

# 一面せん断実験による岩盤不連続面のせん断強度の異方性に関する評価

長崎大学工学部 学生会員 谷川 雅治 長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静  
長崎大学大学院 正会員 李 博 杉本 知史 学生会員 本郷 伸

## 1. はじめに

自然岩盤は、インタクト部と亀裂や断層などの不連続面により構成され、岩盤構造物における有効な設計・施工に当たって、強度の小さい岩盤不連続面のせん断挙動の解明が重要な要素の一つとされている。岩盤不連続面の挙動特性は、ラフネスやせん断履歴、せん断方向など多くの要素に影響される。せん断強度と表面ラフネスや垂直応力の関係が定式化されてきたが、せん断方向によるせん断強度の影響が未だ解明されていないのが現状である。そこで本研究では、既往研究の実績を踏まえた上で、一面せん断試験を行い、供試体を4つの方向からせん断させることにより、せん断方向によるせん断強度の異方性を明らかにすることを目的とする。

## 2. 試験機概要

本研究で用いたデジタル制御型一面せん断試験装置は、下箱を水平に動かすことにより不連続面をせん断するもので、上箱はせん断供試体を挟み込む形で設置され、せん断荷重計測用のロードセルを組み込んだ2本のロッドにより支持されている。このロッドは十分に長く、両端の取り付け部はピン構造となっていることから、供試体の垂直方向の移動あるいは回転は許されるが、せん断方向に対して横方向の動きは固定されている。なお、せん断荷重（最大400kN載荷）はその作用線方向が不連続面とほぼ同じ位置となるよう与えられる。また、この装置はフィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムであり、載荷条件はコンピュータにより自動制御される。

## 3. 一面せん断試験の概要

### 3.1 供試体の作成

一面せん断試験は圧裂させた花崗岩から型取った二つの不連続面（Joint1・Joint2）の供試体を用いた。不連続面を模擬する石膏供試体の材料は重量比で石膏：水：遅延材=1：0.2：0.005であり、気中に14日間養生させた。供試体を作成する際に、下部の供試体を型枠にしてペアとなる上部の供試体を作成しているため、初期状態で上下面はよく噛み合っている。供試体の寸法は幅100mm、長さ100mm、高さ100mmの正方形である。二つの表面は共に凹凸がランダムに分布した非常に粗い表面形状（最大高低差 Joint1=9.717mm、Joint2=6.813mm）を有している。せん断方向は図-1に示すように Case1～Case8 までの各4方向とした。

### 3.2 試験ケース

本試験では不連続面を構成する上部と下部の石膏供試体を組み合わせて、初期垂直応力をそれぞれ1MPa、2MPa、4MPaに設定し、せん断速度を0.5mm/minでせん断変位20mmまでせん断させる。そして、せん断履歴の影響を考察するため、せん断速度0.5mm/minでせん断変位0mmまで戻させ、せん断速度を5.0mm/minおよび50.0mm/minと変えて、

### 3.3 表面形状の評価方法

垂直方向において±20μmの精度と10μmの分解機能を持つ非接触型三次元レーザー変位システムにより岩盤不連続面の表面形状を計測し、図-1に示すように、供試体の表面は0.2mm×0.2mmという細かいメッシュ（501×501個）で表現する幾何モデルを作成した。既往研究を踏まえて、ここでは、RMS（二乗平均平方根）、Z<sub>2</sub>（断面の一次導関数）、ACF（自己相関）、SF（構造関数）、Z<sub>4</sub>の五つのパラメーターを計算しせん断強度との関係を比較評価した。な

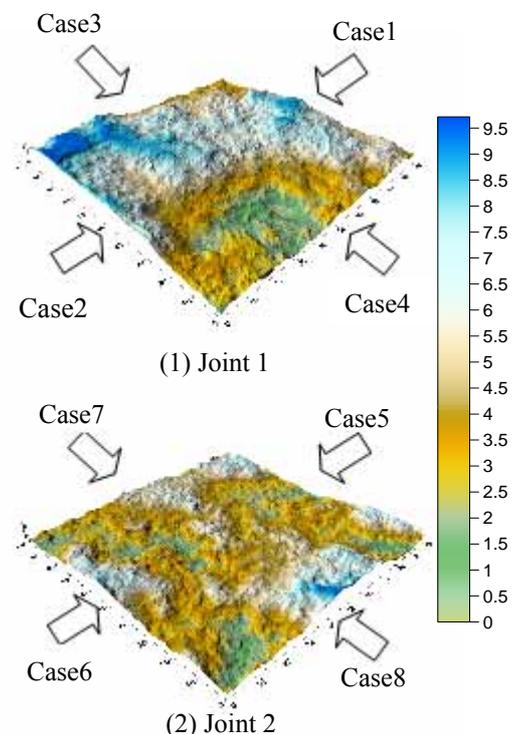


図-1 せん断方向の例示

お、RMS、Z<sub>2</sub>、ACF、SF、Z<sub>4</sub>の計算式は次のようになる<sup>2)</sup>。

$$RMS = \left[ \frac{1}{n} \int_{x=0}^{x=n} z^2 dx \right]^{0.5} \dots (1) \quad Z_2 = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{i+1} - z_i)^2} \dots (2)$$

$$ACF = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=1} Z(x)Z(x+x) dx \dots (3) \quad SF = \int_{x=0}^{x=1} (Z(x) - Z(x+x))^2 dx \dots (4)$$

$$Z_4 = \frac{\sum (x_i)_p - \sum (x_i)_n}{L} \times 100\% \dots (5)$$

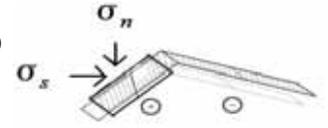


図-2 Z<sub>4</sub>の概念図

ここで、nは計測点数、zは中心線に関する粗さの振幅、dxは振幅間隔、L=10(cm)である。また、Z<sub>4</sub>は図-2に示すように、メッシュ(501×501個)の中で、せん断時に上下表面が接触する部分を+点、離れていく部分を-点と定義し、+点と-点の割合の差を表している。

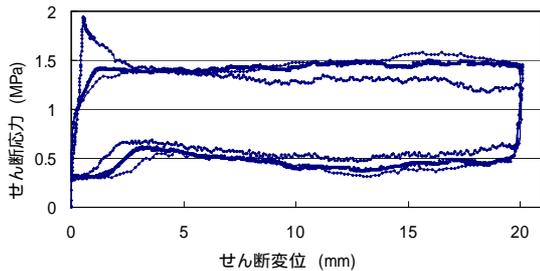


図-3 せん断応力とせん断変位の関係(Case1)

#### 4. 実験結果と考察

図-3にせん断応力とせん断変位の関係の一例(Case1)を示す。せん断過程において、ピークせん断応力は0.7~2.7mmの小さなせん断変位で生じた。これは、せん断初期において、せん断応力と垂直応力を加えることにより凹凸がよりかみ合った状態になり、不連続面の強度が早期に発揮されたものと考えられる。二回目以降のせん断では顕著なピーク応力を示さず、せん断応力の増加にしたがって残留応力が増大することがわかる。

表-1に垂直応力1MPaと4MPaにおけるせん断応力のピーク値および各パラメータの計算結果を示す。各ケースのせん断応力を比較すると、せん断方向により、せん断応力が変わっていくことが分かった。垂直応力が1MPaから4MPaに増加するにつれ、せん断応力のピーク値は概ね比例して増加しているが、ばらつきも見られた。それは供試体の作成および養生時に生じた強度のばらつきに起因したものと考えられる。また、RMS、Z<sub>2</sub>、ACF、SF、Z<sub>4</sub>に関して、せん断応力のピーク値との明確な関係性は見出せなかった。せん断方向を180度回転してせん断させた場合に、せん断応力のピーク値は異なるが、RMS、Z<sub>2</sub>、ACF、SFの値が同じになっている。Z<sub>4</sub>の値はすべての方向によって異なるものの、ピーク値との関係性は見られなかった。従って、単一のパラメーターで不連続面を評価するには限界があると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、せん断強度の異方性を評価するために、一面せん断試験を行い、五つのパラメーターを用いて供試体の表面形状を評価することにより、各パラメーターとせん断強度との関係性を評価した。今後は、異なる模擬供試体の表面形状や様々な境界条件を考慮した一面せん断試験を積み重ねデータを蓄積し、新しいパラメーターあるいはパラメーターの組合せを用いて評価の精度を高めていく必要がある。

[参考文献]

- 1) 佐保亮輔ほか(2007):岩盤不連続面の表面形状がせん断およびせん断-透水カップリング特性に及ぼす影響に関する研究,材料, Vol.56, No9, pp.796-802.
- 2) Lopez.P,Riss.J,Archambault.G(2003):An experimental method to link morphological properties of rock fracture surfaces to their mechanical properties,Int J Rook Mechanics.Min.Sci., Vol.40, pp.947-954.

表-1 せん断応力のピーク値とパラメータの関係

ケース	ピーク値 (1MPa)	ピーク値 (4MPa)	RMS	Z <sub>2</sub>	SF	ACF	Z <sub>4</sub>
Case1	1.064	2.508	5.83	0.406	0.00668	35.8	-0.0288
Case2	0.748	2.234	5.83	0.406	0.00668	35.8	0.0288
Case3	0.756	2.538	5.97	0.480	0.00937	35.9	0.0439
Case4	0.862	2.382	5.97	0.480	0.00937	35.9	-0.0439
Case5	1.153	2.842	3.06	0.403	0.00654	9.45	0.0130
Case6	0.99	2.894	3.06	0.403	0.00654	9.45	-0.0130
Case7	0.879	2.641	3.03	0.445	0.00798	9.45	0.0192
Case8	0.94	2.667	3.03	0.445	0.00798	9.45	-0.0192