

# 真空井戸を用いた真空圧密地盤改良

(株) 大林組 技術研究所

高橋真一 梅原由貴 山田祐樹 杉江茂彦

## 1. はじめに

空港建設用地利用の可能性が考えられる臨海部の埋立工事では、付近の海底から浚渫された土砂を用いる場合がある。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が多く、埋立造成後には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バーチカルドレーン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解析と室内小規模実験、屋外大規模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+バ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Φ100mm、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

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図-1に示す。この工法は、改良対象の軟弱粘性土層下面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鉛直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る。加えて、井戸の透水層相当深度に設置したストレーナ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。

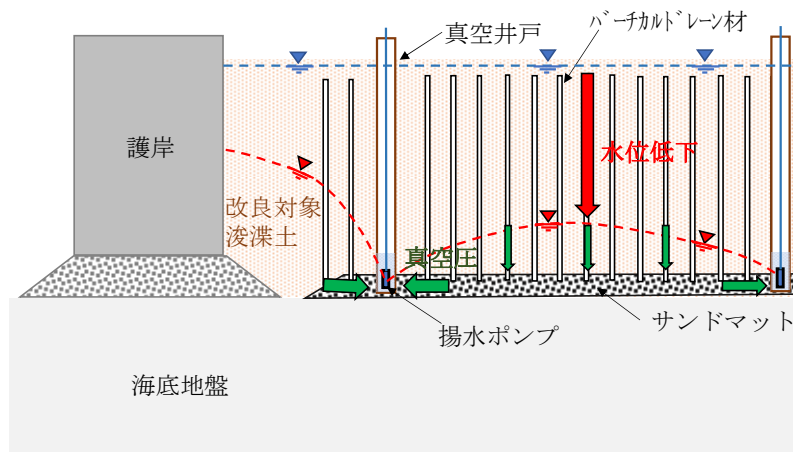


図-1 真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密工法

施工は、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に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パ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である。
- 5) 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作用させながら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<sup>1), 2)</sup>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。

### 3. 土水連成FEM解析による効果検証

#### 3.1 解析手法

自社開発の解析ソフトGRASP3D (Grasp Real 3D Action of Subsoils and Pore water)<sup>3)</sup>を用いた3次元土水連成FEM解析を行い、当該工法の有効性を検証した。土水連成FEM解析は、Biotの3次元圧密理論<sup>4)</sup>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。GRASP3Dでは、粘性土の非線形な変形・強度特性を表現するため、関口・太田の弾塑性モデル・弾粘塑性モデル<sup>5)</sup>を導入しているが、今回は弾塑性モデルで解析した。

解析モデルを図-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。

解析ケースは表-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+パ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/m<sup>2</sup>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て検討した。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。地盤変形の境界条件として、モデル側面・底面の面外方向の変位を拘束した。

主な材料定数を表-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。

表-1 解析ケース

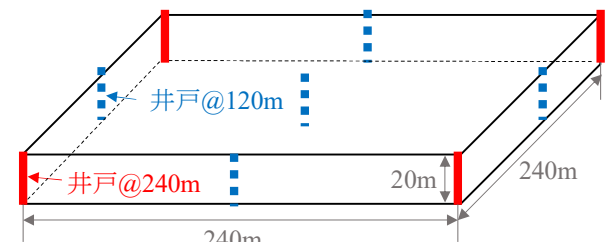
ケース	Case1	Case2	Case3	Case4
工法	プレロード盛土+パーチカルドレーン	真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた真空圧密		
地層構成	(上)サンドマット層 1m (下)軟弱粘性土層 19m	(上)軟弱粘性土層 19m (下)サンドマット層 1m		
ドレーン	1m 正方形配置 (解析中では□16m)			
井戸配置	無	全域	□120m	□240m
圧密荷重	上載荷重 70kN/m <sup>2</sup> (漸増 80 日間)	サンドマット層井戸部に全水頭 H=-27m		

備考：表中の「□」は、正方形配置を示す

表-2 材料定数

材料	透水係数		水中密度 $\rho'$ [g/cm <sup>3</sup> ]	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	$2.56 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-9}$	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<sup>2</sup>倍とした



井戸(Case3)：四角形配置□120m=9本(図中赤+青)  
井戸(Case4)：四角形配置□240m=4本(図中赤)  
ドレーン：四角形配置□1m⇒モデル上では□16m

図-2 解析モデル

### 3.2 解析結果

解析により得られた時間沈下曲線を図-3に示す。沈下量は地表面全地点の平均値である。これを見ると、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期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0.2~0.3m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。別途整理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の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。

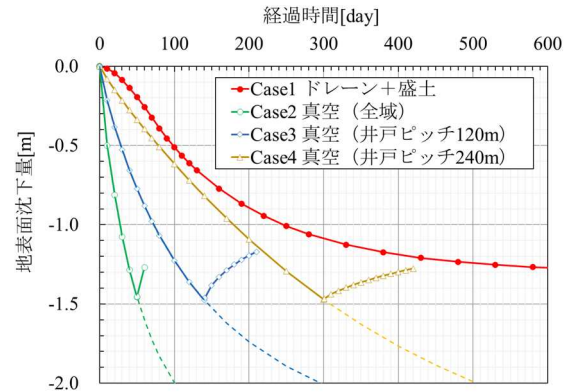


図-3 FEM解析による地表面沈下

## 4. 室内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。

実験概要図を図-4に、実験ケースを表-3に示す。図-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。

実験で用いた粘性土は、大阪咲州から採取した沖積粘土に珪砂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の塑性指数 $I_p$ は21.6%である。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。

図-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

図-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、前述の図-4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

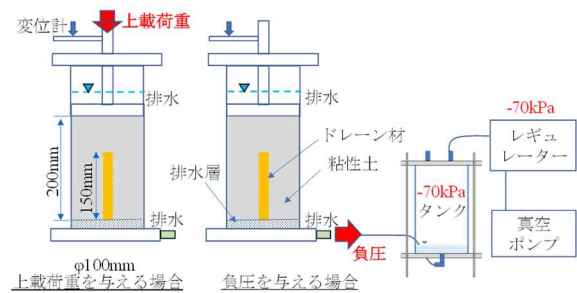


図-4 小規模実験概要図

表-3 小規模実験ケース

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	有
Case4	70	0	
Case5	35	0	
Case6	0	-70	
Case7	20	-70	

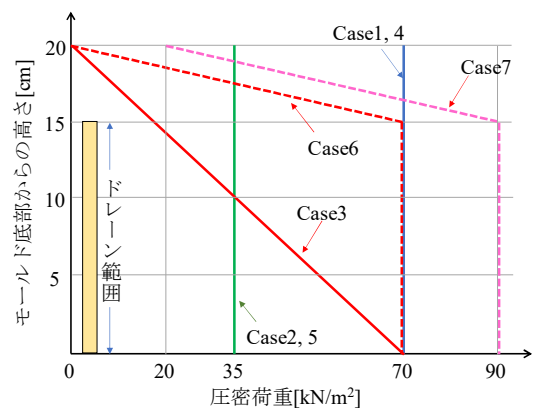


図-5 圧密荷重の想定分布

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。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かった負圧70kPaがドレーン先端まで伝達され、図-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。実施工では上載荷重を盛土荷重で与えられることが多く、盛土施工・撤去の工期を要する。上載盛土荷重を低減させてその分負圧で補う方式は工期的にもメリットがあると考えられる。

図-7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) 負圧による圧密時に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継続

## 5. 屋外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)内に実施工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・平面図を図-8に、土槽外観と土槽上部から撮影した模型状況を写真-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、図-8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 $w=38.8\%$ ( $1.3w_L$ )に調整して使用した。主な特性を表-4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

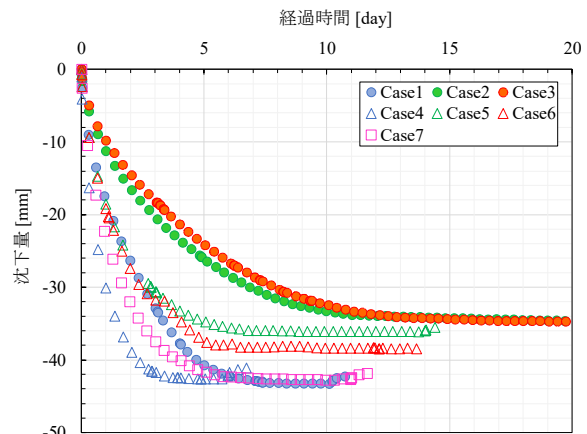


図-6 小規模実験による時間沈下曲線

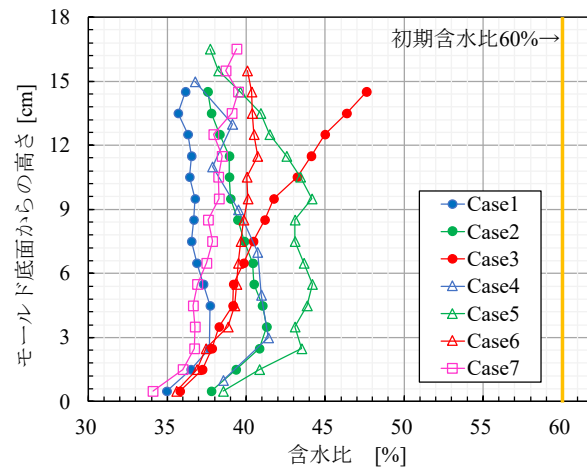


図-7 小規模実験後の含水比深度分布



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3か月間放置し挙動を確認した。計測は、図-8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

地表面沈下量測定結果を図-9に、層別沈下測定結果の一例とともに示す。図中には無対策時の圧密理論計算結果も付記した。図より、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。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。

### 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。

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図-10に示す。圧密降伏応力については、初期圧密圧力 $2.5\text{kN/m}^2$ で段階圧密試験を行って算出した。図をみると、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。土槽左端からの深さ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、土槽左端からの深さが85cm以深の結果で大きくなっている。こ

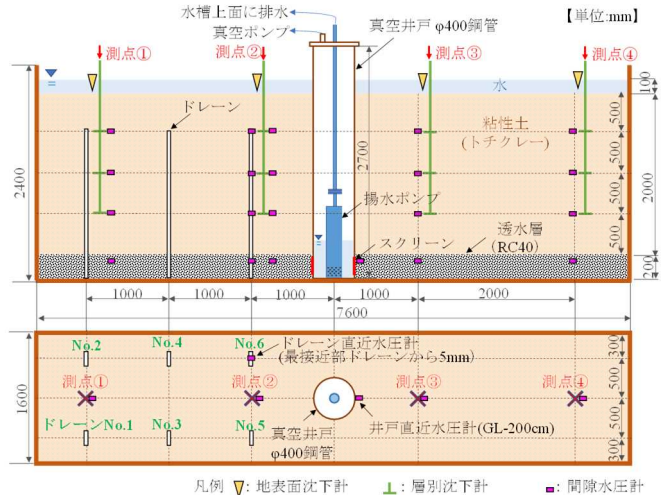


図-8 大規模実験土槽断面図(上)・平面図(下)



写真-1 土槽外観(左)と土槽上部(右)

表-4 粘性土2の物性・圧密特性

土粒子密度 $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	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

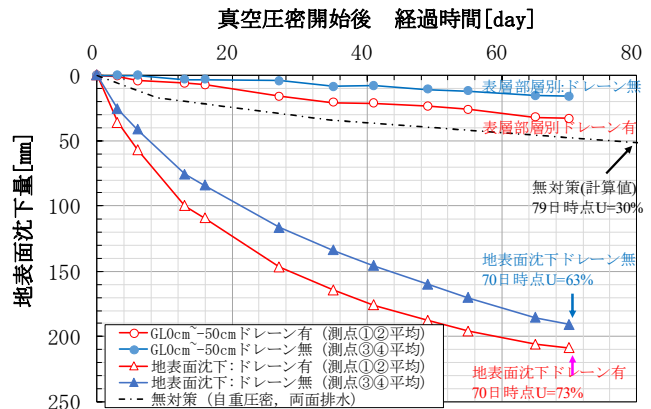


図-9 地表面沈下計測結果

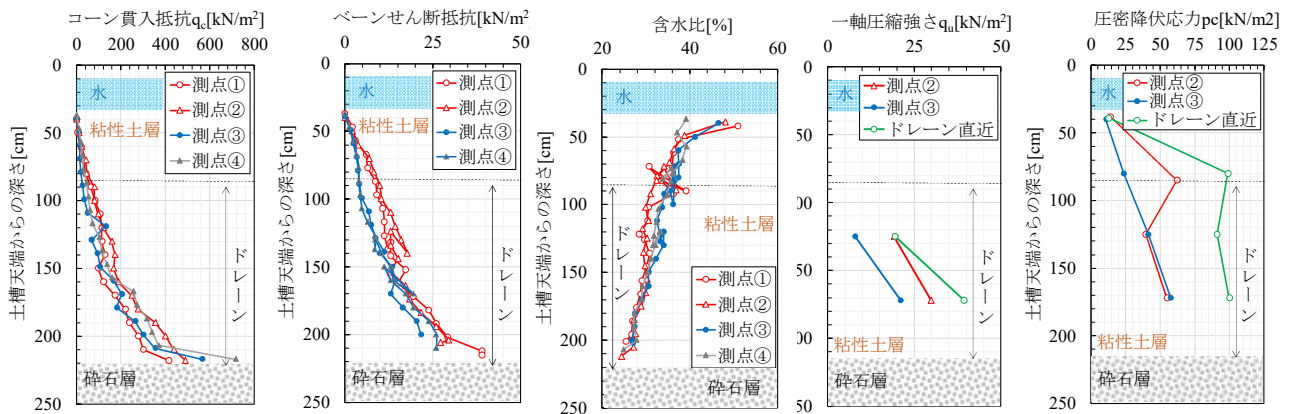


図-10 コーン指数・ベーンせん断抵抗・含水比・一軸圧縮強さ・圧密降伏応力の深度分布

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伝達で圧密促進効果があるためと考えられる。

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可能
- 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促進に有効
- 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、圧密降伏応力の増加等からも確認
- 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、実験中は排水機能を継続

## 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拡がりが見込まれる。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予定である。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、簡易な設計手法の確立を目指す。

## 謝辞

本編をまとめるに際しましては、港湾空港技術研究所森川嘉之地盤研究領域長様、杉山友理研究官様に、有益な助言をいただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

## 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