

護岸近傍に位置する基礎杭の 地震時被害事例

福井 次郎¹・西谷 雅弘¹・中山 学²・板谷 裕次²

¹ 正会員 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ(基礎) (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

² 正会員 (株)奥村組 関西支社 土木技術部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

神戸市東部に位置する東灘処理場では、兵庫県南部地震襲来時に各種構造物に大きな被害が生じた。魚崎運河護岸近傍に位置し、その基礎杭の地中部に大きな被害が生じていることが予測されていた管理本館が、地震後5年半を経過して解体・撤去されることとなった。この機に、杭の地震時挙動や破壊形態を解明することを目的として、杭を掘出して目視調査を含めた各種調査を実施した。調査結果および被害状況を踏まえた数値解析結果により、本調査杭には地震によって大きな荷重が作用し、その後の地盤流動により残留変位が生じたものと推測された。

Key Words: Hyogo-ken Nambu Earthquake, damaged piles, residual displacement, liquefaction

1. まえがき

兵庫県南部地震襲来時に神戸市東部に位置する東灘下水処理場においても、管理本館をはじめとして各種構造物に大きな被害が生じた。その中で、水処理施設(図-1)の撤去・再構築工事に伴い実施した被災杭の調査結果が既に報告されている¹⁾。水処理施設よりもさらに魚崎運河護岸側(離隔距離が約40m)に位置する管理本館では、その基礎杭(PC杭、 $\phi 350$ mm、 $L=27$ m)の頭部に大きな被害が生じていた²⁾が、管理本館が継続使用されたため調査は行われなかった。今回、管理本館が地震後5年半を経過して解体・撤去されることとなったのを機に、地震時の杭の挙動や破壊形態を解明

することを目的として、杭を掘り出し、目視調査を含めた各種調査を実施した。処理場の平面図を図-1に、断面図を図-2に示す。なお、管理本館では、被災後業務を続行するために、調査結果を踏まえ、杭頭部周辺を鉄筋コンクリートで補強する工事を行っている。

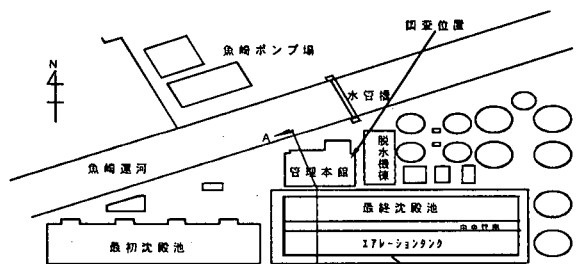


図-1 処理場平面図

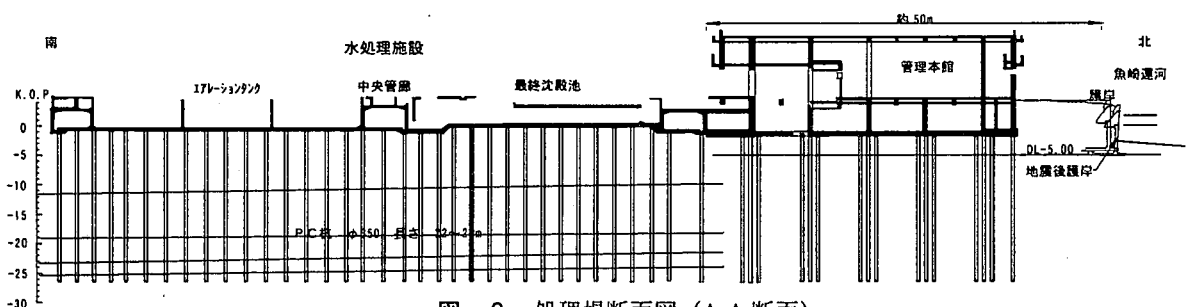


図-2 処理場断面図(A-A断面)

2. 調査概要

図-3に示すように、調査した杭は、管理本館（地上3階建て、一部地下室あり）東側壁部（厚さ1.0m）の基礎で、2本の杭で柱を支える構造になっている。調査にあたっては、2本の杭の周囲を鋼矢板（V型）で締切り、杭頭から約10.5mの深さまで地盤を掘削し、杭の残留変位、損傷状況および周辺の地質状況を中心に調査を行った。残留変位に関する調査では、光波測距儀による三次元測量によって杭の絶対変位を、また、掘削底面以深に対しては挿入式傾斜計によって相対変位を測定した。損傷状況に関する調査では、目視によって損傷状況を観察するとともに、掘削底面以深についてはボアホールカメラを杭内部に挿入して損傷状況を調べた。また、周辺地盤の地質状況調査では、兵庫県南部地震後に本館近くで実施されたボーリング調査の結果、周辺施設の建設工事に際して行なわれたボーリング調査の結果、および埋土層と沖積粘土層との境界を確認するために掘削底面から実施したボーリング調査の結果などを基にして、地質構成および層厚等の推定を行った。さらに、掘削に伴って採取した試料の粒度試験を行った。

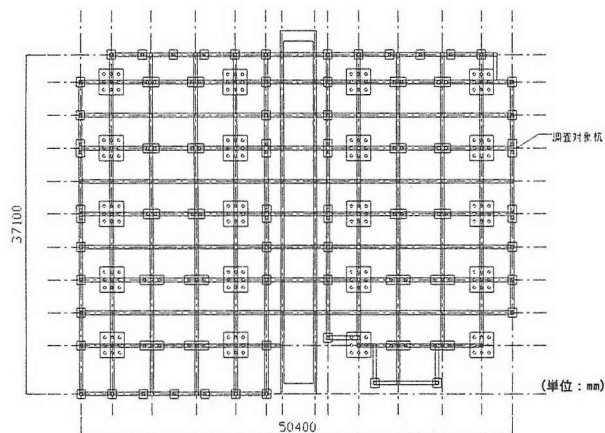


図-3 杭伏図

3. 調査結果

(1) 地質調査

処理場周辺のボーリング調査の結果から、付近地質構成は埋土層、沖積粘土層、洪積粘土層および洪積礫質土層に大別されることが確認できた。埋土層は、全体的に粘土分を含む礫混じりの砂が主体で、層下方には $\phi 15\sim 30\text{mm}$ 程度の礫が点在していた。

沖積粘土層はシルト主体であり、全体的に少量の砂や貝殻片を含み、 $\phi 5\text{mm}$ 程度の礫が混入していた。洪積粘土層は堅いあるいは固結した砂質粘土層であり、 $\phi 10\sim 30\text{mm}$ 程度の礫が混入していた。洪積礫質土層は粗砂主体の堅く締まった層で、 $\phi 30\text{mm}$ 程度以下の礫が混入していた。全体的に概ね均一な積層構造であるが、魚崎運河付近は沖積粘土層が急に薄くなり、傾斜構造になっていると推察される。また、掘削の進行に伴って3箇所で採取した試料について粒度分布試験を実施した。その結果、埋土層は比較的均質で良質なまさ土であることが確認できた。さらに、掘削底面よりボーリング調査を行った結果、本調査箇所においては、杭頭から13.0m程度下の位置に埋土層と沖積粘土層との境界が存在することが確認できた。

(2) 目視調査

目視調査の結果、杭頭(T.P.+1.25m)より3.0~4.5m付近にクラックが確認され、その幅は0.05~0.2mm程度であった。さらに、杭頭から6.5m付近には、約45cmの長さにとわって圧縮破壊が発生(写真-1~2)しており、この圧縮破壊により露出したPC鋼線の多くは屈曲し、中には破断しているものも認められた。

写真-1 圧縮破壊部近景

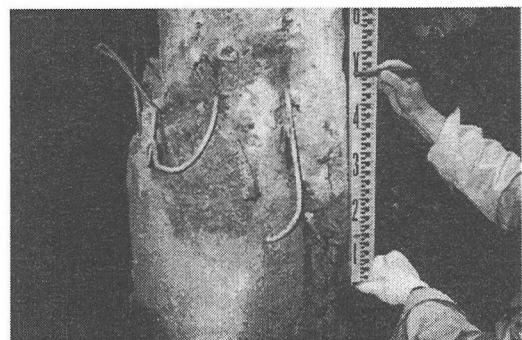
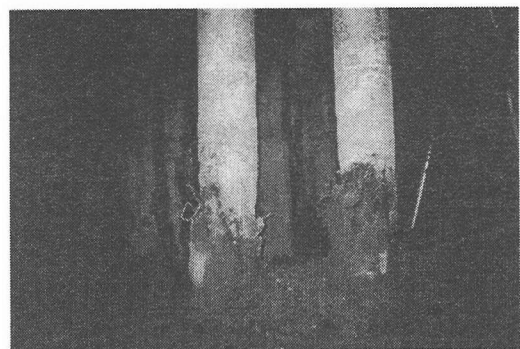


写真-2 圧縮破壊部遠景



(3) 内視調査

内視調査の結果、杭頭より12.6m~12.7m付近で段差のような影が確認された。段差の状況や杭頭からの深度を考慮すると、杭の継手部と考えられる。また、杭頭より12.3m付近では、クラックから漏水しているのが確認された。

(4) 残留変位調査

図-4に杭の残留変位を示す。挿入式傾斜計による掘削底面以深に対する残留変位調査から、杭は埋土層と沖積粘土層との境界よりも上部では、圧縮破壊部で折れ曲がりながら、全体として護岸側に傾斜している。また、圧縮破壊部よりも上部では、圧縮破壊部と杭頭とで相対的に約20cmの残留変位が生じている。この傾斜は、杭の中間部が損傷したのではなく、継手部の目開きによるものと考えられる。ただし、これが施工誤差によるものか、地震時に生じたものかは不明である。また、東西方向については杭先端まで傾斜しているが、これも施工誤差によるものか、地震時に生じたものかは不明である。

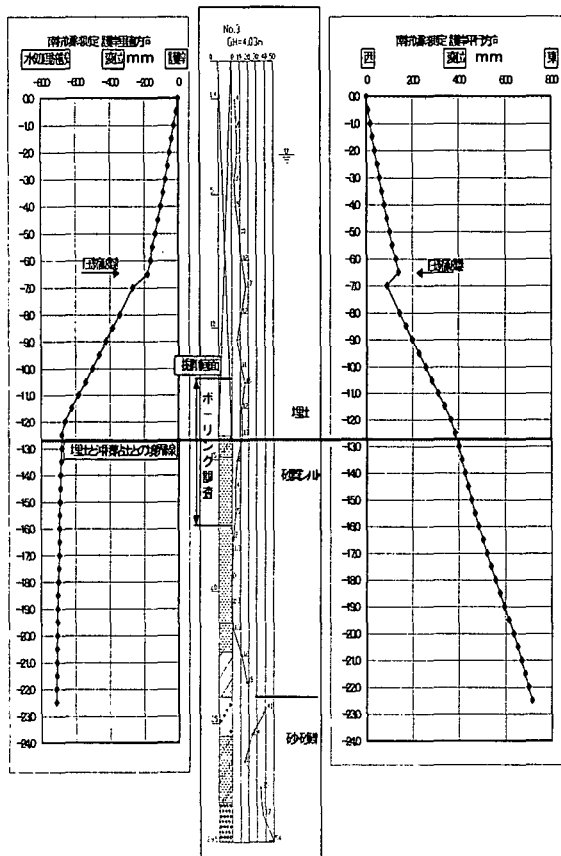


図-4 杭の残留変位 (杭頭に対する相対変位)

4. 地盤・基礎杭解析

(1) 概要

参考文献 1)によると、魚崎運河方向に近いブロックほど大きな残留変位が生じ、被害が大きかったことから、基礎杭は、地盤流動による影響を受けたものと推察される。そこで、地震時の基礎杭の被災状況を把握することを解析により試みた。

解析フローを図-5に示す。

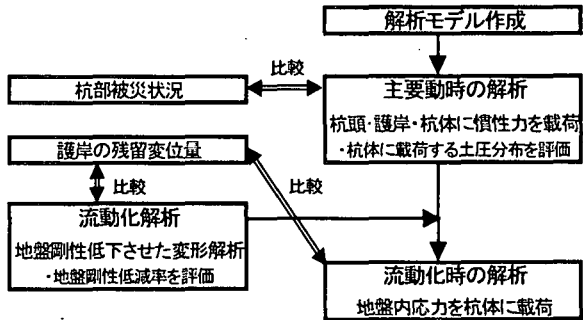


図-5 解析フロー

解析では、杭はトリリニア型の曲げ特性を有するはりとしてモデル化したが、今回掘り出した杭の杭頭から6mの範囲の部分を用いて曲げ試験を行い、その特性を設定した³⁾。曲げ試験の結果を図-6に示す。また、地盤は、調査位置周辺のボーリング調査結果を基にモデル化した。解析に用いた地盤定数を表-1に示す。

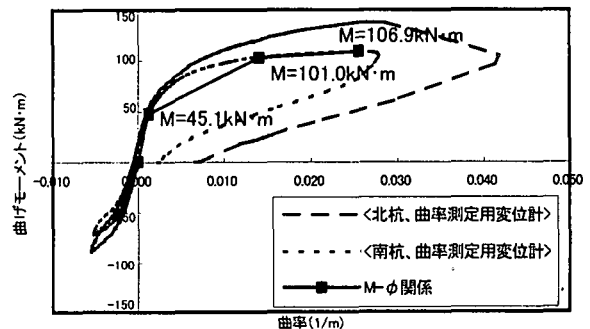


図-6 杭のM-φ関係

表-1 地盤定数

地盤種別	単位体積重量 γ (kN/m^3)	粘着力 c (kN/m^2)	内部 摩擦角 ϕ (degree)	液状化前		液状化後	
				弾性係数 E (kN/m^2)	ポアソン 比 ν	弾性係数 E' (kN/m^2)	ポアソン 比 ν'
埋土層1 (水面上) G.L.-0.0m~2.8m	22.0	0.0	25.0	3000	0.33	300	0.4884
埋土層2 (水面上) G.L.-2.8m~12.2m	22.0	0.0	25.0	3000	0.33	30	0.4962
沖積粘土層 G.L.-12.2m~22.4m	16.5	100.0	0.0	4500	0.40	-	-
沖積粘土層 G.L.-22.4m~28.1m	18.0	200.0	0.0	8700	0.40	-	-
沖積礫質土層 G.L.-28.1m~30.0m	22.0	50.0	35.0	43000	0.33	-	-
基礎砕石	22.0	50.0	35.0	20000	0.33	50	0.4962

(2) 地盤・杭解析

解析は、杭頭部に管理本館の構造図より推定した鉛直荷重 400kN を載荷させた状態で、水平力を 5.0kN きざみで漸増させて行った。また、護岸およびその背面土を合わせた重量に見合う慣性力を護岸の重心位置に作用させた。なお、調査の結果を踏まえ、杭頭部における結合条件はヒンジとした。

一次元有効応力解析の結果、主要動時に間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下が予測された⁴⁾ので、埋土層 2 (表-1、図-7) の変形係数を初期値の 1/6 とした。その結果、水平力 150kN のときに、杭体の発生曲げモーメントが降伏耐力を超えた(図-7)。その発生位置は杭頭から-6.3m となった。次に、液状化に伴う地盤の剛性低下をパラメトリックに変化させて、地盤内応力を流動圧として杭体に載荷して解析した結果、杭体の発生曲げモーメントは終局耐力に達した(図-8)。このとき、剛性低下率は埋土層 1 では 1/10、埋土層 2 では 1/100、基礎砕石では 1/400 であった。護岸の変位は約 2m となり(図-9)、地震後の状況と比較的よく一致した。

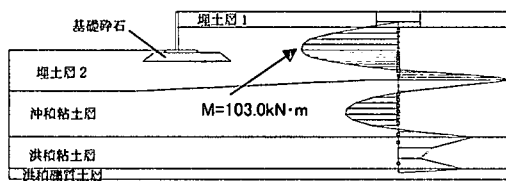


図-7 曲げモーメント図 (水平力 150.0kN 時)

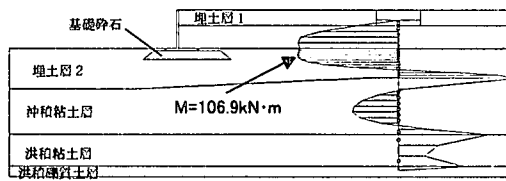


図-8 曲げモーメント図 (液状化後)

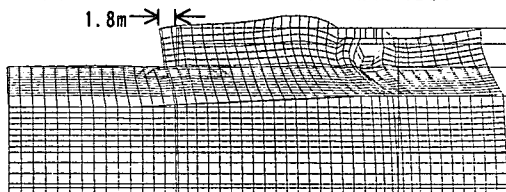


図-9 地盤変位図 (液状化後)

5. 考察

本調査開始前に、図-10 に示す 2ヶ所の基礎杭の杭頭部を調査した。その結果、A点では、杭頭部がフーチングよりも約 20cm 護岸側へ多く移動していたのに対して、B点では、フーチングが杭頭部よりも約 17cm 護岸側へ多く移動していた。すなわち、

A点では、護岸に近いので地盤変位の方が優位となり、フーチングに対して杭頭部が先行して変位した。逆にB点では、慣性力による影響の方が大きく、杭頭部に対してフーチングが先行して変位したものと考えられる。したがって、杭頭部におけるフーチングとの結合状態で回転の拘束度合いが少なかった上に、今回の調査地点はA、B点の中間付近に位置するため、杭頭部における杭とフーチングの変位の相対的な差異が少なかったことも、今回調査を行った基礎杭の杭頭部に損傷が見られなかった原因と推測される。解析結果も踏まえて、以下のような破壊メカニズムを想定した。

①主要動時の液状化に伴い、埋土層の地盤剛性がわずかに低下し、杭頭および杭体に働く地震力(慣性力)によって杭の曲げ耐力に近い曲げモーメントが作用して損傷が生じた。

②護岸の移動に伴って埋土層に流動化現象が生じ、杭体に大きな流動圧が作用して、残留変位が生じた。

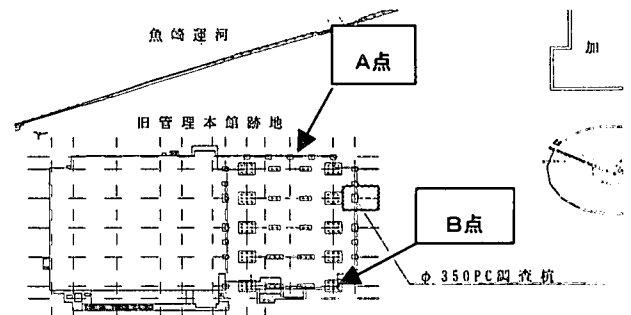


図-10 事前調査位置

6. あとがき

本調査にご協力頂いた神戸市下水道河川部および同東部建設事務所水環境センターの関係各位、PC杭の室内実験にご協力頂いた神戸大学工学部建設学科の三谷勲教授、藤永助手に謝意を表します。

参考文献

- 1) ㈱奥村組：神戸市東灘処理場災害復旧関連建設工事に伴う基礎杭被災状況調査報告書，1997.8
- 2) 神戸市下水道局：阪神・淡路大震災における下水道復旧の記録，平成7年7月
- 3) 藤永隆，三谷勲，大谷恭弘，中山学：兵庫県南部地震で被災したPC杭の被害と構造性能，神戸大学都市安全研究センター平成12年度報告書
- 4) ㈱奥村組：神戸市東灘処理場災害復旧関連建設工事に伴う基礎杭災に関する検討報告書，1998.7