

過剰間隙水圧消散工法の液状化対策効果の予測に関するマクロエレメント法の近似精度の検証

過剰間隙水圧消散工法 有効応力解析法 マクロエレメント

名古屋大学 国際会員 ○野中俊宏
山田正太郎 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^{1,2)}と呼ばれる一種の均質化法がある。これは準静的問題に適用が限られてきたが、著者らは慣性力対応の水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**³⁾に機能拡張を図った同手法²⁾を組み込むことで、過剰間隙水圧消散工法の液状化対策効果を把握する新たな解析手法を提案した⁴⁾。本稿では、盛土直下に過剰間隙水圧消散工法を適用した場合を例に、提案手法を用いた2次元平面ひずみ解析結果と、メッシュ分割によりドレーンを厳密に表現した3次元解析結果を比較し、提案手法の精度を検証する。なお、動的問題に対するマクロエレメント法の近似精度について検証した事例は他に無い。

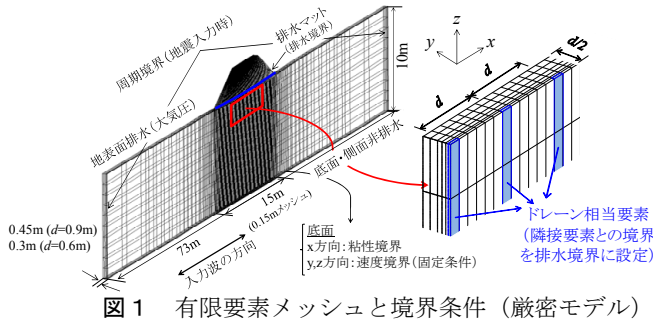


図1 有限要素メッシュと境界条件 (厳密モデル)

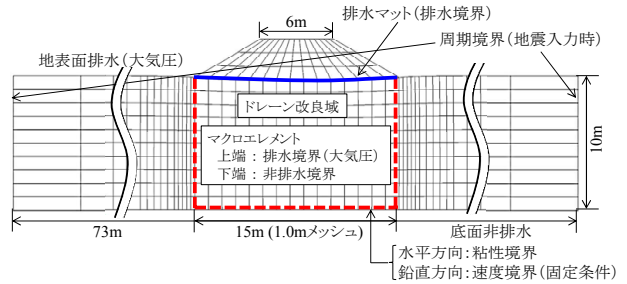


図2 有限要素メッシュと境界条件 (近似モデル)

2. 解析条件

盛土直下の緩い砂地盤に矩形断面を有するグリッドドレーン⁵⁾ (幅 150mm, 厚さ 50mm) が正方形配置されている場合を解析対象として想定した。メッシュ分割により厳密にドレーンを表現する3次元解析 (以下厳密モデルと称する) では、盛土と直交する方向のドレーン1列を対象とし、さらに対称性を仮定して、ドレーン中央断面からピッチ半分の距離までの断面をモデル化した。図1は3次元解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を示す。ドレーンに相当する要素については、地盤と同じ材料とし、水平方向に接する要素との間に排水境界を設定することでドレーンの集排水機能を表現した。排水境界上ではドレーン部の上端を大気圧に設定し、地表面の沈下を考慮して静水圧を深さ方向に分布させている。

図2はマクロエレメント法を適用した2次元解析 (以下近似モデルと称する) に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を示す。破線で囲った領域内にマクロエレメント法を適用した。提案したマクロエレメント法では、メッシュ分割幅をドレーン配置やピッチと切り離して設定できるため、ピッチを変えた計算も比較的粗い1つのメッシュで実施できる。

水平成層地盤上に高さ3mの盛土要素を追加し、定常状態に落ち着くまで圧密計算を行った。その後、作成した盛土-地盤系に、図3に示す三連動地震を、粘性境界を介して水平一方向に入力し、過剰間隙水圧が完全に消散するまで圧密放置した。表1と2に地盤と盛土の材料定数および初期値を示す。また、表3はドレーン (マクロエレメント) の材料定数を示す。ドレーンの有効直径 d_e およびドレーンの直径 d_w は、ドレーン1本あたりの改良面積およびドレーンの断面積から換算した。無改良、ピッチ0.9m、ピッチ0.6mの3ケースを実施し厳密モデルと近似モデルの解析結果をそれぞれ比較した。ドレーンによる改良の効果のみを純粹に把握するため、無改良ケースにおいても盛土と地盤の境界部分を排水境界とした。

3. 解析結果

図4は、地震動入力完了直後の過剰間隙水圧分布を示す。無改良ケースを除き、厳密モデルでは奥行方向に異なる3つの鉛直断面 (x-z断面) の分布を示す。無改良の場合は、地盤全体で間隙水圧が上昇しているが、改良ケースでは、ドレーンの排水効果によって盛土直下の水圧上昇が抑制されていることが確認できる。また、ドレーンピッチが細かい程、水圧の上昇抑制効果は大きくなる。厳密モデルでは、ドレーン近傍で抑制効果が大きく発揮され、ドレーンから離れるにつれて効果が小さくなるが、近似モデルの水圧分布は、ピッチ0.9mの場合、ドレーンから0.3m程度離れた位置の水圧分布に、ピッチ0.6mの場合、ドレーンから0.2m程度離れた位置 (いずれもドレーン中央からピッチの1/3離れた位置) の水圧分布に近い値を示している。以上より、ピッチに応じた水圧上昇抑制効果が表現できていることが分かる。

図5は、盛土中央直下の時間-過剰間隙水圧比関係を示す。厳密モデルでは、ドレーン中央からピッチの1/3離れた

表1 地盤及び盛土の材料定数

	地盤	盛土
(弾塑性パラメータ)		
圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.050	0.110
膨潤指数 \bar{r}	0.016	0.020
限界状態定数 M	1.00	1.35
NCLの切片* N	1.98	1.71
ポアソン比 ν	0.3	0.3
(発展則パラメータ)		
構造低位化指数 a ($b=c=1.0$)	2.20	2.00
正規圧密土化指数 m	0.10	0.50
回転硬化指数 b_r	3.50	0.10
回転硬化限界定数 m_b	0.70	0.40
透水係数 k (cm/sec)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.67

* $q = 0, p' = 98.1$ kPaにおける繰返し粘土の正規圧密線上

表2 地盤および盛土の初期値

	地盤	盛土
構造の程度 $1/R_0^*$	4.0	1.1
過圧密比 $1/R_0$	1.2	42.5
側圧係数 K_0	0.8	0.8
異方性の程度 ζ_0	1.00	1.00
比体積 e	1.00~1.20	0.65~0.72

表3 マクロエレメントの材料定数

ドレーンピッチ d (m)	0.9, 0.6
ドレーンの有効直径 d_e (m)	1.02, 0.68
ドレーンの直径 d_w (m)	0.10
透水係数 k_w (cm/sec)	7.0×10^2

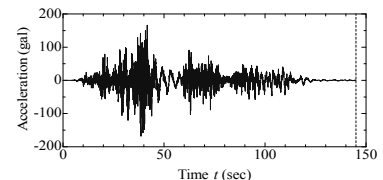


図3 入力地震動

位置の値を示す。無改良ケースでは、地震終了時まで水圧比は高い値を示す。一方、改良ケースでは、入力加速度が最大値を示すまでは過剰間隙水圧比が上昇するものの、その後は地震中であっても時間経過とともにドレーンの排水効果が発揮されて水圧が消散していることが確認できる。また、ピッチが細かい方が水圧の上昇が顕著に抑制されている。近似モデルはいずれの深さにおいても厳密モデルの水圧変動を定量的にも近似している。

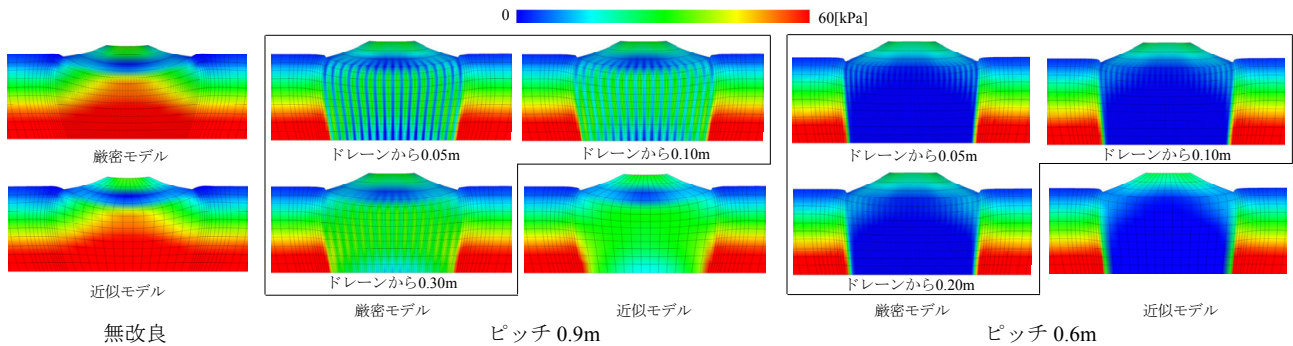


図4 過剰間隙水圧分布（地震動入力完了直後）

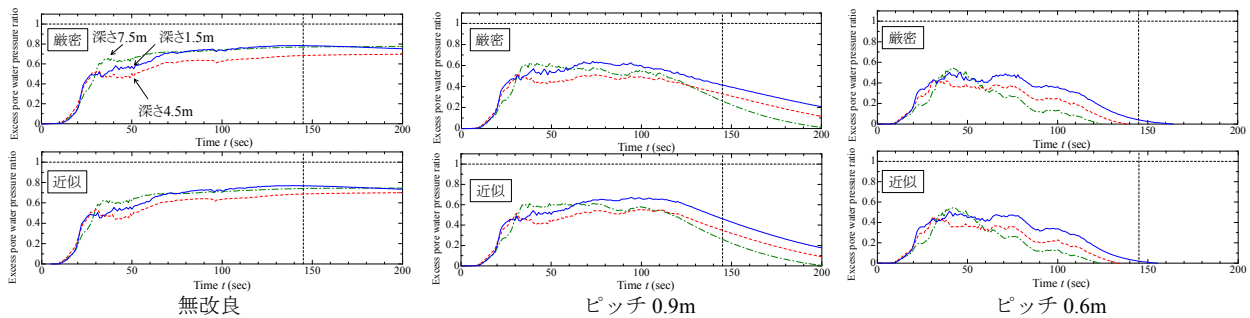


図5 時間—過剰間隙水圧比関係

次に地盤の変形について比較していく。図6は盛土天端中央における時間—沈下量関係を、図7は圧密放置後の改良域の変形をそれぞれ示す。厳密モデルにおける沈下量は、ドレーンに接する節点の値である（奥行方向の他の節点でもほぼ同じ）。無改良ケースでは、水圧上昇を伴って有効応力が減少し、せん断剛性を失うために、大きな側方流動およびそれに伴う沈下が発生するが、ドレーンによる改良によって、有効応力の減少が食い止められ、土がせん断抵抗を発揮するため、地盤の変形を抑えることができている。近似モデルは、過剰間隙水圧消散工法による地盤の変形抑制効果についても厳密モデルを精度良く近似している。また、ドレーンピッチに応じた対策効果の違いもうまく近似できている。

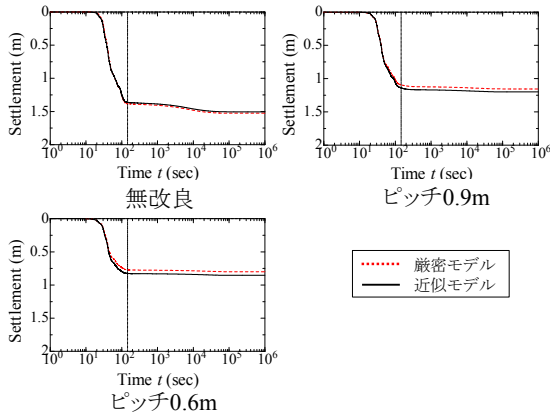


図6 時間—沈下量関係

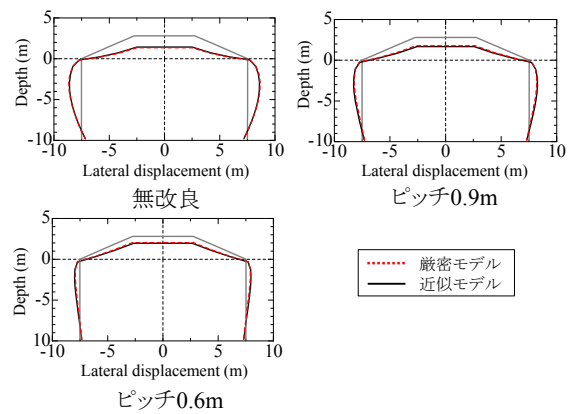


図7 改良域の変形（圧密放置後）

最後に、厳密モデルおよび近似モデルの地震応答解析における1ステップの平均時間を表4に示す。計算時間が約1/170に短縮されている。メッシュ分割に係る省略も含め、提案手法により計算効率の大幅な向上がもたらされることが分かる。

表4 地震応答解析計算時間

厳密モデル(sec)	11.9
近似モデル(sec)	0.07

4. 結論

過剰間隙水圧消散工法の数値シミュレーションにおいて、動的問題に適用したマクロエレメント法を用いた2次元平面ひずみ解析は、メッシュ分割によりドレーンを厳密に表現した3次元解析を精度よく近似できる。また、同手法を用いることにより、メッシュ分割に係る省略化と計算時間の大幅な短縮という2点において、計算効率が大幅に向上する。

参考文献) 1) 関口秀雄, 柴田徹, 藤本朗, 山口博久 (1986): 局部荷を受けるパーティクル・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. 2) Yamada, S. Noda, T., Tashiro, M. and Nguyen, S. H. (2015): Macro element method with water absorption and discharge functions for vertical drains, S&F, 55(5), 1113-1128. 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (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 T., Yamada S., Nonaka, T. and Tashiro M. (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) DEPP 工法研究会 (2011): DEPP 工法技術資料.