

JNC TJ8400 2000-016

地層処分坑道周辺の精密な応力評価に関する研究  
－模型実験の三軸応力化と解析評価－

(核燃料サイクル開発機構 委託研究報告書)

2000年2月

北海道大学大学院工学研究科  
石島洋二

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33  
核燃料サイクル開発機構 東海事業所  
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Information Section,  
Administration Division,  
Tokai Works,  
Japan Nuclear Cycle development Institute  
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

# 地層処分坑道周辺の精密な応力評価に関する研究

## —模型実験の三軸応力化と解析評価—

### 目次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| <b>第1章 緒言</b>                        |    |
| 1. 1 研究の目的                           | 1  |
| 1. 2 研究方法と研究の内容                      | 1  |
| <b>第2章 円柱形供試体の単軸圧縮試験と封圧下の引張試験</b>    |    |
| 2. 1 はじめに                            | 3  |
| 2. 2 供試体と試験方法                        | 3  |
| 2. 2. 1 供試体                          | 3  |
| 2. 2. 2 載荷装置                         | 3  |
| 2. 2. 3 一軸圧縮試験                       | 3  |
| 2. 2. 4 一軸引張試験                       | 3  |
| 2. 2. 5 封圧下の引張試験                     | 3  |
| 2. 3 試験結果                            | 4  |
| 2. 3. 1 単軸圧縮試験結果                     | 4  |
| 2. 3. 2 圧裂試験結果                       | 4  |
| 2. 3. 3 一軸引張試験結果                     | 4  |
| 2. 3. 4 封圧下の引張試験結果                   | 4  |
| <b>第3章 岩盤模型試験における模型材料と載荷の方法</b>      |    |
| 3. 1 3軸載荷試験における留意点                   | 13 |
| 3. 2 岩盤模型                            | 13 |
| 3. 3 載荷方法                            | 14 |
| 3. 4 測定・観測内容                         | 14 |
| 3. 5 試験結果                            | 15 |
| 3. 5. 1 組み合せ応力                       | 15 |
| 3. 5. 2 $\sigma_3=0.0\text{MPa}$ の結果 | 15 |
| 3. 5. 3 $\sigma_3=0.5\text{MPa}$ の結果 | 16 |
| 3. 5. 4 $\sigma_3=1.0\text{MPa}$ の結果 | 17 |
| 3. 5. 5 $\sigma_3=5.0\text{MPa}$ の結果 | 18 |
| <b>第4章 弾塑性応力解析の方法と応用</b>             |    |
| 4. 1 はじめに                            | 35 |
| 4. 2 弾塑性挙動をする岩盤の構成式                  | 35 |
| 4. 2. 1 構成式                          | 35 |
| 4. 2. 2 応力-ひずみの関係                    | 35 |
| 4. 2. 3 破壊条件を満たした岩石の応力-ひずみの関係        | 36 |
| 4. 3 弹塑性解析の方法                        | 36 |
| 4. 3. 1 応力遷移法                        | 36 |
| 4. 3. 2 応力解析の方法-荷重増分法                | 37 |
| 4. 3. 3 比例係数mの決定方法                   | 38 |
| 4. 4 弹塑性解析の方法                        | 39 |

|         |                  |    |
|---------|------------------|----|
| 4. 4. 1 | 解析コード FEMEPA の開発 | 39 |
| 4. 4. 2 | 解析モデル            | 39 |
| 4. 4. 3 | 空洞の問題を解析するモデル    | 40 |
| 4. 4. 4 | 解析例(その1)         | 40 |
| 4. 4. 5 | 解析例(その2)         | 40 |
| 4. 4. 6 | 模型試験結果と解析結果の比較   | 40 |
| 第5章     | 結言               | 49 |
|         | 参考文献             | 49 |

地層処分坑道周辺の精密な応力評価に関する研究－模型実験の三軸応力化と解析評価－  
石島 洋二

要旨

地下数百mの深部に建設される高放射性廃棄物の処分空洞を軟弱な堆積岩に設けた場合には、空洞周囲に緩み域が発達することは避けられない。この場合、空洞の安定性だけでなく、緩み域の存在がもたらすシール性能の低下も問題になる。緩みの評価を正確に行うには、深部空洞の周囲に生じる応力・ひずみ状態を正確に予測する手法を確立しなければならない。本研究は、この予測手法の確立を目指したものである。このために、空洞を持った実岩石から成る模型岩盤に対し、地下に建設した空洞が置かれる3軸地圧応力を載荷したときに現れる変形・破壊を観察し、一方で、これを予測する数値解析手法の開発を試みた。このために、次の3つの項目について研究を実施した。

(1) 岩盤材料の構成式の精密化

(2) 空洞を持った岩盤模型を3軸載荷する方法の確立とそれによる模型試験の実施

(3) 空洞周辺の破壊を含む変形予測する解析手法の開発

(1)については、溶結凝灰岩を用いた封圧下の引張試験が中心とした室内試験を実施し、以下の成果が得られた。

a)一軸引張試験、封圧下の一軸引張試験とも、引張破面が供試体中央部に形成されるような試験技術を開発した。

b)引張強度  $\sigma_t$  は封圧  $p_c$  とともに小さくなり、両者の間には、 $\sigma_t = 0.306p_c - 1.61$  の式があてはまる。

(2)については3軸岩盤模型試験を実施し、以下の結果が得られた。

a)最小主応力が小さいと、円孔上下部に引張き裂が生じる。しかし、最小主応力が 1.0MPa 以上になると引張き裂は発生しなくなる。みかけの軸応力が増すにつれて、円孔の左右側壁に楔状の破壊域が現れる。さらに応力が増すと、この破壊域の先端から1~2本の破面が発達し、模型ブロックを貫通することによりブロックが破断する。

b)みかけの軸応力－みかけの軸ひずみ線図は、最小主応力による次のような影響を受ける。①最小主応力が大きくなるにつれて、最大主応力の最大値(強度)が増す。②最小主応力が大きくなるにつれて、みかけの軸応力が最大値に達した後の応力低下量が小さくなり、また、線図の傾きが緩くなる。これらは、いわゆる封圧効果を表している。③最小主応力が僅かでも作用すると、みかけの軸応力の最大値のばらつきが小さくなる。

(3)については弾塑性解析コードを開発し、以下の結果が得られた。

a)破壊の発生場所と破壊のタイプは模型実験結果と一致し、最小主応力が小さいと、円孔上下部に引張き裂が生じるが、最小主応力が 1.0MPa 以上になると引張き裂は発生しなくなる。軸荷重の増加につれて、最小主応力の大きさの如何にかかわらず、せん断破壊域が円孔側壁に現れ、荷重とともに、この破壊域が帯状にかつ斜めに成長し模型を貫通することにより軸荷重が低下する。

b)最小主応力が大きくなるにつれて、最大主応力の最大値(強度)は増すが、破壊前のみかけの応力－ひずみ線図の傾きは最小主応力の大きさに依存せず一定である。

-----  
\*北海道大学大学院・工学研究科・教授

# 第1章 緒言

## 1. 1 研究の目的

地下数百mの深部に建設される高放射性廃棄物の処分空洞は、硬岩に設けた場合、長期間自立するであろう。しかし、軟弱な堆積岩に設けた場合には、空洞周囲に緩み域が発達することは避けられない。この場合、空洞の安定性だけでなく、緩み域の存在がもたらすシール性能の低下も問題になる。しかし、堆積岩の場合、緩み域の性質は時間とともに変化する。当然に、シール性能の向上も起こり得る。

これらの評価を正確に行うには、深部空洞の周囲に生じる応力・ひずみ状態を正確に予測する手法を確立しなければならない。本研究は、この予測手法の確立を目指したものである。このために、空洞を持った実岩石から成る模型岩盤に対し、地下に建設した空洞が置かれる3軸地圧応力を載荷したときに現れる変形・破壊を観察し、一方で、これを予測する数値解析手法の開発を試みた。

## 1. 2 研究方法と研究の内容

上記の目的を達成するために本年度は次の研究を実施することにした。

- (1) 岩盤材料の構成式の精密化
- (2) 空洞を持った岩盤模型を3軸載荷する方法の確立とそれによる模型試験の実施
- (3) 空洞周辺の破壊を予測する解析手法の開発

(1)については、引張強度の封圧依存性を明らかにすることを主眼に置いて研究を進めることにした。地圧計測データの集積が進むにつれて、地下1000m未満の地圧は、しばしば地域による差異が大きいこと、鉛直成分に比べて水平地圧成分が卓越していることが多いこと、などが明らかになりつつある。偏差応力が大きいと、引張応力が空洞壁に現れ、引張破壊が起きる。これによって生じる破面は開口しているので、シール性能の大幅な低減を来す恐れがある。空洞周囲の岩盤に現れる引張応力は、圧縮場において発生する場合がほとんどである。そこで、ここでは封圧下における引張破壊挙動を調べることにした。試験方法と得られた結果は2章で述べる。

空洞を持つ模型試験は、空洞軸方向の載荷が難しいことから、2軸試験が専ら実施されてきた。この場合、空洞軸方向は無負荷の状態に置かれる。このような状態で2軸載荷をすると、実は、空洞軸方向が最小主応力方向になり、破面は期待した向きに入らない(図1.1a参照)。最初のき裂が空洞周囲の応力集中域で発生するようにするために、空洞軸方向に中間主応力を負荷する必要がある(図1.1b参照)。本研究では、この条件が満たされるような載荷方法を採用することにし、多くの試験を実施した。これについては第3章で述べる。

空洞周囲で起こる破壊を予測する方法として、昨年度から2次元有限要素法による弾塑性解析手法を開発している。昨年度に採用した構成式では、最大応力に達した以降の挙動を正確に表現することができなかった。本年度は、破壊した領域では完全な残留強度状態になるような解析方法の開発を心がけた。これについては第4章で述べる。

第5章は結論で、本研究で得られた成果をまとめた。

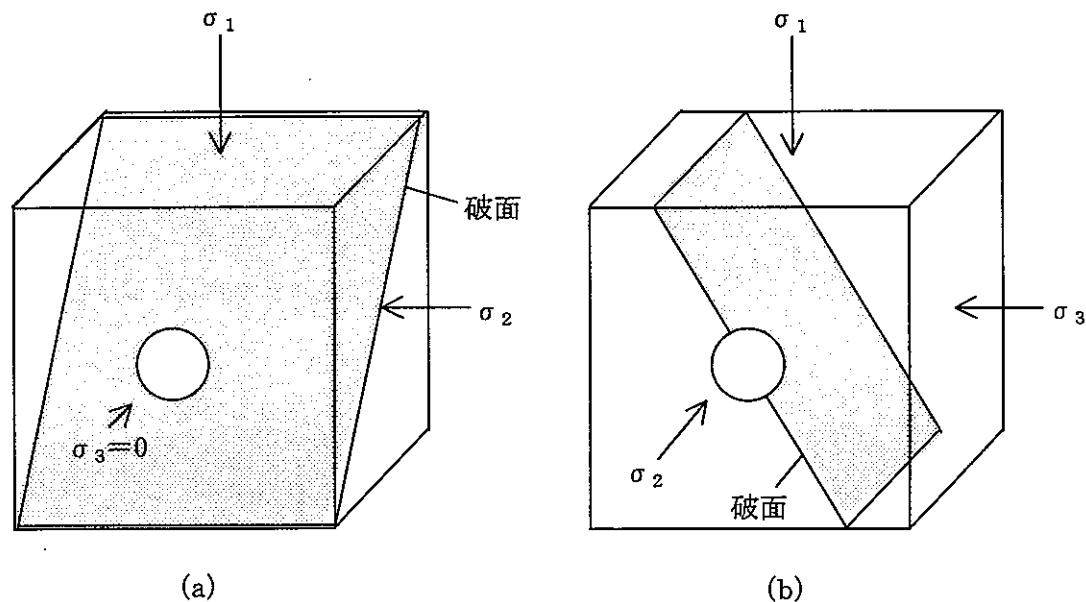


図 1.1 円孔を持った模型に対する3軸載荷とそれによって発生するせん断亀裂。(a), (b)では中間主応力の向きが異なることに注意。

## 第2章 円柱形供試体の単軸圧縮試験と封圧下の引張試験

### 2.1 はじめに

本研究では岩盤模型として札幌石切山の採石現場で採取した支笏熔結凝灰岩を用いるので、この岩石を供試体として一軸圧縮試験を行い、圧縮強度及びヤング率を測定する。また、封圧下の引張試験を行い、引張強度の封圧依存性を明らかにする。当該凝灰岩は3.1~3.4万年前に起源を持つとされている。孔隙が発達しており、風化しにくいので建材として利用されている。

### 2.2 供試体と試験方法

#### 2.2.1 供試体

430x430x200mmの支笏熔結凝灰岩ブロックからボーリングによって抜き出したコアをダイヤモンドカッターや平面研削盤を用いて整形し、円柱形供試体に仕上げる。成型後、80°Cの恒温槽内で24時間放置した後、室温にて自然冷却し、その後、試験に供する。圧縮試験と一軸引張試験には直径30mm、高さ60mmの円柱形供試体、圧裂試験には直径30mm、長さ30mmの円盤形供試体、をそれぞれ用いる。

#### 2.2.2 載荷装置

載荷にはInstron社製材料試験機(5586型、最大荷重300kN、機械式)を用い、載荷速度は0.3mm/minとした。

#### 2.2.3 一軸圧縮試験

載荷方向の変位は材料試験機に内蔵のものを使って測定し、応力-ひずみ線図として整理した。

#### 2.2.4 一軸引張試験

一軸引張試験は図2.1に示す装置(引張装置と呼ぶ)を用いて行った。この装置の上下のエンドピースに円柱形供試体の上下端面を接着し、接着剤が硬化した後、装置を材料試験機にセットし、(圧縮荷重を)載荷する。治具がその上下端面に圧縮荷重を受けると、3本の等間隔に配置された荷重伝達棒の作用により、供試体は軸方向に引張られる。接着材には24時間硬化型のエポキシ系樹脂を使用した。

試験を実施したところ、大部分の供試体において、破面はエンドピースの近傍に発生し、予想より小さい強度値が得られた。そこで、試験方法を次のように改良した。

- 上下エンドピースの平行度を向上させるために、供試体とエンドピースを接着する際、材料試験機によって0.1kN程度の荷重を負荷したままの状態にし24時間以上硬化させる。
- 供試体の側面をエポキシ樹脂系の接着剤で薄く被覆することにより、供試体中央部分以外の強度を上げ、破断面を供試体中央に誘導する(図2.2参照)。

#### 2.2.5 封圧下の引張試験

封圧下の引張試験は次の要領で実施する。まず、供試体を図 2.2 に示すようにエンドピースに接着した後、エンドピースごと熱収縮チューブで被覆する。つぎに、これを図 2.1 の引張装置に組み込んだ後、装置ごと圧力ベッセル内に收め、これを材料試験機にセットする(図 2.3 参照)。

サーボポンプによりベッセル内に油を圧送し所定の圧力に達したならば、試験中この圧力(封圧)を一定に保つ。つぎに材料試験機により供試体を軸方向に引張る。

本試験に際しては、一軸引張試験と同様の方法を採用した。しかし、破断は、供試体とエンドピースの接着面で起きていることがわかった。そこで、接着面付近にアルミニウム板(幅15mm、厚さ0.3mm)を巻きつけた後、周囲をエポキシ系の樹脂で接着し、接着面付近を補強した(図 2.4)。この方法の採用以後、破壊が供試体の中央部分で起きるようになった。

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 単軸圧縮試験結果

得られた応力一ひずみ線図の一例を図 2.5 に示す。4個の平均の圧縮強度およびヤング率は次のようにあった。

圧縮強度 22.4MPa ( $\pm 4.5\text{ MPa}$ )

ヤング率 4.6GPa ( $\pm 0.6\text{ GPa}$ )

### 2.3.2 圧裂試験結果

6回の試験における荷重一ストローク線図を図 2.6 に示す。圧裂引張強度の平均値として 2.31  $\pm 0.4\text{ MPa}$  が得られた(表 2.1)。

### 2.3.3 一軸引張試験結果

図 2.7 に、応力一ひずみ線図と試験後の様子を示す。test3を除けば破断面は供試体中央に現れた。変動係数は 0.24 であり、さほど大きくない(表 2.2)。引張強度の値は圧裂引張強度の 71% であった。一般に前者は後者とほぼ等しいか1~3割程度小さいといわれている(稻田、1997、表2.4)ので、本実験値は妥当なものと考えられる。

ヤング率、ポアソン比の平均値として、それぞれ 1.44GPa、0.153 が得られた。

### 2.3.4 封圧下の張試験結果

応力一ひずみ線図と試験後の供試体の様子を図 2.8 に示す。応力一ひずみ線図には明確なピークが認められ、破断面は供試体中央部に現れた。一軸引張試験で得られた引張強度の値が 1.63MPa であるから封圧を与えると引張強度はやや小さくなるという結果が得られた(表 2.3)。

封圧  $p_c$  と引張強度  $\sigma_t$  の関係を回帰分析し、両者の関係にあてはまる回帰直線として次式が得られた(相関係数は 0.65)(図 2.9)。

$$\sigma_t = 0.306p_c - 1.61$$

表 2.1 圧裂引張試験の結果

| test    | Length (mm) | Strength (MPa) |
|---------|-------------|----------------|
| 01      | 30.5        | 2.37           |
| 02      | 33.0        | 2.79           |
| 03      | 31.4        | 2.74           |
| 04      | 29.6        | 2.05           |
| 05      | 32.2        | 2.12           |
| 06      | 30.2        | 1.77           |
| Average |             | 2.31±0.40      |

表 2.2 改良後の一軸引張試験の結果

| 供試体     | 引張強度 (MPa)  | ヤング率 (GPa)  | ポアソン比         |
|---------|-------------|-------------|---------------|
| 01      | 1. 59       | 1. 25       | 0. 194        |
| 02      | 1. 35       | 1. 26       | 0. 161        |
| 03      | 1. 10       | 1. 35       | 0. 140        |
| 04      | 1. 91       | 1. 31       | 0. 104        |
| 05      | 1. 62       | 2. 04       | 0. 159        |
| 06      | 2. 19       | 1. 42       | 0. 161        |
| Average | 1. 63±0. 39 | 1. 44±0. 30 | 0. 153±0. 030 |

表 2.3 封圧引張試験の結果

| 供試体   | 封圧 (MPa) | 引張強度 (MPa) |
|-------|----------|------------|
| No. 1 | 1        | 1. 48      |
| No. 2 | 2        | 0. 18      |
| No. 3 | 3        | 0. 75      |

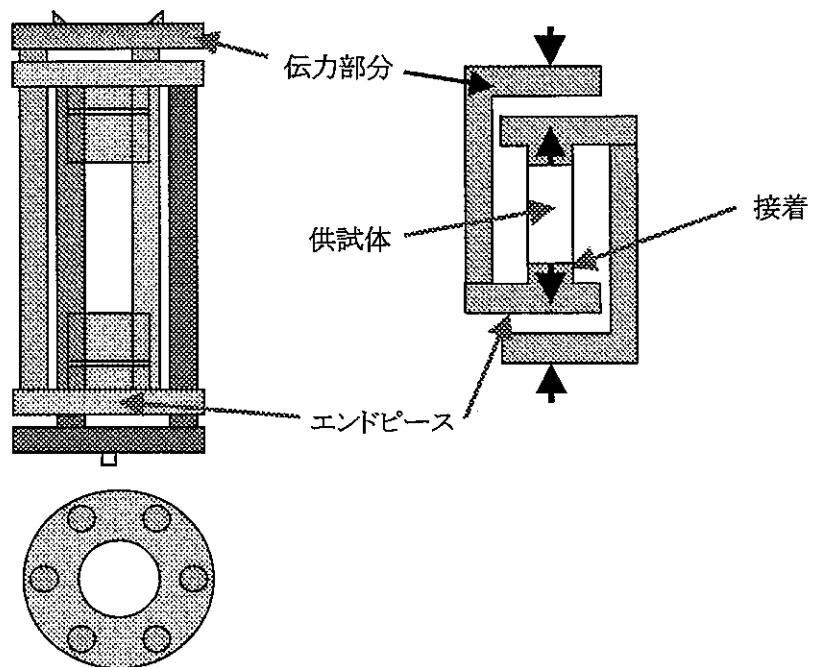


図 2.1 引張試験装置概略図

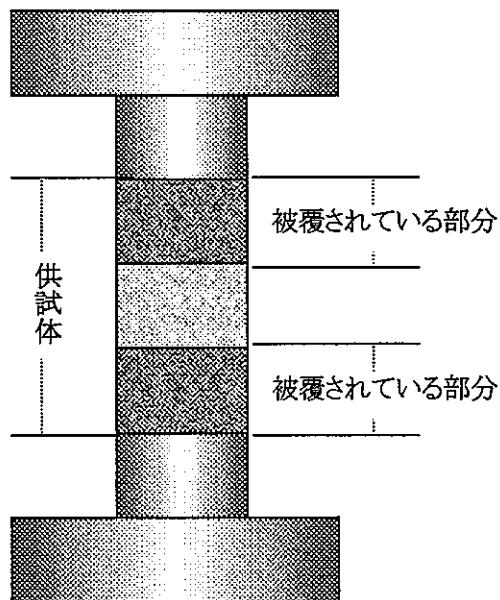


図 2.2 供試体の被覆

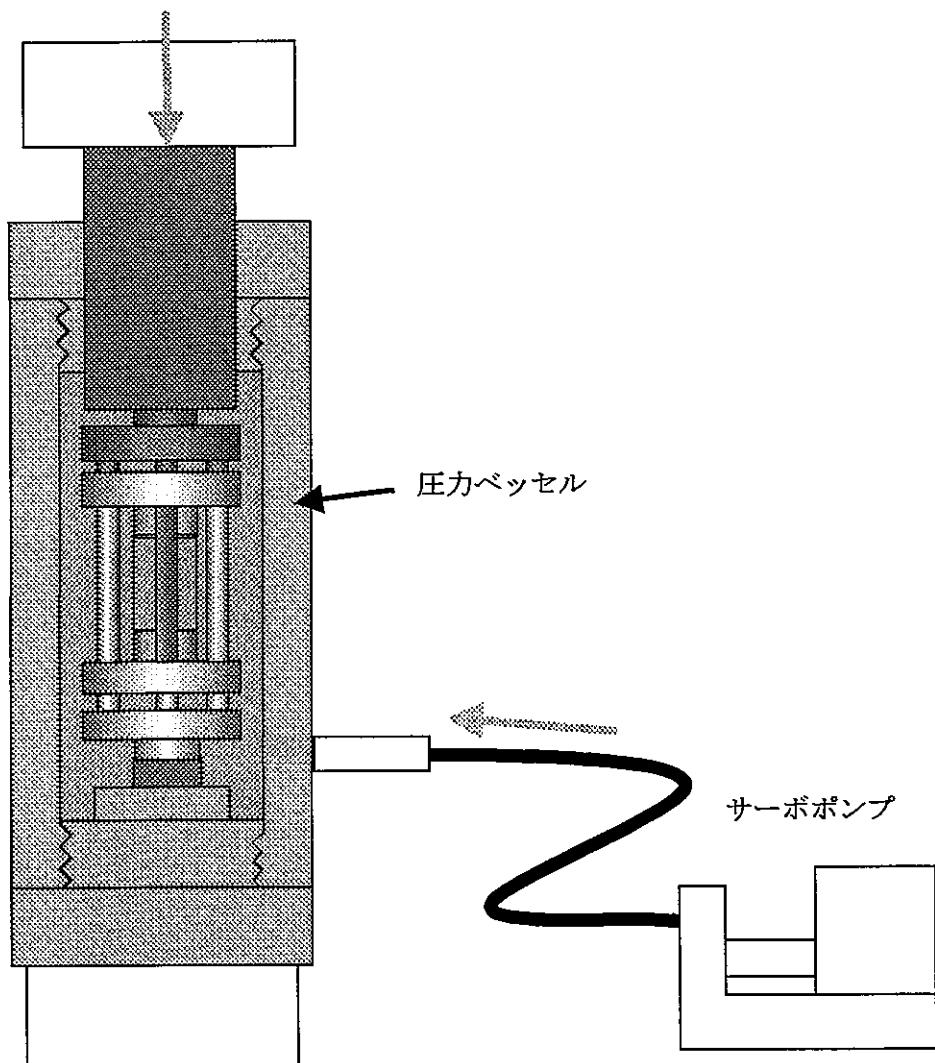


図 2.3 封圧引張試験の模式図

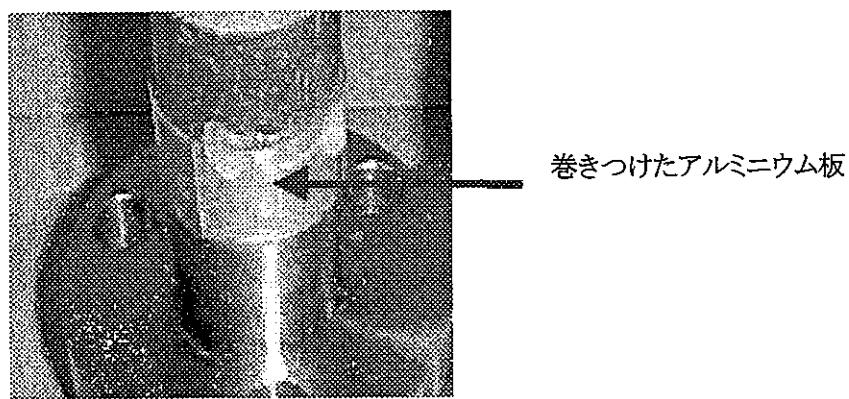


図 2.4 接着面付近の様子

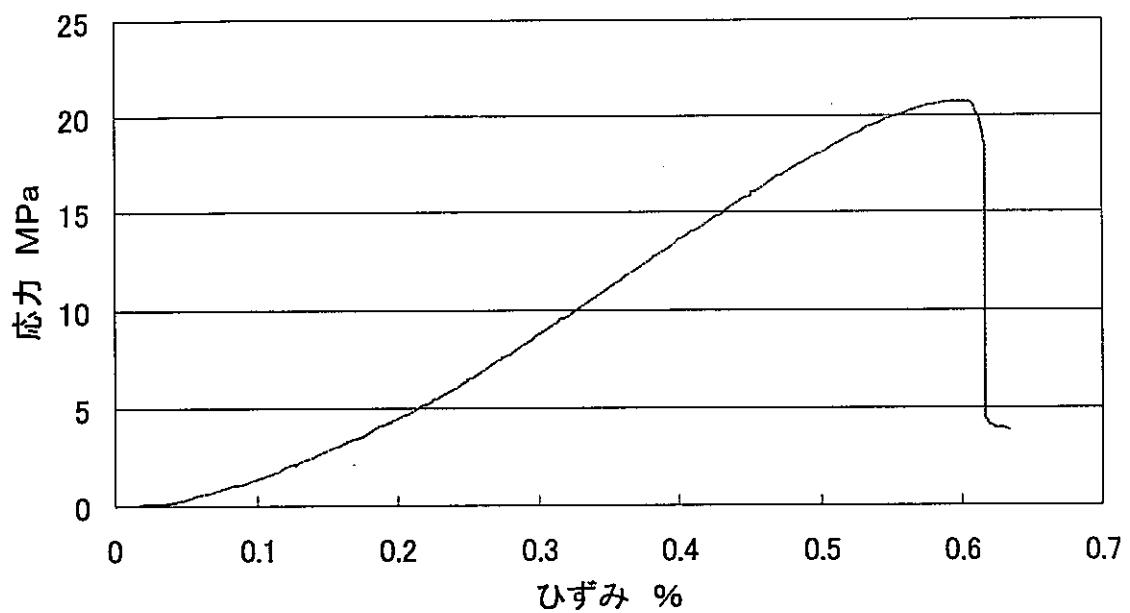
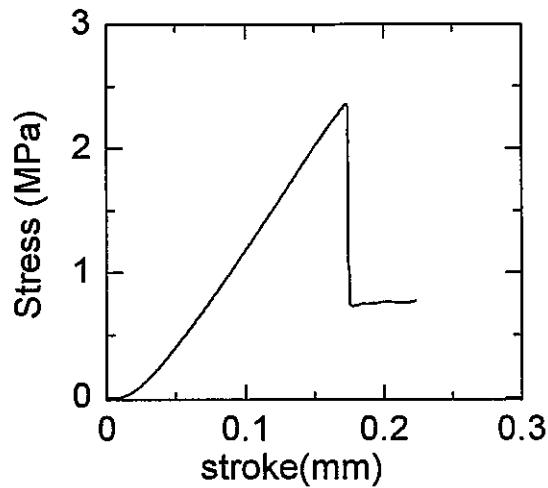
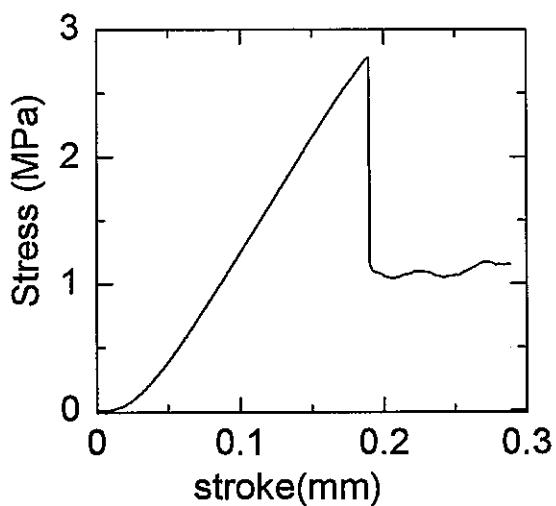


図 2.5 一軸圧縮試験で得られた応力ーひずみ線図

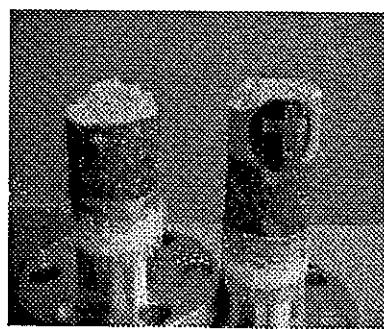
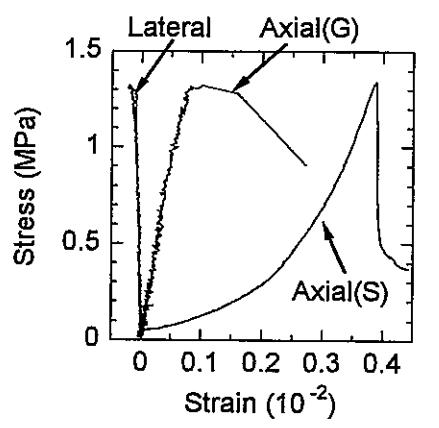


(a) test1

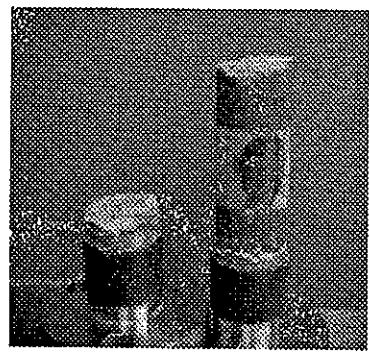
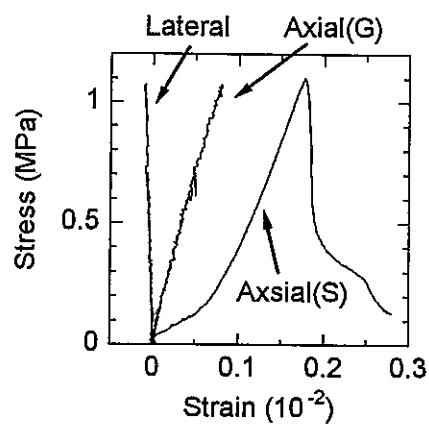


(b) test2

図 2.6 圧裂試験で得られた荷重ストローク線図。(a), (b) 2つの供試体の結果が示されている。

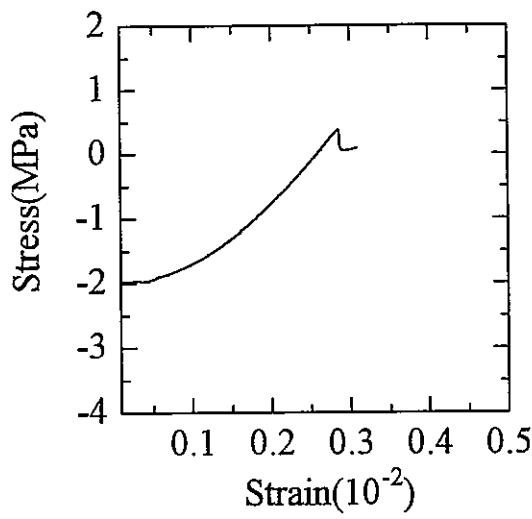


(a) test2

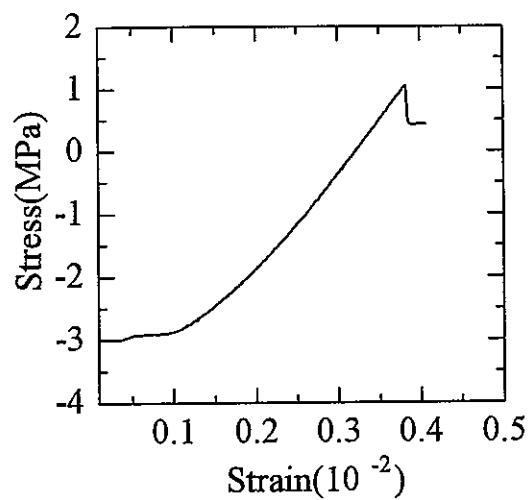
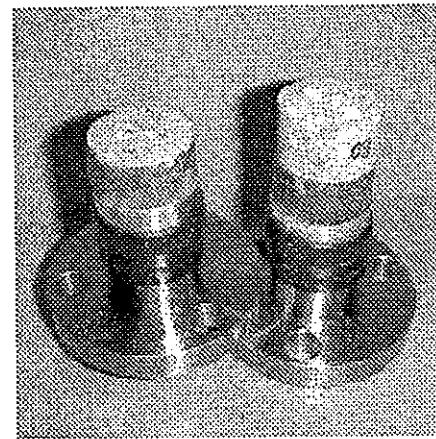


(b) test3

図 2.7 一軸引張試験で得られた応力ーひずみ線図と試験後の供試体の破断の状況。  
test2, test3の結果が示されている。



(a) No. 2



(b) No. 3

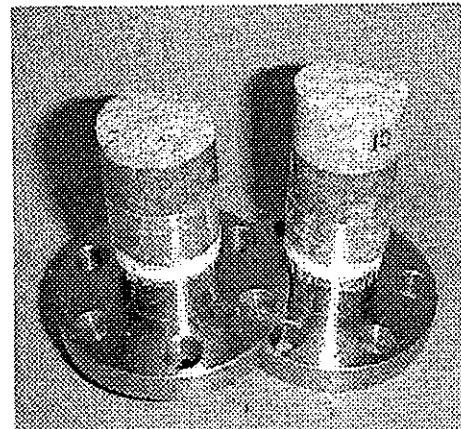


図 2.8 封圧下の一軸引張試験で得られた応力ーひずみ線図と試験後の供試体の破断の状況。  
No. 2, No. 3の結果が示されている。

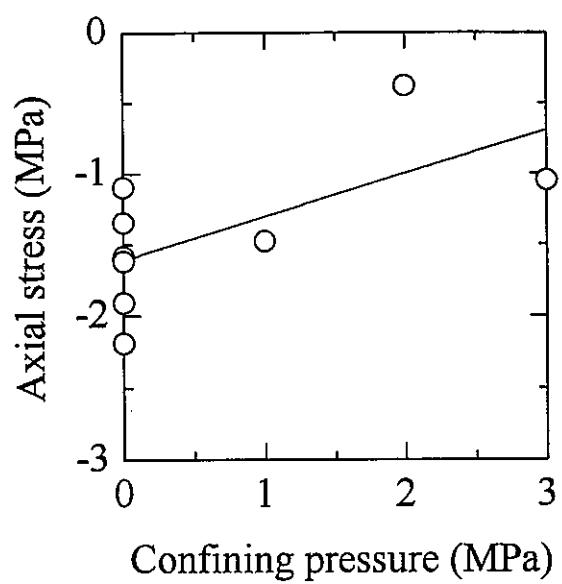


図 2.9 引張強度と封圧の関係

## 第3章 岩盤模型試験における模型材料と載荷の方法

### 3. 1 3軸載荷試験における留意点

岩盤模型試験の目的は、模型を載荷したときに応力集中源である模型空洞から破壊が発生し奥部に向かって進展する現象を再現することにある。いま、トンネル状の空洞を考えることにする。もし、図 1.1a に示すように、トンネル軸方向と最小主応力  $\sigma_3$  の方向が一致している場合には、巨視的な破面は空洞軸に対し斜めに入り、破壊は空洞の存在と関係しない。なぜならば、岩石に形成される巨視的破面の走向は、一般に、中間主応力  $\sigma_2$  ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) の向きに一致するからである。なお、ここでは応力の符号として圧縮を+にする。

したがって、所期の目的を達成しようとすれば、図 1.1b に示すように、トンネル軸方向に中間主応力  $\sigma_2$  の方向を一致させ、最大・最小主応力 ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) の向きがトンネル軸に垂直な面内に入るようとする必要がある。本試験ではこれに留意して模型試験を実施することにした。

さて、主応力と空洞軸の向きが図 1.1b のようであれば、破壊が空洞壁から発生することは、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$  の場合には、以下に示すように、容易に証明することができる。岩盤は破壊条件を満たさない限り弾性的に挙動するものとする。すると円形断面トンネル周囲の応力状態は次のようにになる。

$$\sigma_\theta = \sigma \{1+(r/a)^2\}$$

$$\sigma_r = \sigma \{1-(r/a)^2\}$$

$$\sigma_z = \sigma$$

$$\tau_{\theta r} = \tau_{\theta z} = \tau_{rz} = 0$$

$a$  はトンネル半径、 $r$  はトンネル中心から測った距離である。

応力は、いずれの場所においても、空洞周方向の応力  $\sigma_\theta$  が最大主応力  $\sigma_1$ 、空洞半径方向の応力  $\sigma_r$  が最小主応力  $\sigma_3$ 、空洞軸方向の応力  $\sigma_z$  が中間主応力  $\sigma_2$  になっていることがわかる。上記の応力分布は、 $\sigma_1 - \sigma_3$  座標軸において、図 3.1 のように直線OAで表される。任意点の応力はこの直線上の一点に対応し、空洞壁は点A、空洞から無限遠方は点Oに対応する。応力  $\sigma$  が大きくなるに従い、直線AOは原点から離れる。直線A<sub>2</sub>O<sub>2</sub>の場合にはどの場所も破壊条件を満たさないが、直線A<sub>1</sub>O<sub>1</sub>の場合には、破壊条件を切るので、空洞周辺の領域は破壊条件を満たす。このように、空洞壁が最も破壊しやすく、逆に空洞壁から離れる程、破壊しにくくなることが容易に理解される。

遠方の応力が等方的でない場合の厳密な証明はまだなされていないようであるが、円孔壁は常に一軸応力状態になる、つまり差応力が大きな状態になるので、破壊が空洞壁から生じることはほとんど明かといってよいであろう。

### 3. 2 岩盤模型

岩盤模型材料として、以下に述べる理由から、支笏熔結凝灰岩を選んだ。

- (a)岩石は軟岩に属するので、破壊を起こさせるために大きな荷重を必要としない。
- (b)材料は、等方的のために解析や解釈が容易である。レキを含むので、微視的には不均質であるが、巨視的には均質である。
- (c)研究室の近くでこの岩石を探石しているので新鮮な状態の岩石入手することができる。また、任意の寸法のブロックを得ることができる。価格は低廉である。

岩盤模型として、直方体ブロック(160x160x80mm)を用いる。購入した直方体状岩石ブロックは、整形して各面の平滑度と直角度を出した上で、160x160mm のブロック面の中央に、面に対して直角に径 40mm のブロックを貫通する円孔を作孔し、トンネルの模型とする。

### 3. 3 載荷方法

円孔を持った岩盤模型ブロックに対して、1. 2節で述べたように、3方向から載荷をする。すなわち、ブロックの上下方向より  $\sigma_1$ 、前後方向(円孔軸方向)から  $\sigma_2$ 、左右の側壁から  $\sigma_3$  を載荷し、負荷応力が最大になったときの応力状態が、それぞれ、中間主応力、最小主応力、最大主応力になるようとする。

このために図 3.2 に示すような載荷経路を採用し、前後方向(円孔軸方向)と左右の側壁方向から所与の大きさの応力  $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  を載荷し、試験中、一定に保つ。その後で、ブロックの上下方向より  $\sigma_1$  を一定変位速度で載荷する。 $\sigma_1$  は載荷に伴ない次第に大きくなり、最大値をとった後、低下する。 $\sigma_1$  が最大値を取るとき、これが最大主応力になる。

最大主応力  $\sigma_1$  は、Instron社製材料試験機(5586型、最大荷重300kN、機械式)を用い、0.3mm/min 載荷速度で裁荷する。中間主応力  $\sigma_2$  と最小主応力  $\sigma_3$  は、いずれも対のフラットジャッキによって載荷する。フラットジャッキに、ハンドポンプおよび油圧制御装置つきのポンプを用いて油を圧送することにより、ジャッキ圧が高まる。

模型ブロックは外周の6面全部に荷重を受けるが、変形すると寸法が変わるので、全面に荷重を負荷することはできない。材料試験機を用いたブロックの上下方向からの載荷は 160x80mm の鋼製の載荷板を介して行う(図 3.3 参照)。このため、ブロックの前後面と左右側壁に直接接触する矩形または正方形フラットジャッキの外寸法として、前者については 146x146mm、後者については 146x66mm を採用した。このように載荷面積が模型ブロックの外表面の面積より小さいために、ブロックの端にはフラットジャッキからの荷重が作用せず、上下方向からの荷重だけを受ける領域が出現することに注意する必要がある。

フラットジャッキの反力を取るために、図 3.3 に示すように、ジャッキの後部に対になれた鋼製の載荷板を置き、両者を4本のボルトで変位拘束する(図 3.4 参照)。ブロックの上下端面と載荷板およびブロックの側面や前後面とフラットジャッキの間には、摩擦抵抗が小さくするようにテフロンシートを挟む。

ブロックの前後に中間主応力  $\sigma_2$  を負荷するために用いるフラットジャッキには、図 3.5 に示すように中央に直径 54mm の円孔が設けられている(図 3.3 に示すように載荷板にも円孔が付いている)。この円孔と模型ブロックに設けた円孔とは中心軸が一致しており、載荷中、円孔壁を観察したり、径変化を計測するセンサーを出し入れできるようになっている。模型ブロックの中で、円孔壁だけが載荷中に観察できる唯一の領域になる。

### 3. 4 測定・観測内容

模型ブロックの載荷に際しては、材料試験機に内蔵しているロードセルと変位計の出力を記録し、 $\sigma_1$  方向の荷重一変位線図を求める。載荷中は、3方向の径変化と孔壁面の亀裂発生の様子を観察する。前者を計測するための孔径変化測定器は、60° 毎に設置された3対の片持ち梁センサーを内蔵しており、3方向の径変化を測定できるようになっている(図 3.6 参照)。また、後者の観察のために、CCD カメラやデジタルカメラを用いて、孔壁面の破壊の様子を撮影する。

試験終了後、ブロック表面に現れた破面を観察・記録する。必要ならば、ブロックを切断し、切

断面に現れる破面を観察する。

### 3.5 試験結果

#### 3.5.1 載組合せ応力

中央に円形空洞を有する直方体ブロック模型の1軸および2軸載荷試験の試験結果と観察結果について述べる。載荷試験における最小主応力  $\sigma_3$  と中間主応力  $\sigma_2$  は次に示すような4通りに設定した(図3.2参照)。

- (a)  $\sigma_3=0$        $\sigma_2=2.0\text{ MPa}$
- (b)  $\sigma_3=0.5$        $\sigma_2=2.0\text{ MPa}$
- (c)  $\sigma_3=1.0$        $\sigma_2=2.0\text{ MPa}$
- (d)  $\sigma_3=5.0$        $\sigma_2=10.0\text{ MPa}$

円孔を有する模型ブロックの軸方向の変形挙動を表すために、みかけの軸応力  $\sigma=P/S$  とみかけの軸ひずみ  $\epsilon=u/h$  を導入する。ここで  $P$  は軸荷重、 $u$  は軸方向変位、 $S$  はブロック端面の断面積、 $h$  はブロックの高さである。軸荷重が最大になったときの軸応力は最大主応力  $\sigma_1$  を与える。

#### 3.5.2 $\sigma_3=0\text{ MPa}$ の結果

##### (1) みかけの応力ーみかけのひずみ線図

合計4ブロックについて載荷試験を行った。得られた最大軸応力とみかけのヤング率を表3.1に示す。みかけのヤング率  $E$  は  $E=\sigma/\epsilon$  で定義される。ここで  $\sigma$ 、 $\epsilon$  はそれぞれみかけの軸応力、見かけの軸ひずみである。

供試体001で得られたみかけの応力ーみかけのひずみ線図を図3.7に示す。載荷初期において、みかけの軸応力  $\sigma$  が  $0.3\text{ MPa}$  に達するまでは、加圧板と供試体端面のなじみが悪いために、応力の増分に対するみかけのひずみ増分の比は大きいが、それ以降、線図はほぼ一定の勾配で増加している。その後、みかけの軸応力が  $15\text{ MPa}$  になった辺りから、応力の増分に対するみかけのひずみ増分の比は再び増加し始め、応力が最大値を取ったとき無限大になっている。この剛性の逐次的な低下は、円孔周辺で破壊が発生し、それが拡大していることを示唆している。みかけの軸応力が最大値を越えた後、応力は急激に減少するが、 $\sigma$  が  $9\text{ MPa}$  に達した辺りから、線図の勾配が緩くなり、残留応力状態に達したことを示している。残留応力が0にならないのは、軸方向の変位が途中で拘束されそこで載荷を中止したためである(3.3参照)。

表3.1 最大軸応力とみかけのヤング率

|          | 供試体1    | 供試体2    | 供試体3    | 供試体4    |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| みかけの圧縮強度 | 16.3MPa | 18.4MPa | 15.3MPa | 19.3MPa |
| みかけのヤング率 | 2.2GPa  | 1.9GPa  | 1.4GPa  | 2.0GPa  |

平均の圧縮強度  $17.3\text{ MPa}$

平均のヤング率  $1.9\text{ GPa}$

##### (2) 破壊の状況

後述するように、肉眼による観察で、長さが数cmに達する破面が数枚確認されたが、これらの走向は、いずれも中間主応力の方向と平行であった。

###### (2-1) 側壁近くに現れた亀裂

図3.8(a)は  $160\times160\text{mm}$  の面に現れた端面の端から側面に対して約  $20^\circ$  の傾斜を持った破

面の様子を示したものである。破面はせん断型であるが、側面が自由面になっていることを反映して開口している。この破面は円孔から離れており、後述する円孔周囲のき裂からは独立している。側壁に近い破面部では、き裂に囲まれた領域が剥離している様子が認められる(図 3.8(b), (c)参照)。この破面の発生は次のような力学的な環境の下で生じたと解釈される。

- a) 端面の端は載荷板との摩擦抵抗が小さいために、端面の内側の部分に比べて拘束が小さい。
- b) 供試体上下端面は鋼製の載荷板を介して載荷しているが、側圧や拘束圧を負荷する載荷板との接触を防ぐために、載荷板の面積は端面の面積より小さくしてある。このために、端は無荷重の状態になっており、かつ変位も載荷板が接触している部分に比べると小さい。

#### (2-2)円孔周辺に生じた破壊域(その1)

円孔周囲に生じたき裂の内で、円孔の上下部から発生し、載荷軸方向に 35mm 程度発達したき裂を図 3.9 に示す。円孔中心部は観察がしにくいために、一部の供試体については、図 3.10(a),(b)に示すように、円孔の中心と同心円状に内径 40mm の円孔に対して内径 60mm のオーバーコアリングをし、円筒形の領域を取り出して観察した。上端面の状況(図 3.9)や図 3.10(c)に示したコアの拡大図からわかるように、このき裂は孔軸(すなわち中間主応力の向き)に平行で、かつ供試体の前面・後面間を貫通している。き裂は若干蛇行しているが、き裂の上下面間のずれがなく、かつ開口幅が狭い。弾性体の仮定に基づく応力解析によると、円孔の上下には引張応力が発生する。これらを勘案すると、このき裂は引張き裂であることがわかる。

#### (2-3)円孔周辺に生じた破壊域(その2)

円孔の側壁にも孔軸方向とほぼ平行き裂が生じている(図 3.11)。このき裂は円孔壁から奥(側壁方向)に向かい斜めに傾斜しているが、斜め上方に向いたものと斜め下方に向いたものの2系統があるために、これと壁面で囲まれて形成される楔状の領域が孔内に押し出され、剥離したり浮き上がったりしている(図 3.12)。斜め下方に向いたき裂は下面に達している(図 3.13)。応力解析によると、側壁には最も高い圧縮応力が発生する。したがって、側壁の破面はせん断破壊によって生じたものである。

### 3.5.3 最小主応力が $\sigma_3 = 0.5 \text{ MPa}$ の場合

#### (1)破面

試験後の供試体には、図 3.14 に示すように走向が中間主応力の方向と平行な(すなわち孔軸に平行)数枚の破面の形成が認められる。

#### (1-1)円孔の天盤から上に伸びたき裂

軸応力が 13.4MPa に達した辺りで、円孔の天盤から上方に向かう長さ約 10~25mm のき裂の発生が 20 倍の CCD カメラで観測された(図 3.15)。試験終了後の観察で、このき裂は上端まで達していないこと、したがって、載荷途中で成長が停止したことがわかった。

#### (1-2)円孔の側壁に生じた破面

軸応力が 9.0MPa 前後に達したあたりから、円孔の左右側壁にき裂が入り始めた。図 3.16(a)に示すように、試験後、側壁には楔状の破壊域が形成されていた。図からわかるようにこの破壊域は孔軸に沿い供試体の前面と背面の間を貫通している。図 3.16(b)はまた、この楔状の破壊域が孔壁に対して斜め上方と斜め下方を向いた対のき裂群によって生じたものであることを示している。なお、この破壊域内を斜めに走る直線的なき裂や、円孔に同心円状の弧を描いたき裂の

存在も認められる。

#### (1-3) 円孔上部のき裂

円孔上部には、図 3.16(c)に示すように、引張き裂が現れた。ただし、 $\sigma_3=0$  の場合と異なり、き裂は途中で止まり上端面に達していない。

#### (1-4) 側壁に現れた破面

図 3.17 は 160x80mm の面に現れた端面の端から主要な面に対して約30° の傾斜を持った破面の様子を示したものである。破面はせん断型であるが、側面が自由面になっていることを反映して開口している。この破面は円孔から離れており、円孔周囲のき裂からは独立している。

#### (2) みかけの軸応力ーみかけのひずみ線図

図 3.18 は、みかけの軸応力ーみかけの軸ひずみ線図の一例を示したものである。線図を見るに、みかけの軸応力が 2MPa に達する前は、線図の勾配が徐々に増し、緩い弧を描いている。みかけの軸応力が 2~15MPa の区間では、線図は1本の直線の上に乗っている。ただし、僅かに折れ曲がっている箇所が、1~2 箇所見られる。みかけの軸応力が 15MPa に達した以降、線図は横軸にはほぼ平行になり、その後、微増し、16MPa の最大値に達した後で、応力が徐々に低下している。5MPa 以上のみかけの軸応力の下で現れた線図の折れ曲がり箇所では、破壊が起きていると考えられる。

#### 3.5.4 最小主応力 $\sigma_3=1.0\text{ MPa}$ の場合

図 3.19 に示すように、試験後の供試体には、数枚の走向が中間主応力の方向に一致する破面が見られる。

##### (1) 破面

###### (1-1) 端面の端に生じた破面

下端面の左右の端には、長方形ないしは橢円形をした破面がある(図 3.19(a))。これらは、円孔とは離れており、いわゆる端が欠けたもので、供試体の前面と裏面を貫通しておらず、円孔周囲の応力集中現象とは無関係である。

円孔周辺の破壊域から破面が成長し、上面と底面に達しているき裂がある。これらの破面は走向が中間主応力の方向に一致している。また、左右の面に走向が中間主応力に一致している破面が確認できる(図 3.19(b))。上下の面にはき裂が認められない。供試体の表面では、円孔周辺に接し破面に囲まれた3角形の領域の剥離が起きている(図 3.19(a))。

###### (1-2) 円孔の側壁に生じた破面

みかけの軸応力が 11.4MPa に達したあたりから、円孔左右の側壁に亀裂が入り出した。図 3.19(c)に示すように、最終的には供試体の前面と裏面の間を貫通する楔状の破壊域が形成された。この破壊域は部分的に剥離し、その跡が3角錐状の窪みになっている。また、この破壊域に含まれるき裂の一部は弧を描きながら成長し、やがて向きが載荷方向に一致し、端面に達している。

##### (2) みかけの軸応力ーみかけのひずみ線図

みかけの軸応力ーみかけの軸ひずみ線図の一例を図 3.20 に示す。みかけの軸応力が小さい間は線図は下に凸の緩い弧を描いているが、みかけの軸応力が 5MPa になった辺りから、ほぼ直線になっている。みかけの軸応力が 20.5MPa の最大値をとった後、応力は急激に低下している。みかけの軸応力が 15MPa になった以後、応力の低下は緩やかになり、ついにはほぼ横ばい。

いになっており、残留応力状態に至ったことを示している。残留応力が0でないのは、中間主応力および最小主応力を負荷しているためである。

### (3) 3方向の径変化

図 3.21 に3方向の径変化を示す。軸載荷方向( $0^\circ$ )の径は載荷に伴い終始縮んでいる。線図は軸応力が約 3MPa 以上の領域ではほぼ直線とみなせる。20MPaあたりから線図の勾配が著しく変化し始め、応力の変化量に対して径の変化量が大きくなっている。軸応力が最大値 20.5MPa をとった時点での径変化量は 0.5mm に達している。程度  $60^\circ$  方向は終始変化していないので、センサーの機能に問題があったと考えられる。 $-60^\circ$  方向は 4MPa あたりまでは縮みを示し、その後、伸びに転じている。しかし、20MPa あたりから再度縮みへ変化している。

#### 3.5.5 最小主応力 $\sigma_3=5.0\text{ MPa}$ の場合

##### (1) 破面の状況

試験後の供試体には、図 3.22 に示すように、側壁の楔状破壊域の先端と上下端面の端を繋ぐS字状の巨視的なき裂が形成されていた。最小主応力が 1MPa 以下のときには、側壁の破壊域と上下端面端の破壊域は独立していたが、今回はこれらの破壊域がせん断破面で繋がったといえる。なお、S字状のき裂と対の関係にあるき裂が楔状の破壊域の先端から出ているが、途中で止まり、上下端面に達していない。また、円孔上下部の引張き裂は認められなかった。

みかけの軸応力が 11.2MPa 前後に達したとき、円孔の左右側壁にき裂が発生し、やがて楔状の破壊域が形成された。き裂の形成とともに、図 3.23(a)に示すように、次第に孔壁表面が浮き上がり、粉状の破片が表面から分離し、孔の底部に落下堆積していった。粉状の破片の形成は破面の間隔が密であることを示している。みかけの軸応力の増加とともに、図(a)→(b)→(c)→(d)のように、破壊域は拡大した。

##### (2) みかけの軸応力ーみかけのひずみ線図

みかけの軸応力ーみかけの軸ひずみ線図の一例を図 3.24 に示す。線図はみかけの軸応力が 6MPa までは下に凸の緩やかな曲線を描き、以後凹凸が反転し、最大値 23MPa あたりまで上に凸の緩やかな曲線を描いている。他の線図と異なる点は、最大値に達した後、僅かな応力低下があったのみで、再び増加傾向に転じていることである。応力低下も急激ではなく、緩やかである。みかけの軸応力が最大値に達した後は完全塑性体に近い線図になっている。線図には直線部分がない。

##### (3) 3方向の径変化

図 3.25 に3方向の径変化を示す。軸応力ー軸載荷方向( $0^\circ$ )の径変化の線図は、みかけの軸応力が 0~5MPa の間は下に凸の緩い弧を描いているが、その後はほぼ直線的である。軸応力が 18MPa 以上の領域では径変化が少し不安定な動きをしている。 $-60^\circ$  方向の径変化の線図は軸応力が 12MPa になった辺りから、それまでの伸びから縮みに転じ、縮み量が次第に大きくなっている。 $60^\circ$  と  $-60^\circ$  方向の径変化は軸応力が 12MPa になるまではともに伸びを生じ、線図の形も互いに似ている。これは対称性から互いに似ていて当然である。

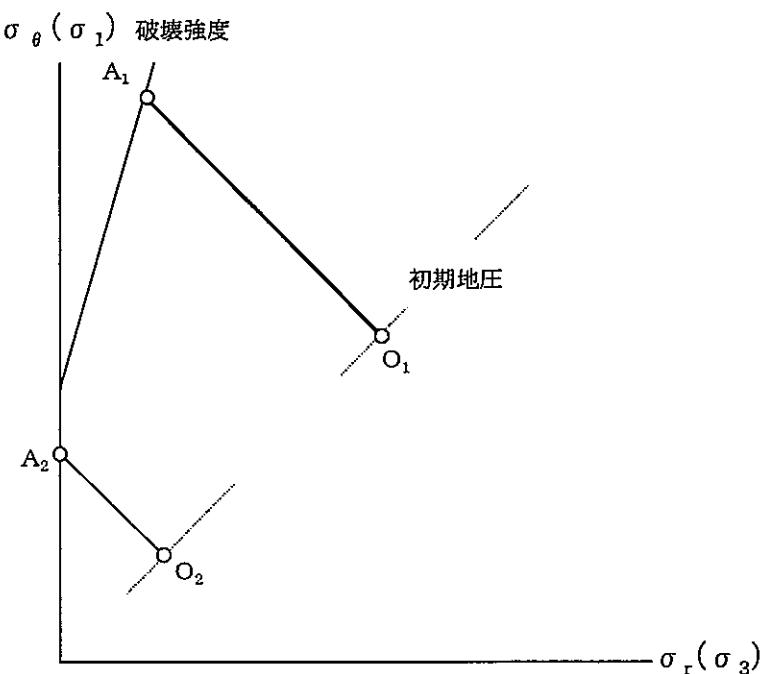


図 3.1 円形断面空洞周辺における弾性岩盤内の応力分布。応力( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ )は図中の線O<sub>2</sub>A<sub>2</sub>上の1点として表される。A<sub>1</sub>O<sub>1</sub>では空洞周辺は既に破壊している。

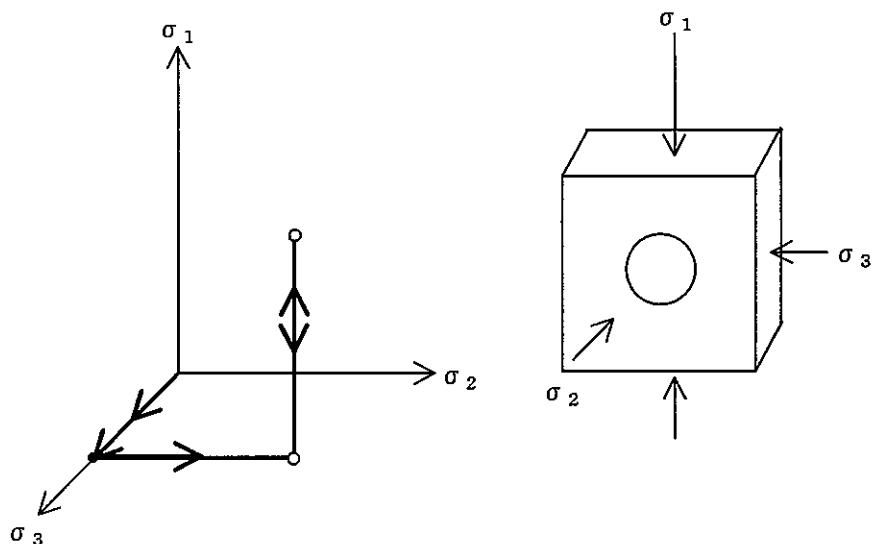


図 3.2 岩盤模型に対する載荷経路

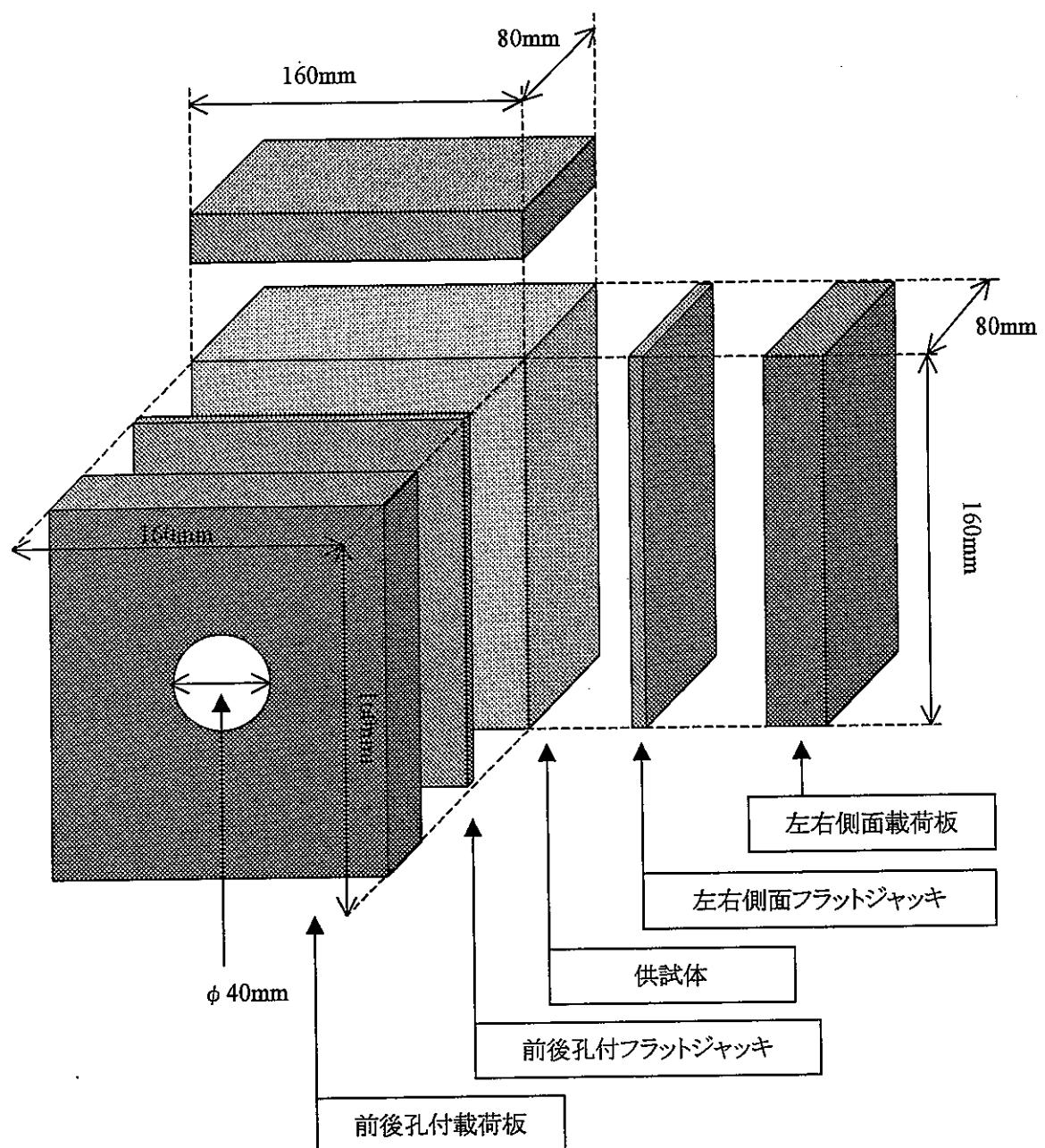
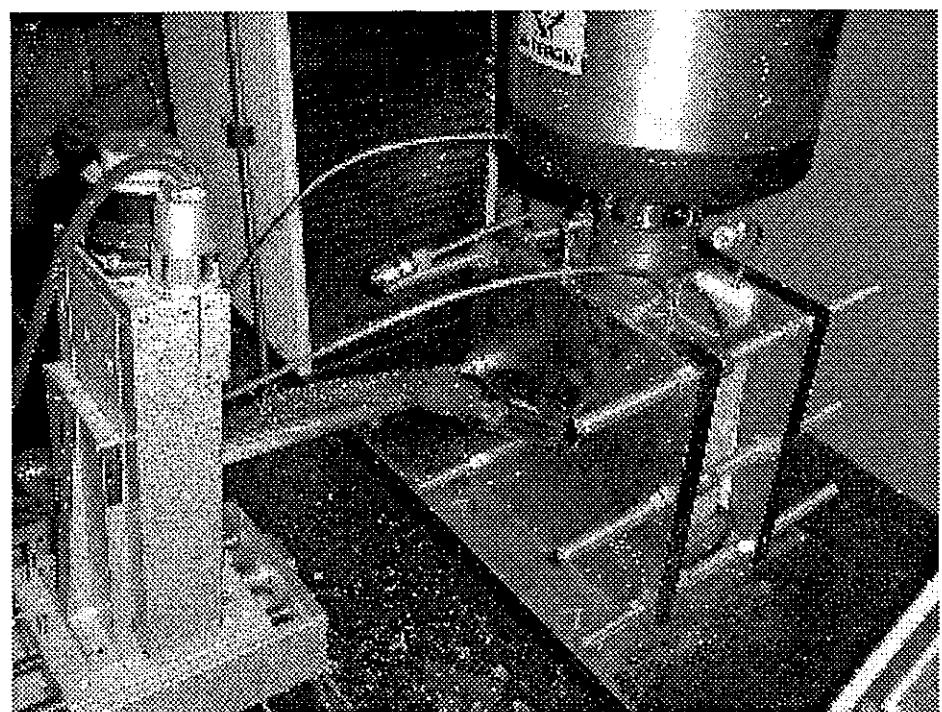
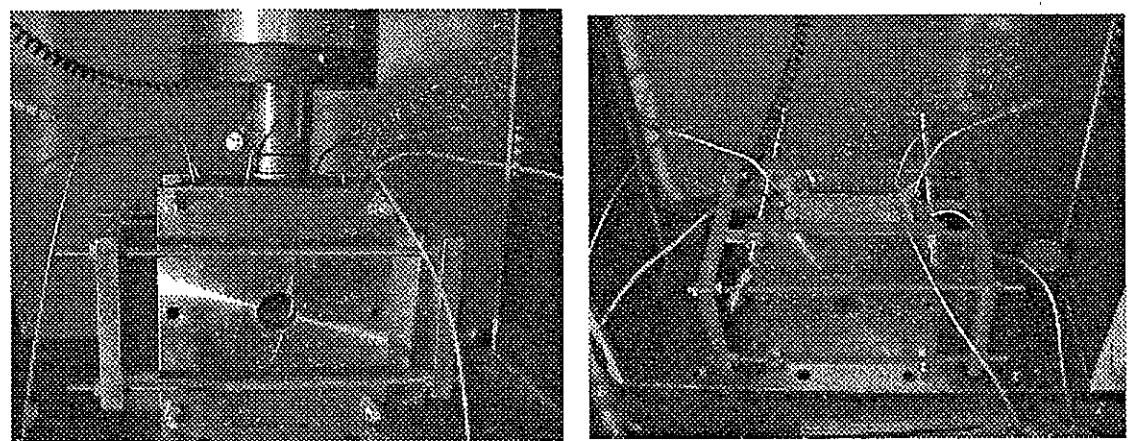


図 3.3 模型供試体の載荷方法



(a)



(b)

図 3.4 模型岩盤ブロックの載荷の状況。(a)は側圧を負荷していない( $\sigma_3=0$ )。手前はCCD  
カメラの取付架台。(b)は側圧も負荷している。

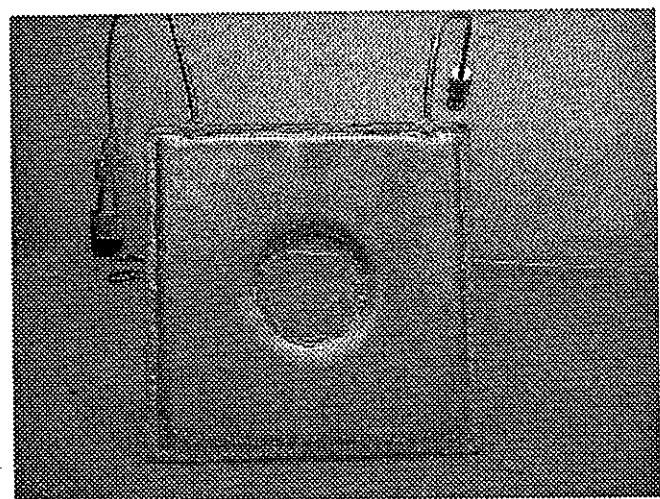
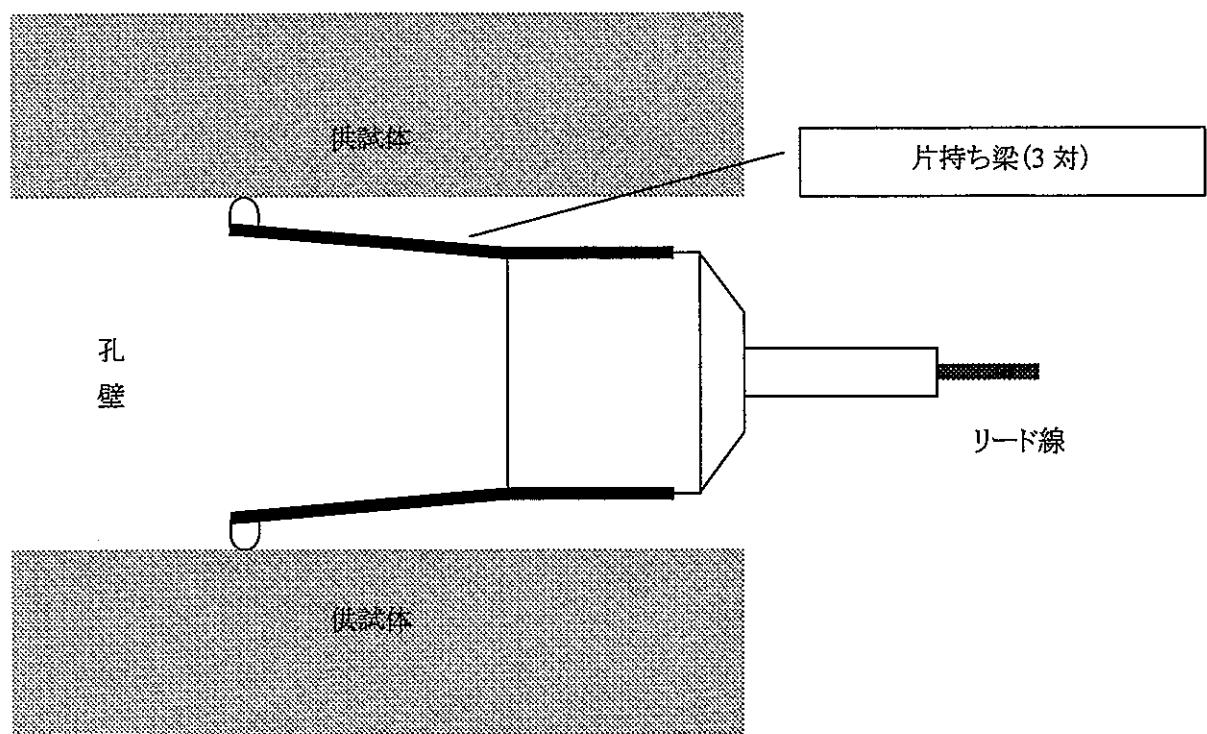
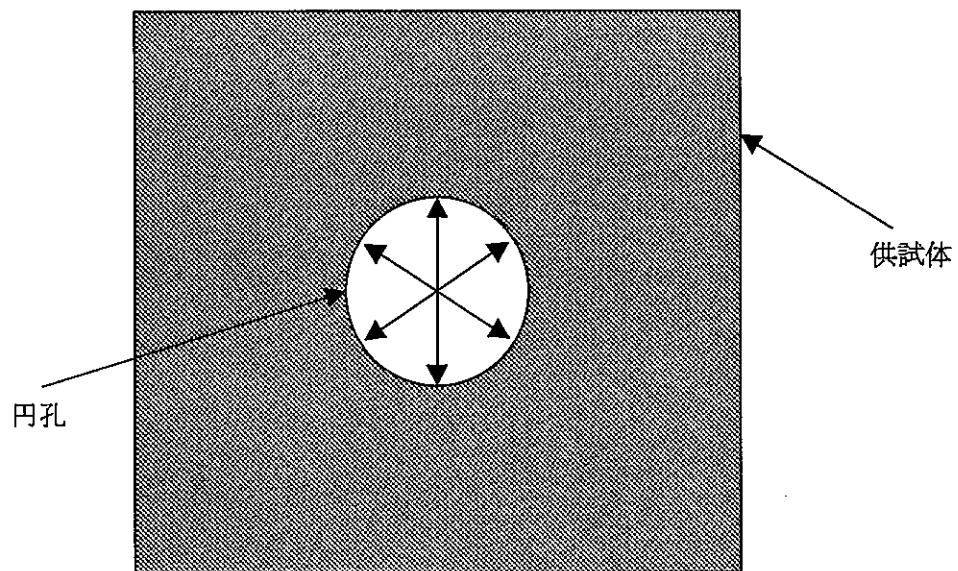


図 3.5 円孔を有するフラットジャッキ



(a)



(b)

図 3.6 孔径変化の測定器(模式図)(a)と測定方向(b)

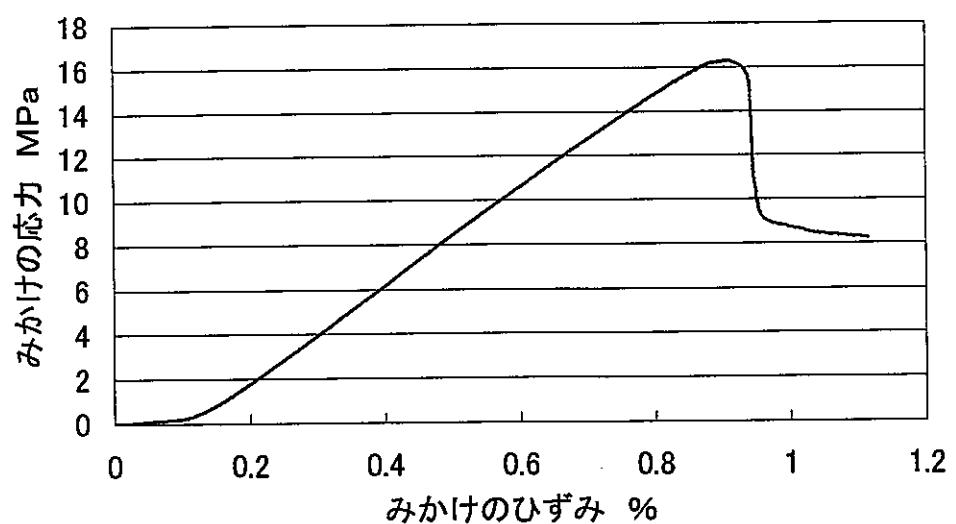


図 3.7 みかけの応力  $\sigma$ ーみかけのひずみ  $\varepsilon$  線図

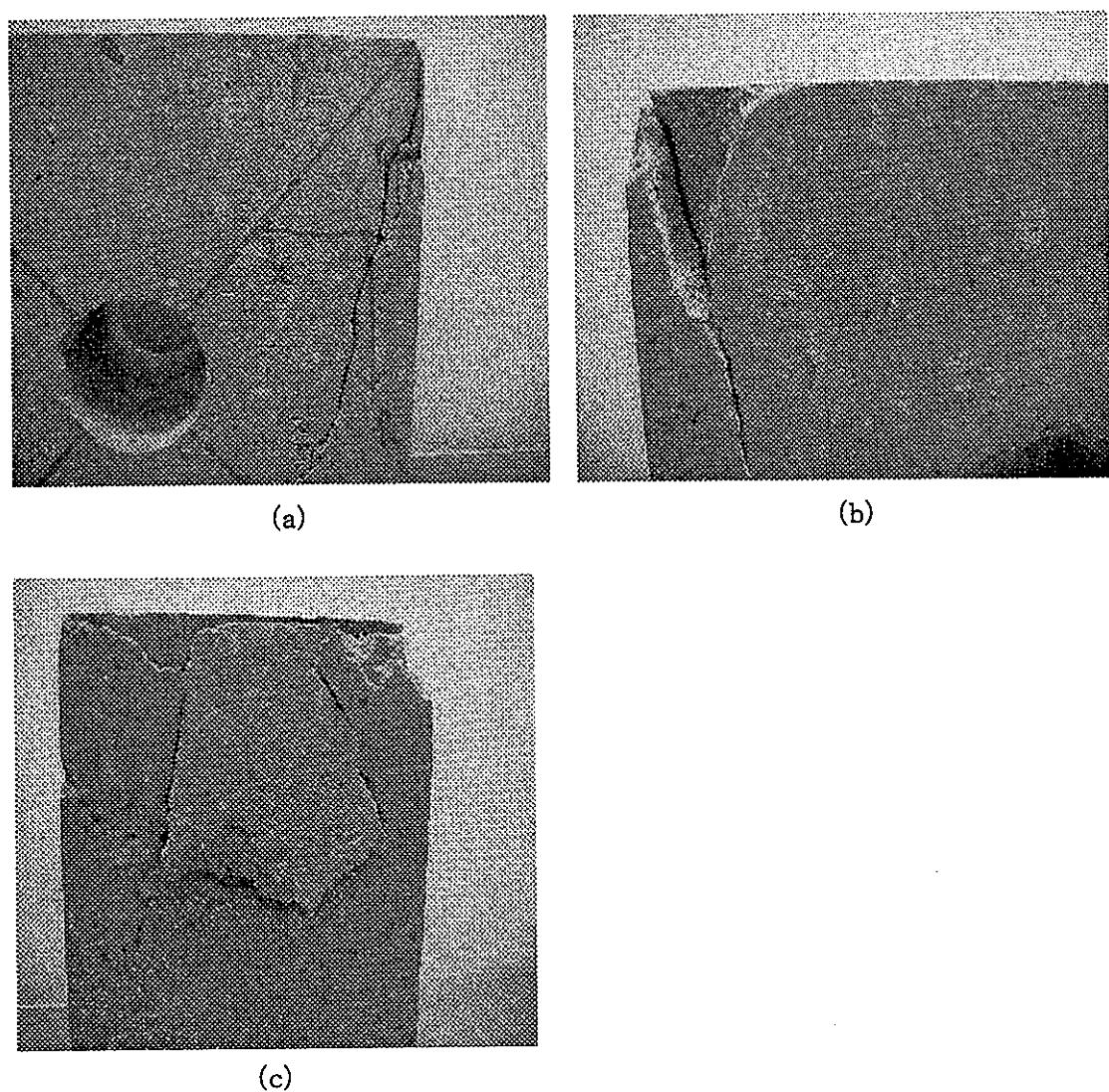


図 3.8 模型ブロックの端に生じた破面

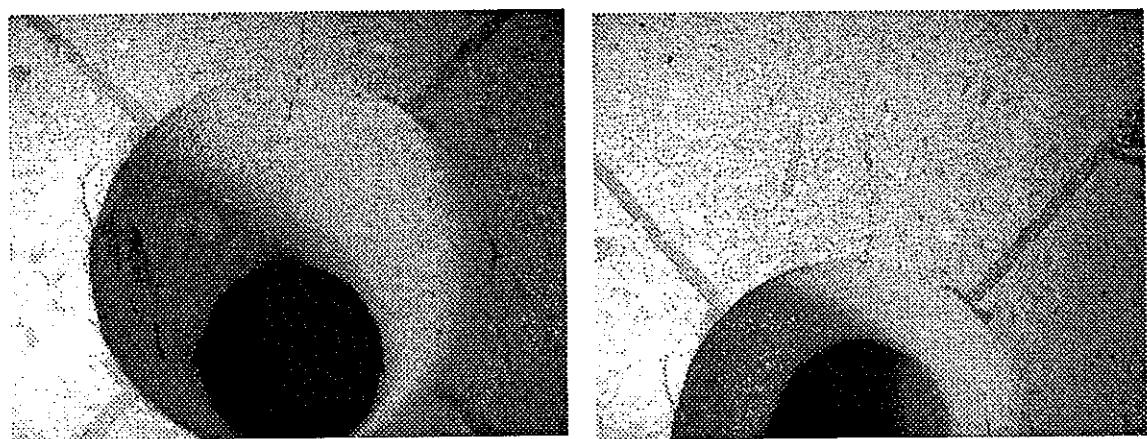


図 3.9 円孔上部に生じたき裂

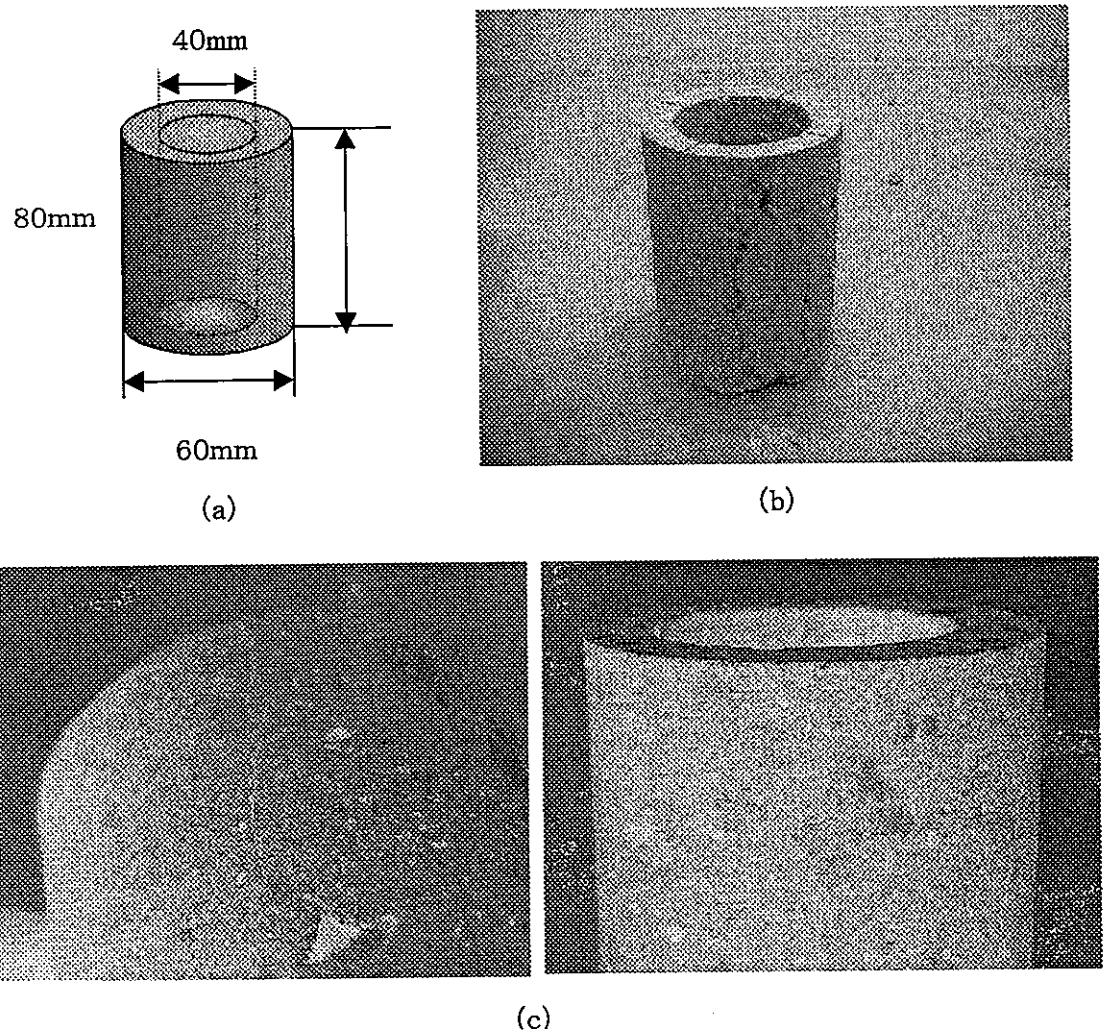


図 3.10 円孔上部に生じたき裂。これを詳細に観察するために円孔をオーバーコアリングし(a)、厚肉円筒状領域を取り出した(b)。コア外周に現れたき裂(c)



図 3.11 孔内側壁部

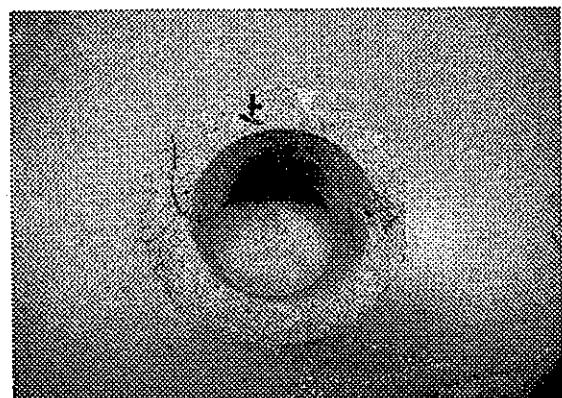
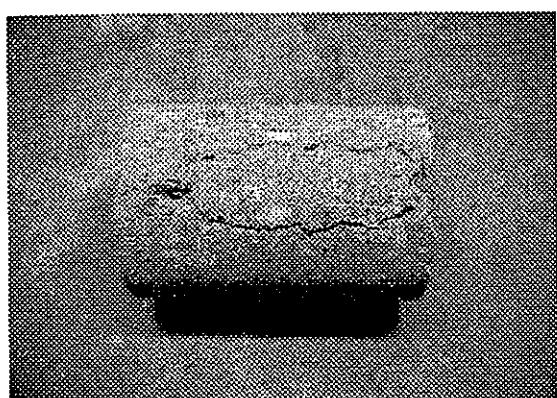


図 3.12 側壁に現れた2系統の破面

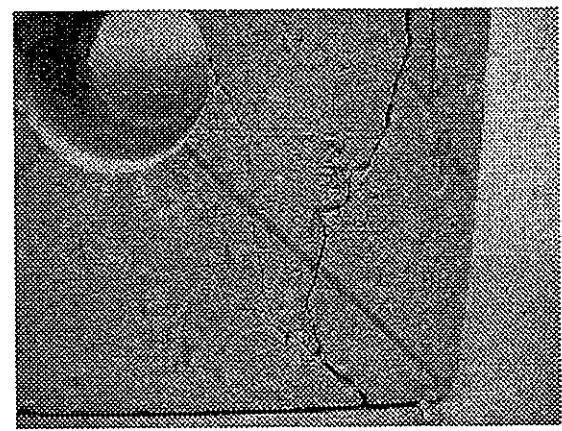
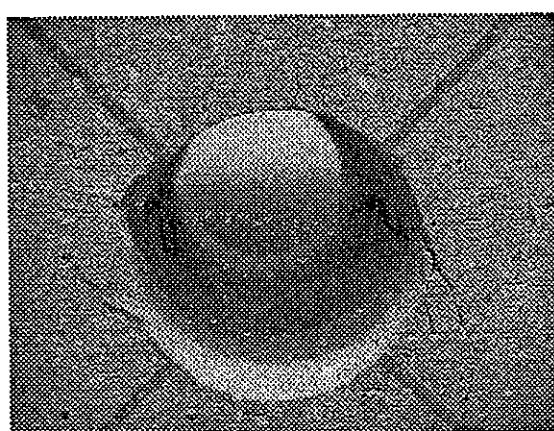


図 3.13 円孔側壁から下面に達したき裂

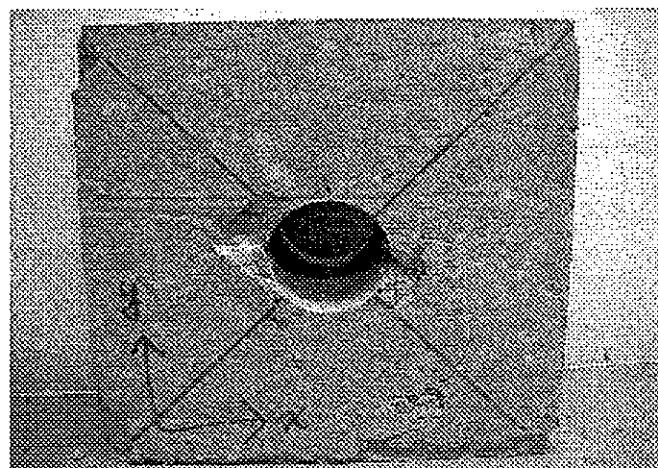


図 3.14 模型に生じた破面

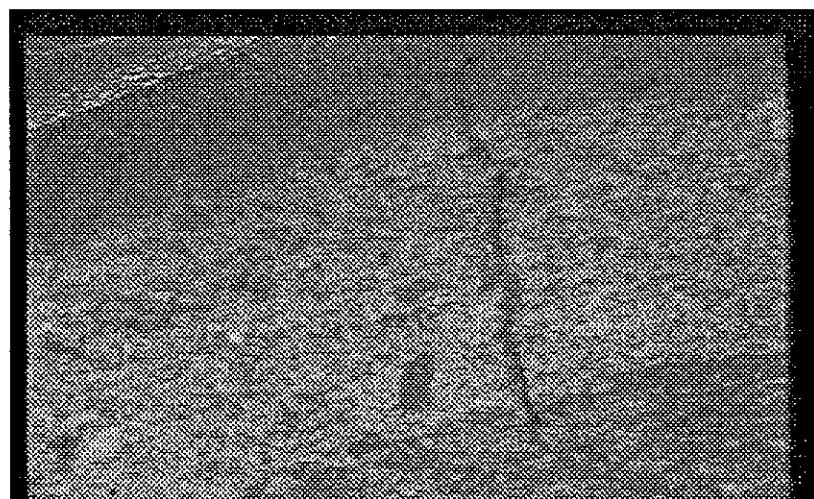
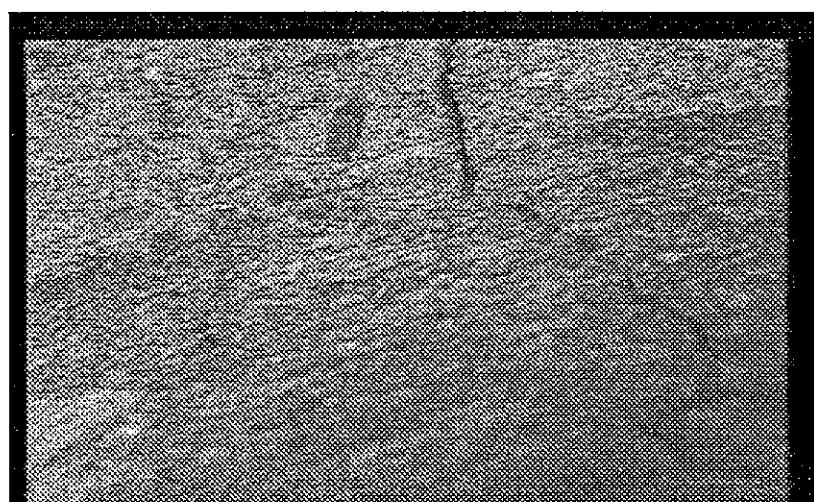
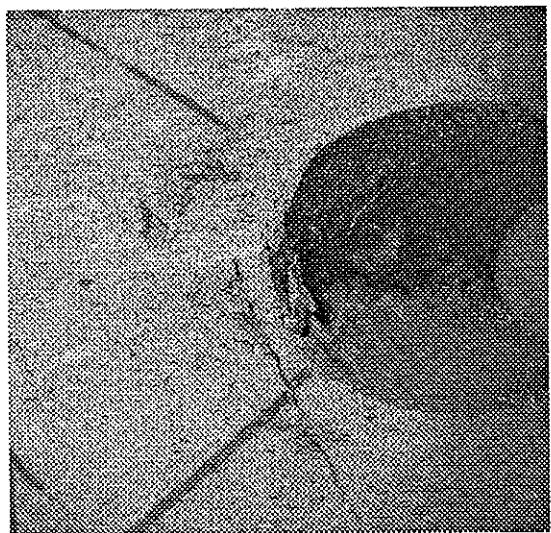
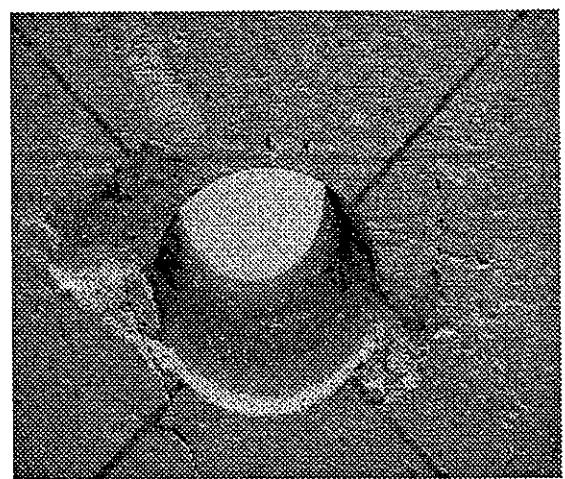


図 3.15 CCD カメラで撮影した円孔上部の破面



(a)



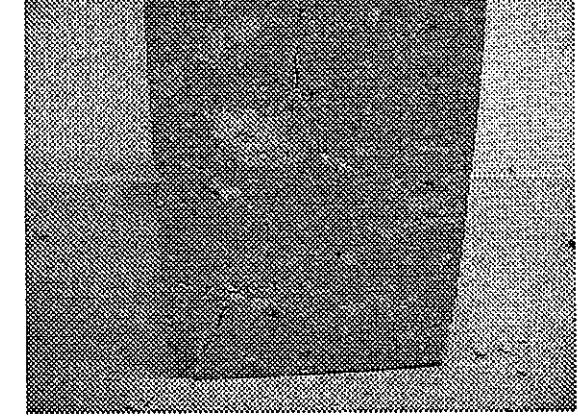
(b)



(c)

図 3.16 円孔周辺の断面。(a)は円孔側壁(b)は円孔周辺全体(c)は円孔上部の状況

図 3.17 模型ブロック側壁に現れた破面(右下)



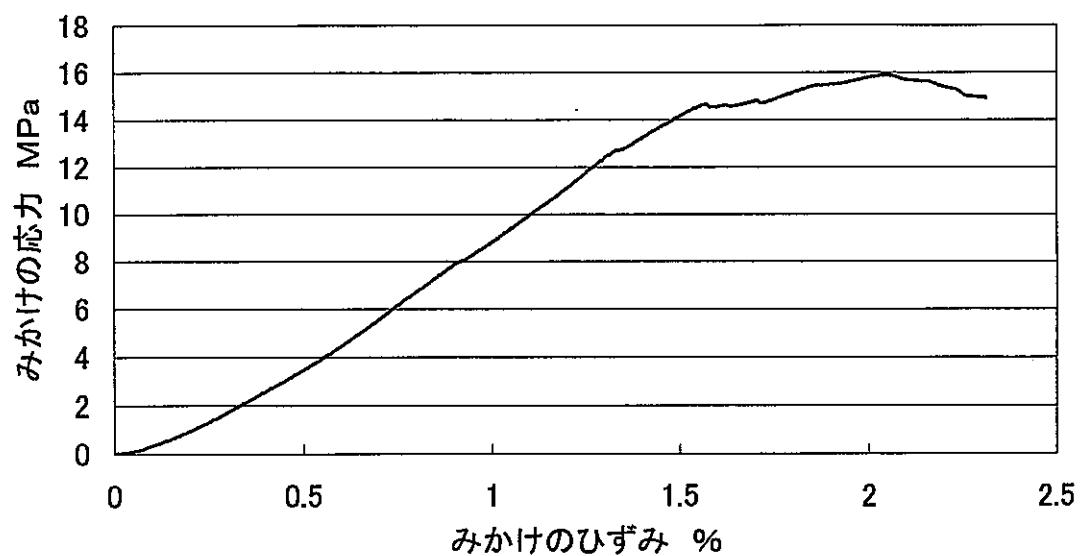


図 3.18 みかけの応力ーみかけのひずみ線図

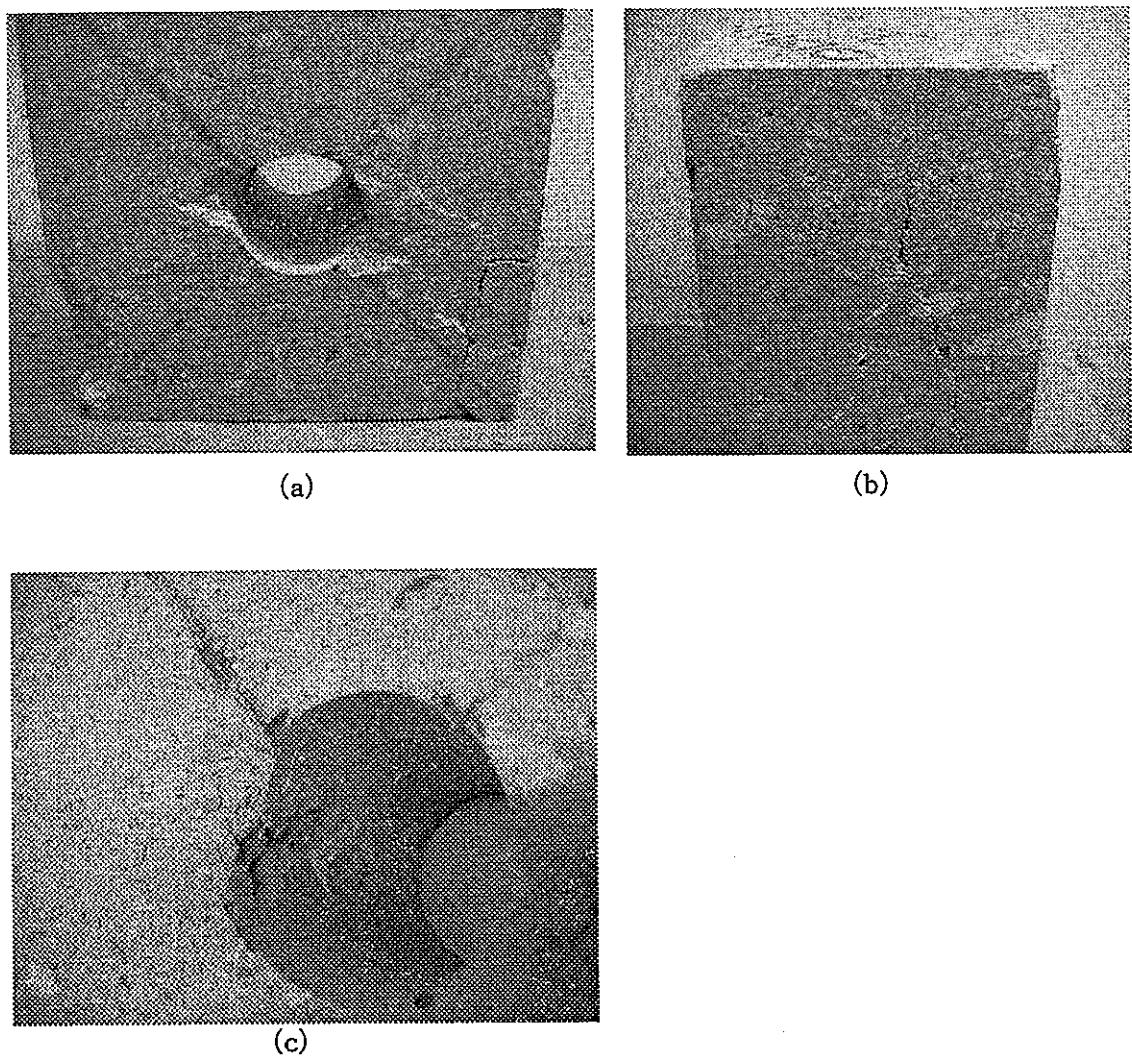


図 3.19 発生したき裂の状況。(a)はブロック前面、(b)は側面(c)は円孔の様子を示している。

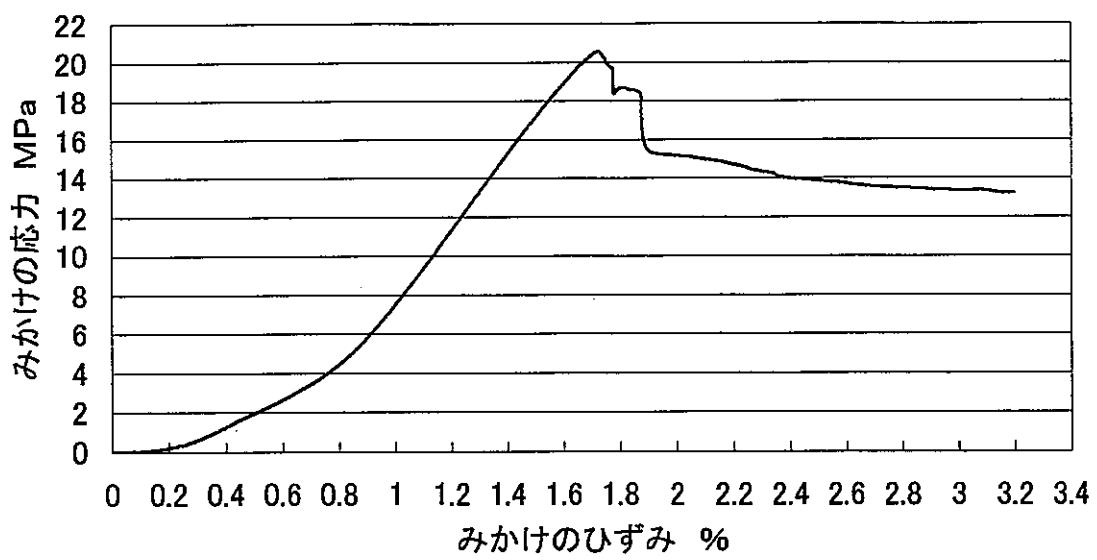


図 3.20 みかけの応力ーみかけのひずみ線図

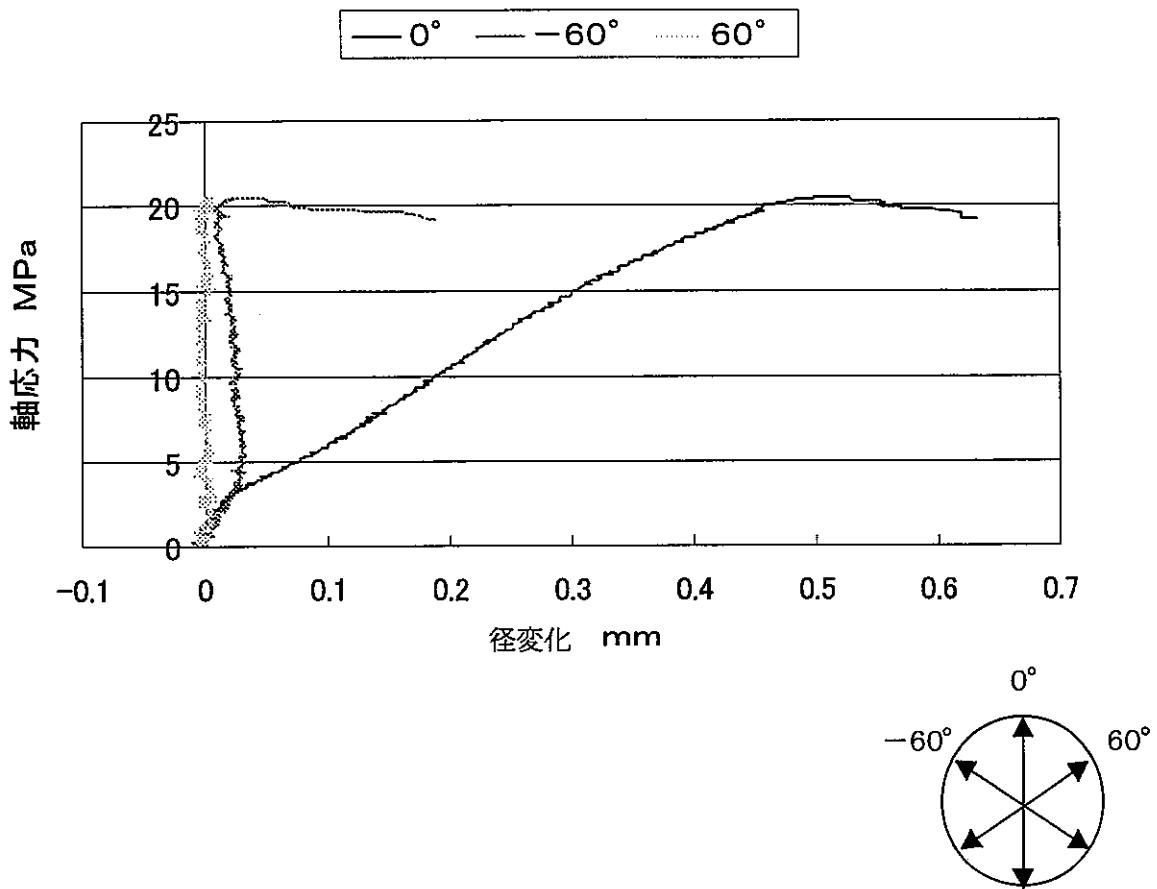
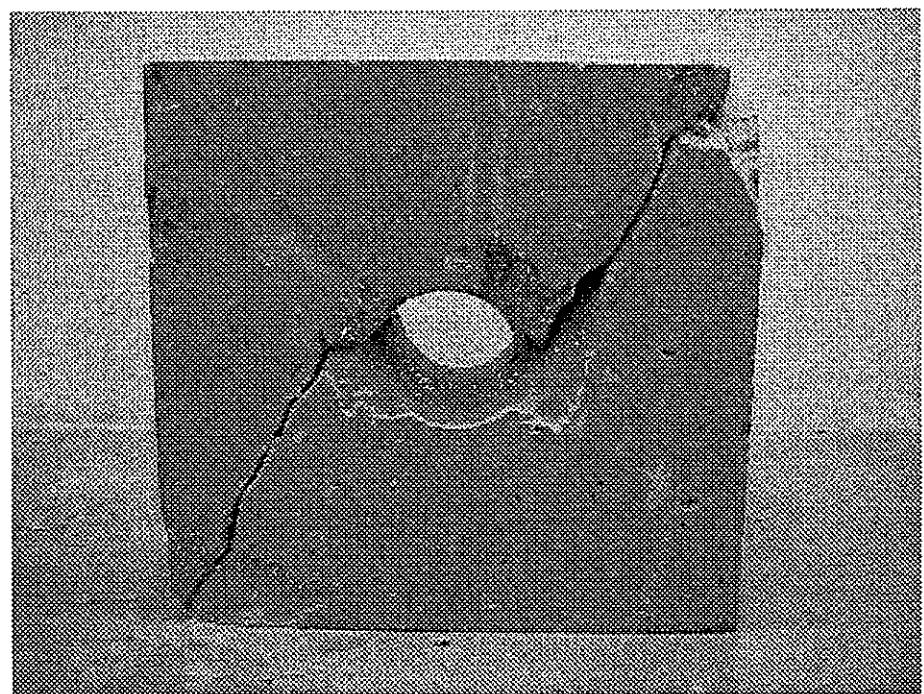
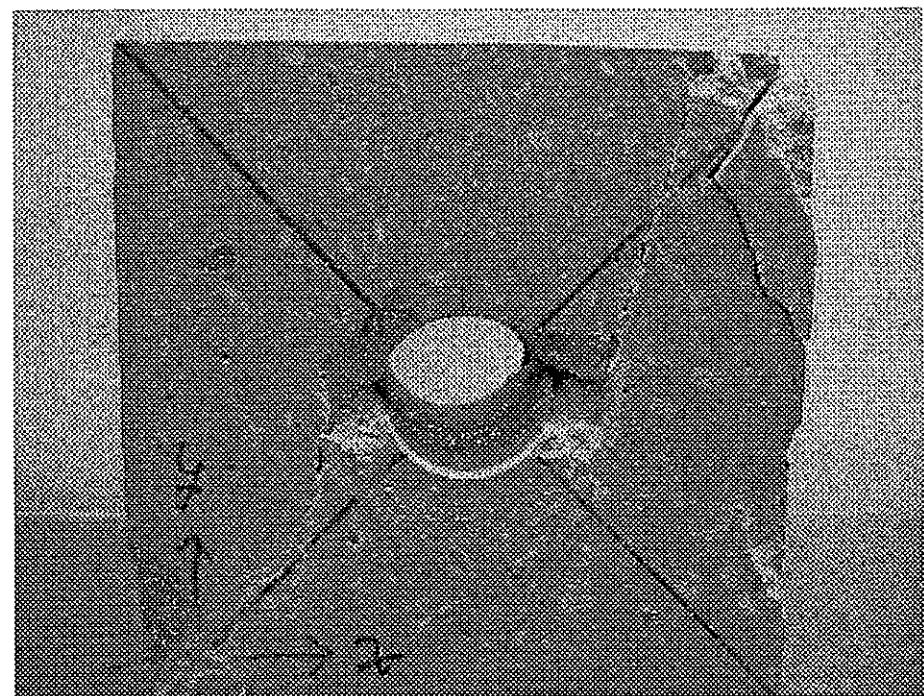


図 3.21 3方向の径変化(径変化は+が縮み)



(a)



(b)

図 3.22 (a)は表面、(b)は裏面の状況

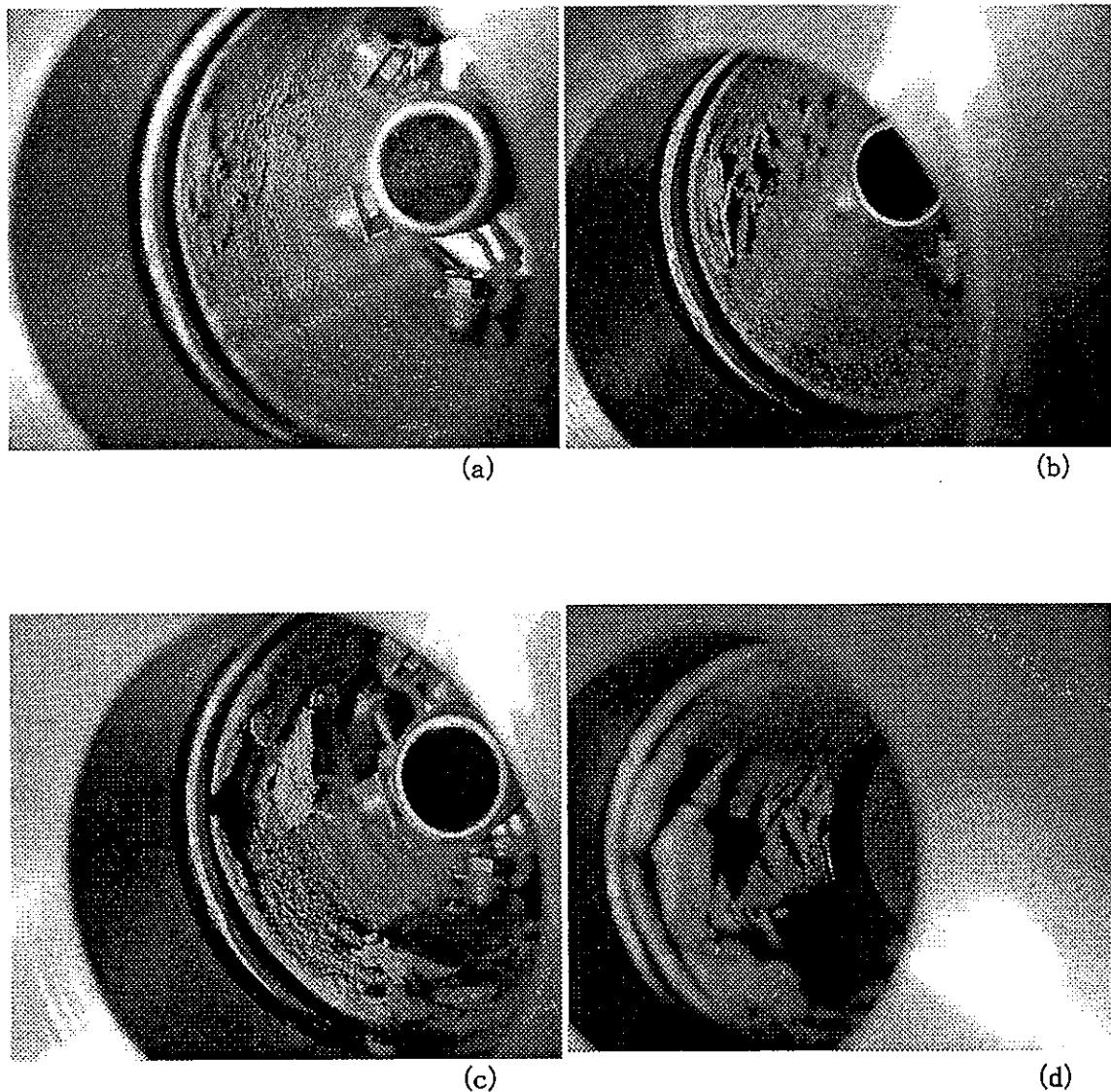


図 3.23 円孔側壁における破壊の発達状況

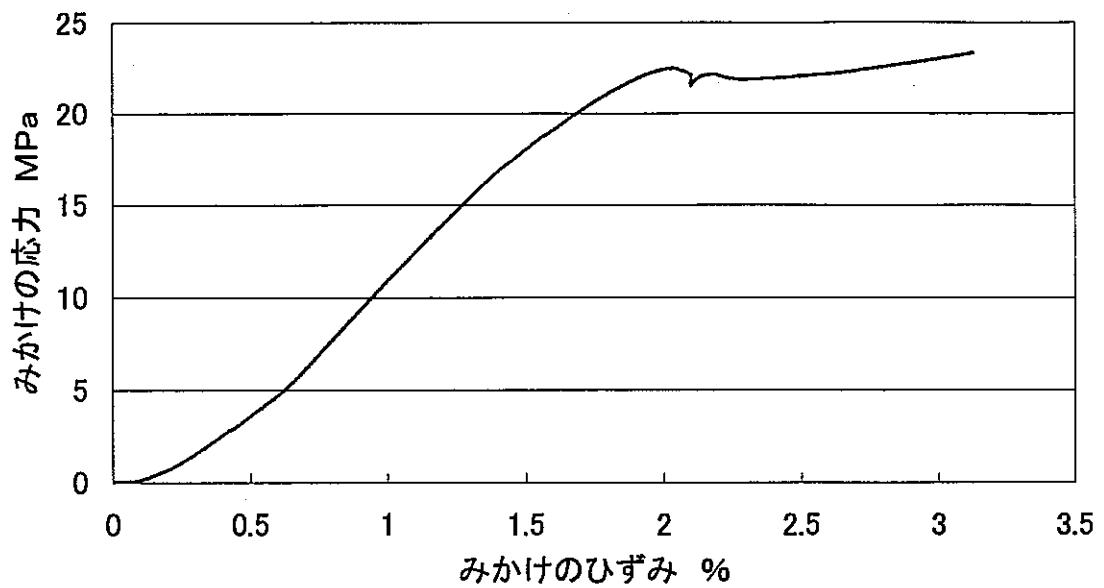


図 3.24 みかけの応力ーみかけのひずみ線図

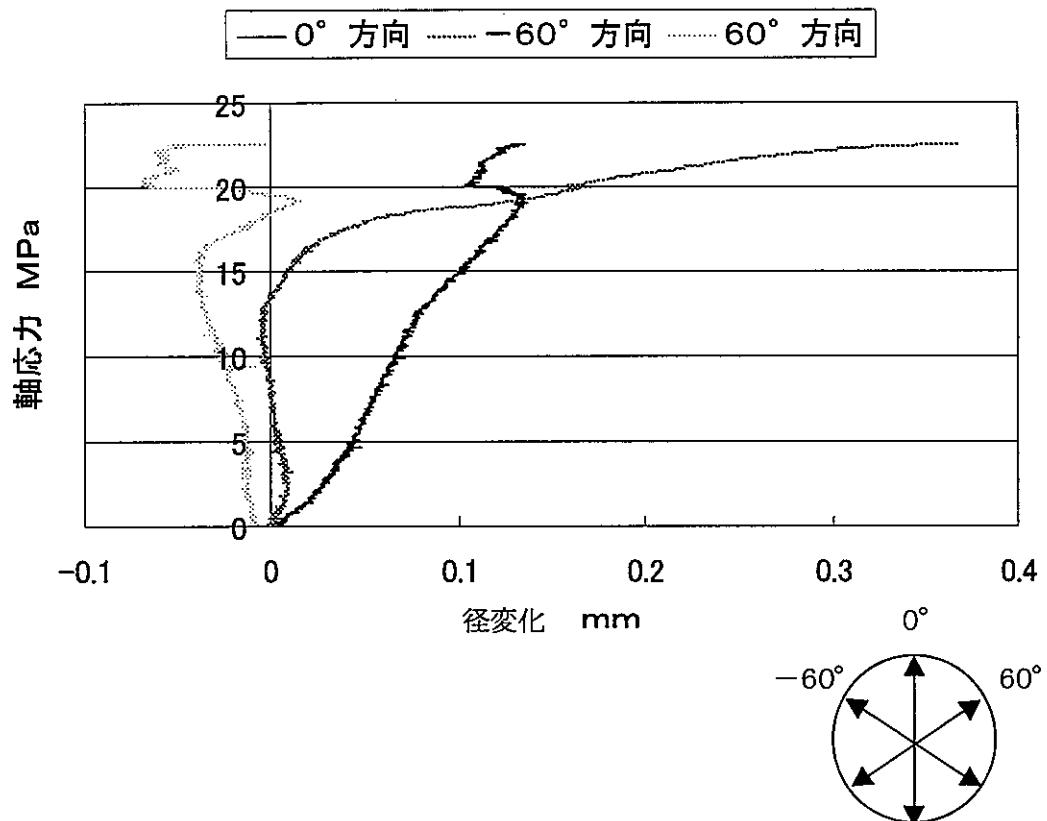


図 3.25 3方向の径変化(径変化は+が縮み)

## 第4章 弹塑性応力解析の方法と応用

### 4.1 はじめに

岩盤の2次元弾塑性解析を、応力遷移法(stress transfer method)を用いて有限要素法で実施する方法について述べる。実用的な問題を解析するするために、パソコンで動く解析コードFEMEPAを開発し、これを用いて例題を解いた。

### 4.2 弹塑性挙動をする岩盤の構成式

#### 4.2.1 構成式

破壊条件と応力-ひずみの関係については以下のように仮定する。

##### (1) 破壊条件

###### (1-1) 圧縮応力場の破壊

圧縮応力場における岩盤の破壊条件は Mohr-Coulomb 式に従うものとする。つまり、未破壊の岩石は応力が次式を満たすと破壊するものとする。(図 4.1 参照)。応力の符号は圧縮を-、引張を+とする。

$$\sigma_3 < K \sigma_1 - \sigma_c \quad (4.1)$$

$$K > 0, \quad \sigma_c (\text{一軸圧縮強度}) > 0$$

$$0 > \sigma_1 > \sigma_3 (\sigma_1, \sigma_3 \text{ 最大、最小主応力})$$

係数  $K$ 、 $\sigma_c$  は強度のパラメータ  $c$  (粘着力)、 $\phi$  (内部摩擦角) と次のような関係になっている。

$$K = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$$

$$\sigma_c = 2c \cos \phi / (1 - \sin \phi) \quad (4.2)$$

破壊すると直ちに残留強度状態に移行するものとする。

残留強度状態は下記のように表される。

$$\sigma_3 = K_r \sigma_1 - \sigma_{cr} \quad (4.3)$$

$$\sigma_{cr} < \sigma_c$$

###### (1-2) 引張破壊

最大主応力が引張強度を越えると、引張破壊  $\sigma_t$  が起きるものとする。2章の封圧下の引張強度に関する知見を満足し、上記の圧縮下における破壊条件との連続性を持たせるために、最大主応力が引張になっているときの破壊条件は次式で表されるものとする(図 4.1 参照)。

$$\sigma_3 = M \sigma_1 - \sigma_c \quad (4.4)$$

$$M = (\sigma_t + \sigma_c) / \sigma_t$$

#### 4.2.2 応力-ひずみの関係

岩盤は破壊する前は等方弾性的に挙動し、応力とひずみとの間に次式の Hooke の法則が成立するものとする。(図 4.2 参照)。ひずみ  $\epsilon$  の下付きの指標の  $e$  は弾性成分であることを示している。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= A \epsilon_{1e} + B \epsilon_{3e} \\ \sigma_3 &= B \epsilon_{1e} + A \epsilon_{3e} \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここに、平面ひずみ条件の場合には

$$A = E(1 - \nu) / \{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\}, \quad B = \nu E / \{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\} \quad (4.6)$$

E:ヤング率、 v:ポアソン比

破壊した岩石内のひずみは、次式のように弾性成分  $\varepsilon_e$  と塑性成分  $\varepsilon_p$  から成り立つものとする。

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_{1e} + \varepsilon_{1p} \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_{3e} + \varepsilon_{3p}\end{aligned}\quad (4.7)$$

また、塑性ひずみについては次の関係を満たすものとする。

$$\varepsilon_{1p} = -\lambda \varepsilon_{3p} \quad (4.8)$$

$\lambda$  (ダイラタンシー係数と呼ぶことにする)は、弾性ひずみにおけるポアソン比に対応するもので、値が 0.5 以上であれば体積ひずみの塑性成分は正になる。

#### 4.2.3 破壊条件を満たした岩石の応力一ひずみの関係

破壊した岩石のひずみ ( $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ ) が既知のとき、これに対応した応力 ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) は以下のように求まる。

まず、応力は残留強度状態になっているので(4.3)式を満たす。

$$\sigma_3 = K_r \sigma_1 - \sigma_{cr}$$

これに(4.5)式を代入すると次のようになる。

$$B \varepsilon_{1e} + A \varepsilon_{3e} = K_r (A \varepsilon_{1e} + B \varepsilon_{3e}) - \sigma_{cr}$$

さらに(4.7)式を代入すると次のようにになる。

$$(B - K_r A) (\varepsilon_1 - \varepsilon_{1p}) + (A - K_r B) (\varepsilon_3 - \varepsilon_{3p}) = -\sigma_{cr}$$

(4.8)式を代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}(B - K_r A) (\varepsilon_1 + \lambda \varepsilon_{3p}) + (A - K_r B) (\varepsilon_3 - \varepsilon_{3p}) &= -\sigma_{cr} \\ \{\lambda (B - K_r A) + K_r B - A\} \varepsilon_{3p} &= (K_r A - B) \varepsilon_1 + (K_r B - A) \varepsilon_3 - \sigma_{cr} \\ \varepsilon_{3p} &= \{(K_r A - B) \varepsilon_1 + (K_r B - A) \varepsilon_3 - \sigma_{cr}\} / \{\lambda (B - K_r A) + K_r B - A\}\end{aligned}\quad (4.9)$$

(4.9)式を(4.7)式に代入すると次の評価が得られる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1e} &= \varepsilon_1 - \varepsilon_{1p} = \varepsilon_1 + \lambda \varepsilon_{3p} \\ &= \{(K_r B - A) \varepsilon_1 + \lambda (K_r B - A) \varepsilon_3 - \lambda \sigma_{cr}\} / \{(\lambda + K_r) B - (1 + K_r \lambda) A\} \\ \varepsilon_{3e} &= \varepsilon_3 - \varepsilon_{3p} \\ &= \{(B - K_r A) \varepsilon_1 + \lambda (B - K_r A) \varepsilon_3 + \sigma_{cr}\} / \{(\lambda + K_r) B - (1 + K_r \lambda) A\}\end{aligned}\quad (4.10)$$

(4.10)式を(4.5)式に代入すると、次のような応力 ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) と ひずみ ( $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ ) の関係が得られる。

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \{(B^2 - A^2) \varepsilon_1 + \lambda (B^2 - A^2) \varepsilon_3 + (B - \lambda A) \sigma_{cr}\} / \{(\lambda + K_r) B - (1 + K_r \lambda) A\} \\ \sigma_3 &= \{K_r (B^2 - A^2) \varepsilon_1 + \lambda K_r (B^2 - A^2) \varepsilon_3 + (A - \lambda B) \sigma_{cr}\} / \{(\lambda + K_r) B - (1 + K_r \lambda) A\}\end{aligned}\quad (4.11)$$

### 4.3 弹塑性解析の方法

#### 4.3.1 応力遷移法

応力遷移法では、弾性計算だけに基づき、正解を逐次近似的に改良することにより求める方法である。

(1)所与の境界条件に対する弾性解が得られたものとし、応力を  $\sigma_{(0)}$  とする。この解は第0近似値を与える。すべての要素が破壊条件を満たさなければ、第0近似は正解を与える。

もし、破壊条件を満たす要素があれば、第0近似は正解ではない。

第m要素の主応力を ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) とする。

a)もし、破壊条件を満たしていないければ、応力は正解とみなせる。

b)もし、破壊条件を満たしていれば、応力状態は残留強度状態に移行しなければならない。そこで、応力の一つの成分  $\sigma_1$  を仮に正しいものとし(実際には、正しくないが)、もう一つの応力成分  $\sigma_2$  を(4.3)式から、

$$\sigma_2^* = K_r \sigma_1 - \sigma_{cr} \quad (4.12)$$

のように評価する。これを第1近似値とみなす。これは、第0近似値と比べて、次の大きさの差異がある。

$$\delta \sigma = \sigma_2^* - \sigma_2 \quad (4.13)$$

これは第0近似の誤差とみなせる。

(2)(4.13)式で与えられる誤差を消すために、この応力差に等価な荷重  $\Delta F$  を求め、この荷重に対応する弾性解を求める。等価な荷重  $\Delta F$  は次のように評価される。

$$\Delta F = \int B(\delta \sigma) dS \quad (4.14)$$

この荷重の下で得られる変位を  $\Delta u$ 、ひずみを  $\Delta \epsilon$ 、応力を  $\Delta \sigma$  とする。

考えている要素の状態に応じて、以下の a), b)のいずれかの処理をする。

a)(1)の時点で弾性であるとき:

このときには、新しい応力を次式で評価する。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1 + \Delta \sigma_1 \\ \sigma_2 &= \sigma_2 + \Delta \sigma_2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

ひずみも同様に評価する。なお、右辺第1項は前の段階の解、左辺は現段階の解を意味する。

(14)式で評価された新しい応力状態は、次の a)', a)"のいずれかである。

a)新しい応力は破壊条件を満たさない、依然として弾性状態になっている。このときには、(4.15)式を正解とみなす。

a")新しい応力が、破壊条件を満たす。このときには、(4.12)によって応力の修正をする。

b)(1)の時点で破壊しているとき:

(4.12)式に対応して(弾性を仮定して)得られるひずみ

$$\epsilon_i = \epsilon_i + \Delta \epsilon_i$$

は正確だとする。そうすると、応力はこのひずみを破壊条件である(4.3)式に代入することにより求まる。

(3) a")と b) の両方とも、上記のようにして評価される応力は、弾性の仮定の下に(4.15)式で評価される応力とは異なる。そこで、両者の応力の差異  $\delta \sigma$  に対応する等価な荷重  $\Delta F$  を評価し、 $\Delta F$  に対応する弾性解を求める。

(4)(2)と全く同じ手続きで、新しい応力を評価する。

(2)～(4)の手続きを差異  $\delta \sigma$  が小さくなるまで繰り返す。

#### 4.3.2 応力解析の方法—荷重増分法

ある領域に荷重  $F$  が作用するときの応力・変位を決める問題を解こうとするとき、一度に荷重  $F$  を与えると収束した解が得られない危険がある。そこで、次に説明するように、荷重を幾つかに分けて負荷する方法(荷重増分法)を採用する。

まず最も危険な要素がちょうど破壊するのに必要な荷重

$$F_1 = \beta_1 F \quad (4.16)$$

を構造物に負荷し、その要素の破壊に伴なう応力の再配分を計算する。つぎに、収束した解が得られたならば、非破壊の要素の内で最も危険な要素がちょうど破壊するのに必要な荷重

$$F_2 = \beta_2 F$$

を負荷する(この段階で構造物には  $F_1 + F_2$  の荷重が作用する)。

このような手続きを繰り返し、

$$F = F_1 + F_2 + \cdots + F_n = (\beta_1 + \beta_2 + \cdots + \beta_n) F$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \cdots + \beta_n = 1 \quad (4.17)$$

になったならば計算を終了する。この場合、荷重はn個に分けて逐次的に作用させたことになる。

$\beta_i$ は次のようにして決めることができる。

いま、(i-1)段階までの解析が終了したものとする。このとき応力を  $\sigma_{(i-1)}$ 、変位を  $u_{(i-1)}$  とする。つぎに、第i段階において、構造物に荷重Fを作用したときに生じる応力を  $\sigma_{(i)}$ 、変位を  $u_{(i)}$  とする。このとき次のような係数  $\mu_i$  を求める。

$$f(\sigma_{(i-1)} + \mu_m \sigma_{(i)}) = 0 \quad (4.18)$$

ここに  $f(\sigma) = 0$  は破壊条件式である。また、 $\mu$  の下付きの指標のmは要素番号を表す。未破壊の全要素について  $\mu$  を求めたとき、その最小値  $\mu_{\min}$  が  $\beta_i$  を与える。

$$\beta_i = \mu_{\min} \quad 0 < \beta_i < 1 \quad (4.19)$$

各要素の第i段階における応力は、前節で述べた応力遷移法に従い次のようになる。

(1)  $\mu = \mu_{\min}$  を満たす要素は前段階では弾性的で、今回、ちょうど破壊条件に達する。破壊により残留強度状態になるので、応力は次のように表現される。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{1(i-1)} + \Delta \sigma_{1(i)} \\ \sigma_2 &= K_r \sigma_1 - \sigma_{cr} \end{aligned} \quad (4.20)$$

(2) 第(i-1)段階で弹性であった要素は今回も弹性で、応力  $\sigma_{(i)}$  は

$$\sigma_{(i)} = \sigma_{(i-1)} + \Delta \sigma_{(i)} \quad (4.21)$$

(3) 第(i-1)段階で塑性であった要素は今回も塑性で、ひずみは

$$\varepsilon_{(i)} = \varepsilon_{(i-1)} + \Delta \varepsilon_{(i)} \quad (4.22)$$

これを(10)式に代入することにより応力  $\sigma_{(i)}$  が求まる。

### 4.3.3 比例係数 m の決定方法

つぎの場合には、要素が破壊条件を満たすような応力増分を決める係数  $m$  を評価する必要がある。

a)ある計算ステップにおいて最も危険な要素が破壊するのに必要な荷重増分を決めたり、

b)ある繰り返し計算の途中で、ある要素が新たに破壊したとき、

この係数は次に示すように、2次方程式の解として与えられる。

いま、1つ前のステップの応力を  $\sigma_b$ 、応力増分を  $\Delta \sigma$  とするとき、応力  $\sigma_b$ 、応力増分  $\Delta \sigma$  と係数  $m$  との間には図4.3を参照し、次式が成立する。

$$\sigma_{3b} + m \Delta \sigma_3 = K(\sigma_{1b} + m \Delta \sigma_1) - \sigma_c \quad (4.23)$$

主応力  $\sigma_1$  を  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$  で表し、(4.23)式に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma_{3b} + m \Delta \sigma_3 &= (\sigma_{xb} + \sigma_{yb} + m \Delta \sigma_x + m \Delta \sigma_y)/2 \\ &\quad - [\{(\sigma_{xb} - \sigma_{yb} + m \Delta \sigma_x - m \Delta \sigma_y)/2\}^2 + (\tau_{xyb} + m \Delta \tau_{xy})^2]^{1/2} \\ \sigma_{1b} + m \Delta \sigma_3 &= (\sigma_{xb} + \sigma_{yb} + m \Delta \sigma_x + m \Delta \sigma_y)/2 \\ &\quad + [\{(\sigma_{xb} - \sigma_{yb} + m \Delta \sigma_x - m \Delta \sigma_y)/2\}^2 + (\tau_{xyb} + m \Delta \tau_{xy})^2]^{1/2} \end{aligned}$$

これらを上式に代入して整理すると、 $m$  についての2次式が得られる。

$$\begin{aligned} S_1 m^2 + 2S_2 m + S_3 &= 0 \\ S_1 &= \{4K/(1+K)^2\}(\Delta \sigma_x^2 + \Delta \sigma_y^2) - \{4(1+K^2)/(1+K)^2\} \Delta \sigma_x \Delta \sigma_y + 4 \Delta \tau_{xy}^2 \\ S_2 &= \{4K/(1+K)^2\}(\sigma_{xb} \Delta \sigma_x + \sigma_{yb} \Delta \sigma_y) - \\ &\quad 2(1+K^2)/(1+K)^2(\sigma_{xb} \Delta \sigma_y + \sigma_{yb} \Delta \sigma_x) + 4 \tau_{xyb} \Delta \tau_{xy} - \{2 \sigma_c (1-K)/(1+K)^2\} \\ S_3 &= \{4K/(1+K)^2\}(\sigma_{xb} + \Delta \sigma_{yb})^2 - \{4(1+K^2)/(1+K)^2\} \sigma_{xb} \sigma_{yb} \end{aligned}$$

上式を解いて得られる根は2個ある。

$$m = \{-S_2 \pm (S_2^2 - S_1 S_3)^{1/2}\} / S_1 \quad (4.24)$$

$m$ は次を満たしていかなければならない。

$$0 < m < 1$$

もし、2根とも上式を満たしていなければ、小さい方が正解を与える。

#### 4.4 弹塑性解析の応用

##### 4.4.1 解析コード FEMEPA の開発

平面ひずみ条件を仮定した2次元弾塑性解析を実行するために、パソコンで作動する解析コード FEMEPA を開発した。本コードは3角形定ひずみ要素の集合として構造体をモデル化する。扱える節点数と要素数の上限は、それぞれ 200 と 300 である。境界条件として、斜線の境界を考慮できるので、対称性の多い問題に対しては能率よく計算が実行できる。

ある要素が引張破壊条件を満たした場合には、その要素の境界辺を自由縁にするという処理法を採用した。

ここに示す例題においては、材料定数を次のように仮定した。

ヤング率 5.2GPa ポアソン比 0.12

ダイラタンシーアルファ 0.6

粘着力 13.7MPa 内部摩擦角 34°

残留強度状態下の粘着力 0.2MPa 内部摩擦角 34°

引張強度 2MPa

##### 4.4.2 3軸圧縮試験のシミュレーション

上記の弾塑性解析で得られる応力-ひずみ挙動ならびにこれに及ぼす各種パラメータの影響を調べる目的で、長方形形状をした岩石供試体の 2 軸圧縮問題を解析した。このために、長方形板を節点総数 16、要素総数 18 の3角形有限要素の集合としてモデル化し、所与の側圧  $p$  の下で、上下より強制変位  $u$  を与えたときに得られる応力・ひずみ挙動を求めた(図 4.4 参照)。側圧は、 $p=0,5,10$  の3種類とした。

図 4.4～4.6 は得られた結果を示したものである。図 4.4 から、軸応力  $\sigma$  一軸変位  $u$  線図は、軸応力  $\sigma$  が最大値に達するまでは、直線的で(弾性的であるが、最大値に達した瞬間、直ちに残留強度状態に移行すること、それ以降は残留強度状態を保ち、強制変位を増しても変位が増大するだけで応力は変化しないこと、などがわかる。塑性が進行しても各要素の応力・変位は常に一樣で、強制変位がある大きさになったときの弾性から塑性への移行は、全ての要素で同時に生じた。最終解を得るのに要したステップ数は3(4.3.2 項の荷重増分法参照)であった。

応力が最大値に達した後の応力低下量は、破壊強度と残留強度の内部摩擦角が同じときには( $\phi = \phi_r = 34^\circ$ )、封圧(最小主応力)の大きさによらずに同じである。後者の方が大きいときには( $\phi_r = 40^\circ > \phi = 34^\circ$ )、封圧が大きくなるにつれて応力低下量は小さくなる。実際の岩石ではいわゆる脆性-延性遷移が見られ、封圧が大きくなるにつれて応力低下量は小さくなる。したがって、この効果は内部摩擦角を調整することにより得ることができる。

図 4.5 は、変形に及ぼすダイラタンシーアルファ係数の影響を示したもので、この係数の値が大きくなるほどダイラタンシーアルファが顕著になることがわかる。

図 4.6 は、図 4.4 の軸応力-一軸変位線図において軸応力が最大値をとると残留強度状態になったときの応力状態が、それぞれ(4.1)式、(4.3)式で表される破壊条件と残留強度条件を満

たしていることを示している。

以上のシミュレーションから、本弾塑性解析法は、岩石の3軸応力下の変形・破壊挙動に関する特徴的な諸現象を表現できていることがわかる。

#### 4.4.3 空洞の問題を解析するモデル

第3章で述べた空洞を持った岩盤ブロックが3軸荷重を受けるときのシミュレーションを実施する。対称性から有限要素モデルは図 4.7、4.8 に示すように、1/4 領域をモデル化した。総要素数は 170、総節点数は 104 である。

#### 4.4.4 解析例(その1)－ブロックに作用する最小主応力が0の場合

境界条件として、ブロックの側面を自由縁とし、上下端面に一様なy方向の強制変位(軸変位)を作成させたときに得られた塑性域の発達状況を図 4.7、みかけの軸応力ー軸方向変位線図を図 4.9 に示す。図 4.7 に示すように、軸変位の増加に伴ない、まず空洞天盤に引張破壊が現れる。引張き裂は軸変位の増加により、上方に伸びる。しかし、き裂先端の引張応力は変位の増加とともに減少するので、き裂の成長は直に止まる。この間のみかけの軸応力ー軸方向変位線図は、図 4.9 に示すように、直線的であり、引張き裂の発生はみかけの軸応力ー軸方向変位線図に変化をもたらさないことがわかる。

軸変位をさらに増すと、側壁に小さなせん断破壊域が現れる(ステップ2、図a)。次いで、水平軸と約 40° 傾いた空洞壁にせん断破壊域が現れ、これが急激に成長して、端に達し(ステップ2 から3、図b)、破壊域がブロックを貫通する。その結果、(みかけの)軸応力は低下し、残留強度状態に至る。これ以上の軸変位の増加に対しては、塑性域はそれほど拡大せず、(みかけの)軸応力は図 4.9 に示すように、ほぼ同じ大きさを維持する。

#### 4.4.5 解析例(その2)－ブロックに作用する最小主応力が 5MPa の場合

境界条件として、ブロックの側面に 5MPa の表面力を与え、その状態を保つつつ、上下端面に一様なy方向の強制変位を作成させたときに得られた塑性域の発達状況を図 4.8、みかけの応力ー軸方向変位線図を図 4.9 に示す。図 4.8a に示すように、軸変位の増加に伴ない、最初に、側壁にせん断海域が現れる(ステップ数1, 2)。軸変位が増加すると、みかけの軸応力も増加するが(ステップ数2, 3)、水平軸から約 30° 方向に現れたせん断破壊域が空洞壁面からブロックの側壁に向かって斜め方向に急激に成長し、ブロックの端に達する。同時に、みかけの軸応力は急激に低下する(ステップ5)。

#### 4.4.6 模型試験結果と解析結果の比較

みかけの軸応力ー軸方向変位線図をシミュレーションと模型試験で比較すると、以下に示すように主要な部分は同じであることがわかる(なお、この線図は、シミュレーションでは図 4.9、模型試験では、図 3.7, 3.18, 3.20 に示されている)。

a) 線図は全体に上に凸の山形をしている。

b) 軸応力の最大値は封圧(最小主応力、横方向の拘束圧)とともに増す。

c) 軸応力が最大値に達した後の応力低下量は、封圧とともに小さくなる。

なお、線図の立ちあがりの直線部におけるみかけのヤング率は、模型試験では 1.1~2.2GPa の間でばらついており、ばらつきは大きいが(表 3.1、図 3.7, 3.18, 3.20 参照)、封圧の依存性はな

いようである。これもシミュレーションの予測と同じである。

破壊形態(引張破壊とせん断破壊)や破壊の発生箇所に関しては、模試験結果とシミュレーションの予測は大体同じといってよいであろう。

シミュレーションでは、破壊の進展について次に示すような2つの予測が得られた。

a)急激に成長しブロックを貫通する破壊が、みかけの軸応力-軸方向変位線図における軸応力が最大値に達した後の急激な応力低下に対応している。

b)ブロック側面に負荷する応力が大きいほど、軸応力が最大値に達する前の空洞側壁の破壊が進む。

模型試験では、最小主応力が小さい場合には、破壊の前兆現象を伴わずに巨視的な破壊が生じた。逆に、最小主応力が大きい場合には、軸応力の増加過程で側壁の剥離と碎片の孔底への堆積が観察された。これらの観察結果は上記シミュレーションの予測と調和的である。

模型試験とシミュレーションの差異の一つに、破面の形態が異なることが指摘できる。模型試験では、少なくとも、巨視的なものは破面のみが存在し、破壊域は存在しないように見える。一方、シミュレーションでは、引張破面を除けばある幅を持った破壊域しか発生し得ない。この差異をなくすには、シミュレーションでも破面しか生じないようにすることである。図4.10は、せん断破壊条件を満たす部位にはき裂が生じるようにした有限要素モデルを、矩形板の一軸圧縮のシミュレーションに応用して得た結果である。このモデルでは、き裂は Goodman ジョイント要素で表される。このモデルで得られる応力-ひずみ線図は、岩石で得られるものとよく似ている。岩石の破壊をよりよくシミュレートする上で、連続体を仮定した弾塑性モデルとき裂モデルのいずれが有利であるかの結論は、き裂モデルを実際の問題に多数応用した後でなければ得られない。これは今後の問題として残されている。

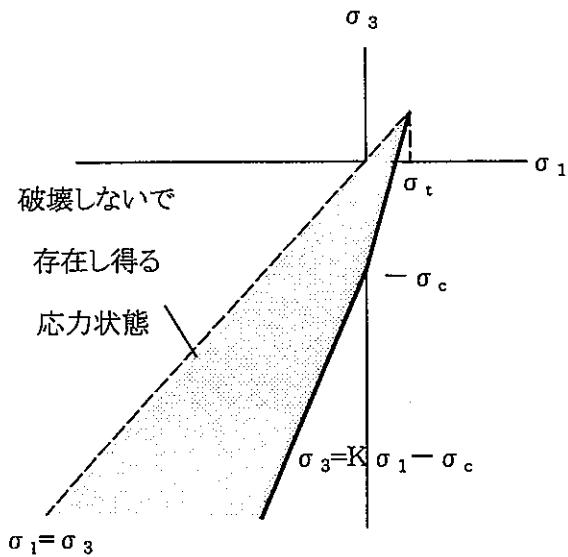


図 4.1 主応力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  で表示した岩石の破壊条件(圧縮-、引張+)

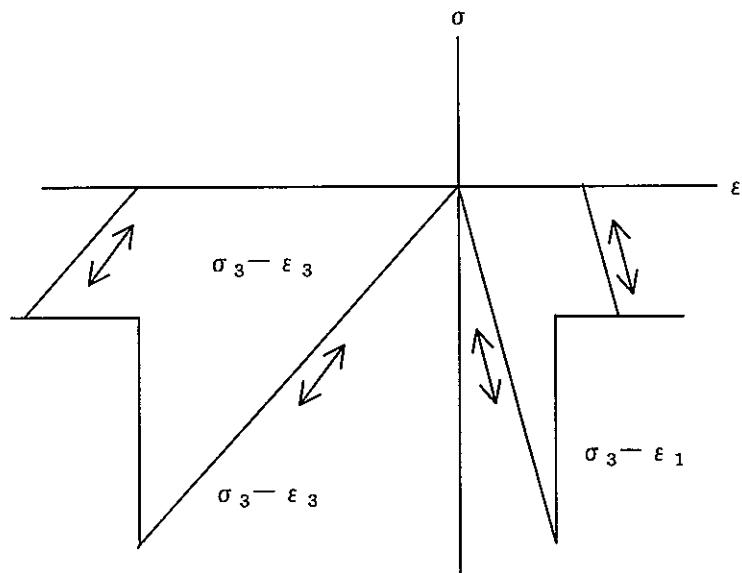


図 4.2 岩石の応力-ひずみの関係

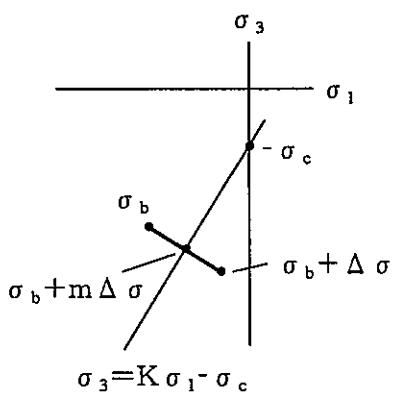


図 4.3  $m$ の意味

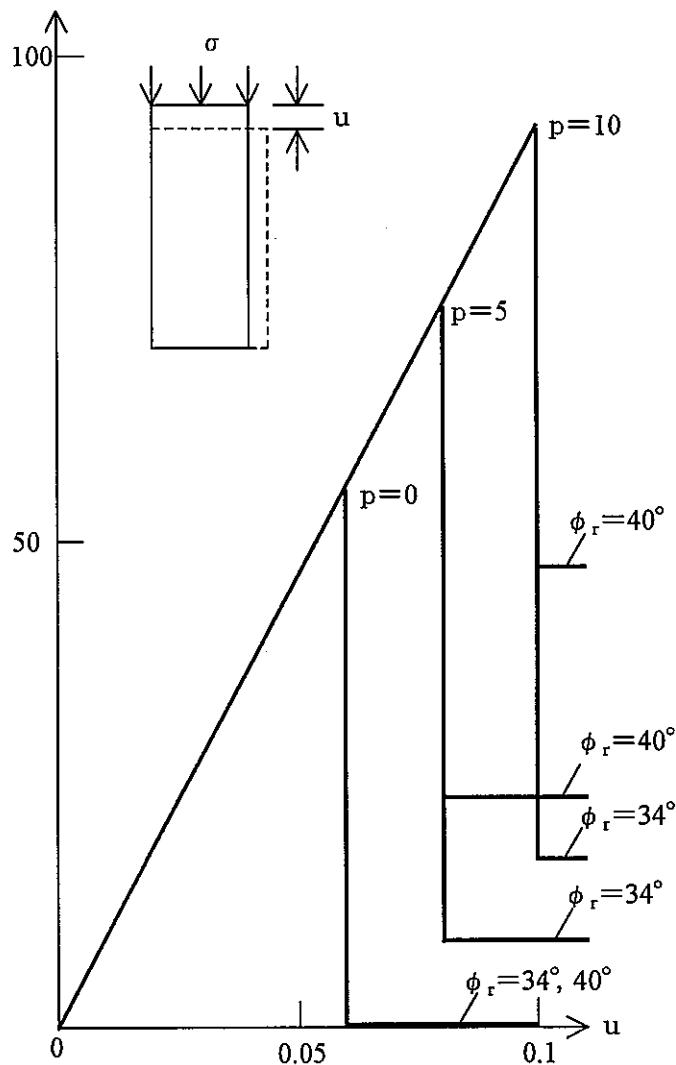


図 4.4 岩石の矩形供試体の3軸圧縮載荷のシミュレーション結果。 $p$ は側方からの拘束圧

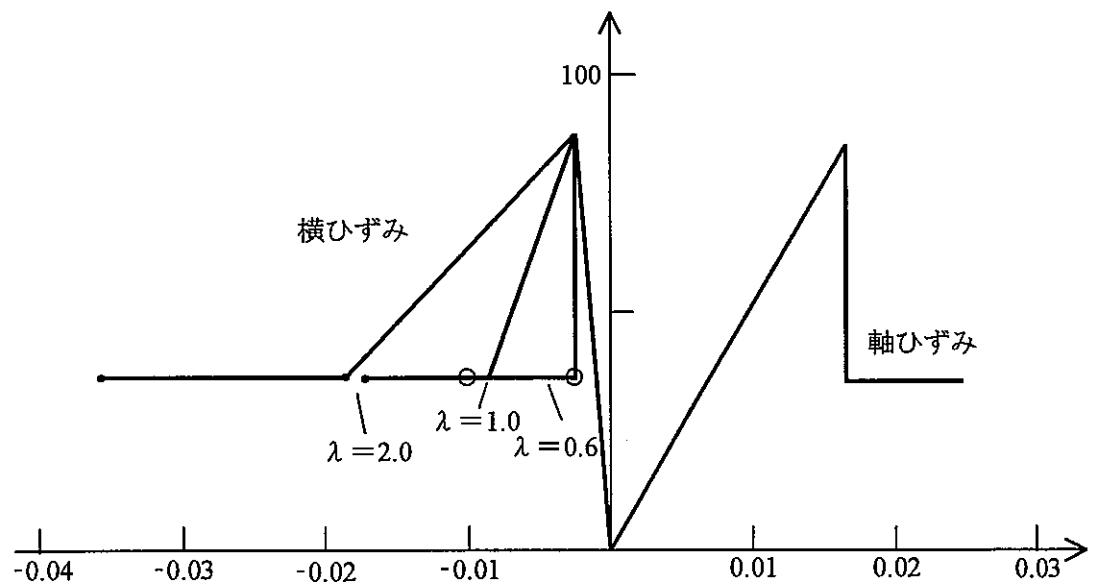


図 4.5 応力-ひずみ線図の形に及ぼすダイラタンシー係数  $\lambda$  の影響。 $\sigma_3=5\text{MPa}$  の場合

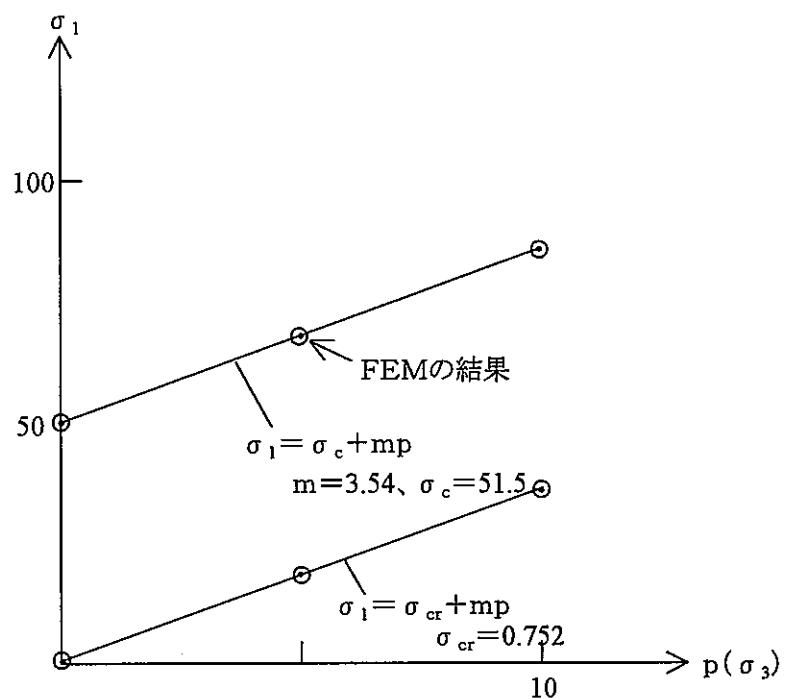


図 4.6 応力-ひずみ線図における応力の最大値と残留強度値のプロット(○印)。  
直線は破壊条件式

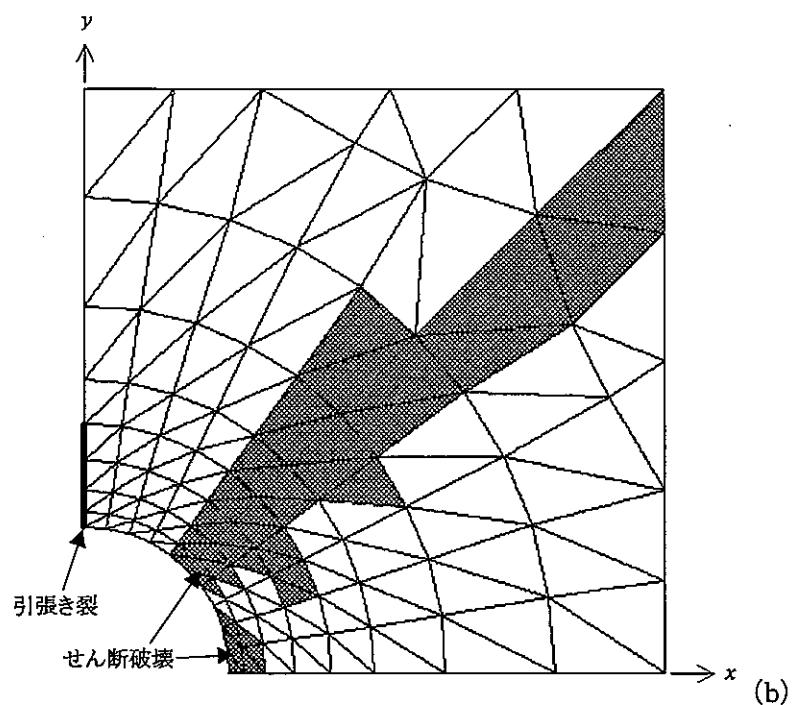
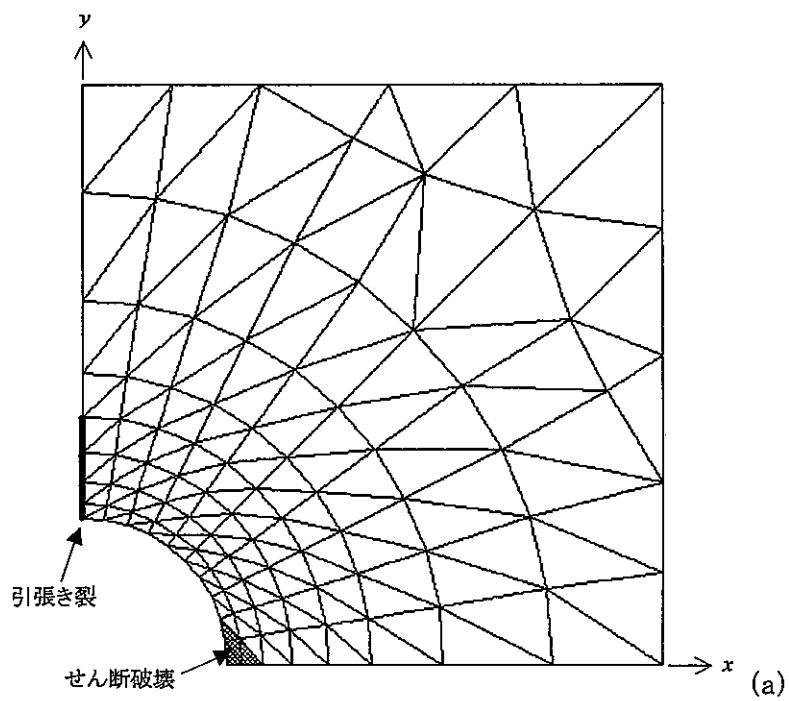


図 4.7 破壊域の発達状況。側方からの拘束圧  $\sigma_3=0$  の場合。  
(a)はステップ 2、(b)はステップ 3 (図 4.9 参照)。

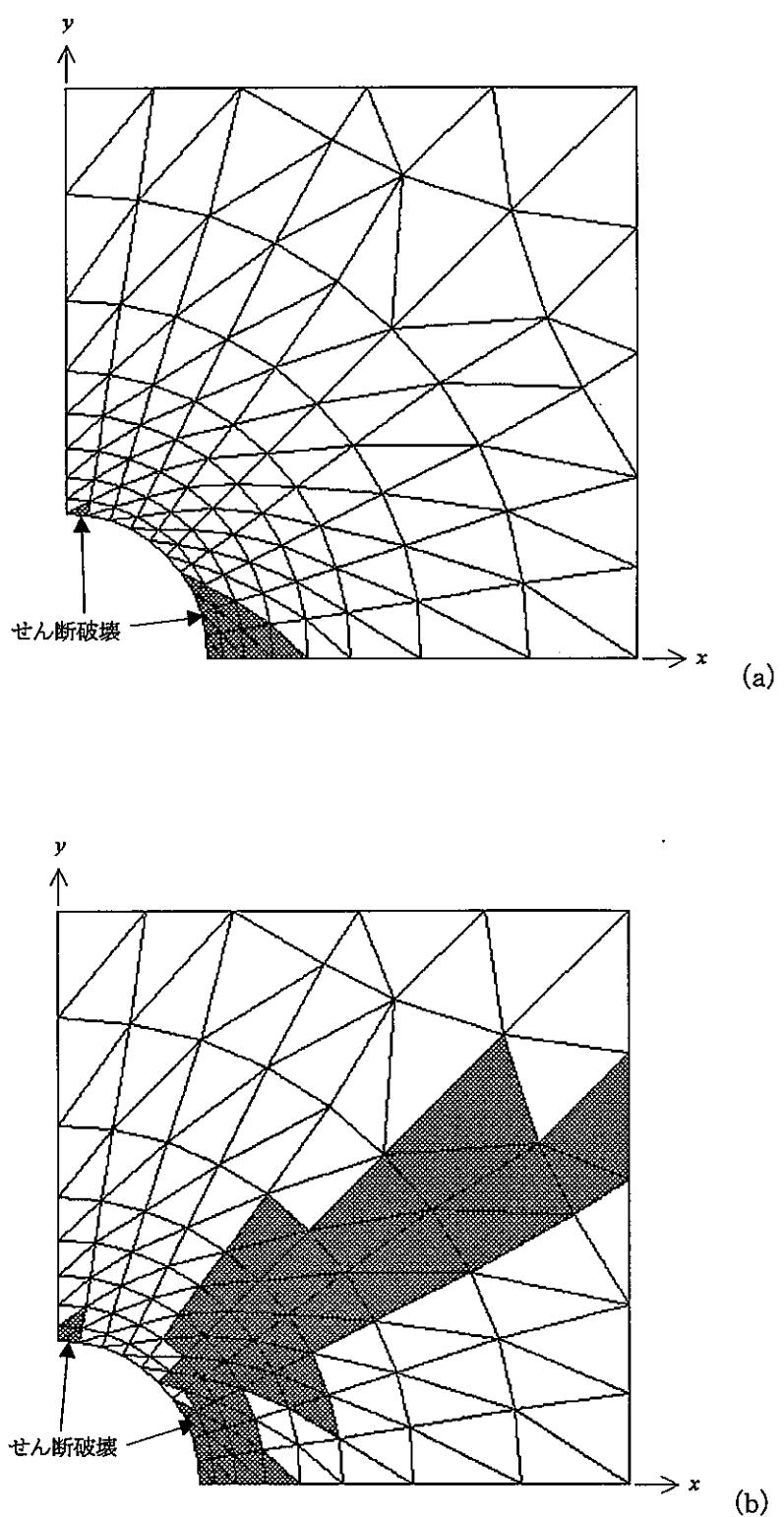


図 4.8 破壊域の発達状況。側方からの拘束圧  $\sigma_3=5\text{MPa}$  の場合。  
(a) はステップ 2、(b) はステップ 5 (図 4.9 参照)。

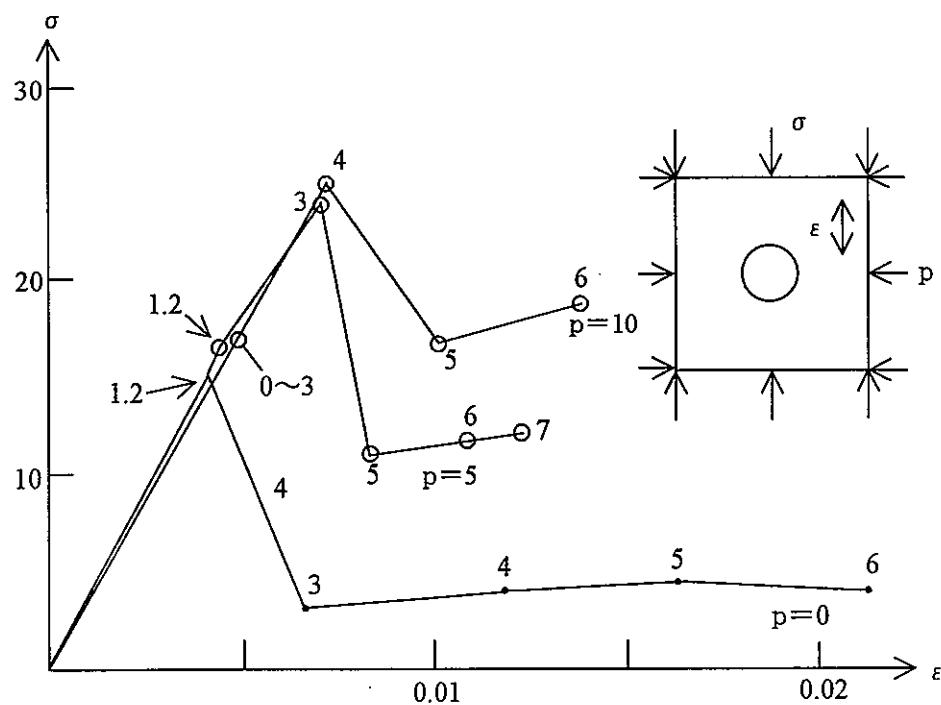
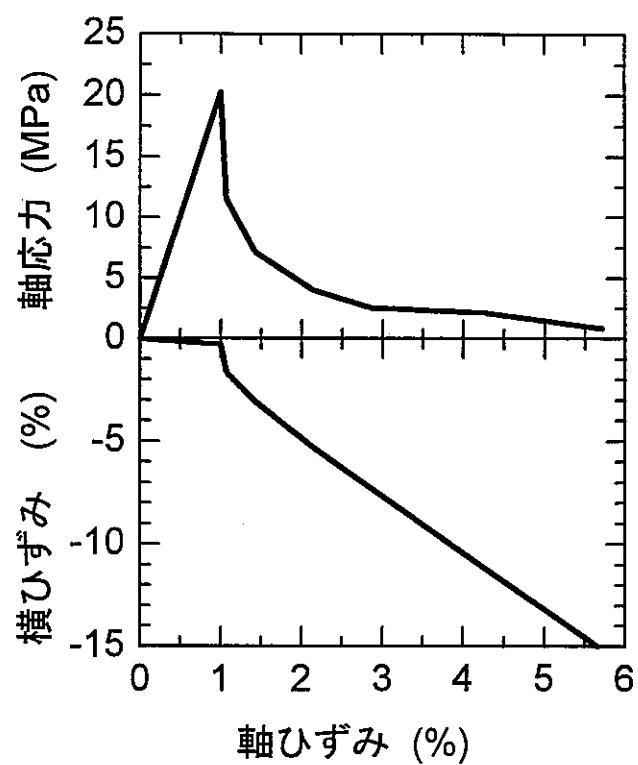
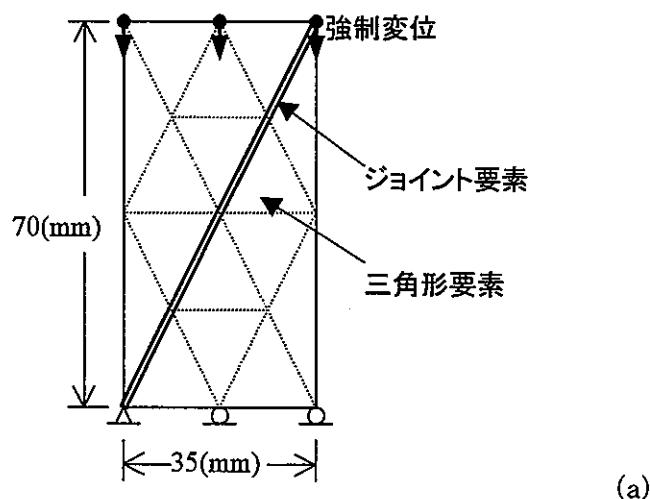


図 4.9 軸応力( $\sigma$ )ー軸ひずみ( $\varepsilon$ )線図に及ぼす側方の拘束圧 $p$ の影響。  
( $p=0, 5, 10$  の場合が示されている)。



(b)

図 4.10 破壊するとせん断面の形成されるモデル (a) を用いた矩形供試体の一軸圧縮。  
(b) がシミュレーションで得られた応力ーひずみ線図である。

## 第5章 結言

本研究では3つのテーマを掲げて研究を実施した。得られた主な成果は以下のようである。

溶結凝灰岩を用いた封圧下の引張試験を中心とした室内試験から、以下の結果が得られた。

- 1)一軸引張試験、封圧下の一軸引張試験とも、供試体中央部で引張破壊が発生するような試験技術を開発した。
- 2)引張強度  $\sigma_t$  は封圧  $p_c$  とともに小さくなり、両者の間には、 $\sigma_t = 0.306p_c - 1.61$  の式があてはまる。

岩盤模型の3軸試験から、以下の結果が得られた。

- 1)最小主応力が小さいと、円孔上下部に引張き裂が生じる。しかし、ブロック側面に作用する最小主応力が 1.0MPa 以上になると引張亀裂は発生しなくなる。
- 2)みかけの軸応力が増すにつれて、円孔の左右側壁に楔状の破壊域が現れる。さらに応力が増すと、この破壊域の先端から1~2本の破面が発達し、模型ブロックを貫通することによりブロックが破断する。

- 3)外に向かって最小主応力はみかけの軸応力ーみかけの軸ひずみ線図に次のような影響を及ぼす。

①最小主応力が大きくなるにつれて、最大主応力の最大値(強度)が増す。

②最小主応力が大きくなるにつれて、みかけの軸応力が最大値に達した後の応力低下量が小さくなり、また、線図の傾きが緩くなる。これらは、いわゆる封圧効果を表している。なお、②の現象は脆性ー延性遷移と呼ばれている。

③最小主応力が僅かでも作用すると、みかけの軸応力の最大値のばらつきが小さくなる。

使用した孔径変化測定器の計測値は、支えるガイドや自重の影響を受けやすいことがわかった。この改良は今後に残されている。

パソコンで動く弾塑性解析コードを開発し、これを用いて行なったシミュレーションから以下の結果が得られた。

- 1)破壊の発生場所と破壊のタイプは模型実験結果と一致した。すなわち、最小主応力が小さいと、円孔上下部に引張亀裂が生じるが、最小主応力が 1.0MPa 以上になると引張亀裂は発生しなくなること、また、せん断破壊域は空洞側壁に生じること、この破壊域から外に向かって斜めに巨視的なせん断亀裂が発生しブロックを貫通すること、などがわかった。
- 2)最小主応力が大きくなるにつれて、最大主応力の最大値(強度)が増すこと、破壊前のみかけの応力ーひずみ線図の傾きは小主応力の大きさに依存せず一定であることが確認されたが、これらは模型試験で得られた結果と一致する。

### 参考文献

- 宮村撮三 編地震・火山・岩石物性、(1987)掌華房  
山口梅太郎・西松祐一、(1991)、岩石力学入門(第3版)、東京大学出版会、  
稲田善紀、(1997)、岩盤工学、森北出版株式会社  
富家孝明、(1999)、北海道大学卒業論文、載荷径路が岩石の強度・変形特性に及ぼす影響  
Goodman,R.E.(1978)、不連続性岩盤の地質工学(訳)、森北出版  
土質工学会編、(1974) 岩の工学的性質と設計・施工への応用、土質工学会