

# 岩石ブロック試験による不連続性岩盤の変形特性に関する研究

鈴木 健一郎 丸山 誠  
平間 邦興

## Study on Deformabilities of Discontinuous Rock Masses by Rock Block Tests

Ken-ichiro Suzuki Makoto Maruyama  
Kunioki Hiramata

### Abstract

The testing method developed for discontinuous rock masses called the rock block test plays an important role in evaluation of the mechanical properties of such rock masses since it combines the two useful aspects of accuracy of laboratory tests and reproduction of practical properties of in-situ rock masses.

Blocks of Shirakawa Tuff having dimensions of  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  with and without artificial tension fractures were subjected to biaxial compressive tests and the variations in deformation behaviors and elastic wave velocities of whole blocks and individual discontinuous planes accompanying shear were investigated. As a result, it was ascertained that the deformation of a whole block shifts from non-linear to linear with increase in confining pressure, while elastic wave velocities increase accompanying deformations of the individual discontinuous planes. In three-dimensional simulation analyses simulating stress dependencies of discontinuous plane deformations by spring models depending on stress, it was possible to simulate the non-linear behaviors of the whole blocks and the variations thereof accompanying increase in confining pressure.

### 概 要

大型の岩石供試体を使用するブロック試験は、室内試験の精度と現位置試験での岩盤の再現性という両者の長所を生かし、構造物設計における不連続性岩盤の物性評価を行える試験である。本報告は岩石ブロック試験の適用性の拡大と再現性について検討したものである。

人工不連続面を挿入した凝灰岩のブロック ( $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ ) の二軸圧縮試験を実施し、せん断に伴うブロック全体、および個々の不連続面の変形挙動や弾性波速度の変化を調べた。その結果、拘束圧力の増加に伴いブロック全体の変形は非線形から線形へ移行する、各不連続面の変形に伴う弾性波伝播速度の増加などの現象が実験的に確認された。不連続面の変形の応力依存性を応力に依存したばねで近似した3次元のシミュレーション解析では、ブロック全体の非線形挙動および拘束圧の増加に伴うその変化が模擬できた。

## 1. 序 論

高レベル放射性廃棄物地層処分施設、岩盤内エネルギー貯蔵施設、原子力発電所地下立地、地下シンフォニーホール等、地下空間の利用が積極的に検討されている。これら岩盤を対象とする構造物の品質を管理し、また周辺環境に及ぼす影響を評価するために、解析技術の精度向上に合わせ、物性評価技術においても高精度な信頼性が要求されている。大型の岩石供試体を使用する試験は、室内試験の精度と現位置試験での岩盤の再現性という両者の長所を生かし、構造物設計における不連続性岩盤の挙動予測を行える試験である<sup>1),2)</sup>。

本研究は、不連続性岩盤の諸特性把握のために新たに開発した岩石ブロック試験装置を用いて実施した変形試験により不連続性岩盤の変形特性を把握し、解析的にそれを表現することを試みたものである。

## 2. 岩石ブロック試験装置の概要

本試験装置の全景を写真-1に示す。供試体の寸法は試験装置および供試体の取扱い限界として一辺30cmの立方体とした。本装置は主に反力容器、載荷部、およ

び計測部よりなる三軸試験装置である。反力容器は耐圧力30MPa、載荷方法は容量300tfの手動式油圧ジャッキ2台の切り替え方式である。この試験装置の特徴の一つは載荷面の微小凹凸による面内の応力の不均質を剛板に取り付けた硬質ゴムおよび摩擦除去のためのテフロンシートにより吸収する構造である。また、ブロックの変位は載荷板の移動量ではなく供試体に直接接触させたターゲットの変位によりギャップセンサーを用いて計測した。供試体への作用圧力は圧力センサーによるジャッキ油圧の測定値に係数を掛けて算出するものである。剛性載荷板および上下剛板は一部ポーラスメタルに交換し変位計測用ターゲット挿入孔を利用して注水による3方向一様流型透水試験または放射流型透水試験に供する事が可能な点も特徴的であり、本試験装置は岩盤の水理・力学的特性を把握するための総合的な試験装置である。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 実験試料および予備試験

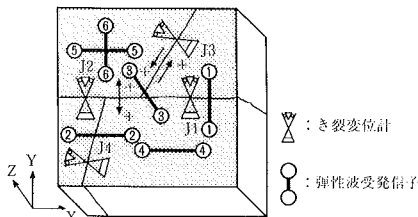
予備試験は新鮮な凝灰岩に対する二軸載荷試験であり、試験装置の性能チェックと新鮮な凝灰岩の変形特性を把握する目的で実施した。載荷に当たり、載荷面に均等に

表一 intact tuff block の試験ケース

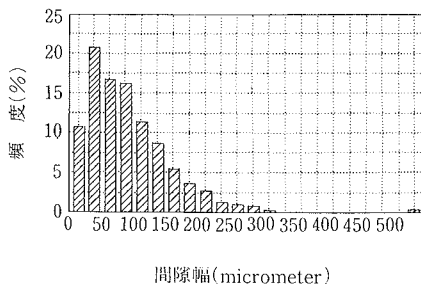
CASE	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	弾性係数(MPa)	ポアソン比
CASE-A00	0	0→6.5→0	12,100	0.21
CASE-B00	0→6.5→0	0	11,900	0.15
CASE-A50	0→3.3(一定)→0	0→3.3+6.5→0	14,600	0.13
CASE-B50	0→3.3+6.5→0	0→3.3(一定)→0	12,300	0.14



写真一 岩石ブロック試験装置全体図



図一 供試体(1)および計測点配置



図三 間隙幅頻度分布

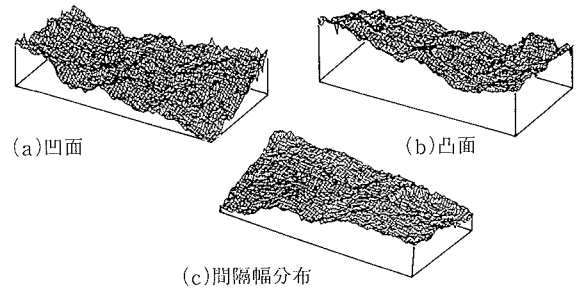
荷重が作用しているかを調べるために感圧紙により荷重状態をチェックし、本供試体においてはほぼ均等に作用している事を確かめた。試験ケースおよび X 方向および Y 方向ともそれぞれ最大軸差応力 6.5 Mpa までの 2 回の繰返し荷重を行った結果をまとめると表一のようになる。今回開発した試験装置の機能検証では、供試体整形の精度1/300程度で新鮮な凝灰岩の円柱供試体より得られた弾性係数とほぼ等しい値が得られたことで所要の精度が満足されたものと考えた。

### 3.2 不連続性岩盤試験(1)

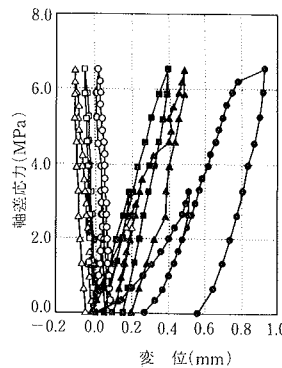
試験(1)では予備試験で用いた供試体を V 字型楔を用いて圧裂破壊させ、4 分割したものをブロック供試体とした。図一は不連続面分布と計測点の配置状況を示している。この方法により得られた不連続面の特徴を一例として図二に示す。図(a)および(b)は不連続面を構成す

表二 試験 1 (試験 2) の荷重パターン

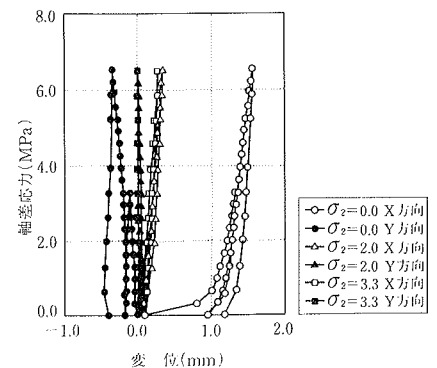
CASE	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
CASE-A00	0	0-3.3-0-6.5-0
CASE-B00	0-3.3-0-6.5-0	0
CASE-A30	0-2.0 (一定) -0	0-2.0-5.3-2.0-8.5-2.0-0
CASE-B30	0-2.0-5.3-2.0-8.5-2.0-0	0→1.9 (一定) →0
CASE-A50	0-3.3 (一定) -0	0-3.3-6.5-3.3-9.8-3.3-0
(試験2)	(0-1.3(一定) -0)	(0-1.3-4.6-1.3-7.8-1.3-0)
CASE-B50	0-3.3-6.5-3.3-9.8-3.3-0	0→3.3 (一定) →0
(試験2)	(0-1.3-4.6-1.3-7.8-1.3-0)	(0-1.3 (一定) -0)



図二 不連続面形状



図四 軸差応力-変位関係 (Y 方向荷重)



図五 軸差応力-変位関係 (X 方向荷重)

る二つの面の凹凸の状態を示しており、これら計測結果を最小間隔が 0 mm となるように合成した物理的な間隙幅の状態が(c)図である。この間隙幅の頻度分布を示したのが図三である。間隙幅のフラクタル次元は間隙幅のパワースペクトルより求めたもので1.6から1.7程度である。試験ケースを表二に示す。2 階および 4 階の 3 次元のクラックテンソルは次の様に決定された。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 0.67 & -0.26 & 0.00 \\ & 1.14 & 0.00 \\ \text{symm.} & & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$F_{ijkl} = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.20 \\ & 1.01 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.06 \\ & & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ & & & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ \text{symm.} & & & & 0.00 & 0.00 \\ & & & & & 0.10 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

試験に当たっては各荷重ステップにおいて、ブロックの

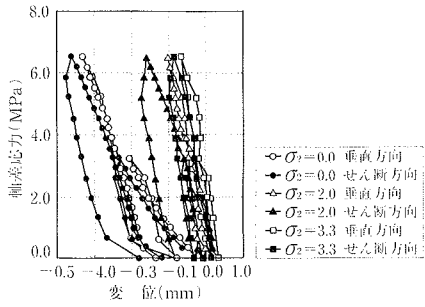


図-6 J3の軸差応力-変位関係 (Y方向荷)

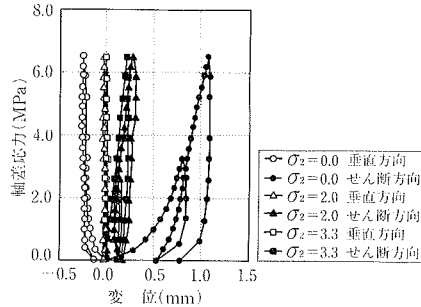


図-7 J3の軸差応力-変位関係 (X方向荷)

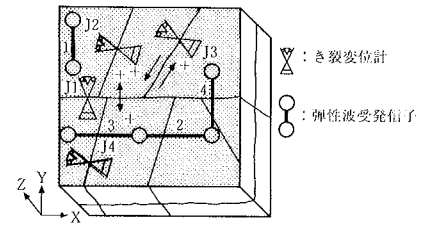


図-8 供試体(2)および計測点配置

平均的な変形と図-1に示した位置での弾性波伝播速度および不連続面の変形を測定し、圧力変化に伴うそれらの挙動も調査した。

**3.2.1 ブロック全体の变形特性** 図-4および5に拘束圧の異なるケースの軸差応力とブロックの全体変位量との関係を軸差応力に対して示す。図-4がY方向を最大主応力とするもの、図-5がX方向を最大主応力の方向とするものである。変形の異方性は拘束圧0の時に顕著で、それぞれの軸方向応力2MPa時にY方向の変形係数はX方向のそれに比べて1/3程度であるが、その後荷重応力レベルが高くなると両方向ともおよそ等しくなる。拘束圧を2.0MPaと3.3MPa作用させたものは、拘束無しのものに比べてどちらもブロック全体としての剛性が大きく向上する傾向を示した。

変形の非線形性については、X方向およびY方向とも、拘束圧が小さい間は極めて非線形性が強いが、拘束圧が高くなると不連続面の影響が薄れ、線形に近くなる。拘束圧3.3MPaのとき、X方向で4.9GPa、Y方向で7.3GPaであった。

**3.2.2 不連続面の变形特性** 不連続面の閉塞量および滑り量を計測するために、図-1に示す位置にき裂変位計を設置した。結果の一例を、縦軸に軸差応力を、横軸に変形量を取って示した。図-6がX方向荷の場合、図-7がY方向荷の場合である。図中の符号は図-1に示す様に、不連続面の開口が正、閉塞は負、滑りについては左ズレを正、右ズレを負とした。図はき裂変位計4の計測結果で、X方向荷、Y方向荷とも左ずれせん断で、Y方向荷時のほうが3倍(0.9mm)変形し、閉塞量は共にほぼ0.3mmである。

**3.3 不連続性岩盤試験(2)**

試験(2)では、図-8に示す様に試験(1)で用いた供試体をさらにV字型楔を用いて圧裂破壊させたものをブロック供試体としたものである。試験ケースは表-2の( )内を試験(1)と交換したものである。不連続面の分布を3次元のクラックテンソルで表すと2次および4次について次の様である。

**3.3.1 ブロック全体の变形特性** 図-9および10に拘束圧の異なるケースの軸差応力とブロックの全体変位との関係を示す。図-9がY方向を最大主応力とするもの、図-10がX方向を最大主応力の方向とするものであ

る。異方性としてはわずかにX方向の変形性がよいようであるがこれはセット時の影響が現れたものと考えられる。拘束圧の影響は試験(1)と同様、ブロック全体としての剛性を増加させ、不連続面の存在が岩盤の変形特性に与える影響を見かけ上小さくするという不連続性岩盤の特性を再現している。

**3.3.2 不連続面の变形特性** 不連続面の閉塞量および滑り量を計測するために、図-8に示すようにき裂変位計を設置した。結果の一例として不連続面4の変形を図-11に示した。図中の符号は試験(1)の場合と同様である。X方向荷の場合、不連続面4は圧縮かつせん断変形が大きく生じている一方、Y方向荷の場合は開口する傾向にあり、せん断変形も小さい。

**3.4 不連続面の变形と弾性波速度の関係**

不連続面に作用するtractionが必ずしもそれに直交しない場合、不連続面の变形としては開口・閉塞と同時に滑りが生じる。本試験ではこのような傾向を再現できたので、計測された不連続面の变形と弾性波速度の変化について本節において考察する。

試験(1)におけるX方向から反時計回りに58度の角度を持つ不連続面3の結果を図-12に示す。図(a)が不連続面の变形を、(b)がその不連続面を挟んで測定された弾性波速度変化である。X方向圧縮の場合、滑り変位はほとんど現れず閉塞が卓越している。一方Y方向圧縮の場合は拘束圧0の場合大きくなすべり変位が生じている。これらの弾性波速度の収束値は、最大閉塞量とともに0.3mmであるにもかかわらず、X方向荷、Y方向荷それぞれ3.6km/secおよび3.3km/secとなっており、滑り変形の影響を受けている。滑り変形の大きいY方向荷の場合、拘束圧が大きくなると滑り変形量が1/10以下になるのでかなり両者は近づくが、拘束圧3.3MPaの場合でもX方向荷が4km/secに対してY方向荷は3.8km/secである。これらの結果より弾性波速度の変化は垂直応力のみ関数ではなく、不連続面の滑り方向のせん断応力も考慮することが必要と考えられる。

試験(2)におけるY方向荷の無拘束の結果を図-14に示す。これは図-13に示したものと同一不連続面の試験結果である。この時、Y方向荷の場合の不連続面により囲まれるブロック要素の挙動が試験(1)の場合と異なるために変形性および弾性波速度の挙動も異なっている。

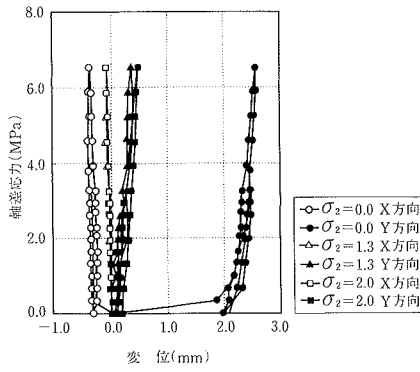


図-9 軸差応力-変位関係 (Y方向荷重)

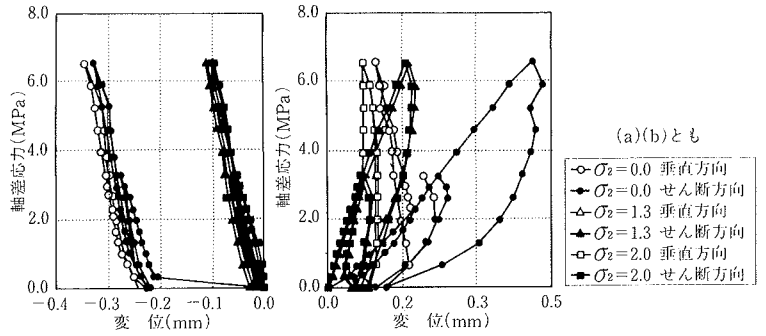


図-11 不連続面 J3 の軸差応力-変位関係

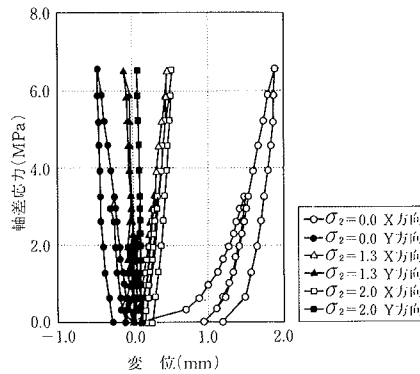


図-10 軸差応力-変位関係 (X方向荷重)

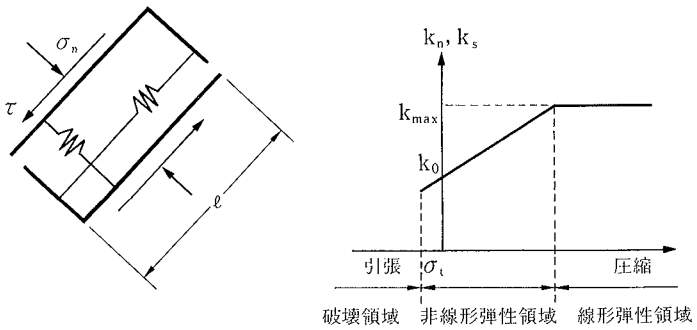


図-16 ばねモデルとばね特性

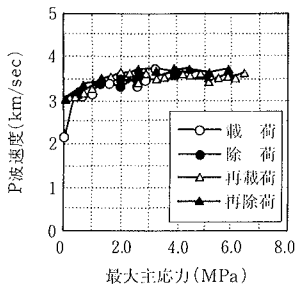
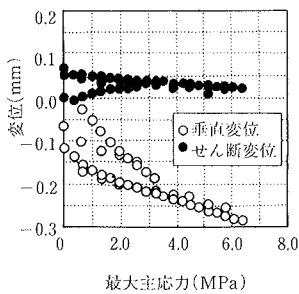


図-12 応力-変位(a) P波速度(b)関係

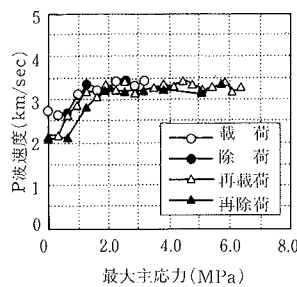
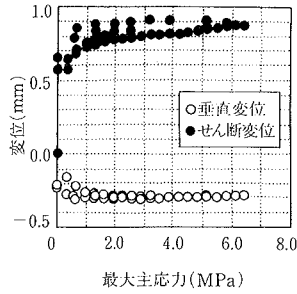


図-13 応力-変位(a) P波速度(b)関係

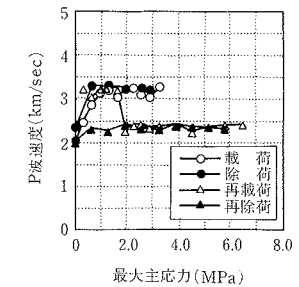
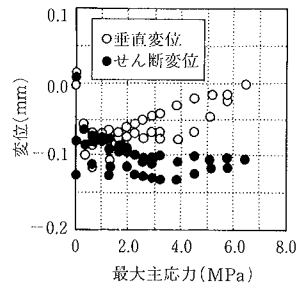


図-14 応力-変位(a) P波速度(b)関係

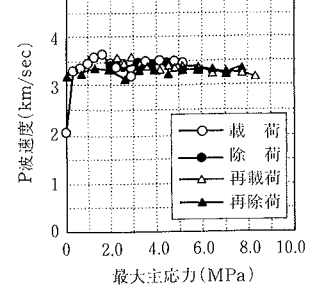
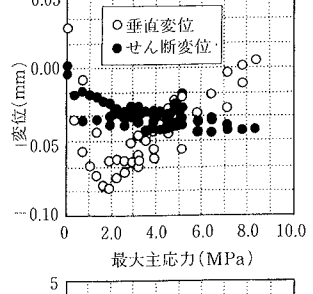


図-15 応力-変位(a) P波速度(b)関係

(上段(a), 下段(b)。図-13~15も同様)

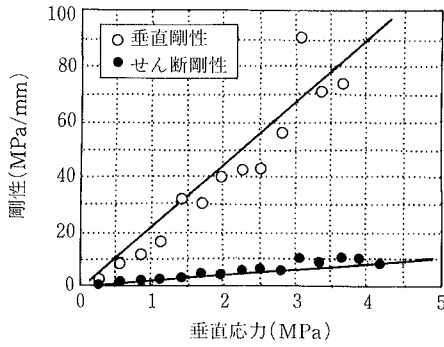
繰返し荷重 2 回目には垂直方向の変位が閉塞から開口に変わり、それにより弾性波速度は初期と変わらない値に収束している。つまり不連続面の密度が増加することによる影響が現れている。しかし、変形と弾性波速度の変化の関係は、主に開口・閉塞に影響を受けている。図-15に示した拘束圧 3.3 MPa における Y 方向荷重の場合、すべり変形が不連続面のダイランシーを誘発し、不連

続面の垂直変形が開口となるために弾性波速度はやや下降傾向で終了している。試験(1)の同じ不連続面の変形挙動とも著しく異なる。

#### 4. 非線形弾性解析によるブロック試験のシミュレーション

##### 4.1 非線形弾性解析

##### 4.1.1 構成則の特徴<sup>3)</sup> 不連続性岩盤を等価な力学特



図一17 垂直・せん断剛性の応力依存性

性を有する非線形異方弾性体に近似するに当たり，①岩盤全体の異方性は不連続面の幾何学的な分布を表現するクラックテンソルにより表現する，②岩盤全体の變形性は単一不連続面の垂直・せん断剛性の応力依存性，不連続面の寸法依存性を考慮したバネで表現する，③岩石部分はコアの弾性係数により表現する，ものである。構成式は次式である。

$$\epsilon_{ij} = \left\{ \frac{1+\nu}{E} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \delta_{kl} + \left( \frac{1}{k_n} + \frac{1}{k_s} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4k_s} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk} + \delta_{il} F_{jk}) \right\} \sigma_{kl} \quad (3)$$

- ここに、  
 E：岩石のヤング率  
 ν：岩石のポアソン比  
 F<sub>ij</sub>：2階のクラックテンソル  
 F<sub>ijkl</sub>：4階のクラックテンソル  
 δ<sub>ij</sub>：クロネッカーデルタ

であり，k<sub>n</sub> および k<sub>s</sub> はき裂の垂直バネおよびせん断バネ（図一16）定数で，応力依存性として，式(4)および式(5)で近似されたものである。

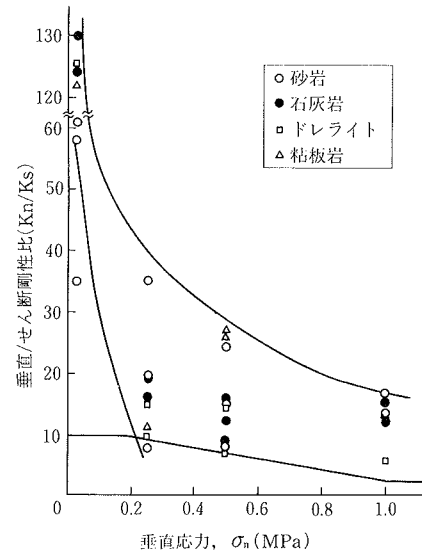
$$K_n = \frac{k_n}{r} = \frac{1}{r} (k_0 + k_1 \overline{N_{ij}}) \quad (4)$$

$$K_s = \frac{k_s}{r} = \frac{1}{r} (G_0 + G_1 \overline{N_{ij}}) \quad (5)$$

- ここに、  
 r：不連続面の代表的な寸法  
 σ<sub>ij</sub>：岩盤に作用する平均応力テンソル  
 N<sub>ij</sub>：不連続面の平均的な方向テンソル  
 k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, G<sub>0</sub>, G<sub>1</sub>：実験，計測より求まる定数

K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub>：き裂の垂直剛性およびせん断剛性である。平均応力テンソルと平均方向テンソルの内積は平均的な不連続面群の方向に対する平均的な垂直応力を表すもので，単一の不連続面に対して考えれば，垂直剛性およびせん断剛性の垂直応力依存性を垂直応力の1次式で近似した形である。不連続面の代表寸法による補正は，剛性の寸法効果を考慮するため，単位寸法当たりのバネ定数で考えている。定数の算定方法については後述するが，計算の中ではバネ定数に上下限を設定し（図一16参照），上限値により不連続面のバネ定数が岩石の弾性係数より大きくなるという不自然さを解消し，下限値は垂直応力が引張となった場合にその時点で，剛性をほぼ0（初期値の10-6）とするものである。

4.1.2 解析手法の特徴 解析は荷重増分法を用い，各荷重段階でその時点の応力（あるいはひずみ）に対応す



図一18 垂直/せん断剛性比と応力の関係

る計算を行う。反復計算は行わず，材料の剛性は一つ前の荷重ステップでの荷重を用いて計算されるので，剛性が急変するような大きな荷重を作用させると誤差が大きくなるので注意する必要がある。前述の引張破壊処理および要素の解放応力による不平衡力の処理については，生じた不平衡力を次増分荷重増分に加算して，得られた等価節点力との差が，誤差範囲になるまでの反復を行っている。

本解析コードは山辺（1988）<sup>4)</sup>および前川ら（1988）<sup>5)</sup>を参考としているが，山辺らが導入したバネ定数の応力依存性は割線係数に対してで，ここでは増分型の係数を用いている点で繰り返しの収束計算ではなく荷重増分に対しては繰返し計算は行わない。

#### 4.2 ブロック試験のシミュレーション結果

4.2.1 入力定数の決定 岩石のヤング率およびポアソン比については不連続面挿入前の凝灰岩のヤング率の平均値，すなわち 12 GPa および 0.16 を用いた。

不連続面の剛性の応力依存性に関する定数は不連続性岩盤試験(1)の不連続面3の応力～変位関係より求めた。試験結果よりまず垂直剛性を各垂直応力増分と垂直変位増分に対して算出し，せん断剛性は各せん断応力増分とせん断変位増分に対して算出し，それらを垂直応力に対してプロットする（図一17）。この図において剛性と垂直応力の線形関係を最小2乗法により算出する。理論的には垂直応力が0の場合，両剛性も0となるが，計算において初期剛性を決定する必要がある。ここでは，実験のシミュレーションを行うので，実験における第1ステップでの応力増分の1/2の応力における両剛性の値を初期値 k<sub>0</sub>, G<sub>0</sub> とした。このときの垂直剛性/せん断剛性比は 11 である。両剛性の増加率の比 (Δk<sub>1</sub>/ΔG<sub>1</sub>) も同じ値であるので応力の増加に伴い垂直剛性/せん断剛性比は変化しない。しかし，垂直バネの剛性が上限値に達するのがおよそ 2 MPa で，せん断バネ定数のそれは 10 MPa であるので，その間，垂直剛性/せん断剛性比は線形的に減少し，最終的には新鮮凝灰岩のヤング率/せん断剛性比＝

2(1+ν)=2.32となる。Bandisら(1983)<sup>6)</sup>がまとめたデータに対して今回採用した値を示したのが図-18である。これはほぼ下限値に相当する。その理由としてこの不連続面が割裂による人工的な不連続面であるため天然のものに比べて噛み合わせが良いことが挙げられる。これは前述の形状調査結果からも平均開口幅が小さいことから伺えるものである。

不連続面のバネ定数の上下限值としては、上限値は新鮮な凝灰岩のヤング率(12 GPa)およびせん断剛性率(5.2 GPa)を垂直ばねおよびせん断ばねに与え、下限値は引張強度0として与えた。

不連続面の幾何学的特性としては式(1)および(2)の値を採用した。

4.2.2 シミュレーション結果 試験(1)および試験(2)のX方向荷重およびY方向荷重のシミュレーション結果の一例を図-19と図-20に示す。図-19は試験(1)におけるX方向圧縮の拘束圧0, 2.0, 3.3 MPaの軸差応力3.3 MPaまでの試験結果、図-20が試験(2)におけるY方向圧縮の拘束圧0, 1.3, 2.0 MPaの軸差応力3.3 MPaまでの試験結果である。図中の実線が実験結果で、破線が計算結果であり、処女荷重におけるブロック全体の応力～変位関係の非線形性および拘束圧依存性をよく模擬している。

## 6. 結論

不連続性岩盤の変形特性は不連続面に支配され、岩石の変形係数との相違、異方性の存在、またそれらが拘束圧下では低下するなどの点が指摘されている。これらの挙動を実験的に調べるために岩石ブロック試験装置を開発し、解析的には岩盤をクラックテンソルを導入した非線形弾性体として近似することを試みた。その結果、以下の知見が得られた。

① 今回開発した岩石ブロック試験装置は上記不連続性岩盤の変形特性を十分反映可能な有効な試験法であることが確認された。

② 不連続面の変形特性のモデル化として、垂直・せん断剛性を垂直応力の一次関数で近似した場合、岩盤の応力依存性が表現できる。

③ 人工的に不連続面を挿入した岩石ブロックの変形特性はクラックテンソルを導入した解析コードにより模擬することが可能である。

現位置岩盤に適用するには、入力定数の決定において本岩石ブロック試験および不連続面の簡易変形試験が有効となるが、現位置の応力状態、および掘削における解放応力を考慮して定数を決定する必要がある。本手法では限られた応力レベルでの近似となり、せん断変位が増加して、不連続面にダイレタンシーが生ずるような場合のモデル化が今後の課題である。

## 参考文献

1) ISRM commission on testing methods: Suggested

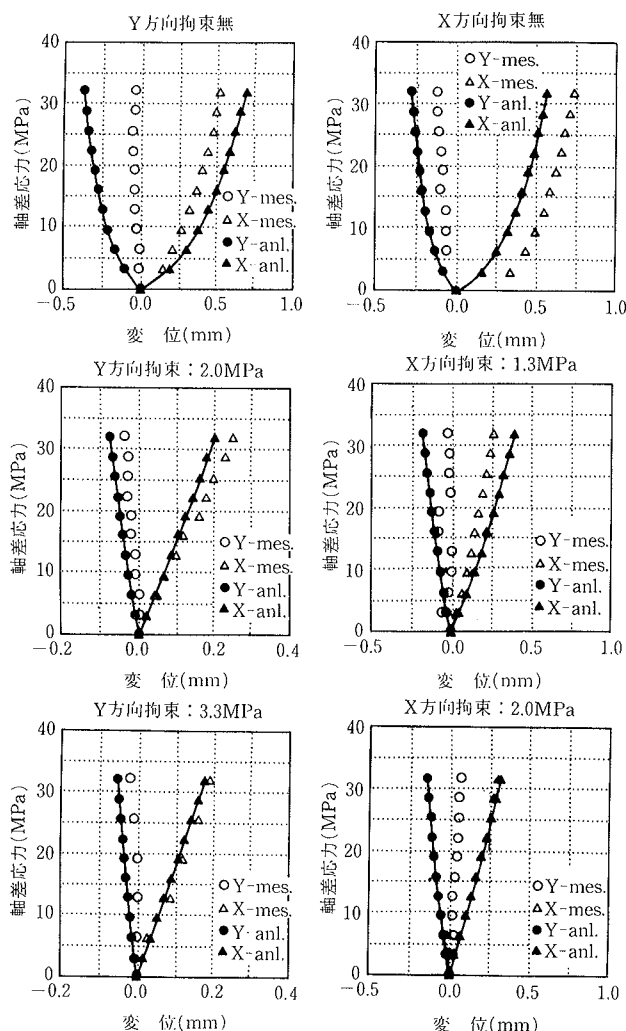


図-19 実験結果と解析結果の比較 (試験(1) X方向荷重)

図-20 実験結果と解析結果の比較 (試験(2) Y方向荷重)

method for large scale sampling and triaxial testing of jointed rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 26, No. 5, p. 427~434, (1989)

2) 下茂道人: 岩盤ブロック試験機の開発とそれを用いた岩盤の透水性評価手法, 大成建設(株)技術研究所報第22号, p. 93~104, (1989)

3) M. Oda: An Experimental Study of the elasticity of Mylonite Rock with Random Cracks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 25, No. 2, p. 59~69, (1988)

4) 山辺 正: 軟岩と不連続性岩盤の力学的特性評価および変形解析に関する基礎的研究, 博士論文, (1988)

5) 前川恵輔, 中野敏雄, 山辺 正, 石塚与志雄: 亀裂性岩盤の非線形弾性変形に関する研究, 土木学会第46回年次学術講演会, p. 552~553, (1991)

6) S. C. Bandis, A. C. Lumsden, N. R. Barton: Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 6, p. 249~268, (1983)