

人工埋立地盤に対する間隙水圧消散工法の  
液状化対策効果に関する数値解析的検討  
(Numerical study on the effectiveness of pore water pressure dissipation method  
against liquefaction for artificial reclaimed ground)

野中俊宏<sup>1</sup>, 山田正太郎<sup>2</sup>, 野田利弘<sup>3</sup>

1 名古屋大学・減災連携研究センター・nonaka.toshihiro@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻

3 名古屋大学・減災連携研究センター

### 概 要

人工埋立地盤は自然地盤に比べると軟弱であり、巨大地震による液状化被害が懸念されている。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ため早急な対策が望まれる。そこで、安価で施工性の高い間隙水圧消散工法を用いた人工埋立地盤の液状化対策効果を数値解析によって調べた。同工法の数値解析では、地震中から地震後における変形量の予測が重要であるとともに、ドレーンを含む地盤を計算コストを抑えて如何に表現するのかという点が課題である。本論文では、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>にマクロエレメント法を実装することでこれらの課題の解決を図った。解析の結果、今回対象とした人工地盤において間隙水圧消散工法が以下に示す効果を発揮することが分かった。1) 間隙水圧の上昇が抑制され液状化対策効果が得られる。2) 地盤が液状化に至らず剛性を有するため局所沈下を抑制できる。3) 地震後における圧密沈下はほとんど生じない。また、1次元メッシュ解析を多次元メッシュ解析と上手く組み合わせることで、より効率的な設計を行うことができることを示した。

キーワード：間隙水圧消散工法，有効応力解析，マクロエレメント法，埋立地盤

## 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。このような状況の中、間隙水圧消散工法は、東日本大震災以来、安価で施工性の高い工法として注目されているが、対策効果の信頼性が不足していることから普及が進んでいない現状にある。そこで本論文では、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、間隙水圧消散工法の数値シミュレーションを実施し、液状化抑制効果に影響を及ぼす要因を明らかにした上で、同工法の定量的な評価手法、設計手法の構築に繋げていくことを目的とする。

間隙水圧消散工法の数値解析を実施するためには、克服すべき課題が少なくとも二点ある。一つは、パ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である。同工法では単に液状化を防げるか否かということだけでなく、この変形の予測が一つの課題となる。もう一点は、計算コストの抑制である。地中に埋められた無数のパ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ため、これを如何にして回避するのかといった点も重要な課題となる。これまで、これらの課題を克服する有効な解析手法が確立されてこなかったことが同工法の対策効果の信頼性向上の一つの足かせとなっていた。これに対し、著者らの研究グループでは、均質化手法の一種であるマクロエレメント法<sup>2)</sup>の機能拡張を図る<sup>3)</sup>とともに、動的問題にも対応可能な水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>1)</sup>へ実装することで上記課題の解決を図った<sup>4)</sup>。**GEOASIA**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うことができ、同工法における地震中から地震後までの変形量の予測が可能である。また、マクロエレメント法は各要素にドレーンの排水機能を

与えることで、細かなメッシュ分割を伴わずに間隙水圧消散工法のシミュレーションを可能にする。さらに、著者らによるマクロエレメント法は、ドレーンの通水能力を解析に取り入れることができるとともに、同一のメッシュで、ドレーンピッチを自由に変化させて解析することも可能である。

以下では、上記の手法を用いて、軟弱な埋立地盤においても、ドレーンによる改良によって、地震中の過剰間隙水圧の上昇が抑制され、地盤全体の変形が抑えられること、間隙水圧の上昇抑制効果に対して地盤の透水性が大きく影響すること等を示す。また、1次元メッシュ計算を活用した、より効率的な設計手法についても述べる。

## 2. 2次元メッシュ解析による検討

### 2.1 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。

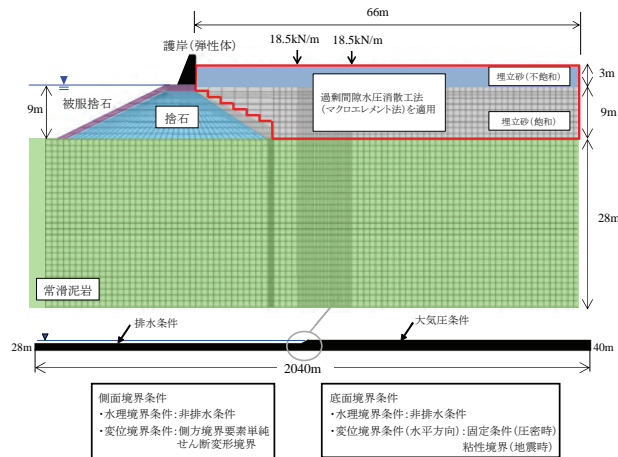


図1 有限要素メッシュおよび境界条件

泥岩層の上に砂質土により直接埋め立てを行っており、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、上部の水利条件として護岸より左側には排水条件、護岸より右側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。地盤下端節点の水平方向には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/mの集中荷重を与えている。構成式は、土の骨格構造(構造・過圧密・異方性)の働きの記述によって、粘土から砂、中間土の力学挙動を同一理

論的枠組で表現する弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル)を用いている。図中の赤枠で囲った領域には、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に地盤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。

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>弾塑性パラメータ</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 $\lambda$	0.003	0.0005	0.0005	0.0002	0.0002
ボアソン比 $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>発展則パラメータ</b>					
$-D_p^*$ と $D_p^*$ の割合 $c_p$	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 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.707	2.593	2.593	2.675	2.035
透水係数 $k$ ( $\text{cm/s}$ )	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$
<b>初期値</b>					
初期比体積 $v_0$ (飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}$ )	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
初期構造の程度 $1/R_0$	50.0	1.0	1.0	1.4	1.4
初期過圧密比 $1/R_0$ (地震直前)	$1.3 \times 10^2$ ~ $3.8 \times 10^2$	$1.27 \times 10^2$ ~ $1.72 \times 10^2$	$1.23 \times 10^2$ ~ $4.81 \times 10^2$	$1.12 \times 10^1$ ~ $2.92 \times 10^1$	$1.12 \times 10^1$ ~ $2.92 \times 10^1$
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)	0, 1.13, 2.26
ドレーンの直径 $d_d$ (m)	0.10
ドレーンの透水係数 $k_d$ (cm/sec)	$7.00 \times 10^3$

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、①無改良、②ピッチ2.0m、③ピッチ1.0mの3ケースの解析を実施した。いずれの計算も図1に示す同一のメッシュで計算を行ったが、メッシュ幅に依らず材料定数を変えるだけでドレーンピッチを容易に変更できる点は著者らが提案するマクロエレメント法の特徴の一つである。地震動は、地盤底面の全有限要素節点の水平方向に、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。最大加速度約250gal、主要動継続時間は約100秒と非常に長い、長周期成分を多く含む海溝型地震である。

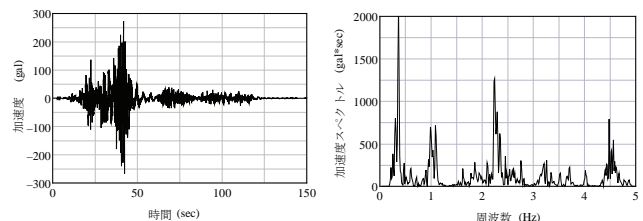
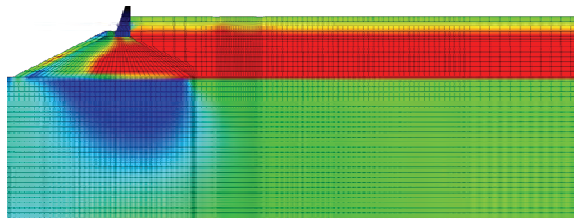


図2 入力地震波

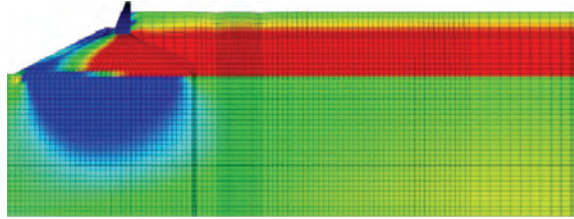
### 2.2 解析結果

図3,4,5に3ケースの過剰間隙水圧分布それぞれ示す。無改良ケースでは、表層の埋立砂層における過剰間隙水圧が地震開始から終了時まで上昇している。一方、ピッチ1.0mのケースでは、地震動の最大加速度付近である40秒

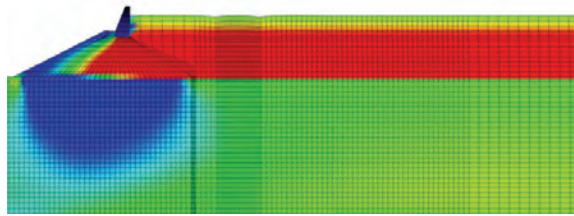
時点では、水圧が上昇するものの、時間経過とともに消散していることが分かる。また、ピッチ 2.0m のケースでは、1.0m のケースと比較してその効果は小さいが、地震終了時には間隙水圧の消散が進行していることを確認できる。



(a) 地震後40秒



(b) 地震後80秒

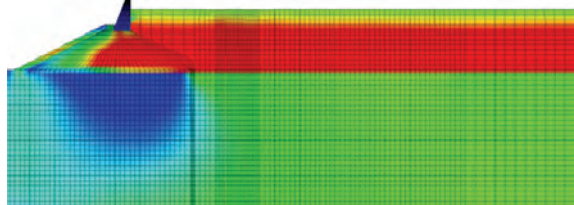


(c) 地震後150秒

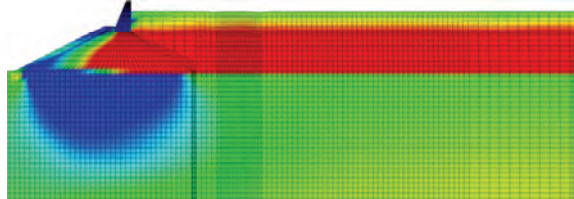


$k=4.0 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$

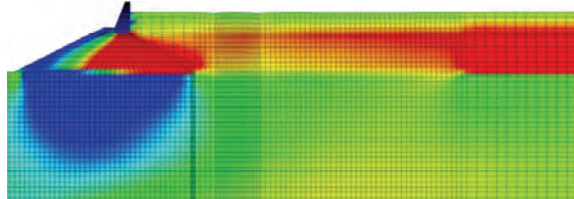
図 3 過剰間隙水圧分布 (無改良)



(a) 地震後40秒



(b) 地震後80秒



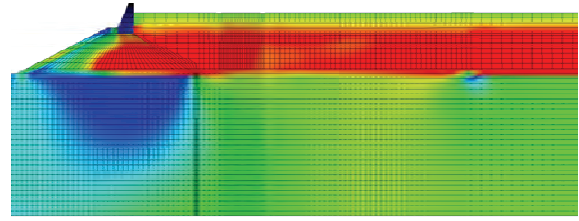
(c) 地震後150秒



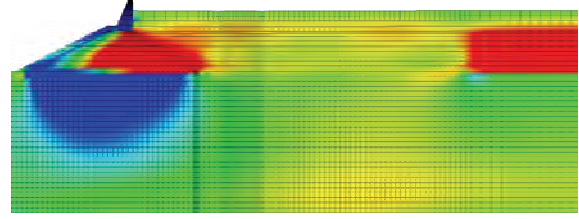
$k=4.0 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$

図 4 過剰間隙水圧分布 (ピッチ2.0m)

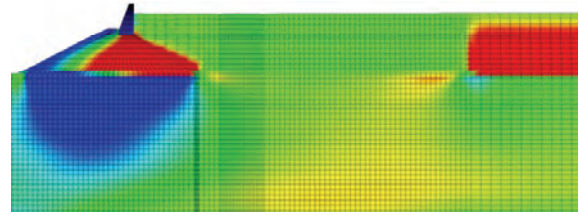
図 6 に、圧密放置後のせん断ひずみ分布を示す。無改良ケースにおいて、集中荷重の周辺で発生している局所的な大きなせん断ひずみが、改良ケースでは抑制されていることが分かる。またピッチが細かい程、抑制効果は大きい。



(a) 地震後40秒



(b) 地震後80秒

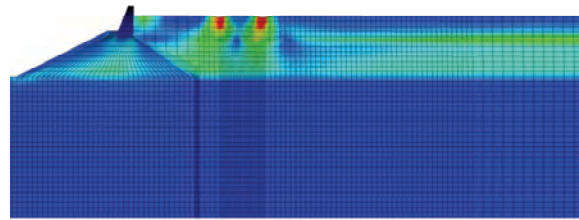


(c) 地震後150秒

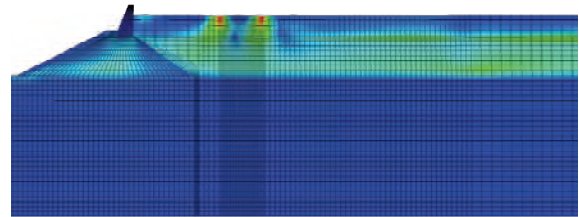


$k=4.0 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$

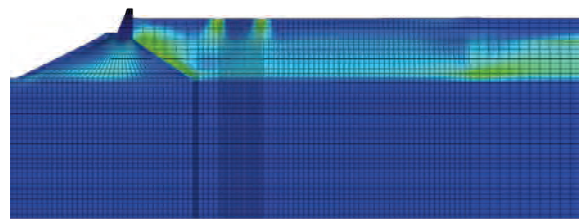
図 5 過剰間隙水圧分布 (ピッチ 1.0m)



(a) 無改良



(b) ピッチ2.0m



(c) ピッチ1.0m



$k=4.0 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$

図 6 せん断ひずみ分布 (圧密放置後)



図7に、護岸構造物から水平距離30mの位置（改良域の中央）の要素における時間-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20秒程度で1.0付近まで上昇し液状化に至っている。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。

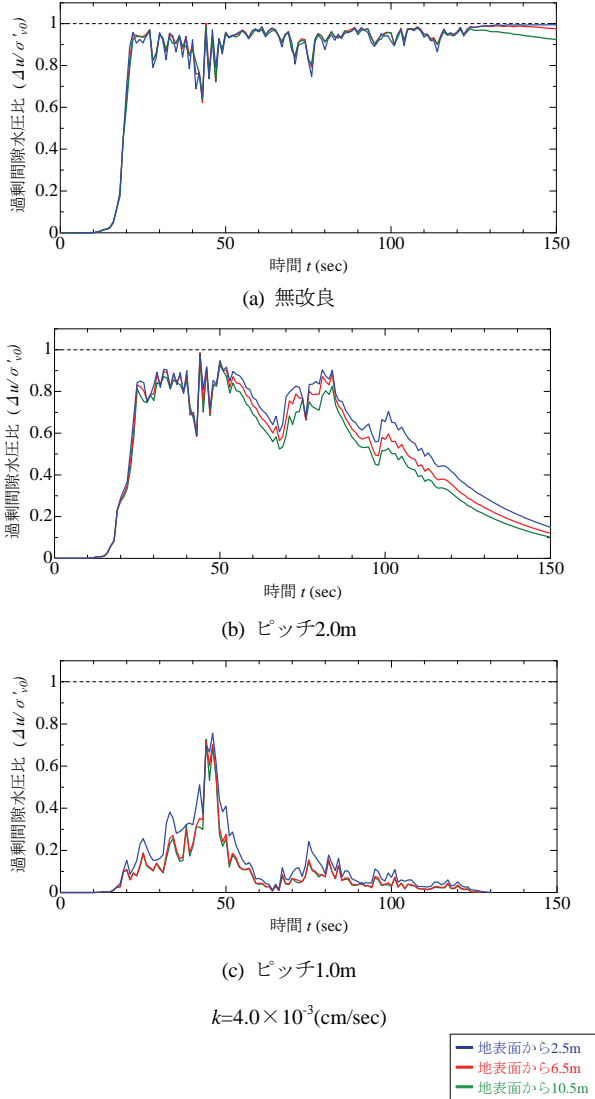


図 7 時間-過剰間隙水圧比関係

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。対象とする要素は護岸構造物から水平距離 30m、深さ 6.5m の位置の要素である。要素挙動を図 8 に示す。無改良ケースでは、地震中の過剰間隙水圧の上昇により有効応力がゼロ付近まで減少し、液状化に至る挙動が確認できる。一方、改良ケースでは、過剰間隙水圧の上昇を抑制した結果、その代償として地震中における地盤の締固めが発生している。また、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圧縮が生じるが、改良ケースではほとんど生じていない。

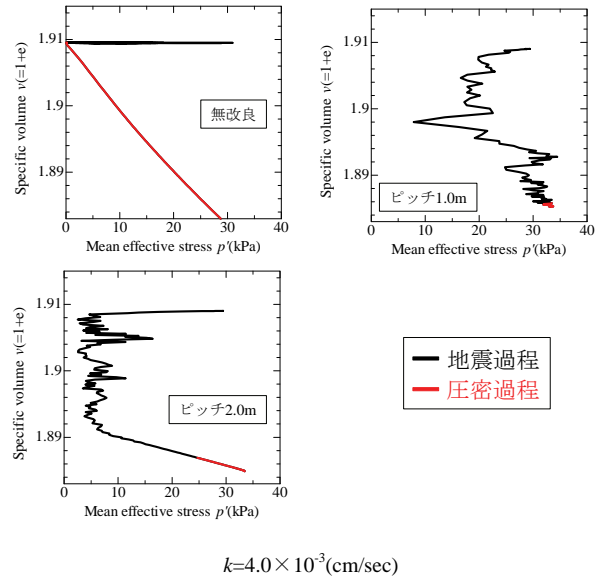


図 8 平均有効応力-比体積関係

埋立地盤全体の変形について考察する。図9, 10に、地震終了時および圧密放置後の地表面沈下量をそれぞれ示す。無改良ケースでは、集中荷重が作用している箇所では30cm程度の局所沈下が発生している。一方、改良ケースでは、地震時の間隙水圧の上昇を抑制した結果、地盤全体に10~15cm程度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沈下は抑制されている。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。圧密放置後、無改良ケースでは、水圧が消散する過程で地盤全体に20cm程度の沈下が生じているが、改良ケースではほとんど生じておらず、最終的な地盤沈下が抑制されている。

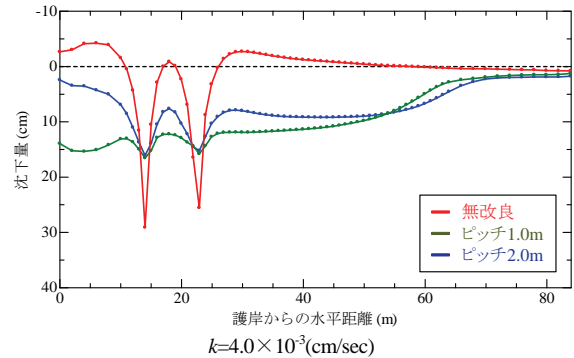


図 9 地表面沈下量 (地震終了時)

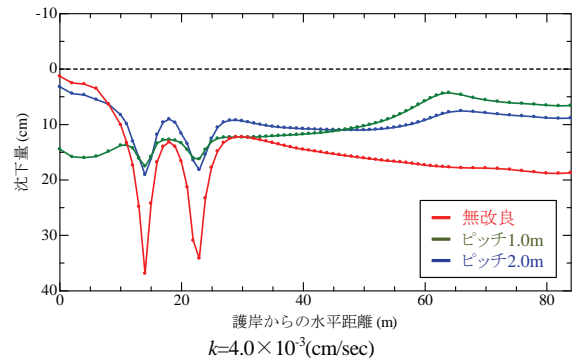


図 10 地表面沈下量 (圧密放置後)

図 11 に、圧密放置後の地表面水平変位量を示す。水平変位量は図面左方向を正とする。無改良のケースと比較して、ピッチ 1.0m のケースでは、水平変位が抑制されている。埋立砂層の液状化を抑制した結果、地盤の側方流動が抑えられたと言える。

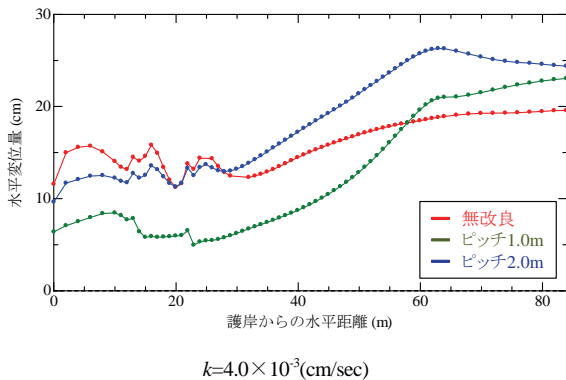


図 11 地表面水平変位量（圧密放置後）

### 2.3 地盤の透水係数の影響

今回対象とした埋立地盤では、間隙水圧消散工法により一定の液状化抑制効果が得られることが分かった。しかし同工法は、地盤内の間隙水がドレーンに流入することで間隙水圧の上昇抑制が発揮されるものであるため、地盤の透水係数に大きく依存する工法であると考えられる。そこで、埋立砂層の透水係数を4分の1まで低下、すなわち  $k=1.0 \times 10^{-3}(\text{cm}/\text{sec})$  として解析を実施した。埋立砂層の透水係数以外の解析条件は全て同じである。

図 12, 13, 14 に、3 ケースの過剰間隙水圧分布を、図 15 に、圧密放置後のせん断ひずみ分布を示す。図 3, 4, 5, 6 と比較して、間隙水圧の上昇抑制や局所的なせん断ひずみの抑制効果は小さく、ピッチ 2.0m ケースでは効果はほぼ無いと言える。

図 16 に、時間一過剰間隙水圧比関係を示す。図 7 と比較し、ピッチ 1.0m のケースでも、過剰間隙水圧比が 1 に近い値まで上昇し、その後の水圧の消散にも時間がかかっている。これは、地盤の透水性が低くなると地盤内の間隙水がドレーンに流入するのに時間がかかるためである。

次に図 17, 18 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 9, 10 と比較して、集中荷重箇所での局所沈下や圧密放置後の地盤沈下の抑制効果は小さい。

以上の結果が示す通り、間隙水圧消散工法は、ある程度透水性の高い地盤に有効な液状化対策工法であり、事前の照査が重要である。

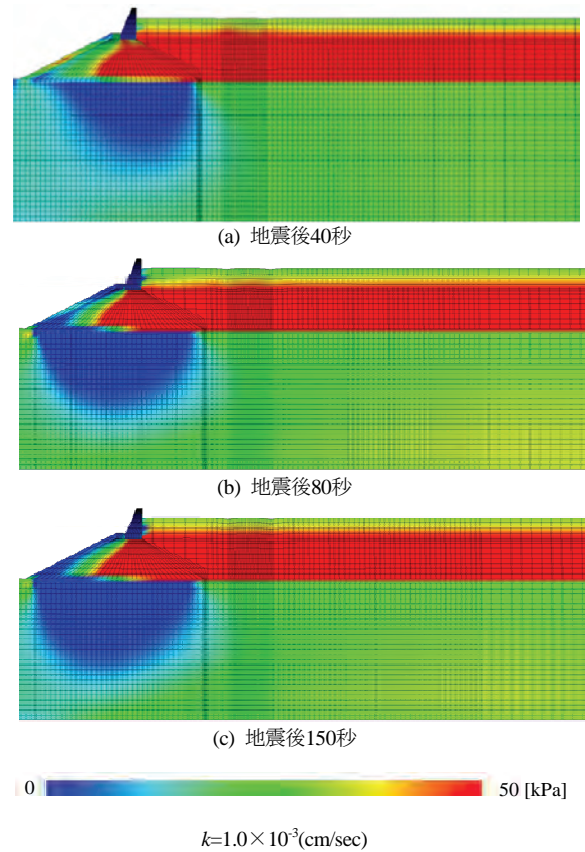


図 12 過剰間隙水圧分布（無改良）

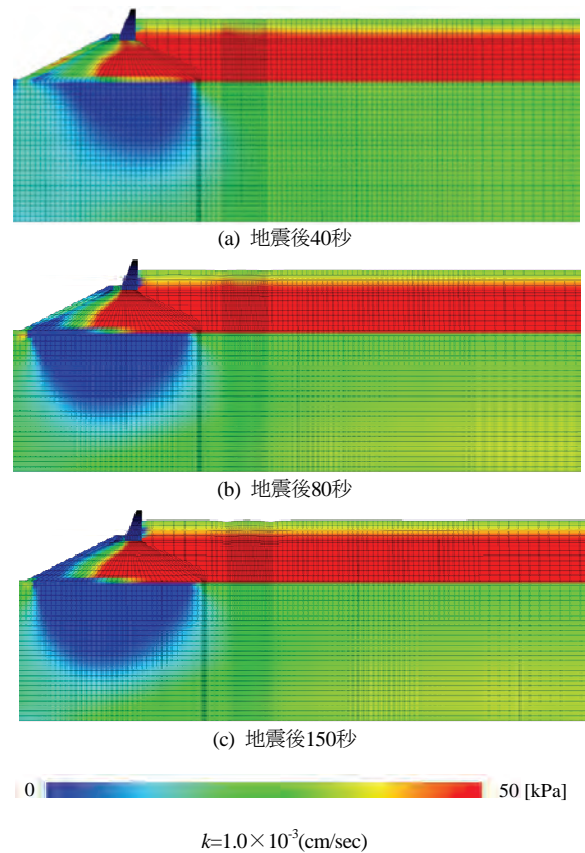


図 13 過剰間隙水圧分布（ピッチ2.0m）

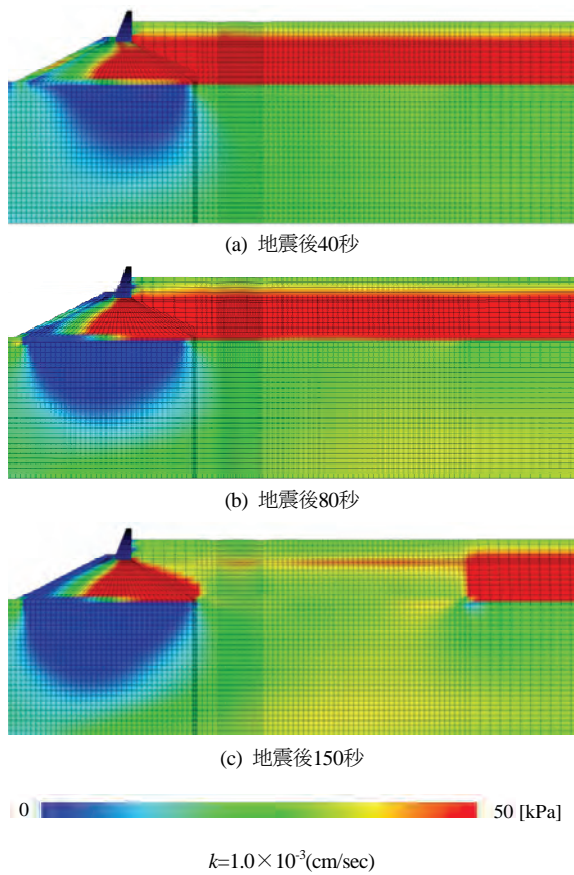


図 14 過剰間隙水圧分布 (ピッチ1.0m)

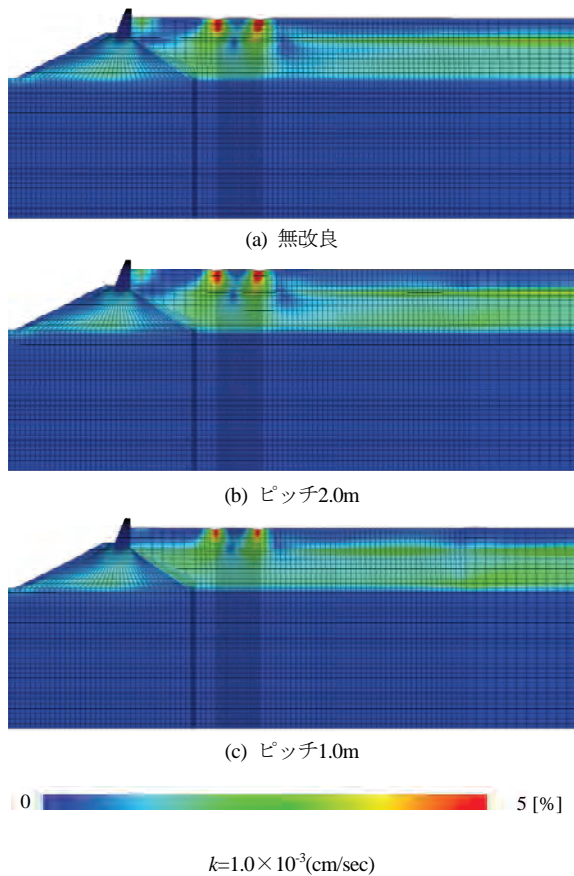


図 15 せん断ひずみ分布 (圧密放置後)

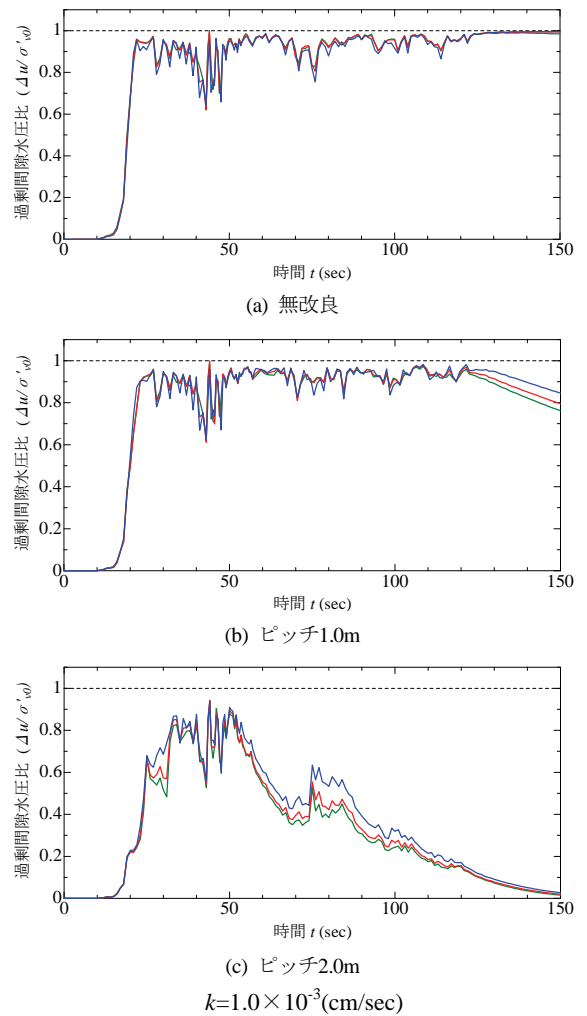


図 16 時間-過剰間隙水圧比関係

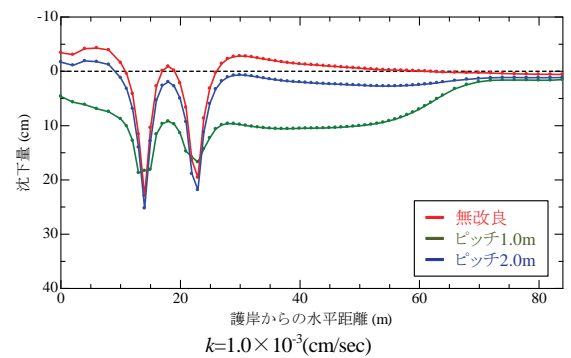


図 17 地表面沈下量 (地震終了時)

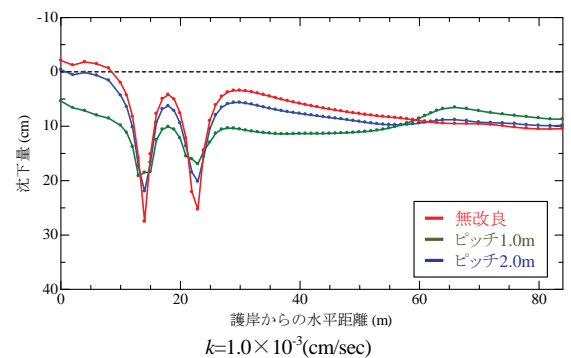


図 18 地表面沈下量 (圧密放置後)



### 3. 1次元メッシュ解析による検討

マクロエレメントを動的問題に適用したことにより計算コストの増加を大幅に抑えて間隙水圧消散工法による人工埋立地盤の液状化対策効果の検討をすることができた。しかし、種々の地盤条件や地震動等を用いて検討する場合、解析ケースがやむを得ず増加するため、このような時、2次元メッシュもしくは3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等を把握しておくことができれば効率的に設計を進めることができる。また、2. では2次元メッシュを用いた地盤の透水係数の影響について調べたが、1次元メッシュを用いた検討が有益な情報を与えるのであれば、より広範かつ補完的にその影響について調べることができる。そこで、図19に示す1次元メッシュを用いた解析と2次元メッシュ解析の結果を比較した上で、実際に地盤の透水係数の影響について調べてみることにする。計算条件は図19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。

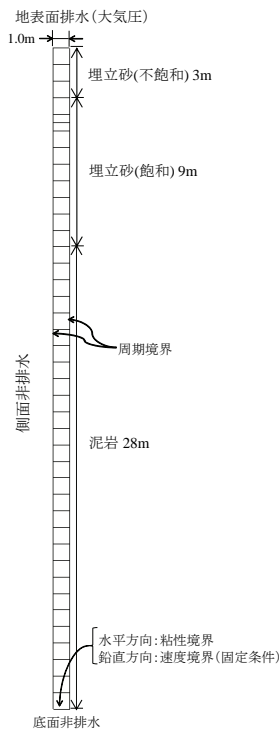


図19 1次元解析メッシュ

#### 3.1 2次元メッシュ解析結果との比較

図20, 21に時間-過剰間隙水圧比関係を示す。2次元メッシュ解析は図7, 16の結果を再掲する。 $k=4.0 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ ,  $1.0 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ の両ケースにおいて、1次元メッシュ解析は2次元メッシュ解析とほぼ同様の傾向を示している。これより、2次元または3次元メッシュを用いた計算の代わりに、1次元メッシュを用いた計算で間隙水圧の上昇抑制効果を把握することにより、改良に有効なドレーンピッチの選定を行う等、間隙水圧消散工法の設計を効率的に進めることが可能であると言える。

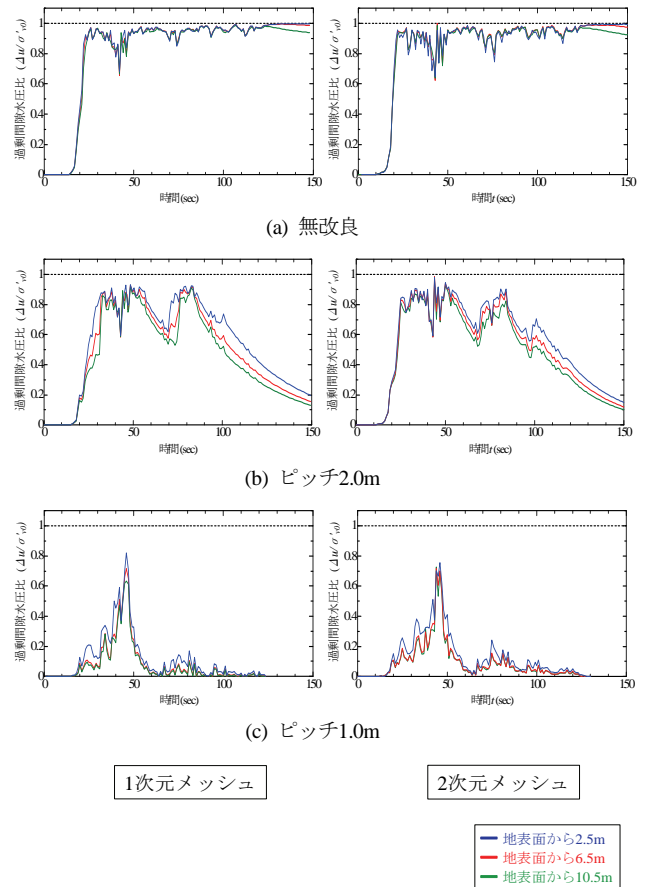


図20 時間-過剰間隙水圧比関係 ( $k=4.0 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ )

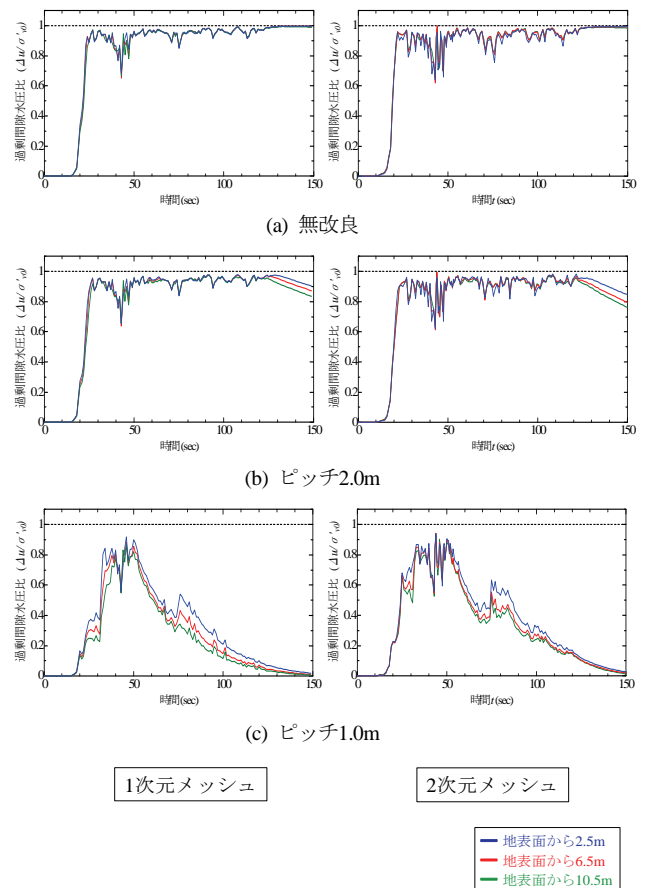


図21 時間-過剰間隙水圧比関係 ( $k=1.0 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ )

### 3.2 地盤の透水性と改良効果の関係

2.3 で述べたとおり、間隙水圧消散工法は対象とする地盤の透水性に大きく依存する。そこで、地盤の透水係数と液状化抑制効果の関係を調べるため、埋立砂層の透水係数を変化させた場合の、最大過剰間隙水圧比について1次元メッシュ解析によって検討した。図22に、ドレーンピッチ2.0m、1.0m、0.6mの3ケースにおける地盤の透水係数と最大過剰間隙水圧比関係を示す。最大過剰間隙水圧比は、地表面から2.5mの深さの値とする。

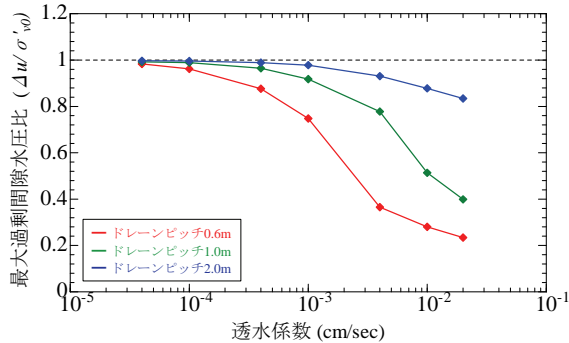


図22 地盤透水係数—最大過剰間隙水圧比関係

図22から分かるように、地盤の透水係数が大きくなる程、また、ドレーンピッチが細かい程、間隙水圧の上昇抑制効果が大きくなる事が分かる。今回対象とした地盤モデルではピッチを0.6mまで狭めると、埋立砂層の透水係数が $k=1.0 \times 10^{-3}$  (cm/sec)の場合でも効果が期待できると考えられる。このように、1次元メッシュ解析によって地盤の透水係数とドレーンピッチから間隙水圧の上昇抑制効果を把握することができる。なお、1次元メッシュ解析で評価が可能であるのはあくまでも間隙水圧の上昇抑制効果であり、変形抑制効果を把握するためには2次元もしくは3次元解析が必要であり、これらを上手く組み合わせることで、効率的な設計が可能になると思われる。

## 4. おわりに

水～土骨格連成有限変形解析コードGEOASIAに著者らによる新たなマクロエレメント法を適用して、人工埋立地盤を対象とした間隙水圧消散工法による液状化対策効果を検討した。その結果以下の知見が得られた。

1) 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を見込むことができる。

- 2) 人工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抑制することができる。
- 3) 地震直後に間隙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) 地盤の透水係数は間隙水圧の上昇抑制効果に対し高い感度を有している。1次元メッシュ解析により、地盤の透水係数、ドレーンピッチに応じた間隙水圧の上昇抑制効果を把握することができ、2次元または3次元メッシュ解析を1次元メッシュ解析とうまく組み合わせることで効率的な設計を行うことができる。

## 謝辞

この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)25249064の助成を受けたものであり、深謝の意を表します。

## 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): 局部載荷を受けるパ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.