

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

室達朗¹・土屋清²・河野幸一³・若林優輔⁴

¹フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²正会員 日立建機(株)地中建機事業部設計部 主任技師 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町650)

³愛媛大学工学部技術専門職員 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

⁴正会員 工修 日立建機(株)技師 (〒300-0013 茨城県土浦市神立町650)

本研究の目的は、2自由面をもつモルタル供試体の端面をディスクカッタビットを使用して一定の切削深さで定常掘削する場合の掘削特性、とくに比エネルギーについて実験的に明らかにすることである。ここでは、種々の切込み幅、切削深さにおいて3種類の刃先角度を有するカッタビットに作用する接線方向力、向心方向力および垂直方向力を計測するとともに掘削土量から比エネルギーを算定した。その結果、単位掘削土量当たりのディスクカッタの回転仕事量で表現される比エネルギーは、切削深さの増加とともに増加するが刃先角度 $\pi/4$ rad において最小値を示し、切込み幅の増加とともに減少することが判明した。

Key Words : disc cutter bit, edge, mortar, steady excavation, specific energy

1. はじめに

従来、トンネル掘進機として重用され多用されてきた T. B. M. は多くの実績を挙げてきたが、依然として掘削効率を一段と向上させるため単位掘削土量に対する掘削仕事量である比エネルギーを減少させるなどいくつかの改良すべき点があげられる。筆者らは、これまでにローラーカッタビットの摩耗寿命予測¹⁾、センターカッタビットの摩耗特性に及ぼすビット斜角の影響²⁾、およびセンターカッタの定常掘削特性として比エネルギーで表現される掘削能力とビット斜角³⁾の関係について研究を行ってきた。ここでは、さらに掘削時の比エネルギーを減少させ、定常掘削に必要な力の減少とカッタビットの摩耗を少なくするための方策として、従来の1自由面である平面掘削ではなく2自由面をもつ岩盤を構成する岩石の端面をディスクカッタビットを使用して一定の切削深さで定常掘削する場合の掘削特性について実験的に明らかにすることを目的としている。その対象とする掘削工法は、従来の円形断面に捕らわれず任意の断面の掘削を可能とすべく、図-1にその概略図を示すように、トンネル中央部分を先にセンタコアビットで穿孔し、その内空部分に数個のディスクカッタビットを挿入して形成された岩石端部を油圧ピストンを用いて外側に向かって切り広げることにより任意の断面をコンピュータ制御により掘削

することができる新しい掘削工法である。実験に当たっては、軟岩の擬似岩石として一軸圧縮強度約 20 MPa のセメントモルタルを作成し、回転式モルタル端面定常掘削試験機を使用して種々の切込み幅、切削深さにおいて、3種類の刃先角度を有するカッタビットに作用する接線方向力、向心方向力および垂直方向力を計測するとともに、掘削土量を測定した。その後、各切削深さおよび刃先角度に対する掘削時の比エネルギーとして、単位掘削土量に対するディスクカッタの回転掘削動力の比率を算定した。さらに、従来の平面掘削時の掘削力および掘削土量より算定される比エネルギーと比較して、今回の端面掘削による比エネルギーが如何に小さく効率よく岩石を掘削できるかについて、実験によって詳しく考察し、明らかにしていく。

2. 実験装置と方法

(1) 回転式モルタル定常掘削試験機

図-2にモルタルの平面および端面をディスクカッタで定常掘削することのできる回転式掘削試験機の概要を示す。実験装置の大きさは、高さ 155 cm、幅 70 cm、奥行 70 cm である。下部に設置した 3相 200 V、1.5 kW の電動モータ付き減速機よりチェーン、スプロケットおよび 1/10 減速機を介して、直

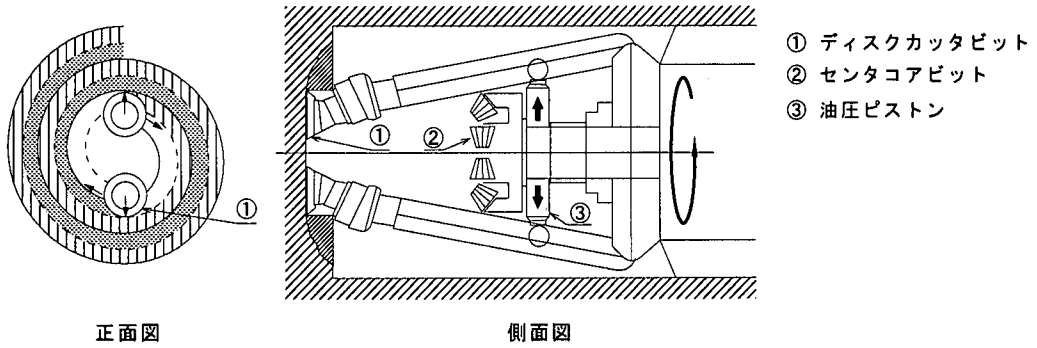


図-1 多断面掘削機概略図

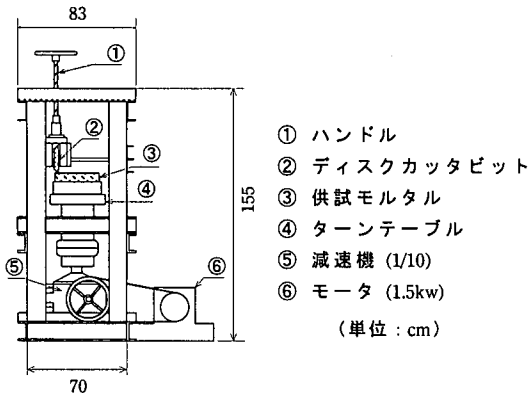


図-2 回転掘削試験機

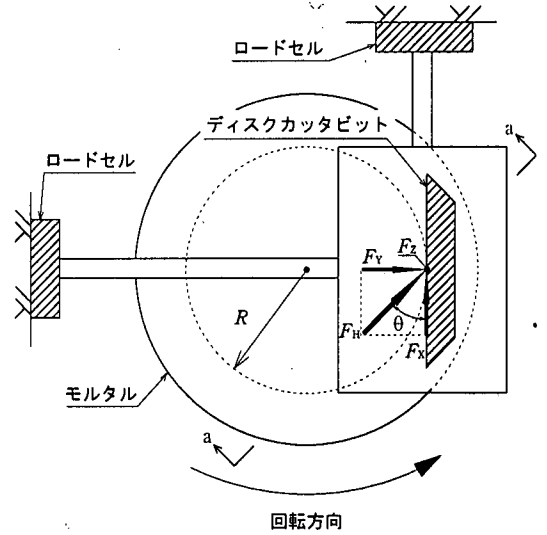


図-3 (a) 回転掘削試験機 (平面図)

径 40 cm, 厚さ 6.5 cm のターンテーブルに回転速度 0.411 r.p.m., 最大トルク 31.9 kNm を出力させることができる。このテーブル上に実施工時と形状は異なるが大きさ約 1/3 の大きさである高さ 9.5 cm, 直径 22 ~ 26 cm の円盤型のモルタル供試体を設置し, 所定の周速度でディスクカッターを回転させることができる。まず, 平面および端面掘削する場合, ディスクカッターをそれぞれ供試体の端部より 5.0 cm 離れた位置および所定の切込み幅にセットし, 試験機上部に設置したハンドルを回転させ台形ねじロッドを通してディスクカッタービットを供試体の所定の切削深さにまで貫入させる。その後, ターンテーブルを回転させてモルタル平面および端面での定常掘削試験を実施することができる。

図-3 (a) は, 掘削部の概略図および作用力とその方向を示したものである。カッタービットに作用する掘削力として, 接線方向力 F_x と向心方向力 F_y はそれぞれ最大容量 19.6 kN のロードセルによって計測し, 垂直方向力 F_z は最大容量 196 kN のロードセルによって計測することができる。 F_x と F_y の合力を水平方向分力 F_H とし, その作用方向を水平角 θ とする。なお, F_x, F_y, F_z, F_H と θ については,

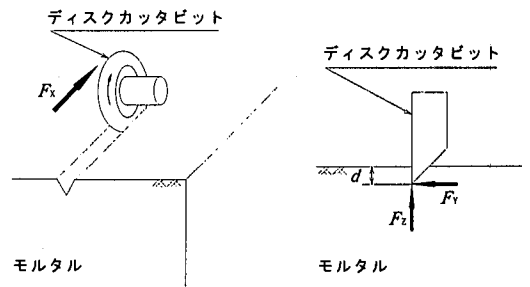


図-3 (b) 平面掘削のメカニズム

図中に示した矢印の方向を正とする。同図 (b) は, 平面掘削において切削深さを d とした場合の掘削力 F_x, F_y および F_z の作用方向を示したものである。同図 (c) は, 端面掘削時の掘削力 F_x, F_y, F_z の 3 分力とそれぞれの作用方向, および斜線部にモルタルの破壊状況を示したものであり, 切込み幅を S , 切削深さを d としている。

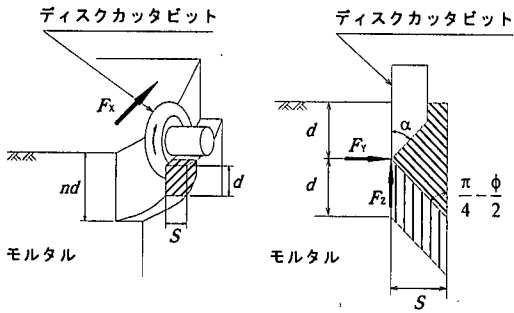


図-3(c) 端面掘削のメカニズム

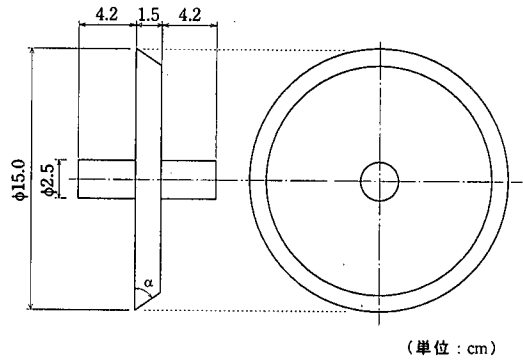


図-4 ディスクカッタービット

(単位: cm)

(2) ディスクカッタービット

図-4は、本実験用に新しく製作したディスクカッタービットの形状寸法を示したものである。実機の1/3を想定した直径15cm、厚さ1.5cm、および刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$ radのカッタービットであり、材質は耐摩耗性を向上させるためS45Cで製作されている。本回転式モルタル定常掘削試験機においては、モルタルの掘削面盤に対するディスクカッターの取付角度であるビット斜角³⁾は0 radとし、平面掘削においては、切削深さ $d = 0.4$ cm、刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$ radの計3通り、端面掘削においては、切削深さ $d = 0.4 \sim 1.2$ cmの4通り、切込み幅 $S = 1.0 \sim 3.0$ cmの5通り、刃物角3通りの各組み合わせにおいて、それぞれ初期掘削と2回目以降の掘削を行い、計120通りについて実験を行った。なお、全ての実験においてモルタル供試体に対するビットの摩耗は殆ど観察されなかった。

(3) モルタル供試体

実験の再現性を確認するため、数多くのデータを収集することが必要である。そのため短時間で強度発現可能な早強ポルトランドセメントを使用することとし、擬似軟岩供試体として3日養生後の一軸圧縮強度20 MPaのセメントモルタル供試体を作成した。そのために、予備実験として、早強ポルトランドセメントと粒径74 μm から2.0 mmの気乾燥した海砂を細骨材とし、3日養生後のモルタルの一軸圧縮強度 S_c (MPa)とセメント水比 C/W (%)の関係について明らかにし、次式を得た。

$$\frac{C}{W} = 54.04 S_c^{0.405} \quad (r = 0.933) \quad (1)$$

ここに、 r は相関係数である。上式より、セメント水比 C/W を187%とし、モルタルの配合設計は、単位水量を 3.43 kN/m^3 (351 kgf/m^3)、単位セメント量

を 6.43 kN/m^3 (656 kgf/m^3)、単位細骨材量を 10.76 kN/m^3 (1098 kgf/m^3)とした。強制練りパッチミキサを用いて混合攪拌し得られたセメントモルタルを高さ9.5 cm、直径22, 23, 24, 25および26 cmの計5種類の鋼製円筒容器に打設し、平均気温18 $^{\circ}\text{C}$ の室内で3日間(72時間)湿潤養生させ、養生完了後1時間以内に定常掘削試験を行った。養生後の一軸圧縮強度は $20.5 \pm 0.8 \text{ MPa}$ 、圧裂引張強度は $2.6 \pm 0.3 \text{ MPa}$ であった。

3. 実験結果

(1) 端面定常掘削力と切込み幅

端面掘削においては、切削深さ $d = 0.4, 0.6, 0.9, 1.2$ cmの4通り、切込み幅 $S = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ cmの5通り、刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$ radの計3通りの各組み合わせにおいて、それぞれ初期掘削実験と2回転目以降の連続掘削実験を行った。なお、3回転目以降は2回転目とほぼ同様であると仮定して省略した。その根拠は、2回転目以降は、図-3(c)に示したように、ディスクカッターが軌道を一周する間の切削深さである単位貫入量当たりの掘削断面積および3次元方向の掘削体積が一定となるために掘削抵抗は定常状態となるからである。このことは、平面掘削の場合において、ある単位貫入量に対する回転数の増加とともに切削深さは増加し、それとともに放物線的に増加する掘削断面積のために掘削抵抗は上昇し、セメントモルタルは進行性破壊をともなう先行する軌道との間隔部分で破壊した後定常状態になることと対比することができる。

この場合、カッタービットの円軌道半径 R は10 cm、ターンテーブルの回転速度 N は1.75 r.p.m.、回転速度 V は、1.83 cm/sである。それぞれの定常掘削実験において、少なくとも3個以上のモルタル供試体

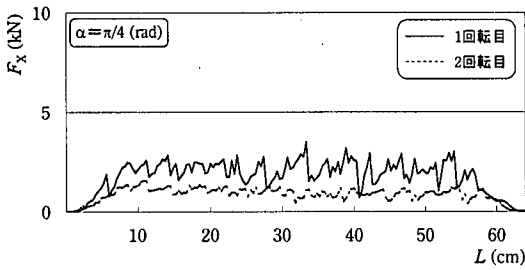


図-5 (a) 接線方向力 F_x と掘削長 L の関係
($S = 2.5 \text{ cm}$, $d = 1.2 \text{ cm}$)

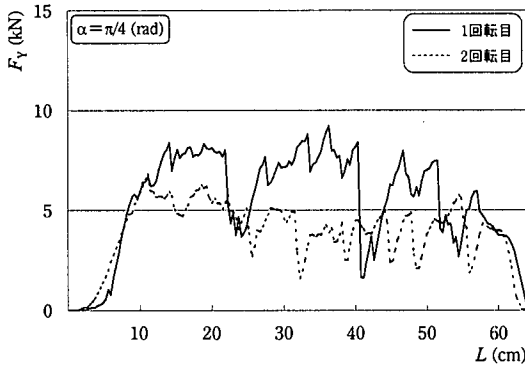


図-5 (b) 向心方向力 F_y と掘削長 L の関係
($S = 2.5 \text{ cm}$, $d = 1.2 \text{ cm}$)

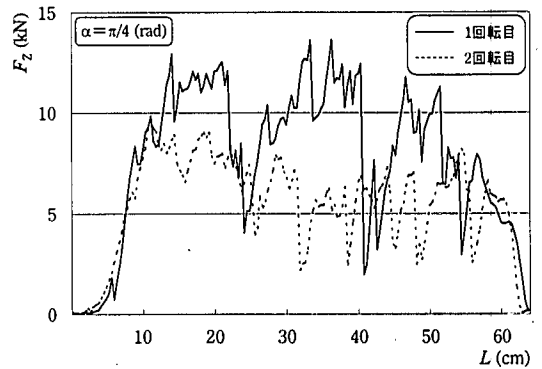


図-5 (c) 鉛直方向力 F_z と掘削長 L の関係
($S = 2.5 \text{ cm}$, $d = 1.2 \text{ cm}$)

について実験を行って定常掘削力 F_x , F_y , F_z を計測した。

図-5 (a) (b) (c) は、一例として、刃物角 $\alpha = \pi/4$ rad, 切込み幅 $S = 2.5 \text{ cm}$, 切削深さ $d = 1.2 \text{ cm}$ における1回転目の初期掘削および $d = 2.4 \text{ cm}$ において同一軌跡を2回転目に掘削する連続掘削の場合について、それぞれの接線方向力 F_x , 向心方向力 F_y および垂直方向力 F_z とカッタビットの転動距離 L の関係を示したものである。なお、データの再現性については、それぞれのピーク値の平均値において、初期掘削時約10%程度のばらつきが認められたが、連続掘削時にはそのばらつきの程度は拡大し約15%となっていた。初期掘削時には、同図(a)より明らかに、ディスクカッタの進行方向に作用する接線方向力 F_x はモルタルの端部破壊に伴って周期的に変動する波状分布を示している。供試体の破壊はこの波状分布の各極大値において発生しているので、モルタルの破壊に必要な F_x は掘削が安定域に達した波状分布の各極大値の平均値として算定した。この F_x の値はディスクカッタの回転動力を算定する際に重要である。同図(b)に示すように、ディスクカッタのすくい面に作用する向心方向力 F_y は接線方向力 F_x の約3倍の大きさを示し、同様に周期的に変動する大きな波状分布を示してい

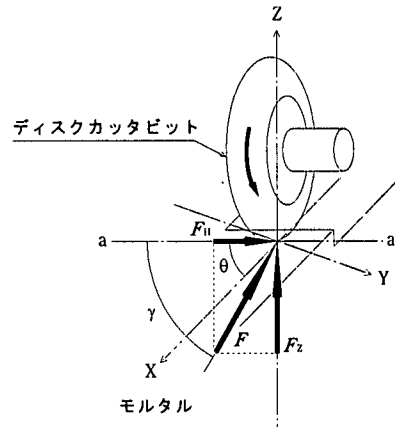


図-6 合成掘削力 F と合成角 γ

る。この場合、ディスクカッタが円軌道を1周する間に、供試体の端部は3ヶ所において大きく破壊されていた。また、同図(c)に示すように、ディスクカッタの推力となる掘削面盤に対する垂直方向力 F_z は接線方向力 F_x の4倍以上の大きさを示し、同様に周期的に変動する大きな波状分布を示している。この場合も、向心方向力と同様に、ディスクカッタが円軌道を1周する間に、供試体の端部が3ヶ所大きく破壊されていた様子を示している。この F_z の値はディスクカッタの推進動力を算定するのに必要である。

なお、2回転目の連続掘削時には、初期掘削時と比較して、一般に、 F_x , F_y , F_z とも減少し、約6割の大きさとなっている。また、初期掘削と比較して数倍の凹凸を有する波形分布から推察すると供試体の端部は比較的細かく破碎されている様子が伺える。

図-6は、前図-3 (a)における a-a 断面に作用する端面定常掘削力 F_x , F_y , F_z について、それぞれ次式で算定される合成掘削力 F , その水平方向

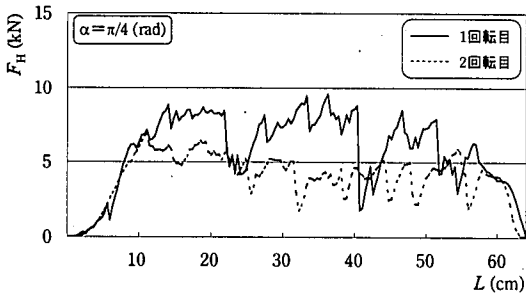


図-7 水平合力 F_H と掘削長 L の関係
($S = 2.5$ cm, $d = 1.2$ cm)

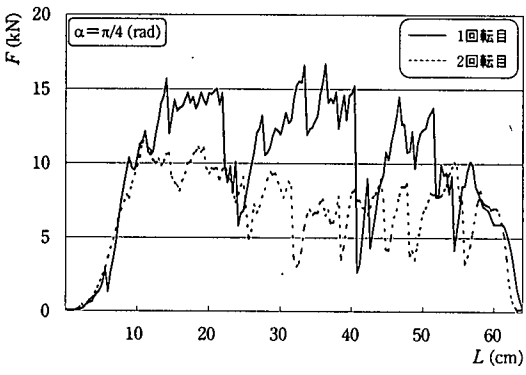


図-8 合成掘削力 F と掘削長 L の関係
($S = 2.5$ cm, $d = 1.2$ cm)

分力 F_H , および F_x と F_H のなす水平角 θ , F と F_H のなす合成角 γ を示したものである。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2)$$

$$F_H = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \quad (4)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{F_z}{F_H} \right) \quad (5)$$

図-7は、前図-5に対応する合成掘削力の水平方向分力 F_H とカットピットの転動距離 L の関係を初期掘削時の1回転目掘削およびそれにつづく2回転目掘削に対して示したものである。なお、この場合の水平角 θ は、1回転目掘削において $\theta = 1.25 \pm 0.12$ rad, 2回転目掘削において $\theta = 1.34 \pm 0.08$ rad と算定された。図より明らかに、モルタルの破壊時における水平方向分力は、1回転目掘削において $F_H = 8.02 \pm 0.64$ kN であり、2回転目掘削において $F_H = 4.22 \pm 1.39$ kN と約半分の大きさを示している。

図-8は、同様に、合成掘削力 F とカットピッ

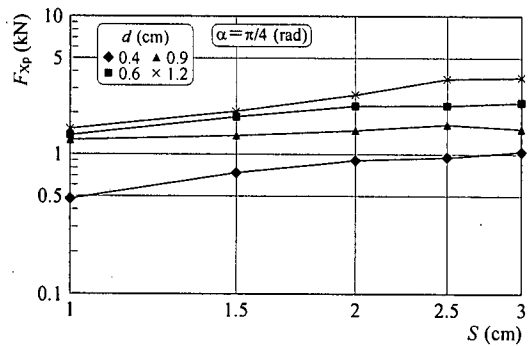


図-9 (a) 接線方向力 F_{xp} と切込み幅 S の関係
(1回転目掘削時)

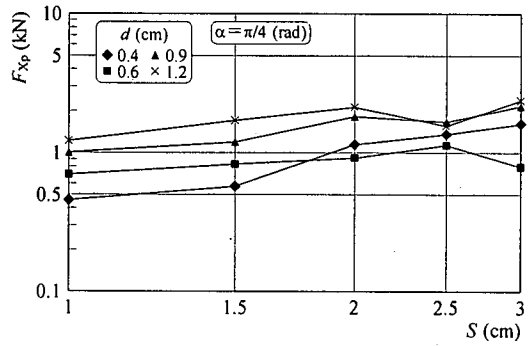


図-9 (b) 接線方向力 F_{xp} と切込み幅 S の関係
(2回転目掘削時)

トの転動距離 L の関係を初期掘削時の1回転目掘削およびそれにつづく2回転目掘削に対して示したものである。なお、この場合の合成角 γ は、1回転目掘削において $\gamma = 0.92 \pm 0.11$ rad, 2回転目掘削において $\gamma = 0.91 \pm 0.17$ rad と算定された。図より明らかに、モルタルの破壊時における合成掘削力 F_p は、1回転目掘削において $F_p = 13.70 \pm 1.36$ kN であり、2回転目掘削において $F_p = 8.76 \pm 1.34$ kN と約6割の大きさを示している。

次に、端面定常掘削力のピーク値の平均値である最大値 F_{xp} , F_{yp} , F_{zp} と切込み幅 S の関係について、一例として、刃物角 $\alpha = \pi/4$ rad に対する実測例を以下に示す。

図-9(a)(b)は、切削深さ $d = 0.4, 0.6, 0.9, 1.2$ cm の4通りにおける最大接線方向力 F_{xp} と切込み幅 S の関係について示したものである。同図(a)に示すように、初期掘削時の1回転目掘削時には、最大接線方向力は切削深さの増加に伴って増加する傾向にあり、また、切込み幅については2.5 cm 付近にピークが認められる。これは、切削深さの増加とともにディスクカッタのころがり抵抗が増加すること、および切込み幅の増加とともに供試体の破断

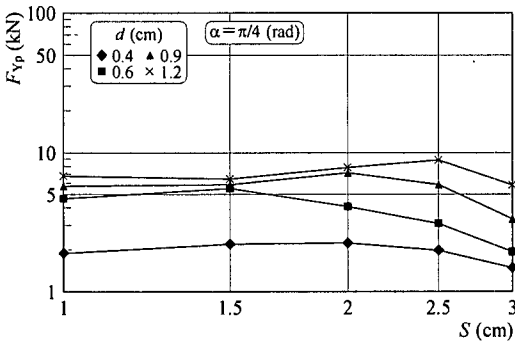


図-10(a) 向心方向力 F_{Vp} と切込み幅 S の関係 (1回転目掘削時)

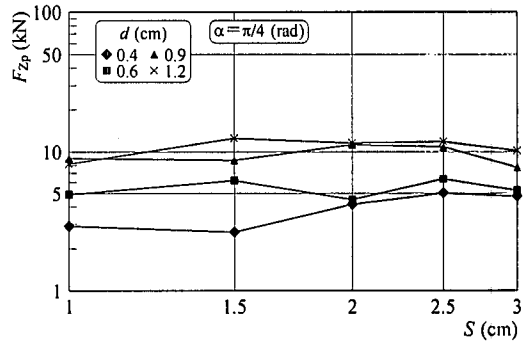


図-11(a) 垂直方向力 F_{Zp} と切込み幅 S の関係 (1回転目掘削時)

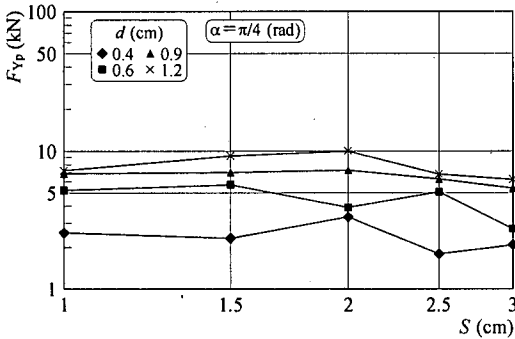


図-10(b) 向心方向力 F_{Vp} と切込み幅 S の関係 (2回転目掘削時)

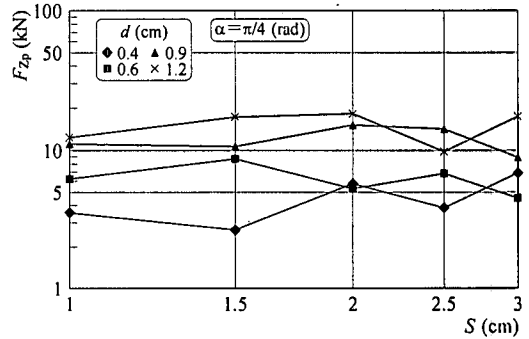


図-11(b) 垂直方向力 F_{Zp} と切込み幅 S の関係 (2回転目掘削時)

面積が拡大するためである。同図(b)に示すように、2回転目掘削時においては、最大接線方向力は切削深さの増加とともに増加する傾向があるが切込み幅については明白な傾向が認められない。 $S = 2.5, 3.0$ cmにおいて F_{xp} が低下しているのは、1回転目掘削時に端部の破断面積が大きくなったためであると考えられる。このように、2回転目以降の掘削においては先行する掘削履歴の影響を受けるために安定した傾向を示していない。

図-10(a)(b)は、最大向心方向力 F_{Vp} と切込み幅 S の関係を切削深さ $d = 0.4, 0.6, 0.9, 1.2$ cmの4通りについて示したものである。同図(a)より明らかに、1回転目掘削時においては、 F_{Vp} は切削深さの増加に伴って増加する傾向にあるが、切込み幅については有意な相関性は見られない。この場合、 $d = 1.2$ cmにおいては $S = 2.0 \sim 3.0$ cmなる位置で大きくなっている。同図(b)より明らかに、2回転目掘削時においても、向心方向力は切削深さの増加に伴って増加する傾向にあるが、切込み幅による影響は少ない。

図-11(a)(b)は、最大垂直方向力 F_{Zp} と切込み幅 S の関係を切削深さ $d = 0.4, 0.6, 0.9, 1.2$ cmの4

通りについて示したものである。同図(a)より明らかに、1回転目掘削時においては、 F_{Zp} は切削深さの増加に伴って増加する傾向にあるが、切込み幅については実測値にばらつきが多く有意な相関性は見られない。2回転目掘削時においても、同図(b)より明らかに、垂直方向力は一般に切削深さの増加に伴って増加する傾向にあるが、切込み幅については多少ばらついており、 $S = 2.5$ cmにおいて最小値を示す場合もあり先行する掘削痕の影響を強く受けている。

なお、刃物角 α が端面定常掘削力 F_x, F_y, F_z に与える影響については別途実験を行っており、 α が大きくなると、X方向の切削断面積が大きくなるために接線方向力 F_x は増加する傾向があり、すくい角 $\pi/2 - \alpha$ radの減少に伴って向心方向力 F_y および垂直方向力 F_z は増加する傾向にあった。

以上の実測例とともに他の刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/3$ radに対して得られた実測データを基に、最大端面定常掘削力 F_{xp} (kN), F_{Vp} (kN), F_{Zp} (kN)の大きさを支配する切込み幅 S (cm), 切削深さ d (cm), および刃物角 α (rad) の関係について重回帰分析を行った結果、次式に示す実験式を得た。

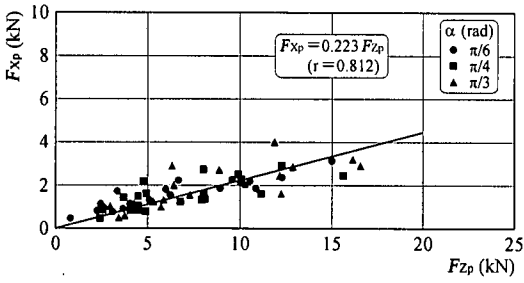


図-12(a) 種々の刃物角 α に対する接線方向力 F_{Xp} と垂直方向力 F_{Zp} の関係 (1回転目掘削時)

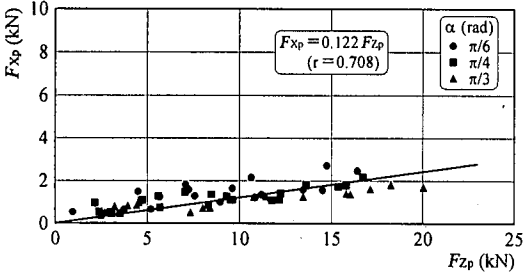


図-12(b) 種々の刃物角 α に対する接線方向力 F_{Xp} と垂直方向力 F_{Zp} の関係 (2回転目掘削時)

1 回転目掘削時 :

$$F_{Xp} = 1.719 S^{0.594} d^{0.953} (\sin\alpha)^{0.474} \quad (R = 0.943) \quad (6)$$

$$F_{Yp} = 8.277 S^{-0.161} d^{1.095} (\sin\alpha)^{0.597} \quad (R = 0.893) \quad (7)$$

$$F_{Zp} = 10.09 S^{0.171} d^{1.161} (\sin\alpha)^{0.462} \quad (R = 0.855) \quad (8)$$

2 回転目掘削時 :

$$F_{Xp} = 0.953 S^{0.358} d^{0.769} (\sin\alpha)^{-0.477} \quad (R = 0.816) \quad (9)$$

$$F_{Yp} = 7.904 S^{-0.138} d^{0.992} (\sin\alpha)^{0.191} \quad (R = 0.900) \quad (10)$$

$$F_{Zp} = 12.61 S^{0.081} d^{1.262} (\sin\alpha)^{0.288} \quad (R = 0.894) \quad (11)$$

ここに, R は重相関係数である. なお, 上述の実験式(6)~(11)は, 本実験で採用したカッタビットの円軌道半径 $R = 10$ cm とディスクカッタの直径 15 cm の範囲においてのみ成立する. 今後はこれらの因子をも説明変数として加えていくことが実機の設計には是非必要なことである.

図-12(a)(b) は, 3 種類の刃物角 α を媒介変数として最大接線方向力 F_{Xp} と最大垂直方向力 F_{Zp} の関係について, 初期掘削時と 2 回転目掘削に分けて図示したものである. 図より明らかに, それぞれの

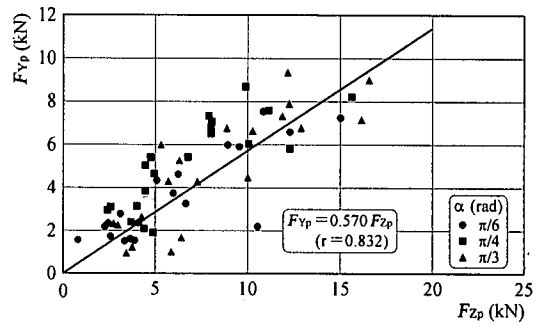


図-13(a) 種々の刃物角 α に対する向心方向力 F_{Yp} と垂直方向力 F_{Zp} の関係 (1回転目掘削時)

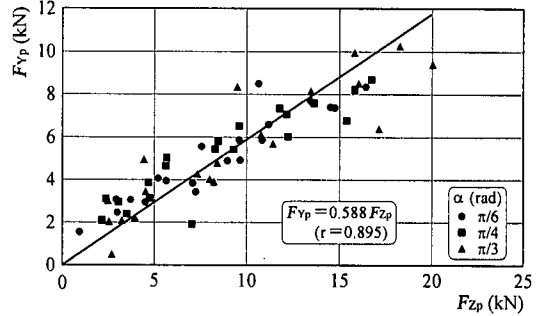


図-13(b) 種々の刃物角 α に対する向心方向力 F_{Yp} と垂直方向力 F_{Zp} の関係 (2回転目掘削時)

すべてのデータについて直線回帰することが可能であり, 次式を得た.

1 回転目掘削時 :

$$F_{Xp} = 0.223 F_{Zp} \quad (r = 0.812) \quad (12)$$

2 回転目掘削時 :

$$F_{Xp} = 0.122 F_{Zp} \quad (r = 0.708) \quad (13)$$

ここに, r は相関係数である.

図-13(a)(b) は, 同様に 3 種類の刃物角 α を媒介変数として最大向心方向力 F_{Yp} と最大垂直方向力 F_{Zp} の関係を, 初期掘削時と 2 回転目掘削に分けて図示したものである. この場合も, それぞれのすべてのデータについて直線回帰することが可能であり, 次式を得た.

1 回転目掘削時 :

$$F_{Yp} = 0.570 F_{Zp} \quad (r = 0.838) \quad (14)$$

2 回転目掘削時 :

$$F_{Yp} = 0.588 F_{Zp} \quad (r = 0.895) \quad (15)$$

以上の実験結果より, 1 回転目掘削時の初期掘削における最大接線方向力 F_{Xp} , 最大向心方向力 F_{Yp}

および最大垂直方向力 F_{z0} はすべて 2 回転目以降の連続掘削時の定常掘削力と比較して常に大きな値を示すことは明らかとなった。従って、実施工における実機的设计製作において、回転および推進動力の算定に当たっては、初期掘削時の F_{xp} および F_{z0} について寸法効果を十分に配慮して使用すべきである。

(2) 掘削土量と切込み幅

ディスクカッタによるモルタル供試体の端面掘削によって発生する掘削ずりを定量化するために、ディスクカッタがターンテーブル上のモルタル供試体を 1 周する間に産出されたずりを刷毛で回収しその重量 W (gf) を計測した。掘削体積は、重量 W をモルタル供試体の単位体積重量 $\rho = 2.02 \text{ gf/cm}^3$ で除して算出することができる。カッタが 1 周する間の時間は、周長 $L = 2\pi R$ (cm) を回転速度 V (cm/s) で除して求めることができる。従って、単位時間当たりの掘削土量 V_E (cm^3/s) は、カッタが 1 周する間の掘削体積をその時間で除すことにより、次式によって算定することができる。

$$V_E = \frac{WV}{\rho L} \quad (16)$$

図-14 は、掘削土量 V_E と切込み幅 S の関係について、一例として、刃物角 $\alpha = \pi/4$ rad に対する実測例として切削深さ $d = 0.4, 0.6, 0.9, 1.2$ cm の 4 通りについて示したものである。同図より明らかに、1 回転目掘削時においては、実測値にかなりのばらつきがあるが、掘削土量は切削深さの増加に伴って増加する傾向にあり、また、切込み幅の増加と共に放物線的に増加している。2 回転目掘削時においても、掘削土量は先行する初期掘削のために大きくばらついており、切削深さの増加に伴って増加するという一般的な傾向は見られないが、切込み幅の増加とともに急増していた。

以上の実測例とともに他の刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/3$ rad に対して得られた実測データを基に、掘削土量 V_E (cm^3/s) の大きさを支配する切込み幅 S (cm)、切削深さ d (cm)、および刃物角 α (rad) の関係について重回帰分析を行った結果、次式に示す実験式を得た。

初期掘削時：

$$V_E = 2.819 S^{2.223} d^{0.707} (\sin\alpha)^{0.345} \quad (R = 0.858) \quad (17)$$

以上の実験結果より、掘削土量を増加させるため

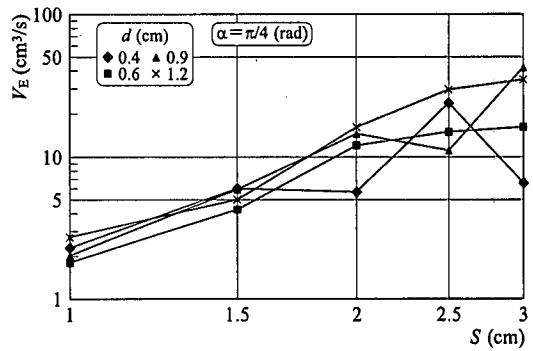


図-14 掘削土量 V_E と切込み幅 S の関係 (初期掘削時)

には、切込み深さを増加させるよりは切込み幅を大きくした方が効果的であることが判明した。

4. 考察

(1) 比エネルギーと切込み幅、切削深さ、刃物角

ディスクカッタによる岩石の掘削動力を大別すると、回転動力 P_R と推進動力 P_T に分類される。単位時間当たりの回転動力 P_R (kNcm/s) は次式に示すように、円軌道半径 R (cm) の軌道を回転数 N (r.p.m.) でディスクカッタを回転させるときの回転距離 $2\pi RN$ (cm) と回転方向に作用する接線方向力 F_x (kN) との積で算定される。単位時間当たりの推進動力 P_T は、掘削面盤の回転数 N (r.p.m.) に対する 1 周当たりの切削深さ d (cm) と推進方向に作用する垂直方向力 F_z (kN) との積で表現される。

$$P_R = \frac{2\pi RN F_x}{60} \quad (18)$$

$$P_T = \frac{F_z d N}{60} \quad (19)$$

実際には $P_R \gg P_T$ となるので、単位掘削土量当たりの回転仕事量を比エネルギー E_S (kNcm/cm^3)⁴⁾ と定義しており、次式に示すように、回転動力 P_R を掘削土量 V_E で除して算定することができる。

$$E_S = \frac{P_R}{V_E} = \frac{\rho F_x L}{W} \quad (20)$$

図-15(a) (b) (c) は、初期掘削時の 1 回転目掘削時における、3 種類の刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$ rad に対する比エネルギー E_S (kNcm/cm^3) と切込み幅 S

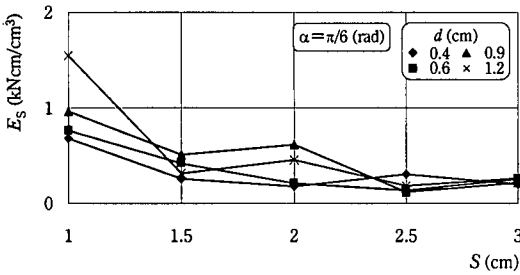


図-15(a) 刃物角 $\alpha = \pi/6$ rad における比エネルギー E_s と切込み幅 S の関係 (初期掘削時)

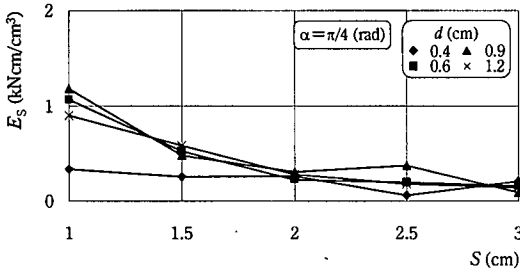


図-15(b) 刃物角 $\alpha = \pi/4$ rad における比エネルギー E_s と切込み幅 S の関係 (初期掘削時)

(cm) の関係を、それぞれ切削深さ $d = 0.4, 0.6, 0.9, 1.2$ cm の4通りについて示したものである。いずれの α の値に対しても、 E_s は一般に切削深さ d の増加とともに増加するが、切込み幅 S の増加とともに指数関数的に減少している。以上得られたデータを重回帰分析した結果、次式を得た。

$$\alpha = \pi/6 \text{ rad} : E_s = 3.58 d^{0.690} \exp(-1.15 S) \quad (R = 0.891) \quad (21)$$

$$\alpha = \pi/4 \text{ rad} : E_s = 2.90 d^{0.479} \exp(-1.07 S) \quad (R = 0.899) \quad (22)$$

$$\alpha = \pi/3 \text{ rad} : E_s = 6.32 d^{1.084} \exp(-1.18 S) \quad (R = 0.877) \quad (23)$$

図-16は、切込み幅 S (cm) を媒介変数として、一例として、切削深さの大きい $d = 1.2$ cm における比エネルギー E_s (kNcm/cm³) と刃物角 α (rad) の関係を示したものである。同図より明らかに、いずれの切込み幅に対しても E_s は $\alpha = \pi/4$ rad において最小値を示している。その理由については次のように考えられる。刃物角 α の増加とともに、モルタルの切削断面積が増加するためにディスクカッタに作用する接線方向力および回転動力 P_r は増加する。一方、掘削土量は d が比較的大きいために刃物角 α の増加とともにすくい角は減少しモルタルの引張破壊領域はせん断破壊の進行とともに縮減するために

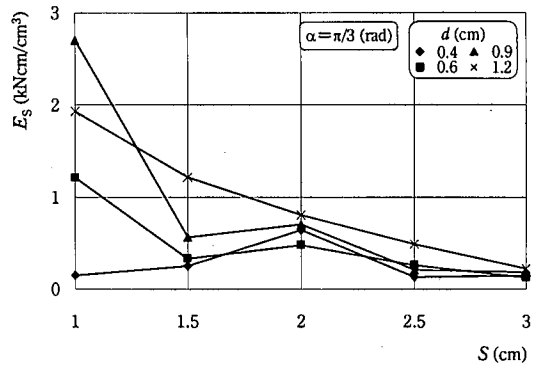


図-15(c) 刃物角 $\alpha = \pi/3$ rad における比エネルギー E_s と切込み幅 S の関係 (初期掘削時)

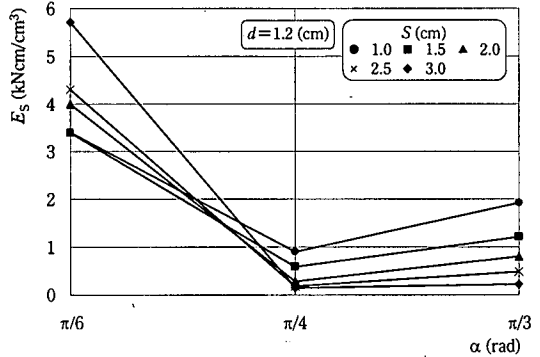


図-16 種々の切込み幅 S に対するの比エネルギー E_s と刃物角 α の関係 (初期掘削時)

減少する。従って、両者の比率である比エネルギーは、 $\alpha = \pi/4$ rad において最小値を取り、最も効率良く掘削することができると考えられる。

以上の考察より、掘削効率を大きくするためには、回転動力を減少させて掘削土量を増加させることにより比エネルギーを最小ならしめることが重要であることが判明した。本実験の範囲内では、切込み幅を大きくとることが肝要であり、また切込み深さを増加させた場合には刃物角を $\pi/4$ rad に選定することも可能である。

(2) 平面と端面掘削特性との比較

従来の T. B. M. 掘削機のディスクカッタでは 1 自由面である平面掘削を行っているが、本研究の対象とする 2 自由面である端面掘削では、回転動力は減少し掘削土量は増加するためにその比エネルギーはかなり小さくなるものと推定される。ここでは、一例として、実施工と比較して形状は異なるが大きさ約 1/3 の寸法と想定される切削深さ $d = 0.4$ cm, 3 種類の刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3$ rad について、平面および端面における掘削特性について両者を比較

表-1 平面掘削実験結果 ($d = 0.4 \text{ cm}$)

| α (rad) | F_X (kN) | F_Y (kN) | F_Z (kN) | V_E (cm^3/s) | P_R (kNcm/s) | E_S (kNcm/ cm^3) |
|----------------|------------|------------|------------|----------------------------------|----------------|------------------------------|
| $\pi/6$ | 1.582 | 3.400 | 10.34 | 0.765 | 2.900 | 3.789 |
| $\pi/4$ | 1.428 | 3.444 | 8.475 | 1.326 | 2.618 | 1.974 |
| $\pi/3$ | 2.904 | 5.411 | 17.11 | 1.589 | 5.322 | 3.350 |

表-2 端面掘削実験結果 ($d = 0.4 \text{ cm}$)

| α (rad) | S (cm) | F_X (kN) | F_Y (kN) | F_Z (kN) | V_E (cm^3/s) | P_R (kNcm/s) | E_S (kNcm/ cm^3) |
|----------------|----------|------------|------------|------------|----------------------------------|----------------|------------------------------|
| $\pi/6$ | 1.0 | 0.796 | 2.169 | 2.293 | 2.152 | 1.459 | 0.678 |
| | 1.5 | 0.440 | 1.535 | 0.829 | 3.148 | 0.805 | 0.256 |
| | 2.0 | 0.899 | 1.718 | 2.605 | 9.301 | 1.647 | 0.177 |
| | 2.5 | 0.891 | 1.521 | 3.903 | 5.373 | 1.632 | 0.304 |
| | 3.0 | 0.902 | 1.595 | 3.674 | 8.247 | 1.652 | 0.200 |
| $\pi/4$ | 1.0 | 0.425 | 1.986 | 2.438 | 2.296 | 0.778 | 0.339 |
| | 1.5 | 0.839 | 2.137 | 2.599 | 5.994 | 1.538 | 0.257 |
| | 2.0 | 0.813 | 1.639 | 3.995 | 5.661 | 1.490 | 0.263 |
| | 2.5 | 0.789 | 1.484 | 4.431 | 23.77 | 1.446 | 0.061 |
| | 3.0 | 0.754 | 1.417 | 4.905 | 6.557 | 1.383 | 0.211 |
| $\pi/3$ | 1.0 | 0.859 | 2.340 | 2.735 | 2.105 | 1.573 | 0.149 |
| | 1.5 | 1.040 | 2.278 | 2.960 | 7.570 | 1.904 | 0.252 |
| | 2.0 | 0.612 | 1.242 | 3.756 | 1.745 | 1.121 | 0.643 |
| | 2.5 | 0.518 | 0.976 | 3.429 | 0.360 | 0.948 | 0.132 |
| | 3.0 | 1.334 | 1.004 | 5.869 | 16.25 | 2.444 | 0.150 |

し考察する。

平面掘削においては、実際の T. B. M. における軌道間隔は岩強度によって決定され少なくとも 5 ~ 6 cm を必要とする隣接溝による影響⁹⁾を考慮して、寸法比 3 として $d = 0.4 \text{ cm}$ に対するディスクカッタの軌道間隔を 2.0 cm として実験を行った。表-1 は、計測した平均接線方向力 F_X 、平均向心方向力 F_Y および平均垂直方向力 F_Z 、掘削土量 V_E 、回転動力 P_R 、および比エネルギー E_S をそれぞれディスクカッタの刃物角 $\alpha = \pi/6, \pi/4, \pi/3 \text{ rad}$ について示したものである。この場合においても、前図-16 に示した端面掘削の場合と同様に、 E_S は $\alpha = \pi/4 \text{ rad}$ において最小値を示している。

端面掘削においては、前述した切削深さ $d = 0.4 \text{ cm}$ 、切込み幅 $S = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ 、および 3.0 cm についての初期掘削時の実験結果として、 F_X, F_Y および F_Z, V_E, P_R 、および E_S をそれぞれディスクカッタの刃物角 α と切込み幅 S との関係として、表-2 にまとめて示した。多少のバラツキはあるが、この場合も E_S の平均値は $\alpha = \pi/4 \text{ rad}$ において最小値を示している。

両表より、平面掘削時の平均接線方向力 $F_X = 1.971 \text{ kN}$ 、平均向心方向力 $F_Y = 4.085 \text{ kN}$ および平均垂直方向力 $F_Z = 11.976 \text{ kN}$ は、端面掘削時の $F_X = 0.794 \pm 0.233 \text{ kN}$ 、 $F_Y = 1.669 \pm 0.434 \text{ kN}$ および $F_Z = 3.361 \pm 1.221 \text{ kN}$ のそれぞれ約 2.48 倍、約 2.45 倍および約 3.56 倍となることが判明した。一方、

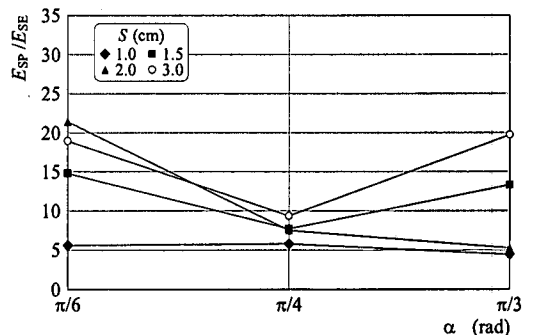


図-17 種々の切込み幅 S に対する端面掘削時比エネルギー E_{SE} に対する平面掘削時比エネルギー E_{SP} の比率と刃物角 α の関係

端面掘削時の掘削土量 $V_E = 5.483 \pm 4.135 \text{ cm}^3/\text{s}$ は、平面掘削時の平均掘削土量 $V_E = 1.227 \text{ cm}^3/\text{s}$ と比較して約 4.47 倍と増大することが判明した。従って、端面掘削時の比エネルギー $E_{SE} = 0.117 \sim 0.457 \text{ kNcm}/\text{cm}^3$ は、平面掘削時の平均比エネルギー $E_{SP} = 3.038 \text{ kNcm}/\text{cm}^3$ と比較して約 1/26 ~ 1/7 倍と減少することが判明した。図-17は、切削深さ $d = 0.4 \text{ cm}$ に対して切込み幅 S を媒介変数として、端面掘削時比エネルギーに対する平面掘削時比エネルギーの比率 E_{SP}/E_{SE} と 3 種類の刃物角 α との関係を示したものである。その結果、端面掘削方式が平面掘削方式と比較して 7 ~ 26 倍と格段の掘削効率を達成することが可能であることを示唆するものである。

5. 結論

ディスクカッタビットを使用して、2自由面を有する一軸圧縮強度 20 MPa のモルタル供試体端部を一定の切込み幅と切込み深さで定常切削するための切削抵抗、切削土量から比エネルギーを算定し、従来の T. B. M. ディスクカッタビットによる平面掘削時の比エネルギーと比較して実験的考察を行った。以下に得られた新しい知見を記す。

(1) 端面掘削において、ディスクカッタに作用する接線方向力であるころがり抵抗は、初期掘削時においては垂直方向力の約 0.22 倍となり、2 回転目以降の掘削時においては垂直方向力の約 0.12 倍と約半分の値となる。モルタル端面を破砕するための向心方向力は、初期掘削時においては垂直方向力の約 0.57 倍となり、2 回転目以降の掘削時においては垂直方向力の約 0.59 倍とほぼ同じ値を示す。

(2) 初期掘削における接線方向力、向心方向力および垂直方向力はすべて連続端面掘削における定常掘削力と比較して常に大きな値を示す。そのために実機の設計における回転および推進動力の算定には初期掘削時の諸力を寸法効果を配慮して使用すべきである。

(3) 掘削効率を増大させるためには、回転動力を減少させて掘削土量を増加させることにより、端面掘削における比エネルギーを最小ならしめることが重要である。そのため、本実験の範囲では切込み幅をできるだけ大きくとることが肝要である。

(4) 初期掘削時においては、切削深さが増加するとともに、いずれの切込み幅に対しても、端面掘削時の比エネルギーは刃物角が $\pi/4$ rad において最小値を示しており、最も効率良く掘削が可能である。

(5) 一例として、寸法比を $1/3$ とした場合の切削深さ 0.4 cm に対するディスクカッタの軌道間隔を

2.0 cm として実験を行った平面掘削時の比エネルギーと、同じ切削深さにおいて種々の切込み幅で実験を行った端面掘削時の比エネルギーとを比較した結果、端面掘削方式が平面掘削方式と比較して 7~26 倍と格段の掘削効率を達成することが可能であることが判明した。

なお、実機設計へ適用する場合、寸法比を 3.0 としているため、切削深さ 1.2 cm、切削幅 3~9 cm、ディスクカッタ直径 45 cm とした端面掘削方式は、軌道間隔を 6.0 cm とした平面掘削と比較してその掘削効率は最大 20 倍程度達成することができると考えられる。

謝辞：本実験を実施するに当たっては本学元学生柴田勝博氏の協力を得ました。ここに真摯なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 深川良一、室達朗：TBM ローラーカッタビットの摩耗特性、愛媛大学工学部紀要、第 12 巻、第 4 号、pp.127-135、1993 年 2 月。
- 2) 室達朗、河野幸一、山村繁雄：T.B.M.用ローラーカッタの掘削と摩耗特性に及ぼすビット斜角の影響、土木学会論文集、No.617/III-46、pp.163-174、1999 年 3 月。
- 3) 室達朗、土屋清、上松正史、河原荘一郎：T.B.M.センターカッタの定常掘削特性に及ぼすビット斜角の影響、土木学会論文集、No.652/III-51、pp.47-60、2000 年 6 月。
- 4) Gong, F., 佐藤一彦、浅井秀明：円周軌道切削における最適切削条件および最大切削抵抗——ディスクカッタによる岩石の切削に関する研究（第 2 報）——、資源・素材学会誌、第 108 巻、第 12 号、pp.849-854、1992。
- 5) Snowdon, R.A., Ryley, M.D. and Temporal, J.: A study of disc cutting in selected british rock, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.19, pp.107-121, 1982.

(2000. 4. 7 受付)

EXPERIMENTAL CONSIDERATIONS FOR THE STEADY EXCAVATION PERFORMANCE OF A DISC CUTTER BIT IN AN EDGE PART OF MORTAR SPECIMEN

Tatsuro MURO, Kiyoshi TSUCHIYA, Koichi KOHNO
and Yusuke WAKABAYASHI

The objective of this study is to investigate experimentally the steady state excavation performances under constant cutting depth, especially the specific cutting energy, of a disc cutter bit in a free edge part of mortar specimen. Here, the tangential, lateral and normal forces acting on the disc cutter bit having three tip angles and the amount of debris were measured for several cutting spaces and cutting depths. As a result, it was observed that the specific cutting energy, i.e. the ratio of the rotation work of the disc cutter bit and the amount of debris, increased with increment of cutting depth, took a minimum value at tip angle of $\pi/4$ rad and decreased with increment of cutting space.