

摩擦杭は地震被害も少ない

—兵庫県南部地震1995の場合、摩擦杭の復活(その7)—

(一社)基礎構造研究会代表理事 杉村義広

前号のいしずえ通信に引き続いて兵庫県南部地震(1995)の際にも摩擦杭の被害は少なかったことについて触れる。以前にも触れたことがある「日本建築学会近畿支部摩擦杭設計技術研究会委員会：摩擦杭の設計-考え方と課題、2003.3」の報告書でも、その事実が記述されている。「あとがき」の中で「…第3章で紹介した地震時WGの報告は、阪神大震災で摩擦杭(節杭)を用いた建物にほとんど被害が無かったことを踏まえて、…」の文章が頭から離れずに印象深く残っていたから、前号の関東地震(1923)で摩擦杭の被害が少なかったことを知った時に阪神・淡路大震災でもそうだとの思いがすぐに頭をよぎったのである。早速に第3章を読み直してみると、確かに「兵庫県南部地震において、摩擦杭基礎建物は支持杭あるいは直接基礎の建物に比べ上部構造・基礎構造ともに被害が少なかった」とあり、参考文献として3.1)金井重夫、小椋仁志、須見光二：摩擦杭基礎の地震に対する安全性、基礎工、pp.69-73、1996.11が挙げられている。

この雑誌は普段から目を通すことにしているもののこの論文を見落としてしまったのかと思い、たまたま第二著者が当研究会の事務局を担当している小椋さんでもあったのを幸いに連絡したら、この論文とその根拠となった報告書、さらにほかの著者による数編の関連論文も添えて送って来てくれた。

まず、論文を読み出してみると、冒頭の「はじめに」で「…節杭を用いた建物については、地震直後からはじめた実態調査の結果、建物・基礎ともほとんど無被害であることが確認され、いわゆる“支持杭”を用いた場合の被害状況との間に際だった差が見られる」と記述されているのが目を惹いた。文献1)とされているのが根拠としての「(株)ジオトップ：節杭を用いた建物の調査報告書、平成8年4月」であるが、その内容は論文と合わせてこの連載にぴったりの内容となっているので、以後、単に「報告書」と呼び、繰り返し引用する。

兵庫県南部地震(1995)の被災地帯の阪神地区は、海側から順に1)液状化地域、2)埋め立て地域、3)震度7の激震地域が線状のようになって並んでおり、調査はそれぞれに及んでいるが、PHC節杭219例、三角杭78例の合計297例について行われている。そのうち、損傷のあったものは僅か2例であり、一つは甲陽断層のずれに伴う地盤変形によるPHC節杭の破損(西宮市)、ほかの一つは側方流動に伴う地盤変形による三角杭の破損(大阪府岸和田市)であるという。ただし、いずれも部分的な損傷で建物への影響はなかったと書かれており、前者はとくに詳しく扱われているが[筆者も調査したことがあり、とくに関心を惹かれる事例である]、後者はこの記述だけで終わっている。したがって、前者を中心にして兵庫県南部地震の被害様相について考えてみたい。

PHC節杭はφ400-300[節部径40cm、軸部径30cm]が最も多く使用されており、各地に分散しているほか、ポートアイランドで7例あるのに対し、やや大き目のφ500-400[節部径50cm、軸部径40cm]はほとんどが六甲アイランドでの40事例という。三角杭は杭頭部径36cmで、昭和55年以前の実績が各地に分散している。調べてみると、人工島の造成が終了したのは、ポートアイランド1981年[ただし、1期工事の北側半分]、六甲アイランド1992年であるので、PHC節杭、三角杭を合わせての分布に時代の違いが現れたということかも知れない。

杭長は4mから25mに及んでいるが、ポートアイランドや六甲アイランドなど、支持層が深い埋立地では12m

前後の実施例が多いこと、設計支持力はおおむね20tから70tにわたっているが、比較的大きなものは地盤が扇状地から丘陵地の例であり、ポートアイランドや六甲アイランドでは30t前後の実績が多いとされている。上部構造の規模は、2階から7階建て程度、用途は共同住宅、事務所、倉庫、工場で、倉庫、工場の割合が約20%である。同様規模の建物の場合、摩擦杭基礎を用いた建物の被害がなく、支持杭基礎の建物での基礎被害が生じたのが特徴として現れたようである。筆者は、この1本当たりの設計支持力が余り大きくないことが摩擦杭の耐震性上の有利性に繋がっているのではないかと考えるようになってきているが、その点については別の所で改めて論じることとし、ここでは上記した甲陽断層に伴うPHC節杭の損傷例について記述を進めたい。

地震後3週間は過ぎた頃であったと思うが、被害状況が相当のものとの報道で筆者も被災程度を調べてみたいと考え、ジオトップの若い方々（熱心であった当協会の建築基礎設計士にもなった上紺屋好行かみこんやよしゆきさんが最も記憶に残っている）とこの事例の調査をしたことがある。その時に撮影した写真を以下に示す。



写真-1 地滑りを思わせる全景



写真-2 内庭コンクリートの段差



写真-3 アプローチの破壊状況

全体として地滑りを思わせる被害状況〔写真-1〕と思われたが、入り口コンクリートの段差〔写真-2〕やアプローチ斜路の被害〔写真-3〕から見て、地盤の変状はかなり大きく出ているとの印象が強かった。建物に近づいてみると、地盤がすべり落ちたため



写真-4 杭頭の状況



写真-5 応急判定の貼り紙

めか基礎スラブと杭頭は浮き出ており〔写真-4〕、杭が傾斜している状況が観察された〔さらに近づいて杭体の状況や杭頭接合の詳細を調べるのが出来なかったのは今でも残念である〕。驚いたのは玄関付近に〈調査済〉の貼り紙〔写真-5〕があって「この建物を応急調査した結果、大きな被災は見当たりません」との内容が書かれていたことである。写真-4までの状況と比べて、この緑紙の〈調査済〉が何か不自然さを感じながら周辺を歩き回って撮影したのが写真-6である。すると、草が生えている地表面に建物の下に向かって地割れが走っているのが見えた。“これは断層ではないか”と直感したので、さらに近づいて撮影したのが写真-7である。地割れはかなり深くまで達してい



写真-6 地割れが走る



写真-7 地割れの詳細

ることが想像され、単なる地割れではなく、断層に違いないと思うに至った。そこで、その延長線上に並ぶようなほかの被害らしきものはないかと町の中を歩いて探してみたが、地図も何も条件ではどうすることも出来なかった。仕方なく、上紺屋さんに「この事例は断層が関係しているのではないかを調べてみるとよい」と告げて仙台に帰ったところ、しばらくして「あれは甲陽断層でした」との連絡を貰った記憶がある。

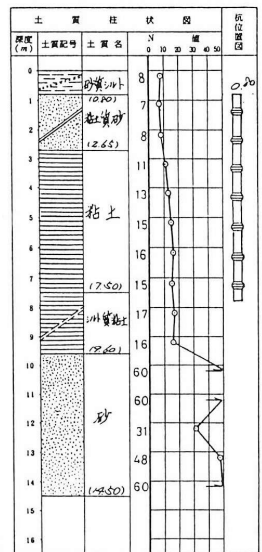
今回小椋さんが送ってくれた報告書では、この事例が節杭では唯一の被害であったためか、とくに5.5節「断層による地すべりの影響を受けた建物」として採り上げられて詳しく記述されていることが分かった。貴重な事例でもあるので、少し詳しく検討してみる。

まず、「被害の見られた1件は、甲陽断層が動いたためと推定される地すべりに起因するものである」と述べ

られ、右のような概要が示されている。

建物はRC造3階建てのマンションであり、基礎はφ440-300（節

所在地：西宮市高塚町4
 施工年度：昭和59年10月
 建物用途：マンション
 構造規模：RC造・3階建
 基礎形式：独立基礎
 設計支持力：25t/本
 杭径・杭種：φ440-300(mm)、A種
 杭長：6m・7m・8m
 施工総本数：81本・33本・24本
 施工方法：モルタル注入工法
 建物調査日：平成7年1月20日
 断層調査日：平成7年2月14日



径44cm、軸径30cm)、設計支持力25t/本のPHC節杭、モルタル注入工法（埋込み工法）で支持されている（杭長が6、7、8m、本数が81、33、24本とあるのは、写真-1などから見て上部構造に少し条件が異なる所があって、それぞれに対応したための違いによると思われる。また、基礎形式が独立基礎と書かれているので、それぞれ1柱1杭形式の基礎スラブが配置されたものと推察される）。報告書では、この敷地のものと思われる柱状図も示されており、地表から0.8mまでが基礎スラブで、その下に7mもの杭が使われていたようである。したがって、杭は上部2m弱がN値7、8程度の粘土質砂、その下5m程度がN値11~6程度の粘土層にあったと推定される。

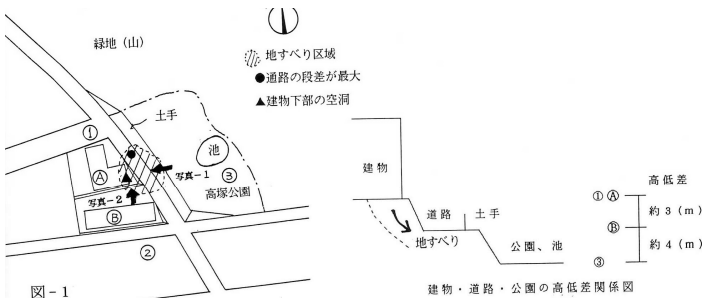


図-1 建物・道路・公園の高低差関係図

(B棟の住民の方の話)
 ・地震当日は、地滑りによる建物下部の空洞の間隔は、あまり大きくなかった。
 ・しかし、翌日の朝には、建物と崩れた地盤表面の間隔は50cm程度であった。
 ・その後、余震が繰り返すとともに、その間隔は大きくなっていった。



写真-1
 建物下の空洞と道路の段差
 道路と石垣が陥没したため、
 建物の下に空洞ができ道路
 に段差が生じた。



写真-2
 建物下の空洞
 地盤が陥没したため、建物
 の下に空洞ができた。
 杭頭が見えている。

報告書では建物と周辺道路との位置関係や微地形も図-1に、写真-1や写真-2の状況との位置関係も示されているので、先に示した筆者の写真との関係も再確認することが出来た。さらに「甲陽断層1メートルずれる、研究者確認、西宮で段差や亀裂」の見出しの平成7年2月12日朝日新聞大阪版のコピーが資料-1として挙げられ、より広い範囲にわたって調べた断層線の地図(図-2)や写真-

分かった。この事例の建物は倉庫1階建てであり、HC-TOPφ500-400B種、杭長8m、設計支持力21t/本、シーリング工法(砂利充填打込み工法)、施工総本数71本で支持されている。ここに示された地図の位置関係から見て神戸市による地震記録が得られた場所とほとんど同じであるので、同一場所と仮定して話を進めることにする。まず、地震観測が行われている場所の柱状図と各深さでの記録(NS成分の場合)は以下のとおりである。

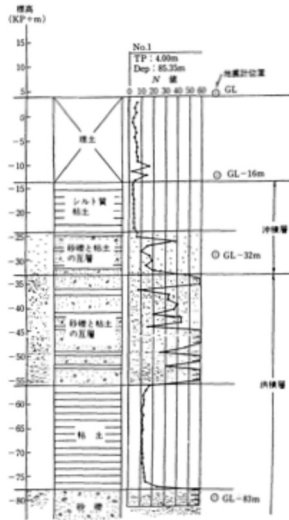


図-1 ポートアイランド観測点の土質柱状図と地中地震計位置

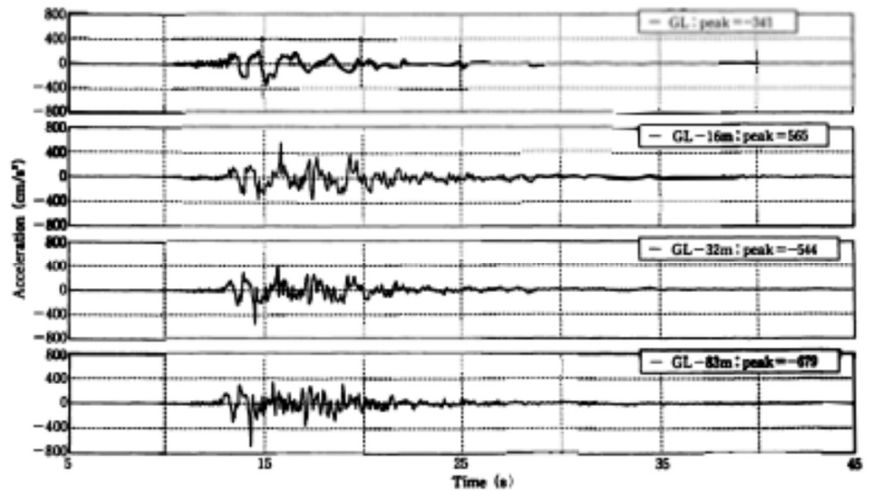


図-2 ポートアイランドにおける地震記録(兵庫県南西部地震NS成分)

この柱状図で建物の支持層を探すと、標高 KP-33m ほどの N 値が大きくなる砂礫と粘土の互層 [GL-32m の観測が行われている層] で比較的深い位置 [やや頼りなさが残るが、よく調べれば可能性はある] を選定することになると思われる。その下には N 値 10 程度の粘土層が 25m ほど続くが、洪積層なのでかなり硬めであると思われる [圧密沈下などの調査は必須であるが]。この層は N 値 60 を超す砂礫層なので、それより深くに位置する GL-83m の観測点は一応の“地震基盤”と考えることは許されるであろう。この深さでの地震波形は最大値-679 ガルで短周期成分の多い地震動であるが、その最大値が次第に GL-32m では-544 ガルと小さ目になり、さらに GL-16m では最大値が+565 ガルに変わるとともに、長周期成分が増え出していると見られる。最も注目されるのは地表 GL の記録で、初期の数秒間を除いて短周期成分は消えてしまい、長周期成分のみの波形となり、最大値も-341 ガルと変わっていることである [とくに液状下層である埋土層では長周期成分を消してしまう性質があることが分かる]。

各深さでの地震動の性質を調べるものとして、フーリエスペクトル [フーリエ変換を用いて様々な振動数(周波数)の正弦波に分解し、振幅と位相の関数として表すと、応答スペクトル [1自由度系の応答解析を行い、周期に対して加速度(構造物への入力を知る)、速度(構造物のエネルギー吸収能力を知る)、変位(構造物の変形を知る)のそれぞれについて周期に対して最大値を示す]があるが、これらの記録に対して得たものを図-3に示す。左はフーリエスペクトルで、縦軸は加速度そのもの、横軸は周波数を対数目盛りで示している。GL-83m で最大値は 3Hz で生じ、GL-16m まで

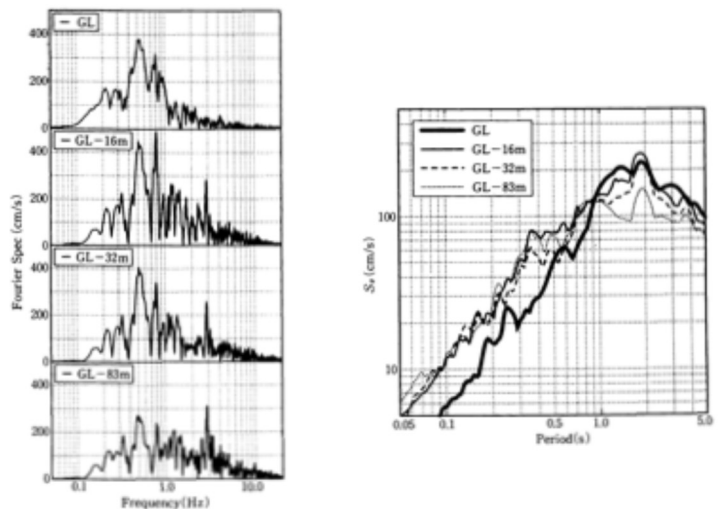


図-3 各記録に対するフーリエスペクトル(左)と速度応答スペクトル(右、5%減衰)

は少し小さくなるがピークとして残っているが、地表ではほとんど消えているのは、上記観測記録で記述した内容を裏付けている。GL-83m で 2 番目のピーク 0.5Hz (2 秒) は各深さで大きな値として伝わり、地表では最大となっていることから、この地震が持つ基本的な性質を表すものと考えられる。そのほかでは、GL-16m で最大となっている 0.8Hz (1.25 秒) が注目される。この成分は元々の GL-83m でも含まれていたものであるが、GL-32m から GL-16m までの間で増幅されたことを示している [その原因はとくにシルト質粘土層にあると推定される]。

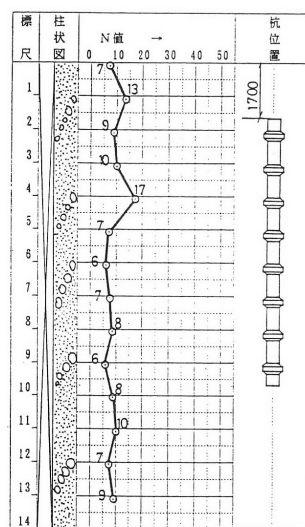
図-3 の右は速度応答スペクトルの場合を両対数グラフで示しているが、この図でもフーリエスペクトルの場合と同様のことが言える。最も目立つのは、地表の記録が大略 1 秒を挟んで短周期側はほかの観測位置よりもずっと小さい値であるのに対して長周期側は大きく増幅していることで、埋土の液状化によることが明白である [とくに GL-16m が 1~2 秒間で谷形状となっているのは液状化層の下端となっていることを意味している]。そのほか、各位置での 2 秒付近が小さいながらピークになっているのは、フーリエスペクトルで 0.5Hz 成分のピークと連動していることも見られる。このようにアレー観測を行うと、それぞれの区間で生じる地震動の性質を絞り出すことも可能であることから、筆者は“地震動のフィルター効果”と呼んでいるのである。

報告書のポートアイランド事例①では、右のような写真と柱状図、杭の姿図も示されている。報告書の記述では、ポートアイランドの埋立て用の土砂には



本物件は、写真右の建物である。建物には、被害は見られなかったが、倉庫周辺地盤では、液状化現象が見られた。

粒度組成が良く締固めが容易な盛土材料とされるマサ土 (風化砂岩) が用いられているため、地震が起こっても液状化は生じないと考えられていたが、地震動が過大であったので島全体的に液状化現象が起きたと書かれている。この柱状図は、全体がその埋土層を示していると考えられるので、先の観測点の地盤柱状図 (図-1) とを組み合わせると、「埋土」と表現されている層にこの柱状図をはめ込めば [観測点の柱状図では埋土層が 16m であり、この柱状図は 14m であるから 2m ほどの差があるが、その違いを気にしなければ] “ポートアイランド事例 1 の地盤” が出来上がってしまうことになる。



もし、そうした地盤条件で支持杭であるならば、先端を GL-32m またはそれ以上の深さまで届かせることになるので、500 ガル程度、あるいはそれ以上の入力があると考えられる。それに対して、摩擦杭の場合は埋土層内に収まっているために地表での 340 ガル程度に近い入力であったと仮定することができる。短期の設計震度は $k=0.2$ であるので、この値でも入力としてはかなりの大きさであると言わなければならないが、500 ガルに比べればずっと小さいから、構造物が受けるダメージもそれに対応して小さくなるのは道理である。したがって、被害程度としては少なくとも破壊的な損傷とはならないように期待できる可能性は残っている筈である。

また、長い支持杭であったとすれば、上部のシルト層や液状化層である埋土層も貫いて地表近くまで杭体が存在して地震動を受けるので、杭長の間中部でも硬い層から柔らかい層に入る境界での地震動の増幅によって杭が大きな変形を強制されることになり、過大な曲率が生じて重大な損傷に結びつく恐れが生じる。それに対して摩擦杭であれば、そうした地層の境界を貫通することなく済むので、そのリスクは避けることができる有利な条件となる。したがって、報告書の写真に添え書きされているように「建物には、被害が見られなかったが、建物周

辺では、液状化現象が見られた」とあるような状況に繋がったのではないかとと思われるのである。

倉庫の場合、床を構造体から切り離して土間コンにする例が多いので、建物の重量が少な目となることで基礎としては摩擦杭で済んだことが理由かと想像され、これもその事例の一つであると思われる〔ただし、土間コン床の場合、床は地盤と一緒に沈下して収容物には思わぬ被害が出たのではないかと想像しているが、倉庫内を詳しく観察することは出来なかったため、それについてはよく分からない〕。

筆者はポートアイランドの各地を見て歩いたが、あちこちでこの事例に似た〈建物は被害らしきものが見られずに建っているが、周辺地盤は液状化した痕跡が残っており、一様に沈下していること〉が観察できた。多くは倉庫であったが、中央広場付近では高層住宅もあって、周辺地盤だけが液状化して沈下している状況が見られる例が少なからずあったのである。とくに印象に残ったのは、建物は周辺も含めて液状化対策として地盤改良されていたが、その境界で外側の地盤沈下との段差が出来ていた事例〔写真-8〕である。水道管には可撓性の伸縮管が使用されていたことを知って、そんな工夫をしている例があるのかと驚いたとともに、それが徒労であったことも経験することになった。中央広場には自衛隊の給水車が来ていて、沢山の市民が水を貰うために並んでいる姿を見ることになったからである。後で知ったことであるが、ポートアイランドへ入る栈橋の根元の所に造られた水道本管が破損したとのことで、ポートアイランド全体で断水が起こっていたというのが真相であるらしい。



写真-8 段差の例