

地層処分坑道周辺の精密な応力評価に関する研究(I)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究報告書)

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
8	ZJ1600 97-003	97.7.17.

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1997年3月

北海道大学工学部

石島 洋二

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

限定資料

P N C Z J 1 6 0 0 9 7 - 0 0 3

1997年3月

地層処分坑道周辺の精密な応力評価に関する研究（I）

石島 洋二*

要旨

地下深部では大きな地圧が発生しているが、ここに地層処分のための坑道を建設すると、その周辺の岩盤内には、大きな差応力を持つ応力状態が誘起される。この状態の下で、弾性波速度の低下や透水係数の増大に象徴される岩盤のひび割れの進行、あるいは破壊発生などがあるたらされる。このような状態の変化は、岩盤に期待される天然バリアの性能を低下を招く。

深部坑道周辺の岩盤の性能低下を定量的に評価するシステムを構築することが本研究の最終目標である。このために段階を踏んで研究を実施することにした。本研究の初年度に当たる本年度は、次のような研究を実施する。

- 1) 岩石の新しい破壊条件式の検証とこれに基づく岩石の構成式の導出
- 2) 岩石の新しい破壊条件式を考慮した応力解析方法の開発
- 3) 空洞周辺の岩石の破壊に関する模型実験の実施と数値解析の比較

得られた主な知見は以下のようである。

(1) 模型試験の岩盤模型となる凝灰岩の物性値は以下のようであった。すなわち、ヤング率5200MPa、ポアソン比0.05、粘着力4.5MPa、内部摩擦角41°、圧裂引張強度3.2MPa、一軸引張強度1.3MPa。

(2) 模型試験では、1もしくは2個の円孔を持つ岩盤模型の単軸圧縮試験を行い、発生する破壊を観察した。孔が1個の場合、大型かつ縦長の模型においては、破壊の初生箇所は孔の天井・床面であった。このき裂はそのまま載荷方向に成長して供試体を貫通した。小型かつ横長の模型においては、破壊の初生箇所は孔の

* 北海道大学工学部・資源開発工学科・岩石力学講座

側壁であった。

孔が2個の場合、破壊の初生箇所は孔間隔に依存し、孔間隔が狭いときにはピラー側の孔側壁に一致した。この破壊の形態は、壁面に平行な薄い剥離が発生したので、せん断型というよりは引張型に近いと解釈できる。

(3) 模型の最終的な破断はき裂が供試体を貫通することによってもたらされ、かつ、緩み域と呼ばれるような破壊域の形成は認められなかった。

(4) 有限要素法に基づく数値解析を模型試験に対して実施し、破壊に関する実際と予測の程度を検討した。その結果、き裂の初生位置はMohr-Coulomb説による予想と一致することがわかった。ただし、破壊の形態は限界引張ひずみ説に近く、いずれの説によっても模型試験結果を完全に説明するのは困難であることがわかった。

(5) 大型模型と小型模型では、境界条件によっては破壊の初生箇所と破壊形態に差異が現れた。この差異は岩石の不均質性に基づくもので、いわゆる寸法効果として説明することが可能である。

(6) 稲田花崗岩を単軸圧縮試験に供し、周ひずみが-0.05~-0.35%になった時点で除荷した。P波速度の測定から以下の諸点が明らかになった。

- a) 載荷方向のP波速度には載荷の影響はほとんど認められない。
- b) 半径方向のP波速度は載荷に伴い減少する。
- c) 半径方向のP波速度のうちハードウェイ面に直交する方向のP波速度はグレイン面に直交するものよりも常に大きい。

(7) また、供試体表面のレプリカの顕微鏡下における観察から以下の諸点が明らかになった。

- a) き裂密度は供試体中心よりも側面付近の方が大きい。
- b) き裂密度は載荷に伴い増加する。
- c) リフト面においてハードウェイ面よりもグレイン面と平行なき裂密度のほうが大きい。
- d) P波速度とき裂密度の関係の間には測定方向に依存しない直線的な関係が認められる。

目 次

第 1 章	緒言	1
1 . 1	研究の目的と意義	1
1 . 1 . 1	岩石の新しい破壊条件式	1
1 . 1 . 2	新しい岩石の破壊条件式を考慮した応力解析方法の開発	2
1 . 1 . 3	岩石の新しい破壊規準と応力に基づく既往の破壊条件 (Mohr-Coulombの条件) の比較および構成式	2
1 . 1 . 4	空洞周辺の岩石の破壊に関する模型試験の実施と数値解析 の比較	3
1 . 2	本研究の内容	3
第 2 章	凝灰岩の強度・変形特性	6
2 . 1	供試岩石	6
2 . 2	凝灰岩の強度・変形特性	6
2 . 2 . 1	供試体	6
2 . 2 . 2	単軸圧縮試験結果	6
2 . 2 . 3	三軸試験結果	7
2 . 2 . 4	圧裂引張試験結果	8
2 . 2 . 5	一軸引張試験結果	8
2 . 2 . 6	破壊条件	8
2 . 2 . 7	破断の様相	8
第 3 章	模型試験	21
3 . 1	概説	21
3 . 2	供試模型と試験方法	21
3 . 3	模型試験結果	21
3 . 3 . 1	供試体 A 1 の結果	21
3 . 3 . 2	供試体 B 1 の結果	23
3 . 3 . 3	供試体 A 2 の結果	23
3 . 3 . 4	供試体 C 1 の結果	24
3 . 3 . 2	供試体 D 1 の結果	24

3.3.3	供試体D2の結果	24
3.4	模型試験結果のまとめと考察	25
第4章	数値解析に基づく模型試験結果の解釈	39
4.1	概説	39
4.2	弾性解析に基づく岩盤模型試験結果の解釈	40
4.2.1	破壊限接近度と最小主ひずみ（最大引張ひずみ）	40
4.2.2	模型A1、A2（またはD1、D2）の結果とその解釈	40
4.2.3	模型B1、C1の結果の解釈	42
4.2.4	円孔上下部の引張き裂を規制する条件	42
4.3	まとめ	43
第5章	岩石の破壊過程と微視的構造の変化	51
5.1	はじめに	51
5.2	供試岩石	51
5.3	応力-ひずみの関係	52
5.4	P波速度の測定	52
5.5	き裂の観察	52
5.5.1	レプリカの作製方法	52
5.5.2	観察方法	53
5.5.3	観察結果	53
5.5.4	き裂密度	53
5.5.5	P波速度とき裂密度	53
5.6	まとめ	
第6章	結言	64
参考文献		66

1.1 研究の目的と意義

地下深部では大きな地圧が発生しているが、ここに地層処分のための坑道を建設すると、その周辺の岩盤内には、大きな差応力を持つ応力状態が誘起される。この状態の下で、弾性波速度の低下や透水係数の増大に象徴される岩盤の劣化や破壊発生などがもたらされる。このような状態の変化は、岩盤に期待される天然バリアの性能を低下を招く。

深部坑道周辺の岩盤の性能低下を定量的に評価するシステムを構築することが本研究の最終目標である。このために段階を踏んで研究を実施することにした。本研究の初年度に当たる本年度は、次のような研究を実施する。

- 1) 岩石の新しい破壊条件式の検証とこれに基づく岩石の構成式の導出
- 2) 岩石の新しい破壊条件式を考慮した応力解析方法の開発
- 3) 空洞周辺の岩石の破壊に関する模型実験の実施と数値解析の比較

以下に各項目について説明する。

1.1.1 岩石の新しい破壊条件式

既往の岩石・岩盤の破壊条件は、普通、応力で記述されている。Mohr-Coulomb式がその代表的なものである。しかし、この破壊条件は、地下岩盤空洞の力学的な安定性を評価・監視する際にはあまり使われない。それは下記の理由による。

- a) 岩盤の強度のパラメタ c (粘着力)、 ϕ (内部摩擦角) を正確に求めるのが困難である。
- b) 破壊に対する岩盤の安全度を評価するには、岩盤内各部の応力状態を知る必要があるが、この測定は極めて難しい。
- c) 例え応力が計測できたとしても、この情報だけでは岩盤内部の劣化の状態が不明であり、それを知るには別途、計測をする必要がある。この背景には、或る大きさの応力状態に対して、破壊している場合としていない場合の2通りの状態を取り得るという岩盤の持つひずみ軟化特性に依拠する特殊性がある。

地下発電所のような大規模地下空洞の建設に際して、力学的な安全管理に、しばしば、空洞壁の軸ひずみが計測され、その大きさが判断規準に使われる。このひずみは設計にも使われる。植田(1997)は破壊の限界の指標として、せん断ひずみ値と引張応力値を用いている。前者は桜井(1982)の提案によるものである。

ひずみは岩石、岩盤の両方で比較的簡単・確実に測定できる唯一の測定量である。現在、岩盤の力学的な安定性の管理にはこのひずみが使われており、ひずみ

量が経験的に決められたある限界値に達すると危険と判断している。また、岩盤のひずみは劣化の進行とともに単調に増加するので、ひずみだけで岩盤の力学的状態が判断できる。

筆者らは、ひずみに基づいた岩石の破壊規準を提案している(藤井他, 1994)。この規準は、岩石が負担する差応力が最大値に達したときの圧縮ひずみの最小値(伸びの最大値) ϵ_{crit} に着目するもので、この値が載荷条件に依存せずほぼ一定であることから、これを破壊規準として使おうとするものである。この場合、破壊条件は次のように表現できる。

$$\epsilon = \epsilon_{\text{crit}}$$

少なくとも、室内試験規模では、この破壊条件の妥当性が検証されつつあり、また、岩石の劣化の進行がこのひずみ成分と正の相関関係にあることが確認されつつある。

この破壊基準は、空洞の力学的な安定性に関する評価に容易に応用することができる。なぜならば、本基準においては、地下空洞の半径方向のひずみ成分の大小に着目することになるが、この測定は、現在、地下空洞の標準的な測定項目になっているからである。

そこで、岩盤の新しい破壊規準を次の研究に応用することを本研究の目標にする。

- a) 新しい破壊規準に立脚した岩盤の応力解析手法の開発
- b) 破壊条件を満たした領域の劣化進行に関する観察手法と評価手法の開発
- c) 地下空洞の安定性に関する管理システムの構築

1.1.2 新しい岩石の破壊条件式を考慮した応力解析方法の開発

上記の新しい破壊条件を考慮した弾塑性応力解析手法を開発し、この方法で地下空洞の安定性評価を解析できるようにする。数値解析手法としては、有限要素法を応用する。

本年度は、模型試験で得られた空洞周辺の破壊の初生が、新しい岩石の破壊基準で説明可能か否かを検証する。

1.1.3 岩石の新しい破壊規準と応力に基づく既往の破壊条件(Mohr-Coulombの条件)の比較および構成式

岩石が破壊強度点まで弾性的に挙動すると仮定し、新しい破壊規準を応力で表現すると Mohr-Coulomb 式に一致する。

構成式については、現在、圧縮ひずみが最小になる方向の剛性がひずみの増加にともない低下するという仮定の下に、一般化された形式の導出を進めていると

ころである。慣用三軸試験で実現される応力状態に対応した構成式は、クラスⅡを含むひずみ軟化材として表現されること、また、強度の封圧効果も表現されていることを確認している（Mohr-Coulomb式とは異なるが、封圧の増加につれて最大軸応力が増加する。図1.1参照）。この式の特徴は、新しい破壊規準が満たされていることである。

バネの連結した構造体の解析から導かれる構成式においても、新しい破壊規準が満たされているが、これに基づく円孔周囲の応力分布は、従来のMohr-Coulomb式に基づくものよりも実測とよく合っているという報告がある（図1.2）。

1.1.4 空洞周辺の岩石の破壊に関する模型実験の実施と数値解析の比較

凝灰岩を供試岩石として、幾つかの模型について2軸載荷試験を行い、発生する破壊の検出方法について検討するとともに、数値解析結果と比較し、新しい岩石の破壊基準が破壊の予測にどの程度有用かについて検証する。

1.2 本研究の内容

第2章では、供試岩石である凝灰岩の力学的特性についての試験結果を述べる。凝灰岩は比較的均質で、岩石の一般的な性質を備えており、入手しやすいという特徴がある。なお、相似比の観点から、実岩盤では中硬岩～硬岩を想定することになる。

第3章では、凝灰岩を用いた模型試験の方法と結果について述べる。模型は小型と大型の2種を準備した。小型模型では、多数の試験が行えるものの、空洞の寸法が小さくなるので、観察や測定に制約がつきまとう。大型模型は小型模型と逆の長所・短所がある。そこで、2種を実施し、互いの短所を補うことにした。

第4章では、模型試験で得られた破壊の初生と成長がどの程度予測できるかについての検討結果について述べる。破壊条件としては、Mohr-Coulombの仮説と限界ひずみ説の2つを採用し、どちらか破壊条件として正確かを比較することに主眼をおいた。

第5章では、最大引張ひずみ成分が岩石の破壊進行（劣化進行）の指標になり得るか否かに関する検討を、花崗岩を用いて実施した研究について述べた。

第6章は結論で、本研究で得られた知見を纏めた。

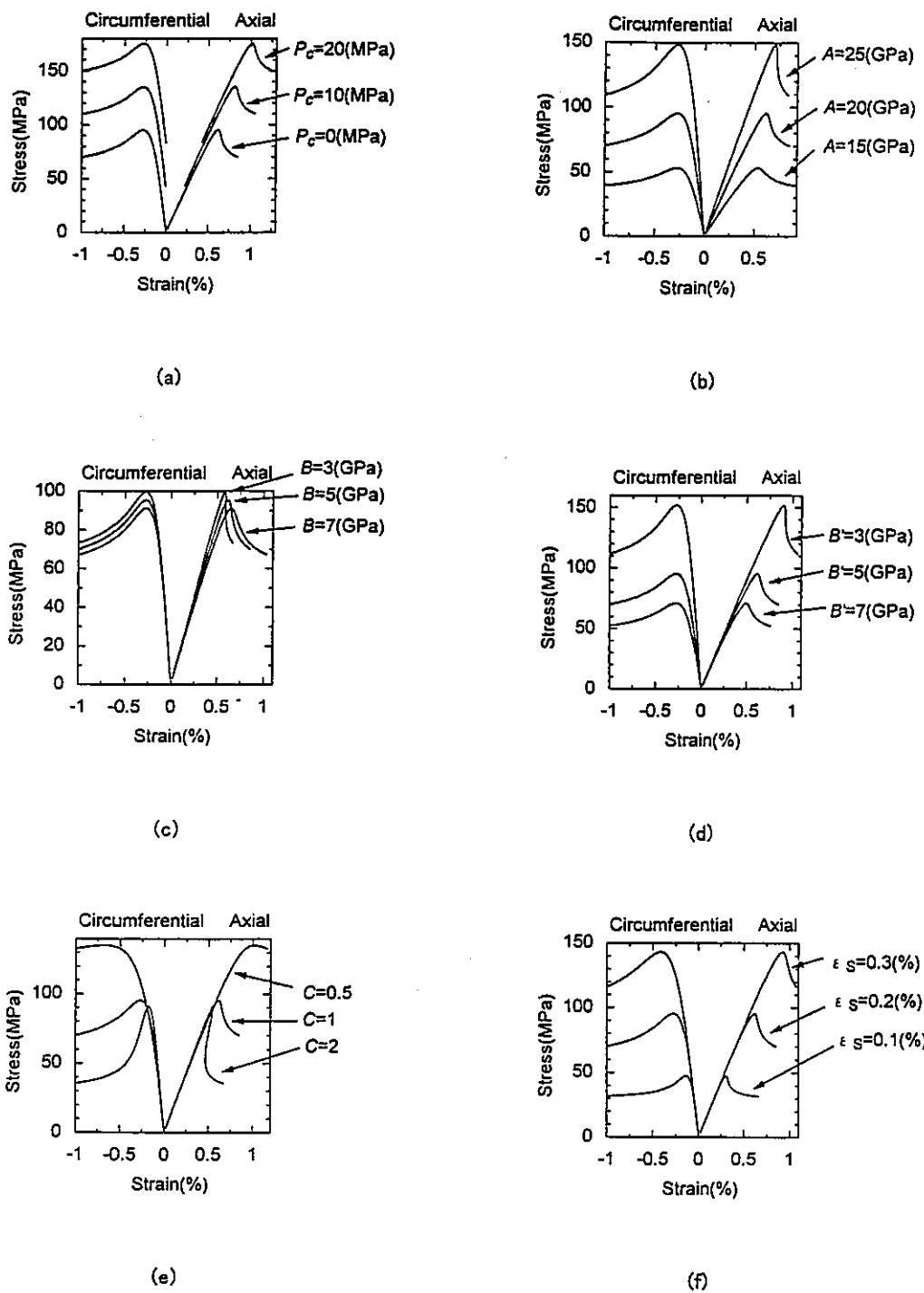
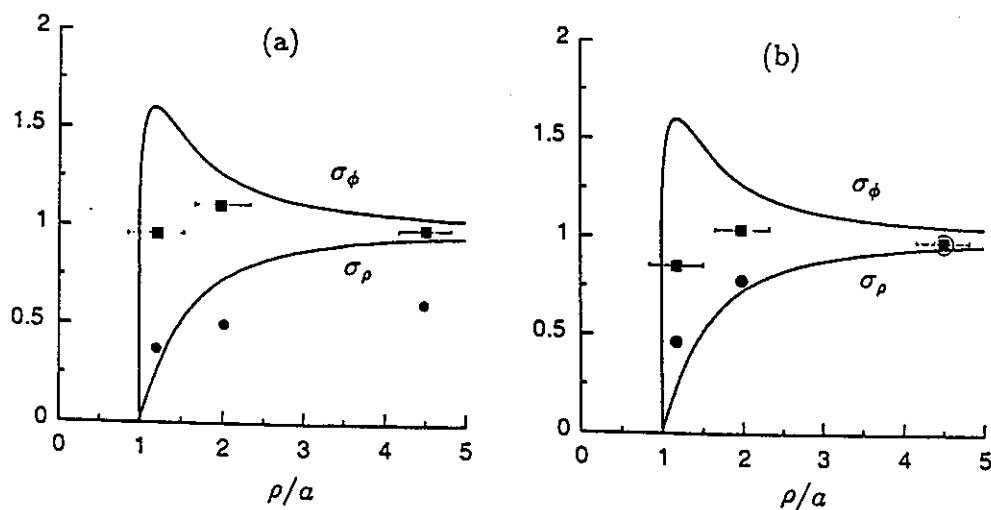


図 1.1 新しく提案された構成式に基づいて作製された岩石の応力-ひずみ線図。
 (a) は封圧の効果を示したもので、軸応力が最大値を取るときの周ひ
 ズみは封圧の大きさによらず一定（値は伸び）になっていることに注意。

Bore No.1



Bore No.2

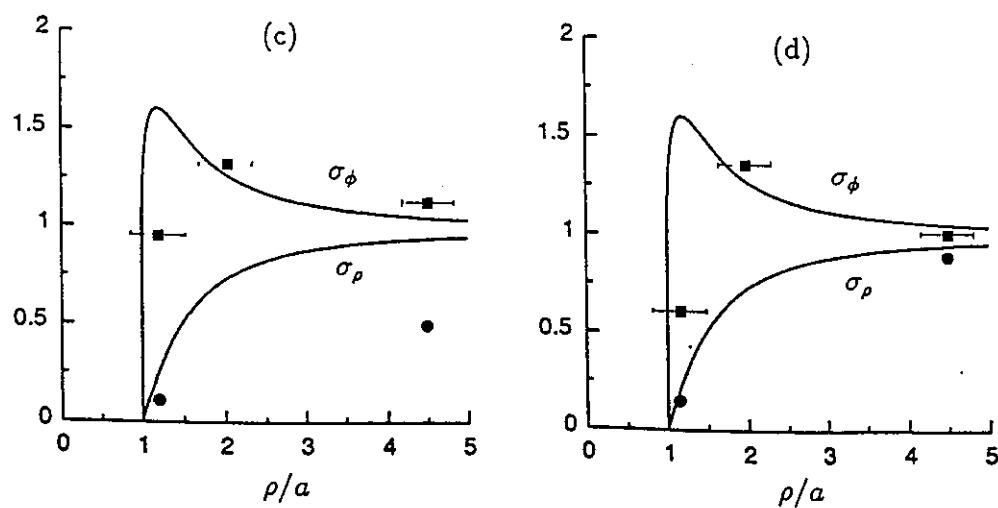


図 1.2 坑道周囲の応力状態。

第2章 凝灰岩の強度・変形特性

2.1 供試岩石

札幌市常盤周辺には第四紀の熔結凝灰岩地層が分布しており、現在、1箇所で採石を稼工している。供試岩石はこの採石場から、 $50 \times 50 \times 30\text{cm}$ のブロックとして入手した。当該凝灰岩は、通常、札幌軟石と呼ばれ、建材等に使用されているが、ここでは単に凝灰岩と呼ぶことにする。

2.2 凝灰岩の強度・変形特性

凝灰岩の強度・変形特性を調べるために以下の試験をした。

- 1) 単軸圧縮試験
- 2) 三軸試験
- 3) 圧裂試験
- 4) 一軸引張試験

2.2.1 供試体

単軸圧縮、三軸、一軸引張の各試験には、直径 $30\text{mm} \times$ 長さ 60mm の供試体、圧裂試験には、直径 $30\text{mm} \times$ 長さ 30mm の供試体を用いた。

供試体の作成方法は以下のようである。まず、ダイヤモンドカッターを使ってブロックを扱いやすい大きさに加工し、ボーリングマシンを用いて直径 30mm のコアを抜き出した後、カッターで切断し、平面研削盤によって両端面の平滑度と平行度を出した。整形後の供試体は恒温槽内に 80°C で24時間放置した後、デシケータ中に保存した。

2.2.2 単軸圧縮試験結果

載荷には、インストロン社製材料試験機(5586型、最大荷重 300kN 、機械式)を用い、載荷速度は、 0.5mm/min とした。軸ひずみ、周ひずみは、それぞれ、伸び計(定格± 1nm)、チェーン式周方向ひずみ計(定格± 5nm 、いずれもインストロン社製)によって計測した。データは、記録用パソコンのハードディスクに記録した。

得られた応力-ひずみ線図の一例を図2.1、2に示す。また、ヤング率、ポアソン比は表2.1のようになった。

表中の e_{ac} 、 e_{lc} はそれぞれ応力が最大値を取ったときの軸ひずみ（限界軸ひずみ）、周ひずみで、後者が限界ひずみである（ひずみは縮みを+としている）。限界ひずみの平均値は 0.04%（伸び）で、比較的ばらつきは小さい。

2.2.3 三軸試験結果

使用した 3 軸装置の模式図を図 2.3 に示す。三軸試験の手順は以下のようである。

- (1) 過重とクロスヘッド変位のバランスをとる。
- (2) 封圧に対応する軸圧を与える。
- (3) 油圧ポンプにより封圧を与える。
- (4) 軸圧を与える。

封圧は、10, 20, 30, 40 MPa の 4 種とした。

一群の供試体については荷重とクロスヘッド変位のみを測定した。別の群の供試体については、周ひずみを測定するために供試体の中央部において周方向にゲージ長 20mm の抵抗線ひずみゲージ 2 枚を左右対称に貼付した。得られた応力 - ひずみ線図の一例を図 2.4、5 に示す。

最大軸応力 σ_{max} と封圧 p_c の関係は図 2.6 のようになり、Mohr-Coulomb の破壊条件に従っていることがわかる。

測点を直線に当てはめると、直線：

$$\sigma_{max} = q_u + c' p_c$$

の 2 つの定数、 q_u （単軸圧縮強度）と c' は、それぞれ

$$q_u = 19.6 \text{ (MPa)} , c' = 0.211$$

となる。

この式を、 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ に対応させると、内部摩擦角 ϕ は

$$\begin{aligned}\phi &= \sin^{-1}(c'/\sigma_{max}) \\ &= 40.6^\circ\end{aligned}$$

また、粘着力 c は

$$\begin{aligned}c &= (q_u/2) \tan\{(90^\circ - \phi)/2\} \\ &= 4.50 \text{ (MPa)}\end{aligned}$$

となる。

軸応力が最大に達したときの周ひずみの値、すなわち、限界ひずみと封圧の関係を図 2.7 に示す。値はばらついているものの封圧には依存せず、封圧が大きくて伸びを示しているのが注目される。平均値は 0.015%（伸び）である。

2.2.4 圧裂引張試験結果

試験で得られた荷重-載荷方向の両端面間の変位線図の一例を図2.8、9に示す。圧裂引張強度は表2.2のようになった。

2.2.5 一軸引張試験結果

円柱状供試体の両端を直径5mmのワイヤーで引張る一軸引張試験を実施した。図2.10はその測定方法を示したものである。測定時には、供試体の中央部に貼付した2枚のひずみゲージによるひずみの他に、供試体表面の2つの粒子を標点としこれをCCDカメラで観察することによる変位を計測した。

得られた一軸引張応力-軸ひずみ軸線図を図2.11、12に示す。軸応力が最大値をとったときの軸ひずみ、すなわち限界ひずみの平均値は、0.02%（伸び）である。

2.2.6 破壊条件

単軸圧縮試験、三軸圧縮試験、単軸引張試験の3つの異なる試験で、札幌軟石の限界ひずみは0.02~0.04%（伸び）と評価された。

当岩石はMohr-Coulombの破壊条件式も満たしている。したがって、破壊条件式だけからいえば、2つの破壊条件式のいずれを使っても差し支えないことになる。

なお、Mohr-Coulombの破壊条件式を用いる場合には、 c （粘着力）、 ϕ （内部摩擦角）、 σ_t （引張強度）の3つのパラメータが必要である。これに対して、新しい破壊規準の場合には、 ϵ_{crt} （限界ひずみ）の1つのパラメータしか必要としない。

2.2.7 破断の様相

試験に供した封圧の範囲内では、単軸圧縮・三軸圧縮試験のいずれの場合にも、破壊モードとして单一せん断型と縦割れ型の2形態が現れた（図2.13参照）。の破壊形態が得られた。

図2.14aは、典型的な单一せん断型の破壊モードを示した供試体をダイヤモンドカッターで縦に切断して得られた中心軸を通る断面の様子である。図b、cは破断面の一部であるが、破断面の周囲に載荷軸に平行なき裂がいくつか見られる他に、破断面自体にも同様のき裂が見られ、破断面はこれらをつなぐように発達している様子が認められる。縦割れの破壊モードは、載荷軸に平行なき裂の内で優勢なものが発達し供試体を貫通することによって形成されたものであろう。こうしてみると、載荷過程の初期の段階において、多数の載荷軸に平行な開口き裂が発生し、載荷荷重の増加とともに、それらが合体してせん断面を形成するか、

あるいは優勢なき裂がそのまま成長したかすることによって、破断に至ったと解釈される。このことは里の予測(1994)と一致するものである。

表 2.1 凝灰岩の圧縮強度 q_u 、ヤング率E、ポアソン比 ν

表2.1 凝灰岩の圧縮強度 q_u 、ヤング率E、ポアソン比 ν

	q_u (MPa)	E(GPa)	ν	$e_{ax}(\%)$	$e_{la}(\%)$
供試体1	19.5	5.7	0.04	0.74	-0.04
供試体2	18.0	4.7	0.03	0.62	-0.01
供試体3	22.5	5.4	0.07	0.74	-0.06
供試体4	19.5	5.2	0.11	0.67	-0.04
平均	19.9	5.3	0.06	0.69	-0.04

表 2.2 凝灰岩の圧裂引張強度

表2.2 凝灰岩の圧縮強度

	最大荷重(N)	圧裂引張強度(MPa)
供試体1	4749	3.5
供試体2	4612	3.3
供試体3	4945	3.5
供試体4	4765	3.4
供試体5	4264	3.0
供試体6	4133	2.9
平均	4578	3.3

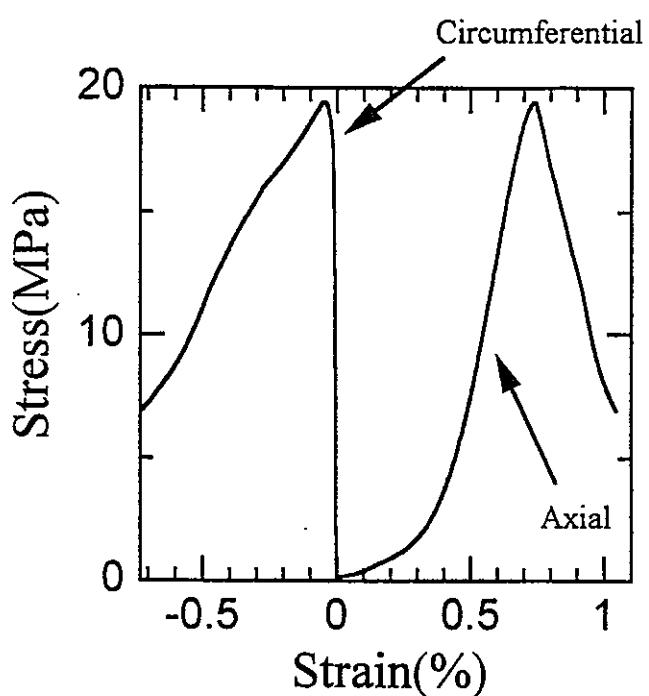


図 2.1 単軸圧縮載荷で得られた供試体 1 の応力－ひずみ線図

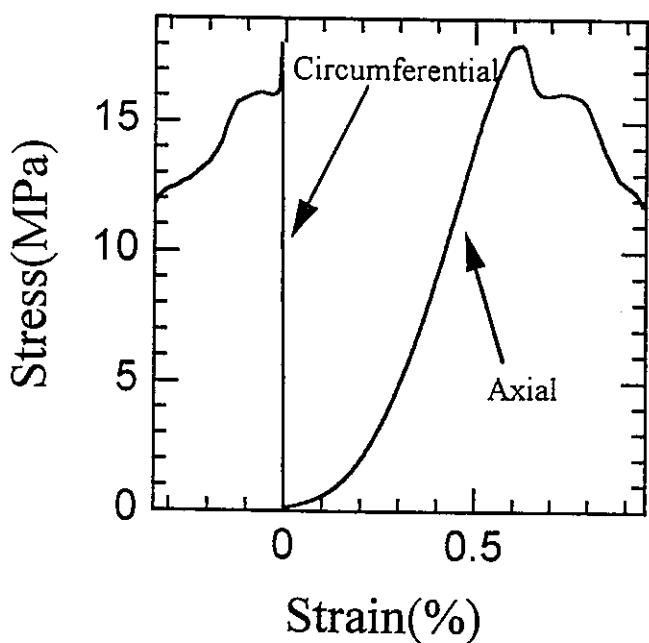


図 2.2 単軸圧縮載荷で得られた供試体 2 の応力－ひずみ線図

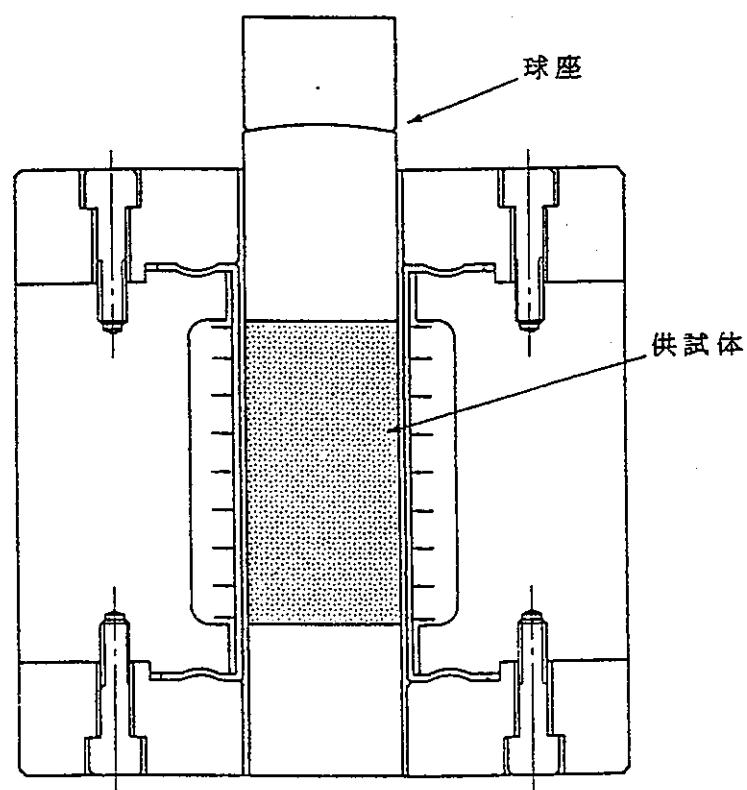


図 2.3 三軸圧縮試験で用いた圧力容器

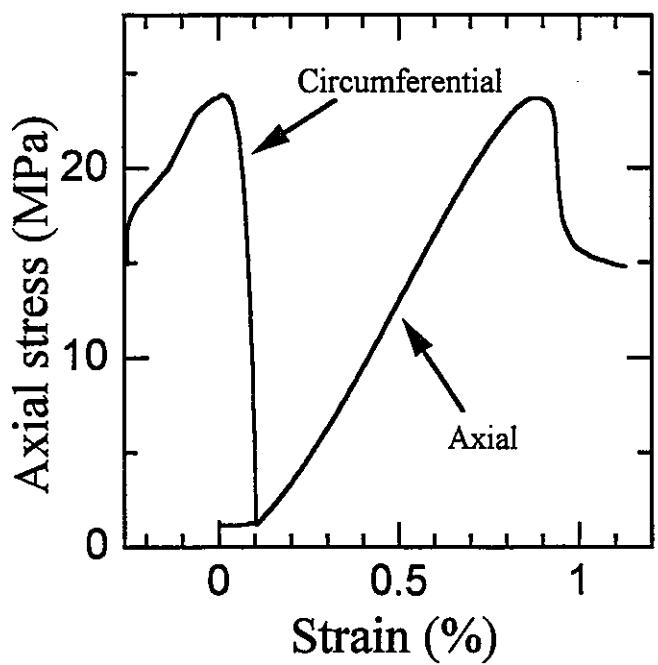


図 2.4 三軸圧縮載荷で得られた供試体 1 の応力－ひずみ線図（封圧 1MPa）

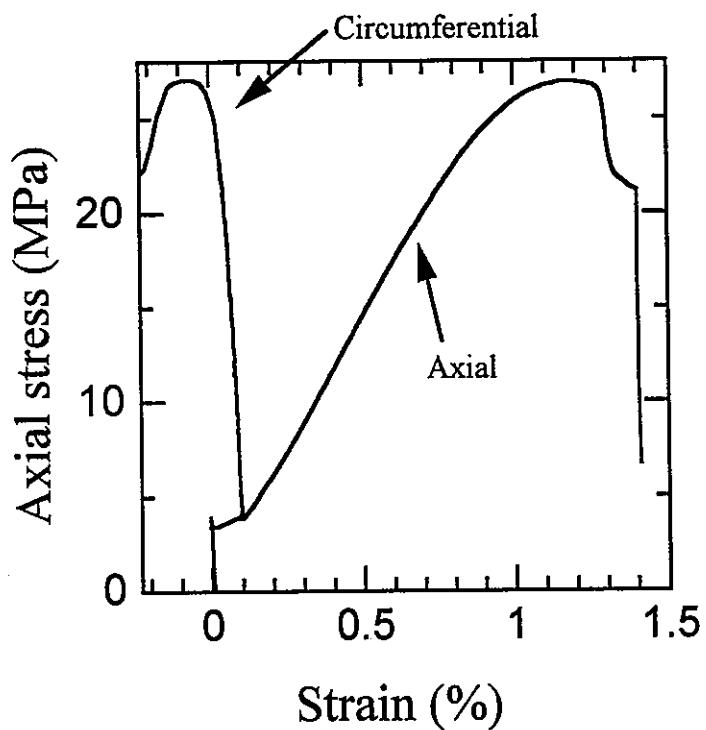


図 2.5 三軸圧縮載荷で得られた供試体 2 の応力－ひずみ線図（封圧 4MPa）

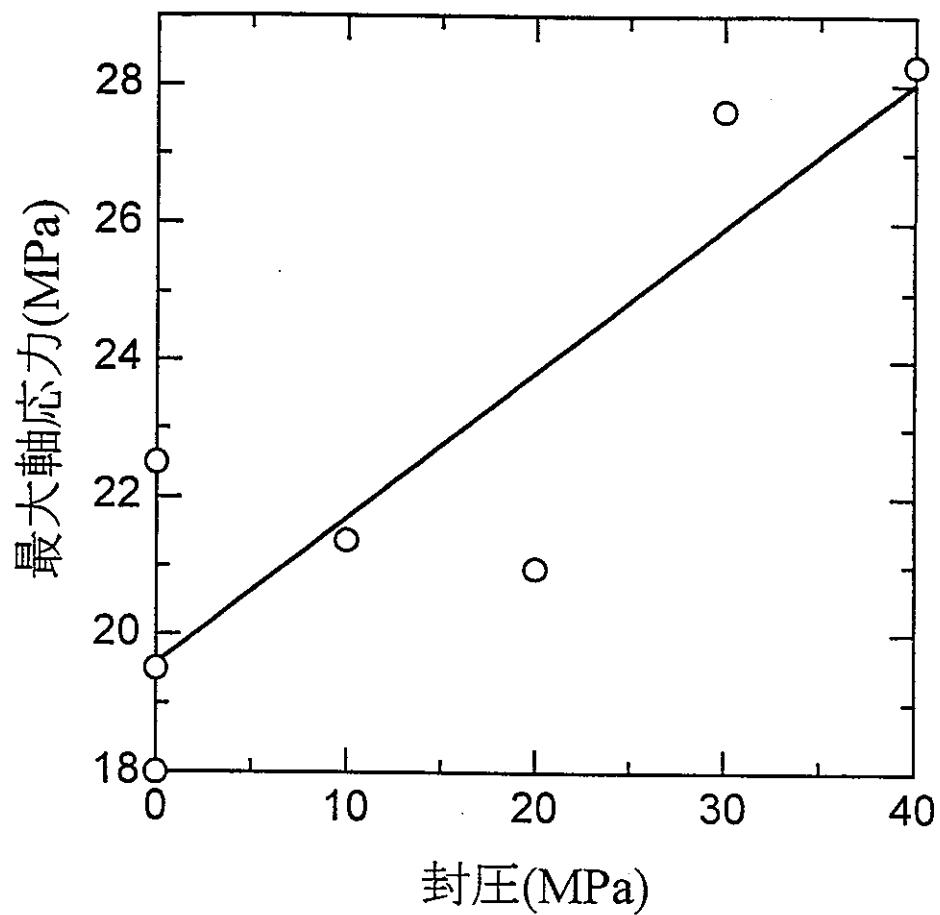


図 2.6 最大の軸応力と封圧の関係

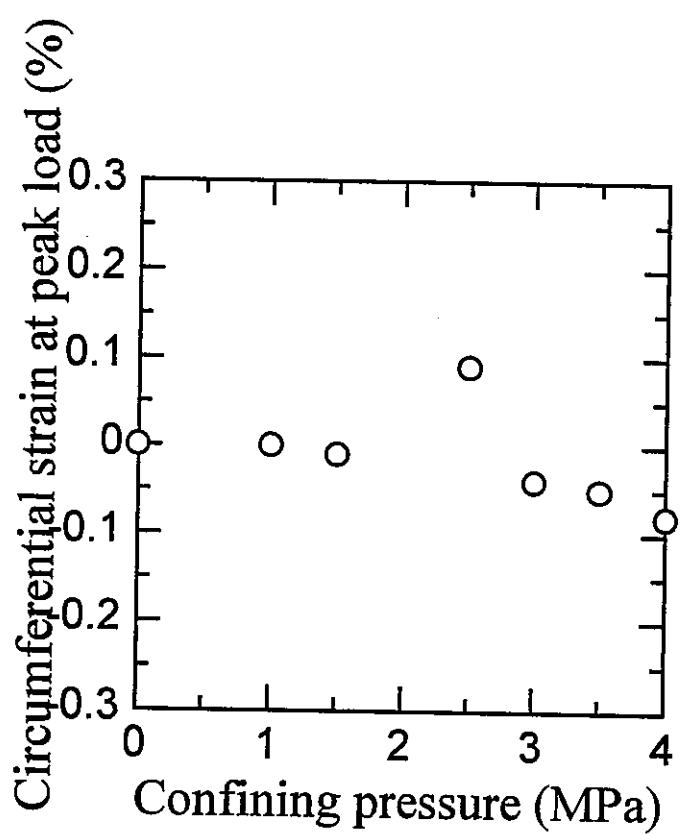


図 2.7 限界ひずみと封圧の関係

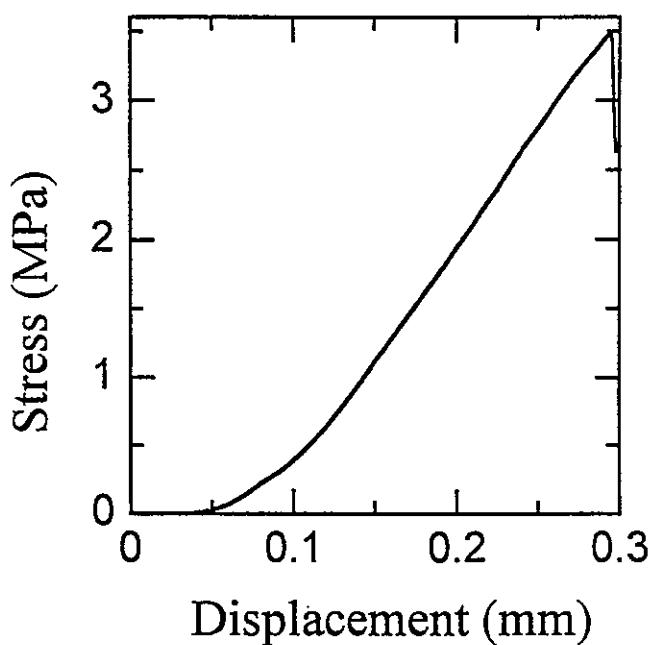


図 2.8 圧裂載荷で得られた供試体 1 の応力 - 軸方向変位線図

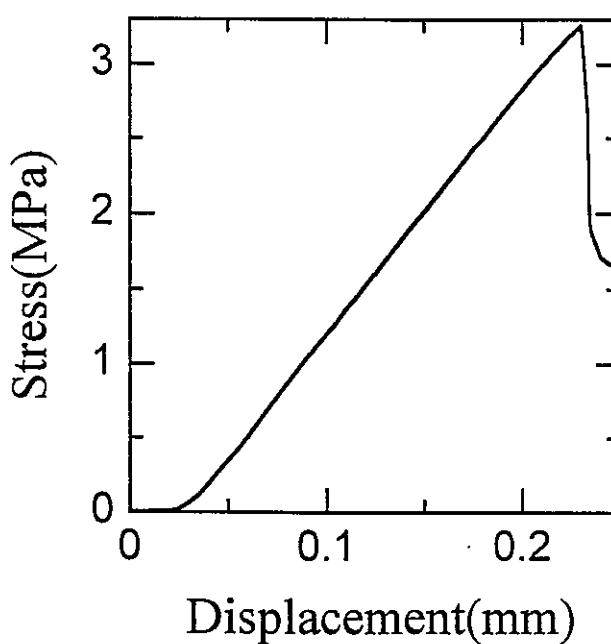


図 2.9 圧裂載荷で得られた供試体 2 の応力 - 軸方向変位線図

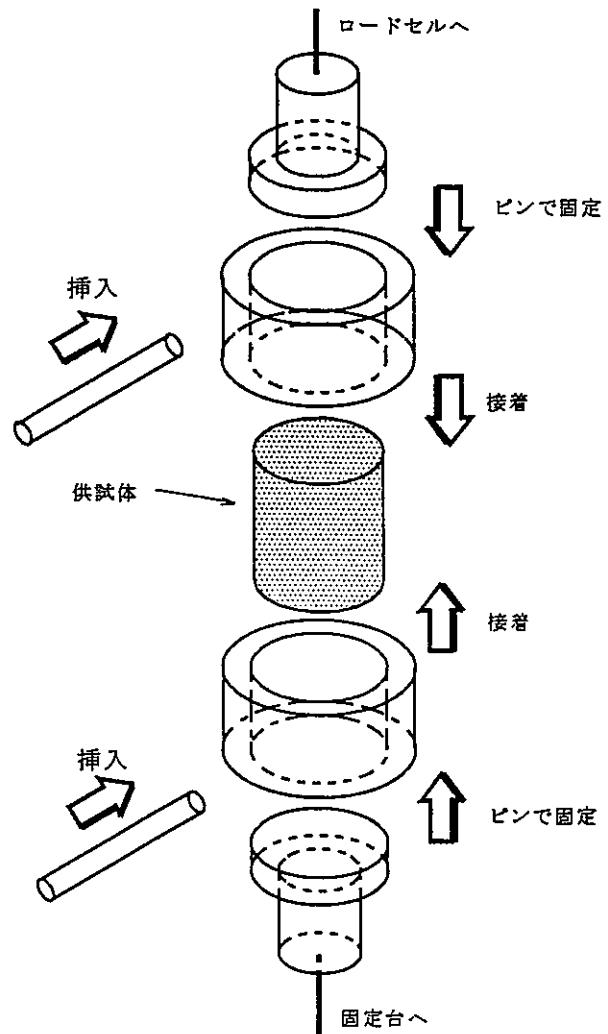


図2.10 一軸引張載荷試験の模式図

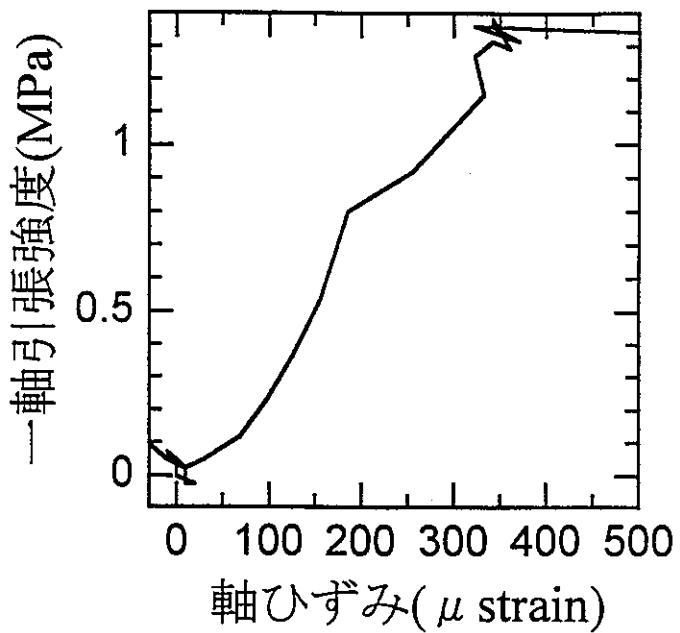


図 2.1.1 一軸引張載荷で得られた供試体 1 の応力－軸ひずみ線図

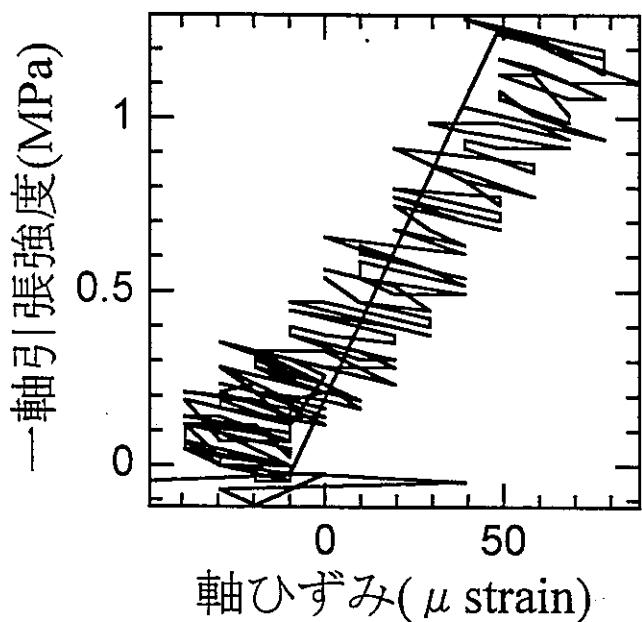


図 2.1.2 一軸引張載荷で得られた供試体 2 の応力－軸ひずみ線図

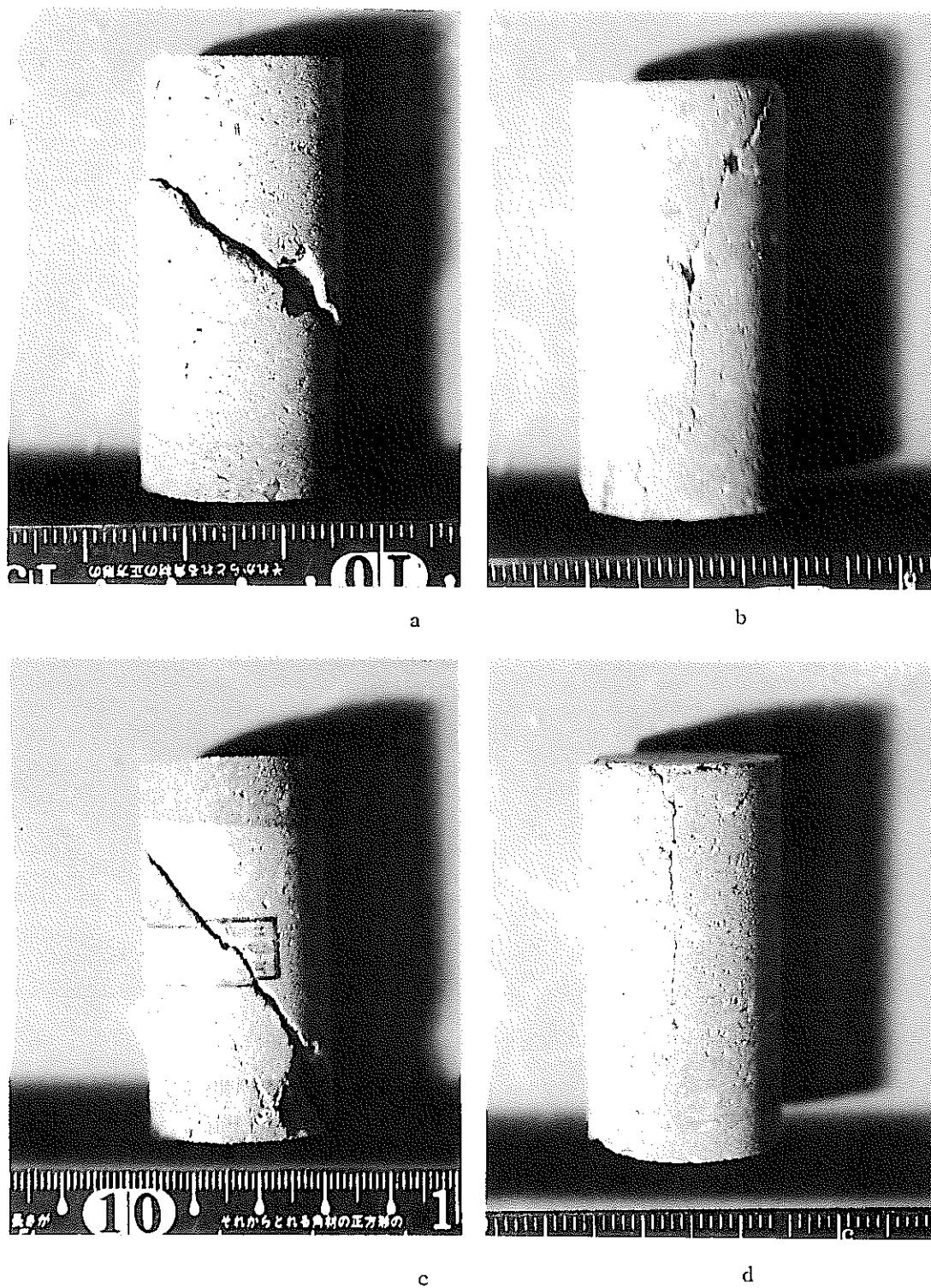


図 2, 13 一軸圧縮試験 (a、b) および 3 軸圧縮試験 (c、d) で得られた凝灰岩供試体岩の破断状況。a、c は一面せん断型、b、d は縦割れ型の破壊モードを示している。

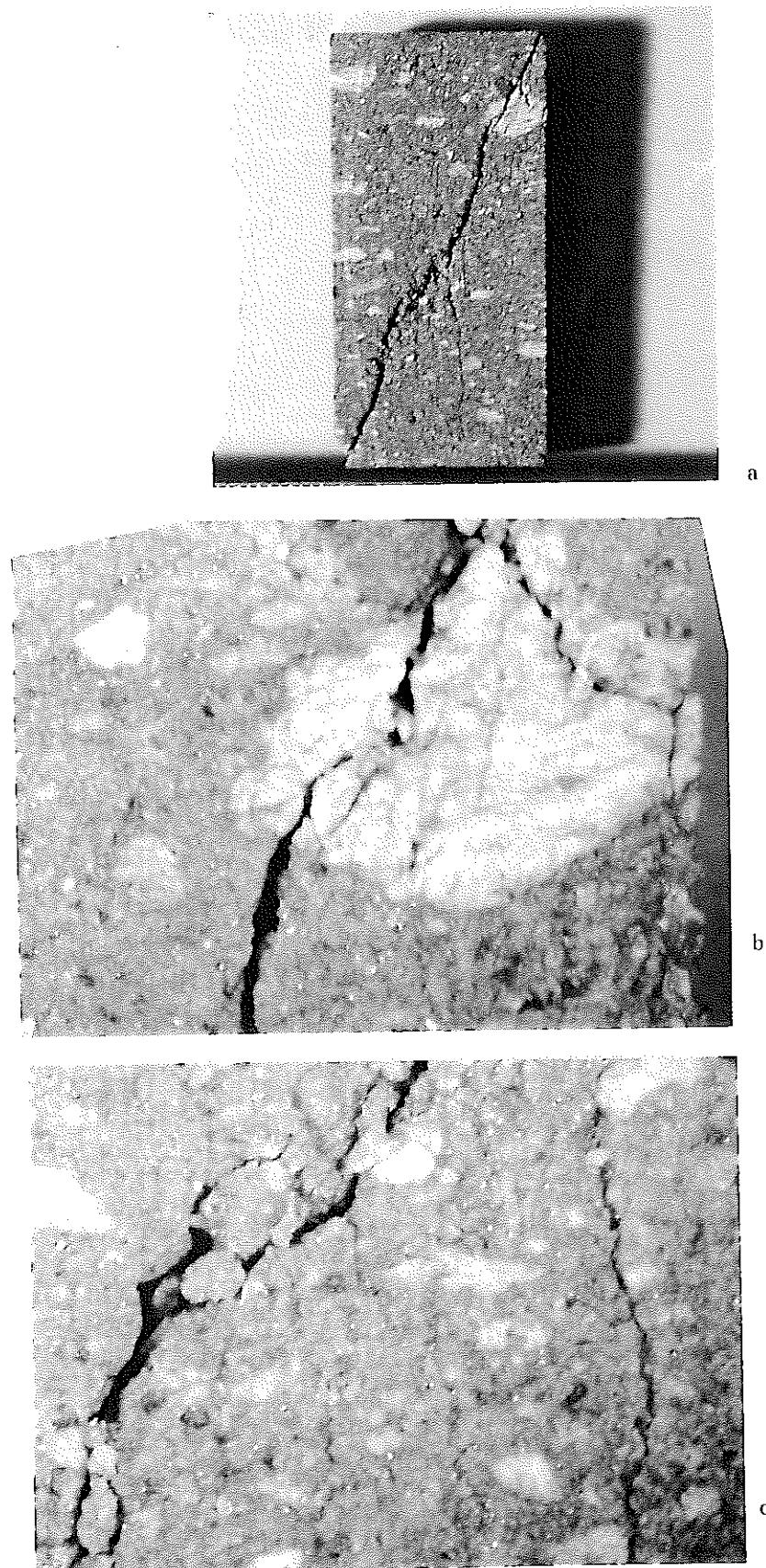


図 2.14 一面せん断型の破壊モードを示した一軸圧縮下の供試体。a は供試体の中心軸を通る断面の様子。b、c は破面の一部を拡大して示したもので、実体顕微鏡で撮影した。載荷軸に平行な多数の縦き裂が見える。

第3章 模型試験

3.1 概説

空洞模型として最も加工が容易な円孔を採用し、1～2個の円孔を有する板状岩盤模型に対して一軸載荷し、載荷の過程で発生する破壊箇所と形態、破壊の発達状況などについて調べることにした。供試体は50x50x100mmの直方体を標準としたが、寸法効果を明らかにするために、一部、90x90x180mmの中型や130x200x400mmの大型の供試体も使用した。載荷試験後、供試体を切断して切断面に現れた破面を肉眼観察した。この他に、実体顕微鏡による観察も併用した。

3.2 供試模型と試験方法

使用した供試岩盤模型を図3.1に示す。模型の種類は記号により区別されている。例えば、記号A1の最初のAは直方体状供試体の寸法を表す。模型A、Bは50x50x100mm、Cは130x200x400mm、Dは180x90x90mmの大きさをそれぞれ有している。記号A1の2番目の数字は円孔の数を表す。A、B…の区別は供試体が載荷方向に対して横長、縦長により区別されており、A、Dは横長、B、Cは縦長である（図参照）。A1、B1の孔径20mmの孔は特殊鋼製のドリルで、孔径20mmのB2、孔径80mmのC1、孔径40mmのD1、D2はダイヤモンドビットで、それぞれ作孔した。

なお、供試体A2、D2は対の孔が2本設けられているが、孔間のピラーの（最も狭い）部分の寸法をピラー幅として表に示した。

供試体はInstron社製材料試験機5586型（最大荷重300kN）を用い、一定変位速度（3mm/min）で載荷した。供試体が破断し載荷能力を失った後に除荷して、破面の状況を観察した。なお、供試体Dは、破壊の進行を確認するために、荷重が最大値に達する前の破壊の初期の段階で除荷し、破壊の観察に供した。

3.3 模型試験結果

3.3.1 供試体A1の結果

4個の供試体について得られた載荷応力-変位線図を図3.2に示す。図の横

軸の変位は供試体の上下面間の縮み量であり、試験機に付属の変位計で計測した。

線図から以下のことことがわかる。荷重が小さい間は、立ち上がりを除けば荷重とともに変位も直線的に増加している。供試体3以外は、応力が最大値の80%前後に達したときに、小規模の応力低下が発生している。これは、孔の両側壁中央部にき裂が発生したことに対応している。

供試体1では、応力が11MPaのときに若干低下している。その後、再び応力が増加したがこの過程で、最初のき裂が次第に明瞭になり、小規模の剥離が生じた。荷重が11MPa以上を越えピークに達する間に、線図には小規模の応力低下が数カ所認められる。これはその都度、供試体を観察するために載荷をホールドしたためである。

供試体2は、載荷応力が12MPaになったときに孔側壁中央にき裂が発生した。荷重がピークに達し低下する過程で、供試体の上下面をつなぐ載荷方向にほぼ平行な数枚の巨視的なき裂が発生した。これらのき裂は荷重の低下とともに開口量が増えていった。なお、この過程に対応する線図において、小規模な応力低下が2カ所見られるが、これは観察のために荷重をホールドしたことに対応している。

供試体4では、最初の破壊は円孔側壁中央部において載荷応力が12MPaのときに発生したが、このときに破壊音を伴った。破壊に対応して線図に若干の応力低下が生じている。

供試体3の応力-変位線図には、応力が最大値に達するまでに、応力の低下部が見られない。側壁にはき裂が認められるので、このき裂の発生と巨視的なき裂の発生がほぼ同時に起こったと解釈される。

達成された応力の最大値は12.5~16MPaであった。直径30mmの円柱形供試体から得られた単軸圧縮強度(18.0~22.5MPa)に比べると少し小さい。この差異は円孔の存在によってもたらされたのであろう。

いずれの供試体においても円孔の両側壁中央にき裂が発生した。既述したように、これらのき裂の多くは応力が最大値に達するまえに発生している。その後の載荷過程においては、これらは成長しておらず、その代わりに、周辺に小さいき裂が発生し、全体として、円孔側壁周囲に破壊領域が形成されているように見える(図3.3a)。さらに供試体に最終的な破断をもたらした供試体の上下面に達する巨視的なき裂(図b)は、この円孔側壁のき裂とは直接的には関係せず、き裂の成長の途中で、後者に接近したものが偶々合体したように見える。

図aでは、円孔壁の上部に極く小規模の引張き裂の存在が認められる。このき裂が発生した原因となった引張応力場は、円孔の上下部の狭い範囲に限定されており、しかも、しばしば引張応力が消える状況にあるために(4.2節参照)、引張き裂は発生しないか、発生しても成長しなかったと考えられる。なお、載荷

試験後、円孔の中心軸を通り載荷軸に平行な断面で供試体を切斷したために、円孔上下のき裂の詳細な観察はできなかった。

3.3.2 供試体B1の結果

供試体B1の最大応力は図3.4に示した応力-変位線図からわかるように、13.5MPaであるが、これはA1供試体の強度とほぼ同じである。載荷応力が最大値に達したときに、供試体を破面が斜めに走り供試体は破断した。破面は図3.5に示すように円孔の両側壁を通っている。破断面の状況は一軸圧縮下の円柱形供試体と似ている(2.2節参照)。両者の対比から、最初のき裂は円孔側壁から発生し、それが巨視的な破断面に成長したというよりは、円孔側壁の応力が他より大きいために、破断面がここを通ったと表現した方がより正確であるように考えられる。

応力-変位線図において、応力が最大値に達した後の破壊後領域で若干の応力低下が2カ所で生じているのは、これらの箇所で観察を目的に載荷をホールドしたためである。

破断面が円孔と交差する部分を見ると、周辺の円孔壁では粒子が一層分だけ緩んでおり、円孔内に押し出しているように見える(図3.6参照)。

3.3.3 供試体A2の結果

2個の供試体について得られた載荷応力-変位線図を図3.7、載荷試験後の供試体の破断の状況を図3.8に示す。線図の形状は全体として、供試体A1やB1のそれと似ている。ただし、達成された応力の最大値(7.5~9MPa)はA1やB1に比べると明らかに小さい。これは、載荷方向に直角に2個の円孔が並んで配列しており、その断面上では荷重を受ける面積が減少しているためと推定される。

供試体1では、応力が①に達したときに両円孔のピラー側側壁中央部においてき裂が発生し、応力が若干低下した。応力が①のレベルを越えた線図の傾きは、それ以下のときの線図の傾きよりもやや小さく、供試体全体の剛性が低下したことを探している。応力が②のピークに達したときに、両円孔においてピラーと反対側の側壁にき裂が生じ、応力が若干低下した。その後の載荷に伴い、若干、応力が増加した後(③)、急激な応力低下が発生した。このとき、円孔と供試体側壁の間に、載荷方向にはほぼ平行な上下面をつなぐき裂(いわゆる縦き裂)が数枚発生した。

供試体2でも、応力がピークの②に達するまでの挙動は供試体1と同様であった。ただし、応力が②になったときに両円孔のピラーと反対側の側壁にき裂が入

り、これと同時に縦き裂が円孔と供試体側面の間に発生し、急激な応力低下が生じた。

載荷試験後、供試体を切断し円孔壁上部を実体顕微鏡で観察したところ、引張型の微小なき裂が円孔軸に平行に点在しているのが認められた。図3.9に示すように、き裂の向きは全体として円孔軸に平行である。

3.3.4 供試体C1の結果

3個の供試体について得られた載荷応力-変位線図を図3.10に示す。線図の形状は全体として、供試体B1のそれと似ている。供試体1の場合には、応力が3MPaになったときにき裂が入り、応力の増加とともに安定的に成長した。線図を見ると、応力が0.5MPa、5MPaのときに応力低下が生じているが、その原因は不明である。供試体2、3では、引張き裂の発生直後にこのき裂が不安定に成長し供試体を貫通した。したがって、応力のピーク以前には応力低下箇所が見られない。

達成された応力の最大値(2.5~4.3MPa)は、A1、B1の対応する値に比べて明らかに小さく、また、2個の円孔を持つ供試体A2よりも小さい。

破壊の様相も他に比べて全く異なっている。すなわち、円孔の上下面に引張き裂が入り、これがそのまま成長し縦き裂となって供試体の上下面に達した時点での強度を失った。図3.11aは破面の状況を示したものである。図bに示すように、引張き裂は円孔の軸方向に平行に入っている。

3.3.5 供試体D1の結果

供試体A1では、最初の破壊が孔側壁中央において観察された。これを確認するために供試体D1に一軸載荷し、荷重の増加とともに最初のき裂が側壁中央部に認められた直後に除荷した。図3.12はこのときの様子を示したもので、孔の両側壁から載荷方向にほぼ直角方向に走るき裂が認められる。供試体を孔軸を通り載荷面に平行に切断し、実体顕微鏡によって孔の天盤・下盤を詳細に観察した。観察結果、この場所には微小なき裂の存在すら認められなかった。本試験によって次の確認がなされたといえる。すなわち、供試体A1やD1では最初の破壊が孔の側壁に現れる。

3.3.6 供試体D2の結果

3個の供試体D2を用いた試験は、供試体A2における破壊の進行順序を確認するためになされた。一軸載荷に伴う最初の破壊は、3供試体ともピラー側の孔壁に現れた。図3.13aは供試体2の様子を示したもので、左孔のピラー側側

壁から右下に向いたき裂が認められる。この時点で除荷し、孔壁を実体顕微鏡によって観察した。

図 b はピラー側側壁の一部を示したもので、次の 2 つの特徴が認められる。

- a) き裂は孔軸に沿ってジグザグに走っている。
- b) このき裂は壁に鋭角に交わっているために剥離しかかっており、孔壁に垂直な引張の作用の下で発生したことを推測させる。図 c はき裂の一部を拡大したもので、薄い板状構造になっている様子がわかる。

ピラーと反対側の側壁および天盤、下盤にはき裂がみられなかった。したがって本試験で、供試体 A 2 や D 2においては最初のき裂がピラー側側壁に発生することが確認されたといえる。

3.4 模型試験結果のまとめと考察

上述した一連の模型試験で得られた知見とそれに関する考察をまとめると以下のようになる。

(1) 破壊の発生箇所の様相

載荷応力の増加とともに開口型のき裂が最初に現れた。荷重の増加とともに、この初生のき裂が成長するか、その近傍に新たなき裂が発生した。これらのき裂の発生場所は空洞壁面上の応力集中箇所に一致しており、き裂が密に分布している場合には、しばしば緩み域と呼ばれる。当該領域では均質的に劣化しておらず、単一または複数個のき裂が発生しているに過ぎないので、この領域を緩み域と呼ぶにはふさわしくないと考えられる。

強度の低下によって特徴づけられる破断は、初生したき裂がそのまま成長するか、あるいは他のき裂と合体し、構造体を貫通することによってもたらされる。この現象は円柱形供試体だけでなく、円孔を有する岩盤模型についても共通している。

(2) き裂の観察

初生の規模の小さいき裂を観察する上で実体顕微鏡は有効なことがわかった。

(3) 寸法効果

同一形状で寸法が異なる供試体 C 1 と B 1 の強度（達成された応力の最大値）を比較すると、寸法の大きい前者の方が後者より小さく、いわゆる寸法効果が認められる。また、両者では破断の形態が異なる。この原因については次章で考察するように、応力集中源である円孔の寸法と岩石を構成する粒子の平均粒径の比が両者で異なることがあると考えられる。したがって、破断の形態の差異も寸法

効果によって解釈することが可能である。

記号	形 状	寸 法 [mm]				
		径	幅	高さ	奥行	ピラーフ
A1		20	100	50	50	—
A2		20	100	50	50	4
B1		20	50	100	50	—
C1		80	130	430	200	—
D1		40	180	90	90	—
D2		40	180	90	90	8

図 3.1 一軸載荷試験に供した岩盤模型。岩石は凝灰岩

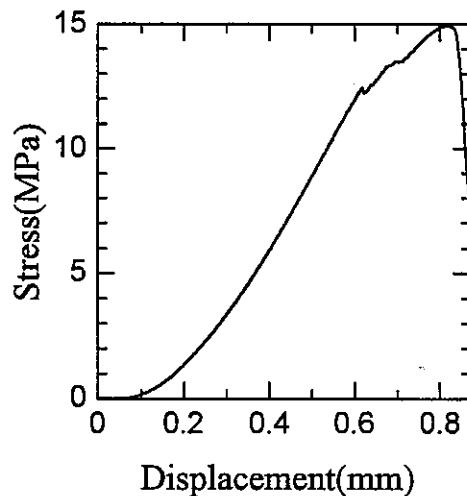
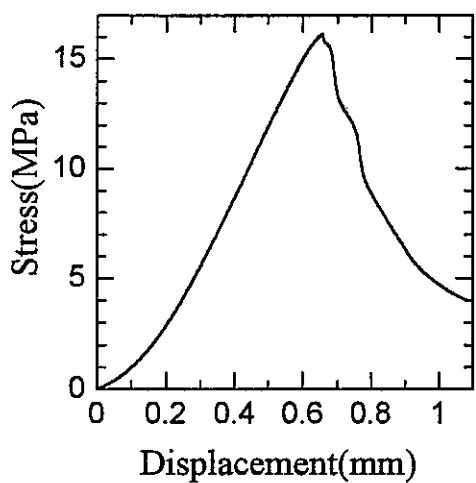
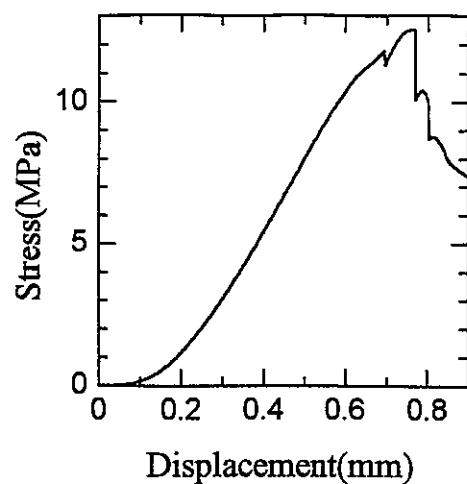
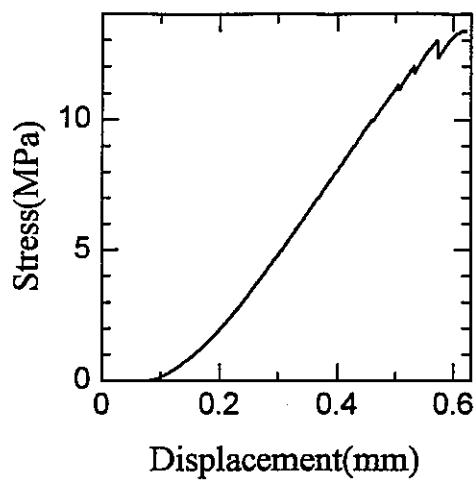
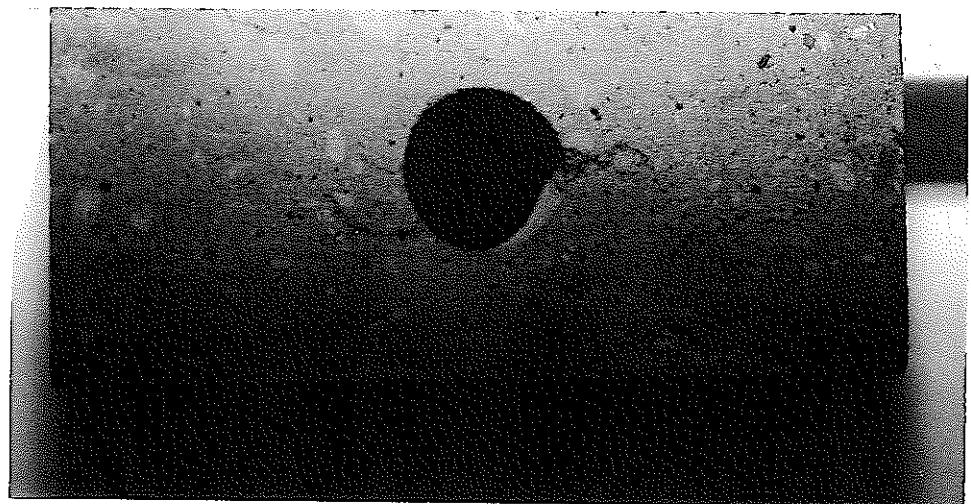
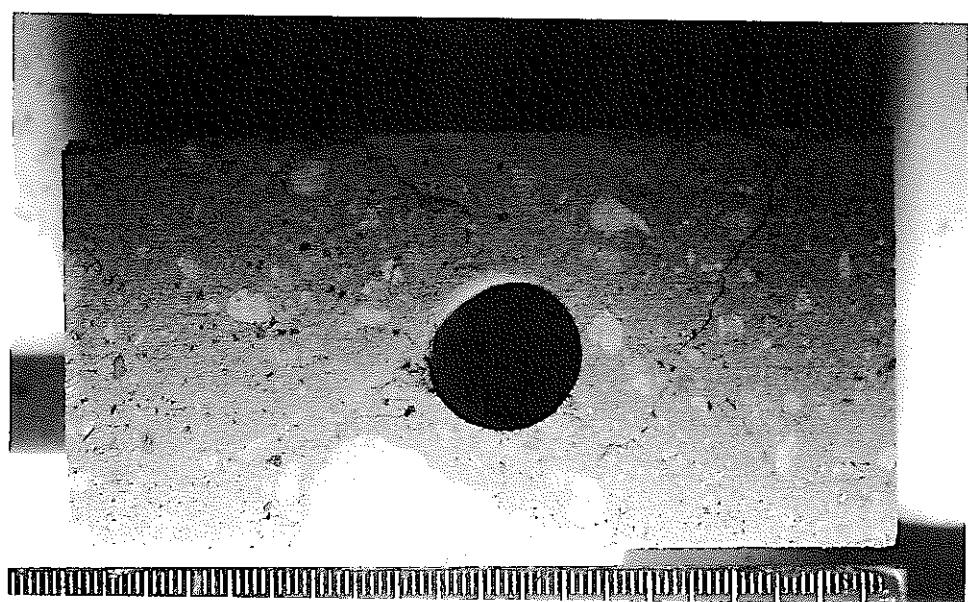


図 3 . 2 模型供試体 A 1 の応力－変位線図



a



b

図 3.3 模型供試体 A-1 の破断状態。供試体 1 は円孔下部に微細なき裂が見える。
また、円孔の右側側壁は数本のき裂が集合して緩み域を形成している
(a)。供試体 2 では円孔と側面の間にせん断割れ目の形成が認められる
(b)。

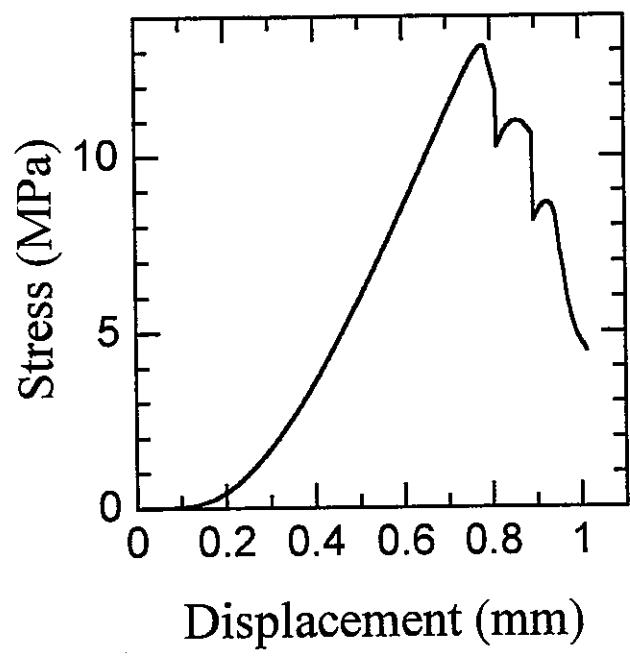


図 3.4 模型供試体 B-1 の応力-変位線図

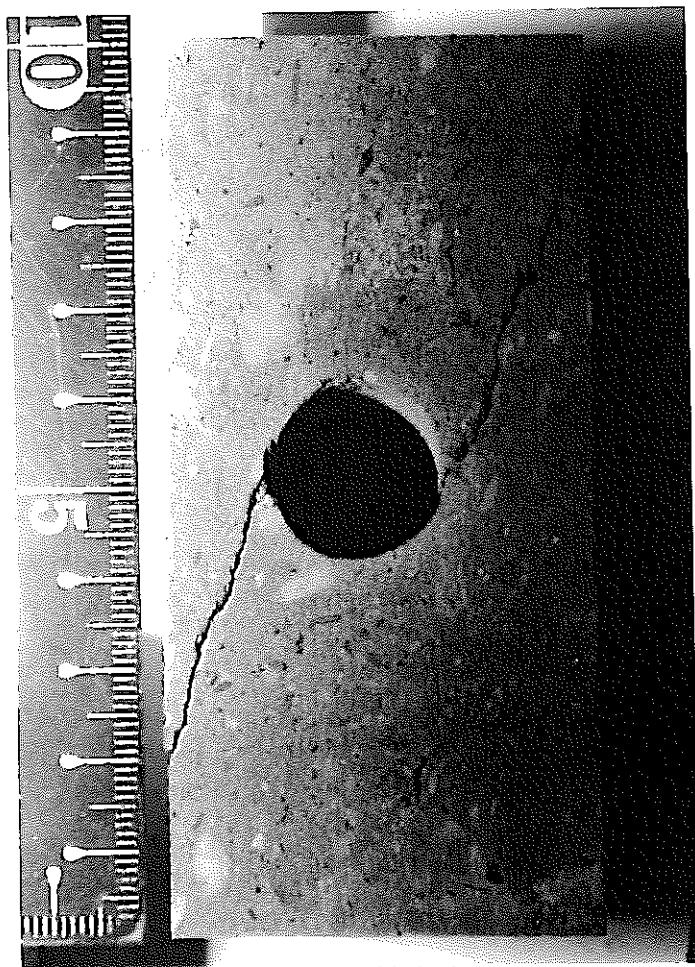


図 3.5 模型供試体 B-1 の破断の状況

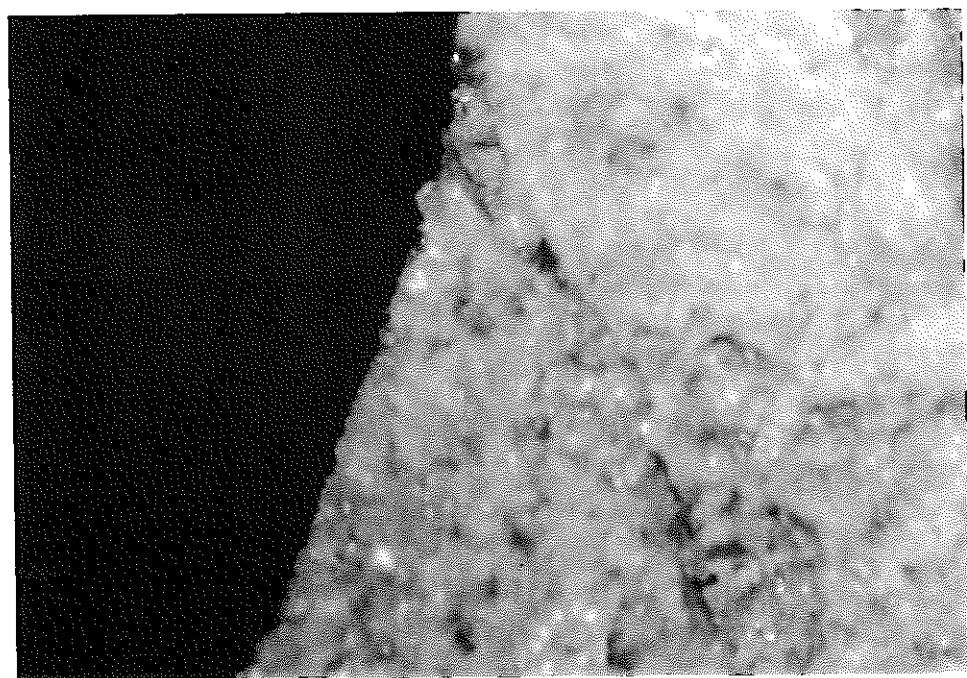


図 3.6 模型供試体 B-1 の破断面と円孔の交差部。周囲では円周に沿って粒子が浮いている様子が認められる。実体顕微鏡の映像（倍率17.5）。

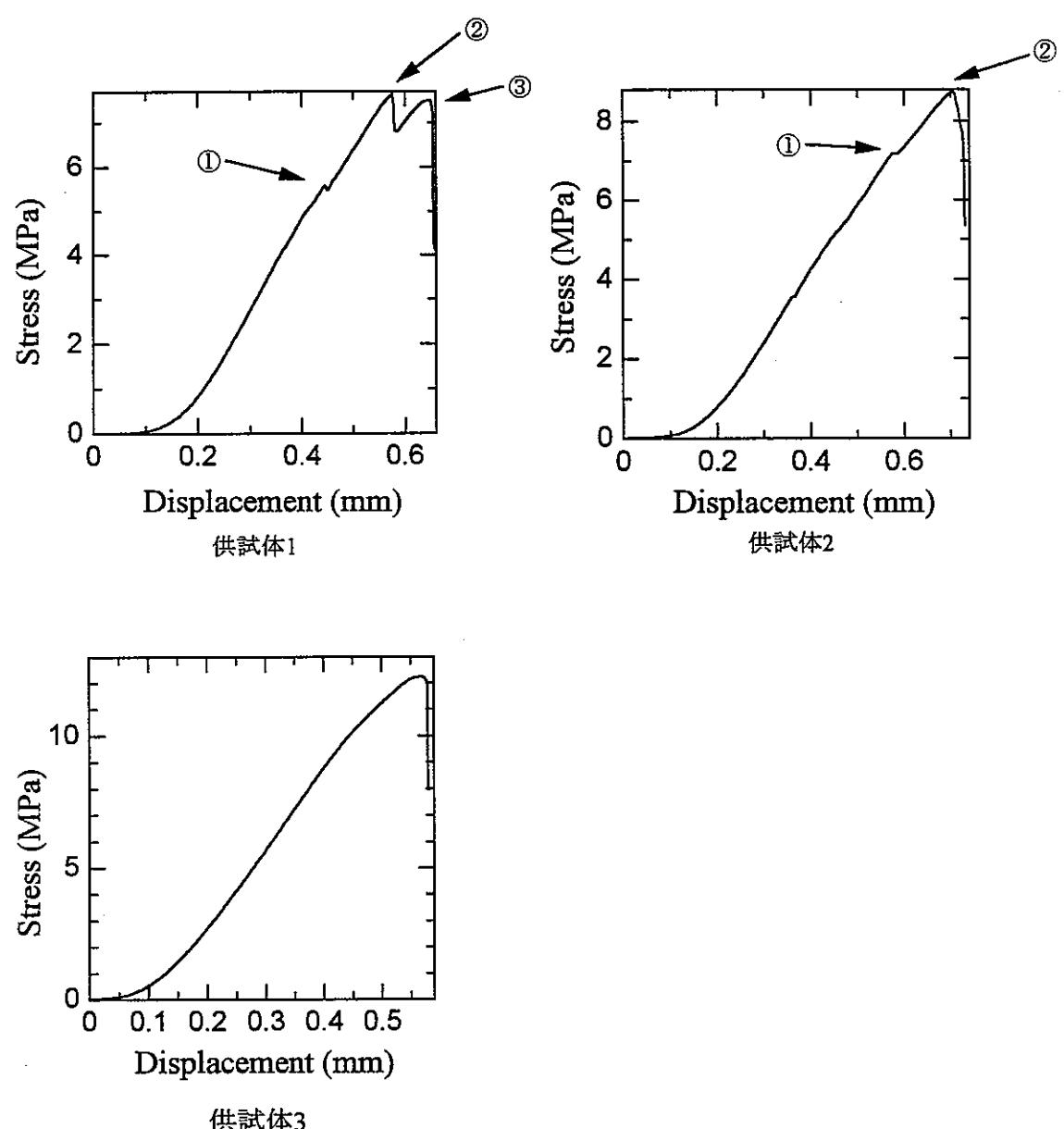


図 3.7 模型供試体 A-2 の応力 - 変位線図。

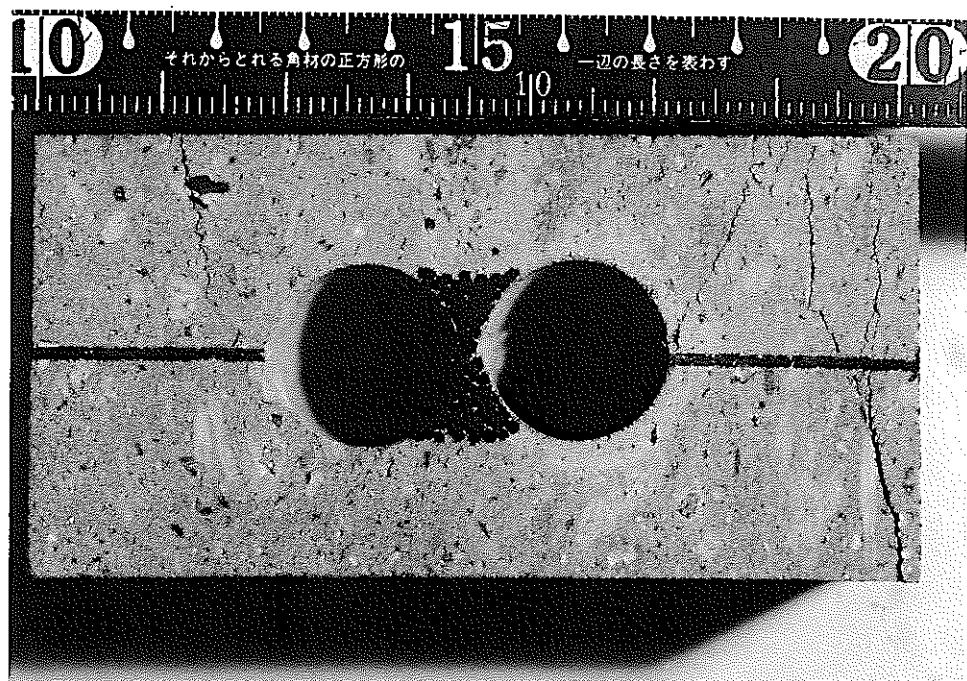
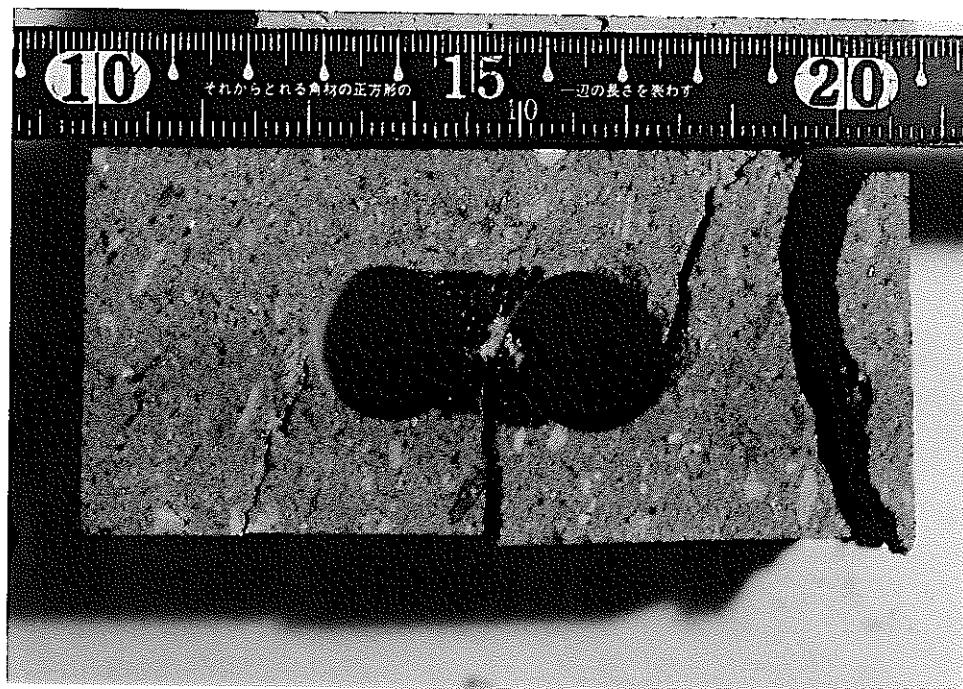


図 3.8 模型供試体 A-2 の破断の状況。

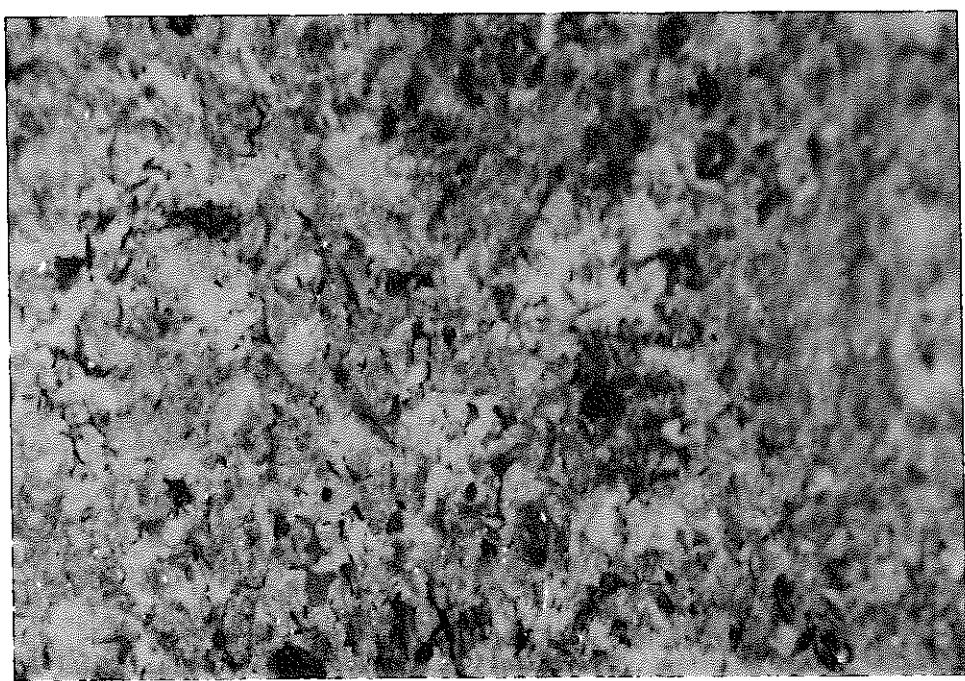


図3.9 模型供試体A2における上部の円孔壁面の様子。孔中心軸に平行な微小
き裂の分布が認められる。実体顕微鏡で観察（倍率15）。

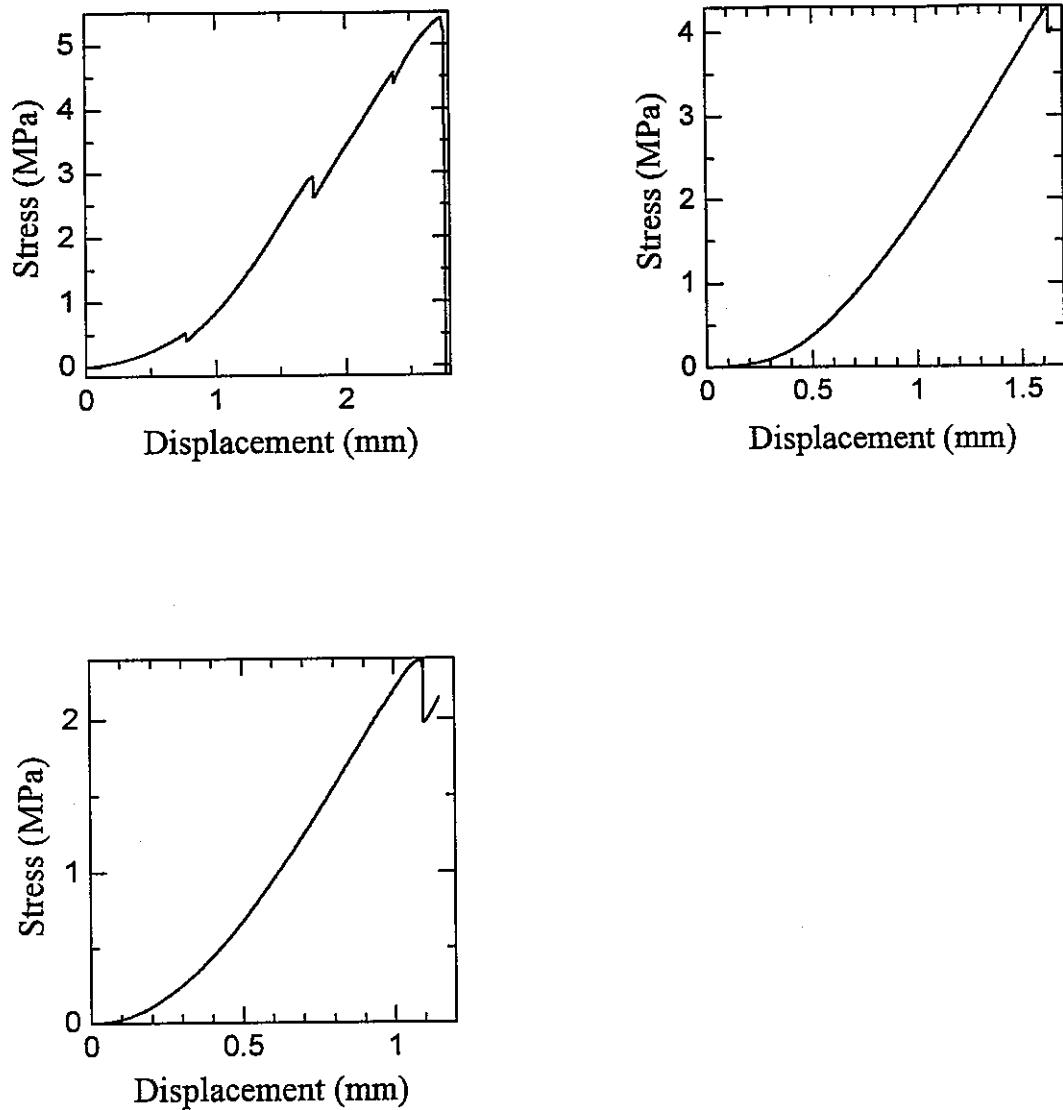
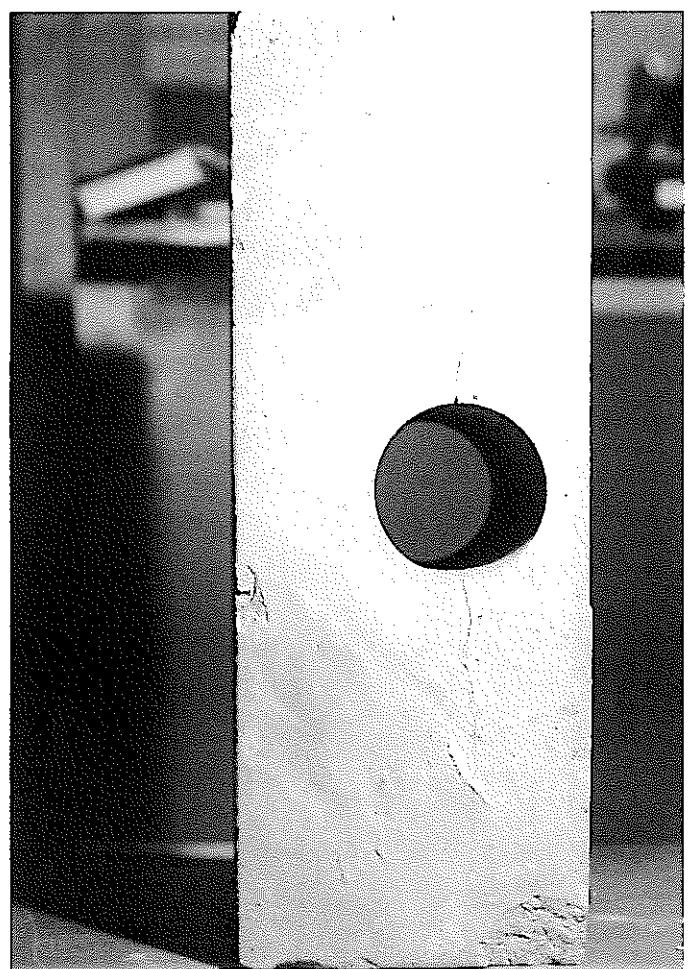
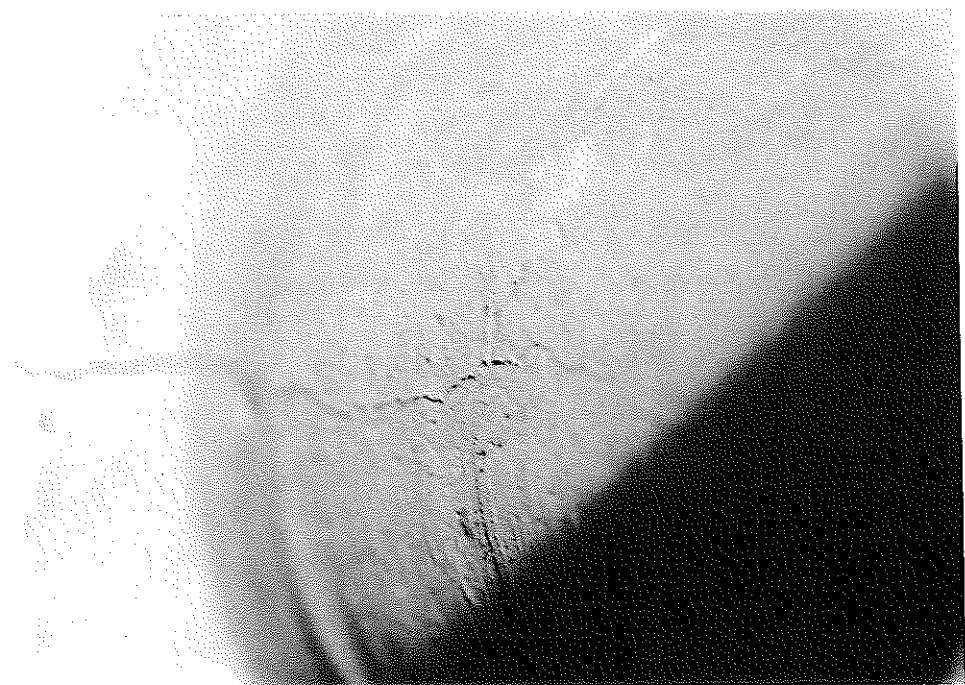


図 3.1.0 模型供試体 C 1 の応力－変位線図



a



b

図 3.1.1 模型供試体 C 1 の破断の様子 (a)。b は円孔壁に現れた破断面で、円孔軸に平行に走っているのがわかる。

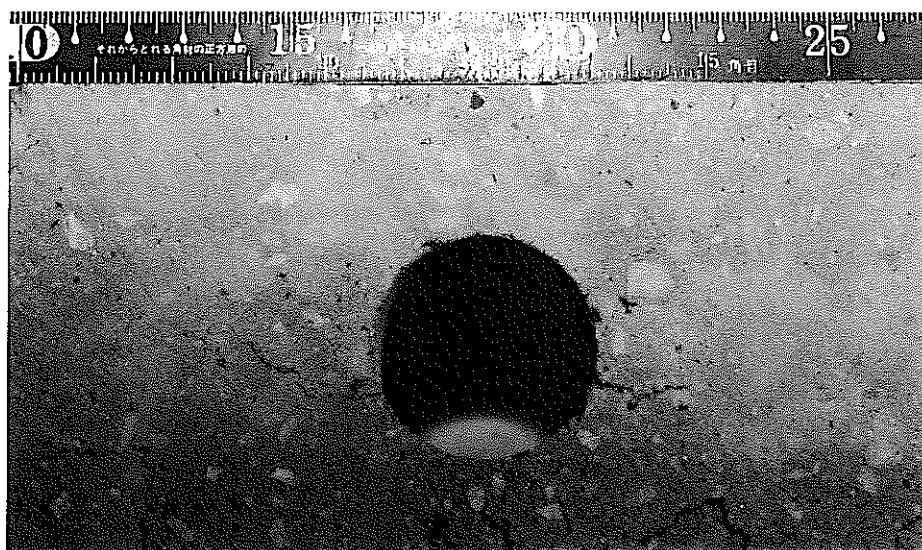


図 3.1.2 模型供試体 D 1 に現れた破面の様子。この破面の出現後に除荷した。
下部に見えるき裂は表面に限定的に現れているに過ぎない。

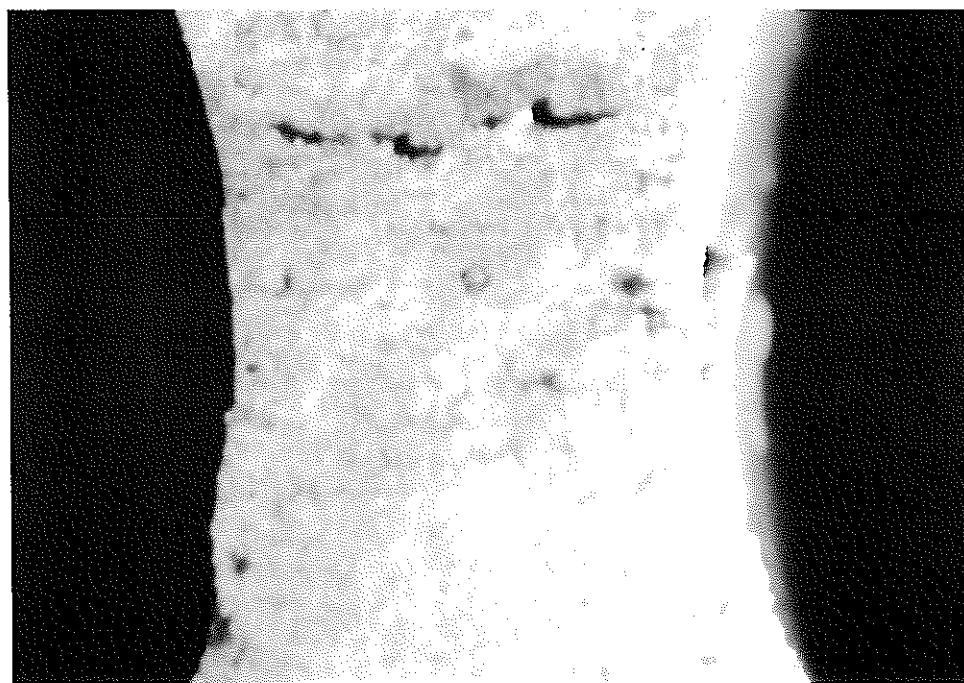
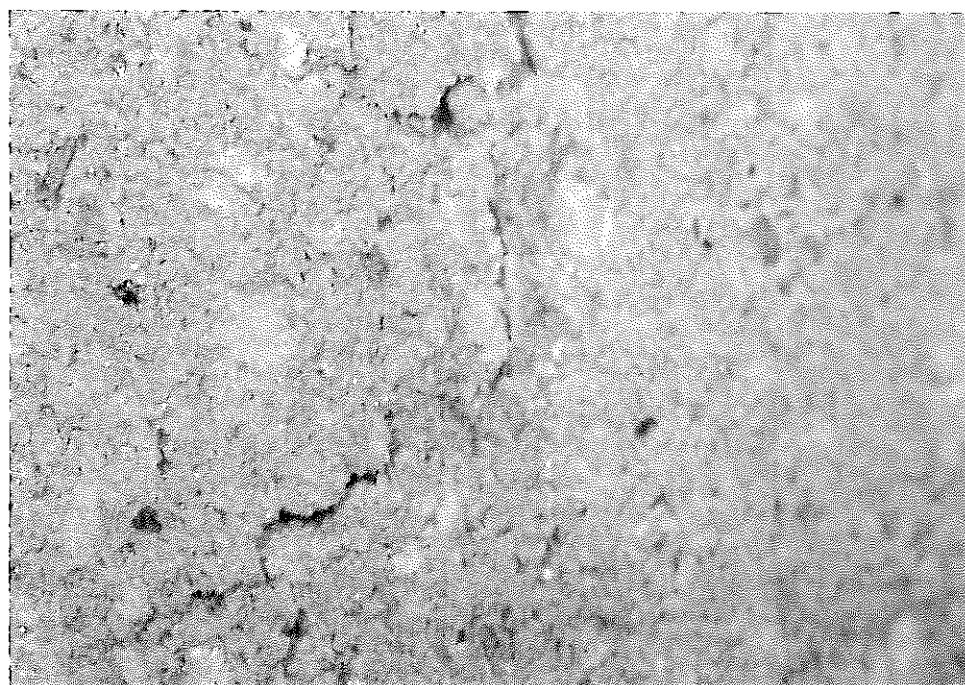
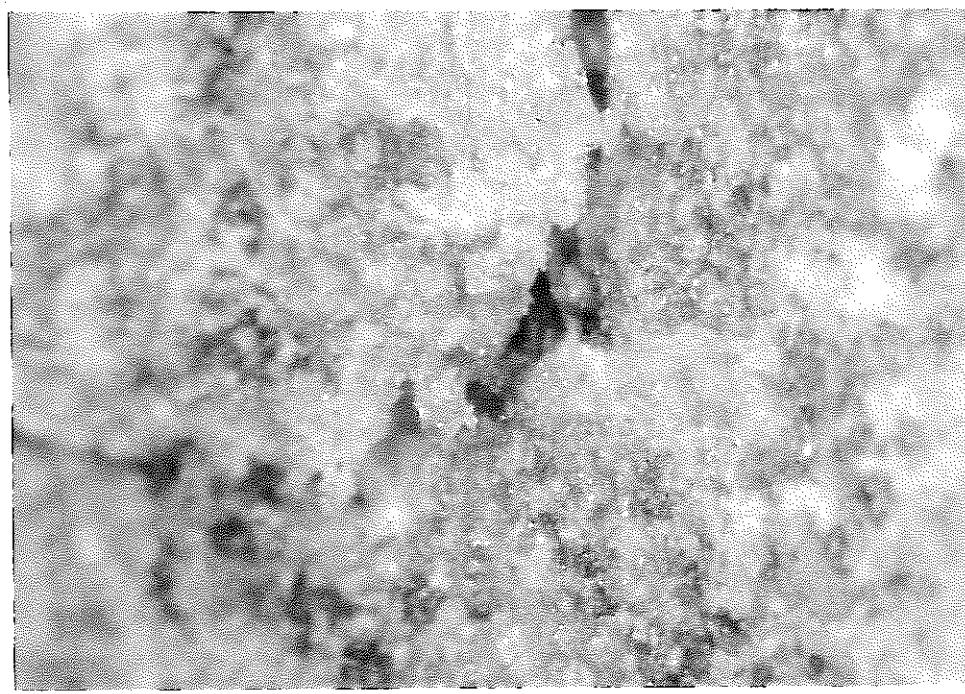


図 3.1.3 模型供試体 D 2 (No. 2) に現れた破面の様子。この破面の出現後に除荷した。観察を容易にするために対の円孔で挟まれたピラー部分を切り出している (a)。



b



c

図 3.1.3 模型供試体 D 2 (No. 2) に現れた破面の様子。ピラー側側壁に沿って孔軸に平行にジグザグに走るき裂 (b) とその拡大図 (c)。いずれも実体顕微鏡の観察写真。

4.1 概説

模型試験の結果によると、空洞周辺の破壊は、最初、1ないし数個のき裂の発生として始まり、次に、き裂数の増加やき裂の進展・合体として進行する。このような力学的現象を考慮した解析方法として、次の2つが考えられる。

(a) き裂の存在を直接的に考慮する

(b) 異方性を考慮した剛性の低下によってき裂の発生を間接的に表現する

(a) に属する数値解析方法は、次の2通りに分類することが可能である。

1)き裂を含む連続体の解析：この解析には有限要素法（FEM）や境界要素法

（BEM）が応用できるであろう。

2)き裂を独立した（閉領域の）剛体（または弾性体）間の隙間として考える：

個別要素法（DEM）や剛体バネモデル法（RBSM）がこの範疇に属する。

(b) に属する解析方法としては、弾塑性解析がある。通常の解析では、塑性域（破壊域）は等方性と仮定するのがほとんどである。限界ひずみ法に基づいた岩石の構成式においては、ひずみが限界値に達したならば、最大引張ひずみの作用方向の剛性が低下すると仮定されている。したがって、破壊域では異方性となる。後者は前者に比べき裂の発生が構造体に及ぼす影響がより正確に考慮されていることになる。

DEMやRBSMは、モデル作成の段階でき裂の場所、向き、寸法が決まるので、それらが未知の場合には正確な結果が得られない危険性がある。また、き裂発生前の弾性的な構造体の応力・変位分布が正確でないという問題がある。

FEMやBEMでは次のような逐次的な方法を採用することにより、破壊の正確なシミュレーションが可能である。すなわち、最初に（き裂のない）連続体として解析し、その結果を用いてき裂の発生箇所と荷重状態を予想する。次に、予測に基づいてきれつを発生させ、これを含む構造体を改めて解析する。以下、荷重を増加させつつ上記の手続きを繰り返す。この方法は自動的な解析の実行が困難であるという欠点がある。

以上述べたように各解析方法には長短がある。

本研究においては、破壊の初生とその後の破壊の進行ならびに破壊のモードが予想可能であるかに焦点を当てて応力解析を進めることにした。破壊の初生直前の力学的環境は弾性体によって近似できるであろう。破壊条件についても弾性体の仮定の下に評価される応力、ひずみを基に検討可能であろう。さらに、破壊の

進行についても弾性解から有益な示唆が得られると考えらえる。そこで、ここではもっぱら有限要素法による弾性応力解析を基に、模型試験結果を解釈することにした。

4.2 弾性解析に基づく岩盤模型試験結果の解釈

4.2.1 破壊限接近度と最大主ひずみ（最大引張ひずみ）

破壊の発生場所や破壊進行の予測は、破壊限接近度と最大主ひずみ（最大引張ひずみ）を基に行う。前者は応力状態、後者はひずみ状態から決定される。ここでは有限要素法を用いた弾性応力解析から応力・ひずみを計算する。凝灰岩から成る模型の弾性定数として、表4.1に示す数値を仮定した。

破壊限接近度は、各点の応力状態が破壊限界線に接近している程度として定義され、値が大きいほど破壊に対して危険なことを表している。破壊条件としては引張強度を考慮したMohr-Coulombの仮説を仮定し、限界線の決定に必要な強度定数は、第2章で述べた測定結果に基づいて採用した（表4.1参照）。

最大主ひずみは、破壊限接近度と同様に、破壊に対する危険度の指標であり、値が大きいほど危険の程度が大きいことを表す。この指標は限界ひずみ説を破壊条件としている。

破壊は荷重の増加とともに破壊限接近度または最大主ひずみが大きい箇所から小さい箇所へ進行すると予想される。もし、破壊限接近度と最大主ひずみの大小の順序が異なる場合には、模型試験結果と比較することにより、いずれの仮説が妥当かを判断する一つの手がかりが得られるであろう。また、いずれの指標についても破面の向きが予測されるので、破面の向きからも仮説の妥当性を検討できよう。

4.2.2 模型A1、A2（または、D1、D2）の結果とその解釈

模型A1、A2は、模型内に含まれる円孔の数がそれぞれ1、2個である以外、同一である。また、模型D1、D2はそれぞれ模型A1、A2と相似である。したがって、同一境界条件の下で発生する応力・変位は、模型A1とD1、および模型A2とD2では同一になる。

模型A1、A2（または、D1、D2）を一軸載荷したときの弾性解を得るために応力解析は有限要素法によって実施する。載荷は鋼製のプラーテンを介して行われるので、供試体の上下端面は同一の大きさの強制変位を受けるものとした。このとき、供試体端面の載荷方向に垂直な方向では、プラーテン間には摩擦が作

用するので、自由変位（図4.1a）と完全拘束（図b）の両極端の中間の変位状態を取るであろう。そこで、この摩擦の影響の程度を調べる一助として、両極端の境界条件に対して解析することにした。

モデルA1とA2（または、D1、D2）に同一の強制変位を与えた場合、載荷端面に発生する平均的な載荷応力は、モデルA1とA2では有効な支持面積が異なるために同一でなく、A2の方がA1よりも20%程度大きくなると推定される。したがって、モデルA1とA2で応力の絶対的な値を比較するときには注意が必要である。

計算結果から、主要な箇所の破壊限接近度と最大主ひずみ（最大引張ひずみ）を求め、表4.2、4.3に示した。

A1（または、D1）の場合、表4.2に示すように、Mohr-Coulombの仮説を仮定するならば、破壊順序は境界条件の影響を受け、次のような予想が得られる。
a) 端面の拘束が無いとき：最初の破壊は円孔の上下部に生じ、その次に側壁中央部が破壊する。

b) 端面が完全に拘束されているとき：最初の破壊は側壁中央部に生じ、その後に円孔の上下部が破壊する。

破壊条件として限界ひずみ説を採用する場合には、破壊の順序は境界条件の影響を受けず、最初の破壊は円孔の上下部に生じ、その後に、側壁中央部が破壊するという予想が得られる。

模型試験結果によると、最初の破壊は側壁中央部で発生し、その後、天盤・下盤が破壊した。これはMohr-Coulombの仮説に基づく予測と一致する。しかし、側壁に現れた破面については、形態や方向が予想と異なっており、この仮説で完全な説明を与えることはできない。

A2（または、D2）では、表4.3に示すように、載荷に伴う破壊の進行順序は、破壊条件により異なるものの端面の境界条件の差異の影響は受けない。破壊の進行は、Mohr-Coulombの仮説に従うならば次のようになる：

円孔のピラー側側壁→円孔のピラーと反対側側壁→円孔の天盤・下盤

限界ひずみ説に従うならば、破壊は次の順になる：

円孔の天盤・下盤→円孔のピラー側側壁→円孔のピラーと反対側側壁

最初のき裂は円孔のピラー側側壁に現れたが、これはMohr-Coulombの仮説に基づく予測と一致する。破壊の順序に関しては、Mohr-Coulombの仮説が模型試験結果と一致することがわかる。しかし、この予測に従うならば、円孔側壁には壁面に対して30°前後傾いたせん断破面が生じるはずであるが、実際には、壁面に平行な引張型の破面が現れた。この結果はむしろ限界引張ひずみ説の予測に一致する。

以上述べたように、模型試験結果を完全に説明し得る予測は見いだされていないのが現状といえよう。

4.2.3 模型B1、C1の結果の解釈

図4.2は模型B1、C1の応力解析結果の一例で、円孔中心を通って載荷軸に平行な断面上の直応力 σ_x (x軸は載荷軸に直角方向とする)の分布を示したものである。図に示すように、模型B1とC1では発生する応力分布にはほとんど差がなく、両者の形状に関する若干の違いは解析結果にあまり影響しないことがわかる。

なお、解析に際しては、供試体の上下端面において載荷に垂直方向の変位は拘束されていないものとした。模型B1、C1は、模型A、Dに比べて、端面が円孔から離れているために、端面の変位拘束の有無が円孔周辺の応力状態に及ぼす影響は小さく、その効果をとりたてて調べる必要はないと考えられる。

2つの破壊条件のいずれを採用したとしても、表4.4に示すように、載荷に伴う破壊の進行は次の順になるという予想が得られる：

円孔の上下盤→円孔の両側壁

模型C1では、円孔の上下部に発生したき裂がそのまま不安定に成長し、供試体を貫通し破断が完了してしまったので、その後に起こると予測される円孔側壁の破壊は発生しなかった。一方、模型B1では、円孔上下部の破壊は小規模に留まり、荷重の増加とともに円孔側壁の破壊が発生し、ここの破壊が発達して破断に至った。

このような差異の発生原因については次項で考察する。

4.2.4 円孔上下部の引張き裂を規制する条件

寸法が小さいA、B、Dグループの模型の場合、円孔上下部のき裂は発生しないか発生しても破断に至るような成長をしなかった。一方、相対的に大型のCグループの供試体では、円孔上下部に生じたき裂がそのまま不安定に発達し破断に至った。供試体の材料が一様であると仮定すれば、応力状態は寸法に関係ないので、同一の破壊形態が得られなければ不合理である。したがって、破壊形態に差異が生じた原因として模型材料が均質でなかったことが推定される。そこで、この推測の妥当性を以下に検討する。

試験に供した凝灰岩は、マトリックスが点在する大小の粒子を埋めた構造をしている。円孔の寸法が小さければ、それだけ円孔径/粒子径の比は大きくなる。したがって、粒子とマトリックスの材料定数が異なれば、円孔径の小さい方が、応力分布に及ぼす不均質の影響は大きくなるであろう。

図4.3に示すように、径が円孔径の0.5倍の円盤（円柱）形粒子が円孔の近傍に存在する場合と、円孔に接して存在する場合の2通りについて、計算した。その結果を示した図4.4は円孔周辺の応力状態の分布例を示したものである。また、表4.5に円孔の上下部近傍に発生する応力成分 σ_x の値を示した。これらの結果からわかるように、不均質な構造を有する場合には均質な場合に比べて、引張応力が消えたり引張応力の値が大幅に減少したりすることがわかる。粒子の存在が引張応力を増加させることはないようと考えられる。

寸法の小さな模型の場合、円孔上下部に引張き裂が発生しなかったり、発生しても発達しなかった理由として、模型材料の不均質性の影響が大きいことを挙げることができよう。

4.3 まとめ

破壊の初生とその後の破壊の進行ならびに破壊のモードに関する予測を弾性応力解析に基づいて実施し、以下の知見が得られた。

(1) 模型試験における空洞周辺の破壊は、概略、破壊限接近度や最大（引張）ひずみの大小の順に進行した。したがってこれらは、破壊の危険度の指標として概ね有効であるといえる。

(2) 模型A1、A2（およびD1, D2）において、載荷とともに最初に現れた円孔壁の破壊はMohr-Coulomb説の予測に一致する。しかし、この破壊箇所では、円孔壁に平行な破片が円孔内部に浮き出しており、引張型の特徴を持っており、限界引張ひずみ説を支持する現象であるといえる。したがって、いずれの説も模型で得られた破壊現象を完全には説明しきれていない。

(3) 模型の寸法が小さくなると、模型材料の不均質性が破壊の進行状況に及ぼす影響が大きくなる。このために、小型の円孔を有する岩盤模型を一軸圧縮したときに円孔上下に発達するはずの引張き裂は発生しないか、発生しても発達しない。模型試験の目的にもよるが、一般に、模型は大型の方が望ましい。

表 4.1 計算で仮定した凝灰岩の諸物性値

ヤング率	5200MPa
ボアソン比	0.05
粘着力	4.5MPa
内部摩擦角	41°
引張強度	3.2MPa

表 4.2 円孔上の主要な場所の破壊限接近度と最大引張ひずみ。模型供試体 A 1
(または、D 1)。a では供試体上下端面の横方向の変位が自由、b は拘束が仮定されている。

a

	破壊限接近度	最大主ひずみ (引張正)
空洞の天盤・下盤	1.09	6.8×10^{-4}
空洞の側壁	0.76	1.4×10^{-4}

b

	破壊限接近度	最大主ひずみ (引張正)
空洞の天盤・下盤	0.84	5.3×10^{-4}
空洞の側壁	0.89	1.4×10^{-4}

表 4.3 円孔上の主要な場所の破壊限接近度と最大引張ひずみ。模型供試体 A 2
 (または、D 2)。a では供試体上下端面の横方向の変位が自由、b は拘束が仮定されている。

a

	破壊限接近度	最大主ひずみ (引張正)
ピラー側の側壁	0.95	1.8×10^{-4}
ピラーの反対側の側壁	0.89	1.5×10^{-4}
天盤・下盤	0.81	5.5×10^{-4}

b

	破壊限接近度	最大主ひずみ (引張正)
ピラー側の側壁	0.96	1.8×10^{-4}
ピラーの反対側の側壁	0.90	1.5×10^{-4}
天盤・下盤	0.72	4.6×10^{-4}

表 4.4 円孔上の主要な場所の破壊接近度と最大引張ひずみ。模型供試体 B 1、
 C 1

B 1

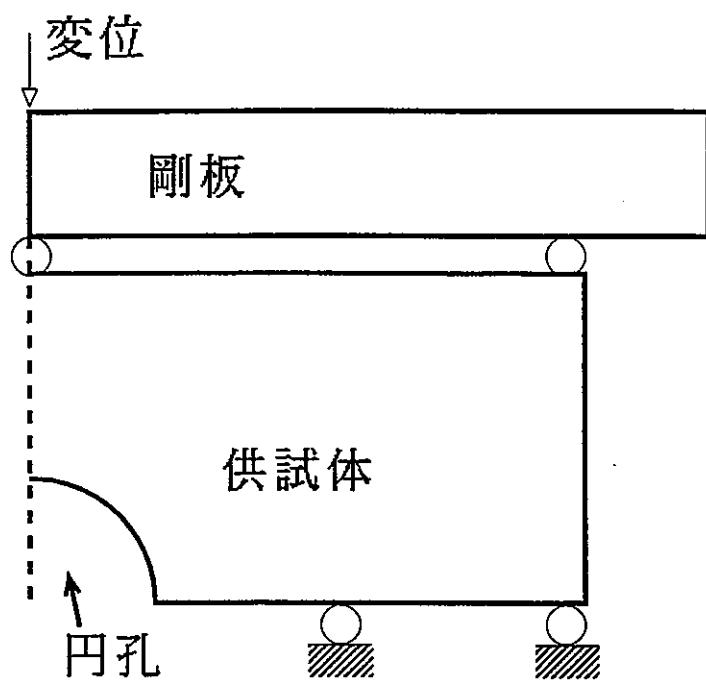
	破壊接近度	最大主ひずみ(引張正)
空洞の側壁	0.73	0.21×10^{-4}
空洞の天盤・下盤	1.12	6.88×10^{-4}

C 1

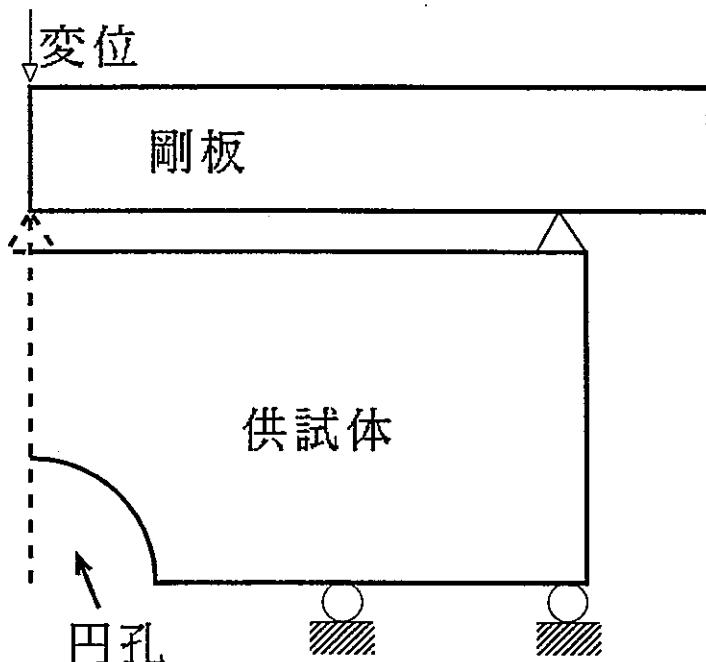
	破壊接近度	最大主ひずみ(引張正)
空洞の側壁	0.79	1.10×10^{-4}
空洞の天盤・下盤	1.11	6.84×10^{-4}

表4.5 円孔周辺の3点(図4.3参照)における直応力 σ_z の値。半球、全球、均一は、それぞれ図4.3のB、C、Aに対応している。

	半球		全球		均一
	E/10	10E	E/10	10E	
1	0.000663	-0.00312	0.021	0.0147	1.26
2	0.529	2.35	-0.00145	-0.00548	0.0520
3	-0.0913	-0.036	0.518	0.872	-0.51



a



b

図 4.1 模型 A 1、A 2（または、D 1、D 2）を一軸載荷する場合の模型の上下端面の横方向変位の拘束に関する 2 つの境界条件。a では拘束がなく自由変位を仮定。b では完全拘束を仮定。

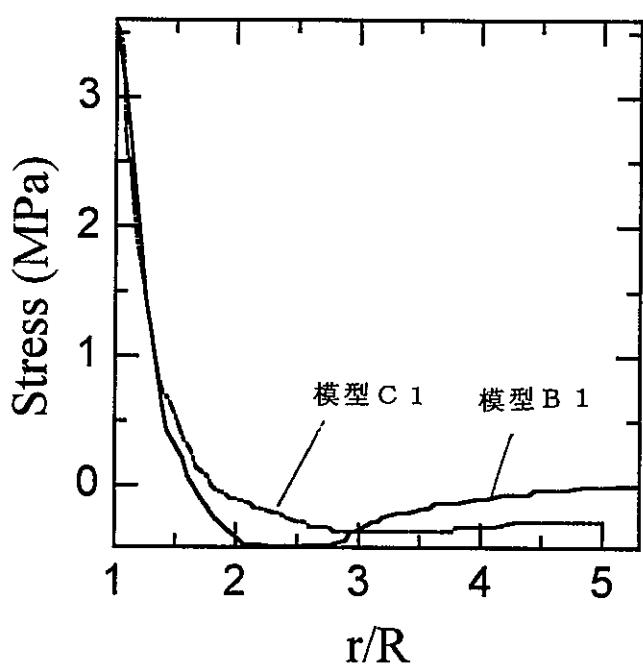


図 4.2 円孔中心を通って載荷方向に平行な線上の直応力 σ_r の分布 (xは載荷方向に直行する方向)

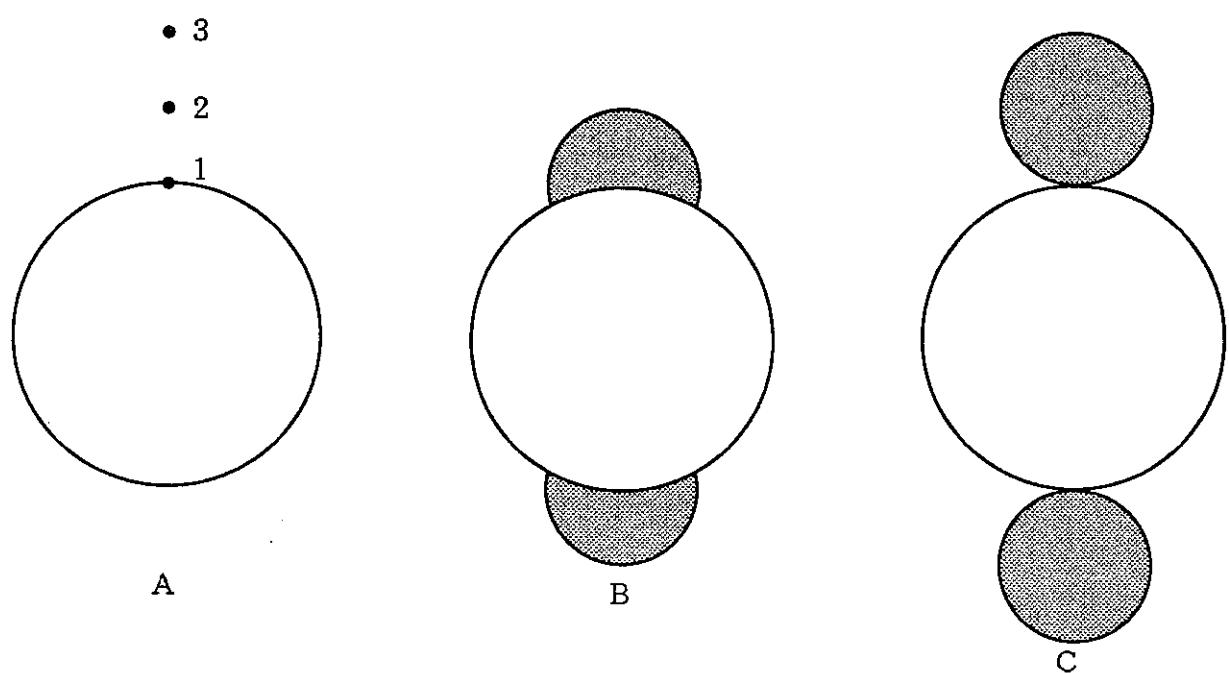


図 4.3 円孔中心を通って載荷方向に平行な線上に円盤形のインクルージョン
2つの位置 B、C にある場合の 3 つの状況。A はない場合（測点は表 4.
5 に示した応力の計算場所である）。

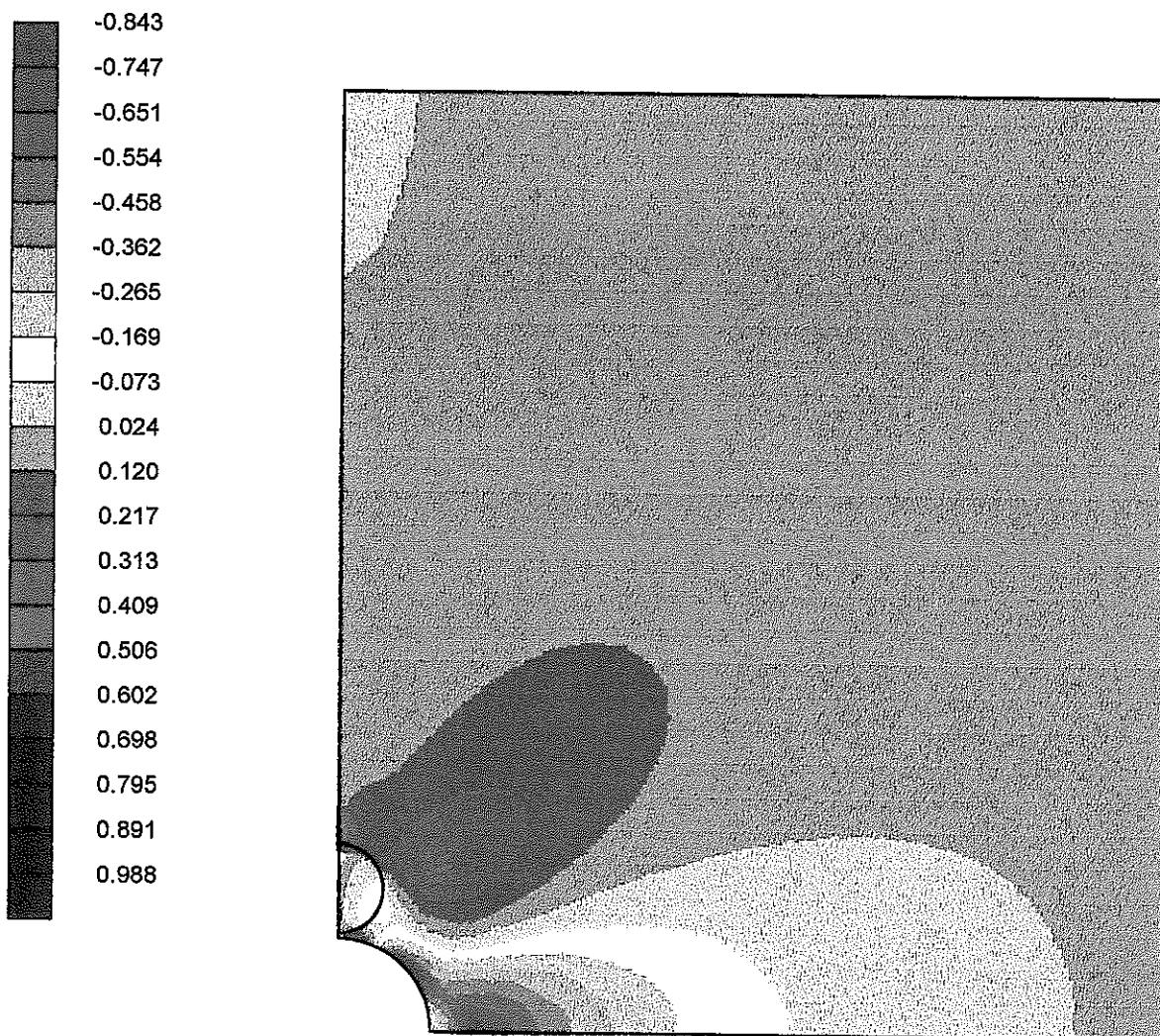


図 4.4 円孔周辺の直応力 σ_x の分布（ x は載荷方向に直行する方向）。C タイプのインクルージョン（図 4.2 参照）がある場合。応力の符号は + が引張である。

第5章 岩石の破壊過程と微視的構造の変化

5.1 はじめに

岩石に負荷される差応力が増大するにつれて、岩石内部では劣化または損傷が進行し、それがある量に達すると破壊に至るらしい。この損傷過程でどのような微視的構造の変化があるかを明らかにすることは、岩石のバリヤ特性の観点から極めて重要である。このために稻田花崗岩を単軸、ならびに、三軸圧縮し、最大荷重点付近で除荷した試料を用い、微視的構造の変化を具体的に明らかにすることを試みた。ここでは単軸圧縮試験結果を中心に報告する。

藤井他（1994, 1997）は、周ひずみの大きさが岩石損傷の程度のよい指標になること、ならびに、周ひずみを用いると最大荷重点付近の試験制御が容易に行えることを明らかにしている。そこで、本研究では、この周ひずみの大きさを損傷のパラメータとする。

供試体としては、稻田花崗岩を用いるが、花崗岩には3つの直交する割れやすい石目と、これに起因する異方性があることが従来から知られている。そこで、き裂の観察にあたっては、載荷軸に直交する断面を持つように切断することとし、石目に注目して実験結果を整理する。

き裂については、P波速度の測定による間接的な評価と、断面の観察による直接的な評価を行う。

P波速度については、多数の研究例があり、載荷に伴い半径方向のP波速度が減少することや、周ひずみの大きさとP波速度の間に直線的な関係があることが示されている（例えば萩野他、1996）。本研究でも、周ひずみの大きさとの関係を検討する。また、いくつかの方向の測定を行い、載荷方向や石目との関係についても検討する。

岩石の微視的構造の観察は、主に、レプリカ法（高橋他、1995）を用い、レプリカを偏光顕微鏡によって観察する。

5.2 供試岩石

稻田花崗岩を単軸圧縮試験に供し、周ひずみが-0.05～-0.35%になった時点で除荷し、P波速度を測定した。また、供試体断面の薄片とレプリカを作成し、スキャナライズ法によりき裂密度を評価した。

花崗岩には割れやすさの順に、リフト面(き裂、切れ目、石目の意)、グレイン面(石目、き裂の意)、ハードウェイ面の3つの面がある。

図5.1のブロックについてP波速度を測定した結果を表5.1に示す。P波速度の大小関係は次のようになった。

ハードウェイ面に直交>グレイン面に直交>リフト面に直交

リフト面に垂直にボーリングしたコアは、直径30mm、長さ60mmの円柱形に整形し、70°Cの温度で24時間乾燥させた後、1カ月以上放置し載荷に供した。

5.3 応力-ひずみの関係

載荷はInstron社製の材料試験器(5586型、最大荷重能力300kN、機械式)を用い、ひずみの計測は、軸方向伸び計(ゲージ長25mm、定格±1mm)、チェーン式周方向伸び計(定格±5mm)を用いて行った(いずれもInstron社製)。

周ひずみが-0.05~-0.35%になったときに除荷した応力-ひずみ線図を図5.2に示す。なお、-0.35%のもののみ最大荷重点をこえた(破断面は認められなかつた)。

5.4 P波速度の測定

無載荷の供試体に関する結果を表5.2に示す。側面を平滑にしないまま測定したので、半径方向のP波速度は載荷方向より小さくなつた。載荷軸方向(リフト面に直交)と2つの半径方向(グレイン、ハードウェイ各面に直交)についてP波速度を測定したところ(図5.3)、除荷開始時の周ひずみと除荷後のP波速度の関係は図5.4のようになった。

載荷方向のP波速度には載荷の影響はほとんど認められないが、半径方向のP波速度は載荷に伴い減少している。また、ハードウェイ面に直交する方向よりもグレイン面に直交する方がP波速度は小さい。

5.5 き裂の観察

5.5.1 レプリカの作成方法

フィルムは厚さ0.034mm、大きさ10×12cmのアセチルセルローズ(Bioden R. F.

A. 社製) を用いた。

レプリカを作成するための岩石表面は最終的にラップ仕上げをする。その後、試料面に少量の酢酸メチルを流し広げ、揮発しないうちに、試料とフィルムの隙間に気泡が入らないように注意しつつフィルムを張り付ける。試料面から剥がしたフィルムは丸まりやすいので、2枚のガラス板の間に挟み、ガラス板をクリップでとめ、30分間、70℃に空気浴させる。

5.5.2 観察方法

除荷後の供試体を載荷軸に平行な互いに直交する方向(軸方向1)、及び、載荷軸に垂直な方向(周方向)に切断し、表面を研磨してレプリカフィルムを作成した。各面の断面レプリカを引き伸し機に直接セットしプリントした。また、各供試体のリフト面の断面レプリカの9個所(図5.5)を偏光顕微鏡(optiphot2-pol、×約50)で撮影し、ハードウェイ・グレイン各面に直交するスキャンラインに交差するき裂の数を数え(図5.6)、き裂密度を評価した。

5.5.3 観察結果

レプリカの写真の一例を図5.7に示す。白い印どうしを結んだものがハードウェイ面に直交する方向を表す。無載荷のものと周ひずみ-0.35%で除荷したものと比較すると、き裂が増加していることがわかる。

図5.5の5の部分のリフト面のレプリカの顕微鏡写真を図5.8に示す。これらの写真において中央の水平な線はハードウェイ面に直交する方向を、鉛直方向の線はグレイン面に直交する方向を示している。き裂は9、すなわち、供試体の側面付近で多く、開口量も大きいようである。

5.5.4 き裂密度

除荷開始時の周ひずみとき裂密度の平均値との関係を図5.9に示す。なお、き裂密度は図5.5に示す要領で数えた。大まかな傾向として、載荷に伴いき裂密度が増加することがわかる。スキャンラインに平行なき裂については数えこぼしが多いので、リフト面内において、ハードウェイ面よりもグレイン面に平行なき裂の密度の方が大きいといえる。

5.5.5 P波速度とき裂密度

P波速度とき裂密度の関係を図5.10に示す。測定方向にかかわらず両者は直線関係を示している。

5.6 まとめ

稻田花崗岩を単軸圧縮試験し、周ひずみが $-0.05\sim-0.35\%$ に達した時点で除荷し、P波速度を測定するとともに、供試体表面のレプリカ像を鏡下で観察し微視的構造を調べた。このとき、花崗岩に存在するとされる異方性との関係にも配慮し、岩石が載荷によって受けた損傷の程度を各方向毎に明らかにしようとした。得られた主な結果は次のようである。

- (1) P波速度に関しては、載荷方向の速度は載荷によりほとんど変化しないが、載荷に直角方向（半径方向）の速度は、周ひずみ速度に反比例して減少する。この半径方向の速度には僅かながら異方性があり、ハードウエイ面に直角方向の速度はグレイン面に直角方向の速度よりも常に大きい。
- (2) き裂密度は供試体中心よりも側面の方が大きく、また載荷とともに増加するが、リフト面においてハードウエイ面よりもグレイン面と平行なほうが多い。
- (3) P波速度とき裂密度の間には、方向にかかわらず正の相関がある。

表 5.1 ブロックのP波速度

測定方向	P 波速度(km/s)
リフト面に直交	4.10
グレイン面に直交	4.16
ハードウェイ面に直交	4.30

表 5.2 円柱形供試体のP波速度

測定方向	P 波速度(km/s)
リフト面に直交	4.046
グレイン面に直交	3.664
ハードウェイ面に直交	3.845

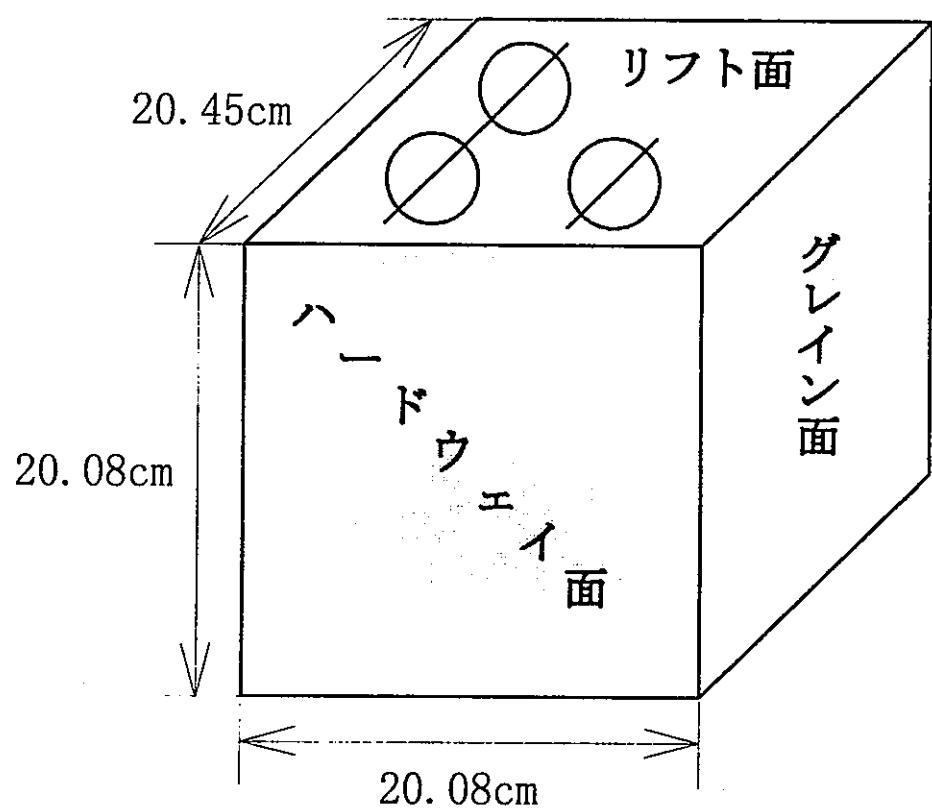
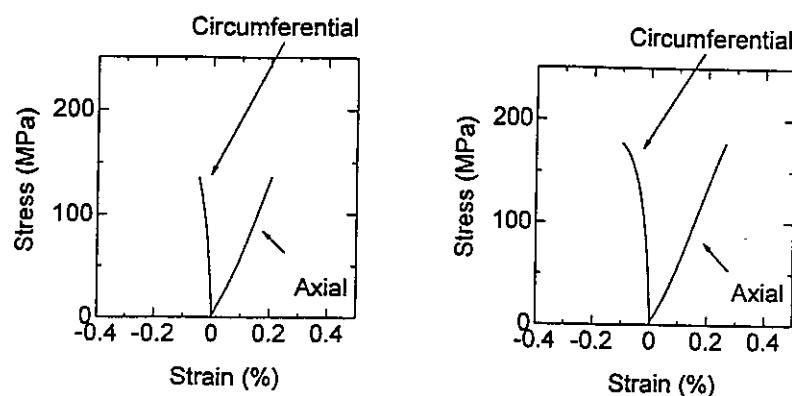
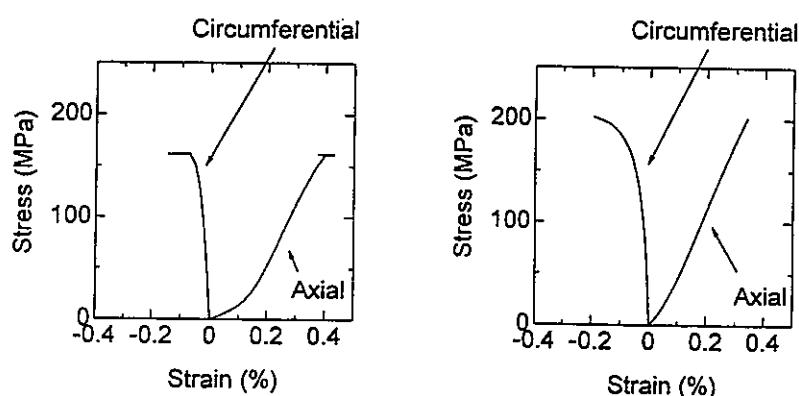


図 5.1 稲田花崗岩



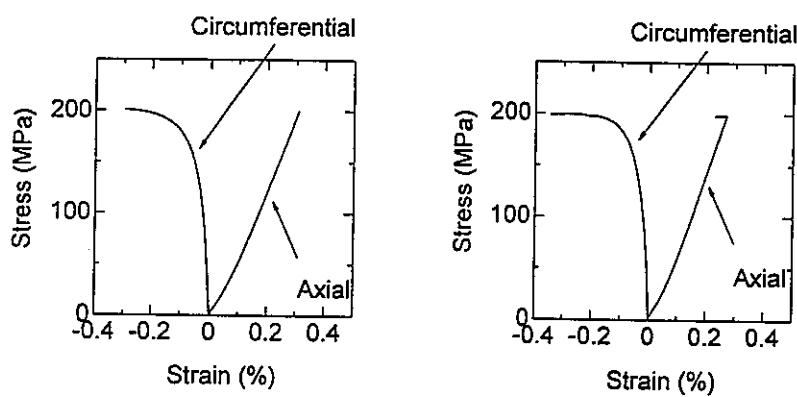
(a) 周ひずみ-0.05%

(b) 周ひずみ-0.10%



(c)周ひずみ-0.15%

(d)周ひずみ-0.20%



(e) 周ひずみ-0.30%

(f) 周ひずみ-0.35%

図 5.2 単軸圧縮試験における応力-ひずみ線図

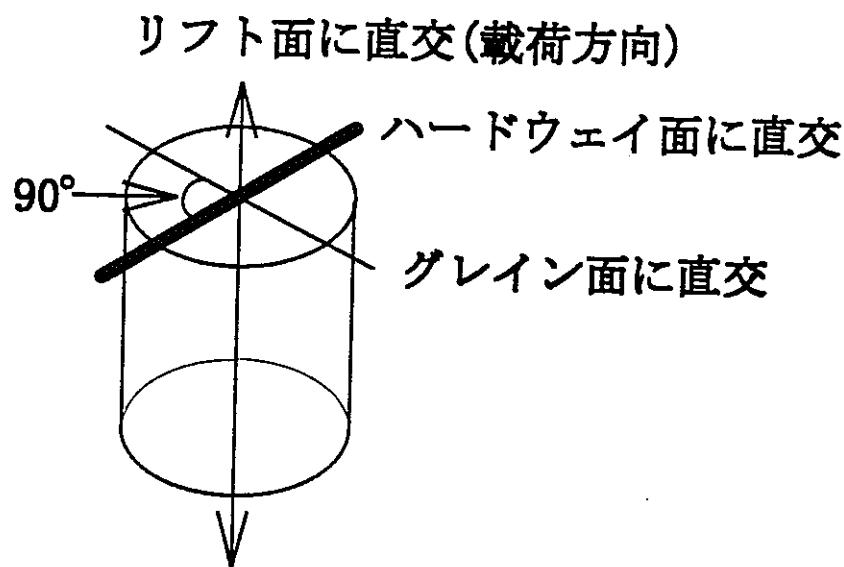


図 5.3 P波速度の測定方向

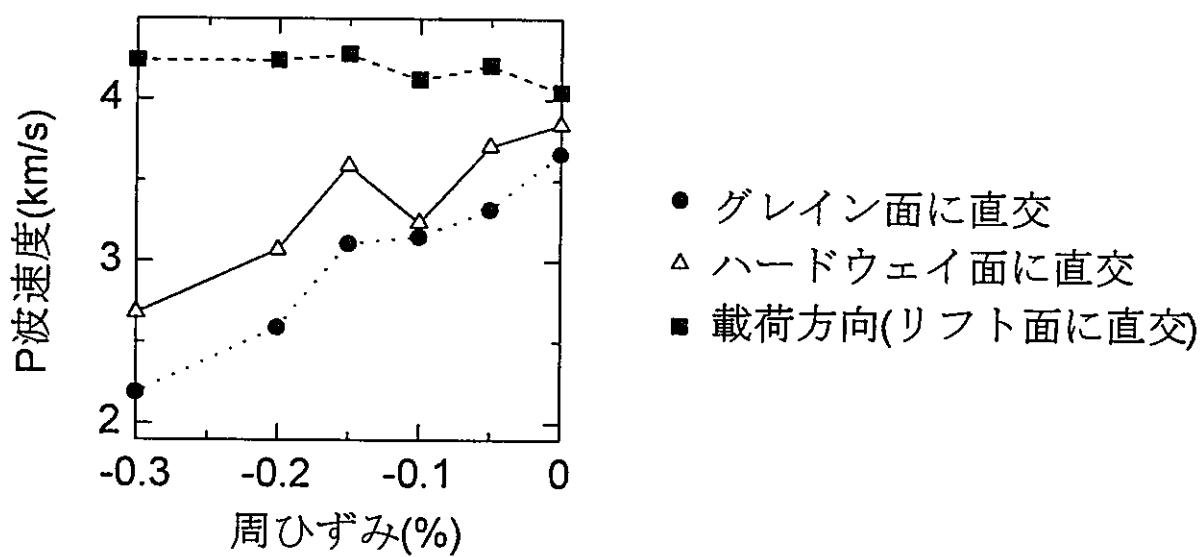


図 5.4 除荷開始時の周ひずみと除荷後のP波速度の関係

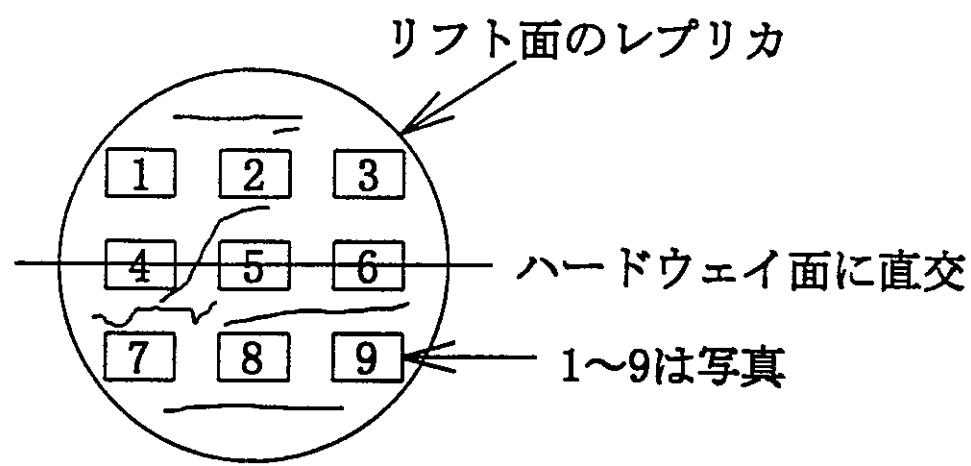


図 5.5 レプリカ上の顕微鏡写真的位置

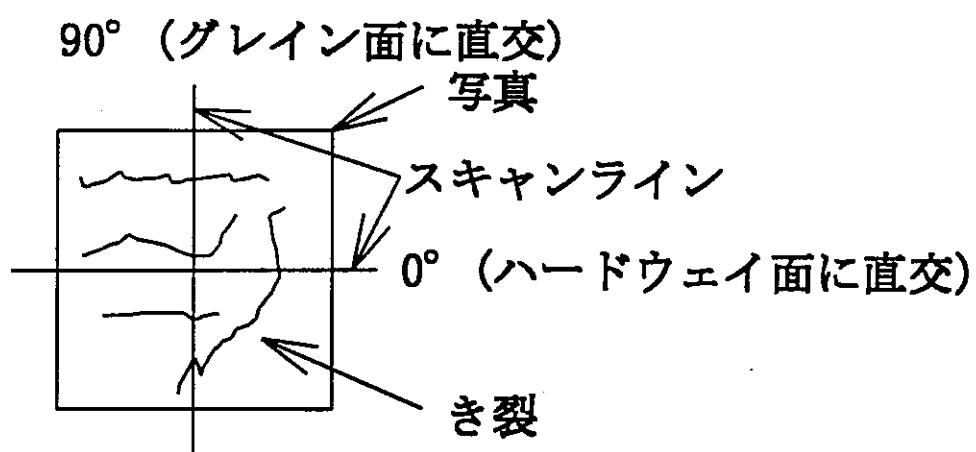
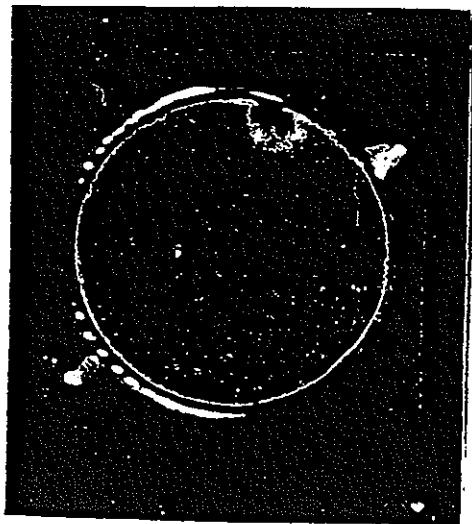
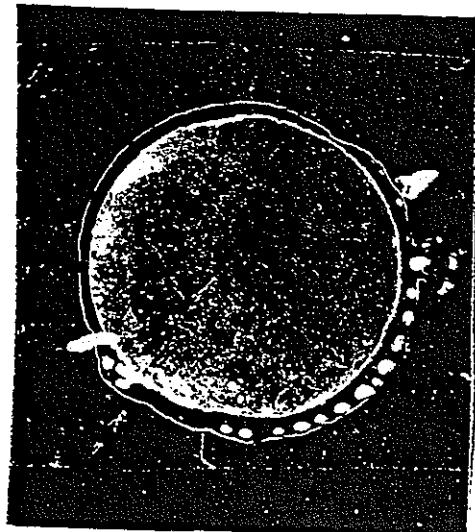


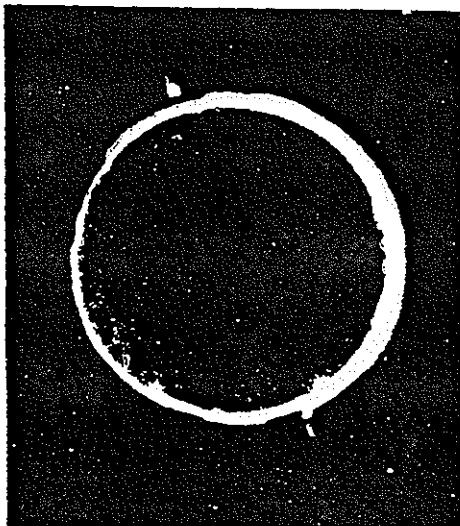
図 5.6 スキャンライン法の模式図



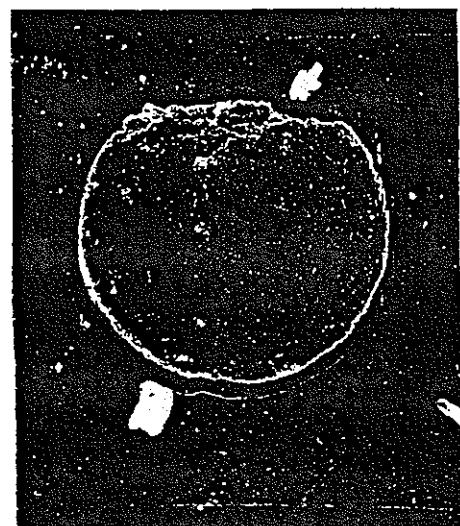
(a) 0%



(b) -0.05%

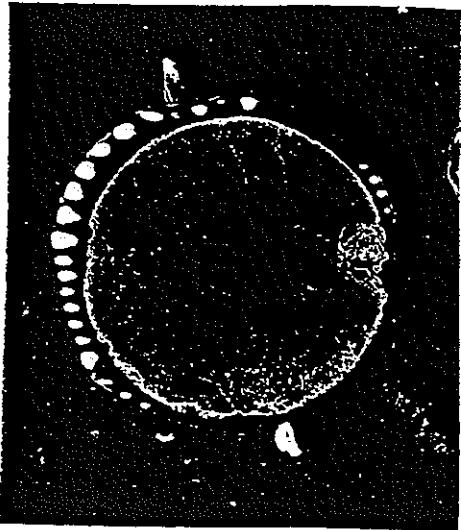


(c) -0.10%

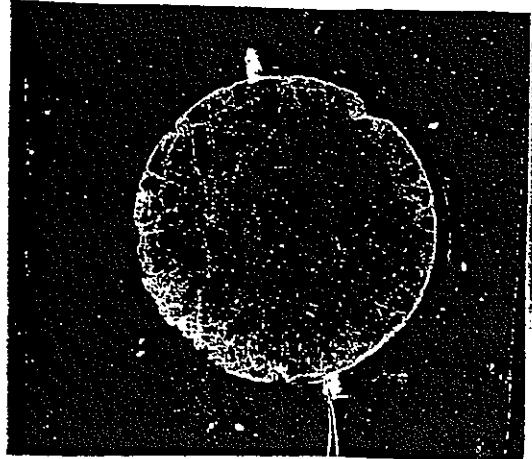


(d) -0.15%

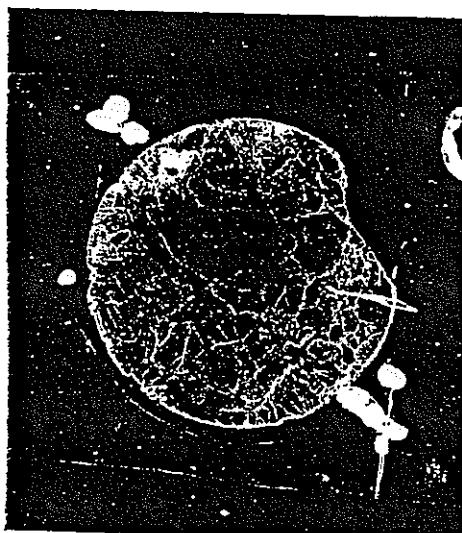
図5.7 単軸圧縮を受けた花崗岩のレプリカ（その1）



(e) -0.20%



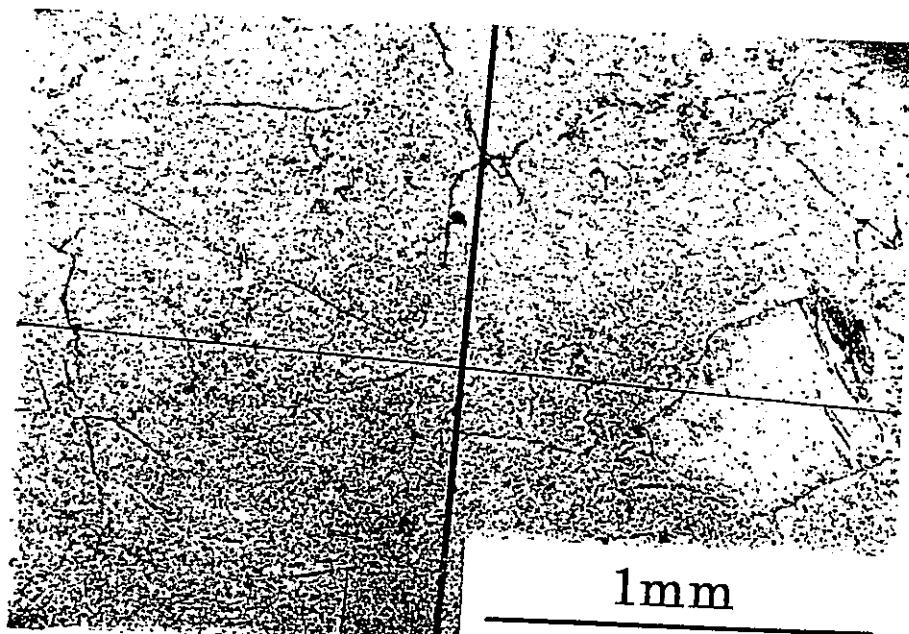
(f) -0.10%



(g) -0.35%

(直径は3cm)

図 5.7 単軸圧縮を受けた花崗岩のレプリカ (その 2)



(a) 0%



(b) 0.05%

図 5.8 単軸圧縮を受けた花崗岩のリフト面のレプリカの顕微鏡写真の例 (5、中央部分)

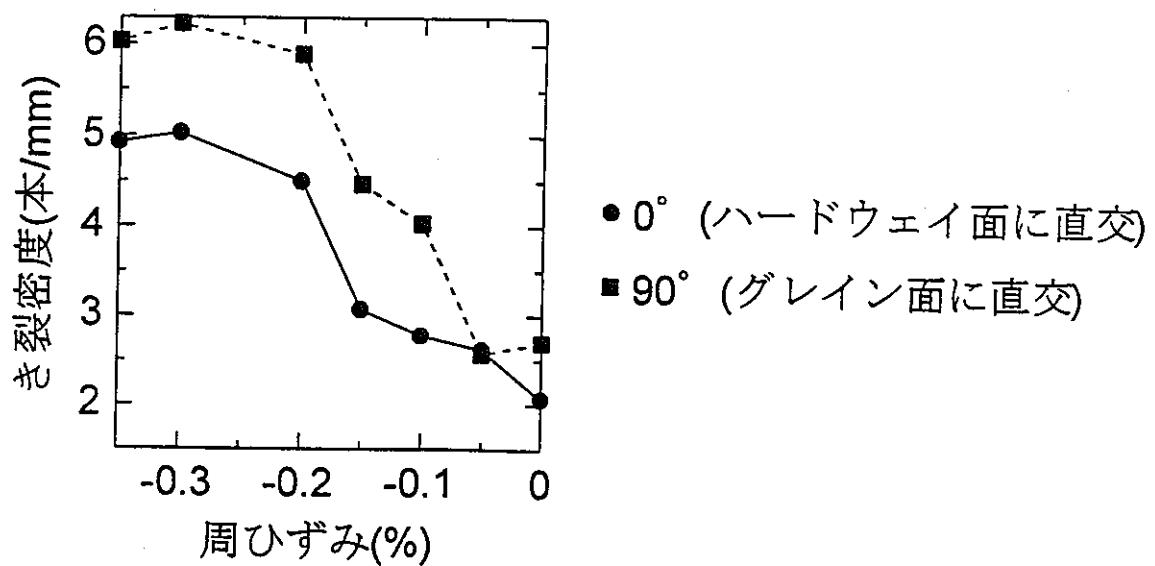


図 5.9 除荷開始時の周ひずみ(周ひずみ-0.30~-0.35%で最大荷重)とスキャン
ライン法による除荷後のき裂密度の関係

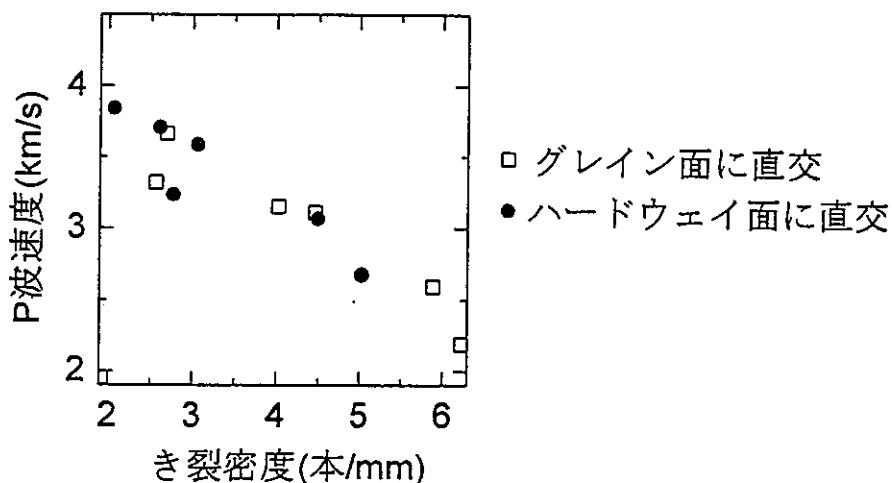


図 5.10 P波速度とき裂密度の関係

第6章 結言

本研究では、地下深部に設けた空洞周囲の周りにもたらされる微視的構造の変化や巨視的破壊について、模型試験を中心に調査したもので、得られた主な知見は以下のようである。

(1) 模型試験の岩盤模型となる凝灰岩の物性値は以下のようにであった。すなわち、ヤング率5200MPa、ポアソン比0.05、粘着力4.5MPa、内部摩擦角41°、圧裂引張強度3.2MPa、一軸引張強度1.3MPa。

(2) 模型試験では、1もしくは2個の円孔を持つ岩盤模型の単軸圧縮試験を行い、発生する破壊を観察した。孔が1個の場合、大型かつ縦長の模型においては、破壊の初生箇所は孔の天井・床面であった。このき裂はそのまま載荷方向に成長して供試体を貫通した。小型かつ横長の模型においては、破壊の初生箇所は孔の側壁であった。

孔が2個の場合、破壊の初生箇所は孔間隔に依存し、孔間隔が狭いときにはピラー側の孔側壁に一致した。この破壊の形態は、壁面に平行な薄い剥離が発生したので、せん断型というよりは引張型に近いと解釈できる。

(3) 模型の最終的な破断はき裂が供試体を貫通することによってもたらされ、かつ、緩み域と呼ばれるような破壊域の形成は認められなかった。

(4) 有限要素法に基づく数値解析を模型試験に対して実施し、破壊に関する実際と予測の一致の程度を検討した。その結果、き裂の初生位置はMohr-Coulomb説による予想と一致することがわかった。ただし、破壊の形態は限界引張ひずみ説に近く、いずれの説によっても模型試験結果を完全に説明するのは困難であることがわかった。

(5) 大型模型と小型模型では、境界条件によっては破壊の初生箇所と破壊形態に差異が現れた。この差異は岩石の不均質性に基づくもので、いわゆる寸法効果として説明することが可能である。

(6) 稲田花崗岩を単軸圧縮試験に供し、周ひずみが-0.05~-0.35%になった時点で除荷した。P波速度の測定から以下の諸点が明らかになった。

a) 載荷方向のP波速度には載荷の影響はほとんど認められない。

b) 半径方向のP波速度は載荷に伴い減少する。

c) 半径方向のP波速度のうちハードウェイ面に直交する方向のP波速度はグレイン面に直交するものより常に大きい。

(7) また、供試体表面のレプリカの顕微鏡下における観察から以下の諸点が明らかになった。

- a)き裂密度は供試体中心よりも側面付近の方が大きい。
- b)き裂密度は載荷に伴い増加する。
- c)リフト面においてハードウェイ面よりもグレイン面と平行なき裂密度のほうが大きい。
- d)P波速度とき裂密度の関係の間には測定方向に依存しない直線的な関係が認められる。

参考文献

- 植田浩義(1997)：緩衝材の設計方法と設計例、地層処分研究情報交換会報告会資料 (INTEGRATE'97), PNC TN1100 97-004
- Zienkiewicz, O.C.(吉識雅夫、山田嘉昭監訳)：マトリックス有限要素法
Goodman, R. E. : *Introduction to Rock Mechanics*
- 利光立行：地表近傍で起こる地圧現象に関する研究、平成7年度北海道大学修士論文(1996)
- 金子勝比古・柴拓海・大見美智人(1988)：クラック理論に基づく岩盤のヤング率の評価、日本鉱業会誌、Vol. 12、 p. 863-869
- 桜井春輔(1982)：トンネル工事における変位計測結果の評価法、土木学会論文報告集、No. 317, p. 93-100
- Scholz, C. (1996、私信)
- 里優(1994)：岩石のダイラタンシーに関する基礎研究、北海道大学学位論文
高橋
- 学・大和田朗・石島洋二(1992)：青色顔料を混合した樹脂によるポア観察について、応用地質33巻5号、 p. 50-62
- 高橋学・鷹城正浩・松崎知子・清水均・浜島良吉・石島洋二(1994)：応力によって生じる亀裂群の可視化について、応用地質学会、平成6年度研究発表会講演論文集、 p. 139-142
- 高橋学・田辺昌士・清水均・浜島良吉(1995)：レプリカフィルムを用いたき裂の可視化法について、資源と素材'95(春季大会)、 p. 71
- 西山孝・楠田啓・北川元紀(1990)：蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の可視化と自動抽出、資源と素材、Vol. 106、No. 10、 p. 573-579
- 林為人・鈴木舜一・高橋秀(1991)：加熱による稻田花崗岩のマイクロクラックの発生、資源と素材'91(春季大会)、 p. 305
- 萩野智成・福井勝則・大久保誠介(1996)：一軸圧縮試験における弾性波伝播特性の変化、資源と素材'96(春季大会)、 p. 171
- Hallbauer, D.K., Wagner, H. and Cook, N.G.W. (1973) : Some Observations Concerning the Microscopic and Mechanical Behavior of Quartzite Specimens in Stiff, Triaxial Compression Tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 10, p. 713-726
- 藤井義明・木山保・石島洋二(1994)：引張ひずみ基準に関する研究、資源と素材、Vol. 110、 No. 3、 p. 211-214

- 藤井義明・木山保・大森瑞穂・石島洋二(1997)：岩石のクリープ試験における周
ひずみの挙動に関する研究、資源と素材、Vol. 113、No. 3、p. 162-168
- ・藤井義明・石島洋二(1995)：気乾状態と湿潤状態における上砂川砂岩 のクリ
ープ特性について、資源・素材学会平成7年度春季大会講演要旨集、p. 2