

ポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いた1次元有効応力解析

(株)熊谷組 仙頭 紀明*
 (株)熊谷組 鈴木 猛康**

ポートアイランドの鉛直アレー観測で、兵庫県南部地震の際に地盤の強い非線形性を示す記録が得られた。本論文では約80mの地下深部までモデル化し、1次元有効応力解析を行った。表層の加速度応答に関するシミュレーション結果は観測結果と重なるほど良く一致した。また洪積砂層については過剰間隙水圧の上昇、せん断剛性の低下は比較的小さく、液状化は埋土層の下部で発生していることが示された。

1. はじめに

ポートアイランドの鉛直アレー観測で、兵庫県南部地震の際に地盤の強い非線形性を示す記録が得られた。この強震記録を用いて、各研究機関で地盤の液状化を考慮した有効応力解析¹⁾が行われ、表層地盤の増幅特性、解析コードの適用性を検証している。その場合、洪積層では非線形性は小さいとして地表下約30mを入力基盤としているものが多い。本論文では、洪積層の非線形性を評価すると同時に、有効応力解析の精度を高めるため、できる限り地盤の深い位置での重複反射をも考慮することを試み、地表面下約80mの強震観測記録を入力波として1次元有効応力解析を行った結果について報告する。

2. 解析条件

(1) 同定解析

本論文では、有効応力解析の精度を高めることを目的として、できる限り地盤の深い位置での重複反射をも考慮することを試みた。ただし、地下深部までの地盤を非線形解析で追跡すると、当然ながら誤差が大きくなり、ターゲットとしている表層部の有効応力解析の精度が保証されない。そこで、ポートアイランドのGL.-83.4mと地表面の強震観測記録に基づいて地盤動的物性の同定を行い、地下深部の地層についてはその結果得られた動的物性を線形で与えた1次元の解析モデルを用いることにした。なお、GL.-83.4mの加速度波形については、杉戸等²⁾によって指摘されているように、反時計周りに22°回転させて得たEW成分を用いた。

同定解析手法は沢田等の提案した改良SLP法³⁾を、

キーワード：兵庫県南部地震、同定解析、強震記録
 表層地盤、有効応力解析、液状化

* 技術研究所材料系研究開発部, 0298-47-7504

** 技術研究所土木系研究開発部, 0298-47-7502

Q値の周波数依存性が考慮できるよう多少修正したもの³⁾であり、Q値の周波数依存性は次式の様子と与え、0.5~7.5Hzの周波数範囲を解析の対象とした。

$$Q = Q_0 f^p \quad (1)$$

ここで、 Q_0 は周波数1Hzでの値、 f は周波数(Hz)であり、 p は係数である。同定解析の結果得られた各層のせん断波速度と Q_0 値を図-1にまとめた。また、同定後のGL.-83.4mに対する地表面の伝達関数を、観測波の伝達関数と比較して図-2に示した。同定後の伝達関数は、4次のピークまで観測結果と良く一致しており、同定された動的物性を用いた場合、GL.-16.4m、GL.-32.4mの加速度応答は観測波とほぼ一致することを確認した。なお、同定された p 値は0.865である。

(2) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。下から3層までの洪積層と最上部の地下水位(GL.-3.0m)より上の地盤はを有する線形モデルとした。線形モデルの洪積層は同定解析に基づいた表-1の動的物性を用いた。上記以外の層について非線形モデルとし、沖積粘土層はHardin-Drebnichモデル、埋土層及び洪積砂層、砂礫層は西モデル⁵⁾を用いた。非線形解析に用いる地盤の初期せん断剛性は図-1に示すPS検層結果より求め、有効応力解析を行う埋土層と洪積層については有効拘束圧の0.5乗に比例するとして求めた。減衰定数 h は同定解析を行った層は Q_0 値より求め、他の層は2%をレーリー減衰として与えた。モデル地盤の一次固有周期から固有円振動数 ω を求め、レーリー減衰は質量比例、剛性比例の係数 α 、 β を ωh 、 h/ω として求め、各層ごとに与えた。入力基盤は強震記録が上

表-1 同定解析から得られた動的物性

layer	ρ (tf/m ³)	G (t/m ²)	ν	h
GL-50-61m	1.9	18643	0.475	0.075
GL-61-79m	2.0	9168	0.48	0.09
GL-70-83.4m	2.0	24563	0.45	0.08

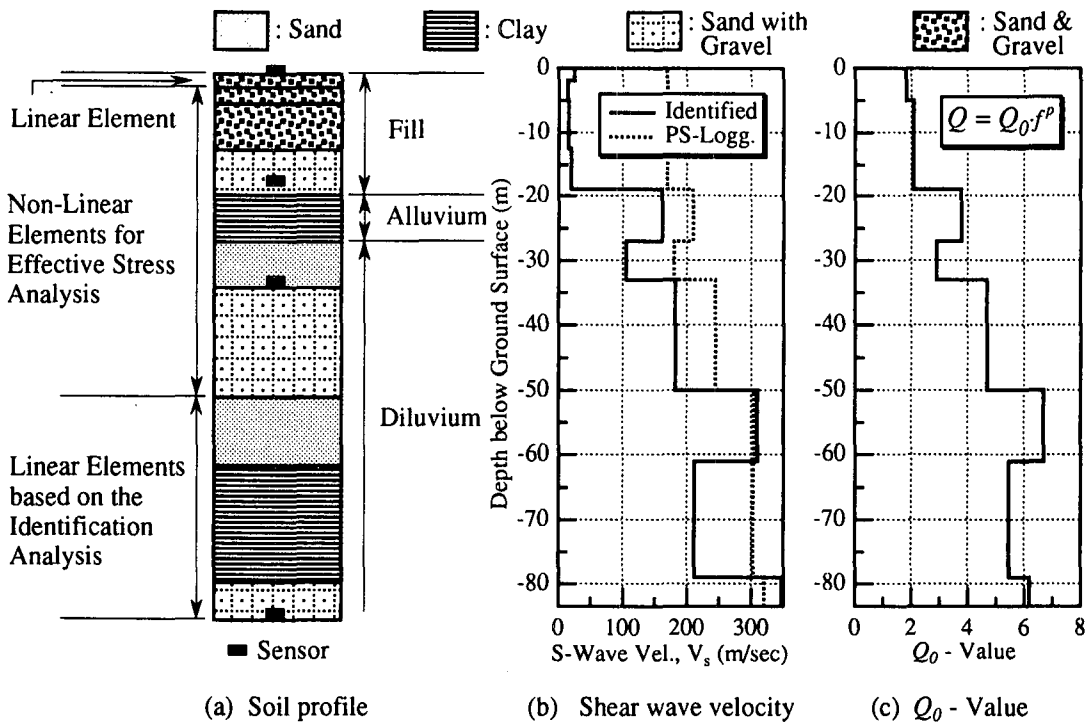


図-1 解析地盤モデルおよびせん断波速度とQ値に関する同定解析結果

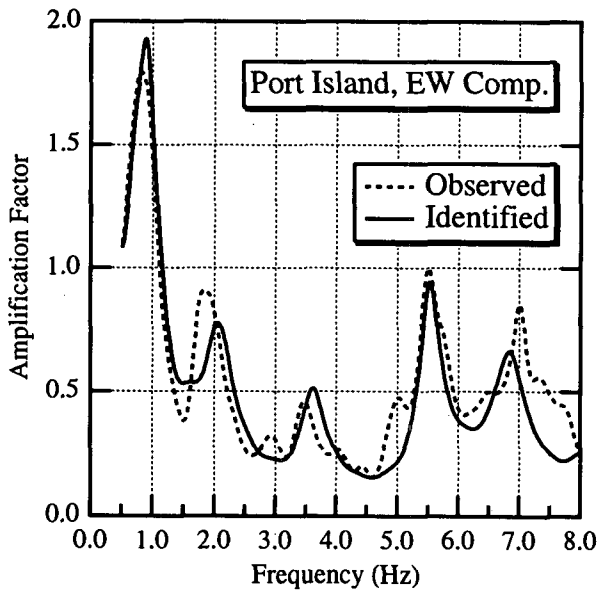


図-2 伝達関数の観測結果と同定解析の比較

昇波と下降波の合成された波と考え、下降波を吸収する粘性基盤として解析を行った。

(3) 解析パラメータ

有効応力解析では、解析コードとして砂の構成則に弾・塑性構成式の西モデルを用いたNANSSIを用いた。液状化強度を決めるための主要なパラメータとしては、体積ひずみの発生（非排水条件で過剰間隙圧の上昇）を制御するパラメータ m^* 、等方圧密試験の除荷時の e -log p 曲線の勾配である膨潤指数 κ 、変相

線と破壊線の間で除荷時のせん断剛性の変化量を制御しサイクリックモビリティを表現する係数 β_1 がある。

液状化強度は吉田の文献¹⁾にある地震前のポートアイランドの液状化試験結果を参考にし、繰り返し回数20回の応力比が埋土で0.26とし、洪積砂層ではデータがないため0.34程度と推定した。パラメータの設定は原位置地盤の K_0 値を0.5と仮定して、平均有効応力を求め、その平均有効応力のもとでの等方三軸試験としたとき上記の応力比となるようシミュレートした。シミュレートした液状化強度曲線を図-3、材料パラメータを表-2に示す。

表-2 有効応力解析に用いたパラメータ
(単位系: ton,m)

layer(GL-)	ρ	G	κ	m^*	β	ϕ	ϕ_m
2.0-5.0	1.9	5603	0.0018	0.005	200	26.4	23.8
5.0-8.0	1.9	7274	0.0018	0.002	200	26.4	23.8
8.0-12.6	1.9	8651	0.0022	0.002	200	26.4	23.8
12.6-16.4	1.9	9954	0.0025	0.003	200	26.4	23.8
16.4-19.0	1.9	10841	0.0028	0.003	200	26.4	23.8
27.0-32.4	1.8	11044	0.0043	6E-04	200	35.0	30.0
32.4-37.0	1.9	16528	0.0049	5E-04	200	42.0	36.0
37.0-42.5	1.9	17711	0.0049	4E-04	180	42.0	36.0
42.5-50.0	1.9	19125	0.0050	4E-04	150	42.0	36.0

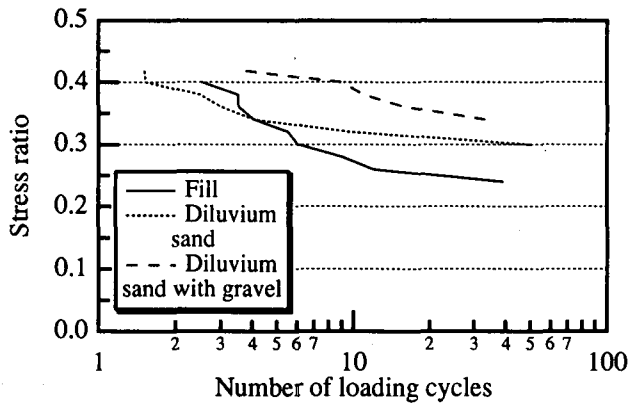


図-3 シミュレートした液状化強度曲線

沖積粘土層はHardin-Drnevichモデルとし、基準ひずみを0.15%とした。

3. 解析結果

表層地盤の加速度応答時刻歴を図-4に示す。図では観測記録が実線、シミュレーションが点線で示されている。強震観測の行われた3深度とも、実線と点線が重なる程よく一致していることがわかる。

地表面に関してはシミュレーション結果の方が若干位相が進んでいる。これに対しては本解析がEW成

分のみを対象としているため、震動主軸方向であるNS成分の影響が考慮されていない等の理由が推定される。GL.-16.4m, ならびに-32.4mについては位相の違いもなくそれぞれの観測点の下部に位置する層の応答特性をよく再現できている。

また下部の洪積層の同定解析による適切な動的物性値の選定することにより、地盤の深い位置での重複反射が考慮されて、有効応力解析の精度が上がっているものと推定される。

過剰間隙水圧比の時刻歴を図-5に示す。過剰間隙水圧比は、沖積粘土の上方の埋土2層のみで (GL.-12.6~-19.0m)液状化しており、それより上の層は液状化していないことがわかる。この結果は、地表面の加速度応答に関するシミュレーション結果の位相が観測結果よりも進んでいたことと対応しており、NS成分を考慮した場合は液状化がもっと上の層まで進行していた可能性を示唆している。比較のため洪積層での解析結果も示したが、過剰間隙水圧比は0.2以下と小さい。

液状化した層 (GL.-16.4~-19.0m)のせん断応力~

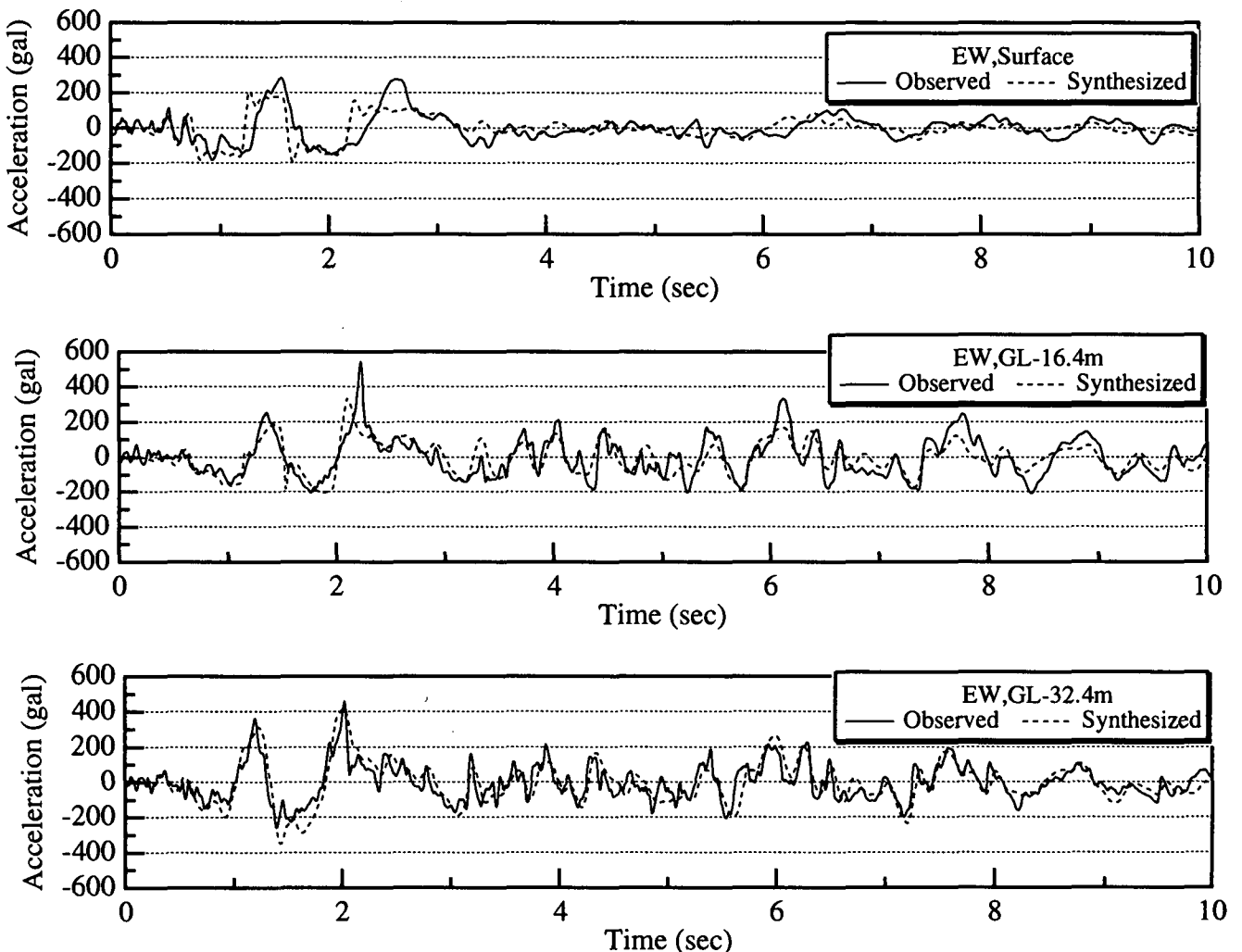


図-4 加速度応答の観測結果と解析結果の比較

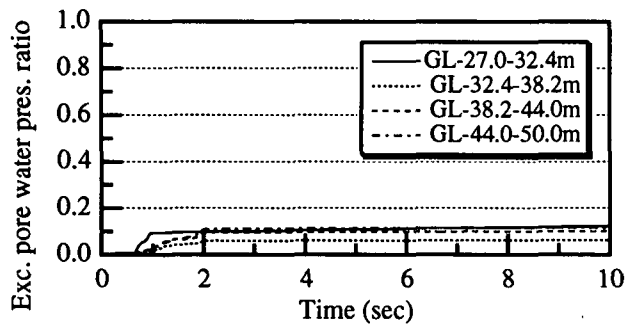
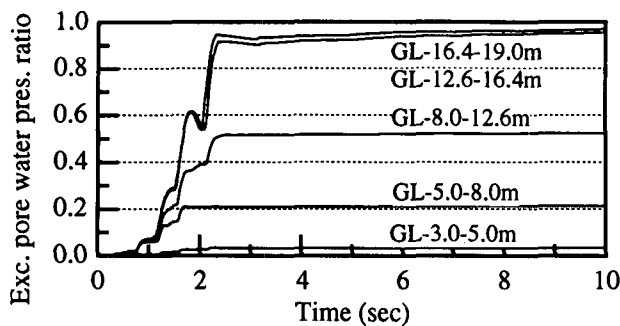


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴 (上: 沖積 下: 洪積)

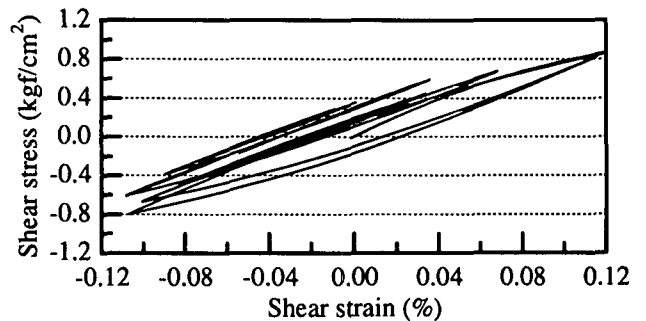
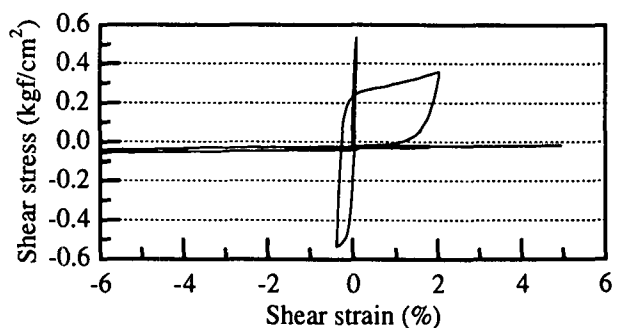


図-6 せん断応力-せん断ひずみ関係(上: 沖積 下: 洪積)

せん断ひずみ関係を図-6に示す。比較のため洪積層上部砂層(GL-27.0~32.4m)の関係も示した。液状化層ではせん断ひずみが6%程度発生しているが、これは液状化後の剛性の回復が本解析コードでは定義されていないためである。

4. まとめ

ポートアイランドの鉛直アレー観測地点を約80mの地下深部まで地盤をモデル化し、EW方向成分に関する1次元有効応力解析を行った。そして以下の結果が得られた。

- (1) 表層の加速度応答に関するシミュレーション結果は、観測結果と重なるほど良く一致した。
- (2) 洪積砂層については過剰間隙水圧の上昇、せん断剛性の低下は比較的小さいことが示された。
- (3) 液状化は埋土層の下部で発生していることが示された。ただし地表面の加速度の位相が若干進んでいることから、NS成分の影響も考慮する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) 吉田望：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.453,1995.10,pp49-54
- 2) 杉戸真太他：ポートアイランド鉛直アレー観測点における強震記録の解析 Part-2:地震計設置方向誤差の検討，耐震工学委員会地震荷重研究小委員会資料，1995.6
- 3) 沢田勉他：地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるSLP法の改良とその適用，土木学会論文集，Vol.1/1-19, No.446, pp.203-213, 1992
- 4) 鈴木猛康，田中港：観測地震波を用いた表層地盤の動的物性の同定，熊谷組技術研究報告，No.53, pp.11-17, 1994
- 5) 西好一，金谷守：地震時における基礎地盤の安定性評価(その5)，電力中央研究所報告，U87003，1987

ONE DIMENSIONAL EFFECTIVE STRESS ANALYSIS USING STRONG MOTION RECORDS AT THE PORT ISLAND

Noriaki SENTO and Takeyasu SUZUKI

Using strong motion data at the Port Island during the Southern Hyogo earthquake of 1995, effective stress analysis(Analysis Code-NANNSI) was conducted from GL.-83.4m through the surface. In addition, the analysis for identifying dynamic ground properties was carried out to determine the property for linear ground model from GL.-50m to GL.-83.4m. Then, the following results were obtained: (1) Synthesized acceleration at the surface, fill, and diluvium were well fit with observed strong motion records; (2) At diluvium, excess pore water pressure ratio were estimated as less than 0.2 and decline of shear modulus are rather small; (3) Liquefaction occurred at the bottom part of fill.