

集排水機能を具備するマクロエレメント法の準静的問題における近似精度の検証

名古屋大学 (正) ○野中俊宏 (正) 山田正太郎 (フェロー) 野田利弘

1. はじめに バーチカルドレーンの排水効果を近似的に水～土連成解析に取り入れる手法としてマクロエレメント法¹⁾と呼ばれる一種の均質化法がある. 著者らはウェルレジスタンス現象の発生を合理的に扱えるよう, 同手法にドレーンの排水機能を付加するなどして機能拡張を図った²⁾. 本稿では, 高機能化したマクロエレメント法の準静的問題における近似精度について検証する.

2. 解析条件 解析には, 著者らの提案するマクロエレメント法を組み込んだ水～土連成解析コード **GEOASIA**^{3), 4)}を用いた. 盛土直下の粘土地盤にキャップ付きドレーンを用いた真空圧密工法による地盤改良を施した場合を解析対象として想定した. 粘土層の間には厚さ 3m の透水性の高い砂層が介在している. 図 1 と 2 に 3 次元モデル (以下厳密モデルと称する) とマクロエレメント法を用いた 2 次元平面ひずみモデル (以下近似モデルと称する) の有限要素メッシュおよび境界条件をそれぞれ示す. 厳密モデルでは, ドレーンに相当する要素の透水性を高めた. 盛土の延長方向に規則的に同一のパターンが繰り返されると仮定して, y 方向の解析領域をドレーンピッチの半分の長さ (0.6 m) に設定した. z-x 面上の節点の y 方向の運動を固定することで, 巨視的に平面ひずみ条件が満たされるようにした. 近似モデルでは, 図 2 の青枠で囲った領域内の要素にマクロエレメント法を適用した. 各種材料定数と初期値は文献^{2), 5)}に示す通りである. 深度方向へは, 地表側, 底面側いずれも 2m 分をシール層として確保した. この改良範囲に幅 $a = 0.1$ m, 厚さ $b = 0.005$ m, 透水係数 $k_w = 100$ cm/s の帯状ドレーンが $d = 1.2$ m ピッチで正方形配置される場合を想定した. 解析は 4 ケース実施した. Case 1 では無改良地盤, Case 2 ではドレーンのみ打設した場合, Case 3 では真空圧密を併用した場合, Case 4 では更に中間砂層からの間隙水の吸込対策として, 砂層とその上下 1m 分を通過する部分のドレーンに遮水シールを施した場合を想定した. Case 3 と 4 では, 盛土載荷前にドレーン上端部の水圧を 1 日かけて 90 kN/m² 減少させ, 真空圧密開始から 140 日後にドレーン上端部の水圧を元に戻した. いずれのケースでも計算開始から 20 日後に, 高さ 6 m の盛土を 30 日間かけて載荷し, 圧密が完了するまで放置した (Case 1 と 2 では, はじめ 20 日間は無載荷状態のまま放置した).

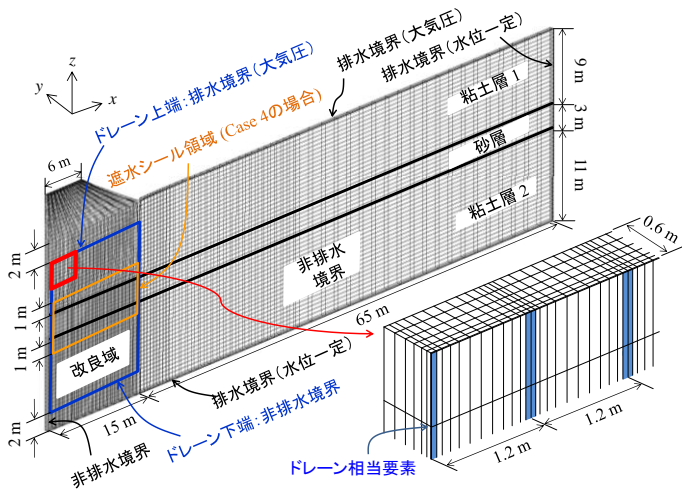


図 1 有限要素メッシュおよび境界条件 (厳密モデル)

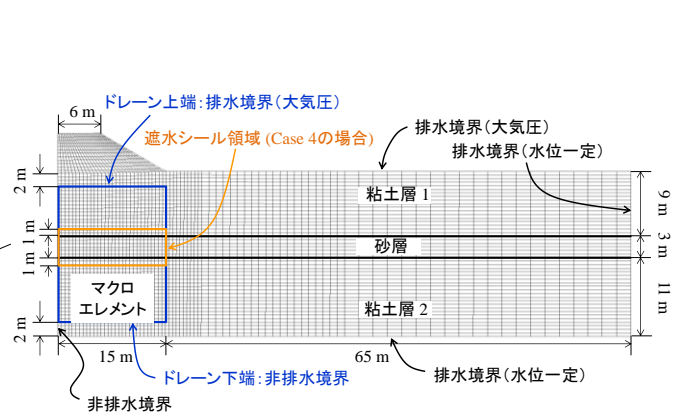


図 2 有限要素メッシュおよび境界条件 (近似モデル)

3. 解析結果 図 3 に, Case 1~4 における, 間隙水圧変化量について, 厳密モデルと近似モデルの解析結果を比較したコンター図をそれぞれ示す. 厳密モデルでは, ドレーンの位置から奥行方向 (y 方向) に 0.4 m 離れた断面の解析結果を示している. Case 1 では, 粘土層において盛土載荷により上昇した間隙水圧が 140 日経過してもほとんど消散していない. 一方, Case 2 では, 圧密の促進効果が表れている. Case 3 では, 盛土載荷前の真空圧密により, 粘土層 1 が著るに減圧されているが, 中間砂層から大量の水を吸い込む影響で, 粘土層 2 では十分な減圧が生じていない. また, 中間砂層では, 改良域外まで減圧が生じてしまっている. このようなウェルレジスタンスの発生による改良効果の低減を表現できるのは, 著者らの提案するマクロエレメント法がドレーンの排水機能を具備しているためである. Case 4 では, 中間砂層からの間隙水の吸込みが抑制された結果, 粘土層 2 にまで減圧効果が及んでいる. 水圧の消散は Case 3 よりさらに早く, 粘土

層 1, 2 とともに圧密を促進する効果が高まっている。また、砂層の水圧が改良域外まで広がることもない。マクロエレメント法を用いた近似モデルの解析結果は、いずれのケース、いずれの時刻においても、厳密モデルの解析結果と近い値を示している。

図 4 に地表面沈下量を示す。Case 3 と 4 では、近似モデルが厳密モデルよりも圧密の進行を若干早く予測する傾向がみられるが、これは厳密モデルにおいて、Case 3 と 4 が他のケースに比べてドレーンの直径方向に高い不均質性を有するた

めである。マクロエレメント法では剛性の変化を要素内で平均的に扱うため、一本のドレーン周りの不均質性が高まるほど、近似精度は低下する可能性があるが、それでも地表面形状は両モデルでほぼ一致している。また、20 日後すなわち真空圧密の単独実施が終了する時点において、Case 3 と 4 の地表面形状を比較すると、改良域内では Case 4 が Case 3 の沈下を上回っているのに対し、改良域外では Case 3 の方が Case 4 の沈下を上回っている。これは図 3 で確認した通り、砂層が介在する影響で、Case 3 では、粘土層における減圧効果が低下する一方で、改良域外の砂層の水圧が低下するのに対し、Case 4 では、遮水シールが機能して、そのような影響が現れなくなったためである。近似モデルはそのような特徴も正確に捉えることができている。

最後に、厳密モデルおよび近似モデルにおける計算時間を比較する。表 1 に両モデルの計算時間を示す。これらの計算時間はドレーンを用いた Case 2~4 の平均値である。近似モデルの計算時間は、厳密モデルと比較して約 180 分の 1 に短縮されている。高機能化したマクロエレメント法の適用により計算効率の大幅な向上がもたらされる。

4. まとめ 本稿で示した通り、著者らが高機能化を図ったマクロエレメント法は、計算コストを大幅に削減しつつ、複数本のドレーンを有する大規模でかつ盛土載荷を併用した真空圧密工法のように複雑な載荷履歴を受ける問題においても高い近似精度を発揮する。なお、同手法は動的問題においても高い近似精度を発揮する⁶⁾。

謝辞 本研究は科学研究費補助金（基盤研究(A)：課題番号 25249064）の補助を受けて実施した。

参考文献 1) 関口ら (1986): 局部載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発表論文集, pp.111-116. 2) Yamada et al., (2015): Macro element method with water absorption and discharge functions for vertical drains, *S&F*, 55(5), 1114-1129. 3) 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. 4) 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. 5) 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. 6) Nonaka et. al., (2017): Verification of a macro-element method in numerical simulation of the pore water pressure dissipation method -a case study on liquefaction countermeasure with vertical drains under embankment-, *S&F*, (掲載決定).

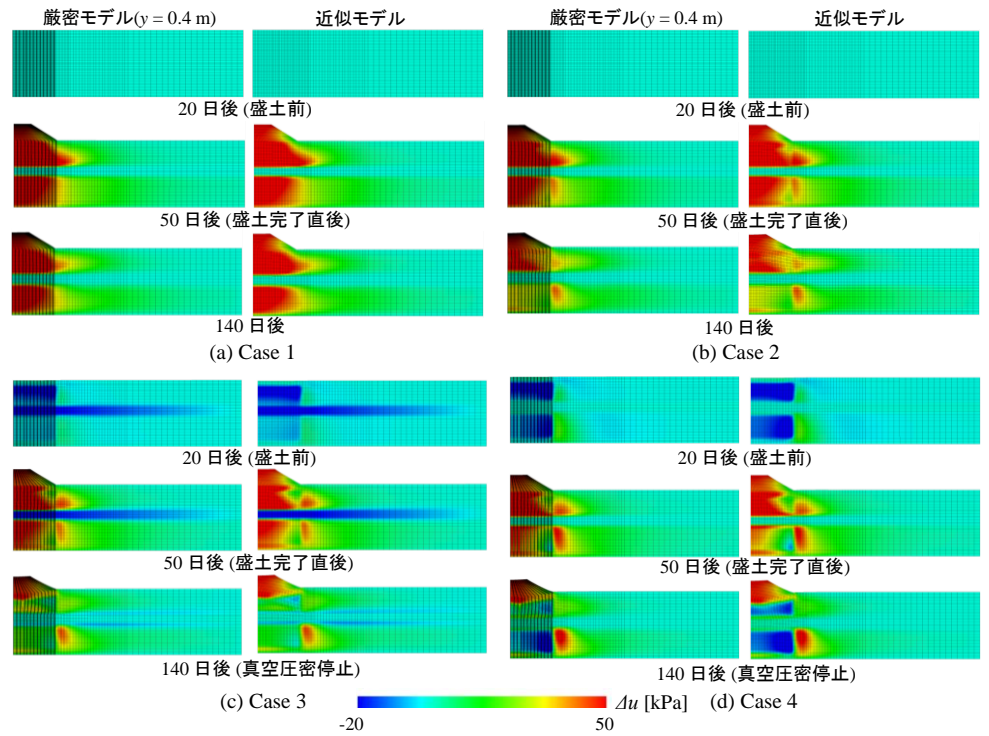


図 3 水圧変化量

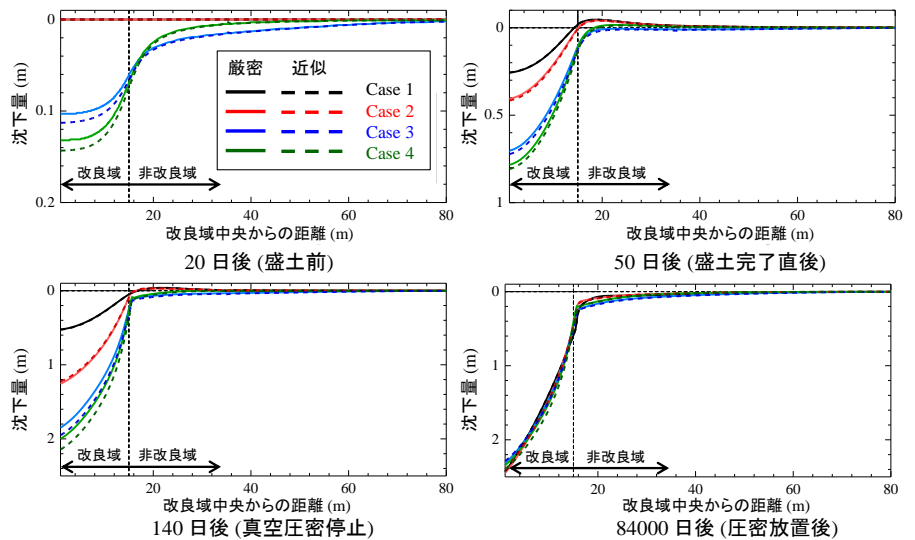


図 4 地表面沈下量

表 1 計算時間

モデル	計算時間
厳密モデル	1,323,700 秒 (約15日)
近似モデル	7,330 秒 (約2時間)