

## 兵庫県南部地震により被災した既製杭の破損メカニズムに関する一考察

大成建設(株) ○大津 宏康\*

羽出山 吉裕\*

立石 章\*

堀越 研一\*\*

本研究の目的は、兵庫県南部地震発生後、筆者らが調査した上部工を含まない既製杭の破損状況について示すとともに、その破損メカニズムについて考察を加えるものである。

具体的な検討手法は、①地盤の液状化過程を考慮した有効応力解析および、②有効応力解析結果を梁-バネモデルのバネ端から多質点に入力する時刻歴解析の2段階からなる。本検討手法の特徴は、地盤バネを有効応力解析結果から算定される液状化対象層の過剰間隙水圧の関数としてモデル化することで、杭と地盤の相互作用をより現実的に表現することである。

そして、上記の解析手法を適用した数値シミュレーションにより、地盤の震動・液状化に伴い杭に発生する断面力を照査し、この既製杭の破損メカニズムについて検討を加えるものである。

### 1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震により、ポートアイランド・六甲アイランドに代表される神戸港から尼崎港にかけての広範囲の湾岸部の埋立地で、大規模な地盤の液状化現象が発生した。そして、この湾岸部の埋立地での液状化した地盤に位置する高架橋の杭基礎・ケーソン基礎について、大きな側方変位及びクラックの発生を伴う被災事例が数多く報告されつつある<sup>1), 2)</sup>。これらの報告によれば、兵庫県南部地震に伴う基礎構造物の被害事例の多くは、地盤の液状化およびそれに伴う地盤の側方流動と関連づけた議論がなされている。

筆者ら<sup>3)</sup>は、これまでに調査した杭基礎の被災事例の内、神戸市内のある埋立地に打設された多数の細径PC杭が破損した状況について詳細に調査した結果について示してきた。この被害事例に着目した理由は、この杭の位置が護岸から約350m離れていたことおよび、被災時にフーチングやスラブを含む上部構造物が一切存在していなかったこと

2点による。

つまり、前者については、石原<sup>4)</sup>による地盤の側方流動量の調査結果では、護岸の滑動による地盤の側方変位の影響範囲は約50~100mと推定されていることから、この調査地点での地盤の変形挙動は、護岸の滑動による地盤の側方変位の影響を受けていないものと推定されるためである。

また、後者については、従来の高架橋基礎の設計では、地震時に基礎に作用する外力は、上部工に作用する慣性力のみを評価するのに対して、この被災事例は、地震時の地盤変位のみで杭が破損する程の多大な断面力の発生する可能性があることを示唆しているためである。

このような観点から、本研究では地盤の液状化過程を考慮した有効応力解析結果での地盤変位を梁-バネモデルのバネ端から入力する時刻歴解析手法を適用し、この上部工を含まない既製杭が地盤の震動・液状化に伴い破損したメカニズムについて検討を加えるものである。

キーワード：杭、液状化、震害

\*大成建設土木設計計画部, 03-5381-5289

\*\*大成建設技術研究所, 045-814-7236

### 2. 被災した杭の破損状況に関する調査結果

被災した杭の打設地点は、まさ土による埋立地であり、今回の地震に伴い至るところに噴砂や沈下の跡が観察されている。また、この調査地域周辺の地

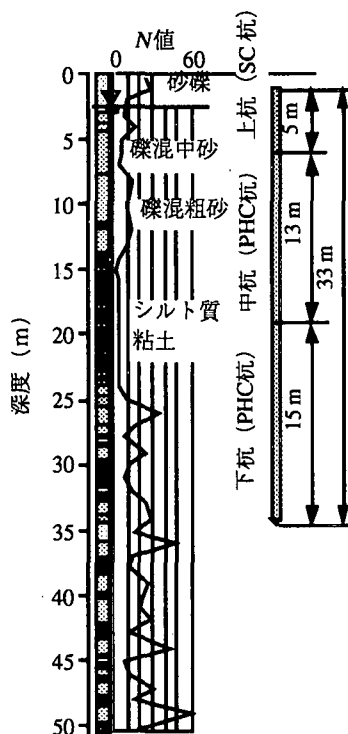


図-1 土質柱状図および杭位置図

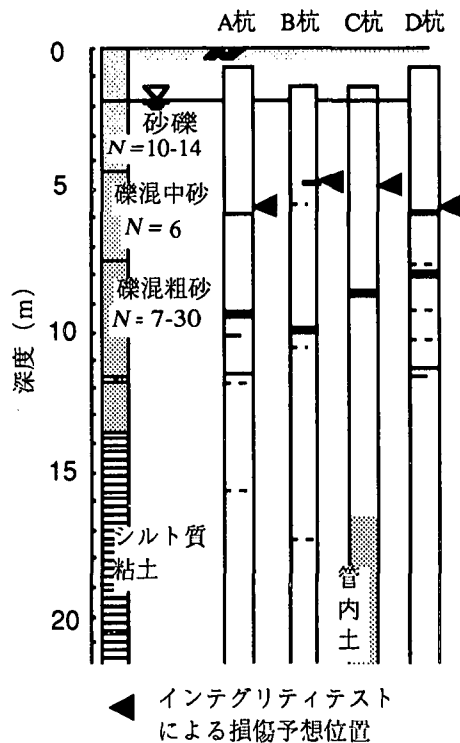


図-2 カメラ撮影で得られた杭の損傷位置

表面は、濱田ら<sup>5)</sup>の震災前後の航空写真を用いた測量調査結果から、南西方向に1m程度移動したことが報告されている。

### (1) 調査概要

当該箇所に打設されていた杭の諸元は、杭径400mmおよび500mm(内径はそれぞれ200mm, 315mm)の2種類であり、杭長は打設時に試験杭として用いられたものを除いて基本的に33mである。

図-1は、新たに実施したボーリング調査結果に基づく、当該地盤の土質条件と代表的な杭の構造形式との関係を示す。同図に示すように、当該地盤は、上部から地表面下約14mまでの砂礫・中砂・粗砂からなる埋立層、沖積粘土層および、洪積粘土層と洪積砂層の互層の層序となっている。地下水位は、地表面下約2mであった。

一方、杭は図-1に示すように3本継ぎ構造(下杭と中杭:PHC杭,上杭:鋼管巻PC杭)であり、杭先端はN値30前後の砂礫層に貫入されている。また、調査対象の杭頭部は震災時には地表面下約0.3~2.0mの深さに位置していた。

本調査では、当初既製杭の破損状況を把握するために、小型ハンマーを用いた杭の非破壊試験(イン

テグリティテスト)を総数111本の杭を対象として調査を実施した。この調査結果で、ほとんどの杭での応答は、その先端部33mに相当する深度からの明瞭な反射が見られず、約5m付近からの反射が顕著であった。したがって、今回調査を実施した全ての杭は、何らかの損傷を受けている可能性が高いと判定された。この結果を受けて、破損が生じている可能性が高いと推定された7~8本の杭を対象として、その破損状況をより詳細に検討するために、以下の調査方法を適用した。

- ① CCDカメラによる杭内部撮影
- ② 傾斜計による杭の曲がり測定

### (2) 調査結果

前述の各種調査方法に基づく調査結果について、以下に要約して示す。

#### (a) CCDカメラによる杭内部撮影

インテグリティテスト結果から破損が生じている可能性が高いと判定した8本の杭について、杭内径部にCCDカメラを挿入し杭の損傷状況を観察した。その調査結果の一部として、クラックの大きさを線の太さで表し損傷の程度をまとめたものを図-2に示す。同図に示すように、カメ

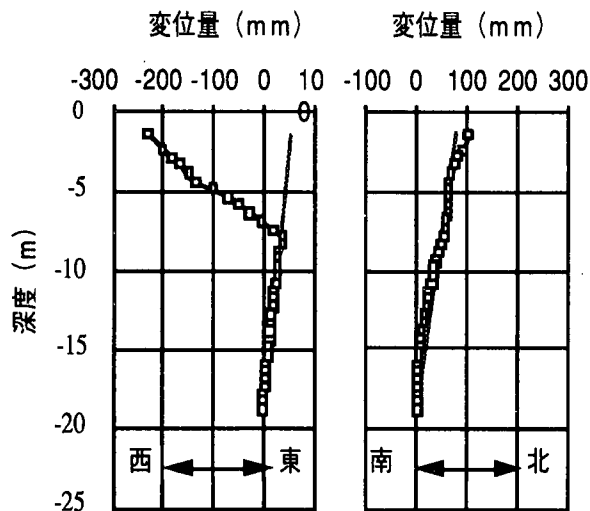


図-3 傾斜計による杭の曲がり測定結果 (C杭)

ラ撮影を実施した8本すべての杭で、SC杭とPHC杭の境界付近(深度約5m)、礫混中砂と礫混粗砂の境界付近(深度約7~8m)および礫混粗砂内にクラックの発生が認められた。この内、礫混中砂と礫混粗砂の境界付近に発生したクラックは、いずれの杭でも完全に破碎された状態であり、図-2に示したようにそのクラックの開口幅も他の深度に発生したものに比べて大きい。

(b) 傾斜計による杭の曲がり測定

杭内径部に CCD カメラを挿入し杭の損傷状況を観察した8本の杭の内7本に対して、特殊な傾斜計<sup>3)</sup>を用いて、杭の水平変位を測定した。その調査結果の一部として、図-3にC杭の曲がり状況を示す。ここで、同図中の淡太線は、計測最深点における杭の傾きを延長し、当初の健全な状態での杭の座標を推定したものであり、C杭は当初北東の方向に少し傾いていたことを示す。したがって、C杭の杭頭部は、深度約7.5m付近を境に大きく西側に曲がっている。この杭が深度約7.5m付近で大きな曲がりを示す傾向は、他の杭についても同様であった。

また、図-4は、傾斜計による調査結果に基づき、すべての調査杭の杭頭部の当初(推定)位置からの変位方向をまとめたものである。同図に示すように、杭頭部は南西から西にかけての方向に250~420mm変位している。なお、この杭頭部の変位について、変位の方向は濱田らの報告とほぼ

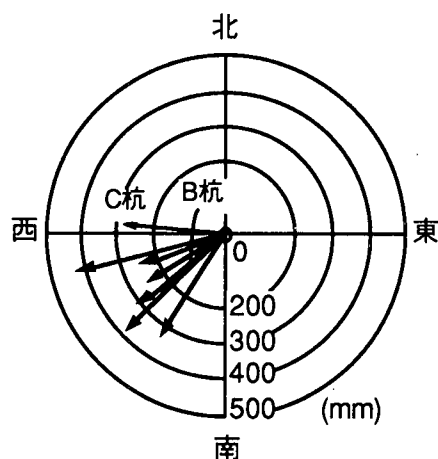


図-4 傾斜計により得られた杭頭変位

同様な傾向を示しているが、変位置自体は小さめの値となっている。

3. 地盤の液状化過程を考慮した有効応力解析

(1) 解析条件

本有効応力解析での解析条件を、以下に列挙する。

- ① 有効解析手法としては、岡ら<sup>6)</sup>により開発された FEM-FDM による有効応力解析コード (LIQCA) を適用する。
- ② 解析領域は、当該地盤がほぼ水平な互層とみなされることから一次元モデルとし、その側方境界を等変位境界とする。
- ③ 解析対象地盤は、図-1に示す土質柱状図に基づき、砂礫・礫混中砂・礫混粗砂・シルト質粘土・洪積互層に区分する。また、各層の解析用物性値を表-1に要約して示す。同表に示すように、本検討では新たに実施した土質試験結果に基づき、液状化対象層を砂礫の地下水位以下の層・礫混中砂層・礫混粗砂層の3層に限定する。
- ④ 解析用入力地震波としては、ポートアイランドで観測された地震動の内、GL-32mのNS成分とEW成分より最大地動方向と考えられるNW-SE45度方向を作成し、その主要動20秒を合成波として入力する(図-5参照)。

(2) 解析結果および考察

有効応力解析結果として、上部から地表面・礫混中砂中央部・礫混粗砂中央部での、加速度および変位の時刻歴波形を図-6～図-7に示す。

図-6に示した各地点での加速度応答の内、礫混中砂中央部では、約4.5秒前後から液状化の影響により、加速度波形が長周期化するとともに、最大応答加速度も入力地震動の最大値に対して約40%に低減している。また、礫混粗砂中央部でも、加速度波形が長周期化する傾向は見られるが、その傾向が顕著になるのは約10秒前後と礫混中砂に比べて遅くなっている。したがって、液状化に伴う地盤剛性の低下は、礫混中砂の方がその下部の礫混粗砂に比べて地震動の初期から発生し、かつその低下率も大きいものと推定される。また、地表面での加速度応答は、礫混中砂中央部と同様に入力地震動の短周期成分が除かれた波形となっている。

次に、図-7に示した各地点での変位応答については、いずれもほぼ同位相の変位波形となっている。そして、各地点の最大変位量は、地表面・礫混中砂・礫混粗砂で、それぞれ41cm、32cm、19cmとなっている。ここで注目すべきことは、前述の加速度応答についての議論と同様に、礫混中砂の領域で大きなひずみが発生することである。

さらに、原位置調査で杭の破損が認められた、礫混中砂・礫混粗砂の層境界付近での、それぞれ礫混中砂・礫混粗砂内の過剰間隙水圧比時刻歴波形を図-8に示す。同図に示すように、いずれの層の過剰間隙水圧比も、約3秒前後からの地震動に伴い急激な増加を示す。ただし、ここで注目すべきことは、礫混中砂が約8秒で過剰間隙水圧比が1.0となる完全液状化状態に到るのに対して、その下部の礫混粗砂は数秒遅れて完全液状化状態に到ることである。

以上の解析結果より、礫混中砂と礫混粗砂の境界付近に大きなひずみが発生することが確認された。したがって、礫混中砂と礫混粗砂との境界付近では、杭体に大きな断面力の発生する可能性がある。

ただし、この有効応力解析結果では、上述のようなメカニズムにより、原位置で観察されたような杭の破損を引き起こすか否かは不明である。このため、この解析により算定した地盤変位を応答変位として入力する、梁-バネモデルによる時刻歴応答解析を、地盤変位に伴い杭体に発生する断面力を照査す

る手法として適用した。

#### 4. 梁-バネモデルによる時刻歴応答解析

##### (1) 解析条件

梁-バネモデルによる時刻歴応答解析での解析条件を以下に列挙する。

- ① 本検討には、杭と地盤を表す梁-バネモデルのバネ端から、3.の地盤の液状化過程を考慮した有効応力解析結果より求められる各時刻での地盤変位(図-7参照)を応答変位として入力する解析手法を適用する。
- ② 杭の構造系は、図-1に示す杭の構造図に基づき、SC杭とPHC杭に分類する。また、それぞれの杭部材の力学的特性は、図-9に示すスケルトンカーブでひび割れ・降伏・終局状態を表現した、ディグレーディング・トリリニアモデルにより曲げモーメント $M$ ～曲率 $\phi$ 関係を規定する。
- ③ 地盤バネ定数は、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の参考資料(案)7)(以下復旧仕様参考資料と称する)に示された、保有水平耐力用の初期地盤バネ定数地盤バネ定数の計算法に準じるものとする。

$$K_{HD} = k_{HD} \cdot L \cdot D \quad (1)$$

ここに、 $K_{HD}$ ：初期地盤バネ定数

$k_{HD}$ ：保有水平耐力用地盤反力係数

$L$ ：初期バネ定数の分担長さ

$D$ ：杭径

ここで、復旧仕様参考資料に示された地震時地盤バネ定数の考え方は、本来地盤の非線形性考慮したものであるが、本検討では極限地盤反力を考慮しない線形バネを仮定した。ただし、液状化対象層の地盤バネ定数については、次式に示すように、有効応力解析結果から算定される過剰間隙水圧の増加に伴って、その値が低減する関数としてモデル化するものとした。

$$K_{HD,t} = K_{HD} (1 - u_t / p'_0)^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 $K_{HD,t}$ ：時刻 $t$ での地盤バネ定数

$p'_0$ ：初期有効鉛直応力

表-1 解析用物性値

土層 深さ DL (m)	土質	単位体 積質量 (t/m <sup>3</sup> )	間隙 比 e	せん断 波速度 Vs m/sec	γ ソノ比 γ	透水 係数 (m/sec)	Go/ σ <sub>mo</sub>	変相角(度)		破壊角(度) M*	塑性剛性		Dilatancy n	規準 ひずみ γ <sub>DA</sub> γ <sub>DA</sub>
								変相応力比 M <sub>n</sub> *	破壊応力比 M*		B <sub>0</sub> *	B <sub>1</sub> *		
+0 ~-2.2 WL	砂礫	1.80	0.60	190	0.25	乾燥弾性材料を仮定 (λ=3316(t/m <sup>2</sup> ) μ=6632(t/m <sup>2</sup> ))								
~2.2 ~-4.4	砂礫	1.80	0.60	190	0.25	2.0x10 <sup>-5</sup>	2055	24.0 (0.77)	27.0 (0.87)	7000 300 2000	0.15 7.00	0.10% 0.05%		
~4.4 ~-7.5	礫混 中砂	1.80	0.60	130	0.25	2.0x10 <sup>-5</sup>	666	22.0 (0.70)	25.0 (0.80)	2000 100 1000	1.00 3.60	0.10% 0.05%		
~7.5 ~-13.7	礫混 粗砂	1.80	0.60	210	0.25	2.0x10 <sup>-5</sup>	1138	27.0 (0.87)	30.0 (0.98)	5600 560 2000	0.75 3.20	0.10% 0.05%		
~13.7 ~-23.9	シルト 質粘土	1.65	1.50	170	0.25	2.0x10 <sup>-7</sup>	443	29.7 (0.97)	29.7 (0.97)	3000 300 5000	0.0 0.0	∞		
~23.9 ~-29.5	洪積 粘土1	1.85	0.50	210	0.25	3.0x10 <sup>-5</sup>	563	52.0 (1.75)	52.0 (1.75)	3000 300 5000	0.0 0.0	∞		
~29.5 ~-38.5	洪積 粘土2	1.85	0.50	250	0.25	3.0x10 <sup>-5</sup>	632	47.0 (1.58)	47.0 (1.58)	3000 300 5000	0.0 0.0	∞		

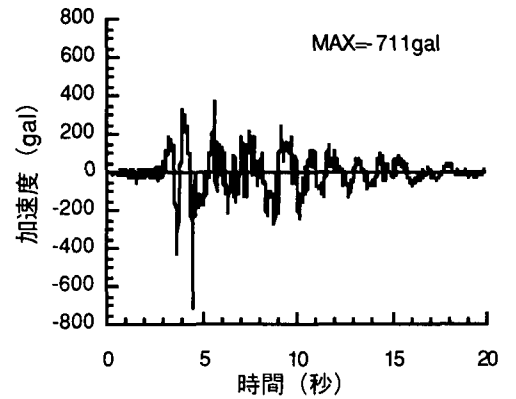


図-5 入力地震動

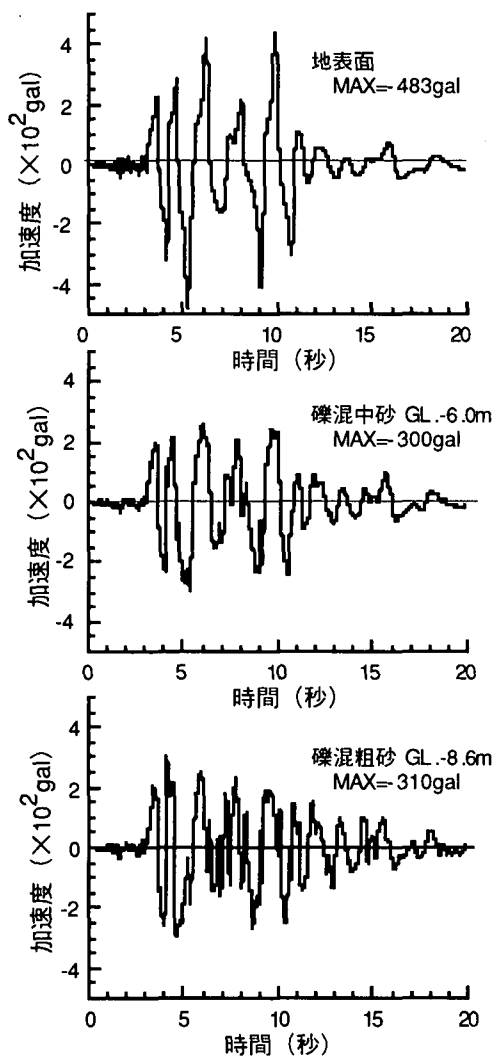


図-6 加速度時刻歴

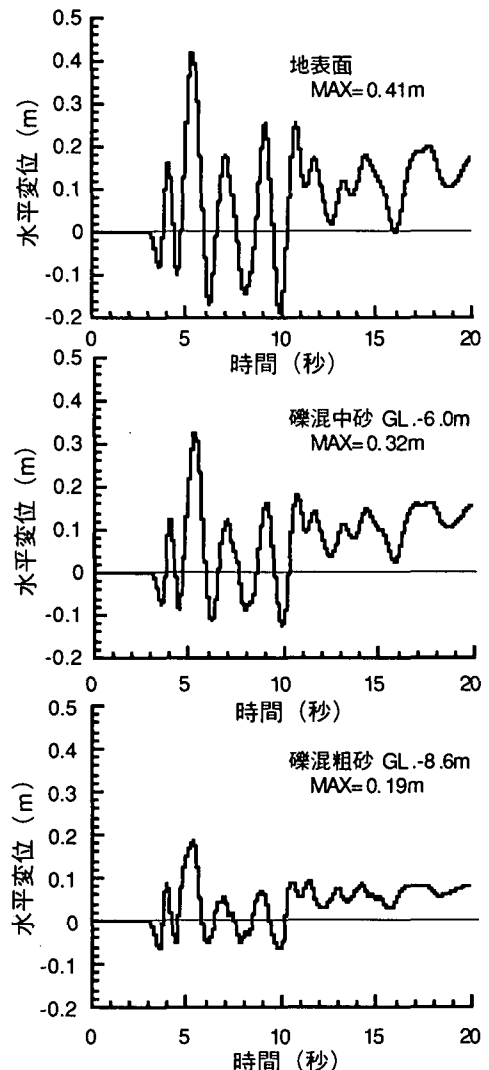
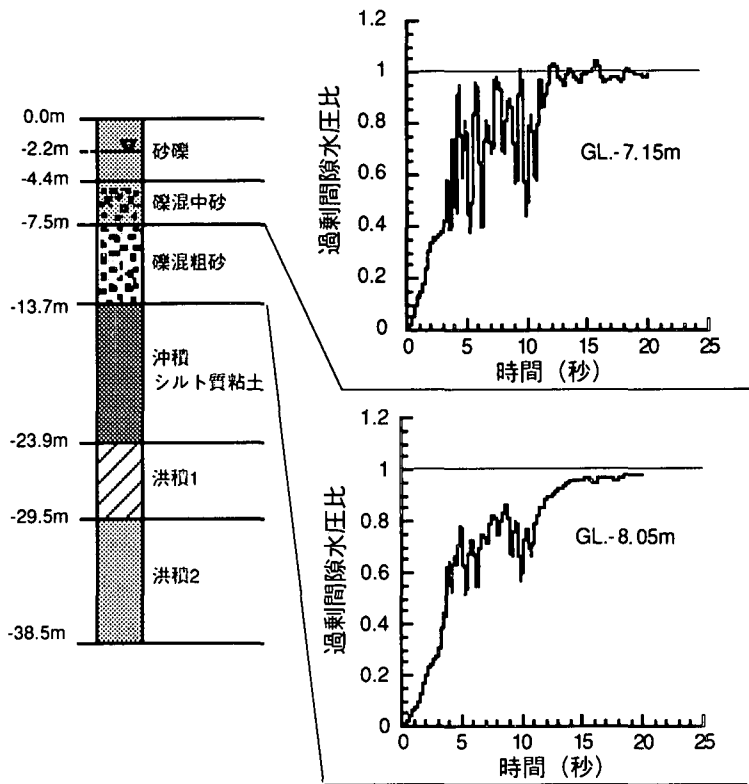
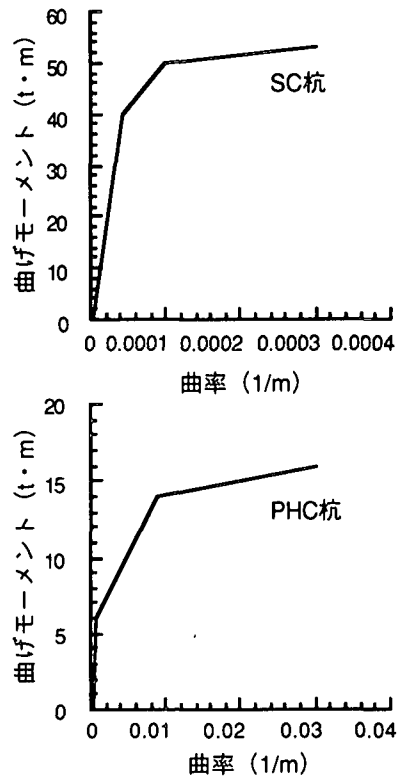


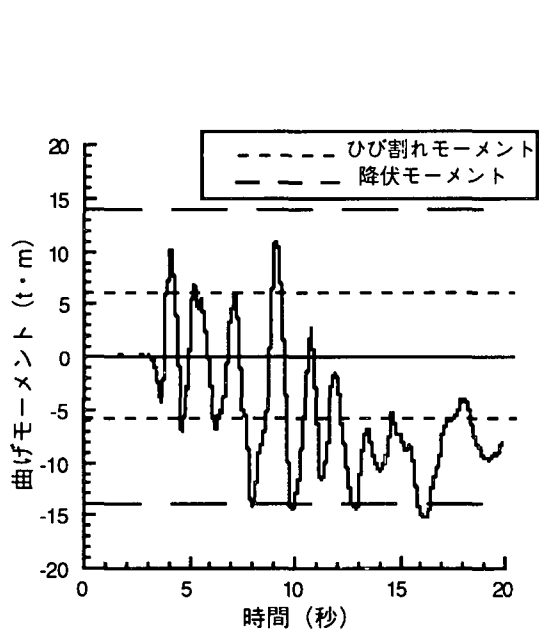
図-7 水平変位時刻歴



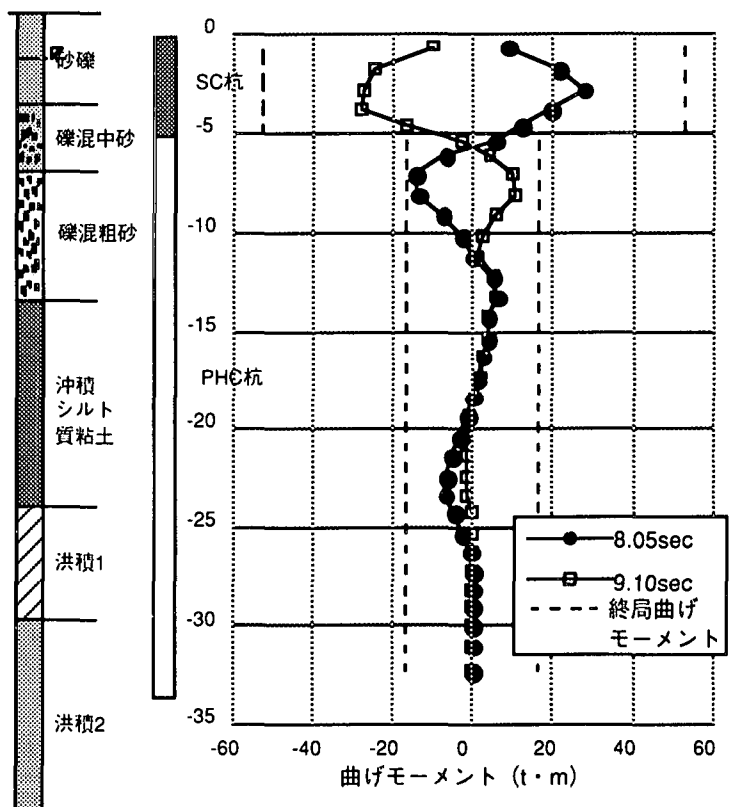
図一八 過剰間隙水圧比時刻歴



図一九 M-φ曲線



図一〇 曲げモーメント時刻歴



図一一 曲げモーメント分布図

$u_t$  : 時刻  $t$  での過剰間隙水圧

## (2) 解析結果および考察

梁-バネモデルによる時刻歴解析結果として、礫混中砂と礫混粗砂の境界部付近の杭体に発生する曲げモーメントの時刻歴変化を図-10に示す。同図に示すように、層境界部付近の杭体に発生する曲げモーメントは、約4秒前後の地震動の第2波でひび割れの発生する状態に達し、その後約8秒で降伏モーメント(14tf・m)を超える。ここで、この杭体に降伏モーメントを超える曲げモーメントが発生する時間ステップは、礫混中砂が完全液状化状態になる時点とほぼ一致する。この原因は、礫混中砂とその下部の礫混粗砂での液状化の状況が異なるために、層境界付近の地盤バネ定数の顕著な相違および大きなひずみ(相対変位)が発生し、それに伴い杭体に大きな曲率が生じることによるものと推定される。

また、杭体に発生する曲げモーメントの分布図を図-11に示す。同図に示すように、地震動に伴い杭体に発生する曲げモーメントは、各地層境界で変局点を有する分布となるが、礫混中砂と礫混粗砂の境界部で最大値を示す。そして、その層境界での曲げモーメントは、前述のように約8秒で降伏モーメントを超える。

ただし、ここに示した結果では、実際に杭体が破損した深度約7~8m付近の杭体に発生する曲げモーメントは、降伏モーメントを超えるが完全に破断を示す状態にまでは達しているとはいえない。しかし、この解析結果での杭体の深度約7~8m付近の位置に発生する最大曲率と降伏状態の曲率の比(塑性率)は約2.5になっている。ここで、既製のPHC杭が繰り返し荷重に対して、強度低下しやすいことを考慮すると、この杭は調査結果と同様に、前述の地層境界付近で完全に破断する可能性があるとして推測される。

## 5. まとめ

本研究に示した上部工を含まない既製杭の破損についての検討結果から得られた知見は、以下のよう要約される。

1) 原位置計測の結果より判明した、既製杭が損傷

を受けて顕著なクラックの発生した位置(深度約7~8m付近)は、礫混中砂と礫混粗砂の境界部に相当する。

2) 1)の計測結果について、液状化過程を考慮した有効応力解析結果より、礫混中砂と礫混粗砂の境界付近に大きなひずみが発生することが明らかになった。したがって、この礫混中砂と礫混粗砂との境界付近では、杭体には大きな断面力の発生する可能性がある。

3) 有効応力解析結果より算定した地盤変位を応答変位として入力する、梁-バネモデルによる時刻歴応答解析により、地盤変位に伴い杭に発生する断面力を照査した。この結果、杭に発生する曲げモーメントは、礫混中砂と礫混粗砂の境界部(深度約7~8m付近)で礫混中砂がほぼ完全液状化状態になる約8秒前後に、降伏状態の曲げモーメントを超えることが確認された。

4) 杭体の深度約7~8m付近の位置での塑性率が約2.5と大きいことおよび、既製のPHC杭が繰り返し荷重に対してねばりがないことから、この杭は調査結果と同様に、前述の地層境界付近で破断する可能性が高いと推測される。

以上の事項より、本研究に示した上部工を含まない既製杭の破損は、震動および地盤の液状化に起因する可能性が高いことが、数値解析モデルにより確認された。ただし、本研究に適用した数値解析モデルには、地盤バネ定数の設定方法、特に液状化層の地盤バネ定数のモデル化には議論の余地がある。このため、これらの課題を踏まえつつ、今後とも液状化した地盤での杭に代表される基礎構造物に地盤変位の及ぼす影響について、より詳細な検討を加えていく所存である。

## 【参考文献】

- 1) 大岡弘：液状化による被害(建築)、基礎工, Vol. 23, No.12, pp. 10-15, 1995.
- 2) 時松孝次：地盤および基礎構造から見た建物被害, 土と基礎, Vol. 44, No. 2, pp.14-18, 1996.
- 3) 堀越研一, 大津宏康, 木村亮, 岡二三生：1995年兵庫県南部地震によって損傷した杭の調査, 土と基礎, Vol. 44, No.11, pp.27-29, 1996.
- 4) 濱田政則ほか：1995年兵庫県南部地震 液状化,

- 地盤変位および地盤条件, (財)地震予知総合研究振興会, 1995.
- 5) 石原研而:土質特性と地盤変状, 土質工学会・阪神大震災報告会-地盤震害とその教訓-講演概要集, pp.25~28, 1995.
- 6) 岡二三生ほか: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, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会概要集, pp.137-144, 1996.
- 7) (社)日本道路協会:「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の参考資料(案), 1995.
- 6) 岡二三生ほか: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, 阪神・

## A consideration of mechanism associated with pile foundations damaged by 1995 Hyougoken-Nanbu earthquake

Hiroyasu Ohtsu, Yoshihiro Hatsuyama, Akira Tateishi and Kenichi Horikoshi

This study is concerned with the investigation of pile foundation. The feature of foundation presented in this study is that the piles were installed in liquefied soil layer in a reclaimed island filled with decomposed granite soil, and that upper buildings supported by the pile foundations were not constructed yet. This paper presented the research results of damaged pile foundations without any upper buildings and the numerical simulation results of the pile damage by means of the simplified analysis method. The conclusion made it obvious that ground deformation due to soil liquefaction caused damage of pile foundations without any upper buildings.