

# 岩石の工学的性状に関する研究 (その2)

——一面せん断試験方法と結果の適用について——

木村 薫 平間 邦興  
丸山 誠

## Study on Engineering Properties of Various Rocks (Part 2)

——Method of Simple Shear Test and Application of Results Thereof——

Kaoru Kimura Kunioki Hiram  
Makoto Maruyama

### Abstract

In construction of civil structures in bedrock, various in-situ and laboratory tests were performed in order to analyze bedrock stability and in trying to grasp fundamental data. Numerous testing machines and measurement methods have been developed to analyze bedrock movements to clarify the engineering properties of rock and bedrock. Studies regarding the engineering properties of bedrock have been carried out widely through laboratory tests. The authors have for some time conducted basic studies of testing methods and their applications through various mechanical tests of rock cores. This report describes shear properties of rocks, especially application of the simple shear test. As a result, it was possible to clarify the usefulness of this method of testing.

### 概 要

岩盤内構造物の建設にあたっては、事前に岩盤の安定性を検討するために、岩盤試験や、室内岩石試験が実施され、種々の基礎資料を得る試みが行なわれている。複雑な岩盤挙動を解析するために、岩や岩盤の工学的性状の把握が必要となり、各種の試験装置や測定装置が考案、開発されている。また、各種の室内試験結果より岩盤の工学的性状を把握することも広く研究されている。

筆者らは、いままで岩石コアによる各種の力学試験を通じて、岩石試験法やその試験結果の適用性などについて比較検討を行ってきた。この報告では、岩のせん断破壊特性として特に一面せん断試験に注目し、その試験方法や結果の利用法について検討した結果を述べる。その結果、簡易的に実施できる一面せん断試験の有効性を明確にすることができた。

#### 1. まえがき

室内の岩石強度試験には種々の方法があり、設計施工への適用が試みられているが、試験方法や試験結果の適用にあたっては問題の残る場合が多い。また、岩盤斜面や地下空洞などの岩盤構造物の解析における基礎資料の一つがそのせん断破壊特性である。筆者らは、岩のせん断試験方法に関する基礎研究として、各種のせん断試験

結果について比較を行ない、その適用性について検討してみた。この報告では、特に(簡易)一面せん断試験を取り上げ、その適用上の問題点について述べる。以下に、若干の試験結果とともに検討結果の概要を示す。

#### 2. 試料と試験方法

##### 2.1. 試験試料と供試体作成

工学的試験に使用した岩石試料の基本的性状を一覧表

岩石試料	産地	自然含水比 $\omega$ (%)	単位体積重量 $\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	間隙率 $n$ (%)	真比重 $G_s$	圧縮強度 $\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) ( )変動係数	変形係数 $E_{50}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) ( )変動係数	圧裂強度 $\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) ( )変動係数	弾性波速度 $V_p$ (km/sec)	
軟岩	泥岩	神奈川県鎌倉市	36.0	1.80	52.1	2.74	28.0 (17.3)	5.200	4.3 (19.7)	1.75
	泥岩	神奈川県横浜市	27.7	1.94	44.0	2.71	37.4 ( 9.7)	6,230	4.2 (16.6)	1.73
	(浮石質)凝灰岩	栃木県宇都宮市	38.7	1.47	58.2	2.58	45.2 (26.5)	7,700	7.0 (22.1)	1.51
硬岩	(閃緑)凝灰岩	福島県南会津郡	26.8	1.84	49.1	2.76	61.8 (31.9)	9,900	5.7 (57.9)	1.98
	(凝灰質)砂岩	兵庫県神戸市	2.8	2.07	19.7	2.51	513.7 (18.7)	64,400	30.5 (24.3)	2.65
岩	砂岩	長崎県諫早市	1.1	2.41	9.8	2.64	786.3 ( 8.1)	68,300	47.0 (13.8)	3.06
	砂岩	静岡県藤枝市	1.0	2.53	4.2	2.62	1208.3 (25.4)	210,500	76.3 (21.9)	3.78
	石灰岩	栃木県阿蘇郡	0.1	2.70	1.9	2.75	1768.3 (26.0)	433,000	70.1 (15.4)	6.16
	玢岩	岐阜県多治見市	0.1	2.62	2.3	2.68	3150.7 (11.6)	443,600	132.5 (15.4)	5.03

表-1 試験試料と基本的性状の一覧表

にまとめたのが表-1である。主に、泥岩、凝灰岩および砂岩の9試料である。

試験供試体の作成にあたって、端面を成形するために、新しく岩石コア用の研磨装置(写真-1)を試作した。これは、研磨盤の回転によって供試体端面を研磨するもので、研磨材の種類を変えることによってあらゆる試料を一度に成形することができる。この研磨装置の使用によって、JIS規格を十分に満足できる端面精度を得ることができた。

### 2.2. 試験方法とその適用について

実施した、岩石試験の種類は、圧縮試験および圧裂引張試験の他に一面せん断試験並びに三軸圧縮試験である。試験方法などの詳細は既報告<sup>1)</sup>を参照されたい。

せん断試験のうち、特に一面せん断試験の概念図を図-1に示す。この試験は建設以外の多くの分野にも活用されつつあり、以下のような数々の利点を有している。

- (1) 試験装置の取扱いが容易で、簡便にせん断試験を行なうことができる。
- (2) 得られる $\tau$ - $\sigma$ 関係より、比較的信頼性のある強度定数( $c$ ,  $\phi$ )を推定することができる。
- (3) 供試体の大きさが50mm $\phi$ ×50mm<sup>h</sup>と小さくて済み、また変形曲線( $\sigma$ - $\gamma$ 関係)も求めることができる。

このように、三軸圧縮試験と比較しても有利な点が多く、今後おおいに利用範囲が広まると予想される。しかし、一方、試験装置の機構上の問題点も考えられ、試験結果の適用にあたっては十分に考慮しておく必要がある。特に、強制せん断面付近では、圧縮応力が集中したりあるいは引張応力が作用する場合がある<sup>3)</sup>。したがって、試験時のせん断角度 $\alpha$ (図-1参照)については、ある範囲に限って考える必要がある。また、一方向のみの載荷試験のため拘束圧が限られ、中・高拘束圧下での挙動が把握できない難点が挙げられる。以上のような試

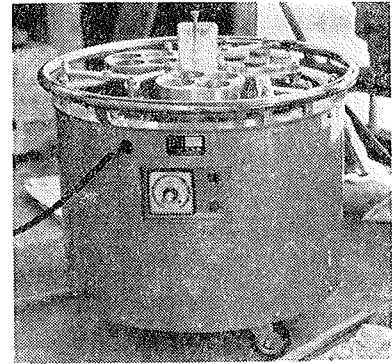


写真-1 岩石用研磨装置

$$\tau = P/A \cos \alpha$$

$$\sigma = P/A \sin \alpha \quad A: \text{せん断面積}$$

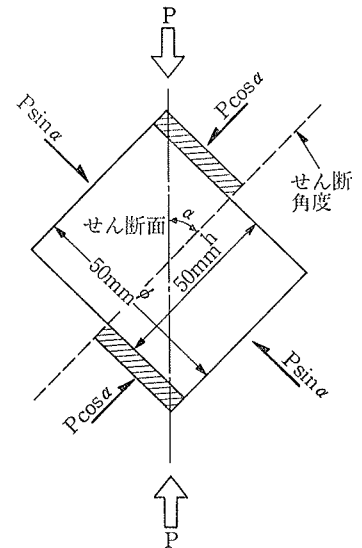


図-1 一面せん断試験概念図

験特性を考慮すれば、限られた範囲で十分に適用できると考えられる。

今回の試験では、せん断角度を $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ の5段階に設定した。以下に、得られた試験結果について、比較検討した結果を示す。

### 3. 一面せん断試験に関する2,3の検討

試験結果のうち、ここでは得られた $\tau$ - $\sigma$ 関係についての数式化を試み、その数式の適合性や利用方法について比較、検討した。近似式としては直線、放物線および双曲線など数種類の数式を適用し、それぞれ最小二乗法によって計算してみた。

#### 3.1. $\tau$ - $\sigma$ 関係の曲線傾向

せん断時のせん断ひずみ $\gamma$ と垂直応力 $\sigma$ との関係を示したのが図-2である。せん断角度 $\alpha$ によって、変形特性にわずかな相違が認められる。これは、せん断角度が大きくなると、垂直荷重による圧縮破壊を併発するため、わずかの永久ひずみが発生するためと推定される。

$\tau$ - $\sigma$ 関係のうち、硬岩と軟岩の代表例を示したのが図-3~4である。図中では、せん断角度ごとに数個ずつ実施した平均値であり、 $\tau$ - $\sigma$ 関係は直線式あるいは放物線式で近似した場合を合わせて示してある。

いずれの場合も直線、放物線で表わすことが可能と思

われるが、硬岩あるいは軟岩によって適用曲線が多少異なるようである。

まず、硬岩の場合(図-3参照)には低圧領域を考慮に入れると、放物線式のほうがより適合する傾向が認められ、側圧依存性の著しい傾向を示している。しかし、前述したように、せん断破壊発生の際力条件が異なると予想される  $\alpha=10^\circ$  お

よび  $40^\circ$  の試験結果を試みに省いて計算してみたのが図中の点線で示される修正した  $\tau-\sigma$  の関係である(図-3参照)。修正して示せば、直線式でも十分近似できる場合もあることがわかる。

ついで、軟岩の場合には(図-4参照)、含水比の違いによる影響を合わせて示してあるが、直線でも放物線でも比較的よく適合すると判断される。つまり Mohr-Coulomb 式で十分適用できるようである。したがって、一面せん断試験によって比較的簡便にせん断強度を推定することが可能となる。また、含水比による影響も一定応力以上の範囲で表われており、拘束圧が大きくなるにつれて、大きい強度変化が得られている。また強度変化の傾向が、岩種や含水比の程度によって著しく影響を受けることがわかる。特に今回の試験結果では泥岩よりも凝灰岩のほうに含水比の影響が強度関係に大きく表われていることがわかる。

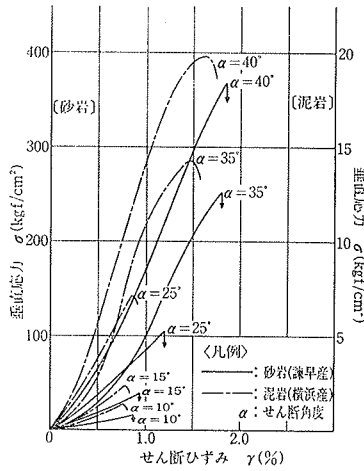


図-2 せん断ひずみの傾向

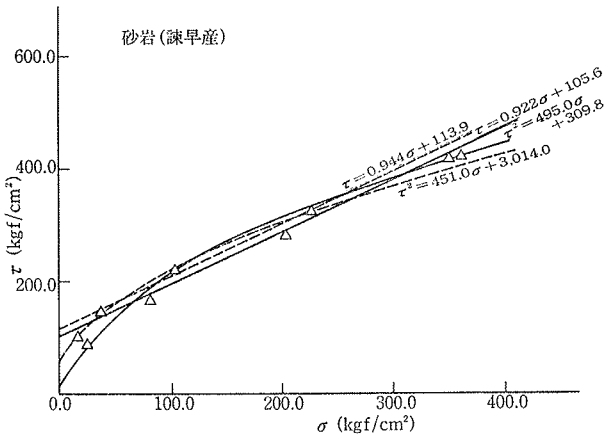
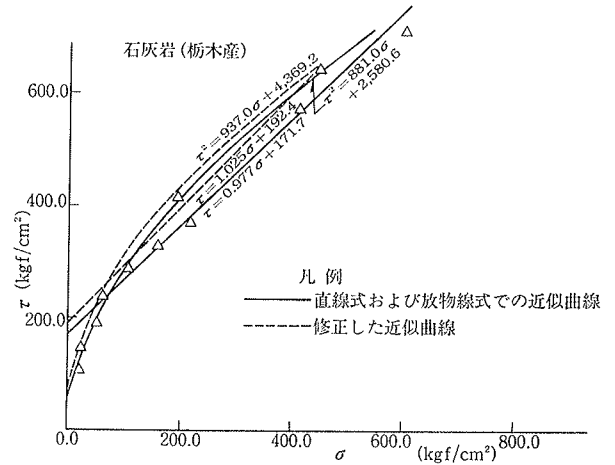


図-3 一面せん断試験における  $\tau-\sigma$  関係(硬岩)

以上、硬岩・軟岩について、一面せん断試験による試験結果の適合性について述べたが、いずれも適用範囲を考慮すると十分利用できることが判明した。

### 3.2. せん断強度の比較

得られた  $\tau-\sigma$  関係を、放物線式あるいは直線式と仮定した場合のせん断強度、すなわち  $\tau$  軸切片を求めてみ

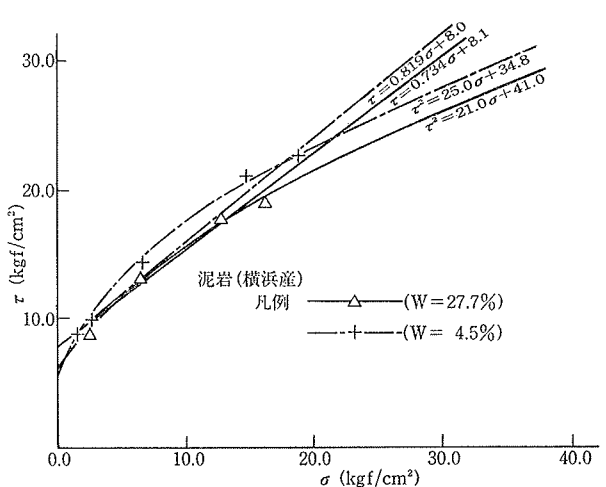
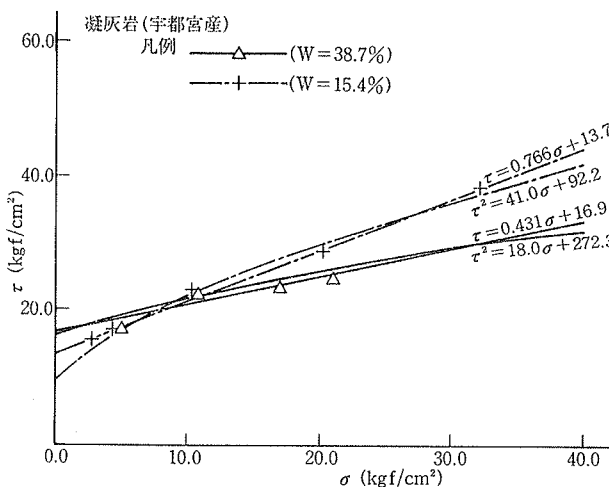


図-4 一面せん断試験における  $\tau-\sigma$  関係(軟岩)

た。まず、  
 圧縮強度 $\sigma_c$ と  
 圧裂引張強度 $\sigma_t$ から  
 の計算結果と  
 比較したのが  
 図-5である。  
 $\tau$ - $\sigma$ 関係から  
 得られる推定  
 せん断強度を  
 ある範囲で  
 図示してある。  
 計算式は図中  
 の二式を採用  
 した。

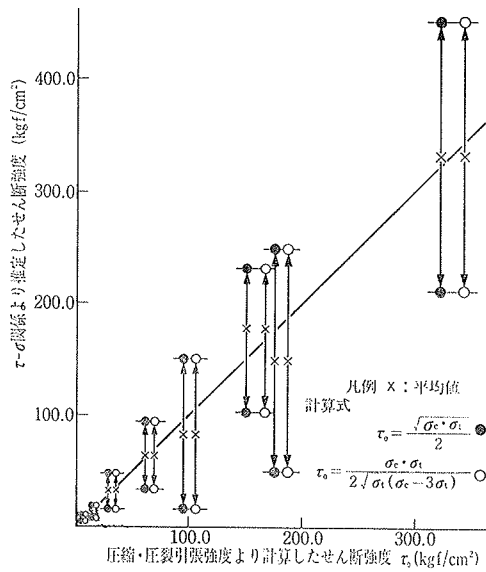


図-5 せん断強度の比較

推定したせん断強度は、岩種によって大きく変動しているが、その平均値は圧縮、圧裂引張強度からの計算値とは、ほぼ一致する傾向が得られた。しかし、中硬岩以上では推定せん断強度の変動が大きく、直線式あるいは放物線式と仮定する場合は問題が残るようである。試みに直線式と仮定した場合の推定内部摩擦角は、37°(軟岩)～45°(硬岩)の範囲で得られた。また、推定せん断強度と圧縮強度 $\sigma_c$ および圧裂引張強度 $\sigma_t$ との関係を試みに求めたところ、平均的に圧縮強度の9～18(%)、圧裂引張強度の170～190(%)のせん断強度が得られた。

3.3. 破壊包絡線の検討

ここでは図-4に示した一面せん断試験結果の妥当性を検討するため、三軸圧縮試験より得られる破壊包絡線との比較を行なった。三軸圧縮試験が得られた破壊包絡線をいくつかの近似式で表わした代表例が図-6である。直線式あるいは放物線式の他に以下の近似式を採用、検討してみた。

$$\tau^2 = k\sigma_t(\sigma_t - \sigma) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$(\tau/\tau_t)^n = 1 - \sigma/\sigma_t \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\sigma_t$ : 引張強度、 $\tau_t$ : せん断強度、K, n: 定数である。まず、破壊包絡線では直線以外は概ね適用可能と思われるが、特に(2)式は硬岩、軟岩とも最もよく近似していることがわかる。

一面せん断試験より得られる $\tau$ - $\sigma$ 関係と比較してみると、高拘束領域での破壊特性を予想することができる。軟岩の場合、含水比の影響も合わせて示してあるが、一面せん断試験結果と比較的一致する傾向が認められ、かつ含水比による強度変化も適確に表われている。硬岩の

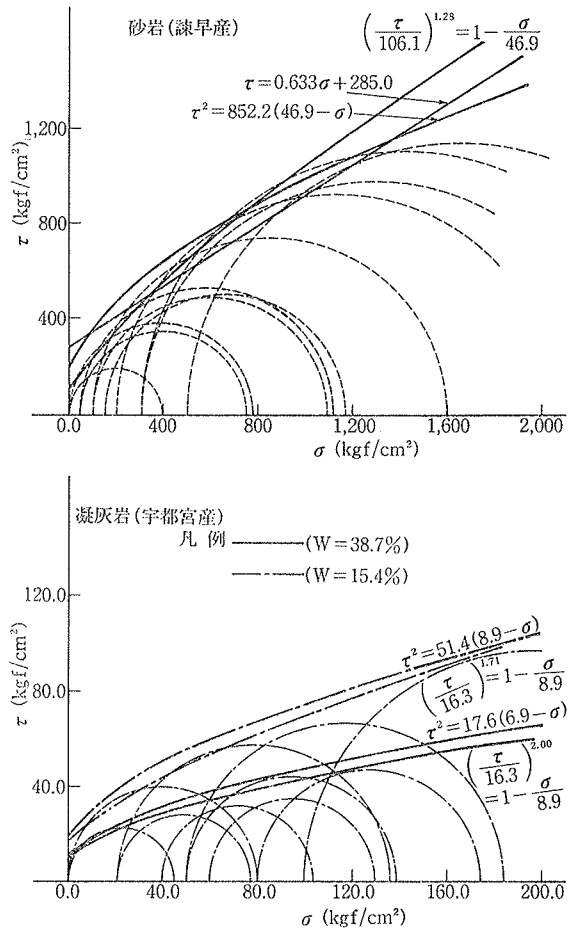


図-6 破壊包絡線との比較

場合には、三軸試験結果より一面せん断試験結果が下回る傾向がある。したがって、硬岩の場合、試験結果の適用にあたっては十分注意する必要がある。

4. あとがき

岩のせん断破壊特性のうち、特に一面せん断試験に注目し、その試験結果の適用性や利用方法などについて述べた。簡便にできる一面せん断試験でも、限られる範囲内では十分信頼性のある結果が得られることが判明した。今後は変形性状を重点的に検討するとともに、応用的に解析手法への適用を考慮している。

なお、この研究を行なうにあたり、法政大学土木工学科学生山浦好則君の尽力に対し深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 木村, 他: 岩石の工学的性状に関する研究, 大林組技術研究所報, No. 22, (1981), pp.100~104
- 2) 荻野, 他: 一面せん断試験における応力と変形の解析, 日本鉱業会秋季大会, (1978)