兵庫県南部地震による建物杭基礎の被害調査報告と杭の破壊状況における上部架構の影響の考察 (西宮市の事例)

INVESTIGATION ON PILE FOUNDATIONS OF A DAMAGED BUILDING BY HYOGOKEN-NANBU-EARTHQUAKE AND INFLUENCE OF SUPERSTRUCTURE ON DAMAGE OF PILES (The Case in Nishinomiya City)

中澤明夫 —*1 蘓鉄盛史 —*2 中澤瑤子 —*3

Akio NAKAZAWA Atsushi SOTETSU Yohko NAKAZAWA

On Hyogoken-Nanbu-Earthquake (1995.1.17), the filling moved in the direction of the old valley in Nishinomiya City. Some buildings in the area were largely damaged. This report is the results of the observation on the damage of pre-cast concrete piles (diameter: 0.35m, length: 5m) on a damaged building. The piles were broken at pile-top mainly in the direction of column row. So, we estimate that the collapse of the piles occurred by the inertia force of superstructure mainly in the direction of column row. The retaining walls on the western side in the area were largely damaged. On the other hand, those on the eastern side were safe except one. We estimate that in the case of the earth pressure increasing by filling movement, the retaining walls were damaged, but in the case of the earth pressure decreasing, they were safe.

キーワード：
杭, 被害, 上部架構, 擁壁, 地震

Keywords:
Pile, Damage, Superstructure, Retaining wall, Earthquake

1 はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震による建築・土木構造物の被害は甚大なものであった。それらの内、建築構造物における被害状況は、上部構造など地上部にあるものについては目視による調査をはじめとして文献^{*)}などの詳細な調査が行われ、報告されている。また、地中部にある基礎構造物についても、地盤が側方流動したり、地割れ、液状化などによって杭周辺の地盤がなくなり、たまたま基礎部が露呈した場合は、目視による杭基礎の大きな被害の観察が可能となった。しかし、一般に、基礎まわりの地盤に大きな変状がない場合、杭基礎の詳細調査は格段の費用と労力を必要とすることから行われることは少なく、このような場合についての詳細な事例報告は、文献^{*)~4)}など極めて少ないのが現状である。

そこで筆者らは、調査対象として、今回の地震において地盤の変状は比較的少ないにもかかわらず上部架構が大きな被害を受けた建物を選び、杭基礎の掘削調査を行った。建物は、西宮市中央北部に位置する鉄筋コンクリート造ラーメン構造の共同住宅である。本報は、その調査結果を報告し、杭被害の原因を考察したものである。

2 建物の概要とその被害状況

本建物（以下、E棟と称する）は、1973年に竣工した鉄筋コンクリート造ラーメン構造の7階建共同住宅である。本建物を含めて合計7棟の建物が、1973年～1978年にかけて順次隣接して建設された。そのうち5棟はラーメン構造7階建て、2棟が壁式

図1 敷地全体図

*1 (株)新井組技術研究 部長
(〒663 西宮市津門西口町2-26)
*2 (株)新井組技術研究部構造研究室
*3 (株)アルマチュール構造設計事務所 工博

*1 General Manager, ARAIGUMI Co., Ltd, Technical Research Dept.

*2 Research Engineer, ARAIGUMI Co., Ltd, Technical Research Dept.

*3 ARMATURE Construction Bureau, Dr. Eng.

図2 上部構造のひび割れ状況（北側側面）

構造5階建てである。敷地全体図および建物配置を図1に示す。E棟の平面形は桁行が36m（4.67m×6スパン+2.67m×3スパン）、梁間が7.32m（1スパン）の長方形である。建物高さは19.7mである。構造は、桁行がラーメン構造で、梁間が耐震壁つきラーメン構造（壁厚：12cm）である。基礎梁は断面：幅35cm×成150cmである。1階床は基礎梁と一体ではなく、コンクリート製PC版を用いた置きスラブ形式となっている。建物2階階段室は、北側擁壁上の道路とRC造の渡り廊下でつながっている。

上部構造のひび割れ状況を北側面について図2に示した。1階柱および2階柱のせん断破壊が激しく、かぶりコンクリートが剥落し、主筋および帯筋は座屈あるいは破断している。ただし、上部構造の傾斜は少なく、西へ約1/400傾いている程度である。渡り廊下とE棟接合箇所には衝突やズレ跡が残っていた。その他の建物のうち、E棟のすぐ北側の建物（以下、F棟と称する）は、同様の被害程度であった。残る5棟の被害は、E棟と同性状の被害であるもののその程度は幾分軽微であり、さらに構造体が壁式構造のものはラーメン構造のものに比べて軽微であった。最終的に、E棟およびF棟は解体されることとなった。

3 基礎の概要

基礎杭の配置を図3に示す。基礎は独立フーチングの杭基礎である。杭はA種PC杭で、杭径350mm、杭長さ5m、杭先端深さはGL-6mの砂礫層である。埋込み工法によって設置された。杭は各フーチングあたり3～5本ずつ配置され、建物全体で78本使用されている。杭の設計支持力は長期で $R_a=4.8$ tf/本である。E棟の設計は1972年になされており、杭の設計にあたって水平力は考慮されていなかった。本調査の結果、杭頭部はフーチングに約5cm埋め込まれ、杭軸筋は直角に折り曲げた上、放射状にフーチングに定着されていることが分った。なお、「建築基礎構造設計規準・同解説」¹⁾にY. L. Chang式が掲載されたのは1974年、「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」²⁾に杭の水平力設計法が掲載されたのは1984年である。

なお、F棟は独立フーチングの直接基礎である。

4 敷地概要と地盤および擁壁の変状

敷地全体は図4に示すように、台地およびこれらに挟まれた谷を

図3 基礎伏図

埋立て、盛土を行って階段状に造成されている（図1も参照されたい）。E棟の地盤面を基準にすると、E棟の東側および北側敷地はこれよりも高く、また西側敷地は低くなっている。それぞれの段差部には石積み擁壁あるいはRC造擁壁が盛土地盤上に設けられている。E棟およびこのすぐ北側に建つF棟は、原地形の台地から谷へ移るあたりに位置している。本建物群が建設される時点で実施された地盤調査結果を用いて、南北および東西方向の地層断面推定図を図5に示した。盛土は、腐植土、木片、コンクリート片等を含んだ砂を主体とする残土状態のものであって、E棟付近での平均層厚は2m程度である。その下部に、N値20程度で層厚約0.8mの砂層、ついで腐植土を含む粘土層（層厚約0.8m程度）があって、約GL-5mからN値50以上の砂礫層（層厚約4m）がある。本建物群はこの砂礫層を杭の支持層としている。これ以下は粘土層と砂層あるいは砂礫層が互層状態となって続いている。

地盤および擁壁の変状を図1に併記した。敷地の最も西側にあつ

図4 建物の配置と旧地形

図5 建物周辺地盤の推定断面図

て、北から南に流れる水路の護岸は西に向かって約30cm程度せり出していた。また、E棟を含めたその他の棟の西側にある石積み擁壁あるいはRC造擁壁は西方向へ水平移動し、多数のひび割れ（最大ひび割れ幅250mm程度）がみられた。擁壁上の地盤は沈下し、擁壁下部の道路は盛り上がっていた。これに比べて、敷地の東側にある擁壁はE棟の付近にある一部を除いてほとんど被害はなかった。また、敷地の南側と北側での擁壁の被害状況に差異はほとんどなかった。地盤の変状としては、建物群の敷地地盤が全体的に南西方向の旧谷筋側に動いた状況と判断できた。この推察される方向を、図4に破線で示した。

敷地の東西で擁壁の変状に大きな差異が生じた理由は、図6のように推論される。すなわち、

- ①擁壁は、旧地盤が台地から谷部へ移るあたりに位置する。
- ②旧地盤上を盛土が地震によって滑ろうとする方向が、擁壁の背面の土圧が増大する方向と一致する場合（西側擁壁およびE棟東側の擁壁（a）がこれにあたる）では擁壁の変状は大きい。
- ③逆に、背面の土圧が減少する方向に盛土が動こうとする地形の場合（東側擁壁（b）がこれにあたる）にはほとんど被害はない。

5 杭の調査結果

杭の調査位置を、図3に黒丸印で併記した。杭の周辺土を約2m程度掘り下げて目視によって観察、調査した。観察の結果、F1およびF2フーチングの杭はほぼ南西方向に傾斜しており、最大傾斜角は南に1/17、西に1/16である（図7参照）。一方、F3フーチングの杭は東南の方向に傾斜し、傾斜角はF1やF2フーチングの杭に比べてかなり小さい。なお、傾斜の測定は、基礎版の下方約1mの範囲について杭の倒れを下げ振りで計測した。

基礎フーチングおよび杭頭部付近の被害状況を目視によって観察した結果を図8（a）～（e）にスケッチで示した。以下に、被害の詳細を記述する。F1フーチングにおけるNo. 1、2および3杭では、ひび割れは基礎版直下の杭周に幅約10mmで水平方向に生じており、No. 2杭の杭頭部では、長さ約25～30cmの鉛直方向のひび割れが数本発生している。なお、杭頭部の表面の一部が剥離していたが、これは施工時における杭頭ハツリによるものと見受けられた。F2フーチングにおけるNo. 4およびNo. 5杭では、鉛直方向のひび割れが杭頭部から約60cmの深さの範囲に発生して、杭の軸筋およびスパイラル筋が破断し、杭コンクリートが圧壊、剥離し

図6 擁壁の変状と盛土の関係の考察

て中埋めコンクリートが露出している。また、基礎版下面のコンクリートも、杭位置でひび割れや剥離が生じて、基礎版内に定着された杭軸筋や補強筋も露出している。さらにNo. 5杭では、杭周囲の基礎版下面に幅約30mmで三日月状の杭と基礎版のずれの痕跡がある。なお、No. 6杭には著しい被害はほとんどみられなかった。F3フーチングにおけるNo. 7、8および9杭では、基礎版直下の杭周に幅約10mmのひび割れが水平方向に生じ、またNo. 9杭では、幅2mm以上のせん断ひび割れが杭頭部の60cmの範囲でX型に発生している。なお、弾性波非破壊検査を実施したところ、杭頭部から約1mよりも下方では大きなひび割れは認められなかった。

6 杭頭部の破壊状況と上部架構との関係について

杭のひび割れ状況や同一のフーチング内での杭の被害度の相違などから、主として桁行方向の慣性力が杭の被害に関与したものと考えられた。

杭頭部の破壊状況が著しいF2フーチングとF3フーチングについて、架構の影響を以下に考察する。地震による慣性力が桁行方向に作用した場合、F2フーチングは建物隅柱を支える基礎にあたる。F2フーチングの杭3本のうち建物に対して外側に位置するNo. 4およびNo. 5杭では、内側に比べて外側の損傷が著しく圧壊している。これは、複数本の杭をもつ隅柱フーチングにおいて杭頭部が固定されていない場合、図9のように地震力による架構からの大きな

図7 杭の傾斜量

図8 杭ひび割れ状況スケッチ

反力を受けた上にフーチングが回転する⁷⁾ため、一つのフーチング中の杭であっても、杭群の外側に位置する杭 (No. 4およびNo. 5がこれにあたる) は大きな軸方向圧縮力と曲げモーメントを受けることとなり、結果として杭体の建物外側部分が圧壊すると考えられる。一方、内側に位置する杭 (No. 6杭がこれにあたる) は、フーチングが回転することによって杭頭がフーチングから離れてほとんど外力を負担しないため、破損しなかったと考えられる。なお、桁行方向の慣性力が作用した場合、F 2フーチングと同様に、F 1フーチングは隅柱フーチングにあたるが、F 2フーチングに比べて

杭の損傷は少ない。この要因として、地盤が南西方向に旧谷側へ滑る傾向の動きをしたため、F 2フーチング側により大きな外力が作用することとなったことが考えられる。

地震による慣性力が桁行方向に作用した場合、F 3フーチングは内柱を支える基礎にあたる。F 3フーチングでは、桁行方向にX型のひび割れが生じ、一部杭表面の剥離がみられるものの、F 2フーチング杭ほどではない。これは、スパン長さの等しい内柱のフーチングでは地震時における上部架構反力による軸方向力の増分はほとんどなく、鉛直荷重としては建物重量だけであって、軸圧縮力は小

F 2 フーチング (隅柱) F 3 フーチング (中柱)

図9 架構を支持する基礎杭の破壊状況

さい状態にある。フーチングの回転も隅柱を支えるフーチングに比べれば小さいであろう。そこで、杭頭は設計上は自由として設計されているものの、現実には固定に近い状態で地震による左右の水平力を受け、上部架構の1、2階柱にみられるようなX型の曲げせん断破壊形状⁹⁾を示したと推察される。

なお、本杭はいずれも杭頭部に中埋めコンクリートが打設された杭であって、低い軸力下では、杭頭が水平力を受けた場合に、円筒形状のP C杭が曲げせん断耐力を発揮するのに、中埋めコンクリートが寄与したであろうことが推測できる。

7 まとめ

本杭はP C杭 (A種、径350mm、杭長さ5m)であって、杭頭はフーチングに5cm程度埋め込まれており、ピンと見なしう状態である。

3箇所のフーチングにおいて杭頭部周辺を掘削し、目視観察した結果、およびその結果から考察できる事項を以下に記す。

- ①杭頭部の傾斜角は最大でも1/16程度であって、さほど大きくはない。
- ②建物の隅柱基礎にあたるF1フーチングの3本の杭のうち、外側にあるNo.1、No.2杭は、杭頭周囲に水平のひび割れがあり、さらに建物に対して外側にあたる杭頭部に、コンクリートの圧壊・剥離がわずかに見られる。これは、架構の桁行方向に水平力が作用し、杭頭が曲げ変形を受けて破壊した状態である。同様に、隅柱基礎にあたるF2フーチングの外側のNo.4、No.5杭も、同じ箇所が著しくせん断圧壊している。これは、地盤が南西方向へ滑る傾向の動きをしたため、桁行方向の水平力がF2フーチングにはF1フーチングよりも大きく作用したこと、また杭頭がピンの状態でフーチングが大きく回転したため、杭頭の一部がフーチングから抜け出し、反対側の杭頭部が圧壊した(図9参照)と推察される。
- ③建物の中柱基礎にあたるF3フーチングの杭は、No.9杭に代表されるように杭頭部に水平ひび割れがあり、かつX型の斜めせん断ひび割れがある破壊形式である。この破壊状況は、2方向から水平力を受けた場合に上部架構の中柱で見られる曲げせん断破壊と同様である。建物の中柱基礎にあつては、フーチングの回転が少ないためほぼ杭頭固定に近い状態で曲げ変形を受けたこと、また地震によ

る軸方向反力も中柱基礎ではほぼ0であって、杭頭に作用する圧縮力が小さいため、曲げせん断破壊となったものと考えられる。

以上述べたように、地盤変状がさほど著しくない場合、杭の破壊状況は架構の慣性力が杭頭に作用したものとして説明することができる。また、地盤変状や擁壁のひび割れ状況から、以下も考察した。
④盛土以前における原地盤上を盛土が滑ろうとする方向が、擁壁の背面土圧を増大させる方向と同じであれば、地盤面および擁壁の変状は大きく、その方向が逆であれば、変状はきわめて小さい。

参考文献

- 1) 新井組技術研究部・京都大学森田研究室・大阪大学鈴木研究室・近畿大学窪田研究室・東京大学小谷研究室:新井組技術研究報告集 第8号 特集:平成7年(1995年)兵庫県南部地震被災調査報告—ジュネス六甲—, (株)新井組技術本部技術研究部, 1995.10
- 2) 藤鉄盛史・中澤明夫:地震による杭基礎の被害事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 投稿中, 1996.9
- 3) 山肩邦男:兵庫県南部地震による建築基礎構造の被害, GBRC Vol.82, pp.13~35, 1996.4
- 4) 日本建築学会兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会:兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査報告書(事例編), 1996.7
- 5) 日本建築学会:建築基礎構造設計標準・同解説, 1974.11
- 6) 日本建築センター:地震力に対する建築物の基礎の設計指針, 1984.9
- 7) 中澤瑞子・山肩邦男:上部架構を考慮した群杭基礎の水平抵抗理論解, 日本建築学会構造系論文報告集, 第389号, pp.132~143, 1988.7
- 8) 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), pp.375~376, 1990.10

[1996年6月27日原稿受理 1996年9月10日採用決定]