

遠心模型実験による井戸式真空圧密工法「BOLVAC®工法」の効果検証

梅原由貴 高橋真一
山田祐樹

Centrifugal Model Tests on Vacuum Consolidation Method using Vacuum Well

Yuki Umehara Shinichi Takahashi
Yuki Yamada

Abstract

Consolidation settlement and insufficient strength are significant problems in reclamation work using soft clay. In this study, using centrifugal model tests, we evaluated the effectiveness of the vacuum consolidation method called BOLVAC®, which consists of vacuum wells, permeable layers, and drains. One-dimensional tests and three-dimensional tests were conducted. The thickness of the simulated clay layer was 15 m. Results of the experiment showed that when the BOLVAC method was applied, the amount of settlement increased by approximately 1.7 times compared to the case without countermeasures. It was confirmed that the water level drop and negative pressure acted as consolidation loads in BOLVAC. The water content decreased and the strength increased up to the depth at which the drain penetrated. In future, we plan to conduct numerical analysis and construction experiments.

概要

軟弱粘性土を用いた埋立工事では、造成後地盤の圧密沈下や強度不足が課題となる。本論文では、これら課題に対応する圧密促進工法の一つとして、真空井戸・透水層・ドレーンを組み合わせた井戸式真空圧密工法「BOLVAC®工法」の有効性について、遠心模型実験で検証した。円筒を用いた1次元実験と中型土槽を用いた3次元実験の2種類を実施し、いずれも粘性土層厚300mmの模型に遠心加速度50Gを載荷して層厚15mの粘性土層を模擬した。実験の結果、BOLVAC工法を適用すると、無対策と比べて、同じ経過時間に発生する圧密沈下量は1.7倍程度増加した。間隙水圧の計測結果より、当該工法では圧密荷重として水位低下と負圧がドレーンを伝って作用することを確認した。実験後の地盤の調査結果から、ドレーンが貫入された深度までは圧密促進により含水比の低下と地盤強度の増加が確認できた。今後、数値解析の検討および実規模の施工実験を予定している。

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場合が多い。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や強度不足が問題となる。また、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進められ、浚渫土砂減容化によるその処分場の確保も重要な課題である。これらの対策には、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・ドレーンを用いた井戸式真空圧密工法「BOLVAC®工法」を開発し、その有効性について検討してきた。2020年には、工法効果検証のために実施したFEM解析や大規模な土槽を用いた大型模型実験等について報告した^{1),2)}。しかし、これまでの実験的検証における最大の粘性土層厚は2mであり、当該工法の主な対象とする粘性土層厚15m程度の地盤への効果について

の検証は不十分であった。そこで本論文では、粘性土層厚15m相当を模擬して実施した、遠心模型実験による当該工法の効果検証結果について報告する。

2. BOLVAC工法の概要と特長

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「BOLVAC工法」の概要図をFig. 1, Fig. 2に示す。本工法は、改良対象の軟弱粘性土層の下に位置する透水層と、その透水層に設置した真空井戸、透水層から粘性土層中に伸びるパーチカルドレーン材で構成される。真空井戸は密閉できる構造であり、外部に設置した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。また、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。これにより、負圧載荷と排水を同時に実施し粘性土層を圧密促進する。

施工手順としては、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真空井戸を設置、③改良対象の粘性土による埋立、④地表からドレーンを打設、の手

順となる。埋立施工時あるいは埋立施工完了後から真空を併用した揚水を行い、目標の沈下量を得られた後、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) 負圧と水位低下による2つの圧密促進効果

真空井戸内にかかる負圧と、水位低下により発生する有効応力の2種類の圧密荷重を改良対象の粘性土層に載荷することが可能である。粘性土層が厚い場合、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、盛土の運搬・盛り立て・撤去が不要となる。

2) 透水層による水平方向への圧密促進効果の伝達

底部透水層を利用し、真空井戸による負圧と揚水の効果を水平方向へ広く伝達させる。

3) 鉛直方向への圧密促進効果の伝達

バーチカルドレーンと透水層の接続により、真空井戸による負圧と揚水の効果を鉛直方向にも伝達させる。

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、埋立期間中も圧密促進が可能となり、工期短縮が見込まれる。

これらの特長により、当該工法を用いることで圧密促進による残留沈下抑制、地盤強度増加が見込まれる。また、浚渫土の減容化によって新たな設置が難しい処分場の延命化にも効果的と考えられる。地下水位を低下させて圧密を促進させた報告は大阪湾沿岸である^{3,4)}ものの、底面からのみ真空を載荷する排水構造の適用事例はなく、この工法の大きな特徴である。

3. 実験概要と実験方法

3.1 実験概要と実験ケース

今回実施した遠心模型実験は、内寸φ100mm×H500mmの亚克力製円筒を用いた1次元模型実験と、内寸L800mm×W200mm×H500mmの中型土槽を用いた3次元模型実験の2種類である。実験ケースをTable 1, Table 2に、模型概要図をFig. 3, Fig. 4に、作製した模型例をPhoto 1, Photo 2に示す。

1次元遠心模型実験について、ケース1D-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1D-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を用いないもの、ケース1D-3は透水層に負圧を作用させて排水し、さらに地表まで貫通しないドレーンを用いるもの（BOLVAC工法を想定）である。3次元遠心模型実験については、ケース3D-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3D-2は透水層に負圧を作用させて排水し、さらに地表まで貫通しないドレーンを用いるもの（BOLVAC工法を想定）である。

模型の底部から50mm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かける構造とした。これによりBOLVAC工法の構成を模擬した。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300mmの模型により層厚15mの地盤を再現した。

なお、遠心模型実験による真空圧密工法の効果検証例としては、例えば白神らの報告⁵⁾があり、本実験でも参考にしていく。

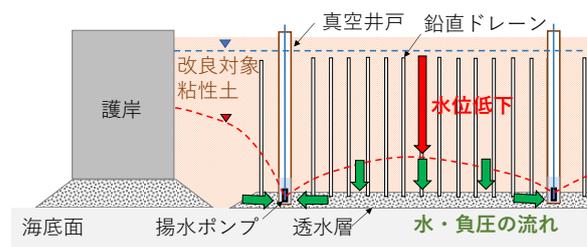


Fig. 1 BOLVAC工法の概要
Overview of BOLVAC Method

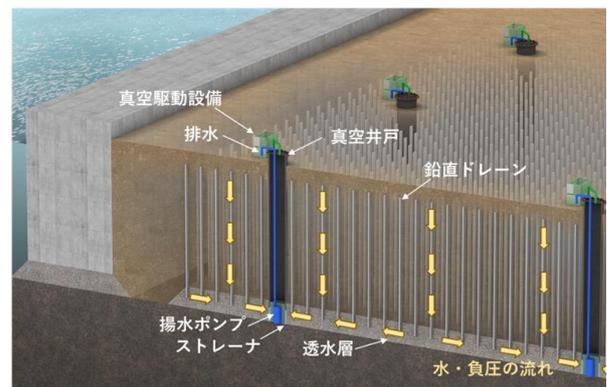


Fig. 2 BOLVAC工法のイメージ
Image of BOLVAC Method

Table 1 円筒を用いた1次元遠心模型実験ケース
Cases of One-dimensional Centrifugal Model Tests

Case	概要	負圧載荷	ドレーン
1D-1	無対策（自重圧密）	無	無
1D-2	負圧載荷のみ	有	無
1D-3	BOLVAC 工法 (負圧/ドレーン有)	有	有

Table 2 中型土槽を用いた3次元遠心模型実験ケース
Cases of Three-dimensional Centrifugal Model Tests

Case	概要	負圧載荷	ドレーン
3D-1	無対策（自重圧密）	無	無
3D-2	BOLVAC 工法 (負圧/ドレーン有)	有	有

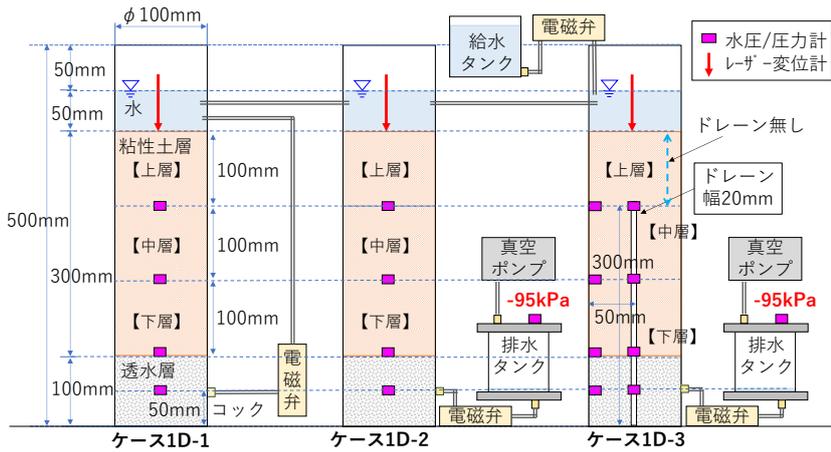


Fig. 3 円筒を用いた1次元遠心実験の模型概要
Schematics of One-dimensional Centrifugal Test Models



Photo 1 1次元遠心実験模型例
One-dimensional Test Model

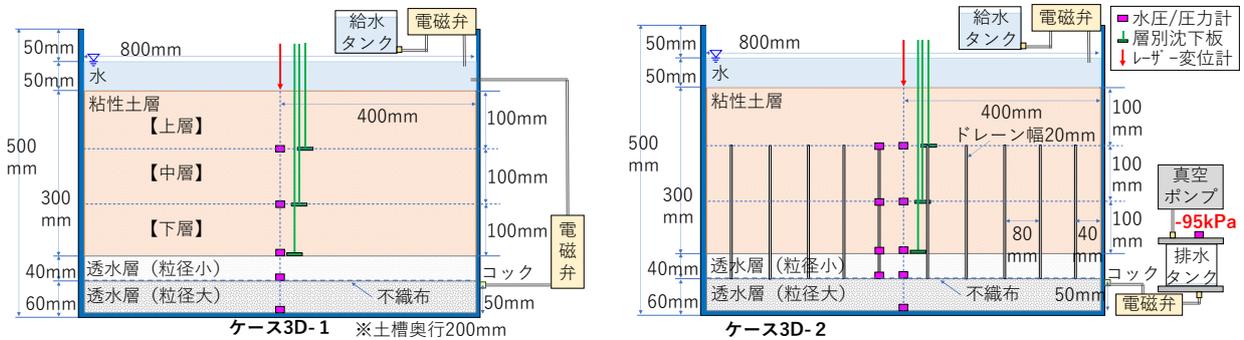


Fig. 4 中型土槽を用いた3次元遠心実験の模型概要
Schematics of Three-dimensional Centrifugal Test Models

3.2 地盤材料

遠心模型実験では、改良対象の粘性土層として市販の粘土材料である粉体トククレーを含水比38.5%に調整したものを用いた。また、円筒模型の透水層と中型土槽模型の透水層上部には珪砂7号を用いた。中型土槽模型の透水層下部には珪砂3号を用いた。Table 3にトククレーの物性と圧密特性値を、Fig. 5にそれぞれの材料の粒径加積曲線を示す。Table 3のトククレーの圧密特性については、初期含水比が遠心模型実験と同程度である39.0%で実施した段階圧密試験（JIS A 1217に準拠）によって得られたもので、平均圧密圧力111kN/m²での値である。同試験で得られた圧密曲線をFig. 6に示す。



Photo 2 3次元遠心実験模型例
Three-dimensional Test Model

3.3 実験手順

模型作製手順として、まず透水層を敷設した。円筒模型では、ケース1D-3のみ円筒底面の中央部にドレーンを固定した。次に全てのケースの模型について、底面に透水層（珪砂7号）を敷設し円筒外部から木槌で叩いて締固めた後、水で飽和した。

中型土槽模型では、排水層の排水距離が円筒模型に比べて大きい条件でも十分な排水機能を確保するため、下層には上層より透水性が大きな材料を使用した。透水層下部層として珪砂3号を層厚60mm敷設し、締固めを行っ

Table 3 粘性土（トククレー）の物性・圧密特性
Material and Consolidation Properties of Clay

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	38.5	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]
0.189	151	7.27×10^{-10}

た。その上に不織布・ろ紙を敷き、ケース3D-2はドレーン材を所定の位置に固定した。この状態で、透水層上部層である珪砂7号を層厚40mm敷設し十分締固め、透水層全層を水で飽和した。

いずれの実験も、透水層中には所定の深度に水圧計を設置した。ドレーン内の水圧計測のための水圧計は、ドレーン材に工作用粘土と接着テープを用いて固定し、事前に水で飽和させて使用した。実験用ドレーン材は、実施工用のプラスチックボードドレーン（幅94mm、厚さ3.6mm）を幅20mmに加工して用いた。

その後、含水比調整したトチクレーを投入し、所定の深度に水圧計等の計測機器を設置しながら層厚300mmまで地盤を作製した。上部に水深50mmの水を張った。

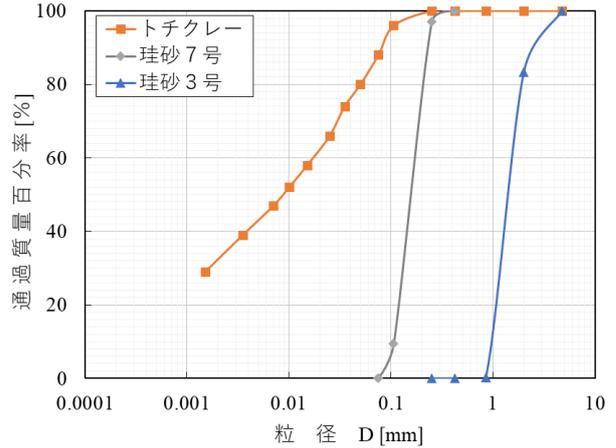
遠心模型実験は、大林組技術研究所内にある実験装置（有効回転半径約7m、Photo 3）を用いて実施した。模型や真空ポンプ等の各種機器はすべて装置のバケット上に搭載した。遠心加速度は50Gとし、粘性土層厚300mmの模型を作製して層厚15mの地盤を再現した。実験時は、装置の回転を開始し50Gに達した後すみやかに模型下部排水コック部の電磁弁を開放し、自重圧密・真空圧密を開始し放置した。真空圧密時の排水タンク内の圧力は、約-95kPaである。圧密中は、模型上部の水位一定となるよう、給水タンクから電磁弁制御により調整した。約5～6時間の放置の後、排水コック部の電磁弁を閉めた上で遠心装置を停止させ実験を終了した。計測は、Fig. 3, Fig. 4に示す点で水圧計、圧力計、層別沈下板、レーザー変位計を用いて行った。実験終了後の模型地盤を対象にベーンせん断試験を実施した。また、模型地盤から採取した試料を用いて含水比試験、一軸圧縮試験を実施した。

4. 円筒模型を用いた1次元遠心模型実験結果

4.1 地表面沈下

以降の実験結果については、全て遠心加速度50Gで相似則（Table 4）に沿って実規模換算した値で示す。経過時間は、排水コックを解放し自重・真空圧密を開始した時点を0日とした。

地表面沈下計測結果をFig. 7に示す。ケース1D-1は、沈下量が600日時点で1.5mとなった。ケース1D-2は、自重圧密分に対して負圧効果が限定的であったためか、ケース1D-1と変わらない挙動となった。一方、ケース1D-3では、最終圧密沈下量は2.5m程度であり、ケース1D-1の沈下量1.5m程度と比べて1.7倍程度圧密促進されていた。Fig. 8に、過去に実施した大規模模型実験¹⁾で得られた層厚2mの場合の地表面沈下計測結果を示す。Fig. 8では、負圧有/ドレーン無と負圧有/ドレーン有の差は小さかった。今回の遠心模型実験では粘性土層厚が15mと大きいため、鉛直方向に負圧を伝えるドレーンの効果が大きかったと考える。なお、今回はドレーン打設間隔は準備作業の制約から約4mとしたが、実施工ではドレーンの打設間隔は1m程度と実験条件に比べて狭く、圧密時間は短くなる。



4.2 間隙水圧

地盤中の間隙水圧と排水タンク内圧力の計測結果を、Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11に示す。ケース1D-1では、自重によって生じた過剰間隙水圧が徐々に消散していく様子が確認できた。ケース1D-2では、真空圧载荷直後に透水層に負圧が伝わる様子が確認できた。その値は-60kPa程度であり、排水タンクの値-95kPaと差があるが、これは排水タンク内の水位の影響を受けたものと考えられる。粘性土層については、下層部に負圧が伝わる様子が確認できた。ケース1D-3では、真空圧载荷直後に透水層とドレーンに負圧が伝わる様子が確認できた。両者の値については、-50~-40kPa程度と、排水タンクの値-95kPaと差がある。これも排水タンク内水位の影響を受けたものと考えられる。粘性土層についても下部から順に負圧が伝わる様子が確認できており、その伝わりはケース1D-2よりも早かった。これはドレーン材により鉛直方向への負圧の伝達が促進されたためと考えられる。なお、ドレーン材については複数深度で水圧計測を実施したが、すべて同様の値となり、圧力損失は無いことを確認した。

Fig. 12に、ケース1D-3の真空圧密開始前と終了時の地盤の間隙水圧低下量実測値を深度分布で示す。付記した①は実験により模型の排水コック位置まで水位低下したと仮定した際の水位低下による水圧低下分(青)を示した。加えて②はドレーン内負圧実測値より算出した負圧作用による水圧低下分(黄)も示す。ドレーン材を設置していない上層部を除き、①と②の和が実測値と一致している。このことから、BOLVAC工法では想定通り圧密荷重として水位低下と負圧が作用すると考えられる。なお、粘性土上層部については模型実験中に圧密沈下に伴いドレーン上端が地表に突出する可能性を回避するためドレーン未貫通範囲を比較的大きく設定したが、実際の施工では、1m程度が可能と考えられ、粘性土層の大部分に想定荷重の作用が可能と考えられる。

4.3 実験後地盤調査

実験後地盤の含水比、ベーンせん断強さ、一軸圧縮強さの深度方向の分布をFig. 13に示す。なお、縦軸の透水層上端からの高さは、実験後の数値である。ケース1D-3の含水比については、ドレーンから離れた円筒側面付近とドレーン近傍の2か所で測定を実施した。

含水比については、いずれのケースも深度が大きくなるほど小さくなり、粘性土層下部では実験後の含水比は25%程度となった。ケース1D-1とケース1D-2の含水比の分布は似た傾向で、粘性土層下部から上部へ向けて含水比が徐々に大きくなる傾向となった。一方、ケース1D-3はドレーンを設置した透水層上端からの高さ9m程度までの範囲は深度にかかわらず含水比は25%程度の値を示した。粘性土上部のドレーン未設置範囲では含水比が徐々に大きくなり、地表面付近では、含水比は35%程度と、初期含水比である38.5%とあまり変わらず、圧密の進行が遅い状況であった。

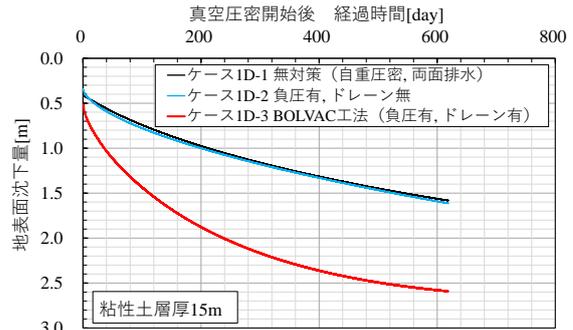


Fig. 7 地表面沈下計測結果 (1次元遠心模型実験)
Settlement at Ground Surface (One-dimensional Tests)

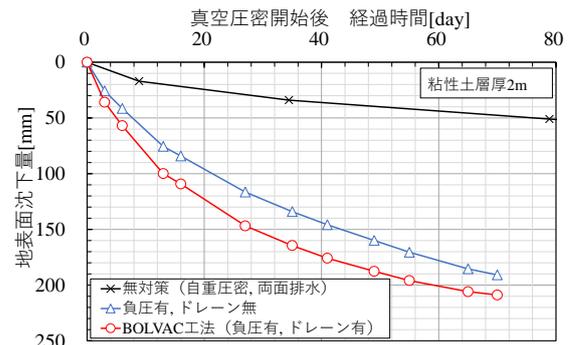


Fig. 8 地表面沈下計測結果 (大規模模型実験¹⁾)
Settlement at Ground Surface (Large-scale Model Test¹⁾)

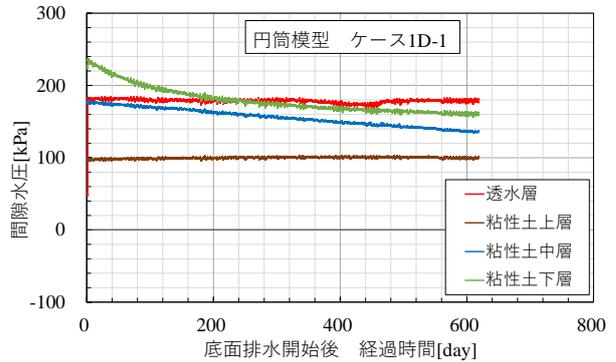


Fig. 9 間隙水圧計測結果 (ケース1D-1)
Pore Water Pressure (One-dimensional Test, Case1D-1)

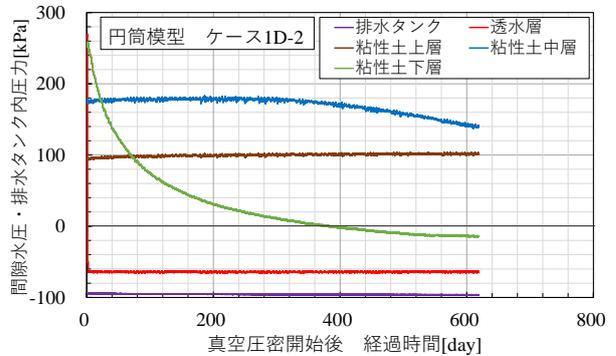


Fig. 10 間隙水圧計測結果 (ケース1D-2)
Pore Water Pressure (One-dimensional Test, Case1D-2)

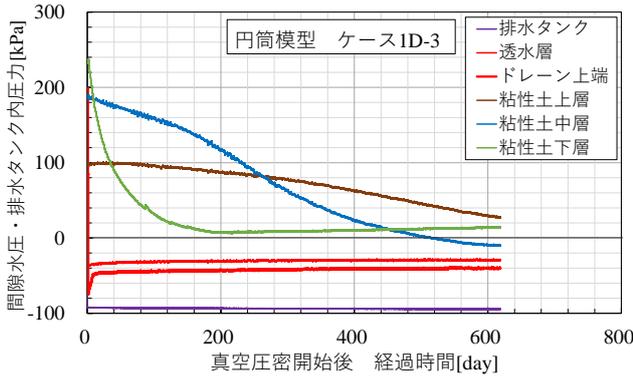


Fig. 11 間隙水圧計測結果 (1次元実験, ケース1D-3)
Pore Water Pressure (One-dimensional Test, Case 1D-3)

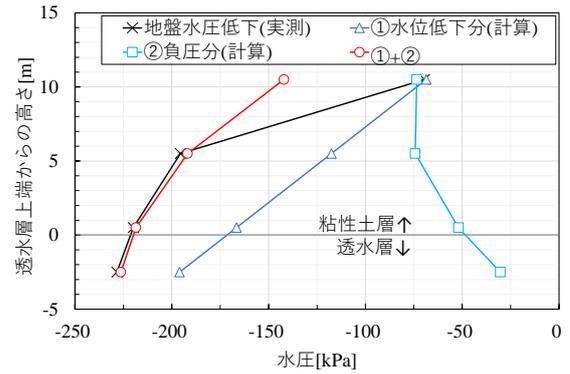


Fig. 12 間隙水圧変化深度分布 (1次元実験, ケース1D-3)
Distribution of Pore Water Pressure Change
(One-dimensional Test, Case 1D-3)

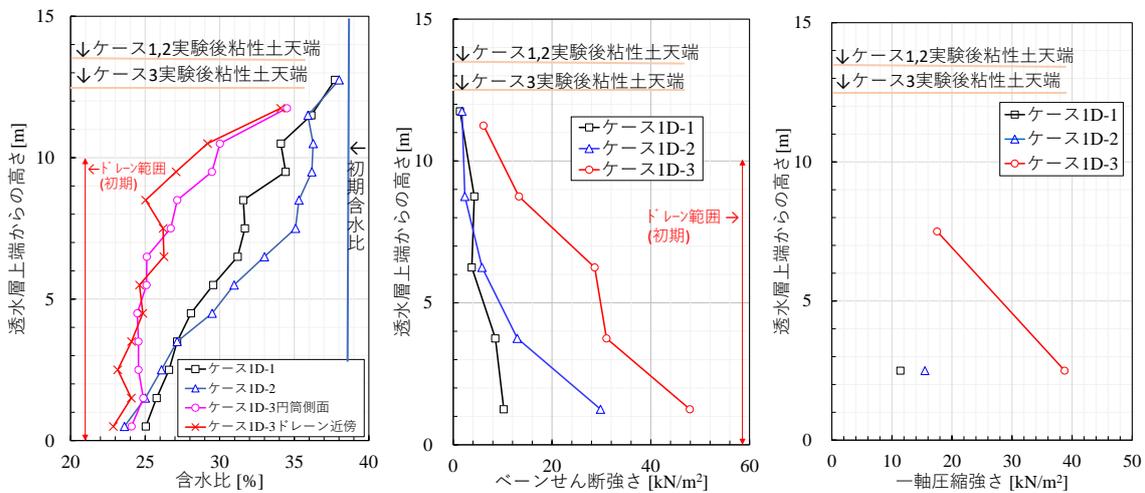


Fig. 13 実験後地盤の含水比・ベーンせん断強さ・一軸圧縮強さ深度分布 (1次元実験)
Distribution of Vane Index, Water Contents and Unconfined Compression Strength (One-dimensional Tests)

ベーンせん断強さは、いずれのケースも深度が大きいほど大きくなるが、特にケース1D-3の値が他のケースよりも大きい。圧密促進による効果と考えられる。ケース1D-2については、粘性土層下部についてケース1D-1よりもベーンせん断強さが大きかったことから、ケース1D-2の真空圧密の効果は粘性土層下部に主に作用しているとみられる。鉛直ドレーンの設置がないために真空圧が粘性土層最上部に伝わらなかったためと考えられる。

一軸圧縮強さは、供試体が自立する深度のみで試験を実施したため、点数が限られている。透水層上端からの高さ2.5m付近の値をケース間で比較すると、ケース1D-1、ケース1D-2は一軸圧縮強さ10~15kN/m²程度である一方、ケース1D-3は40kN/m²と、ケース1D-3が他のケースの3倍程度の値となった。ケース1D-3で圧密が促進され地盤強度が上がったためと考えられる。

5. 中型土槽を用いた3次元遠心模型実験結果

5.1 地表面沈下

地表面沈下計測結果をFig. 14に示す。ケース3D-1では、

実験開始時から400日時点での沈下量が1.5mとなった。ケース3D-2では、同時点の沈下量が2.5mを超えており、ケース3D-1と比べて1.7倍程度沈下量が増加した。ケース3D-2では、前章の1次元遠心模型実験の場合よりも圧密が少し早くなっているが、これはドレーンピッチの影響と考えられる。なお、3次元遠心模型実験では実規模換算で半径2.0mの範囲をドレーン1本で圧密させたが、実施工時はドレーンの打設間隔がより狭いため、圧密時間は短くなる。

実験後に地表面沈下の分布を計測した結果をFig. 15に示す。土槽各点での地表面地下量を可視化したもので、紙面左右方向が土槽長手方向、奥行方向が短手方向である。ケース3D-1では地表面沈下のばらつきが小さいが、ケース3D-2では大きくなっている。土槽短手方向については、壁面では沈下が小さく、中央部では沈下が大きい。これは、中央部はドレーン2列の両方から圧密促進される影響と、土槽壁面の摩擦の影響を受けたためと考えられる。また、長手方向についても不同沈下が生じている。この原因については、地盤作製時の影響等が考えられるが定かではなく、今後検討する必要がある。

5.2 層別沈下

各層の沈下の計測結果をFig. 16に示す。各層の沈下量は、粘性土層中の3深度に設置した層別沈下板から上方に伸ばした棒の目盛りを、実験中にカメラ画像を目測して算出したため、誤差が大きい可能性がある。

ケース3D-1では、粘性土下層が実験終了時0.5m程度、中層・上層が0.2～0.3m程度沈下していた。ケース3D-2では、下層・中層が0.9～1.0m程度、上層が0.5m程度沈下していた。いずれの深度についてもケース3D-1よりケース3D-2の方が沈下量が多い。ケース3D-1では下層が他の層よりも沈下が大きく、ケース3D-2では下層・中層が上層よりも沈下量が大きかった。ケース3D-2ではドレーンの使用により、ドレーンが打設された深度範囲の圧密が促進されたためと考えられる。

5.3 間隙水圧

地盤中の間隙水圧と排水タンク内圧力の計測結果を、Fig. 17, Fig. 18に示す。前章の場合と同様、ケース3D-1では、自重によって生じた過剰間隙水圧が徐々に消散していく様子が確認できた。ケース3D-2では、真空圧載荷直後に透水層とドレーンに負圧が伝わる様子が確認でき、粘性土層についても下部から順に負圧が伝わる様子が確認できた。なお、一部計測結果に乱れがある理由は、実験中に計測用ターゲットが転倒し、その対応のため実験を一時中断したためである。

5.4 実験後地盤調査

実験後地盤の含水比、ベーンせん断強さ、一軸圧縮強さの深度方向の分布をFig. 19に示す。縦軸の透水層上端からの高さは、実験後の数値である。ケース3D-2については、ドレーンとドレーンの間（ドレーンから最も離れた地点）、ドレーン近傍の2か所で測定を実施した。

含水比、ベーンせん断強さ、一軸圧縮強さいずれも、前章と同様の傾向となった。ケース3D-2ではドレーンを用いているため、ドレーン貫入深度までは圧密促進され、含水比が低下し強度増加する傾向となった。特に、ドレーン近傍ではより含水比が低下し強度増加が起きていた。なお、前章と比較すると、いずれのケースも含水比が大きく強度が小さい。これは、1次元実験の圧密時間の方が3次元実験の圧密時間よりも1.5倍程度長く、その結果、3次元実験の圧密が進行したためと考える。

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「BOLVAC工法」について、粘性土層厚15mを想定して、円筒を用いた1次元遠心模型実験と中型土槽を用いた3次元遠心模型実験を実施し、工法効果検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 無対策の場合と比較し、BOLVAC工法を模擬した

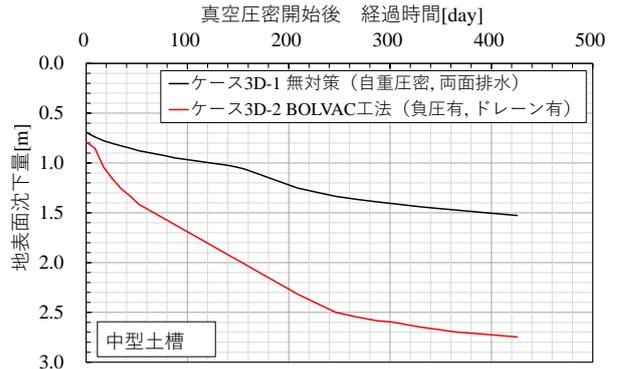


Fig. 14 地表面沈下計測結果 (3次元実験)
Settlement at Ground Surface (Three-dimensional Tests)

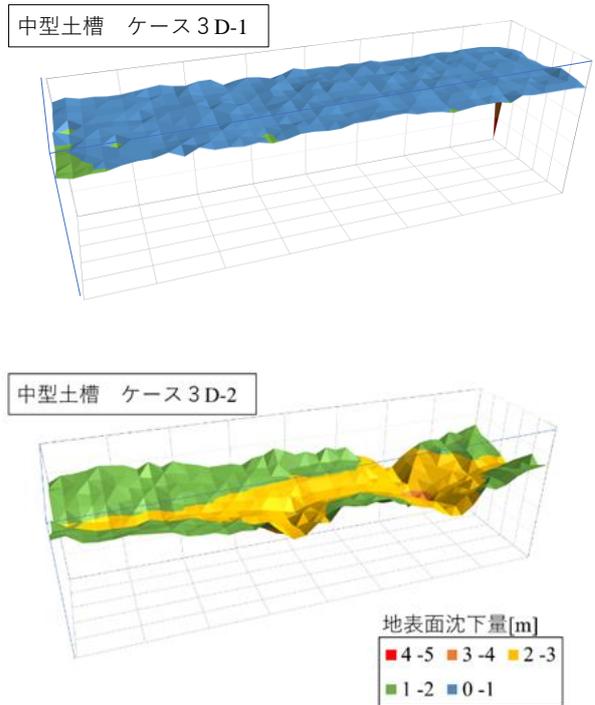


Fig. 15 地表面沈下の分布 (3次元実験)
Distribution of Settlement at Ground Surface
(Three-dimensional Tests)

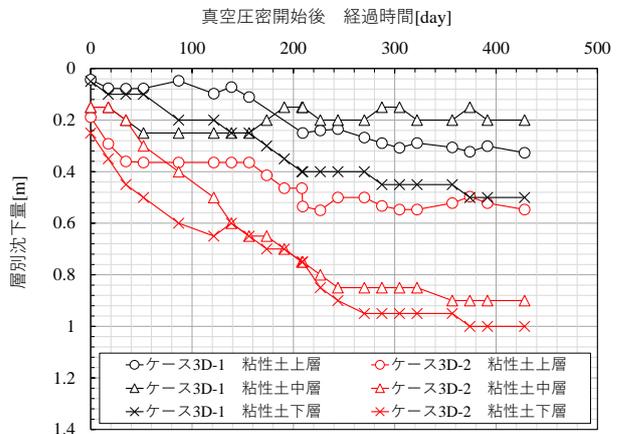


Fig. 16 層別沈下計測結果 (3次元実験)
Settlement of Each Layer (Three-dimensional Tests)

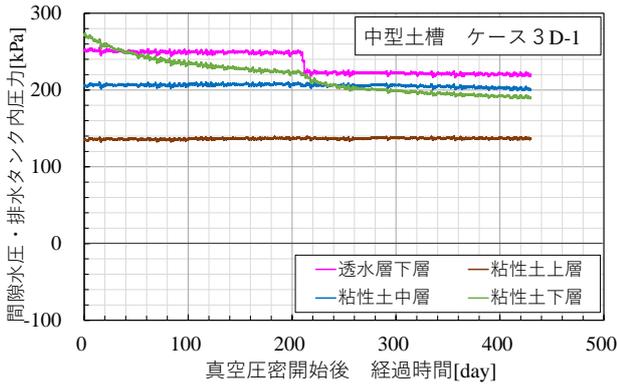


Fig. 17 間隙水圧計測結果 (ケース3D-1)

Pore Water Pressure (Three-dimensional Test, Case1)

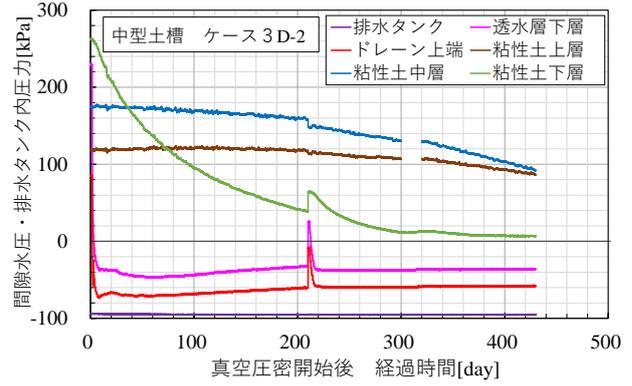


Fig. 18 間隙水圧計測結果 (3次元実験, ケース3D-2)

Pore Water Pressure (Three-dimensional Test, Case2)

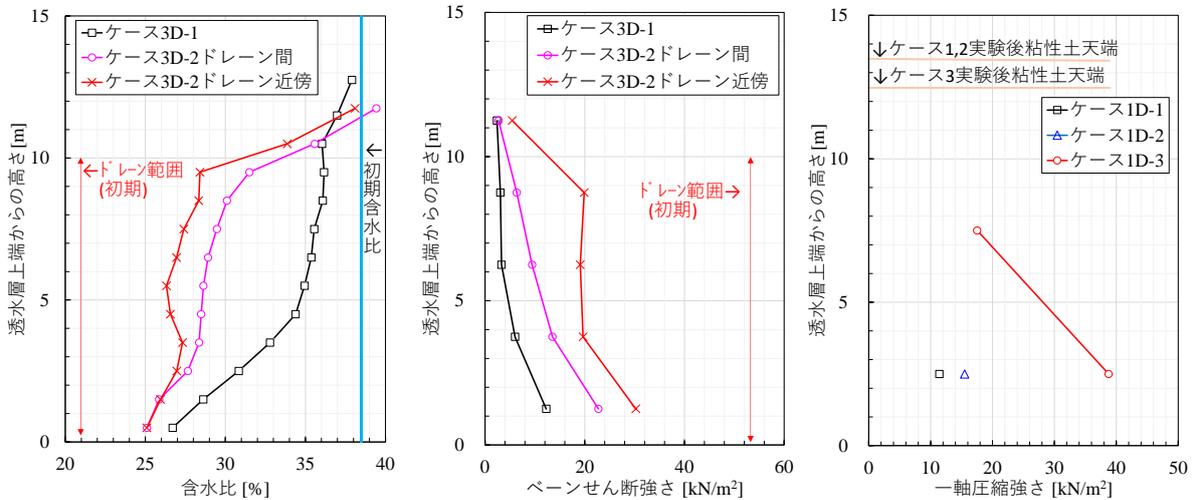


Fig. 19 実験後地盤の含水比・ベーンせん断強さ・一軸圧縮強さ深度分布 (3次元実験)

Distribution of Vane Index, Water Contents and Unconfined Compression Strength (Three-dimensional Tests)

ケースでは圧密沈下が促進されることを確認した。特に、層厚が15mと大きい場合には鉛直ドレーンの効果が大きい。

- 2) 間隙水圧計測結果より、透水層とドレーンの設置によって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。BOLVAC工法を模擬したケースでは圧密荷重として水位低下分と負圧分が作用していることを確認した。
- 3) BOLVAC工法では、ドレーンを設置しない表層粘土層の効果で下面からの圧密圧力が地表面に漏れることなく、有効に働き、主にそれ以深の範囲で圧密沈下が大きく促進される。

ドレーンを打設しない範囲については、その後の利用形態に応じて柔軟に対応できるメリットは大きい。

今後は、FEM解析により実験挙動の再現を試みる予定である。また、実規模の施工実験を実施し、施工性の確認と課題解決を実施する予定である。

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, 大林組研究所報, No.84, 2020
- 2) 梅原由貴, 高橋真一, 山田祐樹: 真空井戸を用いた真空圧密工法に関する大型模型実験, 第55回地盤工学研究発表会, 2020
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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