

(45) 岩盤不連続面の強度・変形特性における寸法効果

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 新井 元
(株)熊谷組 正会員 ○蟻坂 俊英

Scale effect in shear strength and deformability of rock joint

Ryunoshin YOSHINAKA, Jun YOSHIDA, Saitama University
Hajime ARAI, Shunei ARISAKA, Kumagai-Gumi Co., Ltd.

Abstract

It is well known that the shear strength and deformability of rock joints are strongly influenced by the size of shearing bodies, and a number of literatures has pointed out the existence of the scale effect of rock joints. We have executed a series of laboratory shear test using granite specimens to explain the strength characteristics in jointed rock. This paper presents the experimental results on the scale effect in shear characteristics using wide range of joint sizes from 20cm² to 9600cm².

1. はじめに

著者らは、不連続面の垂直変形特性およびせん断強度・変形特性について寸法効果に着目した一連の実験を行ってきた。
不連続面の寸法の増加によって強度の低下が起こること、すなわち寸法効果のあることが、現位置せん断試験およびモデル実験などによって確認されている。しかし、実際の岩石供試体を用いて一定の条件下で行われた研究はこれまでに報告されていない。寸法効果は、表面粗さなどと共に不連続面の強度・変形特性のメカニズムに関わる要因であり、不連続面の力学特性を検討する上できわめて重要なことである。

本稿は、実際の花崗岩供試体を用いてこれまでに行なわれた各種試験結果をまとめ、強度・変形特性における寸法効果について考察するものである。

2. 実験供試体

本実験で使用した供試体は、茨城県笠間市産出の稲田花崗岩（通称稲田石）である。表-1は、各種力学試験（一軸圧縮試験、圧裂引張試験）によって得られた力学的基本物性を示す。図-1は一軸圧縮試験における応力～ひずみ関係の一例を示したものである。これより、稲田花崗岩の変形は破壊にいたるま

表-1 稲田花崗岩の力学的基本物性

計測項目	計測値
一軸圧縮強度 σ_c	1370 kgf/cm ²
圧裂引張強度 σ_t	55 kgf/cm ²
弾性係数 E_{av}	5.53×10^5 kgf/cm ²
ポアソン比 ν	0.26
単位体積重量 γ_d	2.64 gf/cm ³

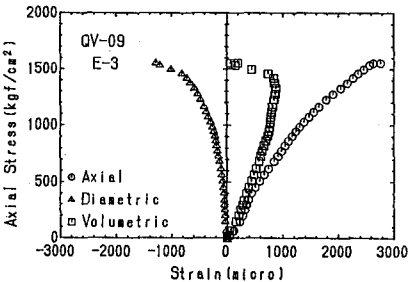


図-1 稲田花崗岩の応力～ひずみ関係
（ロゼット・ゲージによる）

で応力と共に直線的に増加し、塑性変形を示すことなく極めて脆性的に挙動していることがわかる。一連の実験は、約20cm²から9600cm²までの面積を持つ供試体によって行われた。

3. せん断強度における寸法効果

図-2は、不連続面の面積(A)に対するピークせん断強度(τ)の変化を両対数紙上にプロットしたものである。比較的安定したせん断が行われたM、Lシリーズのデータは、各垂直応力 σ_n ごとに平行な線形関係が見られる。従って、これらの関係を

$$\log_{10} \tau = a + b \log_{10} A \quad (1)$$

という平行な回帰曲線によって表現したものが図中の破線である。この時、切片aは垂直応力 σ_n に依存する量で、以下のように表現できる。

$$a = c + d \log_{10} \sigma_n \quad (2)$$

これより、式1の回帰曲線は次式のべき関数型の破壊包絡線となる。

$$\tau = k \cdot \sigma_n \cdot A \quad (3)$$

ここで、k、 α 、 β は定数であり、本実験の結果ではkgf/cm²単位の τ 、 σ_n とcm²単位のAについて、

$$k = 11.4 \quad \alpha = 0.83 \quad \beta = -0.175$$

という値を得ている。これらの定数はせん断強度に影響を及ぼすパラメータのうち垂直応力とせん断面積を除いた、表面粗さ、噛み合いの程度、岩種、風化度などに依存する量であると思われる。

式1の回帰曲線では、せん断面積が無限大になるときにピーク強度がゼロに近づくことになる。しかし、実際にはある程度のせん断面積で一定値に漸近するものと考えられる。図-3は図-2の関係を正規のスケールで表現したものである。これによると、本研究で行ったせん断面積が最大値である9600cm²において、ほぼその漸近値に近い値が得られていることがわかる。現時点ではこの漸近値は、各不連続面に固有の値で、せん断面積には依存しない、残留強度 τ_r と考えるのが妥当である。

現在行われている現位置せん断試験は、60cm x 60cm = 3600cm²のせん断面積を持つ供試体ブロックが使用されている。図-3においてこのせん断面積による結果を検討すると、実際に遭遇する不連続面についての値よりもやや高めの値を示すことがわかる。ここで、実際に遭遇する不連続面とは、本実験で実施したせん断試験の最大面積であるおよそ1m²を最小値として、100m²程度の面を考えている。

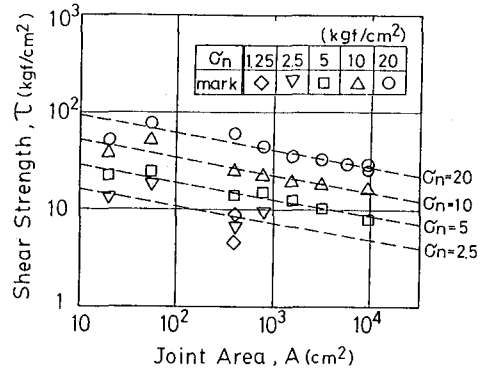


図-2 両対数座標における不連続面面積～せん断強度関係

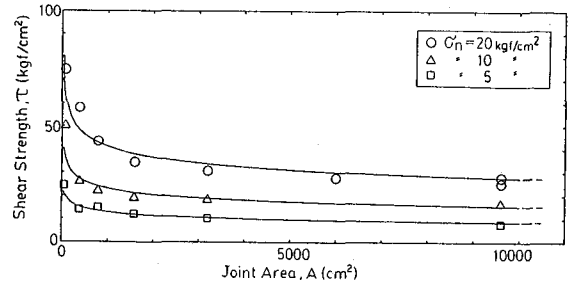
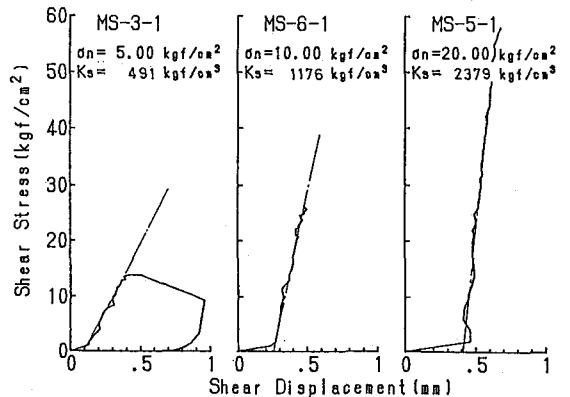


図-3 正規座標における不連続面面積～せん断強度関係



(a) MS シリーズ

図-4 1回目のせん断截荷における変形の様子

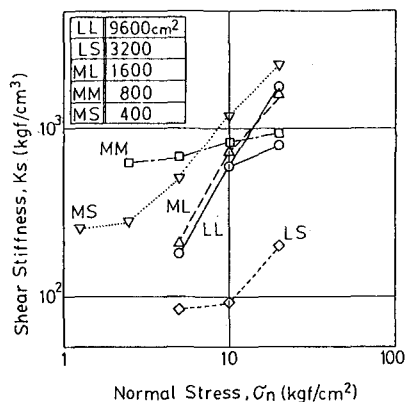


図-5 垂直応力～せん断剛性関係

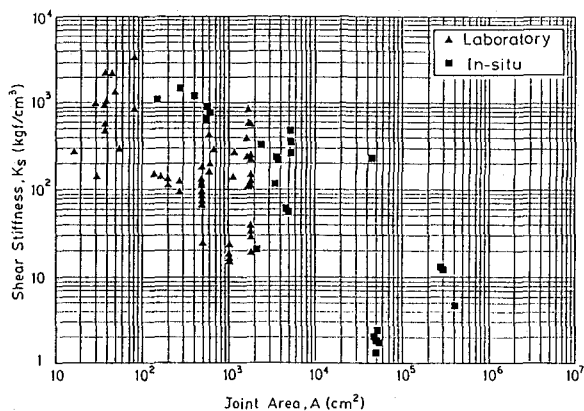


図-6 垂直応力～ピークせん断変位関係

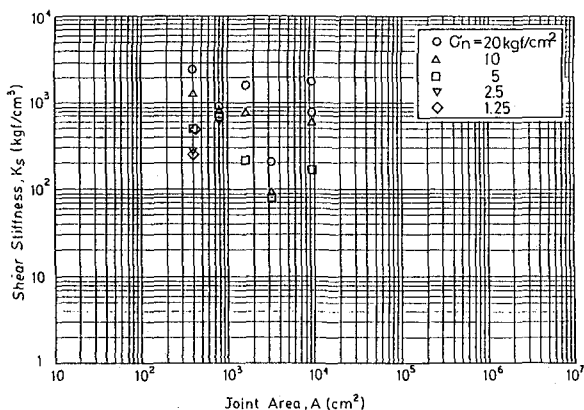


図-7 不連続面面積～せん断剛性関係

4. せん断変形における寸法効果

不連続面のせん断応力～変位関係は、不連続面同士の噛み合わせによって大きく変化する。不連続性岩盤の全体の変位として考えられる範囲は、個々の不連続面がすべりを起こすまでの部分である。ここでは、せん断変形を表現する指標としてせん断剛性 K_s とピークせん断変位 d_{hp} について考察を加える。花崗岩の割裂破壊面の1回目のせん断変形の様子を図-4に示す。これから、ピークせん断強度に至るまではほぼ直線的に変形し、ピーク直前の軟化傾向はほとんどない。

図-5は垂直応力～せん断剛性関係、図-6は垂直応力～ピークせん断変位関係をそれぞれプロットしたものである。これらより、せん断剛性には垂直応力依存性のあることがわかるが、ピークせん断変位には明確な相関関係は見られない。(LSシリーズは他のシリーズに比べて変形が大きく計測方法に不備があったのではないかと考えている。)

図-7はせん断面積～せん断剛性関係をプロットしたものである。図中の(a)は過去に報告されているせん断剛性の実測データであり、図中の(b)は同じ座標上に本実験の結果をプロットしたものである。これらを比較すると、本実験の結果は全体的にやや高めの値を示すことがわかる。これは供試体に硬岩である花崗岩を使用し、しかも割裂破壊面という自然の粗さに比べてかなり粗い面を使用したことによるものと考えられる。特に、本実験の最大寸法の供試体の結果については、過去のデータに比べてかなり大きめである。これは、過去のデータが室内試験で行われた例ではなく、原位置せん断試験であることが考えられる。

原位置試験の場合、充填物、水、そして風化などの影響が考えられ、そのため本実験のデータとの間に

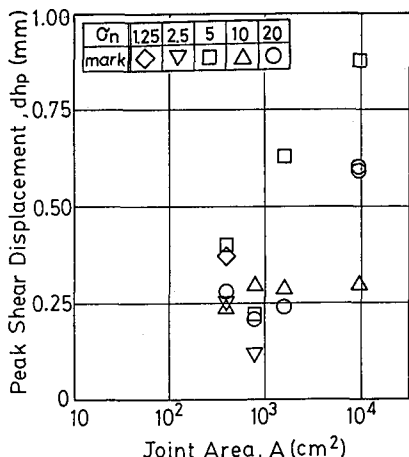


図-8 不連続面面積～ピークせん断変位関係

差が生じたものと考えられる。これらのことを考えると、せん断面積による寸法効果は、過去の結果にみられる寸法効果の傾向よりもやや小さい傾向で現れていると考えられる。図-8は、せん断面積～ピークせん断変位関係を示している。この図から、ピークせん断変位が寸法と共に増加する傾向が見られる。

5. 垂直変形における寸法効果

垂直変形はきわめて非線形性の強い特性であり、変形の特性を表現するために双曲線関数によってモデル化し、初期垂直剛性と最大閉塞量の2つの指標によって考察する。

図-9は、各載荷経路についての垂直応力～ジョイント閉塞量関係の一例であり、○は計測データを表している。この変形関係は以下に示す双曲線関数でモデル化できる。

$$\sigma_n = \frac{V}{a - bV} \quad (4)$$

図中の実線は、計測データを最小自乗法によって双曲線近似したものである。この時、図中には双曲線モデルのパラメータaとb、そしてそれから計算される最大ジョイント閉塞量 V_{max} 、初期垂直剛性 K_{ni} が示されている。

図-10は、最大ジョイント閉塞量 V_{max} の変化である。これより、ジョイント面積の大きなものほど、 V_{max} が大きくなる傾向がわかる。図-11は、ジョイント面積による初期垂直剛性 K_{ni} の変化をプロットしたものである。これより、多少のばらつきはあるが、ジョイント面積の増加に伴って K_{ni} が低下する様子がみられる。図-12は、初期垂直剛性～最大ジョイント閉塞量関係を示している。これらの間には、逆比例関係がみられる。

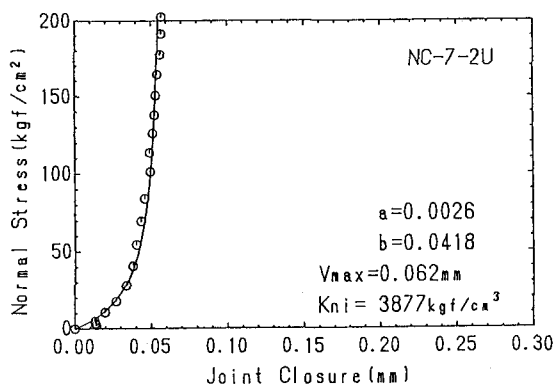


図-9 垂直応力～ジョイント閉塞量関係
(最小自乗法による双曲線近似)

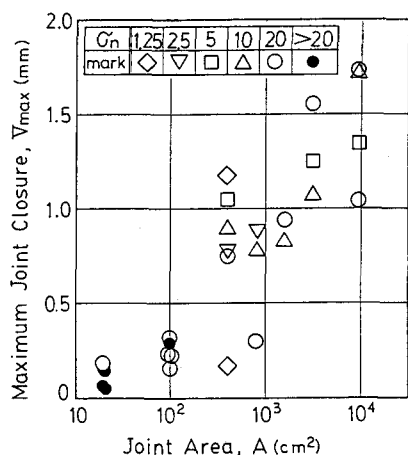


図-10 不連続面面積～最大ジョイント閉塞量関係

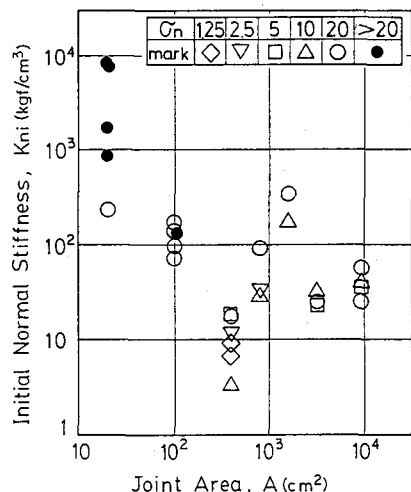


図-11 不連続面面積～初期垂直剛性関係

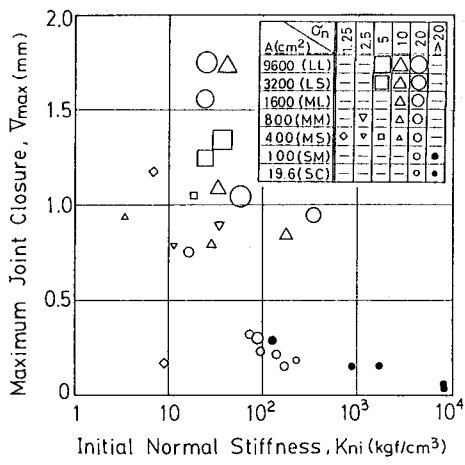


図-1 2 初期垂直剛性～最大ジョイント閉塞量関係

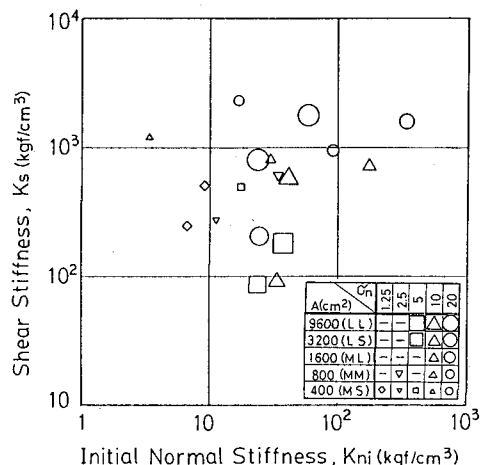


図-1 3 初期垂直剛性～せん断剛性関係

このような結果の得られる理由として、1度開口したジョイントは人工的に作成した割裂破壊面であっても、すべてが完全に噛み合っていないことが考えられる。垂直載荷時のジョイント表面の微小asperityの変形および接触面積によるジョイント閉塞についてはいくつかモデル研究が報告されている。

これらの研究から、ジョイント面積が大きくなるほど接触面積の割合が減少し、これによって K_{ni} の低下および V_{max} の増加が生じると考えられる。

図-1 3 は、初期垂直剛性～せん断剛性を示しているが、ばらつきはあるもののほぼ比例関係にあると思われる。

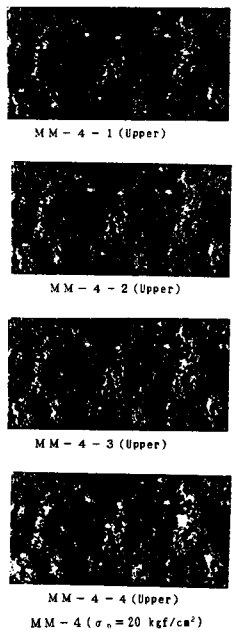


図-1 4 せん断面観察写真の一例

6. まとめ

これまでに行った実験結果から、岩盤不連続面の力学特性に影響を与えている根本的な要因は、不連続面の接触率であると考えられる。図-1 4 は、繰り返し試験終了後のせん断面の観察写真の一例である。表-2 は、これらの写真をもとに画像解析を行ない、全体のせん断面積 (A_s) に対するせん断された部分の面積 (A_s) の割合を算出した結果である。 A_s の割合は、垂直応力の低下およびせん断面積の増加とともに減少しているのが分かる。接触している部分がすべてせん断されたものと仮定するならば、これを面の接触率と言うことができる。せん断面積の増加に伴う接触面積の減少がジョイント表面の局所的な応力集中を進行させ、ピークせん断強度の低下 (寸法効果) につながっていることはよく知られているが、表-2 はその事実を明確に示していると思われる。

表-2 せん断面積 A に対する
せん断された面積 A_s の割合

A σ_n	MS (400)	MM (800)	ML (1600)	cm ²
5	0.87	0.62	—	
10	2.50	1.48	1.32	
20	5.84	2.50	1.76	
	kgf/cm ²			(%)

参考文献

- (1) 吉中、清水、新井、加藤、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2 2 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：岩盤不連続面の強度・変形特性の寸法効果に関する研究 第8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1990、11
- (3) 吉中、清水、新井、加藤、蟻坂：岩盤不連続面の垂直変形に関する実験的考察 第4 6 回土木学会年次学術講演会論文集、1991、9