

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

Numerical simulation on steam-water separator type vacuum consolidation method by using a soil-water coupled finite deformation analysis code equipped with macro-element method

肥後隼大¹, 山田正太郎¹, 野田利弘², 中野正樹¹

1 名古屋大学大学院・工学研究科土木工学専攻・higo.hayata@i.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・減災連携研究センター

概 要

真空圧密工法では、沈下に伴い気密シート直下の水圧が増加する。これを課題と捉え、気水分離型真空圧密工法が開発された。これまでに、同手法が高い減圧効果を発揮することは実証されているが、同工法の変形抑制効果については議論されていない。そこで、本研究では、同工法の変形抑制効果を明らかにすることなどを目的に、バーチカル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搭載した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA** を用いて数値シミュレーションを実施した。その結果、次の知見が得られた。1) 気水分離型真空圧密工法は、高い変形抑制効果を有している。特に、高いプレロード効果を有するため、真空ポンプ停止後の沈下を顕著に抑制する。2) 一方で、通常型真空圧密工法も側方変位の抑制などに対し高い効果を発揮する。これは、沈下に伴って気密シート直下の水圧が上昇しても、真空ポンプにより作用させたのと同等の減圧効果が維持されているためである。3) 通常型・気水分離型ともに、既往の施工実績より短期での施工が可能である。また、これらの議論を通じ、本論文で用いた数値解析手法が、適切な工法選択やより経済的な施工条件の探索のために有効であることを示した。

キーワード：真空圧密，気水分離，マクロエレメント

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、気水分離方式¹⁾と称される真空圧密工法が提案された。この方法では、気密シート直下に気水分離タンクと称されるタンクを埋設し、このタンク内にドレーンから排出されてきた水を一旦溜める。盛土外に設置された真空ポンプとは別の系統でタンク内に溜まった水を排出することで、タンク内は常に水と空気が存在する状態に保たれる。通常の真空圧密工法では、真空ポンプとバーチカルドレーンのチューブは水で満たされているのに対し、気水分離型真空圧密工法では、真空ポンプと気水分離タンクを繋ぐチューブは空気で満たされている（もしくはほぼ真空状態にある）ため、気水分離タンク内の圧力は真空ポンプと同等の圧力になる。これが気水分離方式の基本的な仕組みである。確かに気水分離方式によって減圧効果が高ま

ることは実証されているが²⁾、この工法が変形抑制にとってどの程度の効果をもたらすのかといった点については、議論がなされていない。これは、同じ現場で多数の工法を試験的に試すことの難しさや、地盤の不均質性が等しい条件での比較を阻害することによると考えられる。そこで本論文では、気水分離方式の変形抑制効果等を明らかにするために、バーチカルドレーンの機能を模擬した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⁾を用いて、数値シミュレーションを実施した。

また、地盤工学では、過去の施工実績は同種の工事にとって大変有益であるが、一方で、それらが既成事実となり、挑戦的な施工を妨げている可能性もある。本研究では、過去に行われたことがないような速度での施工を想定して計算を実施し、数値解析による予測が施工条件の幅を広げ得ることを示す。

2. 解析条件

2.1 概説

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合わ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、上端部で水理境界条件を与える。この恩恵として、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、本論文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。

2.2 有限メッシュと基本境界条件

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 model⁷⁾**を用いた。

2.3 地盤の材料定数と初期値

本解析に用いた材料定数と状態変数の初期値を表1に、透水性に関する値を表2に示す。

表1 地盤と盛土の材料定数

	盛土	As1	Ac1	Ac2u Ac2	Ac3u Ac3 Ac4	Apt3	Apt5	Dpt1	Dpt2
弾塑性パラメータ									
λ	0.10	0.15	0.37	0.31	0.24	0.39	0.73	0.48	0.40
κ	0.003	0.020	0.055	0.040	0.030	0.045	0.045	0.050	0.045
M	1.40	1.00	1.55	1.20	1.50	2.40	2.35	2.55	2.10
N	2.09	2.05	2.90	2.75	2.35	2.88	4.10	3.40	2.90
ν	0.30	0.30	0.40	0.40	0.04	0.35	0.04	0.30	0.40
発展パラメータ									
m	1.70	0.05	2.00	2.00	1.80	2.00	2.00	1.50	2.00
a	0.30	1.00	0.37	0.40	0.50	0.25	0.35	0.30	0.40
b	1.00	1.00	0.80	0.80	0.95	0.90	0.90	0.90	0.90
c^*	0.10	1.00	0.20	0.10	0.15	0.20	0.20	0.25	0.25
br	0.30	0.10	3.50	0.05	0.05	0.03	0.07	0.05	0.10
m^*	0.50	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ρ^*	2.73	2.65	2.38	2.42	2.57	2.17	1.84	1.96	2.16

表2 地盤と盛土の透水性

	k_0 (cm/sec)	e_0	C_k
盛土	1.0×10^{-5}	Constant k	
As1	1.0×10^{-3}	Constant k	
Ac1	5.0×10^{-7}	3.09	0.260
Ac2	1.5×10^{-6}	2.48	0.220
Ac3u, Ac3, Ac4	1.0×10^{-6}	1.51	0.160
Ac2u	1.5×10^{-6}	2.48	0.220
Apt3	8.0×10^{-8}	2.89	0.298
Apt5	1.0×10^{-7}	4.53	0.500
Dpt1	1.0×10^{-6}	3.72	0.450
Dpt2	1.0×10^{-6}	2.57	0.350

原地盤については Nguyen et al. (1015)⁸⁾が舞鶴若狭自動車道向笠地区周辺に堆積する超高含水比沖積粘土・ピート地盤の不攪乱試料に対して決めた値を用い、盛土部分については酒井ら(2011)⁹⁾が能登半島に広く分布する風化した凝灰角礫岩(能登赤土)の掘削・締固め試料に対して決めた値を用いた。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。高圧縮性土は圧縮に伴う透水性の変化が顕著であることから、盛土と砂層を除く全ての層の透水性を変化させた。なお、大沈下が生じる問題を扱うため、本論文のように有限変形理論に基づいた解析が必須である。

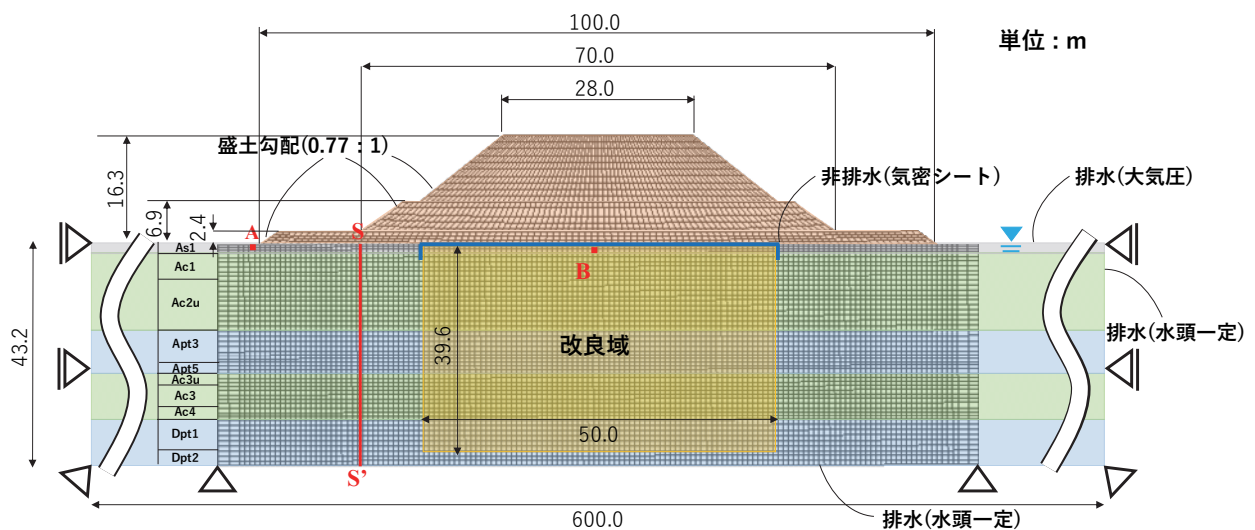


図1 有限要素メッシュと境界条件

2.4 解析ケース

基本パターンとして、以下の4ケースを設けた。

- Case 1 : 無改良
- Case 2 : パーチカルドレーンのみ
(以下、ドレーンのみ)
- Case 3 : パーチカルドレーン+通常型真空圧密
(以下、通常型)
- Case 4 : パーチカルドレーン+気水分離型真空圧密
(以下、気水分離型)

ドレーンは幅 100mm, 厚さ 5mm, 透水係数 $1.0 \times 100\text{cm/sec}$ 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。マクロエレメント法の入力パラメータである改良範囲の有効径 d_e とドレーンの等価径 d_w は, それぞれ面積を等値する換算式を用いて決めた。Case 3 と Case 4 では気密シートの敷設個所に相当する要素境界を非排水条件に設定した。マクロエレメントのドレーンに関する境界条件については, 下端は一律に非排水境界とし, 上端はケースごと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 2 (ドレーンのみ) : パーチカルドレーンの頭部は水平ドレーンに繋がれ, 水平ドレーン内が静水圧分布をしており, かつその出口が図の点 A 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 3 (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 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 4 (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 3 と Case 4 の施工過程として, 以下を想定した。

- ① 真空のみ (20 日間)
- ② 盛土構築+真空 (28 日間)
- ③ 盛土+真空 (34 日間)
- ④ 盛土のみ (沈下が収束するまで放置)

①では, はじめに1時間で所定の圧力まで減圧を行った。②における盛土構築は段階的に要素を追加した。各載荷段階において, 載荷直後の盛土高が所定の値になるように載荷 (1時間) と放置を繰り返した (したがって, 最終的な盛土高は盛土完成後に発生する沈下量に応じて異なる)。比較がしやすいように, Case 1 と 2 は 20 日間放置してから, 盛土載荷を始めた。Case 3 は真空ポンプ停止時 (④のはじめ) に, 1時間で全水頭を A 点と同じ値まで戻した。Case 4 は真空ポンプ停止時に, ドレーン頭部の圧力を同じ時間を掛けて 0kPa まで戻した後に, 気水分離タンクと真空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。

加えて, 施工日数を短くした際の真空圧密工法の有効性を確認すべく, Case 2~3 に対して, 上記①~③における各過程の所要日数を半分にした解析も行った (つまり, ①を 10 日間, ②を 14 日間, ③を 17 日間で施工)。これらの解析ケースをそれぞれ Case 2' ~4' とし, 短縮パターンと称することとする。Case 1 の短縮パターンを設けなかったのは, 後述する通り, 無改良の状態では, 基本パターンの施工速度でもすべり破壊が生じるためである。

なお, 基本パターンは, 現在実際に行われている範囲内の施工速度であるが, 短縮パターンはピート地盤に対してこれまでに実施されることがないような施工速度である。真空圧密工法では, 施工期間の短縮は真空ポンプの稼働・管理期間の短縮に直結するので, 短縮パターンのような施工が実現すれば, 施工費用の大幅な縮減が期待できる。

3. 解析結果

3.1 基本パターン

図2に点Bにおける真空ポンプ圧, 盛土高, 沈下量の経時変化を示す (盛土高は Case 4 の盛土中央部における値である)。また, 図3に点Bにおける間隙水圧の経時変化を示す。

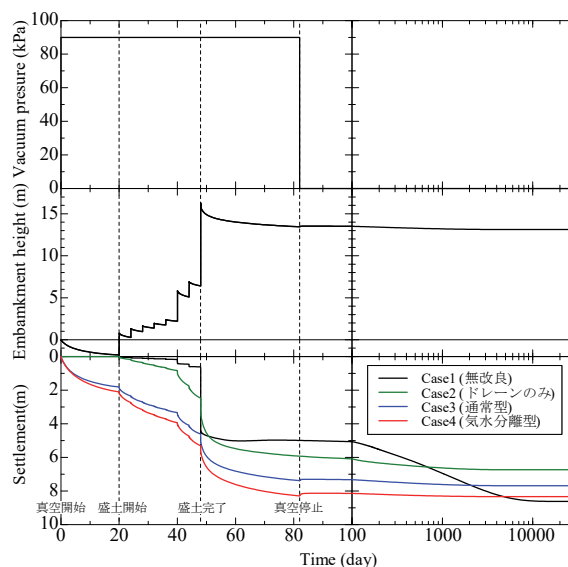


図2 載荷履歴と点Bの時間～沈下関係 (基本パターン)

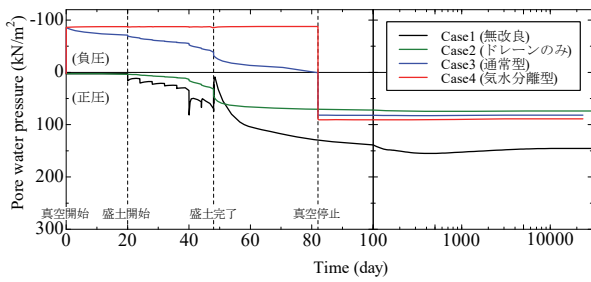


図3 点Bの時間～間隙水圧関係（基本パターン）

注目すべきは、Case 3では沈下に伴って水圧が上昇するのに対し、Case 4では-90kPaに圧力が保たれている点である。図2と図3の青線が真空停止まで同様な曲線を描いていることから分かる通り、Case 3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 3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。

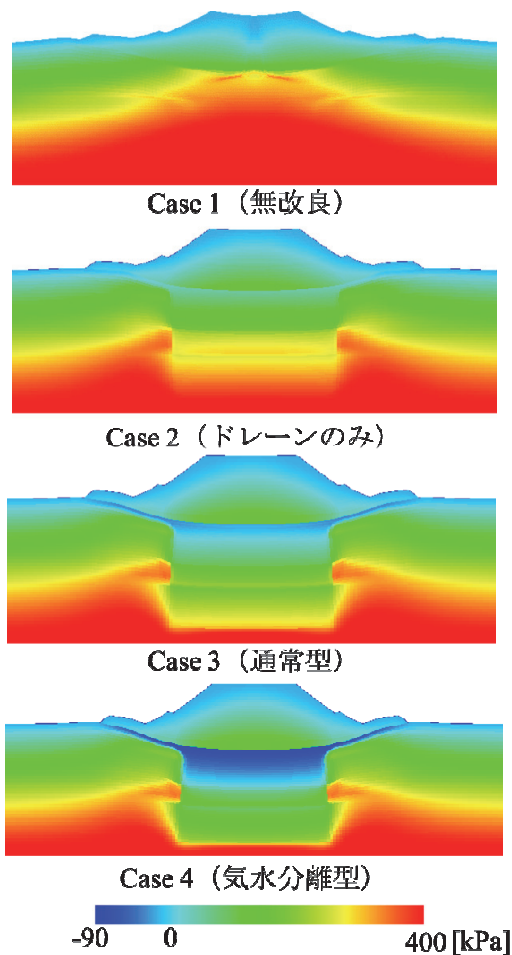


図4 真空停止直前(③終了時)の間隙水圧分布（基本パターン）

バーチカルドレーンの効果により、Case 1よりもCase 2の方が間隙水圧の消散が進行している。また、改良域

全体に渡って、Case 3よりもCase 4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、通常型真空圧密工法と気水分離型真空圧密工法の違いを再現可能であることが分かる。図5に圧密終了時のせん断ひずみ分布を示す。Case 1を見ると、地盤と盛土がすべり破壊を生じていることを確認できる。

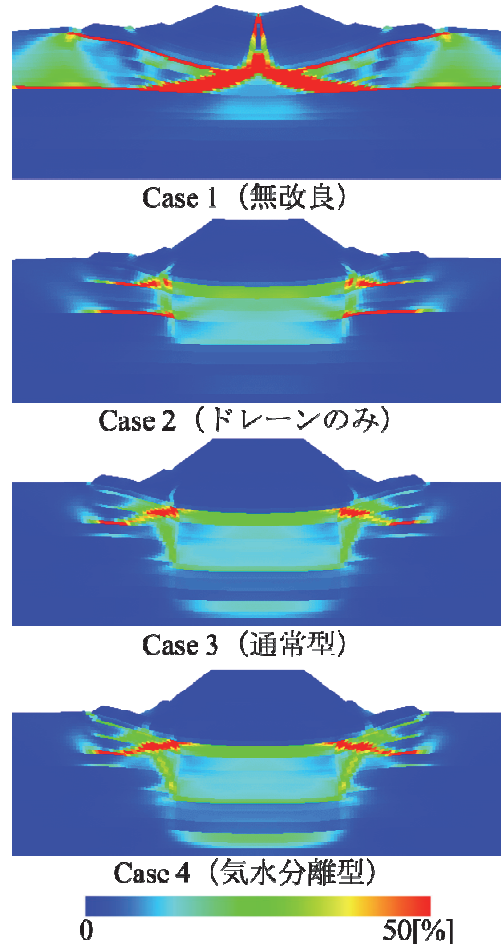


図5 圧密終了時(④終了時)のせん断ひずみ分布（基本パターン）

図2において、Case 1では、盛土の最終立ち上げ段階（48日目）で急激に沈下量が増していることから、この段階ですべりが発生したことが分かる。Case 2, 3, 4では地盤のすべりや盛土の破壊は発生しておらず、対策による効果が表れている。

続いて、各ケースの変形について比較する。沈下量はCase 1, 4, 3, 2の順で大きくなっている。Case 1の沈下量が最も大きくなったのは、地盤のすべり破壊に伴う大沈下が生じたためである。Case 3よりもCase 4の方が沈下量が大きいのは、気水分離型の方がより大きな減圧効果を有するためである。Case 3がCase 2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、通常型の真空圧密工法では、沈下に伴ってシート直下の圧力が増加してしまうが、それでもなお減圧の効果が働いていることを示している。図3を見ると、Case 2においても

Case 3 と同様に沈下に伴って点 B の水圧は上昇するため、Case 3 は Case 2 よりも常に低い水圧を示している。また、Case 3 において、真空ポンプの停止時にドレーン頭部の全水頭を A 点と同じ値まで戻すと、点 B の水圧が 90kPa 加算され、その後もほぼ一定値を保っている。このように、通常真空圧密工法は大沈下時も真空ポンプにより作用させたのと同じだけの減圧効果を確かに維持（同一深度にある地盤内の静水圧よりも真空ポンプによる減圧分だけ低い水圧を維持）していることが分かる。図 6 に盛土載荷終了時の S-S' 断面の側方変位を示す。

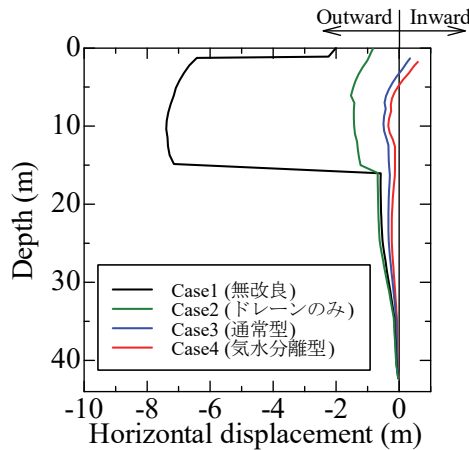


図6 盛土完了時(②終了時)の S-S' 断面の側方変位 (基本パターン)

Case 1 ではすべり破壊に起因する大きな側方変位が生じている。Case 1 と Case 2 の比較より、パーチカルドレーンのみでも側方変位の抑制効果は得られることが分かる。より緩速施工が許される状況であれば、パーチカルドレーンのみでもより高い効果が期待できる。Case 3 と Case 4 では、盛土荷重によるはらみ出しと、真空圧密による引き込みが相殺し、側方変位が抑制される効果が発揮されていることを確認できる。側方変位の抑制効果は Case 4 が最も高いが、Case 3 と Case 4 の差は Case 2 と Case 3 の差ほど顕著ではなく、通常型真空圧密工法でも高い変形抑制効果が発揮されるといえる。

以上の議論を踏まえ、以下の点を改めて強調する。世間一般には、通常型は沈下に伴い減圧効果が失われ、気水分離型は大沈下が生じても減圧効果が維持される工法として理解されているように見受けられるが、これは誤解である。正しくは、通常型が沈下量と関係無く減圧効果を保つことができる工法であり、気水分離型は沈下量×水の単位体積重量分だけより高い減圧効果が得られる工法なのである。図 6 に示す側方変位を見て、思ったよりも通常型が変形抑制に効果を発揮していると感じたならば、上記のような誤解に原因があると考えられる。

3.2 短縮パターン

図 7 に点 B における真空ポンプ圧、盛土高、沈下量の経時変化を示す（盛土高は Case 4' の盛土中央部における値である）。

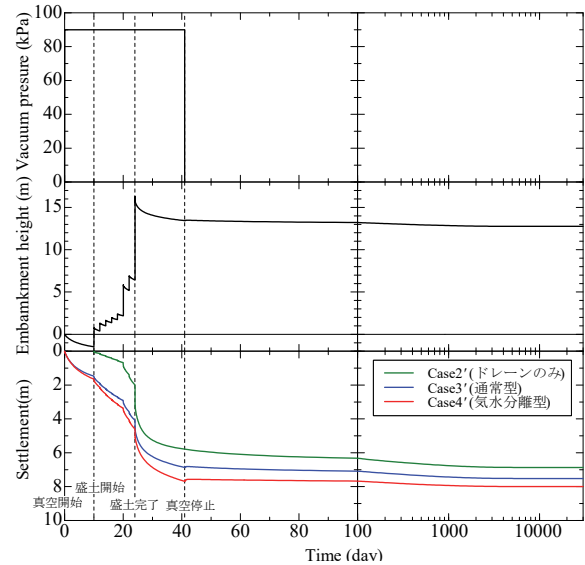
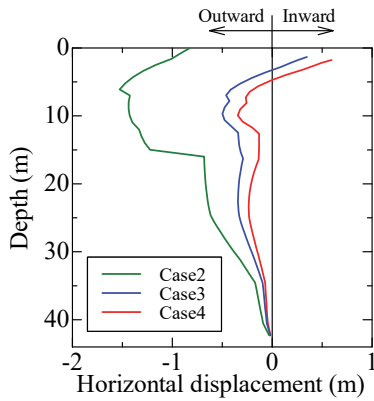
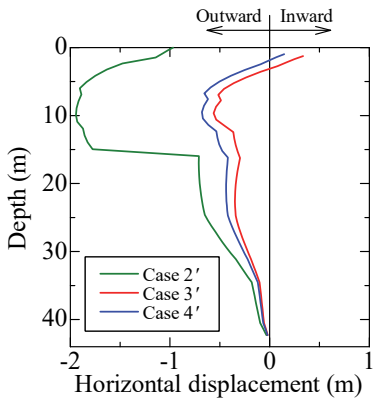


図7 載荷履歴と点 B の時間～沈下関係（短縮パターン）

図 2 と比較すると、真空圧密工法では、短縮パターンの Case 3' と 4'の方が基本パターンの Case 3 と 4 よりも最終沈下量が小さくなっている。一方、ドレーンだけのケースを比較すると、基本パターンの Case 2'の方が短縮パターンの Case 2'よりも最終沈下量が小さくなっている。真空圧密工法で、施工期間を短くすると最終沈下量が減るのは、各載荷段階で、所定の高さまで盛土を立ち上げるため、沈下量が小さい状態で盛土を構築した方が、結果的に盛土荷重が小さくなる（盛土量が減る）ためである（道路盛土に対するオーバーレイまで考慮すれば結果は変わり得る）。一方、ドレーンだけの場合に、施工期間を短くすると沈下量が増えるのは、以下で示す通り改良効果が不十分であるため側方変位に起因する即時的な沈下量が増すためである。図 8 に Case 2~4 と 2'~4' の盛土載荷終了時の S-S'断面の側方変位をそれぞれ示す。ドレーンだけのケースでは、短縮パターンの方が側方変位が大きい。Case 2' では、特に約 17m 以浅、すなわち Ac1 および Ac2u 層において顕著な側方変位が発生している。一方で、真空圧密工法では、工期を短縮することで、側方変位量は増すものの、ドレーンだけの場合に比べればその差は小さく、短縮パターンでも高い改良効果が発揮されている。また、通常型と気水分離型の差は、施工速度を増してもさほど変化しない。



(a) 基本パターン

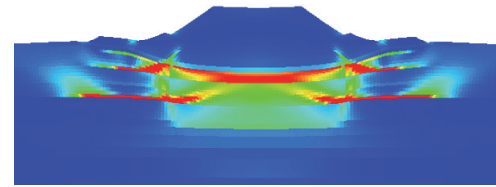


(b) 短縮パターン

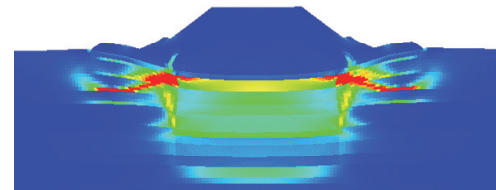
図8 盛土完了時(②終了時)のS-S' 断面の側方変位

図9に圧密終了時のせん断ひずみ分布を示す。図5と比較すると、ドレーンのみのケースでは、短縮パターンの方がAc1層やAc2u層でせん断ひずみが顕著に発生しているが、真空圧密工法では基本パターンと短縮パターンで顕著な差が見られない。上記の事項は、真空圧密工法を適用する場合に、許容される変形量によっては、既往の事例よりも大幅に施工期間を短縮できる可能性を示している。図10に真空ポンプ停止後の時間～沈下関係を示す(④の開始時点を経過時間と沈下量の基準とする)。真空圧密工法を適用したパターンでは、気密シート直下の圧力を回復したことによるリバウンドが一旦生じた後に沈下が発生している。総じて、工期を短縮することで真空ポンプ停止後の沈下量は大きくなっている。通常型に比べた気水分離型の効果は、図9に示す側方変位では小さいようにも感じられるが、図10に示す真空ポンプ停止後の沈下量ではより有意な違いをもたらしている。特に、Case 2では真空ポンプ停止後の沈下量が5cm以内に収まっている。真空圧密による一時的な減圧はプレロードと等価な意味を持つから、気水分離型ではより高いプレロード効果が発揮されると考えれば理解しやすい。また、Case 3とCase 2'は沈下挙動が偶然にもほぼ一致している。これは、例えばCase 4を基準にして、Case 3のように通常型を採用してコストを抑えるか、Case 4'のように工期を短縮してコスト削減するかといった議論を生

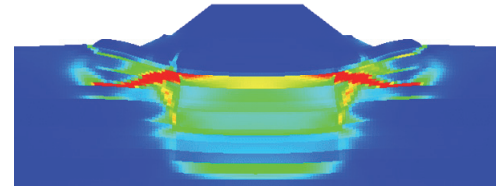
む。当然のことながら様々な制約の中で現場個々に総合的に判断されるべきものであるからここではこれ以上踏み込んだ議論は行わない。確実なことは、本研究で用いた解析ツールがそれらの議論を可能にするということである。



Case 2' (ドレーンのみ)



Case 3' (通常型)



Case 4' (気水分離型)



図9 圧密終了時(④終了時)のせん断ひずみ分布 (短縮パターン)

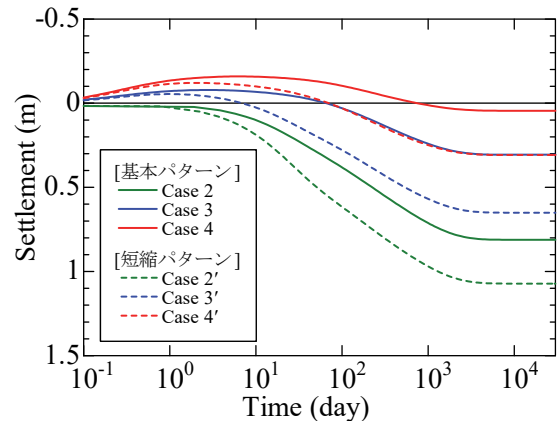


図10 真空停止後(④)の時間～沈下関係

4. おわりに

本論文では、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、盛土構築による変形・破壊挙動と真空圧密工法を軸とした対策効果の数値シミュレーションを実施した。対象としたのは、無改良状態ですべり破壊を生じるような超高含水比沖積粘土・PEAT地盤と施

工条件である。主に気水分離型真空圧密工法を含む対策工法の効果の検証と、対策効果に与える施工期間短縮の影響について議論した。本論文で得られた主要な結論を以下に列挙する。

- 1) 施工速度次第では、バーチカルドレーン工法のみでも、すべり破壊を回避できる。
- 2) 通常型真空圧密工法では、沈下に伴って気密シート直下の水圧が増加するが、そのような状況下でも、真空ポンプで生じさせた分の減圧効果が発揮されている（同一深度にある地盤内の静水圧よりも真空ポンプによる減圧分だけ低い水圧を維持している）。このため、通常型真空圧密工法は高い変形抑制効果を有している。
- 3) 気水分離型真空圧密工法は通常型真空圧密工法よりも高い減圧効果を発揮する。具体的には、真空ポンプによる減圧分よりもさらに沈下量×水の単位体積重量分の減圧効果が発揮される工法である。したがって、通常型真空圧密工法よりも高い変形抑制効果を有するが、その効果は真空ポンプ停止後の沈下量抑制（道路盛土における供用後の残留沈下抑制など）に対し顕著に発揮される。これは、気水分離型がより高いプレロード効果（＝一時的な減圧効果）を有するためである。
- 4) 真空圧密工法は、通常型・気水分離型ともに、既往の施工実績よりも工期を短縮できる可能性がある。
- 5) 本論文で用いた解析手法は軟弱地盤上の盛土載荷による変形・破壊問題にとって有効な予測手段となり得る。

最後に、今後、本論文をもとに、数値解析に基づいた挑戦的施工が実際に試みられることに期待する。

参考文献

- 1) 今井五郎:「真空圧密工法」のさらなる発展にむけて—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, No. 798/VI-68, pp. 1-16, 2005.
- 2) 高坂敏明, Teerachaikulpanich N.: 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, pp. 87-92., 2016.
- 3) 関口秀雄, 柴田徹, 藤本朗, 山口博久: 局部荷重を受けるバーチカル・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, pp. 111-116., 1986.
- 4) Yamada, S., Noda, T., Tashiro, M. and Nguyen, S. H.: Macro element method with water absorption and discharge functions for vertical drains, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 5, pp. 1114-1129, 2015.
- 5) 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-slay model, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 6, pp. 771-790, 2008.
- 6) Noda, T., Yamada, S., Nonaka, T. and Tashiro, M. : 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, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 5, pp. 1129-1138, 2015.
- 7) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57, 2002.

- 8) Nguyen, S. H., Tashiro, M., Inagaki, M., Yamada, S. and Noda, T. : 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, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 5, pp. 1044-1057, 2015.
- 9) 酒井崇之, 中野正樹: 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*, Vol. 7, No. 2, pp. 421-433, 2011.