掘削体積比エネルギーを用いた岩石強度の寸法効果の推定*

福井 勝則¹ 大久保 誠介²

Estimation of Size Effects in Rock Strength Based on Specific Energy

by Katsunori FUKUI^{a*} and Seisuke OKUBO^a

a. Department of Geosystem Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo,
Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

(*Corresponding author: E-mail fukui@geosys.t.u-tokyo.ac.jp)

It is well known that rock strength decreases with increasing of specimen size. Accurate knowledge for the size or scale effects in rock strength is very important to apply the small-scale experimental results to the large-scale underground space design. However, the investigation of the size effects requires tremendous efforts and expenses in most cases. In this study, a new method to estimate the size effects of rock based on the specific energy in excavation was proposed. The method needs minimum efforts without extra equipments. Through the careful examination of eleven excavation methods, it was found that the specific energy decreases with the excavation scale following the equation:

(Specific energy) $\propto$ (Excavation scale) $^{-2\alpha}$ with $\alpha=0.2$.

Cutting spacing, penetration or geometrical mean of the two was found to be appropriate as excavation scale. Specific energy is roughly proportional to square of strength. Then, the following equation stands:

(Rock strength) $\propto$ (Excavation scale) $^{-\alpha}$.

This result is very conformable to the size effects deduced by the results of the compression tests. The size of cuttings in excavation was examined and the close relation was found between the excavation scale and the size of cuttings. Relation between the specific energy and the work index in comminution was also discussed.

KEY WORDS : Specific Energy, Size Effect, Excavation, Cuttings, Work Index, Particle Distribution

1. はじめに

対象とする試験片の寸法により、材料物性が変化することは良く知られている。ことに、寸法により強度が変化することは、構造物の設計において重要であり、古くから多くの研究がなされてきた。岩石を対象とした研究は、1950年代から1970年代にかけて多く行われた¹⁻⁶⁾。その結果、 α を定数として、強度の寸法効果は次式で近似できることがわかった。

強度 $\propto$ (試験片代表寸法) $^{-\alpha}$

$=$ (試験片体積) $^{-\alpha/3}$ (1)

α は岩種により異なるが¹⁾、0.17 ~ 0.32であるものが多い⁷⁾。

強度の寸法効果は、試験片の寸法を変えた実験室実験²⁻⁵⁾、あるいは原位置試験⁶⁾によって検討されてきたが、多くの時間と費用を要することが知られている。そこで、本研究では、大きさの異なる掘削機械の掘削体積比エネルギーからこの寸法効果を見積もる手法を提案する。この方法によれば、計測とデータ整理以外に余分な手間と費用は発生しないし、さらに掘削中に連続的に大量のデータが得られる。

2. 無次元化掘削体積比エネルギーと掘削代表寸法

掘削機械において式(1)の強度と良い相関を持つ量として、掘

削抵抗があげられる。しかしながら、広い範囲の掘削機械を対象としたときには、正確な掘削抵抗を入手することは困難と考えた。これに代わるものとして、掘削機械の分野で広く使用されてきた掘削体積比エネルギー(単位体積の掘削に必要なエネルギー)のデータを収集することにした⁸⁾。以下の議論では、岩種による強度の差異の影響を除いて寸法効果を検討するのに便利な、無次元化掘削体積比エネルギー(無次元化SE)を用いて議論を進める。

無次元化SE = (掘削体積比エネルギー) / (一軸圧縮強度)
..... (2)

なお、式(2)の一軸圧縮強度は室内試験で得られるコア強度で、比較的入手しやすい。

式(1)の試験片代表寸法(掘削代表寸法)に相当するものとして、刃物間隔、切り込み深さ、および両者の積の平方根(幾何平均)などが考えられる。どれが優れているかは、データ整理後に検討することにして、以下では、11種類の岩盤掘削方法における刃物間隔、切り込み深さおよび無次元化SEの求め方について述べる。

自由断面掘削機、シェアラー、コンティニュースマイナーはいずれも切削式ビットで岩盤を切削するので、刃物間隔や切り込み深さは通常の決め方でよい。自由断面掘進機では、カッタヘッド長をビット数で除した平均ビット間隔を刃物間隔とし、カッタヘッド1回転あたりのカッタヘッドの移動量を切り込み深さとした。シェアラーはドラムカッタとも称されて、主として炭坑の長壁切羽で使用される大型機械である。ドラムが回転しながら切羽に沿って横に移動していき、掘削された石炭は手前にあるパンツアコンベアにのせられて運ばれる。ドラムにはらせん状に多数の

* 2004年6月21日受付 8月24日受理 資源・素材学会平成15年秋季大会にて一部発表

1. 普通会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科 地球システム工学専攻

2. 普通会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 地球システム工学専攻

[著者連絡先] FAX 03-5841-7035 (東大・地球システム)

E-mail: fukui@geosys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: 掘削体積比エネルギー, 寸法効果, 掘削, ザリ, 仕事指数, 粒度分布

ピックが配置されるが、この場合の刃物間隔はらせんの1ピッチとし、ドラム1回転あたりのドラムの横方向移動量を切り込み深さとした。コンティニュースマイナーは、炭坑の沿層掘進や短壁切羽で使用されることが多い。自由断面掘進機と似た掘削機械であるが、機械幅とほぼ同じ幅のカッターヘッドを持つ点で異なる。カッターヘッドのデザインやピックの配置は、メーカーにより相違に異なるが、平均的な値として、刃物間隔360mm、切り込み深さ150mmとした。掘削体積比エネルギーを(電動機出力)/(掘削体積)として求め、これを一軸圧縮強度で除して無次元化SEとした。

TBM, 2種類の回転削孔、さく岩機はいずれも円形の孔を掘るもので基本的な扱いは似ている。TBMでは、トンネルの半径をディスクカッター数で除した平均カッター間隔を刃物間隔とし、カッターヘッド1回転あたりの平均掘進長を切り込み深さとした。PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 回転さく孔は、PDC 刃先(直径13.3mm)が18個埋め込まれた外径98mmのビットで、沢入花崗岩(一軸圧縮強度203MPa)をさく孔した場合を対象とした⁹⁾。TBMと同様の考えで、ビット半径をPDC 刃先数で除した平均刃先間隔を刃物間隔とし、切り込み深さは1回転あたりの掘進長とした。振動回転さく孔は、回転に加えて、ビットに振幅50 μ m、周波数22kHzの振動を加え、稲田花崗岩(一軸圧縮強度200MPa)と江持安山岩(一軸圧縮強度120MPa)をさく孔した場合を対象とした^{10,11)}。さく孔中には、ビット先端のダイヤモンドが上下して、岩石面に食い込んだり離れたりするもので、1周期あたりのダイヤモンドの移動距離(岩石と再接触するまでの移動距離)を刃物間隔とし、1回転あたりの掘進長を切り込み深さとした。さく岩機では、ボタンビットが回転しながら、打撃により岩盤を掘削する。そこで1打撃あたりの回転によるボタンチップの平均移動距離を刃物間隔とした。なお、1打撃あたりボタンビットは20°回転するとした。切り込み深さは1打撃あたりの平均掘進長とした。以上の3機種においても、掘削体積比エネルギーを(電動機出力)/(掘削体積)として求め、これを一軸圧縮強度で除して無次元化SEとした。

衝撃力を1打撃ずつ加えた時の結果を2例取り上げた。佐々木ら¹²⁾は一字ビット(刃先角度90°)による動的貫入試験を行い、砂岩(一軸圧縮強度112MPa)で貫入量(切り込み深さ)は0.38mmであった。この場合、1打撃のみの貫入試験で刃物間隔は定義できないため、刃物間隔は切り込み深さと同じとした。砕岩棒による海底岩盤掘削は、重量500kNの鋼製の砕岩棒を数m程度ウインチで吊り上げ、自由落下させ、岩盤を掘削する方法である^{13,14)}。後藤ら¹³⁾は来島海峡大橋下部工事での砕岩棒が岩盤(風化花崗岩)に貫入する際の荷重-貫入量曲線を求めた。岩盤物性および吊り上げ高さにより貫入量は変化するが、平均的には貫入量370mm、最大荷重10MN、一軸圧縮強度10MPaであった。2mずつ横に移動して砕岩棒を自由落下させたので、刃物間隔は2mとし、貫入量を切り込み深さとした。掘削エネルギーを荷重-貫入量曲線の面積から求め、これを掘削体積と一軸圧縮強度で除して無次元化SEとした。

以下に取り上げる2つの方式は、機械掘削ではないが、広範に実施されており比較的容易にデータが得られるため取り上げた。

トンネルでの発破は、掘削機械による掘進と異なるが、比較的大きなずりが生じることもあってエネルギー効率が優れている。この場合には、平均さく孔間隔((トンネル断面積/さく孔数)の平方根)が刃物間隔に対応すると考えた。なお、トンネルの形状を制御するための壁面に沿うさく孔は、さく孔数から除外して平均さく孔間隔を計算した。発破は全断面ではなく、例えば上半1mの掘進長の発破後、上半1mおよび下半2mの掘進長の発破のよう

表1 各種掘削方法の代表寸法と無次元化掘削体積比エネルギー

掘削方法	刃物間隔 (mm)	切り込み深さ (mm)	刃物間隔と切り込み深さの 幾何平均(mm)	無次元化SE
1) 発破	877	1,000	936	0.05
2) 一軸圧縮試験	50	40	45	0.15
3) 砕岩棒	2,000	370	860	0.17
4) コンティニュースマイナー	360	120	208	0.26
5) シェアラール	450	150	260	0.28
6) 全断面トンネル掘進機	80	10	28	0.3
7) 自由断面掘進機	40	15	24	0.4
8) PDC 回転さく孔	2.7	1.0	1.7	1.1
9) さく岩機	3.0	0.8	1.5	2.0
10) ビット貫入試験	0.38	0.38	0.38	2.6
11) 振動回転さく孔	0.068	0.009	0.025	6.7

に進行する事が多い。そのような場合には、2回の発破で2mの掘進長であるとして、1発破あたりの掘進長に相当する1mを切り込み深さとした。例として、ねざめトンネルを取り上げた¹⁵⁾。掘削体積比エネルギーは、岩盤1m³あたりに用いた1.8kgのエマルジョン系含水爆薬の爆発エネルギーと等しいとし、これを一軸圧縮強度で除して無次元化SEとした。

大久保ら⁸⁾は、直径5cmの5種類の岩石(秋吉大理石、来待砂岩、田下凝灰岩、三城目安山岩、葛生ドロマイト)を用いて、一軸圧縮試験を行い、試験中にピーク強度を超えても試験を中止せず、初期高さ5cmの1/5になるまで試験片を圧砕し続け、荷重-変位曲線の面積から消費エネルギーを求めた。これを掘削体積と一軸圧縮強度で除して無次元化SEを求めたところ、その平均は0.15であった。切り込み深さはプラテンの押し込み量である4cmとした。刃物間隔は定義できないが、試験片の直径に相当する大きさを破碎しているため、これが刃物間隔であると考えた。

以上で述べた様々な岩盤掘削方法の刃物間隔、切り込み深さ、無次元化SEを表1に示す。表1は無次元化SEの小さいものから順に並べた。なお、同一の掘削方法でも条件(刃物間隔、切り込み深さ、岩種など)により、無次元化SEは変化することは知られている。そのため、今回は標準的であると考えられる値をなるべく採用したつもりであるが、無次元化SEの正確な見積もりは今後の課題として、表1の値により以下の議論を進めることとする。

3. 無次元化掘削体積比エネルギーの寸法効果

3・1 掘削代表寸法と無次元化SE

掘削代表寸法として、福井ら¹⁵⁾と同様に、刃物間隔、切り込み深さおよび両者の幾何平均を用いることにする。無次元化SEと、①刃物間隔、②切り込み深さ、③両者の幾何平均との関係を図1の両対数グラフ上に示す。(a)に示した無次元化SEと刃物間隔との関係では、両対数グラフで直線に近い関係があり、刃物間隔が大きくなるほど、無次元化SEが小さくなる傾向がみられ、無次元化SEに寸法効果のあることがわかる。図には線形近似した直線を示したが、刃物間隔が大きくなると、近似曲線からの偏差が大きくなる。発破および一軸圧縮試験では、近似曲線より無次元化SEは小さく、他方、砕岩棒、シェアラールおよびコンティニュースマイナーでは、無次元化SEは大きくなっている。(b)に示した切り込み深さとの関係でも、両対数グラフでほぼ直線関係がみられ、刃物間隔とほぼ同様である。(c)に示した刃物間隔と切り込み深さの幾何平均との関係でも両対数グラフ上で直線関係がみられるが、一軸圧縮試験では近似曲線からの偏差が大きい。

掘削代表寸法(mm)として刃物間隔、切り込み深さ、両者の幾何平均のいずれを採用しても、無次元化SEの寸法効果が現れており、近似曲線および相関係数は次のようになった。

$$\text{無次元化SE} = 1.87(\text{刃物間隔})^{-0.402}(\text{相関係数:0.92}) \cdots (3a)$$

無次元化 $SE = 1.24(\text{切り込み深さ})^{-0.398}$ (相関係数: 0.96) … (3b)

無次元化 $SE = 1.55(\text{幾何平均})^{-0.406}$ (相関係数: 0.95) … (3c)

3 者とも指数は -0.40 程度であり、掘削代表寸法としていずれを採用しても寸法効果の影響はさほど変化しない。相関係数に関

(a)

(b)

(c)

図1 代表寸法と無次元掘削体積比エネルギーの関係
図中の数字は表1の掘削方法の番号に対応する
(a) 刃物間隔
(b) 切り込み深さ
(c) 刃物間隔と切り込み深さの幾何平均

しては、刃物間隔との相関がわずかに低く、切り込み深さと幾何平均はほぼ同程度の強い相関である。これらより、寸法効果の影響を表すために、掘削代表寸法としていずれを採用してもかまわないことがわかるが、以下では刃物間隔と切り込み深さの幾何平均を用いることとする。

3・2 粒度分布との関係

今回示した 11 種類の岩盤掘削方法は、2 章で述べたように掘削機構は大きく異なっているが、式 (3) のように無次元化 SE が掘削代表寸法でほぼ決定されているということは興味深い。無次元化 SE に寸法効果が現れる原因として、掘削ずりの粒度分布が関係している可能性が高いと考える。

福井ら¹⁵⁾ は、発破、TBM、自由断面掘進機、さく岩機、PDC 回転さく孔機および振動回転さく孔機で得られた掘削ずりの粒度分布と掘削代表寸法との関係を調べた。縦軸を CDF (cumulative distribution function) とした粒度分布曲線 (加積曲線) を図 2 に示す。図 2 では、発破から振動回転さく孔まで粒径は 4 桁程度変化しており、その間を 3 等分するかのようには、TBM と自由断面掘進機、さく岩機と PDC 回転さく孔の粒度分布曲線が並ぶ。粒径の小さい掘削ずりを回収できなかった、さく岩機と PDC 回転さく孔を除いて、他の粒度分布曲線は比較的似た形状をしている。 CDF が 50% の時の粒径 $D50$ と、①刃物間隔、②切り込み深さ、③両者の幾何平均との関係を図 3 に示すが、3 者とも両対数グラフ上でほ

図2 掘削ずりの粒度分布¹⁵⁾

実線は実測値、破線は式 (6) の Rosin-Rammler 分布による推定曲線

図3 代表寸法と $D50$ の関係¹⁵⁾

図中の直線は代表寸法と $D50$ が比例するとして近似曲線を表す

ば傾きが1の直線関係がみられる。相関係数は、①, ②, ③でそれぞれ0.997, 0.996, 0.999と、③の幾何平均 L と $D50$ との相関が最も高く、次式で近似できる。

$$D50 = 0.353L \quad \dots\dots\dots (4)$$

このように、刃物間隔と切り込み深さの幾何平均と、 $D50$ の間には線形関係が存在している。図2に示したように、掘削方法によらず粒度分布はほぼ同じ形状をしており、式(4)に従い、掘削代表寸法によって平行移動するだけであると考えられる。

粉碎により生じた砕製物の粒度分布に対し、次式の Rosin-Rammler 分布がよく用いられる¹⁶⁾。

$$CDF = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{D}{D_R}\right)^n\right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 D は粒径、 D_R は定数である。4種類(発破、TBM、自由断面掘進機および振動回転さく孔機)の掘削方法における n の単純平均値は0.88であった。次いで、式(4)を満足するように、 D_R を決めると次式が得られる。

$$CDF = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{1.87D}{L}\right)^{0.88}\right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図2には、式(6)より計算した粒度分布を破線で示したが、各掘削方法で得られた粒度分布とほぼ一致する。式(3c)を式(6)に代入すると次式が得られる。

$$CDF = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{0.794D}{\text{無次元化SE}^{2.63}}\right)^{0.88}\right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)によれば、無次元化 SE から粒度分布を推定できる。また、式(4)を式(3c)に代入すると次式が得られる。

$$\text{無次元化SE} = 1.02(D50)^{-0.4} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(7)と(8)から、粒度分布と無次元化 SE との密接な結びつきがうかがえる。粒度分布と消費エネルギーに関しては、古くから粉碎の分野で研究されてきたので、以下では、その成果を踏まえた検討を試みる。

強度の寸法効果は式(1)で表され、ヤング率は寸法によって変化しないとする。掘削(破壊)に要するエネルギーが単純に $0.5 \times (\text{強度})^2 / (\text{ヤング率})$ に比例するとすれば、体積で割って得られる掘削体積比エネルギーは試験片代表寸法の -2α 乗となる。なお、ここでいう強度とは、掘削されにくさをあらわす量であり、掘削方法によって圧縮強度に近かったり、引張強度に近かったりする。この後は山口・西松⁷⁾に示されている Bond の式の誘導をそのまま用いれば、次式が得られる。

$$\text{無次元化SE} = C(x_2^{-2\alpha} - x_1^{-2\alpha}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 x_1, x_2 はそれぞれ掘削前、掘削後の粒径を表す。ここで、 α として0.25を採用すると、Bondの式となる。参考までに、図1(c)に、Bondの式に対応する傾き -0.5 の直線も示した。このように、式(1)の岩石強度の寸法効果とBondの式を結びつけることができる。なお、Bondの式に関しては、Rittingerの式とKickの式の間隔的な形として経験的な式であるとの見方¹⁷⁾もあるが、久保¹⁸⁾は式(1)で $\alpha=0.25$ を仮定し、球形試験片を平板で破壊させた時のエネルギーを算定し、最終的にBondの式を導いている。参考までに、一軸圧縮強度200MPaの花崗岩を対象として、ボールミルによる粉碎エネルギー¹⁹⁾を試算してみると、図1(c)の破線に示すように、掘削エネルギーの20%程度であった。これは、ボールミルでの粉碎では球状のボールと破砕物の衝突によって引張応力により破砕されやすいのに対して、岩盤掘削では自由面が少ないため、圧縮応力で破砕されやすいことが原因であると考えられる。

式(9)において、 $\alpha=0.20, x_1=\infty, x_2$ を掘削代表寸法 L とすると、

図4 一軸圧縮試験における無次元化掘削体積比エネルギーと $D50$ の関係
図中の○は $(D50)^{-0.40}=0.28$ を表す

$$\text{無次元化SE} \propto L^{-0.40} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となり、式(3)の結果が説明できる。山口・西松⁷⁾に示されている α は0.17~0.32であり、 $\alpha=0.20$ は区間に入っているし、またHoek and Brown⁴⁾が一軸圧縮強度から求めた $\alpha=0.18$ に近い値なので、妥当な値と言える。

3.3 一軸圧縮試験に関する考察

一軸圧縮試験以外の掘削方法は、掘削後に比べ掘削前の寸法(粒径)は十分大きく、式(9)の第2項が無視できるのに対して、一軸圧縮試験では直径50mm、高さ50mmの試験片を破砕したため、その分無次元化 SE を小さく見積もっている可能性がある。

大久保⁸⁾は、5種類の岩石試料を用い、一軸圧縮試験において変位を10mm, 20mm, 30mm, 40mmの4種類とした試験を実施した。表1および図1に示した一軸圧縮試験の無次元化 SE は、なるべくその影響が小さくなるよう、変位40mmでの5種類の岩石の平均値を示したが、それでもなお、図1に示した一軸圧縮試験の無次元化 SE は近似曲線より小さい。

式(9)で $\alpha=0.20$ とし、 $x_2=D50$ とすれば、次式を得る。

$$\text{無次元化SE} = C\{(D50)^{-0.40} - C2\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $C2=x_1^{-0.40}$ で、元の試験片の大きさによって決まる定数である。式(11)によると、無次元化 SE と $(D50)^{-0.40}$ は直線関係が成立することとなる。大久保⁸⁾の結果を、無次元化 SE と $(D50)^{-0.40}$ の関係で示すと図4となる。田下凝灰岩、来待砂岩および秋吉大理石は直線に近い関係が見られ、結果を外挿すると3岩石とも無次元化 SE が0となるのは、 $(D50)^{-0.40}=0.28$ でほぼ同じである。図には、式(8)の傾きで、無次元化 $SE=0$ の時、 $(D50)^{-0.40}=0.28$ を通る直線を示したが、3岩石の中間的な位置にあり、この3岩石に関してはほぼ式(11)が成立していることがわかる。

他方、三城目安山岩と葛生トロモイトは下に凸の傾向が見られ、式(11)と一致していない。この点は今後の課題としたいが、両岩石とも変位30mmから40mmの間の勾配と式(8)の傾きはほぼ同じであり、式(8)は5岩石の平均的な値に近く、初期試験片の大きさを考慮すれば、一軸圧縮試験もほぼ式(8)に近い関係があることがわかる。なお、Bondの式では、 CDF が80%の時の粒径 $D80$ を代表寸法として扱う¹⁹⁾。図4の $D50$ を $D80$ とした場合の結果を図5に示す。傾向は図4とほぼ同じであるが、無次元化 SE が0となるのは、 $(D80)^{-0.40}=0.21$ 程度である。これより $D80$ は50mmとなり、試験片の大きさと一致する。

図5 一軸圧縮試験における無次元化掘削体積比エネルギーと $D80$ の関係
図中の○は $(D80)^{-0.40} = 0.21$ を表す

4. 岩石の強度の寸法効果を見積もる手法の提案とまとめ

掘削機械の無次元化掘削体積比エネルギーの寸法効果は、掘削ずりの寸法（粒径）に関連したものであり、岩石の強度の寸法効果と関連していることがわかった。岩石の強度の寸法効果を表す式(1)の α は、岩種により異なることが指摘されている¹⁾。本研究では、極端な寸法効果を示す石炭などを除き、比較的標準的な寸法効果を示すと思われる岩石を掘削したときの無次元化掘削体積比エネルギーを用いて検討した。しかしながら、入手できたデータの数は必ずしも十分とはいえず、 $\alpha = 0.20$ が標準的な岩石の寸法効果を現しているかどうかを確認するには至らなかった。

岩種ごとの α がどのようになっているのかを調べることは重要である。3・2節で述べたように、図1の傾きの半分が α であると考え、岩石の強度の寸法効果を求めることは可能である。その際、誤差を減らすためには、なるべく掘削代表寸法の差の大きな掘削方法を選択することが理想的である。実験室と原位置とにわけて寸法効果の求め方をまとめておく。

a) 実験室実験（一般的に購入可能な数十 cm の岩石ブロックの場合）

今回検討した掘削方法のうちでは、一軸圧縮試験と振動回転さく孔を行うのが、効率的である。一軸圧縮試験は、普通サイズ（直径 2.5cm ～ 5cm 程度）を用い、大久保⁸⁾ のようになるべく大きな変位を与え、荷重－変位曲線の面積から掘削体積比エネルギーを求める。一軸圧縮試験では初期サイズの影響が表れるので、ふり分けにより $D50$ を求め、3・3節で述べた補正を行う必要がある。振動回転さく孔は特殊な装置であるので、一軸圧縮試験用のボーリングをする際のボーリングでの掘削体積比エネルギーで代用できると考える。ボーリングでは回転トルクが主要なエネルギーとなるので、回転用の電動機の出力を測定し掘削体積比エネルギーを求める。掘削代表寸法はドリルの寸法・形状から求めることができる。たとえば、ダイヤモンドドリルであれば、ドリル先端のダイヤモンドの間隔から刃物間隔が求まるし、切り込み深さはさく孔深さを回転数で割れば求まる。また、一軸圧縮試験と振動回転さく孔の中間的なビット貫入試験も併用すると、比較的精度が得られやすいと考えられる。

b) 原位置での計測

原位置での施工では、TBM、自由断面掘削機、発破など何らかの掘削方法で掘削が行われるため、そのデータを取得すれば1つ

めの掘削体積比エネルギーが求まる。また、ほとんどの施工現場で、ロックボルト用や発破用にさく岩機が使用されるので、2つめの掘削体積比エネルギーが求まる。両者により図1を求めることが可能である。

最近の TBM、自由断面掘削機では施工管理の上で様々なセンサーを搭載しているため、容易に掘削体積比エネルギーを求めることができる。発破では本研究と同様の手法で使用する薬量から簡単に掘削体積比エネルギーは求まるし、掘削代表寸法も掘進長とさく孔間隔から求まる。自動さく孔用や切羽前方探査用のさく岩機はセンサーを搭載しており、そのデータから容易に掘削体積比エネルギーを求めることができる。このように原位置での施工では計測とデータ整理以外に余分な手間と費用は発生しないし、さらに掘削中に連続的に大量のデータが得られるため、様々な岩種での強度の寸法効果の推定が可能であると考えられる。

本研究では、掘削代表寸法が 0.01mm ～ 1m の 11 種類の岩盤掘削に関して検討した。その結果、無次元化 SE は掘削代表寸法の -0.4 乗に比例することがわかった。これは、Hoek and Brown⁴⁾ が求めた強度の寸法効果の指数 -0.18 の約 2 倍である。掘削に要するエネルギーが単純に $0.5 \times (\text{強度})^2 / (\text{ヤング率})$ に比例し、さらにヤング率が寸法によって変化しないとすれば、式(3)の掘削体積比エネルギーの寸法効果の指数は、式(1)の強度の寸法効果の指数の 2 倍となるはずであり、本研究の結果を説明できる。

粒度分布における CDF 50% の粒径 $D50$ と掘削代表寸法とはほぼ比例すること、無次元化 SE は $D50$ の -0.4 乗に比例することがわかった。この関係と粉碎の分野で有名な Bond の式との関連性を示した。

寸法効果は、実験室での実験結果を原位置に適用する場合に、是非とも考慮しなければならない事項である。しかしながら、小から大までの試験片を用いた試験は極めて困難であり、不明点が多く残されている。今回提案した方法によれば比較的容易に寸法効果に関する情報が得られる。しかも得られた情報はまさに原位置で得られたもので、小規模強度試験の結果に基づいて大規模岩盤内構造物を設計する際や、小規模掘削試験結果に基づいて掘削機械を設計する際に役立つと考える。さらに、強度の寸法効果は亀裂や不連続面が強度に及ぼす影響の探求と結びついているので、本研究で提案した手法は破壊機構の解明に役立つ可能性がある。

References

- 1) Y. Tsur-Lavie and S. A. Denekamp : Rock Mechanics, **15**(1982), 243-254.
- 2) K. Mogi : Bulletin of the Earthquake Research Institute, **40**(1962), 175-185.
- 3) N. Lundborg : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **4**(1967), 269-272.
- 4) E. Hoek and E.T. Brown : Undergroud excavations in rock, (Institute of Mining and Metallurgy, London, 1980), pp.155-156.
- 5) A. P. Cunha : Proc. Scale Effects in Rock Masses, (1990), pp.3-27.
- 6) Z.T. Bieniawski and W.L. Heerden : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **12**(1975), 101-113.
- 7) U. Yamaguchi and Y. Nishimatsu : Ganseki-Rikigaku-Nyuumon, (University of Tokyo Press, Tokyo, 1991), pp.103-108, 114-115 & 127-129.
- 8) S. Okubo, W. Chen and K. Fukui : Shigen-to-Sozai, **118**(2002), 729-736.
- 9) H. Karasawa : Doctoral Thesis of the University of Tokyo, (1998).
- 10) S. Sarata and H. Kobayashi, Proc. MMJ Spring Meeting, (2000), Vol. I, pp.127-128.
- 11) S. Sarata and H. Kobayashi : Proc. MMJ Fall Meeting, (2000), B10, pp.251-252.
- 12) K. Sasaki, N. Yamakado and Z. Shiohara : Nihon-Kogyokai-shi, **74**(1958), 989-995.
- 13) E. Goto, J. Kawakami, K. Fukui, S. Okubo, Y. Yaeda, H. Kondo and N. Takagi : Shigen-to-Sozai, **109**(1993), 139-145.
- 14) S. Okubo, K. Fukui and J. Kawakami : Rock Mechanics and Rock Engineering, **30**(1997), 113-118.
- 15) K. Fukui, W. Chen, S. Okubo and S. Sarata : Shigen-to-Sozai, **119**(2003), 640-646.
- 16) K. Iiya : Funtai-Kogaku Handbook, (Asakura Shoten, Tokyo, 1965), pp.333-339.
- 17) T. Imaizumi : Nihon-Kogyokai-shi, **80**(1964), 172-175.
- 18) K. Kubo : Funtai-Riron-To-Onyuu, (Maruzen, Tokyo, 1979), pp.543-563.
- 19) F.C. Bond : Mining Engineering, (1953), pp.315-316.