

# 定圧およびダイレイタンス拘束条件下の 不連続性岩盤のせん断強度特性

谷本親伯<sup>1</sup>・北村義宜<sup>2</sup>・川崎了<sup>3</sup>・宮田健治朗<sup>4</sup>・鈴木淳也<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail: tanimoto@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 大阪大学学内講師 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
(現:正会員 博(工) 北海道大学助教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻)

<sup>4</sup>学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

<sup>5</sup>学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

岩盤のせん断挙動には不連続面の凹凸が大きく関係しており、凹凸と強度・変形特性との関係を明らかにすることは、岩盤のせん断挙動を推定する上で重要である。この凹凸がせん断挙動に及ぼす影響は、せん断試験条件によって大きく異なるが、これまで試験条件によるせん断挙動の違いは十分に明らかにされていない。そこで本研究では自然の状態を保つ不連続面を有する人工供試体を作成し、定圧およびダイレイタンス拘束条件において一面せん断試験を行い、それぞれの試験条件におけるせん断強度特性について考察を行った。特に、せん断中にアスペリティーが破断して変形を起こす状態を定量的に評価する手法を考案し、それぞれの試験条件においてアスペリティーの破断体積とせん断強度の間に高い相関が存在することを見出した。

**Key Words:** rock joint, roughness, shear behavior, direct shear test, breakage of asperity, dilatancy

## 1. はじめに

近年、鉄道、道路等の従来からのトンネル建設に加えて、エネルギー問題に関する関心の高まりから地下発電所、石油・LPガス備蓄施設など地下空間を利用するプロジェクトが重要視されている。これらの施設は岩盤内に施工される場合が多いが、岩盤は土や粘土などのマクロに見れば均質であると仮定できる地盤材料と異なり、岩盤内部に存在する割れ目や節理などの不連続面の性状がその強度および変形特性に大きく影響することが特徴である。よって岩盤を対象とする構造物を設計する際には、これらの特性を十分に把握する必要がある。これまで岩石の力学特性を調べる室内試験には、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験などが多用されてきたが、これらの試験では岩盤特有の不連続面の影響を考慮することが難しく、不連続面を直接せん断する岩石一面せん断試験が必要視されていた。

原位置岩盤において構造物を施工する際に特に問題となるのは、掘削に伴って自由面周辺の応力が解放され、岩盤ブロック同士が不連続面に沿って変形を起こす、いわゆる「緩み領域」の力学挙動である。

「緩み領域」の力学挙動について考えると、掘削を開始した後、支保工を設置するまでの間は、掘削自由面周辺に非弾性域が広がり、岩盤ブロックの不連続面は凹凸の乗り上げを伴う比較的自由的な状態でせん断されると考えられる。次に剛な支保工やロックボルトなどを設置した後は、せん断に伴う岩盤ブロック同士の変位がこれらの支保部材により拘束されることになり、支保設置前とは違った条件でせん断を受けることになると思われる。よって岩盤を掘削した後、支保が設置されるまでのせん断挙動を室内試験で再現するには、不連続面を含む供試体に一定の垂直応力を付与し、せん断に伴う不連続面同士の乗り上げを自由に許す「定圧一面せん断試験」から、そしてロックボルトや支保工を設置した後は、せん断に伴うダイレイションを一定値以下に抑えて供試体をせん断させる「ダイレイタンス拘束一面せん断試験」から考察を行なうことで、「緩み領域」における岩盤のせん断挙動を推測することができる。と期待される。

岩盤のせん断挙動には、岩盤不連続面のラフネスが大きく影響している。これまでラフネスとせん断挙動の関係について様々な研究者が考察を行い、多

くのせん断強度式が提案されている。なかでも Barton and Choubey<sup>1)</sup>は不連続面の形状をラフなタイプからスムーズなタイプへと1から10までの基準化された形状に分類し、対象とする不連続面を0から20までの JRC 値として表現する手法を提案している。またこの JRC 値を用いて、垂直応力によるダイレイタンスーの変化やラフネスのせん断強度を考慮したせん断強度式を提案している<sup>2)</sup>。Patton<sup>3)</sup>は三角波型の規則的な起伏を持つモデル供試体のせん断過程を、垂直応力に対して不連続面同士の滑りが卓越する領域と削れが卓越する領域とに分け、遷移応力を  $\sigma_T$  としてバイリニア型のせん断強度式を提案している。この他にも、Goodman<sup>4)</sup>や Ladanyi and Archambault<sup>5)</sup>によっても、様々なせん断強度式が提案されている。しかし、これらは定圧条件でのせん断強度式であり、ダイレイタンスー拘束条件における強度を評価したものではない。岩盤不連続面の力学挙動を考察するためには、定圧試験に加えて、ダイレイタンスー拘束試験からも考察する必要があると考えられる。そこで、本研究ではそれぞれの条件下において、不連続面を有する人工供試体の一面せん断試験を行い、試験条件によるせん断強度特性の違いに関して、ラフネスを考慮して考察を行った。とりわけせん断中にアスペリティーが破断して変形を起こす様子を定量的に評価する手法を提案し、破断したアスペリティーの体積である破断体積とせん断強度の間に高い相関があることを示す。

## 2. ラフネスの定量化

### (1) Barton の JRC

これまで提案されている様々なせん断強度式のうち、Barton and Choubey<sup>1)</sup>によって示された JRC (Joint Roughness Coefficient) を用いたせん断強度式はよく引用される。

Barton は、北欧を中心とする褶曲や変成作用を強く受けた岩盤から供試体を採取し、非常に高い一軸圧縮強度を有する岩石供試体の一面せん断試験を多数行った結果から、不連続面の表面形状とせん断強度の関係を以下の式により示した。

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left\{ JRC \log_{10} \left( \frac{q_u}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_p$  : ピークせん断強度

$\sigma_n$  : 垂直応力

JRC : 不連続面の表面粗さを示す指標

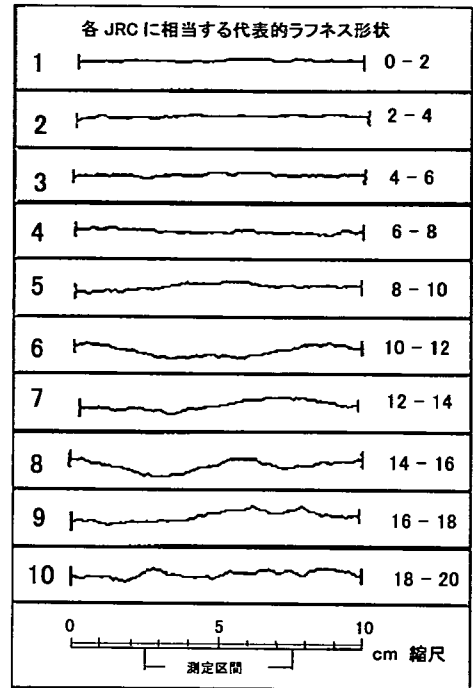


図-1 Barton の JRC

$q_u$  : 不連続面の壁面強度 (一軸圧縮強度)

$\phi_b$  : 残留強度時の内部摩擦角

この式において最も注目すべきことは、せん断強度式にラフネスを表す JRC というパラメータを導入し、JRC をそれに対応する代表的なラフネス形状とともに示した点にある。図-1 に JRC とその代表形状を示す。ここから分かるように JRC は、値の増加とともに形状が複雑になる。しかし実際の JRC は岩盤の不連続面の形状とこの図とを比較して決定されたり、不連続面を含む供試体をせん断させることにより得られるせん断強度から、逆解析的に決定される。Barton のせん断強度式は、実際の不規則な不連続面の形状からせん断強度を推定できるので有用であるが、より信頼性の高い JRC の決定方法が必要とされる。

### (2) スペクトル解析を用いたラフネスの定量化

谷本ら<sup>6)</sup>は不連続面のラフネスを一つの波と考え、波動現象の解析に用いられるスペクトル解析を用いて定量化する手法を提案している。スペクトル解析は、時間-変位の座標系 (時間領域) で定義された関数に対して、フーリエ変換により周波数 (Hz [1/sec]) - 振幅 (mm) の座標系に変換し、それにより得られる周波数特性を利用して、その波の特徴を捉える手法である。

計算手法の概要を示すため、図-2 に示す測線を仮定する。この測線をフーリエ変換を用いて個々の周波数成分ごとに分解すると、図-3 に示すスペクトルグラフが得られる。以下では、このようにして得られる周波数が 1Hz 以下のスペクトル特性から、ラフネスの定量化を行う手法に関して検討する。

本手法は不連続面の表面形状を、単に粗さとしてだけでなく、凹凸の周期性からも考察できる点で優れている。以下ではスペクトル解析により得られるラフネスを凹凸の周期性に着目して考察を行う。まず、パワースペクトル値と周波数分解能の積で表される  $A_s$  値、パワースペクトル方向の重心である重心周波数  $f_G$  値、ラフネスの振幅特性と周期性を同時に表した  $M_s$  値、以上の3つを取り上げ、その特性を考察する。

$$A_s = \sum_{k=0}^{n/2} C_k \cdot \Delta f \quad (2)$$

$$f_G = \frac{\sum_{k=0}^{n/2} f_k \cdot C_k \cdot \Delta f}{A_s} \quad (3)$$

$$M_s = f_G \cdot A_s \quad (4)$$

ここに、 $C_k$  : 有限複素フーリエ級数

$f_k$  : 周波数(Hz)

$\Delta f$  : 周波数分解能

また、 $n$  は  $n=1/\Delta f$  で表される数である。

ここで、不連続面の形状の特性を凹凸の周期性に着目して、それぞれの特性値の物理的意味を考えてみる。まず  $A_s$  値は、それぞれの周波数において観測されたパワースペクトル値の総和を計算することになる。実際のポーリングコアを用いたラフネスのスペクトル解析結果では、図-3 に示すように低い周波数においてパワースペクトル値が大きく、周波数が高くなるにつれ、その値が著しく減少していることが確認される。 $A_s$  値はラフネスがどの程度の凹凸量を持っているかを示しているが、とりわけ低い周波数成分の凹凸量が高く反映されることになる。つまり  $A_s$  値は不連続面の大きな形状変化を表す指標であると考えられる。また重心周波数である  $f_G$  値は、パワースペクトルがどの周波数を中心に存在しているかを示す。 $f_G$  が大きければパワースペクトルが広い領域、小さいときは狭い領域の周波数成分に偏って分布していると考えられる。最後に  $M_s$  値は、重心周波数  $f_G$  値と、ラフネスの平均的な凹凸

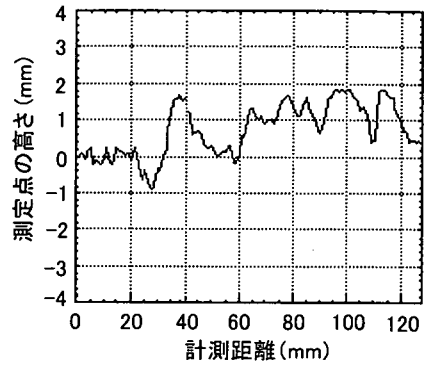


図-2 不連続面の測線形状例

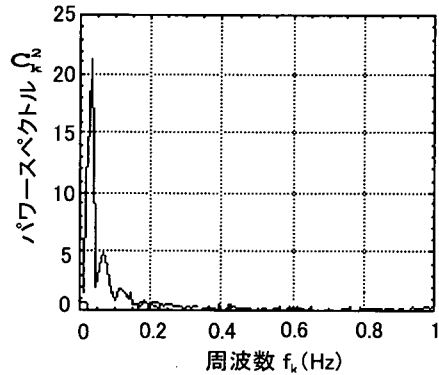


図-3 周波数 - パワースペクトル関係

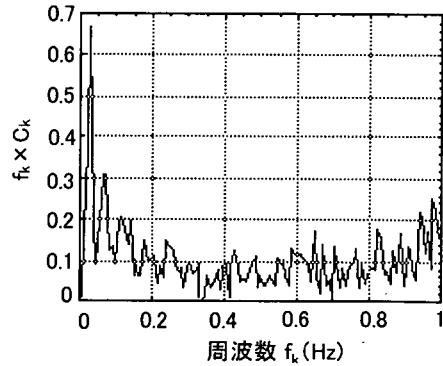


図-4 周波数  $f_k \times C_k$  関係

量である  $A_s$  値とを掛け合わせた値で得られる、ラフネスの周期性と振幅特性とを同時に考慮した粗さ指標である。 $f_k \times C_k \times \Delta f$  の総和で表される  $M_s$  値は、 $C_k \times \Delta f$  の総和で表される  $A_s$  値と異なり、例えば図-3 のパワースペクトル値が、特に 0.2Hz 以下の低い周波数を高く評価するのに対し、図-4 に示す  $f_k \times C_k$  の値は 0.2Hz 以上の高い周波数においても高く評価する。以上から、 $M_s$  値は  $A_s$  値と比較して、高い周波数成分の凹凸を強く反映することになる。つまり  $M_s$  値は不連続面の細かな形状変化を表現すると考えられる。

### (3) JRC との関係

JRC はラフネスを評価する代表的な評価手法として知られている。以下では JRC の形状と、スペクトル解析によって計算されるラフネスの特性値との比較を行った。しかし JRC は紙面に手書きにより描かれた形状であり、これを数値データに変換しないと他の指標との比較は行えない。そこで JRC チャートに描かれている形状をスキャナーにより画像として取り込み、これをコンピューターのスクリーン上に表示させ、次にこの形状を変速フーリエ変換に必要な 0.4mm 間隔でプロットし、その座標を計測することで JRC を数値データに変換した。このデータをもとにして、それぞれの JRC 値に対する  $A_s$  値および  $M_s$  値を計算した。図-5 は JRC 値と  $A_s$  値の比較を行った図である。この図から JRC が増加するにつれて、 $A_s$  値も増加する傾向にあることが確認される。とりわけ JRC の 10~12 と 14~16 の値が大きくなっている。図-1 の JRC チャートの JRC 10~12 と 14~16 を見てみると、それらの測線はうねっており、大きくその形状が変化しているようすが伺える。この形状変化を反映し、 $A_s$  値が高くなったと考えられる。また、図-6 は JRC 値と  $M_s$  値の比較を行ったものである。ここから JRC 値と  $M_s$  値はほぼ直線の相関関係が得られていることが確認される。なお相関係数は 0.96 である。JRC 値、 $A_s$  値および  $M_s$  値の計算精度に関する検討課題が残されているが、以上から不連続面のせん断挙動を支配するラフネスをスペクトル解析を用いて評価する方法が十分に有効であると考えられる。

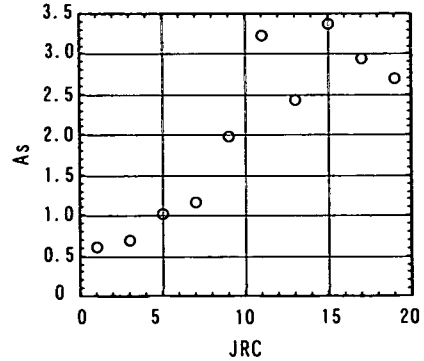


図-5 JRC と  $A_s$  値の関係

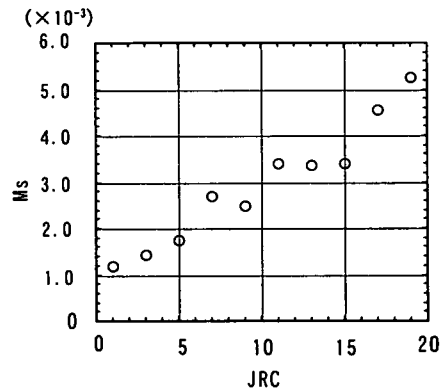


図-6 JRC と  $M_s$  値の関係

## 3. 定圧一面せん断試験における不連続面の表面形状とせん断強度の関係

### (1) 一面せん断試験装置

一面せん断試験装置（誠研舎製）は、せん断箱が上下2つに分割され上箱のみが固定されており、下箱が水平方向に移動する仕組みになっている。水平載荷機構は電気・機械サーボ方式で、垂直載荷機構は一定荷重を与える空圧方式と一定変位を与える電気・機械サーボ方式の2種連動システムを備えている。最大載荷能力は水平 30kN、垂直 20kN であり、水平方向及び鉛直方向の荷重はロードセルにて測定する。垂直変位及び水平変位はそれぞれせん断箱に直接変位計を取り付けて測定した。測定された垂直変位、水平変位、垂直荷重、水平荷重のデータは逐次パソコンに取り込まれる。本試験機の測定精度は、水平荷重及び垂直荷重において 1.0N、水平変位及び

垂直変位において 0.01mm である。

### (2) 供試体

本研究で使用した供試体は、ボーリングコアの不連続面をシリコン印象剤（シージーデンタルプロダクツ製）を用いて型どりし、この形状を石膏（吉野石膏製ニューハイストーン、一軸圧縮強度  $q_u=10.05(\text{MPa})$ 、湿潤密度  $1.85(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、配合比 水：石膏=1：0.24）上に再現したものをを用いている。また、供試体の寸法は、縦×横×高さ=51.5mm×51.5mm×37.0mm である。なお、不連続面同士は隙間なくかみ合っている。

### (3) 表面形状の計測方法

表面形状の計測には、非接触式レーザープロファイラー(TOK-3PR)を用いて計測した。この装置は可動部、計測部、制御部によって構成され、計測されたデータはアンプを介してコンピューターに取り込

まれる。可動部は鋳鉄製の防振台上に XY ステージ (LTS-100XY:シグマ光機製)を固定し、ステージ上には供試体を堅固にかつ再現性をもって固定可能な可動アジャスタを設置している。計測にはレーザー変位計(LB-045:キーエンス製)を用いた。この変位計は焦点距離が  $40\text{mm}\pm 5\text{mm}$ 、分解能は  $4\mu\text{m}$ 、垂直方向の測定可能範囲は $\pm 5\text{mm}$ である。また制御装置には AS-NET(シグマ光機製)を用いている。この装置により XY ステージを  $0.001\text{mm}$  の精度で移動させることができる。

本研究ではこの測定装置を用いて、不連続面の表面形状をせん断方向に  $0.2\text{mm}$  間隔、せん断方向に直交する方向に  $0.5\text{mm}$  間隔で計測を行い、せん断方向に 256 点の測定点を確保した。

#### (4) 試験の概要

不連続面の表面形状とせん断強度との関係进行调查するため、3. (2) に示した方法により様々な不連続面を有する供試体を複数作成し、これに異なった垂直拘束圧を与えてせん断試験を行った。せん断試験は、垂直載荷圧  $0.294\text{MPa}$  において 11 個、 $0.549\text{MPa}$  において 15 個、 $0.804\text{MPa}$  において 11 個の異なる不連続面を持つ供試体を用いて行った。また本試験においてはせん断に伴うアスペリティーの形状変化を調べるため、供試体が  $3\text{mm}$  せん断した時点で全ての試験を終了させた。さらにせん断試験開始前に不連続面の表面形状を 3. (3) に示した計測装置を用いて測定し、2. (2) で示した定量化手法により、それぞれの供試体における  $M_s$  値、 $A_s$  値を算出した。

#### (5) ラフネスインデックスとせん断強度の関係

図-7 に  $M_s$  値とせん断強度の関係、図-8 に  $A_s$  値とせん断強度の関係を示す。図-7 からそれぞれの垂直拘束圧において、 $M_s$  値とせん断強度との相関性は高い。なお相関係数は垂直拘束圧が  $0.294\text{MPa}$  のとき  $0.798$ 、 $0.549\text{MPa}$  のとき  $0.818$ 、 $0.804\text{MPa}$  のとき  $0.812$  である。また図-8 からそれぞれの垂直拘束圧において、 $A_s$  値とせん断強度との相関性は低いと判断される。なお相関係数は垂直拘束圧  $0.294\text{MPa}$  のとき  $0.385$ 、 $0.549\text{MPa}$  のとき  $0.716$ 、 $0.804\text{MPa}$  のとき  $0.288$  である。以上の結果から定圧試験において、不連続面の大きな形状変化はせん断強度に及ぼす影響は小さく、不連続面の細かな凹凸がせん断強度に大きな影響を及ぼすと考えられる。

#### (6) 予測せん断強度とせん断強度実験値の比較

図-6 より JRC 値と  $M_s$  値の間に良好な相関があることから、それぞれの不連続面において計算された

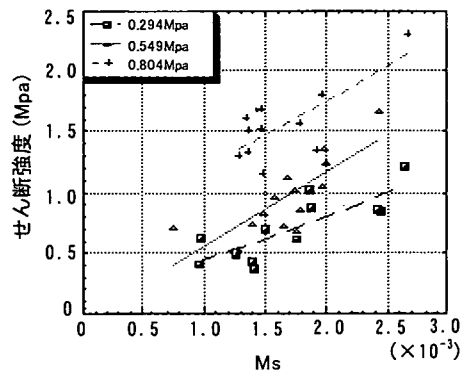


図-7  $M_s$  値とせん断強度の関係

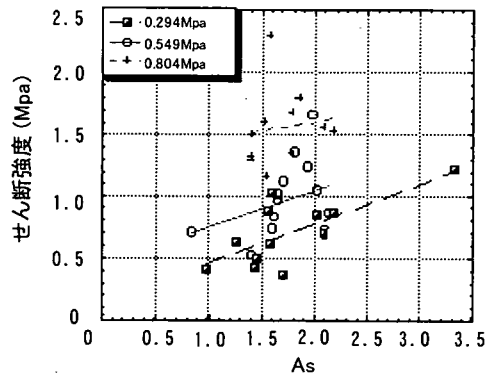


図-8  $A_s$  値とせん断強度の関係

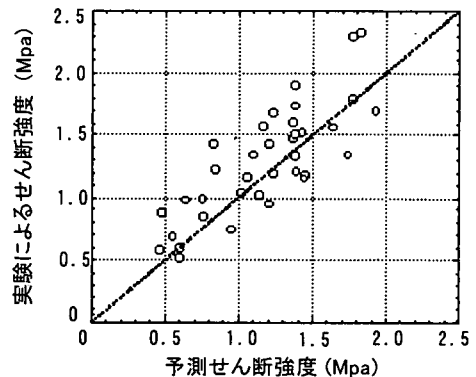
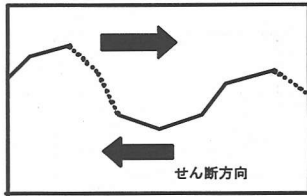


図-9 予測せん断強度と実験によるせん断強度の比較

$M_s$  値を JRC 値に変換し、これを Barton のせん断強度式に代入することにより、せん断強度の予測を行った。なお凹凸を持たない平滑な不連続面をもつ供試体の一面せん断試験結果から、摩擦角  $\phi_b$  は  $38.5$  度、 $M_s$  値と JRC 値の間には図-6 から  $JRC=4460 \times M_s - 3.18$  なる関係がある。図-9 に Barton のせん断強度式より算出された予測せん断強度とせん断強度実験値を比較した図を示す。この図



せん断に対して  
抵抗しない負の傾き  
せん断に対して  
抵抗する正の傾き

図-10 正の傾き・負の傾きの定義

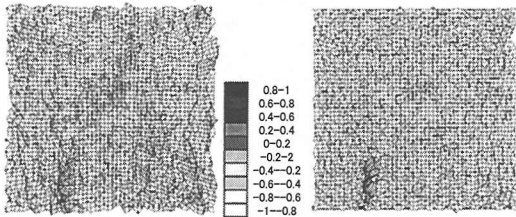


図-11 せん断前の不連続面の傾き分布  
図-12 せん断による不連続面の形状変化

から予測せん断強度とせん断強度実験値の間に高い相関性が見られた。なお相関係数は0.824である。以上から  $M_s$  値を用いてせん断強度を高い信頼性を持って推定できると考えられる。

#### 4. 定圧試験におけるアスペリティーの形状変化とせん断強度の関係

##### (1) 概説

せん断強度と  $M_s$  値の間に高い相関性があることを考えると、高い周波数の細かな凹凸がせん断強度に大きな影響を及ぼしていると考えられる。しかしせん断後の不連続面を観察すると、ごく一部のアスペリティーのみが接触して、その部分が変形し、破断を起こしている様子が確認され、その他のアスペリティーは顕著な変形が確認されなかった。これらのアスペリティーが破断を起こした部分には、せん断中に高い圧力が加わったと考えられ、これらがせん断強度に大きな影響を及ぼしていると考えられる。またその他多くのアスペリティーには顕著な形状の変化が認められないことから、これらはせん断応力には大きく影響を与えないと思われる。そこでせん断前とせん断後の不連続面の形状をレーザープロファイラーを用いて計測し、せん断前後の形状を比較することにより、せん断中に破断を起こす凹凸形状の特定を試みた。また、アスペリティーの破断体積とせん断強度との関係についても考察を行った。

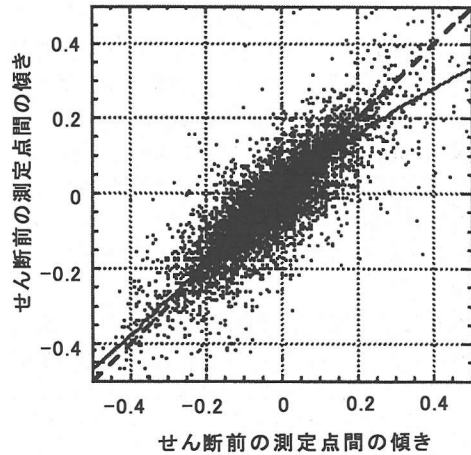


図-13 せん断前後における測定点間の傾きの比較

##### (2) せん断前後におけるアスペリティーの形状変化

せん断試験を行う前の供試体の不連続面の形状と、垂直拘束圧を載荷してせん断させ、せん断応力がピーク値を越えて残留状態に達し、水平方向に3mm変位が生じた後の不連続面の形状をレーザープロファイラーによって計測し、これらの形状を比較することにより、せん断中に破断を起こす凹凸形状の特定を試みた。なお、図-10に示すように、せん断に対して抵抗すると考えられる測定点間の傾きを正、その逆を負と定義する。図-11はせん断前の不連続面における測定点間の傾きの分布を示した図、図-12はせん断前の傾きからせん断後の傾きを減ずることにより、せん断によって破断を起こしたアスペリティーを示した図の一例である。なおこれらの図は正の傾きが大きくなるほどその色が濃く表示してある。図-12から不連続面に存在するアスペリティーは、その傾きが負の場合にはせん断による顕著な形状の変化が認められないが、傾きが正でかつその値が大きいアスペリティーほど、せん断後に形状の変化が顕著であることが確かめられた。また図-13はせん断前とせん断後に計測された個々の測定点における傾きの変化を比較した一例である。後述する図-15のバイリニアモデルを念頭において、図-13に多項式を用いて回帰分析を行うと、同図の実線で示した形状が得られる。ここから正の傾きが大きくなるほど、 $Y=X$ の直線から乖離してくる様子が確認された。つまり測定点間の傾きが正で、かつ傾きが大きいアスペリティーほど、せん断後にその形状変化が顕著であることを示している。以上の傾向をより明瞭に示すために、図-14に複数の供試体を用いて上記と同様の解析を行った結果得られた回

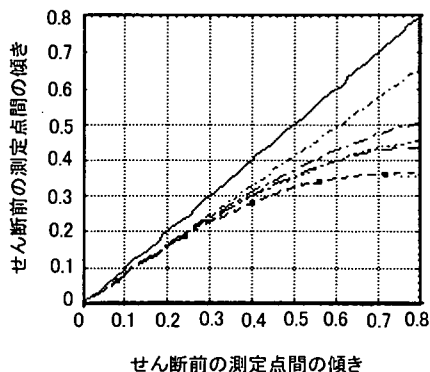


図-14 せん断前後における測定点間の傾きの回帰直線

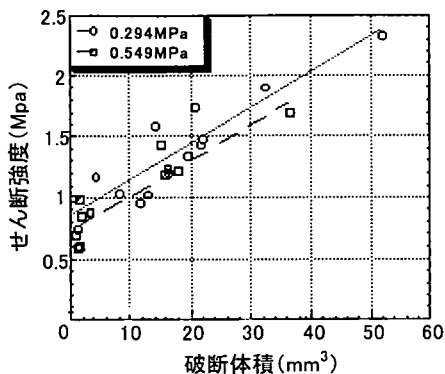


図-16 破断体積とせん断強度の関係

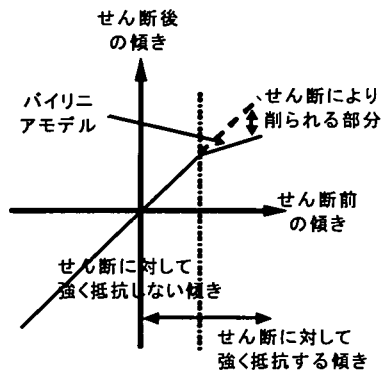


図-15 せん断前後の傾きの変化を示すバイリニアモデル

帰直線の一例を示す。この図からも正の傾きが大きくなるほど、せん断後の形状の変化が著しいことがわかる。これらの回帰直線は4次方程式を用いて近似しているが、データのバラツキが大きく、厳密な回帰直線の決定は困難であった。そこで同図は、ある値より大きな傾きを有するアスペリティーは、せん断に対して強く抵抗することにより、せん断中に変形や破断が生じ、その値よりも小さい傾きを有するアスペリティーは、せん断に対して大きな抵抗は示さないことを表す、図-15のバイリニアモデルに置き換えることができると考えた。なお、このバイリニアモデルの開始点は、図-14に示した回帰曲線の曲率半径が最小となる点から直線をのぼし、この直線と $y=x$ とが交わる点をとした。この計算方法により、図-15のモデルを

$$\sigma_n = 0.294 \text{ MPa のとき} \\ y = x \ (x < 0.40), \quad y = 0.389x + 0.244 \ (x > 0.40) \quad (5)$$

$$\sigma_n = 0.549 \text{ MPa のとき} \\ y = x \ (x < 0.38), \quad y = 0.376x + 0.237 \ (x > 0.38) \quad (6)$$

と決定した。さらに同図の点線と実線との差をとることにより、せん断により破断したアスペリティーを計算できる。図-16に上記の方法で計算されたアスペリティーの破断体積とそれぞれの垂直応力下におけるせん断強度との関係を示す。この図からそれぞれの垂直応力において、アスペリティーの破断体積とせん断強度との間に高い相関が得られた。なお、相関係数は垂直拘束圧が0.294MPaのとき0.917、0.549MPaのとき0.913である。ここから低い垂直応力下での岩盤不連続面のせん断強度に影響を及ぼすアスペリティーは全体のうちごく一部であり、これらを適切に評価することで、せん断強度を精度良く推定できることが分かった。なお、同図中に示されていない $\sigma_n = 0.804 \text{ MPa}$ のときはデータの分布範囲が広くバラツキも大きいため高い相関が得られなかった。高い垂直拘束圧下でのせん断強度の推定が今後の課題である。

## 5. ダイレイタンスー拘束一面せん断試験における不連続面の表面形状とせん断強度の関係

### (1) 試験の概要

不連続面の表面形状と許容ダイレイタンスーがせん断応力に及ぼす影響を調べるため、様々な不連続面を持つ供試体を製作し、これらを許容ダイレイタンスー0.3mm、0.5mm、0.7mmの3つの異なった条件を与えてせん断を行った。使用した供試体は許容ダイレイタンスー0.3mmでは5個、0.5mmでは5個、0.7mmでは3個である。なお供試体の製作方法及びその寸法等は3.(2)に示したとおりである。またせん断試験は、試験開始時に0.345MPaを供試体に載荷してスタートさせた。さらに、それぞれの供試

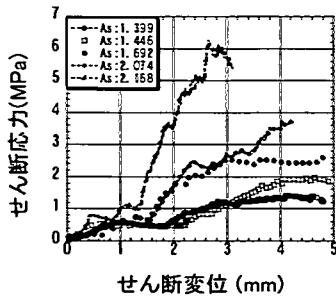


図-17 許容ダイレイタンス0.3mmでのせん断応力とせん断変位の関係

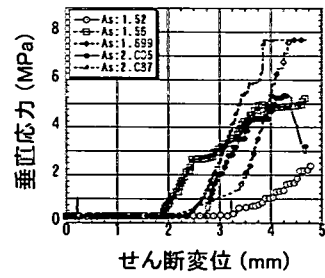


図-20 許容ダイレイタンス0.3mmでの垂直応力とせん断変位の関係

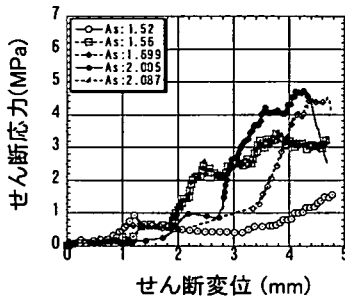


図-18 許容ダイレイタンス0.5mmでのせん断応力とせん断変位の関係

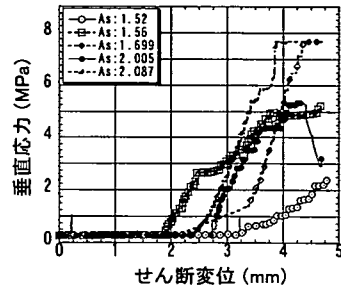


図-21 許容ダイレイタンス0.5mmでの垂直応力とせん断変位の関係

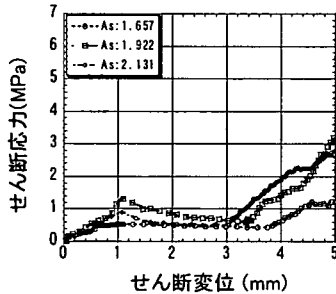


図-19 許容ダイレイタンス0.7mmでのせん断応力とせん断変位の関係

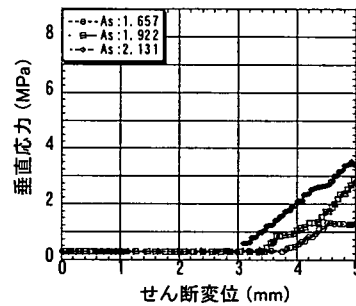


図-22 許容ダイレイタンス0.7mmでの垂直応力とせん断変位の関係

体の表面形状を、試験前にレーザープロファイラーによって、せん断方向に0.2mm、せん断方向に直交する方向に0.5mm間隔で計測し、それぞれの不連続面の $M_s$ 値、 $A_s$ 値を算出した。

## (2) 試験結果

図-17から図-19にそれぞれの許容ダイレイタンスにおける、せん断応力とせん断変位の関係を示す。これらの図から、ダイレイタンスが拘束を受けた時からせん断応力が急激に上昇を始め、おおむねせん断応力はせん断変位が大きくなるにつれて、単調

に増加する傾向が確認された。次に、許容ダイレイタンスが小さいほど、せん断変位が小さい時点で事前に設定した許容のダイレイションに達し、そこからせん断応力が単調に増加することにより大きなせん断応力が得られることも確認された。また、これらに対応した垂直応力とせん断変位の関係を図-20から図-22、さらに垂直変位とせん断変位の関係を図-23から図-25にそれぞれ示す。これらの図には図-17から図-19のせん断変位とせん断応力の関係と同様の傾向がみられ、ダイレイタンスを拘束することにより垂直応力が増加した結果、せん断応力



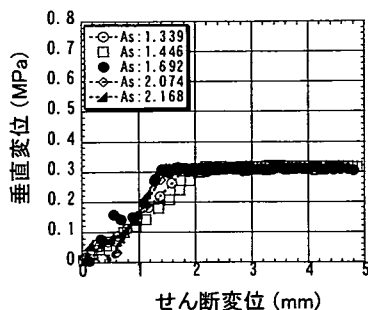


図-23 許容ダイレイタンス0.3mmでの  
垂直変位とせん断変位の関係

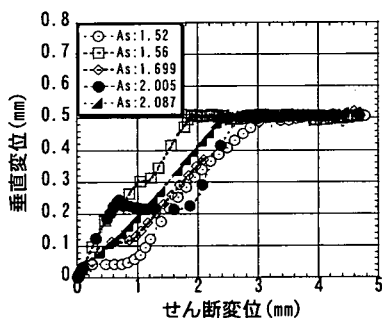


図-24 許容ダイレイタンス0.5mmでの  
垂直変位とせん断変位の関係

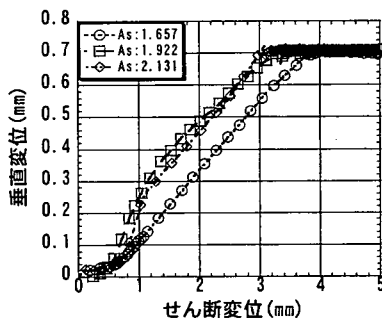


図-25 許容ダイレイタンス0.7mmでの  
垂直変位とせん断変位の関係

が増加したことが確認された。さらに、図-26 から図-27 に  $A_s$  値、 $M_s$  値とせん断変位が4mm生じたときのせん断強度の関係を示す。図-26 から  $A_s$  値とせん断強度との間の相関係数は、許容ダイレイタンスが0.3mmのとき0.839、0.5mmのとき0.890、0.7mmのとき0.999である。ここから  $A_s$  値とせん断強度との相関性は高いと判断される。逆に  $M_s$  値とせん断強度との間の相関係数は、許容ダイレイタンスが0.3mmのとき0.972、0.5mmのとき0.518、0.7mmのとき0.781と算出された。ここから  $M_s$  値とせん断強度

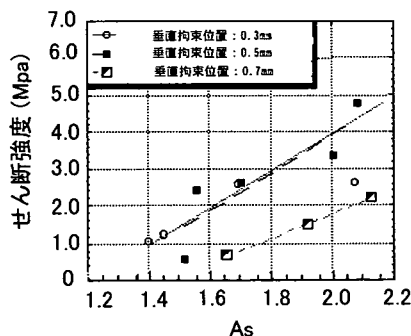


図-26  $A_s$  値とせん断強度の関係

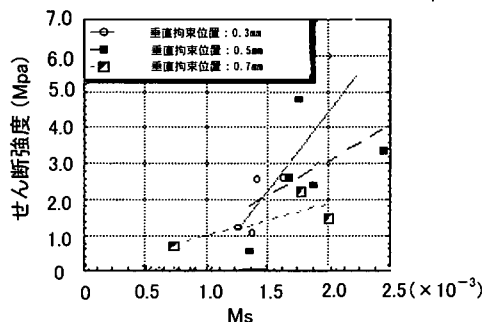


図-27  $A_s$  値とせん断強度の関係

との相関性は低いと判断される。以上の結果からダイレイタンス拘束試験においては、不連続面の大きな形状変化がせん断強度に及ぼす影響が大きく、不連続面の細かな凹凸がせん断強度に及ぼす影響は小さいと判断される。

## 6. ダイレイタンス拘束試験におけるアスペリティーの形状変化とせん断強度の関係

### (1) 概説

ダイレイタンス拘束試験においては、定圧試験と異なり、せん断変位が増加するにつれて、せん断応力が単調に増加する傾向が確認された。このメカニズムは図-28 に示すモデルで説明できると考える。同図のAはせん断を受ける前の状態、Bは水平変位が増したことにより、上部の岩盤ブロックが規定のダイレイションを発生させた直後の状態、CはBに示す状態からさらにせん断が進行し、上部岩盤のアスペリティーと下部岩盤のアスペリティーが接触または破壊を起こしている状態である。Cに示すアスペリティー同士が重なり合っている部分には高い圧力が加わり、この部分が破断を起こして変形することにより互いに密着する。さらにせん断が進行す

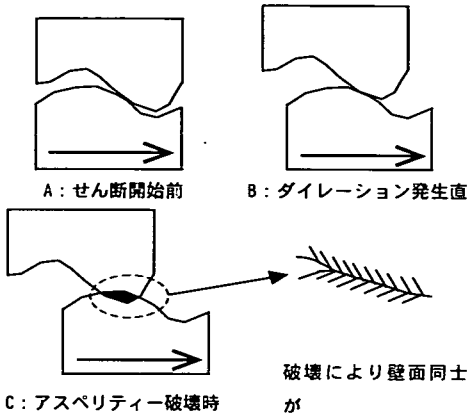


図-28 ダイレイタンスー拘束試験においてせん断強度が発揮されるメカニズム

ることにより不連続面同士が接触する面積が増加し、そのためにせん断に要する抵抗力が増加すると考えられる。以下では、せん断中に破断を起こす凹凸の特定を試み、アスペリティーの破断体積とせん断強度との関係について考察を行った。

(2) せん断に伴うアスペリティーの破断体積の計算方法

せん断の進行に伴って増加するアスペリティーの破断体積を定量的に評価するために以下に示す手法を考えた。図-29 の A に示すように、下部供試体の  $i$  番目の測定点における高さを  $Z(i)$ 、また上部供試体の  $i$  番目の測定点における供試体上端面からの高さを  $Z'(i)$  とし、 $Z(i)+Z'(i)$  の値を供試体の高さ  $H$  とする。また  $a(\text{mm})$  の変位拘束条件で試験を行う場合、B に示した上部供試体が  $a(\text{mm})$  浮いた状態を仮定する。次に上部供試体を固定したまま、下部供試体を  $xx\Delta L$  ( $\Delta L$  はせん断方向の計測間隔) せん断すると、下部供試体の  $i$  番目の測定点 (高さ  $Z(i)$ ) と上部供試体の  $i+x$  番目の測定点 (高さ  $Z'(i+x)$ ) が座標上で対応することになる。このとき上部供試体の高さ  $Z'(i+x)$  と下部供試体の高さ  $Z(i)$  を足し合わせた値 ( $T(i)=Z(i)+Z'(i+x)$ ) が、事前に設定したダイレクション  $a(\text{mm})$  とかみ合った状態での上下供試体の高さ  $H(\text{mm})$  を足し合わせたものよりも大きい場合、アスペリティー同士がぶつかり合い、その部分が変形を起こすと考えられる。いま便宜上  $B'(i)=T(i)-(H+a)$  とし、 $B'(i)>0$  のとき  $B(i)=B'(i)$ 、また  $B'(i)<0$  のとき  $B(i)=0$  とすると、ここから下部供試体が水平方向に  $xx\Delta i$  ( $\text{mm}$ ) せん断したときのアスペリティーの破断体積は

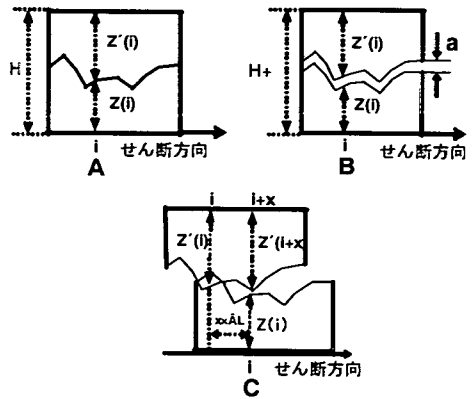


図-29 アスペリティーの破断体積の計算概念

$$V(x) = \sum_{i=1}^{m-x} B(i) \quad (7)$$

で計算されることになる。

(3) アスペリティーの破断体積とせん断強度の関係

6.(2)で示した手法を用いて、5.(2)で試験を行った供試体のせん断変位とアスペリティーの破断体積との関係を図-30 から図-32 に示す。せん断変位とせん断応力の関係を示す図-17 から図-19 と、せん断変位-アスペリティーの破断体積の関係を示す図-30 から図-32 を比較すると、これらの図の間に高い相関性があることが確認される。アスペリティーの破断体積はせん断変位が増加するに従って単調に増加する傾向が 6.(2)で示した計算方法により推定され、これらの増加に伴ってせん断応力が増してゆくものと考えられる。

最後に図-33 はそれぞれの許容ダイレイタンスーにおける、アスペリティーの破断体積とせん断応力の関係を示したものである。この図からアスペリティーの破断体積とせん断応力の関係において、それぞれの許容ダイレイタンスーにおける明確な傾向の違いは確認されなかった。よって同図からダイレイタンスー拘束試験における不連続性岩盤のせん断強度は、許容ダイレイタンスーに関係なく、せん断中に破断を起こすアスペリティーの体積から推定することが可能であると考えられる。本研究において使用した供試体のせん断応力は、図-33 の全ての点を用いた回帰直線 (相関係数: 0.866) から推定することができる。その結果、

$$\tau = 0.0456 + 1.4969 \times 10^{-5} A \quad (8)$$

の式を導くことができ、この式により任意の不連続

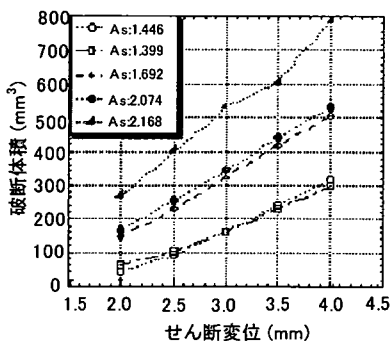


図-30 許容ダイレイタンスー0.3mmでの  
破断体積とせん断変位の関係

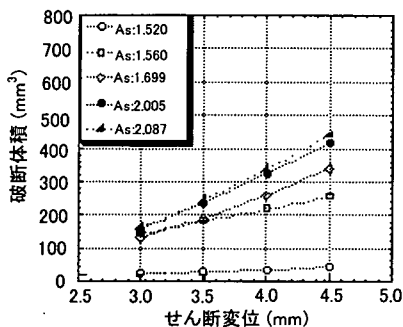


図-31 許容ダイレイタンスー0.5mmでの  
破断体積とせん断変位の関係

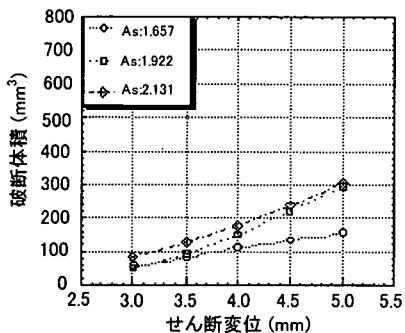


図-32 許容ダイレイタンスー0.7mmでの  
破断体積とせん断変位の関係

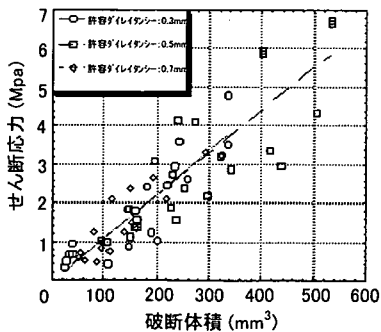


図-33 せん断応力と破断体積の関係

面をもつ供試体のせん断応力が推定できる。ここに  $\tau$  はせん断強度(MPa),  $A$  は単位面積当たりのアスペリティーの破断体積 (mm)である。なお,式(8)は破断を生じるアスペリティーの分布がせん断強度に与える影響を反映していない。また, 同式はせん断変位が 4mm の時におけるせん断強度式であり, さらに実用問題として  $A$  の値をどのようにして求めるか等の課題を残している。

## 7. まとめ

本研究では, 不連続性岩盤を掘削した時に, 掘削自由面近傍に発生する「緩み領域」における岩盤不連続面の力学挙動に着目し, これらの挙動を推測するため, 定圧条件及びダイレイタンスー拘束条件におけるせん断強度特性の違いに関して, ラフネスを考慮して考察を行った。以下に得られた知見を示す。

### (1) ラフネスの定量化に関して

a) スペクトル解析結果から得られる, ラフネスの周期性を考慮したパラメーターとして,  $A_s$  値と  $M_s$  値が有効であることを示した。  $A_s$  値は不連続面の大きな凹凸が強く反映され,  $M_s$  値は不連続面の細かな凹凸が強く反映されていることが分かった。

### (2) 定圧条件およびダイレイタンスー拘束条件におけるせん断強度特性の違いに関して

a) 定圧条件の一面せん断試験において, せん断強度と  $M_s$  値の間に高い相関が見られた。ここから, 定圧試験においてせん断強度に影響を与えるラフネスは, 細かな凹凸であることが分かった。またダイレイタンスー拘束条件の一面せん断試験においては,  $A_s$  値とせん断強度の間に相関が見られた。ここから, ダイレイタンスー拘束試験においてせん断強度に影響を与えるラフネスは, 大きな凹凸であることが分かった。

b) 定圧条件の一面せん断試験では, せん断変位が増加するに伴い, せん断応力が減少するのに対し, ダイレイタンスー拘束条件の一面せん断試験では, せん断変位が増加するにつれて, せん断応力が著しく増加することが分かった。

c) 定圧条件の一面せん断試験では, 付与する垂直拘束圧がせん断強度に大きな影響を与えているのに対して, ダイレイタンスー拘束条件の一面せん断試験では, 許容するダイレイタンスーがせん断強度に大きな影響を与えていることが分かった。

(3) せん断に伴うアスペリティーの変形量とせん断強度の関係に関して

a) 定圧条件における一面せん断試験では、せん断中に不連続面同士が接触する面積は、全体に対してごくわずかであることが分かった。また、せん断時において不連続面同士が接触して破断を起こす体積を解析的に計算する手法を提案し、低い垂直応力下では、破断する体積とせん断強度との間に高い相関があることを確認した。

b) ダイレイタンスー拘束条件での一面せん断試験において、せん断中に不連続面同士が接触して破断をおこす体積を解析的に計算する手法を提案し、破断する体積とせん断強度との間に高い相関があることを確認した。

以上から、掘削を開始後、支保を設置するまでは、岩盤のせん断強度は比較的細かな凹凸によって発揮され、次に支保工を設置した後は、比較的大きな凹凸によってせん断強度が発揮される様子が実験的に確認され、ラフネスがせん断強度に及ぼす影響はせん断試験条件によって異なることが分かった。特に支保を設置して岩盤の変位を拘束すると、ラフネスや拘束する変位によっては、無支保の場合と比較してきわめて大きなせん断強度を期待できることが実験により確かめられた。本研究により得られた知見は、最適なトンネル支保の設計の一助になると考える。

参考文献

- 1) Barton, N. and Choubey, V.: The shear strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mechanics*, vol.10, pp.1-65, 1971.
- 2) Barton, N.R.: Review of a new strength criterion for rock joint in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1-65, 1971
- 3) Patton, F.D.: Multiple Models of Shear Failure In Rock, *Proc. 1<sup>st</sup> Cong. ISRM (Lisbon)*, Vol.1, pp.509-513, 1966.
- 4) Goodman, R. E., Taylor, R. and Berkke, T.L.: A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of SMFD, ASCE*, Vol.94, pp.287-332, 1973.
- 5) Ladanyi, B. and Archambault, G.: Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass, *Proc. 11<sup>th</sup> symposium on Rock Mechanics*, AIME, pp.105-125, 1970
- 6) 谷本親伯, 森岡宏之, 岸田潔: 低拘束圧下での不連続面のせん断特性とラフネスの関係, 第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.127-131, 1991.
- 7) 谷本親伯著: NATM1, 森北出版, pp.147-177, 1984.
- 8) 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, 57-67, 1995.
- 9) 安原英明, 岸田潔, 足立紀尚: ラフネス計測結果を用いた不連続面せん断挙動の推定, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-165, 2000.
- 10) Jeager, J.C.: Friction of Rocks and The Stability of Rock Slopes-Rankine Lecture, *Geotechnique*, vol.21, pp.97-134, 1971.
- 11) アイダン・オメル, 渡嘉敷直彦, 清水泰弘, 川本眺万: 岩盤不連続面表面形状の簡易測定システムについて, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.136-140, 1998.
- 12) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.150-165, 1976

(2001. 3. 26 受付)

## SHEAR STRENGTH OF ROCK JOINT UNDER CONSTANT PRESSURE AND CONSTANT DILATANCY

Chikaosa TANIMOTO, Yoshinori KITAMURA, Satoru KAWASAKI,  
Kenjiro MIYATA and Junya SUZUKI

The shear strength of a rock joint has been focussed by many engineers over several decades. So far as the authors know, there are many publications concerning the shear test under constant normal load and/or stiffness. In consideration of allowable limit of displacement/deformation associated with rock tunnelling, we should pay more attention to the meaning of the shear behavior of rock joints under constant dilatancy than the one under constant normal load and stiffness, which is much far from the reality in rock tunneling with loosening phenomenon. By employing more than 140 specimens which were reproduced from 20 natural joints with different roughnesses, the authors have carried out direct shear tests under both constant pressures and dilatancies.

The breakage of joint asperity was discussed from the point of view standing on the relationship between the loss of asperity and mobilized shear strength. The change of shear strength from the peak to the residual strength has been clarified and the appropriate installation of supporting elements in rock tunnelling was discussed.