

# 不規則な表面形状を有する岩盤不連続面のせん断破壊特性

木村 強\*・江崎哲郎\*\*

BartonとChoubeyによって提示されたプロファイルを有する石膏不連続面を用いてせん断試験を行うとともに、せん断後の表面形状を計測した。表面のアスぺリティは、勾配が大きいほど基底長が短く、そのために応力集中によって簡単に破壊され得る。垂直応力の増加に伴ってアスぺリティの破壊は大きくなり、ダイレイションは抑制される。この実験結果に基づいて、せん断強度を評価する方法を提案し、その妥当性を検証した。

**Key Words** : rock joint, roughness, asperity, shear failure

## 1. はじめに

斜面や地下空洞などの力学的安定性、あるいは放射性廃棄物の地層処分に係わる岩盤の水理学的特性を論じるには、岩そのものだけを対象にしたのでは不十分であり、むしろ多くの場合において、岩盤内に含まれる不連続面が支配的となる。岩盤不連続面の問題に対するアプローチの方法としては、全体としての分布特性と単一の不連続面の特性のどちらに注目するかによって2つに大別される。前者の分布特性とは、不連続面の方向、長さ、密度、連結性であり、現場での観察結果に基づいた統計・確率的手法により研究が進められる一方で、全体の岩盤の挙動をシミュレートするために数値解析法が開発されている。後者の単一の不連続面の特性とは、力学的にはせん断の変形、破壊特性であり、水理学的には開口幅と透水性の関係である。これらの2つのアプローチの違いは、ISRMの主催で行われた2つの国際シンポジウムのありかたによく反映されている<sup>1),2)</sup>。

本研究は、単一の岩盤不連続面のせん断破壊特性を明らかにすることを目的として、その特性に最も影響を及ぼすパラメータの1つである表面形状に注目したものである。実際には表面形状は平面上で2次元的に変化しているが、ここでは問題を単純化して考えるために、まず、せん断方向と直交する方向には凹凸のない不連続面をNC加工によって切削し、これを型枠として石膏供試体を作成した。次に、この石膏不連続面を用いて種々の垂直応力下でせん断試験を行い、そのときの挙動を調べるとともに、試験後の表面形状を計測し、せん断によってアスぺリティがどのように破壊されたかを観察した。最

後に、実験結果をもとに、表面形状が不規則な不連続面のせん断強度を評価する方法について検討した。

## 2. 従来のせん断強度式

岩盤不連続面のせん断強度式は、多くの書物でレビューされており<sup>3)-5)</sup>、その代表的なものとして、Patton<sup>6)</sup>、LadanyiとArchambault<sup>7)</sup>、Barton<sup>8)</sup>の3つを挙げることができる。Pattonは、規則的な三角形のアスぺリティを有する石膏不連続面のせん断試験に基づいて、次の2つの直線で表されるせん断強度式を提案している。

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\phi + i) \dots \dots \dots (1a)$$

$$\tau = C_0 \cdot \sigma_n \cdot \tan \phi_0 \dots \dots \dots (1b)$$

$\sigma_n$ は垂直応力、 $\tau$ はせん断応力、 $\phi$ は不連続面表面の摩擦角、 $i$ はアスぺリティの勾配、また $C_0$ および $\phi_0$ は、不連続面を含まないインタクトの部分の粘着力と内部摩擦角である。上式は、垂直応力の大きさによってせん断のモードが異なることを表している。すなわち、式(1a)は、小さな垂直応力の下でのアスぺリティに沿ったすべりのモードに対応しており、式(1b)は、大きな垂直応力の下ですべりが生じることなくアスぺリティ自身が破壊されるモードに対応している。

LadanyiとArchambaultは、実際の破壊はすべりとアスぺリティ自身の破壊が混在しているとして、エネルギー収支の考察から次のせん断強度式を提案している。

$$\tau = \frac{\sigma_n(1-a_s)(dv/du + \tan \phi) + a_s \cdot \tau_f}{1 - (1-a_s)(dv/du) \cdot \tan \phi} \dots \dots \dots (2)$$

$\tau_f$ はインタクト部の破壊強度であり、式(1b)のような直線式やFairhurstによる放物線式が用いられる。また、 $dv/du$ はせん断変位 $u$ に対する垂直変位 $v$ の増加率、 $a_s$ は不連続面の全長に対するアスぺリティ自身が破壊した部分の割合である。この $a_s$ と $dv/du$ について、LadanyiとArchambaultは、次のような関係式を提示

\*正会員 工博 国立環境研究所 主任研究員  
(〒305 つくば市小野川16-2)

\*\*正会員 工博 九州大学教授 環境システム工学研究センター

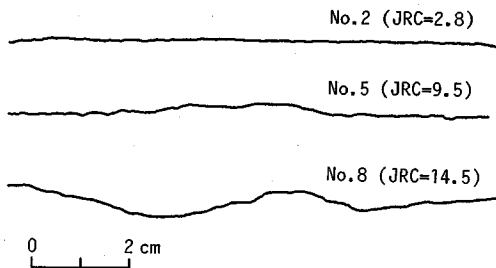


Fig.1 Typical roughness profiles and the JRC values<sup>9)</sup>.

Table 1 Description of original rock joints having different profiles shown in Fig.1<sup>9)</sup>.

No.	Rock type	Description of joint
2	Aplite	smooth, planar: tectonic joints, unweathered
5	Granite	rough, planar: tectonic joints, slightly weathered
8	Aplite	rough, undulating: relief joints, partly oxidized

している。

$$a_s = 1 - (1 - \sigma_n / \sigma_T)^{1.5} \dots \dots \dots (3)$$

$$dv/du = (1 - \sigma_n / \sigma_T)^4 \cdot \tan i \dots \dots \dots (4)$$

$\sigma_T$  は、不連続面の強度が  $\tau_f$  と同じになるときの垂直応力である。彼らは、現段階では実験データがないので式(3)および(4)はあくまでも一時的なものであり、今後の実験によって修正され得ると述べている。また、完全にかみ合っていない状態を表すために、真の応力に対する見かけの応力(作用している荷重を全体の面積で除した値)の比  $\eta$  を導入している。Ladanyi と Archamboult のせん断強度式は概念的には優れているが、実用面において求めるべきパラメータが複雑であることが欠点である。

Barton のせん断強度式は、上述の Patton や Ladanyi と Archamboult のせん断強度式と異なって経験式であり、次式のように表される。

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan (JRC \cdot \log (JCS / \sigma_n) + \phi) \dots \dots \dots (5)$$

JRC は不連続面表面の粗さを表す指標、JCS は不連続面壁面の一軸圧縮強度である。彼がせん断強度式を式(5)のように経験式で与えたのは、せん断時の真の接触面積は全体の面積に比べて極端に小さく、見かけの応力を用いてせん断強度を正しく記述するには物理モデルでは不相当と考えたからである<sup>9)</sup>。式(5)の中の JRC の値は、完全に平坦な面では 0 であり、表面が粗くなるとともに大きくなる。問題となっているプロファイルの JRC 値を簡便に求めるために、JRC 値が既知で表面の粗さが異なる 10 種類のプロファイルと目視で比較する方法が推奨されている<sup>10)</sup>が、この方法では主観的になりやすい。そのため、プロファイルを数値化してそのデータを統計的に処理することで、JRC を定量的に求めようとする試みがなされている。Tse と Cruden<sup>11)</sup>は、数値化したプロファイルデータの種々の統計量と JRC 値の関係を調べ、次式で表される統計量  $Z_2$  が最も相関性がよいことを見いだしている。

$$Z_2 = (1/N \cdot \sum (dy/dx)^2)^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

( $dy/dx$ ) は不連続面表面の勾配、 $N$  はデータ数である。しかし、この  $Z_2$  の値は、2 つの隣接するデータ間の距

離(基底長)  $dx$  に強く依存することが指摘されている<sup>12)</sup>。

### 3. 実験方法

#### (1) 供試体の作成

本研究では、Barton と Choubey<sup>9)</sup> によって提示された 10 種類のプロファイルの中で、Fig.1 に示すように粗さの程度が小、中、大に相当する No.2 (JRC=2.8)、No.5 (JRC=9.5) および No.8 (JRC=14.5) のプロファイルを有する不連続面のせん断挙動および表面形状の変化を調べる。これらのプロファイルは、異なった岩種および成因の不連続面について計測されたもので、その特徴を Table 1 に示している。供試体の作成に当たって、まず、各々のプロファイルを複写機で約 400 mm の長さに拡大した後、デジタイザーを用いて長さ方向に 1 mm 間隔で凹凸の高さを読み取った。結果として、元のプロファイルについてはサンプリング間隔は 0.25 mm となる。こうして得られたプロファイルについて、1 次のトレンドを取り除いたものを基本のプロファイルとした。これは、もしプロファイルに 1 次のトレンドが含まれているならば、JRC=0 のように完全に滑らかな表面であっても、せん断方向によって摩擦角が異なってくるからである。ただし、この 1 次のトレンドの除去により、Barton と Choubey のオリジナルのものとはわずかながらも差異が生じたかもしれない。

次に、長さ 100 mm × 高さ 80 mm × 奥行き 80 mm のアルミニウムブロックの中央高さの位置を、読み取ったプロファイルデータをもとに NC 放電加工(ワイヤー径 0.3 mm)によって直方体ブロックの長さ方向に切削し、1 次元の凹凸、すなわち、せん断方向に直交する方向には凹凸のない不連続面を作成した<sup>13)</sup>。そして、切削したアルミニウムブロックの上部および下部を型枠として、それぞれに石膏を流し込み、所定のプロファイルを有する供試体を作成した。このとき、一面せん断試験装置のせん断箱の寸法に合わせるために、厚さ 10 mm × 高さ 50 mm × 奥行き 80 mm のスペーサをアルミニウムブロックの両側に挟み、仕上りの供試体の大きさが 120 mm × 80 mm × 80 mm、せん断面積が 100 mm × 80 mm になるようにした (Fig.2)。石膏と水の配合は、重量比で

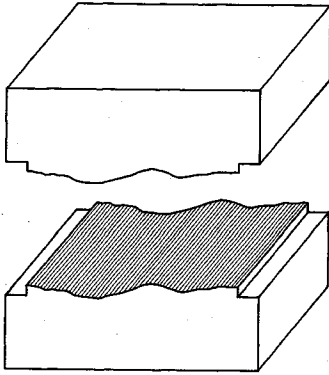


Fig.2 The plaster joint used in the shear tests.

1:0.4であり、また、石膏の急激な固結によるひび割れを防止するため、全体の約0.5%の遅延剤(リグニンスルホン酸ナトリウム)を添加した。型枠に流し込んだ後、30°Cで24時間放置し、さらに80°Cで24時間強制乾燥させた。このようにして作成した3種類の石膏不連続面からそれぞれ1つずつ供試体を選んで、後述するレーザー変位計を用いて、奥行き中央部のプロファイルを計測した。そして、この石膏不連続面のプロファイルと最初にデジタイザーで読み取った数値データとを比べることによって凹凸の再現性を調べた。Table 2は、式(6)で与えられる $Z_2$ について比較したもので、このときの $dx$ はTseとCruden<sup>11)</sup>、YuとVayssade<sup>12)</sup>の結果も参考にできるように0.5mmとしている。石膏不連続面の上下面においてほぼ同じ値を示しており、またデジタイザーによる数値データの $Z_2$ 値ともそれほど差異はないことから、所定の不連続面が得られたと考えてよい。

直径50mm×高さ100mmの円柱形の試験によれば、一軸圧縮強度 $\sigma_c$ は21.5MPaである。

### (2) せん断試験

本実験に用いた一面せん断試験装置<sup>14)</sup>は、せん断能力400kNを有しており、垂直方向の載荷は2,000kNの圧縮試験機により行われる。せん断、垂直の両方向ともに、電気油圧サーボ方式による荷重制御、変位制御が可能である。せん断箱は、摩擦の影響を少なくし正しいダイラタンシー挙動が得られるように、上箱支持-下箱移動方式としている。せん断箱の内容積は、120mm×100mm×80mmの大きさで、Shear-Flow Coupling試験ができるように改良がなされている<sup>15)</sup>。本実験は、垂直方向は荷重制御、せん断方向は変位制御で行った。すなわち、所定の垂直応力(0.1MPa, 0.4MPa, 1MPa, 2MPa, 4MPa)を負荷した後、その垂直応力を一定に保持したまま、変位速度0.025mm/secで最大変位10mmまでせん断し、逆方向に戻すことなくその状態で垂直応力を除荷した。せん断方向は、Fig.1に示したプロファイ

Table 2 Comparison of  $Z_2$  values between digitized and plaster joint profiles.

	No.2	No.5	No.8
Digitized profile	0.135	0.192	0.268
Plaster joint (upper)	0.135	0.179	0.269
(lower)	0.151	0.177	0.270
Tse & Cruden(1979)	0.141	0.198	0.282
Yu & Vayssade(1991)	0.139	0.225	0.302

ルをせん断面として下半部が上半部に対して右に移動するようにした。垂直変位の計測は、せん断箱上面の隅部に設置した4つの変位計によって行った。本実験のように、せん断方向と直交する方向に凹凸がない不連続面供試体では、せん断箱の左側と右側の垂直変位は同じ値になるが、せん断箱の前と後ろのそれは、せん断に伴って回転が生じるときには異なってくる。

本研究では、不連続面を含まないインタクトな円柱供試体(直径50mm×長さ80mm)のせん断試験も行った。このときのせん断方向は、円柱軸に平行な方向である。

### (3) 凹凸の計測

不連続面表面の凹凸を計測するため、精密X-Y位置決めテーブル(日本トムソン製:ストローク長さ120mm×120mm,繰返し位置決め精度 $\pm 2\mu\text{m}$ )とレーザー変位計(キーエンス製:スポット径50 $\mu\text{m}$ ,分解能0.5 $\mu\text{m}$ )からなる自動計測システムを構築した。レーザー変位計は、計測対象物と非接触であることから、迅速な計測が可能となり、近年、従来のプロファイルメーターに代わって多用されている<sup>16)</sup>。レーザー変位計による計測の欠点は、花崗岩のように計測対象物が色調の異なる物質で構成されている場合、レーザー光の反射係数の違いのために、得られる値がその物質間で不連続となることである。しかしながら、本実験で用いた石膏供試体は単一色であり、この問題が生じることはない。

せん断を受けた供試体の不連続面の計測の前に、粉状に破壊された石膏を取り除くために表面を軽くブラッシングした。表面に強く圧着され、ブラッシングによっても残存しているものについてはグージ[gouge]として取り扱うことにする。目視観察によれば、せん断後の不連続面もせん断を受ける前と同様に、奥行き方向の凹凸はほとんどなく、せん断によって一様に凹凸が破壊されたものとみなすことができる。そこで、奥行き中央部をせん断方向に長さ100mm,計測間隔0.05mmで読み取り、そのプロファイルのみで表面を表現することにした。こうして得られたプロファイルをせん断前のそれと比較することにより、せん断による表面形状の変化を調べることができる。

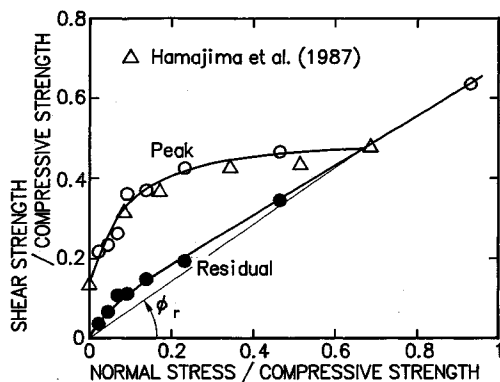


Fig.3 Peak and residual shear strengths of the intact plaster.

4. 実験結果および考察

(1) せん断試験

Fig.3に、インタクトな石膏供試体のせん断強度を示す。同図には浜島ら<sup>17)</sup>のせん断試験の結果もプロットして実験データを補間している。彼らの石膏供試体は配合比が異なるため、一軸圧縮強度は14 MPaと本実験のそれよりも小さいが、せん断強度は一軸圧縮強度で正規化することで同一の曲線で表すことができる。図中の黒丸印は、せん断変位10 mmにおけるせん断応力である。このせん断変位するとき、垂直応力が3 MPaより小さい場合には、せん断応力は減少の途中に、また垂直変位は増加(ダイレーション)の途中にあり、必ずしも一定値に達していないが、ここでは残留強度と呼ぶ。また、垂直応力が20 MPaのときには、完全塑性の変形挙動を示し、ピーク強度と残留強度は同じであった。残留強度線は、原点を通る完全な直線ではなく、垂直応力の小さいときに非線形を示す。この非線形性は、インタクトな供試体がせん断破壊して不連続面が形成されるとき、その表面形状が完全にはフラットではなく(Fig.6を参照)、上述のように残留強度がまだ一定値に達していないことによると考えられる。ここで、ピーク強度と残留強度が同じになるときの応力状態と原点を結ぶ直線の勾配を残留内部摩擦角 $\phi_r$ と呼ぶことにすれば、本実験に用いた石膏のそれは35°である。また、そのときの垂直応力、すなわち遷移応力は一軸圧縮強度のおよそ2/3(本実験の石膏供試体では14.5 MPa)である。遷移応力は、LadanyiとArchambaultのせん断強度式に含まれているパラメータ $\sigma_T$ と等価と考えることができるが、Goodman<sup>2)</sup>は、彼らのせん断強度式に言及して、遷移応力を一軸圧縮強度と同じとすることを提案している。

No.8のプロファイルを有する石膏不連続面のせん断応力-せん断変位および垂直変位(ダイレーション)-せん断変位の関係をFig.4に示している。試験の開始直後には、せん断変位とともにせん断応力も増加する。垂

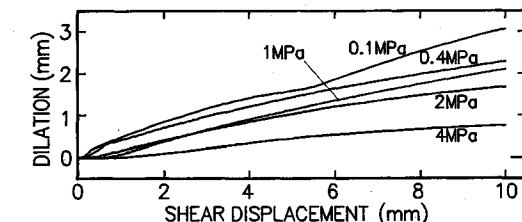
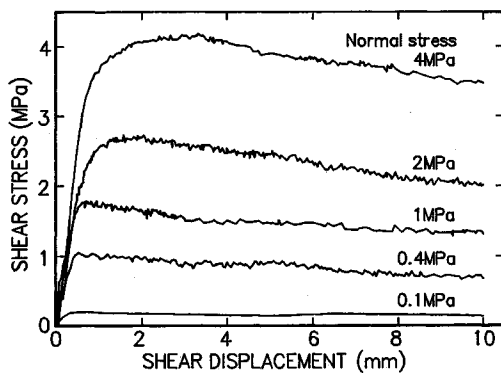


Fig.4 Shear stress-shear displacement and dilation-shear displacement curves under different normal stresses using the plaster joint with the No.8 profile.

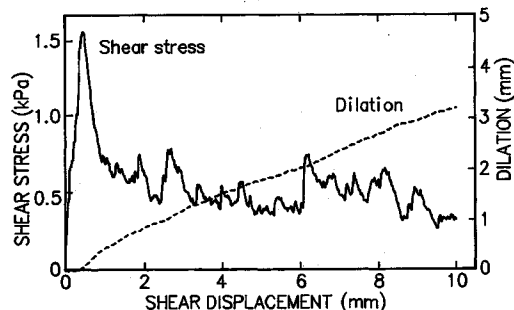


Fig.5 Shear stress-shear displacement and dilation-shear displacement curves using the aluminum joint with the No.8 profile<sup>13)</sup>.

直応力が低い場合には、せん断応力のピークが現れることなく、一定値のままではせん断は進行していく。垂直応力が高くなると、なだらかではあるもののピークが現れるようになり、ピーク後のゆるやかな減少は、せん断変位が10 mmに達しても続いている。No.2およびNo.5のプロファイルの場合には、高い垂直応力の下でもピークが現れることはない<sup>18)</sup>。これは、Fig.1で示しているようにNo.8には他の2つのプロファイルに比べて波長の長い凹凸部があり、この部分が影響していると考えられる。垂直変位は、せん断変位とともにほぼ単調に増加しており、垂直応力が低い場合には凹凸の乗り上げによって大きなダイレーションを示し、垂直応力が高くなると凹凸の破壊が生じてダイレーションは抑制されるようになる。ここで比較のために、アルミニウムブロック

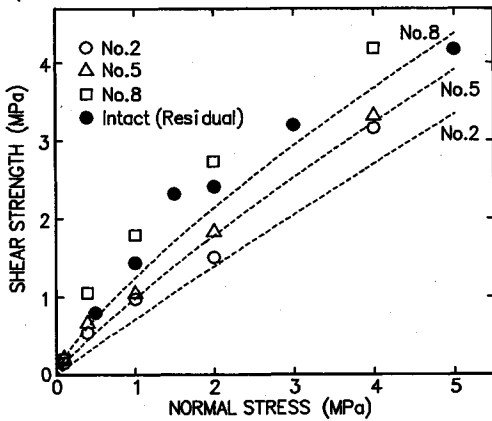


Fig. 6 Shear strengths of the plaster joints with different roughness. The broken lines are given by the Barton's empirical equation.

の不連続面を用いた押し試験 [Push Test] の結果<sup>19)</sup>を述べる (Fig. 5). 押し試験における垂直応力は、供試体上半部の自重によって負荷され、その値は約 1 kPa である。しかもアルミニウムを供試体の材料としているので、不連続面の表面の損傷はまったくなく、凹凸の乗り上げのみを考えればよい。Fig. 5 には、せん断開始直後に明瞭なピークが現れており、その後のせん断応力の挙動は非常に不規則に変化している。これは、垂直応力が 0.1 MPa のときの石膏供試体の結果と比べて大きく異なるところであるが、垂直変位に関しては両者にそれほど差異はなく、せん断変位 10 mm のときのそれぞれの値もほぼ同じである。石膏供試体におけるせん断応力の鋭いピークの消失は、大きな勾配を有しながらもそのアスペリティが非常に小さいために、せん断開始直後の応力集中によって極めて簡単に破壊されたことを意味している。

不連続面を有する石膏供試体のピークせん断強度を Fig. 6 に示す。同図にはインタクトな供試体の残留強度もプロットしている。Fig. 3 で述べたように残留強度線が直線にならないのは、インタクトな供試体をせん断して形成される不連続面の表面形状が、せん断変位 10 mm においても完全には平坦でないためであり、その粗さは、3つの不連続面との比較から、No. 8 と No. 5 の間にあることがわかる。破線で示した曲線は、3つのプロファイルのそれぞれの JRC 値を Barton の式 (5) に代入して得られたものである。No. 5 のプロファイルは No. 2 と No. 8 のほぼ中間の JRC 値を有しており、式 (5) によればせん断強度もこれら 2つの間になるが、実験結果はむしろ No. 2 に近い値となっている。Barton の経験式から評価されるせん断強度は、全体的に実験値よりも小さい。この原因の 1つに、表面の摩擦角  $\phi$  の取扱い方がある。Barton によれば、 $\phi$  の値は傾斜試験

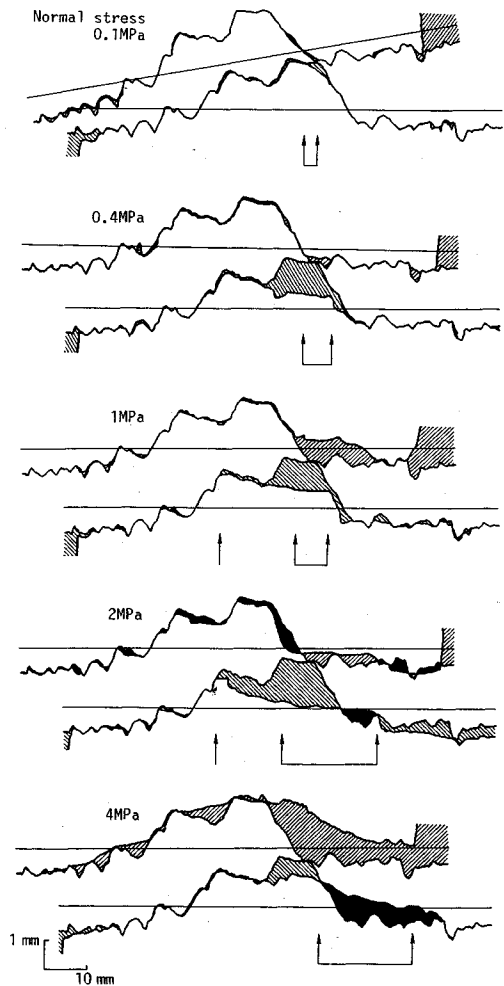


Fig. 7 The plaster joint sheared under different normal stresses (No. 5 profile).

[Tilt Test] により簡易的に求められ、本供試体では  $\phi = 32^\circ$  である。しかし、これは表面の仕上げの程度によって変わり得るので、材料特性とはいえない<sup>19)</sup>。  $\phi$  として、インタクトな供試体の残留内部摩擦角  $35^\circ$  を用いれば、Barton の経験式と実験結果にはもっとよい一致がみられるようになるであろう。

## (2) 表面形状の計測

せん断による表面形状の変化の一例として、No. 5 のプロファイルを有する不連続面の計測結果を Fig. 7 に示す。図中の斜線部は、試験の前よりも表面の高さが低くなった部分、すなわちせん断によって削り取られた表面である。黒く塗りつぶした部分はせん断によって表面が高くなったところで、反対側の面で削られた石膏が圧着されて形成されたグー지를表している。これらの図は、せん断後の状態を再現するために、まず、せん断前の上下面のプロファイル (この 2つはまったく同じもの) を

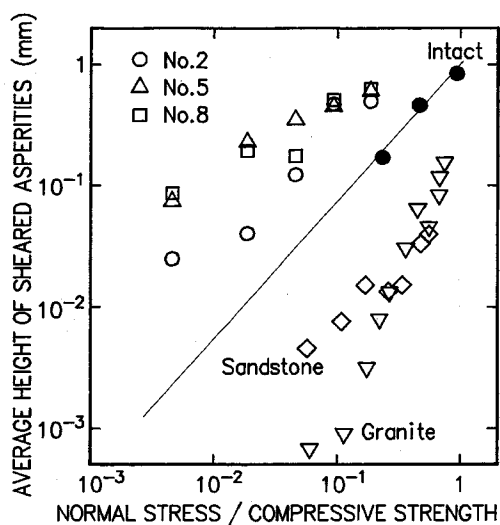


Fig.8 The relationship between the normal stress and the average height of sheared asperities.

重ね、下面のプロファイルのみを右方向に 10 mm 移動させた後、せん断箱の前と後ろ（図においてはそれぞれ右と左）で計測した垂直変位をもとにして上面のプロファイルを回転させ、さらに上下面が重ならないように上面を上方に移動させたものである。せん断後には削り取られた斜線部は存在しないので、実際には上下面の間隔は図に示したものよりも小さい。上向きの矢印は、上下面が接触する部分を示している。下面の左端部および上面の右端部では、せん断よりもむしろ引っ張りによるとみられる大きな剝離が生じている。垂直応力が 0.1 MPa のように低い場合には、表面凸部に若干の変化が認められるが、巨視的には表面形状の変化はほとんどなく、凹凸がお互いに乗り上げながらせん断された様子を見ることができる。また、せん断に伴う回転も顕著である。垂直応力が大きくなると、下面プロファイルの中央やや右にある大きな凸部では乗り上げが生じることなく、その基底部から激しく破壊されるようになり、全体として表面形状は平坦化される。垂直応力が 4 MPa のときには、2 MPa までの場合と違って、上面の凸部で破壊が卓越しており、このときグー지의生成量も多い。垂直応力とともに、上下面の接触面積は増大するが、4 MPa のときでさえ全体の面積に対して約 20% であり、このことは見かけの応力よりも 5 倍ほど大きな応力が、不連続面の限られた部分に作用していることを示している。

せん断によって削り取られた石膏の量について、一断面当たりの削り取られた面積を断面長で除し、単位せん断面積当たりの平均高さとして表すと Fig.8 のようである。これには、下面の左端部および上面の右端部での剝離は含まれていない。Fig.7 でも述べたように、垂直応

力とともに破壊された部分が增大していることがわかる。また、表面が平坦な No.2 のプロファイルの方がグー지의量が少ない傾向にある。しかし、表面粗さを表す最も簡易な指標である振幅（最も高いところと最も低いところの差）を比較すると、No.2, No.5, No.8 のプロファイルでは、それぞれ 1.1 mm, 2.9 mm, 6.5 mm であり、この違いほどにはグー지의量に差異はない。

Yoshioka<sup>20),21)</sup> は、一軸圧縮強度が 150 MPa の花崗岩と 65 MPa の砂岩のせん断試験を行い、そのときに生成されるグー지의重量を測定している。約 10 mm のせん断変位によって発生したグー지의重量を体積に換算し、さらに単位面積当たりの平均高さとして表した結果を Fig.8 に示している。Power<sup>22)</sup> によれば、せん断によるグー지의生成は、表面の形状が変化する状態（トランジェントな状態）と、表面形状の変化のない状態（定常の状態）の 2 つのフェーズが同時に進行している。せん断の初期にはトランジェントな状態が卓越しているが、せん断変位が大きくなるとこの状態はほとんど無視できるようになる。定常の状態では、グー지의生成量はせん断変位と線形関係にある。Yoshioka の実験は、せん断面を #800 の研磨剤で仕上げた後で、せん断変位 1 cm の試験を 3 度繰り返しており、本研究で用いた供試体に比べてその表面はかなり平坦である。したがって、Fig.8 に示した花崗岩と砂岩の結果は、トランジェントな状態よりも定常の状態でのせん断を反映していると考えられる。グー지의発生量は、垂直応力を一軸圧縮強度で除して正規化しているにもかかわらず砂岩と花崗岩で異なっており、垂直応力とグー지의量の関係は、両対数表示したときの勾配より、砂岩では 1 次式、花崗岩では 3 次式で近似される。このことは、せん断に伴うグー지의発生量は、材料定数としての一軸圧縮強度だけでは十分に表現できないことを意味するが、これを検討するにはさらなる実験が必要である。Fig.8 には、インタクトな石膏供試体のせん断試験において削り取られた量も示している。これは、せん断が十分に進んでダイレクションの減少速度が一定になったときの値をもとに、その減少速度で 10 mm のせん断変位が進んだと仮定したときの石膏の削り取られる高さを求めたものである。直接グー지의量を測定してはいないが、その求め方から、砂岩および花崗岩と同様に定常状態でのせん断を反映しているとみなされる。インタクトな石膏については、垂直応力が 5 MPa よりも小さい場合には 15 mm のせん断変位でも負のダイレクションを示さず、削り取られる高さを評価することはできなかった。このため、Fig.8 のインタクトな石膏の結果は 3 つのデータしかないが、両対数表示においてその勾配は 1 に近い。No.2, No.5 および No.8 の不連続面の場合、表面形状の変化を伴うトランジェントなせん断の結果が加わるので、グー지의量は

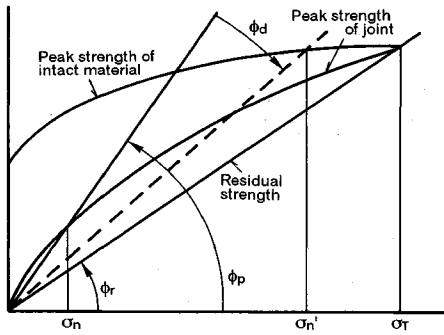


Fig.9 A diagram for explaining the ratio of contact area.

図中に示した直線よりも上にプロットされる。

### 5. せん断強度の評価

上述の実験結果をもとにすれば、不規則な表面形状を有する岩盤不連続面のせん断強度は次のような過程を経て発揮されると考えられる。せん断の開始によって、まず最大勾配の斜面で両面が接触し、この部分で乗り越えようとする。しかしながら、一般にはそのような斜面の基底長は非常に小さいため、接触部に作用する真の応力は見かけの応力よりもずっと大きい。その結果、この斜面では乗り上げが生じることなく極めて簡単に破壊に至る。両面の接触は、次に勾配の大きな斜面に移動するが、同じ理由によりここでも破壊される。最終的には、垂直応力に依存したある基底長  $dL_c$  の斜面に接触部が移動するまでこの過程は続き、そこで初めて乗り上げが生じるようになり、ピーク強度が発揮される。この基底長  $dL_c$  は、本実験のようにせん断方向に直交する方向に凹凸がない場合には、せん断応力がピークを示すときの接触面積比  $a_c$  と供試体の長さ  $L$  の積で表される。

ここで、接触面積比  $a_c$  を算出する方法について述べる。Fig.9 は、Fig.3 で示したインタクトな供試体および Fig.6 で示した不連続面を有する供試体のピーク強度と残留強度を概略的に表示したもので、図中の  $\sigma_T$  は、式(3)および(4)にみられるようにピーク強度と残留強度が同じになるときの垂直応力である。ピーク時の摩擦角  $\phi_p$  には乗り上げに伴うダイレクション角  $\phi_d$  も含まれており、これを除くと破線で示した摩擦角のようになる。基底長  $dL_c$  の斜面において破壊と乗り上げが同時に生じると考えると、その斜面に作用する応力状態は、破線で示した直線上にあり、かつインタクトな供試体の破壊曲線上にプロットされる。見かけの垂直応力  $\sigma_n$  とこのときの垂直応力  $\sigma_n'$  の比が接触面積比である (Fig.7 で述べた接触面積は、せん断変位が 10 mm のときであり、ここでの接触面積とは必ずしも対応しない)。

Fig.10 には、このようにして得られた接触面積比と垂直応力の関係を示している。垂直応力の増大とともに接

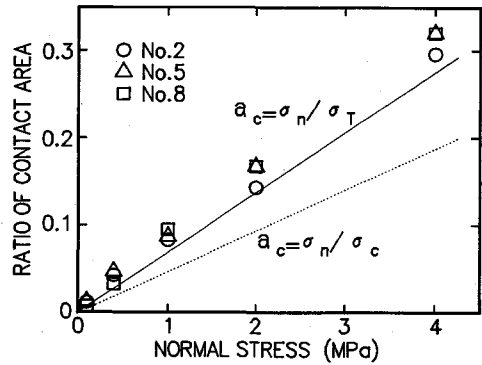


Fig.10 The relationship between the normal stress and the ratio of contact area.

触面積比も増加しており、プロファイルの違いによってもその増加率はほとんど同じである。点線で示した直線は  $a_c = \sigma_n / \sigma_c$  の関係であり、接触面積比がこの直線よりも下になることはない。ここでは、垂直応力が  $\sigma_T (= 14.5 \text{ MPa})$  のときに接触面積比が 1 になると仮定して、次式で接触面積比を表すことにする。

$$a_c = (\sigma_n / \sigma_T)^k \quad (\sigma_n < \sigma_T) \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $k$  は定数である。本研究で行った垂直応力の範囲では、 $k=0.9$  が実験結果によく当てはまるが、関係式を簡単にするためにここでは  $k=1$  とする。そのときには、両面の接触部では、見かけの垂直応力の大きさにかかわらず常に  $\sigma_T$  の垂直応力で乗り上げが生じていることになる。

ピーク強度を支配する斜面の基底長  $dL_c$  と垂直応力の関係が明らかになったので、以下では、実際のプロファイルの数値データからピークせん断強度を評価することを試みる。まず、ある垂直応力に対して、次式によって  $dL_c$  を計算する。

$$dL_c = L \cdot (\sigma_n / \sigma_T) \dots \dots \dots (8)$$

次に、プロファイルの中で  $dL_c$  を基底長とする斜面の最大勾配  $i_m$  を求める。そのとき、右せん断 (上半部が下半部に対して右側に動く) では右上がりの斜面が、左せん断では左上がりの斜面が選ばなければならない。この  $i_m$  を式(1a)の  $i$  に代入し、また  $\phi = \phi_p$  とすれば、所定の垂直応力に対するせん断強度が得られる。

Fig.11 は、No.2, No.5 および No.8 について得られたせん断強度を実験結果と比較したもので、両者がよく合っていることがわかる (図中の丸印)。本方法によってせん断強度を求める場合、式(7)において  $k=1$  とすることは、Fig.10 からわかるように接触面積比を小さく、すなわち  $dL_c$  の値を過小評価することになる。これは  $i_m$  の過大評価となるが、一方においてアスペリティの破壊に相当する  $\phi_p - \phi_d$  の摩擦角を無視しているので、これらが相殺された結果となる。

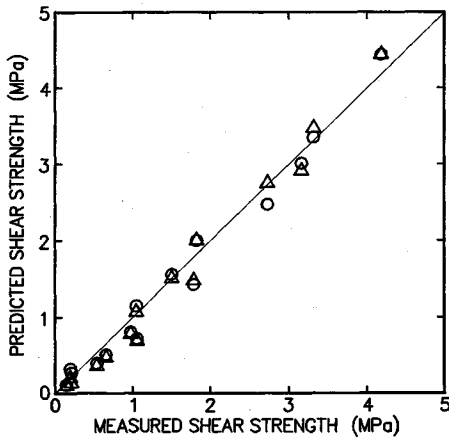


Fig.11 The comparison between the measured and predicted shear strengths. The circle denotes the shear strength predicted using the maximum slope with a base-length in the profile, and the triangle denotes the one predicted using the average and the standard deviation of the slopes with the same base-length.

今までに述べてきたのは、せん断方向に直交する方向には凹凸がない特殊な不連続面についてである。一般には、表面形状は2次元的に変化しており、この中から最大勾配の斜面を特定するのは困難である。その場合には、統計的な処理によって最大勾配を求めなければならない。すなわち、基底長  $dL_c$  の斜面の平均勾配  $i_a$  およびその標準偏差  $i_s$  から、 $i_m$  を次式によって推定する。

$$i_m = i_a + \alpha \cdot i_s \dots\dots\dots (9)$$

$\alpha$  は定数であり、BartonとChoubeyが提示した10種類のプロファイルについて求めた結果によれば、2~3の値が妥当である。 $i_s$  と式(6)の  $Z_2$  は同じ意味を有するが、その違いは  $Z_2$  ではせん断の方向が考慮されていないことである。このせん断方向による強度の違いは、垂直応力が小さいときに顕著となる<sup>23)</sup>。また、式(6)では基底長の取扱いがあいまいであり、どのような基準でこれを定めるべきかが明記されていない。このことは、表面の粗さ角に注目してせん断強度を評価しようとした吉中ら<sup>24)</sup>の研究についてもいえる。Fig.11の中の三角印は、 $\alpha=2$ として式(9)を用いて評価したせん断応力であり、 $i_m$ を直接求めて評価したときと同様に実験結果とよく合っている。2次元的に表面形状が変化している不連続面に対して、本方法によってせん断強度を評価するときのもう1つの問題として、式(8)の適用性がある。2次元性を考慮すると、式(8)は次式のように修正することができるが、その有効性については今後、実際の岩盤不連続面を用いた実験によって検証されなければならない。

$$dL_c = L \cdot (\sigma_n / \sigma_T)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

式(8)あるいは(10)には供試体の長さ  $L$  が含ま

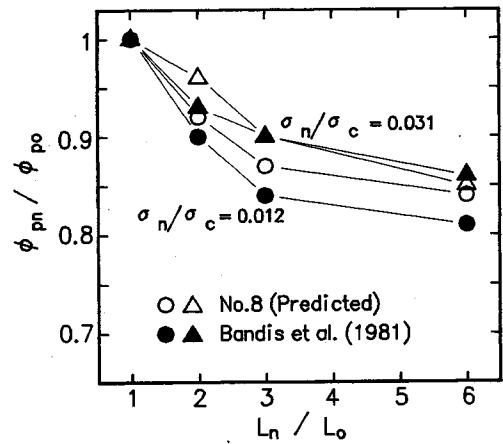


Fig.12 The relationship between the specimen length and the peak friction angle.

れているので、本方法では寸法効果を考慮することができる。すなわち、これらの式によれば、 $L$ が大きくなるとそれに比例して  $dL_c$  が大きくなるので、結果として最大勾配  $i_m$  は小さくなりせん断強度も減少する。Bandisら<sup>25)</sup>は、6 cm から 36 cm の長さの供試体についてせん断試験を行い、供試体が大きくなるとせん断強度は減少するが、その減少の割合は、垂直応力が大きいほど、また JRC の値が小さいほど小さくなることを明らかにしている。Fig.12には、2つの異なる垂直応力の下での彼らの試験結果を示している。その試験で用いられた不連続面の JRC に近い値を有する No.8 のプロファイルについて、本方法によって、供試体の長さの増大に伴うせん断強度の低下を評価した結果を同図に併せて示す。ここで、 $\phi_{p0}$  は基本長さ  $L_0$  (Bandis らの実験では 6 cm, No.8 のプロファイルでは 10 cm) の供試体のピーク時の摩擦角であり、 $\phi_{pn}$  は長さ  $L_n$  の供試体の摩擦角である。本方法においても、垂直応力が大きいときにせん断強度の低下率は小さくなっており、全体として Bandis らの実験結果の傾向をよく示している。

## 6. まとめ

本研究では、まず、BartonとChoubeyによって提示されたプロファイルを有し、かつせん断方向と直交する方向には凹凸のない石膏不連続面を作成した。これを用いて種々の垂直応力下でせん断試験を行うとともに、試験後の表面形状を計測して、せん断によってアスペリティがどのように破壊されるかを調べた。得られた主な結果は以下のようである。

(1) 石膏供試体のせん断応力-せん断変位曲線では金属供試体のそれと異なって、試験開始直後のせん断応力の鋭いピークは消失する。これは、鋭いピークを生じせしめていたアスペリティが、大きな勾配を有しながら



もその基底長が非常に小さいために、応力集中によって簡単に破壊されることによるものであり、不規則な表面形状を有する不連続面の特有の挙動といえる。垂直応力の増加とともに、この破壊は大きな基底長のアスペリティにまで及び、グレイションは抑制される。

(2) グー지의生成量は垂直応力とともに増加し、表面が平坦な No. 2 においてその量が少ない傾向にあるが、3つのプロファイルの振幅の違いほどには顕著な差異はない。生成量の増加の割合は、材料の一軸圧縮強度で正規化した垂直応力だけでは決定できない。なお、グー지의生成は、せん断-透水実験において不連続面内の流路を閉塞させ、結果として透水性が低下することが指摘されており<sup>15)</sup>、この観点からも今後さらなる実験が必要である。

次に、実験結果をもとにして、表面形状が不規則な不連続面について、ピーク強度が発揮されるときにその不連続面に作用する真の応力を算出する（これは不連続面上の接触面積を求めると同等である）方法を述べた後、不連続面のせん断強度を評価する方法を提案した。本方法は、垂直応力の大きさに応じてせん断強度を支配する斜面の基底長を求め、この基底長を有する斜面の勾配からせん断強度を評価しようとするもので、せん断破壊のメカニズムが十分に考慮されている。3つのプロファイルについてこの方法によって評価したせん断強度は、実験結果とよく一致することがわかった。最後に、本方法によれば、せん断強度の寸法効果の問題にも対処できることを述べ、他の研究者の実験結果との比較によってその妥当性を示した。

謝辞 本研究を行うに当たり、九州大学大学院生、生貞幸治君（現：九州電力（株））および中原和宏君には実験の多くの部分においてご協力いただいた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) ISRM : Int. Symp. Rock Joints, Loen, 1990.
- 2) ISRM : Int. Symp. Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, 1992.
- 3) グッドマン, R. E. (赤井浩一ほか訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, pp.128-165, 1978.
- 4) Lama, R.D. and Vutukuri, V.S. : Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Testing Techniques and Results, Vol. IV, Trans Tech Publications, pp.1-199, 1978.
- 5) ファーマー, I. W. (江崎哲郎・松井紀久男訳) : 岩盤工学の基礎と応用, 鹿島出版会, pp.118-137, 1988.
- 6) Patton, F.D. : Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Int. Congr. Rock Mech., pp.509-513, 1966.
- 7) Ladanyi, B. and Archambault, G. : Simulation of shear behavior of a jointed rock mass, Proc. 11th Symp. Rock

- Mech., AIME, pp.105-125, 1970.
- 8) Barton, N. : Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol.7, pp.287-332, 1973.
- 9) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-54, 1977.
- 10) ISRM : Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, pp.319-368, 1978.
- 11) Tse, R. and Cruden, D.M. : Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, pp.303-307, 1979.
- 12) Yu, X. and Vayssade, B. : Joint Profiles and their roughness parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.28, pp.333-336, 1991.
- 13) 木村 強・江崎哲郎 : 岩盤不連続面の表面粗さ (JRC) とせん断特性, 応用地質, Vol. 33, pp. 255-262, 1992.
- 14) 江崎哲郎ほか : 変位制御型せん断試験機の試作と岩のせん断破壊特性, 日本鉱業会誌, Vol. 100, pp. 391-396, 1983.
- 15) Esaki, T. et al. : Shear-flow coupling test on rock joints, Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech., pp.389-392, 1991.
- 16) Lee, D.-H. and Jiang, C.H. : A new technique for measuring the roughness profile of rock joints, Geotech. Test. J., Vol.14, pp.320-322, 1990.
- 17) 浜島良吉ほか : 不規則波形を有する岩盤不連続部のせん断強度, 応用地質, Vol. 28, pp. 167-182, 1987.
- 18) 木村 強ほか : 垂直応力に依存した岩盤不連続面のせん断挙動と表面形状の変化, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.131-135, 1993.
- 19) Reeves, M.J. : Rock surface roughness and frictional strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, pp.429-442, 1985.
- 20) Yoshioka, N. : Temperature measurement during frictional sliding of rocks, J. Phys. Earth, Vol.33, pp.295-322, 1985.
- 21) Yoshioka, N. : Fracture energy and the variation of gouge and surface roughness during frictional sliding of rocks, J. Phys. Earth, Vol.34, pp.335-355, 1986.
- 22) Power, W.L. et al. : Roughness and wear during brittle faulting, J. Geophys. Res., Vol.93, pp.15,268-15,278, 1988.
- 23) Jing, L. et al. : An experimental study on the anisotropy and stress dependency of the strength and deformability of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, pp.535-542, 1992.
- 24) 吉中龍之進ほか : 岩盤不連続面の強度・変形特性の寸法効果に関する研究, 第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.91-96, 1991.
- 25) Bandis, S. et al. : Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.1-21, 1981.

(1993. 5. 13 受付)

## SHEAR FAILURE OF IRREGULAR ROCK JOINTS

Tsuyoshi KIMURA and Tetsuro ESAKI

In this study, first, shear tests are performed, using plaster joints with different profiles presented by Barton & Choubey (1977). No sharp peak appears in the shear stress-shear displacement curves. This implies that the asperity with the maximum slope in the profile, which might yield a sharp peak in the stress-displacement curve in a push test, is with ease sheared because of stress concentration due to the extremely short base-length. After the shear tests, roughness heights of the joints are measured with a laser displacement meter. The average heights of sheared asperities increase with the normal stress. Finally, a method for predicting the shear strength of irregular joints is proposed, and the validity is checked by comparison with the test results.

---