

## 海上埋立による更新統互層地盤の応力と変形に関する数値解析

田 炳坤\*・三村 衛

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

大阪湾泉州沖に海上埋立空港として建設された関西国際空港の基礎地盤は、更新統粘土・砂礫の互層が厚く堆積する構造を有しており、当初から長期沈下問題が懸念されていた。1987年に一期空港島建設が開始され、1994年の開港を経て、1999年から一期空港島から200m沖合に平行滑走路を有する二期空港島が建設され、現在は2つの滑走路を持つ24時間空港として供用されている。本稿では、隣接する2つの空港島建設による更新統互層地盤の長期沈下挙動を総合的に検討する第一段階として、一期空港島を対象として、大規模海上埋立による更新統互層地盤の変形を二次元有限要素法によって解析するスキームを構築する。そのため、更新統砂礫層の透水性を等価透水係数で評価するとともに、更新統粘土の圧密降伏応力 ( $p_c$ ) を評価して擬似過圧密性を考慮したモデルを用いて関西国際空港基礎地盤の二次元弾粘塑性有限要素解析を実施する。また、適用した解析手法の妥当性について実測値との比較を通して議論する。

**キーワード:** 更新統地盤, 弾粘塑性有限要素解析, 長期沈下挙動, 等価透水係数, 擬似過圧密

### 1. はじめに

近年の急速な都市化によって、生活や移動に利便性の高い沿岸部や大河川の流域の低平地に人口が集中する傾向が高くなっている。こうした地域の地盤は河川による運盤土砂の堆積場となっており、河川中流域では扇状地や後背湿地が、河口部から沿岸部では三角州や軟弱土地盤が広がっている。日本の大都市はこうした軟弱地盤上に展開しており、沈下や側方流動、支持力などの地盤工学的問題が懸念されるケースが多い。

本論文で検討対象として取り上げた関西国際空港は大阪湾泉州沖に海上埋立空港として建設されたものである。関西国際空港の基礎地盤は、更新統粘土・砂礫の互層が厚く堆積する構造を有しており、更新統粘土は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と見なすことができる。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 ( $p_o$ ) 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ている。Mimura et al. (1994) は、こうした関西国際空港の地盤では更新統粘土と砂礫層の顕著な過剰間隙水圧の消散が発生しなくても大きい沈下が生じていることを報告している。この現象は過剰間隙水圧の消散と共に沈下が発生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仮定した。したがって、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、更新統粘土は現応力 ( $p_o$ ) 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た。さらにこのモデル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、排水を支配する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としても、载荷による過剰間隙水圧の発生を考慮しないことが多い。つまり砂礫層は完全排水境界と仮定されている。関西国際空港基礎地盤の更新統層内の砂礫層の特徴は、砂礫質で良好な排水層として機能するものは少なく、一部の層については、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った排水層としては問題となる特徴を有しており (Ito et al, 2001)、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証している。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 ( $k=10^{-3}\text{cm/s}$ ) を有していれば、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。しかしながら、層厚が十分ではなく、透水性が低下すると、砂礫層内での水圧消散が遅れ、本来排水層であるはずの砂礫層を介して埋立地外へ過剰間隙水圧が伝播するという現象が生じる。関西国際空港基礎地盤では大阪港に比べて排水層としての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。1987年に

一期空港建設が開始され、1994年の開港を経て、1999年から一期空港島から200m沖合に平行滑走路を有する二期空港島が建設され、現在は2つの滑走路を持つ24時間空港として供用されている。本稿では、隣接する2つの空港島建設による更新統互層地盤の長期沈下挙動を総合的に検討する第一段階として、一期空港島を対象として、大規模海上埋立による更新統互層地盤の変形を二次元有限要素法によって解析するスキームを構築する。

## 2. 数値解析に関するモデル化

### 2.1 解析地盤のモデル化

大阪湾海底地盤は沈降する基盤上に海進、海退によって粘性土と砂礫が交互に堆積するという構造を有している。泉州沖海底地盤も同様の地盤構造となっているが、このあたりには大河川がなく、陸上からの土砂供給が十分ではないことから、大阪湾や神戸沖と比べて砂礫層厚が薄く、連続性に欠け、細粒

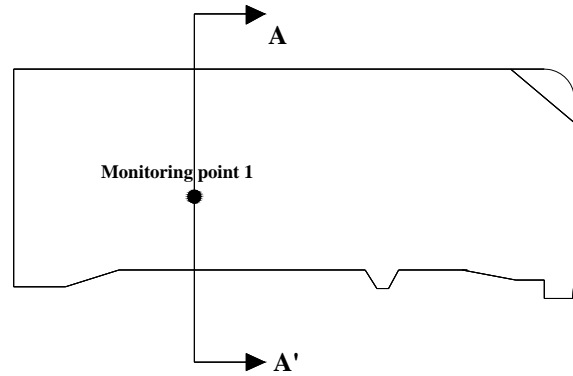


Fig. 1 Plan view of Kansai International Airport (KIA)

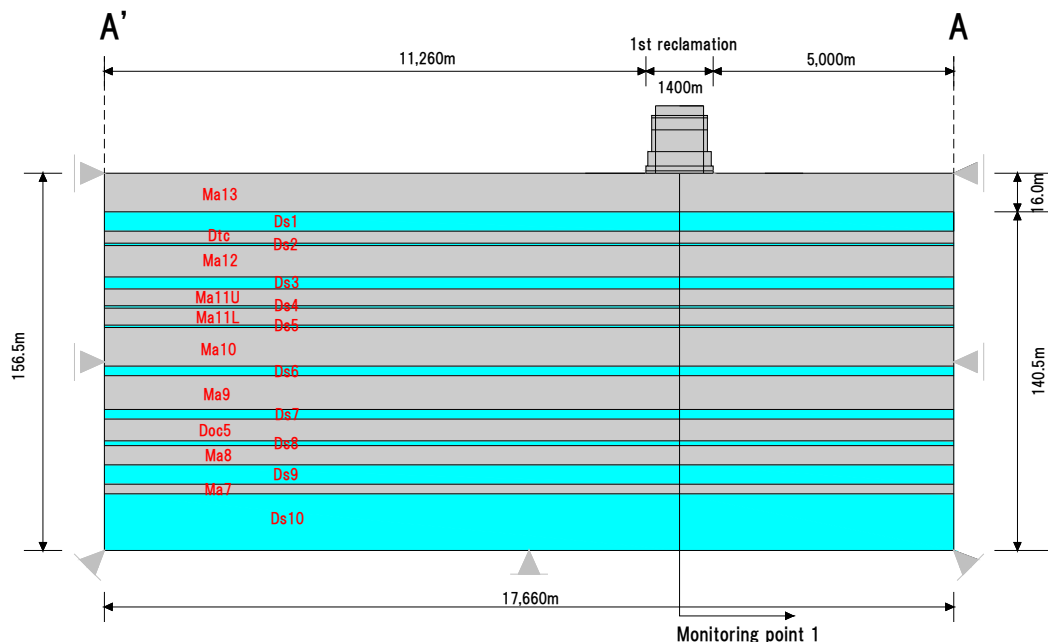


Fig. 2 Model foundation of KIA for finite element analysis

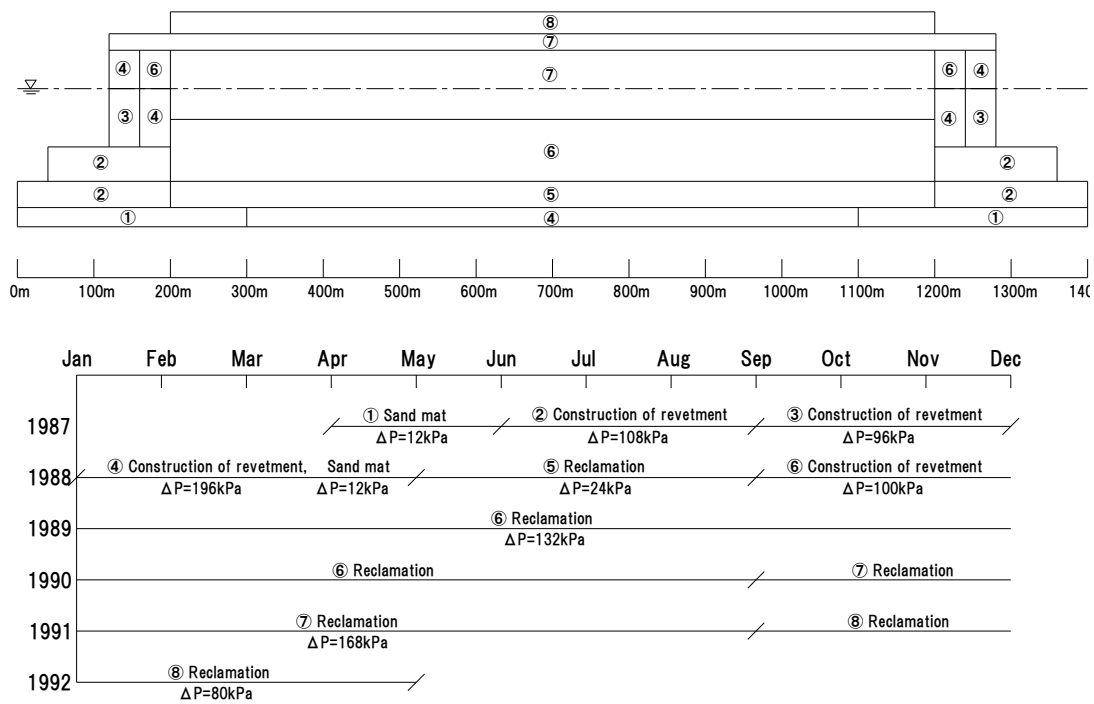


Fig. 3 Sequence of construction for 1<sup>st</sup> phase island of KIA

分含有率が高いという特徴がある。これは、排水層としての能力に全幅の信頼を置けないということにつながり、粘土層の圧密速度を支配する砂礫層の透水性が強く懸念される。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号槽をターゲットとした断面 (Fig.1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.2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、Dtc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。Mimura & Jang (2005) は有限要素解析における側方水理境界の影響を検討し、泉州沖のように砂礫層の排水能力に問題のある地盤では、載荷幅の10倍程度の解析領域を採らなければ、圧密の計算に水理境界の影響が現れてしまうことを報告している。本稿ではその成果に基づき、加えて、次のステップでは二

期空港建設に伴う二期間の相互作用と両島の長期沈下挙動解析を実施することを念頭に置いて、Fig.2に示すように一期空港島沖側に10,000m、陸側に5000mの領域を有する解析モデルを設定した。関西国際空港基礎地盤は海側に向かって出現深度が深くなる傾斜地盤となっているが、本解析では、一期空港島中央部の層厚を基準として水平堆積地盤と設定し、メッシュ両端の排水条件は粘土層は非排水、砂礫層は排水境界とする地盤モデルを設定した。解析に適用した載荷工程をFig.3に示す。沖積粘土層の塑性変形は載荷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載荷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。

## 2.2 解析地盤の主な特性とパラメター

大阪湾更新統粘土は続成作用によって見かけの過圧密が発生している。これは、現在受けている土被

Table 1 Values of equivalent coefficient of permeability for the Pleistocene sand gravel layers

| 砂礫層        | Ds1                  | Ds2                  | Ds3                  | Ds4                  | Ds5                  | Ds6                  | Ds7                  | Ds8                  | Ds9                  | Ds10                 |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 透水係数(cm/s) | $5.0 \times 10^{-2}$ | $8.0 \times 10^{-3}$ | $2.5 \times 10^{-2}$ | $1.6 \times 10^{-3}$ | $4.5 \times 10^{-3}$ | $2.5 \times 10^{-5}$ | $2.5 \times 10^{-5}$ | $2.0 \times 10^{-3}$ | $3.0 \times 10^{-3}$ | $4.0 \times 10^{-3}$ |

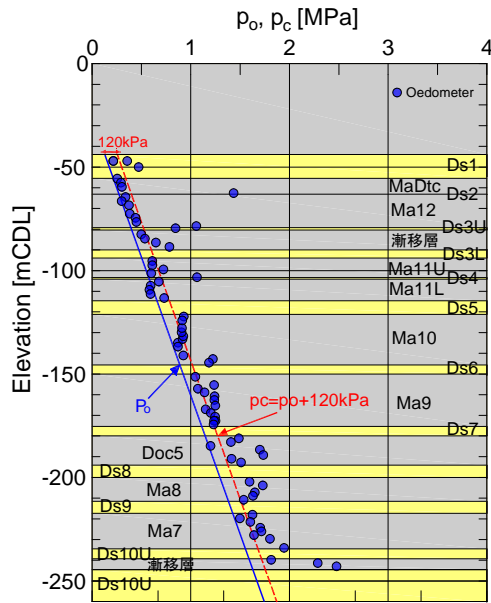


Fig. 4 Profile of  $p_c$  for the Pleistocene clays in the foundation of KIA

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、載荷を受けた時の圧縮しるが大きく、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載荷をう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。関西国際空港基礎地盤の厚序と標準圧密試験の結果に基づく圧密降伏応力の分布をFig.4に示す。図中灰色で示す部分が粘土層で、見かけの過圧密量として $\Delta p_c (=p_c - p_o) = 120\text{kPa}$ が得られることがわかる。本解析では、 $p_c$ を更新統疑似過圧密粘土の見かけのものと考え、 $p_c$ 以下の応力域での非弾性挙動を仮定した(Mimura & Jang, 2005)。また、砂礫層は弾性体とし、水平方向に連続しているモデルを採用した。排水層としての能力に関わる層の連続性、厚さ、細粒分含有率の影響は、等価透水係数に反映させる形で表-1に示すように値を各層に対して仮定することによって考慮した。具体的には、連続性に悪さや薄層厚によってマクロな透水性に問題があるとされるDs6, Ds7層は低い等価透水係数を設定し、連続性のよい礫層であるDs1やDs3層は等価透水係数を高く設定した。それ以外の普通の砂礫層と判断した層については実験で得られる $10^{-3}\text{cm/s}$ オーダーの値をそのまま用いた。一期空港島建設による荷重履歴は沈下と嵩上げによる埋立層の浮力補正を施したものを海底地盤に作用させた。解析に用いた土質定数は、えられた土質試験結果を用い、Mimura et al (1990)が準拠している手法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。

## 2.3 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、Ko値の予測性に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、 $\Lambda$ 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、 $\alpha$ 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に増分形で有限要素法に組み込まれている。

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

ここで、 $\{\Delta \sigma'\}$ 、 $\{\Delta \epsilon\}$ は有効応力増分と対応するひずみ増分であり、 $[C^{ep}]$ 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。

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

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、 $\lambda_k$ 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. 解析結果による関西空港一期島基礎地盤の応力と変形

### 3.1 埋立に伴う地盤内の過剰間隙水圧挙動

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.5に示す。図には(a):埋立完了時点、(b):埋立10年後、(c):二期空港島埋立直前(一期空港島埋立開始から4800日経過時点)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

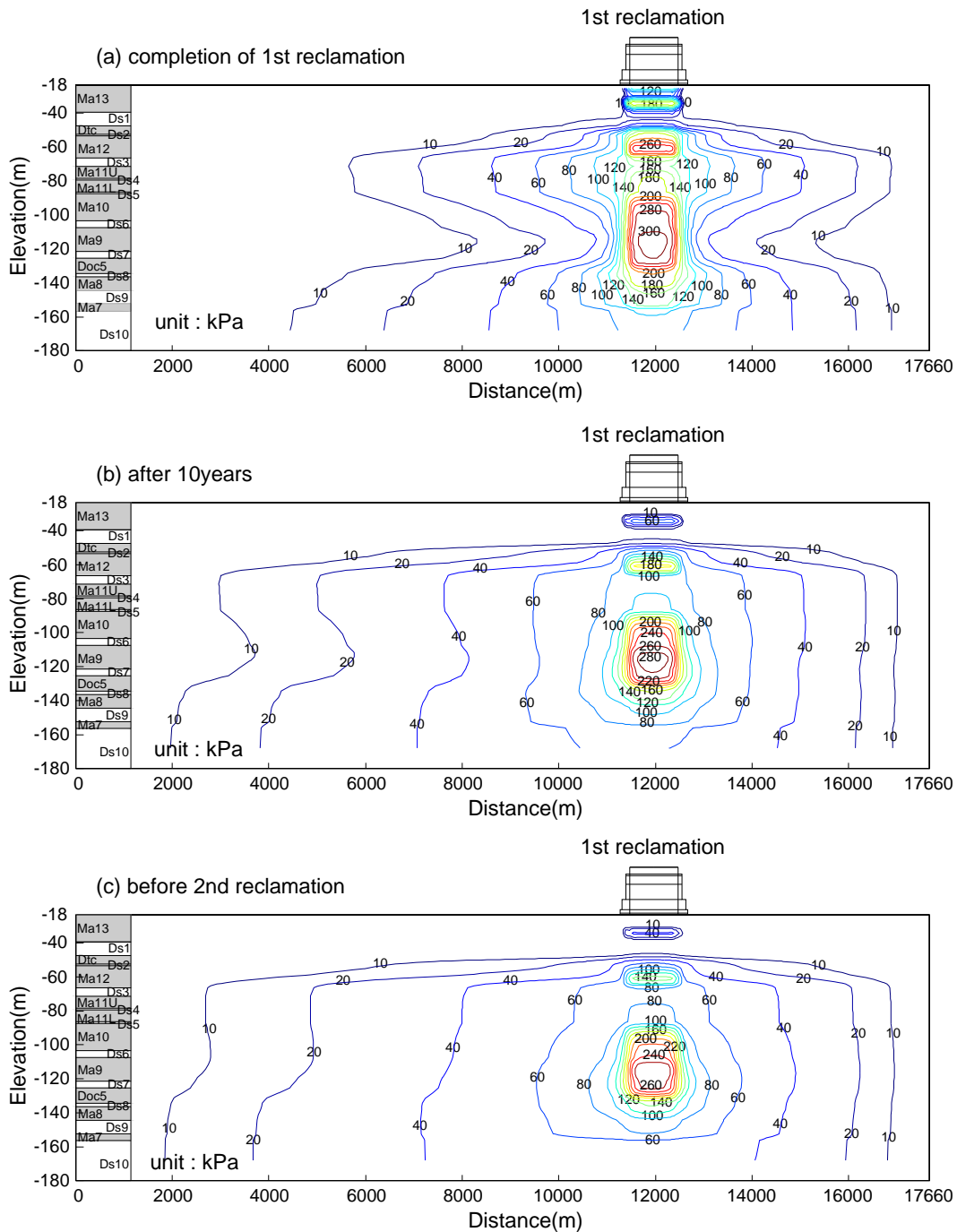


Fig. 5 Calculated contours for the distribution of excess pore water pressure due to reclamation

間中ほぼ消散してしまっていることがわかる。これに対して、深部の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, Ma11などの基礎地盤上部の更新統粘土層では排水能力の高い砂礫層 (Ds1, Ds3) の効果によって過剰間隙水圧が順調に消散しているのに対し、Ds6, Ds7 という難透水性砂礫層の周辺に体積するMa10, Ma9 といった更新統粘土層を中心とした部分では、過剰間隙水圧の消散が非常に遅れていることが分か

る。また、埋立領域外へと過剰間隙水圧が伝播しており、二期空港島建設地点をはじめとする一期空港島周辺では有効応力が減少するという状態が生じている。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、一期島直下部に還流するという、「水枕効果」の存在を示唆するものであり、有効応力的に見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のかについてはさらに検討しなければならない。

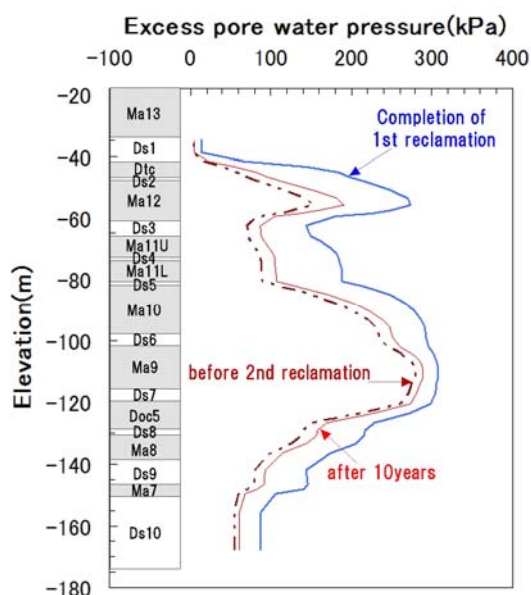


Fig. 6 Distribution of excess pore water pressure with depth at the center of the 1<sup>st</sup> phase island of KIA

解析断面の中央部（一期空港島1号棧地点相当）における過剰間隙水圧の深度方向分布をFig.6に示す。表示時点は、Fig.5に準拠して、一期空港島埋立完了時点、埋立10年後、二期空港島埋立直前時点における結果を示した。Fig.5の地盤内の過剰間隙水圧分布コンターでも明らかのように、浅部更新統粘土層Ma12, Ma11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, Ds3層の高透水性の寄与が大きいこと、またMa11層は砂礫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, Ds7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, Ma9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, Ds7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若干消散するが、10年後～二期空港島埋立直前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

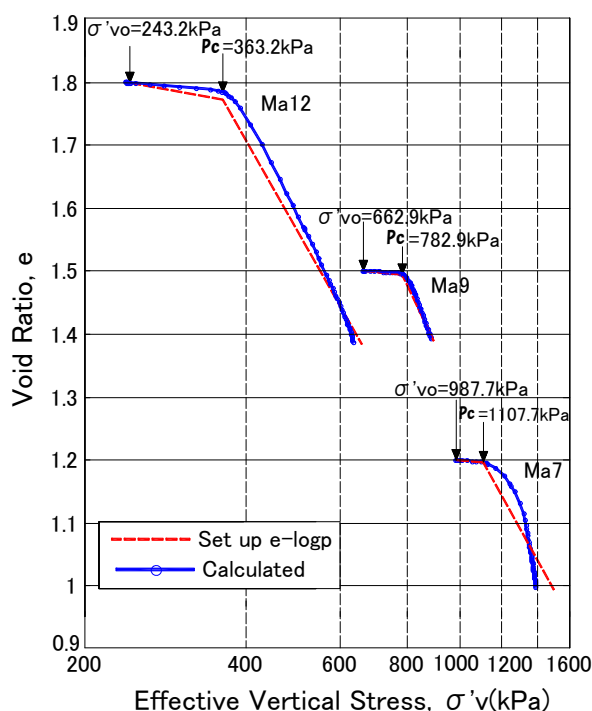


Fig. 7 Advance in stress due to reclamation

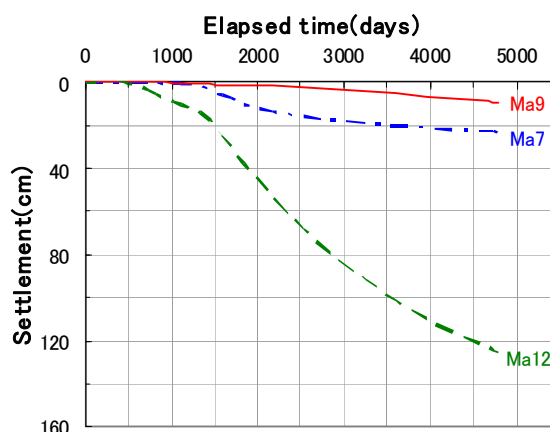


Fig. 8 Typical performance of settlement with time for the Pleistocene differential settlement

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。

### 3.2 埋立に伴う沈下挙動

上部（Ma12）、中部（Ma9）、下部（Ma7）更新統粘土の要素の状態経路をFig.7に、それぞれの沈下～時間関係をFig.8に示す。Fig.7よりすべての粘土層において埋立によって塑性降伏が生じているが、初期応力が小さく、水圧消散も比較的順調なMa12は圧密により大きく圧縮しており、沈下量も二期空港島埋立直前で125cmに達している。これに対して砂礫層の透水性が悪い砂礫層に挟まれているMa9で

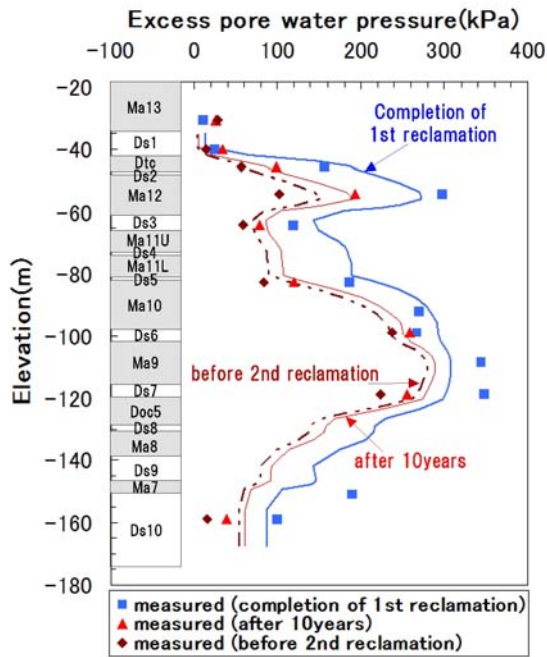


Fig. 9 Comparison of the distribution of excess pore water pressure with depth

は過剰間隙水圧の停留によって圧密の進行が遅く、沈下量も小さくなっていることがわかる。このように、関西国際空港基礎地盤では砂礫層のマクロな透水性によって過剰間隙水圧の停留・消散性状が異なり、それと連動してそれぞれの粘土層が異なる速度で圧密するという現象が生じている。更新統層全体として大きな沈下を生じているが、詳細にみれば、Ds1, 3, 10 という高排水性砂礫層近傍の上部更新統層、下部更新統層では圧密が比較的早く進行するのに対し、Ds6, 7 という難透水性砂礫層に隣接するMa9 を中心とする粘土層では過剰間隙水圧が大きく残留し、圧密は遅れて進行するというモードになっていることが分かる。

#### 4. 解析結果の評価～実測値との比較～

##### 4.1 過剰間隙水圧の比較

関西国際空港一期島の1号橋で計測された砂礫層の過剰間隙水圧を本稿で実施した有限要素解析結果と比較してFig.9 に示す。図中、実線は解析結果を、プロットは1号橋における実測値を表している。実測結果より、透水性に優れているDs3, 10層では、埋立载荷時の水圧上昇もさほど顕著ではなく、長期的にも順調に消散している。これに対して、透水層として劣位として低い等価透水係数を与えているDs6,7層では420kPaの埋立応力に対し、300kPaに達するような大きな過剰間隙水圧が発生し、経時的な消散も緩慢で長期間にわたって砂礫層内に停留するこ

とが分かる。このような過剰間隙水圧が高く、比較的長期間停留する砂礫層では、埋立領域外に水圧が伝播する傾向が認められ、隣接領域との相互作用が問題となることが懸念される。解析結果はこうした実測結果を妥当に表現し得ていることがわかる。また、解析結果の妥当性を評価するために、Fig.6 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.10 に示す。埋立からの経過時間、一期島

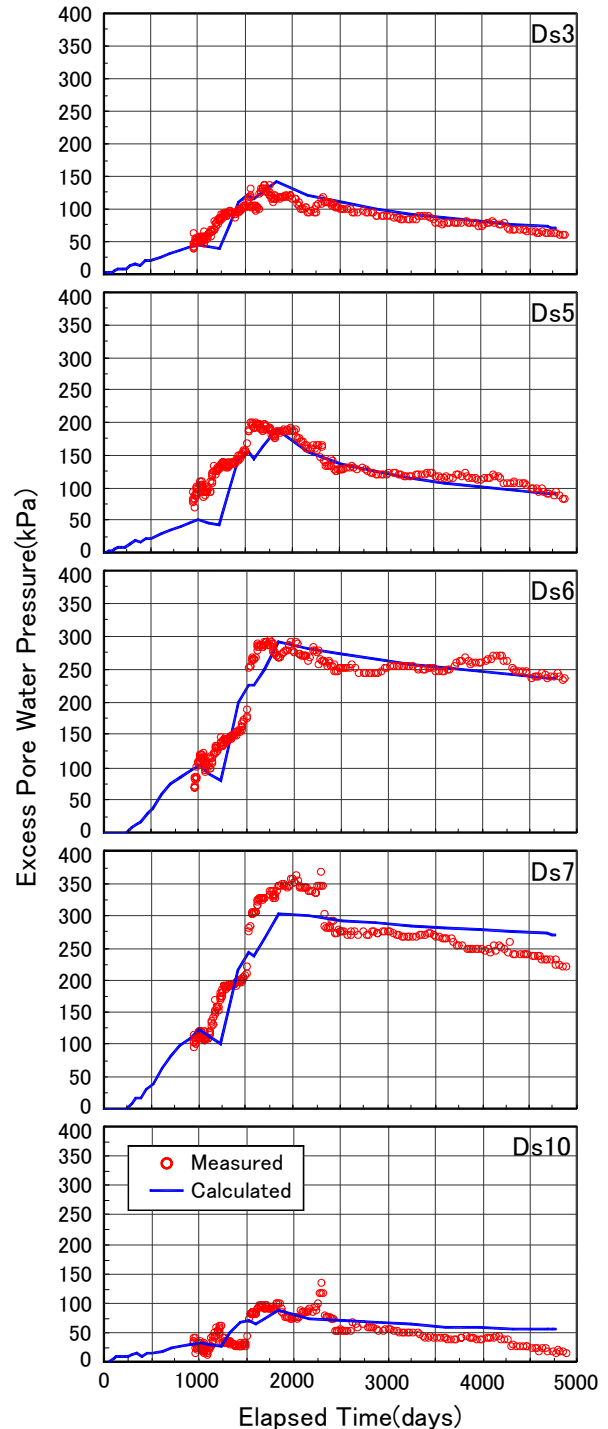


Fig. 10 Comparison of the calculated and measured excess pore water pressure for the Pleistocene sand gravel layers

埋立完了直後、10年、二期島埋立直前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性の値が妥当なオーダーであったことがわかる。

#### 4.2 更新統粘土層の層別沈下の比較

次に、更新統粘土層～時間関係をFig.11 に示す。本稿で対象とした更新統粘土層は、Fig.2 に示すDs1砂礫層以深でDs10より上の粘土層であり、それぞれ

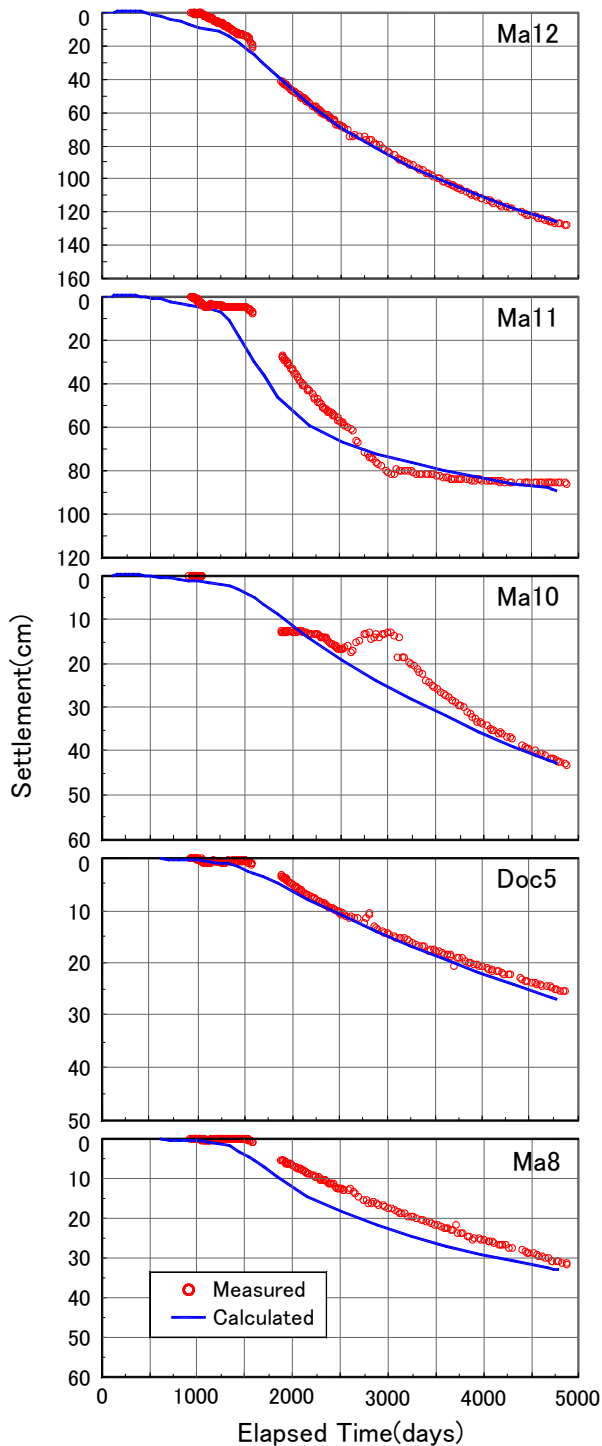


Fig. 11 Comparison of the calculated and measured differential settlement for the Pleistocene clay layers

の深度を代表する粘土層に対する比較を示している。一期空港島の埋立によって海底地盤に作用するネットの上載応力増分  $\Delta \sigma \approx 420\text{kPa}$  によってMa7までの更新統粘土層は $p_c$ を超える状態となる。下位の粘土層になるほど初期応力は大きく、間隙比は小さくなるので、圧縮しろは上部の更新統粘土になるほど大きくなる。更新統層上部のMa12層では一期空港島埋立荷重によって初期から大きな沈下が発生し、二期空港島埋立直前の段階で125cmの沈下量となっている。Ma11, 10 と深くなるにしたがって、沈下の絶対量は小さくなっており、更新統全体の沈下量への寄与率としては上部粘土層が大きい。二期空港島埋立直前の段階での沈下量は、Ma10で43cm、Doc5で25cm、Ma8で32cmとなっている。大水深、大深度における計測のため、測定地の一部に信頼性を欠く挙動が見られるが、実線で示した解析結果は各層の沈下挙動を非常に精度よく表現していることがわかる。

#### 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。こうした更新統砂礫層の特徴としては、このあたりには大河川がなく、陸上からの土砂供給が十分ではないことから、大阪湾や神戸沖と比べて砂礫層厚が薄く、連続性に欠け、細粒分含有率が高いという特徴がある。これは、排水層としての能力に全幅の信頼を置けないということにつながり、粘土層の圧密速度を支配する砂礫層の透水性が強く懸念される。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性を数値化することに苦心した。連続性に優れた砂礫層はDs1 と Ds3 であり、非常に劣悪な砂礫層はDs6 と Ds7 であった。解析にあつては、連続性に悪さや薄層厚によってマクロな透水性に問題があるとされるDs6, Ds7層は低い等価透水性を設定し、連続性のよい礫層であるDs1やDs3層は等価透水性を高く設定した。それ以外の普通の砂礫層と判断した層については実験で得られる  $10^{-3}\text{cm/s}$ オーダーの値をそのまま用いてモデル化を行った。

更新統粘土は全層にわたって軽い過圧密状態であり、空港島埋立荷重によってかなりの深度までの更新統粘土層は $p_c$ を超えて塑性降伏を引き起こす。また、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、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。この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



## 参考文献

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。本稿では, 見かけの過圧密量として $\Delta p_c (=p_c - p_0) = 120\text{kPa}$ が標準圧密試験の結果に基づいて得られた。また, 解析では,  $p_c$ を更新統疑似過圧密粘土の見かけのものと考え,  $p_c$ 以下の応力域での非弾性挙動を仮定して解析を行った。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, 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, 疑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下で起こることになる。

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は時間の経過とともに順調に消散するのに対し, 砂礫層の透水能が低い中深度の更新統粘土層では, 二期空港島の埋立直前でも $250\text{kPa}$ 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。

更新統粘土層の沈下～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。

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, 一期空港島 1 号櫓の結果を用いて検討した。更新統砂礫層の透水性を等価透水係数で評価するとともに, 更新統粘土の疑似過圧密性を考慮したモデルを用いて関西国際空港基礎地盤の二次元弾粘塑性有限要素解析を実施した結果, 一期空港島建設による更新統地盤の過剰間隙水圧と沈下解析結果は現地の層別計測結果を精度よく評価できることが明らかとなった。

このような研究成果は, 大規模海上埋立による更新統互層地盤の変形を二次元有限要素法によって解析するスキームを構築し, 隣接する二つの空港島建設による更新統互層地盤の長期沈下挙動と過剰間隙水圧の還流現象を把握するためのスキームを提供ができる。これは, 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。

- 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.
- 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. 45-58.
- 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, Part2, 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. Int. Symp. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials -Measurement and Application-*, Vol. 1, pp. 517-522.

Sekiguchi, H. (1977): Rheological Characteristics of Clays, Proc. of 9<sup>th</sup> ICSMFE., Vol. 1, pp. 289-292.

## **Numerical Assessment of Stress and Deformation of the Offshore Reclaimed Pleistocene Foundation**

Byung-Gon JEON\* and Mamoru MIMURA

\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

A series of elasto-viscoplastic finite element analyses is conducted to assess the stress and deformation of the reclaimed Pleistocene foundations of Kansai International Airport. A large amount of reclamation overburden was applied to the alternating Pleistocene sandy gravel and quasi-overconsolidated clay deposits. Due to the filling for the construction of the reclaimed airport, long-term settlement has been expected to occur in the quasi-overconsolidated Pleistocene clay layers with insufficient dissipation of the excess pore water pressure generated even in the permeable sand gravel layers that are generally considered as drained ones. Propagation of excess pore water pressure through the sand gravel layers is also expected toward the outside of the reclamation area. In the present paper, the assumption of the equivalent permeability coefficient is introduced to model the macro-permeability of the Pleistocene sand gravel layers considering the effect of discontinuity, change in thickness of the Pleistocene sand gravel layers and high content of fine components in them. Non-elastic strain is also assumed to take place in the quasi-overconsolidated Pleistocene clay layers even in the stress range less than the apparent  $p_c$  that can be derived by the laboratory experiments on those clays. Calculated performance shows that the remarkable compression takes place in the Pleistocene clay layers associated with insufficient dissipation of the excess pore water pressure even in the permeable sand gravel layers. The validity of the calculation has been confirmed by comparing with the differential settlement for each Pleistocene clay layers and the distribution of the excess pore water pressure in Pleistocene foundations.

**Keywords:** Pleistocene layers, Elasto-viscoplastic finite element method, Long-term settlement, Equivalent coefficient of permeability of sand gravel layers, Quasi-overconsolidation