

真空井戸を用いた真空圧密による軟弱粘性土埋立地盤の圧密促進技術

梅原由貴 高橋真一
山田祐樹

Vacuum Consolidation Method Using Vacuum Well for Reclamation Work Using Soft Clay

Yuki Umehara Shinichi Takahashi
Yuki Yamada

Abstract

In reclamation work using soft clay, consolidation settlement after construction is a significant problem. In this study, we evaluate the effectiveness of the vacuum consolidation method, which involves vacuum well, permeable layer, and drain for suppressing residual settlement. Through FEM analysis, it is confirmed that the method yielded a more significant effect than the conventional method. In a small-scale experiment, we investigate the difference in the behavior of vacuum-consolidated soil and that of soil consolidated by loading pressure. In a large-scale experiment using a large tank and materials resembling those used in real conditions, it is confirmed that the installation of the permeable layer and drain propagates the negative pressure over a wide range, thereby facilitating an efficient consolidation.

概要

軟弱粘性土を用いた埋立工事では、造成後の圧密沈下が大きな問題となる。今回の検討では、残留沈下抑制のための圧密促進工法の一つとして、真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法の有効性について、FEM解析と実験により検証した。FEM解析では真空井戸・透水層・ドレーンを設置した地盤をモデル化して負圧を付与した土水連成解析を行い、従来工法と比較して当該工法の圧密促進効果が大きいことを確認した。室内で行った基礎的な小規模実験では、真空圧密させた粘性土と上載圧で圧密させた粘性土の圧密進行の特性を確認した。大型土槽を用いた大規模実験では、真空井戸・透水層・ドレーンについて実際の浚渫埋立て地を想定した高含水粘土を用いて実験を行った。地盤沈下や間隙水圧、実験後地盤の含水比等を計測し、透水層とドレーンの設置によって真空井戸にかけた負圧が広範囲に伝達し、効率的な圧密促進が可能となることを確認した。

1. はじめに

臨海部の埋立工事には付近の海底から浚渫された土砂を用いることが多い。このような浚渫土砂は高含水比で軟弱な粘性土を含むことから、埋立造成後地盤の圧密沈下が問題となる。埋立工事における圧密沈下対策には、プレロード盛土工法やパーチカルドレーン工法、真空圧密工法に代表される圧密促進工法や、機械式攪拌混合や事前混合による固化改良工法等が用いられる。それぞれ工期やコストの面で一長一短であり、施工条件に応じて適切な工法を選択することとなる。

そこで本論文では、軟弱粘性土を用いた埋立工事における残留沈下抑制のための地盤改良工法として、真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法に着目し、その適用可能性についてFEM解析と室内模型実験、屋外大型模型実験によって検討し、効果を検証した。

3次元のFEM解析では、240m四方、層厚19mの軟弱粘性土地盤をモデル化し、当該工法と従来工法であるプレロード盛土+パーチカルドレーン工法の圧密期間を比較し工法の効果検証を行った。

直径 Φ 100mm、高さh200mmの粘性土試料を用いて

行った室内小規模実験では、荷重条件や排水条件を変化させたケースを実施し、それぞれが沈下挙動や圧密後地盤の性状に与える影響を確認した。

大型土槽（長さ7.6m×奥行1.6m×高さ2.4m）を用いて行った屋外大規模実験では、実施工で用いるような真空井戸・透水層・ドレーンの材料を用いた。真空圧密させた際の沈下・水圧消散挙動を計測するとともに、圧密後地盤の性状、実験後の透水層やドレーンの性状についても確認し、工法の効果検証や課題の検討を行った。

2. 工法概要と特徴

2.1 工法概要

本論文で着目する真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法の概要図をFig. 1に示す。この工法は、改良対象の軟弱粘性土層の下に位置する透水層と、その透水層から上部へ伸びる真空井戸、透水層中から上部の粘性土層中まで伸びるパーチカルドレーン材を構成要素とするものである。真空井戸は、外部の負圧発生装置によって井戸内に負圧をかけることができる構造であり、また、井戸の透水層相当深度に設置したストレーナ

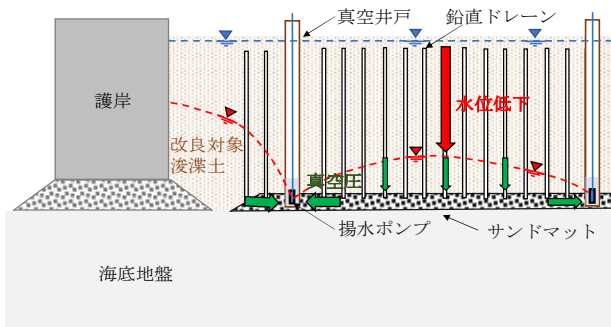


Fig. 1 真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法

Vacuum Consolidation Method Combining a Vacuum Well, a Permeable Layer and a Drain

を通じて流入した水を井戸内に設置した揚水ポンプにより排出できる構造である。

施工としては、①埋立工事を行う領域に護岸を施工、②海底面上に透水層と透水層中まで届くような真空井戸を設置、③改良対象の粘性土による埋立工を開始、の手順となる。このとき、粘性土層厚がある程度以上となったら真空井戸に負圧をかけるとともに揚水を開始する。これにより、粘性土の埋立期間中も真空圧密による圧密促進が可能である。埋立が完了したら、改良対象層にバーチカルドレーンを打設し、下端を透水層に貫入させる。この状態で放置し、目標の沈下量を得られたら真空圧密を完了する。

2.2 工法の特長

工法の特長を以下に述べる。

1) 負圧と水位低下・2つの圧密促進効果

井戸内の負圧と揚水による井戸内水位低下の2種類の圧密荷重を載荷することが可能である。改良対象層厚が厚い場合、水位低下分の圧密荷重が大きくなり、特に効果的と考えられる。プレロード盛土を用いないため、盛土施工・撤去が不要となるメリットがある。

2) 透水層による水平方向への真空圧密効果の伝達

改良対象層下部への透水層敷設により、真空井戸による圧密効果を水平方向に広範囲に伝達させる。

3) ドレーンによる鉛直方向への真空圧密効果の伝達

透水層中から改良対象層までバーチカルドレーン打設により、圧密効果を鉛直方向に伝達させる。

4) 埋立期間中も圧密促進可能

真空井戸を埋立工開始前から設置することで、埋立期間中も負圧を真空井戸にかけ揚水を行うことが可能である。これにより埋立期間中も圧密促進が可能となり、その分工期短縮が見込まれる。

同様の工法は大阪湾沿岸部で使用実績が報告されている²⁾が、工法適用中の地盤の間隙水圧消散状況等の詳細を測定し圧密促進効果の確認や効率的な施工管理に生かした事例は少なく、現場適用に向けては解析・実験により更なる知見の蓄積が必要と考えられる。

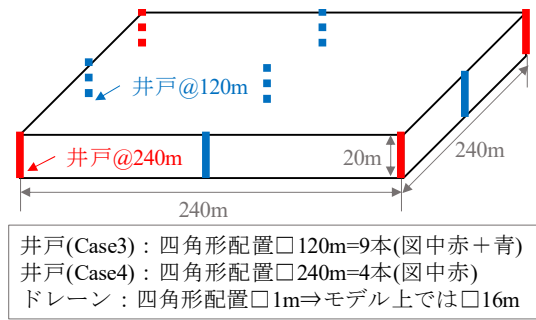


Fig. 2 解析モデル
Model of FEM Analysis

3. 土水連成FEM解析による効果検証

3.1 解析手法

自社開発のFEM解析ソフトGRASP3D (Grasp Real 3D Action of Subsoils and Pore water)³⁾を用いた3次元土水連成FEM解析により、当該工法有効性の検証を行った。土水連成FEM解析は、Biotの3次元圧密理論⁴⁾に基づき、地盤の変形・応力解析と間隙水の浸透流解析を連立させて解くものである。これにより、地盤変位や間隙水圧等の時間的变化を算出することができる。GRASP3Dでは、粘性土の非線形な変形・強度特性を表現するための構成則として、関口・太田の弾塑性モデル・弾粘塑性モデル⁵⁾を導入しているが、今回は弾塑性モデルで解析した。

解析モデルをFig. 2に示す。縦L240m×横W240m×層厚H20mの地盤をソリッド要素でモデル化した。

解析ケースはTable 1の通り4ケースである。Case1は従来工法としてプレロード盛土+バーチカルドレーン工法による圧密促進工法を想定した。層厚19mの軟弱粘性土層を改良するために上部に層厚1mのサンドマット層を設け、さらにその上部に層厚4m程度のプレロード盛土に相当する荷重70kN/m²をかけ圧密させた。盛土荷重は5cm/dayの施工を想定し80日間で漸増させて与えている。軟弱粘性土層中には1m正方形配置でドレーンを設置した。一方、Case2からCase4は井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法を想定したものである。層厚19mの軟弱粘性土層を改良するために下部に層厚1mの透水層(サンドマット層)を設け、軟弱粘性土層中には1m正方形配置でドレーンを設置した。Case2からCase4の違いは、井戸の配置間隔である。井戸のモデル化は真空圧と水位低下分による圧密荷重として与える全水頭値H=-27mをどの要素に与えるかで表現した。Case2ではH=-27mをサンドマット層全域に与え、サンドマット層中全域に水頭低下が伝わった理想ケースとした。Case3,4ではそれぞれ井戸ピッチを120m, 240mの正方形配置と想定し、サンドマット層中それぞれ120m, 240mピッチの井戸底部にあたる要素にのみH=-27mを与えた。なお、本解析では埋立過程は考慮せず、埋立完了後の軟弱状態から圧

密を開始したとし検討を行った。実工事では2.1節で述べた通り、当該工法では埋立過程からも真空圧密による圧密促進が可能となるため、実際はさらに工期短縮効果が見込めると考えられる。Case2からCase4では一定量の地表面沈下量が得られた時点で真空圧密停止を表す井戸底部の水頭をゼロに変更し、その後の挙動も観察した。

全水頭Hの初期条件として全節点にH=0.0mを与えた。地盤の側面は排水境界とした。地盤変形に関する境界条件として、モデル側面・底面の面外方向の変位を拘束した。

主な材料定数をTable 2に示す。軟弱粘性土層・サンドマット層については実施工で想定される各材料の値を入力した。ドレーン材については、一般的なプラスチックボードドレーンの値を参考に決定した。なお、今回の解析ではメッシュ数低減のためドレーンピッチを16倍し(16m正方形配置), 圧密時間が同等となるよう粘性土の水平方向透水係数 k_x, k_y を 16^2 倍として計算を行った。

3.2 解析結果

解析により得られた時間沈下曲線をFig. 3に示す。沈下量は地表面全地点の平均値である。これをみると、Case1の従来工法では圧密度90%となる沈下量1.2mを達成するのに410日要するところ、Case2からCase4ではそれぞれ35, 95, 225日に短縮できている。例えば、この沈下量を満たした時点で真空圧密をとめることによって従来工法よりも短時間で圧密することが可能である。

一方、当該工法の懸念点として真空圧停止後のリバウンドと井戸やドレーン配置による不同沈下があげられる。Case2からCase4の地表面のリバウンドは20-30cm生じる結果となった。しかし、ドレーンを用いた真空圧密工法の実施工で生じるリバウンドは10cm程度の場合が多い。軟弱粘性土での入力パラメータの整合性からリバウンド量の解析結果は過大に評価されることが多いため、実験で検証を行うこととした。地表面の不同沈下については、Case1は盛土荷重が解析領域全域にかかるため不同沈下が生じないのに対し、例えばCase3ではドレーン直上では沈下1.6m、ドレーン間(井戸間)では沈下1.0mと沈下量に0.6mの比較的大きな不同沈下が生じた。今回の解析ではメッシュ数低減のためドレーン間隔を実際の16倍とするとともに地盤の透水係数をモデル化を行っているため、ドレーンまでの距離に依存する沈下量の差が過大に評価されたと考えられる。不同沈下についても実験で再度確認することとした。

4. 小規模実験による効果検証

4.1 実験手法

負圧により真空圧密された粘性土の挙動や真空圧密時の排水条件の影響について知見を得るために、室内で直径Φ100mm、高さh200mmの粘性土試料に対して、荷重条件や排水条件を変化させた小規模な圧密実験を実施した。

Table 1 解析ケース
Cases of FEM Analysis

ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
工法	プレロード盛土+ バーチカルドレーン	真空井戸・透水層・ドレーン を組み合わせた真空圧密		
地層 構成	(上)サンドマット層1m (下)軟弱粘性土層19m	(上)軟弱粘性土層19m (下)サンドマット層1m		
ドレーン	1m正方形配置 (解析中では□16m)			
井戸配置	無	全域	□120m	□240m
圧密 荷重	上載荷重70kN/m ² (漸増80日間)	サンドマット層井戸部に 全水頭H=-27m		

備考：表中の「□」は、正方形配置を示す

Table 2 材料定数
Material Properties
(弾塑性 関口・太田モデル)

材料	透水係数		水中密度 ρ [g/cm ³]	圧密パラメータ		
	水平 k_x, k_y [m/s]	鉛直 k_z [m/s]		圧縮 指数 C_c	膨潤 指数 C_s	過圧 密比 OCR
粘性土	2.56×10^{-7}	1.00×10^{-9}	0.70	0.318	0.0697	1.0

※ドレーンピッチ正方形配置1mを正方形配置16mにモデル化するため、粘性土 k_x, k_y は 16^2 倍とした

(弾性モデル)

材料	透水係数		水中密度 ρ [g/cm ³]	ヤング率 E[MN/m ²]
	水平 k_x, k_y [m/s]	鉛直 k_z [m/s]		
サンドマット	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-4}	0.80	190.0
ドレーン	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-2}	0.80	119.0

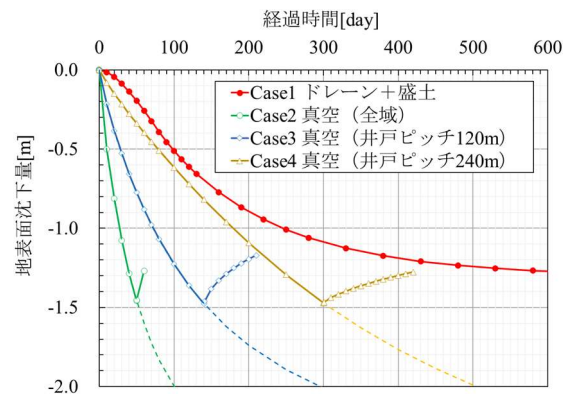


Fig. 3 FEM解析による地表面沈下
Ground Subsidence by FEM Analysis

実験概要図をFig. 4に、実験ケースをTable 3に示す。Fig. 4のように、Φ100mm、h300mmの圧密試験用鋼製モールドに粘性土を初期高さh200mm投入し、上載荷重もしくは下部の排水コックを経由した負圧によって圧密させた。ドレーン材には、幅94mm、厚さ3.6mmのプラスチックボードドレーン材を幅20mmに切断して用いた。ドレーン材は粘性土層下端から150mmの高さまで鉛直に設置し、位置を安定させるため粘性土層下部には層厚20mm分の珪砂7号を敷いた。

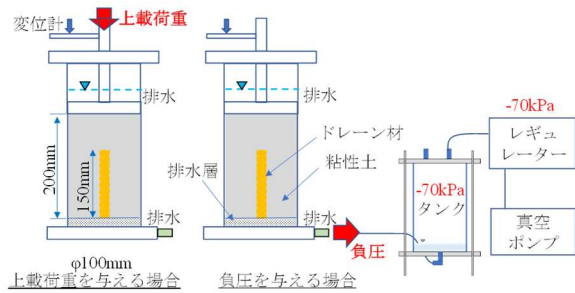


Fig. 4 小規模実験概要図
Diagram of Small-scale Experiment

Table 3 小規模実験ケース

Cases of Small-scale Experiment			
ケース	上載圧 [kPa]	圧力 [kPa]	ドレーンの有無
Case1	70	0	無
Case2	35	0	
Case3	0	-70	
Case4	70	0	有
Case5	35	0	
Case6	0	-70	
Case7	20	-70	

Table 4 粘性土1の主な物性
Material Properties of Clay
used in Small-scale Experiment

土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	初期含水比 w_0 [%]	液性限界 w_L [%]	塑性限界 w_p [%]	塑性指数 I_p
2.68	60.0	46.1	24.5	21.6

砂分 [%]	シルト分 [%]	粘土分 [%]	平均粒径 [mm]
30.5	37.5	32.0	0.013

実験で用いた粘性土は、大阪咲州のDL-34m付近から採取した海成粘土に珪砂7号を混合した混合試料である。以下では粘性土1と称する。混合比率は乾燥重量比で海成粘土:珪砂7号=7:3である。混合後の粘土1の物性をTable 4に示す。粘性土1の実験開始時初期含水比は60%であり、液性限界 w_L の約1.3倍(1.3 w_L)である。

Fig. 5には各ケースの圧密荷重の想定分布を示した。

4.2 実験結果

Fig. 6に各ケースの時間沈下曲線を示す。Case1では、最終沈下量は42mm程度であり約7日で収束した。これに比べ、同じくドレーンを用いないCase2, 3は最終沈下量35mm程度、約13日程度で収束している。この沈下量の差は、前述のFig. 5に示した通り圧密荷重がCase1と比べてCase2, 3で小さいためである。圧密時間については、圧密荷重が大きいと圧密係数が大きくなるためCase1の収束にかかる時間がCase2, 3より短くなったと考えられる。

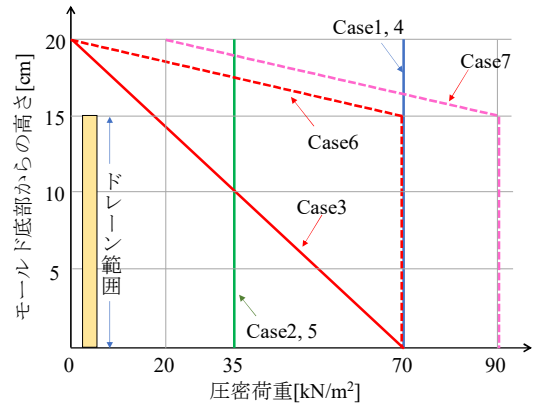


Fig. 5 圧密荷重の想定分布
Distribution of Consolidation Load (image)

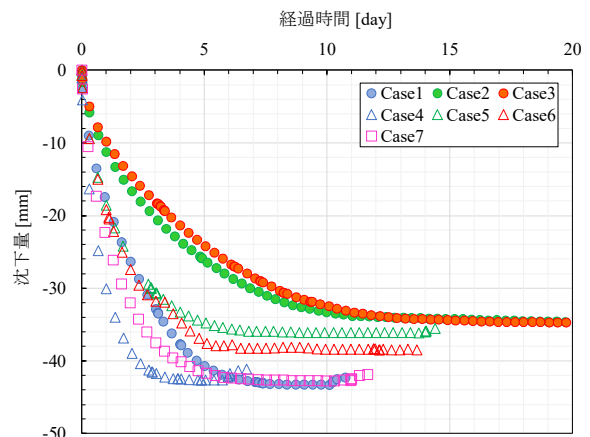


Fig. 6 小規模実験による時間沈下曲線
Consolidation Settlement by Small-scale Experiment

この圧密荷重の違いによる沈下曲線の違いは、ドレーンを使用したCase4からCase6についても同様となった。

一方、ドレーン有無による圧密時間の違いについて、Case1, 4を比較するとドレーン有のCase4は沈下量42mmに4日程度で収束している。沈下量はCase1と同等だが圧密時間が1/2に短縮された。Case1は排水距離が100mm程度であるのに対し、Case4は排水距離が50mm程度であったためである。この傾向は他のケースでも同様であった。Case3, 6について比較すると、Case3の沈下量は35mm程度、Case6は39mm程度と1割の差が生じた。負圧での圧密の場合、ドレーンを用いると試験体下部にかけた負圧70kPaがドレーン先端まで伝達され、Fig. 6の通り圧密荷重がドレーンを用いない場合より大きくなると考えられる。この差が沈下量の際に現れたと考える。今回の実験では上載荷重70kPa分の最終沈下量を負圧併用で実現しようとした場合、Case7のように負圧70kPaに上載荷重20kPaを併用することで可能とわかった。上載荷重は実施工時は盛土荷重で与えられることが多く、盛土施工・撤去には工期がかかる。上載荷重を低減させてその分負圧で補う形は工期的にもメリットがあると考えられる。

Fig. 7に実験中の排水量の経時変化を示す。負圧を与え

たCase3, 6, 7では沈下が収まっても排水が続く傾向があった。これは試験体上部から下部への浸透流の影響と考えられる。

Fig. 8に実験終了後の含水比の深度分布を示す。含水比は35-45%程度であり、沈下が大きいケースほど含水比が低下する傾向であった。Case3, 6を比較すると、Case3では上部の含水比が47%程度と比較的高く、下部ほど含水比は低い。一方、Case6では上部も40%程度の含水比となった。ドレーンによって負圧が上部まで伝達され、圧密荷重が上部でも大きくなったためと考えられる。ドレーンを用いることでより深度方向に広い範囲に圧密促進が可能と考えられる。

以上のことから、小規模実験において得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 負圧を与えることで粘性土の圧密促進が可能
- 2) 負圧による圧密時もドレーン材を用いることで圧密時間を短縮可能
- 3) 特に井戸を用いた工法では粘性土の上層部の圧密のために鉛直ドレーンが有効
- 4) 開発工法では水面からの浸透流が発生し、沈下が収束しても排水は続く

5. 大規模実験による効果検証

5.1 実験手法

大型土槽(長さL7.6m×奥行W1.6m×高さH2.4m)内に実施と同様の大きさの真空井戸・透水層・ドレーンの材料を設置して、大規模な真空圧密実験を実施した。軟弱粘性土を真空圧密させた際の沈下・水圧消散挙動を計測するとともに、圧密後地盤の性状、実験後の透水層やドレーンの性状についても確認した。

実験土槽断面図・平面図をFig. 9に、土槽外観と土槽上部から撮影した模型状況をPhoto 1に示す。模型は、改良対象の粘性土層、粘性土層下部に敷設した透水層、土槽中央に設置したΦ400mm鋼管を利用した真空井戸、Fig. 9の左半分に設置した幅94mm、厚さ3.6mmのプラスチックボードドレーンが主な構成要素である。真空井戸は内部を密閉できる蓋を有する鋼管で、外部に設置した真空ポンプで井戸内に負圧を与えることができる。また、井戸下部の砕石層相当深度に設置されたスクリーンと井戸内の揚水ポンプにより、粘性土層からの排水を揚水できる構造である。

粘性土は、市販のシルト質粘土(以下粘性土2と称する)を、初期含水比 $w=38.8\%$ (1.3 w_L)に調整して使用した。主な特性をTable 5に示す。

模型作製手順としては、まず土槽底面に真空井戸とドレーンを固定し、層厚0.2mの砕石層を敷設・転圧した。その後含水比調整した粘性土2を土槽上部から層厚2mとなるまで投入し、その後上部に水深0.1m分の水を張った。真空圧密開始時は、井戸内の揚水ポンプによる揚水を開始してから井戸内に負圧70kPaをかけた。この状態で約

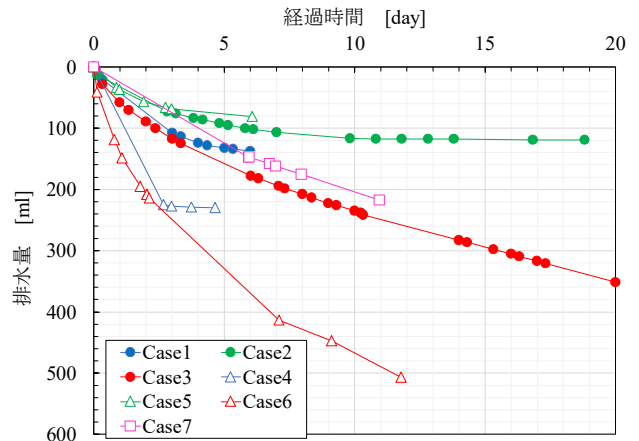


Fig. 7 実験中の排水量
Drainage during Small-scale Experiment

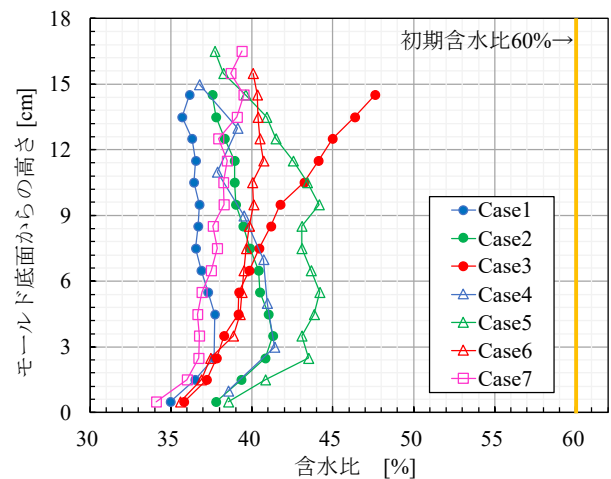


Fig. 8 小規模実験後の含水比深度分布
Water Contents after Small-scale Experiment

3か月間放置し挙動を確認した。計測は、Fig. 9に示す測点において地表面沈下計、層別沈下計、間隙水圧計により行い、井戸内の圧力と揚水量は井戸上部に設置した圧力計と流量計により管理した。

井戸内の水位制御は、井戸内水位が粘性土GL-1.7mで揚水開始した後、GL-2.0mで停止した。実験中の揚水量の実績値は25L/day程度で、時間的な変化は見られなかった。放置期間終了後真空ポンプと揚水ポンプを停止し、3日間放置したのちに地盤調査を行った。なお、真空圧密開始時点では粘性土層の自重圧密は完了しておらず、各測定結果は自重圧密と真空圧密の両方が作用した結果である。

5.2 計測結果

砕石層の間隙水圧測定結果をFig. 10に示す。測点①から④での砕石層の水圧は井戸内作用である負圧70kPa程度で安定していた。井戸内の負圧が砕石層中で時差な

く伝達され、土槽内の限られた範囲ではあるが透水層による負圧伝達効果を確認できた。なお、実験開始から15日程度までの水圧が安定していないのは、井戸上部で負圧の漏れがあり供給負圧が安定しなかったためである。

地表面沈下量測定結果をFig. 11に、層別沈下測定結果の一例をFig. 12に示す。Fig. 11には無対策時の圧密理論計算結果も付記した。Fig. 11より、無対策の場合では、真空圧密開始後79日時点で圧密度 $U=30\%$ となるのに対し、今回の測定結果から双曲線法で算出した圧密度 U はドレーン有の場合(測点①②平均)73%、ドレーン無(測点③④平均)の場合63%と大きく、真空圧密による圧密促進効果が確認された。Fig. 12の層別沈下をみると、下部層GL-100~150cmはドレーン有無によらず70日時点で65mm程度沈下し、ドレーンによる沈下促進効果は比較的小さい。一方上部層GL±0~-50cmでは、ドレーン有(測点②)の沈下は70日時点で32mm程度であり、ドレーン無(測点③)の16mmの2倍となったことから、上部層になるほどドレーンによる効果が大きいといえる。

粘性土層中の間隙水圧測定結果の一例をFig. 13に示す。70日経過時点において、ドレーン無(測点③)の場合はGL-150cmで-15kPa程度まで水圧低下がみられたのに対し、ドレーン有(測点②)の場合はGL-150cmで-40kPa、GL-100cmで-15kPaの水圧低下が確認された。ドレーン設置により上部層にも負圧が伝達され、Fig. 12のように上部層の層別沈下が進行したと考えられる。Fig. 14に示した間隙水圧の深度分布をみると、ドレーン有無いずれの場合も時間経過とともに負圧が発達し、各理想値に近づいていく様子が確認できる。ドレーンの効果は粘性土層厚が大きいほど顕著になると予想される。

5.3 地盤調査結果と考察

実験後に砕石層を掘り出し、砕石層中への粘性土2の侵入状況を観察した。層厚20cmの砕石層のうち、粘性土2の侵入が確認できたのは上部2cm程度であった。実験中の砕石層間隙水圧計測結果を考慮しても砕石層の透水性は実験中も低下せず十分であったと考えられる。

模型解体中に計測したドレーン形状をFig. 15に示す。各ドレーンの位置はFig. 9を参照されたい。実験後のドレーンは、土槽長辺方向については、深度によって最大で20cm程度水平方向へ変形しており、砕石層天端+50cm程度の深度での変形が大きかった。ドレーンNo. 1, 2は下部が井戸とは反対方向に、No. 3からNo. 6は井戸方向に変形した。土槽短辺方向については、長辺方向よりも変形は小さく、いずれも土槽中央方向への変形となった。このようにドレーン材は、粘性土の沈下に湾曲しながら追従することで大きな損傷はみられず、鉛直方向の透水性も実験中維持されたと考えられる。

実験後地盤のコーン貫入抵抗、ベーンせん断抵抗、含水比、一軸圧縮強さ、圧密降伏応力の深度方向の分布をFig. 16に示す。圧密降伏応力については、初期圧密圧力 2.5kN/m^2 で段階圧密試験を行って算出した。Fig. 16をみ

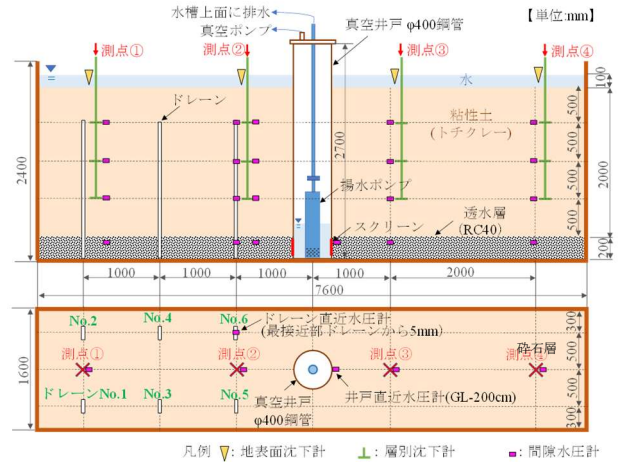


Fig. 9 大規模実験土槽断面図(上)・平面図(下)
Diagram of Large-scale Experiment
Cross Section (upper) and Ground Plan (lower)



Photo 1 土槽外観(左)と土槽上部(右)
Appearance (left) and Upper View (right) of Soil Tank

Table 5 粘性土2の物性・圧密特性
Material and Consolidation Properties of Clay
used in Large-scale Experiment

土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	初期含水比 w_0 [%]	液性限界 w_L [%]	塑性限界 w_P [%]	塑性指数 I_P
2.69	38.8	29.0	19.0	10.0

圧縮指数 C_c	圧密係数 c_v [cm ² /d]	透水係数 k [m/s]
0.149	69.9	5.37×10^{-10}

※段階圧密試験平均圧密圧力56kPaの値

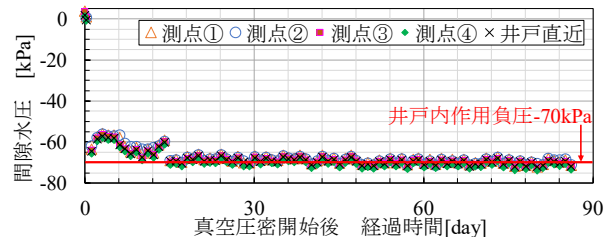


Fig. 10 砕石層の間隙水圧計測結果
Pore Water Pressure in Gravel Layer

ると、深度が深くなるほど含水比は小さく、コーン貫入抵抗、ベーンせん断抵抗、一軸圧縮強さは大きくなることからわかる。これは圧密が深い深度ほど進んでいるためと考えられる。土槽天端からの深さ100~150cm程度の中層部において、ドレーン有の測点①②のほうがドレーン無の③④よりもベーンせん断抵抗が大きく、含水比が小さい。また、ドレーン有の測点②とドレーン直近の一軸圧縮強さは、ドレーン無の測点③よりも大きかった。圧密降伏応力については、ドレーン無の測点③の圧密降伏応力は深度が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある一方、ドレーン有の測点②とドレーン直近については、土槽天端からの深さが85cm以深の結果で大きくなっている。これらの結果は、土槽天端からの深さ85cm程度まで設置されているドレーンにより粘性土層中層部の圧密が促進されたためと考えられる。また、圧密降伏応力について測点②と③の土槽天端からの深さ125cm以深のデータはほぼ同じような値を示している。下層部では、測点③についても砕石層からの負圧伝達で圧密促進効果があるためと考えられる。

ドレーンNo. 5付近について、含水比の水平方向の分布を測定した結果をFig. 17に示す。含水比は深度が深くなるほど小さくなる傾向であるが、それぞれの深度での水平方向の分布をみると、ドレーンからの距離が近いほど含水比が小さい傾向となった。土槽短辺方向の土槽天端-172cm付近の深度について、ドレーン直近の含水比を細かく測定したところ、ドレーン直近で含水比が急激に小さくなる傾向となった。ドレーンからの距離0cm程度の試料は含水比25%程度、距離10~20cmの試料については含水比28%程度と3%程度の差が生じた。

大規模実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) 当該工法で圧密促進効果が得られる。
- 2) 透水層とドレーンの設置により負圧が粘性土層に効率的に伝達され沈下が促進される。
- 3) ドレーンを用いると、より上層の粘性土層で特に圧密が促進される。この傾向は、層別沈下計から得られた深度別の沈下量の増加だけでなく含水比低下やベーンせん断抵抗の増加、圧密降伏応力の

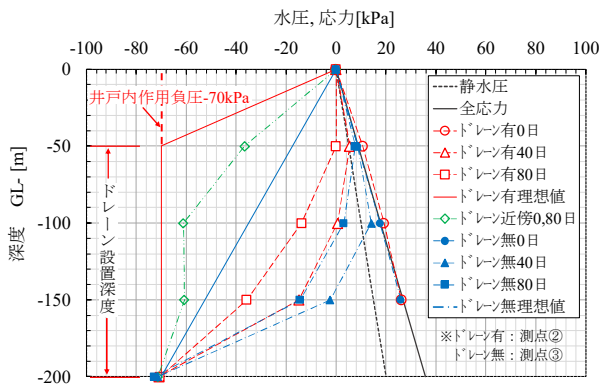


Fig. 14 間隙水圧の深度分布
Distribution of Pore Water Pressure

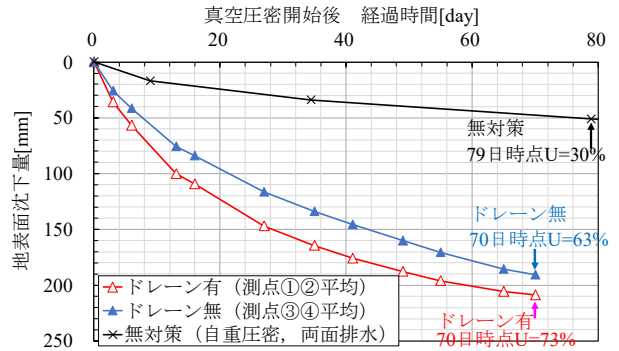


Fig. 11 地表面沈下計測結果
Settlement observed at Ground Surface

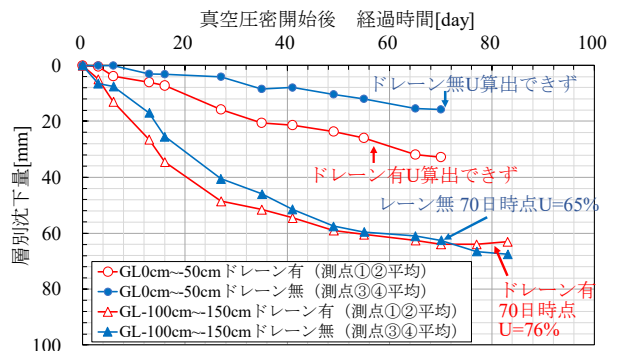


Fig. 12 層別沈下計測結果
Settlement of Each Layer

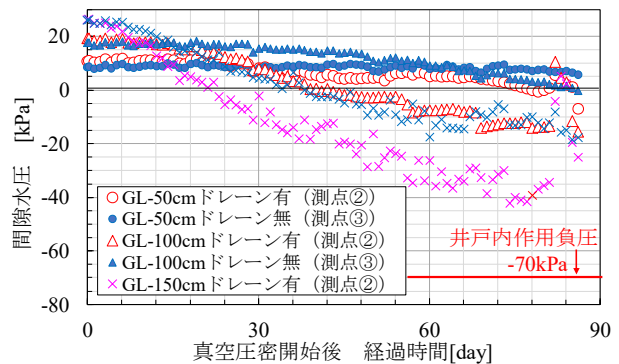


Fig. 13 粘性土層中の間隙水圧計測結果

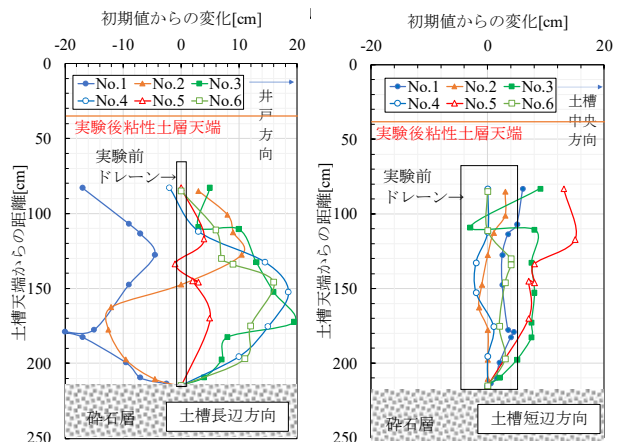


Fig. 15 実験後ドレーン形状
Deformation of Drain by Experiment

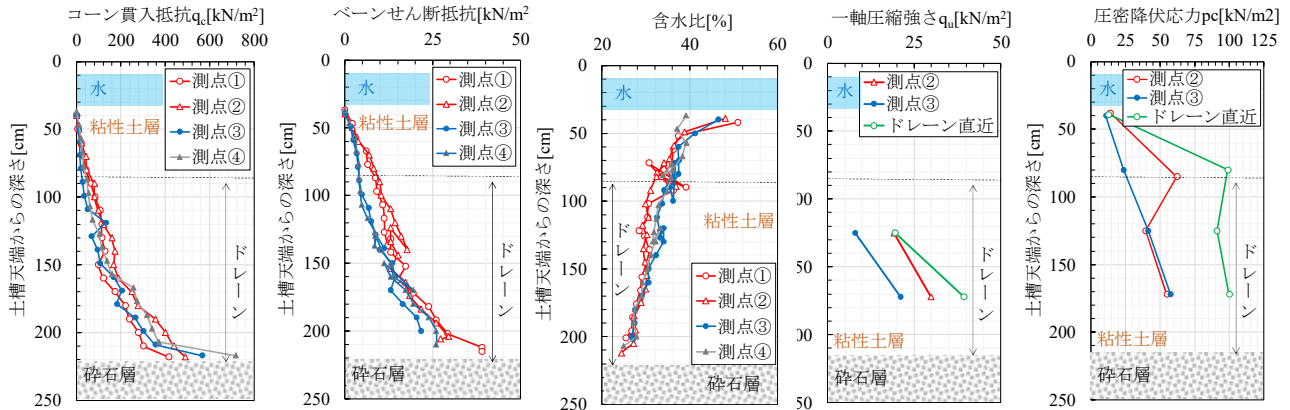


Fig. 16 コーン指数・ベーンせん断抵抗・含水比・一軸圧縮強さ・圧密降伏応力の深度分布

Distribution of Cone Index, Vane Index, Water Contents, Unconfined Compression Strength and Consolidation Yield Stress

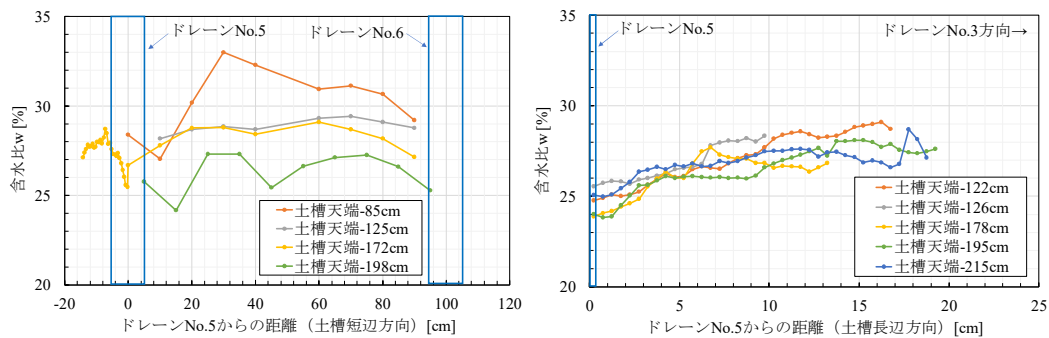


Fig. 17 ドレーン付近の水平方向の含水比分布
Horizontal Distribution of Water Contents near Drain

増加等からも確認された。

- 4) 大規模実験で使用した透水層・ドレーンの材料について、実験中の機能低下はみられなかった。

6. まとめ

真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法について、FEM解析、小規模実験、大規模実験により効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) FEM解析によれば、当該工法により圧密期間の短縮効果が見込まれる。定量的な効果としては、本文中で提示した試算条件では従来のプレロード盛土+バーチカルドレーン工法と比較して圧密期間を1/4に短縮する効果が期待できた。
- 2) 小規模実験によれば、ドレーン打設した場合、ドレーンを通じて負圧の伝達によって圧密促進効果の範囲の広がりが見込まれる。
- 3) 大規模実験によれば、真空井戸、透水層とドレーンの設置により負圧载荷の平面的な広がりが十分に見込まれる。

粘性土層厚が厚いほどドレーンによる効果が大きくなると予想されることから、今後は、より粘性土層が厚い地盤を模擬した遠心模型実験等でも効果検証を行う。ま

た、解析により井戸ピッチやドレーンピッチ等各種パラメータが圧密促進効果に与える影響を検討し、簡易な設計手法の立案を目指す。

参考文献

- 1) 社団法人土質工学会関西支部：海底地盤-大阪湾を例として-, 1995
- 2) 東京国際土質基礎工学会議：大阪南港の水位低下による地盤改良工事，ケースヒストリー集 8.臨海地域の埋立工事，1981
- 3) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y. and Sugie, S.: 3D-analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proceedings 7th International Conference of Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 2, pp. 1191-1196, 1991
- 4) Biot A. M.: General theory of three dimensional consolidation, J. Applied Physics, Vol. 2, pp. 155-164, 1941
- 5) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty session 9, pp. 229-239, 1977