

# 硬質地盤の掘削性に関する検討 (第1報)

—ブレードビットによる回転掘削—

齋藤 二郎 松尾 龍之  
芳賀 孝成

## A Study of Drillability of Hard Ground (Part 1)

—Rotary Drilling by Blade Bit—

Jiro Saito Tatsuyuki Matsuo  
Takashige Haga

### Abstract

It is generally considered that drilling efficiency becomes higher when minimum energy can be used to produce the maximum drilling rate and this is of advantage with respect to drilling costs also. The main factors involved in drilling are bit thrust, rotary speed and circulation rate. Rotary speed is limited by the capacity of the boring machine and the stability of drilling. In these tests, mortar was drilled by a 300-mm blade bit and specific energy consumption, drilling rates, torques and chipped particle sizes were determined. Rotary speed and circulation rate were kept constant and bit thrust was varied. It was ascertained that there is a close correspondence between the minimum specific energies and uniaxial compressive strengths of drilled samples, or the values of specific energies given by the impact-crushing test suggested by the authors.

### 概 要

一般に掘削能率は最小のエネルギーで最大の掘進速度が得られる条件で作業した場合にもっとも能率がよく、掘削コストの面からも有利であると考えられる。掘削条件としては主にビット推力、回転速度、循環水の流量など挙げられるが、回転速度は機械の容量や掘削の安定性に制限される。本実験では回転速度、循環水の流量を一定にしてビット推力を変化させて300mmのブレードビットでモルタルを掘削し、掘削に要した比エネルギー、掘進速度、トルク、掘削ずりの粒径を測定したものである。比エネルギーの最小値は被削試料の一軸圧縮強度や我々が提案した衝撃破砕試験で求めた比エネルギーの値とかなり一致した結果が得られた。

### 1. まえがき

近年本四連絡橋などの大規模な構造物の築造が計画、実施されようとしておるが、これらの基礎施工に大口径掘削機の有利性が認識され、硬質地盤、特に岩盤の回転掘削に関する研究を進めてゆく必要性が増大してきた。従来から岩石の掘削性を定量的に評価することは困難で、岩石そのものの性質だけでなく、使用する掘削機械やビットの性能なども密接な関係をもっているため非常に複雑なものである。

本実験では基礎的な掘削実験により、掘進速度や掘削に要したエネルギーを比較、検討したものである。ビットは300mmのチップ付ブレードビットを用いて3種類の強度のモルタルからなる模型地盤を掘削して、その消費エネルギーを求め、これと筆者らが提案した衝撃破砕試験<sup>1)</sup>で求めたエネルギーの値、および被削試料の一軸圧縮強度の値との相関性などを調べた。

### 2. 回転掘削の考え方

一般に単位量の岩石を破砕するのに必要なエネルギー

一はある限界値を越えるとほとんど一定になるといわれている<sup>2)</sup>。この値を比エネルギーと定義すると、掘進速度  $v$  は

$$v = e(P_0/AE) \quad (\text{cm/min}) \quad (1)$$

となる。ただし  $P_0$  : 岩石に伝わった出力 (joules/min),  $A$  : 掘削断面積 ( $\text{cm}^2$ ),  $e$  : 出力が岩石に伝わる効率である。

また回転掘削の運動はビットの切削刃による圧入と、回転方向の運動という別個の2作用の組合せと考えることができる。すなわち掘削に要する仕事はビット推力  $F$  (kg) とトルク  $T$  (kg-m) によってなされる。いまビットの回転速度  $N$  (rev./min), 掘削断面積  $A$  ( $\text{cm}^2$ ), 掘進速度  $v$  (cm/min) とすれば、1分間になされる全仕事量  $P_0$  は

$$P_0 = (Fv + 2\pi NT)/10.2 \quad (\text{joules/min}) \quad (2)$$

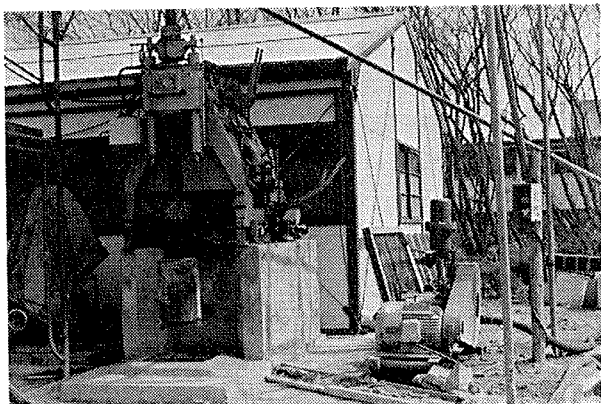
である。他方1分間に掘削される体積は  $A v$  ( $\text{cm}^3$ ) であるので、比エネルギーは次式で求める。

$$E = \{F/A + (2\pi/A)(NT/v)\}/10.2 \quad (\text{joules/cm}^3) \quad (3)$$

### 3. 実験方法

#### 3.1. 実験装置

実験装置は写真のような所要動力10~15psのボーリングマシンを改造して、推力、消費電流、掘進長が検出できるようにしたもので、回転数は18, 155, 280r.p.m., 最大推力3,000kg, 最大トルク400kg-mである。掘削ずりは清水を正循環させて排出した。ポンプの吐出圧力は25~70kg/cm<sup>2</sup>, 流量は2.6~6.3m<sup>3</sup>/h.r.である。



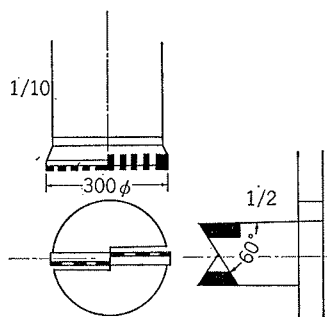
写真一 実験装置

#### 3.2. ビット

ビットはメタルチップを取り付けた直径300mmの2翼ブレードビットで、その形状を図一に示している。チップの材質は超硬合金G-2を使用した。

#### 3.3. 被削試料

試料はA: 高強度のもの(一軸圧縮強度400kg/cm<sup>2</sup>)



図一 使用したブレードビット

を目標に製作したもの, B: 中程度のもの(200kg/cm<sup>2</sup>), C: 低強度のもの(100kg/cm<sup>2</sup>)を直径450mm, 高さ450mmの鋼管内に打設したものでこれを模型地盤とした。各試料の工学的性質を表一に示す。

| 試料 | 一軸圧縮強度                | 引張強度                 | 比重   | ショア硬度 | ヤング係数                                   | 弾性波速度      |
|----|-----------------------|----------------------|------|-------|---|------------|
| A  | 347kg/cm <sup>2</sup> | 27kg/cm <sup>2</sup> | 2.13 | 9.5   | 3.30×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> | 3.59kg/sec |
| B  | 232kg/cm <sup>2</sup> | 17kg/cm <sup>2</sup> | 2.03 | 15.7  | 2.20×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> | 3.15kg/sec |
| C  | 115kg/cm <sup>2</sup> | 10kg/cm <sup>2</sup> | 1.97 | 18.0  | 0.96×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> | 2.55kg/sec |

表一 試料の工学的性質

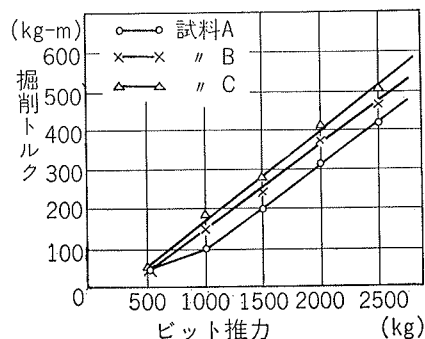
#### 3.4. 実験方法

3種類の試料に対して、回転数は一定(18r.p.m.)にし、ビット推力を500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500kgの5段階に変化させ、各々の推力で10cm掘削して、掘削時間、所要電流、掘削ずりの粒径を測定した。

### 4. 実験結果

#### 4.1. 掘削トルク

ビット推力と掘削トルクの関係は図二に示しているが、推力がある程度大きくなるとほぼ比例してトルクは増加している。これは推力が増加すると歯先の貫入量が大きくなり、切削抵抗が増大するためである。



図二 ビット推力とトルクの関係

また一軸圧縮強度が小さいものほど同一推力でも貫入量が大きくなるのでトルクは大きくなっている。

#### 4.2 掘進速度

単位掘削径当りビット推力 (F/D) とビット1回転当り掘進長 (v/N) の関係については, M.G. Bingham<sup>3)</sup> がかなり詳しく調べている。その考え方の基本を図-3に示す。

OA: (performance line)

掘削ずりの除去がほぼ完全でもっともよい掘削反応を示している。

BC, B'C': (transport line)

ずりの除去が不完全なとき,

OD: (lower drilling limit)

ビット推力が増加しても掘進速度がほとんど変化しない。

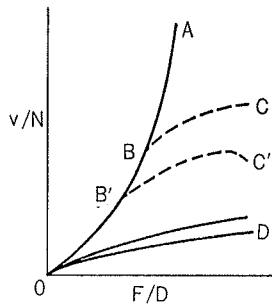


図-3 F/Dとv/Nの関係

本実験のブレードビットについて上の関係を求めたのが図-4であるが, ほぼ performance line 上にありかなり能率のよい掘削が行なわれているようである。またグラフからも明らかなようにビット回転数が一定であれば, 掘進速度はビット推力の増加とともに急激に大きくなっている。よって回転掘削の場合, 最適掘削条件を決定する時にはビット推力をもっとも重要視しなければならないものの一つである。

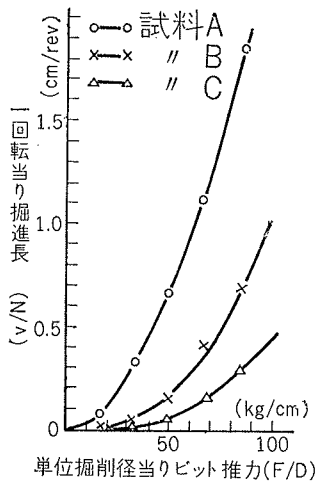


図-4 ブレードビットのF/Dとv/Nの関係

#### 4.3 比エネルギー

ある掘削機械で与えられた岩石を掘った場合に, その性能を評価するのに, 掘削に要した比エネルギーを比較することによって非常に合理的に評価できる。

本実験ではビット推力と比エネルギーの関係を調べたが, その結果を図-5に示している。グラフから明らかなように, 推力が増加するにしたがって比エネ

ギーは急激に減少し, ある定常値に近づいている。

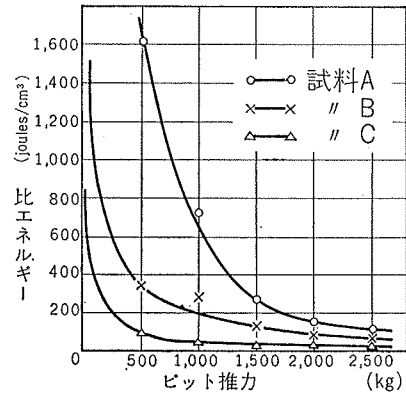


図-5 ビット推力と比エネルギーの関係

比エネルギーの定常値は試料の種類, ビットの形状等種々の条件で異なってくるが, 本実験で使用したビットについての定常値は次のようにして求めた。

(3)式より比エネルギーを推力によるもの  $E_t$  と, 回転によるもの  $E_r$  に分けて考えることができる。

$$E_t = F/10.2A \quad (\text{joules/cm}^3) \quad (4)$$

$$E_r = (2\pi/A)(NT/v)/10.2 \quad (\text{joules/cm}^3) \quad (5)$$

実験結果より  $E_t \ll E_r$  になったのでほぼ  $E \approx E_r$  と考えることができる。図-6には1回転当り掘進長 (v/N) と掘削トルクの関係を示しているが, 両者の関係は, 推力がある程度大きくなるとほぼ一次関係に比例している。よってこの直線のこう配から  $NT/v$  は一定になり,  $E_r$  が求まる。この値がほぼ300mmビットの比エネルギーの定常値と考えられる。

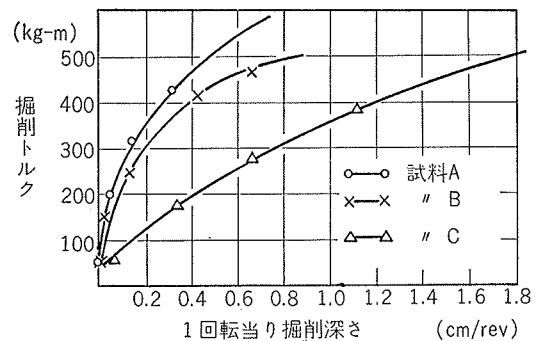


図-6 v/Nと掘削トルクの関係

一方岩石をある大きさに破碎するのに必要な比エネルギーの値は Bond の粉碎理論<sup>4)</sup>より

$$E = \sqrt{D_0} E_0 (1/\sqrt{D_g} - 1/\sqrt{D_f}) \quad (\text{joules/cm}^3) \quad (6)$$

で求めることができる。この式で

$E_0$ : 無限大から  $D_0$  ミクロンの大きさに岩石を破碎するのに必要な比エネルギー (joules/cm<sup>3</sup>)。

$D_f$ : 破碎前の粒子の大きさ (ミクロン)。

$D_g$ : 破碎後の粒子の大きさ (ミクロン)。

いま非常に細かく破碎したとすると  $D_f \gg D_g$  と

るので(6)式は

$$E \approx \sqrt{D_0 E_0} / \sqrt{D_g} \quad (\text{joules/cm}^3) \quad (7)$$

となり、比エネルギーは粒子の大きさの平方根に反比例する。これは掘削ずりの排出状態や掘削機械の出力あるいはカッターの種類などを考えなければ掘削ずりの粒径が大きいほど比エネルギーの値は小さくなり、掘削能率がよくなる。すなわち掘削能率は比エネルギーが最小のとき最大となることを表わしている。

反対に、掘削される岩石を必要以上に小さな破片にすることは比エネルギーが増大するために、単位体積を掘削するのに要するエネルギーが大きくなり、掘削能率は悪くなる。

図-7に試料Bの掘削ずりの粒径加積曲線を示しているが、ビット推力の増加とともにずりの粒径が大きくなっているのがわかる。試料A, Cとも同じようなグラフが得られた。

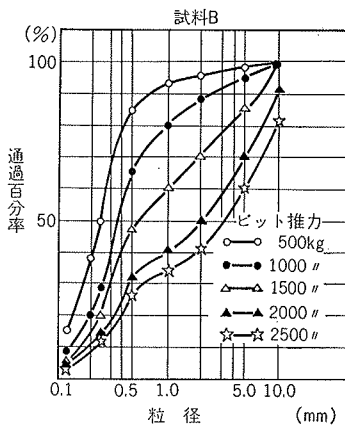


図-7 掘削ずりの粒径加積曲線

図-8は比エネルギーと掘削ずり50%粒径との関係を求めたものであるが、(7)式を用いた衝撃破砕試験で得られるグラフと同じような関係が認められる。

#### 4.4. 比エネルギーと一軸圧縮強度の関係

一軸圧縮強度の単位  $\text{kg/cm}^2$  は比エネルギーの単位  $\text{joules/cm}^3$  と同じになる。 ( $\text{kg/cm}^2 = \text{kg-cm/cm}^3 = 1/10.2 \text{joules/cm}^3$ )

R. Teale<sup>1)</sup>によると比エネルギーの最小値は、ほぼその岩石の一軸圧縮強度に等しいと言われている。

また、M. Mellorと I. Hawkes<sup>5)</sup>はアメリカやヨーロッパで製作、施工されたトンネルボーリングマシンについて上の関係を調べている。それらの関係を図-9に示しているが、一軸圧縮強度  $\sigma_c$  と比エネルギー  $E$  との比  $E/\sigma_c$  は全て0.1~10の範囲に入っている。

図-10には本実験で得られた比エネルギーの最小値および1回転当りの掘進長(v/N)とトルクの関係より求めた比エネルギーの最小推定値を示している。

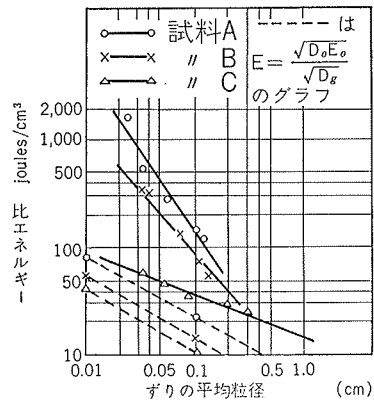


図-8 ずりの50%粒径と比エネルギーの関係

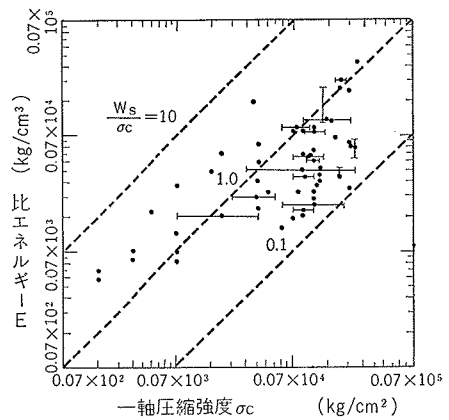


図-9 比エネルギーと一軸圧縮強度の関係

両者とも0.1~10の範囲に入っているが、推定値はほぼ  $E/\sigma_c = 1$  の直線に近いところにプロットされている。

#### 5. 検討

上述したように Bondの粉砕理論より(7)式で得られる比エネルギーの値で掘削される場合に、もっとも効率のよい掘削をしていると考えられる。すなわち理想的なカッターで掘削し、ずりの除去が完全な時のみ

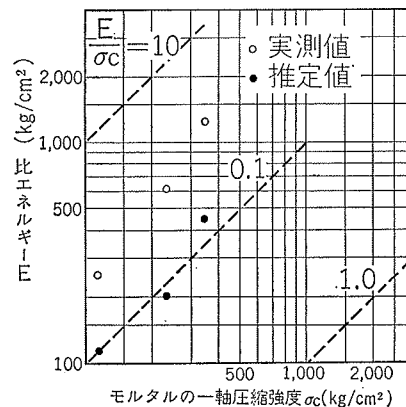


図-10 本実験のEとσcの関係

実現するもので、実際の掘削では歯先と被削体表面間の摩擦やビット側面と孔壁面の摩擦、あるいは機械効率など種々の要因で比エネルギーはこの値よりも大きくなる。両者の比を掘削効率と考へて図-11にビット推力と掘削効率の関係を示した。ビット形状の不良、掘削ずりの再破碎、掘削条件の不適合などの影響で効率は50%以下になっていることがわかる。

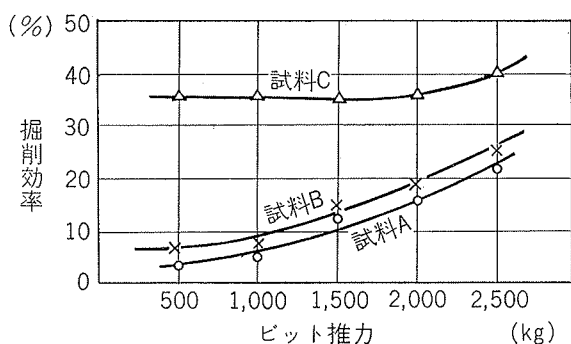


図-11 ビット推力と掘削効率の関係

またビットの回転速度に関しては、これを増加させると掘進速度は直線的に増加することが多くの実験で明らかにされているが、掘削機械の動力容量、掘削の安定性(振動による直進性の不安定、拡孔率の増大など)に回転速度はそれほど変えることはできない。

以上、掘削に要する消費比エネルギーと被削試料を破碎するのに必要な比エネルギー、および被削試料の一軸圧縮強度との関係を調べてきたが、掘削が能率よく行なわれると各々の値はかなり一致したものが得られることが判明した。

逆にこの関係を利用すると掘進速度がある程度予想することができる。すなわちある機械で与えられた岩石を掘削する時、岩石の一軸圧縮試験や衝撃破碎試験を行なって比エネルギーの値を求めてやれば、(1)式より掘進速度の値が得られる。また掘削径や機械出力の異なる場合の掘進速度を推定することも可能である。

図-12にリバースサーキュレーションドリルの三翼ビットで掘削した場合の掘削実績を示している。現場地盤の比エネルギーは本実験の模型地盤と比較してかなり小さいので、通常の掘削機械でも能率よく掘削で

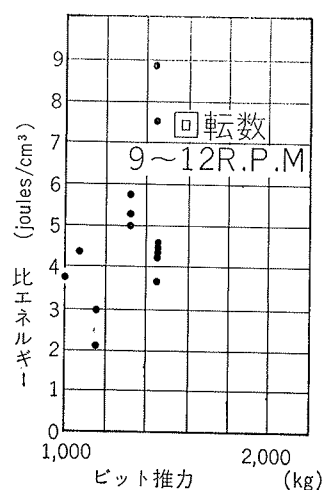


図-12 リバースによる現場実績

きる地盤であることが推定できる。

## 6. あとがき

以上、300mmのブレードビットについて実験を行ったが、ビットが一種類であること、試料がモルタルであること、またビット推力も限られ回転数も一定としているので、本実験結果から実際の掘削能率を評価することはまだ困難である。色々のビットを使用して広範囲の強度の岩石を掘削してさらに実験を進めてゆきたい。

## 参考文献

- 1) 斎藤, 芳賀: 衝撃試験による岩石の破碎常数とその適用性について, 第7回土質工学会講演集, 1972
- 2) R. Teale: The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, 1965.
- 3) M.G. Bingham: A New Approach to Interpreting Rock Drillability, The Oil and Gas Journal, Nov. 2, 1964~Apr. 5, 1965
- 4) F.C. Bond: Crushing and Grinding Calculation, 1961
- 5) M. Meller, I. Hawkes: How to Rate a Hard Rock Borer, World Construction Sep. 1972