

(29) 垂直応力に依存した岩盤不連続面のせん断挙動と表面形状の変化

国立環境研究所 正会員 木村 強
九州大学工学部 正会員 江崎哲郎
九州大学大学院 学生会員 ○生貞幸治

Effect of Normal Stresses on the Damage to Joint Surfaces During Shearing

Tsuyoshi KIMURA
National Institute for Environmental Studies
Teturo ESAKI & Koji IKUSADA
Faculty of Engineering, Kyushu University

ABSTRACT

When rock joints are sheared, the behavior strongly depends on the surface roughness. This paper describes the behavior of rock joints and changes in surface roughness during shearing under normal stresses from 0.1MPa to 4MPa. Three aluminum block, each of which has a profile of ten typical profiles given by Barton and Choubey(1977), are made with a numerically controlled cutting machine and are used to prepare the specimens of plaster(21.5MPa in uniaxial compressive strength). After shearing the joint specimen, roughness heights of the two halves are measured and compared with the ones before shearing. Under lower normal stresses, both surfaces of the joint specimen are sheared as a manner of riding over each other without damage to the opposite surface. This results in occurrence of dilation. The dilation is more noticeable in the joint with a high JRC value than the one with a low JRC value. Higher normal stresses cause great damage to the joint surface, and dilation is then suppressed to a certain degree. It is noted from the measurement of roughness heights that the mechanism of shearing is very complicated.

1. はじめに

岩盤不連続面のせん断特性は、不連続面両面のかみ合わせの程度、充填物の有無とともに不連続面の表面形状に大きく左右される。このため従来より、不連続面の表面形状に注目した研究が多く行われている(例えば、Patton, 1966)。BartonとChoubey(1977)は、表面形状の粗さを表す指標としてJRC(Joint Roughness Coefficient)を提案しており、粗さの程度によりFig. 1に示すような10種類のプロファイルに分類し、それぞれに0~20の値を定めている。図中のJRCの値は、不連続面のせん断試験の結果を次式に代入することにより決定されている(Barton, 1973)。

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(JRC \cdot \log(JCS/\sigma_n) + \phi_0) \quad (1)$$

ここで

τ :せん断強度
 σ_n :垂直応力
JCS:不連続面の壁面強度(一軸圧縮強度)
 ϕ_0 :残留強度時の内部摩擦角

これらのプロファイルとJRCの値は、不連続面の記述に関する指針(ISRM, 1978)にも採用されている。しかし、不連続面の表面形状は2次元的に変化しており、その中からせん断強度に最も影響を与えている凹凸を特定することは非常に困難である。したがって、彼らが示したプロファイルが、必ずしもその試験結果(JRC値)を反映しているとは限らない。そこで、筆者らは、Fig. 1のプロファイルをアルミニウムブロック中に再現し、凹凸が1次元的にしか変化しない不連続面のせ

ん断特性を調べた(木村・江崎, 1992)。その結果、10種類のプロファイルの中にはJRCが正しく評価されていないものがあること、また、せん断方向が違えば同じプロファイルでも摩擦角が異なるケースがあることが明らかとなった。ただし、この実験は、せん断による不連続面の挙動が凹凸の乗り上げのみによって生じると仮定した理想的な条件のもとで行われたものであり、せん断によって凹凸が破壊され、不連続面の表面形状が変化する現象は考慮されていない。

本研究では、BartonとChoubeyが示した典型的な不連続面のプロファイルを石こう試験体で再現し、高、中、低レベルの垂直応力下でせん断試験を行い、表面形状の粗さがせん断挙動に及ぼす影響を検討した。また、せん断試験の後に、レーザー変位計を用いて不連続面の表面形状を計測し、せん断による表面形状の変化とせん断時の垂直応力の関係を調べた。

2. 実験方法

2. 1. 試験体

試験体の作成については、まず、Fig. 1からNo. 2, No. 5, およびNo. 8のプロファイルを選択し、10cmのスケールを複写機で4倍に拡大した後、それらの凹凸の高さをデジタイザーを用いて1mm間隔で読みとった。したがって、もとのプロファイルに対して、0.25mm間隔で約400のデータが得られたことになる。次に、アルミニウムブロック(長さ10cm×高さ8cm×奥行き8cm)の高さの中央部分を、読み取ったデータをもとにNC加工によって切削し、1次元の凹凸、すなわち、せん断方向に直交する方向では凹凸の変化のない不連続面を作成した(木村・江崎, 1992)。そして、切削したアルミニウムブロックの上下片を型枠として、それぞれに石こうを流し込み、Fig. 2に示すような試験体を作成した。その際、試験体をせん断容器の寸法に合わせるために、全体の寸法を12cm×8cm×8cm、せん断面積80cm²(10cm×8cm)とした。石こうの配合比は、石こう:水=1:0.4であり、一軸圧縮強度は21.5MPaである。また、石こうの急激な凝結による試験体のひび割れを防止するため、重量比で全体の約0.5%の遅延剤(リグニンスルホン酸ナトリウム)を混合し、30℃で24時間放置した後、80℃で24時間強制乾燥させた。

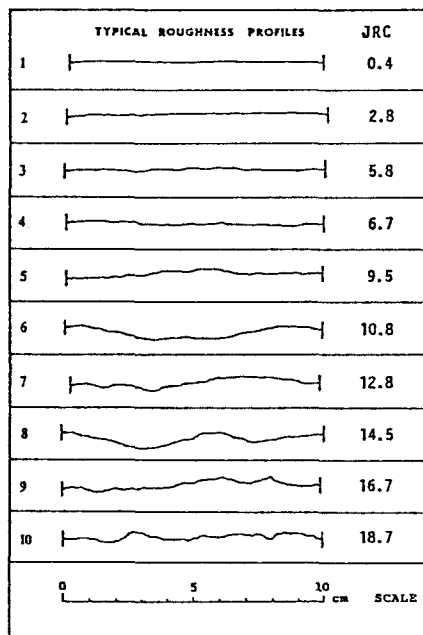


Fig.1 Typical profiles and the values of JRC (Barton and Choubey, 1977).

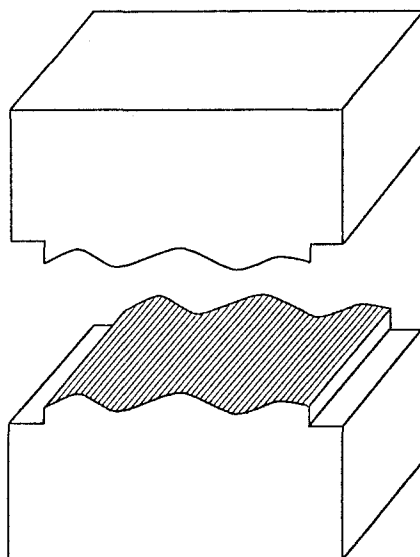


Fig.2 The specimen block having a typical profile.

2. 2. せん断試験

せん断試験は、一定の垂直応力 (0.1, 0.4, 1, 2, 4MPa)のもとで行った。せん断の速度は0.025mm/sで、最大せん断変位10mmに達した後、その状態で垂直荷重を除荷して実験を終了した。せん断方向は、プロフィールの下部を右に移動させる方向とした。なお、垂直

変位の計測は、上箱の4隅に設置した4個の変位計を用いて行った。

2. 3. 凹凸計測システムおよび計測方法

不連続面の凹凸を計測するための完全自動計測システムを構築した。本計測システムは、精密X-Y位置決めテーブル(日本トムソン社製、ストローク長120mm×120mm、繰り返し位置決め精度±0.002mm)、およびレーザー変位計(キーエンス社製、スポット径0.05mm、分解能0.5μm)からなり、試験体をテーブル上に固定し、コントローラーによる自動制御でテーブルを移動させることによって、不連続面の表面形状を1次元的または2次的に計測することができる。

この計測システムを用いて、それぞれの垂直応力下でせん断試験を行った後の不連続面の表面形状を上下両面について計測した。せん断後の不連続面も、せん断を受ける以前と同様に、奥行き方向(せん断方向に直交する方向)の凹凸の変化はほとんどなく、せん断によって一様に凹凸が破壊されたものとみなされる。そこで、計測方法として1次元計測を採用し、奥行き中央部をせん断方向に長さ10cm、測定間隔0.05mmで読み取った。

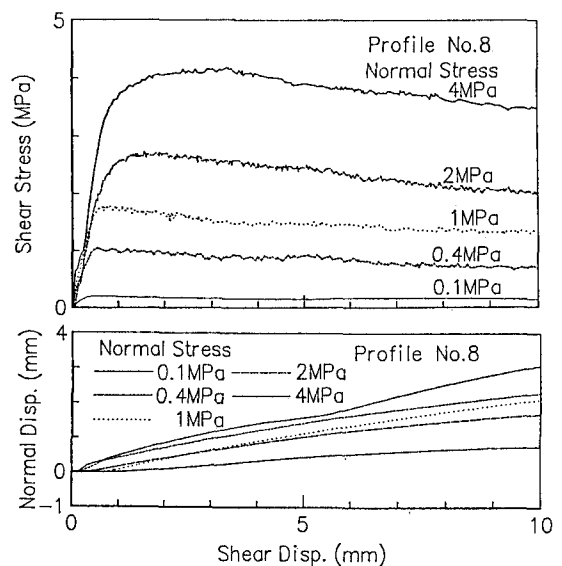
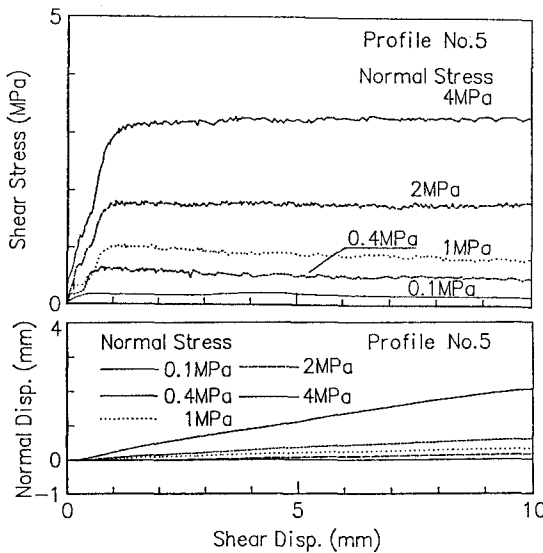
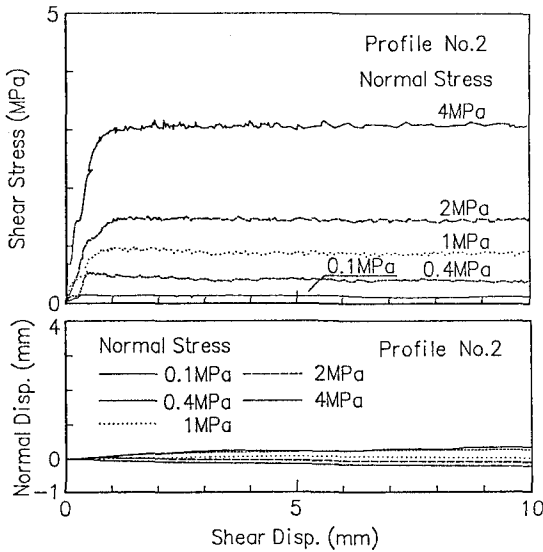


Fig.3 Shear stress-displacement and normal-shear displacement curves for joints having three different profiles.

3. 実験結果および考察

3. 1. せん断特性

Fig. 3に、せん断応力-せん断変位、および垂直変位-せん断変位の関係を示す。プロファイルNo. 8では、すべての垂直応力において、せん断応力になだらかではあるもののピークが現れている。これに対し、No. 2およびNo. 5では、比較的低い垂直応力においてはNo. 8と同様の傾向であるが、垂直応力の増加に伴ってピークは現れなくなり、一定値のままでせん断は進行する。このピークが現れなくなる時の垂直応力はプロファイルの形状が粗いほど高くなっており、No. 8の場合は、本実験の範囲よりもさらに高い垂直応力においてピークが現れなくなると考えられる。垂直変位については、垂直応力が低い場合、せん断が凹凸の乗り上げのみによって生じるため、プロファイルの形状が粗いほど大きなダイレーションを示す。しかし、垂直応力の増加に伴って、凹凸の破壊が主となり、ダイレーションは徐々に減少するようになる。

Fig. 4に、垂直応力とピークせん断強度の関係を示す。同図には、本実験および不連続面を有さないインタクトな石こう試験体(形状は円柱形)のせん断試験結

果をもとに決定した残留強度を直線で示している。この残留強度の摩擦角と、3つのプロファイルのそれぞれのJRC値をBartonの式(1)に代入して得られたのが点線で示した曲線である。JRC値から推定されるNo. 5の強度はNo. 2とNo. 8のほぼ中間の値をとるが、実験結果はNo. 2に近い値となっている。

Bartonのせん断強度式は経験式であり、具体的な物理モデルはない。これに対して、Patton(1966)のせん断強度式は、規則的な三角形の表面形状を有する不連続面を用いてせん断試験を行い、表面が破壊することなく乗り上げのみによる場合と、表面の破壊を伴ってせん断される場合の2つのモードを区別している。本実験のNo. 5については、複雑な表面形状にもかかわらず、この2つのモードを反映したbi-linearで近似できる。

3. 2. せん断によるプロファイルの変化

計測結果の一例として、Fig. 5にNo. 5のせん断によるプロファイルの変化を示す。この図は、せん断後の状態を再現するために、まず、得られた上下面のプロファイルをせん断方向に10mm移動し、せん断箱の前と後ろの2点で計測した垂直変位をもとに上面のプロファイルを回転した後、上下面の破壊された部分が重ならないように鉛直方向に平行移動したものである。図中の斜線部はせん断により破壊された部分、網掛け部は発生したグージが付着して体積が増加した部分であり、せん断後に上下面が接触する部分を矢印で示している。なお、プロファイル端部の点線は、せん断によりその部分で大きな剥離が生じ、正確な凹凸のデータが得られなかった部分である。

垂直応力が低い場合、巨視的にみた形状の変化はほとんどないが、せん断方向に対して負の勾配を有する急な斜面、および凹凸の頂部に若干の変化があり、凹凸が乗り上げながらせん断していった様子を見ることが出来る。これに対し、垂直応力が高い場合では、凹凸は乗り上げを生じる前にその基底部から激しく破壊されており、全体としての表面形状は平坦化し、上下面の接触面積は増加する。これらの垂直応力の違いによる凹凸の乗り上げおよび破壊の状況は、Fig. 3で示したダイレーションの挙動と良く対応している。

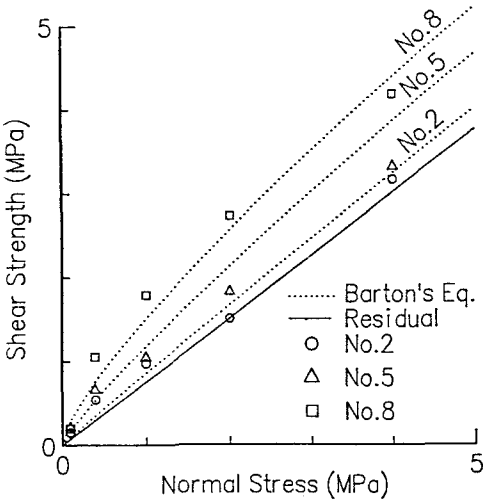


Fig.4 Relationship between peak shear strength and normal stress.

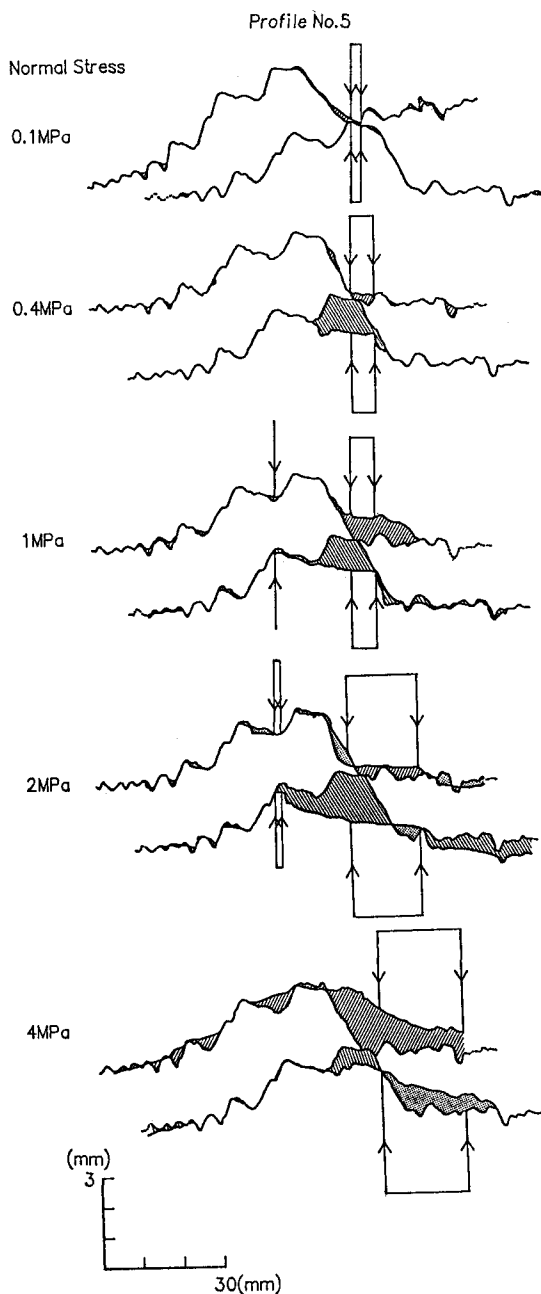


Fig.5 Profiles obtained from the measurement of joint surfaces after shearing under different constant normal stresses (No.5 profile).

4. まとめ

本研究では、せん断試験後の不連続面の表面形状を上下両面について計測し、せん断による凹凸の破壊状況を調べた。その結果、垂直応力が低い場合、不連続面の表面形状がそのせん断挙動を支配するが、垂直応力の増加に伴って凹凸の破壊が激しくなり、そのため、表面形状は平坦化し、上下面の接触面積は増加することが明らかとなった。今後は、この不連続面の表面形状の変化を定量的に検討する予定である。

5. 参考文献

- Patton, F.D. (1966): Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Congr. ISRM, Lisbon, pp. 509-513.
- Barton, N. (1973): Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol. 7, pp. 287-332.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1-54.
- ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in Rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, pp. 319-368.
- 木村強・江崎哲郎 (1992): 岩盤不連続面の表面粗さ (JRC) とせん断特性, 応用地質, 第33巻, pp. 255-262.