

応力比一定下での不連続面の変形特性

THE DEFORMATION PROPERTY OF THE ROCK JOINT UNDER THE τ/σ CONSTANT LOADING CONDITION

安原英明*, 岸田潔**, 藤井浩司*, 足立紀尚***

Hideaki Yasuhara, Kiyoshi Kishida, Hiroshi Fujii & Toshihisa Adachi

When the joint-element is applied to the numerical analysis of the jointed rock, the estimation of the mechanical parameters, the constitutive law of the rock joint and the number of the rock joint must be determined and affect the results of numerical simulations. Instead of the joint-element, the equivalent continuous model is applied to it. In this study, the aim is that the deformability properties with single jointed specimens are estimated before applying the continuous model. In order to grasp the properties, normal stiffness k_n and shear stiffness k_s are measured from the τ/σ constant loading tests.

1. はじめに

不連続性岩盤の力学的特性を論じる場合、岩盤不連続面の分布特性および力学特性を把握することは必要不可欠である。著者らは、特に岩盤不連続面の力学特性における変形問題に着目し、その特性を把握することを目的とする。そこで、不連続面の変形問題を評価する特性として不連続面の垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s を用いることにより不連続面の変形特性の把握を測る。本研究では、その不連続面の垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s と不連続面の傾斜角度との関係を把握するため新たに試験装置の開発を行い、垂直応力、水平応力比一定の試験を行った。

2. 垂直応力、水平応力比一定試験

2.1 概説

本研究では、岩盤内に存在する不連続面の挙動を詳細に検討するため、1つの不連続面を有する供試体を用いて室内試験を行った。図-1に、この試験の模式図を示す。本試験では、直方体のモルタル供試体の中央の高さに相当する部分に、あるラフネスを有する不連続面を水平に設け、この供試体全体を θ だけ傾斜させて鉛直方向に圧縮するというものである。ただし、上下に分離された供試体のうち、上部供試体は完全に拘束し、下部供試体は載荷による不連続面の変位にともなって鉛直方向および水平方向に可動である。計測項目は、図-2のように、載荷荷重 P 、下部供試体の鉛直方向変位 v および水平方向変位 h 、供試体実質部分の変形量 u_{intact} である。この試験は、載荷荷重 P を不連続面に対して垂直方向・せん断方向に分解することにより、せん断応力と拘束圧との比が一定 ($= \tan \theta$) である一面せん断試験の一種とみなすことができる。

* 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻

** 正会員 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

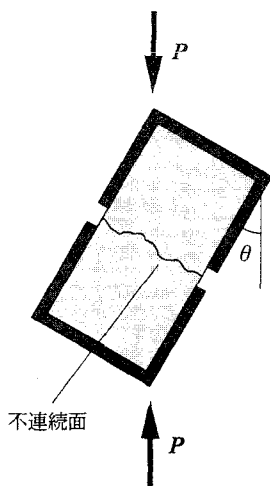


図-1 試験の模式図

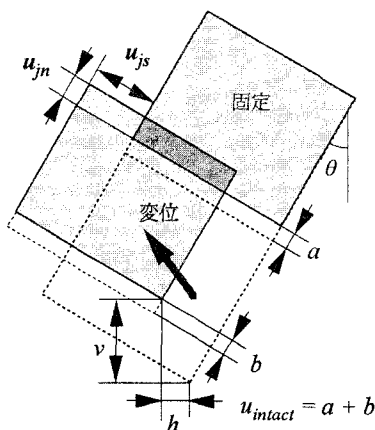


図-2 試験の計測項目

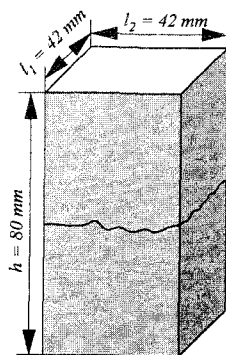


図-3 供試体

2.2 試験概要

本試験に用いた供試体は、図-3 のように、断面が $42 \times 42(\text{mm})$ 、高さが $80(\text{mm})$ の直方体で、中央部の不連続面には、3 種類のラフネスを設定した。材質はモルタルで、配合は、セメント：砂：水 = 1：2：0.65 であり、28 日間の水中養生とした。なお、この材質の円柱供試体を作成して一軸圧縮試験を行ったところ、一軸強度 28.9 MPa 、ヤング率 $3.02 \times 10^3 \text{ MPa}$ が得られた。

試験装置を図-4 に示す。この装置は上部供試体を完全固定とし、下部供試体が鉛直方向および水平方向にベアリングを介して可動できるように設計されたボックス部分を一軸圧縮試験機の载荷部に設置したものである。また、この装置の最大の特徴として、供試体に任意の傾斜角度を与えることができ、それにより不連続面の傾斜角度の関係に対しても考慮することができる。载荷荷重はロードセル、下部供試体の垂直、水平変位は接触型変位計、供試体実質部分の変形量はひずみゲージ、不連続面に対する垂直方向変位を渦電流式変位計で計測を行う。

本研究では、ラフネス 3 種類についてそれぞれ 3 種類の傾斜角度を設定して試験を行う。また、载荷パタ

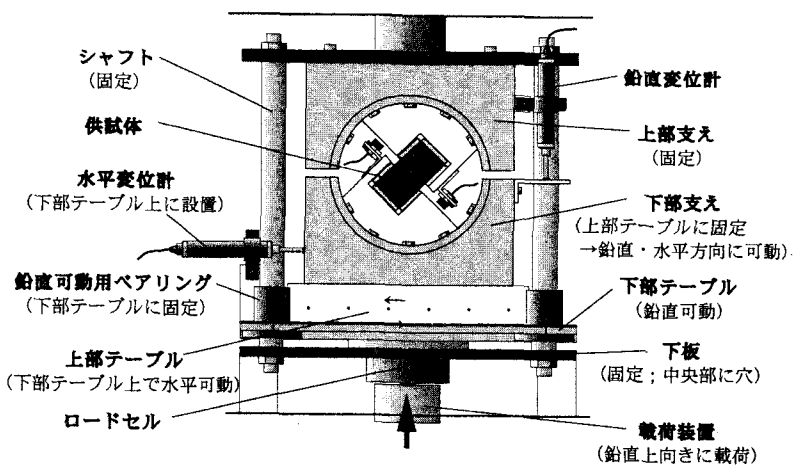


図-4 試験装置

ーンは図-5 のような階段載荷法で、5 ステップの載荷・除荷を応力制御により行った。なお、載荷速度は 2.0 MPa/min、各ステップの最大応力は不連続面の垂直方向に対してそれぞれ 2,4,6,8,10 MPa となるように設定した。

2.3 試験結果

試験によって計測されたデータは試験装置に対して鉛直方向・水平方向のものがあり、これを、不連続面に対して垂直方向・せん断方向のものに変換する必要がある。まず、変位に関しては、不連続面の圧縮量を u_{jn} 、せん断変位を u_{js} とすると、図-2 から理解できるように次式で表される。

$$u_{jn} = v \cos \theta - h \sin \theta - u_{intact} \quad (1)$$

$$u_{js} = v \sin \theta + h \cos \theta \quad (2)$$

次に、応力に関しては、不連続面の圧縮量を σ 、せん断応力を τ 、不連続面の断面積を A とすると、次式のようになる。

$$\sigma = \frac{P \cos \theta}{A} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{P \sin \theta}{A} \quad (4)$$

ただし、断面積は不連続面のせん断変形にともなって次式のように変化をする。

$$A = l_1(l_2 - u_{js}) \quad (5)$$

本試験で扱うラフネスの JRC 値、傾斜角度、並びに試験のパターンを表-1 に示す。また、試験結果の例を図-6~9 に示す。

3. 試験結果による不連続面挙動の検討

3.1 垂直剛性の決定

本節では、不連続面の変形特性を表す垂直剛性 k_n を算定する。垂直応力、水平応力比一定試験において図-6 に示した図は傾斜角度 0° における垂直応力～不連続面の垂直変位関係を表している。この曲線を近似することにより垂直剛性 k_n を算定する方法が従来から行われてきた。Bandis¹⁾および Brown and Scholz²⁾により以下の経験式が提案されている。

$$u_{jn} = \frac{b\sigma}{a+\sigma} + c \quad (a, b, c \text{ は定数}) \quad (6)$$

$$u_{jn} = \alpha + \beta \ln \sigma \quad (\alpha, \beta \text{ は定数}) \quad (7)$$

試験結果と上式を用いた近似を行った。この時用いた試験結果は、最もかみ合わせの影響が少ないと考えられる最終サイクルの除荷時の曲線を用いた。式(7)による近似結果では、相関係数は $R = 0.994$ と高い精度

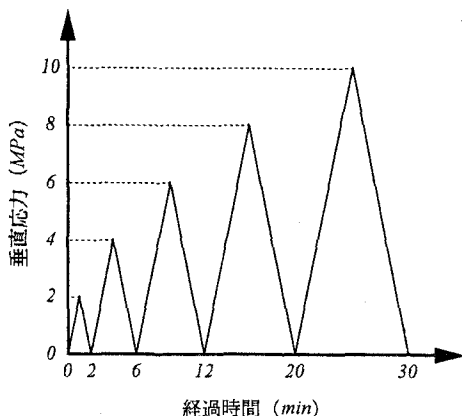


図-5 載荷パターン

表-1 試験パターン

ラフネス	JRC値	傾斜角度		
		0°	15°	30°
A	12.61	○	○	○
B	13.07	○	○	○
C	16.68	○	○	○

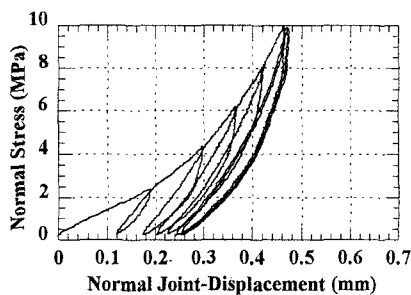


図-6 応力～変位関係
(ラフネスC；傾斜角度 0°)

で近似されているが、垂直応力を無限大にした時、不連続面の垂直変位量は発散してしまう。実際の不連続面には閉塞可能量が存在するため式(7)には矛盾が生じている。一方、式(6)は(閉塞可能量)=($b+c$)で表せる³⁾ことができ、さらに、相関係数は $R=0.997$ とより高い精度で近似されており、式(6)の適用に妥当性があると考えられる。そこで本研究では、式(6)を用いることにより垂直剛性 k_n を算定する。垂直剛性 k_n は垂直応力～不連続面の垂直変位関係においてその接線勾配であり、以下の式で表される。

$$k_n = \frac{d\sigma}{du_{jn}} = \frac{(a+\sigma)^2}{a \cdot b} \tag{8}$$

また、図-7はラフネス3種類の垂直応力～不連続面の垂直変位関係において最もかみ合わせの影響が少ない最終サイクル除荷時の曲線を示したものである。これは、不連続面のかみ合わせがよい時、垂直剛性 k_n は不連続面の形状にほとんど影響されないことを示している。

3.2 傾斜角度 15° における試験結果

試験結果を図-8に示す。ここで、破線は不連続面に対する垂直応力～不連続面の垂直変位関係であり、実線は、不連続面に対するせん断応力～不連続面のせん断変位関係を表している。

まず、式(6)を用いて近似した結果、相関係数は $R=0.991$ であった。さらに、傾斜角度 0° における垂直応力～不連続面の垂直変位関係で近似、算定された $a \sim c$ 値を式(6)に代入し、傾斜角度 0°、傾斜角度 15° における垂直応力～不連続面の垂直変位関係の相関を調べたところ $R=0.913$ となり、垂直剛性 k_n の値は傾斜角度の影響を受けないと考えられる。これは傾斜角度 15° では、せん断変位が少なく不連続面自体の削れやかみ合わせの影響を受けなかったためである。また、最終サイクルの除荷時のせん断応力～不連続面のせん断変位関係より初期接線勾配をせん断剛性 k_s とし、その値は 2.18×10^4 (MPa/m)と一意に算定された。

3.3 傾斜角度 30° における試験結果

試験結果を図-9に示す。最終サイクル除荷時のせん断応力～不連続面のせん断変位関係よりせん断剛性 k_s を決定する。このとき、算定された k_s は 1.41×10^4 (MPa/m)である。次に、垂直応力～不連続面の垂直変位関係に着目した時、その垂直剛性 k_n は、傾斜角度 0°、15° の値に比べ明らかに高い値を示している。これは、せん断変位の増加によるダイレーションの発生を抑止する垂直応力が作用しているためと考えられる。

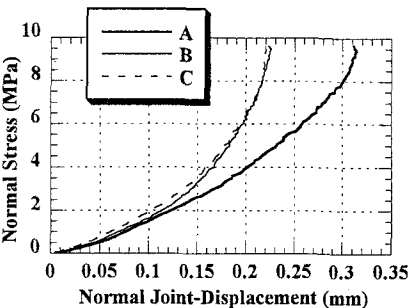


図-7 各ラフネスの応力～変位関係
(最終ステップの除荷時のみ)

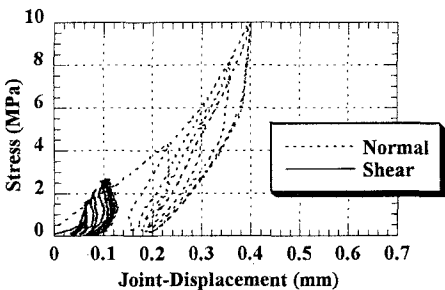


図-8 応力～変位関係
(ラフネスC; 傾斜角度 15°)

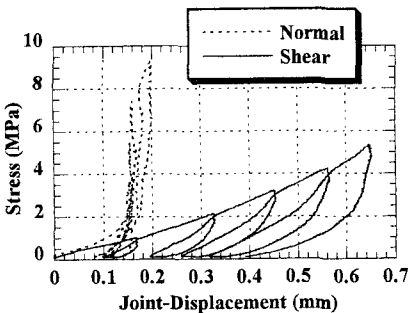


図-9 応力～変位関係
(ラフネスC; 傾斜角度 30°)

4. 載荷軸方向の不連続面剛性を考慮した考察

試験における載荷軸方向の応力～変位関係の曲線より求まる不連続面剛性を $k(\theta)$ としたとき、 $k(\theta)$ と不連続面の垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s の関係は以下の式で表される⁴⁾。

$$k(\theta) = k_n \cos^2 \theta + k_s \sin^2 \theta \quad (9)$$

このとき、 $k(\theta)$ は以下のように示される。

$$k(\theta) = \frac{P}{v \cdot A \cos \theta} \quad (10)$$

式(9)より不連続面の傾斜角度 $\theta = 0, 15, 30^\circ$ における載荷荷重 P 、鉛直方向変位 v 、不連続面の断面積 A を代入し、連立方程式を解くことにより垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s の値を容易に算定できる。式(9)より算定される垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s および式(8)を用いて算定される垂直剛性 k_n 、前節で決定されたせん断剛性 k_s の値を図-10, 11 に示す。図-10 において、式(9)および式(8)より算定される垂直剛性 k_n の値は非常に相関性の高い値を示しており、式(9)より求まる垂直剛性 k_n は十分に妥当性があると考えられる。一方、図-11 において、式(9)より算定されるせん断剛性 k_s はせん断応力に依存して変化するのに対して、前節で求められたせん断剛性 k_s の値は一意に決定されている。つまり、力学特性の考慮のみで求まる式(9)を用いて算定されるせん断剛性 k_s には十分な妥当性があるとは考えられず、更なる検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、垂直応力、水平応力比一定の試験を行うことにより垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s の算定を試みた。垂直剛性 k_n は、式(6)より不連続面の垂直応力の関係式で表され、不連続面の噛み合わせの影響が少ないとき、ラフネス、またその傾斜角度に依存しないことが示せた。一方、せん断剛性 k_s についてはせん断変位経路による明確な値の把握には至っておらず、更なる検討が必要であると考えられる。

6. 参考文献

- 1) Bandis, S. : *Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints*, Ph.D. thesis, Univ. of Leeds, UK ; (1980)
- 2) Brown, S.R. and Scholz, C.H. : Closure of rock joints. *J. of Geophysical Research* 91(B5) ; 4939-4948 (1986)
- 3) 中西祐輔 : 不連続面のせん断挙動が弾性波伝播特性に及ぼす影響, 京都大学卒業論文 ; 7-8 (1995)
- 4) 谷本親伯・岸田 潔 : 岩盤不連続面剛性の評価と原位置岩盤の変形特性, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 ; 119-123 (1997)

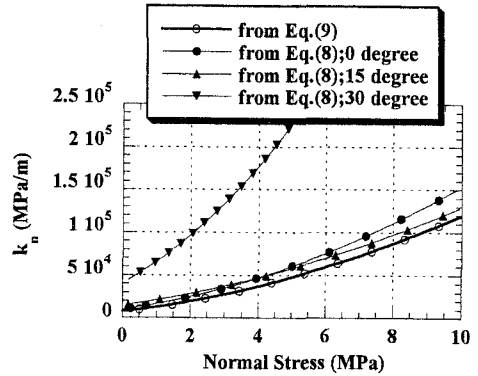


図-10 垂直応力～垂直剛性関係
(ラフネスC)

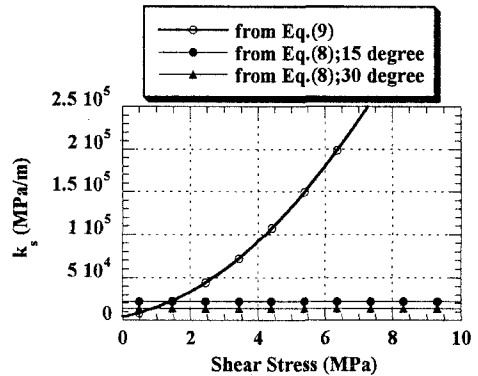


図-11 せん断応力～せん断剛性関係
(ラフネスC)