

岩盤不連続面の表面形状の定量化とせん断強度の推定に関する研究 Estimation Method for the Surface of Rock Joint and Its Application for Share Strength

北村 義宜*・谷本 親伯**・川崎 了*** 舛屋 直****
 Yoshinori KITAMURA, Chikaosa TANIMOTO, Satoru KAWASAKI and Tadashi MASUYA

The characteristics of shear behavior at rock joints have reference to vertical road, material strength, shear loading ratio, roughness, mating and so on. Especially shear strength is closely related to the roughness of discontinuous surfaces at rock joints. This study was therefore aimed at the roughness of discontinuous surface and its estimation method was proposed. Then the relationships between estimated values and shear strengths were revealed. Furthermore, when a discontinuous surface is not parallel to the direction of shearing force, the shear strength is strongly affected by this factor. Hence the effects of initial inclinations at rock joints were discussed.

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、せん断速度、不連続面の表面形状、不連続面のかみ合わせ等の要因に依存する。とりわけ不連続面を有する岩盤のせん断強度は、不連続面の表面形状に大きく依存する。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から、定量化された粗さを表す指標とせん断強度の関係について報告する。また、不連続面が岩盤にかかるせん断力の方向と並行ではない場合には、平行であるときと比べてせん断強度に大きく影響する。よって、不連続面が全体として有する傾斜がせん断強度に与える影響について考察する。

2. 不連続面の表面粗さの定量化手法について

図-1 に、見た目に粗いと感じられる表面形状と、滑らかであると感じられる表面形状の一例を示す。ここで、単位区間 ΔX 間における高さの差 ΔZ に着目すると、見た目に粗と感じられる形状は特に突起や窪みの部分において ΔZ が大きく、見た目に滑らかであると感じられる形状は突起や窪みが少ない分 ΔZ が小さい。そこで、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て、傾きが大きいものが粗く、傾きの小さいものが滑らかであると定義した。ここで、以下の式によって、表面粗さを表すパラ

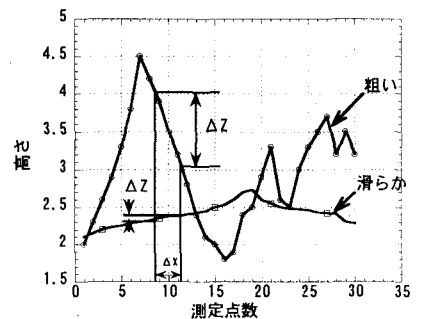


図-1 計測された表面形状の一例

メータ A_m 値を算出する。
$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{Z(X_{i+1}) - Z(X_i)}{\Delta X} \right|$$

*学生会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 **正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻
 正会員 博(工) 大阪大学助手 大学院工学研究科地球総合工学専攻 *ハイテック株式会社

岩盤不連続面の表面形状は、レーザー変位計（ストローク長：±100mm，測定精度：±0.1mm，分解能：4μm，測定範囲：±5mm）を用いて計測した。不連続面の粗さと Am 値の関係の一例を図-2に示す。この図から、目で見ても粗いと判断できる測線ほど Am 値が大きいことが確認される。

ただし、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、Am 値では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を行う場合には不十分であると考えられる。そこで、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、

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

のように m 行、n 列の行列式で表される。そこで X(i,j) 番目の点とその周辺の前後、左右の計 4 点との傾きを合計すると次の式で表される。

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

ただし、Δi, Δj 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で合計する。同じ傾きが 2 回たしあわされているので、合計した値を 2 で割り、一般化のために測定点数 N で割ると

$$C_m = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m A_{ij} \right)$$

となる。この Cm 値を面的な表面粗さを示すパラメータとする。

3. 一面せん断試験

上記の Cm 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。供試体には材質が均一な石膏（吉野石膏製歯科用硬質石膏）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（σn=0.51MPa）で、せん断速度は 0.1mm/min である。また、表面形状はレーザー変位計を用いて計測した。計測間隔は、(i,j) 座標系において、i 方向に 0.1mm，j 方向に 0.5mm 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-3 に、得られた Cm 値とせん断強度の関係を示す。

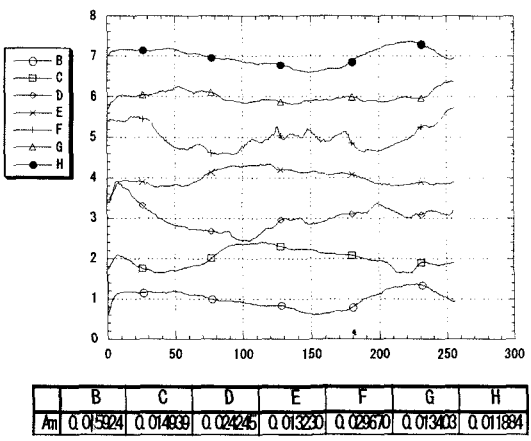


図-2 表面形状と Am 値の関係

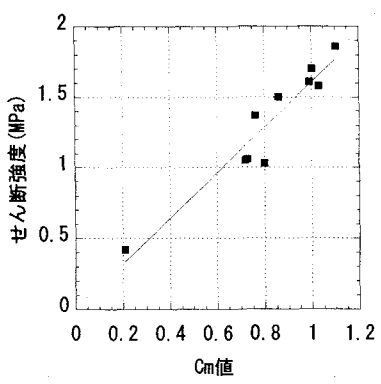


図-3 Cm 値とせん断強度の関係

4. 計測された不連続面の表面形状が有する傾斜の除去する方法

不連続面が水平に保たれておらず、全体としてある方向に傾斜を有したまません断試験を行なうと、不連続面の傾斜がせん断強度に大きく影響する。そこで、計測された不連続面の形状から、不連続面が全体として有する傾斜と、不連続面の粗さの情報を分離して考える必要がある。以下に、計測された不連続面の表面形状が有する傾斜を除去する方法について述べる。レーザー変位計で計測されたデータは

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

i 行目
j 列目

のように m 行、 n 列の行列式で表される。ここで、例えば i 行目において計測された測線を取り出すと図-4 のようになる。この測線を最小 2 乗法を用いて直線で近似すると、 i 行目の傾き a_i が算出される。この操作を 1 行目から m 行目までのすべての行において行い、さらに行列式の列数 m で割ることにより i 方向の平均の傾き a を決定する。また、この値の正接の逆関数をとることにより、 i 方向の平均傾斜角 θ_i を算出する。この操作を式で表すと以下のようになる。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{m} \quad \theta_i = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{m}$$

また図-5 のように、列に対しても上記と同様の操作を行い、 j 方向の平均の傾き b 、および平均傾斜角 θ_j を決定する。

$$b = \frac{\sum_{j=1}^n b_j}{n} \quad \theta_j = \tan^{-1} \frac{\sum_{j=1}^n b_j}{n}$$

さらに、上記の a, b を用いて、計測された不連続面を平面で近似すると、平均平面が以下の行列式で表される。

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

$$B(i,j) = a \times i + b \times j \quad (i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,m)$$

最後に行列式 X から行列式 B を引くことにより、初期の表面形状が有する傾斜を取り除くことができる。図-6 に傾斜を除去する前の表面形状を、図-7 に傾斜を除去した後の表面形状の一例を示す。

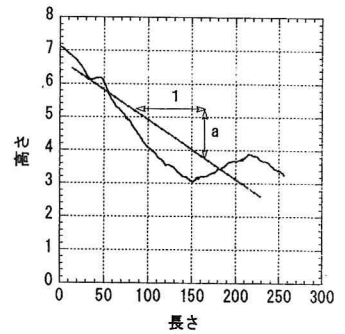


図-4 i 行目に計測された表面形状

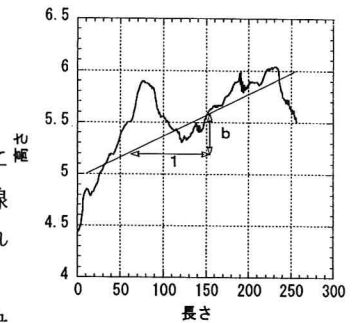


図-5 j 列目に計測された表面形状

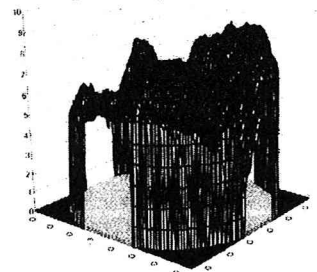


図-6 傾斜を除去する前の形状

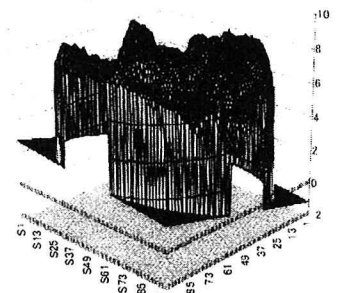


図-7 傾斜を除去した後の形状

5. 不連続面が有する傾斜のせん断強度への影響

岩盤の不連続面が、せん断力が生じる方向に対して平行ではなく傾きを持っている場合に、不連続面の持つ傾斜がせん断強度に及ぼす影響について調べるため、傾斜した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。供試体の形状は縦 5.12cm×横 5.12cm×高さ 4cm であり、石膏（吉野石膏製歯科用硬質石膏）を用いて製作した。まず、図-8 および図-9 に示す、2種類の形状の異なるラフネスを持った供試体を用意した。図-8 は見た目に滑らかであると感じられる A 供試体 ($C_m=0.4432$)、図-9 は見た目に粗いと感じられる B 供試体 ($C_m=1.2076$) の鳥瞰図である。なお、i 方向をせん断方向として、4節で示した方法によって平均平面を算出して、水平面からの傾斜を計算すると、A 供試体の θ_i は 0.78° 、B 供試体の θ_i は 1.31° となり、ほぼ両供試体とも不連続面は水平に位置しているといえる。次に図-10 に示すように、これら2種類のラフネスを i 方向のみに 7.01° 、 11.03° 傾けた供試体を製作し、それぞれの供試体に対して垂直拘束圧 0.51MPa 、せん断速度 0.1mm/min で一面せん断を行った。なお、図-11 に示すように不連続面の平均傾斜角 θ_i は、せん断強度が大きくなる方向の角度を正、小さくなる方向の角度を負とする。図-12 に A 供試体の平均傾斜角とせん断強度の関係を示す。

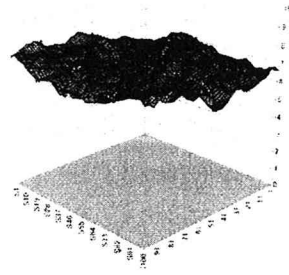


図-8 A 供試体の形状

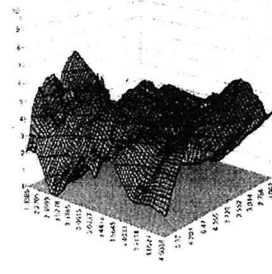


図-9 B 供試体の形状

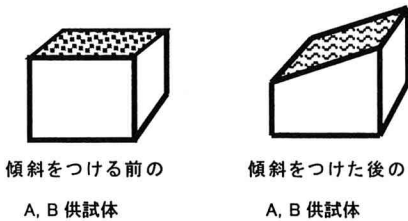


図-10 不連続面に傾斜を有する供試体の図

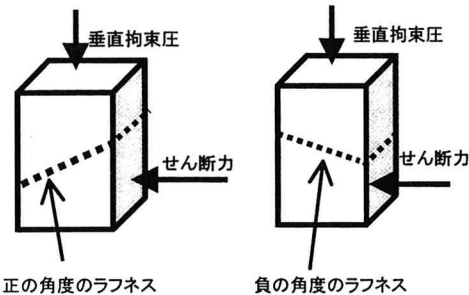


図-11 せん断試験の概念図

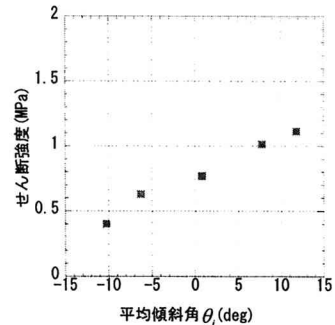


図-12 A 供試体の平均傾斜角とせん断強度の関係

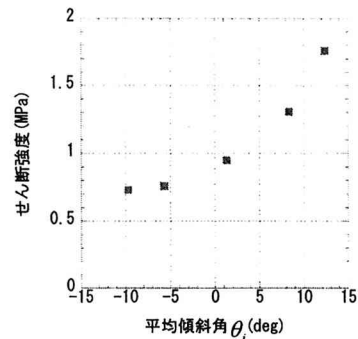


図-13 B 供試体の平均傾斜角とせん断強度の関係

図-12 および図-13 から、平均傾斜角が大きくなるにつれて、せん断強度が高くなる明確な正の相関が確認された。これは図-14 に示すように、4 節で計算された平均平面がせん断力方向に対して傾きを持つ場合、平均平面に直交する方向の応力成分が見かけの垂直拘束圧 N' ($N' = N \cos \theta_i + S \sin \theta_i$) になり、平均平面に対して並行な応力成分が見かけのせん断応力 S' ($S' = N \sin \theta_i + S \cos \theta_i$) となることによる結果であると考えられる。このことから、図-12、図-13 における平均傾斜角とせん断強度の関係は $\theta_i = 0$ における見かけ

の垂直拘束圧と見かけのせん断応力の関係に直すことができ、これを図示すると図-15、図-16 となる。

つまり、垂直拘束圧一定下での岩盤の一面せん断試験は、不連続面が水平に保たれていなければ、不連続面に生じる見かけの垂直拘束圧が、増加または減少することになり、厳密には不連続面に作用する垂直拘束圧が一定で試験を行っているとは言えない。よって不連続面を有する岩盤の一面せん断試験において、不連続面に沿った一面せん断強度を算出する場合、不連続面が全体として有する傾斜をあらかじめ考慮する必要があると考える。

6. まとめ

I, 3次元的な不連続面の粗さの評価指標 C_m 値を提案した。

II, 垂直拘束圧一定下での不連続面を有する岩盤の一面せん断試験において、 C_m 値とせん断強度に正の相関が見られた。

III, レーザプロファイラで計測されたデータを用いて、不連続面を平面で近似することにより、不連続面が全体として水平面から傾斜している角度を計算する手法を提案した。

IV, 不連続面を有する岩盤の一面せん断試験において、

IIIで示した手法を適用することにより、不連続面の傾斜を考慮でき、不連続面に作用する垂直拘束圧と、不連続面に沿ったせん断応力を計算できる手法を提案した。

参考文献

- 1) Barton, N. and Choubey : The shear strength of rock joints in the theory and practice, Rock Mechanics Vol.10, pp.1-65, 1977.
- 2) 谷本親伯・岸田 潔: 岩盤不連続面のラフネスの評価とせん断強度の推定、第10回岩の力学シンポジウム講演論文集, pp.85-90, 1998.
- 3) 北村義宜・谷本親伯・川崎 了・舛屋 直: 岩盤不連続面の表面形状の定量化とせん断特性、第54回土木学会年次学術講演会、III-A325, pp.650-651, 1999

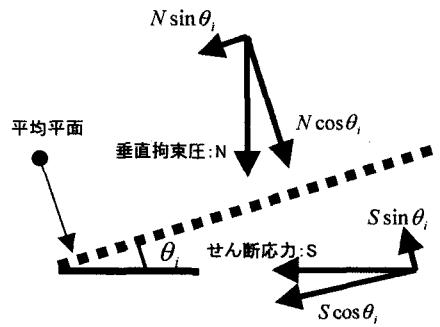


図-14 せん断力方向に対して不連続面が傾きを持つ場合の見かけの垂直拘束圧およびせん断応力の概念図

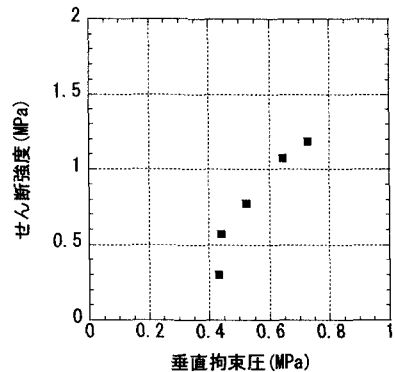


図-15 A 供試体における垂直拘束圧とせん断強度の関係

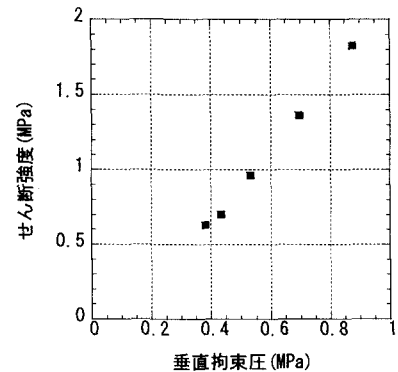


図-16 B 供試体における垂直拘束圧とせん断強度の関係