

岩盤不連続面のせん断挙動に及ぼす表面形状の影響

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
 九州電力(株) 正会員 山下裕司 九州電力(株) 正会員 安藤一郎
 長崎大学大学院 学生員 永家健司 長崎大学工学部○学生員 山下秀一

1. はじめに

近年、放射性廃棄物の地下処分やエネルギーの地下貯蔵など深部地下空間の開発・利用が注目されている。地下空間の安定性は、岩盤内に存在する不連続面の変形・強度特性に支配されるため、岩盤不連続面の力学的特性を適確に判断することが必要である。また、不連続面のせん断強度は不連続面の表面形状特性に大きく支配されるが、この両者の関係はまだ明らかにされていない。

本研究の目的は、せん断試験と表面凹凸計測の結果に基づいて、表面形状特性の変化とせん断強度との関連性を解明し、岩盤不連続面せん断挙動の定量的評価につなげていくことである。

2. 垂直剛性一定せん断試験

深部地下では、不連続面の表面ラフネスや損傷に伴うダイレーションの発生により周辺岩盤からの拘束が変わるため、垂直応力が一定になることはあり得ない。そこで、周辺岩盤からの拘束効果を考慮した岩盤不連続面の力学的特性を適切に求めるため、自動的に垂直剛性制御ができる試験装置を用いて、垂直剛性一定せん断試験を行う。

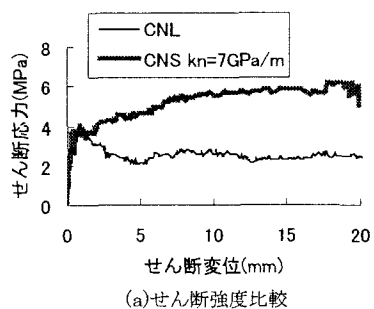
本研究では、初期垂直応力(σ_n)を 2、5MPa とし、CNS 制御では垂直剛性を $k_n=7\text{GPa/m}$ 、JRC 値を 4~6、8~10、12~14 とした計 12 ケースの試験を行った。

3. 試験結果と考察

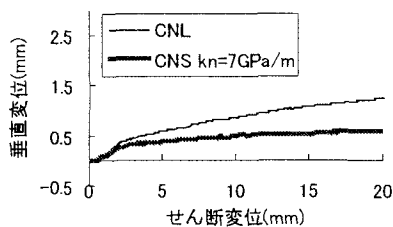
図-1 は、JRC 値 12~14 の形状の供試体に初期垂直応力 $\sigma_n=5\text{MPa}$ で 20mm せん断後の試験結果である。せん断変位—せん断応力の関係を見ると、CNL 制御と CNS 制御のピークせん断応力後の残留強度に大きな差が生じている。また、せん断変位—垂直変位の関係でも垂直変位に大きな差が見られる。ここでせん断変位—垂直変位の関係から残留強度の差について考えると、CNL 制御は周囲からの拘束効果による影響を受けずに垂直変位は増加するが、CNS 制御では周囲からの拘束効果により垂直変位が著しく抑制される。また、CNS 制御は CNL 制御よりも供試体表面のラフネスが削れていると考えることができ、垂直変位は CNS 制御の方が小さくなったと言える。つまり、CNS 制御では供試体表面のラフネスの噛み合いが CNL 制御よりも強いいため、CNS 制御ではピークせん断応力後にせん断に伴いせん断応力が増加していくと考えられる。

4. 表面凹凸計測システムによる表面計測と考察

不連続面のせん断挙動と併せて表面形状の変化を定量的に評価し、表面損傷が力学的特性に及ぼす影響を評価するために、レーザー変位計を用いて、せん断試験後の供試体の表面形状を測定した。その際、供試体に 5 本の測線を上下面の同じ位置に設け、測定間隔 0.3mm でせん断方向のみ、一次元的に読み取った。



(a)せん断強度比較



(b)ダイレーションの比較

図-1 試験結果(JRC=12~14, $\sigma_n=5\text{MPa}$)

図-2にJRC値12~14の形状における表面形状の破壊形状を示す。図では下面を右側にせん断させている。この表面凹凸計測の結果を用いれば、フラクタル次元解析により、不連続面のせん断強度と表面損傷との相関性を見出せると考えられる。そこで、フラクタル次元Dを式(1)と(2)から求めることにする。

$$U(h) = \left\{ \frac{1}{(N-j)} \sum_{i=1}^{N-j} \left[\frac{Z(xi+h) - Z(xi)}{h} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$U(h) = B \times h^{1-D} \quad (2)$$

ここで、 $U(h)$ は表面ラフネス特性(平均ラフネス角)、 B は振幅、 h は水平計測間隔を表わしている。

図-3は一例として、JRC値12~14の形状でCNL制御でせん断試験を行ったもののフラクタル次元の解析結果である。この結果から、水平間隔 h が大きくなるにつれて $U(h)$ が小さくなっていくことがわかる。また表-1からは、せん断前よりせん断後の次元が低くなり、初期垂直応力が大きいほうが次元が低くなっていることがわかる。つまり、表面の凹凸の大きいものから削れ始め、垂直応力が大きいほど、せん断が進むにつれ表面の凹凸が削れ、表面が滑らかになることが示されている。

5. 表面特性とせん断特性の関係

岩盤不連続面のせん断強度の影響要素として、不連続面に加えた垂直応力、不連続面の表面ラフネス特性、不連続面の材料特性が挙げられ、せん断強度は以下の式によって表わされる。

$$\tau_m = \sigma_n \tan \left\{ a [U(h)]^c \log \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right\} \quad (3)$$

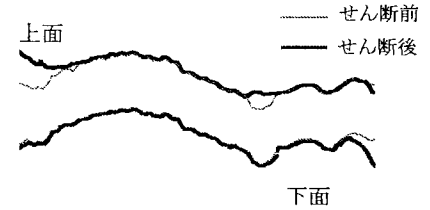
ここで、 σ_n は垂直応力、 σ_j は壁面圧縮強度、 ϕ_b は基本摩擦角、 a 、 c は実験定数である。

6. おわりに

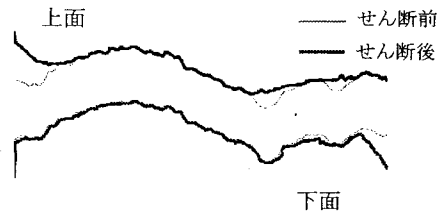
せん断試験と表面形状の計測により、岩盤不連続面のせん断挙動に及ぼす表面形状の影響が明らかになった。今後は、さらに試験データを蓄積して式(3)にある実験定数 a 、 c を定め、せん断強度と表面形状との関係を求めていく。

[参考文献]

- 1) 溝上建, 蔣宇静, 祐徳泰郎: 高性能不連続面せん断試験装置の開発, 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.92-96, 2001.
- 2) 岩の力学連合会: 岩盤不連続面の定量的記載法(ISRM 指針日本語訳), Vol.3, pp.49, 1985.



(a) $\sigma_n = 5 \text{ MPa}$ CNL 制御



(b) $\sigma_n = 5 \text{ MPa}$ CNS 制御

図-2 表面破壊の比較(JRC=12~14)

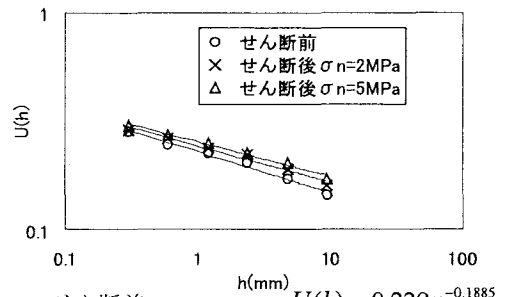


図-3 フラクタル次元の解析結果 (JRC 値 12~14、下面)

表-1 フラクタル次元 D (JRC=12~14)

ケース	フラクタル次元 D
せん断前	1.1885
せん断後 ($\sigma_n = 2 \text{ MPa}$)	1.1637
せん断後 ($\sigma_n = 5 \text{ MPa}$)	1.1583