

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

限定資料

地層処分におけるシーリングに関する 基礎的研究（V）

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
区	ZJ1600 96-001	1996.4.3

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

(動力炉・核燃料開発事業団委託研究報告書)

1996年3月

北海道大学工学部

石島 洋二

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

1996年3月

地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究（V）

石島 洋二*

要旨

地層処分に限らず、岩盤あるいは岩盤内に設けられた構造物を効果的にシーリングする上で、岩盤中に含まれている不連続面のシーリングが最大の問題になる。ところが、天然の不連続面の力学的ならびに水理学的性質に関する研究は、室内試験の段階に留まっている。地下岩盤には、様々な規模と性質を持ち、しかも様々な環境に置かれた無数の不連続面が存在しており、原位置での簡易な計測によって、特性が把握する技術の開発が望まれる。

本研究はこの要請に答えようとするもので、原位置試験として孔内点載荷試験を取り上げ、本試験法により、不連続面の力学的性質に関して、どのような情報を得ることができるかを検討することにした。

今回は、不連続面を含む岩盤に関して、常に均一な供試体を使用できるように、不連続面を持つ岩盤模型を開発した。これを用いて、不連続面の力学的性質を評価するための3つの室内試験法を実施し、試験方法の違いが結果に及ぼす影響について検討した。次いで、孔内点載荷試験に関して、

* 北海道大学工学部・資源開発工学科・岩石力学講座

3 次元有限要素法による解析と岩盤模型試験を実施した。

以下に得られた成果の概要を示す。

充填型不連続面を持つ岩盤模型として、岩盤のインタクト部をモルタル、不連続面を厚さ1mmのセメントミルクで作る方法を開発した。

これを供試体として、不連続面の力学的性質を明らかにするための室内試験を行い、次の知見が得られた。

1) 3軸試験、一軸圧縮試験、一面せん断試験とも、不連続面の強度特性に関してほぼ同じ評価を与える。ただし、一軸圧縮試験では、応力状態に関して狭い範囲の強度しか評価できない。

2) 一面せん断試験においては、用いる変位の計測方法により、得られる結果が著しく異なる。CCDカメラを利用して不連続面の相対的な変形を直接計測する方法は、正確な評価を与える。

3) 一面せん断試験で得られる充填型不連続面のせん断応力-ずれ変位線図は、弾-完全塑性的挙動を示す。

次に、充填型不連続面を含む岩盤の孔内点載荷試験について、3次元応力解析と模型試験を行い、荷重-孔径変位線図の傾き（以下単に傾きと呼ぶ）に関して以下の知見が得られた。

4) 供試体が不連続面を持たず均質、等方の場合、傾きは方向によらずほぼ一定となる。

5) 不連続面が観測孔に接近して存在する場合、不連続面に垂直方向の傾きは、それ以外の方向の傾きより小さい。

6) 不連続面が観測孔に露出している場合、その不連続面を直接載荷したときの傾きは他の方向の傾きよりかなり小さい。

7) 上記の傾きの異方性から、不連続面の垂直剛性を評価することができる。

目 次

1	緒言	1
1. 1	研究の目的と意義	1
1. 2	研究の方法	3
2	不連続面を持つ岩盤模型の開発	4
2. 1	はじめに	4
2. 2	不連続面を持つ岩盤模型の材料とその力学的特性	5
2. 2. 1	不連続面を持つ岩盤模型の材料	5
2. 2. 2	不連続面を持つ岩盤模型の力学的特性	5
2. 3	不連続面を持つ岩盤模型の作成方法	5
2. 3. 1	単軸圧縮試験用の傾いた一枚の不連続面を持つ岩盤模型の作成方法	5
2. 3. 2	一面せん断試験用の一枚の不連続面を持つ岩盤模型の作成方法	6
2. 3. 3	三軸圧縮試験用の一枚の傾いた不連続面を持つ岩盤模型の作成方法	7
2. 3. 4	孔内点載荷試験用の岩盤模型	8
3	不連続面の強度・変形特性に関する室内試験	20
3. 1	はじめに	20
3. 2	傾いた不連続面を持つ岩盤模型の単軸圧縮試験	21
3. 2. 1	理論	21
3. 2. 2	試験方法	21

3. 2. 3	試験結果	22
3. 3	一枚の不連続面を持つ岩盤模型の一面せん断試験	22
3. 3. 1	試験方法と試験装置	22
3. 3. 2	試験結果	24
3. 4	一枚の不連続面を持つ岩盤模型の三軸圧縮試験	24
3. 4. 1	試験方法と試験装置	24
3. 4. 2	試験結果	25
3. 5	不連続面の相対的変位の計測方法	26
3. 5. 1	CCDカメラを応用した測定原理	26
3. 5. 2	不連続面の変位計測方法	26
3. 5. 3	CCDカメラによる変位測定の精度	28
3. 6	一面せん断試験における変位の測定結果	29
3. 6. 1	せん断応力-ずれ変位線図とせん断剛性	29
3. 6. 2	破壊後の様相	29
3. 7	強度の評価	30
4	不連続面の評価に対する孔内点載荷試験の応用	38
4. 1	はじめに	38
4. 2	孔内点載荷試験方法	38
4. 2. 1	測定上の特長	38
4. 2. 2	孔内点載荷試験の概要	39
4. 3	数値解析	40
4. 3. 1	解析方法	40
4. 3. 2	解析1：不連続面の剛性が圧力-孔径変化線図に及ぼす影響	40
4. 3. 3	解析2：不連続面が測定孔を貫通する場合	41
4. 4	室内模型試験	42
4. 4. 1	試験方法	42

4.	4.	2	試験結果	4	2
5	結言	5	5		
6	参考文献	5	6		

第1章 緒言

1. 1 研究の目的と意義

地層処分に限らず、岩盤あるいは岩盤内に設けられた構造物を効果的にシーリングする上で、岩盤中に含まれている不連続面のシーリングが最大の問題になる。ところが、地山状態に置かれた不連続面の性状や力学的ならびに水理学的性質に関する情報を入手するのは、現段階においては、いくつかの理由のために極めて困難である。

地下岩盤には、種々の規模と性質を持ち、しかも様々な環境に置かれた不連続面が多数存在している。したがって、不連続面の特性を把握しようとすれば、ある程度の数を試験することが必要であろう。しかし、1枚の不連続面ですら、これを乱さないで採取するのは困難で、こういった問題があるために、不連続面に関する情報を取得する技術は、まだ研究段階に留まっている。

現在、不連続面の力学的性質に関する情報を得るために、下記の3つの方法が考えられている。

- 1) 不連続面を含む岩盤供試体を採取し、室内試験をする。
- 2) 不連続面の性状・特性と力学的性質の関係を明らかにし、前者の調査から後者を推定する。
- 3) 原位置計測をする。

1)は、現時点では標準的かつ厳密な方法でよく使われている。しかし、ラインドリリングなどを用いた供試体の採取作業は時間と経費を要し、供試体の整形も容易でない。1個の試験を実施するだけでも多大な労力が必要で、多数個の試験を実施することは不可能に近い。また、しばしば小さい供試体しか採取できないので、得られる特性値が現場の値と異なる危険性がある。このように、室内試験にはいくつかの限界や制約があることは否めない。

2)の方法は、不連続面についての知見が集積されつつある現在、将来的

には、かなり定量的な評価が可能になるであろう。不連続面の性状を評価するために、ISRM（国際岩の力学会）では、次の10個の特性を挙げている：

a:方位、b:幅、c:持続性、d:粗さ、e:母岩の強度、f:開口度、g:充填物、h:浸透性、i:組の数、j:ブロックサイズ

不連続面の力学的特性は、このように多くの要因に支配されているので、これらの性状と力学的特性の相関を明らかにするのは、困難を伴うであろう。なお、不連続面の性状の調査は、それが地表や空洞壁面に露出している場合には比較的容易である。地山状態に置かれている場合には、ボアホールの観察やジオトモグラフィーなどの間接的な測定に頼らざるを得ない。ボアホールの観察技術は、CCDカメラを用いたボアホールテレビなどの開発により急速に進歩しているものの、得られる情報の質は肉眼による直接的な観察に比べるとまだ低いといわざるを得ない。

現在、実用化されている3)の方法として、原位置ブロックせん断試験がある。しかし、この方法は大規模で時間と経費を必要とする。なお、原位置せん断試験で実現する不連続面上の荷重分布は一様でないという批判がある。この点で、原位置三軸試験は優れているが、まだ、開発の端緒についたばかりの段階である。

いずれにしても、3)の方法は、実際の地下環境下に置かれた不連続面に対して直接試験をするので、得られる情報の質が高いという利点がある。

そこで、本研究では、3)の原位置試験に注目することにし、具体的には、孔内点載荷試験による不連続面の調査法の開発を研究目的に据え、主に、室内模型試験によって調査を進めることにした。

本試験により、岩盤の荷重-変位線図が得られる。もし、測点近傍の岩盤が不連続面を含んでいれば、その存在は線図に影響するであろう。逆に、影響を調べれば、不連続面に関して次のような特長を持った情報が得られる可能性がある。

a)地山状態の下での特性・挙動が測定されるので、この意味で測定値としての質が高く、有用である。

b)原位置計測技術は岩盤の剛性の測定方法として普及しており、したがって、技術的な問題は少ない。

問題は、本試験で得られる情報量が少ないことである。この欠点は、2)の方法と組み合わせることで補える可能性があり、今後の発展が期待できる方法といえよう。

1. 2 本研究の方法

試験は天然の不連続面を用いるのが理想的である。しかし、一定の品質のものを大量に用意するのは困難である。そこで、ひび割れ岩の模型を開発して使用することにした。試行錯誤の結果、最終的に、岩盤のインタクト部としてモルタルを、また、充填型の厚さ1mm 前後の不連続面の材料として、超微粒子セメントミルクを使用することにした（第2章）。

孔内点載荷試験に先立ち、用いる不連続面の力学的性質を明らかにしておく必要がある。このために、標準的な方法とされる一軸圧縮試験、三軸試験、一面せん断試験を実施した（第3章）。

最後に、孔内点載荷試験を不連続面の性質の把握に応用する可能性について、数値計算、ならびに、模型試験を行って検討した（第4章）。

第2章 不連続面を持つ岩盤模型の開発

2. 1 はじめに

同じ品質の不連続面を持つ岩盤供試体を多数個、用意するのは不可能に近い。そこで、本研究では、不連続面を持つ岩盤の模型を開発して用いることにした。

岩盤模型は、インタクト部と不連続面の2つから構成される。インタクト部として、種々の材料を試験した結果、最終的に、モルタルを採用することにした。

不連続面の作成方法としては、次の2つが考えられる。第一は、楔の圧入などにより、インタクトな岩盤模型に引張破面を入れて、これを不連続面とする方法である。この方法で得られる面は、実際に近い性状を持っていることがわかっている。しかし、品質のばらつきが大きく、また、特に大きな寸法を作ることが難しいという欠点がある。第二は、不連続面として、薄肉の充填層を用いる方法である。この方法は、再現性が高く、均質な供試体を多数作成することが出来るという特長があるものの、一方では、厚みが薄い面を作ることが難しいという問題点がある。試行錯誤の結果、材料として超微粒子セメントミルクを用い、1mmの厚さの面を作成する技術の開発に成功した。

そこで、本研究では、不連続面を第二の方法によって作成することにし、次のような方法を開発した。すなわち、型枠を用いた岩盤模型の作成の際に、不連続面に当たる部分に薄い鋼製の仕切板を置き、インタクト部に相当する部分にモルタルを打設する。その後、仕切板を抜き、その跡に出来る狭い隙間に流動性の良いセメントミルクを流し込んで不連続面を作成する。

以下に、模型の構成材料の特性と模型の作成方法の詳細について述べる。

2. 2 不連続面を持つ岩盤模型の材料とその力学的特性

2. 2. 1 不連続面を持つ岩盤模型の材料

岩盤のインタクト部を構成するモルタルの配合比は、セメント：珪砂：水 = 3 : 6 : 2 (重量比) である。打設後、2～3週間養成してから試験に供する。充填型不連続面の模型材料となるセメントミルクは、セメントとして、超微粒子セメント（三菱セメント製）を使用する。配合比は、水／セメント (W/C) = 1.50 % である。

2. 2. 2 不連続面を持つ岩盤模型の力学的特性

岩盤模型の構成要素であるモルタルとセメントミルクについて、単軸圧縮試験、圧裂試験、三軸圧縮試験を行い、基本的な性質を調べた。

モルタル供試体の単軸圧縮試験に際しては、軸ひずみと周ひずみを測定した。このために、変位計およびひずみゲージの2種類の計測方法を用いた。超微粒子セメントミルクのひずみの測定には変位計を用いた。

モルタルおよび超微粒子セメントミルクの三軸圧縮試験結果を、図2.1に示す。これより、モルタルのせん断強度は4.1MPa、超微粒子セメントミルクのせん断強度は、0.70MPa と評価でき、後者のせん断強度は前者の約1/6 である。

ひずみゲージにより測定したモルタルの三軸試験における応力－ひずみ線図を図2.2に示す。また、得られた強度・変形特性を、表2.1、表2.2に示す。

2. 3 不連続面を持つ岩盤模型の作成方法

2. 3. 1 単軸圧縮試験用の傾いた一枚の不連続面をもつ岩盤模型供試体の作成方法

単軸圧縮試験用の供試体は、図2.3に示すように、 $50 \times 50 \times 90\text{mm}$ の直方体で、一枚の角度 α の傾きを持つ不連続面を含んでいる。角度 α として、 45° から 60° まで 5° おきにえた値を採用した。また、不連続面は次の2種類を用意した。

- a) 厚さが 0.1mm 程度の不連続面
- b) 厚さが 1mm の不連続面

供試体は最初にインタクト部であるモルタルを作成し、次に、不連続面である超微粒子セメントミルクを打設するという方法をとった。以下にその作成手順を示す。

- ①型枠にモルタルを流し込みインタクト部を作成する。
- ②2～3日おいた後、モルタルを、型枠からはずし2～3週間養成する（図2.4(a)）。
- ③このモルタルをダイヤモンドカッターを用いて直方体に整形する（図2.4(b)）
- ④ダイヤモンドカッターを用い直方体の供試体を図2.4(c)に示すように斜めに切断する。この作業においては所定の角度に切断されるように若干の工夫をした。
- ⑤不連続面の幅が 0.1mm の供試体は次の要領で作成した。斜めの切断面の両側に超微粒子セメントミルクを塗った後、互いを密着させ、約1分程押さえつけた後、放置し、10日間空中養生する。

不連続面の幅が 1mm の供試体は次の要領で作成した。斜めに切断した供試体を定盤の上で厚さ 1mm のアルミ板を介して所定の位置に固定した後、この状態がずれないようにして、アルミ板を引き抜き、隙間に超微粒子セメントミルクを流し込む。この際、セメントミルクに含まれている気泡を抜くために、バイブレータを断続的に30秒ほどかける。この状態で1日放置した後、供試体を定盤からはずし、10日間養生する。

2.3.2 一面せん断試験用の一枚の不連続面をもつ岩盤模型の作成方

法

一面せん断試験では、図2.5に示すように、一枚の不連続面をその中央部に含む70x70x35mmの直方体状の供試体を用いる。不連続面は次の3種類を用意した。

- a) 厚さが0mmの不連続面
- b) 厚さが約0.1mmの不連続面
- c) 厚さ1mmの不連続面

供試体は以下の方法で作成した。

- ① 供試体の作成には、図2.6に示す型枠を使用する。型枠には溝が切ってあり、厚さ0.8mmの鋼製の仕切板をここに組み込んだ後にモルタルを流し込む。打設して2日目に仕切板を抜く。
- ② 不連続面の厚さが0mmの供試体の場合、2つのインタクト部を型枠からはずし、位置を合わせて両者を重ねた後、10日間空中養生する。

不連続面の厚さが0.1mmの供試体の場合、2つのインタクト部を型枠からはずし、両側に超微粒子セメントミルクを塗った後、位置に注意して両者を密着させ、約1分程押さえつけ、その後10日間空中養生する。不連続面の厚さが1mmの供試体の場合、仕切板を抜いた後、超微粒子セメントミルクを隙間に流し込む。この際、ミルクに含まれている気泡を抜くためにバイブレータを1分程かける。セメントミルクは打設後1日で固まるので、型枠からはずし、10日間空中養生する。

2.3.3 三軸圧縮試験用の一枚の傾いた不連続面をもつ岩盤模型の作成方法

供試体は、図2.7に示すように、直徑30mm、高60mmの円柱形をしており、その中間部に載荷軸に垂直な面に対し角度 α で交わる不連続面を含んでいる。角度 α として、40°から60°まで5°毎の値を採用した。不連続面は次の2種類を用意した。

- a) 厚さが0mmの不連続面

b) 厚さが約0.1mmの不連続面

供試体は次の手順で作成した。

- ① 紙型の型枠（昭和丸筒製、製品名：ソノモールド）を使用し、この中にモルタルを流し込む。
- ② 2～3日後、直径100mm、長さ200mmの円柱形のモルタルを型枠からはずし2～3週間養生する。
- ③ このモルタルからボーリングマシンで径30mmのコアを抜き、ダイヤモンドカッターで長さ62mmに切断する。次に、平面研削盤でコアの両端面を約1mmずつ削り、長さ60mmに仕上げる。
- ④ 2. 3. 1項で述べた方法により、ダイヤモンドカッターを用いて円柱形供試体を斜めに切断する。
- ⑤ 不連続面の厚さが0mmの場合には、切断された供試体どうしを所定の位置に合わせて試験に供する。

不連続面の厚さが0.1mmの場合には、切断面に超微粒子セメントミルクを塗り、切断された供試体どうしを所定の位置に合わせて密着させ、約1分程押さえつけておく。その後10日間空中養生する。

2. 3. 4 孔内点載荷試験用の岩盤模型

孔内点載荷試験に関する室内試験を実施するために、図2. 8に示すような、 $250 \times 250 \times 250\text{mm}$ の立方体状岩盤模型供試体を用いる。模型は1枚の不連続面を持っており、インタクト部はモルタル、不連続面は厚さ0.4mmのセメントミルクから構成されている。なお、インタクト部分からのみ構成されている供試体も用意する。

模型供試体は次の順序で作製する。

- ① 内寸 $250 \times 250 \times 260\text{mm}$ の型枠の中に、厚さ0.3mmの鋼製の仕切板を挿入した後、モルタルを打設する。
- ② モルタル打設後、1日放置してから仕切板を抜き、隙間に超微粒子セメントミルクを打設する。

- ③供試体を型枠から外し2週間水中で養生する。
- ④ダイヤモンドカッターにより $250 \times 250 \times 250$ mm の立方体に整形し、空気中で2週間養生する。

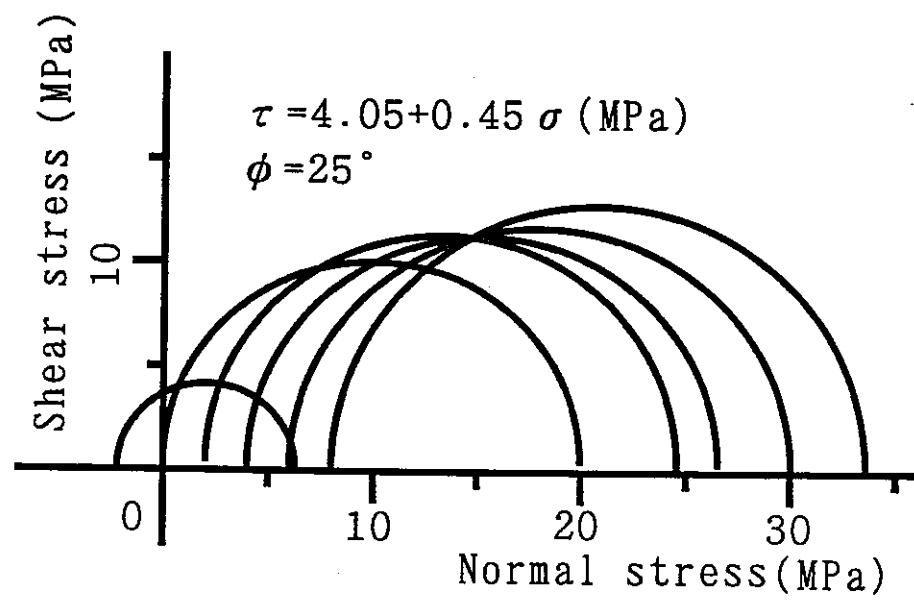
供試体作製後、 250×250 mmの面の中央に垂直に76mmの孔を穿孔し試験に供する。上記の方法で、不連続面と測定孔の位置関係が異なる合計5種類の供試体を各々数個ずつ作製した（図2. 8参照）。

表 2. 1 岩盤模型のインタクト部を構成するモルタルの強度・変形特性

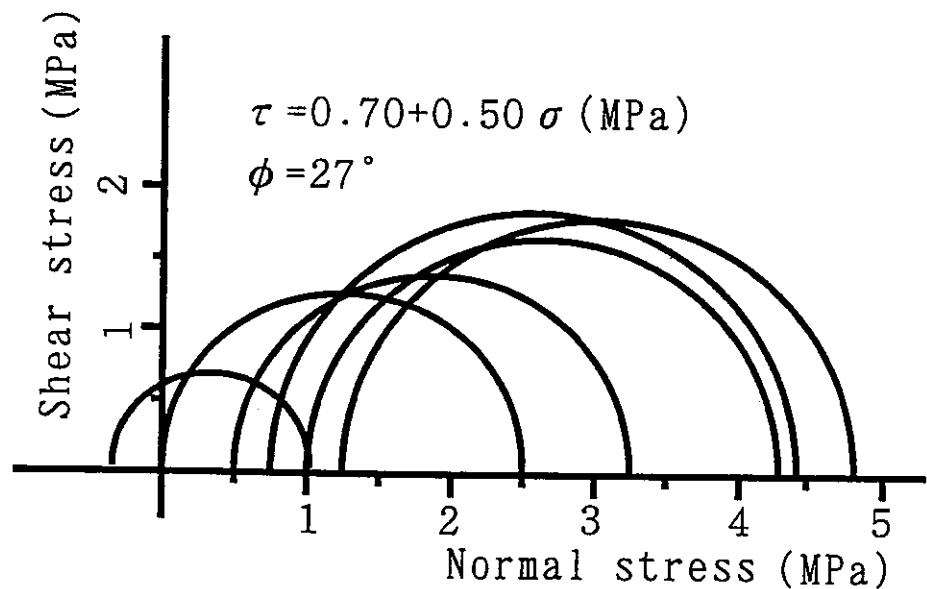
	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
ゲージで測定	19.6 ±0.9	2.13 ±0.04	7.9 ±0.9	0.16 ±0.01
変位計で測定	20.5 ±0.1		8.0 ±0.5	0.14 ±0.01

表 2. 2 岩盤模型の不連続面を構成するセメントミルクの強度・変形特性

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
3.48 ±0.70	0.34 ±0.10	0.85 ±0.10	0.15 ±0.02



(a) モルタル



(b) 超微粒子セメントミルク

図 2. 1 岩盤模型を構成する材料の三軸試験結果。a)はインタクト部を構成するモルタル。b)は不連続面を構成するセメントミルク

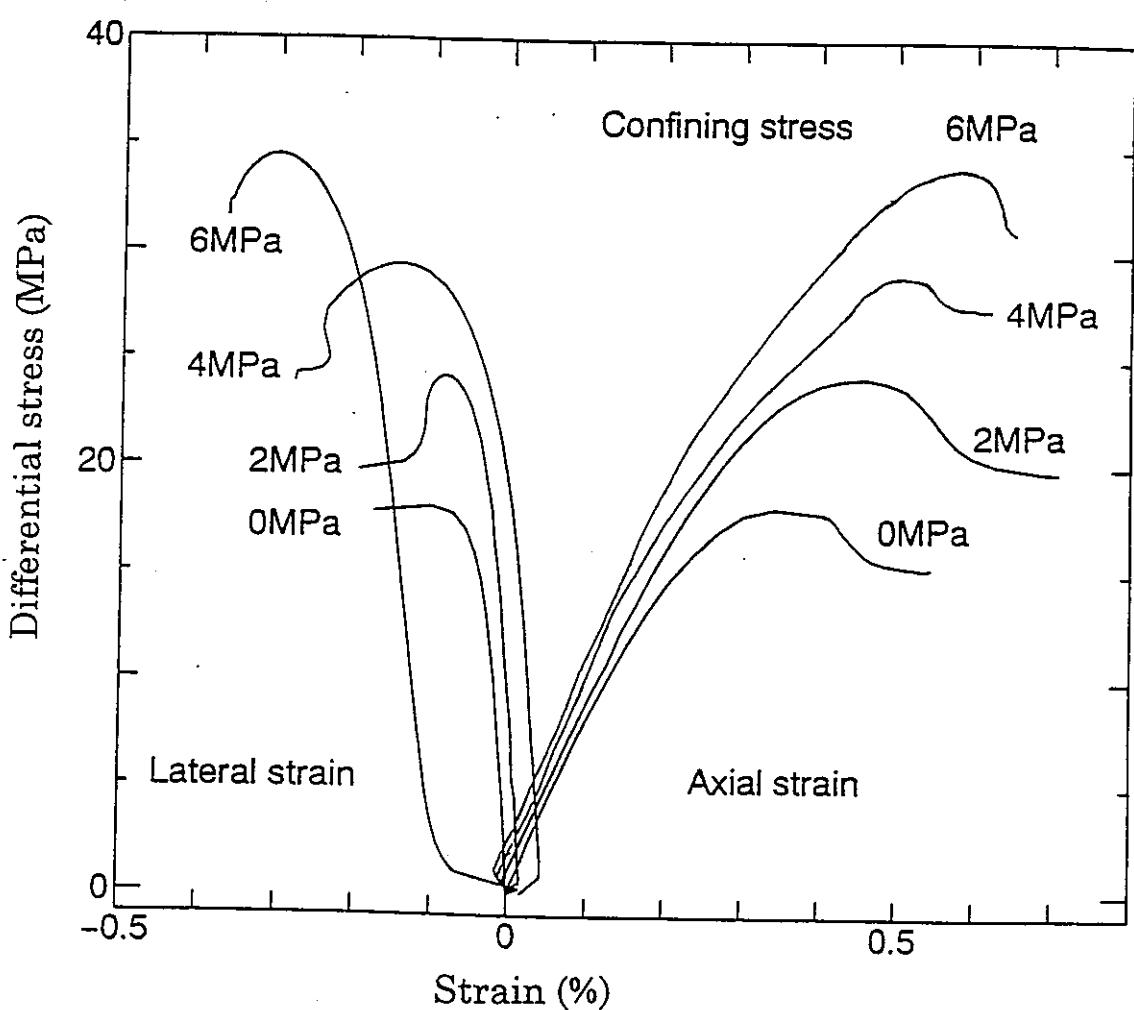


図 2. 2 岩盤模型のインタクト部を構成するモルタルの三軸試験下における差応力 - ひずみ線図。

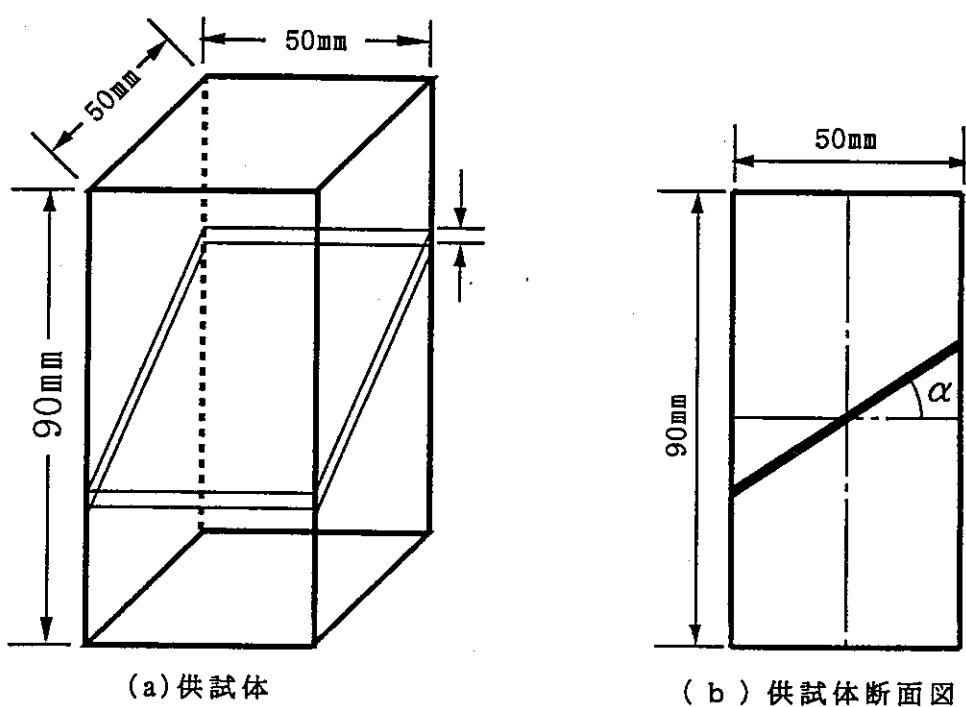


図 2. 3 一枚の傾いた不連続面を持つ供試体（単軸圧縮試験用）

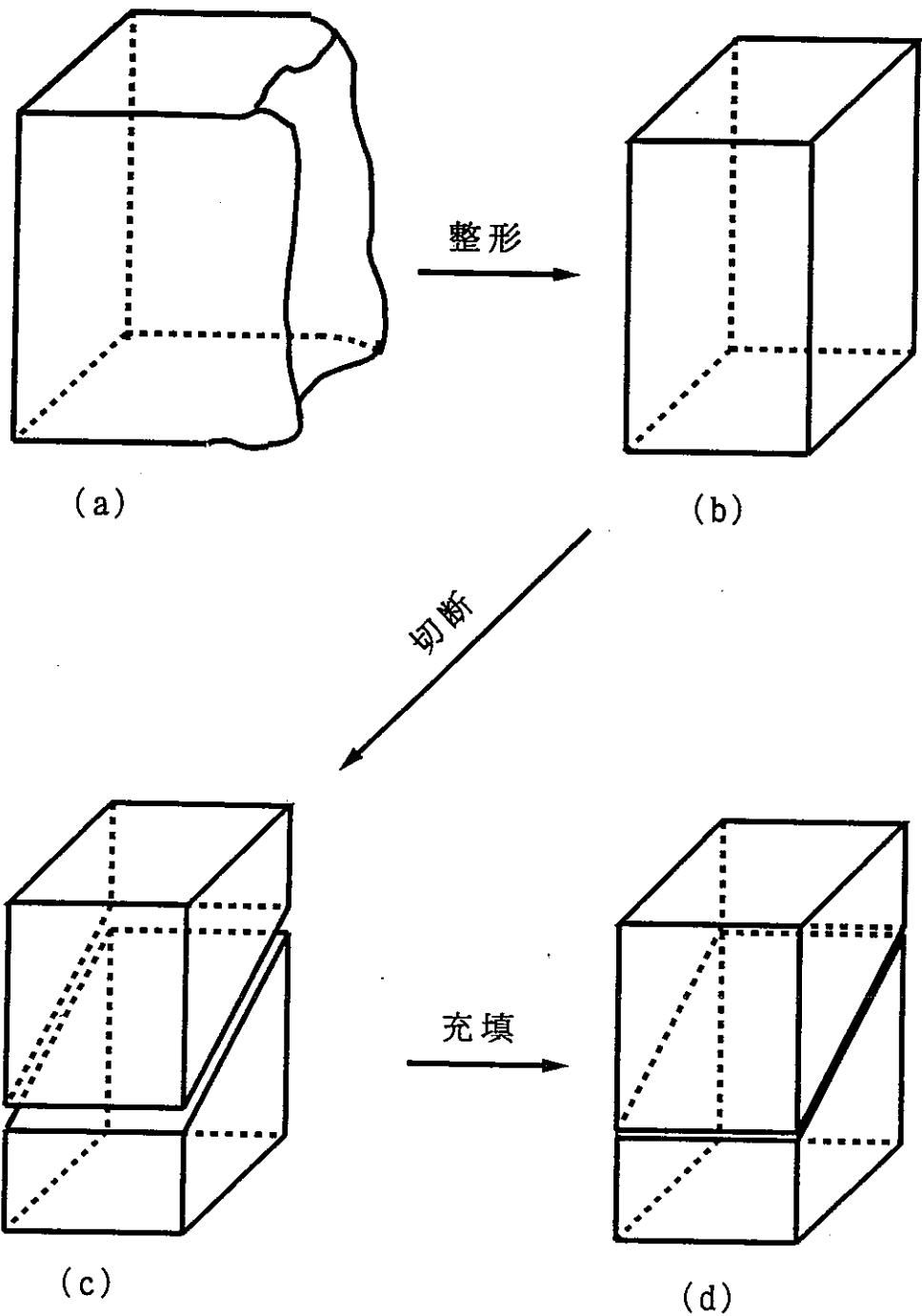


図2.4 一枚の傾いた不連続面を持つ供試体（単軸圧縮試験用）の作成手順

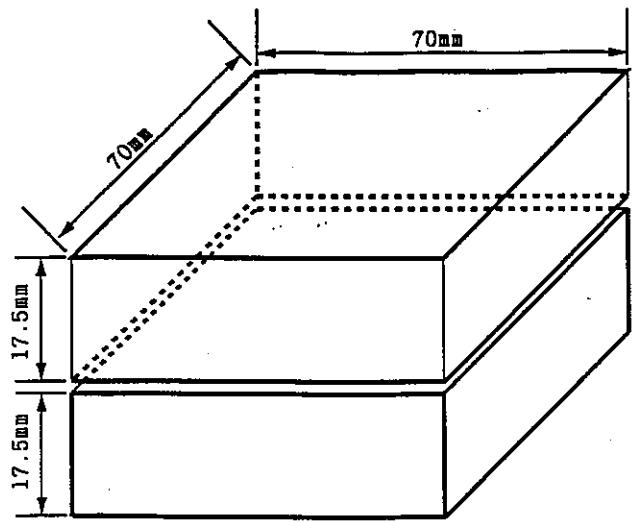


図 2. 5 一枚の不連続面を持つ供試体（一面せん断試験用）

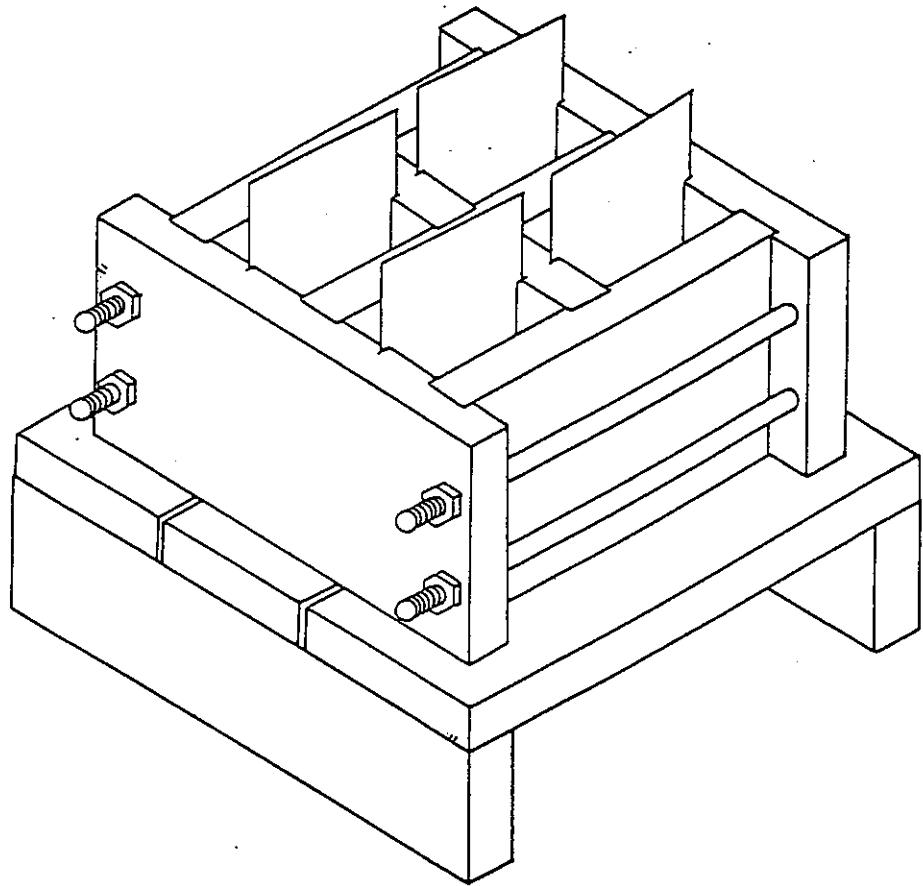


図 2. 6 一面せん断試験用供試体の型枠

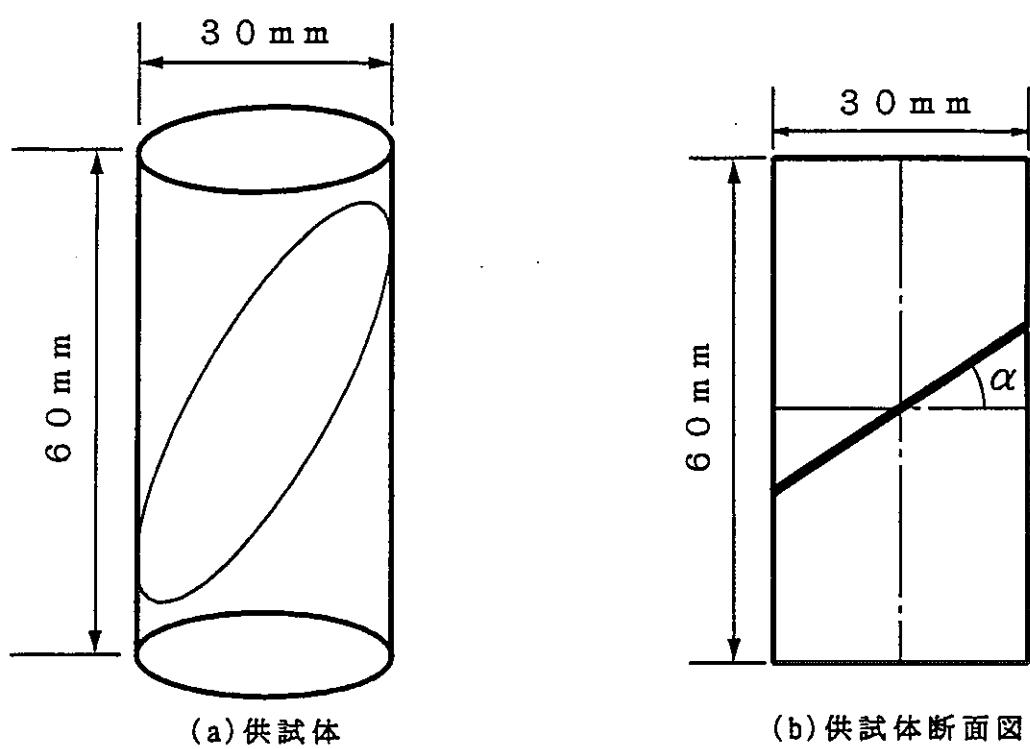


図 2. 7 一枚の不連続面を持つ円柱形供試体（三軸圧縮試験用）

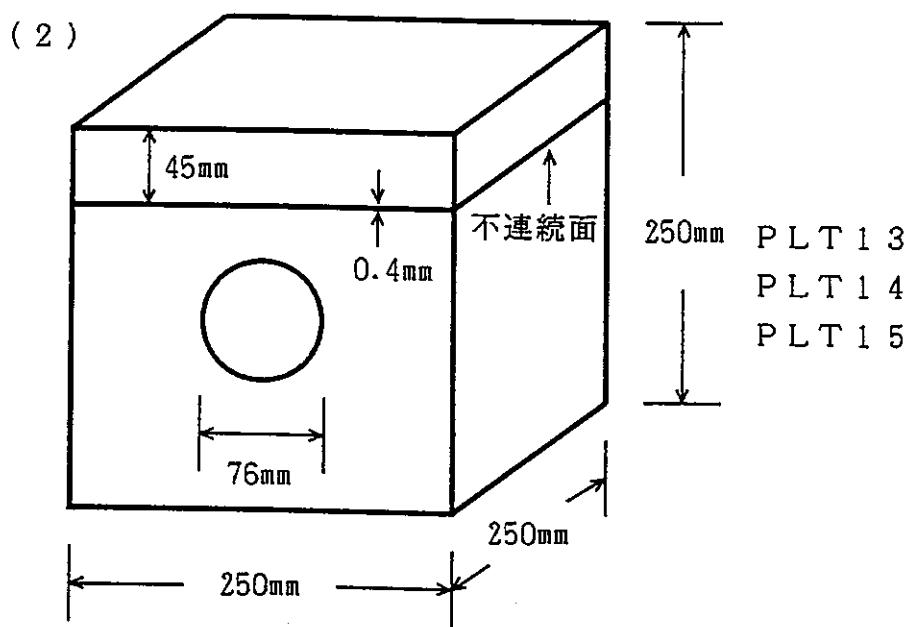
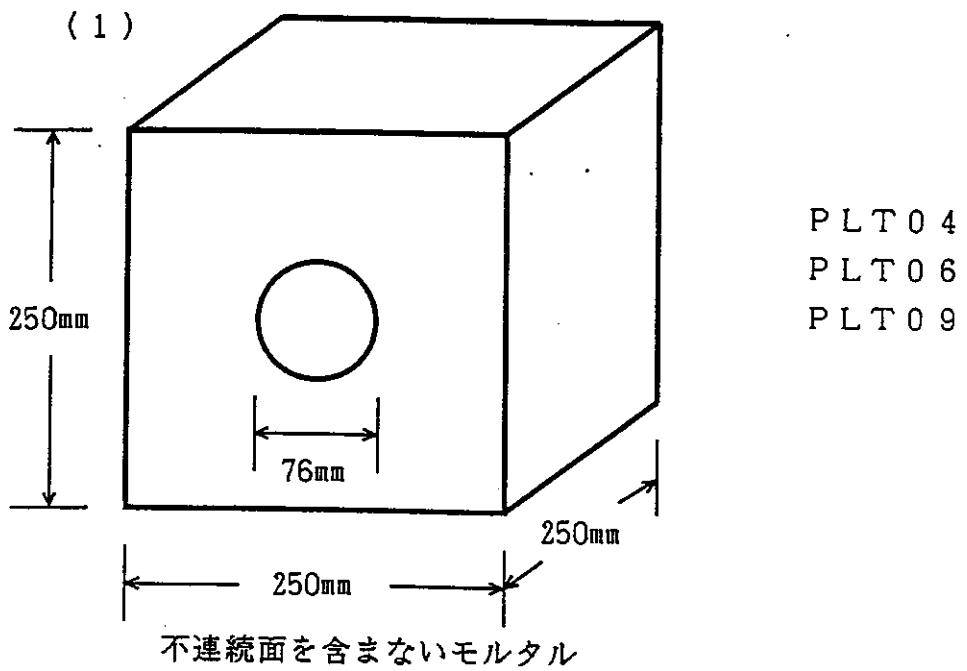


図 2. 8 (その 1) 孔内点載荷試験用の岩盤模型。 (1) 不連続面を含まない供試体。 (2) 不連続面が測定孔に接近して存在する供試体。

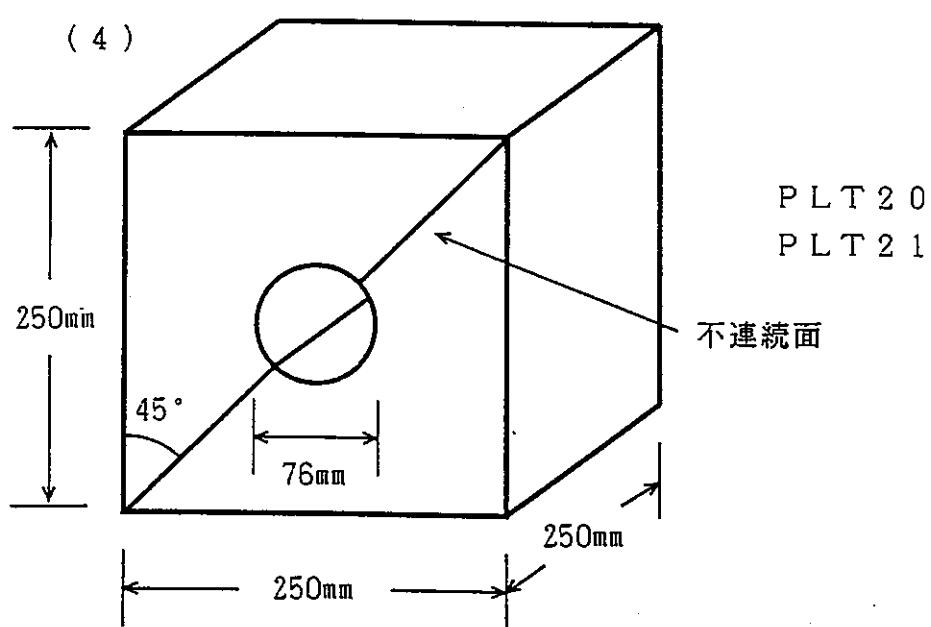
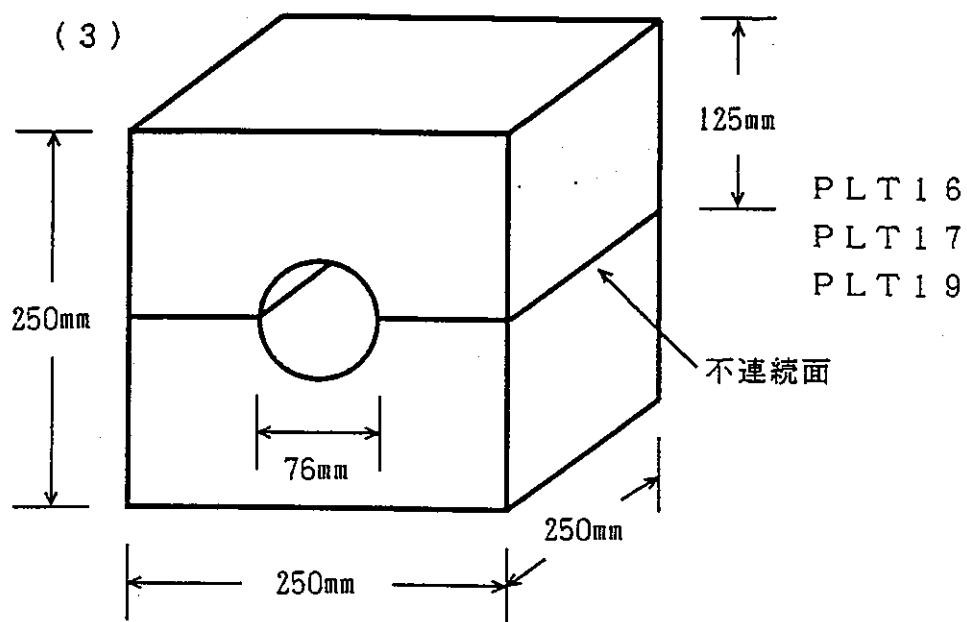


図 2. 8 (その 2) 孔内点載荷試験用の岩盤模型。 (3) 不連続面が測定孔を貫通する供試体 (角度 90°)。 (4) 不連続面が測定孔を貫通する供試体 (角度 45°)。

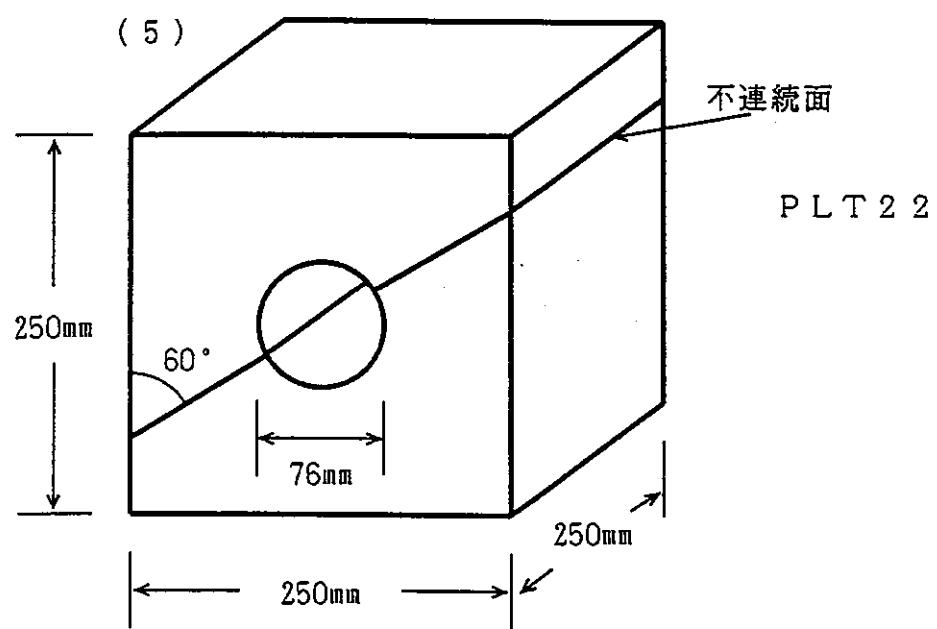


図 2. 8 (その 3) 孔内点載荷試験用の岩盤模型。 (5) 不連続面が測定孔を貫通する供試体 (角度 60°)。

第3章 不連続面の強度・変形特性に関する室内試験

3. 1 はじめに

本章では、不連続面の強度・変形特性を調べるために実施した一面せん断試験、一軸および三軸圧縮試験の方法と結果について述べる。これらは、いずれも不連続面の力学的特性に関する基本的な情報を取得するための標準的な試験法であるが、3つの試験法は、載荷経路などがたがいに異なっており、これらを併せて行うことで、より有益な情報が得られるものと期待される。

不連続面を持つ供試体の一軸圧縮試験においては、不連続面に作用する直応力 σ 、せん断応力 τ は一定の比率を保ちながら増加し、また、面に作用する応力(σ 、 τ)は一様であると考えられる。一方、一面せん断試験の場合、不連続面には、一定の直応力 σ の下で増加するせん断応力が作用する。しかし、応力解析に基づくならば、不連続面上の応力(σ 、 τ)は必ずしも一様ではなく、特に端部は応力変化が激しい。三軸圧縮試験の場合、不連続面には封圧に等しい直応力 σ が作用した後、直応力 σ 、せん断応力 τ の増分が一定の比率を保ちながら作用する。発生する応力は一様と考えられる。

このように、不連続面が受ける載荷経路や応力の一様性が、単軸・三軸圧縮試験と一面せん断試験では異なっている。

不連続面の強度・変形特性を調べるための室内試験の実験上の問題点として、面に作用する応力の不均一性の有無の他に、不連続面の上下の相対的変位の計測に係わる諸問題が挙げられる。不連続面自体は剛性が小さいので、計測センサの剛性が大きいと、場合によっては測定結果に影響する。一面せん断試験では、供試体を収める上箱と下箱の相対的変位を測定し、これを不連続面の上下の相対的変位とみなすのが通常の方法である。この場合には、供試体は箱に完全に固定され、両者は一体となって運動すると

いう仮定がなされている。しかし、この仮定はそれほど正しくないことは明かであろう。そこで、不連続面の相対的変位の計測には、上記の通常の方法の他に、CCDカメラを利用して直接的に不連続面の運動を観察する方法も採用し、両者を比較することにした。

3. 2 傾いた不連続面を持つ岩盤模型の単軸圧縮試験

3. 2. 1 理論

載荷軸に垂直な面に対し角度 α の傾きをなす一枚の不連続面を持つ供試体に σ_{out} なる大きさの単軸圧縮応力を載荷すると、不連続面には次式で表される応力 (σ 、 τ) が生じる（図2. 3 参照）。

$$\sigma = \sigma_{out} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \alpha'$$

$$\tau = \sigma_{out} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad \dots \quad (3.1)$$

破壊が不連続面で起こった場合、このときの不連続面の応力 (σ 、 τ) はこの面の強度を与える。種々の α の値を持つ供試体を用いて試験を行い、破壊が不連続面で発生したものについて、(σ 、 τ) を求め、これを σ - τ 座標にプロットする。各点をなめらかに結ぶ線は不連続面の破壊限界線を与える。もし破壊限界線が直線になれば、縦軸切片値、傾き角として不連続面の粘着力 c 、および内部摩擦角 ϕ が求まる。

3. 2. 2 試験方法

供試体の載荷には、Instron社製材料試験機（5586型、最大載荷能力300kN、機械式）を用いた。試験機のクロスヘッドの変位速度を0.3mm/min とし、プラテンと供試体の間に球座を介し一軸載荷した。

垂直荷重は材料試験機に組み込まれたロードセル（容量 300kN）で測定した。試験機にはクロスヘッドの変位を測るセンサーが備えられており、上下の載荷板の距離変化はこれを用いて測定した。荷重、変位量はともに

材料試験機のアナログ出力からフルスケール10Vで出力される。それを入力±5VのA/Dボードを介しパソコン用コンピューターに取り込み、データファイルとして保存した。

3. 2. 3 試験結果

不連続面の厚さが1mm、および0.1mmの2種類の供試体について試験を行った。得られた不連続面の強度を $\sigma-\tau$ 座標に表示したのが図3. 1である。これから、直応力が大きくなると、不連続面のせん断強度はほぼこれに比例して増加し、 $\sigma-\tau$ 座標に表示した強度は、直線の周りにばらついていることがわかる。つまり、不連続面の強度特性はMohr-Coulomb式で近似できるといえる。

上記の直線が τ 軸と交わる点の値である不連続面の粘着力cは、不連続面の厚さが0.1mmの場合、ほぼ0になっている。これは無充填の不連続面の粘着力に関する理論的な値に等しい。不連続面の厚さが1mmの場合には、粘着力は $c=0.67\text{ MPa}$ と評価される。直線の傾きである内部摩擦角は、不連続面の厚さにかかわらず両供試体で一致しており、 $\phi=41\sim42^\circ$ と評価される。

不連続面の厚さが小さい場合には、達成し得るせん断強度は、厚さが大きい場合に比べて1桁近く小さく、一軸載荷の下では大きな荷重には耐えられないことがわかる。不連続面の厚さが1mmの場合でも、せん断強度の最大値は、他の方法で得られる値に比べてはるかに小さい。このために、本試験は、特別の試験装置を必要としないで実施できるという利点はあるものの、極く狭い範囲の強度特性しか得られないという欠点を持っているといえる。

3. 3 一枚の不連続面を持つ岩盤模型の一面せん断試験

3. 3. 1 試験方法と試験装置

一面せん断試験は、不連続面に所与の垂直応力を加え、その状態を保ったまま、破壊するまでせん断応力を加えていく試験方法である。このために、図2.5のような供試体を用いた。

作成した供試体は、強度のない不連続面に無理がかかるないように、特殊な治具を用いて上下せん断箱に組み入れ、スペーサーを介して上箱と下箱をネジ止めし一体化させる。これをせん断試験装置に組み込むが、この作業に対して、一体化構造は不連続面を保護する役目をする。組み込みが終了したならば、ネジを外しスペーサを取り外した後、可動部である下箱を4本のボルトでせん断装置に固定する。上箱は試験中、せん断方向の運動はしないよう固定される。

垂直荷重の載荷にはInstron社製材料試験機（3.2節参照）を用いる。試験機のクロスヘッドの変位速度を 0.3mm/min とし、供試体とプラテンの間に球座を介して載荷する。荷重が設定した値に達したならば、材料試験機の荷重保持機能を作動させてこの荷重を保持する。次に、せん断試験装置に備わったスクリュージャッキ（容量2tonf）により、 0.3mm/min の変位速度でせん断荷重を載荷する。本試験では垂直応力 σ_n として、0.2、0.6、1.0、1.4(MPa)の4つを選んだ。

垂直荷重は材料試験機に組み込まれたロードセル（容量300kN）、せん断荷重はスクリュージャッキの先端部分に取り付けられた引張圧縮両用型ロードセル（容量2tf）で測定する。鉛直方向の変位は材料試験機のクロスヘッドの変位量に等しいものとし、試験機に内蔵されている変位計で、せん断箱下箱の水平方向の変位はひずみゲージ式小型変位計（容量10mm）で、それぞれ測定する。垂直荷重とクロスヘッドの変位量は材料試験機に備わっているアンプを介してアナログ出力し、せん断荷重と水平変位は動ひずみアンプを介して出力する。これらの出力はA/Dボードを用いて5Hzの周波数でサンプリングし、パーソナルコンピューターに記録する。

なお、不連続面の上下面の相対的変位の計測には、上記の方法の他に、CCDカメラによる方法も用いた（3.5節参照）。

3. 3. - 2 試験結果

いずれの供試体についても、所定の垂直応力 σ_n の下でせん断応力 τ を単調に増加させたところ、 τ が最大値 τ_{max} に達したときに不連続面が破壊した。このときの不連続面の強度は (σ_n , τ_{max}) で与えられる。

不連続面の厚さが 0, 0.1, 1mm の 3 種の供試体について、得られた不連続面の強度を $\sigma - \tau$ 座標にプロットしたのが図 3. 2 である。これより、3 種類の供試体とも、 $\sigma - \tau$ 座標で表した不連続面の強度は一つに直線に乗っていることがわかる。つまり、不連続面の破壊条件は Mohr-Coulomb の基準で表すことができ、強度特性 (c , ϕ) は次のように評価される。

- a) 厚さが 0mm の不連続面： 粘着力 $c = 0.04 \text{ MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi = 29.7^\circ$
- b) 厚さが 0.1mm の不連続面： $c = 0.01 \text{ MPa}$, $\phi = 31.7^\circ$
- c) 厚さが 1mm の不連続面： $c = 0.28 \text{ MPa}$, $\phi = 29.7^\circ$

厚さが 0mm と 0.1mm の不連続面の粘着力は、いずれもほぼ 0 である。これらは、厚さがない不連続面の理論的な粘着力の値に等しい。内部摩擦角については、不連続面の厚さの違いによる差はほとんどなく、 30° 前後の値を取っている。

3. 4 一枚の不連続面を持つ岩盤模型の三軸圧縮試験

3. 4. 1 試験方法と試験装置

三軸圧縮試験では、最初に供試体に所定の封圧を与え、つぎに、これを維持したままで供試体が破壊するまで軸応力を増加させる載荷経路が用いられる。

いま、角度 α の不連続面を持つ供試体（図 2. 7 参照）に、封圧 σ_3 を与え、軸応力が σ_{out} になったときに不連続面が破壊したとする。このとき不連続面の強度 (σ , τ) は次式で表される。

$$\sigma = \sigma_3 + (\sigma_{out} - \sigma_3) \cdot \cos^2 \alpha$$

$$\tau = (\sigma_{out} - \sigma_3) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad \dots \quad (3.2)$$

本試験では封圧の値として、2、4、6、8MPa の4つを設定した。また、不連続面の角度 α は、 $40^\circ \sim 60^\circ$ とした。

軸荷重の載荷には Instron 社製材料試験機（3. 2 節参照）を用いる。内径33mm、許容封圧8MPaの封圧容器は円筒型軸圧分離型で、封圧は油圧ポンプで作動する二段圧力負荷装置（ジャコム社製）を用いて負荷する。

封圧ポンプにより所定の封圧を載荷した後、材料試験機により、クロスヘッドの変位速度を0.3mm/min として軸荷重を載荷する。

軸荷重は材料試験機に組み込まれたロードセル（容量300kN）、封圧は封圧ポンプに付いている圧力ゲージで測定した。軸方向の変位の測定には材料試験機に備わっているクロスヘッドの移動量を測る変位計を用いた。

3. 4. 2 試験結果

供試体としては、次の2種類の不連続面を準備した。

- a) 厚さが0mmの不連続面
- b) 厚さが0.1mmの不連続面

不連続面で破壊した供試体について、破壊時の応力状態を式（3. 2）に代入して（ σ 、 τ ）の値を求め、これを $\sigma - \tau$ 座標にプロットしたものが図3. 3である。なお、不連続面の角度 α が 45° 以上になると、図3. 4の荷重-変位線図に示すように、変形挙動は極めて延性的になり、不連続面が破壊を開始するときの応力値を読みとるのが困難になる。この場合には、図3. 4(a) のようにして降伏点を求めた。

全測点は原点を通る一本の直線に乗っており、これから強度特性が次のように評価される。

内部摩擦角 $c=30.5^\circ$ 、粘着力 $\phi=0\text{MPa}$

この結果は、強度が大きさの異なる4つの封圧、および、2種類の不連

続面の厚さ（ただし、いずれも厚さ0.1mm以下）に依存しないことを示している。

3. 5 不連続面の相対的変位の計測方法

3. 5. 1 CCDカメラを応用した測定原理

本研究では、不連続面の変形挙動を観察するために、対物レンズを付けたCCDカメラを応用する方法を試みた。この方法は従来から用いられている変位計を用いる方法に比べて以下に示す利点を有している。

- 1) ダイヤルゲージなどの変位センサでは捉えることのできない微少な変位を、高倍率の対物レンズを用いることによって測定することができる。たとえば、500倍のレンズを用いた場合、約 $1\mu\text{m}$ の測定精度が得られる。また、低い倍率のレンズを用いれば大変形の測定が可能になる。
- 2) 1つの測点におけるあらゆる方向の変位が同時に計測できる。ダイヤルゲージのような変位計は一般に1つの方向の成分しか計測できない。
- 3) 非接触型の変位計測方法であるため、測定が被測定対象物に対して物理的な影響を与えない。これは剛性が小さく、もろい不連続面の計測には大きな利点である。

3. 5. 2 不連続面の変位計測方法

(1) 変形挙動の観察方法

CCDカメラを用いる場合、使用する対物レンズの倍率によって、観察できる視野の範囲が定まる。たとえば、500倍の対物レンズを用いた場合、視野はヨコ $0.55\text{mm} \times$ タテ 0.41mm となる。したがって、不連続面の幅が1mmある場合には上下の端面は同一視野に納まらない。そこで、不連続面の上下部に測点を設け、そこから載荷方向(y方向)に針を延ばして視野に収まるようにする。針としては、径が $30\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ のガラス棒、もしくはエナメル線などの線材を用いる。針の先端が標識点となるが、この標識点の画像は、後に行う画像処理作業が誤差を伴わずに実施できるように、大きな

コントラストのつくものがよい。

高倍率のレンズを用いる場合は、ピントの合う範囲（被写界深度）が狭い。このため、2つの測点とレンズ間の距離が等しくなるようにしなければならない。標識点の設置後、画面の長さの基準を得るために、ミクロメータ（0.01mm方眼、0.20mm四方）の基準線をビデオ画像として記録しておく。この撮影に際しては、レンズとミクロメータがともに平行を保つよう水準器を用いて位置と向きを調整する。

載荷中は測点の針が動くので、その先端が常に視野の中央に来るよう、必要に応じてカメラを設置したステージを操作し、カメラを移動させる。

（2）ビデオ画像を用いた変位量の評価方法

ビデオテープに記録された標識点の画像から不連続面の変形を評価するために、当初は次のような方法を用いていた。すなわち、標識点の画像をコンピュータに取り込み、その画面上でデジタルスケールを用いて2つの標識点の座標を読みとる。変形は載荷に伴う2つの座標の変化から計算で求める。しかし、この方法は煩雑で時間を要する上に、肉眼でスケールを操作することによる測定誤差が混入しやすい。また画像の取り込みの際に画質が大幅に悪化するが、これも分解能が落ちる一因となる。

そこで、これらの欠点を克服するために、上記の座標を読みとる作業を自動化するシステム（図3.5参照）を開発した。本システムでは、イメージトラッカが重要な役目をし、この装置により、ビデオ画像上のターゲット（標識点）の動きが自動的に追跡され、座標がデジタル値で出力される。これをパソコンのハードメモリに記憶し、測定後の解析、例えば、応力-変位線図を作成するのに利用する。この他、システムにはタイトルジェネレータが備わっており、ビデオ画像に測定内容・日時などの情報を適宜写し込むことができる。

（3）相対的変位の評価方法

CCDカメラで撮影したビデオ画像から、各応力レベルにおける標識点の座標（x, y）が得られる。ここで、載荷前および任意の載荷応力レベ

ル[i]における 2 つの標識点の相対的な距離を、それぞれ、(x_0 , y_0)、
 (x_i, y_i) とすると、載荷応力レベル[i]における相対変位量 (Δx_i ,
 Δy_i) は次のように評価できる。

$$\Delta x_i = x_i - x_0$$

$$\Delta y_i = y_i - y_0 \quad (3.3)$$

不連続面に対し、垂直な方向の変位成分を Δv 、平行な方向の変位成分
 を Δu とすると、 Δv 、 Δu は 2 つの標点間の相対変位量 (Δx , Δy)
 を用いて次のように表せる。

$$\Delta v = -\Delta x \sin \theta + \Delta y \cos \theta$$

$$\Delta u = \Delta x \cos \theta + \Delta y \sin \theta \quad (3.4)$$

ここに θ は y 軸と不連続面の法線のなす角である。

3. 5. 3 CCD カメラによる変位測定の精度

イメージトラッカを用いた場合、撮影されたビデオ画面の視野はデジタル式のスケールにより、640(タテ) × 540(ヨコ)に分割される。たとえば 500 倍の対物レンズを用いると視野は $0.55\text{mm} \times 0.41\text{mm}$ なので、分解能(一目盛りの距離)は $550\mu\text{m} / 640 = 0.86\mu\text{m}$ となる。

一目盛の距離は正確を期すため、ミクロメータ(3. 5. 2 項参照)を用いて校正する。たとえば、500 倍の対物レンズを用いた場合、撮影されたビデオ画像には x 方向(載荷軸に直交する方向)と y 方向(載荷軸方向)にそれぞれ 21 本ずつの互いに直交する直線が写っている。 x 方向の距離を校正するときは、まずイメージトラッカで左端と右端の線のそれぞれの x 座標値を読みとる。それぞれの座標値の差はミクロメータの 20 目盛分($200\mu\text{m}$)に相当するので、座標値の差が 540 とすると分解能は $200\mu\text{m} / 230 = 0.87\mu\text{m}$ となる。同様 y 方向も校正する。

画像のコントラストが低い等の理由でイメージトラッカが使えない場合は、プリンターを用い、ビデオテープに記録した画像を $150\text{mm} \times 110\text{mm}$ の大きさにハードコピーする。出力された画像が鮮明で、かつ 1 目盛が 1mm の定規を用いて 10 分の 1 目盛まで(肉眼で)読めるとすれば、距離の分解

能は、計算上は、 $550 \mu\text{m} / 1500 = 0.37 \mu\text{m}$ となる。

3. 6 一面せん断試験における変位の測定結果

3. 6. 1 せん断応力-ずれ変位線図とせん断剛性

図3. 6は、供試体L1S#2で得られたせん断応力-ずれ変位線図を示したものである（なお、この供試体の不連続面の厚さは約1mmである）。図(a)ではCCDカメラ、図(b)では変位計を用いて得た結果が示されている。計測された変位量は、両者で大幅に異なり、変位計を用いて得た値はCCDカメラを用いて得た値よりもかなり大きい。

線図の立ち上がりの傾きに注目すると、図(b)の変位計を用いた場合には、直応力 σ_n が大きくなるにつれて、大きくなっている。一方、図(a)では、直応力の大きさにかかわらずほぼ一定である。線図のこの傾きは不連続面のせん断剛性を意味し、本来、直応力の大きさに依存しないはずである。したがって、CCDカメラの方が正確な測定結果を与えると判断される。

変位計を用いた場合に得られた挙動については、次のように解釈される。直応力が大きくなると、これに応じて供試体とせん断箱の間の摩擦抵抗力が大きくなり、両者の間の相対的なすべり量が減るために、せん断箱の外側で計測している水平変位が減少する。換言すれば、せん断箱の外側の変位には、供試体の不連続面のずれとせん断箱と供試体間のずれの両方が含まれているが、直応力が大きくなるにつれて、後者が減ってくるので、2つの計測方法で得られた変位量の差異は減少する。

さて、改めて、図(a)のせん断応力-ずれ線図をみると、せん断応力が小さいうちは、応力に比例して変位が増すが、応力が最大値に達した後は応力が変化することなく変位だけが増大している。不連続面は、試験に供した直応力の範囲内では、いずれも、弾-完全塑性的な挙動をしている。

線図の立ち上がりの傾きとして定義されるせん断剛性Ksは、図(a)から、

49～53kPa と評価される。

3. 6. 2 破壊後の様相

試験後の破壊した不連続面について、次のような観察結果が得られた。

- 1) 不連続面の厚さの分布は均一で、セメントミルクの充填が完全に行われたことが確認された。
- 2) 不連続面に接する上下のインタクト部分の面には、セメントミルクが付着しており、破壊は薄いセメントミルクの層で発生した。
- 3) セメントミルクの破面は波を打っており、内部摩擦はこれに起因していると推察される。

3. 7 強度の評価

不連続面の厚さが 0.1mm 以下の供試体について、3つの試験方法で得られた強度を $\sigma - \tau$ 座標にまとめて示したのが図 3. 7 である。いずれの測定値も原点を通る直線の周りに集中しており、強度には試験法による差異はないと判断される。上記の直線より、不連続面の粘着力は $c=0$ 、内部摩擦角は $\phi = 31.5^\circ$ と評価される。不連続面の厚さが増すと、粘着力は増え、内部摩擦角はあまり変わらないようである。

なお、一面せん断試験では、不連続面の強度にかかわりなく、試験機の載荷能力の許容範囲内であれば、任意の大きさの直応力の下でのせん断強度値を求めることができる。三軸試験も同様であり、この場合には、直応力の代わりに封圧の大きさを制御することになる。これに対して、単軸圧縮試験法（3. 3 節参照）では、大きな直応力の下でのせん断強度値を得ることができない。

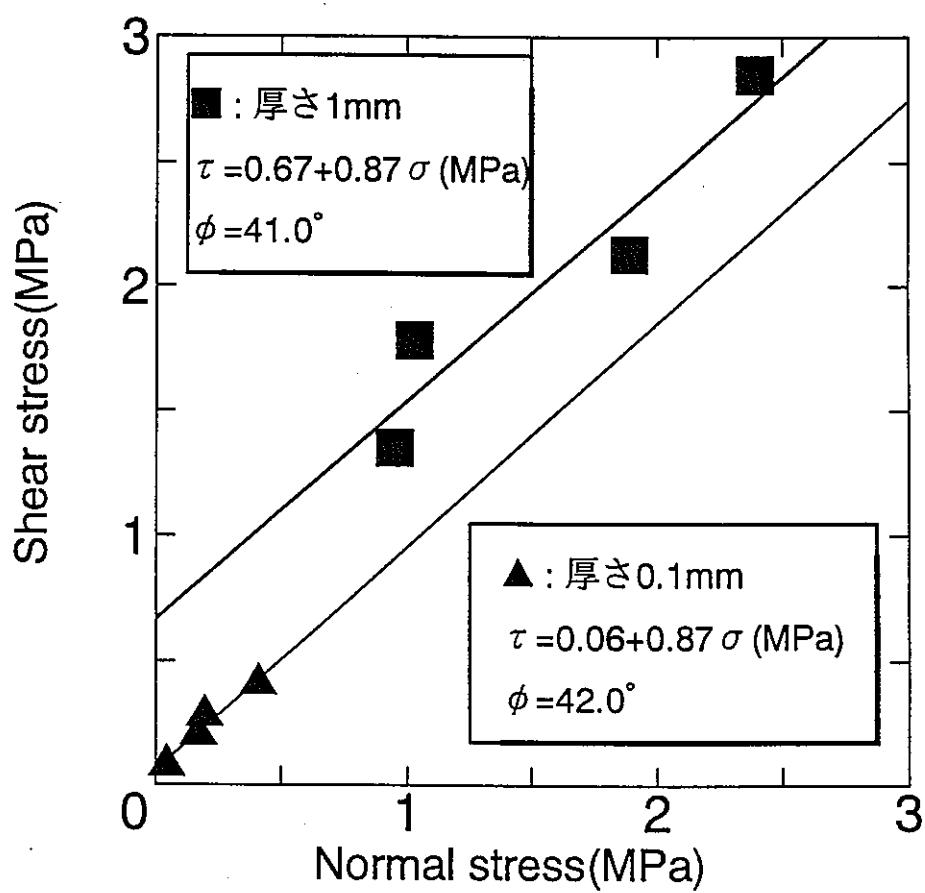
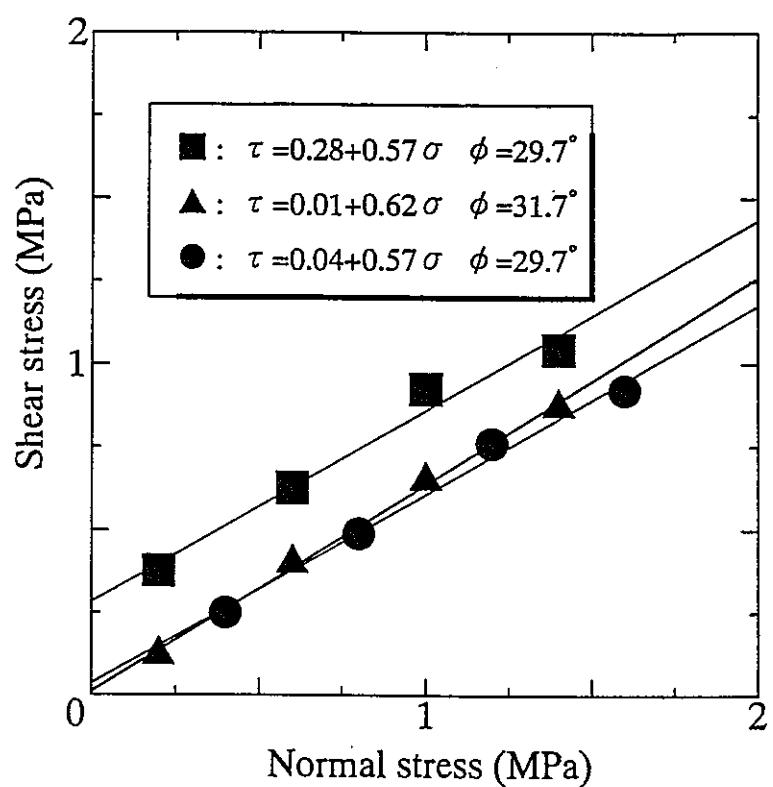


図3. 1 傾いた不連続面を持つ供試体の一軸圧縮試験により得られた不連続面の強度特性。不連続面の厚さが0.1mmと1mmの2種の試験結果が示されている。



(■: 厚さ 1 mmで充填、▲: 充填し密着、●: 充填しない)

図 3. 2 一面せん断試験により得られた不連続面の強度特性。不連続面の厚さが0mm、0.1mm、1mmの3種の試験結果が示されている。

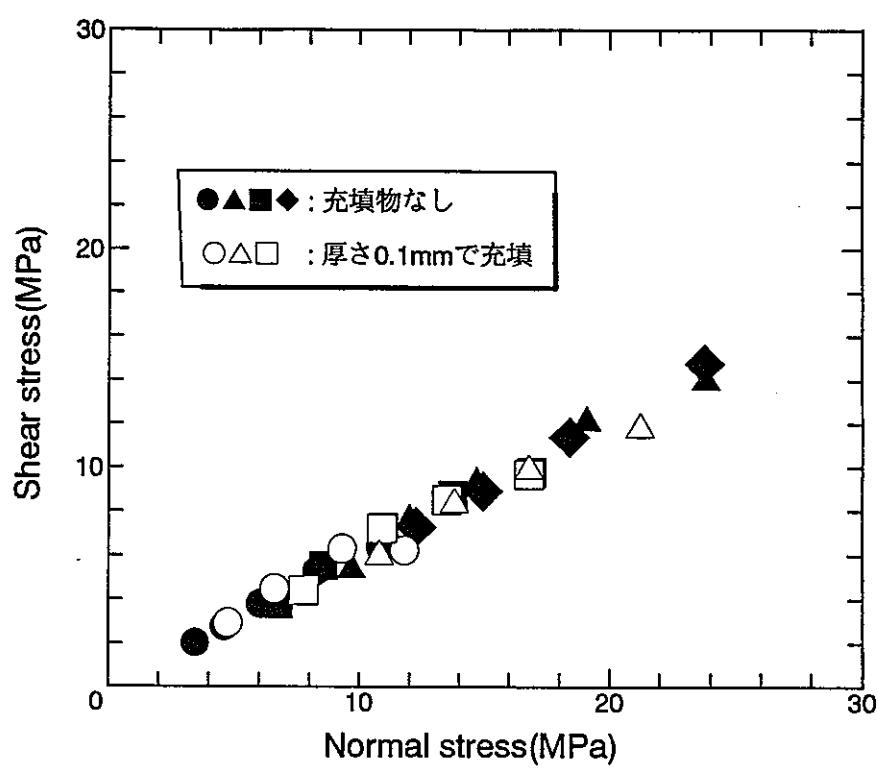
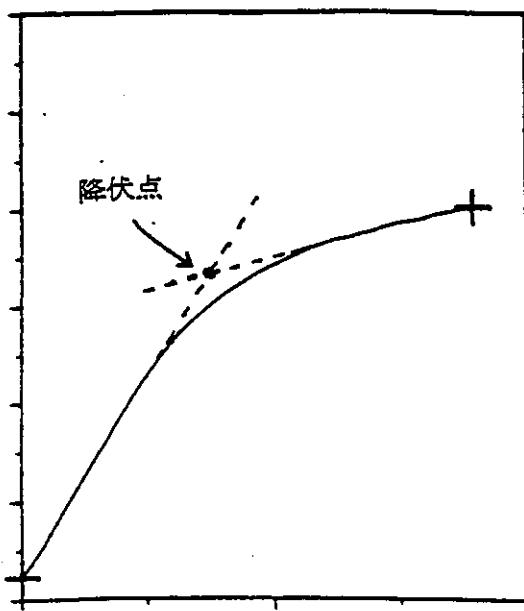
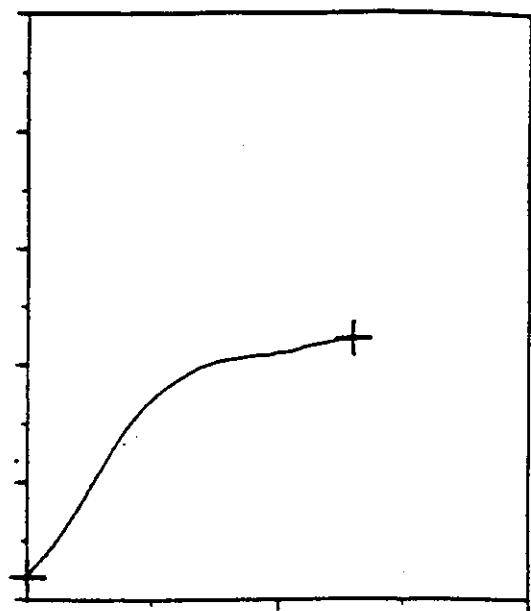


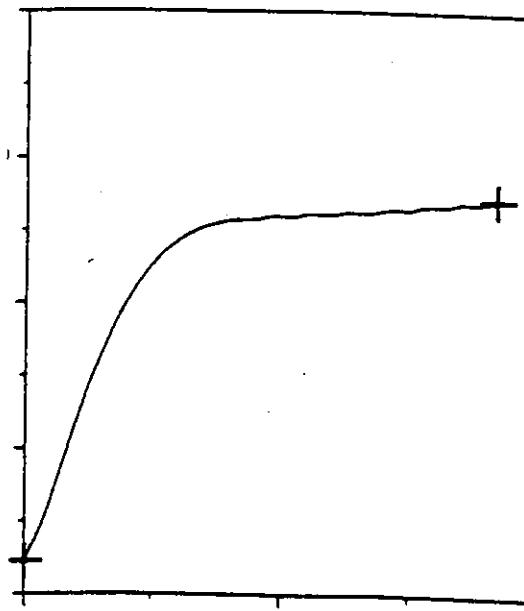
図3.3 傾いた不連続面を持つ供試体の三軸圧縮試験により得られた不連続面の強度特性。不連続面の厚さが0mm、0.1mmの2種の試験結果が示されている。



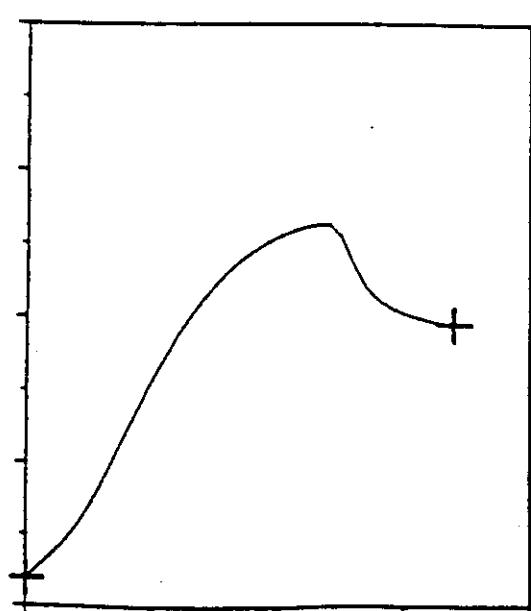
(a) 封圧 4MPa、 $\alpha=55^\circ$



(b) 封圧 2MPa、 $\alpha=55^\circ$



(c) 封圧 4MPa、 $\alpha=60^\circ$



(d) 封圧 4MPa、 $\alpha=40^\circ$

図 3. 4 傾いた不連続面を持つ供試体を用いた三軸圧縮試験における軸差応力 - 軸ひずみ線図

荷重、変位量データ CCDカメラの画像

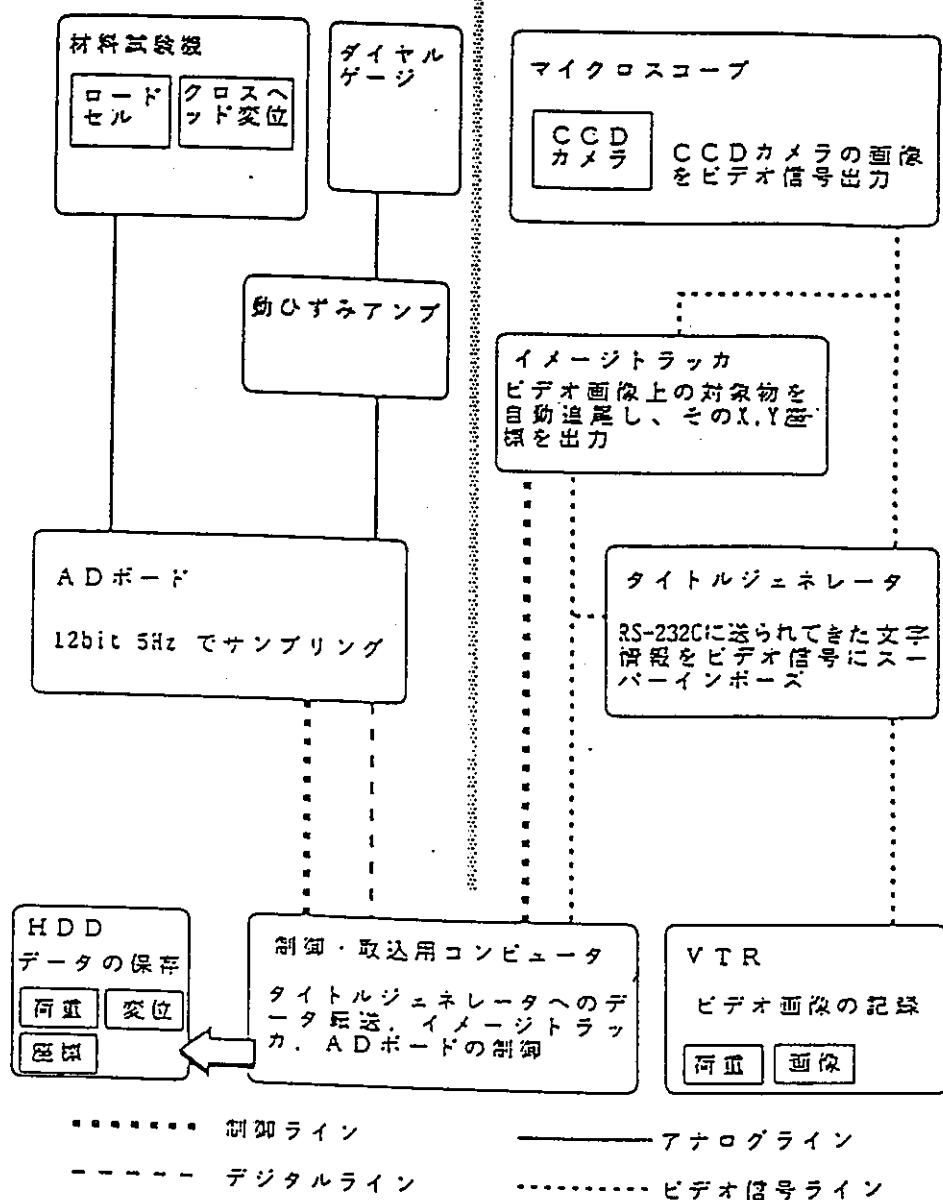
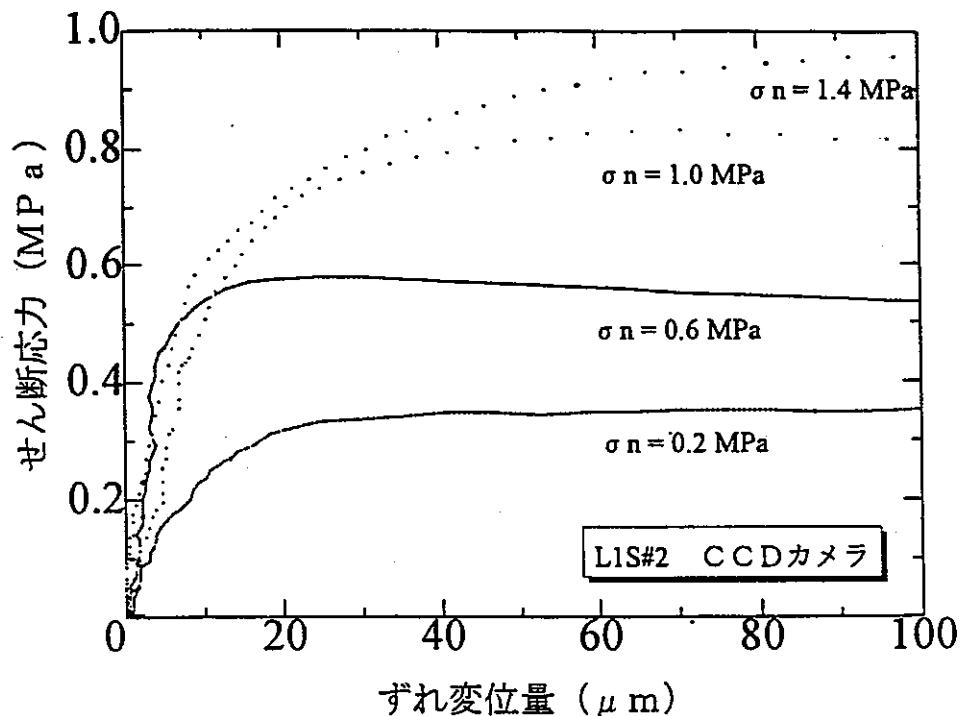
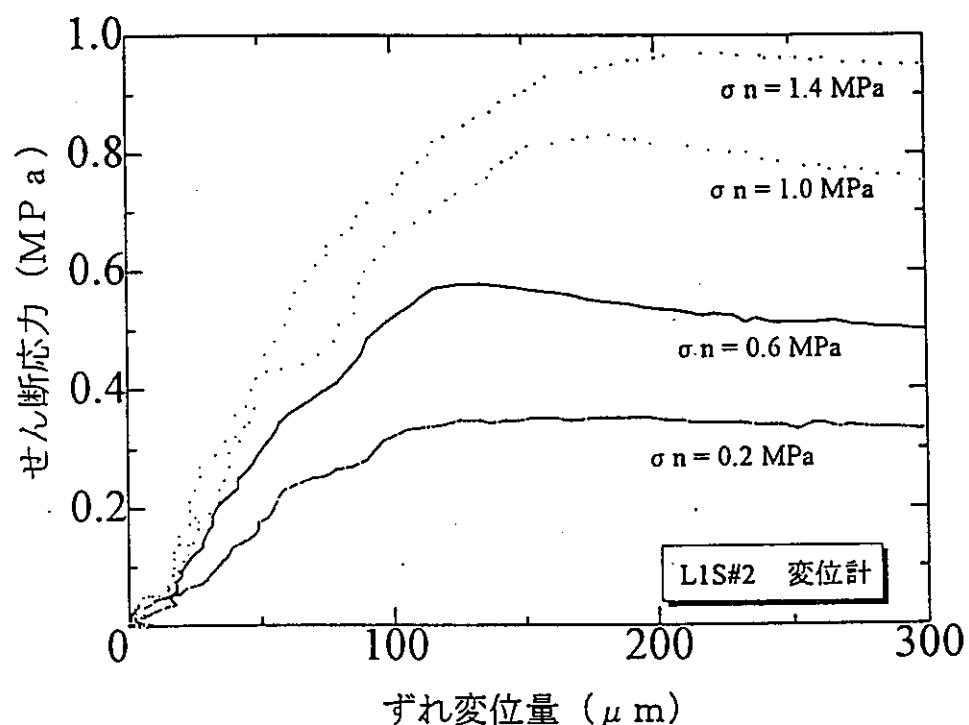


図3.5 CCDカメラを用いた変位計測システム



(a) CCDカメラによる計測



(b) 変位計による計測結果

図3. 6 一枚の不連続面を持つ供試体の一面せん断試験で得られたせん
断応力-ずれ変位線図。CCDカメラにより変位を測定(a)。
変位計により変位を計測(b)。

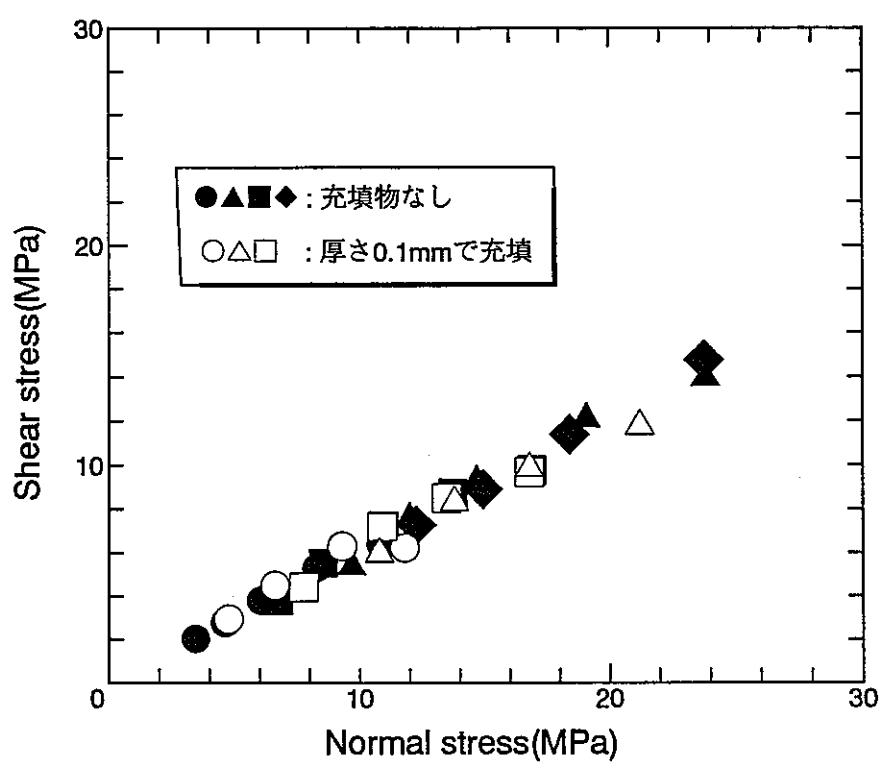


図3. 7 3種の試験法により得られた不連続面の強度特性。不連続面の厚さが0mm、0.1mmの2種の結果が示されている。

第4章 不連続面の評価に対する孔内点載荷試験の応用

4. 1 はじめに

不連続面の力学的性質を明らかにするために、原位置において手軽にかつ数多く実施できる試験法があれば有用である。この試みとして、本研究では孔内点載荷試験を取り上げ、本試験が不連続面の力学的特性を知る上で有効な方法となり得るか否かについて検討することにした。孔内点載荷試験は、ボアホールを利用した岩盤の剛性（変形係数）を測定する原位置試験方法であり、図4. 1に示すように、孔内の任意の深度に挿入して使用する試験機は、所期の方向に集中荷重を載荷し、その方向の孔壁の変形（径変化）を測定する装置を備えている。そして、この測定作業によって荷重－孔径変化線図（P-U線図）が得られる。

もし、不連続面が測定点の近くに存在すれば、この線図に影響すると考えられる。この影響量から不連続面に関してどの程度の情報が引き出せるかについて、数値計算と室内試験によって調査することにした。具体的には、原位置試験で用いる孔内載荷試験機を使用し、不連続面を持つ岩盤模型に対して載荷試験を行い、不連続面と孔の位置関係と荷重－孔径変化線図の関係について調べることにした。

4. 2 孔内点載荷試験方法

4. 2. 1 測定上の特長

孔内点載荷試験は、孔内点載荷試験機と呼ばれる装置を使いボアホールを利用して岩盤の変形特性を求める原位置試験法である。似た試験法に孔内面載荷試験法があり、同様の装置が用いられる。装置で異なるところは、孔壁を押し付ける載荷板（部）の形状と面積にある（図4. 2参照）。孔

内点載荷装置の載荷部は半球の形状を持ち、孔壁は集中荷重を受ける。一方、板状をした孔内面載荷装置の載荷部の表面は、孔壁と同じ曲率を持っており、孔壁は一定変位を受ける。

このように、孔壁が受ける境界条件は両者で異なる。このために、次に示すように、測定孔の仕上がりが測定結果に及ぼす影響は両者で著しく異なる：孔内点載荷試験の場合には、孔壁に多少の凹凸があっても、これが測定結果に及ぼす影響は小さい。一方、孔内面載荷試験の場合、載荷板に接する孔壁部の応力分布は、ボアホールが真直に仕上がっていれば一様になるが、そうでなければ、壁面と載荷板は部分的な接触の仕方をするので、複雑な応力分布になる。その結果、発生する孔径変化も両者では全く異なる。孔の仕上がりの善し悪しが測定結果にほとんど影響しないのは、孔内点載荷試験の利点といえる。

孔内点載荷試験では、載荷場所とその近傍に存在する不連続面の位置関係が試験結果及ぼす影響は、孔内面載荷試験に比べて、より複雑になるとを考えられる。これは、前者の方が後者よりも、不連続面の力学的特性に関する情報をより多く引き出せることを意味する。

以上述べたように、孔内点載荷試験法は孔内面載荷試験法に比べて幾つか利点がある。これが本研究で孔内点載荷試験法を用いた理由である。

4. 2. 2 孔内点載荷試験機の概要

孔径76mmのボアホールでの使用を前提に設計された孔内点載荷試験機は、図4. 3に示すように、全体として円柱形をしており、長さ39.5cm、高さ71.0mm(無負荷時)、幅74.5mmの寸法を持っている。

孔壁に接する鋼製の半球型をした載荷部は、試験機に内蔵されている1基のピストンの先端に付いており、ピストンに圧をかけることによって押し出される。ピストンに負荷する油圧はハンドポンプの操作で作り出しが、その圧はブルドン管または圧力ピックアップにより計測する。載荷部の移動量は、その前後に1つずつ取り付けられているリン青銅製の片持梁式変位計で計測する。この変位計は長さ74.3mm、幅10.0mmの板バネの表裏に1

枚ずつ抵抗線ひずみゲージを貼付した構造になっている。変位1mmに対して $600 \mu\text{strain}$ の感度を有する。なお、圧力にピストンの受圧面積(6.42cm^2)を掛けると、押し付け荷重が得られる。

4. 3 数値解析

4. 3. 1 解析方法

孔内点載荷試験で測定孔を含む岩盤に作り出される応力・変位状態を解析しよとすれば、完全な3次元問題として扱わなければならない。6面体アイソパラメトリック要素を仮定した解析ソフト3- σ を用いて、幾つかの問題を解き、不連続面が孔内点載荷試験で得られる圧力-孔径変化線図に及ぼす影響を調べてみた。なお、使用した解析ソフトには、不連続面としてGoodman要素のような特殊な要素は用意されていないので、不連続面をヤング率が岩盤より小さく薄い層としてモデル化した。つまり、充填型の不連続面を仮定した。解析モデルの総節点数、総要素数は、それぞれ、1820～1910、350～360である。

4. 3. 2 解析1：不連続面の剛性が圧力-孔径変化線図に及ぼす影響

図4. 4に示すモデルにおいて、不連続面に相当する要素のヤング率を変え、それが孔内点載荷試験に伴う圧力-孔径変化線図に及ぼす影響を調べる。なお、図に示すモデルの寸法と形状は、後述する模型試験の供試体と同一である。

2枚の不連続面は、測定孔を挟んで上下の対称の位置に存在する。このような場合、測定孔の中央において、上下方向または水平方向に載荷する問題では、全領域の1/8だけを解析すれば済む。次のような境界条件と材料定数を仮定する。

1)境界条件：供試体の周囲は無拘束状態とし、測定孔の中央において不連

統面に対し垂直方向に集中荷重 $P=100$ を載荷する。

2) 材料定数：岩盤のヤング率は、 $E_r=1000$ とする。

ボアソン比は、岩盤、不連続面とも、 $\nu_r=\nu_d=0.15$ とする。

不連続面のヤング率は、 $E_d=10, 100, 500$ の 3 通りとする。

3) 構造 : 立方体状の模型は 1 辺が 25cm とし、測定孔の孔径は 76mm、
2mm の厚みを持つ不連続面と孔壁の最短距離は 42mm とする。

載荷に伴う載荷方向の孔径変化量 U について、次のような解析結果を得た。

E_d/E_r	$U(\text{mm})$
1.00	0.183
0.50	0.183
0.10	0.184
0.01	0.186

載荷方向が不連続面に直交する場合、孔径変化量は、不連続面のヤング率（剛性）が小さくなると、それに応じて大きくなることがわかる。載荷方向が不連続面に平行の場合には、不連続面の剛性の大きさによらず一定で、 $U=0.183\text{mm}$ であった。以上の結果は次のことを意味する。すなわち、不連続面の剛性が小さくなるにつれて、 $P-U$ 線図の傾きの値は方向により大きく異なってくる。つまり、異方性の程度が増す。

また、計算はしていないが、不連続面と孔の距離が小さくなれば、この傾向がそれだけ顕著になることはいうまでもない。

4. 3. 3 解析 2 : 不連続面が測定孔を貫通する場合

図 4. 5 に示すように、厚さ 2mm の不連続面が測定孔の中心線を通っているモデルを用い、それが孔内点載荷試験に伴う圧力 - 孔径変化線図に及ぼす影響を調べる。モデル全体および不連続面の寸法および形状と、境界条件は、不連続面の数と位置を除けば、解析 1 と同じである。岩盤、不連続面のヤング率は、 $E_r=1000$ 、 $E_d=100$ ($E_d/E_r=0.1$) とした。

載荷方向が不連続面に平行、すなわち、不連続面を直接載荷する場合と、

これに垂直に載荷する場合について、載荷方向の孔径変化量Uを計算し、次のような結果を得た。

$$U(\text{平行}) = 6.05\text{mm}$$

$$U(\text{垂直}) = 0.179\text{mm}$$

不連続面が孔内に露出している場合、この面を直接載荷して得られる孔径変化量は、他の方向の載荷による変化量に比べて極めて大きい。解析1でもP-U線図の傾きに異方性が現れたが、当解析では異方性の程度はより大きいのが特徴といえる。

解析1、2で得られた知見は、孔内点載荷試験の結果(P-U線図の載荷方向の分布)から不連続面の概略の(垂直)剛性値を評価することが可能であることを示唆している。

4. 4 室内模型試験

4. 4. 1 試験方法

2. 3. 4項で述べた岩盤模型供試体を用いて、孔内点載荷の室内試験を実施した。

供試体には、あらかじめフラットジャッキを用いて上下、左右より1MPaの荷重をかけ、その状態を試験中維持する。この載荷の目的は、孔内載荷試験により、供試体が低い荷重の下で引張破壊するのを防ぐためである。次に、供試体のボアホール内に3つの測定断面を設け、各断面において幾つかの方向(図4. 6参照)で載荷試験をする。

載荷は単調増加とし、ハンドポンプによって圧送する油圧の圧力と載荷部の変位を測定する。センサーからの出力はアンプ、ADボードを通してパソコンのハードメモリに記録する(図4. 7参照)。

4. 4. 2 試験結果

点載荷試験にて得られた圧力－ひずみ線図を図4. 8に示す。

(1) 不連続面を含まない等方・均質な供試体の結果

不連続面を含まない等方・均質な供試体の場合、図aに示すように、圧力－ひずみ線図は載荷方向によらず直線的で、しかも線図の傾きはほぼ等しい。ただし、線図をより詳細に見ると、ある大きさの圧力を境に傾きが変化し、大きな圧力の下での傾きは小さな圧力の下での傾きよりも小さい傾向が認められる。この現象が、使用した載荷ポンプの特性に依存して生じたものか、あるいは、模型の特性を反映して生じたものは、現時点では不明である。

圧力－ひずみ線図の傾きから、岩盤の変形係数（ヤング率）に関する情報が得られる。これについて以下に検討する。

まず、線図において、荷重が最大値の50%以上の測点を最小二乗法によって直線で近似し、この傾きに注目する。測定された圧力に油圧ピストンの受圧面積(6.42cm^2)をかけると押付力が得られる。測定されたひずみに片持梁の感度($0.6\mu\text{m}/\mu\text{strain}$)をかけると変位量が得られる。傾き×受圧面積×感度を仮の剛性Gと呼ぶ（単位は $\text{k}\text{gf}/\mu\text{m}$ ）。表4. 1に仮の剛性値を示す。もし、材料が均質・等方ならば、仮の剛性値Gは材料のヤング率Eに比例するので、次の関係が成立する。

$$E = m G, \quad (m \text{は定数})$$

不連続面を含まない等方・均質な供試体(PLT06, 09)の場合、表に示すように計測した4方向の仮の剛性値はほぼ一致している。したがって、この測定結果を利用して定数mを求めてみる。供試体PLT06のヤング率Eは、 17.4GPa ($1.78 \times 10^5 \text{k}\text{gf}/\text{cm}^2$)である。一方、仮の剛性値の平均値は、 $16.5 \times 10^{-2} \text{k}\text{gf}/\mu\text{m}$ なので、

$$m = 1.08 \times 10^2 \text{cm}^{-1}$$

と評価される。同様に、供試体PLT09の場合、

$$m = 1.09 \times 10^2 \text{cm}^{-1}$$

が得られる。両者の一致の程度はよく、この数値はある程度、信頼が置け

ると考えられる。必要ならば、 $m = 1.09 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ を用いて、点載荷試験結果から岩石のヤング率（変形係数）が評価できよう。

（2）不連続面がある供試体の結果

不連続面が測定孔の近くに存在するか、または測定孔を貫通している場合には、圧力－ひずみ線図は載荷方向と不連続面の相対的な位置関係により、次のような挙動をすることが確認された。

1) 不連続面が測定孔の近傍に存在する場合（図2. 8(2)参照）：

図2. 8 bに示すように、ある大きさ以上の圧力の下での線図の傾きを比較すると、載荷方向が不連続面に垂直のときの値は、他の方向の値より僅かながら小さい。載荷方向が不連続面に垂直以外のどの向きの値も、互いにほぼ同じである。

2) 不連続面が孔壁面に露出している場合：

図2. 8(3)～(5)に示すように、不連続面が孔軸に交わる3つのケースについて試験をし、次のような結果を得た。載荷点が不連続面に当たり面自体を載荷しているとき、線図の傾きは他に比べてかなり小さくなる。一方、他の方向の線図の傾きは、ほぼ同じか（図2. 8(3)～(4)の場合）、あるいは、不連続面に近い向きの傾きは、離れた向きの傾きよりも大きい（図2. 8(5)の場合）。

これらの知見は、数値解析で得た知見とほぼ同じであり、孔内点載荷試験をすれば、不連続面に関して以下の情報が得られることを示唆している。

1) 不連続面が測定孔に現れてなくとも、近傍に存在すれば、P-U線図の傾きに関して異方性が表れる。したがって、場所も含めてその存在がわかる可能性がある。

2) 不連続面が測定孔に露出していれば、P-U線図の傾きに関して顕著な異方性が表れる。これから、不連続面の垂直剛性を予測することが可能である。

上記の知見は充填型不連続面の場合に限定されている。今後は、種々の条件の不連続面に対して試験を行う必要がある。

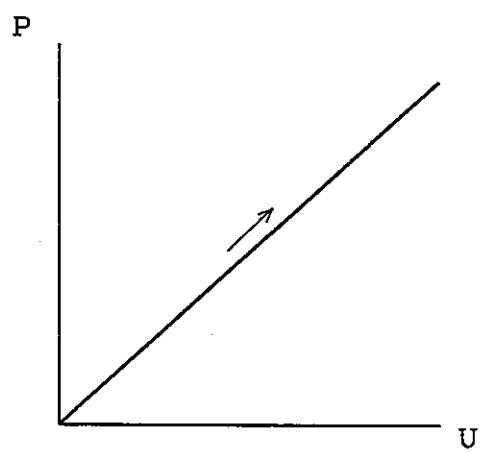
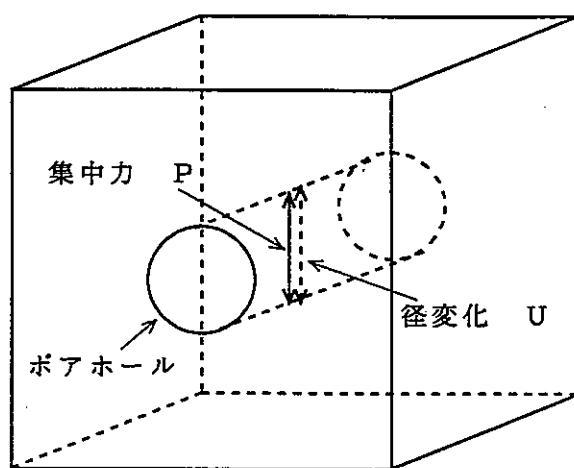
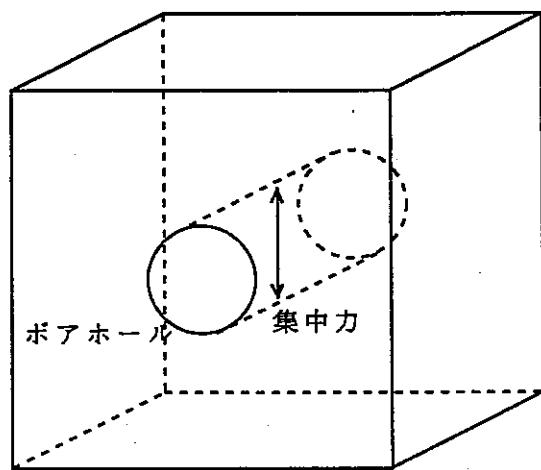


図4. 1 孔内点載荷試験器によるボアホールの載荷（上）と、試験によって得られる荷重P-孔径変化Uの線図（下）

(a)



(b)

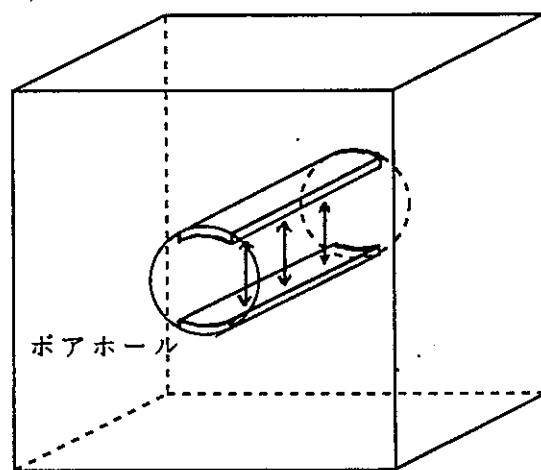
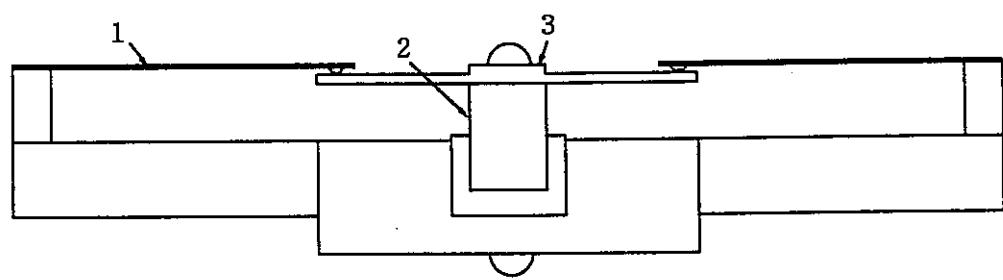


図 4. 2 孔内点載荷試験 (a) と孔内面載荷試験 (b)



1 片持梁式変位計

2 ピストン

3 載荷盤

図4. 3 孔内点載荷試験器の概念図

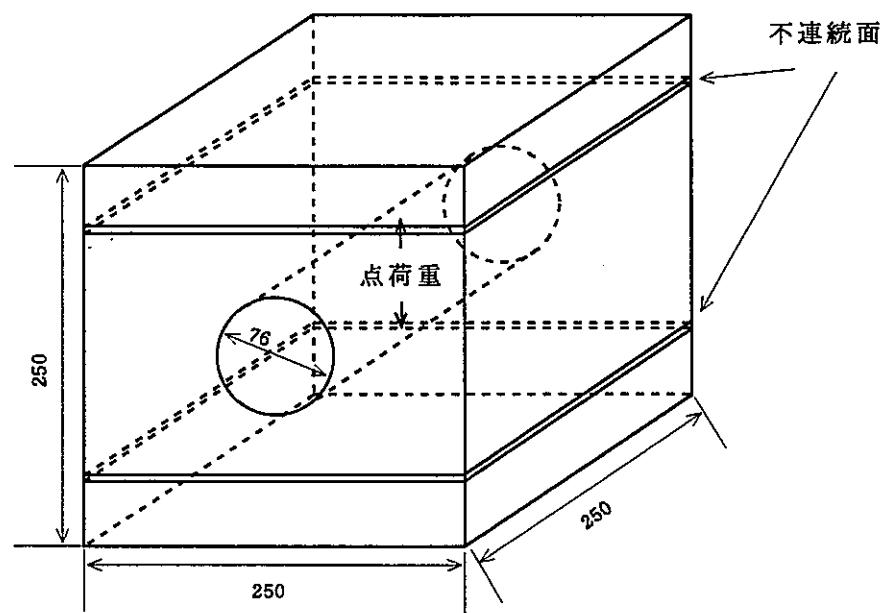


図4.4 近傍に不連続面が存在する孔における孔内点載荷試験

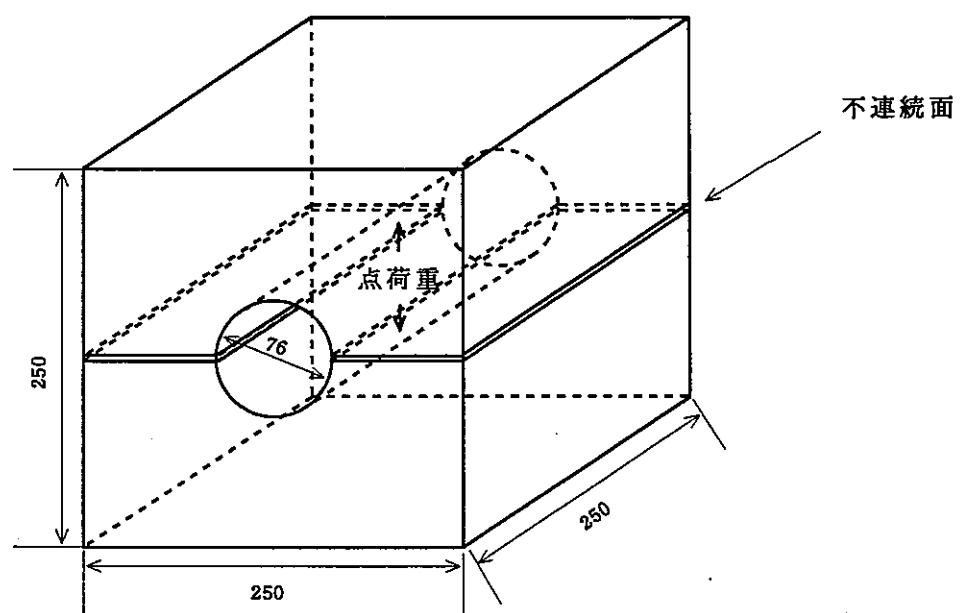


図4.5 不連続面が貫通する孔における孔内点載荷試験

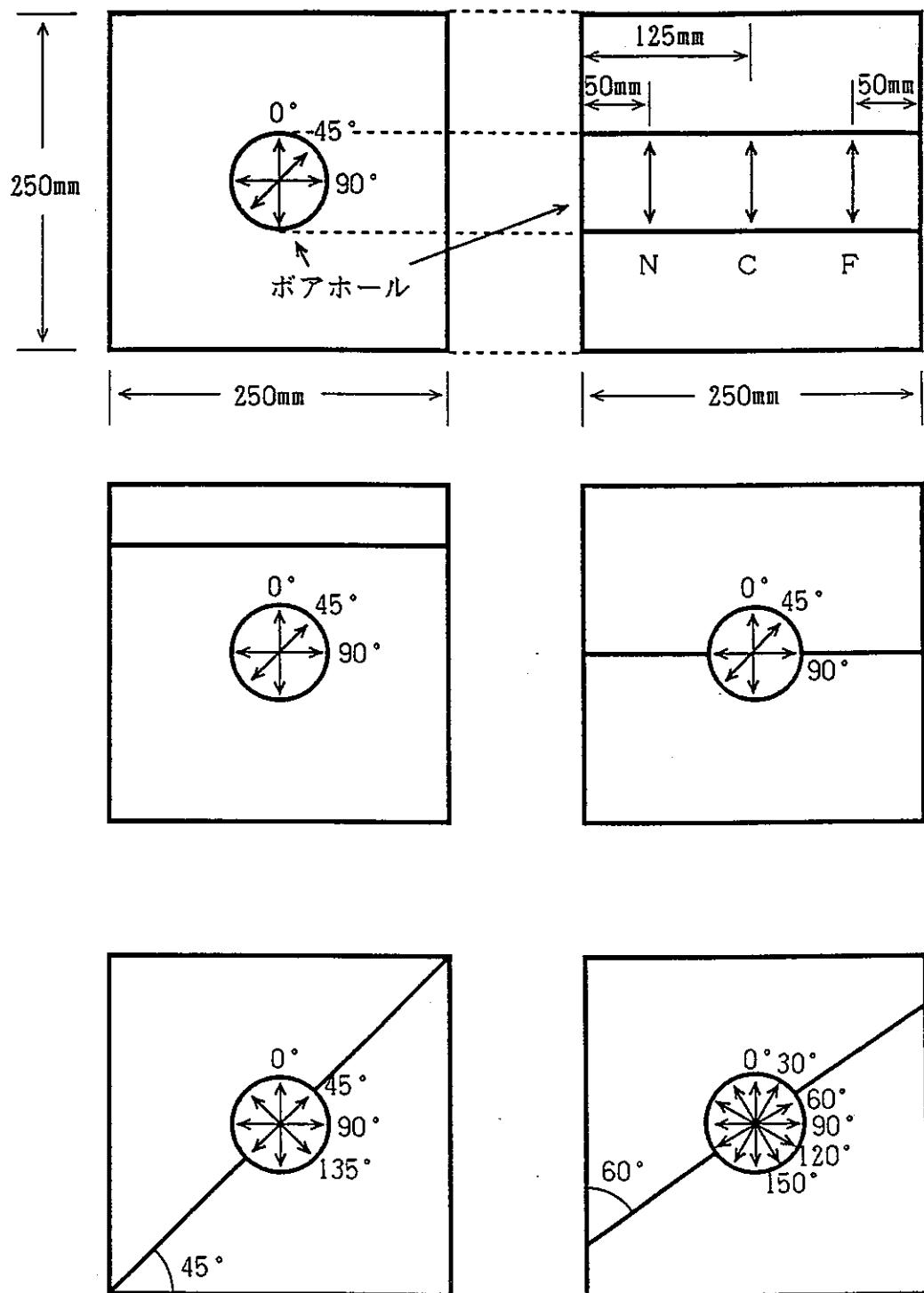


図4. 6 孔内点載荷試験の実施面箇所（右上）と計測断面における載荷方向

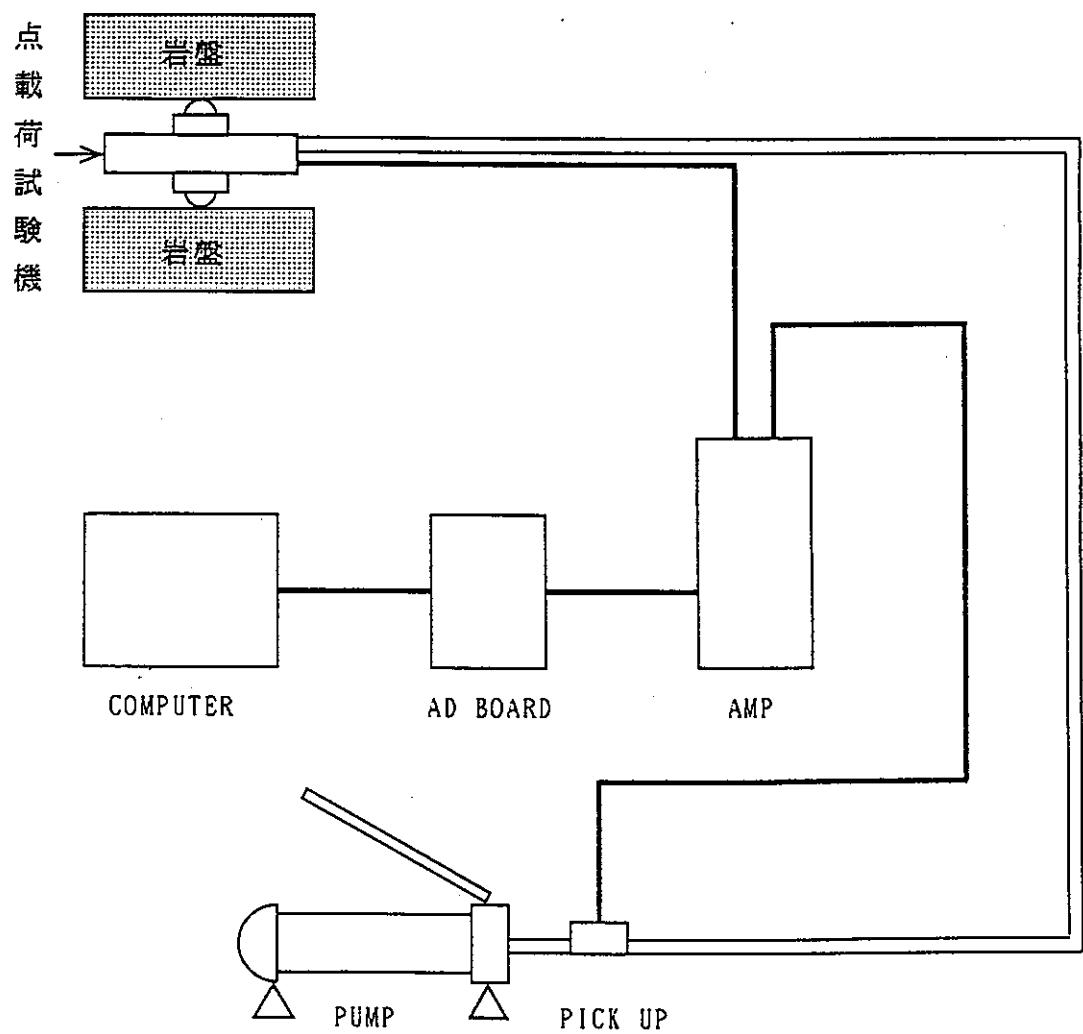
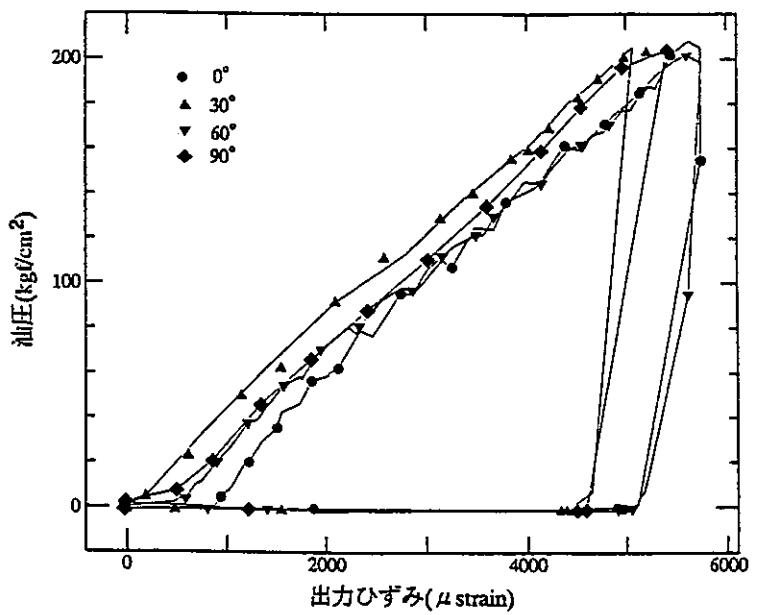
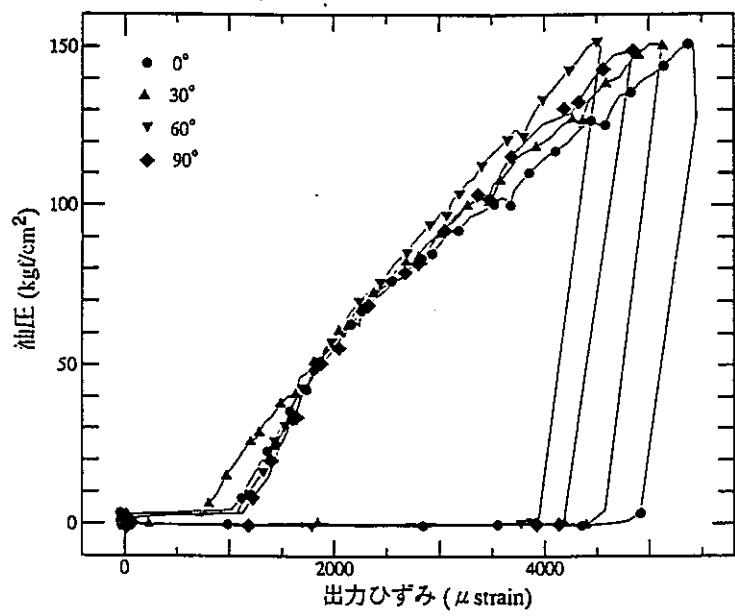


図4.7 孔内点載荷試験の概念図

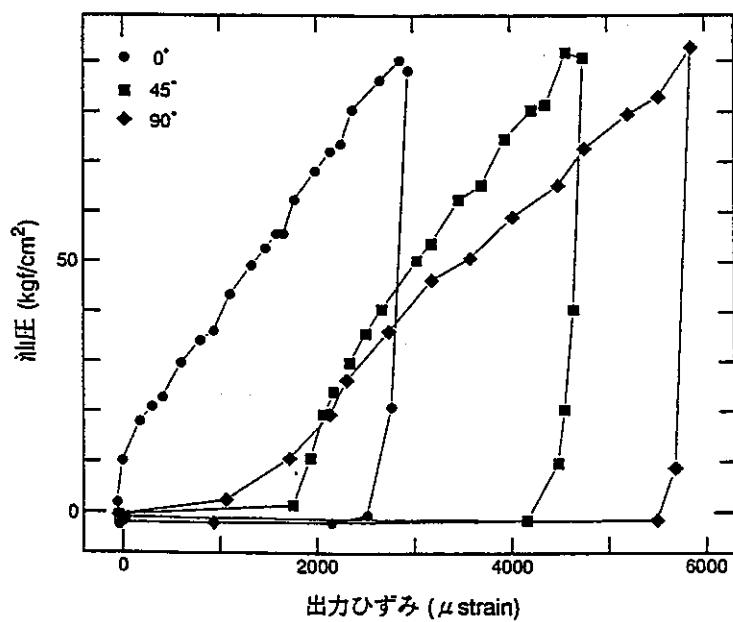


a

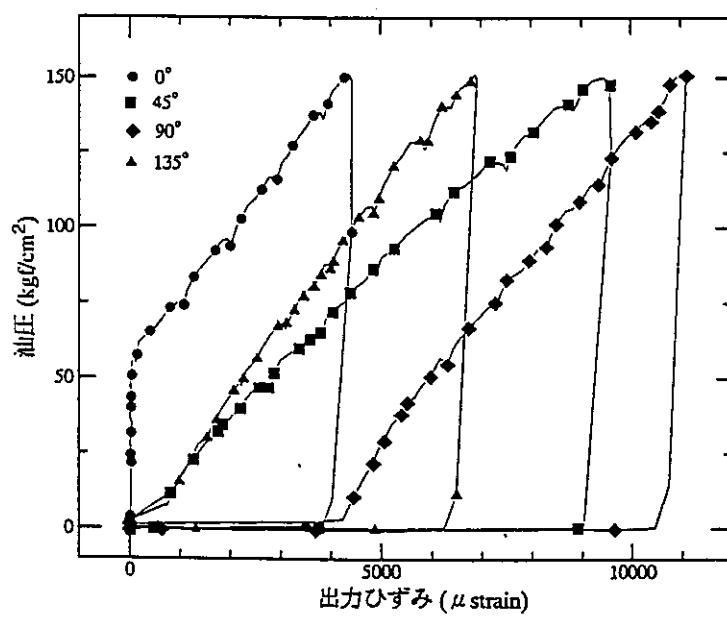


b

図4. 8 (その1) 岩盤模型に孔内点載荷試験を行って得られた圧力 - ひずみ線図。a : 不連続面を含まない模型 (図2. 8(1)参照)。b : 孔に近接した不連続面を持つ模型 (図2. 8(2)参照)。



c



d

図 4. 8 (その 2) 岩盤模型に孔内点載荷試験を行って得られた圧力-ひずみ線図。c : 孔を貫通する不連続面を持つ模型 (図 2. 8 (3) 参照)。d : 孔を貫通する不連続面を持つ模型 (図 2. 8 (4) 参照)。

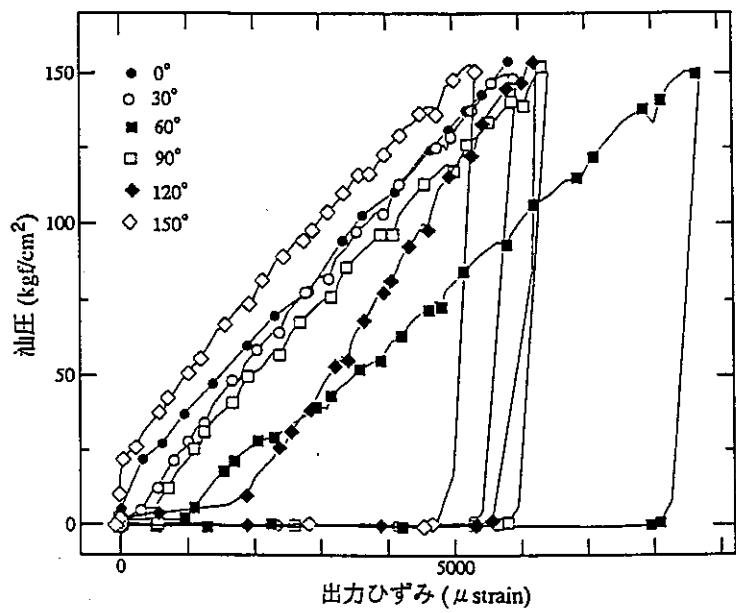


図4. 8 (その3) 岩盤模型に孔内点載荷試験を行って得られた圧力-ひずみ線図。e: 孔を貫通する不連続面を持つ模型
(図2. 8(5)参照)

第5章 結言

不連続面の力学的特性を調べるために行った次の3種類の試験：

- a 傾いた不連続面を持つ供試体の単軸圧縮試験
- b 一面せん断試験
- c 傾いた不連続面を持つ供試体の三軸圧縮試験

から、以下の諸点が明らかになった。

- 1) 不連続面の強度特性は、内部摩擦角と粘着力の2つの定数により表されるが、これらの値は試験法によらない。
- 2) 充填型不連続面の場合、不連続面の厚みが増すと粘着力が増す。厚みが0.1mm以下であれば、粘着力は0とみなせる。内部摩擦角は不連続面の厚みの影響をあまり受けない。
- 3) 一面せん断試験では、不連続面の上下面の相対的な変位を測定するのに、この量を直接的に計測するCCDカメラを用いた方法が正確である。
- 4) 一面せん断試験で得られる充填型不連続面のせん断応力－ずれ変位線図は、弾－完全塑性的挙動を示す。

充填型不連続面を含む岩盤の孔内点載荷試験に関して、3次元応力解析と模型試験を行い、荷重－孔径変位線図の傾き（以下単に傾きと呼ぶ）に関して以下の知見が得られた。

- 1) 供試体が不連続面を持たず均質、等方の場合、傾きは方向によらずほぼ一定となる。
- 2) 不連続面が観測孔に接近して存在する場合、不連続面に垂直方向の傾きは、それ以外の方向の傾きより小さい。
- 3) 不連続面が観測孔に露出している場合、その不連続面を直接載荷したときの傾きは他の方向の傾きよりかなり小さい。
- 4) 上記の傾きの異方性から、不連続面の垂直剛性を評価することができる。

第6章 参考文献

- 1) 山下秀、天野勲三、川辺金光：人工亀裂面を有する試験片の力学的性質、
日本鉱業会誌、Vol. 99, No. 1150, pp1021-1027, (1983)
- 2) 吉中龍之進、吉田淳：岩盤不連続面の強度・変形特性の寸法効果に関する研究、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp91-96, (1990)
- 3) 斎藤敏明、寺田守：岩盤不連続面の表面形状特性がせん断強度に及ぼす影響について、第8回岩の力学シンポジウム講演論文集、pp97-102, (1990)
- 4) J. A. Hudson著、丸井英明、野崎保訳：岩盤工学の基礎、(1991)
- 5) 山口梅太郎、西松祐一著：岩石力学入門、(1967)
- 6) M. S. パターソン著、荻野正二、水野義明、佐野修訳：実験岩石力学 (1986)