

岩盤不連続面の力学的挙動および表面形状フラクタル特性の評価

Mechanical Behavior and Surface Fractal Characteristic of Rock Joints

永家 健司*・蒋 宇静**・棚橋 由彦**・肖 俊***・山下裕司****

Kenji NAGAIE, Yujing JIANG, Yoshihiko TANABASHI, Jun XIAO and Yuuji YAMASITA

The stability and deformation behavior of various underground openings and rock slopes are controlled by the shear strength of rock joints. The surface roughness of joints, which could be damaged by stressing of asperities and sliding during shearing process, has critical influence on the shear behavior, it is necessary to evaluate change of surface roughness in process of shearing. In this research, direct shear tests were carried out under constant normal stiffness condition. The change of joint surface roughness has been determined by using the fractal dimension method. Analysis of experimental results revealed a correlation between shear behavior, fractal dimension, shear stiffness and gouge production.

Keywords : direct shear test, roughness, shear strength, constant normal stiffness, fractal model

1. はじめに

近年、放射性廃棄物の地層処分やエネルギーの地下貯蔵など深部地下空間の開発・利用が注目されている。地下空間の開発は、構成要素である岩盤の剛性、密閉性、耐久性、隔離性などの特徴を活用するものであり、これらの特徴により自然社会環境へ及ぼす影響を極力抑えることが重要である。一方で、地下は一度開発を行うと、元の状態に戻すことが困難になるという不可逆性を有しているため、その設計、施工および維持管理については、適切な対策を施す必要がある。これらの基礎的な情報として、力学、透水、熱特性などの岩盤の諸特性を正確に把握する必要があるが、これらの特性は、岩盤中に存在する不連続面に支配されるため、不連続面の力学特性、透水特性およびこれらの連関特性を見出すことはきわめて重要である¹⁾。しかも、現場によって不連続面の影響は様々であるので、これらを実際に試験して評価するための技術が確立されなければならない。

岩盤不連続面のせん断挙動に影響を及ぼす要因の一つとして、不連続面の表面形状が挙げられる²⁾。不連続面の粗さや凹凸の局所的な傾斜の状況はせん断特性に大きな影響を及ぼすため、せん断前後における表面形状の変化を定量的に評価する方法が必要となる。岩盤不連続面の表面形状特性(ラフネス)とせん断強度との関係についての研究は従来より数多く行われているが、主観や経験に左右されやすいものが多かった³⁾。また、せん断強度は不連続面の表面形状特性に大きく支配されるが、この両者の関係はまだ明らかにされていないのが現状である。

*	学生員	長崎大学大学院	生産科学研究科
**	正会員	長崎大学	工学部社会開発工学科
***	正会員	日本学術振興会特別研究員	
****	正会員	九州電力(株)	総合研究所

本研究では、深部に位置する地下空洞を対象とする場合の不連続面がかみ合った状態から、大きなせん断変形(残留域)までせん断試験を実施し、せん断過程における力学的挙動を調べるとともに、せん断前後の表面形状の変化を把握するために、新しいフラクタルモデルによる評価方法の提案を行い、そのフラクタルパラメータを用いて表面形状特性とせん断挙動との関係を明らかにする。そして、表面形状を計ることによりせん断応力を求め、現場でせん断試験を行わずに推測し、 C 、 ϕ など物性値を求め、将来予測をすることを目的とする。

2. 岩盤不連続面の力学的特性試験法

(1) 試験装置

単一不連続面の力学的特性に関する代表的な室内試験法には、垂直荷重における変形特性を求める垂直荷重試験と、せん断強度特性を求める一面せん断試験が挙げられる¹⁾。既往研究では、不連続面に作用する垂直応力をせん断過程において一定とする、いわゆる垂直応力一定(CNL)でのせん断試験が一般的に行われているが、深部地下やロックボルト等によって補強される亀裂性岩盤の場合、不連続面の表面形状の変形や損傷に伴うダイレイションの発生により周辺岩盤からの拘束が変わるため、不連続面に作用する垂直応力が一定になることはあり得ない。そこで、周辺岩盤からの拘束効果を考慮した岩盤不連続面の力学的特性を適切に求めるために、周辺岩盤の垂直剛性の自動制御ができる試験装置⁴⁾(図-1 参照)を用いて、垂直剛性一定(CNS)でのせん断試験を行う。垂直荷重及びせん断荷重(最大 400kN 荷重)ともに電気・油圧サーボ制御方式で、マイクロコンピュータによりコントロールできる。せん断過程において生じたダイレイションを垂直剛性に基づく垂直変位のフィードバックと照合させながら、2本の垂直ジャッキ荷重の独立制御をパソコン上でほぼリアルタイムで実現することができる。なおせん断途中の垂直応力、せん断応力、垂直変位、せん断変位は、図-1の中に示した圧力計と変位計によって計測記録される。

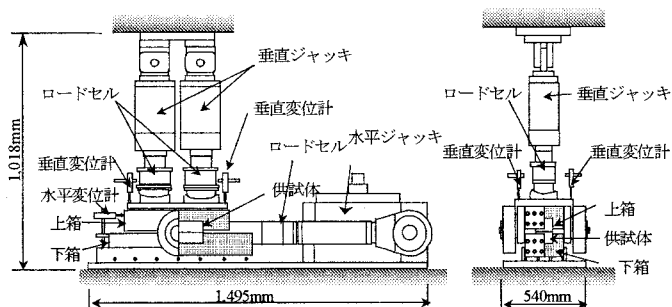


図-1 不連続面一面せん断試験装置の概要

深部に位置する地下空洞等を対象とする場合は、垂直剛性一定(CNS)とする一面せん断試験により不連続面のせん断強度を求めるべきであることが先に指摘されているが、周辺岩盤の変形特性を反映した垂直剛性(k_n)は以下の式によって決定することができる⁵⁾。

$$k_n = E / (1 + \nu) r \quad (1)$$

式中、 E 、 ν は周辺岩盤の弾性係数とポアソン比、 r は不連続面のダイレイションの影響を受ける範囲である⁵⁾。垂直剛性 k_n の決定は弾性係数に依存するが、今回軟岩～中硬岩相当を想定し、ポアソン比 ν を0.23、剛性の影響を受ける範囲 r を3mとし、その範囲の中から垂直剛性 k_n を決定した。なお、本研究での模擬供試体の弾性係数は、 $E=25.4\text{GPa}$ であり、中硬岩相当の模擬供試体である。

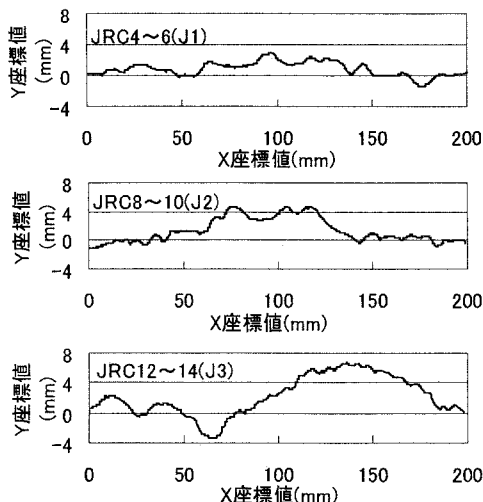


図-2 供試体表面の凹凸の大きさ

(2) 岩盤不連続面供試体

供試体は、14 日気中養生後の一軸圧縮強度が $\sigma_c=68.0\text{MPa}$ の中硬岩相当の供試体(石膏・水・遅延材配合)を用いた。供試体の不連続面寸法は長さ 20cm、幅 10cm であり、表面形状は、ISRM 指針に示した JRC 値(節理の粗さ係数)のプロファイル⁶⁾に基づいて作成した。図-2 にせん断前の供試体の表面形状測定結果を示す。供試体の長手方向に表面形状 JRC=4~6 (J1)、JRC=8~10(J2)、JRC=12~14 (J3)の3種類を測定した。表面形状の最大高低差(最高点-最低点)は、J1、J2、J3 それぞれ、4.2mm、5.88mm、10.12mm となった。

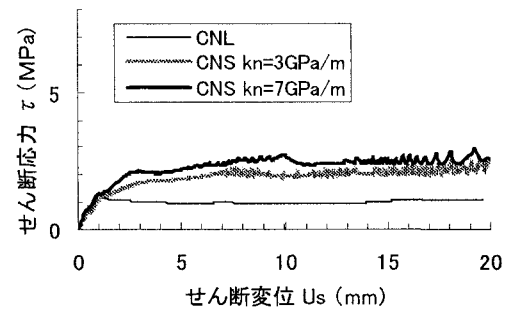
(3) 試験ケース

試験ケースは初期垂直応力 σ_{no} と垂直剛性 k_n で決定した。初期垂直応力 σ_{no} は大深度から比較的土被りの浅いケースを想定し、10MPa を最大として 2、5MPa の 3 パターン、垂直剛性を CNL 試験、CNS 試験($k_n=3、7\text{GPa/m}$)、JRC 値を 4~6(J1)、8~10(J2)、12~14(J3)とした計 27 ケースの実験を実施した。せん断速度は 0.5mm/min である。

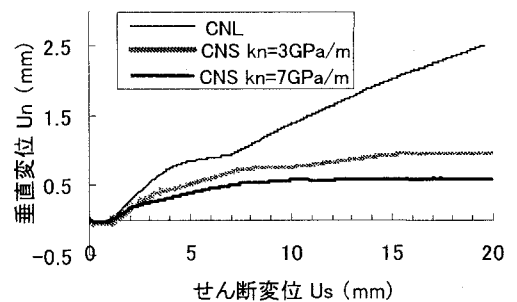
(4) せん断試験結果

図-3 にせん断挙動の試験結果の一部を示す。一般に、垂直剛性を考慮していない場合(CNL)は、ピークせん断強度後にひずみ軟化を生じて残留状態に至るが、図-3(a)を見ると、深部地下を想定した垂直剛性を考慮している場合(CNS)には、ピークせん断強度後に、ひずみ硬化を示すようになり、CNL と CNS では残留強度に差が大きく生じることがわかる。このせん断挙動の違いは、せん断過程における垂直変位及び垂直応力の関係から理解できる。すなわち、垂直剛性を考慮していない場合は、不連続面表面のラフネスの乗り上げに伴い垂直変位が周囲からの拘束を受けず顕著に増加するのに対し、図-3(b)のダイレーションの比較と図-3(c)の垂直応力の変化に示すように、ダイレーションの発生に伴って周囲から大きな拘束を受けるため、垂直変位が前者よりも抑制される。その結果、垂直応力が垂直変位に比例して増大する。

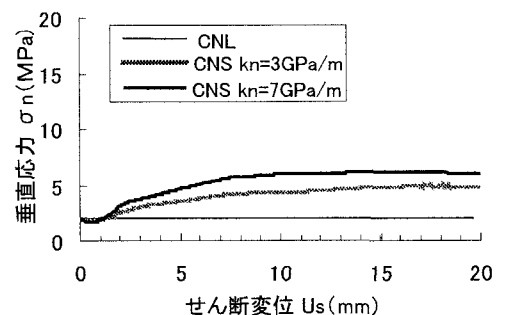
次に、図-3(d)に示すように、完全にかみ合った状態からせん断が開始される場合のダイレーション角の変化を考察する。ここでダイレーション角とは垂直変位の増分をせん断変位の増分で除したもので、表面形状の粗さを示す一つの指標である。この場合、非常に大きい角度を持つアスペリティに応力が集中すると考えられ、削れが全く生じなければ、この大きい角度を持つアスペリティに沿って大きなダイレーション角でせん断が発生すると考えられる。しか



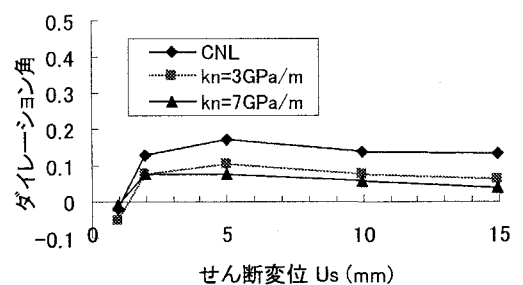
(a) せん断強度比較



(b) ダイレーションの比較



(c) 垂直応力の変化



(d) ダイレーション角の変化

図-3 せん断挙動の試験結果(J2、 $\sigma_{no}=2\text{MPa}$)

し、大きい角度を持つアスペリティは非常に少ないため、集中した応力を支えきれずに削れてしまう。したがって、次第に小さい角度のアスペリティまで接触するようになり、それとともにダイレーション角が小さくなる。同時に、接触面積が増加し、個々のアスペリティに作用する応力は減少する。そして接触するアスペリティに作用する応力が支えきれるところに、ダイレーション角がほぼ一定になると考えられる。このことから、岩盤不連続面の表面形状が不連続面のせん断力学特性に直接に影響する結果となった。

3. 非接触型表面形状計測システムを用いた評価

前述の結果からもわかるように、岩盤不連続面のせん断挙動に影響を及ぼす要因の一つとして、不連続面の表面形状が挙げられる^{2) 3)}。不連続面の粗さや凹凸の局所的な傾斜の状況はせん断特性に大きな影響を及ぼすため、せん断前後における表面形状の変化を定量的に評価する方法が必要となる。

そこで本研究では、レーザー変位計を用いた非接触型表面形状計測システムを用いて、岩盤不連続面の表面形状を高度に計測し、表面形状の定量的な分析を行う。

計測装置は、表面の形状を破壊せずに高精度の計測を必要とするために、非接触型のレーザー変位計を使用する。図-4 に本研究で用いた非接触型の表面形状計測システムの全体写真、図-5 にその概略図を示す。本計測システムは、精密 X-Y 位置決めテーブル（ストローク長 250mm×150mm、測定誤差 $\pm 0.002\text{mm}$ ）、レーザー変位計（測定範囲 $\pm 5\text{mm}$ 、計測精度 $1/1000\text{mm}$ ）、および制御、収録用のコンピュータから構成される。

この計測システムを用いて、それぞれの境界条件下でせん断試験を行った後の不連続面の表面形状を上下両面について計測した。

(1) 計測の概要

せん断による表面形状の変化状況を調べるため不連続面作成後および各ケースでせん断試験を行った後に、不連続面両面の表面形状を上下両面について計測した。表面形状計測を行う際、4本の測線を等間隔に上下面の同じ位置に設け、測定間隔 0.3mm でせん断方向のみ、一次元的に読み取った。

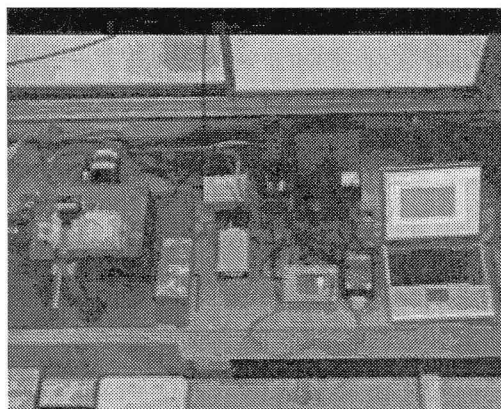


図-4 非接触型表面形状計測システム

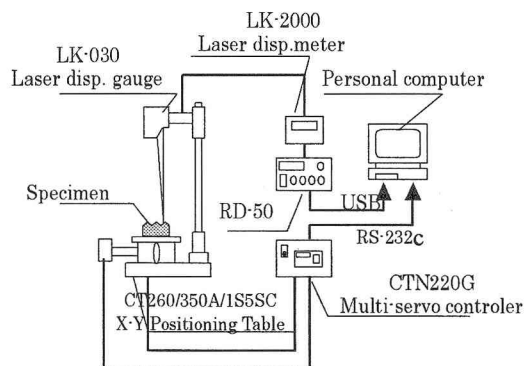
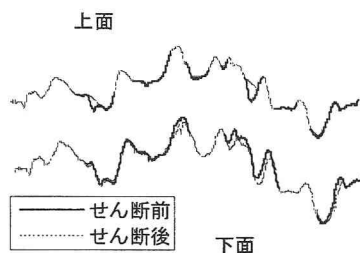
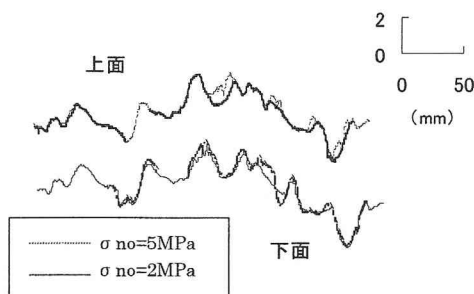


図-5 表面形状計測システム構成図



(a) せん断前後の比較($\sigma_{no}=2\text{MPa}$)



(b) 垂直応力による比較(せん断後)

図-6 表面形状の比較

(2) 計測結果

図-6 に計測結果の例として JRC 値 4~6(J2)の表面形状における、凹凸の破壊状況を示す。図では下面が左方向に移動することにより 20mm セン断を行った後の表面形状である。図-6(a)ではセン断前と比べ、セン断により凹凸が破壊されている状況、図-6(b)では垂直応力の違いによる表面形状の比較を示す。この表面形状計測の結果を用いれば、フラクタル次元解析により、不連続面のセン断強度と表面形状特性の変化との相関性を見出すことができると考えられる。

4. セン断に伴う表面形状変化の定量的評価法

4.1 表面形状の評価法の考察

表面形状の幾何学的特性は、不連続面のセン断特性に影響を及ぼす要因である。多くの研究者によって不連続面の表面形状とセン断強度との関係について研究が行われており、表面形状の大きさを表現する様々な指標が提案されている。

Barton と Choubey⁷⁾は不連続面の断面形状を 1 から 10 までの JRC 値として表わし、この値を不連続面の粗度を表わす指標とした。しかしながら、実際の不連続面の指標を求める場合、その面と Barton らのラフネス断面図を比較して経験的に求めることになり、主観的な値となる欠点がある。そこで、Tse と Cruden ら⁸⁾が JRC 値と以下に示す統計的なパラメータ Z2 との関係から、ラフネスの大きさを定量的に評価する方法を提案した。

$$Z2 = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\Delta z}{h} \right)_i^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 M は 1 ラインあたりの計測点数、 h は水平計測間隔、 Δz は間隔 h で隣接したラフネスの高さの差である。また、Tse らは JRC 値と Z2 には強い相関関係があるとして、次式を主観的に決定した JRC 値も有効な確認方法として提案している。

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z2 \quad (3)$$

この他にも多数の統計的な指標が提案されているが、これらは JRC 値の表面形状に依存するため、主観や経験に左右されやすいものが多く³⁾、ラフネスの大きさとセン断強度との関係について客観的に示すことが必要である。このような背景から、本研究ではフラクタルモデルによる評価方法を検討し、次に述べる表面形状の評価方法を提案する。

4.2 フラクタルモデルによる評価方法

フラクタルモデル次元は一つの集合 (set) が占有する空間の大きさを表現し、非常に小さい尺度で示される不規則な測度である。幾何統計学の観点でみると、不連続面は二つの基本的な幾何学的特性のランダムプロセスを示している。

(1) ランダムアスペクト (random aspect)

ラフネス面は空間で任意に変化するため、その幾何学的特性は空間関数 (spatial function) を用いて表すことができない。

(2) 構造アスペクト (structural aspect)

ラフネス面の分散 (variance) は空間位置 (spatial position) と完全に独立せず、両方の関係は水平間隔によって

決定される。

もし、 X 点に対応するラフネスの高さ $z(x)$ の単値関数 $V(h)$ が上述の二つの性質を満足できるのであれば、不規則なラフネス線上において $z(x)$ は x につれてランダムな方式で変化する。なお、ラフネスの分散 $V(h)$ は水平間隔 h である両点の高さの平方偏差によって表される。

$$V(h) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (4)$$

ここで、 h は両測点間の水平計測間隔、 $z(x)$ は x 点に対応するラフネスの高さ、 N は測点の総数である。式(4)を用いると、分散からフラクタル次元を求めることができる。

$$V(\Delta x) = \langle [z(x_2) - z(x_1)]^2 \rangle \propto |x_2 - x_1|^{2H} \quad (5)$$

ここで、三角括弧 $\langle \rangle$ は $z(x)$ の数多いサンプルの平均値を表している。 H はアフィン指数 (affine exponent) である。単値関数 $z(x)$ に対して、フラクタル次元は $D=2-H$ となることが証明されているから、分散 $V(h)$ は次式によって表されるようになる。

$$V(h) = A \cdot h^{2(2-D)} \quad (6)$$

したがって、 $V(h)$ と水平計測間隔 h の両対数プロットにおいては、 A は縦軸 $V(h)$ の切片、 $2(2-D)$ は対数曲線の傾きとなる。

4.3 新しいフラクタルモデルによる評価方法の提案

以上のフラクタルモデルを用いた場合、フラクタル次元のみで不連続面の表面形状特性を述べることは十分でなく、縦軸 $V(h)$ の切片 A も重要なパラメータであることが指摘されている。また、既存のフラクタル理論は、岩盤不連続面の表面形状特性とせん断特性との関係に至っていない。そこで、フラクタルパラメータおよび平均ラフネス角と岩盤不連続面のせん断力学特性との関係を明らかにするために、次に述べるようにフラクタルモデルの改良を行った⁹⁾。

このモデルでは、ラフネスの高さ $z(x)$ の単値関数 $U(h)$ は前述の二つの幾何学的性質を満足し、水平間隔 h だけ離れている両測点の高さの差を水平計測間隔 h で除した値のルート平方偏差(RMS)で定義されるとする。式(2)と同じ物理的意味を持つ。

$$U(h) = \left\{ \frac{1}{(N-j)} \sum_{i=1}^{N-j} \left[\frac{z(x_i + h) - z(x_i)}{h} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

上式によって定義される $U(h)$ は岩盤不連続面の平均ラフネス角とも言え、 $U(h)$ と $V(h)$ の定義により、両者には次式のような関係が得られる。

$$U(h) = \frac{\sqrt{V(h)}}{h} \quad (8)$$

上式によって定義されているラフネスの分散 $V(h)$ と $U(h)$ との定義により、平均ラフネス角 $U(h)$ とフラクタルパラメータとの関係が求められる。

$$U(h) = \sqrt{A} \times h^{1-D} = B \times h^{1-D} \quad (9)$$

$U(h)$ と h の対数座標系では振幅 B が縦軸 $U(h)$ での切片で、 $1-D$ が曲線の傾きを示している。なお D はフラクタル次元である。フラクタル次元 D は $U(h)$ と h との双対数曲線の直線部分の傾きによって求められ、振幅 B は $h=1$ の時の $U(h)$ である。

$$B=U(h=1) \quad (10)$$

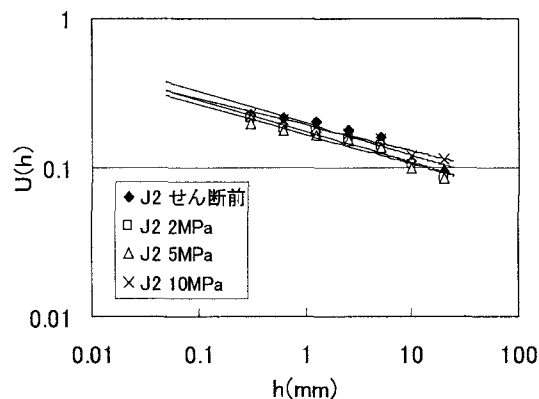
理論的に厳密な自己相関となるラフネスの次元は、サンプリングの長さによらずスケール効果を示さない。しかし、自然の不連続面はある程度の自己相似特性を持っているため、スケールの異なる岩盤不連続面はフラクタル次元が違ふことがある。自己相似フラクタルモデルを用いて岩盤不連続面の表面ラフネス特性を表す場合には、スケール効果は供試体の長さ、測点の最小間隔 h と測定装置の精度に依存していると考えられる。測定する供試体の長さが短いほど、求められたフラクタルパラメータは局所のラフネスの影響を大きく受ける。しかしながら、供試体の長さが一定に達した後では局所のラフネスの影響を受けなくなるため、フラクタルパラメータはある一定値に近づくと考えられる。

5. 計測結果および考察

図-7に改良したフラクタルモデルを用いたフラクタル次元解析の結果について $U(h)$ と h との関係を示す。水平間隔 h が大きくなるにつれて $U(h)$ の値が小さくなっている。フラクタル次元 D で比較すると、せん断前に比べせん断後の次元が低くなっていることがわかる。さらに図-8に示すように、初期垂直応力 σ_{no} の高いほど次元が低くなっている。これは角度の大きいアスペリティから削れはじめ、垂直応力が高いほど、せん断が進むにつれて、角度の小さいアスペリティに削れが移行していき、表面の形状が滑らかになっていくことを示している。表-1にフラクタル次元 D と基本傾斜角 ϕ との比較を示す。基本傾斜角 ϕ はせん断方向の表面凹凸の水平に対する角度(隣接点を結ぶ直線の傾き)を求め、その標準偏差を算出したものである。次元が低くなるにつれて基本傾斜角も下がっていることがわかる。このことから、表面の形状が滑らかになっていくといえる。

このような結果から、せん断変形は表面の凹凸の一部を破壊しながら進行することが多く、このため表面形状はせん断強度に関係するとともに、せん断変位の進行に伴って変形することを把握できた。一方、せん断試験においてせん断強度が一旦ピークを示した後、せん断変位の進行に伴って強度が一時低下するが、これは、表面形状の主な凹凸の破壊によって、強度を低下させるものであると考えられる。

次に、所定の垂直応力を不連続面に与え、せん断速度



Before Shear	$U(h)=0.1993x^{-0.2164}$
2MPa Sheared	$U(h)=0.1769x^{-0.2124}$
5MPa Sheared	$U(h)=0.1677x^{-0.1982}$
10MPa Sheared	$U(h)=0.1937x^{-0.1735}$

図-7 フラクタル次元の解析結果(J2 下面)

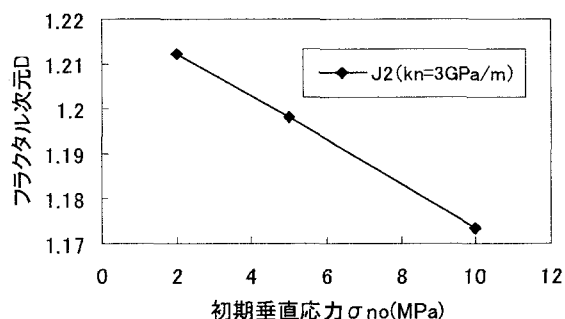


図-8 せん断後のフラクタル次元 D の推移

0.5mm/min で、せん断変位 20mm までせん断させた供試体に発生したグーシ (せん断時の摩耗粉)の測定結果を図-9に示す。初期垂直応力 σ_{no} との関係を検討すると、やはり σ_{no} の値が高くなるにつれて、グーシ量が増えている。表面形状で比較すると形状が粗い程グーシ量が増えている。これは岩盤不連続面のせん断過程で主な凹凸は壊れ、せん断面が滑らかになったためであり、せん断過程で発生するグーシとフラクタル次元 D との関係からも、発生したグーシは、せん断挙動およびダイレーションに影響を及ぼす要因の一つであると考えられる。このように、凹凸の破壊が垂直応力と表面形状特性に密接に関係していることがわかる。

6. おわりに

本研究では、岩盤不連続面の垂直剛性一定制御試験を実施し、せん断挙動とあわせて表面形状特性の評価を試みた。せん断試験結果については、不連続面のせん断挙動が境界拘束条件の影響を大きく受け、ピークせん断強度後の残留強度が増加傾向にあることを明らかにすることができた。表面形状特性の評価については、改良した新しいフラクタルモデルによる評価方法を用いて、次元解析を行うことにより、表面形状特性の定量的評価を試みた。

本研究では、せん断試験と表面形状計測結果の一部について検討を行ったが、今後は、さらに表面形状特性の変化とせん断強度およびダイレーションとの関連性を明らかにし、岩盤不連続面のせん断挙動と透水性の定量的評価につなげていく。

参考文献

- 1) 蔭 宇静, 中川光雄, 江崎哲郎: 岩盤不連続体解析に必要とする不連続面の挙動特性の評価法, 土木学会論文集, No.624/III-47, pp.231-243, 1999.
- 2) 江崎哲郎ほか: 岩盤不連続面の表面形状変化とせん断特性との関係, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.79-84, 1998.
- 3) 例えば, 岸田 潔, 谷本親伯: 岩盤不連続面のラフネスの評価とせん断強度の推定, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.85-90, 1998.
- 4) 溝上 建, 蔭 宇静, 祐徳泰郎: 高性能不連続面せん断試験装置の開発, 第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.92-96, 2001.
- 5) Hock, O.L. and Carter, J. P. : A constant normal stiffness direct shear device for static and cyclic loading, Geotechnical Testing Journal, Vol.10, No.1, pp.3-12, 1987.
- 6) 岩の力学連合会: 岩盤不連続面の定量的記載法 (ISRM 指針日本語訳), Vol.3, pp.49, 1985.
- 7) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-65, 1971.
- 8) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, pp.303-307, 1979.
- 9) 蔭 宇静: 岩盤不連続面のフラクタル特徴とせん断挙動および透水特性との関係, 平成 9 年度科学研究費補助金(奨励研究(A))研究成果報告書, 1999.

表-1 フラクタル次元 D と基本傾斜角の比較(J2)

初期垂直応力 σ_{no}	フラクタル次元 D	基本傾斜角 ϕ
せん断前	1.2164	0.1837
2MPa	1.2124	0.1785
5MPa	1.1982	0.17
10MPa	1.1735	0.1688

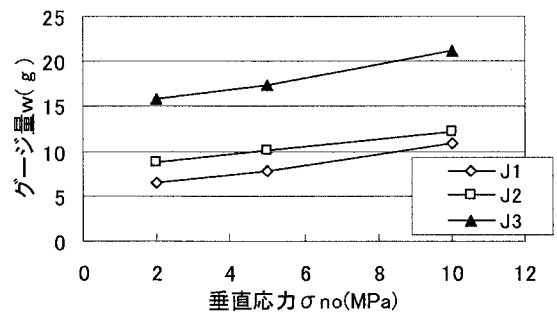


図-9 グーシの量の測定 ($k_n=3\text{GPa/m}$)