

高性能不連続面せん断試験装置の開発

Development of High-performance Direct Shear Apparatus for Rock Joints

溝上 建*・蔣 宇静**・祐徳泰郎***

Tatsuru MIZOKAMI, Yujing JIANG and Yasuo YUUTOKU

Correct evaluation of the shear strength of rock joints plays an important role in the design of underground openings in rocks and stability analysis of natural and excavated rock slopes. The shear behavior of rock joints is usually investigated in the laboratory by using a direct shear apparatus, where the normal load is kept constant (CNL) during the shear process. However, they may be quite inappropriate for the situations where the normal stress in the field changes considerably during the shearing process. In this study, a high-performance direct shear apparatus has been developed to accommodate the change in normal stress with dilation under constant normal stiffness(CNS) condition. The shear test results of the irregular joint specimens show that the normal stiffness can have a large influence on shear strength and dilation behavior of the joints.

Keywords : direct shear test, rock joints, shear strength, constant normal stiffness

1. はじめに

揚水発電所建設などの大深度地下空洞や自然または掘削岩盤斜面の変形挙動および安定性は、岩盤内に存在する不連続面のせん断強度に強く支配される場合が多い。一方、自然界における岩盤不連続面の挙動特性は、その表面ラフネスや開口性、挟在物、せん断履歴、垂直応力等、多くの要素に影響されるため、これらをすべて含めた理論的検討や原位試験は非常に困難であり、様々な条件が比較的自由に設定できる室内試験によって求めるべきものであると思われる。既往研究では、不連続面に作用する垂直応力をせん断過程において一定とする、いわゆる垂直応力一定条件 (CNL) での一面せん断試験が一般的に行われている。この試験方法は、無補強岩盤斜面問題のように、不連続面に作用する垂直応力がほぼ一定に保たれる場合に適するものであるが、深部地下やロックボルトなどによって補強される亀裂性岩盤の場合に対しては、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強くなるため、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¹⁾。このような場合の岩盤不連続面の力学的特性を適切に求めるためには、垂直剛性一定 (CNS) での一面せん断試験を行なう必要がある^{2)~5)}。Indraratna ら^{2)~4)}や大西ら⁵⁾は垂直載荷装置に弾性バネを挿入して地山の変形剛性を表現する方式を取り、不連続面のせん断強度に及ぼす垂直剛性の影響を実験的に考察している。しかしながら、この方式では地山の変形特性に応じた垂直剛性を容易に与えられないことや、バネの剛性をハード的に強くし過ぎると表面ラフネスに衝撃を与える恐れがあり試験結果を正しく得られない問題点がある。

本研究は、垂直応力一定 (CNL)、垂直変位一定 (CND) のみならず、周辺地山や不連続面の表面ラフネスの変形・破壊に応じる垂直応力の変化をコンピュータにより自動的に制御できる垂直剛性制御 (CNS) 一面せん断試験装置を開発する。また、開発した試験装置とコンピュータ制御システムを用いて、CNL と CNS における人工模

* 正会員 九州電力㈱総合研究所

** 正会員 工博 長崎大学工学部社会開発工学科

*** 正会員 九州電力㈱総合研究所

擬不連続面のせん断強度およびダイレーション挙動の比較実験を行ない、岩盤不連続面の力学的特性の境界条件依存性を明らかにする。

2. 岩盤不連続面の力学的特性試験法

単一不連続面の力学的特性に関する代表的な室内試験法には、垂直载荷における変形特性を求める垂直载荷試験と、せん断強度特性を求める CNL 一面せん断試験及び CNS 一面せん断試験が挙げられる。
 ⑥. 深部に位置する地下空洞を対象とする場合は、CNS 一面せん断試験により不連続面のせん断強度を求めるべきであることが先に指摘されているが、周辺岩盤の変形特性を反映した垂直剛性 (k_n) は以下の式より決定することができる。

$$k_n = E / (1 + \nu) r \quad (1)$$

式中、 E , ν は周辺岩盤の変形係数とポアソン比、 r は影響を受ける範囲である。

3. 新しい岩盤不連続面せん断試験装置の製作

3.1 装置のハード構成

開発した不連続面せん断試験装置の概要を図-2 に示す。試験機の基本的ハード構成は、江崎らが開発した試験機⁷⁾を参考とする。すなわち、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 载荷) 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 か所若しくは 2 か所で载荷 (各ジャッキは独立した制御が可能で、1 台当たり最大 200kN、計 400kN まで载荷) 可能な構造となっている。

供試体を収納するせん断箱の詳細を図-3 に示す。供試体幅 10 cm を標準としているが、スペーサーを取り外すことにより最大幅 12.5 cm までの供試体の設置が可能である。コアリング等により採取した試料については、JIS 規格の溝形鋼 (B125×H65) を型枠にして試料を埋め込み、これをせん断箱内にセットしてせん断を行なう。なお、

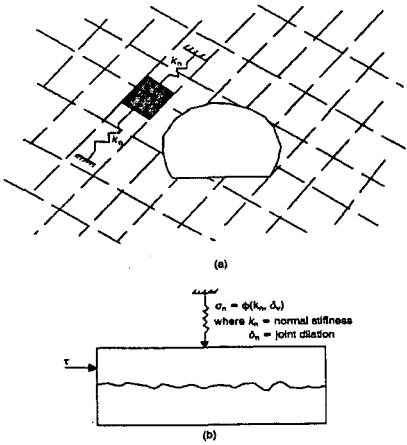


図-1 垂直剛性一定試験载荷条件⁴⁾

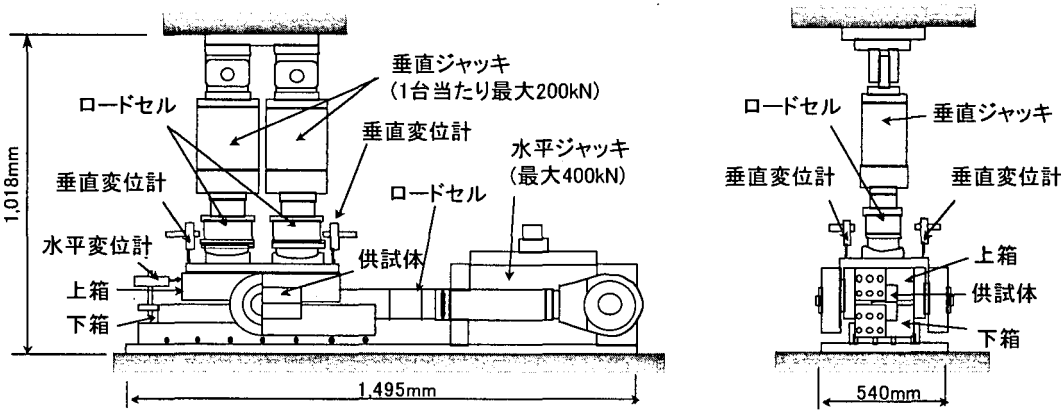


図-2 不連続面せん断試験装置の概要

供試体の長さが最大で 50 cm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。

3.2 デジタル制御システム

システム構成を図-4 に示す。垂直荷重及びせん断荷重ともに電気・油圧サーボによるクローズドループ制御で、マイクロコンピュータによりコントロールするシステムである。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出来るだけ短くすることが精度の高い制御に繋がることから、A/D・D/A 変換ボードは 16 ビットのものを使用する。また、計測制御プログラムは、仮想計測器ソフトウェア LabVIEW5.1 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ーションを式(1)より決定された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ることにより、2 本の垂直ジャッキ荷重の独立制御は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。

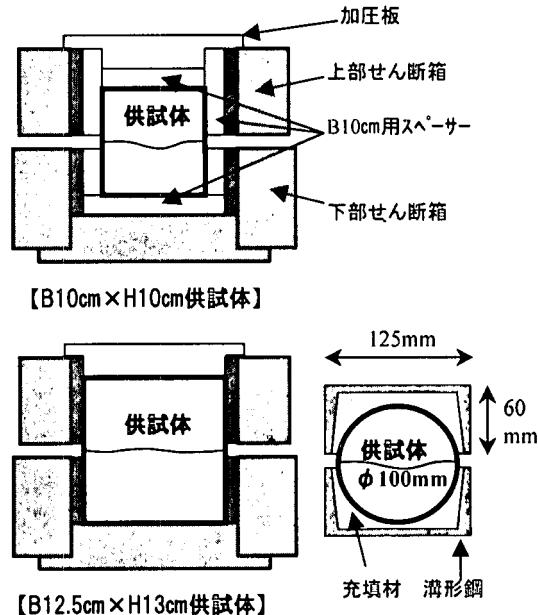


図-3 せん断箱の詳細図

3.3 試験装置全体の特長

(1)垂直剛性一定制御が可能

既往の垂直荷重载荷装置にバネを挿入する垂直剛性一定試験に比べて、今回開発した試験装置は、コンピュータに所定の垂直剛性値を入力するだけでよく、垂直剛性の設定、変更が格段に容易である。

(2)試験途中での制御切替えが可能

試験途中において試験を中断することなく（垂直荷重を除荷することなく）制御を切り替えること、たとえば、CNS 試験から CNL 制御への切り替え、あるいは CNS 制御において剛性値の切り替えが可能である。これは、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。

(3)最大長さ 50 cm の不連続面供試体のせん断試験が可能

2 本の垂直载荷ジャッキを独立して制御できることから、これまでよりも大きなサイズの供試体（最大長さ 50 cm）のせん断試験を可能とする。

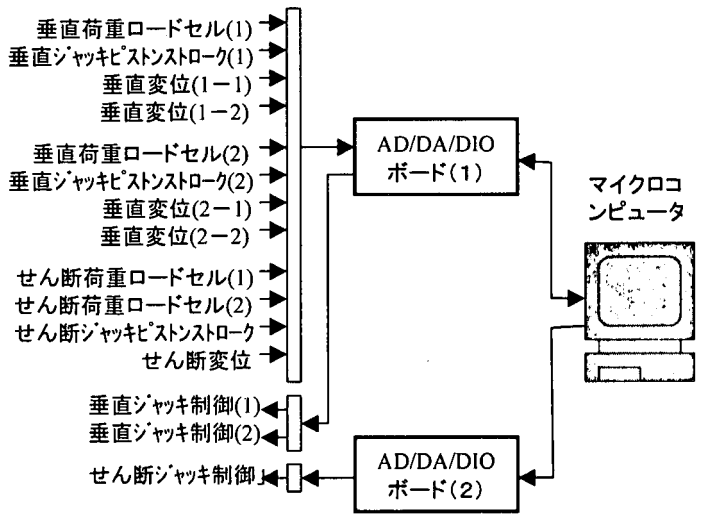


図-4 不連続面せん断試験装置のシステム構成

4. 垂直剛性制御条件における不連続面のせん断挙動の考察

4.1 模擬供試体の作成

開発したせん断試験機の機能検証を行なうために、模擬供試体 (B10cm×L20cm×H10cm) を用いたせん断試験を実施した。一例として、不連続面の表面形状は ISRM 指針⁸⁾ に示した JRC 値 8～10 のプロファイルを用い、奥行き方向には同じ形状とした。このプロファイルの木製形枠を作成し、これに石膏系材料を流し込み不連続面供試体の片方を作成する。硬化後、この供試体を形枠とし他方の供試体を作成する。すなわち、表面ラフネスがかみ合った不連続面供試体である。なお、供試体の材料配合は、重量比で速硬性石膏：水：遅延材＝1：0.23：0.005 で、28 日気中養生後の模擬供試体の物性は、一軸圧縮強度 $\sigma = 65\text{MPa}$ 、弾性係数 $E = 24.7\text{GPa}$ ($E/\sigma = 380$) であり、中硬岩相当の模擬材料である。

4.2 試験結果

垂直剛性がせん断強度に及ぼす影響を明らかにするために、CNL 制御と CNS 制御の 2 種類境界拘束条件下での一面せん断試験を行なう。CNS 制御では式(1)に基づき垂直剛性値 (k_n) を 4GPa/m と 20GPa/m の 2 ケースを設定する。また、初期垂直応力は 0.5MPa 、せん断速度は 0.5mm/min である。

せん断中の垂直応力の制御結果を図-5 に示す。CNS 制御の 2 ケースはともに所定の垂直剛性で精度良く制御できている。また、CNL 制御も問題ない。せん断変位とせん断応力、垂直変位、垂直応力との関係を図-6 に示す。せん断応力-せん断変位の関係を見ると、CNL 制御では、ピークせん断応力はせん断変位 1mm 以下の小さなせん断変位で生じる。これは初期のかみ合った不連続面の強度が早期に発揮されたと考えられる。その後は、ひずみ軟化を生じてせん断変位 5mm 以降で残留状態となる。これに対して $k_n = 4\text{GPa/m}$ の CNS 制御では、せん断初期に CNL 試験とほぼ同じ傾向を示すものの、その後はひずみ硬化を示しながらせん断変位 12mm 程度で最大せん断応力 1.3MPa を生じる。次に $k_n = 20\text{GPa/m}$ のケースでは、せん断変位の増加とともにひずみ硬化を生じ、同じせん断変位 12mm 付近で最大せん断応力 2.5MPa を示す。

CNL 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及び垂直応力の関係から理解できる。

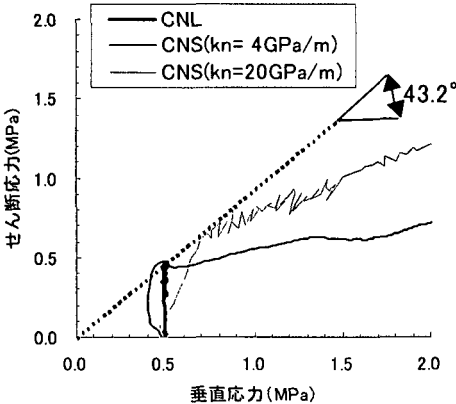


図-7 応力経路

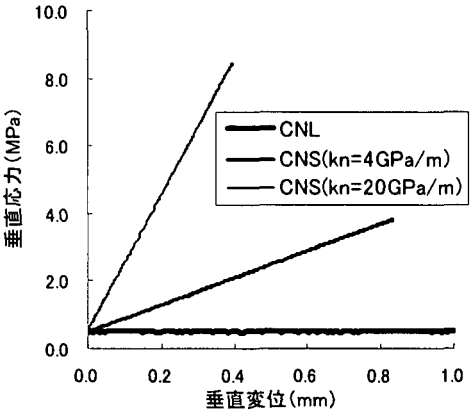


図-5 垂直応力の制御結果

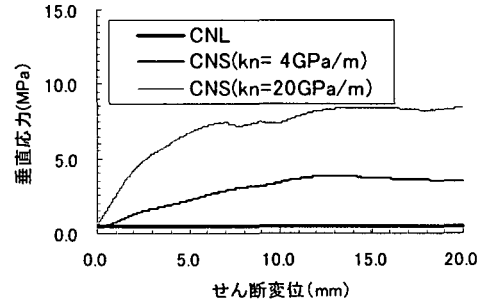
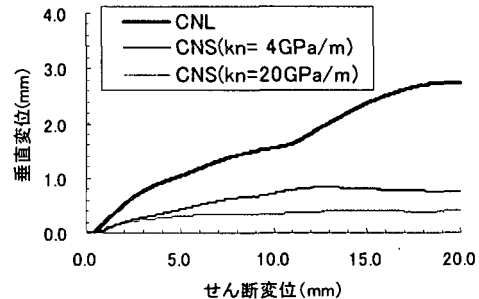
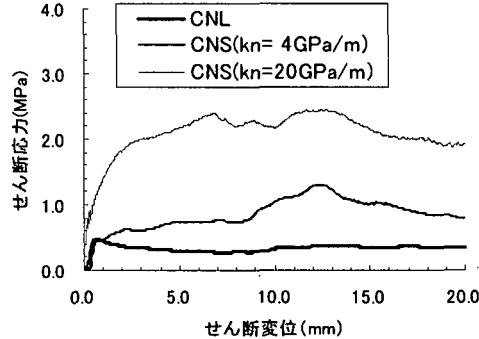


図-6 試験結果

すなわち、CNL 制御では、不連続面表面のラフネスの乗上げに伴いせん断過程での垂直変位(ダイレーション)は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、垂直変形に伴って垂直荷重が増加して周囲からの大きな拘束を受けることになるので、垂直変位が CNL 制御よりも抑制される。その結果、せん断過程においては垂直応力がダイレーションに比例して増大する。ちなみに $k_n=20\text{GPa/m}$ の CNS 制御では、最大垂直変位は 0.4mm と CNL 制御の $1/7$ 程度になり、垂直応力は 8MPa まで増加する。

せん断中の垂直応力とせん断応力の応力経路を図-7 に示す。既往の研究⁵⁾でも指摘されているが、CNL 制御下での最大せん断応力時及び CNS 制御下での応力経路が最初に折れ曲がる点は、原点を通り勾配 43.2° の直線上に概ね位置している。この CNS 制御下の応力経路の折れ点が現れる時のせん断変位は 1mm 以下であり、CNL 制御で最大せん断応力が発揮されるせん断変位とほぼ一致することから、この CNS 試験応力経路の最初の折れ点は初期のかみ合った状態の不連続面のせん断強度と垂直応力の関係を意味すると考える。すなわち初期のかみ合った状態の不連続面の強度定数は粘着力 $c=0$ 、内部摩擦角 $\phi=43.2^\circ$ で与えられることを示している。

以上の試験結果の考察により、今回開発したせん断試験機の性能と制御精度が検証できたとともに、不連続面のせん断強度が境界拘束条件に大きく支配されることを明らかにすることができたと考える。

5. おわりに

本研究は、岩盤不連続面の力学的特性を正しく求めることを目的とし、実際の様々な境界条件を再現できる高性能一面せん断試験装置と制御システムを試作した。垂直応力一定 (CNL) と垂直剛性一定 (CNS) での人工模擬不連続面のせん断強度およびダイレーション挙動の比較実験を行なうことにより、試験機の信頼性と実用性を検証できたとともに、実験ケースがまだ少ないものの、岩盤不連続面の力学的特性の境界拘束条件依存性を明らかにすることができた。今後は、原位置不連続面の表面型取りを行なうことにより、より実際の賦存状況に近い不連続面の一面せん断試験を実施し、岩盤構造物の合理的設計に役に立つデータを蓄積していく。

参考文献

- 1) Huang,X., Haimson,B.C., Plesha,M.E. and Qiu,X. : An Investigation of the Mechanics of Rock Joints-Part 1. Laboratory Investigation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No.3, pp.257-269, 1993.
- 2) Brahim Benmokrane & Gerard Ballivy : Laboratory of shear behaviour of rock joints under constant normal stiffness conditions, Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources, Khair(ed.), Balkema, pp.899-906, 1989.
- 3) Indraratna,B. & Haque,A. : Experimental Study of Shear Behaviour of Rock Joints Under Constant Normal Stiffness, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 34, No.3/4, pp.534, 1993.
- 4) Indraratna,B., Haque,A. and Aziz,N. : Shear behaviour of idealized infilled joints under constant normal stiffness, Geotechnique 49, No.3, pp.331-355, 1999.
- 5) 大西有三ほか：岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発・研究とその変遷，土木学会論文集 No.645/III-50, pp.307-320, 2000.
- 6) 蔣 宇静，中川光雄，江崎哲郎：岩盤不連続体解析に必要とする不連続面の挙動特性の評価法，土木学会論文集 No.624/III-47, pp.231-243, 1999.
- 7) 江崎哲郎ほか：岩盤不連続面の表面形状変化とせん断特性との関係，第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.79-84, 1998.
- 8) 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.