

岩盤の掘削作業性判別のための簡易試験法について (第1報)

齋藤二郎 松尾龍之
芳賀孝成

Simple Method of Rock Determination to Decide Excavating Efficiency (Part 1)

Jiro Saito Tatsuyuki Matsuo
Takashige Haga

Abstract

It is reasonable to carry out geological surveys of base rock, field tests of the rock and laboratory determinations on rock samples to comprehensively decide excavation properties. In making plans for rock excavating work, it is desirable to quickly obtain results by simple apparatus or methods and be able to utilize the results to determine excavating efficiency immediately. Especially, the tests on rock samples need to be done by a simple method with many samples. This is effective in knowing the mechanical properties of rock at the site. It is judged in this paper that of the many laboratory testing methods proposed up till now, the impact-crushing method which can be performed without processing the rock is comparatively satisfactory, and an investigation is made of the methods of testing and of analysis of test results.

概 要

岩盤の掘削特性を判別するには岩盤の地質学的調査、現在置岩盤試験および岩石試料の力学試験を行なって総合的に判断するのが合理的である。また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。特に岩石試料の試験については簡単な方法でなるべく数多くの試料について実施することが現場における岩盤の力学的性質の状態を正しく知るために有効である。本報告は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碎試験が室内における岩石簡易試験法としての条件を比較的満足するものであると判断し、この試験法と試験結果の解析の方法について検討を行なったものである。

1. まえがき

岩盤の掘削計画に際してはあらかじめ掘削作業の対象となる岩盤の力学的性質を把握する必要がある。ところが通常は現地踏査による露頭岩盤の観察程度しか行なわない場合が多い。

岩盤の掘削作業性判別のためには地質学的岩盤調査と現位置岩盤試験および岩石試料の力学的試験などの調査・試験を合理的に組み合わせて実施する必要がある。これまでの岩盤力学的特性調査としては弾性波探査と岩石試料に対する一軸圧縮試験が一般に行なわれており、この2種の方法を組み合わせれば岩盤の掘削作業性の判別はある程度可能である。しかしこれらに

は共通した大きな短所がある。第1に調査や試験の方法が複雑で高度の技術が必要である。弾性波探査には精密な測定機を要し、試験結果の解析は熟練した技術者が行わねばならない。一軸圧縮試験も供試体の採取・整形・試験の過程で高度の岩石整形技能者・試験技術者が必要である。強度の弱い岩石の供試体を作成することは困難であることが多く、また供試体の両端は完全に平行かつ平滑に整形しなければならない。供試体の整形技術・試験技術の差で結果は大きく相違する。第2に、これらの調査と試験には多大の時間と費用を要するため調査箇所・試験供試体個数が限られてしまうことである。岩石や岩盤の物性にはそれらの成因に基づく本質的なバラツキがあることは古くから地球物

理学・地質学の分野で知られているところだが、このため岩石の力学的特性を少数の精密な室内試験で求めるよりも簡易な方法でなるべく数多く試験することが現場状態での岩盤の力学的性質を知る上では有効である。弾性波探査からは逆に大きな断層の位置や広範な区域のマクロ的な弾性波速度は求められるが、これからただちに掘削作業性を判別することには無理がある。

以上のような事由から簡単にかつ適確に岩盤の力学的特性が得られる試験法を確立することを目的として現在種々の試験法について検討を加えているが、このうち岩石の力学的試験のなかで衝撃破砕試験・点載荷引張試験・比重および空隙率試験の3種については試験方法が簡単で、試験結果も岩盤の掘削作業性とかなり関連があると認められた。

本報告では上記の3種の室内岩石試験方法のうち衝撃破砕試験を用いて種々の岩石について試験を行なった結果とこの試験方法および試験結果の解析方法に関する問題点と改善方法について述べる。

2. いままでの衝撃破砕試験

岩石や石炭などの衝撃破砕試験として知られているものには次のようなものがある¹⁾。

(i) 落下破砕試験：これは底開き箱より岩石試料約 2.3kg を 6 feet 下の鋼板上に落下させた後、破砕した試料の粒度分析を行ない F 式によってフライアピリティー (F) を求めるものである。

$$F = 100 - (X_1/X_{2.5}) \times G \quad \dots\dots\dots(1)$$

X_1 ：ふるい網目の寸法, G ：ふるい残留量 (%)

(ii) 回転破砕試験：1kg の試料を円筒形容器に入れ 40rpm で 1 時間回転させた後粒度分析を行ない (i) の試験とほぼ同様な方法でデータ処理を行うものである。

(ii) 落槌衝撃破砕試験：この方法にはソ連の方法と英国の方法との2種がある。ソ連の方法はプロトジャコノフ試験といわれているもので図-1 に示す鋼製の試験容器に試料とする小塊 1 個を入れ、重錘を n 回落下させて破砕する²⁾。これを 5 個の小塊について行ない、その破砕試料を全部まとめて網目 0.5mm のふるいでふるい分け網目を通過した粉をメスシリンダーに入れ、その高さ (l) を測定する。破砕指数としてのプロトジャコノフ係数 (f) は(2)式で求められる。

$$f = 20n/l \quad \dots\dots\dots(2)$$

英国の方法は約 100g の試料を円筒形容器に入れ約 1.8kg の重錘を 30.5cm の高さから 20 回落下させて破

砕し、この試料を網目 3.18mm のふるいでふるい分け、網目を通らないものの重量を測定して、この値を衝撃破砕指数 (ISI) とするものである。

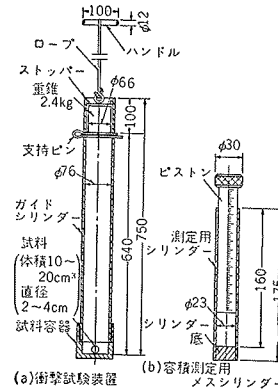


図-1 プロトジャコノフ試験機

以上の数種の試験法のうち岩石に対して比較的適していると思われるものはプロトジャコノフ試験である。表-1 は種々の岩石に対して試験条件を変えて求めたプロトジャコノフ係数を示す。試料の体積が大きくなれば f は一般に大きくなり打撃回数が多くなればやや小さくなる傾向が認められる。このように試料体積・打撃回数の差が試験結果に影響をおよぼすことがこの試験法の欠点である。

3. 提案する衝撃試験法

ここで提案する試験に使用する試験機はプロトジャコノフ試験機に対して製作および取扱いを容易にする目的で若干の改良を加えたものである。プロトジャコノフ試験と大きく相違する点は試料を破砕後、粒度分析を行なうことである。試験条件の変動による試験結果のバラツキが少なく、また試験によって求められる値から岩盤の掘削作業性判別に必要な比エネルギーが算定できる。試料の大きさは 1cm~4cm であれば良いが通常は A 種および B 種の 2 種類の試料、いずれかとしている。A 種試料はプロトジャコノフ試験と同様に直径約 3cm の小塊 5 個とするものでプロトジャコノフ係数も同時に求めることが可能である。B 種試料は網目 19.5mm を通過し、網目 9.5mm を通らない破砕岩石 50g とするもので小さな掘削ざりからも破砕常数を求めることができる。現場より採取した岩石を所定の大きさにハンマーで破砕して写真-1 に示すように衝撃破砕試験機で破砕する。重錘の落下回数は試料の衝撃強さが大きい程多くするが通常は 1 回の試験で 10 回とする。A 種試料の場合は合計 50 回となる。破砕は試験機をなるべく大きなコンクリートブロックの上で行う。破砕後、破砕試料を粒度分析するが、粒度分析に使用するフルイは直径 10cm の小型フルイで網目

岩石名	点荷引張強度 D = 2 cm kg/cm ²	試料5ヶ の重量 g	プロトジャコノフ係数 f					平均	変動係数
			N=3	N=5	N=10	N=15			
花崗石	80.0	600	5.88	3.16	3.08	2.68	2.86	0.34	
		400	2.39	2.63	2.73	2.81			
		200	1.60	2.49	2.41	2.50			
粘板岩	145.0	600	14.63	8.93	9.76	9.84	9.78	0.19	
		400	12.00	9.62	10.00	7.50			
		200	8.00	10.53	8.89	7.71			
凝灰岩	64.0	600	20.00	11.11	11.11	12.50	9.77	0.41	
		400	8.57	8.33	13.33	7.14			
		200	6.67	6.67	7.14	4.62			
閃緑岩	140.0	600	2.50	14.49	14.81	12.00	9.16	0.37	
		400	9.23	10.00	7.55	7.59			
		200	6.00	5.55	5.71	4.54			
玄武岩	240.0	600	30.00	33.33	22.22	20.00	20.23	0.38	
		400	30.00	25.00	15.38	18.75			
		200	12.00	14.29	11.76	10.00			

表-1 プロトジャコノフ試験による値

は15.9・9.52・5.6・2.0・1.0・0.5・0.25 (単位mm)の7段階が適当であり、これらに受皿を加えたものを標準ふるいとする。この粒度分析結果から(1)式によって破砕常数(F₀)を求める。

表-2は種々の岩石に対する試験結果で試料はA種試料である。変動係数は表-1のプロトジャコノフ係数より小さく試験条件の差の影響が少ないことがわかる。

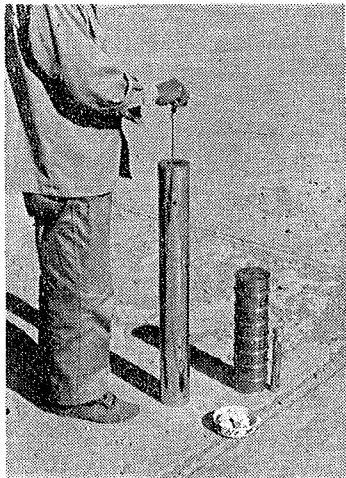


写真-1 衝撃破砕試験

4. 破砕常数の算定式

衝撃破砕試験で破砕された岩石試料の全重量をM, 比重をρ, また試料はD_LからD_Sの大きさに破砕されたと考えれば比表面積の増加量ΔS_Sは破砕岩石の形状係数を6と仮定して(3)式で与えられる。

$$\Delta S_S = \frac{6M}{100\rho} \left(\frac{1}{D_S} - \frac{1}{D_L} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここでLewisらの理論より粉砕に要する仕事量は新しく生成された粉砕産物の比表面積のn乗に比例す

岩石名	点荷引張強度 D = 2 cm kg/cm ²	試料5ヶ の重量 g	破砕常数 F ₀ joule/cm ²					平均値	変動係数
			N=3	N=5	N=10	N=15			
花崗岩	80.0	600	4.87	4.00	4.52	4.14	4.66	0.15	
		400	3.52	3.74	4.56	4.59			
		200	2.73	3.63	4.45	5.07			
粘板岩	145.0	600	6.39	7.12	10.26	11.73	9.37	0.18	
		400	8.59	8.62	8.63	8.63			
		200	8.60	10.70	11.82	11.40			
凝灰岩	64.0	600	7.51	8.34	12.31	15.57	10.06	0.27	
		400	7.13	8.80	15.01	10.93			
		200	7.79	8.86	10.20	8.32			
閃緑岩	140.0	600	7.42	11.65	16.59	18.41	11.76	0.27	
		400	8.56	13.95	13.52	11.50			
		200	8.88	9.84	10.74	10.00			
玄武岩	240.0	600	8.98	14.09	19.53	21.47	17.17	0.30	
		400	11.62	16.54	18.06	30.93			
		200	15.61	16.93	16.77	15.51			

表-2 衝撃破砕試験によるF₀値

ると仮定すれば(4)式が成り立つ

$$E_S \propto (\Delta S_S)^n \quad \dots\dots\dots(4)$$

いまD_Lの大きさの岩石の単位量を基準とする大きさD₀まで破砕するのに必要なエネルギーをE₀, D₀に破砕された岩石の比表面積増加量をΔS₀とすれば(3)・(4)式より

$$E_S = E_0 \left(\frac{\Delta S_S}{\Delta S_0} \right)^n \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$= E_0 \left(\frac{\frac{1}{D_S} - \frac{1}{D_L}}{\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_L}} \right)^n \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで初期の岩石の大きさを無限大とすれば $\frac{1}{D_L} \rightarrow 0$ となるので(6)式は(7)式のようになる。

$$E_S = E_0 \left(\frac{D_0}{D_S} \right)^n \quad \dots\dots\dots(7)$$

よって岩石をD_{i-1}の大きさからD_iの大きさまで破砕するときのエネルギーΔE_iは次式で示される。

$$\Delta E_i = E_0 D_0^n \left(\frac{1}{D_i^n} - \frac{1}{D_{i-1}^n} \right) \quad \dots\dots\dots(8)$$

いまある仕事(W)により岩石を破砕して種々の粒径の破砕岩石が生じた場合に、それぞれの粒径をD_iとしD_i以下の岩石の全体積をV_iとすれば

$$W = \sum \Delta E_i V_i = E_0 D_0^n \sum \left\{ \left(\frac{1}{D_i^n} - \frac{1}{D_{i-1}^n} \right) V_i \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

いまF₀=E₀D₀ⁿとし、衝撃破砕試験の試料に対する全打撃回数をN, 重錘落下高をH, 重錘重量をGとすれば仕事量はW=NHGとなる。また打撃効率をe, 岩石の比重をρ, X_{i-1}のふるいを通過する岩石試料重量をW_{i-1}とし、さらに(9)式においてn=1/2とおけば

$$F_0 = e\rho NHG / \sum \{ (D_i^{-n} - D_{i-1}^{-n}) \times W_{i-1} \} \quad \dots\dots\dots(11)$$

e=1.0 G=2.4kg H=60cm とすれば

$$F_0 = 14.1N\rho / \sum \{ (D_i^{-n} - D_{i-1}^{-n}) W_{i-1} \} \text{ (Joule/cm}^{5/2}\text{)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに } D_i &= (X_{i-1} - X_i) / 2 \\ D_{i-1} &= (X_{i-2} - X_{i-1}) / 2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

X_i: 試験ふるい網目

試験データ整理の便宜のため(13)式の分母内 W_{i-1} 係

数 $\left(\sqrt{\frac{2}{X_{i-1} - X_i}} - \sqrt{\frac{2}{X_{i-2} - X_{i-1}}} \right)$ の値をあらかじめ計しておくが良い。標準フルイの使用による W_i に対し、岩石の均一性係数 m=10 と仮定した場合の上記分母内係数の値を表-3に示す。

試験方法	A 試験				B 試験	
	40mm	30mm	25mm	20mm		
試料1ヶの大きさ	40mm	30mm	25mm	20mm	12.7mm	
試料数量	5ヶ	5ヶ	5ヶ	5ヶ	50g	
標準打撃回数	5×10回	5×10回	5×10回	5×10回	10回	
係数	15.90mm残留量	0.098	0.083	0.066	0.039	0
$\left(\sqrt{\frac{2}{X_{i-1} - X_i}} - \sqrt{\frac{2}{X_{i-2} - X_{i-1}}} \right)$	15.90mm通過料	0.289	0.227	0.188	0.141	0
	9.52 "	0.264	0.264	0.264	0.264	0.264
$\left(\sqrt{\frac{2}{X_{i-1} - X_i}} - \sqrt{\frac{2}{X_{i-2} - X_{i-1}}} \right)$	5.60 "	0.472	0.472	0.472	0.472	0.472
	2.00 "	0.961	0.961	0.961	0.961	0.961
$\left(\sqrt{\frac{2}{X_{i-1} - X_i}} - \sqrt{\frac{2}{X_{i-2} - X_{i-1}}} \right)$	1.00 "	1.066	1.066	1.066	1.066	1.066
	0.50 "	1.505	1.505	1.505	1.505	1.505
$\left(\sqrt{\frac{2}{X_{i-1} - X_i}} - \sqrt{\frac{2}{X_{i-2} - X_{i-1}}} \right)$	0.25 "	3.774	3.774	3.774	3.774	3.774

備考: m=10 (n=1/2)

表-3 m=10 W_{i-1} 係数表

5. 比エネルギーと寸法効果

ある岩盤を掘削する場合の掘削作業全体についての岩盤を単位体積掘削するに要するエネルギー (比エネルギー) を E とすれば W=E∑V_i であるから(9)式より

$$E = \frac{1}{\sum V_i} F_0 \sum \left\{ \left(\frac{1}{D_i^n} - \frac{1}{D_{i-1}^n} \right) V_i \right\} \quad \dots\dots\dots(14)$$

掘削ずりの粒径は一律とし、また掘削対象地盤の岩石の大きさは掘削ずりに比較して非常に大きいとみなされるので(14)式は次のようになる。

$$E = F_0 / D^n \quad \dots\dots\dots(15)$$

(15)式において D₀=100μ n=1/2 とし Dをμ単位で計算すると

$$E = 10E^0 / \sqrt{D} \text{ [joules/cm}^3\text{]} \quad \dots\dots\dots(16)$$

となり、これは F.C. Bond の提案する粉砕の理論式と同一である³⁾。

神田ら⁴⁾ は弾性体の球が2枚の平行平板によって圧縮され破壊するまでに球の内部にたくわえられる単位体積当りの弾性ひずみエネルギーは球の圧壊強度の関

数としてあらわすことができるとして(17)式を示した。

$$E' = C_1 \left(\frac{1-\nu_1^2}{Y_1} + \frac{1-\nu_2^2}{Y_2} \right)^{2/3} \cdot (S_t)^{5/3} \quad \dots\dots\dots(17)$$

ν₁・ν₂: 球および平行平板のポアソン比

Y₁・Y₂: " のヤング率

一方点载荷の状態弾性体の球を圧縮した場合、破壊荷重をP、着力点間距離をXとすると試料の引張強度 S_t は次式で与えられる⁵⁾。

$$S_t = k \frac{2P}{\pi X^2} \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで Griffith はぜい性材料中には先天的にクラックが存在し、この部分に応力が集中してぜい性材料の破壊が始まるとしている。このクラックは材料の単位体積当り一定の密度をもって分布していると考えられ材料の強度は、そのクラックの中の最も弱いものによって決まる。このような考え方に基づいて岩石の破壊応力がσよりも大きくなる確率 P(σ) を求めると極値統計学より体積をVとして

$$P(\sigma) = \exp\left(-V \cdot \frac{\sigma'}{\sigma} \cdot \sigma_m\right) \quad \dots\dots\dots(19)$$

が得られる⁶⁾。この分布を Weibull 分布といい m は Weibull の均一性係数と呼ばれる定数である。このような強度の分布が Weibull 分布に従うとき強度の平均値 σ_m は

$$\sigma_m \propto V^{-1/m} \cdot \sigma'^{1/m} \quad \dots\dots\dots(20)$$

いま体積 V₀ なる材料を σ₀ の応力速度で破壊したときの破壊強度を S₀ とすると(20)式は(21)式のように書き直すことができる。

$$S_t = (S_0 \cdot \sigma_0^{-1/m} V_0^{1/m}) \cdot \sigma'^{1/m} V^{-1/m} \quad \dots\dots\dots(21)$$

(21)式および V=1/6πX³ の関係を(17)式に代入すれば

$$E = C_2 (S_0 \cdot \sigma_0^{-1/m} V_0^{1/m})^{5/3} \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{Y_1} + \frac{1-\nu_2^2}{Y_2} \right)^{2/3} \cdot \sigma'^{5/3m} \cdot X^{-5/m} \quad \dots\dots\dots(22)$$

よって比エネルギーは応力速度の 5/3m 乗に比例し粒径の 5/m 乗に反比例することとなる。

(22)式をXについて微分すると

$$dE = -C_3 \frac{dX}{X \frac{m+5}{m}} \quad \dots\dots\dots(23)$$

また(7)式において E_S=E, D_S=X として微分すれば

$$dE = -nE_0 D_0^n \frac{dX}{X^{n+1}} \quad \dots\dots\dots(24)$$

となり(23)(24)式を比較して次式が得られる。

$$n=5/m \quad \dots\dots\dots(25)$$

6. F₀ による掘削作業性の判別

試験によって F₀ 値が求められたら F₀ 値そのもので掘削作業性を判別することもできるが、掘削粒径を推定して(14)~(16)式を用いてEを計算し、これまでの施工実績におけるEと掘削能率との関係から判別するのがよい。また使用機械の出力および掘削効率が推定できれば(20)~(28)式を用いて掘進速度を求めることも可能である。

$$V = P_0 \cdot e \cdot \sum V_i / \sum \left\{ \left(\frac{1}{D_i^n} - \frac{1}{D_{i-1}^n} \right) V_i \right\} A \cdot F_0 \quad \dots\dots\dots(26)$$

P₀ : 機械出力, e : 機械効率, A : 削孔径
ここにロータリー掘削の場合は

$$P_0 = (F \cdot U + 2\pi NT) \quad \dots\dots\dots(27)$$

F : 推力 U : 掘進速度 N : 回転数 T : トルク
パーカッション掘削の場合は

$$P_0 = (nSH) \quad \dots\dots\dots(28)$$

n : 打撃回数 S : チゼル重量 H : チゼル落下高
また掘削ずりの大きさを一様と考え、初期の岩石の大きさをすなわち岩盤の大きさは掘削ずりの粒径よりも非常に大きいとみなせば

$$U = P_0 e D^n / A \cdot F_0 \quad \dots\dots\dots(29)$$

7. 衝撃破碎試験の現場測定例

兵庫県宝塚市の宅地造成工事現場は岩盤が露出しているため、ここでロータリー掘削方式とパーカッション掘削が可能な地中連続壁掘削機 Super CIS 71型の掘削実験が行なわれたが、この際に岩盤の力学特性試験の一つとして衝撃破碎試験が実施された。この地点の岩盤は硬質頁岩および凝灰岩で一軸圧縮強度は約 1000 kg/cm² である。

衝撃破碎試験に用いた岩石試料は掘削機による掘削ずりを採取してB種試料の大きさにフルイ分けしたものである。図-3に深度方向の破碎常数 F₀ 値の分布を示す。GL-4.0m~-5.0m で F₀ 値が非常に大きくなっているが、柱状図からわかるように、ここは岩質が異なっている。

掘削パネルの形状は幅 67cm×長さ4.0mである。ロータリー掘削はGL-6.0mまで行なわれた。この時の実稼動掘進速度は約 100cm/min である。掘削時の平均推力は 16ton, 平均トルクは 260ton 回転数は 25rpm である。

掘削ずりに対する衝撃破碎試験および粒度分析より F₀ 値は平均 5Joule/cm^{5/2}, 50%平均粒径は15mm で

あるのでこれらの諸数値と実際に測定された推力・トルク・回転数の値を(28)(29)式に代入し、さらに掘削効率を0.5と仮定すれば掘進速度は 109cm/min となり実際の掘進速度とほぼ等しくなる。

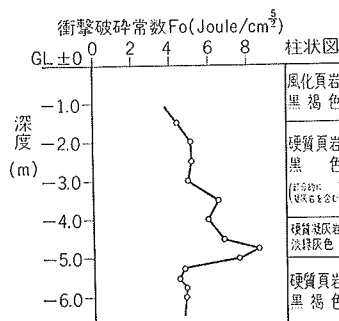


図-2 衝撃破碎試験試験結果の1例

8. あとがき

本報告で提案した衝撃試験は試験機が安価で持ち運びが容易であること、試験方法が容易で現場作業員でも試験が可能であること、試験員の個人差や試験条件の相違による試験値の変動が少ないことなどから実用的な試験方法といえよう。

この試験方法の問題点としてはまだデータの集積が少ないということである。今後岩盤掘削作業を行う現場に本試験を適用しさらに掘削作業能率の調査を行なって両者の結果の相関性を求めて掘削作業効率判定のための資料を作成する予定である。さらに他の室内岩石簡易試験法および現位置における岩盤簡易調査法についても検討を行ない、岩盤掘削作業性判別のための調査システムを確立したい。

参考文献

- 1) 芳賀孝成：衝撃破碎試験による岩石の破碎常数とその適用性 大林組技術研究所内報 1972年3月
- 2) M. M. Protodyakonov Mechanical properties and drillability of rocks Rock Mechanics P 130 ~118 1962年5月
- 3) William C Maurer: Novel drilling Techniques P9~13 1966年
- 4) 神田良照 他 単一球形粒子の破碎における寸法効果とエネルギー法則 日本鉱業会誌 1969年12月号 P21~26
- 5) 西林新蔵 他 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 土木学会論文報告集第199号1972年3月 P89~96
- 6) 西松裕一 岩石強度の確率論的考察 材料 第17巻 第181号 P50~55 1968年10月