

動的問題に適用したマクロエレメント法を用いた 過剰間隙水圧消散工法の数値シミュレーションの精度検証

Verification of simulation of the excess pore water pressure dissipation method using macro-element method applied to a dynamic problem

野中俊宏¹⁾, 山田正太郎²⁾, 野田利弘³⁾

Toshihiro Nonaka, Shotaro Yamada and Toshihiro Noda

- 1) 修(工) 名古屋大学 助教 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町, E-mail: nonaka.toshihiro@h.mbox.nagoya-u.ac.jp)
- 2) 博(工) 名古屋大学 准教授 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町, E-mail: s-yamada@civil.nagoya-u.ac.jp)
- 3) 博(工) 名古屋大学 教授 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町, E-mail: noda@civil.nagoya-u.ac.jp)

In the simulation of the vertical drain method using a soil-water couple finite element analysis, macro-element method can be used as an approximate method to introduce the water absorption and discharge functions of drains into individual elements. Although this method has been applied only to quasi-static problems, the author extends the function of the method and applied it to the soil-water coupled analysis code *GEOASIA* with inertial term to grasp the countermeasure effect of the excess pore water pressure dissipation method against liquefaction. In this paper, in order to verify the new macro-element method in dynamic problem under plane strain condition, the results of 2-dimensional analysis using the new macro-element method was compared with those of 3-dimensional analysis in which vertical drains were expressed exactly by dividing finite element meshes finely.

Key Words : Excess pore water pressure dissipation method, Liquefaction countermeasure, Macro element method, Soil-water coupled analysis

1. はじめに

著者ら[1]はこれまでに、過剰間隙水圧消散工法の数値シミュレーションを行うにあたり、バーチカルドレーンの集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[2], [3]という一種の均質化手法の適用を試みている。同工法の数値解析では、地中に埋められた無数のバーチカルドレーンとその周辺地盤を細かくメッシュ分割することによる莫大な計算コストが数値計算における大きな課題であったが、マクロエレメント法では改良域にある個々の要素にドレーンの集水機能を持たせることで細かなメッシュ分割を要さず計算効率を向上させることができる。著者らは、主に準静的な問題へ適用が限られていた同手法を、慣性力対応の水～土連成有限変形解析コード*GEOASIA*[4]へ実装することで、新たに動的問題へ適用させ、課題の解決を図った[1]。過剰間隙水圧消散工法では、液状化を防げるか否かという点と併せて、液状化を抑制した際に発生する変形量の予測が、数値解析におけるもう一つの大きな課題であるが、*GEOASIA*は、締固め現象と液状化現象、および地震中に発生する変形と地震後に発生する圧密沈下を統一的に扱うことができるため、この課題も克服することができる。

マクロエレメント法は2次元平面ひずみ条件下であってもドレーンの集排水機能を精度よく取り入れることができる方法である。本論文では、著者らの提案する、動

的問題に適用した新たなマクロエレメント法が、2次元平面ひずみ条件下で地震時のドレーンの集排水機能およびそれに伴う液状化抑止効果を精度よく近似できているかを検証するため、メッシュ分割によりドレーンを厳密に表現した3次元解析結果と比較する。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。

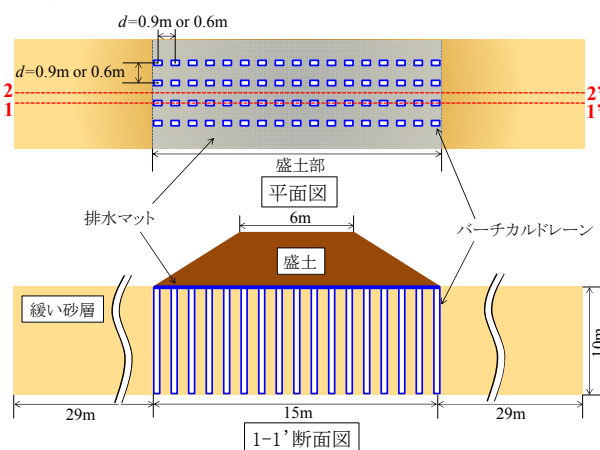


図-1 解析対象の概要図

2. 解析条件

図-1に示す通り、盛土直下の砂地盤に過剰間隙水圧消散工法による液状化対策を施した場合を解析対象として想定した。盛土直下の緩い砂層に矩形断面を有するグリッドドレーン[5] (幅150mm, 厚さ50mm) が一定のピッチ

で正方形配置されている。

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、簡単のため、盛土と直行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、図-1の平面図に示す破線で挟まれた領域をモデル化した。図-2に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。厳密モデルではドレーンおよび周辺地盤を細かくメッシュ分割する必要があるため、改良域のメッシュ数が膨大となる。

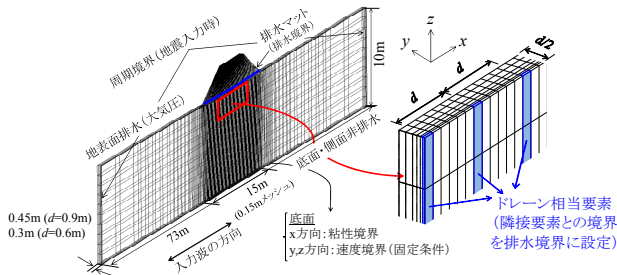


図-2 有限要素メッシュと境界条件（厳密モデル）

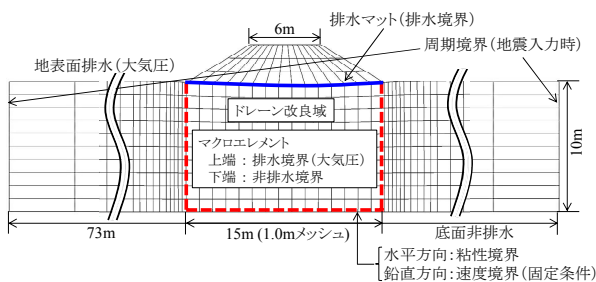


図-3 有限要素メッシュと境界条件（近似モデル）

図-3に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の要素にマクロエレメント法を適用した。マクロエレメントの境界条件については、地盤と同様に上端は大気圧に解放し、下端は非排水境界とした。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、ドレーン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が可能である。なお、既に述べた通り、厳密モデルではドレーンを排水境界条件により表現した。これは、無限の透水性を持つドレーンを想定したことになる。一方で、使用したマクロエレメント法では有限の透水性を持つドレーンをモデル化している。今回のマクロエレメント法による解析結果は、ドレーン内の水圧がほぼ静水圧分布を示していたため、マクロエレメント法の近似精度を比較する上で、上記の違いは特に問題とならないことを断っておく。なお、厳密モデルで

要素の透水性を高めることでドレーンを表現しなかったのは、 u - p formulationに基づく解析では、透水係数に1ステップあたりの時間増分に関連する上限値が存在するためである[4]。

はじめに、両モデルにおいて、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。このようにして作成した盛土-地盤系に、図-4に示す三連動型の地震動を、粘性境界を介して水平方向に入力し、過剰間隙水圧が完全に消散するまで圧密放置した。表-1、2に地盤と盛土の材料定数および初期値、表-3に底面粘性境界の材料定数を示す。また、表-4にドレーン（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。

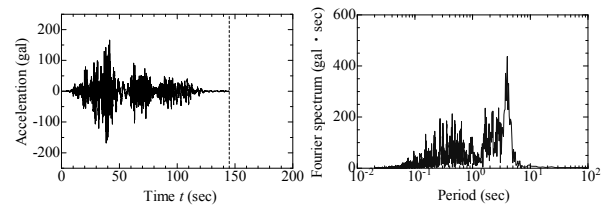


図-4 入力地震動

表-1 地盤および盛土の材料定数

	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 $\bar{\kappa}$	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_s	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 底面粘性境界の材料定数

基盤の密度 ρ (g/cm ³)	2.00
基盤のS波速度 V_s (m/sec)	150.0

表-4 ドレーン（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

ピッチ0.9m, 0.6mの2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。

3. 解析結果

図-5に、地震動入力完了直後の過剰間隙水圧分布を示す。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。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を、ピッチ0.6mの場合、ドレーンから0.2m程度離れた位置(いずれもピッチの1/3)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。

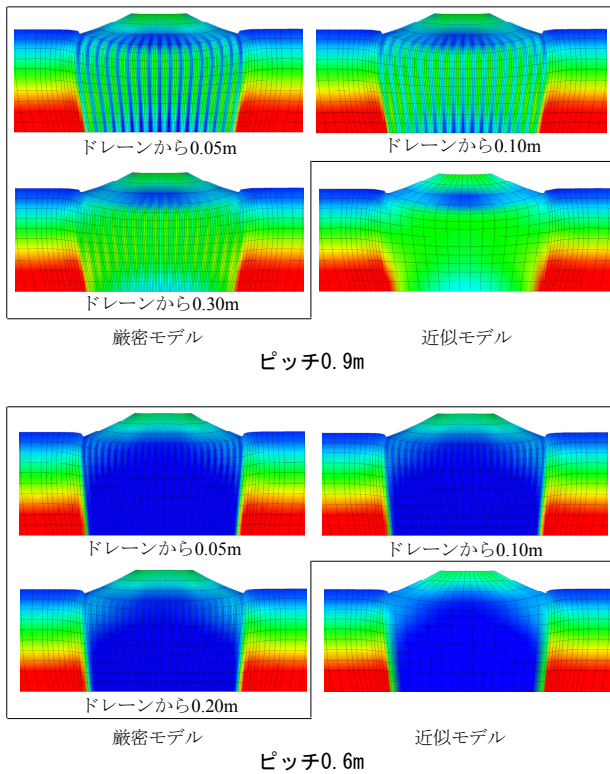


図-5 過剰間隙水圧分布

図-6に、改良域中央直下の時間一過剰間隙水圧比関係を示す。厳密モデルについては、中央のドレーン1本が受け持つ改良範囲内における水平方向の全要素を対象とした体積による重み付き平均値を示す。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。

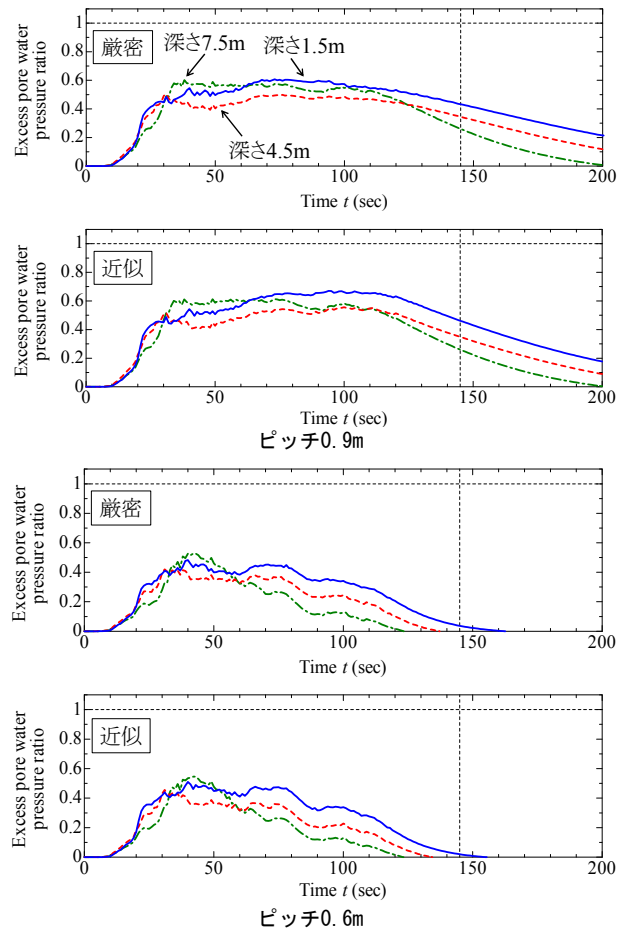


図-6 時間一過剰間隙水圧比関係

地盤の変形について比較する。図-7, 8に地盤と盛土の境界の中央位置における、時間一水平変位量関係、時間一沈下量関係をそれぞれ示す。厳密モデルの応答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挙動を示す)。いずれも近似モデルは厳密モデルとほぼ等しい応答を示している。ピッチが細くなる程、水圧の上昇抑制効果が高く発揮される結果、地盤の変形は抑制されるという特徴をよく捉えている。

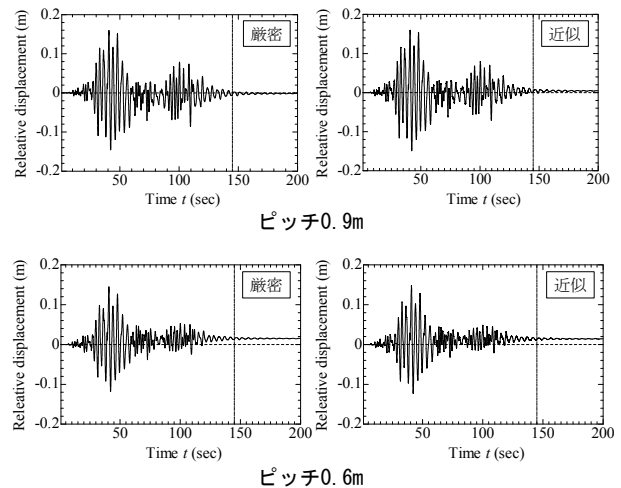


図-7 時間一水平変位関係

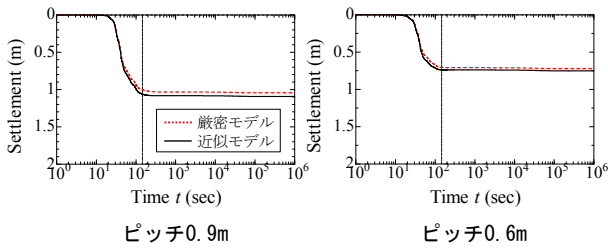


図-8 時間—水平変位関係

改良域全体の変形を比較する。図-9に圧密放置後の改良域の変形を示す。水平変位量は基盤中央の節点を基準とする。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、土がせん断抵抗を發揮するため、側方流動およびそれに伴う沈下を抑えることが出来ている。近似モデルは、改良域全体の変形についても厳密モデルを精度良く近似している。

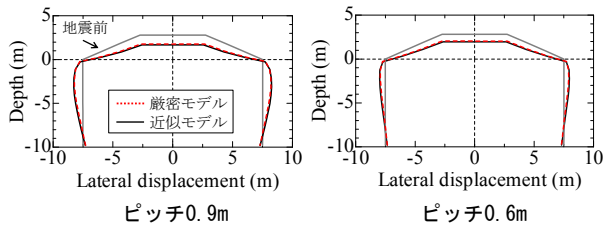


図-9 改良域の変形

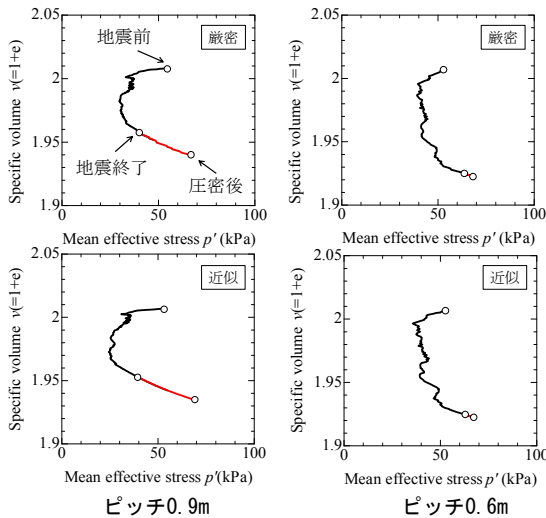


図-10 平均有効応力—比体積関係

次に、地盤内の要素挙動として、平均有効応力と比体積の関係について比較する。比較の対象とする要素は、改良域中央直下の深さ4.5mの位置の要素である。また、厳密モデルについては、中央のドレーン1本が受け持つ改良範囲内における水平方向の全要素を対象とした体積による重み付き平均値を示す。該当する要素の挙動を図-10に示す。2ケースとも近い応答を示している。地震中の有効応力の減少はあまり生じておらず、その代わりに地震中に締固めによる圧縮が生じている。地震中の圧縮に比べ地震後の圧密による圧縮は小さく、ピッチ0.6mのケースではほとんど発生していない。このように、過剰間隙

水圧消散工法に特有の、間隙水圧の上昇抑制、およびその代償として生じる地盤の締固めが、近似モデルによる計算で精度良く再現できており、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。

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-5示す。両モデルともに表-6に示す計算環境を用いている。近似モデルでは計算時間が約1/170に短縮されている。メッシュ分割に係る省略化も含め、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-5 地震応答解析1ステップ平均計算時間

厳密モデル (sec)	11.9
近似モデル (sec)	0.07

表-6 計算環境

CPU	Intel(R) Core(TM) i7-3970X 3.50GHz
Memory	16.0GB
OS	Windows 7 Professional

4. 結論

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 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、水圧変動から地盤の変形に至るまで精度よく近似できる。
- 2) ドレーンピッチに応じた液状化抑制効果の違いを、同手法では定量的にも近似できる。
- 3) 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、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短縮という2点において、計算効率の大幅な向上がもたらされる。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 関口秀雄, 柴田徹, 藤本朗, 山口博久 (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論文集, 111-116.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] DEPP工法研究会 (2011): DEPP工法技術資料.