

## 真空圧密工法で改良された浚渫粘土埋立地盤の変形挙動とその解析

水野健太<sup>1</sup>, 土田孝<sup>2</sup>, 新舎博<sup>3</sup>

1 広島大学・大学院工学研究科社会環境システム専攻

2 広島大学・大学院工学研究科社会環境システム専攻

3 五洋建設(株)・土木本部土木設計部

## 概 要

本論文は、真空圧密工法が採用された浚渫粘土埋立地盤における動態観測結果を報告するとともに、土～水連成有限要素解析を適用し、真空載荷時における地盤変形挙動の予測精度の検証と改良地盤の応力状態について考察を行ったものである。解析では、構成モデルとして関口・太田モデルにおける降伏曲面を楕円関数に変更したモデル（修正関口・太田モデルと呼ぶ）を適用し、従来の研究で良く用いられている修正カムクレイモデルとの比較を行っている。修正関口・太田モデルの適用によって真空圧密の工法原理を有効応力経路から考察することが可能なこと、改良域内の圧密沈下量や側方変位量を実務上十分な精度で評価できることを示した。

キーワード：真空圧密，埋立地盤，変形，有限要素法，応力経路

## 1. はじめに

真空圧密工法は、急速施工が可能な点や載荷重としての盛土材が不要な点など、工期短縮，コスト縮減，環境保全の観点から注目される地盤改良技術の一つである。軟弱地盤の支持力増加や圧密促進のみならず、浚渫埋立地の減容化，湖沼や内湾の水深確保などその用途は幅広く、近年になって着実に施工実績を伸ばしている。

真空圧密工法の技術的な課題は、いかにして改良対象地盤の気密性を確保し、所定の負圧を改良地盤内に安定的に作用させるかにあるといっても良い。また設計的には、工法の原理を適切にモデル化した上で沈下量や側方変位量を精度良く予測し、ドレーンの改良ピッチや真空載荷期間などの設計条件を合理的に設定することが重要である。特に真空圧密工法では、改良域内へ大きな引き込み型の変形が生じるほか、改良域外においても、かなり広範な範囲まで真空載荷に起因する沈下や側方変位が観測される事例が多い。このような周辺地盤に及ぼす変形の影響範囲およびその程度を定量的に事前予測し、必要に応じてこれらの影響を軽減する補助工法の効果を評価することが、真空圧密工法を選定する上で重要である。

しかしながら、実務の設計段階で実施される圧密計算では、間隙水圧の減少分 $-\Delta u$ を圧密荷重の増加分 $+\Delta p_v$ と見なし、一般的なバーチカルドレーン工法において採用されている Barron の理論に基づいた一次元圧密計算が行われているのが現状である。このような慣用計算法では、真空圧密特有の引き込み型の変形を考慮できない点や改良域

中央の一次元的な沈下を示す箇所さえも深度方向の拘束条件の違いによる地盤内の応力状態を適切に表現できないなど問題点も多い。

このような問題に対する検討方法の一つとして、有限要素解析が有効であると考えられるが、真空圧密工法に対する有限要素解析の適用事例は、サンドドレーン改良地盤などに比べると圧倒的に少ないのが現状である。また、真空圧密工法の場合は、境界条件に応じて変化する地盤内応力状態を適切に表現できる構成モデルを適用することが、工法原理を理解する上で重要であるが、このような観点に立って構成モデルの適用性を検証した事例はほとんどない。

このような背景から本研究では、真空圧密工法が採用された浚渫粘土埋立地における地盤改良工事に対して、土～水連成の二次元有限要素解析を実施し、その適用性や解析精度を検証した。解析では、構成モデルとして関口・太田モデルにおける降伏曲面を楕円関数に変更したモデル（以下、修正関口・太田モデルと呼ぶ）<sup>1)</sup>を適用し、地盤内の応力状態と変形挙動の関係について考察するとともに、一次元的な慣用計算法との比較も行った。また、従来の研究で採用実績が多い修正カムクレイモデル<sup>2)</sup>についても同様の解析を実施し、解析結果の比較を行った。

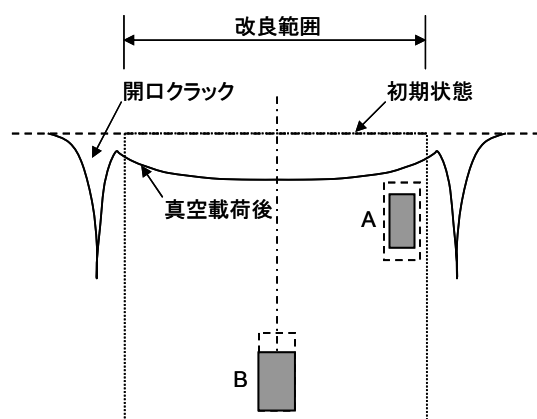
## 2. 既往の研究

## 2.1 工法原理に関する研究

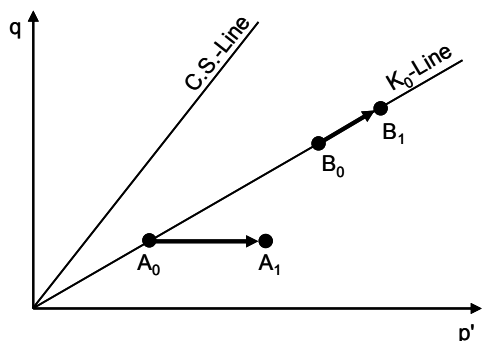
我が国では 1990 年代から真空圧密工法が徐々に普及するに従って、工法原理に関する研究が梅崎ら<sup>3)</sup>、三田地ら<sup>4)</sup>、

今井<sup>5)</sup>, Chai et al.<sup>6)</sup>によって相次いで報告された。

梅崎ら<sup>3)</sup>は、図1に示すように、真空載荷時の地盤変形状態から、地盤内をA)側方変形状態とB)側方拘束条件に大きく分類した。すなわち、改良域端部の浅層部分(A)は等方圧密に近似できるような変形が生じ、改良域中央部の深層部分(B)は一次元圧密( $K_0$ 圧密)に近似できるような変形が生じると考えた。そして、これらの応力状態を三軸圧縮試験機および一次元圧密試験機内で再現し、試験結果に基づいて、上記のモデル化の妥当性と強度増加特性・圧密特性について考察を行った。三田地ら<sup>4)</sup>も異方応力条件による三軸圧縮試験を行い、真空解除後の過圧密効果による強度増加特性に着目した報告をしている。



(a) 真空載荷による地盤変形の模式図



(b) 真空載荷時の有効応力経路

図1 真空圧密工法による地盤変形と応力履歴の関係

今井<sup>5)</sup>は、梅崎ら<sup>3)</sup>のモデル化をより単純化し、改良域の上部は水平方向のひずみ拘束がないので、水圧の減少によってどこでも一様に等方圧密し、改良域の下端は水平方向にひずみが拘束されているため  $K_0$  圧密すると考えた。そして、改良域内部は上部から下部に向けて等方圧密状態から  $K_0$  圧密状態へ変化するとした。さらに、改良域外周の土塊は主働状態にあると見なし、改良域内外の地盤変形(地表面沈下)を予測する理論を組み立てた。

Chai et al.<sup>6)</sup>は、引き込み型の側方変形が生じる条件を静止土圧係数、有効土被り圧、真空圧による増加応力の関係で導くとともに、開口クラックの深さに着目して地盤内の応力状態をモデル化した。すなわち、土要素に作用する側

方応力は、開口クラック下端より浅い部分では真空圧による増加応力のみで、深い部分では真空圧による増加応力と経験的に求められる土圧係数を考慮した側方応力の和で表されると考えた。そして、これらのモデル化に基づいて沈下量や側方変形量を予測する理論を構築し、実工事の計測データに対してモデルの適用性を検討している。

いずれの研究も、真空圧密工法メカニズムの把握、あるいは地盤変形量の予測理論を構築することを目的としているため、地盤内の応力状態は極めて単純化されて扱われている。三田地ら<sup>4)</sup>や今井<sup>5)</sup>は、実際の地盤における応力状態はより複雑で、これを合理的に扱う場合は有限要素解析が有用であることを指摘している。

## 2.2 有限要素解析の適用性に関する研究

工法原理に関する研究と並行して、真空圧密工法で改良された実地盤に対して有限要素解析を適用し、地盤変形量の予測精度や設計、安定管理への応用の可能性を検討した事例は幾つか報告されている。

松本<sup>7)</sup>は、浚渫埋立地盤に対して関口・太田の弾塑性モデルを用いた解析事例を報告している。この事例における真空圧密の改良仕様は、改良範囲が  $20\text{m} \times 20\text{m}$  の正方形、改良深さが  $27\text{m}$  となっており、気密シートタイプの真空圧密工法が採用されている。解析結果は、改良域内の沈下挙動を精度よく再現しているが、改良域外の地盤変形量を過大評価している。この原因として、解析では地表面に生じる開口クラックを表現できていない点を挙げている。

山添・三田地<sup>8)</sup>は、北海道の泥炭性軟弱地盤に対して修正カムクレイモデルを用いた解析事例を報告している。この事例は盛土併用型の地盤改良工事で、改良範囲が  $48\text{m} \times 88.8\text{m}$  の平行四辺形、改良深さが約  $20\text{m}$  となっている。本工事も気密シートタイプが採用されている。泥炭という特殊な地盤を対象としているが、地盤を代表する土質パラメータを適切に設定することにより、弾塑性解析の枠組みの中で過剰間隙水圧挙動、盛土中央部の沈下挙動、盛土法尻部の地中側方変位挙動を概ね再現している。ただし、改良域周辺の地盤変形の予測精度については詳しく報告されていないため不明である。また、地盤の変形挙動と安定性を盛土中央部要素の有効応力経路から考察し、負圧載荷は応力点を破壊線から遠ざけ、地盤を安全側に移行させる働きを持つことを示している。山添<sup>9)</sup>はさらに泥炭性軟弱地盤の大変形問題に対応するために有限変形理論を組み入れた解析も実施しており、カムクレイモデルと修正カムクレイモデルの比較や微小変形理論と有限変形理論の比較を行っている。

Chai et al.<sup>10)</sup>は、佐賀平野の道路盛土工事に対して修正カムクレイモデルを用いた解析事例を詳細に報告している。帯状盛土下の真空圧密改良範囲は、延長約  $1\text{km}$ 、幅  $16\text{m} \sim 18\text{m}$  であり、改良深度は  $10\text{m} \sim 11.5\text{m}$  である。本工事も気密シートタイプ(厚さ  $0.5\text{mm}$ 、ポリ塩化ビニール製)が採用されている。解析結果は、真空載荷時の改良域内沈下量を概ね再現しているが、改良域端部から  $4.2\text{m}$  離れた改良

域外の沈下量をやや過小評価している点、真空除荷時のリバウンド量の不一致、改良域端部の地中側方変位量を過小評価している点など、解析は依然として多くの課題を有していることが報告されている。また、透水係数や境界条件の設定の難しさなど複雑な自然地盤を対象とする上での解析の限界を指摘している。

このように、真空圧密工法を適用した実地盤に対する幾つかの有限要素解析事例を見ると、本工法特有の引き込み型の側方変位や改良部中央の圧密沈下量を比較的精度よく予測できていることがわかる。しかしながら、改良域外を含めた施工エリア全体の地盤変形量の予測精度については依然として未解明な部分が残されている。また、梅崎ら<sup>3)</sup>や今井<sup>5)</sup>が仮定したような地盤内応力状態と変形挙動の関係について、有限要素解析がどの程度合理的に評価できているかを詳細に検討した事例は少なく、地盤変形の予測精度の検証と併せて、応力状態の妥当性についても詳細に検討する必要があるように思われる。

### 3. 真空圧密工法による浚渫埋立地盤の改良

#### 3.1 工事概要

検討対象とした現場は、浚渫土が投入されてから数年が経過した徳山下松港(徳山地区)T-9 埋立地である。浚渫埋立部は非排水せん断強度が  $c_u=1.4\text{kN/m}^2$  程度の超軟弱な未圧密地盤であるため、この埋立地内において臨港道路を建設する際の圧密促進および支持力増加を目的とした地盤改良工法として、キャップ付ドレーンを用いた真空圧密工法<sup>11)</sup>が採用された<sup>12),13)</sup>。図 2 に施工位置平面図、図 3 に動態観測機器の平面配置図を示す。改良範囲は幅 44.4m、中心線延長 250m、改良層厚 28m、設計真空圧は  $-65\text{kN/m}^2$  である。図 3 に示すように施工中は地表面沈下および地表面側方変位、作用負圧 (ポンプ元圧、集水管端部、ドレーン内)、地盤内間隙水圧、排水量、傾斜計による地中側方変位を計測した。特に「区域 B」は集中計測管理区域と位置づけ、密な計測を行っている。したがって、後述の有限要素解析においても「区域 B」を検討対象とした。

#### 3.2 地盤概要

図 4 に土層構成と間隙水圧計の設置深度を示す。真空圧密工法による地盤改良は、図 4 に示すように浚渫粘土である埋立粘土 1、埋立粘土 2 および在来粘土である沖積粘性土を対象に実施した。表 1 に地盤物性値を一覧する。当該地域の在来粘土に関する元々の地盤特性は、既往の文献<sup>14),15),16)</sup>が詳しいのでここでは省略するが、浚渫粘土の埋立に起因する圧密によって、含水比  $w_n$  は 97~143% から 72~122%へと 20%程度低下している。負圧載荷前の在来粘土は含水比が小さく、湿潤密度が大きい傾向にあるが、サンプリング位置 (ドレーン近傍か、ドレーン間中央か) の違いによるばらつきの可能性が考えられる。渾粘土の含水比  $w_n$  は約 120%、湿潤密度  $\rho_t$  は  $1.42\text{g/cm}^3$  で比較的均質な地盤を形成していることがわかる。その物理特性は浅部

の在来粘土と大きく変わらない。

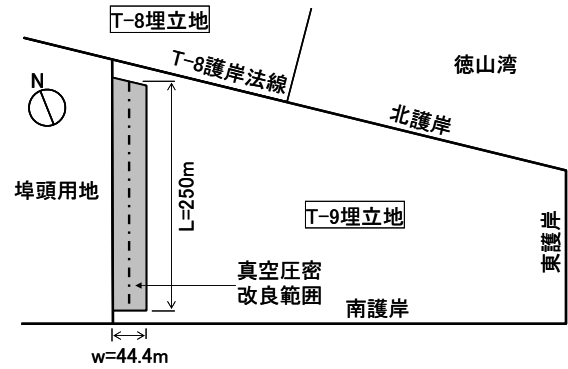


図 2 施工位置平面図

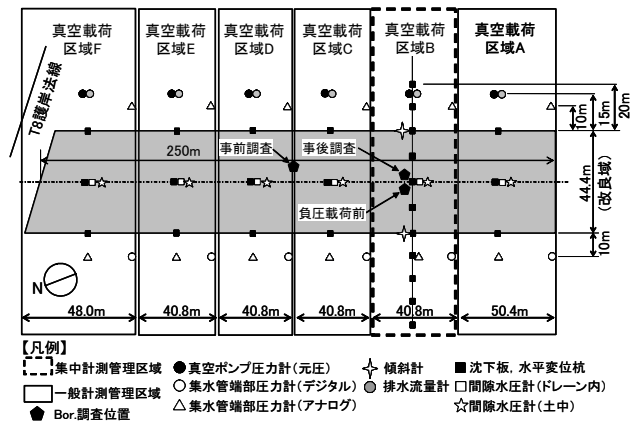


図 3 動態観測機器の平面配置図

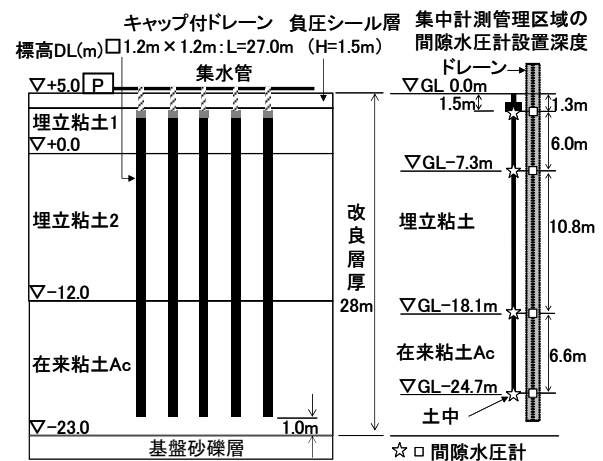


図 4 土層構成および間隙水圧計の設置深度

表 1 地盤物性値

パラメータ	単位	埋立粘土 1	埋立粘土 2	在来粘土
層厚	m	5.0	12.0	11.0
湿潤密度 $\rho_t$	$\text{g/cm}^3$	1.42	1.42	1.51
含水比 $w_n$	%	119	120~129	72~122
せん断強度 $c_u$	$\text{kN/m}^2$	1.4	$1.4+0.3z$ ( $z=0$ at $DL=0$ )	$4.0+0.7z$ ( $z=0$ at $DL=0$ )
圧縮指数 $C_c$	—	1.026	1.026	1.035
圧密係数 $c_v$	$\text{cm}^2/\text{d}$	180	180	130

### 3.3 キャップ付ドレーン工法による地盤改良

本工事で採用したキャップ付ドレーン工法<sup>11),17)</sup>は、表層の粘性土を上部シール層として利用することによって、気密シートが不要となる点が大きな特長である。ドレーン1本毎に気密キャップを接続し、負圧は気密キャップを介してドレーン内に直接作用させるため、負圧の伝達効果が高い。また、改良層の中間に透水性の良い層が存在する場合には、該当深度のドレーン材にあらかじめ遮水シールを取り付けることにより、改良効果が低下することを防ぐことができる。気密シートタイプと比較して、水上や泥土上の施工も可能な点が長所として挙げられる。一方、表層（上部シール層）が未～弱改良層となる点、キャップ部は地下水位以下に維持する必要がある点、ドレーン打設時に生じる打設孔の漏気対策が必要な点など留意が必要である<sup>18)</sup>。

本工事では図4に示すように、鉛直ドレーン材は基礎砂礫層より1.0m上部まで泥土施工機（PDF船）によって打ち込み（下部シール層1m）、地表面から1.5mの埋立粘土を上部シール層とした。ドレーン打設長さは27m、ドレーンの打設間隔は1.2mピッチの正方形配置、ドレーンの総打設本数は8,053本、総延長は217,431mである。また、区域Aおよび区域Fは、護岸築造時の築堤材が介在していたため、鉛直ドレーンに遮水シール処理を施している。

実際の工事は真空圧の停止後に二段階の盛土（二回目の真空圧密を含む）が施工されているが<sup>19)</sup>、本論文では真空圧荷のみに起因する地盤の応力変形挙動を有限要素解析によって考察することに主眼を置き、盛土載荷前の真空圧荷期間133日間（真空除荷を含まない）を解析対象とした。

### 3.4 地盤改良効果<sup>12),13)</sup>

図5および図6に事前調査、負圧載荷前および事後調査（一次負圧除荷後）の含水比、湿潤密度、一軸圧縮強さ、圧密降伏応力の深度分布図を示す。図5および図6より、事前調査から負圧載荷前にかけて自然含水比の低下、湿潤密度の増加、一軸圧縮強さの増加が見られる。これは改良対象地盤が未圧密地盤であり、鉛直ドレーンの打設によって自重圧密が促進されたこと（平均放置期間約160日）によるものと考えられる。これは、図6の圧密降伏応力の深度分布図において、負圧載荷前に圧密降伏応力が有効土被り圧とほぼ一致していることから理解できる。

真空載荷後は、自然含水比は平均で82%に低下し、湿潤密度は $1.42\text{g/cm}^3$ から $1.48\text{g/cm}^3$ へと増加した。一軸圧縮強さの増加は、平均で $\Delta q_u = 54\text{kN/m}^2$ であった。事前の三軸CU試験結果（ $\phi = 22.4$ 度）より強度増加率 $m (= \Delta c_u / \Delta p)$ を0.28、圧密度 $U$ を80%（浅岡法による真空載荷後のひずみに関する圧密度の推定値は平均82%程度<sup>13)</sup>）と仮定すると、設計真空圧 $-65\text{kN/m}^2$ による非排水せん断強度の増加量は、 $\Delta c_u = 15\text{kN/m}^2$ と計算される。一方、一軸圧縮試験による未圧密状態からの強度増加量は平均的に $\Delta c_u (= \Delta q_u / 2) = 27\text{kNm}^2$ 、負圧載荷後の強度増加量はその半分程度であり、真空載荷による強度増加量はほぼ理論計算どおりの値が得られていると判断できる。また、圧密降伏応力

は有効土被り圧よりも大きくなり、真圧除荷によって対象地盤が過圧密化（ $OCR = 1.5 \sim 2.1$ ）していることがわかる。

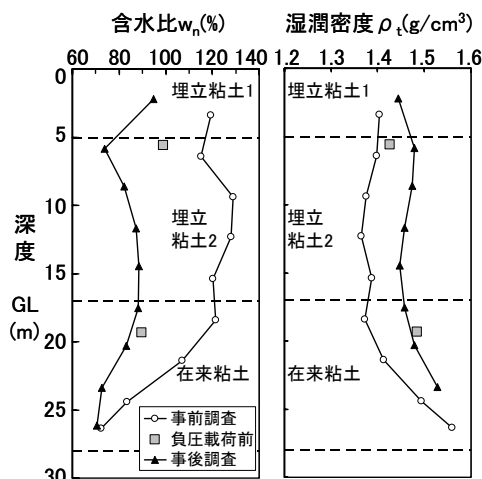


図5 真空載荷前後の物理特性の変化

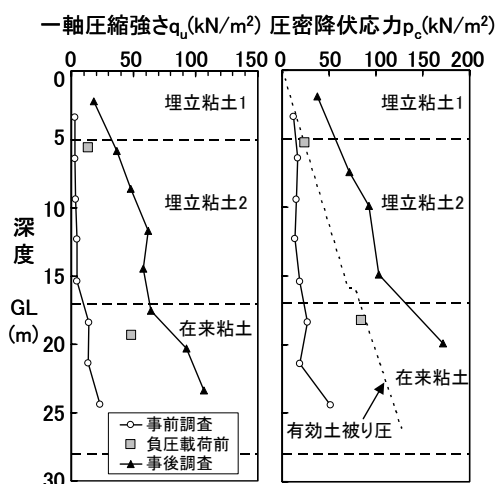


図6 真空載荷前後の力学特性の変化

### 3.5 地盤挙動

図7は間隙水圧計による過剰間隙水圧の経時変化を示したもので、上段が真空ポンプの元圧、集水管端部の負圧、ドレーン先端の負圧、下段が地盤内（ドレーン間中央）の負圧を示したものである。なお、図7は経過時間の基準日を負圧作用開始時（ドレーン打設から178日後）としている。30～40日、55日、70～75日にかけてポンプ元圧が一時的に低下する期間はあるが、ポンプ元圧は $-90 \sim -95\text{kN/m}^2$ 、集水管端部およびドレーン先端部の負圧は概ね $-65\text{kN/m}^2$ を達成しており、設計真空圧が均一に作用していると判断できる。一方、地盤中の負圧は、ほぼ直線的に経時低下しており、シール層（ $-1.5\text{m}$ ）を除くと改良終了時の負圧は、 $-35 \sim -54\text{kN/m}^2$ となっていることがわかる。

図8は「区域B」の改良域中心、改良域端部、改良域中心から52.2mにおける時間～沈下量関係、図9は改良域縦断方向の沈下形状、図10は「区域B」横断方向の地表面沈下形状、図11は「区域B」横断方向の地表面側方変位形状を示したものである。なお、図8～図11は、ドレ

ーン打設時を経過時間の基準日としている。これらの図を見てわかるように、改良地盤はドレーンの打設によって自重圧密が促進され、改良域中心部で最大 1.8m 程度の沈下量が生じている。図 8 より、改良域においては自重圧密挙動はほぼ終息状態にある。自重圧密による沈下と負圧荷荷による沈下を合わせると、改良域中心部で 2.0m~3.8m の沈下量が生じており、区域 B~区域 E においてはほぼ一般的な沈下を示している。これに対して区域 A および区域 F は、既設護岸における築堤材が介在していることと、在来地盤が低置換率 SCP 工法による地盤改良が行われていることが原因で沈下量が小さくなっていると思われる。

図 10 の地表面沈下に着目すると、横断方向の沈下形状はすり鉢状となっており、改良域中央部と改良域端部の沈下比は、約 0.64 (=端部沈下量/中央部沈下量)であった。また、改良域端部から 40m 離れた地点においても 70cm 程度の沈下が生じている。この周辺地盤の沈下の原因としては、1)天日乾燥、2)自重圧密沈下の進行、3)介在砂層の存在と負圧の伝搬による圧密沈下、4)改良域の沈下に伴う連れ込み沈下などが考えられるが、各要因の影響度を解明するためには詳細な分析を行う必要がある。

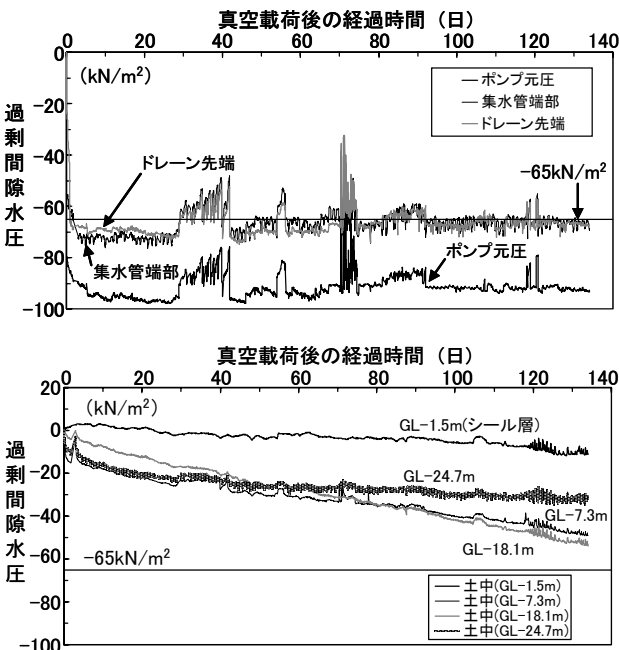


図 7 過剰間隙水圧の経時変化

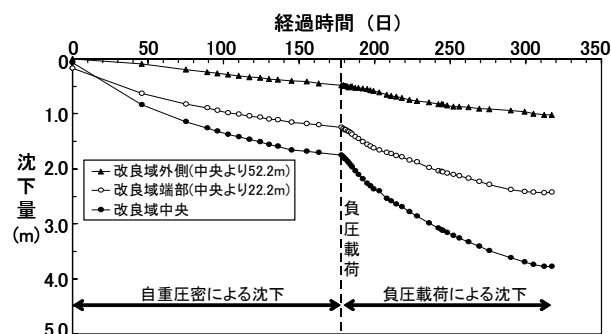


図 8 時間～沈下関係 (区域 B)

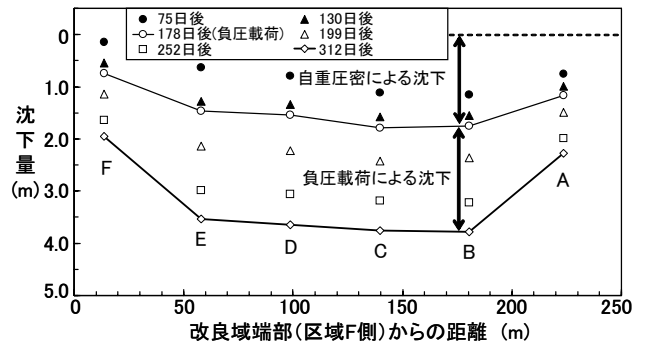


図 9 縦断方向の地表面沈下形状 (区域 A~F 中央部)

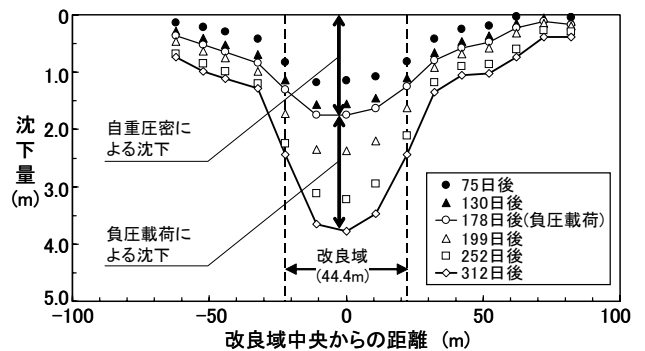


図 10 横断方向の地表面沈下形状 (区域 B)

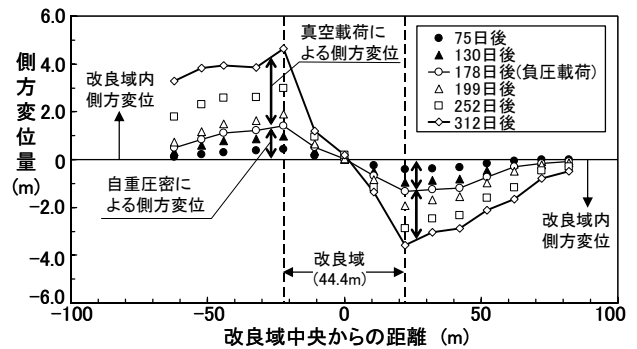


図 11 横断方向の地表面側方変位 (区域 B)

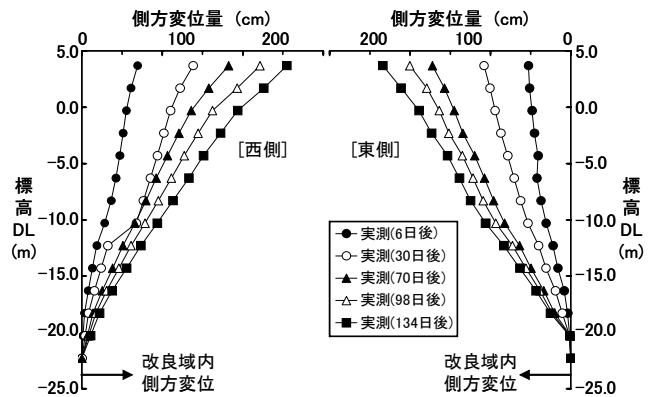


図 12 改良域端部の側方変位深度分布 (区域 B)

図 11 より、地表面の側方変位は改良域内へ一貫して引き込まれており、真空載荷時の典型的な地盤変形性状を示している。地表面側方変位の最大値は、改良域端部において 4.6m である。地表面沈下量と同様に、側方変位量についても周辺地盤への影響が大きく、改良域端部から 40m 離れた地点において、2~3m 程度の大きな側方変位が生じている。また、地表面には引っ張りクラックが観察された。

図 12 は「区域 B」の改良域端部における地中側方変位の深度分布図である、傾斜計は負圧載荷の数日前に設置し、負圧載荷に併せて自動計測を行っている。図 12 に示す値は、負圧載荷開始時を初期値として整理したものである。改良域端部の側方変位は地表面で最大値を示し、改良域内へ倒れ込むような変形モードを示していることがわかる。

#### 4. 有限要素解析

##### 4.1 解析の前提条件

前章の計測結果で詳述したように、真空載荷時は地盤改良域内だけでなく、改良域外においても広範囲に及ぶ地盤変形を誘発していることがわかる。これらの影響を定量的に評価する手法として有限要素解析が有効である。

本論文で対象とする浚渫埋立地は未圧密粘土地盤であり、ドレーンの打設によって自重圧密が生じている。このような地盤を対象とした圧密解析では、粘土の沈降から圧密沈下に至る過程を一貫して扱うことのできる解析手法が本来必要となる。しかし図 8 より自重圧密過程がほぼ終息状況にあると考えられること、図 6 の圧密降伏応力の深度分布図から、真空載荷前の地盤はほぼ正規圧密状態にあると判断できることから、ここでは、真空載荷前の地盤を初期状態と見なし、浚渫埋立粘土は正規圧密地盤 (OCR=1.0) を仮定して解析を行った。したがって、検証解析は負圧載荷後を対象として行い、実測値との比較も負圧載荷日を基準日として整理した。なお、解析に用いたプログラムは、港湾空港技術研究所による GeoFem<sup>20)</sup>である。

##### 4.2 解析条件

図 13 に解析に使用した有限要素メッシュ図および載荷工程図を示す。解析は負圧載荷開始から負圧除荷前までを対象とした。地盤改良中心から片側断面をモデル化し、平面ひずみ条件で解析を行った。水平方向の解析範囲は改良層厚の約 3 倍の 80m とした。土層構成は、埋立粘土 1, 2 (浚渫土) と在来地盤 (沖積粘土) が成層状態で均質に堆積しているものとしてモデル化した。

変位境界条件は側面を水平変位固定、底面 (基盤砂礫層上面) を水平および鉛直変位固定とし、水理境界条件は右側側面を非排水境界、上面および底面を排水境界 ( $\Delta u=0$ ) とした。鉛直ドレーンは 1.2m 毎の鉛直メッシュ線上に水圧固定境界を設けて表現し、設計負圧 ( $-65\text{kN/m}^2$ ) を 2 日間で徐々に作用させた。なお、図 7 に示したような元圧の一時的な低下は考慮していない。解析次元は平面ひずみ条件であるため、改良域の透水係数を軸方向流れの

Barron の理論解と Terzaghi の一次元圧密理論解が 50% 圧密時間で一致するように換算した<sup>21)</sup>。図 13 の詳細図に示すように、1.2m 間隔の鉛直ドレーン間には 4 つの要素が存在する。以後の解析結果の評価においては、鉛直ドレーン間の粘土要素を代表する着目点として、黒丸 (●) で示したドレーン間中央要素の応力値を参照することとした。

##### 4.3 構成モデル

埋立粘土および在来粘土の構成モデルは、修正関口・太田モデル<sup>1)</sup>を適用した。このモデルは、Sekiguchi and Ohta<sup>22)</sup>の弾塑性モデル (関口・太田モデル) の降伏関数をオリジナルカムクレイ型から楕円関数を用いた修正カムクレイ型に変更し、降伏曲面の軸の傾き  $\beta$  を堆積時の有効応力比  $\eta_0 (=q_0/p'_0)$  の 2/3 としたものである。なお、構成モデルに用いるパラメータはオリジナルの関口・太田モデルと変わらない。図 14 に修正関口・太田モデルと関口・太田モデルの降伏曲面の比較を示す。

本研究で修正関口・太田モデルを適用した理由について述べる。2 章でも述べたように、既往の研究事例では関口・太田モデルや修正カムクレイモデルを適用した報告が多い。しかし、関口・太田モデルは、降伏面上における尖り点 (特異点) の問題があり、真空載荷時のように等方的な応力が作用して図 1 に示すような有効応力経路を辿ったときに、妥当な応力・ひずみ曲線を示すかどうかの保証がなく、地盤変形量の評価を見誤る可能性がある。また、実務的には解析コードによって尖り点処理の方法も異なると考えられるため、関口・太田モデルの適用は解析結果のバラツキの原因にもなりうる。

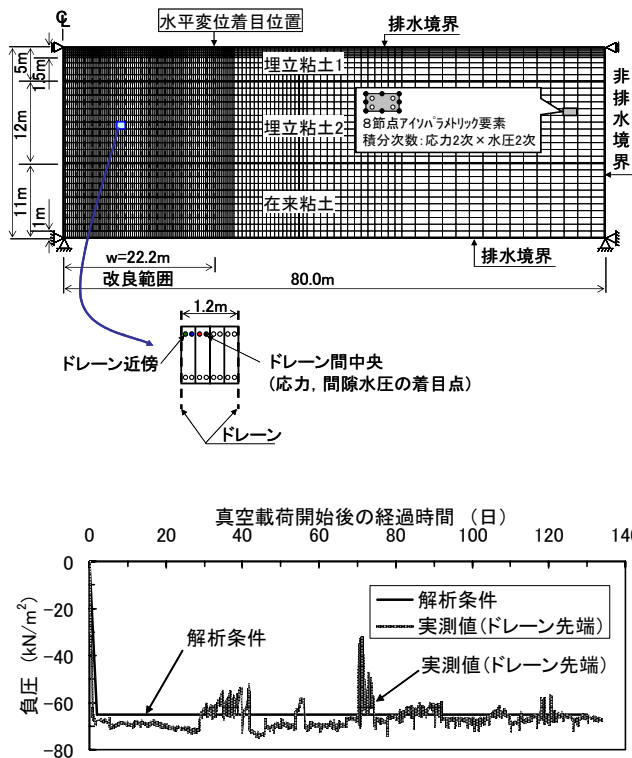


図 13 有限要素メッシュ図および載荷工程図

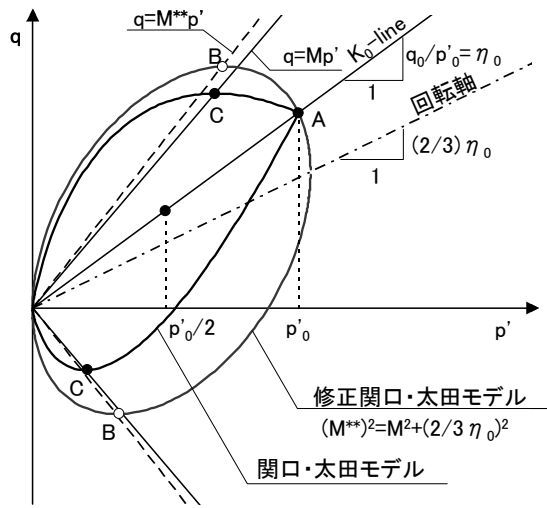


図 14 降伏曲面の比較<sup>1)</sup>

一方、修正カムクレイモデルは降伏曲面が楕円形状をしているため尖り点の問題がない。しかし、等方硬化型のモデルであるため、地盤の強度異方性を考慮できない問題点がある。また、修正カムクレイモデルは、側方変形が生じない  $K_0$  圧密条件下では、 $K_0$  値がその他の弾塑性パラメータから理論的に導出されるので<sup>23)</sup>、Jáky の式に代表される経験的な  $K_0$  値や実験的に求められる  $K_0$  値とは異なる  $K_0$  値を解析上仮定する必要がある。これも実地盤の解析においては大きな問題である。

これに対して本研究で適用した修正関口・太田モデルは、降伏曲面の軸の傾き  $\beta$  を堆積時の有効応力比  $\eta_0$  の  $2/3$  とすることにより、自然堆積粘土地盤が有する強度異方性や静止土圧係数を概ね表現できる点が特長である<sup>1)</sup>。異方圧密粘土に対する構成モデルとして、Hashiguchi & Chen による弾塑性モデル<sup>24)</sup>があるが、このモデルは回転硬化変数の導入によって異方性の発展が塑性変形の進展に伴って変化している（変化しないことも許容する）。修正関口・太田モデルは実務的な簡便さを重視して降伏曲面の軸の傾きを固定しており、Hashiguchi & Chen による弾塑性モデルの一部と見なすこともできる。

図 15 は修正関口・太田モデル ( $\beta=2/3\eta_0$ )、修正カムクレイモデル ( $\beta=0$ )、降伏曲面の軸の傾きを  $\beta=\eta_0$  としたモデルによって計算される  $K_0$  値を一要素の有限要素モデルで調べた結果である。解析は平面ひずみ条件で行い、初期条件を等方応力状態として側方変形を拘束 ( $K_0$  条件) した上で要素上面の節点に等ひずみを与えている。図 15 は、非可逆比  $A(=1-\kappa/\lambda)$  を 0.85 および 0.70 の 2 ケースとし、有効内部摩擦角  $\phi'$  を 20 度から 45 度の範囲で計算した結果である。ここで限界状態応力比は  $M=6\sin\phi'/(3-\sin\phi')$ 、ポアソン比は  $\nu'=K_0/(1+K_0)$  で与えている。ただし、ポアソン比の計算に用いた  $K_0$  値は Jáky の式 ( $K_0=1-\sin\phi'$ ) より求めている。図 15 が示すように、修正関口・太田モデルは  $K_0$  値を求める経験式として適用性が高い Jáky の式や Brooker の式 ( $K_0=0.95-\sin\phi'$ ) を概ね満足する  $K_0$  値を予測することができる。これに対して、修正カムクレイモデルは過大

な  $K_0$  値、 $\beta=\eta_0$  としたモデルは過小な  $K_0$  値を仮定する必要があることがわかる。また、修正関口・太田モデルは非可逆比に対する  $K_0$  値の感度が他のモデルよりも小さいことがわかる。このことから降伏曲面の軸の傾きを  $2/3\eta_0$  とすることは一般性が高いと考えられる。

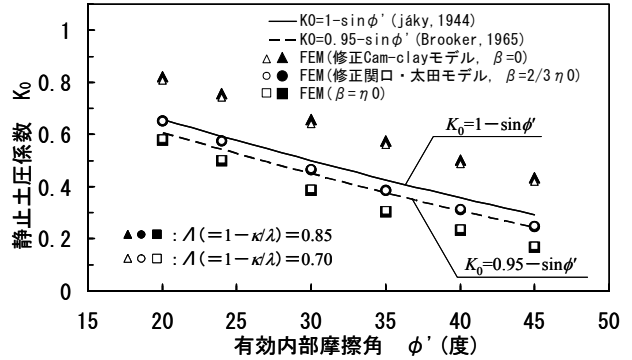


図 15  $K_0$  値の予測性能 ( $A=0.70, 0.85$ )

#### 4.4 土質パラメータ

表 2 に解析に用いた土質パラメータおよびその算定式を示す。土質パラメータは、事前ボーリング調査結果を参考に設定した。ただし、 $\phi'$  と  $M$  については、海成粘土の一般的な値である  $\phi'=30$  度 ( $M=1.20$ ) を採用した。また、膨潤指数  $\kappa$  は圧縮指数  $\lambda$  の  $1/10$  を仮定し、正規圧密時の静止土圧係数  $K_0$  は Jáky の式から算定した。有効ポアソン比  $\nu'$  は地盤を弾性体と仮定した式 ( $\nu'=K_0/(1+K_0)$ ) から算定した。地盤の透水係数  $k$  は、 $e-\log k$  関係で直線的に低下すると仮定し、このときの傾き  $\lambda_k$  は圧縮指数  $\lambda$  と同じ値とした。地盤の初期状態は、表 2 に示すような初期間隙比を仮定し、応力積分点で有効土被り圧を計算し初期応力状態とした。土被り圧がゼロに近い地表面要素では計算が発散しやすくなるが、本解析では載荷ステップを可能な限り細かくして ( $\Delta t=0.05\text{day}$ )、計算が発散しないよう配慮した。

表 2 解析に用いた土質パラメータ

パラメータ	単位	埋土粘土 1	埋土粘土 2	在来粘土
湿潤単位体積重量 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	14.0	14.0	14.8
圧縮指数 $\lambda$	—	0.445	0.445	0.449
膨潤指数 $\kappa$	—	0.045	0.045	0.045
非可逆比 $A$	—	0.90	0.90	0.90
初期間隙比 $e_0$	—	2.90	2.40	2.10
限界状態応力比 $M$	—	1.20	1.20	1.20
内部摩擦角 $\phi$	度	30.0	30.0	30.0
過圧密比 $OCR$	—	1.0	1.0	1.0
降伏曲面の回転角 $\beta$	—	0.500	0.500	0.500
透水係数 $k$	cm/sec	8.38E-7	3.79E-7	1.86E-7
$e-\log k$ の傾き $\lambda_k$	—	0.445	0.445	0.449
ポアソン比 $\nu'$	—	0.333	0.333	0.333
先行時静止土圧係数 $K_0$	—	0.500	0.500	0.500
原位置静止土圧係数 $K_1$	—	0.500	0.500	0.500

パラメータの算定式： $\lambda=0.434C_c$ 、 $\kappa=0.434C_s(C_s=C_c/10)$ 、 $A=1-\kappa/\lambda$ 、 $M=6\sin\phi'/(3-\sin\phi')$ 、 $\beta=(2/3)\cdot\eta_0=(2/3)\cdot3(1-K_0)/(1+2K_0)$ 、 $\lambda_k=\lambda$ 、 $\nu'=K_0/(1+K_0)$ 、 $K_0=1-\sin\phi'$  (Jáky,1944)、 $K_1=K_0(OCR)^{\sin\phi'}$  (Schmidt,1966)

### 4.5 軸対称モデルによる検証

真空載荷時における修正関口・太田モデルの基本的な応答性能を確認するために、図 16 に示す軸対称モデルを用いて、地盤内の有効応力状態を調べた。図 16 の右図に示すように、典型的な変位境界条件として、a)  $K_0$  圧密条件 (側方拘束)、b) 等方圧密条件 (側方変形) を仮定した。負圧は、対称軸 (鉛直ドレーン打設位置) に水圧固定境界として設計真空圧  $-65\text{kN/m}^2$  を 2 日間で作用させた。解析に用いた土質パラメータは、表 2 に示した値と同じである。

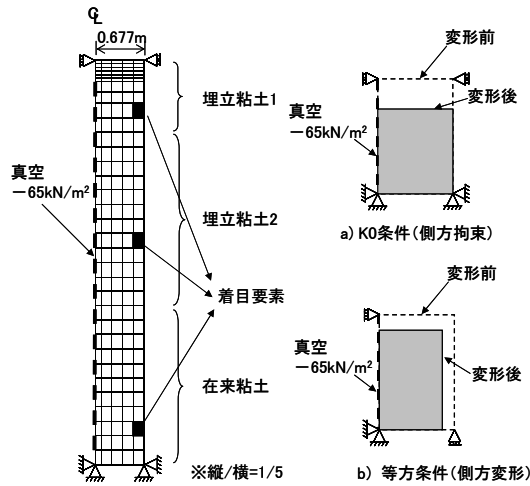
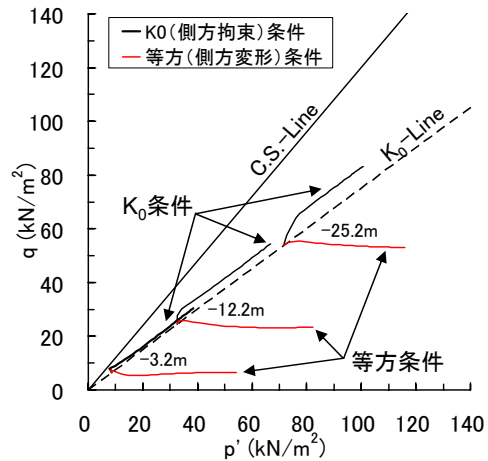


図 16 軸対称モデルによる修正関口・太田モデルの検証

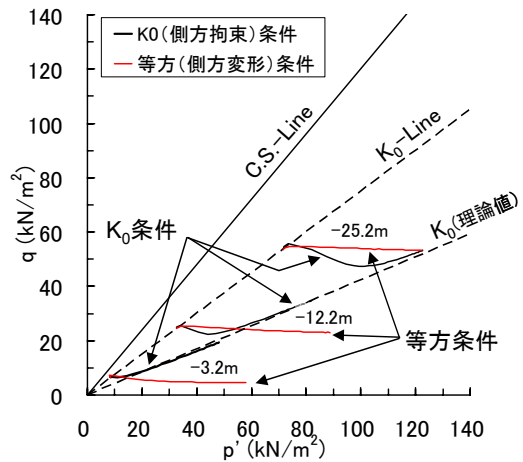
図 17 に 3 深度の着目要素における  $p'$ - $q$  面の有効応力経路を示す。上段は修正関口・太田モデル、下段は修正カムクレイモデルによる結果である。修正関口・太田モデルの場合、側方拘束条件では深部の要素ほど  $K_0$  ラインからややずれているが、概ね  $K_0$  ライン上を推移しており、側方拘束条件下の  $K_0$  圧密挙動をほぼ満足していることがわかる。これに対して側方変形条件の場合は、いずれの深度においても軸差応力  $q$  がほぼ一定のまま平均有効応力  $p'$  が増加する応力経路を示しており、図 1 に示したような等方圧密挙動を再現していると判断できる。それぞれの条件における沈下量については後述の「慣用計算法との比較」において詳述する。

一方、修正カムクレイモデルの場合は、初期応力条件として与えた  $K_0$  値 ( $=0.50$ ) は、ポアソン比  $\nu'$ 、限界状態応力比  $M$  および非可逆比  $\lambda$  ( $=1-\kappa/\lambda$ ) から導出される  $K_0$  理論値 ( $=0.66$ ) と異なるため、側方拘束条件では理論  $K_0$  ラインに漸近するような応力経路を描き、結果として軸差応力  $q$  がいったん低下することも起こりうる。

有効応力経路から真空載荷時の応力状態を考察する観点に立つと、修正カムクレイモデルを適用する場合は、初期応力条件として入力する  $K_0$  値をモデルにより導出される  $K_0$  値 (理論値) と一致させるか、あるいは入力値と理論値が異なる場合は、図 17(b) のような応力経路を取りうることを前提にして、解析結果の解釈をすることが重要と考えられる。



(a) 修正関口・太田モデル



(b) 修正カムクレイモデル

図 17 着目要素の有効応力経路

### 4.6 二次元モデルによる解析結果

#### 4.6.1 沈下量

図 18 に時間～沈下量関係、図 19 に地表面沈下量の水平分布の実測値との比較をそれぞれ示す。なお、図 18 はドレーン打設日、図 19 は真空載荷開始日を経過時間の基準日として整理している。

図 18 および図 19 より、解析結果は実測値に比べて初期の沈下速度がやや速いものの、改良域内に生じた圧密沈下量を実務上十分な精度で再現できていると思われる。また、図 19 において改良域端部付近で沈下形状がわずかに波打つ傾向を示すが、改良域境界の局所的な変形による影響と考えられる。改良域端部に近い未改良域は、改良域の圧密沈下に連れ込まれるため、圧密による強度増加量が小さいにも関わらず伸張方向にせん断力が作用するため、局所的な大きなせん断ひずみが生じたと思われる。後段の修正カムクレイモデルによる解析結果 (図 26) では、このような局所的な変形が生じていない。これは、修正カムクレイモデルを異方圧密粘土に適用した場合は、非排水伸張条件で弾性応答を示すこと<sup>25)</sup>が影響している可能性がある。



改良域外の沈下量に着目すると、解析は全般的に過小評価となっており、周辺地盤への影響予測を行う観点からは、課題の残る結果となっている。前章で述べたように、改良域外の沈下の要因として、1)天日乾燥の影響、2)自重圧密沈下の進行、3)介在砂層の存在と負圧の伝搬による圧密沈下、4)改良域の沈下に伴う連れ込み沈下などが考えられるが、本モデルは、4)の連れ込み沈下以外の影響を考慮できるものではない。本工事の事前ボーリング調査結果の記事によれば、シルト質である浚渫埋立粘土中には、「所々微細砂を不規則に混入する」、「GL-12.4m 付近にレンズ状に砂を挟む」とある。そこで、3)の影響について着目し、介在する高透水層を仮想的にモデル化した感度解析を別途実施している<sup>26)</sup>。その結果によれば、仮に層厚 1m の連続した透水層が  $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  以上の透水係数を有すれば、真空圧の影響が改良域外にも伝搬し、実測値にみられる程度の沈下を起こす可能性があることが示された。ただし、この仮説が成立するかどうかは、より詳細な地盤調査結果や動態観測結果に基づいて判断する必要がある。

なお、上述の要因のうち、2)の影響が相対的に大きい可能性がある。これについては、自重圧密過程を考慮した解析手法を構築する必要があり、今後の課題として挙げられる。いずれにしても、浚渫粘土地盤を正規圧密地盤とみなすことができれば、有限要素解析によって真空載荷に起因する改良域内の圧密沈下量を実務上十分な精度で予測することができると考えられる。真空圧密工法による浚渫埋立地の減容化工事など、圧密沈下量の予測が重要となる案件に対しては、本解析手法が非常に有効であると考えられる。

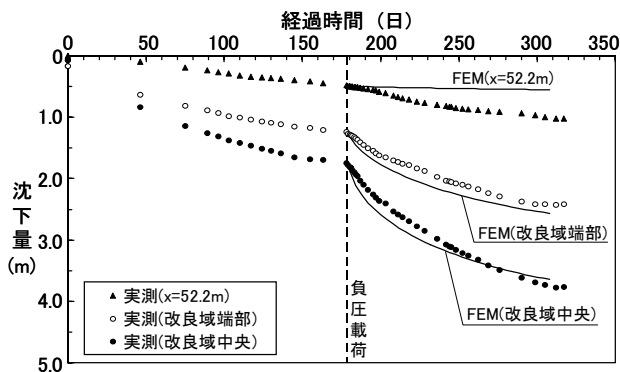


図 18 時間～沈下量関係

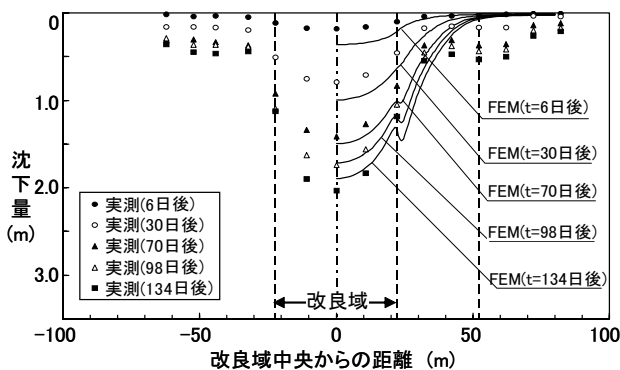


図 19 地表面沈下量の水平分布

#### 4.6.2 側方変位

図 20 は地表面側方変位量の水平分布を実測値と比較したもので、図 21 は改良域端部における地中側方変位の深度分布を比較したものである。図 20 より、地表面側方変位については、解析結果は実測値に比べて全体に過小評価となっているが、改良域内への引き込み変形モードを示している点や改良域端部で最大値を示している点は再現できている。図 21 の改良域端部の側方変位の深度分布についても、解析結果は深部ほどやや過小評価となっているが、地表面付近では実測値をほぼ再現できている。

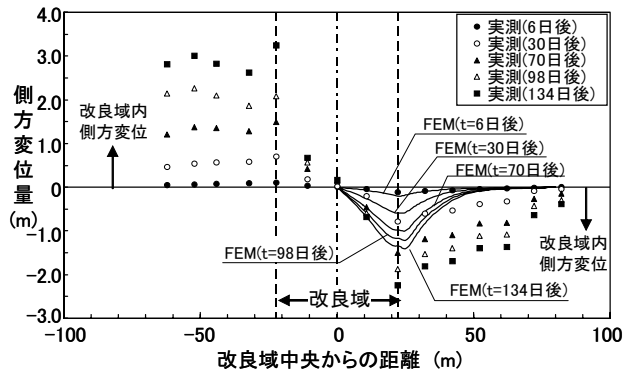


図 20 地表面側方変位量の水平分布

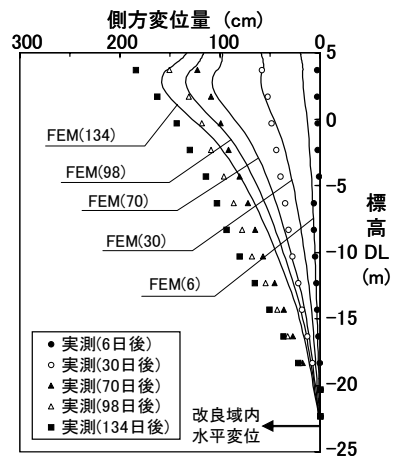


図 21 改良域端部の地中側方変位の深度分布

#### 4.6.3 過剰間隙水圧

図 22 は、改良域中央部のドレーン間中央要素における過剰間隙水圧の経時変化を比較したものである。着目要素は排水境界から最も遠く、解析の初期段階では非排水条件に近い正の過剰間隙水圧が発生している。その後は実測値と同様の傾向で過剰間隙水圧は経時的に低下していることが読み取れる。すなわち、解析による時間～沈下量関係が実測値とよく対応していること(図 18)を過剰間隙水圧の挙動からも確認することができる。Biot の圧密理論では、ポアソン比が  $\nu' = 0.5$  以外の場合に間隙水圧が初期上昇することが知られており、この現象は Mandel-Cryer 効果<sup>27)</sup>と呼ばれている。本解析モデルにおいてポアソン比を  $\nu' = 0.5$  とし、その他の定数は変化させないで計算した

ところ、正の過剰間隙水圧が発生しないことを確認している。このことから、図 22 の過剰間隙水圧の初期上昇は Mandel-Cryer 効果の可能性が考えられる。後述するように、正の過剰間隙水圧が発生することにより、 $p'$ - $q$  面上の有効応力経路は非排水せん断挙動を示す。

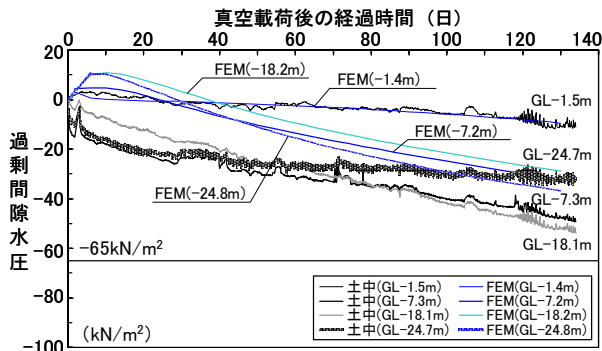


図 22 改良域中央部の過剰間隙水圧の経時変化

4.6.4 有効応力経路

図 23 に、改良域中央部、中央部から 9.6m、改良域端部および改良域端部から 4m (未改良部) における 3 深度 (浅層部: GL. -3.2m, 中央部: GL. -12.2m, 深層部: GL. -25.2m) の有効応力経路を示す。なお、実工では負圧期間は 133 日間であるが、ここでは有効応力経路の終局状態を調べるために、負圧期間を 360 日まで延長した結果 (負圧除荷は考慮しない) を示している。

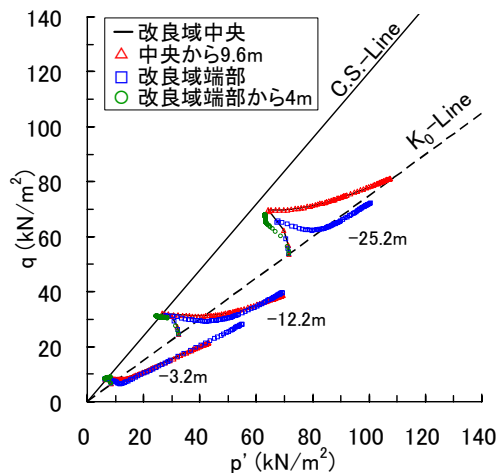


図 23 有効応力経路

改良域中央部と中央から 9.6m の位置では有効応力経路に有意な差は見られないが、改良域端部は改良域中央部とはわずかに異なる応力経路を示している。深度毎に見ると、中央部 (-12.2m) は全般的には等方圧密状態に近く、深層部 (-25.2m) は  $K_0$  ラインに漸近していることから  $K_0$  圧密条件に近い応力状態にあると考えられる。浅部 (-3.2m) は  $K_0$  ラインを超えてやや右上がりの応力経路を辿っており、 $K_0$  圧密状態か等方圧密状態かを判断するのは難

しい。これは、キャップ付ドレーン工法では表層部が排水境界となっていることも影響していると考えられる。以上をまとめると、修正関口太田モデルによる数値解析で求めた真空載荷時の地盤内応力状態は、深部では「 $K_0$  圧密状態」、それ以外では「等方圧密状態」で概ね近似でき、今井<sup>5)</sup>の仮定したモデル化がほぼ妥当であると判断できる。

4.7 慣用計算法との比較

図 24 は改良域中央部の沈下量について、二次元 FEM、前述の軸対称 FEM (側方変形条件, 側方拘束条件), Barron 理論および今井による提案式<sup>5)</sup>を実測値と比較したものである。ここでは、Barron 理論を慣用計算法と呼ぶが、最終沈下量  $S_f$  は水圧の減少分  $-\Delta u$  を圧密荷重の増加分  $+\Delta p_v$  と見なし  $C_c$  法によって算定している。また、今井による真空載荷時の沈下量  $S_f^*$  は次式によって表される。

$$S_f^* = \frac{1+K_0}{1+2K_0} S_f \tag{1}$$

ここに、 $K_0$  は静止土圧係数、 $S_f$  は圧密荷重を上載荷重として作用させた場合の圧密沈下量である。図 24 には  $K_0=0.4, 0.5, 0.6$  の 3 ケースを示している。

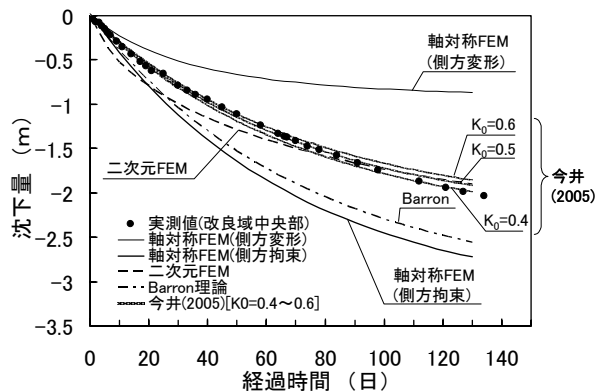


図 24 改良域中央部の沈下量

図 24 より慣用計算法は実測沈下量を過大評価しているのに対し、 $K_0$  値に応じて沈下量が低減される今井の式は、実測値に非常に近い沈下量を計算しており、実用性が高いことがわかる。一方、前述した軸対称モデルについては、側方拘束条件 ( $K_0$  圧密条件) は慣用計算法とほぼ同じ沈下量を計算し、側方変形条件 (等方圧密条件) は実測値を過小評価している。これに対し、二次元 FEM は軸対称 FEM よりも実測値の再現性が相対的に高いと言える。これらのことより、真空圧密工法による圧密沈下量を有限要素解析で予測する場合は、境界条件の極端な単純化は予測を見誤る可能性が示唆され、平面ひずみ条件の二次元有限要素解析手法が有効であると思われる。

なお、改良域中央部の沈下量が慣用計算法で計算される沈下量より小さく観測される理由として、いわゆる「部分改良効果」の影響が指摘されている<sup>28)</sup>。すなわち、改良深さ  $H$  に対して改良幅  $b$  が十分広くない場合 ( $b/H < 2.0$ )、改良域中央部の沈下量が慣用計算法で算定される一次元圧

密沈下量の0.8~0.9程度しか生じない実績が多い。このような沈下量の低減が  $b/H$  に依存するのか、改良域深度方向の境界条件に依存するのか、それとも工法の違い（気密シート式、キャップ式）によるものかは、今後もデータの蓄積を図って検証していく必要がある。

### 5. 構成モデルによる比較

#### 5.1 検討ケース

従来の事例解析で採用実績が多い修正カムクレイモデルについても4章と全く同じ条件、同じプログラムで解析を実施し、地盤変形量および応力状態の違いについて考察を加える。前述したように、修正カムクレイモデルを適用する場合は  $K_0$  値の設定が問題となるが、本検討では修正関口・太田モデルで解析した条件と同様に、Jákyの式 ( $K_0=1-\sin\phi$ ) で計算した  $K_0$  値 ( $K_0=0.50$ ) を初期条件として仮定した。

なお、関口・太田モデル<sup>22)</sup>による解析も実施したが、修正関口・太田モデルよりも改良域端部における局所変形が卓越し、改良域中央部の沈下量の精度にも影響を及ぼした。したがって、関口・太田モデルは有意な比較が行えないと判断し、本論文では比較の対象外とした。

#### 5.2 解析結果

図25~図28に修正カムクレイモデルによる解析結果を示す。それぞれ、図18~図21の修正関口・太田モデルによる解析結果と同様の整理を行っている。なお、図示は省略するが、過剰間隙水圧挙動については、修正関口・太田モデルによる結果とほぼ同じ傾向を示している。

図25と図18、図26と図19の比較より、修正カムクレイモデルの方が、改良域内の沈下量をわずかに大きく計算している。これは修正関口・太田モデルによる解析結果に見られた改良域端部における局所的な変形が、修正カムクレイモデルでは生じなかったためと考えられる。地表面沈下量に関しては、大局的には両構成モデルによる大きな差はないと言える。

図27と図20の比較より、地表面側方変位量についても両モデルによる傾向の大きな違いはないが、修正カムクレイモデルの方が、改良域内外ともに地表面側方変位量がわずかに小さく、実測値をやや過小評価する結果となった。また、図28と図21の比較より、改良域端部の地中側方変位については両モデルの差は大きく、修正カムクレイモデルによる側方変位は実測値を1/2程度に過小評価している。ただし、修正関口・太田モデルも全体的には地中側方変位は過小評価である。真空載荷時における側方変位の過小評価の傾向は、Chai et al.<sup>9)</sup>による解析結果においても報告されており、原因の一つとして地盤の異方性を考慮していない修正カムクレイモデルの適用限界の可能性を述べている。本解析結果は、Chai et al.<sup>9)</sup>の推察を裏付けるものと言えるが、その他の要因の可能性も考えられることから、今後もこのような比較解析が必要であると考えられる。

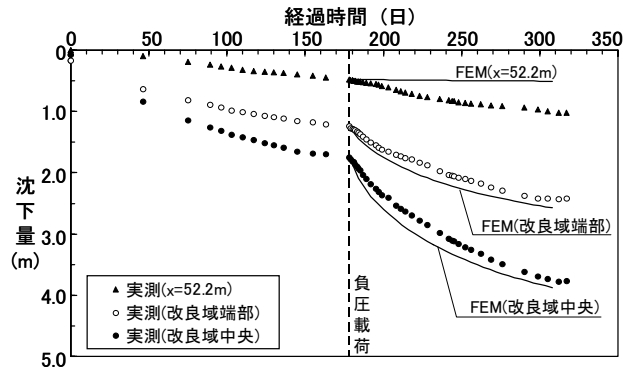


図25 時間~沈下量関係 (修正カムクレイモデル)

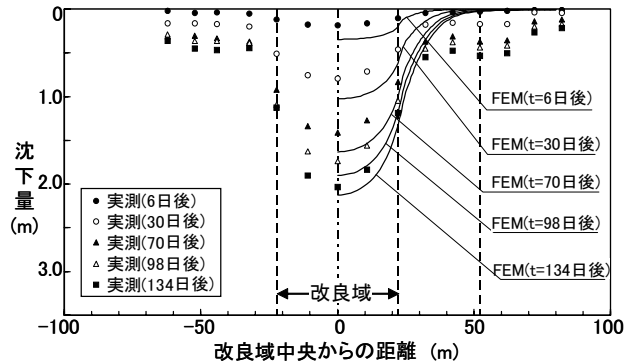


図26 地表面沈下量の水平分布 (修正カムクレイモデル)

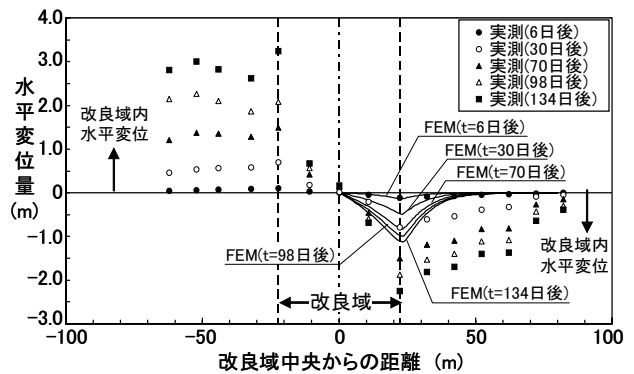


図27 地表面側方変位量の水平分布 (修正カムクレイモデル)

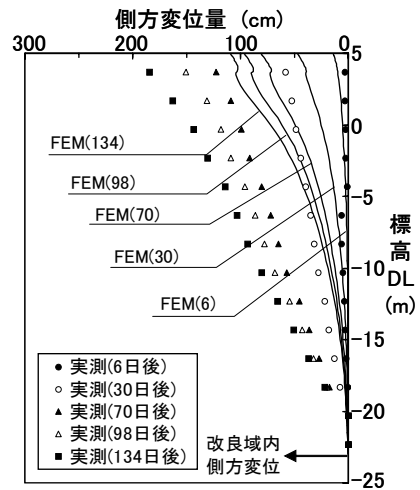


図28 改良域端部の地中側方変位量 (修正カムクレイモデル)

図 29 は、修正カムクレイモデルによる真空載荷時の有効応力経路を示したものである。深部 (G.L. -25.2m) の要素では、理論  $K_0$  ラインに漸近している様子が分かるが、そこに至る経路は等方圧密状態に近い。ただし改良域端部の深部要素は、軸差応力  $q$  が減少しつつ理論  $K_0$  ラインを大きく超えており、図 23 に示す修正関口・太田モデルによる傾向とはやや異なる。図 17 で示したように、完全に  $K_0$  圧密状態であれば、理論  $K_0$  ラインに沿って右肩上がりに推移するはずなので、全体的にやや等方圧密に近い状態にあると考えられる。このように、降伏曲面の硬化タイプの違いと修正カムクレイモデルにおける  $K_0$  値の問題が複雑に影響して、両モデルによる有効応力状態は異なる経路を示し、側方変位の解析結果にも差が生じた可能性が考えられる。

以上をまとめると、修正カムクレイモデルを適用することにより、改良域内の沈下量は概ね再現できることがわかった。しかし、地表面側方変位量や改良域端部における地中側方変位量は、解析値が実測値の半分程度となっており、これまでも報告されている過小評価の傾向<sup>9)</sup>を本事例は追認するものであった。また、修正カムクレイモデルにおいて、理論的に導出される  $K_0$  値と大きく異なる  $K_0$  値を初期条件として入力した場合は、地盤内の有効応力状態の解釈が難しくなるなど、適用には注意が必要である。

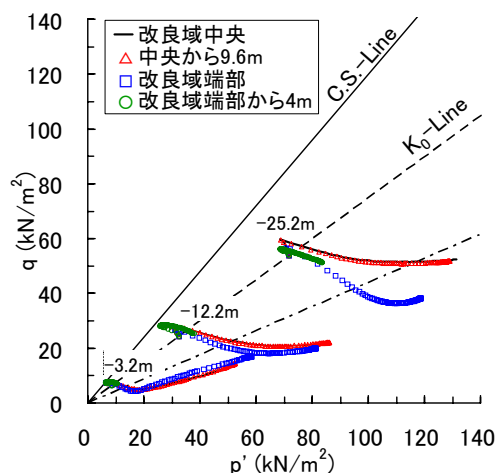


図 29 着目要素の有効応力経路 (修正カムクレイモデル)

## 6. 結論

本論文では、真空圧密工法で地盤改良された浚渫粘土埋立地盤の動態観測結果を報告するとともに、有限要素解析による地盤変形予測精度の検証と真空載荷時の応力状態に関する考察を行った。本研究によって得られた主要な結論を以下に示す。

1) 在来粘土および浚渫粘土から成る埋立地盤に対してキャップ付ドレーンを用いた真空圧密工法を採用したところ、改良域内では最大 3.8m のすり鉢状の沈下形状と最大 4.2m の引き込み型の側方変位を示した。

また、改良域端部から 40m 離れた地点でも 70cm の沈下を観測した。

- 2) 関口・太田モデルにおける降伏曲面を楕円関数に変更したモデル (修正関口・太田モデル) による真空載荷時の応力状態を鉛直ドレーン 1 本分の軸対称モデルで検証した結果、側方拘束条件 ( $K_0$  圧密条件) および側方変形条件 (等方圧密条件) における有効応力状態を適切に表現できることがわかった。
- 3) 浚渫埋立地盤を均質な正規圧密粘土地盤と仮定した二次元有限要素解析では、負圧載荷による改良域内の圧密沈下量、側方変位量、地盤内間隙水圧の実測値を良好に再現した。しかし、改良域外の広範囲にわたる沈下量や側方変位量は過小評価した。
- 4) 修正関口・太田モデルによる有効応力経路から、深部は「 $K_0$  圧密状態」、それ以外は「等方圧密状態」で近似することでき、今井によるモデル化がほぼ妥当と考えられる。
- 5) 水圧の減少分を鉛直方向の圧密荷重の増加分と見なす従来の慣用的な圧密沈下計算法は、改良域中央部の沈下量を過大評価した。一方、 $K_0$  値に応じて沈下量を低減する今井の式は実測値を良好に再現しており、実用性が高いことを示した。
- 6) 実務で多用される修正カムクレイモデルによる同様の解析を実施した。修正カムクレイモデルは改良域内の圧密沈下量を良好に再現したが、地表面側方変位や改良域端部の地中側方変位は総じて実測値を過小評価しており、過去の解析事例を追認する結果であった。
- 7) 有限要素解析によって真空載荷時の地盤変形量を精度良く予測するためには、改良深さに対する改良幅の影響 (部分改良効果)、自重圧密の影響、介在砂層による負圧伝搬の影響などに対する解析手法の構築と実測値による検証作業が今後も必要である。

## 謝辞

本論文で使用した各種データは、山口県周南港湾管理事務所よりご提供いただいた。本工事の調査、設計、施工に携わった多くの関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 水野健太, 土田孝, 小林正樹, 渡部要一: 水平変位の予測精度に着目した粘土の構成モデルと現地計測事例による検証, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.4, pp.936-953, 2007.
- 2) Roscoe, K. H. and Burland, J. B.: On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay, *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, pp.535-609, 1968.
- 3) 梅崎健夫, 河村隆, 鈴木俊介, 飯塚貴久: 真空圧密工法の施工過程を考慮した粘土の圧密および強度増加特性, 施工過程を考慮した地盤の変形・破壊予測に関するシンポジウム, pp.93-100, 2002.
- 4) 三田地利之, 高橋秀彰, 香西篤: 真空圧密工法による地盤の変形と強度増加—三軸試験によるシミュレーション—, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.245-252, 2002.
- 5) 今井五郎: 「真空圧密工法」のさらなる発展に向けて—真空圧密を利用した地盤改良の原理とその適用—, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.1-16, 2005.

- 6) Chai, J.-C., Carter, J.P. and Hayashi, S. :Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.12, pp.1552-1561, 2005.
- 7) 松本江基：軟弱地盤上の急速盛土工への真空圧密工法の適用に関する研究，九州大学学位論文，2002.
- 8) 山添誠隆・三田地利之：真空圧密併用盛土下における泥炭地盤の変形挙動解析，*地盤工学ジャーナル*，Vol.1, No.4, pp.143-156, 2006.
- 9) 山添誠隆：真空圧密工法を適用した泥炭地盤の変形挙動とその予測に関する研究，北海道大学学位論文，2006.
- 10) Chai, J.-C., Carter, J.P. and Hayashi, S. :Vacuum Consolidation and its combination with embankment loading, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, No.10, pp.985-996, 2006.
- 11) 真空圧密ドレーン工法協会：真空圧密ドレーン工法－キャップ付ドレーンを用いた圧密排水工法－技術資料，2007年3月.
- 12) 中岡淳二，米谷宏史，仁井克明，本永博明：浚渫粘性土を埋め立てた未圧密地盤への真空圧密工法の適用（その1）～施工概要と地盤挙動～，第40回地盤工学研究発表会（函館），pp.1053-1054, 2005.
- 13) 中岡淳二，藤木泰宏，仁井克明，新舎博：浚渫粘性土を埋め立てた未圧密地盤への真空圧密工法の適用（その2）～改良効果と地盤強度～，第40回地盤工学研究発表会（函館），pp.1055-1056, 2005.
- 14) 松田博，石井一郎，横山壽一，本田一光，中川義守：SCP打設後の粘土地盤の強度・変形特性に関する研究，*地盤と建設*，Vol.11, No.1, pp.31-41, 1993.
- 15) 松田博，高橋総一，藤原克久，來山尚義：サンドコンパクションパイルの打設が地盤改良域外の粘土地盤の強度に及ぼす影響，*土木学会論文集*，No.596/III-43, pp.101-110, 1998.
- 16) 水野健太，土田孝，松本英雄，近井玲子：サンドコンパクションパイル工法による改良地盤に対する有限要素解析の適用事例，第7回地盤改良シンポジウム論文集，pp.249-254, 2006.
- 17) 小林正樹，土田孝：錦海湾における真空圧密工法現地実験，*港湾技研資料*，No.476, 1984.
- 18) 新舎博，米谷宏史，長津辰男：真空圧密工法の変化・変遷について，*土と基礎*，Vol.54, No.7, pp.16-18, 2006.
- 19) 津守嘉彦，米谷宏史，本永博明，新舎博，大久保泰宏：浚渫粘性土を埋め立てた未圧密地盤への真空圧密工法の適用（その3）～二次負圧による改良効果～，*土木学会第62回年次学術講演会（広島）*，pp.703-704, 2007.
- 20) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定解析，*港湾技術研究所報告*，Vol.23, No.1, pp.481-499, 1984.
- 21) 新舎博，原久夫，安部豊彦，田中昭人：サンドドレーンによる部分改良地盤の圧密沈下と側方変位，*土と基礎*，Vol.30, No.5, pp.7-12, 1982.
- 22) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive equations of soils, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.229-237, 1977.
- 23) 野田利弘，高稲敏浩，浅岡頭：水へ土連成計算による土留めに作用する力の時間依存性挙動の解析，*土木学会論文集*，No.617/III-46, pp.125-138, 1999.
- 24) Hashiguchi, K. and Chen, Z. -P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.22, pp.197-227, 1998.
- 25) 森脇武夫：異方圧密粘土の変形特性とその構成式，*広島大学学位論文*，1988年3月.
- 26) 水野健太，土田孝，新舎博：真空圧密工法で改良された浚渫埋立地盤の変形とその解析，*地盤と建設*，Vol.25, 2007（登載決定）.
- 27) 最上武雄編著：土質力学 第4章 圧密，*技報堂*，pp.417-421, 1969.
- 28) 熊谷隆宏，新舎博，椎名貴彦，池野勝哉：キャップ付きドレーンを用いた真空圧密工法による改良域周辺部の沈下特性，第42回地盤工学研究発表会（名古屋），pp.837-838, 2007.

(2007. 9. 4 受付)

## Ground deformation of dredging clay reclaimed land by vacuum consolidation method and its finite element analysis

Kenta MIZUNO<sup>1</sup>, Takashi TSUCHIDA<sup>2</sup>, Hiroshi SHINSHA<sup>3</sup>

1 Department of Social and Environmental Engineering, Hiroshima University

2 Department of Social and Environmental Engineering, Hiroshima University

3 Civil Engineering Design Division, Penta-Ocean Construction Co., Ltd.

### Abstract

In this paper, field observation result in dredging clay reclaimed land where the vacuum consolidation method was applied is reported. In addition, the prediction accuracy of soil-water coupled finite element analysis for ground deformation behavior by the vacuum consolidation method and the stress state of improved ground was examined. In this analysis, the modified Cam-clay model considering the anisotropy which authors proposed as a constitutive equation was applied and it was compared with the original modified Cam-clay model. By the application of the proposed model, it was shown that the principle of the vacuum consolidation method could be examined from the effective stress pass and that settlement and horizontal displacement in the improvement area could be predicted at the sufficient accuracy.

Key words: vacuum consolidation, reclamation ground, deformation, finite element method, stress pass