるが、ここでは仮に青石については常に $d_0 = 0.9\text{mm}$ 、セメントモルタルについては常に $d_0 = 0.7\text{mm}$ とにおいて、計算することにした。結果は第6図および第7図に示すとおりである。これらのグラフには、第1報に示した計算結果も再び示してある。

ここで(8)式は、一定の刃先削り落し高さを有する刃

物で、切込深さを種々に変えた場合の切削抵抗の式であり、これに対して(6)式は、種々の刃先削り落し高さを有する刃物で、切込深さが、その刃先削り落し高さと等しくなったときの切削抵抗を表わす式である。

いま刃先削り落し角 $\delta = 14^\circ$ の刃物で青石を切削した場合の(8)式、すなわち

$$\begin{aligned} P(\text{kg/cm}) &= 18.8(t + 0.9\text{mm}) \\ Q(\text{kg/cm}) &= 14.0(t + 0.9\text{mm}) \end{aligned} \quad (11)$$

を(4)式*と比較すると、各パラメータの値がかなり近似していることがわかる**これは圧碎帯の切削抵抗についても、一般に(7)式があてはまることを暗示するものである。

5. 結 論

第1報においては、切削抵抗の式

$$\begin{aligned} P &= P_0 + b_1(t-d) \\ Q &= Q_0 + b_2(t-d) \end{aligned} \quad (12)$$

の第2項について主として論じたが、本報においては、専ら第1項について考察した。

まず P_0 あるいは Q_0 の値と、刃物すくい角 α の大きさとが無関係であることを知り、つぎに刃先削り落し高さ d と P_0 および Q_0 の関係を考察し、実際には切込深さ t より下方まで切削が行なわれていること、すなわち過切削現象が存在することを推論した。

新たに、切込深さが小さく、刃物すくい角が負の場合について二次元切削実験を行ない、この場合にも過切削現象の存在を仮定すると、筆者らの式すなわち(7)式をあてはめ得ることを示した。

さらに(7)式は、鈍い刃先を有する刃物の切削抵抗のうち圧碎帯に関する項、すなわち(2)式の第1項の値を計算するためにも適用できるであろうことをのべた。

したがって本報および第1報で報告した実験条件の下では、第1図に示したような鈍い刃先を有する刃物の切削抵抗を表わす式として、

* これがこの場合の(6)式に相当する。

** セメントモルタルについては各ブロックごとに強度特性が異なるため、同様の検討をすることができない。

第6図 摩擦角 ϕ と刃物すくい角 α の関係

第7図 応力分布指数 n と刃物すくい角 α の関係

$$P = \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot \sin k \cdot \left\{ \frac{\cos(\delta+\phi)(d+d_0)}{1-\cos(k-\delta-\phi)} + \frac{\cos(\phi-\alpha)(t-d)}{1-\cos(k+\alpha-\phi)} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

$$Q = \frac{4}{n+1} \cdot S_t \cdot \sin k \cdot \left\{ \frac{\sin(\delta+\phi)(d+d_0)}{1-\cos(k-\delta-\phi)} + \frac{\sin(\phi-\alpha)(t-d)}{1-\cos(k+\alpha-\phi)} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

が成立するといえよう。

なお第6図に示したように刃物すくい面と被切削材料の間の見掛けの摩擦角 ϕ が、刃物すくい角 α の増加とともに増加すること、さらには過切削現象の存在など、金属材料の切削において見られるような構成刃先⁴⁾と類似した現象が、岩石類の切削でも存在することを想像させるが、今回の実験ではこの点を確認することはできなかった。

最後に実用的な面から言えば、切込深さを大きくすると(13)式および(14)式の第1項、すなわち圧砕帯が切

削抵抗に及ぼす影響が、相対的に減少して、切削効率が上昇することが予想される。

切込深さが大きいときの方が切削効率が低いことは、石炭の場合についてはすでに指摘されていることで、その理由として切屑の比表面積の減少や強度の寸法効果などが挙げられているが⁵⁾、その他に本実験の場合のように刃先圧砕部の影響が相対的に減少することも考えられるであろう。

謝辞 本研究に関し、試料の作製からデータの整理に至るまで、終始一貫して協力を惜しまれなかつた東京大学工学部資源開発工学教室の秋山政雄技術員に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木光・西松裕一：岩石およびセメントモルタルの切削抵抗について(第1報)，日鉱誌，Vol. 84，No. 961(1968) p. 548
- 2) I. EVANS: The force to cut coal with blunt edges, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 2, 1 (March, 1965) p. 1/12
- 3) W. E. DEMING (森口繁一訳)：推計学によるデータのまとめ方，岩波書店 (1950)
- 4) 星光一：金属切削，工業調査会 (1960)
- 5) C. D. POMEROY: The breakage of coal by wedge action, Coll. Guard., 207 (1963) p. 642/8

43年度秋季大会分科研究会資料頒布について

大会資料(会誌9月号)を分冊してお頒けしております。必要記事を簡便にご利用できますので、お手許にお備え下さい。

■ 最近における試錐の実状と諸問題	60頁	¥ 300
■ 岩石強度測定法に関する発表会	28頁	¥ 250
■ 深部採掘に関する諸問題		
採掘および掘進(とくに坑内)の機械化	86頁	¥ 300
鉱山のテレコントロール		
■ 機械採炭・自然発火対策	84頁	¥ 300
■ 第8回国際選鉱会議に現われた選鉱の新しい動き	44頁	¥ 250
■ 新製錬法の可能性	62頁	¥ 300

《各送料共》