

(45) 節理面のせん断強度の寸法効果に関する実験的研究

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

Experimental Study on Scale Effects of Joint Shear Strength

Ryunoshin YOSHINAKA, Jun YOSHIDA, Saitama University

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

Abstract

This paper presents the experimental studies to investigate the scale effects on shear strength of rock joints, by using granite blocks which have 3-types joint area ; 400cm^2 , 800cm^2 , 1600cm^2 . Tests result showed that shear strength at high normal stress decreases remarkably with increasing of joint area, as shown in Fig.7.

1. はじめに

近年、ブロック理論など不連続性岩盤を岩石ブロックの集合体として取り扱う方法がいくつか提案されている。しかしそのような解析に必要な不連続面のせん断特性についてはよく知られていない。本研究は不連続面のせん断強度における寸法効果を実際の花崗岩供試体を用いて実験的に研究している。

2. 寸法効果

Pratt, Black and Brace(1974)[1]は石英閃緑岩における室内試験と原位置試験によって 142cm^2 から 5130cm^2 までの範囲のせん断面積における強度寸法効果についての研究を行った。Prattらは40%の強度の低下を指摘しているが、しかし彼らの行った実験は傾斜した不連続面に対する1方向からのみのフラットジャッキによる載荷であり、垂直応力 σ_n がせん断応力 τ と共に増加してゆく。そのため強度包絡線は載荷方向に対する不連続面の方向に大きく依存してしまう。

Barton and Choubey(1977)[2]はDrammen花崗岩の 1800cm^2 と 50cm^2 の不連続面でtilt試験を行い、そのせん断強度に寸法効果の存在することを報告している。

Bandis, Lumsden and Barton(1981)[3]は石膏をもとにしたモデル材料によって天然の不連続面を型どり、同一の粗さを持つ供試体について寸法の異なる供試体でShear Box試験を行っている。彼らはモデル材料の強度特性から相似則によっておよそ数mの実岩盤の強度を推定している。

岩盤不連続面のせん断強度寸法効果についての主な研究は以上のとうりであるが、実際の岩石を用いて一定垂直応力のもとで行われた例はまだない。

3. 実験概要

3-1. 供試体

本実験で使用した供試体は茨城県笠間市産出の花崗岩(通称稲田石)で、その一軸圧縮強度 σ_c はおよそ1300kgf/cm²である。供試体は採石場近くの加工場でダイヤモンド・カッターで所定の寸法に整形し、その中心線に沿ってノミによる割裂破壊面を形成した。基本形状はFig.1のようであり、さらにその片側のみを2分割および4分割したものも作成した。このようにして400cm²(MS), 800cm²(MM), 1600cm²(ML)の3タイプの供試体を準備した。

3-2. 実験方法

本研究においては400cm²から1600cm²までの大きなせん断面積を持つ岩石の1面せん断試験を計画した。そのため一般に行われているShear Box試験ではなく、油圧ジャッキによるせん断試験を行うことにした。油圧ジャッキによる載荷方法はFig.2のようであり、供試体にモーメントが多少作用するなどShear Box試験とは供試体の挙動に若干の違いがある。

3-3. 計測データ

載荷時の計測データは；(1)油圧計による主(せん断)方向と側(拘束)方向のジャッ

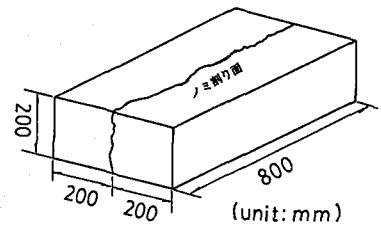


Fig.1 供試体の形状

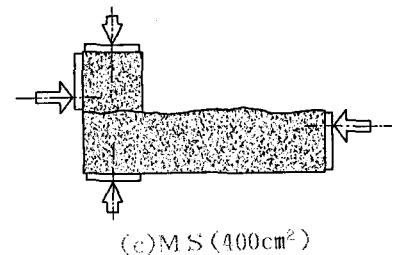
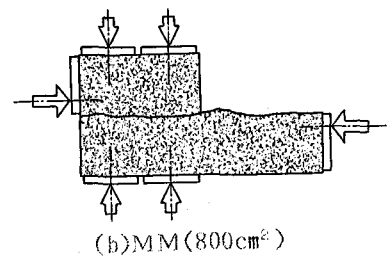
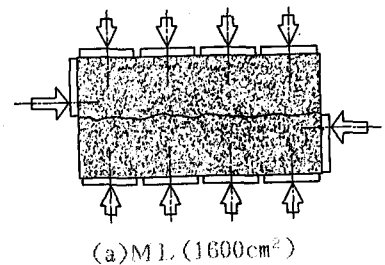


Fig.2 載荷方法

キの油圧，(2)ダイヤル・ゲージによる供試体の変位，である。ジャッキ油圧はジャッキ受圧面積と乗ずることによって力に算定し、それからせん断面積当りの応力(σ_n, τ)に算定した。ダイヤル・ゲージによる変位量は供試体に生じるモーメントによる回転量を消去した相対変位(dh, dv)に算定する。このとき、実際に生じる回転量は最大でも 0.1° のオーダーであり、これは不連続面の粗さ角よりはるかに小さく、作用している応力の値には影響を与えないと考えられる。

4. 実験結果

4-1. 粗さを持つ面のせん断強度

ノミによって作成した不連続面のせん断試験を行った。この不連続面(破壊面)は花崗岩に特有の石目(破壊の進展しやすい方向)に沿って作成されており、その粗さはほぼ各供試体について同一のものである。従って、せん断試験におけるパラメータは垂直応力(拘束応力) σ_n のみである。

供試体は各垂直応力について1組ずつ準備した。载荷の手順は、まず垂直応力を所定の値まで载荷し、そのまま一定垂直応力のもとでせん断応力を増加させピークせん断強度を計測し、除荷を行った。各载荷-除荷サイクル終了ごとに供試体の噛み合わせをもとに戻し、合計4サイクルの载荷を行った。

また4回目の载荷はピークを越えて残留状態まで行った(Fig.3)。

垂直応力-せん断強度関係をFig.4に示す。この図より、粗さを持つ面のせん断強度はそのせん断面積の減少にともなって増加することがわかる。

4-2. 平坦な面のせん断特性

ダイヤモンド・カッターによって作成した平坦面のせん断強度試験を行った。

平坦面の場合は残留状態までのせん断を2回行った。载荷手順は粗さを持つ面の場合と同じである。平坦面におけるせん断は"Stick-slip"という規則的な振動現象を示す(Fig.5)。Jaeger and Cook(1964)[4]は"Stick-slip"における最大値 τ_{max}

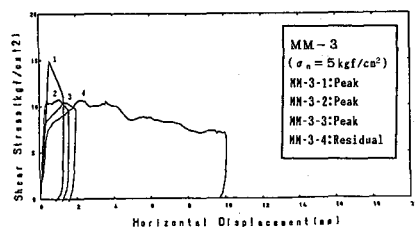


Fig.3 せん断強度-変位図(粗さを持つ面)

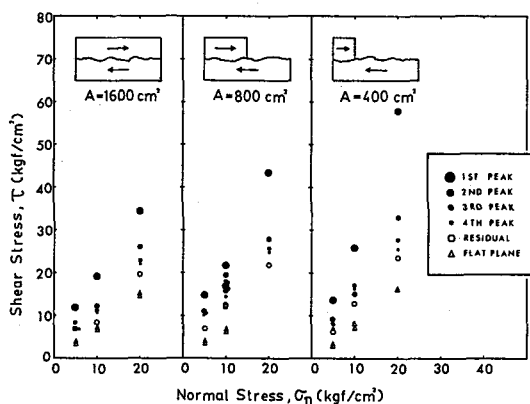


Fig.4 垂直応力-せん断強度図(粗さを持つ面)

と最小値 $\tau_{\min}$ からせん断面の静止摩擦係数 μ と動摩擦係数 μ' を以下のように定義している。

$$\tan \mu = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_n} \quad (1)$$

$$\tan \mu' = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2 \sigma_n} \quad (2)$$

Fig.6には平坦な面における最大および最小せん断強度を示す。これより平坦な面には強度寸法効果は存在しないと考えられる。

5. まとめ

粗さを持つ面のせん断強度寸法効果について考察を続ける。Fig.7はせん断面積に対するせん断強度の変化を示す。これは初回のピークせん断強度についての図であり、その理由として2回目以降のピーク強度はそれ以前に経験しているせん断の大きさが異なるために同一の規準では比較できないことにある。この図より垂直応力 $\sigma_n = 20 \text{ kgf/cm}^2$ のときにはピークせん断強度が寸法の増加と共に約40%低下することがわかる。

岩盤不連続面のせん断強度についてこれまでに提案されている破壊規準に対して、今回の実験結果を用いた最小自乗法によるパラメータの算定を行った。対象とした破壊規準は：

① Coulomb則

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3)$$

② べき乗則 (Power's Law)

$$\tau = k \sigma_n^b \quad (4)$$

③ Hoek and Bray(1974)[5]

$$\tau = A \sigma_c (\sigma_n / \sigma_c - T)^B \quad (5)$$

の3つである。Fig.8は各せん断面積ごとの初回のピークせん断強度に上記の3つの破壊規準を当てはめたものである。

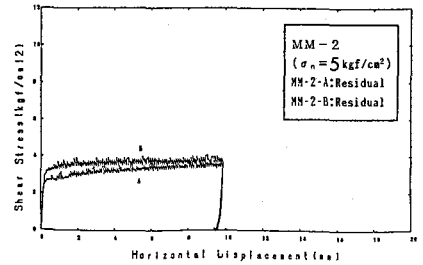


Fig.5 せん断強度-変位図(平坦な面)

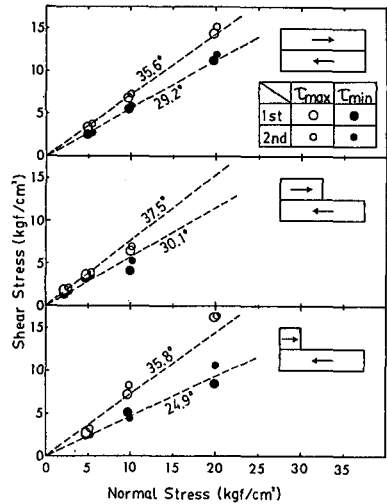


Fig.6 垂直応力-せん断強度図(平坦な面)

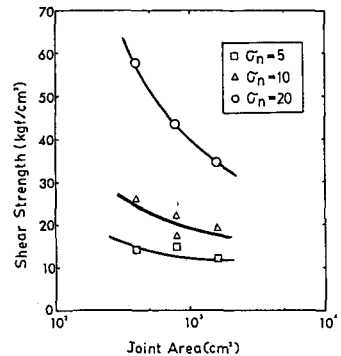


Fig.7 せん断面積-せん断強度図

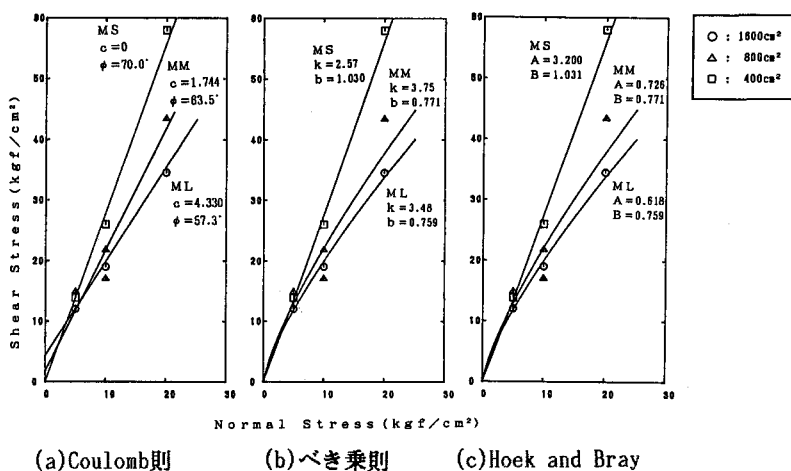


Fig.8 各破壊規準による算定

以上より本研究における結論としては：

- (1) 平坦な面のせん断強度には寸法効果はない(摩擦角はおよそ 36° である)。
- (2) 粗さを持つ面のせん断強度は垂直応力の大きいもののほど寸法効果が著しい。
- (3) 粗さを持つ面のCoulomb則における摩擦角は 70° から 57° まで低下する。ただし、せん断面積の増大に伴う摩擦角の低下はまだ収束していない。

6. 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。

7. 参考文献

- [1] Pratt, Black and Brace (1974): "Friction and Deformation of Jointed Quartz Diorite." (Proc. 3rd. Cong. I.S.R.M. Denver, Colorado, Vol. 3-A, pp. 306-310)
- [2] Barton and Choubey (1977): "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice." (Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1-54)
- [3] Bandis, Lumsden and Barton (1981): "Experimental Study of Scale Effects on the Shear Behaviour of Rock Joints." (Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 1-21)
- [4] Jaeger and Cook (1976): "Fundamentals of Rock Mechanics. (3rd edit.)" (Chapman and Hall, London)
- [5] Hoek and Bray (1981): "Rock Slope Engineering. (3rd edit.)" (The Institution of Mining and Metallurgy, London)