



# ひずみ速度に着目した大阪湾洪積粘土地盤の一次元 圧密特性に関する研究

藤原, 照幸

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2009-09-25

(Date of Publication)

2011-11-22

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4762

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004762>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 藤原 照幸  
博士の専攻分野の名称 博士（工学）  
学 位 記 番 号 博い第 4762 号  
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当  
学位授与の日付 平成 21 年 9 月 25 日

【 学位論文題目 】

ひずみ速度に着目した大阪湾洪積粘土地盤の一次元圧密特性に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 澁谷 啓  
教 授 田中 泰雄  
教 授 飯塚 敦

神戸から泉南に至る大阪湾の沿岸域では、近年、水深15mを超える大水深域において海上空港や海面型廃棄物最終処分場の建設、高規格コンテナターミナルの整備など、大規模な埋立事業が行われている。大水深域での埋立事業では必然的に埋立土量も増加することとなり、海底地盤に作用する載荷重も増大することから、軟弱な沖積粘土層の沈下のみならず、深部に堆積している洪積粘土層の沈下が顕在化し問題となってきた。この洪積層における沈下の最大の問題は、地盤改良が困難なために埋立完了後も長期にわたってクリープ的に沈下が継続することである。

大阪湾海底に堆積している洪積粘土層は擬似過圧密粘土と呼ばれており、過去に現在の上載荷重よりも大きな荷重を受けていない正規圧密粘土地盤であるにもかかわらず、実験室で圧密試験を行うと過圧密比OCR=1.1~1.6程度の軽い過圧密を示すことが知られている。また一方で、神戸港・大阪港埋立地の現場観測データや長期圧密試験結果によると、埋立後の最終応力状態 $p_f$ が、圧密降伏応力 $p_c$ に達しないかまたは $p_c$ 付近に最終応力状態が来る(土質力学的には過圧密地盤とみなされる)ケースについても、二次圧密的な変形が生じ、長期にわたって洪積粘土層の沈下が継続して発生している。大阪湾に堆積している洪積粘土が有するこのような特徴的な擬似過圧密挙動は、年代効果(エージングやセメンテーション)による「構造」の発達に起因すると考えられているが、その原位置・室内のいずれにおいてもその挙動については未解明な部分が多く残されている。

一般的には沈下予測方法として、事前の室内圧密試験で得られた圧密定数( $e\text{-log}p$ ,  $m_v$ ,  $c_v$  etc.)と粘土層厚から理論計算によって最終沈下量 $S_f$ 、沈下量 $S$ と時間 $t$ 関係を予測する慣用法による沈下計算や弾粘塑性構成モデルを用いた一次元圧密計算が行われる。しかしながら、洪積粘土層の沈下予測に適用しようとする場合、高位の構造を有する洪積粘土では、圧密降伏応力 $p_c$ 付近あるいは $p_c$ 以下の過圧密領域においても顕著な時間依存性挙動を示すことが明らかになっており、過圧密領域では弾性的な即時沈下のみを考えるという従来の予測方法では現実の挙動をうまく予測できない場合もあることも指摘されている。

本論文は、神戸沖(神戸空港サイト)で採取した試料を用いた室内圧密試験データと原位置での詳細計測データを整理し、神戸地域の上部洪積粘土(Ma12層)の圧密特性の特徴を明らかにするとともに、その一次元圧縮挙動におけるひずみ速度依存性に着目し洪積粘土の沈下挙動の法則性について検討し、原地盤における時間~沈下関係の予測への適用性を確認するものである。

本論文は、6つの章から構成されている。それぞれ次のような内容について検討と得られた成果のまとめをおこなった。

第1章は序論であり、研究の背景と目的について述べるとともに、本論文の内容および構成についてまとめた。第2章では、はじめに、地盤沈下問題の歴史(地下水汲み上げによる地盤沈下問題とその原因解明の歴史、洪積粘土層の沈下)と大阪およびその周辺地域と神戸港における埋立の歴史についてレビューし、洪積層粘土の沈下が問題となるに至る経緯について述べた。さらに大阪湾堆積粘土の物理特性・力学特性、粘土の擬似過圧密挙動に関する研究、実測沈下に基づく沈下予測手法に関する既往の研究について詳しくまとめた。

第3章では、神戸空港サイトの地盤概要、洪積粘土層の物理特性・力学特性を種々の観点(粘土層ごと、液性限界ごと、等)に立って検討するとともに、洪積層の最上部にある海成粘土層(Ma12層)に着目して、一次元圧縮挙動に関する実験的検討を行い、次に示すことを明らかにした。

- 1) 神戸空港サイトのコンシステンシー特性について、Ac(Ma13)~Ma11層は、液性限界が深度方向に一定となる典型的な「神戸型」を示すが、Ma10、Ma9層では弓形の分布を示している。なお、Ma12層については層上部で最も塑性が高く、海退時における後背山地からの土砂供給により上端部が削剥された可能性もある。
- 2) 洪積粘土層のうちMa12上部、Ma10、Ma9層の液性限界(LL)が80~100%と他の粘土層よりも大きい。逆に、Ma11層は液性限界が他の粘土層に比べやや低い。
- 3) 神戸空港サイトの洪積粘土層の $e\text{-log}p$ 曲線を液性限界で分類して比較検討した。液性限界(LL)が80%以上の $e\text{-log}p$ 曲線では、Maナンバーにかかわらず年代効果による $p_c$ 付近での飛び出し現象が見られる。一方で、液性限界(LL)が80%未満の試料では $p_c$ 付近での飛び出し現象はほとんどみられなくなり、正規圧密領域では沖積粘土層・Ac層の正規圧密ラインと同じライン上を辿る。また、同じ液性限界の $e\text{-log}p$ 曲線では、堆積年代が古い粘土層(Maナンバーの小さな粘土層)ほど $p_c$ 付近での飛び出し現象が大きくなることが予想されたが、本サイトでは、飛出し量(言い換えれば過圧密比OCR)はMaナンバーによらず同程度であった。
- 4) 洪積粘土層の圧縮指数 $C_c$ の値は、Skemptonが提唱した関係式の1.5~4.5倍程度の値を示す。しかしながら、高応力域での $e\text{-log}p$ 曲線の勾配 $C_{cr}$ は、Skemptonの関係式であらわすことができる。
- 5) 地質分析(堆積環境調査)と液性限界の深度分布を対比した。海の指標を示す微化石類の検出個数と液性限界は調和的である。
- 6) Ma12層洪積粘土について圧密降伏応力付近の挙動に着目して長期圧密試験を行った結果、

$p_c$ 以下の過圧密領域においても時間の経過に伴ってクリープ的沈下が進行する、いわゆる擬似過圧密的な挙動が本サイトの洪積粘土でも確認できた。

- 7) Ma12層洪積粘土の圧密中のせん断弾性係数Gの変化を調べる実験を実施し、正規圧密領域でのGの値は概ね $G=100\sigma_v$  ( $\sigma_v$ :有効土被り圧)で近似できること、二次圧密の進行に伴ってGは微増することが明らかとなった。
- 8) 埋立前の堆積地盤におけるMa12層洪積粘土のせん断弾性係数 $G_0$ は、 $G>200\sigma_v$ を示し、室内試験の正規圧密範囲から得られた値よりもかなり大きい。これについては、粘土が堆積してから現在に至るまでの年代効果等が大きく寄与していると考えられる。

第4章では、神戸沖(神戸空港)サイトのMa12層洪積粘土層を用いた種々の一次元圧密試験データと現場でのMa12層洪積粘土層の時間～沈下関係の計測結果から、圧縮挙動のひずみ速度依存性に着目して整理し検討し、次のことを明らかとした。

- 1) Ma12層洪積粘土層は、ひずみ速度に応じて圧密降伏特性が異なる。
- 2) Ma12層洪積粘土層は、正規圧密領域で、ひずみ速度に固有の $e-\log\sigma'_v$ 曲線上を推移する挙動を示すことから、応力～ひずみ関係はIsotach性を有しているといえる。
- 3) Ma12層に関する室内試験(段階載荷圧密[IL]、定ひずみ速度圧密[CRS])、三軸KO圧密および原位位置計測結果から得られた圧密降伏応力について、過圧密比OCR(= $p_d/\sigma'_{v0}$ )とひずみ速度の関係を整理した結果、洪積粘土Ma12層の $p_c$ のひずみ速度依存性は次の式で表される。

$$p_c/\sigma'_{v0} = 1.65 + 0.1 \cdot \log\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{0.01}}\right)$$

- 4) 原位位置における圧密挙動から室内圧密試験における広範なひずみ速度領域に対して、ひずみ速度に応じた圧密降伏応力の値がユニークな関係で表現できることが明らかとなった。

第5章では、第3章・神戸沖(神戸空港サイト)の地盤特性、第4章・圧縮ひずみ速度に着目した沈下～時間関係での検討結果から得られた知見に基づいて、神戸空港B-1地点について3つの手法によりMa12層洪積粘土の将来的な沈下～時間関係の予測方法を提案した。検討の結果から、次に示すことを明らかとした。

- 1) 原位位置における圧縮指数 $C_c$ は、ひずみ速度の違いによらず室内圧密試験から求めたものとほぼ同程度であった。
- 2) 双曲線近似法を用いた原地盤の沈下量の予測によると、2100年時点におけるMa12層全体の圧縮ひずみは3.1%、また圧縮量は0.88mとなった。また、 $\sqrt{t}$ 目盛りによる双曲線近似を利用した方法では2100年時点におけるMa12層全体の圧縮ひずみは4.5%、また圧縮量は

1.3mとなった。

- 3) ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 一定の $e-\log\sigma'_v$ 曲線群は正規圧密領域で平行であるとの経験則と、 $p_c/\sigma'_{v0} \sim \dot{\epsilon}$ 関係からひずみ速度が異なる場合の圧縮曲線の位置を予測し、原地盤の $e-\log\sigma'_v$ 関係を予測することができた。
- 4)  $e-\log\sigma'_v$ 関係のコンター図を利用した沈下量の予測によると、Ma12層全体の圧縮挙動が上部層の計測結果で代表されると仮定すれば、2100年時点におけるMa12層全体の圧縮ひずみは5.9%、また圧縮量は1.7mであった。

第6章は、本研究の総括と第1章から第5章までの各章で得られた結果をとりまとめて結論とした。

氏名	藤原 照幸		
論文 題目	ひずみ速度に着目した大阪湾洪積粘土地盤の一次元圧密特性に関する研究		
審査 委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	澁谷 啓
	副査	教授	田中 泰雄
	副査	教授	飯塚 敦
	副査		
	副査		
印			
要 旨			
<p>大阪湾の人工島建設に代表されるように、海底に厚く粘土地盤が堆積する大水深海域の埋立工事では、地盤改良工事ができない深部の洪積粘土層の長期圧密特性の評価が人工島の長期沈下予測にとって極めて重要となる。本論文は、大阪湾に建設される大規模人工島造成時における長期沈下予測手法の確立をテーマとして、その長期沈下の原因となっている洪積粘土の圧密特性を室内試験・原位置計測データに基づいて明らかにしている。さらに、洪積粘土層の長期沈下メカニズムを解明するために、一次元圧縮挙動におけるひずみ速度依存性に着目して沈下挙動の法則性について検討し、原地盤における時間～沈下関係の予測法を新たに提案している。</p> <p>第1章は、序論であり、本研究の背景と目的を論じた上で、本論文の構成を簡略に説明している。</p> <p>第2章では、本論文での研究に関連する既往の研究をとりまとめて説明している。まず、地盤沈下問題の歴史（地下水汲み上げによる地盤沈下問題とその原因解明の歴史、洪積粘土層の沈下）と大阪およびその周辺地域と神戸港における埋立の歴史、洪積層粘土の沈下が問題となるに至る経緯について説明し、次に、大阪湾堆積粘土の物理特性・力学特性、粘土の擬似過圧密挙動、ひずみ速度依存性、年代効果と構造の定量化、実測沈下に基づく沈下予測手法に関する既往の研究について紹介している。</p> <p>第3章では、本研究の研究対象とした神戸空港サイトの地盤概要、神戸沖の洪積粘土層の物理特性・力学特性に関して詳細に説明している。また、洪積層の最上部にある海成粘土層（Ma12層）を用いて実施した一次元圧縮挙動に関する実験的検討の試験条件、試験結果等について詳しく説明している。</p> <p>第4章では、神戸空港サイトのMa12洪積粘土層を用いて実施した一連の一次元圧密試験データと現場でのMa12洪積粘土層の時間～沈下関係の計測結果から、ひずみ速度依存性に着目して検討した結果について詳しく述べ、原位置における圧密挙動から室内圧密試験における広範なひずみ速度領域に対して、ひずみ速度に応じた圧密降伏応力が推定可能であることを説明している。</p>			

氏名	藤原 照幸
<p>第5章では、第3章の神戸沖（神戸空港サイト）の地盤特性、第4章の圧縮ひずみ速度に着目した沈下～時間関係での検討結果から得られた知見に基づいて、神戸空港B-1地点について3つの将来沈下予測手法によりMa12層洪積粘土の将来的な沈下～時間関係の予測方法を提案し、その予測結果について説明している。</p> <p>最後に、第6章の「結論」では、本研究において得られた成果や知見を総括し、結論を述べている。</p> <p>以上のように本研究は、大阪湾海底の深部に堆積する洪積Ma12粘土層の長期圧密特性に関してひずみ速度による影響を定量的に評価した上で、新たな長期沈下予測法を提案したものであり、大規模人工島建設に伴う長期沈下予測の精度向上に資する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。</p> <p>よって、学位申請者の藤原 照幸は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。</p>	