

摩擦とラフネスの削れを考慮した岩盤不連続面の一面せん断特性
THE SHEAR BEHAVIOR OF ROCK JOINT
IN CONSIDERATION OF MATERIAL FRICTION AND SHEARED JOINT ASPERITY

津野 究* ・ 岸田 潔** ・ 中島伸一郎* ・ 足立紀尚**
Kiwamu TSUNO, Kiyoshi KISHIDA, Shinichiro NAKASHIMA and Toshihisa ADACHI

The shear behavior of the rock joint is closely and complicate connected with some factors, such as the confining condition, the material strength, joint surface roughness and the material friction. Therefore, it is necessary to grasp clearly the connection so as to evaluate the shear behavior. The direct shear test of the rock joints is carried out using specimens whose joint surfaces are smooth and the material friction is measured. On the other hand, changes in joint surface roughness are observed at performing the direct shear test of the natural rock joint in certain process of the shear behavior. Then it is considered that the shear behavior is consisted with the material friction and the sheared joint asperity.

1. はじめに

不連続性岩盤において掘削を行うと、空洞周辺部で応力解放が起こることにより不連続面にかかる拘束圧が小さくなり、せん断が起こりやすくなる。したがって、低拘束圧下における岩盤不連続面のせん断特性を把握することが、岩盤構造物の変形挙動を予測する上で重要である。岩盤不連続面の一面せん断特性は、垂直拘束圧、材料強度、ラフネス、基礎摩擦角など多くのパラメータが複雑にからみ合っており、それを評価するためには、個々の因子の影響を明確にすることが必要となってくる。

本研究では、まず、滑らかな不連続面を持つ供試体を用いて一面せん断試験を行い、パラメータを垂直拘束圧と基礎摩擦角の2つに固定して、摩擦角に関する検討を行った。

つぎに、Bartonのせん断強度式¹⁾を用いてピークせん断強度の予測を行い、過去に筆者らが行ったラフネスを有する不連続面の一面せん断試験の結果と比較した²⁾。ここで、ラフネスの定量化には Ms 値³⁾を用いた。 Ms 値とBarton&Choubeyの示すラフネス指標(JRC)⁴⁾との関係は既に表示されており⁵⁾、それを用いて検討を行った。これより、不連続面の表面形状を計測することでせん断強度の予測が行えるが、供試体によっては、精度があまりよくないことも確認されている⁵⁾。これは、せん断挙動がごく一部のアスペリティに支配されているため、面全体を評価している定量化パラメータを用いても、十分に評価できないためと考えられる。

本研究では、岸田・谷本の行ったせん断強度の推定⁵⁾を行う一方で、不連続面中のどのようなアスペリティがせん断に寄与しているのかを調べるために、ラフネスを有する不連続面の一面せん断試験を行い、せん断過程の各段階においてラフネスを計測することにより、せん断中のラフネスの変化を観察した。

* 学生員 京都大学大学院工学研究科 土木工学専攻

** 正会員 京都大学大学院工学研究科 土木工学専攻

2. 実験概要

本研究で用いたせん断試験機（誠研舎製）は、水平・垂直変位、水平・垂直荷重を逐次コンピュータに取り込み、そのデータにより試験機の制御を行う。

滑らかな面の一面せん断試験は、垂直拘束圧一定 ($\sigma_n=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0\text{MPa}$)、せん断速度 0.2mm/min. 、最終せん断変位 4mm の条件下で行い、ジェットセメント、砂、水を $1:1:0.375$ およびデンシットバインダー、砂、水を $1:1:0.2$ で配合したモルタルで作製した角柱供試体を用いた。細骨材（砂）として、ジェットセメントにはケイ砂 6 号、デンシットバインダーにはケイ砂 3 号 (35.0%)、4 号 (22.5%)、5 号 (22.5%)、6 号 (20.0%) の混合砂を用いた。一軸圧縮強度は 52MPa および 100MPa である。

一方、ラフネスを有する不連続面については、2 種類 (Sample A, Sample B) のラフネスを用意し、垂直拘束圧一定 ($\sigma_n=0.5, 1.0\text{MPa}$)、せん断速度 0.2mm/min. でせん断試験を行った。せん断中のラフネスの変化を観察するため、1 パターンにつき 3 個の供試体を用意し、それぞれ 4mm 、ピークせん断変位、ピークせん断変位の半分までせん断を行った。そして、各供試体のせん断前後でラフネスの測定を行い、ラフネスの状態を比較することにより、せん断中にどのようなアスペリティが削れるのかを調べる。ラフネスの計測は、レーザー変位計を用いた 3 次元プロファイラーを使用し³⁾、 0.1mm 間隔で行った。供試体は、自然のラフネスを有する不連続面をシリコンゴムで型取りし、ジェットセメント、ケイ砂 6 号、水を $1:1:0.375$ で配合したモルタルで複製した。一軸圧縮強度は 52MPa である。供試体は、不連続面の寸法が $42\text{mm}\times 42\text{mm}$ の角柱になるように整形した。

3. 実験結果

(a) 滑らかな面を用いた一面せん断試験

図-1 に、ジェットセメントを用いて作成した、滑らかな不連続面をもつ供試体のせん断試験結果を示す。せん断応力は立ち上がりの部分を除き一定になる。また、ダイレーションが現れないことも確認できた。せん断変位—せん断応力の関係から図-2 に示す垂直拘束圧—せん断応力の関係を図示し、Mohr-Coulomb の破壊規準を適用して、 $c=0$ および $\phi=32^\circ$ を求めた。デンシットバインダーの場合も同様に、 $c=0$ および $\phi=9.8^\circ$ を求めた。本論文では、この ϕ を基礎摩擦角 ϕ_b として用いる。ただし、基礎摩擦角とは、ラフネスを持たない滑らかな面の摩擦角である。

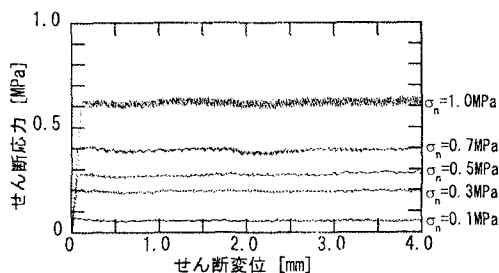


図-1 滑らかな面の一面せん断試験結果
(ジェットセメント)

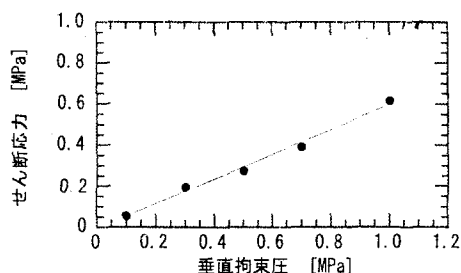


図-2 垂直拘束圧—せん断応力の関係
(ジェットセメント)

(b) ラフネスを有する不連続面の一面せん断試験

実験より、図-3 のようなせん断変位—せん断応力の関係が得られた。そして、せん断前とせん断後にラフネスの計測を行い、せん断方向に対し隣り合う2点間の傾斜角を求め、図-4 に示すようなアスペリティの傾斜角分布のヒストグラムを作成した。これより、アスペリティの傾斜角分布のヒストグラムは、正規分布に似た分布形状をしており、傾斜角の急なアスペリティの度数は非常に少ない。

4. 考察

(a) ピークせん断強度の予測

岩盤不連続面のラフネスを定量化する指標としては、Barton の *JRC* が有名である。Barton & Choubey¹⁾ は、代表的なラフネス形状とその *JRC* 値を示している¹⁾。本論文では、*Ms* 値を用いてラフネスの定量化を行った。*Ms* 値は、表面形状を計測して一測線の形状を一波形と考え、*MEM*法によるスペクトル解析を用いた、ラフネスの定量化パラメータである³⁾。*Ms* 値と *JRC* 値の間には次式のような関係式がある⁵⁾。

$$JRC = \frac{\ln\left(\frac{Ms \cdot 10^3}{1.117}\right)}{0.23} \quad \text{-----}(1)$$

この式を用いて、*JRC* 値を計算し、次式に示す Barton のせん断強度式を用いて、ピークせん断強度の予測を行った¹⁾。

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left(JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right) \quad \text{-----}(2)$$

そして、過去に筆者らがおこなったラフネスを有する不連続面の一面せん断試験の結果と比較した²⁾。予測値と実験値を比較した図を、図-5 に示す。これより、全般的に推定値が実験結果よりも小さく現れている。また、推定値が実験値の2分の1以下になるようなケースも多くみられ、推定の精度が十分でないことが確認できた。これは、*Ms* 値がせん断方向に対するアスペリティの広がりやを考慮しておらず、また、せん断挙動がごく一部のアスペリティに支配されることを、面全体の形状をあらわした *Ms* が考慮していないことが

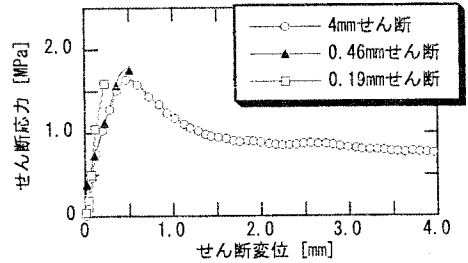
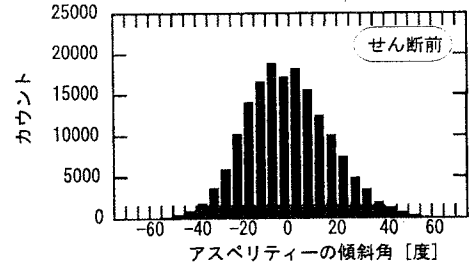
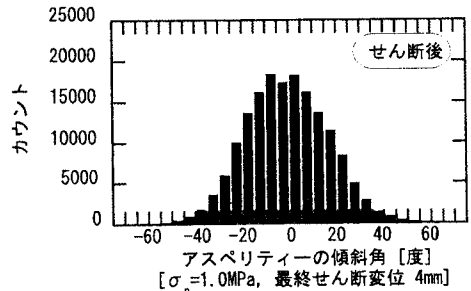


図-3 ラフネスを有する面の一面せん断試験結果



(a) せん断試験前



(b) せん断試験後

図-4 アスペリティの傾斜角のヒストグラム

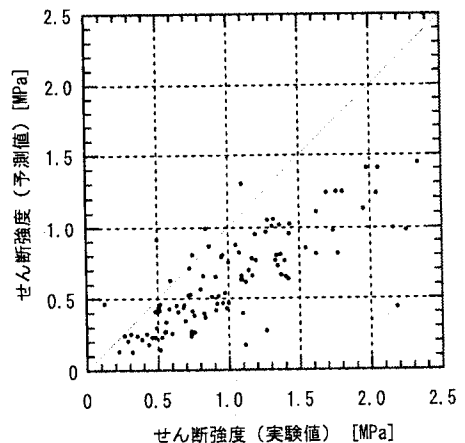


図-5 せん断強度の予測値と実験結果の比較

原因として挙げられる。

そこで、さらに良い精度でせん断強度を推定するためには、どのようなアスペリティがせん断に寄与しているのかを明確にする必要がある。そこで、本論文では、せん断中にラフネスがどのように変化をするのかを一面せん断試験を行って観察した。

(b) せん断中のラフネスの変化

ラフネスを有する不連続面の一面せん断試験のせん断前後で計測したラフネスデータから、せん断前後の M_s 値を計算した。そして、 M_s 値を用いてラフネスの変化をとらえようと試みた。せん断変位が大きくなるにつれ M_s 値がどのように変化するかを図-6に示す。 $\sigma_n=1.0MPa$ の場合、ピークまでは M_s 値が減少するが、4mm せん断してもそれ以上の M_s 値の減少はみられなかった。 $\sigma_n=0.5MPa$ の場合は、せん断することにより M_s 値が増加する場合もあり、 M_s 値を用いてもラフネスの変化を十分とらえることができなかった。

図-4 に示すようなアスペリティの傾斜角のヒストグラムを、せん断前とせん断後で比較したが、明確な違いを確認できなかった。そこで、せん断後の頻度分布からせん断前の頻度分布を引くことにより、せん断前後でのアスペリティの増減を調べた。Sample A, $\sigma_n=1.0MPa$ の時の結果を図-7 に示す。これより、全部の計測点 (16 万点) に比べ、傾斜角が変化する (削られる) アスペリティの数はごくわずかであることが確認できた。せん断によって削れるのは、不連続面全体の中のごく一部のアスペリティである。また、角度の大きいアスペリティから削れはじめ、せん断が進むにつれ、角度の小さいアスペリティに削れが移行していく様子も確認できた。

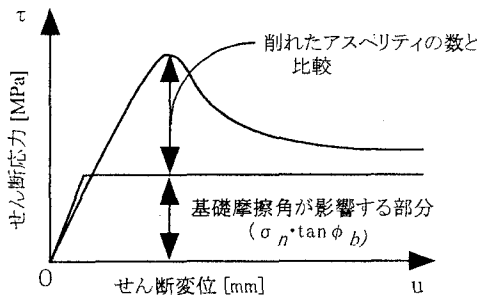


図-8 せん断強度と基礎摩擦角の関係

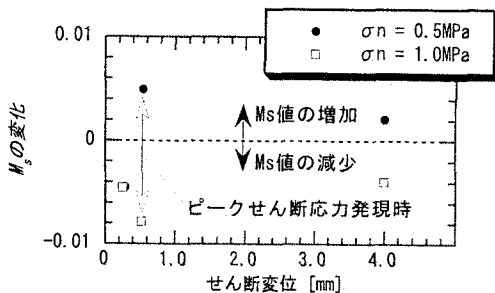
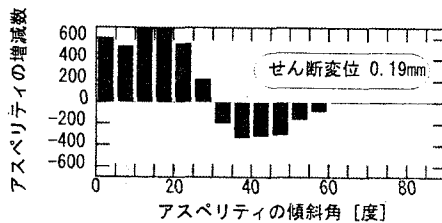
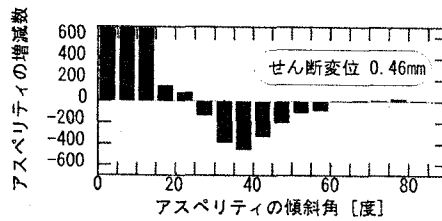


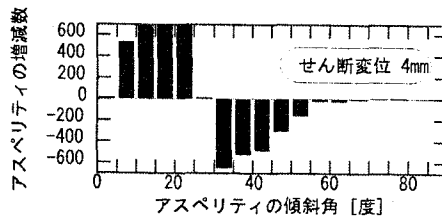
図-6 せん断による M_s 値の変化



(a) せん断変位 0.19mm



(b) せん断変位 0.46mm



(c) せん断変位 4mm

図-7 アスペリティの増減数

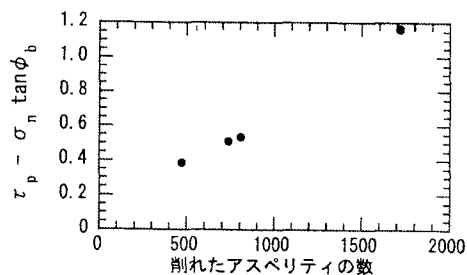


図-9 削れたアスペリティとピークせん断強度の関係

また、ピークまでせん断させたパターンについて、アスペリティの増減数を示すグラフのマイナス部分の面積を、削れたアスペリティの数として計算した。図-8 に示すように、せん断強度と基礎摩擦角の関係を示す。不連続面のせん断強度は、材料が持つ摩擦とラフネスのアスペリティの削れ方によって決まるものとする。ピークせん断強度から基礎摩擦角が影響する部分 ($\sigma_n \tan \phi_b$) を引いた量と、削れたアスペリティの数の関係を図-9 に示す。その結果、削れたアスペリティが多いほど、ピークせん断強度から基礎摩擦角が影響する部分を引いた量が大きくなることが確認できた。以上より、削れた量がピークせん断強度に大きな影響を与えることが確認できた。

5. 結論

本研究では、滑らかな不連続面を有する供試体を用いた一面せん断試験を行い、材料と拘束圧により決定される摩擦を調べ、基礎摩擦角を求めた。また、ラフネスを有する不連続面を用いてせん断試験を行い、せん断過程の各段階においてラフネスを計測することにより、せん断中のラフネスの変化を観察した。ラフネスの評価指標として提案されている Ms 値では、せん断強度とラフネスの関係を明確に示さないケースがあることを確認した。 Ms 値自信は、せん断面のラフネス形状を一意に表現しているが、せん断挙動はごく一部のアスペリティで支配されていることになる。せん断中のラフネスの変化計測結果から、角度の大きいアスペリティから削れはじめ、せん断が進むにつれ、角度の小さいアスペリティに削れが移行していく様子が観察でき、削れたアスペリティの数がピークせん断強度に大きな影響を与えていることが確認できた。また、ピークせん断強度から摩擦が寄与しているであろう部分を差し引いた量とアスペリティの削れ量との比較を行い、基礎摩擦角と削れる量が、ピークせん断強度に起因していることが確認できた。

6. 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) 岸田 潔・谷本親伯・藤崎 淳 : 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, 第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 241-245, 1996.
- 3) 谷本親伯・岸田 潔 : 3 次元非接触式ラフネス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.
- 4) Barton, N. & Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol. 10, pp. 1-65, 1997.
- 5) 岸田 潔・谷本親伯 : 岩盤不連続面のラフネスの評価とせん断強度の推定, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 85-90, 1998.