

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

岐阜大学 岡 二三生*, 岐阜大学 八嶋 厚*, 大成建設 田口 洋輔**
大成建設 立石 章**, 岐阜大学 古川 浩司*, 大成建設 福嶋 研一**

兵庫県南部地震において得られたポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いて、液状化した地盤のシミュレーション解析を実施した。解析手法は水と土を連成させた3次元有効応力解析手法であり、著者らによって提案された再現性の高い構成モデルを組み込んでいる。アレー観測地点における地盤調査結果および土質試験結果等をもとに材料パラメータを設定し、解析を実施することにより液状化した地盤に見られる地表面加速度応答の長周期化、振幅の減衰に加え、鉛直動の増幅特性など、観測値をよく再現することができた。

1. はじめに

兵庫県南部地震において得られたポートアイランドの鉛直アレー観測記録は、液状化した地盤における増幅特性を捉えたものであり、地盤の深さ方向の液状化予測に欠かせない貴重なデータである。液状化した地盤においては剛性の急激な低下、水と土の連成など複雑なメカニズムによる挙動が生じていると考えられる。観測された波形からも表層地盤における加速度応答の減衰、長周期化など液状化を考慮しない解析では再現できない増幅特性を示している。本研究では著者らが提案する解析手法を用いて観測記録のシミュレーション解析を実施した。解析手法は水と土を連成させた3次元有効応力解析手法であり、弾塑性理論に基づいた再現性の高い構成モデルを組み込んでいる。

はじめに解析手法及びポートアイランドの鉛直アレー観測記録について概括し、次にアレー観測地点における材料パラメータの設定等解析モデルについて示す。さらにシミュレーション解析結果を観測記録と比較検討し、アレー観測地点の震動特性および液状化特性について考察する。

2. 連成3次元液状化解析手法

本研究においては、Biotの二相混合体理論に基づき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た解析手法を用いている。定式化に際しては水の圧縮性を考慮することにより鉛直成分の増幅特性を再現することも可能な手法としている。

釣りあい式、連続の式はそれぞれ式(1)、式(2)のように与えられる。

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

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

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、 n は間隙率、 K^F は液相の体積弾性係数を示し、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¹⁾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。

$$\begin{bmatrix} [M] + \gamma \Delta t [C] + \beta (\Delta t)^2 [K]_{t+\Delta t} & \bar{K}_v \\ \bar{K}_v^T & A' - \alpha' \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_N|_{t+\Delta t} \\ p_{el}|_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} + \{ \alpha'_i p_{el}|_{t+\Delta t} \}$$

キーワード：アレー記録、液状化解析、土の構成式

* 岐阜大学工学部, 058-293-2416, 2419

** 大成建設土木設計計画部, 03-5381-5289

$$= \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}|_{t+\Delta t} - \vec{R}|_t \\ -[C](\vec{u}_N|_t + \Delta t \vec{u}_N|_t - \gamma \Delta t \vec{u}_N|_t) \\ -[K]|_{t+\Delta t} \left\{ \Delta t \vec{u}_N|_t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) (\Delta t)^2 \ddot{u}_N|_t \right\} \\ \vec{K}_v^T \left\{ \vec{u}_N|_t + (1-\gamma)\Delta t \vec{u}_N|_t \right\} \frac{1}{k \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k}\right)} + A' p|_t \end{array} \right\} \quad (3)$$

ここに、

$$A' = \frac{\int_V \frac{n\gamma\omega}{kK^J} dV}{\Delta t \gamma \omega \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k}\right)}, \quad \alpha' = \frac{1}{\gamma \omega \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k}\right)} \alpha \quad (4)$$

$$\alpha'_i = \frac{1}{\gamma \omega \left(\frac{1}{g} - \frac{\gamma \Delta t}{k}\right)} \alpha_i, \quad \alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (5)$$

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に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²⁾、Tateishiら³⁾)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。

3. ポートアイランドの鉛直アレー観測記録

アレー観測は、神戸市開発局⁴⁾がポートアイランド北西部において鉛直方向4深度(GL-83m, -32m, -16m, ± 0 m)における3方向(N S, E W, U D)成分の加速度計を設置し、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(各深度各方向成分の加速度時刻歴および最大加速度分布)を示す。ただし、GL-83mの水平成分はSugitoら⁵⁾の指摘をもとに22°の方向補正を行った波形を用いている。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。N S, E W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のGL-16mからGL ± 0 mにかけて長周期化が顕著であり最大加速度も減衰しており、地盤の剛性が低下して液状化

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、その傾向は埋土層で顕著である。ただし、図-1に示した加速度時刻歴GL-16mのUD成分には他に比較して突出した加速度成分が記録されており信頼性に欠けるので、最大加速度分布のプロットにおいてはこの深度(GL-16m)の観測値を取り除いている。

4. 解析モデル

(1) 材料パラメータの設定

表-1に設定したパラメータの一覧を示す。各パラメータは下記に示す調査結果、既往の研究に基づく一般値、構成モデルの要素シミュレーション解析結果などから設定している。

a) 土層構成・せん断波速度・N値 土層構成・せん断波速度・N値は神戸市開発局⁴⁾によるアレー観測地点のボーリング調査・PS検層結果よりモデル化されたものである(図-1参照)。ただし土層番号1と2および3と4のせん断波速度は拘束圧依存性を加味し、平均有効拘束圧の1/4乗則により再分配している。

b) 地下水位 地震前の神戸市による複数のボーリング孔内水位計測より、地下水位をGL-2.4mとした。

c) 埋土層の液状化強度 まさ土を主体とする埋土層の液状化強度は、地震後の複数の液状化試験結果に基づいて、一律繰返し回数N=10回が0.22、N=30回が0.17とした。図-2に想定した液状化強度とシミュレーション解析による液状化強度曲線を示す。図-2には要素シミュレーション解析結果も併せて示す。

d) 沖積・洪積砂礫層の液状化強度 沖積砂礫層の液状化強度は、埋土層の液状化強度と同様、地震後の液状化試験結果に基づいて想定した。一方、洪積砂礫層の液状化強度は、研究成果が多いとは言えないが、田中ら⁶⁾の試験結果より同程度のせん断波速度を有する洪積砂礫の液状化強度をもとに想定した。図-3に想定した液状化強度とシミュレーション解析による液状化強度曲線を示す。

e) 破壊角・変相角 砂礫質土の破壊角 ϕ_f は大崎の式を用いて $\phi_f = \sqrt{20N} + 15$ ($N \geq 50$ のとき $N=50$)とした。砂礫質土における変相角 ϕ_m は、石原ら⁷⁾が示した ϕ_f との関係を用いて $\tan \phi_m = 0.875 \tan \phi_f$ とした。ただし、洪積砂礫は既往の試験結果より $\phi_m = 35^\circ$ とした。

深度 (GL.m)	土層	平均 N 値	せん断波速度 (m/sec)
0.0	砂礫(混土)	5.2	170
-5.0	砂礫(混土)	6.5	210
-12.6 (-16m)	礫混り砂(混土)	6.5	210
-19.0	沖積粘土	3.5	180
-27.0 (-32m)	沖積砂礫	13.5	245
-33.0	洪積砂礫	36.5	305
-50.0	洪積砂礫	61.9	350
-61.0	洪積粘土	11.7	303
-79.0 (-83m)	洪積砂礫	61.9	320

▲ 加速度計

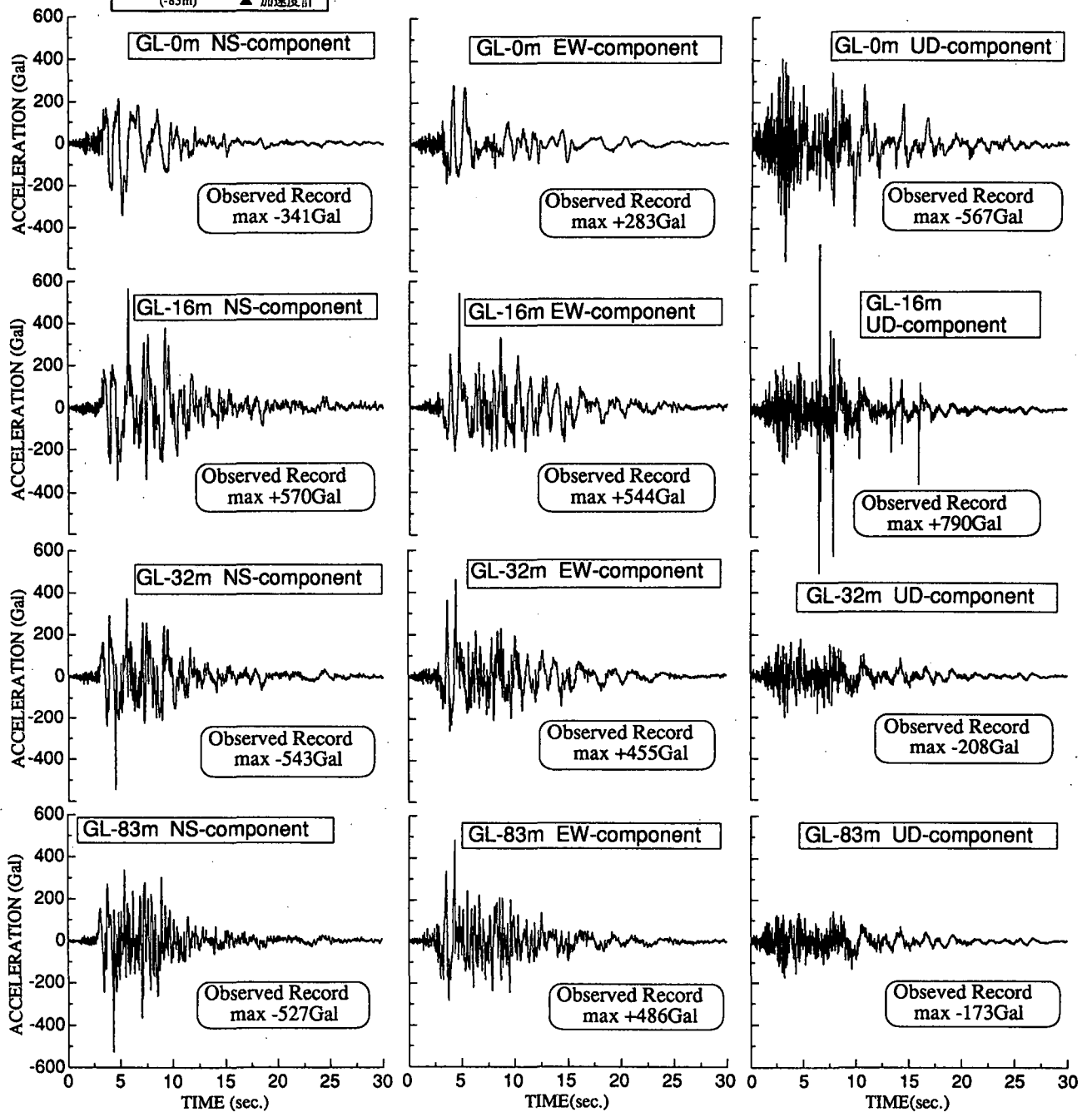
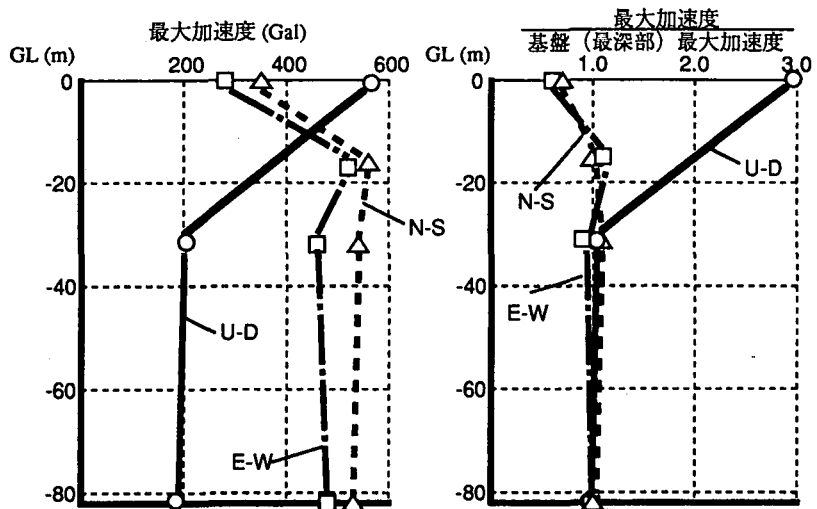


図-1 ポートアイランドの鉛直アレー観測記録と加速度振幅特性
(GL-83mの水平波形はSugitoら(1996)により方向補正)

表-1 解析に用いたパラメータ

深度 (GL m)	土層 <土層番号>	単位体積重量 t/m ³ (N値)	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	Go/σ'mo	変相角(°) (変相応力比 M _m)	破壊角(°) (破壊応力比 M _f)	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: B ₀ 中段: B ₁ 下段: C ₁	上段: D ₀ 下段: n	上段: γ ^E _{DA} 下段: γ ^P _{DA}		
0.0	<1> 砂礫 (埋土)	2.0 (5.2)	0.60	140	0.25	—	3350	25.2 (0.81)	25.2 (0.81)	—	—	50000 1000 50000	—	0.0	—	∞ ∞
-2.4	<2> 砂礫 (埋土)	2.0 (5.2)	0.60	180	0.25	3.0×10 ⁻⁵	1700	22.4 (0.71)	25.2 (0.81)	0.22	0.17	8000 800 2000	0.6 2.8	—	—	0.005% 0.05%
-5.0	<3> 砂礫 (埋土)	2.0 (6.5)	0.60	195	0.25	3.0×10 ⁻⁵	1050	23.5 (0.75)	26.4 (0.85)	0.22	0.17	6000 600 2000	0.8 2.8	—	—	0.005% 0.10%
-12.6	<4> 礫混り砂 (-16m) (埋土)	2.0 (6.5)	0.60	220	0.25	3.0×10 ⁻⁵	820	23.5 (0.75)	26.4 (0.85)	0.22	0.17	5000 500 2000	0.8 2.7	—	—	0.005% 0.10%
-19.0	<5> 沖積粘土	1.7 (3.5)	1.50	180	0.30	2.0×10 ⁻⁶	350	—	—	—	—	8000 160 10000	—	0.0	—	∞ ∞
-27.0	<6> 沖積砂 (-32m)	2.0 (13.5)	0.60	245	0.25	2.0×10 ⁻⁵	615	28.0 (0.91)	31.4 (1.03)	0.35	0.25	6500 650 2000	1.0 2.0	—	—	0.02% 0.10%
-33.0	<7> 洪積砂礫	2.0 (36.5)	0.50	305	0.25	1.0×10 ⁻⁵	700	35.0 (1.16)	42.0 (1.41)	0.45	0.35	7000 700 2000	0.8 2.5	—	—	0.02% 0.10%
-50.0	<8> 洪積砂礫	2.0 (61.9)	0.50	350	0.25	1.0×10 ⁻⁵	680	35.0 (1.16)	46.6 (1.57)	0.60	0.40	7000 700 2000	0.5 3.0	—	—	0.02% 0.10%
-61.0	<9> 洪積粘土	1.75 (11.7)	1.20	303	0.30	1.0×10 ⁻⁶	365	—	—	—	—	8000 160 10000	—	0.0	—	∞ ∞
-79.0	<10> 洪積砂礫 (-83m)	2.0 (68.0)	0.50	320	0.25	1.0×10 ⁻⁵	410	35.0 (1.16)	46.6 (1.57)	0.60	0.40	7000 700 2000	0.6 2.3	—	—	0.05% 0.10%

備考 1. ▲ 加速度計 2. 静止土圧係数 K₀=0.5 3. 過圧密比…沖積・洪積砂礫層は1.5、その他は1.2を仮定

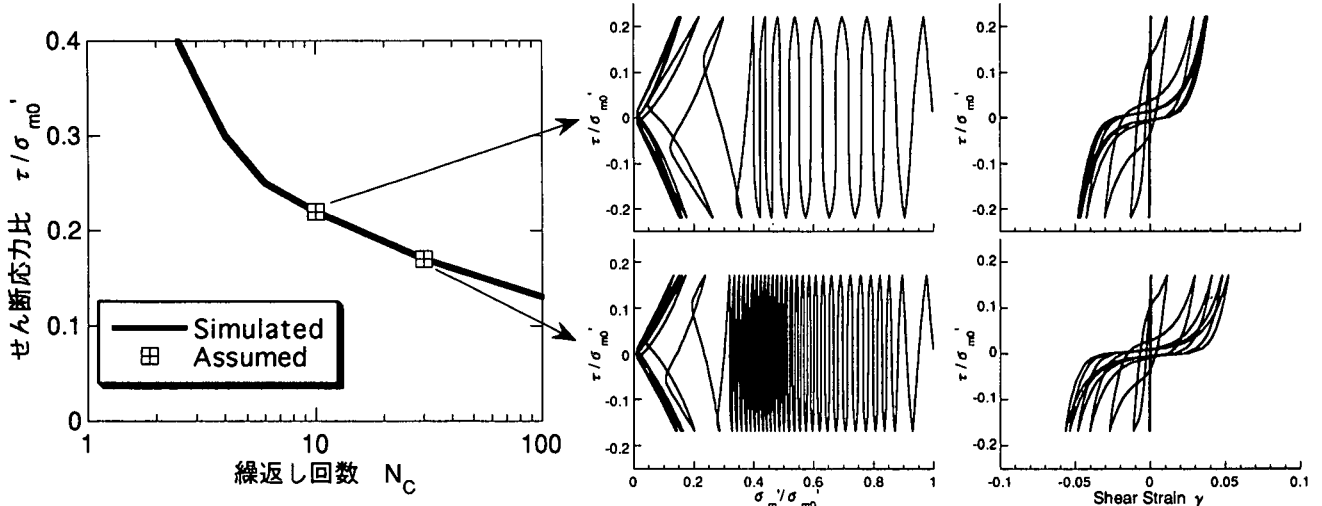


図-2 埋立地盤に想定した液状化強度と要素シミュレーション解析結果

f) 沖積・洪積粘性土層の動的変形特性 沖積粘性土層の $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係は吉田⁹⁾により設定された Hardin-Drnevich モデルを用い、洪積粘性土層については沖積粘性土層と同様な手法で設定して、構成モデルにより近似した。

g) 透水係数 各土層の透水係数は、地震後の透水試験および圧密試験結果より平均的な値を設定した。

h) 埋土地盤の不飽和性 埋土地盤においては、八嶋⁹⁾が指摘するとおり、埋め立て時の気泡の混入、潮位の変化などから十分な飽和地盤とはなっていないことが予想される。不飽和地盤においては土中の間隙の圧縮性が大きくなることから、本モデルでは体積弾性係数 K_f が常温における水の値より 1/10 から 1/100 に低下するものとして設定を行っている。

i) その他のアジャスティングパラメータ 表-1に示

すその他のパラメータは主として液状化強度曲線の傾き、剛性低下時のひずみレベルの制御などを行うアジャスティングパラメータである。本来、物理的意味を有したパラメータであるが、現状の試験手法ではパラメータの確定が困難であるため、トライアンドエラーによって最適な値を求めている。

(2) 解析条件

解析は、6面体ソリッド要素を用いて GL-83m 以浅の地盤を 1列の柱状にモデル化した (39要素、160節点)。拘束条件は、底面節点が拘束、側面は等変位境界である。また、地下水位以深の側面と底面は非排水境界、地下水位面は排水境界とした。Newmark の β 法における β , γ の値をそれぞれ 0.3025, 0.6 とし、Reileigh 減衰 2% を考慮した。入力荷重は図-1に示した GL-83m における補正された加速度記録を用いた。

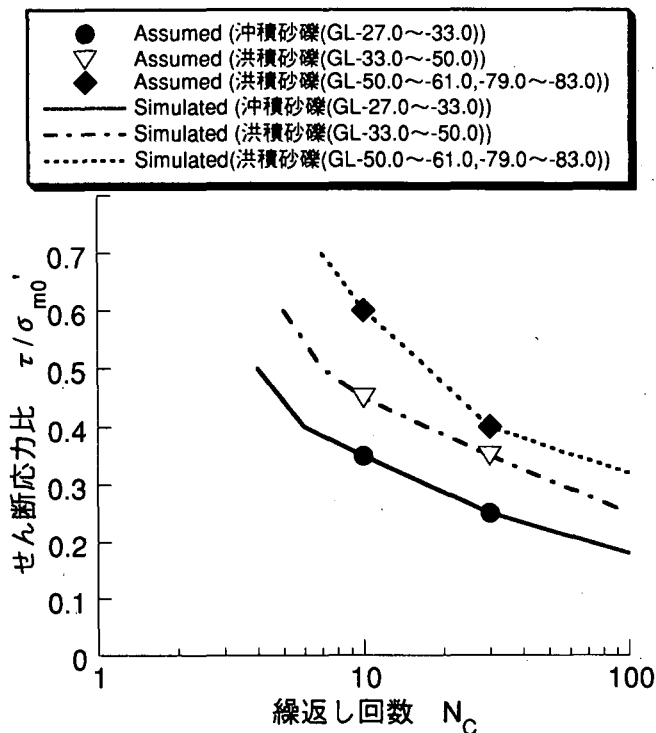


図-3 沖積砂礫・洪積砂礫地盤に想定した液状化強度と要素シミュレーション解析結果

時間刻みは $\Delta t = 0.005$ 秒とした。

(3) 解析ケース

解析ケースは以下の4ケースである。

- a) Case-1NS 1方向NS入力
- b) Case-1EW 1方向EW入力
- c) Case-2 水平2方向(NS、EW)入力
- d) Case-3 3方向(NS、EW、UD)入力

5. 解析結果および考察

解析結果を観測結果と比較し、いくつかの観点に分けて考察する。

(1) 水平加速度の増幅特性との液状化

図-4に1方向入力の解析結果と観測結果による水平加速度の比較を、図-5に2方向入力の解析結果と観測結果による水平加速度の比較を、図-6に3方向入力の解析結果と観測結果による鉛直加速度の比較を示し、図-7には全ケースの解析結果と観測結果による最大加速度分布の比較を示す。

水平加速度について見ると、GL-32mでは1方向入力の解析結果は観測結果の位相特性および振幅をほぼ再現しており、比較的短周期成分の卓越した波形が得られている。これに対して、GL-16mでは1方向入力の解析結果は観測結果に比べ位相特性は比較的一致しているが、振幅が小さい結果となっている。GL±0mでは観測結果はGL-16mより振幅が減少す

るとともに長周期化しているが、1方向入力の解析結果はこの傾向をほぼ再現している。

2方向入力の解析結果の水平加速度は、定性的には上記の1方向入力と同じであるが、1方向入力に比べて全般的に振幅が小さく、残念ながら観測結果の再現性は悪い。

上記比較結果を、図-8に示した1方向入力および2方向入力の解析結果の過剰間隙水圧比時刻歴、および図-9、図-10に示した2方向入力の解析結果のせん断応力～せん断ひずみ関係、有効応力経路から検討する。埋土層では、1方向入力、2方向入力とも、過剰間隙水圧比は主要動の約10秒間で90%程度、震動終了時にはほぼ100%に達しており、最大せん断ひずみは両振幅で2～4%生じていて、埋土層は液状化したと言える。沖積砂礫層についても、埋土層より過剰間隙水圧比の上昇は遅く主要動の約10秒間で70～80%程度であるが震動終了時にはほぼ100%まで上昇しており、最大せん断ひずみも両振幅で1～2%生じていて、解析結果によれば最終的に液状化した結果となっている。

以上より、埋土層については、主要動の間にほぼ液状化に至ったために、GL±0mの水平加速度はGL-16mより振幅が減少し長周期化したものと考えられる。沖積砂礫層については、解析結果では主要動の間に過剰間隙水圧比が70～80%まで上昇してGL-16mの水平加速度がGL-32mより振幅が減少したが、観測結果ではGL-16mの水平加速度はGL-32mより振幅が減少していない。このことから、実際には沖積砂礫層では解析結果ほど過剰間隙水圧が上昇せず、完全な液状化には至っていなかった可能性もあるものと推察される。

(2) 鉛直加速度の増幅特性と液状化への影響 図-6および図-7より、鉛直加速度の増幅特性を3方向入力の解析結果と観測結果で比較すると、解析結果はGL-83mからGL-32m、GL-16mまでほとんど増幅はなく、GL-16mからGL±0mの間で大きく増幅していて、観測結果の再現性は良い。本解析では、八嶋ら⁹⁾の指摘に基づき埋土層では飽和度が100%でなく間隙の圧縮性が增大することを想定して液相の体積弾性係数を下げることにより、より再現性の良い結果を得ている。

次に、解析結果より鉛直地震動の液状化への影

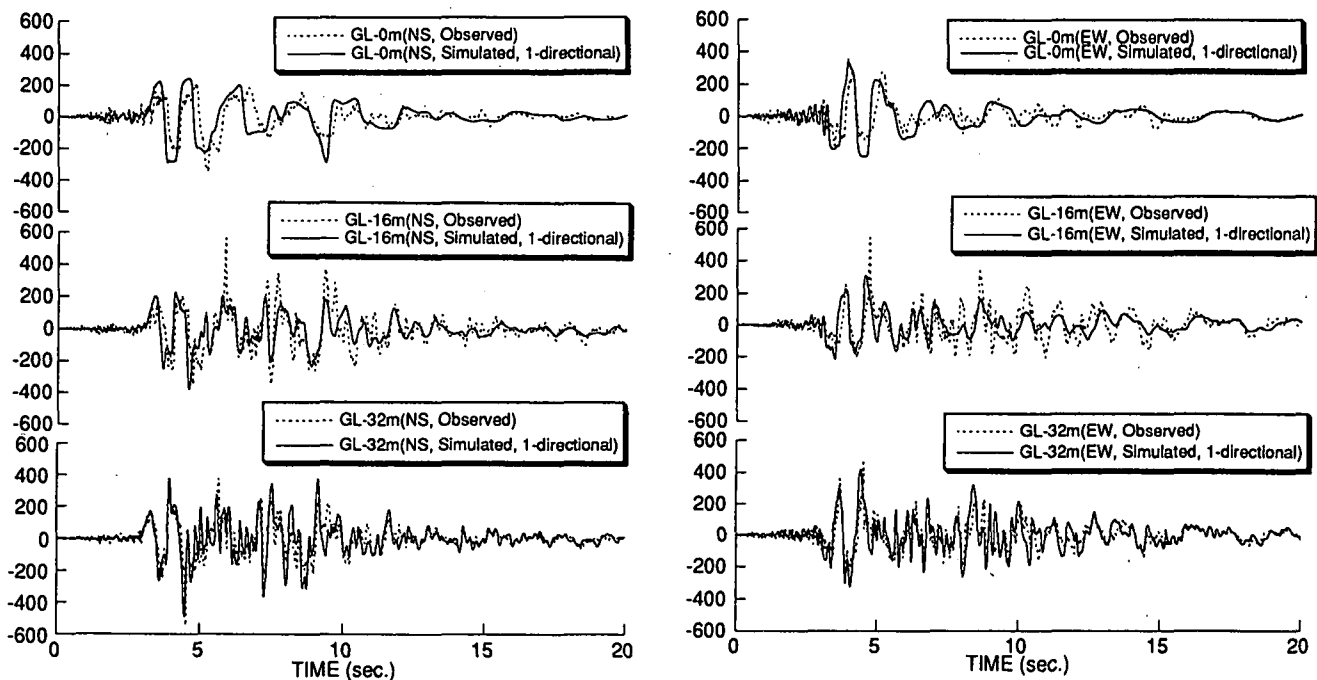


図-4 水平加速度の観測記録と解析結果の比較 (1方向入力)

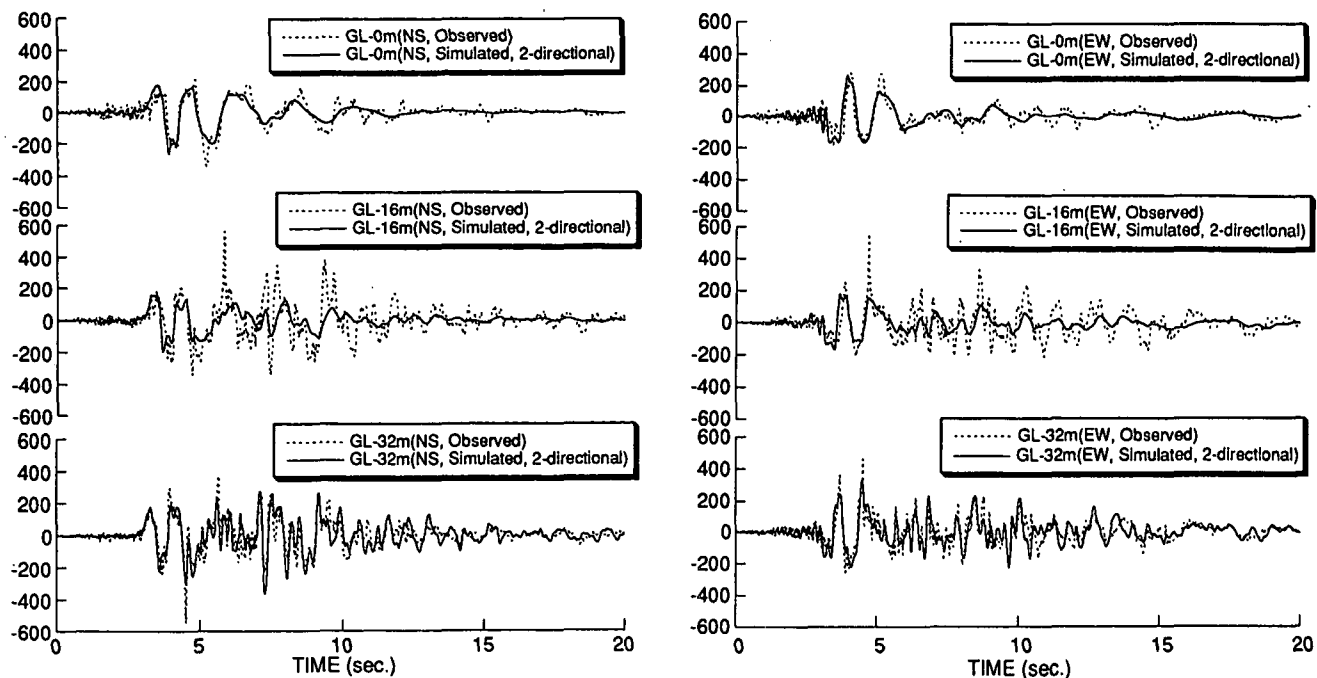


図-5 水平加速度の観測記録と解析結果の比較 (2方向入力)

響を見る。水平加速度について2方向入力と3方向入力の最大加速度分布を比較すると、全深度にわたってほぼ一致している。過剰間隙水圧比の時刻歴について比較すると、GL-32m、GL-16m、GL±0mのいずれも3方向入力の解析結果には高振動数成分が入っているが、これは鉛直振動に伴う弾性変動でありこの弾性変動分を無視して平均的な過剰間隙水圧比の変化を見ると、3方向入力は2方向入力とほぼ同じである。以上より、鉛直地震動の液状化現象への影響は解析結果からは小さいものと考えられる。ただし、本検討の解析は一次元土柱による解析であり、3次元的不成層の影響等は考慮されていない。

(3) 水平2方向の震動成分が液状化に及ぼす影響埋土層および沖積砂礫層について、1方向入力と2方向入力の解析結果による過剰間隙水圧比時刻歴を比較すると、2方向入力の方が1方向入力より上昇は早く、図では示していないが洪積砂礫層についても同様な傾向が見られることから、今回の地震動の場合、水平2方向の震動成分の入力は1方向入力より液状化しやすい結果となった。この結果は永瀬らによる実験結果¹⁰⁾と同様であり、地盤の液状化特性を2方向せん断問題として扱う必要があることを示唆している。また、方向補正により入力地震動であるGL-83mでのNS成分とEW成分の水平加速

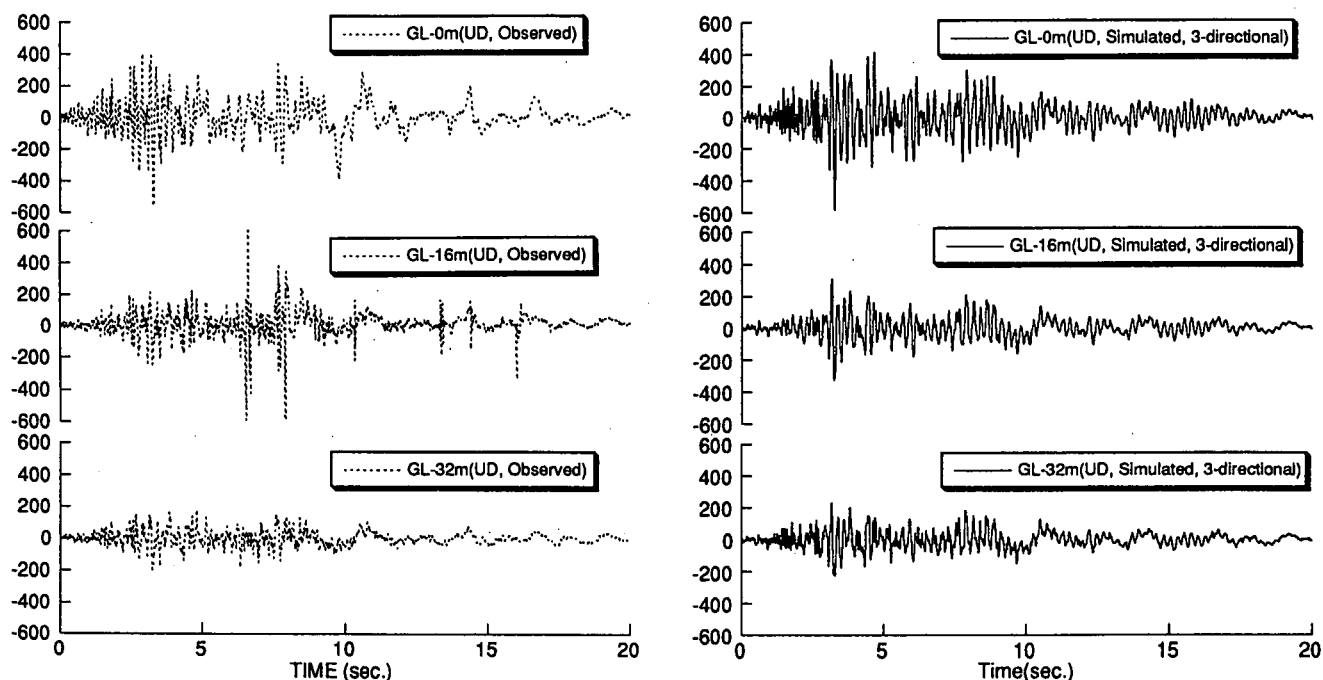


図-6 鉛直加速度の観測記録と解析結果の比較 (3方向入力)

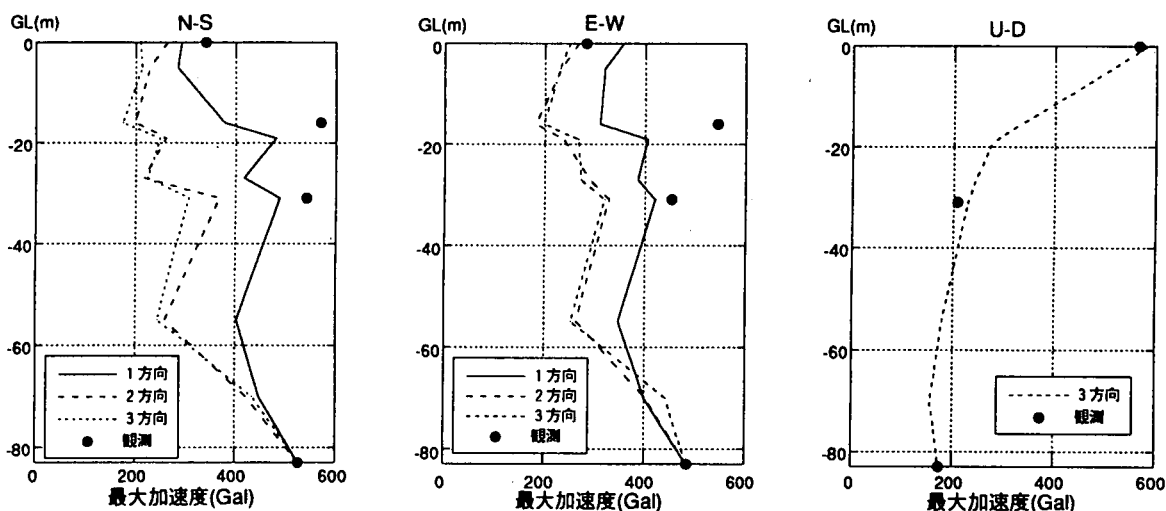


図-7 最大加速度分布の観測記録と解析結果の比較

度振幅の差が小さくなり、これにより主たる震動方向がN S成分またはE W成分に大きく偏らなかったことも関係していると考えられる。

6. まとめ

兵庫県南部地震において得られたポートアイランドの鉛直アレー観測結果を、弾塑性理論に基づく砂の構成モデルを組み込んだ連成3次元有効応力解析によりシミュレーション解析した。解析結果と観測結果を比較し、観測地点の震動特性および液状化特性を考察した結果、以下のことがわかった。

(1) 埋土層は、主要動の間にほぼ液状化に至ったために、GL±0mの水平加速度はGL-16mより振幅が減少し長周期化したものと考えられる。沖積砂礫層については、解析結果では主要動の間に過剰間隙水圧比が70~80%まで上昇してGL-16mの水平加速度がGL-32mより振幅が減少したが、観測結果では振幅の

減少が見られないことから、解析結果ほど過剰間隙水圧が上昇していなかった可能性がある。

(2) 鉛直加速度が埋土層で大きな増幅を示した原因として、埋土層における間隙の圧縮性の増大を考慮し飽和度が100%以下であり液層の体積弾性係数が小さかったことが考えられる。また、鉛直地震動の液状化現象への影響は、1次元土柱モデルの解析結果では小さかった。

(3) 今回の地震動の場合、方向補正によりGL-83mでの地震動のN S成分とE W成分の水平加速度振幅の差が小さくなったため、解析結果では2方向入力の方が1方向入力より液状化が早く生じる結果となった。

本解析にあたっては、一次元土柱の解析モデルを用いるなど必ずしも観測地点の地盤を忠実に再現しているとは言えず、地盤材料のパラメータは解析の時点でできるかぎり情報を収集して設定したがま

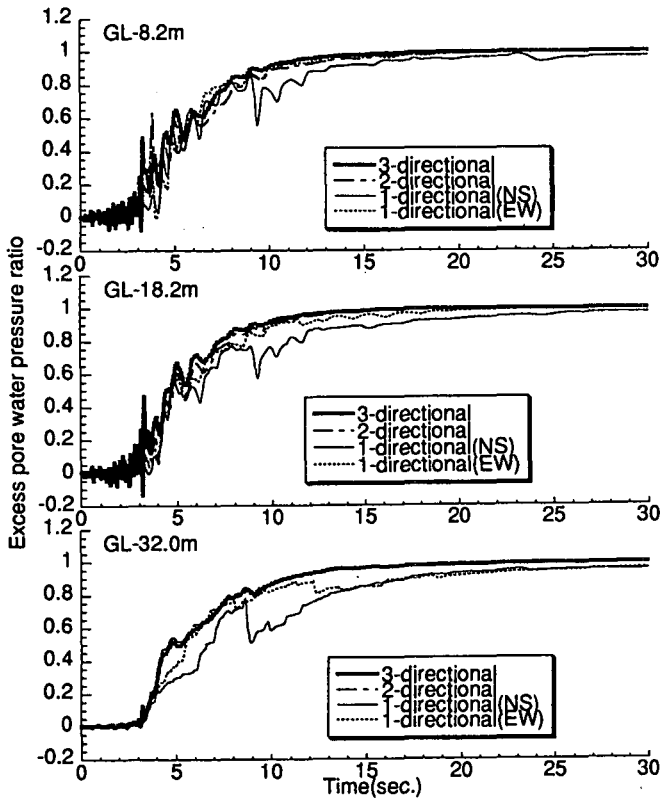


図-8 解析結果による埋土層・沖積砂礫層の過剰間隙水圧比時刻歴

だ不十分である。今後の調査に基づき、地盤材料の見直し等を図ったうえで解析による再現性が不十分な点を改善し、さらに現象を解明していきたい。

謝辞

本研究に際して、データを提供していただいている神戸市開発局の方々に感謝致します。

参考文献

1) 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.
 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.

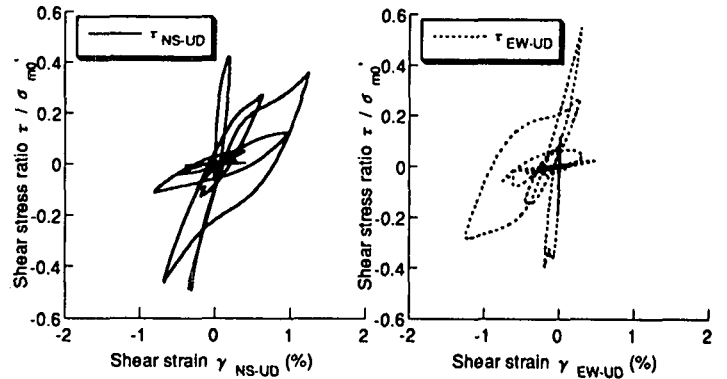


図-9 解析結果による埋土層のせん断応力～ひずみ関係

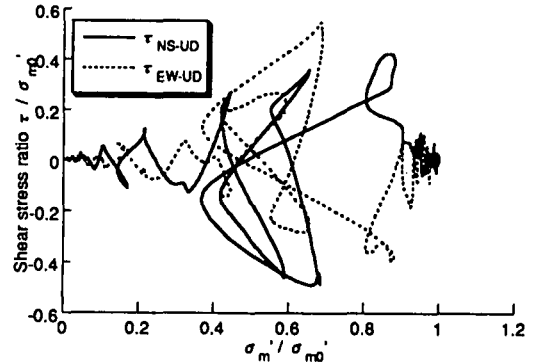


図-10 解析結果による埋土層の有効応力経路

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 (95年11月掲載予定)
 4) ポートアイランド記録 (神戸市提供)
 5) Sugito, M., Sekiguchi, K., Yashima, A., Oka, F., Taguchi, Y. and Kato, Y. (1995): "Correction of orientation error of borehole strong motion array records during the South Hyogo Earthquake of Jan.17, 1995," 土木学会論文集 (96年1月号掲載予定)
 6) 田中・工藤・吉田・片岡・国生 (1988): "砂礫地盤の力学的特性に関する研究," 電力中央研究所報告, U88021 および田中・工藤・吉田・国生 (1991): "砂礫地盤の地震時の強度と沈下量の簡易評価法," 電力中央研究所報告, U90063
 7) Ishihara, K. and Towhata, I. (1982): "Dynamic response analysis of level ground based on the effective stress method," Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, John Wiley & Sons Ltd, Chapter 7.
 8) 吉田 (1995): "1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析," 土と基礎, Vol.43, No.453, pp.49-54.
 9) 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, pp.257-264.
 10) 永瀬・石原・中村 (1985): "多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性," 第20回土質工学研究発表会, pp.611-612.

3-Dimensional Liquefaction Analysis in Port Island Using Borehole Strong Motion Vertical Array Record

Fusao Oka, Atsushi Yashima, Yosuke Tagushi, Akira Tateishi, Koji Furukawa, Ken-ichi Fukushima

Simulation analyses of the ground response at Port Island which contains the liquefied sand layer were carried out. The borehole strong motion vertical array record during the 1995 South Hyogo Earthquake was compared with the analytical results. Three-dimensional effective stress-based analytical technique was used for the simulation. Analytical method is based on the Biot's two phase mixture theory and the proposed elasto-plastic constitutive model. Horizontal amplification in the simulation analysis as well as vertical amplification reproduced the observed record well by considering material parameters and compressibility of the fluid phase.