

(50) ラフネスおよび壁面強度を考慮した岩盤不連続面せん断挙動の評価

Estimation of Shear Behaviour at Rock Joints in Consideration of Roughness and Material Strength

岸田 潔¹⁾・谷本 親伯²⁾・藤崎 淳³⁾

Kiyoshi KISHIDA, Chikaosa TANIMOTO and Kiyoshi FUJISAKI

Abstract

To clarify the shear behaviour at rock joint, we have carried out the laboratory shear tests by using natural rock joints. The shear behaviour of rock joints is strongly controlled by many kind of factors ; namely, normal stress, material strength of rock and surface roughness of joint, etc.. In our study, after measuring surface roughness and material strength, respectively, we have performed the shear test under several kinds of normal confining pressure. Then, we have discussed the results in consideration of these factors and estimated of them for shear behavior.

1. はじめに

原位置岩盤の力学的挙動を支配する要因のひとつである不連続面のせん断挙動は、不連続面に対する拘束圧、不連続面のラフネス形状、材料強度、充填物の有無および風化の度合い等によって決定される。Bartonが提案した岩盤不連続面のせん断強度を示す式は、不連続面の拘束圧、壁面強度、ラフネスを考慮したものである[1]。

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left(JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right) \quad (1)$$

この式において、JCSは、不連続面表面の壁面強度を表すもので、シュミットハンマー試験あるいはインタクトな岩の一軸圧縮強度より求められる。JRCは、不連続面のラフネスを表す係数である。ただし、このJRCは不連続面の表面形状を測定するなどして定量化したものではなく、多数行った実験結果よりラフネスが大きく関係していると考えられるピーク強度発現時のダイレイション角 d_n に着目し、 τ_p/σ_n と d_n の関係、 σ_p/JCS と d_n の関係より逆解析的に求

めた数値である。ラフネスの研究において、JRCは中心的なものと位置付けられており、多くの研究者が表面形状の計測および定量化手法を提案を行い、JRCとの比較検討を行っている。しかし、JRCがせん断試験の結果から逆解析的に求める値であるなら、同一形状の不連続面において、壁面強度や垂直拘束圧が異なれば、せん断強度も異なりJRCも異なる可能性が考えられる。Bartonの示すJRCは、不連続面の形状を幾何学的に評価して決定した指標でなく、せん断強度を表現するために与えた指標であり、その要因がラフネスにある、とした値であると考ええる。したがって、筆者らも行ってきたことであるが[2]、Bartonら[3]が示す代表形状を数値化しラフネスの定量化手法を適用しても、実際のせん断強度を評価するラフネスの定量化には至らないものと考ええる。

本研究では、自然の不連続面を有する供試体を用い、その不連続面を型取りし、同一形状で材料強度の異なる供試体を作成し、拘束圧一定のせん断試験を行った。試験の前後において、不連続面の形状を面的に計測し、せん断結果の評価に用いる。これにより得られたせん断試験の結果から、不連続面形状、

¹⁾ 正会員 工修 京都大学工学部助手 土木工学教室

²⁾ 正会員 工博 京都大学工学部助教授 土木工学教室

³⁾ 学生員 京都大学大学院工学研究科修士課程

材料強度および垂直拘束圧を考慮にいたした評価指標の提案を行い、ピークせん断強度との関係を調べる。

2. 供試体および試験機・試験方法

供試体は、 $\phi=60\text{mm}$ のボーリングコアから自然の不連続面を8種類選り出し、それをシリコンゴムで型取りし、モルタルで複製したものを用いた。供試体は、不連続面の寸法が $42\text{mm}\times 42\text{mm}$ の角柱になるよう整形している。モルタルに使用したセメントは、ジェットセメント（住友セメント）とデンシットバインダー（電気化学工業）であり、水・セメント比を変えるなどして、3種類の一軸圧縮強度を持つモルタル供試体を作成した。表-1に各材料の配合および一軸圧縮強度を示す。

ラフネスの計測は、非接触変位計（キーエンス製）を用いた3次元ラフネスプロファイラー[2]を使用し、 0.5mm ピッチで計測を行った。図-1にラフネス鳥瞰図（供試体No.5の上面と下面）を示す。

せん断試験機（誠研舎）[4]は、水平、垂直変位、水平垂直荷重を逐次パーソナルコンピュータに取り込み、そのデータより試験機の制御を行うことが可能である。したがって、この試験機では垂直拘束圧を一定にしたせん断試験、鉛直剛性を一定にしたせん断試験が可能となっている。本研究では、垂直拘束圧一定（ $\sigma_v=0.032, 0.2, 0.4, 0.8\text{MPa}$ ）、せん断速度 0.2mm/min でせん断変位が 4mm に達するまで試験を行った。

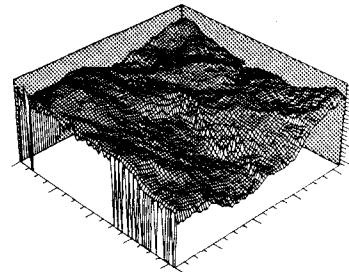
3. 実験結果

図-2にSample No.6、一軸圧縮強度： $\sigma_c=100\text{MPa}$ の供試体を用い、垂直拘束圧を変化させたせん断試験結果を示す。垂直拘束圧の増加にともない、ピークせん断強度および残留強度が大きくなっているのが確認できる。また、ダイレーションは拘束圧の増加にともない減少している。低拘束圧ではせん断変位が 0.2mm 付近で現れていたピーク強度も、拘束圧が増加するに従いせん断変位が 0.3mm 付近へと移動している。同じ不連続面形状を有し、材料強度が同じであれば、垂直拘束圧の増加にともないせん断される凹凸が増加し、ピーク強度やそれが現れるせん断変位が増加することになる。

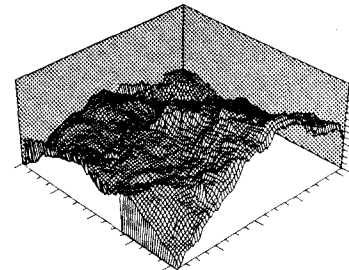
つぎに、図-3に $\sigma_c=100\text{MPa}$ 、 $\sigma_v=0.8\text{MPa}$ での不連続面の形状のことなる4種類の供試体のせん断試験

表-1 モルタル材料の配合および一軸圧縮強度

使用セメント	セメント：砂：水	一軸圧縮強度 (材令28日)
ジェットセメント	1：1：0.375	52.0 MPa
ジェットセメント	1：2：0.65	28.0 MPa
デンシットバインダー	1：1：0.2	100.0 MPa

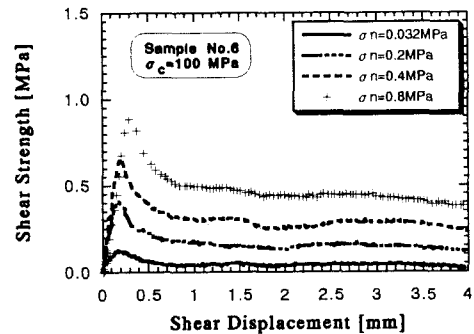


(a) 供試体No.5, 上面

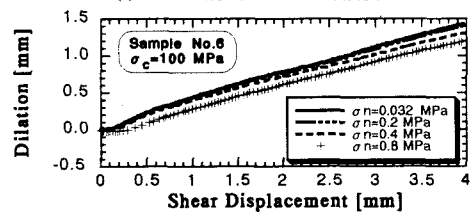


(b) 供試体No.5, 下面

図-1 ラフネス鳥瞰図

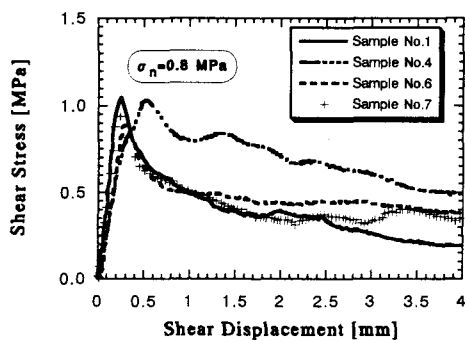


(a) せん断変位～せん断強度

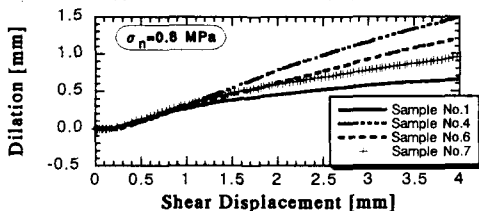


(b) せん断変位～ダイレーション

図-2 ラフネス・材料強度一定条件でのせん断試験

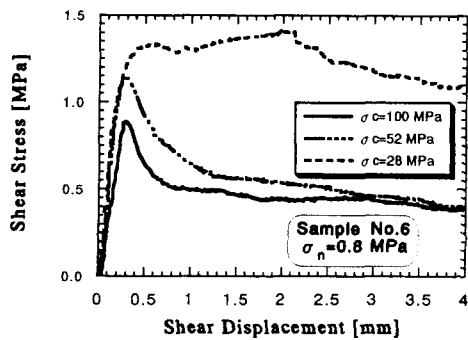


(a) せん断変位～せん断強度

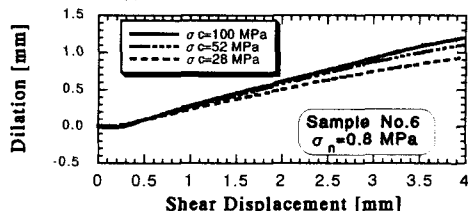


(b) せん断変位～ダイレイション

図-3 ラフネス形状を考慮したせん断試験



(a) せん断変位～せん断強度



(b) せん断変位～ダイレイション

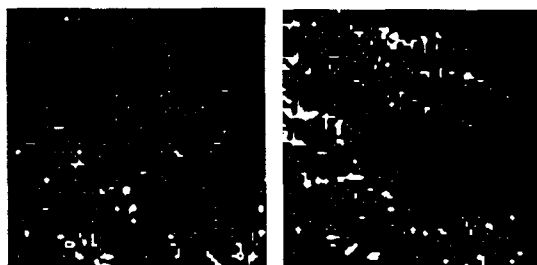
図-4 材料強度を考慮したせん断試験

験結果を示す。表面形状の違いにより、ピーク強度、残留強度、ダイレイション、ピーク強度の出現するせん断変位が異なることが確認できる。

図-4 には、Sample No.6を用い、拘束圧0.8 MPaでの3種類の異なる材料強度を持つ供試体に関するせん断試験の結果を示す。材料強度が大きいほど、せん断強度は小さくダイレイションが大きい傾向を示している。ラフネスすなわちJRCが等しい場合には、材料強度が大きいほどピークせん断強度も大きいというBartonのせん断強度式(式(1))とは逆の現象である。この理由として次のように考えた。

まず、図-4(b)に表れているように、材料強度が大きいほどダイレイション角が大きくなる傾向がうかがえる。材料強度が大きくなるとアスペリティの破壊が少なく、ジョイントのダイレイト(乗り上げ)が大きくなることを示している。ダイレイションが大きいとジョイント上下面で接触している部分が少ないため応力集中度が高く、アスペリティの破壊がより低い载荷状態で起こるためと考える。これは、同じ不連続面で材料強度が大きいと、破壊される凹凸は小さくせん断強度が発生しにくいことを示している。

せん断前のラフネス表面形状の計測結果からせん断後の計測結果を差し引きし、せん断変形により破壊されたアスペリティ(凹凸)の分布を表した例を図-5に示す。この図より、せん断に寄与しているア



(a) 供試体 No.7, $\sigma/\sigma_r=1,250$ (b) 供試体 No.7, $\sigma/\sigma_r=1,300$

図-5 せん断前後によるラフネスの変化
(白い部分が割れた箇所)

スペリティはジョイント表面のごく一部であることが確認できる。

4. ピークせん断強度の評価指標の提案

ここでは、実験により得られた知見を基に、不連続面表面形状、材料強度、垂直拘束圧を考慮に入れたピークせん断強度の評価指標の提案を行う。

まず、図-6に示すような手順でラフネスの幾何学的形状の定量化を行う。表面形状は、0.5mm毎に計測されており、せん断方向に対し隣り合う2点間の傾斜角を求める。せん断方向から見て、正の角度を有するアスペリティの頻度分布を図-7に示す。図-7において、縦軸はその角度(ここでは5°づつの

範囲)を有するアスペリティの個数を示し、実際は角度の小さいものは100以上存在するが、後の比較のために表示範囲を100までとする。しかし、この方法では、せん断方向にたいして0.5mm以上の長さがある大きな凹凸や、せん断方向に垂直に抜がる凹凸の評価が十分に行えない。そこで、

- I) せん断方向に対し正の傾斜を持つものに1、負の傾斜を持つものに0という重みを与える。
- II) せん断方向に対して直交する方向に重み1が続けば、その部分は続いた個数を重みとする。
- III) せん断方向に対し正の値が続けば、せん断方向に沿ってその値を順次加えて重みとする。
- IV) 個々のアスペリティの傾斜角を θ とすると、 $1/\cos \theta$ をそれぞれの重みに対し乗じる。

として、アスペリティの連続性に対する考慮を行う。以上のようにして求めた、アスペリティの角度の分布を図-8に示す。図-8の縦軸は、アスペリティの個数に重みを乗じたものである。表示範囲は図-7と同様、100までとする。

図-5に示すように、実際にせん断により破壊されるアスペリティはごくわずかで、せん断方向に対し幅を持つ大きい角度の凹凸であると考えられる。したがって、ラフネス計測で求めた個々の傾斜角に、式(2)に示す重み関数を乗じる。

$$f(\theta) = 1 - \cos \left(90 \times \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \quad (2)$$

ここで、 θ は個々の傾斜角、 θ_{max} は計測された傾斜角の最大値である。これにより、実際にせん断に影響するアスペリティを十分考慮に入れたラフネス形状の評価が行えるものとする。

つぎに、材料強度および拘束圧の影響について、式(2)に沿って考える。材料が軟らかい試料では、多くの凹凸が破壊され、摩擦が上昇すると考える。摩擦は、垂直拘束圧によって影響されるパラメータである。したがって、式(2)を

$$f(\theta) = \sigma_n \cdot \left\{ 1 - \cos \left(90 \times \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \right\}^{\log \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_n} \right)} \quad (3)$$

とした。ここで、 σ_c は材料の一軸圧縮強度、 σ_n は垂直拘束圧である。表-2に本研究で用いた σ_c/σ_n を示す。同一不連続面形状で、 $\sigma_n=0.8\text{MPa}$ 、 $\sigma_c=1,000\text{MPa}$ の場合、 $\sigma_c/\sigma_n=1,250$ であり(図-5(a))、一方、 $\sigma_n=0.4\text{MPa}$ 、 $\sigma_c=520\text{MPa}$ の場合、 $\sigma_c/\sigma_n=1,300$ (図-5(b))となり、同じ様な値を示す。しかし、図-5に示すとおり、せん断に伴う凹凸の破壊される(削られる)量が異なり、せん断試験の結果も異なる。他の供試体の結果も含めて考えると、 σ_c が凹凸

表-2 σ_c/σ_n

σ_c/σ_n	0.032MPa	0.2MPa	0.4MPa	0.8MPa
100MPa	3,125	500	250	125
52.0MPa	1,625	260	130	65
28.0MPa	875	140	70	35

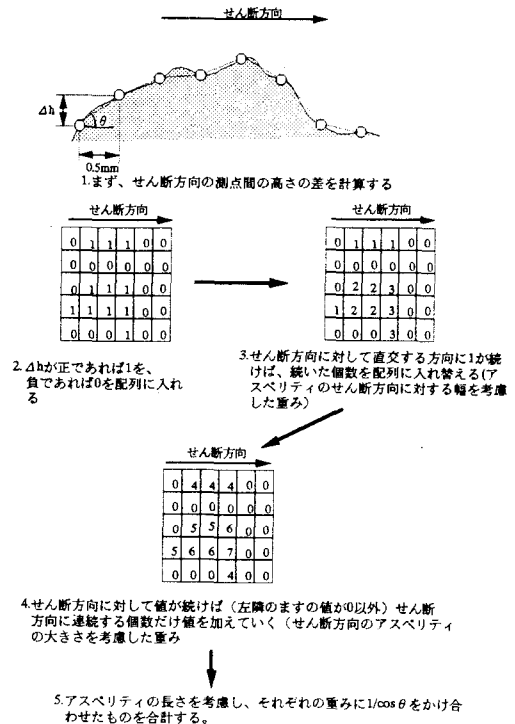


図-6 ラフネス形状定量化の概念図

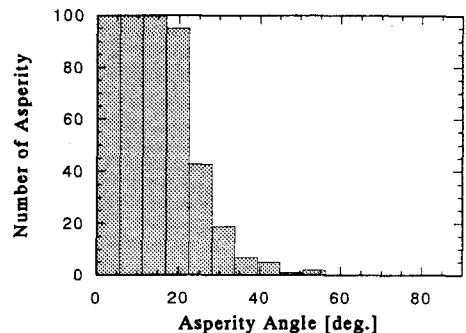


図-7 アスペリティの頻度分布

の削られる量に影響する傾向が示されている。そこで、式(3)において σ_c の影響を強調するように、

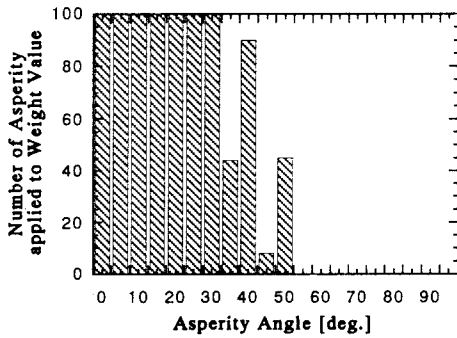


図-8 形状に関する重みを適用したアスペリティの頻度分布

$$f(\theta) = \sigma_n \cdot \left\{ 1 - \cos \left(90 \times \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \right\}^{\log \left(\frac{\sigma_c^2}{\sigma_n} \right)} \quad (4)$$

とする。これが、表面形状・垂直拘束圧・材料強度を考慮に入れ、せん断に影響するアスペリティを強調した式である。図-9に、各アスペリティに式(4)を乗じた結果を示す。これにより、せん断挙動に寄与する大きな角度有するアスペリティのみを抽出することが可能となった。また、不連続面全体の評価指標(CRM)は、

$$CRM = \sum_{j=1}^n \theta_j f(\theta_j) \quad (5)$$

となる。ここで、 n は実際に計測されるアスペリティの数である。この評価指標とピークせん断強度の関係を図-10に示す。材料強度および不連続面の表面形状が異なる供試体において、種々の垂直拘束条件下でせん断試験を行って得られたピークせん断強度を比較的統一的に表現できているものとする。本研究で得られたピークせん断強度を表す実験式は、

$$\tau_p = 1.85 + 0.579 \log(CRM) \quad (6)$$

となる。

5. まとめ

岩盤不連続面のせん断挙動に影響する、垂直拘束圧・不連続面表面形状・材料強度を変化させ、不連続面のせん断試験を行った。それぞれの条件に違いにより、せん断試験の結果が異なることが確認できた。特に、同一不連続面において材料強度が増加するとせん断強度が低下し、ダイレーションが増加する傾向を示し、強度増加にともない破壊されるアスペリティが減少していることを確認した。これは、式(1)のせん断強度式が示すところとは異なることに

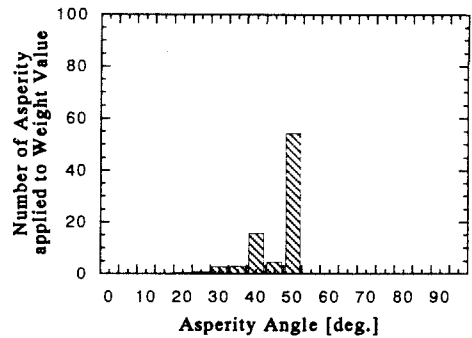


図-9 式(4)を適用したアスペリティの頻度分布

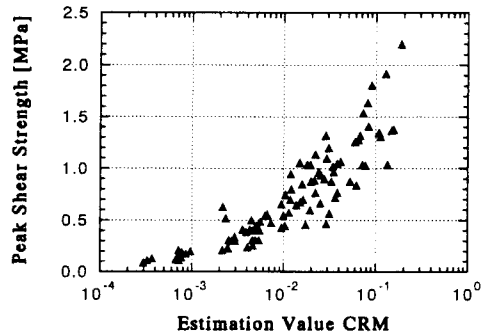


図-10 ピークせん断強度と評価指標CRM

なる。

不連続面形状・垂直拘束圧・材料強度を今日慮にいたれた評価指標の提案を行った。得られた評価指標は、ピークせん断強度と相関性があることが確認でき、不連続面形状と材料強度を求めれば様々な拘束圧に対し、ピークせん断強度を推定することが可能となった。

参考文献

- [1] Barton, N. : Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7, pp. 287 - 332, 1973.
- [2] 谷本親伯, 岸田潔: 3次元非接触式プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp. 57 - 67, 1995.
- [3] Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp. 1 - 54, 1977.
- [4] 谷本親伯ほか: 岩盤不連続面の一面せん断特性とラフネスについて, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 103 - 108, 1990.