

兵庫県南部地震鉛直アレー観測記録の2次元・3次元液状化解析

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

1. はじめに

著者らは、Biot の二相混合体理論をもとに固相と液相を連成させた3次元液状化解析手法を開発してきた。固相の変位と液相の間隙水圧を未知数とした u-p 形式の定式化により支配方程式を記述し、FEM、FDM および Newmark の β 法によって空間的・時間的に離散化を行っている。構成式には、著者らが提案した弾塑性理論に基づいた3次元応力下の砂の繰返しモデルを用いており、実用的で再現性の高い挙動が確認されている。1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、設計上の想定を超える地震動によって、各種構造物がさまざまな被害を受け、耐震工学上解決すべき課題が多数顕在化した。その一つとして、沖合いあるいは沿岸の埋立地や低湿地における液状化被害に対するメカニズムの解明と対策は早急を実施すべき重要なテーマである。本研究はポートアイランドで記録された鉛直アレーの加速度記録をもとに、有効応力解析法に基づく2次元および3次元液状化解析を当該地盤に対して行ったものであり、観測記録とシミュレーション解析結果の比較、あるいは2次元解析と3次元解析の比較と考察を行った。地盤の物性値に関する情報などに不十分なものが多く必ずしも的確なパラメーターの設定には至っていないが、観測記録をおおよそ再現することができた。

2. 解析手法の概要

Biot の二相混合体理論に基づいて u-p 形式に定式化した支配方程式は、式(1)、(2)のように与えられる。

つりあい式

$$\rho \ddot{u}_i^S = \sigma_{ij,j} + \rho b_i \quad (1)$$

連続の式

$$\rho^F \ddot{u}_{i,i}^S - p_{,ii} - \frac{\gamma_w}{k} \dot{\varepsilon}_{ii}^S = 0 \quad (2)$$

ここに、 ρ は密度、 u_i は変位ベクトル、 σ_{ij} は応力テンソル、 b_i は物体力、 p は間隙水圧、 γ_w は間隙流体の単位体積重量、 k は透水係数、 ε_{ij} はひずみテンソルを示し、添字 S と F はそれぞれ固相、液相によるものを示している。Oka ら (1994) の方法に従い、つりあい式(1)はFEMを用いて、連続の式(2)はFDMを用いてそれぞれ空間に関して離散化し、(1)、(2)両式をNewmarkの β 法を用いて時間に関して離散化すると、最終的に下式に示す方程式に展開される。

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} [M] + \gamma \Delta t [C] + \beta (\Delta t)^2 [K] |_{t+\Delta t} & \bar{R}_v \\ \bar{R}_v^T & -\alpha' \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \bar{u}_N |_{t+\Delta t} \\ p_e |_{t+\Delta t} \end{array} \right\} + \{ \alpha_i / p_{ei} |_{t+\Delta t} \} \\ & = \left\{ \begin{array}{c} \bar{F} |_{t+\Delta t} - \bar{R} |_t - [C] (\bar{u}_N |_t + \Delta t \bar{u}_N |_t - \gamma \Delta t \bar{u}_N |_t) - [K] |_{t+\Delta t} \left\{ \Delta t \bar{u}_N |_t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) (\Delta t)^2 \bar{u}_N |_t \right\} \\ \bar{R}_v^T \left\{ \bar{u}_N |_t + (1 - \gamma) \Delta t \bar{u}_N |_t \right\} \frac{1}{k \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k} \right)} \end{array} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

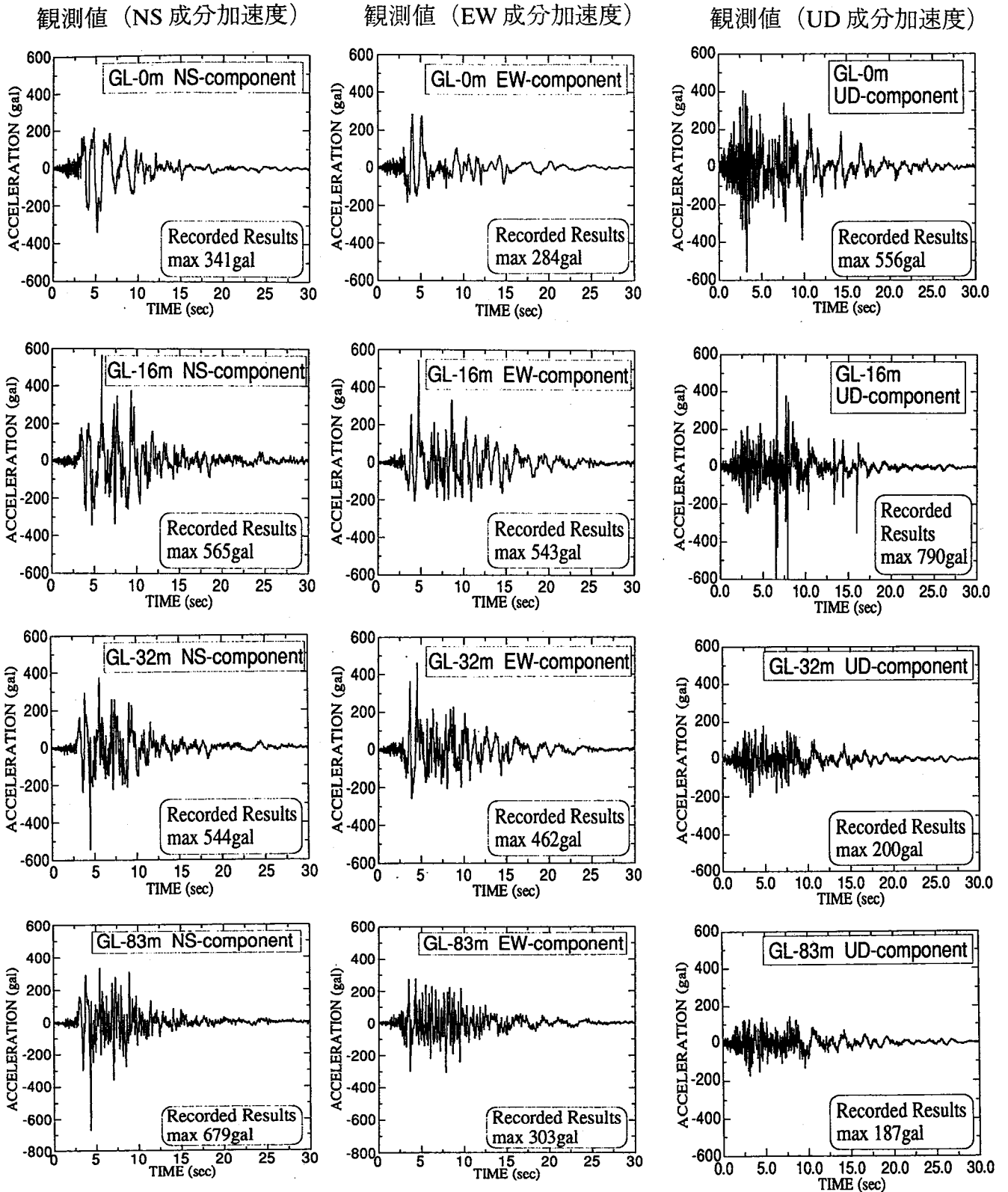


図-1 兵庫県南部地震におけるポートアイランドの鉛直アレー観測記録 (神戸市開発局による)

ここに、

$$\alpha' = \frac{1}{\gamma_w \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k} \right)} \alpha, \quad \alpha'_i = \frac{1}{\gamma_w \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k} \right)} \alpha_i, \quad \alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (4)$$

であり、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、粘性、剛性マトリクス、 \vec{K}_v は節点変位ベクトル \vec{u}_N と要素の体積ひずみを関係付けるベクトル、 α_i は要素重心間の距離と接触する要素の面積 (あるいは線の長さ) で決まる係数

である。また β, γ はNewmarkの β 法の係数、 g は重力加速度であり上式に基づいた2次元平面ひずみ、および3次元有効応力解析コードが整備されている。

土の有効応力とひずみの関係を記述する構成モデルは、弾塑性理論に基づいており、過圧密境界曲面、非線形移動硬化則、流れ則の一般化などの概念を取り入れた構成モデル (Oka ら; 1992、Tateishi ら; 1995) であり、多様な応力状態に対応する実用的な3次元および2次元液状化解析を可能としている。有効応力～ひずみ関係を式(5)に示す。

$$d\sigma'_{ij} = \left\{ D_{ijkl}^E - \frac{1}{h} D_{ijmn}^E \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{mn}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{pq}} \cdot D_{pqkl}^E \right\} d\epsilon_{kl} \quad (5)$$

ここに、

$$h = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} D_{ijkl}^E \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{kl}} - B^* \frac{\partial f}{\partial \chi_{ij}^*} \left\{ A^* \frac{\partial g}{\partial s_{ij}} - \chi_{ij}^* \left(\frac{\partial g}{\partial s_{pq}} \frac{\partial g}{\partial s_{pq}} \right)^{1/2} \right\} \quad (6)$$

であり、 D_{ijkl}^E は弾性の応力～ひずみ関係マトリクス、 f, g はそれぞれ降伏関数、塑性ポテンシャル関数である。 χ_{ij}^* は非線形移動硬化パラメータ、 s_{ij} は偏差応力テンソル、また A^*, B^* は材料パラメータであり、破壊時の応力比や初期塑性せん断剛性と関係付けられる。

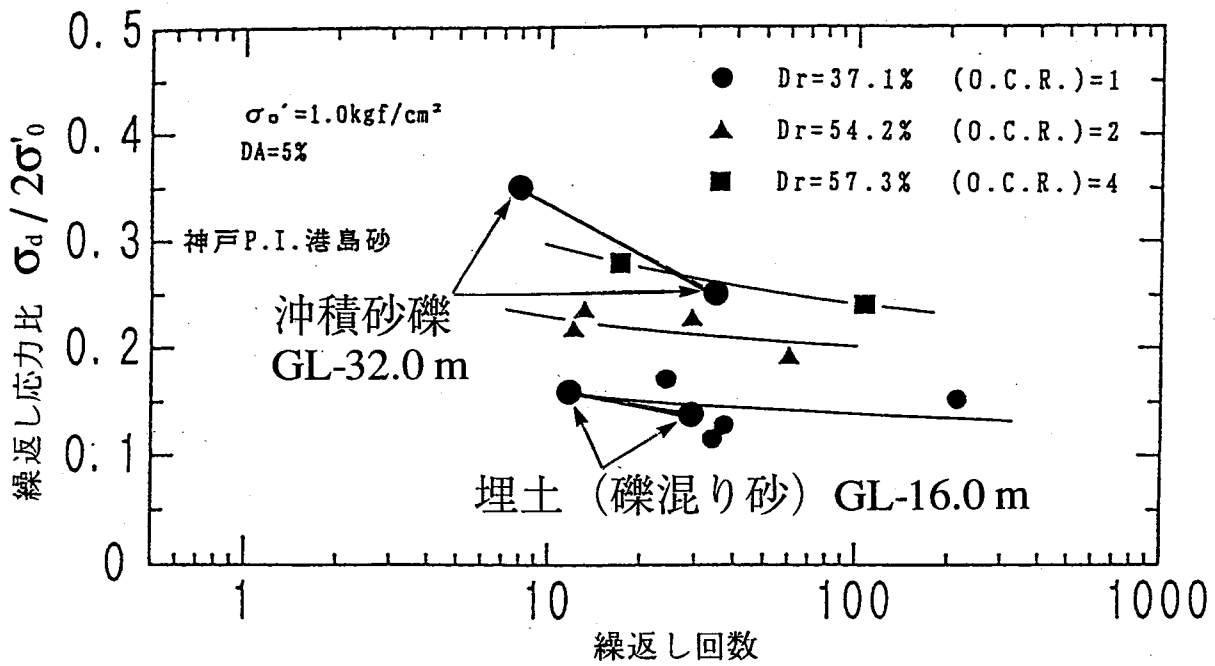
3. 鉛直アレー観測記録

アレー観測は、神戸市開発局がポートアイランドにおいて鉛直方向4深度 (GL-83m, -32m, -16m, 0m) における3方向 (NS, EW, UD) 成分の観測を実施していたものである。図-1に1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震 (震源淡路島北端、マグニチュード7.2) における観測記録を示す。洪積砂礫層のGL-83mにおいて、水平成分では300galを超える加速度が数波観測されている。NS, EW両成分とも深度が浅くなるにしたがって長周期化が進み、特に砂礫を主体とした埋土層が堆積するGL-16mからGL±0mにかけて長周期化が顕著であり、激しく液状化が生じたことがうかがえる。一方、UD成分に関しては深度が浅くなるにつれて全般的に増幅傾向がみられている。

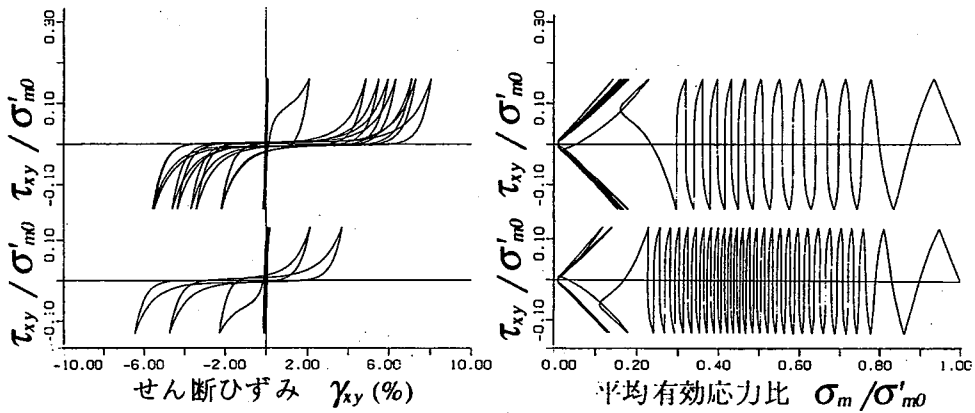
表-1 解析に用いたパラメーター

深度 (GL m)	土 層	単位体積重量 tf/m ³ (N/m ³)	間隙比 e	せん断波速度 Vs m/sec	ポアソン比 ν	透水係数 m/sec	G_0/σ'_{mo}	変相角 (°) (変相応力比 Mm*)	破壊角 (°) (破壊応力比 Mf*)	液状化抵抗		塑性剛性 パラメータ		ダイレイタンス パラメータ		規準ひずみ
										N=10	N=30	上段:Bo* 中段:Bl* 下段:Cf*	上段:Do* 下段:n	上段: γ_{Dr}^* 下段: γ_{Dr}^*		
0.0	砂礫 (埋土)	1.9 (5.2)	0.80	170	0.25	乾燥弾性材料を仮定 ($\lambda = 2800 \text{tf/m}^2, \mu = 2800 \text{tf/m}^2$)										
-5.0	砂礫 (埋土)	1.9 (6.5)	0.80	210	0.25	4.0×10^{-4}	1000	23.8 (0.76)	26.4 (0.85)	0.16	0.13	4000 400 2000	0.8 2.2	0.005% 0.10%		
-12.6 (-16m)	礫混り砂 (埋土)	1.9 (6.5)	0.80	210	0.25	4.0×10^{-4}	670	23.8 (0.76)	26.4 (0.85)	0.16	0.13	3000 300 2000	0.8 2.0	0.05% 0.20%		
-19.0	沖積粘土	1.6 (3.5)	1.20	180	0.30	1.0×10^{-8}	320	28.0 (0.91)	36.7 (1.22)	—	—	4000 400 2000	0.001 1.2	0.05% 0.20%		
-27.0	沖積砂	1.9 (13.5)	0.75	245	0.25	1.0×10^{-4}	590	28.0 (0.91)	31.4 (1.03)	0.35	0.25	7000 700 2000	0.8 4.0	∞ ∞		
-33.0	洪積砂礫	1.9 (36.5)	0.72	305	0.25	1.0×10^{-4}	680	28.0 (0.91)	42.0 (1.41)	0.40	0.30	10000 1000 2000	0.6 5.0	0.005% 0.03%		
-50.0	洪積砂礫	1.9 (61.9)	0.70	350	0.25	1.0×10^{-4}	680	28.0 (0.91)	43.0 (1.44)	—	—	10000 1000 2000	0.3 5.0	0.005% 0.03%		
-61.0	洪積粘土	1.6 (11.7)	1.00	303	0.30	1.0×10^{-8}	355	28.0 (0.91)	39.4 (1.31)	—	—	6000 600 2000	0.001 1.2	∞		
-79.0	洪積砂礫	1.9 (61.9)	0.70	320	0.25	1.0×10^{-4}	425	28.0 (0.91)	43.0 (1.44)	—	—	10000 1000 2000	0.3 5.0	0.005% 0.03%		
-83.0 (-83m)	洪積砂礫	1.9 (61.9)	0.70	320	0.25	1.0×10^{-4}	425	28.0 (0.91)	43.0 (1.44)	—	—	10000 1000 2000	0.3 5.0	0.005% 0.03%		

備考 1. ▲ 加速度計 2. 静止土圧係数 $K_0=0.5$ 3. 過圧密比 1.2



埋土 (礫混り砂) GL-16.0 m (応力比 上段 : 0.16、下段 : 0.13)



沖積砂礫 GL-32.0 m (応力比 上段 : 0.35、下段 : 0.25)

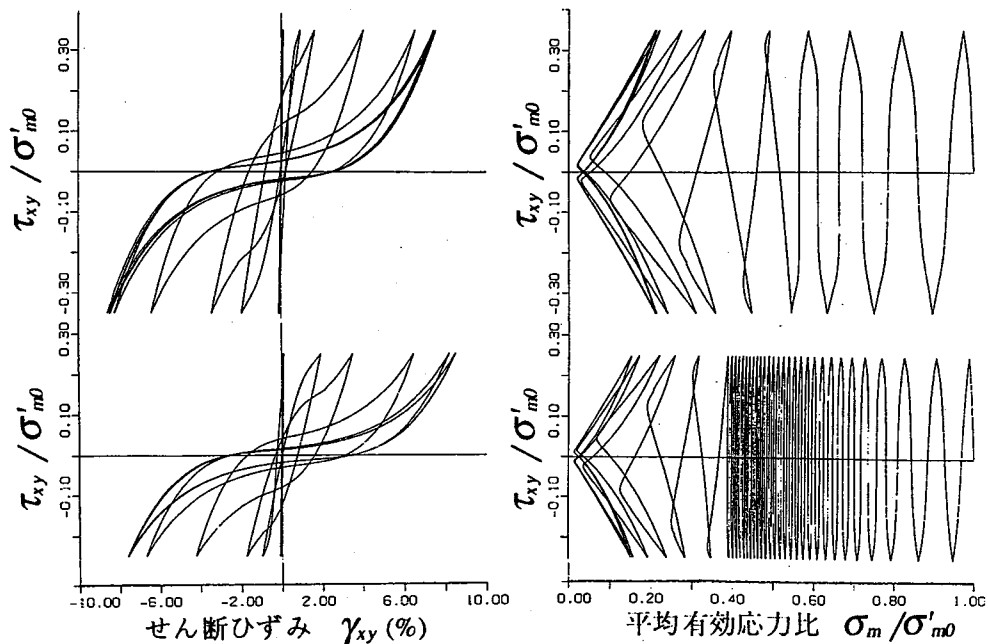


図-2 想定した液状化強度と要素シミュレーション解析結果の一例 (実験結果は永瀬ら (1995) による)

4. 解析モデルと解析条件

本研究では GL-83m の加速度記録を入力加速度とし、GL-83m 以浅の地盤を 1 列の柱状要素 (39 要素) としてモデル化した。底面節点変位は固定、側方は等変位境界とし、また底面と側面は非排水境界、地下水位面 (GL-5m) を排水境界とした。Newmark の β 法における β 、 γ をそれぞれ 0.3025、0.6 とし、Reileigh 減衰 2% を考慮した。各土層のパラメーターに関しては、N 値、せん断波速度、土質程度の情報しかないことから、付近の土質データ、一般的な値などをもとに推定した。表-1 に本解析に用いたパラメーターと想定した各層の液状化強度を示す。そのうち GL-16m (礫混り砂の埋土層)、GL-32m (沖積砂礫層) に想定した液状化強度お

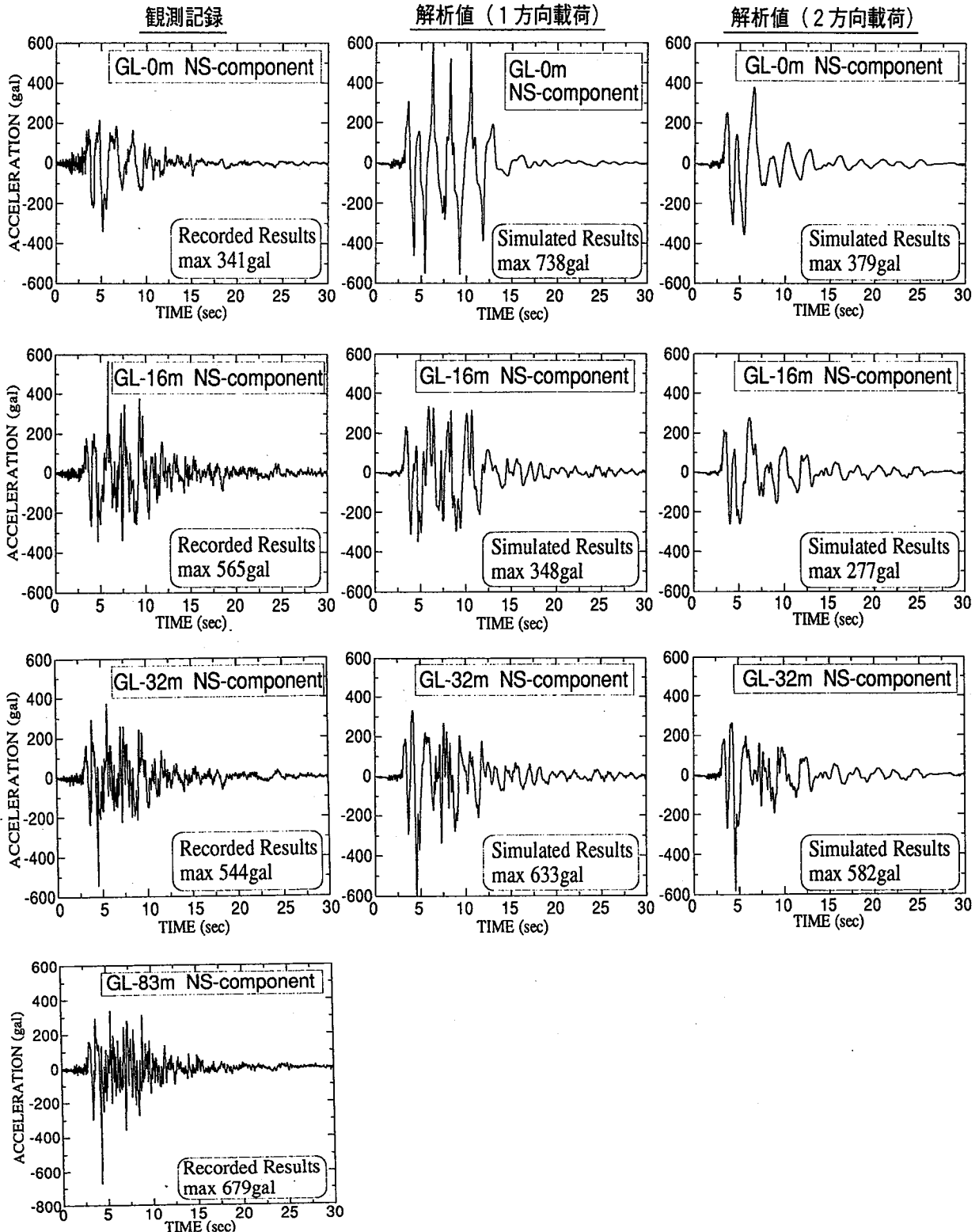


図-3 観測記録とシミュレーション解析結果の加速度応答の比較 (NS 成分)

よび要素シミュレーション結果を図-2に示す。図-2の液状化強度は永瀬ら(1995)によってポートアイランド内の埋土を用いて行われた試験結果を参考にして想定した。

5. シミュレーション結果と考察

表-1で設定したパラメーターを用いて、3次元モデル(6面体ソリッド要素)による3方向入力の解析を行った。また同じモデルを用いた水平成分1方向のみの入力による解析を、NSおよびEW成分について行った。1方向成分による解析は、本解析に用いた1列の柱状要素モデルでは2次元平面ひずみモデルと等価で

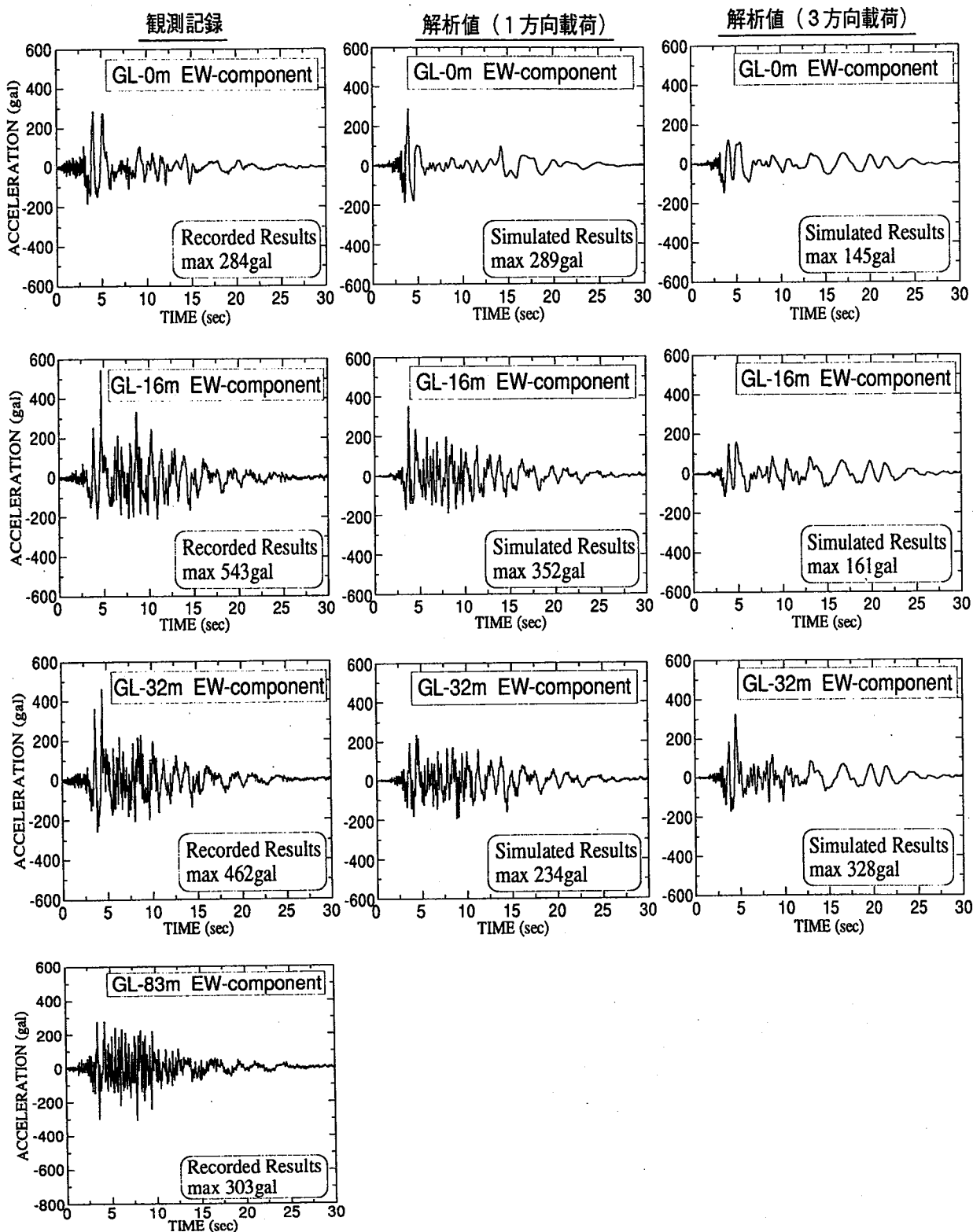


図-4 観測記録とシミュレーション解析結果の加速度応答の比較 (EW成分)

埋土 (礫混り砂) GL-16.0 m

沖積砂礫 GL-32.0 m

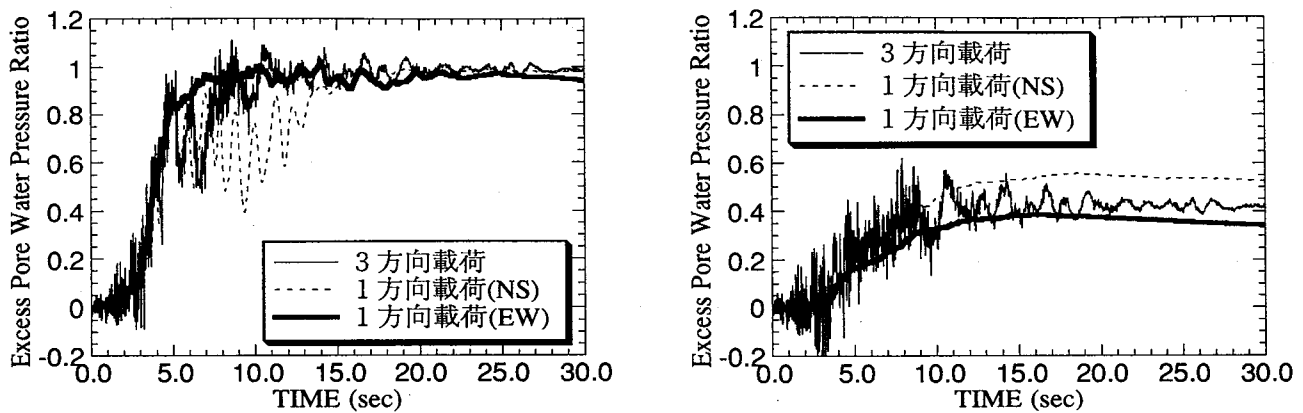


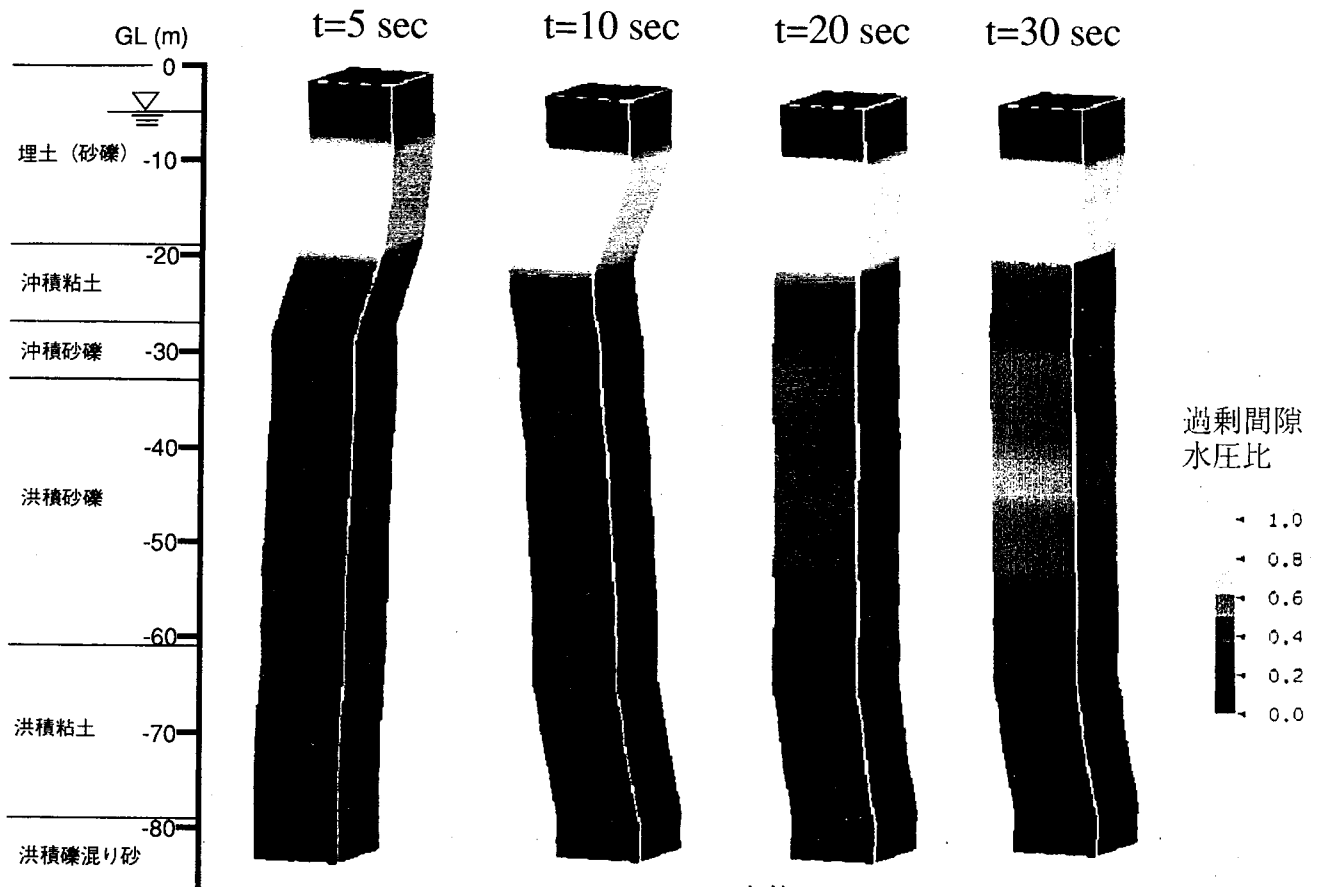
図-5 シミュレーション解析による過剰間隙水圧の時刻歴

ある。図-3、図-4にそれぞれNS, EW成分の加速度の観測記録と解析結果の比較を示す。解析結果は1方向入力と3方向入力の2ケースをそれぞれ示している。いずれの解析結果も液状化にともなう加速度応答の減衰や長周期化などの傾向は観測記録をよく再現し得ており、全体的にピークの形状はほぼ再現されており整合のとれた観測結果、解析結果であることがうかがえる。1方向入力と3方向入力の解析結果を比較すると、NS, EW両方向とも3方向入力の方が減衰、長周期化が顕著であるが、この結果は、一方向せん断よりも多方向せん断の方が液状化強度が低下するという既往の実験結果(例えばIshihara and Yamazaki; 1980)を裏付けている。本研究に用いた構成モデルは多方向せん断に対する液状化強度の低下をすでに検討している(田口ら; 1995)。図-3、図-4に示した結果を比較すると、観測値は3方向入力よりも1方向入力の方が比較的良く再現しているようにも考えられるが、むしろ想定した剛性、強度が低めに設定されていたともとらえることができる。一方、UD成分に対しては図-1に示すように観測記録においては増幅がみられたが、本解析の様な1列の柱状のモデルでは加速度増幅を十分再現することができず、ほとんど増幅がみられなかった。3次元的な変形、あるいは水の流れ、また水の圧縮性を考慮するモデル化についてもさらに検討する必要がある。図-5にGL-16m(礫混り砂の埋土層)、GL-32m(沖積砂礫層)における過剰間隙水圧の時刻歴の解析結果を示す。図には3方向入力、および1方向入力(NS,EW)のケースを示している。3方向入力の場合は鉛直方向の成分が付加されているため、振動成分が顕著にみられている。図-5から埋土層では完全液状化がみられ、沖積粘土層の下の沖積砂礫層では間隙水圧比が0.5前後に達する結果が得られた。図-5においては3方向入力と1方向入力の顕著な差はみとめられなかった。図-6には3次元鳥瞰図を用いた3方向入力のケースにおける $t=5, 10, 20, 30$ secの過剰間隙水圧の分布と変形図(変位スケールは構造スケールの20倍)を示す。

6. まとめと今後の課題

土と水を連成させた有効応力解析手法を用いて、兵庫県南部地震における鉛直アレー観測記録の2次元・3次元液状化解析シミュレーションを実施し、限られた情報のなかで比較的良好に観測記録を再現することができた。今後は、当該地盤の調査、土質試験結果をもとにより精度の高いパラメーターの設定を行い解析を実施するとともに、3次元的な変形、浸透あるいは水の圧縮性を考慮したモデルによる比較解析を行なう予定である。

謝辞 アレー観測記録は神戸市開発局の提供を受けたものであり、また本検討で用いた加速度データは岐阜大学において計器補正を行なったものである。末筆ながら、データを提供していただいた神戸市開発局、補正データを作成していただいた岐阜大学の杉戸真太助教授に謝意を表します。



※変位スケールは構造スケールの20倍

図-6 3次元鳥瞰図による過剰間隙水圧比の分布と変形

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Ishihara, K. and Yamazaki, F. (1980): "Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading," Soils and Foundations, Vol.20, No.1, pp.45-59.
- 4) 永瀬、宍道、辻野、木村 (1995): "過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度," 第30回土質工学研究発表会 (投稿中)
- 5) 田口、立石、岡、八嶋、高野 (1995): "非線形移動硬化則に基づく弾塑性構成モデルを用いた3次元液状化解析," 第30回土質工学研究発表会 (投稿中)
- 6) 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 (投稿中)