

マクロエレメント法を用いた水～土骨格連成有限変形解析による 間隙水圧消散工法の液状化対策効果予測シミュレーション

間隙水圧消散工法
有効応力解析法
マクロエレメント法

名古屋大学 学生会員 ○矢藤 彰悟
国際会員 山田正太郎 野田 利弘 野中 俊宏

1. はじめに 間隙水圧消散工法では、バーチカルドレーンによる排水によって地震時の水圧上昇を抑制する結果、締固めによる地表面沈下をある程度許容する。したがってこの工法では、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重要な課題の一つとなる。この沈下量の定量的予測を含め、間隙水圧消散工法の諸特性を把握すべく、**GEOASIA**¹⁾による同工法の数値シミュレーションを行った。**GEOASIA**を用いて計算を行った理由は、間隙水圧消散工法のシミュレーションでは、締固め現象と液状化現象、および、地震中に発生し得る締固めによる沈下と液状化後に発生し得る圧密沈下を統一的に扱える必要があるためである。同工法を対象とした数値計算でもう一点重要となるのは、計算効率を如何に上げるかという点である。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と、莫大な計算コストが掛かってしまうということがその背景にある。このバーチカルドレーン工法に共通する課題を克服するために、圧密問題を対象にした有効応力解析では、マクロエレメント法^{2), 3)}という一種の均質化手法がしばしば用いられる。これまで準静的な問題へ適用が限られてきたこのマクロエレメント法を新たに動的な問題へ適用することでこの課題の解決を図ったので、本稿ではその計算例を提示する。また、2次元メッシュと1次元メッシュを用いた計算結果について比較することにより、2次元メッシュを用いた計算ケースを減らすための工夫についても触れる。

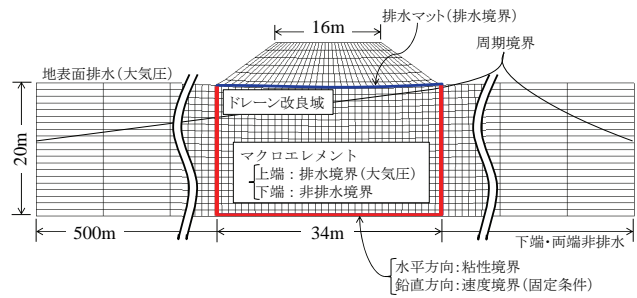


図1 有限要素メッシュおよび境界条件 (2次元メッシュ)

2. 解析条件 盛土直下の砂地盤に間隙水圧消散工法による液状化対策を施す場合を想定して計算を行った。図1に解析に用いた有限要素メッシュ並びに境界条件を示す。水平成層地盤上に、高さ6mの盛土を18日間かけて追加し、定常状態に落ち着くまで圧密計算を行った後に地震動を入力した。間隙水圧消散工法による改良域にはマクロエレメント法を適用した。今回適用したマクロエレメント法はドレーンの水圧を未知数として地盤の変形や間隙水圧と同時に解くという点で、オリジナルのマクロエレメント法と異なる³⁾。この機能拡張により、ドレーンの通水能力が不十分で排水が滞り液状化が発生するようなケースも解析の対象とすることができる(ただし、今回想定した条件ではそのような現象は発生しなかった)。

マクロエレメントの境界条件についても、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。本稿では、無改良のケースを基準に比較検討を行うが、ドレーンによる改良の効果のみを純粋に把握するため、無改良の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。表1と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、表4にドレーンの材料定数を示す。地盤は無改良の場合に液状化が発生しやすい緩い砂地盤を、盛土には実際に河川堤防に用いられている材料を想定した。ドレーンはDEPP工法のスパイラルドレーン⁴⁾を想定した。入力地震動は、主要動の継続時間120sec、最大加速度180gal程度の東海・東南海・南海三連動型地震を想定した地震波である。

3. 解析結果 図2に無改良とドレーンピッチ0.8mのケースの地震動入力完了直後の間隙水圧分布を示す。図中には変形の様子分かりやすいように、地震前の改良域側面と盛土外周を示す太線を示した。マクロエ

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 $\tilde{\epsilon}$	0.050	0.110
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	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_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の比体積

表2 地盤および盛土の材料定数

	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

ドレーンの有効直径 d_e (m)	0.80
ドレーンの直径 d_w (m)	0.1
透水係数 k_w (cm/sec)	7.0×10^2

メント法の適用により、間隙水圧消散工法の水圧上昇抑制効果が解析結果に表れていることが分かる。紙幅の都合上結果については割愛するが、ドレーン一本とそのドレーンが担当する改良域を対象とした3次元解析により、マクロエレメント法の近似精度について比較した結果、細かくメッシュ分割を行ってドレーンを表現した場合とほぼ同じ解析結果が得られることを確かめている。図3より、間隙水圧の上昇を抑制した結果、盛土直下地盤の側方流動および沈下や、盛土の変形が抑制できていることを確認できる。図4にドレーンピッチと無改良地盤に対する水圧上昇率(=改良時の最大間隙水圧/無改良時の最大間隙水圧)ならびに、沈下率(=改良時の盛土天端の最終沈下量/無改良時の盛土天端の最終沈下量)、側方流動率(=改良時の最終盛土底面幅/無改良時の最終盛土底面幅)との関係を示す。同図より、ドレーンピッチを狭くして間隙水圧の上昇を抑制するほど、沈下や側方流動等の変形を抑えることができることを確認できる。本解析の条件下では、ドレーンピッチが2.0mぐらいいから効果が発揮されはじめ、ドレーンピッチが1.0mを切ると、より大きな効果が得られている。なお、図4に示す計算は全て図1に示す有限要素メッシュを用いて行った。メッシュ分割幅がドレーンピッチに左右されない点や、2次元解析でもドレーンピッチの効果を3次的に換算して解析に取り込むことができる点もマクロエレメント法の長所として挙げることができるが、図4に示すドレーンピッチをパラメトリックに変化させた解析においてもその長所が発揮されていると言える。

4. 1次元メッシュを用いた計算 冒頭でも述べた通り、間隙水圧消散工法では変形のある程度許容するため、変形量を予測して改良域やドレーンピッチを決めることが肝要である。上記の結果より、マクロエレメント法を適用して計算効率を上げた有効応力解析はこの要求を満たす一つの有効な手段に成り得ると言える。ただし、マクロエレメント法を適用して計算効率が上がっているといえども、できる限り計算ケース数は抑えたい。図4が示す通り、有効なドレーンピッチは限られているため、予めこのピッチを把握することができれば、計算ケースを絞ることができる。図4が示すもう一つ重要な点は、工法原理からすれば当然であるが、間隙水圧の上昇抑制と変形抑制の間には高い相関があるという点である。変形の正確な予測には多次元メッシュを用いた解析が必須であるが、間

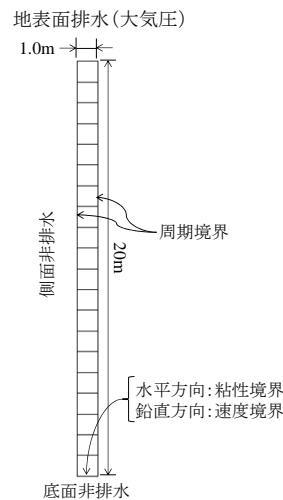


図5 有限要素メッシュと境界条件(1次元メッシュ)

隙水圧の上昇抑制効果を把握するためだけであれば、1次元メッシュを用いた解析でもその効果を十分に把握できる可能性がある。そこで、図5に示す1次元メッシュを用いた解析によりドレーンピッチと間隙水圧の上昇抑制効果について調べた。解析結果を図6に示す。計算条件は図5に示す通りで、地盤の材料定数や初期値は2次元メッシュ解析と同じである。ただし、1次元メッシュ解析では、盛土分の分布荷重を地表面に加えることで、簡易的に盛土の存在を考慮した。図6には2次元メッシュ解析の結果も併せて示しているが、1次元メッシュ解析と2次元メッシュ解析で、ドレーンピッチと水圧上昇率の関係はほぼ同じであることが分かる。これより、2次元メッシュ解析に先立って1次元メッシュ解析を実施し有効なドレーンピッチを把握しておくことで、より効率的に設計を進めることができると言える。

5. おわりに 有効応力解析による効率的な間隙水圧消散工法の対策効果の予測手法について示した。なお、本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会(委員長:浅岡顕)」に関連する報告である。

参考文献) 1) 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, Vol. 45, No. 6, pp. 771-790. 2) 関口ら(1986): 局部荷重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. 3) 山田ら(2013): ドレーン内の水圧を未知数にとるマクロエレメント法によるウェルレジスタンス現象の再現, 第48回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 991-992. 4) DEPP 工法研究会(2011): DEPP 工法技術資料.

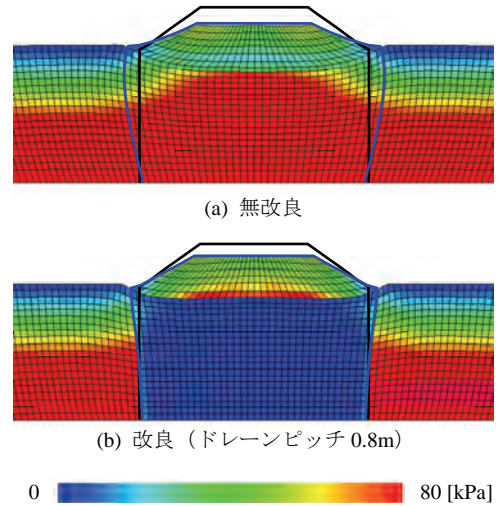


図3 地震終了直後の過剰間隙水圧分布

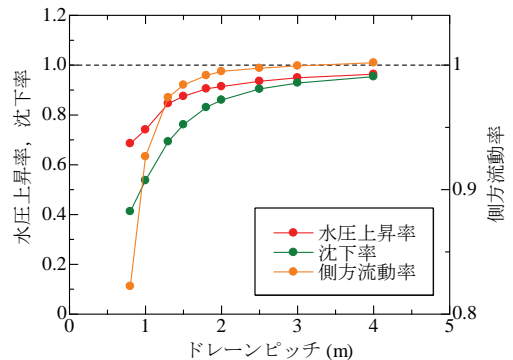


図4 ドレーンピッチと改良効果の関係(2次元メッシュ解析)

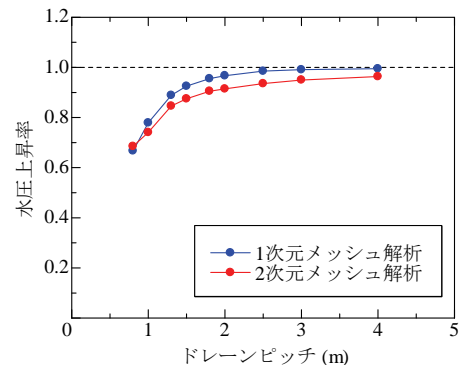


図6 ドレーンピッチと改良効果の関係(1次元メッシュ解析と2次元メッシュ解析の比較)