

## 岩盤せん断試験における破壊機構に関する研究

A Study on Mechanisms of Failure in In-situ Rock Shear Tests

西山竜朗\*・長谷川高士\*\*

Tatsuro NISHIYAMA and Takashi HASEGAWA

\*正会員 農修 岡山大学助手 環境理工学部環境管理工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

\*\*正会員 農博 近畿大学教授 農学部国際資源管理学科 (〒631-0052 奈良市中町 3327-204)

The mechanisms of in-situ rock shear tests were investigated for the sake of constructing a theoretical method for the estimation of the strength of rock masses. Localized failure in the testing process was especially noticed, and it was treated with Mohr's failure criterion. The investigation consisted of experiments on gypsum models whose conditions were similar to those in in-situ rock shear tests and of stress analyses for these experiments. Theoretical interpretations of the characteristic cracking process and of the mechanisms of the appearance of shear strength, measured by in-situ rock shear tests, were obtained from the results.

**Key Words :** in-situ rock shear test, failure criterion, localized failure

## 1. 序 論

岩盤の破壊強度を実用的に評価する際には、あるがままの岩盤の強度を知る必要から、原位置における岩盤せん断試験が行われている。しかしながら、岩盤自体の力学的挙動が複雑であることに加え、原位置で行われる試験には载荷方法や試験対象の規模などの点で制約条件も多く、岩盤せん断試験で理論的に明快な試験過程を構成することは非常に困難である。そのために、原位置試験で得られた結果は、理想的な条件下での室内試験から得られた基本強度特性との対比すらされていない。このことは逆に、原位置試験において原位置にある岩盤の持つ不均質や不連続を含んだ特性を求めながら、それらの影響を評価せずにいることに相当する。

上記のような現状を考えると、原位置における岩盤の強度を評価するためには、第一に理論的に明快な試験過程を構成することが出来る試験法および装置の確立、第二にマクロな不均質や不連続を含まない岩盤の強度評価、第三にマクロな不均質や不連続を含んだ岩盤の評価と進めることによって、実用性の要望を満たすことが出来ると考えられる。ここでは、実用的に行われている試験法による評価を前提とし、その試験から得られる結果を材料の基本強度特性と対比していかに評価し得るかという点を出発点として、実用的な岩盤強度評価法を検討しようとした。

## 2. 岩盤せん断試験の未解決事項

岩盤せん断試験として実用的に行われている試験法の主流はブロックせん断試験およびロックせん断試験

であり、これらはいずれも傾斜荷重型の直接せん断試験である。ロックせん断試験における試験体付近の概略を図-1に示す。

試験過程においては、終始一定とする垂直荷重  $N$  を与えた後に傾斜荷重  $F$  を増加させて、ブロック-基盤接触面付近を破壊に至らせる。試験から得た測定結果の評価においては、ブロック-基盤接触面上の平均的な垂直応力  $\sigma$  およびせん断応力  $\tau$  を次式により算定する。

$$\sigma = \frac{N + F \sin \theta}{A}, \quad \tau = \frac{F \cos \theta}{A} \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  は傾斜荷重の作用線がブロック-基盤接触面となす角を表し、 $A$  はブロック-基盤接触面の面積を表す。傾斜荷重  $F$  が最大値を示すときを破壊点と呼ぶが、複数回の試験における破壊点の  $\sigma$  および  $\tau$  から、図-2に示すように岩盤のせん断抵抗を求めることによって強度を評価する。

ここに、岩盤せん断試験においては、破壊される材料に作用する主応力の大きさ、方向および破壊面上の分布が不明であり、既知となっている応力径路は想定された破壊面すなわちブロック-基盤接触面上の平均的な応力に関するもののみである。つまり、载荷方法の特性上、岩盤せん断試験では破壊に関して得られる情報が少なく、理論的に明快な試験過程の構成が第一の未解決事項となっている。

理論的に明快な試験過程を持つ試験法には、破壊現象を Mohr の破壊理論に対応させることが出来る三軸圧縮試験がある。理論上、三軸圧縮試験の試験過程における供試体は一様な応力場をなし、供試体に作用する主応力の大きさおよび方向は既知である。また、一般的な三軸圧縮試験においては最小主応力一定の下で最大主応力を増加させるため、試験過程における応力

径路は単純明快である。

岩盤に関して三軸圧縮試験から得られた有効な理論には、Hoek<sup>1)</sup>による岩盤の破壊規準が挙げられる。破壊規準を表す方程式は現代の破壊力学の礎となっている Griffith の理論に基づいて導かれており、その方程式に材料試験結果を代入した破壊規準は、理論的根拠を持った岩盤の基本強度特性とし得る。しかし、三軸圧縮試験に用いる供試体は岩盤の一部を取り出したものであり、極めて理想的な試料となっているため、原位置にある岩盤を代表するものとし難い面がある。

岩盤せん断試験の結果を三軸圧縮試験の結果に関連付け得たならば、材料の基本強度特性に照合した上で、岩盤の強度評価が可能となる。しかし、岩盤せん断試験においてブロック-基盤接触面上に与えることの出来る垂直応力の変化範囲は、载荷方法による制約および原位置での試験であるがゆえの試験規模の制約から、岩盤強度と比較して極めて小さい範囲に限定されている。そのために、試験から得ることが出来るせん断抵抗線は、理論的な解釈に必要な範囲全体のうちの限られた一部となっている。このことが、せん断抵抗の特性を三軸圧縮試験から得られる Mohr の包絡線に関連付けた解釈の障害となっており、その解釈が第二の未解決事項と言える。

ここに、岩盤せん断試験における破壊は岩盤内に起こるため、目視により破壊過程を確認することは出来ないが、類似した条件下におけるコンクリートの破壊に関する研究成果が Kaneko et al.<sup>2)</sup>により報告されている。この報告には、コンクリートシェアキーの破壊試験において、多数の小規模な局所破壊が起こった末に最終的なブロックと基盤の分離に至った旨が記されている。上記の破壊試験と岩盤せん断試験では载荷条件が異なるが、ブロックを基盤から分離させる破壊面が局所的な破壊によって形成されることについては、岩盤せん断試験においても同様と予想される。

岩盤せん断試験において岩盤内に起こる破壊が上記のようであるならば、試験過程における応力場は局所破壊によって生じた亀裂の存在に強く影響を受ける。試験過程での破壊機構に注目することによって応力経路を知り得たならば、十分な理論的根拠を持った岩盤強度評価への糸口となり得るものと考えられる。

3. 模型試験

3.1 手法

岩盤せん断試験の試験過程における破壊機構を知るために、同試験を想定した模型試験を行った。

図-3(a)のように、岩盤せん断試験におけるブロック試験体と岩盤を一体とした形状を持ち、全体が同一材料からなる模型に対して、実際の岩盤せん断試験と同様にブロック-基盤接触面付近を破壊に至らせた。試

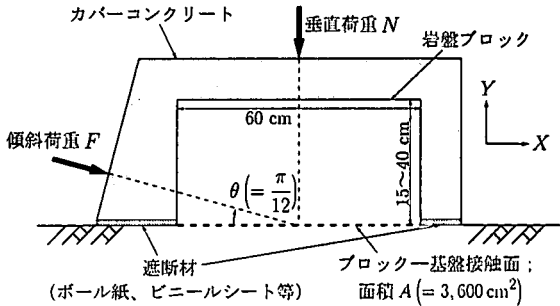


図-1 ロックせん断試験の試験体

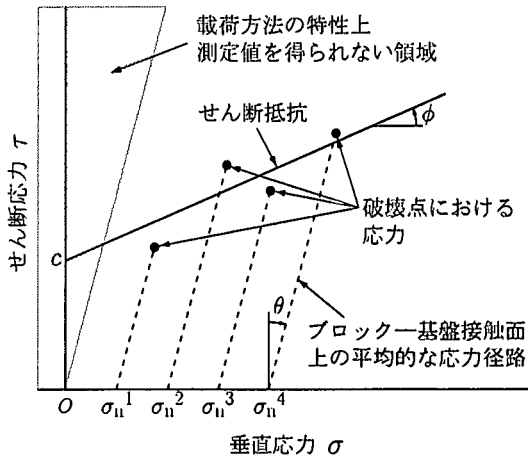


図-2 岩盤せん断試験における強度評価

表-1 試験において与えた垂直荷重

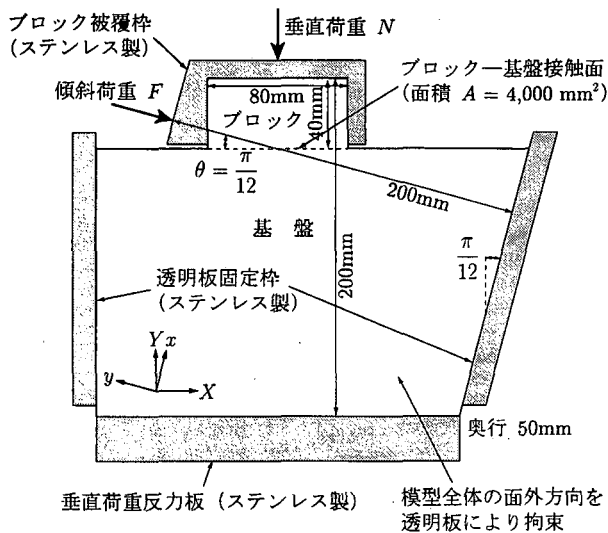
| 垂直荷重<br>N (kN) | 試験<br>個数 | 初期垂直応力<br>$\sigma_n$ (MPa) | 等分布荷重<br>P (N/mm) |
|----------------|----------|----------------------------|-------------------|
| 0              | 2        | 0                          | 0                 |
| 1.5            | 3        | 0.375                      | 15                |
| 2.5            | 1        | 0.625                      | 25                |
| 5              | 1        | 1.25                       | 50                |
| 10             | 1        | 2.5                        | 100               |
| 15             | 2        | 3.75                       | 150               |
| 20             | 2        | 5                          | 200               |
| 30             | 1        | 7.5                        | 300               |

験において与えた初期垂直応力  $\sigma_n = N/A$  を表-1 に示す。図-3 の X-Y 平面の面外方向は透明板により拘束し、模型に平面歪に近い条件を与えた。载荷においては図-3(b)のように模型を配置し、垂直荷重 N を油圧シリンダにより、傾斜荷重 F を岩石一軸圧縮試験機により与えた。なお、現時点では载荷速度の影響には配慮しないこととしている。

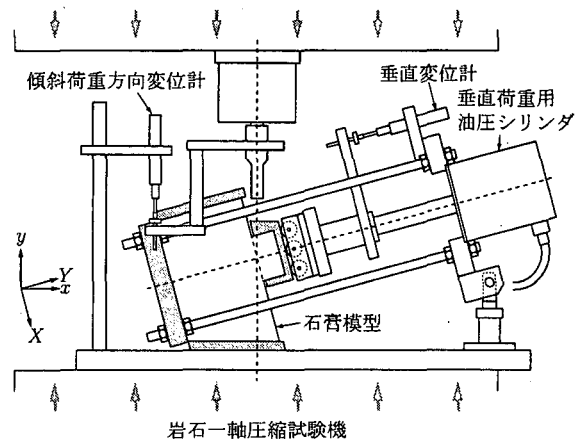
模型の材料には、代表的な脆性材料である石膏を用いた。その物性値を表-2 に示す。なお、表中の  $\sigma_{ti}$  は圧裂引張試験から得たものである。

試験過程においては、荷重およびブロックの変位の測定に画像を対応させながら、図-3 に示した X-Y 平面の垂直方向から模型をビデオ撮影した。

測定結果の評価においては、実際の岩盤せん断試験と同じように、ブロック-基盤接触面上の平均的な垂直応力  $\sigma$  およびせん断応力  $\tau$  を式 (1) により求め、こ



(a)



(b)

図-3 模型試験の概要：(a) 模型の寸法および部位の呼称；(b) 試験装置

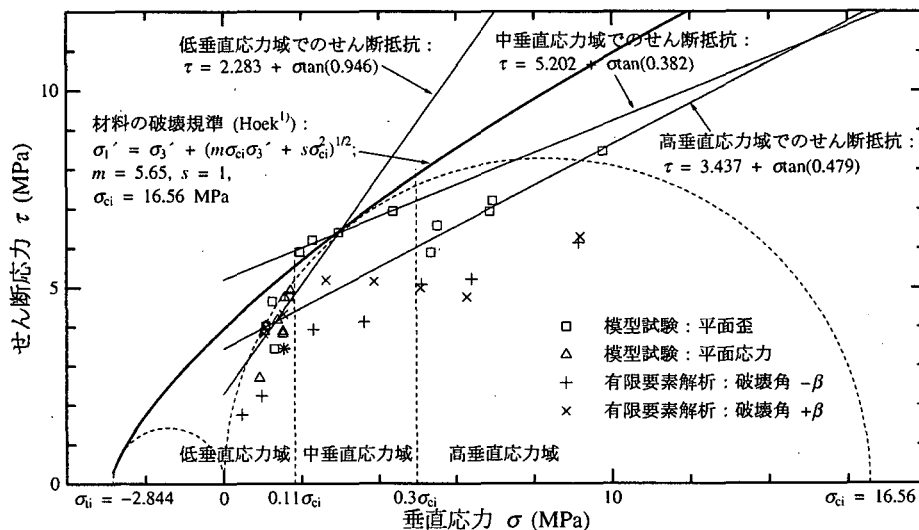


図-4 模型試験および計算から得た破壊点の応力

表-2 石膏の物性値

| 項目                         | 値                   |
|----------------------------|---------------------|
| 密度 $\rho$ (kg/m³)          | $1.121 \times 10^3$ |
| 弾性係数 $E$ (MPa)             | $3.697 \times 10^3$ |
| Poisson 比 $\nu$            | 0.35                |
| 一軸圧縮強度 $\sigma_{ci}$ (MPa) | $1.656 \times 10^1$ |
| 一軸引張強度 $\sigma_{ti}$ (MPa) | -2.844              |

これらの応力を石膏の材料試験から得た Mohr の包絡線と比較した。Mohr の包絡線の方程式には、次式で表される Hoek<sup>1)</sup>による岩盤の破壊規準を用いた。

$$\sigma_1' = \sigma_3' + (m\sigma_{ci}\sigma_3' + s\sigma_{ci}^2)^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_1'$ 、 $\sigma_3'$ は破壊時の最大・最小有効主応力、 $\sigma_{ci}$ は無傷の岩盤構成材料の一軸圧縮強度を表す。 $m$ 、 $s$ は岩盤の劣化の具合に対応する定数である。 $m$ 、 $s$ は三軸圧縮試験結果を近似するよう求めるべき定数であるが、

ここでは  $\sigma_{ci}$  および無傷の材料の一軸引張強度  $\sigma_{ti}$  を用い、石膏模型が不連続を含まないことから  $\sigma_{cm} = \sigma_{ci}$  および  $\sigma_{tm} = \sigma_{ti}$  といった条件を与えることにより、図-4中に示す値を得た。ただし、 $\sigma_{cm}$  および  $\sigma_{tm}$  は劣化を含めた岩盤の一軸圧縮強度および一軸引張強度を表す。Hoek<sup>1)</sup>はさらに、式(2)を Balmer<sup>3)</sup>による Mohr の包絡線の媒介変数方程式に代入することにより、曲線をなす Mohr の包絡線としての表現を示しており、本稿中の Mohr の包絡線はこの方程式を用いて表示した。

### 3.2 結果

模型試験から得た破壊点の応力を石膏の材料試験から得た Mohr の包絡線と比較して図-4に示す。図-4において、模型試験から得た破壊点のせん断応力は、図中に中垂直応力域として示した特定の垂直応力域のみに Mohr の包絡線にほぼ同様の値を示し、そ

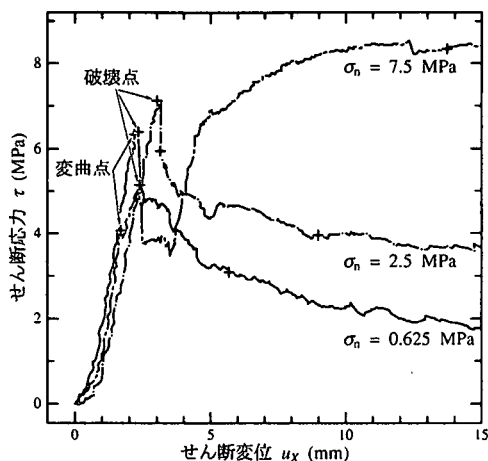


図-5 せん断変位—せん断応力関係

の範囲を挟む低・高両垂直応力域においては、明らかに Mohr の包絡線より小さい値を示している。ここに、図-4 に現れている中垂直応力域は一軸圧縮強度を表す Mohr の応力円と Mohr の包絡線の接点を含み、概して  $0.11\sigma_{ci} < \sigma < 0.3\sigma_{ci}$  となっている。図-4 中に併せて示したように、各垂直応力域内で求めたせん断抵抗は、互いに大きく異なっている。

せん断変位—せん断応力関係にも、上記の垂直応力域に対応した特性の変化が現れた。図-5 に低・中・高垂直応力域から各 1 個の測定結果を示す。同図において、低垂直応力下でのせん断変位—せん断応力関係には、変曲点・破壊点・残留状態が現れており、残留状態においてはせん断応力の減少が顕著である。中垂直応力下では変曲点が現れず、明らかな破壊点を示した後、低垂直応力下同様の残留状態を示している。高垂直応力下では変曲点の後に明らかなピークが現れているが、その後の残留状態においてせん断応力が再度増加している。

なお、垂直変位—せん断応力関係においては、用いた測定装置の感度の限界から、実際の岩盤せん断試験に見られるブロックの浮上がりを読み取ることが出来なかった。ブロックの浮上がりについては、岩盤と模型材料の相似性の点からも今後の検討課題と考えている。

図-6 のように、撮影した破壊過程にも垂直応力域による相違が現れた。低垂直応力下では、変曲点においてブロック—基盤接触面の上流側端部を起点とする引張亀裂が現れ、この亀裂はその後緩やかに進展した。進展を終えた後の破壊点では、ブロック—基盤接触面を斜めに横切る局所的な亀裂が現れた。中垂直応力下では、破壊点において最初の亀裂が現れた。高垂直応力下では、変曲点において下流側基盤内に局所的な破壊が起こり、その後破壊点において、基盤内深部に局所的な亀裂が現れた。残留状態での破壊も含め、高垂直応力下では、接触面上でなく基盤内深部の破壊が支配的であった。

## 4. 模型試験の応力解析

### 4.1 手法

前節に述べた破壊過程において模型に作用する応力を知るために、有限要素法による模型試験の応力解析を行った。

ここでは、局所的な破壊の進行が応力分布に与える影響を反映することを目的として、試験過程の進行に伴う増分計算を次のように行った。

1. 第 1 回の計算において、垂直荷重  $N$  に相当する分布荷重  $P$  を与えた (図-7)。
2. 第 2 回以降の計算において、傾斜荷重  $F$  に相当する条件として、 $F$  が与えられる境界に図-7 中に示した変位  $\Delta u_y$  を与えた。

$P$  には、垂直荷重がブロック上端に等分布荷重として作用するものと仮定した上で、模型試験の際に与えた  $\sigma_n$  に等価な表-1 に示した値を与えた。また、 $\Delta u_y = 0.01$  mm とした。

局所破壊の発生については、各回の計算において、中心に作用する応力が破壊規準を満たした要素中に亀裂が生じるものと考えることにより反映させた。

破壊規準には、Hoek<sup>1)</sup>による式 (2) を用いた。ここに、式 (2) は前にも述べた通り Mohr の包絡線を表しており、破壊時には 2 個の共役な破壊角を定める。ここでは、これらのうちいずれか一方の角度を示す破壊面が現れるものと仮定し、計算過程のすべての破壊時において図-8 に示した  $+\beta$  を破壊角とする場合および同様に  $-\beta$  を破壊角とする場合の 2 通りの計算を行った。なお、 $\beta$  は次式により与えられる (Hoek<sup>1)</sup>)。

$$\beta = \frac{1}{2} \text{Arcsin} \frac{\tau_m}{\tau_m + m\sigma_{ci}/8} \left( 1 + \frac{m\sigma_{ci}}{4\tau_m} \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 $\tau_m = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$  である。

破壊が起こった要素には、以後の計算において要素を二分する亀裂が内在するものと想定し、Jaeger and Cook<sup>4)</sup>による弱面を含む材料のせん断強度の取扱いに従い、亀裂面に平行な面上に摩擦強度以上の応力が作用しないと条件を与えた。なお、ここでは、亀裂面の摩擦強度  $\tau_f = \sigma \tan(0.7)$  を仮定した。ただし  $0.7 \text{ rad} \simeq 40^\circ$  である。

計算において上記の摩擦強度に関する条件を与える際には、Zienkiewicz et al.<sup>5)</sup>による手法を応用し、超過応力の再分配を行った。なお、ここに、超過応力は次の通りとした。ただし、全体剛性行列を考えている座標系を  $x$ - $y$ 、亀裂に平行および垂直な軸を持つ座標系を  $x'$ - $y'$  とし (図-8)、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{x'}$  および  $\sigma_{y'}$  は各々  $x$  面、 $y$  面、 $x'$  面および  $y'$  面上の垂直応力、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{x'y'}$  は各々  $x$  面と  $y$  面上、 $x'$  面と  $y'$  面上のせん断応力を表す。また、 $\bar{\sigma}_{y'}$ 、 $\bar{\tau}_{x'y'}$  は、弾性計算により算定された  $\sigma_{y'}$ 、 $\tau_{x'y'}$  の値を表す。

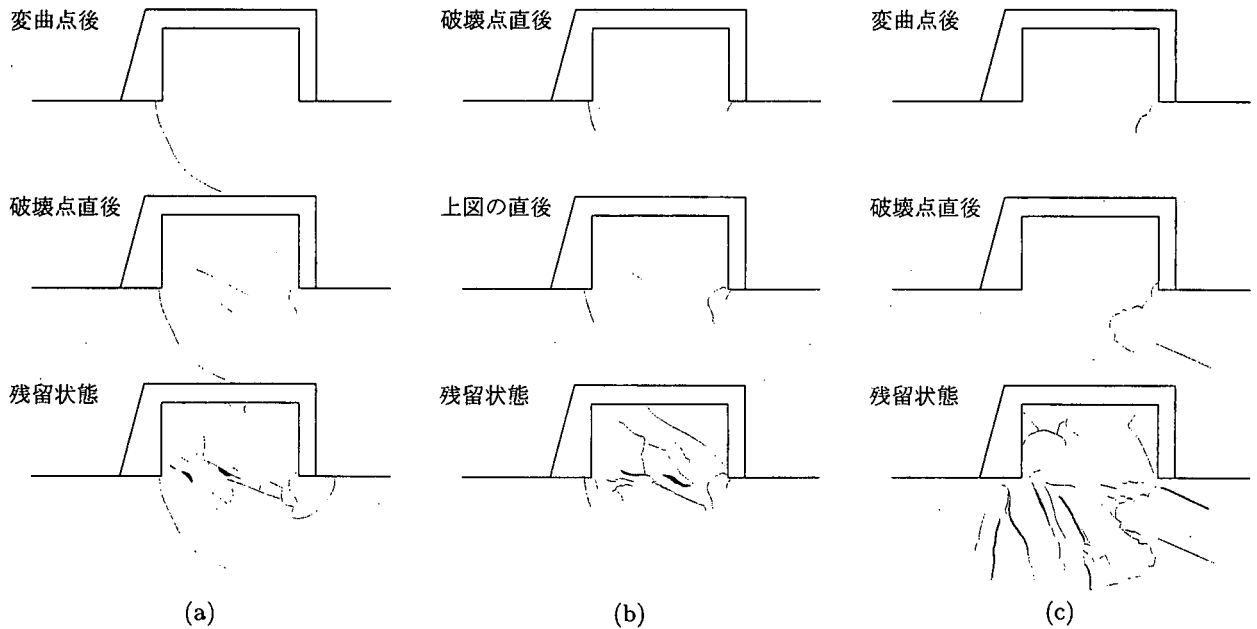


図-6 模型試験における破壊過程：(a)  $\sigma_n = 0.625 \text{ MPa}$ ; (b)  $\sigma_n = 2.5 \text{ MPa}$ ; (c)  $\sigma_n = 7.5 \text{ MPa}$ .

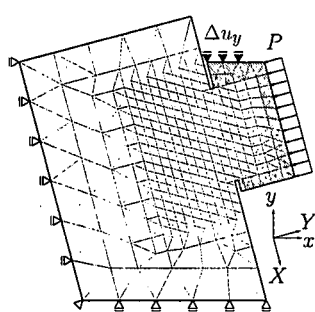


図-7 解析領域および境界条件

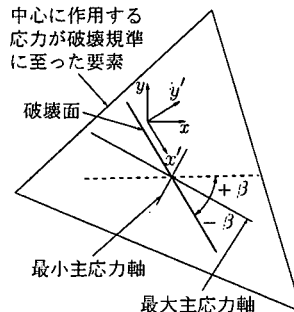


図-8 破壊角の選択

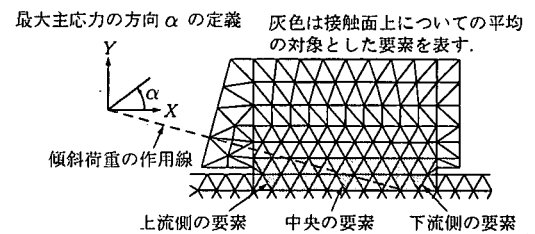


図-9 解析領域の部位の呼称

亀裂面の垂直応力が圧縮すなわち  $\overline{\sigma_{y'}} \geq 0$  である場合、 $|\overline{\tau_{x'y'}}| > \tau_f$  であったならば、 $\pm(|\overline{\tau_{x'y'}}| - \tau_f)$  は亀裂を含む要素に作用しないはずのせん断応力である。ただし、複号については  $\overline{\tau_{x'y'}}$  の値に同様の符号を選択する。したがって、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm(|\overline{\tau_{x'y'}}| - \tau_f) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

に釣合う  $\{\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}\}^T$  を超過応力とした。

亀裂面の垂直応力が引張すなわち  $\overline{\sigma_{y'}} < 0$  である場合には、亀裂が開くために亀裂面上に応力が作用しないことを想定し、

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \tau_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \overline{\sigma_{y'}} \\ \overline{\tau_{x'y'}} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

に釣合う  $\{\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}\}^T$  を超過応力とした。

図-7 に解析領域の有限要素分割および境界条件を示す。領域全体に平面歪場を仮定し、要素を定歪三角形とした。解析領域の寸法は図-3 に従い、未破壊の要

素を等方線形弾性体と仮定して石膏材料の物性値を与えた。なお、図-7 中に灰色で示した要素にはステンレス製のブロック被覆枠を想定し、密度には測定した  $7.717 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  を、弾性係数には石膏の 10 倍を与え、計算過程において破壊が生じないものとした。

結果の解釈における傾斜荷重およびブロックの変位には、境界条件として変位  $\Delta u_y$  を与えた 3 個の節点における荷重の和および変位の平均を用いた。

## 4.2 結果

すべての計算について、式 (1) により求めた破壊点の応力を図-4 に示す。いずれの計算結果も模型試験の結果より小さいせん断応力を示しているが、模型試験の場合と同じように、垂直応力が中垂直応力域から離れるほど、破壊点の応力が Mohr の包絡線から離れている。

ここに、選択した破壊角が異なる 2 通りの計算のうち、計算過程における亀裂の分布について、破壊角として  $-\beta$  を選択した計算において模型試験に類似した結果を得た。例として、破壊角として  $-\beta$  を選択した計算の結果を図-10 に示したが、同図における亀裂の

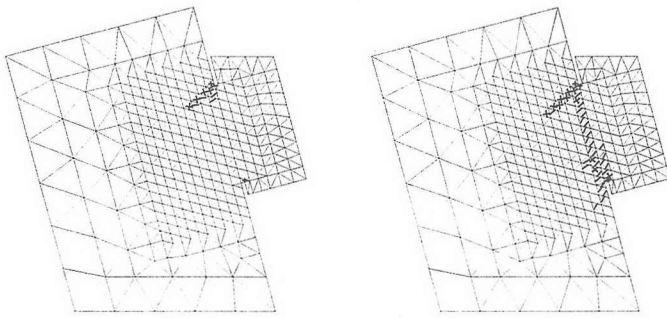


図-10  $\sigma_n = 2.5$  MPa を与えた計算における亀裂の分布；左図が破壊点，右図が最終回。

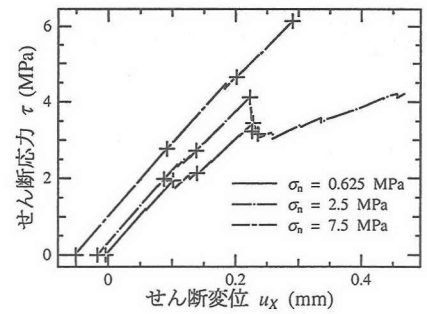


図-11 計算におけるせん断変位—せん断応力関係

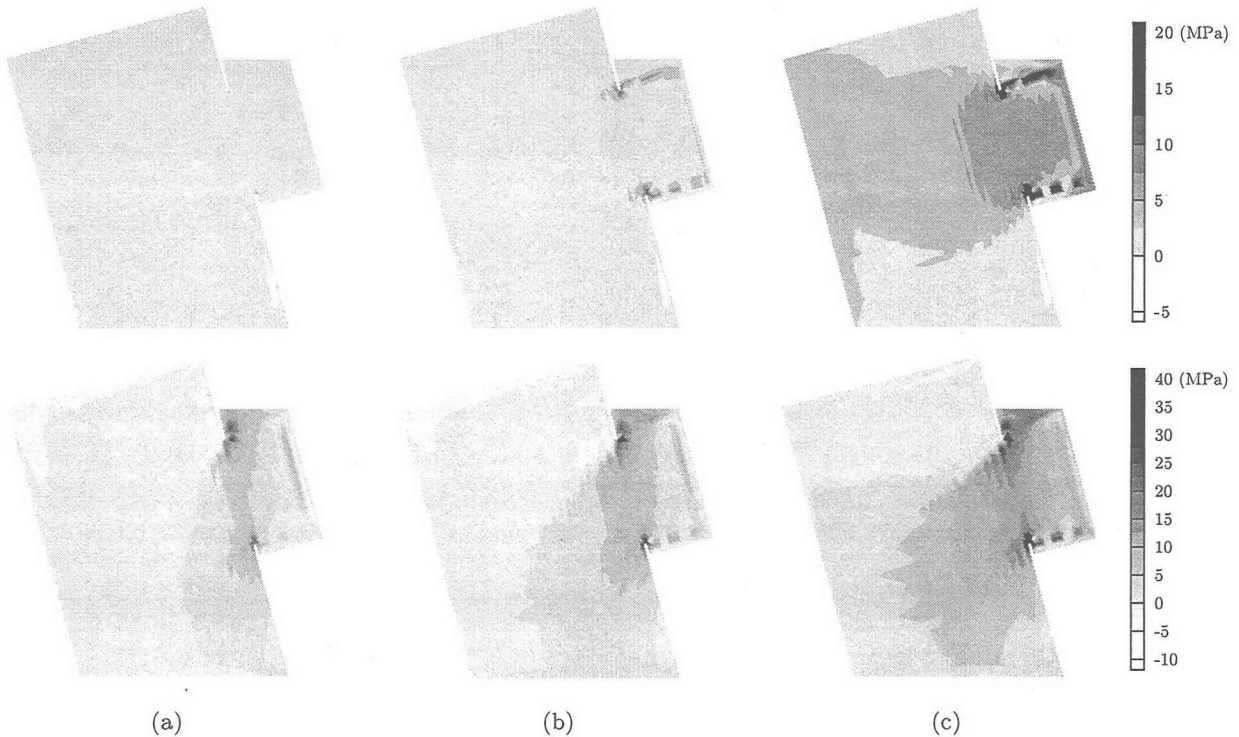


図-12 計算における最大主応力の分布：(a)  $\sigma_n = 0.625$  MPa；(b)  $\sigma_n = 2.5$  MPa；(c)  $\sigma_n = 7.5$  MPa；上段はいずれも初期，下段は(a)，(b)が破壊点，(c)が最終回。

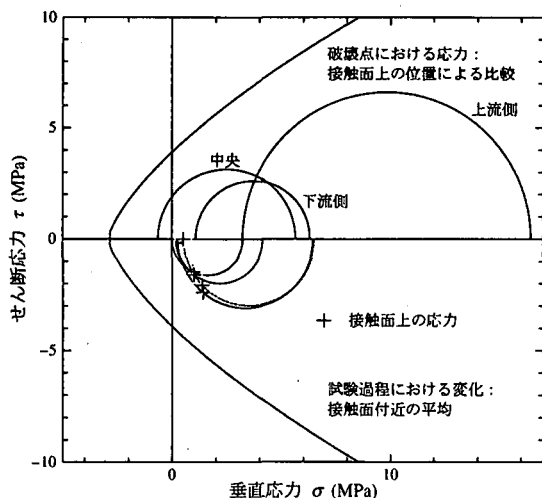
分布は，同条件下での模型試験から得た図-6(b)に類似している．計算における共役な破壊角の取扱いには議論の余地が残るが，以下では破壊角を  $-\beta$  とした計算の結果を取り上げることとする．

計算から得たせん断変位—せん断応力関係を図-11に示す．なお，図-11～14においては低・中・高垂直応力域から各1個の結果を示した．せん断変位—せん断応力関係において，計算過程における亀裂の発生との対応関係について，模型試験に類似した結果を得た．なお，高垂直応力域での試験に相当する3.75 MPa以上の  $\sigma_n$  を与えたすべての計算において，図-11に示した  $\sigma_n = 7.5$  (MPa) の場合のように，せん断荷重が減少を示さずに超過応力の再分配処理が不能となり計算が終了した．変位はすべての計算において模型試験から得た結果より明らかに小さく，特に材料境界の取扱

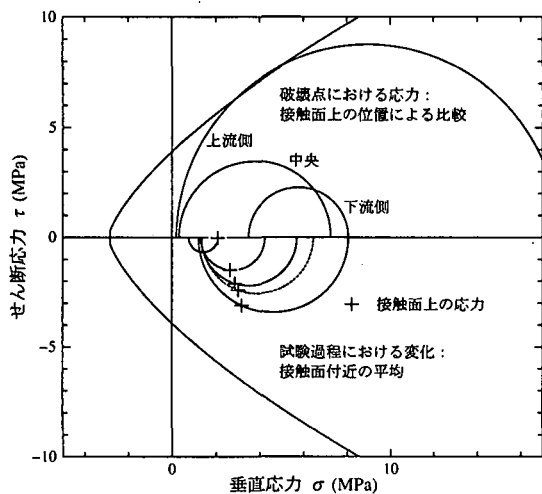
いと与えるべき変形係数について，今後の検討課題と考えている．

計算における，模型に作用する最大主応力の分布を図-12に示す．同図上段の初期状態を各垂直応力域について比較すると，低垂直応力域においてのみ，接触面端部への圧縮応力の集中が生じていないことが分かる．このために，低垂直応力域においてのみ，試験過程の比較的初期の引張破壊が起こる．また，同図下段の破壊が進行した状況について比較すると，高垂直応力域では，圧縮応力が基盤内深部に顕著に発達していることが分かる．このような応力分布が，基盤内深部に集中的に破壊が起こる原因となっている．

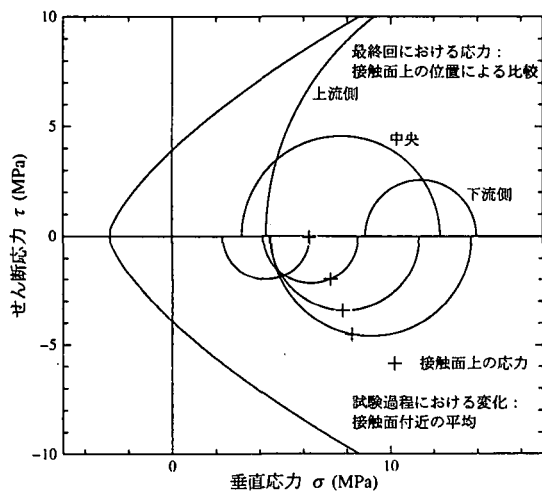
計算から得たブロック—基盤接触面付近についてのMohrの応力円を図-13に示す．同図(a)～(c)の各々において，上半分に破壊点における接触面上の位置に



(a)



(b)



(c)

図-13 計算における接触面付近の応力:(a)  $\sigma_n = 0.625$  MPa; (b)  $\sigma_n = 2.5$  MPa; (c)  $\sigma_n = 7.5$  MPa.

よる応力の比較を示し、下半分に計算過程における接触面上全体について平均した応力の変化を示した。計算過程における変化を構成する Mohr の応力円は図-11中に記した+印の計算段階に対応しており、破壊点後のものは点線で示した。

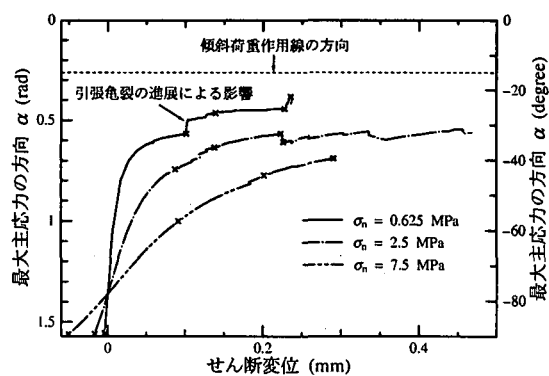


図-14 計算における最大主応力の方向

低垂直応力下の結果を示す図-13(a)では、破壊点において作用する応力が接触面上の位置により大きく異なり、特に中央では引張応力が作用している。したがって、仮に破壊点における局所破壊が接触面上に生じたとしても、Mohr の包絡線から大きく離れた応力が作用している他の部分を含む、接触面上全体についての平均に相当する破壊点の応力は、必然的に Mohr の包絡線より小さいせん断応力を示す。

中垂直応力下の結果を示す図-13(b)では、接触面上のすべての Mohr の応力円が圧縮側へ収まり、下流側以外では一軸圧縮に近い状態となっており、同図 (a)と比較したならば、接触面上に作用する応力が一様に近い。このことにより、中垂直応力下での破壊点の応力は低垂直応力下での場合よりも Mohr の包絡線に近づく。

高垂直応力下の結果を示す図-13(c)では、接触面上に作用する応力がさらに圧縮側へと発達している。高垂直応力下では接触面上に Mohr の包絡線から離れた応力が作用し、破壊が基盤内深部に起こる傾向が強い。このことにより、接触面上全体についての平均に相当する最終回における応力は Mohr の包絡線より小さいせん断応力を示す。

計算から得た最大主応力の方向を図-14に示す。同図は接触面上全体について平均した応力に関して表示した。なお、角度の表示は図-9の定義に従っている。図-14から、試験過程における主応力軸の回転が見て取れる。この回転は初期垂直応力  $\sigma_n$  が小さいほど早く起こっており、傾斜荷重型せん断といった载荷方法ゆえのものと言える。また、低垂直応力下の試験においてのみ、接触面上流側端部からの引張亀裂の進展によるさらなる回転が起こっている。

## 5. 試験における破壊機構に関する考察

模型試験の結果から、岩盤せん断試験のような傾斜荷重型せん断試験における破壊過程は、局所的な破壊から構成されることが分かる。局所的な破壊は非一様な応力分布により起こるが、応力解析から得た結果がそのことを裏付けている。

岩盤せん断試験での評価対象となる破壊点における

破壊も極めて局所的であり、模型試験と応力解析の双方から、垂直応力の規模により破壊機構が変化する結果を得た。このことに伴い、低・中・高の各垂直応力域における破壊点の応力に関する特性に、互いに顕著な相違が現れた。

低垂直応力下での試験の特徴は、ブロッカー基盤接触面付近に引張応力が作用することである。引張応力が集中した位置においては引張亀裂が発生・進展し、接触面上の応力の非一様性の要因となる。このことにより、接触面上全体で平均したせん断応力は、破壊規準を満たす応力とそれとは大きく異なる応力の平均となることから、結果として破壊規準より小さいものとなる。また、亀裂の発生・進展により接触面上のせん断応力を減少させる方向に主応力が回転するため、このことも破壊点におけるせん断応力の減少に寄与する。ここに、低垂直応力下での強度特性の変化について谷<sup>6)</sup>による報告に傾向が一致している。

中垂直応力下の試験では引張亀裂の顕著な発達は認められず、接触面付近に関する Mohr の応力円が圧縮側へ収まり、接触面付近は一軸圧縮に近い状態にあると考えられる。接触面上の応力は、低垂直応力下での試験に比べれば一様に近く、このことにより、接触面上全体について平均した応力が材料の破壊規準に近づく。

高垂直応力下の試験では、接触面付近に作用する応力がさらに圧縮側へ発達し、局所破壊が起こる位置が基盤内深部となる。破壊点においても接触面上のすべての位置に破壊規準を満たさない応力が作用しており、このことにより、接触面上全体で平均したせん断応力は破壊規準より小さいものとなる。

現行の岩盤せん断試験では、ブロッカー基盤接触面上の垂直応力およびせん断応力のみといった限られた情報から強度評価を行っているため、結果解釈の理論的根拠に乏しい。本稿においては、試験過程での破壊挙動の特性を知った上で、数値解析の援用により応力を Mohr 円表示し、結果評価を試みた。今後、数値解析により、理想材料の脆性破壊をより妥当に再現するとともに、不均質性、異方性および不連続を含めた岩盤の挙動を再現し得たならば、上記のような解釈が実務における強度評価に大きく貢献するものと思われる。

## 6. 結 論

本稿に述べた検討から、岩盤せん断試験の試験過程における破壊機構は次のようであると考えられる。

1. 岩盤せん断試験の試験過程における破壊は非常に局所的であり、最終的なせん断面は局所破壊の累積によって形成される。このような破壊過程は、強制的にせん断される面付近において、作用する応力が位置により大きく異なるために起こる。
2. 破壊機構は、試験における垂直応力の規模により

大きく変化する。垂直応力の規模は、試験対象材料の一軸圧縮強度を表す Mohr 円と Mohr の包絡線の接点付近を中垂直応力域とする、低・中・高の垂直応力域に分けることが出来る。

3. 岩盤せん断試験では最終的にせん断抵抗が評価対象となるが、上記の垂直応力域の相違により、せん断抵抗の発現特性が大きく変化する。せん断抵抗を材料試験から得られた Mohr の包絡線と比較したとき、中垂直応力域でのみ Mohr の包絡線に沿ったせん断抵抗が現れ、低・高両垂直応力域では明らかに Mohr の包絡線より小さいせん断抵抗が現れる。
4. 上記の垂直応力域の相違により、岩盤内に作用する応力の分布特性が大きく変化する。このような変化は、初期垂直応力が大きいほど、基盤内の圧縮応力の発達が顕著であることに起因する。応力分布特性の変化による影響を受け、低垂直応力下では基盤内に引張破壊が起こり、高垂直応力下では破壊が起こる局所が基盤内深部となるといった破壊機構の変化が生じる。このような破壊機構の変化が、本節ですでに述べたせん断抵抗の発現に直接の影響を与えている。
5. ブロッカー基盤接触面付近に作用する主応力の方向が試験過程において大きく変化する。このような、言わば主応力軸の回転は、傾斜荷重型せん断といった載荷方法に起因している。低垂直応力域での試験においては引張亀裂の発生・進展によるさらなる回転が起こり、破壊点における最大主応力の方向が傾斜荷重の作用線となす角は、他の垂直応力域での場合より小さい。

謝辞 本稿に報告した検討の一部は科学研究費補助金(課題番号: 11760173)により行った。ここに記し、感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Hoek, E.: Strength of Jointed Rock Masses, *Géotechnique*, Vol. 33, No. 3, pp. 185-223, 1983.
- 2) Kaneko, Y., Connor, J. J., Triantfillou, T. C. and Leung, C. K.: Fracture Mechanics Approach for Failure of Concrete Shear Key. I: Theory, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 119, No. 4, pp. 681-700, 1993.
- 3) Balmer, G.: A General Analytic Solution for Mohr's Envelope, *Proceedings of American Society of Testing Materials*, Vol. 52, pp. 1260-1271, 1952.
- 4) Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W.: *Fundamentals of rock mechanics*, Vol. 18 of *Science paperbacks*, Chapman and Hall Ltd., third edition, 1979.
- 5) Zienkiewicz, O. C., Valliappan, S. and King, I. P.: Stress Analysis of Rock as a 'No Tension' Material, *Géotechnique*, Vol. 18, pp. 56-66, 1968.
- 6) 谷 和夫: 人工の泥質軟岩を用いた室内岩盤せん断試験, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 767-772, 1998.

(2002 年 4 月 19 日 受付)