

(44) 岩盤不連続面の变形モデルに関する実験的研究

埼玉大学 吉中 龍之進 吉田 淳
熊谷組 新井 元 磯坂 俊英

Experimental Study on the Deformability Models of Rock Discontinuities.

Ryunoshin YOSHINAKA Jun YOSHIDA, Saitama University
Hajime ARAI Shunei ARISAKA, Kumagai-gumi Co. Ltd.

Abstract.

In the past, studies of rock joint deformability have concerned with the shear deformations under constant normal loading, and the normal deformations under the condition of absence of shear loading. However, discontinuities in the rock masses are accepted any principal stress state, so that are accepted any change of normal and shear loading, simultaneously. In this study, the condition is defined the "generalized stress state", where on the discontinuity, normal and Shear stress changes simultaneously. Then the strength and deformation behaviours of discontinuities under generalized stress state are considered. Also, numerical models of its behaviours, that were necessary for the mechanical analysis with discontinuities, are presented.

1. はじめに

これまでに報告されている岩盤不連続面の变形特性についての研究は、せん断变形については一定垂直荷重のもとでのせん断荷重に対する挙動であり、また、垂直变形についてはせん断荷重の作用しない条件での垂直荷重についての挙動であった。しかし、実際に岩盤中に存在する不連続面は任意の主応力状態の中にあり、垂直およびせん断荷重の変化を同時に受けている。本研究では、不連続面において垂直応力とせん断応力が同時に変化してゆく状況を一般的な応力状態として定義し、このような状態の強度・变形特性について実験による検討を行っている。そして、実際の不連続面を対象とした力学解析において必要とされる、そのような一般的な応力状態での強度・変形の数値モデルの作成を試みている。

2. 一般的な応力状態における不連続面の变形特性

不連続面の垂直变形およびせん断变形を表現する量として、Goodman, Taylor and Brreke(1968)[1]は以下の2つの係数を定義している；

$$\text{垂直剛性(normal stiffness)} : K_n = d \sigma_n / d v \quad (1)$$

$$\text{せん断剛性(shear stiffness)} : K_s = d \tau / d h \quad (2)$$

またSun, Gerrard and Stephansson(1985)[2]は、実際の3次元応力状態にある不連続面上では、1つの垂直応力成分とそして互いに直交する2つのせん断応力成分とが以下のように作用することを示している。

$$\begin{bmatrix} d \sigma_{11} \\ d \tau_{12} \\ d \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d v_{11} \\ d h_{12} \\ d h_{13} \end{bmatrix} \quad (3)$$

この関係をマトリクス表示すると次式となる。

$$\{d \sigma\} = [K] \cdot \{d \delta\} \quad (4)$$

$$\text{あるいは} \quad \{d\delta\} = [C] \cdot \{d\sigma\} \quad (5)$$

ここで、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $[C]$ はコンプライアンス・マトリクスで、 $[C]$ は $[K]$ の逆行列である。従って、不連続面の変形特性をモデル化することは、剛性マトリクス $[K]$ あるいはコンプライアンス・マトリクス $[C]$ の各成分を求めることである。しかし現時点では、不連続面についての3次元応力状態での載荷試験はきわめて困難であり、通常は、2次元応力状態についての研究が行われている。2次元状態における変形-応力関係は以下のようなものである。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{nn} & C_{ns} \\ C_{sn} & C_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{Bmatrix} \quad (6)$$

方法としては、一定せん断応力 τ ，すなわち $d\tau=0$ である垂直変形試験によって C_{nn} と C_{sn} を決定し、また $d\sigma_n=0$ である直接せん断試験によって C_{ns} と C_{ss} を決定するものである。最も簡単なモデル化は、 C_{nn} と C_{ss} のみを考え、対角項 C_{ns} と C_{sn} をゼロとするものである。実際に $C_{sn}=0$ であり、このことは過去に行われている多くの研究においても報告されている。しかし、 C_{ns} すなわちダイレイションを表す成分は、特に粗い面においては無視することはできない量である。

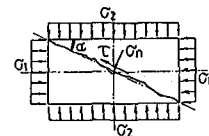
3. 2軸載荷試験とその結果

一般的な応力状態を2次元的にシミュレートする試験として、供試体に直交する2方向から主応力 σ_1 と σ_2 を作用させる2軸載荷試験を行った。この供試体には、あらかじめ主応力軸に対して任意の角度で不連続面が作成されており、この角度によって垂直応力 σ_n とせん断応力 τ の変化する割合が設定できる。Fig. 1には2軸載荷試験の原理を示す。図の(a)は供試体に作用する主応力とそして供試体へ作成した不連続面の方向との関係であり、(b)はそれらによって不連続面上に作用する垂直応力 σ_n とせん断応力 τ の変化を応力経路によって示している。

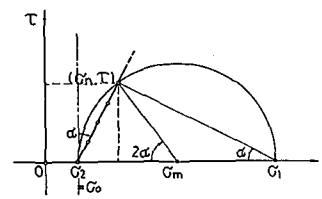
実験に使用した供試体岩石は栃木県大谷地区周辺に分布する凝灰岩(通称大谷石)を2種類準備した。1つは大谷石の中目、もう1つは戸室石であり、それぞれの岩石についてその基本物性および供試体寸法をTable. 1に示す。供試体の寸法は、試験装置の大きさに合わせるためにおよ80cm×40cm×20cm程度の中型のものであり、その成形は大谷地区の採石所において行った。これは、大谷石を供試体として選定した理由の1つでもあるが、採石業の対象となっている岩石は、比較的安価に入手することができ、しかも精度よく簡単に成形が行えるという利点がある。

不連続面は、実験室内において「矢」と呼ばれるノミを使用して人工的に作成した割裂破壊面である。この時使用した「矢」とは、大谷地区の採石業者らによって石材の小割に用いられるもので、これを破壊面を予定する線に沿って2～3cm間隔で打ち込み、割裂破壊面を作成する。どちらの供試体も垂直変形試験および直接せん断試験のための供試体をそれぞれ作成している。

試験は埼玉大学岩石実験室内にある試験ピットにおいて、H鋼によるフレームを反力装置とした油圧ジャッキによる載荷装置によって行った(Fig. 2)。載荷は中間主応力 σ_2 を一定として、最大主応力 σ_1 を増加させる方法で行った。この時、 σ_2 と σ_1 方向に直交する方向にあ



(a) 応力状態



(b) 応力経路

Fig. 1 2軸載荷試験

Table. 1 供試体岩石の基本物性および供試体寸法

物 性	大谷石(中目)	戸室石
一軸圧縮強度, σ_c kgf/cm ²	76.0	106.0
平均弾性係数, E_{av} kgf/cm ²	2.04×10^4	1.44×10^4
破壊ひずみ, ϵ_s %	0.44	0.93
単位体積重量, γ_n grf/cm ³	1.60	1.44
基本摩擦角, ϕ_b °	37.5	40.0
供試体の寸法 cm	80×30×15	80×40×20
不連続面角度, α °	21°, 36°, 57°	27°

る最小主応力は $\sigma_3=0$ ，すなわち荷重を行わない状態である。理想的な2次元平面ひずみ状態では、この最小主応力方向に変形の拘束を与えるべきであるが、不連続面の変位計測などのために拘束は行っていない。従って厳密には、2次元平面応力状態での荷重となっている。

荷重は、まず始めに最大および中間主応力方向のそれぞれの油圧ジャッキによって設定応力 σ まで荷重する。次に中間主応力を一定($\sigma_2=\sigma$)としたまま最大主応力 σ_1 を増加させてゆく。荷重は不連続面のせん断が起これ、10mm以上のせん断変位を生ずるまで続けた。しかし、不連続面の角度によってはせん断せずにインタクトロックの部分で破壊が生ずるものもあり、それらは破壊発生後に直ちに除荷を行った。荷重の制御の形態としては、せん断が生じるまで、すなわちピークせん断強度発生までは応力制御であり、ピーク後は最大主応力方向の油圧ジャッキを一定の突出量だけ増加させる変位制御である。

応力は油圧ジャッキに接続した油圧計によって計測・算定し、変位については供試体周囲に設置したLVDTおよび不連続面に設置した亀裂変位計によって計測している。Fig. 3は戸室石による直接せん断試験および2軸荷重試験(不連続面方位 $\alpha=27^\circ$)の結果である。せん断応力-せん断変位関係はピーク強度に至る前に降伏し、ピーク後に強度低下する傾向を示している。直接せん断の場合、ピーク後には残留強度に漸近してゆく傾向がみられるが、2軸荷重の場合には、強度低下が続いてゆく。ダイレイションはせん断変位とともに増加する傾向にあり、垂直応力に準じてその大きさが決まる。

ピークせん断強度 τ_p とその手前で生じる降伏せん断強度 τ_y とを、垂直応力-せん断強度関係としてプロットしたものがFig. 4(a)である。この図では、各試験の応力経路が実線でプロットされており、□が降伏強度、○がピーク強度である。また図の(b)はこれをBartonの強度包絡線式によってそれぞれ

モデル化したものであり、この図から、せん断強度における応力経路の影響はないものと考えられる。

4. 変形特性のモデル化

これまでに述べた実験結果をもとに、一般的な応力状態における不連続面の変形特性のモデル化を行う。不連続面の垂直変形およびピーク前のせん断変形は不連続面表面の微小接触部分の変形であり、また、ピーク後のせん断変形は不連続面の表面粗さにおけるすべりおよび破断によるものと考えられる。著者らは、ピーク後の変形が表面粗さによってモデル化

反力フレーム 50tonジャッキ

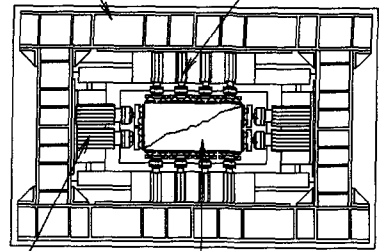
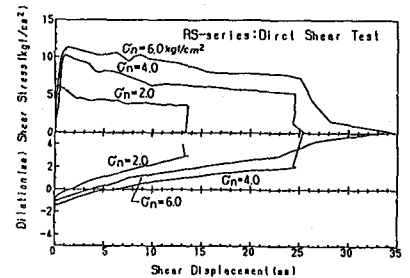
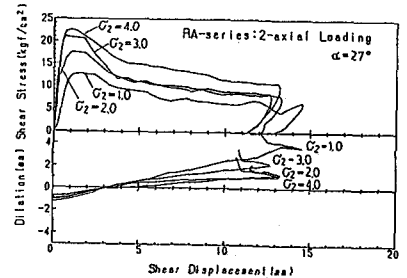


Fig. 2 荷重試験装置



(a) 直接せん断試験



(b) 2軸荷重試験 $\alpha=27^\circ$

Fig. 3 戸室石の実験結果

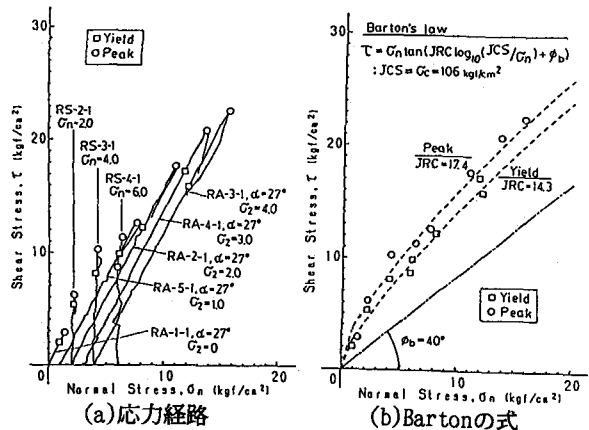


Fig. 4 戸室石の破壊包絡線

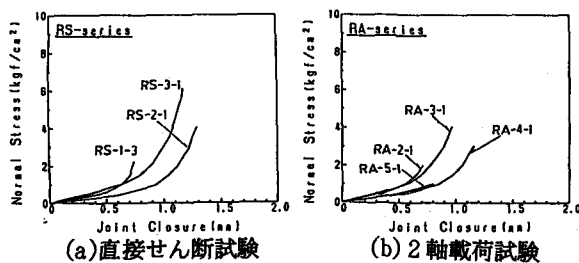
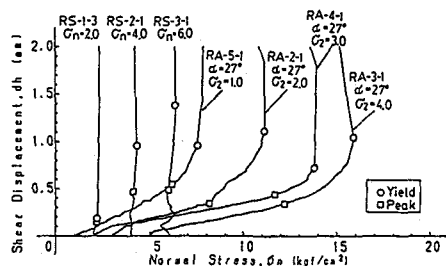


Fig. 5 戸室石の垂直変形試験結果



(a) 応力経路

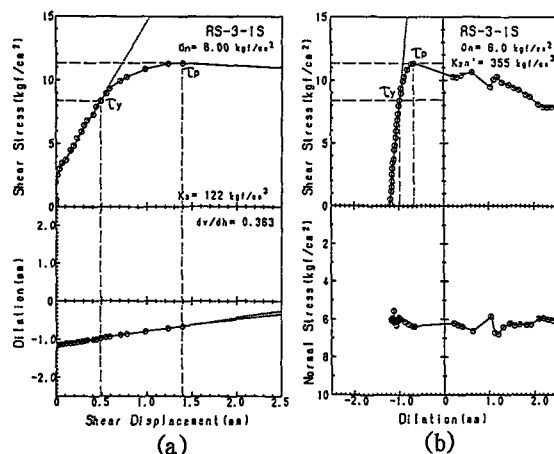
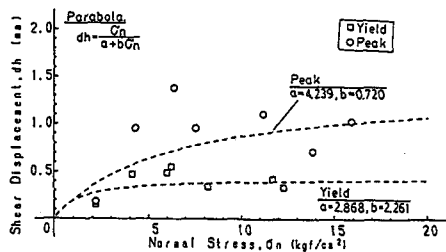


Fig. 6 戸室石の直接せん断試験結果



(b) 双曲線によるモデル化

Fig. 7 戸室石の垂直応力-せん断変位関係

できることを報告しており[3]、今回はピーク前の変形についてモデル化を行っている。

Fig. 5は戸室石の直接せん断および2軸載荷試験における垂直応力-ジョイント閉塞量曲線である。

最近の研究[4]にもあるように、これらの関係は双曲線によってモデル化することができる。これによって C_{nn} を決定する。

Fig. 6は戸室石の直接せん断試験におけるピーク前の部分を拡大した結果の例である。図の(a)は横軸にせん断変位 dh を取り、縦軸にはせん断応力 τ とダイレイション dv をとったものである。また、図の(b)は横軸にダイレイション dv 、縦軸にはせん断応力 τ と垂直応力 σ_n をとったものである。この図からわかることは、せん断応力-ダイレイション関係も降伏強度まではほぼ直線的に変化し、それ以後ピーク強度までに軟化を示すということである。これより、せん断応力によるせん断変位およびダイレイションの変化を降伏強度までの線形関係とそれ以後の非線形関係とに分けてモデル化することができる。

Fig. 7(a)は垂直応力によるせん断変位 dh の変化を示したもので、Fig. 4(a)と同様に実線が計測データ、そして□が降伏強度、○がピーク強度である。図(b)は降伏せん断変位 dh_p およびピークせん断変位 dh_p を双曲線関数によってモデル化したものである。ダイレイション dv についても同様のことを行い、これらと先の強度包絡線によって、任意の垂直応力時の C_{nn} と C_{ss} を決定する。

モデル化によって算定した変形マトリクス成分を用いて実験結果をシミュレートしたものがFig. 8およびFig. 9である。この図では、モデルによってシミュレートした強度・変形特性を点線で、そして実験によって得られた計測データを実線で示している。全体的な傾向はほぼ一致しているように考えられるが、若干の差も生じている。この要因として、各供試体ごとの表面粗さおよび噛み合わせの違いなどが考えられるが、一方で、このモデルは算定されたマトリクス成分を最も単純な方法である重ね合わせによってモデル化した結果であり、実際にはせん断変位による C_{nn} の変化などの効果を考慮していないことも考えられる。

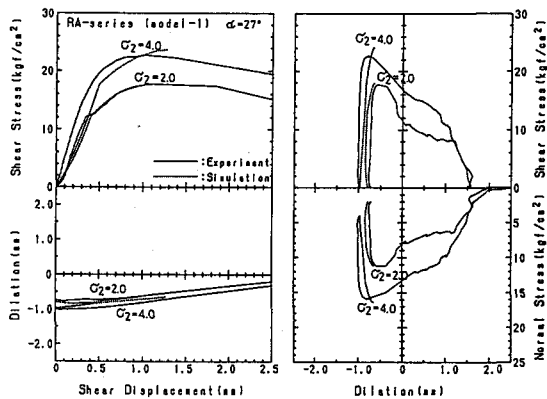


Fig. 8 戸室石のモデルと実験値の比較

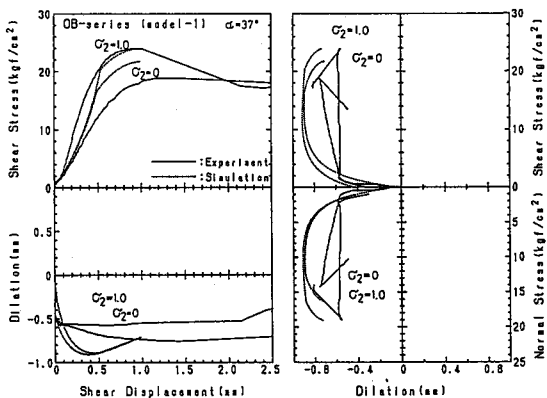


Fig. 9 大谷石のモデルと実験値の比較

5. まとめ

本論文では、一般的な応力状態にある不連続面の強度・変形特性について実験による検討を行い、それらのモデル化を試みている。今回報告したモデル化の方法については、今後さらに検討が必要であると考えている。

謝 辞

本研究を行うに当たり、埼玉大学工学部 内田 繁、松長 剛の両氏には多大なる協力を得ましたことをここに感謝します。

参考文献

- [1] Goodman, R. E. Taylor, R. Brekke, T. A. (1968): "A Model for the Mechanics of Jointed Rock." (A.S.C.E., Vol. 94, SM-3, 1968, pp. 637-659)
- [2] Sun, Z. Gerrard, C. Stephansson, O.: (1985) "Rock Joint Compliance Tests for Compression and Shear Loads." (Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, 1985, pp. 197-213)
- [3] 吉中龍之進, 吉田淳, 本山憲一, 清水昭男, 新井元, 蟻坂俊英 (1991): "岩盤不連続面の垂直変形に関する実験的考察" (土木学会第46回年次学術講演会・講演概要集Ⅲ-257, 1991. 9.)
- [4] 吉中龍之進, 吉田淳, 清水昭男, 新井元, 蟻坂俊英 (1990): "岩盤不連続面の粗さとせん断特性に関する実験的研究" (土木学会第45回年次学術講演会・講演概要集Ⅲ, 1990. 9.)