

本資料は、 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

2002. 2. 28

[技術情報室]

分 置

配布限定

# 堆積軟岩の透水性および変形・ 強度特性の異方性に関する研究(Ⅱ)

(動力炉・核燃料開発事業団 依託研究成果報告書)

1991年 3 月

北海道大学工学部  
基礎地盤工学講座

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

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

て、  
認が

必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

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 技術情報室



配 布 限 定  
PNC 1600 90-007  
1991年 3月

## 堆積軟岩の透水性および変形・強度特性の 異方性に関する研究(Ⅱ)

土 岐 祥 介<sup>\*</sup>、三 浦 均 也<sup>\*</sup>

### 要 旨

試験条件を種々に変えて、強度・変形特性に及ぼす褶曲作用の影響とそれとともに力学特性の異方性を、三軸圧縮試験を中心とした室内試験によって実験的に研究した。試料は地層の堆積(褶曲)状況が比較的良く調査されているダム建設地点に於て4方向から採取した。このサイトでは、右岸の地層はほぼ水平であるのに対し、左岸では地層がほぼ垂直となっている。

試験結果の考察より、以下のような知見を得た。

1) 右岸試料では、降伏拘束圧の最も大きいダム軸水平方向の供試体が、一軸圧縮特性や三軸圧縮特性に於て最も大きな剛性と強度を示した。それに対し左岸試料では、水平方向よりも鉛直方向で高い降伏拘束圧と強度を示した。このような特性は、以前に受けた水平方向からの応力によるものと考えられ、その顕著な影響をある程度定量的に示した。

2) 弾性波の伝播速度および透水係数の異方性と堆積条件との関係を、堆積条件および褶曲に伴って生じた微細な不連続面の影響とから説明した。

---

本報告書は、北海道大学工学部基礎地盤工学講座が動力炉・核燃料開発事業団の依頼により実施した研究の成果である。

契 約 番 号 : 020D0038

事業団担当者 : 川 濱 隆 司

<sup>\*</sup> : 北海道大学工学部基礎地盤工学講座



LIMITED DISTRIBUTION  
PNC EJ1600 90-007  
March 31, 1991

Study on the Anisotropic Characteristics of Permeability  
and Deformation-Strength Behavior of Sedimentary Soft Rock (II)

\*                      \*  
Shosuke Toki   and   Kinya Miura

Abstract

Experimental study, using the triaxial compression test apparatus, was carried out to investigate the effects of folding and anisotropy of engineering properties, induced by tectonic forces, on the mechanical behavior of sedimentary soft rock. Test specimens were secured from four different directions at a dam site, where its geological structure are well documented by a series of geological surveys; the bedding planes of the left bank are almost upright in contrast to the right bank, where the bedding planes are almost horizontal.

Based on the examination of test results, the following findings were obtained.

1) In the samples taken from right bank, the stiffness and strength in unconfined compression and triaxial compression tests were the highest for the test specimens secured from horizontal direction, yielding confining pressure of which is the highest also. On the contrary, in the samples of left bank, the yielding confining pressure was higher in the samples secured from vertical direction than the one from horizontal direction, and the other mechanical properties were also superior to the samples secured from the other directions. Such characteristics shown in the both sides of the banks may be attributed to the previously subjected horizontal stresses, and their contributions to the significant anisotropy was evaluated quantitatively.

2) The relationships between the anisotropy of elastic wave velocity and permeability of test specimens and sedimentary environment were examined in view of folding and micro discontinuities exerted by the folding.

---

Work Performed Hokkaido University under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation  
PNC Liaison: Takashi Kawahama (Technical Information Service)  
\*: Foundation Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

## 1. 序論

- 1. 1 本研究の目的と意義 …1
- 1. 2 在来の研究
  - 1.2.1 足立らの研究 …2
  - 1.2.2 佐野らの研究 …5

## 2. 試料採取地について

- 2. 1 採取地の位置 …10
- 2. 2 周辺の地質概要
  - (1) 北海道中央部の地質構造 …11
  - (2) ダム周辺の地質 …11
  - (3) ダムサイトの地質 …12
- 2. 3 褶曲状態 …14

## 3. 試料と試料採取の方法

- 3. 1 試料採取 …20
- 3. 2 試料の運搬・保存 …22
- 3. 3 採取箇所及び採取箇所の地質状態 …23

## 4. 試料の物理的性質

- 4. 1 試料の品質 …31
- 4. 2 基本的な物理的性質 …33
- 4. 3 鉱物組成 …34
- 4. 4 考察 …35

## 5. 弾性波速度

- 5. 1 試験装置及び試験方法 …42
- 5. 2 試験結果 …44
- 5. 3 考察
  - (1) 褶曲作用の影響 …45
  - (2) 異方性について …45

## 6. 透水性

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 6. 1 試験装置及び試験方法 | ...52 |
| 6. 2 試験結果       | ...54 |
| 6. 3 考察         |       |
| (1) 摺曲作用の影響     | ...55 |
| (2) 異方性について     | ...55 |

## 7. 一軸圧縮時の変形・強度特性

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 7. 1 試験装置及び試験方法 | ...64 |
| 7. 2 試験結果       | ...66 |
| 7. 3 考察         |       |
| (1) 摺曲作用の影響     | ...68 |
| (2) 異方性について     | ...68 |

## 8. 三軸圧縮時の変形・強度特性

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 8. 1 試験装置及び試験方法                        | ...76 |
| 8. 2 試験結果                              |       |
| 8.2.1 応力～ひずみ～ダイレイタンスー関係と供試体破壊形態        | ...82 |
| 8.2.2 変形特性 $E_{50}$                    | ...83 |
| 8.2.3 ピーク強度 $(\sigma_3 - \sigma_1) p$  | ...85 |
| 8.2.4 残留強度特性 $(\sigma_1 - \sigma_3) r$ | ...86 |
| 8.2.5 降伏拘束圧 $\sigma_y$                 | ...86 |
| 8. 3 考察                                |       |
| (1) 摺曲作用の影響                            | ...88 |
| (2) 異方性について                            | ...88 |

## 9. 結論

...137

## あとがき

...140

## 参考文献

...142

# 第 1 章

## 序 論

## 1 . 序 論

### 1 . 1 本 研 究 の 目 的 と 意 義

本研究の目的は、顕著な褶曲作用を受けている軟岩地盤より採取した細粒砂岩を対象に、種々の室内試験を実施し、物理的および力学的性質を調べるとともに褶曲作用によって導入された軟岩の力学的性質の異方性についても考察するものである。

軟岩に関する研究は、近年注目され始めており、従来の研究でも足立<sup>1)</sup>・2)<sup>3)</sup>らにみられるように大谷石を対象として三軸圧縮試験を行い、基礎的な力学特性を説明している例は多く見受けられる。

しかし、軟岩の性質を褶曲構造といった地質構造を舞台に展開している例は皆無に近い。

今後、益々軟岩地盤を対象とした調査や設計は急増し、極めて高いレベルでの技術的手段が要求されるのは間違い無い。

本研究のように、軟岩の物性と地質構造の関係を少しずつ説明していくことにより、地質の動きに対応した指標が得られるはずである。近い将来、軟岩の物性と地質構造に関して何らかの指標を導き出せたらと考えている次第である。

## 1.2 在 来 の 研 究

### 1.2.1 足 立 ら の 研 究 <sup>1), 2), 3)</sup>

足立らは、理想的堆積軟岩材料として大谷石を用いた実験により軟岩の力学的特性の解明に努め、その弾-塑性挙動、ダイレイタンスー特性、また時間依存性について論じ、さらに硬岩はもとより土質材料と定量的には全く同様の力学挙動を示すことを確かめている。その後、地盤材料の力学特性は定性的に異なることがないという立場で大谷石を用いた三軸試験を行い、堆積軟岩の力学的特性と破壊規準について報告しているので、今回はこれを参考にした。

要旨をまとめると次のようになる。

- (1) 軟岩には先行履歴応力が存在し、拘束圧がその応力より低いか高いかで異なる力学挙動を示す。すなわち、低い場合には応力-ひずみ関係はひずみ硬化-軟化型となり、そのせん断過程に体積膨張を生ずるが、高い場合にはひずみ硬化型となって体積の圧縮を示す。
- (2) 最終的に到達する応力状態を残留強度とするがこの状態は有効応力も体積もそれ以上変化せず、単にせん断変形のみが継続するという、いわゆる土質材料に対しての critical state に相当する状態であると定義づける。
- (3) 拘束圧がある応力以上になると最大強度と残留強度が等しくなる。また、最大強度線と残留強度線が最初に交わった応力を先行履歴応力と仮称する。
- (4) 最大強度、残留強度ともに拘束圧と非線形の関係にある。また、強度と体積ひずみの間にも唯一的な非線形関係が成立する。これらのことから、軟岩の破壊規準は単に応力間の関係式のみで与えるのは不十分であって、強度と体積ひずみの関係式も同時に規定することが必要である。
- (5) その破壊規準は、次のような関係式で表される。

(1) 最大強度に対する破壊条件式

①  $p' = \sigma_m' \leq$  先行履歴応力の場合

$$(q / p_0')_{peak} = \alpha_p (p' / p_0')^{\beta_p}$$

$$v_{peak} = C_s \log_{10} (p' / p_0')$$

②  $p' = \sigma_m' \geq$  先行履歴応力の場合

$$(q / p_0')_{peak} = (q / p_0')_{residual}$$

$$v_{peak} = C_c \log_{10} (p' / p_0') - v_{op}$$

(2) 残留強度に対する破壊条件式

①  $p' = \sigma_m' \leq$  先行履歴応力の場合

$$(q / p_0')_{residual} = \alpha_R (p' / p_0')^{\beta_R}$$

$$v_{residual} = C_R \log_{10} (p' / p_0') - v_{or}$$

②  $p' = \sigma_m' \geq$  先行履歴応力の場合

$$(q / p_0')_{residual} = \alpha_R (p' / p_0')^{\beta_R}$$

$$v_{residual} = C_c \log_{10} (p' / p_0') - v_{op}$$

式中では、 $p' = \sigma_m' = (\sigma_1' + 2\sigma_3') / 3$  , 平均有効応力  $q = (\sigma_1' - \sigma_3')$  , 軸差応力  $p_0' =$  単位圧力  $= 1 \text{ kg/cm}^2$  ,  $\alpha_p, \beta_p, \alpha_R, \beta_R, C_s, C_c, C_R, v_{op}$  は材料定数であって、大谷石に対するこれらの値は、図 1-2-1, 2 中に示している。

この破壊条件式は図 1-2-1, 2 の実験事実に基づき求められたものである。

(6) 水で飽和した軟岩の強度特性は有効応力によって唯一的に表現できる。また、軟岩の強度特性からみて、望ましい三軸試験方法は排水試験であり、圧密非排水試験となる場合には間隙水圧の計測が必要である。

(7) 先行履歴応力以下の拘束圧のもとでは、岩石試料の最大強度は地質分離面（節理等）を含む岩盤の強度の上限値を、残留強度はその下限値を与えるものと考えられる。従って、岩石試験であっても、残留強度を正しく把握すれば、岩盤の取り得る強度の範囲だけは少なくとも明らかに出来るから三軸試験は必ずみ制

御によって残留強度まで求める種類のものが望ましい。

(7) をもう少し詳しく考えてみると、岩石がその先行履歴応力以下の拘束圧のもとでせん断を受け破壊して、最終的に到達する残留強度状態というのは、一つの破断面が生じそれに沿って滑っている状態である。

換言すれば、不連続面によって材料の力学挙動が完全に支配されている状態を再現しているときであると考えられる。さらにこの場合、供試体中に生ずる破断面の方向は最大主応力の作用方向に対して最もすべりやすい方向にあるから、この状態での強度は不連続面を有する岩盤の強度としてもその最小値に相当するものであろう。すなわち岩盤強度の下限值は、岩石供試体の三軸試験で求めた残留強度と一致するはずである。

この事を模式的に示したのが図1-2-3である。図は岩盤強度の上限値は岩石(不連続面を含まない)の強度に、その下限値が岩石の残留強度に相当して、岩盤の強度が少なくともその範囲内にあることを表している。

足立らは地質分離面の有無による岩盤と岩石の力学特性を、この様にまとめている。

### 1.2.2 佐野らの研究<sup>4)</sup>

佐野らは、注意深い観察無しには外見状異方性を認めることが困難であり、しばしば等方性材料として取り扱われる岩石（萩野凝灰岩，島崎安山岩，浮金斑勵岩，大島花崗岩，黒髪島花崗岩）を用いて、岩石の力学的異方性の程度や、異方性のもたらす岩石内の構造を検討し、さらに岩石の異方性の主軸をどの様にして見いだすかという問題について報告している。その中で、クラックによる弾性波速度  $V_p$  (P波) の受ける影響を報告しているので、以下にその要旨を示す。

岩石はその岩石の成因や応力履歴に応じてその岩石独自の構造を有する。それは時として鉱物粒の選択配向であったり、間隙の選択配向であったりする。その多様性にもかかわらず異方性の主軸が比較的単純であるのはそれらがいずれも重力の影響のもとで形成された構造であるためと考えられる。

異方性の主軸を決定するには、偏光顕微鏡を用いた薄片観察による方法と、弾性波速度  $V_p$  による方法がある。

引張強度などの力学的異方性について考えるときは、開口したクラックがこうした強度に大きな影響を与えると考えられるので、この種のクラックの存在に敏感な  $V_p$  はその配向面を決定する上で極めて有効な物理量となる。

実際に、大島花崗岩を用いた弾性波試験結果を示しているので紹介する。

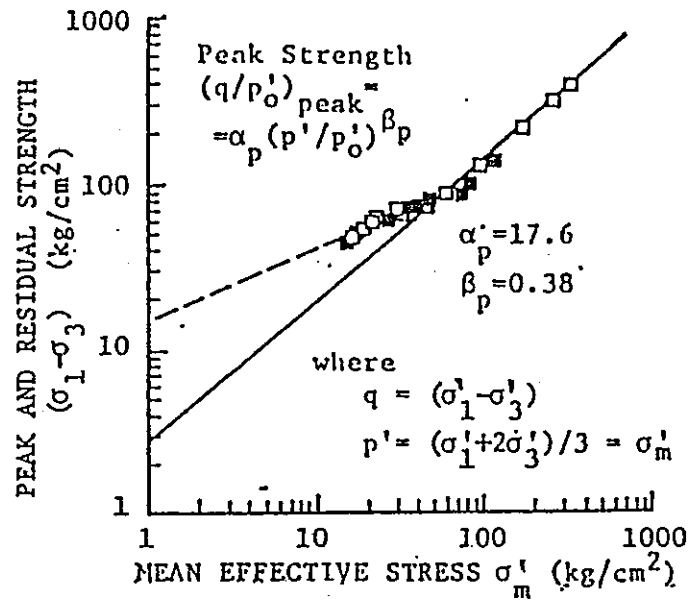
大島花崗岩は、薄片観察では顕著な異方性が認められるにもかかわらず、弾性波速度  $V_p$  の異方性はほとんど認められない岩石である。佐野らは、この様な場合を次のように解釈した。

図 1-2-4 は、大島花崗岩内を伝する弾性波速度波形の方向依存性について示している。これは円柱形供試体の側面に、圧電振動子を固定しパルス透過法によりさまざまな方向に伝播する弾性波を測定したものである。

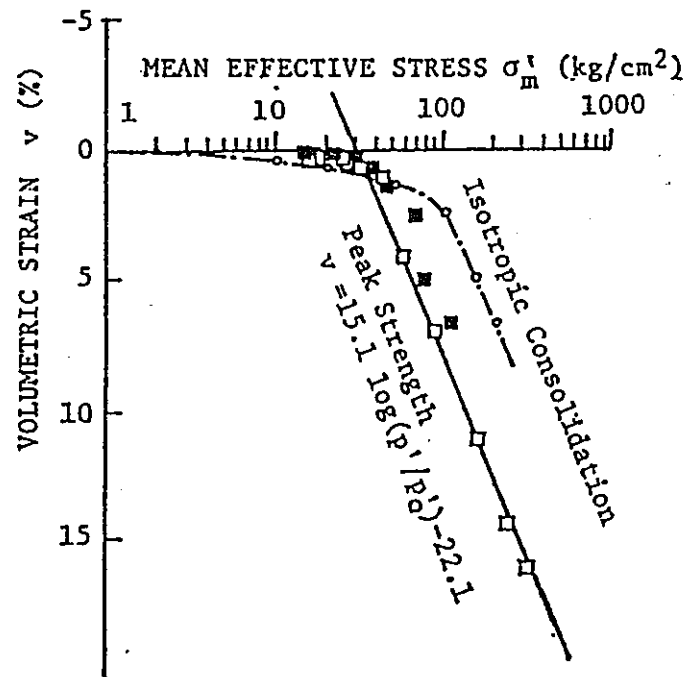
hardway面に垂直に伝 する波形が、この近傍の伝 経路を有する弾性波と比較して振幅が小さくなっている。

すなわち、波動の到達時間から計算される弾性波速度には反映されなかった癒着したクラックの配向面が、速度振幅には反映されていることが分かる。

以上のことにより、佐野らは開口したクラックに支配されるような力学的異方性の主軸については、 $V_p$ のみから決定可能であると判断している。



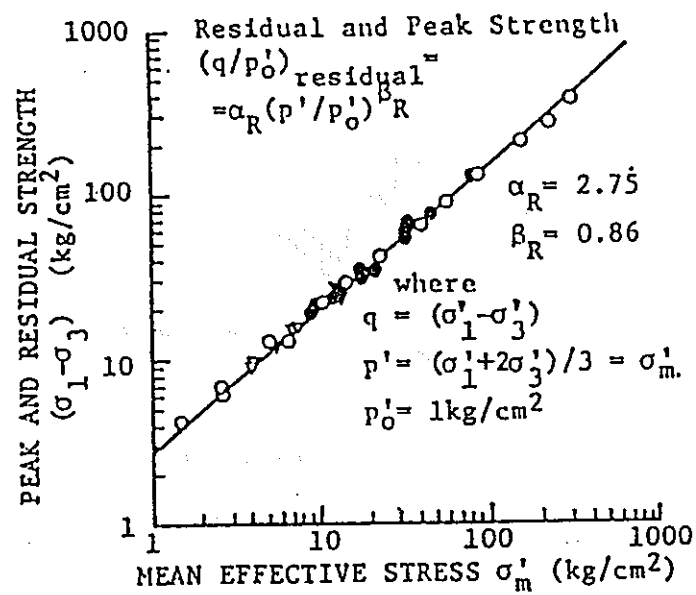
(a) 応力関係



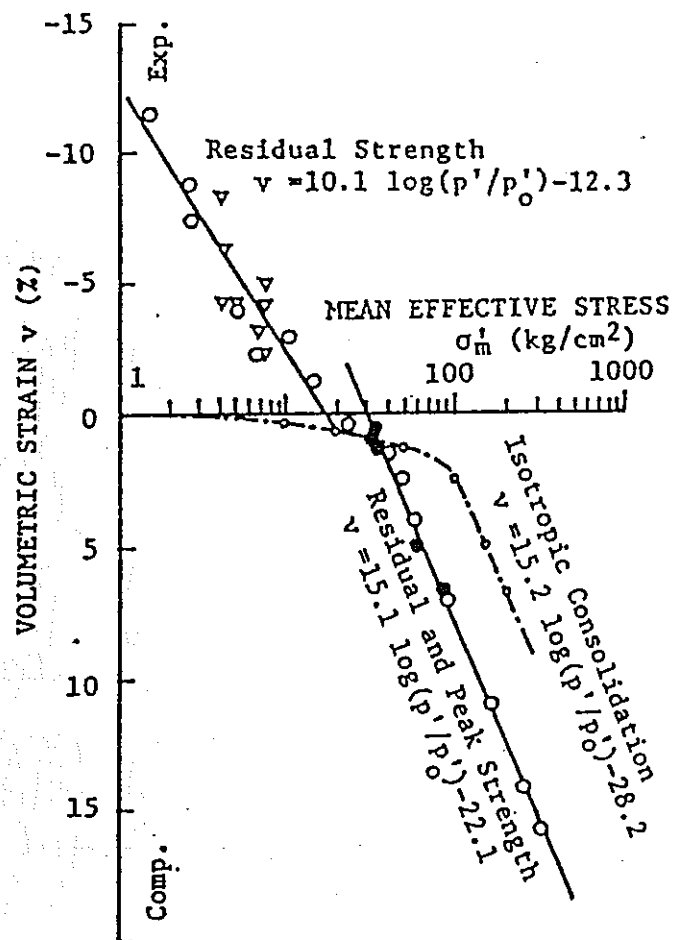
(b) 平均有効応力-体積ひずみ関係

最大強度（先行履歴応力以上では  
 残留強度に等しい）

( 図 1 - 2 - 1 )



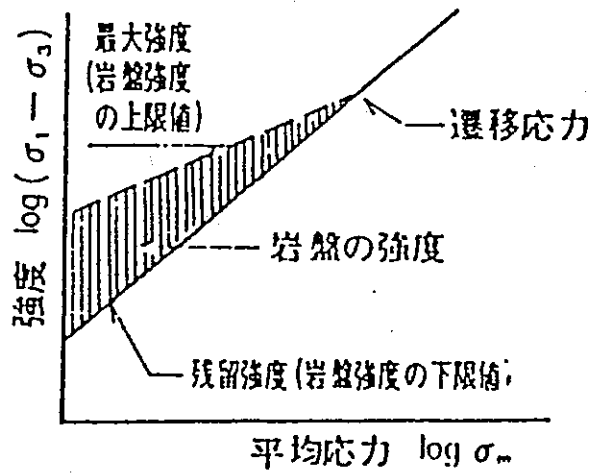
(a) 応力関係



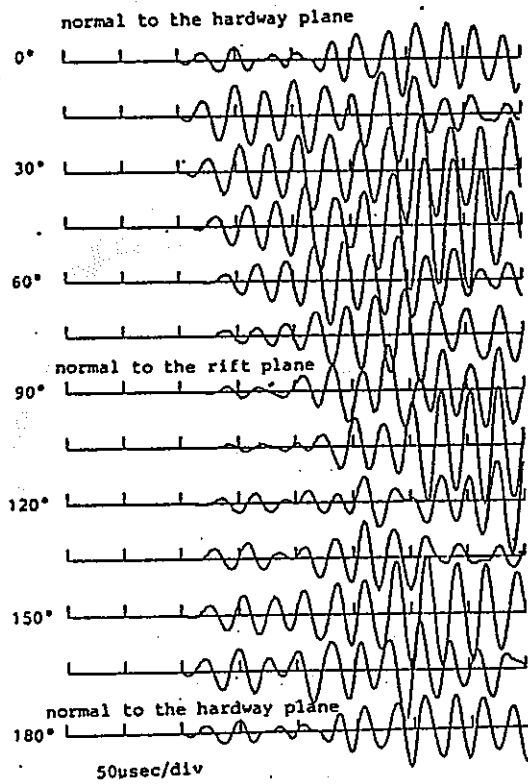
(b) 平均有効応力-体積ひずみ関係

残留強度（先行履歴応力以上では  
最大強度に等しい）

( 図 1 - 2 - 2 )



岩石強度と岩盤強度  
( 図 1 - 2 - 3 )



弾性波の波形の方向依存性 (大島花崗岩)  
伝播距離は約43mm

( 図 1 - 2 - 4 )

## 第 2 章

### 試料採取地について

## 2 . 試料採取地について

### 2 . 1 採取地の位置

試料採取は、北海道留萌市幌糠町字チバベリ110林班地先で行われた。この試料採取地点は留萌市の南東約1.5 km、留萌川支流チバベリ川流域に計画されている留萌ダムサイトに位置している。ダムサイトの調査地案内図を図2-1-1,ダムサイトにおける調査坑の位置を図2-1-2に示す。調査坑内での試料採取位置は3章を参照。

## 2.2 周辺の地質概要

### (1) 北海道中央部の地質構造

北海道中央部の地質構造（地質帯の配列・褶曲軸や断層の方向）は、大局的には南北性のものである。この構造運動は白亜紀からすでに始まっており、現在もなお続いている。ダムサイト広域の地質構造概念図を図2-2-1に示す。留萌ダムサイトは樺戸山地の北縁に位置する。

ダムサイトは、新第三紀後半から第四紀にかけての褶曲帯（石狩・天塩帯）中にある。より詳しく言うと、樺戸山地の北方延長である「樺戸背斜」（隆起帯）と、「深川構造盆地」から「留萌向斜」（沈降帯）の境界部付近に位置する。ダムサイト付近で地層の一部が急立し、褶曲が非対称の形態を示すのは、この様な事によっている。上記の様な構造運動は第四紀に入っても継続しているため、山地（樺戸・空知）と盆地（石狩低地帯から札幌・苫小牧低地帯）の境界部にはしばしば第四紀断層が認められる。

### (2) ダム周辺の地質

ダムサイトは、留萌川の支流、チバベリ川に位置し、周辺を構成する地層は主として新第三系・第四系である。

ダムサイト周辺の地質構造は南北の方向性を有しており、地層の分布や褶曲軸・断層の方向は南北に延長している。この南北性の構造方向は、ダムサイトの北側で留萌川に沿ってNW-S E方向に変化する。

本地域は全体に褶曲帯となっている。「樺戸背斜」と「留萌向斜」が主なもので、新第三紀後期の隆起域と沈降域の軸に対応している。恵別背斜は箱型褶曲に近い非対称な形態を持ち、西翼で緩く、東翼側（ダムサイトを含む）で急傾斜となっている。

これらの褶曲群は、全体的には南に落ち込んで（プランジして）いる。

断層としては褶曲軸の背斜部付近が断層に転化したもの（幌糖断層など）があるほか、小縮尺の地質図では表示されないような小規模な断層として東西ないしENE～WSW方向のものが認められている。

### （３）ダムサイトの地質

ダムサイトの地質は新第三紀中新世の増毛層および鮮新世の深川層群の幌加尾白利加層からなり、これらを第四紀の未固結堆積物よりなる扇状地体積層，崖錐堆積層，氾濫原堆積物，現河床堆積層などが覆っている。

ダムサイト近傍の地質はダムサイト西方約400mに幌糖断層とされる破碎帯が存在し、ダムサイトの左岸尾根部にはこれに付随すると思われる同方向（南北方向）の擾乱帯が存在している。

地層はこれらの断層付近で直立に近い急勾配となり、これより漸時ダム敷部の河床部で緩傾斜に移行している。

このような地質構造は、東西方向に圧縮される地質構造運動によってもたらされたものであるが、このような構造力が作用したときの地層の変形や断裂を模式的に示すと図2-2-2のようになる。

図2-2-2に示されるように、本ダムサイトでは東西方向の力が最大の圧縮力となり、これに伴い南北方向の断層や破碎帯が生成し、また圧縮力と斜交するせん断性の割れ目（せん断節理）が生成していると言える。また本ダムサイトでは、構造運動時に地層が変形しこれに伴い生じたせん断節理が多数みられるが、せん断節理は地層と同方向で地層より急傾斜の節理と、最大圧縮力（東西方向）に斜交する二方向の共役節理がみられる。

河床部では、層理と同方向でこれに急傾斜で交わる節理がみられる。これは構造運動の最初期に地層の変形に伴って生じたものと思われる。生成が早いため（地層が十分固結していないので）割れ目としては潜在的で、多

くの場合は密着したり、極く薄い粘土質のシームの薄いもの（数mmないしそれ以下）を伴っている。

構造的節理は地層の急立する左岸側で卓越するが、河床中央部から右岸側では極く少ないものとなっている。

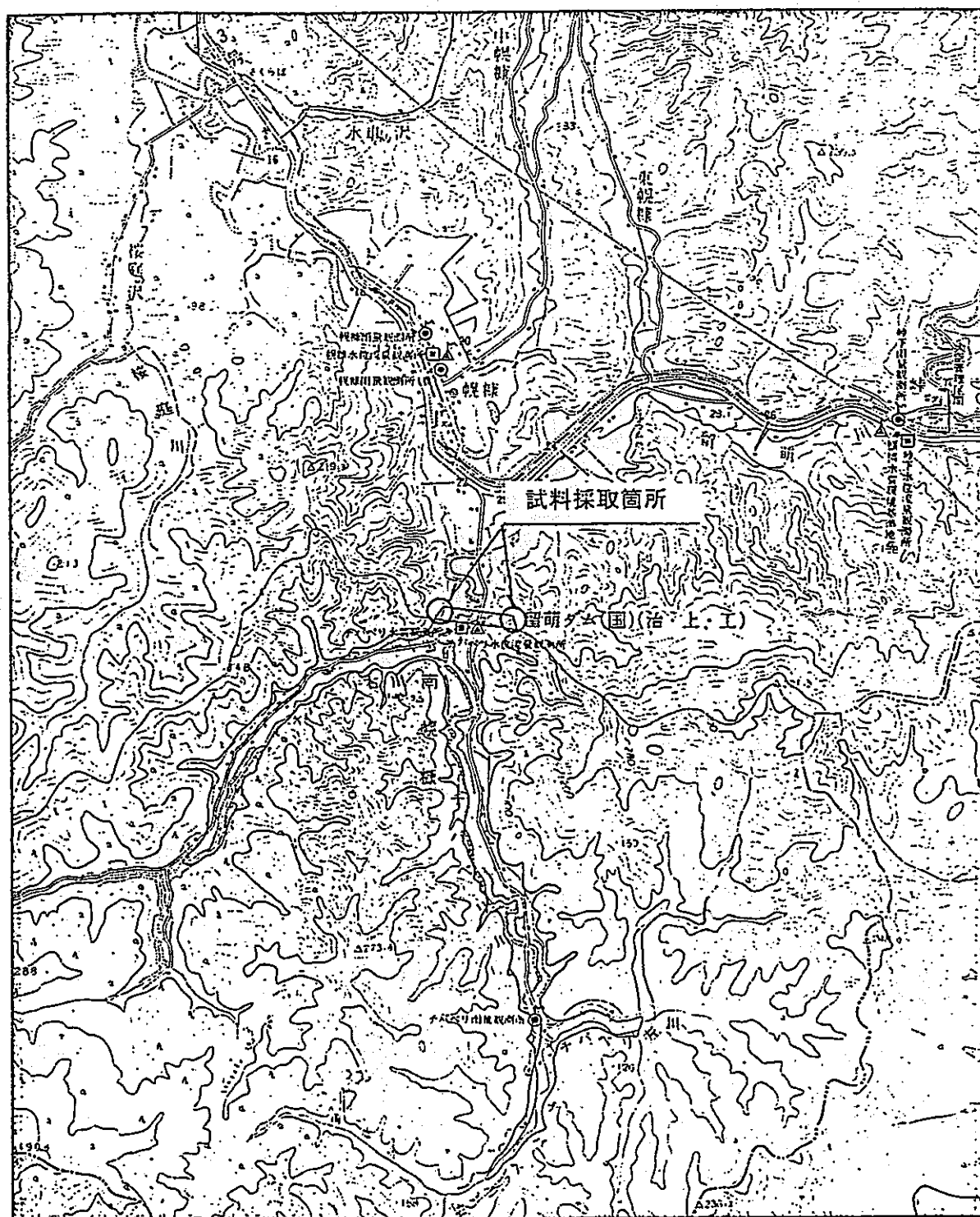
節理には構造運動時とは別生成のものがある。本ダムサイトで代表的なものは、現地形の形成に伴う浸食作用時に生成したと思われるシーテング節理である。この割れ目は地盤中の応力が解放される際、解放面に平行に生じる割れ目である。このような生成条件によるため現地形に平行に生じ、河川敷部では着岩から2～5mの深さでやや頻繁に、また両岸斜面では希にはあるが10～20mの深度にもこの割れ目と思われるものがみられる。

層理については、本ダムサイトの岩盤が比較的一様な岩質の砂岩からなるため層理の発達は少なく、特に問題となるようなものは存在しない。

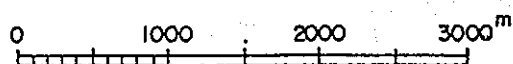
### 2.3 褶曲状態

ダムサイトは樺戸背斜と称される褶曲帯にあり、その地質構造は河床の向きと同様に南北の方向性を持っている。ダムサイト周辺の地質構造断面図を図2-3-1に示す。その詳細を見ると、地層（細粒砂岩）は図2-3-2に示されるように、右岸部で水平層をなすが、左岸に向かい押し上げられるように傾き、左岸丘陵部では直立に近い急勾配となっている。この様に、試料採取地であるダムサイト一帯は、著しい褶曲作用を受けていることが分かる。

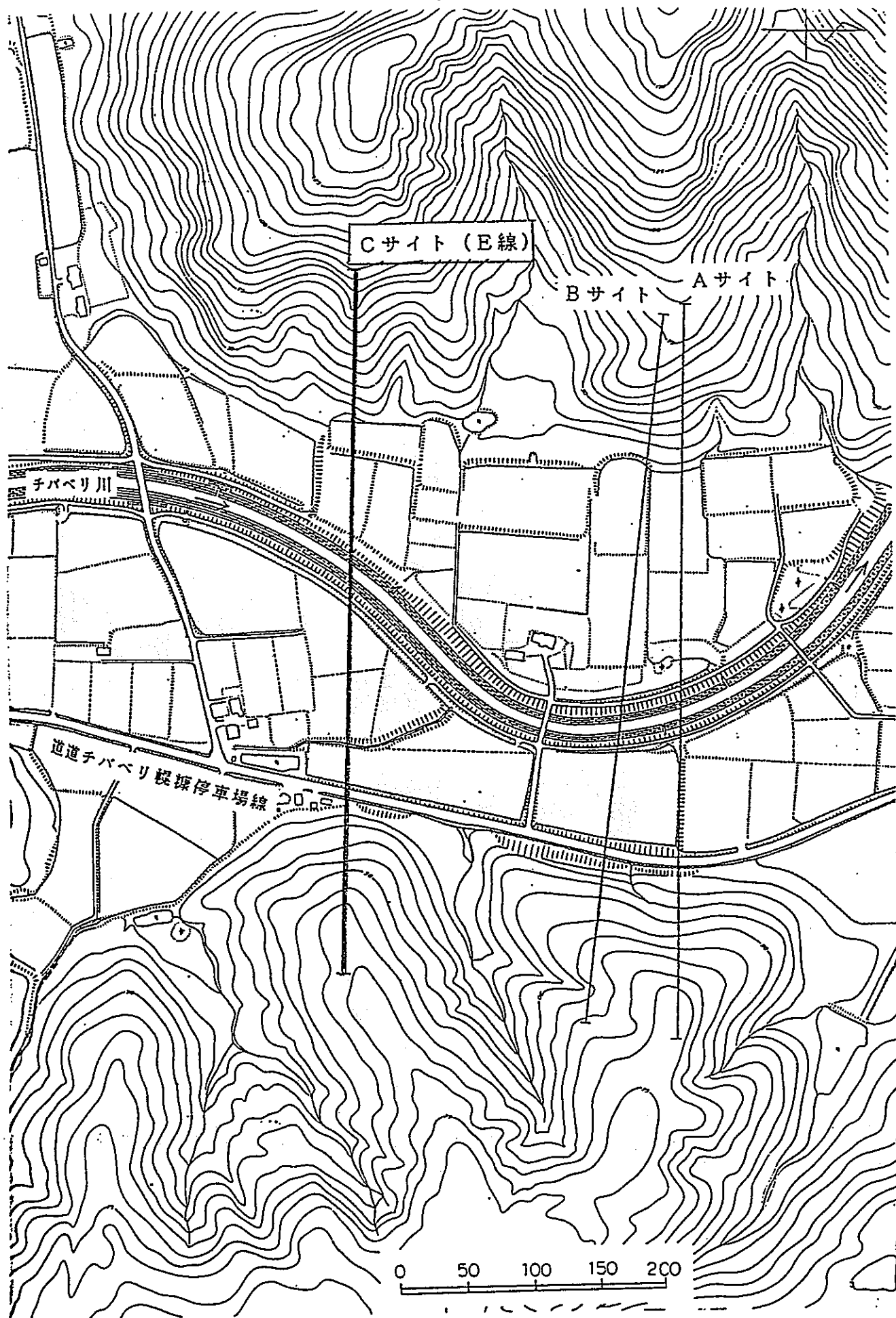
## 調査地案内図



1 : 50,000

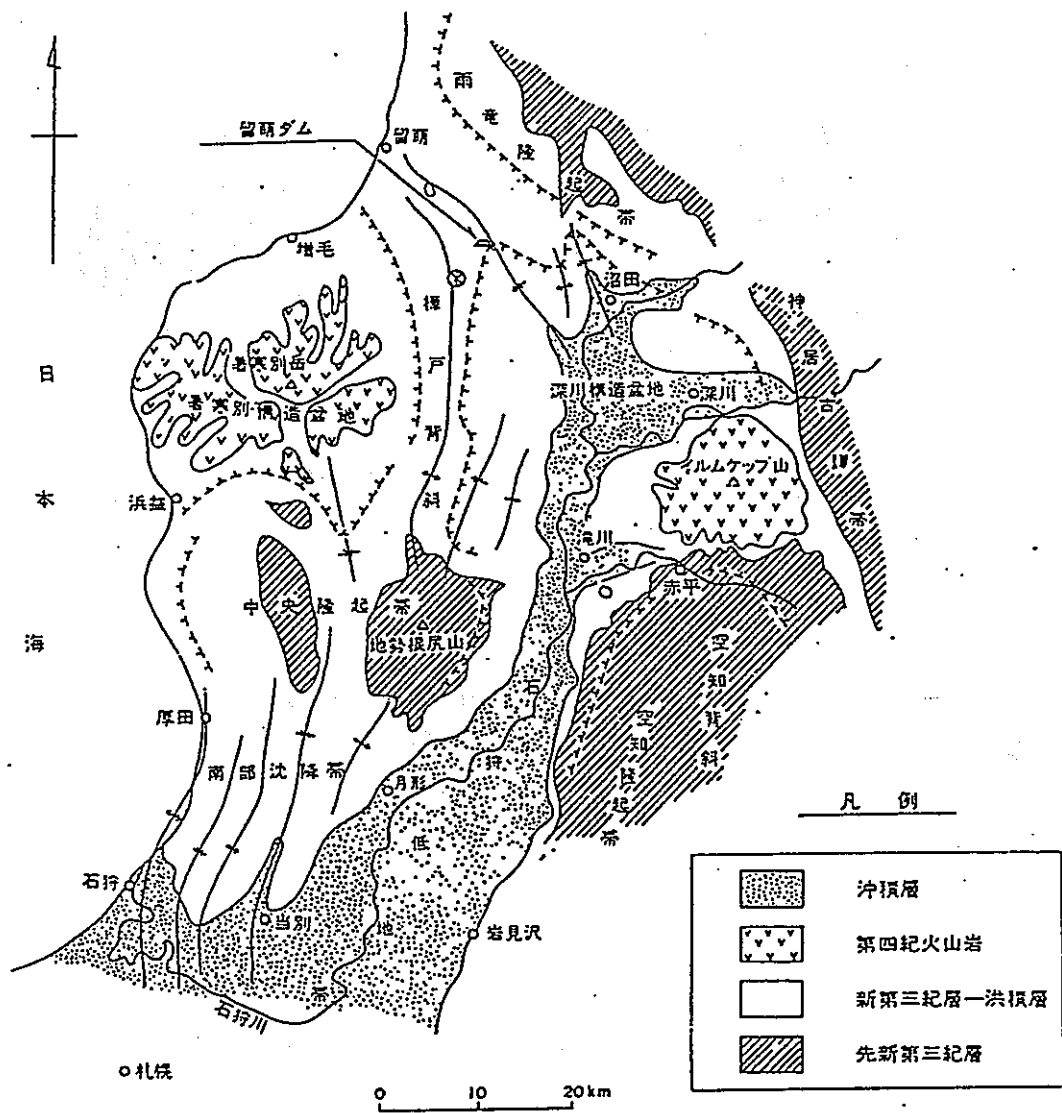


( 圖 2 - 1 - 1 )



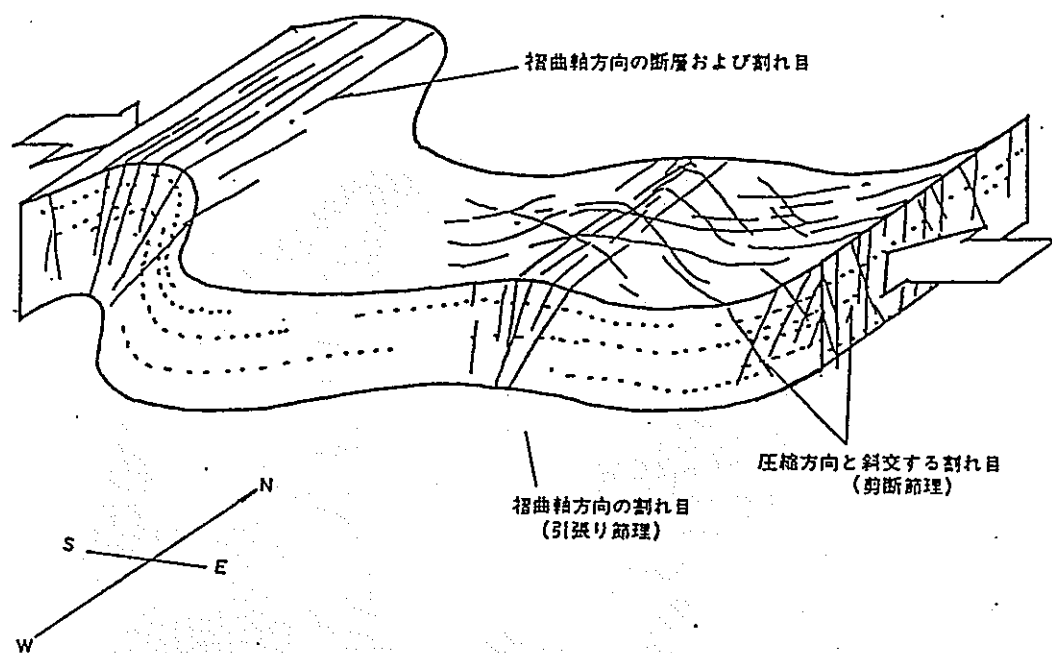
比較軸平面図

(図2-1-2)

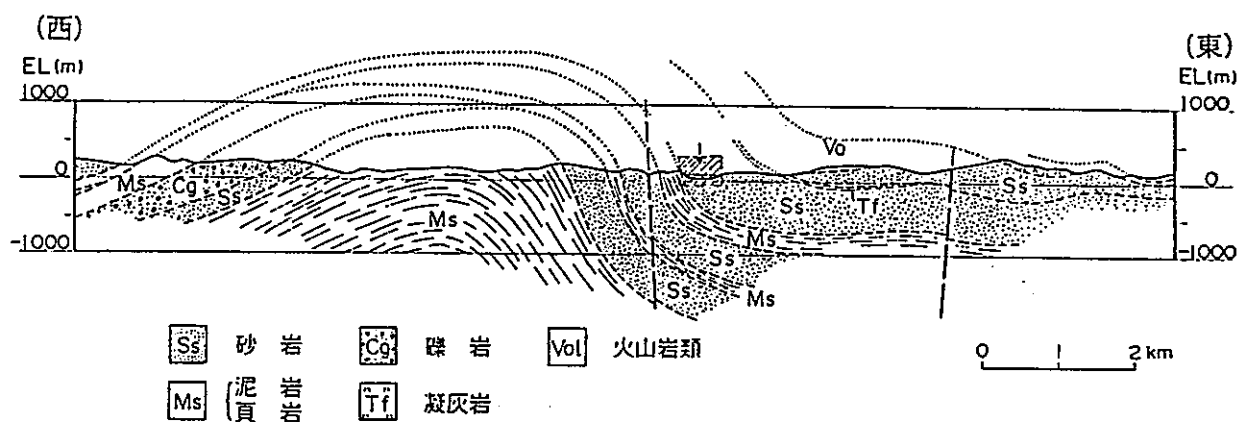


樺戸山地地質構造概念図

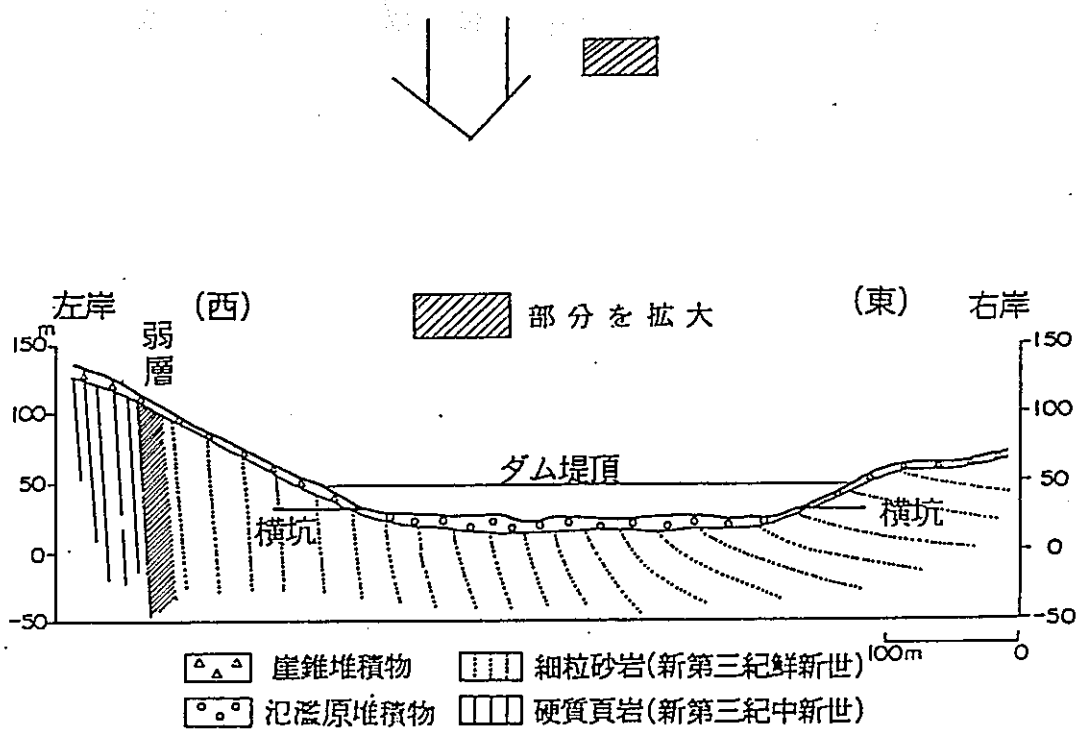
( 図 2 - 2 - 1 )



圧縮力と地層の変形  
( 図 2 - 2 - 2 )



(図 2-3-1)



砂岩、頁岩の模様は地層の傾斜を示す。

(図 2-3-2)

## 第 3 章

### 試料と試料採取の方法

### 3. 試料と試料採取の方法

#### 3.1 試料採取

実験に供された試料は、1988年から1990年にかけて留萌ダム建設予定地における調査用試掘坑内（T-3 右岸試掘横坑，T-2 左岸試掘横坑）より採取したものである。採取に当たっては、シングルコアカッター（直径55mm）を用い採取コア径約53.5mmのコアを採取した。

試料採取方向は図3-1-1に示すように、右岸横坑では鉛直方向（RV）、水平ダム軸方向（Rh）、水平ダム軸直角方向（Rhp）、川の上流から見てダム軸水平方向から鉛直面内で時計回りに45°傾いた方向（ $R\theta + 45$ ）、半時計回りに45°傾いた方向（ $R\theta - 45$ ）で、これら5種類の試料を右岸試料（R-Sample）としている。左岸横坑では、鉛直方向（Lv）、水平ダム軸方向（Lh）で、これら2種類の試料を左岸試料（L-Sample）としている。

サンプリングでは、コアリングマシンの台座面積が小さかった為と地表面が軟質でアンカーが固定できなかったことにより、縦70cm、横70cm、高さ40cm程度の現場ブロックせん断試験用のコンクリートブロック（約300kg）にマシンを設置しサンプリングを行った。

試料の掘進長は1988年～1989年にかけて採取したRV、Rh、Rhp、Lvは5m、1990年に採取した $R\theta + 45$ 、 $R\theta - 45$ 、Lhについては3mとした。

この理由として、本年採取した $\theta 45^\circ$ 方向は掘進長が長くなるとマシンが不安定になりカッターにブレが生じ良質なコアが採取できないと考えたこと、およびLhでは昨年までの経緯より岩盤内に非常に多くのクラックが存在しているものと思われカッターのブレによって事前にコアを破壊するのを回避しようとしたためである。

各方向におけるボーリング概念図を図3-1-2, 3, 4

に示す。また、作業状況を写真 3 - 1 に示す。

### 3.2 試料の運搬・保存

ボーリングにより採取されたコアは乾燥を防ぐため坑内で速やかにポリ塩化ビニルフィルムでシールし、採取深度および上下方向を明記したラベルを添付した。その後、エアキャップなどのクッション材の敷いてあるコア箱に収納した。

また、留萌から札幌、実験室に試料を運搬するに当たっても、コア箱は布団などのクッション材で巻き輸送車の運転にも細心の注意をはらった。

実験室に運搬された試料は、実験に供されるまでの間水の張った水槽内に放置し乾燥を防ぐ処置を講じている。

### 3.3 採取箇所及び採取箇所の地質状態

右岸試掘横坑（T-3）の試料採取箇所を図3-3-1、その地質状況を図3-3-2に示す。なお、図3-3-2で用いられている記号の説明は表3-3-1に示している。

右岸試掘横坑は、ダム軸右岸部の斜面脚部に昭和61年に掘削されたものである。長さは坑口から約50mで16.5m～27m間が上流側に拡幅されている。坑内全体の地質状況は、坑口から3mまではシルト質砂を主体とし、それ以深50mまでは均質な微細粒砂岩であり硬質である。割れ目頻度は非常に少なく、風化の度合も坑口から12m付近までは岩塊が褐色に変色する風化帯であるが、それ以深の岩盤は非常に新鮮である。

今回サンプリングを行った拡幅部の16.5m～27mでは、割れ目がほとんどなく風化も進んでいない極めて新鮮な岩盤であることがわかる。

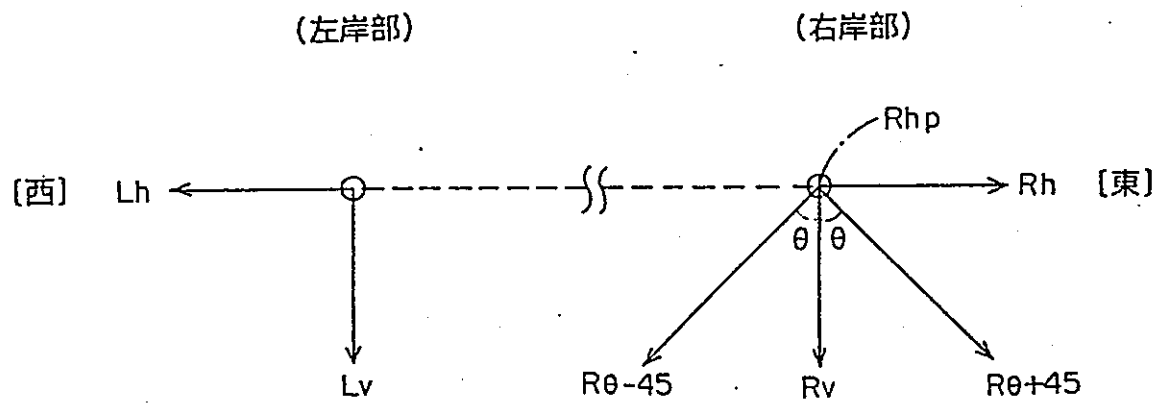
左岸試掘横坑（T-2）の試料採取箇所を図3-3-3、その地質状態を図3-3-4に示す。図3-3-4における記号の説明は表3-3-1を参照。

左岸試掘横坑はダム軸左岸部の斜面脚部に昭和60年に掘削されたものであり、長さは坑口から約60mである。坑口から21m～26.2m間と35.2m～40.2m間の2カ所が上流側に拡幅されている。坑内の地質状況は、坑口から2.5mまでは完全風化した土砂、それ以深34mまでは軟質な細粒砂岩を主体とするが局部的に硬質な微細粒砂岩と互層している。しかし34m～60m間は微細粒砂岩が主体で、所々で細粒砂岩と互層している。また38m付近には厚さ20cmの白色凝灰岩を挟在している。割れ目は全体的に多く、右岸部の2～4倍程度である。風化の度合は坑口から2.5mは強風化した土砂で、以深13.2mまでは割れ目や岩石自体も褐色に変色している中～強風化部である。13.2～22.5mまでの岩盤は極めて新鮮であるが、22.5m地点に褐色

の割れ目が見られることからこの地点を弱風化部の下限としている。34 m 以深の岩盤は新鮮ではあるが、所々割れ目に沿って滴水があり褐色の鉄バクテリアが発生している。

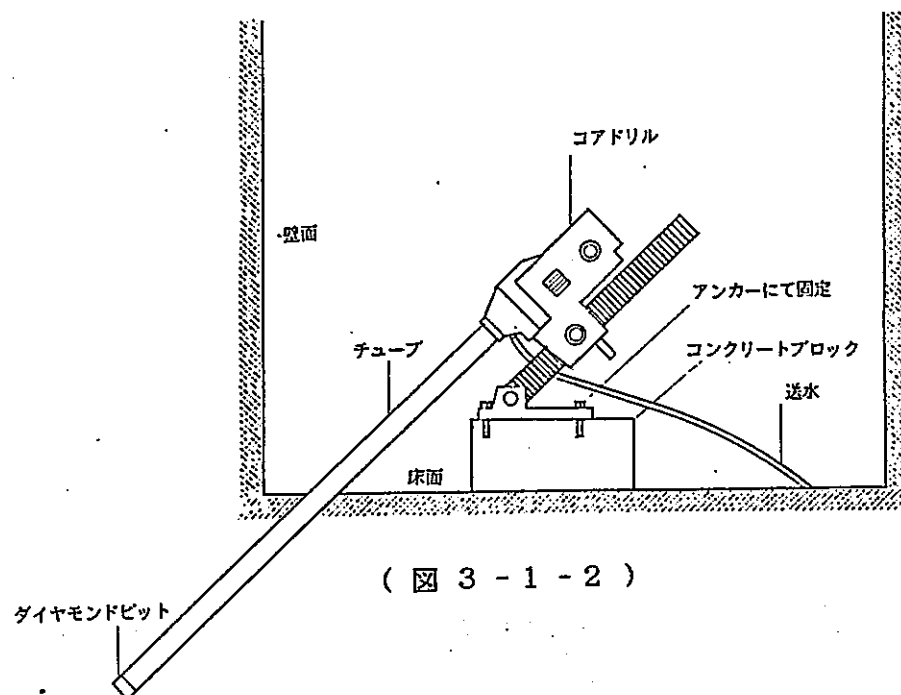
今回サンプリングした拡幅部の35 m ~ 40 m 付近は、微細粒砂岩と細粒砂岩の互層で割れ目を多く含むが、岩質の状態は極めて新鮮であった。

# 試料採取地地質断面図



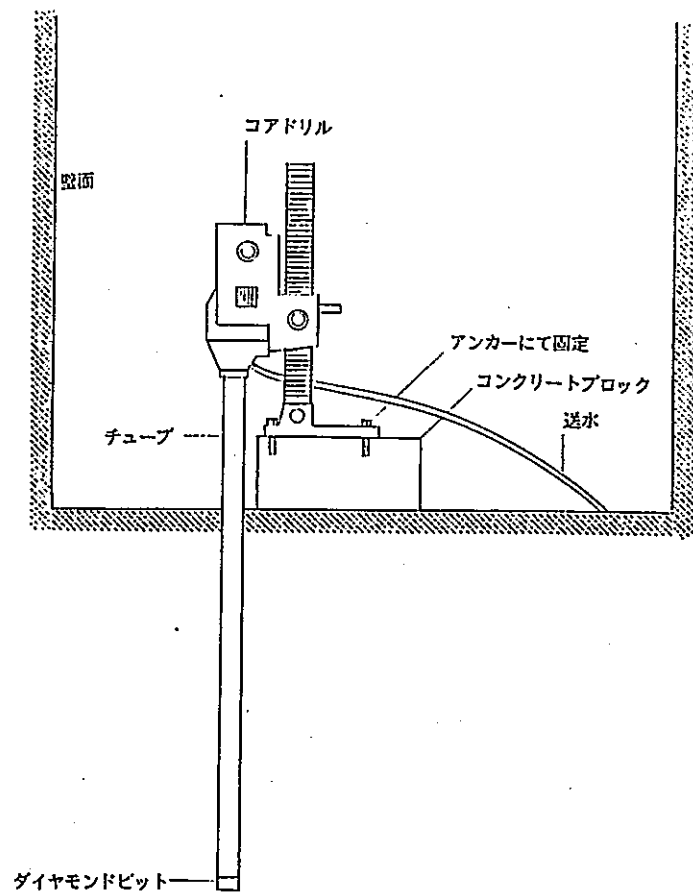
( 図 3 - 1 - 1 )

ボーリング概念図 (  $\theta \pm 45^\circ$  方向 )



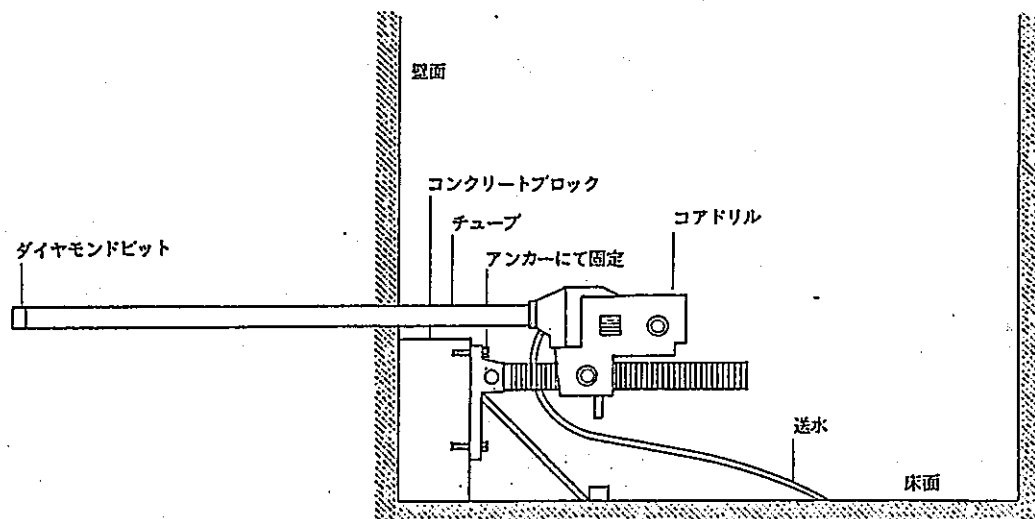
( 図 3 - 1 - 2 )

ボーリング概念図（鉛直方向）



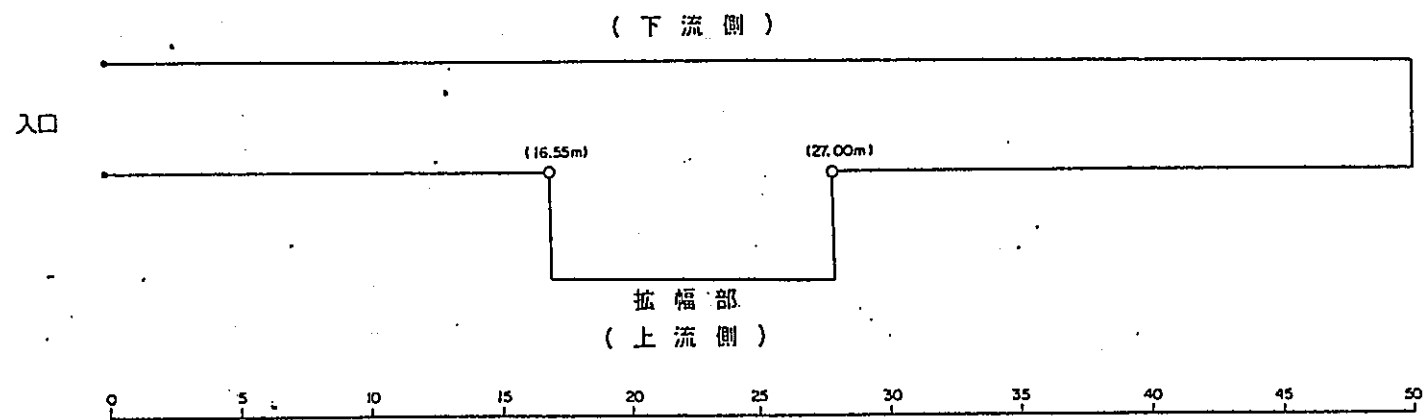
（図 3 - 1 - 3）

ボーリング概念図（水平方向）

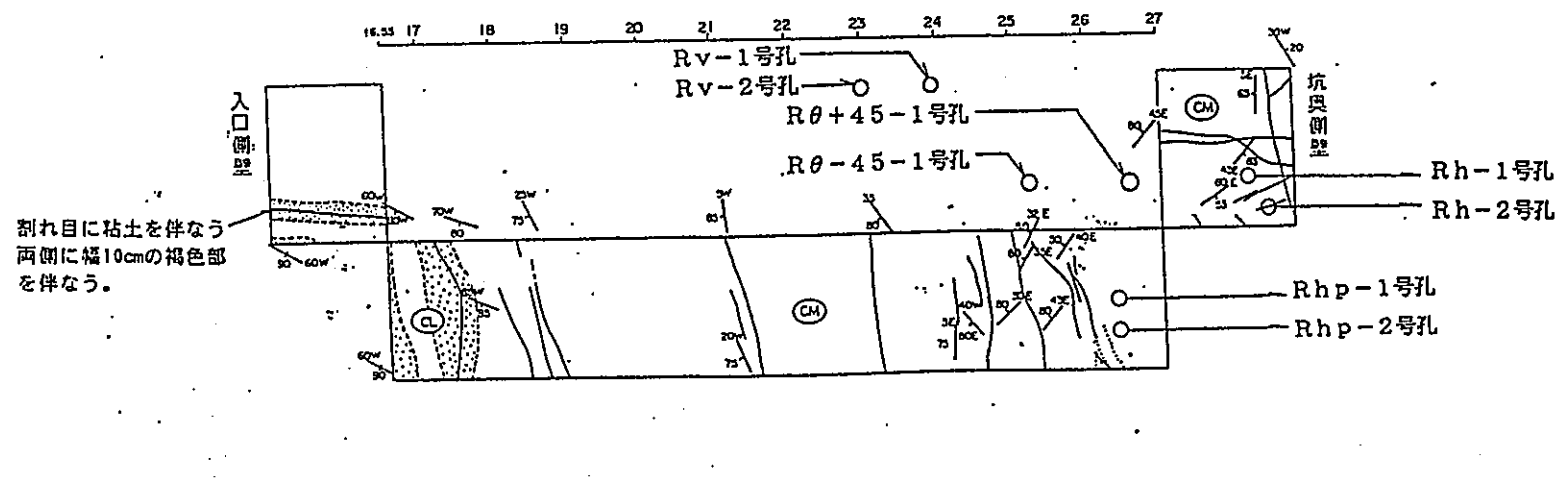


（図 3 - 1 - 4）

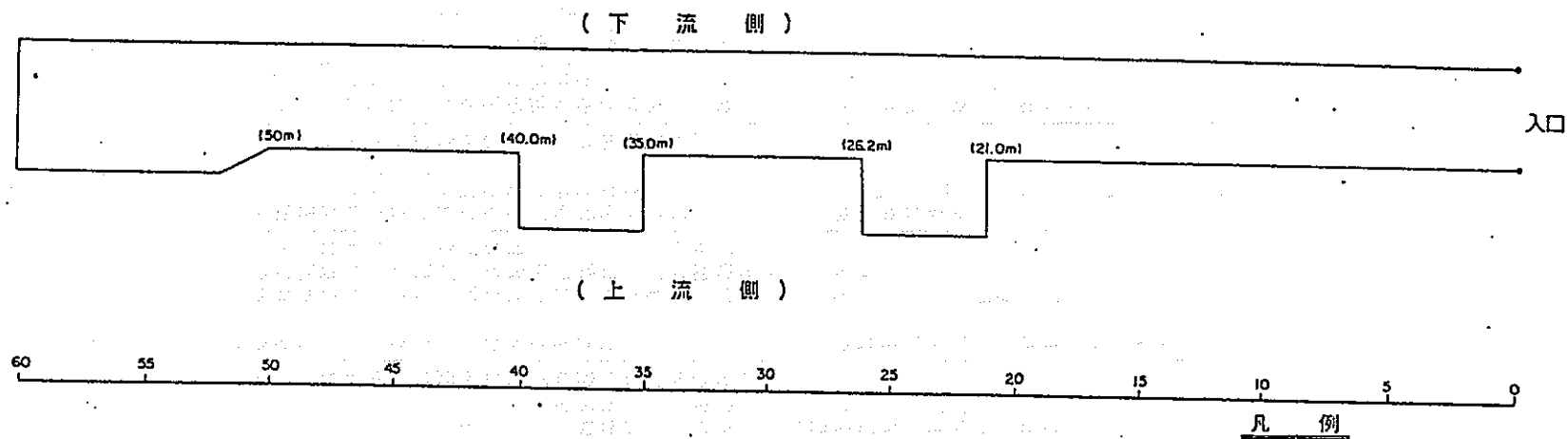
・ T - 3 右岸試掘横坑平面図 ( 図 3 - 3 - 1 )



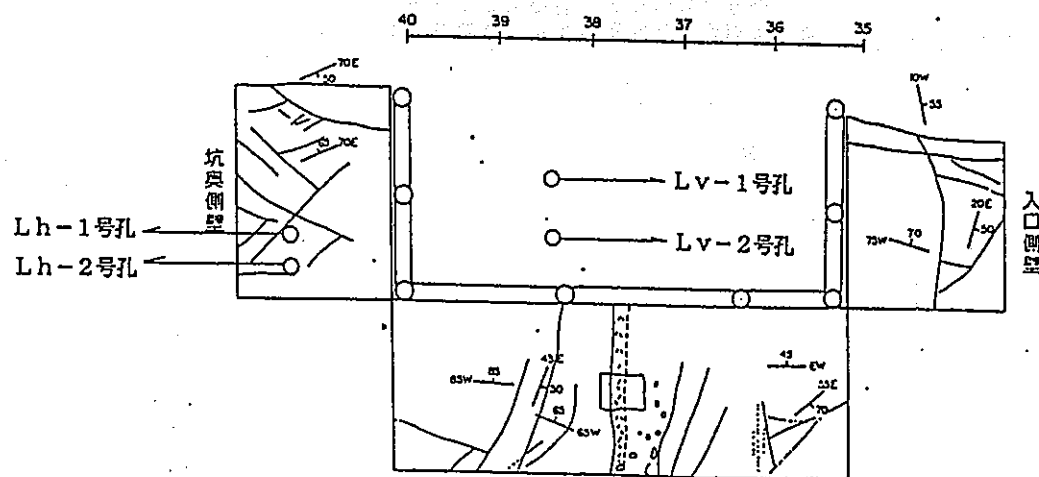
・ 拡張部分展開図 ( 図 3 - 3 - 2 )



• T-2 左岸試掘橫坑平面圖 (圖 3-3-3)



• 拉幅部分展開図 (35.0~40.0m) ( 図 3 - 3 - 4 )



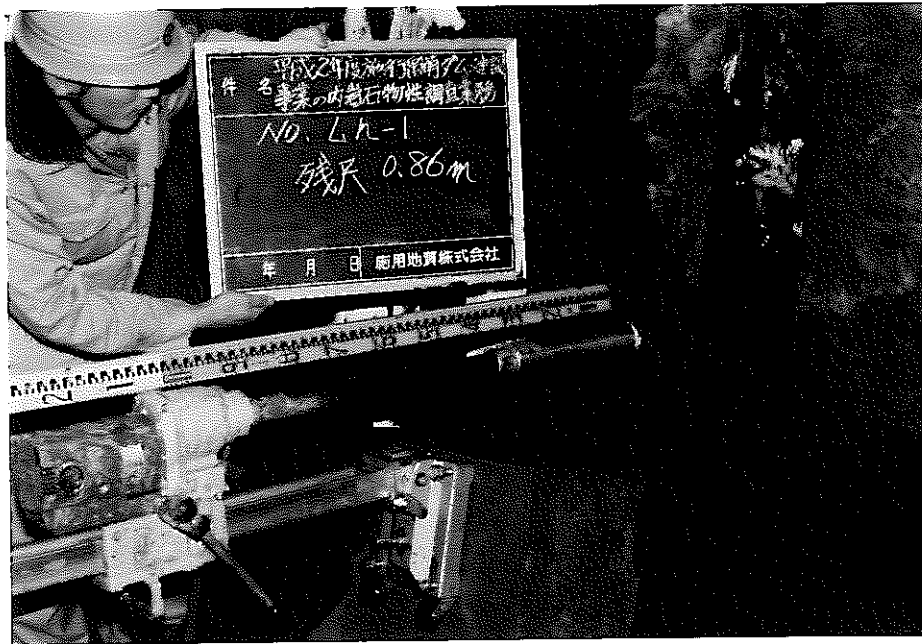
- |                                                                                       |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|    | 凝灰質砂岩         |
|    | 凝灰岩           |
|    | 凝灰岩の薄層        |
|   | 豆粒構造          |
|  | 褐色風化部         |
|  | 稜柱部           |
|  | 地質境界          |
|  | 褐色風化面を持つ割れ目   |
|  | 褐色沈着物析出する割れ目  |
|  | 二枚貝、巻貝の化石     |
|  | 海水および淡水       |
|  | 層理面の走向傾斜      |
|  | 褶皺を伴う割れ目の走向傾斜 |

(T-2左岸側試掘橫坑)

( 表 3 - 3 - 1 )

| 名 称            | 特 徴                                                                                                                                                                |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A              | きわめて新鮮なもので造岩鉱物および粒子は風化、変質を受けていない。キレツ、節理はよく密着し、それらの面に沿って風化の跡は見られないもの。<br>ハンマーによって打診すれば澄んだ音を出す。                                                                      |
| B              | 岩質堅硬で開口した（たとえ 1mm でも）キレツあるいは節理はなく、よく密着している。ただし造岩鉱物および粒子は部分的に多少風化、変質が見られる。<br>ハンマーによって打診すれば澄んだ音を出す。                                                                 |
| C <sub>H</sub> | 造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けてはいるが岩質は比較的堅硬である。<br>一般に褐鉄鉱などに汚染せられ、節理あるいはキレツの間の粘着力はわずかに減少しており、ハンマーの強打によって割れ目に沿って岩塊が剝脱し、剝脱面には粘土質物質の薄層が残留することがある。<br>ハンマーによって打診すれば少し濁った音を出す。 |
| C <sub>M</sub> | 造岩鉱物および粒子は石英を除けば風化作用を受けて多少軟質化しており、岩質も多少軟らかくなっている。<br>節理あるいはキレツの間の粘着力は多少減少しておりハンマーの普通程度の打撃によって、割れ目に沿って岩塊が剝離し、剝脱面には粘土質物質の層が残留することがある。<br>ハンマーによって打診すれば多少濁った音を出す。     |
| C <sub>L</sub> | 造岩鉱物および粒子は風化作用を受けて軟質化しており岩質も軟らかくなっている。<br>節理あるいはキレツの間の粘着力は減少しており、ハンマーの軽打によって割れ目に沿って岩塊が剝脱し、剝脱面には粘土質物質が残留する。<br>ハンマーによって打診すれば濁った音を出す。                                |
| D              | 岩石鉱物および粒子は風化作用を受けて著しく軟質化しており岩質も著しく軟らかい。<br>節理あるいはキレツの間の粘着力はほとんどなく、ハンマーによってわずかな打撃を与えるだけでくずれ落ちる。剝脱面には粘土物質が残留する。<br>ハンマーによって打診すれば著しく濁った音を出す。                          |

ボーリング作業状況



(写真 3 - 1)

## 第 4 章

### 試料の物理的性質

1. 目的

#### 4. 試料の物理的性質

##### 4.1 試料の品質

試料の品質を定量的に表示するインデックスとして現在非常に広く利用されているのが R Q D (コア採取率) である。R Q D は、ボーリング孔の全長に対して長さが 100 mm 以上のコアの百分率として、(1) 式で定義されている。

$$R Q D (\%) = 100 \times \frac{\text{長さ 100 mm 以上のコアの累計長さ}}{\text{ボーリング孔の長さ}} \quad (1)$$

本研究で用いる試料のサンプリングでは、1 回のボーリング作業でボーリング孔全長分のコアを採取することが困難であったため、全長分のコアを数回にわたってボーリング作業を繰り返す事によって採取した。

したがって、R Q D は本来の定義に従って求める事ができず、本研究では(2)式で表される「コアの掘進長当りにおける 100 mm 以上のコアの採取率」を R Q D 値とした。

$$R Q D (\%) = 100 \times \frac{\text{長さ 100 mm 以上のコアの累計長さ}}{\text{1 回のボーリング作業による掘進長}} \quad (2)$$

各試料における R Q D 値を表 4-1 に示す。それを見ると右岸試料は 84 ~ 93 % と非常に高い値を示し、コアが極めて良質でクラック等の割れ目が非常に少ないことがわかる。一方、左岸試料は 43 ~ 60.5 % と右岸試料と比較してかなり低い。

これは、左岸試料に地層が直立するほど大きな力を受けたことによって形成されたクラックが多数含まれていることを意味している。肉眼観察での左岸試料のクラックの状態は、コア採取方向に対し $10^{\circ}$ 程度の傾きを持っているものが多く、また現在割れ目として剥離していても将来的に剥離するだろうと思われるクラックの層理面が多数確認された。

実験で使用した供試体は、このクラックや層理面を避けて準備した。

#### 4.2 基本的な物理的性質

各試料の基本的な物理的性質を把握するため、種々の物理試験を行った。含水比試験および土粒子の密度試験は力学試験用供試体の削りカスを用いて行い、粒度試験では供試体1個相当の岩塊を過酸化水素水に約10日間浸し、土粒子の固結を解放した後行った。

物理試験方法は表4-2-1に示すものとする。

表 4 - 2 - 1

|          |                 |
|----------|-----------------|
| 土粒子の比重試験 | J I S A 1 2 0 2 |
| 土の含水量試験  | J I S A 1 2 0 3 |
| 土の粒度試験   | J I S A 1 2 0 4 |

試験結果として表4-2-2～8に粒度配合，図4-2-1に粒度組成，表4-2-9に試料の物理的性質を示す。

表4-2-2～8，図4-2-1より、各試料の粒度組成はいずれも砂分（細砂），シルト分がほぼ同量で全体の約90%を占めている。残りの10%は粘土分で、砂粒子，シルト粒子を膠結しているものと思われる。

これらの粒度組成は、土質工学会による日本統一土質分類法により分類すると細粒土（F）に分類される。

次に、表4-2-9より物理的性質について見ると、右岸試料では自然含水比が20～22%，土粒子密度が2.59～2.63，乾燥密度でも1.62～1.65とそれぞれ安定している。一方、左岸試料では右岸試料と比較すると、乾燥密度が0.1程度大きく間隙比が0.05程度小さいという特性のある事がわかる。

#### 4.3 鉱物組成

本軟岩を構成している鉱物の種類、またその量比を把握するため偏光顕微鏡による鏡下観察を行った。この測定方法は、各コアにおける横断面上で任意の1000個の鉱物の種類と数を測定したものである。ただし、時間的な制約もあり実験が間にあった4供試体（Rv, Rhp, Rh, Lv）についてのみ報告する。

各コアの横断面顕微鏡写真および岩全体の特徴を表4-3-1～2に、測定結果を表4-3-3に示す。

表4-3-1～2より、いずれの試料も細粒の砂岩でありその構成粒子も石英、長石類、雲母類等の結晶片や粘土鉱物からなる岩片類、火山ガラス、火山岩片等が含まれており基質部は変質した粘土鉱物で充填されている。これらの配列には特記するような相違は認められない。

次に、表4-3-3より構成鉱物の量比を見ると、右岸試料、左岸試料共に基質部、褐色粘土化粒子が全体の60%を占めており、岩石自体が粘性を有している事がわかる。従って、右岸試料、左岸試料共に構成鉱物の種類や量比においていずれも大きな差は無いと言える。

#### 4.4 考察

前節で述べた試験結果は、試験に用いた全ての供試体について行ったものではなく、限られた数の供試体についての代表値を示しているものである。その特性は以下のように説明できる。

いずれの試料も、粒度分布や土粒子密度では顕著な差は認められない。また、構成鉱物については右岸試料で若干のばらつきが認められるものの、左岸試料と比較すると左岸試料もそのばらつきの範囲内にあり、両者共に有為な差は認められない。従って両者は単一の地層に属していて、その位置関係から左岸試料は右岸試料よりも前に堆積したものと考えられるが、その環境には大きな差はなく、両者は起源が同じ細粒砂が堆積し固結したものであると推測される。

一方、左岸試料は右岸試料に比べ間隙比が小さく、乾燥密度が大きいという特徴がある。これは地層の状態からも分かるように、左岸試料は右岸試料に比べ堆積していた年代が古く、高い圧力の下にあって圧密が進行していたためと考えられる。

ところが、左岸試料のRQD値は右岸試料に比較するとかなり小さい事が分かる。左岸試料は右岸試料に比べ圧密が進み、固結が進んでいるはずである。この事は、左岸試料が地層が直立する程大きな褶曲作用を受けた事に起因するもので、その直立過程において生じた岩盤の歪が、コアの割れ目（クラック）として現れたためであろう。

以上から右岸試料、左岸試料は、粒度組成や構成鉱物、及びその量比において差が無い事から、各々の堆積環境や堆積物（細粒砂）には差が無かったと言える。しかし左岸試料は、乾燥密度や間隙比、RQD値の関係からも明らかのように、堆積後に受けた褶曲作用の影響によって試料の持つ特性が変化している事は間違い無いだろう。

( 表 4 - 1 ) RQD値

| 試料名              | Rv   | Rh   | Rhp  | R $\theta$ +45 | R $\theta$ -45 | Lv   | Lh   |
|------------------|------|------|------|----------------|----------------|------|------|
| コア採取率<br>RQD (%) | 89.0 | 87.0 | 89.0 | 93.0           | 84.0           | 60.5 | 43.0 |

( 表 4 - 2 - 2 ) 粒度配合 (Rv)

| 試料名 |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Rv  | 1 | 0.0       | 42.0      | 46.5        | 11.5       | 0.42         | 16.8                   | 3.3                     | 2.634 | 22.8         |
|     | 2 | 0.0       | 42.5      | 46.5        | 11.0       | 0.42         | 17.2                   | 2.8                     | 2.634 | 23.2         |
|     | 3 | 0.0       | 38.0      | 50.5        | 11.5       | 0.42         | 29.6                   | 5.2                     | 2.628 | 21.9         |
| 平均  |   | 0.0       | 40.8      | 47.8        | 11.3       | 0.42         | 21.2                   | 3.8                     | 2.632 | 22.6         |

( 表 4 - 2 - 3 ) 粒度配合 (Rh)

| 試料名 |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Rh  | 1 | 0.0       | 39.5      | 55.0        | 5.5        | 0.25         | 5.8                    | 1.2                     | 2.646 | 21.8         |
|     | 2 | 0.0       | 40.0      | 51.5        | 8.5        | 0.25         | 9.1                    | 2.8                     | 2.617 | 22.3         |
|     | 3 | 0.0       | 39.0      | 53.0        | 8.0        | 0.25         | 6.9                    | 2.4                     | 2.622 | 22.3         |
| 平均  |   | 0.0       | 39.5      | 53.2        | 7.3        | 0.25         | 7.3                    | 2.1                     | 2.628 | 22.1         |

( 表 4 - 2 - 4 ) 粒度配合 (Rhp)

| 試料名 |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Rhp | 1 | 0.0       | 30.0      | 63.5        | 6.5        | 0.25         | 5.5                    | 1.2                     | 2.608 | 22.7         |
|     | 2 | 0.0       | 30.5      | 63.0        | 6.5        | 0.25         | 5.5                    | 1.2                     | 2.597 | 22.6         |
|     | 3 | 0.0       | 32.5      | 60.5        | 7.0        | 0.25         | 7.8                    | 1.7                     | 2.603 | 22.8         |
| 平均  |   | 0.0       | 31.0      | 62.3        | 6.7        | 0.25         | 6.3                    | 1.4                     | 2.603 | 22.7         |

( 表 4 - 2 - 5 ) 粒度配合 (Rθ + 45)

| 試料名       |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----------|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Rθ<br>+45 | 1 | 0.0       | 30.5      | 63.9        | 5.6        | 0.25         | 6.6                    | 2.6                     | 2.591 | 22.3         |
| 平均        |   | 0.0       | 30.5      | 63.9        | 5.6        | 0.25         | 6.6                    | 2.6                     | 2.591 | 22.3         |

( 表 4 - 2 - 6 ) 粒度配合 (Rθ - 45)

| 試料名       |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----------|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Rθ<br>-45 | 1 | 0.0       | 34.2      | 59.0        | 6.8        | 0.25         | 7.9                    | 2.0                     | 2.585 | 22.8         |
| 平均        |   | 0.0       | 34.2      | 59.0        | 6.8        | 0.25         | 7.9                    | 2.0                     | 2.585 | 22.8         |

( 表 4 - 2 - 7 ) 粒度配合 (Lv)

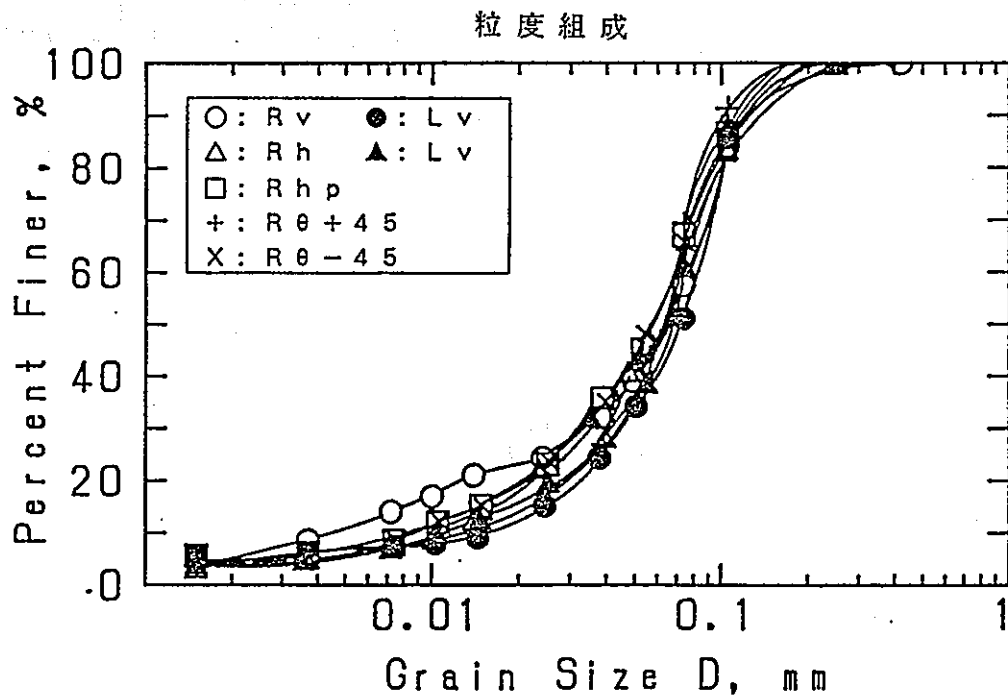
| 試料名 |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Lv  | 1 | 0.0       | 48.5      | 44.5        | 7.0        | 0.25         | 4.9                    | 1.5                     | 2.674 | 20.1         |
|     | 2 | 0.0       | 49.5      | 43.0        | 7.5        | 0.25         | 7.7                    | 2.4                     | 2.651 | 20.2         |
|     | 3 | 0.0       | 49.0      | 45.5        | 5.5        | 0.25         | 5.3                    | 2.0                     | 2.668 | 20.4         |
| 平均  |   | 0.0       | 49.0      | 44.3        | 6.7        | 0.25         | 6.0                    | 2.0                     | 2.664 | 20.3         |

( 表 4 - 2 - 8 ) 粒度配合 (Lh)

| 試料名 |   | 礫分<br>(%) | 砂分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 均等係数<br>U <sub>c</sub> | 曲率係数<br>U <sub>c'</sub> | 比重    | 自然含水比<br>(%) |
|-----|---|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------|--------------|
| Lh  | 1 | 0.0       | 39.3      | 55.4        | 5.3        | 0.25         | 6.9                    | 2.3                     | 2.658 | 19.0         |
| 平均  |   | 0.0       | 39.3      | 55.4        | 5.3        | 0.25         | 6.9                    | 2.3                     | 2.658 | 19.0         |

( 表 4 - 2 - 9 )  
各 試 料 の 物 理 的 性 質

| 試料名                                    | RV    | Rh    | Rhp   | R $\theta$ +45 | R $\theta$ -45 | Lv    | Lh    |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|-------|-------|
| コア採取率<br>RQD(%)                        | 89.0  | 87.0  | 89.0  | 93.0           | 84.0           | 60.5  | 43.0  |
| 自然含水比<br>W (%)                         | 21.7  | 22.1  | 22.8  | 22.3           | 22.8           | 20.3  | 19.0  |
| 土粒子密度<br>$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.632 | 2.628 | 2.603 | 2.591          | 2.585          | 2.664 | 2.658 |
| 湿潤密度<br>$\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 1.980 | 2.018 | 1.984 | 2.001          | 1.996          | 2.064 | 2.110 |
| 乾燥密度<br>$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 1.627 | 1.653 | 1.616 | 1.636          | 1.628          | 1.716 | 1.773 |
| 間 隙 比<br>e                             | 0.618 | 0.590 | 0.611 | 0.594          | 0.588          | 0.552 | 0.499 |
| 飽 和 度<br>S <sub>r</sub>                | 92.4  | 98.4  | 97.1  | 97.3           | 100.0          | 98.0  | 100.0 |



( 図 4 - 2 - 1 )

表 4 - 3 - 1 コアの横断面写真および特徴 ( 1 )

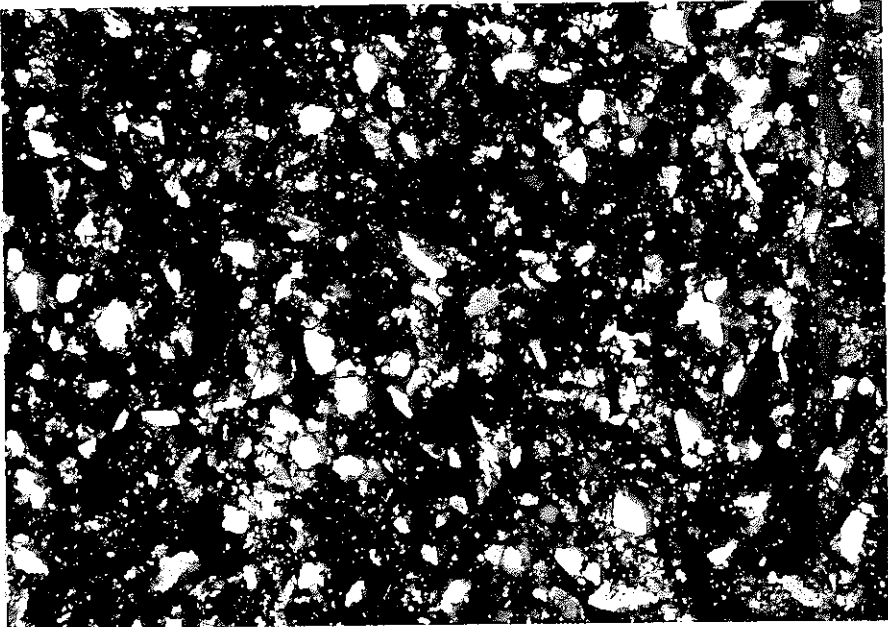
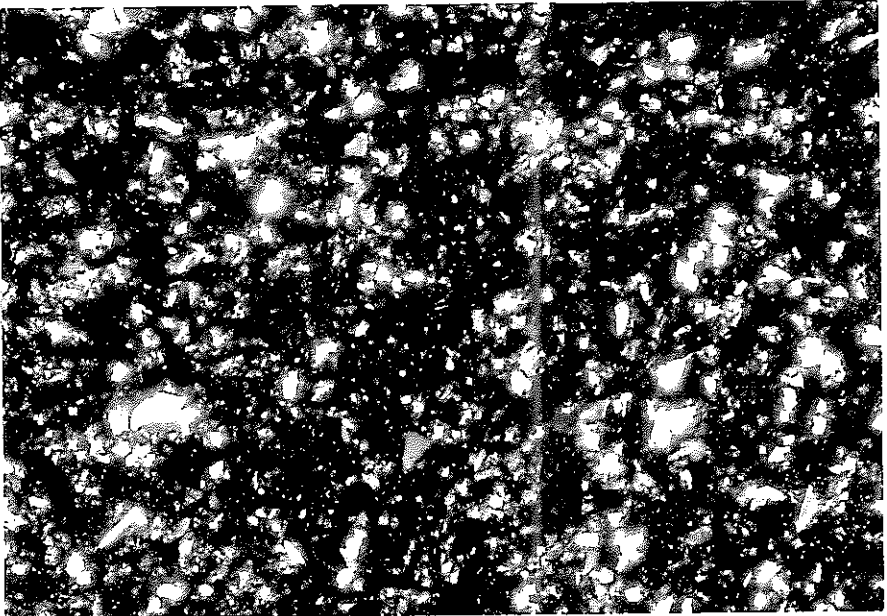
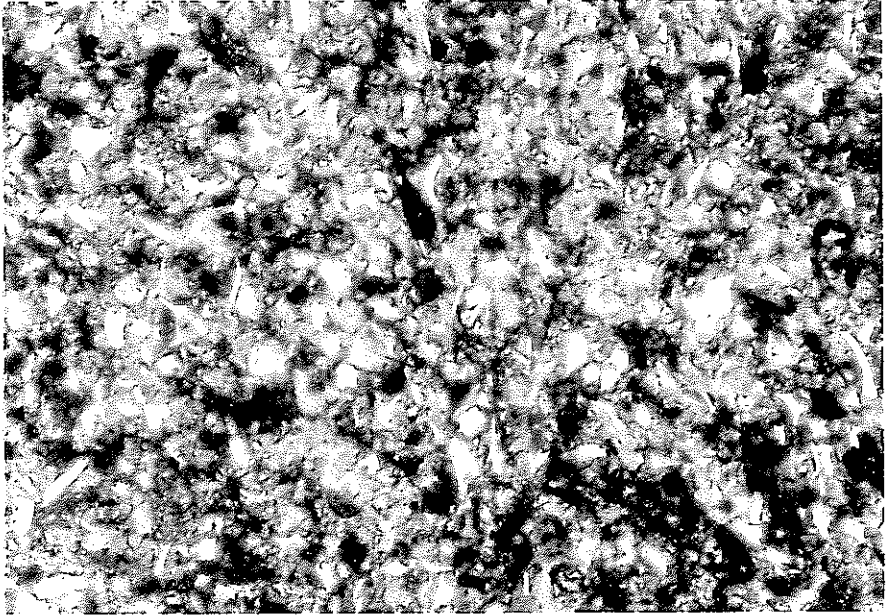
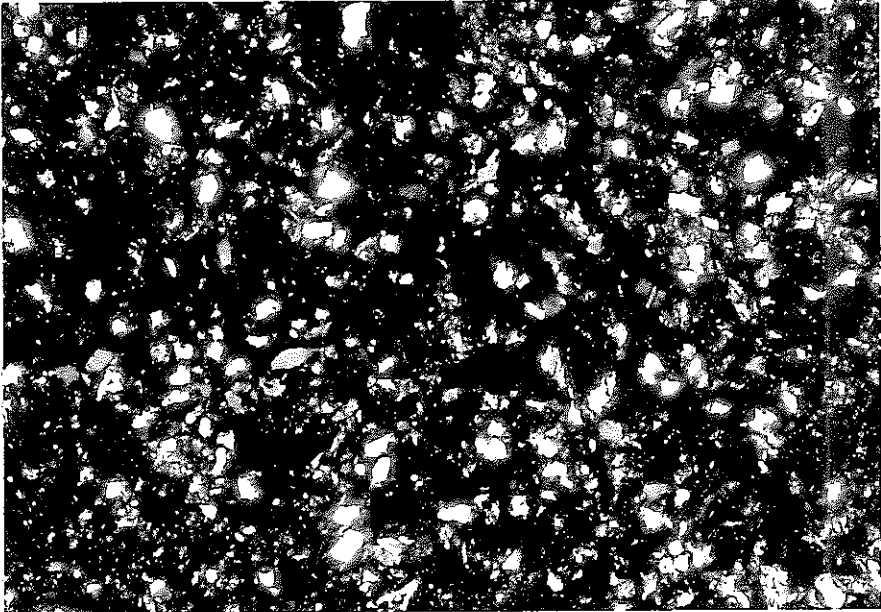
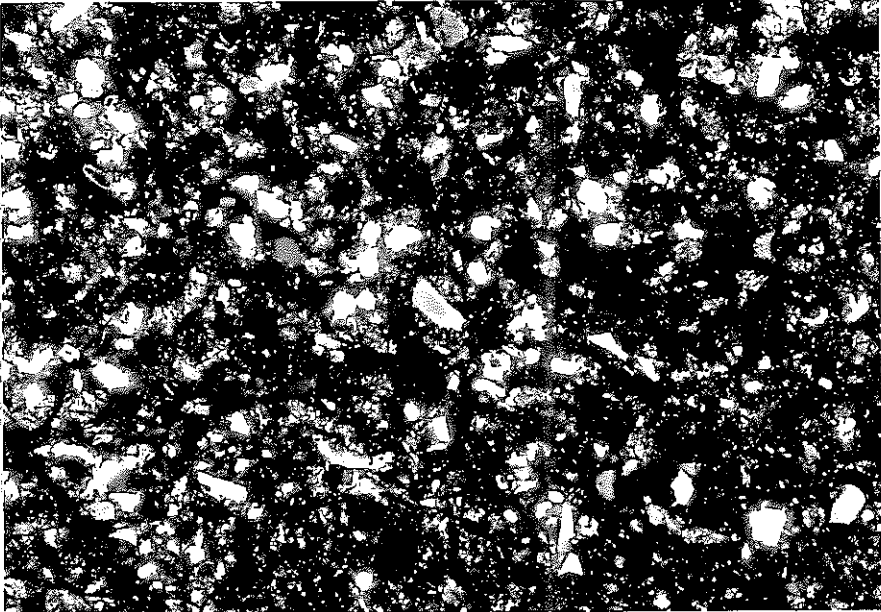
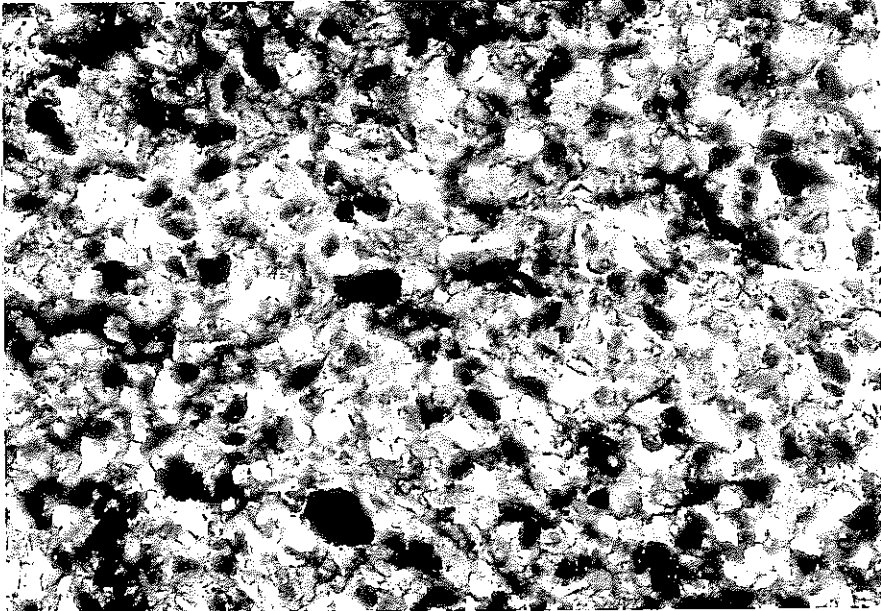
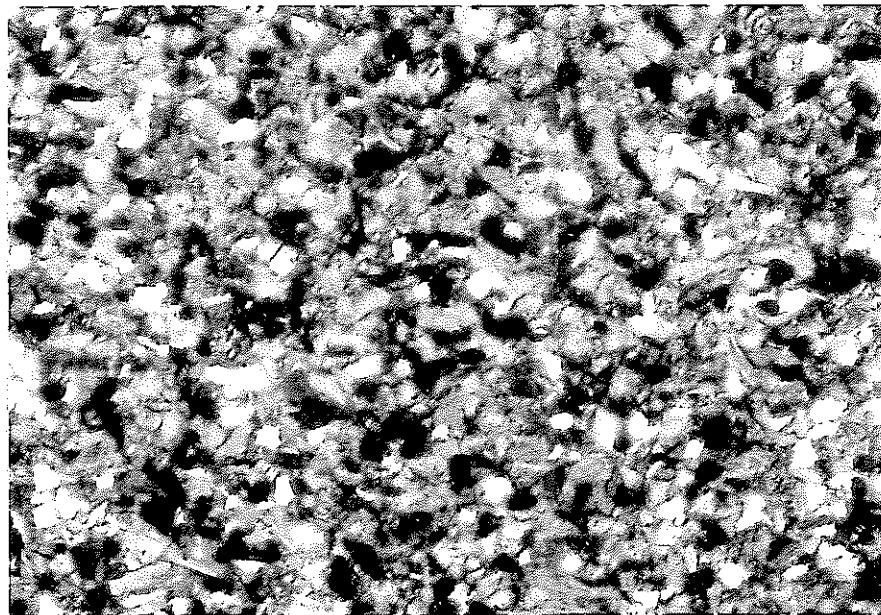
|                                        | 右 岸 R v (鉛直方向)                                                                                                                                          | 右 岸 R h p (ダム軸直角方向)                                                                                                                                     |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| コアの横断面<br>顕微鏡写真<br>(Crossed<br>nicols) |                                                                       |                                                                      |
| コアの横断面<br>顕微鏡写真<br>(Open<br>nicols)    |                                                                     |                                                                    |
| 岩 石 名                                  | 細 粒 砂 岩                                                                                                                                                 | 細 粒 砂 岩                                                                                                                                                 |
| 岩 全 体 の 特 徴                            | 色は暗灰色を呈し、非常に脆い。生物擾乱構造が認められる。構成粒子は、石英、長石類、雲母類などの結晶片や、淡褐色～濃褐色を呈す。粘土鉱物からなる強変質した岩片類、また、珪藻類の化石片を含む。基質部は、淡褐色～濃褐色の粘土鉱物からなり、粒状の不透明鉱物を多数含む。モンモリロン石化している部分も認められる。 | 色は暗灰色を呈し、固結度低く非に脆い。生物擾乱構造が認められる。構成粒子は、石英、長石類、褐色の粘土化した粒子が主体であるが、雲母類、角閃石などの結晶片や、緑色粘土鉱物からなる粒子、火山岩片、火山ガラス、化石片などが含まれている。基質部は、淡褐色を呈する不均質な粘土鉱物からなり、部分的に量比が異なる。 |

表 4 - 3 - 2 コアの横断面写真および特徴 ( 2 )

|                                            | 右 岸 R h ( ダム軸方向 )                                                                                                                                                                          | 左 岸 L v ( 鉛直方向 )                                                                                                                            |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| コアの横断面<br>顕 微 鏡 写 真<br>(Crossed<br>nicols) |                                                                                                          |                                                          |
| コアの横断面<br>顕 微 鏡 写 真<br>(Open<br>nicols)    |                                                                                                        |                                                        |
| 岩 石 名                                      | 細 粒 砂 岩                                                                                                                                                                                    | 細 粒 砂 岩                                                                                                                                     |
| 岩 全 体 の 特 徴                                | 色は暗灰色を呈し、固結度低く、非常に脆い。生物擾乱と思われる層理の乱れが認められる。構成粒子は、石英、長石類、角閃石、雲母類などの鉱物片や、中性火山岩、塩基性火山岩、などの岩片類、また、有孔虫、放散虫、珪藻などの微化石片を含む。大量の茶～緑褐色の粘土化した粒子を含む、その一部は石英片、斜長石片を含んでいる。基質部は、濃褐～淡褐色を呈し、大部分は、非熔結の粘土粒子である。 | 色は暗灰色を呈し、固結度低く非に脆い。生物擾乱構造が認められる層理の乱れがあり不均質である。。構成粒子は、石英、長石類、雲母類などの結晶片や、珪長質岩などの岩片類、火山ガラス、珪藻、有孔虫などの化石岩片及び褐色粘土化粒子である。基質部は、淡褐色～褐色を呈す微細な粘土鉱物である。 |

(表 4 - 3 - 3 ) 構成鉱物のモード測定結果 (横断方向)

|                     | Qm  | Qp | Fel | Kf | Mic | Cpx | Bi | Ho | Lv | Lp | Lm | Br  | Gr | Fo | Per | Unk | Gl | Opq | Po | Max | Total |
|---------------------|-----|----|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-------|
| 右岸 Rv<br>(鉛直方向)     | 267 | 4  | 153 | 7  | 0   | 0   | 16 | 13 | 21 | 0  | 0  | 165 | 38 | 58 | 22  | 6   | 21 | 24  | 0  | 185 | 1000  |
| 右岸 Rhp<br>(タム軸直角方向) | 173 | 3  | 20  | 14 | 3   | 0   | 14 | 3  | 47 | 0  | 0  | 159 | 10 | 17 | 20  | 7   | 64 | 14  | 3  | 427 | 1000  |
| 右岸 Rh<br>(タム軸方向)    | 167 | 8  | 49  | 8  | 3   | 3   | 21 | 3  | 90 | 8  | 0  | 128 | 13 | 23 | 8   | 3   | 38 | 23  | 5  | 403 | 1000  |
| 左岸 Lv<br>(鉛直方向)     | 177 | 10 | 82  | 21 | 3   | 0   | 31 | 0  | 86 | 8  | 0  | 175 | 78 | 21 | 10  | 0   | 23 | 26  | 5  | 243 | 1000  |

凡例：

Qm；単結晶石英， Qp；複結晶石英， fel；斜長石， Kf；カリ長石， Mic；白雲母， Cpx；単斜輝石， Bi；黒雲母， Ho；角閃石  
Lv；火山岩～火山砕屑岩片， Lp；深成岩片， Lm；変成岩片， Br；褐色粘土化粒子， Gr；緑色粘土化粒子， Fo；化石片， Per；軽石片  
Unk；未区分粘土粒子， Gl；火山ガラス， Opq；不透明鉱物， Po；孔隙， Max；基質

## 第 5 章

### 弹性波速度

## 5. 弾性波速度

### 5.1 試験装置及び試験方法

試験は、国鉄で規定している地質調査標準示方書（第10条）に準拠して実施した。

直径50mm,高さ100mmに成形した一軸圧縮試験用供試体を用い、1対のP波用およびS波用発振子,受振子を備えた透過式超音波速度測定装置（Model 5210 SONIC VIEWER,応用地質（株）製）でP波とS波の伝播速度を測定した。試験装置全景を写真5-1-1に、概念図を図5-1-1に示す。

発振子と受振子の波の伝播時間は、デジタルオシロスコープの時間軸上で、供試体の有無による初動の「立ち上がり時間」の差として読み取った。なお、測定は発振子と受振子の位置を正逆2通り入れ換えて2回行うものとし、この2回の測定による到達時間差が5%以上の時は再測定を行った。ここで、供試体の高さはノギスを用いてあらかじめ測定し、P波およびS波速度は供試体の高さを伝播時間で割ることによって算出した。

ここで得られたP波速度,S波速度,密度から以下の物性値を求めた。

#### ○ P 波 伝 速 度

$$V_p = (L / t_1) \times 10,000 \quad (\text{m} / \text{sec})$$

#### ○ S 波 伝 速 度

$$V_s = (L / t_2) \times 10,000 \quad (\text{m} / \text{sec})$$

ここで、

$L$  : 供試体の長さ (cm)

$t_1, t_2$  : P波, S波の到達時間 ( $\mu\text{sec}$ )

○ 動ポアソン比

$$\nu_d = \frac{(V_o / V_s)^2 - 2}{2 \{ (V_o / V_s)^2 - 1 \}}$$

○ 動せん断弾性係数

$$G_d = \frac{10 \cdot \rho_t \cdot V_s^2}{980} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

○ 動弾性係数

$$E_d = 2(1 + \nu_d) \cdot G_d \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

ここで、

$V_o$  : P波速度 (cm/sec)

$V_s$  : S波速度 (cm/sec)

$\rho_t$  : 密度 (g/cm<sup>3</sup>)

## 5.2 試験結果

右岸および左岸の各採取方向における弾性波速度の測定結果を表5-2-1～表5-2-7に、それぞれの方向における平均値からP波速度とS波速度の関係を図5-2-1に示す。

### 5.3 考察

#### (1) 褶曲作用の影響

図5-2-1より、右岸試料と左岸試料を比較してみると、両者共にP波速度はいずれも1000～2000 m/secの範囲内にあり顕著な差は認められなかった。S波速度で比較してみると右岸試料と左岸試料とでは顕著な差が認められ、左岸試料のS波速度は右岸試料の60～70%程度でしかなかった。

一般に、飽和した軟岩のP波速度は含有水分（間隙水）の体積弾性率の影響を強く受け水のP波速度1000～2000 m/secを示し、S波速度はP波速度と同様に含有水分の影響を受けるものの粒径や構成鉱物、軟岩自身が持つせん断剛性率に直接依存するとされている。<sup>5), 6)</sup>

今回の試験で用いた試料はすべて飽和度が95%以上であるため、P波速度は含有水分の影響をまともに受けたと考えられる。S波速度は、当初、間隙比が小さくて固結の進んでいると考えられる左岸試料の方が大きいと予想されたが結果は逆であった。このことはRQDが物語っているように、左岸部の地盤には褶曲時に発生した大きなクラックが多数含まれており、それに加えて肉眼では確認できない微小な不連続面が存在している事を示している。その不連続面の存在が、S波速度を低下させたと考えられる。

#### (2) 異方性について

右岸試料及び左岸試料における採取方向の相違による弾性波速度の差は認められなかった。このことから、本研究で用いたような軟岩の場合、弾性波速度を測定することによって供試体内部の構造はある程度知ることが出来るが、硬岩の場合とは異なりその異方性は弾性波速度に明瞭には反映されていないことが分かる。

( 表 5 - 2 - 1 ) 弾性波速度試験結果 ( R v )

| 試料名     | P波速度<br>(m/sec) | S波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|---------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| R v - 1 | 971             | 505             | 5070                               | 13340                           | 0.315  |
| R v - 2 | 1060            | 497             | 4910                               | 13350                           | 0.359  |
| R v - 3 | 1020            | 483             | 4630                               | 12540                           | 0.355  |
| R v - 4 | 1320            | 633             | 8110                               | 21910                           | 0.351  |
| R v - 5 | 1350            | 651             | 8700                               | 23470                           | 0.349  |
| R v - 6 | 1380            | 661             | 8960                               | 24220                           | 0.351  |
| R v - 7 | 1170            | 550             | 6110                               | 16580                           | 0.358  |
| R v - 8 | 1220            | 577             | 6780                               | 18400                           | 0.356  |
| R v - 9 | 1420            | 599             | 7320                               | 20360                           | 0.392  |
| 平均値     | 1210            | 573             | 6730                               | 18240                           | 0.354  |

( 表 5 - 2 - 2 ) 弾性波速度試験結果 ( R h )

| 試料名     | P波速度<br>(m/sec) | S波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|---------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| R h - 1 | 1250            | 596             | 7330                               | 19840                           | 0.353  |
| R h - 2 | 1250            | 590             | 7140                               | 19360                           | 0.357  |
| R h - 3 | 1510            | 625             | 7980                               | 22290                           | 0.397  |
| R h - 4 | 1960            | 626             | 8090                               | 23360                           | 0.443  |
| R h - 5 | 1870            | 641             | 8530                               | 24450                           | 0.433  |
| 平均値     | 1570            | 616             | 7810                               | 25510                           | 0.397  |

( 表 5 - 2 - 3 ) 弾性波速度試験結果 ( R h p )

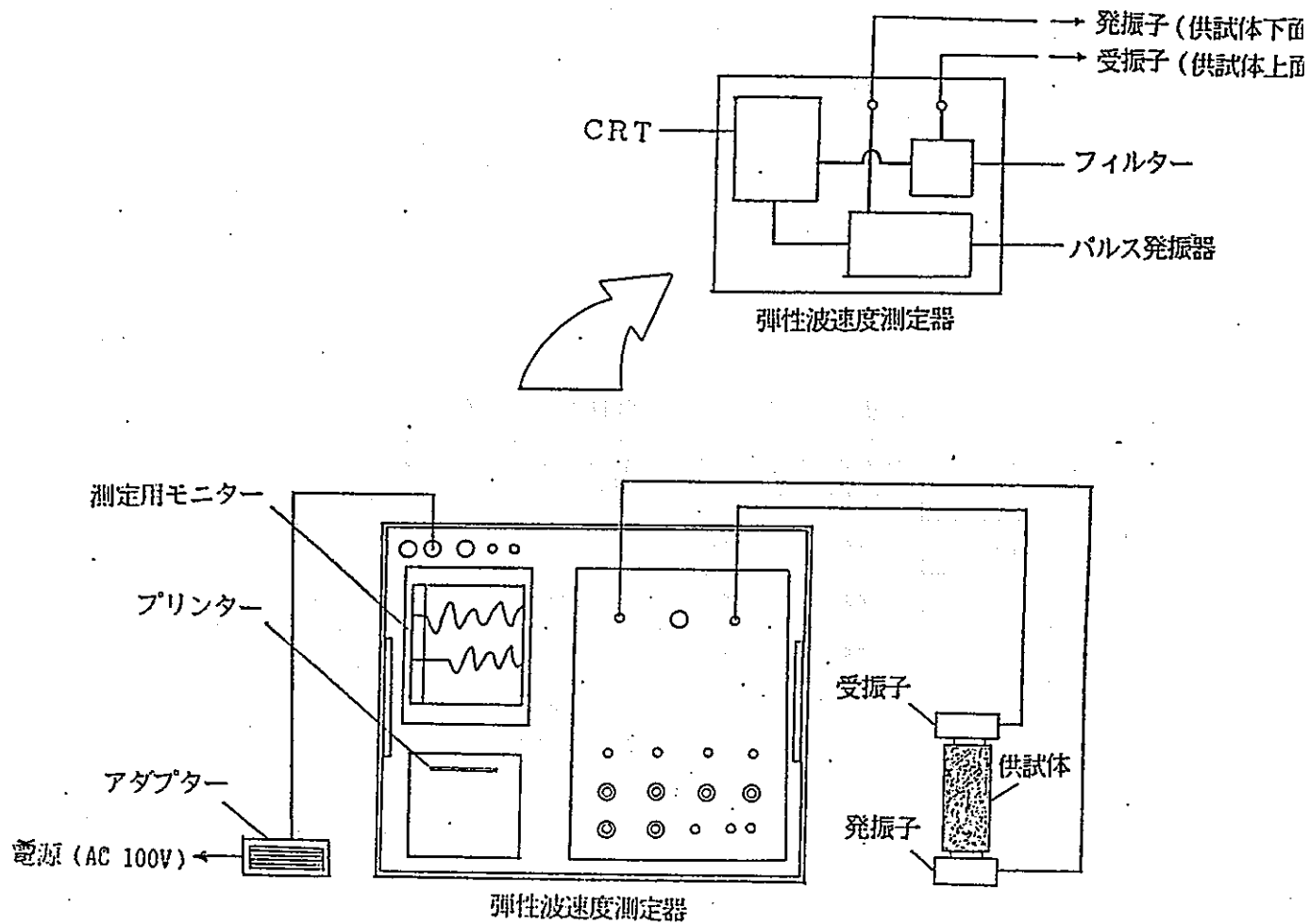
| 試料名       | P波速度<br>(m/sec) | S波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| R h p - 1 | 1910            | 638             | 8320                               | 23930                           | 0.437  |
| R h p - 2 | 1920            | 671             | 9170                               | 26220                           | 0.430  |
| R h p - 3 | 1950            | 625             | 7980                               | 23040                           | 0.443  |
| R h p - 4 | 1940            | 625             | 7600                               | 21910                           | 0.442  |
| R h p - 5 | 2000            | 610             | 7660                               | 22190                           | 0.449  |
| 平均値       | 1940            | 634             | 8150                               | 23460                           | 0.440  |

( 表 5 - 2 - 4 ) 弾性波速度試験結果 ( R θ + 4 5 )

| 試料名           | P波速度<br>(m/sec) | S波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| R θ + 4 5 - 1 | 1590            | 605             | 7440                               | 21070                           | 0.415  |
| R θ + 4 5 - 2 | 1660            | 610             | 7530                               | 21420                           | 0.422  |
| R θ + 4 5 - 3 | 1750            | 650             | 8600                               | 24410                           | 0.420  |
| R θ + 4 5 - 4 | 1920            | 620             | 7900                               | 22790                           | 0.442  |
| R θ + 4 5 - 5 | 1920            | 620             | 7920                               | 22840                           | 0.442  |
| 平均値           | 1770            | 621             | 7880                               | 22510                           | 0.428  |

( 表 5 - 2 - 5 ) 弾性波速度試験結果 ( R θ - 4 5 )

| 試料名           | P波速度<br>(m/sec) | S波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| R θ - 4 5 - 1 | 1920            | 620             | 7880                               | 22710                           | 0.442  |
| R θ - 4 5 - 2 | 1720            | 600             | 7260                               | 20780                           | 0.431  |
| R θ - 4 5 - 3 | 1850            | 650             | 8650                               | 24740                           | 0.430  |
| R θ - 4 5 - 4 | 2000            | 700             | 9940                               | 28430                           | 0.430  |
| R θ - 4 5 - 5 | 1880            | 610             | 7600                               | 21900                           | 0.441  |
| 平均値           | 1870            | 640             | 8270                               | 23710                           | 0.435  |



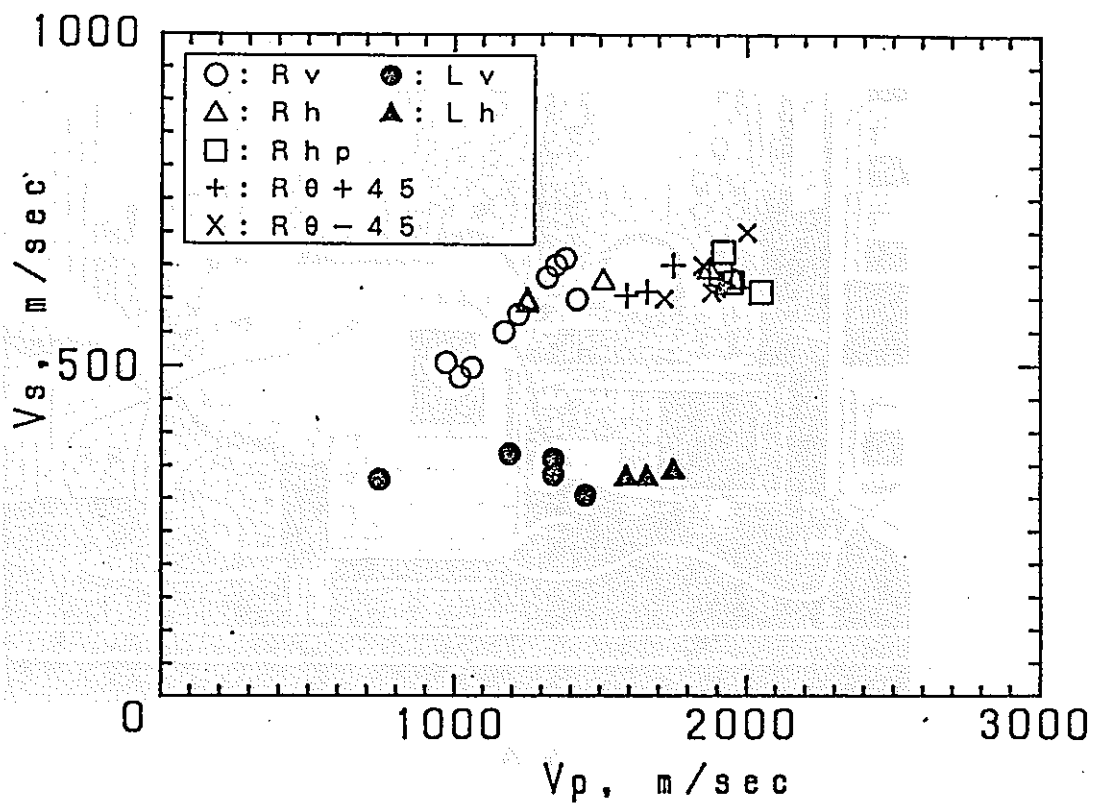
弾性波速度の測定概念図  
( 図 5 - 1 - 1 )

( 表 5 - 2 - 6 ) 弾性波速度試験結果 ( L v )

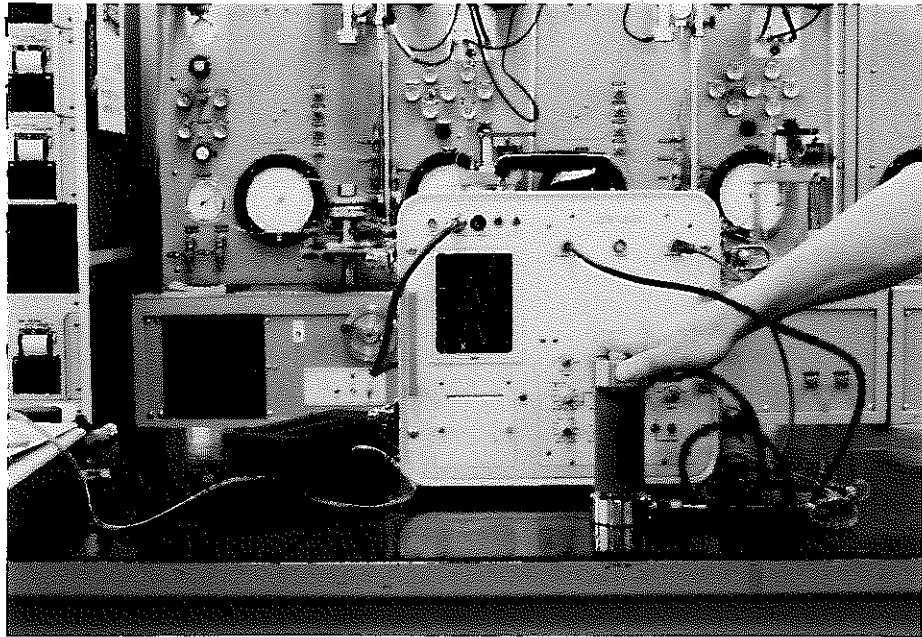
| 試料名     | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|---------|------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| L v - 1 | 1340             | 360              | 2750                               | 8050                            | 0.461  |
| L v - 2 | 1340             | 336              | 2390                               | 7010                            | 0.466  |
| L v - 3 | 1190             | 367              | 2860                               | 8270                            | 0.447  |
| L v - 4 | 744              | 328              | 2250                               | 6220                            | 0.379  |
| L v - 5 | 1450             | 305              | 1930                               | 5690                            | 0.477  |
| 平均値     | 1210             | 339              | 2440                               | 7050                            | 0.446  |

( 表 5 - 2 - 7 ) 弾性波速度試験結果 ( L h )

| 試料名     | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) | 動せん断弾性<br>係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 動ポアソン比 |
|---------|------------------|------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|
| L h - 1 | 1590             | 330              | 2350                               | 6950                            | 0.477  |
| L h - 2 | 1660             | 330              | 2320                               | 6870                            | 0.479  |
| L h - 3 | 1750             | 340              | 2490                               | 7360                            | 0.480  |
| 平均値     | 1670             | 330              | 2390                               | 7060                            | 0.479  |



( 5 - 2 - 1 )



( 写真 5 - 1 - 1 )

# 第 6 章

## 透 水 性

## 6. 透水性

### 6.1 試験装置及び試験方法

透水試験は最大セル圧  $50 \text{ kgf/cm}^2$  の三軸圧縮試験装置を用い、変水位法により実施した。三軸室使用による変水位透水試験概念図を図 6-1-1 に示す。三軸室を用いて行う透水試験における長所は、供試体をメンブレンで覆うことにより拘束圧  $\sigma_3$  の負荷が可能になり、任意の拘束圧の下で透水係数を測定できるという点にある。

今回は背圧  $U_b = 0 \text{ kgf/cm}^2$  とし、拘束圧を  $0.2 \sim 40 \text{ kgf/cm}^2$  の範囲で変化させて透水係数を測定した。

試験装置の詳細は、第 8 章の“試験装置の説明”を参照。

試験は、以下の手順で行った。

- ① 供試体は、直径  $50 \text{ mm}$ 、高さ  $50 \text{ mm}$  に成形した後、脱気水中に 24 時間以上浸して真空脱気し飽和化を図る。  
(写真 6-1-1)
- ② 飽和した供試体を取り出し、その側面に漏水防止のためのシリコン系ゴムを塗布する。(写真 6-1-2)
- ③ 塗布したゴムが硬化する前にメンブレンを装着し、三軸セルにセットする。(写真 6-1-3, 4)
- ④ 三軸セルを水で満たす。
- ⑤ 供試体の下方から上方向に脱気水を通水し、供試体内に残留する空気を排除する。
- ⑥ 通水終了後任意のバックプレッシャーを負荷し、数秒間放置する。
- ⑦ 測定する任意の応力で供試体を圧密する。(圧密終了は、3t 法による。) ※三軸圧縮試験手順参照
- ⑧ 圧密終了後、供試体下方部の通水系路にビューレットを接続し、ビューレットに脱気水を満たす。(この時、ビューレット内に空気が残らないように、細心の

注意を払う。 ) ( 図 6 - 1 - 1 参 照 )

- ⑨ 側 圧 を 一 定 に 保 っ た 状 態 で、 供 試 体 下 方 部 と 上 方 部  
の 通 水 コ ッ ク を 同 時 に 解 放 し、 圧 力 水 を 供 試 体 下 方 よ  
り 浸 透 さ せ 上 方 よ り 排 水 さ せ る。 こ の 時 の 排 水 量 と 排  
水 に 要 し た 時 間 に よ り 透 水 係 数 を 算 出 す る。 排 水 量 は  
測 定 開 始 時 と 測 定 終 了 時 の ビ ュ ー レ ッ ト の 目 盛 り の 差  
か ら 読 み 取 る。 ( 写 真 6 - 1 - 5 )
- ⑩ 数 回 測 定 し て、 透 水 係 数 の ば ら つ き が 大 き い 場 合 は  
さ ら に 繰 り 返 し 測 定 し、 値 が 安 定 し た 時 点 で 次 の 側 圧  
段 階 に 移 行 す る。 ( ⑨ に 戻 る。 )
- ⑪ 最 終 段 階 (  $\sigma_3 = 40 \text{ kgf/cm}^2$  ) の 測 定 が 終 了 し た 時  
点 で、 供 試 体 を 回 収 す る。

## 6.2 試験結果

各試料の透水試験結果を表6-2-1に、拘束圧 $\sigma_3$ と透水係数 $k$ の関係を図6-2-1に示す。

図6-2-1より、いずれの試料も透水係数は拘束圧の増加と共に低下している。ただし、拘束圧 $\sigma_3 = 0.2 \sim 5$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) の範囲内での透水係数 $k$ の低下が著しく、それ以上の拘束圧では比較的安定する傾向がある。

低拘束圧状態での $k$ の急激な低下の原因としては、試験に用いた岩自体の特性が微小な拘束圧の変化にも大きな影響を受け、急激に間隙が狭まる事、もしくは載荷している拘束圧が極めて小さいことから、供試体側面に塗布したシリコン系ゴムと供試体側面との間に僅かに残留していたと思われる隙間が影響している事などが考えられる。拘束圧が高くなるにつれて $k$ が次第に安定してくるのは、供試体側面とシリコン系ゴムが密着するようになり、その結果残留していた隙間が消失するためではないだろうか。

これらの理由から、本研究では $\sigma_3 = 30 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 時の値を各試料の透水係数として採用している。

### 6.3 考察

#### (1) 褶曲作用の影響

右岸試料, 左岸試料の透水性を比較し、褶曲作用による影響について考察する。

図6-2-1より左岸試料は右岸試料のどの試料よりも透水性が良い事がわかる。

一般に、堆積軟岩の透水性は一般の土質材料と同様に、構成粒子の粒度組成, 間隙比の割合, 粒子配列構造, 構成鉱物の種類に影響される。またそれらの要因に加え、粒子相互を膠結しているセメンテーションの効果の影響も加わる事が知られている<sup>7)</sup>。

この事をふまえ、左岸試料の褶曲作用による影響と透水係数を増大させた原因を探る。

左岸試料は右岸試料に対して、基本的性質において粒度組成や粒子配列構造, 構成鉱物の種類には差が無いが、間隙比が小さく乾燥密度が大きいという特徴がある。この事から考えると、両者の関係は逆になるはずである。

しかし左岸試料は、地層が直立する程大きな褶曲作用を受けたために、大きなクラック以外にも供試体内部に微小な不連続面が多数発生したものである。この事は、S波速度の低下にも現れている。

したがって、この不連続面が形成された事によりセメンテーションが破壊され、水と粒子骨格の摩擦抵抗が低減し、透水係数が増大したと言える。

#### (2) 異方性について

右岸試料, 左岸試料の透水性における異方性を表すため図6-3-1を用意した。ただし各試料の透水係数は $\sigma_3 = 30 \text{ kgf/cm}^2$ の時の値を採用している。

図6-3-1より右岸試料の透水性について見ると、透水係数はいずれの試料も $2.75 \times 10^{-8} \sim 2.28 \times 10^{-7}$ の範囲内にあり、その異方性では鉛直方向Rvが最

も透水係数が大きく、次いで  $R_{\theta + 45}$ ,  $R_{\theta - 45}$ ,  $R_h$ ,  $R_{hp}$  の順に低下している。

一般的な土質材料は、鉛直方向よりも水平方向の方が透水性は良いとされているが、今回の結果はそれとは相違するものであった。

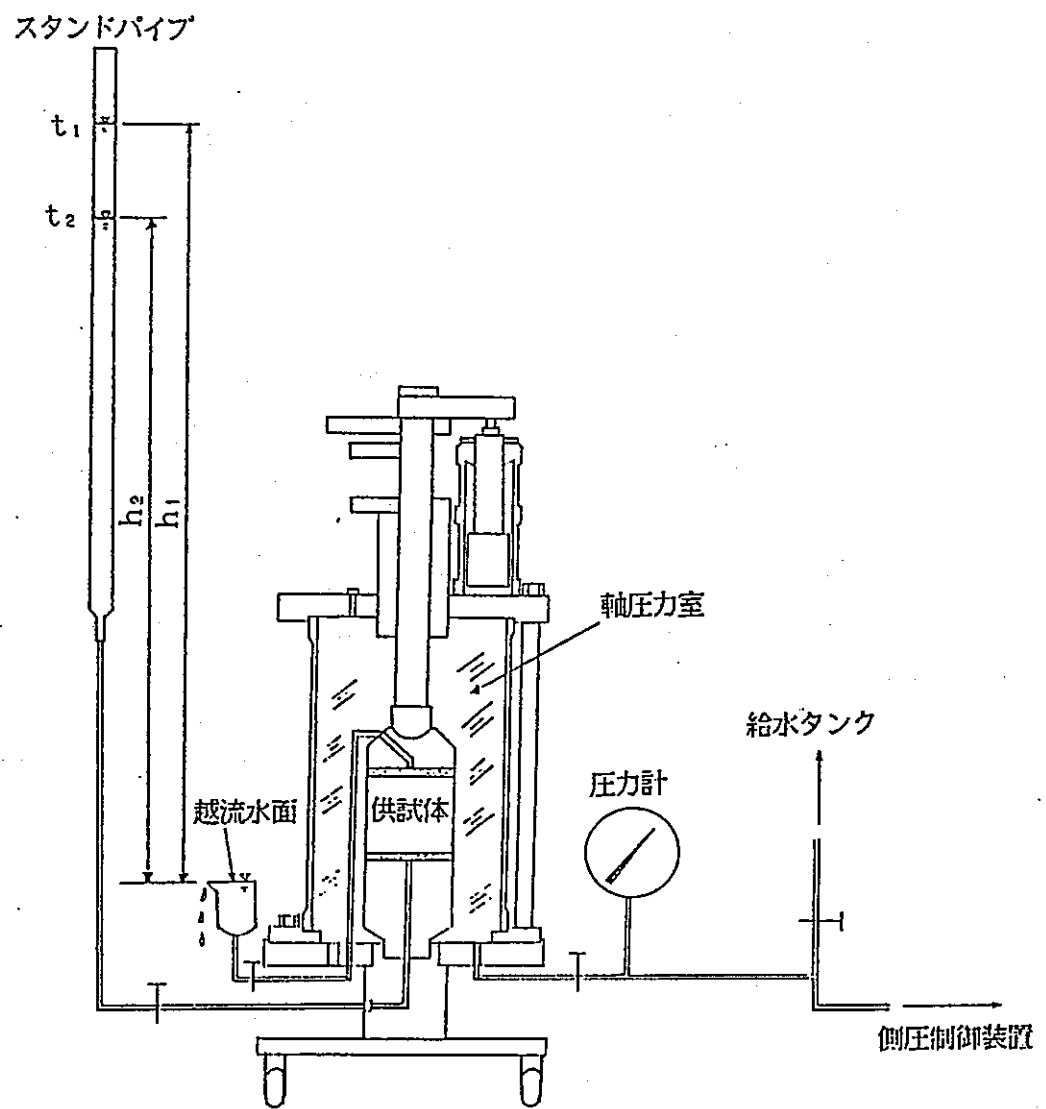
これは、長期間にわたり褶曲構造を形成する事になった水平力に起因するものと考えられる。すなわち水平力が加わったと思われる  $R_h$  は、他の試料よりも大きな応力を受け圧密効果が促進されたものと推測される。その結果  $R_h$  の内部構造は、基本的性質における乾燥密度が右岸の他試料よりも僅かながら大きい事でも分かるように構造が緻密で、水と粒子骨格との摩擦抵抗が増大し透水係数を低下させたのだろう。

一方、左岸試料の透水係数は  $L_v = 7.32 \times 10^{-7}$ ,  $L_h = 5.79 \times 10^{-7}$  と両者は非常に接近しているものの、 $L_h$  の方が僅かながら低い値を示している。

両者の異方性は、前節で述べたように供試体内部に存在する微小な不連続面に支配されていると思われる事から、この実験で得られた結果はその不連続面の存在の仕方によって発現したものであると考えられる。

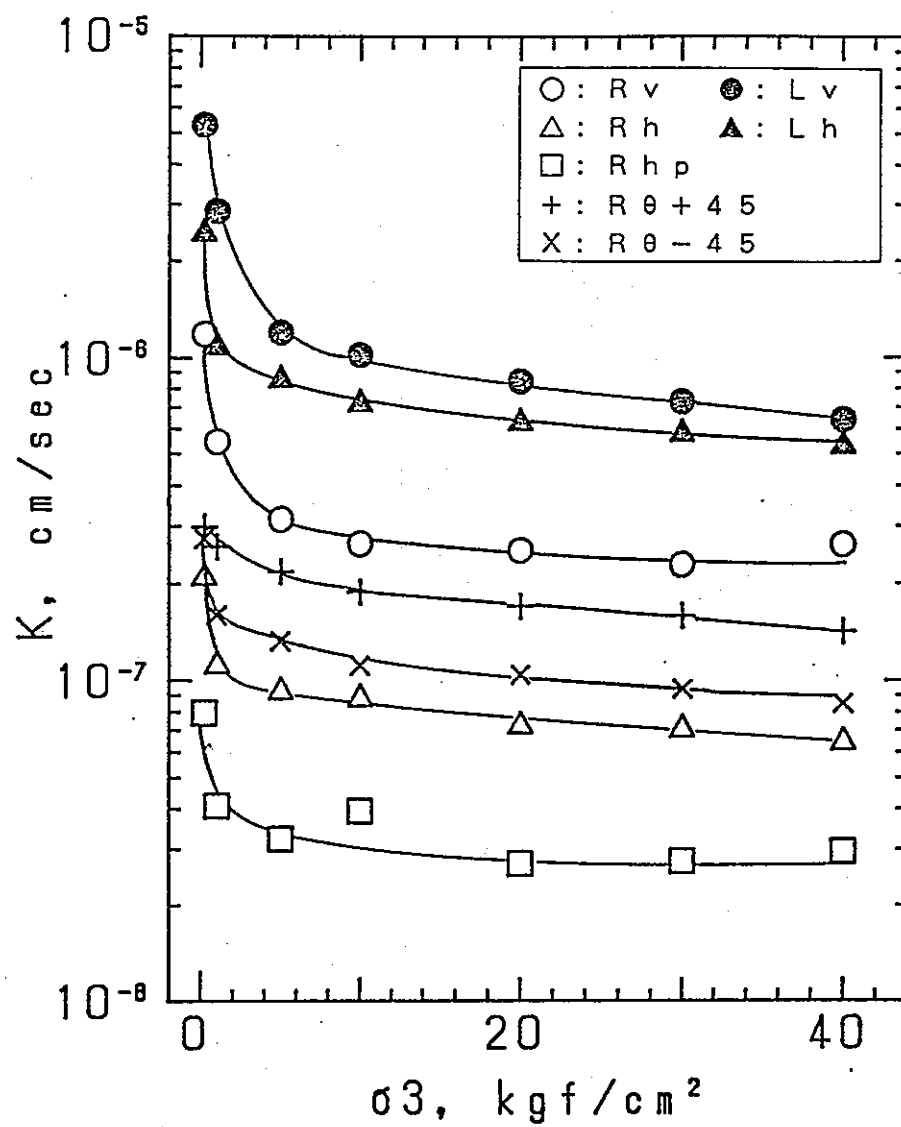
( 表 6 - 2 - 1 ) 透水試驗結果

| 試料名             | 拘束圧 $\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                 | 透水係数 $k$ (cm/sec)                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|                 | 0.2                                   | 1.0                   | 5.0                   | 10.0                  | 20.0                  | 30.0                  | 40.0                  |
| RV              | $1.19 \times 10^{-6}$                 | $1.19 \times 10^{-6}$ | $1.19 \times 10^{-6}$ | $1.19 \times 10^{-6}$ | $1.19 \times 10^{-6}$ | $1.19 \times 10^{-6}$ | $1.19 \times 10^{-6}$ |
| Rh              | $2.08 \times 10^{-7}$                 | $1.11 \times 10^{-7}$ | $9.20 \times 10^{-8}$ | $8.75 \times 10^{-8}$ | $7.20 \times 10^{-8}$ | $7.04 \times 10^{-8}$ | $6.41 \times 10^{-8}$ |
| Rhp             | $7.93 \times 10^{-8}$                 | $4.09 \times 10^{-8}$ | $3.23 \times 10^{-8}$ | $3.95 \times 10^{-8}$ | $2.70 \times 10^{-8}$ | $2.75 \times 10^{-8}$ | $2.95 \times 10^{-8}$ |
| R $\theta$ + 45 | $2.99 \times 10^{-7}$                 | $2.60 \times 10^{-7}$ | $2.18 \times 10^{-7}$ | $1.88 \times 10^{-7}$ | $1.70 \times 10^{-7}$ | $1.58 \times 10^{-7}$ | $1.42 \times 10^{-7}$ |
| R $\theta$ - 45 | $2.75 \times 10^{-7}$                 | $1.59 \times 10^{-7}$ | $1.32 \times 10^{-7}$ | $1.11 \times 10^{-7}$ | $1.04 \times 10^{-7}$ | $9.39 \times 10^{-8}$ | $8.47 \times 10^{-8}$ |
| Lv              | $5.31 \times 10^{-6}$                 | $2.86 \times 10^{-6}$ | $1.20 \times 10^{-6}$ | $1.02 \times 10^{-6}$ | $8.44 \times 10^{-7}$ | $7.32 \times 10^{-7}$ | $6.41 \times 10^{-7}$ |
| Lh              | $2.44 \times 10^{-6}$                 | $1.08 \times 10^{-6}$ | $8.53 \times 10^{-7}$ | $7.16 \times 10^{-7}$ | $6.26 \times 10^{-7}$ | $5.79 \times 10^{-7}$ | $5.31 \times 10^{-7}$ |

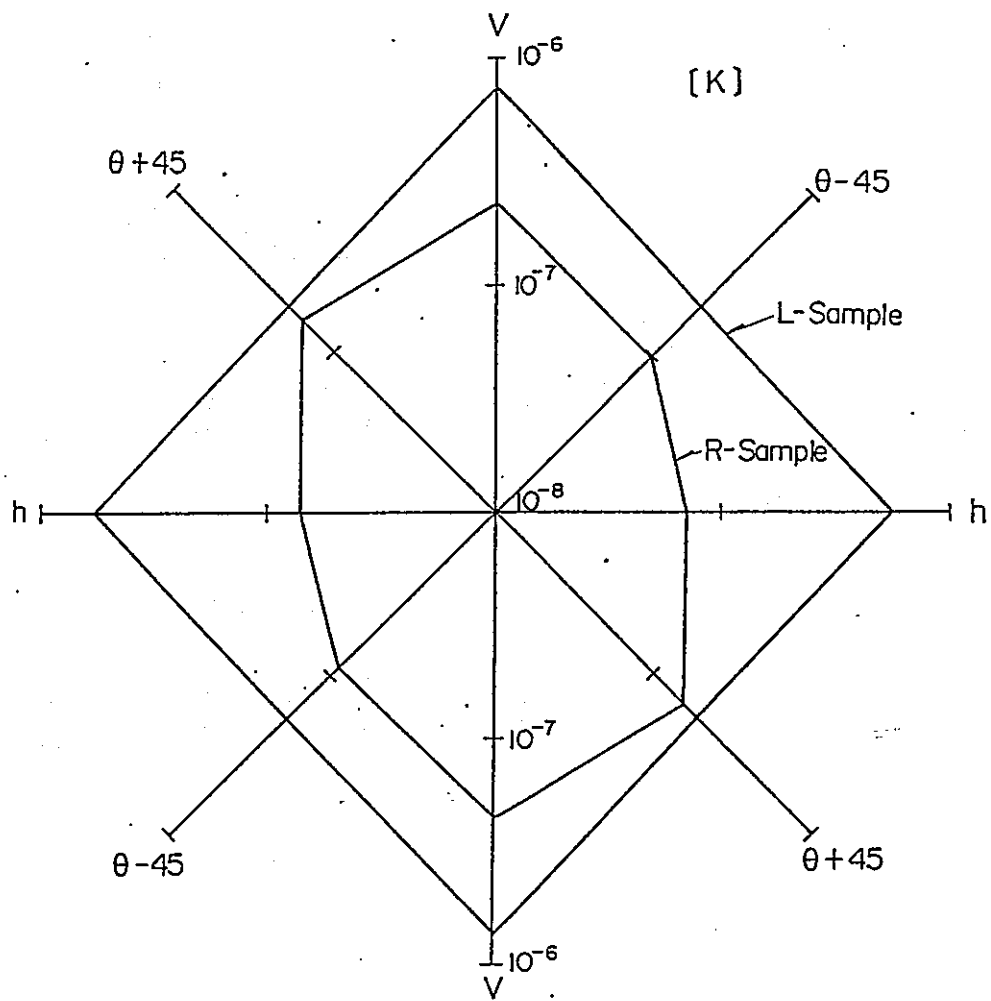


三軸試験装置を用いた変水位透水試験

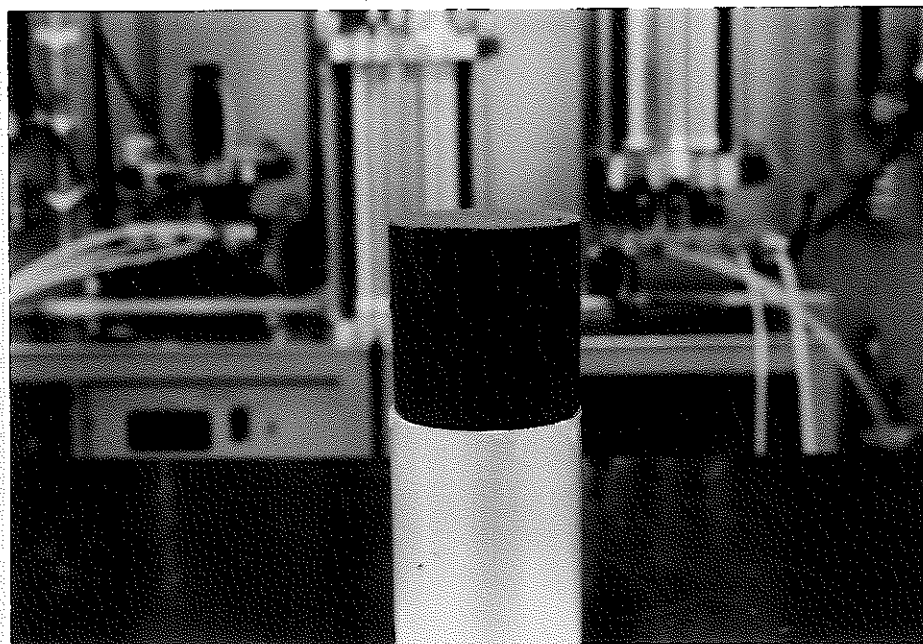
( 図 6 - 1 - 1 )



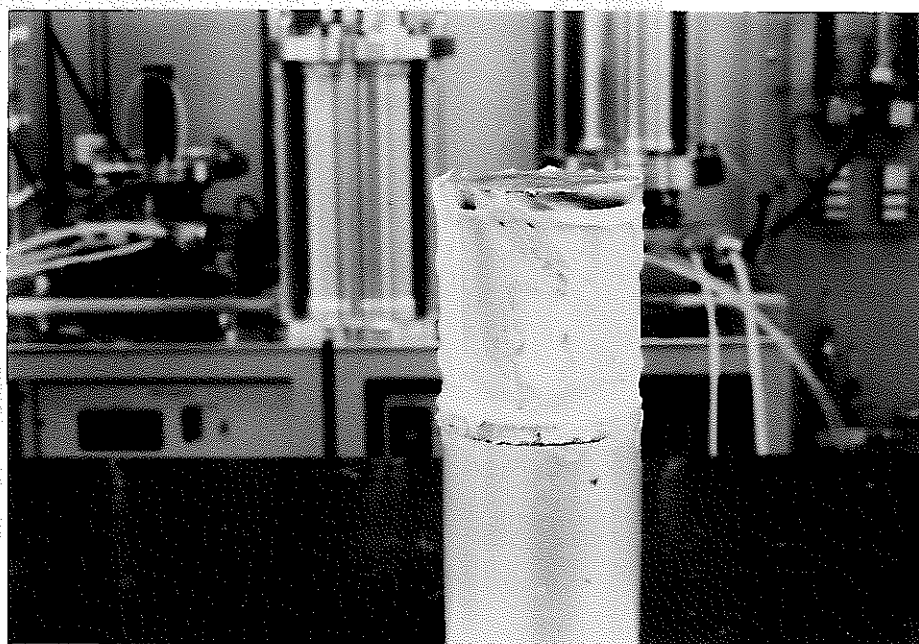
( 6 - 2 - 1 )



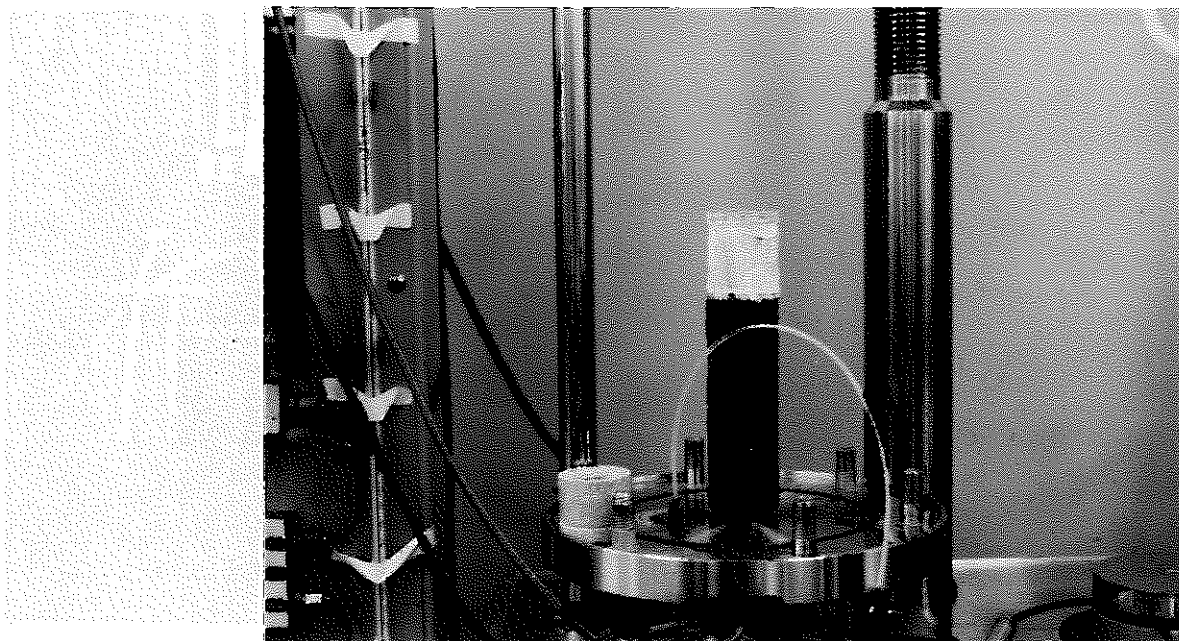
( 图 6 - 3 - 1 )



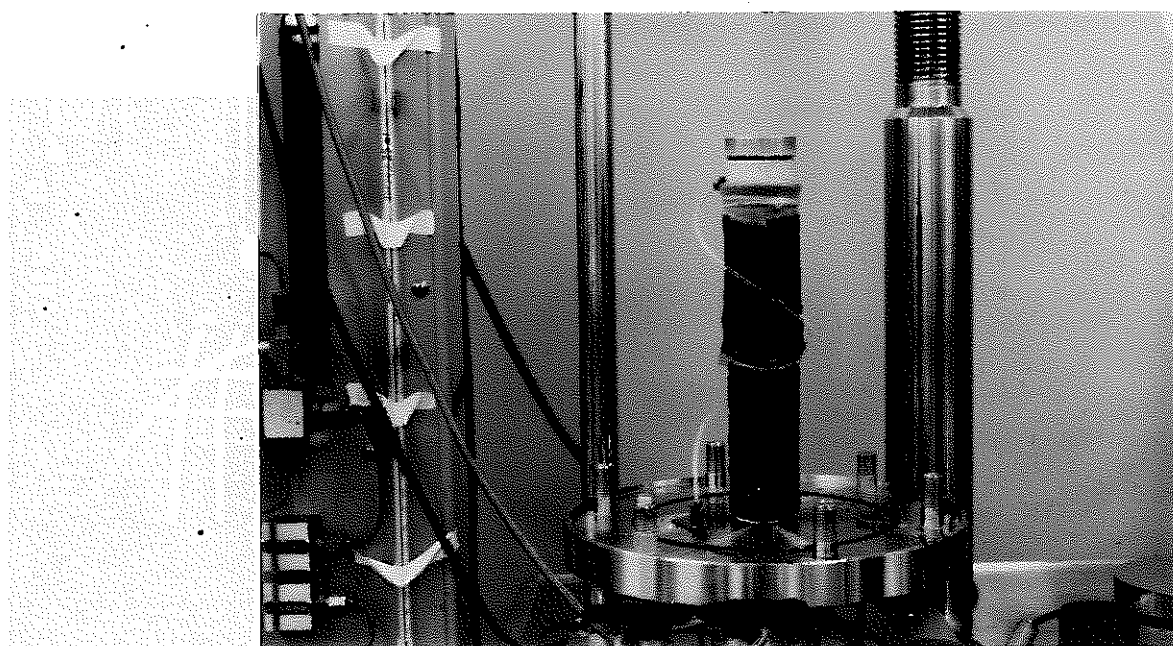
（写真 6 - 1 - 1）



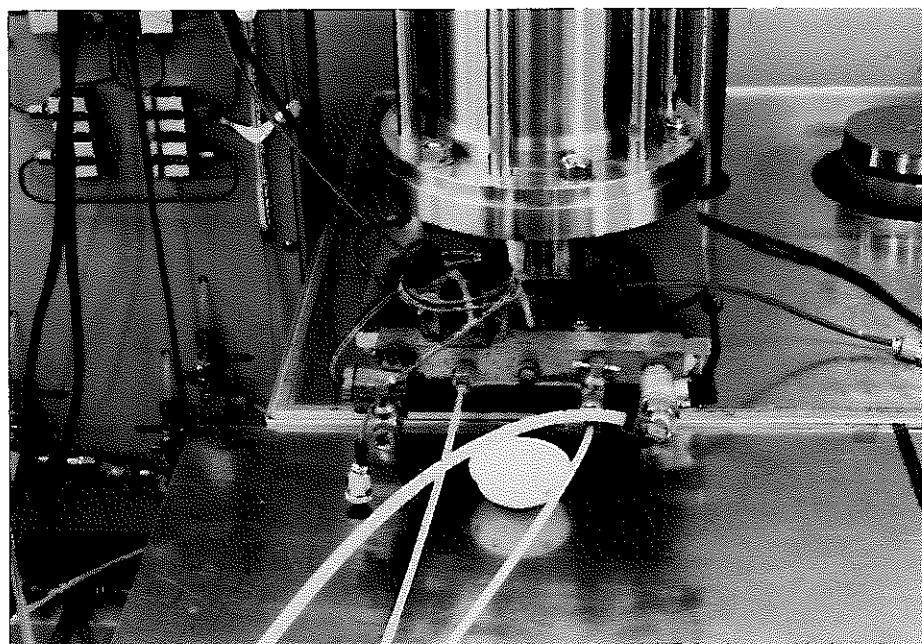
（写真 6 - 1 - 2）



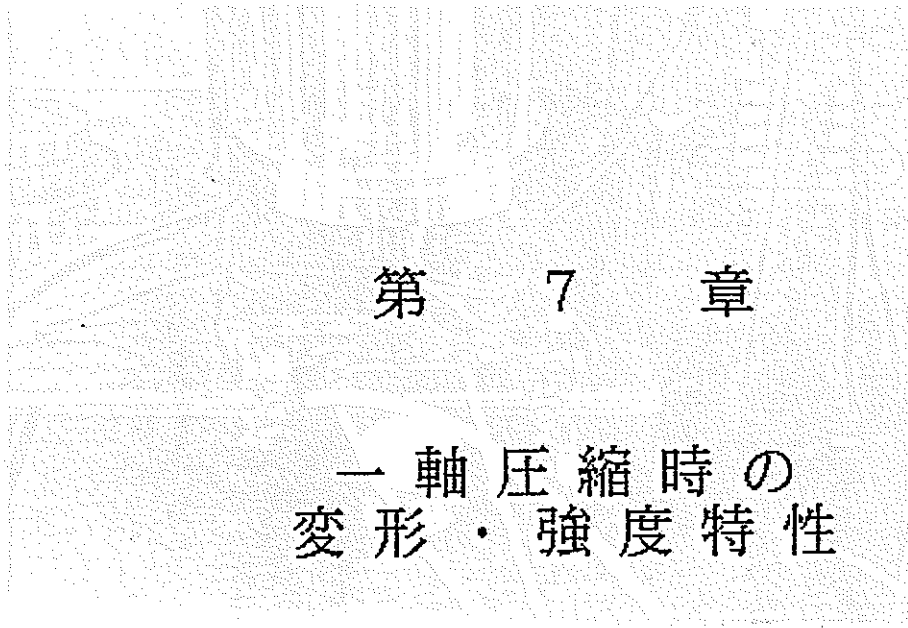
( 写真 6 - 1 - 3 )



( 写真 6 - 1 - 4 )



( 写真 6 - 1 - 5 )



## 第 7 章

### 一軸圧縮時の 変形・強度特性

( 6 ・ 1 ・ 2 頁 )

## 7. 一軸圧縮時の変形・強度特性

### 7.1 試験装置及び試験方法

一軸圧縮試験は、中圧三軸圧縮試験用垂直載荷装置を用い、J I S A 1 2 1 6 ならびに J I S M 0 3 0 2 に従って実施した。中圧三軸圧縮試験用垂直載荷装置使用による一軸圧縮試験概念図を図 7 - 1 - 1 に示す。

本試験に用いたコアは、ボーリングによって採取した自然状態のコア（直径 5 5 mm）を、約 1 5 cm の大きさに切り出し、トリマーおよびマイターボックスにより、直径 5 0 mm、高さ 1 0 0 mm の円柱に成形したものを使用した。

なお成形する際には、刃長 3 0 0 mm 程度の刺身包丁を用いた。特に、供試体端面の状態は試験結果に大きな影響を与えるため、成形においては細心の注意を払った。

また試験用コアの採取位置は、サンプリングの乱れの影響、または応力解放による状態の変化を考慮して、サンプリング深度 0 ~ 0 . 5 m のものは使用しないものとした。

試験状態は、全ての供試体について載荷方式をひずみ制御法とし、ひずみ速度は 0 . 1 % / min とした。

試験中の荷重、軸変位はデータロガーに収録し、そのデータをさらにコンピューターに転送した。その後、コンピューターに初期状態（ $H_0$ ,  $D_0$ ,  $m_0$ ）を入力し、応力～ひずみ曲線を図化させた。試験終了後、供試体の破壊状況を観察、記録した。

得られた応力～ひずみ関係からは、一軸圧縮強度  $q_u$ 、変形係数  $E_{us_0}$ 、破壊ひずみ  $\varepsilon_{a,r}$  を求めた。

実験装置の詳細は、第 8 章の“試験装置の説明”を参照。

試験は以下の手順で行った。

- ① 自然状態のコアを直径 5 0 mm、高さ 1 0 0 mm に成形する。成形時の削りカスから含水量測定を行う。含水量試験は、（J I S A 1 2 0 3）に規定された方法に

従って行う。

- ② 供試体の質量 ( $m$ ) , 高さ ( $L$ ) , 直径 ( $D$ ) を計る。  
供試体の高さ, 直径より体積 ( $V$ ) を求め、 $m/V$  より  
供試体の密度を計算する。(ノギス法)
- ③ 供試体を試験機の圧縮盤の中央に置き、上部圧縮盤  
を供試体に密着させる。
- ④ 圧縮量測定用差動トランス型変位計を取り付け、ゼ  
ロ点の調整を行う。
- ⑤ データロガーに接続されたロードセルのゼロ点の調  
整を行ない、その後ロードセルと供試体端面を密着さ  
せる。
- ⑥ 一定の圧縮量ごとの荷重をデータロガーによって収  
録し、その後コンピュータでデータを演算して応力  
～ひずみ曲線を描く。
- ⑦ 応力～ひずみ曲線から以下の物性値を求める。
  - ・ 一軸圧縮強度  $q_u$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) :  $\sigma \sim \varepsilon$  曲線上の最  
大応力値
  - ・ 破壊ひずみ  $\varepsilon_r$  (%) : 最大応力値に対応するひず  
み
  - ・ 変形係数  $E_{u_{50}}$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) :  $\sigma \sim \varepsilon$  曲線上の  $q_u$   
/ 2 における割線

## 7.2 試験結果

表 7-2-1 ~ 7 に試料別における一軸圧縮試験結果を示す。これらの表から、以下に示す各値の相関を図 7-2-1 ~ 5 に示す。

- ・変形係数  $E_{us}$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係 (図 7-2-1) 及び試料の採取方向と  $E_{us}$ ,  $q_u$  の平均値との関係 (図 7-2-2), (図 7-2-3)
- ・一軸圧縮強度  $q_u$  と P 波速度  $V_p$  の関係 (図 7-2-4)
- ・一軸圧縮強度  $q_u$  と S 波速度  $V_s$  の関係 (図 7-2-5)

変形係数と一軸圧縮強度の関係は、図 7-2-1 に示すように、右岸試料と左岸試料の間に顕著な差が認められた。図から、一軸圧縮強度が増加すると変形係数も増加するという極めて一般的な傾向が伺えるが、右岸試料と左岸試料とを分けて見た場合、両者共に一軸圧縮強度と変形係数の間には比例関係が見られ、 $q_u:E_{us}$  は右岸で 1:140, 左岸で 1:100 であった。

一軸圧縮強度を各方向の平均値で比較すると、右岸試料では  $R_{\theta-45}$  が 49.3 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) と最も大きな値を示し、次いで  $R_{\theta+45}$  の 44.4,  $R_h$  の 40.6,  $R_v$  の 36.9,  $R_{hp}$  の 26.1 の順になっている。左岸試料では  $L_h$  が 24.4、 $L_v$  は 20.2 であり、 $L_h$  は  $L_v$  より大きな値を示している。右岸試料と左岸試料で比較すると、右岸 5 方向の試料全てが左岸 2 方向の試料よりも大きい値を示しており、その差は左岸試料が右岸試料の 40 ~ 90 % 程度の値であった。

次に変形係数を各方向の平均値で比較すると、右岸試料では  $R_{\theta-45}$  が 8560 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) と最も大きな値を示し、次いで  $R_{\theta+45}$  の 6600,  $R_h$  の 5480,  $R_v$  の 4630,  $R_{hp}$  の 3540 の順になっている。

左岸試料では  $L_h$  が 3320,  $L_v$  は 1890 である。両者の関係は、一軸圧縮強度の関係と同様であること

が分かる。右岸試料と左岸試料で比較すると、一軸圧縮強度同様、右岸5方向の試料全てが左岸2方向の試料よりも大きい値を示している。左岸試料は右岸試料の20～90%程度であった。

このように、両者の $q_u$ ならびに $E_{us}$ の関係は、ほぼ同じであると言って良いだろう。

一軸圧縮強度とP波速度では、図7-2-4に示すように特に目立った相関関係はなく、右岸試料、左岸試料共にそれぞれの一軸圧縮強度に対してのP波速度は安定しており、1000～2000 m/secを示している。一般的に、硬岩は一軸圧縮強度とP波速度の間に相関があり、 $q_u$ が増加すると $V_p$ も増加する傾向がある<sup>4)</sup>が、今回実験に用いた軟岩ではこのような相関関係は見られなかった。

一軸圧縮強度とS波速度では、図7-2-5に示すように $q_u$ - $V_p$ 同様、特に目立った相関関係はなく、右岸試料、左岸試料共にそれぞれの一軸圧縮強度に対するS波速度は安定している。ただし、弾性波速度試験からも明らかのように、左岸試料は右岸試料に比べS波速度は低い値で安定している。

### 7.3 考察

#### (1) 褶曲作用の影響

右岸試料と左岸試料の剛性、強度を比較すると、右岸試料5方向は左岸試料2方向を上回る傾向が認められた。

試料採取地の地質構造から判断すれば、試料を採取した左岸側地層は右岸側地層に比べ古い時代に堆積したため、褶曲する以前は右岸側地層の下部に位置し、現在に至るまでに受けた応力履歴は右岸側地層より大きいはずである。これは、左岸試料が右岸試料に比べ乾燥密度が大きく間隙比が小さいという事にも現れている。従って、左岸試料は、過去に受けた応力履歴が大きく圧密が進行しているので、粒子骨格におけるセメンテーションがより発達し、試料の剛性、強度も増大していると考えられる。

しかし今回の実験結果は、これらに矛盾したものとなっている。これは次のように解釈できる。

左岸側地層は、地層が直立するほど大きな褶曲作用を受けたため、地層内には大きなひずみが生じ、それによってクラック等の不連続面が多数発生している。これらの地層から採取した左岸試料は、供試体の内部構造を反映するとされるS波速度が右岸全ての試料よりも小さく、また乾燥密度が大きく間隙比が小さいにもかかわらず透水係数が右岸試料全てより高いという性質からも分かるように、試料の内部に大きなクラック以外にも目に見えない多数の微小な不連続面を含んでいたものと思われる。従って、左岸試料の一軸圧縮強度と変形係数の低下は、この供試体内部に存在する不連続面の影響を受けたためであろう。

#### (2) 異方性について

右岸試料、左岸試料の各採取方向での異方性を検討するために、図7-2-2に試料採取方向と変形係数の平均値との関係を、図7-2-3に試料採取方向と一軸圧縮強度

の平均値との関係を示す。

右岸試料では、変形係数は  $R_{\theta - 45}$  が最も大きく、次いで  $R_{\theta + 45}$ ,  $R_h$ ,  $R_v$  の順になっている。一軸圧縮強度では、 $R_{\theta - 45}$  が最も大きく、次いで  $R_{\theta + 45}$ ,  $R_v$ ,  $R_h$  の順になっている。このように、拘束圧の無い状態でせん断する一軸圧縮強度及び剛性では、 $R_{\theta + 45}$ ,  $R_{\theta - 45}$ ,  $R_h$  が非常に接近した値を示しており、厳密に異方性の程度を判断するのは難しいように思われる。

しかし、この結果を地質構造を踏まえて解釈すると、次のようになる。

試料採取地一帯の褶曲構造は、水平方向の強い圧縮力が原動力となっており、その時に受けた応力履歴の影響が現在もなお残っていると考えられる。従ってその原動力となった水平方向では、他の方向に比較すると圧密効果等による岩の固結が進行し、より大きな剛性、強度を示すと考えられる。その事から考えると、右岸の異方性はやはり  $R_h$  の応力履歴が他を上回っていたと考えるのが妥当ではないだろうか。

左岸試料では、変形係数、一軸圧縮強度ともに  $L_h$  が  $L_v$  を上回った。この結果は、褶曲する以前の左岸部の地層が水平方向であったことから考えると、水平の地層から採取した右岸試料では水平方向の強度、剛性が鉛直方向に比べ卓越していたという結果からも分かるように矛盾したものとなっている。これは低拘束圧下における一軸圧縮時の変形、強度特性においては、右岸では一貫した異方性の影響となって現れているが、左岸部では褶曲時に多数の不連続面が発生したことから、その不連続面の存在の仕方等の影響によって異方性の方向が変化しなかったためではないかと思われる。

(表 7 - 2 - 1) 一軸圧縮試験結果 (R v)

| 試料名   | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|-------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| R v   | 0.1                    | 21.7              | 1.950                       | 40.9                                  | 0.95              | 4690                           | 971              | 505              |
|       | 0.1                    | 23.5              | 1.948                       | 32.3                                  | 0.74              | 4050                           | 1060             | 497              |
|       | 0.1                    | 23.7              | 1.943                       | 33.8                                  | 0.83              | 4390                           | 1020             | 483              |
|       | 0.1                    | 22.8              | 1.984                       | 40.2                                  | 0.84              | 5310                           | 1320             | 633              |
|       | 0.1                    | 21.9              | 2.012                       | 41.3                                  | 0.85              | 4690                           | 1350             | 651              |
|       | 0.1                    | 21.9              | 2.010                       | 43.5                                  | 0.89              | 5340                           | 1380             | 661              |
|       | 0.1                    | 19.7              | 1.978                       | 32.8                                  | 0.86              | 4070                           | 1170             | 550              |
|       | 0.1                    | 20.3              | 1.997                       | 31.2                                  | 0.84              | 4140                           | 1220             | 557              |
|       | 0.1                    | 19.7              | 1.998                       | 36.4                                  | 0.79              | 4970                           | 1420             | 599              |
| 平 均 値 |                        | 21.7              | 1.980                       | 36.9                                  | 0.84              | 4630                           | 1210             | 573              |

(表 7 - 2 - 2) 一軸圧縮試験結果 (R h)

| 試料名   | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|-------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| R h   | 0.1                    | 21.8              | 2.023                       | 35.8                                  | 0.80              | 4680                           | 1250             | 596              |
|       | 0.1                    | 22.0              | 2.009                       | 36.8                                  | 0.86              | 4620                           | 1250             | 590              |
|       | 0.1                    | 22.4              | 2.002                       | 41.1                                  | 0.71              | 5890                           | 1510             | 625              |
|       | 0.1                    | 22.3              | 2.024                       | 43.8                                  | 0.71              | 6320                           | 1960             | 626              |
|       | 0.1                    | 22.2              | 2.034                       | 45.7                                  | 0.80              | 5910                           | 1870             | 641              |
| 平 均 値 |                        | 22.1              | 2.018                       | 40.6                                  | 0.78              | 5480                           | 1570             | 616              |

(表 7 - 2 - 3) 一軸圧縮試験結果 (R h p)

| 試料名   | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|-------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| R h p | 0.1                    | 22.8              | 2.004                       | 28.2                                  | 0.75              | 3960                           | 1910             | 638              |
|       | 0.1                    | 22.7              | 1.995                       | 23.4                                  | 0.81              | 3410                           | 1920             | 671              |
|       | 0.1                    | 22.7              | 2.003                       | 28.9                                  | 0.83              | 3660                           | 1950             | 625              |
|       | 0.1                    | 22.9              | 1.906                       | 25.0                                  | 0.89              | 3070                           | 1940             | 625              |
|       | 0.1                    | 22.7              | 2.017                       | 25.1                                  | 0.81              | 3580                           | 2000             | 610              |
| 平 均 値 |                        | 22.8              | 1.984                       | 26.1                                  | 0.82              | 3540                           | 1940             | 634              |

(表 7 - 2 - 4) 一軸圧縮試験結果 (Rθ + 45)

| 試料名     | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|---------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Rθ + 45 | 0.1                    | 21.6              | 1.993                       | 41.5                                  | 0.74              | 6110                           | 1590             | 605              |
|         | 0.1                    | 22.1              | 1.984                       | 36.6                                  | 0.76              | 6540                           | 1660             | 610              |
|         | 0.1                    | 22.7              | 1.994                       | 44.1                                  | 0.76              | 6490                           | 1750             | 650              |
|         | 0.1                    | 22.0              | 2.015                       | 46.4                                  | 0.77              | 5960                           | 1920             | 620              |
|         | 0.1                    | 23.0              | 2.019                       | 53.5                                  | 0.72              | 7880                           | 1920             | 620              |
| 平 均 値   |                        | 22.3              | 2.001                       | 44.4                                  | 0.75              | 6600                           | 1770             | 620              |

(表 7 - 2 - 5) 一軸圧縮試験結果 (Rθ - 45)

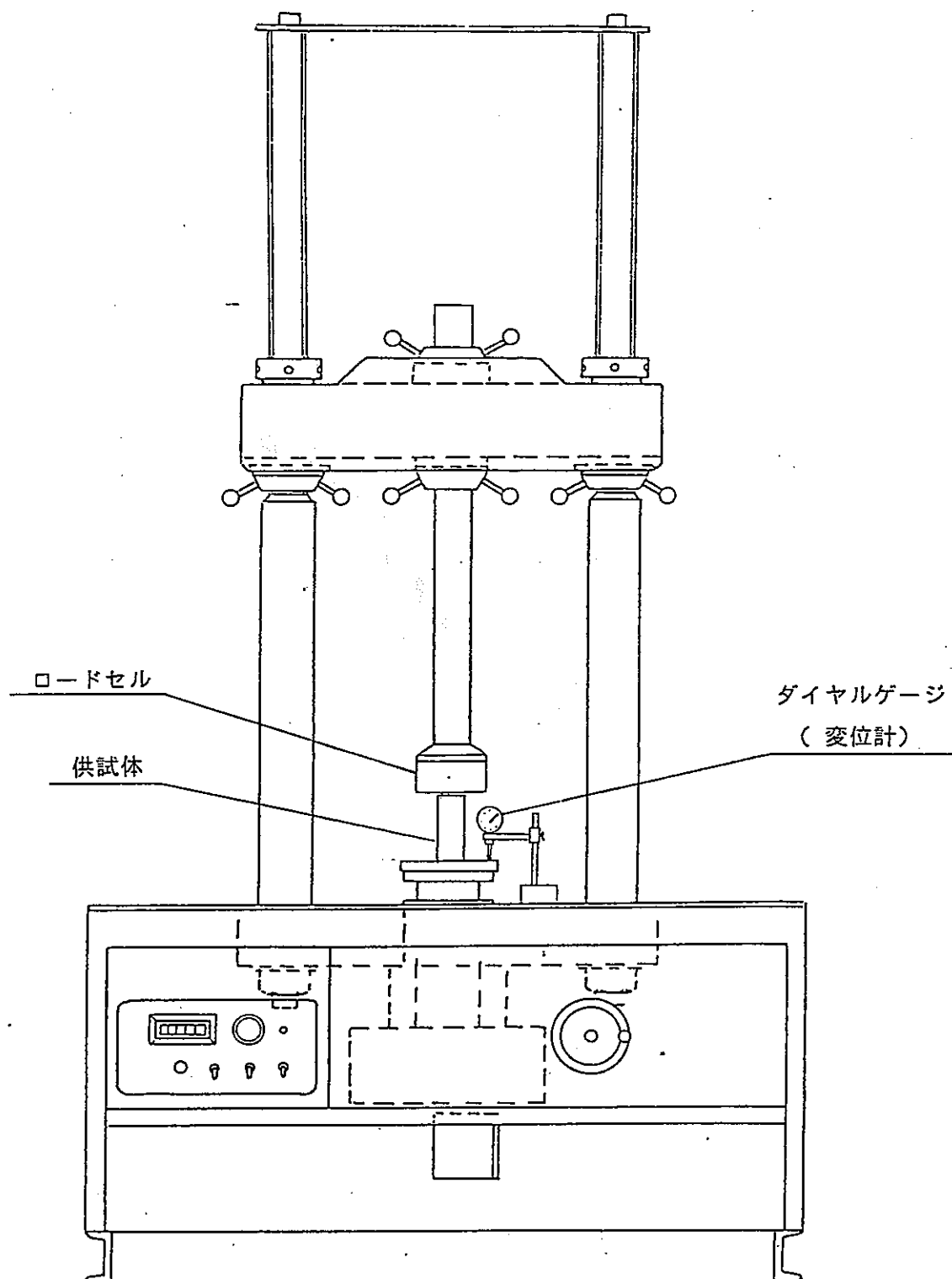
| 試料名     | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|---------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Rθ - 45 | 0.1                    | 22.0              | 2.008                       | 49.9                                  | 0.71              | 7130                           | 1920             | 620              |
|         | 0.1                    | 21.8              | 1.977                       | 41.9                                  | 0.72              | 6550                           | 1720             | 600              |
|         | 0.1                    | 22.4              | 2.007                       | 51.4                                  | 0.67              | 8570                           | 1850             | 650              |
|         | 0.1                    | 24.3              | 1.988                       | 61.6                                  | 0.65              | 13400                          | 2000             | 700              |
|         | 0.1                    | 22.4              | 2.001                       | 41.5                                  | 0.64              | 7160                           | 1880             | 610              |
| 平 均 値   |                        | 22.6              | 1.996                       | 49.3                                  | 0.68              | 8560                           | 1870             | 640              |

(表 7 - 2 - 6) 一軸圧縮試験結果 (Lv)

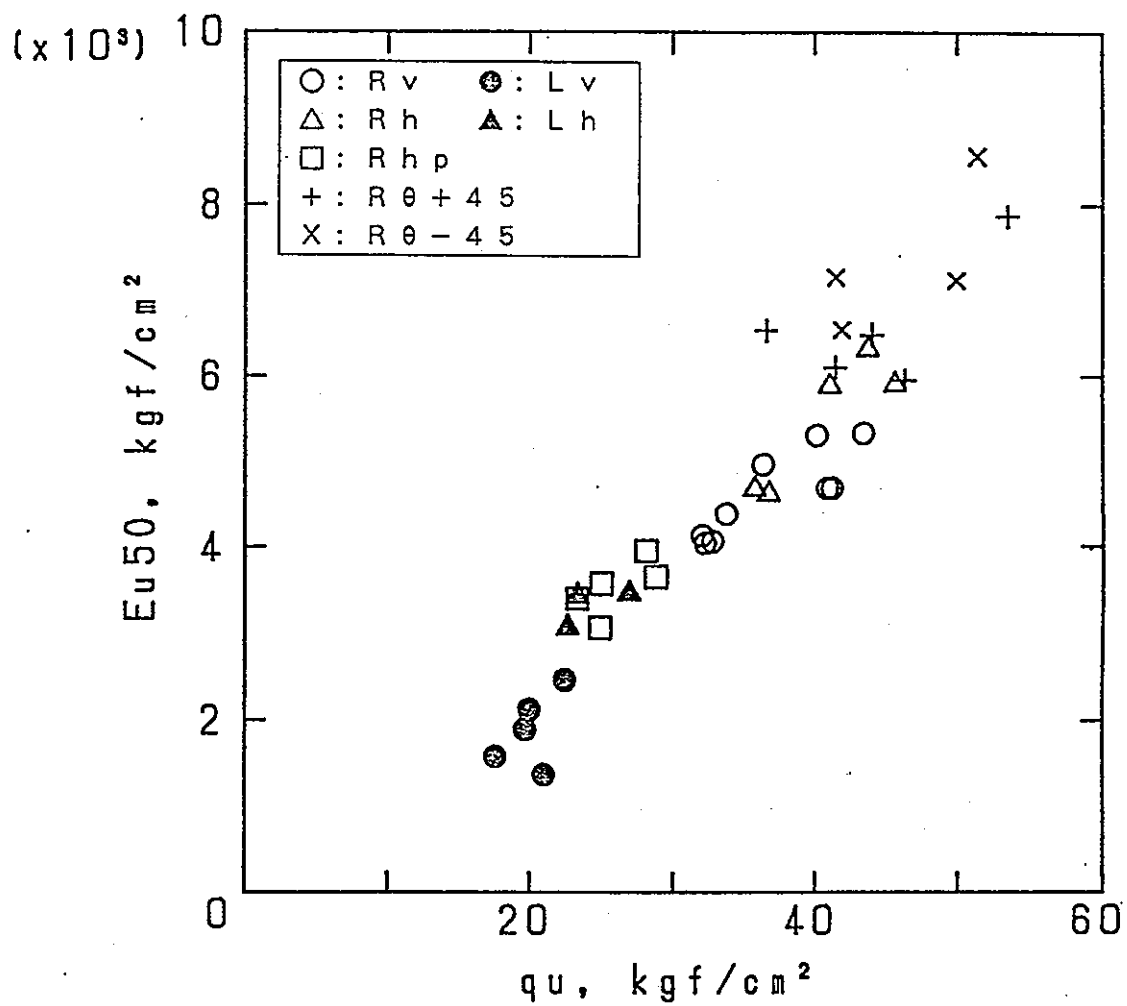
| 試料名   | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|-------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Lv    | 0.1                    | 20.2              | 2.083                       | 21.0                                  | 1.36              | 1370                           | 1340             | 350              |
|       | 0.1                    | 20.1              | 2.075                       | 22.5                                  | 0.93              | 2470                           | 1340             | 336              |
|       | 0.1                    | 20.2              | 2.079                       | 19.7                                  | 1.05              | 1900                           | 1190             | 367              |
|       | 0.1                    | 20.7              | 2.054                       | 17.6                                  | 1.14              | 1580                           | 744              | 328              |
|       | 0.1                    | 20.4              | 2.029                       | 20.4                                  | 0.93              | 2130                           | 1450             | 305              |
| 平 均 値 |                        | 20.3              | 2.064                       | 20.2                                  | 1.08              | 1890                           | 1210             | 339              |

(表 7 - 2 - 7) 一軸圧縮試験結果 (Lh)

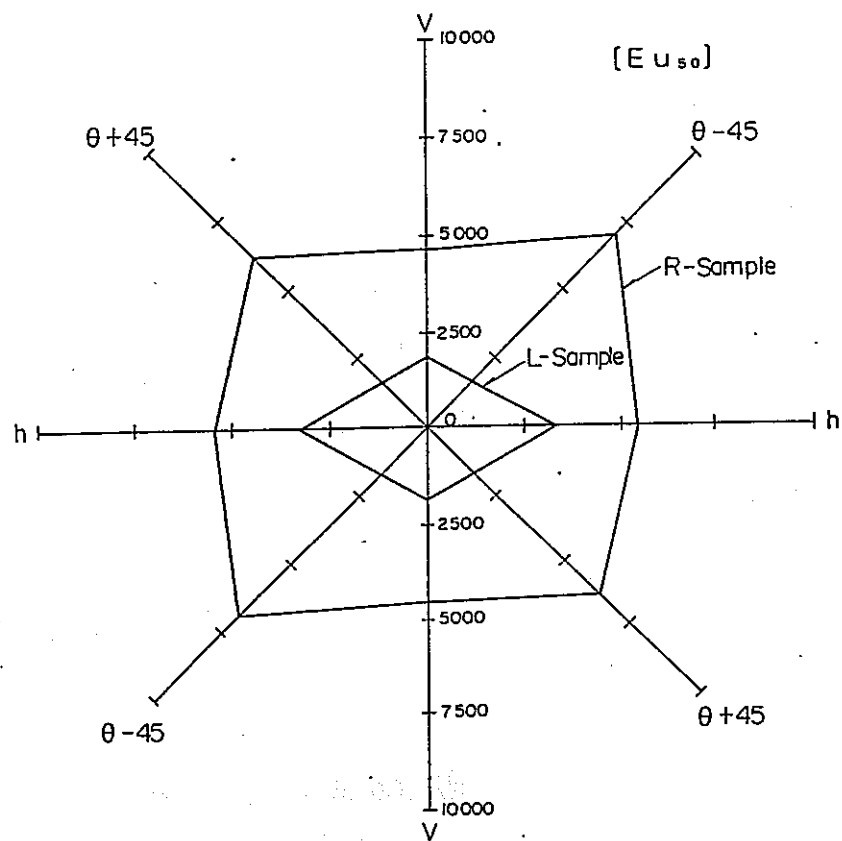
| 試料名   | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 自 然<br>含水比<br>(%) | 湿潤密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 一軸圧縮<br>強 度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>ひずみ<br>(%) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | P 波速度<br>(m/sec) | S 波速度<br>(m/sec) |
|-------|------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| Lh    | 0.1                    | 18.3              | 2.118                       | 22.7                                  | 0.76              | 3070                           | 1590             | 330              |
|       | 0.1                    | 19.4              | 2.089                       | 27.0                                  | 0.82              | 3450                           | 1660             | 330              |
|       | 0.1                    | 18.3              | 2.108                       | 23.4                                  | 0.70              | 3440                           | 1750             | 340              |
| 平 均 値 |                        | 18.7              | 2.105                       | 24.4                                  | 0.76              | 3320                           | 1670             | 330              |



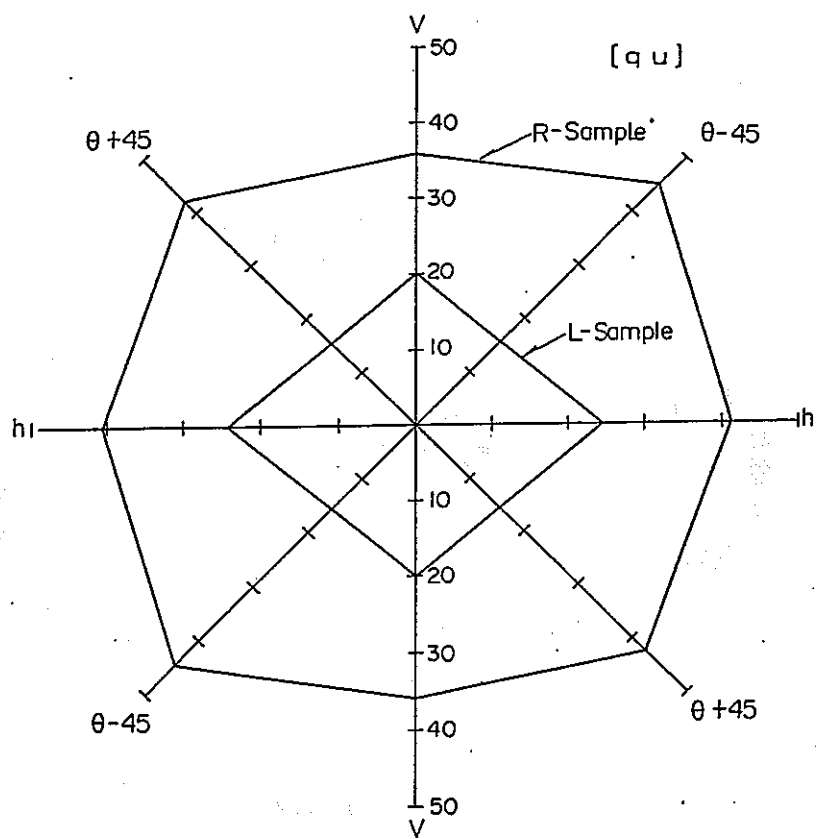
( 図 7 - 1 - 1 )



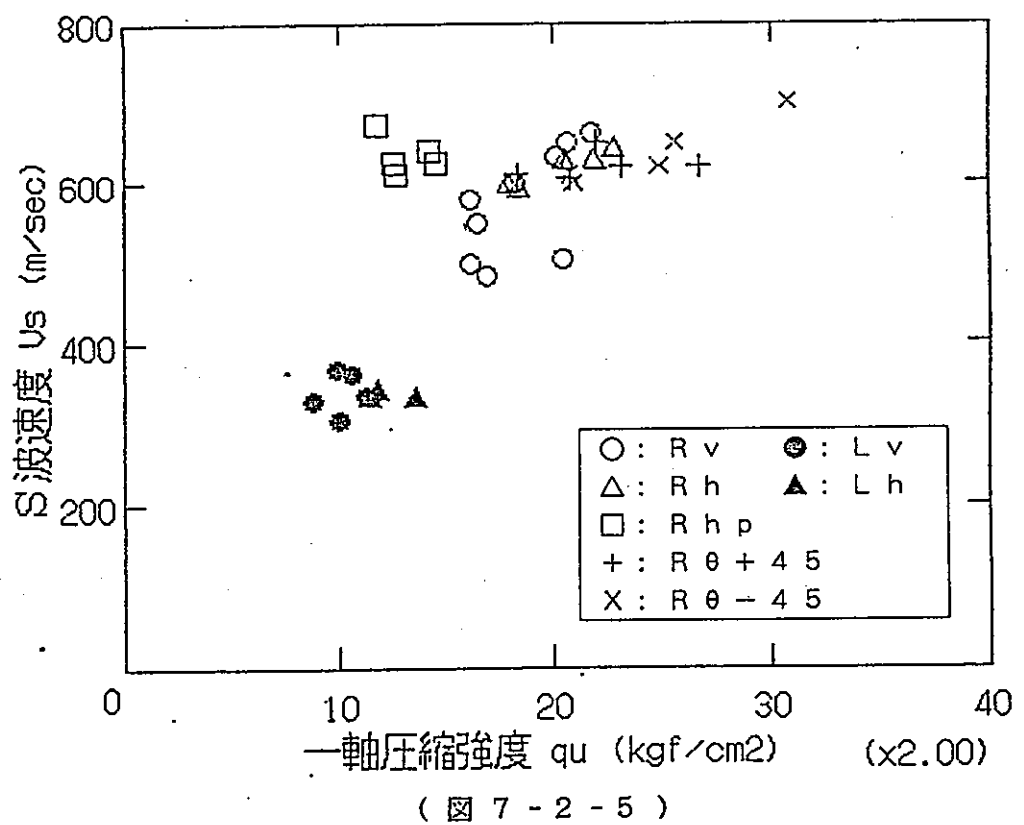
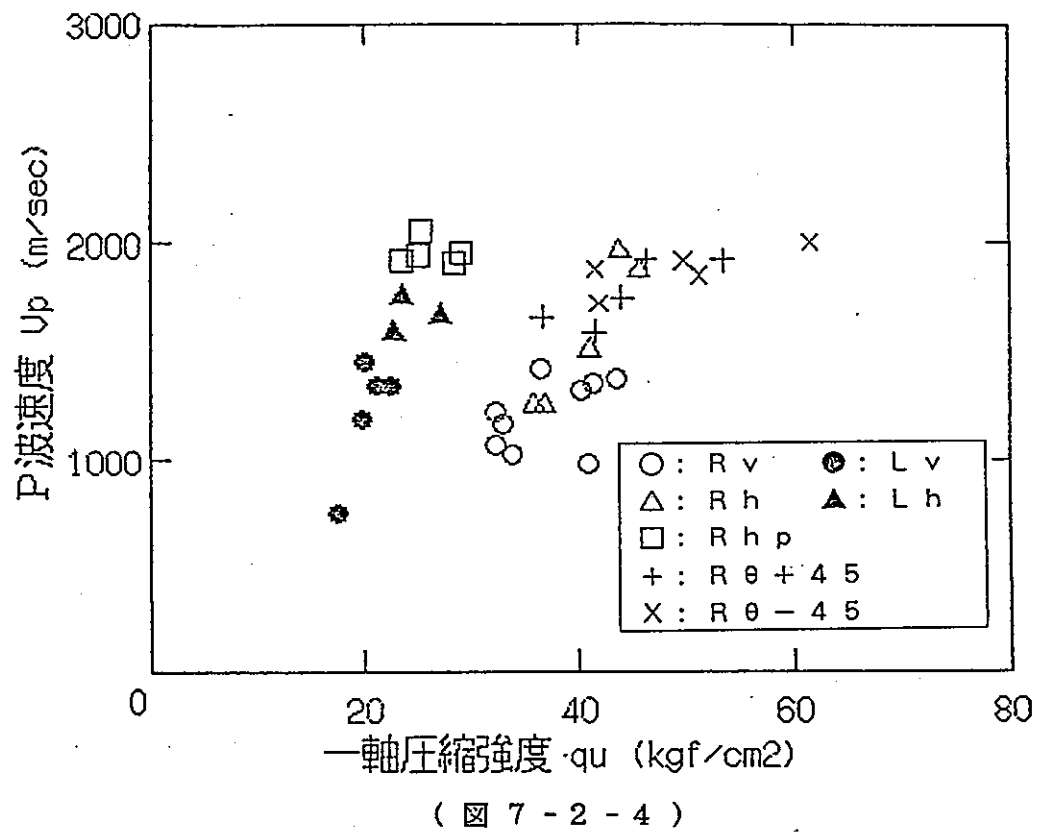
( 図 7 - 2 - 1 )



( 图 7 - 2 - 2 )



( 图 7 - 2 - 3 )



## 第 8 章

### 三軸圧縮時の 変形・強度特性

## 8. 三軸圧縮時の変形・強度特性

### 8.1 試験装置及び試験方法

試験は全て応用地質(株)札幌支社の小・中兼用型三軸圧縮試験機で行われた。写真8-1-1に試験機の全容を示す。

標準的な三軸試験機であるが、三軸セル側円筒及び体積ひずみ計に高圧用のオプションを使用した。

また、載荷装置1台に対し、三軸セル及び空気水系制御装置が2基備えられていて、Back Pressureに高圧が求められる時には、待機側装置の側圧用ブースターを稼働側のBack Pressure用に転用できた。

以下に、各試験装置の詳細を示す。

#### ① 三軸セル (写真8-1-2)

構造の概略を図8-1-1に示す。側円筒はステンレス鋼製で、耐圧 $50 \text{ kgf/cm}^2$ の物を使用する。載荷ピストンは径 $30 \text{ mm}$  S C M硬質クロームメッキ仕上げの物で、左右に備えた低・高圧用載荷ピストン補償用シリンダー(今回は高圧用を使用)と接続アームで連結されている。

供試体上下のフィルターには、ポーラスメタル(S U S製)を使用する。

供試体上下からの給・排水,拘束水給排水,側圧給水,及び間隙水圧系など水の出入りはすべて、セル底板に取り付けられた水路分岐ブロックに集められている。

#### ② 空気水系制御装置 (写真8-1-3)

全体の配管系路図を図8-1-2に示す。なお、記号に関する説明は表8-1-1に示す。Back Pressureが $10 \text{ kgf/cm}^2$ 以下の時は、片側装置のみで試験を行うことが出来るが、図には待機側装置の側圧用ブースターを稼働側に転用したときの図を示す。またこの他に、大型脱気水供給装置があり、拘束水,間隙水ともにこの装置によって供給される。

側圧の調整は空気圧制御によって行う。側圧槽内にゴム製のバルーンが入っており、空気で膨らんだバルーンに槽内の水が三軸セル内に押し出されることによって側圧が供給される。側圧槽はアクリル製の円筒で、耐圧は10 kscである。それより高い側圧が必要な時には、圧力水を一旦ブースターに導き、昇圧してからセルに送り込む。

Back Pressureも同様にして載荷するが、供試体からの吸排水量で体積ひずみを測るため、途中にペロフラム式の体積計を経由する点異なる。また不用時のために体積計のバイパス回路もある。

### ③ 垂直載荷装置

垂直載荷装置全容を図8-1-3に示す。載荷台中央のスクリージャッキが三軸セル底板を押し上げることによって行われる。最大容量は20 ton, 働長10 cmで、ひずみ速度は0.001 mm/minから3 mm/minまでの範囲で設定可能である。またせん断終了時間のタイマーが付いており、夜中でもせん断作業が出来る。

### ④ 測定器類

#### 1) 垂直荷重検出器 (ロードセル)

全試験に於て容量5000 Kgの物を使用する。

#### 2) 体積ひずみ測定器

ステンレス鋼製のシリンダー内にピストンが入っており、上下室をペロフラムで遮断している。供試体内部からの排水は、背圧管を通過して体積ひずみ計の上室に入る。

すると中のピストンが押し下げられ、下室から排水が起こり背圧槽の水圧と釣り合ったところで静止する。ピストンには細いロッドが付いており、これが検出部にピストンの動きを伝え、電気的な信号に変える。

またこの装置には配管上の工夫がなされており、ピストンが働長いっぱいに動いてしまった時には、コックの操作により簡単に反転計測が出来るようになっている。

### 3) 間隙水圧測定器

間隙水圧の測定は、配管図で分かるように供試体底部で行う。容量は500 psi, 1000 psiの2種類がある。

今回の実験では $u_0 = 5 \text{ kgf/cm}^2$ に統一したので、排水がスムーズに行われているかを確認するのに用いた。

### 4) その他の計測系

各計測器で計測されたデータは、空気水系供給装置のボード上のパネルに入力され、一括してロガーに送られる。ロガーでは、簡単にサンプリング間隔時間を設定、変更できる様になっている。

試験は以下の手順で行った。

#### (1) 実験ケースの選定

試験方法は圧密排水条件(CD試験)で行い、実験ケースを選定する。ひずみ速度の設定については、昨年までに同じ岩石でひずみ速度の違いによる間隙水圧の変化を実験して調べており、その結果ひずみ速度が $0.1\%/\text{min}$ では、実験の初期段階において $\Delta u$ の発生が無いことが確認されたため<sup>9)</sup>、また試料の透水係数からみるとこの値は高い値であるが<sup>9)</sup>、試験にかかる時間を考慮して全ての供試体についてこの条件を採用した。CD試験の実験ケースを表8-1-2, 3に示す。

#### (2) 試料の準備, セッティング

- ① 実験に用いる供試体は、一軸圧縮試験用供試体と全く同様の方法で、直径50 mm, 高さ100 mmの円柱状に成形した物を用いる。
- ② 成形した供試体を飽和させるために、供試体を脱気水を満たしたビーカー中に水没させて、試験直前の少なくとも1晩以上真空室中に放置し浸水させる。
- ③ 脱気した供試体を真空室から取り出して、重量を測定する。
- ④ ポーラスメタルとろ紙を水で飽和し、ペデスタルに

- 乗せ、その上に供試体を乗せる。（写真 8 - 1 - 4）
- ⑤ 供試体の側面に紙を巻く。（写真 8 - 1 - 5）
  - ⑥ 外側メンブレンの装着をスムーズにするため、内側に薄手のメンブレンを装着する。（写真 8 - 1 - 6）
  - ⑦ 外側メンブレンを装着し、試料キャップをかぶせメンブレンのたるみを伸ばした後、両端を輪ゴムで縛って供試体への拘束水の浸水を防ぐ。
  - ⑧ 供試体上部からの排水のためのチューブを試料キャップに装着し、球座を乗せる。（写真 8 - 1 - 7）
  - ⑨ 側円筒、上蓋をかぶせ、ナットで固定する。（写真 8 - 1 - 8）
  - ⑩ 載荷ピストンを、供試体（球座）に密着するまで押し下げる。

### （ 3 ） 三 軸 圧 縮 （ C D ） 試 験

以下に C D 試験の手順を示す。なお、装置に関する記号は表 8 - 1 - 1 を参照。

#### ① 拘束水の供給

大型脱気水供給装置より拘束水を供給する。三軸セルの内部が見えないため、上部のエア抜き弁から水が噴き出すのを確認して、まずエア抜き弁を閉める。この状態で補償用シリンダーのエア抜き弁を開けると、接続チューブが水で飽和されて水が噴き出す。それを確認した後、その弁を閉める。それから C<sub>0</sub> を閉め、さらに大型脱気水供給装置へのコックも閉め、拘束水供給口からの拘束水の漏れを幾重にも防ぐ。

#### ② 系の飽和

系全体からエアを抜いて水で飽和するために、供試体のセット後最低 1 時間の通水を行う。今コックが全て閉まっていると考えて、まず V<sub>3</sub> を開き V<sub>1</sub> を操作して 0.1 kgf/cm<sup>2</sup> の圧力を側圧槽のバルーンにかけ、C<sub>1</sub> を開いて圧力を供試体に加える。これは、通水時に供

試体とメンブレンやフィルターの間に水が貯るのを防ぐためである。次に  $C_6$  と  $C_7$  を開け、上部の脱気水槽の水を供試体下面を経て上面、そして真空槽へと導く。

真空槽には  $-30\text{ cmHg}$  程度の負の圧力がかかっており、これが脱気水を吸い上げる力となっている。なお、排水ブロックとホースの継目には空気が貯るため、時々ホースを揺さぶり排気をスムーズにする必要がある。

### ③ Back Pressureの載荷

$0.5\text{ kgf/cm}^2$  の Back Pressure とそれより  $0.2\text{ kgf/cm}^2$  程度大きい側圧を同時に供試体に載荷する。まず、 $C_6$ 、 $C_7$  を閉じて通水を止める。上下遮断弁  $C_8$  を開いて、Back Pressure が上下からかかるようにする。ここで、側圧が  $10\text{ kgf/cm}^2$  以下の時は  $V_1$ 、 $V_3$  を操作して側圧を  $V_4$ 、 $V_5$  を使って Back Pressure を発生させる。

$C_8$  を開いて体積計をバイパスし、 $C_2$ 、 $C_5$  を同時に開いて側圧、Back Pressure をかける。側圧が  $10\text{ kgf/cm}^2$  を越える時には、 $V_1$ 、 $V_2$  を操作して側圧を発生させる。後の操作は、側圧が  $10\text{ kgf/cm}^2$  以下の時と同様である。

### ④ 側圧を適用値まで昇圧する。

$C_4$ 、 $C_9$  を閉じて供試体を非排水状態にした後、小刻みに側圧を昇圧する。その際、各段階で  $\Delta u$  を求め、 $\Delta \sigma_v'$  で割って B 値を求める。試験に適用される  $\sigma_v'$  まで昇圧した後、体積ひずみ計のバイパス ( $C_6$  と  $C_9$ ) を閉じ、 $C_4$ 、 $C_9$  を開いて圧密を始める。同時にロガーを作動させ圧密用のタイムモードで圧密排水量を自動計測させる。

### ⑤ せん断

三軸セルを移動させ、スクリュージャッキ上に位置させる。載荷装置のハンドルを回してジャッキを上げ、載荷ピストン頭部が荷重枠の取り付けられたロードセルに軽く触れたら止める。ひずみ速度とタイマーをセ

ットする。またロガーにサンプリングするチャンネル  
( 1 ch:ロードセル, 3 ch:間隙水圧計, 5 ch:体積ひずみ  
計 ) を入力する。ロードセルの反応で、ピストンとの  
接触を確認した後せん断を開始する。

⑥ 試験に用いた供試体の回収

⑦ データの転送

ロガーから、コンピューターにデータを転送する。  
コンピューターは、YHP及びPC-9801を使用。

## 8.2 試験結果

### 8.2.1 応力～ひずみ～ダイレイタンスー関係と供試体破壊形態

表 8-2-1, 2 に三軸圧縮試験結果を、図 8-2-1～7 に各試料の応力～ひずみ、図 8-2-8～14 にひずみ～ダイレイタンスーの関係を示し、図 8-2-15～30 ではそれを応力別に整理している。

図 8-2-1～7 から、 $\sigma-\varepsilon$  関係はいずれの試料においても  $\sigma_3'$  が低いほど脆性破壊によるひずみ軟化傾向が著しく、それが大きくなるに従い延性破壊によるひずみ硬化型の変形挙動を示している。これは、岩石材料が示す典型的な傾向である。

また図 8-2-8～14 から、 $\varepsilon_v \sim \varepsilon$  の関係ではいずれの試料においてもダイレイタンスーは  $\sigma_3'$  が低いほどせん断初期段階において急激に収縮し、ピーク強度に達する直前に膨張に転じている。この時の体積膨張は、 $\sigma_3'$  が小さいほど著しくなる。ただし  $\sigma_3'$  が大きくなるに従い、体積収縮傾向が著しくなる。

このような変形挙動がひずみ軟化型で、正のダイレイタンスーを示すものは、その岩が過去に受けた最大主応力よりも小さな拘束圧で圧密、せん断されたことによるものであり、弾性領域にあると考えて良い。しかし、変形挙動がひずみ硬化で負のダイレイタンスーを示すのは、降伏拘束圧（降伏応力）、またはそれ以上の応力で圧密、せん断されたものであり、これは塑性領域と考えて良い。

この事について、図 8-2-15～30 を観察することによって、右岸部、左岸部での異方性の程度を知ることが出来る。

$R_v, R_{hp}$  は  $\sigma_3'$  が  $40 \text{ kgf/cm}^2$  ですでに延性的な破壊に転じているのに対し、 $R_{\theta+45}, R_{\theta-45}$  は  $50 \text{ kgf/cm}^2$  付近、 $R_h$  は  $70 \text{ kgf/cm}^2$  付近と最も大きい。

$L_v$  では  $\sigma_3'$  が  $90 \text{ kgf/cm}^2$  でも脆性的な破壊挙動を

示しており、応力履歴が大きいことを物語っている。

このような変形挙動の相違は、試験後の供試体破壊形態の相違にも現れている。表 8-2-3 より右岸試料に着目すると、 $R_v$  では  $\sigma_3'$  が  $25 \text{ kgf/cm}^2$  までは明瞭なせん断面が生じ、その面に沿って粒子間相互の摩擦力によって破壊が進行し、それ以上の  $\sigma_3'$  ではせん断面を伴わない塑性変形（ピア樽状）へと移行している。この移行点は、 $R_{hp}$  では  $15 \text{ kgf/cm}^2$  と最も小さく、 $R_{\theta+45}$ 、 $R_{\theta-45}$  は  $35 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $R_h$  は  $70 \text{ kgf/cm}^2$  と最も大きい。

一方左岸試料では、表 8-2-4 を観察すると  $L_h$  が  $35 \text{ kgf/cm}^2$  まで、 $L_v$  は  $90 \text{ kgf/cm}^2$  でもなおせん断面が生じており、最も大きな主応力を過去に受けていたことを物語っている。

この様に、変形挙動、ダイレイタンスー挙動、破壊形態の関係には、いずれの試料についても明瞭な異方性が認められ、その程度は右岸試料では  $R_h$ 、左岸試料では  $L_v$  が最も大きな移行点を持っていた。これは両者それぞれが、最も大きな応力を過去に受けたことを意味している。

なお参考データとして、ピーク時と残留時のモールの応力円を図 8-2-3 1～4 4 に示している。

ピーク強度、残留強度ともに  $\sigma_3'$  が高圧になるに従い曲線状を呈する傾向がある。これは先に述べた、応力状態の変化に伴って生じる岩石内部の破壊形態の違いであることが考えられる。

これはピーク強度において、Mohr-Coulomb型の破壊規準が適用しがたいことを示している。

## 8.2.2 変形特性 $E_s$

図 8-2-4 5 に、割線変形係数  $E_s$  と拘束圧  $\sigma_3'$  の関係を示し、図 8-2-4 6、4 7 には変形係数と試料採取方向について示している。

図 8 - 2 - 4 5 から、褶曲作用や応力履歴の影響を調べるため、右岸と左岸について比較してみる。

$\sigma_{3'}$  が  $40 \text{ kgf/cm}^2$  付近までは、一軸圧縮時の変形特性と同様に、左岸試料は右岸試料のどの試料よりも小さな値を示している。この結果は、供試体の内部構造を反映するとされる S 波速度の低下や透水係数の増大といったように、各性質と整合しているものである。これは左岸試料が褶曲作用を受けたことにより発生した大きなクラックを多数含んでいたことから、供試体内部にも肉眼では確認できない微小な不連続面が多数存在しているものと考えられる。この不連続面の存在が、低拘束圧での変形係数を低下させた原因であろう。但し、右岸部の  $R_v$  と  $R_{hp}$  はともに  $E_{s0}$  も増加するが、ある  $\sigma_{3'}$  を境に  $E_{s0}$  が低下する傾向が認められている。この  $\sigma_{3'}$  は  $R_v$  では約  $60 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $R_{hp}$  では  $40 \text{ kgf/cm}^2$  付近である。

これは過去に経験したことのない  $\sigma_{3'}$  でせん断したために、供試体の内部が粒子の再配列などにより構造が変化していくためと言われている。この両者の値は、後で述べる降伏拘束圧とほぼ一致している。

次に、図 8 - 2 - 4 6 , 4 7 より両者の異方性について着目する。

まず右岸試料は、褶曲作用受けたときの主方向であると思われる  $R_h$  が、いずれの拘束圧のもとでも最も大きな変形係数を示していることが分かる。これは、前述した  $\sigma \sim \varepsilon$ ,  $\varepsilon \sim \varepsilon_u$ , 破壊形態での移行点との関係と一致している。

いっぽう、左岸試料でも異方性は認められるが、右岸部とは逆に水平方向よりも鉛直方向の方が大きな値であることが分かる。これは、鉛直方向の応力履歴の方が大きいことを意味している。すなわち、左岸部の地層は現在直立しているため、現在の鉛直方向は過去においては水平方向であったと言えよう。その水平方向であった時

代に受けた応力履歴が、現在もなお残っているものと考えられる。

### 8.2.3 ピーク強度 ( $\sigma_3 - \sigma_1$ )<sub>p</sub>

図 8-2-48 にピーク強度と拘束圧の関係、図 8-2-49, 50 にはピーク強度と試料採取方向について示している。褶曲作用による影響を観察するため、右岸試料と左岸試料を比較してみる。

図 8-2-48 より、比較的拘束圧が低い状態では左岸試料は右岸試料と同等またはそれ以上のピーク強度を発揮している。しかし、大きな  $\sigma_3$ ' のもとでは両者の関係は逆転している。この関係は、前述した剛性特性の関係と一致している。

この原因は、前述の剛性特性と同様に、左岸試料は拘束圧が低いときは不連続面の存在が大きく影響を及ぼし、拘束圧が高くなるに従い不連続面の影響が極めて少なくなり、過去に受けた応力履歴を再現するためと考えられる。

図 8-2-49, 50 より、右岸試料、左岸試料の異方性について観察する。

右岸試料は  $\sigma_3$ ' が比較的小さな範囲では剛性特性と同様に、褶曲作用の主方向である R h が他を卓越しているが、 $\sigma_3$ ' が高くなると異方性は顕著でなくなる傾向がある。この事は、後で述べる降伏拘束圧と密接な関係がある。すなわち降伏拘束圧を越えると、岩の内部構造は変化して塑性領域に遷移し、降伏拘束圧以上の拘束圧のもとでは、皆同様の応力履歴を受けた事になる事に起因するものであろう。

また左岸部でも、広い応力範囲において顕著な異方性が認められ、剛性特性と同様に水平方向よりも鉛直方向で強い強度を発揮している。この理由も剛性特性と同様に、過去の地質状態を導入することで説明できる。

#### 8.2.4 残留強度特性 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>r</sub>

図 8-2-5 1 に残留強度と拘束圧の関係を示し、図 8-2-5 2, 5 3 に残留強度と試料採取方向について示している。

図 8-2-5 1 より右岸試料と左岸試料を比較すると、 $\sigma_3'$  が 15 kgf/cm<sup>2</sup> 付近までは両者はほぼ同じ値を示すが、拘束圧が高くなるに従い左岸試料は右岸試料よりも残留強度が卓越するようになる。なおこの関係は、 $\sigma_3'$  が高くなるほど顕著である。この事も、褶曲作用によって受けた応力履歴の相違に起因しているものと思われる。

また図 8-2-5 2, 5 3 で両者の異方性に着目しても、右岸部、左岸部ともに顕著な異方性は認められない。

岩が残留強度を発揮している状態では、セメンテーションがすでに破壊されていると考えられる。従って両者は、セメンテーションが破壊された（水平力の下で形成された構造）後では、異方性が消滅するのであろう。

#### 8.2.5 降伏拘束圧 $\sigma_y$

軟岩の場合には、先に説明したように  $\sigma \sim \epsilon$  関係において  $\sigma_3'$  が高くなるに従い変形特性はひずみ軟化を伴う脆性的なものからひずみ硬化特性が見られる延性的なものへと変化するが、本研究ではその境界の拘束圧を降伏拘束圧  $\sigma_y$  として定義している<sup>3)</sup>。

図 8-2-5 4 ~ 6 0 は、各試料のピーク強度と残留強度の拘束圧との関係を示したものであり、ひずみ特性が軟化から硬化へ転ずる時、すなわちピーク強度と残留強度が一致するときの拘束圧が降伏拘束圧で、図のように決定できる。

図 8-2-6 1 は、上記の様にして決定した降伏拘束圧と試料採取方向の関係を示したものである。これを見ても分かるように、左岸試料の  $\sigma_y$  は右岸試料よりもかなり大きいことが分かる。L v 試料では、試験を行った拘束

圧の範囲よりも $\sigma_y$ が大きかったので外挿して推定している。

この結果は $E_{sa}$ や $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ の関係でも見られたように、左岸試料の方が過去に大きな圧力を受けていたことの証拠であり、物理的性質において見られた小さな間隙比と大きな乾燥密度はこの事によって証明できる。

降伏拘束圧を、右岸試料、左岸試料の異方性で着目すると、右岸試料はダム軸水平方向が最も大きく、左岸試料では鉛直方向で最も大きい。従って、試料採取地付近一帯の地盤は、過去に長期間にわたり大きな水平力を受けていたことになり、これが褶曲構造を形成した原動力となったことは間違いないであろう。

左岸試料は、褶曲によって地盤が直立しているため、過去の水平方向であった現在の鉛直方向に卓越した形で応力履歴が残されていると言えよう。

従って両者の異方性は、褶曲構造が出来る以前の応力状態が現在もなお残っていると言えよう。

### 8.3 考察

以上で述べた三軸圧縮特性から、褶曲作用による影響と両者の異方性についてまとめてみる。

#### (1) 褶曲作用による影響

第2章で述べたように、試料採取地は右岸部から左岸部にかけて著しい褶曲作用を受け、左岸部の地層は現在直立している。

左岸試料は、褶曲作用によって発生したと思われる大きなクラックが試料採取時に多数確認されている。また、岩石学的にはその大きなクラックに対しおおむね90°の方向を持って、微小なクラックが存在すると言われている。このことから考えると、左岸試料には大きなクラック以外にも、肉眼では確認出来ない微小な不連続面が多数存在していたものと思われる。それが低拘束圧状態においてせん断時のひずみを増加させ、剛性や強度を低下させている。ただし、高い拘束圧を加えることによって存在しうる不連続面が閉塞し、より安定で剛な構造を再現し、左岸試料は右岸試料よりも大きな剛性、強度を発揮している。この事は、降伏拘束圧にもよく現れている。

#### (2) 異方性について

岩石や土が、以前に地盤中で受けた応力履歴の影響は、その後の変形、破壊挙動に現れてくる。本軟岩の場合も、地盤内で受けたと思われる応力状態が、褶曲構造を形成する原動力となった大きな水平力を伴う異方的なものであったため、三軸圧縮特性においても顕著な異方性が確認されている。

右岸試料では、剛性、強度ともに褶曲作用の主方向と思われるR<sub>h</sub>が常に他を卓越していた。これは降伏拘束圧にもよく現れている。ただしピーク強度では、降伏拘束圧を越えると内部構造の変化がそれぞれ異なるために、

異方性は低減している。

一方、左岸試料でも右岸と同様に異方性は認められるが、右岸部とは逆に水平方向よりも鉛直方向で剛性、強度が上回っている。この特性も、 $\sigma_y$ を見るとよく分かる。

この事から先に述べたように、左岸部の地層は現在直立しているが、現在の鉛直方向は過去には水平方向であったと推測できる。従って $L_v$ は、水平方向であった時代に受けた応力履歴の影響が、現在もなお残っていると言えよう。

この事から考えると、右岸試料と左岸試料の異方性は統一的に説明できる。

空気水系供給装置 各部名称 (表 8-1-1)

|      |           |                      |
|------|-----------|----------------------|
| 1.   | 側圧計 (低圧用) | 1 0 ksc              |
| 2.   | 側圧計 (高圧用) | 5 0 ksc              |
| 3.   | 側圧用増圧器    | 7 : 1, 5 0 0 ml / ST |
| 4.   | 側圧槽       | 4 l, バルーン式           |
| 5.   | 背圧計 (低圧用) | 1 0 ksc              |
| 6.   | 背圧槽       | 4 l, バルーン式           |
| 7.   | 脱気水槽      | 5 l                  |
| 8.   | 体積ひずみ測定器  | V B C 型 低背圧時使用       |
| 9.   | 真空槽       | 5 l                  |
| 1 0. | 真空計       | 7 6 0 mmHg           |
| 1 1. | 三軸室       | 詳細別図                 |
| 1 2. | 供試体       |                      |
| 1 3. | 体積ひずみ測定器  | V B C 型 高背圧時使用       |
| 1 4. | 背圧計 (高圧用) | 5 0 ksc              |
| 1 5. | 背圧用増圧器    | 7 : 1, 5 0 0 ml / ST |

(表 8-1-2) Consolidated-Drained Test

| 試料名                                                          | $\sigma_3'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )          | $u_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_a$ (%/min) |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| R v<br>-1<br>-2<br>-3<br>-4<br>-5<br>-6<br>-7<br>-8          | 5<br>15<br>25<br>35<br>40<br>50<br>70<br>90 | 5                            | 0.1                     |
| R h<br>-1<br>-2<br>-3<br>-4<br>-5<br>-6<br>-7<br>-8          | 5<br>15<br>25<br>35<br>40<br>50<br>70<br>90 | 5                            | 0.1                     |
| R h p<br>-1<br>-2<br>-3<br>-4<br>-5<br>-6<br>-7<br>-8        | 5<br>15<br>25<br>35<br>40<br>50<br>70<br>90 | 5                            | 0.1                     |
| R $\theta + 45$ -1<br>-2<br>-3<br>-4<br>-5<br>-6<br>-7<br>-8 | 5<br>15<br>25<br>35<br>40<br>50<br>70<br>90 | 5                            | 0.1                     |
| R $\theta - 45$ -1<br>-2<br>-3<br>-4<br>-5<br>-6<br>-7<br>-8 | 5<br>15<br>25<br>35<br>40<br>50<br>70<br>90 | 5                            | 0.1                     |

(表8-1-3) Consolidated-Drained Test

| 試料名 |    | $\sigma_3'$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $u_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $\varepsilon_a$ (%/min) |
|-----|----|------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| L v | -1 | 5                                  | 5                            | 0.1                     |
|     | -2 | 15                                 |                              |                         |
|     | -3 | 25                                 |                              |                         |
|     | -4 | 35                                 |                              |                         |
|     | -5 | 40                                 |                              |                         |
|     | -6 | 50                                 |                              |                         |
|     | -7 | 70                                 |                              |                         |
|     | -8 | 90                                 |                              |                         |
| L h | -1 | 5                                  | 5                            | 0.1                     |
|     | -2 | 15                                 |                              |                         |
|     | -3 | 25                                 |                              |                         |
|     | -4 | 35                                 |                              |                         |
|     | -5 | 40                                 |                              |                         |
|     | -6 | 50                                 |                              |                         |
|     | -7 | 70                                 |                              |                         |
|     | -8 | 90                                 |                              |                         |

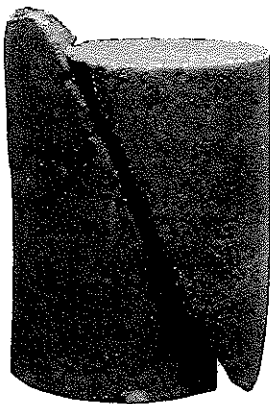
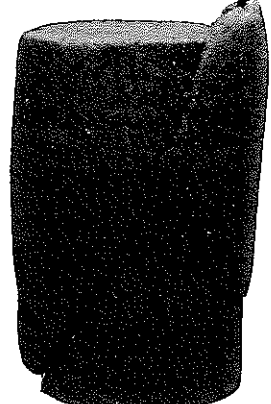
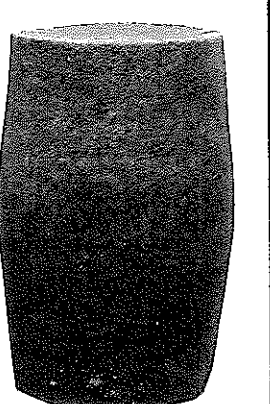
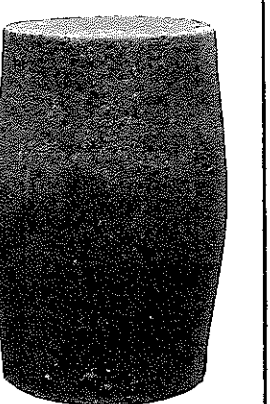
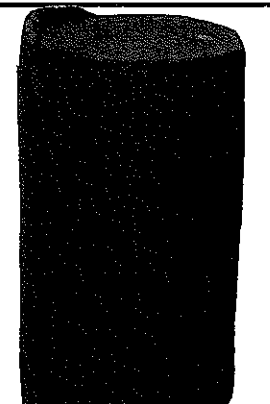
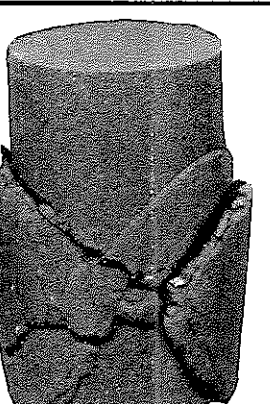
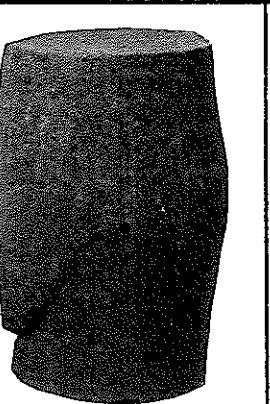
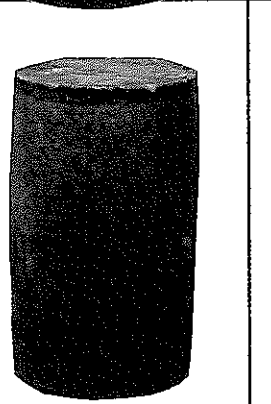
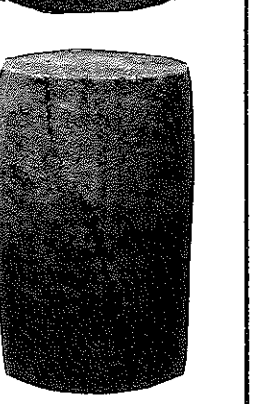
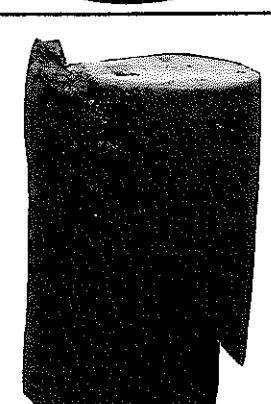
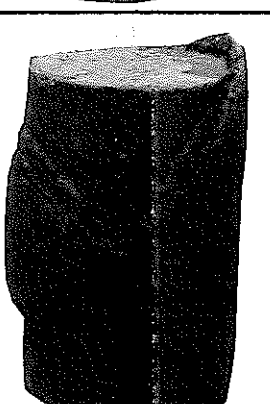
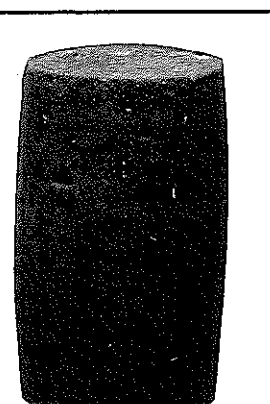
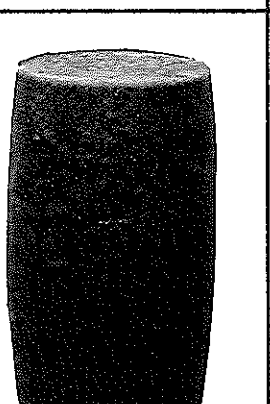
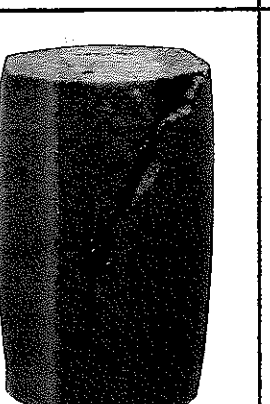
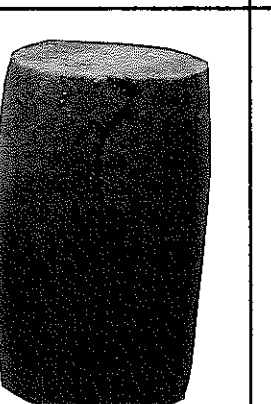
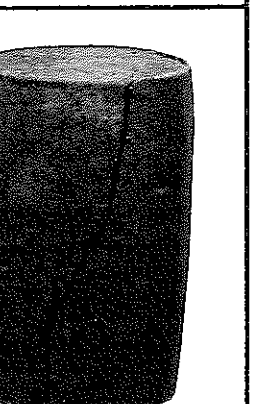
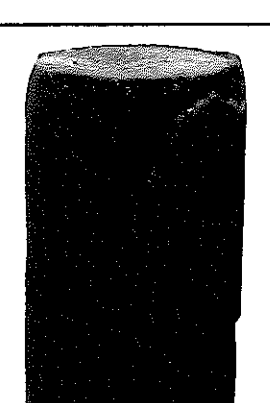
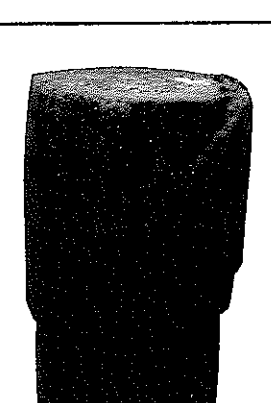
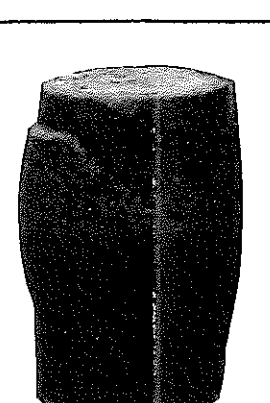
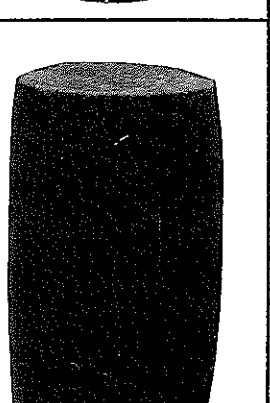
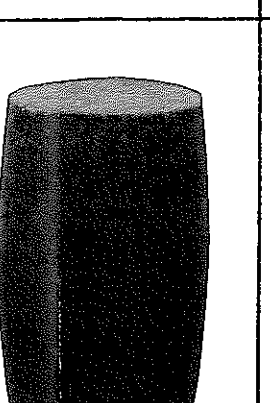
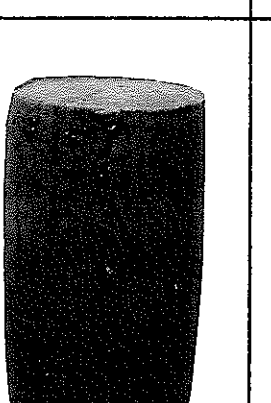
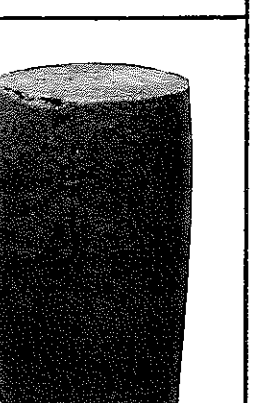
(表8-2-1)

| 試料名      | 有効側圧<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 背 圧<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 破 壊 時<br>主応力差<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 残 留 時<br>主応力差<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊 時<br>軸ひずみ<br>(%) | 残 留 時<br>軸ひずみ<br>(%) |
|----------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| R v      | 5                              | 5                             | 0.1                    | 49.19                                   | 21.26                                   | 5550                           | 1.40                 | 0.16                 |
|          | 15                             | 5                             | 0.1                    | 78.58                                   | 52.50                                   | 7580                           | 1.60                 | 0.43                 |
|          | 25                             | 5                             | 0.1                    | 85.14                                   | 74.64                                   | 8880                           | 1.70                 | 0.51                 |
|          | 35                             | 5                             | 0.1                    | 90.29                                   | 87.12                                   | 8520                           | 2.0                  | 0.03                 |
|          | 40                             | 5                             | 0.1                    | 106.0                                   | 106.0                                   | 9220                           | 15.0                 | 0.87                 |
|          | 50                             | 5                             | 0.1                    | 117.0                                   | 117.0                                   | 10500                          | 15.0                 | 5.72                 |
|          | 70                             | 5                             | 0.1                    | 152.4                                   | 152.4                                   | 9900                           | 15.0                 | 7.22                 |
|          | 90                             | 5                             | 0.1                    | 177.9                                   | 177.9                                   | 5080                           | 15.0                 | 8.81                 |
| R h      | 5                              | 5                             | 0.1                    | 70.86                                   | 20.46                                   | 8820                           | 0.85                 | 0.30                 |
|          | 15                             | 5                             | 0.1                    | 99.86                                   | 59.33                                   | 9800                           | 1.25                 | 0.50                 |
|          | 25                             | 5                             | 0.1                    | 109.27                                  | 80.99                                   | 12300                          | 1.29                 | 0.48                 |
|          | 35                             | 5                             | 0.1                    | 123.55                                  | 100.61                                  | 13000                          | 1.24                 | 0.55                 |
|          | 40                             | 5                             | 0.1                    | 128.71                                  | 106.04                                  | 12840                          | 1.39                 | 0.62                 |
|          | 50                             | 5                             | 0.1                    | 114.8                                   | 114.8                                   | 12500                          | 1.58                 | 0.74                 |
|          | 70                             | 5                             | 0.1                    | 142.4                                   | 142.4                                   | 14000                          | 15.16                | 6.48                 |
|          | 90                             | 5                             | 0.1                    | 167.9                                   | 167.9                                   | 15200                          | 15.11                | 7.76                 |
| R h p    | 5                              | 5                             | 0.1                    | 51.64                                   | 27.10                                   | 6120                           | 1.10                 | 0.48                 |
|          | 15                             | 5                             | 0.1                    | 58.37                                   | 56.09                                   | 7690                           | 1.42                 | 0.46                 |
|          | 25                             | 5                             | 0.1                    | 75.78                                   | 75.78                                   | 9120                           | 13.6                 | 1.95                 |
|          | 35                             | 5                             | 0.1                    | 93.80                                   | 93.80                                   | 9200                           | 15.0                 | 2.37                 |
|          | 40                             | 5                             | 0.1                    | 105.51                                  | 105.51                                  | 9260                           | 15.0                 | 4.78                 |
|          | 50                             | 5                             | 0.1                    | 120.1                                   | 120.1                                   | 9000                           | 15.0                 | 6.14                 |
|          | 70                             | 5                             | 0.1                    | 147.9                                   | 147.9                                   | 4090                           | 15.0                 | 7.65                 |
|          | 90                             | 5                             | 0.1                    | 168.5                                   | 168.5                                   | 2310                           | 15.0                 | 8.59                 |
| R θ + 45 | 5                              | 5                             | 0.1                    | 60.97                                   | 26.5                                    | 7070                           | 1.20                 | 0.40                 |
|          | 15                             | 5                             | 0.1                    | 87.52                                   | 32.0                                    | 9050                           | 1.40                 | 0.30                 |
|          | 25                             | 5                             | 0.1                    | 92.99                                   | 77.0                                    | 10100                          | 1.20                 | 0.50                 |
|          | 35                             | 5                             | 0.1                    | 90.46                                   | 88.0                                    | 8220                           | 15.0                 | 2.60                 |
|          | 40                             | 5                             | 0.1                    | 105.66                                  | 102.9                                   | 11800                          | 1.60                 | 0.50                 |
|          | 50                             | 5                             | 0.1                    | 119.6                                   | 119.6                                   | 14700                          | 15.07                | 4.86                 |
|          | 70                             | 5                             | 0.1                    | 138.4                                   | 138.4                                   | 14900                          | 15.06                | 5.78                 |
|          | 90                             | 5                             | 0.1                    | 154.0                                   | 154.0                                   | 14600                          | 15.12                | 6.73                 |
| R θ - 45 | 5                              | 5                             | 0.1                    | 67.09                                   | 24.5                                    | 8030                           | 1.10                 | 0.30                 |
|          | 15                             | 5                             | 0.1                    | 87.78                                   | 56.0                                    | 8700                           | 1.30                 | 0.30                 |
|          | 25                             | 5                             | 0.1                    | 103.52                                  | 76.2                                    | 11100                          | 1.30                 | 0.50                 |
|          | 35                             | 5                             | 0.1                    | 114.37                                  | 96.5                                    | 12200                          | 1.50                 | 0.60                 |
|          | 40                             | 5                             | 0.1                    | 114.31                                  | 104.1                                   | 12700                          | 1.30                 | 0.60                 |
|          | 50                             | 5                             | 0.1                    | 124.3                                   | 118.0                                   | 15000                          | 1.41                 | 0.66                 |
|          | 70                             | 5                             | 0.1                    | 144.5                                   | 144.5                                   | 16000                          | 15.16                | 6.59                 |
|          | 90                             | 5                             | 0.1                    | 167.8                                   | 167.8                                   | 15800                          | 15.08                | 7.51                 |

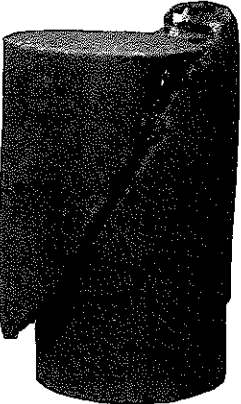
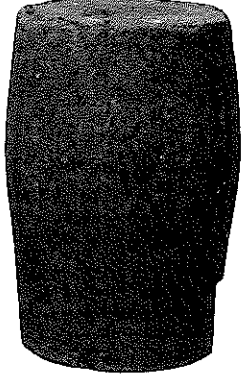
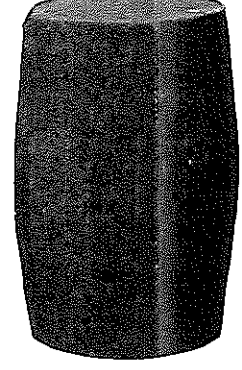
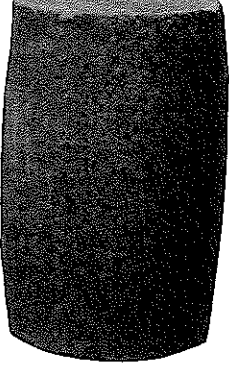
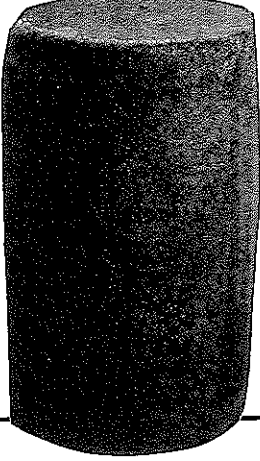
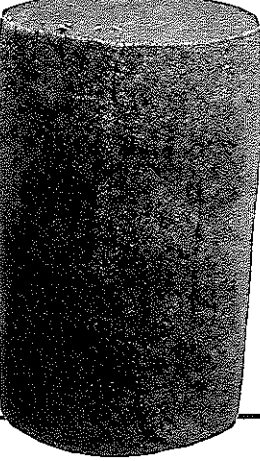
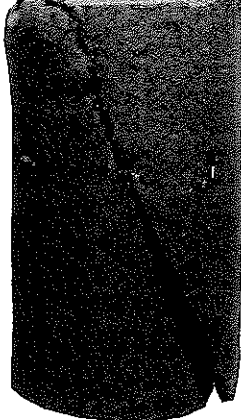
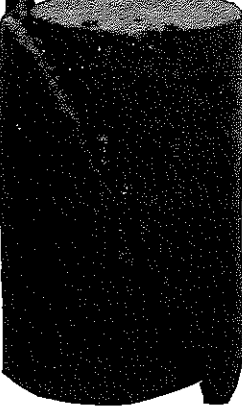
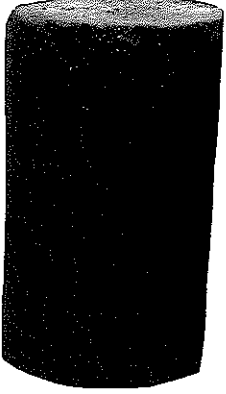
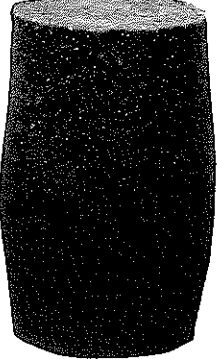
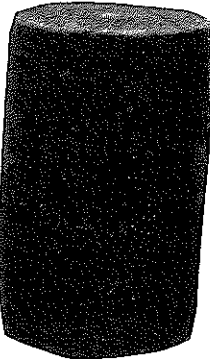
(表8-2-2)

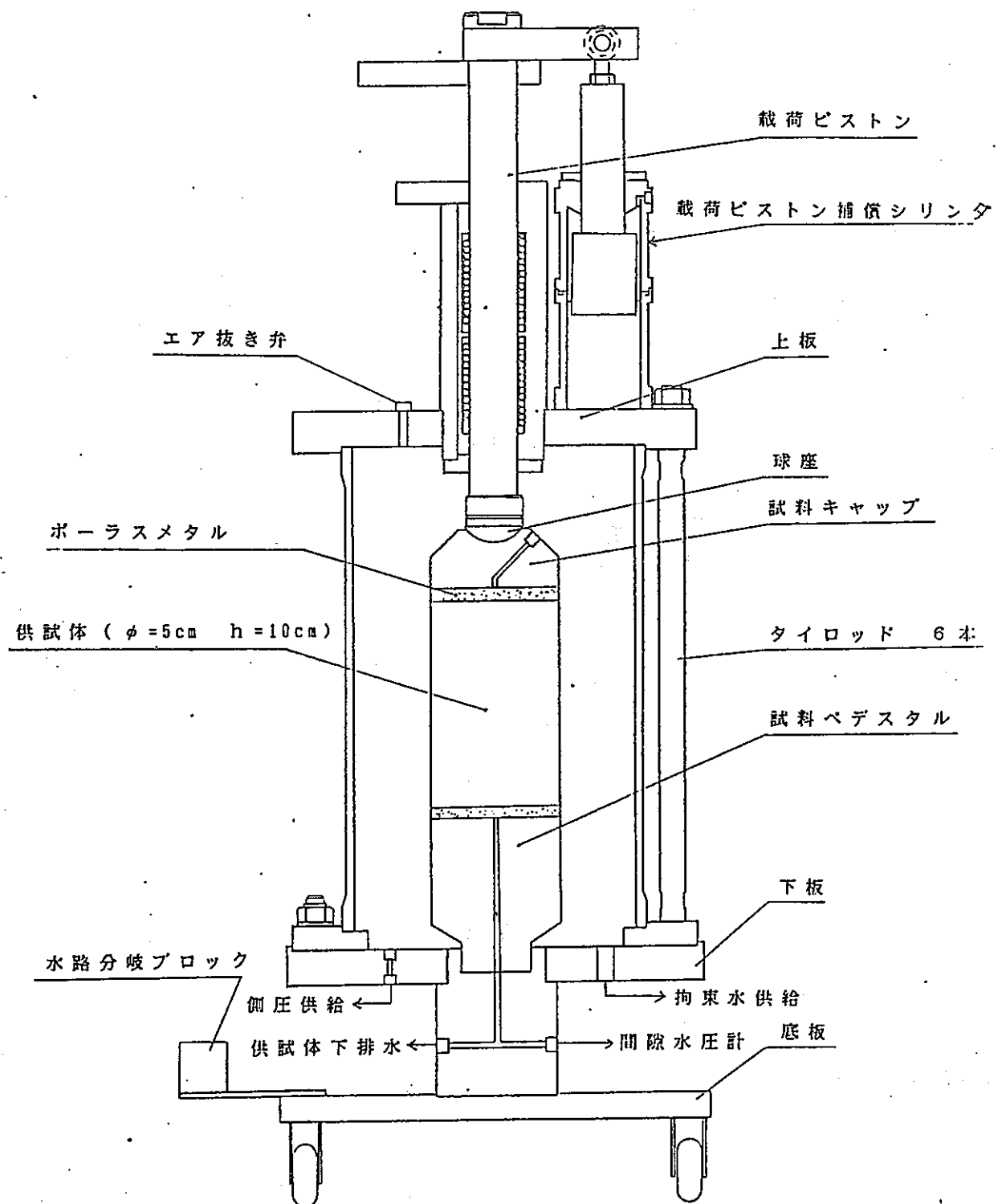
| 試料名 | 有効側圧<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 背 圧<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 軸ひずみ<br>速 度<br>(%/min) | 破 壊 時<br>主応力差<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 残 留 時<br>主応力差<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 変形係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊 時<br>軸ひずみ<br>(%) | 残 留 時<br>軸ひずみ<br>(%) |
|-----|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| L v | 5                              | 5                             | 0.1                    | 56.57                                   | 25.38                                   | 4350                           | 1.43                 | 0.16                 |
|     | 15                             | 5                             | 0.1                    | 92.51                                   | 52.90                                   | 6670                           | 1.82                 | 0.21                 |
|     | 25                             | 5                             | 0.1                    | 120.82                                  | 96.25                                   | 8450                           | 1.74                 | 0.49                 |
|     | 35                             | 5                             | 0.1                    | 126.71                                  | 105.39                                  | 9430                           | 1.71                 | 0.45                 |
|     | 40                             | 5                             | 0.1                    | 131.76                                  | 113.36                                  | 9800                           | 1.75                 | 0.56                 |
|     | 50                             | 5                             | 0.1                    | 201.20                                  | 148.00                                  | 16200                          | 1.34                 | 0.42                 |
|     | 70                             | 5                             | 0.1                    | 196.90                                  | 169.00                                  | 17400                          | 1.63                 | 0.54                 |
|     | 90                             | 5                             | 0.1                    | 226.10                                  | 194.00                                  | 18500                          | 1.64                 | 0.62                 |
| L h | 5                              | 5                             | 0.1                    | 45.06                                   | 21.00                                   | 3760                           | 1.70                 | 0.00                 |
|     | 15                             | 5                             | 0.1                    | 71.09                                   | 59.50                                   | 5050                           | 2.20                 | 0.20                 |
|     | 25                             | 5                             | 0.1                    | 99.09                                   | 86.00                                   | 9100                           | 1.90                 | 0.40                 |
|     | 35                             | 5                             | 0.1                    | 106.46                                  | 103.00                                  | 8190                           | 2.40                 | 0.60                 |
|     | 40                             | 5                             | 0.1                    | 138.18                                  | 123.00                                  | 13000                          | 2.10                 | 0.60                 |
|     | 50                             | 5                             | 0.1                    | 136.30                                  | 136.30                                  | 12700                          | 15.13                | 2.85                 |
|     | 70                             | 5                             | 0.1                    | 164.30                                  | 164.30                                  | 11600                          | 15.07                | 5.44                 |
|     | 90                             | 5                             | 0.1                    | 199.70                                  | 199.70                                  | 17700                          | 15.01                | 6.61                 |

(表8-2-3)  $U_b = \text{一定} (5.0 \text{ kgf/cm}^2)$ 、 $\sigma_3' = \text{変化}$  による破壊形態の異方性

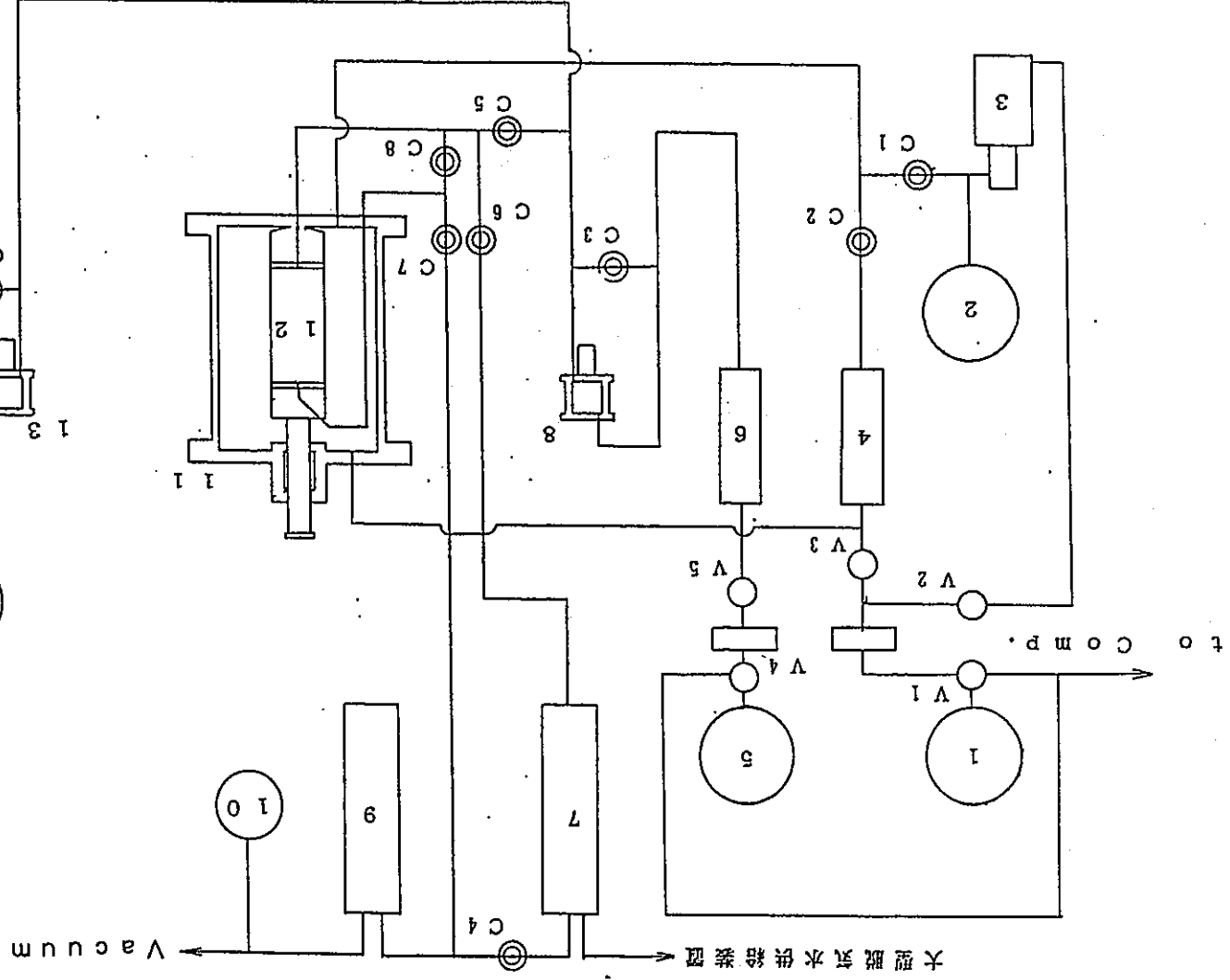
| $\sigma_3'$<br>試料名 | $\sigma_3' = 5$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                           | $\sigma_3' = 15$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                           | $\sigma_3' = 25$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 35$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 40$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 50$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 70$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 90$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| R v                |    |    |    |    |    |    |    |    |
| R h                |   |   |   |   |   |   |   |   |
| R $\theta + 45$    |  |  |  |  |  |  |  |  |
| R $\theta - 45$    |  |  |  |  |  |  |  |  |

(表8-2-4)  $U b = \text{一定} (5.0 \text{ kgf/cm}^2)$ 、 $\sigma_3' = \text{変化}$  による破壊形態の異方性

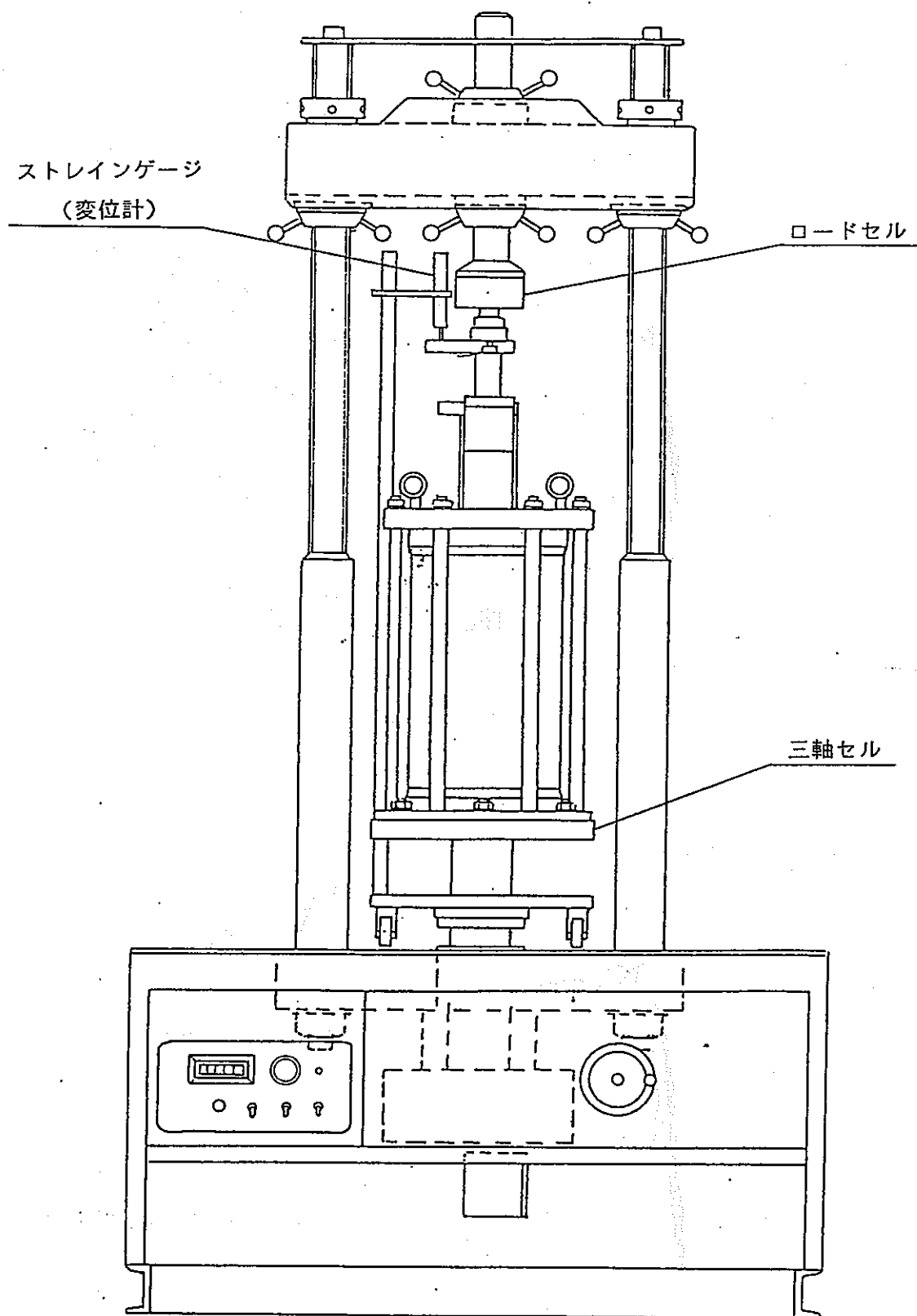
| $\sigma_3'$<br>試料名 | $\sigma_3' = 5$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                           | $\sigma_3' = 15$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                           | $\sigma_3' = 25$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 35$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 40$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 50$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 70$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            | $\sigma_3' = 90$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> )                                            |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| R h p              |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                       |
| L v                |  |  |  |  |  |  |  |  |
| L h                |  |  |  |  |  |  |  |  |



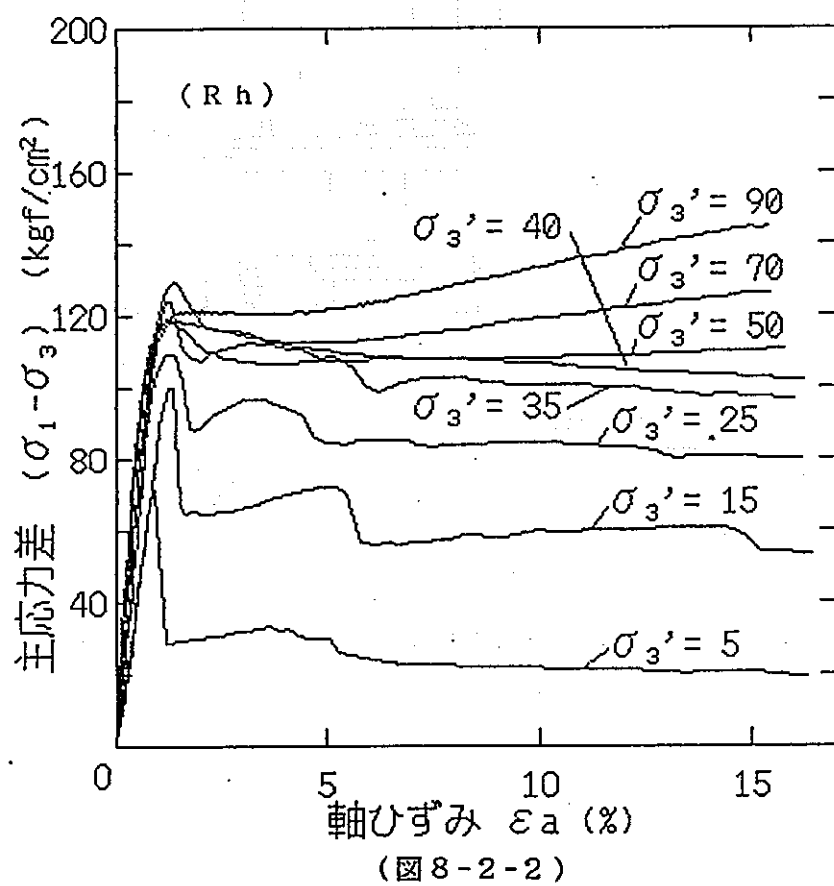
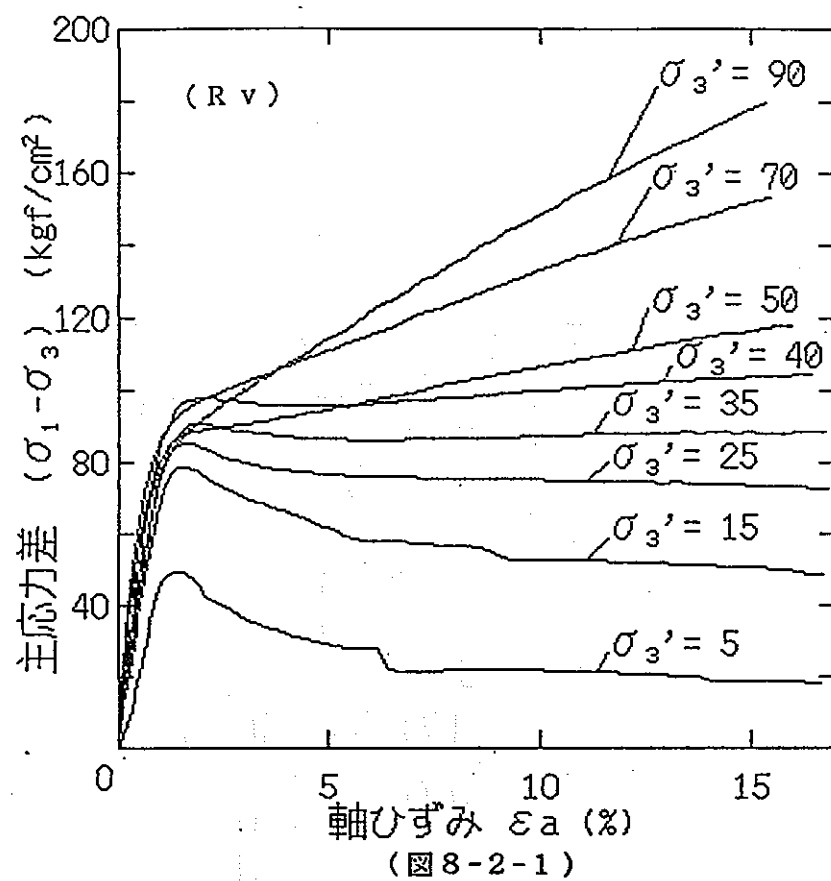
( 図 8 - 1 - 1 )

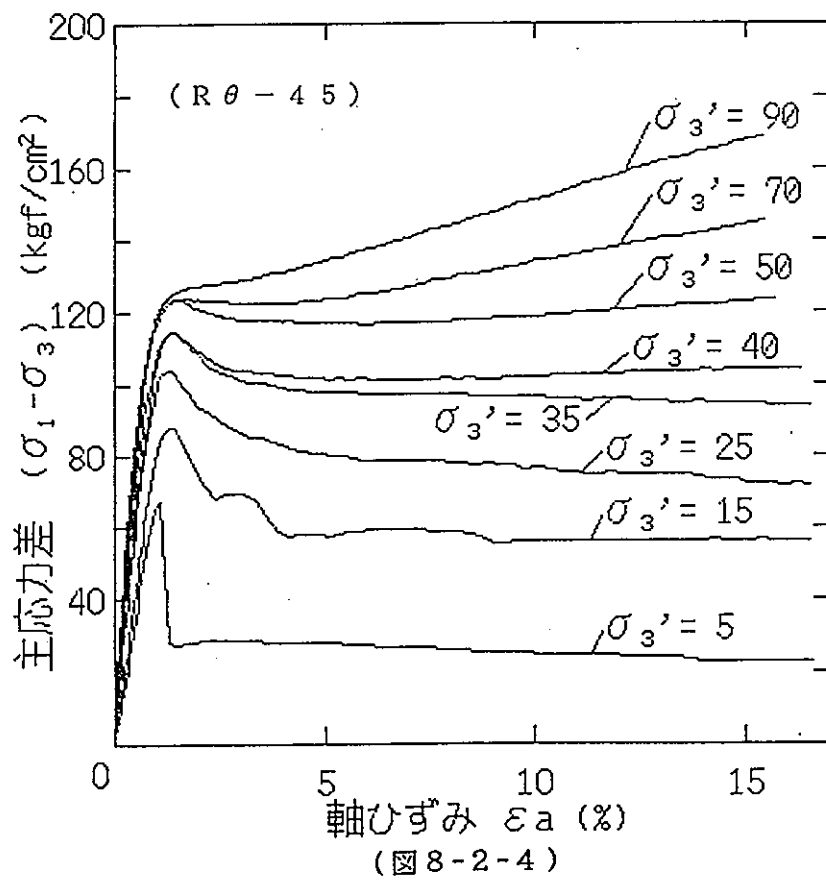
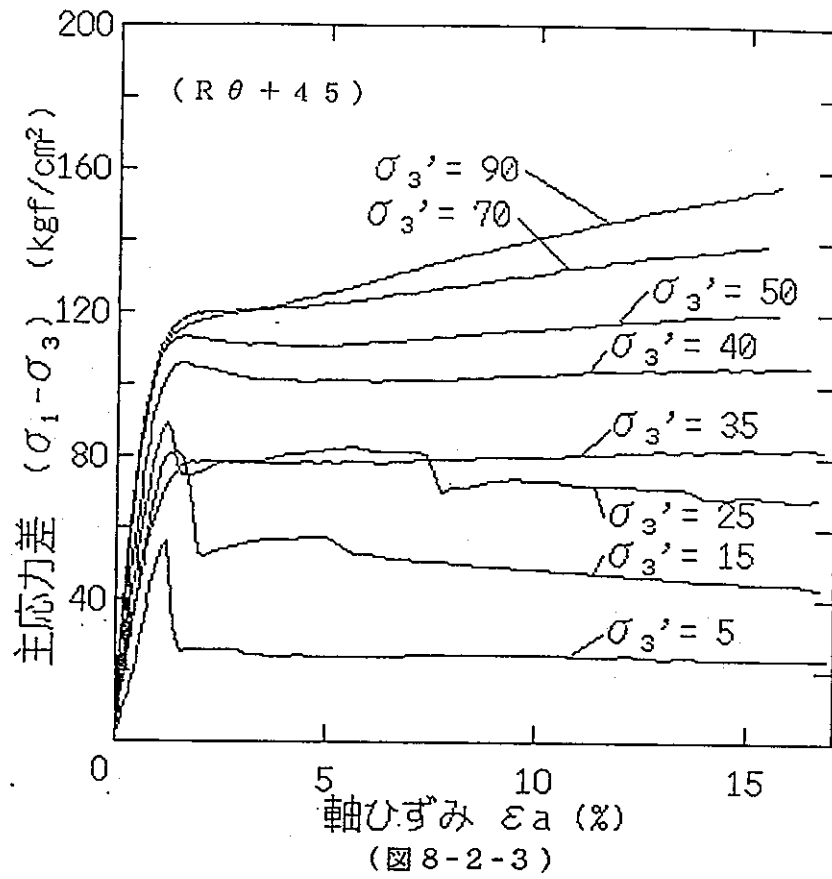


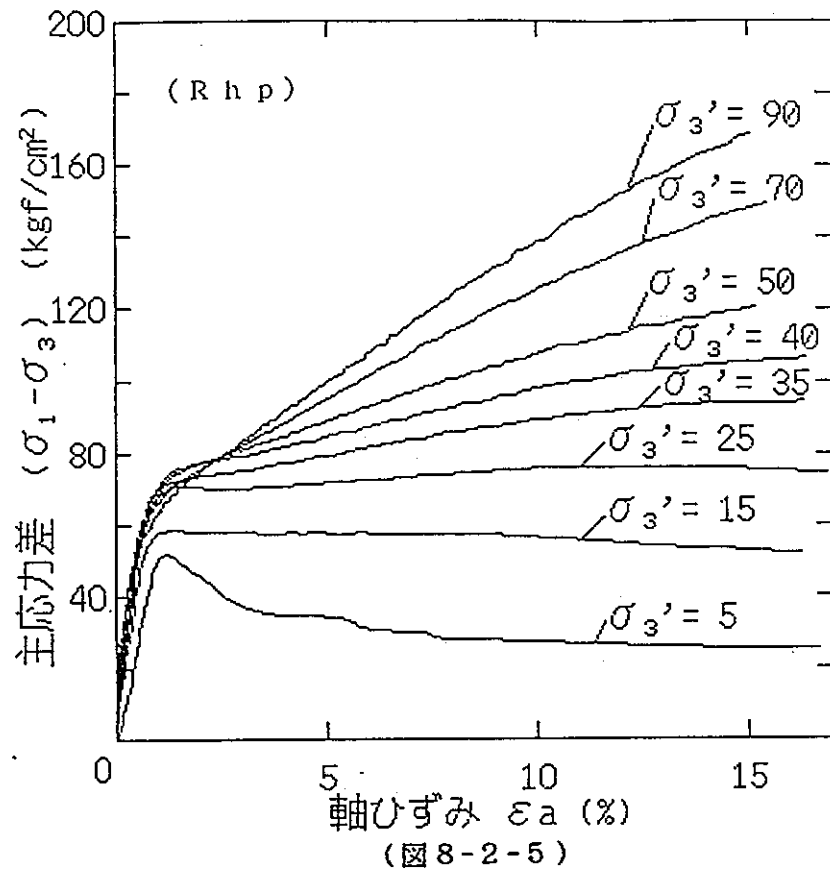
( 図 8 - 1 - 2 )

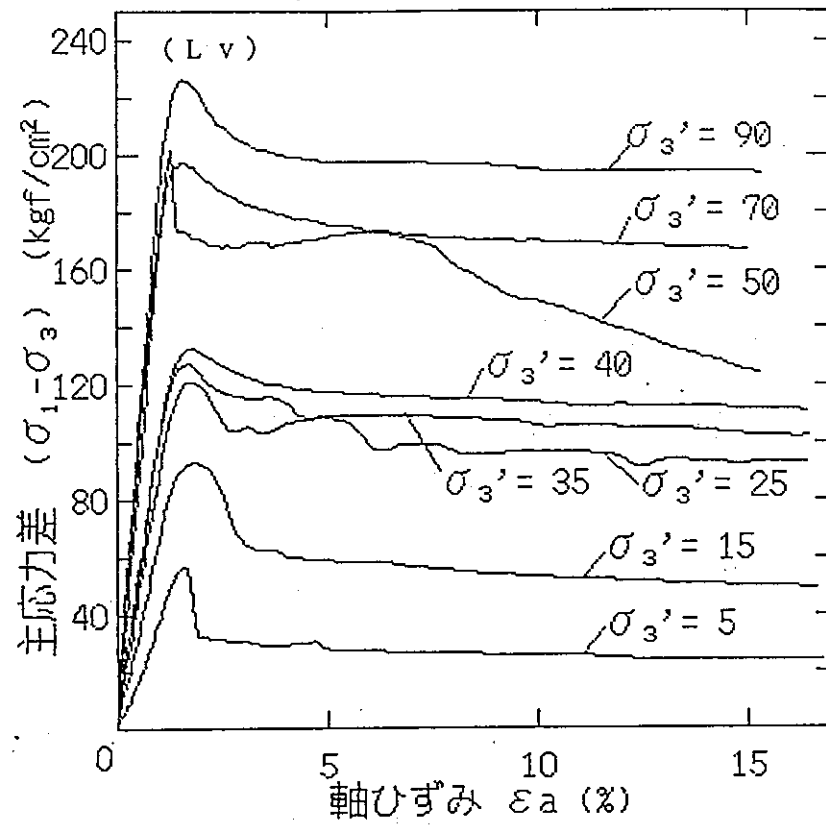


( 図 8 - 1 - 3 )

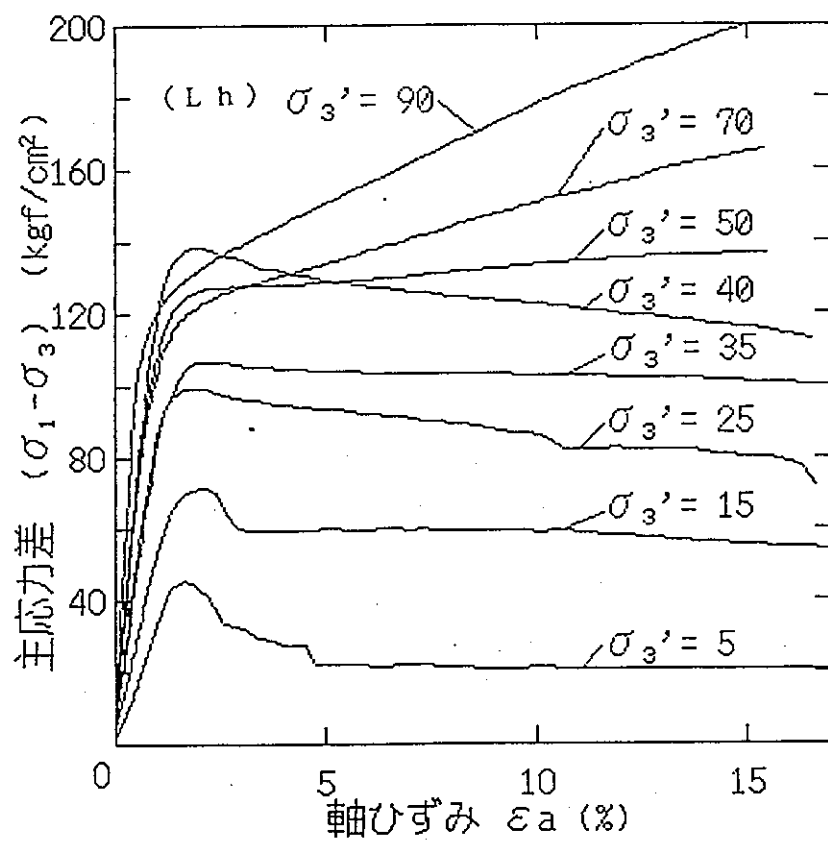




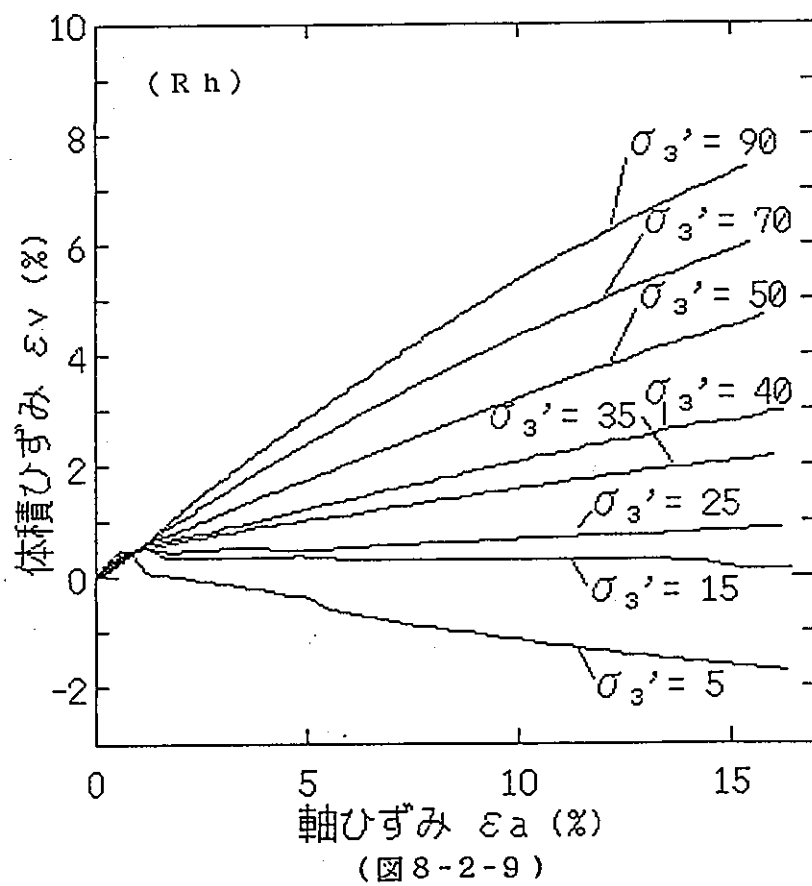
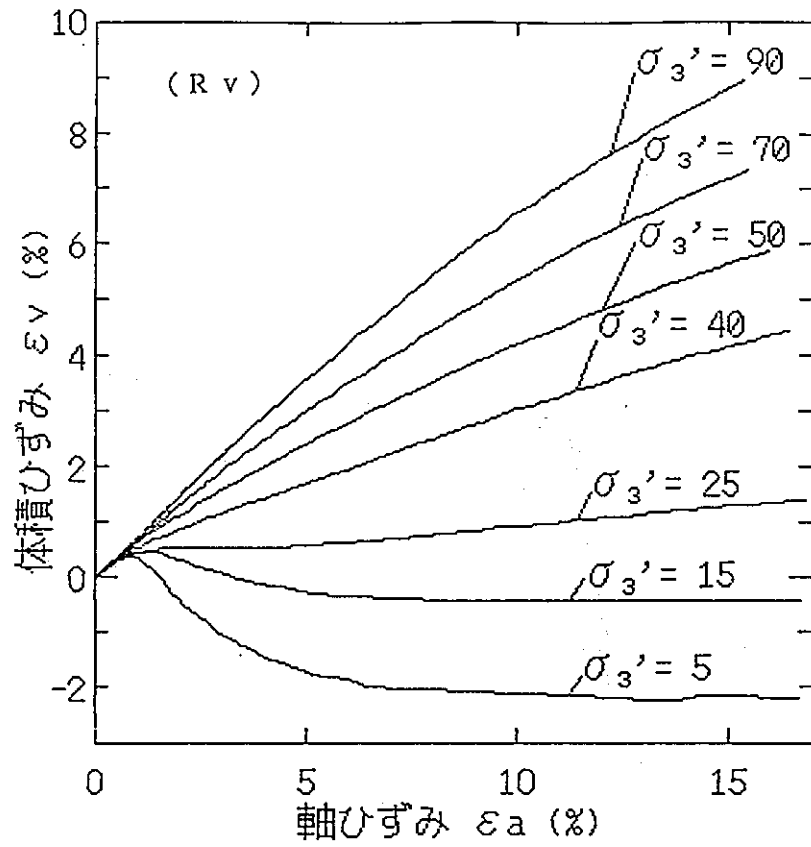


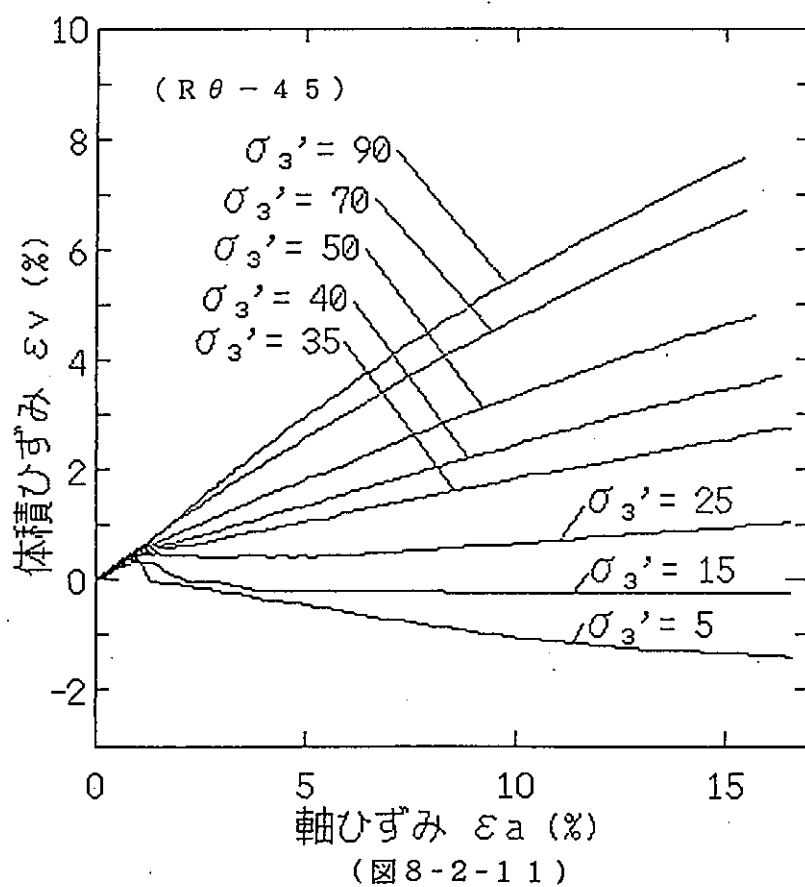
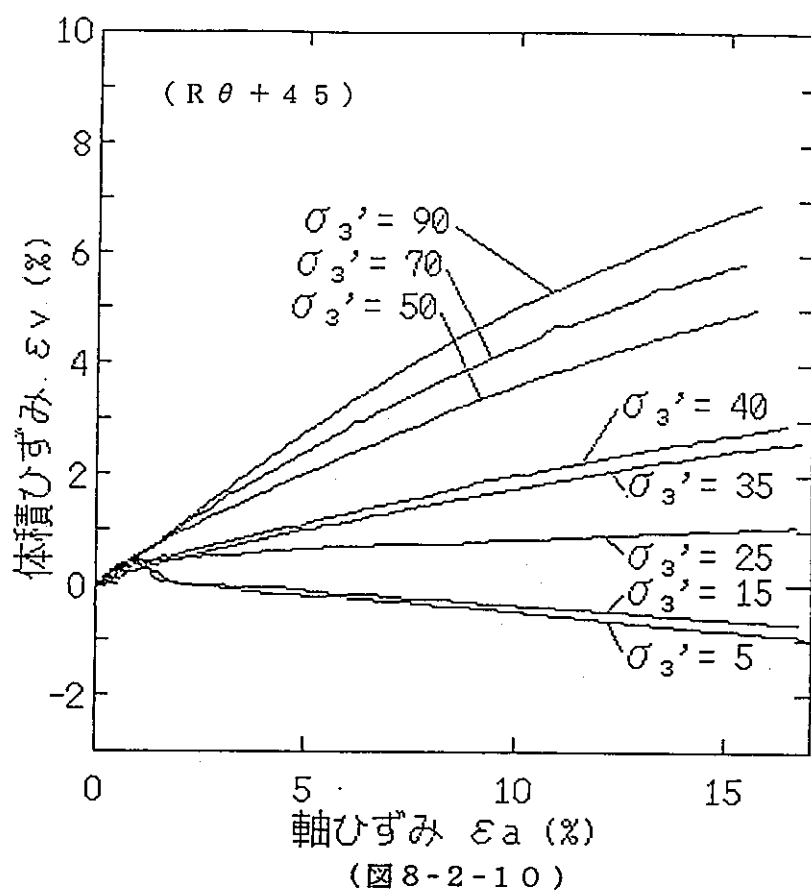


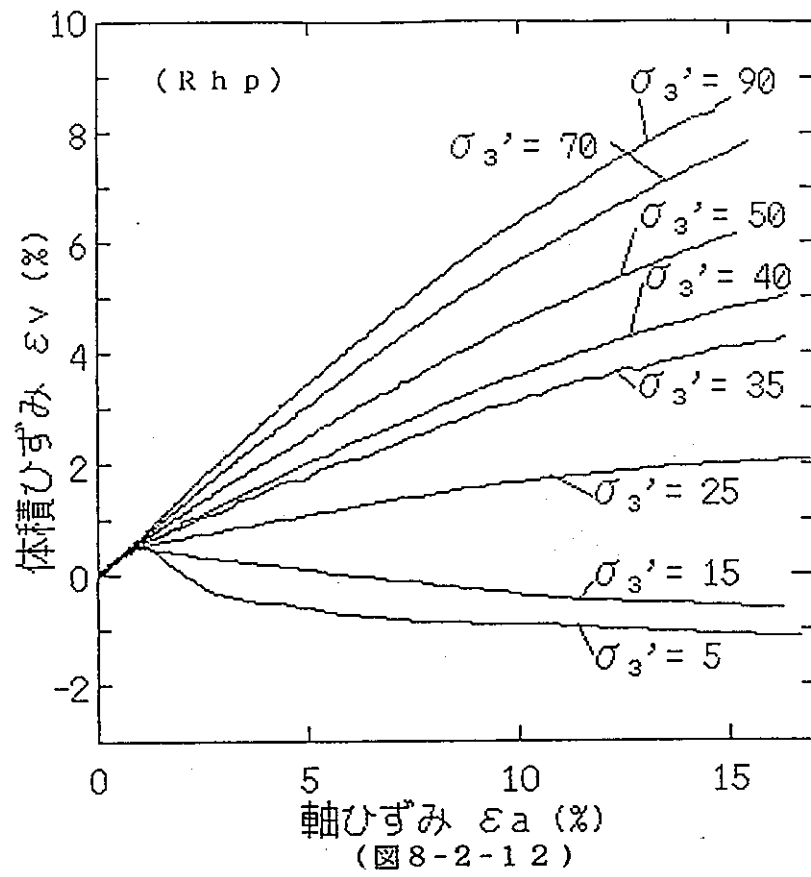
(図 8-2-6)

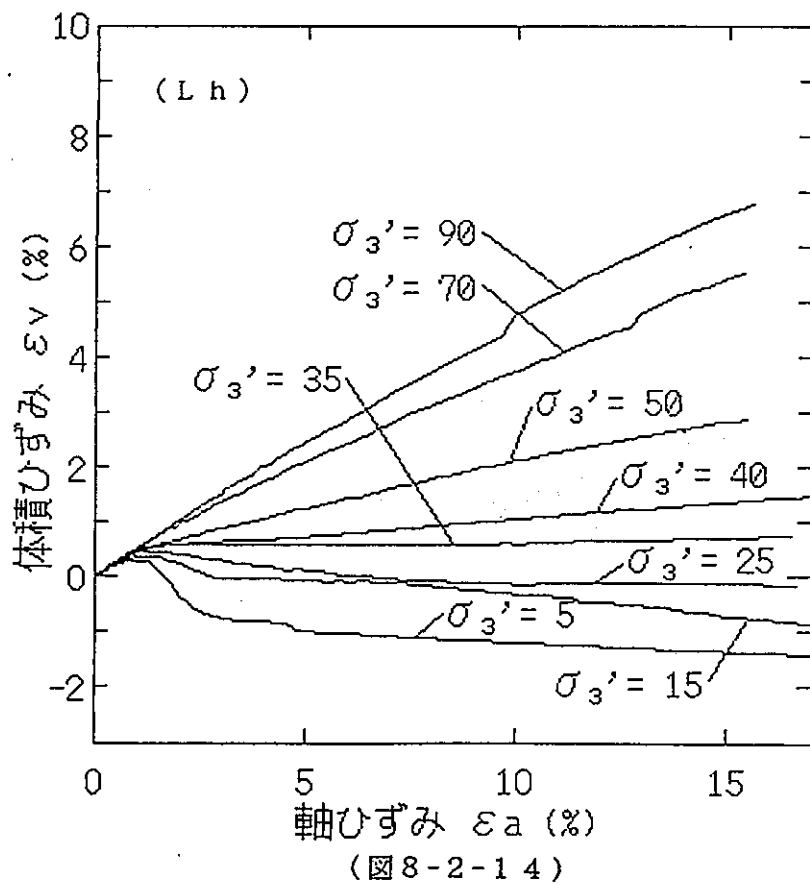
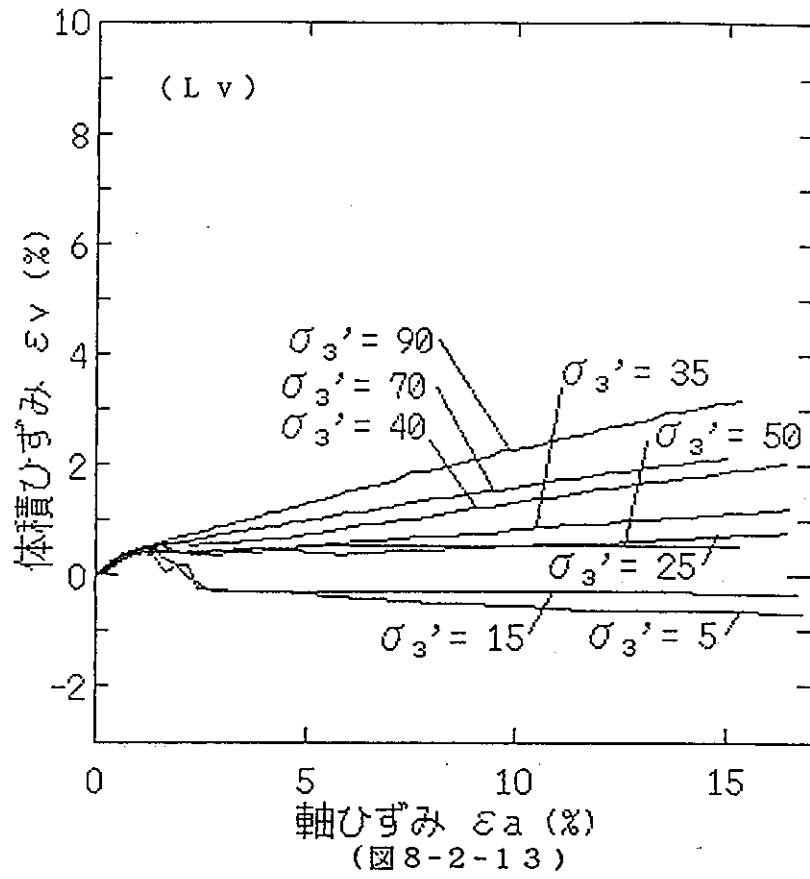


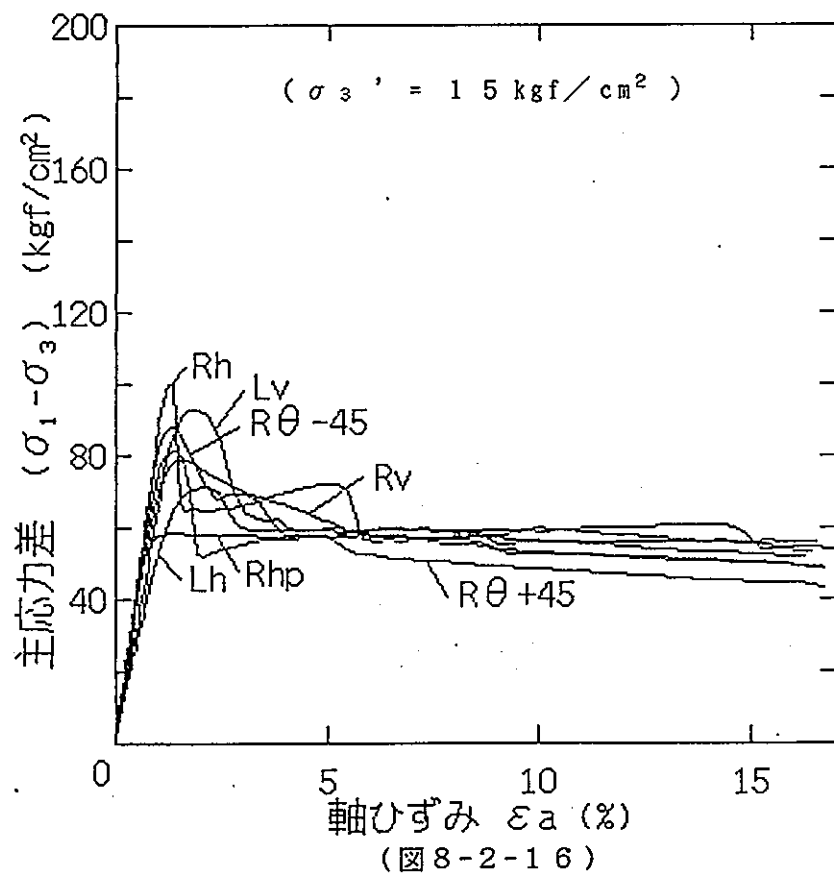
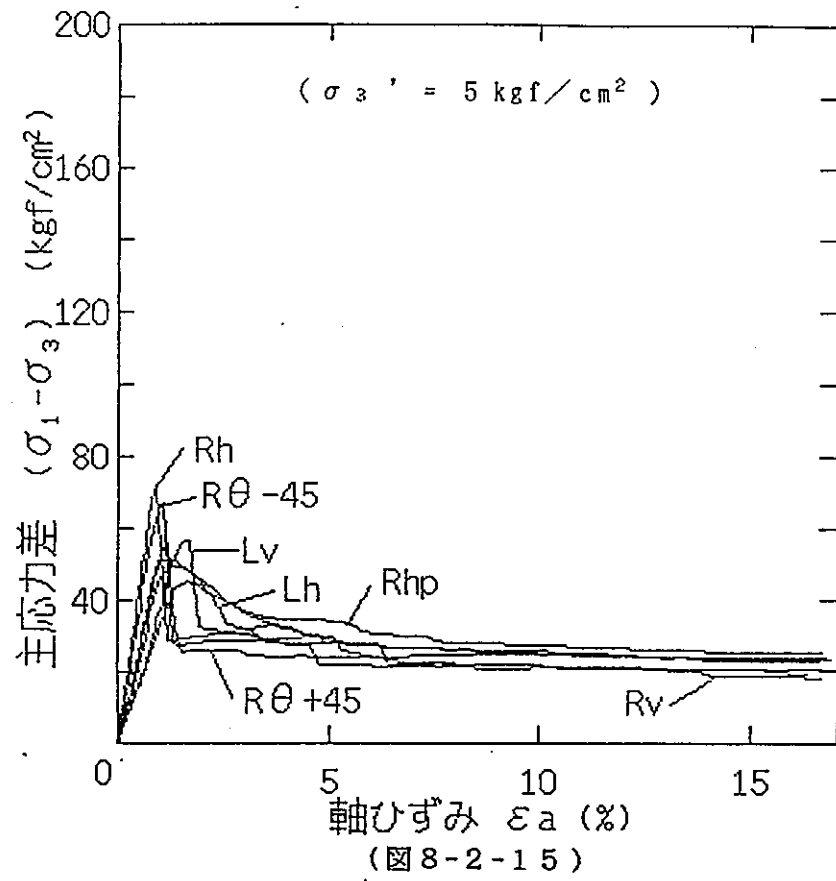
(図 8-2-7)

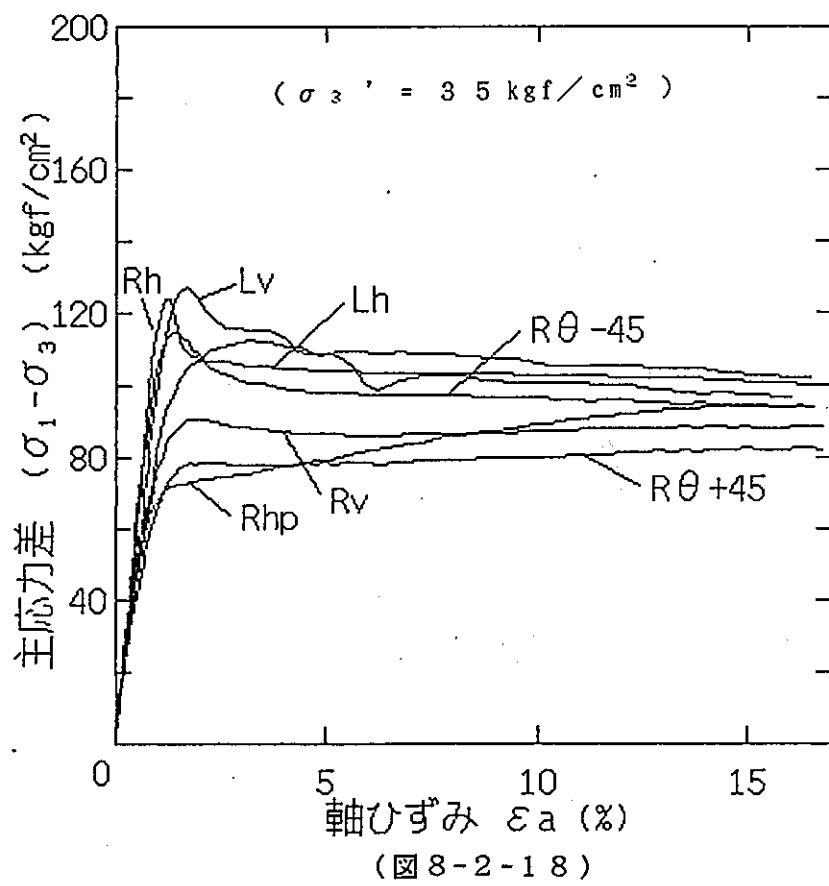
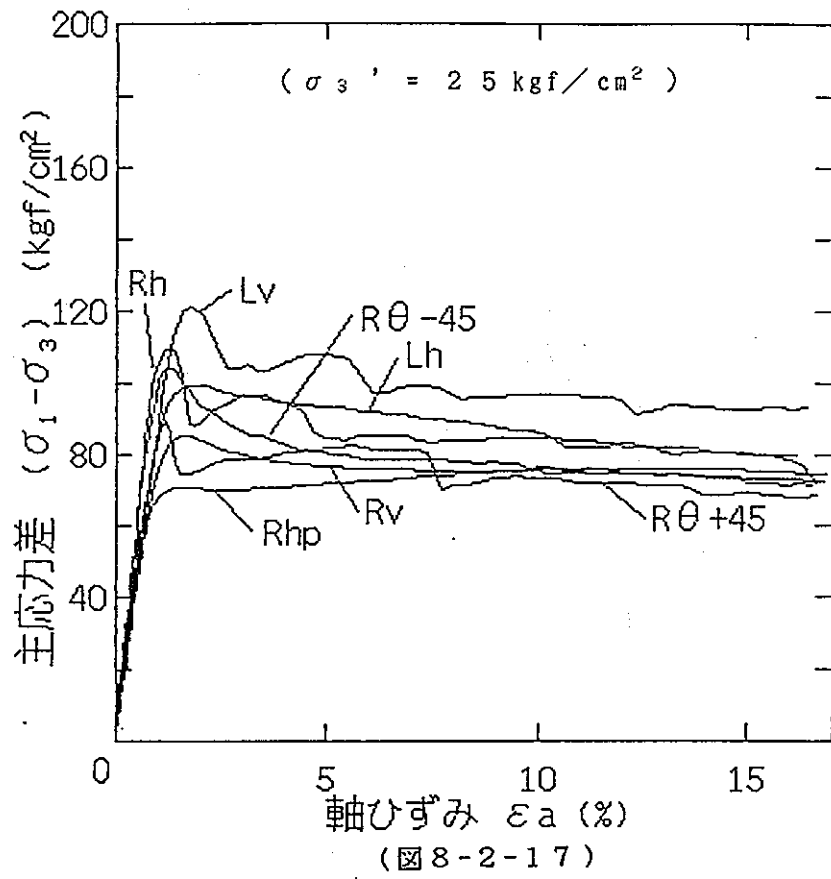


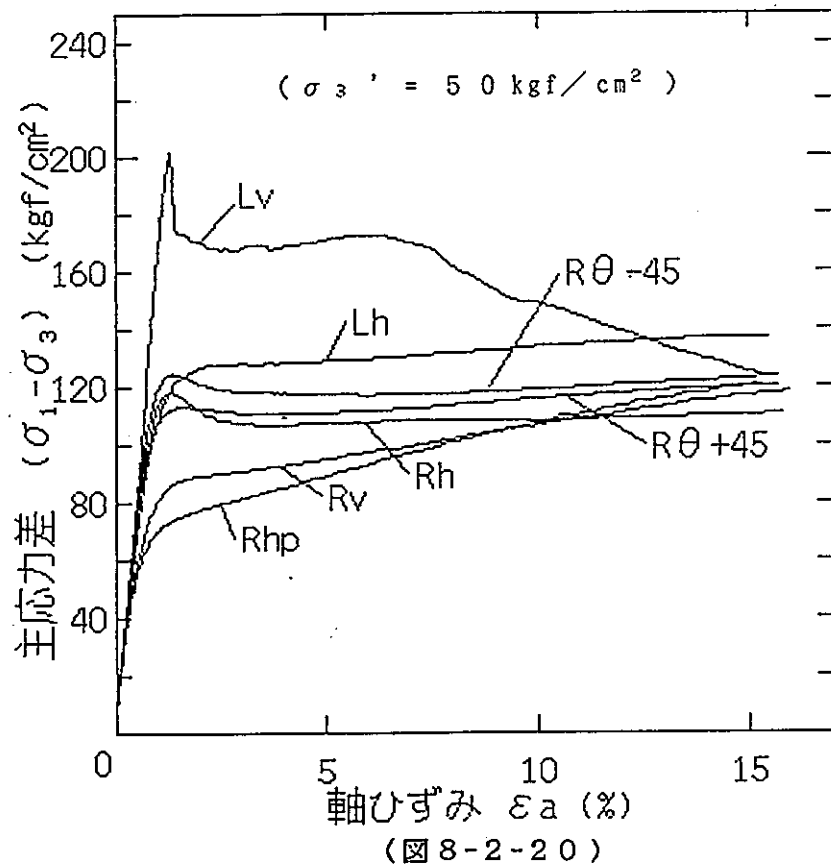
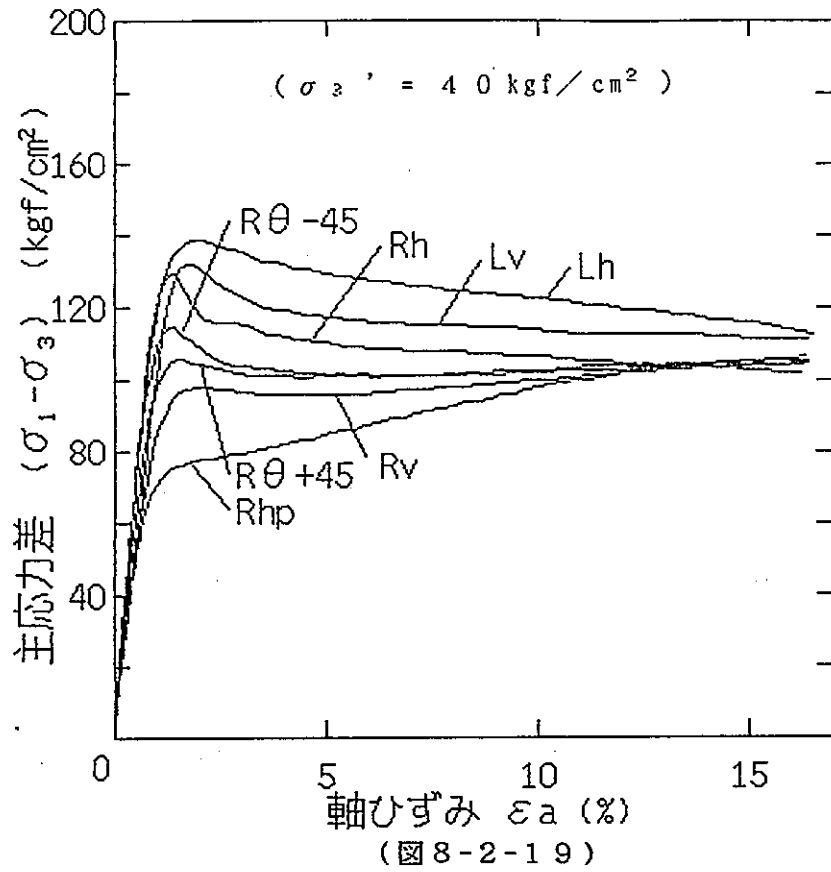


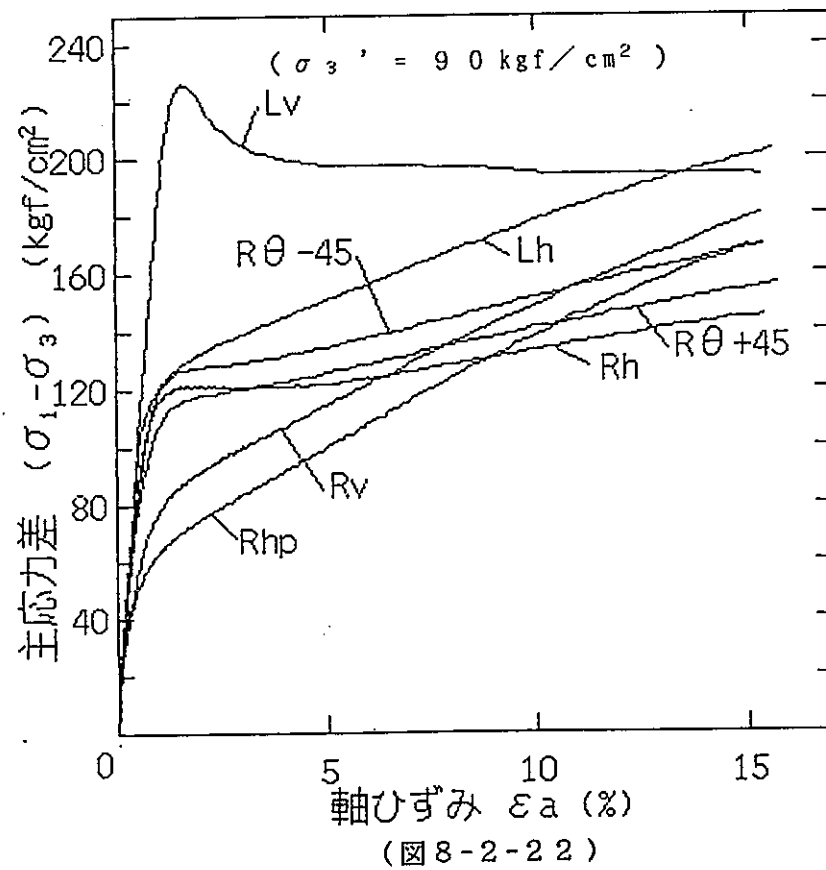
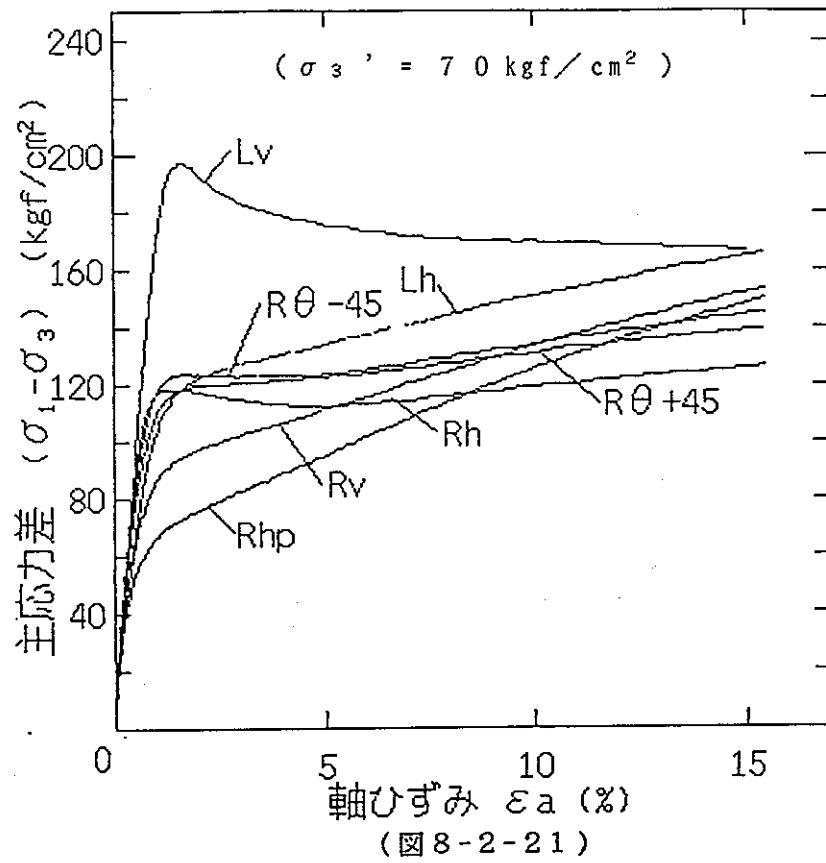


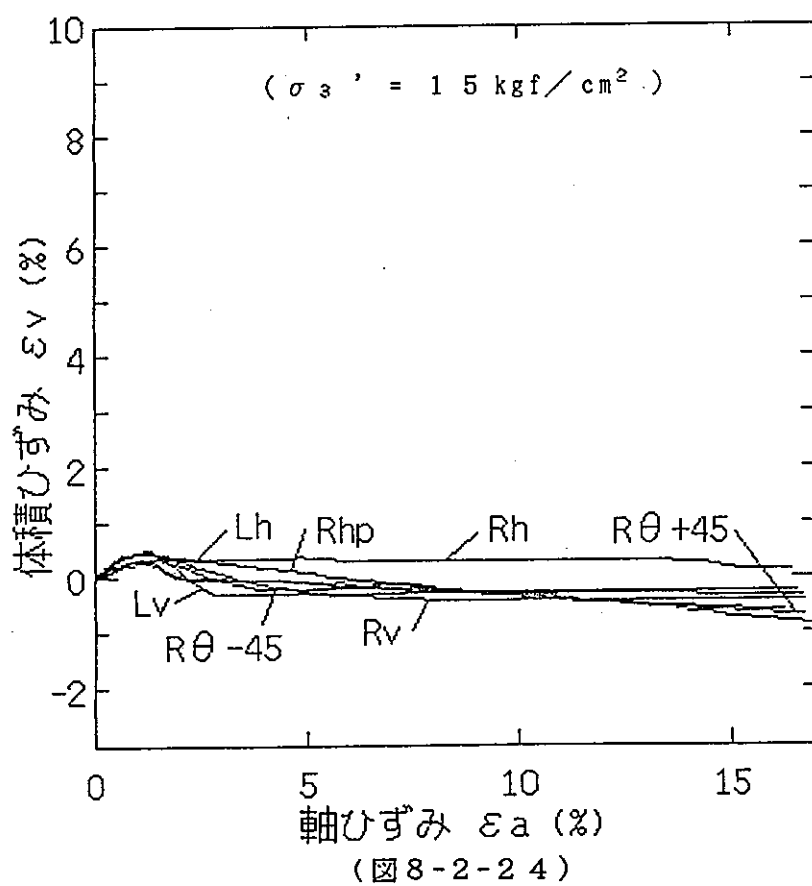
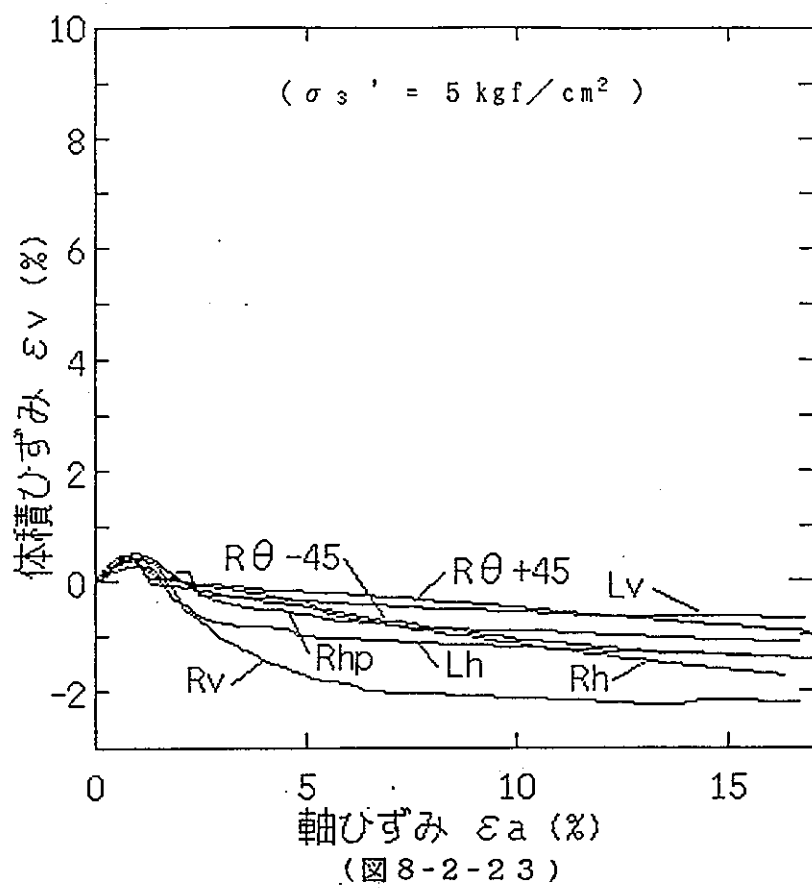


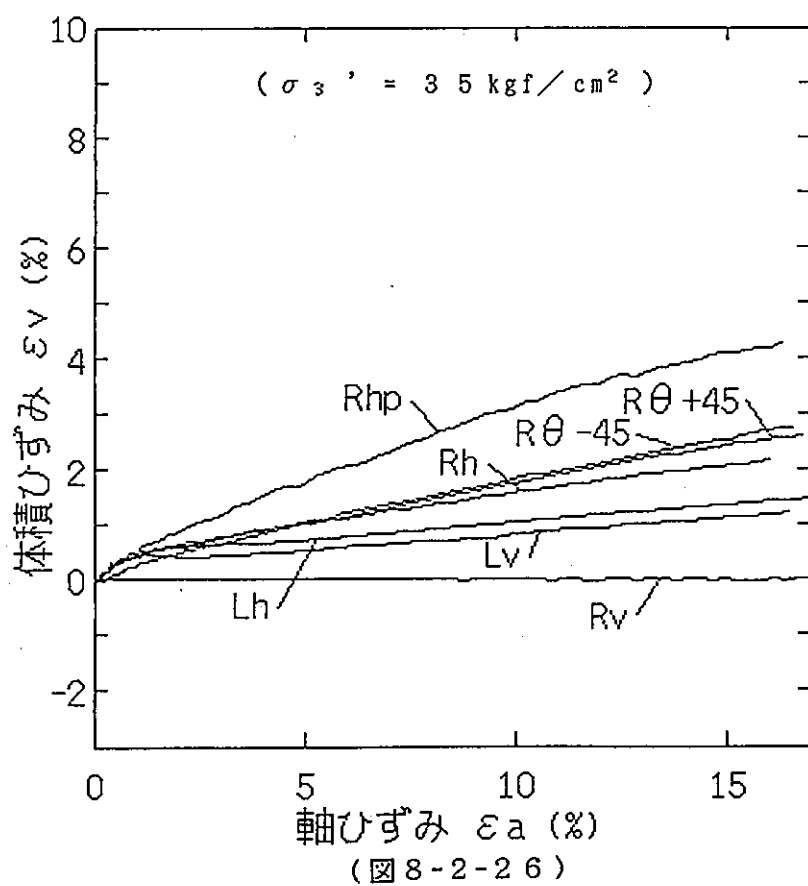
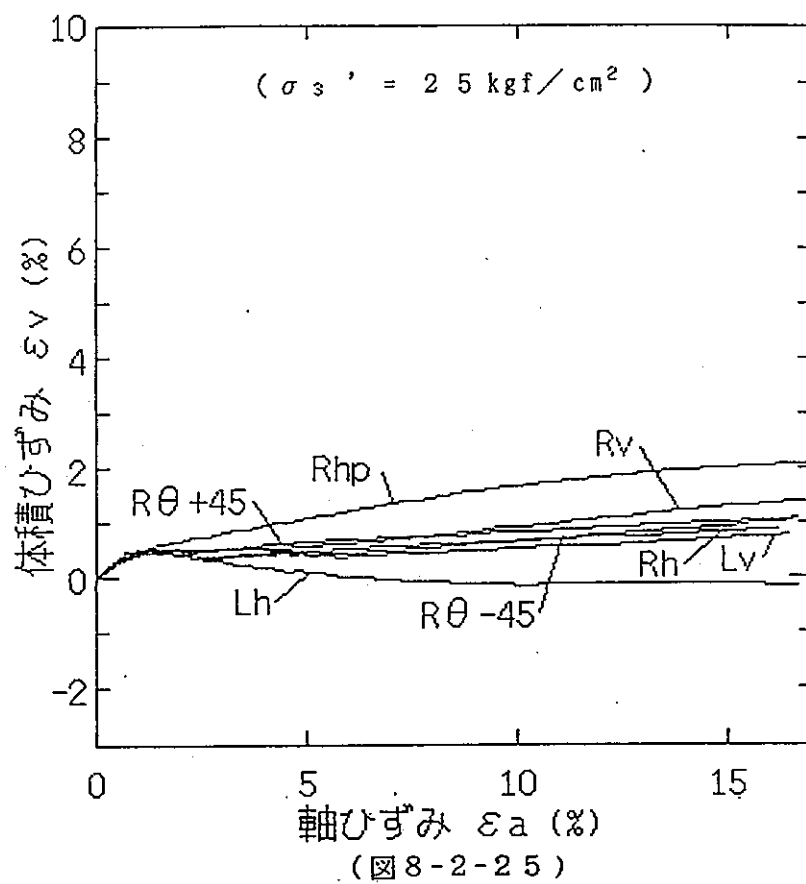


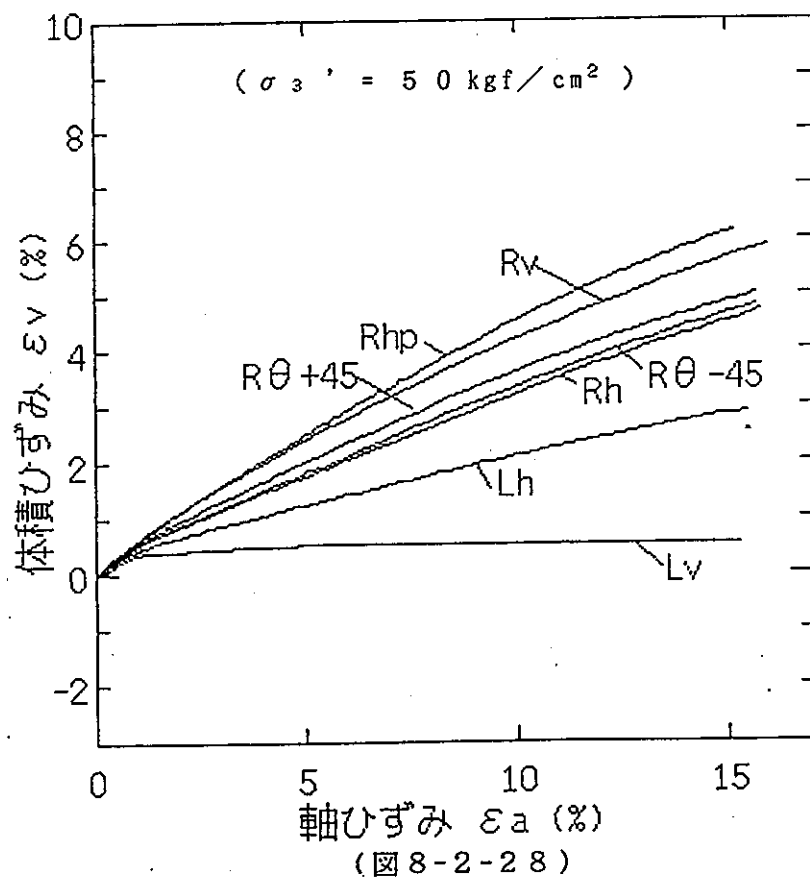
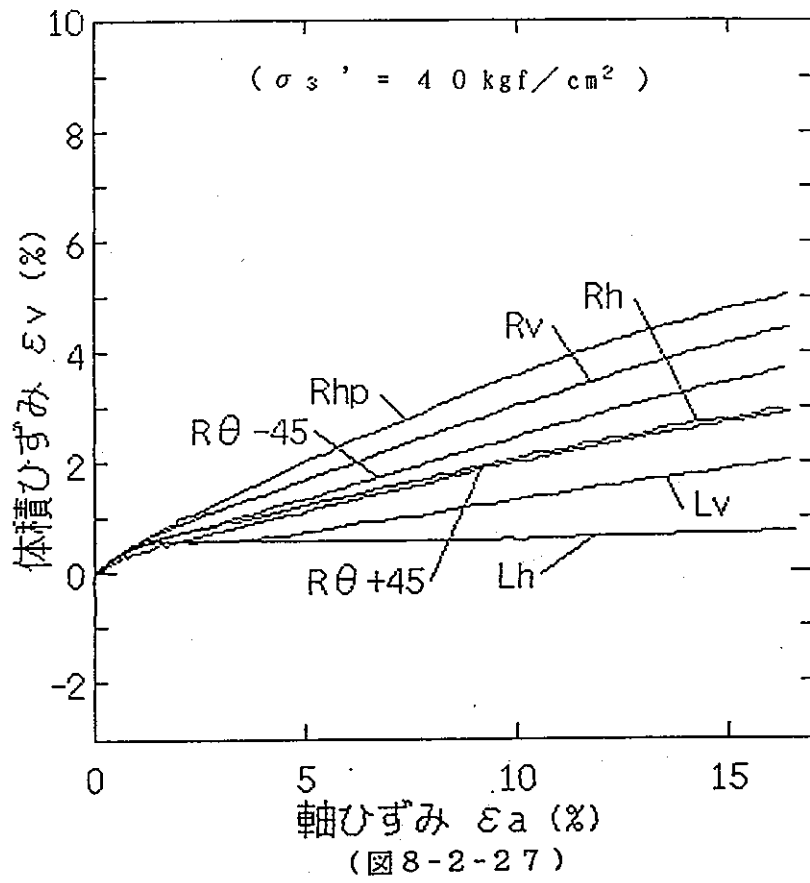


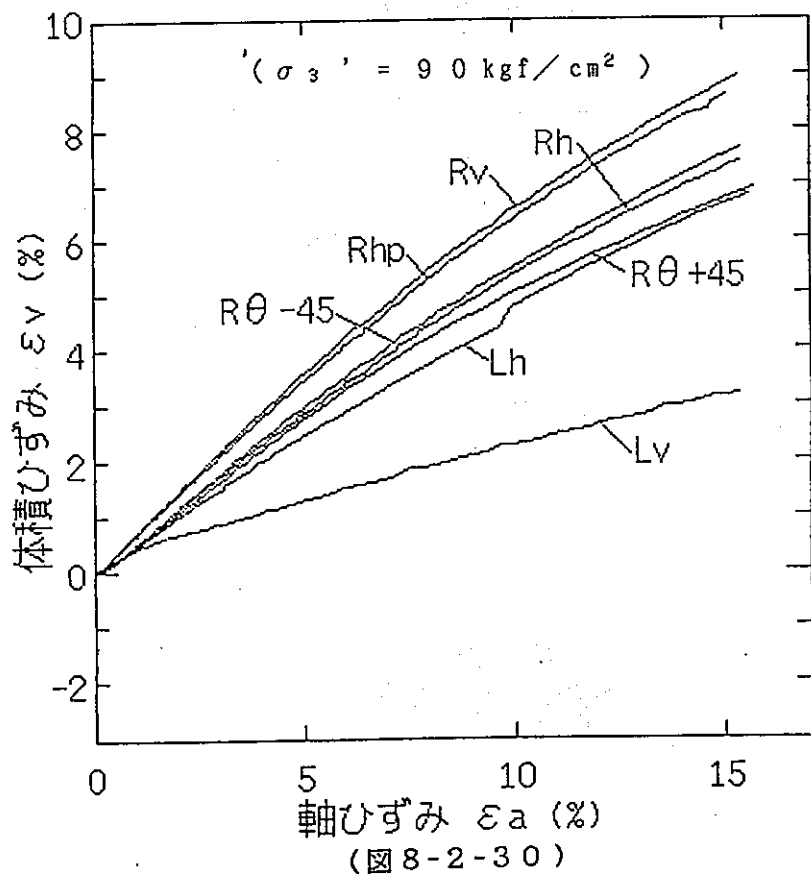
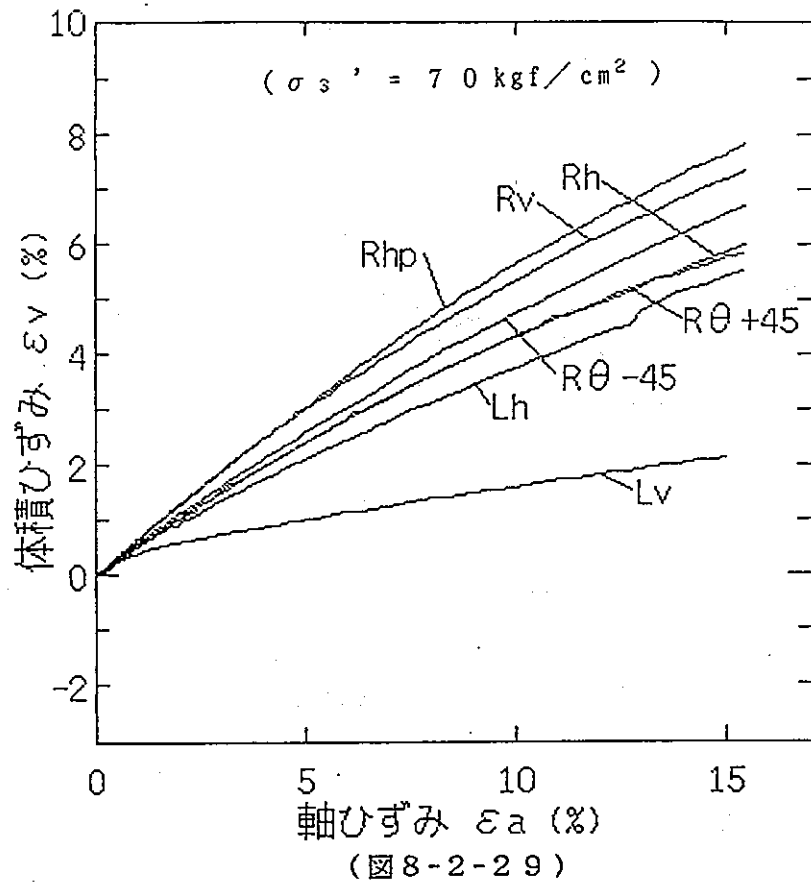


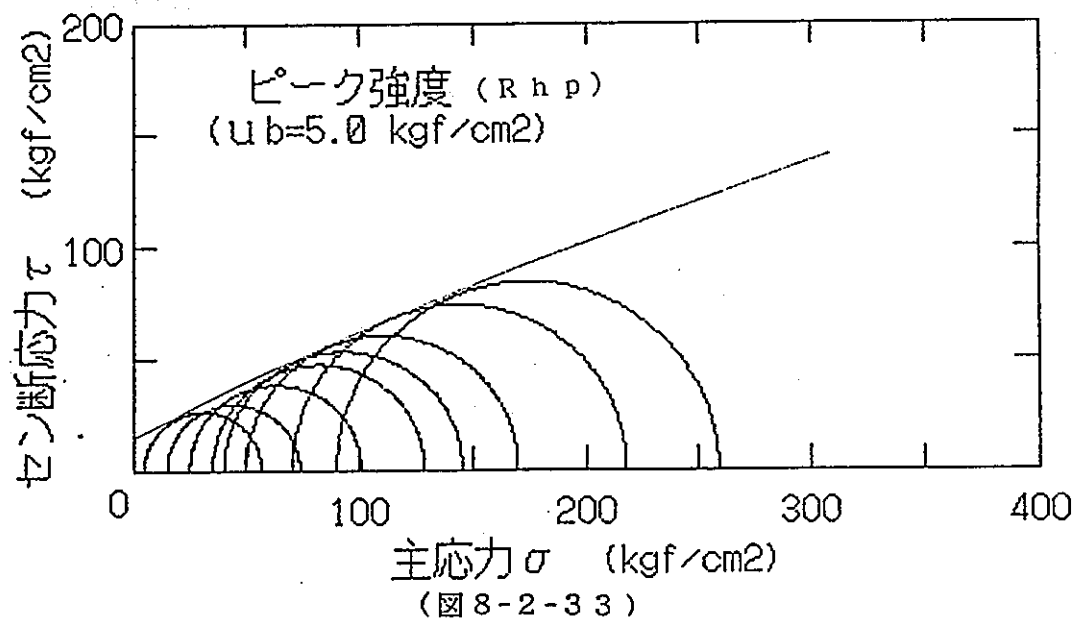
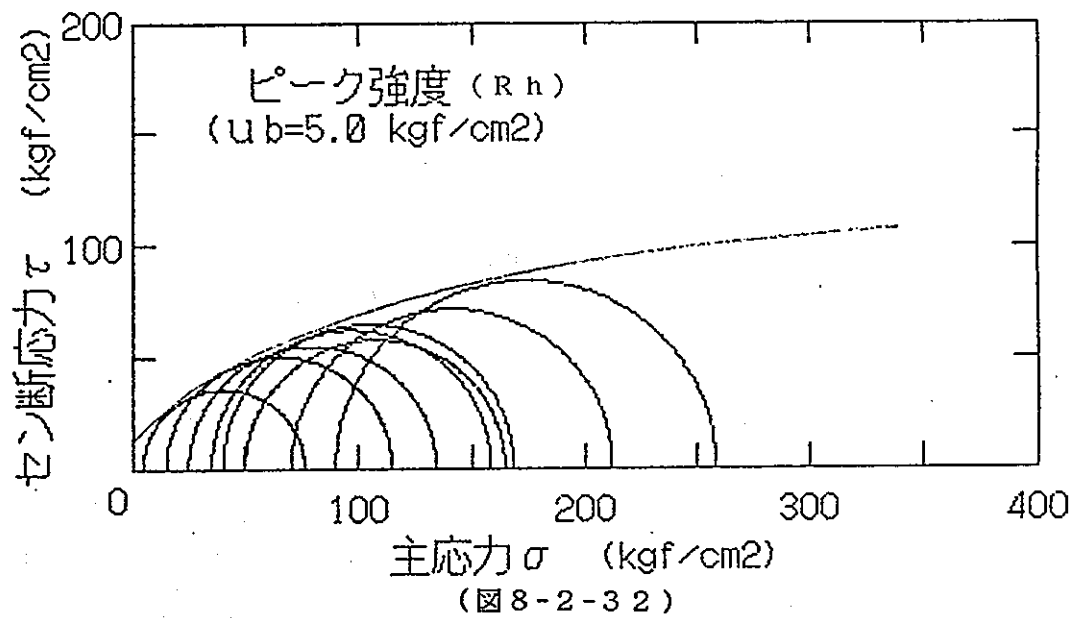
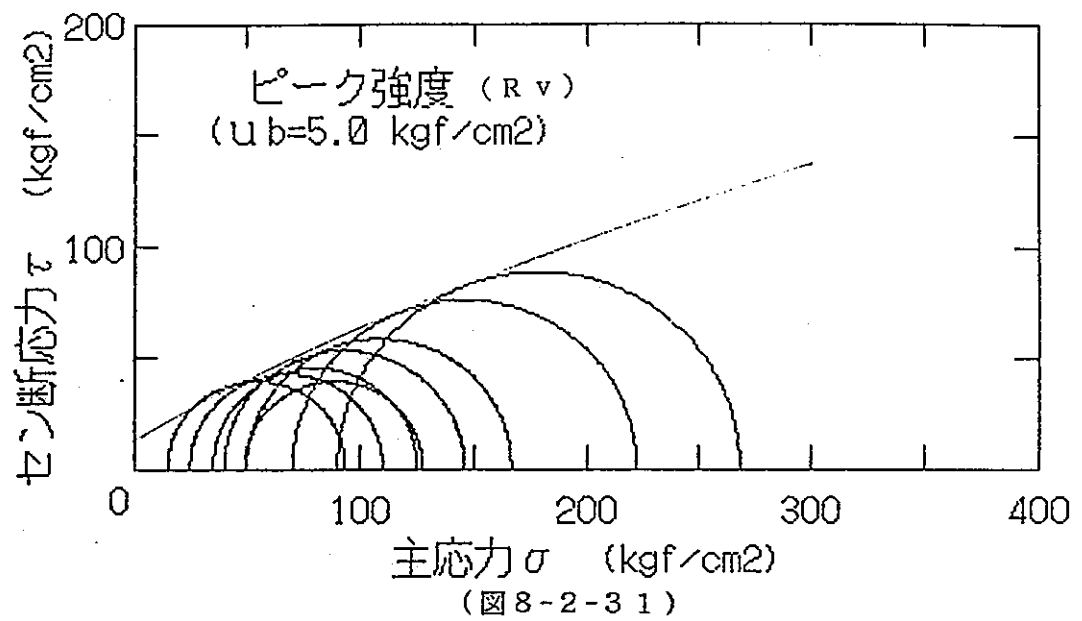


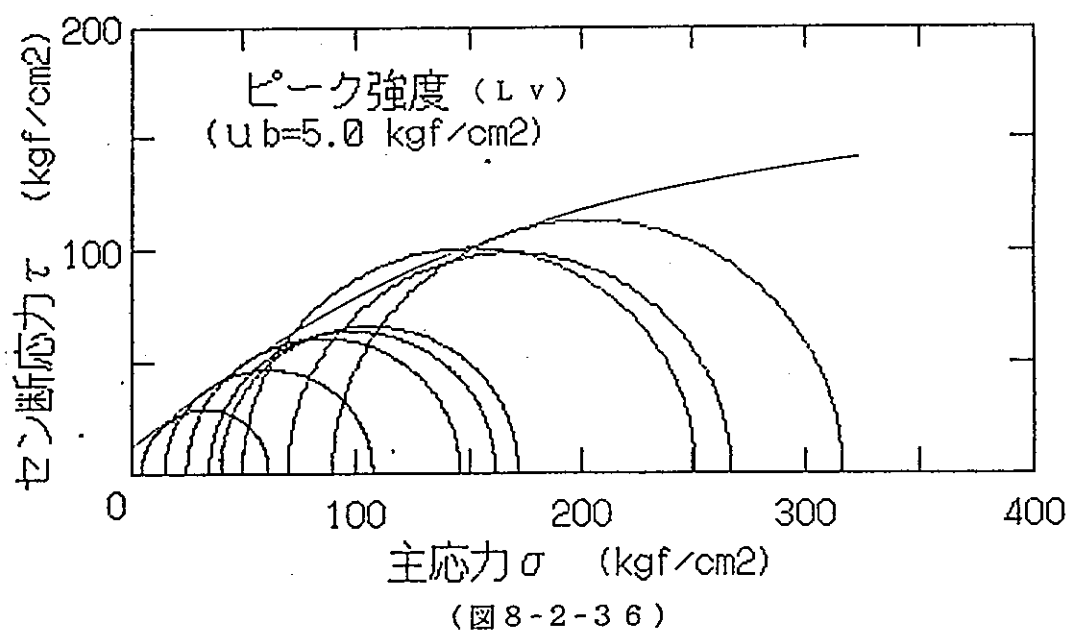
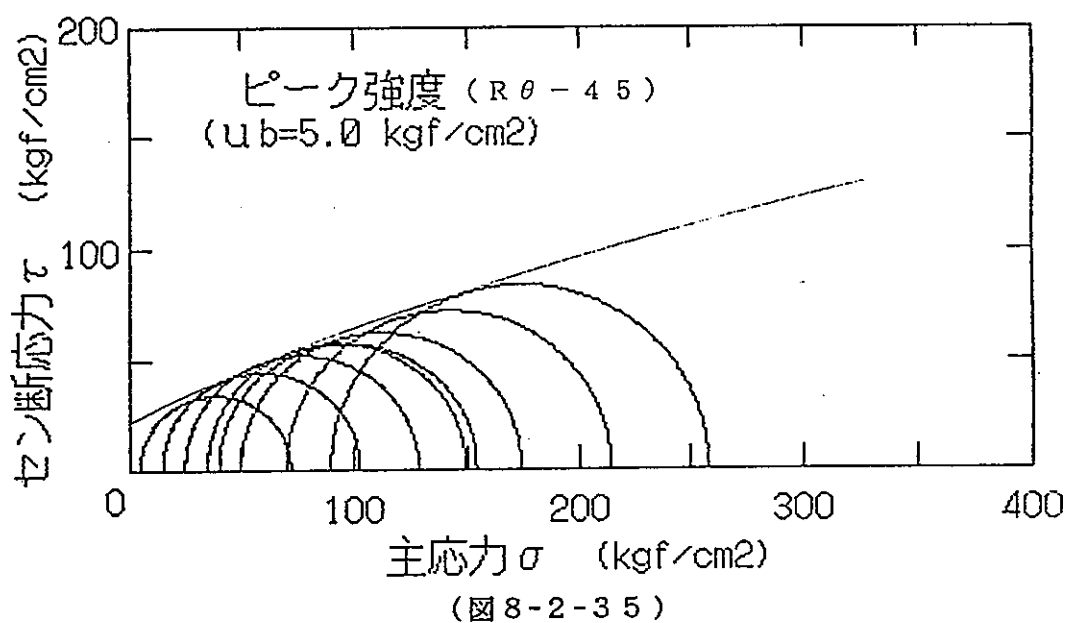
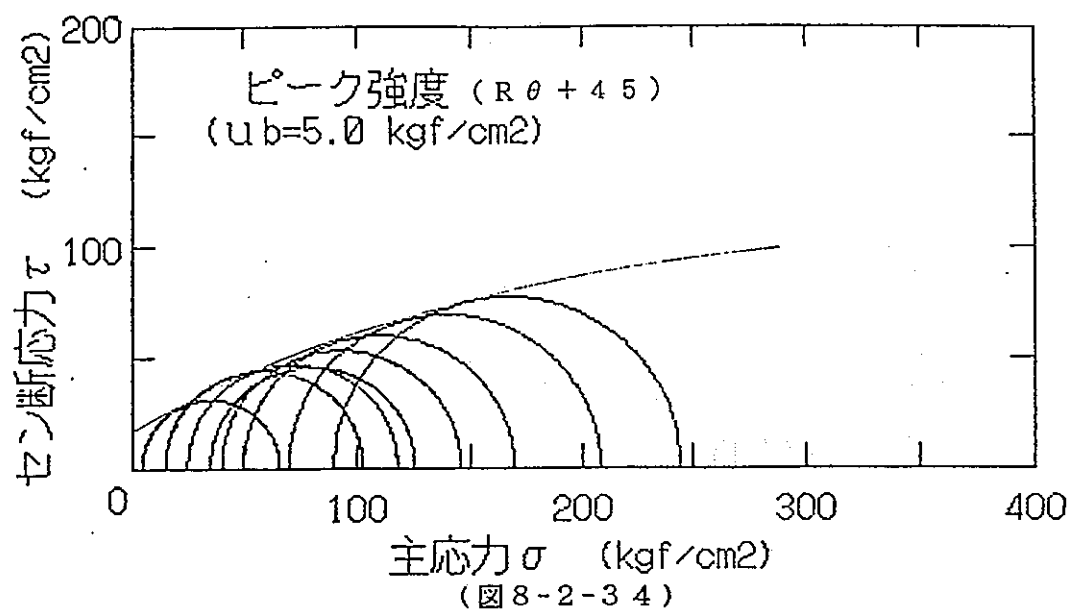


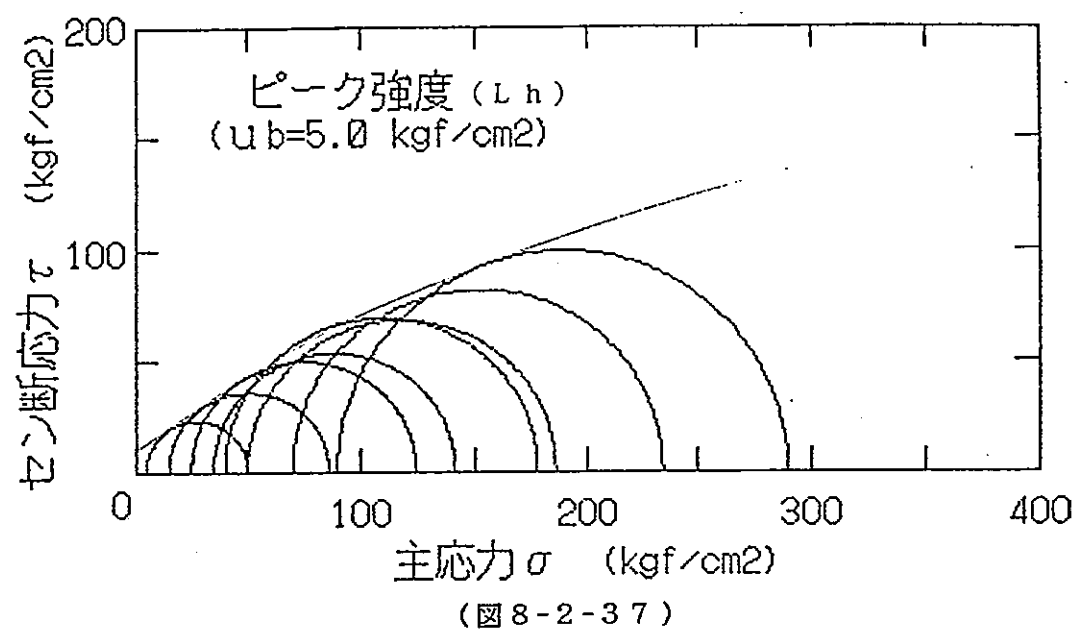


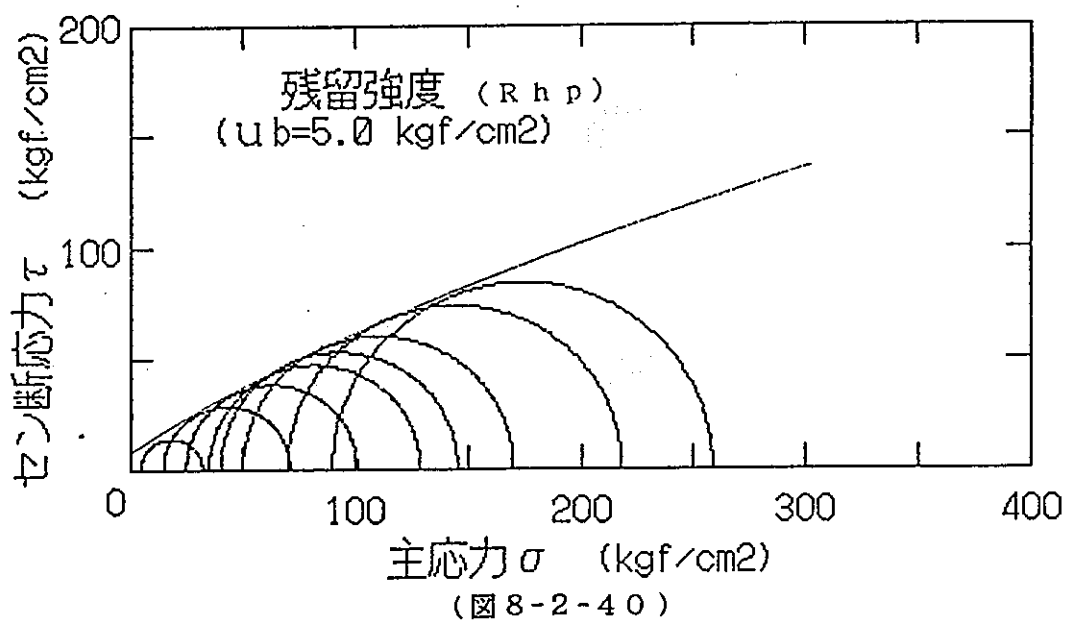
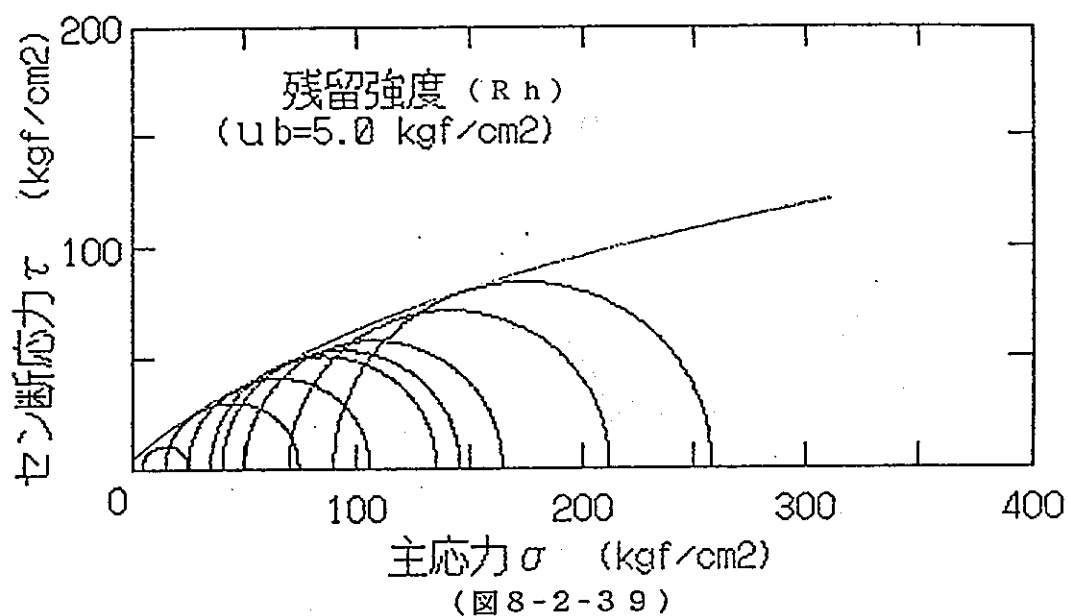
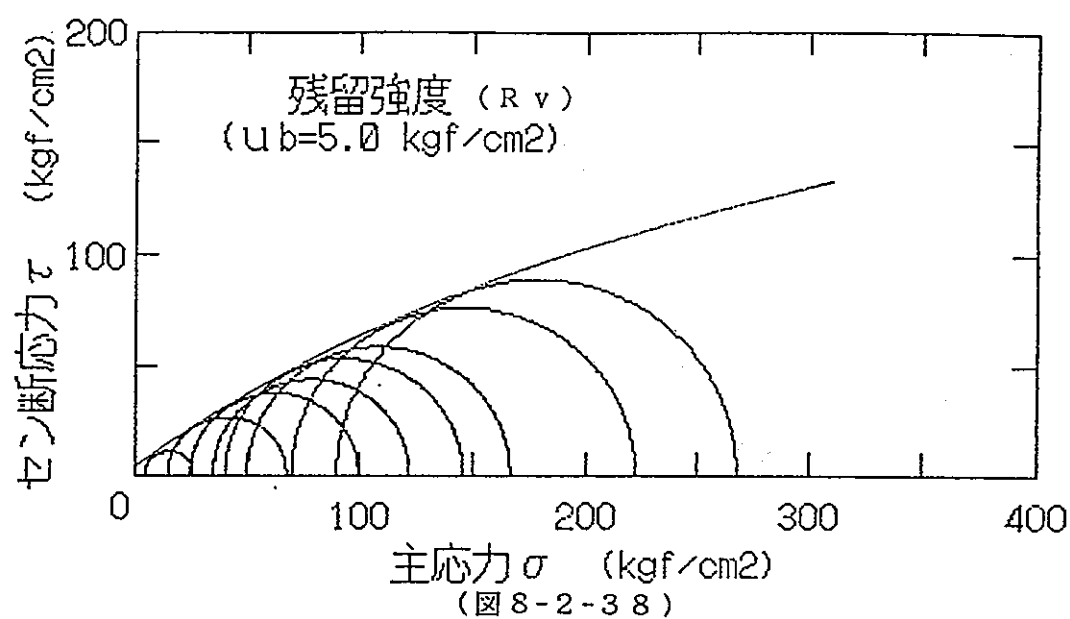


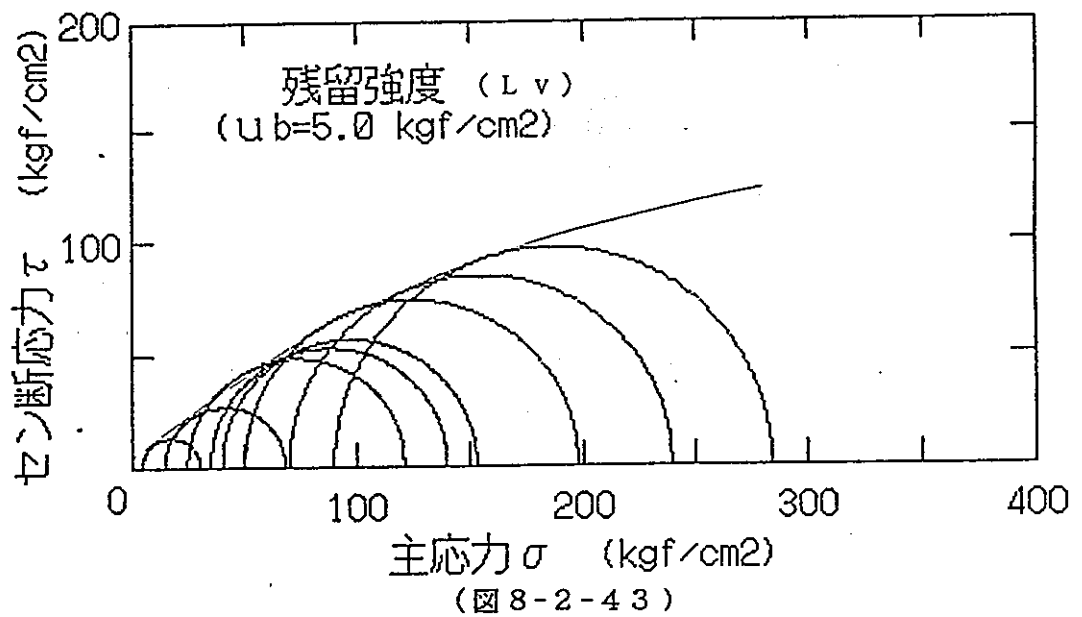
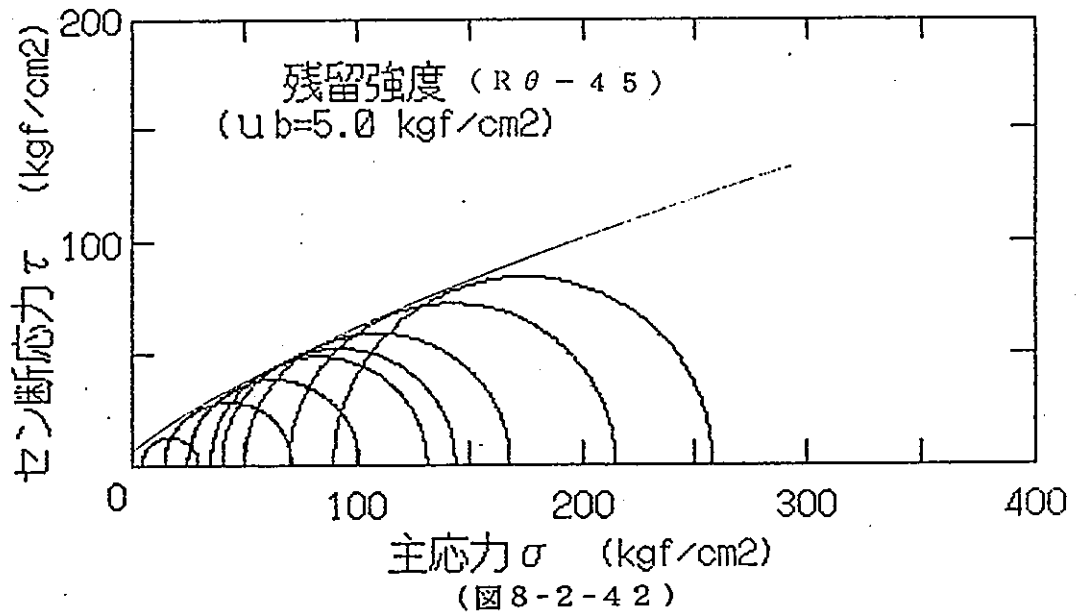
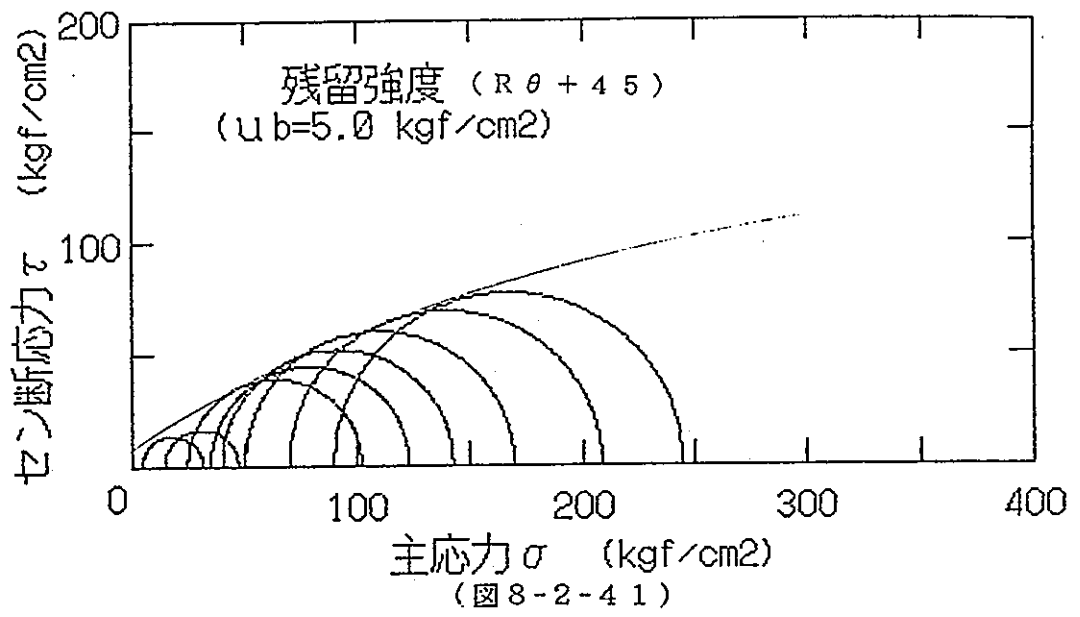


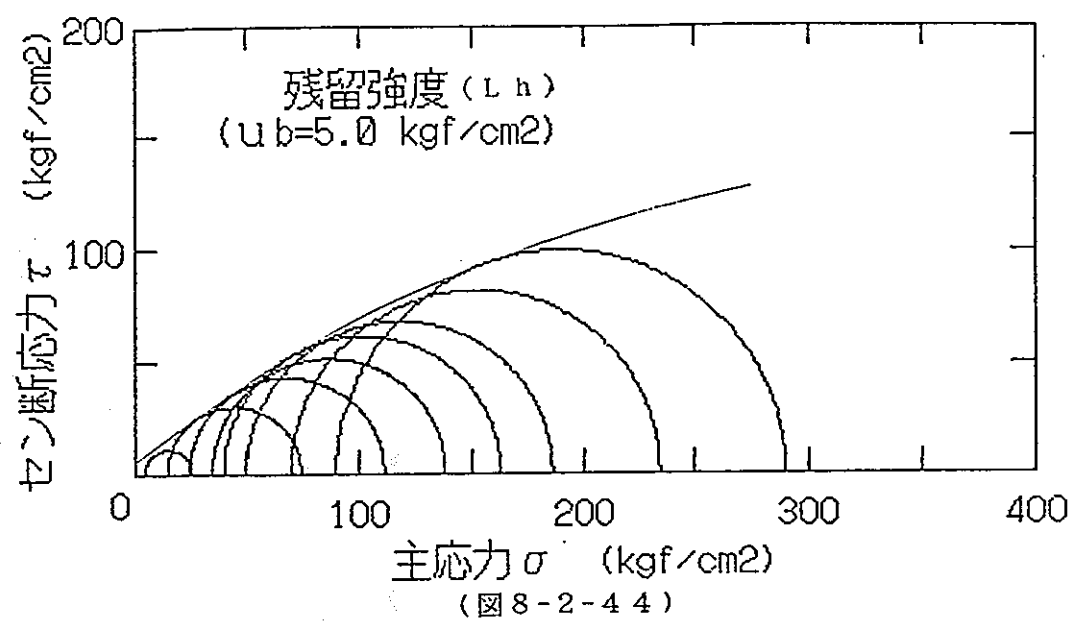


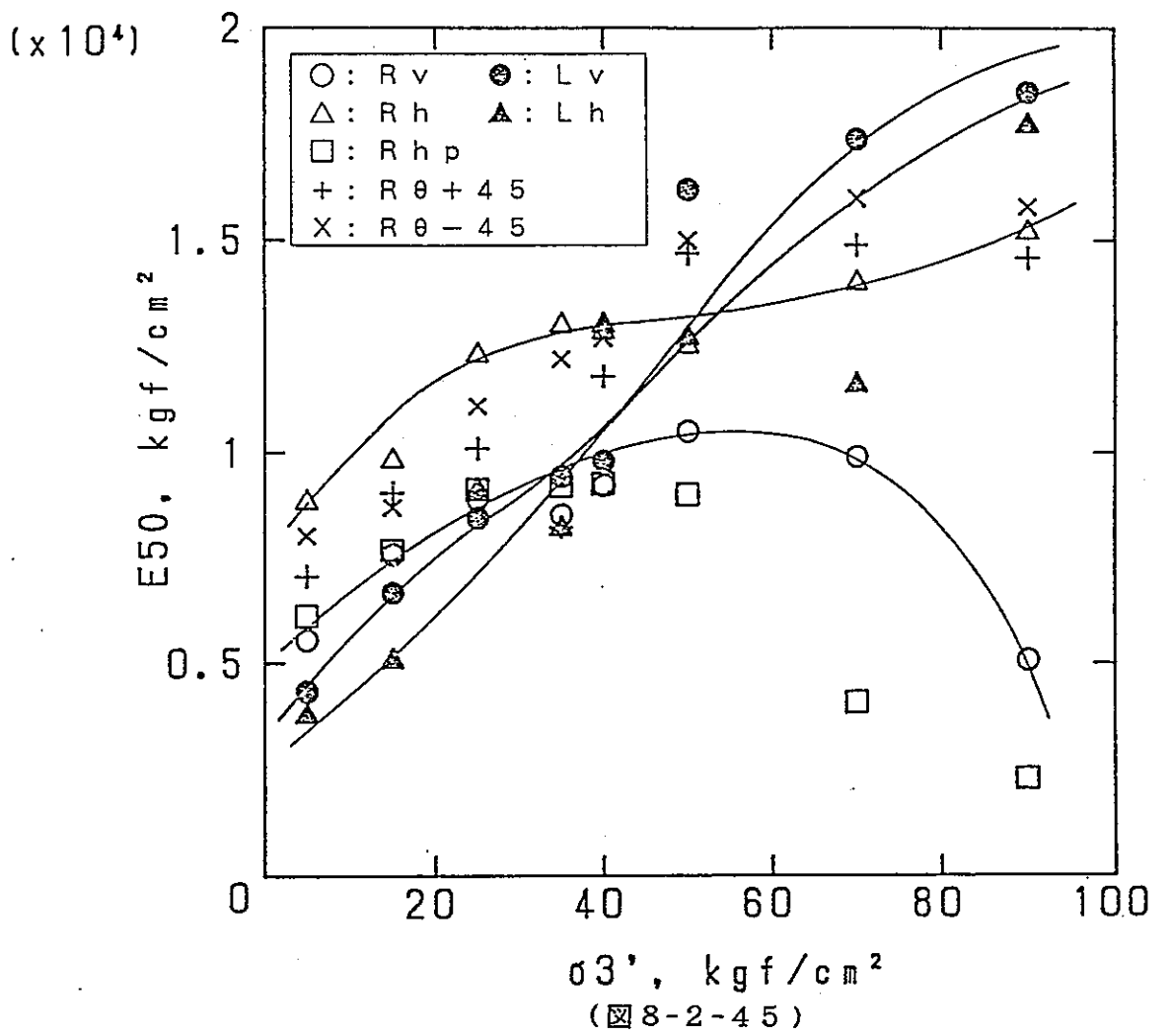


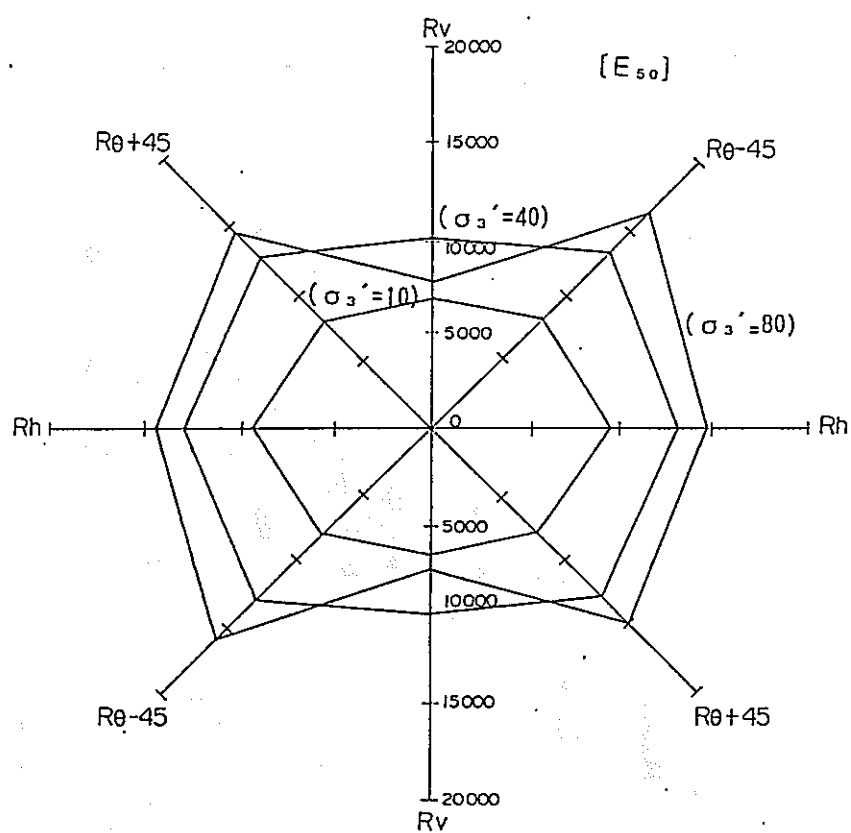




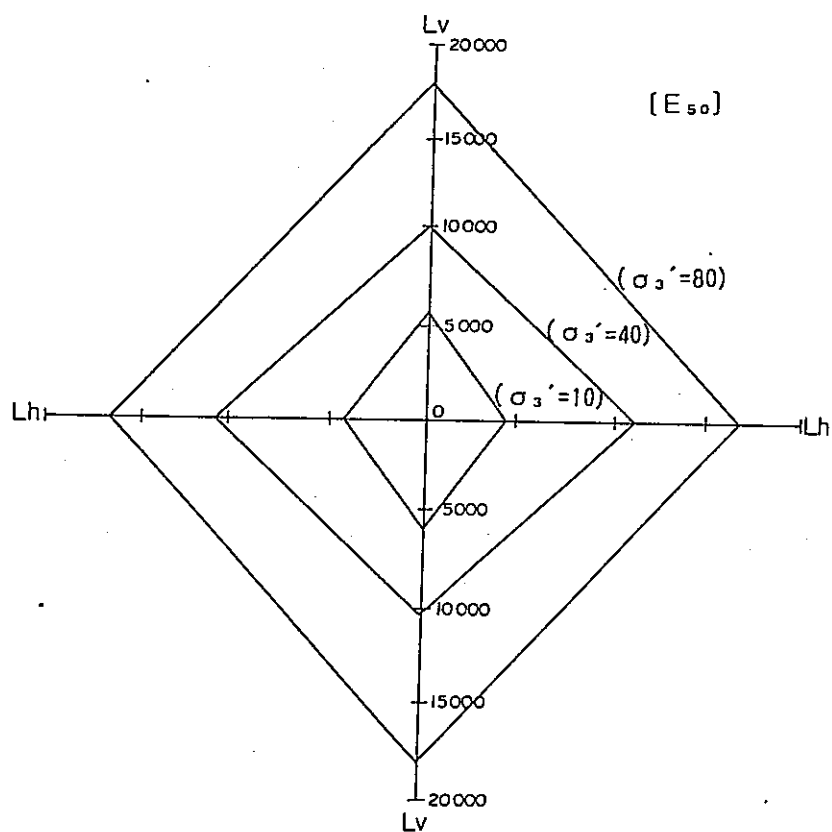




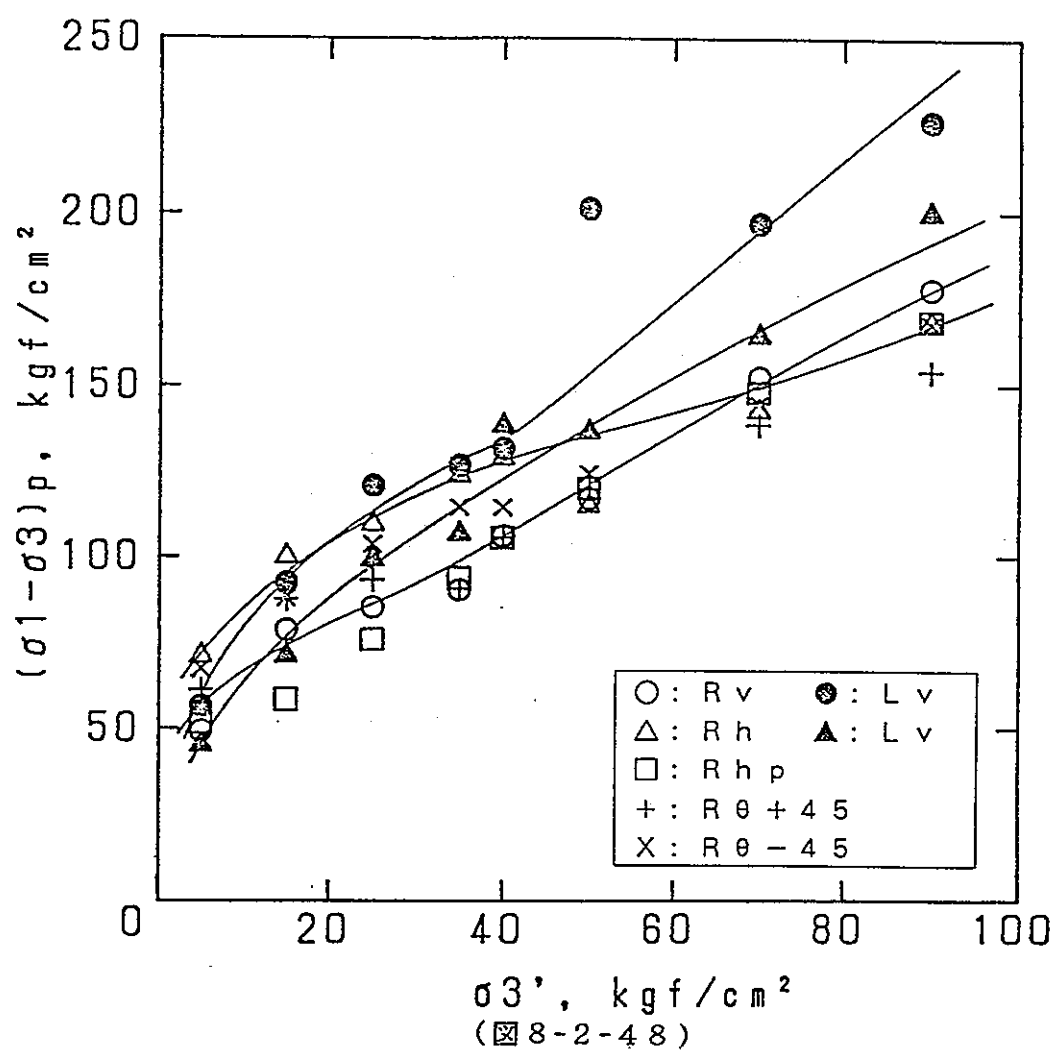


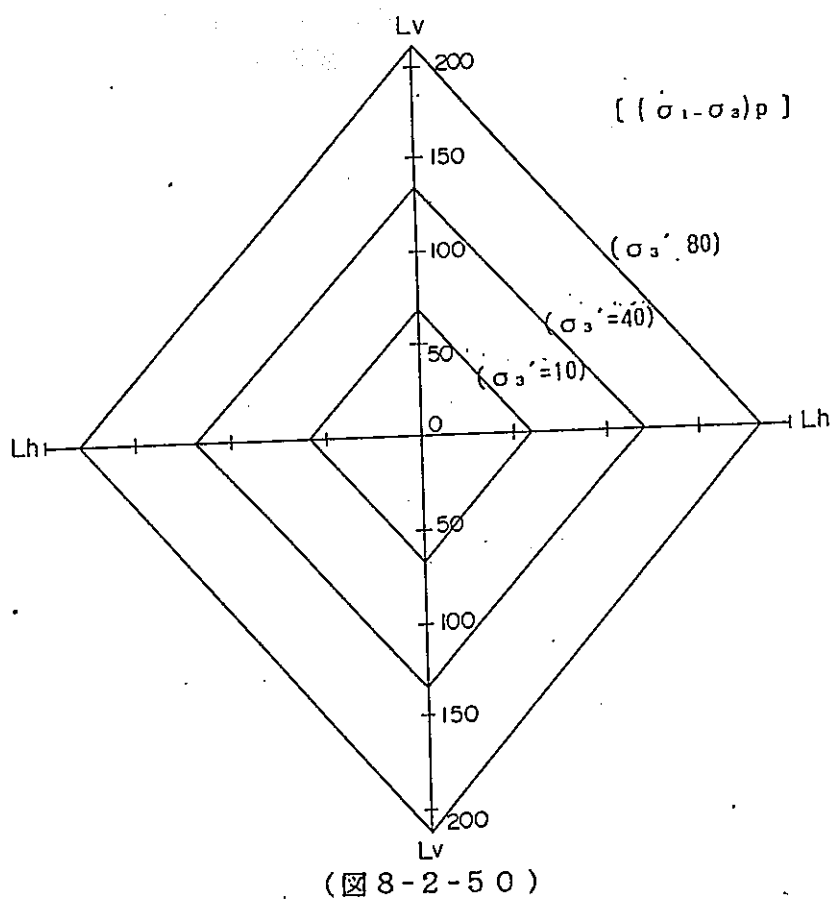
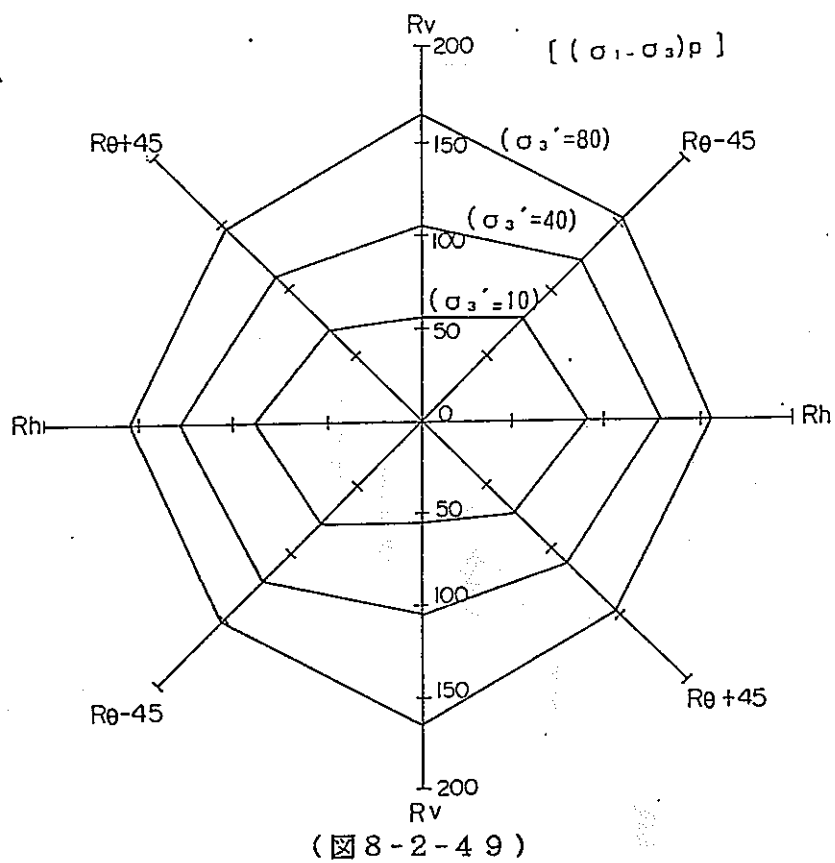


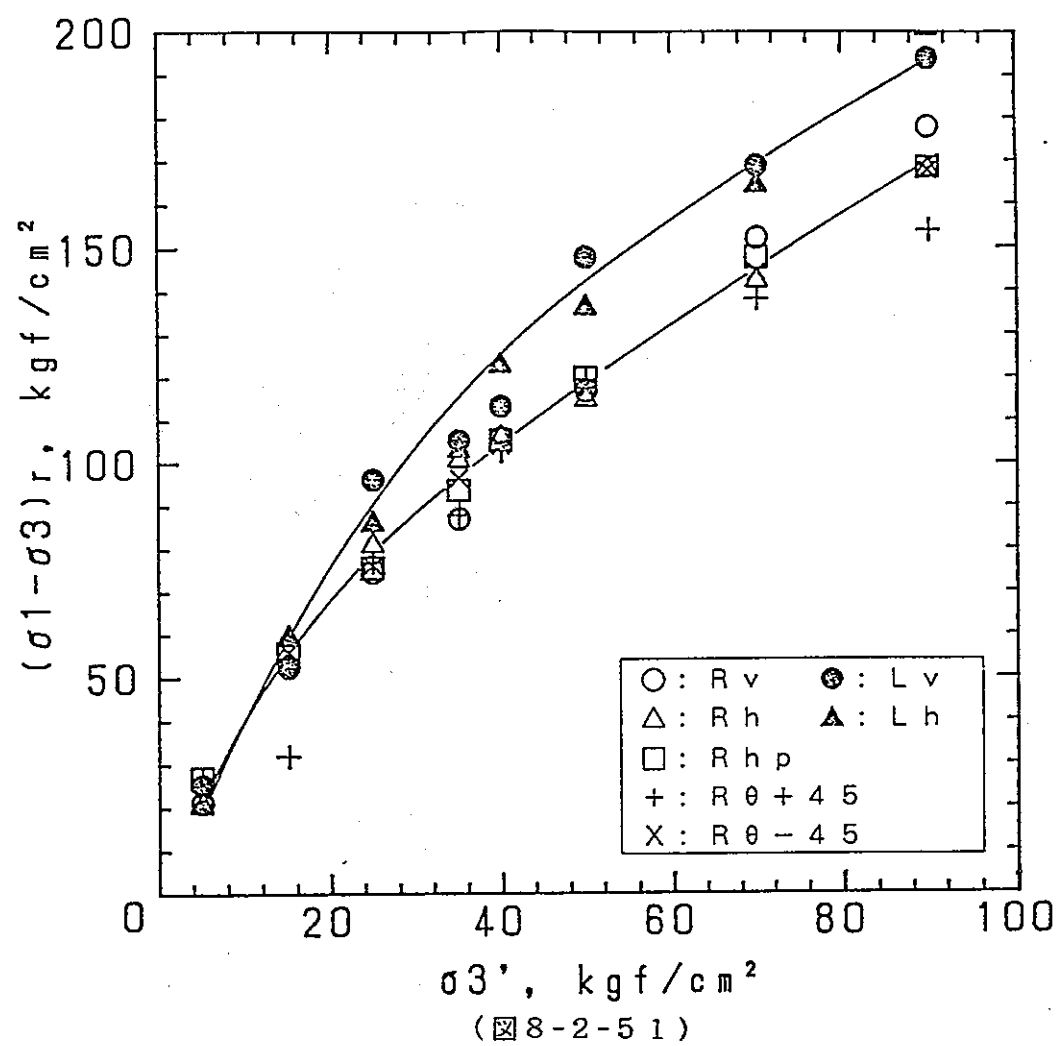
(图 8-2-46)

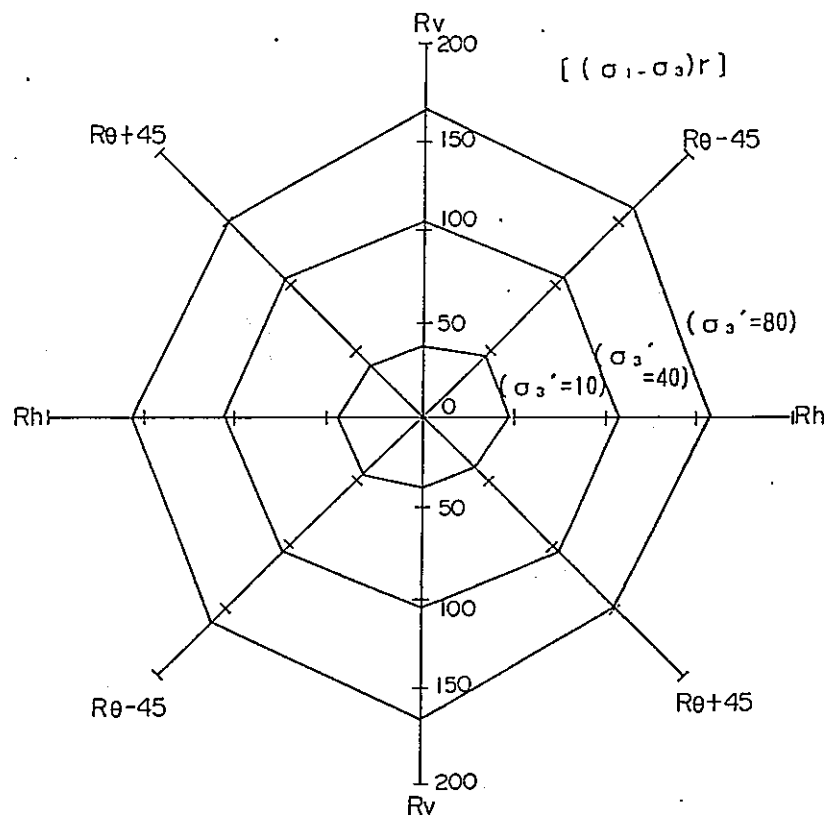


(图 8-2-47)

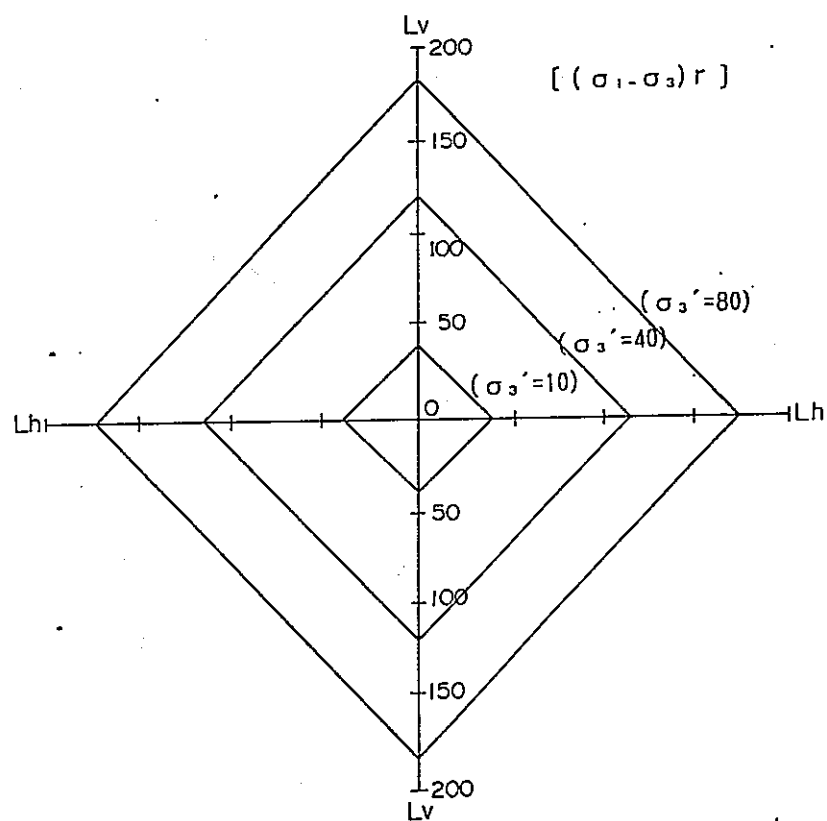




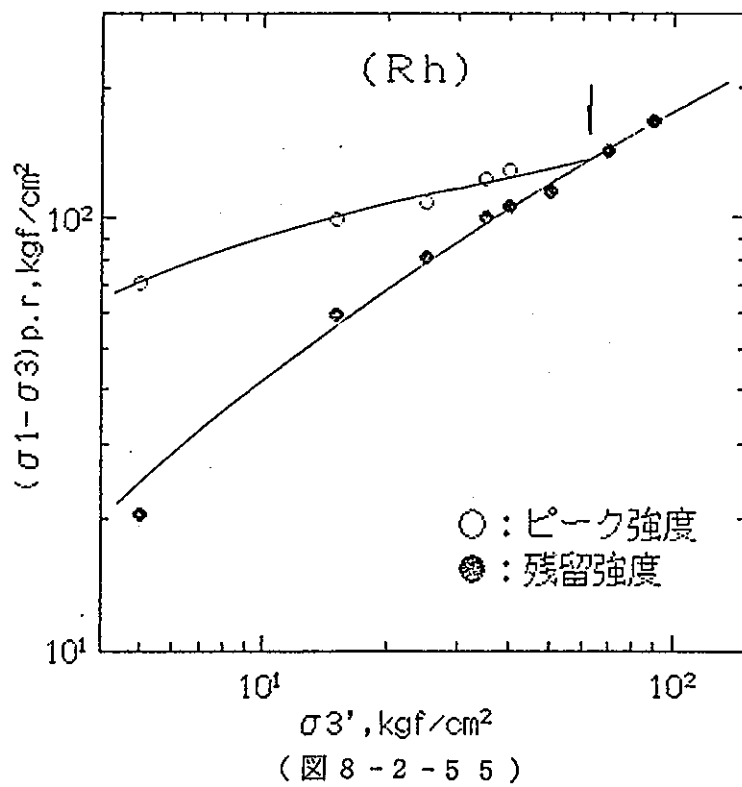
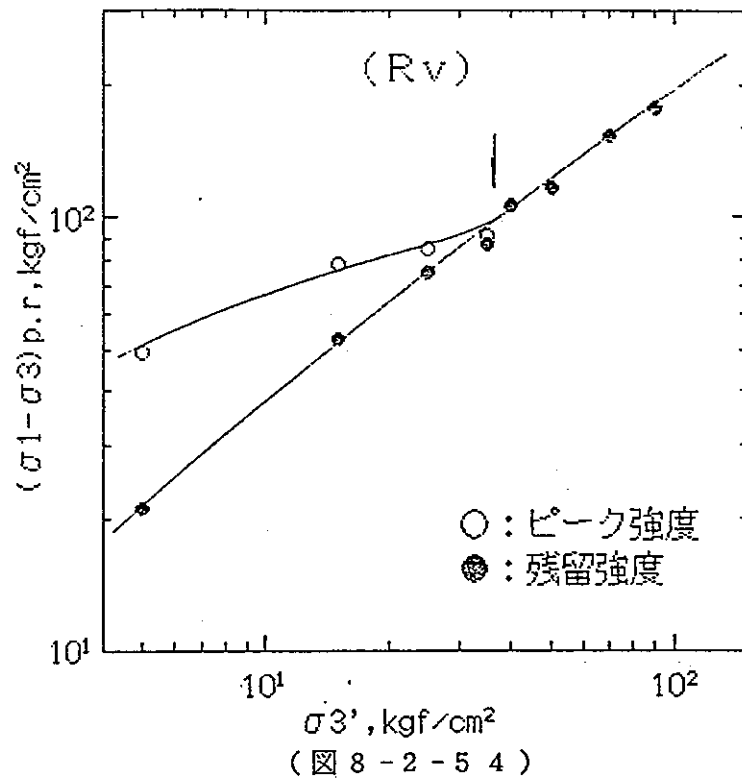


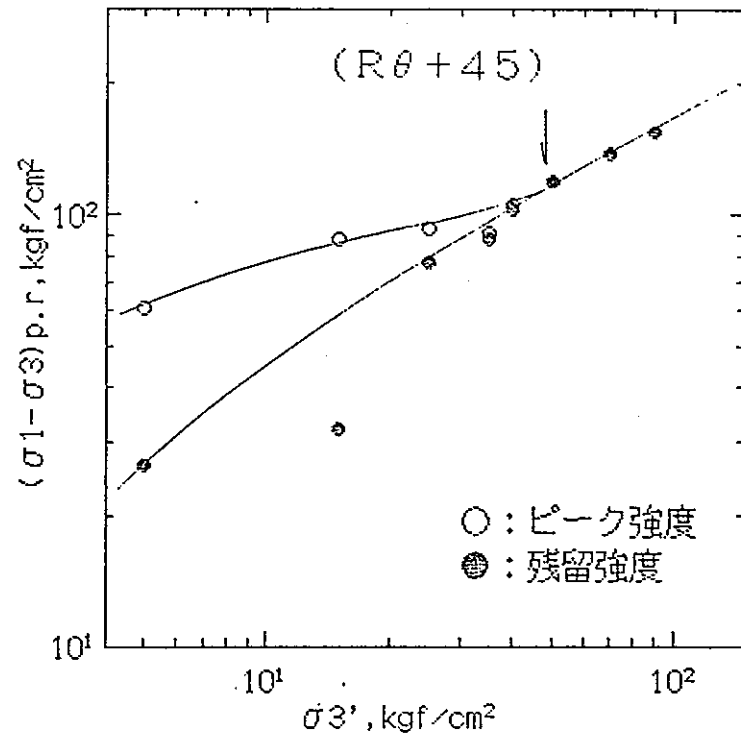


(图 8-2-52)

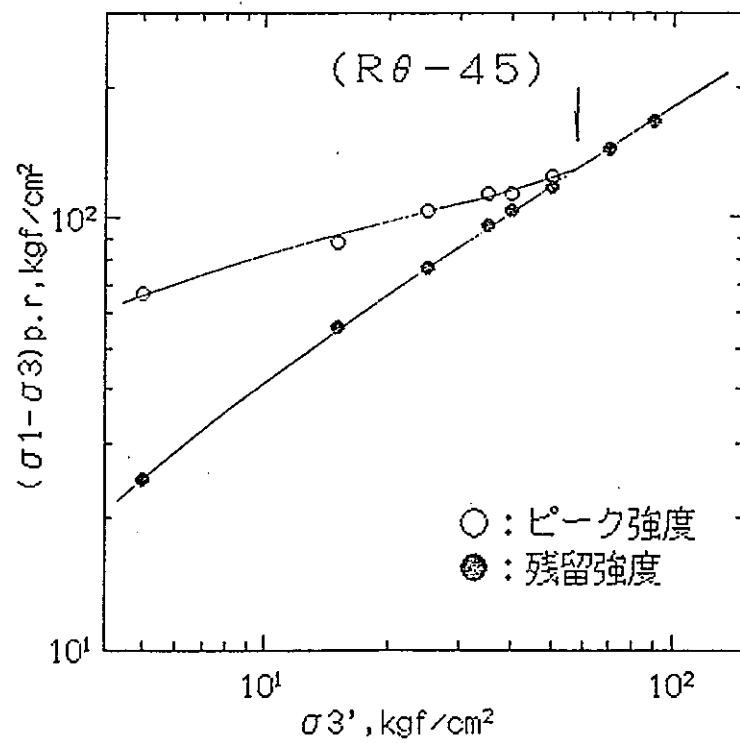


(图 8-2-53)

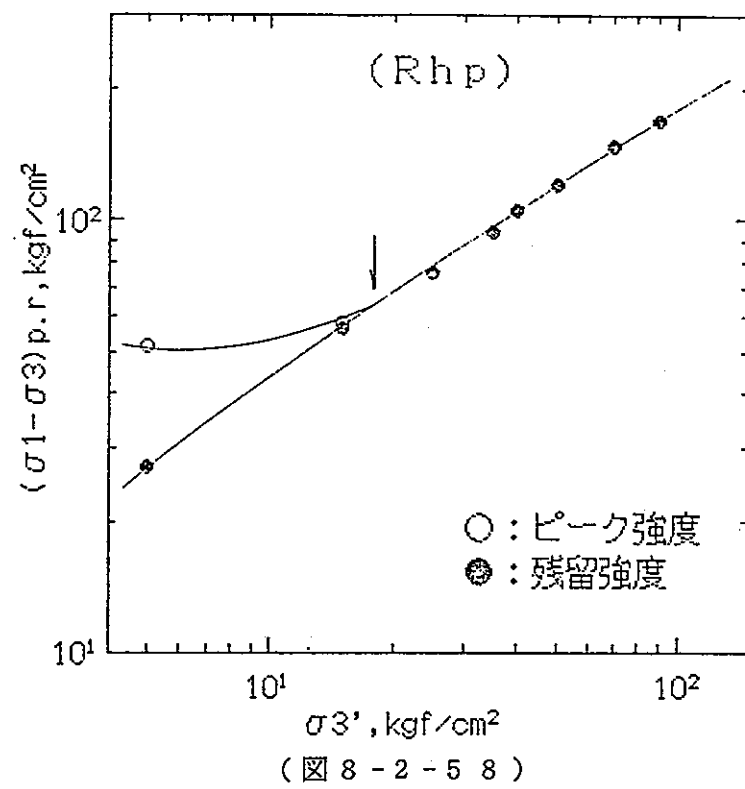


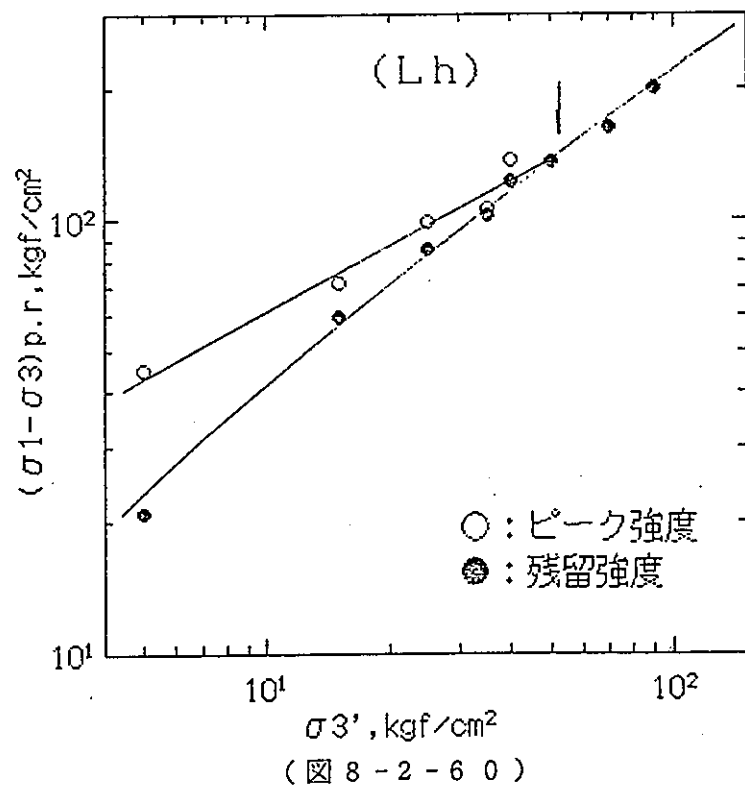
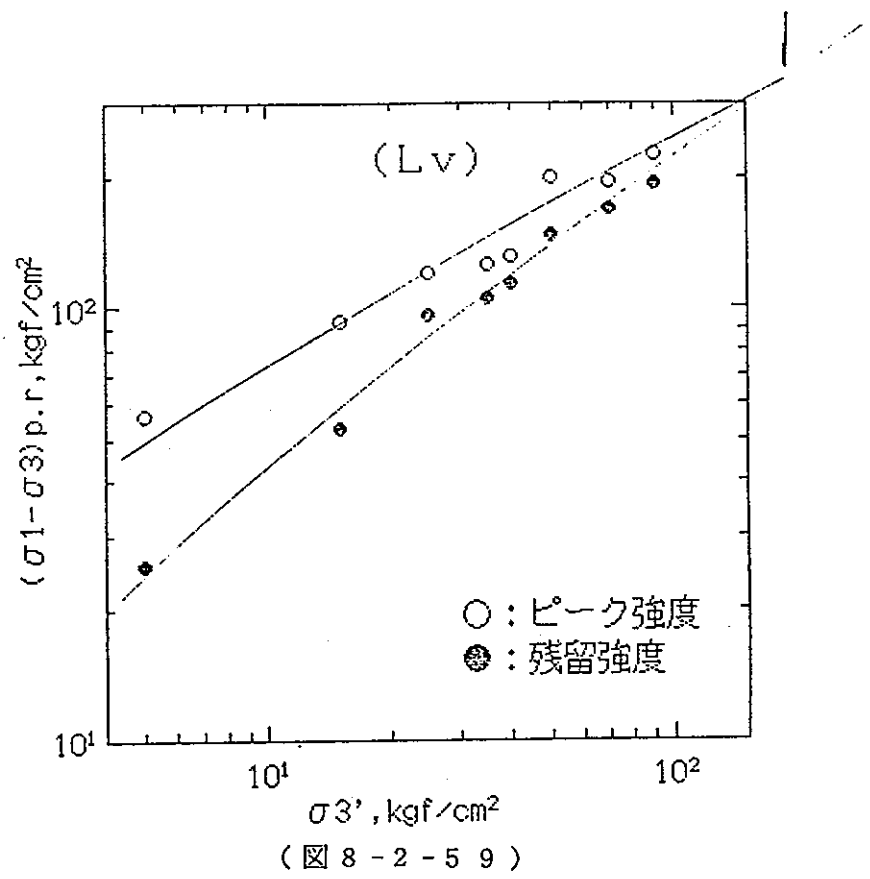


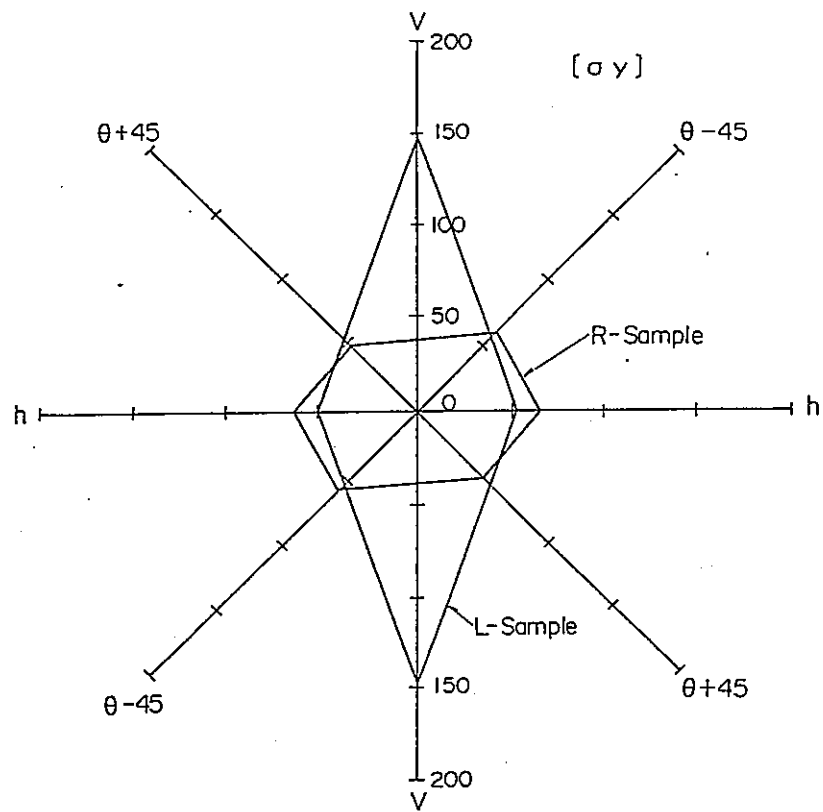
( 図 8 - 2 - 5 6 )



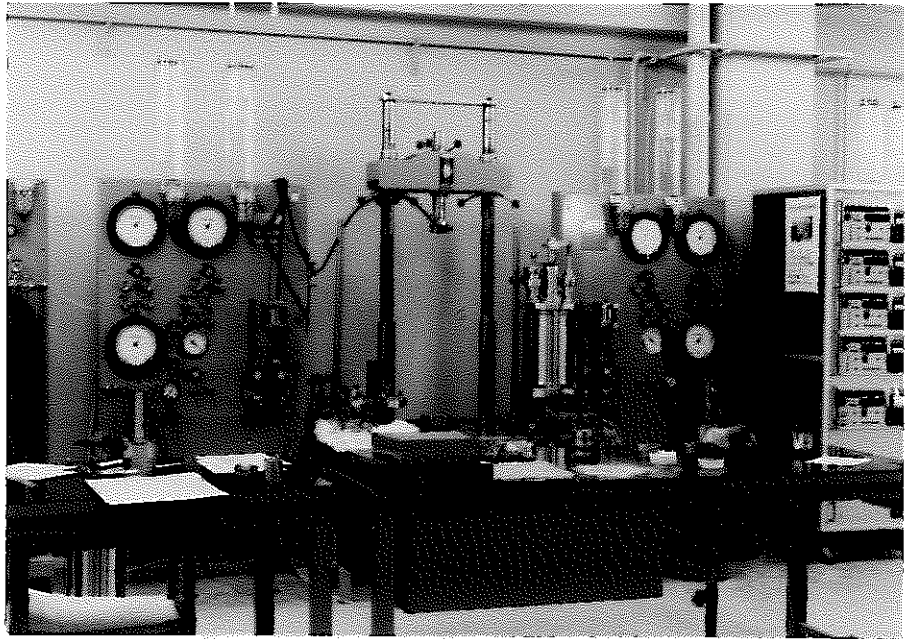
( 図 8 - 2 - 5 7 )



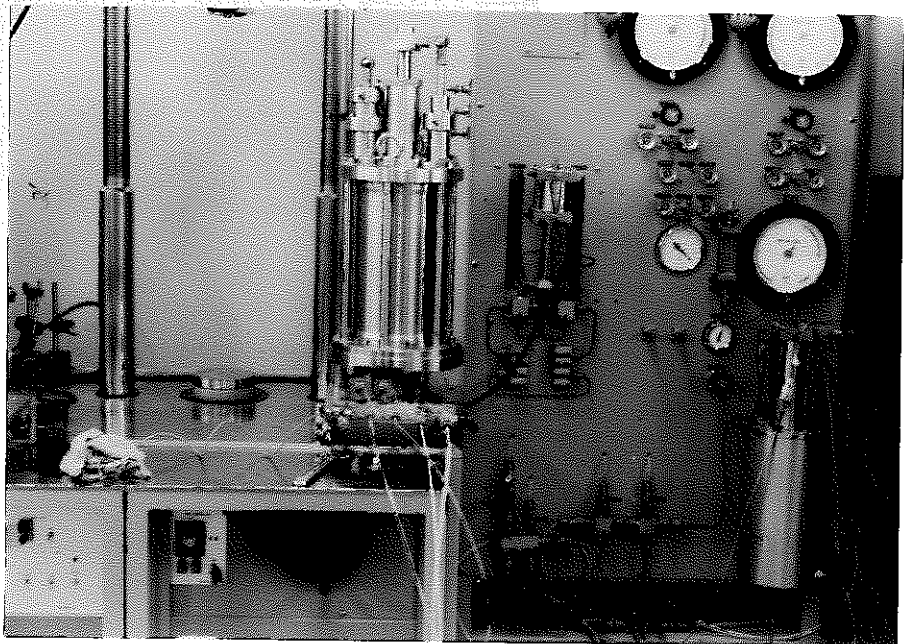




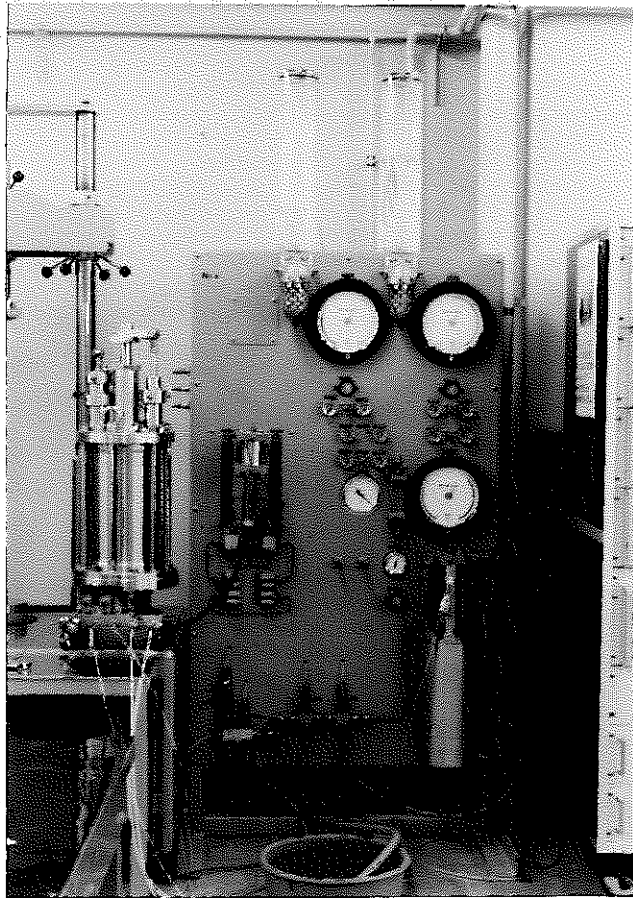
( 8 - 2 - 6 1 )



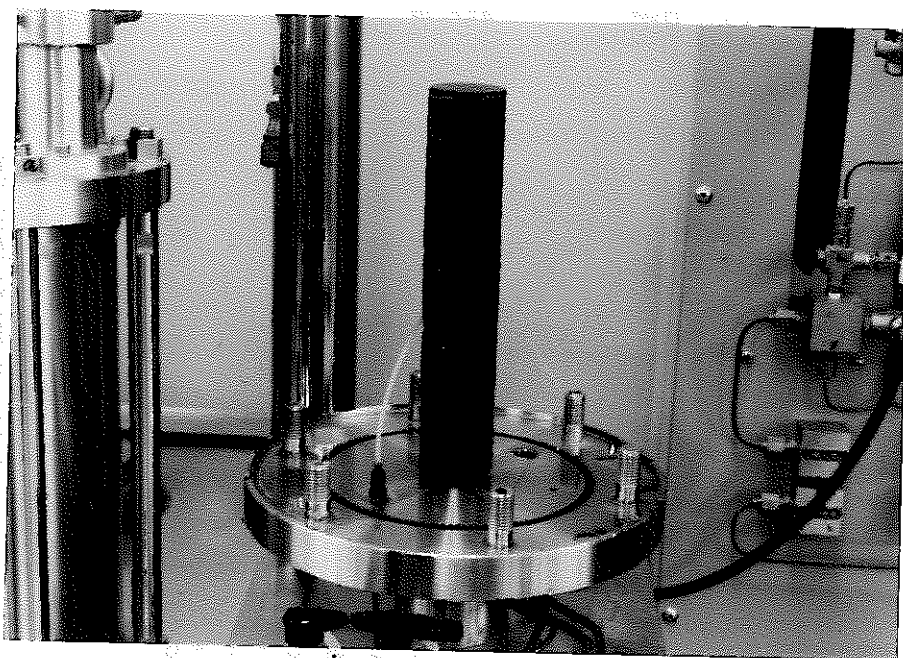
( 写真 8 - 1 - 1 )



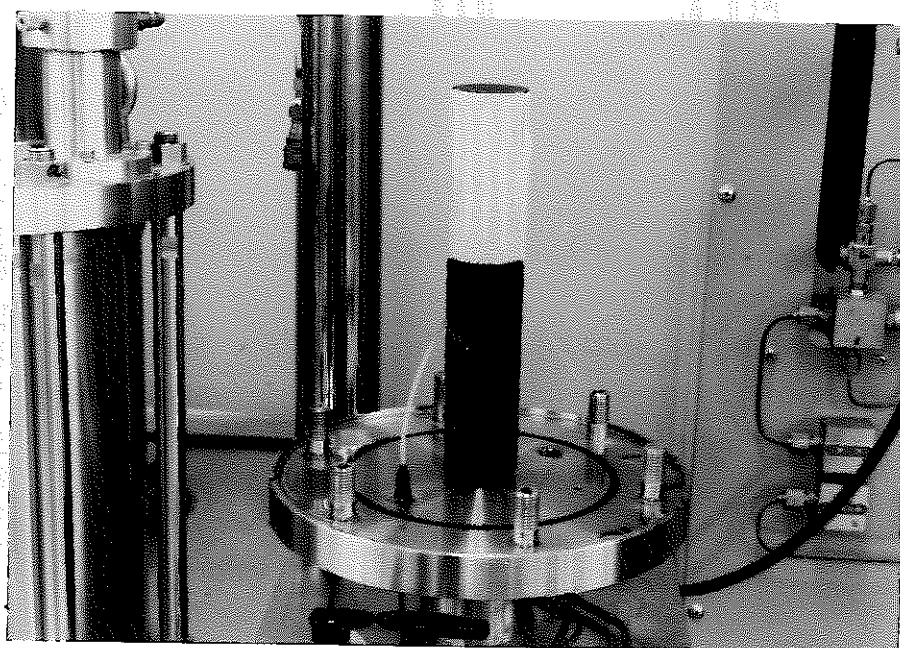
( 写真 8 - 1 - 2 )



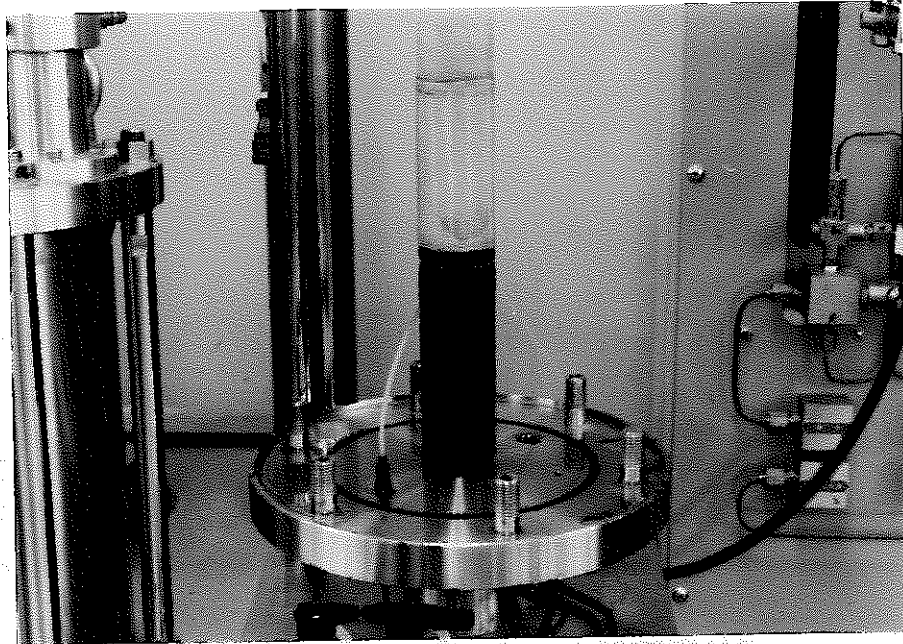
( 写真 8 - 1 - 3 )



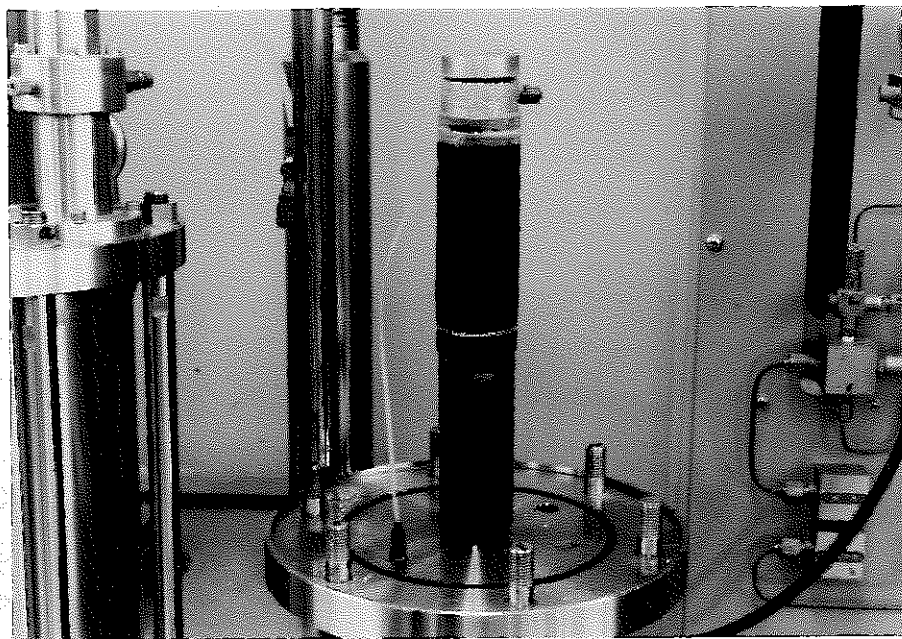
( 写真 8 - 1 - 4 )



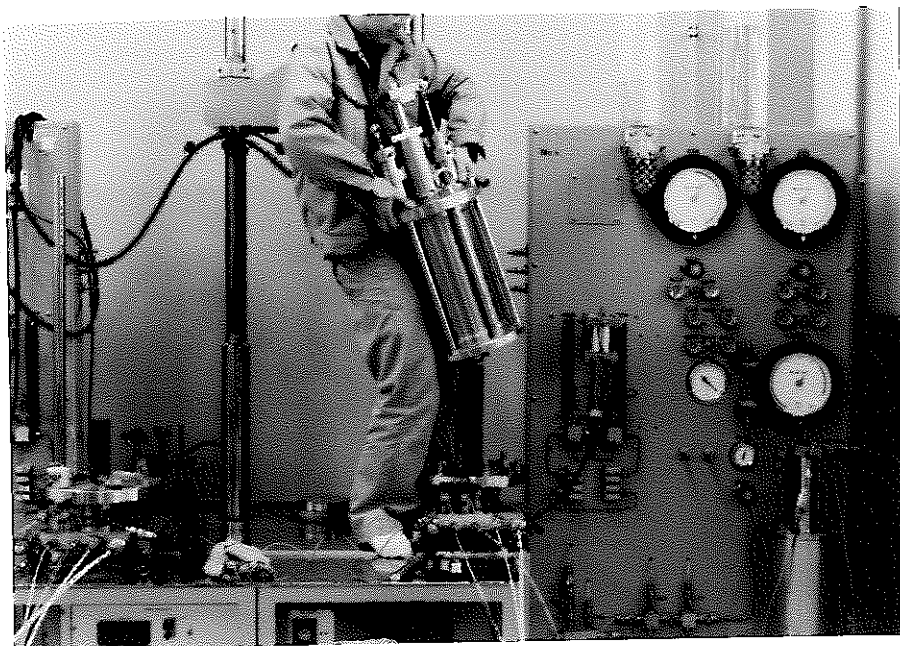
( 写真 8 - 1 - 5 )



( 写真 8 - 1 - 6 )



( 写真 8 - 1 - 7 )



( 写真 8 - 1 - 8 )

## 第 9 章

### 結 論

## 9 . 結 論

以上、各性質について説明してきた。これを表 9 - 1 にまとめ、地質構造と関連付けてまとめると次のようになる。

① 本研究では、顕著な褶曲構造を持つ地盤より、褶曲状態の異なる 2 つの場所から試料を採取した。

地層が直立するほど大きな褶曲作用を受けた左岸試料は、試料採取時に大きなクラックが多数確認され、これは R Q D にもよく現れている。これに起因して、供試体内部にも微小な不連続面が多数存在しているものと予想されたが、左岸試料は右岸試料よりも堆積した年代が古く、かつ地層が下部に属しているので、より大きな圧力が作用し圧密が促進したと思われ、間隙比が小さく密度が大きいという物性を示した。これを見る限り、左岸試料は右岸試料より固結が進んでいるように思われた。

しかしながら実験結果は、供試体内部に存在すると思われる微小な不連続面の影響によって、供試体の内部構造を反映するとされる S 波速度は低下し、無拘束状態でせん断する一軸圧縮時の剛性、強度も低下しており、透水係数は最も大きいという結果であった。また、三軸圧縮特性においては低拘束圧での剛性、強度が低下しているが、高い拘束圧を与えることにより供試体内部に存在すると考えられる不連続面が閉塞し、右岸のどの試料よりも大きな強度を示すなど、過去の応力履歴の影響が再現されている。

② この様に褶曲状態の異なる場所から採取した試料の性質は、長期間にわたる水平力による応力履歴の影響で顕著な異方性を示していた。

降伏拘束圧の異方性は、過去における大きな水平力の

存在を示唆している。

右岸試料では、降伏拘束圧の最も大きいダム軸水平方向では、一軸圧縮特性や三軸圧縮特性において最も大きな剛性、強度を示すなど、水平方向からの応力履歴の影響が顕著であった。

左岸試料では、右岸試料とは逆に水平方向よりも鉛直方向で高い降伏拘束圧を示していた。この事は、現在では試料を採取した地層が直立していることから、現在の鉛直方向は過去には水平方向であったと推測でき、その水平方向の時代に受けた応力履歴が現在もなお残っているためと考えられる。

これらを総合して考察すると、両者の異方性は統一的に証明できるものである。

本研究の目的は、顕著な褶曲作用を受けた軟岩地盤より採取した細粒砂岩の物理的、力学的性質を明かにし、褶曲状態の異なる2つの場所での力学的諸性質の違い、及びそれらの異方性について考察することであった。

今回の実験では、この目的は達せられたと考えて良いだろう。しかし、今後さらに軟岩の物性と地質構造とを解明していくためには、左岸では $\theta 45^\circ$ 方向、及びダム堤体の中央部における種々の方向での物性値を把握していく事が必要であろう。これらを明らかにしていく事で、大きな意味での軟岩の物性と地質構造との関係は、ある程度定量化出来るのではないだろうか。

(表 9 - 1 )

|                   | 褶曲作用の影響<br>(左岸試料と右岸試料の比較)                                                                                                                                                                                       | 異 方 性<br>(左岸試料) (右岸試料)                                                                                              |                                                                                                                     |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 物理的性質             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 左岸試料はクラックが多く試料採取率が低い</li> <li>・ 構成鉱物、粒度分布、土粒子密度に差はない</li> <li>・ 左岸試料は間隙比が小さく、乾燥密度が大きい<br/>(左岸試料の方が固結は進んでいる)</li> </ul>                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物理的性質に差はない</li> </ul>                                                      |                                                                                                                     |
| 弾性波速度             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ P 波速度に差はない</li> <li>・ S 波速度は左岸試料の方が遅い</li> </ul>                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ P 波速度に差はない</li> <li>・ S 波速度に差はない</li> </ul>                                |                                                                                                                     |
| 一軸圧縮時の<br>変形・強度特性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 剛性、強度ともに左岸試料の方が大きい</li> </ul>                                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 剛性、強度は水平方向で大きい</li> </ul>                                                  |                                                                                                                     |
| 透水性               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 透水係数は左岸試料の方が大きい</li> </ul>                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 透水係数は鉛直方向で大きい</li> </ul>                                                   |                                                                                                                     |
| 三軸圧縮時の<br>変形・強度特性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低拘束圧で剛性、破壊強度は左岸試料の方が小さい<br/>あるいは同等</li> <li>・ 高拘束圧で剛性、破壊強度は左岸試料の方が大きい</li> <li>・ 広い拘束圧で残留強度は左岸試料の方が大きい</li> <li>・ 降伏拘束圧は左岸試料の方が大きい</li> <li>・ 降伏拘束圧以上でも差がある</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 剛性、破壊強度は鉛直方向で大きい</li> <li>・ 残留強度に差はない</li> <li>・ 降伏拘束圧は鉛直方向で大きい</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 剛性、破壊強度は水平方向で大きい</li> <li>・ 残留強度に差はない</li> <li>・ 降伏拘束圧は水平方向で大きい</li> </ul> |
|                   |                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 降伏拘束圧以上では異方性は消えてしまう</li> </ul>                                             |                                                                                                                     |

[ 参 考 文 献 ]

- 1 ) 足立紀尚・小川豊和(1980): 堆積軟岩の力学特性と破壊規準,土木学会論文報告集第295号,pp.51-62.
- 2 ) 足立紀尚・林正之(1981): 軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の影響,土木学会論文報告集第305号,pp.97-110.
- 3 ) 小林昭一・足立紀尚(1982): 地盤材料の工学的性質(軟岩を中心として),材料Vol.31,pp.2-10.
- 4 ) 工藤洋三・橋本堅一・佐野修・中川浩二: 異方性岩石における主軸の決定,山口大学工学部研究報告,pp.43-48.
- 5 ) 物理探査学会(1989): 土と岩の弾性波速度,pp.129-165.
- 6 ) 土木学会(1986): ダムの地質調査,pp.43-52.
- 7 ) 土質工学会(1987): 堆積軟岩の工学的性質とその応用,pp.43-114.
- 8 ) 電力中央研究所(1982): 電力中央研究所報告,pp.36-40.
- 9 ) 土岐・三浦・持田・林(1987): 軟岩の力学特性に及ぼす間隙水圧の影響,第24回土質工学研究発表会,pp.1075-1078.