

(19) 統計的手法による岩盤不連続面の形状評価と せん断挙動との関係について

関西大学工学部	正会員	楠見晴重
関西大学大学院	学生員	○ 辻内 健
関西大学大学院	学生員	鈴木哲也
関西大学工学部	正会員	西田一彦

Relationship between Shear Behaviour and the Estimation of Rock Joint Surface by Statistical Method

Department of Civil Engineering Kansai University
Harushige Kusumi, Takeshi Tsujiuchi, Tetsuya Suzuki and Kazuhiko Nishida

Abstract

The shear behaviour of rock mass depends on the mechanical properties of discontinuity, and these are listed on aperture, strength, weathering, roughness, etc. Especially, it is known that the roughness of discontinuity surface directly affects shear strength of rock mass, however, the relationship between shear behaviour and roughness of discontinuity surface is not completely clear. In this paper, the roughness of discontinuity surface is measured by the laser displacement meter. Using these data, the roughness of discontinuity surface are statistically analyzed, and we are done the direct shear test. As the result, it is recognized that the analytical initial dilation angle obtained by the statistical method are corresponded with the dilation angle obtained by direct shear test under lower normal stress condition.

1. はじめに

近年の土木事業において、ダム、トンネル、地下空洞などの岩盤を対象とした工事の大型化が進行しているが、岩盤の強度特性や変形特性を支配しているのは、不連続面であることはよく知られている¹⁾。特に岩盤のせん断強度は、岩盤内部に存在する不連続面のせん断特性に強く結びついており、従来から多数の研究が行われている²⁾。

不連続面のせん断挙動は、不連続面の形状、間隙、介在物などによって左右される。本研究は、不連続面のせん断特性に最も大きく影響を与えると考えられる不連続面形状について検討を行うために、人工的に作成した岩石供試体の不連続面の凹凸をレーザ変位計で計測し、その計測結果を統計処理して、それらの諸数値とせん断強度特性との関連について考察した。

2. 試験に用いた供試体

本研究では、岩盤内部に存在する不連続面と岩盤の強度や変形特性との関係を検討するために、円柱状の岩石供試体を圧裂破壊し、その破断面を不連続面としてせん断試験を行った。岩石は稲田花崗岩を使用した稲田花崗岩の諸特性を表. 1 に示す。

試験に使用した稲田花崗岩の内部には、図. 1 のように石目 (Rift面、Hardway面、およびGrain面) が存

在するため³⁾、各面について弾性波速度を計測し、これらの差異を検討した。その結果、表. 2 に示すように、Hardway面、およびGrain面に対して垂直方向の弾性波速度は、ほぼ同じ値を示すが、それに対して、Rift面に対して垂直方向の弾性波速度は他の速度よりも遅いことが明らかになった。これから、本研究では、Rift面に対して垂直方向にボーリングを行った供試体をTYPE:A、Hardway面、およびGrain面に対して垂直方向にボーリングを行った供試体をTYPE:Bの2種類に区別した。供試体は、半径50mm、高さ100mmの円柱状で、これを圧裂破壊することで人工的に不連続面を作成した。図. 2 は、TYPE:A、TYPE:B供試体の圧裂時の载荷位置を示しており、TYPE:Bの供試体については、圧裂時にRift面が破壊するようにした。また、供試体のせん断方向は、図. 2 で示されるx軸方向である。

表. 1 稲田花崗岩の諸特性

密度(gf/cm ³)	2.67
一軸圧縮強度(kgf/cm ²)	1840
圧裂引張強度(kgf/cm ²)	61.0

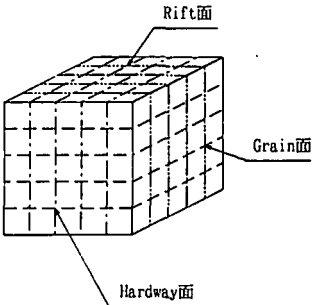


図. 1 稲田花崗岩の石目

表. 2 各面に対する弾性波速度

伝播方向に対する鉛直面	Rift	Hardway	Grain
弾性波速度(m/s)	3110	3240	3260

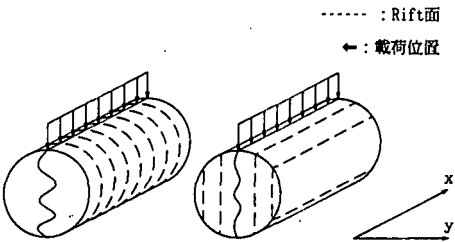


図. 2 Rift面と圧裂時の载荷位置

3. レーザ変位計による不連続面形状の計測

本研究では、不連続面の粗さを評価するためにレーザ変位計を用いて不連続面の計測を行った。図. 3 は、計測システムを示している。ロケティングボードとデータロガーの制御はコンピュータで行い、測定されたデータは、データロガーを介して、フロッピーディスクに保存される。図. 2 に示すように、計測はx軸方向、y軸方向ともに1mm間隔で行い、2つに分離した供試体両面について行った。本研究では、この計測データを用いて、せん断方向に対するアスベリティー傾斜角 i のヒストグラム、初期ダイレーション角度 i_0 ⁴⁾を求めた。

図. 4 は、計測データから求めたせん断方向に対するアスベリティー傾斜角 i のヒストグラムで、2つに分離した供試体のデータをまとめた結果である。図. 4 から、TYPE:Bの供試体は、TYPE:Aの供試体より傾斜角 i のばらつきが少ないことが認められる。この傾向は、他のTYPE:A、TYPE:Bの供試体についてもほぼ同様となった。

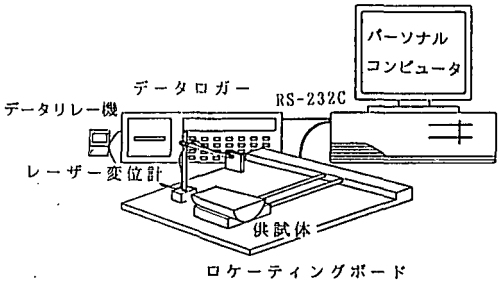


図. 3 レーザ変位計のシステム図

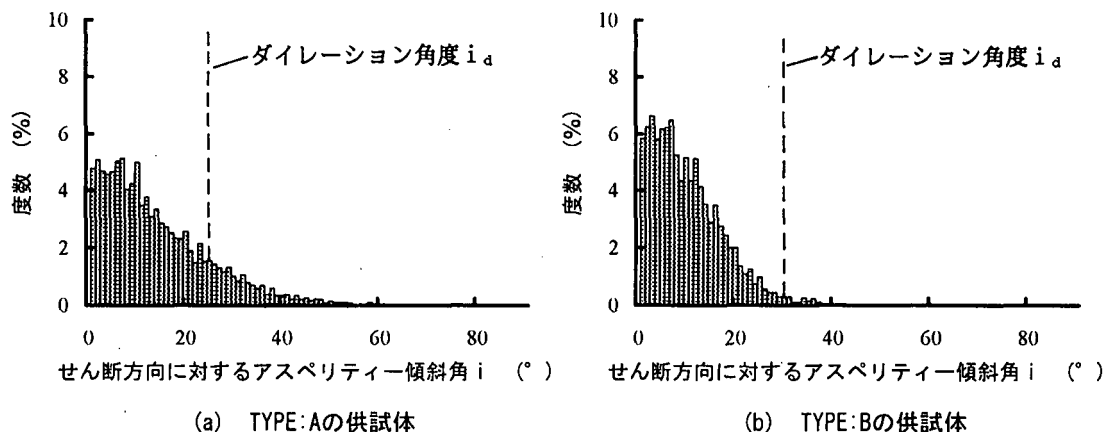


図. 4 TYPE:A,TYPE:B供試体のアスペリティー傾斜角 i のヒストグラム

図. 5 は、初期ダイレクション角度 i_0 のヒストグラムであり、2つに分離した供試体のデータをまとめて表示したものである。初期ダイレクション角度 i_0 は、せん断方向に対して解析し、図. 2 に示す y 軸方向に 1 mm 間隔で 50 個算出する。式(1)は、初期ダイレクション角度 i_0 を求めた式である。

$$i_0 = i_{ave} + \sqrt{2} \cdot SDi \quad ***(1)$$

ここで、 i_{ave} : アスペリティー傾斜角 i の平均値

SDi : アスペリティー傾斜角 i の標準偏差

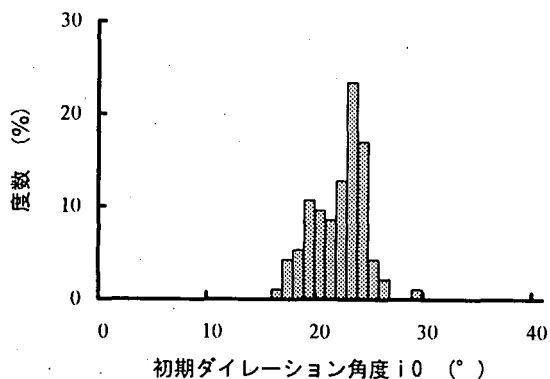


図. 5 レーザ変位計の計測結果から得られた初期ダイレクション角度 i_0 のヒストグラム

4. せん断試験方法

本研究では、図. 6 に示す直接一面せん断試験機を用いてせん断試験を行った。供試体は、せん断箱に収め、直接一面せん断試験機に挿入する。せん断荷重は、高圧三軸試験装置の加圧盤の上昇により作用させ、せん断箱が上下にずれることで供試体を直接せん断する。垂直荷重は、マニュアル方式によって油圧により水平力負荷ジャッキを介して水平方向に作用させる。せん断荷重及び垂直荷重のデータは、データロガーを介して、フロッピーディスクに記録される。

試験は、定圧一面せん断試験で行い、垂直応力 1.0, 5.0, 10.0, 20.0 kgf/cm² の 4 種類でせん断試験を行った。せん断荷重の載荷方式は変位制御方式を採用し、変位速度は 0.10 mm/min とした。

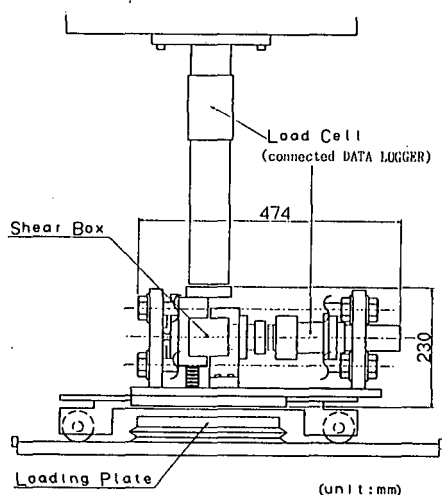


図. 6 直接一面せん断試験機

5. せん断試験結果と不連続面計測結果との比較

図. 7 は、垂直応力 $\sigma_n=1.0, 5.0, 10.0, 20.0\text{kgf/cm}^2$ におけるTYPE:A供試体のせん断試験結果であり、(a)は、せん断応力とせん断変位との関係を示し、(b)は、垂直変位とせん断変位との関係を示している。(a)から、垂直応力が増加するにしたがって、最大せん断応力は増加する傾向が認められ、(b)から、垂直応力が増加するにしたがって、ダイレーション率は減少する傾向が認められた。また、 $\sigma_n=1.0\text{kgf/cm}^2$ 下においては、試験後、アスペリティーの破壊がほとんど見られなかったことから、図. 7 より、最大せん断応力が発生した直後のせん断変位付近のダイレーション角度に注目し、その角度を初期ダイレーション角度 i_{0d} (試験値)とした。

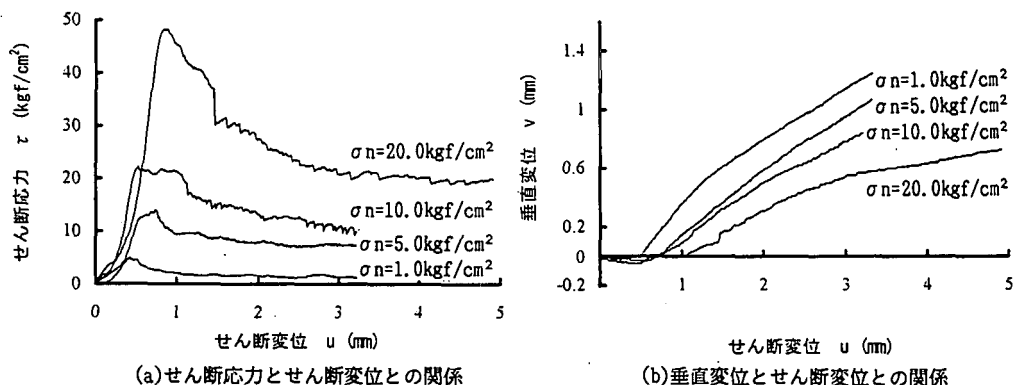


図. 7 各垂直応力におけるTYPE:A供試体のせん断挙動

図. 8 は、垂直応力 $\sigma_n=1.0\text{kgf/cm}^2$ における各供試体の初期ダイレーション角度の最大値 i_{0max} と i_{0d} と比較した図である。図. 8 から、レーザ変位計の計測結果より求めた i_{0max} とせん断試験の結果から求めた i_{0d} は、ほぼ一致することが認められた。これから、アスペリティーがほとんど破壊しないような比較的低い垂直応力下において、せん断初期のダイレーション角度は、初期ダイレーション角度の最大値とほぼ等しいものと考えられる。

図. 9 は、TYPE:A、TYPE:B供試体の破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数と垂直応力との関係を示したものである。破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数は、図. 4 に示すように、せん断試験から得られたダイレーション角度 i_d よりも大きい傾斜角 i を加算することによって求めた。

図. 9 から、TYPE:A、TYPE:Bの供試体について、垂直応力が増加するにしたがって、破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数は増加する傾向が認められ、特に、同じ垂直応力下においてTYPE:Aの供試体は、TYPE:Bの供試体よりも破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数が大きく、その増加率も大きいことが認められた。これは、図. 4 でも示すように、一般にTYPE:Aの供試体の不連続面形状がTYPE:Bの不連続面形状よりも急な傾斜角を有するアスペリティーを多く有していることから、同じ垂直応力下のせん断試験において、アスペリティーの破壊が容易であっ

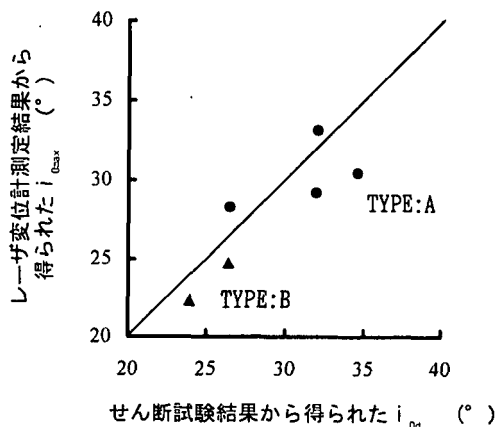


図. 8 初期ダイレーション角度の最大値 i_{0max} と i_{0d} との比較

たことが原因であると考えられる。

図. 10 は、各垂直応力におけるせん断剛性と破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数との関係を示したものである。せん断剛性は、図. 7 (a) のせん断応力とせん断変位との関係において、応力が最大せん断応力に達するまでの直線部分の傾きから求めた。図. 10 から、各垂直応力において、破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数が増加するにしたがって、せん断剛性は減少する傾向が認められた。これから、せん断剛性は、傾斜角 i を有するアスペリティーの破壊の程度に影響を受けると考えられ、破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数とせん断剛性との関係は、垂直応力に関係なく、ほぼ直線的な減少傾向となることが考えられる。

6. まとめ

本研究では、岩石供試体を圧裂することで、人工的に不連続面を作成し、その粗さ評価とせん断特性との比較を行った。以下は、その結果である。

(1) アスペリティーがほとんど破壊しないような比較的低い垂直応力下において、せん断初期のダイレーション角度 i_{0d} は、レーザ変位計の計測結果から得られた、初期ダイレーション角度の最大値 i_{0max} とほぼ等しい。

(2) せん断剛性率は、傾斜角 i を有するアスペリティーの破壊の程度に影響を受け、破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数とせん断剛性との関係は、垂直応力に関係なく、ほぼ直線的な減少傾向となることが認められた。

参考文献

- 1) 例えば、川本眺万：岩盤力学，朝倉書店，1975。
- 2) 例えば、楠見晴重・寺岡克己・谷口敬一郎：規則的な不連続面のせん断時のダイレーション特性，土木学会論文集，No. 430，pp. 125～133，1991。
- 3) 工藤洋三・橋本堅一・佐藤 修・中川浩二：石工の経験則と花崗岩の力学的性質，土と基礎，Vol. 34，No. 8，pp. 47～51，1986。
- 4) 楠見晴重・寺岡克己・谷口敬一郎：不規則な岩盤不連続面におけるせん断強度の定式化に関する研究，土木学会論文集，No. 499，pp. 13～22，1994。

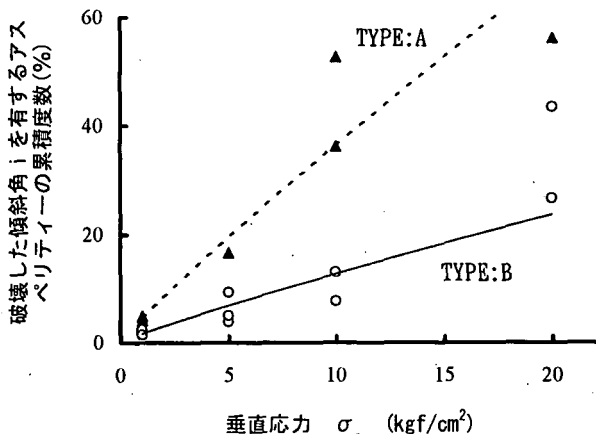


図. 9 垂直応力と破壊した傾斜角を有するアスペリティーの累積度数との関係

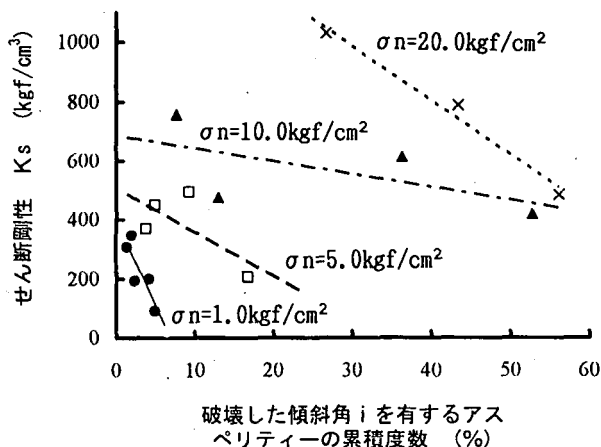


図. 10 各垂直応力における破壊した傾斜角 i を有するアスペリティーの累積度数とせん断剛性 K_s との関係