

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.48 No.2 June 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 2 号 (Vol.48, No.2), 2009年6月 (June 2009)

目 次 (CONTENTS)

| |
|---|
| 棧橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究加藤 絵万・岩波 光保・横田 弘3 (Development of Life Cycle Management System for Open-type WharfEma KATO・Mitsuyasu IWANAMI・Hiroshi YOKOTA) |
| 潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の底質輸送と干潟の地形変化に関する 3次元数値モデルの開発と現地適用鶴崎 賢一・栗山 善昭37 (Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field.Ken-ichi UZAKI・Yoshiaki KURIYAMA) |
| 関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動に関するアイソタックモデルによる評価渡部要一・田中政典・佐々真志・森川嘉之63 (Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International AirportYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiyuki MORIKAWA) |
| 分割型圧密試験によって評価した関西国際空港海底粘土の圧密挙動に見られる層厚の影響渡部要一・田中政典・佐々真志・江村 剛83 (Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay ClaysYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Tsuyoshi EMURA) |
| 東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に関する一考察渡部要一・田中政典・佐々真志・野口孝俊・宮田正史 ...103 (A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Takatoshi NOGUCHI・Masafumi MIYATA) |
| 信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案渡部要一・田中政典・佐々真志・菊池喜昭 ...123 (New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based DesignYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiaki KIKUCHI) |
| 沿岸域に用いた気泡混合処理土の長期安定性確認調査渡部要一・田中政典・佐々真志 ...145 (10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal AreasYoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA) |
| 海上大気中における各種防食塗装による鋼材の防食効果と塗膜の健全性評価手法審良 善和・岩波 光保・山路 徹 ...161 (Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layersYoshikazu AKIRA・Mitsuyasu IWANAMI・Toru YAMAJI) |
| 任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案平山 克也・宮里 一郎 ...199 (Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary SpectrumKatsuya HIRAYAMA・Ichiro MIYAZATO) |

分割型圧密試験によって評価した関西国際空港海底粘土の圧密 挙動に見られる層厚の影響

渡部要一*・田中政典**・佐々真志**・江村 剛***

要 旨

本研究の目的は、長期圧密挙動に見られる層厚の影響を実験的に明らかにすることである。層厚が増せば、供試体と圧密リングとの間に発生する摩擦による圧密圧力損失を考慮しなければならなくなる。層厚 20mm の供試体を用いた圧密試験における摩擦損失を評価するために、摩擦による圧力損失を評価できる特殊な圧密容器を使用した段階荷重圧密試験を実施した。摩擦による圧力損失比（荷重圧力に対する損失圧力の比）が 0.2 を超す大きな値になるのは、過圧密領域にある場合と言うよりもむしろ圧密圧力がおよそ 300kPa 以下の場合と言った方が適切であった。次に、供試体となる個々の要素の層厚を薄く制限して摩擦の影響を最小限にとどめた分割型圧密を種々の条件の下で実施することによって、供試体全体の層厚が 20mm から 200mm の範囲で変化したときに、層厚の影響が長期圧密挙動にどのように現れるかを実験的に調べた。過剰間隙水圧の消散過程については、一次圧密終了（EOP）を明瞭に決定できた。また、 H^2 則は、過剰間隙水圧の消散に対しては十分に有効であることがわかった。しかしながら、供試体全体の層厚が薄くなると、ひずみに関して得られる EOP が次第に不明瞭になった。EOP のときの圧縮ひずみは、供試体全体の層厚が増加した場合に、一定値を示す、あるいは、やや増加する傾向が認められた。

キーワード：長期圧密，二次圧密，層厚，摩擦，一次圧密，粘土

* 地盤・構造部地盤研究領域土質研究チームリーダー

** 地盤・構造部地盤研究領域土質研究チーム主任研究官

*** 関西国際空港（株）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays

Yoichi WATABE*
Masanori TANAKA**
Shinji SASSA**
Tsuyoshi EMURA***

Synopsis

The objective of this study is to empirically clarify the scale effect in long-term consolidation behavior. Frictional pressure loss arising at the interface between the consolidation ring and the specimen must be considered, when the specimen thickness increases. This study uses a special oedometer that can evaluate the quantity of the frictional pressure loss. Incremental loading oedometer tests are carried out in order to evaluate the frictional pressure loss in the normal oedometer test using a specimen with a height of 20 mm. The frictional pressure loss ratio generally exceeds 0.2 when the consolidation pressure is less than approximately 300 kPa, rather than the overconsolidation range. Consequently, a series of inter connected-type consolidation tests, in which the frictional pressure loss can be minimized by limiting the thickness of each specimen element, are carried out in order to investigate the scale effect of the specimen thickness in the range of 20–200 mm. The EOP can be clearly identified in the excess pore pressure dissipation. The law of squared H is essentially valid for the pore water pressure dissipation. However, the EOP becomes unclear in the strains when the specimen thickness decreases. The compressive strain at the EOP stays constant or slightly increases with the specimen thickness.

Key Words: long-term consolidation, secondary consolidation, thickness, friction, primary consolidation, clay

* Head of Group, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division,
Geotechnical and Structural Engineering Department
** Senior Researcher, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division,
Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Kansai International Airport Co., Ltd.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

目 次

| | |
|---------------------------------|-----|
| 要 旨 | 83 |
| 1. はじめに | 87 |
| 2. 圧密試験における供試体とリングとの摩擦の影響 | 87 |
| 2.1 背景と目的 | 87 |
| 2.2 摩擦を評価した段階载荷圧密試験 | 88 |
| 2.3 摩擦を評価した長期圧密試験 | 89 |
| 2.4 三軸セルを用いた長期 K_0 圧密試験 | 90 |
| 2.5 摩擦の影響についてのまとめ | 91 |
| 3. 層厚が圧密挙動に及ぼす影響 | 92 |
| 3.1 分割型圧密試験 | 92 |
| 3.2 試験結果 | 95 |
| 3.3 層厚の影響 | 97 |
| 3.4 分割要素の均質性 | 99 |
| 3.5 圧密降伏応力 p_c 付近の挙動 | 99 |
| 3.6 層厚の影響に関するまとめ | 100 |
| 4. 結論 | 100 |
| 謝辞 | 100 |
| 参考文献 | 101 |

1. はじめに

関西国際空港は厚く堆積した海底粘土地盤の上に建設された人工島である。供用開始後に生じる残留沈下の大部分は地盤改良が及ばない洪積粘土に起因するため、沈下挙動の「予測」が極めて重要である。

一般に、わずか20mm程度の厚さの小さな供試体を使って圧密試験を実施する。得られた試験結果を使って、原位置にある数メートル～数十メートルの厚さの粘土層の挙動が予測される。圧密試験は要素試験ではなく、境界値問題となっているため、寸法効果の影響が懸念される。一次圧密過程を対象としたTerzaghiの圧密理論では、所要の圧密時間が最大排水距離 H の2乗に比例するという、いわゆる H^2 則が成り立つ。一方で、現場で生じる圧密沈下挙動と試験室で得られる圧密沈下挙動との関係について、層厚の影響がどのように現れるかについての疑問があり、Ladd et al. (1977)やJamiolkowski et al. (1985)が指摘したように、図-1に示す2つの仮定がなされている。

仮定Aでは、クリープ変形は一次圧密終了（EOP）後にしか発生しないとす。したがって、 H^2 則が圧密過程全般に適用でき、EOPにおける原位置での圧縮ひずみは試験室での圧縮ひずみと同じ値になる。一方、仮定Bでは、構造的な粘性がクリープ挙動を支配していて、クリープ変形は過剰間隙水圧の消散中にも発生するとす。したがって、沈下に関して H^2 則は成り立たず、EOPでの圧縮ひずみは層厚とともに増加する。圧密問題に関する層厚の影響への関心は高く、たとえばBerre and Iversen (1972), Aboshi (1973), Ladd et al. (1977), Jamiolkowski et al. (1985), Imai and Tang (1992), Yin et al. (1994), Imai et al. (2003), Tanaka (2005), Leroueil (2006)など、多くの研究成果が報告

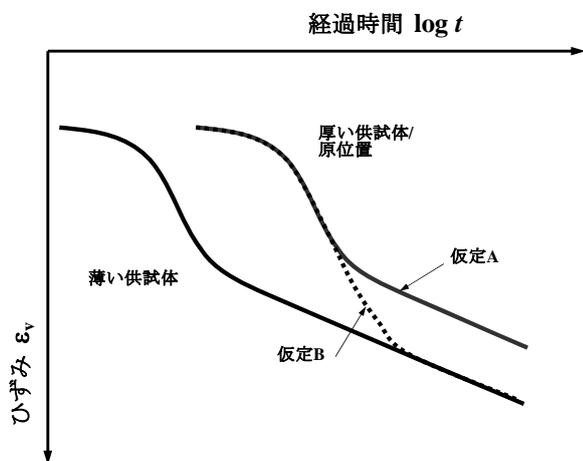


図-1 薄い供試体と厚い供試体（あるいは原位置の土層）の圧密曲線の比較

されている。

本研究は、圧密挙動に見られる層厚の影響を実験的に調べることを目的としている。実務における最大の関心事は、厚さ20mmの供試体を用いた室内試験結果と厚さ数メートル～数十メートルの原地盤の挙動との関係である。しかし、実地盤の圧密挙動は著しい長時間を要することから、実際にこれを実験的に比較することは不可能である。そこで、室内試験によって比較可能な範囲で層厚の影響を調べることにする。

供試体を圧密リングにセットした状態で実施するタイプの圧密試験では、供試体の厚さが増すと、圧密リングと供試体との摩擦によって、圧密圧力が下部まで十分に伝達されない恐れがあり、これにより試験結果に無視し得ぬ影響が現れることが懸念される。特に関西国際空港の海底粘土のうち、長期沈下予測の対象となる更新世の堆積粘土（いわゆる洪積粘土）の場合、通常圧密試験で対象とする粘土よりも著しく深い層から採取されており、試験を実施する応力レベルが高いことから、層厚がどの程度までであれば摩擦の影響を許容できるかを事前に明らかにしておく必要があった。

そこでまず、直径60mm、厚さ20mmの供試体を用いて実施される通常圧密試験において、摩擦の影響がどの程度あるかについて評価するために、摩擦力を評価できる特殊な圧密容器を用いた段階的圧密試験を実施した。加えて、二次圧密過程において摩擦の影響がどのように現れるかを評価するために、同圧密容器を用いて長期圧密試験も実施した。さらに、リングの摩擦が全くない試験として、三軸セルを用いた長期 K_0 圧密試験も比較のために実施した。これらの結果を踏まえ、摩擦の影響をできるだけ小さくするために一つあたりの供試体寸法を10～20mmとした分割型圧密試験を実施した。層厚を20～200mmの範囲に設定した長期圧密試験を実施することにより、層厚の影響を実験的に評価した。分割圧密試験は片面排水条件で実施する試験であり、上述の層厚の範囲は、通常両面排水条件を想定すると40mm～400mmの範囲に相当する。

2. 圧密試験における供試体とリングとの摩擦の影響

2.1 背景と目的

供試体を圧密リングにセットした状態で実施するタイプの圧密試験では、供試体の厚さが増すとリングと供試体との摩擦によって、圧密圧力が下部まで十分に伝達されない恐れがある。厚さ20mm程度で行われる一般的な圧密試験においても摩擦の影響は不可避である。このため、

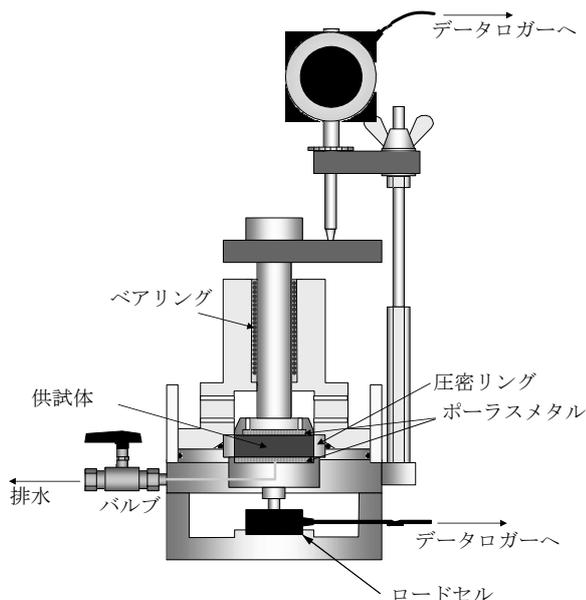


図-2 周面摩擦による圧力損失を評価するための圧密容器

その影響がどの程度であるかに関して高い関心があり、これまでもいくつかの研究成果が報告されてきた (Yamanouchi and Yasuhara, 1975; 佐藤ら, 1999; 岡井ら, 1999; Sivrikaya and Togrol, 2006)。これらの研究によれば、過圧密領域では摩擦による荷重圧力減少の影響が著しく現れ、正規圧密領域でも時間とともにその影響が強くなっていくという知見が得られている。また、摩擦の影響により、正規圧密領域であっても二次圧密が過小評価される。このため、本研究で対象としているような長期的な圧密挙動に関する試験においては、摩擦の影響がより大きく生じることが懸念される。本章では、圧密リングを使って圧密試験を行う場合に不可避である「リングと供試体との摩擦」がどの程度であるかを定量的に評価することを目的とする。

2.2 摩擦を評価した段階荷重圧密試験

リングと供試体との境界面に発生する摩擦力を評価す

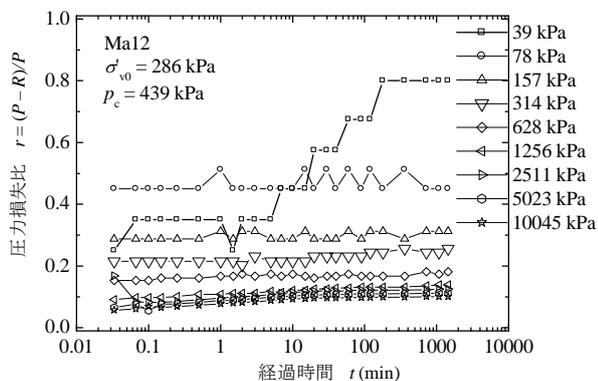


図-3 圧力損失比の経時変化 (Ma12)

表-1 段階荷重圧密試験に用いた粘土試料の諸特性

| 試料 | Ma12 | Ma7 | Ma4 | Ma3 | Ma2 |
|-------------------------------------|------|-------|------|------|------|
| 深度 z (CDL -m) | 73 | 223 | 264 | 283 | 305 |
| 有効土被り圧 σ'_{v0} (kPa) | 365 | 1457 | 1802 | 1937 | 2102 |
| 圧密降伏応力 p_c (kPa) | 530 | 1887 | 2512 | 2627 | 3141 |
| 過圧密比 OCR | 1.45 | 1.30 | 1.39 | 1.36 | 1.49 |
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.66 | 2.70 | 2.67 | 2.70 | 2.66 |
| 液性限界 w_L (%) | 99.8 | 100.4 | 93.6 | 82.4 | 83.6 |
| 塑性限界 w_p (%) | 37.8 | 37.8 | 35.3 | 35.7 | 32.7 |
| 塑性指数 I_p | 62.0 | 62.6 | 58.3 | 46.7 | 50.9 |
| 自然含水比 w_n (%) | 69.1 | 51.7 | 42.4 | 36.6 | 51.8 |

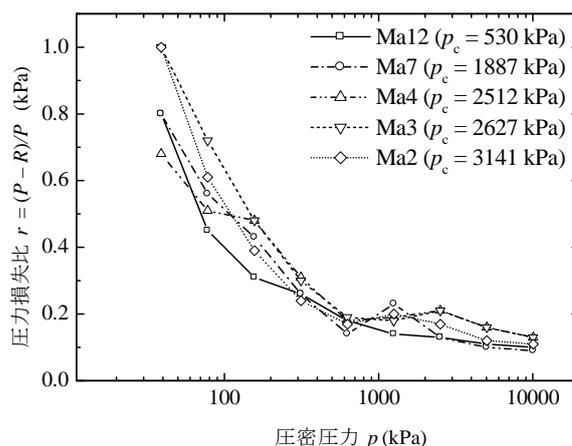


図-4 圧力損失比と圧密圧力の関係

ることができる圧密試験容器を開発し、関西国際空港海底粘土に対する圧密試験を実施した。試験に用いた圧密容器を図-2に示す。本圧密容器は、段階荷重圧密試験に用いられる通常の圧密容器を基本としているが、下部に設置されたロードセルによって供試体下面まで伝達した荷重圧力に対する反力を計測する機構が付加されている。これにより、荷重荷重 P と計測された反力 R の差 ($= P - R$) を周面摩擦による圧密荷重の損失として捉えられる。ここで、圧力損失比 r を次式により定義する。

$$r = \frac{P - R}{P} \quad (1)$$

圧密リングは十分な剛性を有するステンレス製で、供試体寸法に合わせて内径60mm、高さ20mmである。供試体と接する上下面にはポーラスメタルが取り付けられており、両面排水条件での試験が可能である。荷重圧力はテコを介したレバーに対して重錘により付与した。沈下はリニアゲージ (容量20mm、精度0.001mm) により計測した。

試験に用いた粘土試料は、水深約19mの関西国際空港建設予定地点 (当時) において採取した大阪湾海底粘土Ma12, Ma7, Ma4, Ma3, Ma2の不攪乱試料である。試験に用いた試料の特性を表-1に示す。圧密圧力増分比 $\Delta p/p = 1.0$ で24

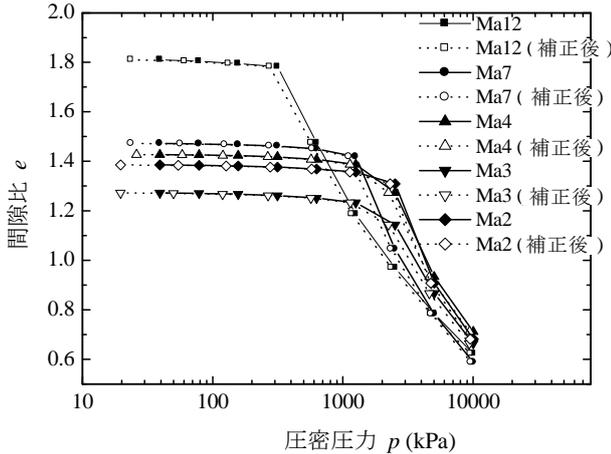


図-5 圧縮曲線における圧力損失分の補正の有無の影響

時間載荷とし、圧密圧力39kPaから78, 157, 314, 628, 1256, 2511, 5023, 10045kPaの順で段階的に載荷した。

試験結果の一例として、Ma12の(a)ひずみ ϵ および(b)圧力損失比 r と経過時間 t の関係を図-3に示す。圧力損失比 r は圧密の進行とともに上昇する傾向にある。このことは、摩擦係数が一定であると仮定できたとして、過剰間隙水圧の消散に伴って有効応力が増加し、圧密の進行とともにリングと供試体との摩擦力が増大していくことを示唆している。過圧密であるほど圧力損失比 r は大きく、圧密圧力39kPa (過圧密比OCR=11) では0.8, 78kPa (OCR=5.6) では0.45にも達している。しかしながら、正規圧密領域では圧密圧力によらずほぼ同程度の圧力損失比 ($r=0.1\sim 0.15$) となっている。これらの試験結果の定性的な傾向は、上述の既往の研究成果とも良く整合する。

図-4は、全試料の試験結果について圧力損失比 r と圧密圧力 p の関係をとりまとめたものである。載荷圧力ごとの摩擦損失比の値は、いずれの試料でもほぼ同程度であることも読み取れる。周面摩擦の影響が大きく、圧力損失比 r が0.2を超えるのは過圧密領域であると一概に言えるのではなく、圧密圧力 p が約300kPaより小さい範囲であることがわかる。しかし、対象としている粘土の場合、もっとも圧密降伏応力が小さいMa12でも $p<300\text{kPa}$ の範囲は過圧密領域にあるため、圧密によるひずみが小さく、圧密試験結果の工学的利用という点において影響は小さい。このことは、圧密沈下予測をする実務において、摩擦の影響を補正する必要はないことを示唆している。

一連の試験において通常データ整理によって得られた $e\sim\log p$ 関係と、供試体に作用している実質的な圧密圧力が供試体上面から作用させた載荷圧力と供試体下面に伝達している圧力(底面からの反力)の平均値であるとして補正した $e\sim\log p$ 関係を比較して図-5に示す。関西国際空港海底粘土に対して厚さ20mmの供試体を用いて段

表-2 長期圧密試験の載荷条件

| 試料名と採取深度 (CDL-m) | 載荷段階による圧密圧力 | | | |
|------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| | 1段階目 (kPa) | 2段階目 $\sigma'_{v0}/2$ (kPa) | 3段階目 σ'_{v0} (kPa) | 長期載荷圧密圧力 (kPa) |
| Ma12 (-66.5m) | 39 (2 hours) | 179 (1 day) | 358 (1 day) | 358 |
| | | | | 412 |
| | | | | 465 |
| | | | | 646 |

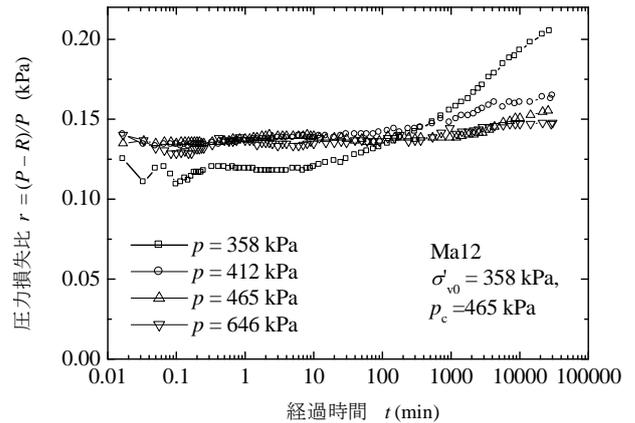


図-6 圧力損失比の経時変化

階載荷圧密試験をした場合、圧密沈下が工学的に重要となる正規圧密領域において、リングと供試体の摩擦の影響は沈下予測に用いる圧縮曲線の形状や位置にほとんど影響しないことを確認できる。

上述のように、24時間載荷程度では摩擦の影響は無視し得る程度であると言える。しかしながら、図-3からも読み取れたように、長期的に圧力損失率は上昇する傾向にあり、長期圧密試験における二次圧密挙動の評価において懸念される。これについては、次節において検討する。

2.3 摩擦を評価した長期圧密試験

リングと供試体との境界面に発生する摩擦力を評価することができる圧密試験容器(図-2)を用いて、長期圧密試験も実施した。試験に用いた粘土試料はMa12 (C.D.L.-66.5m)の不攪乱試料である(表-1)。試験条件を表-2に示す。定ひずみ速度圧密試験 ($\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) から求めた圧密降伏応力 ($p'_c = 465 \text{ kPa}$) に基づいて、載荷圧力を358 kPa (=有効土被り圧 σ'_{v0})、412 kPa (= $(\sigma'_{v0} + p'_c)/2$)、465 kPa (= p'_c)、646 kPa (= $1.4p'_c$) の4ケースとし、約20日間の長期圧密を行った。また、原地盤の鉛直有効土被り圧 σ'_{v0} までの載荷は2段階で行った。

長期圧密試験の結果として、圧力損失比 r と経過時間の関係を図-6に示す。ひずみの経時変化から一次圧密が生じ

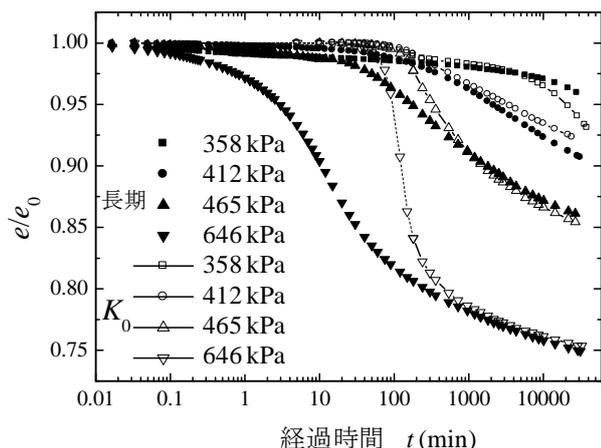


図-7 三軸 K_0 圧密試験および圧密リングによる長期圧密試験で得られた間隙比の経時変化の比較

ていると判断できる間は、 σ'_{v0} に荷重したものは圧力損失比が0.12程度とやや小さめであるが、他は0.14程度でほぼ一定値になっている。しかし、二次圧密期間に入るとこれらの値が次第に増加していく傾向にある。 σ'_{v0} に荷重したもので0.20以上に達するとともに、時間の対数に対して急激に増大しているなど、過圧密領域に荷重したものの摩擦の影響は顕著である。正規圧密領域に荷重した場合には、二次圧密においても圧力損失比は高々0.15程度である。なお、ここで定義した圧力損失比は供試体の上下面の圧力差に基づいており、供試体中央を対象とした場合の実質的な圧力損失比 r' はその半分程度 ($r' \approx r/2$) であると考えられる。したがって、当該粘土試料では、過圧密領域に荷重した場合には摩擦の影響が長期圧密の評価に現れる可能性があるが、正規圧密領域に荷重した場合には、実質的な圧力損失比 r' は $0.15/2=0.075$ 程度であり、摩擦の影響は大きくはないことを確認できる。

2.4 三軸セルを用いた長期 K_0 圧密試験

長期圧密試験中の供試体の周面摩擦の影響を調べるために、上述では供試体と圧密リングとの摩擦による圧密圧力の損失の影響を評価した。一方で、摩擦の影響について、これとは異なるアプローチとして、三軸セルを用いて K_0 圧密を実施することにより、周面摩擦の影響を完全に除去した試験を実施することもできる。そこで、本節では、三軸セルを用いた長期 K_0 圧密試験を実施し、得られた沈下挙動を上述の圧密リングを用いた試験結果と比較した。

三軸セルを用いた K_0 圧密試験は、Watabe et al. (2003)に用いた実験システムによって実施した。このシステムは飽和粘土の K_0 圧密を可能にするもので、軸方向の圧力を漸増させ、供試体の沈下量と排水量（体積変化量）から

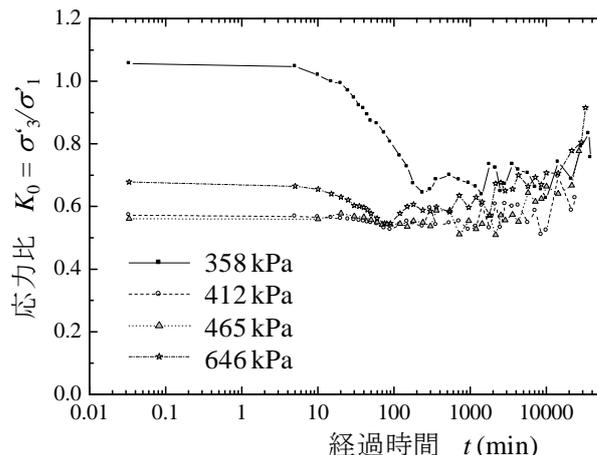


図-8 K_0 値の経時変化

供試体の側方ひずみを算出し、これをゼロとするようにセル圧をコントロールするフィードバック方式が採用されている。この方法により、長期圧密中の側方ひずみは、 K_0 値に影響がないといわれている約 $\pm 0.04\%$ 以内に制御できた。

三軸供試体の排水距離が長い場合に、排水に要する時間を短縮するとともに供試体内の排水挙動を均質化する目的で、ドレーンペーパーを供試体に巻き付けることがある。ドレーンペーパーからの排水量とセル圧の関係を予め求めておき、ドレーンペーパーからの排水量を補正すれば、ドレーンペーパーの存在が試験精度にほとんど影響しないことが確認されている (Tsuchida and Kikuchi, 1991; Watabe et al. 2003)。しかしながら、非排水せん断試験の準備段階として実施する通常 K_0 圧密試験とは異なり、ここでは、排水量が微量となる二次圧密を対象とした長期圧密挙動を検討対象としていることから、不確定要因をできるだけ排除することが望ましい。そこで、Watabe et al. (2003)で実施された一部の試験に倣って、供試体寸法を直径50mm、高さ20mmとして、ペーパードレーンを用いずに片面排水条件で K_0 圧密試験を実施した。

試験に用いた試料はMa12で、試験条件は前節の表-2と同様である。試験中は、バックプレッシャーとして98kPaを作用させた。

三軸セルを用いた長期 K_0 圧密試験の結果について、前節の周面摩擦を評価した長期圧密試験の結果と比較して以下に示す。長期圧密中の間隙比の経時変化を図-7に示す。供試体によって初期間隙比に若干の差があるため、ここでは、試料のばらつきの影響を小さくして結果を比較できるように、間隙比 e を初期間隙比 e_0 で除して整理した。

圧密開始直後から約500minまでは、リングを用いた長期圧密試験と三軸 K_0 圧密試験の結果に著しい差が見られる。これは、三軸 K_0 圧密試験の荷重方法に起因したもの

であり、ここで着目している圧密挙動の本質的違いではない。すなわち、三軸 K_0 圧密試験では、リングを用いた圧密試験のように瞬間載荷することは不可能である。これは、試料の一様性を保たなければならないこと、ならびに制御用のフィードバック機能が働くまでにある程度の時間が必要であること等に起因する。本研究では、約3時間かけて目的の荷重に達するような漸増載荷を採用した。約20日間という長期圧密の対象となるような時間スケールを対数で見える場合、最初の3時間（180min）程度の特異な挙動は無視できるので、以下では二次圧密の部分を比較することにする。

圧密降伏応力 p_c よりも大きな圧力で載荷した正規圧密領域の挙動に着目してみると、三軸 K_0 圧密、特殊圧密の結果ともに非常によく一致していることがわかる。ただし、有効土被り圧 σ'_{v0} で載荷したケースの挙動については、三軸 K_0 圧密の試験の方が長期圧密試験より大きな圧密沈下が発生し、両者の沈下量の差は、時間の経過とともに徐々に増大する傾向が見られる。

周面摩擦により圧力損失比 r が増加していく一因として、二次圧密中の K_0 値の増加が考えられる。そこで、 K_0 圧密試験中の応力比（ K_0 値）の経時変化を図-8に示す。本図においても、前述と同様に最初の3時間（180min）程度の特異な挙動は無視できるので、以下では二次圧密の部分を比較することにする。前節の図-6において、過圧密比が大きいものの方が、圧力損失比 r が大きく、かつ、長期的な増加がより顕著になる傾向が見られた。しかし、 K_0 値については、正規圧密や過圧密であることに依存した傾向は特に見られず、全ての試験ケースにおいて K_0 値は長期的に徐々に増加している。

K_0 値は周面摩擦と密接に関係していると考えられる。すなわち、ある試料の長期圧密試験において、供試体とリングとの間の摩擦係数が一定値であると仮定した場合、二次圧密中の K_0 値の増加は側方からの有効応力の増加を意味し、周面摩擦増加による圧密圧力損失比増大の要因のひとつとして考えられる。しかしながら、 K_0 値の増加、すなわち側方有効応力の増加に比べて圧力損失比の増加は緩やかであることから、圧密圧力損失の主たる要因は、有効応力に起因するものと言うよりはむしろ、付着によるものであると判断される。

2.5 摩擦の影響についてのまとめ

圧密降伏応力が異なる試料Ma12, Ma7, Ma4, Ma3, Ma2の不攪乱試料について、周面摩擦の評価ができる段階載荷圧密試験を実施した。その結果、当該試料について直径60mm、高さ20mmの供試体とした場合、過圧密領域

の方が正規圧密領域より摩擦損失比が大きくなる傾向にあり、摩擦損失比の値が0.2を超えるかどうかの判断基準は、採取深度が著しく異なるいずれの試料においても圧密圧力が約300kPaより小さいかどうかであることがわかった。

有効土被り圧 σ'_{v0} で載荷する場合など、過圧密比が大きなケースでは、摩擦による圧力損失が著しい。このような場合には摩擦損失がない K_0 圧密の場合の方が、摩擦損失があるリングを用いた圧密試験に比べて沈下量は大きくなる。しかしながら、工学的見地からすると、過圧密領域では圧密量自体が小さいために沈下予測において摩擦の影響は小さい。一方、正規圧密領域では摩擦の影響は圧密の進行とともに増加する傾向にある。しかし、長期圧密試験を実施した結果、長期的にも時間の対数に対して急激な増加は見られず、摩擦の影響はほぼ定常状態にあることがわかった。したがって、実務における長期圧密挙動予測では、圧密リングを用いた試験結果に特別な補正などを行う必要はないと判断できた。なお、供試体と圧密リングとの摩擦の原因として、有効応力の増加と付着の両者が考えられるが、一連の試験結果から、後

表-3 分割型圧密試験に用いた粘土試料の諸特性

| 試料名 | Ma13 | Ma12 | Ma11 | Ma13Re |
|-------------------------------------|------|-------|------|--------|
| 不攪乱試料 | Yes | Yes | Yes | No |
| 再構成試料 | No | No | No | Yes |
| 採取深度 (CDL-m) | 30 | 63 | 85 | — |
| 有効土被り圧 σ'_{v0} (kPa) | 65 | 291 | 489 | — |
| 圧密降伏応力 p_c (kPa) | 106 | 452 | 701 | 116 |
| 過圧密比 OCR | 1.63 | 1.55 | 1.43 | — |
| 土粒子密度 ρ_s (g/cm ³) | 2.67 | 2.67 | 2.67 | 2.70 |
| 液性限界 w_L (%) | 91.2 | 104.6 | 85.9 | 91.3 |
| 塑性限界 w_p (%) | 37.2 | 40.5 | 25.6 | 30.4 |
| 塑性指数 I_p | 54.0 | 64.1 | 60.3 | 60.9 |
| 自然含水率比 w_n (%) | 83.3 | 82.2 | 51.5 | 75.2 |

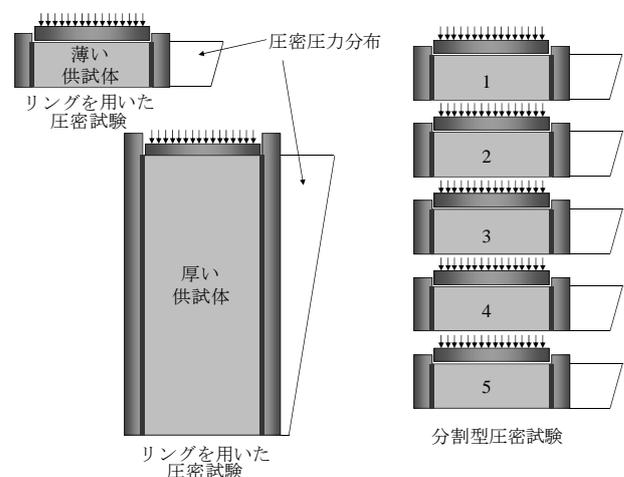


図-9 圧密試験および分割型圧密試験における摩擦の影響に関する概念図

表-4 分割型圧密試験の载荷条件

| 試料名 | 全体層厚 (mm) | 予圧密圧力 | | 長期圧密圧力 (kPa) | バックプレッシャー (kPa) |
|--------|------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------|-----------------|
| | | 予圧密 24 h. (kPa) | 有効土被り圧 σ'_{v0} (kPa) 7 days | | |
| Ma13 | 20, 100 | 39 → | 69 → | 216 (= $2p_c$) | 98 |
| Ma12 | 20, 100 | 39 → | 291 → | 904 (= $2p_c$) | 196 |
| Ma11 | 20, 50, 100, 200 | 59 → | 489 → | 1080 (= $1.5p_c$) | 196 |
| Ma13Re | 20, 100 | 20 → | 88 → | 235 (= $2p_c$) | 98 |

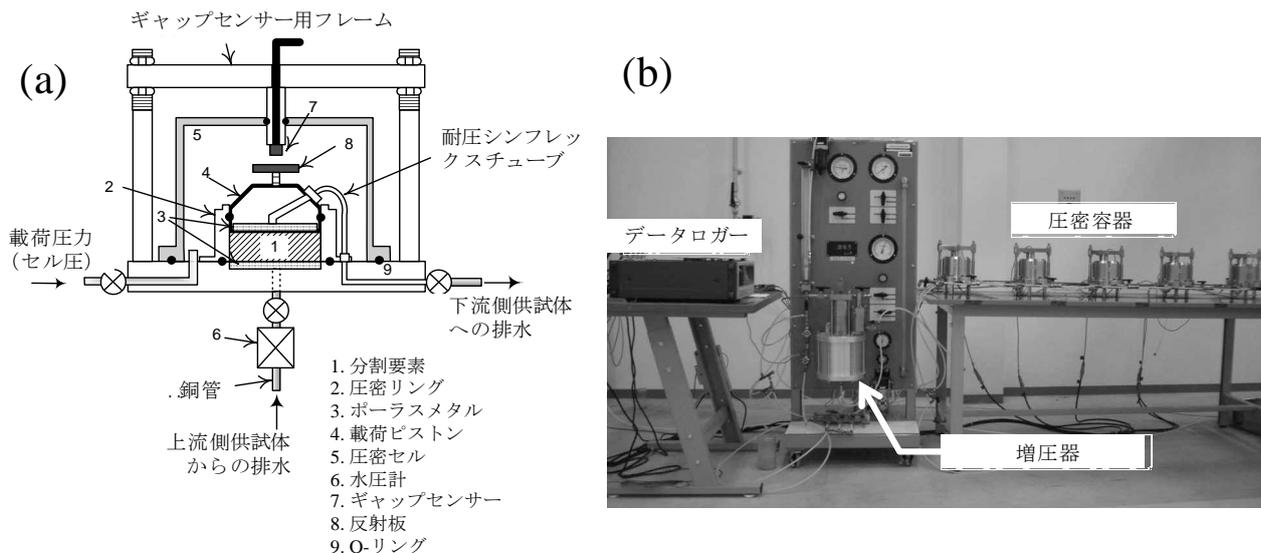


図-10 分割型圧密試験機の概要: (a) 分割型圧密試験用の圧密容器の概念図, (b) 分割型圧密試験機の写真

者の方が卓越していると判断された。

上述のリング摩擦に関する検討結果を踏まえて、以下では直径60mm、高さ20mmの供試体の場合にリング摩擦の影響については考慮しないことにする。沈下挙動における層厚の影響を調べるために実施した次章の分割型圧密試験では、直径60mmの個々の供試体厚さの上限を20mm（直径が高さの3倍以上）とし、分割要素ごとに圧密圧力を载荷することによって摩擦の影響を最小化した。

3. 層厚が圧密挙動に及ぼす影響

3.1 分割型圧密試験

長期圧密挙動に見られる層厚の影響を調べるために、以下に記述する分割型圧密試験を実施した。図-9の概念図に示すように、分割要素ごとに圧密圧力を作用させ、圧密リングによる摩擦の影響を最小化した。厚さ10mmの要素2個を直列接続して片面排水とした全体層厚20mmのケ

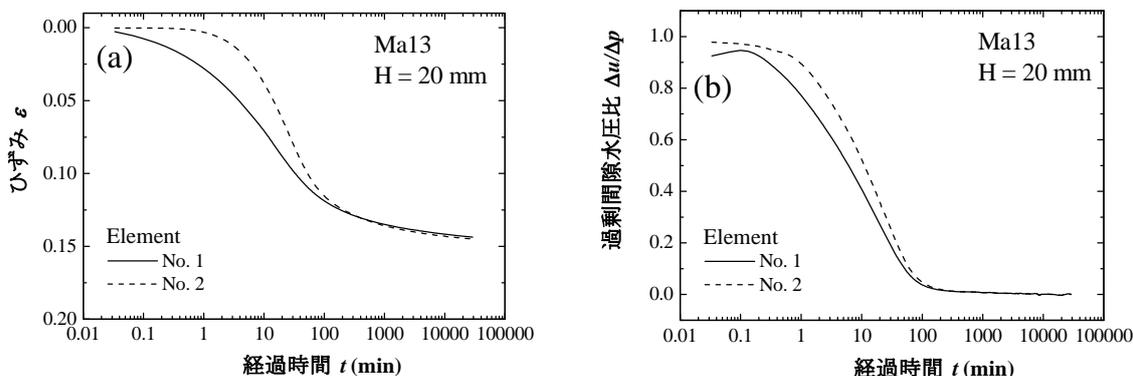


図-11 Ma13 (H2) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

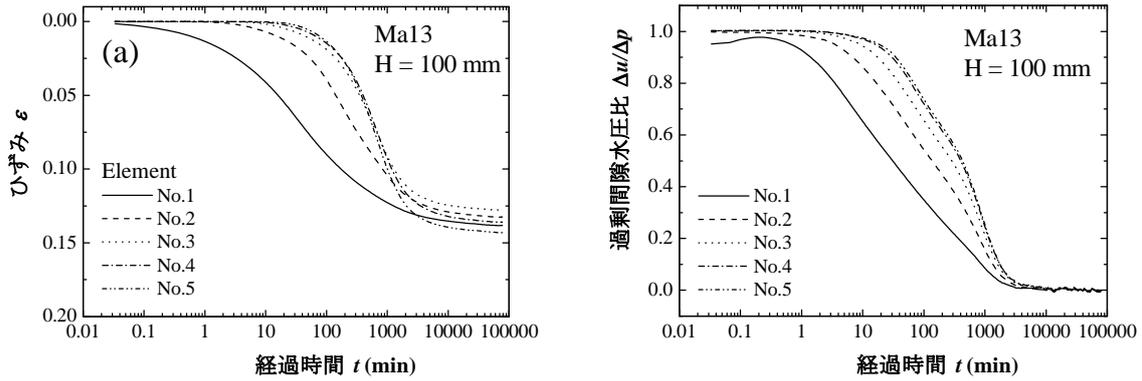


図-12 Ma13 (H10) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

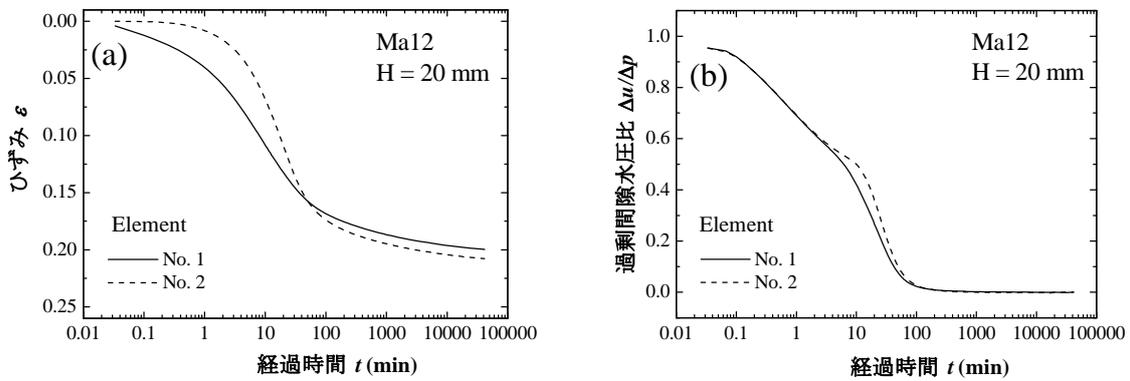


図-13 Ma12 (H2) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

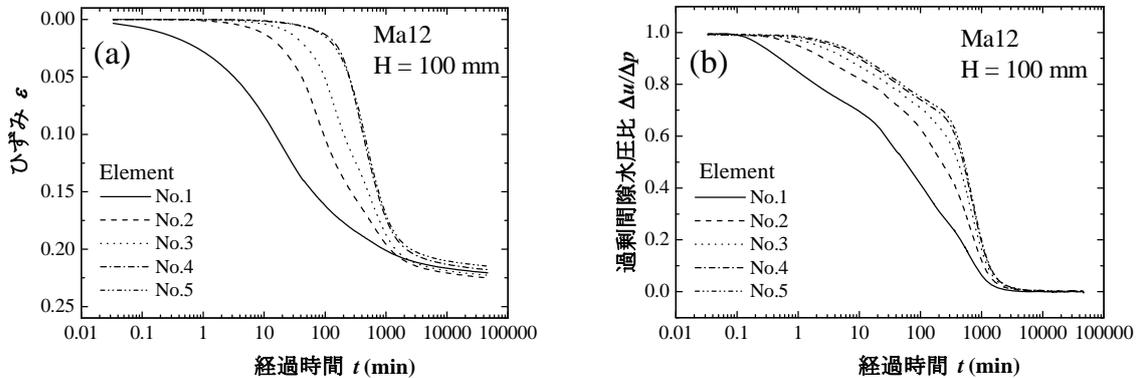


図-14 Ma12 (H10) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

ース (H2), 厚さ20mmの要素5個を直列接続して片面排水とした全体層厚100mmのケース (H10) について, 分割圧密試験を実施した. 使用した分割圧密試験機は, Tanaka (2005)が用いたものと同じである. なお, 一部の試料については, 厚さ10mmの要素5個を直列接続して片面排水とした全体層厚50mmのケース (H5) や, 厚さ20mmの要素10個を直列接続して片面排水とした全体層厚200mmのケース (H20) についても試験を実施した.

試験に用いた試料は, 関西国際空港海底から採取した

Ma13, Ma12, Ma11の不攪乱試料, ならびにMa13の再構成試料 (Ma13Re) である. 試料の諸特性を表-3に示す (Ma12は表-1のものと採取深度が異なる). サンプルングされた試料からワイヤソーを使って直径60mm, 高さ約15mm (あるいは約25mm) にトリミングした後, 内側にシリコングリースを塗布した直径60mm, 高さ10mm (あるいは20mm) のステンレス製リングに挿入し, 上下端をトリミングすることによって供試体を整形した. 供試体を圧密リングに挿入し, 分割圧密容器に一つずつセット

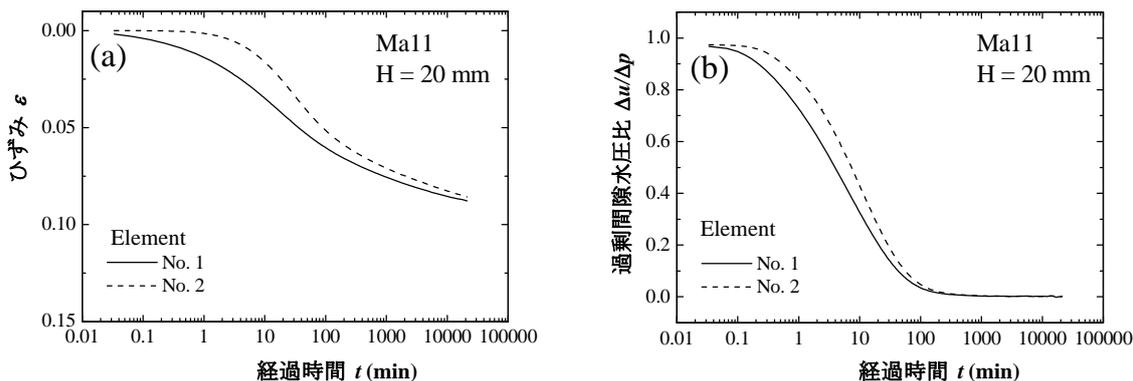


図-15 Ma11 (H2) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

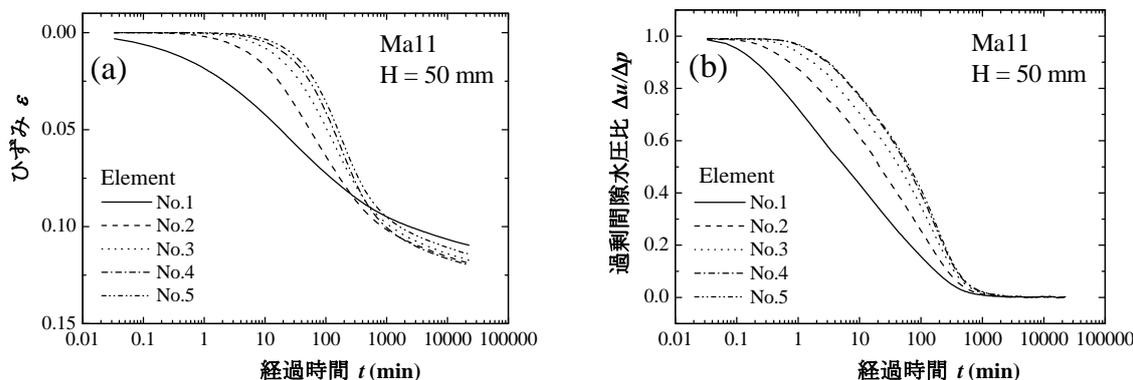


図-16 Ma11 (H5) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

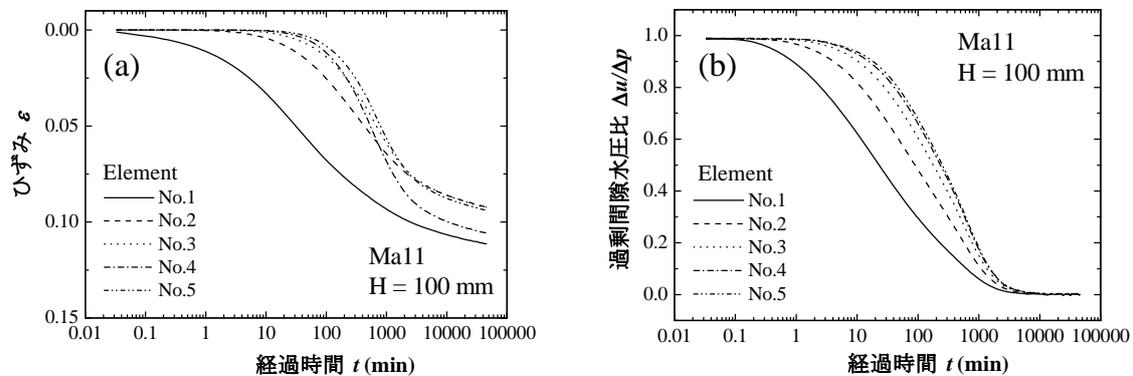


図-17 Ma11 (H10) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

した。実験システムを図-10に示す。

容器内を水で満たし、バックプレッシャーとして98kPaまたは196kPaを作用させた。容器底部および上部ピストンには直径55mmのポーラスメタルを介して銅パイプが接続されている。これらの銅パイプにより、各容器の排水経路を直列に接続した。ただし、各要素間の排水経路接続にはバイパスが設けてあり、バルブ操作により、各要素の排水経路を並列に接続することもできる構造となっている。各容器下部側の排水経路上に間隙水圧計が設置されている（容量3500kPa, 精度0.88kPa）。O-リングが

取り付けられたピストン上部の圧力室に水圧を作用させることによって、圧密圧力を作用させる。

試験条件を表-4に示す。所定の予圧密圧力までは、有効土被り圧 σ'_{v0} まで24時間ごとに段階荷重した。この段階まではバルブ操作により各要素の排水経路をバイパスに並列接続し、それぞれの要素が両面排水となるようにしてある。7日間放置した後、それぞれの要素の排水経路が直列接続となるようにバルブを操作し、所定の荷重圧力（ $1.5p_c$ または $2p_c$ ）まで圧密圧力を増加させ、各要素の沈下量と間隙水圧を計測した。沈下計測にはピストン上部

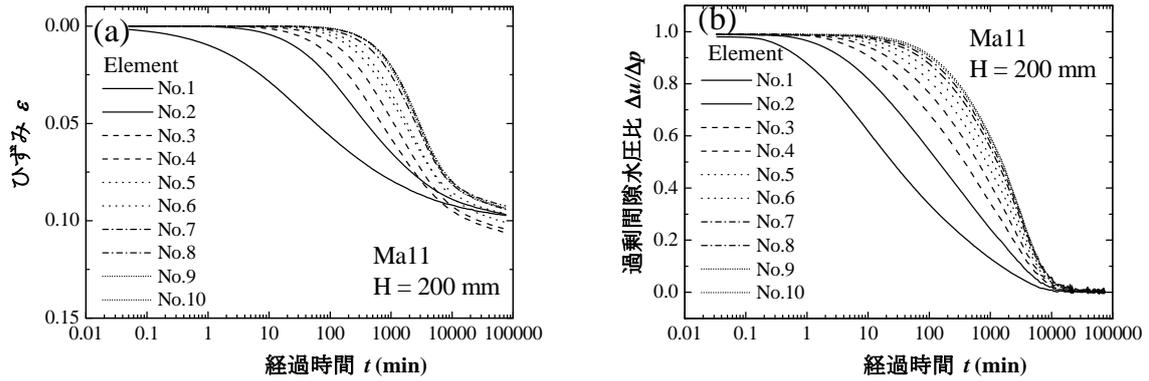


図-18 Ma11 (H20) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

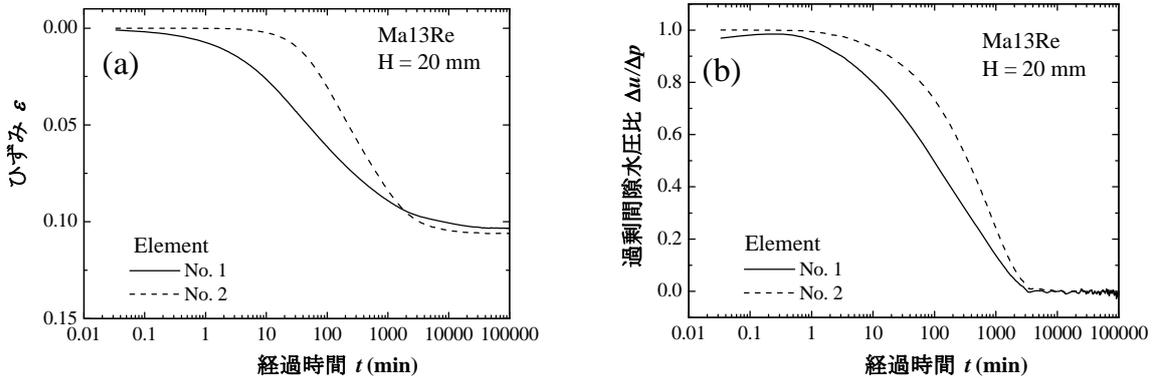


図-19 Ma13Re (H2) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

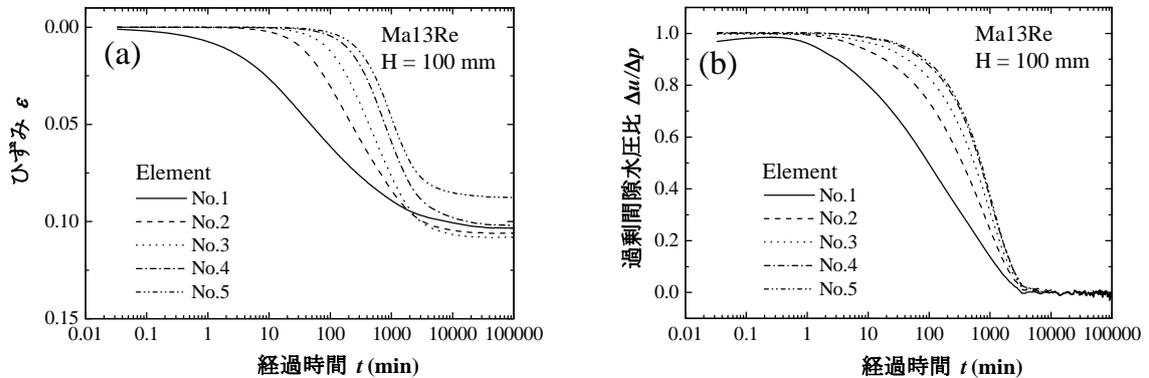


図-20 Ma13Re (H10) における分割要素ごとの経時変化: (a) 圧縮ひずみ～時間関係, (b) 過剰間隙水圧～時間関係

に取り付けられたギャップセンサー（容量2mm，精度0.0005mm）を用いた。

3.2 試験結果

分割圧密試験により得られた(a)分割要素ごとのひずみ, および(b)分割要素ごとの過剰間隙水圧と経過時間の関係を図-11～図-20に示す。いずれの試験結果も, 排水層に近いものほど間隙水圧の消散ならびにひずみの増加が速いことが読み取れる。しかし, 間隙水圧の消散完了は, いずれの要素もほぼ同時刻となっている。排水層に近い層

ほど消散は速いものの, 隣接する要素からの排水が流入してくるために, 最終的な消散完了時刻は, いずれの要素もほぼ同時刻になるものと理解できる。こういった視点から見ると, 一次圧密終了時刻は, 過剰間隙水圧の消散において明瞭に現れているといえる。一方, ひずみの変化について見ると, 層厚が厚いケース (50mmや100mm) では一次圧密と二次圧密が比較的明瞭に区別できる。しかし, 層厚が薄いケース (20mm) では一次圧密と二次圧密の区別が明確にできない。さらに個々の要素のひずみ挙動に着目すると, いずれの試験でも排水層に近い要素

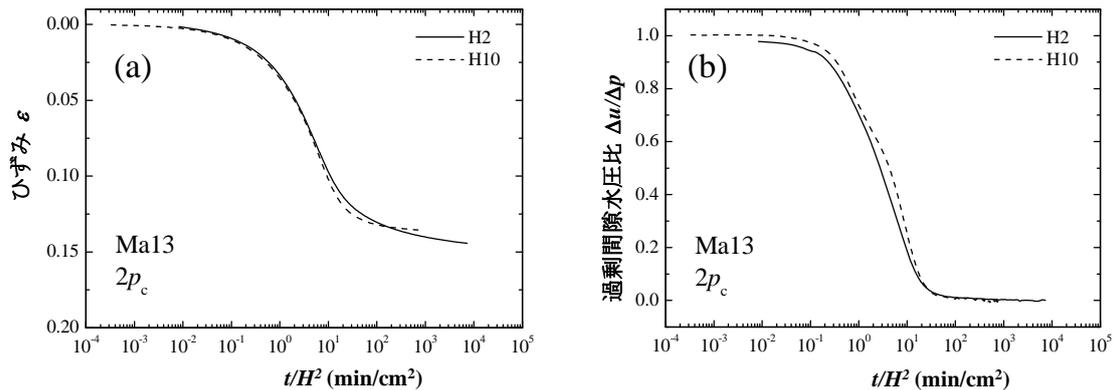


図-21 Ma13における経時変化: (a) 全層厚に対する圧縮ひずみ～時間関係, (b) 非排水境界の過剰間隙水圧～時間関係

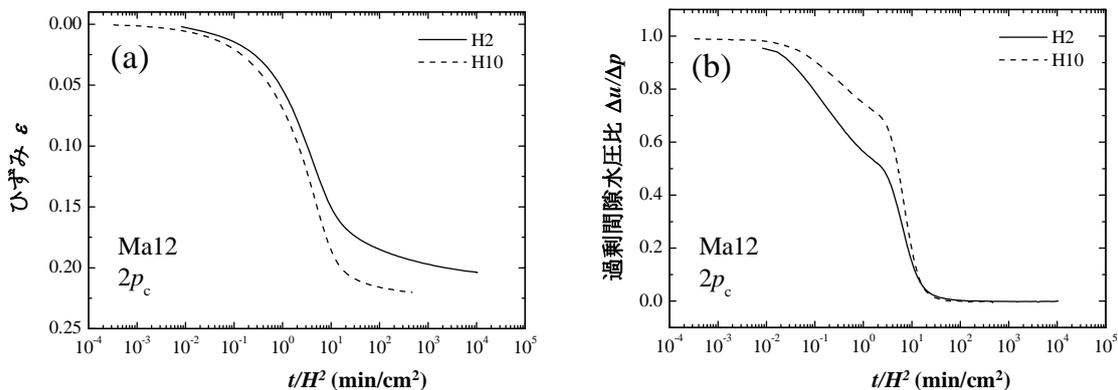


図-22 Ma12における経時変化: (a) 全層厚に対する圧縮ひずみ～時間関係, (b) 非排水境界の過剰間隙水圧～時間関係

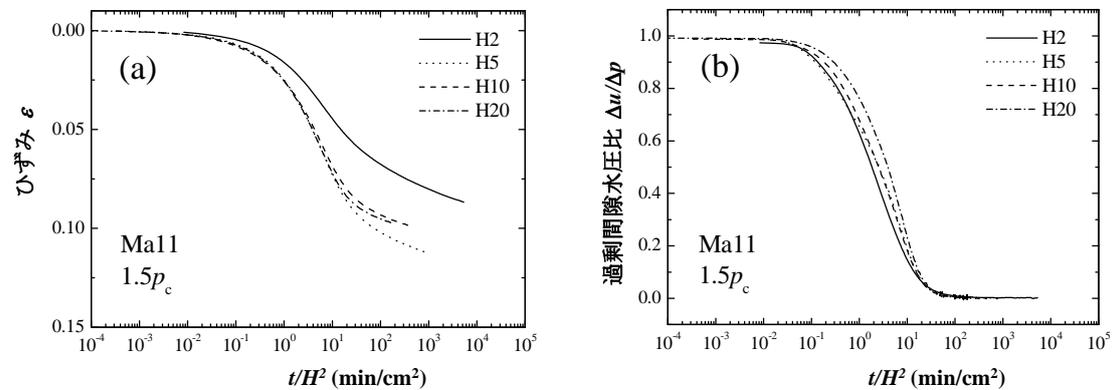


図-23 Ma11における経時変化: (a) 全層厚に対する圧縮ひずみ～時間関係, (b) 非排水境界の過剰間隙水圧～時間関係

ほど、特に要素No.1では一次圧密と二次圧密の区別が不明瞭になっている。

過剰間隙水圧については、消散進行の順番と要素の排水層からの距離とが逆転することはないが、ひずみについては、ひずみの増加と要素の排水層からの距離とが逆転しているものも一部に見られる。上述のように、過剰間隙水圧については、上流側の要素から下流側の要素への流入があるために、たとえ要素ごとに試料特性のばらつきが見られても逆転は生じない。しかし、ひずみについては、最終ひずみ量に要素ごとの試料特性が反映され

るため、要素特性に多少なりともばらつきがある自然堆積粘土を扱う場合、順番の逆転が一部にあることはやむを得ないといえる。実際、過剰間隙水圧消散時（EOPに相当。例えば98%消散時）の各要素のひずみによって消散途中のひずみを除して整理すると、順番に逆転は生じないことを確認した。また、Ma13Reの試験結果は、試験室で作られた均質な試料を扱っていることから、要素ごとのひずみ挙動についても逆転は見られない。要素の排水距離に応じたこのようなひずみ挙動は、分割圧密試験の品質・精度が十分に高いものであったことを物語っている。

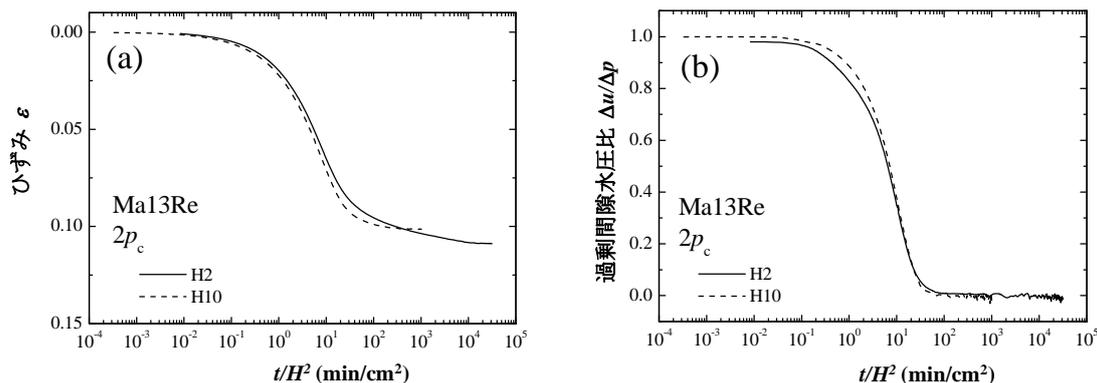


図-24 Ma13Re における経時変化: (a) 全層厚に対する圧縮ひずみ～時間関係, (b) 非排水境界の過剰間隙水圧～時間関係

3.3 層厚の影響

(a)全層の平均として算出したひずみと(b)非排水面の過剰間隙水圧と経過時間の関係を図-21～図-24に示す。それぞれの試料について、層厚が異なる試験結果を一つの図に示した。ここで、経過時間は、長期荷重直前の層厚（最大排水距離） H の2乗で除した値、すなわち時間係数を圧密係数で除した $T_v/c_v (=t/H^2)$ で表した。

再構成試料であるMa13Reでは、ひずみに関しても過剰間隙水圧の消散に関しても、一次圧密挙動については層厚が異なる試験の結果が極めて良く一致しており、いわゆる H^2 則が成り立つことがわかる。一方、不攪乱試料であるMa13, Ma12, Ma11では、ひずみに関しては、試料のばらつき等の影響により試料ごとにひずみが著しく異なることもあるので比較が難しい。しかしながら、一次圧密終了（EOP）の時間などに限定して比較すると、 H^2 則が成り立っていることが読み取れる。実際、間隙水圧に関しては層厚が異なる試験の結果が良く一致しており、 H^2 則が成り立つことがわかる。

Ma13とMa13Reは、ひずみ挙動についても層厚20mm (H2) と層厚100mm (H10) の曲線が良く一致している

ことから、一次圧密から二次圧密に至るまで H^2 則が適用できる。このような挙動は、図-1に示した仮定Aに分類される。一方、Ma12とMa11では、層厚20mm (H2) のケースは、層厚が厚いケースに比べて沈下量が小さく、図-1に示した仮定Bに近い挙動であるといえる。これらの傾向から、構造が発達した粘土試料の場合には、仮定Bに近い挙動が現れると理解できる。しかしながら、Ma11の層厚50mm (H5), 100mm (H10), 200mm (H20) の曲線はほぼ一致しており、層厚が厚いものだけを比較すると、仮定Aに近い挙動が現れている。

以下では、Ma11の試験結果を取り上げ、さらに詳しく考察する。ひずみの経時変化において、排水面側の要素から順に沈下が発生する。層厚20mmのケースでは約200分、層厚50mmのケースでは約1000分、層厚100mmのケースでは約3000分において、いずれの要素でも、ひずみを対象としてlog t法により定義される一次圧密が終了していることを確認できる。また、過剰間隙水圧も排水面側の要素から順に消散し、いずれの要素ともひずみの一次圧密終了と同時にほぼ完全に消散している。

不攪乱試料を用いた実験の場合、たとえ同一のサンプル

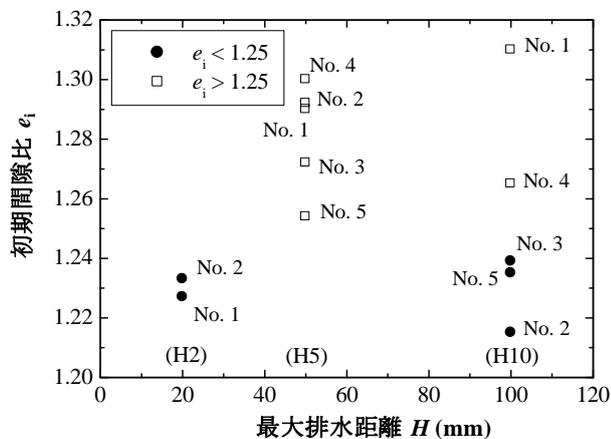


図-25 各供試体の初期間隙比 e_i と最大排水距離（全体層厚）の関係

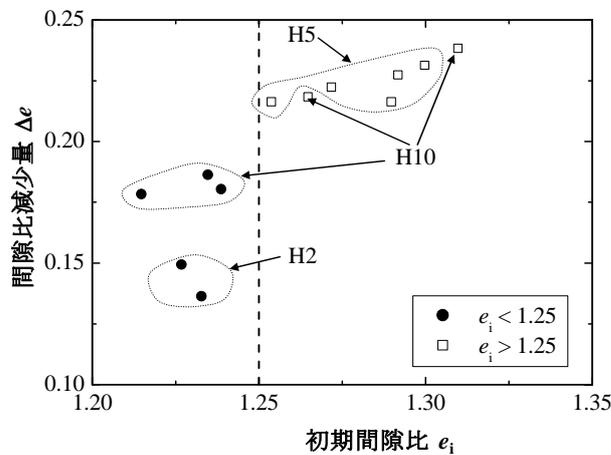


図-26 間隙比の変化量と初期間隙比の関係

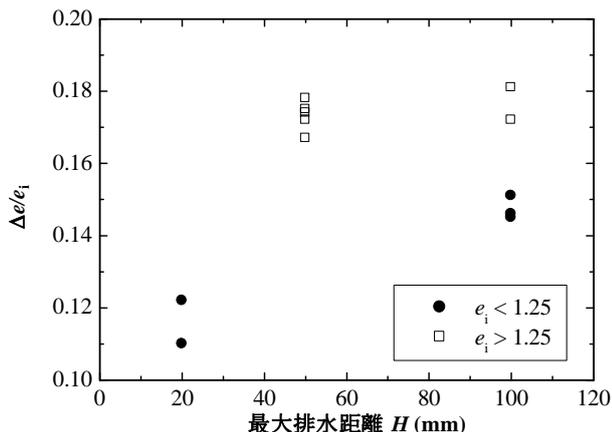


図-27 Ma11 の $\Delta e/e_i$ と H の関係

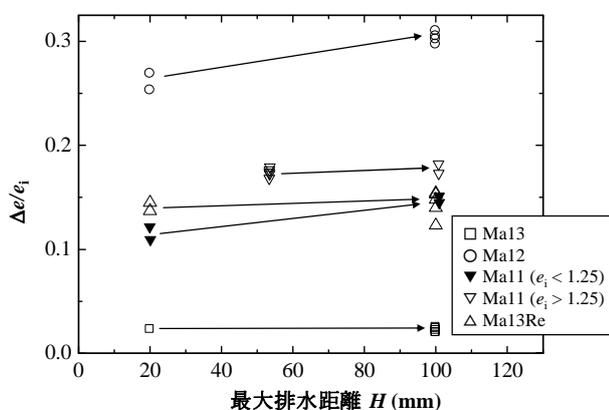


図-28 全試験結果の $\Delta e/e_i$ と H の関係

ラーで同時に採取された試料であっても、試料ごとの物性は均質ではない。すなわち、深度のわずかな違いであっても堆積には長い年月（堆積速度は約1mm/年）を要しており、堆積時の状況の変化に起因した粒度等のばらつきがあるものと推測される。このため、単に沈下挙動をひずみで整理しただけでは、要素特性のばらつきによって、要素ごとの挙動の違いを正しく評価できない。一次圧密終了時（EOP）のひずみで正規化することも考えられるが、この場合には、要素ごとの力学挙動の違いが見えにくくなってしまふ。

そこで、試料の状態を表す指標として各要素の長期載荷直前の間隙比 e_i を用い、これを要素ごとに整理する。試験をした層厚ごとに、各分割片の e_i がどのような値であったかを図-25に整理した。近傍の試料を使用しているものの、試料特性のばらつきにより初期間隙比 e_i は1.21～1.31の範囲にあった。しかしながら、Ma11試料の分割要素については、 $e_i = 1.25$ を境にして、初期間隙比がこれより大きいものと小さいものの2つにグループ分けして考えられそうである。

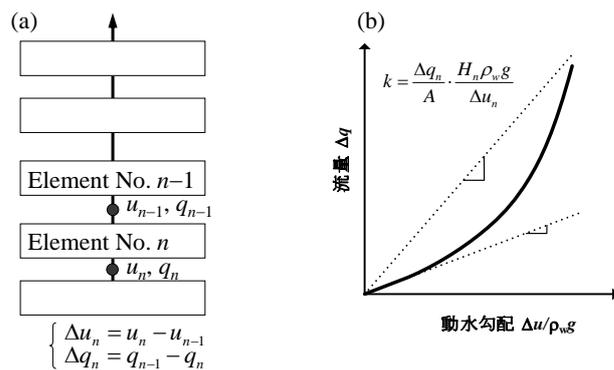


図-29 (a) 各要素の過剰間隙水圧 Δu と流量 Δq の定義, (b) 載荷中の透水係数 k の変化

グループ分けに基づいて、初期間隙比 e_i と当該載荷段階での間隙比減少量 Δe の関係を図-26に整理した。なお、以下では、過剰間隙水圧 Δu が98%消散した時点をもEOPとし、そのときの間隙比 e_{EOP} を用いて当該載荷段階での間隙比変化量 Δe を $\Delta e = e_i - e_{EOP}$ と定義した。この図において $e_i > 1.25$ のグループでは e_i の増加とともに Δe がほぼ直線的に増加する関係にあるのに対し、 $e_i < 1.25$ では明確な関係は認められない。このことから、試験に用いた試料は $e_i = 1.25$ 前後で性質が異なっていたと判断できる。

Δe を e_i で除した $\Delta e/e_i$ を層厚毎に整理した結果を図-27に示す。上述のように2つのグループに分けて整理すると、 $e_i < 1.25$ の場合は、層厚が大きくなると $\Delta e/e_i$ が増加しているが、 $e_i > 1.25$ の場合は層厚が大きくなっても同程度または若干大きくなる程度であることが読み取れる。これらの整理結果から、Ma11では、 $e_i < 1.25$ のグループは、層厚が増加すると一次圧密終了時点（EOP）に対するひずみが増加するとしたAboshi (1973)の大型圧密実験結果と同様の傾向が明瞭に現れた。 $e_i > 1.25$ のグループでも不明瞭ながらも同様の傾向があるといえる。しかしながら、後者のグループでは、一次圧密終了時点（EOP）でのひずみが層厚の違いによらずほぼ同程度であるとしたMesri and Choi (1985)の報告にも近い結果となった。

Ma13, Ma12, Ma11, Ma13Reについて $\Delta e/e_i$ と H の関係を整理したものを図-28に示す。層厚 H が大きくなったときに、間隙比変化 $\Delta e/e_i$ は同程度あるいはわずかに増加する傾向を読み取れる。

上述のように、構造が未発達なMa13とMa13Reのみならず、ある程度以上に粘土層が厚い場合（分割型圧密試験では50mm以上の場合）には構造が発達した粘土Ma11やMa12でも、仮定Aが成り立っている。しかし、より詳細に見ると、 $\Delta e/e_i$ の値は、層厚の増加とともにわずかに増加する傾向が見られることから、真の挙動は、主に仮定A

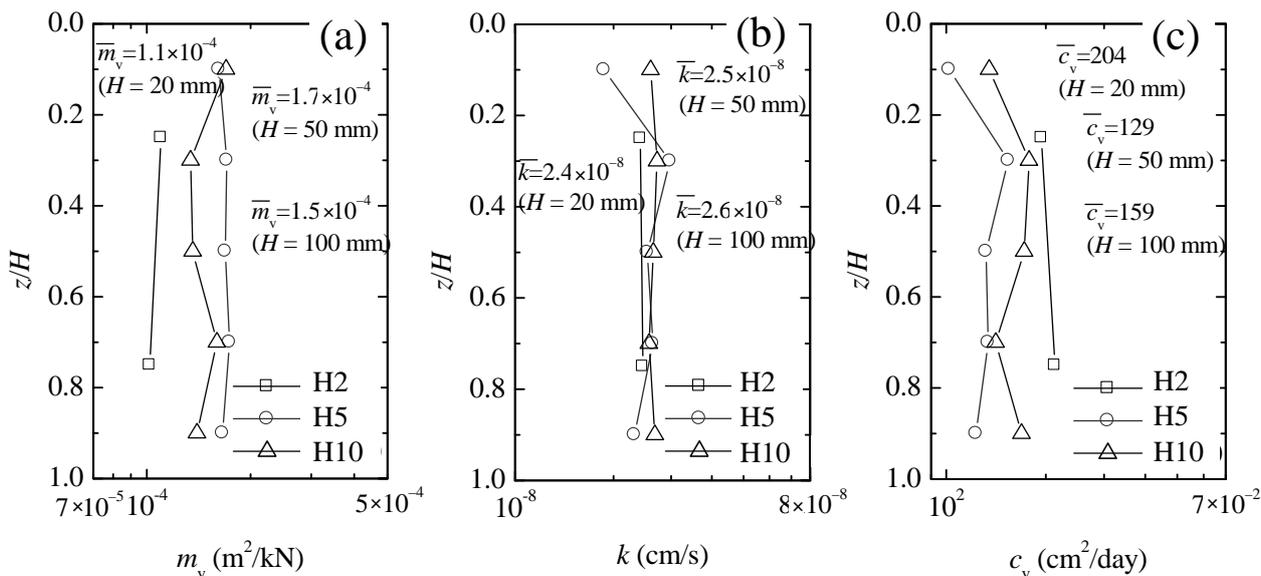


図-30 各分割要素に対応した圧密定数の深度分布: (a) 体積圧縮係数 m_v , (b) 透水係数 k , (c) 圧密係数 c_v

に従うが、わずかに仮定Bの要素も含まれていることが示唆される。

3.4 分割要素の均質性

分割要素毎の圧密特性について、分割圧密試験結果を細かく分析して検討する。 Δu が98%消散した時点（ここではこれをEOPとする）でのひずみを ϵ_{EOP} とする。体積圧縮係数 m_v は、有効応力増分 $\Delta p'$ を用いて $m_v = \epsilon_{EOP} / \Delta p'$ なる関係により算出した。図-29(a)に示すように n 番目の要素を考えると、排水に関して上流側要素からの流入量 q_n と当該要素の沈下量から流出量 q_{n-1} を算出し、当該要素における流量の変化 $\Delta q_n (= q_n - q_{n-1})$ を求めた。また、当該要素の上流側と下流側境界での過剰間隙水圧（それぞれ u_n と u_{n-1} ）から当該要素における間隙水圧の変化 $\Delta u_n (= u_n - u_{n-1})$ を求めた。ある圧密圧力下での透水係数 k_2 は、次式によって算出できる。

$$k_2 = \frac{\Delta q_n}{A} \cdot \frac{H_n \rho_w g}{\Delta u_n} \quad (2)$$

ここで、 A は供試体の断面積、 ρ_w は間隙水の密度、 g は重力加速度、 H_n は n 番目の要素の厚さである。

透水係数は有効応力 p' とともに変化することから、当該圧密圧力での代表的な透水係数とするため、長期载荷直前すなわち有効土被り圧 σ'_{v0} による予圧密終了時の透水係数 k_1 と長期圧密圧力 $p' + \Delta p$ での長期载荷後の最終的な透水係数 k_2 との相乗平均を代表値 k とした。予圧密終了時の k_1 は、今回実施した分割型圧密試験では求められないため、別途実施した定ひずみ速度圧密試験（CRS圧密試験）によって得られた $\log p' \sim \log k$ 関係の直線勾配を利用して推定

した。一方、長期载荷後の k_2 は、図-29(b)に示すように Δp 载荷後の最終収束値付近から原点を通る直線勾配に対してDarcy則を適用して算出した。圧密係数 c_v は、求めた m_v と k を用いて、 $c_v = k / (m_v \rho_w g)$ の関係式により算出した。

以上のようにして、長期圧密に対応する圧密パラメータ m_v 、 k および c_v を要素毎に求め、これらの深度分布を図-30にプロットした。深度 z については層厚 H で除して、正規化深度 z/H により表示した。分割圧密試験では、上述の方法により個々の要素の圧密特性を評価できることがわかる。また、若干のばらつきはあるものの、全深度にわたってほぼ同じ値となっており、かなり均質な試料であったことが確認される。このことは、Watabe et al. (2007) によって示された関西国際空港海底粘土の均質性に関する研究成果とも整合する。

3.5 圧密降伏応力 p_c 付近の挙動

Ma12については、沈下挙動に見られる傾向は他の試料のものと特筆すべき差は見られないが、過剰間隙水圧の消散挙動には特徴的な部分が見られる。すなわち、圧密初期に $\Delta u / \Delta p = 0.7$ 程度まで速い消散が生じた後、一旦消散速度が遅くなり、再び $\Delta u / \Delta p = 0$ に向かって消散するという二段階の消散過程が見られる。

Tanaka (2005) は、一旦消散した過剰間隙水圧が増加に転じ、再び消散するような極端な試験結果を例示し、海洋生物の巣穴の痕跡などが供試体の鉛直ドレーンになっていることを指摘した。本研究で用いた供試体については、目視に加え、バックプレッシャーを作用させた時の間隙水圧の上昇感度などによって、鉛直ドレーンとなるよう

な要因を含んでいないことを確認した。このため、ここで示しているような特徴的な過剰間隙水圧の消散は、他に原因があると思われる。

Leroueil et al. (1980)は、構造が発達した鋭敏な東カナダの粘土に対して、同様の過剰間隙水圧挙動を計測し、過圧密領域から正規圧密領域にかけて載荷する場合には、初期には過圧密領域における大きな圧密係数 c_{vOC} に基づく速い消散が生じ、その後、正規圧密領域における小さな圧密係数 c_{vNC} に基づく遅い消散が生じることを指摘した。Ma12は含水比が高く比較的構造が発達した粘土層である。このために、大きな c_{vOC} から小さな c_{vNC} に推移する圧密に対応した過剰間隙水圧の消散過程が計測されたものと理解できる。

3.6 層厚の影響に関するまとめ

一次圧密終了 (EOP) は、過剰間隙水圧の消散において明瞭に現れる。しかし、ひずみにおいては、層厚が薄い場合にはEOPは不明瞭であり、層厚が増すと次第にEOPが明瞭になる。構造が発達していない粘土ではひずみ挙動は仮定Aに従い、構造が発達している粘土ではひずみ挙動は仮定Bに従う。後者の場合においても、層厚が厚くなると仮定Aに従うようになる。層厚が増加しても一次圧密終了時 (EOP) の沈下ひずみは同程度であるものが多く、Mesri and Choi (1985)のEOP概念は近似としては実用的である。しかし、沈下ひずみはやや増加する傾向にもあったことから、厳密には成り立たない可能性が高い。過剰間隙水圧の消散に対して実質的に H^2 則が成立していることが確認できた。また、分割型圧密試験から各要素の m_v 、 k および c_v を算出する方法を示した。分割要素ごとに評価した m_v 、 k および c_v に基づき、要素ごとのばらつきは小さいと判断できた。

4. 結論

摩擦計測を伴う圧密試験、三軸セルを用いた K_0 圧密試験、分割型圧密試験により得られた一連の試験結果に対する考察を通じて、本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 大阪湾の関西国際空港海底粘土の場合、ひずみと圧力損失比の間には採取深度によらずユニークな関係があり、直径 60mm、高さ 20mm の供試体を用いた場合、摩擦損失比が 0.2 以上になるのは圧密圧力が約 300kPa より小さい場合である。
- 2) 過圧密領域では、摩擦による圧力損失が著しいこともある。しかし、工学的な立場からすると、過圧密

領域では圧密量自体が小さいために沈下予測において摩擦の影響は小さい。

- 3) 実務における長期圧密挙動予測では、圧密リングを用いた試験結果に特別な補正などを行う必要は無い。
- 4) 供試体と圧密リングとの摩擦の原因として、有効応力の増加と付着力の増加の両者が考えられるが、後者の影響の方が卓越している。
- 5) 過剰間隙水圧の消散に見られる EOP は層厚に関係なく明瞭に現れる。しかし、ひずみに関しては、層厚が厚い場合には EOP が明瞭であるが、層厚が薄い場合に EOP が不明瞭になる傾向にある。
- 6) 構造が発達していない粘土ではひずみ挙動は仮定Aに従い、構造が発達している粘土ではひずみ挙動は仮定Bに従う。後者の場合においても、層厚が厚くなると仮定Aに従うようになる。
- 7) 層厚の増加により EOP に対応する沈下ひずみは同程度であるものが多く、Mesri and Choi (1985)の EOP 概念は、近似としては実用的である。しかし、沈下ひずみはやや増加する傾向にもあったことから、厳密には成り立たない可能性が高い。このことは、クリープによる土骨格の変形は過剰間隙水圧消散中にも生じていることを示唆している。
- 8) 過剰間隙水圧の消散に対しては、実質的に H^2 則が成り立つことが確認できた。
- 9) Ma12 の過剰間隙水圧の消散には、圧密初期に $\Delta u/\Delta p=0.7$ 程度まで速い消散が生じた後、一旦消散速度が遅くなり、再び $\Delta u/\Delta p=0$ を目指して消散するといった二段階の消散過程となる特徴的な挙動が見られた。Ma12 は比較的構造が発達した粘土層であることから、Leroueil et al. (1980)が構造の発達した鋭敏な東カナダ粘土に対して示したのと同様に、過圧密領域の大きな圧密係数 c_{vOC} から正規圧密領域の小さな c_{vNC} に推移することによって現れる挙動であると推察された。
- 10) 分割型圧密試験から各要素の m_v 、 k 、 c_v を算出する方法を示した。また、これにより分割要素ごとの m_v 、 k 、 c_v を評価した結果、要素ごとのばらつきは小さいと判断できた。

謝辞

本研究は、関西国際空港用地造成株式会社と独立行政法人港湾空港技術研究所との共同研究の一部として実施された。また、実験計画立案ならびに結果のとりまとめにあたっては財団法人沿岸技術研究センターの小林正樹氏より多大なる助言をいただくとともに、試験結果の整

理・検討にあたっては応用地質株式会社の宇高 薫氏にご協力いただいた。ここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- Aboshi, H. (1973): An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary creep settlement. *Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Moscow, Vol. 4(3): p88.
- Berre, T. and Iversen, K. (1972): Oedometer tests with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression, *Géotechnique*, 22(1): 53–70.
- Imai, G. and Tang, Y.-X. (1992): A constitutive equation of one-dimensional consolidation derived from inter-connected tests, *Soils and Foundations*, 32(2), 83–96.
- Imai, G., Tanaka, Y. and Saegusa, H. (2003): One-dimensional consolidation modeling based on the isotach law for normally consolidated clays, *Soils and Foundations*, 43(4), 173–188.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R. (1985): New developments in field and laboratory testing of soils. *Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, San Francisco, Vol. 1, 57–153.
- Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G. (1977): Stress-deformation and strength characteristics. State-of-the-Art Report, *Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Tokyo, Vol. 2, 421–494.
- Leroueil, S. (2006): The isotache approach. Where are we 50 years after its development by Professor Šuklje? (2006 Prof. Šuklje's Memorial Lecture), *XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, Ljubljana 2006, 55–88.
- Mesri, G. and Choi, Y.K. (1985): The uniqueness of the end-of-primary (EOP) void ratio-effective stress relationship. *Proc. 11th ICSMFE*, San Francisco, Vol. 2: 587–590.
- Sivrikaya, O. and Togrol, E. (2006): Measurement of side friction between specimen and consolidation ring with newly designed oedometer cell, *ASTM Geotech. Test. J.*, Vol.29, No.1, 87–94.
- Tanaka, H. (2005): Consolidation behavior of natural soils around pc value—Inter-connected oedometer test, *Soils and Foundations*, 45(3), 97–105.
- Tsuchida, T. and Kikuchi, Y. (1991): K_0 consolidation of undisturbed clays by means of triaxial cell, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.3, 127–137.
- Watabe, Y., Tanaka, M., Tanaka, H. and Tsuchida, T. (2003): K_0 -consolidation in a triaxial cell and evaluation of in-situ K_0 for marine clays with various characteristics, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.1, 1–20.
- Watabe, Y., Shiraishi, Y., Murakami, T. and Tanaka, M. (2007): Variability of physical and consolidation test results for relatively uniform clay samples retrieved from Osaka Bay, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.4, 701–716.
- Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. (1975): Secondary compression of organic soils, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, 69–79.
- Yin, J.H., Graham, J., Clark, J.L. and Gao, L. (1994): Modelling unanticipated pore-water pressures in soft clays. *Can. Geotech. J.*, 31, 773–778.
- 岡井大八, 水本桂輔, 目堅智久, 楠見正人, 利藤房男, 野坂和正 (1999) : 大型特殊圧密試験機による高有機質土のリング周面摩擦力の測定例, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部 (A), 370-371.
- 佐藤友也, 落合英俊, 林 重徳, 梅崎健夫 (1999) : 圧密試験における周面摩擦の影響について, 第 24 回土質工学研究発表会講演集, 389–392.

港湾空港技術研究所報告 第48巻第2号

2009・6

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所
発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf | Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA3 |
| Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field. | Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA37 |
| Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport | Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiyuki MORIKAWA63 |
| Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays | Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Tsuyoshi EMURA83 |
| A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport | Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Takatoshi NOGUCHI, Masafumi MIYATA103 |
| New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design | Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiaki KIKUCHI123 |
| 10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas | Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA145 |
| Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers | Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Toru YAMAJI161 |
| Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum | Katsuya HIRAYAMA, Ichiro MIYAZATO199 |