

(43) 岩盤不連続面のせん断特性とラフネスに関する基礎的研究

京都大学工学部	正会員	谷本親伯
京都大学大学院	学生員	岸田 潔
京都大学大学院	学生員	○ 梅澤孝行
京都大学大学院	学生員	松崎 聡
(株) 東京電力	正会員	森岡宏之

Fundamental Study on Roughness and Shear Behavior at Rock Joint

Chikaosa TANIMOTO, Kiyoshi KISHIDA, Takayuki UMEZAWA
and Satoshi MATSUSAKI - Dept. of Civil Eng., Kyoto University
Hiroshi MORIOKA - Tokyo Electric Power Co.

Abstract

Mechanical characteristics of rock joint is strongly affected by its roughness. In this paper the relation between roughness and shear strength has been investigated by the use of spectrum analysis with the FFT apparatus (Fast Fourier Transform), and this method was applied to the roughness expressed by Barton et al. [1977]. Based on the obtained result, the authors have confirmed that their approach is effective in evaluating quantitatively the roughness and distinguishing the share direction.

1. はじめに

トンネルや地下空洞といった岩盤構造物の最適な支保工の設計・施工を考える上で掘削後の地山の挙動を予測することが最大の課題となっている。しかし、調査時に得られる情報を基に、その挙動を適切に予測することは難しく、掘削後に設計を変更すると言った例は少なくない。このことは地山の挙動を予測する技術が立ち後れていることに起因している。例えば、原位置岩盤の安定性を評価する基準としてBartonらによるQ-systemや、電中研方式による分類などが広く採用されている。しかし、これらの方法は経験的かつ主観的な分類によるものであるため、統一化された原位置岩盤の定量的評価手法というものが必要とされているのが現状である。

そこで、本研究では原位置岩盤の挙動を支配すると考えられる岩盤中の不連続面に着目し、中でも岩盤の変形挙動や透水問題を考える上で大きな影響を及ぼす不連続面の表面形状（ラフネス）についてその定量的評価の手法について検討を行った。

2. 従来のラフネス定量化法

現在までに発表されているラフネスの定量化手法の中で、サンプリング試料を用いた定量化法に力学的特性（せん断特性）を考慮したものとして、次に挙げるBartonらによるJRC値を利用した方法がある。[1] (Bartonら, 1977)

Bartonらは充填物のない不連続面を有する供試体の実験結果から次のせん断強度式を導いた。

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_0 \right] \quad (1)$$

ただし、

JRC : Joint Roughness Coefficient

(ラフネスに起因するパラメータ),

τ : ピークせん断強度,

σ_n : 垂直拘束圧,

JCS : Joint Wall Compression Strength

(不連続面付近での材料強度に関するパラメータ),

ϕ_0 : 基本摩擦角。

ここでBartonはラフネスに起因するパラメータとして JRC という値を考え、表面形状によって1~20の数を割り当てた。その割り当ての方法は、実際に様々なラフネスを有する供試体について同一条件で数多くのせん断試験を実施し、その結果からせん断強度の値によって表面形状を分類したものである。そして、 JRC 値に対するその代表的な形状を示している(図1)。そして、実際に不連続面のピーク強度を推定しようとする場合には、この図に示された形状との比較を行い、視覚的判断によって JRC 値を決定しようとするものである。しかし、この方法によりラフネスを定量化する場合、その判定の基準が観察者の主観的な判断に委ねられているため、データの信頼性はどうしても低くなり推定値の信頼性も低くなると考えられる。そのため本実験においては、ラフネスを定量化する際に図1の表面形状を利用し、定量化のためのパラメータとして JRC 値を組み入れ客観的に決定し得るようにした。

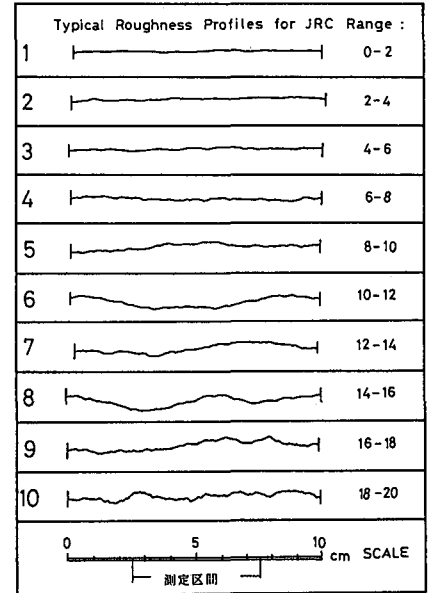


図1 表面粗さ形状とJRC値
(Bartonら, 1977)

3. パワースペクトルの基本的性質

本研究では、不連続面の表面形状を1つの波としてとらえ、波動現象に用いられるスペクトル解析を行い、それによって得られる周波数特性(パワースペクトル)を用いて定量化を行った。ここで、パワースペクトルによる定量化を行う前に、パワースペクトルが、ラフネスの形状的特徴である起伏の長さや振幅(凹凸の高さ)によりどのように変化するかを述べる。[2](谷本ら, 1991)

- ① 振幅が大きければ卓越振動数を保持しながら、パワースペクトルはそのまま上側に平行移動する。つまり、振幅(凹凸の高さ)の大きさは、そのままパワースペクトルの強さになって現れる。
- ② 起伏の長さ(半波長に相当)が長くなるにつれてパワースペクトルのピーク値を結んだ直線の傾きが急になる。つまり規則的なラフネスを有する供試体については、その起伏の長さが周波数特性のピーク値を結んだ直線の傾きに影響を与える。
- ③ 規則的なモデルにおいて、凹凸形状が同じでかつ凹凸間隔を変化(周期に相当)を変化させると、周期が長くなるほど、周波数特性はそのまま低い周波数側へ平行移動する。

これらの特徴を用いて定量化を行った。

4. ラフネスの定量化の手法

規則的なラフネスを有するモデルについては定量的評価の方法として、パワースペクトルのピーク値を結ぶ直線を用いて表すことが考えられる。しかし、実際のラフネスについては、その周波数特性からわかる通り、規則的モデルであられるような明確なピークが見られないため、どの点をプロットするかを決定することができない。そのため、周波数特性における振幅成分(パワースペクトルに相当)が白色雑音の影響を受ける 10^{-2} 以下のものを除いたすべての点についてプロットし最小自乗法で直線近

似することにした。また、ここでは定量化した量を一般化するために、1mmを1波長とする波を1Hzとする「空間周波数」という量を定義すれば、変数変換を行うことにより最小自乗法によって求められた直線は次のような式で書き表すことができる。[2]（谷本ら,1991）

$$\sqrt{S}=b\cdot f^{-a} \tag{2}$$

ここに、 S ：パワースペクトル (mm²)

f ：空間周波数 (1/mm)

ここで示された2つの定数は、 a がスペクトル曲線の包絡線の傾き、 b がパワースペクトルの強さを示す量である。これらの量の物理的な意味については、 a が測定を行った表面形状の持つ周波数の分布状況を示し、 a 値が大きくなればなるほど周波数分布帯が狭いことを意味する。一方 b 値は、 a 値が同じであれば b 値が大きくなればなるほどパワーが大きいことを意味している。これらの量を見てわかるとおり、 a 値と b 値はそれぞれ組にして評価する必要がある。そこで、ラフネスの評価を行いやすくするため、新たに2つの量を考える。1つは、表面形状の持つ全パワーの強さ A_s で、概念的には周波数特性のグラフと周波数軸との間に囲まれた面積を意味する。この A_s は、その表面形状を考える場合の基準面（せん断面）からの凹凸の総断面積と線形な量を一意的に与える。そして、その周波数特性の分布からパワースペクトル軸方向に重心を求め、重心周波数 f_g を求める。この重心周波数 f_g の物理的な意味は、表面形状の周波数特性の分布の中心的な周波数を示し、値が大きければそれだけ周期の短い波が中心となっている。これらの量を数学的に表すと、

$$A_s=\sum_{k=0}^{N/2} (|C_k|-1.0\times10^{-2}) \cdot \Delta f \tag{3}$$

$$f_g=\frac{\sum_{k=0}^{N/2} f \cdot (|C_k|-1.0\times10^{-2}) \cdot \Delta f}{A_s} \tag{4}$$

ここに、 C_k ：有限複素フーリエ係数 (mm)

f ：空間周波数 (1/mm)

Δf ：周波数分解能 (1/mm)

ただし、 $|C_k|\leq10^{-2}$ ならば $|C_k|\approx0$ とする。

これにより、まず A_s によって分類した後、 f_g と a 値を用いることによって、一意的にかつ独立した量によって定量化することができると思われる。

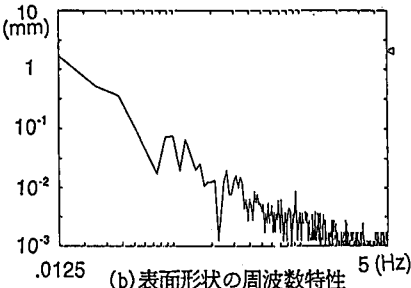
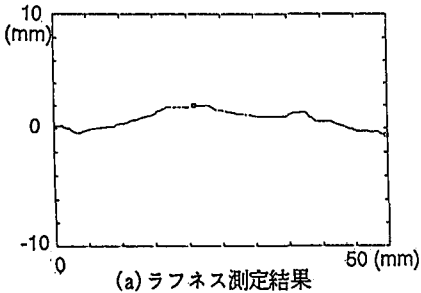


図2 BartonによるJRC基準の周波数特性(JRC=9)

5. 力学特性を考慮したスペクトル解析によるラフネスの定量化

この定量化手法の有効性を確認するために、図1に示した表面形状についてスペクトル解析を行った。その理由としては、Bartonらにより、これらのラフネスと強度との関係が実験的に明らかにされているからである。[1]（Bartonら,1977）

まず最初に、これらのラフネスについて、一定速度（50mm/80秒）で動く接触型変位計を用いてトレースを行った。ここで、他の測定データと条件を等しくするために、図1に示すラフネスのうち中央50mmの部分について解析を行う方法をとった。測定および解析結果の一例を図2に示す。

これらの解析により得られた周波数特性から、 A_s 、 f_g 、 a の値をそれぞれ計算により求めた。その

結果を表1に示す。これらの結果から、 JRC 値が増加するに従いおおむねスペクトルの面積量 A_s 値も増加する傾向を示している。しかし、サンプル5, 6, 8については、増加傾向からはずれている。ここで注目すべきこととして、これらのサンプルについて、重心周波数 f_G は一樣に低い値を示し、スペクトルの傾き a については高い値を示している。これは、サンプル5, 6, 8が他のサンプルと比べて、周期の短い起伏成分よりも周期の長いうねり成分の方が、せん断強度に対して強い影響を与えているからである。そこで、これらの量から新しくスペクトルモーメント M_s という量を次のように定義する。

$$M_s = A_s \cdot f_G \quad (5)$$

このようにして得られた M_s 値について、 JRC 値との比較を行った結果を図3に示す。なお、 JRC 値は指定されたレンジの中の中心値を取った。この結果から、 JRC 値と M_s 値の間にはおおよ線形な関係があることがわかる。これらの関係から両者の関係を最小自乗法により近似すると、

$$M_s = 3.57 \cdot JRC \times 10^{-4} \quad (6)$$

と表せる。ここで相関係数は0.923である。

これらの結果より今回示した定量化法が十分有効であることが認められる。

6. ラフネスの定量化とその方向性について

不連続面のラフネスとせん断特性の関係について論ずる場合、ラフネスのせん断に対する方向性が大きな要因となる。本研究では、ラフネスの方向性がスペクトル解析を行って得られた周波数特性にどのような影響を及ぼすかについて実験を行った。まず、規則的なモデル（供試体A）を用いて行った。図4および図5は一つの起伏に対して2方向のせん断（ある方向とその逆方向）についてスペクトル解析を行った結果である。次に周期的なモデル（供試体B）について実験した結果を図6および図7に示す。これらの結果より、2つの場合に共通して言えることとして、両方向から計測して得られた周波数特性はその包絡線を引いた場合、概形はほぼ等しいものとなり、逆方向からラフネスをトレースしたもの（図5、7）については0.3Hz付近のところで一度スペクトル値が落ちることがわかった。このことはパワースペクトルというものが方向性についてもその違いを見分けることのできる方法であることを示している。こ

表1 JRC 値とスペクトル解析により得られた諸量

JRC 値	A_s ($\times 10^{-3}$)	f_G (1/mm)	a (mm^3)	M ($\times 10^{-3}$) (1/mm)
0-2	0.512	0.0588	0.518	0.0301
2-4	1.518	0.0319	1.078	0.0484
4-6	3.820	0.0420	1.333	0.1604
6-8	5.572	0.0768	1.062	0.4279
8-10	8.344	0.0353	1.413	0.2945
10-12	8.566	0.0320	1.613	0.2741
12-14	7.914	0.0654	1.180	0.5176
14-16	16.954	0.0392	1.405	0.6646
16-18	8.796	0.0646	1.235	0.5682
18-20	11.186	0.0561	1.307	0.6275

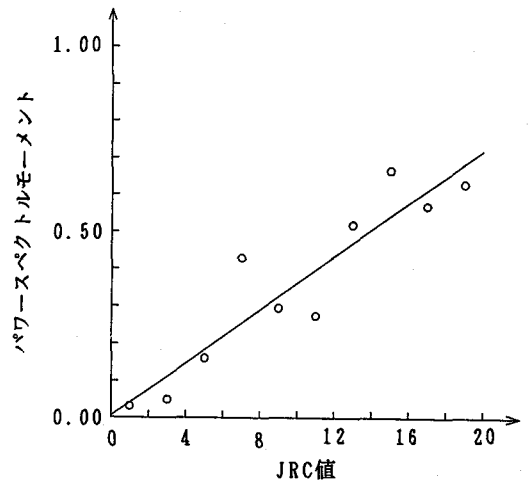


図3 パワースペクトルモーメント M_s と JRC 値の関係

表2 スペクトル解析により得られた諸量

型	A_s ($\times 10^{-3}$)	f_G (1/mm)	a (mm^3)	M ($\times 10^{-3}$) (1/mm)
供試体A(順)	8.354	0.2213	1.3945	1.8487
供試体A(逆)	7.676	0.1436	1.6287	1.1023
供試体B(順)	8.324	0.2204	0.8690	1.8346
供試体B(逆)	8.284	0.1240	1.0804	1.0272
NA(順)	4.330	0.0730	1.2534	0.3160
NA(逆)	4.354	0.0535	1.4477	0.2329
NB(順)	5.224	0.0283	1.5224	0.1478
NB(逆)	1.554	0.0615	1.0208	0.0957

こ

ここで、定量化に用いた諸数値を計算した結果を表2に示す。結果からわかるように、傾きが急な方向（逆方向）からトレースした場合、 A_s, f_G の値は小さくなり、 a の値が大きくなる事がわかる。次に実際の不連続面を有する供試体（NA, NB）についても測定した。その結果も表2に示す。表2からはほぼ同様の傾向が認められる。これらの結果から、この定量化法は、方向性についても考慮する事が可能である。今後の課題としては、実際の不連続面についてもさらに数多くの実験を行い、その方向性の影響について詳しく調べ、パワースペクトルにより得られたデータとせん断特性との関係を明らかにする必要があると思われる。

7. 終わりに

本研究では、不連続面の性状の一つであるラフネスの定量化手法について考察を行った。本研究で得られた事についてまとめる。①スペクトル解析により求められるパワースペクトルのピーク値を結ん

で得られる直線の傾き（ a 値）、切片（ b 値）の他に A_s 値、 f_G 値および M_c 値を求めることにより、一意的にかつ独立した量によってラフネスを定量化し得る。②この定量化法は、方向性を考慮し得る可能性を持つ。今後の課題として、自然のラフネスを有する供試体について、さらに数多くの実験を行い、先に述べた方向性の影響についてさらに詳しく調べる必要があると思われる。

<参考文献>

- [1] Barton N. and V. Choubey (1977): "The shear strength of rock joints in theory and practice", Rock Mechanics 10, pp. 1-65.
- [2] 谷本、森岡、岸田、梅沢(1991): 「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.

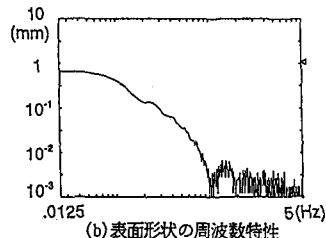
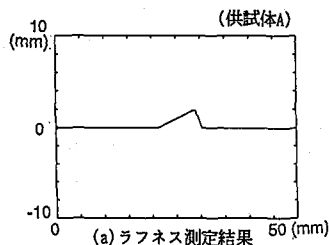


図5 規則的ラフネスと周波数特性 (順方向)

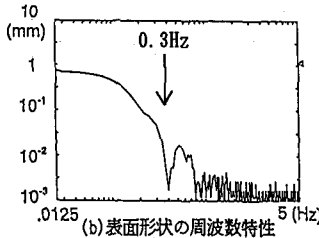
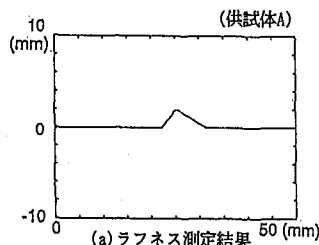


図6 規則的ラフネスと周波数特性 (逆方向)

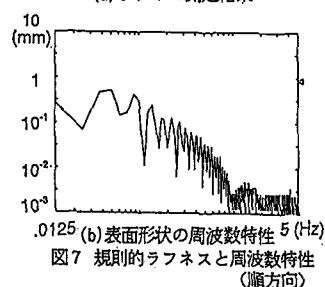
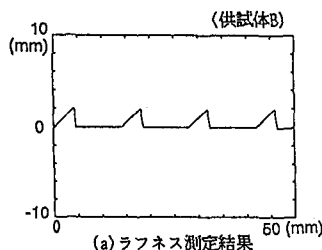


図7 規則的ラフネスと周波数特性 (順方向)

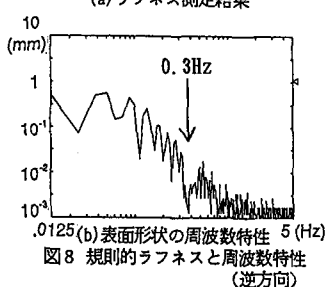
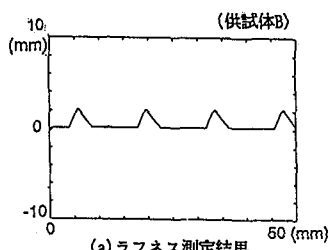


図8 規則的ラフネスと周波数特性 (逆方向)