

## (92) 花崗岩を用いた節理モデルの強度特性

埼玉大学 正会員 吉中 龍之進  
熊谷組 正会員 清水 昭男 新井 元  
熊谷組 正会員 〇藤坂 俊英 西村 良司

### Strength Property of Jointed Model using Granite

Ryunoshin YOSHINAKA, Saitama University  
Teruo SHIMIZU, Hajime ARAI, Shunei ARISAKA  
Ryoji NISHIMURA, Kumagai-Gumi Co., Ltd.

#### Abstract

The authors have executed a series of laboratory shear test to explain the property of strength and deformation in jointed rock. But those tests were performed by using artificial materials (mortar).

This paper presents the experimental results of shear tests using granite specimens and mortar specimens whose roughness are copies of granite joint.

### 1. まえがき

筆者らは、これまでに岩盤不連続面の強度・変形特性を解明するために、様々な実験研究を行ってきた。しかし、それらの実験はすべて人工材料（モルタル）を用いたものである。今回は、モルタル供試体の他に実際に花崗岩を用いたせん断試験も行ったので、その概要を報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験供試体

実験供試体には、茨城県笠間市を中心に分布する「稲田石」と呼ばれる花崗岩を用いた。本来ならば、岩盤中に存在する自然の不連続面を用いるべきであるが、そのような不連続面を含んだ岩を採取し、実験用サイズに加工することが困難なことから、今回の実験では人工的に作成した不連続面を用いることにした。

まず、採取した岩塊を図1に示すような80cm×40cm×20cmの実験用サイズに加工し、あらかじめ不連続面として決めたラインに沿って供試体を2つに分割した。不連続面の形状は2種類で、ライン上の数箇所にノミを打ち込み割裂させ作成した「粗い面」と同じラインをダイヤモンドカッターで切断して作成した「平滑面」である。「粗い面」は3断面（A, B, C）で、これらの面はシリコンを用いて復元し、そのシリコン板をモルタル打設用の型板

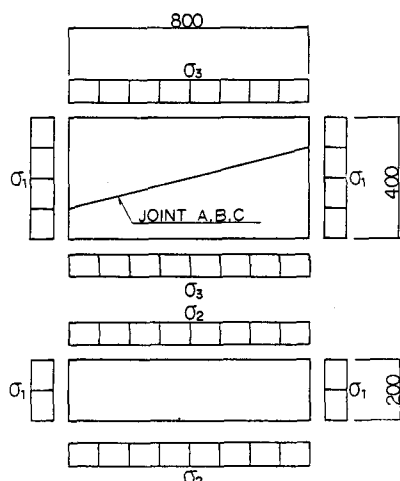


図1 実験供試体

表1 実験パラメータ

| 実験材料         |     | 花崗岩, モルタル                     |
|--------------|-----|-------------------------------|
| 垂直応力         |     | 5, 10, 20 kgf/cm <sup>2</sup> |
| 不連続面<br>(粗度) | 三次元 | A, B, C                       |
|              | 二次元 | A-1, A-2, A-3                 |

にした。なお、モルタル供試体の作成方法については文献1)を参照して頂きたい。

## 2.2 実験方法

花崗岩のせん断試験は、同一供試体において垂直応力を $\sigma_n = 5, 10, 20 \text{ kgf/cm}^2$ と変化させ、再び $\sigma_n = 5 \text{ kgf/cm}^2$ に戻す繰り返し試験とし、毎回のせん断で生じた残留変位は次のせん断試験の前に元の位置に戻した。载荷は、平面ひずみ状態を保ちつつ、不連続面の垂直応力 $\sigma_n$ が一定のまません断応力 $\tau$ が増加していくように、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を調整しながら行った。モルタル供試体は、花崗岩のように同一供試体での繰り返し試験は行わず、それぞれの条件下でせん断試験を行った。実験パラメータは表1に示す通りである。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 花崗岩供試体

図2は、花崗岩供試体のせん断応力～せん断変位曲線の一例である。初回のせん断試験( $\sigma_n = 5 \text{ kgf/cm}^2$ )では、ピーク強度に達した後激しい軟化を示し、せん断変位の進行に伴い一定の残留強度に近づいている。しかし、次に同じ供試体で $\sigma_n$ を変化させ同様の実験を繰り返しても極端なピーク強度は現れず、弱い軟化の傾向を示しながら残留強度に近づいている。これは初回のせん断でピーク強度に寄与した小さな凹凸が、ほとんど破壊され(削げ落ち)たことによるものと考えられる。図中のダイレイタンスー曲線は、初回のせん断試験の初期に最大の傾きを示し、その後傾きは徐々に低下している。せん断試験を繰り返しても傾きにあまり変化はないが、垂直変位量は減少している。一方、「平滑面」では各 $\sigma_n$ 段階において、せん断変位の進行に伴いピークを生じることなく漸増の傾向を示している。図3に、各 $\sigma_n$ 段階におけるせん断強度と不連続面の関係を示す。低垂直応力時( $\sigma_n = 5 \text{ kgf/cm}^2$ )には、面の強度はA, B, Cの順であるが、垂直応力を高くするとAとBの強度がほぼ同じになった。 $\sigma_n = 5 \text{ kgf/cm}^2$ でのピーク強度が初回と繰り返し後で $A > B$ の傾向を示していることから、面Bにおいて低垂直応力時に強度に寄与していなかった凹凸が高垂直応力時に発現したものと考えられる。

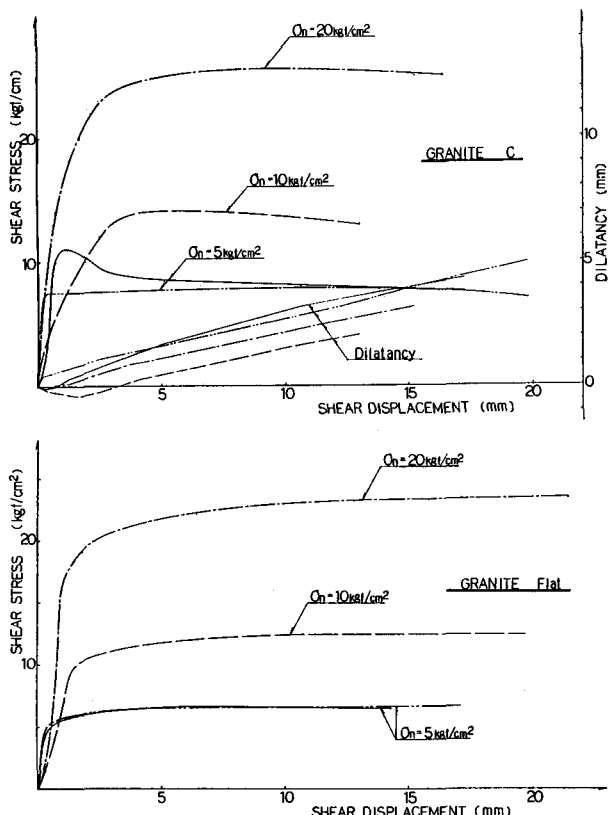


図2 せん断応力～せん断変位曲線(花崗岩)

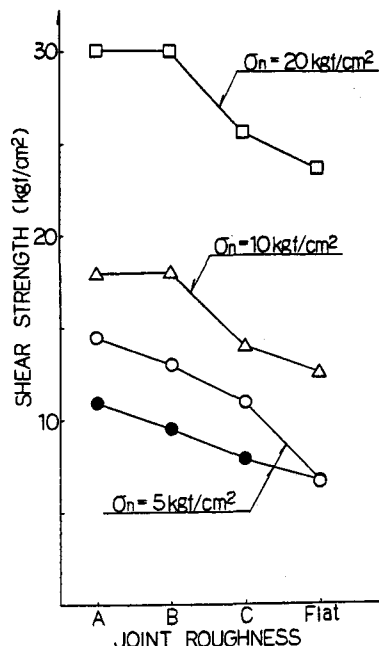


図3 せん断強度～不連続面関係(花崗岩)

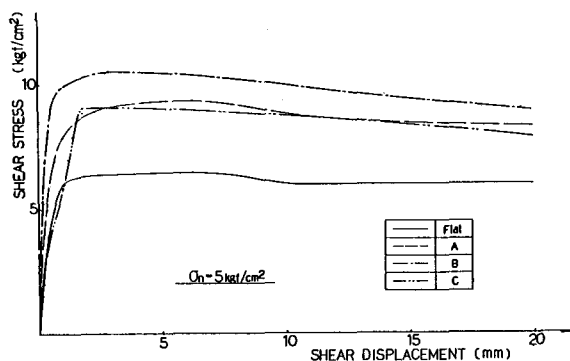


図4 せん断応力～せん断変位曲線 (モルタル)

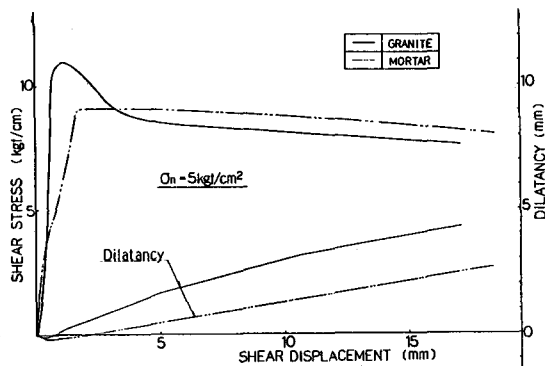


図5 同一不連続面のモルタルと花崗岩の比較

### 3.2 モルタル供試体

図4は、モルタル供試体で復元した不連続面のせん断応力～せん断変位曲線である。いずれの供試体も弱い軟化の傾向を示し、花崗岩供試体における初回のそれとは異なる傾向を示した。図5は、面Cにおけるモルタルと花崗岩のせん断応力～せん断変位曲線である。同図によればダイレイタンスー曲線は花崗岩の方が傾き、変位量ともに大きい。これは母材強度によって不連続面上の凹凸の破壊過程が異なるためと考えられる。すなわち、花崗岩は母材強度が高いため不連続面上の凹凸が切断されないまません断変位が増加し、その後応力の集中によって凹凸が切断されたが、モルタル供試体では母材強度が相対的に低いので不連続面上の凹凸がせん断変位の進行と共に徐々に切断されたと推定される。図6は、モルタル供試体のピークせん断強度と亀裂面の関係である。せん断強度はB, A, Cの順で花崗岩供試体のそれとは傾向が異なった。これには、次のことが考えられる。モルタル供試体では、噛み合わせの悪い場合がありピーク強度が低くなったこと、母材強度の違いによる凹凸の破壊過程の違いがピーク強度の発現に影響したことである。

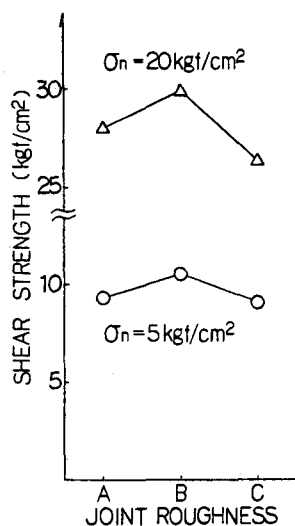


図6 せん断強度～不連続面関係 (モルタル)

### 3.3 二次元不連続面モデル

図7に二次元不連続面モデルのせん断応力～せん断変位曲線を示す。これらの面は花崗岩不連続面Aの縦断面形状から作成したものである。前回の報告では、「三次元不連続面の強度と軟化の程度は、数本の縦断面形状から作成した二次元不連続面のその平均に近い」と結論した。今回の実験結果も、ほぼ同様の傾向を示している。三次元不連続面では、二次元に比べて奥行き方向の広がり小さいので角度の急な凹凸は応力の集中により切断されやすく、その

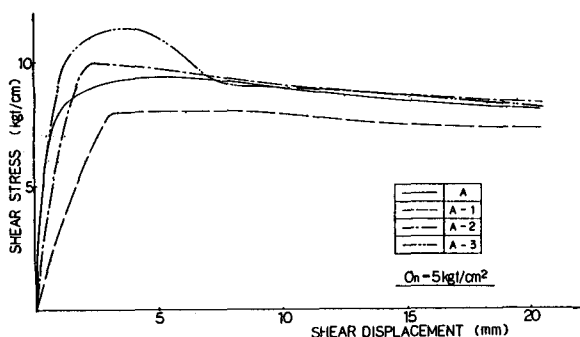


図7 せん断応力～せん断変位曲線 (二次元不連続面)

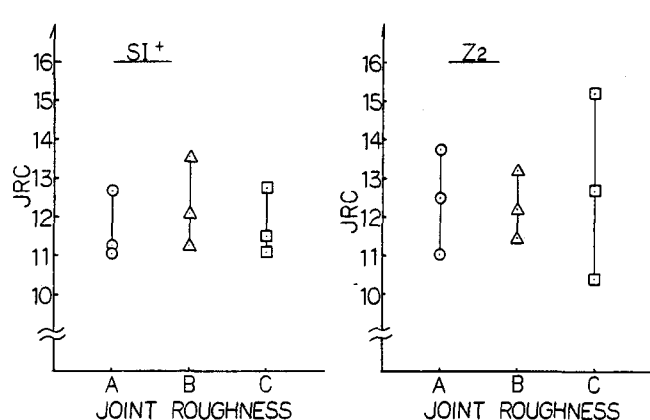


図8 各不連続面におけるJRC計算値のばらつき

切断面積は二次元不連続面における最大値を示した縦断面の切断面積より小さいので、ピーク強度も二次元不連続面の最大値より小さくなるものと考えられる。

表2 JRC計算値 (平均値)

|                       | A     | B     | C     |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| JRC(SI <sup>+</sup> ) | 11.67 | 12.29 | 11.78 |
| JRC(Z <sub>2</sub> )  | 12.41 | 12.28 | 12.76 |

### 3.4 既往の強度式と実験結果との比較

岩盤不連続面の経験的なせん断強度式としてBartonの式が良く知られている。Bartonの式は、

$$\tau_p = \sigma_n \tan \{JRC \log_{10}(\sigma_c / \sigma_n) + \phi\}$$

と表され、JRCは不連続面の粗さを表す係数である。

筆者らは、このJRCを定量的に表現できる簡易な指標についていくつかの統計量を提案している。ここでは、正斜面の全体平均勾配(SI<sup>+</sup>)および勾配の自乗平均(Z<sub>2</sub>)から求めたJRCを使って、実験結果とBartonの式から求まるピークせん断強度を比較する。なおJRCは二次元不連続面での実験結果を踏まえ、一断面3本の縦断線の平均値を使用した。JRCのばらつきを図8に、平均値を表2に示す。JRCの最大値と最小値では、各面ともばらつきが大きいのが平均すると3断面でそれほどの差はない。図9は、花崗岩供試体におけるピークせん断強度の実験値と計算値の比較である。初回のせん断試験では比較的よく一致しているが、垂直応力が大きくなるに従って両者の差は広がり、 $\sigma_n = 20 \text{ kgf/cm}^2$ の実験では、予測強度の約75%にしか至っていない。

前節で述べたように、初回のせん断試験においてピーク強度を発生させる凹凸が破壊されたことにより不連続面の形状が大きく変化していると仮定すると、2回目以降のせん断強度を計算するためにはBartonの式に代入するJRCを変化させる必要がある。図10は、各面においてどの程度JRCが変化しているかを示したものである。これは、Bartonの式に実験値から求められたそれぞれの垂直応力時のピーク強度を代入し、JRCを逆算した結果である。低下の大小は面によってやや異なるが低下の傾向は類似している。初回から次のステップに移行した時のJRCの低下が激しい。しかし、この低下量を繰り返し実験による不連続面の強度低下のみに起因していると結論するには大きすぎると思われる。図11は、モルタル供試体におけるピークせん断強度の実験値と計算値の比較である。ここでも、低応力時には比較的よく一致しているが、高応力時には花崗岩同様に計算値のほうが高い値を示している。モルタル供試体の実験は花崗岩のそ

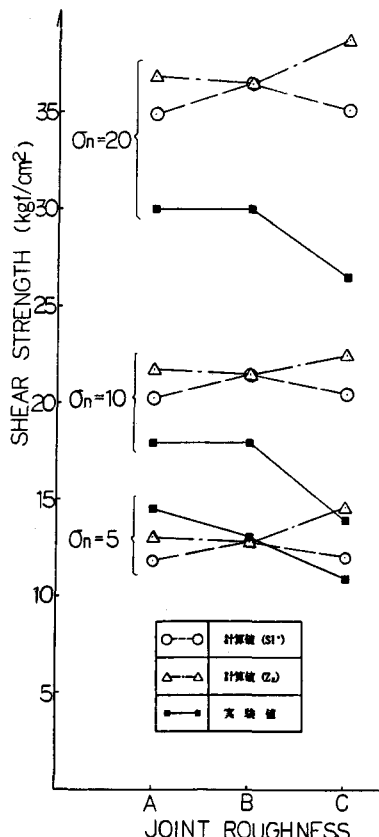


図9 せん断強度の比較 (花崗岩)

れとは違い、それぞれのパラメータにおける初回の実験であるから、面の状態は同じはずである。表3はBartonの式からJRCを逆算した結果であるが各面において垂直応力を変化させた結果、それぞれJRC=1.5~2.0の差がでた。JRCの値は不連続面に固有の指標であるから同一不連続面上では垂直応力が変化しても変化しないはずである。したがって、この事実はBartonの式が垂直応力や母材強度の変化に対して修正が必要であることを意味していると考えられる。

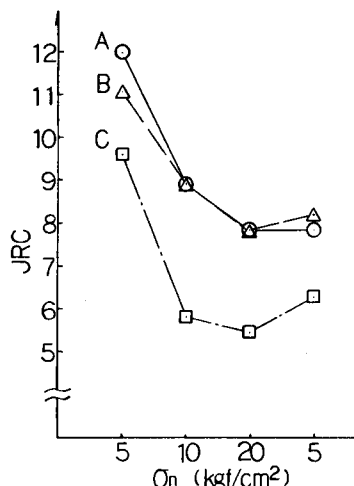


図10 繰り返し試験によるJRC計算値の変化(花崗岩)

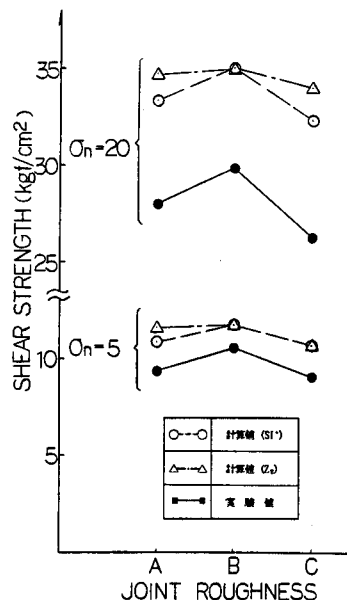


図11 セン断強度の比較(モルタル)

#### 4. あとがき

花崗岩およびモルタル供試体を用いた自然のせん断試験を行った結果をまとめると、①花崗岩では、ピーク強度を発現させる不連続面上の凹凸が初回のせん断でほとんど破壊される。②同一供試体の繰り返し実験により、不連続面の強度は徐々にその面の残留強度に近づいている。③母材強度の違いは不連続面上の凹凸の破壊過程に影響し、ピーク強度の発現にも影響する。④Bartonのせん断強度式では、垂直応力が高い時に実験結果より大きい値を示す。

岩盤不連続面の強度・変形特性については、今後既往のせん断強度式の修正も含めて研究を進めていきたいと考えている。

表3 実験結果から求めたJRC計算値(モルタル)

|   | $\tau_5$ | $\tau_{20}$ |
|---|----------|-------------|
| A | 9.83     | 8.33        |
| B | 11.10    | 9.40        |
| C | 9.68     | 7.50        |

#### 参考文献

- 1) 吉中, 清水, 新井, 加藤, 蟻坂: 実際の岩盤不連続面粗さを持つ節理モデルのせん断試験第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1988.2
- 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
- 3) R.E.Goodman 原著, 赤井, 川本, 大西共訳: 不連続性岩盤の地質工学; 森北出版, 1978
- 4) 吉中, 吉田: 花こう岩分離面のせん断強度特性  
応用地質, Vol.15, No.2, 1974
- 5) 吉中, 石井: 花こう岩分離面のせん断特性に及ぼす表面性状と垂直応力度の影響  
応用地質, Vol.16, No.2, 1975