

# 岩盤の掘削作業性判別のための簡易試験法について (第2報)

齋藤 二郎 松尾 龍之  
芳賀 孝成

## Simple Method of Rock Determination to Decide Excavating Efficiency (Part 2)

Jiro Saito Tatsuyuki Matsuo  
Takashige Haga

### Abstract

In making plans for rock excavating works, it is desirable to quickly obtain results by simple apparatus or methods and be able to utilize the results to determine excavating efficiency immediately. It is judged that of the many laboratory testing methods proposed up till now, the impact crushing method, the determination of tensile strength by a concentrated load and the specific gravity-porosity test which can be performed without processing the rock, possess the conditions necessary for a simple laboratory method of rock determination. In this paper, the problems awaiting solution and the matters regarding three tests that demand special attention are described and the mutual relations of the impact crushing index, the tensile strength under concentrated load, the porosity, the unconfined compressive strength and sonic wave velocity are presented.

### 概 要

岩盤の掘削作業計画に際しては簡単な試験装置・試験方法によって迅速に結果を得てそれをただちに掘削作業性の判定に利用することが望ましい。これまで提案されている多くの室内岩石試験法のうち岩石を整形せずに試験できる衝撃破砕試験・点載荷引張試験・比重・空隙率試験が室内における岩石簡易試験法に要求される条件を比較的満たしているため、これらの試験法と試験結果の解析方法について検討を行ってきた。本報ではこれら3種の試験の問題点・注意点について述べる。また衝撃破砕常数・点載荷引張強度・空隙率・一軸圧縮強度および弾性波速度の相関関係も示す。

### 1. まえがき

岩盤の掘削特性を判別するための試験としては岩盤の弾性波速度の測定と岩石試料の一軸圧縮試験が一般に知られているが、これらの試験は多くの時間と手間を要し実際にはあまり実施されていないのが現状である。これが岩盤の掘削特性とその掘削実績との関係を統計的に処理して行くうえに大きな障壁となっている。そこで簡単にかつ適確に岩盤の掘削特性を得るための試験法を確立することを目的として種々の試験法について検討を加えて来た。第1報では岩石の簡易試験法として衝撃破砕試験をとりあげて新しい衝撃破砕試験法とその解析方法を提案した。

本報ではこの衝撃破砕試験法に加えて点載荷引張試験および比重・空隙率試験を岩石簡易試験法としてと

りあげ、これらの試験法の問題点について述べ試験値と一軸圧縮強度・弾性波速度などとの相関関係を示す。

### 2. 衝撃破砕試験の問題点

筆者らの提案する衝撃破砕試験はプロトジャコフ試験と同様な試験機で岩石を破砕し(1)式—第1報(1)式—で衝撃破砕常数  $F_0$  を求めるものである。

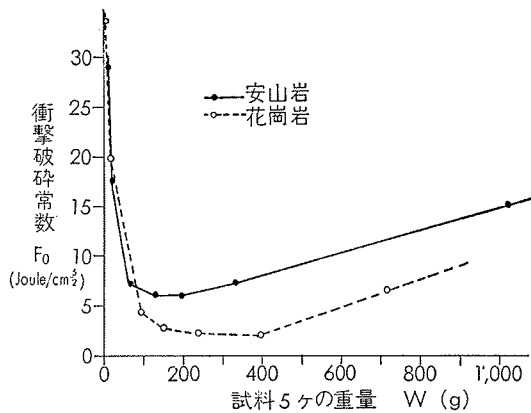
$$F_0 = e \cdot \rho \cdot N \cdot H \cdot G / \sum \{D_i^{-n} - D_{i-1}^{-n}\} \times W_{i-1} \quad (1)$$

ここに  $e$  : 打撃効率,  $\rho$  : 岩石の比重,  $N$  : 打撃回数  
 $H$  : 重錘落下高  $G$  : 重錘重量  $n$  : 粉砕指数 (第1報参照)  $D_i$  : 粉砕粒径  $W_i$  :  $D_i$  以下の粒径の岩石重量である。

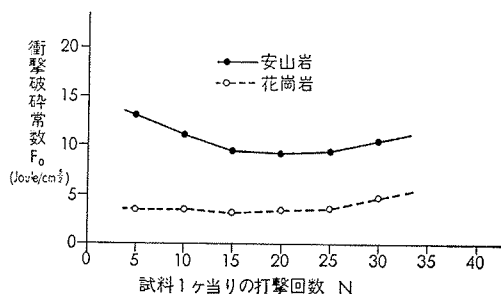
この試験で問題となるのは初期の岩石試料の大きさ打撃回数, 岩石の湿潤状態および(1)式中の  $n$  の値など

である。初期の岩石試料は直径約3cmの小塊5個（A種試料）か19.5mmフルイを通過し9.5mmフルイを通らないもの50g（B種試料）の2種類を定め、これらの試料について検討してきた。図一1はA種試料の重量と  $F_0$  の関係、図一2は試料1ヶ当りの打撃回数と  $F_0$  の関係を示したものである。

$F_0$ が極小となる試料重量・打撃回数は岩石の種類によって異なるが通常の試験を行なうときに仮に定めている試料重量(200~300g)、打撃回数(10~20回)に近い。表一1はA種試料とB種試料について数人の試験者が試験を行なったときの  $F_0$  のバラツキを示したものである。変動係数はB種試料の方が小さく岩石の衝撃強度の比較をする場合は試料重量と粒径を規定したB種試料による方が良いことが認められた。表一2は岩石の湿潤状態の差による  $F_0$  の変化を示したもので一般に乾燥したものほど  $F_0$  の値は大きい。 $F_0$ を計算する場合(1)式中の  $n$ の値は F. C. Bond の理論にもとづいて0.5と仮定してきたが実際に破碎エネルギーと破碎された岩石の表面積増加量との関係を図一3のようにプロットしてこれより  $n$ の値を求めてみると花崗岩で1.00安山岩で0.94となり0.5より大きい。岩石の種類にかかわらず  $n$ は一定であるとみなした方が  $F_0$ の計算は簡単であるが試験する岩石に対応する  $n$ の値を求めて、この値を代入して  $F_0$ を求める解析方法も今後検討する必要がある。



図一1 試料重量と衝撃破砕常数



図一2 打撃回数と衝撃破砕常数

### 3. 点載荷引張試験の問題点

この試験方法は整形しないままの岩石試料を上下2つの載荷ポンチではさんで点載荷し試料を破壊させてその時の荷重から岩石の引張強度  $S_t$  を求めるものである。 $S_t$  は球形試験片に点載荷したとき載荷点を通る軸上に生ずる応力成分を弾性理論解析によって計算した結果から次式によって求める。

$$S_t = k \frac{2P}{\pi D^2} \quad (2)$$

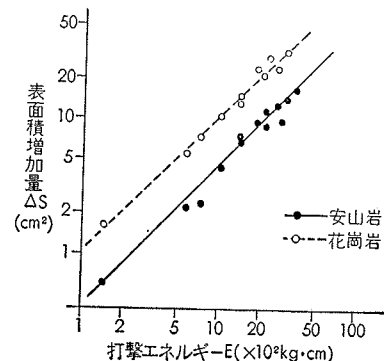
ここに、P：破壊荷重 D：載荷点間距離 k：ポアソン比 ( $\nu$ )および載荷ポンチ接触点直径(a)と(D)との比によって決まる係数で木山らが計算した結果より  $\nu=1/6$  の場合のkと a/D の関係を示したものが図一

試験方法	試験者	衝撃破砕常数 $F_0$ (Joule/cm <sup>2</sup> )			
		凝灰岩	砂岩	花崗岩	安山岩
A種試料 $\Sigma N=50$	実験助手	16.06	12.28	6.35	17.59
	アルバイト学生	16.59	12.01	6.71	18.94
	現場作業員	20.45	11.38	8.24	17.88
	会社職員	16.12	11.38	6.26	19.49
	変動係数	1.83	0.39	0.80	0.77
B種試料 $\Sigma N=10$	実験助手	15.73	9.84	6.08	12.91
	アルバイト学生	16.16	10.54	6.50	14.31
	現場作業員	16.79	10.24	6.27	11.75
	会社職員	17.97	11.58	5.58	14.09
	変動係数	0.84	0.64	0.34	1.02

表一1 個人差による衝撃破砕常数の変動

試験方法	試料の状態	衝撃破砕常数 $F_0$ (Joule/cm <sup>2</sup> )			
		凝灰岩	砂岩	花崗岩	安山岩
A種試料 $\Sigma N=50$	乾燥	19.30	12.64	7.51	15.81
	湿潤	16.77	9.21	6.92	16.77
	乾燥/湿潤	1.15	1.37	1.09	0.94
B種試料 $\Sigma N=10$	乾燥	16.16	10.51	7.10	13.58
	湿潤	13.53	9.03	6.50	13.58
	乾燥/湿潤	1.19	1.16	1.09	1.05

表一2 試料の湿潤状態による衝撃破砕常数の変動



図一3 打撃エネルギーと表面積増加量

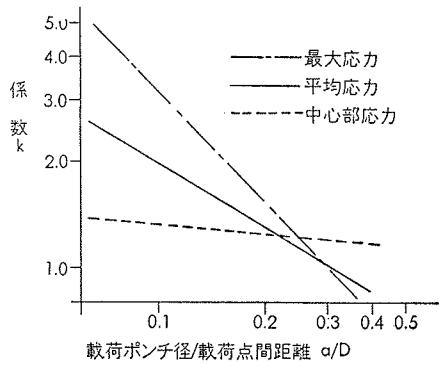


図-4 k と a/D

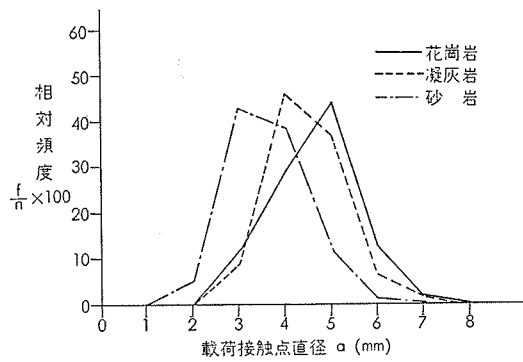


図-5 荷重接触点直径頻度曲線

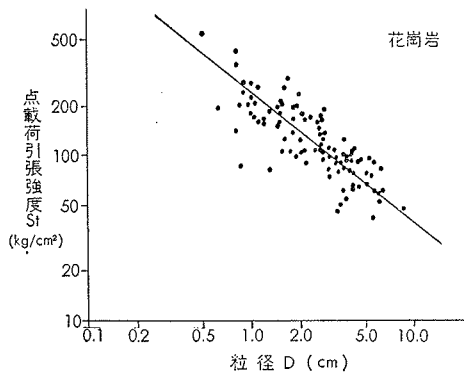


図-6 (2)式 (k=1.4) による点荷重引張強度と St

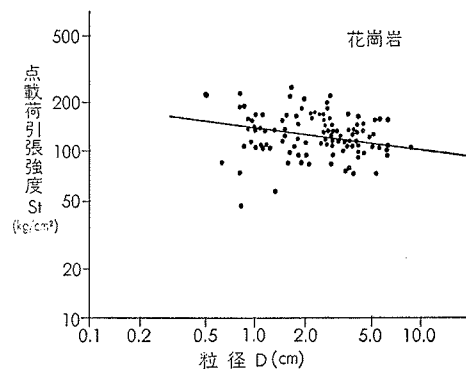


図-7 (3)式による点荷重引張強度と St

岩石名	D-St関係式 St=aD <sup>b</sup>	均一性係数 m	粉碎指数 n
花崗岩	St=95D <sup>-0.41</sup>	7.31	0.68
閃緑岩	St=163D <sup>-0.34</sup>	8.82	0.57
凝灰岩	St=86D <sup>-0.55</sup>	5.45	0.92
玢岩	St=325D <sup>-0.38</sup>	7.89	0.63
砂岩	St=42D <sup>-0.53</sup>	5.66	0.88

表-3 点荷重引張試験による均一性係数

4である。しかしこれまではkに対するa/Dの影響は事実上無視できると考え k=1.4として計算して良いと言われてきた。

図-6は(2)式で k=1.4として求めた St と試料の径との関係の1例で試料の径が小さくなるにしたがい St は大きくなる。これは寸法効果の影響以外に a/D の影響がかなり入っているものと考えられたので図-4より平均応力の場合についてkとa/Dの関係を求め(2)式に代入してkを消去したのが(3)式である。

$$St = 0.544 \frac{P}{D^{1.39}} \quad (3)$$

なおaの値は図-5に示すように同一荷重ポンチでも岩石の種類によって異なるが(3)式では a=4mm と仮定した。(3)式を用いて計算した St と D との関係を示したのが図-7で試料の径の影響は図-5よりも小さい。この計算式によってもまだ引張強度は試料の径

の影響を受けているがこれは寸法効果によるものと考えられることができる。

いま図-7において St と D との関係は St = aD<sup>b</sup> の形であらわされるとし、また第1報(2)式において V ∝ D<sup>3</sup> と考えれば

$$St = (S_0 \sigma \cdot \frac{1}{m} D_0^{-\frac{3}{m}}) \cdot \frac{1}{\sigma^m D^{-\frac{3}{m}}} \quad (4)$$

m : weibull の均等性係数

よって b = -3/m より m = -3/D となる。この m の値から前報(2)式 n = 5/m を用いて n の値が計算できる。表-3は点荷重引張試験に

よって求めた種々の岩石の m, n の値である。n の値は Rittmger は 1, Bond は 0.5 であると提唱しているが本試験で得られた値は 0.5~1.0 の範囲にあり衝撃破砕試験機により求めた n の値よりも小さい。

試験に際しては現場より採取した岩石を数多く試験し St と D との関係を保対数紙上にプロットして平均曲線を求め、これより一定の試料の径の引張強度および m, n の値を計算して岩石の静的な力学的・物理的特性を評価する手法が合理的であると思われる。

#### 4. 比重および空隙率試験の問題点

岩石の比重の測定方法としては日本工業規格 (JIS) による固体比重測定方法に準じた水浸法、ピクノメーター法およびかさ比重法などが考えられる。水浸法は試料の強制乾燥空中重量 (W<sub>1</sub>) 湿潤飽和空中重量 (W<sub>2</sub>) および湿潤飽和水中重量 (W<sub>3</sub>) を測定しこれから強制乾燥状態、飽和含水状態におけるみかけの比重 (γ<sub>d</sub>, γ<sub>s</sub>) およびみかけの空隙率 (n) を(5)式より計算するものである。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_d &= W_1 / W_2 - W_3, & \gamma_s &= W_2 / W_2 - W_3 \\ n &= W_2 - W_1 / W_2 - W_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ピクノメーター法はピクノメーターと呼ぶ一定の容積を持ったガラスビンの中に直径 208~147 μ 程度に粉砕

した岩石試料を入れて定められた量の水を加え加振・加熱などにより気泡を除去して秤量し計算を行なうものである。これに水の比重の温度補正，重量測定の際の空気の浮力の補正などを行なえば真比重あるいはそれにかなり近いものが求められる。かさ比重はきちんと成形された試料の寸法から試料の体積を計算してその重量を除して求めるものである。パラフィン法は試料の湿潤飽和空中重量( $W_2$ )強制乾燥空中重量( $W_1$ )の測定を行なった後，強制乾燥した試料の表面にパラフィンを塗付して空中重量( $W_3$ )および水中重量( $W_4$ )を測定し水の比重の温度補正，パラフィン重量補正を行ない(6)式によってみかけの比重，みかけの空隙率を求めるものである。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_d &= W_1 / W_1 - W_4, \quad \gamma_s = W_2 / W_1 - W_4 \\ n &= W_3 - W_4 / W_1 - W_4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

水浸法やパラフィン法では水浸によって空隙内の空気を完全に水と置き換えることができず真比重，真の空隙率を求めることができない。また湿潤空中重量測定の場合表面吸着水の除去が困難で特に非整形試料の場合には吸着水の量は多くなるので測定値に大きな誤差を与えることになる。さらにこれらの試験法で問題とされるのは乾燥時間および湿潤時間である。図-8は直径約40mmの2種類の岩石を水浸および強制乾燥させた場合の含水率経時変化を示したものである。水浸・強制乾燥のいずれの場合も10時間までに数%の重量変化がある。また空隙率の大きい岩石の方が10時間以降の変化量は少ない。表-4は2種類の岩石の比重および空隙率を各種の方法によって測定した結果であ

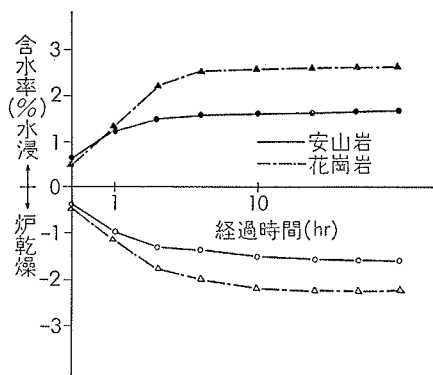


図-8 水浸・炉乾燥による含水率の変化

試験番号	試験方法	試料の状態	試料の大きさ	比重		空隙率	
				花崗岩	安山岩	花崗岩	安山岩
1	かさ比重法	整形	φ30mm ℓ=20cm	2.578	2.561	—	—
2	ピクノメーター法	粉碎		2.590	2.707	—	—
3	パラフィン法	非整形	φ50mm	2.600	2.580	1.45	4.53
4	水浸法	"	"	2.594	2.735	4.26	6.08

表-4 試験方法の相違による比重と空隙率

る。比重・空隙率ともかなりのバラツキがあり岩石の比重空隙率の測定の困難さを示している。特に岩石の空隙率は非常に小さいのではかりの精度も高いものが要求されるが一般にはこのようなはかりは取扱いに多くの注意が必要となる。このため比重，空隙率の試料重量をできる限り大きくして，はかりに必要な精度を低くすることも一方法である。

### 5. 各試験値の相関関係

岩石の力学的・物理的特性の相関関係があらかじめわかっているならばすべての試験が実施できなくても試験が可能なものだけを実施してこの結果からその他の諸数値の概略を間接的に知ることができる。

図-9，図-10に一軸圧縮強度 $q$ と衝撃破砕常数 $F_0$ および点載荷引張強度 $S_t$ との関係を示す。また図-11に $F_0$ と $S_t$ の関係を示す。図-12・図-13に弾性波速度 $V_p$ と $F_0$ および $S_t$ の関係を示す。図-14にプロトジャコノフ係数 $f$ と $F_0$ の関係を示す。図-15・図-16にみかけの空隙率 $n$ と $F_0$ および $V_p$ との関係を示す。これらの関係は概略的に(7)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} f &= 0.8F_0 = 0.03S_t \\ q &= 200F_0 = 6S_t \\ V_p &= 3.05 \log F_0 + 1.9 = 3.05 \log S_t - 2.75 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

図-15・図-16は水浸法によって求めたみかけの空隙率 $n$ と $F_0$ および $V_p$ との関係を示したものである。岩石の結晶構造が異なるとみかけの空隙率が等しくても， $F_0$ ， $V_p$ にはかなりの相違があり，顕晶質の岩石の $F_0$ ， $V_p$ は微晶質，非晶質の岩石のものよりも小さい。

### 6. あとがき

同一の岩石ブロックから試料を作成し全く同一に試験を行なってもその結果が大きくバラつくことは岩石の試験ではめずらしいことではない。このようなバラツキは岩石の性質の一つの特徴であって岩石の不均質性に起因するものである。このため岩石の性質を論議する場合には試験結果の統計学的な処理が必要である。岩石の非整形簡易試験法はこれを実際的に可能とさせるの一つの有力な手段であると思われる。また岩盤掘削特性の判別のためには広範囲な調査が必要なので一軸圧縮試験のような精密な試験法は不相当である。

3種の非整形岩石簡易試験法を実施する場合現場より採取して来た岩石に対して次の順序で行うのが良い。

- 1) 非整形点載荷引張試験
- 2) 比重・空隙率試験
- 3) 衝撃破砕試験

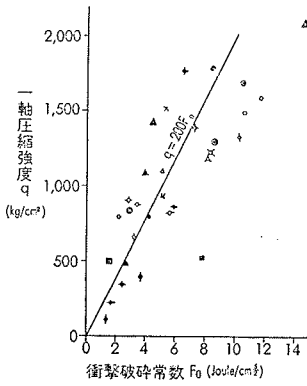


図-9 一軸圧縮強度と衝撃破砕

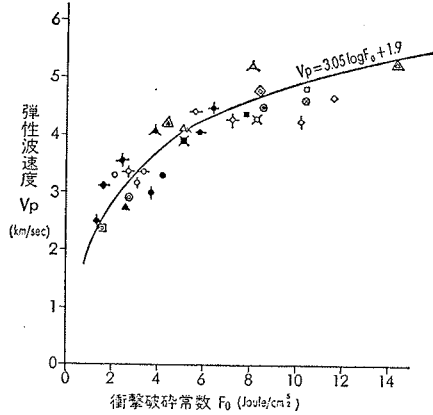


図-12 弾性波速度と衝撃破砕常數

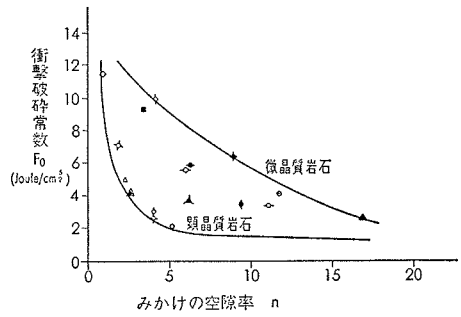


図-15 衝撃破砕常數とみかけの空隙率

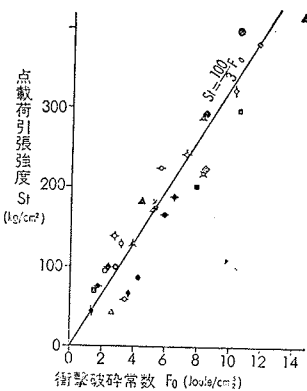


図-10 点載荷引張強度と衝撃破砕常數

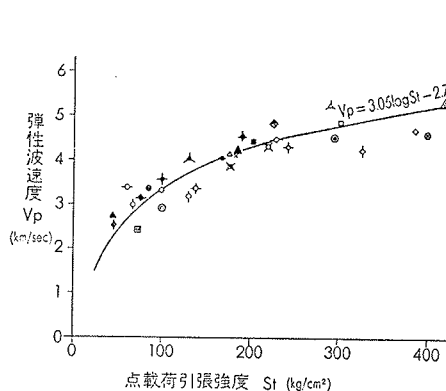


図-13 弾性波速度と点載荷引張強度

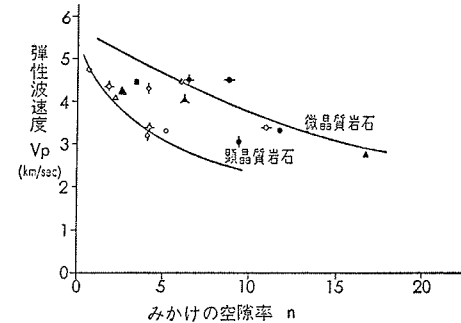


図-16 弾性波速度とみかけの空隙率

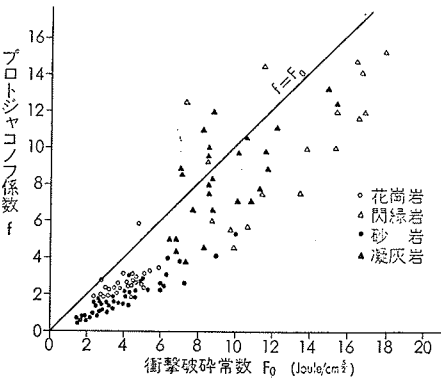


図-11 プロトジャコフ係数と衝撃破砕常數

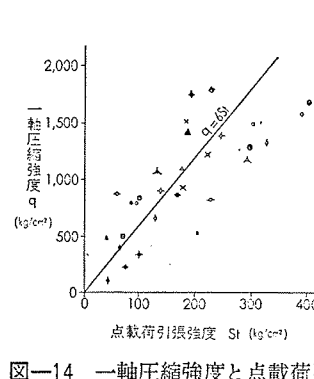


図-14 一軸圧縮強度と点載荷引張強度

記号	岩石名	産地	記号	岩石名	産地
○	閃雲花崗岩	長野	△	長砂岩	福井
◇	閃緑岩	長野	●	凝灰岩	長野
◇	玢岩	長野	◇	玄武岩	長野
●	凝灰岩	兵庫	◇	変麻岩	長野
▲	砂岩	徳島	△	石英安山岩	新潟
■	粘板岩	埼玉	◎	花崗岩	群馬
○	花崗岩	岡山	△	珪岩	埼玉
▲	礫岩	徳島	◎	硬質凝灰岩	兵庫
●	流紋岩	兵庫	×	頁岩	兵庫
○	花崗岩	長野	×	粘板岩	福井
○	花崗岩	茨城	◇	玄武岩	福岡
◇	安山岩	神奈川	□	砂岩	福岡
●	角礫凝灰岩	福井	◆	モルタルσ=100kg/cm²	
□	輝緑岩	福井	◆	モルタルσ=200kg/cm²	
◎	玢岩	長野	◆	モルタルσ=400kg/cm²	

表-5 凡例

この順序で行なえば先に試験した試料の破砕片を次の試験に利用でき試料は少量で済むので岩石採取地から試験場所への試料運搬手間が軽減される。

3種の岩石簡易試験から得られた結果を総合的に判断すれば岩石の物性をかなり正確に把握することができる。すなわち静的・動的破壊強度・岩石の均一性・多孔性などでこれらの諸数値は岩盤の掘削作業特性と密接な関係があるものと考えられる。しかし現在の試験結果と実際の掘削実績との対応を行なった例が少ないので今後は、岩盤掘削作業を行なう現場に岩石簡

易試験を適用してデータを集積し簡易試験結果から、ただちに掘削作業性が判別できるようにする予定である。

参考文献

- 1) 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 1973年8月
- 2) 西林・木山・阪田：点載荷圧裂試験による人工軽量骨材の強度に関する研究，土木学会論文集第199号 1972年3月