

# 硬質地盤の掘削性に関する検討 (第2報)

—ローラー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 2)

—Rotary Drilling by Roller Bit—

Jiro Saito      Tatsuyuki Matsuo  
Takashige Haga

### Abstract

When hard ground is drilled, especially in the case of rock, specific energy—the energy consumed in drilling per unit volume—can be used as an index for evaluation of drilling efficiency. In Part 1, experiments were conducted with 300-mm blade bits to drill model ground made of mortars of several different strengths, and it was recognized that there is a close correspondence to minimum specific energies and uniaxial compressive strengths of drilled samples or the values of crushing energy given by the impact-crushing test. In this Part 2, mortars of three different strengths the same as in the previous tests were drilled using two roller bits. And in case of the roller bits also, it was shown that the concept of specific energy is proper as an index to evaluate drilling efficiency.

### 概 要

硬質地盤、特に岩盤を掘削する場合、その掘削能率を評価するための指標として、掘削された地山の単位体積当りに消費されたエネルギー、すなわち比エネルギーを用いることができる。前報では300mmのブレードビットで各種の強度をもつ模型地盤(モルタル)について削孔試験を行なったところ比エネルギーの最小値は被削試料の一軸圧縮強度や衝撃破碎試験で求めた破碎エネルギーと密接な関係が存在することが確かめられた。本報では2種類のローラービットについて、前回と同様3種類の強度からなるモルタルを掘削したが、ローラービットの場合も比エネルギーの概念が掘削能率を評価する指標として有効であることを示す。

## 1. まえがき

最近、構造物の大型化にともなって、その基礎支持層は岩盤等の堅固な硬質地盤に基礎を設置する必要が多くなってきた。これらの基礎施工には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。

一般に掘削能率は最少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

が、本実験では単位体積を掘削するのに要したエネルギー、すなわち比エネルギーの値を掘削能率を評価するための指標とし、2種類のローラービットについてその掘削特性を検討した。

## 2. 回転掘削の考え方

ローラービットの回転掘削運動はブレードビットの場合と同様、切削刃による圧入と、回転方向の2つの作用の組合わ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、回転速度  $N$  (r. p. m), 掘削断面積  $A$  ( $\text{cm}^2$ ), 掘進速度  $v$  ( $\text{cm}/\text{min}$ ) とすれば 1 分間になされる仕事は

$$P_0 = Fv + 2\pi NT \quad (\text{kg-cm}/\text{min}) \dots\dots(1)$$

である。他方 1 分間に掘削される体積は  $Av$  ( $\text{cm}^3$ ) であるので比エネルギー  $E$  は次式よりもとめることができる。

$$E = P_0/Av = F/A + (2\pi/A)(NT/v) \quad (\text{kg-cm}/\text{cm}^3) \dots\dots(2)$$

また  $E$  の成分を推力によるもの  $E_t$  とトルクによるもの  $E_r$  に分けて考えると

$$E = E_t + E_r \quad (\text{kg-cm}/\text{cm}^3) \dots\dots(3)$$

$$E_t = F/A \quad ( \quad " \quad ) \dots\dots(4)$$

$$E_r = (2\pi/A)(NT/v) \quad ( \quad " \quad ) \dots\dots(5)$$

となり、 $E_t$  は掘削面に働く推力によって生じる応力に等しく、また  $E_r$  は断面積  $A$  が一定であれば、トルク  $T$  と 1 回転当り掘進長さ  $v/N$  の比として求めることができる。

### 3. 実験方法

#### 3.1. 実験装置

実験装置は前回と全く同じものを用いている。表一 1, 2 にボーリングマシンと循環ポンプの主な仕様を示す。

所要動力	10~15馬力 (7.5~11kW)
回転数	18, 155, 280, 18(R) r.p.m.
推力	最大 3000 kg
トルク	最大 400 kg-m

表一1 掘削機械の主な仕様

吐出圧力	25 ~ 70 $\text{kg}/\text{cm}^2$
吐出量	2.6 ~ 6.3 $\text{m}^3/\text{hr.}$

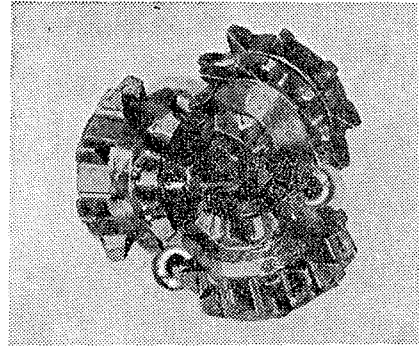
表一2 循環ポンプの主な仕様

#### 3.2. ビット

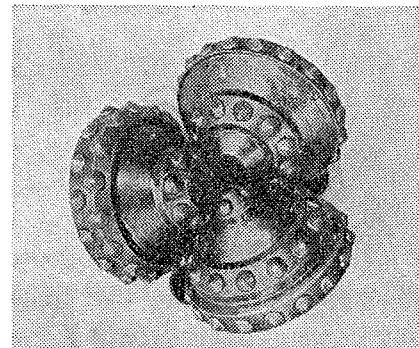
ビットは  $5\frac{5}{8}$ inch のトリコンローラービットで、次に示す 2 種類のものを用いた。

3S ビット……軟質地層用の中でもっとも広く使用されているもので、他の歯形よりも歯の間隔が広く、歯高も高い。(写真一1)

3VH ビット……硬質地層用のビットで歯のかわりに焼結したタングステン・カーバイドチップをカッターの円周上に植込んだもの。(写真一2)



写真一1 3Sビット



写真一2 3VHビット

#### 3.3. 被削試料

試料は表一3に示すような 3 種類の強度を有するモルタルを直径 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。

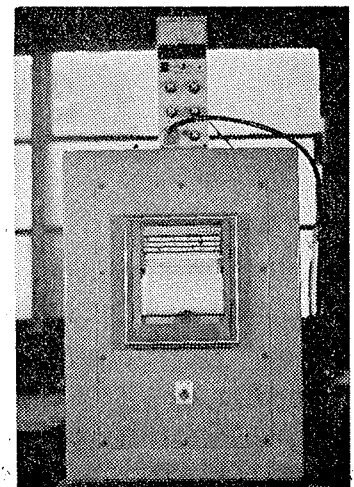
試料	一軸圧縮強度	引張強度	比重	ショア硬度	弾性波速度
A	375 $\text{kg}/\text{cm}^2$	26 $\text{kg}/\text{cm}$	2.10	34	3.38 $\text{km}/\text{sec}$
B	214 "	15 "	1.91	26	2.90
C	130 "	8 "	1.89	16	2.21

表一3 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, 1000, 1500, 2000, 2500 kg の 5 段階に変化させ、各々の推力で 10cm 掘削した場合の掘削時間、所要電流、掘削ずりの粒径を測定した。

なお、所要電流、ビット推力、掘削深



写真一3 記録装置

度は写真-3に示すペン書きレコーダに記録し、掘削時間はストップウォッチで測定した。

#### 4. 実験結果

##### 4.1. 掘削トルク

ビット推力Fと掘削に要するトルクTは密接な関係がある。この関係を示す式としては一般に Hughes 社の次式がよく用いられている<sup>2)</sup>。

$$T = 2.961 \times 10^{-2} k W_d^{1.5} D^{2.5} \quad (\text{kg-m}) \dots\dots (6)$$

$W_d$  : 単位口径当りのビット推力  $F/D$  (kg/cm)

$D$  : ビット径 (cm)

$k$  : 地質によって変わる定数。

$$(k = 14 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5})$$

この式は直径 1.3m 程度の中口径ビットに対する実用式とされており、掘削トルクはビット推力の 1.5 乗に比例している。

本実験で求められた両者の関係を図-1に示しているが、掘削トルクは低推力域の部分を除いてほぼ推力の 1 乗に比例している。また測定値は(6)式で計算された値よりもかなり大きくなったが、これは実験に用いたビットが小口径 (142.9mmφ) であり、中口径に対する実用式(6)はあまり適用できないようである。

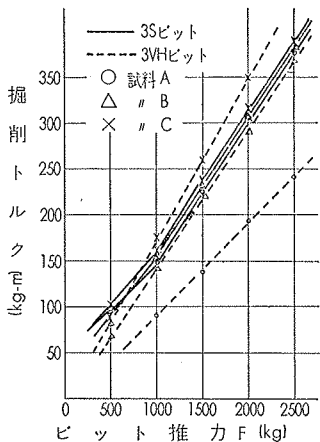


図-1 ビット推力とトルクの関係

##### 4.2. 掘進速度

ビット推力が掘進速度に及ぼす影響は図-2に示している。両ビットとも推力の増加とともに掘進速度は直線状に大きくなっているが、3VH ビットの掘進速度は 3S に比べて小さくなっている。これは 3VH の歯型形状が最硬岩用に設計されたものであり、カッタの掘削作用は摩擦が少ない破碎 (chipping)、押しつぶし (crushing) 作用が主となっており、3S ビットの削り作用 (scrapping)、ひねり掘り起こし作用 (gou-

ging) に比べて切削効率が悪いためであると思われる。

また、3S ビットで中軟質試料 B、C を掘削した場合、推力 1500~2000kg のところで曲線が変曲点を示しており、掘進速度の増加割合が小さくなっている。これは掘削量が多くなると、循環水の流量が不足して掘削ずりの排出が不完全になり、ずりの再破碎が行われたためである。

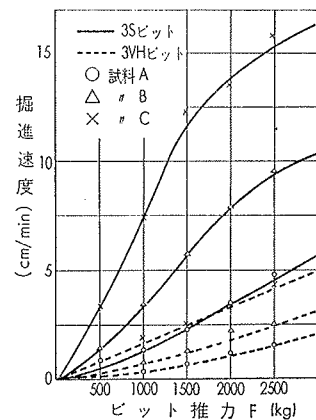


図-2 ビット推力と掘進速度の関係

##### 4.3. 比エネルギー

4.3.1. 比エネルギーEとビット推力Fの関係 一般に岩石を破碎する時、破碎エネルギーが大きくなると比エネルギーEは減少し、ある限界値を越えるとほとんど定常になるといわれている<sup>3)</sup>。実験で求められたEとFの関係を図-3に示した。Fが大きくなるとEは減少する傾向を示しているが、推力が小さいために、まだ定常値を示すまでには到っていない。

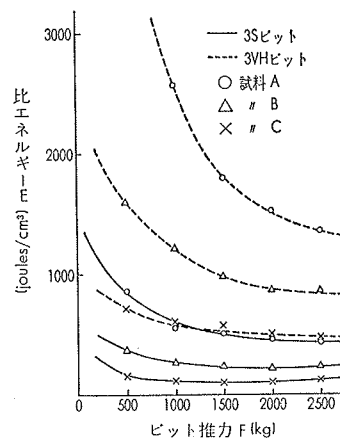


図-3 ビット推力と比エネルギーの関係

4.3.2. 比エネルギーの定常値  $E_{min}$  2でのべたように比エネルギーEは二つの成分,  $E_t$  と  $E_r$  に分けて考えることができるが, 実験した結果  $E_r \gg E_t$  となるので, 比エネルギーEはトルクTと1回転当り掘進長 $v/N$ の関数になる。掘削ずりの排出が完全で十分な大きな推力を与えてやるとこの比は一定となり, 比エネルギーは  $E_{min}$  を示す。実験よりこの関係を求めたのが図-4である。グラフではTと $v/N$ がまだ比例関係になっていないが, 推力が十分な範囲で両者の比を推定してやれば  $E_{min}$  を求めることができる。このように推定して得たのが表-3である。

ビット	試料A	試料B	試料C
3 S ビット	1830	697	261
3 V H ビット	3310	2090	1220

表-4 T と  $v/N$  の関係より求めた  $E_{min}$  ( $\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ )

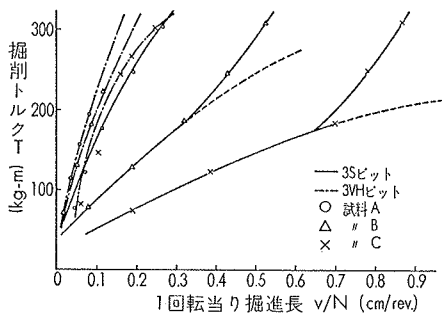


図-4 T と  $v/N$  の関係

4.3.3. 比エネルギーEと一軸圧縮強度  $\sigma_c$  の関係

比エネルギーEの単位 ( $\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ ) は, 圧縮強度  $\sigma_c$  の単位 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) と次元が等しく両者の間に密接な関係が期待できる。図-5に実験で求めたこれらの関係を示しているが, 両対数目盛で直線となっている。また3Sビットの  $E/\sigma_c$  の値は3.2~5.0の範囲にある。すなわち, 能率のよいビットで理想的な掘削が行なわれた場合は  $E/\sigma_c$  の値が1に近くなるものと推定できる。

図-6に  $\sigma_c$  が  $100\sim 1000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の範囲で非常に変化に富んだ花崗岩を1.3m径のMRビットで掘削した現場実績を示している。各々の強度の岩石を掘削した場合の比エネルギーの値を正確には求められないが, Eの値はほぼ  $200\sim 500 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$  の範囲にあり, 地盤の強度の範囲とかなり一致している。

4.3.4. 被削試料の理論的破碎エネルギー  $E_{min}$  の値は理論的に得られる破碎エネルギーの最小量であるが, この値は被削試料の性質のみによるものである。

Bond は次の関係式によってこの値がほぼ求まることを多くの岩石破碎データから得ている<sup>9)</sup>。

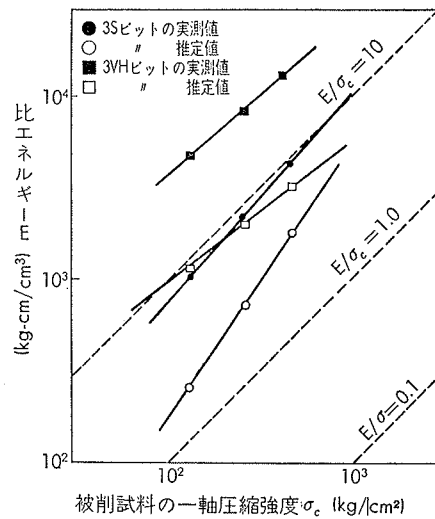


図-5 E と  $\sigma_c$  の関係

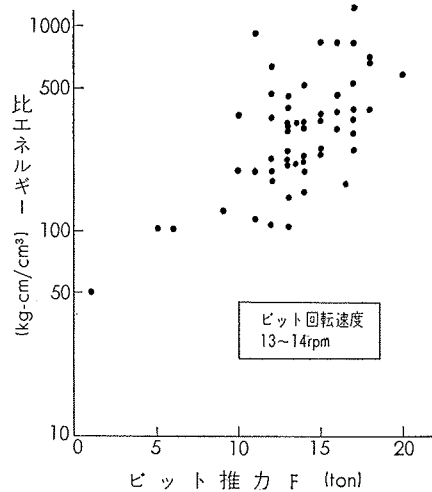


図-6 MRビットによる現場実績

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

この式で  $E_0$ : 無限大から  $D_0(\mu)$  の大きさに岩石を破碎するのに必要な比エネルギー

$D_g$ : 破碎後の粒子の大きさ

表-5には Bond が実験で求めた各種岩石の典型的な破碎比エネルギーを示している。

この比エネルギーの値は, 現在筆者らが提案している衝撃破碎試験で簡単に得ることができる<sup>5)</sup>。(図-7) 実験で推定した  $E_{min}$  はこの理論値よりもかなり大きくなるが, これは消費される仕事の量によるもので, 例えば必要以上に小さな破片に砕いた場合やビットと被削物との摩擦, あるいは機械的損失に消費される仕事によるものであろう。

岩 石	粒子の大きさ			岩 石	粒子の大きさ		
	0.1mm	1mm	10mm		0.1mm	1mm	10mm
ガラス	30	10	3	石 英	120	38	12
砂 岩	110	35	11	花 崗 岩	140	45	14
石 灰 岩	110	35	11	頁 岩	150	48	15
ドロマイト	110	35	11	タコナイト	180	57	18
石 英 岩	120	38	12	玄 武 岩	210	67	21

表-5 通常の破壊に必要な比エネルギー (Joules/cm<sup>3</sup>)

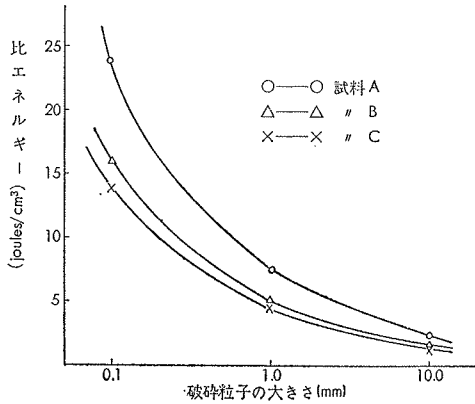


図-7 被削試料の理論的破碎エネルギー

#### 4.4. 掘削ずりの粒径

Bond の(7)式から、掘削ずりの粒径が大きいほど比エネルギーの値は減少し、効率のよい掘削ができることが期待できる。

図-8に3Sビットで試料Aを掘削した場合の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。

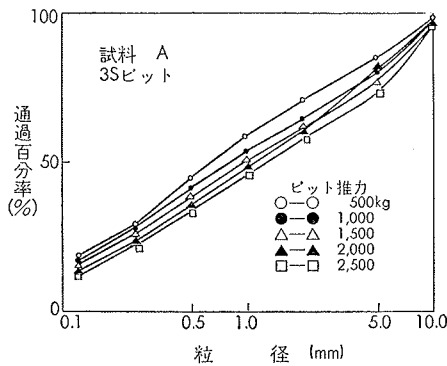


図-8 掘削ずりの粒径加積曲線

## 5. 検 討

以上、比エネルギーを比較することにより、掘削特性を検討してきたが、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た時が最大であると考えることができ、その意味から消費比エネルギーの値はただちに掘削能力を反映すると考えられる。

また、比エネルギーと被削試料の一軸圧縮強度の関係が求まれば、第(2)式よりある機械である岩石を掘削する場合、岩石の圧縮強度から掘進速度を推定するのが可能であることがわかった。

しかし、岩石の強度特性と掘削能力との関係は極めて複雑であり、掘削方法、ビットの種類によっても異なり非常に複雑なものである。そのために今後、一軸圧縮強度だけではなく、引張強度、かたさ、じん性、摩耗に対する抵抗性等、他の強度特性も考慮に入れて検討してゆく必要があると思われる。

## 6. あとがき

第1報ではブレードビットについて、今報では2種類のローラービットについて比エネルギーの定常値と被削物の一軸圧縮強度や破碎エネルギーとの相関関係を調べたが、実際の掘削作業においては比エネルギーの比較だけではなく、ビット摩耗等の経済的な問題も多数あり、掘削能率の検討はそれらの要因も含んで考慮しなければならない。

### 参考文献

- 1) 斎藤, 芳賀, 松尾: 硬質地盤の掘削性に関する検討 (第1報), 大林組技研報 No. 7, 1973
- 2) E. A. Morlan: Designing Large Diameter Hole Drilling Programs, World Oil 1962
- 3) R. Teale: The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, 1965
- 4) F. C. Bond: Crushing and Grinding Calculation, 1961
- 5) 斎藤, 芳賀, 松尾: 岩盤の掘削作業性判別のための簡易試験法について, 大林組技研報, No. 7, No. 8