

岩石切削におけるビット摩耗と切削抵抗

BIT WEAR AND CUTTING FORCE IN ROCK CUTTING

大久保誠介*・秋山政雄**・梁 文仲**・福井勝則*

Seisuke OKUBO, Masao AKIYAMA and Liang WENZHONG and Katsunori FUKUI

The paper describes a fundamental investigation on bit wear and cutting mechanism in rock cutting comparing with those in mortar and metal cuttings. Turning-operation (facing) test previously developed by the authors were modified and used in this study. Main modification was made to measure cutting forces in three orthogonal directions by a newly attached dynamo-meter.

A series of laboratory tests were carried out. Eleven rock samples, two mortars and five metals (mild steel, cast iron, copper, brass, aluminum) were tested in the study. Five kinds of cutting bits/chips made from three kinds of WC, a cermet and a ceramic were used. A measurement of cutting force and bit wear were successfully performed.

1. はじめに

岩盤の掘削方法として発破と機械化掘削とがある。前者は従来よりおこなわれており在来工法と呼ばれることがある。さく岩機によって孔を開けた後、装薬、発破、ずりの排出・運搬といういくつかの作業を繰り返しおこなうが、種々の岩盤条件に適用可能である上、エネルギー効率がよく、熟練した作業員が確保できる場合には有力な方法といわれている。一方、後者の機械化掘削・切削が徐々に増加しつつあるが、その際の問題の一つとしてビットに関連する、ビットの摩耗、ビットの摩耗に伴う切削抵抗の変化、適切なビットの選択方法などがある¹⁾。

ビットに関する問題を研究する手段の一つとして、旋削試験がある。この試験では、岩石を旋盤のチャックで把持して、ビットで切削をする。古くから行われていた方式では、円筒形の岩石試験片の側面を切削していたが、これでは試験片が曲げにより折損することが多かった。そこで、著者は岩石試料の端面を切削（正面削り）する試験方法を開発した²⁾。この方法を採用すると、短い試験片で済むし、折れやすい岩石の試験も可能である。既報²⁾にて、この試験方法で求められた岩石の摩耗能について論じた。

引き続き提案した試験方法を用いた検討を進めるため、切削抵抗（3成分）が測定できるように、試験装置を改良した。この改良した試験装置を用いた結果について本稿では述べることにする。なお、研究にあたっては、金属を切削したときとの相違に着目した。その理由は、①岩石の切削は特殊なものと考えられ、他の分野との交流が十分でない。本当に特殊なのかどうかを確かめる必要があると考えた、②金属の切削に関する試験結果は多く発表されているが³⁾、ほとんどが冷却と潤滑用の切削油を使用した条件下での結果であ

* 正会員 東京大学工学系研究科地球システム工学専攻

** 東京大学工学系研究科地球システム工学専攻

る。これを無くした条件下で、岩石の試験結果と比較・検討することは重要と思われるが、これに類する研究は著者の知る限りなされていない。

2. 試験方法

旋盤のチャックに直径 40 mm の試験片（ボーリングコア）を固定して、超硬チップ付きのバイトで試験片の右端を外周から順次中心に向かって切削する方式（正面削りないし Facing）を採用した。この方式によれば、ボーリングコアはチャックより 10 mm 強右にでていればよく、試験片が折損する心配はほとんどない。既報²⁾で述べたように、種々検討の末に決定した試験条件を表 1 に示す。表中の切り込み深さとは、試験片の長手方向（軸方向）に測った切り込み量であり、径方向送りとは試験片が 1 回転する間のビット先端の径方向への移動量である。なお、径方向送りは、旋盤主軸と連動して回転するねじによる連続送りとした。

今回、切削抵抗を測るために 3 成分工具動力計を追加した。工具動力計は共和電業（株）の TD-500KA であり、直交する 3 方向の力を測定することができる。この工具動力計をアンプ内蔵の A/D コンバータ（共和電業（株）PCD-100A）につないで計測をおこなった。データのサンプリング速度は毎秒 10 回とした。

使用したビット（チップ）の形状は三角で、ISO 呼び記号が TNGA160404 のものとした。この試験法で通常使用するビットの材質は、ISO 呼び記号が K10 と K30 であるが、今回は K01、P01（サーメット）、P10（セラミック）を追加した。ビット材質に関する諸値を表 2 にまとめて示す。

試料として、岩石 11 種、モルタル 2 種のほか鋼、鋳鉄、銅、真鍮、アルミニウムを用いた。

3. ビット材質に関する検討

表 3 に、ビット材質を変えた切削試験のまとめを示す。○は、10 回の試験（切り込み深さ 1 mm×10 回）でビット先端は摩耗はするが、欠損(chipping)はみられなかったものである。表 3 に示したのは今回追加したビット材質のみであるが、従来から使用してきた K10 と K30 は全ての場合○であった。△は 10 回の試

験後も肉眼ではわからないが、拡大鏡で詳しくビット先端を調べてみるとわずかではあるが欠損がみられた場合である。×は切削試験開始後、直ちに（1 回目の試験で）数 mm 程度の明瞭な欠損がビット先端に認められた場合である。△の場合には切削試験を 10 回

表 1 旋削試験の試験条件

試験片直径	4 0 mm
試験片長さ	4 0 mm 以上
回転速度	8 3 r p m
切り込み深さ	1. 0 mm
径方向送り	0. 2 mm
摩耗能 W_L	端面を長さ方向に 1 0 mm 旋削したときの摩耗長
超硬ビット形状	TNGA160404*
超硬ビット材質	標準 1 K10* 標準 2 K30*
切削油	無し（乾式）

* : I S O 呼び記号

表 2 ビット材質にかかわる諸値

名称	主たる成分	比重	硬度 H R A	抗折力 (GPa)	ヤング率 (GPa)	線膨張系数 ($\times 10^{-6}K^{-1}$)	熱伝導率 (W/(m・K))
K01	WC,Co	13.8	94.0	1.9	620	4.5	96
K10	WC,Co	14.7	92.0	2.0	630	4.6	79
K30	WC,Co	14.8	90.5	3.1	570	5.0	71
P01	TiC,TiN	6.6	92.0	1.7	—	7.8	33
P10	Al ₂ O ₃	4.3	94.0	0.9	400	7.4	25

表3 ビット材質を変えた切削試験のまとめ

ビット材質 試料	K01	P1 (NS520) サーメット	P10 (LX11) セラミック
諫早石(砂岩)	○ ○	○ ○	○ ○
稲田花崗岩	△ △	× ×	× ×
稲田花崗岩*	○ △	× ×	× ×
鋼(S25C)	○		
鋳鉄(FC250)	○		
銅(C1100)	○		
真鍮(C3604)	○		
アルミニウム(A5056)	○		

○：欠損なし

△：10回目までに欠損

×：1回目の切削中欠損

*：切込み深さ0.5mm

0.5 mm では2回中1回だけ、わずかであるがビット先端に欠損が認められた。また、サーメット(P1)とセラミック(P10)の抗折力はより小さいためか、諫早石(砂岩)の切削は可能であったが、稲田花崗岩を切削すると切り込み深さ1 mm、0.5 mm とも試験を開始するとただちにビット先端が欠損した。

以上の試験の結果、新たに追加した K01、P1、P10 で、硬岩の切削をするには無理があることがわかった。なお、ビット材質による差が明瞭にでたことから、この旋削試験は、ビット材質の評価のための試験として有力な手段となる可能性がある。

4. 切屑と切削モード

標準条件下での試験中に採取した切りくずについて述べる。使用したビットの材質は K10 である。

稲田花崗岩と河津凝灰岩では、切りくずの中には最大 1 mm 程度の粒が混じるが、小さい粉が大部分を占める。稲田花崗岩と河津凝灰岩とを比べると、花崗岩の方がやや大きな粒径の切りくずが多かった。その原因は、稲田花崗岩に含まれる粒子の径が、河津凝灰岩のそれよりかなり大きいことに起因していると思われる。他の岩石の切削における切りくずは、総じて粉状であり小さかった。切削モードは、流れ型でないことは確かであるが、金属切削という裂断型とせん断型ともやや異なっているように思われた。

鋼の場合、切削油を使用すると、切削モードは流れ型となりらせん状の切りくずが連続してでてくるが、切削油なしでは、切りくずは短く切れてしまう。ことに中心に近づくとその傾向が顕著に認められた。鋳鉄の場合、切削モードは裂断型といえ、切りくずは 1 mm 程度の大きさで、まれにはあるがこの切りくずの飛散(飛び出し)が見られた。銅の場合、外周部では長さ 5 ～10 cm 程度の切りくずが排出されるが、中心に近づくとつれて短く切れるようになる。真鍮の場合、鋳鉄と同様に細かい粒が排出される。鋳鉄と比べると粒径が小さい。アルミニウムの場合、切削モードは流れ型であり、らせん状の切りくずが連続して排出される。ただし、切削油を使用していないので、切削面はやや荒れており滑らかとはいえない。

岩石の切りくずは、金属に比べて小さいことが第一の特徴であった。また、金属では 10 回の試験が終了した後も、ビット先端の摩耗はほとんどみられなかった。他方、既報で述べたように、岩石では多かれすくなかれビット先端に摩耗が認められた。

までおこなったが、×のものは大きな欠損が生じるので切削試験を途中で中止した。

表3よりわかるように、従来使用してきた K10 や K30 と比較して、K01 は、硬度は高いが抗折力(曲げ強度)がやや小さく、より硬くてもろい材質といえる。このことを反映して、K01 で花崗岩を切削すると、切り込み深さ 1 mm では 2 回とも、また切り込み深さ

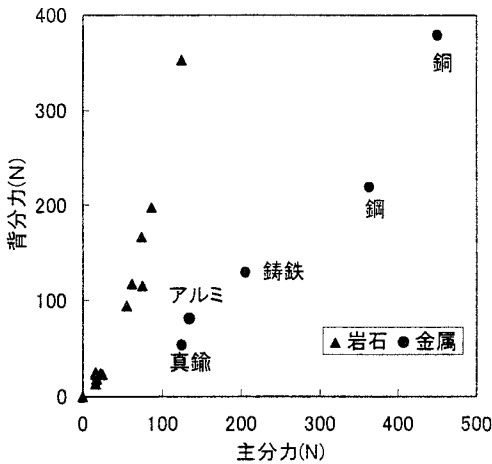


図1 背分力 vs 主分力. とともに 1 回目の試験の平均値. ビットは K10 を使用.

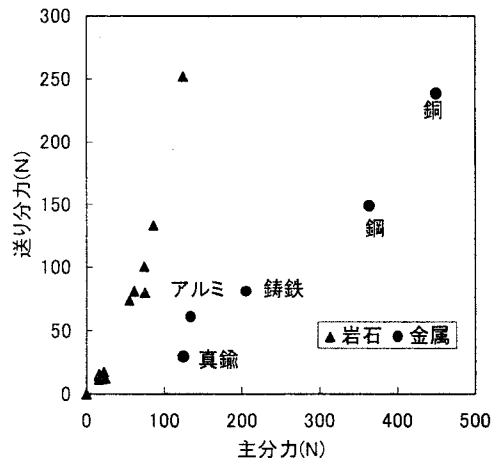


図2 送り分力 vs 主分力. ビットは K10 を使用.

5. 切削抵抗

図1に背分力と主分力の関係を示す. とともに 1 回目の試験の平均値である. この図からわかるように, 今回試験で使用した 11 種の岩石と 2 種のモルタルは, 次式でほぼ近似できる直線上に並ぶことがわかる.

$$\text{背分力} = 2.24 \times \text{主分力} \quad (1)$$

これと比較して 5 種の金属の背分力は三分の一ほどであり, ややばつづくが近似式は次のようになる.

$$\text{背分力} = 0.72 \times \text{主分力} \quad (2)$$

図2には, 送り分力と主分力の関係を示す. 図1の場合と同様に, 岩石とモルタルとを合わせて 13 種類はほぼ同一線上に並ぶ.

$$\text{送り分力} = 1.55 \times \text{主分力} \quad (3)$$

この場合にも, 5 種の金属の送り分力は, 岩石に比べて格段に小さく次式で近似できる.

$$\text{送り分力} = 0.46 \times \text{主分力} \quad (4)$$

暫定的な結論ではあるが, 岩石の主分力は, 金属のそれと比べて格段に小さいことがわかった. この原因の解明は今後の課題といえるが, 細かく粉碎された岩粉がビット先端にて広い意味での潤滑作用 (動摩擦係数を減らす作用) をしている可能性が考えられる.

6. ビットの摩耗と切削抵抗

従来より岩石を切削するとビットの摩耗が進行し, しばしばビットの交換をせねばならない場合のあることが知られている. 今回の試験においても, 金属を切削した場合には, 10 回程度の試験ではビットの摩耗は認められなかった. 岩石の中にも, 10 回程度の試験ではほとんどビットの摩耗が認められなかったものがある. その例として, 秋吉大理石の測定結果を図3(a)に示す. この図よりわかるように, 秋吉大理石の場合には, 3分力とも変化が少なく, 10 回の試験を行った後のビット先端の摩耗もほとんど見受けられなかった.

反対に, 硬い造岩鉱物よりなりたっており, 切削ビットはもちろんさく岩機用のビットにおいても摩耗が激しいとされた神流川チャートの測定結果を図3(b)に示す. この場合には, 3分力とも顕著に増加して

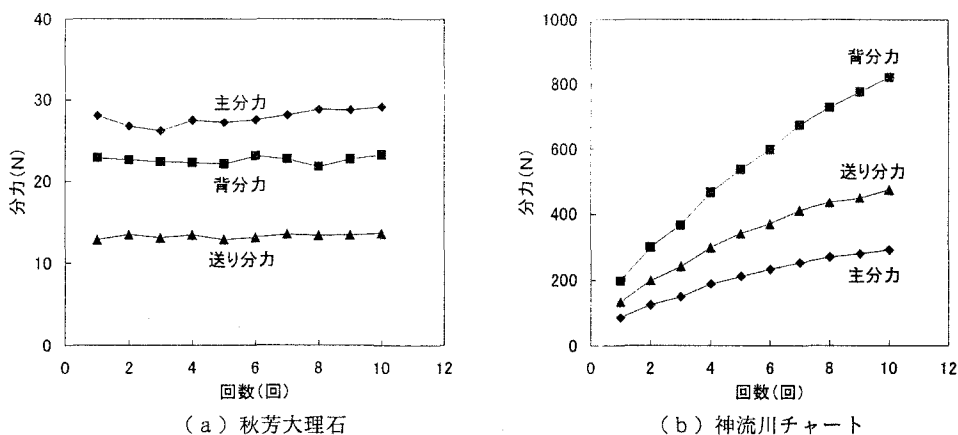


図3 ビット摩耗による切削抵抗の変化。ビットはK10を使用。

いることがわかる。例えば背分力は最初 200 N であるが、10 回目のそれは 4 倍の 800 N となる。ビット先端を観察すると顕著な摩耗が生じており磨耗長は 2~3 mm と肉眼でもはっきり認識できるようになる。

7. まとめ

11 種の岩石、2 種のモルタル、5 種の金属を使用して旋削試験をおこなった。旋削試験方法は以前著者が開発したが、今回は 3 方向の主分力が測定できるように試験装置を改良した。得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 岩石の切りくずは総じて小さく粉状となるといえる。これは従来より知られていることであるが、金属との比較を通じて再確認した。
2. サーマットとセラミック製のビットを使用したところ、硬岩を切削すると簡単に破損することがわかった。材質の差が顕著に表れるので、旋削試験は、開発した新材料の評価に使用できる可能性がある。
3. 岩石の主分力は、金属と比べて小さいことがわかった。この原因は今後の課題といえるが、細かく粉碎された岩粉がビット先端にて広い意味での潤滑作用（動摩擦係数を減らす作用）をしている可能性が考えられる。
4. 岩石は、金属と比べてビットの摩耗が激しい。金属の切削には通常切削油を使用するが、今回の試験では一切使用しなかった。それでもなお、金属の場合には、ビットの摩耗はほとんど認められなかった。
5. チャートなどでは 3 分力とも次第に増加した。特に背分力の増加が著しかった。この結果は現場で知られている事実と一致する。摩耗長に加えて新たに測定をすることにした 3 分力を合わせた旋削試験は、今後岩石/ビットの評価や、摩耗の進行過程を検討するのに有力な手段となる可能性がある。

8. 参考文献

- 1) Verhoef, P. N. W. : Wear of Rock Cutting Tools, A. A. Balkema, 1997
- 2) 大久保誠介, 大田彰則, 秋山政雄, 福井勝則, 西松裕一 : 資源と素材, 113, pp. 325~332, 1997
- 3) Boothroyd, G. : Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, McGraw-Hill Kougakusya, 1975