

岩盤における溝掘削機の掘削特性

CHARACTERISTICS OF EXCAVATION OF A TRENCH EXCAVATOR FOR ROCK MASS

室 達朗*・黒瀬 賢二郎**・河野 幸一***

Tatsuro Muro, Kenjiro Kurose, Kouichi Kohno

The aim of this paper is to investigate experimentally the effect of characteristics of excavation of a trench excavator for rock mass of tuffaceous rock and cement mortar. A trench excavator consisted of 4 center disc cutter bits and 8 edge disc cutter bits was fabricated. The observed horizontal and vertical excavation force and torque were related to the uniaxial compressive strength of rock and the cutting depth. As the result, it was observed that the specific cutting energy for the edge disc cutter bit is smaller than that for the center disc cutter bit.

Key words: trench excavator, tuffaceous rock, edge disc cutter bit, specific cutting energy

1.概説

土木構造物を建設するとき、必ずといっていいほど実施されるものが掘削工事であり、掘削工事そのものが建設工事の大半を占めることすらある。掘削工事は、昨今の公共事業への厳しい世論に対してだけではなく、自然を相手とすること、建設工事に占める工費が大きいこと、工期を左右する大きな要素であること、などからより効率のよい掘削方法の開発による合理化、コストダウンを目指さなければならない。また民家が隣接した場所や都市部において従来の発破工法による工事の制約も厳しくなっており、掘削機械に求められる能力も以前より高くなってきている。このような現状のなか、最近では岩盤の掘削工事を精度良く効率的に進めていくことが可能な大型岩盤切削機¹⁾(サーフィスマイナー)などによる岩盤切削工法が注目されている。岩盤切削工法とは岩盤を層状に掘削する工法である。掘削する1層の厚みは通常5~30cmで、層状に掘削することで岩盤を薄く掘削できるため、一般の硬岩掘削工法に比べ低騒音・低振動での硬岩掘削が可能である。そこで、その補助掘削として溝を作ってから岩盤切削工法を行うことで、より効率の高い掘削が可能と考えられる。

本研究の目的は、掘削効率を向上させるための方策として、2自由面をもつ岩石の端面をディスクカッタービットで掘削する端面掘削²⁾の特性を実験的に明らかにし、その特性を利用した新しい岩盤掘削機の提案とその検討をおこなうことを目的とする。

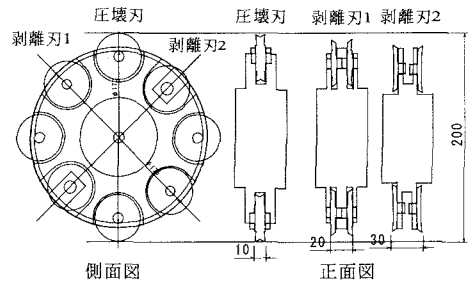


図-1 掘削刃全体図

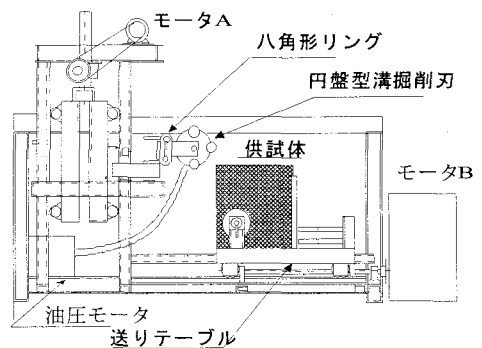


図-2 実験装置

*フェロー会員 工学博士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

**学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

***正会員 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

自由面とは、破碎の際に破壊を拘束しない面のことをいい、従来のトンネル掘削などにおいて、多くが1自由面を掘削する平面掘削を採用している。本研究は、岩盤の溝掘削機の提案とその検討を行う。この掘削機械は道路工事などで行われる岩盤切削工法の補助工法として適用されるものである。この機械は端面掘削を利用した剥離破碎刃を装着することで、掘削効率の向上を目指すものである。

2.実験装置

2-1 概要

本研究のために製作した実験装置は大きく分けて円盤型破碎刃が付いている切削ドラムと供試体を固定し円盤型溝掘削刃に送る供試体送りテーブルに分けられる。本体には、破碎刃に回転を与える油圧モータ、円盤型溝掘削刃、掘削する際刃に作用する諸力を測定する八角形リング、供試体を固定し円盤型溝掘削刃に送る供試体送りテーブルを備えている。切削刃の全体図を図—1に、実験装置の全体図を図—2に示す。

2-2 円盤型破碎刃

本研究のために円盤型溝掘削刃を製作した。用いる破碎刃は圧壊刃、剥離破碎刃1、剥離破碎刃2の3つの刃で構成されている。刃幅は圧壊刃が10mm、剥離刃が5mm、刃物角が $\pi/3$ radである。また回転半径に5mmずつ差をつけている。また、破碎刃自体は純粋回転しておりトルクが発生しない。

2-3 モータ

本実験に使用した油圧モータは円盤型溝掘削刃に回転を与えて駆動回転させることによって溝掘削実験を行うことを目的としている。回転数は140rpm、回転トルクは140Nmである。

2-4 八角形リング

掘削時に切削部本体に作用する主分力 F_x 、背分力 F_z を測定するため八角環のダイナモメータを作製し、切削ドラムの軸受け部分に装着した。

2-5 供試体送りテーブル

本実験装置では、円盤型溝掘削刃をモータで回転させ、そこへ供試体送りテーブルに載せた岩石供試体を送り込むことによって、溝掘削を再現している。供試体は4つのスクリュージャッキで固定する。動力はテーブル送りモータであり、出力は2.2kwである。この送りモータの回転数は1,710rpmであり、減速比が6:1の減速機を通して回転させている。テーブル送り

表—1 供試体の物理特性

岩石名	大谷石	モルタル A	モルタル B	モルタル C	モルタル D
見かけ比重 G	1.63±0.017	2.006±0.020	2.030±0.014	2.059±0.033	2.062±0.005
自然含水比 $w(\%)$	3.70±0.145	—	—	—	—
吸水率 $W(\%)$	17.5±0.314	—	—	—	—
一軸圧縮強度 $S_c(\text{MPa})$	10.3±1.720	3.82±0.20	9.62±0.59	17.56±1.07	23.37±1.35
圧裂引張強度 $S_t(\text{MPa})$	1.46±0.221	—	—	—	—
せん断強度 $S_s(\text{MPa})$	2.56	—	—	—	—
ショア硬さ H_s	23.4±6.860	—	—	—	—
破壊靱性 $K_{cb}(\text{MN/m}^{1.5})$	0.166	—	—	—	—
セメント水比 $C/W(\%)$	—	80.4	115.4	147.7	185.5

速度は 0.21 m/min で、その速度を掘削速度とする。

2-6 供試体

実験には岩石として、合分比が軽石岩片 54%、石英結晶片 7%、斜長石結晶片 5%、マトリックス 34%である栃木県産の流紋岩質軽石凝灰岩（大谷石）と、4 種類の異なる強度のセメントモルタル供試体；モルタル A、モルタル B、モルタル C、モルタル D を作製し、擬似岩石として用いた。1 パッチ当たりの細骨材、セメント、水を用意し、供試体を製作した。細骨材には、気乾燥状態にした海砂を用いた。この海砂に早強ポルトランドセメントと水を加え、均一な強度を得るためによく混合攪拌させた。これを型枠に流し込み、供試体が仕上がったときに傾きがないようにするため、打設後に表面を平滑にした。そして、水平な床の上で 3 日間湿潤養生させた。型枠は塩化ビニール板と鋼材で作製した直方体の型枠内に作製し、モルタル供試体の寸法は、25×25×25cm とした。供試体の物理特性を表— 1 に示す。

2-7 実験方法

2-3 節で説明した実験装置を用い、2-4 節で述べた大谷石と異なる強度の 4 種類のセメントモルタル供試体に対して、切削深さ $Z=5, 10, 15\text{mm}$ と変化させて計 17 通りの溝掘削実験を行う。なおすべての実験において切削ドラムの回転数は 140rpm とした。また、切削速度は 0.21m/min の一定とした。

本実験における測定項目である、円盤型溝掘削刃に作用する切削抵抗の水平成分である主分力 F_x と鉛直成分である背分力 F_z を、破碎刃が供試体を切削開始する直前から記録を始め、すべての刃が定常的な切削状態になってから 10 秒経過後実験を終了するとともに測定を終了した。

3. 実験結果と考察

3-1 概説

ここでは、端面掘削を行う剥離破碎刃がどの程度有効であるかを解明するために前述した実験装置等を用いて、大谷石と 4 種類のセメントモルタル供試体に対する溝掘削実験を行い、その結果について述べる。

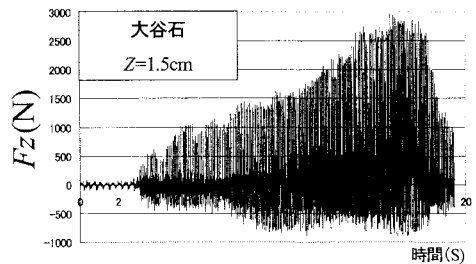
測定結果から端面掘削の有効性を考察していく。圧壊刃と剥離破壊刃に分けて、それぞれに働く主分力 F_x 、背分力 F_z 、およびトルク T の関係を供試体別に示し、それらを比較することによって溝掘削特性を解明していきたい。

また掘削土量 V_E および掘削に必要な掘削動力 P を実験で得られた主分力 F_x 、背分力 F_z より算出し、比エネルギー E_S を求める。

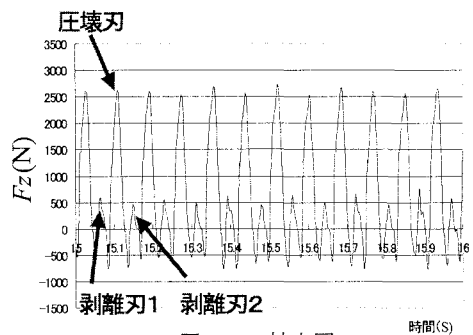
3-2 実験結果

実験により得られた大谷石による深さ $Z=1.5\text{cm}$ の時の背分力 F_z の経時変化の生データを図— 3 に、その拡大図を図— 4 に示す。図— 4 から分かるように圧壊刃および剥離刃 1, 2 の背分力がはっきり表れていることが分かる。

また、円盤型溝掘削刃が回転し、切削刃が順次変化



図— 3 背分力 F_z の経時変化



図— 4 拡大図

していくため、常に切削刃が当たっていないことから、短周期の波形になり、なおかつ主分力 F_x と背分力 F_z とが 0 にまでもどる激しい波形になっている。またどの実験条件においても背分力 F_z が主分力 F_x よりも大きい値を示している。切削トルク T (Nm) は次式より算定した。

$$T = (F_z \sin \theta - F_x \cos \theta) \times r \quad (1)$$

T : 切削トルク (Nm)

F_x : 主分力 (kN)

F_z : 背分力 (kN)

θ : 切削刃の作用角 (rad)

r : 作用半径 (cm)

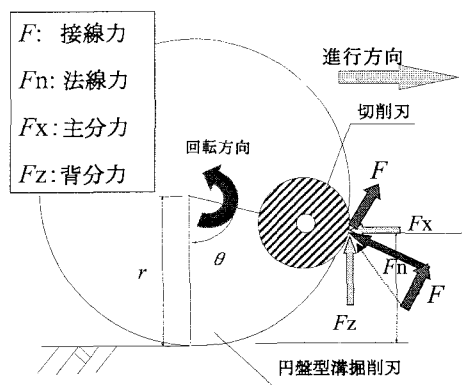


図-5 溝掘削機緒力

3-3 圧壊刃と剥離刃 1、2 の比較

測定した主分力 F_x と背分力 F_z においては、すべての切削刃が定常掘削状態になってからの掘削時間を 10 分割したブロック毎の最大値を抜き出し、平均したものを主分力 F_{xSM} (kN)、背分力 F_{zSM} (kN)、トルク T_{SM} (Nm) と定義した。これにより圧壊刃だけに働く F_x 、 F_z 、 T を求めることができる。

剥離刃に働く F_x 、 F_z 、 T の最大値を抜き出し、平均したものを主分力 F_{xEM} (kN)、背分力 F_{zEM} (kN)、 T_{EM} (Nm) と定義した。これにより剥離刃 1、2 だけに働く F_x 、 F_z 、 T を求めることができる。切削深さ $Z=5$ mm 時の F_x 、 F_z 、 T と圧縮強度 Sc の関係を図 6~8 に示す。この図で圧壊刃より剥離刃 1、2 のほうが少ない力で掘削していることが分かる。また、供試体の強度が大きくなると主分力 F_x 、背分力 F_z およびトルク T も増加する。

3-4 掘削土量

本実験において発生したズリを算出した。掘削によって発生するズリを時間当たりで表したものを掘削土量 V_E (cm³/s) とし、次式で算出した。

$$V_E = B/t \quad (2)$$

$$B = [(vt \cdot r \sin \theta)(r \cdot r \cos \theta)$$

$$+ (\pi r^2 \cdot \theta/2 \pi - (1/2 \cdot r^2 \sin \theta \cos \theta)) \cdot b \quad (3)$$

V_E : 掘削土量 (cm³/s) B : 発生ズリ (cm³)

v : 切削速度 (cm/s) t : 切削時間 (s)

b : 掘削幅 (cm) r : 作用半径 (cm)

θ : 切削刃の作用角 (rad)

なお、実験条件において、切削深さ $Z=0.5, 1.0, 1.5$ cm としているため、 $Z=0.5$ cm のときは、圧壊刃しか作用せず、 $Z=1.0$ cm のときは圧壊刃と剥離破砕刃 1 が作用

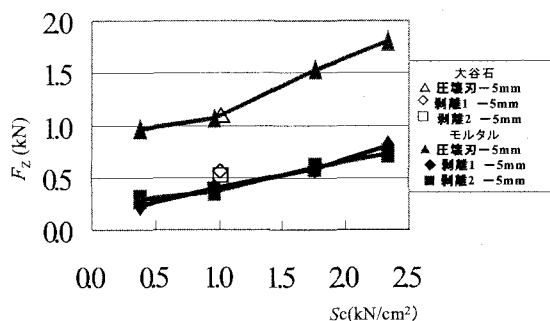


図-6 背分力 F_z と圧縮強度 Sc の関係

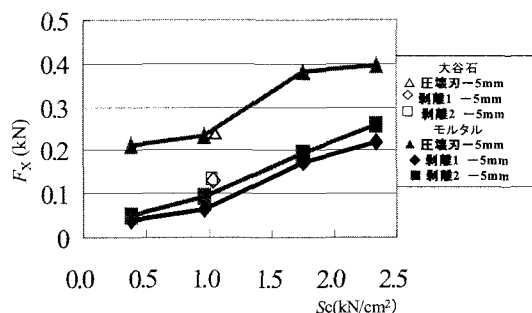


図-7 主分力 F_x と圧縮強度 Sc の関係

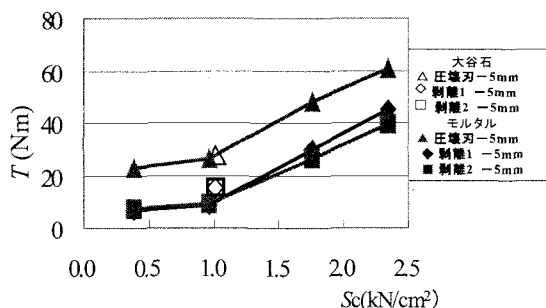


図-8 トルク T と圧縮強度 Sc の関係

するため、それぞれの刃によって算出される土量を合計している。 $Z=1.5\text{cm}$ のときも同様に、圧壊刃、剥離 1、剥離 2 の合計土量となっている。

また、圧壊刃に及ぼす主分力 $F_{xSM}(\text{kN})$ 、背分力 $F_{zSM}(\text{kN})$ およびトルク $T_{SM}(\text{Nm})$ 、剥離刃に及ぼす主分力 F_{xSM} 、背分力 F_{zSM} およびトルク T_{SM} について、切削深さ $Z(\text{cm})$ と岩石の一軸圧縮強度 $S_c(\text{kN/cm}^2)$ の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、次式に示す実験式を得た。 R は重相関係数である。 S_c の範囲は $0.382\sim 2.337(\text{kN/cm}^2)$ である。

$$F_{xSM}=0.556Z^{1.089}S_c^{0.623} \quad (R=0.948) \quad (4)$$

$$F_{zSM}=1.887Z^{0.396}S_c^{0.453} \quad (R=0.933) \quad (5)$$

$$T_{SM}=45.40Z^{0.872}S_c^{0.719} \quad (R=0.892) \quad (6)$$

$$F_{xEM}=0.558Z^{0.663}S_c^{0.786} \quad (R=0.833) \quad (7)$$

$$F_{zEM}=1.155Z^{1.025}S_c^{0.625} \quad (R=0.821) \quad (8)$$

$$T_{EM}=9.872Z^{0.878}S_c^{0.454} \quad (R=0.754) \quad (9)$$

3-5 掘削動力、比エネルギー

掘削に必要な動力を求めるため、実験によって得られた主分力 $F_x(\text{kN})$ 、背分力 $F_z(\text{kN})$ より切削刃の接線方向力 $F(\text{kN})$ を算出した。単位時間当たりの動力 P を次式として定義する。

$$P=2\pi r \times F \times 140/60 \quad (\text{kNcm/s}) \quad (10)$$

P : 掘削動力 (kNcm/s)

r : 切削ドラム半径 (cm)

F : 接線方向力(kN)

本実験で用いる切削ドラムの回転距離と 1 分間当たりの回転数は 140rpm と一定であるので、動力は接線方向力によって決定され、単位時間当たりの掘削動力として表す。

次に、掘削動力 P を上述の掘削土量 V_E で除することによって、単位体積を切削するのに必要な動力として表すことができ、これを比エネルギー E_S として次式のように定義する。また、図-9 に比エネルギー E_S と深さ Z の関係を示す。また、大谷石での圧壊刃と剥離刃の関係を図-10 に示す。

$$E_S=P/V_E \quad (\text{kNcm/cm}^3) \quad (11)$$

E_S : 比エネルギー (kNcm/cm³)

P : 掘削動力 (kNcm/s)

V_E : 掘削土量 (cm³/s)

比エネルギー E_S は溝掘削特性を評価する際、掘削効率にあたりこの E_S の値がより小さければ、単位体積を掘削するのに必要な動力が小さいということになり、より効率のよい掘削であると判断できる。掘削動力 $P(\text{kNcm/s})$ および比エネルギー $E_S(\text{kNcm/cm}^3)$ について、切削深さ $Z(\text{cm})$ と岩石の一軸圧縮強度 $S_c(\text{kN/cm}^2)$ の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、次式に示す実験式を得た。 R は重相関係数である。 S_c の範囲は $0.382\sim 2.337(\text{kN/cm}^2)$ である。

$$P=11.56Z^{0.707}S_c^{0.754} \quad (R=0.821) \quad (12)$$

$$E_S=25.69Z^{0.787}S_c^{1.025} \quad (R=0.845) \quad (13)$$

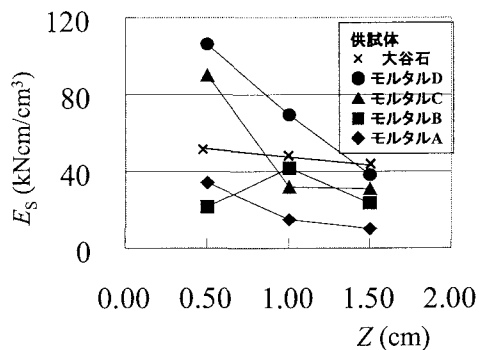


図-9 比エネルギー E_S と深さ Z の関係

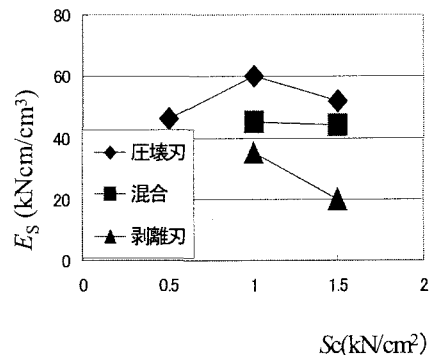


図-10 比エネルギー E_S での圧壊刃と剥離刃の関係

図-10 より、圧壊はのみの掘削時に比べ合体刃の方が比エネルギーが小さいことにより、より効率的に掘削していることが分かる。

4. 結論

溝掘削を行うことによって端面掘削をする剥離破碎刃がどの程度有効であるかを解明するために岩盤の溝掘削機を製作し、それを用いて様々な条件で実験を行い、円盤型溝掘削刃に作用する主分力、背分力、およびトルクとそれより算出する掘削動力、掘削土量、比エネルギーより溝掘削特性を明らかにした。

1) 圧壊刃と剥離刃では同じ土量を掘削する場合、剥離刃の方が約 1/3 の掘削力で掘削できることが分かった。

2) 圧壊刃に及ぼす主分力 F_{xSM} (kN)、背分力 F_{zSM} (kN)およびトルク T_{SM} (Nm)、剥離刃に及ぼす主分力 F_{xEM} 、背分力 F_{zEM} およびトルク T_{EM} について、切削深さ Z (cm)と岩石の一軸圧縮強度 S_c (kN/cm²)の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、次式に示す実験式を得た。

$$F_{xSM}=0.556Z^{1.089}S_c^{0.623} \quad (R=0.948)$$

$$F_{zSM}=1.887Z^{0.396}S_c^{0.453} \quad (R=0.933)$$

$$T_{SM}=45.40Z^{0.872}S_c^{0.719} \quad (R=0.892)$$

$$F_{xEM}=0.558Z^{0.663}S_c^{0.786} \quad (R=0.833)$$

$$F_{zEM}=1.155Z^{1.025}S_c^{0.625} \quad (R=0.821)$$

$$T_{EM}=9.872Z^{0.878}S_c^{0.454} \quad (R=0.754)$$

2) 掘削動力 P (kNm/s)および比エネルギー E_s (kNm/cm³)について、切削深さ Z (cm)と岩石の一軸圧縮強度 S_c (kN/cm²)の関係についてそれぞれ重回帰分析を行い、次式に示す実験式を得た。

$$P=11.56Z^{0.707}S_c^{0.754} \quad (R=0.821)$$

$$E_s=25.69Z^{-0.787}S_c^{1.025} \quad (R=0.845)$$

参考文献

- 1) 竹垣喜勝,古川忠彦,丸山健一：大型岩盤掘削機 3500SM サーフィスマイナーの低騒音・低振動岩盤切削工法, 建設機械,420,Vol.36,No2,pp.46-50,2000 年 2 月
- 2) 室達朗,土屋清,河野幸一,若林優輔：ディスクカッタビットによるモルタル端面の定常掘削特性に関する実験的考察,土木学会論文集 No.687/Ⅲ-56,pp.37-47,2001 年 9 月