

非排水条件下の地震応答解析結果を用いた 過剰間隙水圧消散-応力変形連成解析

曾田 暁* 森尾 敏** 森田修二**
柳原純夫*** 三木英通****

1. まえがき

近年、有効応力法に基づく液状化解析が実務設計でも頻繁に行われるようになってきている。これは、過剰間隙水圧の上昇、消散による有効応力の変化に応じて土の応力-ひずみ関係を時々刻々と変化させ解析を行うものであり、間隙水の浸透を考慮する場合としない場合に分類される。このうち前者は理論的に最も優れているものの、特に二次元解析における過剰間隙水圧発生に関する適切なパラメータの取扱いなど研究途上の部分も多く、実務段階では後者の浸透を考慮しない条件（非排水条件）の下で液状化解析を行うことも多い¹⁾。

一般的には液状化解析を行う際の地盤の排水条件は「非排水」とし、間隙水の浸透は特に考慮する必要はないとされているが、砂礫地盤など特に透水性の高い地盤では地震動継続中にも過剰間隙水圧の消散が高速で起こっていると考えられ、地盤の排水性が液状化の発生そのものを左右することも十分に考えられる²⁾。例えば、グラベルドレーン工法のような排水による液状化対策工法の効果を評価しようとする場合、それは無視できないものとなる。

本研究では、既往の研究³⁾を参考に、非排水条件下の地震応答解析結果と応力-浸透連成解析を連繋させることにより、地震動継続中および終了後の過剰間隙水圧の消散とそれに伴う地盤変形を近似的に評価する解析手法を考案した。本論前半では、実地盤に基づく一般的な一次元モデルに対しこの手法を適用し、この実用性について検証し、本論後半では、発展事例としてグラベルドレーンを考慮した二次元モデルに対し同様の解析を行い、グラベルドレーン工法の効果を数値解析的に評価した。なお、本研究における地震応答解析には FLIP（沿岸開発技術研究センター）⁴⁾、応力-浸透連成解析には FEAST（奥村組自社開発 FEM プログラム）^{5)~7)}を用いた。

2. 解析手法の概要

地震動継続中（含地震後）の過剰間隙水圧の消散を考慮する手法（以下手法1）と地震動終了後（のみ）の消

消散を考慮する手法（以下手法2）の概要を以下に示す。

手法1は、地震動継続中から地震動終了後の全過程で過剰間隙水圧の消散とそれに伴う地盤変形を考慮する手法である。この消散解析理論を図-1に示す。ここでは、予め、非排水条件下の地震応答解析から間隙水圧と有効応力の変化分を求めておき、この変化分をもとにして排水条件で有効応力法に基づく応力-浸透連成解析を行い、過剰間隙水圧の消散を考慮する。

これは、前述したグラベルドレーン工法のような地震動継続中の過剰間隙水圧の消散を無視できない場合に有効であり、この実用性を確立できれば Seed and Booker の理論に基づく設計法⁸⁾を数値解析的にバックアップでき、実務設計にも役立つものと考えられる。

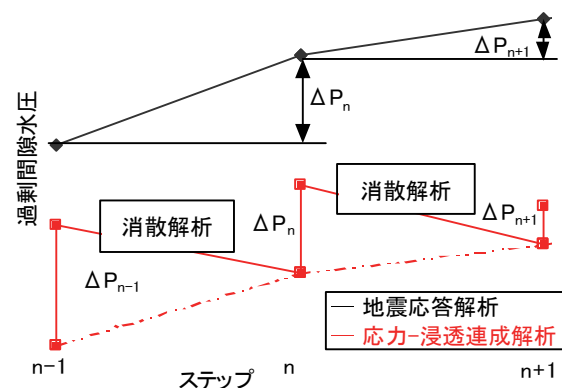


図-1 地震動継続中の消散解析理論

手法2は地震動継続中の消散は考慮せず、地震動終了後（のみ）の過剰間隙水圧の消散とそれに伴う地盤変形を考慮する手法である。この手法は、地震応答解析の最終ステップの間隙水圧と有効応力のみを使用するので、手法1と比べより簡易的な解析および照査が可能である。対象地盤に透水性の高い土層がなく、地震動継続中の消散を考慮する必要がない場合はこの手法で十分と思われる。

3. 一次元モデルの解析事例

前章で説明した2つの手法の実用性、および手法によ

*関西支社土木部 **情報システム室 ***本社土木部 ****本社土木設計部

る解析結果の違いを検証するために、実地盤に基づく一般的な一次元モデルに対し手法1と手法2をそれぞれ適用し、解析結果を比較、検証した。

3.1 解析モデル

解析対象地盤モデル、土質条件、および地震応答解析による地震動終了時の過剰間隙水圧比分布（手法2の解析における初期条件）を図-2に示す。地盤モデルは、1995年の兵庫県南部地震における神戸ポートアイランド（P I）の地盤特性に基づいたモデルである。なお、透水係数は砂質土では 1.0×10^{-2} cm/s、粘性土では 1.0×10^{-6} cm/s とそれぞれの土質特性の一般的な値を用い、地盤の非線形特性はFLIPと同じ平均有効拘束圧依存型とした。

応力-浸透連成解析を行う際、排水面境界位置が問題となるが、現状では排水条件について不明確な部分が多いため、ここでは便宜的に地下水面高さに排水面境界を設定した。

また、地震動継続中の応力-浸透連成解析における時間間隔を大きくすると、解析結果に大きな影響を及ぼす可能性があるため、試行錯誤の結果、数値誤差が無視できる程度の小さい値（ここでは $\Delta t = 0.01$ s）を用いた。

図-3に今回の地震応答解析で用いた入力地震波を示す。ここでは神戸P IのGL-32 m波（Max=543.594 Gal、継続時間30 s）を用いた。

3.2 解析結果

要素2、4、6の手法1と手法2による過剰間隙水圧時刻歴の比較を図-4に、地表面の鉛直方向変位（沈下



図-2 地盤モデル（一次元解析）

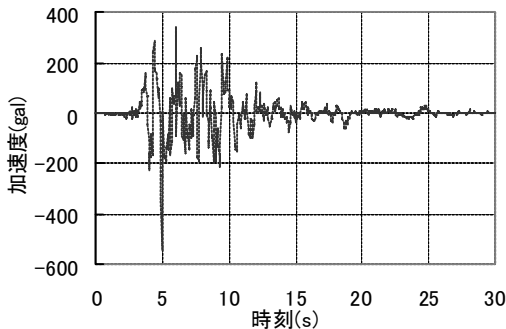
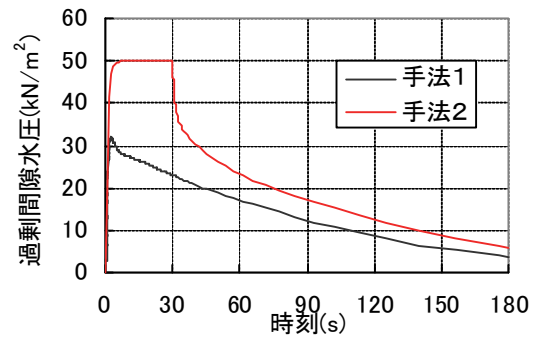


図-3 入力地震波（一次元解析）

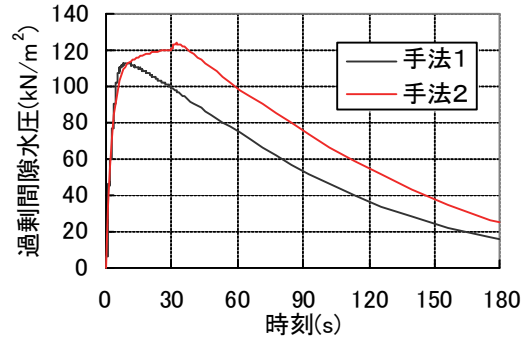
量)の比較を図-5に示す。また、手法1による過剰間隙水圧比の時系列変化を図-6に示す。なお、手法2の $t=0.0 \sim 30.0$ sの結果は地震応答解析（非排水条件）によるものである。

3.3 考察

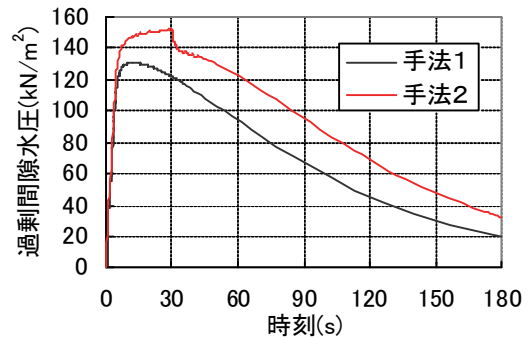
図-4の過剰間隙水圧の消散過程に着目すると、要素2のみ手法1、2の結果に大きな違いが見られるが、これは排水面境界の影響である。要素4、6については、結果に大きな違いはなく、手法1では要素4、6ともに $t=10.0$ s付近で最大値に達した。また、要素4の手法2の結果より $t=30.0$ s直後に数秒間の過剰間隙水圧の



(a) 要素2



(b) 要素4



(c) 要素6

図-4 過剰間隙水圧時刻歴（一次元解析）

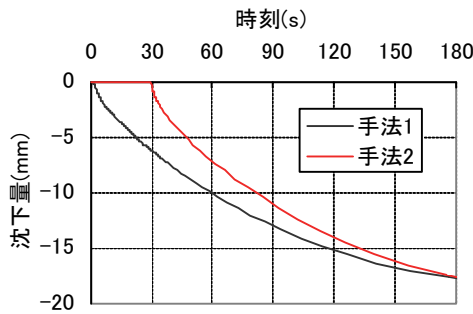


図-5 鉛直変位時刻歴

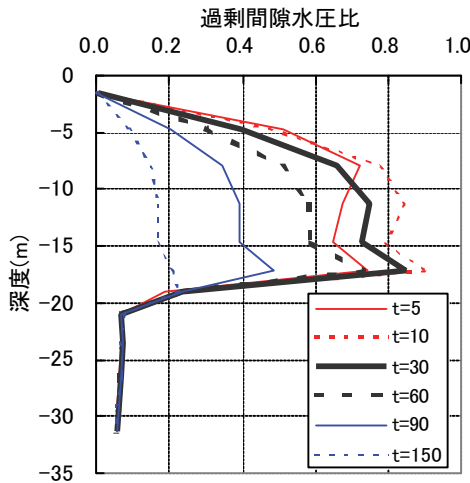


図-6 過剰間隙水圧比時系列変化(手法1)

上昇が見られるが、これは下方要素からの浸透を伴う migration の影響と考えられる。

また、地盤変形に着目すると $t=180$ s までは図-5 のような沈下経過をたどり、それ以降の沈下過程および最終沈下量(約 25 mm)は手法1、2ともほぼ同じであり、地盤の非線形特性による違いはあまり見られなかった。

解析結果にそれほど大きな違いが見られなかったのは、解析対象地盤が一般的な砂質土と粘性土のみで構成されているためであろう。図-6より、 $t=30.0$ s での砂質土層での過剰間隙水圧比は 0.6~0.9 程度であり、地震動継続中の過剰間隙水圧の消散はそれほど大きくないことがわかる。すなわち、地盤の透水性が高く地震動継続中の過剰間隙水圧の消散を考慮する必要がある場合などを除いて、手法1を用いずとも、より簡易的な手法2を用いることで手法1と同等な結果を得ることができる。

また、地盤変形量が実際(20~40 cm 程度と推定される)よりかなり小さい理由としては、地震応答解析における液状化時の地盤剛性が実際のそれよりかなり大きく、応力-浸透連成解析でこの地盤剛性をそのまま使用したことが考えられる。実際に予想される地震動終了時の埋

立砂質土層の地盤剛性を地震動終了時の S 波速度⁹⁾から計算すると、地震応答解析により得られた地盤剛性の 1/6 程度であった。

以上の結果、手法1と2の比較から、地震動継続中の排水条件の違いによる過剰間隙水圧の消散過程の違いを数値解析的に評価することができた。ただ、ここでの解析結果にそれほど大きな違いが見られなかったのは上述の理由によるものであり、対象地盤に透水性の高い土層があれば、結果に明確な違いが表れることが予想される。

また、地盤沈下量については実際より小さい結果となり、今後の課題としたい。

4. 二次元モデルの解析事例

前章の一次元モデルの解析結果より、地盤変形量については今後課題を残したものの、過剰間隙水圧の消散については定量的に評価できる結果を得た。

ここでは、発展事例としてグラベルドレーンを考慮した二次元モデルに対して手法1を適用し、グラベルドレーンの有無による過剰間隙水圧の上昇、消散過程および消散速度の違いを比較、検証した。

4.1 解析モデル

解析対象地盤モデル、土質条件および予めこの地盤特性に基づく自由地盤モデルに対して行った地震応答解析による地震動終了時の過剰間隙水圧比分布を図-7に、グラベルドレーンの諸元を表-1に示す。地盤モデルは、四国電力坂出火力発電所の3号機脱硫装置基礎地盤に基づくものであり、グラベルドレーンの諸元のうち地震応答解析で使用するのは FLIP 研究会の捨石 WG 検討報告書¹⁰⁾によるもの、応力-浸透連成解析で使用するのは実際の設計計算書によるものである。

ここでは、グラベルドレーンの効果を評価するために改良前の原地盤モデル(CASE 1)とグラベルドレーン施工部(図-7参照)を表-1に基づいてモデリングした

表-1 グラベルドレーン諸元

せん断強度特性	$C=0, \phi=40^\circ$	地震応答解析で使用
初期せん断剛性($=\rho V_s^2$)	$V_s=300(\text{m/s})$	
最大減衰定数	0.3	
ドレーン形状	柱状	応力-浸透連成解析で使用
ドレーン材透水係数	10(cm/s)	
ドレーン半径	0.25(m)	
ドレーン長	5.3(m)	
打設間隔(正方形配列)	2.0(m)	

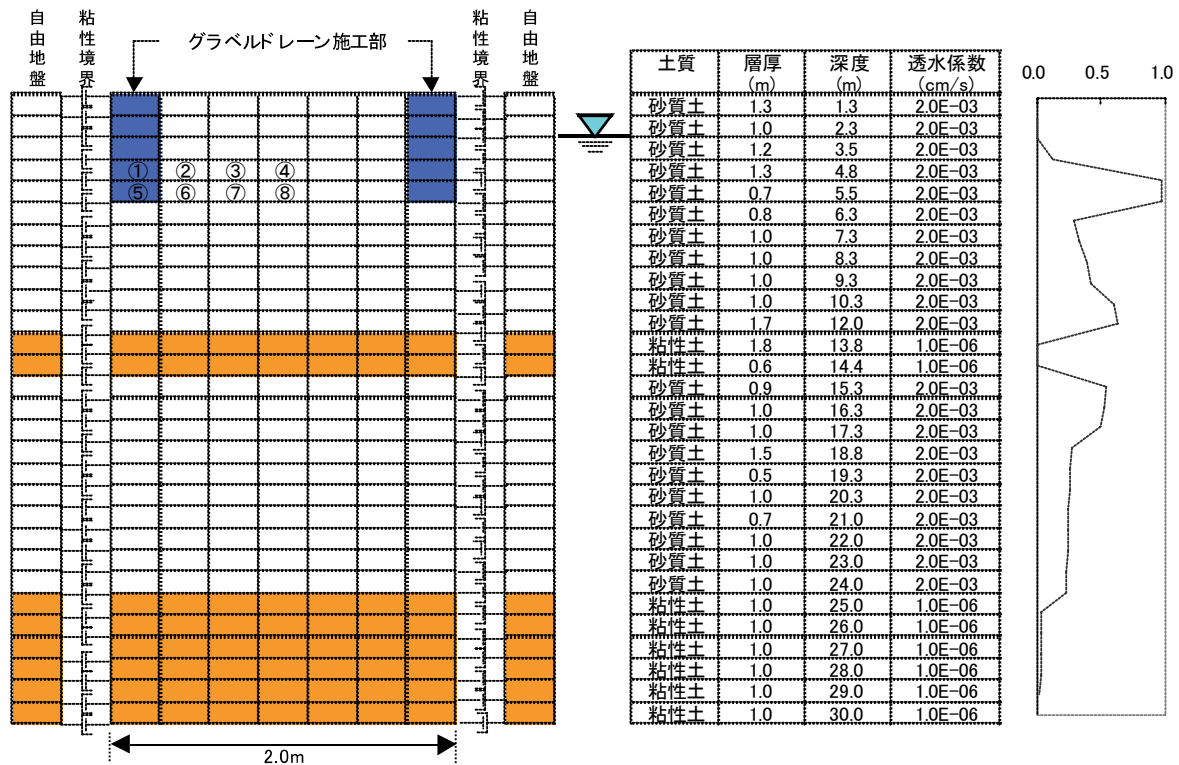


図-7 地盤モデル（二次元解析）

改良後の地盤モデル（CASE 2）を別々に設定し、それぞれに対し地震応答解析および応力-浸透連成解析を行った。なお、図-7中の透水係数は改良前地盤の値である。

図-8に地震応答解析で用いた入力地震波を示す。ここでは1978年の宮城県沖地震波（Max=102.240 Gal、継続時間25 s）を用いた。

また、参考文献10)によると、砂礫等の透水性の高い要素の近似的モデリング手法として、水の体積弾性係数を本来の値 $K_f=2.2 \times 10^6$ kN/m² とせず、 $K_f=2.2 \times 10^4$ kN/m² とする案が示されているが、この方法はまだ研究途上の段階にあり、実務設計への適用事例も少ないことから、今回の解析では同文献のはじめに示されている既往のパラメータ設定法に基づく諸数値を用いた。

4.2 解析結果

自由地盤モデルに対して行った地震応答解析から過剰間隙水圧比がほぼ1.0となり液状化の危険性が示された図-7中の要素1~8のCASE1とCASE2による過剰間隙水圧時刻歴の比較を図-9に示す。

4.3 考察

図-9各図より、原地盤に対する解析（CASE1）とグラベルドレーンを考慮した解析（CASE2）の結果を比較したところ、グラベルドレーンの有無により結果に大きな違いが表れた。

CASE2の結果より、水平排水距離が短いほどグラベルドレーンの影響を強く受け、効果的に過剰間隙水圧が消

散することが確認された。要素1、5はグラベルドレーン施工部そのものであり、過剰間隙水圧の上昇は見られず、グラベルドレーン隣接の要素2、6では最大過剰間隙水圧がCASE1の結果と比べ半分以下に抑えられ、かつt=10.0 s前には全ての過剰間隙水圧が消散した。また、要素3、4、7、8では最大過剰間隙水圧はCASE1の結果とそれほど大きな違いはないものの、t=10.0 s 過ぎには全ての過剰間隙水圧が消散し、CASE1との消散速度の違いは一目瞭然である。

以上より、グラベルドレーンを考慮した二次元モデルに対し手法1を適用させた結果、地震動継続中の過剰間隙水圧の上昇の抑制かつ高速な消散を数値解析的に評価することができた。

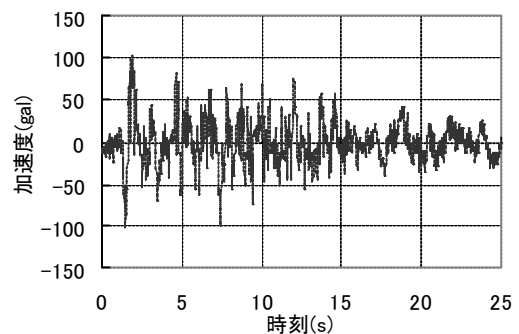
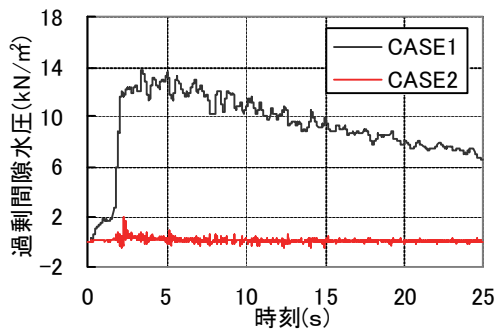
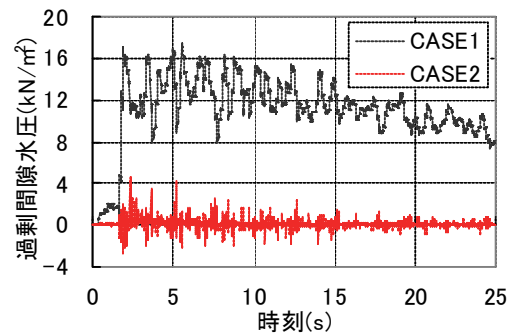


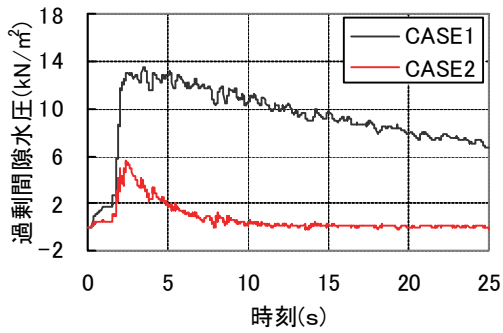
図-8 入力地震波（二次元解析）



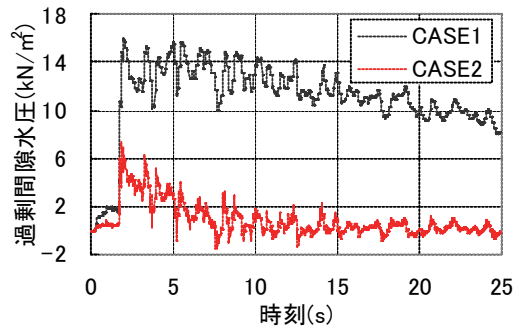
(a) 要素 1



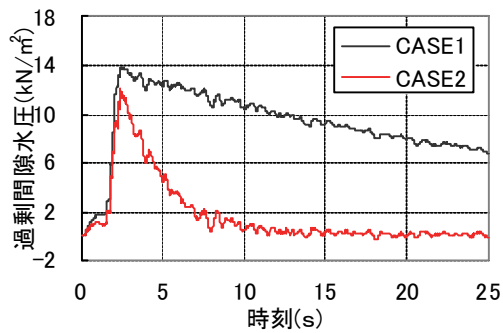
(e) 要素 5



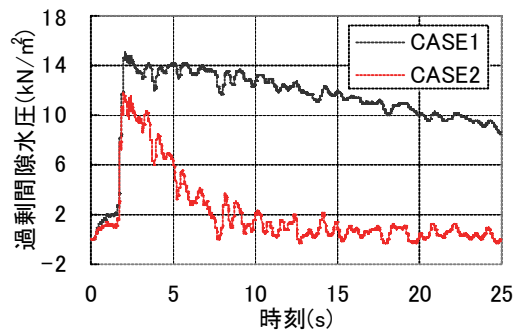
(b) 要素 2



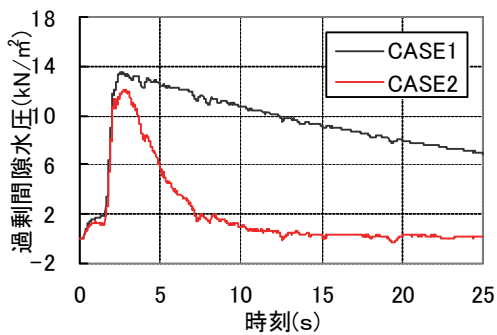
(f) 要素 6



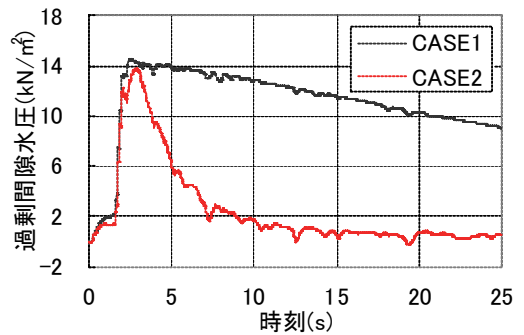
(c) 要素 3



(g) 要素 7



(d) 要素 4



(h) 要素 8

图-9 过剩间隙水压时刻历 (二次元解析)

5. まとめ

本研究から得られた成果、結論を以下に列記する。

- i. 非排水条件下の地震応答解析結果と応力-浸透連成解析を連繫させることにより、地震動継続中および終了後の過剰間隙水圧の消散を近似的に評価する解析手法を考案した
- ii. 上の手法を一般的な地盤構成からなる一次元モデルに対し適用させた結果、地盤変形量については実際より小さい結果となり今後に課題を残したが、過剰間隙水圧の消散過程については排水条件による消散過程の違いを評価することができた
- iii. 一次元解析の結果を踏まえ、発展事例としてグラベルドレーンを考慮した二次元モデルに対し同様な解析を行った結果、地震動継続中の過剰間隙水圧の上昇の抑制かつ高速な消散を数値解析的に評価することができた

6. あとがき

本研究の結果より、最終的に上のような結論を得たが、地震動継続中の解析手法（過剰間隙水圧の消散）については定量的な検証がまだ不十分であり、今後の課題と考えている。また、応力-浸透連成解析から求まる地盤変形量が実際のそれより小さいこと、応力-浸透連成解析における排水面境界位置、不飽和浸透領域および負の間隙水圧の取扱いなどの課題もあり、それらについても今後検討していきたい。

【参考文献】

- 1) 安田 進、「液状化の調査から対策工まで」、鹿島出版会、1988、pp. 121～123
- 2) 吉見吉昭、「砂地盤の液状化（第2版）」、技報堂出版、1991、p. 91
- 3) 安倍 勇、森尾 敏、「2次元液状化解析によるグラベルドレーンの効果について」、奥村組技術研究年報、No. 10、1984、pp. 85～89
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T., 「Strain space plasticity model for cyclic mobility」, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1～15, 1992
- 5) 林 一隆、小田恵之輔、増井 仁、「有限要素法による地盤の変形解析」、奥村組技術研究年報、No. 1、1975、pp. 69～76
- 6) 小田恵之輔、増井 仁、「有限要素法による浸透流解析（第1報）」、奥村組技術研究年報、No. 2、1976、pp. 107～113
- 7) 増井 仁、森田修二、「応力・浸透を連成した有限要素解析」、奥村組技術研究年報、No. 12、1986、pp. 83～88

- 8) 地盤工学会、「液状化対策の調査・設計から施工まで」、1993、pp. 322～330
- 9) 森尾 敏、北角 哲、日下部 伸、「ポートアイランド・鉛直アレー観測記録における波動の伝播特性」、第31回地盤工学研究発表会講演集（2分冊の1）、1996、pp. 1093～1094
- 10) FLIP 研究会、「捨石 WG 検討概要の報告」、2001. 1