埋立て地における地盤と杭基礎の地震被害調査

INVESTIGATION OF EARTH-QUAKE-INDUCED DAMAGE TO SOIL AND PILE FOUNDATION ON RECLAIMED LAND

鈴木康嗣 — *1
安達直人 — *2
笹尾 光 — *3

二木幹夫 — *4
嶋津伸一 — *5

Yasutsugu SUZUKI
Naohito ADACHI
Hikari SASAO

Mikio FUTAKI
Shin-ichi SHIMAZU

*1

*2

*3

*4

*5

An investigation of pile foundation damage in the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake is presented. To clarify the degree of damage and effect of pile arrangement, 11 piles were examined with three methods i.e. integrity test, inner observation by borehole camera and lateral displacement measurement by inclinometer. And to correlate the pile damage with soil conditions, a standard penetration test and 11 cone penetration tests were conducted. It was found that the damage to pile foundations was caused by (1) both strong ground shaking and ground failures including liquefaction and lateral spreading, (2) pile arrangement, and (3) local soil conditions.

キーワード:

埋立て地, 液状化, 杭基礎, 地震被害, 調査, コーン貫入試験

Keywords:

Reclaimed land, Liquefaction, Pile foundation, Earthquake damage, Investigation, Cone penetration test

1 はじめに

兵庫県南部地震では、臨海部の広い範囲で地盤の液状化や側方流動が発生し、多くの構造物基礎に甚大なる被害をもたらした。基礎の被害は目視による確認が容易でないためその実体が明らかになっていない部分が多いが、各研究機関の努力により調査事例が公表されてきている^{1), 2)}。杭基礎の被害調査では孔中内視カメラによる破壊状況の観察と傾斜計等による変形測定が重要であるが、杭内部に測定装置を挿入する必要があるため、多数本の調査を行うには多大の費用と労力がかかる。従って、1建物で2本程度の調査^{1), 2)}が一般的である。

筆者らは、震災により取壊しを余儀なくされた杭基礎構造物の被害調査を実施する機会を得た。被害調査はフーチング解体後に行ったため、多数本の調査が比較的容易に実施できた。そこで、建物の隅角部と内部の杭被害の相違や主構造物と付属構造物の被害の相違などを明らかにするために11本の杭について調査を行った。また、敷地が埋立て地で地盤がかなり不均一であることが予測されたので、11本の調査杭に対応する位置で地盤調査を行い、被害と地盤との対応を検討した。本報は、被害調査と地盤調査結果について報告するもので詳細な検討は今後行う予定である。

2 調査地および調査建物

調査対象は、神戸市灘区摩耶埠頭の臨海部埋立て地盤上に位置する昭和42年に建設された鉄筋コンクリート造3階建て（一部平屋建て）の杭基礎構造物である。調査地は図1に示すように、摩耶埠頭の中心部に位置し、最も近い南東側の護岸から約50m、北側の護岸から約250m離れた位置にある。この地域は、兵庫県南部地震で噴砂が生じ、周辺地盤が50cm程度沈下するとともに、航空写真測量により側方流動と考えられる50cm程度の地表の水平変位が測定されている³⁾。

図1 調査位置図

*1 鹿島技術研究所 主任研究員・工修
(〒182 調布市飛田給2-19-1)

*2 鹿島技術研究所 研究員

*3 鹿島技術研究所 専門部長・工博

*4 建設省建築研究所 室長・工博

*5 建設省近畿地方建設局 構造係長

*1 Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, M. Eng.

*2 Research Engineer, Kajima Technical Research Institute

*3 Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

*4 Manager, Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.

*5 Chief Clerk, Kinki Regional Construction Bureau, Ministry of Construction

地震直後の被害調査から、液状化に起因した地盤沈下によって当該建物と周辺地盤との間に20～40cm程度の段差が認められるとともに、当該建物の北側の3階建て部分が北方向に約0.6度、西方向に約0.7度の傾斜を生じ、3階建て部分で最も沈下が著しかった北西の隅では最も沈下が少なかった南東の隅に対して相対的に14.4cm沈下していた。また、上部構造物は北側の3階建て部分（以後中層部と呼ぶ）に比べて南側の平屋建て部分（以後低層部と呼ぶ）の被害が著しかった。

基礎伏図および被害調査・地盤調査位置を図2に示す。杭は外径 ϕ 500mm（内径 ϕ 310mm）および外径 ϕ 350mm（内径 ϕ 210mm）のP C杭（一部P R C杭）で、ディーゼルハンマーにより支持層に打込まれている。地中障害物があって打込めない杭があったため一部で増杭をしているが、調査した杭は全てフーチング下端から17～18mの洪積砂層まで打ち込まれたものである。

3 調査概要

調査項目を表1に示す。杭の被害調査として弾性波非破壊試験（以後I T試験と呼ぶ）による杭の損傷度調査、孔中内視カメラによる破壊状況の観察、孔内傾斜計による杭の変形測定を実施した。また、地盤調査として標準貫入試験（SPT-1）を1カ所行うとともに

図2 基礎伏せおよび被害調査・地盤調査位置図

表1 杭の調査項目一覧

杭番号	位置	杭径 (mm)	杭長 (m)	フーチング下端 深さ (m)*1	孔中内視測定 深さ (m)*1	傾斜計測定 深さ (m)*1	コン貫入 試験番号	コン貫入試験 深さ (m)*1
No.1	中層部	500	18.0	1.55	11.9	11.4	CPT-01	24.8
No.2		500	17.0		14.6	13.8	CPT-02	21.1
No.3		500	18.0		9.8	9.3	CPT-03	18.5
No.4		500	18.0		9.2	9.2	CPT-04	9.5
No.5		500	17.0		10.4	10.1	—	—
No.6		500	17.0		6.9	6.9	CPT-06	16.2
No.7		500	17.0		9.9	9.4	CPT-07	16.2
No.8		500	18.0		12.4	12.1	CPT-08	17.1
No.9	低層部	350	18.0	0.9	4.0 *2	4.2 *2	CPT-09	10.8
No.10		350	18.0		10.2	3.6 *3	CPT-10	16.7
No.11		350	18.0		10.3	3.6 *3	CPT-11	20.4

*1 フーチング下端および測定深さは、震災前のGLからの深さで表わしている。

*2 杭孔内洗浄時にGL-10mの破壊を確認したが、再度土砂が侵入したため測定できなかった。

*3 杭が破断していたため、傾斜計の挿入ができなかった。

に、調査杭位置に対応した位置で3成分コーン貫入試験（CPT-01～12）を実施した。ただし、調査杭No.5地点にはGL-3m付近に旧構造物基礎と考えられるコンクリートがあったため、コーン貫入試験は実施していない。

杭の被害調査は、まず上部構造物解体後にフーチング周りを掘削し、杭頭付近の被害状況を目視により確認した。次にフーチングを撤去し、破壊された杭頭部を除去した後、杭孔内の洗浄を行った。その後、上記3種類の被害調査を実施した。当該建物は昭和41年の設計であるため、水平力が設計外力として考慮されておらずフーチングと杭の接合は図3に示すように水平力を伝達させるようにはなっていない。このことは、フーチングを撤去した際にフーチング内に埋込まれていた杭のP C鋼線が抜け出して髭のように残っていたことから確認されている。なお、フーチング撤去時に全ての杭頭部が写真1に示すように破壊していた。また、杭頭部の破壊によって生じたと考えられるコンクリート塊が杭孔内の洗浄により出てきたが、全てのコンクリート塊を取り除くことはできなかった。そのため、調査を行った11本全ての杭で設計上の杭長までの洗浄はできなかった。

4 調査結果

4.1 地盤調査結果

震災後の地盤において実施したボーリングと3成分コーン貫入試験結果を基に、震災前に行われていた8カ所のボーリング結果も考慮して作成した地盤断面図を図4に示す。3成分コーン貫入試験結果からは先端抵抗と周面摩擦抵抗を用いて文献⁴⁾に示されている

図3 基礎断面図

写真1 杭頭の被災状況

図4 敷地地盤断面図（東西断面）

土質区分指数 I_c に従って土質分類を行い、ボーリング調査結果の土質柱状図との対比から土質を判断し断面図を作成した。また、ここで求めた土質区分指数 I_c と細粒分含有率 FC との関係⁵⁾、および3成分コーン貫入試験の先端抵抗 q_c と標準貫入試験の N 値との比 q_c/N と FC との関係⁶⁾ から、3成分コーン貫入試験結果を N 値に換算している。深度約14m以浅の埋立地盤には、敷地の南西側から中央付近に粘性土層が存在し、北東側に玉石混り砂礫（旧柱状図の一部には転石と標記）が存在すること、同じ砂礫層（まき土）でも敷地東側ほどその N 値が大きいこと等、かなり異なった地盤構成をしていることが分かる。

摩耶埠頭の埋立の歴史⁷⁾によると、埋立土には4カ所の山（鶴

甲山、高倉山、天神山、勝岡山）からの土砂、港内の浚渫土、市内の工事現場で発生した土砂（良質なものの）、および市中廃土が用いられている。本敷地付近の埋立時期には上記の全ての土が用いられている。敷地内でかなり異なった地盤構成をしているのはこの様に多種多様な埋立土を用いたためである。

4.2 杭の被害調査結果

杭の被害調査結果の一覧を表2に示す。杭頭部はいずれの杭も破壊していた。中層部隅角部の杭（No.1～4）はいずれもGL-2.5～5.0m（フーチング下端から1.0～3.5m）付近でコンクリートの剥離やクラックが認められたが、中層部隅角部以外の杭（No.5～8）には同深度付近にクラックは認められなかった。液状化を考慮せずに

表2 杭の被害調査結果一覧

杭番号	位置	IT試験による 反射深さ(m)*1	杭体の被害	
			上部構造物慣性力の影響 と考えられる被害*1	上部構造物慣性力以外の 影響と考えられる被害*1
No.1		20.5	4.5m付近剥離	—
No.2	中層部	5.8	2.5~5m付近クラック	13~14m付近剥離・クラック
No.3	(隅角部)	8.1	4.5m付近クラック	—
No.4		8.2	3m付近クラック	6~7m付近破壊
No.5		20.6	—	—
No.6	中層部	13.0	杭頭破壊	杭体傾斜
No.7	(隅角部)	8.0	—	—
No.8	以外)	7.7	—	7m付近クラック
No.9		6.2	3.5m付近クラック	—
			4m付近破壊	—
No.10		7.5	2.5m, 4~4.5m付近クラック	7m付近破壊
	低層部		4m付近破壊	—
No.11		—*2	2.5m, 4~5.5m 付近クラック	8m付近クラック
			4.5m 付近破壊	8.5m付近破壊

*1 震災前のGLからの深さで表わしている

*2 杭頭部分の破壊が激しく測定不能

図5 代表的な杭被害および地盤・傾斜計測例

Changの式⁸⁾で最大モーメント発生深さを求めると、 $\phi 500\text{mm}$ の杭の場合、フーチング下端から約2m (杭頭ピン) ~4m (杭頭固定) となる。杭頭は図3に示したようにピンに近い状態であると考えられるので、液状化を考慮しなければフーチング下端から2.0m程度の深さで最大モーメントが発生することになるが、当該地域の周辺地盤が液状化したことを勘案すると杭の被害深度はさらに深くなることが予想される。従って、フーチング下端から1.0~3.5m (GL-2.5~5.0m) 付近の杭の被害は上部構造物の慣性力によるものと考えら

れる。この結果より、上部構造物の慣性力による影響は建物隅角部で大きかったものと推測される。

南側の低層部の杭 (No.9~11) はGL-2.5~5.5m (フーチング下端から1.5~4.5m) 付近で上部構造物の慣性力によるものと考えられる曲げクラックが幾つか認められるとともに、GL-4.0~4.5m (フーチング下端から3.0~3.5m) 付近に曲げ破壊が認められた。この破壊は中層部隅角部の杭のクラックに比べて明らかに顕著な被害であった。また、低層部の3本の杭の内、No.10、11杭はいずれ

図6 地表および調査杭の水平変位分布

もGL-7.0～8.5m（フーチング下端から6.0～7.5m）付近に2つめの曲げ破壊が確認されるとともに、杭頭部の被害も中層部に比べて顕著であった。この原因は不明であるが、上部構造物に関しても低層部は中層部よりも被害が顕著であったこととの関係は今後の検討課題として興味深い。

なお、表2に示したIT試験による反射深さ²⁾は、杭のヤング係数を $E_p=400,000(\text{kgf/cm}^2)$ と仮定した場合のもので、大きな破壊または継ぎ手の深さに対応するが、大きなクラック（特にNo.10の4m付近）を見逃す場合もある。従って、孔中内視カメラによって観察されていない深度における反射は、必ずしも杭体のクラックや破壊とは言いきれない。

4.3 杭の被害と地盤との関係

調査した11本の杭の代表例として、中層部隅角部（No.2,3）、中層部隅角部以外（No.8）、低層部（No.10,11）の地盤調査結果、杭の破壊観察・傾斜測定結果、および地盤調査結果より建築基礎構造設計指針⁸⁾の方法により液状化判定を行った結果（マグニチュード $M=7.2$ 、地表面最大加速度 $a_{\max}=400\text{Gal}$ を仮定）を図5に示す。図中に示す杭の変形量は、X、Y両方向のベクトル和である。なお、 $\phi 350\text{mm}$ のNo.10、No.11杭は、杭が途中で破断していたため、傾斜計は杭の洗浄深度まで挿入できなかったが、それ以深での傾きは比較的小さいことを下げふりにより確認している。上部構造物の慣性力によって曲げクラックが生じたと考えられるGL-2.5～5.5m付近の破壊を除いて考えると、No.2、4、8、10、11杭で破壊やクラックが認められた。No.2杭のGL-13.0～14.0m付近のクラックが認められた深度は、液状化が生じた想定される境界付近に相当する。従って、この深度でのクラックは液状化により上層部の剛性が低下したため、あるいは側方流動が発生したためと考えられる。また、 $\phi 500\text{mm}$ の杭の内、No.4杭以外は図5に示した5本の杭と同様に一様に傾斜していることから、調査した深度以深で側方流動による杭の被害が存在している可能性が考えられる。

4.4 地表の変位

航空写真測量から求めた被災建物周辺の地表の水平変位³⁾と調査した範囲での調査杭の地表の水平変位を図6に示す。調査地周辺には南東、南西及び北側に海がある（図1参照）ため、地表の各水平変位の方向は必ずしも一致していないが、概ね南西から北西の方

向に向いている。また、その変位量は38～63cmとなっている。調査杭の水平変位は下端の変形していない深度まで調査が行えなかったこと、および杭頭で破壊しているため杭頭でのずれ量が分からないことから、いずれの杭ももっと大きな変形が生じている可能性があるが、杭の変形の方法は概ね西から北の方向で、航空写真測量の結果（地表の水平変位）と比べると若干北よりではあるが概ね対応している。また、調査できた範囲における杭の最大水平変位が47cmであり、航空写真測量から得られた地表の変位量に概ね一致しているものと考えられる。

5 まとめ

兵庫県南部地震で液状化により被害を受けた埋立地盤に建つ3階建て建物の11本の杭基礎の被害調査と、それに対応する位置で地盤調査を行った。得られた知見は以下の通りである。

- ①全ての杭の杭頭部は破壊していたが、中層部隅角部の杭はGL-2.5～5.0m付近で曲げによるものと考えられるクラックが確認されたのに対し、中層部隅角部以外の杭にはクラックは認められなかった。これは、構造物の慣性力の影響が隅角部で大きかったためと考えられる。
- ②上部構造物の被害が顕著であった低層部の杭は、上部構造物の被害が少なかった中層部の杭よりも被害が顕著であった。
- ③航空写真測量から得られた地盤の側方流動方向と、杭の変形方向は概ね一致していた。

謝 辞

今回の調査に際して御協力いただいた鹿島建設（株）関西支店神戸営業所 竹下所長、太中課長をはじめとする関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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、1996.3
- 2) 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、1996.3
- 3) 浜田正則、磯山龍二、若松加寿江：1995年兵庫県南部地震液状化、地盤変位及び地盤条件、（財）地震予知総合研究振興会、1995.9
- 4) Robertson, P. K. and Fear, C. E. : Liquefaction of sands and its evaluation, Special, Keynote and Theme Lectures Preprint Volume, First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (IS-TOKYO), pp.91～127, 1995
- 5) 鈴木康嗣、時松孝次、古山田耕司：コーン貫入試験の先端抵抗と摩擦抵抗を併用した液状化強度予測、第31回地盤工学研究発表会、pp.1229～1230、1996
- 6) Muromachi, T. and Kobayashi, S. : Comparative Study of Static and Dynamic Penetration Tests Currently in Use in Japan, Proceedings Second European Symposium on Penetration Testing, pp.397～402、1982
- 7) 神戸開港百年史編集委員会：神戸開港百年史、神戸市、1970
- 8) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、1988

[1996年6月28日原稿受理 1996年9月10日採用決定]