

マクロエレメント法を用いた水～土連成有限変形解析による 気水分離型真空圧密工法の数値シミュレーション

真空圧密, 気水分離, マクロエレメント

名古屋大学 特別会員 ○肥後 隼大

名古屋大学 国際会員 山田正太郎, 野田 利弘, 中野 正樹

1. はじめに 真空圧密工法では, 沈下に伴い真空ポンプとバーチカルドレーンの頭部に高低差が生じると, 気密シート直下の水圧は, 真空ポンプの圧力よりも沈下量に応じた静水圧分だけ増加する. これを回避するために, 気水分離システム¹⁾と称される方法が提案され, 気密シート直下で真空ポンプと同等の負圧が得られることが実証されている²⁾. この工法の有効性を確認すべく, バーチカルドレーン工法に対するマクロエレメント法^{3), 4), 5)}を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁶⁾を用いた数値シミュレーションを実施した. 以下では, その結果について報告する.

2. 解析条件 解析には水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA** を用いた. また, バーチカルドレーン工法を模擬するために, ドレーンの集排水機能を具備するマクロエレメント法を適用した. 関口ら³⁾によって提案されたオリジナルのマクロエレメント法はドレーン内の水圧を解析者が入力条件として与える手法であり, 各要素にドレーンの集水機能を付加する手法である. これに対し, 名古屋大学地盤工学研究グループでは, ドレーン内の水圧を未知数として扱うマクロエレメント法を提案している^{4), 5)}. この機能拡張により, マクロエレメント法は集水機能に加え排水機能を併せ持つようになった. このマクロエレメント法では, ドレーン内の水圧を指定する代わりに, 上下端部で水理境界条件を与える, この変化の恩恵として, ドレーン頭部の水圧を低下させるだけで, 真空圧密工法を容易にシミュレーションすることが可能となった. また, 本稿で取り上げる気水分離型の真空圧密工法と通常型の真空圧密工法の差異も, ドレーン頭部の水圧をそれぞれの条件に見合ったように与えるだけで容易に表現することが可能である.

図 1 に解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す. ピートと粘土からなる互層地盤を想定した. 構成式には骨格構造概念に基づく弾塑性構成式 **SYS Cam-clay model**⁷⁾を用いた. 材料定数と初期値は, 原地盤については **Nguyen et al. (2015)**⁸⁾が決めた値を用い, 盛土部分については **酒井ら (2011)**⁹⁾が決めた値を用いた. ピート地盤を想定したのは, 気水分離型真空圧密工法は大沈下が生じるほど, 効果が顕著に表れるためである. また, この点に付随して, 同工法の効果を正確に把握する上で, **GEOASIA** が有限変形理論に基づいているという点も重要な要素である.

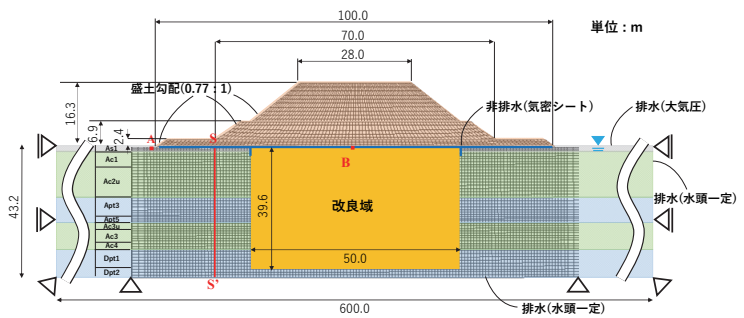


図 1 有限要素メッシュと境界条件

解析ケースは, **Case 1: バーチカルドレーンのみ (以下, ドレーンのみ)**, **Case 2: バーチカルドレーン+通常型真空圧密 (以下, 通常型)**, **Case 3: バーチカルドレーン+気水分離型真空圧密 (以下, 気水分離型)** の 3 通りである. ドレーンは幅 100mm, 厚さ 5mm, 透水係数 $1.0 \times 10^0 \text{ cm/sec}$ の帯状ドレーンを想定し, 改良深度は 40m, ドレーンピッチは 1.0m とした. Case 2 と Case 3 では気密シートを表現するために, 地盤と盛土の境界部分などを非排水境界に設定した. マクロエレメントの境界条件については, 下端は一律に非排水境界とし, 上端はケース毎に以下のように設定した.

<ドレーン頭部の水理境界条件>

Case 1 (ドレーンのみ): 水平ドレーンが設置され, 水平ドレーン内が静水圧分布をしており, かつその出口が図 1 の点 A 付近にあると仮定して, 点 A と同じ全水頭を与える排水境界

Case 2 (通常型): 点 A に真空ポンプが設置されており, 真空ポンプとドレーンの間が静水圧分布をしていると仮定して, 点 A の全水頭より真空ポンプによる減圧 (-90kPa) 分だけ低い全水頭を与える排水境界

Case 3 (気水分離型): 地盤と盛土の間に, 沈下に追従する気水分離タンクが設置されていると仮定し, 大気圧より真空ポンプによる減圧 (-90kPa) 分だけ低い圧力を与える排水境界

Case 2 と Case 3 の施工過程として, 以下を想定した.

① 真空のみ (20 日間), ② 盛土载荷 (28 日間で所定の高さまで段階载荷), ③ 盛土荷重+真空放置 (真空を掛けたまま 34 日間放置), ④ 盛土荷重のみ (真空ポンプを停止し, 放置)

比較がしやすいように, Case 1 は 20 日間放置してから, 盛土载荷を始めた. Case 3 は真空ポンプ停止時に, ドレーン頭部の圧力を 0kPa まで戻した後に, 気水分離タンクとポンプの繋がりを絶つ場合を想定して, ドレーン頭部の水理境界条件を非排水境界条件に切り替えた. また, 盛土の各構築段階において, 盛り立て直後の盛土高が各ケースで一致する

ように要素を加えた。

3. 解析結果 図2と3に、図1の点B (Case 2と3ではシート中央直下)における沈下量と間隙水圧の経時変化をそれぞれ示す。注目すべきは、Case 2では沈下に伴って水圧が上昇するのに対し、Case 3では-90kPaに圧力が保たれている点である。Case 2における水圧の上昇量は沈下量×水の単位体積重量にほぼ等しい値となっている。Case 2では真空ポンプ停止直前に7mを超える沈下が生じているため、シート直下の圧力は-20kPaを上回るレベルまで増加している。図4に真空ポンプ停止直前の間隙水圧分布を示す。改良域全体に渡って、Case 2よりもCase 3の方が高い減圧効果が現れている。本研究で用いた解析手法ならびに解析条件によって、気水分離型真空圧密工法を再現可能であることが分かる。

続いて、各ケースの変形の差異について比較する。沈下量はCase 3, 2, 1の順で大きくなっている。Case 2よりもCase 3の方が、沈下が大きいのは、減圧の効果がより高く得られているためである。これに加え、Case 2がCase 1より沈下が大きくなっている点にも注意が必要である。これは、通常型の真空圧密は沈下に伴ってシート直下の圧力が増加してしまう

が、あくまでも減圧の効果は効いていることを示している。図3を見ると、Case 1においても沈下に伴って点Bの水圧が上昇している点や、Case 2において、真空ポンプの停止を想定してドレーン頭部の水頭を元の値まで戻すと、点Bの水圧が90kPa加算され、ほぼ一定値を保つ点を見ても、通常型の真空圧密工法が大沈下時でも減圧効果を発揮していることが分かる。真空ポンプ停止後の沈下挙動を比べると、Case 3はほぼ残留沈下を生じておらず、より高い効果が発揮されていることを確認できるが、一方で、Case 2でも残留沈下が抑制されていることが分かる。図5に盛土载荷終了時のS-S'断面の側方変位を示す。盛土载荷によるはらみ出しを、真空圧密による引き込みが相殺する効果が、Case 3において最も生じているが、やはりCase 2でも大きな効果が表れている。

4. おわりに 本稿では、ドレーンの集排水機能を有するマクロエレメント法を搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA** を用いて、気水分離型真空圧密工法の数値シミュレーションが実施できることを示した。また、解析の結果、気水分離型真空圧密工法がより高い減圧効果を発揮できることを示した。一方で、通常型の真空圧密工法でも、大沈下が生じる場合においても減圧の効果が発揮されることも示した。ここで示した解析ケースはあくまでも一例であるから、費用面や工期の制約などを含め、どちらの工法がより適しているかは、状況によって異なると思われる。より適切な工法選択のために、本稿で示した手法による数値解析的予測は有効な手段となり得るであろう。

参考文献 1) 今井 (2005): 「真空圧密工法」のさらなる発展に向けて—真空圧を利用した地盤改良の原理とその適用—, 土木学会論文集, 798/V1-68, 1-16. 2) 高坂ら (2016): 気水分離型真空圧密工法の適用事例, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第54号, 87-92. 3) 関口秀雄ら (1986): 局部载荷を受けるパーティカル・ドレーン打設地盤の変形解析, 第31回土質工学会シンポジウム論文集, 111-116. 4) Yamada et al., (2015): Macro element method with water absorption and discharge functions for vertical drains, *S&F*, 55(5), 1114-1129. 5) Noda et al., (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *S&F*, 45(6), 771-790. 6) Noda et al., (2015): Study on the pore water pressure dissipation method as a liquefaction countermeasure using soil-water coupled finite deformation analysis equipped with a macro-element method, *S&F*, 55(5), 1129-1138. 7) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, 42(5), 47-57. 8) Nguyen et al. (2015): Simulation and evaluation of improvement effects by vertical drains/ vacuum consolidation on peat ground under embankment loading based on a macro-element method with water absorption and discharge functions, *S&F*, 55(5), pp. 1044-1057. 9) 酒井ら (2011): 地震後に発生した傾斜地盤上盛土の大崩壊に関する水～土連成有限変形解析による再現, 地盤工学ジャーナル, 7(2), 421-433.

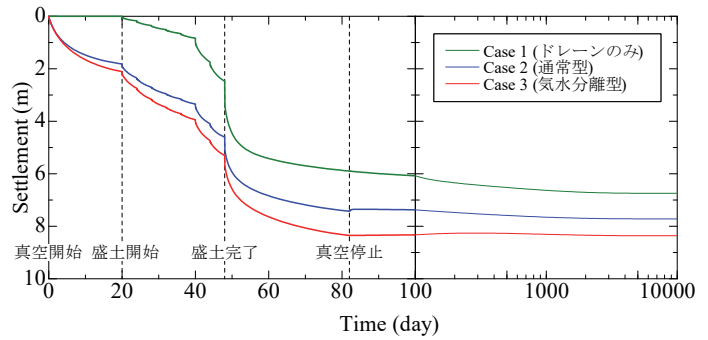


図2 時間～沈下関係 (点B)

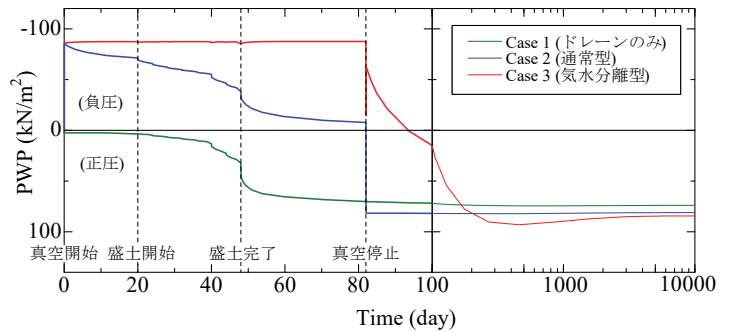


図3 時間～水圧関係 (点B)

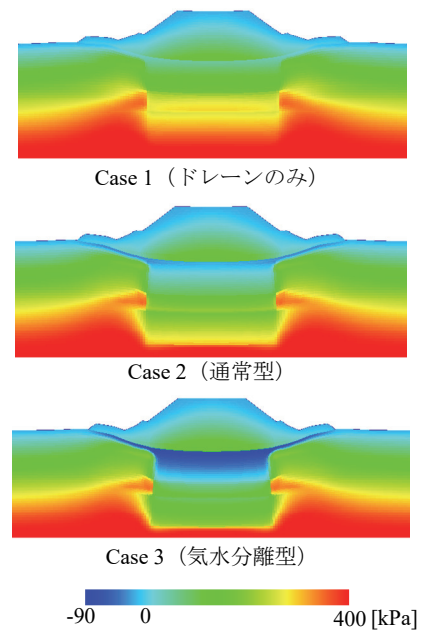


図4 水圧分布 (真空停止直前)

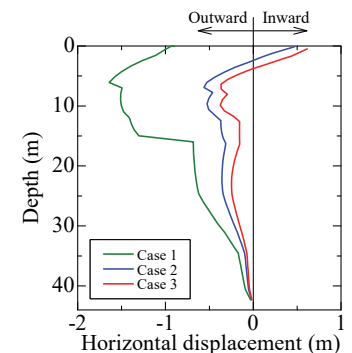


図5 S-S'断面の側方変位 (盛土完了時)