

Ⅲ-A 325

岩盤不連続面の表面形状の定量化とせん断特性

大阪大学大学院 学生会員 ○北村 義宜

大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯、川崎 了

日本振興(株)

舩屋 直

1) はじめに

不連続性岩盤のせん断特性は、垂直拘束圧、材料強度、不連続面の表面形状、かみ合わせなどの要因に依存する。特に不連続面の表面形状が不連続面を有する岩盤のせん断強度に大きく依存する。そこで本報告では、まず不連続面の表面形状に着目し、不連続面の表面粗さを定量化する手法について述べる。次に別途実施した不連続面を有する供試体の一面せん断試験の結果を用いて、定量化された粗さを示す指標とせん断強度の関係について報告する。

2) スペクトル解析を用いた不連続面表面形状の定量化手法

スペクトル解析とは、計測された波形が異なった周波数と波高を持つ正弦波の重ね合わせと考え、どれ位の周波数と、どれ位の波高を持った正弦波で構成されているのかを分解する解析手法である。図 a) に岩盤不連続面の計測例を示す。この波形に FFT (高速フーリエ変換) 法を用いて、スペクトル解析を施すと、図 b) のようになる。ただし、パワースペクトルとは、分解された正弦波の波高の 2 乗の値を示す。ここで、計測される区間内に存在する正弦波の波数が多い(周波数が高い)あるいは検出された正弦波の波高が高い(パワースペクトルが大きい)ほど不連続面の形状が粗いと定義すると、粗さを示すパラメータ M_s 値は以下の式 (1) で表される。

$$M_s = \sum_{k=1}^{N/2-1} (f_k \times \sqrt{P_{s_k}}) \quad (1)$$

3) 測定点間の傾きを利用した不連続面表面形状の定量化手法

図 c) に見た目に粗いと感じる表面形状と滑らかであると感じる表面形状の一例を示す。粗いと感じる表面形状では、突起やくぼみの部分において単位区間 ΔX あたりの高さの差 ΔZ が大きくなる。また、滑らかであると感じられる表面形状においては、突起やくぼみが少ない分、高さの差 ΔZ が小さい。よって、測定点ごとに計測された高さの差を測定点間隔で割って算出される傾きに注目し、傾きが大きいものが粗く、傾きが小さいものが滑らかであると定義した。ここで以下の式より、表面の粗度のパラメータ A_m 値を算出する。

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{Z(X_{i+1}) - Z(X_i)}{\Delta X} \right| \quad (2)$$

4) スペクトル解析を用いた定量化手法と測定点間の傾きを用いた定量化手法の比較

計測された表面形状が傾きを有する場合には、解析結果に大きく影響することが確かめられた。よって計測された一測線を、最小 2 乗法により直線で近似して、元の測線から計算された回帰直線を引くことにより、傾きを取り除いた。

またスペクトル解析においては、測定した初めの点と最後の点の高さが一致しないことにより誤差(リンケージ誤差)が生じる。そこで、例えば図 a) に示す表面形状に対し、図 d) の示すような重み付け関数を乗じることで、図 e) のように初めの点と最後の点の高さを一致させる。この操作を行なうことでリンケージ誤差を取り除いた。

Key Words: 不連続面、ラフネスの定量化、スペクトル解析、一面せん断試験

連絡先: 大阪府吹田市山田丘2-1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻、TEL: 06-6879-7558

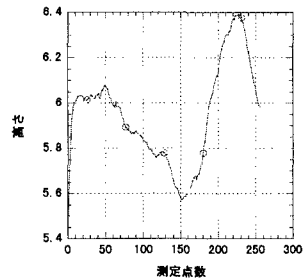


図 a) 計測された不連続面表面形状の一例

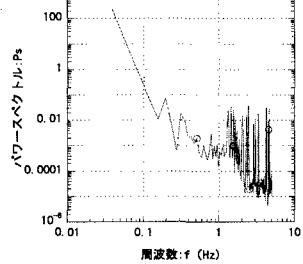


図 b) スペクトルグラフ

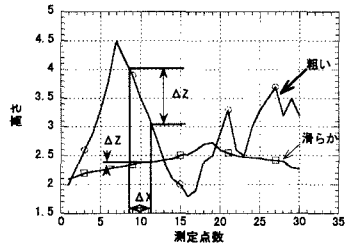


図 c) 計測された表面形状の一例

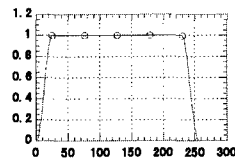


図 d) 重み付け関数の形状

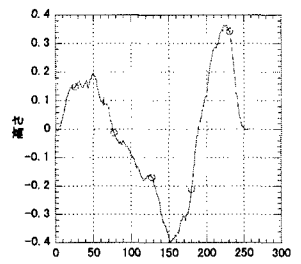


図 e) 重み付け後の波形

岩盤不連続面上の計測された測線に対して以上の補正を行った後、Ms 値と Am 値を算出した。図 f) に、見た目に粗さの異なる測線の例と、Ms 値、Am 値を示す。この図より、Am 値、Ms 値ともに粗いと目で見えて判断できる測線ほど、値が大きくなっていることが確認できる。ところで、Ms 値を FFT 法を用いて算出する場合、2 のべき乗個のデータがないと解析できないこと、重み付け関数をかけることにより、元の形状をゆがめてしまうこと等の理由により、現在の計測方法で Ms 値を算出するには問題があると思われる。それに対し、Am 値は解析結果が測定点数に影響されないで、Ms 値に比べて有利であると考えられる。

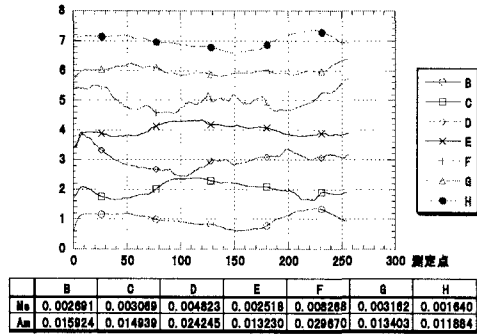


図 f) 表面形状と粗さのパラメーター

5) 3 次元的な不連続面表面形状の定量化手法について Am 値を用いて面的な広がりを持つ表面形状を定量化しようとする場合、計測した測線と直交する方向の凸凹形状を考慮できないため、3 次元的な不連続面表面形状の定量化手法としては不十分であると考えた。そこで、以下に示すような 3 次元的な不連続面の定量化手法を提案する。レーザー変位計で得られたデータは

$$X = \begin{bmatrix} X(1,1) & \dots & \dots & X(1,m) \\ & & X(i-1,j) & \\ & X(i,j-1) & X(i,j) & X(i,j+1) \\ & & X(i+1,j) & \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ X(n,1) & \dots & \dots & X(m,n) \end{bmatrix}$$

のように m 行、n 列の行列式で表される。

そこで $X(i,j)$ 番目の点と前後、左右の点との傾きを合計すると下の式 (3) で表される。

$$A_{ij} = \left| \frac{X(i,j) - X(i,j-1)}{\Delta j} \right| + \left| \frac{X(i,j) - X(i,j+1)}{\Delta j} \right| + \left| \frac{X(i,j) - X(i-1,j)}{\Delta i} \right| + \left| \frac{X(i,j) - X(i+1,j)}{\Delta i} \right| \quad (3)$$

ただし、 $\Delta i, \Delta j$ はそれぞれ i 方向、j 方向の計測間隔を示す。この傾きをすべての点において合計する。なお同じ傾きが 2 回足し合わされているので、合計した値を 2 で割り、さらに一般化するために測定点数 N で割ると

$$C_m = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m A_{ij} \right) \quad (4) \quad \text{となる。これを 3 次元的な粗さを表すパラメーターとする。}$$

6) 一面せん断試験 上記の C_m 値とせん断強度の関係を調べるため、様々な不連続面を持つ供試体を製作して、一面せん断試験を行った。本報告では、材料が均質である石膏を用いて、直径 5cm、高さ 4cm の円柱形の供試体を製作した。なお、不連続面同士は隙間なくかみ合っている。垂直拘束圧は一定 ($\sigma_n = 0.52 \text{ MPa}$) で、せん断速度は 0.1 mm/min である。また、表面形状の計測はレーザー変位計を用いた。計測間隔は i 方向に 0.1 mm 、j 方向に 0.5 mm 間隔で、せん断する方向と測線を平行に合わせて計測した。図 g) に得られた C_m 値とせん断強度の関係を示す。

7) 終わりに スペクトル解析を用いて算出した定量化パラメーター Ms 値は、測定点間の傾きを用いて算出した定量化パラメーター Am 値よりも、凸凹形状の変化に伴って値が大きく変化することが確認された。これは Am 値に比べて、凸凹形状を検知する感度が高いことを示す。ただし、現在の計測方法では、一本の測線に対し 2 のべき乗個のデータ数を確保できないので、この手法を用いて表面形状を定量化するのは困難である。また、Am 値から派生した 3 次元的な表面形状パラメーター C_m 値とせん断強度の間に高い相関が見られた。

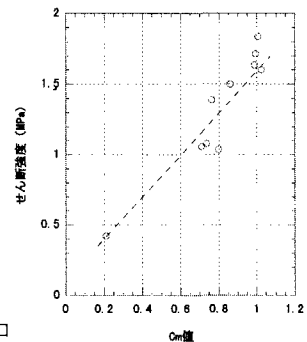


図 g) C_m 値とせん断強度の関係

参考文献: 谷本親伯、岸田潔：3 次元非接触式ラフネスプロファイラー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、土木学会論文集、No511/Ⅲ - 30、