

岩盤不連続面のせん断強度と表面形状との関係の評価

長崎大学工学部 学生員 加藤竜士 長崎大学大学院 学生員 李 博
長崎大学工学部 フェロー 棚橋由彦 長崎大学工学部 正会員 蔣宇静

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物の地層処分など、深部地下空間の開発・利用が注目され、岩盤構造物の大規模化に伴い、地下空間の安定性や維持管理の重要性が増してきている。深部地下の空洞変形挙動および安定性は、岩盤中に必然的に存在する不連続面の挙動に支配される場合が多い。

本研究では、既往の研究で用いられてきた JRC 値を基準としたものではなく、自然状態での岩盤不連続面の供試体を作成し、垂直応力一定 (CNL) のみならず、垂直剛性一定 (CNS) での一面せん断試験を行い、せん断強度およびダイレーション挙動の比較検討を行う。また、表面形状計測を三次元的に行うことによりフラクタル次元を算出することで、表面形状とせん断強度との関係を明らかにする。

2. 一面せん断試験機概要

一面せん断試験機の基本的ハード構成¹⁾は、供試体を収納した下箱を水平に動かすことにより不連続面をせん断するもので、上箱はせん断供試体を挟み込む形で設置され、せん断荷重計測用のロードセルを組み込んだ 2 本のロッドにより支持されている。このロッドは十分に長く、両端の取り付け部はピン構造となっていることから、供試体の垂直方向の移動あるいは回転は許されるが、せん断方向に対して横方向の動きは固定されている。なお、せん断荷重 (最大 400kN 載荷) はその作用線方向が不連続面とほぼ同じ位置となるよう与えられる。垂直荷重は 1 箇所若しくは 2 箇所で載荷 (各ジャッキは独立した制御が可能で、1 台あたり最大 200kN、計 400kN まで載荷) 可能な構造となっている。

3. 岩盤不連続面模擬供試体と試験ケース

材料配合比は、重量比で水 : 石膏 : 遅延剤 = 0.2 : 1.0 : 0.005 で、14 日養生後の模擬供試体は、一軸圧縮強度 $\sigma_c = 32\text{MPa}$ であり、中硬岩相当の模擬材料である。模擬供試体の不連続面寸法は長さ 20cm、幅 10cm であり、表面形状は、自然の表面形状を作成した。試験ケースは、CNS 制御では垂直剛性 k_n を 3GPa/m とした。初期垂直応力 σ_{n0} は 2、5MPa、せん断速度は 0.5mm/min である。

4. 試験結果と考察

実験結果について図-1 ~ 3 に示す。また図-5 にせん断前の供試体表面形状を示す。せん断変位とせん断応力の関係を見ると、ピークせん断応力はせん断変位 0.1mm 程度の非常に小さなせん断変位で生じた。これは表面の凹凸の影響で不連続面の強度が早い段階で発揮された結果であると考えられる。CNL 制御と CNS 制御のせん断挙動の違いはせん断過程における垂直変位と垂直応力の関係から明らかである。垂直変位に関しては、CNL 制御では周囲からの拘束を受けずに増加しているが、CNS 制御ではせん断が進むにつれて垂直応力が増加し、周囲からの拘束を受けるため垂直変位が CNL 制御よりも抑制されている。

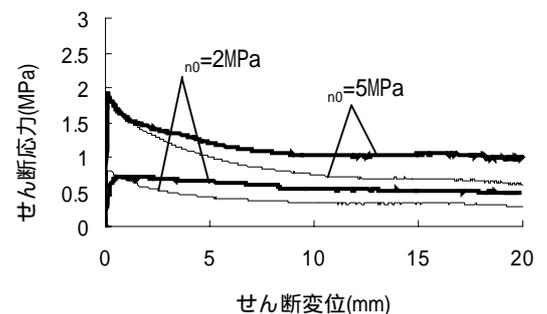


図-1 せん断応力とせん断変位の関係

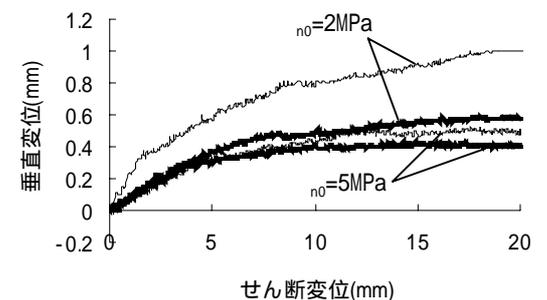


図-2 垂直変位とせん断変位の関係

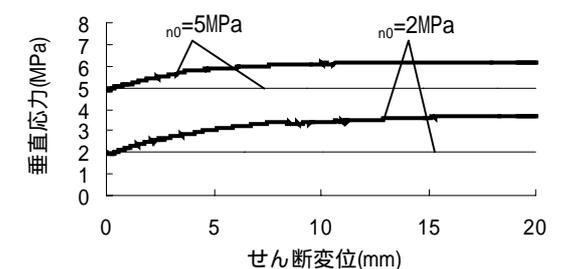


図-3 垂直応力とせん断変位の関係

(— CNL — CNS, $k_n = 3\text{GPa/m}$)

5. 表面形状の三次元評価

従来の研究ではBartonらの提案するJRCを用いたモデルを使って解析を行ってきた。しかしながら、JRC値については主観や経験に大きく左右されやすいという問題がある。フラクタルモデルによる三次元評価方法にはさまざまなものがあるが、本研究では投影被覆法²⁾という方法により評価することとした。

まず、フラクタル表面を面積 \times のメッシュに分割し、図-4より k 番目の平面 $abcd$ とするとき、各点 a, b, c, d の高さはそれぞれ $h_{ak}, h_{bk}, h_{ck}, h_{dk}$ となる。したがって点 a, b, c, d によって囲まれた凹凸表面の面積は式(1)のようになる。

$$A_k(\delta) = \frac{1}{2} \left\{ \left[\delta^2 + (h_{ak} - h_{dk})^2 \right]^{1/2} \left[\delta^2 + (h_{dk} - h_{ck})^2 \right]^{1/2} + \left[\delta^2 + (h_{ak} - h_{bk})^2 \right]^{1/2} \left[\delta^2 + (h_{bk} - h_{ck})^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

k 番目の領域までの凹凸表面の面積の合計は式(2)によって与えられる。

$$A_T(\delta) = \sum_{K=1}^{N(\delta)} A_k(\delta) \quad (2)$$

ここで $N(\delta)$ は凹凸表面を被覆するために必要な面積 \times の区画の合計数である。フラクタル幾何において、寸法上の空間におけるフラクタルの測定は、一般的な式(3)で表される。

$$G(\delta) = G_0 \delta^{E-D} \quad (3)$$

ここで E はユークリッド次元を意味している。 $E = 2$ ならば G とは面積を導き、式(4)のようになる。

$$A_T(\delta) = A_{T0} \delta^{2-D_s} \quad (4)$$

ここで A_{T0} は凹凸表面の見かけの面積、 D_s は凹凸表面の実際のフラクタル次元である。以上の式より表面形状の三次元評価が可能となる。

式(1)~(4)を使って $\times = 0.3125\text{mm} \times 0.3125\text{mm}$ のメッシュに分割して求めた結果、せん断前は $D_s = 2.00504$ 、せん断後は CNL 制御で $D_s(\sigma_{n0} = 2\text{MPa}) = 2.00490$ 、 $D_s(\sigma_{n0} = 5\text{MPa}) = 2.00434$ 、CNS 制御 ($k_n = 3\text{GPa/m}$) で $D_s(2\text{MPa}) = 2.00465$ 、 $D_s(5\text{MPa}) = 2.00407$ であった。 D_s 値の減少割合は、CNL(2MPa):CNS(2MPa):CNL(5MPa):CNS(5MPa) = 14:39:70:97 であり、両ケースともに CNS 制御下で、また垂直応力が高いほど減少量が多い結果となった。これはせん断挙動と同じく拘束を受けることが影響していると考えられる。このような表面形状の変化は、図-6に示すように、高い凹凸部分が削られ、黒色区域が減少していることから明らかである。

6. おわりに

今回は初期垂直応力 $\sigma_{n0} = 2\text{MPa}$ 、 5MPa のケースで比較したが、今後はさらに試験ケースを増やし、異なる垂直応力における表面形状の変化とせん断強度との関係を解明していく。

「参考文献」 1) 永家健司他：岩盤不連続面の力学的挙動および表面形状のフラクタル特性の評価, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.33 - 40, 2004 2) H.Xie, J.Wang. Direct fractal measurement of fracture surfaces, Int. J. Sol. Str, 36, pp.3073-3084, 1999.

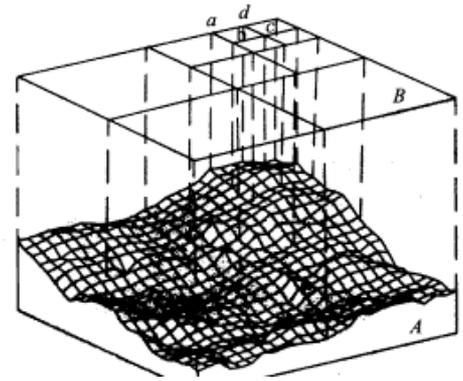


図-4 投影被覆法によるメッシュ分割

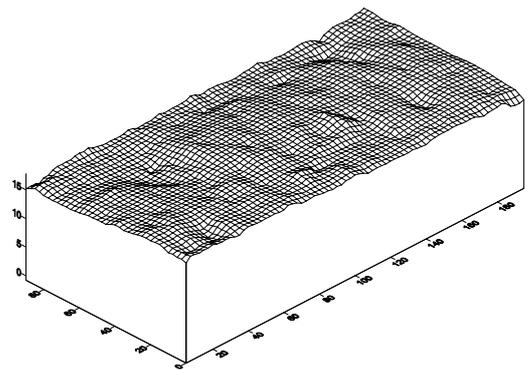


図-5 せん断前供試体表面形状

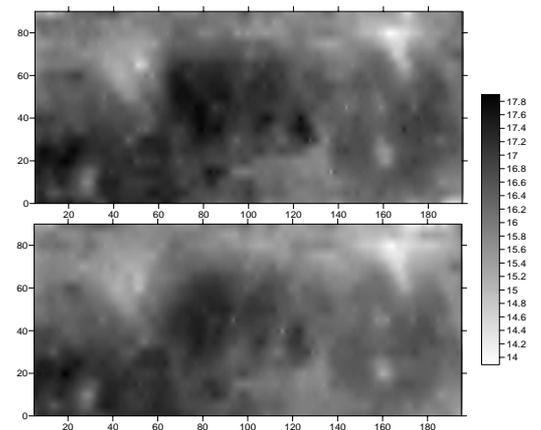


図-6 表面形状の変化

(上:せん断前 下:せん断後)