岩石の破断面の粗さに関する研究

杉本文男*1・古住光正*2・阿部 司*3

Study on Roughness of Rock Fracture Surface

Fumio SUGIMOTO*1, Mitsumasa FURUZUMI*2 and Mamoru ABE*3

Key words : 表面粗さ surface roughness, フラクタル次元 fractal dimension, スペクトル解析 spectral analysis, 自乗平均平方根粗さ root mean square roughness

Abstract

The topography of rock fracture surfaces created by Brazilian tests and direct shear tests is investigated as a fundamental study on the roughness of joint surface. The roughness is measured with the profilometer built up as a trial. The spectral analysis is done on the profiles of surfaces, and then various roughness parameters of those profiles are estimated.

The whole and the magnified portion of profile on rock fracture surfaces show a similar form. Also, the power spectral density increases linearly with wavelength on the log-log graph. Therefore, it is found that the profile of fractured rock surface obeys fractal.

Fractal dimension and various roughness parameters of fracture surface are different with rock type and fracture condition. Also, it is not shown that the correlations exist between fractal dimension and each roughness parameter.

1. 緒 言

岩盤内に存在するジョイント（不連続面）は、岩盤の工学的特性に大きな影響を及ぼす。すなわち、ジョイントの粗さ、風化の程度、傾斜の角度と方向、充填物の存在、開口幅などが岩盤の強度・変形特性、透水性などの工学特性を支配する。特に、ジョイント面の粗さは岩盤のせん断強度に多大な影響を与えるため注目を集め、

従来から自乗平均平方根粗さ、中心線平均粗さなどにより数値化が行われてきた^{1)~5)}。

しかし、これらの方法では特定の測定長さにおける粗さを数値化することはできるが、測定長さに伴う粗さの変化については表現できない⁶⁾。また近年、ジョイント面の粗さをフラクタル次元を用い数値化することが行われるようになってきた^{6)~9)}が、BROWN ら⁶⁾によると、フラクタル次元は空間周波数帯により変化し、限定された空間周波数内で一定であるとも言われている。

本研究では、岩盤内に存在するジョイント面の粗さの基礎研究として、粗さ測定装置を試作し、圧裂引張試験および直接一面せん断試験において形成された、破断条件の異なる破断面の粗さについてスペクトル解析を行い、従来の方法による粗さとフラクタル次元との関係な

*1 工業技術院公害資源研究所 (National Research Institute for Pollution and Resource)

*2 岩手大学工学部 (Faculty of Engineering, Iwate University)

*3 東北大学工学部 (Faculty of Engineering, Tohoku University)

図-1 測定装置の概念図

どを来待砂岩、荻野凝灰岩、秋吉大理石の3岩種について検討したので、それらの結果について述べる。

2. 測定装置ならびに測定方法

本研究では、岩石の破断面の凹凸の高さを測定するための装置を試作した。測定装置の概念図を図-1に示す。同図において、①は試験片固定台および前後方向の送り台（精度0.025 mm）、②は差動トランス（測定範囲 ± 10 mm、測定精度0.01 mm）、③、⑦はステッピング・モータ（0.36°/パルス）、④、⑧は歯車、⑤はボール・ねじ（4 mm/回転）、⑥は差動トランス固定部、⑨はラダー・チェーンである。測定可能な試験片の寸法は左右200 mm、前後100 mmである。また、試験片固定台の前後方向（図-1の下図において紙面に垂直な方向）への移動は手動式の送り台（精度0.025 mm）により行った。なお、差動トランスに取付けた測定針の先端半径は約250 μ mである。

測定手順としては、まず試験片を固定台①上に置く。差動トランス②の針先を試験片左端から約0.5 mmの位置に移動させ、設置する。この位置で、破断面の凹凸の高さを測定した後、差動トランス②の軸芯をステッピング・モータ⑦により持ち上げる。次に、ステッピング

図-2 粗さ曲線における粗さの各パラメータ

・モータ③により歯車④、⑧、ラダー・チェーン⑨を介し、ボール・ねじ⑤を回転させ、所定の測定間隔だけ差動トランス固定部⑥を移動させる。その後、差動トランス②の軸芯をステッピング・モータ⑦により下ろし、破断面の凹凸の高さを測定する。この動作を順次繰り返し、試験片軸方向の凹凸の高さを測定する。これら一連の動作をパーソナル・コンピュータにより制御し、凹凸の高さの計測はA/D変換器を介し、パーソナル・コンピュータにより行った。また、一直線上での測定が終了した後に、前後方向の送り台により試験片固定台を所定の位置まで移動させ、次の直線上での測定を行うことができる。なお、本研究では、試験片中央部における凹凸の高さの測定間隔（精度0.01 mm）は0.5 mmで行った。

3. 粗さの表示法

従来、表面の粗さを表示するパラメータとして用いられてきた代表的なものを以下に示す（図-2）。

(1) 自乗平均平方根粗さ (R_q)

中心線からの距離の標準偏差であり、粗さ曲線を y 、測定長さを l とすると、

$$R_q = \left(\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right)^{1/2} \quad (1)$$

である。

(2) 中心線平均粗さ (R_a)

中心線からの平均距離であり、

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2)$$

図-3 破断面の3次元形状

である。

(3) 十点平均粗さ (R_z)

測定長さ l 内 (5 区間) の各区間における最高点と最小点との差を Z_i とすると,

$$R_z = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) / 5 \quad (3)$$

である。

(4) 最大高さ $R_{\max}$

最大高さ $R_{\max}$ は式 (3) における Z_i の最大値である。

(5) 最大粗さ (R_t)

最大粗さ R_t は測定区間内における最高点と最低点との高さの差である。

(6) 中心線の深さ (R_p)

測定長さ l 内 (5 区間) の各区間内における最高点の中心線からの高さを P_i とすると,

$$R_p = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 5 \quad (4)$$

である。

4. フラクタル次元

フラクタルとは、自己相似性を持つ形や集合である。しかし、自然界においては完全な自己相似となることは少なく、一般的には統計的自己相似を考える。統計的自己相似とは不規則的な集合において、ある集合の小さな部分の成分の分布と、集合の大きな部分の成分の分布とが一致する集合である¹⁰⁾。

このようなフラクタルを定量的に表す量として、フラ

クタル次元が用いられる。フラクタル次元を求める方法¹¹⁾には、粗視化の度合を変える方法、測度の関係から求める方法、相関関数から求める方法、分布関数から求める方法、スペクトルから求める方法がある。本研究では、スペクトル解析により求めたパワー・スペクトル密度と波長との両対数上における傾き (S) を求め、一次元の粗さ曲線のフラクタル次元 (D_f) を次式から得た。

$$D_f = (5 - S) / 2 \quad (5)$$

なお、1 次元粗さ曲線上では、 $1 < D_f < 2$ である。

5. 試験結果ならびに考察

各岩石試料の圧裂引張試験および直接一面せん断試験 (垂直応力 $\sigma_n = 2.4 \text{ MPa}$ および 4.8 MPa) において形成された破断面を、3 次元に表示した結果を図-3 に示す。なお、凹凸の高さを表示するための格子間隔は縦横ともに 2 mm であり、凹凸の高さは約2.5倍誇張してある。

各岩石試料の破断面の形状を比較すると、来待砂岩および荻野凝灰岩では、直接一面せん断試験において形成された破断面は圧裂引張試験の破断面より凹凸が激しく、また大きくうねっている様子が見られる。一方、秋吉大理石では圧裂引張試験により形成された破断面は、他の岩石試料に比べ凹凸が激しい。しかし、秋吉大理石では、圧裂引張試験と直接一面せん断試験により形成された破断面の相違はほとんど認められない。

試験片中央部の粗さ曲線を図-4 に示す。同図におい

図-4 試験片中央部における粗さ曲線

図-5 粗さ曲線の部分的拡大図

でも、破断面の立体図と同様なことが言える。さらに、図-4に示した粗さ曲線の一部を拡大し、図-5に示す。同図と図-4との比較から、両者の曲線は完全な相似ではないが、曲線の形状が全体的に類似していることが認められる。

図-6に、各岩石試料においてスペクトル解析（フーリエ変換、サンプル数：239、ウィンドウ未使用）により求めたパワー・スペクトル密度と波長との関係を示す。なお、同図は岩石試料中央部における粗さ曲線について求めたものである。これらの図において、一般的にはパワー・スペクトル密度の変動量は大きい、波長が長くなるにつれて、パワー・スペクトル密度は線形的に増加する傾向が見られる。なお、本研究ではスペクトル解析においてはウィンドウを用いなかったため、パワー・スペクトル密度の変動量が大きい、適切なウィンドウを用いることによりパワー・スペクトル密度の推定誤差が小さくなり、パワー・スペクトル密度の変動量が小さくなると考えられる。

両対数上でのパワー・スペクトル密度と波長の関係は線形であるとみなせるので、粗さ曲線はフラクタルであ

る。そこで、最小自乗法により傾き(S)を求め、前述の関係からフラクタル次元 D_f を算出した。

図-7には従来の粗さの各パラメータとフラクタル次元の関係を示す。なお、これらの関係は試験片中央部における粗さ曲線について得られた結果である。同図において、フラクタル次元と粗さの各パラメータの間にはばらつきが大きく、明瞭な相関が見られない。また、岩石試料と破断条件によりフラクタル次元および粗さの各種のパラメータの値が異なってくる。

従来の粗さを評価するパラメータの中で利用されるものの1つが、自乗平均平方根粗さである。このパラメータはBROWN⁶⁾やPOWER⁹⁾によっても述べられているように、パワー・スペクトル密度から次式により求めることができる。

$$\sigma_{rms} = \left(\int_{f_{min}}^{f_{max}} P(f) df \right)^{1/2} \quad (6)$$

ここで、 σ_{rms} は自乗平均平方根粗さ、 f は空間周波数、 f_{max} は最大空間周波数、 f_{min} は最小空間周波数である。

上式を用いパワー・スペクトル密度から求めた測定断面の長さ L と自乗平均平方根粗さ σ_{rms} の関係を図-8に示す。

図-6 パワー・スペクトル密度と波長の関係

同図からわかるように、測定断面の長さに伴い自乗平均平方根粗さの変化を知ることができる。また、式(5)、(6)および

$$P(f) \propto f^{-s} \quad (7)$$

の関係から両対数上で自乗平均平方根粗さは、測定断面長さに対し $(2-D_f)$ 倍で比例する。

なお、各岩石試料の直径60 mm、長さ60 mmの試験片において、圧裂引張試験により形成された破断面につ

図-7 粗さのパラメータとフラクタル次元の関係

いての測定値から求めた自乗平均平方根粗さは、長さ 120 mm の試験片で求めた粗さより小さく、パワー・スペクトル密度から推定される自乗平均平方根粗さの傾向と実験的にも合致した。

本研究では、破断面の中央部の粗さ曲線に注目し、破

断面の粗さについて検討したが、破断面の凹凸の高さの変動が面上で均質でないために粗さ曲線は測定箇所により異なり、フラクタル次元、粗さの各パラメータの値も異なってくる。したがって、今後破断面全体についての粗さの特性を評価することが必要であると思われる。

図-8 測定断面の長さで自乗平均平方根粗さの関係

6. 結 言

不連続面上の粗さについての基礎的研究として、粗さ測定装置を試作し、来待砂岩、荻野凝灰岩、秋吉大理石試料において圧裂引張試験および直接一面せん断試験により形成された破断面の凹凸の高さを測定し、それらについてスペクトル解析を行い、フラクタル次元を求めるとともに、従来の粗さに関する各パラメータなどを求めた。

その結果、直接一面せん断試験と圧裂引張試験とにより形成された破断面の粗さ曲線において、曲線の一部を拡大して得られた曲線の形状が全体の曲線の形状と類似していることが認められた。また、パワー・スペクトル密度と波長の関係を両対数で表すと、波長の増大とともに線形的に増加する傾向が見られ、破断面はフラクタルであると考えられる。

岩石試料および破断面の形成条件によりフラクタル次元および粗さの各パラメータの値は異なり、また、フラクタル次元と粗さの各パラメータの間には相関性が認められなかった。

参 考 文 献

- 1) RENGAR, N. (1970): Influence of surface roughness properties of rock planes, Proc. Int. Symp. on Rock Mech., Belgrade, Paper1 - 31.
- 2) BARTON, N. (1971): A relationship between joint roughness and joint shear strength, Proc. Int. Symp. on Rock Mech., Nancy, Paper1 - 8.
- 3) WEISSBACH, G. (1978): A new method for the determination of rock roughness of rock joints in the laboratory, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 15, pp. 131 - 133.
- 4) KRAHN, J. and MORGENSTERN, N. R. (1979): The ultimate frictional resistance of rock discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 127 - 133.
- 5) TSE, R. and CRUDEN, D. M. (1979): Estimating joint roughness coefficients, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 303 - 307.
- 6) BROWN, S. R. and SCHOLZ, C. H. (1985): Broad band width study of the topography of natural rock surfaces, J. Geophys. Res., Vol. 90, No. B14, pp. 12575 - 12582.
- 7) CARR, J. R. (1987): Rock mass classification using fractal dimension, Proc. 28th U.S. Symp. on Rock Mech., Tuscon, pp. 73 - 80.
- 8) TURK, N., GREIG, M. J., DEARMAN, W. R. and AMIN, F. F. (1987): Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension, Proc. 28th U.S. Symp. on rock Mech., Tuscon, pp. 1223 - 1236.
- 9) POWER, W. L., TULLIS, T. E. and WEEKS, J. D. (1988): Roughness and wear during faulting, J. Geophys. Res., Vol. B12, pp. 15268 - 15278.
- 10) 大野博之, 小島圭二 (1988): 岩盤中の割れ目系にみられるフラクタル, 応用地質, Vol. 29, pp. 295 - 302.
- 11) 高安秀樹 (1986): フラクタル, 朝倉書店

(1990年7月23日受付, 1990年12月10日受理)