

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)

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***

要 旨

ひずみ速度効果に着目してアイソタック概念を取り入れた粘土の圧密特性に関する研究が、多くの研究者によってなされてきた。これらの研究の多くは、長期圧密に関する予測精度の向上を目指したものである。本研究では、関西国際空港の長期的な圧密沈下挙動の予測精度向上を目指しており、その第一段階として、関西国際空港海底粘土の長期圧密特性をアイソタック概念に基づいて整理した。ここでは、アイソタック概念を圧縮曲線ならびに圧密降伏応力とひずみ速度の関係によって単純化したモデルを新たに提案する。圧縮曲線については、定ひずみ速度圧密試験によって簡単に求められる。また、後者の関係については、長期圧密試験から得ることができ、同関係は 3 つのアイソタックパラメータを取り入れた単純な関係式で表される。提案モデルは、最も試験数が少ない場合を考えると、定ひずみ速度圧密試験と長期圧密試験をわずか 1 ケースずつ実施すれば良く、実用的である。関西国際空港建設地の海底からさまざまな深度で採取した粘土に対して、3 つのアイソタックパラメータはそれぞれ共通の値を設定できることが明らかとなった。

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・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

*** 地盤・構造部地盤研究領域地盤改良研究チームリーダー（元 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

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 MORIKAWA***

Synopsis

The consolidation characteristics of clay, based on the isotache concept in which the strain rate effect is considered, have been studied by many researchers. Most of these studies are aimed at calculating the secondary consolidation with high accuracy in order to evaluate the long-term settlement of large structures. In this study, as the first step toward improving the accuracy of the evaluation of the long-term settlement at the Kansai International Airport, the consolidation characteristics of Osaka Bay clay are examined and organized based on the isotache concept. This study proposes a simplified model based on the isotache concept by using a compression curve and the relationship between the consolidation yield stress and the strain rate. The former and the latter are obtained from the 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. This model is very practical because it requires a minimum of only one CRS test and one LT test. It is widely applicable to the Osaka Bay clay. The isotache parameters used in this model can be commonly determined for the Osaka Bay clays retrieved from various depths at the Kansai International Airport.

Key Words: long-term consolidation, secondary consolidation, isotache, strain rate, 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

*** Head of Group, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department (Formerly Kansai International Airport Co., Ltd.)

**** Oyo Corporation

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	63
1. はじめに	67
2. アイソタックの整理方法	68
2.1 基本概念	68
2.2 アイソタックモデル式	69
3. 試料	70
4. 試験内容	71
4.1 定ひずみ速度圧密試験 (CRS圧密試験)	71
4.2 長期圧密試験 (LT圧密試験)	72
5. 試験結果	73
5.1 定ひずみ速度圧密試験 (CRS圧密試験)	73
5.2 長期圧密試験 (LT圧密試験)	74
6. アイソタック概念による結果の整理	75
7. まとめ	81
謝辞	81
記号	81
参考文献	82

1. はじめに

関西国際空港が立地する大阪湾泉州沖は、水深が深く、粘土層が厚く堆積している。上部の軟弱な沖積粘土層については、サンドドレーンにより圧密促進が図られるなど、沈下に関する制御が可能である。しかし、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更新世の粘土に起因するため、制御することができない。このため、沈下挙動を「予測」することが極めて重要になる。

1994年9月に開港した関西国際空港 I 期事業は、大阪湾泉州沖5kmの海域に造成された約510haの人工島である。建設海域の平均水深は18mで、空港島埋立てによる圧密圧力増分が最大450kPa程度にも達した。さらに沖合に約545haの人工島を埋め立てて、平行滑走路を建設する II 期事業も進められ、滑走路と誘導路は2007年8月にオープンした(写真-1)。対象海域は平均水深が19.5mもあり、海底には I 期よりもさらに厚い400mほどの粘土層が幾つかの砂層と互層をなして堆積する。埋立てによる圧密圧力増分は最大600kPaにも達した。



写真-1 関西国際空港。

空港施設の特徴はその平面性にあり、長期沈下は施設管理の上で最も重要な課題に位置づけられる。関西国際空港の圧密沈下予測では、データベース化された地盤情報を用いて、一次元弾塑性圧密解析が実施された。長期圧密挙動の予測計算には、圧密降伏応力付近での二次圧密係数 C_{α} が用いられた。

近年、長期沈下予測のためには、二次圧密を精度良く評価する必要があるとして、圧縮特性に表れるひずみ速度の影響に着目したアイソタック概念を取り入れた研究も進んでいる(Leroueil, 2006)。本研究では、関西国際空港の長期圧密に関する予測精度向上に向けた研究の第一歩として、関西国際空港海底粘土の圧密特性について、

アイソタック概念に基づいた考察・整理を行う。

関西国際空港の粘土地盤の特性については、これまでに様々な研究がなされてきた。関西国際空港建設予定地(当時)の海底地盤調査では、港研式ワイヤーライン方式によって、水圧式固定ピストン式シンウォールサンプラー、あるいはやや深いところではロータリー式二重管サンプラー(デニソンサンプラー)による効率的な粘土試料採取が行われた(Kanda et al. 1991; 堀江ら, 1984)。サンプリングされた粘土試料は乱れがほとんどない高品質なものであったことも確認されている(Watabe and Tsuchida, 2001a)。粘土試料の不均質性については、大深度用に試作・実施された電気式静的コーン貫入試験によって深度方向に連続的なデータを得ても先端抵抗が著しくばらつくことがTanaka et al. (2003)によって示されている。一方、Watabe et al. (2007)は、長さ1mの試料に対して深度25mmごとに細かいピッチで物理試験や定ひずみ速度(CRS)圧密試験を実施することを通じて、変動係数はいずれのパラメータについても0.1未満であり、ある深度の試験結果は、前後1m程度の範囲を代表する試験結果と見なせる程度には均質であることを示した。当該粘土には珪藻微化石が多く含まれることが特徴であり、圧縮特性やせん断特性が珪藻微化石の存在と密接に関係していることも示されている(Tanaka and Locat, 1999)。その他、 K_0 圧密特性(Watabe et al. 2003)や非排水せん断特性(Watabe et al. 2002; Watabe and Tsuchida, 2001)についてとりまとめた研究も報告されている。空港島の沈下予測に関連しては、Nakase (1987), Akai (2000), Mimura and Jang (2005)等の研究があり、最近ではKobayashi et al. (2005)が粘土層について実施する鉛直方向の一次元圧密解析と砂層について実施する二次元浸透流解析を連成させて解く合理的解析手法を開発した。

圧密予測の実務や研究において、次に挙げる3つのアプローチが主要なものとして挙げられる。

- ①Terzaghiの一次元圧密理論と C_{α} 一定の組合せ
- ②EOP (end of primary) 概念 (Mesri and Choi, 1985) と C_{α}/C_{α} 一定概念 (Mesri and Castro, 1987)
- ③アイソタック (Isotache) 概念 (Šuklje, 1957)

ここで、ひずみで表した二次圧密係数を $C_{\alpha e}$ とする。①のアプローチは、実務で最も広く使われている手法である。一次圧密終了後、二次圧密によるひずみは載荷開始からの経過時間の対数($\log t$)に対して直線的に生じるとして扱う。二次圧密期間中の時間の対数1サイクルあたりに生じるひずみ増分を二次圧縮係数 $C_{\alpha e}$ とし(図-1)、これが一定であると仮定して長期沈下を予測する。日本では、実務における長期圧密の実測値とのフィッティングは、

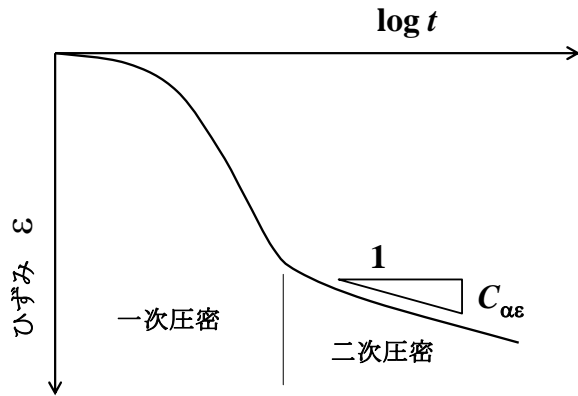


図-1 圧縮曲線に見られる一次圧密と二次圧密

双曲線近似も行われている。この方法は、収束性のみを利用した経験に基づくフィッティングに頼っており、非科学的なものである。関空の沈下予測は、非科学的な「双曲線近似」ではないが、段階載荷圧密試験 (JIS A 1217) の結果に基づいて、もっとも一般的な方法として位置づけられる①が基本になっている。

②は明快なコンセプトであり、実務でも使いやすい。Mesri and Choi (1985)は、段階載荷圧密試験で、EOP (一次圧密終了時) の沈下データを連ねた圧縮曲線から得られる圧密降伏応力は、原位置でも試験室でも一致することを経験的に見出した。さらに、Mesri and Castro (1987)の C_{α}/C_c 一定の概念は、 $\varepsilon \sim \log p$ がクリープによって載荷継続時間に応じて下方にシフトしていくこと (Bjerrum (1967)の遅延圧密) を併用して二次圧密を表現する。ただし、「ひずみ速度」ではなく「時間」そのものが陽なたちで取り入れられているので、この意味では①と本質的に同じである。 C_{α}/C_c 一定の概念は、アイソタック概念と矛盾するものではないが、二次圧密が永遠に終わらず、時間が無限に経過すれば沈下量が無限大になることを意味しているため、適用には限界があるはずである。なお、Leroueil (2006)は、過圧密比OCRが1.6以上の過圧密粘土の場合に、試験室にてEOPによって定義される圧密降伏応力が、実際の圧密降伏応力よりも著しく過大評価になったことを指摘し、EOP概念の一般性を否定している。

③はŠuklje (1957)によって提案された粘性の影響に関する概念であり、ある圧密圧力の下ではひずみ速度に応じてひずみが唯一に決定されるとする。ひずみ速度に着目したこの概念は、近年の圧密研究において関心が高まっている。アイソタック概念が示されたŠuklje (1957)の研究は50年以上前と非常に古いですが、実務で用いられるにはほど遠く、未だに研究対象となる概念に留まっている。長期圧密に関して、粘性を考慮した研究アプローチは、Leroueil et al. (1986; 1988), Yin et al. (1994), Adachi et al.

(1996), Kim and Leroueil (2001)を始め、多くの研究者によって取り組まれてきた。関西国際空港海底粘土の長期沈下に関しても、アイソタック概念を適用できることが明らかにされてきており、Imai et al. (2005)やTanaka, et al. (2006)の研究などがある。

本論文では、長期圧密沈下挙動に着目し、関西国際空港海底粘土のひずみ速度依存性について、アイソタック概念に基づいた整理法を提案する。また、これを適用することによって、圧密挙動を支配するパラメータをとりまとめる。 C_{α}/C_c 一定概念の適用性 (適用可能範囲) についても検討する。ただし、層厚が圧密挙動に及ぼす影響については本研究の発展形として別の機会に検討することにし、EOP概念の妥当性については本論文では着目しない。

2. アイソタックの整理方法

2.1 基本概念

本論文において③のアイソタック概念を整理するにあたっては、シンプルな形で示されているLeroueil et al. (1985)の方法、すなわち、次に示す式(1)と式(2)を使う。

$$\frac{p'}{p'_c} = f(\varepsilon) \quad (1)$$

$$p'_c = g(\dot{\varepsilon}) \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度 ($=d\varepsilon/dt$) である。

アイソタック概念は、粘塑性変形に対してのみ適用できることから、全体の変形から弾性変形分を差し引いて適用される。このことを明示するために、圧密試験から得られるひずみ ε から弾性ひずみ成分 ε_e を差し引いて粘塑性ひずみ ε_{vp} を算出し、 $\varepsilon_{vp} \sim \log p'$ 関係を使うことにする。すなわち、本論文では式(3)、式(4)、式(5)の表現を適用する。

$$\varepsilon_{vp} = \varepsilon - \varepsilon_e \quad (3)$$

$$\frac{p'}{p'_c} = f(\varepsilon_{vp}) \quad (4)$$

$$p'_c = g(\dot{\varepsilon}_{vp}) \quad (5)$$

弾性ひずみ成分 ε_e は、 $\varepsilon \sim \log p'$ 関係上で、 $(p', \varepsilon) = (1 \text{ kPa}, 0)$ と $(\sigma'_{v0}, \varepsilon_0)$ を通る直線で表されるひずみ成分を圧密圧力 p' に対応する弾性ひずみ $\varepsilon_e(p)$ と定義し (図-2(a))、その直線の傾きを C_{se} と表すことにする。ここで、 σ'_{v0} は有効土被

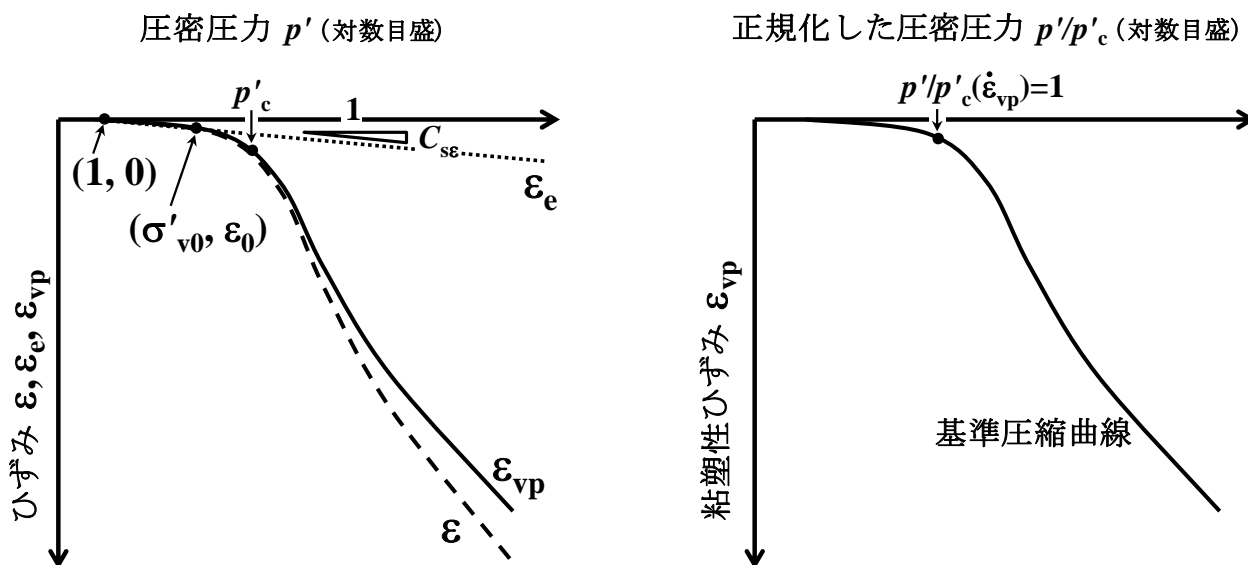


図-2 圧縮曲線: (a)弾性ひずみ ϵ_e と粘塑性ひずみ ϵ_{vp} の定義, (b)基準圧縮曲線

り圧, ϵ_0 は $p=\sigma'_{v0}$ のときのひずみである. C_{se} は, ひずみで表した膨張指数に相当する. CRS圧密試験の結果として得られる $\epsilon \sim \log p'$ 関係に対して, 弾性ひずみ ϵ_e を ϵ から差し引いた粘塑性ひずみ ϵ_{vp} を用いて $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 関係を得る. 同関係から読み取れる圧密降伏応力 p'_c で p' を除すことにより, 式(4)に対応する $\epsilon_{vp} \sim \log p'/p'_c$ 関係を得る. これを基準圧縮曲線と称することにする (図-2(b)). 基準圧縮曲線を粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応した圧密降伏応力 $p'_c(\dot{\epsilon}_{vp})$ 倍することによって, 任意の粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応した $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 関係が得られる.

長期圧密試験では, 後述するように間隙水圧 u を計測していないので有効応力 p' は得られないが, 本論文で扱う二次圧密の挙動については実質的に過剰間隙水圧 $\Delta u=0$, すなわち $p'=p$ と見なすことができる. このため $\dot{\epsilon}$ は $\dot{\epsilon}_{vp}$ に実質的に一致する. 以下では混乱を避けるため, $\dot{\epsilon}$ と $\dot{\epsilon}_{vp}$ が実質的に一致する場合には $\dot{\epsilon}$ を $\dot{\epsilon}_{vp}$, $\Delta u=0$ で $p=p'$ のときには p を p' と記述することにする.

長期圧密試験から得られる $\epsilon \sim \log t$ 曲線 (圧密曲線) の二次圧密部分において $\dot{\epsilon}_{vp}$ を算出し, $\epsilon_{vp}=f(p', \dot{\epsilon}_{vp})$ を求める. ある $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応する幾つかの (p', ϵ_{vp}) に対して基準圧縮曲線上の ϵ_{vp} に対応する p'/p'_c を読み取り, p' を用いて p'_c を得る. 同様の操作を幾つかの $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対して行い, $p'_c \sim \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係を得る.

長期圧密試験から得られた $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応する幾つかの (p', ϵ_{vp}) に対して, CRS圧密試験から得られた基準圧縮曲線ではうまく表現できないものもあった. 長期圧密試験に用いた供試体とCRS圧密試験に用いた供試体はできるだけ近い深度のものを選出するよう務めたが, 自然堆積粘土

を対象としているために, 実際には物性が少し異なる試料になっていたことが原因と考えられる. そこで, このようなケースでは, 基準圧縮曲線を粘塑性ひずみ ϵ_{vp} 方向に伸縮させてフィッティングすることを試みた.

2.2 アイソタックモデル式

式(5)に対応する $p'_c \sim \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係を数学モデルで記述することを以下で考える. アイソタック概念について, 既往の知見を概観すると以下のように整理される.

Leroueil (2006)は, カナダ東部の粘土に関する独自データに加え, Imai et al. (2005)によって示された関西国際空港海底粘土のデータを引用し, $\log \dot{\epsilon}_{vp}$ の低下とともに $\log p'_c$ が直線的に減少するのではなく, ある程度より $\dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなると p'_c の低下が鈍る, すなわち, $\dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなると傾き $\alpha = \Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなることを主張した.

Tanaka (2005)は $p'_c \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係が直線関係にあるとして関西国際空港海底粘土の圧密データを整理した. この場合, アイソタック概念が導入されているものの, $\dot{\epsilon}_{vp} \rightarrow 0$ になると $p'_c \rightarrow 0$ となるようにモデル化されており, 時間の対数に対して圧密が永遠に止まらないなど, 長期挙動としては非現実的な記述とならざるを得ない.

大向・今井 (2006) は, $\dot{\epsilon}_{vp} > 1.0 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ の範囲において, $\dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなると $\alpha = \Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなるようなアイソタック概念のモデル化をした. ただし, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が非常に小さな範囲 ($\dot{\epsilon}_{vp} < 1.0 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$) になると, $p'_c(\dot{\epsilon}_{vp})$ が一定値になることを示した. このような関係は, 吉國ら (1994) が提案したリラクゼーション試験とその解釈を関西国際空港海底粘土に対して適用する

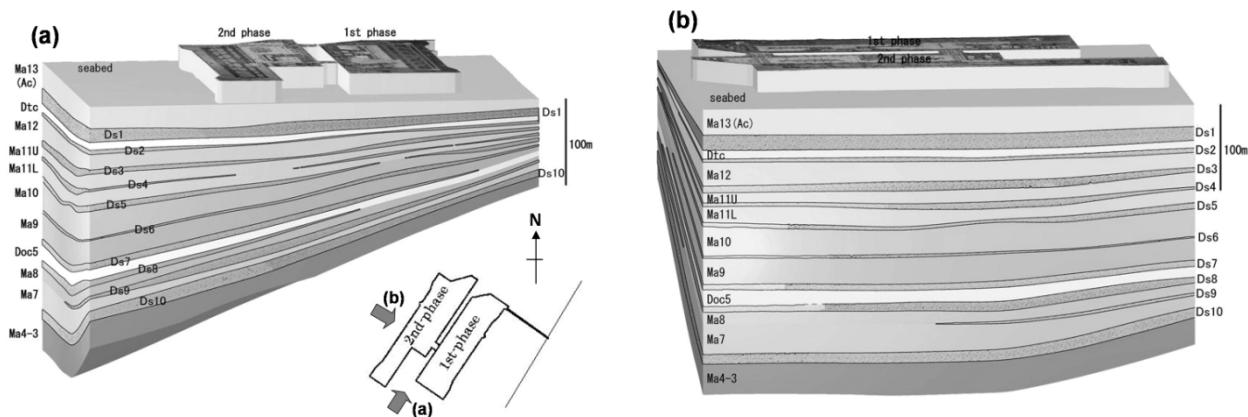


図-3 関西国際空港の地層構成: (a) 岸沖断面, (b) 沿岸断面

ことよって、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の減少に伴う p'_c の下限値を $0.7 \times p'_{c0}$ であると設定した。ここで、 p'_{c0} は $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ に対応した p'_c である。しかしながら、このように $\dot{\epsilon}_{vp} < 1.0 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ の範囲で p'_c が下限値で一定になると設定する場合、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が決まると $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ の位置、すなわち p'_c が決まるが、逆に $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ の位置、すなわち p'_c が決まっても $\dot{\epsilon}_{vp}$ が唯一に決まらないので、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ と $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ の位置、すなわち $\dot{\epsilon}_{vp}$ と p'_c が一对一に対応しない。この点において、アイソタック概念とやや反するモデル化になっているといえるであろう。

筆者らは、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなると $\alpha = \Delta \log p'_c / \Delta \log \dot{\epsilon}_{vp}$ が小さくなる関係を採用し、次に示す2つのモデル式を検討してきた (Kobayashi et al. 2005)。一つめのモデル式は次式によって表される。

$$\ln p'_c = a_1 + a_2 \ln \dot{\epsilon}_{vp} \quad (6)$$

ここで a_1 と a_2 は定数である。式(6)は $\log p'_c$ と $\log \dot{\epsilon}_{vp}$ が直線関係にあるとしてモデル化しているため、 $\dot{\epsilon}_{vp} \rightarrow 0$ になると $p'_c \rightarrow 0$ となるモデルであり、非現実的ではある。ただし、上述した $p'_c \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係が直線とするモデル (Tanaka, 2005) に比べ、式(6)では $\log p'_c \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係が直線になるとしてモデル化しており、 p'_c の減少が緩やかなのでやや改善されている。もう一つのモデル式は次式によって表される。

$$p'_c = p'_{cl} + b_1 \exp(b_2 \ln \dot{\epsilon}_{vp}) \quad (7)$$

ここで b_1 と b_2 は定数、 p'_{cl} は p'_c の下限値である。式(7)では、 $\dot{\epsilon}_{vp} \rightarrow 0$ になると $p'_c \rightarrow p'_{cl}$ に収束するように p'_c の下限値を設定している。本論文では、式(7)の表現を改めた式(8)を新たにアイソタックモデル式として提案する。

$$\ln \frac{p'_c - p'_{cl}}{p'_{cl}} = c_1 + c_2 \ln \dot{\epsilon}_{vp} \quad (8)$$

ここで c_1 と c_2 は定数である。なお、式(8)は対数内を無次元化しているが、次に示す無次元化しない式(9)と等価である。

$$\ln(p'_c - p'_{cl}) = c'_1 + c'_2 \ln \dot{\epsilon}_{vp} \quad (9)$$

ここで c'_1 と c'_2 は定数である。式(8)と式(9)を比較すると、 $c'_1 = c_1 + \ln p'_{cl}$ なる関係があり、 c'_1 は p'_{cl} と独立ではないことがわかる。 c'_1 と p'_{cl} は式(10)で関連づけられる。

$$c'_1 = c_1 + \ln p'_{cl} \quad (10)$$

式(8)では $p'_{cl} \rightarrow 0$ のとき $c_1 \rightarrow \infty$ として記述されるため式の構造がやや複雑に見えるが、式(9)で考えると $p'_{cl} \rightarrow 0$ とすれば(6)式に帰結することがわかる。

$\dot{\epsilon}_{vp} = 1$ のとき、 c_1 と c'_1 はそれぞれ $\ln\{(p'_c - p'_{cl})/p'_{cl}\}$ と $\ln(p'_c - p'_{cl})$ となり、 $\log p'_c \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 曲線の相対的な位置を表している。また、 c_2 と c'_2 ($c_2 = c'_2$) は $\log(p'_c - p'_{cl}) \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 曲線の $\dot{\epsilon}_{vp} = 1$ 付近でのひずみ速度に対する感度を表している。

3. 試料

CRS圧密試験ならびに長期圧密試験に供した試料は、関西国際空港Ⅱ期事業に先駆けて実施した地盤調査において採取した大阪湾海底粘土である。海底表層の完新世の粘土層Ma13が20mほどの厚さで堆積し、その下部の更新世の地層は、粘土層と砂層が互層になって堆積している。粘土層は、海成粘土と陸成粘土に分けられており、海成粘土はMa13に続いて深くなるほどに番号が減るように名付けられている。一方、砂層はMa13直下の厚い砂層(層厚約20m)をDs1と称し、深くなるほどに番号が増えるように名付けられている。Ma6とMa5は番号が欠落しているが、これらの層は侵食等により当該地点には存在していないためである。なお、陸成粘土はDs1とDs2の間および

表-1 試料の物理特性

地層区分	Ma13	Ma12	Ma11	Ma10	Ma9	Ma8	Ma7	Ma4	Ma13Re
不攪乱	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
再構成	No	No	No	No	No	No	No	No	Yes
深度 (C.D.L.-m)	39	61	109	142	167	208	223	264	30-40
有効土被り圧 σ'_{v0} (kPa)	88	286	619	857	1030	1348	1457	1802	(98)
圧密降伏応力 p'_c (kPa)	122	439	737	1294	1403	1698	1887	2512	134
過圧密比 OCR	1.39	1.53	1.19	1.51	1.36	1.26	1.30	1.39	(1.37)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.66	2.66	2.67	2.69	2.70	2.72	2.70	2.67	2.70
液性限界 w_L (%)	75.1	102.6	88.9	84.2	98.3	91.8	100.4	93.6	91.3
塑性限界 w_p (%)	31.9	40.8	34.4	36.4	37.4	35.8	37.8	35.3	30.3
塑性指数 I_p	43.2	61.8	54.5	47.8	60.9	56.0	62.6	58.3	61.0
自然含水比 w_n (%)	62.0	83.8	55.4	48.6	54.0	49.9	49.0	50.6	71.5

Ds7とDs8の間に存在しており、それぞれDtcとDocと名付けられている。

本研究では、海成粘土を研究対象とし、不攪乱試料についてはMa13, Ma12, Ma11, Ma10, Ma9, Ma8, Ma7, Ma4を取り扱った。関西国際空港建設地点における大阪湾海底粘土の地層構成を図-3に示す。Ma13については、練返し後に98kPaで予圧密した再構成試料についても試験を実施した。試験に用いた粘土試料の採取深度、有効土被り圧 σ'_{v0} ならびに各種物理特性の代表値を表-1に示す。なお、自然堆積粘土を扱っているため、各粘土層内部でも物理特性は一様ではなく、個々の試料によって物理特性は少しずつ異なっている。

4. 試験内容

上述した式(3), 式(4), 式(5)による整理に必要なデータを得るために、定ひずみ速度圧密試験 (CRS圧密試験) と

長期圧密試験 (LT圧密試験) を実施した。

4.1 定ひずみ速度圧密試験 (CRS 圧密試験)

CRS圧密試験は、JIS A 1227に準じて以下のように実施した。サンプリングされた試料をワイヤーソーで直径60mm, 高さ約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20mmのステンレス製圧密リングに挿入し、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。リングに挿入された状態の供試体を圧密容器にセットし、これを載荷台に設置した。載荷枠に取り付けられたロードセルを介して上部の載荷用ピストンの上昇を拘束した状態で容器内に注水し、バックプレッシャーとして98kPaを作用させた。容器底部には直径10mmのポーラスメタルを介して間隙水圧計 (容量3500kPa, 精度0.88kPa。ただし試料Ma13の試験では容量700kPa, 精度0.18kPa) が設置されている。鉛直荷重は載荷台に取り付けられたロードセル (容量49kN, 精度

表-2 長期圧密試験 (LT 試験) の載荷条件

試料名	予圧密圧力 (kPa)		長期圧密の設定載荷圧力 (kPa)
	24時間ごとに 段階載荷	σ'_{v0} で 7日間載荷	
Ma13	10→29→	88→	98, 137, 206, 235, 353, 412
Ma12	39→79→157→	294→	333, 373, 412, 451, 490, 529, 608, 686, 882, 1370
Ma11	39 (2時間)→	628 (24時間)→	647, 667, 686, 706, 726, 745, 1000, 1569
Ma10	39 (2時間)→	863 (24時間)→	922, 981, 1040, 1118, 1196, 1236, 1275, 1667
Ma9	39 (2時間)→	1059 (24時間)→	1138, 1177, 1216, 1255, 1314, 1393, 1471, 2059
Ma8	39 (2時間)→	1373 (24時間)→	1412, 1471, 1530, 1589, 1648, 1726, 1785, 2040
Ma7	39 (2時間)→	1491 (24時間)→	1549, 1608, 1667, 1726, 1785, 1844, 1922, 2177
Ma4	39 (2時間)→	1863 (24時間)→	1902, 1961, 2059, 2157, 2256, 2354, 2452, 3138
Ma13Re	10→29→	88→	118, 137, 206, 275, 343, 412

0.012kN. ただし試料Ma13の試験では容量19.6kN, 精度0.0049kN)で計測し, バックプレッシャーによるピストンの揚力を計測値から差し引いた. 沈下はリニアゲージ(容量20mm, 精度0.001mm. ただしひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ を含む試験では容量10mm, 精度0.0001mm)により計測した. 供試体の圧縮は, 一定のひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.02\%/min$ ($3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)により付与した. ただし, 試料Ma12については, 降伏後の沈下が他より著しいので, 圧密降伏応力付近の曲線を明瞭に得るためにひずみ速度を遅く設定し, $\dot{\epsilon} = 0.0002\%/min$ ($3.3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$)とした.

4.2 長期圧密試験 (LT 圧密試験)

CRS圧密試験と同様の方法で直径60mm, 高さ20mmのステンレス製圧密リングに挿入された供試体を準備し, 圧密容器にセットした. 容器下部ならびに上部ピストンにはポーラスメタルが取り付けられており, 上下両端が排水境界となる構造になっている. 荷重圧力はテコを介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. 試験条件の一覧を表-2に示す. 長期圧密での荷重圧力は圧密降伏応力 p'_c を前後する $\sigma'_{v0} \sim 2.0p'_c$ の範囲で6~10種類の圧力を設定し

た. 試料Ma13, Ma12, Ma13Reのケースでは, 圧密圧力 p を有効土被り圧 σ'_{v0} まで荷重増分比 $\Delta p/p = 1 \sim 2$ で24時間ごとに増加させ, 圧密圧力 $p = \sigma'_{v0}$ において7日間の予圧密をした. 他の試料 (Ma11, Ma10, Ma9, Ma8, Ma7, Ma4) のケースでは, 試料の膨張を防ぐために圧密圧力 $p = 39\text{kPa}$ を2時間だけ荷重した後, 直ちに圧密圧力 $p = \sigma'_{v0}$ を荷重して24時間放置して予圧密とした. 予圧密終了後, 長期圧密を実施する圧力まで瞬間荷重し, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が $3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ よりも十分に小さくなるまで長期圧密を継続した. 試験

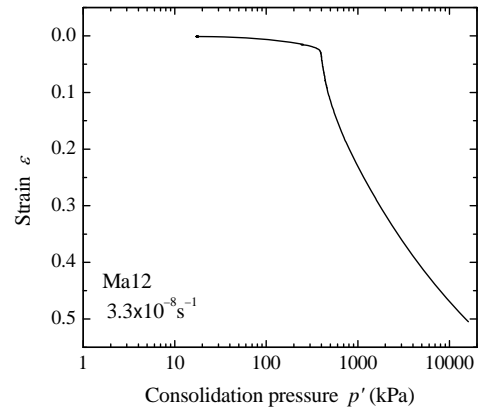


図-4 Ma12の圧縮曲線 ($\epsilon \sim \log p$ 曲線)

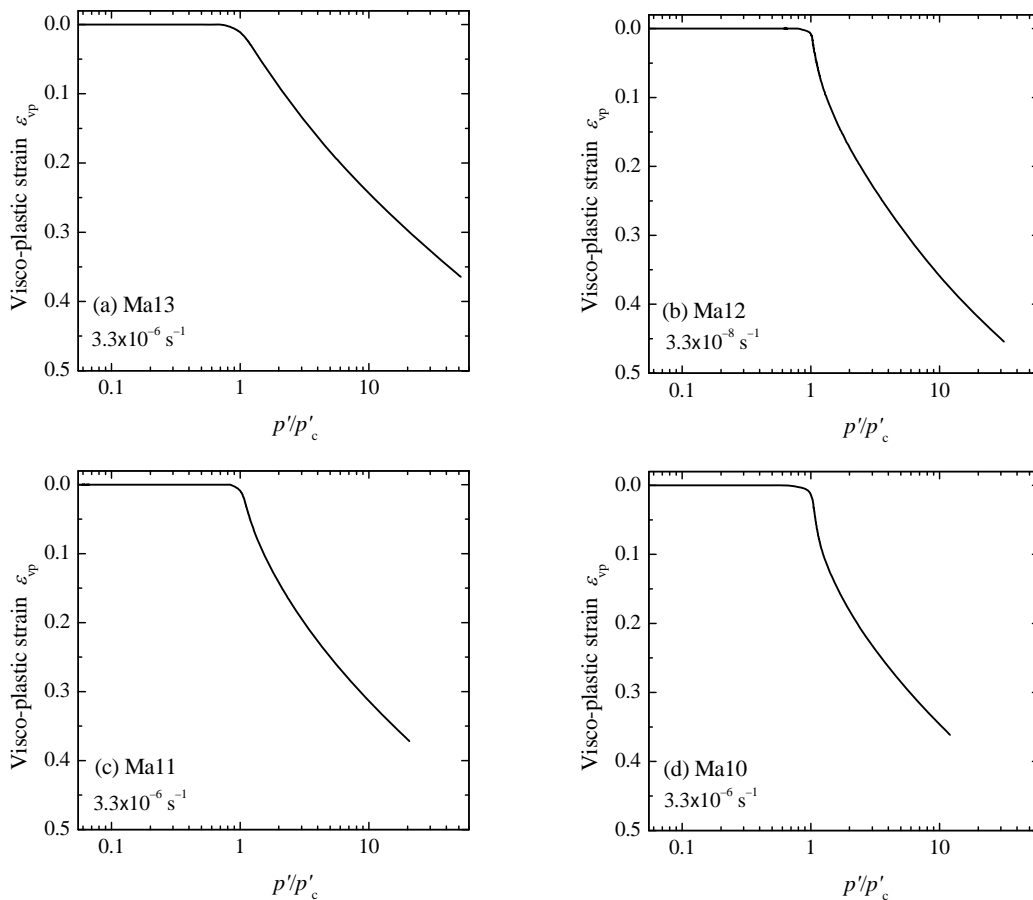


図-5 基準圧縮曲線 ($\epsilon_{vp} \sim \log p'/p'_c$ 曲線) : (a) Ma13, (b) Ma12

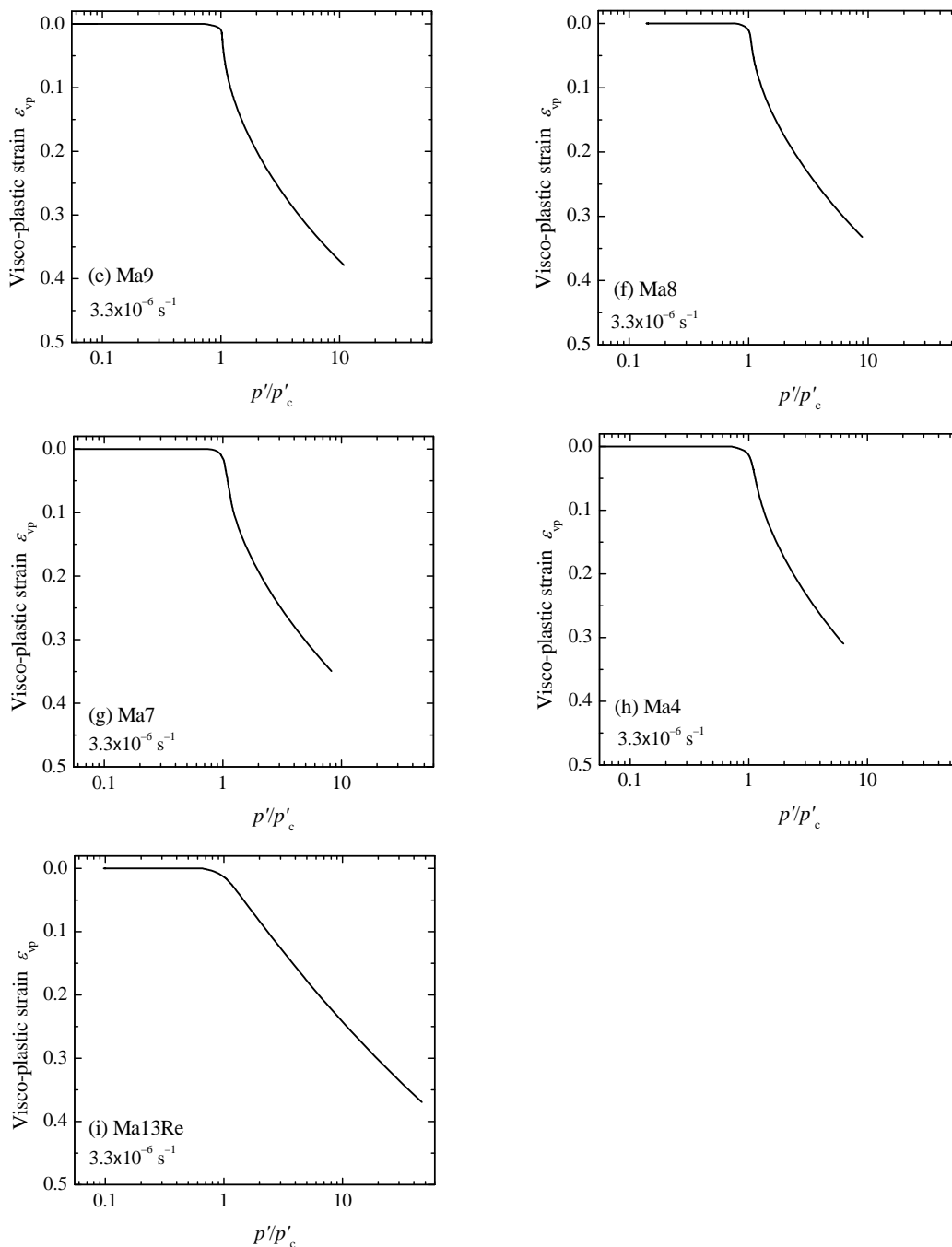


図-5 基準圧縮曲線 ($\epsilon_{vp} \sim \log p'/p'_c$ 曲線) : (e) Ma9, (f) Ma8, (g) Ma7, (h) Ma4, (i) Ma13Re

中に供試体が膨張してしまうことを防止するため、圧密降伏応力を超えて沈下が大きくなるまでは供試体の乾燥を防止するために湿潤状態を保持した上で、圧密容器に注水しないことにした。

5. 試験結果

5.1 定ひずみ速度圧密試験 (CRS 圧密試験)

CRS圧密試験から得られた圧縮曲線 ($\epsilon \sim \log p'$ 曲線)

の一例として、試料Ma12の試験結果を図-4に示す。図から圧密降伏応力 p'_c は439kPaと読み取れる。有効土被り圧 σ'_{v0} は286kPaの試料であるので過圧密比OCRは1.5と算出される。この値はやや大きめであるが、この地区の海底粘土の過圧密比が1.3~1.5程度であることと整合する。圧縮曲線は p'_c 付近が張り出したような形状であり、構造が発達した粘土の特徴が良く現れている。この圧縮曲線を用いて「2. アイソタックの整理方法」で述べた方法(図-2)に従って整理する。すなわち、ひずみ ϵ から弾性ひず

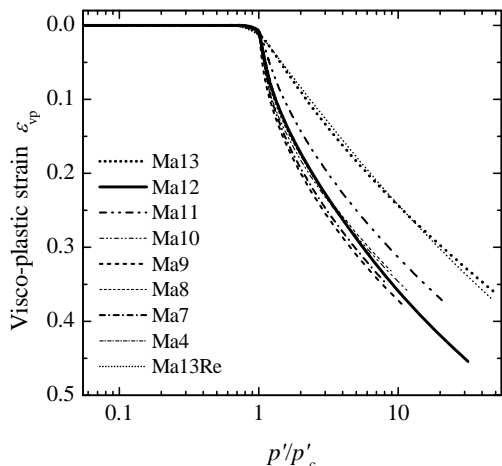


図-6 基準圧縮曲線の比較

み成分 ϵ_e を差し引いて粘塑性ひずみ成分 ϵ_{vp} を算出するとともに、圧密圧力 p' を圧密降伏応力 p'_c で正規化することによって基準圧縮曲線 ($\epsilon_{vp} \sim \log p'/p'_c$ 曲線) が得られる。CRS圧密試験から得られた基準圧縮曲線を全試料について図-5に示す。

再構成Ma13Reは圧密降伏応力 p'_c で折れ曲がったようなバイリニアな関係にあり、構造が未発達な粘土の特徴が現れている。不攪乱Ma13もこれに準ずる形状を呈して

いる。Ma12~Ma4はいずれも同じような基準圧縮曲線が得られ、 p'_c 付近が張り出し、正規圧密領域で下に凸な曲線となる。この傾向はMa12において最も顕著である。全試料の基準圧縮曲線を一つの図に描くことによって、これらの傾向はより明瞭になる (図-6)。

5.2 長期圧密試験 (LT 圧密試験)

長期圧密試験から得られた圧密曲線 ($\epsilon \sim \log t$ 曲線) を図-7に示す。ここで、縦軸のひずみ ϵ は供試体の初期高さを基準に算出しているが、有効土被り圧 σ'_{v0} で7日間圧密終了時、すなわち長期圧密開始直前のひずみを差し引いている。

長期圧密の載荷圧力が p'_c よりも大きな正規圧密領域にある場合には、一次圧密終了後に二次圧密が生じていることがわかる。二次圧密部分ではわずかに下に凸な曲線となっており、傾き $\Delta\epsilon_{vp}/\Delta \log t$ はわずかずつではあるが次第に減少していく傾向にあるといえる。正規圧密領域に載荷したもののうち、Ma13からMa10およびMa13Reについては、上に凸な曲線から下に凸な曲線に変化した後にEOPが現れているが、Ma9以深では、上に凸な曲線上にEOPが現れている。Ma9以深については、圧密圧力は p'_c を超しているもののさほど大きくはないために、次に述

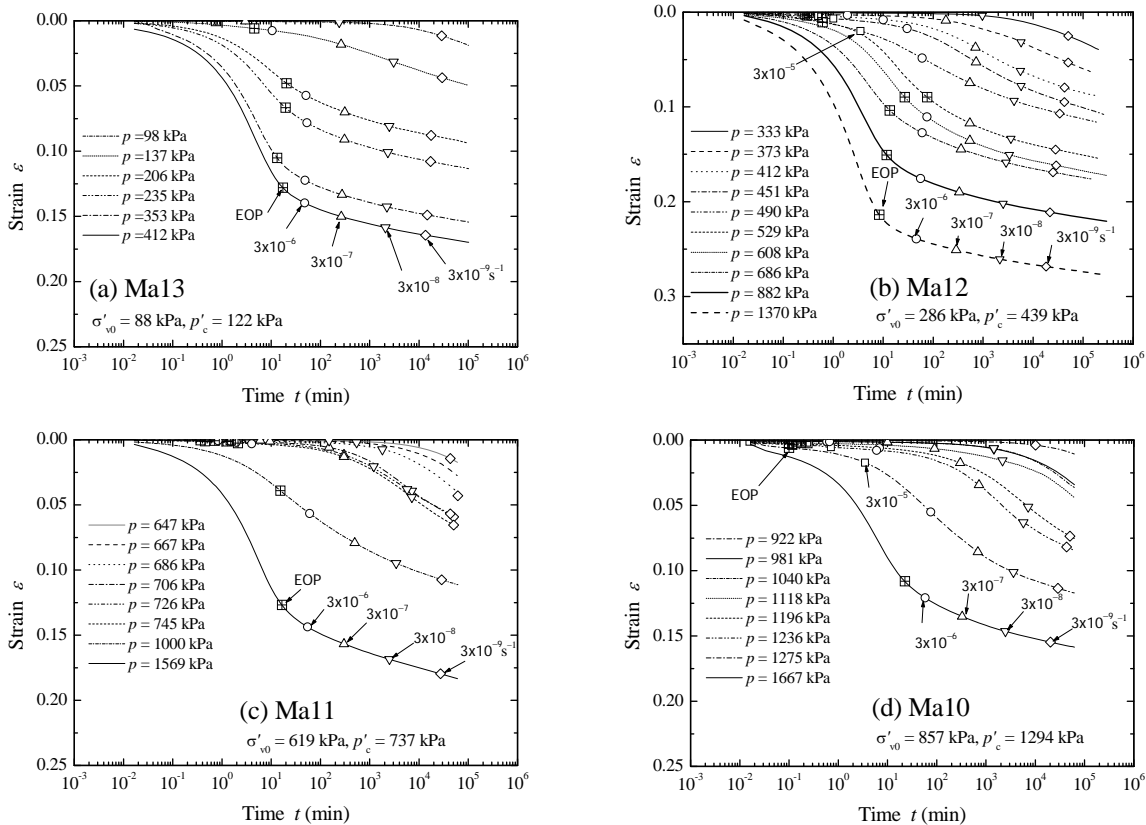


図-7 長期圧密試験 (LT 試験) から得られた圧密曲線 ($\epsilon \sim \log t$ 関係) : (a) Ma13, (b) Ma12, (c) Ma11, (d) Ma10

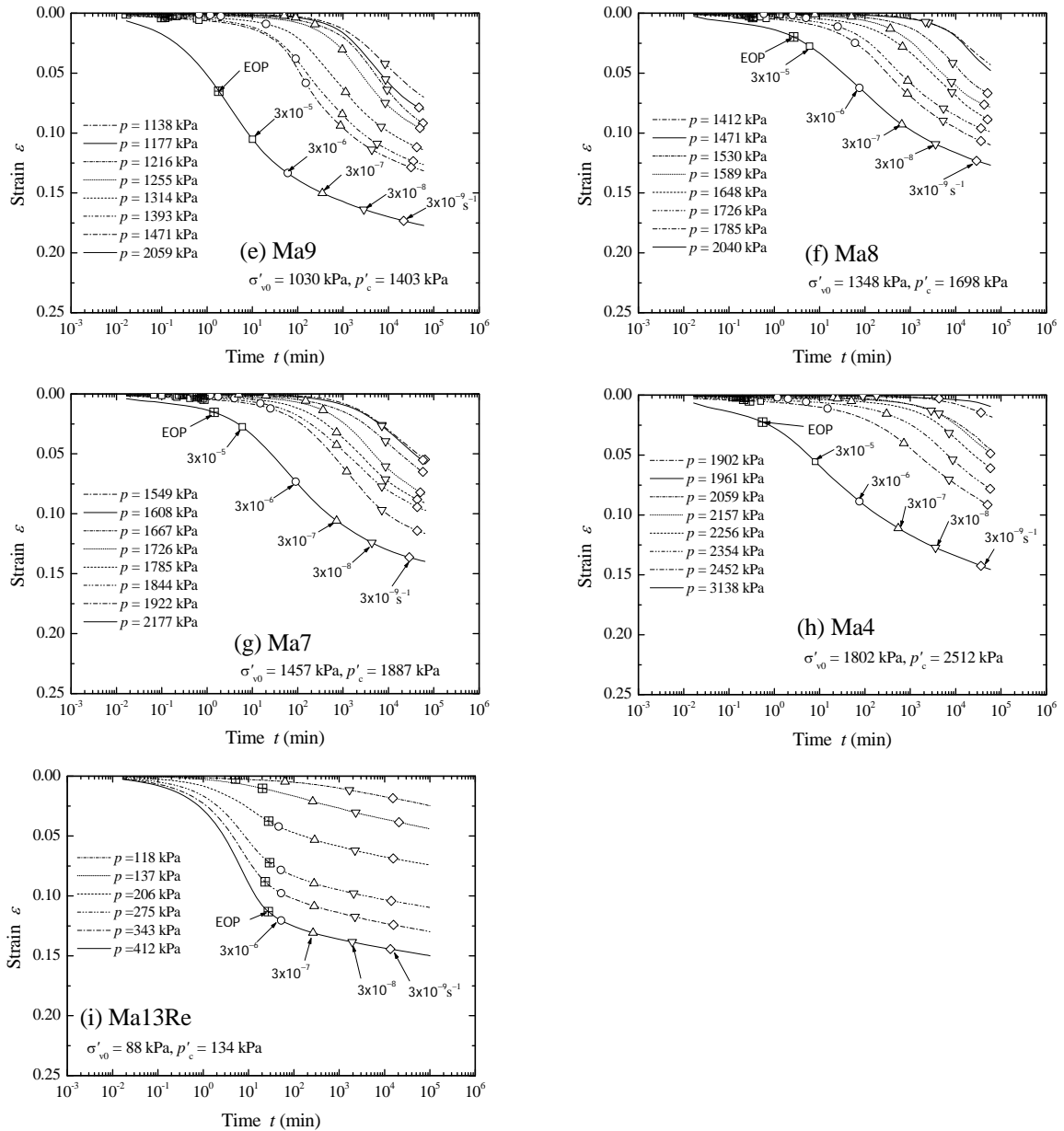


図-7 長期圧密試験 (LT 試験) から得られた圧密曲線 ($\epsilon \sim \log t$ 関係) : (e) Ma9, (f) Ma8, (g) Ma7, (h) Ma4, (i) Ma13Re

べる過圧密状態での挙動に近いものとなっていると考えられる。

長期圧密の荷重圧力が有効土被り圧 σ'_{v0} と圧密降伏応力 p'_c の間の過圧密領域にある場合には、一次圧密は極めて短い時間で終了した後二次圧密による沈下が生じるが、二次圧密の初期は沈下がほとんど生じない。試料にもよるが時間が 1.0×10^3 分程度以上経過すると上に凸な曲線となって、傾き $\Delta\epsilon_{vp}/\Delta\log t$ が次第に増加していく傾向にある。なお、以下では $\Delta\epsilon_{vp}/\Delta\log t$ を粘塑性ひずみに関する二次圧密係数 $C_{\alpha_{vp}}$ と表すことにする。図中には粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp} = \Delta\epsilon_{vp}/\Delta t$ が 3.3×10^{-5} (一部の試験でのみ得られた)、 3.3×10^{-6} , 3.3×10^{-7} , 3.3×10^{-8} , $3.3 \times 10^{-9} s^{-1}$ に対応する

点を示してある。

6. アイソタック概念による結果の整理

CRS圧密試験を実施するにあたって基本的な荷重条件として設定したひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-6} s^{-1}$ に対応した粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ における圧密降伏応力を上で定義したように p'_{c0} と表す。Ma12についてはCRS圧密試験を $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-8} s^{-1}$ で実施したが、 p'_{c0} は定義に従って $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-6} s^{-1}$ に対応する値とする。

試験した全試料について、図-8にフローチャートで示した以下の作業を行う。まず、 $p = 1.15 \times p'_{c0}$ 以上の正規圧密

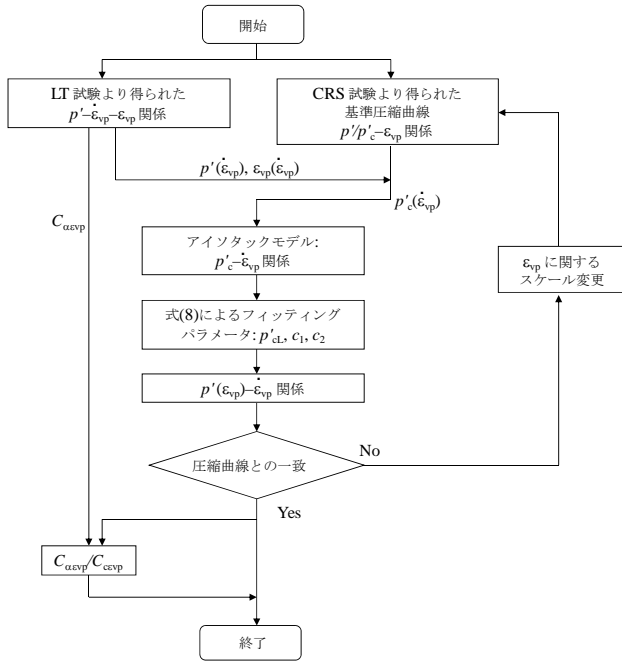


図-8 アイソタックモデルにおけるデータ取扱いのフローチャート

領域に载荷した試験結果について、 $\dot{\epsilon}_{vp} = \Delta\epsilon_{vp}/\Delta t$ が 3.3×10^{-5} , 3.3×10^{-6} , 3.3×10^{-7} , 3.3×10^{-8} , 3.3×10^{-9} s⁻¹に対応する点の ϵ_{vp} を読み取る。 p' と ϵ_{vp} を基準圧縮曲線に当てはめて、当該

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応する圧密降伏応力 p'_c を得る。こうして描いた $\log p'_c \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係に対して、式(8)を適用して試験結果にフィッティングさせる。フィッティングは、 p'_{cl} を仮定した上で最小二乗法により得られた回帰曲線のうち誤差最小となるものを採用した。得られたフィッティング関係に対して、 p'_c を p'_{c0LT} で除すことにより、縦軸(p'_c 軸)を正規化した。ここで、 p'_{c0LT} はフィッティング曲線上の $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-6}$ s⁻¹に対応する p'_c の値あり、混乱を避けるためにCRS圧密試験から得た p'_{c0} (以降、 p'_{c0CRS} と表記する)と区別し、長期圧密試験から得られたものであることがわかるように添字LTを付けて表記した。

Ma10とMa9では、基準圧縮曲線をそのまま用いると、長期圧密試験結果を基に描いた $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 関係をうまく表現することができなかった。これは、CRS試験に用いた供試体と長期圧密試験に用いた供試体が実際には異なるため、物理・力学特性が多少なりとも異なっていたことに起因すると思われる。そこで、基準圧縮曲線の縦軸(ひずみ ϵ 軸)を伸縮させて調整し、Ma10では1.1倍、Ma9では0.8倍することによって、長期圧密試験結果と整合するモデル圧縮曲線群が得られるようにした。

このようにして得られた $\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係を図-9に実線で示す。定義により、 $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-6}$ s⁻¹において

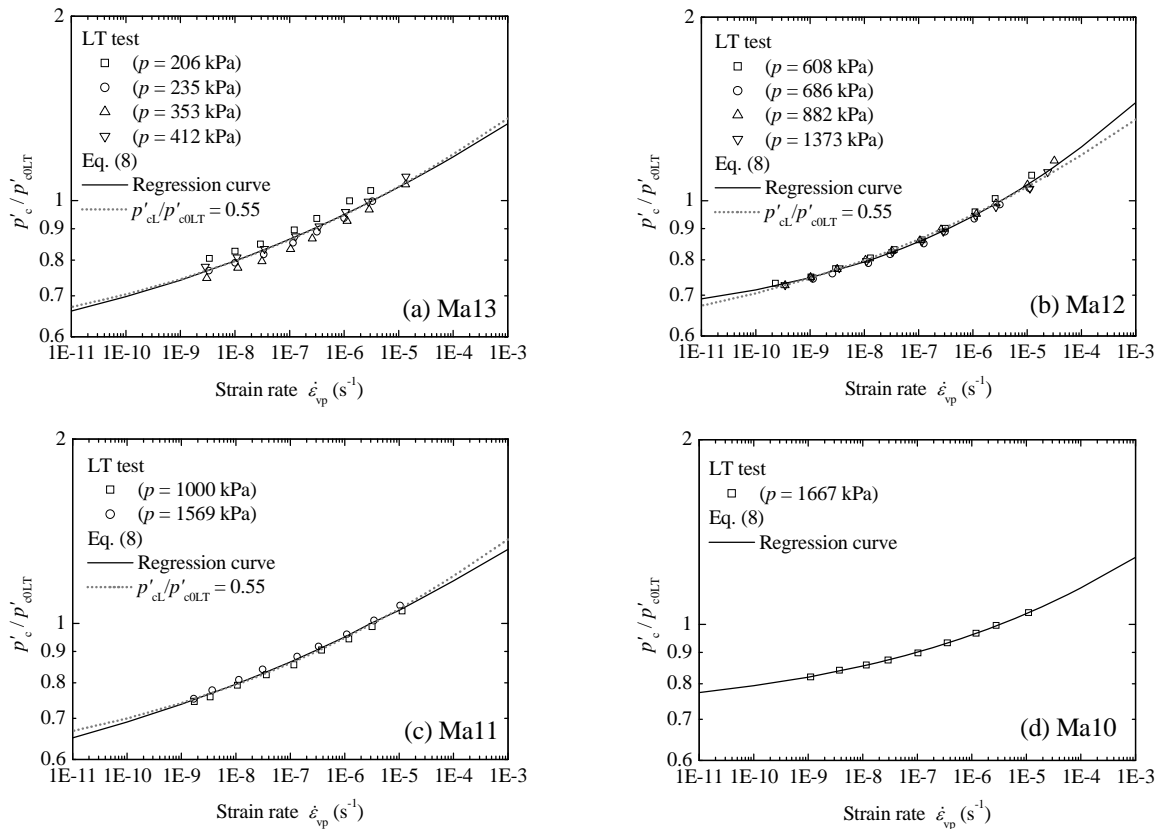


図-9 $\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係と式(8)によるフィッティング結果: (a) Ma13, (b) Ma12, (c) Ma11, (d) Ma10

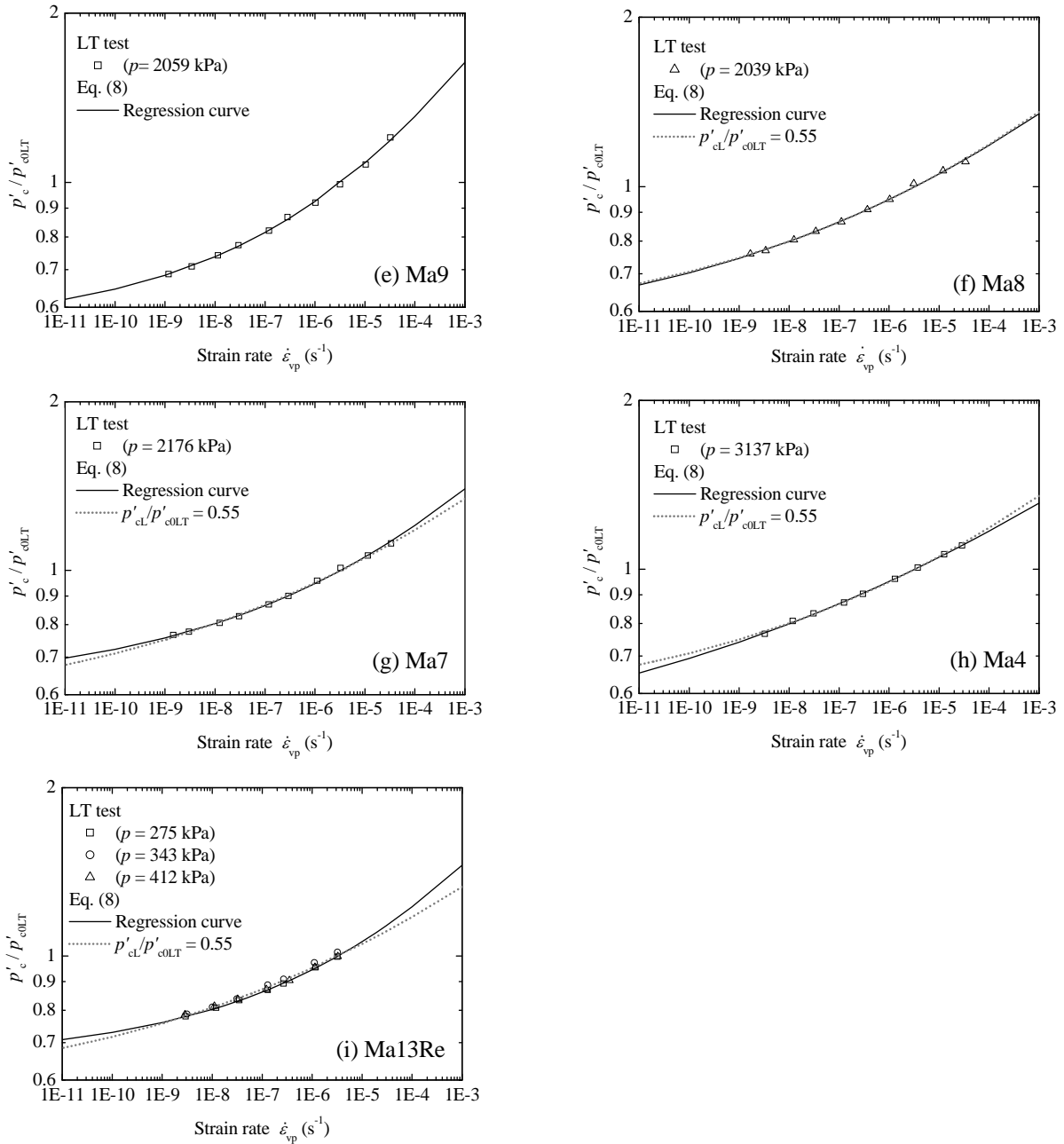


図-9 $\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係と式(8)によるフィッティング結果: (e) Ma9, (f) Ma8, (g) Ma7, (h) Ma4, (i) Ma13Re

$p'_c/p'_{c0LT} = 1$ を通る。

正規圧密領域において複数の圧密圧力で長期圧密試験を実施したMa13, Ma12, Ma11では、いずれの試料でも、それぞれほぼ同一の関係が得られている。このことから、正規圧密領域に载荷したケースを対象とする場合、 $\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係が試料ごとに唯一に存在することがわかる。また、いずれの試料に対しても式(8)によって見事にフィッティングできており、式(8)で表現したアイソタックモデルが幅広く適用できることが示されたといえる。設定したパラメータを表-3にまとめる。

上述では、限られた数のデータを基に p'_{cl} を設定した。

$\dot{\epsilon}_{vp}$ のデータが存在する範囲は狭く、これに対して p'_{cl} はグラフ上での遙か遠方の収束点を設定していることになる。このため、 p'_{cl} の設定において信頼性が低くなっている可能性を否定できない。一方、大向・今井(2006)が、関西国際空港海底粘土に対して、 $\dot{\epsilon}_{vp} = 1 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ における p'_c は $0.7 \times p'_{c0}$ になることを示している。これに対応するかたちで、試験をした試料に対して共通の p'_{cl}/p'_{c0LT} が設定できると考えられる。実際、基準圧縮曲線を伸縮させたMa10とMa9を除き、正規圧密領域に载荷した各試料(再構成したMa13Reを含む)に対して得られた p'_{cl}/p'_{c0LT} の値は 0.549 ± 0.084 であり、変動係数COVは0.15と狭い範囲にあっ

表-3 式(8)によるフィッティングで設定したアイソタックパラメータ

試料	σ'_{v0} (kPa)	p'_{c0CRS} (kPa)	p'_{c0LT} (kPa)	p'_{cL} (kPa)	p'_{cL}/p'_{c0LT}	c_1	c_2
Ma13	88	122	133	67	0.504	1.128	0.0903
Ma12	286	439	448	280	0.625	1.228	0.1377
Ma11	619	737	813	372	0.458	1.196	0.0813
Ma10	857	1294	1211	862	0.712	0.617	0.1205
Ma9	1030	1403	1198	670	0.559	1.731	0.1561
Ma8	1348	1698	1736	922	0.531	1.097	0.0967
Ma7	1457	1887	1809	1121	0.620	1.093	0.1253
Ma4	1802	2512	2423	1091	0.450	1.192	0.0786
Ma13Re	(98)	134	151	99	0.656	1.209	0.1467

表-4 式(8)で $p'_{cL} = 0.55 \times p'_{c0LT}$ としてフィッティングにより設定したアイソタックパラメータ

Sample	σ'_{v0} (kPa)	p'_{c0CRS} (kPa)	p'_{c0LT} (kPa)	p'_{cL} (kPa)	p'_{cL}/p'_{c0LT}	c_1	c_2
Ma13	88	122	133	73	0.55	1.11	0.103
Ma12	286	439	447	246	0.55	1.09	0.103
Ma11	619	737	814	447	0.55	1.13	0.105
Ma8	1348	1698	1736	955	0.55	1.09	0.102
Ma7	1457	1887	1811	995	0.55	1.05	0.099
Ma4	1802	2512	2420	1333	0.55	1.07	0.101
Ma13Re	—	134	150	83	0.55	1.01	0.097

た。

そこで、 p'_{cL}/p'_{c0LT} の平均値である0.55をこれらの試料に共通の値として採用することにした。この値を用いて、

改めて c_1 と c_2 を最小二乗法によって設定した回帰曲線も図に点線で示すとともに、設定したパラメータを表-4にとりまとめた (Ma10とMa9を除く)。これらは、実験結果に

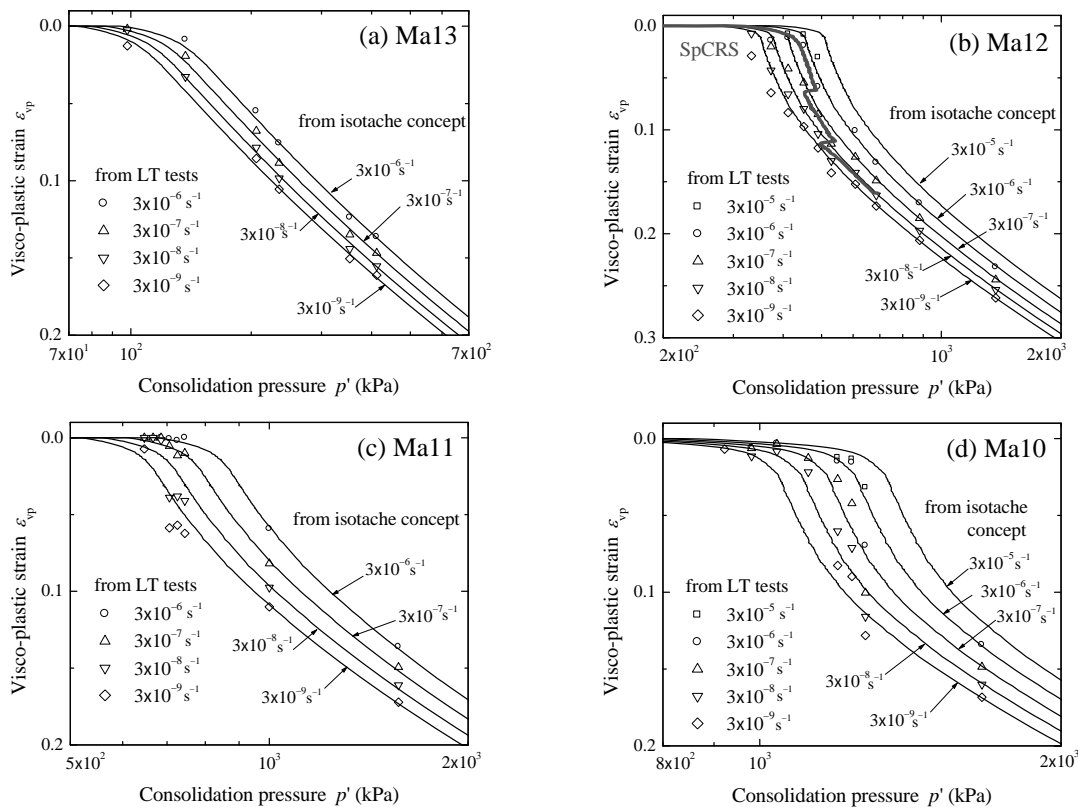


図-10 圧縮曲線 ($\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 曲線) : (a) Ma13, (b) Ma12, (c) Ma11, (d) Ma10

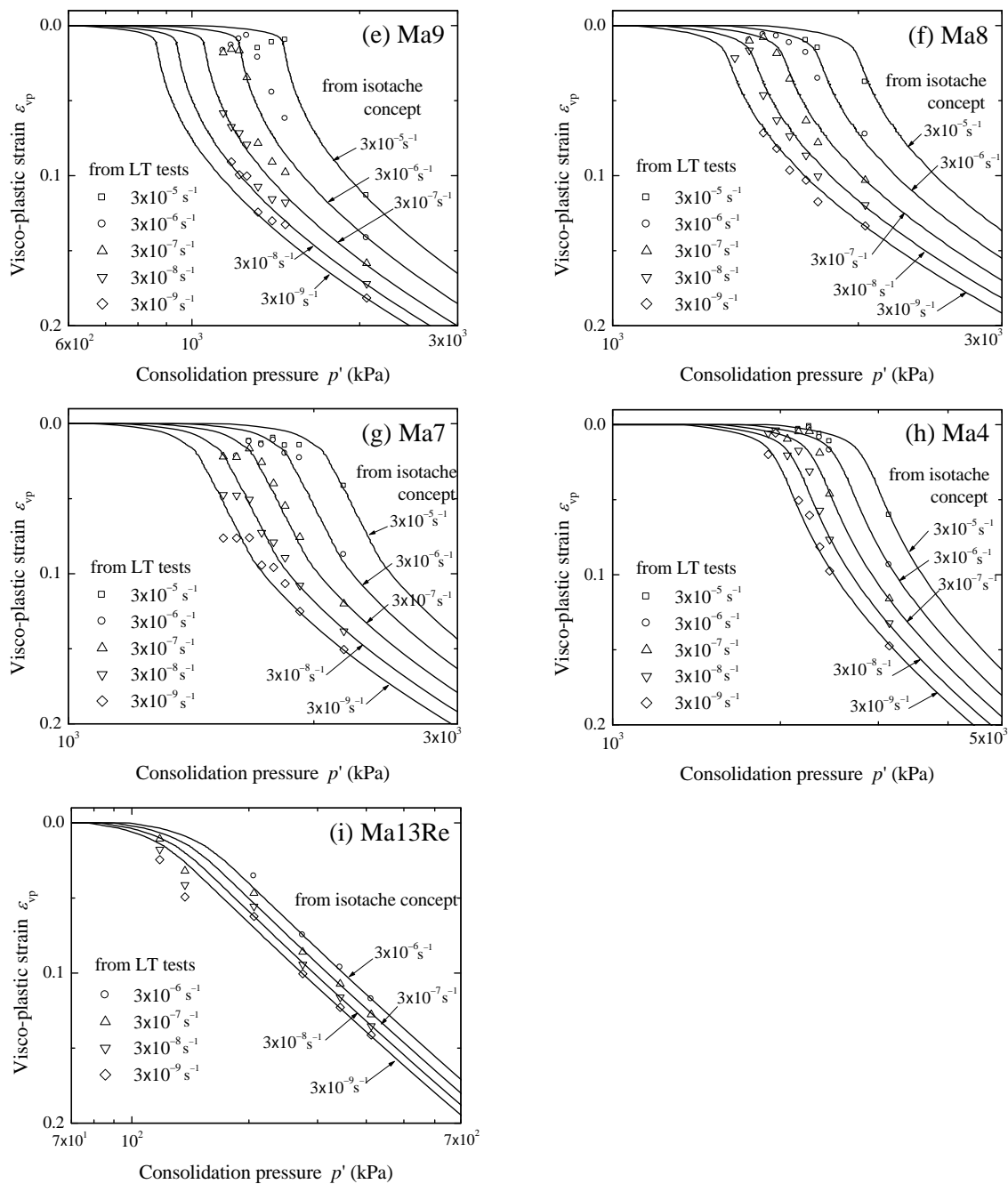


図-10 圧縮曲線 ($\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 曲線) : (e) Ma9, (f) Ma8, (g) Ma7, (h) Ma4, (i) Ma13Re

対する適切なフィッティングになっていると考えられる。

$p'_{cl} = 0.55 \times p'_{colT}$ を設定した場合に、CRS試験に用いた供試体と長期圧密試験に用いた供試体の採取深度が異なり、両供試体の物性が若干異なっていたために基準圧縮曲線を伸縮したMa10とMa9を除いて考えると、表-4に示したように、 c_1 、 c_2 はそれぞれ 1.08 ± 0.04 、 0.101 ± 0.003 となり、それぞれ変動係数COVにして0.04と0.026であった。このことは、 c_1 、 c_2 についても関西国際空港海底粘土に対して共通の値があることを示唆しているといえる。

Watabe et al. (2007)が示したように、Ma13の不攪乱試料

と再構成試料では土の骨格構造が著しく異なる。また、Ma13(不攪乱試料と再構成試料)の基準圧縮曲線は、Ma12以深(不攪乱試料)のものと形状が異なり、圧縮特性に違いが見られた。このような状況にもかかわらず、正規圧密領域に载荷した場合のアイソタック特性が、関西国際空港海底粘土各層の不攪乱試料およびその再構成試料に対して共通であると示唆される結果は大変興味深い。このことは、大阪湾に厚く堆積した海成粘土層の粘土鉱物や組成に著しい変化がなく、均質な堆積層であることと整合するとともに、アイソタック特性により表される

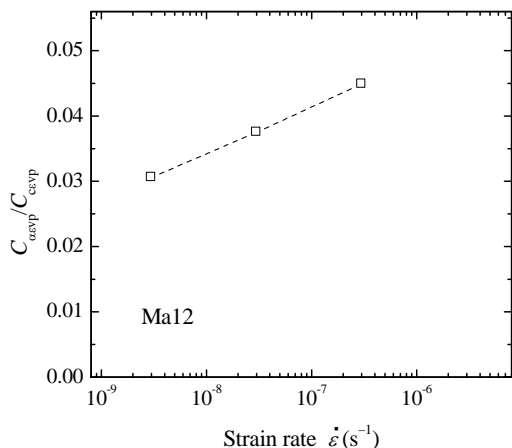


図-11 Ma12 の $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}} \sim \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係

二次圧密挙動は、骨格構造の発達程度よりも鉱物組成に依存していることを示唆するものでもある。

上述によって設定した表-4の3つのパラメータ p'_{cL} , c_1 , c_2 (Ma10とMa9は表-3の値)を用いて、(8)式により粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応した圧密降伏応力 p'_c を設定することができる。図-5に示した基準圧縮曲線を p' 軸方向に $p'_c(\dot{\epsilon}_{vp})$ 倍することにより、任意の $\dot{\epsilon}_{vp}$ に対応した圧縮曲線 ($\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 関係) が得られる。 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が 3.3×10^{-5} (長期圧密試験でEOP後に $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-5}$ が明瞭に得られなかった試料を除く)、 3.3×10^{-6} , 3.3×10^{-7} , 3.3×10^{-8} , $3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ に対応した圧縮曲線群を図-10に示す。同図には、長期圧密試験で得られた圧密曲線 (図-7) の二次圧密部分から読み取った粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ に対応したデータもプロットしてある。Ma10とMa9については、CRS圧密試験と長期圧密試験の結果が整合するように基準圧縮曲線を伸縮させるなどの調整を図ったが、無視し得ぬ乖離がある。しかしながら、他の試料については、長期圧密試験結果と一致する圧縮曲線群が描けていることがわかる。

上述のアイソタック概念によるモデル化では、正規圧密領域に载荷したデータのみを使って整理した。しかし、過圧密領域を含む基準圧縮曲線により整理すると、過圧密領域から正規圧密領域に至る広い範囲にわたって、試験結果をモデル化できていることは大変興味深い。また、基準圧縮曲線と3つのパラメータ (式(8)の p'_{cL} , c_1 , c_2) しか用いていないので、実務でも使いやすいかたちのモデルになっているといえる。

Ma12については、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を3段階 (3.3×10^{-6} , 3.3×10^{-7} , $3.3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$) に変化させた特殊なCRS圧密試験 (SpCRS) を実施しており、これにより得られた圧縮曲線も比較のために合わせて示してある。長期圧密試験と特殊CRS圧密試験から得られた $\epsilon_{vp} \sim \log p'$ 関係は、見事に一致

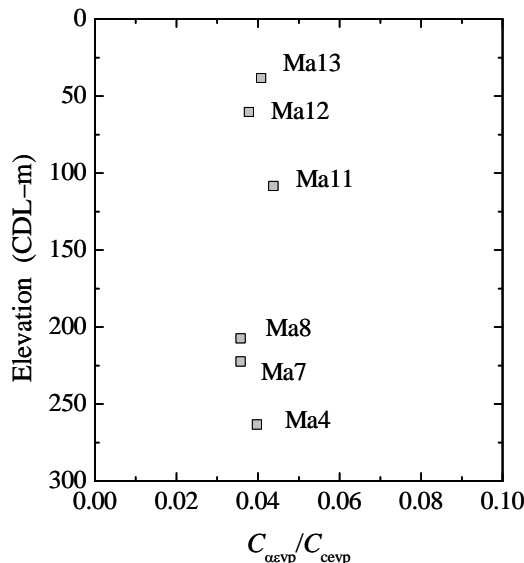


図-12 $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}}$ の深度分布 ($\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ に対応するデータ)

しており、長期圧密試験の結果に対してアイソタック概念を適用して整理できることをここでも確認できる。

長期圧密試験により得られた圧密曲線から粘塑性ひずみに関する二次圧密係数 $C_{\alpha_{evp}}$ を読み取れる。このときの粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{vp}$ と粘塑性ひずみ ϵ_{vp} に対応した圧縮曲線の傾きは、基準圧縮曲線 (図-5) より、粘塑性ひずみ ϵ_{vp} で表した圧縮指数 $C_{c_{evp}}(p'/p'_c) = \Delta \epsilon_{vp} / \Delta \log(p'/p'_c)$ として算出される。このようにして得られた $C_{\alpha_{evp}}$ と $C_{c_{evp}}$ を用いて、 p' 一定の下で $\dot{\epsilon}_{vp}$ とともに変化する $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}}$ が算出される。一例としてMa12について、 $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}}$ と $\dot{\epsilon}_{vp}$ の関係を図-11に示す。 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の減少とともに $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}}$ は減少する傾向にあることがわかる。このことは、 C_{α}/C_c 一定概念を経験的に導き出したMesri and Castro (1987)の主張と矛盾する。その一方で、基準圧縮曲線を伸縮させたMa10とMa9を除く各試料について、 $\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ に対応する $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}}$ を求め、深度分布としてプロットすると (図-12)、 0.039 ± 0.003 と極めて狭い範囲に分布しており、 C_{α}/C_c 一定概念を主張したMesri and Castro (1987)が、 C_{α}/C_c は一般に 0.04 ± 0.01 の狭い範囲の値になると指摘したこととも非常に良く整合する。

式(8)は、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が減少すると $p'_c(\dot{\epsilon}_{vp})$ も減少し、 $\dot{\epsilon}_{vp} \rightarrow 0$ のときに $p'_c \rightarrow p'_{cL}$ になるという下限値を設定している。これによるフィッティングが実験結果を良く表現することは上述の通りである。Leroueil (2006)は、 $\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係の傾き α が理論的に $C_{\alpha_{evp}}/C_{c_{evp}}$ に一致することを示した。図-9からわかるように、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の減少とともに傾き α が小さくなる傾向が見られる。このことは、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が小さな範囲 ($\dot{\epsilon}_{vp} < 10^{-8} \text{ s}^{-1}$) ではMesri and Castro(1987)の C_{α}/C_c 一定概念が成

り立たないことを意味している。すなわち、Leroueil (2006) が指摘したように、 C_{α}/C_c 一定概念は工学的近似として、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ が大きな範囲 ($10^{-8} \sim 10^{-5}$) において大まかに成り立つ関係であることがわかる。なお、式(9)で $p'_{cL} \rightarrow 0$ とするとき式(6)に帰結する、すなわち C_{α}/C_c 一定概念に帰結する。

大向・今井 (2006) の $\dot{\epsilon}_{vp} \leq 1 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ で $p'_c =$ 一定であるという主張も、 C_{α}/C_c 一定概念が成り立たない範囲があることを主張していることになる。

本研究では関西国際空港海底粘土について、Leroueil et al. (1985) が提案した式(1)と式(2)によるアイソタック概念を取り入れた整理をした。その結果、CRS圧密試験結果を整理して得られる基準圧縮曲線と粘塑性ひずみ速度の影響に関する評価結果を用いて式(8)を適用することにより、関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動をアイソタック概念に基づいて一般的に表せることがわかった。提案する式(8)は、アイソタック概念が適用できる $\dot{\epsilon}_{vp}$ の範囲に適用限界を設定していないため、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ と p'_c が一対一に対応して決定される。このことから、アイソタック概念を用いた沈下予測計算に便利である。

7. まとめ

本研究では、CRS圧密試験と長期圧密試験の結果を用いて、基準圧縮曲線と $p'_c(\dot{\epsilon}_{vp})$ によりアイソタック概念を単純にモデル化できることを示した。もっとも試験数が少ない場合を想定すると、一つのCRS圧密試験と正規圧密領域での一つの長期圧密試験さえあれば、基準圧縮曲線と3つのパラメータ p_{cL} , c_1 , c_2 を設定でき、実務への適用も期待できるものと思われる。

$\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係の傾き $\alpha (=C_{\alpha evp}/C_{cevp})$ の値は、 $\dot{\epsilon}_{vp}$ の減少とともに小さくなる傾向にあることから、 C_{α}/C_c 一定概念は $\dot{\epsilon}_{vp}$ がある程度大きな範囲において近似的に成り立つ関係に過ぎないことを確認した。しかし、ある $\dot{\epsilon}_{vp}$ の下では、試験をしたいずれの試料においても狭い範囲の値をとることから、実務に用いる上では便利な関係であるといえる。ただし、実地盤の圧密現象におけるひずみ速度は非常に遅いので、 C_{α}/C_c が一定と考えることは、沈下を過大評価することになる。

いずれの試料に対する試験結果も、 $\epsilon_{vp} \sim \log p'/p'_c$ 関係 (基準圧縮曲線) と $\log p'_c \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ 関係 (アイソタックモデル式) によって見事に記述することができる。

本論文では、アイソタック概念のモデル化を式(8)のあたりで提案し、関西国際空港海底粘土に対して幅広く適用できることを示した。式中の3つのパラメータ p'_{cL} , c_1 , c_2 のうち p'_{cL} については、関西国際空港海底粘土の場合、

$\dot{\epsilon}_{vp} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ のときの $p'_c (=p'_{c0})$ に対して $p'_{cL} = 0.55 \times p'_{c0}$ と設定できた。各試料に対して設定したパラメータの値を表-4にとりまとめた。 $p'_{cL} = 0.55 \times p'_{c0}$ を設定した場合に、 c_1 , c_2 については最小二乗法によりそれぞれ 1.08 ± 0.04 , 0.101 ± 0.003 が得られ、それぞれ狭い範囲の値となった。このことから、 c_1 , c_2 についても関西国際空港海底粘土試料に対して共通の値を設定できることが示唆された。

今後は、本論文で示した基準圧縮曲線ならびに式(8)で表されるアイソタックモデル式の3つのパラメータ p_{cL} , c_1 , c_2 を使った長期圧密挙動のシミュレーションを行っていく予定である。

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、本論文で提案するモデルの構築にあたっては、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、結果の整理・検討にあたっては応用地質株式会社の宇高 薫氏から多大なるご協力をいただいた。ここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

記号

- a_1, a_2 : 式(6)の定数
- b_1, b_2 : 式(7)の定数
- c_1, c_2 : 式(8)の定数
- c'_1, c'_2 : 式(9)の定数
- C_c : 圧縮指数
- C_{ce} : ひずみで表した圧縮指数
- C_{cevp} : 粘塑性ひずみで表した圧縮指数
- COV: 変動係数
- C_{α} : 二次圧密係数
- $C_{\alpha s}$: ひずみで表した二次圧密係数
- $C_{\alpha evp}$: 粘塑性ひずみで表した二次圧密係数
- OCR: 過圧密比
- p : 圧密圧力
- p' : 有効圧密圧力
- p'_c : 有効圧密降伏応力
- p'_{c0} : ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ における p'_c
- p'_{c0LT} : LT 試験により得られた p'_{c0}
- p'_{c0CRS} : CRS 試験により得られた p'_{c0}
- p'_{cL} : p'_c の下限値
- t : 圧密経過時間
- α : $\log p'_c/p'_{c0LT} \sim \log \dot{\epsilon}_{vp}$ ($=C_{\alpha evp}/C_{cevp}$) 関係の傾き
- ϵ : ひずみ

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