

(21) 岩盤不連続面の表面形状の定量化に関する研究

京都大学工学部 大西 有三
京都大学大学院 ○加藤 雅広
京都大学工学部 矢野 隆夫

Methods of Quantification for Surface Roughness of Rock Joint

Yuzo Ohnishi, Masahiro Kato and Takao Yano (Kyoto University)

ABSTRACT

It is well-known that at a small confining pressures, joint geometry has a much larger role in determining shear strength than the strength of the material does. Moreover, the size of an irregular rock joint of a certain roughness is increased its shear strength is decreased, the "scale effect". We present results of our recent direct shear experiments with ruled surface specimens (including regular, repeated irregular, and single irregular joints) simulated rock joints. The surface geometry of the joints was measured by a laser profile meter and evaluated by a several mathematical indices such as fractal, Z2, etc. Among these roughness indices, the maximum profile asperity angle imax showed the best correlation with peak shear strength in our tests. Thus, imax is a good index for predicting the peak shear strength of regular and irregular joints.

1. はじめに

岩盤不連続面のせん断強度、変形特性に大きな影響を与える因子の一つに不連続面の表面形状（ラフネス）がある。ラフネスとせん断強度との関係についての研究は従来より数多く行われており、Barton¹⁾は基準化された断面形と実際の不連続面の断面形とを視覚的に比較し、0から20までのJRC値を決めて粗度の指標とし、JRC値を用いた経験的なせん断強度式を提案している。しかしJRC値は主観的になりやすいため、ラフネスを定量的に表現するための指標に関する提案も、R.Tse²⁾らの研究など様々なものがある。また岩盤不連続面のせん断強度、変形特性を考える上では寸法効果の影響も考慮しなければならない。Barton³⁾は、実際の岩石表面を型取った様々なサイズの供試体での一面せん断試験によって、供試体寸法の減少とともにせん断強度が大きくなることを示している。（図1）

本研究では、様々な不連続面の表面形状の粗度指数を求めることで定量化を試み、一面せん断試験を行ってラフネスの幾何学的な特性がせん断強度、および寸法効果に与える影響を調べた。

2. 実験方法

2.1 供試体について

本研究では、表面形状の違いによるせん断強度や寸法効果への影響を調べるのが目的であるため、規則的な歯形形状の不連続面をもつ場合と、自然に存在する実際のラフネスを型どった不連続面を持つ場合のセメ

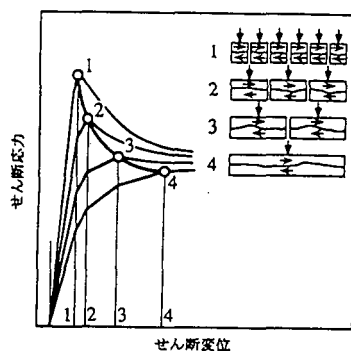


図1 せん断強度の寸法効果

ントモルタル供試体を用いて一面せん断試験を実施した。

規則的な表面形状を持つ供試体として図2のA～D型を用いた。A～C型は図3に示すような幅が5,10,20mm（以下a,b,c）の歯形を繰り返し規則的に並べ、せん断方向に測った全長が40,80,120mmの3種類を用意した。どの型も40mm単位長の中にaが2個、b,cが各1個ずつ並んでおり、80,120mmはその繰り返しとなっている。また各型の中には、歯形の高さが一定のH型と歯形の傾斜角が一定のI型とがあり、C型はA型と左右対称となっている。D型はB型をもとに歯形をなめらかな曲線にしたもので、A～Cの3つの型より自然なラフネスに近づけた型であり、この型も40mmを単位長

とし、それを3回繰り返して120mm供試体にしている。なお、図4に示すように80mm供試体には120mm全体のどの部分を選択するかで3つの種類ができていく。

不規則な表面形状としては、図2に示すような花崗岩の割裂表面上をその面に垂直な平面で切りとった時にできる表面形状を持つ、ラフネスの大きなE型と小さなF型の供試体を用意した。40,80mm供試体は図4の様に120mm供試体を分割したもので、80mm供試体にはD型同様3種類ある。なお図2に示す表面形状はせん断方向のものであり、せん断方向に直交する方向には凹凸はなく、供試体の奥行き寸法はすべて120mmである。

供試体の作成方法としては、A～C型の供試体は鉄製歯形を用い、D～F型の場合は石膏を用いて供試体と同じ原型をまず作り、金属製の型枠の中に原型をセットして、そこにセメント:砂:水=1:2:0.65の重量比で混ぜ合わせたセメントモルタルを流し込んで供試体上部、下部をそれぞれ別々に作り、せん断試験の際には上部と下部が完全に噛み合わさるようになっている。なお供試体の材料定数は、単位体積重量2.01gf/cm³、一軸圧縮強度374.6kgf/cm²、基本摩擦角33.0°である。

型	供試体の概形 (4cm)
A	H
	I
B	H
	I
C	H
	I
D	
E	
F	

図2 供試体の概形

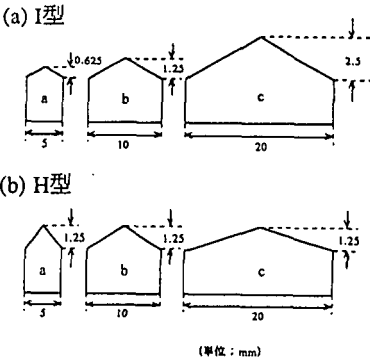


図3 A,B,C型供試体作成用鉄製歯形の種類

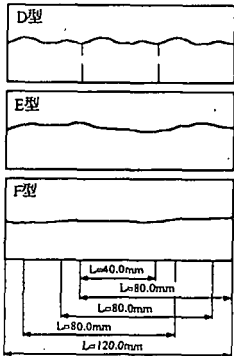


図4 D,E,F型供試体の寸法

2.2 実験装置および方法

本研究に用いた一面せん断試験機は、フィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気、油圧サーボシステムで、パーソナル・コンピュータの信号により载荷がコントロールされている。実験方法はすべて垂直応力一定試験で、垂直応力は5.0,10.0,20.0kgf/cm²の3種類で行い、せん断荷重の载荷方法は変位制御とし、1.0mm/minのせん断速度で最大変位20mmという条件下でせん断試験をした。

2.3 ラフネスの計測

せん断試験を実施する前に、センサー部の光源に0.5μmの高分解機能を持った半導体レーザーを使用している、最小スポット径0.05mmのレーザービームを使用した変位計を用いて、供試体表面上をせん断方向に平行な30mm間隔の3本の線に沿ってラフネスを計測し、データをA/D変換機によってパーソナルコンピュータで処理のできる離散化したデータとしてフロッピーディスクに記録した。また本研究では、次に説明する様々な粗度指数を計算する際には、上述した3本の計測線で計測した値を平均して用いた。

3. ラフネスの定量化

R.Tseらはラフネスを定量的にあらわす方法として指標 CLA, RMS, Z_2 などを提案し、せん断強度、JRCとの関係を調べている。

本研究では、供試体ラフネスをレーザー変位計で計測し、A/D変換機によって離散化したデータを用いて、まずCLA, RMS, Z_2 の値をR.Tseらの定義にしたがい式(1)～(3)により計算した。

$$CLA = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |y_i - \bar{y}| \quad (1)$$

$$RMS = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで M: 測定区分数

$\bar{y}$: 中心線的位置

y_i : i番目のラフネス表面上の点の位置

Δx : 測定区分の単位長さ (図5参照)

本研究では、上記の指数のほかに傾斜最大角 $I_{\max}$ およびフラクタル次元 D の2つの指数を計算した。最大傾斜角指数は、せん断方向に向かって登りになっている部分の傾斜角のうち最大の角度を $I_{\max}$ (度) として次の様に定義している。

$$\tan I_{\max} = \max \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x}, 0 \right) \quad (4)$$

なお式(1)～(4)の値を計算する際、どれも測定区分の単位長さ Δx を1.0mmとしている。粗度指数を計算する際にはこの単位長さ Δx によって値が変わってくることが予想される。そこで Δx を0.0012mm～7.5mmの範囲で変化させて計算したときの $I_{\max}$ の値の変化を検討し、その結果を図6に示す。この図6から今回用いた供試体では Δx が0.2mm位までの範囲では、指数はほぼ同じ値となり、 Δx として1.0mmとしているのは妥当であると言える。他の指数も同様の結果であった。フラクタル次元 D は、供試体せん断方向の長さを1分割から1000分割までの範囲内で12種類の分割を行い、その際の単位長さを Δx 、供試体表面総延長 L を式(5)とし

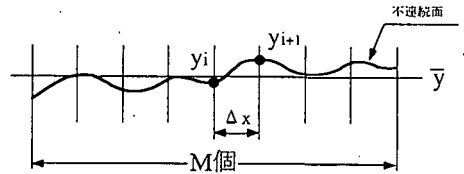


図5 R.Tse ちによるラフネスの評価

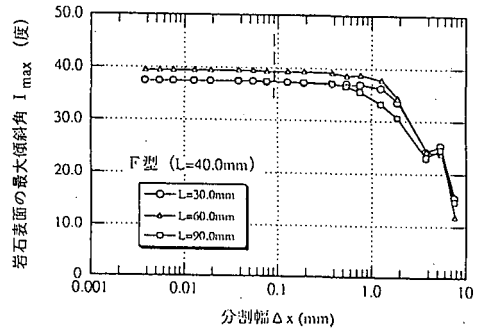


図6 Δx と粗度指数の関係

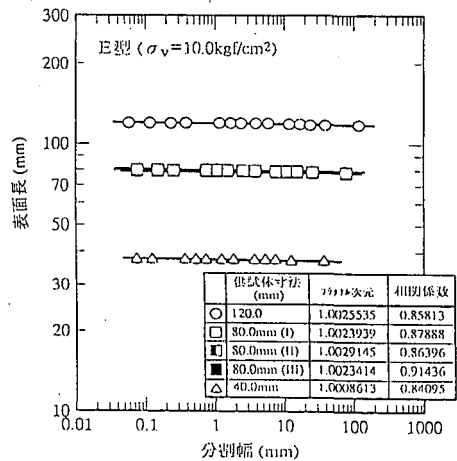


図7 E型供試体のフラクタル次元

$$L = \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (\Delta x)^2} \quad (5)$$

X軸に Δx 、Y軸に L を両対数グラフとして描き直線近似してその傾きを a 、フラクタル次元を D すると

$$a = 1 - D \quad (6)$$

という関係がなりたち、この式によって求めている。

例として図7にE型供試体の計算例を示す。ただし、このフラクタル次元Dは供試体の表面がフラクタルな形状であると仮定した上での指数であることに注意する必要がある。

以上のように、本研究では供試体表面をレーザー変位計を用いて実測した値からCLA,RMS,Z₂,フラクタル次元、I_{max}およびtan I_{max}の指標を計算し、それらの値とせん断強度との関係を調べている。

4. 実験結果および考察

初めに、歯形の組み合わせ順序の違い(A,B,C型)によるせん断強度の影響を調べた結果例として、図8にI型4cm供試体の垂直応力 σ_v と最大せん断応力 τ_p の関係を示す。各垂直応力における最大せん断応力 τ_p の値は、A,B,Cどの型でもほぼ等しく、順序の違いによる影響は出てない。

次に、H,I型の比較によって歯形の角度の違いによるせん断強度への影響を調べた結果例として、図9にB型12cmの σ_v と τ_p の関係を示す。なおI型の歯形傾斜角は $i=14.0^\circ$ で一定であるがH型は $i=7.1^\circ, 14.0^\circ, 26.6^\circ$ と3種類ある。Patton⁵⁾は規則的な歯型を持つ模型ジョイントの最大せん断応力 τ_p が次式のように双一次関係で表されることを示している。

$$\tau_T \text{ 以下のとき} \quad \tau_p = \sigma \tan(\phi_b + i) \quad (7)$$

$$\tau_T \text{ より大きいとき} \quad \tau_p = c + \sigma \tan \phi_r \quad (8)$$

$$\text{ただし} \quad \tau_T = c / (\tan(\phi_b + i) - \tan \phi_r)$$

ϕ_r : 岩石の残留内部摩擦角

図9の $\sigma_v \sim \tau_p$ の関係からH, I型のグラフの傾き(摩擦角)は約 $54^\circ, 49^\circ$ と違いがあるのがわかる。I型の $\sigma_v \sim \tau_p$ 関係を見るとほぼ原点を通る直線上にあり、今回の供試体の基本摩擦角 ϕ_b が 33.0° 、歯型傾斜角 $i=14.0^\circ$ およびグラフ上の摩擦角が約 49° であったことから、最大せん断応力は式(7)にほぼ従っていることがわかる。一方、H型の方は双一次関係(この場合 $\sigma_v=5.0\text{kgf/cm}^2$ を境に傾きが違う2本の直線)に近似できる。H型は歯形の最大傾斜角が大きく、歯形を乗り越えるのに必要な仕事より削ってせん断する仕事の方が小さかった為に歯形が削られ、その影響で垂直応力の高い範囲では、 $\sigma_v \sim \tau_p$ グラフの傾き(摩擦角)が低い範囲に比べて小さくなっている。この図9では、 σ_v が 5.0kgf/cm^2 以下の範囲に限れば摩擦角が約 59° であることより、低い垂直応力の範囲では式(7)で i は約 26° となりH型供試体の最大傾斜角 26.6° とほぼ一致することがわかる。

以上より平滑な表面の摩擦抵抗が基本摩擦角 ϕ_b で表せ、垂直応力が低く表面の破壊を伴わない時には最大せん断応力は、式(7)において i をせん断面の最大傾

斜角とすることである程度の予測ができるといえる。しかし表面が粗く、垂直応力が高いときには i に最大傾斜角を入れた式(7)では適さないことがわかる。

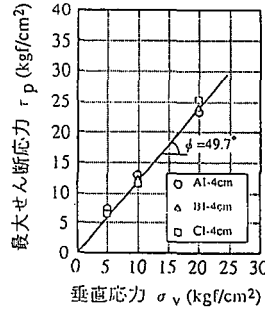


図8 I型4cm $\sigma_v \sim \tau_p$ の関係

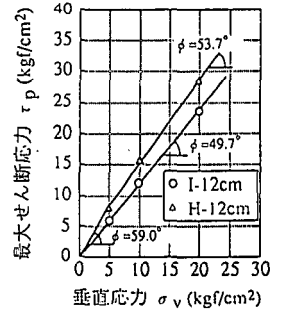


図9 H, I 型 $\sigma_v \sim \tau_p$ の関係

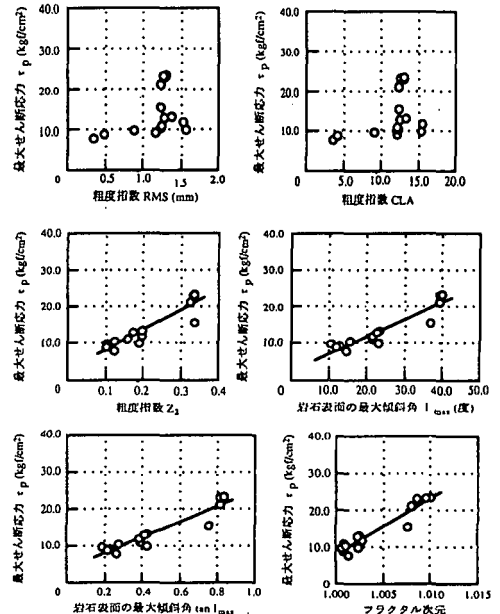


図10 粗度指数と最大せん断応力 τ_p の関係

次に、D,E,F型の供試体を用いて $\sigma_v=10.0\text{kgf/cm}^2$ における、最大せん断応力に対する様々な粗度指数の相関性を調べ、図10に各々の粗度指数と最大せん断応力

の関係を示した。なお、各型とも長さ40,80,120mmの供試体は粗さが各々若干異なり、また寸法効果の影響もなしと考え、別々の供試体としてその全ての結果をグラフ上にプロットしてある。図10の結果よりRMS, CLAの粗度指数と最大せん断応力には相関がほとんどないことが分かる。一方 $Z_2, I_{max}, \tan I_{max}$ およびフラクタル次元の粗度指数は最大せん断応力とかなり相関があるといえる。2次元的で完全に噛み合わさった表面の供試体をせん断するときには、最大傾斜角の部分にせん断力が作用すると思われるが、今回の実験の結果で、 I_{max} と最大せん断応力の相関の良さはこれを実証している。

図11に実測したラフネス最大傾斜角 I_{max} と、垂直応力 $\sigma_v=10.0\text{kgf/cm}^2$ での実験結果から式(7)により逆算した傾斜角 i との比較を示す。ここで ϕ_0 は計測値の 33.0° としている。この図は、言い換えるとせん断試験前の供試体の形状(最大傾斜角)がX軸に、またせん断過程に於いて実質的にせん断力を受け持つ部分の傾斜角がY軸となり、供試体が完全な剛体で表面の破壊の影響がない場合には、原点を通る傾き 45° の直線上に結果がプロットされるはずである。この図中の●は全A,B,C型供試体をH,I型の2つに分けたときの平均値を示す。これを見ると表面破壊のより少なかったI型の方は傾き 45° の直線上に近く、H型はかなりずれていることがわかる。また○はD,E,F型供試体のすべての結果であるが、これらも傾き 45° の直線からのずれが確認できる。さらにD,E,F型のデータを直線近似すると傾きは約 40° になり最大傾斜角 I_{max} が大きくなるにつれ表面破壊の影響が大きくなっていることが確認できる。

最後に供試体寸法の違いによるせん断強度への影響を調べるため、図12では規則的な歯形形状および不規則な形状の例として、F型の供試体せん断面積と最大せん断応力の関係を示す。この図より冒頭で述べた、せん断面積の増加に伴うせん断強度の減少を示す寸法効果は確認できなかった。また他の型の供試体もこの図12とほぼ同様の結果であった。

5. 結論

本研究では規則的、および不規則的な表面形状を持つ供試体を用いて一面せん断試験を行い、表面形状の違いが不連続面の挙動に与える影響を調べた。また供試体表面のラフネスを定量的に評価し、得られた指標とせん断強度との相関関係を調べ、有効性を検討した。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 粗度指数と最大せん断応力の関係を調べる際には、その指標としてせん断方向に正の傾斜(登り)で

ある部分内の最大傾斜角 I_{max} は、物理的にも有効と考えられるし、実験結果からもそれが実証されている。
(2) 表面が規則的、不規則的であるかに関わらず、供試体の寸法が増加すると最大せん断応力が減少するという寸法効果の現象は、今回の実験では見いだすことはできず、また表面粗さの大小の差による寸法効果への影響も、明確には現われなかった。

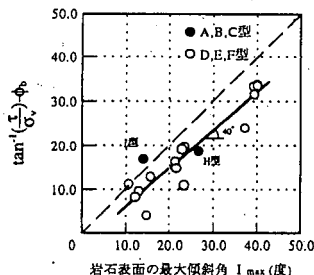


図11 摩擦角について

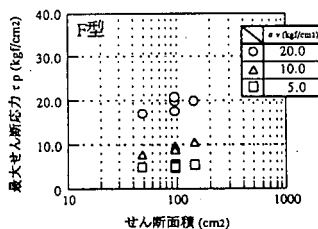


図12 F型の寸法効果について

参考文献

- 1) Barton, N. and V. Choubey: The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Springer, Vienna, No. 1/2, pp. 1-54. Also NGI-Publ. 119, 1978.
- 2) Tse, R. and Cruden, D. M.: Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16, pp. 303-307, 1979.
- 3) Barton, N. R. & Bandis, S.: Effect of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock, 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., pp. 736-760, 1982.
- 4) 高安秀樹: フラクタル、朝倉書店、1986.
- 5) Patton, F. D.: Multiple Models of Shear Failure in Rock, Proc. 1st cong. ISRM (Lisbon) vol. 1. 11, pp. 509-513, 1966.