

液状化・側方流動で損傷した 鋼管杭の被害の検討

三輪 滋¹・池田隆明¹・大岡 弘²

¹ 飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)

² 新潟工科大学 建築学科 工博 (〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋1719)

A dynamic analysis was conducted to examine the dynamic response of steel pipe pile foundations deformed due to liquefaction and liquefaction-induced lateral flow of the ground during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake by using a soil-structure interaction system of simple spring-mass considering liquefaction based on the investigation data. The residual deformation of piles caused by lateral flow of the ground due to liquefaction was also examined. As a result, it was presumed that piles were damaged because large deformation of the ground took place at the base boundary and the top surface of the liquefied "Masado" layer during the main phase of the earthquake. Still more, the residual deformation was found to have occurred on piles by lateral flow of the ground.

Key Words : liquefaction, lateral flow, steel pipe pile, soil-pile-structure interaction, simplified method

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、広い範囲の埋め立て地で激しい液状化が生じ、さらに、液状化に伴う側方流動により、構造物の基礎は大きな被害をうけた。ここでは鋼管杭基礎の被害の過程と原因について被害調査¹⁾、地盤調査、室内試験をもとに動的相互作用解析に加え、応答変位法も用いて、被害原因を解析的に比較検討した。

2. 構造物の被害調査の概要

対象構造物の北側と西側には護岸があり、構造物までの距離は双方とも約100mである。構造物は一階が鉄筋コンクリート造、二階が鉄骨造の二階建の杭基礎構造物である。基礎は独立フーチング基礎であり、各フーチングは6本または4本の鋼管杭 ($\phi=406.4\text{mm}$, $t=9.5\text{mm}$, $L=27.5\text{m}$) で支持されている。地盤調査は、1968年、地震後、1997年に行われており、全部で15地点の調査結果が得られている。図-1にその代表的な柱状図を示す。他地点もほぼ同様な層構成であり、構造物周辺の地盤構造は概ね水平成層と考えられる。地表からG.L.-14m程度までの約14mが埋立まさ土層である。G.L.-6~-7m以下の厚さ8m程度のまさ土層のN値は0~15程度と小さく液状化の可能性の高い層である。まさ土層の液状化強度比は、 $N=20$, $DA=5\%$ で0.20程度であり、周辺埋立地で採取されたまさ土の不攪乱試料による既往の試験結果とほぼ同程度である。

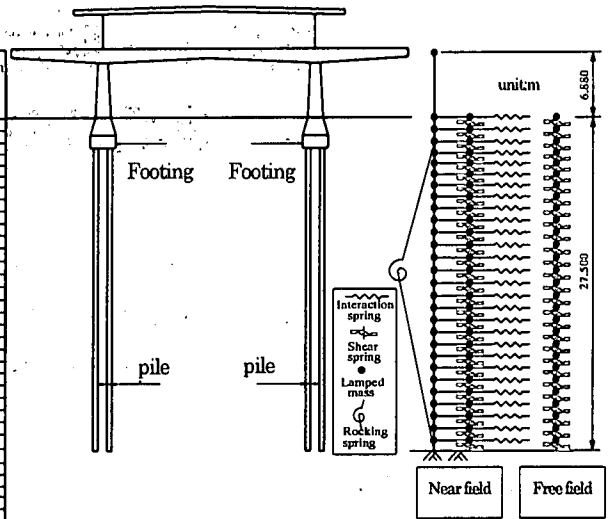
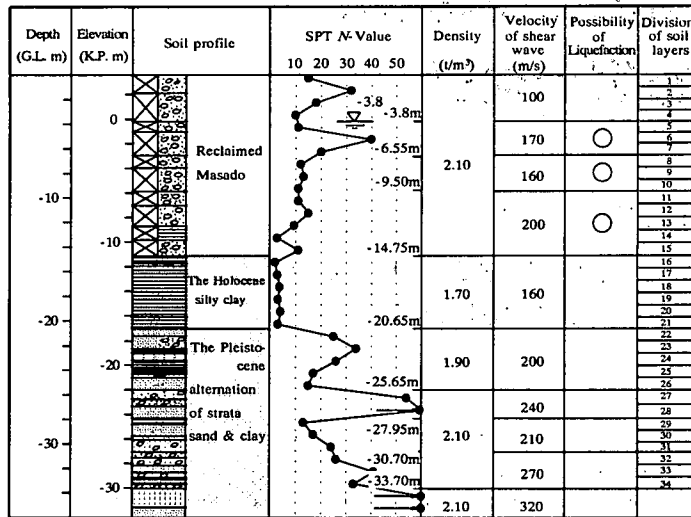
3. 動的相互作用解析モデル

杭や構造物の地震時挙動、および被害原因を検討するため、多質点系モデル²⁾による地盤-杭-構造物連成系の地震応答解析を実施した³⁾。解析モデルを図-1に示す。このモデルは、杭-構造物系、周辺地盤系、自由地盤系からなる。周辺地盤と自由地盤はそれぞれの質点で相互作用ばねによって結ばれている。自由地盤は質点とせん断ばねでモデル化している。地盤ばね、相互作用ばねに関してはひずみに依存した非線形性だけでなく、液状化に起因した間隙水圧の上昇による有効拘束圧の変化に依存した非線形性も考慮している。建物は1質点系のバネマスでモデル化した。杭、構造物については線形の梁要素でモデル化し、杭頭は固定とした。

この解析では自由地盤系は構造物系と切り離して考え自由地盤系の応答は、一次元有効応力解析法“FLIP”⁴⁾で求め、相互作用ばねに入力した。G.L.-3.8~-14.75mのまさ土層が液状化の可能性のある層とした。東神戸大橋でのG.L.-34mの観測記録⁵⁾を入力地震動とした。当該地点の検討断面方向(N334E)に変換した。S波速度が300m/s以上の工学的基盤と見なせるG.L.-33.7mに入射波入力(E+F入力)した。

4. 地盤と杭の地震時挙動

図-2に有効応力解析から得られた地表面での加速度時刻歴と液状化層の過剰間隙水圧比時刻歴を示す。この図



(G.L.±m=K.P.+36m)

図-1 土質柱状図と地盤-杭-構造物の相互作用解析モデル

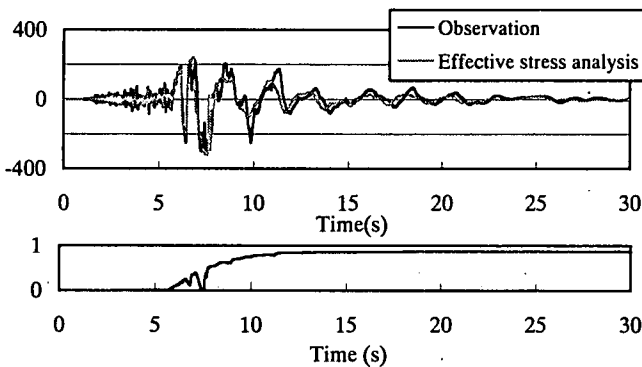


図-2 地表の加速度時刻歴の比較と解析で得られた過剰間隙水圧時刻歴

には、東神戸大橋の地震観測記録のうち、入力地震動と同様に方向変換したG.L.-1.5mでの波形をあわせて示す。解析結果は、観測記録に見られる液状化以降の波形の長周期化と振幅の現象といった様子を概ね再現できている。

図-3に地盤および杭の最大応答値分布、加速度、せん断ひずみ、過剰間隙水圧、相対変位、および杭の曲げモーメントを示す。また、被害調査で得られた杭の変形を重ねて示す。G.L.-6m以深のまさ土層では過剰間隙水圧は有効応力の90%程度以上に上昇している。また地下水位からG.L.-6mまでの比較的N値の高い範囲をのぞいてはせん断ひずみが4%程度となっている。これらのことから、まさ土層はG.L.-6~15mにかけて液状化したものと推定される。杭の挙動は、概ね地盤の挙動と一致しているが、地表面近くでは地盤よりも応答がやや大きい。これは構造物の慣性力による影響のためと考えられる。

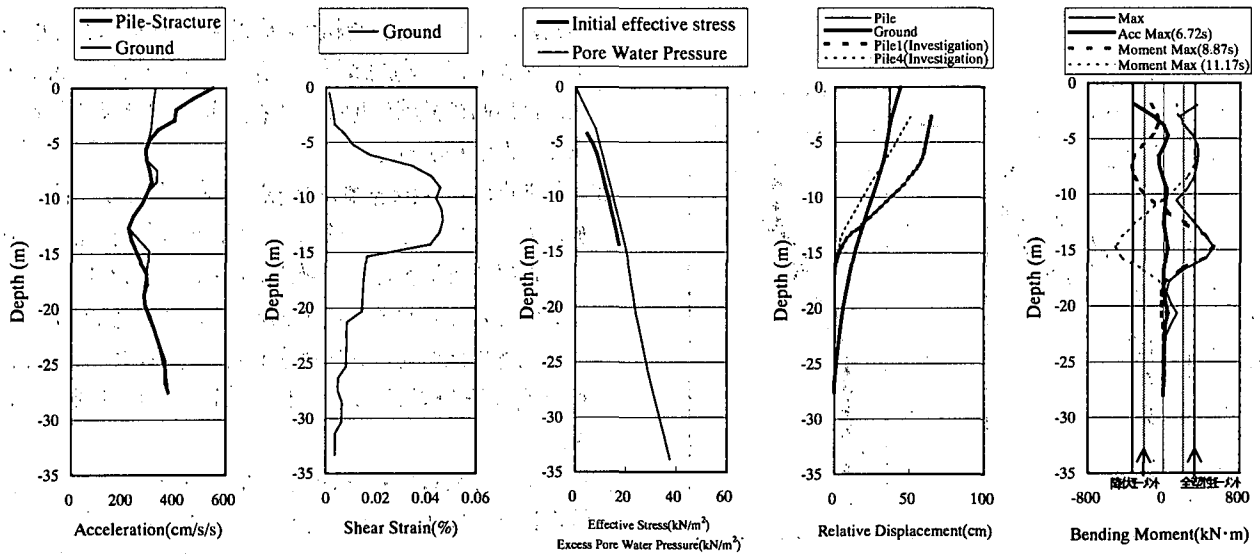
図-3に曲げモーメントが最も大きくなる時刻(8.87秒)二番目に大きくなる時刻(11.17秒)、杭頭加速度が最大になる時刻(6.72秒)における曲げモーメント分布も合わせて示す。杭には全塑性モーメントを越える大きな曲げモ

ーメントがG.L.-4~8mと、G.L.-15m前後で主要動中に同時に生じている。これらの深さは液状化層の上端と下端であり、杭の残留変形の位置と一致する。曲げモーメントの大きな時点では液状化層内の相対変位も大きくなっている。これに対し、杭頭部の加速度が大きい時点では液状化層内の相対変位、杭の曲げモーメントともに小さい。これらのことから、杭の残留変形が見られる部分の損傷は、地震動の主要動中に、液状化に起因する大きな地盤変形により生じたものと考えられる。

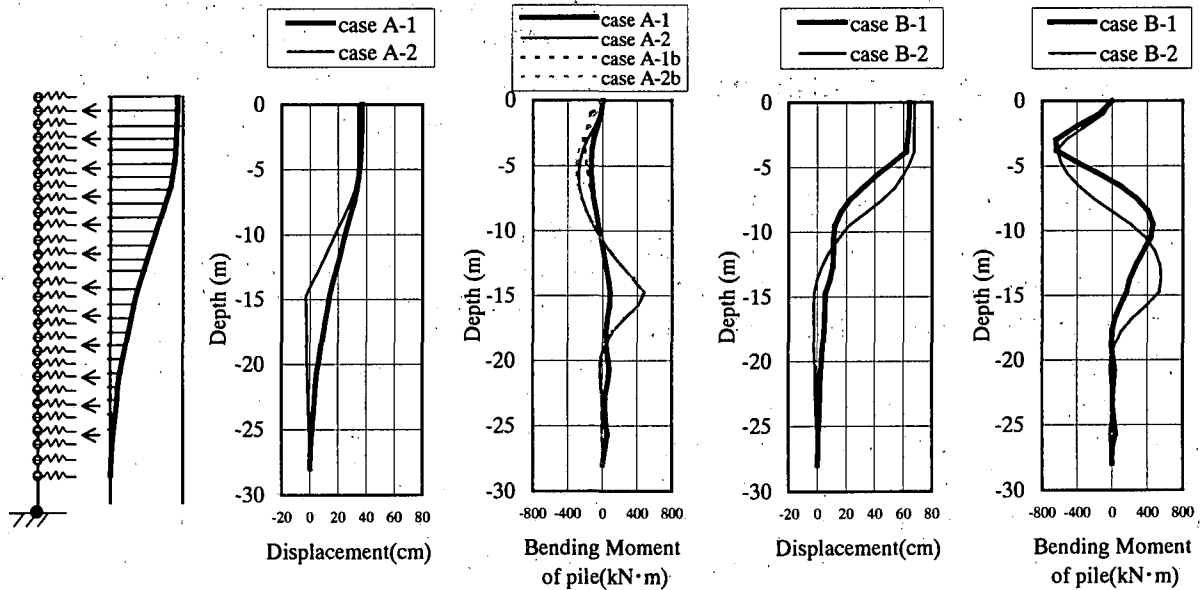
5. 地盤変位に基づく杭の静的解析

簡易モデルとしてウインクラーばねに支持された杭のモデルによる静的解析を実施した。図-4にモデルとその結果を示す。等価線形解析で得られた収束せん断剛性を地震時のせん断剛性と見なし、また、液状化層に関しては、液状化を考慮したせん断剛性を、液状化地盤での強震記録の検討に基づき初期値の1/100と評価した⁹⁾。パネ値はせん断剛性を基にMindlinのII解で求めた。地盤の変位は上述した有効応力解析から(ケースA)、また、液状化層のせん断剛性を初期値の1/100、そのほかの層の剛性を収束剛性とした、液状化を考慮した等価線形解析⁹⁾から求めた(ケースB)。また、変位分布は地表面の最大加速度発生時(ケース1)、液状化層の上端と下端の相対変位が最大になる時点(ケース2)とした。

ケースA-1の場合、曲げモーメントは比較的小さい。一方、ケースA-2では大きな曲げモーメントがG.L.-6mとG.L.-15m付近に発生している。また、同時刻での建物の慣性力を加えることで杭頭付近の曲げモーメントは大きくなり、特にケースA-1(杭頭加速度最大時)では杭頭部でのモーメントが最も大きくなる。これらの結果は、動的解析結果とよい一致を示し、液状化地盤中の杭の挙動



Moment Max (sec): 曲げモーメントが最大時の分布 (生起秒) Acc Max (sec): 杭頭加速度最大時の曲げモーメント分布 (生起秒)
 図-3 動的相互作用解析の応答値分布



A: 有効応力解析の地盤変位を用いる 1: 地表面加速度最大時の変位分布
 B: 液状化を考慮した等価線形解析の地盤変位を用いる 2: 液状化層の上下端の相対変位最大時の変位分布
 -b: 杭頭の慣性力を付加した場合

図-4 簡易な静的解析の応答分布

の評価にこのような簡易な検討法が有効であると考えられる。また、ケースB-2では、液状化層の変位をやや大きめに評価しているものの、有効応力解析の場合とほぼ同じ深さに同程度の大きさの曲げモーメントが生じている。一方、ケースB-1では、せん断剛性を一定として検討しているため、発生する曲げモーメントはケースA-1とはかなり異なる。このように、地盤の変形を、等価線形解析で評価した場合でも、時々刻々の挙動を評価することは難しいが、地震時に杭に生じる最大断面力を評価することに対しては有効と考えられる。

6. 液状化による地盤の側方流動の影響

以上の地震応答解析では、水平成層地盤を仮定した地

盤の応答解析では、地盤や杭には大きな残留変位は発生せず、杭の残留変位を説明できない。航空写真測量から求めた護岸法線直角方向の側方流動量は、検討地点付近の護岸では2.6~4.6mであり、平均的には3.7m程度であった。時松は、震害調査結果から護岸の変位量 D_0 と付近の側方流動の影響範囲 L および液状化層厚 H の関係式、および護岸からの距離 X とその地点での側方流動量 D の関係式を提案している⁷⁾。

$$L/H = (25 \sim 100) \times D_0 / H \quad (1)$$

$$D/D_0 = (1/2)^{5X/L} \quad (2)$$

D_0 の係数を50と仮定すると、影響範囲は185mにおよび、護岸から106~124m離れた構造物周辺は影響範囲にはい

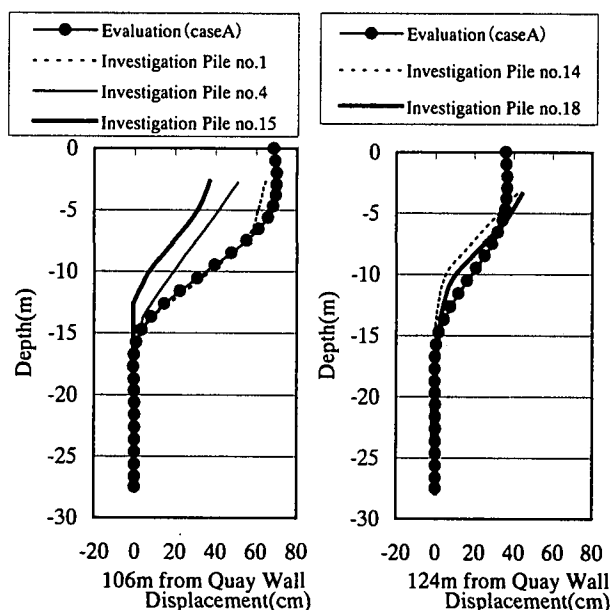


図-5 簡易法で求めた側方流動による残留変位を作用させた場合の杭の変形

る。検討地点での側方流動量は64~36cmとなる。ここでも簡易モデルとしてのウィンクラーばねに支持された杭のモデルを用いて、地中（深さ方向）の水平変位分布が、社本らの提案した簡易法⁹⁾で求めた液状化後の水平残留変位分布と相似であるとして、変位を入力することにより静的解析を実施した。得られた杭の残留変位の深さ方向分布を被害調査結果とともに図-5に示す。解析結果は、調査から得た深さ方向の変形分布とほぼ一致する。以上の検討から、杭は液状化により損傷し、さらに、護岸から100m以上離れているにもかかわらず、護岸方向への地盤の側方流動によって残留変形が生じたものと推定される。

7. 結論

1995年兵庫県南部地震で被災した鋼管杭基礎構造物に対し、液状化を考慮した地盤-杭-構造物連成系解析、簡易解析を行い、得られた結果を被害調査結果と比較し、鋼管杭基礎構造物の被害原因について、また解析法の適用性について検討した。その結果、以下のことがわかった。

①バネ-質点系の地盤-基礎-構造物連成系地震応答解析から、地震の主要動の間にG.L.-6m付近と、液状化したまさ土層の底面境界付近のG.L.-15mに全塑性モーメントを越える大きな曲げモーメントが発生することがわかった。その位置は杭の被害調査から得られた変形の位置一致し、杭の損傷が液状化により地震動の主要動時に発生した可能性が高いと考えられる。

②地盤ばねで支持された杭の静的解析から得られた曲げモーメントは、動的解析の結果とよく一致し、簡易手法は地震時の液状化地盤中の杭の挙動の評価に有効であることがわかった。

③検討地点から約100m離れた護岸は液状化による側方流動で大きく変位した。検討地点はその影響範囲内にあり、杭は側方流動により護岸方向への残留変形が生じたものと考えられる。被害調査に基づいた側方流動による地盤の残留変位を作用させた、地盤ばねで支持された杭の静的解析により、杭の残留変形がほぼ表現できた。

④埋立まさ土はG.L.-6m付近から層下端までが激しく液状化した。杭は、大きく変形した液状化層で損傷した。さらに液状化に起因した地盤の護岸方向への側方流動により残留変形が生じた。

謝辞：この論文の一部は(社)建築研究振興協会に設けられた建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会の成果に基づいている。委員の方々の協力に感謝いたします。また、解析結果の整理と図表の作成には鈴木重良氏の協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)加藤史彦,佐竹啓一,廣瀬智治,大岡弘,時松孝次,兵庫県南部地震で側方流動を受けた鋼管杭基礎建物の損傷調査,第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 365-370, 1998. 11.
- 2)Mori, S., Ikeda, T., Takimoto, Y., Muto, M. and Tohaya, T.: Influence of soil liquefaction on dynamic response of structure on pile foundation, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, pp. 1777-1780, 1992.
- 3)三輪滋,池田隆明,原田尚幸,高津忠,水取和幸,大岡弘,兵庫県南部地震により被災した埋立地盤に建つ鋼管杭基礎構造物の被害の検討,第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 1757-1762, 1998.11.
- 4)Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *Soils and Foundations*, Japan Geotechnical Society, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 5)建設省土木研究所:土木構造物における加速度記録(No.21)土木研究所発報,第64号, 1995.
- 6)Miwa, S., Ikeda, T. and Oh-Oka, H.: A study Seismic Behavior of Liquefied Ground Using Strong Motion Records of the 1995 Hyogoke-Nambu Earthquake, the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, January, 2000.
- 7)Tokimatsu, K. and Asaka, Y.: Effects of Liquefaction-Induced Ground Displacements on Pile Performance in the 1995Hyogoke-Nambu Earthquake, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp. 163-177, 1998.
- 8)Shamoto, Y., Zhang, J.-M. and Tokimatsu, K., Method for Evaluating Residual Post-Liquefaction Ground Settlement and Horizontal Displacement, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp. 69-83, 1998.