兵庫県南部地震の側方流動による杭の破壊・変形モード

FAILURE AND DEFORMATION MODES OF PILES
DUE TO LIQUEFACTION-INDUCED LATERAL SPREADING
IN 1995 HYGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE

時松孝次*, 大岡 弘**, 杜本康広***, 浅香美治****
Kohji TOKIMATSU, Hiroshi OH-OKA, Yasuhiro SHAMOTO
and Yoshiharu ASAKA

Inclinometer survey and television observation are conducted for piles of a building that experienced severe tilt due to liquefaction-induced lateral spreading during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. The result of the field tests together with a preliminary analysis has shown that (1) there is a significant difference in the failure and deformation patterns of piles along the line perpendicular to the shoreline, and (2) this difference could have been induced by the change in the lateral ground displacements along the line.

Keywords: liquefaction, lateral spreading, pile, bending moment, ground displacement, earthquake

液状化、側方流動、杭、曲げモーメント、地盤変位、地震

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、液状化とそれに伴う側方流動により、杭支持建物に多数の被害が生じた^{1)~8)}。その多くは、上屋の構造体が無傷のまま沈下・傾斜したもので、掘削調査から杭頭の被害が確認されている。しかし、杭頭が健全でも沈下・傾斜した建物があることから、杭が地中部で被害を受けた可能性が地震直後から指摘されている。このため、インテグリティ (I T) 試験・内視カメラ調査⁹⁾が多数試みられ、地中部における杭の被害が確認されている。しかし、液状化・側方流動による杭の被害を評価し、基礎の耐震設計に反映させるためには、上記調査だけでは不十分で、さらに杭の変形モードと地盤の側方流動量の把握が望まれる。

以上の背景から、既製コンクリート杭・鋼管杭に対し、傾斜計を用いた調査法が提案され、実施例が報告⁷⁾されている。しかし現在のところ、側方流動と杭の破壊・変形モードとの関係について検討したものはない。そこで本報告では1995年兵庫県南部地震で被害を受けた杭基礎建物(写真1)を対象に、内視カメラ・傾斜計による現地調査と航空写真測量を行い、基礎杭の破壊・変形モードと地盤の側方流動量を把握する。さらに、応答変位法による試算を行い、杭基礎の破壊・変形モードを支配した要因について考察する。

2. 被害状況および地盤概要

2.1 建物および地盤の概要

調査対象は、神戸市東灘区の臨海部・埋立砂礫地盤に位置する昭和56年設計の鉄筋コンクリート造3階建て6 x 1スパンの杭基礎

写真1 建物の被災状況

* 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

** 建設省建築研究所 室長・工博

*** 清水建設技術研究所 主任研究員・工修

**** 東京工業大学工学部建築学科 大学院生

Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Faculty of Engineering, Tokyo Inst. of Tech., Dr. Eng.

B.R.I. Ministry of Construction, Dr. Eng.

Shimizu Corporation, M. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Eng., Faculty of Engineering, Tokyo Inst. of Tech.

図1 建物の配置図と航空写真測量から求めた変位ベクトル

建物⁶⁾である。図1に配置図、図2に断面図を示す。建物(図1-A)は護岸から6mにあり、桁行き方向が海岸線と平行している。図3に基礎伏図を示す。38本の杭が、プレボーリング工法と打撃工法(掘削底面より1m程度打ち込み)の併用により埋込杭として施工されている。杭種はPC杭A種、杭径は400mm(内径約240mm)、設計杭長は10mもの2本継ぎで全長約20mである。杭1本あたりの設計用長期鉛直荷重は、約40t(35~50t)である。図4に示す

図2 建物の断面図(単位 mm)

図3 基礎伏図(単位 mm)

図4 杭頭接合部の詳細(単位 mm)

ように杭頭は10cm程度基礎スラブに埋め込まれ、杭頭から40cm程度、コンクリートだけでなく鉄筋も中詰めされている。基礎スラブ底面はG.L. -1.65mである。

建物設計時に得られた敷地内2点(図3に記載のNo.1点、No.2点)の地盤柱状図を図5に示す。深度8m付近まで細粒分の少ない砂礫主体の埋立土層、その下に沖積砂層、砂質シルト層、深度17m程度より締まった砂礫層となっている。設計では、深度21m程度に現れるN値50以上の層を杭の支持層と考えている。地下水位は深度約2mで、岸壁前面の水深は3.5m~5m程度である。

2.2 建物および地盤の被害概要

1995年兵庫県南部地震後、建物前面の岸壁は、海側へ移動・前傾した。この結果、建物は上部構造が無被害のまま海側(南側)に約3度(52~57/1000)傾き(写真1、図6)、建物背後には数十cmの隙間が生じた。岸壁に平行する方向の傾斜は西に0~10/1000程度ときわめて小さかった。隣接するRC杭で支持された平屋建物B(高さ4.5m、杭径300mm、長さ9m)も同様に南へ40~41/1000、西へ6/1000傾斜した。

図5 調査地点の地盤柱状図

図6 一次調査から得られた被害の概要

建物北側グラウンドでは、多数の噴砂および地割れ・陥没が認められた。どの層が液状化したかを判断するため、日本建築学会建築基礎構造設計指針⁹⁾によりNo. 1点、No. 2点の液状化判定を行ったところ、深度9m以浅の埋立層・沖積砂層が液状化したものと推定された。なおこの際、地表面最大加速度は埋立地での実測記録¹⁰⁾を参考に300gal、砂礫層の細粒分含有率は5%以下と仮定した。

2.3 航空写真測量による地盤の側方流動量

建物周辺地盤における地震後の側方流動量を把握するため、航空写真測量を行った。地震前の写真は平成3年4月撮影の縮尺1/6000、地震後の写真は平成7年1月18日と12月20日撮影の縮尺1/4000のものである。1月18日の写真は建物変位の測量に、12月20日の写真は地盤変位の測量に用いた。これは、地震直後の写真では地表が噴砂で覆われ、目標物が特定できなかったためである。測量誤差はいずれも±20cm程度であった。

写真測量から得られた水平変位ベクトルを図1に示す。変位が主

図7 航空写真測量から得られた地盤の変位量

として護岸直交方向に生じていることから、図7に海側への地盤変位量と岸壁からの距離との関係を示す。地盤変位は岸壁付近で大きくなって大きい(1.5m以上)、陸に向かって急激に小さくなっている。なお建物4隅の変位量は屋上の値で、地震後の建物傾斜による変位が加算され、2m程度の大きな値となっている。これを地表レベルに換算すると建物東側で88-93cm西側で94-109cm、パイルキャップ底部に換算すると東側で79-84cm西側で85-100cmとなる。西に隣接する建物Bの地表レベルの水平変位は、前面西側岸壁の大移動に対応し、建物東側で112-132cm西側で153-155cmと西側で大きくなっている。以上の検討から、埋立層の液状化に伴う側方流動が建物被害と密接に関係していることが確認される。

3. 内視カメラおよび孔内傾斜計による杭の破壊変形モード調査

3.1 内視カメラおよび孔内傾斜計調査の概要

本建物の内視カメラ調査は、すでに大岡ら⁶⁾により実施されている。この調査は、基礎ばり・基礎スラブを残した状態で、基礎スラブと杭の中詰めコンクリートをコアリングして行われた。しかし、内視カメラの感度に限界があり、杭全周の被害状況を観察することが出来なかった。今回の調査は、基礎ばり・基礎スラブを取り除いた状態で、高感度内視カメラおよび孔内傾斜計⁷⁾を用いて行った。今回の調査対象は、海側(S7)杭および山側(N7)杭で、調査深度は、杭孔内残土のため、それぞれ13.6m、16.3mであった。

孔内傾斜計は、2個の傾斜計を取り付けた全長700mmまたは1200mmのL型鋼に、さらに鉄板(羽)および板バネを取り付け、装置全体が杭の中空部に内接できるようになっている。これに、長さ1mの角ロッドを繋ぎ足して杭中空部に押し込むことで、直交2方向の傾斜角が測定できる。測定された1方向の傾斜角を θ とし、2次の微少項を無視すれば、次式が成立する。

$$\theta = dy / dz \quad (1)$$

$$1/\rho = -d\theta / dz \quad (2)$$

ここに、 y は杭の水平変位、 z は深度、 ρ は杭の曲率半径である。したがって、(1)式から傾斜角を積分すれば水平変位の深度分布が、(2)式から傾斜角を微分すれば曲率($1/\rho$)の深度分布が推定できる。

3.2 内視カメラおよび孔内傾斜計の調査結果

図8は内視カメラ調査から確認された海側杭・山側杭の被害状況の展開図を示している。海側杭では杭頭、深度4.5m付近、液状化層最下部と推定された深度9m付近の3カ所に大きな水平クラックがあり、深度4.5m付近で杭体が破断している。しかし、山側杭では杭頭部と液状化層最下部の2カ所に大きな水平クラックがあるだけで、それ以外にはほとんど被害が認められない。なお、両杭とも継手部が深度約10mに確認できる。

図9、10は建物梁間方向・桁行方向(以下南北・東西方向)の傾斜角の深度分布を、図11、12は傾斜角を深度方向に積分した2方向の水平変位の深度分布を、図13は最大水平変位が発生する方向の深度分布を、それぞれ実線で示している。なお、海側杭は深度4.5mで破断して中空部の断面が小さくなっており、それ以深では前述の方法での調査が出来なかった。そこで、孔内傾斜計から羽とバネをとり、これが杭内面に接するようにロープで釣り下げて測定を行った。このため、直交2方向の傾斜角が分離されていない。そこで、

図9 (a)には2方向の傾斜角を合成した最大傾斜角を、図11(a)には最大傾斜角を積分した変位分布を破線で示している。

図11～13から山側杭では東西方向に比べ南北方向の変位量が大きく、最大水平変位がほぼ海岸直交方向に発生していることが分かる。海側杭も深度4.5mまで同様であることから、深度4.5m以深でも南北方向の変位が優勢で、その分布は図11(a)の最大変位分布にほぼ対応するものと考えられる。したがって、以下、変位の卓越する南北方向について議論を進める。

図9 (a)と図10(a)の比較から、山側杭の傾斜角は全長にわたって正であるが、海側杭の傾斜角は深度5m付近まで負、それ以深で正となっていることが分かる。この結果、山側杭は全長にわたり海側

図8 内視カメラ調査から求めた杭の被害状況

図10 山側杭の傾斜角の深度分布

図11 南北方向における杭の水平変位の深度分布

図9 海側杭の傾斜角の深度分布

図12 東西方向における杭の水平変位の深度分布

図13 杭の最大水平変位が発生した方角の深度分布

に傾斜し、液状化層最下部と推定された深度9m付近で海側に大きく折れ曲がっている（図11(b)）。一方、海側杭は深度5m付近で折れ曲がり点として、くの字に変形している（図11(a)）。しかし、両者の杭先端に対する杭頭相対変位はともに60cm程度と等しくなっている。基礎ばりで繋がれた海側・山側の杭頭水平変位が等しい値を示していることは、傾斜計の信頼性を裏付けるものと考えられる。また杭頭水平変位は航空写真測量から得られた値とも矛盾がない。したがって、両者の杭頭変位は等しいが、変形パターンは大きく異なっていることになる。

確認のため、図14に南北方向における杭の曲率分布を海側杭・山側杭について示している。この際、杭頭付近の傾斜角は、前回の調査結果⁶⁾を参考にした。山側杭は杭頭・深度9m付近の2カ所で大きな曲率を持つが、海側杭は杭頭・深度5m付近・深度9m付近の3カ所で大きな曲率を持つ。このように、海側杭・山側杭の変位分布の違いは、曲率分布の違いにも反映されている。同様の被害は側方流動により被害を受けた他の建物でも認められている⁸⁾。図14に

図14 曲率の深度分布

図15 側方流動を受ける杭基礎の応力解析モデル

は内視カメラ調査で確認された杭体のクラック発生位置（図8）も示している。傾斜計調査から曲率が大いだと推定された部分には、顕著な水平クラックが認められ、傾斜計により求められた変形・曲率モードの妥当性が確認される。

4. 応答変位法による杭の破壊と変形モードの検討

海側・山側で杭の被害パターンが異なった要因として、図7のように側方流動量が海岸線に向かって大きくなる影響が考えられる。そこで、図15に示すように海側と山側の杭を基礎ばりで繋いだ杭・基礎一体系モデルを考え、弾性支承ばり理論に基づく応答変位法¹¹⁾¹²⁾を拡張して、側方流動による杭の応力・変形パターンを試算する。この際、上屋からの水平力の影響は無視できるものとし、地盤の側方流動量は液状化層のみで生じ、その鉛直分布は図15に示すような逆三角形、水平分布は図7を参考に、建物海側地表で120cm、建物山側地表で50cmとする。杭に作用する土圧は、地盤と杭の相対水平変位に水平地盤反力係数を乗じたものとし、液状化による間隙水圧上昇および変位増大に伴う非線形効果を考慮する¹³⁾。また杭の曲げ剛性は、その変位が実測値と適合するように低減させて等価線形として扱う。

図16、図17に海側杭・山側杭に対し試算された曲げモーメントと水平変位の深度分布を示す。曲げモーメントが大きくなる箇所は、山側では杭頭部・液状化層下部の2カ所であるが、海側では杭頭部

図16 試算した杭の曲げモーメント分布

図17 試算した杭の水平変位分布

・液状化層中央部・液状化層下部の3カ所である。杭を等価線形材料と仮定したため厳密な議論はできないが、モーメントが相対的に大きな箇所は、実際に水平または斜めクラックがあった部分（図8）および傾斜計調査から曲率が大きいと判定された部分（図14）と対応している。また試算された杭の変形パターンも、図11に示す実測値と調和的である。

算定された杭頭変位と側方流動量との関係から、海側では地盤が杭を押し、山側では杭頭が海側に引っ張られて杭が地盤を押していることが分かる。この結果、海側杭・山側杭の曲げモーメント分布（図16）および破壊・変形モードの違いが生じているものと考えられる。杭体に生じた被害の一部は、上屋からの杭頭水平力などにより生じた可能性もあるが、以上の結果は、杭の最終被害形態が地盤の側方流動に支配されていることを示すものと考えられる。なお、本報では、側方変位の深度分布を逆三角形としたが、1/4波長の余弦関数と仮定してもほぼ同様の結果が得られる。

5. 結論

1995年兵庫県南部地震の液状化による側方流動で被害を受けた杭基礎建物を対象に、内視カメラ・傾斜計による現地調査と航空写真測量を行い、基礎杭の破壊・変形モードと地盤の側方流動量を調べ、さらに応答変位法による試算を行って以下の結論を得た。

- 1) 傾斜計から求めた杭の変位・曲率分布が孔内内視カメラ・航空写真測量調査結果と整合することを確認し、杭の破壊・変形モ

ードの把握に傾斜計調査が有効であることを示した。

- 2) 護岸部の側方流動に伴う杭の破壊・変形モードが海側・山側で異なる場合があり、その原因が海側・山側での側方流動量の違いに起因することを示した。
- 3) 側方流動による杭の応力算定には、海側・山側での地盤の側方流動量の違いを考慮することが必要で、このための簡便な手段として、杭・基礎構造一体系に対する応答変位法が有効であることを示した。

謝辞

本建物の被害調査にあたっては、神戸商船大学施設課牧野郁夫氏のご協力を得た。記して謝意を表す。

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. 10-16, 1995.
- 2) 二木幹夫：建築物の被害－基礎構造および宅地擁壁、建築雑誌、Vol. 110, No. 1377, pp. 30-31, 1995.
- 3) 永井興史郎、建築基礎の掘り出し調査4例、Vol. 23, No. 10, pp. 41-47, 1995.
- 4) 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.
- 5) 兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書、日本建築学会近畿支部基礎構造部会、兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会、400pp., 1996.
- 6) 大岡弘、飯場正紀、阿部秋男、時松孝次：孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物杭基礎の震害調査、土と基礎、Vol. 44, No. 3, pp. 28-30, 1996.
- 7) 社本康広、佐藤正義、二木幹夫、嶋津伸一：埋立て地盤の液状化による杭の変形調査、土と基礎、Vol. 44, No. 3, pp. 25-27, 1996.
- 8) 蕨鉄盛史、中澤明夫：兵庫県南部地震による基礎構造の被害と地盤の等価線形応答解析、第31回地盤工学研究発表会講演集、Vol. 2, pp. 1705-1706, 1996.
- 9) 建築基礎構造設計指針、日本建築学会、430pp., 1988.
- 10) 関西地震観測協議会の記録
- 11) 西村昭彦：地盤変位を考慮した構造物の設計、基礎工、Vol. 6, No. 7, pp. 48-56, 1978.
- 12) 時松孝次、能村商栄：液状化過程における地盤変形が杭の応力に与える影響、日本建築学会構造系論文報告集、No. 426, pp. 107-113, 1991.
- 13) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)、日本建築学会、713pp., 1990.

(1996年9月9日原稿受理、1997年1月21日採用決定)