

液状化に伴う流動化に関する遠心振動実験

小笠原政文¹・角田 浩²・牧田篤弘³・五瀬伸吾⁴

佐藤正義⁵・宮田 和⁶

- ¹正会員 首都高速道路公団 工務部 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)
²正会員 首都高速道路公団 神奈川建設局 (〒231 神奈川県横浜市中区真砂町2-25)
³正会員 首都高速道路公団 保全施設部 (〒100 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)
⁴正会員 (株)建設技術研究所 道路本部 (〒103 東京都中央区日本橋本町4-9-11)
⁵正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)
⁶正会員 清水建設(株) 土木本部 (〒105-07 東京都港区芝浦1-2-3 シーパンスS館)

矢板護岸の近傍にある杭基礎構造物を想定し、流動化の対策工がない場合とある場合の比較するため、地盤の透水性や護岸矢板、杭基礎、対策工を現実に対応するようにモデル化した遠心振動実験を行い、対策工の効果について検討した。その結果、護岸近傍の杭基礎の前面にある剛性を有する対策工を設置することにより、杭の前面地盤の流動変位を小さくでき、これに伴い杭に発生する曲げひずみが小さくなり、流動化対策として有効であることが分かった。

Key Words: dynamic centrifuge test, group pile foundation, quay wall, liquefaction damage, lateral ground spreading

1 まえがき

兵庫県南部地震では、埋立地などにおいて地盤の液状化に伴う流動化の被害が目撃されたが、矢板護岸¹⁾にも数メートル程度の流動化がみられ、その近傍基礎の被害も見られた。大地震による被害から軽減するためには、流動化による変位のメカニズムを把握するとともに、その近傍杭基礎に及ぼす影響を明かにし、対策工法について検討しておく必要がある。その検討の一環として、せん断土槽を用い矢板護岸および控え矢板とその近傍の杭基礎を精密にモデル化して遠心振動液状化実験を実施した。これまで、護岸のみの場合において、地盤構造の違いが流動化の変位に及ぼす影響について報告した²⁾。本文では、矢板護岸の近傍にある杭基礎を想定し、流動化の対策工がない場合とある場合の実験を行い、その違いが杭に発生する断面力に及ぼす影響について報告する。

2 遠心振動実験の概要

実験に使用したせん断土槽の内寸法は、長さ80cm(加振方向)、幅47.5cm、深さ31.5cmである。矢板護岸の近傍にある杭基礎を想定しており、対策工がない場合と対策工がある場合の2ケースの実験を行い、両者の比較による流動化対策工の効果について検討する。図1に対策工がある場合の実験についての試験体を示す。対策工がない場合の地層構成、計器配置は同じである。実物との縮尺比は、1/30にした。

液状化層に用いた砂は、平均粒径 $D_{50}=0.09\text{mm}$ の珪砂8号であり、液状化後の過剰間隙水圧の消散過程における実地盤の挙動を再現するという観点から、実地盤に近い透水係数になるようにできるだけ D_{50} が小さいものを採用した。模型地盤は、最初に下層の液状化しにくい地盤として豊浦砂 $Dr=90\%$ で作成し、次に上層の非液状化層と液状化層として珪砂8号 $Dr=50\%$ を空中落下法により作成した。上層の非液状化層は、地下水位以上にすることにより不飽和にしている。間隙流体には、透水性の相似則を満足させるため、間隙流体には水の30倍の粘性を持つシリコンオイルを使用した。模型地盤の飽和は、土槽全体を真空容器に入れ、土槽下部からシリコンオイルを注入して約3日間かけて行った。矢板護岸および控え矢板の模型は、実際の矢板護岸と同じように法線方向の曲げモーメントを発生しなくするために、一枚の矢板幅を1cmに分割し、それをビニールテープで接続した。矢板護岸と控え矢板は、頭部にアルミニウムのコーピングを設置し、タイロッドをモデル化した鋼線でつないだ。実験で想定した護岸の高さは、実物換算で高さ3.6mになる。護岸の実験では、矢板護岸周辺の地盤は大きく変位し、それから離れた地盤での変位は小さい。そのため、せん断土槽側壁におけるメンブレンの拘束の影響が位置によって異なるので、側壁には厚さ0.2mm、幅10cmの短冊状メンブレンを並べて貼って、その影響を小さくしている。

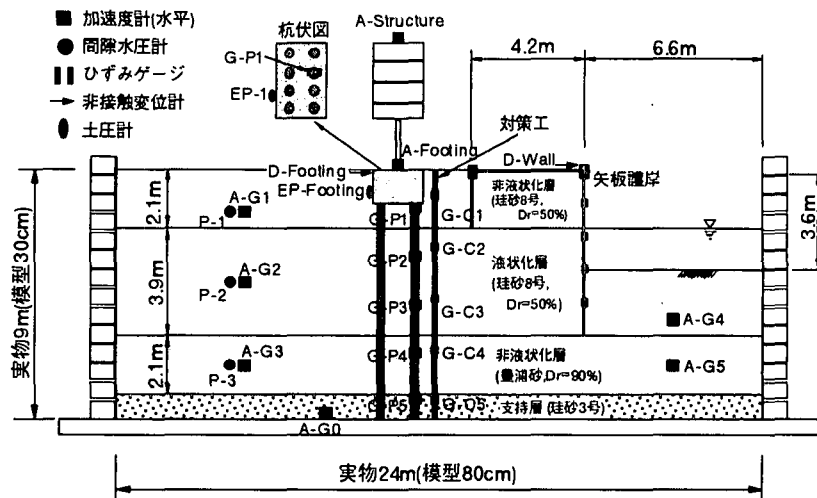


図1 矢板護岸および杭基礎の試験体および計器配置

模型杭は、直径10mm、肉厚1mmのアルミニウムパイプであり、相似則によると実物の鋼管杭で直径30cm、厚さ8mmのものに相当する。杭配置は8本(4x2)の群杭で、護岸法線方向のピッチは2.5D(Dは杭外径)である。杭頭はフーチングに剛結し、杭下端は土槽底面に固定している。構造物模型は、一質点系でモデル化し、固有振動数は実物換算で2Hz、減衰定数は約5%である。流動化対策工の設置位置については、護岸矢板と杭基礎の間、杭基礎の陸側などの配置が考えられる。安田ら³⁾の報告にもあるように、護岸と杭基礎の間に設置するのが最も効果的であると考え、ここでは対策工は、護岸と杭基礎の間に基礎幅の鉄製の板を土槽下端固定にして設置した。

計測計器は、地盤内に加速度計と間隙水圧計を埋設し、杭および対策工矢板にはひずみゲージを貼った。矢板護岸頭部の水平変位を測定するためレーザー変位計を設置した。レーザー変位計は、遠心装置本体に固定した。フーチングには土圧計を設置して、非液化化層の流動圧を測定することを試みた。また、地盤内に地盤の変形に追従できる小さなボールを、細い糸で連結したボールチェーンを鉛直に設置した。これは、実験を終了して模型地盤を解体する時にボールチェーンの変形を測定することにより、地盤の残留変形分布を得るためである。液化化実験の加振は、遠心加速度30gにおいて繰返し回数10回のサイン波を実地盤換算2Hzで行った。目標とした入力加速度は、150galである。

3 実験結果

(1) 加速度応答

図2に構造物、フーチング、護岸から離れた地表地盤、基盤入力動の加速度時刻歴を示す。なお、以後に示す図は相似則⁴⁾にそって、対応する実物に換算して示し

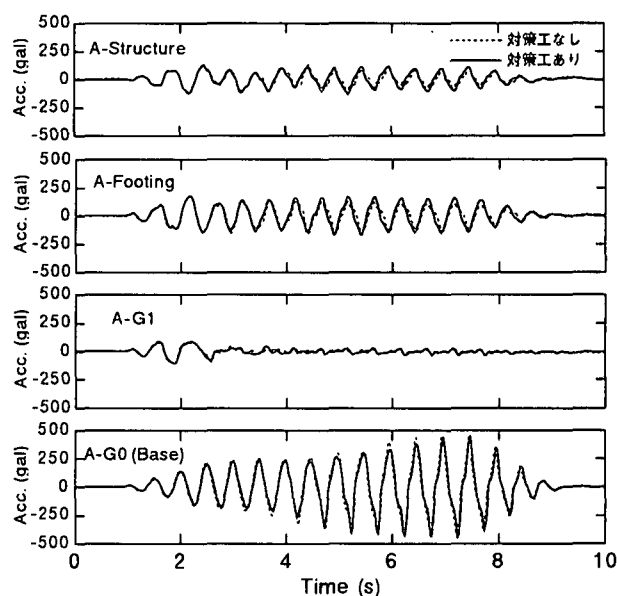


図2 地盤加速度の時刻歴

ている。地表地盤(A-G1)の加速度時刻歴より、入力²⁾の2目目で地盤は液化化していることが分かる。基盤入力動は最初はほぼ目標の加速度150galであったが、地盤の液化化に伴い大きくなる傾向を示した。構造物(A-Structure)、フーチング(A-Footing)、地表地盤(A-G1)の応答は、何れも対策工がない場合とある場合で概ね一致している。

(2) 過剰間隙水圧および変位の応答

図3に地盤の過剰間隙水圧、矢板護岸とフーチングの水平変位、およびフーチングに作用する流動圧の時刻歴を示す。なお、時刻歴において加振時間は約1~9秒であり、加振中と加振後の変化がわかるように時間軸を対数で表示している。地盤の過剰間隙水圧(P-2)より、加振開始後2秒間で対策工がある場合とない場合の実験の両者ともほぼ同じように液化化していることが分かる。

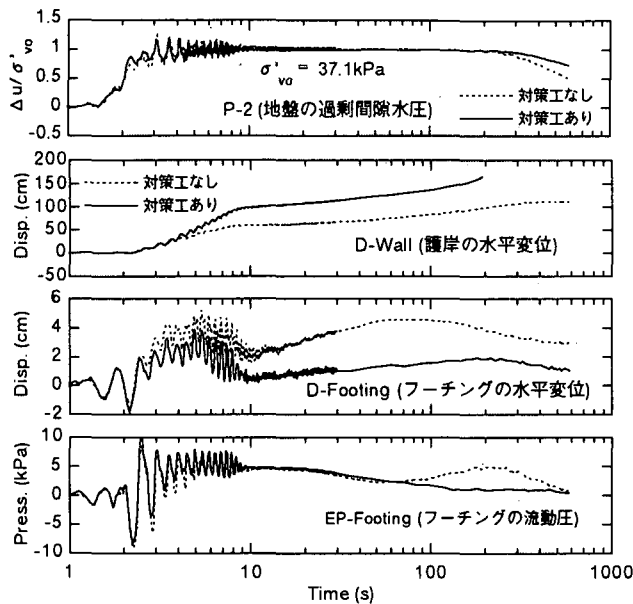


図3 過剰間隙水圧と変位の時刻歴

しかし、護岸矢板の水平変位 (D-Wall) は加振中の1~9秒と加振後において、対策工がある場合はない場合よりもかなり大きい。これは、対策工がある場合はない場合よりも、護岸矢板前面の河川地盤の受動抵抗が小さかったためと推察される。流動化によるフーチングの残留変位は、最終時刻の600秒において対策工がある場合は1cm、ない場合は3cmとなっており、対策工の効果が現れている。フーチングに作用している流動圧は、対策工がある場合とない場合で、加振中の振動土圧は両者ともほぼ同じ程度であり、途中異なる部分もみられるが最終的には両者ともほぼ加振前の圧力にもどっている。これは、地盤の変形・ひび割れ等が発生し、土圧が再配分されたためではないかと考える。

(4) 杭および対策工に発生する曲げひずみ

図4に杭頭と杭下端の曲げひずみ、対策工下端の曲げ

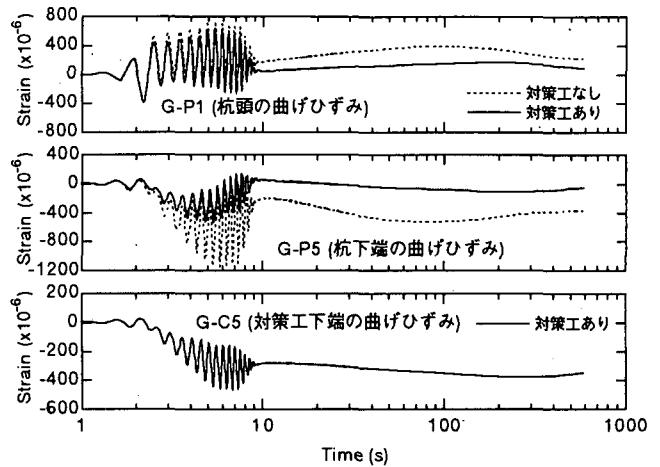


図4 杭と対策工の曲げひずみの時刻歴

ひずみの時刻歴を示す。なお、矢板の曲げひずみが正の場合は河川側に凸の曲げモーメントが発生している状態である。加振中の1~9秒の振動成分において、杭の曲げひずみは大きく、上部工の慣性力と地盤震動による変形に支配されている。これは、杭の下端が土槽底面に固定され入力動の影響を強く受けたためと考えられる。また、杭頭はほぼ同じであるのに、杭下端は対策工がある場合には小さくなっており、加振中にも対策工効果が現れている。杭頭と杭下端の曲げひずみも、その残留量は対策工がある場合は、ない場合よりも小さい。これにも、対策工の効果が現れている。流動化の対策工は、下端に大きな曲げひずみが発生しており流動化に抵抗していることが分かる。

図5に (a) 杭の曲げひずみ (対策工がない場合)、(b) 杭の曲げひずみ (対策工がある場合)、(c) 対策工の曲げひずみの深度分布を示す。図の (a) と (b) において対策工がある場合はない場合よりも、何れの時刻におい

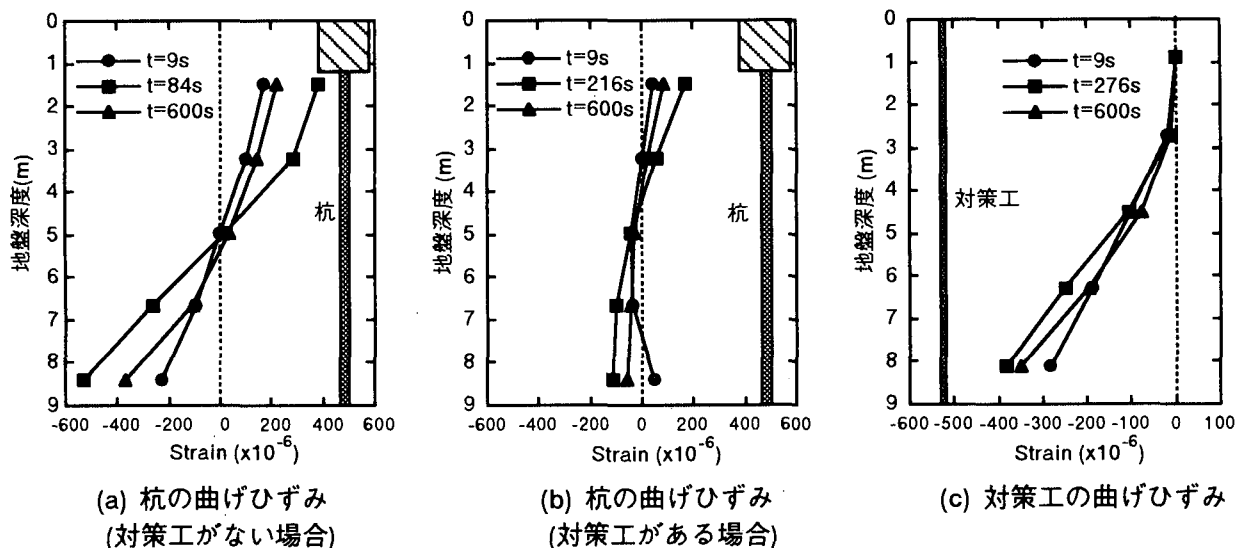


図5 杭と対策工の曲げひずみの深度分布

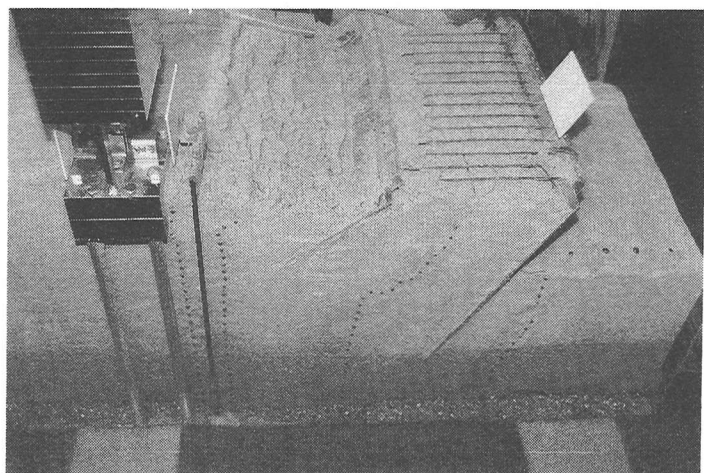


図6 対策工がある場合の実験終了後の試験体

ても杭の曲げひずみは小さく、対策工の効果が現れている。図の(c)において、曲げひずみの分布形状より流動化の対策工の下端を固定しているため片持ち梁として抵抗している。

図6は対策工がある場合の実験終了後における地盤のひび割れ状況と地中変位の状況の写真である。護岸矢板が流動化により傾斜している様子がみられる。実験後の地表地盤の変状は、控え矢板の背面が大きく陥没していた。これは、矢板護岸に控え矢板がタイロッドで結合されているため矢板護岸の移動に控え矢板がひきずられたためである。また、護岸矢板と控え矢板の間の地盤は、控え矢板の下端で大きくなっていることが分かる。

図7に対策工がある場合について、杭の前面地盤と一般地盤における地中変位の分布を示す。一般地盤とは杭がない位置で、側壁から9cm(実物換算で2.7m)の位置である。矢板と対策工の間の地盤において、地表近くに特に大きな変位が発生しているのは、控え矢板の移動によりその背面地盤が崩壊したためである。また、地盤の水平変位は、8号珪砂による液状化層の下端の境界付近の深度6m付近から発生しており、非液状化層とした豊浦砂層の変位はほとんど発生していない。控え矢板と対策工の間の地盤において、水平変位は杭の前面地盤(—○—)は一般地盤(—■—)よりも小さい。これは、杭と対策工の剛性により護岸側の地盤変形も抑えられたためと考えられ、剛性がある材料があればその前面の地盤変位を小さくできることを示している。対策工と杭の間の地盤における水平変位については、一般地盤(—●—)には大きな水平変位が生じているものの、杭の前面地盤(—○—)の水平変位は非常に小さい。これは、流動化対策工の効果が現れているためである。

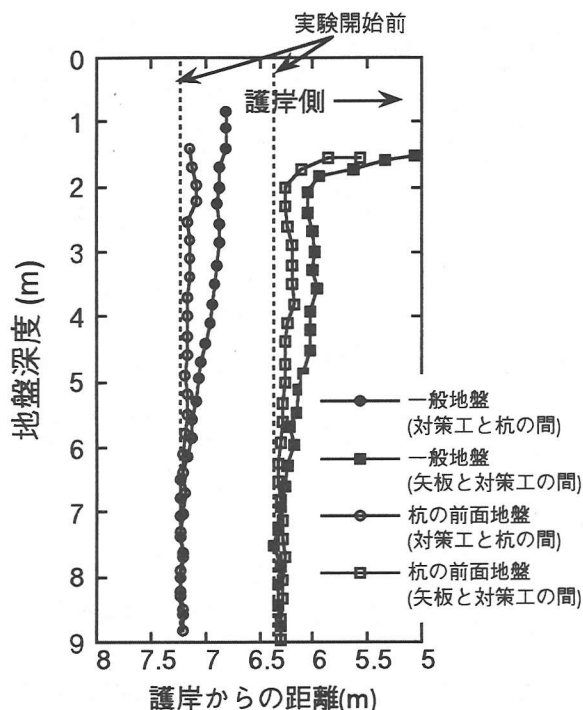


図7 実験終了後の地中変位の分布

4 まとめ

矢板護岸の近傍にある杭基礎の構造物を想定し、流動化の対策工がない場合とある場合の比較するため遠心振動実験を行い、対策工の効果について検討した。その結果、護岸近傍の杭基礎の前面にある剛性を有する対策工を設置することにより、杭の前面地盤の流動変位を小さくでき、これに伴い杭に発生する曲げひずみが小さくなり、流動化対策として有効であることが分かった。

最後に、本検討にあたって「地盤流動に伴う高架橋への影響に関する調査研究」委員会(委員長 八戸工業大学 塩井幸武教授)の委員の方々および関係者の皆様に深謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 阪神・淡路大震災報告書(解説編) 5.3 岸壁・護岸の被災状況, 社団法人 地盤工学会 阪神大震災調査委員会, pp.290-291, 1996年3月
- 2) 角田浩, 小笠原政文, 牧田篤弘, 五瀬伸吾, 宮田和, 佐藤正義: 地盤流動とその対策工の効果に関する遠心振動実験 その1 矢板護岸における地盤流動の再現, 第32回地盤工学研究発表会, 1997年7月(投稿中)
- 3) 安田進, 野村博之, 寺内哲也, 田中宏征, 喜田浩, 龍田昌毅, 原田典佳: 液状化による護岸背後地盤の流動とその対策工に関する振動台実験, 第二回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.121-126, 1999年1月
- 4) 佐藤正義, 社本康広, 後藤茂, 桂 豊, 木全宏之: ケーソン岸壁および杭基礎の液状化被害に関する遠心振動実験, 土木学会, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.391-396, 1996年1月