

ケーソン岸壁とこれに近接する杭基礎構造物の 地震時挙動に関する重力場振動台実験

廣岡 明彦¹・永瀬 英生¹・坂本 賢司²

¹正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)
²学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

本研究では、ケーソン岸壁直下の置換砂層厚並びに杭基礎構造物とケーソン岸壁との距離に着目し、これらが両者の地震時挙動及びその動的相互作用に及ぼす影響について検討することを目的として、重力場振動台実験を実施した。これより、置換砂層厚の増加に伴い、より大きな領域において地震動による地盤流動が生じ、ケーソン岸壁の変位並びに岸壁背後地盤の変形量がより大きくなり、そのため杭にはより早い時点で大きな曲げ歪が発生すること、ケーソン・杭基礎構造物間の距離が遠くなるほどその間の地盤はより大きな側方変形を生じケーソンが大きく変位することなどの知見が得られた。

Key Words : Liquefaction, Backfill, Quay wall, Pile, Deformation, Model Test,

1. 研究の目的並びに背景

護岸構造物とこれに近接する構造物の被害の原因となる地盤の側方流動現象は振動により発生する液状化の程度に加え、護岸構造物自体の地震時安定性にも大きく影響される。また、地盤での側方流動による変形量は通常水際線から離れるほど減少するため、近接構造物の被害は護岸構造物との距離に大きく依存する可能性がある。兵庫県南部地震では、地盤の側方流動現象により多くの重力式護岸構造物が変状をきたすとともに、これに近接する種々の構造物が甚大な被害を受けたことが報告されている¹⁾。そこで本研究ではケーソン式岸壁の地震時の安定性に大きな影響を及ぼすと考えられるケーソン直下の置換砂層の厚さ並びに護岸構造物と近接構造物の距離に着目して振動台実験を実施し、ケーソン式岸壁並びにその背後の杭基礎構造物の地震時挙動について調べた。

2. 実験方法並びに条件

本研究で用いた模型の縮尺は想定した実物の 1/60 であり、その概要を図-1 に示す。表-1 は井合の相似則²⁾における各物理量の比 λ (模型/実物) を表しており、本実験の各種模型寸法等の決定に際してはこれを適用した。また、基盤並びに背後地盤・置換砂層はそれぞれ相対密度 70%、40%となるように豊浦砂を水中落下させて作製し、マウンドは粒径 4.76mm~9.50mm の丸礫を、地下水位上の非液状化層は粒径 1mm~4.76mm の礫を用

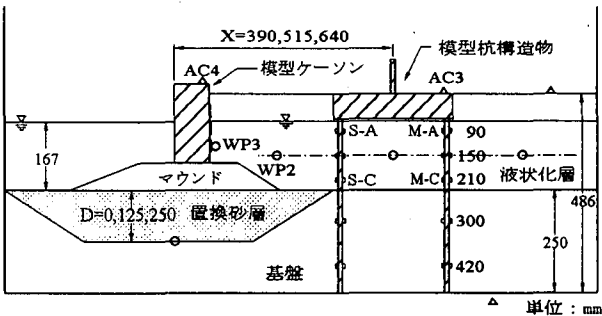


図-1 実験モデル

表-1 各物理量に対する相似則

長さ	λ	0.0167
土の透水性	$\lambda^{0.75}$	0.0464
応力	λ	0.0167
時間	$\lambda^{0.75}$	0.0464
歪	$\lambda^{0.5}$	0.1291
加速度	λ^0	1

いて作製した。想定した実物の基盤は透水性が低いので、基盤と液状化層・置換砂層の境界にはビニールシートを敷設し、振動中に基盤への過剰間隙水圧消散の抑制を試みている。ただし、各実験結果におけるビニールシートの影響を軽減するためその敷設方法は全てのケースで置換砂層が大きい場合に準じた。模型ケーソンはアルミニウムで作製し、その比重を実物と一致させるために内部を空洞とし、また壁面の摩擦の影響を軽減するため、中央部の計測ケーソンと両端のダミーケーソンからな

る3分割構造とした。4本の10mm×56mm×476mmの
 アクリル製の杭の上端を280mm×300mm、厚さ60mm
 のアクリル板に、下端を同断面を有する厚さ16mmの鉄
 板に剛結し、杭構造物模型としている。これは実規模で
 杭径1.5mのコンクリート杭22本分に相等する。また杭
 には深さ90mm、150mm、210mm、300mm、420mmの
 地点に歪ゲージを貼付し振動時に発生する歪の測定を
 行った。実験条件は、置換砂層厚を変化させる場合につ
 いては杭～ケーソン間距離一定($X=515\text{mm}$)の下で置換砂
 層厚Dを各実験で0mm、125mm、250mmとし、また杭
 とケーソンとの距離を変化させる場合については置換
 砂層を設けずにケーソンと杭との距離Xを各実験で
 390mm、515mm、640mmとして剪断土槽内に模型地盤
 を作製し、加速度振幅約500gal、周波数11Hzの正弦波
 を入力波に設定して振動実験を実施した。

3. 実験結果および考察

(1) 置換砂層厚を変えた場合

図-2はケーソン応答加速度AC4の時刻歴であり、図中
 に各実験ケースでの入力加速度振幅を A_p として示した。
 これからAC4の振幅はどの実験ケースにおいても加振
 直後に急増し、その後減衰しほぼ一定となる。この定常
 状態に至るまでの時間はD125、D250、D0の順に小さく
 なり、その振幅はD125とD250に対し置換砂層の無い
 D0が大きい。これは、置換砂層は相対密度が小さいの
 で、基盤のみの場合と比べ振動によるケーソン直下での
 剛性低下が顕著であり入力振動が著しく減衰してケー
 ソンに伝播されるためと考えられる。

図-3に各実験ケースの変位ベクトル図を示す。これに
 よれば、ケーソン直下において置換砂層の厚いD250で
 は海側への隆起が著しく置換砂層で非常に大きな地盤
 流動現象が生じており、D125では置換砂層の部分にお
 いて地盤流動が卓越している。これに対して、D0にお
 いては側方変位は生じているもののD125、D250と比べ
 明らかに小さい。また、ケーソン変位とケーソン近辺の
 背後地盤の変形について比較すると、D250では置換砂
 層に向かって斜め下方へと地盤が変形しケーソン頂部
 が山側へ傾斜しているのに対して、D0では地盤の変位
 ベクトルの水平成分が卓越しており他に比べてケーソ
 ン方向へと地盤が変形しケーソンがほぼ水平に変位し
 ていることが観察される。一方、ケーソン鉛直変位は置
 換砂層の厚さの増加に伴い増大しており、ケーソン鉛直
 変位はケーソン直下の地盤の剛性の減少による支持力
 値の低下が主要因であると推察できる。また、図-4は
 ケーソン背後に設置した水圧計WP3とケーソンと杭構
 造物の中間の地盤内に設置した水圧計WP2により得ら
 れた過剰間隙水圧比($\Delta u/\sigma'_v$)の時刻歴である。これより

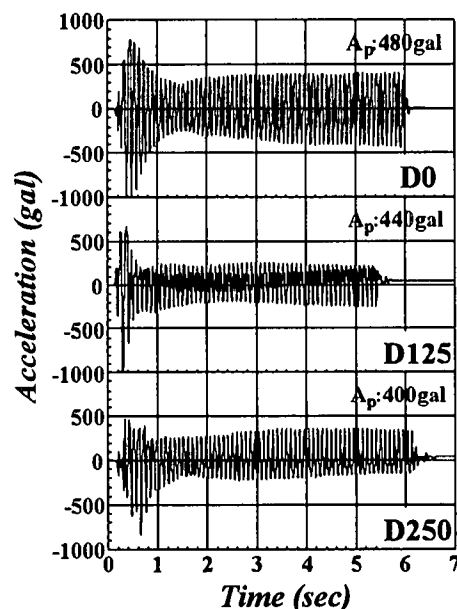


図-2 ケーソンの応答加速度

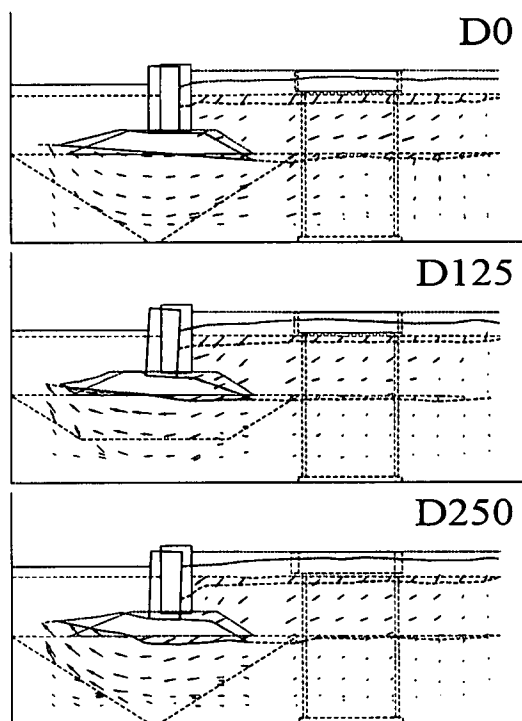


図-3 変位ベクトル

D0ではWP3において負圧、WP2において正圧、D250
 では反対にWP3において正圧、WP2において負圧が観
 測されている。この間隙水圧の減少が変形速度の不連続
 領域において観察されるものであるとすると、D0はケ
 ーソン背面近傍が、D250ではより杭構造物に近い領域
 がこれに該当することとなる。すなわち、D0のように
 振動中のケーソン直下の地盤の剛性低下が小さい場合
 にはケーソン変位は主にケーソン自体の滑動もしくは
 ケーソンのごく近傍の地盤変形に伴い発生し、D250、
 D125のようにケーソン直下の地盤の剛性が振動により
 著しく低下する場合にはケーソン変位は支持力値の減

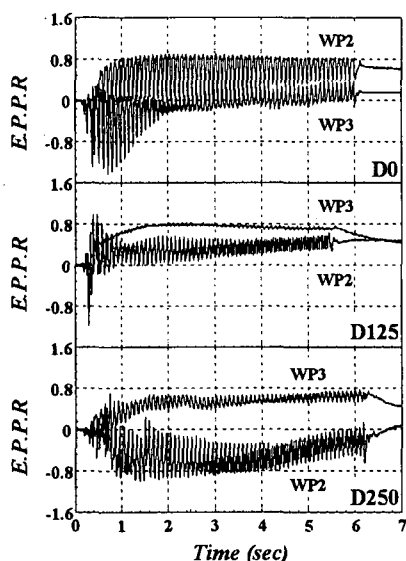


図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴

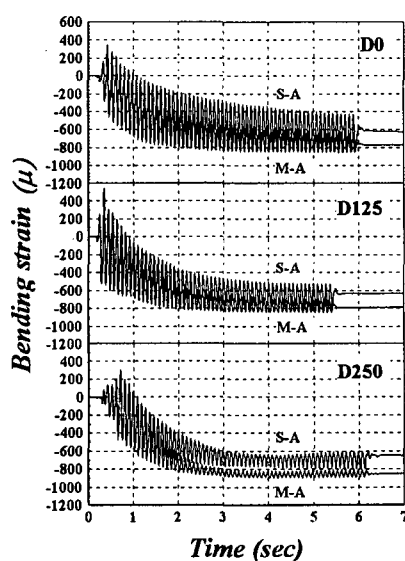


図-5 曲げ歪の時刻歴 (M-A, S-A)

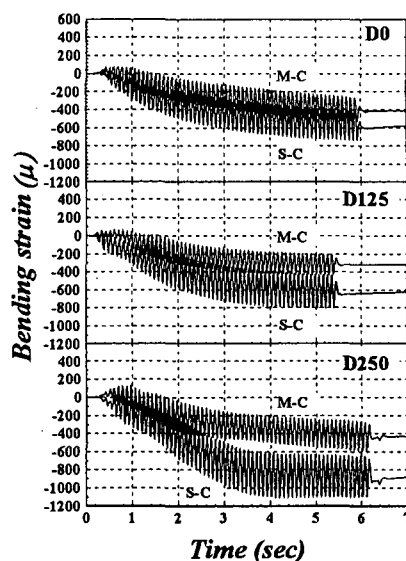


図-6 曲げ歪の時刻歴 (M-C, S-C)

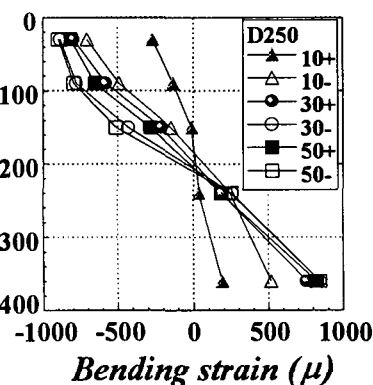
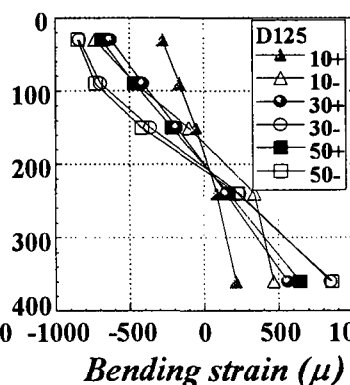
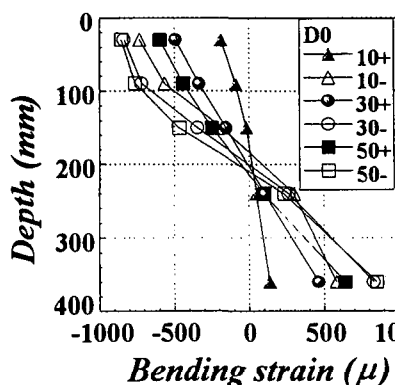


図-7 深さ方向の曲げ歪の分布

少による沈下と置換砂層を含めたより広範囲な地盤の側方流動により発生すると考えられる。

次にケーソンの地震時安定性が杭構造物の挙動に及ぼす影響について考察する。まず図-5は深さ 90mm の地点 A における海側と山側の杭の曲げ歪 S-A, M-A(図-1 参照)の時刻歴を示したものであり、その符号は杭が海側に凸に変形した場合を負と定義している。この結果から、置換砂層厚を変えた場合における全ての実験ケースで S-A, M-A の曲げ歪振幅は振動前半で大きく後半で小さくなっており、その絶対値は山側の M-A が大きい。また、実験ケースごとに比較すると置換砂層厚が増加するにつれ、振動後半において S-A, M-A の曲げ歪振幅がより減少していることがわかる。これに対し、図-6 に示した深さ 210mm の地点 C における海側と山側の杭の曲げ歪 S-C, M-C の時刻歴は S-A, M-A の挙動と異なり、その絶対値は海側の S-C でより大きくなり、その振幅は振動後半でより大きくなるのが観察された。また、置換砂層厚の増加に伴い S-C, M-C の曲げ歪の絶対値の差が大きくなっていることがわかる。全ての実験ケースで、杭構造物上部での応答加速度が振動初期に増幅した後減衰することから、A 点での曲げ歪振幅が振動後半にかけて徐々に減少するのは、杭構造物上部の慣性力による

影響が大きいと考えられる。これに対して C 点では曲げ歪振幅は徐々に増加しており、このことから杭の曲げ歪振幅に及ぼす構造物上部の慣性力の影響は杭の上部に限られ、杭の比較的深い部分では振動による地盤変形の影響が卓越することが推測される。また曲げ歪の蓄積量が A 点では海側より山側で大きく C 点でその反対となるのは、地盤が流動する海側方向に、海側の杭ではケーソン-杭間の地盤剛性の低下が著しい領域が、山側の杭では杭に囲まれた比較的剛性が保持される領域が存在するため、海側の杭においてその変形は側方流動圧の影響を大きく受けるのに対して、山側の杭では海側の杭の変形が基礎スラブを介して杭上部に伝達されることによる水平力の影響が大きく現れるためと考えられる。また、地盤のより広範な領域で側方流動が生じた D250 で M-C, S-C の差が顕著となることもこのことを示唆している。

図-7 は、入力波 10 波目、30 波目、50 波目において、A 点の曲げ歪が極大・極小となる時点での山側の杭 (M) に発生した曲げ歪の深さ方向の分布を示したものである。ここで、A 点での曲げ歪が極小の時点を一、極大の時点をとし、深さは基礎スラブ底面を 0 としている。これによれば、緩い置換砂層が無い D0 に対し D250 では 10 波-30 波間で急激に曲げ歪振幅が減少する一方、曲

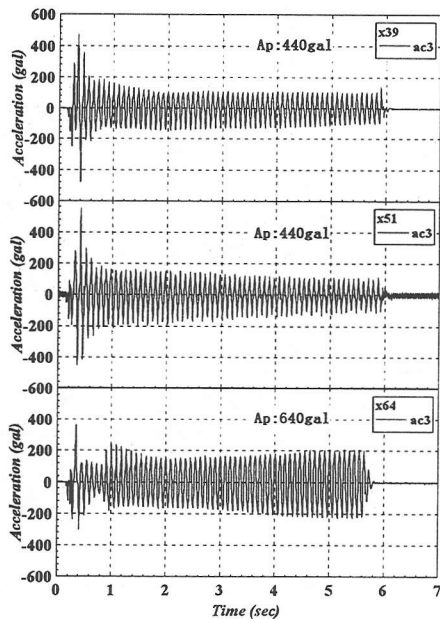


図-8 杭上部の応答加速度

げ歪は急激に蓄積し、その絶対値はD0の50波目の値とほぼ等しくなっていることが確認される。これは、緩い置換砂層が無い場合には、ケーソン直下の地盤は振動によって徐々に剛性が低下することから急激な変形は生じず、このためケーソン背後の地盤の変形並びに杭に発生する曲げ歪の蓄積も徐々に進行する。これに対して緩い置換砂層を有する場合においては振動前半で急激な置換砂層での剛性低下による地盤流動が進行しその影響を受けたケーソン背後の地盤も側方変形量が急増するため、杭において振動初期から急激に大きな曲げ歪が蓄積されるものと考えられる。

(2) ケーソンと杭との距離を変えた場合

図-8は杭構造物上部の応答加速度AC3の時刻歴を前述と同じく入力加速度振幅Apとともに示したものである。他のケースはほぼ設定どおりの加振条件であったのに対し、ケーソン～杭間の距離が最大の場合(X640)のみ振動が極初期で小さく、時刻1秒以降設定値より大きくなるという変則的な加振条件であった。AC3は、X390においては応答が最大となった後急激にその振幅が減衰しほぼ一定となるのに対して、X515では加振時間中振幅の減衰が引き続き観察され、X640では一度減衰した後再び増幅するという挙動が観察される。これは距離Xが小さいものほど側方流動による地盤剛性の低下が杭構造物の応答に顕著に現れたものと考えられる。

図-9に各実験ケースにおける振動による地盤の変位ベクトルを示す。ケーソンと杭構造物間の地盤の変形に着目すると、距離が遠いものほど、ケーソン直下の基盤を含めた大きな領域で側方流動が生じている。図-10に示した地盤の奥行き方向に設置したヌードルターゲットの振動実験終了後の変状の観察結果からも明らかな様

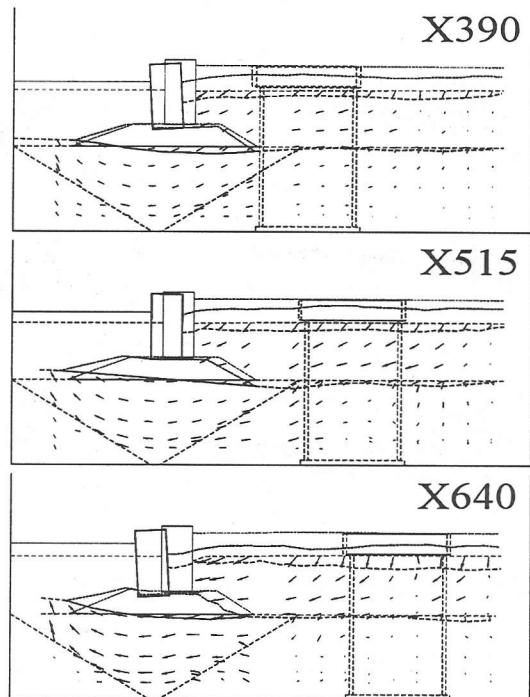


図-9 変位ベクトル

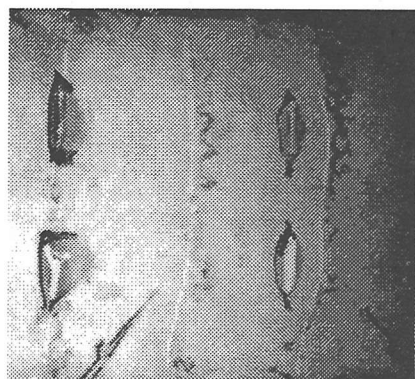


図-10 杭間部の地盤変形

に、杭は地盤の側方流動を抑制しており、他の実験ケースと比較して大きかった入力加速度振幅の影響もあるが、これが杭構造物から最も離れたX640においてケーソンの水平変位が著しくなった原因と考えられる。一方、杭構造物がケーソンに極めて近接したX390では、振動初期での杭構造物上部の増幅された振動がケーソンに及ぼす影響に加えて、側方流動するケーソン背後地盤の領域が杭により制限されたため、結果として基盤に流動変形が及ばずケーソンの前傾が卓越したと推定できる。

参考文献

- 1) 時松孝次：地盤および基礎構造物から見た建物被害，土と基礎，Vol.44，No.2，pp.14～pp.18，1996
- 2) 井合進：1g場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則，港湾技術研究所報告，第27巻，第3号，1988