

(44) 不連続面粗さと面の接触率による強度特性

埼玉大学	正会員	吉中	龍之進
埼玉大学	学生会員	吉田	淳
(株)熊谷組	正会員	清水	昭男
(株)熊谷組	正会員	新井	元
(株)熊谷組	正会員	○蟻坂	俊英

The Influence of Joint Roughness and Degree of Interlocking on Strength Characteristics

Ryunoshin YOSHINAKA, Jun YOSHIDA, Saitama University

Teruo SHIMIZU, Hajime ARAI, Shunei ARISAKA, Kumagai-Gumi Co., Ltd.

Abstract

The authors have executed a series of laboratory shear test using granite specimens to explain the strength characteristics in jointed rock. We also have measured roughness profiles and distribution of sheared spot of the specimens.

This paper presents the experimental results of the influence of joint roughness and degree of interlocking on strength characteristics.

1. まえがき

不連続性岩盤のせん断強度に大きな影響を与える重要な因子としてBartonらは不連続面の粗さ形状に、Ladanyi らは噛み合わせの分布にそれぞれ着目している。

ここでは、三次元不連続面形状を持つ花崗岩供試体による実験結果をもとに、不連続面粗さと面の接触率がせん断強度にどのような影響を及ぼしているか検討する。

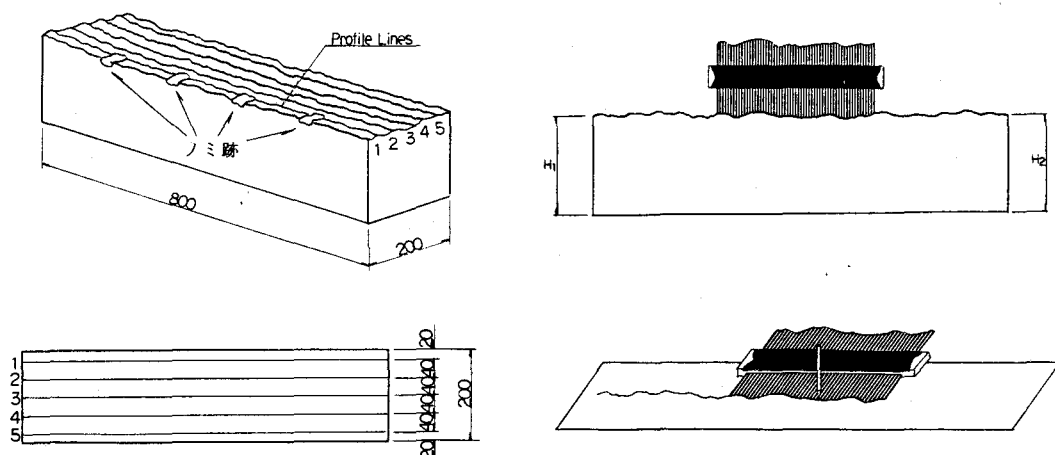
2. 計測方法

2.1 不連続面粗さの計測方法

今回は、不連続面粗さの計測に型取りゲージを用いた。実験供試体における不連続面粗さの計測方法を以下に示す。(図-1)

- ① まず、供試体不連続面のせん断方向に沿って5本の縦断線を引く。
- ② 次に、型取りゲージを縦断線上にあて、十分に押しつけ面の凹凸を計る。
- ③ その状態のまま、型取りゲージをグラフ用紙の上に置き、粗さをペンで書き写す。型取りゲージで、一度に計測出来る長さは300mmであるため、それ以上の供試体に対しては100mmずつだぶらせながら計測した。

グラフ用紙に複写された不連続面の縦断図は、デジタイザーで読み取りパソコンに取り込む。面のデータは、端面からの計測距離をX、供試体底面からの高さをYとするX-Y座標上の曲線として取り込まれる。この際、各点はX軸方向が1mm、Y軸方向が0.1mmピッチで読み取られるものとする。デジタイザーで読み込まれたデータのY座標は、デジタイザー盤上の絶対座標のままなので、供試体の両端面の高さを測定しておき、その高さがデータの両端部のY座標になるように補正した。実験供試体は、せん断面積が



図－１ 不連続面粗さの計測方法

400 cm^2 (MS)、800 cm^2 (MM)、1600 cm^2 (ML) の3タイプを用いた。なお、実験概要およびせん断試験の結果については文献(1)を参照されたい。

2.2 せん断面積の計測方法

せん断試験の終了後、二つの供試体を引き離しせん断された面積（破断面積）の計測を行った。不連続面は三次元形状であるが、今回は写真を用いて二次元面として捉えた方法で行った。実験供試体の不連続面にはあらかじめ墨を塗っておき、せん断された部分は墨が剥げ落ちて白くなるようにしておいた。実験終了後の供試体をピット内で不連続面が上になるようにセットし、不連続面にスポットライトを当て、真上から撮影条件（絞り、シャッタースピード）を変えて数枚撮影した。この写真をイメージスキャナーを用いてパソコンに取り込む。取り込まれた画像データは、せん断された部分の白いドットと残った黒いドットに分かれている。このうちの白いドット数を供試体全体のドット数で割った値が破断面積比となる。

3. 実験結果および考察

3.1 粗さの指標とせん断強度

不連続面の粗さの指標として、次式で定義される Z_2 および SI^+ が有望なことは、以前に述べた。

$$Z_2 = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \quad (\text{勾配の自乗平均})$$

$$SI^+ = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} \max \left(\frac{dy}{dx}, 0 \right) dx \quad (\text{正斜面の全体平均勾配})$$

前述の方法で測定した不連続面縦断面図について、今回は正斜面の平均勾配 SI^+ を加えた3つの項目を計算した。MMタイプの供試体において、ノミ跡の影響のない4本の測線の平均値を載荷前と初期載荷後のそれぞれについて求め、それらの平均値とせん断強度を表－1に示す。

表－1 粗さ指標（平均値）とせん断強度（単位： kgf/cm^2 ）

ケース	項目	Z_2	SI^+	SI'	ピーク強度	残留強度	垂直応力
MM－2		0.0438	0.0774	0.1534	17.05	14.49	10.0
MM－3		0.0471	0.0779	0.1829	14.19	10.73	5.0
MM－4		0.0478	0.0759	0.1618	43.41	25.04	20.0
MM－6		0.0454	0.0665	0.1347	21.82	12.64	10.0

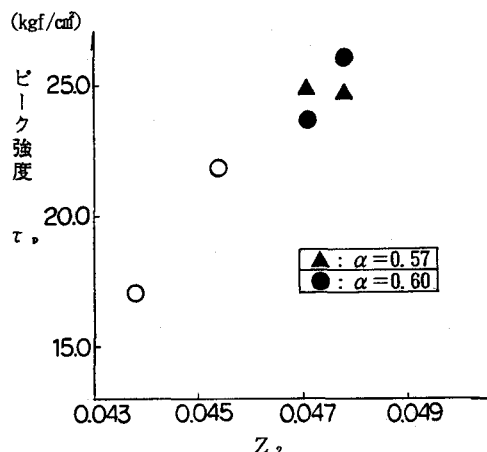


図-2 ピーク強度と Z_2 の関係

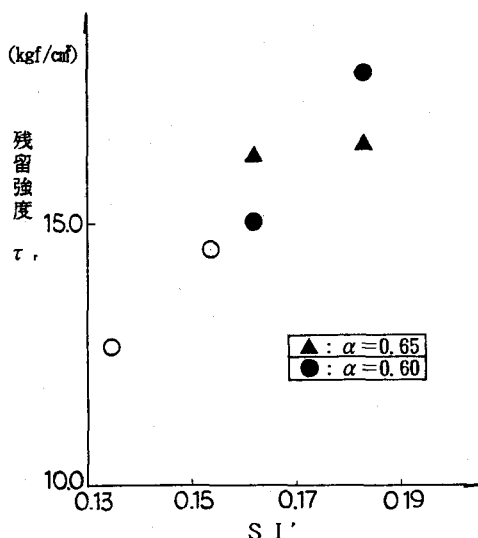


図-3 残留強度と $S I'$ の関係

これらのせん断強度は载荷時の摩擦補正をしていない値である。

垂直応力 σ_n が異なるため、直接比較できるデータは2ケースしかなくデータ数として不足なので $\sigma_n = 10 \text{ kgf/cm}^2$ の時のせん断強度の推定を次式により試みる。

$$\sigma_n \text{ が } 20 \text{ kgf/cm}^2 \text{ の } \tau_{20} \text{ に対して} \quad \tau_{10} = \alpha \tau_{20} \quad (\alpha = 0.55 \sim 0.65)$$

$$\sigma_n \text{ が } 5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ の } \tau_5 \text{ に対して} \quad \tau_{10} = 1/\alpha \tau_5 \quad (\alpha = 0.55 \sim 0.65)$$

せん断強度と各指標との関係で相関度のよいものを図-2、図-3に示す。 Z_2 は急な勾配があると大きくなる傾向があるため、今回のように微少な粗さがピーク強度に顕著に反映される実験では、ピーク強度と相関が良いものと思われる。また、 $S I'$ は大きなうねりのような凹凸を代表するので、供試体が正斜面を滑り上がるにより発現される残留強度と良い相関を示すものと考えられる。

3.2 不連続面の凹凸の破断面積

図-4は、2.2で述べた方法により求めた不連続面の凹凸の破断状況の一例を示したものであり、黒い部分が破断面を表す(破断面の中には擦れた面も含むものと考えられる。)破断面は広く分布しているが、左四半分と右四半分の破断面積が中央寄りの二つの四半分のそれより大きくなっている。

図-5は、MMタイプの供試体について、試験回数の変化に伴う破断面積比の変化を示したものであり、試験回数(すなわちせん断変位)の増加に伴い、破断面積比が増加することが分かる。

図-6に初期载荷時における破

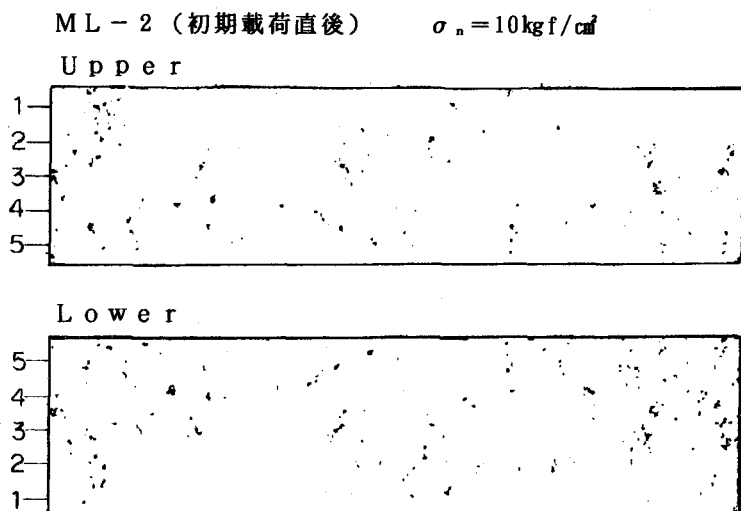


図-4 不連続面の凹凸の破断状況

断面積比と垂直応力の関係を示す。(MLタイプの供試体では、破断面積比は $\sigma_n=10\text{kgf/cm}^2$ の時1.27%、 $\sigma_n=20\text{kgf/cm}^2$ の時1.00%であった。) 個々の供試体の粗さの違いや破断面積の読み取り精度の問題などもあって、ややばらついているが、垂直応力の増加に伴い破断面積が増加する傾向がみられる。

3.3 不連続面の凹凸の噛み合わせ

図-7は、載荷前の不連続面の縦断面図に図-4から読み取れる破断面の位置を記したものである。破断面の位置は、二つのブロックの凹凸がぶつかり合った部分(以後、接触面と呼ぶ)と概ね対応すると考えられるが、接触面はすべて正斜面上にあり特に勾配の急な点が多いように見受けられる。

初回のせん断実験はピーク強度を検出したら直ちに中止するので、破断して凹凸から離れた粒子の量はわずかであり、したがってピーク強度発生前後で不連続面の粗さの変化は小さいと考えられる。(測定精度上の問題から、明確に示すことは出来ないが、ピーク強度発生前後で Z_2 がやや低下する傾向は認められた。)

ピーク強度とそれ以降の強度の差は、かなり大きい。ピーク強度と相関性の良い Z_2 の変化は小さいので、不連続面の凹凸の噛み合わせがピーク強度に影響する一つの大きな要因となっていることが分かる。

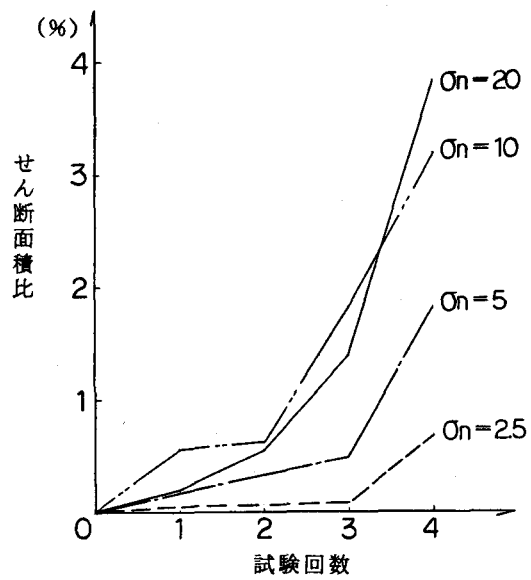


図-5 せん断面積比と試験回数との関係

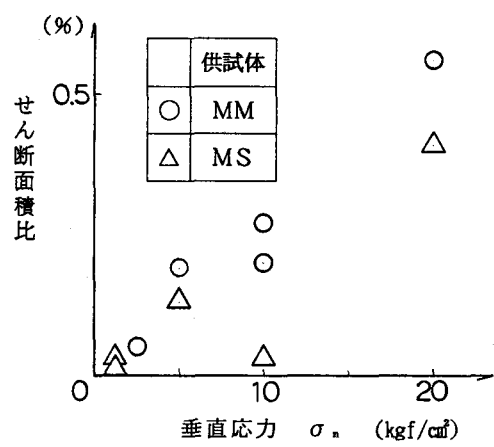


図-6 せん断面積比と垂直応力との関係

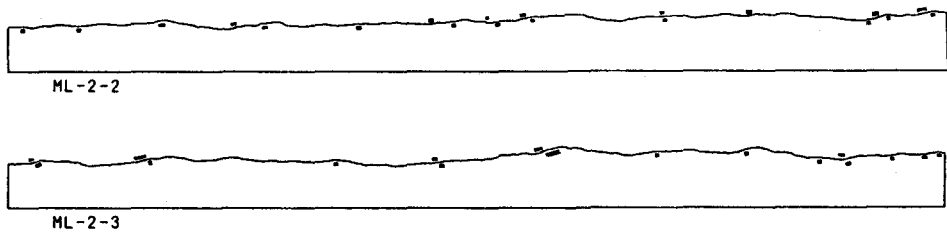


図-7 粗さ縦断面図上の凹凸の破断位置

4. まとめ

花崗岩をノミ割りした不連続面の直接せん断試験に際し、不連続面の粗さと凹凸の破断状況を計測・解析した結果、次の点が明らかとなった。

- ① 花崗岩不連続面の粗さの指標として勾配の自乗平均がピークせん断強度と、正斜面の平均勾配が残留せん断強度と良い相関を示す。
- ② 凹凸の破断面積は、せん断変位の増加につれて増加し、また垂直応力の増加に伴い増加する傾向がある。
- ③ 不連続面の凹凸の噛み合わせは、そのピークせん断強度に影響する一つの重要な要因であると思われる。

不連続面の粗さの計測は、煩雑な割りに精度上の問題を含み、今後さらに検討を加える必要がある。

5. 謝 辞

本実験を行うに当たり、その労力を惜しまれなかった埼玉大学丹沢昭義、飯島真一、細田英生、渡辺和典の各氏に感謝致します。

6. 参考文献

- (1) 吉中、吉田、清水、新井、蟻坂：節理面のせん断強度の寸法効果に関する実験的研究
第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1990.2
- (2) 吉中、清水、新井、加藤、蟻坂：岩盤不連続面の粗さの指標について
第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1987.2