

兵庫県南部地震により被災した既製杭の 地盤流動による損傷メカニズムの一考察

¹ 立石章・¹ 大矢敏雄・¹ 名合牧人・² 大津宏康・³ 堀越研一

¹ 正会員 工修 大成建設土木設計計画部 (〒163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

² 正会員 工博 大成建設土木設計計画部 (〒163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

³ 正会員 Ph.D. 大成建設技術研究所 (〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

兵庫県南部地震の後上部工のない既製杭を調査した結果、砂層の境界で破損していることが判明した。そこで、本研究では、その損傷メカニズムを地盤流動との関連で解析的に検討した。解析は、対象とする既製杭が予め地震中に液状化を伴う震動により破損していた可能性があるとして、損傷程度を損傷なし、ひび割れ、降伏の3段階を想定し、異なる砂層の液状化程度をパラメータとして、地盤流動による流動変位または流動力を静的に作用させた。結果として、既往の基準より小さい流動力により被災した杭の残留変形モードが得られた。

Key Words : lateral spreading, liquefaction, single pile, earthquake damage, simulation analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震による構造物基礎の被害事例が数多く報告され、中でも液状化による地盤流動が原因と見られる杭基礎の被災事例が特徴的である。著者らが阪神地区の埋立地において調査した既製杭についても、液状化およびこれに伴う地盤流動が原因と見られる損傷が見つかった¹⁾。この杭が液状化を伴う震動によりどの程度損傷するかについては解析的検討を試みている²⁾。

本研究では、損傷の見つかった杭が地盤流動によりどのような外力を受けて損傷に至ったかを推定するため、解析的検討を実施した。ここに、対象とする杭の特徴的な点は、被災時に上部工がなかったため、通常の耐震設計で考慮される上部工の慣性力の影響がなく、地盤からの外力のみで損傷したことである。

2. 杭の被災状況

(1) 調査地点の地盤状況と杭の構造

調査地点は、図-1 に示したようにまさ土による埋立地内の護岸から約 350m 以上離れた位置にある。濱田らによる地震前後の航空写真測量結果³⁾では、護岸の水平移動が西岸で 3.0~4.4m、南岸で 2.5~4.0m 護岸法線方向に

生じており、残留変位は調査地点まで連続的に分布していて、調査地点では 0.8~1.2m の残留変位が南西の方向に発生している。

対象とした杭の構造と杭周辺の地盤状況を図-2 に示す。周辺地盤は、GL-14 m 程度までが砂礫層、礫混中砂、礫混粗砂からなる埋立層で、その下に沖積のシルト質粘土層、洪積粘土層と洪積砂礫層の互層、という層序で続いており、地下水位は GL-2m 付近である。杭は、3本継ぎ構造で、上杭は鋼管巻き PC 杭 (SC 杭)、中杭と下杭は PHC 杭で、杭先端は N 値 30 前後の洪積砂礫層に打ち込まれ、杭頭は地表面下約 0.3~2.0m の位置にあった。

(2) 杭の調査結果

調査地点の杭 111 本すべてに対して実施したインテグリティテストの結果から、破損の可能性の高い 8 本の杭について CCD カメラによる杭内部の撮影を行い、その中の 7 本の杭には傾斜計による曲がり測定を実施した。カメラ撮影による杭の損傷位置を図-3 に、傾斜計による杭の残留変位分布を図-4 に、7本の杭の杭頭の地震前からの残留変位を図-5 に示す。

特徴的な点は、カメラ撮影した 8 本のすべての杭で、礫混中砂と礫混粗砂の境界付近 (GL-7~8m 付近) で破砕状態のクラックが認められること、C 杭については

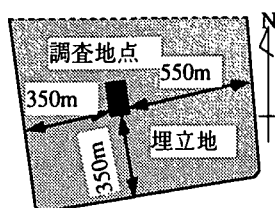


図-1 埋立地内の調査地点位置

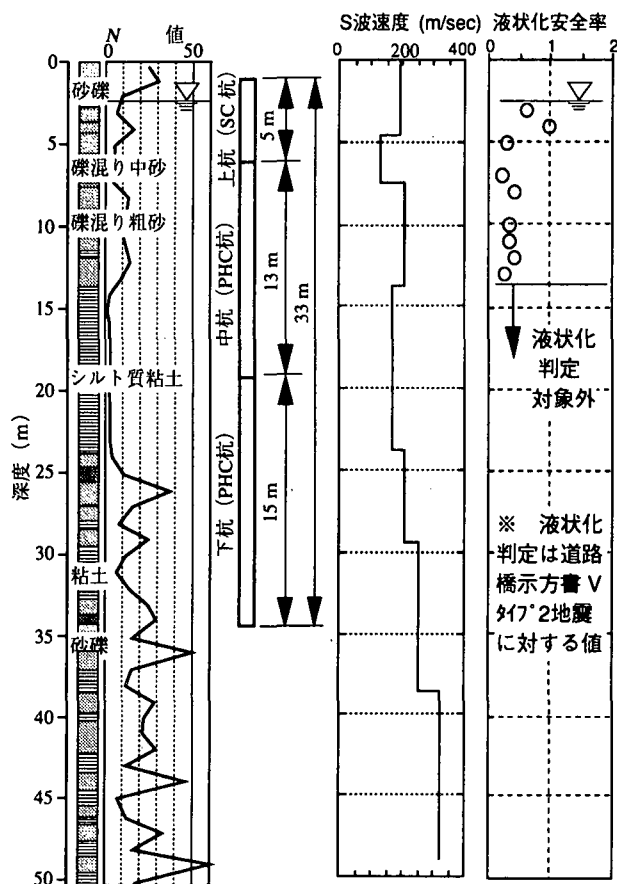


図-2 検討対象とした杭の構造と周辺の地盤状況

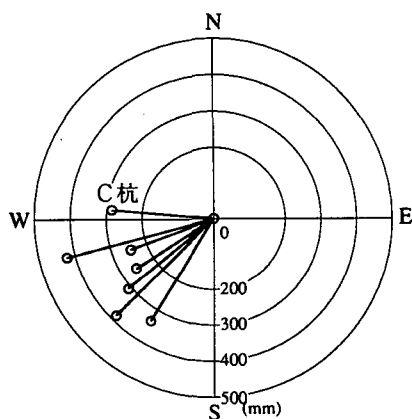


図-5 傾斜計による杭頭の地震前からの残留変位

残留変位分布から GL-7.5m の礫混中砂と礫混粗砂の境界付近で大きな折れ曲がりがあり、カメラ撮影の損傷と対応していること、7本の杭の杭頭は南西から西方向に0.25～0.42mの残留変位が生じており、濱田らによる残留変位の方向と概ね一致しているこ

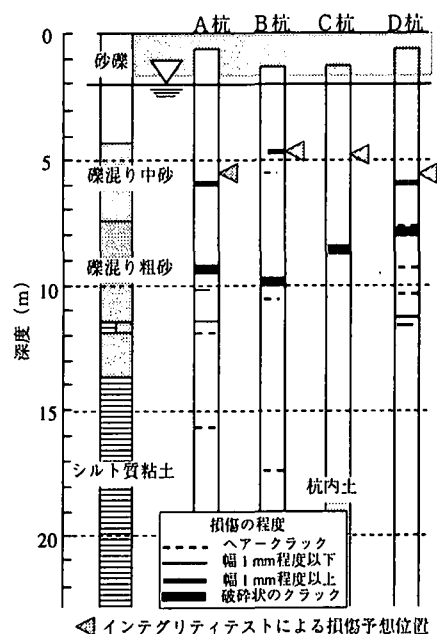


図-3 カメラ撮影による杭の損傷位置

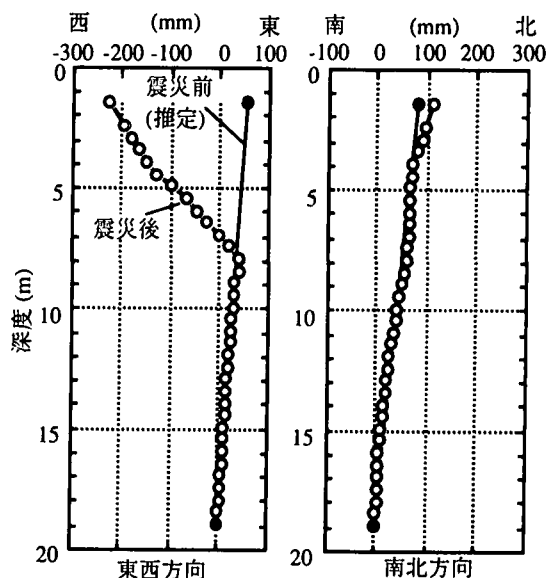


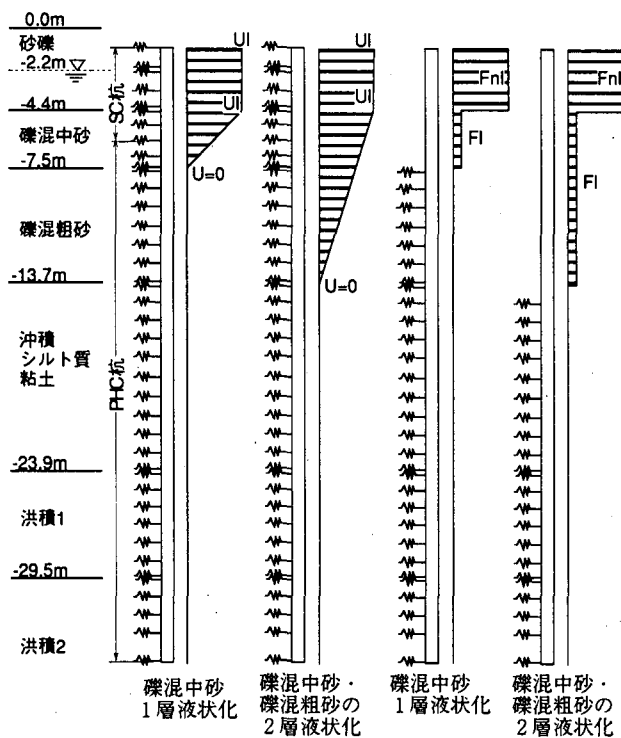
図-4 傾斜計による杭の残留変位 (C 杭)

と、である。

3. 地盤流動解析のパラメトリックスタディ

(1) 解析方針

1) 地盤流動による検討は、震動により杭がどの程度損傷したかを推定したあと実施することが必要である。しかし、兵庫県南部地震における主たる震動の方向は強震記録より北北東～南南西方向であるのに対し、対象とした杭周辺地盤および杭の残留変位がこれとほぼ直交する南西から西方向であることから、杭－地盤系の震動解析として3次元解析が必要となり難しい。そこで、本検討では地盤流動発生時点で



a) 流動変位解析モデル b) 流動力解析モデル
図-6 地盤流動解析モデル

の地盤震動変位による杭の損傷程度を3段階想定して、その影響を調べることにする。

2) 杭周辺地盤の液状化は、図-3に併記した道路橋示方書Ⅴ耐震設計編(平成8年12月)(以下新道示Ⅴと呼ぶ)によるタイプ2地震動に対する液状化判定結果から、礫混中砂と礫混粗砂においてその発生の可能性が高い。しかし杭の損傷状況から礫混中砂のみで地盤流動が発生した可能性も考えられる。そこで、礫混中砂1層液状化のパターンと、礫混中砂と礫混粗砂の2層液状化のパターンの解析を行う。

3) 地盤流動の解析は、杭を梁、地盤をばねでモデル化し、地盤流動による変位を地盤ばねを介して作用させる解析(流動変位解析)⁴⁾⁵⁾と、新道示Ⅴで採用されている地盤流動による力を作用させる解析(流動力解析)の、2種類の解析を実施する。解析では、主たる地盤震動が終了したあと地盤流動が発生したと考え、地盤流動による外力のみを作用させた静的解析を行う。

(2) 解析条件

a) 解析モデル

流動解析モデルと作用荷重分布を図-6に示す。

b) 杭の構造

杭のM- ϕ 関係を表-1に示す。杭は、M- ϕ 関係をtilinearモデルにより表す。地盤震動変位による損傷は、

表-1 杭の断面諸元とM- ϕ 関係

	断面諸元		M (tf/m)	ϕ (1/m)
SC杭	外径 500mm	ひび割れ	40	4.4×10^{-3}
	内径 315mm	降伏	50	1.0×10^{-2}
	鋼管肉厚 7mm	終局	53	3.0×10^{-2}
PHC杭 (A種)	外径 500mm	ひび割れ	6	6.6×10^{-4}
	内径 340mm	降伏	14	9.0×10^{-3}
	PC鋼材 $\phi 9.2 \times 9$ 本	終局	16	3.0×10^{-2}

表-2 杭周辺地盤の物性値および

地盤流動時の有効拘束圧低下率

層下端 深度 GL-m	土質名	平均 N値	S波 速度 (m/sec)	地盤流動時の 有効拘束圧低下率	
				礫混中砂 1層液状化	礫混中砂/粗砂 2層液状化
-2.2		22	190	1.00	1.00
-4.4	砂礫	12	190	0.25	0.25
-7.5	礫混中砂	5	130	0.01	0.01
-13.7	礫混粗砂	12	210	0.25	0.01
-23.9	シルト質粘土	3	170	1.00	1.00
-29.5	粘土/砂礫	17	210	1.00	1.00
-38.5	の互層	19	250	1.00	1.00

* 地盤ばねの有効拘束圧依存性

Ko: 有効拘束圧の0.5乗に比例、Pf: 有効拘束圧に比例

表-3 杭頭変位40cm発生時の地盤流動解析結果

	流動変位解析		流動力解析	
	礫混中砂 1層液状化	礫混中砂/粗砂 2層液状化	礫混中砂 1層液状化	礫混中砂/粗砂 2層液状化
損傷なし	U1 = 35 cm	U1 = 39 cm	Fnl = 2.0 tf/m ²	Fnl = 0.6 tf/m ²
ひび割れ	U1 = 35 cm	U1 = 39 cm	Fnl = 1.6 tf/m ²	Fnl = 0.6 tf/m ²
降伏	U1 = 35 cm	U1 = 39 cm	Fnl = 0.9 tf/m ²	Fnl = 0.4 tf/m ²

礫混中砂と礫混粗砂の境界の要素で発生したものとし、その損傷程度を損傷なし、ひび割れ、降伏の3ケースとして、当該要素ではtilinearモデル上の各ケースの損傷程度に対応した位置にあるとして地盤流動解析を始める。

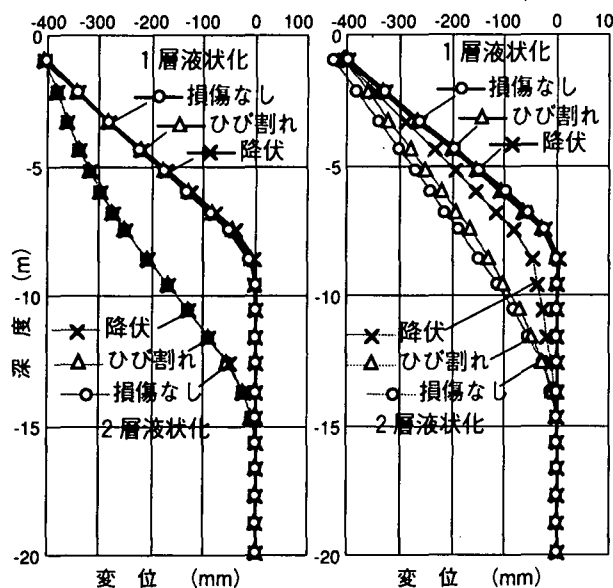
c) 地盤ばね

杭周辺地盤の基本地盤物性値を表-2に示す。地盤ばねは初期地盤ばね定数Koと極限地盤ばね反力PfからなるH-Dモデルで表す。KoおよびPfは、道路橋示方書Ⅳ下部構造編(平成8年12月)における保有水平耐力用の杭の地盤反力係数と極限地盤反力より与えるが、地盤流動発生時点での液状化による有効拘束圧の低下率に応じて低減する。液状化による有効拘束圧の低下率は、図-3の液状化判定および著者らの有効応力解析結果²⁾を参考に、表-2に示したように仮定した。

d) 入力荷重

流動変位解析に用いる変位分布は、非液状化層で一様、液状化層で線形とする台形分布とする⁴⁾⁵⁾。(図-6)

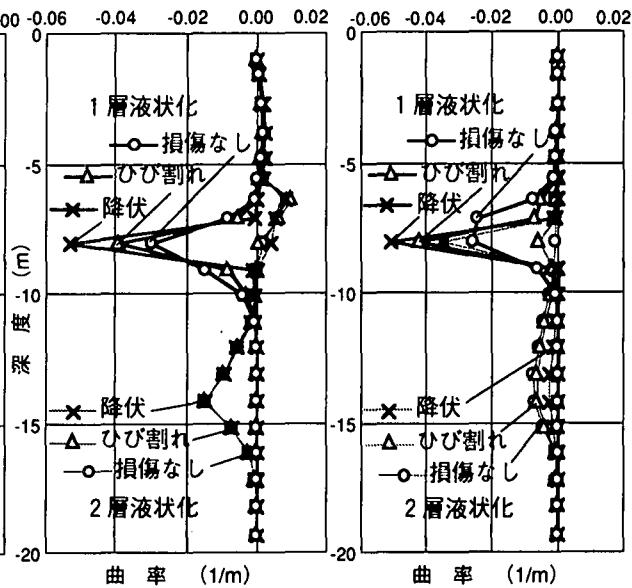
流動力解析に用いる圧力分布は、本検討では簡単のため液状化層、非液状化層とも一様分布とする。液状化層と非液状化層の作用圧力の比率は、新道示Ⅴによる流動圧力を参考に、5対1とする。(図-6)



a) 流動変位解析

b) 流動力解析

図-7 杭頭変位 40cm 発生時の杭の変位分布



a) 流動変位解析

b) 流動力解析

図-8 杭頭変位 40cm 発生時の杭の曲率分布

(3) 解析結果

解析結果は、流動変位解析、流動力解析とも、杭頭変位が 40cm となった時点ですべて整理し、作用変位および作用圧力を表-3 に、杭の変位分布を図-7 に、杭の曲率分布を図-8 に示す。図表より以下のことがわかる。

1) 杭の変位分布が傾斜計による残留変位分布と一致するのは、流動変位解析、流動力解析ともに、礫混中砂 1 層液状化のパターンの 3 ケースであり、その 3 ケースの杭の曲率分布を見ると、いずれの解析でも杭の損傷程度がひび割れまたは降伏のケースで終局曲率 $0.03(1/m)$ を上回っていて、カメラ撮影による損傷程度に対応する。

2) 流動変位解析結果において、杭頭 40cm 変位時の入力変位は、液状化層のパターン、杭の損傷程度に関係なく $U=35\sim39\text{cm}$ で、対象とした杭より 50m 離れた道路における濱田らによる航空写真測量結果 $80\sim120\text{cm}$ より小さい。濱田らの結果には、断層運動に伴う基盤変位あるいは広域的な地盤の移動として南西方向に 20cm の変位が含まれているという見方もあり、航空写真測量の精度も関係して、解析結果との違いには検討を要する。

3) 流動力解析結果において、杭頭 40cm 変位時の作用圧力は、礫混中砂 1 層液状化のパターンでは $F_{nl} = 1.98\sim0.88 \text{ t/m}^2$ で、震動による損傷がひどいほど作用圧力は小さくなる。新道示 V により設計用流動圧力を求めると、水際線からの距離による補正係数 C_s を 1.0 としたとき、平均で $F_{nl} = 24.6 \text{ t/m}^2$ 、 $F_l = 4.7 \text{ t/m}^2$ となる。新道示 V による流動圧力は杭が震動により損傷しないことを前提としていることから⁹⁾、損傷なしの解析結果と比較すると解析結果は新道示 V の $8.0/100$ と小さい。この違いは C_s が $8.0/100$ と考えることもできる。

4. おわりに

兵庫県南部地震により被災した既製杭の地盤流動による損傷メカニズムを、杭の残留変位および損傷程度を現地調査結果と流動解析結果とを比較して考察した。

今後は、対象とする杭が周辺地盤の液状化を伴う震動によりどの程度損傷したかを詳細に検討するとともに、遠心模型実験のシミュレーションを通して地盤流動の設計手法を検討していく予定である。

参考文献

- 堀越研一，大津宏康，末岡徹，亀村勝美：1995 兵庫県南部地震によって被災した杭の詳細調査”，大成建設技術研究所報，第 29 号，pp. 59-64，1996。
- 大津宏康，羽出山吉裕，立石章，堀越研一：兵庫県南部地震により被災した既製杭の破損メカニズムに関する一考察，第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会，pp.127-134，1997。
- 濱田政則，磯山龍二，若松加寿江：1995 年兵庫県南部地震 液状化，地盤変位および地盤条件，（財）地震予知総合研究振興会，1995。
- Miura F., Stewart H.E. and O'Rourke T.D.: The effects of liquefaction-induced lateral spreading on pile foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.10, No.5, pp.271-279, 1991.
- （財）地震予知総合研究振興会：一日米共同研究—地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究，昭和 63 年度調査・研究報告書，pp.633-683，1989。
- 田村敬一，濱田禎，東拓生：流動化に対する道路橋の耐震設計，建設書土木研究所土木技術資料 39-2，pp.26-31，1997。