

兵庫県南部地震における液状化に伴う地盤被害と杭基礎被害の原因分析

社 本 康 広 佐 藤 正 義
(技術研究所) (技術研究所)
桂 豊 田 地 陽 一
(技術研究所) (技術研究所)
堀 田 洋 之 石 川 裕
(技術研究所) (技術研究所)
玉 置 克 之
(技術本部)

§1. はじめに

兵庫県南部地震では、埋立地などにおいて液状化に伴う被害が数多く発生し、社会的に大きな注目を集めた。埋立地においては基礎構造としての信頼性や経済性から杭基礎が数多く用いられているが、それらの杭基礎も地盤の液状化により被害を受けた。被害が発生した地盤構造に注目すると、杭基礎が水平地盤に位置した場合と水際線近傍に位置した場合がある。杭基礎の耐震性を確保するためには両方の場合とも重要な研究課題であり、今回の地震で発生した被害の実態を把握するための調査が必要である。特に、後者のケーソン岸壁背後地盤の側方流動による被害¹⁾は注目すべき現象である。地震時の液状化によって生じる側方流動は、post-liquefactionの問題として、地盤工学の分野では、重要な研究課題として注目されている。しかし、実地震の際に生じた地盤変形の分布やそのメカニズムには不明な点も多く、今後の研究に待たなければならない課題も数多く残されている。

このような背景から、本研究では兵庫県南部地震における地盤の液状化被害の実態を把握し、杭基礎被害の調査を実施した。また、埋立地に数多くあるケーソン岸壁と背後の建物をモデル化した遠心模型振動実験を実施することにより、側方流動による杭基礎被害の原因について検討した。

§2. 地盤概要と液状化による地盤被害

2.1 地盤の概要

兵庫県南部地震において被災した神戸市から西宮市にかけての市街地域は、六甲山麓の南側に位置し、六甲山麓から流れる十数の中小河川の堆積による沖積低地の上に位置している。この地区の地形²⁾は、

北から南に向かって、山岳地帯、扇状地、海岸平野、埋立地の4つに分類することができる。

今回の地震において顕著な液状化が発生した埋立地は、明治時代の海岸線より海側の部分で、沖積低地部の堆積層の上部に、主に砂または六甲山から産出されるまき土によって埋立てられたものである。

図-1は、阪神地区の埋立地盤の例として、ポートアイランドの地盤柱状図を示したものである。沖積粘土地盤の上部は、まき土による埋立が行われている。埋立て地盤の層厚は10~20m程度であり、N値は10以下の部分が多い。海上投棄やハイドロリックフィルによる埋立地盤で地盤改良を行っていない場合には、このようなN値を示すことが多く、地震の際には液状化の発生が懸念される地盤である。

2.2 液状化による地盤被害

液状化の発生した地点は、明治以降に埋立てられた場所と良く対応しており、特に著しく液状化現象

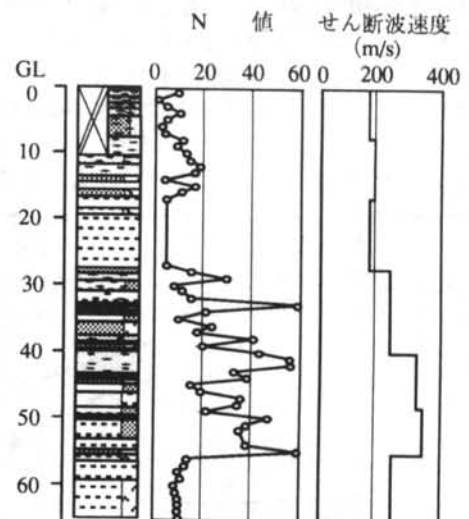


図-1 ポートアイランドの地盤(例)

が生じた場所は、1960年以降に沖合いに造られた埋立地に集中している。明治以前の新田開発に伴う埋立地や自然堆積の沖積低地にも液状化は認められたが、その規模は比較的小さく構造物に大きな被害を与えてはいなかった¹⁾。

兵庫県南部地震における液状化による地盤被害の中で、特筆すべきは液状化によって生じた側方流動である。側方流動は、1964年の新潟地震や1983年の日本海中部地震で指摘されているが、規模、範囲のいずれも兵庫県南部地震はこれらを遙かにしのぐものである。特に、埋立地ではケーソン岸壁が2～5m海側に移動するとともに、その背後地盤には側方流動が生じ、側方流動によって岸壁背後の構造物に種々の被害をもたらした。

(1)地盤の液状化

埋立地では、液状化による地盤沈下がいたる所でみられ、側方流動による地盤変形や地盤が崩壊したような事例を除けば、岸壁から離れた水平地盤では、10～70cm程度の沈下が見られた。ポートアイランドを例にとると、ポートライナーの橋脚部で約70cm、住宅地の外周部で約40cm、中心部で20～30cmの沈下が生じていた。これと同様の沈下は、六甲アイランド、住吉浜、魚崎浜、深江浜、芦屋浜、西宮浜、甲子園浜などの埋立地でもみられた。

図-2および図-3は、六甲アイランドとポートアイランドの沈下量を示したものである。沈下量の測定にあたっては、建物の側面に土の色が付着している場所と地表の差を測るなど、できる限り液状化によって生じたものを測定するように心がけたが、人工島の海岸線付近は現在も圧密沈下が進行しているため、圧密による沈下と区別できていない可能性も残されている。これらの図から、埋立地では、液状化によって全体に20～60cm程度の沈下が生じていることがわかる。なお、ポートアイランドと六甲アイ

ランドでは、こうした沈下量に及ぼす地盤改良の効果が整理されており、地盤改良が施された地点で沈下が抑制されていたとの報告もある³⁾。

(2)地盤の液状化に伴う側方流動

海岸線に沿った埋立地や人工島における岸壁や護岸は、液状化によって甚大な被害が生じた。写真-1および写真-2は、六甲アイランドの北部の公園の護岸を示したものである。護岸が水平方向に移動したため、プラットフォーム表面が海岸にそってひび割れている。また護岸が水平方向に移動したため、ケーソンの背面が約1m沈下している(写真-3)。このような事例は、六甲アイランドばかりでなく、今回の地震で液状化の生じた多数の岸壁や護岸で見られるものである。

六甲アイランドのケーソン岸壁(図-2のA-AおよびB-B)の2カ所で、側方流動による地盤の変形を測定した。A-Aでは、岸壁に直交する手すり(写真-4)の鉛直方向のアルミ角パイプの傾きの相対差から地表の変位を測定した。B-Bでは、アスファルトの舗装面のクラック間の距離を測定することにより求めた。図-4は、縦軸に地盤の水平移動距離、横軸に側方流動前の水際線からの距離をとって示したものである。アスファルト舗装のクラックから測定したものは、特に水際線から近い所ではばらつきが大きい。両者の分布は全体的には良く一致しており、海に対する方向が南北逆方向であるにも関わらず同程度の地盤変形が生じていることがわかる。この図から判断すると、この岸壁では、水平方向に最大2～2.3m程度変形しており、その約2/3が岸壁から20m以内で発生している。また水平変位の影響範囲は水際線から50～60mであり、それ以上岸壁から離れると水平変位はほとんど生じなくなる。

これと同様の現象は海岸の護岸・岸壁のみならず

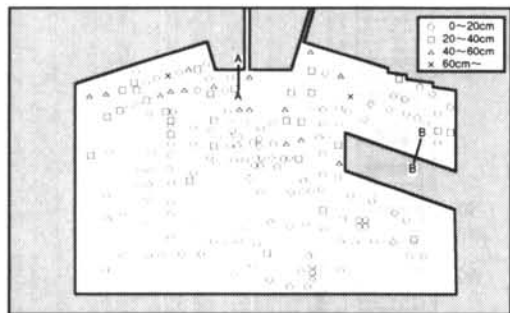


図-2 六甲アイランドにおける地盤沈下量の分布

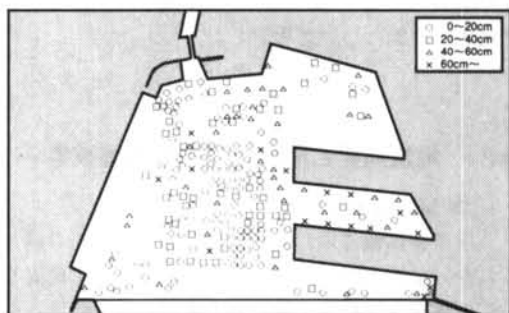


図-3 ポートアイランドにおける地盤沈下量の分布

埋立地の河川堤護岸にも生じている。写真-5の例では、側方流動により川幅の減少が見られるが、橋の基礎部分が変形に抵抗したため、その部分のみ変形が小さくなっている様子がうかがえる。

§ 3. 杭基礎の被害調査

3.1 液状化による杭基礎被害の特徴

調査対象とした構造物の一覧を表-1に示す。表には、構造概要、杭種、建物診断による被災区分、液状化による被害形態の分類を示している。調査した構造物は、埋立地もしくは水際線近傍に位置する支持杭を有した構造物であり、地震時に周辺地盤では液状化が生じた。調査した構造物の杭基礎の被害には、液状化が大きく関与していると考えられる。調査結果から液状化による杭基礎の被害形態を分類すると主として以下のように大別できる。

- ①水際線から離れた水平地盤に構造物が位置しており、地盤の液状化により水平地盤反力が減少し、地震による水平動により杭が損傷した場合



写真-1 護岸の移動



写真-2 プラットホームのひび割れ

- ②水際線近傍に構造物が位置しており、岸壁あるいは護岸背面の地盤が液状化により側方流動を生じ、杭が強制変形を受け損傷した場合

これらの被害形態を模式的に示すと図-5のようになる。

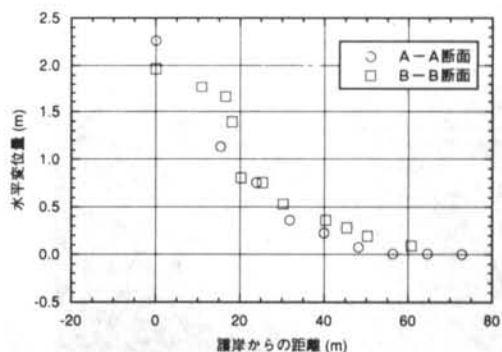


図-4 六甲アイランドで計測された地盤の水平変位



写真-3 ケーソン背面の沈下



写真-4 傾いた手すり

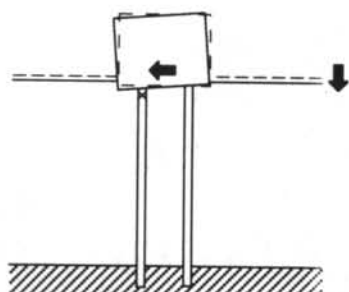
表-1のうち①の被害形態で杭基礎が被害を受けた事例は、B, D, E, F, J, K, Nである。これらの構造物は、いずれも埋立地の中でも比較的水際線から離れた水平地盤に位置しており、調査により杭頭もしくは杭の中間部で損傷が確認されている。写真-6に杭頭の被害例を示す。杭頭には曲げによると思われるクラックが生じている。



写真-5 河川堤防の側方変位

構造概要	杭種	被害区分	被害形態
A S造2F	既製コンクリート杭	大破	②
B S造3F	既製コンクリート杭	中破	①
C S造3F	鋼管杭	中破	②
D RC造2F	既製コンクリート杭	中破	①
E RC造3F	既製コンクリート杭	中破	①
F RC造3F	既製コンクリート杭	大破	①
G RC造3F	既製コンクリート杭	小破	②
H RC造3F	場所打ちコンクリート杭	小破	②
I RC造3F	場所打ちコンクリート杭	大破	②
J RC造4F	既製コンクリート杭	無被害	①
K RC造4F	既製コンクリート杭	中破	①
L RC造4F	既製コンクリート杭	中破	②
M RC造	既製コンクリート杭	小破	②
N SRC造5F	既製コンクリート杭	中破	①

表-1 調査した構造物



(a) 水平地盤 [被害形態①]

図-5 液状化による杭基礎の被害形態

一方、表-1のうち地盤の側方流動（被害形態②）により杭基礎が被害を受けた事例は、A, C, G, H, I, L, Mである。これらの構造物は、水際線近傍に位置しており、岸壁もしくは護岸が海側に移動するとともに、周辺地盤には側方流動が生じている。このうち杭の傾斜を測定することにより損傷評価を行った例については3.2で述べる。

3.2 杭基礎の被害調査例

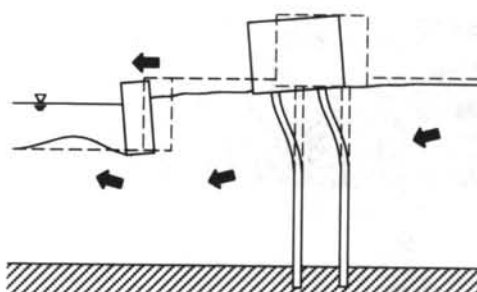
被災した杭の調査は、杭体全長を掘り出して調査するのが最良であるが、費用や労力の面でこうした調査を行うのは一般に困難である。そこで、掘削以外の杭の調査手法として以下の方法が試みられている。

- ①杭頭の目視による観察および弾性波動論を利用した杭の非破壊試験
- ②ボアホールカメラによる杭体内部の目視調査
- ③特殊な傾斜計の挿入による杭の変形量の測定

ここでは、このうち①と③の方法について実施した例を紹介する。①は、杭頭を直接打撃することにより得られた反射波の挙動を一次元波動論を用いて



写真-6 杭頭の被害



(b) 水際線近傍 [被害形態②]

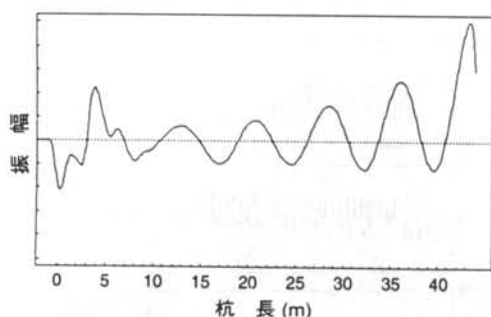


図-6 杭の非破壊試験における測定波形

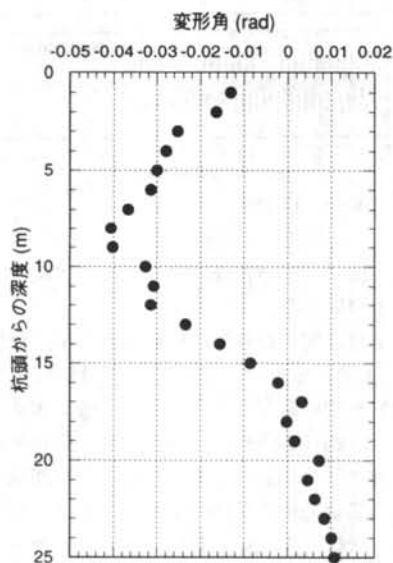


図-7 測定された杭の変形角

解析する方法である⁴⁾、実際に測定された波形の例を図-6に示す。調査した杭は、3本継ぎのPHC杭で杭長は31mである。杭に損傷がある場合、弾性波はその深度において反射して、波形は損傷深度を境界とする重複反射になることから、この杭は8m付近の深さで損傷している可能性が高いと判断された。ただし、この方法は掘削調査に比べて比較的簡単に調査できる利点はあるものの、ノイズの問題や軽微な損傷を判断し難いなど、未だ完全に確立された技術とは言い難い点に留意が必要である。

③は、杭の内部に特殊な傾斜計(写真-7)を挿入することにより杭の変形量を測定する方法である。特殊な傾斜計というのは、長さ1.5mの取付け治具を作製し、直行する2方向を測定できるように2台の傾斜計を取り付けたものである。杭内壁から一定距離を保ちながら上下移動できるように、杭内壁と



写真-7 傾斜計

は4点の支持金具と板バネで支持するよう工夫されている。ここで調査した例では、構造物周辺の地盤は1m近くも水平移動しており、杭が損傷している可能性が高いと考えられた。杭頭の目視による観察によれば杭頭には損傷は確認されなかったが、杭の内部に挿入した傾斜計により変形角を測定したところ図-7に示す深度方向の分布が得られた。この図より、変形角の変化が大きい深度15m付近で杭が損傷している可能性が指摘される。当該地盤では上部の埋立層(層厚約10m)が液状化し、それに伴う側方流動により杭が強制変形を受け損傷したと考えられる。

一般に杭の全長は目視で確認できないため被害状況を把握するのが難しく、地震から半年以上経過した現時点においても杭の被害が明らかにされた事例は少ない。1964年新潟地震の際に液状化により折損した杭が20年近く経てから発掘調査された例⁵⁾もあるように、今回の地震による被害についても今後地道な調査を続けていくとともに、そうしたデータが公表され、基礎の耐震設計法の見直しにつなげていくことが必要である。

§4. 遠心模型振動実験

今回の地震の大きな特徴として、ケーソン岸壁に被害が集中したことが挙げられる。ケーソン岸壁が海側に移動するとともに、ケーソン岸壁背後地盤の側方流動による構造物基礎の被害が多く発生した。

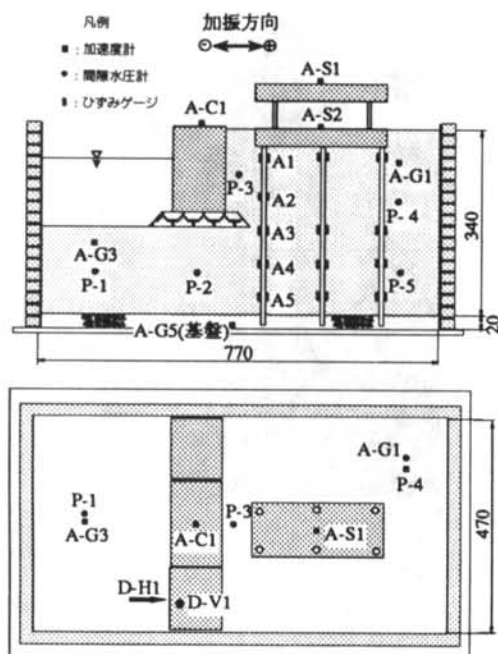


図-8 模型概要および計器配置

そこで、ケーソン岸壁の地震時の挙動を明らかにし、構造物基礎の被害を発生させる要因を把握するために、遠心模型振動実験を行い実現象の究明を試みた。

4.1 遠心模型振動実験の概要

実験に用いた遠心模型実験装置は、振動実験時の有効半径が3.11m、約50g ($g=980\text{cm/s}^2$)の遠心力場で300kgの試験体を最大10gの加振力で振動させることができる⁶⁾。実験に用いた土槽は、内寸が長さ770mm、奥行き470mm、高さ400mmのせん断土槽で、内側に厚さ0.5mmのゴムメンブレンを有している。また地盤の飽和を行うために、ポーラスメタル付の吸排水孔を土槽底部に4箇所設置している。

ケーソンおよび杭を有する建物の模型は図-8に示すとおりであり、実物との縮尺比は1/30を想定している。ケーソン模型は3分割し、局所的な動きによってケーソンの動きが拘束されないような工夫を加えた。ケーソン模型は、高さ150mm・幅100mmの中空の剛体鉄箱で、比重は約2.1であり実際の重力式ケーソンとほぼ等しい。また、基礎捨石として平均粒径約6mmの碎石を高さ20mmで敷き詰めた。

建物模型は、一質点系のせん断振動が卓越するようにモデル化し、30gの遠心場で接地圧が85kPaとなるように作成した。また建物の減衰定数は約6%

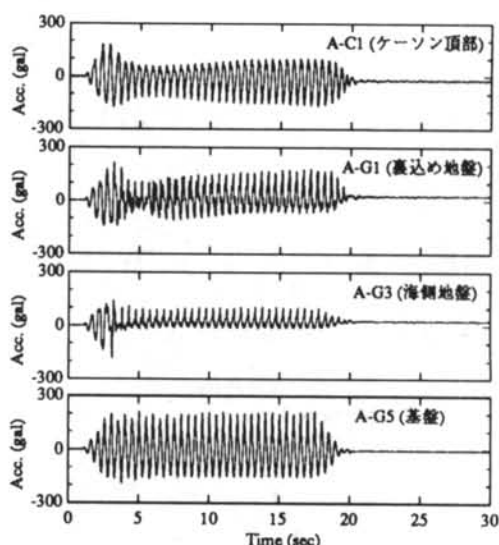


図-9 加速度の時刻歴

である。杭は、直径10mm、厚さ1mmのアルミニウム製で6本設置した。

模型地盤に用いた砂は、硅砂8号で平均粒径は約0.1mmである。模型は、最初に海底地盤に相当する水平地盤を空中落下法で作成し、土槽全体を真空容器に入れ、約15時間かけて模型地盤の飽和を行った。なお、透水性の相似則を満足させるため間隙流体には水の約30倍の粘性を持つシリコンオイルを使用している。次に、大気中で基礎捨石およびケーソンを設置し、裏込め地盤を乾燥状態で作製した。その後、海に相当する部分にシリコンオイルを入れ、30gの遠心力場で浸透により裏込め地盤を飽和させた。

計測は、地盤内、建物、ケーソンに加速度計を設置し、地盤内に間隙水圧計を埋設した。また、杭の曲げひずみを測定するために杭の両面にひずみゲージを添付し、ケーソンの水平変位と垂直変位の測定のため、非接触のレーザー変位計を設置した。計測位置の詳細は、図-8に示すとおりである。

加振実験は、遠心加速度30gの状態、繰返し回数30回のサイン波を、実地盤換算で2Hz、約200galの入力となるように設定した加振を行った。

4.2 実験結果と考察

(1) ケーソンおよび地盤の液状化時の挙動

ケーソン頂部(A-C1)、裏込め地盤(A-G1)、海側地盤(A-G3)および基礎(A-G5)の加速度時刻歴を図-9に、海底地盤(P-1)、ケーソン下部(P-2)、

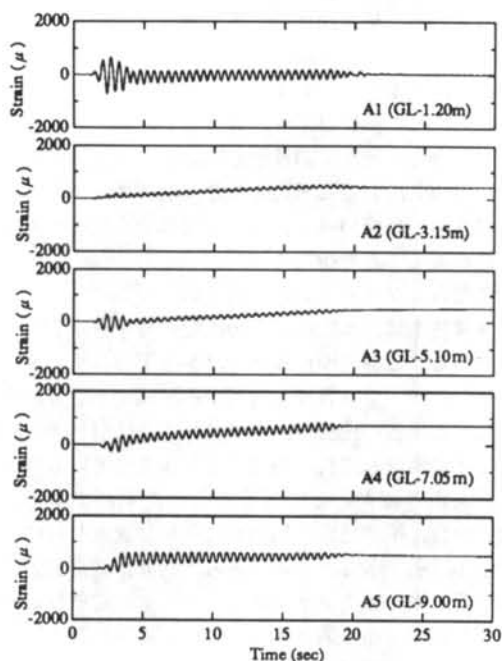


図-10 過剰間隙水圧の時刻歴

ケーソン背面(P-3)、裏込め地盤のG.L.-2.1m(P-4)およびG.L.-7.5m(P-5)の深度における過剰間隙水圧の時刻歴を図-10に示す。図中の数値は、実験の相似則により実物に換算している。ケーソン下部地盤では、過剰間隙水圧が一旦低下した後、徐々に上昇する傾向にある。この原因は、地盤の剛性変化に伴い生じた自重によるせん断変形によって正のダイレイタンスが発生し、非排水条件下で過剰間隙水圧が低下するためである。図-10から判断すると、本実験では、ケーソン背面も含めて広い範囲で液状化が発生している。しかし、実験後の地表面の調査では、ケーソン背面地盤には噴砂などは見られなかった。このことは、現実のケーソン背後地盤についても噴砂の有無のみで液状化現象を推定することが困難であることを示唆している。

図-11は、ケーソン頂部(A-C1)の加速度およびケーソンの水平(D-H1)と鉛直変位(D-V1)の時刻歴を示したものである。ケーソンは、振動回数の増加に伴って徐々に水平方向に移動し、加振終了時には水平変位が約380mm、沈下は約200mmとなっている。その後の過剰間隙水圧の消散に伴うケーソンの変形も測定しており、最終的な水平変位は417mm、沈下は238mmであった。模型実験で想定したケーソン高さは実物換算で4.5mであり、ポートアイランドや

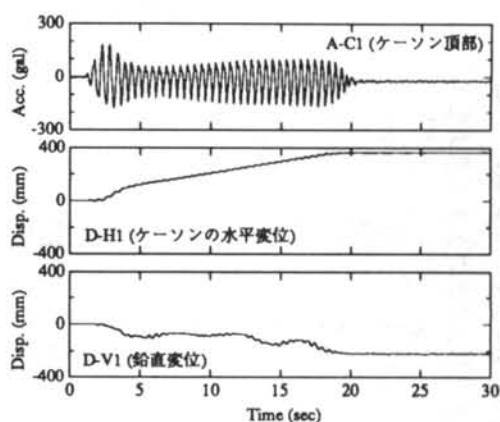


図-11 ケーソンの加速度と変位の時刻歴

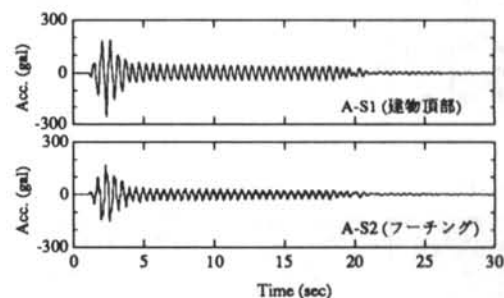


図-12 建物頂部とフーチングの加速度時刻歴

六甲アイランドのケーソン高さ16~18mより小さいことを考えると、実験結果におけるケーソンの移動・沈下の状況は兵庫県南部地震の被害状況と定性的には対応している。ケーソンの水平移動は、図-10のケーソン背後地盤の過剰間隙水圧の上昇と相関性は小さいようである。この実験の場合ケーソンを変形させた主要因は、ケーソンの慣性力に伴う初期せん断の加わったケーソン下部地盤の繰返し変形により蓄積される残留変形であると考えられる。なお、上述したように、いわゆるpost-liquefactionによる地盤変形は本実験の場合、加振時に生じた変形に比べ1/10以下と小さかった。

(2)杭基礎構造物の挙動

建物頂部(A-S1)、フーチング(A-S2)の加速度時刻歴を図-12に示す。液状化により地盤の剛性が低下したため建物およびフーチングの応答は著しく減少している。

図-13は、杭Aの曲げひずみの時刻歴を示したものである。杭頭の曲げひずみは主として建物の応答によるもので、図-12に示した建物の応答と良く対

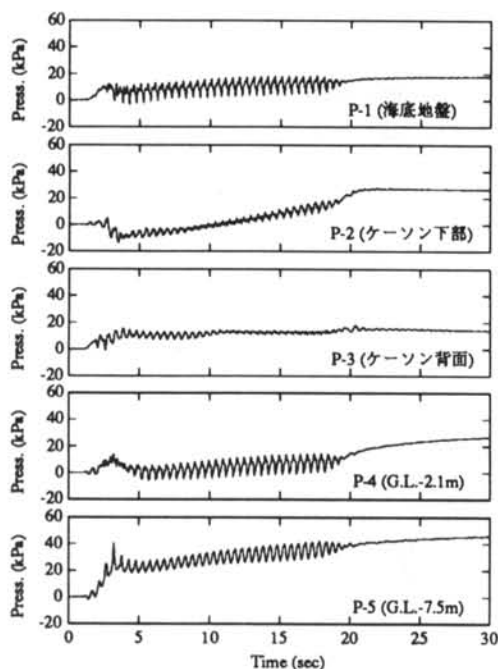


図-13 杭Aの曲げひずみの時刻歴



写真-8 加振終了後の模型

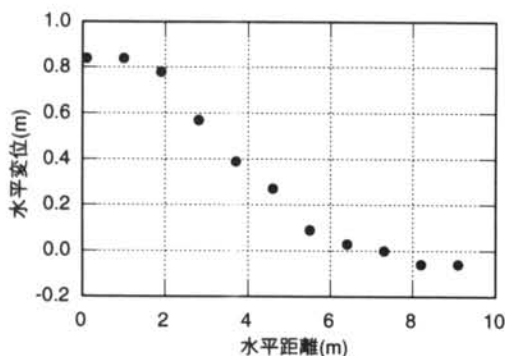


図-14 模型地盤の水平変位

応じている。杭頭曲げひずみの値は、コンクリート杭であれば十分に破壊する大きさである。注目すべき点は、杭頭のみならず杭中間部にもケーソンの変形に対応した曲げひずみが発生していることである。この場合もケーソンの移動と同様に、地盤の側方流動に起因していると考えられる。杭は地盤の側方流動により、杭頭のみではなく中間部でも損傷する可能性があることを指摘できる。

(3)地盤およびケーソンの残留変形

写真-8は、加振終了後の模型の様子を示したものである。地盤表面にはケーソンと平行にクラックが生じ、ケーソン背面の地盤が約80cm沈下している。また建物周辺の地盤が、ケーソン方向に引きずられるように変形し、杭の周辺で沈下が生じている様子も、実際の被害として良くみられたものである。図-14は、模型地盤の地表面に一列に設置した標点の水平移動を示したものである。兵庫県南部地震において六甲アイランドで生じたケーソン岸壁付近の地盤変位の分布(図-4)と定性的には、良く一致していることがわかる。

以上のように、兵庫県南部地震で被災したポートアイランドや六甲アイランドのケーソン移動・沈下や背後地盤の被災状況のみならず岸壁近傍において発生した杭基礎の被害状況を、模型実験は比較的良く再現していると考えられる。

§5. まとめ

液状化現象により甚大な被害の生じた兵庫県南部地震の地盤ならびに基礎に関する地震災害調査と、特に被害の顕著であったケーソン岸壁と杭基礎構造物の遠心模型振動実験による原因分析の結果、以下のような点を明らかにすることができた。

- 1) 兵庫県南部地震において、埋立地では液状化に伴う地盤災害や基礎の被害が見られたが、この現象は、水平地盤において発生したものと岸壁や護岸背後のものに大別できる。
- 2) 水平地盤における杭基礎の被害は、地盤が液状化したため水平方向の地盤反力が低下し、建物の応答による水平力によって、杭頭と杭の中間部で被害が生じていた。
- 3) ケーソン岸壁近傍に構築された杭基礎の被害に着目すると、水平地盤での液状化に伴う地盤反力の低下による杭頭部分の損傷ばかりでなく、

地盤の側方流動現象によって、中間部でも損傷する可能性がある。

4) 遠心模型振動実験の結果では、加振後に生じる

いわゆるpost-liquefactionによって生じる地盤変形は相対的に小さく、加振によって発生した変形成分の1/10以下であった。

＜参考文献＞

- 1) 清水建設技術研究所：“1995年兵庫県南部地震調査報告書”（1995年2月）
- 2) 土質工学会関西支部：“関西地盤”（1992年）
- 3) 原田健二，安田進，新川直利：“兵庫県南部地震により液状化した地盤の沈下量と改良工法の効果に関する考察”土木学会第23回地震工学研究発表会講演概要（1995年7月）pp.229～232
- 4) ㈱東京ソイルリサーチ：“実測結果を中心とした杭の非破壊試験技術の適用性などについて”（1994年3月）
- 5) 西沢敏明，河村壮一，田尻貞夫：“新潟地震時に破損した既製RCぐいの調査と耐震解析（その1）調査概要”日本建築学会大会学術講演梗概集（1982年）pp.767～768
- 6) 佐藤正義：“遠心力場における振動台実験と地盤の動的変形特性に関する研究”土木学会論文集 第499号/III-28（1994年）pp.207～216

