

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.54 No.1 March 2015

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 54 卷 第 1 号 (Vol. 54, No. 1) , 2015 年3月 (March 2015)

## 目 次 (CONTENTS)

1. アイソタック概念を用いてモデル化した世界各地の粘土の長期圧密挙動  
..... 渡部要一, 金子崇 ..... 3  
(Interpretation of long-term consolidation behavior of worldwide clays on the basis of the isotache concept  
..... Yoichi WATABE, Takashi KANEKO)

# アイソタック概念を用いてモデル化した 世界各地の粘土の長期圧密挙動

渡部要一\*・金子 崇\*\*

## 要 旨

アイソタック概念を用いた圧密挙動の解釈は、港湾空港技術研究所を始めとして、多くの研究機関によって試みられてきた。これらの研究の多くは、大規模構造物の長期圧密沈下予測のために、二次圧密の計算精度向上を目指したものである。第一著者らの既往の研究では、関西国際空港の埋立て建設地から採取した大阪湾粘土の長期圧密特性を詳細に調べ、圧縮曲線とそのひずみ速度依存性（圧密降伏応力とひずみ速度の関係）を利用し、アイソタック概念に基づく実用的なモデルを提案した。圧縮曲線は定ひずみ速度載荷圧密（CRS）試験から、圧密降伏応力とひずみ速度の関係は長期圧密（LT）試験から得られる。後者の関係は、3つのアイソタックパラメータを導入したモデル式で表される。ここで、3つのアイソタックパラメータは、深さ300mまでの様々な深度から採取した大阪湾粘土に対して、共通の値を設定し得ることは注目に値する。本研究では、世界各地の様々な特性を有する粘土に対して提案モデルを適用し、大阪湾粘土に対して共通に設定したアイソタックパラメータの一般性について検討した。その結果、いずれの粘土の長期圧密特性も、共通のアイソタックパラメータを用いた提案モデルによって一次近似としては上手く表現できることがわかった。

**キーワード**：長期圧密，二次圧密，アイソタック，ひずみ速度，粘土

---

\* 地盤研究領域長

\*\* 地盤研究領域土質研究チーム研究官

〒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

## **Interpretation of long-term consolidation behavior of worldwide clays on the basis of the isotache concept**

**Yoichi WATABE\***

**Takashi KANEKO\*\***

### **Synopsis**

The consolidation characteristics interpreted with the isotache concept have been studied by many researchers, including the Port and Airport Research Institute. The aim of most of these studies has been to calculate secondary consolidation with high accuracy in order to evaluate the long-term settlement of large-scale structures. In a previous study of the first author and his co-workers, the long-term consolidation characteristics of Osaka Bay clays, collected from the construction site of the Kansai International Airport, were examined, and a simplified method based on the isotache concept, using a compression curve and the relationship between the consolidation yield stress (preconsolidation pressure) and the strain rate, was proposed. The former and the latter were obtained from constant rate of strain consolidation (CRS) tests and long-term consolidation (LT) tests, respectively. The latter is expressed by an equation with three isotache parameters. It is noteworthy that the three isotache parameters can be commonly determined for the Osaka Bay clays retrieved from various depths up to 300 m below the seabed. In the present study, the proposed method was applied to worldwide clays with various characteristics using the common values for the isotache parameters determined for the Osaka Bay clays. It was found that the long-term consolidation behavior of those worldwide clays can be well characterized by the proposed method, along with the common values for the isotache parameters.

**Keywords:** long-term consolidation, secondary consolidation, isotache, strain rate, clay

---

\* Director, Geotechnical Engineering Field (Head, Soil Mechanics and Geo-environment Group)

\*\* Researcher, Soil Mechanics and Geo-environment Group

Port and Airport Research Institute, 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	3
1. はじめに	7
2. アイソタック概念と提案方法	7
3. 試験手順	8
3.1 定ひずみ速度載荷圧密試験 (GRS圧密試験)	8
3.2 長期圧密試験 (LT圧密試験)	8
4. 大阪湾粘土の圧縮・圧密特性	9
4.1 粘土試料	9
4.2 試験結果	10
5. 世界各地の粘土への適用	14
5.1 既往データとの比較—世界各地の粘土への適用の動機	14
5.2 粘土試料	14
5.3 試験結果	15
6. 考察	17
7. 結論	22
謝辞	23
記号	23
参考文献	23
付録A 勾配 $\alpha$ ( $=\Delta\log p'_{\nu}/\Delta\log \dot{\epsilon}_{\nu p}$ )と $C_{ae}/C_c$ の関係	25
付録B 土の長期圧密試験方法	26

## 1. はじめに

圧密挙動に関するアイソタック概念は、圧縮特性に関するひずみ速度効果を考慮するものである。この概念を用いて粘土の圧密特性を評価する試みは、第一著者らのこれまでの研究成果を含め、数多く報告されている。これらの既往の研究の多くは、ひずみ速度効果を考慮した二次圧密計算手法の確立を目指すものである（例えば、Leroueil et al. 1985; Yin et al. 1994; Adachi et al. 1996; Hinchberger and Rowe, 1998; Rowe and Hinchberger, 1998; Kim and Leroueil 2001; Den Haan and Kamao 2003; Imai et al. 2005; Tanaka et al. 2006; Watabe et al. 2008; 渡部ら 2009a; Qu et al. 2010; Degago et al. 2011）。

圧密沈下に関する実務的かつ理論的な評価手法として、以下に挙げる3つの代表的なアプローチが挙げられる。

- (i) テルツァギの一次元圧密理論と二次圧密係数 $C_{ae}$ （一定値）を組み合わせた沈下予測
- (ii) 一次圧密終了時（EOP）の沈下ひずみ量が層厚によらず同じ値になるという経験則（Mesri and Choi 1985）と $C_{ae}/C_c$ が一定値になるという経験則（Mesri and Castro 1987）を組み合わせた沈下予測
- (iii) アイソタック概念（Šuklje 1957）に基づいた沈下予測  
ここで、 $C_{ae}$ は間隙比で表した二次圧密係数、 $C_c$ は圧縮指数である。

アイソタックの概念はŠuklje (1957)によって提案されたもので、沈下ひずみと圧密圧力の関係が、粘性の影響を受けてひずみ速度によって唯一に決定されるというものである。ひずみ速度効果に着目したこの概念は、近年の圧密に関する研究において大いに注目されてきた。アイソタック概念は55年以上前に提案されたものであるが、現在でも学術面での研究の段階にある。近年、第一著者ら（Watabe et al. 2008; 渡部ら 2009a）は、定ひずみ速度載荷（CRS）圧密試験から得られる基準圧縮曲線ならびに長期（LT）圧密試験から得られる圧密降伏応力のひずみ速度依存性の関係を用いることにより、アイソタック概念を実用的に導入する方法を提案した。この方法で用いる3つのアイソタックパラメータは、関西国際空港の人工島埋立地の海底300mまでの様々な深度から採取した大阪湾粘土に対して共通の値を設定できることが示されており、注目に値する。このことは、近似計算であれば深度ごとのパラメータを個々に設定する必要が無いので、提案方法が実務で使いやすいことを示唆している。本研究では、大阪湾粘土に限らず、様々な特性を有する世界各地の粘土の長期圧密挙動に対して提案方法の適用を試み、これら全ての粘土に対してアイソタック概念による統一

的な解釈を議論する。また、その統一的解釈を実務で使いやすいチャートとして提示することを試みる。

## 2. アイソタック概念と提案方法

Šuklje (1957)は、湖沼性の軟質石灰岩に対して一連の段階載荷圧密試験を行い、得られた結果の整理を通じて、粘性に基づくアイソタック挙動、すなわち、ひずみ・圧密圧力・ひずみ速度の三者の関係が唯一に決まる法則を見出した。その後、上述したように、圧縮特性に関する多くの研究においてひずみ速度効果を考慮するアイソタック概念に焦点が当てられてきた。Leroueil (2006)はアイソタック概念に関連した最近の研究成果を総括し、圧密降伏応力の対数とひずみ速度の対数の関係における傾き $\alpha$ は $C_{ae}/C_c$ に等しく、試験室で観察される一般的なひずみ速度の範囲では実質的に一定値と見なせること、しかしながら、ひずみ速度が原位置におけるひずみ速度のように非常に小さな値まで減少すると一定値とは見なせなくなり減少する傾向にあることを指摘した。

第一著者らのモデル（Watabe et al. 2008; 渡部ら 2009a）では、Leroueil et al. (1985)の簡便な提案式を利用しているが、粘塑性変形にのみ適用されるとした。このことを明確にするために、圧縮曲線として $\varepsilon_{vp} - \log p'$ を導入した。ここで、 $\varepsilon_{vp}$ は粘塑性ひずみであり、圧密試験から得られる全ひずみ $\varepsilon$ から弾性ひずみ $\varepsilon_e$ を差し引いた値である。基本式は以下の式(1)～(3)で表される。

$$\varepsilon_{vp} = \varepsilon - \varepsilon_e \quad (1)$$

$$\frac{p'}{p'_c} = f(\varepsilon_{vp}) \quad (2)$$

$$p'_c = g(\dot{\varepsilon}_{vp}) \quad (3)$$

ここで、 $p'$ は有効鉛直圧密圧力、 $p'_c$ は有効圧密降伏応力、 $\dot{\varepsilon}_{vp}$ は $d\varepsilon_{vp}/dt$ で定義される粘塑性ひずみ速度であり、 $f$ と $g$ は( )内の変数の関数を表す。式(2)と式(3)で表される関係を得るには、CRS圧密試験とLT圧密試験を実施する必要があり、その詳細は後述する。

図-1(a)に図示するように、弾性ひずみ $\varepsilon_e$ は $\varepsilon - \log p'$ 曲線上の $(p', \varepsilon) = (1 \text{ kPa}, 0)$ と $(\sigma'_{v0}, a_0)$ の2点を通る直線で表されるものと定義する。ここで、 $\sigma'_{v0}$ は有効土被り圧、 $a_0$ は $p' = \sigma'_{v0}$ における全ひずみを表す。CRS圧密試験によって得られる $\varepsilon - \log p'$ 曲線において、 $\varepsilon$ から $\varepsilon_e$ を差し引いて $\varepsilon_{vp}$ を算出すると $\varepsilon_{vp} - \log p'$ 曲線となる。 $\varepsilon_{vp} - \log p'$ 曲線から読み取れる圧密降伏応力 $p'_c$ によって有効圧密圧力 $p'$ を正規化すると、式(2)に相当する $\varepsilon_{vp} - \log p'/p'_c$ 曲線が得られる（図

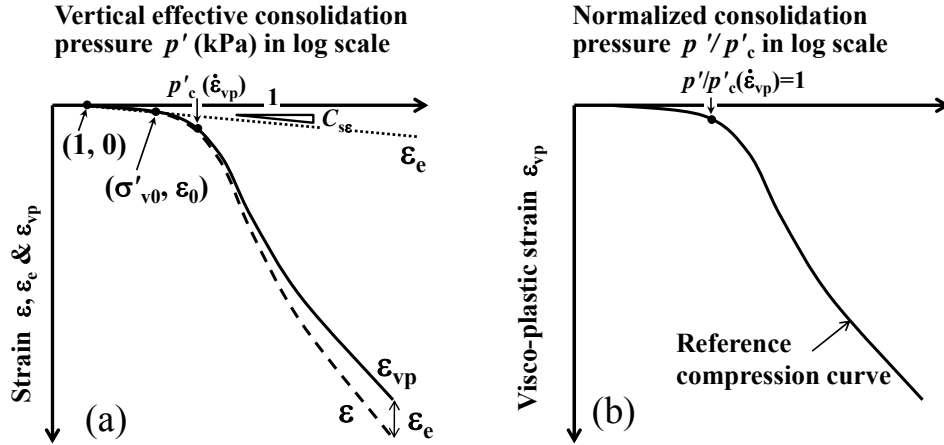


図-1 圧縮曲線 ( $\varepsilon - \log p'$  曲線): (a)  $\varepsilon_c$  と  $\varepsilon_{vp}$  の定義, (b) 基準圧縮曲線

-1(b)). 以下では, この曲線のことを基準圧縮曲線と呼ぶことにする.

長期圧密試験では, 一般に間隙水圧 $u$ は計測しないので, 一次圧密過程における有効圧密圧力 $p'$ はわからない. しかしながら, 二次圧密過程では, 過剰間隙水圧は実質的にゼロ ( $\Delta u = 0$ ) であり,  $p'$ は $p$ と一致する一定値となっている. また, 二次圧密過程では弾性ひずみは生じないので,  $\dot{\varepsilon}$ は実質的に $\dot{\varepsilon}_{vp}$ に一致する.

粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{vp}$ は, ある一定の圧密圧力の下で実施するLT圧密試験から得られる $\varepsilon - \log t$ 曲線 (圧密曲線) の二次圧密過程の部分 (一次圧密終了 (EOP) よりも後の部分) から算出されるので, 長期圧密中の $\dot{\varepsilon}_{vp}$ は $\varepsilon_{vp}$ と一対一に対応する. 正規化した圧密圧力 $p'/p'_c$ は基準圧縮曲線 ( $\varepsilon_{vp} - \log p'/p'_c$ 曲線) によって $\varepsilon_{vp}$ の関数となるので,  $p'_c(\dot{\varepsilon}_{vp})$ は $p'$ と $p'/p'_c(\dot{\varepsilon}_{vp})$ から計算できる. この過程を幾つかの $\dot{\varepsilon}_{vp}$ の値に対して繰り返すと, 式(3)に相当する( $p'_c, \dot{\varepsilon}_{vp}$ )のデータセットを得る.

この提案方法で用いるひずみ速度依存性, すなわち, 式(3)の $p'_c - \dot{\varepsilon}_{vp}$ 関係の表現式として, Watabe et al. (2008) や渡部ら(2009a)は式(4)を提案した.

$$\ln \frac{p'_c - p'_{cl}}{p'_{cl}} = c_1 + c_2 \ln \dot{\varepsilon}_{vp} \quad (4)$$

ここで,  $c_1$ と $c_2$ は定数,  $p'_{cl}$ は $p'_c$ の下限値である. 式(4)において $\dot{\varepsilon}_{vp}$ が減少してゼロに近づいたとき,  $p'_c$ は下限値 $p'_{cl}$ に漸近する. この式は,  $\dot{\varepsilon}_{vp}$ が非常に小さな値にまで減少すると,  $\Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\varepsilon}_{vp}$ で定義される勾配 $a$ が減少するはずだとしたLeroueil (2006)の主張と整合する. なお, 式(4)は, Nortonのべき乗則 (Norton 1929) に超過応力理論 (Perzyna 1963) を導入して導いたQu et al. (2010)の提案式と類似している.

式中の定数 $c_1$ は $\dot{\varepsilon}_{vp} = 1$ における $\ln\{(p'_c - p'_{cl})/p'_{cl}\}$ に等しく, これは,  $\log p'_c - \log \dot{\varepsilon}_{vp}$ 曲線の相対的な位置を表

している. また, 定数 $c_2$ はひずみ速度依存性の程度を表している. 骨格構造の発達程度が強く反映される圧縮特性については, 式(2)で表される基準圧縮曲線の形状によって表現される. 従って, 提案方法の適用に当たっては, 基準圧縮曲線と3つのアイソタックパラメータ ( $p'_{cl}, c_1, c_2$ )が必要となる. 式(4)で表される関係では, 曲線がある一点を通ると仮定すると, パラメータ $c_2$ は他の2つのパラメータ ( $p'_{cl}$ と $c_1$ )の従属変数として自動的に計算される (あるいは,  $c_1$ は $p'_{cl}$ と $c_2$ の従属変数として自動的に計算される). 詳細については後述する.

### 3. 試験手順

#### 3.1 定ひずみ速度載荷圧密試験 (CRS圧密試験)

CRS圧密試験は, JIS A 1227に基づいて, 直径60mm, 高さ20mmの供試体を用いて実施した. 試験容器のセル内を脱気水で満たし, 背圧として98kPaまたは196kPaを作用させた. 軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{vp}$ を $0.02\%/min (= 3.3 \times 10^{-6} s^{-1})$ の一定値として一次的に供試体を圧縮した.

#### 3.2 長期圧密試験 (LT圧密試験)

直径60mm, 高さ20mmの供試体をセットして圧密試験機を組み立て, 段階的に圧密圧力を増加させ, 有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ 相当の圧密圧力では圧密の継続時間を24時間または7日間とした. その後, 長期圧密の目標圧密圧力を作用させ, ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{vp}$ が減少して $3.3 \times 10^{-9} s^{-1}$ に達するまで継続した. 多くのケースで, 長期圧密の期間は30~100日間であった. 各試料の目標長期圧密圧力 $p$ は, 圧密降伏応力 $p'_c$ の1.5~3.5倍の範囲とした. 試験条件の詳細は後述する.

表-1 大阪湾粘土試料の物理特性

試料名(粘土層)	Ma13	Ma12	Ma11	Ma10	Ma9	Ma8	Ma7a	Ma7b	Ma3	Ma4	Ma13Re
不攪乱試料	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
再構成試料	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes
深度 (C.D.L.-m)	39	61	109	161	195	208	223	271	325	264	30-40
有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ (kPa)	88	286	619	1014	1262	1348	1457	1839	2278	1802	98
圧密降伏応力 $p'_c$ (kPa)	122	439	737	1357	1719	1698	1887	1991	3016	2512	134
過圧密比 OCR	1.4	1.5	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	1.1	1.3	1.4	1.4
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.66	2.67	2.69	2.72	2.72	2.70	2.71	2.61	2.67	2.70
液性限界 $w_L$ (%)	75	103	89	95	88	92	100	97	119	94	91
塑性限界 $w_P$ (%)	32	41	34	36	33	36	38	39	42	35	30
塑性指数 $I_p$	43	62	55	59	54	56	63	58	77	59	61
自然含水比 $w_n$ (%)	62	84	55	53	52	50	49	53	52	51	72
自然間隙比 $e_n$	1.6	2.2	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.9

#### 4. 大阪湾粘土の圧縮・圧密特性

##### 4.1 粘土試料

試験に使用した大阪湾粘土は、関西国際空港二期事業の地盤調査において大阪湾海底から採取したものである (Furudo 2010)。関西国際空港建設地の海底地盤の地層構成の概要を図-2に示す。ここで、Maは海成粘土、Docは湖沼性粘土、Dsは洪積砂層（更新統砂層）を意味する。厚さ約20mの表層地層はMa13と称する沖積粘土（完新統粘土）で、正規圧密状態にあり、軟弱で構造の発達もあまり見られない。これより下部の地層は洪積層（更新統地層）であり、粘土層と砂層が互層となって堆積している。海成粘土は表層のMa13から深さ方向に数字が減るように番号が付けられている。

本研究では、海成粘土の不攪乱試料Ma13, Ma12, Ma11, Ma10, Ma9, Ma8, Ma7, Ma4, Ma3を取り扱う。十分に練り返した後、98kPaで予圧密したMa13の再構成試料(Ma13Reと呼ぶ)についても試験を実施した。Ma13, Ma12, Ma11, Ma8, Ma7, Ma4, Ma13Reのデータは、Watabe et al. (2008)や渡部ら(2009a)において既に報告したものであるが、Ma10とMa9については、新たに試験を行ってデータを充実させた。Ma7については既往の試験結果とはやや異なる深度の試料で試験をし、新たなデータを得た(既往のMa7をMa7aとし、本研究のMa7をMa7bと呼ぶ)。その他、Ma3については既往の研究では扱っていなかったもので、新たに試験を実施した。これらの粘土の物理特性を表-1にまとめた。

最近の研究によれば、Ma8がDoc5の一部に含まれることが判明したことから、Ma8とMa7は、それぞれMa7とMa6

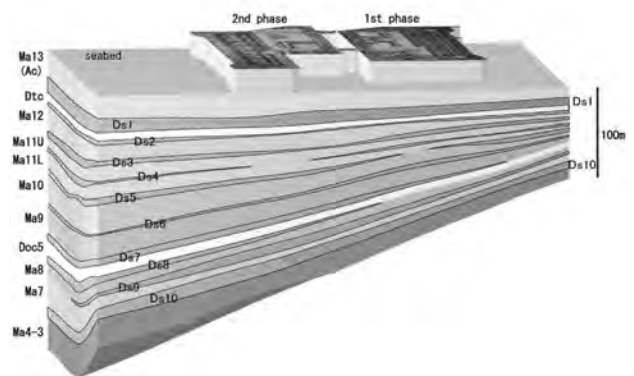


図-2 関西国際空港における地層モデルの岸沖方向断面

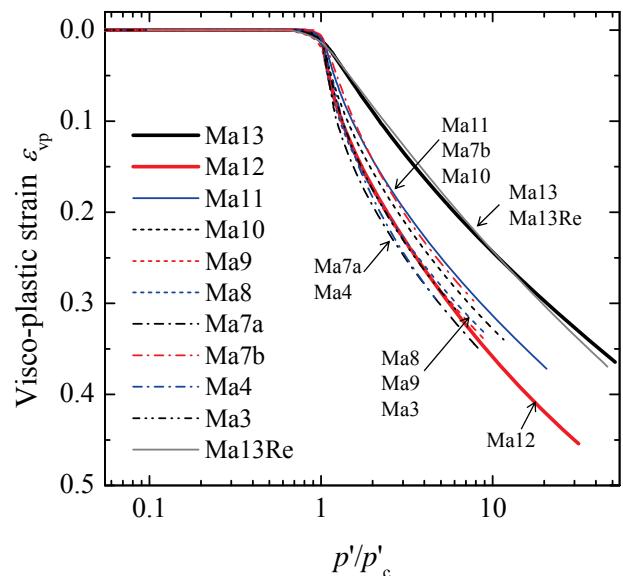


図-3 大阪湾粘土の基準圧縮曲線。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸は圧密降伏応力で正規化した圧密圧力。



表-2 大阪湾粘土試料に対するLT圧密試験条件

試料名	予備圧密圧力 (kPa)		長期圧密の載荷圧力 (kPa)	
	24時間(または2時間) 段階載荷	24時間(または7日) 有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$		
Ma13	10→29→	88(7日)→	98, 137, 206, 235, 353, 412	
Ma12	39→79→157→	294(7日)→	333, 373, 412, 451, 490, 529, 608, 686, 882, 1370	
Ma11	39(2時間)→	628→	647, 667, 686, 706, 726, 745, 1000, 1569	
Ma10	157→314→627→	1014→	2275, 2903	
Ma9	157→314→627→	1262→	2511, 3295	
Ma8	39(2時間)→	1373→	1412, 1471, 1530, 1589, 1648, 1726, 1785, 2040	
Ma7a	39(2時間)→	1491→	1549, 1608, 1667, 1726, 1785, 1844, 1922, 2177	
Ma7b	157→314→627→1255→	1843→	2991	
Ma4	39(2時間)→	1863→	1902, 1961, 2059, 2157, 2256, 2354, 2452, 3138	
Ma3	157→314→627→1255→	2275→	4521	
Ma13Re	10→29→	88→	118, 137, 206, 275, 343, 412	

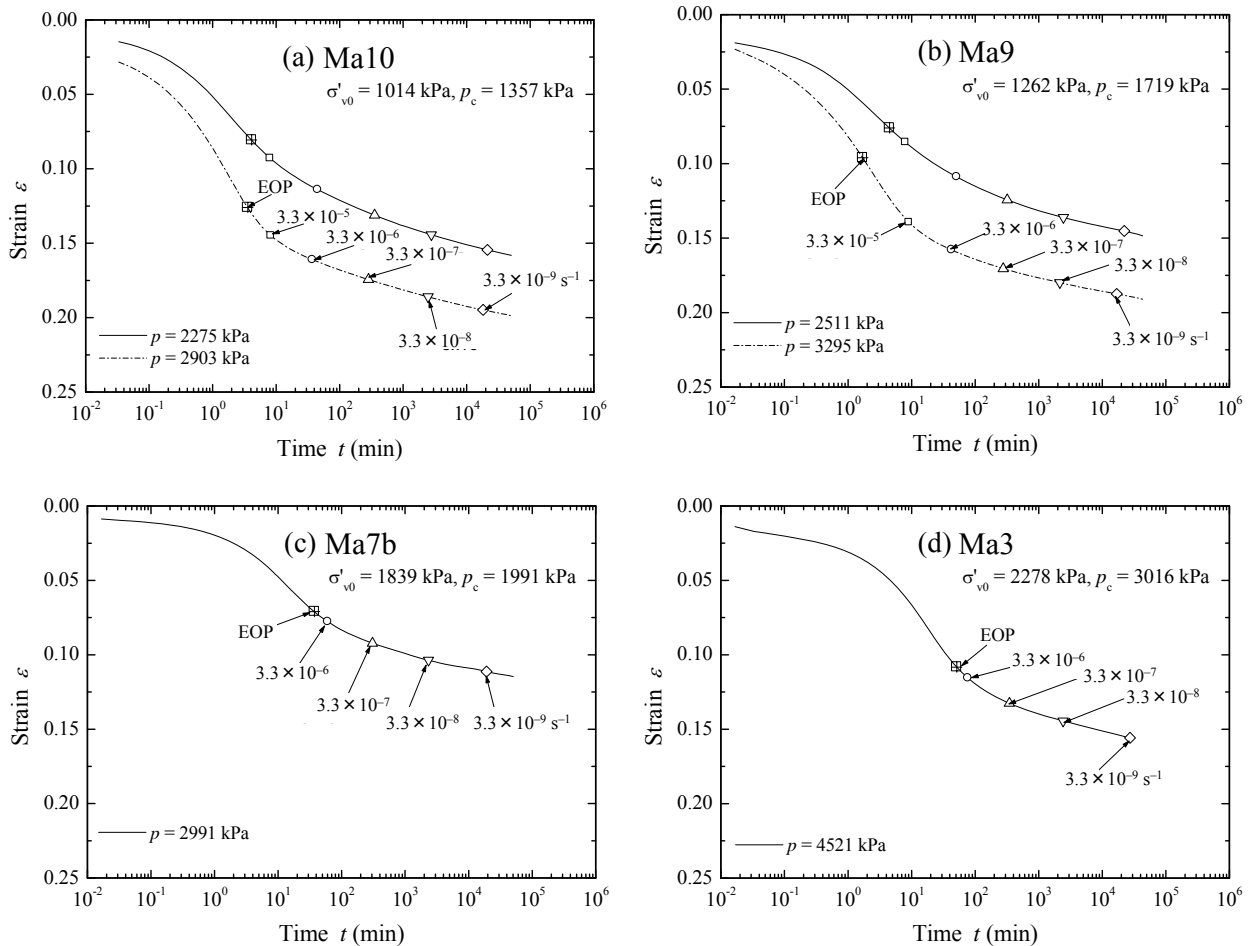


図-4 LT圧密試験で得られた圧密曲線 ( $\epsilon - \log t$ 曲線) : (a) Ma10, (b) Ma9, (c) Ma7b, (d) Ma3. 縦軸はひずみ, 横軸は経過時間.

に改称された。しかしながら、本研究では古い地層名をそのまま使用することにし、長期圧密に関する一連の既往研究と整合させ混乱を避けた。

#### 4.2 試験結果

全ての試料の基準圧縮曲線を図-3に示す。Ma13Reの曲線は、 $p'_c$ において降伏する2つの直線で近似表現できるバイリニアなパターンになっている。このパターンは、構

造が発達していない粘土においてよく見られる典型的なものである。Ma13についてもこれに似た曲線である。Ma12からMa3の曲線はほぼ同一の基準圧縮曲線となっており、 $p'_c$ 付近で曲線が右に張り出したような形状を示した後、正規圧密領域では下に凸な曲線を呈している。これは、セメンテーション等の年代効果により、構造が発達した自然堆積粘土で良く見られる曲線形状である。

LT圧密試験の試験条件を表-2に示す。多くのデータは既にWatabe et al. (2008)や渡部ら(2009a)に示してあるので、ここでは、本研究で新たに得たMa10, Ma9, Ma7b, Ma3のデータについてのみに示すことにする。LT圧密試験により得られた圧密曲線 ( $\varepsilon - \log t$ 関係) を図-4に示す。ひずみ $\varepsilon$ は初期供試体高さ (=20mm) と $\sigma'_{v0}$ での予圧密が完了した時点からの沈下変位増分から算出した。このため、全ての圧密曲線はひずみゼロから始まっている。

新たに試験を実施した試料 (Ma10, Ma9, Ma7b, Ma3) で、作用させた長期圧密圧力は、いずれも正規圧密領域内にある。一次圧密終了 (EOP) 後に、二次圧密が明瞭に現れていることがわかる。ここでは、 $\sqrt{t}$  法によって求められる圧密度90%時点でのひずみを1.11 (=10/9) 倍したひずみに達した時点をもってEOPを定義した。二次圧密過程における曲線は下に凸な形状を呈し、その勾配 $\Delta\varepsilon_p/\Delta\log t$ 、すなわち、ひずみで定義した二次圧密係数 $C_{\alpha\varepsilon}$ は、時間の対数とともに徐々に減少する。EOPは、上に凸な曲線から下に凸な曲線に推移した時点よりも後に得られている。粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{vp}$ は曲線に沿って $\Delta\varepsilon_p/\Delta t$ として計算され、図中には $\dot{\varepsilon}_{vp}$ が、 $3.3 \times 10^{-5}, 3.3 \times 10^{-6}, 3.3 \times 10^{-7}, 3.3 \times 10^{-8}, 3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ に対応する点を曲線上にマーカーで示した。Ma10について、図-4に基づいて読み取った長期圧密圧力 $p'$ とそれぞれの $\dot{\varepsilon}_{vp}$ に対応した $\varepsilon_{vp}$ の関係を図-5にプロットした。正規圧密領域において、各ひずみ速度に対応した圧縮曲線が存在することを確認できる。ここで見

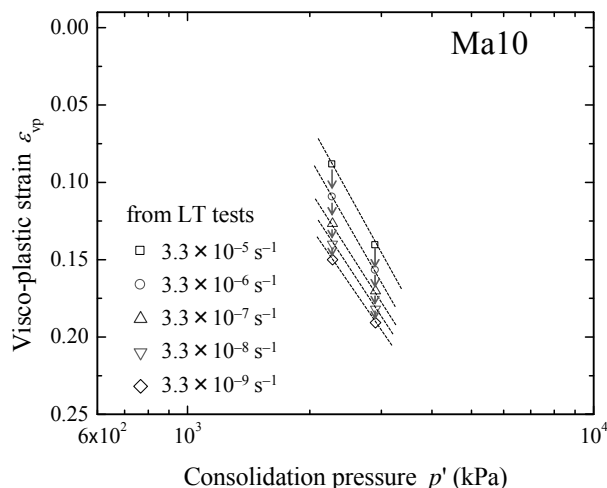


図-5 Ma10に対するLT圧密試験から得られた $\varepsilon_{vp} - \log p'$  関係に見られるひずみ速度依存性。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸は圧密圧力。凡例はLT圧密において読み取ったひずみ速度。

られるひずみ速度依存性は、まさにアイソタック概念と整合するものである。

基準圧縮曲線 $\varepsilon_{vp} - \log(p'/p'_c(\dot{\varepsilon}_{vp}))$ を使うと、 $p'$ と $\varepsilon_{vp}$ のデータセットから圧密降伏応力 $p'_c$ は $\dot{\varepsilon}_{vp}$ の関数として得られる。この方法の手順は図-6に図を使って示してある。新たなデータを得た粘土試料 (Ma10, Ma9, Ma7b, Ma3) に対して得られた $p'_c$ と $\dot{\varepsilon}_{vp}$ の関係を図-7にプロットした。式(4)のアイソタックパラメータ ( $p'_{cL}, c_1, c_2$ ) は、ここで得られた $\log p'_c - \log \dot{\varepsilon}_{vp}$  関係に対してフィッティングによって設定した。フィッティングでは、 $p'_{cL}$ を変化させていき、それぞれの $p'_{cL}$ において $c_1$ と $c_2$ を最小自乗法で設定し、最も相関が高い組み合わせによるものを近似曲線とした。図の縦軸の $p'_c$ の値は $p'_{c0}$ で正規化して示してある。ここで、 $p'_{c0}$ は $\dot{\varepsilon}_{vp}$ が $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のときの $p'_c$ と定義した。

Watabe et al. (2008)や渡部ら(2009a)では、定ひずみ速度

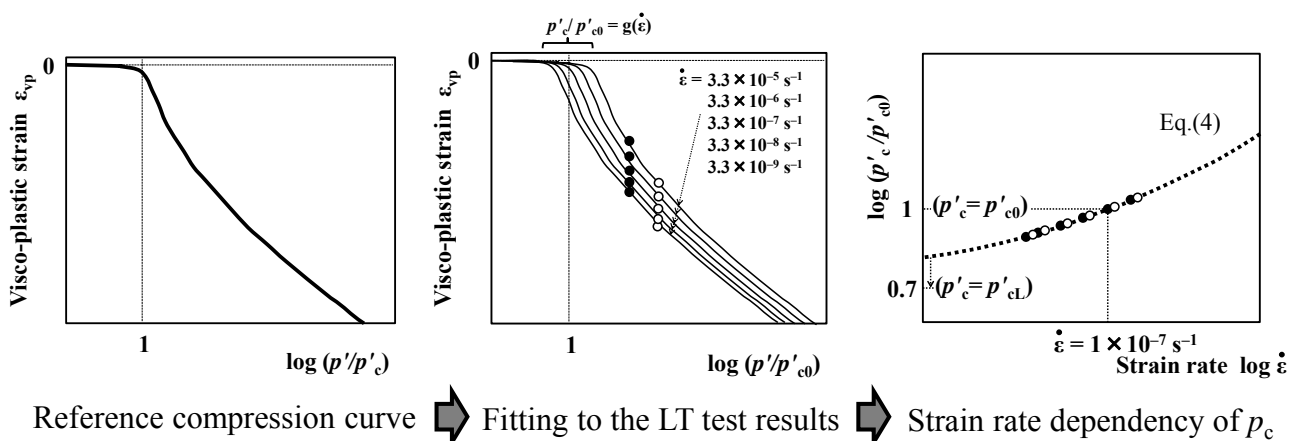


図-6. CRS圧密試験とLT圧密試験の結果から $p'_c$ のひずみ速度依存性を評価する方法の解説図。

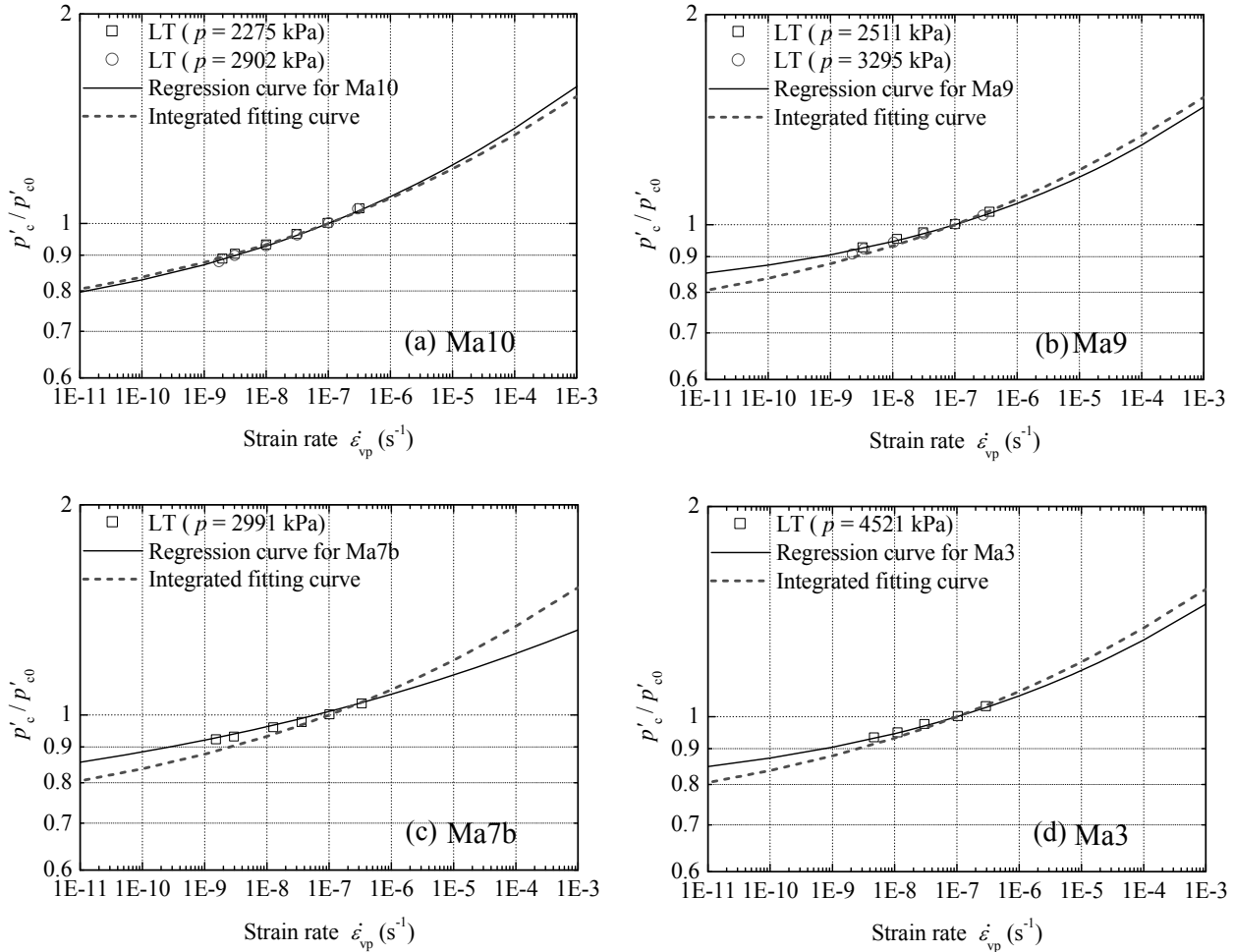


図-7  $\log p'_c/p'_{c0} - \log \dot{\epsilon}_{vp}$  関係と式(4)によるフィッティング: (a) Ma10, (b) Ma9, (c) Ma7b, (d) Ma3. 縦軸はひずみ速度  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  のときの値で正規化した圧密降伏応力, 横軸はひずみ速度. 図中の実線は各粘土個別の近似曲線, 破線は大阪湾粘土に対して共通に設定した統合近似曲線.

載荷圧密試験で一般に用いられる  $\dot{\epsilon}_{vp}$  の値の一つである  $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  に対応する圧密降伏応力を正規化に用いる  $p'_{c0}$  として使っていた. しかし, 本研究では, Leroueil (1988) などの既往文献を参考にし, 24時間載荷による段階載荷圧密試験のひずみ速度に近い  $\dot{\epsilon}_{vp}$  の値として  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  に対応した圧密降伏応力を  $p'_{c0}$  として定義し直すことに変更した. このひずみ速度の値は, 関西国際空港の建設プロジェクトの実務において実施された24時間載荷による段階載荷圧密試験においてもほぼ同等の値になっていたことを確認した. また, Leroueil (2006) に示されているカナダの粘土に対するデータとも整合する値である. 著者らは, この  $p'_{c0}$  の定義の修正によって, 実務における  $p'_{c0}$  の本質的な意味がより明確なものになったと考えている.

Watabe et al. (2008) や渡部ら (2009a) は, 大阪湾粘土のいずれの深度の試料に対しても  $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.55$  を共通に設定でき, 他のパラメータ  $c_1$  と  $c_2$  も共通の値としてそれぞれ 1.08 と 0.101 を設定できることを示した. ここで, Watabe et

al. (2008) や渡部ら (2009a) が  $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  に対応する  $p'_{c0}$  を用いて設定した  $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.55$  は, 本研究における  $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  に対応する  $p'_{c0}$  を用いると  $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$  に換算される. 式(4)を使って評価される  $\log p'_c/p'_{c0} - \log \dot{\epsilon}_{vp}$  曲線を図-7 に実線で示した. Ma10 の場合, アイソタックパラメータは  $p'_{cl} = 907.0$  ( $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$  と仮定),  $c_1 = 1.05$ ,  $c_2 = 0.114$  と設定された. 定義から, 近似曲線は  $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  において  $p'_c/p'_{c0} = 1$  を通る. 試験結果から得られたプロットと近似曲線とは非常によく一致している.

Watabe et al. (2008) や渡部ら (2009a) が示したように, 試験対象としたいずれの大阪湾粘土に対しても  $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$  を共通の値として設定すると, アイソタックパラメータ  $p'_{cl}$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  は最小自乗法によって設定することができる. 式(4)に  $p'_c = p'_{c0}$  と  $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  を代入すると, パラメータ  $c_2$  はパラメータ  $c_1$  の関数として次式で表される.

$$c_2 = \frac{\ln \frac{p'_c - p'_{cl}}{p'_{cl}} - c_1}{\ln \dot{\epsilon}_{vp}} = \frac{\ln \frac{1-0.7}{0.7} - c_1}{\ln 1.0 \times 10^{-7}} = \frac{c_1 + 0.847}{16.12} \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入すると、

$$\ln \frac{p'_c - p'_{cl}}{p'_{cl}} = (1 + 0.0620 \ln \dot{\epsilon}_{vp})c_1 + 0.0526 \ln \dot{\epsilon}_{vp} \quad (6)$$

従って、圧密降伏応力のひずみ速度依存性は、2つのアイソタックパラメータ $p'_{cl}$ と $c_1$ によって実質的に表現され、もう一つのパラメータ $c_2$ は式(5)によって自動的に計算される。

自然堆積粘土を対象としているため、データのばらつきはやむを得ないと考え、共通のアイソタックパラメータを設定するために、全てのデータを利用することとした。その結果、本研究では、大阪湾粘土に対する共通のアイソタックパラメータとして、 $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$ と $c_1 = 0.935$ が設定された。パラメータ $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$ 、 $c_1 = 0.935$ （と $c_2 = 0.107$ ）を用いた近似曲線（これを統合近似曲線と呼ぶことにする）を図-7に破線で表示した。共通のアイソタックパラメータを用いた統合近似曲線は、試験結果を見事に表現できており、一次近似としては十分なものであるといえる。

各深度の大阪湾粘土に対する $\log p'_c/p'_{c0} - \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係（Watabe et al. 2008や渡部ら 2009aのデータを含む）を図-8に重ねて示すとともに、共通のパラメータ（ $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$ と $c_1 = 0.935$ ）を式(4)に代入した統合近似曲線も比較のために描いてある。試験結果と統合近似曲線は良く一致していることがわかる。このことは、大阪湾粘土のひずみ速度依存性は共通の近似曲線として統一的に解釈できることを示唆している。

完新統粘土（不攪乱Ma13と再構成Ma13Re）の基準圧縮曲線は、更新統粘土（Ma12とそれ以深の粘土層）とは著しく異なるものであった。しかしながら、本研究で扱った全ての深度の大阪湾粘土の供試体に対して、正規圧密領域に载荷した際のアイソタックパラメータを共通に設定できることは、とても興味深い結果であり、後述するように実務上重要な意味を持つ。

この統合近似曲線を使えば、 $p'_{c0}$ が既知であれば、圧密降伏応力 $p'_c$ は $\dot{\epsilon}_{vp}$ の関数として唯一に決定される。与えられた $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応した圧縮曲線（ $\epsilon_{vp} - \log p'$ 曲線）は、統合近似曲線から得られる $p'_c(\dot{\epsilon}_{vp})$ を基準圧縮曲線上の $p'/p'_{c0}$ に乗じることによって得られる。この統合近似曲線から得られるMa10の圧縮曲線として、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が $3.3 \times 10^{-5}$ 、 $3.3 \times 10^{-6}$ 、 $3.3 \times 10^{-7}$ 、 $3.3 \times 10^{-8}$ 、 $3.3 \times 10^{-9}$  s<sup>-1</sup>に対応す

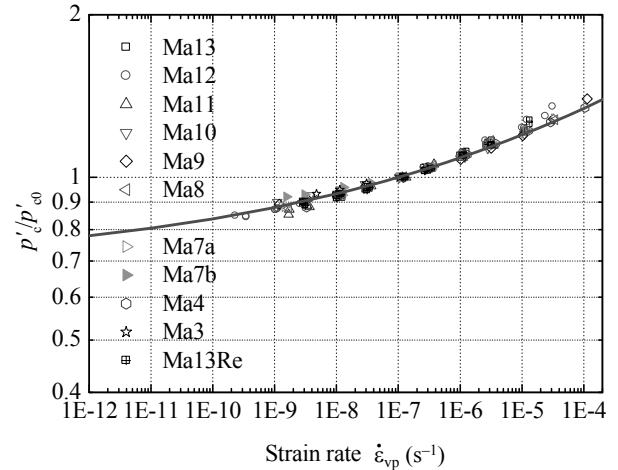


図-8 大阪湾粘土の全試料に対する $\log p'_c/p'_{c0} - \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係と統合近似曲線との比較。縦軸はひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>のときの値で正規化した圧密降伏応力、横軸はひずみ速度。

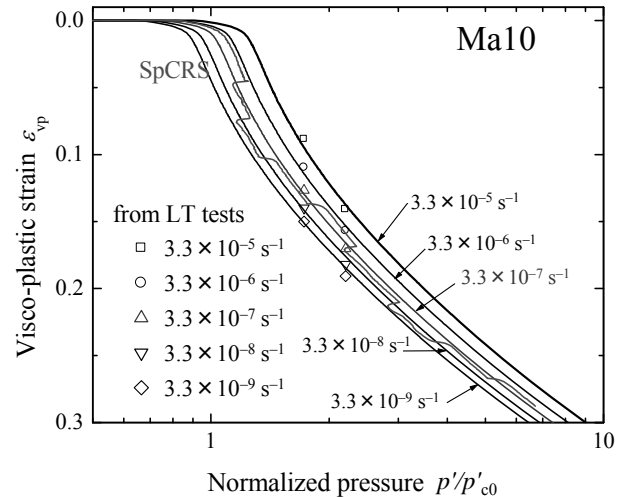


図-9 Ma10に対する試験結果からして統合近似曲線を使って得られた圧縮曲線群とSpCRS圧密試験結果との比較。横軸は $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>に対応した圧密降伏応力 $p'_c$ で正規化してある。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸はひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>のときの値で正規化した圧密降伏応力、凡例はLT圧密試験から読み取ったひずみ速度。

る曲線群を図-9に示す。特殊CRS圧密試験（SpCRS圧密試験）は、3つのひずみ速度（(a)  $3.3 \times 10^{-6}$  s<sup>-1</sup>、(b)  $3.3 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>、(c)  $3.3 \times 10^{-8}$  s<sup>-1</sup>）を(a) → (b) → (c) → (b) → (a) → (b) → (c) → (b) → (a)の順に変化させて実施したものである。この図の横軸は供試体の物性値のばらつきを考慮して比較できるように、 $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7}$  s<sup>-1</sup>に対応した圧密降伏応力 $p'_c$ で正規化してある。LT圧密試験において二次圧密曲線から得られる $(\epsilon_{vp}, p')$ データ（図-5）も、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の関数としてこの図にプロットしてある。統合近似曲線による圧縮曲線群とLT圧密試験から得られたデータばかりでなく、

SpCRS圧密試験から得られたデータも含めて、いずれもアイソタック概念によるモデルと合致している。Leroueil et al. (1985)もカナダ・ケベック州のBatiscan粘土に対して同様の結果を得ている。

## 5. 世界各地の粘土への適用

### 5.1 既往データとの比較－世界各地の粘土への適用の動機

本研究の大阪湾粘土に対して決定した統合近似曲線と、Leroueil (2006)によって解釈を加えられたLeroueil et al. (1988)の結果を図-10に比較した。ここで、Leroueil et al. (1988)のデータの縦軸の変数は、 $\epsilon = 10\%$ における $p'(\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1})$ で正規化した $\epsilon = 10\%$ における $p'(\dot{\epsilon})$ として得られたものである。カナダやスウェーデンにおける記録が整った試験盛土を対象として、室内試験や現地計測から得られた結果が示されている。大阪湾粘土に対して設定した統合近似曲線はカナダやスウェーデンの粘土の試験結果や原位置計測データとも良く整合するものであるといえる。このことは、大阪湾粘土に対して決定した統合近似曲線が、世界各地の粘土に対しても適用できることを示唆するものである。このことを受けて、以下では、提案方法の適用性について、世界の様々な特性を有する粘土に対して検討することにした。

### 5.2 粘土試料

大阪湾粘土に対して設定した統合近似曲線を使ったアイソタック概念について、様々な特性を有する世界各地

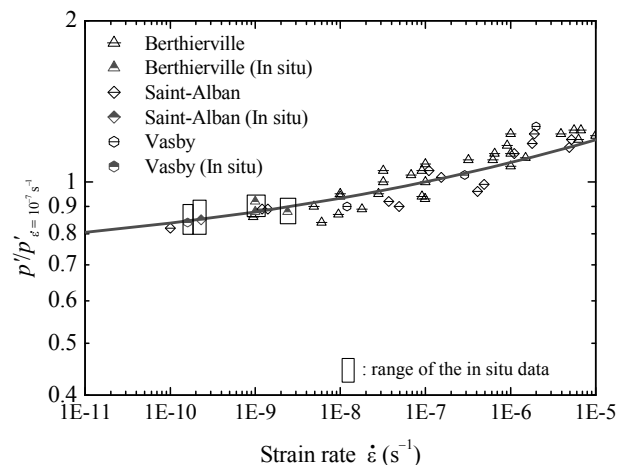


図-10 正規化した応力-ひずみ速度関係 (Leroueil et al. 1988のデータをLeroueil 2006がデータ処理したもの) と大阪湾粘土の統合近似曲線との比較。

の粘土に対して適用することを試みた。本研究では、表-3に示した物理特性を有する9種類の粘土を対象とした。

尼崎粘土 (大阪府)、洛西粘土 (京都府) はともに大阪湾粘土に属するが、地盤の隆起によって現在では過圧密状態にあることが特徴である (Tanaka et al. 2002)。有明粘土 (佐賀県) はとても鋭敏な軟弱粘土であり、きわめて高い間隙比を有している (Hanzawa et al. 1990)。羽田粘土 (東京都) は、上部の高塑性粘土と下部の低塑性粘土の2つのグループに分けられる。これらの粘土は、東京国際空港 (羽田空港) におけるD滑走路建設プロジェクトの地盤調査でサンプリングされた試料である。その諸特性については、渡部ら(2009b)やWatabe and Noguchi (2011)にまとめられている。ルイズヴィル粘土 (カナダ東部) はセ

表-3 本研究で扱った世界各地の粘土試料の物理特性

試料名	尼崎粘土	洛西粘土	有明粘土	上部羽田粘土	下部羽田粘土	ルイズヴィル粘土	ピサ粘土	オンソイ粘土	メキシコシティ粘土
不攪乱試料	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
再構成試料	No	No	No	No	No	No	No	No	No
深さ (G.L.-m)	34	24	10	10	24	9	17	17	7
有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ (kPa)	257	205	51	35	127	62	173	106	26
圧密降伏応力 $p'_c$ (kPa)	542	846	57	72	242	190	261	129	43
過圧密比 OCR	2.1	4.1	1.1	2.1	1.9	3.1	1.5	1.2	1.7
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.69	2.73	2.63	2.69	2.66	2.75	2.76	2.77	2.65
液性限界 $w_L$ (%)	124	108	107	153	46	79	99	80	415
塑性限界 $w_p$ (%)	44	34	45	63	22	22	33	25	64
塑性指数 $I_p$	80	74	62	90	24	57	66	55	351
自然含水比 $w_n$ (%)	83	63	139	151	41	74	55	61	395
自然間隙比 $e_n$	2.2	1.7	3.7	4.1	1.1	2.0	1.5	1.7	10.5

表-4 本研究で扱った世界各地の粘土試料に対するLT圧密試験条件

試料名	予備圧密圧力 (kPa)		長期圧密の載荷圧力 (kPa)
	24時間(または2時間)段階載荷	7日(または24時間)有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$	
尼崎粘土	39(2時間)→	255(24時間)→	314, 373, 412, 451, 490, 608
洛西粘土	39(2時間)→	196(24時間)→	314, 471, 549, 628, 726, 824, 941
有明粘土	9.8→20→	49→	83, 113, 172
上部羽田粘土	4.9→9.8→20→	35→	93, 152
下部羽田粘土	20→39→	127→	314, 549
ルイズヴィル粘土	10→29→	59→	137, 196, 275, 373, 471
ピサ粘土	39→78→	176(24時間)→	177, 265, 530
オンソイ粘土	20→49→	98→	118, 137, 176, 235, 353
メキシコシティ粘土	10→20→	29→	69, 88

メンテーションによる著しい固結の影響と氷河の融解と地盤の隆起により力学的な過圧密の影響を受けたきわめて鋭敏な粘土である。この粘土の主な鉱物は、ロックフラワーと呼ばれる微細な石英等の粒子で構成されており、いわゆる粘土鉱物(カオリナイト、スメクタイト、イライトなど)はほとんど含まれていない。この粘土の諸特性はLeroueil et al. (2003)に詳しい。ピサ粘土は、有名なピサの斜塔の前面の広場でサンプリングされた試料である。採取深度は著しく異なるものの、間隙比や圧縮指数などは大阪湾粘土と良く似た特性を有していることが特徴である(Watabe et al. 2013)。ピサ粘土の諸特性はLo Presti et al. (2003)に詳しい。オンソイ粘土(ノルウェー)は氷河性のロックフラワーと呼ばれる微細な粒子で構成されたきわめて均質な粘土である(Lunne et al. 2003)。メキシコシティ粘土(メキシコ)は、高含水比の状態で骨格構造が著しく発達した粘土である。この粘土は、火山地帯からの湖沼性堆積粘土であり、セメンテーションによる固結の影響が著しいことが特徴である(Diaz-Rodriguez 2003)。

### 5.3 試験結果

これらの世界各地の粘土について、CRS圧密試験とLT圧密試験を新たに実施した。試験方法は、大阪湾粘土に対して実施したものと同様である。LT圧密試験の試験条件を表-4に示す。これらの試験から得られた結果を以下に示す。

試験した9種類の粘土に対して得られた基準圧縮曲線を図-11に示す。これは、大阪湾粘土に対して示した図-3に対応する図である。下部の羽田粘土は、これらの粘土の中で最も小さな粘塑性ひずみしか生じず、バイリニアな関係を呈している。これは構造が発達していない低塑

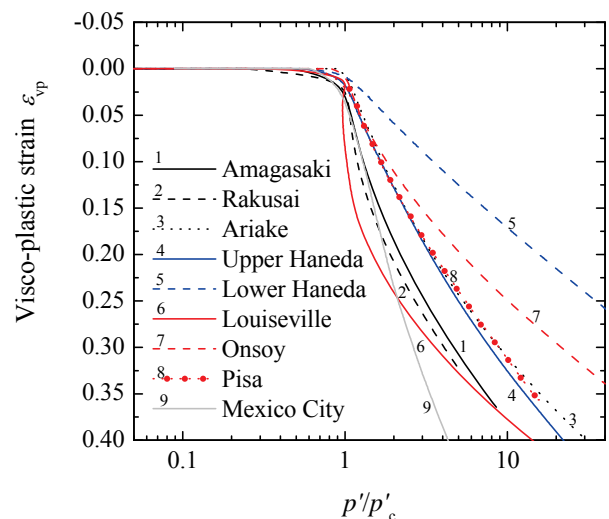


図-11 本研究で扱った世界各地の粘土試料の基準圧縮曲線。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸は圧密降伏応力で正規化した圧密圧力。凡例は表-3に示した粘土試料に対応する。

性粘土の特徴である。その他の粘土は、 $p'_c$ 付近で曲線が張り出したかたちをしており、正規圧密領域では下に凸な曲線を呈している。これは、大阪湾更新統粘土で見られたように、構造が発達した粘土の圧縮曲線の典型的なパターンである。この傾向が最も顕著に表れているのが、脆性的な降伏に伴い発生する過剰間隙水圧によって有効応力のわずかな減少すら見られるルイズヴィル粘土である。メキシコシティ粘土の曲線は、きわめて高い間隙比のために最も大きな粘塑性ひずみが生じている。

長期圧密試験から得られたこれらの粘土に対する圧密曲線( $\varepsilon - \log t$ 関係)を図-12に示す。これは、大阪湾粘土に対して示した図-4に対応する図である。正規圧密領域に載荷した場合には、いずれの粘土に対してもEOPの後に二

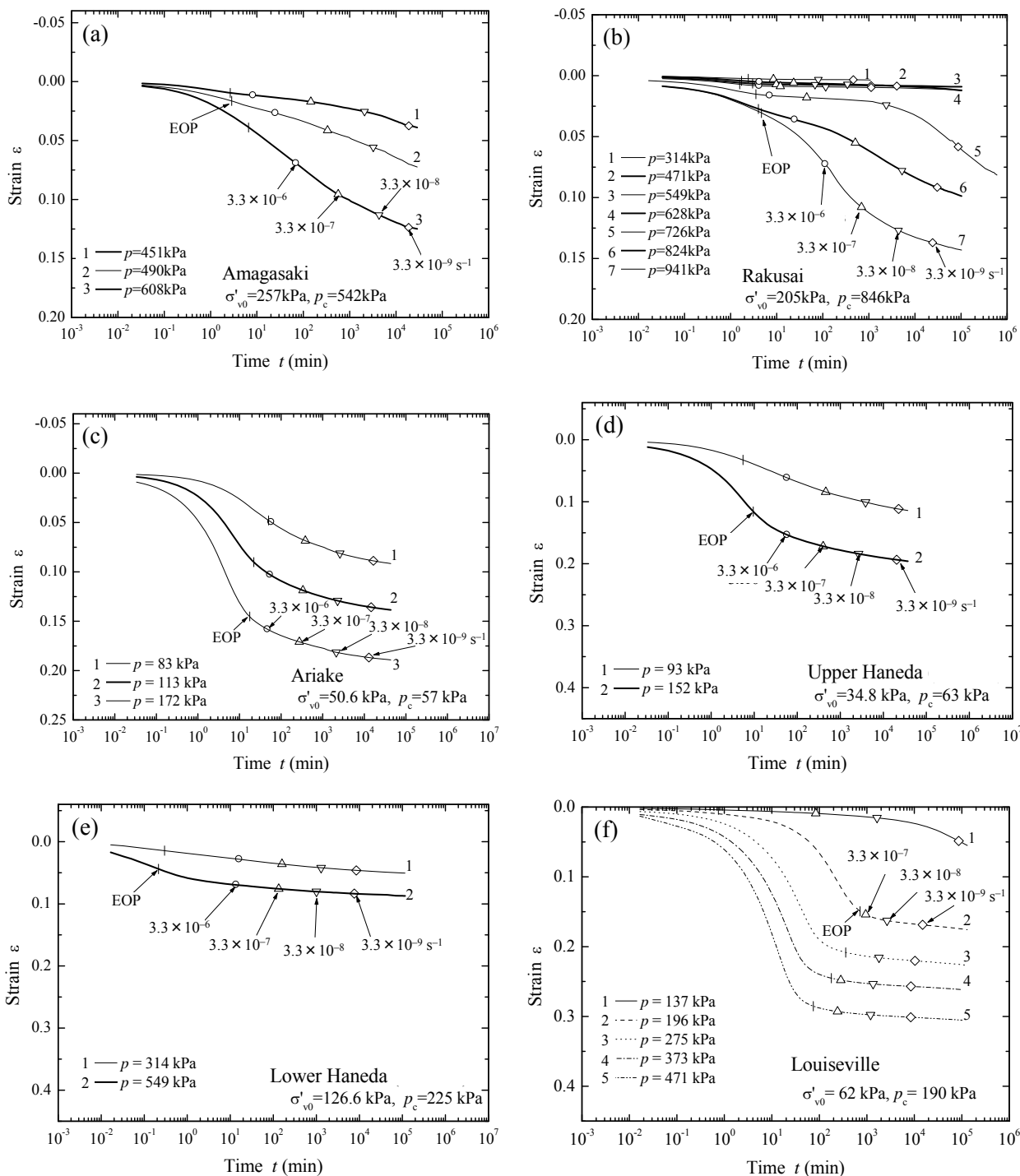


図-12 LT圧密試験により得られた圧密曲線 ( $\varepsilon - \log t$  curves) : (a) 尼崎粘土, (b) 洛西粘土, (c) 有明粘土, (d) 上部羽田粘土, (e) 下部羽田粘土, (f) ルイズヴィル粘土, (g) オンソイ粘土, (h) ピサ粘土, (i) メキシコシティ粘土. 縦軸はひずみ, 横軸は経過時間.

次圧密沈下が明瞭に現れている. これらの曲線の傾向は, 大阪湾粘土に対して得られた圧密曲線に見られた傾向と良く似ている. ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}_{vp}$  が  $3.3 \times 10^{-6}$ ,  $3.3 \times 10^{-7}$ ,  $3.3 \times 10^{-8}$ ,  $3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  に対応する点を図にマーカーで記してある.

過圧密領域に載荷した場合, 例えば, 洛西粘土の  $p = 726$

kPaやルイズヴィル粘土の  $p = 137$  kPaでは, 二次圧密過程において著しい遅れ沈下が観察された. この傾向は, 東カナダの粘土 (Leroueil et al. 1985) や大阪湾粘土 (Watabe et al. 2008; 渡部ら 2009a)において見られた結果と同様である. この遅れ沈下の現象は, アイソタック概念を用いて明瞭に説明することができる. すなわち, 図-13を使っ

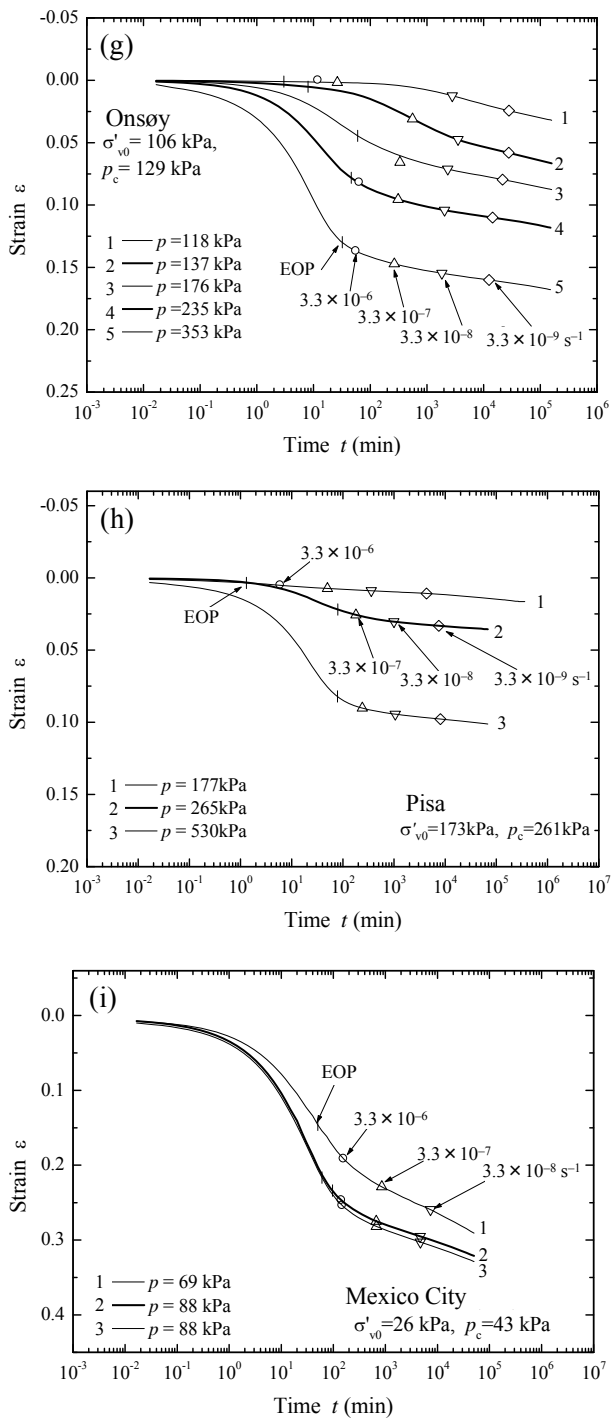


図-12 (続き)

て説明するように、ひずみ速度が大きいときにはもともと過圧密領域にあった粘土であっても、一定の有効応力  $p'$  の下で二次圧密が進行しひずみ速度が遅くなってくると、圧密降伏応力  $p'_c$  を超えて正規圧密状態に移行し得ることがわかる。洛西粘土では、 $p'_c$  よりわずかに小さな  $p = 726 \text{ kPa}$  のケースにおいてこの傾向がきわめて顕著であり、一方、 $p'_c$  より著しく小さな  $p \leq 628 \text{ kPa}$  ではこの傾向が見られないことはとても興味深く、上述によって説明できる

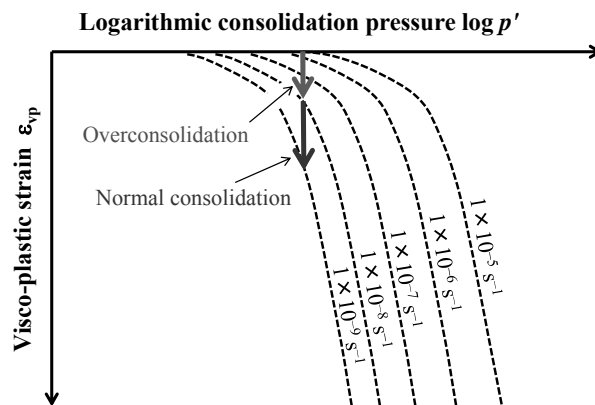


図-13 速いひずみ速度における過圧密状態から遅いひずみ速度における正規圧密状態へ推移。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸は対数表示した圧密圧力。赤い矢印は過圧密領域での沈下、青い矢印は正規圧密領域での沈下。

現象である。

圧密圧力  $p'$  一定の下で実施したLT圧密試験の結果より、 $\dot{\epsilon}_{vp}$  が  $3.3 \times 10^{-6}$ ,  $3.3 \times 10^{-7}$ ,  $3.3 \times 10^{-8}$ ,  $3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  のときに対応する  $\epsilon_{vp}$  をそれぞれ読み取る。ここで得られた  $p'$  と  $\epsilon_{vp}$  のデータセットを使って、基準圧縮曲線から  $\dot{\epsilon}_{vp}$  の関数としての圧密降伏応力  $p'_c$  を求めることができる。このようにして得られた結果を図-14に示す。これは、大阪湾粘土に対して示した図-7に対応する図である。縦軸  $p'_c$  は  $p'_{c0}$  で正規化して示していることから、全ての試験結果は、 $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  において  $p'_c/p'_{c0} = 1$  を通る。これらの図には、大阪湾粘土に対して共通のアイソタックパラメータ ( $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$  と  $c_1 = 0.935$ ) を設定した統合近似曲線も重ねて描いた。ピサ粘土を除き (Watabe et al. 2013)、試験結果は統合近似曲線と良く一致している。なお、ここで得られた試験結果はいずれも自然堆積粘土に対するものであり、ある程度のばらつきはやむを得ないといえる。しかしながら、統合近似曲線は試験結果を良く表現しているため、二次圧密を簡易に計算する際に一次近似としてきわめて有用である。統合近似曲線によるモデルは、Leroueil et al. (1985)によって得られた室内試験結果 (図-10) とも良く一致しており、有機物の少ない粘土に対して広く適用可能であることが示唆される。

## 6. 考察

図-14の縦軸の変数  $p'_{cl}/p'_{c0}$  の逆数は過圧密比OCRのような意味を持つ。二次圧密が発生しない载荷条件の点をもって過圧密比OCRを定義する概念は、Feijo and Martins (1993)によって提案され、その有効性が示されている。変数  $p'_{cl}/p'_{c0}$  が0.7となる曲線は、ひずみ速度  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  の曲



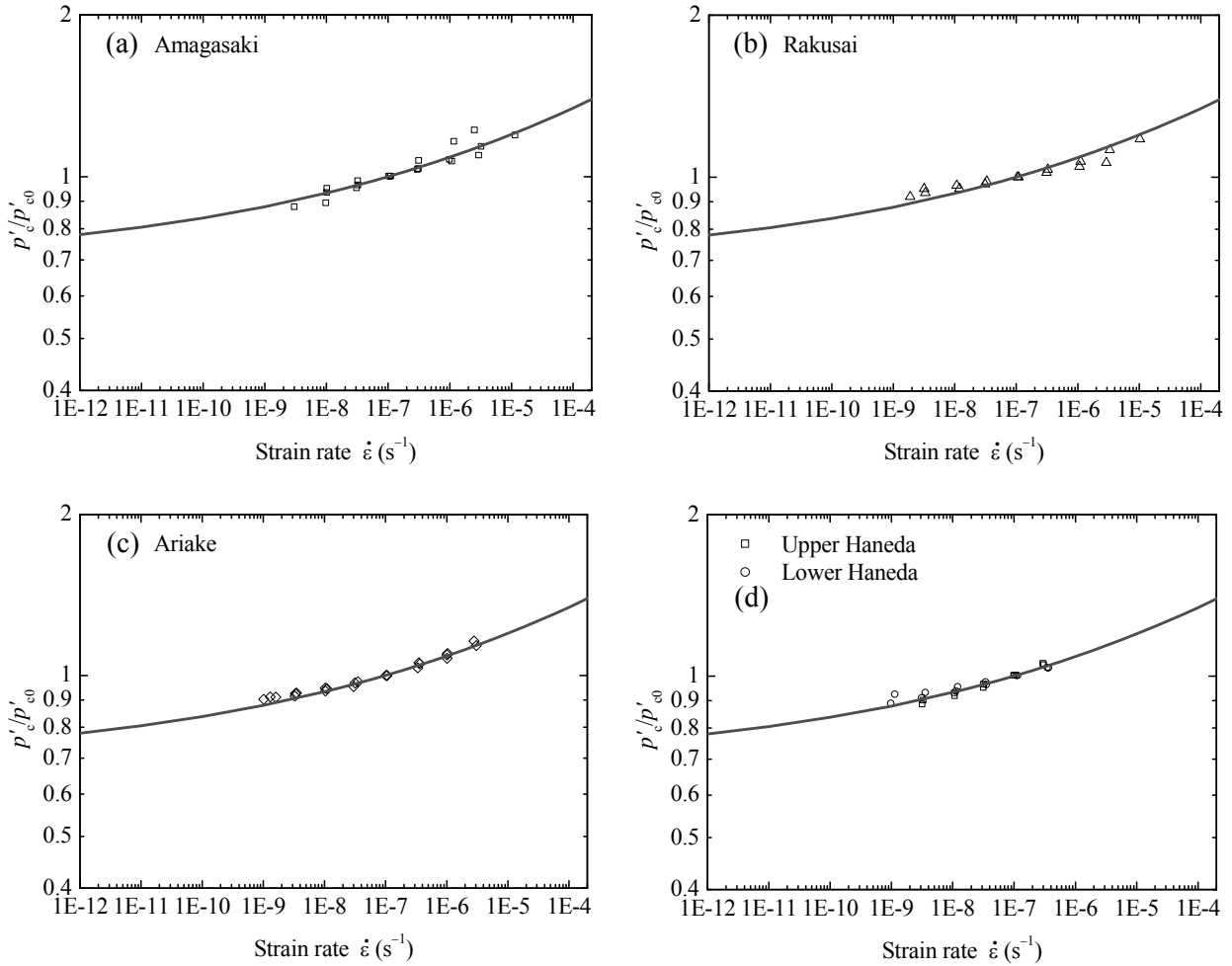


図-14  $\log p'/p'_{c0} - \log \dot{\epsilon}_{vp}$  関係と大阪湾粘土に対する統合近似曲線との比較: (a) 尼崎粘土, (b) 洛西粘土, (c) 有明粘土, (d) 上部・下部羽田粘土, (e) ルイズヴィル粘土, (f) オンソイ粘土, (g) ピサ粘土, (h) メキシコシティ粘土. 縦軸はひずみ速度  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  のときの値で正規化した圧密降伏応力, 横軸はひずみ速度.

線との比較により,  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  を基準にすると  $\text{OCR} = 1.43$  に相当する. ブラジルの有機質なサラブイ粘土に関する長期クリープ試験に基づいて, Feijo and Martins (1993) は二次圧縮も二次膨張も無い「zone of indifferent equilibrium (中立均衡領域)」なる概念を展開した. 一次圧密終了EOPに対応した圧縮曲線と比較して, 二次圧密を生じない最小のOCRは約2.0であることが示された. サラブイ粘土のEOPにおけるひずみ速度は  $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  より大きいことから, ひずみ速度  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  に対応したOCRに換算すると2.0より小さく, 恐らく1.43よりは大きいと考えられる. これは恐らくサラブイ粘土が有機質であることに起因しているであろう. 本研究で扱っている粘土は, 本質的に有機物の少ない粘土である.

関西国際空港二期工事の大阪湾粘土も含め, 本研究で試験した世界各地の粘土において, それぞれの試料に対するCRS圧密試験から得た基準圧縮曲線を用いて, LT圧

密試験のデータを整理した結果を図-15に示す. 図中には, 大阪湾粘土に対して設定した統合近似曲線を重ねて描いてある. 加えて, 関西国際空港一期事業の人工島下において得られた原位置のひずみ速度と正規化した鉛直有効応力の関係も図-15にプロットしてある. ここでは層別沈下計測 (Furudo 2010) からMa12とMa11の層別沈下と層厚 (図-2参照) から計算された値を示している. ここで, 原位置の圧密圧力  $p'$  は, 埋立土層から作用する鉛直有効応力, 原地盤の有効土被り圧, 観測した過剰間隙水圧  $\Delta u$  から算出した. 現地観測データとして得られた  $p'$  は, 24時間載荷による段階載荷圧密試験から得られた  $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  に対応する  $p'$  で正規化してある. なお, 関西国際空港一期プロジェクトでは, CRS圧密試験は実施していない. 海成粘土層Ma12の層別沈下情報から得られた結果は統合近似曲線よりやや上方に, Ma11の場合にはやや下方にそれぞれプロットされている. 結果に不確定要素があるこ

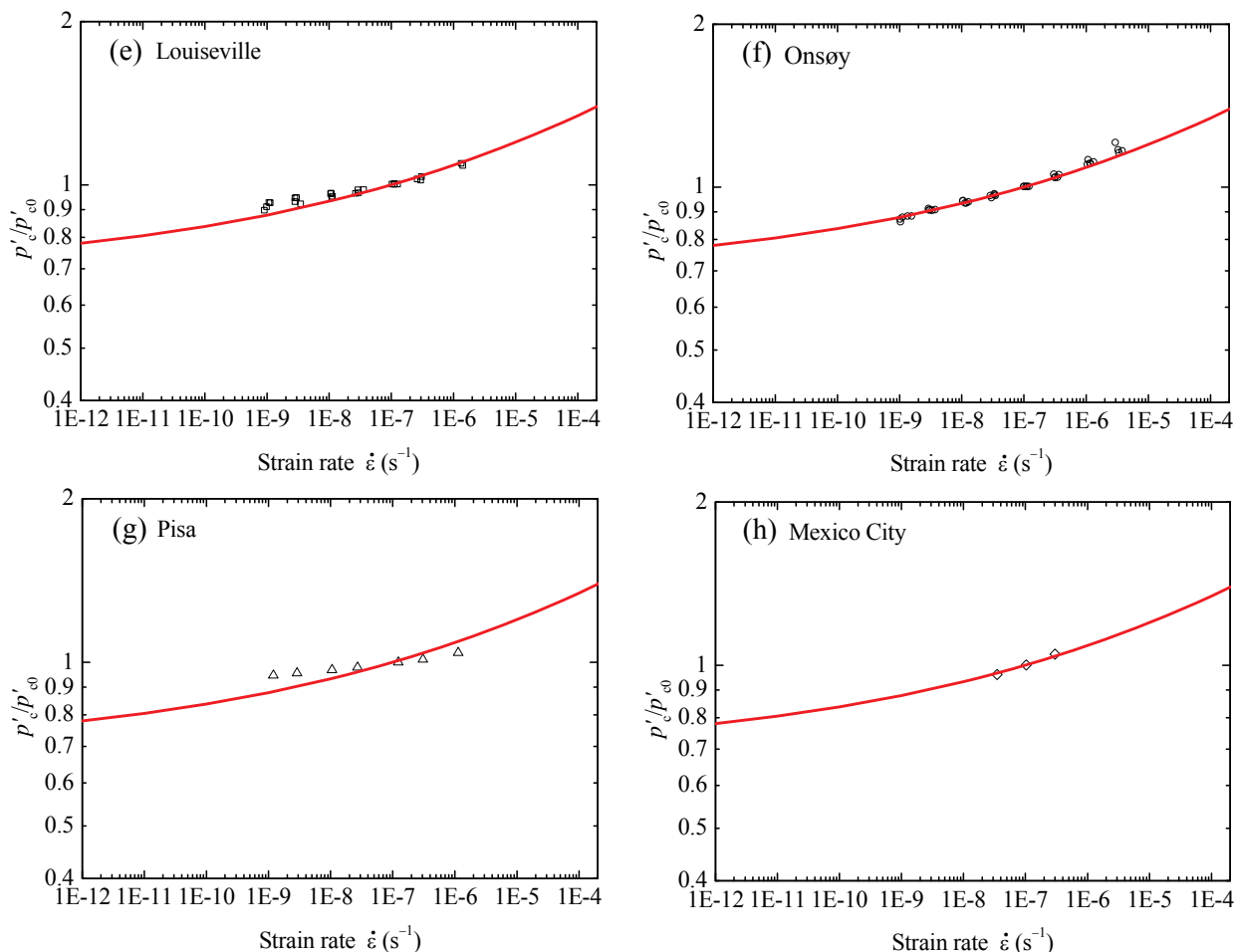


図-14 (続き)

とを考慮する必要があるが、Leroueil et al. (1988)によって示された東カナダやスウェーデンの粘土に対して得られた原位置データや室内試験データとも整合した結果になっているといえる。

関西国際空港一期島の海成粘土層Ma12とMa11で観測された圧縮曲線について、24時間載荷による段階載荷圧密試験結果と統合近似曲線から導いたアイソタックモデルによる圧縮曲線群とともに図-16に示す。段階載荷圧密試験は、関西国際空港一期島の層別沈下観測地点とは異なる位置で採取された試料を用いて実施されたものである。ここで、ひずみ速度に対応したアイソタック圧縮曲線群を描く際には、2mごとの異なる深度の試料に対して実施された計5つの試験結果の平均値として描いた基準圧縮曲線を使った。ここで示したデータセットでは、原位置データは室内試験データよりも同一のひずみとひずみ速度において大きな有効応力となっている。しかしながら、原位置で観測された圧縮曲線の傾きは、室内試験におけるアイソタック曲線群よりも勾配がかなり急であり、より左側の圧縮曲線にシフトしていくアイソタック

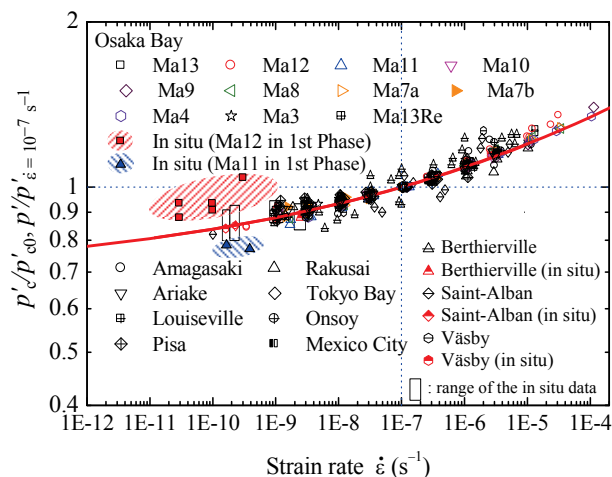


図-15 本研究で扱った大阪湾粘土を含む世界各地の粘土の  $\log p'_0/p'_e0 - \log \dot{\epsilon}_p$  関係と統合近似曲線との比較。縦軸は縦軸はひずみ速度  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  のときの値で正規化した圧密降伏応力（あるいは、それと幾何学的に同等の値）、横軸はひずみ速度。

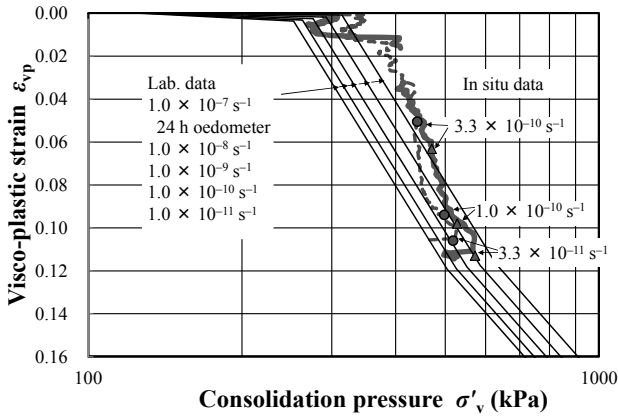


図-16 関西国際空港1期島の海底粘土Ma12層で観測された原位置の圧縮曲線と24時間段階荷重圧密試験（ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に相当）に基づいて描いたアイソタックモデルによる圧縮曲線群。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸は有効鉛直圧密圧力。段階荷重圧密試験は、関西国際空港1期島の層別沈下計測位置とは異なる場所でサンプリングされた試料に対して実施されたものである。なお、ここで使った基準圧縮曲線は、2mごとの異なる深度で採取された計5つの試料に対して実施された圧密試験により得られた基準圧縮曲線を平均化したものである。

の概念と整合する結果となっている。このことから、室内試験における粘土の挙動と原位置における粘土の挙動は、どちらも同様のひずみ速度効果が見られ、アイソタック概念に従うことが確認できる。

大阪湾粘土に対して設定した共通のアイソタックパラメータによる統合近似曲線が、メキシコシティ粘土のように通常の粘土に比べて極めて高い含水比（あるいは間隙比）で、固結した骨格構造を有する粘土も含めた世界各地の多様な粘土（ただし、有機物の少ない粘土）に対して適用できることはとても興味深い。

統合近似曲線が広く適用できることから、試験の実施に非常に長い時間を要するLT圧密試験を実務で実施しなくてもある程度の沈下予測が可能となる。室内で実施するLT試験で得られる $\dot{\epsilon}_{vp}$ は $1.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ から $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の範囲程度であるが、原位置のひずみ速度はそれよりもさらに小さい値であることから、統合近似曲線の活用はとても便利である。CRS圧密試験によって簡易に得られる基準圧縮曲線があれば、ひずみ速度依存性を統合近似曲線で代表させることによって、アイソタック概念を導入した粘塑性挙動の予測が可能となる。

$\log(p'_c/p'_{c0}) - \log \dot{\epsilon}_{vp}$  関係上で、あるひずみ速度における勾配 $\alpha$ は、式(7)で表されるように、二次圧密係数 $C_{ae}$ と圧縮指数 $C_c$ の比と一致する（付録A参照）。

$$\alpha = \frac{\Delta \log(p'_c/p'_{c0})}{\Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}} = \frac{\Delta \log p'_c}{\Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}} = \frac{C_{ae}}{C_c} \quad (7)$$

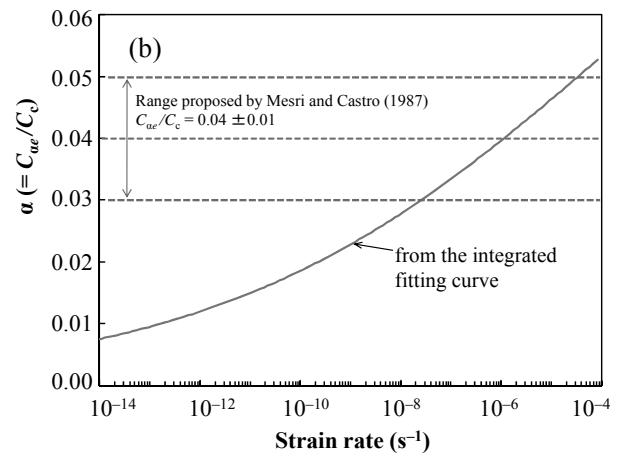
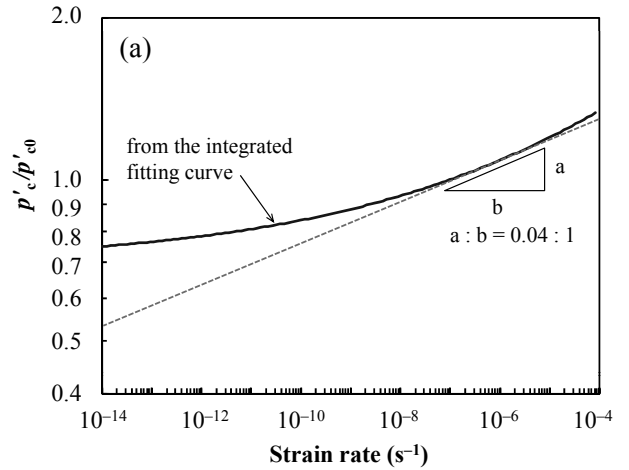


図-17 統合近似曲線と $C_{ae}/C_c$ 一定概念との比較: (a)  $p'_c/p'_{c0}$ とひずみ速度の関係、縦軸はひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のときの値で正規化した圧密降伏応力、横軸はひずみ速度。実線は統合近似曲線、破線は勾配0.04の直線、(b)  $\alpha (=C_{ae}/C_c)$ とひずみ速度の関係。横軸はひずみ速度。実線は統合近似曲線の勾配、破線はMesri and Castro (1987)が示した範囲。

Mesri and Castro (1987)は、 $C_{ae}/C_c$ が一定値になるという実用的な概念を経験的に提案した。有機物の少ない粘土の場合、Mesri et al. (1995)によると $C_{ae}/C_c$ は多くの場合 $0.04 \pm 0.01$ の範囲にある。図-17は、(a) 統合近似曲線と $C_{ae}/C_c$ 一定の概念（ここでは $\alpha = 0.04$ に相当）との比較、(b) 統合近似曲線から得られる $\alpha$ とひずみ速度との関係を示している。図-17(b)から読み取れるように、統合近似曲線によると $\alpha = C_{ae}/C_c$ は一定値ではなく、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の減少とともに減少することがわかる。このことは、Leroueil (2006)が東カナダやスウェーデンの粘土のデータに基づいて示唆した傾向や本研究において世界各地の粘土に対して確認された事実（図-15が下に凸な曲線で近似できること）と合致する。統合近似曲線の場合、ひずみ速度 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 付近で $\alpha$ の値が0.04となる。そして、統合近似曲線では、ひずみ

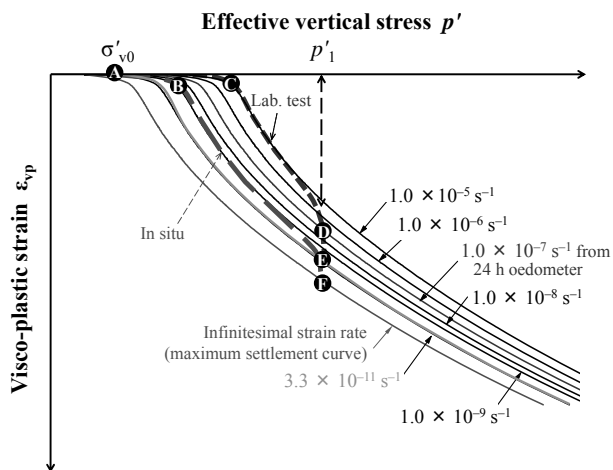


図-18 LT圧密試験から得られる圧縮曲線と原位置で観測される圧縮曲線との比較概念図。縦軸は粘塑性ひずみ、横軸は有効鉛直応力、青の破線は室内試験において想定される経路、赤の破線は原位置において想定される経路。青の実線で示された圧縮曲線はひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のもので、4時間載荷による段階載荷圧密試験から得られる圧縮曲線に相当、最も下側にある赤の実線で示された圧縮曲線はひずみ速度が無限小となったときのもので、起こりうる最大の沈下量に相当。

速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のときの $a$ は0.035、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ のときの $a$ は0.019、ひずみ速度がきわめて小さくなると $a$ は0.0となって $p'_c/p'_{c0}$ は0.7に最終的に収束する。この傾向は、Leroueil (2006)の定性的記述とも整合し、本研究ではこれを定量的に示したといえる。 $C_{ae}/C_c = 0.04 \pm 0.01$ はひずみ速度が $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ から $1.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ の範囲、すなわち試験室で一般に観測されるひずみ速度において有効であり、Mesriらの計測結果を説明するものである。本研究で扱っている土は有機物の少ない粘土であるが、Mesri et al. (1995)が示した非粘性な土に対する $C_{ae}/C_c = 0.02$ 、有機質土に対する $C_{ae}/C_c = 0.05$ 、ピートに対する $C_{ae}/C_c = 0.06$ についても、上述と同様にひずみ速度の減少とともに収束するかたちの式を使って表現できるといえる（もちろんアイソタックパラメータは異なる）。試験室における結果に基づいて $C_{ae}/C_c$ を一定値とする方法では、盛土下で一般に観測されるような小さなひずみ速度の領域にまで外挿して圧密挙動を予測することには限界があり、本研究の成果はこの問題を解決するものとなっている。

図-18は、有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ から圧密降伏後の鉛直応力 $p'_1$ まで圧密圧力を増加させたとき、室内でLT圧密試験から得られるであろう経路(A → C → D → E)と原位置で得られるであろう経路(A → B → E → F)との比較を概説している。この図では、幾つかのひずみ速度に対応した圧縮曲線群も重ねて描いてある。ひずみ速度が無限小となったときの圧縮曲線は、その粘土に生じる最大の沈

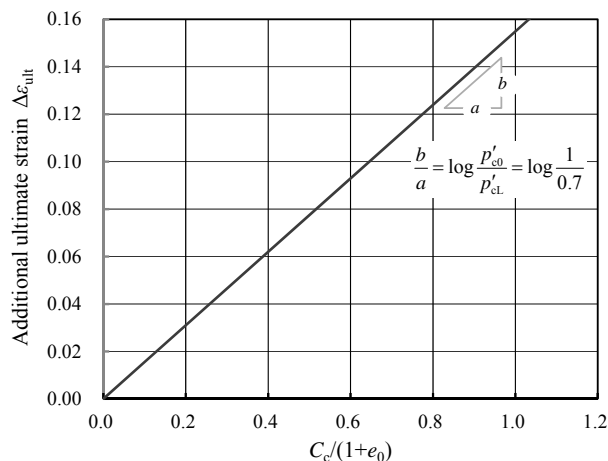


図-19 ひずみ速度 $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ から無限小となったときの沈下ひずみ増分量と $C_c/(1+e_0)$ の関係図

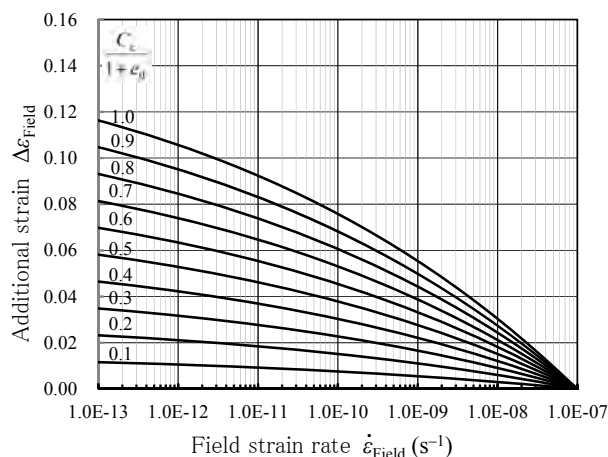


図-20 原位置ひずみ速度に対応したひずみ増分量チャート。縦軸は原位置でのひずみ増分量、横軸は原位置ひずみ速度。

下ひずみを表している。点D, E, Fは、ひずみ速度がそれぞれ $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 、 $3.3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-\infty} \text{ s}^{-1}$ となった点を表している。著者らの経験では、試験室で行うLT圧密試験から得られる最小のひずみ速度はおよそ $1.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ であることから、その経路が点Eに達するのは困難である。関西国際空港で観測された原位置のひずみ速度は、一次圧密の段階にある現在でも $3.3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ であり、EOPに対応するのは、点Eよりももう少し小さなひずみ速度になると考えられる。ここでは、簡単にするため、図の説明上は点Eが原位置におけるEOPに相当するとする。しかしながら、経路はひずみ速度無限小の点Fを目指して漸近するものの到達はできない。

実務では、圧密沈下量は24時間載荷による段階載荷圧密試験から得られる $e - \log p$ 曲線に基づいて計算されるが、これは、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  (点D)に対応した沈下量である。有効圧密圧力 $p'_1$ における圧縮指数 $C_c$ を使

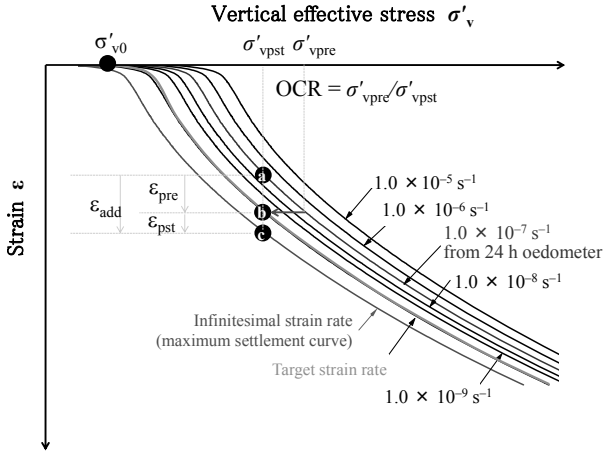


図-21 プレロード除荷後の目標ひずみ速度と残留沈下の概念図。縦軸はひずみ、横軸は有効鉛直応力。青の実線で示された圧縮曲線はひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のもので、24時間荷重による段階荷重圧密試験から得られる圧縮曲線に相当、最も下側にある赤の実線で示された圧縮曲線はひずみ速度が無限小となったときのもので、起こりうる最大の沈下量に相当。緑の1実線は、原位置での目標ひずみ速度に対応した圧縮曲線。

って、原位置で従来法による予測よりも過大に生じ得る沈下量（D → Fの沈下ひずみ増分ならびにD → Eの沈下ひずみ増分）は以下の式によって予測することができる。

$$\Delta \varepsilon_{D \rightarrow F} = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{p'_{c0}}{p'_{cl}} \quad (8)$$

$$\Delta \varepsilon_{D \rightarrow E} = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left[ \frac{p'_{c0}}{p'_{cl}} \left\{ \frac{1}{1 + \exp(c_1 + c_2 \ln \dot{\varepsilon}_{Field})} \right\} \right] \quad (9)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}_{Field}$  は原位置のひずみ速度であり、ここでは上述したように原位置における一次圧密終了時と同等程度として考えているが、実際の状況に合わせて任意に設定することができるパラメータである。 $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.7$ は世界各地の粘土に対して共通に設定できる値である。大阪湾粘土のMa12の場合には、例えば、自然含水比が84%で初期間隙比 $e_0$ が約2.2（表-1を参照）、圧縮指数 $C_c$ が約1.0（Watabe et al. 2002を参照）である。これらの値を上式に適用すると、 $\Delta \varepsilon_{D \rightarrow F}$  は0.048（4.8%）と求められる。さらに、関西国際空港では、Ma12の原位置における層別沈下計測から推定されたひずみ速度が $3.3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ であることから、式(9)に統合近似曲線のアイソタックパラメータを代入して、あるいは式(8)で $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.7$ を図-15から読み取れる $p'_{cl}(\dot{\varepsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})/p'_{c0} = 0.82$ で置き換えることによって、 $\Delta \varepsilon_{D \rightarrow E}$ が0.025（2.5%）と求められる。この値は原位置での予測値と実測値との比較と概ね合致しているといえる。

式(8)と式(9)をチャートにしたものを図-19と図-20にそ

れぞれ示す（Watabe and Leroueil 2012）多くの粘土に対して適用可能な大阪湾粘土で設定した近似曲線を用いる場合、 $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.7$ 、 $c_1 = 0.935$ および $c_2$ （式(5)から決まる）を用いて、 $\Delta \varepsilon_{ult}$ と $\Delta \varepsilon_{Field}$ はいずれも $C_c/(1 + e_0)$ と原位置のひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{Field}$ の関数として表すことができる。ここで、式(8)や図-19は $\dot{\varepsilon}_{Field}$ が無限小になった時に相当する。

上述のアイソタック圧縮曲線群（図-18）は、地盤改良の設計にも応用できる可能性がある（Leroueil and Watabe 2012）。図-21に示すように、プレロード時の圧密を24時間ごとの段階荷重圧密試験から得られた圧縮曲線で設計する場合、プレロード除荷後の原位置での目標ひずみ速度と許容残留沈下ひずみ $\varepsilon_{pst}$ を設定し、設計断面に基づいた除荷後の有効土被り圧 $\sigma'_{vpst}$ が与条件となったとき、プレロードとして作用すべき有効圧密圧力 $\sigma'_{vpre}$ を設定することが可能となる。逆に、同じ与条件に加えてプレロードの有効圧密圧力 $\sigma'_{vpre}$ も与条件となる場合には、プレロードを除荷するタイミングにおける原位置のひずみ速度を確認して施工管理に役立てられる。

## 7. 結論

Watabe et al. (2008)や渡部ら(2009a)は、圧縮曲線（圧密圧力と沈下ひずみの関係）と圧密降伏応力のひずみ速度依存性（圧密降伏応力とひずみ速度の関係）とを使ったアイソタック概念に基づき、簡便で実用的な方法を提案した。前者の関係は定ひずみ速度荷重圧密試験（CRS圧密試験）により、後者の関係は長期圧密試験（LT圧密試験）からそれぞれ求められる。後者の関係は、3つのアイソタックパラメータ（ $p'_{cl}$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ ）を用いた式(4)により表される。

本研究では、Watabe et al. (2008)や渡部ら(2009a)に続いて、大阪湾で様々な深度（海底下約300mまで）から採取した粘土試料に対して、一連のCRS圧密試験とLT圧密試験の追試験を実施し、試験結果のデータセットを更新し充実させた。いずれの深度の大阪湾粘土に対してもアイソタックパラメータは $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.70$ 、 $c_1 = 0.935$ と共通の値を設定できる。ここで、 $p'_{c0}$ は24時間荷重による段階荷重圧密試験に対応する平均的なひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に対応した圧密降伏応力である。共通のアイソタックパラメータを設定した式(4)による近似曲線を統合近似曲線と称する。パラメータ $c_2$ は式(5)によってパラメータ $p'_{cl}/p'_{c0}$ と $c_1$ の関数として計算される。

塑性、鉱物、骨格構造、セメンテーション、過圧密などに関して多様な性質を有する世界各地の粘土に対して一連のCRS圧密試験とLT圧密試験を実施し、それらの試

験結果に対して提案方法を適用した。その結果から、大阪湾粘土で設定した共通のアイソタックパラメータが、含水比が400%と高く通常の粘性土に比べると例外的な特性を有するメキシコシティ粘土も含めた世界各地の粘土（ただし、有機物の少ないもの）に対して適用できることを見出した。大阪湾粘土を対象とした統合近似曲線は、世界各地の粘土に対する試験室データばかりでなく、原位置の観測結果とも整合したものであることを確認した。CRS圧密試験から容易に得られる基準圧縮曲線があれば、ひずみ速度依存性を統合近似曲線で代表させることによって、アイソタック概念を導入した土の粘塑性挙動の一次近似としての予測が可能となる。

$\log(p'_{cl}/p'_{c0}) - \log \dot{\epsilon}_{vp}$  関係において、あるひずみ速度での傾き $\alpha$ は二次圧密係数 $C_{ae}$ と圧縮指数 $C_c$ の比に対応する。その値は統合近似曲線から計算され、一定値ではなく、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の減少とともに減少するものとなる。この傾向はLeroueil (2006)にも定性的にコメントされており、本研究ではこれを定量的に示すことができた。

実務では、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に対応する24時間載荷による段階載荷圧密試験から得られる $e - \log p'$ 曲線に基づいて、圧密沈下量が一般に予測されている。ある有効圧密圧力 $p'$ のときの圧縮指数 $C_c$ を使うと、従来法による予測沈下量に対して追加的に生じる可能性のある沈下のひずみ増分は、世界各地の粘土に対して共通に設定できる $p'_{cl}/p'_{c0} = 0.7$ を式(8)や式(9)に適用することによって予測することができる。また、この手法については実務で使いやすいように、 $C_c/(1+e_0)$ の関数として表される簡便なチャートとして提示した。

本研究において実施した土の長期圧密試験方法の手順と計算方法について整理し、付録Bに取りまとめた。

(2014年12月12日受付)

## 謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所と関西国際空港用地造成株式会社（当時）との共同研究として実施したものであり、関係各位に感謝の意を表す。

## 記号

$c_1, c_2$ : 式(4)で用いる定数

$C_{ae}$ : 二次圧密係数

$C_{ae}$ : ひずみで表した二次圧密係数

$C_c$ : 圧縮指数

$e_0$ : 初期間隙比

$p'$ : 鉛直有効圧密圧力 ( $\sigma'_v$ )

$p'_{c0}$ : 圧密降伏圧力

$p'_{c0}$ :  $\dot{\epsilon}_{vp} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に対応する $p'_{c0}$

$p'_{cl}$ :  $p'_{c0}$ の下限値

$t$ : 経過時間

$u$ : 間隙水圧

$\alpha$ :  $\log p'_{cl} - \log \dot{\epsilon}_{vp}$  関係の傾き ( $= C_{ae}/C_c$ )

$\Delta u$ : 過剰間隙水圧

$\epsilon$ : 全ひずみ

$\dot{\epsilon}$ : 全ひずみ速度

$e_0$ :  $p' = \sigma'_{v0}$ における全ひずみ

$\epsilon_e$ : 弾性ひずみ

$\dot{\epsilon}_{EOP}$ : 原位置における一次圧密終了時のひずみ速度

$\epsilon_{vp}$ : 粘塑性ひずみ

$\dot{\epsilon}_{vp}$ : 粘塑性ひずみ速度

$\sigma'_{v0}$ : 有効土被り圧

## 参考文献

- Adachi, T., Oka, F. and Mimura, M. (1996): Modeling aspects associated with time dependent behavior of soils. *Session on Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behavior, ASCE Convention, Washington, Geot. Special Publication*, **61**, 61–95.
- Degago, S.A., Grimstad, G., Jostad, H.P., Nordal, S. and Olsson, M. (2011): Use and misuse of the isotache concept with respect to creep hypotheses A and B, *Geotechnique*, **61**(10), 897–908.
- Den Haan, E.J. and Kamao, S. (2003): Obtaining isotache parameters from a C.R.S.  $K_0$ -oedometer, *Soils and Foundations*, **43**(4), 203–214.
- Díaz-Rodríguez (2003): Characterization and engineering properties of Mexico City lacustrine soils, *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan et al. (eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, 725–755.
- Feijo, R.L. and Martins, I.M.S. (1993): Relationship between secondary compression, OCR and  $K_0$  (in Portuguese). COPPEGEO '93, COPPE/Federal University of Rio de Janeiro, 27–40.
- Furudoi, T. (2010): The second phase construction of Kansai International Airport considering the large and long-term settlement of the clay deposits. *Soils and Foundations*, **50**(6), 805–816.
- Hanzawa, H., Fuyaka, T. and Suzuki, K. (1990): Evaluation of engineering properties for an Ariake clay, *Soils and Foundations*, **30**(4), 11–24.
- Hinchberger, S.D. and Rowe, R.K. (1998): Modelling the rate-sensitive characteristics of the Gloucester foundation soil. *Can. Geotech. J.*, **35**(5), 769–789.
- Imai, G., Ohmukai, N. and Tanaka, H. (2005): An isotaches-type compression model for predicting long term consolidation of KIA clays, *Proc. Symp. Geotech. Aspects of Kansai Int. Airport*, 49–64.
- Kim, Y.T. and Leroueil, S. (2001): Modelling the viscoplastic behaviour of clays during consolidation: application to Berthierville clay in both laboratory and field conditions. *Can. Geotech. J.*, **38**(3): 484–497.
- Leroueil, S. (2006): The isotache approach. Where are we 50 years after its development by Professor Šuklje? (2006 Prof. Šuklje's Memorial Lecture), *Proc. 13th*

- Danube-European Conf. Geotech. Engrg, Ljubljana 2006*, 55–88.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R. (1985): Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Géotechnique*, **35**(2), 159–180.
- Leroueil, S., Kabbaj, M. and Tavenas, F. (1988): Study of the validity of a  $\sigma_v - \varepsilon_v - \dot{\varepsilon}_v$  model in in situ conditions. *Soils and Foundations*, **28**(3), 3–25.
- Leroueil, S., Hamouche, K., Tavenas, F., Boudali, M., Locat, J., Virely, D., Roy, M., La Rochelle, P. and Leblond, P. (2003): Geotechnical characterization and properties of a sensitive clay from Québec, *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan et al. (eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, 363–394.
- Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M. and Pepe, M. (2003): Geotechnical characterisation of the subsoil of Pisa Tower, *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan et al. (eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, 909–946.
- Lunne, T., Long, M. and Forsberg, C.F. (2003): Characterisation and engineering properties of Onsøy, *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan et al. (eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, 395–427.
- 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.
- Mesri, G. and Castro, A. (1987): The  $C_u/C_c$  concept and  $K_0$  during secondary compression, *J. of Geotech. Engrg., ASCE*, **113**(3), 230–247.
- Mesri, G., Shahien, M. and Feng, T.W. (1995): Compressibility parameters during primary consolidation, *Proc. Int. Symp. Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima 95*, Hiroshima, Vol. 2: 1021–1037.
- Norton, F. H. (1929): *The creep of steel at high temperature*. New York, McGraw-Hill.
- Perzyna, P. (1963): Constitutive equations for rate sensitive plastic materials. *Q. Appl. Math.* **20**(4), 321–332.
- Qu, G., Hinchberger, S.D. and Lo, K.Y. (2010): Evaluation of the viscous behaviour of clay using generalized overstress viscoplastic theory, *Géotechnique*, **60**(10), 777–789.
- Rowe, R.K. and Hinchberger, S.D. (1998): The significance of rate effects in modelling the Sackville test embankment. *Can. Geotech. J.*, **35**(3), 500–516.
- Šuklje, L. (1957): The analysis of the consolidation process by the isotache method, *Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engrg., London*, Vol. 1, 200–206.
- Tanaka, H., Ritoh, F. and Omukai, N. (2002): Quality of samples retrieved from great depth and its influence on consolidation properties, *Can. Geotech. J.*, **39**(6), 1288–1301.
- Tanaka, H., Udaka, K. and Nosaka, T. (2006): Strain rate dependency of cohesive soils in consolidation settlement, *Soils and Foundations*, **46**(3), 315–322.
- Watabe, Y., Tsuchida, T. and Adachi, K. (2002): Undrained shear strength of Pleistocene clay in Osaka Bay, *J. of Geotech. Geoenv. Engrg., ASCE*, **128**(3), 216–226.
- Watabe, Y., Udaka, K. and Morikawa, Y. (2008): Strain rate effect on long-term consolidation of Osaka bay clay, *Soils and Foundations*, **48**(4), 495–509.
- Watabe, Y. and Noguchi, T. (2011): Site-investigation and geotechnical design of D-runway construction in Tokyo Haneda Airport, *Soils and Foundations*, **51**(6), 1003–1018.
- Watabe, Y. and Leroueil, S. (2012): Modelling and implementation of isotache concept for long-term consolidation behavior, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, A4014006. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)JGM.1943-5622.0000270](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)JGM.1943-5622.0000270)
- Watabe, Y., Sassa, S. and Udaka, K. (2013): Comparative study of long-term consolidation for subsoils under Kansai International Airport and Pisa Tower, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 437–440.
- Yin, J.H., Graham, J., Clark, J.L. and Gao, L. (1994): Modelling unanticipated pore-water pressures in soft clays. *Can. Geotech. J.*, **31**(5), 773–778.
- 渡部要一, 田中政典, 佐々真志, 森川嘉之 (2009a): 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, 港湾空港技術研究所報告, **48**(2), 63–82.
- 渡部要一, 田中政典, 佐々真志, 野口孝俊, 宮田正史 (2009b): 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, 港湾空港技術研究所報告, **48**(2), 103–121.

付録A

勾配 $\alpha$  ( $=\Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}$ )と $C_{ae}/C_c$ の関係

図-A1に示すアイソタック圧縮曲線群の傾きが $C_{ce}$ であることから、距離 $x_\epsilon$ と $x_{\log p}$ は $C_{ce}$ と式(A1)により関連づけられる。

$$\frac{x_\epsilon}{x_{\log p}} = \frac{C_{ce}}{1} \quad (A1)$$

ここで、距離 $x_\epsilon$ と $x_{\log p}$ は以下のように導かれる。まず、ひずみで表現する二次圧密係数 $C_{ae}$ の定義から、対数時間増分 $\Delta \log t$ に対して、ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ は式(A2)により表される。

$$\Delta \epsilon = C_{ae} \cdot \Delta \log t \quad (A2)$$

式(A2)を使うと、ひずみ速度は以下のように算出される。

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{C_{ae} \Delta \log t}{\Delta t} = \frac{C_{ae}}{\ln 10} \cdot \frac{\Delta \ln t}{\Delta t} = \frac{C_{ae}}{2.303} \cdot \frac{1}{t} \quad (A3)$$

式(A3)はひずみ速度が時間に反比例して減少することを意味しており、その時間増分の中に $C_{ae}$ が一定であるならば、経過時間が10倍（すなわち $\Delta \log t = 1$ ）になるとひずみ速度が10分の1になることを意味する。従って、式(A2)から、 $\Delta \epsilon$ （図-A1における距離 $x_\epsilon$ に対応する）は式(A4)に示すように $C_{ae}$ に一致する。

$$x_\epsilon = C_{ae} \quad (A4)$$

図-A1における距離 $x_{\log p}$ はひずみ速度の対数1サイクルあたりの $\log p'_c$ の増分に等しく、式(A5)のように表され、これは、勾配を表すパラメータ $\alpha$ の定義そのものである。

$$x_{\log p} = \frac{\Delta \log p'_c}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \alpha \quad (A5)$$

式(A4)と式(A5)を式(A1)に代入すると、式(A6)が得られる。

$$\frac{C_{ae}}{C_{ce}} = \frac{\Delta \log p'_c}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \alpha \quad (A6)$$

以上により、 $C_{ae}/C_{ce}$ は、勾配を表すパラメータ $\alpha$  ( $=\Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}$ )と数学的に等しいことがわかる。間隙比で表現する二次圧密係数 $C_{ae}$ と圧縮指数 $C_c$ との比 $C_{ae}/C_c$ は、ひずみで表現する二次圧密係数 $C_{ae}$ と圧縮指数 $C_{ce}$ との比 $C_{ae}/C_{ce}$ と等しいことから式(A7)が得られる。

$$\frac{C_{ae}}{C_c} = \frac{C_{ae}}{C_{ce}} = \alpha \quad (A7)$$

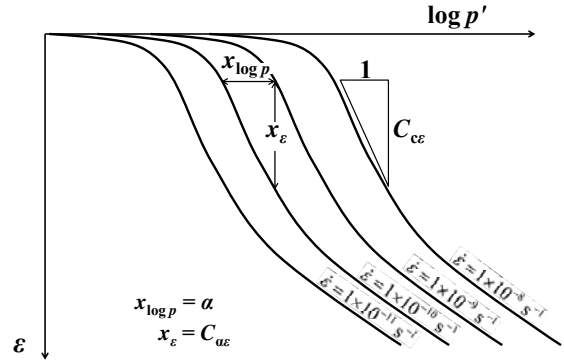


図-A1 勾配 $\alpha$  ( $=\Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}$ )と $C_{ae}/C_c$ の関係



付録B

土の長期圧密試験方法

序文

この試験方法は、JIS A 1217を応用して、土の長期圧密特性を評価する手順をまとめたものである。

1 適用範囲

この試験方法は、飽和した粘性土を対象として、一次的に、かつ、一定の荷重圧力の下で長期的に荷重する際の圧密特性を評価するための試験法である。

2 引用規格

次に掲げる規格は、この試験方法に引用されることによって、この試験方法の一部を構成する。引用規格は、その最新版を適用する。

- JIS A 1202 土粒子の密度試験方法
- JIS A 1203 土の含水比試験方法
- JIS A 1217 土の段階荷重による圧密試験方法
- JIS A 1227 土の定ひずみ速度荷重による圧密試験方法

3 用語及び定義

この試験方法で用いる主な用語及び定義は、次による。

3.1

長期圧密

飽和した粘性土が一定の静的圧密圧力の下で間隙水を徐々に排出して密度増加する圧密過程の長期的な挙動。狭義には、過剰間隙水圧の消散を伴う一次圧密と区別して、過剰間隙水圧が消散した後の二次圧密過程を指すこともある。

3.2

ひずみ速度

沈下ひずみの単位時間あたりの変化で、単位は $s^{-1}$ 。

3.3

長期圧密圧力

長期圧密で作用させる一定の圧密圧力。

3.4

予圧密

長期圧密圧力を荷重する直前まで行う段階荷重による圧密過程。原位置の状態を再現した試験の場合には、小さな圧密圧力から始め、有効土被り圧相当の圧密圧力まで圧密する。

3.5

基準圧縮曲線

JIS A 1227によって求められる連続的な圧縮曲線で、縦軸を粘塑性ひずみ $\varepsilon_{vp}$ 、横軸を有効圧密圧力 $p'$ を圧密降伏応力 $p'_c$ で正規化した値 ( $p'/p'_c$ ) で表したもの。図-B1に示すように、弾性ひずみ $\varepsilon_e$ は $\varepsilon - \log p'$ 曲線上の $(p', \varepsilon) = (1 \text{ kPa}, 0)$ と $(\sigma'_{v0}, \varepsilon_0)$ の2点を通る直線で表されるものと定義し、粘塑性ひずみ $\varepsilon_{vp}$ は全ひずみ $\varepsilon$ から弾性ひずみ $\varepsilon_e$ を差し引いたものと定義する。

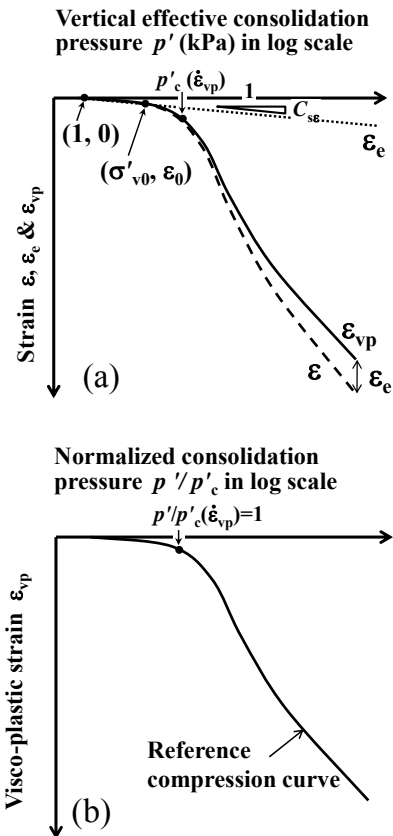


図-B1 圧縮曲線 ( $\varepsilon - \log p'$  曲線)における(a)  $\varepsilon_e$ と $\varepsilon_{vp}$ の定義と(b) 基準圧縮曲線

4 試験装置及び器具

4.1 圧密試験機

圧密試験機は、次のとおりとする。

- a) 圧密容器 JIS A 1217に規定されたもの。
- b) 水浸容器 JIS A 1217に規定されたもの。
- c) 荷重装置 JIS A 1217に規定されたもの。

注記 各荷重段階の圧力変動を小さくできるので、重錘レバー式を使うことが望ましい。必要とする圧密圧力に相当する重錘がない場合には、鉛散弾などを小袋に入れて重錘の上に乗せ重さを調整する。

- d) 変位計 JIS A 1217に規定されている変位計よりも

精度の高いものが必要で、変位計は、0.001mmまで測定できるものを標準とする。ダイヤルゲージ又はこれと同等以上の性能をもつ電気式変位計を用いる。

**注記** 安定した計測結果が得られる変位計として、リニアゲージの利用が望ましく、豊富な利用実績がある。

#### 4.2 供試体作製器具

供試体作製器具は、次のとおりとする。

- a) トリマー JIS A 1217に規定されたもの。
- b) カッターリング JIS A 1217に規定されたもの。
- c) 供試体押し込み円板 JIS A 1217に規定されたもの。
- d) ワイヤソー JIS A 1217に規定されたもの。
- e) 直ナイフ JIS A 1217に規定されたもの。
- f) ナイフ

#### 4.3 その他の器具

その他の器具は、次による。

- a) はかり JIS A 1217に規定されたもの。
- b) ノギス JIS A 1217に規定されたもの。
- c) 含水比測定器具 JIS A 1203の4（試験器具）に規定されたもの。
- d) 時計 JIS A 1217に規定されたもの。
- e) 最高最低温度計 JIS A 1217に規定されたもの。
- f) シリコンオイル又はシリコングリース JIS A 1217に規定されたもの。

### 5 供試体の作製

#### 5.1 供試体の形状と寸法

供試体の形状と寸法は、JIS A 1217に規定されたものとする。直径6cm、高さ2cmを標準とする。

#### 5.2 供試体の成型

供試体の成型は、JIS A 1217に規定された方法で行う。

**注記 1** 供試体の成型において記録する値は、圧密リングの質量 $m_R$  (g) と高さ $H_0$  (cm) 及び内径 $D$  (cm)、圧密リングに供試体を入れた状態の質量 $m_T$  (g)、試料の削りくずの代表的部分からJIS A 1203によって求めた初期含水比 $w_0$  (%), 初期飽和度 $S_{i0}$  (%), 供試体の実質高さ $H_s$  (cm) である。

**注記 2** 初期飽和度 $S_{i0}$  (%) の計算には、水の密度 $\rho_w$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) とJIS A 1202によって求めた土粒子の密度 $\rho_s$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 供試体の実質高さ $H_s$  (cm) の計算にはJIS A 1202によって求めた土粒子の密度 $\rho_s$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) が必要である。

### 6 試験方法

#### 6.1 準備

準備は、JIS A 1217の規定による。

**注記 7** 計算で必用となる基準圧縮曲線をJIS A 1227により別途求めておく必要がある。

#### 6.2 予圧密

予圧密過程における荷重の載荷及び圧密量の測定は、JIS A 1217に準じて載荷と測定を行う。荷重増分比が1となることを基本とし、最終予圧密圧力までに3段階以上の荷重段階となるように段階載荷する圧密圧力を設定する。載荷時間は1荷重段階あたり24時間を基本とするが、最終予圧密圧力では7日間載荷する。

**注記 1** 長期圧密試験で推奨される重錘レバー式の圧密試験機の場合、設定した圧密圧力を載荷できるように重錘を組み合わせたり、小袋に入れた鉛散弾等を載せたりして、荷重増分比が0.75～1.5の範囲となるように調整して載荷する。

**注記 2** 原位置の状態を再現した試験の場合、予圧密過程は過圧密領域での載荷になるので沈下量がわずかであることから、各載荷段階の圧密量と時間との関係を描き、圧密の進行状況を確認するだけでよい。荷重段階ごとに、縦軸に変位計の読み $d$  (mm) を算術目盛に、横軸に経過時間 $t$  (min) を平方根目盛にとって $d-\sqrt{t}$ 曲線を描く。最終予圧密圧力では、縦軸に変位計の読み $d$  (mm) を算術目盛に、横軸に経過時間 $t$  (min) を対数目盛にとって $d-\log t$ 曲線を描く。

#### 6.3 長期圧密

長期圧密は次による。

- a) 最終予圧密圧力から長期圧密圧力まで1つの荷重段階として載荷する。
- b) 圧密圧力は、衝撃を与えないように短時間に載荷した後、ひずみ速度が十分小さくなるまで長期間にわたって一定に保つ。

**注記 1** 載荷に要する時間はJIS A 1217による。

**注記 2** 同一の性質を有する複数の供試体を準備し、同一過程で予圧密を行った後、それぞれの供試体に対して異なる長期圧密圧力を載荷することが望ましい。

**注記 3** 同一の性質を有する複数の供試体を準備し、同一過程で予圧密を行った後、それぞれの供試体に対して異なる長期圧密圧力を載荷することが望ましい。

- c) 長期圧密圧力の載荷直前の変位計の読み $d_i$  (mm) を記録する。

- d) 変位計の読み $d$  (mm) は、圧密度—時間の関係を滑らかな曲線で描くことのできるような経過時間ごとに記録する。

**注記** 変位計の読みを測定するときの経過時間の例として、下記の時間を参考にする。

3s, 6s, 9s, 12s, 18s, 30s, 42s, 1min, 1.5min, 2min, 3min, 5min, 7min, 10min, 15min, 20min, 30min, 40min, 1h, 1.5h, 2h, 3h, 6h, 9h, 12h, 18h, 24h, 30, 36h, 48h, 3d, 4d, 5d, 7d, 10d, 15d, 20d, 25d, 30d, 以降5日ごと

- e) 連続する2回の計測結果ごとに、計測時間間隔 $\Delta t$  (s)、変位計の読みの変化 $\Delta d$  (mm) を使って次式によりひずみ速度 $\dot{\epsilon}$  ( $s^{-1}$ ) を算出する。

$$\dot{\epsilon} = \frac{(\Delta d / d_i)}{\Delta t}$$

ひずみ速度が $3.3 \times 10^{-9} s^{-1}$ より小さくなったことを確認した後に荷重試験を終了する。

- f) 長期圧密圧力の荷重開始から最終荷重段階の測定終了に至る間の最高および最低室温を記録する。

**注記** 試験は温度変化が $\pm 2^\circ C$ 以下になるように管理された室内で実施することが望ましい。

### 6.3 解体

JIS A 1217の規定による。

## 7 計算

### 7.1 供試体の初期状態

初期状態の供試体の含水比 $w_0$  (%), 間隙比 $e_0$ 及び飽和度 $S_{r0}$  (%) は、JIS A 1217の規定により算出する。

### 7.2 圧密度—時間の関係

#### 7.2.1 各荷重段階の圧密度と時間との関係

- a) 予圧密及び長期圧密の各荷重段階における圧密度と時間との関係は、JIS A 1217に規定された手順で整理し、理論圧密度0%に当たる変位計の読み $d_0$  (mm), 理論圧密度100%に当たる変位計の読み $d_{100}$  (mm) 及び理論圧密度90%に当たる時間 $t_{90}$  (min), 又は理論圧密度50%に当たる時間 $t_{50}$  (min) を求める。

**注記** 過圧密領域での予圧密の荷重段階では、 $d_0$ ,  $d_{100}$ ,  $t_{90}$ 又は $t_{50}$ を強いて求める必要はない。

**注記**  $d-\sqrt{t}$ 曲線及び $d-\log t$ 曲線を描いて、圧密の進行状況を確認する。 $d-\sqrt{t}$ 曲線は24時間まで、 $d-\log t$ 曲線はその荷重段階終了時間までの曲線を描く。

#### 7.2.2 各荷重段階の圧密度, 供試体高さ及び平均供試体高さ

各荷重段階において、荷重直前の供試体高さ $H'$ , 圧密

終了時の供試体高さ $H$  (cm), 圧密度 $\Delta H$  (cm) 及び平均供試体高さ $\bar{H}$  (cm) は、JIS A 1217に規定された手順で求める。

### 7.2.3 各荷重段階の圧密係数

- a) 7.2.1で、 $t_{90}$ 又は $t_{50}$ を求めた場合には、各荷重段階の圧密係数 $c_v$  ( $cm^2/d$ ) は、JIS A 1217に規定された方法によって算出する。
- b) 縦軸に $c_v$ を対数目盛に、横軸に次の式で求めた平均圧密圧力 $\bar{p}$  ( $kN/m^2$ ) を対数目盛にとつて $\log c_v$ と $\log \bar{p}$ の関係を示す。

**注記** 平均圧密圧力 $\bar{p}$  ( $kN/m^2$ ) は、各荷重段階の圧密圧力 $p$  ( $kN/m^2$ ) と荷重直前の圧密圧力 $p'$  ( $kN/m^2$ ) との相乗平均とする。但し、第1荷重段階の $\bar{p}$ は $p/2$ とする。

## 7.3 圧密度と圧力との関係

### 7.3.1 圧縮曲線, 圧縮指数及び圧密降伏応力

圧縮曲線, 圧縮指数及び圧密降伏応力は、次の手順で求める。

- a) 各荷重段階の圧密終了時と24時間経過時の間隙比 $e$ は、次の式によって算出する。

$$e = \frac{H}{H_s} - 1$$

- b) 縦軸にa)で求めた間隙比 $e$ を算術目盛に、横軸にその荷重段階の圧密圧力 $p$ ( $kN/m^2$ )を対数目盛にとつてプロットし、24時間経過時のプロットを使って圧縮曲線を描く。

**注記 1** 圧縮曲線は、 $e$ のかわりに次の式によって算出する体積比 $f$ で描いてもよい。

$$f = \frac{H}{H_s}$$

**注記 2** 各荷重段階の圧密終了時と24時間経過時が異なる場合、圧密終了時の間隙比は参考値としてプロットし、荷重時間を明示する。

**注記 3** 長期圧密試験では、荷重段階が少ないため、JIS A 1217に規定されている圧縮指数 $C_c$ , 圧密降伏応力 $p_c$  ( $kN/m^2$ ), 体積圧縮係数 $m_v$  ( $m^2/kN$ ) を算出する必要はない。

### 7.4 長期圧密特性

#### 7.4.1 基準圧縮曲線

JIS A 1227により得られた間隙比 $e$ と有効圧密圧力 $p'$ の関係から基準圧縮曲線を求める。

- a) 間隙比 $e$ を次式によりひずみ $\epsilon$ に換算する。

$$\epsilon = \frac{e - e_0}{1 + e_0}$$

- b) 3.5 基準圧縮曲線の定義により、ひずみ $\epsilon$ から弾性

ひずみ $\varepsilon_e$ を差し引いて粘塑性ひずみ $\varepsilon_{vp}$ を求めたものと、有効圧密圧力 $p'$ を圧密降伏応力 $p'_c$ で除した正規化圧密圧力 $p'/p'_c$ の関係を基準圧縮曲線として描く。

#### 7.4.2 ひずみ速度の計算

ひずみ速度は以下により求める。

- 7.2.1で描いた長期圧密载荷の圧密量と時間の関係 ( $d-\log t$  曲線) をひずみと時間の関係 ( $\varepsilon-\log t$  曲線) として描き直す。
- 沈下計の読みが理論圧密度100%に当たる変位計の読み $d_{100}$ を超えたあるひずみ速度を基準として、ひずみ速度が10分の1になるごとに対応する点を着目点として $\varepsilon-\log t$  曲線上に示す (図-B2参照)。これにより、圧密圧力 $p$ 、ひずみ $\varepsilon$ 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ の複数の組み合わせを求める。

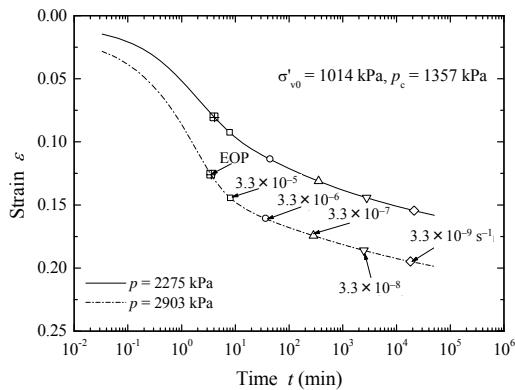


図-B2 ひずみと時間の関係 ( $\varepsilon-\log t$  曲線) と着目するひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ に対応する点の例。この例では有効土被り圧1014kPa、圧密降伏応力1357kPaの試料に対して、予圧密圧力を有効土被り圧としてから長期圧密圧力2275kPaと2903kPaを载荷した試験をそれぞれ実施している。

**注記** 一次圧密終了後の着目するひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は、基準圧縮曲線を求めるために実施した定ひずみ速度载荷による圧密試験 (JIS A 1227) で設定したひずみ速度を含むようにする。着目するひずみ速度として、以下を参考にする。

$1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

- b)で求めた $p$ 、 $\varepsilon$ 、 $\dot{\varepsilon}$ の組み合わせについて、**3.5 基準圧縮曲線**の定義により、ひずみ $\varepsilon$ から弾性ひずみ $\varepsilon_e$ を差し引いて粘塑性ひずみ $\varepsilon_{vp}$ を求め、 $p$ 、 $\varepsilon_{vp}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ の組み合わせに書き換える。

#### 7.4.3 圧密降伏応力のひずみ速度依存性

7.4.2で求めた複数の $p$ 、 $\varepsilon_{vp}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ の組み合わせと基準圧縮曲線を使って、以下により圧密降伏応力とひずみ速度

の関係を求める。

- $p$ 、 $\varepsilon_{vp}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ の組み合わせを粘塑性ひずみ $\varepsilon_{vp}$ と正規化した圧密圧力 $p'$ との関係としてプロットする。
- $p$ 、 $\varepsilon_{vp}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ のプロットに対しひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ ごとに基準圧縮曲線をフィッティングさせ、それぞれの圧密降伏応力 $p'_c$ を読み取る (図-B3)。特に、ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に対応した圧密降伏応力を $p'_{c0}$ と定義する。

**注記 1** ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ は、JIS A 1217の段階载荷による圧密試験において得られる24時間载荷後のひずみ速度の経験的な値である。対象とする土のひずみ速度がこれと著しく異なる場合には、試験から得られたひずみ速度の値を用いることが望ましい。

**注記 2** ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ を着目するひずみ速度としなかった場合など、 $p'_{c0}$ を直接読み取れない場合には、前後のひずみ速度に対して読み取った圧密降伏応力 $p'_c$ の間隔を按分して $p'_{c0}$ を読み取る。

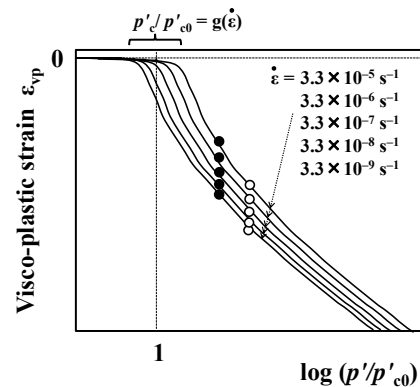


図-B3 ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ ごとの $p$ 、 $\varepsilon_{vp}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ のプロットに対する基準圧縮曲線のフィッティング。この図では横軸をひずみ速度 $3.3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のときの圧密降伏応力 $p'_{c0}$ で正規化しているが、正規化せずに $p'$ をそのままプロットしてもよい。

- 正規化圧密降伏応力 $p'/p'_{c0}$ とひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ との関係をプロットし、次式をフィッティングさせ、アイソタックパラメータ $c_1$ 、 $c_2$ 、 $p'_{cl}$ を決定する (図-B4参照)。

$$\ln \frac{p' - p'_{cl}}{p'_{cl}} = c_1 + c_2 \ln \dot{\varepsilon}_{vp}$$

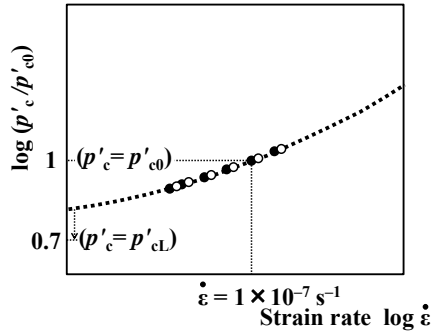


図-B4  $\log(p'_c/p'_{c0})$ と $\dot{\epsilon}$ の関係と近似曲線

**注記 1** 上式は $p'_{cL}$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ の3つのパラメータを有しており, 1つパラメータを仮定して, 残りの2つのパラメータを最小自乗法により設定し, もっとも相関が高い組み合わせを近似曲線とする. このとき,  $p'_c$ の下限値である $p'_{cL}$ を仮定すると,  $c_1$ と $c_2$ を設定しやすい.

**注記 2** 近似曲線は, ひずみ速度 $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ,  $p'_c/p'_{c0}=1$ で表される点を通ることから, 上式の3つのパラメータのうちの任意の1つのパラメータは, 他の2つのパラメータの従属変数となる.

**注記 3** ひずみ速度が無限小となったときの $p'_c$ の下限値である $p'_{cL}$ を限られたデータから設定することは難しいため, 既往の研究成果として得られている汎用的な値として $p'_{cL}/p'_{c0}=0.70$ を仮定して良い. この場合,  $c_1$ を最小自乗法によって設定すると $c_2$ は次式により設定される.

$$c_2 = \frac{\ln \frac{p'_c - p'_{cL}}{p'_{cL}} - c_1}{\ln \dot{\epsilon}_{vp}} = \frac{\ln \frac{1 - 0.70}{0.70} - c_1}{\ln 1.0 \times 10^{-7}}$$

**注記 4** 既往の研究に基づいた一般的な値として,  $p'_{cL}/p'_{c0}=0.70$ ,  $c_1=0.935$ ,  $c_2=0.107$ が得られており, 正規化圧密降伏応力 $p'_c/p'_{c0}$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係において, 実験結果に基づいて求めた近似曲線と既往の研究に基づいた近似曲線とを比較することによって, 圧密挙動におけるひずみ速度依存性を評価することができる.

## 8 報告

試験結果については, 次の事項を報告する.

- a) 供試体の直径及び初期高さ
- b) 供試体の初期状態の含水比, 間隙比又は体積比及び飽和度
- c) 各载荷段階の圧密量-時間曲線
- d) 最終予圧密圧力とその载荷時間
- e) 長期圧密圧力とその载荷時間
- f) 基準圧縮曲線
- g) 正規化圧密降伏応力 $p'_c/p'_{c0}$ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ との関係図
- h) アイソタックパラメータ $p'_{cL}/p'_{c0}$ ,  $c_1$ ,  $c_2$
- i) 長期圧密試験期間中の最高及び最低室温
- j) その他報告事項

**注記** その他の報告事項の例として, 次の項目がある.

- a) 試料及び供試体の作製方法
- b) 供試体の状態, 貝殻片及び粗大粒子の混入状態

港湾空港技術研究所報告 第54巻第1号

2015. 3

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 株式会社 大 應

Copyright © (2015) 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

1. Interpretation of long-term consolidation behavior of worldwide clays on the basis of the isotache concept  
.....Yoichi, WATABE, Takashi KANEKO ..... 3