

せん断変形過程における岩盤不連続面の 間隙幅分布の評価に関する研究

EVALUATION OF A ROCK JOINT APERTURE DISTRIBUTION UNDER NORMAL AND SHEAR LOADING

三谷泰浩*・江崎哲郎**・浦川文寛***・Mostafa SHARIFZADEH***
Yasuhiro MITANI, Tetsuro ESAKI, Fumihiro URAKAWA, Mostafa SHARIFZADEH

A new evaluation method of joint aperture distribution using surface asperities height is developed and aperture distribution under different normal loads and shear displacements are determined. For this purpose, high resolution laser scanning system is designed and applied. Surface characteristics such as asperities height and slope angle distribution for each halves are determined indicating highly matching between two surfaces. Mean distance between two surfaces from normal loading and dilation data is obtained. Utilizing new evaluation method enabled a clear visualization of aperture distribution during normal loading and shear process. Although increasing normal loading, aperture distributed evenly, surfaces anisotropy causes spatially localization of aperture distribution by proceeding shear.

Keywords: rock joint aperture, GIS, shear property of rock joint, asperity height, aperture visualization

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分や各種エネルギーの地下貯蔵など、これからの深部地下の開発は安全性、経済性、環境上の配慮など、従来の施設と比べて格段に厳しい設計条件が要求される。そのため岩盤の特性を支配する不連続面の力学・透水特性およびそれらのカップリング特性を適切かつ詳細に把握する必要がある。特に不連続面の透水特性については、不連続面の間隙幅分布に大きく影響を受ける。そして、間隙幅は、不連続面に作用する応力状態、不連続面の幾何学的状況などに依存している。これまで、不連続面の間隙を評価する手法は直接的に不連続面の間隙幅を計測する方法と、不連続面を構成する上下面の形状を計測し、その結果を用いて間接的に評価する方法がある。しかしながら、不連続面の間隙幅分布の変化、特に上下不連続面に対して垂直およびせん断方向に相対的な移動を生じる際の挙動を精度よくかつ定量的に評価する手法は確立されていない。

不連続面を直接的に評価する手法とし、Gale¹⁾、Hakami²⁾、Pyrak-nolte ら³⁾は、レジンやウッズメタルを不連続面内に注入し、不連続面の間隙幅分布を評価した。しかしこの方法では、試験体を分解(切断等)して間隙幅を計測するため、ある状態における不連続面の間隙幅の分布を求めることはできるものの、不連続面の動的な変化状況を把握することは不可能である。さらに、注入物の粘性によっては微小な空隙部や閉塞されている間隙にまで注入されないことがあるため、細かな不連続面凹凸の変化まで把握することは難しく、必要な計測精度を確保することは困難である。Kumar ら⁴⁾、Dijk ら⁵⁾は NMRI(Nuclear Magnetic Resonance Imaging)を用いて間隙幅の分布を測定した。Ohtani ら⁶⁾、Bertels ら⁷⁾は CT(Computer Tomography)スキャンにより間隙幅を測定した。CT スキャン

* 正会員 博(工) 九州大学大学院工学研究院 助教授
** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院 教授
*** 非会員 九州大学大学院工学府

や NMRI は前述したような、注入物を用いた計測方法とは異なり、応力が作用しているような様々な状況下においても不連続面の間隙幅分布を求めることができる。しかしながら高解像度で、高精度な計測を行う場合には、装置、操作ともに煩雑なものとなり、経済的にも非常に高価なものとなる。

一方、不連続面表面形状を計測し、その間隙幅分布を求めるような間接的な手法としては、接触式の表面形状計測法と、レーザーやステレオ写真などを用いる非接触式の表面形状計測法がある。Brown ら⁸⁾は不連続面の表面形状を接触式の計測装置を用いて測定し、上下面の形状データを重ねることにより間隙幅の分布を特定した。しかし、接触式の計測装置は計測の精度がプローブの大きさ、形状に支配されること、形状が急激に変化する部分（角度のある部分など）の計測に問題があること、計測面を破壊する可能性があることなどの問題がある。Esaki ら⁹⁾、Iwano ら¹⁰⁾は非接触式のレーザー変位計を用いることにより、接触式の計測装置の問題点を解決した。しかし、このような間接的な不連続面間隙幅の評価方法は、不連続面の表面形状を比較的容易に、かつ高精度に計測できたとしても、間隙幅を評価することが難しく、間隙幅を評価したほとんどの事例が断面2次元として、間隙幅を捉えており、平面2次元としての間隙幅分布の評価を行う際には、まだ解決できていない問題点が存在する。

本論文では、これまでの計測装置がもつ欠点を解決できるように開発した分解能の高いレーザー変位計を用いた表面計測装置を用いて不連続面の表面形状の計測を行う。そして、計測結果を用いて、不連続面間隙幅分布を適切にかつ高精度に評価する手法を提案する。さらに提案した評価手法を用いて実際の岩の不連続面に対して様々な応力状態における不連続面間隙幅分布を GIS（地理情報システム）により評価する方法を提案する。

2. 不連続面の表面形状の計測

(1) 従来の計測手法の問題点

不連続面の表面形状の計測結果から不連続面間隙幅を特定する方法の最大の問題点は、(a)不連続面上下面の位置をどのようにして整合させるのか、また、(b)の上下面の表面形状からどのようにして間隙幅を求めるのか、(c)様々な条件により不連続面の状況が変化した場合に間隙幅分布をどのように表現するかということである。

これまでに提案されている様々な不連続面間隙幅の評価手法では、上記の問題点に対して厳密に考慮されたものはない。本節では特に(a)の問題点を解決するために、計測時の位置精度を高精度に制御する方法と計測データに発生する誤差を最小にする方法について述べる。なお、(b)、(c)については次節以降に述べる。

(2) 計測条件

中国福建省産花崗岩試験体（縦 200 mm×横 100 mm×高さ 80 mm の直方体、人工不連続面）に対して 0.2 mm 間隔で計測を行う。

(3) 計測装置

試験体の表面形状を正確に計測するため、Fig.1 のような計測装置を開発した。本装置は、レーザー変位計

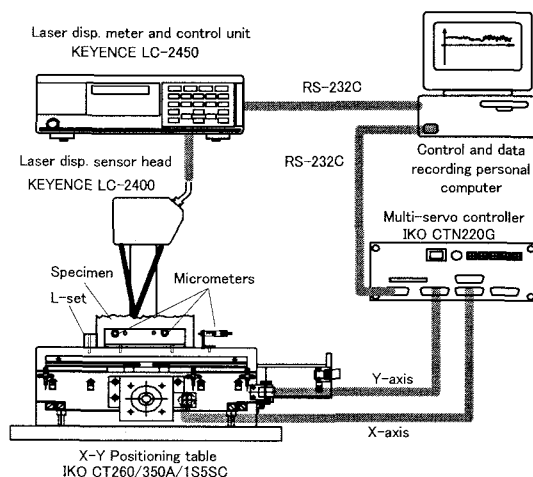
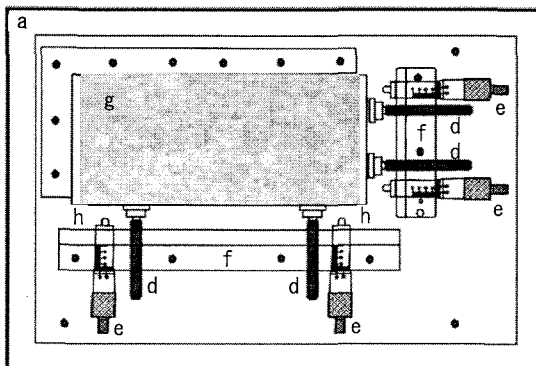


Fig.1 Schematic view of laser scanner system with modified table for joint asperities height measurement.



a) Laser scanner table, b) Modification tools base plate, c) Guide block, d) Fixing screw pins, e) Micrometers, f) L-shape holders, g) Specimen, h) Specimen steel plates
Fig.2 Schematic view of modified laser scanner table.

LC-2450 (キーエンス社製, 最小スポット径 $45\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$ (楕円形), 測定範囲 $\pm 8\text{ mm}$, 分解能 $0.5\text{ }\mu\text{m}$), 精密 X-Y 位置決めテーブル (日本トムソン社製 CT260/350A/IS5SC, ストローク長 $250\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 位置決め精度 $15\text{ }\mu\text{m}$, 繰り返し位置決め精度 $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$), 制御・収録用のコンピュータから構成される。X-Y テーブルおよびレーザー変位計は RS-232C インターフェイスによりコンピュータと接続されており, 双方向通信により制御・収録を行うプログラムを独自に開発し, 不連続面の表面形状を自動計測する。表面形状の計測では, 不連続面上下面を別個に計測せざるをえない。そのため, 不連続面上下面の計測位置を把握し, 間隙幅を評価するためには不連続面上下の位置を開口以前の状態に戻すことが重要となる。そこで, 試験体の X-Y テーブルへの固定方法として Fig.2 に示すように X-Y テーブル上試験体固定用に直角のガイドを設け, 試験体をこのガイドに押し当てたあと, マイクロメーター (最小目盛り 0.01 mm) を取り付け付けたプレートを 2 方向から押し当て, その位置をできるだけ正確にかつ定量的に固定できるようにする。

(4) 表面計測装置の精度の検証

凹凸計測時の機械的な誤差を捉え, 精度を把握するとともに, 所用精度を得るために必要な各設定値を決めるための確認試験を実施する。確認試験は, 試験体の中央部の $20\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ の領域を計測間隔 0.2 mm で同じ領域を 3 回計測する。計測結果を統計処理し標準偏差求め, これを誤差とする。

(i) 試験体を固定する手順

試験体を X-Y テーブル上に固定する際, 直角のガイドブロックに試験体を押し当てるが, 試験体は完全には直角ではないので, 試験体の長辺か短辺のどちらか一方を最初に直角のガイドブロックに押し当てることになる。長辺を初めに当てた場合と短辺を初めに当てた場合の精度を比較するため, それぞれ 3 回の計測を行う。また, 基準値は 3 回の計測の平均値とする。その結果, 長辺を初めに当てた場合の誤差は $3.383 \times 10^{-5}\text{ mm}$, 短辺を初めに当てた場合の誤差は $3.579 \times 10^{-5}\text{ mm}$ となった。この結果より, 試験体は長辺を初めに直角のガイドブロックに当て固定することとする。

(ii) マイクロメーターによる設置位置決め精度

マイクロメーターを用いて試験体の設置位置を微調整する際の精度を調べる。まず試験体を固定し, マイクロメーターの値を記録し, 基準となる計測値を得る。その後, 試験体を一旦取り外し, マイクロメーターの値が予備試験の値と等しくなるように試験体を改めて設置し, 計測を行う。この操作を 3 回繰り返し, 誤差を求める。その結果, 誤差は $2.100 \times 10^{-5}\text{ mm}$ となり, マイクロメーターを用いることで, ある程度設置の誤差を小さくすることができ, 設置時の目安としては十分なものであると考えられる。

(iii) 計測間隔による誤差

計測間隔はテーブルの静止時間により制御されており, 計測装置全体の固有振動数やレーザー変位計の単位時間当たりのサンプリング数の関係で, 計測間隔が計測精度に影響すると考えられる。これを検証するため, テーブルの静止時間を 340 msec から 550 msec まで 30 msec ずつ変化させ, 3 回の計測を行う。また, 基準値は各静止時間での 3 回の計測の平均値とする。静止時間が 400 msec で誤差は $7.96 \times 10^{-6}\text{ mm}$ となり, 最小となったことから, テーブルの静止時間は 400 msec に設定する。

(5) 誤差の補正

得られた不連続面表面高さの計測データには表面計測装置が持つ機械的な誤差の他に, 計測時に不可避免的に発生する誤差が含まれる。1 つが試験体の設置条件の誤差であり, マイクロメーターによる位置精度の向上はあくまでも目安であり, 人為的な誤差は避けられない。さらに岩種の違いから, レーザー反射光の受光による計測エラーが含まれており, これらの誤差に対して補正を行う必要がある。

(i) 試験体の設置条件の誤差

上下面の計測を別個に行うことにより, 試験体の設置条件の誤差が発生する。これは Fig.3 に示すように, X-Y

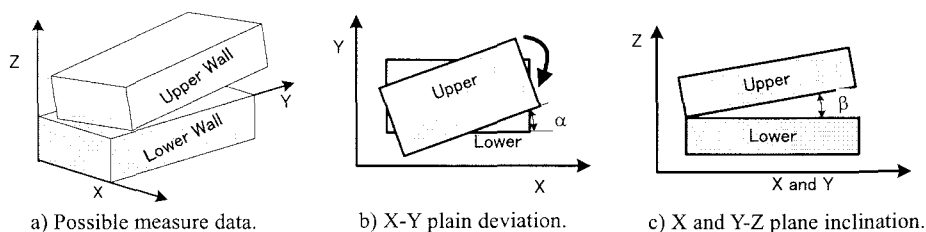


Fig.3 Error which originates from the installation on the X-Y table

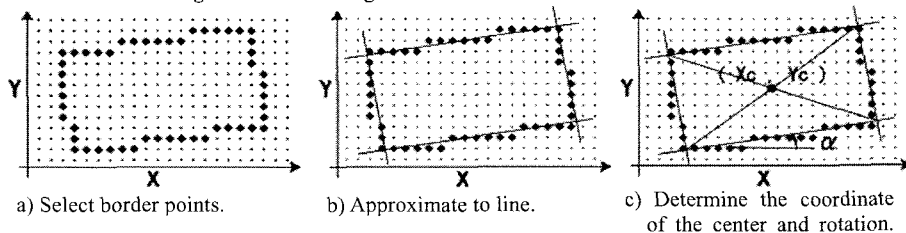


Fig.4 Procedure to determine the position of the measured joint on X-Y plane.

平面上の設置位置の誤差 (Fig.3b), 不連続面の傾きの誤差 (Fig.3c) の2項目に分類できる。

不連続面上下の X-Y 平面上の設置位置の誤差は, 試験体作成時に面の平滑性は高精度で保持されており, 上下面の輪郭は等しいため, X-Y 平面上の上下面の中心座標および回転角から特定することができる。また, 不連続面の中心座標および回転角は以下の手順で特定する。

試験体のへりから 1 mm 外側, すなわち縦 202 mm×横 102 mm の範囲を計測する。計測したデータのうち, 試験体上の点と試験体から外れた点では, その計測値は大きく異なる。これを利用し, 試験体の端部となる点を, 抽出する (Fig.4a)。抽出した点を最小二乗法により直線近似し, 試験体の4辺を求める (Fig.4b)。この4辺および4辺の交点から試験体の X-Y 平面上での中心座標, 回転角を求める (Fig.4c)。不連続面の傾きの誤差は, 計測した表面高さのデータを最小二乗法で平面の式に近似することにより, 上下面の平均平面から特定できる。

計測の結果, 上下面の X-Y 平面上の設置位置は, 上面: 中心座標 (100.969 mm, 51.088 mm), 回転角 -0.060° , 下面: 中心座標 (100.990 mm, 50.849 mm), 回転角 0.082° であった。上面の回転角が下面のそれより小さいことから, 下面の計測データを平行移動, および回転させ, 上下面の中心座標, 回転角が一致するように補正を行う。また, 上下面の平均平面は, 上面 $Z = -0.00006X + 0.00022Y + 0.89518$, 下面 $Z = -0.00005X + 0.00017Y - 1.37830$ である。下面の方がより水平に近いため, 上面の計測データを補正し, 上下面の平均平面を一致させる。

(ii) 計測エラー

不連続面には反射率の小さい黒雲母や, 傾斜角の大きい部分が含まれている。このような場所では, レーザー変位計の性能上, 計測不能, あるいは正しく計測されない場合がある。本計測装置では計測不能の点は 99.9999 の値が出力される。この点に対し, 周囲 8 点の値を用い, 補正する点までの距離の-1 乗を重みとした重み付き平均で補正する。さらに, 隣接する点からの高低差の標準偏差を計算し, その5倍を基準値として設定する。隣接する4点との高低差全てがこの基準値を越える点を正しく計測されていない点とする。この点の補正も, 計測不能の点と同様の方法で補正を行う。

(6) 不連続面表面の幾何学的分布特性

最終的に得られた上下不連続面の表面形状データから, GIS を利用して幾何特性の定量的な分析を行う。Fig.5(a)に上下面の高さの分布, Fig.5(b)に高さのヒストグラム, Fig.5(c)に傾斜角のヒストグラムを示す。不連続面表面の高さの分布は, ほぼ正規分布に従い, 傾斜角の分布はほぼ対数正規分布に従う。また, 上下面の幾何特性の類似性さらには GIS による不連続面の可視化, および, 空間分析の結果から, 上下面の形状が非常に類似していることがわかる。

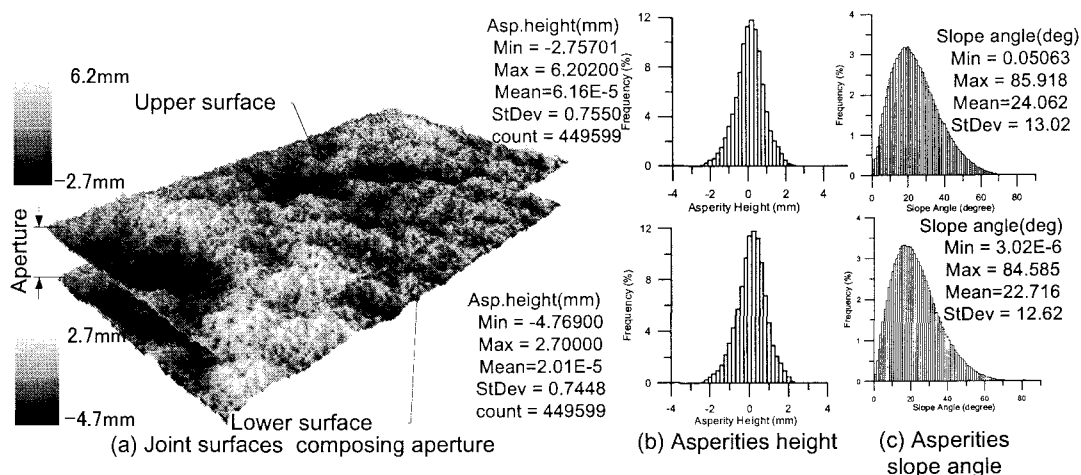


Fig.5 Upper and lower surface asperities height, and slope angle.

3. 平均間隙幅の特定

不連続面上下の位置関係は、間隙幅が初期の垂直荷重に非常に敏感であり、無負荷状態における不連続面の間隙幅分布を実験で直接的に計測することは困難であるため、不連続面の垂直載荷実験（0.1 MPa から 10 MPa まで載荷）の結果から得られる不連続面全体の平均間隙幅を用いて、上下面の相対的な位置関係を求める。

載荷曲線（曲線 a）のうち、実験から得られたデータ（ $\sigma_n < 3$ MPa）を、最小二乗法を用いて双曲線関数で近似し、垂直応力が無負荷および 0.1 MPa 以下の状態における垂直変位（曲線 a'）を求める。また、載荷曲線（曲線 a）は垂直応力が大きくなると不連続面が閉塞し、顕著な線形性を示し垂直剛性がほぼ一定となる。これは、不連続面の垂直剛性が岩石のインタクト部およびせん断箱の垂直剛性と比べて非常に小さいためであり、線形部分の垂直剛性は岩石インタクト部およびせん断箱の垂直剛性とみなすことができる。そこで、高い垂直応力部分（ $\sigma_n > 8$ MPa）の実験データを直線で近似し、その傾きを岩石インタクト部分およびせん断箱等実験装置の垂直剛性とする（直線 b）。曲線 a および曲線 b を原点に移動させることにより、載荷実験の垂直変位（曲線 a₀）と岩石インタクト部およびせん断箱の変形量（直線 b₀）を求めることができる。

不連続面の垂直載荷実験で測定される垂直変位は、不連続面の非線形的変形と岩石インタクト部や実験装置の線形的変形和であるので、この垂直変位の曲線 a₀ から岩石インタクト部およびせん断箱の変形量を示す直線 b₀ を差し引くことで、各垂直応力における不連続面のみの変形量（曲線 u_n）を求めることができる。

この曲線を Bandis ら¹¹⁾の提案する双曲線関数で近似し、式(1)を得る。漸近線である不連続面の最大閉塞量 V_m を式(2)のように求める。垂直応力がゼロの場合の不連続面の初期間隙幅をこの最大閉塞量 V_m に等しいと考え、

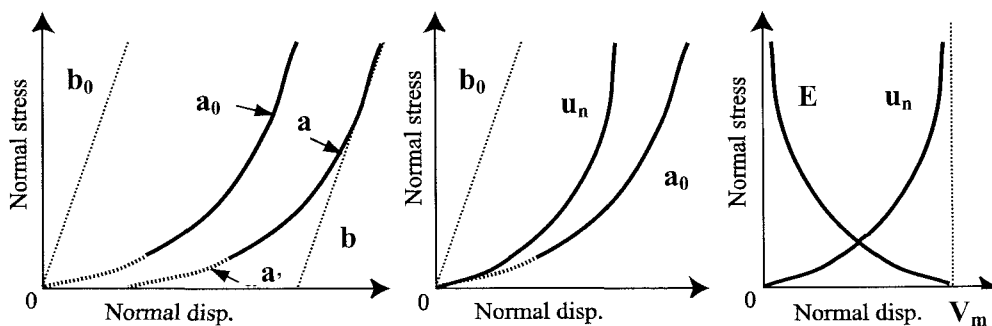


Fig.6 Concept of procedure for initial aperture determination.

最大閉塞量から不連続面の垂直変形量 u_n を引くことにより、せん断前の不連続面がかみ合った状態における垂直応力に応じた平均間隙幅 E (式(3)) を得る。以上により求めた平均間隙幅 E を、Fig.7 に示す。

$$\sigma_n = \frac{u_n}{a - bu_n} = \frac{u_n}{0.12274 - 1.2442 \cdot u_n} \quad (1)$$

$$V_m = \sigma_n \lim_{\infty} u_n = \frac{a}{b} = 0.0986 \quad (2)$$

$$E = V_m - u_n = \frac{0.0986}{1 + 1.244 \sigma_n} \quad (3)$$

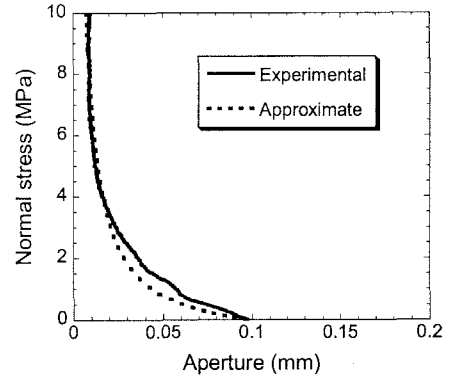


Fig.7 Initial aperture vs. normal stress curve.

4. 間隙幅の分布の特定

(1) せん断前の間隙幅の分布

せん断前の不連続面の間隙幅分布は以下のように求める。上面のグリッドを下面のグリッドに一点が接触する状態から近づけ、全メッシュの間隙幅の平均値がモデルの初期状態の間隙幅（最大閉塞量 V_m に等しい）に一致するように上下不連続面の位置関係を決定する。その際、オーバーラップした領域の間隙幅はゼロとし、不連続面の凹凸はそれまでの载荷履歴により塑性変形を生じているものと考え、上下不連続面の高さはオーバーラップ量の中央値で置き換え、不連続面の高さを再調整する。次に初期状態から垂直応力が载荷された状態での間隙幅の変化を前述したモデルにより求め、全メッシュの間隙幅の平均値が求めた間隙幅となるよう、上面グリッドを下方へ移動させる。その際オーバーラップした領域の凹凸は垂直応力の载荷により弾性変形を生じているものと考え、上下不連続面の高さは変更しない。このような処理を GIS のラスターデータとして処理することにより、得られた間隙幅の分布を視覚化さらには、凹凸の接触量などを定量的に取り扱うことができる。不連続面に 1 MPa, 3 MPa, 6 MPa, 10 MPa の垂直応力を载荷した状態を再現し、不連続面の間隙幅分布およびそのヒストグラムを求めた結果を Fig.8 に示す。ヒストグラムは基本的にポアソン分布に従っており、垂直応力の増加とともに接触領域は増加し、間隙幅が減少する。特に間隙幅の分布は上下面がかみ合った状態で、一部不連続面作成時に剥離したと思われる箇所を除き、ほぼ一様に分布しており、自然の不連続面と比べて、接触率が比較的大きい²⁾。

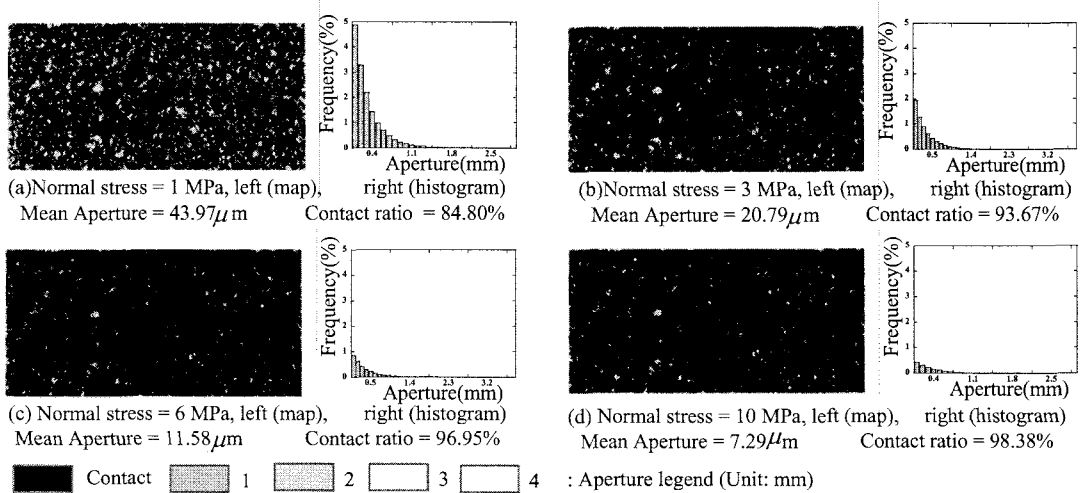


Fig.8 Initial aperture distribution under normal stress.

(2) セン断変形時の間隙幅の分布

せん断変形時における間隙幅の分布は、せん断前の上下面の表面形状データおよび上下面の位置関係、そして実験より得られたせん断による垂直変位の変化 (Fig.9) から、GIS を用いて次のように特定する。ただし、実験では、試験体上部のせん断に伴う回転を制御しており、試験体上部と下部は平行状態を維持した状況でせん断されている。

せん断挙動は上下面のグリッドを相対的に移動させることで表現し、せん断前の状態から上面グリッドを水平方向に移動させる。さらにこのとき、ダイレーションに応じて上面不連続面を垂直方向に移動させる。不連続面の壁面強度は 170 MPa であり与えた垂直応力 3 MPa の条件下では不連続面凹凸の破壊はほとんど生じないと考えられることから、せん断により不連続面は弾性変形するとし、せん断中も不連続面は破壊せず、せん断前の形状を保つものとする。また、上下の不連続面は平行性を保つようにする。

Fig.10 は垂直応力 3 MPa, セン断変位 1 mm, 3 mm, 6 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm での間隙幅の分布とヒストグラムである。せん断変位 1 mm では未だ約半分の領域が接触している。所々に、せん断に対して直交する方向に長い接触が集中した領域が現れてくる。3 mm になると接触領域が独立した細長い縞状になり、およそ 20 mm 程度の間隔でかつせん断方向に対して垂直な方向に分布している。このような現象がせん断時の異方性が生

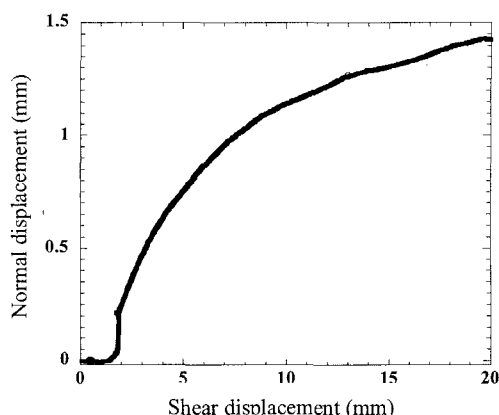


Fig.9 Dilation curve (Normal disp. vs. shear disp.).

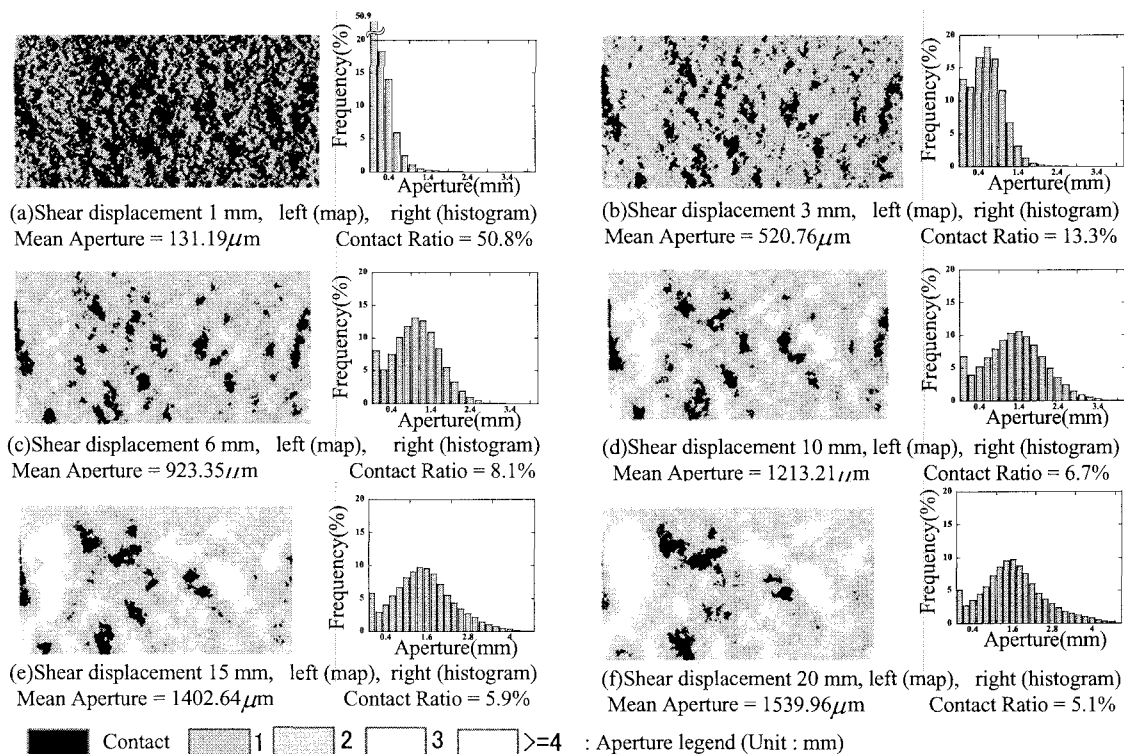


Fig.10 Change of aperture distribution under shear process.

じる原因であると考えられる。さらに変位が増加するとこの縞状の接触部分は面積が小さくなり、せん断変位が10～20mmになると接触領域が約5%と大きく減少して局所的に集中する結果となる。

5. 結論

本研究では、せん断変形過程における不連続面の間隙幅分布を定量的に評価する手法を提案した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 過去の多くの研究では不連続面を垂直2次元断面で取り扱っているのに対し、本研究で提案した手法は、0.2mmの格子状の計測を行い、面的に(3次元的に)不連続面を取り扱うことができる。
- (2) 過去の研究は垂直変形時の限られた状態のみを取り扱っているが、本研究では回転を含めたせん断変位の増加過程での間隙幅の分布を評価することができる。
- (3) 不連続面の間隙幅分布は、せん断前の上下面がかみ合った状態では一様に分布し、接触率は大きい。しかしながらせん断が進むにつれ、接触領域は減少し、せん断に対して横方向に長い接触が集中した領域が見える状態、接触領域が独立した縞状に存在する状態、接触領域が大きく減少して数箇所に集中する状態へと変化することが明らかになった。

参考文献

- 1) Gale, J. E., Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties, Proceedings of the 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 1213-1222, 1987.
- 2) Hakami, E., Aperture distribution of rock fractures, Ph.D. thesis, Division of Engineering Geology, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1995.
- 3) Pyrak-Nolte, L. J., Myer, L. A., Cook, N. G., Witherspoon, P. A., Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, pp. 225-231, 1987.
- 4) Kumar, A. T., Majors, A. P. and Rossen, W., Measurements of aperture and multiphase flow in fractures with NMR imaging, SPE Form. Eval., pp. 101-107, 1997.
- 5) Dijk, P., Berkowitz, B., Investigation of flow in Water saturated rock fractures using nuclear magnetic resonance imaging (NMRI), Water Resour. Res., Vol. 35, No.2, pp. 347-360, 1999.
- 6) Ohtani, T., Nakashima, Y., Nakano, T., Muraoka, H., X-Ray CT imaging of pores and fractures in the Kakkonda granite, NE Japan, Proceedings of the World Geothermal Congress, pp.1521-1526, 2000.
- 7) Bertels, S. P., DiCarlo, D. A., Blunt, M. J., Measurement of aperture distribution, capillary pressure, relative permeability, and in-situ saturation in a rock fracture using computed tomography scanning, Water Resour. Res., Vol. 37, No.3, pp. 649-662, 2001.
- 8) Brown, S. R., Scholtz, C. H., Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, J. of Geophys. Res., Vol. 90, No.B14-12, pp.575-582, 1985.
- 9) Esaki, T., Ikusada, K., Akikawa, A., Surface roughness and hydraulic properties of sheared rock, Proceeding of the Fractured and Jointed Rock Masses, pp. 393-398, 1995.
- 10) Iwano, M., Einstein, H., Laboratory experiments on geometric and hydromechanical characteristics of three different fractures in granodiorite, Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics, Vol. 2, Rotterdam: Balkema, pp. 743-50, 1995.
- 11) Bandis, S. C., Lumsden, A. C., Barton, N. R., Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 6, pp. 249-268, 1983.
- 12) Mitani, Y., Esaki, T., Zhou, G., Nakashima, Y., Experiments and simulation of Shear-Flow Coupling properties of rock joint. Proceeding of the 39th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 1459-1464, 2003.