

# ポイントアタックビットによるモルタル供試体の 衝撃切削能力に関する実験的考察

室達朗<sup>1</sup>・竹垣喜勝<sup>2</sup>・石川哲也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 工修 奥村組土木興業(株) 環境開発事業本部技術部長 (〒552 大阪市港区市岡3-9-2)

<sup>3</sup>正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株) (〒102 東京都千代田区九段北1-11-5)

ポイントアタックビットによるモルタル供試体の衝撃切削能力を解明するため回転式衝撃切削試験機を試作した。本研究の目的は、切削ビットの進行方向切削ピッチ、切削深さおよびビット先端周速度が、切削トルクと切削土量に及ぼす影響について実験的考察を行うことである。その結果、切削ドラムに作用する最大トルクおよび水平方向の最大衝撃加速度は、進行方向切削ピッチおよびビット先端周速度とともに増大することおよび切削能力は、いずれの切削深さに対してもある切削ピッチにおいて最大となることが判明した。

**Key Words :** mortar, point attack bit, pitch, circumferential speed, cutting torque, impact cutting productivity

## 1. まえがき

近年、環境に優しくかつ作業効率と仕上げ精度を高めるべく開発された岩盤切削機は、総重量 1421 kN (145 tf) の車両本体を4履帯で支持し、岩盤またはコンクリートの表面を走行して切削作業を行うことができる<sup>1)</sup>。切削装置として、走行方向に対して逆回転する切削幅 350 cm、ビットの回転直径 140 cm の切削ドラムが本体中央下腹部に設置され、掘削されたずりは  $\pi$  rad 旋回できるベルトコンベヤーによって搬出される。切削回転ドラムには、160 本のポイントアタックビットが螺旋状に取り付けられており、標準回転数 48 r.p.m.、周速度 352 cm/s で衝撃切削を行うものである。仕上がり精度は、 $\pm 5$  cm 以下で、横方向ピッチ 3.0 cm の条痕からなる平坦な岩盤またはコンクリート面を作成することができる。

本研究においては、この岩盤切削機を対象として、ポイントアタックビットによるコンクリートの代用品としてモルタル供試体に対する衝撃切削能力を調査研究するため、新しく回転式衝撃切削試験機を試作した。研究の目的は、①切削ピッチが衝撃切削能力に及ぼす影響について試験し、単位仕事当たりの切削量を最大ならしめる最適な切削ピッチを見出すこと、②ビット先端周速度が衝撃切削能力に及ぼす影響を明らかにすることである。

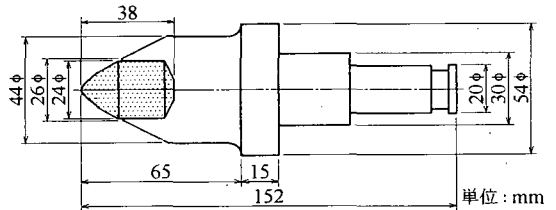


図-1 ポイントアタックビット (新品時)

## 2. 実験装置と方法

### (1) モルタル供試体

一軸圧縮強度が約 20 MPa のセメントモルタルを作成した。粒径  $74 \mu\text{m} \sim 2.0 \text{ mm}$  に調整した気乾燥の海砂を細骨材とし、普通ポルトランドセメント、及び水の配合を決定するために、7日間水中養生後の一軸圧縮強度  $S_c$  (MPa) と水セメント比  $W/C$  (%) の関係を室内実験により求めた。得られた実験式を以下に示す。

$$W/C = (1.14 \times 10^7 / S_c)^{1/3.28} \quad (r=0.908) \quad (1)$$

ここに、 $r$  は相関係数である。上式に、 $S_c=20$  MPa を代入すると、 $W/C=57.2\%$  と算定される。従って、単位水量は、 $3.49 \text{ kN/m}^3$  ( $356 \text{ kgf/m}^3$ )、単位セメント量は、 $6.11 \text{ kN/m}^3$  ( $623 \text{ kgf/m}^3$ )、単位細骨材量は、 $11.36 \text{ kN/m}^3$  ( $1159 \text{ kgf/m}^3$ ) として配合設計を行った。この配合によって、各材料を強制混合攪拌して

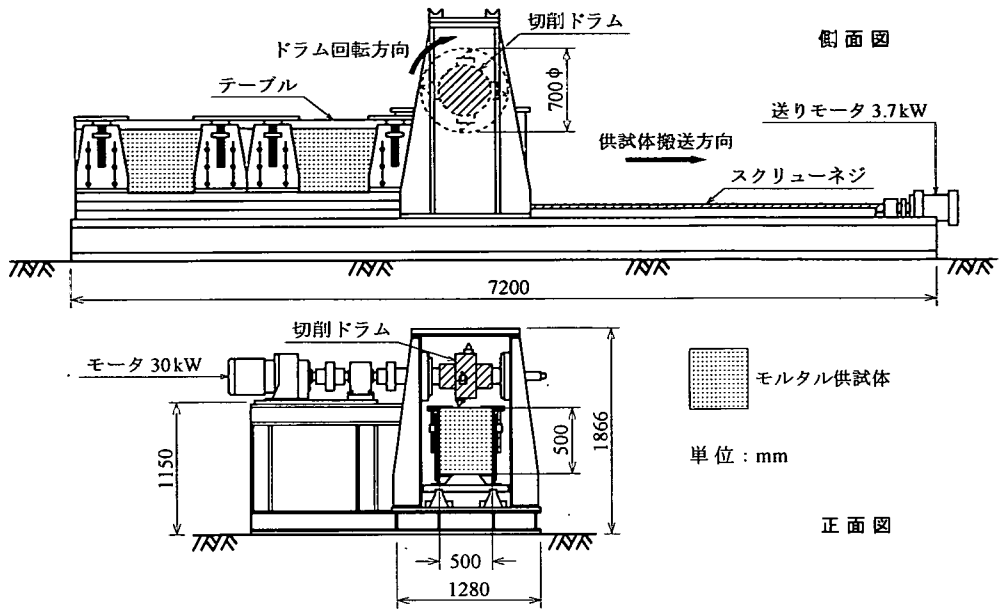


図-2 回転式衝撃切削試験機

セメントモルタルを作成し、寸法 100(cm)×50(cm)×50(cm) の型枠に打設し、平均気温 18°C の屋外で 7 日間湿潤養生させ、試験に供した。養生後の一軸圧縮強度は  $20.3 \pm 0.7$  MPa、引張強度は  $2.5 \pm 0.1$  MPa、およびせん断強度は  $4.5 \pm 0.2$  MPa であった。

### (2) ポイントアタックビット

本実験で使用したポイントアタックビットの形状と大きさは、実機で使用されているものと同一のものであり、軸対称のコニカルビットである。図-1 に新品時のポイントアタックビットの形状を示す。ビット 1 本の重量は 14.8 N (1.51 kgf)、その全長は 15.2 cm で、ビットホルダーに対する台座の直径は 5.4 cm である。ビット先端部には、直径 2.4 cm、長さ 3.8 cm の円筒体の先端部を円錐形にした頂角  $\pi/2$  rad のタングステンカーバイドの超硬合金チップが焼嵌されている。また、超硬合金チップを直接ホルドするシャンク部分の材質は、硬さ  $HrC=42 \sim 48$  の SKC-24 である。

### (3) 回転式衝撃切削試験機

岩盤切削機の回転ドラム部位に装着されたポイントアタックビットによるモルタルの切削能力を試験するため、実機の 1/2 サイズのビットの回転直径 700 mm の切削ドラムを装備した回転式衝撃切削試験機を試作した。試験装置の寸法は、全長 7200 mm、全幅 1280 mm、全高 1866 mm であり、図-2 にその

側面図と正面図を示す。試験機は、大別して、切削ドラム、供試体搬送テーブル、操作盤、および集塵機から構成されている。切削ドラムは、AC200V、出力 30 kW、最大出力トルク 362 kNcm、回転数 0~3,150 r.p.m. のドラムモータで駆動され、1/21 の減速機によってドラム回転数 0~150 r.p.m. に制御されている。従って、ビット周速度は、0~550 cm/s の範囲で設定することができる。供試体搬送テーブルは、寸法 100 (cm)×50 (cm)×50 (cm) のモルタル供試体の位置および高さを調整した後、供試体をテーブル上に固定することができる。供試体搬送テーブルは、AC 200 V、出力 3.7 kW、回転数 0~3,750 r.p.m. の送りモータより、1/6 の減速機およびスクリューネジロッドを介して駆動され、供試体の搬送速度は 0~500 cm/min に制御されている。なお、切削深さは、0~15 cm の間で調整することができる。また、ポイントアタックビットによる衝撃切削を円滑に行うため、はずみ車を設置している。切削ドラムに作用するトルク  $T$  は、回転軸に  $\pi/2$  rad 間隔で貼り付けた 4 枚のひずみゲージによって計測した。切削されたモルタルの容積である切削土量  $Q$  は、切削溝の断面積  $S$  と供試体の搬送速度  $V$  より求めた。 $S$  の値は、ポイントアタックビットによる切削溝にワックスを流し込みその断面積を測定した。また、モルタル供試体に作用する水平方向の衝撃加速度  $a_H$  は、供試体の側面に埋設した圧電式加速度計によって計測することとした。

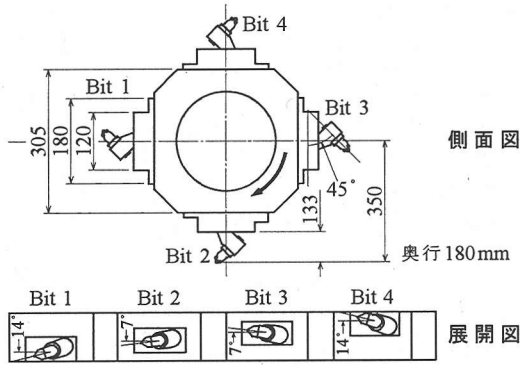


図-3 切削ドラム詳細図

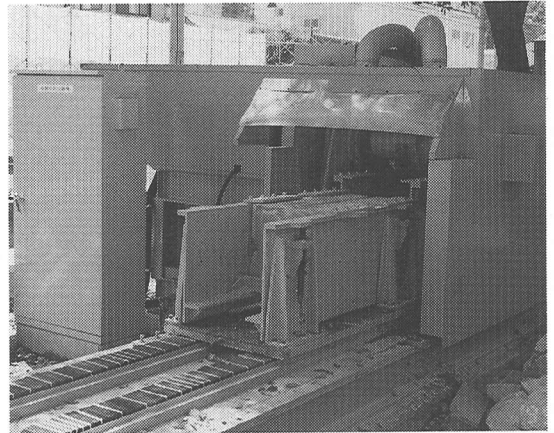


写真-1 回転式衝撃切削試験機

### 3. 進行方向切削ピッチと衝撃切削能力

切削ドラムの回転数が一定である実機においては、走行方向の切削ピッチは車両本体の走行速度によって決定される。ここでは、上述した回転式衝撃切削試験機において、モルタル供試体表面における切削ドラム1回転当たりのビットの打撃間隔である進行方向の切削ピッチが衝撃切削能力に与える影響について検討する。従来、亀裂のない和泉砂岩に楔型の刃で単一打撃を加えたとき、岩石の破砕量を最大とする最適な打撃間隔が存在することが実験的に明らかにされており<sup>2)</sup>、ポイントアタックビットによるモルタルの衝撃切削実験においても最適な切削ピッチが存在すると予測される。

図-3は、切削ドラムに $\pi/2$  rad 間隔で、横方向ピッチ 3.0 cm で配置した4本のポイントアタックビットを示す。ビットはすべて新品のものを設置した。ビットホルダーは、実機と同一のものを使用し、ポイントアタックビットの方向と円周の接線方向とのなす角度を $\pi/4$  rad に設定している。図に示すように、「Bit 1」と「Bit 4」は、外側のビットであり、「Bit 2」と「Bit 3」は内側のビットである。モルタルへの打撃順序は、「Bit 1」、「Bit 2」、「Bit 3」および「Bit 4」の順である。また、ビットの横方向への取付け角度は、実機に合わせて「Bit 1」で左外向きに $7\pi/90$  rad、「Bit 2」で左外向きに $7\pi/180$  rad、「Bit 3」で右外向きに $7\pi/180$  rad、「Bit 4」で右外向きに $7\pi/90$  rad としている。これらの取付け角度は、掘削性能の向上とビット摩耗に対するセルフシャープネス性<sup>3)</sup>を確保するためである。

前章に述べた試験装置、および一軸圧縮強度約 20 MPa のセメントモルタルを使用し、切削ドラムの回転数  $N=96$  r.p.m.、回転角速度  $\omega=3.2\pi$  rad/s、ビット先端周速度  $V_b=352$  cm/s と一定とし、モルタ

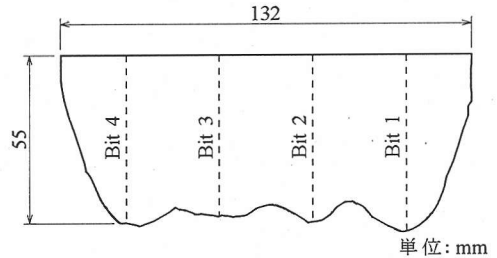


図-4 コンクリートの切削溝横断面

ル供試体の搬送速度  $V=24\sim 432$ (cm/min)、進行方向の切削ピッチ  $p=0.25\sim 4.50$  cm、切削深さ  $z=3.0\sim 5.5$  cm の範囲で実験を行った。ここに、切削ピッチ  $p$ (cm)は、 $p=V/N$  として算定することができる。また、切削土量  $Q$ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )は、切削溝の断面積  $S$ ( $\text{cm}^2$ )とモルタル供試体の搬送速度  $V$ (cm/min)より、 $Q=SV$  として算定することができる。写真-1は、回転式衝撃切削試験機を使用した実験風景である。図-4は、4本のポイントアタックビットによる切削深さ 5.5 cm に対する切切断面の一例であり、外側に位置する「Bit 1」と「Bit 4」が両端部の切削を行い、内側に位置する「Bit 2」と「Bit 3」が中央部の切削を行っていることが分かる。

#### (1) トルクと進行方向切削ピッチ

図-5は、4本の各ポイントアタックビットに作用する最大トルク  $T_{\max}$ (kNm)と切削ピッチ  $p$ (cm)の関係について、一例として、切削深さ 4.0 cm に対するものを示したものである。一般に、外側に位置する「Bit 1」と「Bit 4」の最大トルクは、切削溝の両端部を切削するために、内側に位置する「Bit 2」と「Bit 3」のものより増大している。また、いずれのビットにおいても、 $T_{\max}$  は  $p$  の増加とともに増加している

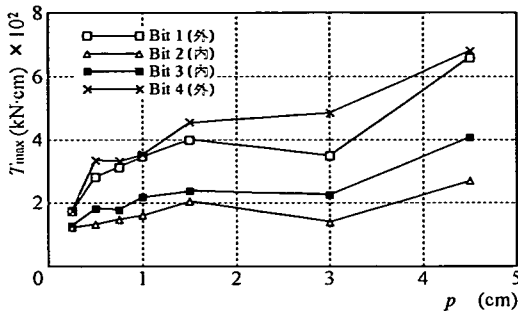


図-5 最大トルク  $T_{max}$  と切削ピッチ  $p$  の関係 (切削深さ 4.0 cm)

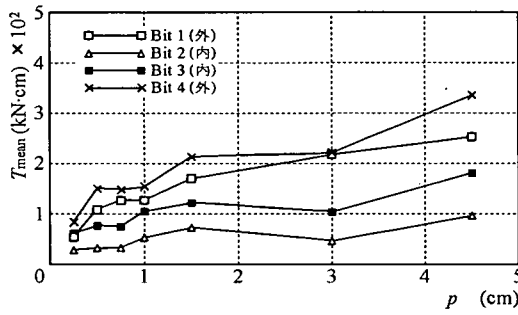


図-6 平均トルク  $T_{mean}$  と切削ピッチ  $p$  の関係 (切削深さ 4.0 cm)

が、 $p=3.0$  cm 以上となると急増しているのが明らかである。

図-6 は、同様に、平均トルク  $T_{mean}$  (kNcm) と切削ピッチ  $p$  (cm) の関係について、一例として、切削深さ 4.0 cm に対するものを示したものである。一般に、外側ビットの平均トルクは、内側ビットのものより増大している。また、いずれのビットにおいても、 $T_{mean}$  は  $p$  の増加とともに増加しているが、 $p=3.0$  cm 以上となるとさらに増加する傾向にある。

図-7 は、各ビットに作用する平均トルクの和として与えられる全トルク  $T_T$  (kNcm) と切削ピッチ  $p$  (cm) の関係について、3種類の切削深さ  $z=3.0$ , 4.0, 5.5 cm に対して示したものである。図より明らかに、いずれの切削ピッチに対しても、 $T_T$  は  $p=3.0$  cm まではゆるやかに増加し、その後急激に増加している。

従来、平らな岩石面の垂直方向に対して円錐形ビットを静的に貫入する場合、圧入理論<sup>4)</sup>を用いて、岩石内部にチップング<sup>5)</sup>が発生する場合のビットの貫入力と貫入量との関係、および破碎岩石の体積<sup>6)</sup>が、岩石の内部摩擦角、岩石のクラッシングコーンとビットとの間の摩擦角、およびビット頂角より算

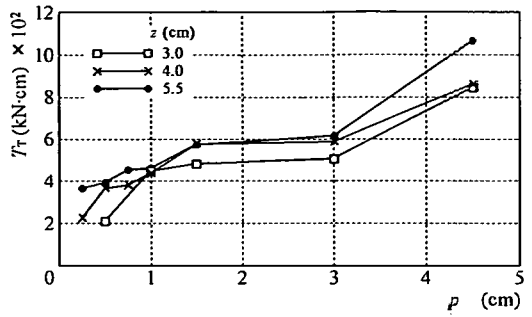


図-7 全トルク  $T_T$  と切削ピッチ  $p$  の関係

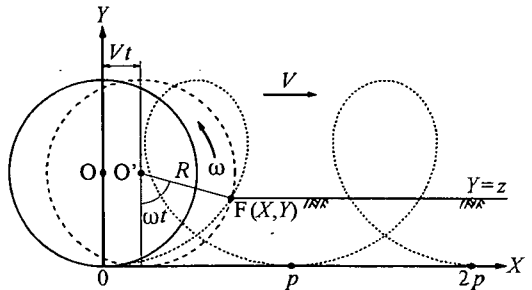


図-8 ポイントアタックビットの転動軌跡 (トロコイド曲線)

定されている。しかし、本実験の場合、ポイントアタックビットはその走行軌跡であるトロコイド曲線に沿って約 45 度傾斜してモルタルを切削しているため、この圧入理論をそのまま適用することはできない。切削溝の観察の結果、モルタルの破碎はビットの走行軌跡に沿って進行しており、モルタル供試体の強度が小さいため、モルタル切削溝の幅方向のチップング現象はほとんど存在していないことが分かった。また、この場合のモルタルの破壊は三次元方向に発生しており、ポイントアタックビットの打撃間隔である横方向ピッチが 3.0 cm であることより、進行方向の切削ピッチ  $p$  が 3.0 cm 以下では側方の自由面が多く切削抵抗が少なくよすが、 $p$  が 3.0 cm 以上となると自由面が少なくなるため切削抵抗が増大し、最大トルク、平均トルク、および全トルクが急激に増大してくるものと考えられる。

図-8 は、ポイントアタックビットの転動軌跡であるトロコイド曲線を示したものである。転動軌跡上の任意の点  $F(X, Y)$  は、ビットの回転半径  $R$ 、走行速度  $V$ 、回転角速度  $\omega$ 、および時間  $t$  に対して次式で与えられる。

$$X = Vt + R \sin \omega t \quad (2)$$

$$Y = R(1 - \cos \omega t) \quad (3)$$

今仮に、 $F$  点が切削深さ  $Y=z$  の位置にあるとき、

原点からF点までの軌跡の長さLは、次式によって算定される。

$$L = \int_0^t \{1 + (dY/dX)^2\}^{1/2} dX$$

$$= \int_0^t \left\{1 + \left(\frac{R\omega \sin\omega t}{V + R\omega \cos\omega t}\right)^2\right\}^{1/2} (V + R\omega \cos\omega t) dt$$

$$= R\omega \int_0^t \left\{\left(\frac{V}{R\omega}\right)^2 + \frac{2V\cos\omega t}{R\omega} + 1\right\}^{1/2} dt \quad (4)$$

図-9 (a) (b) は、切削溝の平面図および進行方向の断面図を示す。各ビットの1打撃当りの切削せん断面積  $a$  と切削容量  $q$  は、ビットの進行方向ピッチを  $p$ 、横方向ピッチを  $l$  とすると、「Bit 1」では、 $a=7pz/4+Ll$ 、 $q=7pz/8$ 、「Bit 2」「Bit 3」では、 $a=pz+Ll$ 、 $q=pz/2$ 、「Bit 4」では、 $a=5pz/4+Ll$ 、 $q=7pz/8$  と概算することができる。さて、同図(b)に示すように、切屑断面の形状は半月状であり、各ビットの回転とともに切削厚さ  $h(s)$  はP点からの軌跡の長さ  $s$  によって変化する。今、あるビットが軌跡  $\overline{PF}$  上を走行しているとき、 $h(s)$  は任意の点Qの法線と直前の軌跡との交点Aとの距離であり、 $\overline{AQ}$  と水平線  $\overline{AB}$  とのなす角  $\theta$  に対して次式で与えられる。

$$h(s) = p \cos\theta \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(-\frac{V + R\omega \cos\omega t}{R\omega \sin\omega t}\right)$$

なお、A点が地表面と接する位置E点に達するときの  $\overline{PQ}$  の長さを  $s_0$ 、 $\overline{AQ}$  の長さを  $h(s_0)$  とすると

$$h(s) = h(s_0)(L-s)/(L-s_0) \quad (6)$$

で与えられる。この場合、一例として、 $R=35\text{ cm}$ 、 $\omega=3.2\pi\text{ rad/s}$ 、 $z=4.0\text{ cm}$ 、 $p=3.0\text{ cm}$  に対する  $h(s)$  の算定結果を以下に示す。

$$L=16.9\text{ cm}, s_0=14.1\text{ cm}, h(s_0)=1.16\text{ cm}$$

$$0 \leq s \leq s_0 \text{ cm} : h(s) = 8.48 \times 10^{-2} s^{0.991} \quad (7-1)$$

$$s_0 \leq s \leq L \text{ cm} : h(s) = 0.414(16.9-s) \quad (7-2)$$

従来、平刃による軟岩の水平方向の掘削抵抗  $H_a$  (kN/cm) は、平刃のすくい角  $\alpha$  (rad)、切削厚さ  $h$  (cm)、および岩石の動的せん断強度  $S_d$  (kPa) に対して、次の実験式で与えられている。<sup>7) 8)</sup>

$$H_a = 1.20 \times 10^{-3} h^{0.925} S_d^{0.741} 10^{-0.353\alpha} \quad (8)$$

$$S_d = \{1.48 + 0.160(\log \dot{\epsilon}) + 0.013(\log \dot{\epsilon})^2\} S_s$$

上式に、 $\alpha=0\text{ rad}$ 、 $h=h(s)$ 、ひずみ速度  $\dot{\epsilon}=20.8\text{ s}^{-1}$ 、静的せん断強度  $S_s=4,500\text{ kPa}$  を代入して次式をえる。

$$H(s) = 0.911 \{h(s)\}^{0.925} \quad (9)$$

ビットの走行軌跡に沿って発生する1打撃当りの衝撃切削仕事量  $W$  (kNcm) は、上式で与えられる切削抵抗  $H(s)$  (kN/cm) を切削幅  $x=0$  から  $l$  (cm) および

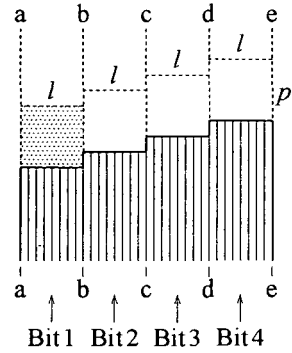


図-9 (a) 切削溝の平面図

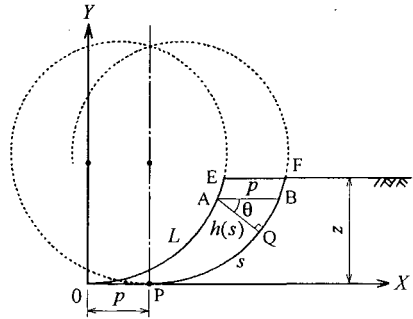


図-9 (b) 切削溝の進行方向断面図

軌跡の長さ  $s=0$  から  $L$  (cm) まで積分した値、および両側面のせん断に要する仕事量の和として次式で算定することができる。なお、 $H(s)$  は波状分布するので、ここでは三角形分布を仮定する。一例として、内側ビット「Bit 2」「Bit 3」について述べる。

$$W = \frac{1}{2} \left[ 0.911 \int_0^L \int_0^l \left\{ \frac{1}{4} h(s) \right\}^{0.925} + \left\{ \frac{3}{4} h(s) \right\}^{0.925} - \left\{ \frac{1}{4} h(s) \right\}^{0.925} \right] \frac{x}{l} dx ds + \eta p z S_d L \times 10^{-4}$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 0.911 \xi l \int_0^{s_0} \{h(s)\}^{0.925} ds + \int_{s_0}^L \{h(s)\}^{0.925} ds \right] + \eta p z S_d L \times 10^{-4} \quad (10)$$

ここに、 $\xi=0.522$ 、 $\eta=1.00$ 、 $l=3\text{ cm}$ 、 $S_d=7,711\text{ kPa}$ 、 $x$  は各ビットの横断方向の切削溝端面からの距離である。なお、外側ビット「Bit 1」については、 $\xi=0.883$ 、 $\eta=1.75$ 、「Bit 4」については、 $\xi=0.639$ 、 $\eta=1.25$  である。

上式より、回転ドラムに作用する平均トルク  $T_{\text{mean}}$  を求めると、

$$T_{\text{mean}} = WR/L \quad (11)$$

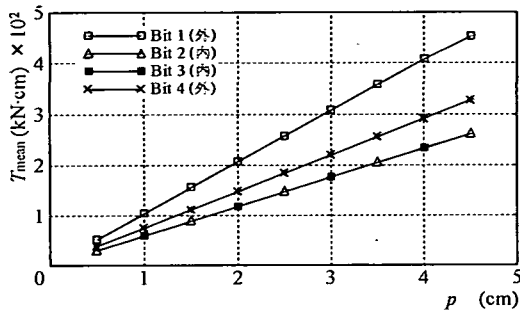


図-10 理論解析より求めた平均トルク  $T_{\text{mean}}$  と切削ピッチ  $p$  の関係 (切削深さ 4.0 cm)

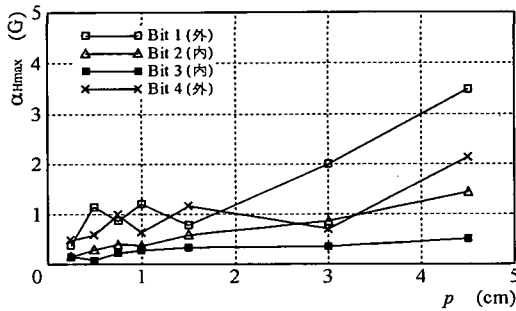


図-11 水平方向最大衝撃加速度  $\alpha_{H\text{max}}$  と切削ピッチ  $p$  の関係 (切削深さ 4.0 cm)

として算定することができる。なお、以上の算定式は、使用したコンクリート供試体が引張り破壊することなくせん断破壊するとして誘導されたものである。その根拠は、ポイントアタックビットのすくい角  $\alpha=0 \text{ rad}$  が、岩石材料のせん断破壊を引き起こす範囲である  $\alpha \leq 5\pi/18 \text{ rad}$ <sup>9)</sup> を満足しているからである。

図-10 は、各ビットに対する平均トルク  $T_{\text{mean}}$  と切削ピッチ  $p$  の関係を理論的に求めたものである。前述したように、外側の「Bit 1」の切削断面積  $a$  は最も大きく、次いで外側の「Bit 4」の順となり、内側の「Bit 2」と「Bit 3」の  $a$  は最も小さくかつ等しい値を示すため、 $T_{\text{mean}}$  の大きさもその順番となっている。前図-6と比較して、簡単なモデル解析を行ったにもかかわらず両者の  $T_{\text{mean}}$  の値はほぼ合致している。しかし、各ビットに作用する  $T_{\text{mean}}$  を詳細に比較すると理論値と実験値の間には多少の相違が認められる。実験結果では  $p=3.0 \text{ cm}$  以上となると  $T_{\text{mean}}$  はさらに増加しているが、この現象については、各ビットの左右への取り付け角度の差異や切削ピッチ  $p=3.0 \text{ cm}$  以上での側方向のせん断破壊領域の拡大に伴うすべり線の存在を十分に考慮できなかったためである。

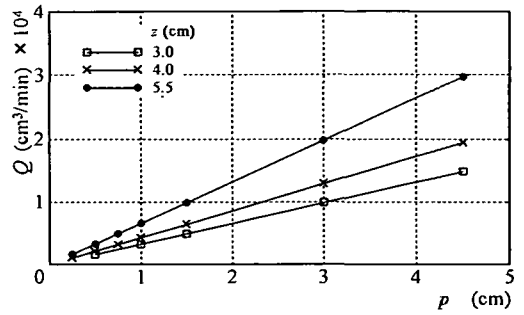


図-12 単位時間当りの切削土量  $Q$  と切削ピッチ  $p$  の関係

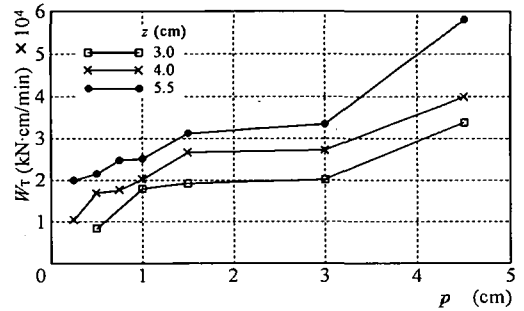


図-13 単位時間当りの仕事量  $W_T$  と切削ピッチ  $p$  の関係

## (2) 衝撃加速度と進行方向切削ピッチ

ポイントアタックビットの打撃によるモルタル供試体に作用する衝撃加速度について、水平方向の最大衝撃加速度  $\alpha_{H\text{max}}$  と進行方向切削ピッチ  $p$  の関係について測定した。その結果、一例として、切削深さ 4.0 cm に対する  $\alpha_{H\text{max}}-p$  の関係を図-11 に示す。一般に、外側ビットの  $\alpha_{H\text{max}}$  が内側ビットのものと比較して大きな値を示している。また、 $\alpha_{H\text{max}}$  は  $p$  の増加とともに増加するが、特に外側ビットでは  $p=3.0 \text{ cm}$  以上となると急増していることが明らかである。 $\alpha_{H\text{max}}$  と最大トルク  $T_{\text{max}}$  の関係は直接対応するものではないが、前図-5の傾向と類似している。

## (3) 単位衝撃切削仕事量当りの切削土量

図-12 は、前述した単位時間当りの切削土量  $Q$  ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ) と切削ピッチ  $p$  (cm) の関係を 3 種類の切削深さ  $z=3.0, 4.0, 5.5 \text{ cm}$  に対して示したものである。 $p$  の増加とともに  $Q$  はほぼ直線的に増大している。重回帰分析の結果、以下の実験式を得た。

$$Q = 8.94 \times 10^2 p^{1.01} z^{1.18} \quad (r=0.999) \quad (12)$$

ここに、 $r$  は相関係数である。

次に、単位時間当りの衝撃切削仕事量  $W_T$  ( $\text{kNcm}/\text{min}$ ) は、全トルク  $T_T$  ( $\text{kNcm}$ ) をビットの回転

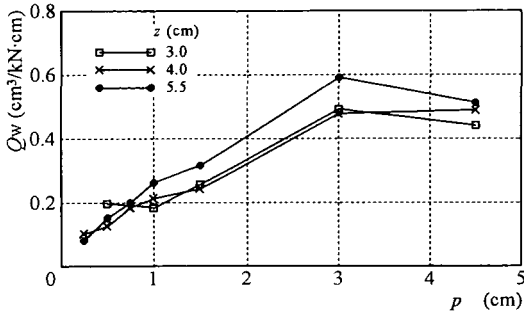


図-14 単位衝撃切削仕事量当りの切削土量  $Q_w$  と切削ピッチ  $p$  の関係

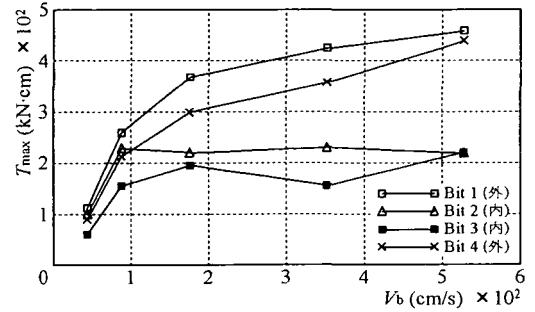


図-15 最大トルク  $T_{max}$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係 (切削深さ 3.0 cm)

半径  $R$ (cm) で除した平均せん断力と軌跡の長さで与えられる切削長  $L$ (cm) との積に回転数  $N$ (r.p.m.) を乗じたものとして、次式によって算定することとする。

$$W_T = T_T L N / R \quad (13)$$

図-13 は、単位時間当りの衝撃切削仕事量  $W_T$  (kNcm/min) と切削ピッチ  $p$ (cm) の関係を 3 種類の切削深さ  $z=3.0, 4.0, 5.5$  cm に対して示したものである。一般に、 $p$  の増加とともに  $W_T$  は増加するが、 $p=3.0$  cm 以上となると  $W_T$  は急激に増加する傾向にある。

従って、単位衝撃切削仕事量当りの切削土量  $Q_w$ (cm³/kNcm) は、単位時間当りの切削土量  $Q$ (cm³/min) を単位時間当りの衝撃切削仕事量  $W_T$ (kNcm/min) で除したものとして、次式で算定することができる。

$$Q_w = Q / W_T \quad (14)$$

図-14 は、単位衝撃切削仕事量当りの切削土量  $Q_w$ (cm³/kNcm) と切削ピッチ  $p$ (cm) の関係を 3 種類の切削深さ  $z=3.0, 4.0, 5.5$  cm に対して示したものである。いずれの切削深さにおいても  $Q_w$  は  $p=3.0$  cm において最大値を示している。すなわち、本実験の結果、切削能力は切削ピッチ 3.0 cm において最も高い値を示すことが実証されたのである。また、ビットの摩耗に関しては、切削ピッチ 3.0 cm 以上では切削トルクが増大するためビットの摩耗寿命<sup>1)</sup>は短くなる。従って、ビットの切削能力および摩耗対策の観点より、最適切削ピッチは 3.0 cm としてよいことが判明した。なお、実機である岩盤切削機の切削回転ドラムに取り付けられている 160 本のポイントアタックビットは、端部を除きほとんどが「Bit 2」「Bit 3」の位置に相当しており、この場合においても切削ピッチ 3.0 cm において切削能力である  $Q_w$  は最大値を示すことが明らかである。

#### 4. ビット先端周速度と衝撃切削能力

従来、円錐形ビットの岩石への動的圧入試験において、単位切削土量当りの衝撃切削仕事量である比エネルギーは岩石材料の岩石衝撃硬度数<sup>10)</sup>およびビット頂角に比例して増加することが明らかにされている<sup>11)</sup>。また、コンクリートに高速圧縮荷重を載荷させるとき、平均荷重速度は平均ひずみ速度の指数関数<sup>12)</sup>で、初期弾性係数は八面体垂直ひずみ速度の対数関数<sup>13)</sup>で表されている。

ここでは、ポイントアタックビットの打撃速度を変化させるとき、セメントモルタルの衝撃切削能力である衝撃加速度、切削トルクおよび単位衝撃切削仕事量当りの切削土量がどのように変化するかについて実験的考察を行う。同一軌跡上でのビット先端周速度の衝撃切削能力への影響を調べるため、供試体搬送速度  $V$ (cm/min) と切削ドラム回転数  $N$ (r.p.m.) との比である進行方向切削ピッチが一定となるように  $V$  と  $N$  を種々に変化させて行った。すなわち、ビット先端周速度  $V_b$ (cm/s) はビットの回転半径  $R$ (cm) に対して次式で与えられる。

$$V_b = 2\pi R N / 60 \quad (15)$$

なお、この場合、切削試験機の切削能力の限界により進行方向切削ピッチ  $p=3.0$  cm では実験が不可能となるために、 $p=1.0$  cm となるように、 $V=12\sim 144$  cm/s に対し  $N=12\sim 144$  r.p.m. の間で 5 通りの条件を設定した。その結果、ビット先端周速度  $V_b$  は、44, 88, 176, 352 および 528 cm/s で試験を行っている。なお、切削深さ  $z$  は、1.5, 2.0 および 3.0 cm において実験を行った。

##### (1) トルクとビット先端周速度

図-15 は、4 本の各ポイントアタックビットに作用する最大トルク  $T_{max}$ (kNcm) とビット先端周速度  $V_b$ (cm/s) の関係について、一例として、切削深さ

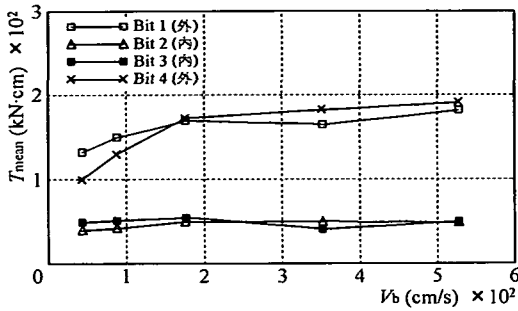


図-16 平均トルク  $T_{mean}$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係 (切削深さ 3.0 cm)

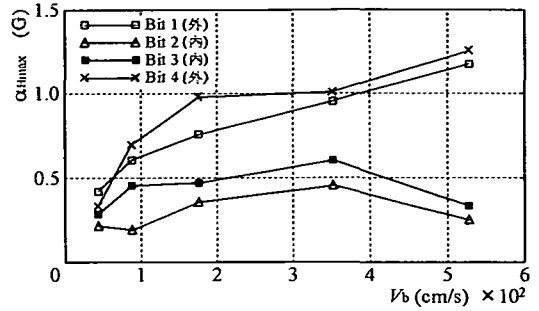


図-18 水平方向最大衝撃加速度  $\alpha_{Hmax}$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係 (切削深さ 3.0 cm)

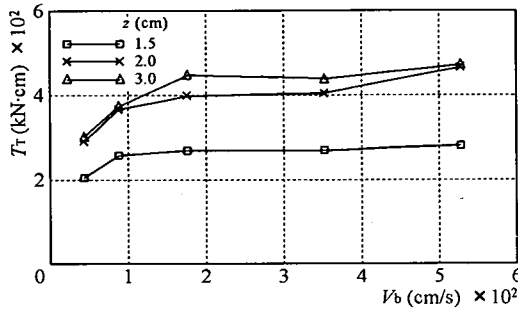


図-17 全トルク  $T_T$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係

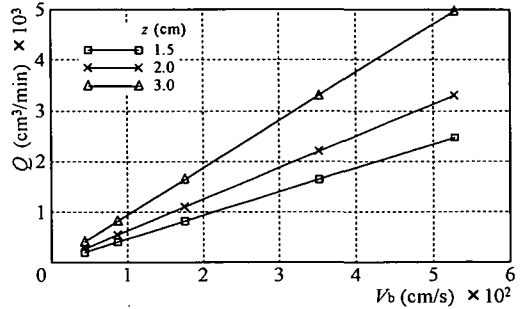


図-19 単位時間当りの切削土量  $Q$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係 (切削ピッチ 1.0 cm)

3.0 cm に対するものを示したものである。外側に位置する「Bit 1」と「Bit 4」の最大トルクは、一般に、内側に位置する「Bit 2」と「Bit 3」と比較して約2倍の値を示しており、また、ビット先端周速度の増加とともに著しく増加している。各ビットに対する重回帰分析の結果を以下に示す。

$$\text{「Bit 1」 } T_{max} = 64.8 V_b^{0.150} z^{1.070} \quad (r=0.988) \quad (16)$$

$$\text{「Bit 2」 } T_{max} = 39.1 V_b^{0.171} z^{0.830} \quad (r=0.441) \quad (17)$$

$$\text{「Bit 3」 } T_{max} = 64.4 V_b^{0.103} z^{0.394} \quad (r=0.445) \quad (18)$$

$$\text{「Bit 4」 } T_{max} = 46.3 V_b^{0.260} z^{0.257} \quad (r=0.830) \quad (19)$$

ここに、 $r$ は重相関係数である。

図-16は、同様に、平均トルク  $T_{mean}$ (kNcm) とビット先端周速度  $V_b$ (cm/s) の関係について、一例として、切削深さ 3.0 cm に対するものを示したものである。外側に位置する「Bit 1」と「Bit 4」の平均トルクは、一般に、内側に位置する「Bit 2」と「Bit 3」と比較して約3倍強の値を示しており、また、ビット先端周速度の増加とともにゆるやかに増加している。各ビットに対する重回帰分析の結果を以下に示す。

$$\text{「Bit 1」 } T_{mean} = 34.3 V_b^{0.115} z^{0.859} \quad (r=0.988) \quad (20)$$

$$\text{「Bit 2」 } T_{mean} = 1.11 V_b^{0.686} z^{0.686} \quad (r=0.441) \quad (21)$$

$$\text{「Bit 3」 } T_{mean} = 23.8 V_b^{0.051} z^{0.595} \quad (r=0.445) \quad (22)$$

$$\text{「Bit 4」 } T_{mean} = 36.6 V_b^{0.218} z^{0.398} \quad (r=0.830) \quad (23)$$

なお、 $T_{max}$ 、 $T_{mean}$ とも内側ビット「Bit 2」「Bit 3」で重相関係数  $r$  が小さくなっているのは、外側ビットが新鮮なモルタルを切削しているのに対し、内側ビットはすでに外側ビットで大半が破砕されてモルタルの強度が小さくなり、すでに潜在クラックが存在する部分を切削するためである。

図-17は、各ビットに作用する平均トルクの和として算定される全トルク  $T_T$ (kNcm) とビット先端周速度  $V_b$ (cm/s) の関係について、3種類の切削深さ  $z=1.5, 2.0, 3.0$  cm に対して示したものである。いずれも、 $T_T$  は  $V_b$  の小さい範囲で急増し、それ以降はゆるやかに増加する傾向にある。重回帰分析の結果、以下の実験式を得た。

$$T_T = 1.05 \times 10^2 V_b^{0.139} z^{0.640} \quad (r=0.893) \quad (24)$$

ここに、 $r$ は重相関係数である。

## (2) 衝撃加速度とビット先端周速度

モルタル供試体に作用する水平方向の最大衝撃加速度  $\alpha_{Hmax}$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係について試験した。図-18は、一例として、切削深さ 3.0 cm に対する  $\alpha_{Hmax}-V_b$  の関係を示したものである。一般に、外側ビットの  $\alpha_{Hmax}$  が内側ビットのものより



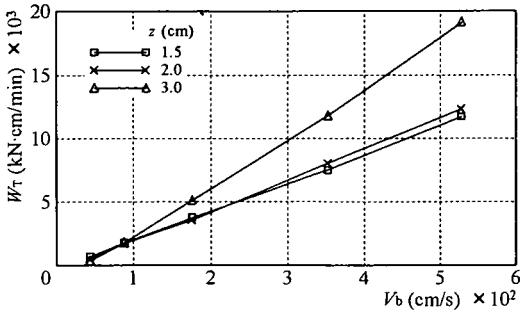


図-20 単位時間当りの衝撃切削仕事量  $W_\tau$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係 (切削ピッチ 1.0 cm)

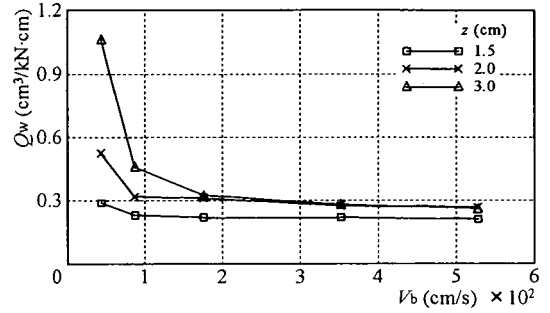


図-21 単位衝撃切削仕事量当りの切削土量  $Q_w$  とビット先端周速度  $V_b$  の関係 (切削ピッチ 1.0 cm)

較して大きな値を示しており、また、ビット先端周速度の増加とともに著しく増加している。 $\alpha_{Hmax}$  と最大トルク  $T_{max}$  の関係を直接対応させることは困難であり、また、 $V_b=3.5 \times 10^2$  cm/s 以上で「Bit 2」「Bit 3」の対応関係は明確ではないが、前図-15の傾向とほぼ一致している。

### (3) 単位衝撃切削仕事量当りの切削土量

図-19は、単位時間当りの切削土量  $Q$  (cm<sup>3</sup>/min) とビット先端周速度  $V_b$  (cm/s) の関係について、3種類の切削深さ  $z=1.5, 2.0, 3.0$  cm に対して示したものである。いずれも、 $V_b$  の増加とともに  $Q$  はほぼ直線的に増加している。

図-20は、単位時間当りの衝撃切削仕事量  $W_\tau$  (kNcm/min) とビット先端周速度  $V_b$  (cm/s) の関係について、3種類の切削深さ  $z=1.5, 2.0, 3.0$  cm に対して示したものである。いずれも、 $V_b$  の増加とともに  $W_\tau$  はほぼ直線的に増加している。

図-21は、単位衝撃切削仕事量当りの切削土量  $Q_w$  (cm<sup>3</sup>/kNcm) とビット先端周速度  $V_b$  (cm/s) の関係を3種類の切削深さ  $z=1.5, 2.0, 3.0$  cm に対して示したものである。 $Q_w$  は  $V_b$  の増加とともに双曲線的に減少し一定値に近づく傾向にある。重回帰分析の結果、以下の実験式を得た。

$$Q_w = 1.49 \times 10^{-1} V_b^{-0.292} z^{1.319} \quad (r=0.888) \quad (25)$$

ここに、 $r$ は重回帰係数である。

従って、切削ピッチ 1.0 cm の場合、切削能力である  $Q_w$  は切削深さが深い程、また  $V_b$  の低速域にある程顕著に増大することが判明した。

ることである。そのため、切削ドラムの進行方向切削ピッチ、切削深さおよびビット先端周速度の変化による衝撃切削能力について測定を行った。得られた新しい知見を以下に示す。

(1) 切削ドラムに作用する最大トルク、平均トルク、全トルクおよび水平方向の最大衝撃加速度は、進行方向切削ピッチの増加とともに増加するが、切削ピッチが 3.0 cm 以上となると急増する。また、外側に位置する「Bit 1」「Bit 4」のトルクは、切削溝の両端部を切削するために、内側に位置する「Bit 2」「Bit 3」の値よりも増大している。

(2) 単位衝撃仕事量当りの切削土量で表現される切削能力は、いずれの切削深さに対しても進行方向切削ピッチが 3.0 cm において最大値となる。これは単位時間当りの切削土量が切削ピッチにほぼ比例して増加するのに対し、単位時間当りの衝撃切削仕事量が切削ピッチ 3.0 cm 以上で急増するためである。

(3) ビット先端周速度が切削能力に与える影響について、最大トルクおよび水平方向の最大衝撃加速度はビット先端周速度の増加とともに著しく増加している。また、外側に位置する「Bit 1」「Bit 4」の値は、内側に位置する「Bit 2」「Bit 3」と比較して約 2 倍の値を示している。平均トルクおよび全トルクはビット先端周速度の小さい範囲で急増しそれ以降はゆるやかに増加している。

(4) 切削ビットに作用する全トルク  $T_\tau$  (kNcm) とビット先端周速度  $V_b$  (cm/s)、切削深さ  $z$  (cm) の間には次の実験式が成立する。

$$T_\tau = 1.05 \times 10^2 V_b^{0.139} z^{0.640} \quad (r=0.893)$$

ここに、 $r$ は重回帰係数である。

(5) 単位衝撃仕事量当りの切削土量で表現される切削能力  $Q_w$  (cm<sup>3</sup>/kNcm) とビット先端周速度  $V_b$  (cm/s)、切削深さ  $z$  (cm) の間には次の実験式が成立

## 5. 結論

本研究の目的は、ポイントアタックビットによるモルタルの衝撃切削能力を実験的に考察し、評価す

する。

$$Q_w = 1.49 \times 10^{-1} V_b^{-0.292} z^{1.319} \quad (r=0.888)$$

ここに、 $r$ は重相関係数である。

なお、本実験はドラム径を実機の1/2としているために、回転速度とビット周速度については実機と同一の値としているが、切削長 $L$ については実機の1/2となっている。今後、より厳密な理論解析を行い実機における切削能力と最適ピッチについて検討していく所存である。

さらに、実際の切削は摩耗したポイントアタックビットで行う時間の方が多く、ビットの摩耗による切削能力の変化については別の論文<sup>14)</sup>に記述している。本実験においては比較的強度の小さいモルタルを切削したために、実験前後のビットの摩耗量、摩耗形状を計測した結果殆ど変化はなく、各種計測値に影響はなかったことを追記する。

謝辞：最後に、本研究を実施するに当り、実験に際しては本学技官河野幸一氏、元学生吉川和男氏に多大なる援助を得たことに対し謝辞を表す。

#### 参考文献

- 1) 室達朗, 竹垣喜勝, 丸山健一, 藤本英樹: 岩盤切削機の掘削能力とビット摩耗の寿命予測, 土木学会論文集, No.492/VI-23, pp.127-136, 1994年6月.
- 2) 土質工学会編: 土と基礎・最近の工法, pp.1-18, 1967年12月.
- 3) 室達朗, 深川良一: 岩盤掘削刃の摩耗とハードフェーシング対策, 土木学会論文集, 第364号/III-4,

- pp.87-95, 1985年12月.
- 4) Dutta,P.K. : A theory of percussive drill bit penetration, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.9, pp.543-567, 1972.
- 5) Lundberg,B. : Penetration of rock by conical indenters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.11, pp.209-214, 1974.
- 6) 島田英樹, 松井紀久男, 古賀英司: 円錐形ビットの岩石への静的圧入, 資源と素材, Vol.109, No.1, pp.43-49, 1993年.
- 7) 室達朗, 深川良一, 藤田克美: 軟岩に対する比切削抵抗と定常掘削力の発生機構, 土木学会論文集, 第424号/III-14, pp.125-133, 1990年12月.
- 8) Soroushian,P., Choi,K. and Alhamad,A. : Dynamic constitutive behavior of concrete, *ACI Journal*, Vol.83, pp.251-259, 1986.
- 9) 鈴木光, 西松裕一, 小泉昇三: 石炭・岩石類の切削機構について(第2報) — 二次元切削実験 —, 日本鉱業会誌, Vol.82, No.938, pp.502-508, 1966年6月.
- 10) 島田英樹, 松井紀久男, 一ノ瀬政友: 衝撃破砕試験による岩石の破砕性の評価, 資源・素材学会誌, 108, No.5, pp.402-407, 1992.
- 11) 島田英樹, 松井紀久男: 円錐形ビットの岩石への動的圧入挙動, 九州大学工学集報, 第65巻, 第2号, pp.137-142, 平成4年3月.
- 12) 竹田仁一, 立川博之: 高速圧縮荷重をうけるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式, 日本建築学会論文報告集, 第78号, pp.1-6, 昭和37年10月.
- 13) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文報告集, 第396号, pp.50-58, 1989年2月.
- 14) 室達朗, 吉川和男, 柳原信也: コンクリートの衝撃切削抵抗に及ぼすポイントアタックビットの摩耗による影響, 愛媛大学工学部紀要, 第16巻, 1997年2月. (投稿中)

(1996. 7. 30 受付)

## EXPERIMENTAL CONSIDERATION ON THE IMPACT CUTTING PRODUCTIVITY OF MORTAR BY A POINT ATTACK BIT

Tatsuro MURO, Yoshikatsu TAKEGAKI and Tetsuya ISHIKAWA

To clarify the impact cutting productivity of mortar by a point attack bit, a new rotary impact cutting test machine was developed. The purpose of this study is to consider experimentally the effect of the cutting pitch, the cutting depth and the circumferential speed of the point attack bit on the cutting torque and the cutting volume of mortar. As the result, it is verified that the maximum torque acting on the cutting drum and the horizontal maximum impact acceleration increase with the increment of the cutting pitch and the circumferential speed of the point attack bit, and the cutting productivity takes a maximum value at some value of the cutting pitch for all cutting depth.