

(30)一面せん断試験における岩盤不連続面のラフネスの変化

京都大学工学部 正会員 岸田 潔

京都大学工学部 正会員 谷本親伯

京都大学大学院 学生員 ○ 梅澤孝行

ニュージェック 正会員 國井仁彦

Determination of Roughness and Shear Behavior at Rock Joints

Kiyoshi KISHIDA, Chikaosa TANIMOTO, Takayuki UMEZAWA -Kyoto University,
and Hitohiko KUNII - NEWJEC

Abstract

In discussing the underground excavation and the effect of supporting elements, we must understand the mechanical behavior of rock joints under low confining pressure such as below 3MPa. The development of low confining stress area has closely related to shear behavior at rock joints. Then, through the relationship between shear behavior and roughness at rock joints, we can estimate the realistic behavior of rock mass in-situ. In general, roughness is conveniently expressed in terms of Barton's JRC-value, the determination of its value highly depends on an individual personal judgement because of visual observation. In this paper, the authors have tried to establish more scientific estimation of roughness through the Ms-value, which can be determined as power spectrum moment by the use of FFT(Fast Fourier Transform). We have obtained the roughness in three dimensional expression, and compared Ms-value with JRC. The results on Ms-value before and after shear testing can represent the change of roughness at rock joint quite appropriately.

1. はじめに

地下発電所やトンネルなどの岩盤構造物を設計・施工する際には、岩盤内部に存在する岩盤不連続面の分布状態やその力学的性状を把握することは非常に重要になる。特にトンネル切羽近傍のゆるみ領域においては、拘束圧が低いために岩が自重により移動し不連続面上でせん断が発生する。このような状態において、岩盤が崩れるかどうかを判定するには、岩盤不連続面の性状とせん断挙動の関係を明確にする必要がある。

そこで本研究においては、不連続面の性状の一つであるラフネスに着目し、2次元ラフネスの定量化、および3次元ラフネスへの適用について考察した。さらに、室内岩石一面せん断試験を実施し、定量化で用いるパラメータMs値がせん断前後でどのように変化し、またせん断特性とどのような関係にあるかを考察した。その際、せん断による形状変化とせん断特性の基本的傾向を調べるために、三角形からなるモデルラフネスを作成し、シミュレーションを行った。

2. ラフネスの定量化手法

ラフネス定量化手法には、不連続面のラフネスを複合波形とみなし、波動現象を解析する際によく用いられるスペクトル解析を使用し、それにより得られる周波数特性（パワースペクトル）により定量化を行った。この場合の周波数は、空間周波数に相当し、単位長さ(1mm)あたりの波数で表現される。

定量化には、Bartonにより示されているJRC値とその表面形状を用いた。ここで、この形状を定量化する理由は、この表面形状(JRC値)とせん断特性との関係は明らかになっているものの、JRC値の決定は目視のため個人的誤差が避けられないことや一意に決定することが難しいことが指摘されるからである。JRC値(8-10)の表面形状測定結果を図1(a)に、そのスペクトル解析結果を

図1(b)に示す。

グラフから分かるように、ラフネスの周波数特性は、低周波（波長の長いもの）成分が非常に支配的である一方、高周波成分（1Hz(1/mm)以上）は、低周波成分のパワースペクトルの最大値に比べると1%以下の成分しか持たないものが多い。そこで、1Hz以上の波はせん断時に力学的挙動に及ぼす影響は少ないと考えて、この部分は一応除去して考えることにした。

ここで、定量化で用いる2つの量について考える。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が1Hzまでのパワースペクトル値と周波数分解能の積で得られる面積、 As である。これらはそれぞれ、そのラフネスがどの周波数を中心に存在し、そして、そのラフネスがどのくらいの強さ（凹凸量）を持っているかを意味している。それぞれ次式で表される。

$$As = \sum_{k=0}^n Ck \cdot \Delta f \quad (1)$$

$$f_G = \frac{\sum_{k=0}^n f \cdot Ck \cdot \Delta f}{As} \quad (2)$$

ここに、 Ck : 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、

また、 n は $n = 1/\Delta f$ で表される数である。

定量化には、この2つの値の積で求められるパワースペクトルモーメント Ms 値を用い、JRC 値との相関を調べた。図2に JRC 値と Ms の関係を示す。なお、JRC 値は例えば JRC (8-10) の場合は、その中心値9をとった。

この結果から、JRC 値19は大きめの値がでているものの、全体としてはほぼ線形の関係（相関係数0.89）にあることがわかった。つまり、ラフネスを測定し、 Ms 値を求めれば、JRC 値を媒介にして、せん断特性を決定できる。

3. 自然状態の岩石供試体への適用

上で述べた定量化手法は、二次元のラフネスを対象とする定量化法である。しかし実際の供試

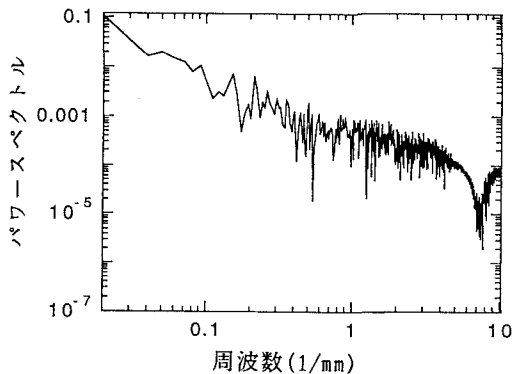
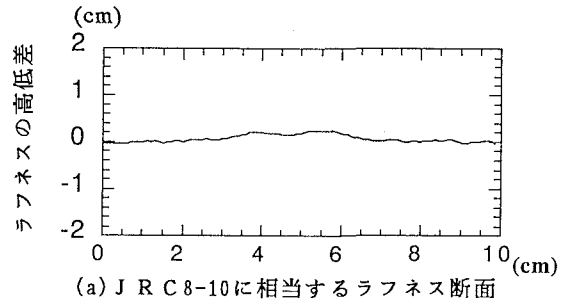
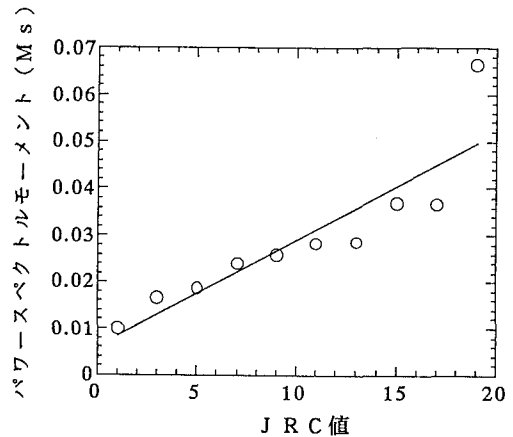


図1 J R C スペクトル解析結果



体は、図3（高さは、縦、横に比べ3倍に強調）のようにせん断方向と垂直な方向にも広がりを持ち、三次元的に挙動する。そこで、この定量化法が、このような3次元のラフネスに対して適用し得るものか、そしてその結果がせん断特性とどのような関係にあるのかを検討した。

三次元的なラフネスにこの方法を適用する一つの方法として、せん断方向に対して平行に数本の測線を引き、それらから求められるMs値を平均してMs値とする方法が考えられる。しかしこの方法では、せん断に影響しない測線を評価してしまう可能性がある。そこで、せん断に影響した測線の形状変化に着目し、せん断前後の形状変化、特にせん断前後のそれぞれの測線の高さの差について調べ、次のような過程でこの定量化法を3次元ラフネスに適用した。

まず、せん断前の高さを H_i 、せん断後の高さを AH_i とすると高さの差の総和量 S_i は、

$$S_i = H_i - AH_i \tag{3}$$

($i=1, n$ n : 測線数)

で表され、測線すべての総変化量 TS_n は、

$$TS_n = \sum_{i=1}^n S_i \tag{4}$$

となる。ここで、それぞれの測線の総和量 S_i を総変化量 TS_n で除した値 E_i を

$$E_i = S_i / TS_n \tag{5}$$

をせん断におけるその測線の影響度と考え、そのラフネスの最終評価 Ms 値を

$$Ms = \sum_{i=1}^n Ms_i \cdot E_i \tag{6}$$

と定義する。

このような過程で求まる最終評価 Ms 値をそのラフネスの Ms^* 値とし、実際の岩石について室内せん断試験を行い、この Ms^* 値とせん断特性との関係について調べた。

実験は、ラフネスの異なる4つの岩石供試体 (No 1 から No 4) を用い、垂直拘束圧一定条件 (5kgf/cm^2) で行った。

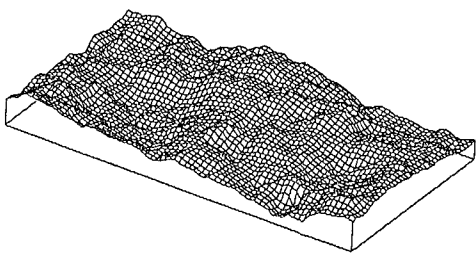


図3 3次元ラフネス測定結果

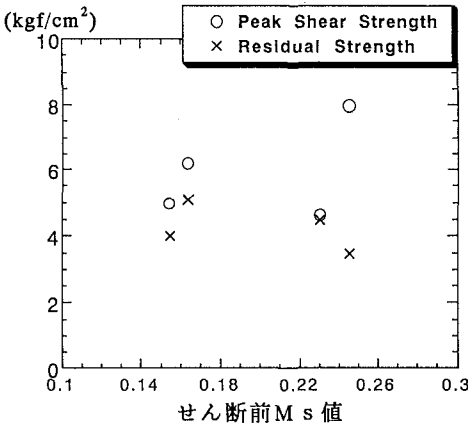


図4 せん断前 Ms 値とピークせん断強度、残留強度の関係

表1 せん断試験結果と Ms^* 値の関係

供試体番号	S_p	S_r	S_r / S_p	$V (6\text{mm})$	Ms^*	せん断後 Ms^*
No 1	7.98	3.49	0.437	1.108	0.245	0.205
No 2	6.19	5.10	0.823	0.462	0.164	0.163
No 3	4.63	4.50	0.972	0.645	0.231	0.223
No 4	4.98	4.00	0.803	0.734	0.154	0.150

また、せん断前後の表面形状変化を詳細に計測することが可能になるように、実験前に、せん断面（長径約55mm、短径約50mmの楕円）に対して、2.5mm間隔にてせん断方向に平行な測線を約20本設定し、これらのラフネス測定を行った。

上で示した過程をこれらの供試体に適用し得られた Ms^* 値とせん断特性の関係を表1に示し、 Ms^* 値とピーク強度、残留強度の関係を図4に示す。ここで、 S_p 、 S_r 、 V はそれぞれピークせん断強度、残留強度、ダイレーションを示している。

第2節の定量化法で考察したように、JRC値と Ms 値は線形関係であったことから、表面硬度を考慮しない場合、 Ms^* 値とせん断特性とは線形の関係にあると考えられる。グラフから分かることとして、No3の供試体を除いては、 Ms^* 値が増加するに従いせん断強度は増加している事がわかる。しかし、残留強度に関しては、そのような傾向が見られずばらついた結果になっている。

これらの結果をまとめると、ピーク強度は Ms^* 値と密接な関係にあると思われるが、残留強度に関しては、そのような傾向はみられない。さらに実験を続け検討する必要がある。また、ピーク強度を考える場合には、硬度の影響を十分に考える必要がある。

4. せん断による Ms^* 値の変化とせん断特性の関係

次に、せん断特性と Ms^* 値の関係についてさらに詳しく考察するために、せん断前後の高さ変化だけでなく、せん断後の Ms^* 値の変化とせん断特性の関係について調べた。その際、 Ms^* 値とせん断特性の基本的な傾向をみるために、三角形が複数個並んだ形状（モデルラフネス）に対して、垂直拘束圧一定にてせん断シミュレーションを行った。シミュレーションの条件として、基本摩擦角 ϕ_b を20, 30, 40°と変化させ、せん断時による基本摩擦角の関係について考察した。図5にモデルラフネスとシミュレーションによる形状変化を、図6にせん断後の Ms 値とピークせん断強度、図7にせん断後の Ms 値とダイレーションの関係を示す。

図5のように、モデルラフネスは、左右が対称の三角形を用いた。また、ここでのシミュレーション結果は、基本摩擦角40°の場合の形状変化を示している。

図6より、ピークせん断強度は、垂直拘束圧、形状が同じであれば、基本摩擦角が増加するに従い、増加することが確認される。さらに、せん断後の Ms 値について着目すると、基本摩擦角が増加するに従い、せん断後の Ms 値は減少している。ここで基本摩擦角が硬度に比例する値であると考えたと、全く逆の傾向がでていますが、これはピーク強度の大きさの違いによるものと考ええる。つまり、ピーク強度の値でせん断後 Ms 値を除いて正規化すれば、せん断後 Ms 値と基本摩擦角はほぼ比例関係にあることがわかる。

また、図7よりせん断後 Ms 値とダイレーションは、基本摩擦角の値に関係なく線形関係（相関係数0.96）にある。この結果は、 Ms 値が、ラフネスの

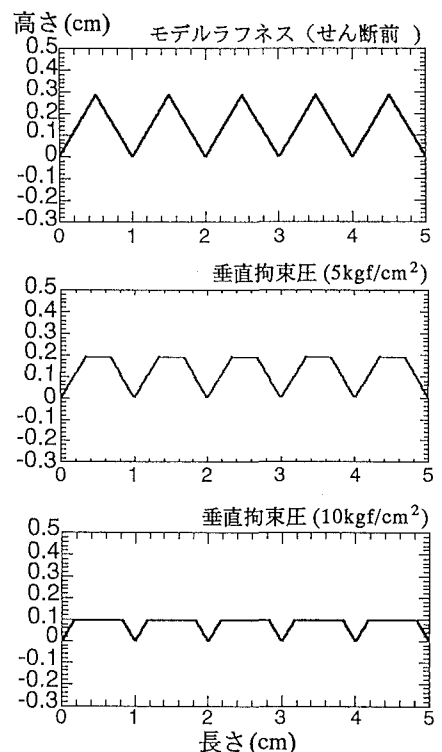


図5 モデルラフネスとシミュレーション結果（形状変化）

形状変化を詳細に表現し得るものであり、せん断後 Ms 値は、ダイレーションとほぼ一対一の関係にあることを示している。

ここで、実際の岩石一面せん断試験結果とせん断後 Ms 値の関係を考えてみる(表1)。シミュレーションの結果からは、ダイレーションとせん断後 Ms 値は、基本摩擦角に関係なくほぼ線形な結果が得られた。しかし、実際には、No 4 供試体はその傾向からはずれている。ここで、残留強度とピーク強度の比(Sr/Sp : この値は表面形状の変化度を表すと考えられる)と、直接的な形状変化量を表すせん断前の Ms 値からせん断後の Ms 値の差を見てみると、反比例していることがわかる。

これらの結果をまとめると、 Ms 値は、形状変化を詳細に表し得るものであり、三角形からなるモデルラフネスにおいては、せん断後の Ms 値とダイレーションは、線形関係にあることがわかった。この傾向をふまえ、3次元ラフネスについてせん断特性について考察した。その結果、ダイレーションとは一対一の関係は得られなかった。これは、形状変化が面的に起こり、今回設定した測線では十分変化を読み取れなかったためと考えられる。しかし、せん断前後の全体の変化量と比例関係にあると考えられる残留強度とピーク強度の比について検討した結果、 Ms^* 値が形状変化を表現し得る事がわかった。今後はさらに、実験数を増やし、ダイレーションとせん断前後の Ms 値の差を検討することにより、線形の関係が得られると思われる。

5. 終わりに

本研究においては、せん断前およびせん断後において、定量化で用いる Ms 値とせん断特性の関係について考察した。しかし最終目的は、せん断前のラフネスからせん断特性を推測する事である。今後は、せん断前に新たなパラメータとして、せん断面積を導入し、せん断前にどの部分が、どのように形状変化するかを推測し得る方法について考察する必要がある。

<参考文献>

- [1]谷本、森岡、岸田、梅澤(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.
- [2]谷本、岸田、梅澤、松崎、森岡(1992):「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」、第24回 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.206-210.
- [3]木梨、畑、藤原(1992):「岩盤ジョイント面の形状測定と粗さの定量化」、土木学会第47回 年次学術講演会、pp.622-623

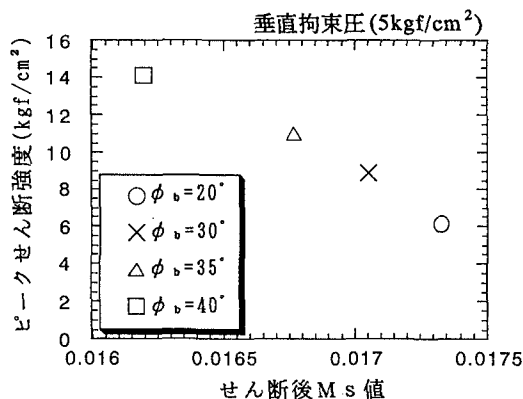


図6 せん断後 Ms 値とピークせん断強度の関係

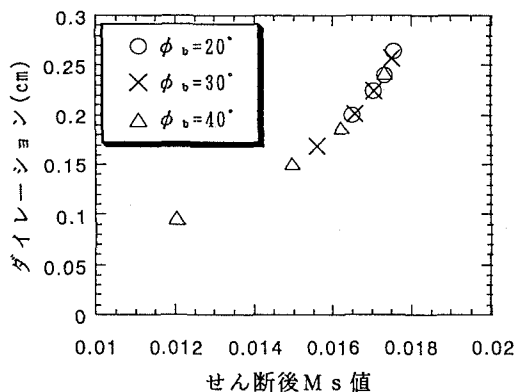


図7 せん断後 Ms 値とダイレーションの関係