

応力比一定載荷試験における岩盤不連続面のダイレイタンスー特性の考察

THE CONSIDERATION OF THE DILATANCY PROPERTY OF ROCK JOINT THROUGH THE τ/σ CONSTANT LOADING CONDITION TESTS

岸田 潔*, 安原英明**, 足立紀尚***

Kiyoshi Kishida, Hideaki Yasuhara, & 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. In this study, the aim is that the deformability properties with single jointed specimens are estimated before applied to the numerical analysis. Especially, we focus on the dilatancy property k_{ns} of the rock joint, which is measured and determined from the τ/σ constant loading tests. Also, the deformability properties of normal stiffness k_n and shear stiffness k_s are measured from the test results. The consideration about the deformability feature of the rock joint is performed in detail using these properties.

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、岩盤不連続面の力学特性における変形問題に着目し、載荷角度（応力状態）の影響を考慮した不連続面変形特性の詳細な考察を行う。

本研究では、単一不連続面を有する供試体を用い、不連続面上でのせん断・垂直応力比一定の載荷試験¹⁾を行い、供試体の変形を測定する。その際、供試体の変形挙動を、不連続面の変形挙動と岩石実質部分の変形に分離して考察を行う。不連続面の変形挙動を考察する際、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・せん断剛性とともダイレイタンスー特性を表現するパラメータを導入する。不連続面に対する垂直方向の変形（垂直剛性）および水平方向の変形（せん断剛性）は相互に関連するものであり、載荷状態に依存すると考えられる。また、岩盤不連続面の複合的な変形挙動を表現する際、垂直剛性・せん断剛性のみでは十分な考察は行えず、ダイレイタンスー特性の導入は必要不可欠であると考え²⁾。

そこで、本研究では、これら不連続面の変形特性を表す不連続面の垂直剛性・せん断剛性、さらにダイレイタンスー特性に着目し、岩盤不連続面の変形挙動について詳細な考察を行う。

2. 垂直・せん断応力比一定載荷試験

2.1 試験概要

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、図-2に試験装置の概略図を示す。詳しい試験概要については、参考文献1), 2)に譲る。

また、試験供試体と同材質の円柱供試体を作成して一軸圧縮試験、圧裂試験を行ったところ、一軸強度 38.4 MPa, 引張強度 4.30 MPa, ヤング率 1.79×10^4 MPa, ポアソン比 0.194 が得られた。

2.2 試験結果

試験によって計測されたデータより不連続面に対する変位、応力を換算する。まず、不連続面の変位に関しては、鉛直および水平変位計により得られる変位 v [mm], h [mm], 渦電流式変位センサにより得られる不連続面に対して垂直方向の供試体全体の圧縮量 u_{mass} [mm], ならびにひずみゲージより得られる供試体実質部分の不連続面に対して垂直方向の圧縮量 u_{intact} [mm]を用いる。不連続面の圧縮量を u_n [mm], せん断変位を u_s [mm]とすると、図-1からも理解できるように次式で表される。

$$u_n = u_{mass} - u_{intact} \quad (1)$$

* 正会員 工修 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻
** 学生員 京都大学修士2年 工学研究科土木工学専攻
*** フェロー Ph.D. 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻

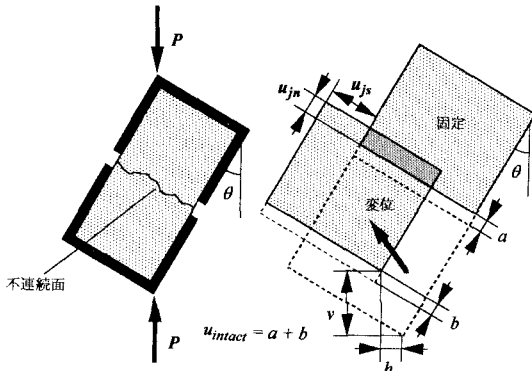


図-1 実験の模式図

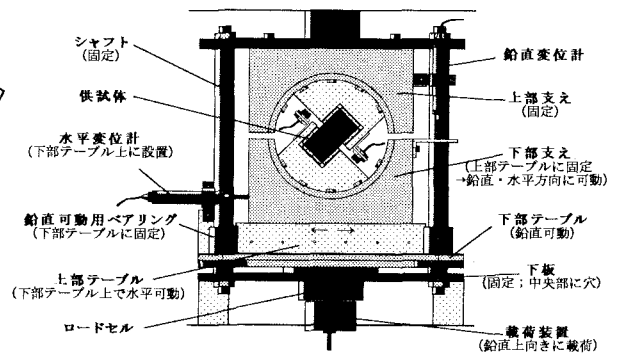


図-2 試験装置

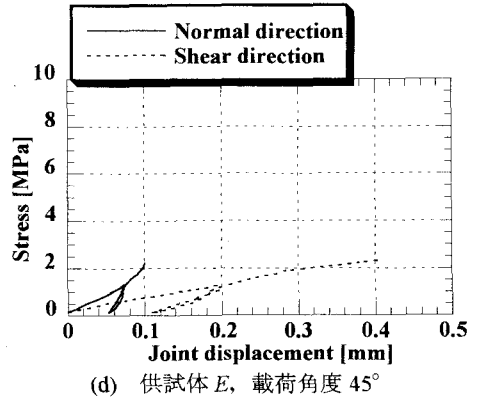
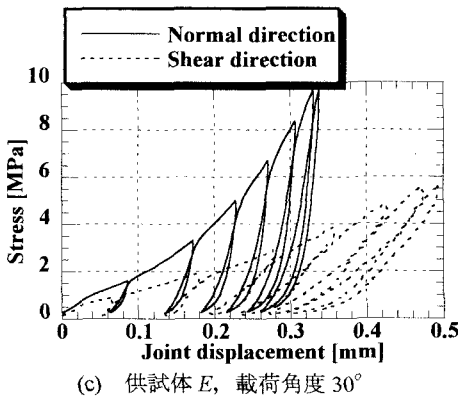
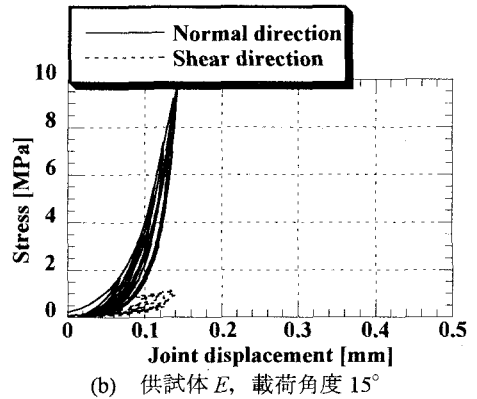
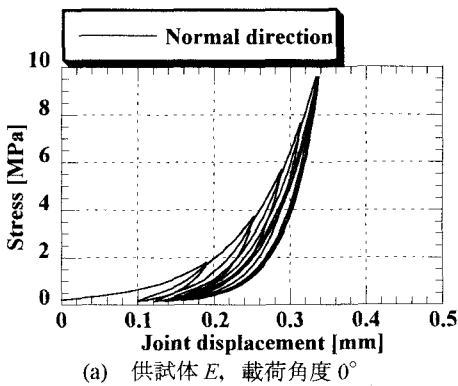


図-3 応力比一定載荷試験による応力～変位関係の一例

$$u_{js} = u_{mass} \tan \theta + h \sec \theta \quad (2)$$

つぎに、応力に関しては、不連続面の圧縮応力を σ_j 、せん断応力を τ_j 、不連続面の断面積を A とすると、次式のように算定される。

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

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

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は 6 種類で、ラフネスの JRC

値 (算出方法は、参考文献 3)) はそれぞれ、 $A=12.61, B=13.67, C=16.68, D=11.72, E=15.36, F=15.63$ である。また、試験結果として不連続面の応力～変位関係の例を図-3 に示す。これらの図において実線は、不連続面の垂直応力～垂直変位関係 ($\sigma_j \sim u_{jn}$ 関係) を示しており、波線は、不連続面のせん断応力～せん断変位関係 ($\tau_j \sim u_{js}$ 関係) を表している。

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

表-1 変形特性を表すパラメータ算出結果

パラメータ	載荷角度	供試体					
		A (JRC = 12.61)	B (JRC = 13.67)	C (JRC = 16.68)	D (JRC = 11.72)	E (JRC = 15.36)	F (JRC = 15.63)
垂直剛性 k_n (at $\sigma_j = 1.0$ MPa) [MPa/m]	0°	16882	17563	24424	22820	24368	28208
	15°	34247	43524	46434	59111	43057	41535
	30°	27517	70788	76661	52081	54189	56870
	45°	74947	—	95683	70551	109950	89237
せん断剛性 k_t [MPa/m]	15°	10748	11256	20347	17983	8251	19241
	30°	15825	14939	24779	17347	9272	10923
	45°	5123	—	7844	5724	5464	5391
ダイレイタンスー特性 k_{nr} [MPa/m]	15°	22967	25057	35994	41204	13366	23041
	30°	10594	19455	24245	16881	8838	9535
	45°	3969	—	5842	3873	4253	3687

-3(a)に示した図は傾斜角度 0° における $\sigma_j \sim u_{jn}$ 関係を表している。この曲線を近似することにより k_n を算定する方法が従来から行われてきた^{4)~6)}。本研究では、相関係数が高く ($R=0.991\sim 0.997$ 程度) また、 k_n が非常に単純な形の応力の関数で表現することができる次式の近似式を独自に設定した。

$$\sigma_j = a \exp(bu_{jn}) \quad \text{より}$$

$$k_n = \frac{\Delta\sigma_j}{\Delta u_{jn}} = b\sigma_j \quad (6)$$

式(6)を用いて、図-3の $\sigma_j \sim u_{jn}$ 関係より垂直剛性の値を算出する。このとき、最終サイクル除荷時の曲線を用いて近似を行う。算出結果を表-1に、また、近似結果の例を図-4に示す。さらに、すべてのラフネスについて算出した垂直剛性(式(6)における b 値)を図-5に示す。図-5において載荷角度 0° のとき、垂直剛性の値はほぼ同じ値を示しており、不連続面のかみ合わせがよい時、 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。

また、表-1、図-5より明らかなように、傾斜角度が増加するにしたがって垂直剛性の値は、増加する傾向を示している。傾斜角度 15, 30, 45° の垂直剛性の値が傾斜角度 0° のそれより大きな値を示しているのは、供試体の傾斜によりせん断変位が生じ、その結果ダイレイションが発生するためと考えられる。また、傾斜角度の増加にともない垂直剛性の値が増加するのは、せん断変位の増加によりダイレイションも大きく発生するためであると考えられる。

垂直剛性の値は、傾斜角度に依存せず1つの不連続面に対して固有の値であると考えるとき、せん断変位にともなうダイレイションの影響を個別に評価する必要がある。そこで、新たにダイレイションを考慮する指標を導入し、その考察を第4節で行う。

3.2 せん断剛性の決定

不連続面のせん断剛性 k_s の算出には、 $\tau_j \sim u_{js}$ 関係の

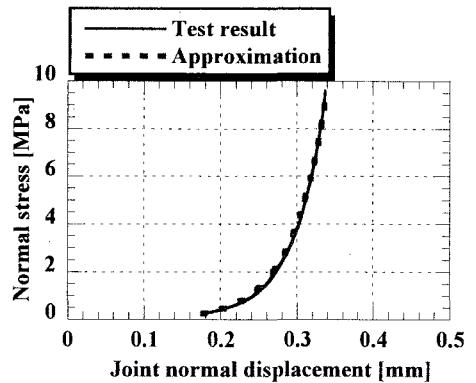


図-4 $\sigma_j \sim u_{jn}$ 関係による垂直剛性の近似例 (供試体 E, 載荷角度 0°)

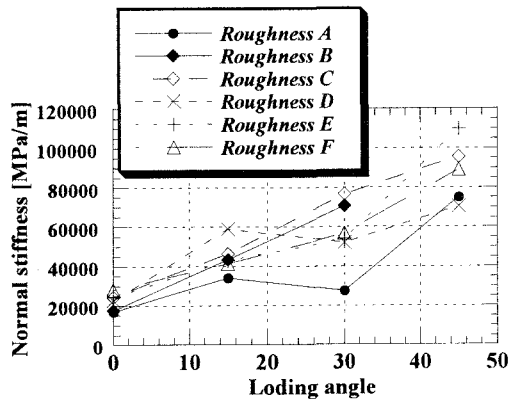


図-5 載荷角度毎の垂直剛性

処女載荷部分において得られる曲線の包絡線の勾配を用いる。これは、通常の一面せん断試験よりせん断剛性を求めるときと同様の考え方により載荷時の勾配を採用する。この曲線の近似は次式のように直線で行っ

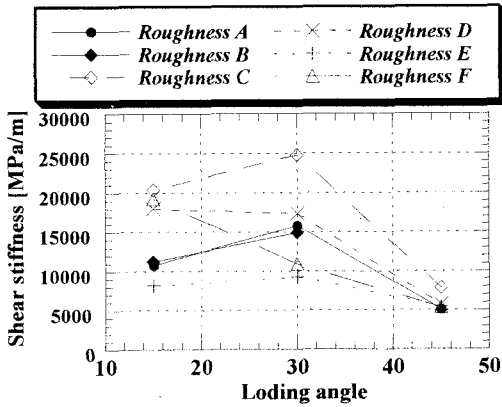


図-6 载荷角度毎のせん断剛性

た. 図-6 に载荷角度ごとの k_s をまた, その値を表-1 に示す.

$$\tau_j = cu_{js} \quad \text{より}$$

$$k_s = \frac{\Delta\tau}{\Delta u_{js}} = c \quad (7)$$

図-6, 表-1 より, 傾斜角度 15, 30° のとき, せん断剛性はほぼ同じ値を示している. 他のラフネスについてはほぼ同じ値もしくは傾斜角度 30° のほうが小さな値を示しており, 全体としては, 減少する傾向にある. また, 傾斜角度 45° のとき, せん断剛性は傾斜角度 15, 30° のときより明らかに小さな値を示している. これは, 不連続面に作用するせん断応力に対する垂直応力の比が, 傾斜角度の増加により小さくなるためであると考えられる. つまり, 傾斜角度の増加により垂直拘束圧が減少し, せん断変位が発生しやすくなり, 結果的にせん断剛性が小さくなると考えられる.

4. ダイレタンシー特性の考察

これまで, 不連続面挙動は, 垂直方向とせん断方向

とで切り離して考えてきた. これは, ダイレクションの影響を垂直剛性の値に組み込んでいたということである. ここで, 不連続面剛性は垂直方向とせん断方向とで独立したものではなく, ダイレクションの発生を通じて相互に関連しているものとする. 最も一般的な形として, 応力ベクトルは剛性マトリックスと変位マトリックスを用いて次式のように表せる⁷⁾.

$$\begin{pmatrix} \Delta\sigma_j \\ \Delta\tau_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & k_{ns} \\ k_{ns} & k_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_{jn} \\ \Delta u_{js} \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで, k_{ns} はせん断にとまうダイレタンシー特性を表しており, 垂直方向の変位を拘束したまま単位大きさのせん断変位を強制的に与えるときに必要な垂直拘束圧である. また, k_{ns} はせん断方向の変位を拘束したまま単位大きさの垂直変位を強制的に与えるときに生じるせん断応力を表しているが, これは微視的に考慮した不連続面表面形状を要因とするわずかな量であると考えられるので, 無視することができる. 式(8)を用いてダイレタンシー特性 k_{ns} は次式のように表せる.

$$k_{ns} = \frac{\Delta\sigma_j}{\Delta u_{js}} - \frac{\Delta u_{jn}}{\Delta u_{js}} k_n$$

$$\Leftrightarrow k_{ns} = \frac{\Delta u_{jn}}{\Delta u_{js}} (k_n^* - k_n) \quad (k_n^* = \frac{\Delta\sigma_j}{\Delta u_{jn}}) \quad (9)$$

$$k_{ns} = \frac{I}{\tan\theta} k_s - \frac{\Delta u_{jn}}{\Delta u_{js}} k_n$$

$$(\Delta\tau_j/\Delta\sigma_j = \tan\theta, \Delta\tau_j = k_s \Delta u_{js}) \quad (10)$$

上式(9), (10)において k_n は傾斜角度 0° のときの垂直剛性の値であり, また, k_n^* は, 傾斜角度 15, 30, 45° における $\sigma_j \sim u_{jn}$ 関係より直接求まる値 (表-1 における傾斜角度 15, 30, 45° の垂直剛性の値) であり, ダイレクションによる影響分を含んだ値である. これを

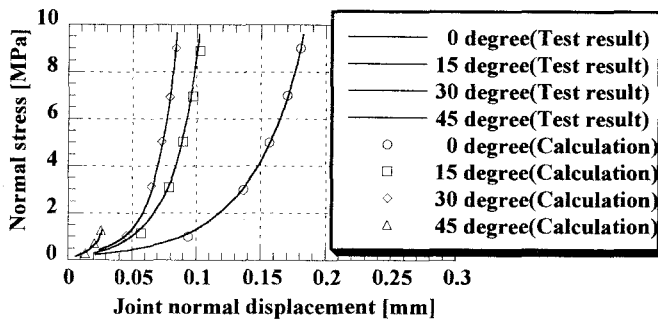


図-7 不連続面の垂直応力～垂直変異関係
(試験結果および解析結果)

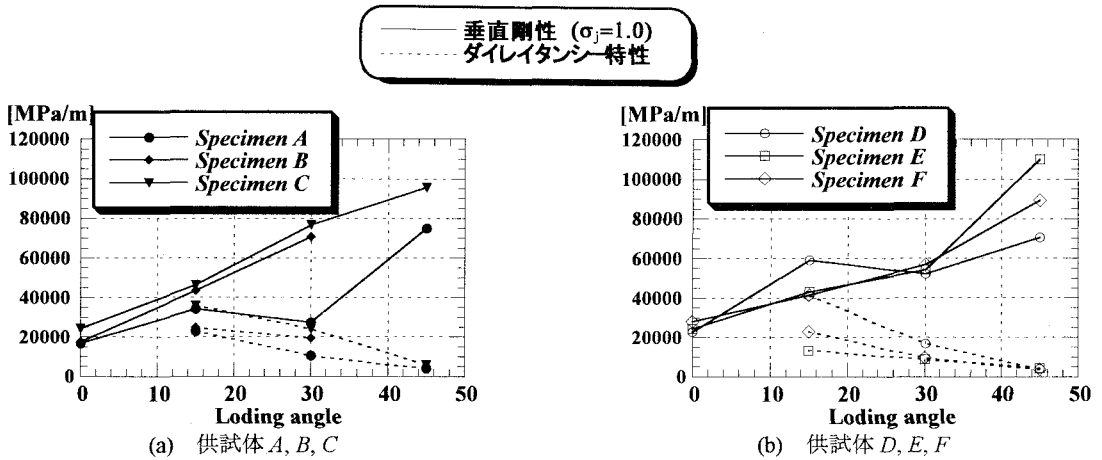


図-8 荷角度度毎の垂直剛性およびダイレイタンスー特性

見かけの垂直剛性とする。 k_s は荷角度度ごとの値を設定する。さらに、式(9), (10)より k_{ns} は垂直剛性, せん断剛性, 荷角度度に依存する次式のような関数形で表せる。

$$k_{ns} = \frac{k_s}{\tan\theta} \left(1 - \frac{k_n}{k_s}\right) \quad (11)$$

式(11)を用いた k_{ns} の算出結果を表-1 に示す。また、試験結果より算定される k_n , k_n^* , k_s , k_{ns} の値を式(8) に代入し、数値解析を行い、 $\sigma_j \sim u_{jn}$ 関係関係を求めた。解析結果と試験結果を図-7 に示す。この図より、解析結果と試験結果は、相関の良い結果を示しており、試験結果の近似より求める k_{ns} の値に妥当性が認められる。

また、図-8 において、ダイレイションの影響分を含んだ見かけの垂直剛性の値は、荷角度度が増すごとに増加しているのに対して、 k_{ns} の値は、減少する傾向が得られている。荷角度度が大きくなるほど、すなわち、せん断挙動が支配的になると、ダイレイションのトータル量は増加する。見かけの垂直剛性は、荷角度度の増加に伴い値が大きくなり、ダイレイションを発現しない傾向を示すことになる。したがって、荷角度度が大きくなるにしたがい、本研究で示すダイレイタンスー特性がダイレイタンスー挙動を支配していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、岩盤不連続面の力学特性における変形問題に着目し、不連続面の変形挙動を表す特性を、応力比一定試験より算出した。不連続面の垂直剛性 k_n は、不連続面を純粋に圧縮したときの値を不連続面

固有の値とし、応力の関数で表した。また、せん断剛性 k_s は定数で表現し、これは荷状態により変化するとした。さらに、不連続面のダイレイタンスー特性を表す k_{ns} は、荷角度度の増加にともない減少する傾向を示した。

最後に、これら垂直剛性 k_n , せん断剛性 k_s , ダイレイタンスー特性 k_{ns} を算定し式(8)を用いることにより、垂直・せん断方向相互に作用する不連続面の変形挙動を定量的に表現することが可能である。

【参考文献】

- 1) 安原英明, 岸田 潔, 藤井浩司, 足立紀尚: 応力比一定下での不連続面の変形特性, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.146-150, 1999.
- 2) 藤井浩司, 足立紀尚, 岸田 潔, 安原英明: 応力比一定試験による岩盤不連続面剛性の決定に関する一考察, 第 34 回地盤工学研究発表会講演概要集; pp.665-666, 1999.
- 3) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, *Int. J Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16 ; pp.303-307, 1979.
- 4) Goodman, R.E. : Methods of geological engineering in discontinuous rocks, *West Publishing Company, San Francisco*, 1976.
- 5) Bandis, S. : Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints, *Ph. D. Thesis, University of Leeds*, 1980.
- 6) Brown, S.R. and Scholz, C.H. : Closure of rock joints, *J. of Geophysical Research* 91(B5), 1986
- 7) 日本材料学会編: 岩の力学 (基礎から応用まで), pp.462, 1993.