

液状化に起因する杭基礎被害の解析的検討

清水建設(株) 淵本正樹* 大槻 明*
同 福武毅芳** 田蔵 隆*

平成7年兵庫県南部地震は典型的な直下型地震で、阪神地区の臨海部は液状化現象により大きな被害を受けた。本報告では埋立地盤に建設された杭基礎建物に着目し、杭基礎の被害メカニズムを解析的に検討した。まず液状化を考慮した非線形地震応答解析を通して地震時の杭体の挙動を分析した。液状化が起こった後で生じた地盤の永久変形を推定し、地震応答解析結果と併せて杭基礎の健全性を考察した。今回の検討から次のような結果が得られた。1) 検討対象構造物の基礎杭はその中間部および先端付近に被害を受けた可能性が高い。2) 杭中間部の損傷は地盤の液状化によるものと推測される。3) 杭先端付近の損傷は液状化後に生じた地盤の側方変形が大きな要因となっている可能性がある。

1. はじめに

平成7年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震は、典型的な直下型地震で神戸市を中心とする限定された範囲に未曾有の被害をもたらした。西宮、芦屋、神戸、明石などの海岸沿いに位置する埋立地とポートアイランド、六甲アイランドの人工島では液状化現象により大きな被害を受けた^{1)~3)}。上部構造物の被害は比較的容易に調査することが可能であるが、杭基礎など地中に埋設されている構造物の被害調査は直接目視することができないため、非常に困難である。

本報告では、埋立地盤に建設された杭基礎建物に着目し、杭基礎の被害メカニズムについて解析的に検討した。まず液状化を考慮した非線形地震応答解析を通して地震時の杭体の挙動を分析した。さらに液状化により剛性が低下した地盤の永久変形を推定し、地震応答解析結果と併せて杭基礎の健全性について考察した。

2. 検討対象と解析条件

本解析の対象は、埋立地盤に建設されている比

較的小規模な建築構造物と護岸を含む周辺地盤で、建物から護岸までの距離は約100[m]である。上部構造物は鉄骨造2階建ての事務所建物で、6本の既製コンクリート(PHC)杭で支持されている。杭径は0.4~0.5[m]、杭長は42[m]である。杭諸元を表-1に示す。この周辺では地盤調査、地盤と構造物の常時微動測定そして地盤および構造物の地震前後における移動量を測定するため、GPSを利用した航空測量など様々な調査が実施されている。

図-1に地盤と構造物の概略を示す。地盤物性は地盤調査結果と既往の調査報告など^{4)~8)}を参考に設定した。当該敷地周辺の地盤では噴砂が地表面を覆っているなど、大規模な液状化現象が確認されている。液状化した地盤は「まさ土」と呼ばれる花崗岩起源の風化土で、当該地盤では埋立土として利用されている。地下水位は当該地盤の標高がKP+4.2[m]であったことから、GL-4[m]とした。

入力地震動として、神戸市が実施したポートアイランドの鉛直アレー観測波形を用いた^{7,8)}。構造物と護岸の位置関係からEW成分の観測波を用いた。これまでの調査報告⁹⁾によれば、GL-83[m]に設置した観測装置は時計回りに約19度回転していた可能性が高いとのことであるが、本解析では神戸市より公表されたEW成分の観測波をそのまま使用した。ただし演算時間を節約するため、観測された波形から

キーワード：液状化，永久変形，杭基礎

* 清水建設(株)技術研究所， 03-3820-5522

** 清水建設(株)和泉研究室， 03-3508-8101

主要動を含む20秒間を取り出し、水平一方向入力するものとした。また、GL-83[m]における観測波形を直接用いず、液状化を考慮した1次元有効応力解析によりGL-50[m]における地震波形を算出した上で、これを2次元有効応力解析の入力波とした。

3. 液状化を考慮した構造物の地震時挙動

(1)解析手法の概要

実地盤の挙動を厳密に表現するためには3次元モデルによる解析が理想であるが、3次元有限要素法による解析には膨大な計算機容量と計算時間が必要となり、容易とは言えない。それ故、本検討では2次元有限要素法を採用した。本解析で用いた解析コードは2次元有効応力解析プログラム「ALISS」である^{10,11)}。「ALISS」では、その演算精度、安定性の面から陰解法を採用している。また、空間領域については有限要素法により対象構造物を離散化して表現している。

土の非線形挙動を表現する構成則として応力-ひずみ関係には修正Ramberg-Osgoodモデル¹²⁾を用

い、液状化現象が発生すると考えられる領域については、ひずみ-ダイレイタンスー関係としておわんモデル(Bowl Model)¹³⁾を用いた。このモデルでは振動過程で生ずる過剰間隙水圧の影響は応力-ひずみ関係に反映され、有効応力の減少に伴う土の軟化現象やサイクリックモビリティも表現可能である。

(2)2次元動的解析のためのモデル化

3次元の広がりを持つ実地盤を2次元空間で表現するため、解析モデル全体を対象構造物の基礎奥行きを考慮した平面ひずみ問題として取り扱った^{14,15)}。図-2に解析モデル全体図を示す。

上部構造物の1次固有周期が実構造物のそれと一致するよう1質点の集中質量と線形バネ要素により表現した。図-3(a)に示す震災後に実施した常時微動測定で得られた速度波形のフーリエスペクトル

表-1 杭諸元

深さ [m]	杭径 [m]	等価断面積 [m ²]	等価断面2次モーメント [m ⁴]	ヤング係数 [tf/m ²]
0~30	0.4	0.0726	1.06×10 ⁻³	3.5×10 ⁶
30~42	0.5	0.1116	2.54×10 ⁻³	

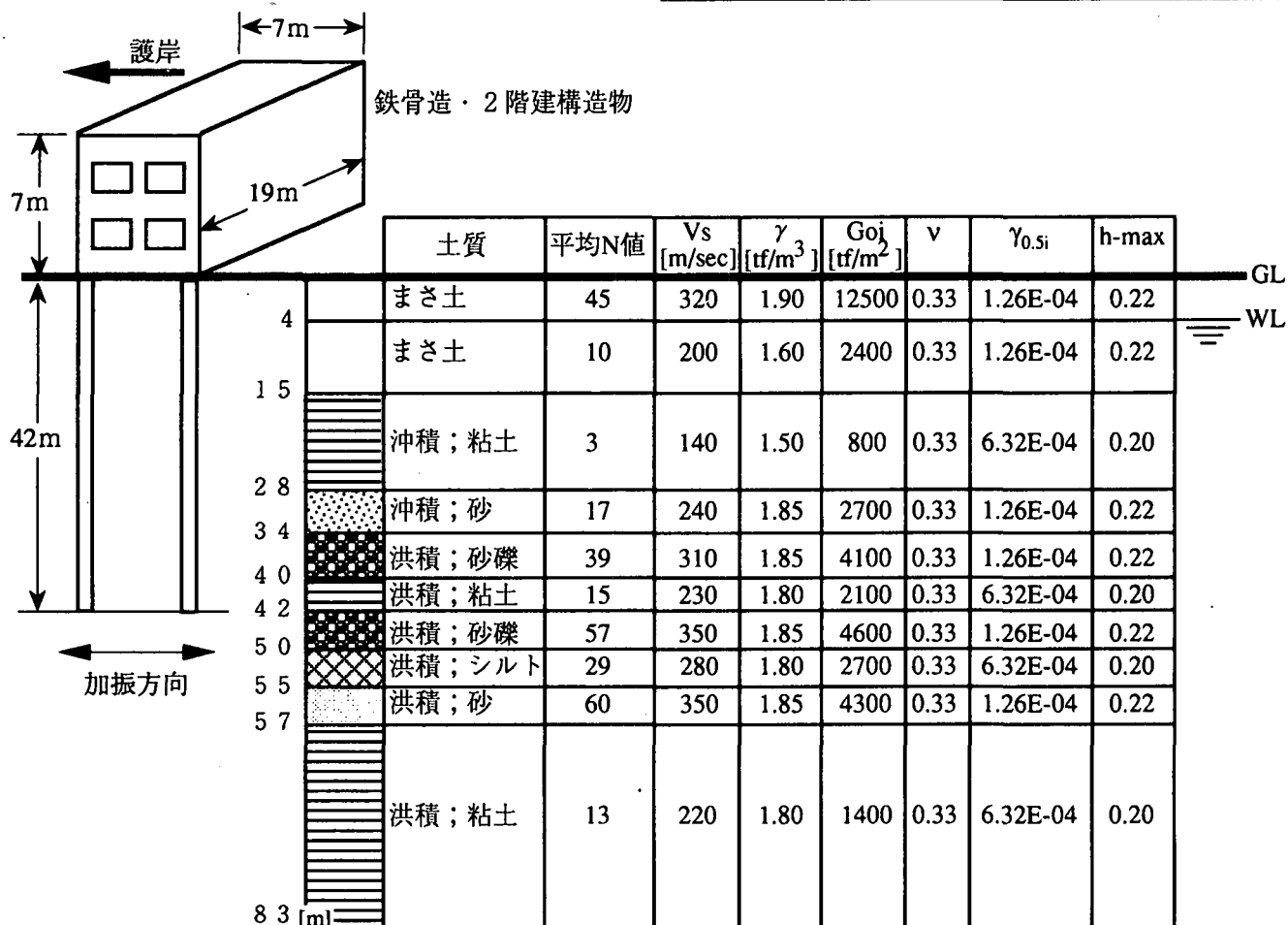


図-1 地盤柱状図と構造物概略図

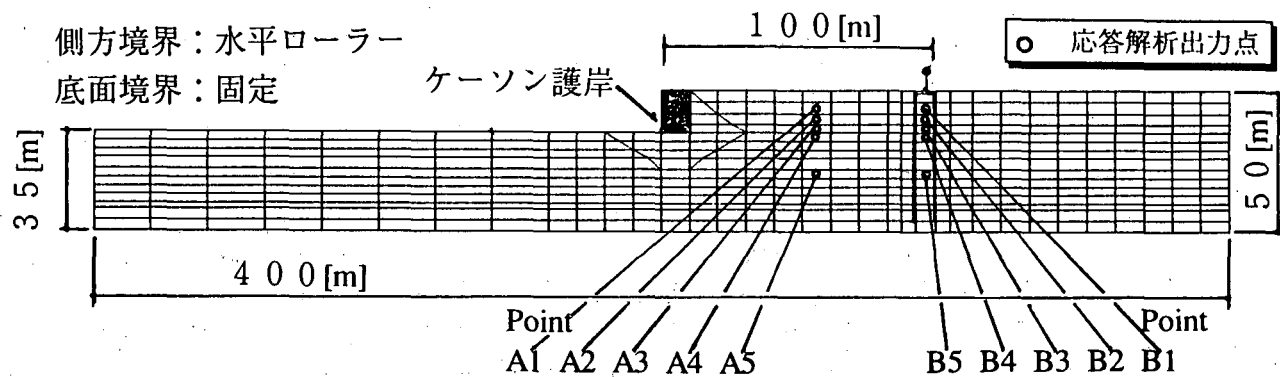


図-2 解析モデル全体図

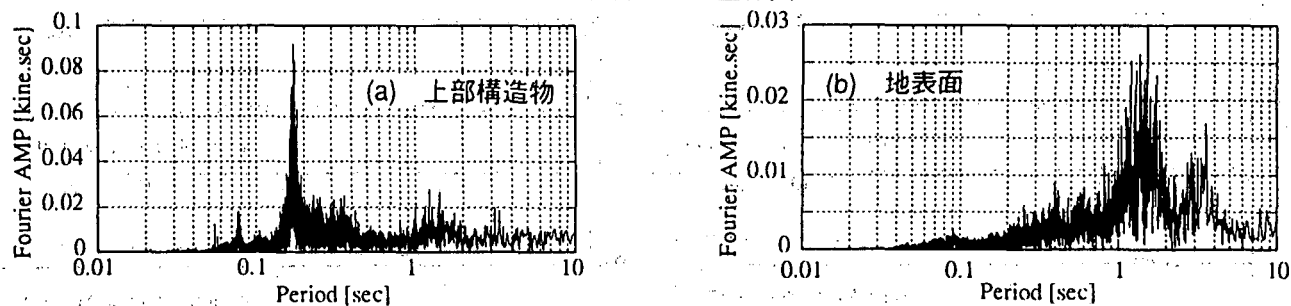


図-3 常時微動測定結果

から構造物の1次固有周期は約0.2秒である。

基礎杭は、その剛性、重量について等価となるように合計2本の杭に縮合し、線形の曲げせん断型梁要素によりモデル化した。基礎梁は剛体と仮定し、杭頭は基礎梁に剛結されているものと考え、杭頭節点の回転を拘束した。

阪神地区の護岸はそのほとんどが海側に大きく移動しており、護岸に近い構造物はこの影響を受けていると考えられる為、本解析でもケソン護岸、海底地盤を含む広い領域をモデル化した。但し本解析の主眼は杭基礎の損傷度の検討にある為、ケソンは剛体とし、その周囲の人工地盤（置換砂、裏込め土）は標準的な断面図を参考にモデル化した³⁾。

図-3 (b)に震災後に実施した当該敷地における地盤の常時微動測定結果をフーリエスペクトルのかたちで図示する。これより地盤の1次固有周期は1.5[sec]前後である。地盤のモデル化の妥当性を検証するために実施した固有値解析結果から、表-2に示すように地盤モデルの1次固有周期は1.44[sec]である。これより今回設定した地盤モデルの初期せん断剛性は実地盤をおおむね表現できていると考えられる。

(3)液状化時の地盤と建物の応答

前節までに示した条件で、地盤-構造物系の有効応力解析を行った。

図-4に建物直下(Point B1~B5)と近傍地盤(Point

表-2 地盤モデルの固有周期

次数	1	2	3	4
固有周期 [sec]	1.44	0.62	0.29	0.22

A1~A5)の過剰間隙水圧比の時刻歴波形を示す。GL-28~31[m]の沖積砂層では、建物直下(Point B5)、近傍地盤(Point A5)ともほぼ同様に過剰間隙水圧比の上昇が認められる。建物直下の地盤は杭で拘束されている為、杭間の過剰間隙水圧比(B5)は近傍地盤(A5)の約80[%]の値となっている。埋立地盤であるGL-8~15[m]のまさ土は加振後約3~5[sec]の間に過剰間隙水圧比は0.8以上となり、液状化にいたっている。これに対してGL-4~8[m]の地下水面上端付近(Point A1,B1)では同時刻に過剰間隙水圧比が上昇しはじめるものの、その最大値は建物直下で0.85、近傍地盤で0.53となり、沖積砂層の場合とは逆に杭間の地盤で過剰間隙水圧比が大きくなっている。これは上部構造物の慣性力の影響ではないかと考えられる。

図-5に杭頭部(GL-0[m])、GL-15[m]、GL-28[m]、GL-34[m]、GL-40[m]における曲げモーメント波形を示す。図-6に杭周辺地盤の過剰間隙水圧比の最大値分布図を示す。洪積粘土層と洪積砂礫層の境界であるGL-40[m]における波形には入力波形に見られる比較的周期の短い成分も含まれているが、GL-28[m]とGL-34[m]では長周期成分が卓越する形状で、最大振幅もGL-40[m]における値の4倍程度となっている。

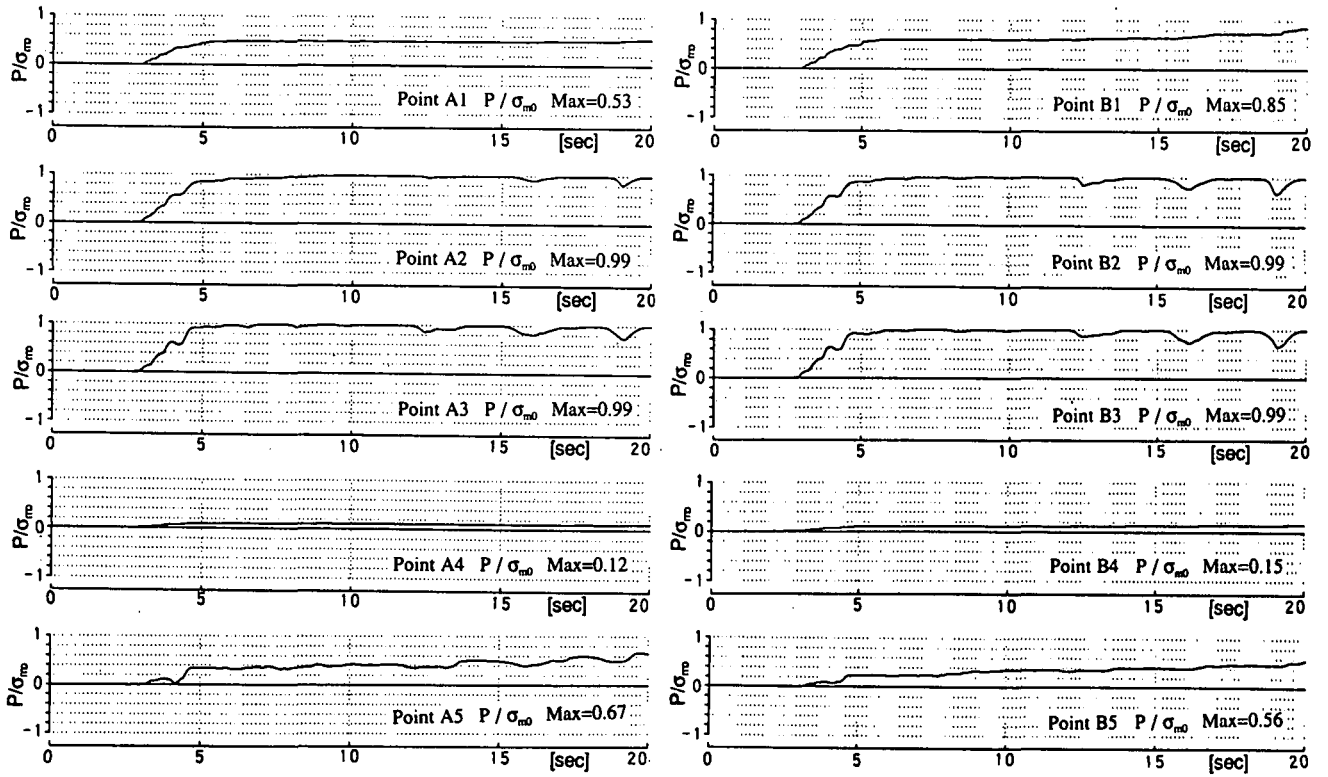


図-4 建物直下と近傍地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴波形

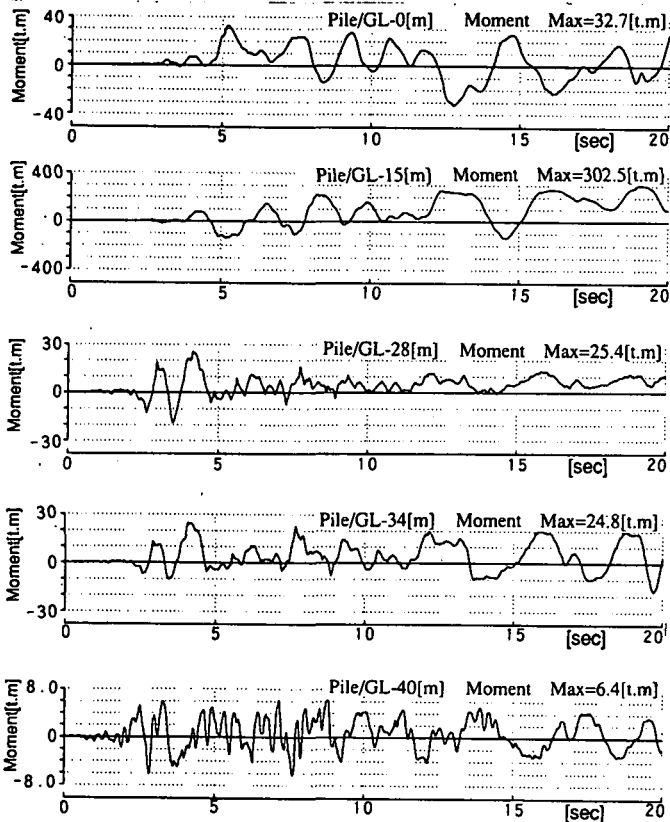


図-5 地震時に杭体に生ずる曲げモーメント波形

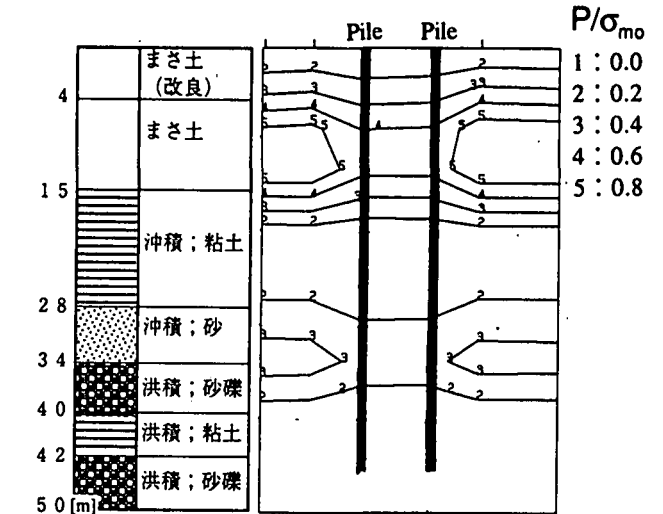


図-6 杭周辺地盤の過剰間隙水圧比の最大値分布図

表-3 液状化後の地盤の剛性低下率

	過剰間隙水圧比	ヤング係数(割線剛性)
液状化領域	0.9~	$E_o/1000$
中間領域	0.5~0.9	$E_o/100$
非液状化領域	~0.5	$E_o/10$

E_o : 地震応答解析に用いた初期剛性

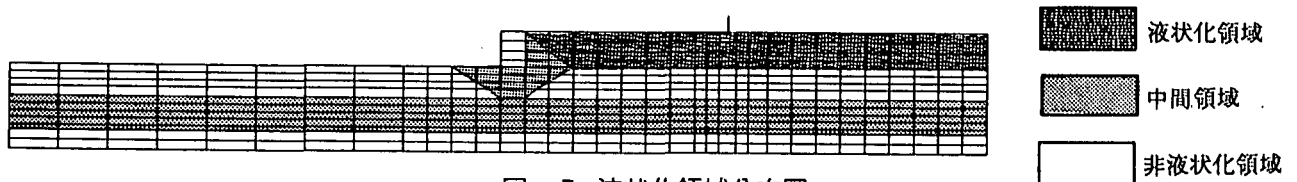


図-7 液状化領域分布図

これは図-6からもわかるように、GL-28~34[m]の沖積砂層でも過剰間隙水圧比の上昇により地盤が軟化し、液状化に近い状態となったためと考えられる。また、まさ土層(GL-0~15[m])と沖積粘土層(GL-15~18[m])の境界部では、短周期成分は全く認められず、液状化発生後となる12[sec]以降で最大となっている。この部分の杭の曲げモーメントは地盤の加速度より、むしろ液状化による地盤変位が大きな影響を与えたものと考えられる。ただしGL-4[m]以浅のまさ土層は地下水面上で、液状化現象は発生していないため、杭頭部の波形はGL-15[m]における波形と形状は類似しているものの、その振幅は1/10程度である。

4. 液状化後の地盤-構造物系の挙動予測方法

兵庫県南部地震により埋立地全体が大きく沈下し、護岸は海側に押し出されるかたちで崩壊した例は幾つか報告されている。これらの被害調査報告^{1,2)}によれば、護岸の水平移動量は数メートルにおよび、これに伴い護岸の裏込め土は陥没、周辺の地盤も大きく流動している³⁾。

液状化に伴う地盤の残留変形は沈下と側方変形に大別でき、主に液状化後に発生すると考えられる。このうち側方変形は日本海中部地震(1983)の際、浜田ら¹⁶⁾により発見された液状化後に生ずるタイプの被害で、今回の地震でも臨海部や人工島護岸の多く

の地点でこの種の変形が確認されている。

液状化発生までの地盤の挙動は微小変形理論に基づいた有効応力解析によりある程度評価できる。しかし液状化直前までの地盤挙動の評価に比べ、液状化後の地盤は大変形を伴うため、残留変形を定量的に推定することは現段階ではかなり難しい。また、地震時と地震後の地盤の挙動を統一的に取り扱うことができる土の構成式や解析手法は今のところ確立されておらず、現段階での評価方法として、地震応答解析と残留変形解析を分けて各々の変形を評価する方法が幾つか提案されている^{16,17,18,19,20,21)}。

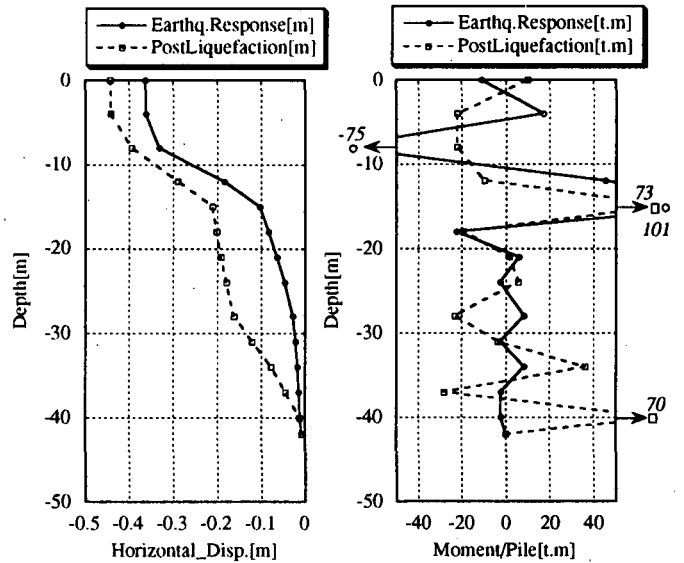


図-8 杭体の最大水平変位と最大曲げモーメント

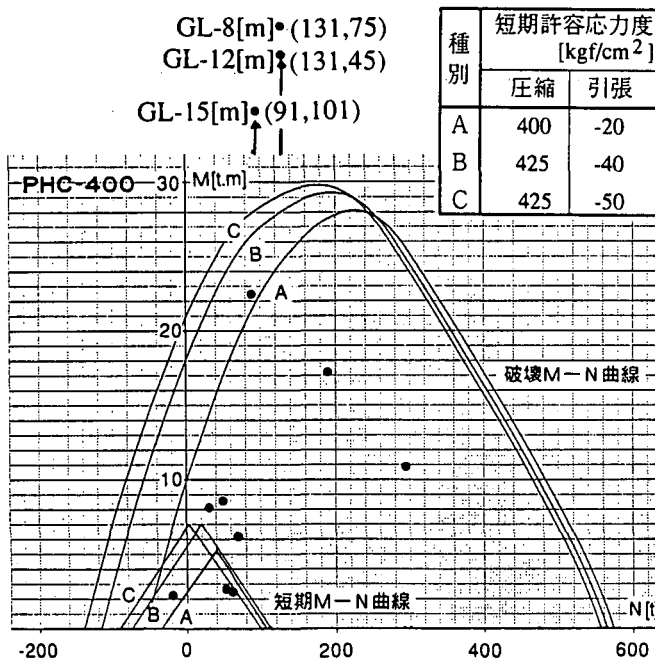


図-9 杭に生ずる最大軸力・最大曲げモーメントと破壊M-N曲線の関係(地震時)

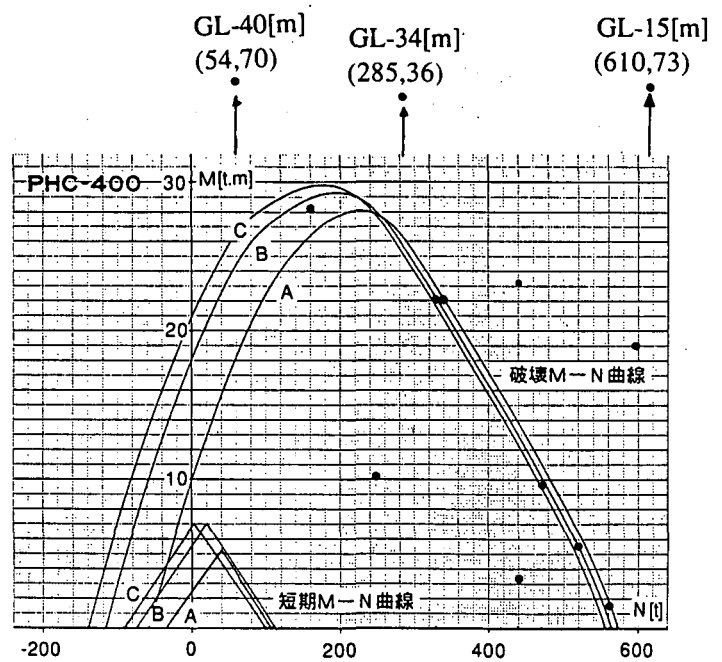


図-10 杭に生ずる最大軸力・最大曲げモーメントと破壊M-N曲線の関係(地震後)

本検討では液状化後の地盤の沈下および側方変形とそれに伴う構造物の挙動を概略評価するため、地盤の剛性低下を考慮した自重解析を行うこととした。剛性低下率の設定方法はいくつか提案されているが^{22,23)}、ここでは規矩・安田らの方法²⁴⁾に基づき表-3のように設定した。具体的な手順として、まず地震応答解析で得られた過剰間隙水圧比の最大値分布から、地盤を液状化により剛性をほぼ失った領域（液状化領域：過剰間隙水圧比0.9以上）、過剰間隙水圧比は上昇しているもののある程度の剛性は保持している領域（中間領域：過剰間隙水圧比0.5～0.9）、液状化は発生しなかった領域（非液状化領域：過剰間隙水圧比0.5以下）の3つに分けた。それぞれの領域ごとに設定した剛性低下率を、動的解析に用いた初期剛性に乗じて、地震後の地盤剛性とした。この状態でモデル全体に静的に物体力を作用させた。

図-7に今回のモデルにおける液状化領域、中間領域、非液状化領域の分布を示す。GL-4[m]以浅の地盤は地下水位面より上で、過剰間隙水圧比の上昇はなく、また比較的硬い地盤であることから、非線形性の影響も他の地層に比べて小さいが、その直下のまさ土層が液状化しており、この層からの噴砂により、液状化が発生した層と同程度の剛性低下が起こっているものと考えられる。そこで、本検討ではこの層も液状化領域として扱った。また、実際のケーソン護岸は海側に大きく移動しているため、この段階では解析モデルから取り外している。自重解析は全応力解析となるため地盤のポアソン比は0.5に限りなく近い値を用いた。

5. 地震時と地震後の杭の損傷度の検討

図-8に地震時に生じた杭体の水平方向変位、曲げモーメントの最大値分布を実線で示す。液状化が発生したまさ土層内で、杭は大きく変形し、曲げモーメントはこの層の境界部で最大となっている。

杭体の各点における最大軸力・最大曲げモーメントと標準的なPHC杭の破壊M-N曲線の関係を図-9に示す。杭径は深さにより異なるが、液状化層に埋込まれた部分に注目するため、直径0.4[m]とした場合の曲線と比較することとした。杭先端付近の応答値は短期許容応力度以内の値であるが、その他

の位置では、この範囲を超え、GL-4～15[m]のまさ土層に埋込まれている部分の杭の断面力は破壊曲線を大きく越える結果となっている。杭は地震時の変形および応力状態からGL-4[m]またはGL-15[m]の液状化層境界部で曲げひび割れの発生や、降伏など何らかの被害を受けているものと推定される。

図-8に地震後に生じた水平方向変位、曲げモーメントの最大値分布を破線で示す。また図-10に各深度における最大軸力・最大曲げモーメントを標準的なPHC杭（杭径0.4[m]）の破壊M-N曲線と併せて示す。これよりGL-30[m]付近の地盤剛性が大きく変化する部分で、側方変形による水平力が作用し、杭は損傷していると推定される。

以上の解析結果から、実際の杭は地震時に液状化層境界部で生ずる非常に大きな曲げモーメントにより塑性化し、その後の地盤の流動により杭先端付近も被害を受けたものと推定される。

6. ケーソンを含む地盤の挙動

液状化後の挙動を対象とした解析の信頼性を確認する為、地表面の水平移動量を調べた。図-11に護岸からの距離と地表面の水平移動量の関係を示す。破線が剛性低下を考慮した静的解析による値で、実線は地震時に生ずる最大振幅である。また独自調査および最近の調査報告²⁵⁾から得られた航空測量による実測値もあわせて示す。このように護岸から40[m]以上離れた地点の水平移動量はほぼ再現できた。しかし護岸からの距離が20[m]以内の地点

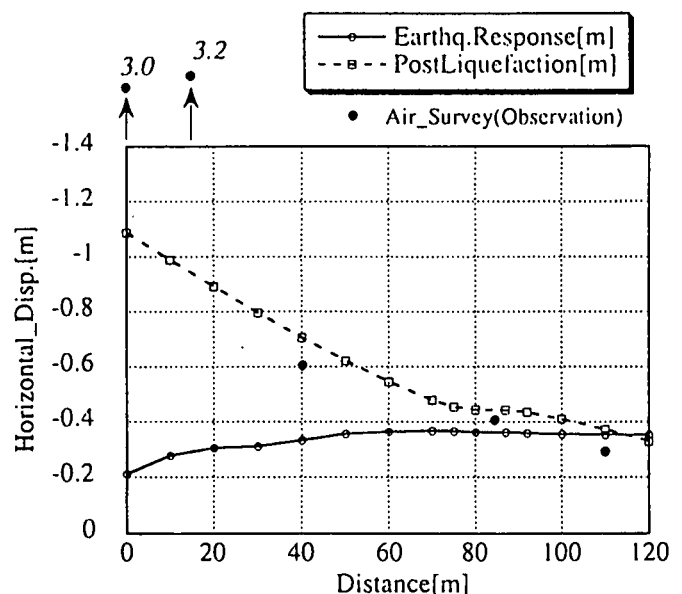


図-11 護岸からの距離と地表面水平変位量の関係

で測定された3[m]以上の移動量は今回実施した解析では表現できなかった。

7. 結論

埋立地盤に建設された杭基礎建物を対象に、液状化を考慮した地震応答解析を行い、液状化後の地盤の永久変形を既往の研究成果を参考に推定し、杭基礎の健全性について考察した。以下に検討結果をまとめる。

- ・検討対象建造物の基礎杭はその中間部および先端付近に被害を受けた可能性が高い。
- ・杭中間部の損傷は地盤の液状化によるものと推測される。
- ・杭先端付近の損傷は液状化後の側方変形が大きな要因となっている可能性がある。

今回の検討では入力地震波としてEW成分のみを考慮したが、実際には、この他にNS成分とUD成分が同時に入射するため、建造物の塑性変形に伴うエネルギー吸収などを考慮しても、杭体が許容しうる断面力を大きく越える可能性がある。また液状化強度や非線形パラメータなどは暫定的な値を用いている。今後、調査結果を吟味した上で、より詳細な検討を行う予定である。

本報告をまとめるにあたっては早稲田大学教授・浜田政則先生から多くの貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1)清水建設(株)・技術研究所："1995年兵庫県南部地震調査報告書",1995.2
- 2)(社)土質工学会・阪神大震災特別委員会編："阪神大震災報告会—地盤災害とその教訓—",1995.5
- 3)井合 進："ケーソン式岸壁の被害の特徴",土木学会誌,Vol.80-6,pp.46-49,1995
- 4)渡辺嘉道："神戸ポートアイランドの開発と基礎工",基礎工,Vol.9,No.1, pp.83-91, 1981
- 5)(社)土質工学会編："風化花こう岩とまさ土の工学的性質とその応用",土質基礎工学ライブラリー-16
- 6)赤司六哉、山本繁登、溝上 健："乱さないローム、シラス、まさ土の動的変形特性",第21回土質工学会研究発表会,pp.675-678,1986

- 7)神戸市開発局、シマダ技術コンサルタント："ポートアイランド土質調査および地震計設置業務報告書",1991
- 8)川瀬 博、佐藤智美、福武毅芳、入倉孝次郎、岩田知孝："兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録のシミュレーション",日本建築学会大会学術講演梗概集B-2,pp.161-162,1995
- 9)Ansarg,M.A., F.Yamazaki, T.Katayama, I.Towhata:"Analysis of Ground", Proc.of the 23rd JSCE Earthquake Engineering Symposium, pp277-280, 1995
- 10)Fukutake K., A.Ohtsuki, M. Sato and Y. Shamoto;"Analysis of saturated dense sand - structure system and comparison with results from saking table test", Earthquake Eng. Struct. Dyn.,vol.19,pp.977-992, 1990
- 11)Ohtsuki A., M.Hirota, K.Ishimura, K.Yokoyama and K. Fukutake; "Verification of two dimensional nonlinear analysis of sand - structure system by examining results from shakin table test", Earthquake Eng. Struct. Dyn., vol.21,pp.591-60,1992
- 12)龍岡文夫、福島伸二："砂のランダム繰返入力に対する応力-ひずみ関係のモデル化について(1)",生産研究第30巻9号,pp.26-29,1978
- 13)福武毅芳、松岡 元："任意方向単純せん断におけるダイレイタンシーの統一的解釈",土木学会論文集,No.412/III-12, pp.240-248,1989
- 14)黒沢 到、福武毅芳、藤川 智、大槻 明、宇野壽郎："二次元および三次元液状化解析の比較による杭・構造物系のモデル化の検討",第9回日本地震工学シンポジウム,pp.1351-1356,1994
- 15)福武毅芳、大槻 明、鈴木 健："円筒形建造物の杭基礎の液状化挙動(その1,2)",第49回土木学会年次学術講演会I,pp.1636-1639,1994
- 16)浜田政則、安田 進、磯山竜二、恵本克利："液状化による地盤の永久変位の測定と考察",土木学会論文集,No.376/III-6,pp.211~220,1986
- 17)社本康広、佐藤正義："液状化時代の地盤沈下量の予測",繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシンポジウム,pp15-18,1990

- 18)Ishihara,K.,M.Yoshimine:"Evaluation of settlements in sand deposits following Liquefaction during earthquakes ",Soils and Foundations,Vol.32 No.1, pp.173-188,1992
- 19)松本秀応、常田寛一、佐谷祥一："液状化による地盤流動量に関する模型実験"、第25回土質工学研究発表会,pp.1045-1047,1990
- 20)Towhata,I.,Y.Sasaki,K.Tokida,H.Matsumoto, Y.Tamari, K.Yamada:"Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle", Soils and Foundations, Vol.32, No.3, pp.97-116,1992
- 21)Yasuda,S.,H.Nagase,H.Kiku,Y.Uchida:"The Mechanism and a Simplified procedure for the Analysis of Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction",土質工学会論文報告集,pp.103-109, 1989
- 22)安田 進、規矩大義、丸井 宏："液状化による永久変位の対策に関する簡易解析",第24回土質工学研究発表会, pp.1041-1042,1989
- 23)後藤 茂、森 誠二、馬場幸吉、西尾伸也："動的載荷により間隙水圧の上昇した砂の変形特性",第28回土質工学研究発表会,pp.931-932,1993
- 24)規矩大義、安田 進、増田民夫、佐藤一也："細粒分を含んだ砂の液状化後の変形特性試験",第29回土質工学研究発表会, pp.1041-1042,1994
- 25)Hamada M.,R.Isoyama, K.Wakamatu :"The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) Earthquake(Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area), Association for Development Earthquake Prediction",Waseda University and Japan Engineering Consultants, 1995

Analytical Exploration of Damage to Piles-Structure System Caused by Liquefied Ground Motion

Masaki FUCHIMOTO, Akira OHTSUKI ,Kiyoshi FUKUTAKE and Takashi TAZOH

The object of this study is to explore the reasons resulting in the failure of pile foundations built on the soft reclaimed ground due to the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake. Based on the case investigation results, at first,numerical analysis of non-linear earthquake responses have been performed to examine the dynamic behavior of the soil-pile-structure system during earthquake shaking. Then, the permanent ground displacements due to post-liquefaction stiffness reduction of the soil has been estimated, and the safety of the piles against the earthquake has been investigated. The following main conclusions have been drawn. 1) The investigated pile foundations were likely to be damaged at their heads and middle parts; 2) The failure of the piles at their middle parts may be attributed to their surrounding soil liquefaction; 3) The failure of the piles at their tips may be attributed to the permanent ground displacements due to post-liquefaction.