

地盤・杭基礎一体系 3次元液状化解析による被災事例の検証

有効応力解析、液状化、杭

矢作建設工業(株) 正会員 ○高木 麻有
岐阜大学 国際会員 八嶋 厚
岐阜大学 国際会員 張 鋒
東北大学 国際会員 渦岡 良介

1. はじめに

兵庫県南部地震では数多くの杭基礎構造の建物が被害を受けた。特に埋立地など地盤の液状化が発生した地域では、大きな地盤変位の影響を受けて、杭基礎が破断するなどの被害を受けている。これらの被害は、水際地盤の側方流動の影響を受けた地域で顕著であるが、内陸部の永久変位が比較的少ない地域でも被害が報告されている。このように、大規模地震が起きた場合、杭基礎構造物の被害形態として、地盤の液状化による杭基礎の塑性変形が予想される。杭基礎構造物の適切な設計のためには、杭の非線形挙動を適切に評価する必要がある。

本研究では、兵庫県神戸市東灘区深江浜に位置し、兵庫県南部地震時に比較的内陸部で被災した杭基礎を有する建物を対象として、有効応力解析コード LIQCA3D²⁾を用いて、地盤・杭基礎・上部工の一体系 3次元有効応力解析を行った。解析の対象とした杭基礎構造物は、地震後、北東方向へ傾斜した。その原因を解明するために、杭の非線形モデルに、杭の軸力変動による曲げ剛性への影響を考慮できる軸力変動モデル(AFD モデル)を用いて数値解析を行ない、杭基礎構造物の地震時挙動を詳細に検討した。

2. RC 部材の非線形特性の定式化

従来、杭の $M-\phi$ 関係をひびわれ、降伏、終局の 3点で決定した Tri-linear モデルを用いて表わし、さらに、繰り返し荷重を表現するために Tri-linear 復元力モデルとして、杭の非線形特性を表現してきた²⁾。しかし、このモデルでは、軸力変動による曲げ剛性への影響が考慮されておらず、群杭基礎と周辺地盤との相互作用を詳細に把握するには不十分である。そこで本研究では、Multi-Spring Model³⁾の杭断面を離散化する概念を導入し、円形杭のコンクリート部材を Figure 1 のように離散化した。それらの鉄筋とコンクリートそれぞれの要素に Figure 2(a)(b)のような、非線形特性を与え、杭の非線形特性を考慮した。梁要素のつりあい式の弱形式を再定式化した AFD モデル⁴⁾を用いることによって、杭基礎において軸力変動による曲げ剛性の非線形への影響を考慮した解析を行った。Figure 3 は軸力一定で、横方向に繰り返し強制変位を与える時に片持ちばりの荷重・変位関係を示したものである。提案した理論が実験結果をよく説明できることがわかる。

3. 被災建物の概要⁵⁾

Figure 4a に被災した建物の位置を示す。被災建物は兵庫県東灘区深江浜に位置しており、西側の海岸線から建

物までの最短距離は 350m である。建物は平成元年に建設された RC 造 5 階建ての事務所ビルで、杭基礎により支持されている。Figure 4b に地震後の周辺地盤と建物の変位を示す。建物周辺地盤が北西方向へ変位しているのに対して、建物が北東方向へ変位している。地震後、杭頭で最大約 70cm 沈下が発生し、建物は北側に約 1/80、東側に約 1/30 傾斜したが、上部構造の被害は全くなかった。検討の対象となる地盤構成を Figure 5a に示す。杭基礎の平面図を Figure 5b に示す。杭は、上部より SC 杭(6m)、PHC 杭 A 種(12m)、PHC 杭 A 種(先端拡底杭、13m)の 3 本継ぎとなっている。杭系は 500mm および 600mm であり、1 柱あたり 2~3 本の杭で支持されている。地震後、Figure 5b の◎印で示した 4 本の杭について健全度調査が実施されている。その調査結果を Figure 5c 示す。図中には、建物建設時に実施されたボーリングから得られた地層構成も示している。杭基礎について、ボアホールカメラによる杭孔内調査などの調査結果より、中杭の上部(杭頭より 6~8m)において、土砂の流入が見られた。この位置で杭は大きな損傷を受けていると思われる。また、地震後、深江浜では噴砂や地盤沈下が観測されており、埋土層において液状化が発生した可能性がある。土砂の流入した位置は、埋土層下部と粘土層との境界付近であり、埋土層での大きな水平変位が被害の一因となっていることが予想される。

4. 解析条件

砂の弾塑性モデル⁶⁾および粘土の弾粘塑性モデル⁷⁾を組み込んだ有効応力解析手法 LIQCA3D を用いて、地盤・杭基礎・上部工の一体系 3次元解析を行った。地盤の材料パラメータは深江浜で実施された既存の土質調査結果および室内試験をもとに設定した。対象地盤における要素シミュレーションの結果を Figure 6 に、要素シミュレーションに用いたパラメータを Table 1 に示す。要素シミュレーションの結果から、せん断応力比 $R=0.22$ のとき、 A_c 層(GL-10.7m~GL-21.6m)では有効応力が 0 に達しておらず、液状化には至っていないことがわかる。また、 B_c 層の地下水位以深(GL-2.2m~GL-10.7m)では、有効応力がほぼ 0 に達しており、液状化したことがわかる。Figure 7 に室内試験で得られた B_c 層の液状化強度と要素シミュレーションで得られた理論解の比較を示す。解析で用いられた地盤特性が要素レベルでの有効性が示された。群杭基礎のモデル化については、Figure 5b に示すように、一つのフーチングあたり 2~3

本の杭が配置されているが、解析では各フーチングあたりの杭の断面積、断面二次モーメントを足し合わせ、1本のはり要素で杭をモデル化した。杭の諸元を Table 1 に示す。また、杭基礎には死荷による初期軸力を与えて解析を行う。解析に用いた入力加速度の時刻歴を Figure 8 に示す。解析手法は Newmark- β 法による時刻歴動的解析とし、時間刻みは 0.002s, 10000step の計 20 秒間について解析した。Figure 9 に示す解析モデルのメッシュは、節点数が 4803、要素数が 4366 である。地盤の側方境界は同一深度の節点を等変位とし、周辺地盤の各層が水平に挙動するように配慮した。また、排水条件として、GL-2.2m の地下水位面を排水境界、その他の面を非排水境界とした。解析結果整理の都合上、Figure 9 に示すような x、y、z 方向を建物の短軸、長軸および鉛直方向とする。

5. 解析結果

Figure 10 に、地表面における加速度、速度および変位の観測値と解析値の比較を示す。x 方向について、解析結果は観測結果に比べて若干の位相のずれがみられたが、それほど大きな差ではなくよく表現できているといえる。y 方向についても、位相はよく一致している。

Figure 11 に観測加速度・解析加速度、および観測変位・解析変位の軌跡の比較図を示す。いずれも、観測結果と解析結果に多少の違いはあるものの、定性的にも定量的にもよく一致している。以上のことから本研究で提案した解析手法の地盤への適応性を確認した。

Figure 12 に Pile1 に隣接した地盤での過剰間隙水圧比時刻歴を示す。過剰間隙水圧比とは、発生した間隙水圧を初期の鉛直有効応力で除したものであり、この値が 1.0 に達すると地盤は完全液状化状態に至る。Figure 12 を見ると、主要動が開始する約 8 秒後以降に B_s 層(e4)における間隙水圧比が 1.0 になっており、完全液状化状態に至った。B_s 層の乾燥部分(e1)および A_c 層(e8)、A_{s/c} 層(e12)は、間隙水圧比が 1.0 になっておらず、液状化には至っていないことがわかる。

Figure 13 に Pile1~Pile4 における杭頭および B_s 層下端 (GL-10m) での曲率の時刻歴を示す。ここに示したのは、x 方向・y 方向および、曲率水平 2 成分の二乗和平方根の時刻歴である。杭頭では約 6 秒で、x 方向の曲率がすべての杭で破壊曲率を越えている。Pile1 で約 -0.013/m、Pile2 で約 -0.008/m、Pile3 で約 -0.014/m、Pile4 で約 -0.014/m となっている。Pile1、Pile3、Pile4 ではほぼ同じ曲率となっているが、その中で Pile4 が最も大きな値になっている。その後、約 9 秒のとき B_s 層が完全液状化に至ると曲率の変動が長周期化し、Pile1、Pile3、Pile4 で破壊曲率を越える大きな曲率となっている。y 方向でも同様な傾向が見られる。曲率平方和を見ると、約 6 秒のとき破壊曲率を越える大きな曲率になっている。特に Pile3 が大きく約 0.019/m、次いで Pile1、Pile4 が約 0.016/m となっている。

B_s 層下端では、x 方向・y 方向ともに杭頭よりも 1 秒ほど遅れて、約 7 秒で最大曲率となっている。このとき、破壊曲率を越える大きな曲率となっている。また、B_s 層下端は、地震後

の調査で杭に大きな損傷が見られた位置に相当する。曲率平方和を見ると、約 7 秒のとき各杭は最大曲率となり、破壊曲率(D600:0.00248/m、D500:0.00348/m)を越える大きな曲率になっている。特に Pile3 が大きく約 0.015/m、次いで Pile1 が約 0.011/m となっている。

Figure 14 に水平変位が最大となる時刻 5.73 秒のときの Pile1~Pile4 曲率分布を示す。x 方向・y 方向ともに、GL-30m~GL-26m 付近までは曲率はほぼ 0 になっている。GL-26m から曲率は徐々に大きくなっているが、GL-20m~GL-10m 付近(A_c 層)で一度小さくなっている。また、GL-10.7m~地表面(G.L.)で特に大きな値となっている。この GL-10.7m は、B_s 層と A_c 層の境界である。5.73s での曲率は、x 方向では Pile4 が -0.014/m と最も大きく、次いで Pile3 が -0.014/m となっている。y 方向では Pile3 が 0.012/m と最も大きく、次いで Pile1 が 0.010/m と大きな値をとっている。

Figure 15 に加速度入力後 20 秒の時点での地盤および上部構造物の変位図を示す。メッシュ部が初期位置で、色付きの部分が加速度入力後 20 秒の時点の位置である。上部構造物は北方向へ約 3.0'、東方向へ約 6.0' 傾斜していることがわかった。

6. まとめ

地盤・杭基礎・上部工の一体系 3 次元有効応力解析の結果、東方向に位置する Pile3 と Pile1 の曲率および曲げモーメントが比較的大きくなっており、他の杭よりも大きな損傷を受けたことが予想される。また、上部構造物が北東方向へ傾斜したことを確認した。また、観測結果と解析結果の比較より、解析結果は定量的・定性的に観測地を再現できており、本研究で提案した解析手法の地盤への適応性を確認した。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM- FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 2) 渦岡良介、久保哲夫、八嶋厚、張 鋒: 兵庫県南部地震で被災した杭基礎建物の 3 次元有効応力解析、第 36 回地盤工学会発表会、平成 13 年度発表講演集、pp.1727-1728, 2001.
- 3) Lai, S-S., Will, G. T. and Otani, S.: Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Member, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.110, No.11, pp.2568-2584, 1984.
- 4) Zhang, F., Yashima, A., Kimura, M. and Uzuoka, R.: 3-D FEM Analysis of Laterally Cyclic Loaded Group-Pile Foundation Based on an Axial-Force Dependent Hysteretic Model For RC, Proc. of Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng2000), Melbourne, Balkema, CD-ROM, 2000.
- 5) 伊勢本昇昭他: 兵庫県南部地震における液状化で被災した杭基礎建物の解析的検討(その 1)、第 33 回地盤工学会発表会、pp.801-802, 1998.
- 6) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 7) Oka, F.: A cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear hardening rule, Proc. of the Fourth Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, pp.105-114, 1992.

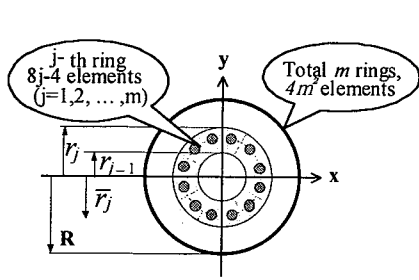


Figure 1 円形断面のRC 杭の離散化

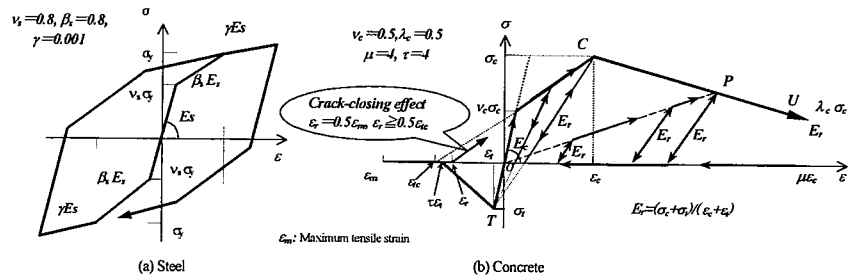


Figure 2 杭部材の応力～ひずみ関係

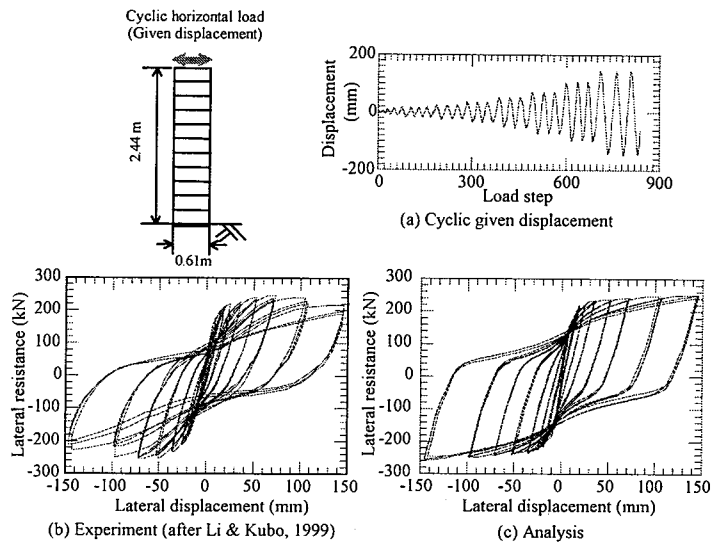


Figure 3 繰り返し水平荷重を受ける片持ちばりの実験検証

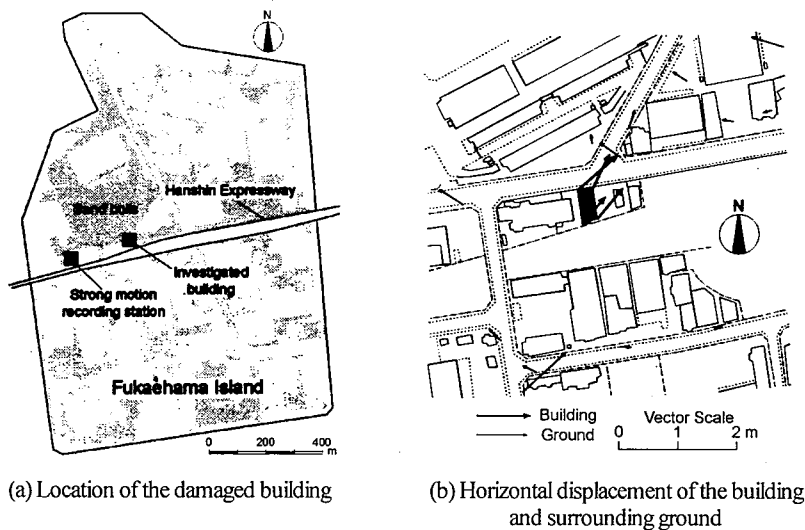


Figure 4 被災した建物の位置および周辺地盤・建物の変位 (伊勢本昇昭他, 1998)

Table 1 地盤パラメータ

土層	間隙比	圧縮指数	膨潤指数	初期せん断比	変相心力比	破壊心力比	塑性パラメータ			粘塑性パラメータ		ダイレイタンス係数	基準ひずみ			
	E	λ	κ	G_0/σ_{vm0}	M_m	M_r	B_0	B_1	C_f	$C_{01}(1/s)$	$C_{02}(1/s)$		D_0	n	γ_{ref}^p	γ_{ref}^E
B _s	0.0~2.2	0.42	0.01	0.001	1686	0.91	1.2	3500	0	0			1	4	1000	1000
B _s	2.2~10.7	0.42	0.01	0.001	1686	0.91	1.2	3500	7	0			1	4	0.002	0.01
A _c	10.7~21.6	1.41	0.331	0.043	401	1.026	1.2	55	0	0	5.54E-06	7.76E-07				

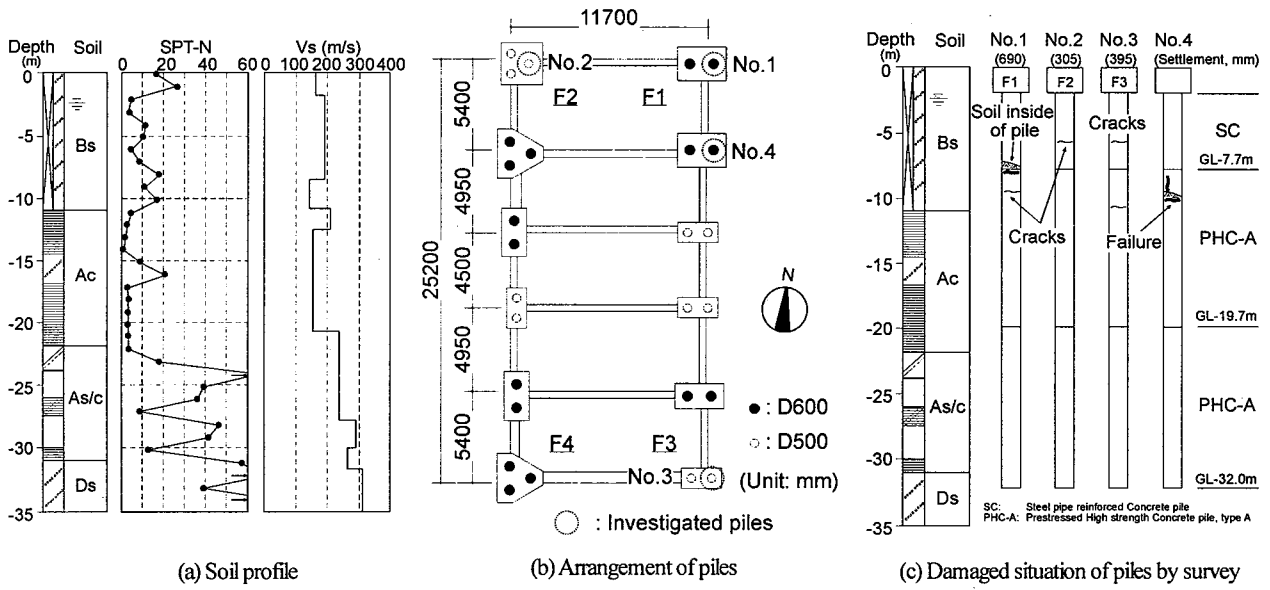


Figure 5 地盤状況、杭配置および杭の被災状況 (伊勢本昇昭他, 1998)

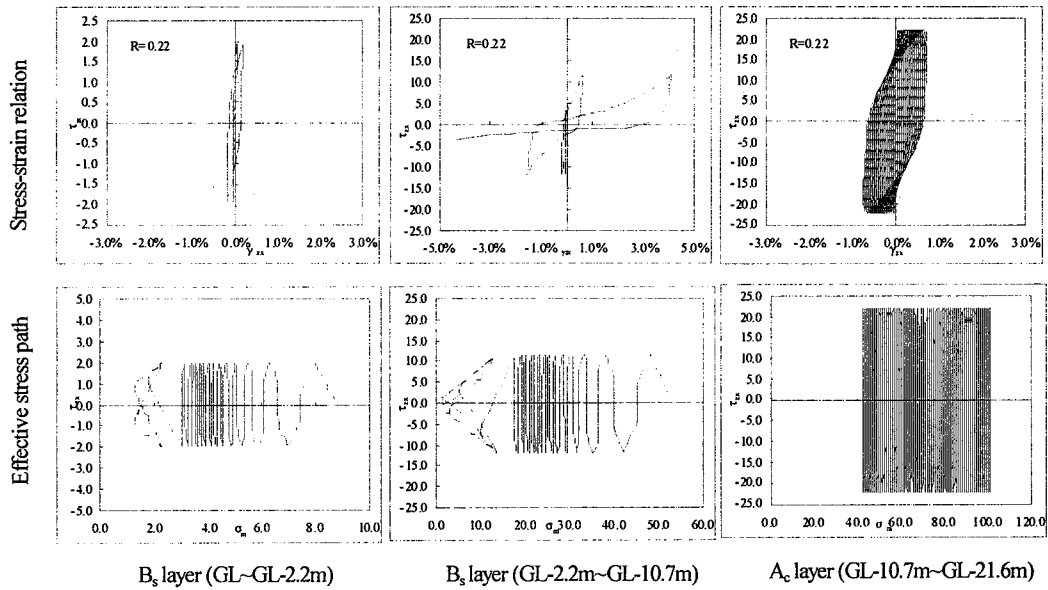


Figure 6 要素シミュレーションの結果

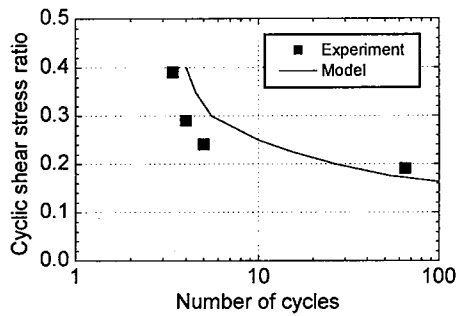


Figure 7 B_s 層の液状化強度

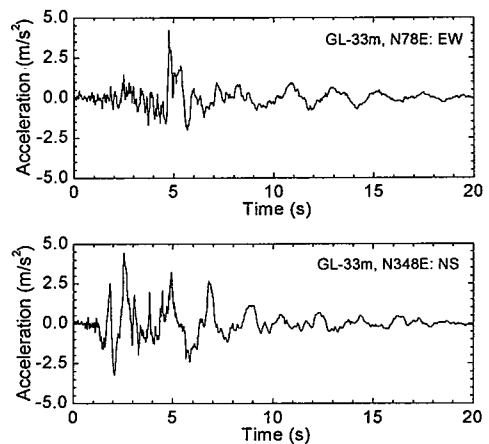


Figure 8 入力地震波

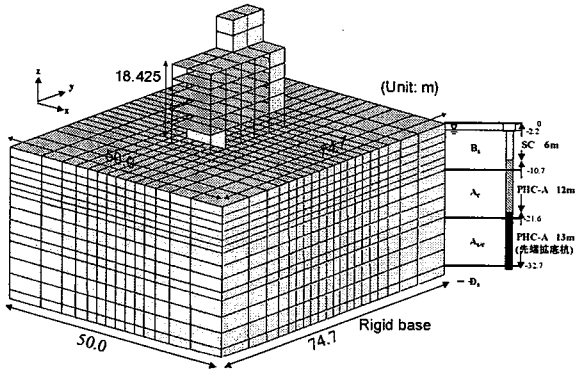


Figure 9 地盤・杭基礎・建物一体系有限要素解析メッシュ

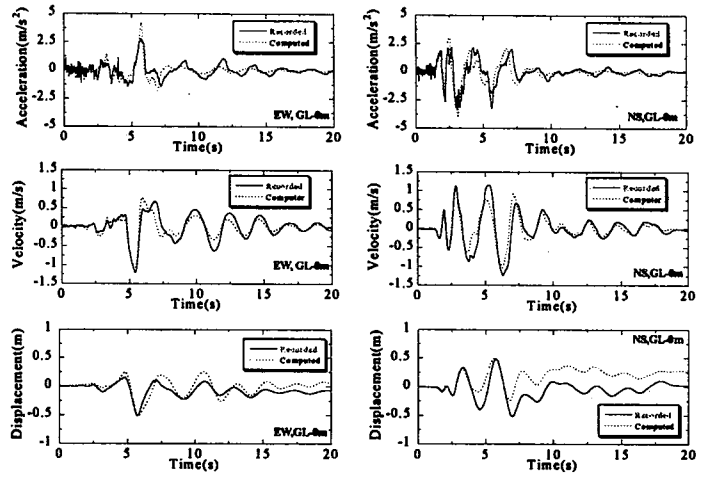


Figure 10 地表面における観測加速度・速度・変位の計測値と解析値の比較

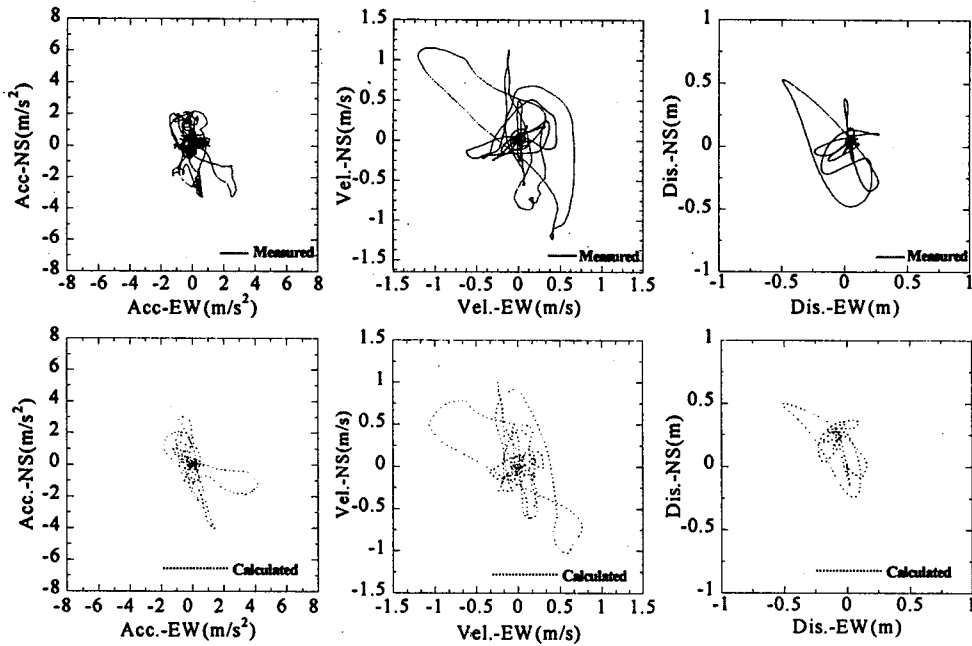


Figure 11 加速度・速度・変位の軌跡の観測値と解析値の比較

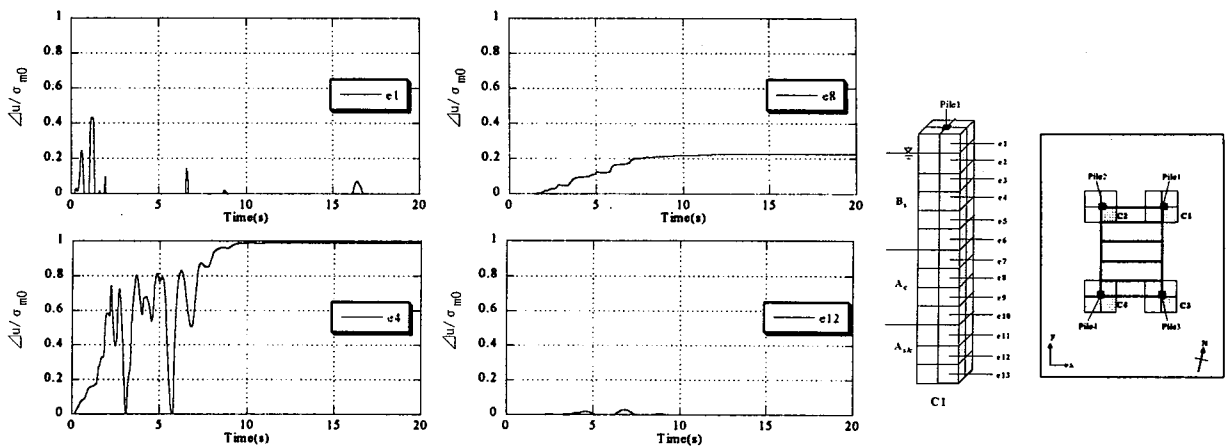


Figure 12 各層における過剰間隙水圧比の時刻歴

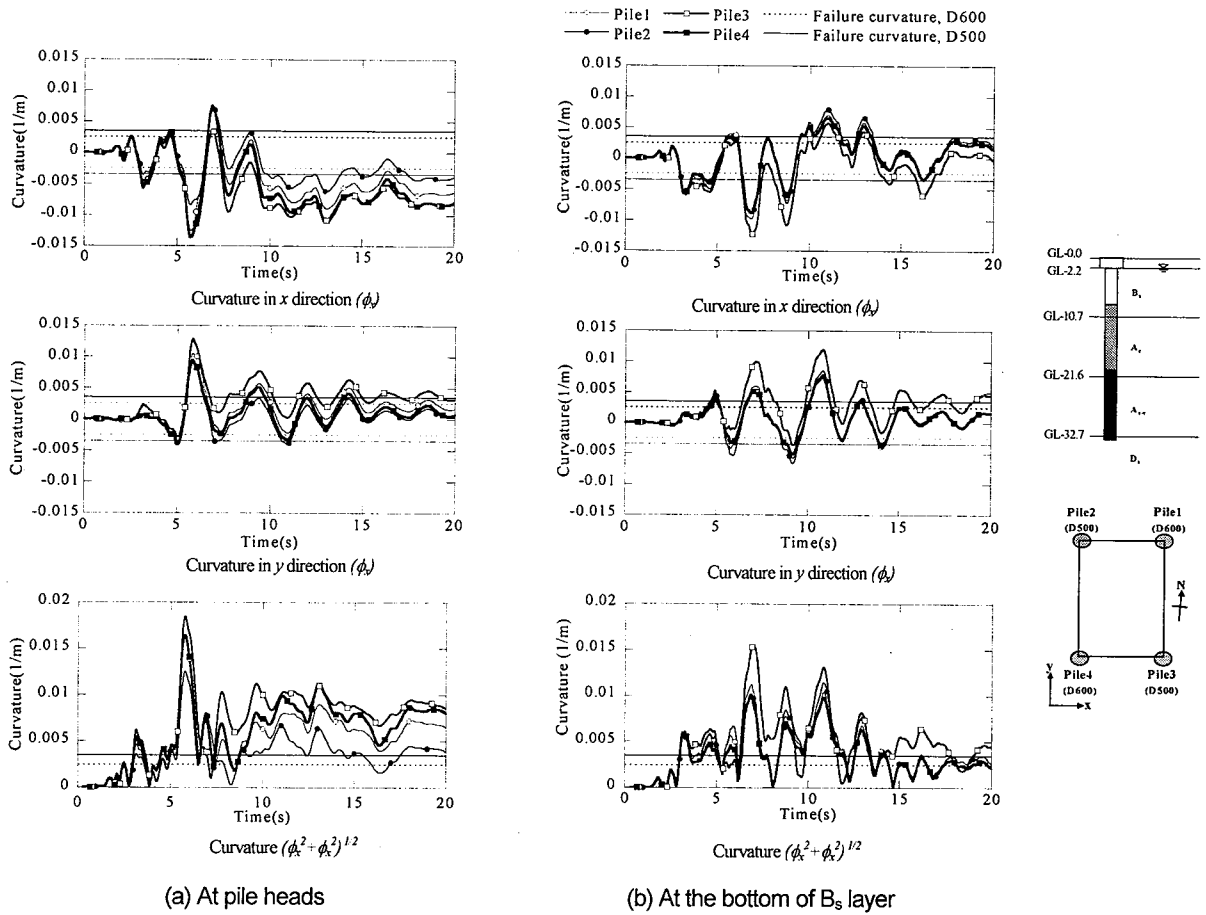


Figure 13 群杭1~4における曲率の計算時刻歴の比較

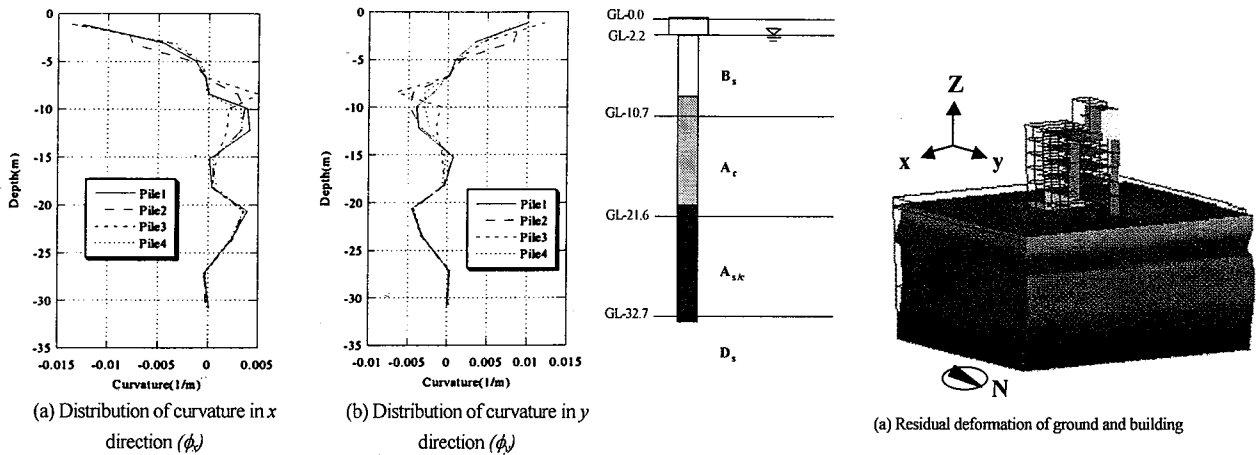


Figure 14 群杭1~4の $t=5.73\text{sec.}$ における曲率の分布

Table 2 杭の諸元

杭種	SC		PHC-A	
外径 (mm)	600	500	600	500
内径 (mm)	510	420	510	420
肉厚 (mm)	90	80	90	80
鋼管厚 (mm)	6.0	6.0	6.0	6.0
コンクリートのかぶり厚さ(mm)	45	40	45	40
鉄筋の直径(mm)	22.7	20.7	7.1	7.1
コンクリートの圧縮強度(MPa)	78.4	78.4	78.4	78.4
コンクリートの引張強度(MPa)	4.7	4.7	4.7	4.7
鉄筋の降伏強度 (MPa)	235.0	235.0	1270.0	1270.0
鉄筋の本数	28	28	19	14

