石炭の切削機構について*

正 会 員 会 田 俊 夫**
正 会 員 岡 本 隆***

On the Cutting Mechanism of Coal

Toshio AIDA and Takashi OKAMOTO

In this paper, the authors studied on the cutting mechanism of brittle materials as gypsum, cement, rock and coal blocks.

Results obtained from these experiments are as follows:

1. Type of cutting mechanism changes from shear type to crack type as depth of cut and brittle index (ratio of compressive and tensile strength of material defined by the authors) increases, with larger fluctuations in cutting resistance.
2. Fluctuation in cutting resistance decreases as bit width increases.
3. Distance of peaks of cutting resistance increases as rake angle of bit decreases.
4. Cutting resistance of brittle materials in practical cutting conditions may be concluded as the press-in resistance of cutting edge.
5. When cutting brittle materials, tensile stress in the case of larger rake angle bit and shear stress in the case of smaller rake angle bit, takes the most important role in cutting breakage occurrence.

1. 結 言

従来金属切削における機構学的研究は多くの研究者によつてなされ、その切削機構については流れ型、せん断型などの特色が明らかにされている。石炭の切削に対しては従来より筆者らは多くの研究を行い、それらの結果については順次報告してきた。そしてこれらのうち切削現象の本質である切削機構については、それが亀裂型であり、したがって刃物にかかる切削抵抗は被削材料中への刃物の進入に伴う押込抵抗であることを述べ、刃先付近の応力分布を光弾性実験により調べた結果を一部報告したり。しかしながら石炭の切削機構としての上記述べた亀裂型は一般の切込深さの場合であつて、切込が極めて小さくなると切削形態が変るように見うけられるので、筆者らはこの際石炭のみならず、いわゆる脆性材料の切削機構を広く観察した結果、切削の形態が被削材料の脆さの度合によつて相当に変化することを認めたので、ここにとりまとめて述べることにする。

2. 切削機構の一般的説明

第1図は軟鋼および普通鑄鉄の切削機構を示したもので、(a)の軟鋼では滑りの間隔が極めて短く、切削層は

流れていわゆる流れ型(Flow type)の切削機構を示している。この場合の破壊はせん断応力によつて滑りが発生するもので、その切削抵抗は多くの研究者によつて解析されている²⁾。この滑りの間隔は極めて小さく、連続的であるので、切削抵抗の変動は第1図のように極めて少ない。

ところが鑄鉄では軟鋼よりも脆い材料であるので、切削の機構も異なつたものになつてくる。脆さの度合を表わすのにここでは一応圧縮強さ S_c と引張強さ S_t との比をもつて表わすことにした。すなわち

$$\text{脆性度 } Br = \frac{S_c}{S_t} \dots \dots \dots (1)$$

第1図 各種材料の切削機構

* 昭和34年7月6日理 昭和34年度日本鉱業会春季大会にて講演

** 工博, 京都大学教授, 鉱山学教室

*** 京都大学助手 鉱山学教室

第2図 流れ型，せん断型，亀裂型の切削模型

の切削抵抗の変動も大きく，いわゆるせん断型 (Shear type) の切削機構を示す。

金属以外の脆性材料，たとえばセメント材を例にとると，脆性度 B_r は8~12と大きくなり，このような材料では塑性変形が極めて少なく，第1図(c)のように刃物の圧入により亀裂を生ずるとその進展にはほとんどエネルギーを必要とせず，破壊は急激に進んで切削抵抗は0になり，ついで小さい亀裂を繰返しながら再び大亀裂を生じ，これを繰返していくので，切削抵抗の変動も図に示すように極めて著しくなり，亀裂型 (Crack type) の切削機構となる。

これらの切削形式の抵抗変化を模型的に第2図のように示してみた。脆性度 $B_r=1$ である軟鋼などが示す流れ型機構では前述のように切削抵抗の変動がほとんどなく，切削抵抗 $P(x)$ は時間 x に関係せずほぼ一定として

$$P(x)=K_1 \dots\dots\dots (2)$$

の直線で表わす。この K_1 は切込深さ，「被削材料のせん断強さなどに比例する。この場合の切削抵抗の最大値 P と平均値 p との比，すなわち変動比 r_p は

$$r_p = \frac{P}{p} = 1 \dots\dots\dots (3)$$

である。

せん断型の機構では切削抵抗の変化は模型的にフーリエの級数の形で表わすことができる。すなわち

$$P(x) = K_2 + \frac{K_2'}{\pi} \left(\pi - 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin k \frac{\pi}{L_1} x}{k} \right) \dots\dots (4)$$

ここで x は滑りの間隔であり，常数 $(K_2 + K_2')$ は前同様

S_c, S_t がそれぞれ異なつた寸法効果を示す場合は試験寸法の大小により B_r の値も異なってくるが，ここでは一応試験片の大きさは直径30mm，高さ55mm程度のものについて示した。

この定義よりすれば前述の軟鋼では第1図に添記したように $B_r \approx 1$ であり，普通鉄では $B_r = 3 \sim 4$ という値をとる。このような脆性金属になると滑りの間隔が幾分大きくなり，第1図に示すように刃物の進行に伴い，abcdの部分は一

つて滑りを起すので，切削

抵抗のせん断強さあるいは圧縮強さに比例するものである。この場合の変動比は

$$r_p = \frac{K_2 + K_2'}{K_2 + \frac{K_2'}{2}} \dots\dots\dots (5)$$

つぎに筆者が対象とする石炭や岩石あるいはセメント材のように脆性度 B_r が大きい材料においては切込がある程度以上大きくなると亀裂型の様相を呈するが，この場合は第1図に示したように小亀裂および大亀裂と繰返しを続けるので，模型的には第2図(3)において①と②を合成して切削抵抗の変化を考えることができる。すなわち小亀裂を繰返して時間 $m x_1$ に大亀裂を生じ， $n x_1$ まで切削抵抗は0で，ついで再び小亀裂を繰返すことを考えれば

$$x = 0 \sim m x_1$$

$$P(x) = \frac{K_3}{\pi} \left(\pi - 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin k \frac{\pi}{L_1} x}{k} \right) + \frac{K_3'}{\pi} \left(\pi - 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin k \frac{\pi}{m L_1} x}{k} \right) \dots\dots (6)$$

$$x = m x_1 \sim n x_1$$

$$P(x) = 0$$

$$r_p = \frac{2L}{L_1} \dots\dots\dots (7)$$

ここで $K_3 + K_3' = P$ (切削抵抗の最大値) は均質な材料ではその強さに比例する³⁾。また L, L_1 は切削長さにとつたが，この模型による場合，いわゆる切削中の刃物の遊び l がなければ ($L = L_1$) 変動比 r_p は2である。しかしながら切込深さが大きくなると刃物の遊びも大になり (7) 式により r_p は2より大きくなるが，実際の切削において測定した r_p は模型の式より求めたものよりはいくらか大きい値を示す。第1表は (7) 式により L, L_1 を測つて求めた模型的な変動比と実測変動比の比較である。

第1表 切削抵抗変動比の比較

実験番号	模型による r_p	実測による r_p	実験番号	模型による r_p	実測による r_p
1	2.84	3.61	5	2.56	3.76
2	3.66	5.31	6	2.30	3.74
3	2.77	4.27	7	3.40	5.96
4	2.92	4.52			

試料：セメント材，刃物刃幅 $B=15\text{mm}$ ，すくい角 $\gamma=40^\circ$ ，切込深さ $t=8\text{mm}$ 。

3. 石炭の切削機構

3.1 脆性度 B_r が異なる場合の切削破壊の様相

石炭の切削機構を観察すると同時に均質脆性体として，石膏，セメント材についても実験を行つた。これらの試料の要目は第2表のようである。

上述のように一般に脆性材料の切削形式は亀裂型とみ

第 2 表 切 削 試 料 要 目

	圧縮強さ S_c	引張強さ S_t	$B_r = S_c/S_t$
石 膏 (湿)	30.5 kg/cm ²	6.5 kg/cm ²	4.7
〃 (乾)	93.4	18.4	5.1
セメント材	185.2	20.4	9.1

第 3 図 石膏 (湿) の切削抵抗オシログラフ

られるが、これはコール・カッタ・ピックなどで通常の大きい切込深さの場合であつて、これのみで終始するのでないことが認められる。第3図は石膏 (湿) の刃幅 $B = 15\text{mm}$ のピック・バイトによる切削抵抗のオシログラフであつて、(a) は刃物すくい角 $\gamma = 40^\circ$ 、(b) は $\gamma = 10^\circ$ の場合である。①は切込深さ $t = 0.5\text{mm}$ の場合で

第 4 図 切 削 写 真

あつて第4図の切削写真①で判るように被削材の分離の間隔は極めて小さく、切屑は流れているようにはみえるが、せん断型の機構である。この場合の切削抵抗の変動は極めて小さく定常的な切削がつづいている。②は切込深さ $t = 1\text{mm}$ の場合であつてせん断型の様相をはつきりと示し (第4図②)、③、④と順次切込が大きくなると、脆性度 B_r がこの程度の材料でも、もはや亀裂型の様相を示し (第4図③)、切削抵抗の変動比 r_p も第7図にとりまとめて示したように切込深さ t の増加に伴い大きくなっていく。なおこの場合切削速度は $v = 484\text{mm/min}$ で実験を行つたが、 $v = 63\text{mm/min}$ の低速でも大きい差は認められなかつた。

つぎに石膏 (乾) の $B_r = 5.1$ と少し大きい材料では上に比較して変動比も第7図に示すように幾分大きくなる。この場合のオシログラフは省略したが、つぎに $B = 9.1$ のセメント材について観察すると上の場合に比して著しい差を示してくる。この場合の切削抵抗のオシログラフを第5図に示したが、 $t = 0.5\text{mm}$ と極めて小さい場合でも同図①に示すように切削抵抗の変動もある程度大きくなり、せん断型の様相が判然とし、 $t = 1\text{mm}$ で早くも亀裂型の様相がみえ、 $t = 3\text{mm}$ 程度では上述のものに比べてはるかに判然とした切削形態である。かつ脆性度 B_r がこのように大きいと変動比 r_p も順次大きくなることは第7図に示すようである。なお第4図の切削写真④は典型的な亀裂型切削で、その実際の切削抵抗の変化は第5図④に示すように若干遊びに変化はあるが、さきに示した切削模型と類似した形をとつていることが判る。

第6図は石炭 (試料: 釧路下層炭) の場合である。石炭の場合は B_r が25程度であつて脆性度はいよいよ大きく、したがつて切削抵抗の変動も大きく、かつ不均質性も加つてセメント材のような画一的なものにならな

第5図 セメント材の切削抵抗オシログラフ($r=40^\circ$) 第6図 石炭の切削抵抗オシログラフ ($r=40^\circ$) 第7図
脆性度 B_r と切
削抵抗変動比

いで不規則な形になる。同図の①は $t=0.5\text{mm}$ の場合であつて、早くもせん断型と亀裂型が相半ばしているような様子が考えられ、以下②の $t=1\text{mm}$ では亀裂型切削の様相が示され、③、④と切込深さが大きくなるにしたがつて切削抵抗の変動が著しくなってくる。これらの変化の様子が第7図に併せ示してある。

以上のことから切削形態は材料の脆性度 B_r によつて著しく左右され、 B_r が大きいほど、また切込深さ t が大きいほど切削抵抗の変動が著しくあらわれることにな

第8図 刃物刃幅の変化による切削抵抗の相異
($r=40^\circ$, $t=4\text{mm}$) 第9図
刃物刃巾Bと
切削抵抗変動
比

る。

3.2 刃物刃幅による切削形態の相異

筆者らの石炭切削実験ではすべて実際の切削と同じように三次元切削を行つているが、同一の切込深さにおいても刃物の刃幅が大きくなると石炭の刃幅方向の不均質性のため、切削において一つの貝がら状の破面を形成せず、すなわち刃幅全部にわたつて同時に切削破壊が行われずに刃幅方向に細かく破壊される。第8図は切込深さを一定にして刃幅 B を変えて石炭を切削した場合の切削抵抗オシログラフの1例で、刃幅が大きくなるにしたがい変動は小さくなってくるのが判る。(第9図)

なお刃幅が小さくても切込深さが極めて小さいとこの傾向になることが観察される。

3.3 切削速度による差異

脆性度が大きい金属、たとえば鋳鉄の切削においては実用の切込深さおよび切削速度の範囲ではせん断型の機構であるが、切削速度が 3.6mm/min と極めて低速になると亀裂型の切削機構となり、それとともに滑りの間隔も大きくなることが認められている。

このように同一切削条件下における滑り(破壊)の間隔、すなわち切粉の大きさにより切削機構の変化を推定することができる。石炭やセメント材については切削抵抗および切粉の大きさが切削速度によつてほとんど変化のないことから、切削の機構も速度によつて変らないものとみてよい。この点についての詳細は別の機会に改めて述べることにする。

3・4 刃物すくい角による相異

刃物すくい角 γ が小さくなると後述するように主として刃物の圧入に伴い刃先付近に発生するせん断応力により、 γ が大きくなつて刃先が鋭くなると主として引張応力により材料は破壊(切削)されるが、この種の脆性材料では γ が小さいとせん断による滑り(破壊面)が遠くまで進展する傾向になる。この傾向は鋳鉄のせん断型切削機構においてもみられ、第10図に示すように γ の小さいほど滑りの間隔は大きくなっている。第11図は大理石の押圧試験における亀裂破面の長さで上に述べたことを示している。したがって実際の切削においてもこの傾向はあらわれ、第3図(a)(b)に示す切削抵抗オシログラフからも判るように、大亀裂の間隔はすくい角の小さいほど大きくなっている。

3・5 亀裂破面の大きさと切削抵抗

石炭や岩石などの亀裂型切削においては次に簡単に述べるように金属切削におけるような滑り面のせん断抵抗ではなく、刃物の押込抵抗であることが考えられる。したがってこの種の亀裂型機構においては切込深さの大小によつてはく離される切粉の大きさは当然変化するが、これと切削抵抗 P とが比例しない。すなわち金属切削における

$$P \propto A \tau_s \dots\dots\dots (8)$$

の概念が成立しないことである。ここに A は滑り面の面積、 τ_s は被削材料のせん断強さである。第12図は $t=1.0$ mmの切込深さの場合の切削抵抗を基準にして他の場合の破面面積比および切削抵抗比の関係を示したものである。もしも(8)式の関係があるならば、これらの実験値は図の破線上に集るべきである。せん断型に近くなる脆性度 B_r の低い材料ではそのようにみられるが、典型的な亀裂型切削になる B_r の大きい材料ではほとんど変倚しており、切削抵抗が破面の面積に比例しないことを示している。

第10図 鋳鉄の切削における滑りの間隔

第11図 大理石の押圧試験における破面の長さ

4. 刃物圧入時の解析

さきに述べたように脆性材料の亀裂型の切削形態においては、刃物の圧入により亀裂を生ずるとその進展にはほとんどエネルギーを必要とせず急激に切削片はく離するので、前項に示したように切削抵抗は破面のせん断抵抗ではなく、刃物の押込抵抗であると考えられる。この刃物の被切削材料中への圧入の現象を考えると、刃先に摩擦のない場合、第13図において切削幅を B 、圧入深さを h 、単位面積当りの材料の抗圧力を n 、刃面と材料の間に見掛けの摩擦係数を μ として計算すれば、主切削抵抗 P および背分力 R は二次元的に

$$\left. \begin{aligned} P &= nhB(\cot \gamma + \mu) \dots\dots\dots (9) \\ R &= nhB(\mu \cot \gamma - 1) \dots\dots\dots \end{aligned} \right\}$$

となる。すなわち圧入深さの増加とともに切削抵抗は直線的に増加し、ついにある一定深さに達したところで材料の刃先近くが破壊限界応力に達し破断することになる。このことは実験的にも確めている。これらの実験結果をもとにして材料の抗圧力 n を求めるとこれは押込硬度 H と関連性を示し、炭理の発達極めて少ない石炭やあるいは均質なセメント材において切削抵抗が押込硬度に比例することと一致している。

さてこのように刃先の圧入により切削抵抗が漸次増加し、材料内の生起応力も増加してついに破断を起すわけであるが、この刃先の圧入による材料内部の応力の状態を二次元光弾性実験より求めて第14図に示した。これは刃先を通る水平線上の応力分布を示したもので、すくい角 $\gamma=0$ の場合は引張である σ_x よりもせん断応力 τ_{xy} が大きい。が、 γ が大きくなるにつれ σ_x が順次大きくなってくる。ここで脆性材料のせん断強さ τ_s をモールの応

第12図 破面面積比と切削抵抗比

第13図 被削材料中
への刃先の圧入

第14図 刃先線上の応力分布

力円の包絡線を直線におきかえることにより

$$\tau_s = -\frac{S_t S_c}{S_t - S_c} \dots\dots\dots (10)$$

として、石炭に対し $S_c \cong -25S_t$ として計算すれば

$$\tau_s : S_t : S_c \cong 0.96 : 1 : 25$$

となり、これらの比より判るようにすくい角が小さいと刃先の圧入により生ずるせん断応力による破壊であり、 $\gamma = 40^\circ$ では完全な引張破壊であり、そして $\gamma = 20^\circ$ 程度がその中間であることが推察される。

5. 結 言

以上に石炭の切削形態について二、三考察した結果を述べた。すなわち一般に脆性材料の切削機構は亀裂型と認められるのであるが、切込深さが極めて小さくなるとせん断型の様相を呈することを明らかにし、かつ材料の脆さの度合を表わすのに脆性度 B_r を定義し、これと切削形態あるいは切削抵抗の変動比などとの関連性を明らかにした。また刃幅や刃物の角度、切削速度などの要素との関係についても同様に検討した。

さらに脆性材料の切削抵抗は刃物の押込抵抗であるこ

とを示し、同時に刃物の圧入に伴う被削材料内の生起応力を二次元光弾性実験により解析し、刃物のすくい角が小さいときはせん断応力により、すくい角が大きくなつて刃物が鋭くなると引張応力によつて破壊されるものであることを考察した。

なおこれらの解析は刃物の刃先に摩耗のない場合であつて、刃先が摩耗した場合の考察は改めて述べることにしたい。

本研究の一部は昭和33年度科学試験研究費補助金により行つたものである。

文 献

- 1) 会田俊夫・岡本隆：切削採炭機械に関する基礎的研究，日本機械学会誌，第61巻，第472号（昭和33年5月）p. 522.
- 2) たえば，M. Field and M. E. Merchant：Mechanics of Formation of the Discontinuous Chip in Metal Cutting Trans. A.S.M.E. July. 1949, p. 421.
M. E. Merchant：Basic Mechanics of the Metal Cutting Process Journal of App. Mech. Sep. 1944, p. 168.
- 3) 三雲英之助・会田俊夫・岡本隆：石炭の強度と切削抵抗，日本鉱業会誌，第73巻，第824号（昭和32年2月）p. 81.
- 4) 大越 諒：切削抵抗に関する研究，理研彙報，第12巻，第1号，p. 71.
- 5) 三雲英之助・会田俊夫・岡本 隆：石炭の切削抵抗と硬さとの関連性について（Ⅱ），日本鉱業会誌，第70巻，第793号（昭和29年7月）p. 291.