

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560603

研究課題名(和文) 砂礫層のマスパーミアビリティの評価と更新統埋立地盤の長期変形への適用

研究課題名(英文) Evaluation of mass-permeability of sand-gravel layers and its application to the prediction of long-term settlement of the reclaimed Pleistocene deposits

研究代表者

三村 衛 (Mimura, Mamoru)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00166109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：大水深海域における埋立に伴う更新統地盤の変形挙動を解析するにあたり、奥行き方向の水分移動を考慮しなければ現実的な解を得ることができないことから、弾粘塑性有限要素プログラムの三次元化を行い、隣接する2つの埋立人工島の相互作用を含めた三次元解析を行う体制を確立した。既往の二次元解析で対象とした断面を奥行き1要素の三次元有限要素メッシュに分割して解析を行ったところ、各更新統粘土層の沈下～時間関係は二次元解析結果と一致した。一方、埋立に伴う過剰間隙水圧については、埋立直後の水圧発生量が二次元解析と比べてやや低くものの、その後の消散過程において長期的には同一値に収束し、合理的な結果を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：A three-dimensional code of the finite element method with the non-stationally flow surface elasto-viscoplastic constitutive model has been developed because the rational numerical solution cannot be derived without considering the three-dimensional effect of the generation and dissipation of excess pore water pressure in the reclaimed Pleistocene clay deposits due to the construction of large-scale reclaimed island in the deep sea condition. The pseudo-3D calculated performance with one element in the anteroposterior direction shows a good match with the conventional one with the plain-strain calculated one in terms of the compression of the individual Pleistocene clay layers as well as the excess pore water pressure in the reclaimed deposits. It is demonstrated that the newly developed three-dimensional finite element code can function well to analyze the actual stress-deformation behavior of the large-scale reclaimed Pleistocene deposits.

研究分野：地盤工学

キーワード：弾粘塑性構成モデル 有限要素法 三次元解析 相互作用 過剰間隙水圧 沈下

### 1. 研究開始当初の背景

大規模埋立に伴う更新統粘土層の圧縮現象は、更新統粘土の擬似過圧密性によって生じる見かけの降伏応力以下の擬似過圧密領域における非弾性的挙動の適切なモデル化と、粘土を挟み込むように堆積している砂礫層の透水性の適切なモデル化の2つが大きな課題であることがわかっていった。更新統粘土の擬似過圧密特性については、1980年代からその存在が指摘されており、現実の工学的問題となって顕在化した関西国際空港一期島建設過程において、モデル化の必要性と適切にモデル化することによって、埋立荷重による過剰間隙水圧が停留しつつ圧縮が進行するという挙動が説明できるという研究成果が報告されていた。一方、排水層である更新統砂礫層のモデル化については、要素としての砂礫層の透水係数とマスとしての砂礫層の透水能力が必ずしも一致するものではないという指摘がなされてはいたものの、具体的に数値解析に適用できるような合理的な透水性のモデル化手法が確立されているとは言えない状況であった。

### 2. 研究の目的

大阪湾堆積盆地に堆積する更新統粘土・砂礫互層地盤に都市開発に伴う大規模な埋立が行われた場合、続成作用によって構造が高度に発達した更新統粘土の圧縮メカニズムを解明し、特に長期にわたって継続する沈下の予測を的確に行うスキームの構築が、安定した社会インフラ供用にとって不可欠である。特に埋立が大規模化するにつれて、河川性の砂礫層の堆積エリアではカバーしきれない領域の変形をマネジメントしなければならず、従来の地盤工学の枠組みでは対応しきれないことが明らかである。

本研究は、更新統粘土の擬似過圧密特性については既往研究の成果を援用しつつ、圧密進行時の排水を担う更新統砂礫層の透水特性を合理的にモデル化することを目的としている。次に、モデル化された透水性を数値解析の枠組みにどのように取り込むのかについて、堆積環境を勘案した理工学融合アプローチを導入することによってマスパーミアビリティと呼称する、三次元的な更新統砂礫層の透水性モデルを構築することを試みるものである。

### 3. 研究の方法

研究対象サイトとしている関西国際空港は一期島と二期島を合わせるとほぼ4km四方の領域を占有する。さらに、数値解析上の水理学的境界としてその数倍の領域を解析領域として確保する必要がある。このことは、その領域に広がる砂礫層の分布状況を正確に把握し、モデル化しなければならないことを意味する。関西国際空港近傍には約270本の

のボーリングデータが存在するが、ボーリングはあくまでもその点の情報であり、面的な広がりを持つものではない。これを補完するのが物理探査である。関西国際空港建設にあたり、陸域・海域で反射法地震探査が実施されており、上部から土質の異なる層の境界を探知することにより、各砂礫層の厚さを面的に把握するための有意な情報が得られている。本研究では、点情報であるボーリングデータと面情報である物理探査データを活用し、砂礫層の三次元的分布特性と、各砂礫層の透水性をモデル化することを試みた。

### 4. 研究成果

本報告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。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1)$$

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。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。

$$\{\Delta \sigma^s\} = [C^{vp}] \{\Delta \varepsilon\} - \{\Delta \sigma^R\} \quad (3)$$

ここに、 $\{\Delta \sigma^s\}$ 、 $\{\Delta \varepsilon\}$ は有効応力増分と対応するひずみ増分であり、 $[C^{vp}]$ 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、 $\lambda_k$ 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。

関西国際空港基礎地盤に対する弾粘塑性有限要素解析は、図1に示すように、一期空港島のほぼ中央に位置する1号櫓(Monitoring Point 1)を通り、一期、二期空港の滑走路に直交する測線にそった断面A-A'で実施する。

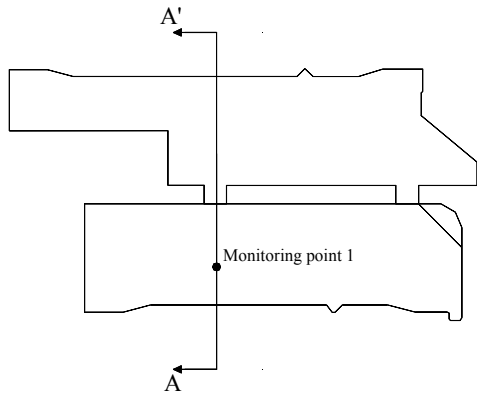


図1 関西国際空港の模式平面図と解析測線

解析に用いた地盤モデルを図2に示す。関西国際空港が建設された大阪湾泉州沖の海底地盤は、陸側から沖合に向かって基盤標高が低くなる堆積構造を有しているが、本報告では対象とする一期空港島1号櫓(Monitoring Point 1)地点における各層の層厚を基準として、その層厚で水平一様と仮定している。したがって、二期空港島基礎地盤部では層厚が過小に、一期空港島陸側では過大に設定されている。ここで、Maは海成粘土層、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、得られた $p_c$ の値を基に各層ごとに過圧密比(OCR)を設定した結果を図3に示す。OCRは深度とともに微減する傾向となり、上部更新統層では1.5~1.6、

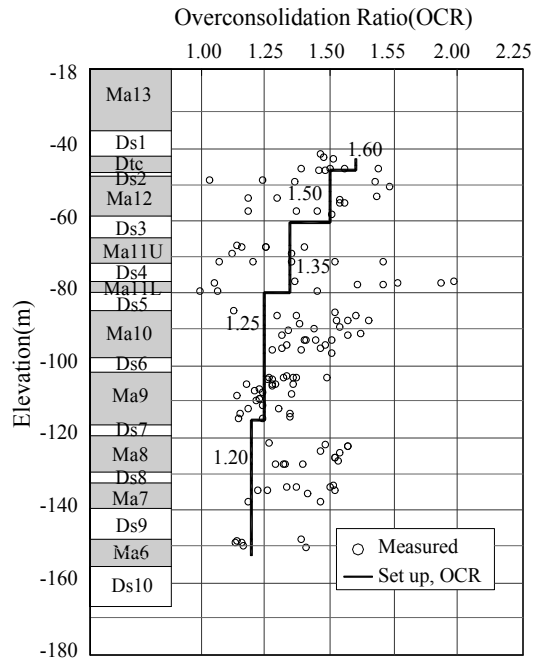


図3 更新統粘土に対する設定過圧密比の深度分布

中部更新統粘土層では1.3前後、下部更新統粘土層では1.2程度となる。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。

図2における側方境界については、陸側に5000m、沖側に10000mを取り、水理境界の影響を受けない条件を確保している。排水条件として、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。

解析による1号櫓地点における過剰間隙水圧の深度分布を実測値と比較して図4に示す。同図では実測値との比較が可能な一期空港

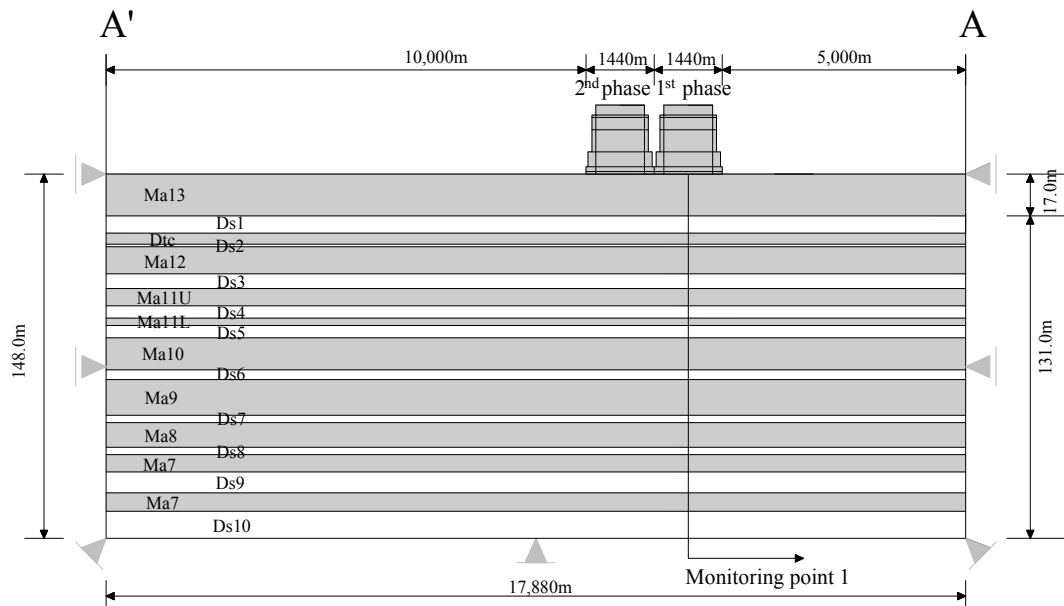


図2 解析に用いる関西国際空港基礎地盤の模式断面と層序

島埋立完了時点，二期空港島埋立開始直前，二期空港島埋立完了時点の3時点について解析結果と実測値を比較している。一期空港島埋立完了時点では，上部更新統層と中位の更新統層の過剰間隙水圧が突出している。前者については初期応力が小さく，埋立荷重によって応力状態が大きく正規圧密領域にはいるために，大きな過剰間隙水圧が発生したものであり，後者については上下を挟む砂礫層Ds6, 7の低透水性によって消散が妨げられた結果であると考えられる。時間の経過とともに，上部はDs1, 3砂礫層の，下部はDs10, 9, 8砂礫層の高い透水能によって順調に消散に向かう。一方，中位更新統層ではやはりDs6, 7砂礫層からの排水がさほど進まないために過剰間隙水圧の消散速度は大きくない。その後二期空港島が沖合で建設されることによって発生する大きな過剰間隙水圧が1号櫓地点にも伝播・還流することにより，Ma12からDs5までと，Ma8からDs10までの各層で過剰間隙水圧が増加していることがわかる。これに対してMa10からMa8までの中位更新統層では，透水能が小さいために十分に水圧伝播が起こらず，二期空港島建設中に過剰間隙水圧はわずかに減少する傾向を示している。一連の解析結果は実測値を概ね良好に評価し得ており，設定地盤モデル，土質パラメータ，解析手法が妥当なものであることを，応力面から確認することができる。

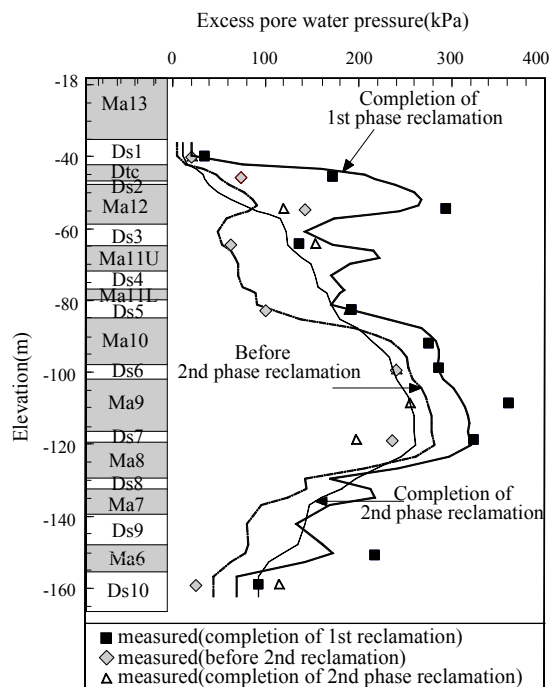


図4 一期空港島1号櫓地点における過剰間隙水圧の深度分布に関する解析結果と実測値の比較

解析による一期島1号櫓地点における二期島建設直前までの13年間に対する更新統粘土層の沈下～時間関係を各層ごとに図5に示す。過剰間隙水圧の消散過程が，近傍に良好

な透水性を有する上部更新統層，透水能が十分ではない中位更新統層，基底礫層を中心とした比較的良好な透水性を有する下部では過剰間隙水圧が長期にわたって停留することを示した。こうした状況下では有効応力の増大が十分に起こらないため，擬似過圧密を保つか，降伏したとしても $p_c$ を少し超えた応力状態を維持しながら変形が進むモードとなり，正規圧密粘土の圧密曲線とは異なり，時間軸に対して上に凸ないしは直線的に沈下が進行する。同図におけるMa10, 9, 8の各粘土層がこれに該当し，時間の経過とともにゆっくりと直線的に圧縮していくことがわかる。これに対して，上部更新統の各層(Dtc, Ma12, Ma11)では，いわゆる逆S字型の圧密曲線を示し，過剰間隙水圧の消散に伴う圧密が進んでおり，過剰間隙水圧の発生・消散モードと調和的である。また下部更新統層では，

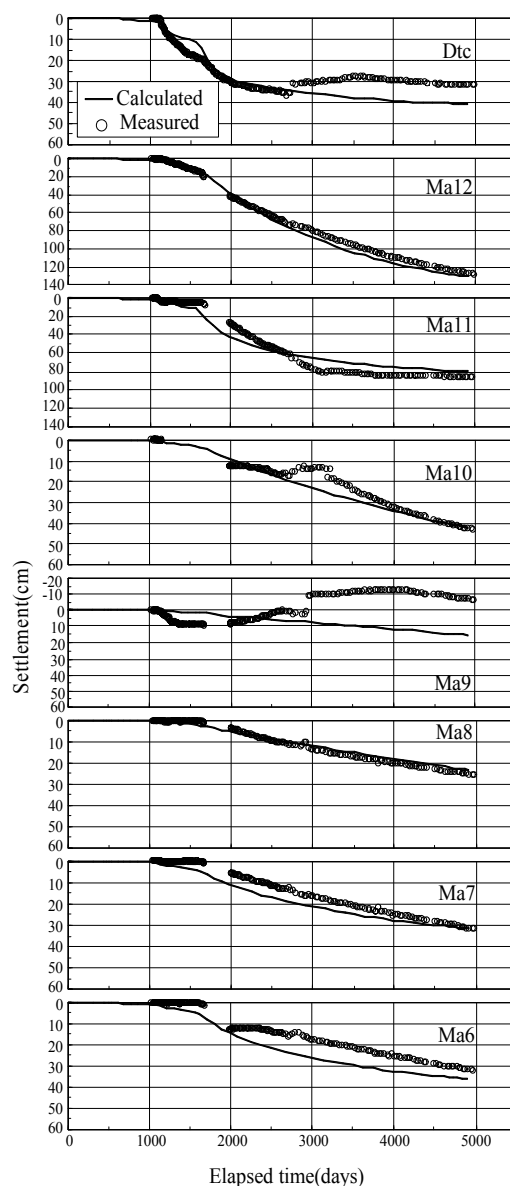


図5 一期空港島1号櫓地点における更新統粘土層の沈下～時間関係の解析結果と実測値の比較（一期空港島建設から二期空港島建設直前まで）

過剰間隙水圧は上部更新統層と同様，Ds10をはじめとする高透水性砂礫層の寄与によって比較的順調に消散するという過程をたどる。しかしながら，深部にあることで初期応力が大きく，上部更新統層に比べて $p_c$ 近くの応力領域で変形するために，やや直線的な逆S字曲線を示しながら圧縮が進んでいくことがわかる。一部，実測値がおかしい層が見受けられるが，全体として解析結果は実測値を的確に表現しており，適用した解析モデルが妥当なものであることが確認できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

Jeon, B. G. and Mimura, M. (2013): Long-term Deformation of the Reclaimed Pleistocene Foundation of the Offshore Twin Airport, Proc. 18ICSMGE, pp.559-562.

Mimura, M. and Jeon, B. G. (2013): Interactive Behavior of the Pleistocene Marine Foundations of the Existing 1st Phase Island Due to Construction of the 2nd Phase Island of Kansai International Airport, Soils and Foundations, Vol. 53, No. 3, pp.375-394.

〔学会発表〕(計6件)

田炳坤・三村衛・才津陽平 (2012): 海上埋立による地盤挙動に対する更新統砂礫層の排水性能を評価手法について,第47回地盤工学研究発表会, pp.741-742, 2012.

才津陽平・三村衛・田炳坤(2012): 更新統砂礫層の排水性能を考慮した合理的な等価透水係数の設定手法について,第47回地盤工学研究発表会, pp.743-744, 2012.

元宗美郷・矢田啓晃・三村衛・肥後陽介 (2015): 三次元弾粘塑性有限要素解析による地盤内応力に関する基礎的研究,土木学会関西支部年次学術講演会, -7, 2015.

矢田啓晃・三村衛・肥後陽介・元宗美郷 (2015): 数値解析による海底地盤の3次元変形挙動評価手法の開発,第50回地盤工学研究発表会(発表予定)

元宗美郷・矢田啓晃・三村衛・肥後陽介 (2015): 三次元弾粘塑性有限要素解析による多次元集排水挙動に関する基礎的研究,第50回地盤工学研究発表会(発表予定)

元宗美郷・矢田啓晃・三村衛・肥後陽介 (2015): 三次元弾粘塑性有限要素解析による粘土地盤の地盤内応力について,第70回土木学会年次学術講演会(発表予定)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
特になし

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者  
三村 衛

研究者番号: 00166109