

岩盤不連続面の表面のフラクタル特性とせん断強度との関係に関する研究

九州大学工学部 正員 江崎哲郎 蔭 宇静
九州大学工学部 学生員 杜 守継 小林和昭
九州大学工学部 学生員 ○和田圭仙

1. はじめに

今日、放射性廃棄物の地層処分などの地下利用が注目されている。これらは岩盤の剛性、密閉性、耐久性などの特徴を活用するものであるが、この自然バリアの設計、施工及び維持管理においては、岩盤内に存在する不連続面の力学的、水理学的特性を明らかにする必要がある。それらが不連続面の表面特性（ラフネス、接触状況、異方性など）に支配されるため、本研究では、特にせん断過程における不連続面表面のフラクタル特性に着目し、フラクタルパラメータとせん断強度との関係を、室内せん断試験とフラクタル理論解析を用いることによって明らかにすることを目的とする。

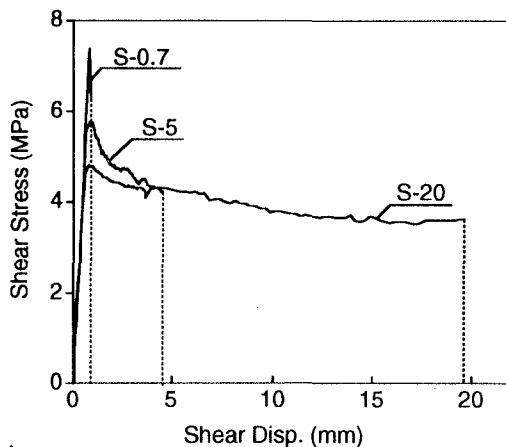
2. 不連続面のせん断試験方法

実験の試験体は韓国南原産花崗岩と長崎相浦産砂岩の2種類で $120 \times 100 \times 80$ mm（せん断面積： 80×100 mm²）の大きさに整形したものを使用した。まず試験体を圧裂して人工的に不連続面を作成し、垂直応力10MPaのもとでせん断速度0.1mm/secで、せん断応力ピーク時（約0.7mm）までせん断を行い、垂直荷重除荷後せん断変位を0mmの状態まで戻す。同様に5mm（残留状態に入る直前）、20mm（残留応力時）、計3回のせん断を行った（以後、砂岩を用いた実験をS-0.7、S-5、S-20、花崗岩を用いた実験をG-0.7、G-5、G-20と表現する）。また、各せん断試験の前後に開発したレーザ変位計による三次元表面測定装置を用いて不連続面表面の凹凸の変化を計測した。

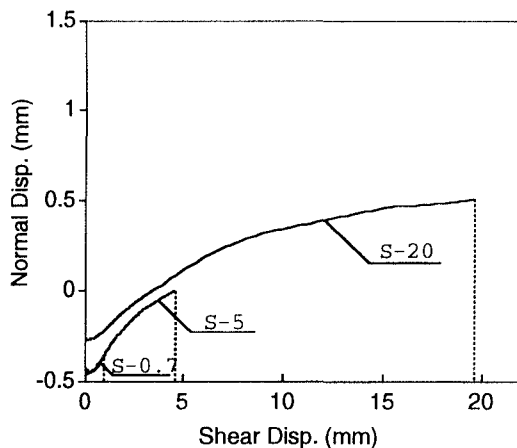
3. 実験結果および考察

Fig.1は砂岩供試体を用いた場合のせん断応力とせん断変位の関係、及び垂直変位とせん断変位の関係を示す。すべてのケースでせん断応力のピークが確認できたが、その値はせん断履歴を与えるごとに小さくなっている。これはせん断履歴により表面の凹凸が破壊されたためであると考えられる。特にS-0.7では凹凸の破壊の影響は大きいので、S-5のせん断応力のピークはS-0.7の約3/4の値しか示さない。ピーク前の弾性挙動の傾きは微小ではあるが徐々に小さくなっていることが分かる。

次にせん断過程での不連続面のダイレーション（凹凸の乗り上げによる垂直変位の増加）を見ると、まず初期の段階においてダイレーションがやや減少するが、これは



(a) Shear stress and shear displacement curves



(b) Normal displacement vs. shear displacement curves

Fig1. Behavior of sandstone for different shear displacement during shearing

最初に大きな凹凸が破壊されてかみ合いが良くなったからと考えられる。その後せん断変位とともに、凹凸に沿った乗り上げによってダイレーションが増加する傾向にある。

以上の結果から、表面形状とせん断強度との間に強い相関を持つことが分かる。

4. 岩盤不連続面のフラクタルモデル

従来の研究では、フラクタル次元のみで不連続面の表

面形状の特徴を幾何学的に論じてきたが、ここでは、不連続面のせん断特性との関連を明らかにするために、フラクタル次元のみならず、特に岩盤不連続面の平均ラフネス角が不連続面のせん断力学特性に影響すると考えて以下のように新しいフラクタルモデルの提案を試みる。

不連続面の表面の平均ラフネス角は、水平間隔 h だけ離れている両測点の高さ Z(X) の差のルート平方偏差 (RMS) で定義されるとする。

$$U(h)=\left\{\frac{1}{(N-j)}\sum_{i=1}^{N-j}\left[\frac{Z(x_i+h)-Z(x_i)}{h}\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式 (1) にバリオグラム法を適用することにより、平均ラフネス角 U(h) とフラクタルパラメータ B、D との関係が求められる。

$$U(h)=B\cdot h^{1-D} \quad (2)$$

U(h) と h を対数座標軸でプロットすると、振幅 B が縦軸 U(h) での切片で、1-D が曲線の傾きを表す。

またせん断実験と表面凹凸測定結果より求められたせん断強度とフラクタルパラメータ、平均ラフネス角 U(h) を Table1 に示す。

Fig.2 に式 (2) より得られた相対ラフネス角とせん断変位の関係を示す。花崗岩と砂岩ともに、せん断応力がピークに達したとき相対ラフネス角は大幅に減少しているが、これは最初に起伏の激しい凹凸が破壊され、フラクタル次元 D が小さくなったためと考えられる。その後はせん断変位とともに減少率は小さくなる。

Fig.3 に水平間隔 h が供試体長さの 0.5% の場合のピークせん断角 ϕ_m と平均ラフネス角 U(h) の関係を示す。花崗岩と砂岩ともにピークせん断角 ϕ_m は平均ラフネス角 U(h) の増加とともにほぼ線形的に大きくなることが分かる。

5. 結論

本研究では、2 種類の岩石供試体で人工的に作成した不連続面試験体を用いて、せん断試験と表面形状の測定を行った。また表面フラクタル特性とせん断強度との関係を明らかにした。

(1) 不連続面の凹凸はピークせん断応力に達したときかなりの損傷を受け、凹凸の弱い部分や起伏の激しい部分が最初に破壊され、その後せん断変位とともに表面どうしの凹凸の乗り上げなどによって残留強度に至ることが分かった。

(2) 新しく提案したフラクタルモデルでは、岩盤不連続面の表面形状の幾何学的特性としてフラクタルパラメータ (振幅 B と次元 D) によって、平均ラフネス角 U(h) がピークせん断角 ϕ_m と線形的な関係を持つことが明らかになった。

Table1. Fractal parameters and shear strength of granite and sandstone joint in shear test.

Sample's name	B	D	U (h=0.5%L)	τ max	$\phi_m=\arctan\left(\frac{\tau}{\sigma_n}\right)$
S-0.7	0.235	1.430	0.324	10.86	47.36
S-5	0.239	1.403	0.305	7.43	36.61
S-20	0.229	1.253	0.286	5.65	29.47
G-0.7	0.256	1.284	0.210	7.39	36.46
G-5	0.184	1.266	0.197	5.76	29.94
G-20	0.235	1.258	0.182	4.80	25.64

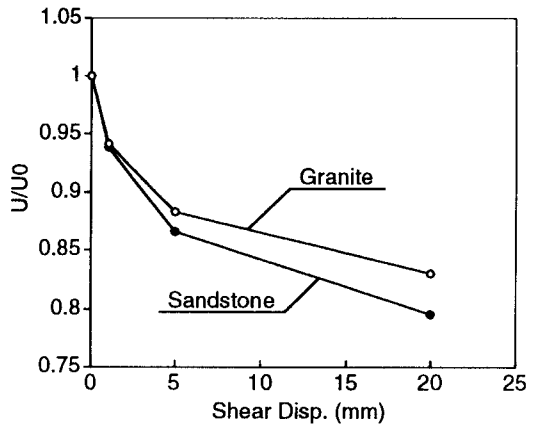


Fig2. Average roughness angle vs. shear displacement diagram.

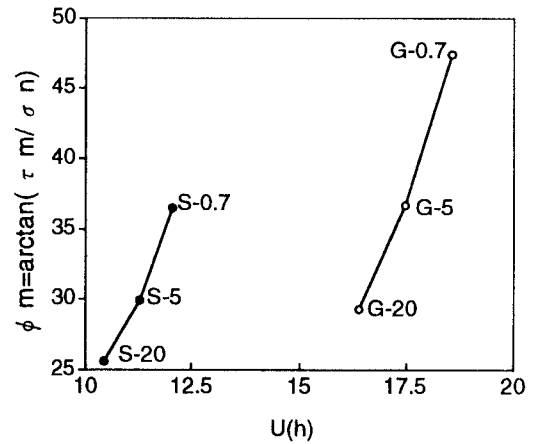


Fig3. Peak shear angle vs. average roughness angle diagram.

6. 参考文献

1) 杜 守継, 江崎哲郎他: 岩盤不連続面表面のフラクタル特性とせん断強度との関係に関する研究, 土木学会第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, 1997.