

# 水平 2 方向入力を考慮した液状化地盤中の単杭の 3 次元有効応力解析

東北大学 大学院工学研究科 渦岡良介, 権 永哲  
 岐阜大学 流域圏科学研究センター 張 鐘  
 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 八嶋 厚

## 1. はじめに

1995 年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<sup>1)</sup>。特に広範囲で地盤の液状化が発生した埋立地では、PHC 杭が破断するなどの大きな被害を受けている。液状化を考慮した杭基礎の動的解析を行う場合、液状化地盤の水平変位などの応答を予測する必要があることから、有効応力解析が用いられることが多い。有効応力解析を用いた杭基礎の応答解析には、1 次元の土柱モデルと杭基礎をバネで接続した比較的簡易なモデルから杭基礎と地盤を 3 次元でモデル化した比較的複雑な解析まで、様々な手法がある<sup>2), 3)</sup>。

近年、計算機能力の向上に伴って 3 次元有効応力解析が可能となりつつある。杭基礎のような 3 次元構造物を直接モデル化するには 3 次元解析が最も適していると考えられることから、杭基礎の 3 次元有効応力解析は他の構造物より比較的早くから行われている<sup>4)</sup>。しかしながら、3 次元解析の特長である水平 2 方向入力下での杭基礎の挙動予測という観点で、3 次元有効応力解析の適用性が検討された事例は少ない。特に杭基礎が破壊に至るようなレベル 2 地震動下において、水平 2 方向入力下での杭基礎の挙動予測を行った事例はほとんどない。そこで、本研究では 1995 年兵庫県南部地震で被災した深江浜の上部工なしの単杭<sup>5)</sup>を対象として、レベル 2 地震動の水平 2 方向入力下で杭基礎が破壊に至る過程を 3 次元有効応力解析によって再現することを試みる。この事例を解析対象としたのは、1) 上部構造物がないことから杭の曲げ剛性への軸力変動の影響が無視できる、2) 比較的近傍で水平 2 方向の基盤波形が観測されている、3) 地盤調査と杭の被災調査が十分になされている、などの理由による。

## 2. 被災した杭基礎の概要<sup>5)</sup>

被災した杭は深江浜に位置する工場敷地内にあり、フーチングなどの上部構造が存在しない形で被災した。被災した工場敷地の深江浜における位置を図-1 に示す。図中の噴砂位置は Hamada ら<sup>6)</sup>による航空写真判読結果であり、島全域で噴砂が確認されている。このことから、深江浜では埋立層が激しく液状化したと考えられる。また、島を囲む護岸の海側への水平変位は数 m に達しており、この影響で護岸からやや内陸部でも護岸方向への残留水平変位がみられる。当サイトは最も近い西側護岸から約 350m 離れた地点に位置しており、残留水平変位ベクトル<sup>6)</sup>によると、当サイトでは

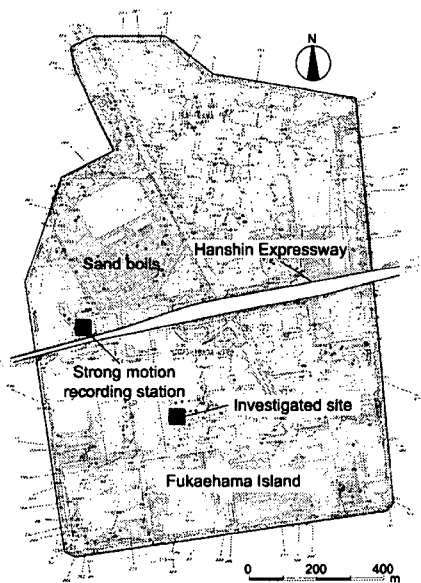


図-1 深江浜の噴砂範囲と解析対象地点  
(Hamada ら<sup>6)</sup>に加筆)

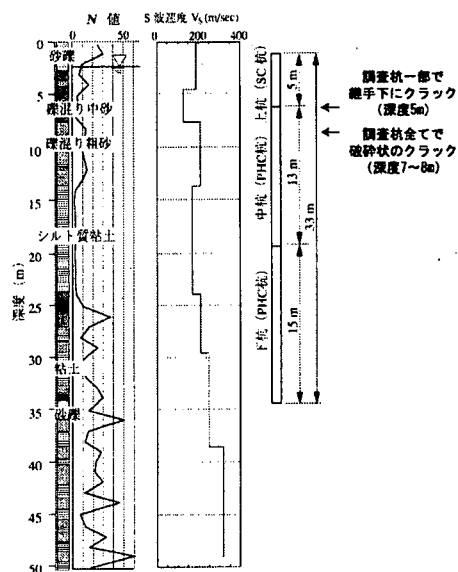


図-2 土質柱状図と杭の構造  
(堀越<sup>5)</sup>に加筆)

南西方向に1m前後の残留水平変位がみられる。深江浜全体でも、護岸から離れた内陸部で50cmから1m程度の残留変位が測定されており、数10cmの測定誤差があるとしても、いくらかの残留水平変位が内陸部でも発生したと考えられる。実際、挿入式傾斜計による杭の曲がり測定の結果でも、杭頭部は南西～西の方向に25cm～40cmの残留変位がみられる。このような地盤や杭の残留変位については、地震後の地盤流動変形の影響も考えられることから、ここでは解析対象としないこととする。したがって、残留変位に対する議論は行わない。

被災した杭は地震の10年以上前に施工された外径400mmおよび500mmの打ち込み杭である。杭の構造および土質柱状図を図-2に示す。杭は3本継ぎ構造（最上部はSC杭、下2本はPHC杭A種）であり、杭長は33mである。敷地内の杭は長方形配置（約10m×6m）されたフーチングに対して、1基あたり2本から4本の杭が配置されている。したがって、フーチング内では杭間が非常に狭くなるが、杭頭は結合されていないことから、解析では単杭として扱うこととする。地盤は地表から約14mはマサ土による埋立層であり、上から砂礫、礫混り中砂、礫混り粗砂からなっている。その下は沖積シルト質粘土層（Ma13）、洪積粘土と洪積砂礫の互層である。地下水位はGL-2m付近にある。

地震後、1)弾性波を用いたインテグリティテスト、2)カメラによる孔内撮影、3)挿入式傾斜計による杭の曲がり測定が実施されている。これらの調査結果より、調査杭の一部でSC杭継ぎ手直下にクラックがみられ、調査した全ての杭に共通して深度7～8mで大きな破砕状のクラックがみられることがわかっている。この深度7～8m位置は、図-2より礫混り中砂と礫混り粗砂の境界付近にあたることがわかる。礫混り中砂のN値は5程度であるが、その下の礫混り粗砂のN値は12程度となっている。

### 3. 解析手法

解析には砂の繰返し弾塑性モデル<sup>7)</sup>および粘土の弾粘塑性モデル<sup>8)</sup>を組み込んだ3次元有効応力解析コードLIQCAを用いた。場の方程式の定式化には、2相混合体理論に基づいた土骨格の変位と間隙水圧を未知数とするu-p formulation<sup>9)</sup>を用いており、力のつりあい式と連続式が連成したものとなっている。有限要素法（固相の変位）と有限差分法（要素重心での過剰間隙水圧）を適用し、空間離散化を行う。また、時間積分にはNewmarkのβ法を用いる。筆者らは、本解析手法を用いて、1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドでの鉛直アレー記録や深江浜の内陸部で被災した杭基礎建物のシミュレーション<sup>10)12)</sup>を実施しており、本解析手法の適用性を検討している。

### 4. 解析条件

#### (1) 有限要素モデル

有限要素モデルは図-2に示した土質柱状図および杭の構造に基づき作成した。作成した有限要素モデルを図-3に示す。有限要素モデルの底面は剛基盤として、せん断波速度300m/sの洪積層上面とした。この層は入力動に用いる観測記録が得られた土層にほぼ対応する。解析対象杭は長方形配置のフーチングに対して、1基あたり2本から4本が配置されているが、ここでは、先に述べたように、配置間隔10mの単杭を対象として、側方を周期境界とした。また、杭頭は地表面より1m地中（要素1つ分）にある。杭径50cmの杭体積をモデル化するために、図-3(b)に示すように杭の芯材として

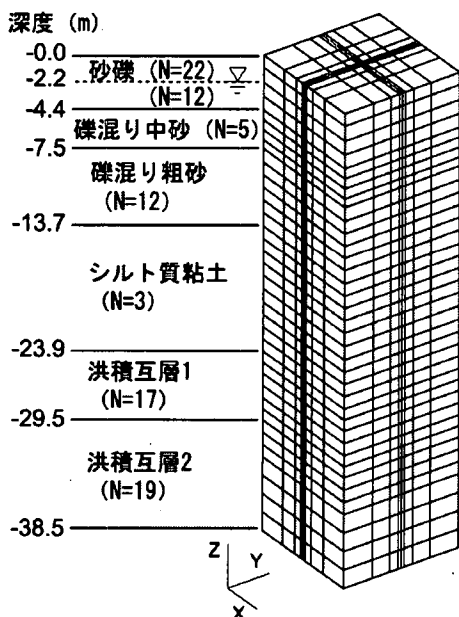


図-3(a) 有限要素モデル（土層分割）

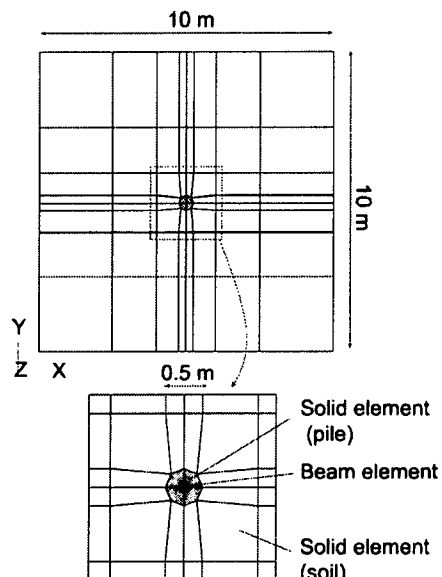


図-3(b) 有限要素モデル（平面図、杭のハイブリッド要素）

剛性を受け持つビーム要素と杭体積を表すソリッド要素を組み合わせたハイブリッド要素<sup>13)</sup>を用いた。なお、液状化地盤中の杭の挙動が主な対象であり、杭と液状化地盤の間のすべりや剥離が杭の挙動に与える影響は少ないと考え、杭と地盤間のすべりや剥離は考慮していない。間隙水の境界条件として、地下水位面を水頭固定の排水境界とし、その他の面は全て非排水境界とした。

## (2) 地盤材料のパラメータ

埋土層を構成している砂礫、礫混り中砂および礫混り粗砂については、砂の弾塑性モデル、シルト質粘土層には粘土の弾粘塑性モデル、その他の層にはR-Oモデルを適用した。各土層に対して設定したパラメータを表-1に示す。パラメータ設定においては、既往の調査・解析事例<sup>5)</sup>の他、ポートアイランド・六甲アイランドでの調査および解析事例<sup>12)</sup>も参考とした。表に示すパラメータのうち、弾塑性モデルの密度から変相応力比までのパラメータ、弾粘塑性モデルとR-Oモデルの全てのパラメータについては、既往の解析事例<sup>5)</sup>、<sup>12)</sup>から設定した。弾塑性モデルのそれ以外のパラメータについては、繰返しせん断試験の要素シミュレーションによって試行錯誤で設定した。ここで目標とした液状化強度は各層の平均N値から推定した値<sup>5)</sup>であり、表にその値を示している。既往の解析事例<sup>5)</sup>が指摘しているように、深度7~8mでの杭の被災状況を再現するには、礫混り中砂と礫混り粗砂の液状化強度の違いを正確に把握する必要がある。そこで、

表-1 地盤材料パラメータ

土層名		砂礫	礫混り中砂	礫混り粗砂	シルト質粘土	洪積互層1	洪積互層2
密度	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.80	1.80	1.80	1.65	1.85	1.85
透水係数	$k$ (m/s)	$2.2 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-10}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$
初期間隙比	$e_0$	0.6	0.6	0.6	1.41	1.2	1.2
せん断波速度	$V_s$ (m/s)	190	130	210	170	210	250
砂の弾塑性モデル・粘土の弾粘塑性モデル							
圧縮指数	$\lambda$	0.0250	0.0100	0.0250	0.331	-	-
膨潤指数	$\kappa$	0.0025	0.0010	0.0025	0.043	-	-
過圧密比	OCR*	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-
初期せん断係数比	$G_0/\sigma'_m$	2057	667	1139	401	-	-
破壊応力比	$M_f^*$	1.23	1.08	1.23	1.23	-	-
変相応力比	$M_m^*$	0.91	0.91	0.91	1.03	-	-
硬化関数中のパラメータ	$B_0^*$	7000	3000	3000	55	-	-
"	$B_1^*$	80	60	60	-	-	-
砂の弾塑性モデル							
液状化強度 (N=5)	$R_{L5}$	0.47	0.26	0.34	-	-	-
液状化強度 (N=20)	$R_{L20}$	0.32	0.18	0.23	-	-	-
規準ひずみ (塑性剛性)	$\gamma P_f^*$	0.002	0.004	0.003	-	-	-
規準ひずみ (弾性剛性)	$\gamma_f^{E*}$	0.050	0.040	0.070	-	-	-
ダレイタツン係数	$D_0^*$	1.0	1.0	1.0	-	-	-
ダレイタツン係数	$n$	6.0	4.0	6.0	-	-	-
粘土の弾粘塑性モデル							
粘塑性パラメータ	$m_0^*$	-	-	-	14.0	-	-
"	$C_{01}$ (1/s)	-	-	-	$5.5 \times 10^{-6}$	-	-
"	$C_{02}$ (1/s)	-	-	-	$7.8 \times 10^{-7}$	-	-
R-Oモデル							
ポアソン比	$\nu$	-	-	-	-	0.35	0.35
初期せん断弾性係数	$G_0$ (kPa)	-	-	-	-	81585	115625
粘着力	$c$ (kPa)	-	-	-	-	127.0	147.0
内部摩擦角	$\phi$ (deg)	-	-	-	-	0.0	0.0
パラメータ	$\alpha$	-	-	-	-	1.60	1.29
"	$r$	-	-	-	-	2.06	2.06

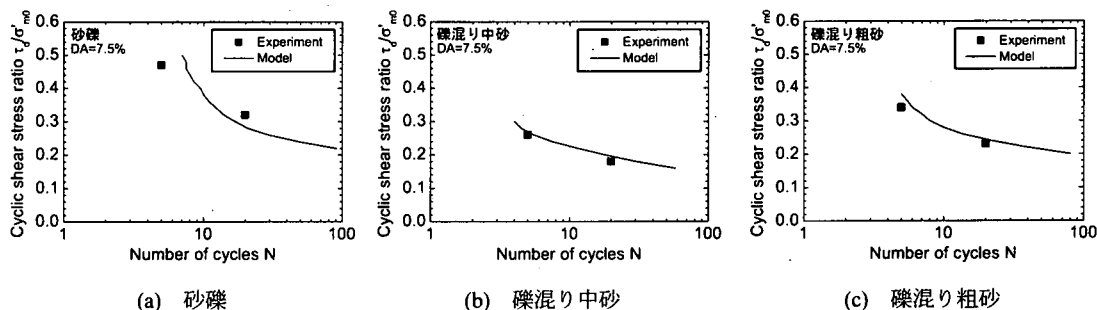


図-4 液状化強度曲線

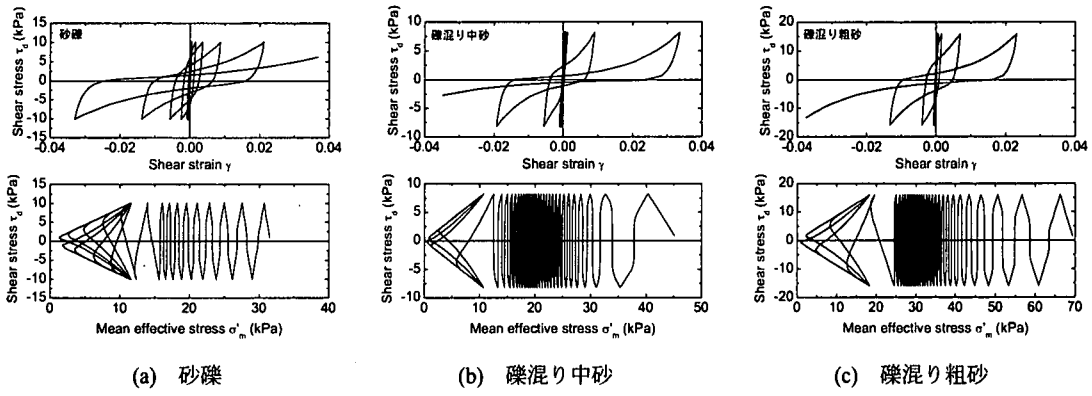


図-5 せん断応力とせん断ひずみの関係（上）および有効応力経路（下）

表-2 杭材料のパラメータ

杭種		SC杭	PHC杭 (A種)	備考
杭外径	$D_{out}$ (mm)	500	500	
杭内径	$D_{in}$ (mm)	315	340	
コンクリート				
ヤング係数	$E_c$ (GPa)	40.0	40.0	
ポアソン比	$\nu_c$	0.167	0.167	
圧縮強度	$f_c$ (MPa)	78.4	78.4	
引張強度	$f_t$ (MPa)	0.0	0.0	
モデルパラメータ	$\lambda$	1.0	1.0	軟化なし
"	$\mu$	2.5	1.25	終局ひずみ係数
"	$\tau$	0.0	0.0	引張強度0とする
"	$\alpha_c$	0.0	0.0	バイリニアとする
"	$\beta_c$	1.0	1.0	バイリニアとする
かぶり厚さ	$d_c$ (mm)	0.0	40.0	
有効プレストレス応力	$\sigma_{cc}$ (MPa)	0.0	3.9	
鉄筋 (外巻鋼管に相当) (PC鋼材に相当)				
ヤング係数	$E_s$ (GPa)	200.0	200.0	
ポアソン比	$\nu_s$	0.300	0.300	
降伏強度	$Y_s$ (MPa)	235.0	1420.0	
直径	$d$ (mm)	21.45	9.2	SC杭は鋼管を換算
本数	$N$ (本)	30	9	
モデルパラメータ	$\alpha_s$	0.0	0.0	バイリニアとする
"	$\beta_s$	1.0	1.0	バイリニアとする

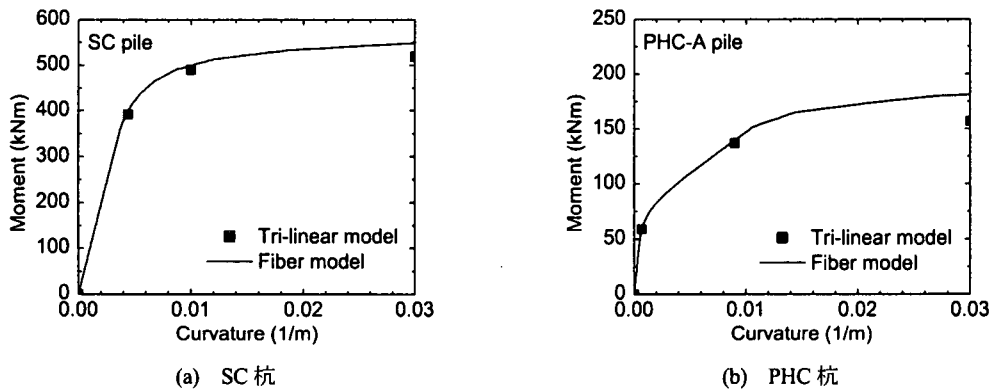


図-6 杭材料のモーメントと曲率の関係

両土層の不攪乱試料を用いて液状化試験が実施されているが、両土層の液状化強度の差はさほど明確に表れていない<sup>5)</sup>。ここでは、被害状況の再現を目標とすることから、液状化試験の結果は用いず、表に示したN値からの推定値を用いることとした。

設定したパラメータを用いて弾塑性モデルにより算定した砂礫、礫混り中砂および礫混り粗砂の液状化強度曲線を図4に示す。図中には目標とした液状化強度（せん断ひずみ両振幅7.5%）も示している。また、繰返し回数20回のシミュレーションにおけるせん断応力～せん断ひずみ関係と有効応力経路を図5に示す。図に示すようにモデルは目標液状化強度をよく再現している。また、液状化強度の大きさに合わせて、サイクリックモビリティ後のひずみの増加速度を調整しており、液状化強度が小さいほど、ひずみの増加速度が速くなるモデル化としている。本来は、液状化試験にお

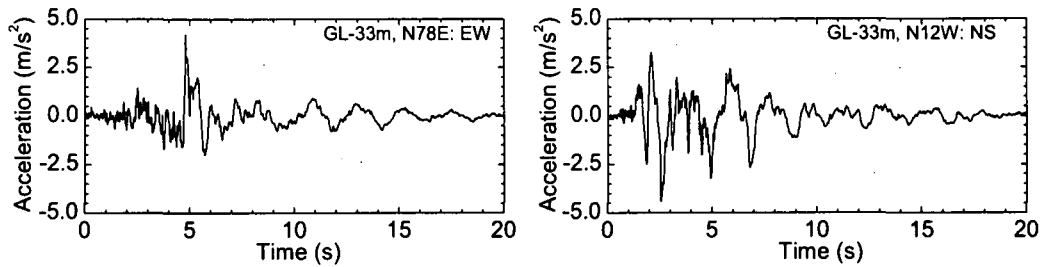


図-7 入力地震動

けるせん断ひずみの増加傾向を再現する必要があるが、ここではN値に基づく液状化強度を用いたため、参考となるデータがない。そこで、既往の解析事例<sup>12)</sup>などを参考にして、各層の液状化強度の違いが動的解析でより明確に表れるようにこのようなモデル化を行った。

### (3) 杭材料のパラメータ

SC杭、PHC杭ともにファイバー分割の手法を用い、曲げ剛性と軸力の連成を考慮できるモデル<sup>14)</sup>を用いた。なお、ここでは軸力変動はほとんど生じないため、2方向曲げの影響のみを評価するためにこのモデルを用いた。杭の調査結果<sup>5)</sup>から設定した杭材料のパラメータを表-2に示す。コンクリートの引張強度は無視し、コンクリート、鉄筋とも骨格曲線はバイリニア型の応力ひずみ関係とした。コンクリートの応力ひずみ曲線において、破壊後の軟化は考慮していない。SC杭については、外巻鋼管の断面積に相当する鉄筋量を離散的に配置している。設定した杭材料パラメータによるM-φ関係を図-6に示す。図にはトリリニアモデルでモデル化する際のパラメータ<sup>5)</sup>であるコンクリートのひびわれ点( $M_c$ )、PC鋼材の降伏点( $M_y$ )、破壊点( $M_u$ )も示している。図に示すように、ここで用いた杭のモデルはトリリニアモデルにおける折れ曲がり点を包絡する形となっている。

### (4) 初期条件および入力地震動

各要素の初期応力は、各層の有効重量から静止土圧係数0.5として、算定した。

入力地震動として、同じ深江浜の東神戸大橋付近で観測された深度33mでの加速度記録<sup>15)</sup>を図-3(a)の底面における合成波(E+F)として用いる。観測地点の位置は図-1中に示した通りであり、調査杭との水平距離は約400mである。観測された水平2成分(正確にはN78E, N12W成分だが、ここではそれぞれEW, NS成分と呼ぶ)の加速度波形を図-7に示す。

数値解析上の解析条件として、計算時間増分は0.002秒、Newmark法の係数は $\beta=0.3025$ 、 $\gamma=0.6$ とした。Rayleigh減衰として、初期剛性比例型を用いた。その係数は、地盤の1次固有周期0.8秒に減衰定数2%を仮定して、0.005とした。動的解析時間は20秒である。

## 5. 解析結果

### (1) 地盤の応答結果

図-3に示した地盤-杭の連成解析を実施する前に、設定した地盤材料のパラメータの妥当性を検討するため、地盤の

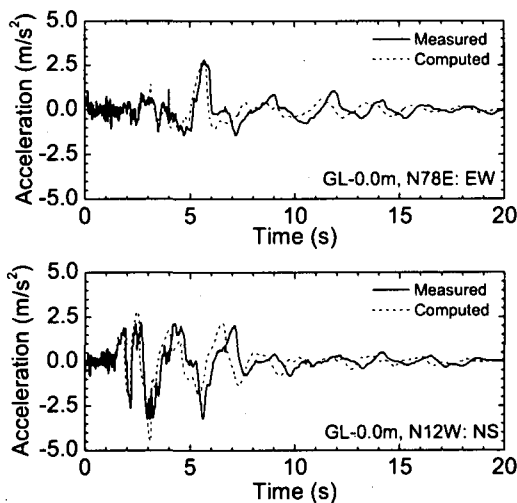


図-8 地表面での加速度の時刻歴

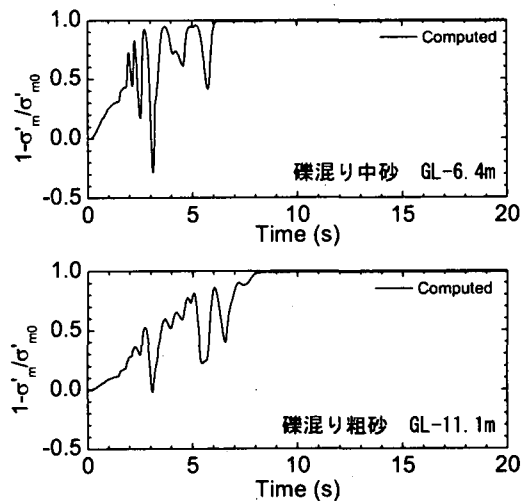


図-9 埋立層での有効応力減少比の時刻歴

みの1次元土柱モデルを対象とした解析を実施する。用いた有限要素モデルの深度方向の分割は図-3と同様とし、水平面内は1要素とした。側方、底面の境界条件は図-3の有限要素モデルと同様とした。

地表面での加速度応答の時刻歴をEWおよびNS成分について図-8に示す。図には東神戸大橋付近で観測された地表面での加速度記録も示している。地盤中の有効応力減少比の時刻歴を礫混り中砂および礫混り粗砂について図-9に示す。ここで有効応力減少比は $(1 - \text{平均有効応力} / \text{初期平均有効応力})$ で算定される量である。図-8の加速度波形をみると、5秒を過ぎるあたりで波形から高周波成分が消え、長周期化している。この時点は図-9に示すように礫混り中砂層が完全液状化に達する時刻となっており、埋立層の液状化の影響が地表面の加速度波形に表れたと推測される。図-8には解析値に加えて、観測値も示しているが、解析は観測地点を対象としているわけではないので、素直に比較することはできない。しかしながら、被災杭の地点と観測地点は同一の人工島にあり、地盤構成もほぼ同じであることから、本解析による地盤応答が実際の応答と大きくかけ離れていないかどうかを、両者の比較から確認することは可能と考えられる。図-8の解析値と観測値を比較すると、いずれの加速度成分についても、6秒以降は解析値の位相が実験値よりも0.5秒程度早くなっている点を除けば、解析値は観測値を比較的良好に再現しており、本解析で得られた地盤応答は現実的なものと判断できる。6秒以降にみられる位相のずれが生じた原因の一つとして、当該地盤の埋立層厚(13.7m)が東神戸大橋付近の観測点での埋立層厚(16.8m<sup>6)</sup>)より薄いことが考えられる。

基盤に対する相対変位、せん断ひずみ(要素重心位置)、有効応力減少比(要素重心位置)の深度分布を図-10に示す。図には解析開始後5秒、7.5秒、10秒および最大値を示しており、相対変位、せん断ひずみについては水平2成分の2乗和平方根の値としている。礫混り中砂、礫混り粗砂およびシルト質粘土で比較的大きなせん断変形が発生しており、特に液状化強度の小さい礫混り中砂でのせん断変形が大きい。最上部の砂礫では10秒以降に平均有効応力が0となるものの、せん断ひずみ量は小さい。シルト質粘土での有効応力減少比は最大0.25程度であるが、初期せん断剛性が小さいことから、液状化に至る礫混り粗砂と同程度のせん断ひずみが発生している。

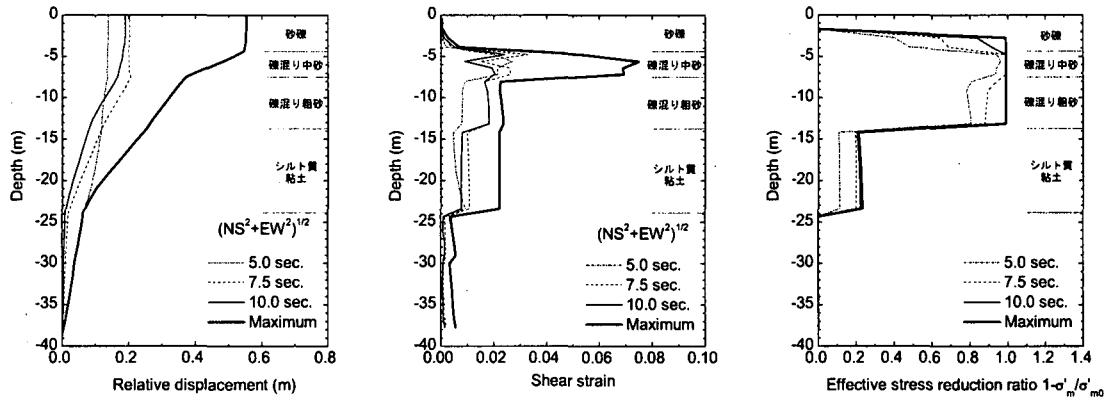
## (2) 杭の応答結果

杭の曲げモーメント、曲率、せん断力が所定の値に到達する時刻の深度分布図を図-11に示す。いずれも水平2方向の値の2乗和平方根である。また、曲げモーメントおよび曲率の図には鉄筋(SC杭：外巻鋼管、PHC杭：PC鋼材)の降伏値を、せん断力図には損傷限界耐力(せん断ひび割れ強度：建築基礎構造設計指針<sup>17)</sup>より算定)も示している。

杭の曲げモーメントと曲率に着目すると、SC杭については砂礫と礫混り中砂の境界部(GL-4.4m)、PHC杭についてはSC杭接合部直下(GL-6.4m)から礫混り中砂と礫混り粗砂の境界部付近(GL-8.1m)の間で、鉄筋の降伏値を超えている。本解析事例のように上部構造物が存在しない場合は、杭の曲げ変形を支配するのは主に地盤変位となる。このため、図-10(b)に示した地盤内のせん断ひずみ分布の変化が大きい礫混り中砂の上下の境界部で、このような大きな曲げモーメントが発生する結果となる。実際のPHC杭の損傷が大きかったのはGL-7~8mであり、解析は実際の被害をよく再現している。しかしながら、SC杭については実際の被害は確認できておらず、解析はSC杭の曲げモーメントを過大に評価した可能性がある。また、シルト質粘土と洪積互層との境界でも降伏値を超える曲げが発生しているが、この深度までは調査が十分になされていないので、実際の被害との対応は不明である。

杭のせん断力は曲げモーメントの深度方向の変化率に対応し、その変化率の大きいSC杭とPHC杭の接合部で大きなせん断力が発生している。SC杭接合部直下のPHC杭ではせん断力が損傷限界耐力を超えている。PHC杭のSC杭接合部直下(GL-6.4m)では曲げだけでなく、せん断による損傷を受けた可能性もある。ただし、解析で用いた杭のモデルでは、曲げによるコンクリートおよび鉄筋のヤング率の低下を考慮し、そのヤング率にポアソン比を考慮してせん断剛性を算定している。したがって、せん断そのものによるせん断剛性の低下を評価しているわけではなく、せん断力の評価についてはさらに検討の余地がある。

PHC杭において、鉄筋の降伏点を超える曲率が発生したSC杭接合部直下(GL-6.4m)および礫混り中砂と粗砂の境界付近(GL-8.1m)における、曲げモーメントと曲率の時刻歴をそれぞれ図-12、図-13に示す。ここでは、水平2成分(NS、EW)をそれぞれ別々に示している。SC杭接合部直下では、8秒あたりのNS方向の曲げによって降伏値を超えている。一方、礫混り中砂と粗砂の境界付近では、6秒あたりのEW方向の曲げによって降伏値を超えている。また、図-9に示したように最も液状化強度の小さい礫混り中砂が完全液状化に至るのは6秒過ぎであり、礫混り中砂と粗砂の境界付近にみられる曲げによるPHC杭の損傷は礫混り中砂層が完全液状化に至るあたりで生じていることになる。以上のことから、PHC杭の損傷過程は以下のように説明できる。1)液状化強度の比較的小さい礫混り中砂層で過剰間隙水圧が上昇し、6秒過ぎに完全液状化に至る。この過程では図-8に示したように主にNS方向の振動が要因となる。2)このとき、図-8に示したようにEWおよびNS方向の大きな振動が生じ、これによって、まず礫混り中砂と粗砂の境界付近で杭が曲げによる損傷を受ける。3)その後、7秒過ぎのNS方向の振動によって、礫混り中砂と粗砂の境界付近に加えて、SC杭接合部直下も損傷を受ける。

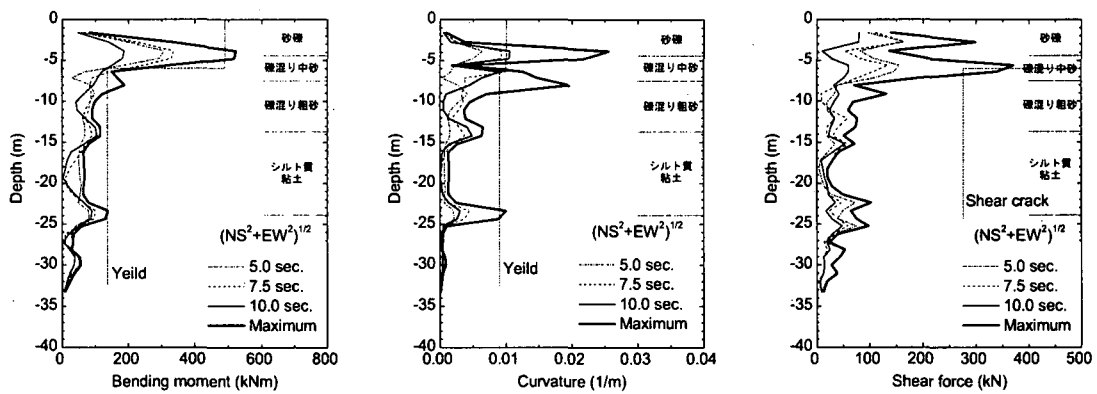


(a) 基盤に対する相対変位

(b) せん断ひずみ

(c) 有効応力減少比

図-10 地盤の応答値の深度分布図



(a) 曲げモーメント

(b) 曲率

(c) せん断力

図-11 杭の応答値の深度分布図

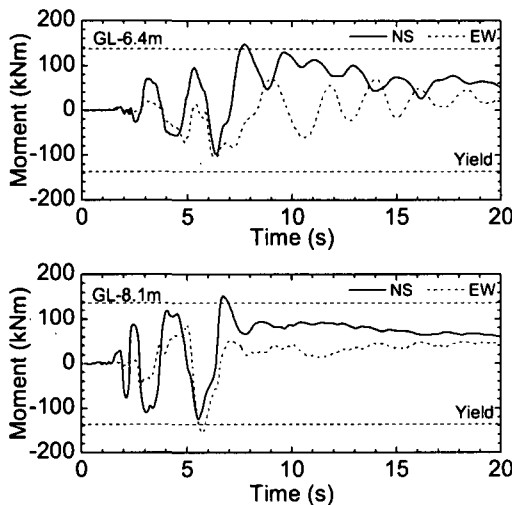


図-12 曲げモーメントの時刻歴

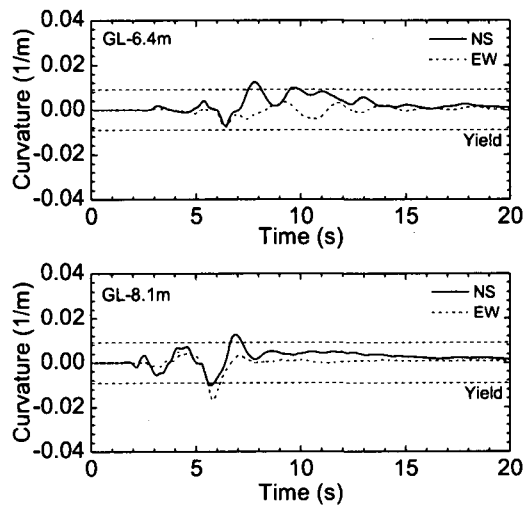


図-13 曲率の時刻歴

## 6. まとめ

1995年兵庫県南部地震で被災した深江浜の上部工なしの単杭を対象として、レベル2地震動の水平2方向入力下で杭基礎が破壊に至る過程を3次元有効応力解析によって再現することを試みた。杭のモデルには水平2方向曲げの影響を考慮するために、ファイバー分割に基づいた曲げと軸力の連成を考慮できるモデルを用いた。この結果、以下のことがわかった。

- ・地盤応答を同一人工島内の地表面観測記録と比較した結果、解析値は観測値に近い結果となった。解析に用いた地盤材料のパラメータは現実的な値と考えられる。
- ・PHC 杭については SC 杭接合部直下から礫混り中砂と礫混り粗砂の境界部付近の間で、曲げによる損傷がみられ、実際の損傷位置と対応した結果となった。しかしながら、SC 杭については実際に損傷がみられない位置でも曲げによる損傷が発生し、解析は曲げ変形を過大に評価した。
- ・解析の結果より PHC 杭の損傷過程は以下のように説明できる。1)まず、主に NS 方向の振動により、液状化強度の比較的小さい礫混り中砂層で過剰間隙水圧が上昇し、6 秒過ぎに完全液状化に至る。2)このとき、EW および NS 方向の大きな振動が生じ、これによって、まず礫混り中砂と粗砂の境界付近で杭が曲げによる損傷を受ける。3)その後、8 秒あたりの NS 方向の振動によって、礫混り中砂と粗砂の境界付近に加えて、SC 杭接合部直下も損傷を受ける。

#### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告建築編-4，建築基礎構造，pp.333-368，1998.
- 2) 吉田望：3.4 液状化地盤中の杭の解析法，杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書，土木学会，地震工学委員会，杭基礎耐震設計研究小委員会，pp.261-268，2001.
- 3) 渦岡良介・立石章・八嶋厚：液状化メカニズム・予測法と設計法，7.液状化解析法，土と基礎，地盤工学会，Vol.51，No.2，pp.49-54，2003.
- 4) 大槻明，福武毅芳，藤川智，佐藤正義：液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析，土木学会論文集，No.495/1-28，pp.101-110，1994.
- 5) 堀越研一：3.3 上部工なしで被災した杭基礎の事例とその分析，杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書，土木学会地震工学委員会，杭基礎耐震設計研究小委員会，pp.242-260，2001.
- 6) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.: The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Association for Development of Earthquake Prediction, Tokyo, 1995.
- 7) 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, pp.661-680, 1999.
- 8) Oka, F.: A cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear hardening rule, Proc. 4th Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Swansea, pp.105-114, 1992.
- 9) 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.
- 10) 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三次元有効応力解析，第 36 回地盤工学研究発表会，徳島，pp.1727-1728，2001.
- 11) 渦岡良介，仙頭紀明，八嶋厚，張鋒：護岸近傍に位置する杭基礎建物の 3 次元有効応力解析，日本地震工学会論文集，Vol.2，No.2，pp.1-14，2002.
- 12) 古田竜一，八嶋厚，渦岡良介，竹内法道：埋立層直下の粘土層の圧密進行度が人工島液状化特性に及ぼす影響，土木学会論文集，No.729/III-62，pp.15-30，2003.
- 13) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, Soils and Foundations, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000.
- 14) Zhang, F. and Kimura, M.: Numerical prediction of the dynamic behaviors of an RC group-pile foundation, Soils and Foundations, Vo.42, No.3, pp.77-92, 2002.
- 15) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録(No.21)，土木研究所彙報，第 64 号，1995.
- 16) 田村敬一，二宮嘉朗，濱田禎：液状化を考慮した簡易な地震応答解析，土木学会第 51 回年次学術講演会，III-A168，pp.336-337，1996.
- 17) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，p.309，2001.