

泉州沖更新統層における中間砂礫層の透水能と 海上空港建設による長期沈下について

三村 衛・池田侑哉*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

大阪泉州沖の大水深海域において埋立によって建設されている関西国際空港基礎地盤は、第四紀更新統の堆積層において大きな沈下を引き起こしている。本稿では、その主たる要因が、更新統粘土の擬似過圧密性と時間依存性、更新統砂礫層のマクロ透水能をであると考えた。既に著者らによって提案されている構造を有する粘土の新たな圧縮モデルを適用し、砂礫層の不連続性や細粒分による透水性低下を等価な透水係数を与えることによってマクロな透水特性をモデル化し、これらを弾粘塑性有限要素法に組み込むことによって、現地で起こっている現象を評価することを試みた。解析結果は、基礎地盤内の過剰間隙水圧分布、各更新統粘土層の沈下挙動の実測値を表現し得ており、提案している解析手法が妥当なものであることがわかった。

キーワード：更新統粘土，更新統砂礫層，埋立，長期沈下，弾粘塑性有限要素解析

1. はじめに

大阪湾海底地盤は沈降し続ける基盤上に土砂が堆積することによって形成されたもの（小林他，2001）で、気候変動によって起こる海進・海退に符合して粘性土と砂礫土が互層をなす構造を有している。また氷河などによる明確な過圧密履歴を受けておらず、土質力学的には正規圧密状態に近い。ところが、更新統粘土に対して圧密試験を行うと、圧密降伏応力 p_c は現在の有効土被り圧 p_0 よりもやや大きく、およそ 1.1～1.4 程度の軽い過圧密比を示すことが知られている。この見かけの過圧密の要因については、続成作用による構造骨格の形成が考えられるが、確たる証左は得られていない。赤井・佐野（1981）は、こうしたメカニカルな過圧密履歴を受けていない過圧密粘土を“擬似過圧密粘土”と呼称し、先行圧縮を受けた過圧密粘土と明確に区別して考えるべきであると指摘している。

大阪湾更新統粘土は海底に堆積してそのまま圧縮を受けたと考えた時に達する間隙比よりも大きな間隙比を示し、いわゆるかさばった構造を有している

という特徴を有している（土田，2001）。そのため、見かけの p_c 以下の応力域にとどまっている間は構造が大きく壊されることがないが、 p_c を超える载荷を受けると構造の劣化と破壊が起こり、元々圧縮しろが大きいことも相まって、急激かつ大きな変形を引き起こすことになる。この特徴を端的に表すと、圧密曲線 $e \sim \log p$ 関係の非線形性ということになる。練り返し粘土の力学においては、 $e \sim \log p$ 関係は p_c をはさんで過圧密側では勾配 C_s の、正規圧密側では勾配 C_c の直線で表現できるものとされている。事実、カオリンや藤森粘土に対して行われる圧密試験ではそのようになっている。ところが、自然堆積粘土、特に堆積年代の古い更新統粘土においては、载荷によって構造骨格がダメージを受ける正規圧密領域での $e \sim \log p$ 関係は直線とは言い難く、下に凸の非線形性を示す。つまり、 p_c を超えると急激に間隙比が減少し、その後応力レベルが高くなるにしたがってその勾配は緩やかに変化するような形を示す。こうした $e \sim \log p$ 関係の非線形性が更新統粘土層の圧縮挙動にどのように寄与するのかを検討することが、関西国際空港基礎地盤の沈下挙動を理解する上

で不可欠である。

次に、大阪湾更新統粘土の見かけの p_c 以下の領域での圧縮特性についても言及しておかなければならない。Mimura et al. (2003) は、大阪港埋立地の咲洲、舞洲、夢洲において実施された長期沈下計測結果から、更新統粘土層において無視できない長期沈下が生じていることを報告している。大阪市港湾局によって継続的に実施された層別沈下計測結果によれば、浅部の Ma12, 11 層では埋立によって p_c を超える応力状態になるために、顕著な時間遅れ沈下が長期間にわたって発生している一方、 p_c を超えないいわゆる過圧密領域に留まっている Ma10, 9 といった比較的深部の粘土層においても時間遅れ沈下が継続している。この現象は p_c 以下の領域を弾性変形とする従来の考え方では表現できないものである。Mimura and Jang (2004) は、大阪湾更新統粘土がメカニカルな過圧密履歴を受けていないという意味で土質力学的には正規圧密粘土であるということから、圧密試験によって得られる圧密降伏応力 p_c は見かけのものであり、現応力 p_0 から载荷を受けると直ちに粘塑性ひずみが発生すると仮定した圧縮モデルを提案し、これを組み込んだ弾粘塑性有限要素解析によって、咲洲、舞洲、夢洲の時間遅れ沈下挙動を的確に表現できることを明らかにした(Mimura and Jang, 2004, 2005a)。関西国際空港のある泉州沖と大阪港のある湾奥部では粘土の特性に若干の違いはあるが、基本的な堆積環境は共通であり、関西国際空港基礎地盤の更新統粘土層でも同じ挙動が起こることが予想される。したがって本稿では、解析にあたり、Mimura and Jang (2004) による解析スキームを適用する。

関西国際空港基礎地盤の変形を考えるにあたり、透水を受け持つ砂礫層についても十分な検証が求められる。従来の土質力学では、砂礫層は透水層であり、有限の透水係数を有しているにせよ、载荷による過剰間隙水圧の発生は考慮されていない。つまり砂礫層は完全排水境界と考えられている。関西国際空港基礎地盤の更新統層内の砂礫層の特徴は、Ma13 直下の Ds1 層と Ma7 層直下の Ds10 層は厚く、砂礫分も多く良好な排水層として機能すると考えられるものの、その中間に存在する各層については、層の連続性の欠如、層厚の貧弱さ、細粒分含有率の高さという特徴を有しており、大きな埋立荷重を受けて粘土層から大量に排出される間隙水を遅滞なく消散させられるかどうかについて問題視されてきた。Jang and Mimura (2005) は、大阪港埋立地の地盤を用いて砂礫層の透水性と砂礫層内の過剰間隙水圧消散特性の関係を数値実験によって検討している。大阪港近傍の地盤は淀川からほど近いこともあり、陸上からの豊富な土砂供給によって砂礫層が厚く、水平方向への連続性に優れた良好な排水層として存在し

ている。こうした環境下では、通常の透水係数 10^{-3}cm/s であれば、埋立による砂礫層内での過剰間隙水圧の発生はほとんどなく、ほぼ完全排水状態と考えて問題がないが、透水性を低下させると埋立地外へ過剰間隙水圧が伝播し、砂礫層は完全排水境界とはならない。関西国際空港基礎地盤では大阪港に比べて砂礫層の品質が極端に悪くなっているため、砂礫層内を伝播する水圧の影響は無視できないと考えなければならない。Mimura and Sumikura (2000) は二次元弾粘塑性有限要素解析において、埋立地外側の水理境界までの距離を変えて砂礫層内の過剰間隙水圧の伝播傾向を検証し、泉州沖の地盤条件では埋立幅の 10 倍程度の領域を海側に設定しないと、水理境界条件の影響を受けることを明らかにしている。

関西国際空港基礎地盤の変形を考えるにあたり、更新統粘土が持つかさばった構造とそれに起因する時間依存性挙動、擬似過圧密性による見かけの p_c 以下の応力域における非弾性的変形、中間砂礫層のマクロな透水性が後続沈下に及ぼす影響の 3 つの要素について考慮することが必要である。本稿では、こうした観点に基づき、大水深海域における大規模埋立に伴う関西国際空港基礎地盤の応力～変形挙動について、数値解析によってどのようにアプローチすべきであるかについて議論する。

2. アプローチ手法としての弾粘塑性有限要素解析

本稿で更新統粘土の挙動を表現するために用いられている弾粘塑性構成モデルは Sekiguchi (1977) によって提案され、平面ひずみ解析に適用するにあたり、 K_0 値の予測性の改善とともに修正されたもの(関口他, 1982)である。構成モデルの弾粘塑性流動則は以下のように表される。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 Λ は比例定数、 F は粘塑性ポテンシャルであり、次式のように定義される。

$$F = \alpha \cdot \ln \left[1 + \frac{\dot{v}_0 \cdot t}{\alpha} \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right] = v^p \quad (2)$$

ここで、 α は二次圧縮指数、 $\dot{v}_0$ は基準体積ひずみ速度、 f は有効応力表示の応力関数、 v^p は粘塑性体積ひずみである。モデルの詳細構造は Mimura and Sekiguchi (1986) を参照されたい。こうして得られた応力～ひずみ関係は次式のような増分形で有限要素法に組み込まれている。

$$\{\Delta \sigma'\} = [C^v] \{\Delta \epsilon\} - \{\Delta \sigma^R\} \quad (3)$$

ここに、 $\{\Delta\sigma'\}$ 、 $\{\Delta\varepsilon\}$ は有効応力増分と対応するひずみ増分であり、 $[C^v]$ は弾粘塑性係数行列、 $\{\Delta\sigma^R\}$ はひずみ一定条件下で時間の経過とともに増加する緩和応力である。間隙水の流れは等方 Darcy 則に従うとし、透水係数 k は間隙比の変化に対応して次式のように変化する。

$$k = k_0 \exp \left[\frac{e - e_0}{\lambda_k} \right] \quad (4)$$

ここで、 k_0 は初期状態における間隙比 e_0 に対応する透水係数 k の値を表し、 λ_k は間隙比の変化に伴う透水係数の変化指数を示している。

3. モデル化に際して考慮すべきポイント

3.1 基準曲線としての $e\text{-log}p$ の考え方

大阪湾更新統粘土は、現在受けている土被り圧に対応する間隙比よりも大きな間隙比を有する、「かさばった構造」を持っている。これにより、载荷を受けた時の圧縮しろが大きく、特に続成作用によると思われる構造が破壊されるような载荷を受けると大きな沈下を引き起こす可能性が指摘されてきた。本節では、基準曲線としての $e\text{-log}p$ 関係の形が地盤挙動に及ぼす影響について検討する。

圧密試験を行うと圧密曲線 $e\text{-log}p$ は p_c を超えた領域で下に凸の非線形形状を示す。したがって、 p_c を超える応力域に载荷応力が来るような場合には、これを忠実のモデル化しなければ沈下を的確に評価できないということはわかりやすい。一方、この非線形性を有する $e\text{-log}p$ が過剰間隙水圧の発生消散過程にどのように寄与するのかについてはきちんと検証されてこなかった。Mimura et al. (1994) は圧密曲線 $e\text{-log}p$ の非線形性が地盤の応力～変形特性に及ぼす影響を検証するために、 p_c を超える領域における下

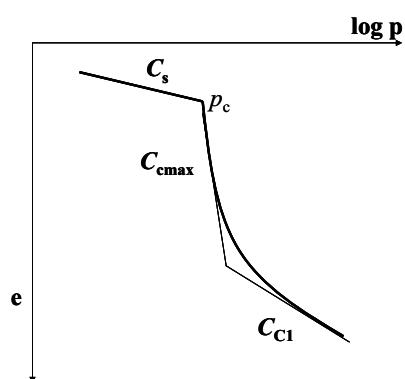


Fig. 1 Consolidation curve for structured clays

に凸の非線形的な $e\text{-log}p$ 関係を 2 本の直線でモデル化する“トリリニア型 $e\text{-log}p$ 関係”を仮定し、粘土・砂礫層の互層モデル地盤に埋立荷重が作用した場合の地盤挙動について数値実験を行った。Fig. 1 に仮定した圧密モデルを模式的に示す。圧密試験結果に基づいて描かれる $e\text{-log}p$ 関係は p_c を境界として過圧密領域では C_s 、正規圧密領域では C_{ci} の勾配を与えて決定される。ところが、いわゆる構造を有する粘土では、塑性降伏による構造の劣化によって p_c を超えた直後に急激な間隙の圧縮が起こり、応力が大きくなるに従ってその勾配が徐々に小さくなるという挙動を示す。結果的に $e\text{-log}p$ 関係は下に凸の非線形関係を示すことになる。ここではこれを 2 本の直線で近似し、 p_c 直後の最急勾配を C_{cmax} 、応力レベルの高い領域の勾配を C_{ci} とする。また粘土の透水係数は間隙比との一義的な関係により $e\text{-log}k$ にしたがって線形的に変化するものと仮定する。試行解析によって、更新統粘土の p_c 直後の圧縮性を C_{cmax} とすることにより、粘土層内のみならず、上下を挟み込む砂礫層においても過剰間隙水圧の長期間の停留が起こり、一次圧密に要する時間が長期化する現象が表現できることが明らかにされている。また高い圧縮性を C_{cmax} を仮定しているため、沈下については従来モデルを用いた場合よりも早期に大きな沈下が発生するという結果となっている。このように、かさばった構造と载荷に伴う構造劣化をモデル化することが、現地で起こっている「地盤内に大きな過剰間隙水圧が停留しつつ早くて大きな沈下が進行する」という現象が説明できることがわかっている。本稿における解析でもこの考え方を踏襲している。

3.2 砂礫層のマクロ透水性

粘土層の圧密挙動は、過剰間隙水圧の消散に伴う一次圧密と、消散後も継続する二次圧密から成る。本稿で使用している弾粘塑性構成モデルは、非弾性的なひずみとして粘塑性ひずみを仮定しており、一次圧密変形にも時間依存性ひずみが含まれることになる。一次圧密は载荷による応力によって発生する過剰間隙水圧の消散に伴って進行するため、排水層の透水機能が重要なファクターとなる。大阪湾内において、湾奥に位置する大阪港付近の地盤は淀川河口から近く、大河川の運搬する豊富な土砂によって砂礫層が厚く堆積している (Mimura and Jang, 2004)。礫分の含有率が高く、水平方向への連続性も優れている (大阪湾地盤情報の研究協議会, 2002) ため、高い透水性を有しており、砂礫層内における埋立荷重による過剰間隙水圧はほぼ瞬時に消散し、周囲への伝播は起こらない。このような条件で広大な埋立が行われると、島内の変形は近似的に一次元圧密で

評価することができる。注意すべきことは、変形の一次元性だけでなく、水圧の水平方向への広がりがないという“水の流れの一次元性”も担保されなければ、一次元圧密計算は成り立たないということである。上記の両方が満足される地盤条件を満足する大阪港埋立地の場合、一次元有限要素解析での沈下計算が可能であった (Mimura and Jang, 2004)。これに対して関西国際空港の場合は、更新統砂礫層が、①層厚が薄く、②連続性に欠け、③細粒分が多く含有されているという特徴を有している。このような条件で大規模な埋立が行われると、本来期待されている砂礫層内の水圧消散が十分に起こらず、粘土層だけでなく砂礫層内にも過剰間隙水圧が停留するという現象が起こる (例えば Akai and Tanaka, 1999)。前節で説明したように、intrinsic な圧密曲線 (e - $\log p$ 曲線) の非線形性は地盤内の過剰間隙水圧の停留に寄与するが、これに加えて排水層として期待している更新統砂礫層の貧透水性はこの現象を増大させることが懸念される。Mimura and Sumikura (2000), Mimura and Jang (2005b) によって指摘されているように、劣位の透水性を有するような互層地盤においては、透水を担う砂礫層が十分に機能せず、相対的に透水性が高い砂礫層内を過剰間隙水圧が埋立地外へと伝播し、海底地盤の応力状態を内部から変化させてしまう可能性がある。したがって、埋立による基礎地盤の応力～変形特性を評価するにあたっては、多次元的な水圧伝播特性を勘案したモデル化が求められる。Mimura and Jang (2005b) によれば、埋立領域のほぼ 10 倍程度の距離をとって水理境界とすれば境界の影響を受けない解析結果が得られることが報告されている。

3.3 p_c 以下の領域におけるひずみ速度依存性の考慮

既に述べたように、大阪湾に堆積する更新統粘土は、沈降する基盤上に土砂が連続的にたまる形で形成されており、一部削り込みなどを除けば、氷河などによる明確な過圧密履歴を受けていない。つまり土質力学的には正規圧密状態にあると考えられる。ところが長期圧密試験を実施すると、 p_c 以下の応力域であっても顕著な時間依存性変形を起こし、弾性的な変形とはいえない挙動を示すことが報告されている (武田他, 2000, Mimura et al., 2003)。大阪湾海底から採取した更新統粘土に対する長期圧密試験結果の一例を Fig. 2 に示す。基準となる CRS 圧密試験による圧密曲線に対して、一定荷重で長期間放置する圧密試験を p_c の両側の応力域で実施すると、時間の経過とともに圧縮が進行し、等ひずみ速度線を描くとひずみ速度によってその挙動が全く異なっていることがわかる。同様の結果は Tanaka (2005) によ

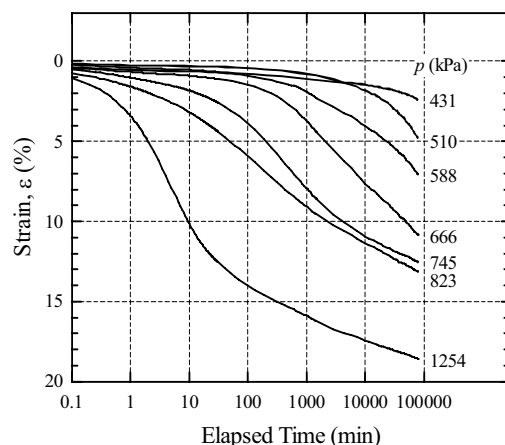


Fig. 2 Strain time relations for Osaka Pleistocene clay (Ma12) by long-term consolidation test (Mimura et al., 2003)

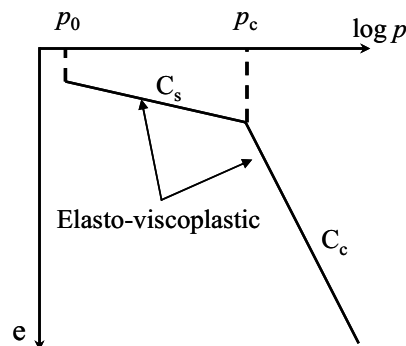


Fig. 3 Compression modeling for quasi-over consolidated clay (Mimura and Jang, 2004)

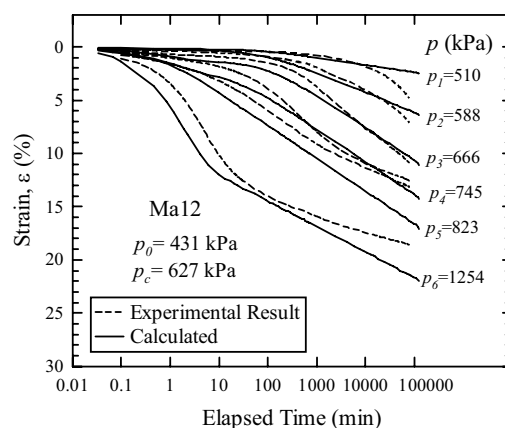


Fig. 4 Calculated strain time relations for Osaka Pleistocene clay (Ma12) by elasto-viscoplastic FEM compared with experimental results (Mimura and Jang, 2004)

って行われた関西国際空港基礎地盤から採取した更新統粘土においても認められており、大阪湾一帯に堆積している更新統粘土の共通した特性であろうと

考えられる。こうした事実を受けて、Mimura and Jang (2004)は擬似過圧密粘土と呼ばれる大阪湾更新統粘土を、正規圧密 aged 粘土と位置づけ、圧密試験で現れる p_c はひずみ速度依存性を有する見かけのものであり、圧密曲線の p_c 以下の応力域であっても粘塑性ひずみが発生すると仮定した圧縮モデルを提案している。

Fig. 3 に圧縮モデルの概要を示す。同圧縮モデルでは、圧密試験によって得られる圧密曲線を基準として、これによって得られている p_c を時間効果によるみかけのものと考え、現応力 p_0 から载荷を受けると、

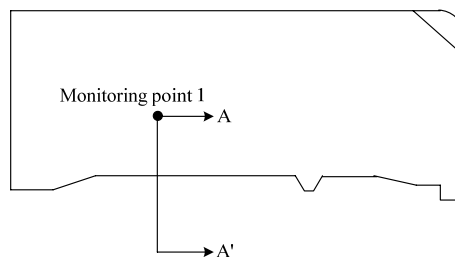


Fig. 5 Section for calculation and monitoring point

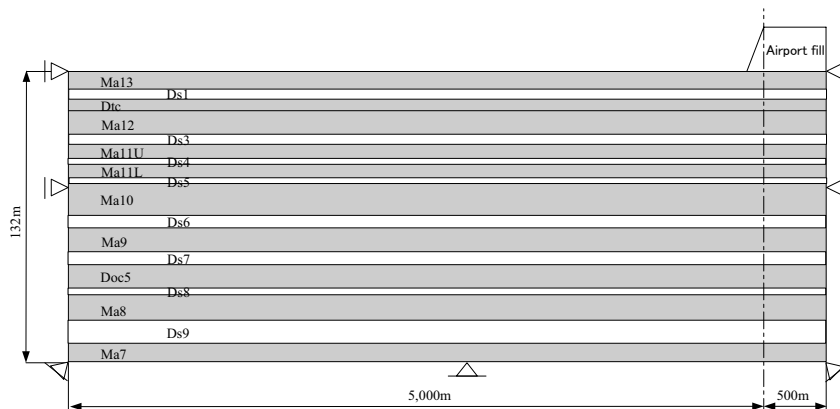


Fig. 6 Cross-section of the foundation ground adopted for FE analysis

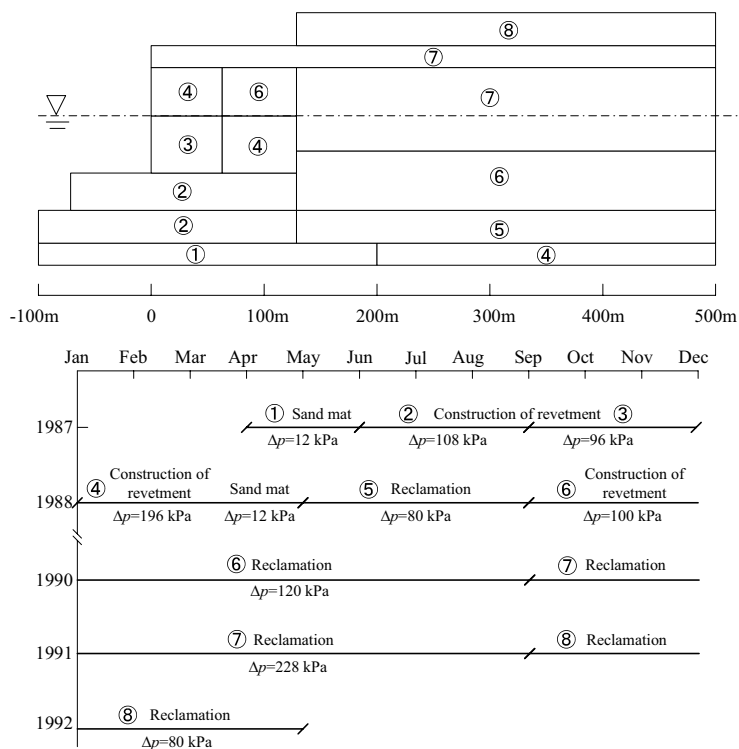


Fig. 7 Construction sequence

たとえ p_c 以下の領域であっても非弾性的挙動を起こすと仮定している。また使用する構成モデルが弾粘塑性モデルであり、ひずみ速度依存性については自動的に考慮されている。このモデルによって Fig. 2 に示した実験を解析した結果を Fig. 4 に示す。解析結果は実挙動を的確に表現しており、関西国際空港基礎地盤の変形挙動を評価するにあたり、 p_c 以下の非弾性挙動とひずみ速度依存性挙動を考慮しなければならないことがわかる。

4. 関西国際空港基礎地盤の解析

4.1 解析モデル化の概要

本節では、前節までに説明した枠組みによる関西国際空港基礎地盤の変形解析について議論する。問題の性質上、長期の変形が焦点となるため、一期空港島の層別沈下と過剰間隙水圧が継続的に測定されている 1 号櫓をターゲットとした断面 (Fig. 5 における A-A'断面) を考える。解析に用いた地盤モデルを Fig. 6 に示す。ここで、Ma は海成粘土層、Doc は非海成粘土層、Ds は砂礫層を表す。Ma13 はいわゆる沖積粘土層であり、Ma12 層以深は更新統層である。沖積粘土層はサンドドレーンが径 0.4m、2.0~2.5m ピッチで砂礫層 (Ds1) まで打設されている。解析に際し、サンドドレーンによる放射状の集配水機能はマクロエレメント法 (関口他, 1986) によってモデル化し、断面二次元の有限要素解析であっても三次元的な水の流れを考慮している。Ma12 以深の更新統粘土層については、既往の圧密試験結果に基づき、過圧密比 OCR=1.3 の軽い過圧密を仮定し、砂礫層 (Ds 各層) は有限の透水性を有する線形弾性体としている。具体的な透水性については後段で議論する。

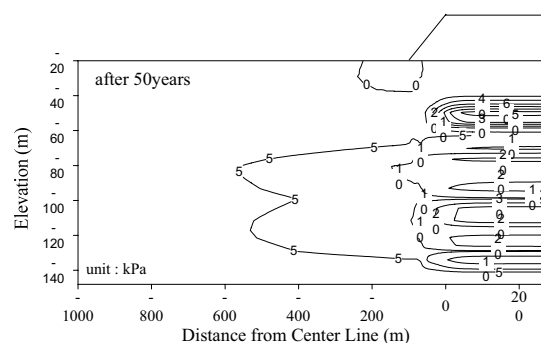
Fig. 6 におけるセンターラインの水平方向は、メッシュの対称性を考慮して完全非排水とし、埋立による排水はすべて海側に向かって生じると考える。一方、海側境界については、粘土層では完全非排水、砂礫層では完全排水と仮定している。解析に適用した荷重工程を Fig. 7 に示す。沖積粘土層の塑性変形は荷重履歴の影響を色濃く受けるため、正確な変形モードを再現するためには土砂投入の履歴を正確にモデル化する必要がある。本解析では当該地点の埋立履歴にそって荷重工程のモデル化を行っているが、目的が更新統粘土層の時間遅れ沈下の評価であることから、場所ごとに大きく平均化した埋立荷重を設定した。そのため、埋立の時刻歴という点では正確性をやや欠くものとなっていることを断っておく。解析に用いた土質定数は、得られた土質試験結果を

用い、著者らが準拠している手法 (Mimura et al., 1990) に沿って合理的に決定した。値の詳細については Mimura and Jang (2005b) を参照されたい。

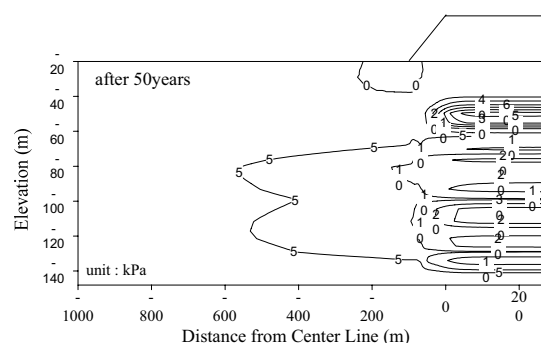
4.2 解析結果と考察

(1) 水理境界設定の影響

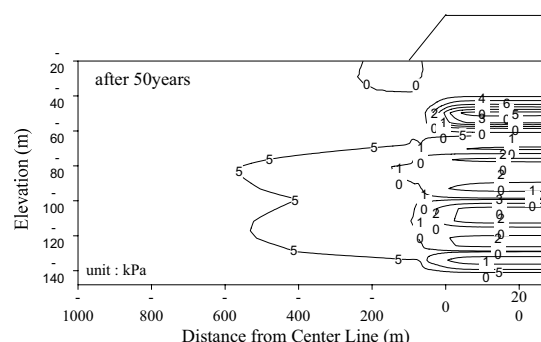
土水連成解析において、境界条件の設定が解析結果に大きく影響を及ぼすことはよく知られた事実である。対象となる変形層が表層近傍の沖積粘土層に限定されるような小規模な陸上の盛土の場合は、側方流動を抑え込むような近い距離に境界を設定すると過小評価の要因となる (三村・幸繁, 2005)。これは変位に関する境界条件の寄与を表す例である。大



(a) Seaside boundary: 1,000m, hydraulic condition at the seaside boundary of sand gravel layer: fully drained



(b) Seaside boundary: 5,000m, hydraulic condition at the seaside boundary of sand gravel layer: fully drained



(c) Seaside boundary: 5,000m, hydraulic condition at the seaside boundary of sand gravel layer: undrained

Fig. 8 Effect of distance to hydraulic boundary on the performance of excess pore water pressure due to reclamation

規模海上埋立の場合もこの点は同じであるが、載荷重、載荷面積両面という意味での載荷規模の増大により、影響を受ける地盤領域が鉛直・水平両方向に広がるため、深部更新統粘土層、排水を受け持つ中間砂礫層への影響を考慮しなければならない。大阪港埋立地における更新統粘土層の長期沈下評価に際し、Jang and Mimura (2005)は砂礫層の透水性が 10^{-3} cm/sec 以上であれば、砂礫層を完全排水層（透水係数 $k = \infty$ ）としても解析結果に影響を及ぼさない一方、この値が低下し、粘土層の透水係数に近づくと、載荷による全応力増大によって粘土層内で発生した過剰間隙水圧が砂礫層に伝播した後、砂礫層内を埋立地領域外に水平方向に広がっていくことを報告している。つまり、排水に関しては水平方向への動きを無視しては誤った解を与える可能性があることに

留意しなければならない。この試行解析は、淀川河口に近く、豊富な土砂供給環境にあって砂礫層が厚く堆積している大阪港基礎地盤を対象として行われたものであるが、泉州沖の海底地盤は近傍に大河川がなく、更新統砂礫層が貧弱であるということを考えると、その影響はさらに深刻なものとなる。解析にあたって、砂礫層内における過剰間隙水圧の水平方向への伝播特性を把握し、水理境界条件による解

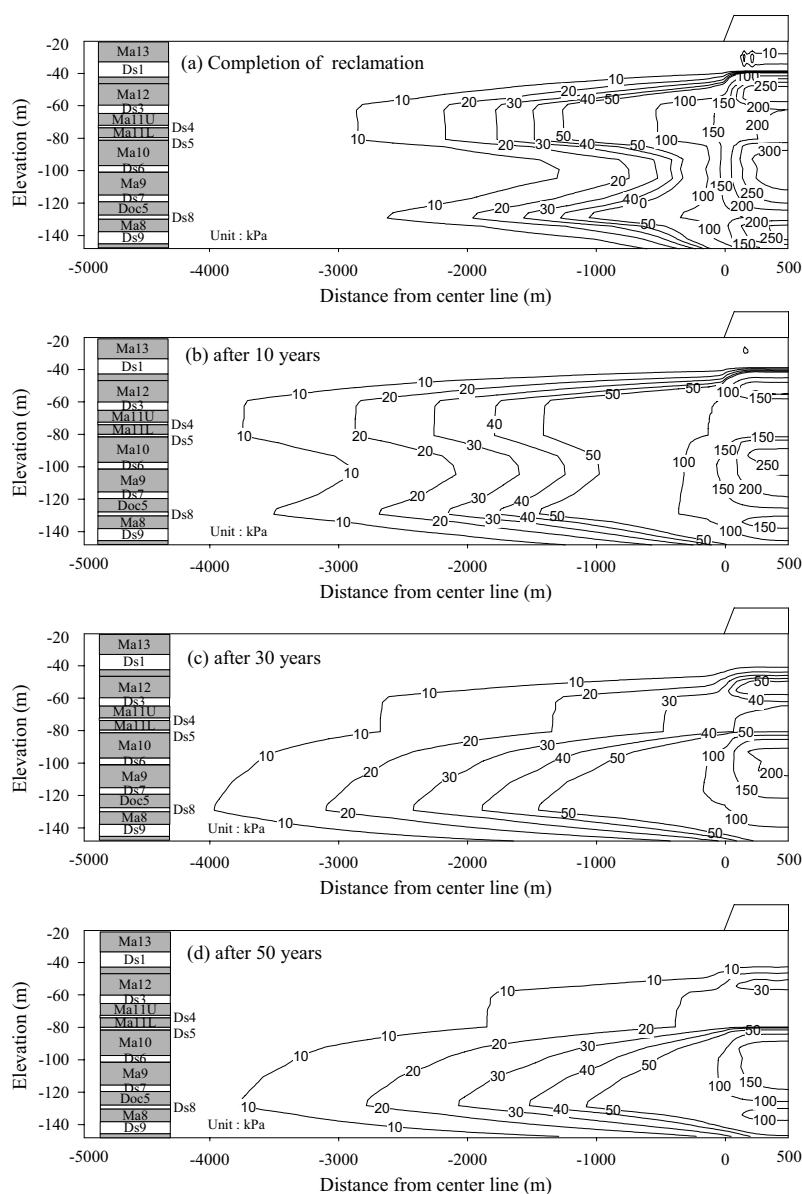


Fig. 9 Change in the distribution of excess pore water pressure with time in the Pleistocene foundation

析結果への影響を排除するメッシュを作成するための基礎資料として、海側の境界までの距離を変化させた時の地盤内応力の挙動についての検討を行った。ここで、Ito et al. (2001) による泉州沖砂礫層の分布状況に関する知見と、竹村 (2002) による砂礫層の透水性能評価にもとづいて、一連の解析では、透水性に優れていると評価された Ds1, Ds10 層の透水係数を 10^{-1}cm/sec のオーダーに、特に層厚、連続性、

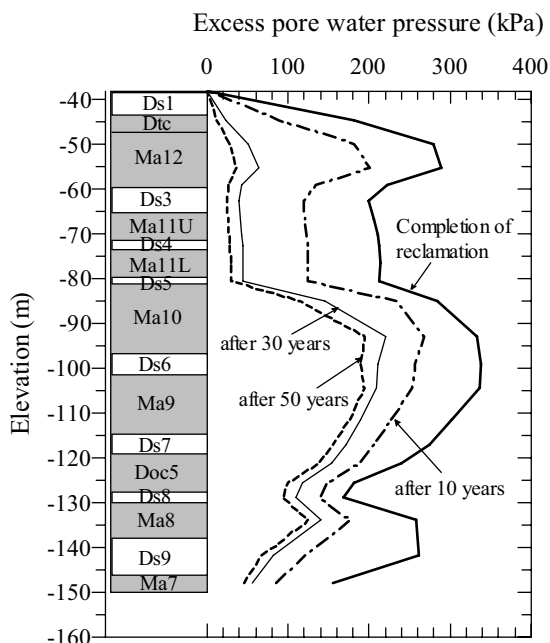


Fig. 10 Profiles of excess pore water pressure with depth at the center of the reclaimed foundation

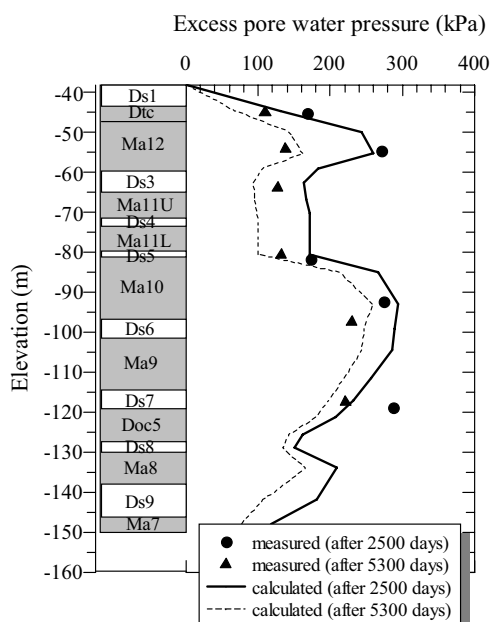


Fig. 11 Comparison of the calculated and measured excess pore water pressure with depth at the center of the reclaimed foundation

細粒分含有率に問題があって透水性をあまり期待できないと評価された Ds-6, 7, 8 については 10^{-5}cm/sec のオーダーに設定し、それ以外の普通レベルと評価された砂礫層については 10^{-3}cm/sec の値を適用した。ここで強調しておかないといけないのは、これらの値は薄い層厚、連続性の欠如、細粒分含有率の高さといった要因を包含したマクロな透水性という観点で設定された値であり、等価透水性という趣旨のものである。砂礫層の詳細な三次元的な広がりが確実に把握できれば、それを幾何条件として与えることができるが、実際には限られた地点の情報に基づいて推定せざるを得ないため、更新統砂礫層の層厚を一定とし、水平方向には連続的に広がっていると仮定した上で、各層に透水性の良否に沿った等価透水係数を与えることによって、各更新統砂礫層のマクロな透水性をモデル化した。Fig. 8(a), (b)に海側境界までの距離を 1,000m とした場合と載荷領域の約 10 倍の 5,000m とした場合の埋立後 50 年時点の過剰間隙水圧分布を比較して示す。埋立載荷領域は同一、埋立地側側方境界はメッシュの対称性を考慮してすべて完全非排水、海側水平境界は、粘土層は非排水、砂礫層は排水境界と仮定している。境界距離が短い Fig. 8 (a)では 1,000m 地点で水圧値ゼロという強制値が支配するため、埋立地から外れると急速に水圧値が低下し、境界での値ゼロに収束しているが、同じ条件で境界までの距離を 5,000m とすると (Fig. 8 (b)), 全く異なった水圧分布になることがわかる。埋立地直下では 50 年後であってもかなり大きな過剰間隙水圧が残留し、かつ 3,000m 外側であっても

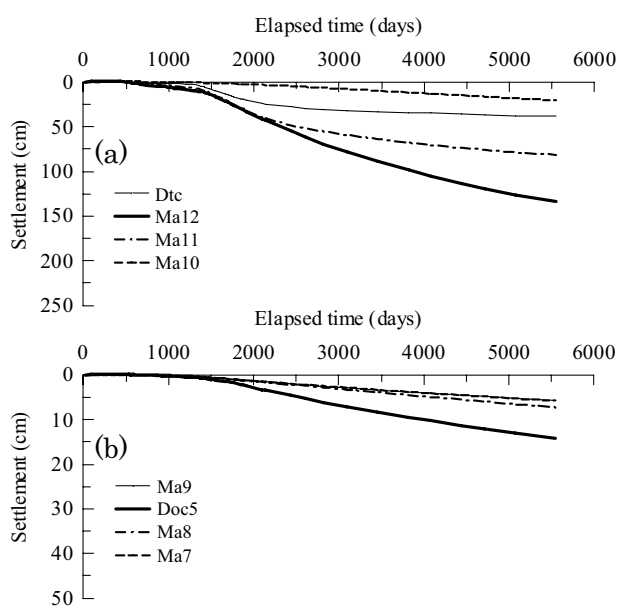


Fig. 12 Calculated settlement time relations for each Pleistocene clay layer

20～40kPa の過剰間隙水圧が伝播、残留している。ちなみに 1,000m 地点では 80kPa に達する量が残留しており、完全にゼロとなっている Fig. 8 (a)とは全く異なる結果をあたえることがわかる。一方, Fig. 8 (c)は Fig. 8 (b)と全く同じ幾何条件で, 砂礫層海側水平境界を完全非排水としたときの結果である。定量的には若干の相違はあるものの, 埋立領域外での過剰間隙水圧分布は両者で有意な差異はなく, 水理境界条件の影響を受けていないことが確認できる。以上の結果より, 載荷幅のおよそ 10 倍程度の排水距離を設定することによって水理境界条件の影響を排除できることが確認できる。したがって以後の解析では海側境界までの距離を 5,000m としている。

(2) 埋立に伴う地盤内応力～過剰間隙水圧挙動～

関西国際空港一期島建設による基礎地盤内の過剰間隙水圧コンターの解析結果を Fig. 9 に示す。図には (a): 埋立完了時点, (b): 埋立 10 年後, (c): 同 30 年後, (d): 同 50 年後における結果を示している。沖積粘土層 (Ma13) では, 全面にサンドドレーンが打設されており, この排水効果によって過剰間隙水圧は埋立期間中にほぼ消散してしまっていることがわかる。これに対して深部にあり, 地盤改良が不可能な更新統粘土層では大きな過剰間隙水圧が発生し, 長期間停留していることがわかる。当然のことではあるが, 埋立部直下では非常に大きな過剰間隙水圧が発生する。Ma12, 11 など比較的浅部の更新統粘土層では周辺の砂礫層が高透水性であるため, 時間の経過とともに水圧が消散していくのに対し, 透水性に問題有りとされる Ds6, 7 を挟むような Ma10, 9 層では時間が経過しても顕著な消散が起こっていない。さらに, 注目すべきことは, 絶対値はさほど大きくないものの埋立地外への過剰間隙水圧伝播が時間の経過とともに広がっていく傾向があることである。埋立から 50 年後でさえも, 埋立人工島地直下で 150kPa, 島外 1,000m 地点で 50kPa の水圧残留が認められる。この埋立領域外への過剰間隙水圧の伝播は, 二期空港島が 200m 隣接して埋め立てられる際には, 現行の一期島直下部に環流するという, 「水枕効果」の存在を示唆するものであり, 有効応力的にみて除荷を受ける部分 (一期島建設時の二期島予定地) と, 除荷・再載荷を受ける部分 (一期島直下) とがあり, それぞれの地盤がどのように変形するかについてはさらに検討しなければならない。一連の解析結果より, 埋立から 50 年間は水圧消散過程が持続するということであり, いわゆる一次圧密にこのオーダーの時間を要し, 必然的に水圧消散に伴う圧密変形も長期化すると考えるのが妥当であろう。

解析断面の中央部 (一期空港島 1 号橋地点相当) における過剰間隙水圧の深度方向分布を Fig. 10 に

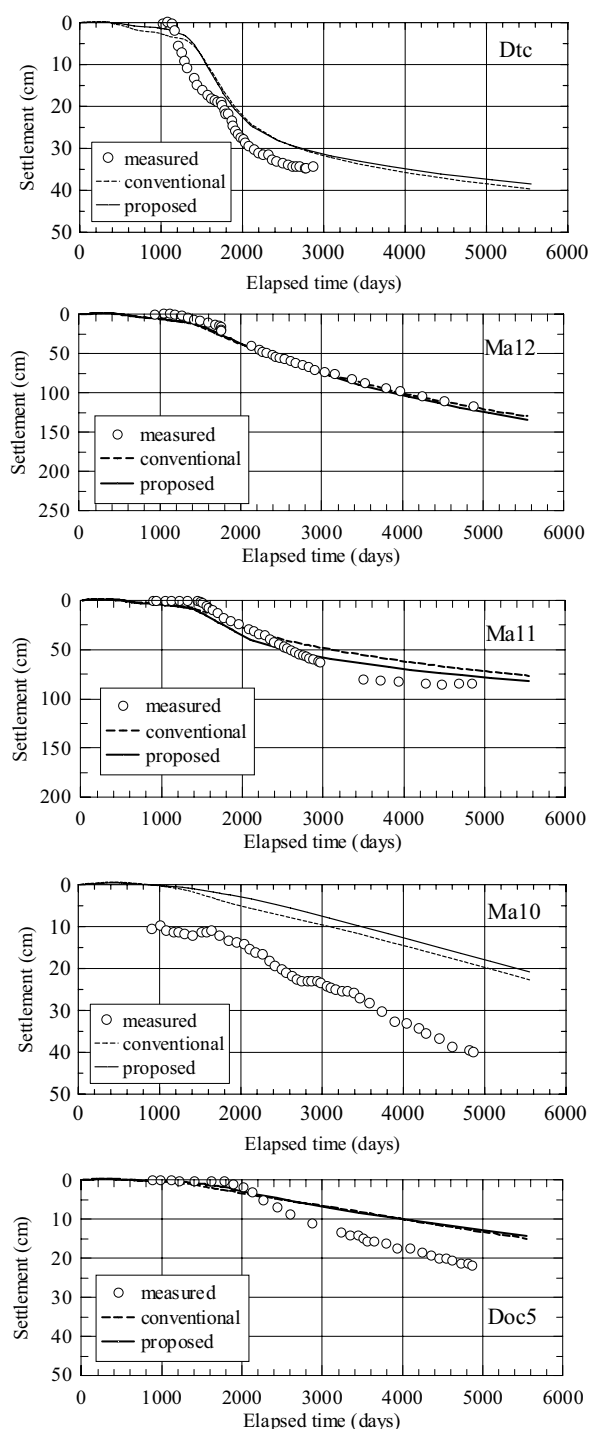


Fig. 13 Comparison of calculated and measured settlement with time for each Pleistocene clay layer at monitoring Pont 1

示す。表示時点は, Fig. 9 に準拠して, 埋立完了時点, 埋立 10 年後, 30 年後, 50 年後における結果を示した。Fig. 9 の地盤内の過剰間隙水圧分布コンターでも明らかなように, 浅部更新統粘土層 Ma12, 11 では埋立によって最大 300kPa 近い過剰間隙水圧が発生するものの, その後の時間経過とともに順調に消散して圧密が進行する様子が明確に現れている。

この理由としては、Ds1 層の高透水性の寄与が大きいこと、また Ma11 層は砂層によって二層に分割され、粘土自身もシルト質で透水係数もやや大きくなっている (Mimura and Jang, 2005b) ことなどがあげられる。これに対して、その下位の更新統層の水圧消散モードは明らかに異なったものとなっている。この領域に堆積する砂礫層、Ds6, 7 は泉州沖の地盤でもかなり透水能力に難があると評価された層であり、解析に際しても 10^{-5} cm/sec オーダーの低い等価透水係数を与えている。結果として、Ma10, 9 そして非海成の Doc5 といった粘土層はあたかも 1 枚の粘土層 (中間に狭在する Ds6, 7 が存在しないかのような) であるかのような過剰間隙水圧の発生モードを示している。これらの層では埋立から短期間ではいくぶんかの消散が進むものの、30 年後～50 年後の時間帯ではほとんど有意な変化を示さない。このメカニズムは以下のようなものである。すなわち、埋立直後から短期間は、元々静水圧状態であって粘土層に比べると透水性の高い砂礫層に、埋立によって粘土層内に発生する過剰間隙水圧が伝播してくる。そのため、粘土層内の水圧は砂礫層内に再配分されるために若干軽減される。ところが、砂礫層の低い透水性のために排水が追いつかず、ある平衡状態に達するとその後は劇的な変化が期待できなくなるため、互層全体 (Ma10～Doc5 まで) が粘土一層であるかのような挙動を示すことになる。その結果、埋立から 50 年が経過した時点でも最大で 200kPa 近い過剰間隙水圧が Ma10 層下部や Ma9 層上部で残留することになっている。

解析結果の妥当性を評価するために、Fig. 10 で示した解析断面の中央部 (一期空港島 1 号橋地点相当) における過剰間隙水圧の深度方向分布を実測値と比較して Fig. 11 に示す。限られた数のデータによる比較となっているが、埋立からの経過時間、2500 日、5300 日における解析結果は概ね実測値を再現できており、設定した地盤モデル、特に更新統砂礫層の等価透水係数の値が妥当なオーダーであったことがわかる。

(3) 埋立に伴う沈下挙動

関西国際空港埋立による更新統粘土各層の沈下～時間関係の解析結果を Fig. 12 に示す。図の煩雑さを避けるために、Dtc から Ma10 までを Fig. 12(a) に、Ma9 から Ma7 までを Fig. 12(b) に分けて示す。前項 (2) の Fig. 9, 10 に示すように、浅部更新統粘土層 (Dtc, Ma12, 11) の過剰間隙水圧は時間と共に順調に消散するため、いわゆる一次圧密が教科書的に進行し、Fig. 12(a) からわかるように下に凸の沈下～時間曲線を示す。これに対してその下位に堆積する Ma10, 9 においては Ds6, 7 層の低透水性のために過剰間隙水

圧の消散が遅れて停留し、そのために一次圧密もさほど進行しない。したがって、水圧消散をさほど伴わない時間遅れ沈下が生じるということになる。二次圧密を「一次圧密終了後に過剰間隙水圧のない状態で進行する沈下」と定義すれば、この段階で発生している沈下は二次圧密とは言えない。しかしながら、既に大阪港埋立地の長期沈下測定 (武田他, 2000, Mimura et al., 2003) から、過圧密領域においても更新統粘土層に時間遅れ沈下が発生することや、大阪湾に堆積する擬似過圧密粘土は、同じ載荷応力を受けていてもひずみ速度が小さくなると大きな圧縮が生じることがわかっており、こうした特性を評価できる圧縮モデル (Mimura and Jang, 2004) が導入され、その妥当性が検証されている (Mimura and Jang, 2005a)。本稿における解析モデルもこの考え方を踏襲しており、元々一次圧密中に発生するひずみも時間依存性を含んだ粘塑性ひずみであり、さらに p_c 以下の応力域であっても非弾性的なひずみが発生することになる。典型的な水圧消散＋一次圧密というパターンに乗らない変形モードであるため、経過時間に対して直線的で、応力状態やひずみ速度によっては上に凸な形状の沈下～時間曲線を示すことになる。

(4) 実測値との比較と考察

関西国際空港一期島の 1 号橋で計測された層別沈下結果を本稿で実施した有限要素解析結果と比較して Fig. 13 に示す。比較的沈下進行の早い浅部の Dtc, Ma12, 11 と、遅れている中深度の Ma10, Doc5 を取り上げて比較する。また採用した圧縮モデルのパフォーマンスをみるために、 p_c 以下の応力域での挙動を弾性と仮定した従来法による結果を併せて示した。優勢な透水層に近接する浅部更新統粘土層、Dtc, Ma12, 11 では、解析結果と実測結果は非常によい一致を示しており、適用した解析手法の妥当性が確認できる結果となっている。またこの領域は埋立荷重によって載荷のかなり早い時期に p_c を超えて正規圧密領域に入り、排水も順調に行われるということで、見かけの過圧密領域 (擬似過圧密領域) に長く留まる大阪港の場合とは異なり、Ma11 で今回の圧縮モデルを用いた場合に沈下の量と速度がやや大きくなる以外は従来法との差異がさほど認められない。これに対して、周辺の砂礫層の低透水性のために水圧消散が遅れる中深度の粘土層では変形モードが異なってくる。Ma10 については測定値にやや問題があり評価は難しい。また Doc5 では 2,000 日付近からの急激な沈下を解析結果がフォローしきれていない。水圧消散が遅れる中深度の更新統粘土層の中でも、Doc5 層は非海成でややシルト質であるため透水係数が上位の Ma10, 9 に比べて大きくなっていることと、同層直下の Ds8 層の透水性が悪くないことも相

まって、比較的圧密進行が順調な層である。過剰間隙水圧の停留が顕著で、ひずみ速度が極端に小さくなる粘土層での再現性がよくないという結果になっている。

5. おわりに

関西国際空港基礎地盤である泉州沖の更新統層は、粘土層と砂礫層の互層構造を有している。特徴としては、大阪港における淀川のような大河川が付近になく、土砂供給が潤沢ではないため、透水を司る砂礫層の発達があり優勢ではない。層厚が薄く、連続性に欠け、細粒分含有率が高いという透水性にとってはネガティブな特性を持つため、大規模海上埋立地の荷重を受けた時の排水機能に大きな問題がある。関西国際空港基礎地盤の変形を検討するにあたり、要素レベルでの砂礫層試料の透水係数で評価される透水性は、地盤全体を見通した時に考えなければならないマクロな透水性とは違ったものとなるということを十分念頭に置く必要がある。本稿では、各種地盤調査結果に基づいてできる範囲で更新統砂礫層のマクロ透水能を数値化することに苦心した。連続性に優れた厚い砂礫層は **Ds1** と **Ds10** であり、非常に劣悪な砂礫層は **Ds5**, **6**, **7** であった。解析にあたっては、層厚はそれぞれの調査孔の平均的な値を与え、結果として、地質学的知見から砂礫層の幾何的な要因を等価な透水係数に押し込む形でのモデル化を行った。

更新統粘土は全層にわたって軽い過圧密状態であり、空港島荷重によってかなりの深度まで塑性降伏を引き起こす。また、初期状態が基準堆積曲線に比べて間隙比がかなり大きな、いわゆる“かさばった”構造を有しており、一旦その構造が壊れるとその分圧縮しろが大きくなる。圧密降伏応力 p_c を超えた直後には対数スケールでも下に凸状の強い非線形性を示し、この高い圧縮性を考慮しなければ、現地で起こっている大きな過剰間隙水圧の発生と停留、およびその条件下での急激な沈下の進行という現象は説明できない。逆に、この圧縮特性を適切にモデル化することによって、現場の特異と思われた挙動を統一的に表現できることがわかった。特に、粘土層の圧縮モデルの改良が、狭く砂礫層内の過剰間隙水圧の停留と消散遅れに寄与するという事実が事前のモデル解析で明らかとなった。

排水砂礫層が優位な浅部更新統粘土層では、埋立によって大きく正規領域に入り、かつ順調に過剰間隙水圧が消散するという、まさしく教科書的な圧密が進行するのに対して、過剰間隙水圧の消散が非常に遅れる中深度の粘土層では降伏に達する時間が大

きく遅れるため、擬似過圧密粘土特有の p_c 以下の応力域での時間遅れ沈下が過剰間隙水圧残留状態で起こることになる。また大深度下での長期間の変位測定には技術的な問題も多く、必ずしも納得できるデータがすべての更新統粘土層で蓄積されたとはいえない。こうした条件下で、擬似過圧密粘土の見かけの過圧密と見かけの p_c 以下の応力域における粘塑性挙動の発現を仮定した圧縮モデルを組み込んだ弾粘塑性有限要素解析を実施した。本解析に先立って、水理境界条件の影響を検討し、泉州沖地盤ではかなり大きな領域を埋立地外に採らなければ、境界条件の影響を除いた解析結果が得られないことを明らかにした。この結果に基づいて、一期島の変形解析にあたり、載荷領域外に載荷幅の約 10 倍にあたる 5,000m を必要解析領域とした。

弾粘塑性有限要素解析により、空港島建設によって発生する過剰間隙水圧は、埋立地区直下で非常に大きくなるが、更新統砂礫層内を海側に伝播し、長期的には空港島外の基礎地盤に広がることがわかった。空港島直下地盤では、浅部更新統層においては初期の大きな過剰間隙水圧は時間の経過とともに順調に消散し、埋立 50 年後には一次圧密が終了するのに対し、砂礫層の透水能が低い中深度の更新統粘土層では 150kPa に達する非常に高い水圧が長期にわたって残留し、その分圧密の進行は遅れることになる。1号櫓地点解析結果を埋立開始から 2500 日時点、5300 日時点で比較すると、**Doc5** 層でやや過小評価となるものの、それ以外の測定値は解析結果によく一致しており、一連の解析結果は現地の地盤内応力状態を概ねよく評価し得ていることがわかる。

更新統粘土層の各層ごとの層別沈下～時間関係では、埋立荷重によって大きく正規圧密領域に達する浅部更新統粘土層 (**Dtc**, **Ma12**, **11**) では、逆 S 字型の沈下曲線となるのに対し、中深度で過剰間隙水圧が長期間停留する **Ma10**, **9** やそれ以降の粘土層では初期応力レベルが大きいことも相まって直線的な沈下曲線となる。ただし、**Doc5** については、非海成で粘土自身の透水係数が高いこともあって、比較的早く沈下が進行する。

解析結果の妥当性については、現地における実測値との整合性によって評価される。本稿では、空港島 1 号櫓の結果に絞って検討したが、深度の大きい地点での計測では多様な困難を伴い、**Ma9**, **8**, **7** の各層についてはあまり信頼できる値となっていなかったため、解析結果との比較を行っていない。また **Ma10** についても、初期段階において理解に苦しむパフォーマンスを示しており、結果として解析結果とのずれを生じている。**Dtc** から **Ma11** に至る浅部更新統粘土各層では解析結果と実測値は非常によく整合しており、解析手法の妥当性が確認できる結果と

なっている。応力状態が p_c 近傍にあつて過剰間隙水圧が停留している粘土層における挙動がうまく説明できるかどうかに関心のあるところであつたが、Ma10, Doc5 を除いて議論できなかった。この 2 層についても、上位の各層の結果と比較すると整合性が悪く、深部更新統粘土層の計測を含めた問題の幾分かは先送りされている。今後二期島の長期沈下データが蓄積されるが、その際、一期島を埋め立てたことによって二期地区基礎地盤に過剰間隙水圧が伝播し、有効応力が減少するために生じる除荷、二期島を埋め立てたことによって逆に一期島直下基礎地盤への過剰間隙水圧伝播によって生じる除荷、この水圧が消散していくことによって生じる一期島基礎地盤への再載荷に際して、更新統粘土地盤がどのような挙動を示すのか、巷間指摘される「水枕効果」の検討、さらには除荷時であっても変形が弾性的ではなく、時間の経過とともに除荷領域でも二次圧密的な沈下が現れるという研究成果（渡部他，2004）を考慮した場合の後続沈下の可能性の検討など、克服すべき課題は山積している。空港島の今後の長期間にわたる安定的な供用に資する研究成果が期待される。

謝 辞

本稿の基となる一連の研究を遂行するにあたり、京都大学大学院理学研究科の竹村恵二先生に、泉州沖地盤の成り立ちと砂礫層の分布、透水性について地質学的知見に立脚した助言を多くいただいた。（財）地域地盤環境研究所の山本浩司氏には、大阪湾更新統土の物性値について数多くのデータを提供いただいた。また数値解析は、隅蔵雄一郎氏（現国土交通省）、張祐榮氏（現GS Engineering & Construction Co. Ltd）の大学院における研究の一環として行われたものである。記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 赤井浩一・佐野郁雄（1981）：大阪上部洪積層粘土の長期圧密特性，土と基礎，第29巻，第3号，pp. 43-47.
- 小林岳・三田村宗樹・吉川周作（2001）：深層ボーリングコアからみた神戸地域第四紀系の岩相変化と堆積速度，地球科学，第55巻，第3号，pp. 131-143.
- 三村 衛・幸繁宜弘（2005）：FEM解析結果に影響する因子の評価～圧密解析を題材に～，土と基礎，第53巻，第8号，pp. 28-30.
- 大阪湾地盤情報の研究協議会（2002）：ベイエリア

の地盤と建設～大阪湾を例として～，505p.

- 関口秀雄・西田義親・金井文夫（1982）：粘土の平面ひずみ粘塑性モデルについて，第37回土木学会年次学術講演会概要集，第3部，pp. 181-182.
- 関口秀雄・柴田徹・藤本朗・山口博久（1986）：局部載荷を受けあるバーチカル・ドレーン打設地盤の変形解析，第31回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 111-116.
- 武田弘一・三村衛・小田和広・諏訪靖二・山本浩司（2000）：大阪港埋立地における洪積層の沈下について，過圧密土および過圧密地盤の力学に関するシンポジウム発表論文集，pp. 105-110.
- 竹村恵二（2002）：私信.
- 土田 孝（2001）：海成粘土地盤の自然含水比と土被り圧の関係に関する統一的な解釈，地盤工学会論文報告集，第41巻，第1号，pp. 127-143.
- 渡部要一・田中洋行・宇高薫・野坂知正・小林正樹・田端竹千穂・森川嘉之（2004）：大阪湾洪積粘土の除荷膨張及びその後の再クリープ（その1），第59回土木学会年次学術講演会発表論文集，III，pp. 519-520.
- Akai, K. and Tanaka, Y. (1999): Settlement Behaviour of an Off-shore Airport KIA. Proc. 12th ECSMGE, Vol. 2, pp. 1041-1046.
- Ito Y., Takemura, K., Kawabata, D., Tanaka, Y. and Nakaseko, K. (2001): Quaternary Tectonic Warping and Strata Formation in the Southern Osaka Basin Inferred from Reflection Seismic Interpretation and Borehole Sequences. Journal of Asian Earth Science, Vol. 20, pp. 45-58.
- Jang W. Y. and Mimura, M. (2005): Effect of Permeability and Compressibility of Sandwiched Gravelly Sand Layers on Subsequent Settlement of Pleistocene Deposits, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 6, pp. 111-119.
- Mimura, M. and Jang, W. Y. (2004): Description of Time-dependent Behavior of Quasi-overconsolidated Osaka Pleistocene Clays Using Elasto-viscoplastic Finite Element Analyses, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 4, pp. 41-52.
- Mimura, M. and Jang, W. Y. (2005a): Verification of the Elasto-viscoplastic Approach Assessing the Long-term Deformation of the Quasi-overconsolidated Pleistocene Clay Deposits, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 1, pp. 37-49.
- Mimura, M. and Jang, W. Y. (2005b): Long-term Settlement of the Pleistocene Deposits Due to Construction of KIA, Proc. of the Symposium on

- Geotechnical Aspect of Kansai International Airport, pp. 77-85.
- Mimura, M. and Sekiguchi, H. (1986): Bearing Capacity and Plastic Flow of A Rate-sensitive Clay Under Strip Loading. Bulletin of DPRI, Kyoto University, Vol. 36, Part 2, pp. 99-111.
- Mimura, M., Shibata, T., Nozu, M. and Kitazawa, M. (1990): Deformation Analysis of a Reclaimed Marine Foundation Subjected to Land Construction. Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, pp. 119-133.
- Mimura, M., Shibata, T. and Watanabe, K. (1994): Post Yield Modeling of Compression for Pleistocene Clays and Its Application to Finite Element Analysis. Proc. Pre-failure Deformation of Geomaterials, Vol. 1, pp. 517-522.
- Mimura, M. and Sumikura, Y. (2000): Deformation and Excess Pore Water Pressure of the Pleistocene Marine Deposits due to Offshore Reclamation, Proc. Int. Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Vol. 1, pp. 339-344.
- Mimura, M., Takeda, K., Yamamoto, K., Fujiwara, T. and Jang, W. Y. (2003): Long-term Settlement of the Reclaimed Quasi-overconsolidated Pleistocene Clay Deposits in Osaka Bay, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 6, pp. 141-153.
- Sekiguchi, H. (1977): Rheological Characteristics of Clays. Proc. 9th ICSMFE, Vol. 1, pp. 289-292.
- Tanaka, H. (2005): Consolidation Behavior of Natural Soils Around p_c Value -Long Term Consolidation Test-, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 3, pp. 83-95.

Contribution of Macroscopic Permeability of Sand/Gravel Layers to Subsequent Long-term Settlement of the Reclaimed Marine Foundation of KIA

Mamoru MIMURA and Yuya IKEDA*

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

A series of elasto-viscoplastic finite element analyses is carried out to simulate the stress and deformation of the reclaimed Pleistocene foundation due to construction of Kansai International Airport fill. The foundation ground at Senshu area consists of alternating Pleistocene clays and sandy gravel layers. The influential factor controlling the deformation of the foundation ground is high compressibility and strain rate dependency of the structured Pleistocene clays as well as mass permeability of the Pleistocene sandy gravel layers controlling the rate of consolidation. In the FE analyses, the equivalent permeability is introduced considering the discontinuity and/or change in thickness of permeable sand gravel layers and low permeability due to finer components.

The calculated performance can describe the measured long-term settlement with time for each Pleistocene clay layer as well as the process of generation/dissipation of excess pore water pressure both in the Pleistocene clay and sand layers very well.

Keywords: Pleistocene clay Elasto-viscoplastic FEM, Long-term settlement, Mass permeability