

広範囲を対象とした埋立て地盤の3次元液状化解析とアレー観測記録の比較

大成建設(岐阜大学大学院)	正員	田口 洋輔
岐阜大学	正員	八嶋 厚
岐阜大学	正員	岡 二三生
岐阜大学	正員	杉戸 真太
大成建設	正員	立石 章

1. はじめに

大規模な埋立によって建設される人工島には、その性格上重要かつ大規模な構造物が多数存在していることが多い。一方で埋立地盤には圧密沈下や地震時の液状化など、地盤工学的に重要な問題が内在している。特に液状化に関しては、瞬時にして構造物の支持力を失わせ、大変形、沈下をもたらすため、甚大な被害につながる。液状化による被害のメカニズムを解明し、適切な措置を施すことは、埋立地盤に対して早急に行うべき課題であると考えられる。

本研究においては、人工島の液状化時の基本的な挙動を把握するため、兵庫県南部地震において大規模な液状化が確認されたポートアイランド周辺の地盤をモデル化し、Biotの二相混合体理論に基づく3次元液状化解析を行った。ポートアイランドでは、神戸市開発局により鉛直アレー観測記録が得られており、地震時の液状化特有の挙動が観測記録からも確認できる。本研究は、1次元土柱モデルを用いたアレー観測記録のシミュレーション解析(岡ら;1996¹⁾)に引き続き、ポートアイランド全域および周辺海底地盤を簡単な形状にモデル化し、広域的な液状化挙動を概略的に把握することを目的としたものである。人工島および周辺地盤の各地点における挙動を整理・比較し、さらにアレー観測地点における観測記録と解析結果の比較を行った。

2. 解析手法

解析に用いた砂の繰返し構成モデルは、非関連流動則による弾塑性理論に基づいており、微小ひずみを仮定している。過圧密境界曲面の概念と非線形移動硬化則、あるいは流れ則の一般化、塑性剛性のひずみ依存性を導入し、3次元まで含めた多様な応力状態に適用することが可能な比較的シンプルなモデルとなっている^{2),3)}。

土粒子骨格と間隙水の二相系の連成問題を解析する支配方程式として、Biotの理論に基づいた固相の変位 u と液相の液圧(間隙圧) p を未知数とする u - p 形式の定式化が行われている。釣合い式はFEMの離散化手法に基づき、また連続の式は赤井・田村の方法を用いてFDMにより離散化されている。両式はNewmarkの β 法を用いて時間に関して離散化され、空間的・時間的に離散化された支配方程式が得られる⁴⁾。定式化に際しては、間隙流体の圧縮性を仮定している。これは、埋立地盤においては埋立時の気泡の混入、あるいは潮位の変化などにより間隙流体を非圧縮とはみなせず、圧縮性を考慮した方が実挙動の再現性が高いという既往の検討結果に基づいている⁵⁾。

3. 解析モデル

解析は兵庫県南部地震の際にポートアイランドで得られたアレー観測記録(GL-83m、3方向成分加速度)および観測地点の地盤データを用いて行った。図-1にアレー観測地点の土層構成と観測記録(加

Three Dimensional Liquefaction Analysis of Man-made Island and Comparison with the Vertical Array Record:
TAGUCHI, Y., YASHIMA, A., OKA, F., SUGITO, M.(GIFU University) and TATEISHI, A.(TAISEI Corporation)

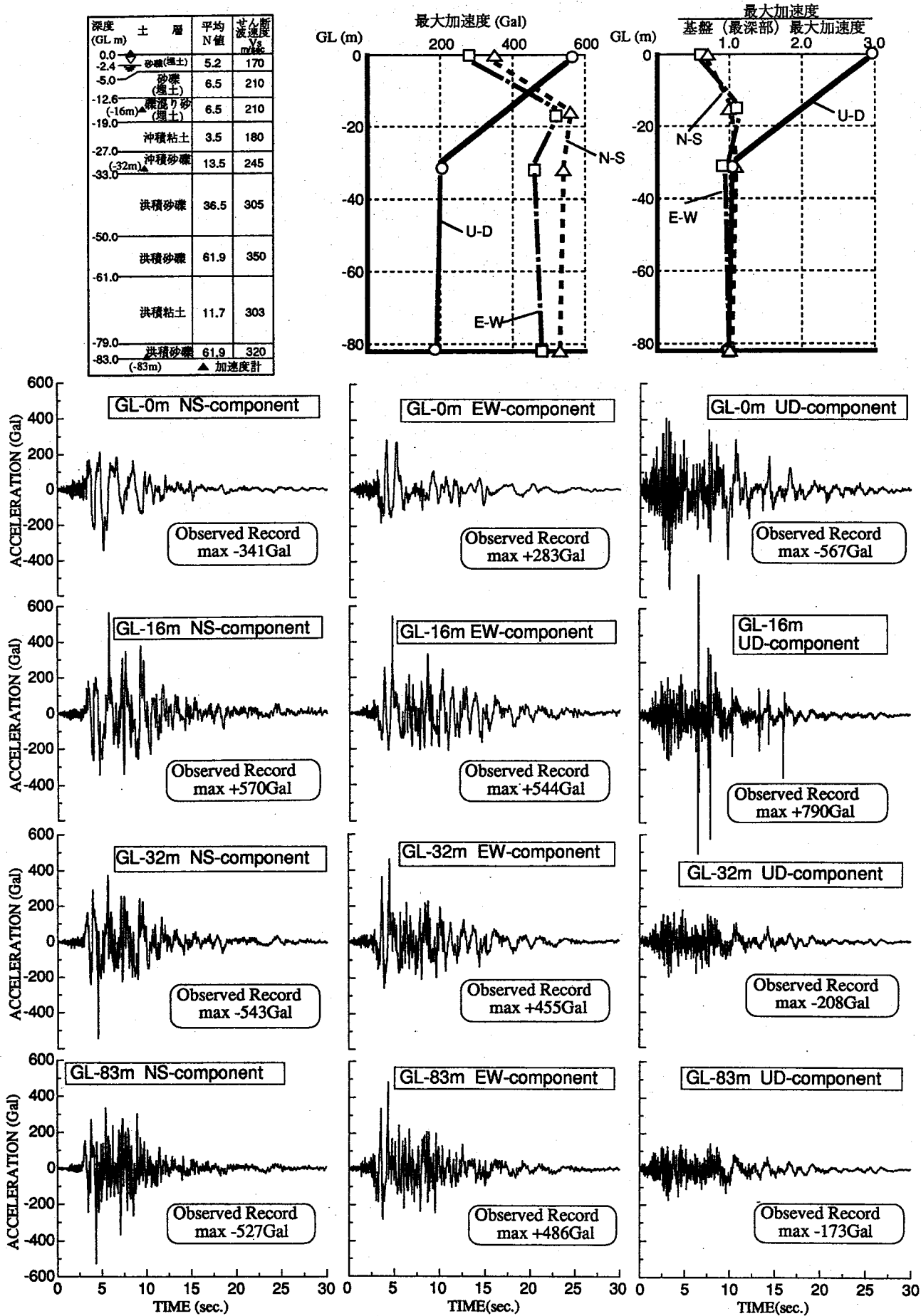


図-1 ポートアイランドの鉛直アレー観測記録と加速度増幅特性および地盤構成
(GL-83mの水平波形はSugitoら(1996)⁶⁾により方向補正)

速度時刻歴、加速度増幅特性)を示す。材料パラメータおよびその設定根拠についてはこれまでの研究¹⁾に基づいている。本研究においては、人工島の平面を面積がほぼポートアイランド第1期埋立てと等価な正方形(2km×2km)とし、GL-19mまでの直方体にモデル化した。GL-19m(海底面)以深は自然堆積地盤とし、解析の平面範囲は、人工島を中心に6km×6km、深さはGL-83mまでとした。地盤はすべて水平成層を仮定している。拘束条件は、底面が固定のほかはすべて自由変位境界とし、排水条件は人工島地下水位面(GL-2.4m)と海底面を排水境界に、人工島側面などは非排水境界とした。要素は約600の六面体ソリッド要素を用いているが、非常に粗く扁平な形状であり、また地層の傾斜あるいはローカルな土質の相違、入力地震動の位置的相違などを無視しており、解析的な精度に関していえば不十分であると思われる。しかし、定性的に人工島の中央部と端部の挙動、あるいは人工島の存在による海底地盤の挙動の相違などについて考察が可能であると考えられる。

4. 解析結果と考察

解析は図-1に示したGL-83mにおける3方向加速度成分を用いて行った。ただし図-1の時刻2秒から14秒の12秒間のみ解析を行っている。

はじめに、解析結果をアレー観測記録と比較する。図-2は3次元モデルにおいて、護岸からの平面位置がアレー観測地点とほぼ同様の節点における3成分加速度応答時刻歴と観測記録の比較である。水平成分はN-S、E-W両成分ともほぼ振幅の最大値、位相特性などを再現している。ただし、GL-16m、-32mにおいては、解析において高周期成分の減衰が顕著であり、時刻6秒程度以降の再現が十分ではないが、この原因の一つとしては解析メッシュの粗さに起因するものと考えられる。一方、鉛直成分については、埋土層の圧縮性の増大による増幅特性などを含め、解析結果は観測記録をよく再現している。図-3はアレー観測地点の平面変位軌跡の観測値と解析結果の比較である。観測値は加速度記録をFFTを用いた積分により変位記録に変換し、有効周波数範囲0.15-20.0Hz、0.1Hz以下および25Hz以上を不通過とする台形デジタルフィルターを介したものである⁶⁾。図-3においては観測記録の描画範囲が8-18秒であるのに対して解析結果の描画範囲が2-12秒であり、単純な比較はできないが、卓越する方向がほぼ合致している点、および変位の絶対値が同様である点は注目すべき事項であり、メッシュ等の粗さに問題はあっても本手法および本モデルによりよい再現性が得られていることが確認された。

次に、人工島および周辺地盤全体の挙動について解析結果を示す。図-4は加振14秒後の過剰間隙水圧比の分布を示す。この時点で主要動はほぼ終了している。また、図-4の構造スケールは鉛直方向に対して水平方向を1/20としている。地下水位以深の埋立地盤および海底面以深の沖積砂礫層(GL-27m~-33m)、あるいはその下層の洪積砂礫層で過剰間隙水圧比が0.7を超える上昇が確認できる。図-5は、GL-32m(沖積砂礫層)およびGL-16m(埋土層)における各地点の過剰間隙水圧比の時刻歴である。地点としては、海底地盤部(沖積砂礫層のみ)、西側護岸中央部直下、護岸北西コーナー部直下および人工島中心部直下を選んだ。図-4および図-5より、各地点に明確な差異は現れず、同一レベルにおいてはほぼ同様な結果が得られた。この原因の一つとして、特に埋土層においては人工島側面を非排水境界としたため各地点が同様の水圧蓄積傾向を示したが、排水条件によっては人工島中央部と護岸近傍で挙動が異なることが予想される。沖積砂礫層においては、海底地盤面が排水境界となっているため図-5の海底地盤直下の水圧上昇は他の地点と比較して多少低くなっているが、粘性土層を介しているためその傾向は顕著ではない。図-6は人工島の4コーナー部およびアレー観測地点地表面の水平変位軌跡を示す。NW-SE方向に卓越した入力地震動により、地表面各点の変位もこの方向の振動を生じている。ただし、各コーナー部においては自由変位境界面となっているため、残留変形が海側に生じている。変位の最大値は、アレー観測地点で50cm程度、コーナー部で100~150cm程度となっているが、護岸の構造などを考慮するとコーナー部の変位はさらに抑えられるものと考えられる。一方ではこれらの検討に

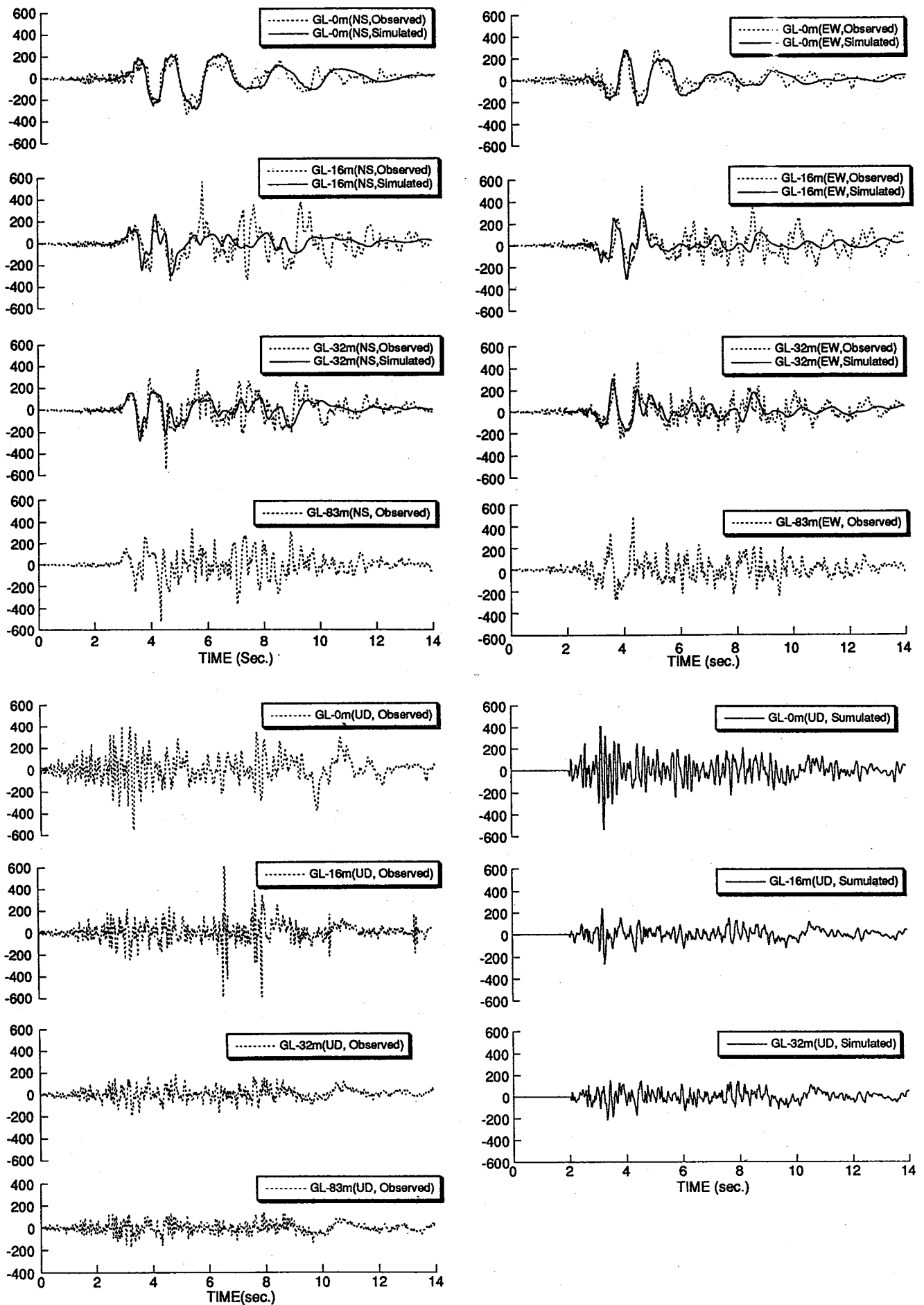


図-2 3次元液状化解析によるアレー観測地点の解析結果と観測記録の加速度応答時刻歴の比較

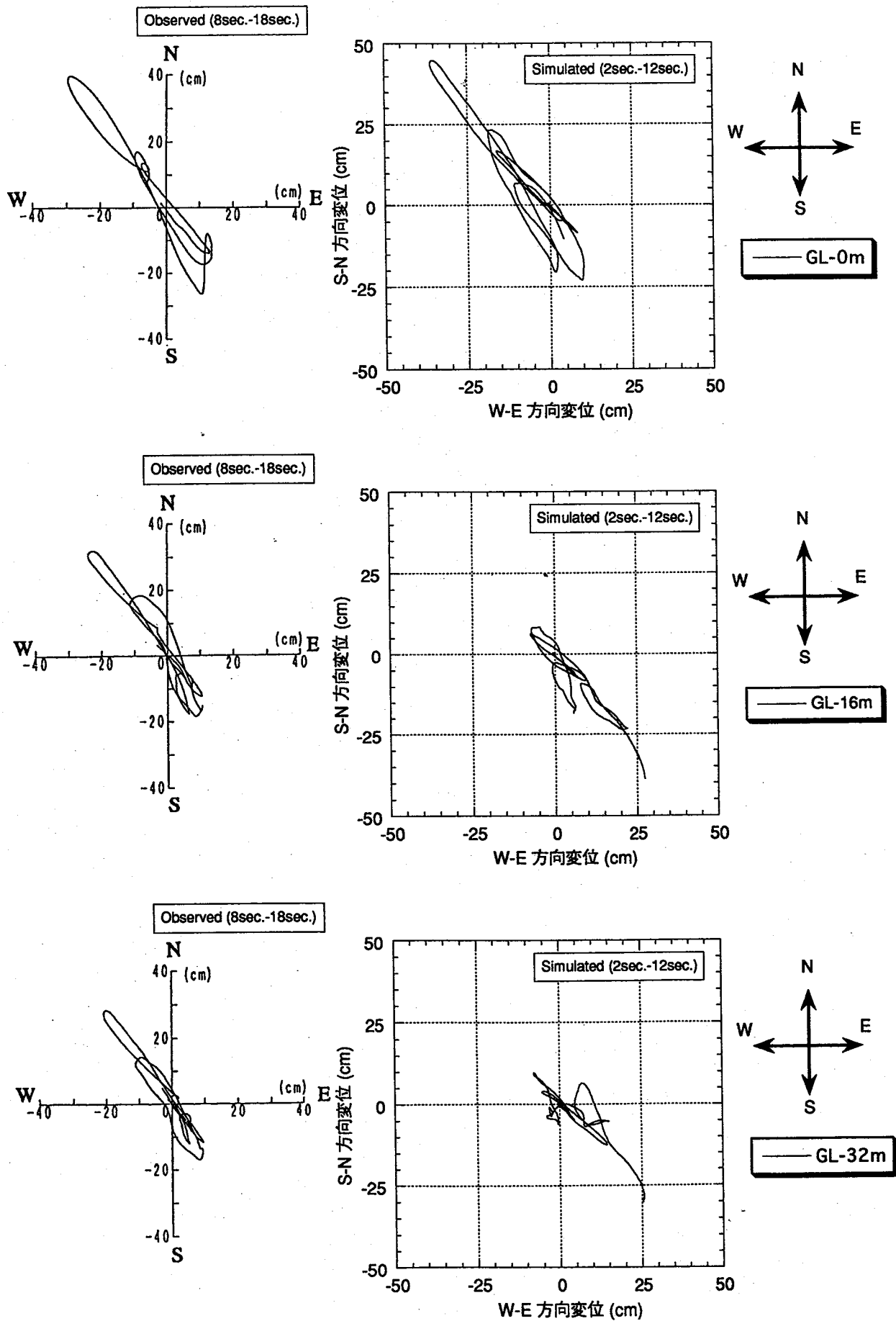
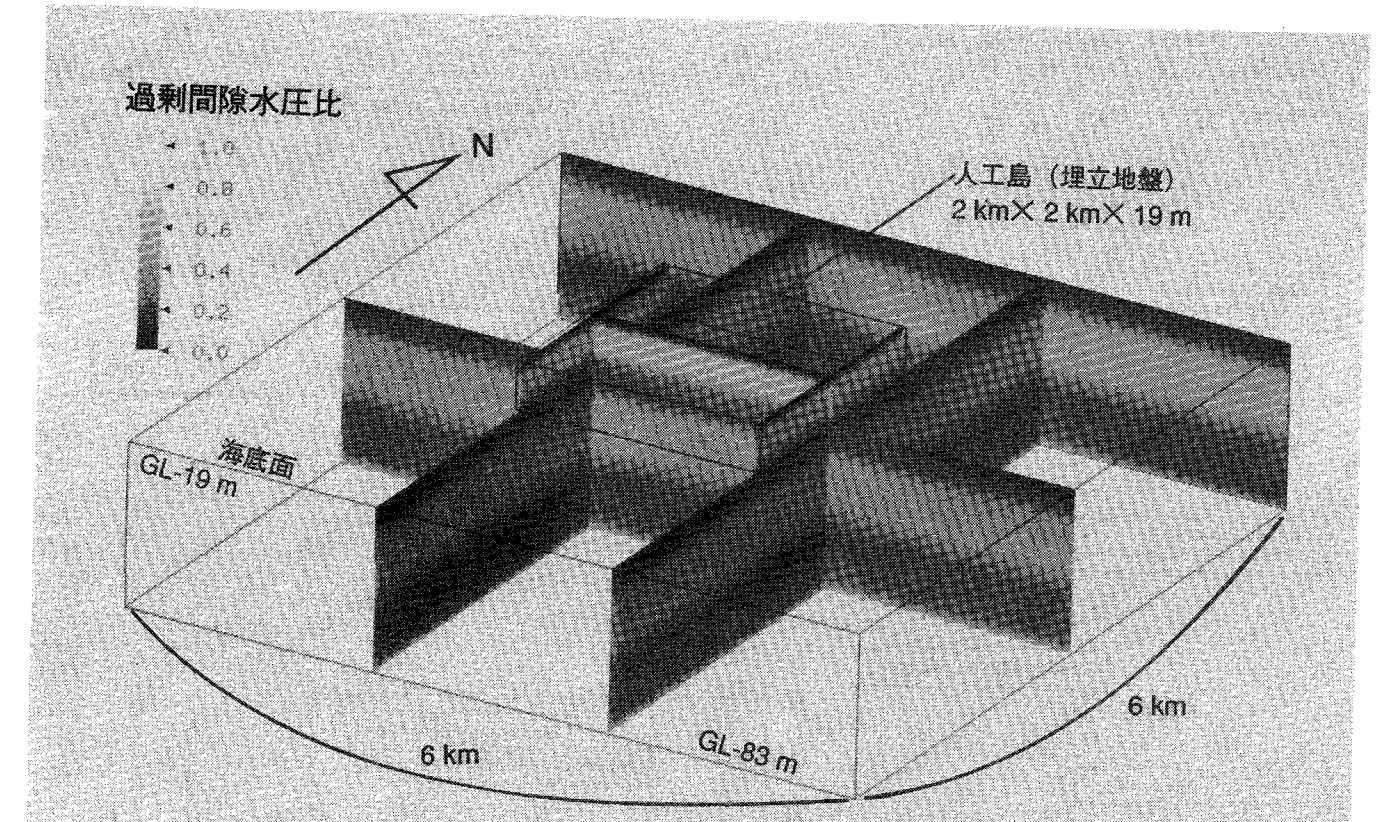
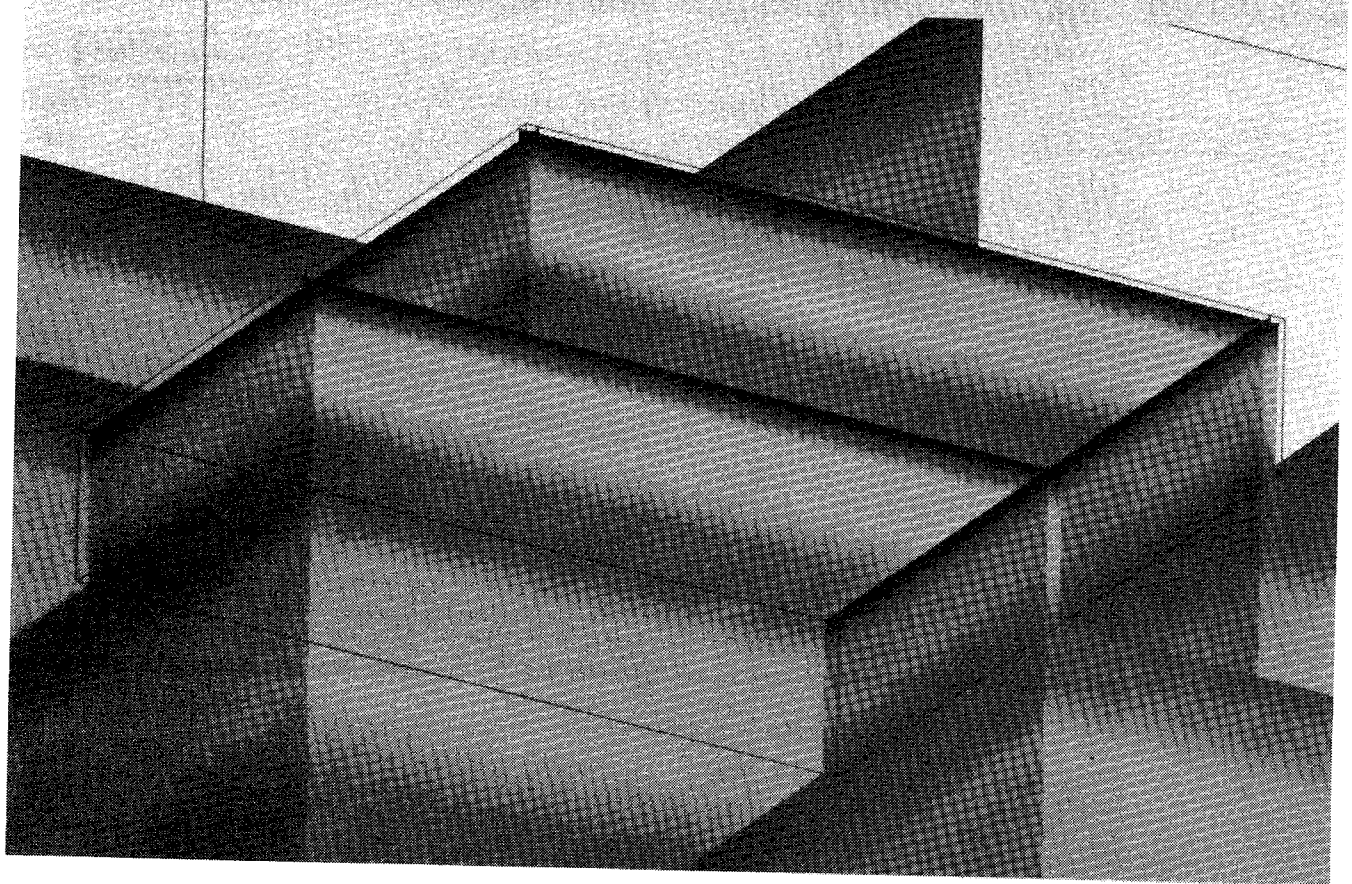


図-3 アレー観測地点における平面変位軌跡と3次元液状化解析結果の比較
 (観測値はSugitoら(1996)⁶⁾による)



全体図 (縦横スケール比 1:20)



人工島部拡大図 (縦横スケール比 1:20)

図-4 3次元液状化解析による時刻14秒の過剰間隙水圧比の分布

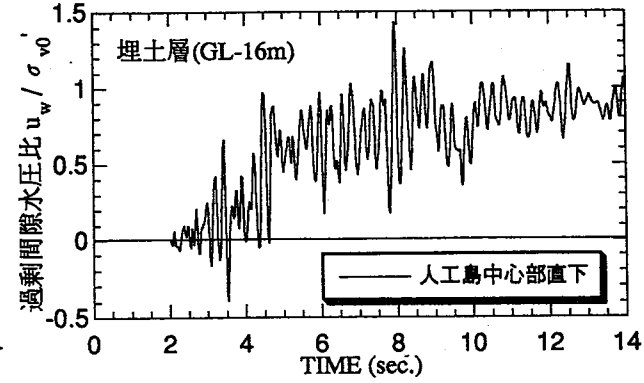
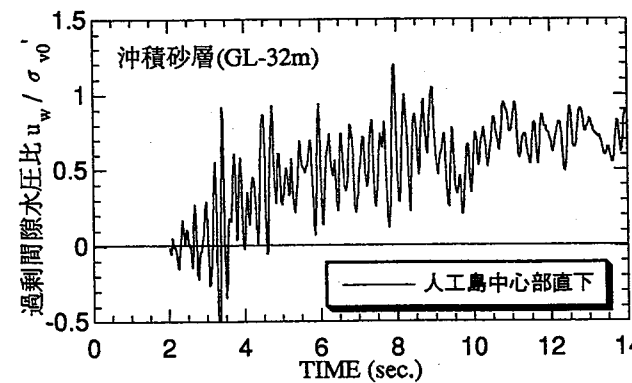
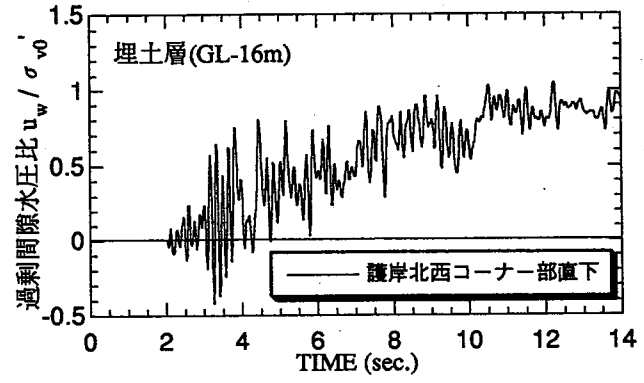
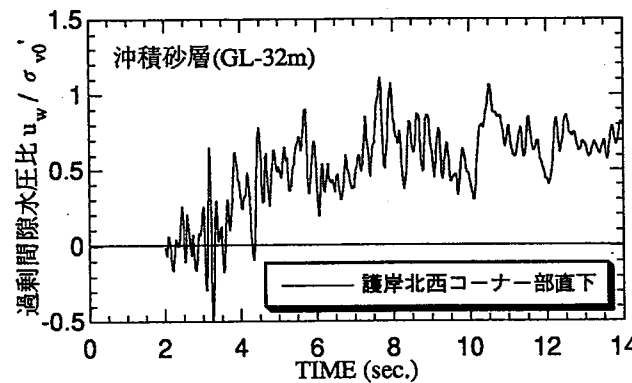
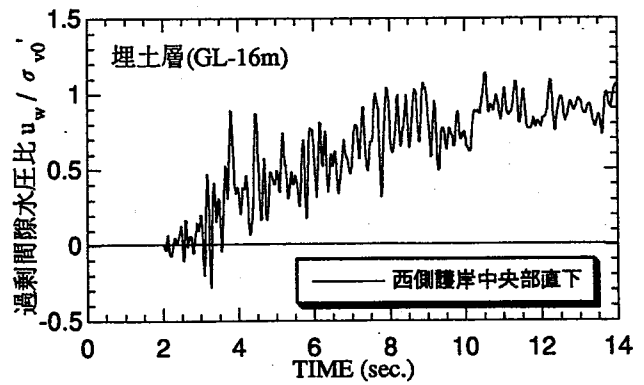
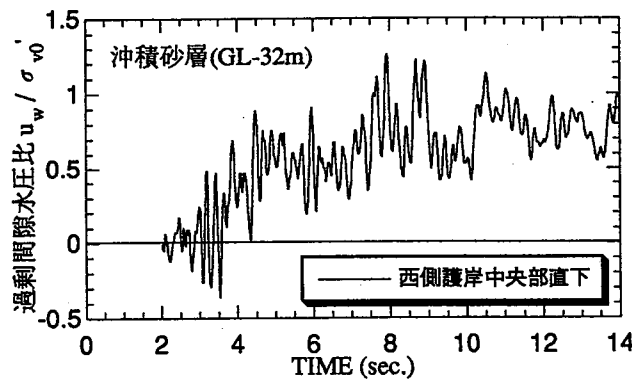
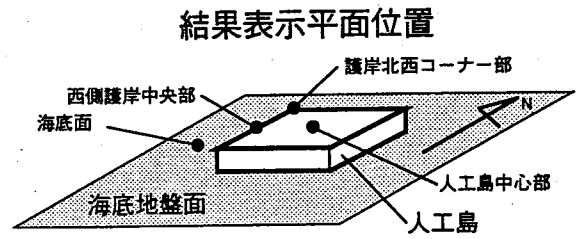
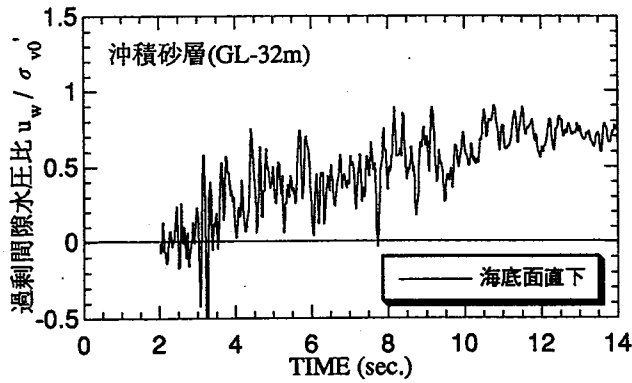


図-5 3次元液状化解析による同一レベル (GL-32m およびGL-16m) における各地点の過剰間隙水圧比時刻歴の比較

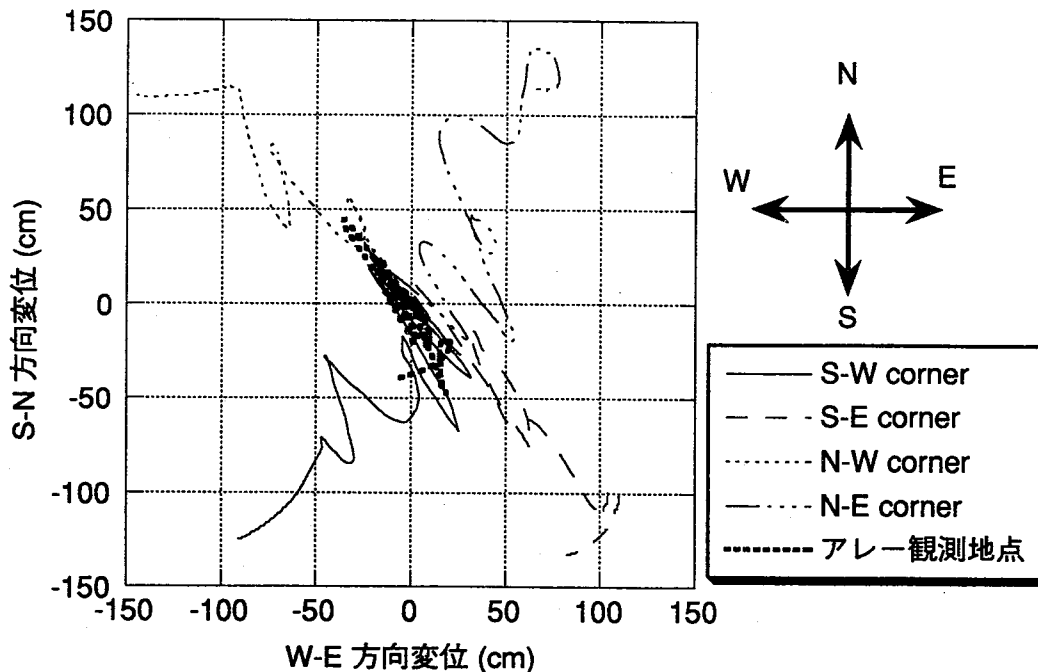


図-6 3次元液状化解析による人工島コーナー部およびアレー観測地点地表面の平面変位軌跡

は強震後の過剰間隙水圧の消散による沈下、流動などが考慮されていないが、実際に地震によって観測された変位はこれらを含めた複合的なメカニズムで生じたものと考えられる。

5. まとめ

広範囲を対象とした埋立地盤の連成3次元液状化解析を実施し、人工島および周辺海底地盤の概略的な挙動のシミュレーションを行った。その結果、本解析手法および解析モデルはメッシュの粗さなどに問題はあっても、得られた観測データをよく再現することができ、手法の妥当性を確認することができた。また、人工島および周辺地盤の広域的な挙動については、水圧の蓄積過程に関しては明確な知見を得ることはできなかったが、変形についてはその定性的な挙動を再現することができた。適切な境界条件の設定と詳細な解析メッシュのモデル化を行うことで、より精度の高い挙動の再現が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 岡・八嶋・田口・立石・古川・福嶋(1996):鉛直アレー観測記録を用いたポートアイランドの連成3次元液状化解析、阪神・淡路大震災に関する学術講演会、土木学会、pp.137-144.
- 2) Oka, F., Yashima, A., Kato, M. and Sekiguchi, K. (1992):“A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application,” Proc. of 10th WCEE, pp.2529-2534.
- 3) Tateishi, A., Taguchi, Y., Oka, F. and Yashima, A. (1995):“A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions,” 1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, IS-TOKYO '95, pp.399-404.
- 4) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R. (1994):“FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model,” Applied Scientific Research, 52, pp.209-245.
- 5) 八嶋・岡・田口・立石(1995):水の圧縮性を考慮した3次元液状化解析、第40回地盤工学シンポジウム、地盤工学会、pp.257-264.
- 6) Sugito, M., Sekiguchi, K., Yashima, A., Oka, F., Taguchi, Y. and Kato, Y.(1996):“Correction of orientation error of borehole strong motion array records obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan. 17, 1995,” 土木学会論文集, No.531, I-34, pp.51-63.