

井戸式真空圧密「BOLVAC®工法」の設計・施工方法の検証

梅原由貴 高橋真一
山田祐樹 杉江茂彦Verification of Design and Construction Approaches
for a Vacuum Consolidation Method using a Vacuum WellYuki Umehara Shinichi Takahashi
Yuki Yamada Shigehiko Sugie

Abstract

In reclamation work using soft clay, the lengthy time associated with consolidation settlement and the concomitant insufficient strength must be addressed. To solve these problems, a vacuum consolidation method called BOLVAC® that utilizes vacuum wells, a permeable layer, and drains, was developed. This paper describes a reproducibility analysis of experiments using a 3D water-soil coupled FEM analysis. Notably, the FEM analysis was effective in expressing the propagation of negative pressure and subsidence. Additionally, a drain penetration experiment was conducted focusing on the joint between the permeable layer and the drain. The results showed that a 0.1 m penetration length ensured sufficient negative pressure propagation and that hydraulic pressure measurement during penetration was an effective management method.

概要

軟弱粘性土を用いた埋立工事では、造成後地盤の残留沈下や強度不足が課題となる。筆者らはこれまで、これらに対する圧密促進工法の一つとして、真空井戸・透水層・ドレーン材を組み合わせた井戸式真空圧密「BOLVAC®工法」の有効性について実験等により確認してきた。本論文では、本工法のFEM解析による設計方法の検証を目的として、これまで実施した大型模型実験と遠心模型実験の3次元水土連成FEM解析による再現解析を実施した。その結果、解析によって地盤中の負圧の伝播状況や沈下挙動を再現でき、FEM解析による設計が有効であることを確認した。また、施工方法の検証を目的とし、透水層とドレーン材の接合部に着目したドレーン材貫入実験を実施した。透水層へのドレーン材の貫入長が0.1mあれば、透水層・ドレーン材間の負圧伝播が十分できること、貫入長の管理方法としてケーシング押し込み時の油圧計測が有効であることを確認した。

1. はじめに

全国の大規模港湾では港湾機能確保のために定期的な航路浚渫が行われている。浚渫された土砂は処分場に埋立てられ、埋立完了後の造成地盤は港湾施設や空港などとして活用されるなど、造成地盤上に構造物等を構築して利用されることも多い。

現在、浚渫土砂の処分場の容量が不足しており、土砂の減容化による処分場の延命化が重要な課題である。さらに、浚渫土砂は高含水比の粘土分を多く含むことから、埋立造成地盤の残留沈下や強度不足も課題である。これらの課題の対策には、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があり、施工条件に応じて適切な工法を選択することとなる。

筆者らは、これらの課題に対する圧密促進工法の一つとして、真空井戸・透水層・ドレーン材を組み合わせた井戸式真空圧密「BOLVAC®工法」(Bottom-Loaded

Vacuum Consolidation)を開発した¹⁾。これまでに、28m³土槽を用いた大型模型実験¹⁾や、直径Φ0.1m×高さH0.5mの亚克力製円筒を用いた遠心模型実験²⁾を実施し、本工法の圧密促進効果を検証してきた。これらの実験により工法の有効性は確認できたが、その設計・施工方法については十分な検証ができていなかった。

そこで本論文では、本工法のFEM解析による設計方法の検証を目的として、これまで実施した大型模型実験や遠心模型実験の再現解析を実施した。また、施工方法の検証を目的として、工法の成立に最も重要である透水層とドレーン材の接合部に着目し、打設実機を用いたドレーン材貫入実験を実施した。これらの検証方法と結果を報告する。

2. 本工法の設計・施工方法と今回の検証項目

BOLVAC工法の概要図をFig. 1およびFig. 2に示す。本工法は、改良対象の軟弱粘性土層の下に設置する透水層、透水層から地表へ伸びる真空井戸、透水層から粘性土層

中まで伸びる鉛直ドレーン材（以下、ドレーン材）が構成要素である。真空井戸は密閉できる構造で、外部に設置した真空駆動設備によって井戸内に負圧を作用させることができる。また、透水層に該当する深度にストレーナを設けており、井戸内に設置した揚水ポンプによりストレーナを通じて流入した水を排水する。真空状態の井戸内で揚水ポンプを駆動させると負圧作用下で排水でき、負圧分+水位低下分の大きな圧密荷重で粘性土層を効率的に圧密促進する。さらにその効果を透水層とドレーン材でそれぞれ水平、鉛直方向に広げることができる。

工法の設計時には、真空井戸やドレーン材の本数や配置を検討する必要がある。本論文ではFEM解析による設計の有効性を確認するため、これまで実施した大型模型実験と遠心模型実験の再現解析を実施した。層厚の大小に関わらず解析が有効であることを確認するために、粘性土層厚2m程度の大型模型実験および、層厚15m程度に相当する遠心模型実験の2つの実験の再現解析を実施した。

一方、施工手順は、「①埋立工事を行う領域に護岸を構築、②海底面上に透水層と真空井戸を設置、③改良対象の粘性土による埋立て、④地表からドレーン材を透水層中まで貫入」である。施工完了後から負圧作用下の揚水を行い、目標の沈下量に達したら真空圧密を完了する。このうち、粘性土層の圧密を効率的に行うために最も重要な手順は④の透水層へのドレーン材の貫入である。貫入が不十分な場合、排水経路がなくなり排水と圧密の効率が大幅に落ちてしまう。そこで本論文では、この透水層とドレーン材の接合部の施工に着目して打設実機を用いたドレーン材貫入実験を実施し、貫入長の管理方法や必要な貫入長等を確認した。

3. FEMによる大型模型実験の再現解析

3.1 解析対象の大型模型実験概要

改良対象の粘性土の層厚が2m程度と小さい場合の大型模型実験¹⁾を対象にして、再現解析を実施した。

当該実験模型の断面図・平面図をFig. 3に示す。また、実験に使用した粘性土(大竹工業株式会社製トククレー)の物理特性と圧密特性をTable 1に示す。模型は、改良対象の粘性土層(層厚2.0m)、粘性土層下部に敷設した透水層(層厚0.2m)、土槽中央に設置した真空井戸(Φ0.4m鋼管)、Fig. 3の左半分に設置したドレーン材(プラスチックボードドレーン、幅0.094m、厚さ0.0036m)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、井戸下部の透水層相当深度に設置されたスクリーンと井戸内揚水ポンプにより、粘性土層からの排水を揚水できる構造である。井戸内の揚水ポンプによる揚水を開始した後、井戸内に負圧-70kN/m²を載荷し、真空圧密を開始した。揚水は井戸内の水位が揚水ポンプの下部に達しないよう、水位がGL-1.7mから

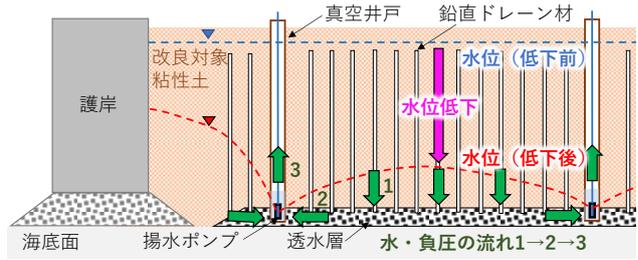


Fig. 1 BOLVAC工法概要
Overview of BOLVAC Method

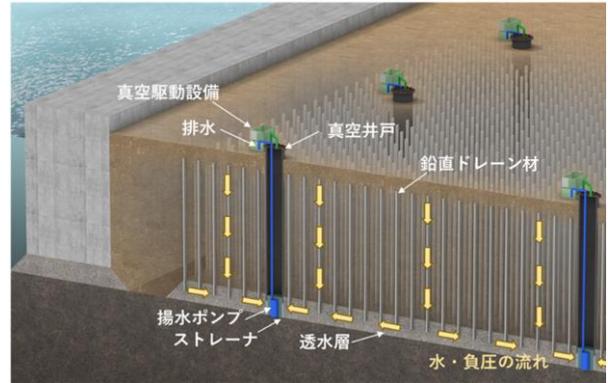


Fig. 2 BOLVAC工法イメージ
Image of BOLVAC Method

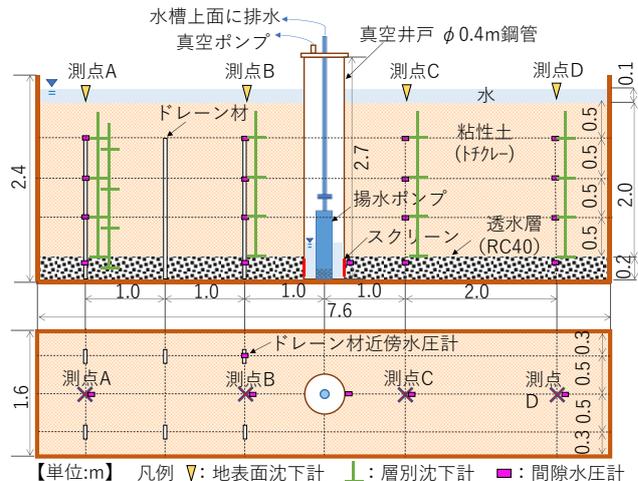


Fig. 3 大型模型実験の模型 (上:断面図, 下:平面図)
Model of Large-Scale Model Test

Table 1 粘性土 (トククレー) の物理特性と圧密特性

Material and Consolidation Properties of Clay

土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	液性限界 w_L [%]	塑性限界 w_P [%]	塑性指数 I_p
2.690	29.0	19.0	10.0
初期含水比 w_0 [%]	圧縮指数 C_c	圧密係数 c_v [cm ² /d]	透水係数 k [m/s]
38.5	0.189	151	7.27×10^{-10}

※透水係数は段階載荷による圧密試験の平均圧密圧力111kN/m²の値

GL-2.0mの範囲となるようにフロートで制御した。Fig. 3に、地表面沈下計，層別沈下計，間隙水圧計の測点を示す。井戸内の圧力は井戸上部に設置した圧力計により管理した。真空圧載荷時間は，約80日間とした。

3.2 大型模型実験の解析手法

大型模型実験を対象としてGEOASIA³⁾を用いた3次元水土連成FEMによる再現解析を実施した。GEOASIAは、弾塑性構成式であるSYS Cam-Clayモデル⁴⁾を搭載した3次元FEM解析ソフトである。SYS Cam-Clayモデルは、圧密開始前のコロイド状態の高間隙比と静水圧以上の間隙水圧を有する未圧密状態の土砂も表現できる上負荷面概念に基づく弾塑性構成式であり、BOLVAC工法が対象とする非常に軟弱な粘性土の挙動を表現するのに適している。また、土の大圧縮に伴う透水性変化モデル（透水系数の間隙比依存性⁵⁾）を導入している。

Fig. 4に解析に用いた有限要素メッシュを示す。応力と変形の対称性を考慮して、模型の1/2の範囲を解析モデルとした。解析の主対象の粘性土層の他，下部透水層，ドレーン材をモデル化した。

Table 2に解析で用いた主な材料定数を示す。粘性土（トチクレ）の材料定数は，基本的には要素試験（圧密試験，三軸圧縮試験）をもとに決定した⁶⁾。透水係数と透水系数変化指数については，数値を変化させて解析を実施し，実験結果と整合した組み合わせを記した。なお，透水係数については，段階載荷による圧密試験で得られた値（Table 1）の10倍程度の値になった。段階載荷による圧密試験による透水係数の利用にあたっては，その10倍程度の値を使用することで実測結果と整合すると既往研究⁷⁾もあることから，解析に使用した透水係数の設定は妥当な範囲と考える。粘性土の未圧密状態は，初期の構造の程度1/R*を大きくすることで表現した。ドレーン材のヤング係数は粘性土相当以下の値に設定し，粘性土の沈下に追従する挙動を表現した。

3.3 大型模型実験の再現解析結果

Fig. 5に，ドレーン材有りの領域（Fig. 3およびFig. 4の左側）とドレーン材無しの領域（同右側）における地表面沈下量の経時変化を示す。いずれも2点の測点の平均値である。実験結果を見ると，真空圧密開始後70日時点でドレーン材有りの沈下量が0.22m程度，ドレーン材無しの沈下量が0.19m程度と差は少ないが，ドレーン材有りの方が圧密が進んでいる。解析結果では，ドレーン材無しの場合は実験結果と同様に70日時点で0.19m程度の沈下量であった。高含水比状態の沈下挙動を精度よく再現できた。一方で，ドレーン材有りの場合の解析結果は0.27m程度と，0.05mほど実験よりも沈下量が大きい。実験時には，設備の都合で井戸内水位をGL-1.7~2.0mの範囲で制御しており，0.3m分の水位変動がある。ドレーン材有りの領域ではこの水位変動がドレーン材を伝わって粘性土の圧密に影響し，実験と解析で結果に差が出た可

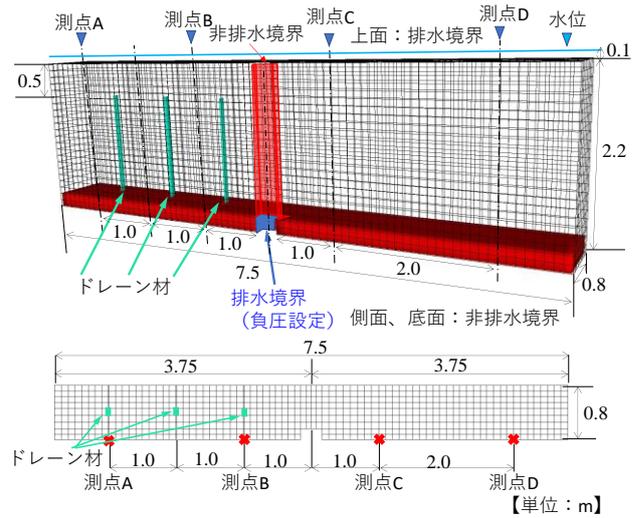


Fig. 4 大型模型実験の解析モデル
Finite Element Mesh of Large-Scale Model Test

Table 2 大型模型実験の解析の材料定数
Material Parameters of Large-Scale Model Test

粘性土（トチクレ）				
圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	限界状態 定数M	NCLの 切片N	ポアソン比 ν
0.07	0.01	1.20	1.62	0.3
透水係数 $k[m/s]$	透水系数 変化指数	初期 比体積 v_0	初期の 構造の 程度1/R*	初期 応力比 K_0
8.00×10^{-9}	0.16	2.033	250	1.0

透水層（RC40）			ドレーン材		
ヤング 係数E [kN/m ²]	ポアソン 比 ν	透水係数 $k[m/s]$	ヤング 係数E [kN/m ²]	ポアソン 比 ν	透水係数 $k[m/s]$
2.1×10^7	0.3	1.00×10^{-5}	1.0×10^3	0.3	1.00×10^{-2}

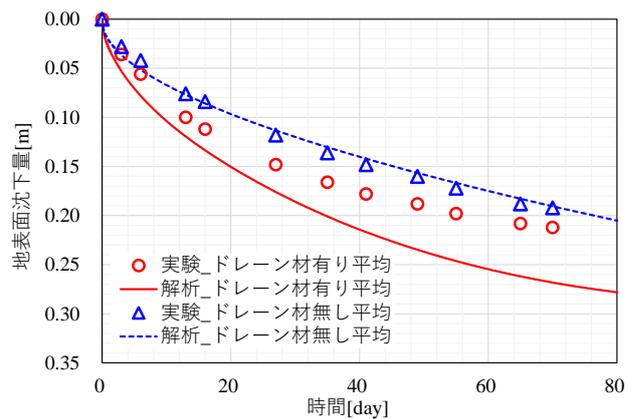


Fig. 5 地表面沈下量の経時変化（大型模型実験）
Temporal Changes of Surface Subsidence
of Large-Scale Model Test

能性が考えられる。

Fig. 6に，ドレーン材有りの測点Bとドレーン材無しの測点Cの層別沈下量の経時変化を示す。粘性土上層部（ド

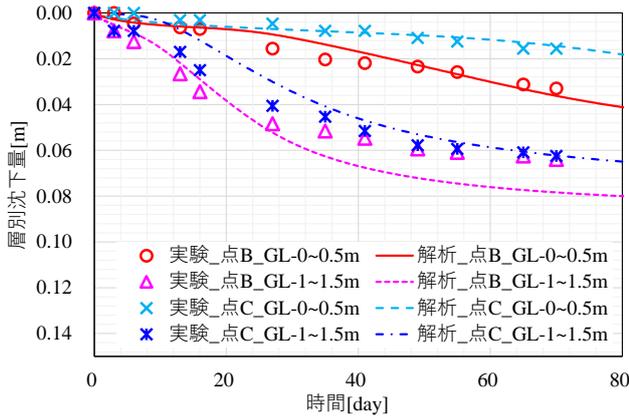


Fig. 6 層別沈下量の経時変化 (大型模型実験)
Temporal Changes of Stratification Subsidence
(Large-Scale Model Test)

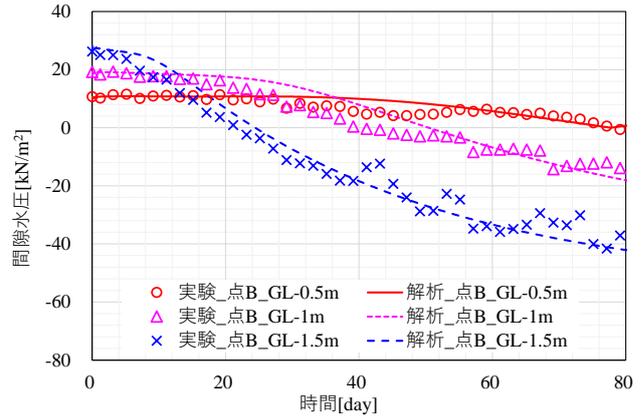


Fig. 7 間隙水圧の経時変化 (ドレーン材有り, 測点B)
Temporal Changes of Pore Water Pressure
(With Drain, Point B)

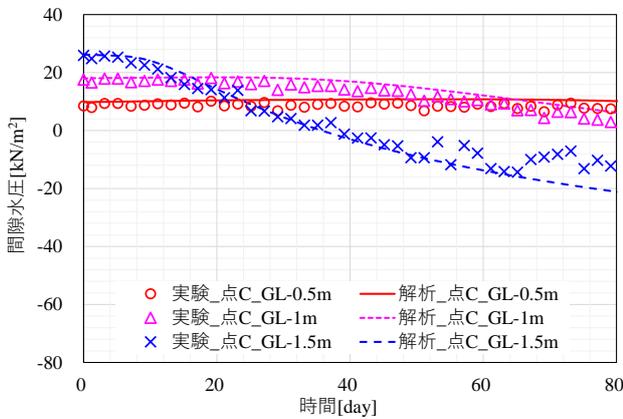


Fig. 8 間隙水圧の経時変化 (ドレーン材無し, 測点C)
Temporal Changes of Pore Water Pressure
(Without Drain, Point C)

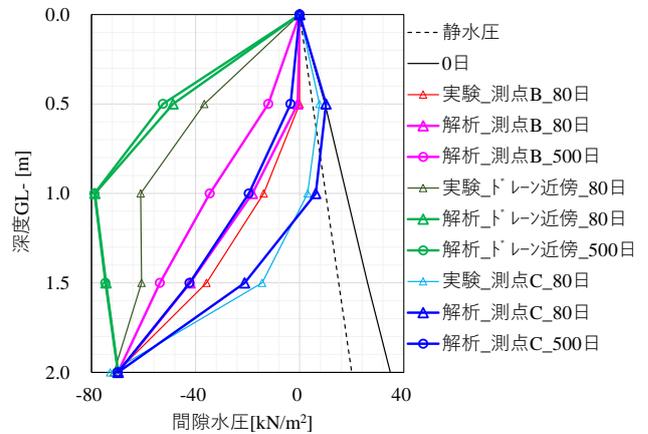


Fig. 9 間隙水圧の深度分布 (大型模型実験)
Vertical Distribution of Pore Water Pressure
(Large-Scale Model Test)

レーン材が貫通していない領域, GL±0.0~0.5m) と下層部(透水層直上の領域, GL-1.0m~1.5m)の比較や, ドレーン材の有無で比較をすると, 実験では, 上層よりも下層の沈下量が大きく, またドレーン材有りの方が無しの場合よりも沈下量が大きかった。下部透水層やドレーン材による圧密促進効果の影響と考えられる。解析では, 概ね実験結果と同様の沈下挙動となり, 透水層とドレーン材の効果を表現できた。

Fig. 7にドレーン材有りの測点Bの間隙水圧の経時変化を, Fig. 8にドレーン材無しの測点Cの間隙水圧の経時変化を示す。測点B (Fig. 7) では, 70日時点の水圧が, GL-1.5mで-40kN/m², GL-1.0mで-15kN/m², GL-0.5m地点で0kN/m²程度となった。一方, 測点C (Fig. 8) では70日時点の水圧がGL-1.5mで-10kN/m², GL-1.0mで+5kN/m², GL-0.5m地点で+10kN/m²程度となった。負圧による間隙水圧の低下は, 下層ほど, またドレーン材が設置された地点ほど大きいことがわかる。下部透水層とドレーン材の効果により粘性土内に負圧が伝播されて水圧が低下し, それにより先に述べた沈下傾向にも差が出たと考えられ

る。解析でも, これらの間隙水圧と負圧伝播の挙動を表現できており, 実験結果と同様の結果が定量的にも再現できていた。なお, GL-1.5mの水圧計測結果にばらつきがあるのは, 井戸内の水位を前述の通りGL-1.7~2.0mの範囲でフロートにより制御した影響と考えられる。

Fig. 9に, 間隙水圧の深度分布を示す。グラフ下端の, GL-2.0m地点が粘性土層の下端である。真空圧密開始時は未圧密状態であったため, 0日時点の初期間隙水圧は静水圧よりも大きい値から始まっている。時間経過とともに負圧が発達していく実験結果となっている。解析でも, 軟弱な粘性土の未圧密状態を模擬することで, 実験の水圧の挙動と似た結果が得られた。

Fig. 10およびFig. 11に, 解析で得られた初期状態からの間隙水圧と間隙比の変化量の分布を示す。Fig. 10では, これまで述べてきたように負圧が下部透水層とドレーン材近傍から順に伝わる様子を見ることができる。またそれによって, Fig. 11では, 透水層やドレーン材近傍の粘性土層から順に体積変化していく様子が再現できた。

以上の結果より, 層厚2m程度の大型模型実験についての3次元FEM解析を実施することで, BOLVAC工法の真

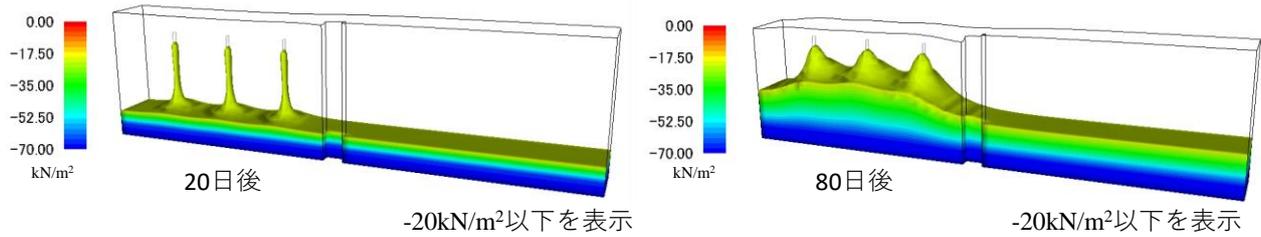


Fig. 10 間隙水圧変化量の分布 (大型模型実験)

Distribution of Changes in Pore Water Pressure (Large-Scale Model Test)

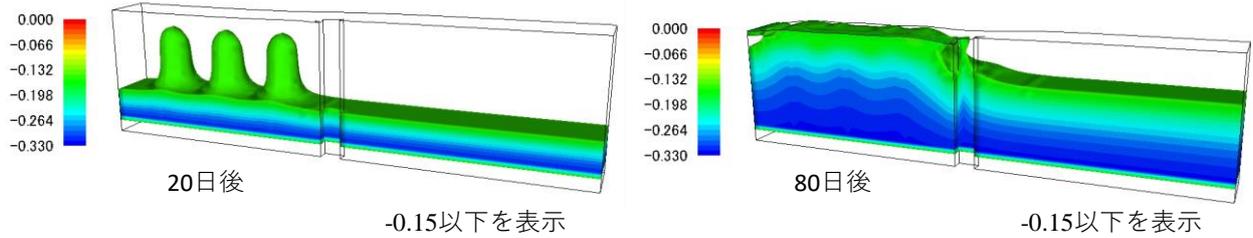


Fig. 11 間隙比変化量の分布 (大型模型実験)

Distribution of Changes in Void Ratio (Large-Scale Model Test)

空圧密挙動を概ね再現できることが分かった。下部透水層とドレーン材の効果で負圧が効率的に伝播され、沈下が促進される様子について再現できた。人工の埋立地盤では特に地盤の不均一性があると考えられることから、実施工時には事前地盤情報を用いた解析による予測とともに、施工中の実測データのフィードバックによる解析条件の再検討が重要と考える。

4. FEMによる遠心模型実験の再現解析

4.1 解析対象の遠心模型実験概要

改良対象の粘性土層厚が15m程度と大きい場合として、内寸直径 $\Phi 0.1\text{m}$ ×高さH0.5mのアクリル製円筒を用いた1次元遠心模型実験²⁾を対象にして、再現解析を実施した。

当該実験の実験ケース一覧をTable 3に、模型断面図をFig. 12に示す。ケース1は無対策（地盤改良無し、自重圧密のみ）を想定したもの、ケース2は透水層に負圧を作用させて排水を実施するがドレーン材を用いないもの、ケース3は透水層に負圧を作用させて排水し、さらにドレーン材を用いるもの（BOLVAC工法を想定）である。

模型は、改良対象の粘性土層（トチクレー、初期含水比38.5%、Table 1）、粘性土層下部に敷設した透水層（珪砂7号）、円筒中央に設置したドレーン材（ケース3のみ設置、プラスチックボードドレーン、幅0.02m、厚さ0.0036mm）が主な構成要素である。模型の底部から0.05mの高さに排水コックが設置されており、自重圧密のケースではコックからの排水を模型上部の水面下に排水する構造とした。負圧を載荷するケースではコックからの配管を排水用タンクに接続し、そのタンク内に真空ポンプを用いて負圧を作用させる構造とした。模型からの排水

Table 3 遠心模型実験ケース

Cases of Centrifugal Model Tests

ケース	概要	負圧	ドレーン材
1	無対策（自重圧密）	無	無
2	負圧載荷のみ	有	無
3	BOLVAC 工法	有	有

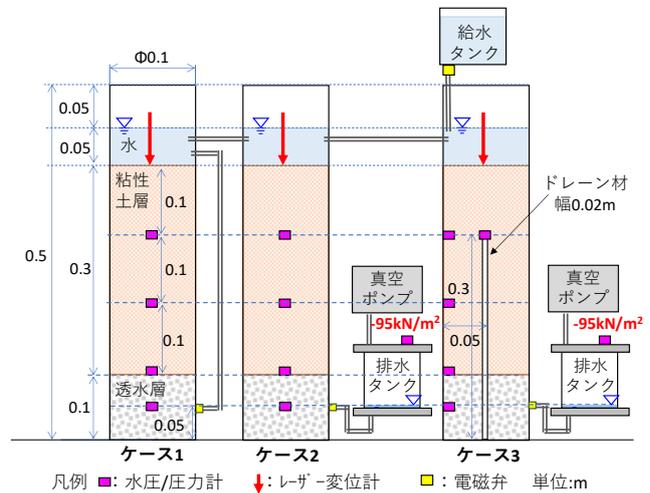


Fig. 12 遠心模型実験の模型 (実模型寸法)

Models of Centrifugal Model Test

によりタンク内水位が大きく変わらないようタンクは直径の大きいものを使用した。これらの模型を遠心模型実験装置に搭載して遠心場で圧密させ、その挙動を確認した。遠心加速度は50Gとし、粘性土層厚0.3mの模型により層厚15mの粘性土地盤を再現した。

実験時は、遠心模型実験装置の回転を開始し遠心加速

度50Gに達した後すみやかに模型下部排水コックを開放し、自重圧密・真空圧密を開始し放置した。真空圧密時の排水タンク内の圧力は、約-95kN/m²である。放置中に模型上部の水位が低下する場合は、給水タンクからのコックを開閉し一定の水位となるよう調整した。約5~6時間の放置の後、排水コックを閉じた上で遠心装置を停止させ実験を終了した。なお、遠心加速度が50Gに達する前の加速度上昇過程において、下部排水コックは閉じており下部は非排水状態であるが、粘性土上部は排水状態であるために片面排水の自重圧密状態となっている。いずれのケースもこの影響を受けていることに留意されたい。計測は、Fig. 12に示す各地点で水圧計、圧力計、レーザ変位計を用いて行った。

4.2 遠心模型実験の解析手法

大型模型実験と同様に、GEOASIAを用いた3次元水土連成FEM解析により再現解析を実施した。なお、遠心模型実験による真空圧密工法の実験とその解析例としては、例えば白神ら⁸⁾がある。

Fig. 13に解析に用いたモデル(ケース3)を示す。応力・変形の対称性を考慮して、実験模型の1/2の半円状の範囲を解析モデルとした。解析の主対象の粘性土層の他、下部透水層、ドレーン材をモデル化した。解析は、遠心場での模型実験条件を解析するのではなく、相似則により換算された層厚15mの粘性土地盤として解析した。

実験と解析の比較の際、遠心装置が回転して遠心加速度が50Gに達し、排水用コックを開放した時点を開始時刻とした。実験では遠心加速度の上昇過程に自重圧密が起き、開始時刻の時点で内部に過剰間隙水圧が生じている。その未圧密状態を考慮するために、実験開始初期の粘性土層の間隙水圧の実験値を再現するように初期値として設定した。

Table 4に解析で用いた材料定数を示す。多くの値は前章の大型模型実験の解析時と同じ値である。初期の構造の程度、透水係数、透水係数の変化指数については、遠心加速度上昇過程により自重圧密が少し進んだ状態を模擬するため、また大型模型実験時よりも大きな圧密荷重での圧密挙動を模擬するために、大型模型実験時と異なる値を用いた。初期比体積については、粘性土層厚が大きいことから深度が大きい地点ほど比体積が小さくなるように分布させた。

4.3 遠心模型実験の再現解析結果

相似則に沿って実規模換算した値で実験と解析の結果を示す。排水コックを開放して自重・真空圧密を開始した時点をも0日とし、地表面沈下と比体積については0日時点からの差分で示す。

地表面沈下の経時変化をFig. 14に示す。実験による計測値は、開始600日時点で、ケース1の地表面沈下量は約1.1m、ケース2は約1.2m、BOLVAC工法を模擬したケース3は約2.1mであった。BOLVAC工法では他のケースより

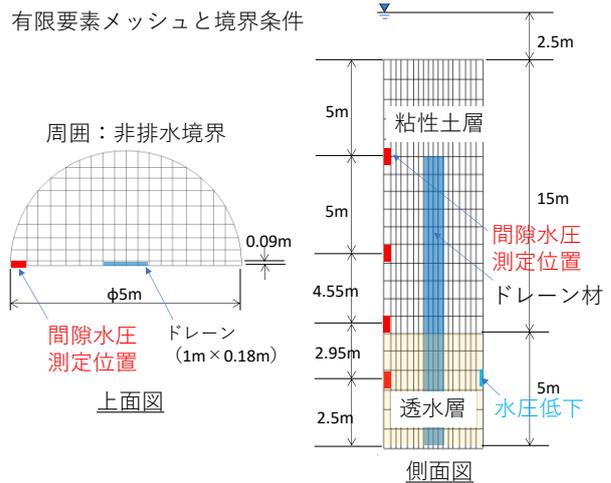


Fig. 13 遠心模型実験の解析モデル (ケース3)
Finite Element Mesh of Centrifugal Model Test (Case3)

Table 4 遠心模型実験の解析の材料定数
Material Parameters of Centrifugal Model Test

粘性土 (トチクレー)					
圧縮指数 λ	膨潤指数 κ	限界状態 定数M	NCLの 切片N	ポアソン比 v	
0.07	0.01	1.20	1.62	0.3	
透水係数 k[m/s]	透水係数 変化指数	初期 比体積 v_0	初期の 構造の 程度1/R*	初期 応力比 K_0	
5.00×10^{-9}	0.32	分布	150	1.0	

透水層 (珪砂7号)			ドレーン材		
ヤング 係数E [kN/m ²]	ポアソン 比v	透水係数 k[m/s]	ヤング 係数E [kN/m ²]	ポアソン 比v	透水係数 k[m/s]
2.1×10^7	0.3	1.00×10^{-5}	1.0×10^3	0.3	1.00×10^{-2}

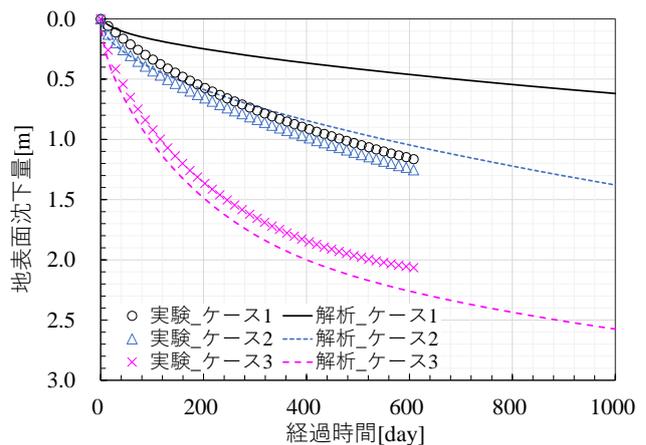


Fig. 14 地表面沈下量の経時変化 (遠心模型実験)
Temporal Changes of Surface Subsidence
of Centrifugal Model Test

も地表面沈下量が大きく、圧密促進効果が高い。解析結果を見ると、同様にケース3は他のケースよりも沈下量が大きくなった。例えば600日時点ではケース1の4倍、ケー

ス2の2倍程度の沈下量となった。同工法による圧密促進効果を解析でも再現できたといえる。それぞれのケースの解析結果を実験結果と比較すると、ケース2およびケース3の負圧を作用させたケースでは実験の挙動を解析で再現できた。一方、自重圧密のみのケース1については解析結果と実験結果で差が見られた。同じ排水条件で圧密荷重だけが異なる条件の差を考慮すると、解析結果のようにケース1の沈下量がケース2に比べて小さくなる方が合理的な結果と考えられる。ケース1の沈下量の実験結果が解析結果より大きくなった理由について、後述の間隙水圧計測結果を考慮すると、ケース1は負圧が作用しないため、遠心場でアクリル円筒の内径が広がる方向に力が働き、円筒壁面と粘性土層の間に排水層ができた可能性が考えられる。これにより、粘性土中層の排水が促進され沈下量が大きくなった可能性がある。なお、今回の条件ではドレーン材1本で半径2.5mの範囲を圧密させたが、実施工時のドレーン材ピッチはより小さいため、圧密時間は短くなる。

Fig. 15からFig. 17に各ケースの粘性土層の間隙水圧の経時変化を示す。先に述べた通り、解析においては、実験開始初期の自重による未圧密状態を考慮するため、

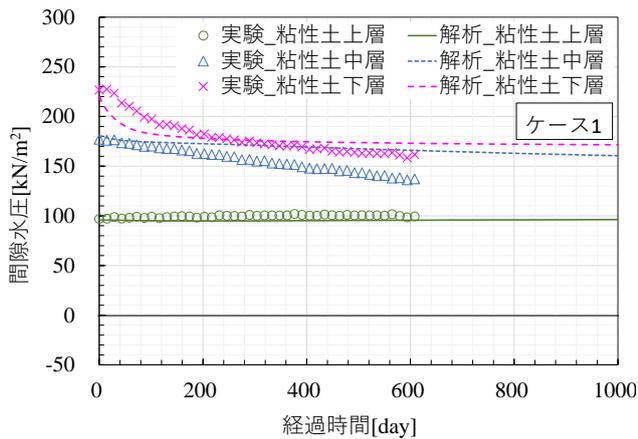


Fig. 15 間隙水圧の経時変化 (ケース1)

Temporal Changes of Pore Water Pressure (Case1)

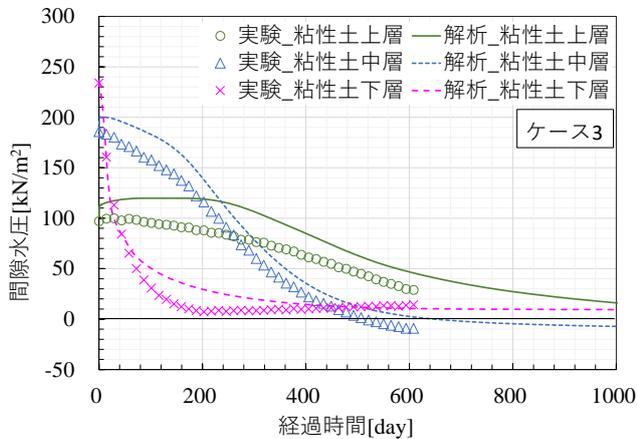


Fig. 17 間隙水圧の経時変化 (ケース3)

Temporal Changes of Pore Water Pressure (Case3)

粘性土層の0日時点の間隙水圧の実験値を再現するように初期値として設定した。間隙水圧の実験結果をみると、ケース1では正の過剰間隙水圧の消散過程が見られるのに対し、ケース2およびケース3では負圧が粘性土中に作用していく様子が確認できる。いずれも粘性土の下層から順に水圧が低下していく様子が見られた。ケース3の実験結果では、下層では0~100日の間に、中層では100~500日の間に水圧が大きく低下し、上層では200日を過ぎたあたりで水圧が低下し始める様子であったが、解析でもこれと同様の水圧低下の状況を再現できた。透水層やドレーン材からの負圧が粘性土層に徐々に伝播されていく現象が、実験・解析ともに確認できた。なお、ケース1では粘性土中層の水圧消散が解析よりも実験で早く、これが前述の解析と実験の地表面沈下量の違いにつながったと考えられる。

Fig. 18に、ケース3の粘性土層内の間隙水圧の深度分布を示す。解析値をみると、真空圧密開始時は未圧密状態から開始し、時間とともに各深度で水圧が低下している。まず粘性土層の下部から水圧低下が進み、最終的にドレーン材の天端にあたる粘性土下端からの高さ10mまでは水圧変化が大きい結果となった。実験結果と同様の

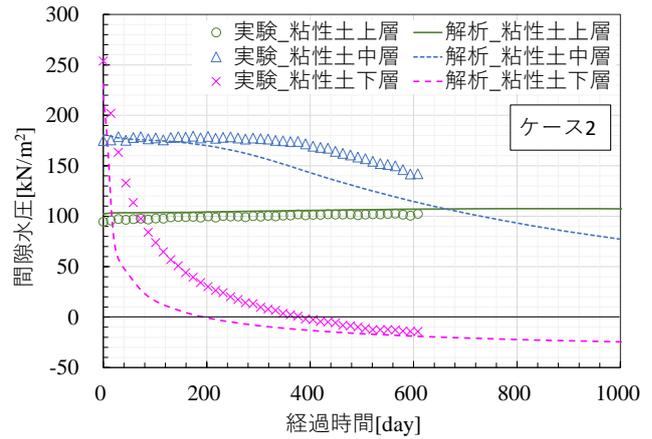


Fig. 16 間隙水圧の経時変化 (ケース2)

Temporal Changes of Pore Water Pressure (Case2)

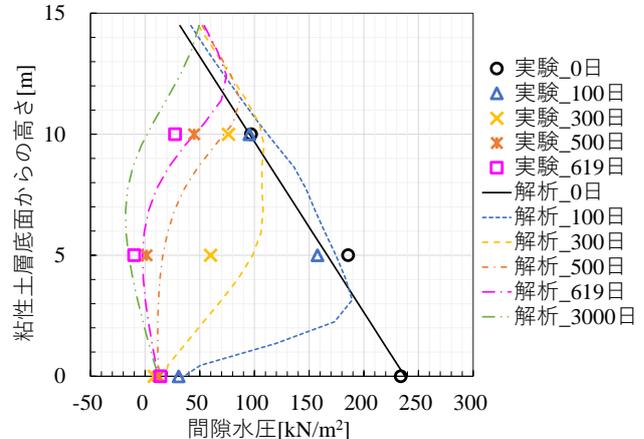


Fig. 18 間隙水圧深度分布 (ケース3)

Vertical Distribution of Pore Water Pressure (Case3)

傾向が得られていることがわかる。

Fig. 19に、解析で得られた各ケースの200日時点の間隙水圧の分布を示す。ケース1では正の間隙水圧が生じているが、ケース2およびケース3では、透水層やドレーン材付近に負の間隙水圧が発生する様子を再現できた。

Fig. 20に、解析で得られた各ケースの間隙比の実験開始時から200日後までの変化量の分布を示す。ケース1およびケース2では粘性土下層での間隙比の減少が顕著でありその大きさはケース2の方が大きい。ケース3ではドレーン材の効果でドレーン材付近でも間隙比の変化が大きくなった。ケース3のBOLVAC工法では、負圧が広範囲に伝わっており、体積の減少が大きく、広範囲で圧縮が生じることがわかる。

以上の結果より、層厚15m相当の遠心模型実験についても、3次元FEM解析を実施することで、BOLVAC工法の真空圧密挙動を概ね再現できることが分かった。前章で述べた通り、3次元FEM解析による施工前の圧密挙動予測と、実施工で得られた結果を用いたフィードバックによるモデルの再検討が重要と考えられる。

5. 施工実機を用いたドレーン材貫入実験

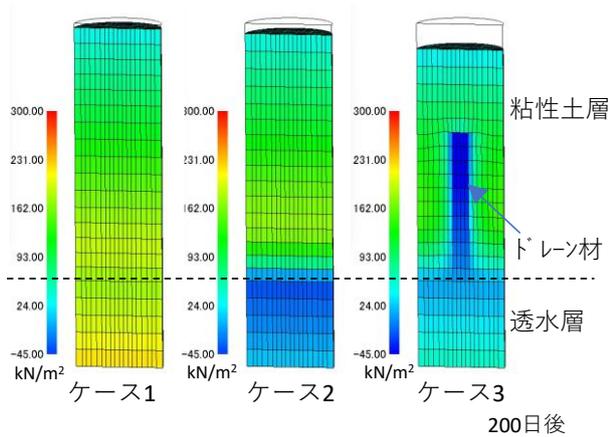


Fig. 19 間隙水圧の分布 (遠心模型実験)
Distribution of Pore Water Pressure
(Centrifugal Model Test)

5.1 ドレーン材貫入実験概要

施工方法の検証として、工法成立のために最も重要な透水層とドレーン材の接合部分について、ドレーン材の貫入実験を実施した。通常の打設機により、BOLVAC工法が対象とする模擬地盤にドレーン材を貫入できるか、貫入長を管理可能か、透水層に作用させた負圧がドレーン材に伝わるかを検証することを目的とした。

実験状況をPhoto 1に、実験時にドレーン材を貫入させた模擬地盤の概要をFig. 21に示す。容積22m³の大型土槽 (L6.0m×W1.8m×H2.0m) に、層厚0.9mの透水層と層厚1.0mの粘性土層から成る模擬地盤を作製した。土槽底部に暗渠管や水圧計を設置した上で、北九州市産の海砂を水中投入することで下部の透水層を作製した (乾燥密度 $\rho_d = 1.750\text{g/cm}^3$, 締固め度95%)。上部の粘性土層は粉体の粘性土 (トチクレー) を含水比 $w=46.7\%$ (液性限界 w_L の1.6倍) に調整し、土槽内に投入し敷き均して作製した ($\rho_d = 1.249\text{g/cm}^3$)。土槽底部の暗渠管は、土槽外部の真空ポンプと接続し透水層に均質に負圧を載荷、排水できる構造とした。

この模擬地盤に対し、架台上に設置した打設実機を用いて長さ等の条件が異なる複数のドレーン材 (プラス

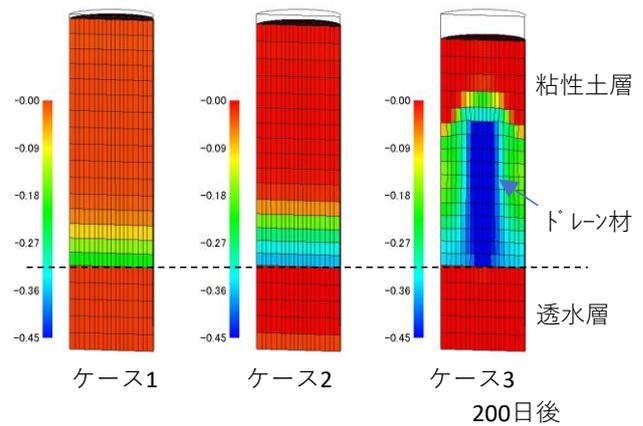


Fig. 20 間隙比変化量の分布 (遠心模型実験)
Distribution of Changes in Void Ratio
(Centrifugal Model Test)



Photo 1 ドレーン材貫入実験状況
Drain Penetration Test

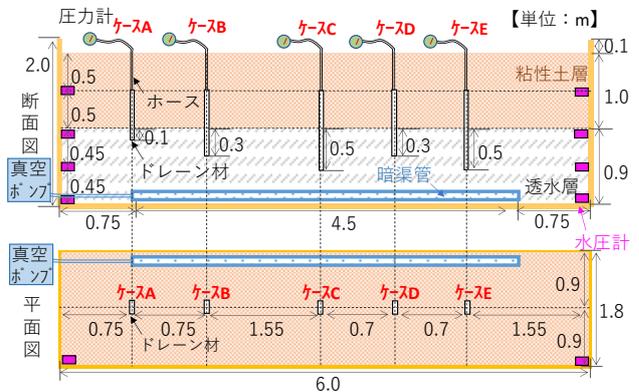


Fig. 21 ドレーン材貫入実験の模擬地盤概要
Model of Drain Penetration Test

チックボードドレーン)を貫入し、貫入時の油圧を計測した。まず、ケースA~Dのドレーン材を負圧を作用させていない状態の地盤に貫入した。貫入後の各ドレーン材を圧力計に接続し、内部の圧力を計測できる状態とした。この状態で、透水層に真空ポンプで負圧を与え排水させ、地盤内の間隙水圧やドレーン材に作用する圧力を計測した。ケースEについては負圧を作用させた状態で貫入実験を行った。実験後は模擬地盤を掘削し、ドレーン材の透水層への貫入長を実測した。ドレーン材周囲への粘性土の付着状況や、内部への粘性土の侵入状況を観察した。

5.2 ドレーン材貫入実験結果

Table 5に計画貫入長と実績貫入長の一覧を、Photo 2に実績貫入長の計測例を示す。ケースBではケーシング引き抜き時に共上がりが生じ、計画貫入長より実績貫入長が0.2m程度小さくなった。今回の実験地盤は粘性土層厚が1.0mで土被り圧が非常に小さく、共上がりが生じやすい条件であったと考えられる。以降のケースではドレーン材下部の引き抜け防止用の鉄板(アンカー)の枚数を増やす等の工夫により、低土被り圧条件でも共上りを抑制することができた。

Table 5 計画・実績貫入長
Planned and Measured
Penetration Length

ケース	透水層 負圧	透水層への 貫入長[m]	
		計画	実績
A	無	0.10	0.05
B		0.30	0.09
C		0.50	0.40
D		0.30	0.23
E	有	0.50	0.54



Photo 2 貫入長計測例
Example of Penetration
Length Measurement

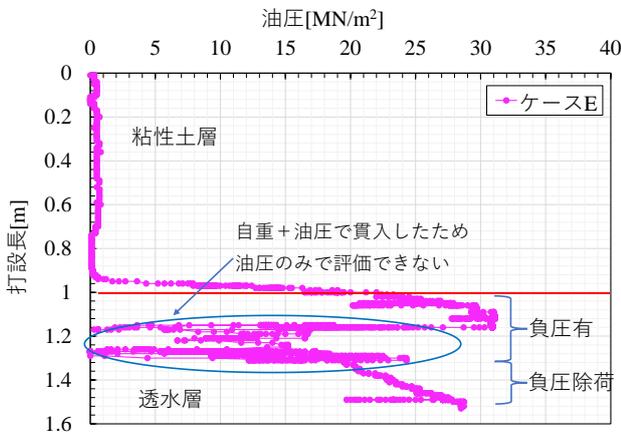


Fig. 23 貫入時の油圧計測結果 (透水層への負圧有)
Hydraulics during Penetration (With Negative Pressure)

Fig. 22およびFig. 23にドレーン材貫入時の油圧計測結果を、透水層への負圧無(ケースA~D)と透水層への負圧有(ケースE)に分けて示す。油圧値とは、ケーシングを押し込むモータの油圧を計測したものである。ドレーン打設機では、油圧モータに油圧が作用することで油圧モータが回転してトルク力を発揮し、ギアを通してフリクションローラに力が伝達されてケーシングを押し込む機構となっている¹⁰⁾。この油圧モータに作用する油圧値はケーシング貫入時の地盤抵抗と相関があることから、一般にドレーン打設時の打設管理に使用されている。貫入実験の結果、ケースA~Dは貫入に全く問題がなかったが、ケースEについては負圧による拘束圧で透水層が硬くなり、油圧のみでは貫入できず打設機自重も使用して貫入を実施した。なお、一度負圧を作用させてもその負圧を除荷すれば、油圧のみで貫入が可能であった。Fig. 22およびFig. 23より、いずれのケースも粘性土層と透水層の境界である深度1.0m付近で油圧値が変化しており、油圧計測により透水層への貫入管理が可能であることを確認できた。

Fig. 24に、透水層に負圧を作用させた際のドレーン材内部の圧力計測結果を示す。ケースB~Dのドレーン材内

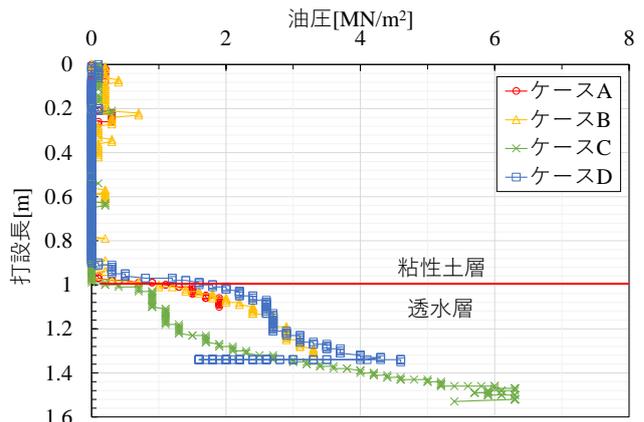


Fig. 22 貫入時の油圧計測結果 (透水層への負圧無)
Hydraulics during Penetration (Without Negative Pressure)

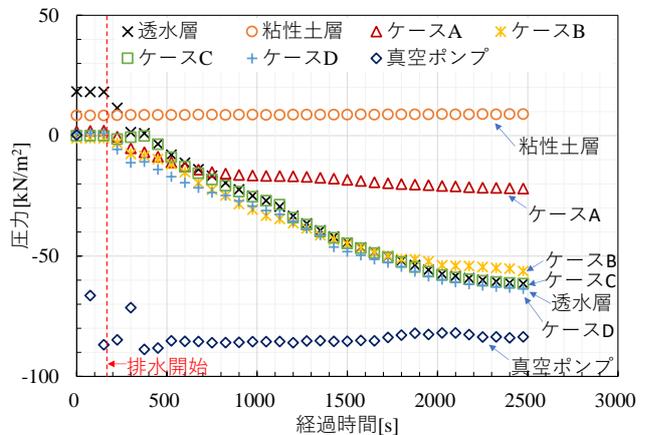


Fig. 24 透水層へ負圧载荷時のドレーン内圧力計測結果
Pressure in the Drains when Negative Pressure
is Applied to the Permeable Layer

部の圧力は透水層内の間隙水圧と近い計測値（2500秒時点で -60kN/m^2 程度）となった。一方ケースAは -20kN/m^2 程度であった。これは、ケースAの透水層への貫入長（実測 0.05m ）が負圧伝播のためには不十分であったためと考えられる。ケースB~Dの貫入長は $0.09\sim 0.40\text{m}$ であることから、貫入長は最低でも 0.10m 、共上がり等が生じる可能性を考慮して 0.30m として設計するのが適切と考えられる。解体調査の結果、透水層に貫入されたドレーン材の周囲には一部薄く粘性土が付着していたが、この状態でも負圧がドレーン材内に十分伝わる事が確認できた。

実験終了後に掘り出したドレーン材について、ドレーン材下端切断面からの粘性土のドレーン材内への侵入状況を観察した。その結果、侵入が確認されたのはドレーン材の切断面から、最大でも 0.05m 程度であり、ドレーン材の透水性能を変化させるほどの粘性土の侵入は見られなかった。BOLVAC工法では、ドレーン材内部に負圧を作用させるためドレーン材切断面から粘性土が引き込まれてドレーン材全体の透水性を低下させる懸念があったが、今回実験に用いた液性限界の1.6倍程度の軟弱地盤については、粘性土の侵入量は非常に少なかった。より高含水比の地盤で打設を実施する際には切断面からの侵入防止措置について検討する必要がある。

6. まとめ

真空井戸・透水層・ドレーン材を組み合わせた真空圧密「BOLVAC工法」の3次元水土連成FEM解析による設計の有効性を、これまで実施した大型模型実験や遠心模型実験の再現解析を実施することで検証した。また、工法の成立に最も重要である透水層とドレーン材の接合部に着目し、打設実機を用いたドレーン材貫入実験を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 粘性土層厚 2m 程度の大型模型実験についての3次元水土連成FEM解析により、高含水比状態の粘性土に対して実験中の負圧の伝播状況や沈下挙動を概ね再現できることが分かった。
- 2) 粘性土層厚 15m 相当の遠心模型実験についても、3次元水土連成FEM解析により、実験中の高含水比状態の粘性土中の負圧の伝播状況や沈下挙動を概ね再現できることが分かった。
- 3) 打設実機を用いたドレーン材貫入実験では、透水層へのドレーン材の貫入長が 0.10m あれば、透水層・ドレーン材間の負圧伝播ができることが分かった。また、貫入長の管理方法としてケーシング押し込み時の油圧計測が有効であることを確認した。なお、設計貫入長については共上がり等が生じる可能性を考慮し 0.30m 程度で設計するのが適切であると考えられる。

実施工時にはこれらの結果を参考に、現地の条件に依

じて、3次元FEM解析による井戸やドレーン材の配置の事前検討や、施工実験を実施する予定である。その後は実施工時の動態観測データによるフィードバックを行いながら安全かつ合理的な施工を進めることが必要である。

謝辞

GEOASIAによるFEM解析では、名古屋大学の中野正樹教授、野田利弘教授、一般社団法人GEOASIA研究会の高稲様に貴重なご協力、ご助言を賜りました。また、ドレーン材貫入実験では、錦城護謨株式会社の白神様、三成様、大寺様に貴重なご協力、ご助言を賜りました。この場を借りて皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 梅原由貴，高橋真一，山田祐樹：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，大林組技術研究所報，2020
- 2) 梅原由貴，高橋真一，山田祐樹：円筒模型を用いた井戸式真空圧密工法の一次元遠心力模型実験，第57回地盤工学研究発表会，2022
- 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, S&F, Vol. 45, No. 6, pp. 771-790, 2008
- 4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two-distinct volume change mechanisms of soils, S&F, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002
- 5) Taylor, D. W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, USA, 1948
- 6) 中井健太郎，野田利弘，河村精一，白鳥洋平：水～土連成有限変形解析による自然堆積粘土地盤に打設された杭に作用する地盤反力の検討，土木学会論文集 A2, 73(2), I_535-I_544, 2017
- 7) 太田秀樹，鍋谷雅司，藤井信二，山本松生：弾・粘塑性有限要素解析の入力パラメータ決定における一軸圧縮強度の利用，土木学会論文集，第400号，III-10, pp.45-54, 1988
- 8) 白神新一郎，長谷川元輝，澤村康生，木村亮：真空圧密工法と盛土載荷を併用した地盤の力学挙動に着目した遠心模型実験とFEM解析，土木学会論文集，Vol.76, No. 2, pp. 174-190, 2020
- 9) NCBドレーン協会，“NCBドレーン工法 ドレーン材”，<https://www.ncb-drain.gr.jp/matmac.html>，(参照2024-07-26)
- 10) 平田昌史，白神新一郎，清水英樹，福田淳，川鍋修，野村忠明：プラスチックボードドレーン打設機の油圧抵抗を利用した地質推定手法の開発，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.67, No.3, pp.358-371, 2011