

デジタル制御型岩盤不連続面一面せん断試験機の製作と応用

長崎大学工学部 正会員 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 溝上 建 九州電力(株) 正会員 祐徳泰郎
長崎大学工学部○学生員 渡辺秀一

1. はじめに

大深度地下空洞や掘削岩盤斜面の変形挙動および安定性は、岩盤内不連続面のせん断強度に支配される場合が多い。既往研究では、垂直応力一定(CNL)でのせん断試験が一般的に行われているが、この試験方法では、深部地下やロックボルト等によって補強される亀裂性岩盤の場合、不連続面の表面ラフネスの変形や損傷に伴うダイレイションの発生により周辺岩盤からの拘束が変わるため、不連続面に作用する垂直応力が一定になることはあり得ない。そこで岩盤不連続面の力学的特性を適切に求めるには、垂直剛性一定(CNS)での一面せん断試験を行う必要がある。本研究は、CNL制御のみならず、CNS制御もコンピュータにより自動的に行える一面せん断試験機を開発し、これを用いた模擬不連続面のせん断強度およびダイレイション挙動の比較実験を行い、岩盤不連続面の力学特性の境界条件依存性を明らかにする。

2. 一面せん断試験機の製作

開発した不連続面一面せん断試験装置の概要を図-1に示す¹⁾。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、垂直荷重は2か所で载荷(各ジャッキは独立した制御が可能で、一台当たり最大200kN、計400kN 载荷)可能な構造となっている。供試体は最大幅12.5cm、最大長さ50cmまで設置可能であり、2本の垂直载荷ジャッキにより不連続面の表面に比較的均一に垂直応力を作用させることが可能である。システム構成を図-2に示す。垂直荷重及びせん断荷重(最大400kN 载荷)ともに電気・油圧サーボ制御方式で、マイクロコンピュータによりコントロールすることができる。なお、油圧サーボの動作制御上、フィードバックをかける時間間隔はできるだけ短くすることが精度の高い制御につながることから、A/D・D/A変換ボードは16ビットのものを使用する。計測制御プログラムは仮想計測器ソフトウェアを採用することにより、試験中のデータを迅速に採取することができ、せん断過程において生じたダイレイションを垂直剛性に基づく垂直変位のフィードバックと照合させながら、2本の垂直ジャッキ荷重の独立制御をパソコン上でほぼリアルタイムで実現することができる。

試験装置の特長としては、コンピュータに所定の垂直剛性値を入力するだけで、CNS制御試験ができること、また試験途中において試験を中断することなく制御を切り替えることが可能であり、表面ラフネスの損傷などによる垂直剛性の低下の影響効果を調べる多段階垂直剛性制御試験を可能にすることが挙げられる。

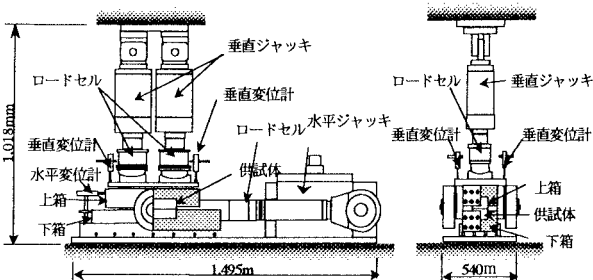


図-1 不連続面一面せん断試験装置の概要

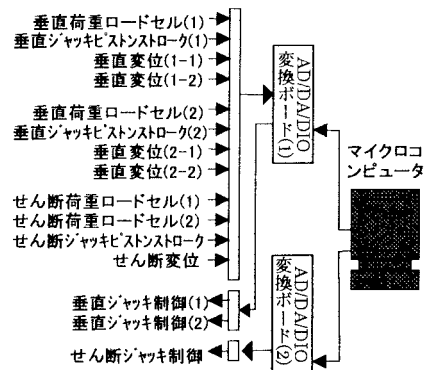


図-2 システム構成

3. 岩盤不連続面模擬供試体

材料配合は、重量比で石膏：砂：水：遅延剤＝1：1：0.28：0.005で、28日気中養生後の模擬供試体は一軸圧縮強度 $\sigma_c=47.4\text{MPa}$ であり、軟岩～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20m、幅10cmであり、表面形状は、ISRM 指針②に示したJRC 値(節理の粗さ係数)12～14 のプロファイルに基づいて作成し、奥行き方向は同じ形状とする。

4. 試験結果

垂直剛性値がせん断強度に及ぼす影響を明らかにするため、CNL 制御とCNS 制御での一面せん断試験を行う。CNS 制御では垂直剛性を3 GPa/mと7 GPa/mとした2 ケースを用いた。

初期垂直応力 σ_{n0} は2, 5, 10MPa, せん断速度は0.5mm/minである。

図-3に垂直応力の制御結果を示す。CNL およびCNS では高精度の制御が実現できた。図-4に $\sigma_{n0}=5\text{MPa}$ でせん断に伴うせん断応力、垂直変位、垂直応力の変化を示す。せん断力-せん断変位の関係を見ると、CNL 制御ではピーク強度後にひずみ軟化を起こして残留状態に至るが、CNS 制御では垂直剛性値が大きくなるにつれひずみ硬化を示すようになり、残留強度に差が大きく生じることがわかる。このせん断挙動の違いは、せん断過程における垂直変位及び垂直応力の関係から理解できる。すなわち、CNL 制御では、不連続面表面のラフネスの乗り上げに伴い垂直変位が周囲からの拘束を受けず顕著に増加するのに対し、CNS 制御では、ダイレーションの発生に伴って周囲から大きな拘束を受けるため、垂直変位が前者よりも抑制される。その結果、垂直応力が垂直変位に比例して増大する。

CNL 制御ピーク強度に対応したせん断変位までの垂直応力とせん断応力の経路と、それ以降の残留せん断強度の変化(例えば、せん断変位5mm 時)を図-5に示す。CNL, CNS 制御ともにピーク強度に大きな差はないが、垂直剛性値が大きくなるにつれて、摩擦角は大きく、粘着力は小さくなる傾向が認められる。また、せん断変位5mm では、摩擦角があまり垂直剛性によって変わらなかった。それは、ここに用いた供試体の圧縮強度や表面形状による結果であって、圧縮強度と表面粗さをいろいろと変化させた場合の傾向を詳細に調べていく必要がある。

5. おわりに

模擬供試体を用いたせん断試験結果より、今回開発したせん断試験機の制御精度が検証できたとともに、不連続面のせん断挙動が境界拘束条件の影響を大きく受けることを明らかにすることができた。今後は表面損傷の定量評価などに基づき、せん断挙動の境界条件依存性のメカニズムをさらに解明していく。

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, 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.

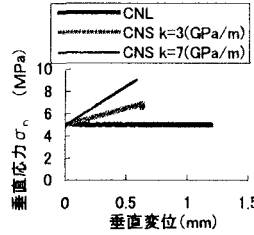


図-3 垂直応力の制御結果

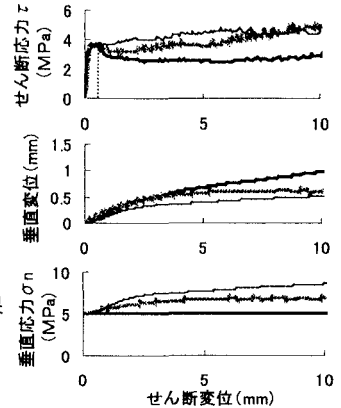
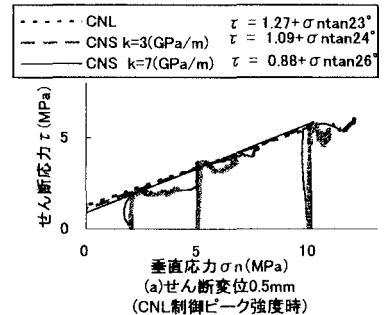
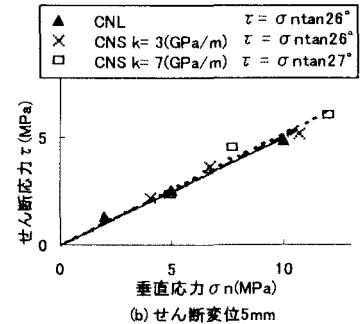


図-4 試験結果($\sigma_{n0}=5\text{MPa}$)



(a)せん断変位0.5mm (CNL制御ピーク強度時)



(b)せん断変位5mm

図-5 応力経路