

3次元非接触式プロファイル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

谷本親伯¹・岸田 潔²

1正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室(〒606-01京都市左京区吉田本町)

2正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室(〒606-01京都市左京区吉田本町)

不連続岩盤のせん断特性を支配する不連続面のラフネスの定量的測定法を開発した。本研究では、ラフネスを波形と考えた。すなわち、波形解析手法を応用するため、振幅～時間関係を振幅～距離(せん断面長さ)の関係に適用し、最大エントロピー法によりスペクトル解析を行った。その結果、ラフネスを定量的に示す量として、パワースペクトルモーメント(M_s)値を定義した。この方法は、データ数に制限されず高分解能の結果が得られるので、実際に採取される自然のラフネスへの適用が便利に行え、新しく開発した測定装置により、 M_s 値が有効であることを示した。

Key Words : joint roughness, shear behaviour, maximum entropy method,
FFT(Fast Fourier Transform), JRC

1. はじめに

岩盤には多数の不連続面が存在し、それによって岩盤の変形・強度・透水性などは大きく支配される。したがって、岩盤不連続面の分布状況および力学的・水理学的特性を定量的に把握することが不可欠となってくる。

岩盤不連続面の力学的特性は、圧縮特性およびせん断特性の2つに分けて考えられる。例えば、Goodmanら¹⁾は、不連続面の垂直変形およびせん断変形を表現するパラメータとして垂直剛性(k_v)およびせん断剛性(k_s)の2つの係数を定義し、不連続面に垂直な方向およびせん断方向にこれらに相当するバネ剛性を持ったモデル(ジョイント要素)を仮定し、有限要素法などの数値解析に用いている。これら2つの力学的特性の中で、トンネル切羽近傍など岩盤の掘削により生じる「ゆるみ」領域では、特にせん断特性が非常に重要な因子であると考えられる。

不連続面のせん断特性は、充填物や不連続面の表面形状(ラフネス)と密接に関係している。Barton²⁾は、不連続面が直接接触している状態でのせん断強度に関する研究を行っている。それによると、不連続性岩盤の変形挙動、特にせん断挙動に影響する要因として、次のような4つの事柄を挙げている。すなわち、不連続面に対する拘束圧のレベル、ジョイ

ントセットと載荷重によって左右される破壊のモード、せん断強度を支配する不連続面のラフネス、およびその不連続面の生成過程や構成する鉱物によって決まるジョイントのタイプである。これらのことから、考慮したうえで、不連続面を有する供試体の実験結果から、様々なラフネスを持つ不連続面のせん断強度式の提案を行っている²⁾。従来では、クーロン破壊条件でのせん断強度定数(c, ϕ)と垂直拘束圧で示されるせん断強度式が主流であったが、Bartonはラフネスと不連続面壁面強度を導入してせん断強度を表現している。この推定式において、ラフネスに関するパラメータをJRC、不連続面付近の材料強度に関するパラメータをJCSとしている。JRCは、不連続面の表面形状をラフなタイプからスマーズなタイプに20の段階に分類したもので、各段階の代表的な形状は、Bartonら³⁾によって示されている。また、JCSは、壁面強度を表すもので、不連続面が充填物を含まないものであれば岩実質部分の一軸圧縮強度と一致する。Bartonら³⁾によって示されたプロファイルを用いてラフネス形状のJRCを視覚的に推定し、シュミットハンマー試験からJCSを決定すれば、原位置でのせん断強度の推定は敏捷かつ簡便である。このような点で、Bartonの提案したせん断強度式²⁾は、クーロン定数(c, ϕ)によるせん断強度式より岩盤不連続面のせん断強度を原位置で

タから推定するのに適し、ラフネスとせん断強度の関係は非常に重要であり、せん断強度を推定するうえでJRCは有効なラフネス表現法であると考える。

しかし、実際にBartonら³⁾は、JRCを視覚的判断により決定してからせん断強度を推定するのではなく、せん断試験の結果からせん断強度・垂直拘束圧、シュミットハンマー試験から得られるJCSをもとに推定式より逆解析的にJRCを求めており、一方、供試体レベルで行うせん断試験の様な比較的精度の高い試験においては、ラフネスとせん断挙動の関係を論ずる場合、より精度の高いラフネスの定量化が必要となってくる。

以上のようなことから、不連続面の定量化、特にせん断特性を支配する主要因であるラフネスの定量化手法の確立を試みた。まず最初にJRC(2次元ラフネス)の定量化を行った。さらに、室内一面せん断試験で用いる供試体のラフネスを新しく開発したラフネス測定装置(TOK type 3 Dimensional Roughness Profiler: TOK-3DRP)で3次元的に計測を行い、自然のラフネスの定量的な評価を行った。ラフネスの定量化手法を確立することで、岩盤不連続面のせん断挙動およびダイレイタンシーの変化を定量的に評価出来るものと考える。

2. 2次元ラフネスの定量化

(1) JRCを用いたラフネスの評価

せん断特性とラフネスの関係を考察した研究は多く存在するが、特に、Bartonにより示されたJRCを用いたせん断強度式²⁾はよく引用される。

Bartonは、北欧を中心とした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。これらのせん断結果と不連続面の表面強度から、次に示すような経験式を導いた。

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan \left\{ JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (1)$$

ここで、 τ_p : ピークせん断強度

σ_n : 垂直応力

JRC : 不連続面の表面形状粗さを示す指標

JCS : 不連続面の壁面強度(一軸圧縮強度)

ϕ_b : 残留強度時の内部摩擦角

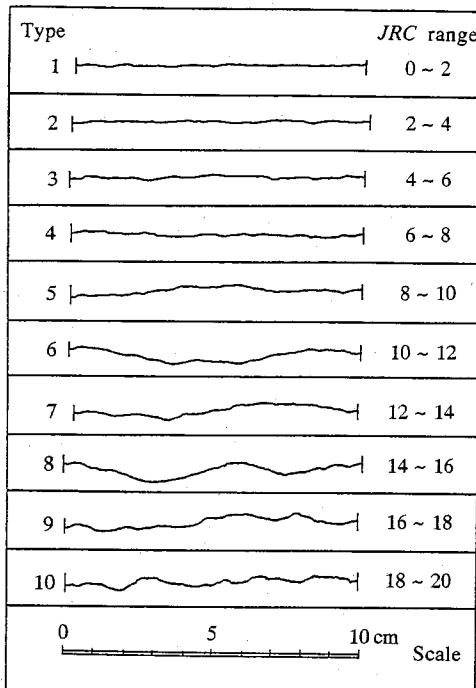


Fig. 1 Joint roughness coefficient (JRC) and corresponding surface roughness profiles at 10 cm scale (after Barton, et al., 1977)³⁾

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。Fig. 1にJRCとその代表形を示す。Fig. 1からわかるようにJRCには、0~20までの値が割り当てられ、値の増加とともに形状が複雑になる。実際の岩盤のJRCは、その岩盤の不連続面の形状との図を比較して決定される。先にも述べているが、この決定方法は現場のせん断強度を推測するには敏速かつ簡便な方法であり、現場においては非常に有用な経験式である。しかし、問題として残されていることは、JRCが目視によりFig. 1に示した断面形状と比較して決定されるため、決定者の主觀に大きく影響されるという点が挙げられる。JRCとせん断特性との関係を室内試験により追究する場合、人為的な誤差を含む目視によるJRCの決定方法ではなく、信頼できる定量的決定法が必要となる。

このため、この手法に代わる定量化手法を確立することは、非常に重要なことである。すなわち、JRCとせん断強度の関係が多数の室内試験結果より明確になっているため^{2),3)}、このJRCを客観的に決定してせん断強度を推定することは非常に有効な手法

であると考えられる。そこで、本研究においては、まず2次元ラフネスの定量化としてFig. 1に示された形状の定量化を行った。

(2) スペクトル解析

Fig. 1の画像データをイメージスキャナ(NEC製PC-IN502)により、パーソナルコンピュータに取り入れ、ラフネスの凹凸量を離散的なデジタル量として記録し、そのデータをもとに定量化を行う。測定間隔は、10cmの測線長に対して2048点のデータを取っている。定量化には、ラフネスを一つの波と考え、波動解析に用いられるスペクトル解析を利用した。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(周波数領域)へと変換し、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。本研究においては、スペクトル解析により得られる周波数特性の一つであるパワースペクトルを用いて解析を行うが、ラフネス形状を波形として取り扱うため、「1波長が1mmとなる波を1Hzとする空間周波数」という量を定義した。したがって、周波数(Hz)に相当する単位は、1/mmとなる。

本研究では、フーリエ変換を行った結果により、そのスペクトル特性から、ラフネスの定量的評価を行う。ここでは、2種類のフーリエ変換法により解析を行う。ここで用いたフーリエ変換は、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform:FFT)法と最大エントロピー(Maximum Entropy Method:MEM)法である。

a) FFT法

FFT法は、非常に計算速度が早いためフーリエ変換法の中では比較的よく用いられている手法である。この方法は、従来より用いられてきたスペクトル推定法(Blackman-Tukey法⁴⁾に対し、Cooley and Tukey(1965)⁵⁾により開発されたもので、従来の方法の計算時間を著しく短縮したものである。

FFT法による、スペクトル解析結果(JRC 0-2, 8-10, 18-20)の一例をFig. 2示す。その他のJRCに対しても同様にしてパワースペクトル解析を行った。

通常FFT法を用いてパワースペクトルを計算する場合、取り扱うデータが有限個であるため、打ち切り誤差の影響が出てくる。そこでFFT法においては、ウィンドウ関数によるスペクトルの平滑化を行うのが一般的である。ここでは、Parzenのラグ・ウィンドウを用いることにより、与えられた波形の平滑化されたパワースペクトルの計算を行った⁶⁾。平滑化のためのバンド幅band(Hz)は、

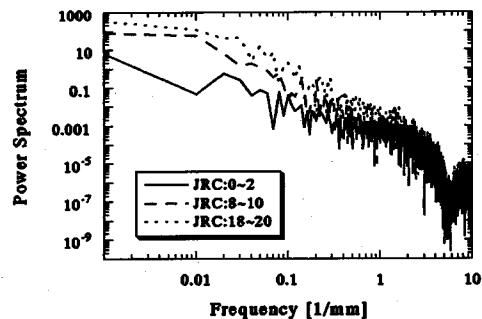


Fig. 2 Power Spectrum ~ Frequency relation by FFT method for representative JRC ranges

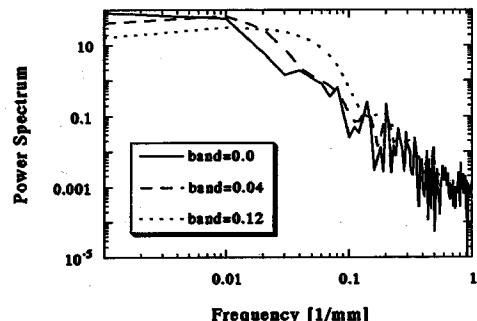


Fig. 3 Power Spectrum ~ Frequency relation for filtering with various band ranges: band (in case of JRC 8-10)

$$band = \frac{280}{151 \cdot u} \quad (2)$$

なる関係により、打ち切り幅u(secまたはmm)を換算し、Parzenのラグ・ウィンドウW(τ)を求めて平滑化を行う⁷⁾。したがって、バンド幅band=0の場合、平滑化は行われない。Fig. 3はJRC 8-10のラフネスに対し、バンド幅band=0.0, 0.04, 0.12でのそれぞれのスペクトルを示したものである。

b) MEM

FFT法は、高速で波形のスペクトル解析が出来るが、有限個のデータを取り扱うため打ち切り誤差の影響が出てくる。これに対し、Burg(1967)は、"情報エントロピーを最大にするようスペクトルを決定する"という考えに立ち、ランダムデータからスペクトルを推定する方法を提案している。この方法(MEM)の特徴は、少ないデータからもスペクトルの計算が可能であること、スペクトル分解能が高いことである⁸⁾。一方でMEMの弱点は、予測誤差フィルタの打ち切り項数mを合理的に決定する基準がなかったことである⁹⁾。Fig. 4にMEMによりJRC 8-10をスペクトル解析を行った結果を示す。ここでは、予測誤

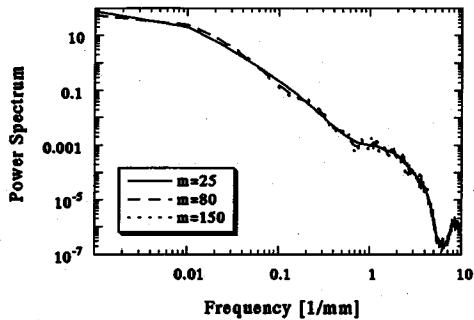


Fig.4 Power Spectrum ~ Frequency relation for numbers of terms (m) in prediction-error filter function (in case of JRC 8-10)

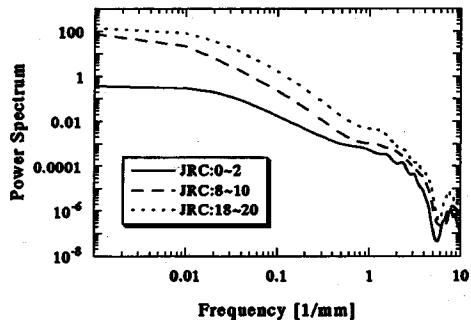


Fig.6 Power Spectrum ~ Frequency relation by MEM for representative JRC ranges

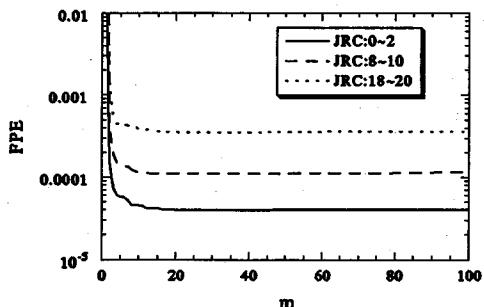


Fig.5 FPE ~ m relation

差フィルタの項数mをm=25, 50, 75, 80, 100, 150, 200と変化させて解析を行った。Fig. 4にはm=25, 80, 150の結果のみを示す。また、Fig. 5に予測誤差の期待値(Final Prediction Error : FPE)と項数の関係をJRC 0-2, 8-10, 18-20について示した。赤池(1969)は、MEMのフィルタ打ち切り項数をFPEが最小となるmをとることを提案し、mの見積の範囲として次式を示している⁹⁾。

$$m < (2\sim 3) \sqrt{N} \quad (3)$$

ここで、Nはデータ数を示す。本研究では、N=2048であり、

$$m < 90 \sim 136$$

となる。Fig. 5に示すようにFPEの値は、どのJRCでも、ほぼm=20で一定値に収束する傾向を示している。Fig. 4によると、m=25, 80では滑らかな形のスペクトルが得られているが、式(3)で満たされていない範囲のm=150はスペクトルの形はおだやかでなく、安定度が低下しているものと考えられる。Fig. 4および5から考えて、本研究ではm=25のスペクトル解析結果を用いる。Fig. 6にm=25でのJRC 0~2, 8~10, 18~20のパワースペクトルを示す。

c) FFT法とMEMの比較

以上のように、FFT法とMEMを用いたJRCのスペクトル解析を行った。FFT法ではFig. 3に示すよう

に、平滑化ウィンドウによりスペクトルの形状が変化する。これは、Fig. 4に示す予測誤差フィルタの項数mの違いによるスペクトルの変化より顕著である。MEMでは、予測誤差フィルタの項数mは、赤池によって示された考え方⁹⁾で、決定することが可能であるが、FFT法では、ラグ・ウィンドウのバンド幅について、「結果を目で比べ、どのくらいのバンド幅が適当かを決める」という方法が良いとされている¹⁰⁾。実際、波形の周波数特性を見るのであれば、平滑化されたFFT法でも十分である。しかし、JRCのスペクトルはいずれも1Hz以下に集中したものである。また、後述する定量化手法においてはスペクトルの形状（強度や傾き）で議論することになるため、平滑化ウィンドウでスペクトルの変化するFFT法では、安定した定量化を行うことは出来ないものと考えられる。また、FFT法は、データを2のベキ乗個必要とする制限があるが、実際に自然のラフネスを計測する場合、必ずしも2のベキ乗個のデータを測定できるとは限らない。FFT法では、データの後続に「0」を付けデータ数を2のベキ乗個にして計算するケースがある。Fig. 2および6のグラフに示されるように、基本的にラフネスは周波数特性が偏ったもので差異は微少である。このようなラフネスに人工的な操作を加えることは、いかに精度よくラフネスを計測しても適切でなく、操作の影響が現われる可能性がある。ラフネスを解析する際は、出来るだけ計測されたデータのままフーリエ変換することが妥当であると考える。

以上より、本研究では高分解能で安定した結果の得られるMEMで定量化を行う。

(3) 定量化手法

a) スペクトルの有効範囲

Fig. 2および6のグラフに示されるように、スペクトル解析結果に共通していることは、低周波領

Table 1 a - and b - values for JRC profiles

| JRC | MEM(m=25) | | FFT band=0.0 | | FFT band=0.04 | | FFT band=0.08 | |
|-------|-----------|---------|--------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| | a | b | a | b | a | b | a | b |
| 0~2 | 7.4354 | 0.32071 | 8.1727 | 0.25847 | 7.4862 | 0.30828 | 7.3858 | 0.30570 |
| 2~4 | 7.0175 | 0.25175 | 8.0260 | 0.21858 | 7.0879 | 0.23599 | 6.9224 | 0.22971 |
| 4~6 | 7.1242 | 0.19882 | 7.4414 | 0.20834 | 7.0075 | 0.23431 | 6.8550 | 0.23717 |
| 6~8 | 6.9207 | 0.16992 | 6.9797 | 0.21332 | 6.8449 | 0.21480 | 6.7083 | 0.21824 |
| 8~10 | 6.8070 | 0.15923 | 7.2189 | 0.19388 | 6.7287 | 0.19517 | 6.5592 | 0.19091 |
| 10~12 | 7.3836 | 0.11383 | 7.3545 | 0.18976 | 7.0752 | 0.15481 | 6.7760 | 0.15083 |
| 12~14 | 7.1321 | 0.11972 | 7.1181 | 0.21020 | 6.8417 | 0.17789 | 6.6695 | 0.17379 |
| 14~16 | 7.3677 | 0.10643 | 7.7874 | 0.12363 | 7.1328 | 0.13876 | 6.7154 | 0.13702 |
| 16~18 | 4.9286 | 0.19034 | 4.5967 | 0.30464 | 4.4422 | 0.28283 | 4.3498 | 0.27778 |
| 18~20 | 5.0746 | 0.15924 | 5.1185 | 0.22897 | 4.7829 | 0.21128 | 4.6507 | 0.20902 |

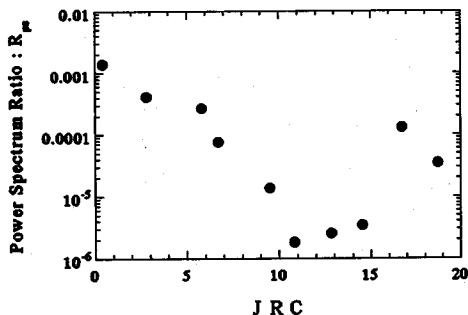


Fig.7 Power Spectrum Ratio (R_{ps}) ~JRC relation by
MEM (for $m=25$)

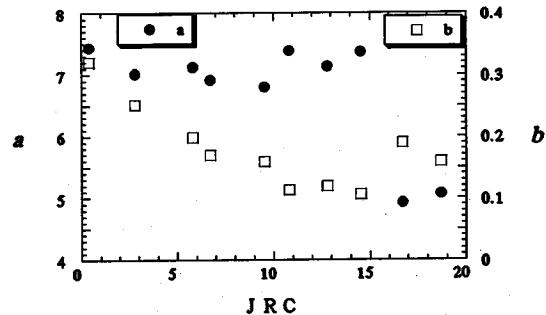


Fig.8 a - and b - value ~ JRC relation

域のパワースペクトル値は高周波領域のそれと比較して相対的に値が高く、高周波領域に移行するに従いパワースペクトル値が徐々に減少していくことが挙げられる。この傾向は、10種類の形状全てに共通する傾向である。

ここで、このパワースペクトル分布のどの部分が最もせん断に大きく寄与するかについて考察する。
Fig. 2, 6を見てみると、パワースペクトルの最大値は必ず低周波領域に存在し、1Hz以上のパワースペクトル成分は最大値の1/100以下の大きさしかもたない。一般に、同一周期で振幅の異なる波形のフーリエ変換を行うと、スペクトル強度は振幅に比例する¹¹⁾。パワースペクトル $S(f)$ とフーリエ振幅スペクトル $B(f)$ には以下の比例関係がある¹²⁾。

$$S(f) \propto |B(f)|^2 \quad (4)$$

したがって、振幅値とパワースペクトルには一応の比例関係があると考えられる。1Hz以上のパワースペクトル成分は最大値の1/100以下の大きさしかもたないということは、仮にパワースペクトルの最大値を1とした場合、言い換えれば振幅成分が1cmの場合は、1Hz以上の波は振幅成分が0.01cmにも満たない波であることになる。全てのJRCについて、最

大パワースペクトル値($S(f)_{max}$)に対する1Hzでのパワースペクトル($S(1)$)をパワースペクトル比 $R_{ps}(R_{ps}=S(1)/S(f)_{max})$ と定義し、Fig. 7に示す。この図から、1Hzでのパワースペクトルは最大パワースペクトル値の1/500以下であることが確認された。

そこで本研究においては、1Hz以上の波はせん断運動に与える影響は非常に少ないと考え除去することにする。

b) 従来の定量化手法

パワースペクトルを利用して定量化する一つの方法として、パワースペクトルのlog-log空間での傾きを用いて定量化する方法が考えられる¹³⁾。先にも述べたように、力学的特性については無視し得る1Hz(1/mm)以上の波を除いた全ての点について最小自乗法により次式にて近似した。

$$S = b \cdot f_r^{-a} \quad (5)$$

ここに、
S : パワースペクトル(mm^2)
 f_r : 空間周波数($1/\text{mm}$)

MEM($m=25$)で得られたスペクトル解析結果より求めたJRCに対する a 値、 b 値をTable 1 およびFig. 8に示す。また、比較のためにTable 1にはFFT法(band=0.0, 0.04, 0.08)で求めた a 値、 b 値も示

す。FFT法では、例えば、band=0.0のときのJRC 4-6とband=0.04のときのJRC 0-2では、 a 値は同じような値を示す。先にも述べたように、バンド幅を確定する方法が見当たらないので、同じ a 値でも同じレンジのJRCを示していることにはならない。このような点でも、FFT法による解析は不適当である。Fig. 8によると、JRC 0~16の範囲では、 a 値はほぼ一定で b 値は減少傾向にある。

ここで示された2つの定数の物理的な意味は、 a 値はスペクトル曲線の傾き、 b 値がスペクトルの平均的な強さを示す量となる。つまり、傾き a が小さい場合は、パワースペクトルが低周波数側の狭い領域に分布し、 b 値が大きければパワースペクトルの平均値が大きいことを示す。パワースペクトルの値が全体的に大きいほど、ラフネスの振幅（凹凸量）は大きくなるために、せん断強度は大きくなると考えられるので、傾き a が大きくかつ b 値が大きい場合は、パワースペクトルが広く分布し平均的にパワースペクトル値は大きいため、せん断強度は大きくなる。これとは逆に、傾き a が小さくかつ b 値が小さい場合は、狭い領域に分布し平均的にパワースペクトル値は小さくなるため、せん断強度は小さくなると考えられる。このことからラフネスを定量化する際には、 a 値および b 値は独立したパラメータとしてではなく、両者を総括して考察する必要がある。

また、ラフネスの定量化手法としてフラクタル次元を用いる場合がある。Maetzら¹⁴⁾は、Yardstick法によりラフネスのフラクタル次元を求め、JRCとの比較を行っている。その結果、JRCとフラクタル次元の間には、0.973の高い相関性をもって一次近似できることを示している。しかし、そこに示されているフラクタル次元の範囲は1.00~1.02であり、ごくわずかの違いからラフネスを分類しようとするものである。これは、データ入力の分解能によっては結果が変わってくる範囲であると考えられる。

また、パワースペクトルが $S(f)$ と f^a が比例関係にある場合、フラクタル次元は式(6)によって決定される¹⁵⁾。

$$D = \max\left(\frac{5-a}{2}, 1\right) \quad (6)$$

この式を用いて、MEMでスペクトル解析したJRCのフラクタル次元の算定を行ったが、すべて $D=1$ の結果となった。岩盤不連続面のラフネスの評価にフラクタル解析を適用する研究は、Muralhaら¹⁶⁾、Bartonら¹⁷⁾、Turkら¹⁸⁾、Carrら¹⁹⁾、Zipfら²⁰⁾等によって行われているが、いずれも不連続面の特性を正当に評価できているとは考えられない。その理由は、評価されたフラクタル次元の差異が微小であり、実際に表

Table 2 A_s , f_G and M_s -values for JRC profiles

| JRC | A_s | f_G | M_s |
|-------|---------|----------|-----------|
| 0~2 | 0.01474 | 0.057630 | 0.0008493 |
| 2~4 | 0.05141 | 0.042020 | 0.0021600 |
| 4~6 | 0.12600 | 0.035240 | 0.0044410 |
| 6~8 | 0.24200 | 0.030190 | 0.0073170 |
| 8~10 | 1.1320 | 0.008573 | 0.0097020 |
| 10~12 | 5.6540 | 0.004673 | 0.026420 |
| 12~14 | 3.3020 | 0.005917 | 0.019530 |
| 14~16 | 4.2640 | 0.011020 | 0.047010 |
| 16~18 | 2.1060 | 0.020430 | 0.043020 |
| 18~20 | 3.1610 | 0.018440 | 0.058290 |

面形状を計測して行うのに十分対応する分解能が得られないものと考える。

c) 新しく提案する M_s 値を用いた定量化手法

ここでより詳細な評価を行うために新たに2つのパラメータを加える。一つは、パワースペクトル成分方向の重心である重心周波数 f_G 。そしてもう一つは周波数軸と1Hzまでのパワースペクトル値と周波数分解能の積で与えられる A_s 値である。これらの値は次式で与えられる。

$$A_s = \sum_{k=0}^n C_k \cdot \Delta f \quad (7)$$

$$f_G = \frac{\sum_{k=0}^n f \cdot C_k \cdot \Delta f}{A_s} \quad (8)$$

ここに、 C_k ：有限複素フーリエ級数

f ：空間周波数(1/mm)

Δf ：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、重心周波数 f_G 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し、 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成分に偏って分布していると考えられる。また、 A_s 値は式(4)との関係などから、そのラフネスがどの程度の凹凸量をもっているかを示していると考える。すなわち、せん断強度に強く影響するものとして、ラフネス全体の凹凸変化量が挙げられるが、それを A_s 値により分類する。基本的には A_s 値が大きいほどせん断強度は強くなると考える。Fig. 1に示す10種類のラフネスに対し、 A_s および f_G 値を求めたところ、Table 2に示すような結果を得た。Fig. 9および10には A_s および f_G 値とJRCの関係を示す。 A_s 値に関しては、JRC 0~12の範囲で増加する傾向にある。しかし、JRC 12~20の範囲では、JRCと A_s 値の対応関係は得られ

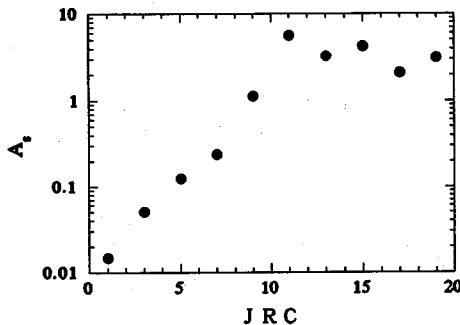


Fig.9 A_s ~JRC relation

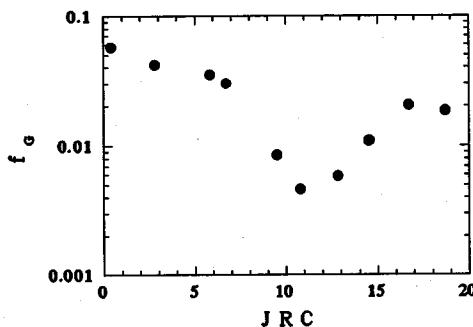


Fig.10 f_G ~JRC relation

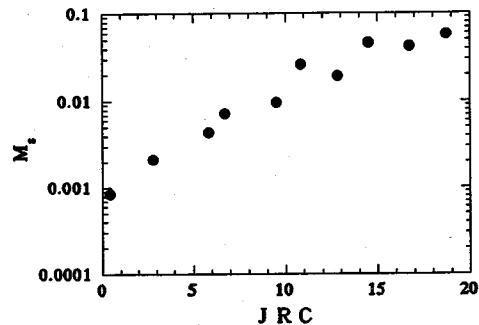


Fig.11 M_s ~JRC relation

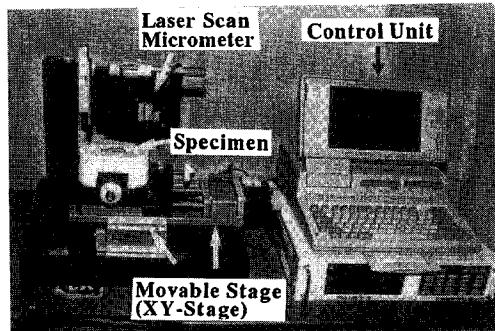


Photo 1 Apparatus of 3-D Roughness Profiler
(TOK-3DRP, developed by the authors)

ない。一方、Fig.10に示す重心周波数 f_G 値は、JRC 8~16の範囲を除くとJRCの増加に伴い、減少傾向にあることが理解できる。 A_s 値および f_G 値を個別に用いてラフネスの評価を行うのは、ラフネスの振幅特性と周期性を同時に把握するには不十分である。そこで A_s 値と f_G 値を掛け合わせることにより、ラフネスを一意に表わすことを考えた。ここで新たにパワースペクトルモーメント値 M_s を

$$M_s = f_G \cdot A_s \quad (9)$$

という式で定義する。Table 2 および Fig.11 にその結果を示す。この M_s 値は、波形（ラフネス）の凹凸変化量と周期性を同時に評価できるものと考える。Fig.11 によると、ほぼJRCの増加に伴い M_s 値が増加する傾向にあると考えられる。

以上のように、岩盤不連続面のせん断挙動を支配するラフネスを評価する指標として、MEMで解析されたパワースペクトル値から定義される M_s 値を用いる方法を提案した。この方法は、分解能等の点で他の方法より優れており、振幅特性と周期性を同時に把握することが可能である。Fig.1 に示すJRC 値とは必ずしも1対1の対応は得られないが、詳細に岩盤不連続面の表面形状を把握するには M_s 値は有効的な方法であると考える。

3. 3次元ラフネスへの適用

(1) ラフネスの測定装置(TOK-3DRP)

著者らは、岩盤不連続面のせん断挙動を把握するため、原位置で採取されたボーリングコアから自然の不連続面を含む供試体を作製し、著者らの開発した岩石一面せん断試験機（DTA-176：誠研舎製）で様々なタイプのせん断試験を行っている^{19),21)}。その際、不連続面のラフネスを測定し定量的に評価を行うことが必要となる。以前は、同じく著者らが開発した接触型のラフネスプロファイルメータ²²⁾を用いていたが、接触型であるため、せん断面を微妙に削りながら計測しており、正確なラフネスの測定やせん断試験後のラフネスの変化量を議論するには適当でないと考える。そこで、新たに非接触型レーザー変位計を用いて面上に計測のできるラフネスプロファイルメータ(TOK-3DRP)を開発し、3次元的なラフネスの測定を実施した。

Photo 1 にTOK-3DRP型ラフネス測定装置を示す。これは、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に記録される。

a) 可動部

可動部は、鋳鉄製の防振台上にXYステージ（

LTS-100XY(1) : シグマ光機)を固定し、ステージの上にはせん断試験で用いる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。このXYステージは、可動ガイドにリニアボールベアリング、送り機構に精密ボールネジを使用し、本体の材質にはアルミ合金を用いることで軽量化を計ると同時に十分な剛性を持った構造になっている。可動機構には、オーバラン防止のリミットスイッチを用いている。アジャスタはせん断試験で用いる供試体専用に製作され、高い再現性 (1/1000mm以下の誤差)により供試体の位置を固定することができる。このアジャスタは、実際にせん断試験の前後でラフネスを測定し、せん断による表面形状の変化を考察する場合に非常に有効な機構である。また、脱着可能であり、様々な形状の供試体も測定することができる。XおよびY方向のストロークは100mmである。

b) 計測部

計測にはレーザー変位計 (LB-045 : キーエンス製) を用いる。この変位計は、防振台上にベンチ、ガイド、キャリアにより固定され、XおよびZ方向には高精度で位置の調節と固定を行うことが可能なステージがあり、様々な形状の供試体の測定に対応する。レーザー変位計は、焦点距離が40mm±5mmで、分解能は最小4 μm である。これらは、防振台の上に堅固に固定されているため、測定の際には振動が全く認められず、振動による測定誤差は無い。

c) 制御部

測定間隔や測定測線数をコンピュータに入力することにより、自動的に不連続面を面的に計測できる。制御装置にはAS-NET (シグマ光機) を用いている。これにより、XYステージを0.001mmの測定移動精度で稼働させることができる。

(2) ラフネスの測定

本研究では、ボーリングにより採取されたコアに存在する自然の不連続面を用いてラフネスの計測を行った。コアから、不連続面がほぼ中心に位置するように約10cmに切り出し供試体としたもの (Fig.12(a)) を6種類準備した。岩種は、花崗斑岩 (2個)、流紋岩質凝灰岩 (4個) である。

不連続面の形状は梢円形であり、せん断方向に長軸が来るようせん断箱にセットされる (Fig.12(b))。長軸の両端の座標を計測し、長軸長を定め、長軸での測点数nを入力する。同時に、せん断方向と平行に測線をm本設定する。本研究では、測線数49、長軸での測点数512で測定を行った。測定間隔は、同一供試体では常に一定である。測点数

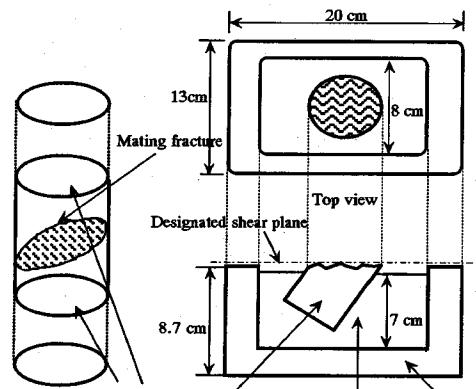


Fig.12 Setting of a natural joint into the Shear Box for the DTA-176 Shear Tester (designed by authors)

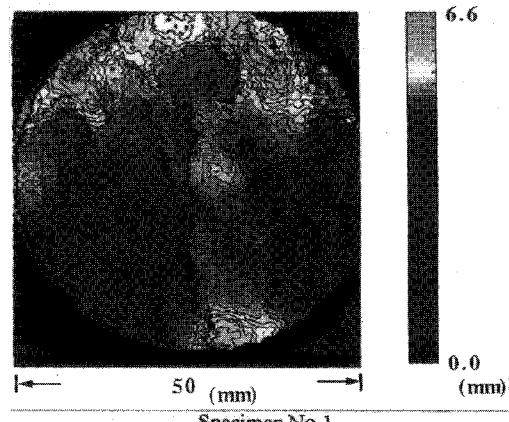


Fig.13 Contour map of natural roughness

は、同一供試体において各測線によって異なり、最小で143点である。このようなせん断箱にセットされている供試体の測定を行うことは、せん断試験結果とラフネスの関係を議論するうえで非常に重要である。

(3) 測定結果および解析結果

TOK-3DRPで測定した供試体のラフネス形状のセンターをFig.13、鳥瞰図をFig.14に示す。Fig.14は、比較のために3種類の供試体について示した。いずれも個別に、異なる形状を有していることが確認できる。解析は、各測線毎にMEMによるスペクトル解析を行い、 M_s 値を求める。MEMの打ち切り回数は25回と設定して計算を行った。これは、供試体の中で最も短い測線での測点数が143点であり、式(3)の条件を満足するものである。実際、FPEは25

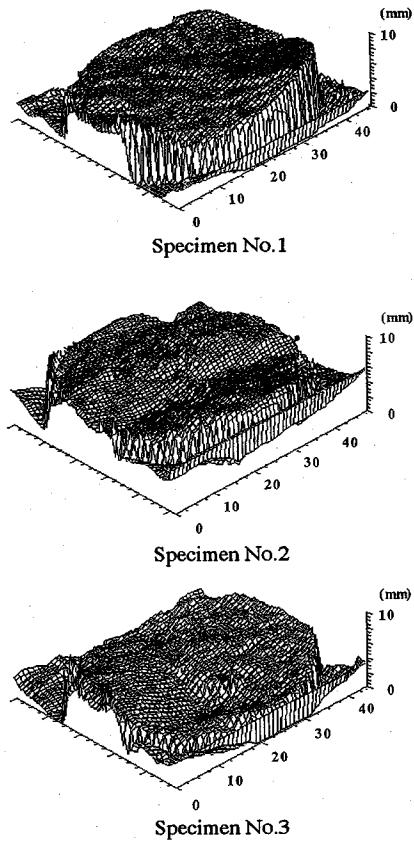


Fig.14 Bird's-eye view of natural roughness

回までにいずれの測線も極小値を示している。

ここでは、一つの供試体につき計測測線がいずれも49本であるので、49個の M_s 値を得ることになる。そこで、供試体を代表する M_s 値を決定するために次のような処理を行う。各 M_s 値に各測線の長さ l を乗じ、その総和($T M_s$)を求める。

$$T M_s = \sum_{i=1}^m M_{s,i} \cdot l_i \quad (10)$$

この $T M_s$ 値を測線長の総和 TL で除したものを供試体を代表する M_s^* 値とする。

$$M_s^* = T M_s / TL \quad (11)$$

ただし、今後特に断らない限り繁雑さを避けるため、 M_s^* を単に M_s と表示する。測定により得られた6種類の供試体のせん断方向に沿った M_s 値をTable 3に示す。Table 3には、Fig.11に示されるJRCと M_s 値の関係より求めたJRCも表示する。

以上のようにして定義された円柱供試体のラフネスを評価する M_s 値(M_s^* 値)を用いてせん断強度との関係を調べた。なお、力学的挙動とラフネスの関係に関する考察は、改めて詳細を公表する。本論文の目的は、ラフネス形状の定量的評価にある。さ

Table 3 Measured M_s -values of natural joint roughness

| Specimen | M_s | JRC |
|----------|------------------------|-------|
| 1 | 9.121×10^{-3} | 8~10 |
| 2 | 7.796×10^{-3} | 6~8 |
| 3 | 1.112×10^{-2} | 8~10 |
| 4 | 1.576×10^{-2} | 10~14 |
| 5 | 2.791×10^{-2} | 10~14 |
| 6 | 3.262×10^{-2} | 10~18 |

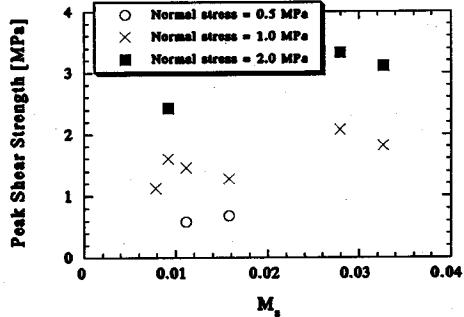


Fig.15 Peak Shear Strength ~ M_s relation (through the replica test, regardless of JCS)

て、ここでは、Table 3に示す6種類の供試体のラフネスをシリコンゴムで型取りし、モルタル材料にて複製を行い、同一の不連続面に関して様々な条件のせん断試験を行えるようにした。このような試験では、ラフネスに関する議論は出来るが、同じ材質のモルタルを用いているので、不連続面の壁面強度がせん断挙動に及ぼす影響に関する考慮は出来ない。複製された供試体を用い、一定拘束圧($\sigma_N = 0.5, 1.0$ および 2.0 MPa)でせん断試験を行い、 M_s 値とピークせん断強度に関する考察を行った。参考のため、Fig.15にその結果を示す。いずれの拘束圧でも、 M_s 値の増加に伴い、せん断強度が増加する傾向を示している。これは、ここで定義した M_s 値が自然の供試体のせん断特性を評価するものであり、ラフネスの影響を定量的に表現しているものであると考える。

4. まとめ

本研究では、MEMによるスペクトル解析結果からパワースペクトルモーメント M_s 値を定義し、岩盤不連続面のラフネス形状の量化を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 目視によるものであるが、広く基準として用いられているBartonらの提案するJRCの代表形

- 状に対しスペクトル解析を行い、パワースペクトルを求めた。フーリエ変換法としてMEMがFFT法より安定したラフネスのスペクトルを示すことを確認した。MEMは、少ないデータからもスペクトル計算が可能であり、また、分解能が非常に高いので、実際の円柱供試体のように測定箇所によってはデータ数が変化するケースでも安定した結果を得ることが出来、自然のラフネスへの適用性が高い。
- 2) スペクトル解析結果からラフネスを定量化するパラメータとして M_s 値を定義した。これは、空間周波数1Hz以下を定量化に有効な周波数領域とし、その範囲内でのパワースペクトル強度と重心周波数の積によって決まる値である。パワースペクトル強度はラフネスの凹凸変化特性を、重心周波数はラフネスの周期性を表現するものである。したがって、 M_s 値は凹凸特性と周期性を一意に表現することが出来る。

- 3) M_s 値を用いてBartonらが示したJRCの定量化を行った。 M_s 値とJRCの間には、JRCの増加に伴い M_s 値も増加する関係が認められる。
- 4) 不連続面の形状を高精度かつ面上に計測できるラフネス測定装置を開発し、採取された不連続面を含むボーリングコアを計測した。計測により得られたデータを、せん断方向に平行な測線毎にMEMにより M_s 値を求め、それぞれに測線長に対応する重み付けを行い、平均化したものを供試体を代表する M_s 値と定義した。
- 5) 一定拘束圧下で行ったせん断試験の結果を著者らが定義した M_s 値により評価した。その結果、 M_s 値の増加に伴い、せん断強度が増加する傾向があることを確認した。これにより、 M_s 値は不連続面のせん断方向に沿ったラフネスを定量的に評価し、実用的な精度で具体的にせん断特性を評価できるパラメータであると考える。

参考文献

- 1) Goodman, R.E., Taylor, R. and Brekke, T.L. : A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of SMFD*, ASCE, Vol.94, pp.637~659, 1968.
- 2) Barton, N. : Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Vol.7, pp.287~332, 1973.
- 3) Barton, N. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, Vol.10, pp.1~54, 1977.
- 4) Blackman, R. B. and Tukey, J. W. : *The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering*, Dover Publications, Inc., 1958.
- 5) Cooley, J. W. and Tukey, J. W. : An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematics of Computation*, Vol.19, No.90, pp. 297~301, 1965.
- 6) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会, pp.150~154, 1976.
- 7) 同上, pp.159~165.
- 8) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店, p.91, 1977.
- 9) 同上, pp.221~222.
- 10) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会, p.158, 1976.
- 11) 同上, pp.106~107.
- 12) 相沢洋二：カオスと1/fゆらぎ, 数理科学, No.349, pp.8~16, 1992.7.
- 13) 谷本親伯ほか：低拘束圧下での岩盤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, 1991.2.
- 14) Maetz, N.H. and Franklin, J. : Roughness scale effects and fractal dimension, *Scale Effects in Rock Masses*, Pinto da Cunha (ed.), pp.121~126, 1990.
- 15) 高安秀樹：フラクタル科学，朝倉書店, pp.240, 1987.
- 16) Muralha, J. and Charrua-Graca, J.G. : An experience on the application of fractal theory to basic shear strength studies, *Rock Joints*, N. Barton and O. Stephansson (ed.), pp.667~671, 1990.
- 17) Barton, C.C. and Larsen, E. : Fractal geometry of two dimensional fracture networks at Yucca Mountain, southwest Nevada, *Proc. of Int'l. Symp. on Fundamentals of Rock Joints*, pp.77~84, 1985.
- 18) Turk, N. et al. : Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension, *Proc. of 28th U.S. Rock Mech. Symp.*, pp.1223~1236, 1987.
- 19) Carr, J.R. et al. : Rock mass classification using fractal dimension, *Proc. of 28th U.S. Rock Mech. Symp.*, pp.73~80, 1987.
- 20) Zipf, R.K. and Bieniawski, Z.T. : Microscopic studies of fractures generated under mixed mode loading, *Proc. of 29th U.S. Rock Mech. Symp.*, pp.151~158, 1988.
- 21) 谷本親伯ほか：岩盤不連続面の一面せん断特性とラフネスについて, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.103~108, 1990.
- 22) 畠昭治郎ほか：岩盤不連続面の定量的評価と力学的特性に関する基礎的研究, 昭和64年度土木学会関西支部年次学術講演概要, pp.III-25-1~2, 1989.

(1994. 1. 31受付)

QUANTITATIVE DETERMINATION OF ROCK JOINT ROUGHNESS BY 3-D NON-CONTACT TYPE PROFILER AND THE MAXIMUM ENTROPY METHOD

Chikaosa TANIMOTO and Kiyoshi KISHIDA

A new method to determine quantitatively the roughness of rock joint is proposed. Considering rock joint roughness, which is expressed in the relation of asperity vs. shear displacement, as a series of waves in the amplitude vs. time relation, wave forms corresponding to various roughnesses were analyzed in terms of power spectra by FFT (Fast Fourier Transform) and MEM (Maximum Entropy Method). It is concluded that a value of Power Spectrum Moment (M_s) defined by MEM can be uniquely determined for rock joint roughness with high resolvability, and it owns high applicability to practical use. The validity of this M_s -method was verified through the experiment on several natural joints, which were analyzed by our newly-developed 3-D profiler, in comparison with Barton's JRC-values.