

# 過剰間隙水圧消散工法を用いた護岸構造物を有する人工埋立地盤の液状化対策効果の数値解析的検討

間隙水圧消散工法 有効応力解析 埋立

名古屋大学 国際会員 ○野中俊宏 山田正太郎 野田利弘  
地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡顕

## 1. はじめに

人工埋立地盤は自然地盤に比べると軟弱で、巨大地震によって液状化被害を受けることが懸念されている。特に名古屋港地区は港湾貿易・エネルギープラント等が人工埋立地盤上に集積し、被災時の経済的損失が大きくなることが懸念されるため、早急に液状化対策を行うことが望まれる。本稿では、名古屋港内の護岸構造物を有する人工埋立地盤を対象に、過剰間隙水圧消散工法を用いた場合の液状化対策効果について数値解析的に検討した。同工法では、液状化を防げるか否かという点と併せて、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生じる変形量の予測が重要な課題となる。そこで、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うことができる、水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>1)</sup>を用いてシミュレーションを行った。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。この課題を克服するために、バーチカルドレーンを用いた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<sup>2),3)</sup>という一種の均質化手法がしばしば用いられる。著者らは、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ている<sup>4)</sup>。本稿でも同手法を適用して、過剰間隙水圧消散工法が人工埋立地盤の液状化の抑制に一定の効果があること等を示す。

## 2. 解析条件

解析対象としたのは、昭和40年代半ばに完成した名古屋港内の人工埋立地盤である。昭和19年の東南海地震等の大地震を経験しておらず、大地震発生時の地盤変状が危惧されている。図1に、全解析領域および護岸部周辺を拡大した有限要素メッシュを示す。図中には、解析に用いた境界条件を併記している。泥岩層の上に直接埋め立てを行っている地盤で、地下水位は地表より3.0mの深さにある。護岸構造物は、被覆捨石で覆われた捨石マウンドの上に設置されている。解析領域は、幅2040mで、高さは左端28m、右端40mとした。沿岸部の解析を行うため、上端部の水理条件として護岸左には排水条件、護岸右には大気圧条件を与え、地盤の側面と底面には非排水条件を与えた。地盤下端節点はPS検層結果をもとに、底面粘性境界 ( $V_s=600\text{m/sec}$ )を与え、地盤両側端要素には、側方境界要素単純せん断変形境界<sup>5)</sup>を与えている。また、埋立地盤上に構造物が設置されていることを想定し、図中に示す2ヶ所にそれぞれ18.5kNの集中荷重を与えている。図中の赤枠で囲った領域には、過剰間隙水圧消散工法による改良を実施したことを想定しマクロエレメント法を適用している。表1に用いた材料定数および初期値<sup>6)</sup>を、表2にマクロエレメント法の材料定数を示す。不飽和状態の埋立砂は、飽和単位体積重量が、飽和度30%の湿潤体積重量と等しくなるよう土粒子密度を換算して与えた。ドレーンはDEPP工法のスパイラルドレーン<sup>7)</sup>を想定した。地震動は、地盤底面の全有限要素節点

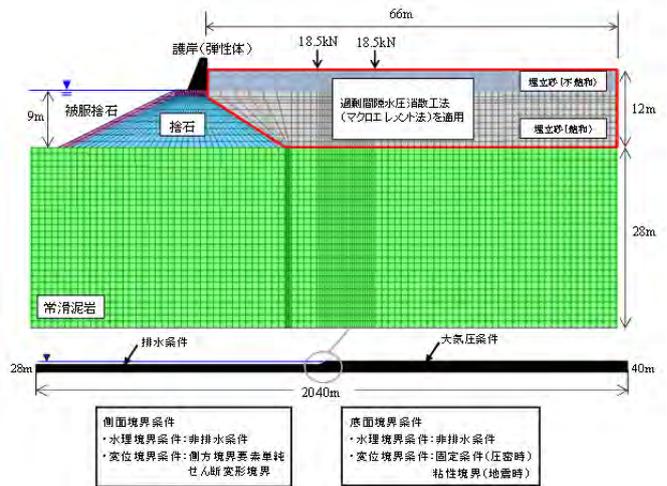


図1 有限要素メッシュおよび境界条件

表1 材料定数および初期値

	常滑泥岩	捨石	被覆捨石	埋立砂 (飽和)	埋立砂 (不飽和)
<b>弾性パラメータ</b>					
限界状態定数 M	0.60	1.7	1.7	1.10	1.10
NCLの切片 N	2.10	1.895	1.895	1.989	1.989
圧縮指数 $\lambda$	0.17	0.105	0.105	0.05	0.05
膨潤指数 $\kappa$	0.003	0.0005	0.0005	0.0002	0.0002
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>発展パラメータ</b>					
$-D^*$ と $D^*$ の割合 $c_c$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
構造劣化指数 $a$ ( $b=c=1.0$ )	0.01	2.0	2.0	5.0	5.0
正規圧密土化指数 $m$	10.0	1.20	1.20	0.12	0.12
回転硬化指数 $br$	0.001	1.0	1.0	3.0	3.0
回転硬化限界面 $m_b$	1.0	0.001	0.001	0.9	0.9
土粒子密度 $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.707	2.593	2.593	2.675	2.035
透水係数 $k$ ( $\text{cm/s}$ )	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$
<b>初期値</b>					
初期比体積 $v_0$ (飽和単位体積重量 $\gamma_w$ )	1.70 (2.00)	1.593 (2.0)	1.062 (2.5)	1.914 (1.87)	1.914 (1.87)
初期応力比 $\eta_0$	0.545	0.0	0.0	0.0	0.0
初期過圧密比 $1/R_0$	50.0	1.0	1.0	1.4	1.4
初期過圧密比 $1/R_0$ (地震直前)	$1.3 \times 10^2$ ~	$1.27 \times 10^2$ ~	$1.23 \times 10^2$ ~	$1.12 \times 10^2$ ~	$1.12 \times 10^2$ ~
	$3.8 \times 10^2$ ~	$1.72 \times 10^2$ ~	$4.81 \times 10^2$ ~	$2.92 \times 10^2$ ~	$2.92 \times 10^2$ ~
初期異方性の程度 $\zeta_0$	0.0	0.0	0.0	0.7	0.7

表2 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)	1.13, 2.26
ドレーンの直径 $d_w$ (m)	0.10
ドレーンの透水係数 $k_w$ ( $\text{cm/sec}$ )	$7.00 \times 10^2$

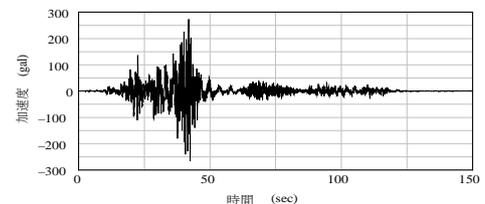


図2 入力地震波

の水平方向に、図2に示す当該地域で想定される東海・東南海・南海3連動型地震<sup>8)</sup>を入力した。

### 3. 解析結果

図3, 4, 5に無改良, ドレーンピッチ2.0m, ドレーンピッチ1.0mのケースの地震終了時の平均有効応力分布およびせん断ひずみ分布をそれぞれ示す。無改良のケースでは、埋立砂層の平均有効応力がほぼ0となり、地震時の繰返し载荷によって液状化に至っていることが分かる。一方、ドレーンによる対策を施したケースでは、埋立砂層の平均有効応力が比較的高い値に留まり、液状化が抑制されていることが分かる。液状化抑制効果はピッチが細かい程大きい。また、無改良ケースでは、集中荷重の周辺で局所的に大きなせん断ひずみが発生しているが、改良ケースでは局所的なせん断ひずみは発生していない。図6に、

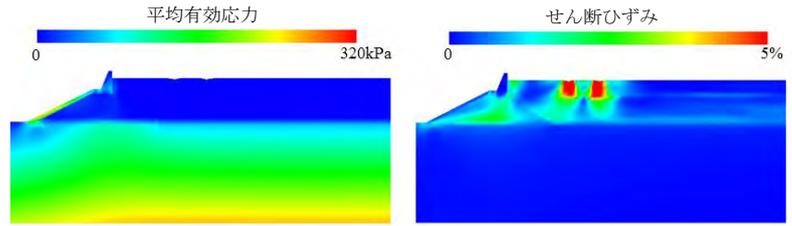


図3 無改良 (地震終了時)

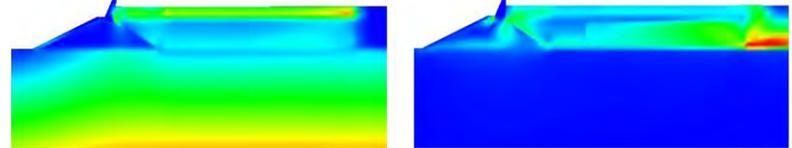


図4 ドレーンピッチ2.0m (地震終了時)

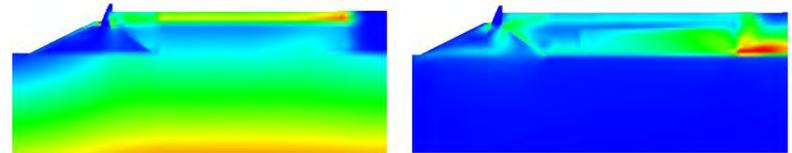


図5 ドレーンピッチ1.0m (地震終了時)

無改良, ドレーンピッチ1.0mのケースにおける、護岸構造物から水平距離30mの位置(改良域の中央)の時間一過剰間隙水圧比関係を示す。無改良ケースでは、過剰間隙水圧比が地震開始から10秒程度で1.0まで上昇し液状化に至っていることが確認できる。しかし改良ケースでは、入力加速度が最大値を示す時刻に、一旦過剰間隙水圧比が1.0付近まで上昇しているが、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き、液状化が抑制されていることが確認できる。図7に、地震終了時および圧密放置後の地表面沈下量を示す。

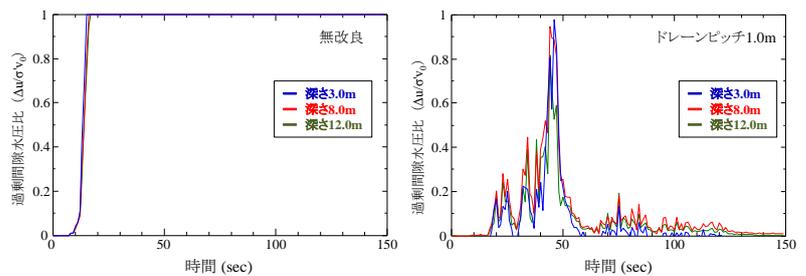


図6 時間一過剰間隙水圧比関係

図中の下矢印は集中荷重が作用している箇所を示している。地震終了時に、無改良ケースでは、集中が作用している箇所で30cm程度の局所沈下が発生している。一方、改良ケースでは、地震時の水圧上昇を抑制した結果、地盤全体に10cm程の沈下が生じているが、集中荷重が作用している箇所での局所的な沈下は発生していない。これは、表層の埋立砂層が液状化に至らず剛性を有しているためである。

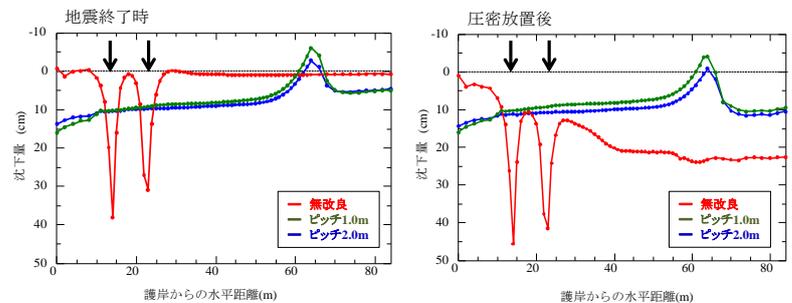


図7 地表面沈下量

圧密放置後、無改良ケースでは、地震時に上昇した水圧が消散する圧密過程で地盤全体に沈下が発生しているが、改良ケースでは、地震直後に水圧の消散がほぼ完了しているため、地震後における圧密沈下はほとんど生じていない。

### 4. おわりに

人工埋立地盤を対象に、過剰間隙水圧消散工法を用いた場合の液状化対策効果を検討した。ドレーンの排水効果により、埋立砂層の過剰間隙水圧の上昇が抑制され、一定の液状化対策効果が見込めることが分かった。また、埋立地盤上の構造物に対して、地盤が液状化に至らず剛性を有しているため局所的な沈下を防げること、地震直後に水圧の消散がほぼ完了していることから、地震後の圧密沈下を抑制できることが分かった。

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): 局部载荷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発表論文集, pp.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* (accepted). 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* (accepted). 5) 吉見吉昭, 福武毅芳(2005): 地盤液状化の物理と評価・対策技術, 技報堂出版. 6) Noda, et al. (2010): Modeling and seismic response analysis of a reclaimed artificial ground, *Geotechnical Special Publication No.201*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ASCE, GeoShanghai 2010 International Conference, June 3-5, Shanghai, China, pp.294-299. 7) DEPP 工法研究会(2011): DEPP 工法技術資料. 8) 内閣府(2004): 東南海・南海地震公開データ.