

(18) 岩盤不連続面のせん断特性の応力依存性に関する実験的研究

(株)青木建設	正会員	○國村省吾
(株)青木建設	正会員	高橋裕之
(株)青木建設	正会員	永井哲夫
東京電力(株)	正会員	田中典明

Experimental Study on Stress – Dependency of Shear Stiffness in Discontinuities of Rock Masses

Shogo	Kunimura, Aoki Corporation
Hiroyuki	Takahashi, Aoki Corporation
Tetsuo	Nagai, Aoki Corporation
Noriaki	Tanaka, Tokyo Electric Power Co., Inc.

Abstract

The behaviour of jointed rock masses is dominated by the geometrical and mechanical properties of rock joints. To construct an economical and rational cavern in jointed rock masses, it is very important to evaluate the mechanical behaviour of rock masses.

The authors have already indicated that shear stiffness depended on normal stress and the mechanical behaviour of rock masses could be estimated from considering normal stress-dependency of shear stiffness of discontinuities. Consequently, it is important to consider properties of discontinuities well in the case of estimating the mechanical behaviour of jointed rock masses.

In this research, we aim at deformational properties of discontinuities and the direct shear tests was conducted on modelling of discontinuities in rock masses. We estimate shear stiffness – normal stress relationship of discontinuities and parameters of shear stiffness.

1. はじめに

不連続性岩盤においては、岩盤の力学的挙動がそれを構成する岩石の力学特性よりも不連続面の特性により支配される。このような不連続性岩盤内に大規模地下空洞を合理的に建設するためには、空洞掘削に伴う周辺岩盤の挙動を的確に把握し安定性を評価することが重要である。

著者らは、これまでに国内の既設揚水発電所地下空洞における施工実績および実測結果に関する事例解析をもとに、大規模地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の力学的挙動に関して考察を行い、火成岩よりなる岩盤においては、掘削に伴う既存節理の開口現象の影響で岩盤内に大きな変位を生じ、不安定な状態になることがあることを明らかにした¹⁾。この開口現象に関しては、既存節理のせん断挙動による影響が強いと考えられるような報告^{2), 3)}もある。さらに、不連続面をある一方向に規則的に設けた不連続供試体を用いて、その不連続面の数および角度を変化させた一軸および三軸圧縮試験⁴⁾から、不連続面のせん断剛性はそこに作用する垂直応力に依存することがわかり、不連続性岩盤の見かけの変形特性が不連続面のせん断剛性の応力依存性を考慮することにより説明できることを明らかにした⁵⁾。以上のことから、不連続性岩盤の力学的挙動を評価するに際して、不連続面の力学特性を十分に考慮することが重要であることが分かった。

不連続面のせん断強度特性に関する研究は、従来から数多く行われており、Patton, Barton, Ladanyi &

Archambault らによりせん断強度式が提案されている。また、変形特性に関する研究も、Goodman, Barton, Bandis, Kulhawy らによりせん断応力-変位関係や垂直およびせん断剛性について行われている。しかし、未解決な問題が多く残されているのが現状である。

そこで本研究では、不連続面の変形特性に主眼を置いて、岩盤不連続面モデルを用いた直接せん断試験を実施し、不連続面の変形特性について検討を行う。

2. 不連続面の変形特性について

著者の一人は、不連続面についてはその変形特性を不連続面の垂直剛性とせん断剛性を用いて表せることを明らかにした⁶⁾。そこでは、不連続面のせん断剛性に関しては、Kulhawy⁷⁾が提案している式(1)を用いて、不連続面に作用する垂直応力 (σ_n) に依存する量として表している。

$$K_s = K_j \cdot \gamma_w \left[\frac{\sigma_n}{P_a} \right]^{n_j} \quad (1)$$

ここで、 K_j は剛性数、 n_j は剛性指数である。なお、 γ_w および P_a はそれぞれ水の比重および大気圧で、 K_j の次元を無次元化するために用いられているパラメータである。垂直剛性に関しては、そこに作用する垂直応力が小さい場合には一定として差し支えないことを示している。

工学的問題に対して上記の関係を適用する場合に問題となるのが、剛性数 (K_j) と剛性指数 (n_j) の2つのパラメータの設定方法にある。

3. 不連続面の直接せん断試験の概要

本研究では、せん断剛性に関する2つのパラメータを評価する目的で、その第一ステップとして平坦な不連続面に関してせん断面積の相違による寸法効果と、平坦と規則的な歯型の不連続面での不連続面粗さの影響について実験を行った結果を報告する。

3.1 実験装置

本実験に用いた実験装置を図-1に示す。実験装置は、せん断箱とH型鋼による門型フレームと垂直方向100tonおよび水平方向50tonまで載荷可能なアクチュエータから構成されている。せん断箱は、せん断面積が1000cm² (50cm×20cm) と450cm² (30cm×15cm) の2種類があり、上箱支持-下箱移動方式となっている。垂直およびせん断の両方とも電気油圧サーボ方式により、垂直方向は荷重制御、変位制御と剛性一定制御、水平方向は荷重制御と水平制御が可能である。

3.2 供試体

平坦な不連続面と規則的な歯型の不連続面を有する供試体を用いて実験を行った。図-2に供試体を示す。供試体の寸法は、平坦な不連続面を有する供試体として、せん断面積が1000cm² (長さ50cm×幅20cm×高さ20.1cm) と450cm² (長さ30cm×幅15cm×高さ15.1cm)、規則的な歯型の不連続面を有する供試体として、歯型斜面の傾斜角10°、歯型の基底長3cm、せん断面積450cm² (長さ30cm×幅15cm×高さ15.1cm) である。供試体はモルタルにより作製し、その配合は早強セメント：川砂：水が重量比1：2：0.6である。それを、上下別々の型枠に打ち込み気中養生させた。これらの供試体の諸特性は、一軸圧縮強度が平均30MPa、限界ひずみが平均0.35%で、図-3に示す限界ひずみ⁸⁾—一軸圧縮

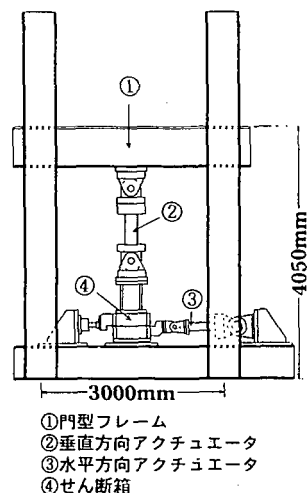
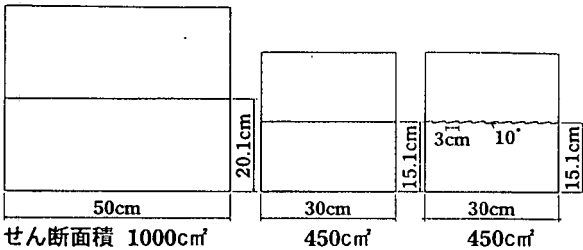
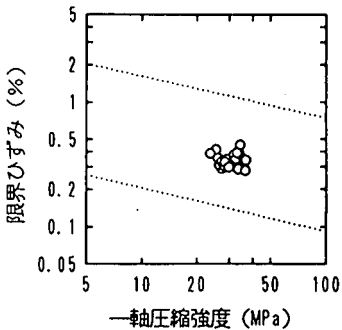


図-1 せん断実験装置

強度の関係に示される帯状範囲内に位置している。



図－２ 供試体形状



図－３ 境界ひずみ－一軸圧縮強度関係

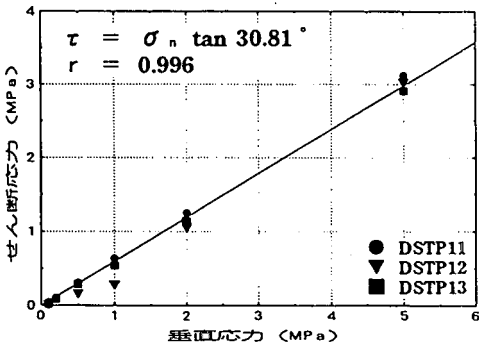
3.3 実験方法

供試体を上下別々のせん断箱に設置する。ここでは不連続面の中心がせん断面と一致するようになる。応力径路としては、垂直荷重を所定の設定値まで荷重制御により載荷し、その荷重を一定に保持したまま、せん断荷重を変位制御により載荷し、せん断終了後垂直応力を除荷するものである。せん断載荷は、所定の垂直応力でピークを越えて残留状態まで行い、試験終了後に供試体をせん断箱より脱型しせん断面の観察を行った後、もう一度せん断箱に設置して次の載荷を行った。本実験では、垂直応力を、0.1MPa、0.2MPa、0.5MPa、1.0MPa、2.0MPa、5.0MPaの6パターン設定し変位速度は0.05mm/minとした。ここで、不連続面の垂直方向の変形特性を得るために、せん断試験を開始する前に、所定の垂直荷重の繰り返し載荷を行った。変位は、垂直方向は垂直荷重載荷板を高感度変位計により4箇所、せん断方向は上下のせん断箱を高感度変位計により5箇所の計測を行った。試験数は、それぞれの不連続面の状態に対して3個の供試体で行った。

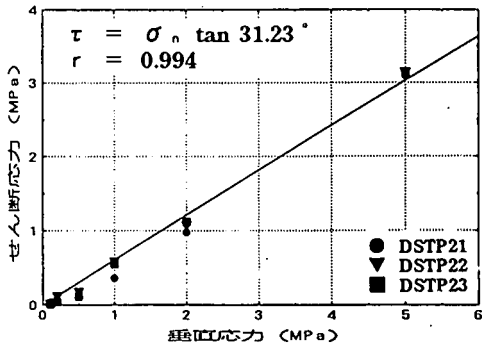
4. 実験結果

4.1 せん断強度－垂直応力関係

図－4～図－5に平坦な不連続面でのせん断試験から得られたせん断強度－垂直応力関係を示す。それにあわせて、実験結果から最小二乗法により直線近似したせん断破壊線も図示した。両方ともかなり強い相関があり、それから得られた摩擦角はおよそ31°である。一般に、平坦な不連続面の摩擦角は30～35°の間にあると見られており⁹⁾、本実験の岩盤不連続面モデルは妥当であることが分かる。この結果より、



図－４ せん断面積 1000cm²、
平坦な不連続面のせん断強度



図－５ せん断面積 450cm²、
平坦な不連続面のせん断強度

せん断強度に対してせん断面積の相違すなわち寸法効果の影響は見られないことがわかる。図-6には、規則的な歯型(10°)の不連続面に対するせん断強度-垂直応力関係を示した。ここでは、実線で垂直応力範囲が0.5MPa以下に対して最小二乗法により直線近似したせん断破壊線を、点線で平坦な不連続面から得られたせん断破壊線を図に示した。垂直応力が0.5MPa以下の場合の摩擦角はおよそ39°であり、平坦と比べてほぼ歯型形状程度の増加となっている。

4.2 せん断剛性の垂直応力依存性

図-7～図-9にせん断剛性-垂直応力関係を、併せて最小二乗法により近似した直線も示した。これらの結果から、それらの間には強い相関があり、せん断剛性は不連続面に作用する垂直応力に依存することが分かる。図-7と図-8の結果から、せん断面積が大きい方がせん断剛性が小さいものとなっており、せん断剛性は寸法効果の影響を受けることが分かる。これは、せん断剛性は強い寸法効果を示すというBarton¹⁰⁾の結果に対応している。また、規則的な歯型の不連続面のせん断剛性は、平坦に比べ小さい値となっており、せん断剛性は不連続面の粗さの影響を受けることが分かる。

表-1に、それぞれの不連続面形状における剛性数(K_s)、剛性指数(n_s)およびせん断剛性(K_s)を示す。表-1から、剛性指数(n_s)は0.69～0.72であり、不連続面の粗さおよび寸法効果によらずほぼ同様な値となることが分かる。それに対して、剛性数(K_s)は21,000～31,100程度の範囲にあり、不連続面の粗さおよび寸法効果の影響を受けると考えられる。

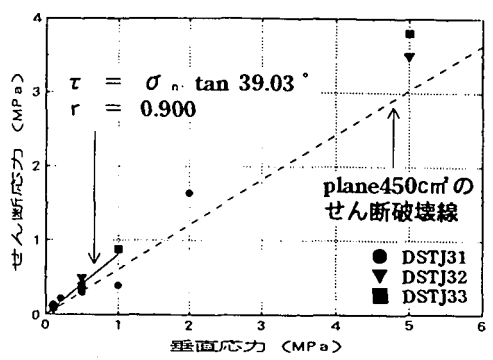


図-6 せん断面積 450cm²、規則的な歯型(10°)の不連続面のせん断強度

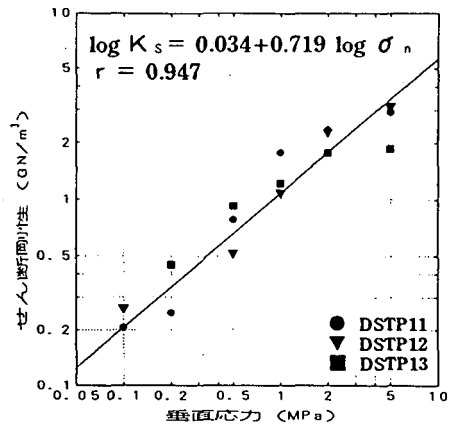


図-7 せん断面積 1000cm²、平坦な不連続面のせん断剛性

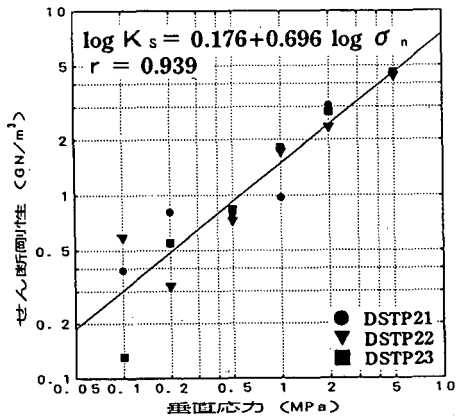


図-8 せん断面積 450cm²、平坦な不連続面のせん断剛性

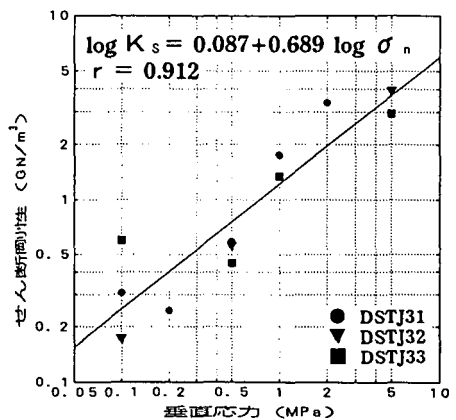


図-9 せん断面積 450cm²、規則的な歯型(10°)の不連続面のせん断剛性

表－１ 不連続面のせん断剛性に関するパラメータ

Properties	Plane 1000cm ²	Plane 450cm ²	Joint 10° 450cm ²
剛性数 : K_j	21288.9	31150.8	25732.7
剛性指数 : n_j	0.719	0.696	0.689
せん断剛性 : K_s (GN/m ³)	$1.081 \sigma_n^{0.719}$	$1.500 \sigma_n^{0.696}$	$1.221 \sigma_n^{0.689}$
K_s と σ_n の相関係数	0.947	0.939	0.912

この剛性数と剛性指数について、Bandisらは4種類の岩盤不連続面のせん断試験から、剛性指数は不連続面の種類によらず同様であるが、剛性数はかなり変化すると報告されており¹¹⁾、本実験の結果はそれとよく対応していることが分かる。

5. おわりに

本研究では、不連続面の変形特性に主眼をおいて、岩盤不連続面モデルによる直接せん断実験を行いその結果を示した。そこでは、不連続面のせん断剛性はそれに作用する垂直応力に依存し、その関係はべき乗関数により表現できそうであることが分かった。実験のケースは少ないけれども結果の信頼性は高いものと考えられる。工学的問題に対して、不連続面のせん断剛性の応力依存性を考慮する場合の入力パラメータとして剛性数 (K_j) と剛性指数 (n_j) の評価が問題となるが、実験結果から剛性指数は同一岩盤に対して定数として取り扱えそうであるが、剛性数は何らかの方法で決定する必要があると考えられる。今後は、さらに角度を変化させた規則的な歯型の不連続面、不規則な不連続面での考察を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 池尻 健・國村省吾・永井哲夫：大規模地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の挙動に関する一考察，第2回岩盤システム工学シンポジウム講演予稿集，pp.27-30，1994.
- 2) 打田靖夫・吉田次男・浦山 克・平川芳明：大規模地下空洞掘削における不連続性岩盤の変形形態、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部門，pp1178-1179，1994.
- 3) 井上大栄：空洞掘削に伴う節理の多い岩盤のゆるみ性状に関する検討－BTVによる高見地下発電所の測定－，電力中央研究所報告，研究報告：381017，1981.
- 4) Arora, V.K.: Strength and Deformational Behaviour of Jointed Rocks, Ph.D Thesis Indian Institute of Technology, New Delhi, India, 1987.
- 5) 永井哲夫・孫 建生・國村省吾：不連続面のせん断剛性の応力依存性を考慮したFEM解析，第21回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.360-361，1994.
- 6) 永井哲夫：ロック・ルトにより補強された不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究，神戸大学博士論文，1992.
- 7) Kulhawy, F.H.: Stress Deformation Properties of Rock and Rock Discontinuities, Engineering Geology, Vol.9, pp.327-350, 1975.
- 8) 櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価方法，土木学会論文報告集, No.317, pp.93-100, 1982.
- 9) 例えば，Goodman, R.E. (大西有三・谷本親伯 共訳)：わかりやすい岩盤力学，鹿島出版会，1984.
- 10) Barton, N.R.: A Model Study of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.9, No.5, pp.579-602, 1972.
- 11) Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R.: Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.20, No.6, pp.249-268, 1983.