

粗・微細間隙構造からみた  
土の圧密機構の研究

(研究課題番号06660291)

平成7年度科学研究費補助金(一般研究C)

研究成果報告書

平成8年3月

研究代表者 古賀 潔

(岩手大学農学部教授)

## 平成7年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書

研究課題 粗・微細間隙構造からみた土の圧密機構の研究

研究課題番号 (研究課題番号06660291)

研究組織

研究代表者：古賀 潔 (岩手大学農学部教授)

研究経費

平成6年度	1,200千円
平成7年度	800千円
<hr/>	
計	2,000千円

研究発表

### (1)学会誌等

- 1)菊池 智士,古賀 潔:粘土の精密透水係数試験装置の開発, 土壌の物理性, 投稿予定
- 2)杉井 徹,古賀 潔:水銀圧入法による圧密過程中的間隙分布変化 農業土木学会論文集, 投稿予定

### (2)口頭発表

- 1)吉野 眞一,古賀 潔 他:水銀圧入法による二次圧密過程の間隙径分布変化,第29回土質工学研究発表会 平成6年度講演要旨集, pp.297-298, 1994年6月25日
- 2)菊池 智士,古賀 潔 :圧密透水試験器の開発と測定例,農業土木学会東北支部第41回研究発表会講演要旨集, pp.54-55, 1995年10月31日
- 3)杉井 徹,古賀 潔 他:水銀圧入法による圧密各過程の間隙分布変化,農業土木学会東北支部第41回研究発表会講演要旨集, pp.56-59, 1995年10月31日

4)菊池 智士，古賀 潔：粘土の二次圧密および応力緩和中の透水性変化，平成8年度農業土木学会大会講演会，1996年6月発表予定

5)杉井 徹，古賀 潔 他：圧密各過程における間隙構造の変化，平成8年度農業土木学会大会講演会，1996年6月発表予定

## 研究成果

以下のとおり

粗・微細間隙構造からみた  
土の圧密機構の研究

平成8年3月

古 賀 潔

# 目 次

第1章 緒 論	.....	1
1-1 粘土の圧密と Terzaghi 理論	.....	1
1-2 Terzaghi 以降の圧密研究	.....	1
1-3 圧密と粘土の構造	.....	2
1-4 粘土の構造の研究手法	.....	3
1-5 本研究の目的	.....	4
第2章 圧密過程中的の間隙径分布の変化	.....	5
2-1 水銀圧入法の適用	.....	5
2-2 実験方法	.....	7
2-3 実験結果	.....	11
2-4 考 察	.....	31
第3章 圧密過程中的の透水性の変化	.....	34
3-1 間隙構造と透水性	.....	34
3-2 実験方法	.....	35
3-3 実験結果	.....	39
3-4 考 察	.....	47
第4章 結 論	.....	50

## 第1章 緒論

### 1-1 粘土の圧密と Terzaghi 理論

土質基礎地盤に盛土や構造物などの上載荷重が加わると沈下が生じる。地盤が透水性であったり不飽和であればこの沈下は概ね瞬間的に終了するが、飽和した粘土地盤では圧密沈下と呼ばれる長期間にわたる沈下が継続する。圧密沈下は多くの場合、建設事業や市民生活の障害となるので、その量と時間的経過を知ることは工学的に重要な課題であり、土質力学は長い間これを研究対象としてきた。

Terzaghi の圧密理論は粘土の圧密現象を初めて力学的なモデルによって解析し、今日に至るまで実用されている有力な理論である。この理論では有効応力と過剰間隙水圧を定義した上で、圧密現象を①有効応力とひずみの線形関係、②ダルシー則の成立、③間隙水の質量保存則 を理論的骨組みとして解析するものである。これによれば、圧密は浸透水の粘性抵抗によって間隙水の排水に時間かかるために生じる、圧縮の遅れということが出来る。Terzaghi の理論は室内実験で観測される沈下の前半部分をよく説明できる。しかし、後半部分、すなわち過剰間隙水圧が消散した後、ダルシー則に従う排水が起き得ない状態になっても、圧縮が長時間かけて進むことが知られている。この後半部分の圧縮は二次圧密と呼ばれ、前半部分の一次圧密とは機構が異なるといわれている。

### 1-2 Terzaghi 以降の圧密研究

Terzaghi 以降の圧密研究の発展方向としては、三次元圧密への理論的展開、有限ひずみの圧密理論と非線形の応力-ひずみ関係の適用、そして二次圧密の解析などがあるが、ここでは二次圧密の問題についてさらに触れる。

二次圧密を時間による遅れを含んだ応力-ひずみ関係、すなわちレオロジーモデルで説明しようとする研究が 1940~1960 年代を中心にになされた。これは、土の骨格をスプリング、ダッシュポット、スライダーで置き換え、これらの定数を求めようとするものである。

Bjerrum(1967)は応力-ひずみ関係を等時曲線群で表し、一次および二次

圧密の応力経路を描いた。この等時曲線は圧密土層全体に対応しており、土の骨格に関する応力-ひずみ関係ではなかったが、その後の研究に大きな影響を与えた。

Lowe ら(1969), Hawley ら(1973), Leroueil ら(1985), Imai(1992)らの研究は骨格点について、応力-ひずみ-ひずみ速度に関する構成式が存在し、一次・二次圧密を通してこれが適用できることを示している。

吉国ら(1994)は過去の研究を検討した上で、土の骨格を非線形弾粘性液体と総括している。

以上のように、土の骨格点の応力-ひずみおよび時間の関係を表す構成式の研究は過去 20 年間に格段の進歩を遂げたといえることができる。したがって、近い将来これらの基礎研究に基づいた二次圧密の解析手法が確立され、実用化される可能性がある。

一方、二次圧密の機構に関する研究は上述の構成式の研究と比べると、ほとんど見るべきものがないといわざるを得ない。すなわち、骨格が圧縮する際に粘性を示すことは構成式の研究から明らかであるが、粒子レベルでどのような現象が起きているのかについては研究の蓄積が少ない。この問題を検討するためには、圧密により粘土の構造にどのような変化が生じているのかを研究する必要がある。

### 1-3 圧密と粘土の構造

1940 年代に発達したコロイド粒子間の相互作用に関する研究は、土質力学分野における粘土の構造の研究に大きな影響を与えた。この中で、Lambe(1958)の一連の研究は、圧縮性や透水性など土の巨視的力学性を粘土粒子の分散と凝集、および粘土粒子の配向性のなどの構造と結びつけて説明している。その成果は顕著であったため、彼の説は今日でも多くの土質力学教科書に引用されている。

しかし、その後の多くの研究は、粘土の構造は Lambe が描いたような個々の粘土粒子の配列よりは、粒子が集合してできた微細団粒(ped)の存在を無視しては考えられないものであることを示してきた。たとえば、Lambe の弟子 Olsen(1962)は、各種粘土を圧密して間隙比と透水係数の変化を検討し、それらの関係は粘土粒子の集合(cluster)を考えなければ説明できない

としている。また、Yoshinakaら(1973)は締め固めたカオリナイトの電顕観察から、三次元的に広がるブロック様の構造を認めている。

Yongら(1975)は ped の存在を前提とし、ped 内の微細間隙からの排水が二次圧密の原因であるとの説を提起している。さらに大西ら(1988)は二重空隙モデルを用い、ped の力学性を仮定することにより Yong の仮説を数値的に表現することに成功している。また、Akagi(1994)は団粒内に  $\text{Ca}^{++}$  イオン、団粒間に  $\text{Na}^+$  イオンを吸着させた粘土から圧密により排水された間隙水を分析し、圧密後半では  $\text{Ca}^{++}$  が増加することを示している。これらの成果は、団粒の存在を前提とした二次圧密の機構についての数少ない研究例として評価される。

#### 1-4 粘土の構造の研究手法

粘土の構造に関する研究はこの他にも多々あるが、ここでは圧密に直接関係する主な手法をあげ、特徴を述べる。

##### 電子顕微鏡観察

圧密荷重の増加に伴う骨格構造および間隙構造の変化を映像により観察。直接的な観察が可能で、配向の程度を指標で表すことができるが、視野は限定された断面に限られる。観察の評価は客観性に乏しい。

##### x線回折

反射強度のピークから、格子間距離、配向の方向と程度が推定される。  
粘土粒子間の距離が大きい場合は小角散乱装置が必要。

##### 水分特性曲線

十分な体積の試料について定量的な間隙径分布が得られる。  
試験中の水分含量の変化による土の体積変化が避けられない。

##### 透水係数の異方性

圧密荷重方向に対する水みちの方向性がわかる。



## 水銀圧入法

十分な体積の試料について広い範囲で定量的な間隙径分布が得られる。  
試料は予め乾燥する必要があるが、乾燥過程での体積変化が避けられない。

## その他の物理量による異方性の測定

誘電率、電気伝導度、熱伝導度、磁気を用いることにより、土粒子の配列の判定が可能とされている。

以上のうち、電子顕微鏡観察のみが骨格および間隙の構造を共に直接観察することができ、それ以外は骨格または間隙のみの評価となる。したがって、構造の評価はいくつかの手法の組合せによることが望ましいといわれている。

### 1-5 本研究の目的

本研究は粘土中に微細な団粒構造が存在することを前提に、一次および二次圧密の機構に関する情報を粘土の構造測定から検討することである。

とくに、一次圧密過程と二次圧密過程における間隙構造に関する情報として、間隙径分布と透水性に着目する。これは本来、土の構造には骨格構造と間隙構造の両面があり、これらを統一的にとらえることが重要であるのだが、現時点では圧密に伴う骨格構造の変化を十分客観的に捉える手法が確立していないと筆者は判断しているからである。

間隙径分布は、水銀圧入法とくに後述する二回侵入法を用いると、封入間隙と自由間隙を分離して測定できる。また、これらの間隙がそれぞれ団粒間隙、団粒内間隙にほぼ対応すると考えられるので、一次、二次の圧密過程でどの間隙が圧縮、減少するのかを測定できることになり、圧密機構について意義ある情報を得ることができるものと思われる。

透水係数は、供試体の上端から下端にいたる間隙の内、主要な水みちとなっている粗間隙の特性を反映するものである。一次圧密過程の透水係数を直接測定することは困難であるが、二次圧密過程では工夫すれば可能である。二次圧密過程で粗間隙がどのように変化するのかを、透水係数によって非破壊的、定量的かつ連続的に測定する意義は大きいと言える。

## 第2章 圧密過程中的間隙径分布の変化

### 2-1 水銀圧入法の適用

水銀圧入法 (Mercury Intrusion Porosimetry, 以下 MIP と略記する) は乾燥、脱気した多孔質体試料に圧力をもった水銀を侵入させ、水銀の圧力と圧入量を測定することにより、試料の間隙径分布を測定する方法である。圧入圧力  $P$  と間隙径  $D$  の関係は、間隙が円筒形であると仮定して、次式により求める。

$$D = \frac{-4\sigma \cos \theta}{P}$$

ここで、 $\sigma$  は水銀の表面張力 ( $484 \text{ dyne/cm}^2$ )、 $\theta$  は水銀の土粒子に対する接触角 (同 141.3 度) である。

間隙が円筒形でなく径が変化する場合は、 $D$  は水銀が侵入しようとする部分の径である。また、断面が円形でなく、不定形の場合は  $D$  は等価直径ということになる。水銀圧入法の誤差が最も顕著に現れるのは、間隙がインクボトル様の形状を持つ場合である。この場合は、実際には大きな径をもつボトルの肥大部がボトルのネックの径をもつものとして測定される。

土の間隙の形状は複雑であり、上記の式を用いて間隙径を計算することには問題が残る。したがって、結果の解釈は慎重に行う必要がある。しかし、本研究のように圧密各過程での間隙分布の変化を相対比較する場合には、問題は軽減されよう

本研究で採用した2回侵入法の原理は以下のとおりである。まず、1回目の圧入で試験器の最高圧力まで加圧する。これによって、極微細な間隙を除く全間隙に水銀が侵入し、圧入圧力-侵入量の関係が得られる。次に、水銀圧力を大気圧まで減じると、試料中の水銀の一部が浸出する。この時、試料内部に残留する水銀は前述のインクボトル様の肥大部にあると考えられる。その後、再び2回目の圧入を行うと、先に水銀が浸出した部分に再度侵入する。2回目に水銀が侵入した間隙部分は、水銀が加圧・減圧により可逆的に出入りできる部分であり、これを自由間隙と呼ぶ。これに対し、残留している部分を封入間隙と呼び、全間隙から自由間隙を減ずることにより求めることができる。

以上のように、2回侵入法は比較的簡単な操作で、全間隙を封入間隙と自由間隙に分離することができる。封入間隙の所在としては、団粒間隙の肥大部分や、団粒内の間隙のうち周囲を微細な間隙で囲まれた空洞状の間隙が考えられる。一方、自由間隙は団粒内部で土粒子に囲まれた微細な間隙や土粒子表面に開口する円筒ないし平板状の間隙が考えられる。

Griffiths ら(1990)は封入および自由間隙の実体を Collins ら(1974)のモデルによって図 2.1 の様に説明している。

なお、本研究では第1回侵入後の減圧を大気圧までとしているが、これを真空まで減圧した場合は自由間隙は増加し、例えば団粒間隙の狭さく部などがこれに加わるものと思われる。

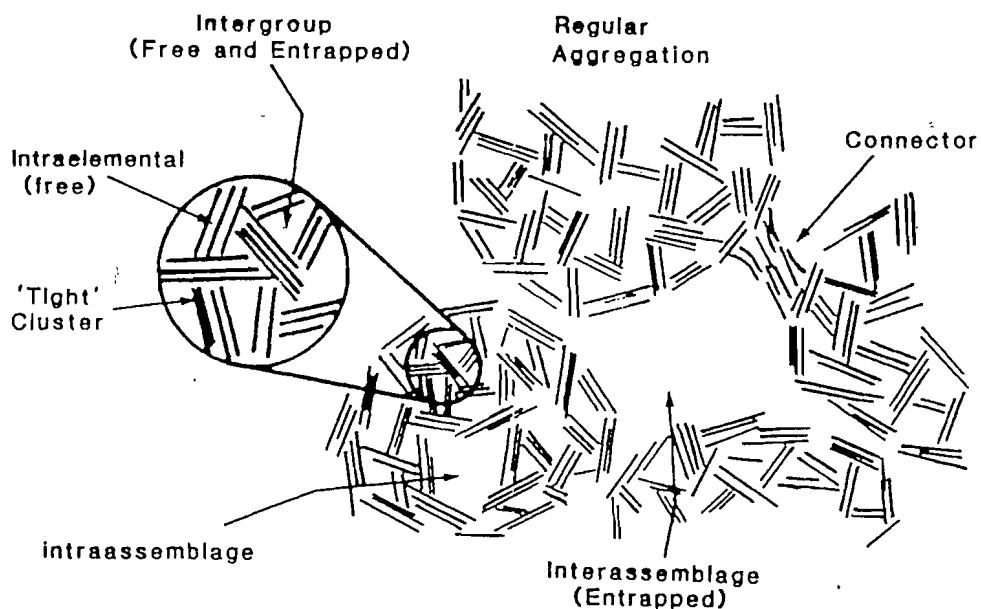


図 2.1 封入間隙と自由間隙の所在

(Collins らの構造モデルに Griffiths らが解釈を加えたもの)

## 2-2 実験方法

### 2-2-1 供試土

供試土には火山灰質粘性土である岩手大学附属滝沢農場心土（以下火山灰土）と岩手県玉山村下日戸の流紋岩風化土を用いた。主な物理性を表 2.1 に示す。

表 2.1 供試土の物理性

試料	岩手火山灰ローム土	流紋岩風化土
真比重	2.74	2.58
粒径分布 シルト分(%)	74	63
粘土分 (%)	24	37
$W_L$ (%)	97.0	47.9
$W_P$ (%)	67.9	38.1
$I_P$	29.1	8.28
日本統一土質分類	VH <sub>2</sub>	M <sub>L</sub>

### 2-2-2 供試体作成

#### 1) 試料調整

供試土は大量の逆浸透水で希釈し、水中で 74 $\mu$ m 篩を通過させた後、一昼夜放置し、上澄み液を除去した。沈定したスラリーを保存した。

スラリー試料は以下の圧密試験の直前に真空中で攪拌して脱気した。

#### 2) 圧密、凍結

火山灰土については、スラリーを内径 60mm、高さ 20mm の標準圧密試験器の圧密リングに注ぎ、自重圧密させた後、荷重を 0.4kgf/cm<sup>2</sup> まで徐々に増加させて予圧密した。圧密装置は三連で、うち一つは 24 時間圧密用とし、他の二つに先行して試験を行った。その時間沈下曲線から  $\sqrt{t}$  法により一次圧密終了時点、二次圧密途中の時間を定め、他の二つがそれぞれの時間に達した時に除荷し、凍結した。

上述の操作では除荷から凍結まで 90~120 秒を要し、その間の供試体の体積変化が避けられない。そこで、新たに図 2.2 に示す圧密室を製作した。供試体を包む圧密リングは肉厚を薄くし、ポーラスメタルを支える底板と載荷板には大きな穴をあけてあり、圧密室ごと液体窒素による凍結が可能である。流紋岩風化土の圧密にはこの改良型の圧密室を用いた。

載荷は荷重増加比を 1 として、0.4~12.8kgf/cm<sup>2</sup> (39~1,254kPa) の範囲で行った。

### 3) 乾燥

2)で凍結した試料を減圧瓶に入れ、これを $-2^{\circ}\text{C}$ の低温恒温水槽に入れて脱気し、真空凍結乾燥した。ある程度乾燥が進んだ時点で、乾燥促進のために減圧瓶に五酸化リンを入れ、真空乾燥を続けた。五酸化リンは水分の吸収が見られなくなるまで適宜交換した。完全に乾燥が終了するのに要した日数は約10日であった(図2.3)。

## 2-2-3 水銀圧入

装置は Carlo Erba 社製のマクロポアー・ユニットおよびポロシメータ2000を用いた。水銀圧力は0(真空)から開始して2000barまで増加させることができる。

水銀が試料に侵入する際に粘性抵抗を受けるので、水銀圧力の上昇は可能な限り緩速で行った。また、2回侵入法で必要な減圧も同様である。

## 2-2-4 計算方法

### 1) 累積侵入曲線

一つの試料について2回以上の測定を行い、ばらつきの少ないものについて浸入量の平均計算を行い、第1回侵入および第2回侵入の累積侵入曲線を求める。これらは各々、全間隙、自由間隙に対応する。次に、第1回の累積侵入量と第2回の累積侵入量の差を計算し、封入間隙の累積侵入曲線を求める。

なお、これらの分布曲線の横軸(間隙径)は数nmから100,000nmまでの広い範囲を含むため、対数軸を用いる。

### 2) 間隙量分布曲線

各累積浸入量曲線を対数軸に関して数値微分して、間隙量分布曲線を求める。なお、対数軸の微分幅は1/64サイクル(1サイクルは間隙径が10倍となる横軸上の距離)とした。

### 3) 間隙量変化分布曲線

着目する圧密過程の終点の間隙量分布量から始点の間隙量分布量を差し引いて間隙量変化分布曲線を求める。例えば、一次圧密過程であれば終点は当該の一次圧密終了時、始点は前段階の24時間圧密終了時の分布を用いる。

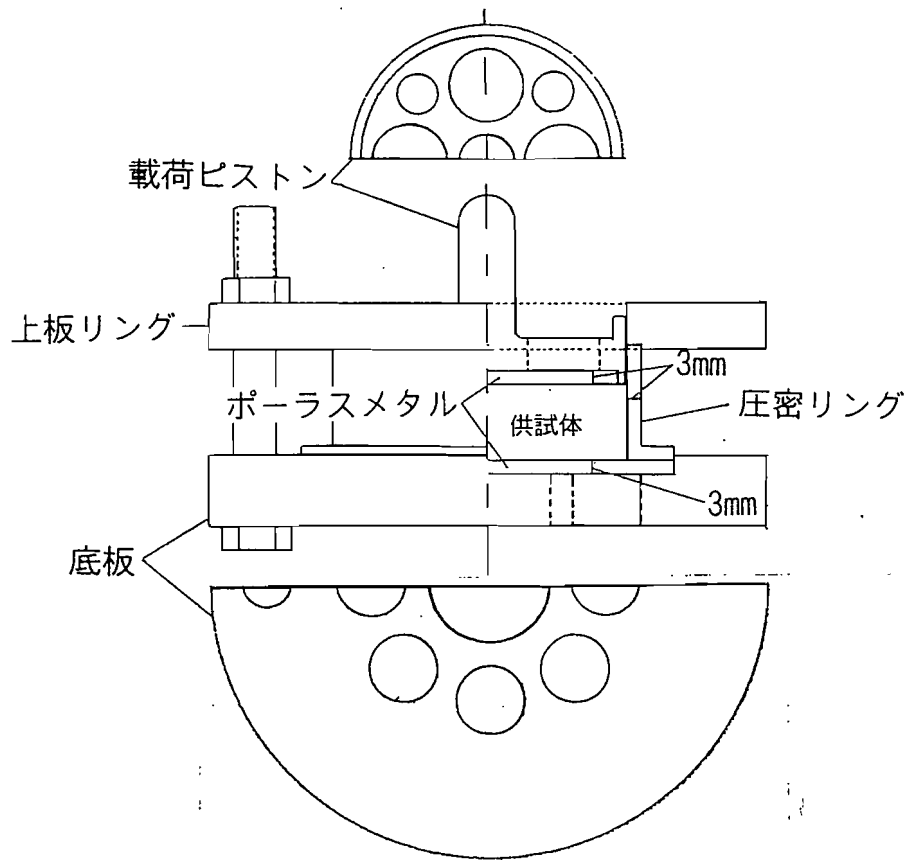


図 2.2 液体窒素凍結用圧密室

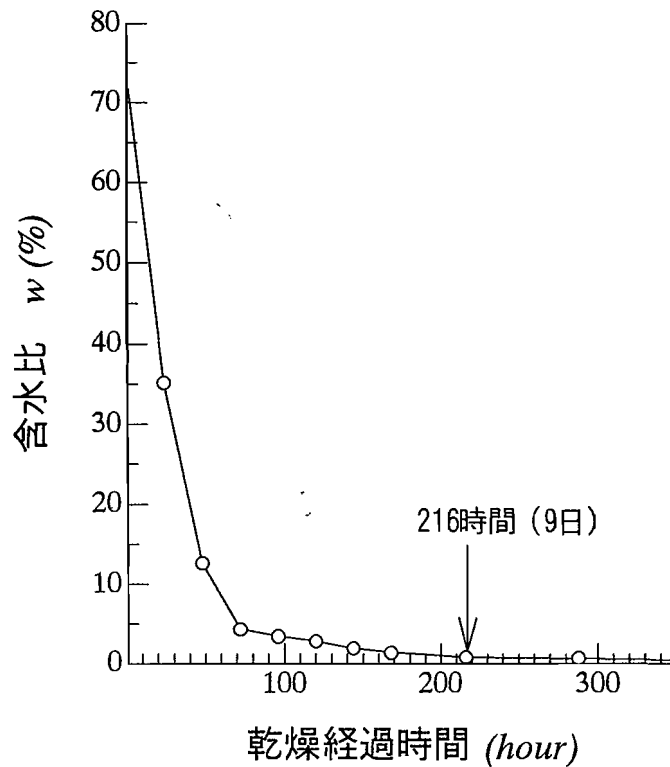


図 2.3 凍結試料の乾燥過程

## 2-2-5 電子顕微鏡観察

流紋岩風化土については凍結乾燥試料を走査型電子顕微鏡写真で観察した。

## 2-3 実験結果

### 2-3-1 火山灰質粘性土の結果

#### 1) 荷重 0.8~12.8kgf/cm<sup>2</sup> の二次圧密終了段階の比較

0.8~12.8kgf/cm<sup>2</sup> の各載荷段階での全間隙の分布量曲線と変化分布曲線を図 2.4 に示す。

それぞれの分布曲線は約 700~1,100nm 付近に 1 つのピークを持つ類似の分布形を示す。ここで、荷重が増加すると 3.2, 6.4, 12.8kgf/cm<sup>2</sup> の各段階ではピークを小間隙径方向（左方向）に移動するが、1.6kgf/cm<sup>2</sup> 段階のみピークを大間隙径方向（右方向）に移動している。また、各荷重により減少する間隙径の範囲が 1.6kgf/cm<sup>2</sup> では約 600nm まで、3.2kgf/cm<sup>2</sup> では約 350nm まで、6.4 と 12.8kgf/cm<sup>2</sup> では約 200nm 付近までと、荷重の増加に伴い小間隙方向に広がっていくことが分かる。また、0.8kgf/cm<sup>2</sup> 段階に約 2,000nm 以上に粗間隙が残留していることが特徴である。

各荷重の変化分布曲線からみると、3.2 および 6.4kgf/cm<sup>2</sup> 圧密過程では、各々 1,500, 1,100nm 付近で分布量を大きく減少させ、350~1,100nm, 200~900nm の広範囲で間隙量が増加する。また、12.8kgf/cm<sup>2</sup> 圧密過程でも約 900nm 付近で大きく減少し、約 100~500nm の範囲で僅かであるが増加する傾向にある。このように 3.2, 6.4, 12.8kgf/cm<sup>2</sup> 過程では、粗大な間隙径で減少、それより小さい間隙径で再び増加するという類似した傾向を示す。一方、1.6kgf/cm<sup>2</sup> 過程では約 2,000nm 以上で減少、約 1,500nm 付近で増加、約 1,000nm またそれ以下の間隙径で減少するという全く異なる傾向を示す。この現象は、0.8kgf/cm<sup>2</sup> 荷重で残留していた約 2,000nm 以上の粗間隙の圧縮分が、約 1,500nm 付近の間隙に変化したことによるものと考えられる。

#### 2) 各圧密荷重での一次・二次圧密過程の比較

ここでは紙面の都合で、低荷重領域の代表として 1.6 kgf/cm<sup>2</sup>、高荷重領域の代表として 12.8 kgf/cm<sup>2</sup> の結果を示す。

##### ① 1.6kgf/cm<sup>2</sup> 圧密過程

図 2.5 に 0.8kgf/cm<sup>2</sup> の二次圧密終了段階と 1.6kgf/cm<sup>2</sup> の一次圧密終了、二次圧密途中、二次圧密終了段階の各間隙径分布、図 2.6 に圧密各過程での各分布変化を示す。



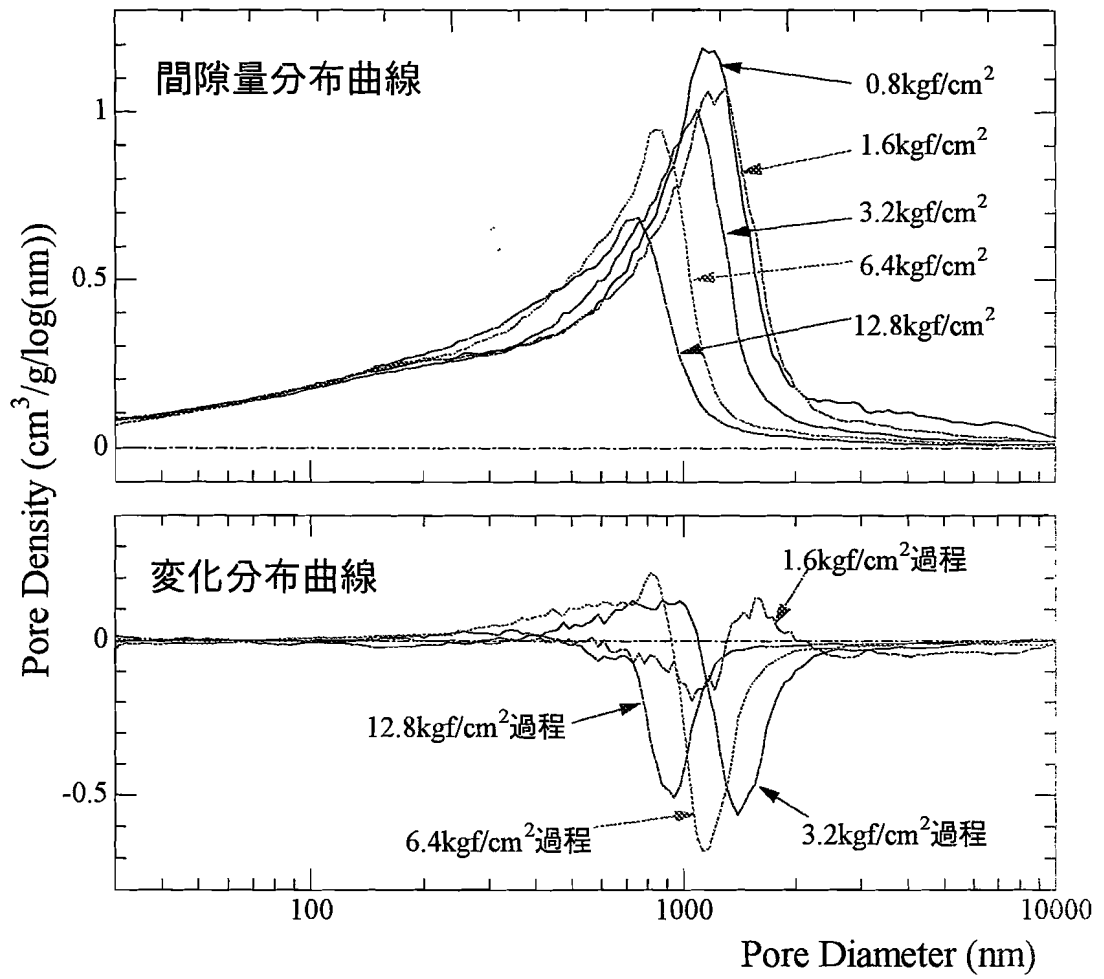


図 2.4 各圧密荷重における間隙量分布と変化量分布の比較  
(火山灰質粘性土)

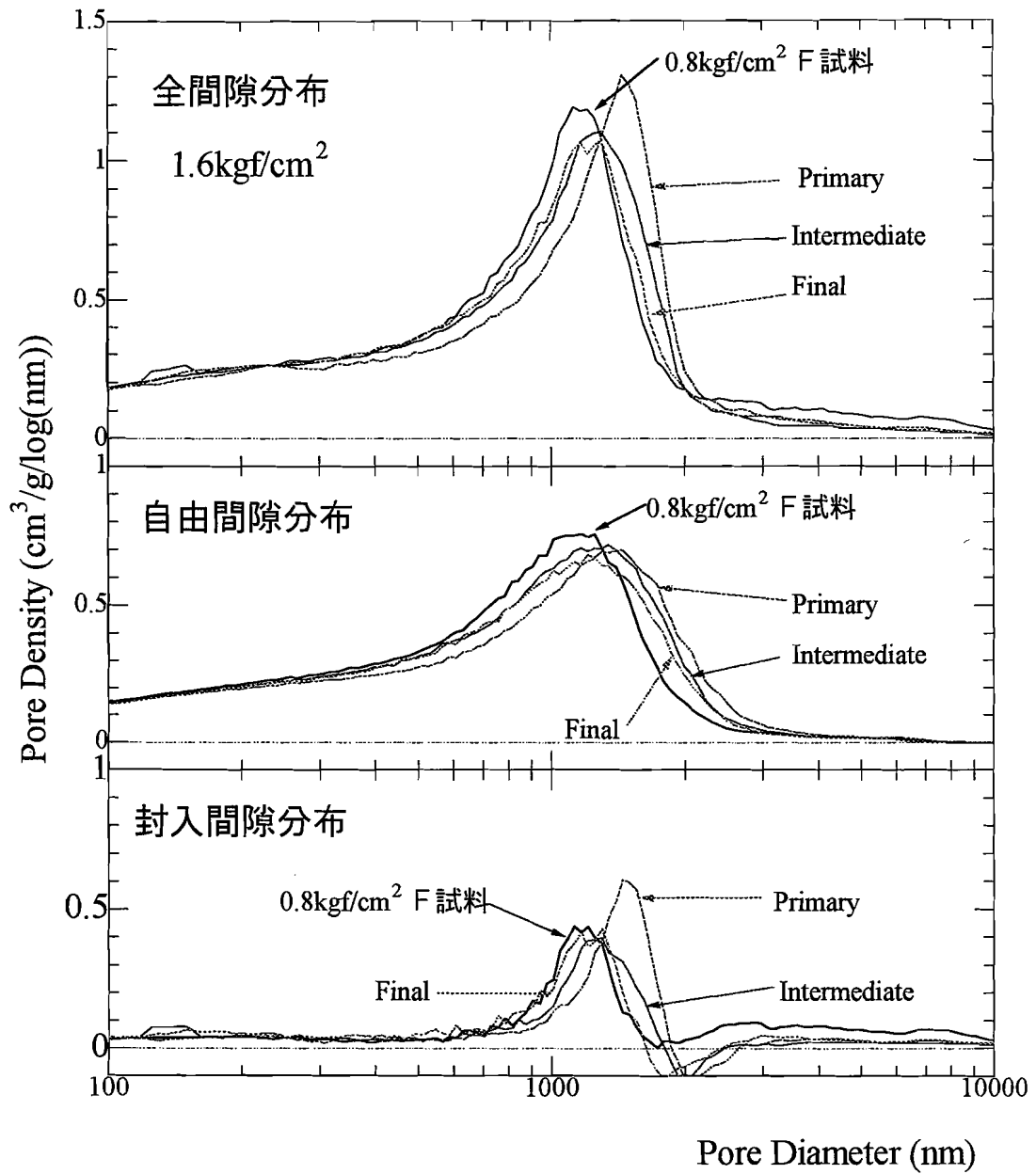


図 2.5 各種間隙量分布の比較(火山灰質粘性土, 載荷重 1.6kgf/cm<sup>2</sup>)

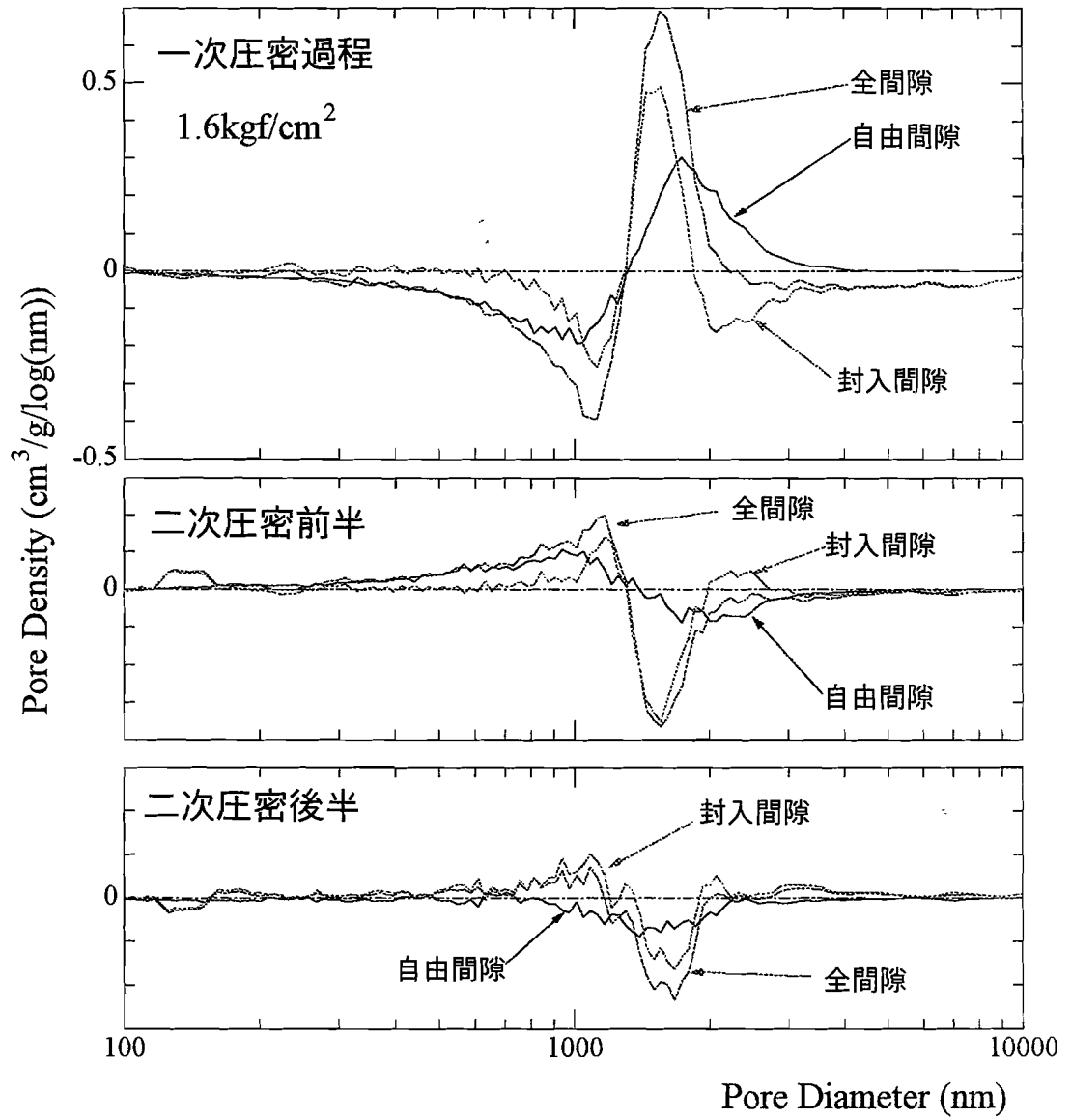


図 2.6 各種間隙量変化分布の比較(火山灰質粘性土, 載荷重 1.6kgf/cm<sup>2</sup>)

### [一次圧密過程]

これは、 $0.8\text{kgf/cm}^2$ の分布から $1.6\text{kgf/cm}^2$ の一次終了時への変化で示される。自由、封入ともに分布曲線はピークを大きく右に移動している。特に、封入間隙の分布曲線が右上がりに大きく移動している。これは、この過程にのみに現れる現象である。また、全間隙の分布で約 $2,000\text{nm}$ 以上の間隙径で分布の低下が見られる。これを変化分布曲線で見ると、約 $4,000\text{nm}$ 以上では自由間隙は変化せず、封入間隙の減少のみが見らる。約 $2,000\text{nm}$ 付近では封入間隙は減少、自由間隙は増加を示す。また、約 $1,500\text{nm}$ 付近では両間隙ともに増加を示している。ここで、圧密の進行中に間隙体積が増加（膨張）するとは考えられないので、より大径の封入間隙が自由間隙に転化し、移行したものであると考えられる。なお、封入間隙は単に大径から小径へ移行したものと考えられる。また、約 $1,100\text{nm}$ 以下の間隙径においては両間隙とも減少を示しているが、自由間隙の減少は約 $100\text{nm}$ まで及んでおり、減少が約 $700\text{nm}$ までしか及ばない封入間隙とは対照的である。

### [二次圧密前半]

各間隙の分布は、ピークを左に移動する類似した傾向を示している。しかし、封入間隙がピークを大きく下げながら移動するのに対し、自由間隙はピークの分布をそのまま保ちながら移動している。

変化分布曲線を見ると、自由間隙、封入間隙ともに移行を示している。すなわち、自由間隙は約 $1,200\sim 3,000\text{nm}$ で減少し、約 $200\sim 1,200\text{nm}$ で増加を示す。一方、封入間隙は約 $1,200\sim 2,000$ で減少し、約 $800\sim 1,000\text{nm}$ で増加を示しており、自由間隙に比べて間隙量の変化範囲が狭い。しかし、約 $1,500\text{nm}$ 付近での減少が大きいため全間隙の減少を支配している。逆に、約 $300\text{nm}$ 以下では両間隙ともに増加するが、自由間隙の方がより小径にまで増加範囲が及んでいる。

### [二次圧密後半]

封入間隙の間隙分布はピークを左に移動するが、自由間隙の間隙分布はピークの移動を伴わずにそのまま低下を示している。

変化分布曲線を見ると、封入間隙は約 $1,800\text{nm}$ 付近で大きく減少して約 $1,000\text{nm}$ 付近に移行する。これに対して自由間隙は、約 $800\sim 2,100\text{nm}$ の間隙径にわたり減少のみを示している。これは、見かけ上は自由間隙の消滅を伴う圧縮であると見られる。このように、二次圧密後半の自由間隙の圧

縮は、一次圧密過程と比べてより小さな径を中心に行われ、かつ移行が見られない。長い時間をかけてより徹底した圧縮が進行しているものと思われる。

以上のように、 $1.6\text{kgf/cm}^2$  では一次圧密と二次圧密の間隙の変化には顕著な相違が見られた。

## ② $12.8\text{kgf/cm}^2$ 圧密過程

図 2.7 に載荷重  $12.8\text{kgf/cm}^2$  における各間隙分布量の比較、図 2.8 に圧密各過程における各間隙の分布変化の比較を示す。

### [一次圧密過程]

各分布曲線はピークをそのまま低下させる傾向を示す。

変化分布曲線を見てみると、自由間隙、封入間隙ともに減少を示し、間隙体積の消滅を伴う圧縮が進行している。特に、自由間隙は約  $100\text{nm}$  付近まで圧縮が及んでいる。

### [二次圧密前半]

各間隙径分布は、一次圧密過程と同様にピークをそのまま低下させる傾向を示す。特に、自由間隙のピークの低下が顕著に現れている。

変化分布曲線では、自由間隙、封入間隙ともに減少を示し、消滅を伴う圧縮が進行している。特に、自由間隙は約  $400\sim 1,100\text{nm}$  の広範囲で減少している。

### [二次圧密後半]

各分布曲線は、多少ピークを左に移動させる傾向が見られる。特に、自由間隙は封入間隙に比べ広範囲にわたり移動する。

変化分布曲線では、約  $1,000\text{nm}$  付近で自由間隙、封入間隙ともに減少を示す。減少した封入間隙は約  $700\text{nm}$  までの小径に移動している。一方、自由間隙は約  $100\sim 600\text{nm}$  の広範囲に渡り増加を示す。このように両間隙とも移行を示すが、自由間隙の移行が支配的である。

以上のように火山灰質粘性土では、圧密の全ての過程で封入間隙、自由間隙とも特徴ある分布の変化が見られた。結果のまとめと検討は 2-4 考察で行う。

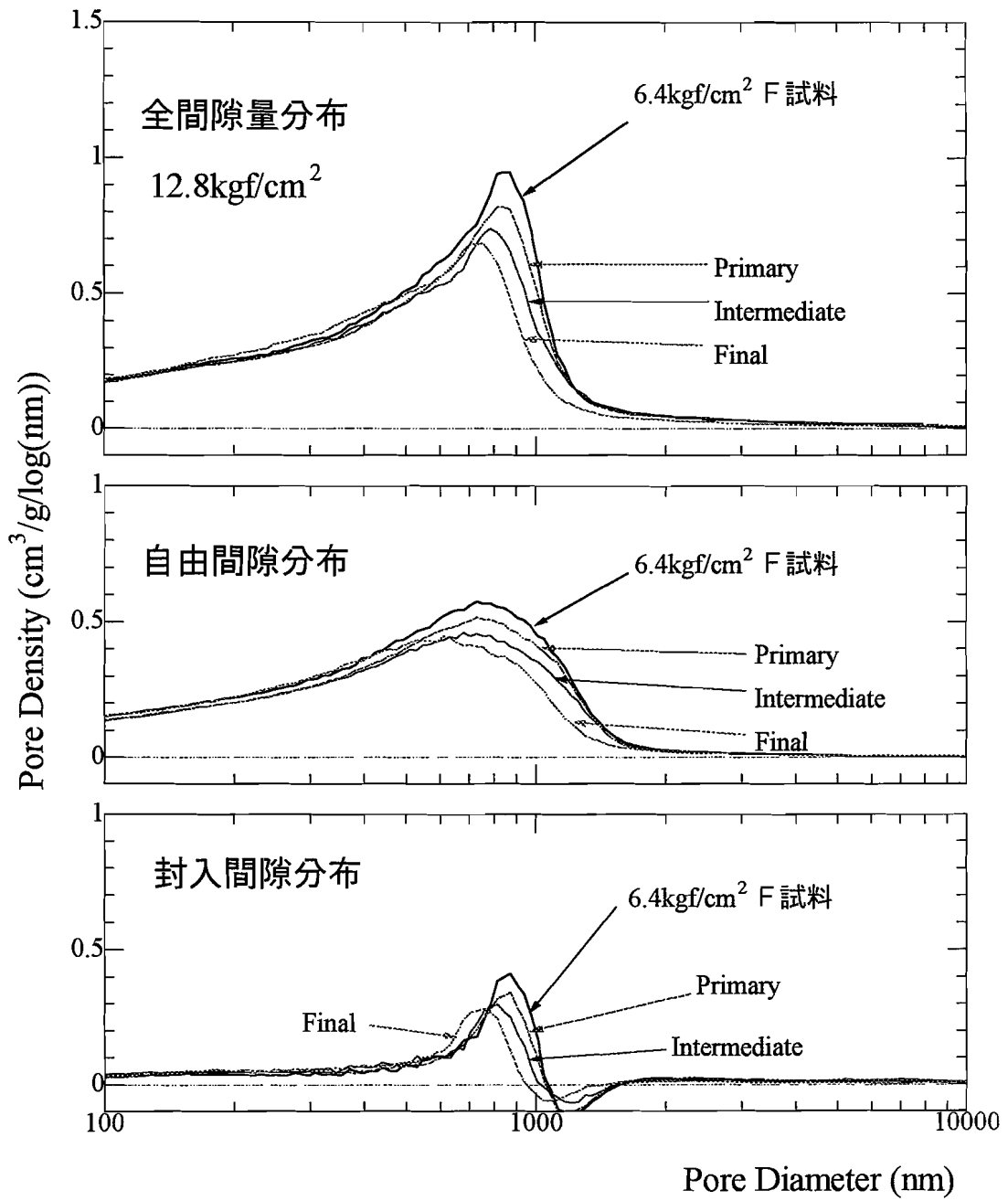


図 2.7 各種間隙量分布の比較(火山灰質粘性土, 載荷重 12.8kgf/cm<sup>2</sup>)

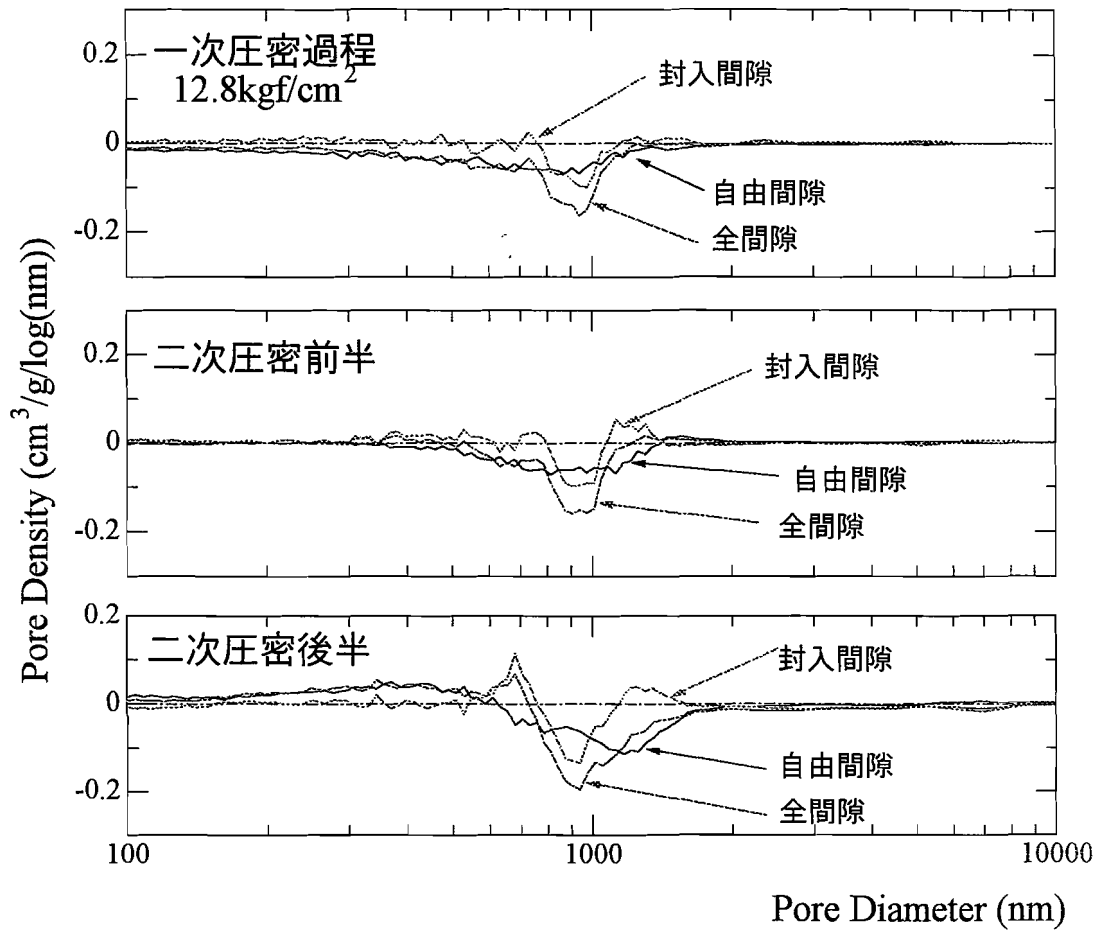


図 2.8 各種間隙量変化分布の比較(火山灰質粘性土, 載荷重 12.8kgf/cm<sup>2</sup>)

## 2-3-2 流紋岩風化土の結果

### 1) 載荷重 0.4~12.8kgf/cm<sup>2</sup> の二次圧密終了段階の比較

0.4~12.8kgf/cm<sup>2</sup> の異なる載荷段階での全間隙の間隙量分布曲線と変化量分布曲線を図 2.9 に示す。

それぞれの間隙径分布曲線は、約 1,000~5,000nm 付近に 1 つのピークを持つ類似した分布を示す。荷重の増加に従い、ピークが小径方向に移動を示す。12.8kgf/cm<sup>2</sup> まで荷重が増えると約 100nm 付近までこの影響が見られるが、約 100nm 以下の間隙径にはほとんど変化が見られない。すなわち約 100nm 以下の間隙は、載荷重 12.8kgf/cm<sup>2</sup> までの圧密には影響を受けないことが分かる。また、約 10,000nm 以上の間隙においては、0.4kgf/cm<sup>2</sup> の二次圧密終了段階において間隙は存在しない。

変化分布を見ると、すべての荷重段階の変化分布は大径側で減少し、小径側で増加するという、移行の傾向を示す。また、約 100nm 以下と約 10,000nm 以上の間隙径の範囲での分布には、ほとんど変化が見られないのは火山灰土と全く異なる点である。

ここで、間隙量分布曲線は 1 log 当たりかつ 1 g 当たりの間隙体積 (mm<sup>3</sup>) をプロットしたものであるから、この曲線で囲まれる部分が 1 g 当たりの間隙体積量である。これを踏まえると、ほとんど変化を示さない約 200nm 以下の間隙は、すべての間隙体積の約 3 割 (0.4kgf/cm<sup>2</sup> のとき) に達する。すなわち、流紋岩風化土内の間隙は、圧密の影響をほとんど受けない微細な間隙が約 3 割も存在することが分かる。

### 2) 各圧密荷重での一次・二次圧密過程の比較

ここでも、1.6 kgf/cm<sup>2</sup> および 12.8 kgf/cm<sup>2</sup> での結果を例として示す。

#### ① 1.6kgf/cm<sup>2</sup> 圧密過程

図 2.10 に載荷重 1.6kgf/cm<sup>2</sup> における各間隙分布量の比較、図 2.11 に圧密各過程における各間隙の分布変化の比較を示す。

間隙分布は一次、二次前半及び二次後半過程を通して左に移動をする。

変化分布を見ると、一次と二次後半過程では移行を示す。二次圧密前半過程では、間隙の変化が見られない。これは、一次圧密終了試料と二次圧



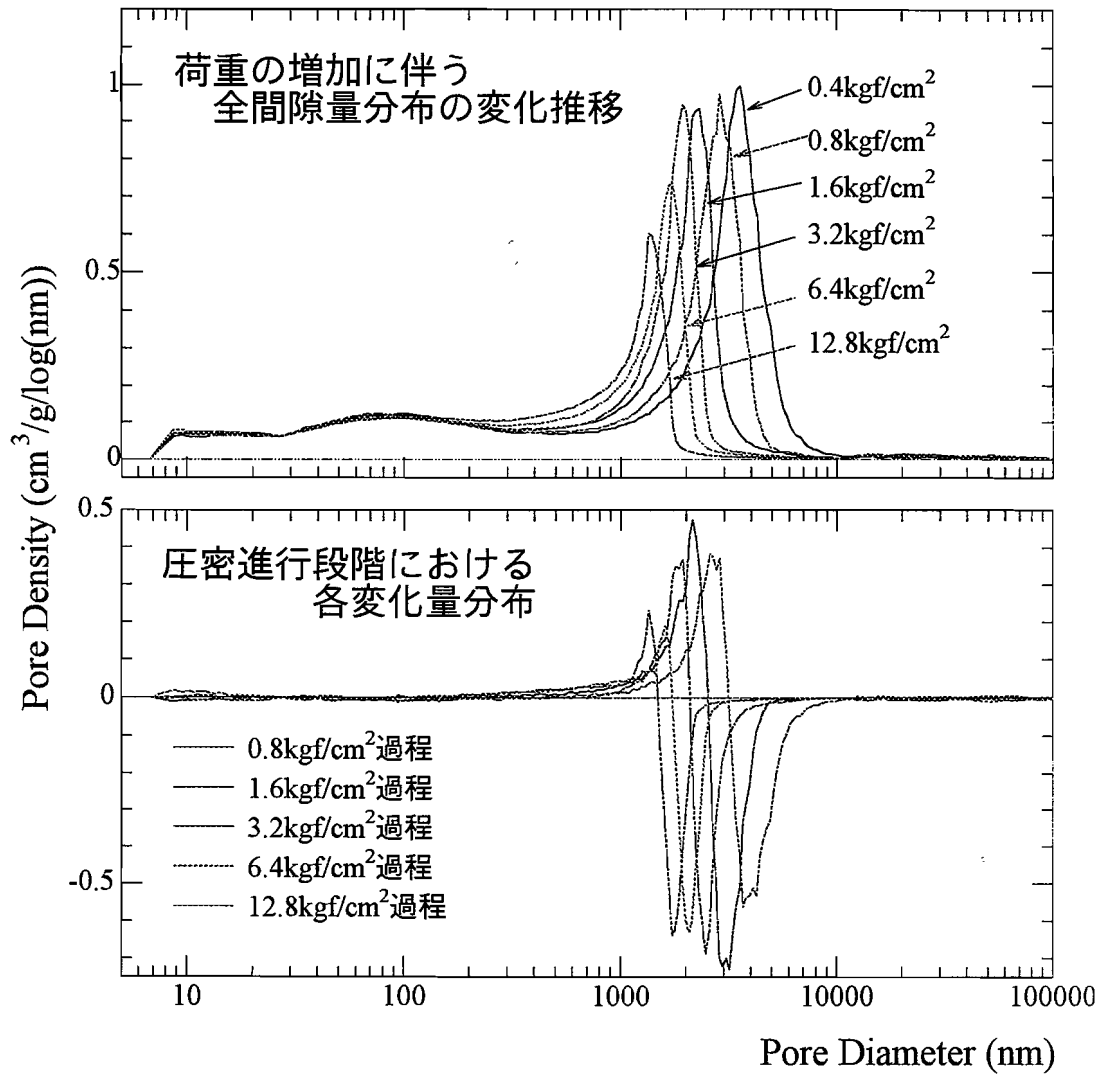


図 2.9 各圧密荷重における間隙量分布と変化量分布の比較(流紋岩風化土)

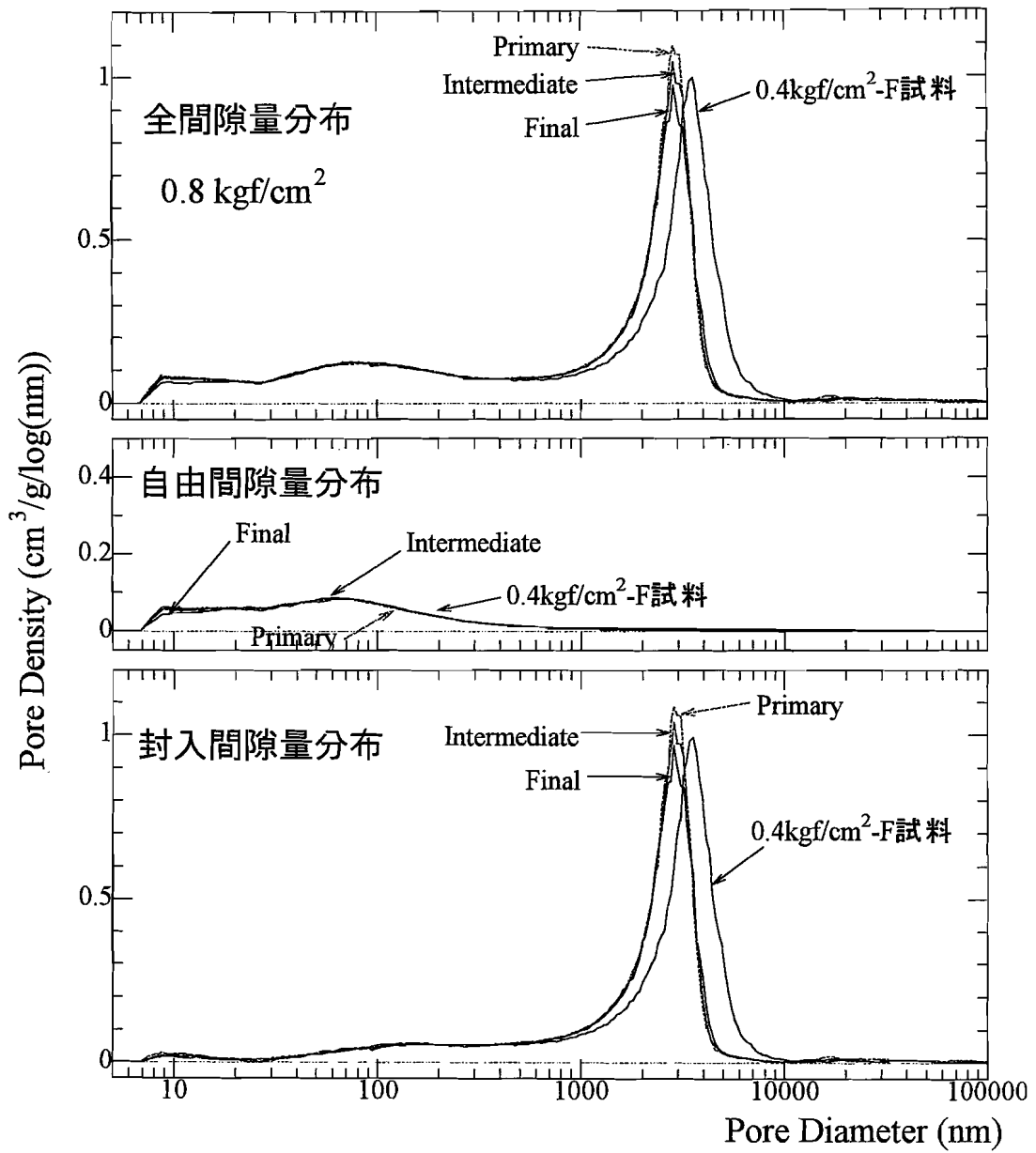


図 2.10 各種間隙量分布の比較 (流紋岩風化土, 載荷重 1.6kgf/cm<sup>2</sup>)

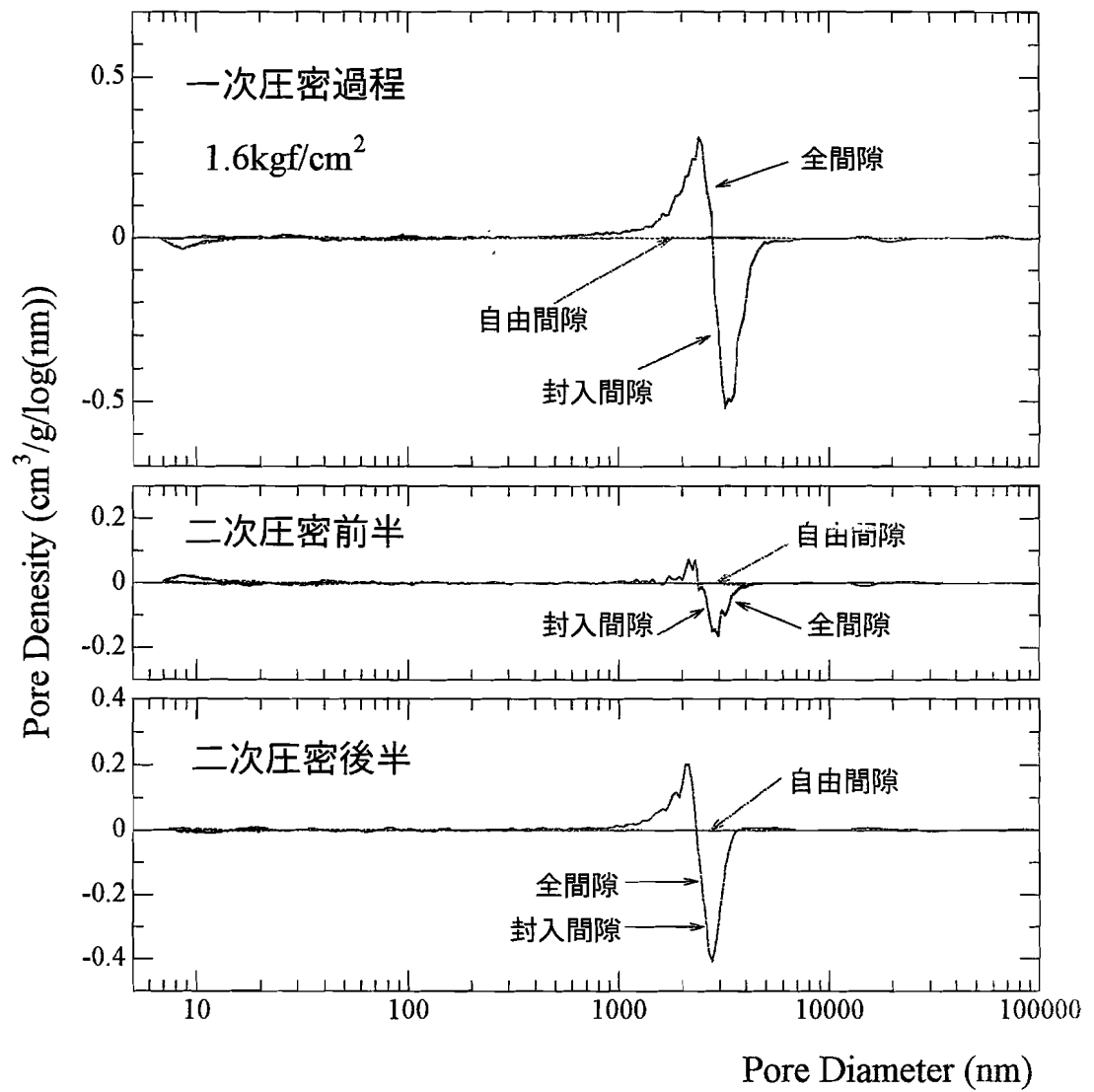


図 2.11 各種間隙量変化分布の比較 (流紋岩風化土, 載荷重 1.6kgf/cm²)

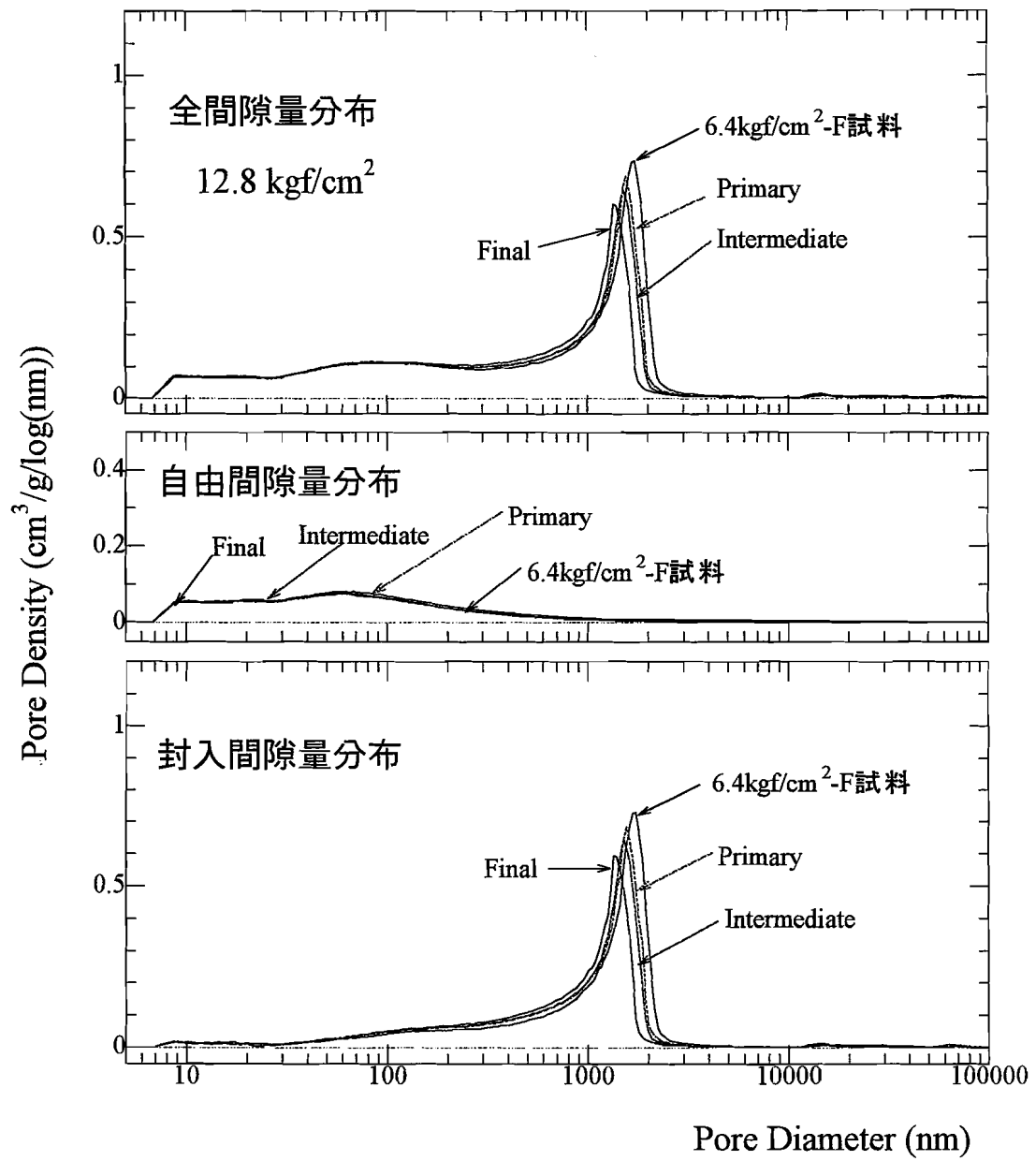


図 2.12 各種間隙量分布の比較 (流紋岩風化土, 載荷重 12.8kgf/cm<sup>2</sup>)

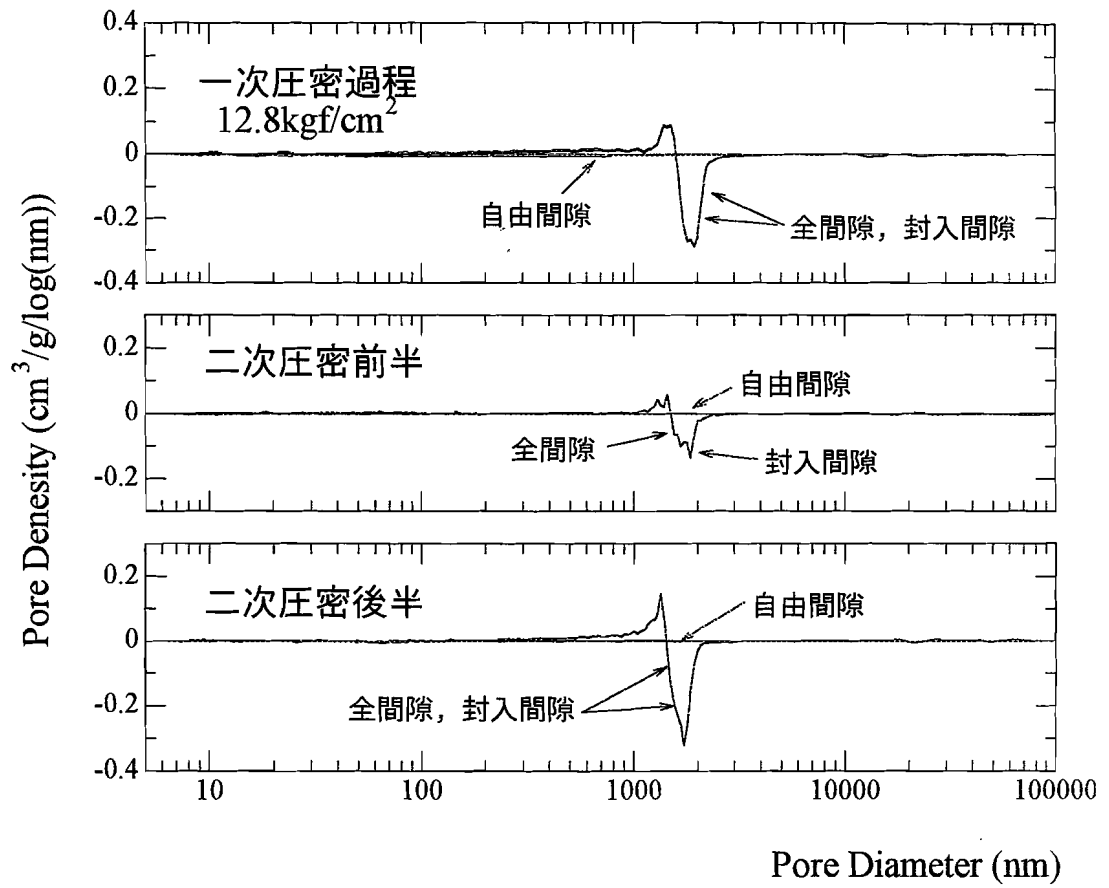


図 2.13 各種間隙量変化分布の比較(流紋岩風化土, 載荷重 12.8kgf/cm<sup>2</sup>)

密途中試料の分布がほぼ変わらないとの理由からである。一次圧密終了試料又は二次圧密途中試料の凍結のタイミングが悪かったためであると考えられる。

また、減少する間隙径に着目すると一次では約 3,200nm、二次後半では約 1,800nm で減少のピークを示している。

## ② 12.8kgf/cm<sup>2</sup> 圧密過程

図 2.12 に載荷重 12.8kgf/cm における各間隙分布の比較，図 2.13 に圧密各過程における各間隙の分布量変化の比較を示す。

間隙分布は、圧密各過程を通してピークを下げながら左に移動を示す。分布曲線は、圧密各過程で移行を示す。移行により減少する間隙径は、一次圧密過程と二次圧密前半では約 1,900nm、二次圧密後半では約 1,700nm である。

以上に示した結果とそれ以外の各荷重段階の実験結果から流紋岩風化土の封入間隙の変化はすべての圧密過程で移行を示すといえる。また、荷重の増加により減少する間隙径がより小径に移り、かつ移行に伴う分布変化が小さくなっていく。すなわち、移行する間隙量が減ってくる。

移行により減少する間隙径を一次圧密と二次圧密で比べると、二次圧密では、一次圧密過程で減少する間隙径より小さい間隙径で減少している。

## 2-3-3 流紋岩風化土の電子顕微鏡観察結果

### 1) 自由間隙，封入間隙の存在について

図 2.14 に示した荷重  $0.4\text{kgf/cm}^2$  の試料の倍率 1,500 倍の写真において，土の骨格は大きく 5 つのブロックから構成される。これらのブロックは約  $20\mu\text{m}$  を越える大きな結晶と微細な粒子が一体となって存在している。これらの粒子は，球状のものまた結晶面に付着しているものなどさまざまな形状をしているが，結晶面付近ではこれに付着して大きな塊となってい。また，一部に半球状に突出している粒子も見られる。一方，ブロックの間ではほぼ球状の粒子が見られる。

骨格間の間隙に着目すると，ブロックの間では約  $5\mu\text{m}(5,000\text{nm})$  前後の粗大な間隙が見られる。また，ブロック内にもより小さな間隙を見ることが出来る。さらに，微細な粒子の表面にも間隙が存在するようである。

ここで， $0.4\text{kgf/cm}^2$  で見られる粒子を 4,000 倍と 10,000 倍に拡大した写真を図 2.15，2.16 に示す。なお，これらは前の写真とはとは別の部分である。これらの写真から，粒子の表面には超微細な間隙が無数存在することがはっきり見られ，間隙はブロックの間や内部に存在する粗大な間隙と粒子内部に存在する超微細な間隙の 2 つの種類が存在することがわかる。

MIP の結果から，封入間隙は約  $1,000\sim 10,000\text{nm}(1\sim 10\mu\text{m})$  を中心に分布している。自由間隙は約  $1,000\text{nm}(1\mu\text{m})$  以下にのみ分布していることが明らかなので，自由間隙は粒子表面に見る超微細な間隙に対応することがわかる。これに対し，封入間隙はブロック間やその内部に見られる粒子間の粗大な間隙であると考えられる。

### 2) 荷重の増加に伴う構造変化

$0.4$ ， $3.2$ ， $12.8\text{kgf/cm}^2$  における 1,500 倍の写真を図 2.14 に示す。荷重の増加に伴い，ブロック間の粗大な間隙が減少し，全体的に密な構造になってきていることがわかる。

同様に 4,000 倍に拡大した写真を図 2.15 に示す。明らかに粗間隙の減少が見られる。また，粒子が細かくなり粗間隙を埋めてきている。

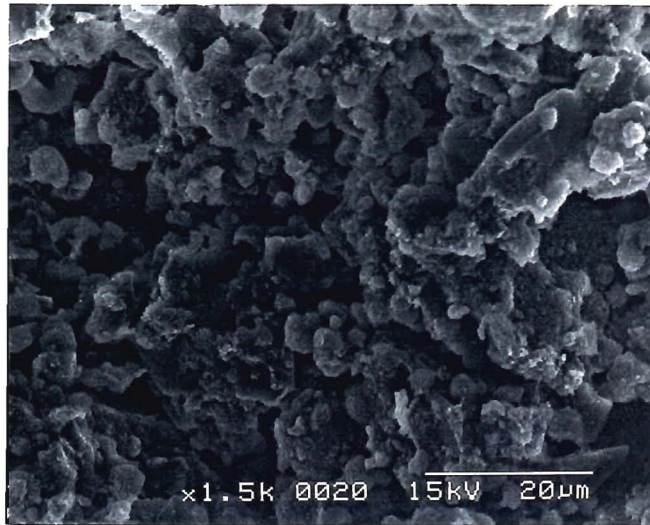
さらに，これらの粒子を 10,000 倍に拡大した図 2.16 からは，水銀圧入

法で変化が見られなかった自由間隙の実体は、写真に見られる  $1\mu\text{m}$  ほどの穴や無数の微細間隙であると判断される。

この粒子は、荷重の増加に伴い細粒化（破壊）し、粗間隙を埋めてきていると思われる。この結果、粗大な間隙が減少する。一方、粒子は破壊され細分化するが、その表面に見られた間隙にはほとんど変化がないことが分かる。すなわち、間隙分布で見られた封入間隙の移行は、ブロック間またはブロック内の粗間隙の減少と見られる。また、自由間隙の分布がほとんど変わらないことは、粒子の表面に開口する微細な間隙がほとんど変化しないことと対応する。

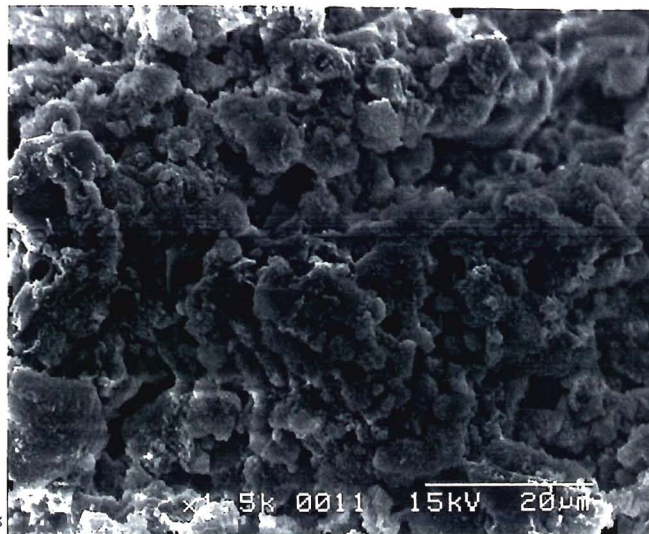
ここで、団粒がその内部に微細な粒子を持つ粒子の最小単位とするならば、これらの写真で示された粒子はさらに微細な粒子の固まりのようにも見えるので、団粒と見られないことはない。また、これらの粒子は結晶の表面が風化により侵食されて内部の鉱物が溶脱し、多孔質の粒子となったとも考えられる。もし、この粒子が結晶の風化過程にあるものとする、粒子の圧縮性が非常に乏しいことが理解できる。図 2.16,  $0.4\text{ kgf/cm}^2$  の写真の左側に結晶が見られるが、この結晶の下端（画面左下）で、風化による崩れのような多孔質と見られる部分がある。画面の中央に見られる  $4\mu\text{m}$  程の粒子は、このような結晶の風化が進んだ粒子である可能性がある。この粒子が、団粒なのか結晶の風化した一次粒子であるのかを電顕のみから断定することはできないが、圧密によっても自由間隙が減少しないことを合わせて考えると、風化過程の一次粒子である可能性が高い。



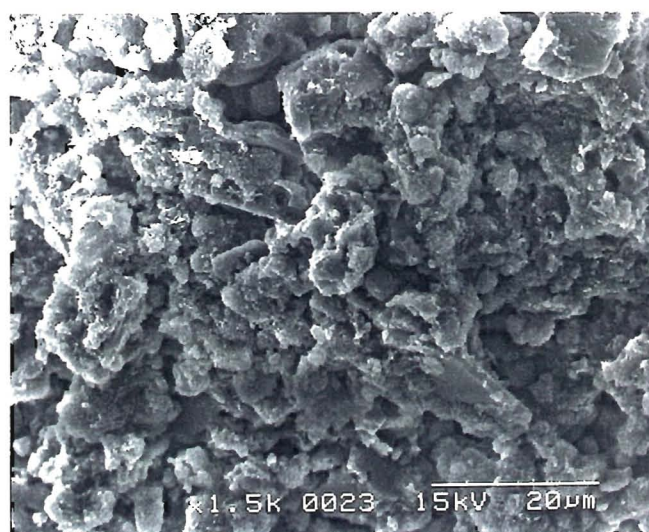


載荷重

0.4kgf/cm<sup>2</sup>

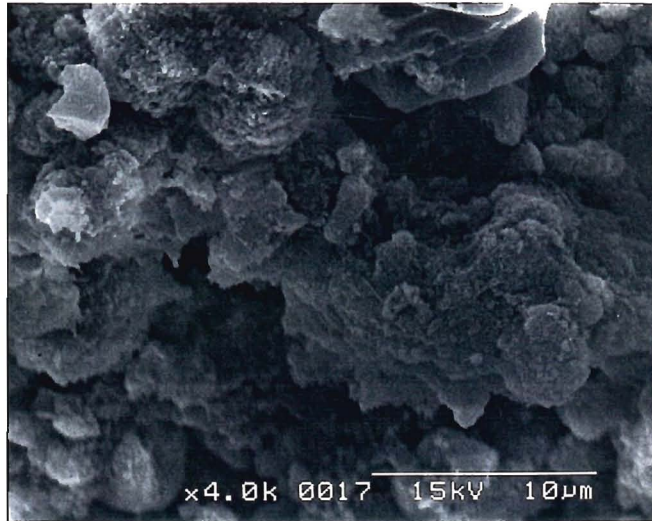


3.2kgf/cm<sup>2</sup>



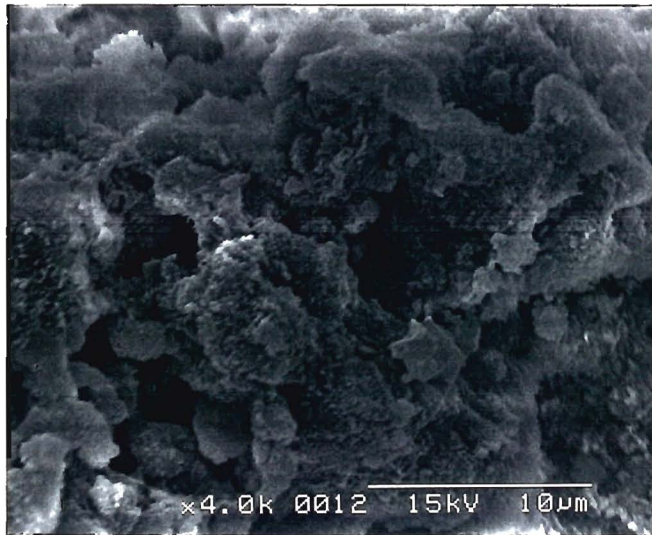
12.8kgf/cm<sup>2</sup>

图 2.14 走査型電子顕微鏡写真(流紋岩風化土, 1,500倍)



載荷重

0.4kgf/cm<sup>2</sup>



3.2kgf/cm<sup>2</sup>



12.8kgf/cm<sup>2</sup>

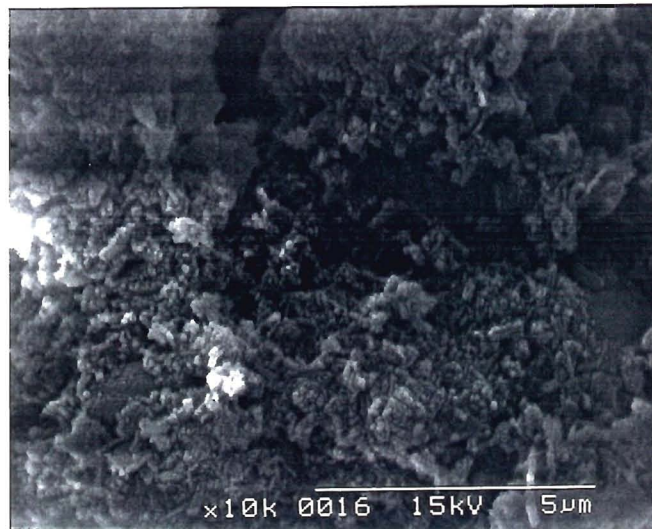
圖 2.15 走査型電子顕微鏡写真(流紋岩風化土, 4,000倍)



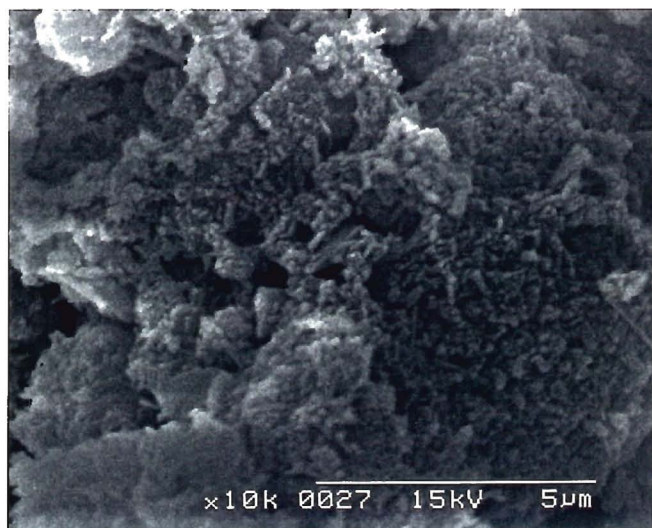


載荷重

0.4kgf/cm<sup>2</sup>



3.2kgf/cm<sup>2</sup>



12.8kgf/cm<sup>2</sup>

図 2.16 走査型電子顕微鏡写真(流紋岩風化土, 10,000倍)

## 2-4 考 察

### 1) 間隙分布の変化形態について

2-3 で示した間隙量の分布変化図において、二種類の特徴的な変化形態がみられた。一つは「移行型」であり、大径側で分布量が減少し、小径側で増加する形態である。特に減少量（ $x$ 軸より下の面積）と増加量（上の面積）がほぼ等しくなる場合があり、この場合は間隙の体積は変わらない。もう一つは「消滅型」であり、これは分布量の減少のみで、小径側での増加がみられない。

移行型が発現する機構には次のような場合が考えられる。

- ①径の大きさが限定された範囲で、間隙が圧縮されより径が小さい間隙に変化する。ただし、この場合は小径側の増加は大径側の減少より小さくなり、正味の体積圧縮がある。
- ②インクボトル状の間隙において、外部に開口し水銀が侵入する部分の径が小さくなるが、内部のより大きな径をもつ部分はほとんど体積を変えない。

また、消滅型の機構は以下のように考えられる。

- ③径の大きさが限定された範囲で、間隙が大幅に圧縮されて、MIP では測定できないほどの微細な間隙に変わる。
- ④径の広い範囲で間隙が圧縮される。このうち、小径側ではそれ自身の圧縮による分布量の減少と、大径側から圧縮により小径側に移ってきたことによる分布量の増加が相殺し、見かけ上大径側の減少のみが観察される。

以上は推測にすぎないが、間隙分布の変化を読みとる際に注意すべきことを含むと考える。

### 2) 封入間隙と自由間隙について

図 2.1 で引用した Griffiths らの説によると、団粒間隙 (Interassemblage) は封入間隙であり、団粒を構成する最小単位である要素内の間隙 (Intra-

elemental) は自由間隙である。また、団粒内でも要素間の間隙 (Intergroup) は封入または自由間隙であるとしている。筆者もこの説を基本的に踏襲する。しかし、流紋岩風化土でみられた 10~100nm を主体とし 1000nm 以下にのみ分布する自由間隙は、電子顕微鏡写真の映像を参考にすると、風化一次粒子の表面に開口する孔隙である可能性が高い。

### 3) 荷重による間隙径分布変化形態の相違

両試料に共通して、圧密荷重の増加に伴って間隙分布曲線のピークが大径側から小径側に移動しており、主に圧縮される間隙径が荷重の増加により減少してゆくことが確認された。

流紋岩風化土では 12.8kgf/cm<sup>2</sup> までの圧密によっても自由間隙はほとんど変化せず、封入間隙のみが圧縮された。この場合、低荷重領域では前述の移行型が顕著だが (図 2.11) , 高荷重領域では移行を示すものの変化量が少なかった (図 2.13) 。低荷重領域ではインクボトル状を含む粗大な間隙が、骨格の圧縮や降伏により前項の①, ②などの影響を受けるが、間隙の体積自体の減少はそれほど顕著ではなかったものと思われる。これに対し、高荷重領域では著しい構造変化はなく、残存する間隙が比較的単純に圧縮されている様である。

火山灰質粘性土の場合も大略上と同じことがいえるが、自由間隙も圧縮する点が異なる。顕著な移行型を示したのは低荷重における封入間隙であった (図 2.6) 。自由間隙は 1.6 kgf/cm<sup>2</sup> の二次圧密後半と 12.8 kgf/cm<sup>2</sup> の全過程で消滅型をとった (図 2.6, 2.8) 。また、1.6 kgf/cm<sup>2</sup> の一次圧密では粗大な封入間隙が自由間隙に転化しており、この荷重段階での間隙構造の変化が激しいものであったことを示している。

### 4) 一次圧密過程と二次圧密過程

一次、二次を通して共通する点は、封入間隙が移行型の圧縮を示すことである。

相違点としては、一次、二次前半、二次後半の順に主として圧縮される

間隙の径（変化分布のピーク位置）が徐々にではあるが、小径側へ移動している点が上げられる。

火山灰土において、封入間隙、自由間隙の圧縮が一次、二次圧密にどのような割合で寄与しているのかは、これまでみてきた分布図からは判然としない。そこで、間隙径によらず体積のみで整理したのが図 2.17 である。

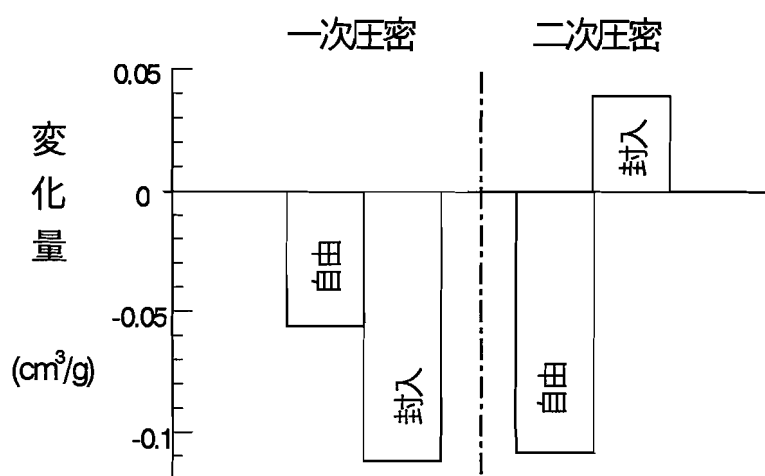


図 2.17 一次、二次圧密別の各種間隙の体積変化量累計

(火山灰質粘性土)

同図から、体積圧縮は一次圧密過程においては封入間隙が、二次圧密過程においては自由間隙が主要であることがわかる。また、二次圧密中に移行型の間隙径変化を示す封入間隙は、全体としてはその体積が増加していることに注意する必要がある。

流紋岩風化土の場合は、前述のように自由間隙は圧密現象にはほとんど関係ない。この土が構造的に乏しい特殊な試料である可能性がある。

### 第3章 圧密過程中的透水性変化

#### 3-1 間隙構造と透水性

Olsen(1962)は各種の粘土を圧密して透水係数を測定した。これによれば、間隙比が 0.4 ないし 0.5 以上の領域では、間隙比の減少に伴う透水係数の変化は Kozeny-Carman の式から予測されるより、はるかに急激に低下している。彼は間隙を間隙比が高い領域で圧縮する cluster 間隙、すなわち団粒間隙と、より低い間隙比で圧縮を始める cluster 内間隙、すなわち団粒内間隙に分け、透水は cluster 間隙を通してのみなされるというモデルをつくり、これについて間隙比と透水係数の関係を計算したところ、上述の実験結果と類似する結果を得ている。

以上のように粘土が団粒構造をもっているとき、浸透水は全ての間隙を均等に流れるのではなく、径が大きくかつ連続している間隙を選択的に流れる。第1章で述べた Yong の仮説が正しいとすれば、一次圧密過程では団粒間隙が圧縮され、二次圧密過程では団粒内間隙が圧縮されることになる。これが透水性の変化にどのような影響を与えるかを考えると、一次圧密過程では透水に大きな役割を果たしている団粒間隙が圧縮するため、透水性は大幅に低下し、二次圧密過程では透水にあまり関係しない団粒内間隙が圧縮するため、透水性の低下はわずかであると予測される。古賀(1990)の行った締固めた火山灰土の浸透圧密試験によると、二次圧密中の透水性の変化はわずかであった。しかし、締固め土には独特の構造が形成されることがわかっている(徳永、古賀、1991)ので、通常の圧密粘土を用いて、これを確かめる必要がある。

次に、二次圧密と裏腹の関係にある応力緩和過程中的構造変化も興味深い問題である。吉国(1994)は圧密過程でひずみを固定し、非排水条件で間隙水圧の変化を測定した。その結果、間隙水圧は上昇し、有効応力が低下すること、すなわち応力緩和がおきることが示された。この事実を団粒構造から検討すると、団粒内部に発生した過剰間隙水圧が団粒間隙に解放されたことを暗示している。これが正しいければ、団粒内部では緩和中に有効応力が増加していること、すなわち団粒の圧縮が生じることになり、Yong の仮説を裏付けることになる。

もし団粒が形を変えずに圧縮すれば、団粒間隙の体積は増加して透水性が増加することになる。この点も実験的に検討する必要がある。

## 3-2 実験方法

### 1) 試料調整

供試土はカオリナイト粘土（関東化学製）および、岩手大学農学部附属滝沢農場心土（火山灰質粘性土，以下火山灰土と呼ぶ）を用いた。

カオリナイトは，大量の逆浸透水で洗浄を繰り返し，最後に上澄みを除去してスラリー状としたものを脱気を兼ねて煮沸し，含水比 150%に調整した。

火山灰土は第 2 章と同じ方法で調整し，圧密リング入れる前に真空脱気した。

両試料の基本的物理性を表 3.1 に示す。

表 3.1 供試土の物理性

試料名	カオリナイト	火山灰質粘性土
$G_s$	2.67	2.74
$W_L$	56%	97%
$W_p$	35%	68%
$I_p$	21	29
粒度分布		
0.074~0.005mm	45%	76%
0.005mm以下	55%	24%

### 2) 圧密透水試験機

粘土供試体の応力とひずみを制御し，二次圧密または応力緩和過程で連続的に透水係数を測定できる試験機を開発した（図 3.1, 3.2）。

圧密リングは内径 100mm，高さ 50mm（ガイドリングも兼ねる）のステンレス製で，内面は鏡面加工してある。

荷重はペロフラム・エアシリンダにより加える。シリンダに入力する空気圧はエアレギュレータで制御される。このエアレギュレータにはコンピュータにより制御されるステッピングモータが直結している。

浸透は新たに開発した定水頭差透水装置を連結して行う。浸透水は上流側タンクからボールバルブを介して供試体底面のポーラスメタルへ導かれ，上面のポーラスメタルを通過して，下流側タンクへ導かれる。下流側タンクの重量をロードセルにより測定することにより，浸透量が測定される。水頭差は微差圧計で測定する。ボールバルブにはステッピングモータが直結しており，これもコンピュータからの指示で開閉することができる。



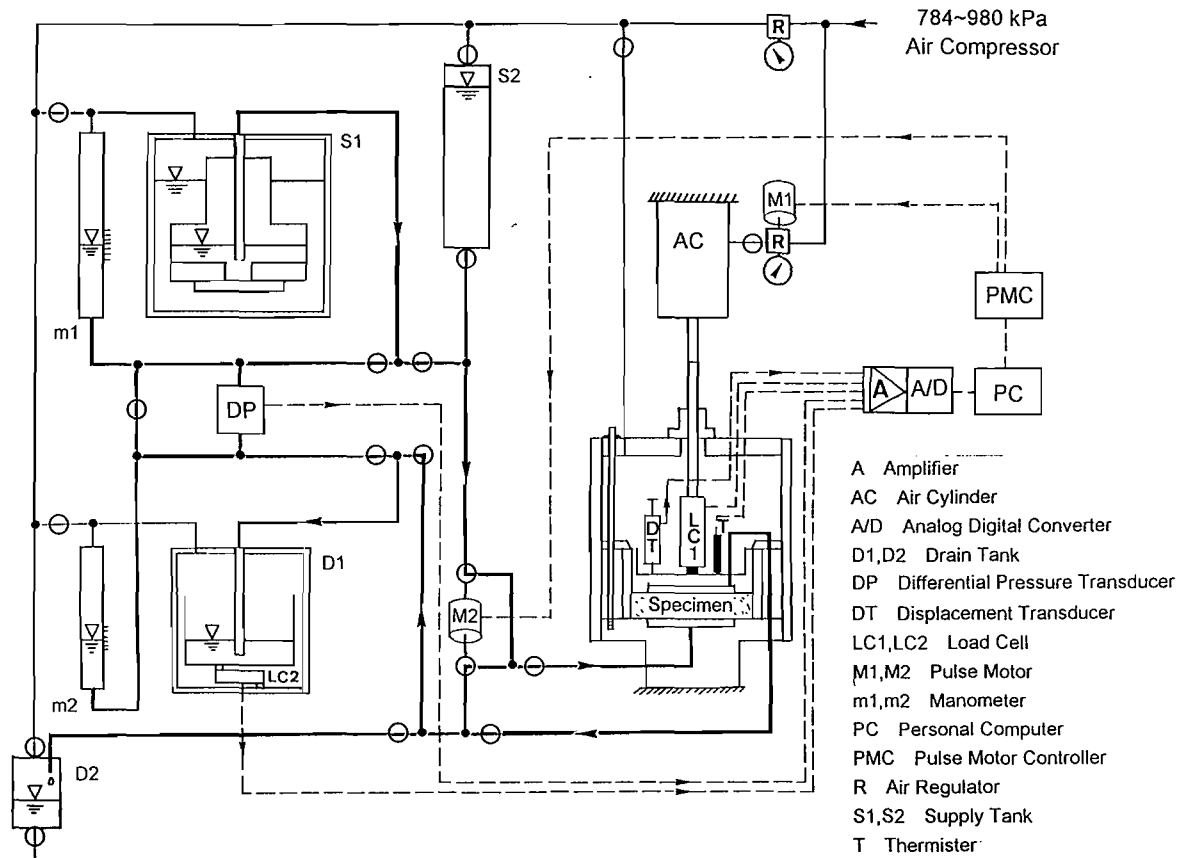


図 3.1 圧密透水試験機全体系統図

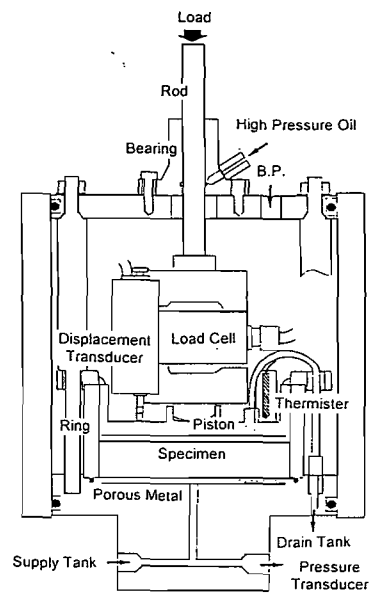


図 3.2 圧密室の構造

供試体にかかる荷重と変位を載荷ピストン直上でそれぞれロードセルと変位計により測定する。また、載荷ピストンにはサーミスタを取り付け、温度を測定する。

以上のシステムには 98kPa の背圧を加えた。

この装置は供試体にかかる荷重、ひずみ、温度、浸透量、水頭差をコンピュータにより自動計測するとともに、プログラム運転により荷重一定、ひずみ一定の制御条件をつくり出すことができる。

新型の定水頭差透水装置と在来のマリオット瓶方式の定水頭差透水装置の性能比較を図 3.3 示す。マリオット方式では通気管からの気泡の侵入のために周期的な水頭差の変動があり、最大 4mm に達している。これに対し、新型装置は変動幅が 0.1mm 以下に収まっており、水頭差を小さくした透水試験において、短時間の透水試験においても高い精度が確保されることがわかる。

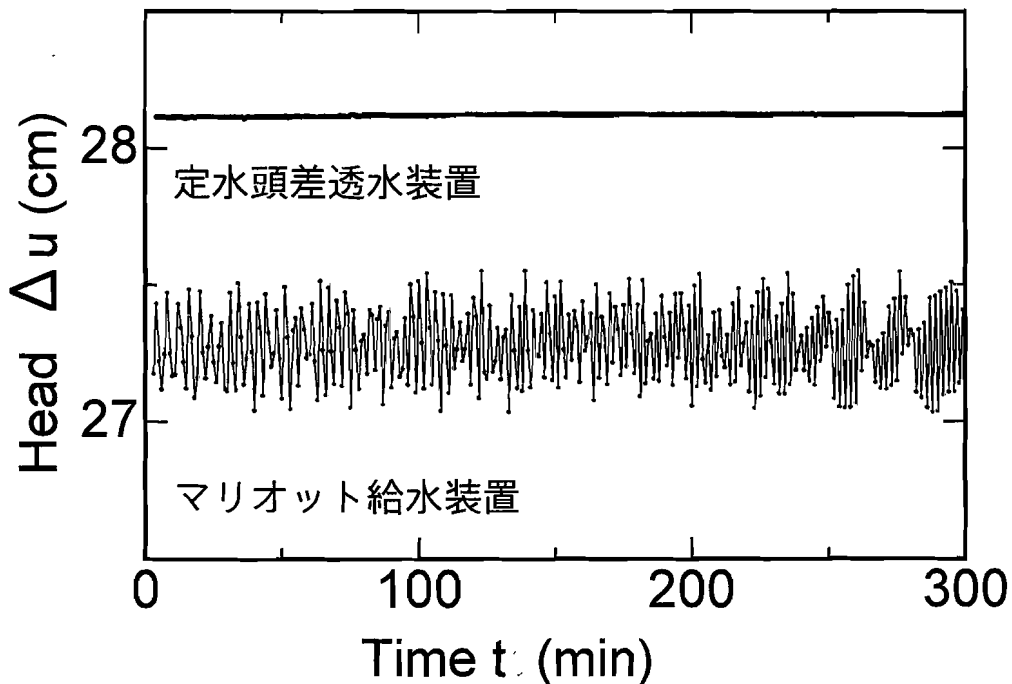


図 3.3 新型定水頭差装置とマリオット装置の性能比較

### 3) 二次圧密過程での透水試験

スラリー状の試料を圧密リングに入れ、徐々に荷重を加えて、9.2kPaまで予圧密した。以降、荷重増加比1で最大588kPaまで段階載荷した。

各荷重段階では一次圧密が終了した直後に透水バルブを開き、以降24時間まで2時間に1回の間隔で各35分間の透水を行った。一次圧密終了の判定は $\sqrt{t}$ 法に基づくプログラムをコンピュータに組み込み、リアルタイムで行った。

前述のような間断透水を行ったのは、透水量を極力少なくし、粘土粒子の目詰まりによる影響を避けるためである。また水頭差は荷重174kPaまでは10cm、以降は15cmと極力小さくした。その結果、1荷重段階での浸透量は水深で0.5~4mmの範囲であった。また、供試体の厚さは16~23mmの範囲であった。

### 4) 応力緩和過程での透水試験

一次圧密終了の判定までは3)と同じである。プログラムのモードをひずみ固定に切り替え、エアシリンダの圧力を自動制御して、結果として発生する荷重を測定した。

緩和過程に入り、直ちに前述と同様の間断透水試験を開始し、24時間まで続けた。24時間目にモードを応力一定に切り替え、元の荷重を加えて圧密を再開させた。この2回目の圧密過程についても、3)と同じ方法で二次圧密過程に入ったことを確認して、48時間まで間断透水試験を行った。

### 3-3 実験結果

#### 1) 二次圧密中の透水試験結果

図 3.4 に火山灰質粘性土の時間-沈下曲線の一例を示す。図中で E.O.P は別途  $\sqrt{t}$  法で定めた一次圧密終了時 (end of primary consolidation) を表す。

透水係数の計算は以下のように行った。実験では E.O.P に達した直後に透水バルブを開いて下流側排水タンクの重量を 5 分毎に 35 分まで計測した。このうち、はじめの 5 分間は供試体内部の水頭勾配が安定するまでの待ち時間とし、透水係数は 5 分~25 分, 10 分~30 分, 15 分~35 分の 3 区間, 各 20 分間についてそれぞれ行った。

計算に当たって、まず上述の浸透水の重量を、測定された温度により体積に換算し、これを時間と供試体断面積で除して流出流速  $v_{out}$  を求めた。これは試験機の構造から、供試体上面における水の土粒子に対するみかけの相対流速である。一方、二次圧密の供試体上面はわずかではあるが、速度  $v_{st}$  で沈下しているのでこれを考慮する必要がある。したがって、供試体底面における水の土粒子に対するみかけの相対流速  $v_{in}$  は、

$$v_{in} = v_{out} - v_{st}$$

で表される。このように、圧縮中の供試体内部の水の土粒子に対する相対流速は変化しているが、ここでは上下の値の平均値を採用した。したがって、透水係数は次式で表される。

$$k = \frac{(v_{out} - v_{st} / 2) L}{h}$$

ここで、 $L$  は測定期間中の供試体平均厚さ、 $h$  は測定期間中の平均水頭差である。このようにして求めた透水係数にさらに温度補正係数 (水の粘性の温度補正) を乗じて標準温度 (20°C) における透水係数を求めた。

透水係数の測定は 2 時間間隔で行い、図には以上の方法で得られた 3 個の  $k$  を平均して、示してある。

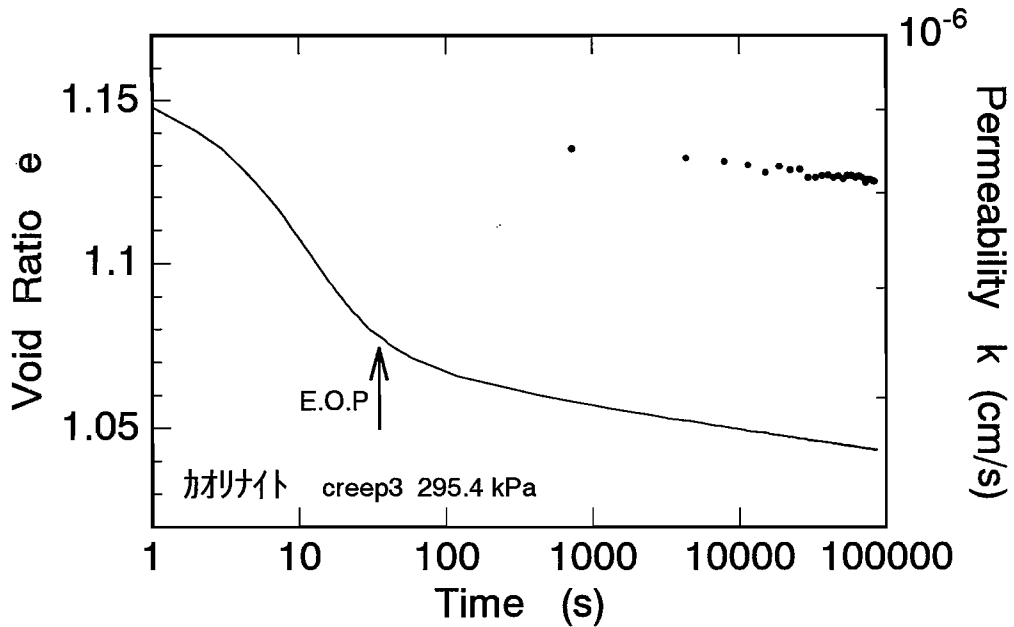


図 3.4 二次圧密中の透水試験

これまでの研究から、粘土の透水係数の対数と間隙比の間には経験的に直線関係が成り立つことが知られている。そこで本研究のカオリナイトおよび火山灰質粘性土について、各荷重段階の二次圧密過程で得られた透水係数（対数）を間隙比に対してプロットしたのがそれぞれ図 3.5, 3.6 である。

各図とも測点は 6 個のグループとなっているが、右上から 18.4kPa, 36.8kPa, 73.6kPa, 147.1kPa, 294.2kPa, 588.4kPa の荷重段階である。各荷重段階の左端の点は 24 時間後の測点である。図中の破線はこれら 24 時間後の測点のみを回帰直線で代表させたものである。測点は全体として、この直線に対しわずかながら上に凸の分布を示している。

なお、横軸を間隙率にすると、実験結果はより直線性が高くなるが、ここでは紙面の都合で省略する。

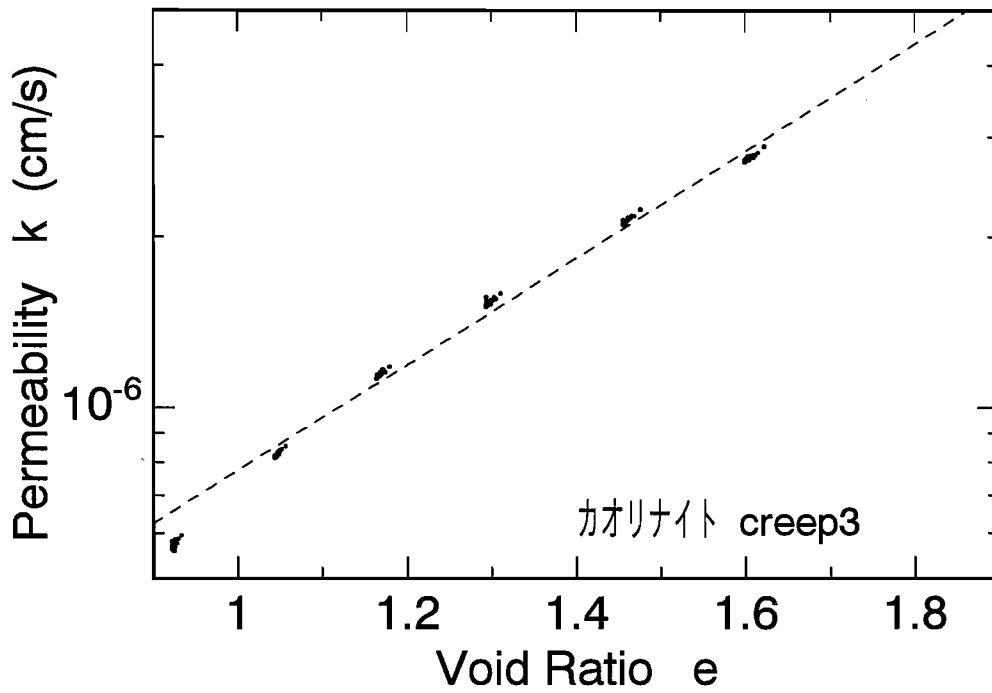


図 3.5 二次圧密過程中の透水試験結果のまとめ(カオリナイト)

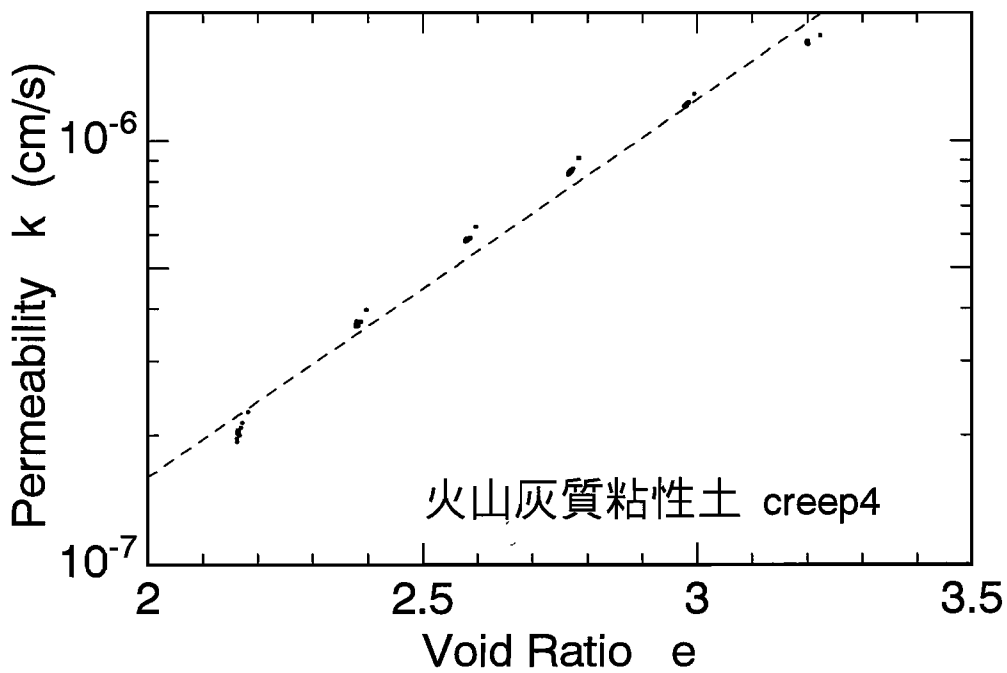


図 3.6 二次圧密過程中の透水試験結果のまとめ(火山灰質粘性土)

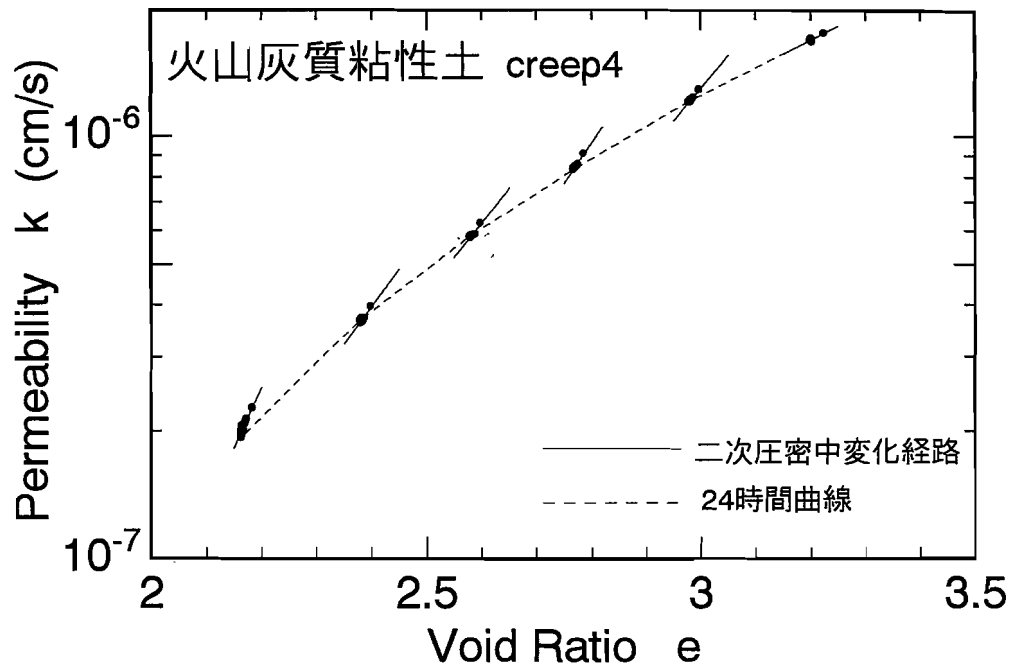


図 3.7 二次圧密過程における透水係数の変化

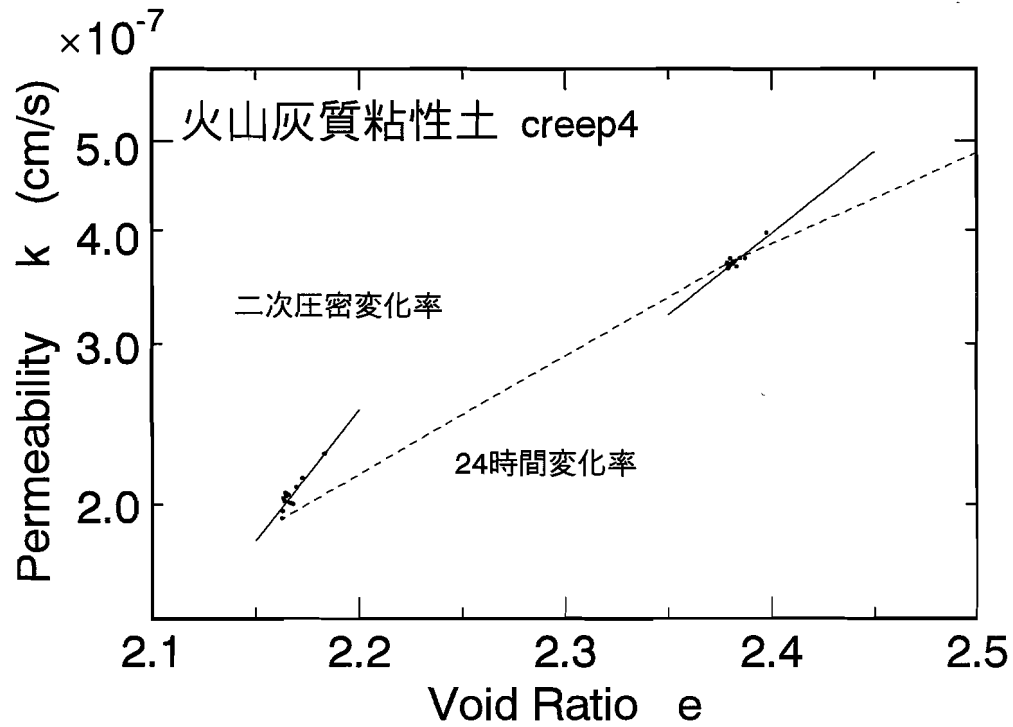


図 3.8 透水係数の二次圧密変化率と 24 時間変化率

図 3.7 は図 3.6 と同じ火山灰質粘性土の試験結果であるが、各荷重段階について二次圧密過程における透水係数の変化経路を回帰直線（実線）で表したものである。また、破線は 24 時間後の透水係数を結んだものである。図 3.8 は図 3.7 の一部を拡大したものである。

これらの図で二次圧密過程における透水係数は、各々の同一荷重グループ内で右上から左下に時間の進行に伴って移動している。すなわち、実線の回帰直線は測点の存在する範囲内で、透水係数の変化経路を示している。この直線の勾配を仮に「二次圧密変化率」と呼ぶことにする。

一方、破線は実測点をつないだもので、測点以外は実測されていない。しかし、仮に荷重を小刻みに増加させ、24 時間経過後の透水係数を測定するという操作を繰り返せば、結果はこの破線上にのると考えられる。この直線の勾配を仮に「24 時間変化率」と呼ぶことにする。

これらの変化率は、共に間隙の減少による透水係数の低下の効率を表しているが、さらに一次圧密過程における変化率を想定することもできる。すなわち、図 3.7 において前段階の 24 時間後と当該段階の二次圧密段階当初の  $k$  を結ぶ線が一次圧密過程の経路と考えられ、その勾配が一次圧密中の変化率にあたる。

上で定義した二次圧密変化率と 24 時間変化率を圧密荷重に対してプロットすると、図 3.9（カオリナイト）、図 3.10（火山灰質粘性土）のようになる。なお、図 3.9 では図 3.5 で示した試験結果の他に動水勾配を 1.5～2 倍にして行った類似条件での試験結果も加えた。

カオリナイトの 24 時間変化率はほぼ直線であり、荷重増加にともなって増加する傾向がある。二次圧密変化率は 24 時間変化率と同様に増加するが、値は 2～4 割程度大きく、24 時間変化率を下回ることはなかった。

火山灰質粘性土の 24 時間変化率も荷重に伴って増加するが、やや上に凸であり、高荷重段階では間隙比の低下による透水係数の低下の効率が高くなることを示している。二次圧密変化率は大きく、概ね 24 時間変化率の 2 倍の値であった。

以上をまとめると、両試料とも二次圧密変化率は 24 時間変化率よりも大きかった。さらに、先にふれた一次圧密における変化率も考えることができ、二次圧密過程では間隙比の減少に対する透水係数の減少割合あるいは効率が一次圧密過程よりも大きいことがわかった。



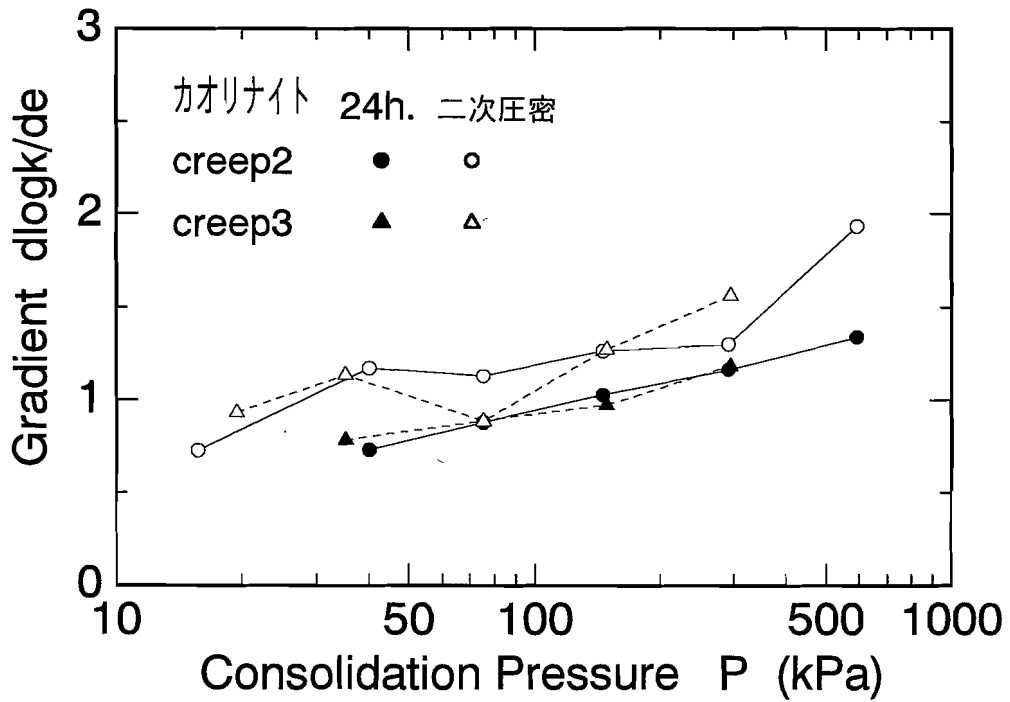


図 3.9 二次圧密変化率と 24 時間変化率の比較 (カオリナイト)

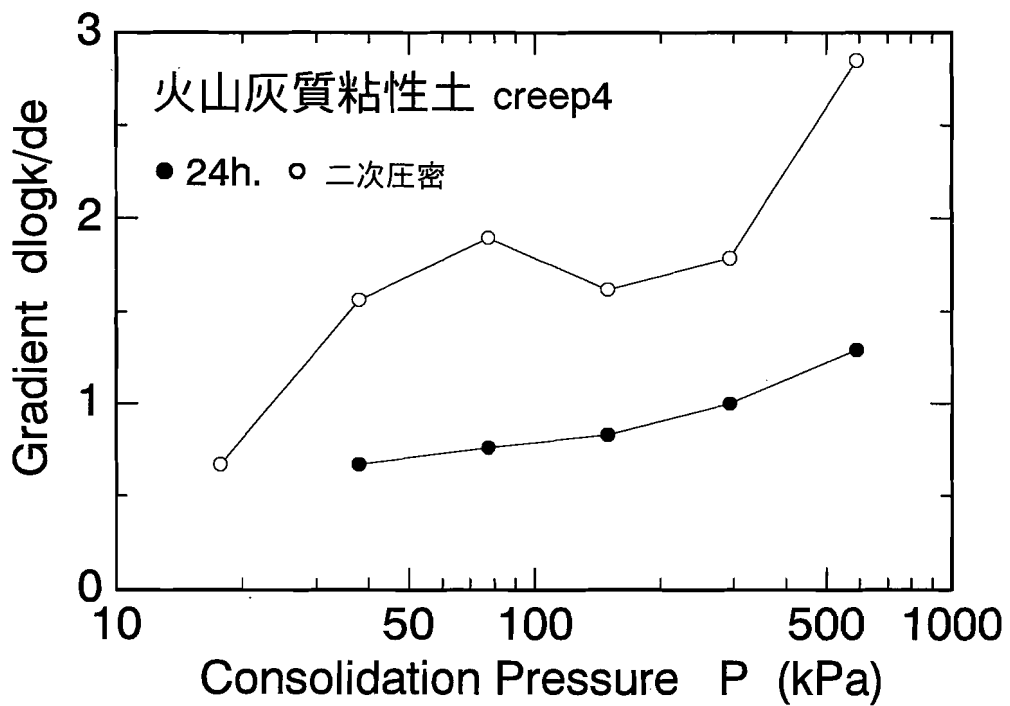


図 3.10 二次圧密変化率と 24 時間変化率の比較 (火山灰質粘性土)

## 2) 応力緩和中の透水係数の変化

一次圧密過程の終了後にひずみを止め、応力緩和を行った試験の一例を図 3.11 に示す。図中にはひずみを停止させるために加えた応力の経時変化も示されており、多少の変動はあるが応力が緩和されていることがわかる。

透水係数の測定は緩和過程に入ってから直ちに開始し、二次圧密過程と同じ方法で透水係数を計算した。ただし、土粒子は静止しているので  $v_{st}$  を考慮する必要はない。

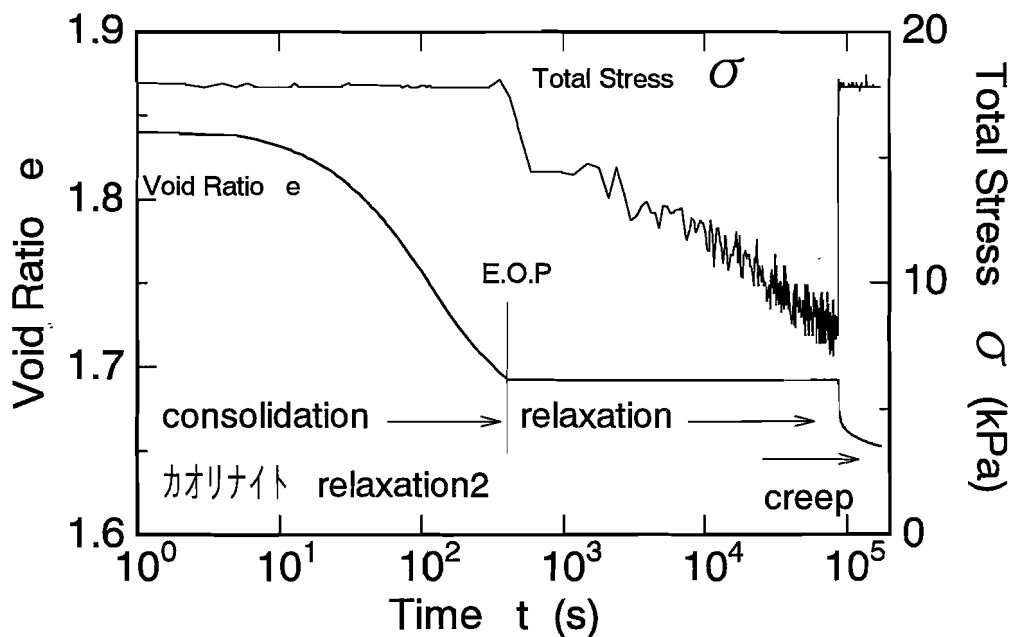


図 3.11 応力緩和過程中の透水試験

測定結果を図 3.12 (カオリナイト) と図 3.13 (火山灰質粘性土) に示す。両試料とも、24 時間の測定期間中、透水係数の変化は認められなかった。

なお、24 時間の応力緩和後に再びもとの荷重を加えて、再度圧密させ、透水係数を測定したが、その結果は前述の二次圧密中の透水係数とほとんど同様であったため省略する。

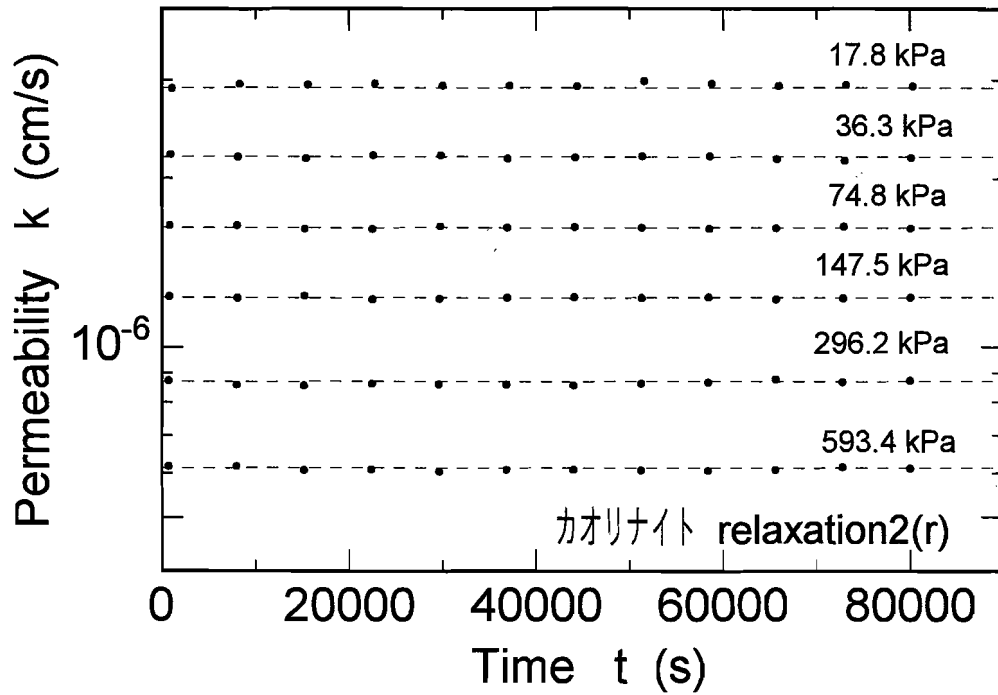


図 3.12 応力緩和過程中の透水係数(カオリナイト)

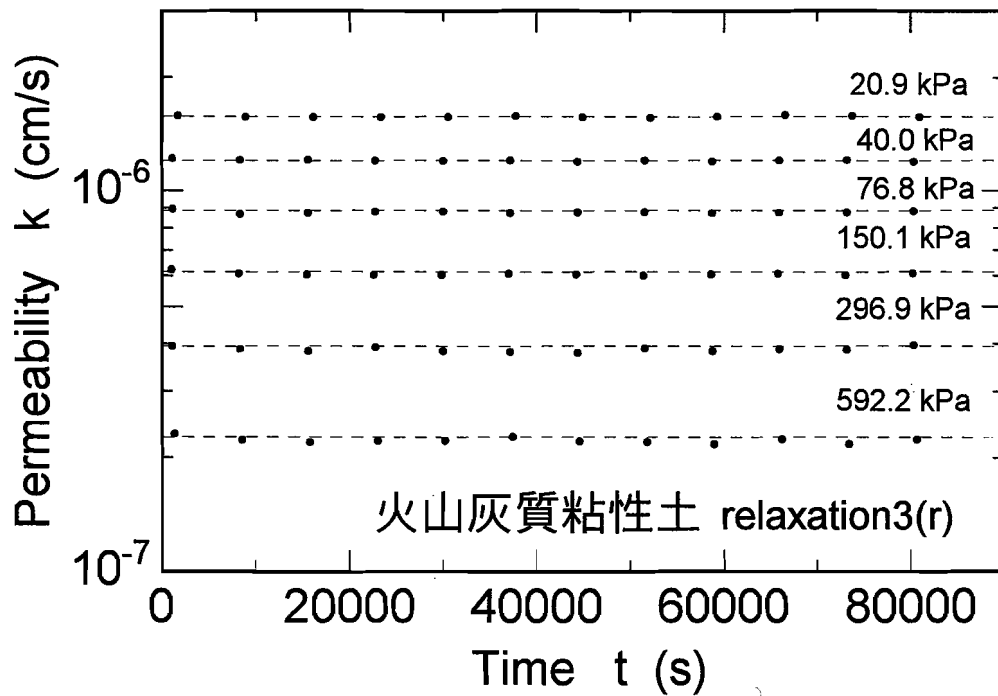


図 3.13 応力緩和過程中の透水係数(火山灰質粘性土)

### 3-4 考察

圧密による間隙比の低下に対する透水係数の低下割合は、一次圧密中よりも二次圧密中の方が高いという結果となり、締固め土の浸透圧密試験による結果（古賀，1990）とは逆であった。これは、二次圧密過程では団粒内間隙が圧縮され、透水性の低下はわずかであるとする予想を覆すものである。しかし、粗大な団粒間隙が一次圧密過程で圧縮されず、二次圧密過程で圧縮するという考えも受け入れ難い。第2章の水銀圧入法によれば、二次圧密過程では封入間隙に大きな変動がみられるものの、体積圧縮の主体は自由間隙の圧縮であった（火山灰質粘性土の場合）。自由間隙は団粒内に存在すると考えられるから、団粒の圧縮により透水係数が効率的に低下する機構を改めて考える必要がある。

団粒間隙には肥大部と狭窄部があり、水みちはこの両者を含むものと考えられる。このうち透水性を制限しているのは狭さく部である。これは成層土層の平均透水係数が最も透水係数の低い土層に支配される事実（Koga, 1992）から容易に類推される。水みちの狭窄部が二次圧密過程でさらに圧縮されるとすれば、実験結果を説明できる可能性がある。そこで、以下のようなモデルを考えた。

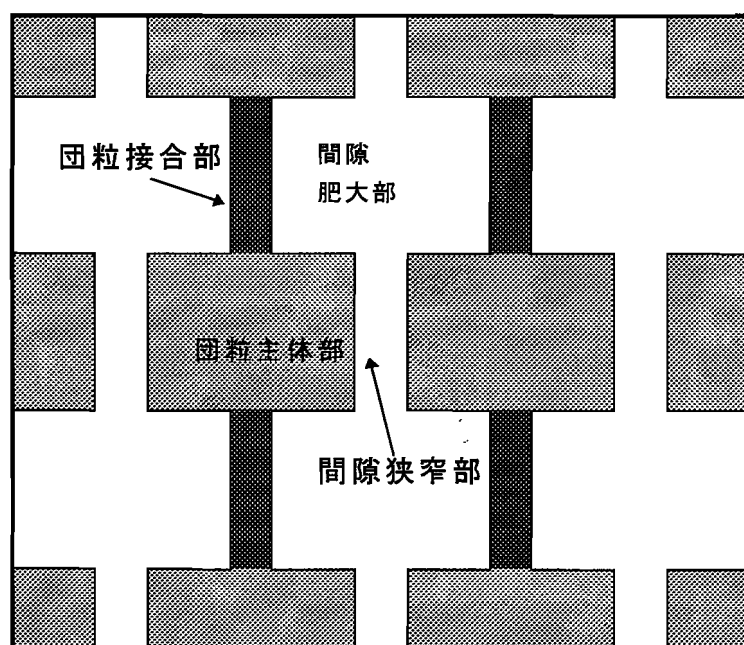


図3.13 骨格および間隙構造の模式図

図 3.13 は団粒をもつ土の間隙および骨格構造を模式的に表したものである。団粒の主体部を薄い灰色で、団粒と団粒の接合部を濃い灰色で、団粒間隙を白色で表してある。また、団粒間隙には肥大部と狭さく部がある。荷重は上下方向に加わり、透水は下から上に向かうとする。同図から一つの団粒間隙を取り出し、さらに水平に二分したものを考察の対象とし、図 3.14 に示した。

図 3.14 において構造の各部分の性質を以下のように単純化する。

#### 骨格について

- A 団粒主体部： 一次圧密中は圧縮しない。  
二次圧密中に圧縮，変形する。
- B 団粒接合部： 一次圧密中に圧縮，変形する。  
二次圧密中は圧縮しない。

#### 間隙について

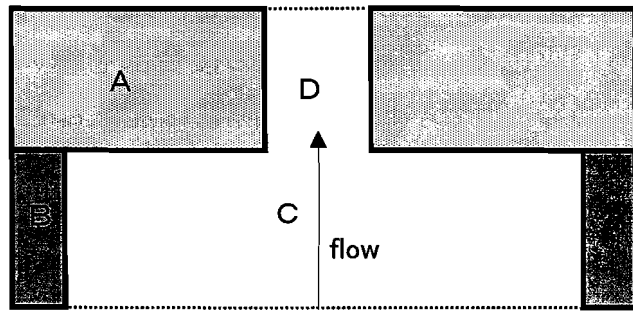
- C 間隙肥大部： 一次圧密中に径が減少する。  
二次圧密中は径が変化しない。
- D 間隙狭窄部： 一次圧密中は変化しない。  
二次圧密中に径が減少する。

以上のように、間隙肥大部の径は団粒接合部の圧縮，変形に、狭窄部の径は団粒主体部の圧縮，変形に対応して縮小する。

このように規定したモデルの各部が一次および二次圧密によりどのように変化するかを表したのが図 3.15 である。

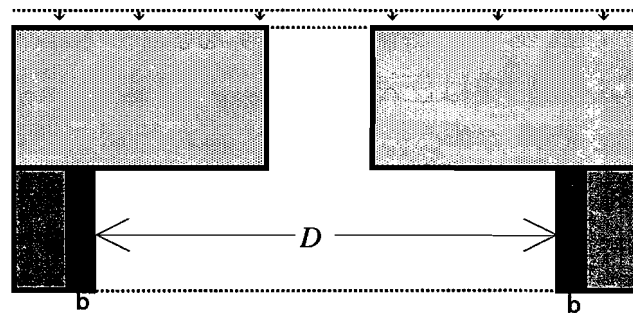
一次圧密過程では透水性が低い団粒主体部はほとんど圧縮変形せず、有効応力の増加によって接合部のみが圧縮して扁平化する。その結果、間隙肥大部は荷重方向に圧縮すると共に、その径が減少する（図中の b, D）。このとき、団粒間隙中の過剰間隙水圧は消散しているが、団粒主体部内部には残存していると考えられる。

二次圧密過程では団粒主体部の過剰間隙水圧が消散し、内部の骨格にはたらく有効応力が増加して圧縮がおきる。同時に水平方向への扁平化が進み（図中の a），間隙狭窄部の径が減少する（d）。



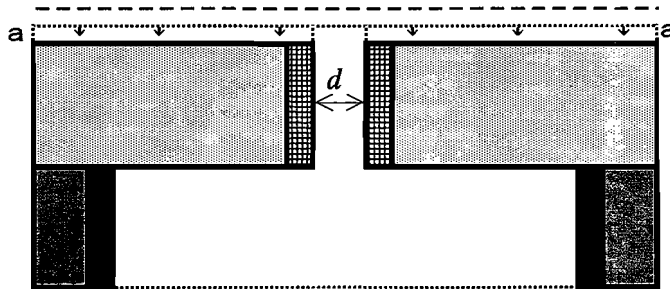
- A: 団粒主体部
- B: 団粒接合部
- C: 間隙肥大部
- D: 間隙狭窄部

図3.14 間隙の要素の模式図



一次圧密終了時

- b: 団粒接合部B  
の  
圧縮変形  
間隙肥大部の  
径 $D$ が縮小



二次圧密終了時

- a: 団粒主体部  
Aの  
圧縮変形  
間隙狭窄部の  
径 $d$ が縮小

図3.15 一次および二次圧密における骨格と間隙の圧縮，変形

次に以上の過程を，間隙体積の減少による透水性への影響という点で検討する。

一次圧密過程では体積圧縮はほとんど肥大部の体積圧縮による。すなわち肥大部の  $D$  が縮小すると共に，その長さが減少する。 $D$  の縮小はその部分の透水性を低下させるが，狭窄部も含めた全長に対する比率が低下するから，全体の透水性に対する影響は一概にいえず，各部の長さを仮定したモデル計算を実施しないと明確な結論は得られない。なお，団粒接合部の体積圧縮も生じているが，その量はわずかと考えられる。

二次圧密過程では体積圧縮は団粒主体部の体積圧縮と間隙狭窄部の体積圧縮からなる。このうち後者について上述の間隙肥大部と同じことがいえる。したがって，全体の体積圧縮が透水性へ与える影響を検討するためには，体積圧縮量の団粒主体部と間隙狭窄部への配分比率，各部の寸法を仮定したモデル計算が考えられる。

以上のように，ここで示した極めて単純なモデルにおいてもさえも，間隙体積の圧縮（間隙比の減少）が透水性へ与える影響（3-3 で述べた一次および二次圧密変化率）について数理的に検討するためには必要な未知数が多い。よってこれ以上の検討は今後の研究によりたい。

しかし，管路の流れにおいて水理抵抗は管径の二乗に反比例する（Hagen-Poiseuille の法則）ことを考えると，二次圧密中の狭窄部  $d$  の縮小が全体の透水係数の低下に大きく寄与する可能性がある。

最後に応力緩和中に透水係数が変化しなかったことを，前掲の図 3.15 で考察すると，一次圧密終了時の形が緩和中も基本的に持続したものと考えられる。

このモデルでは，緩和開始当初に団粒主体部に残存していた過剰間隙水圧は，緩和過程で消散する。これを応力からみると，緩和開始時に全応力はほとんど団粒中の過剰間隙水圧で支えていたが，時間と共に水圧が消散し，その分全応力は減少する。一方，ひずみは固定されているから団粒内の骨格にはたらく有効応力は増加しない。もし，粒子レベルでの滑りが生じれば有効応力も低下するであろう。このようにして，全応力が緩和するものと考えられる。今回，より構造的に富むと考えられる火山灰質粘性土でより緩和が進んだのも以上のような機構を考えると理解しやすい。

## 第4章 結 論

従来から圧密については土質力学の分野で優れた研究が多く、一次圧密、二次圧密を統一的に扱うことができる理論が現在展開されつつある。これらは、骨格の応力-ひずみ関係に着目するものである。

本研究では土の圧密機構を間隙構造の変化に着目して実験的に解明することを目的とした。特に、二次圧密の機構に重点を置いた。

土は骨格と間隙からなり、それぞれに着目した構造がある。これらの構造には階層性があることが知られており、本研究でも団粒構造を念頭においた間隙構造の変化を明らかにしようと試みた。骨格ではなく間隙を調べたのは、より定量的な測定が可能なこと、圧密過程で経時的な測定が可能なことなどである。

第2章で扱った水銀圧入法から、圧密中の間隙構造の変動が予想以上に複雑であることがわかった。本研究で初めて示された間隙量変化分布図によれば、一次、二次の圧密過程を通して封入間隙は移行型の変動を示した。しかし、間隙体積の変化で整理すると一次圧密では封入間隙、二次圧密では自由間隙の体積が減少していることが火山灰質粘性土では明瞭に示された。これは、一見矛盾するようにみえるが、第3章で示した二次圧密のモデルを念頭におくと、理解しやすい事実である。流紋岩風化土では、自由間隙がほとんど圧縮せず、火山灰土とは全く異なる構造をもつと考えられた。電子顕微鏡写真の観察から、この土の自由間隙は風化粒子の孔であり、また構造の階層性が発達していない可能性が高い。一方、この流紋岩風化土でも二次圧密を生じており、構造的だけが二次圧密の原因であるとは言い難い。この点を明確にするためには、この土の構造的性の検討をさらに進める必要がある。

第3章では二次圧密および応力緩和中の透水係数の変化を調べた。当初、二次圧密では団粒が圧縮されるため、水みちとなっている団粒管間隙は影響を受けず透水係数の変化は小さいと予想していたが、実験結果は逆であった。先に示した一次、二次圧密の模式図はこれを解決するためのひとつの仮説である。このモデルは荒削りでしかも多くの未知定数を決定する必要があるが、間隙と骨格の関係が対等に扱われている点に特徴がある。今後このモデルを数理的に解析すること、あるいはより現実的な形態に変え



てゆく必要があると思われる。しかし、その前にこのモデルが圧密現象の根底にある圧縮性や透水性を正しく表現しているかをさらに検討する必要がある。

本報告では応力緩和については十分検討していないが、先にあげたモデルにより一応の説明が可能である。

また、このモデルには圧密とは逆の現象である膨潤についても取り込んでゆく必要がある。

本研究では荷重をかけたまま液体窒素凍結が可能な圧密室、応力制御・ひずみ制御が可能な圧密透水試験器を製作した。また、極めて精密な定水頭差装置を新たに開発した。今後はこれらの機器を活用してさらに以下のような課題に取り組んでゆく必要がある。

本研究で使用した供試土はカオリナイト、火山灰質粘性土、流紋岩風化土と限られている。いずれも力学的に特徴ある試料であるが、今後はより多様な供試土についてデータを集積する必要がある。

水銀圧入における2回侵入法では以下の点の検討を要する。第1に加圧、減圧の速度を十分に遅くして測定精度を高めること。第2に減圧時の圧力と封入・自由間隙の関係を検討すること。その他、供試体の作製方法に関することなどである。

圧密透水試験においては、さらに応力、ひずみの制御精度を向上するなどのほか、根本的には一次圧密中の透水係数を直接的方法で測定するという難題の解決が待たれる。

これらの方法で実験精度をさらに向上させ、多くのデータを集積した上で、モデルを再検討し完成させてゆくことが望まれる。

本研究は平成6,7年度文部省科学研究費補助金（一般研究C）によって可能になったものである。関係各位に深く感謝申し上げたい。

また、実験装置の製作、実験の遂行と結果の解析には岩手大学大学院農学研究科専攻生菊池 智士、杉井 徹両君に多大な協力をいただいた。岩手大学農学部馬場 秀和博士には試料の提供など実験上多くの便宜をいただいた。これら皆様に深く感謝申し上げたい。

## 引用文献

- Akagi, H. (1994) : A physico-chemical approach to the consolidation mechanism of soft clays, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.4, pp.43-50.
- Bjerrum, L. (1967) : Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, 17, pp.81-118.
- Collins, K. & A. McGown (1974) : The form and function of microfabric features in a variety of natural soils, *Geotechnique*, 24, pp.223-254.
- Griffiths, F. J. & R. C. Joshi (1990) : *Applied Clay Science*, 5, pp.37-66.
- Hawley, J.G. & D. L. Borin (1973) : A unified theory for consolidation of clays, *Proc. 8 ICSMFE*, (I-3), pp.107-119.
- Imai, G. & Y. Tan (1992): A constitutive equation of one-dimensional consolidation derived from inter-connected tests, *Soil and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.83-96.
- Koga, K. (1992) : *Introduction to Paddy Field Engineering*, Asian Institute of Technology.
- Lambe, T. M. (1958) : The structure of compacted clay, *Proc. ASCE SM2*, pp.1-34.
- Leroueil, S. et.al. (1985) : Stress-strain-strain rate relation for compressibility of sensitive natural clays, *Geotechnique*, 35, pp.159-180.
- Lowe, J. et.al. (1969) : Controlled gradient consolidation test, *Jour. ASCE SM1*, pp.77-79.
- Olsen, H. W. (1962) : Hydraulic flow through saturated clays, *clay and Clay Minerals*, Vol. 11, pp.131-161.
- Yong, R. N. et.al. (1975) : Soil composition control of fabric and response behavior, *Proc. Int. Clay Conf.*, pp.663-672.
- Yoshinaka, R. and H. Kazama : Micro-structure of compacted kaolin clay, *Soils and Foundation*, Vol.13, No.2, pp.19-34 (1973)

大西, 小林, 塩田 (1988) : 二重空隙モデルを用いた地盤挙動に関する考察,  
土木学会論文集, 第 394 号 / III - 9, p.p.61-70.

古賀 (1990) : 浸透圧密過程の解析, 農土論集 145, pp.43-48.

徳永, 古賀 (1991) : x線造影法による突固め土の透水間隙について, 土と基礎,  
39(4), pp.15-20.

吉国, 西海, 岡田 (1994) : 一次元圧密の機構, 第 29 回土質工学会研究発表会  
発表講演集, pp.267-268.

吉国, 西海, 池上, 瀬戸 (1994) : 一次元圧密における $\kappa$ - $\gamma$ と有効応力緩和,  
第 29 回土質工学会研究発表会発表講演集, pp.114-115.