

兵庫県南部地震による下水処理場の 基礎杭に対する一考察

柳原 純夫¹・中井 敏男²・中山 学¹

¹正会員 (株)奥村組本社土木部 (〒545 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²神戸市建設局下水道河川部 (〒650 神戸市中央区加納町6-5-1)

兵庫県南部地震襲来時に多くの下水道施設が被災した。その内、東灘処理場の水処理施設建替え工事の中で、地盤掘削時に旧施設の基礎杭(PC杭φ350mm)の被害を定量的に把握するための調査を実施した。まず、得られた地層構成から、近傍にある被災した護岸を考慮した地盤解析を実施し、調査結果との比較を行った。次に、杭破壊状況等を踏まえ、杭の大変形問題として取り扱った数値シミュレーションによって被害の再現に努めた。その結果、当該地域では地盤剛性に低下は認められるが、噴砂現象を伴った大規模な液化化現象は見られず、基礎杭に地震時慣性力と地盤の地中部の変形分布を考慮した解析結果からほぼ被害状況を表せるとの結論を得た。

key Words: The Great Hanshin Earthquake, Sewage Works, ground deformation, damaged piles
Ultimate Behavior Analysis

1. まえがき

平成7年1月17日未明、突如襲った兵庫県南部地震によって、多くの人命が失われたとともに、未曾有の物的震災が発生した。倒壊した高架橋とともに下水道施設としては大きく、その震害状況を報じられた神戸市の東灘処理場の建て替え工事を実施したところ、地盤掘削の進捗に伴って、既設構造物の基礎杭の被害状況が明らかになってきた。既設構造物を撤去解体した後、震災復旧工事として処理施設を新設するため、24時間の施工体制を堅持しつつ、基礎杭(PC杭)を調査するという特殊事情の下、工事の進行に極力支障なく、基礎杭の被害を定量的に把握するための調査を実施した。その結果を踏まえて、杭の破壊メカニズムを推察するための数値解析を実施した。その結果を、杭調査結果とともに報告する。

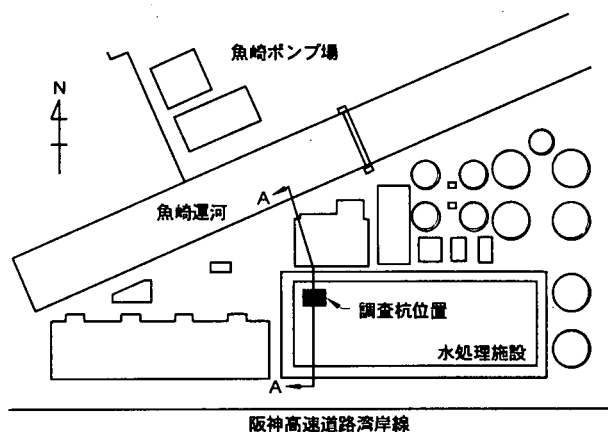


図-1 東灘処理場平面図

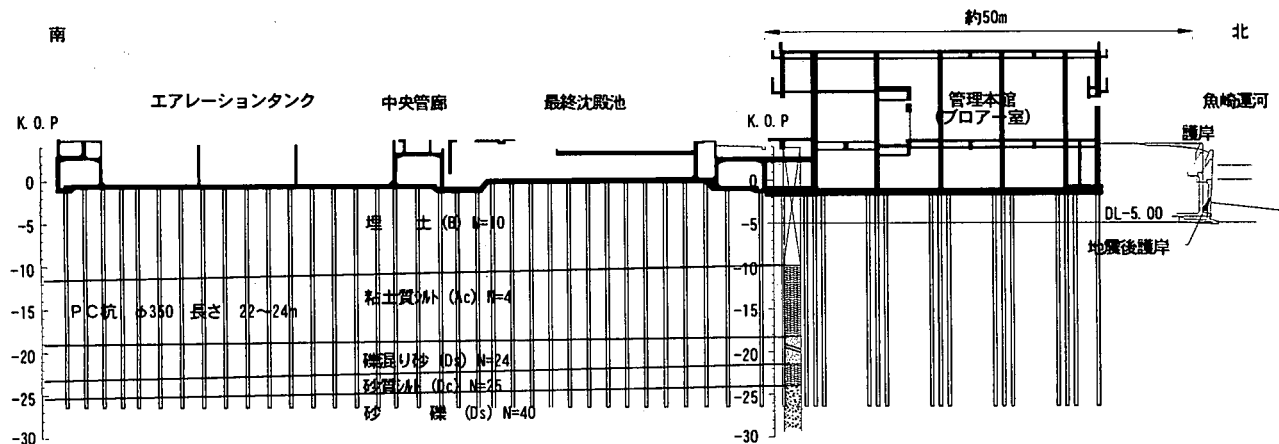


図-2 断面図 (A-A断面)

2. 基礎杭の震害調査結果

当該処理場は神戸市東部の埋立地に立地し、処理場北側の護岸、ポンプ場からの送水渠の破断、汚泥濃縮槽や連絡通路用の橋の基礎等に大きな被害が見られた。また、地震発生後公表された航空写真に基づく地表面における地盤変状報告でも大きな値が示されている。したがって、図-1, 2に示す既設構造物である水処理施設等の基礎杭にも大きな被害が生じているものと判断し、工事に着手した。

地層構成は図-2に示すように、上位より埋土(B)、沖積層(Ac, 海成粘土), 洪積層(Ds, Dc, Dg)となっている。

昭和30年代～40年代にかけて埋め立てられた埋土層は、層厚約10.0mの間で上部5.0mは粘土質シルト、シルト混じり礫等杭の平面的な位置の違いにより種々の土質が確認された。これに対し下部の5.0mでは礫分を含む様な砂層(真砂土)で構成されており、上部の層との境界も明瞭に確認できた。

調査は、水処理施設基礎杭約2000本(PC杭φ350 JIS-A種)のうち56本について実施した。

調査目的は損傷状況、土中の杭変位、周辺地盤状況を把握することである。それぞれの項目について実施した具体的な調査方法を表-1に示す。

杭の損傷状況は、露出した杭の外観(クラック、PC鋼線の破断)の目視を主とし、掘削下端以深(目視できない範囲)は杭中心の空洞にボアホールカメラを挿入し、画像撮影により内側を確認した。

杭の地震後残留変形は、工事区域に三次元座標を設定し、掘削段階毎に測定した杭中心座標をもとに杭のある点を基準とする相対モードとして求めた。

目視による調査等から以下の①～③、3次元計測結果等から④のことがうかがわれる。

表-1 調査方法

調査目的	調査方法	調査項目	調査範囲
損傷状況	外観目視スケッチ	損傷状況	掘削部露出杭
	杭体破壊確認	損傷位置	
	ボアホールカメラ	損傷状況	空洞内全長
		損傷位置	
杭変位	3次元計測	相対変位	掘削段階毎
土質性状	レベル測量	平面的地層境界分布	掘削部全域
	土質目視調査		
	土質試料採取	粒度試験	掘削部任意
	ボーリング	推定土質分布 試料物理試験	処理場全体

① 水処理施設北西部では、杭頭から2.5～3.0mの位置で杭部の破壊があり(写真-1 A)、その他ではほぼ同じ位置でPC鋼線の切断やクラックがあった。この傾向は北側および西側ほどその程度は顕著である。また、ほぼ全基礎杭の杭頭部に0.3mm程度のクラックが認められた。

② 埋土と粘性土層境界で杭の破壊は認められなかったが、層境界上部では2～3本のクラック(写真-1 B)が認められた。なお、北西部では、同様の位置でPC鋼線の破断があった。

③ 埋土層では、層状、脈状に液状化したと思われる痕跡も一部には見られたが、杭打設時の地盤の変形(層状湾曲)状態が層境界付近にあった点も含め、大規模に液状化現象が発生したと判断できる状況は認められなかった。

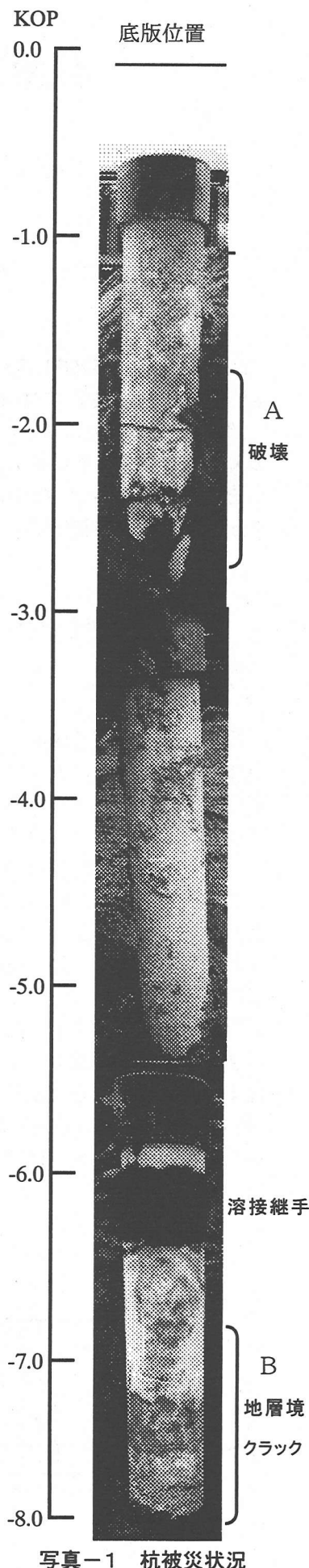


写真-1 杭被災状況

④ 全体的に西方向への変位モードが顕著であり、北西部および南西部では北西方向への変位モードが卓越している。また、中央部、南部では南方向への変位モードも見られる(図-3)。これは、北西部において、約 80 m 離れた護岸の変状(約 3 m)の影響を顕著に受けていると判断できる。

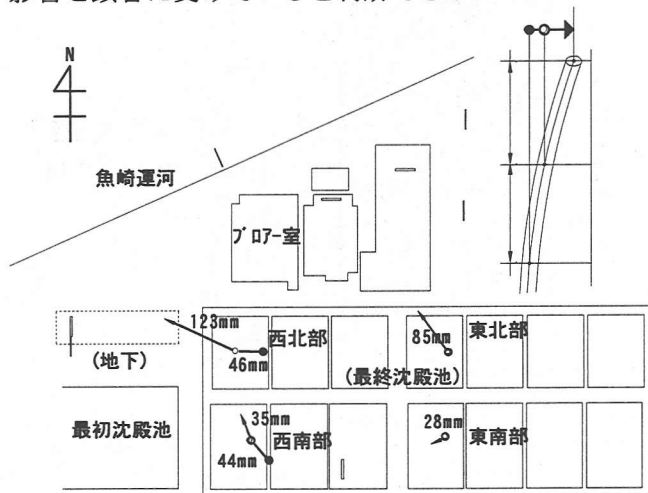


図-3 変位ベクトル図

3. 基礎杭解析

1) 解析概要

以上の基礎杭の調査結果をもとに、破損状況の数値シミュレーションを試みた。すなわち、底版部に水平力を作用させて杭体内に発生する曲げモーメントを求め、杭体の状況について検討した。なお、杭の地中部における変位分布と計算結果との整合性についても検討を加えた。解析コードには、木村らが開発した3次元弾塑性解析有限要素法(GPILE-3D)を用いた。

2) 解析手法

調査結果より、被災した杭の多くは大きな変形をしたものと判断した。大変形領域では、杭は強い非線形性を示すものと考えられる。そこで、本解析では、図-4に示すような軸力に応じたクラック、降伏、極限の3段階のトリリニアモデルのM-φ曲線

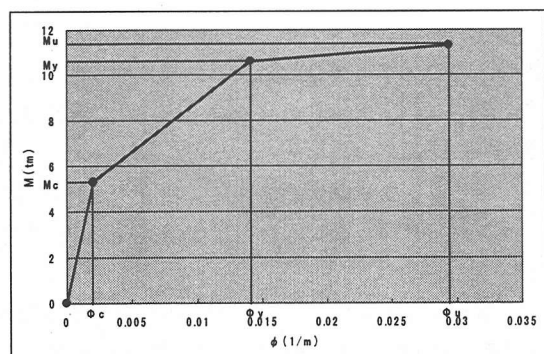


図-4 M-φ曲線図 (N=40 tf)

を設定した。

また、地盤の非線形性は、応力～ひずみ関係を双曲線で近似した Duncan-Chang モデルで表した。

3) 解析条件

解析は図-5のような接点数 3230、要素数 2592 の単杭モデルで行い、杭体はトリリニア型の曲げ剛性が等価な密実体と仮定し、ソリッド要素とビーム要素の集合体とした。なお、杭の弾性係数の1割をソリッド要素に、9割を梁要素に負担させるようにモデル化した。また、調査結果から以下の2点が確認されているので、底版には側方の拘束力は作用しておらず、底版直下の地盤との間には剛性の小さなダミー要素を入れた。

①底版の直下に空隙があったこと

②底版と底版との間に設置されていた伸縮材にひずみは集中し、伸縮材に囲まれた底版は様々な方向に変位している。

また、地盤条件を表-2に示す。なお、解析には回転拘束の有無をパラメータとした。

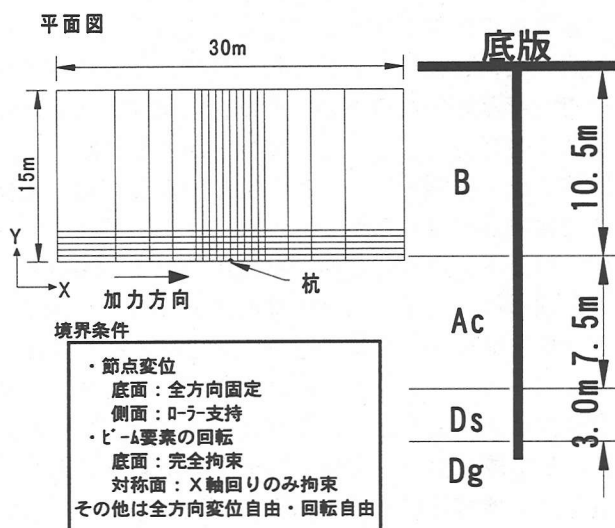


図-5 解析モデル図

表-2 解析に用いた地盤定数

地盤種別	γ	C	ϕ	E
埋土	2.20	0.0	25	30
沖積粘土	1.65	6.0	0	45
洪積砂	2.00	0.0	30	58
洪積砂礫	2.20	5.0	35	430

γ (tf/m³), C (tf/m²), ϕ (degree), E (kgf/cm²)

N=40tf の場合の $M_c = 4.7$ (tf·m)

$M_y = 9.9$ (tf·m), $M_u = 10.4$ (tf·m)

4) 解析結果

結果を図-6, 7に示す。これから以下のことがうかがえる。なお、軸力は設計荷重の 40 tf とした。

①杭頭部の回転拘束が有る場合、最大曲げモーメントが発生する位置は杭頭部であり、 M_u を超えた値となる。一方、回転拘束がない場合、最大曲げモーメントが発生する位置はほぼ底版下 2.0 m 前後であり、その値は M_y を超えて M_u に近い。

②計測された杭の地中変位分布と比較すると、杭頭部付近は計測値がないので予想の域を出ないがほぼ整合性は認められると判断できる。

したがって、杭の被災状況から判断すると、実際の杭と底版の結合は、杭頭部の回転をある程度許した状態になっており、今回の解析ではほぼ被災状況を近似していると思われる。また、杭周辺地盤も降伏領域に達しており、1/10程度の地盤の剛性低下が予想される。

4. あとがき

基礎杭の震害事例としては多く報告されているが、被災した杭を掘出したのは新潟地震の際の事例ぐらいでさほど見あたらない。本調査では対象とした杭本数は絶対量として不足しているかもしれないが、24時間施工体制下における震災調査としては、全体を把握するに足りる程度と考えている。現在検討されている下水道施設に関する検討委員会の答申内容とも関連付けながら、今後は被害調査および地盤調査結果を踏まえた土質特性を考慮した大変形領域での数値シミュレーションによる検討で、杭単体に地中変位を強制変位として作用させた場合や杭体を群杭として取り扱い、同様の解析を実施することによって巨大地震時における基礎杭の破壊メカニズムの解明を行う予定である。

謝辞：調査には、奥村・三井・東亜JVの姫野所長はじめ職員の方々の協力を得、杭解析にあたっては京都大学木村亮助教授に貴重な助言を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 古関 潤一：基礎構造物の事例(1)土木分野、地盤工学会、P. 54～P. 68、平成8年11月
- 2) 小西 誠：東灘下水処理場杭基礎の被害と補強、基礎工 Vol. 24, No. 10, P. 88～P. 93, 1996. 10
- 3) 濱田ら：1995年兵庫県南部地震における液状化、地盤の永久変位、地盤条件、(財)地震予知総合研究振興会、1995. 9
- 4) 足立 紀尚ら：3次元弾塑性FEMによる実杭大変形

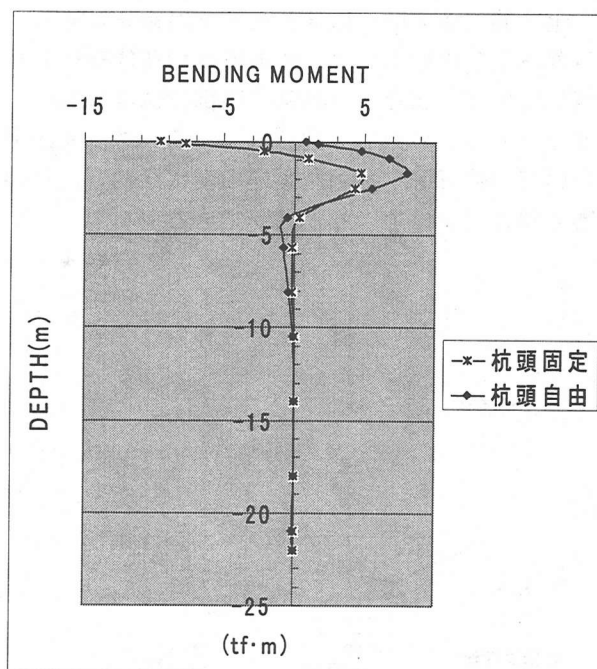


図-6 曲げモーメント図

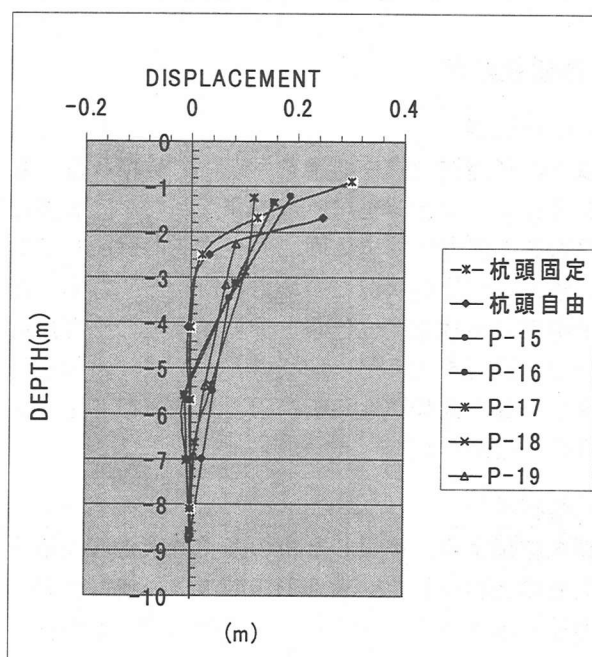


図-7 変位図

水平載荷試験に関する挙動解析、基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp 215～222, 1995

5) 竹中 恭三ら：兵庫県南部地震による下水処理場基礎杭の被害事例(速報)、第32回地盤工学研究発表会(投稿中)、1998

6) 中山 学ら：兵庫県南部地震による下水処理場基礎杭の被害事例、第52回年次学術講演会(投稿中)、土木学会、1998