せん断破壊面の統計的性質

九州共立大学　工学部　正　員　○森　信之
正　員　亀田　伸裕
九州大学　工学部　学生員　杜　守継
正　員　蒋　宇静
正　員　江崎　哲郎

1. はじめに

岩盤不連続面の力学的、水理学的性質は、不連続面表面のラフネスや接触状況などの幾何学的特性に大きく依存する。従って、不連続面表面の幾何学的特性を定量的に評価することが、不連続面の力学的挙動や透水のメカニズム、またこれらの相互の関連を見出すためにも重要となる。

不連続面のラフネスの指標として最も広く用いられているのはBarton等[1]によるジョイントラフネス係数JRCであろう。しかし、JRC値の決定は、実際の不連続面の断面形状を基準ラフネス形状と視覚的に比較することで行われるため、主観的であり、個人の経験に左右されやすいという欠点がある。

そこで、客観的なラフネスの定量化を試みる研究や提案も数多くなされている。特に最近では、Mandelbrot[2]の提唱した新しい幾何学「フラクタル」を用いたラフネス評価の研究が多く見られる。

本研究では、表面ラフネスを定量化するいくつかの統計解析をフラクタルの観点から行ない、その有用性を検討した。用いた表面ラフネスのデータは、せん断試験により作成された60cm×60cmの不連続面の表面の凹凸を、せん断方向のラインに沿って1mmおきに測定したもので、ライン間の間隔は1cmとしている。測定にはスポット径0.05mm、分解能0.5μmの高精度レーザー変位計を用いた。

2. 平均ラフネス角

平均ラフネス角[3]は、ラフネスの高さZ(x)から次式で定義される統計量である。

$$U(h)=\sqrt{\frac{1}{N-j}\sum_{i=1}^{N-j}\left(\frac{Z(x_i+h)-Z(x_i)}{h}\right)^2}$$

ここにNは、ピッチΔ（$=x_{i+1}-x_i$）で測定した測点の数で、$h=j\Delta$である。平均ラフネス角U(h)は、スケールhで粗視化したラフネスの傾きを表わすものであるといえる。Z(x)の増分の分散V(h)は$V(h)\sim h^{2(2-D)}$(Dはフラクタル次元)となることが知られており[4]、$U=(V/h)^{1/2}$なので、$U(h)=B\cdot h^{1-D}$が得られる。

図1に計算されたU(h)の両対数プロットを示す。hがおよそ60mm以下ではグラフはほとんど直線であり、フラクタルであると考えられる。フラクタル次元はD=1.3783となった。

なお、せん断力学特性とU(h)との関係は、フラクタル次元Dよりも係数Bのほうが相関性が強いという研究結果[3]がでている。

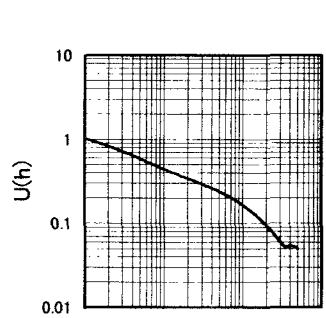

図1　平均ラフネス角U(h)の両対数プロット

3. ウェーブレット解析

フーリエ変換も不連続面表面プロファイルのラフネスを特徴づける統計解析手法であり、ある大きさ（スケール）のラフネスがどれくらいの割合で含まれているかを明確にするものである。フラクタル性が成り立っている領域では、自己相関関数がべき則で減衰するので、パワースペクトルは低周波数領域において、2D-5 のべき則[5]で発散する。しかし、この方法で求めたフラクタル次元は誤差が大きく、妥当な値にはならなかった。

フーリエ変換によるラフネスの評価では、波数領域への変換によって空間の情報が失われるという欠陥がある。ラフネスの特性が空間的にあまり変化しない場合には問題がないが、系統的な変化や急変部を取り出すには適していない。あるスケールのラフネスをとりだすとともに局所的な解析を可能にする手段として有用なのがウェーブレット解析[6] である。

ウェーブレット解析では、フーリエ変換における三角関数のかわりに、ウェーブレットとよばれるコンパクト・サポートをもった波 $\Psi(x)$を用いて、

$$W_{\psi}(a,b)=\int_{\infty}^{\infty}\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)f(x)dx$$

により、座標 x からスケール a とシフト b の張る空間に、関数 f(x)をウェーブレット係数 W(a,b)へ変換する。

ここで考えたウェーブレットは、図２に示される双直交ウェーブレットとよばれるもののひとつである。不連続面の表面プロファイルを、この$\Psi(x)$でウェーブレット変換を行なった例を図３に示す。フラクタル特有の自己相似パターンが明確に現れている。また、およそ 100mm 以下の領域でフラクタル性が成り立っていることが見て取れる。

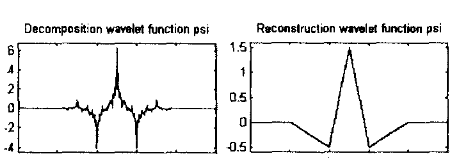

図２ 双直交ウェーブレット関数

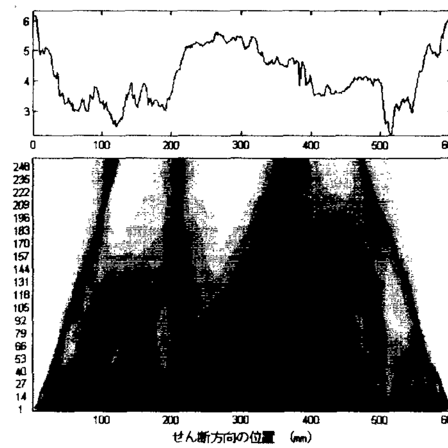

図３ 連続ウェーブレット変換の例
上図：変換に用いた不連続面プロファイル
下図：ウェーブレット係数を濃淡で表示。白色ほど値が大きく、黒色ほど小さい。

ウェーブレット変換は、このようにフラクタルを可視化するだけでなく、任意のスケールでラフネスを適切に近似することも可能となる。双直交ウェーブレットによる離散展開を用いれば、区分線形の形で、ラフネスを逐次近似できる。詳細については、当日に譲る。

参考文献

1) Barton,N., Choubey,V. : The share strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech*, 10, 1-54, 1977.
2) Mandelbrot,B.B. : The fractal geometry of nature, W.H.Freeman, New York, 1982.
3) 杜 守継, 江崎 哲郎, 蒋 宇静, 小林 和昭：岩盤不連続面表面のフラクタル特性とせん断強度との関係に関する研究, 岩盤力学シンポジウム, 1997.
4) Xie,H. : Fractals in rock mechanics, A.A.Balkema, Rotterdam, 1993.
5) 高安 秀樹：フラクタル, 朝倉書店, 1986.
6) Chui,C.K. : Introduction to wavelets, Academic Press, New York, 1992.