

### 3.3.8 側方流動に対する基礎の耐震性向上の新技术・新工法の研究

#### 目 次

##### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3カ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

##### (2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
  - 1) 遠心模型実験装置によるケーソン護岸モデル実験
  - 2) 1G場における杭基礎変位低減に関する振動台実験
  - 3) 1G場における杭基礎に作用する流動荷重低減に関する振動台実験
  - 4) 2種類の対策工を用いた流動対策に関する3次元残留変形解析
  - 5) 流動対策工の提案
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 成果の論文発表・口頭発表等
- (e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

##### (3) 平成14～16年度業務のまとめ

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 2.2.3 側方流動に対する基礎の耐震性向上の新技术・新工法の研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京電機大学 理工学部	教授	安田 進
中央大学 理工学部	教授	石原 研而
(財)電力中央研究所 地盤耐震部	上席研究員	金谷 守
関東学院大学 工学部	助教授	規矩 大義
(独)港湾空港技術研究所 構造振動研究室	室長	菅野 高弘
東京大学大学院 工学系研究科	教授	東畑 郁生
不動建設(株)技術統轄部 技術管理室	室長	原田 健二
応用地質(株)技術本部地震防災センター	技師長	吉田 望
(研究協力者)		
東京大学大学院 工学系研究科	助手	本多 剛
(独)港湾空港技術研究所 構造振動研究室	主任研究員	小濱 英司
(株)竹中工務店 技術研究所建設技術開発部	研究員	濱田 純次
武蔵工業大学 工学部	技術職員	田中 剛
(株)東京ソイルリサーチ 本店技術部	課員	安 浩輝
JIP テクノサイエンス(株) 事業開発部	テクニカルリーダー	川口 和広
JIP テクノサイエンス(株) 事業開発部	課員	大矢 陽介
東京大学大学院 工学系研究科	元修士課程学生	福井 聡
東京大学大学院 工学系研究科	元修士課程学生	亀田 真加
東京大学大学院 工学系研究科	博士課程3年	M.Jahangir ALAM
東京大学大学院 工学系研究科	修士課程2年	佐藤 宏樹
東京電機大学大学院 理工学研究科	博士課程3年	田中 智宏
関東学院大学大学院 工学研究科	修士課程2年	横田 正樹
関東学院大学大学院 工学研究科	修士課程1年	伊藤 忠
関東学院大学 工学部	学部学生	中根 美香

(c) 業務の目的

本研究では、都市部における効率的な震災軽減を目的として、新しい合理的な側方流動対策技術の開発、提案を行なう。そして、提案する技術の有効性を確認する室内試験、模型振動実験を計画、実施するのと並行して、その数値シミュレーションを行ない、実地盤、実大模型に対策工を適用した場合の効果を予測、検討する。

(d) 3ヵ年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成14年度:

既存の液状化対策の流動対策への適用性を検討するため、既に工法として実績のある複数の液状化対策工法を、既往の研究成果等から抽出して討議、検討を行い、そのなかから基礎の流動対策として有効と考えられる、地盤改良工法、地中連続壁工法、排水工法を選定した。さらに、それらの対策工が最も有効に機能する施工位置を基礎形式ごとに検討し、次年度以降の本実験の資料とした。

統一された条件での実験を実施するため、護岸形式、地盤条件の検討を行った。これまでに実施された一斉実験、一斉解析等の結果も参考に、流動対策の模型振動実験、ならびに遠心実験の実験条件を確定した。

流動対策の実験に用いる実験用土槽の製作と、排水実験のための準備工を実施したほか、標準的に使用する土質試料を大量採取し、各種土質定数を求める試験を実施した。

採取された試料を用いて、遠心載荷実験により予備実験を実施した。

## 2) 平成15年度：

前年度の準備工を踏まえて、流動対策の中型振動台実験と動的遠心模型実験を実施した。中型振動台実験では、ケーソンの変位に対して抑止杭、連続壁による対策工は有効的に作用しなかったが、杭基礎変位を減少させることができ、その配置は千鳥に配置する方が効果的であることが明らかになった。

河川堤防の遠心模型実験では、地盤変形は加振時の繰返し載荷に伴うせん断変形の蓄積によって生じることが明らかになった。矢板壁や改良体を地中壁として設置したケースでは、地中壁周辺のせん断変形が抑制され、結果として堤体の沈下も抑制あれることが分かった。

せん断土槽による模型杭の実験では、側方流動に伴う杭基礎被害を低減させる工法の効果を高精度で確認できる計測杭を考案した。

## 3) 平成16年度：

護岸変状を考慮に入れた流動対策の検討と模型実験、中型模型振動台実験の実施  
既設構造物、新設構造物の両面から見た対策工の施工性の検討

対策効果の解析的な確認、検証

実大規模の模型実験への適用性の検討

## (e) 平成16年度業務目的

平成15年度の業務に引き続き、側方流動対策の新技术として変形抑制技術、地盤改良技術、基礎の補強技術、等の開発と提案を目的にその有効性を検討するための実験と数値シミュレーションを実施する。具体的には、

流動対策の動的遠心模型実験を実施する。

平成15年度で実施した基本ケースの模型振動実験をもとに、流動対策工を施した模型地盤における、中型振動台実験、小型振動台実験を実施して、対策の有効性の確認を行なう。

対策工の種類としては、護岸背面の地盤改良タイプ、変形抑制タイプとする。

護岸形式ごとに護岸変状と流動変形量の関係を明らかにする。

簡易な流動解析手法を用いて、対策効果のシミュレーションを実施する。  
 実験結果を総括し、有効な流動対策工法の提案を行なう。  
 最終報告書を作成する。

## (2) 平成16年度の成果

### (a) 業務の要約

被害軽減技術として、地中壁(抑止杭)の設置により地盤流動を抑制する工法の有効性について遠心模型実験および大型、中型、小型の各種振動台実験を行なった。また、流動対策工の3次元解析を実施した。動的遠心模型実験では、抑止杭によって、護岸の背後地盤の流動変形がよく抑制されることが分かった。また、抑止杭の剛性を上げることで護岸の変位そのものを軽減する効果があることが分かった。振動台実験では、対策工の施工位置はケーソンと基礎杭の中間部、すなわち流動の下流側への施工が有効であることが分かった。

### (b) 業務の成果

#### 1) 遠心模型実験装置によるケーソン護岸モデル実験

##### a) 実験概要

図1に動的遠心模型実験にて用いたケーソン護岸模型地盤の概要を示す。地盤材料には平均粒径0.58mmの日光珪砂(目標相対密度40%)を使用し、空中落下法によって模型地盤を作製した。ケーソン護岸模型は高さ150mm×幅60mmとし、単位体積重量 $20.6\text{kN/m}^3$ である。護岸背後地盤には構造物の基礎杭を想定した直径10mm、厚み1mmのアルミ製基礎杭模型(実物換算:直径500mm、厚み14mmの鋼管杭に相当)を設置した。海水面はケーソン天

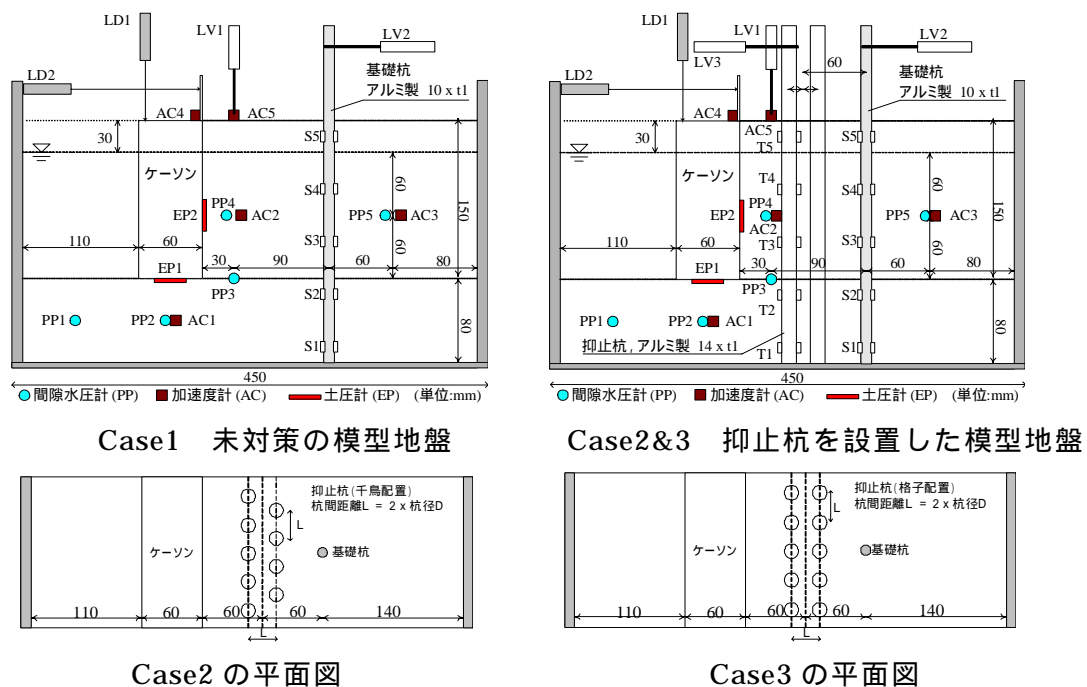


図1 模型地盤概要

端から 30mm の位置にある。対策地盤では、護岸と杭基礎の間に抑止杭(実物換算:直径 700mm、厚み 16mm の鋼管杭に相当)を千鳥 (Case2) と格子 (Case3) 配置で設置し、ケーソン及び背後地盤の変形抑制効果を比較した。実験条件を表 1 に示す。加速度計と間隙水圧計を地盤内部に設置するとともに、ケーソン陸側の側壁に土圧計を設置した。加振実験は 50G の遠心加速度場にて実施し、加振波形は正弦波であり、その条件は 2Hz、400gal、20 波 (実物換算) である。また間隙流体には、透水時の相似則を考慮して水の 50 倍の粘性係数を持つシリコンオイルを使用した。

表 1 実験条件

名称	地盤条件	相対密度(%)
Case 1	未対策	41
Case 2	抑止杭(千鳥配置)	45
Case 3	抑止杭(格子配置)	40

### b) 実験結果と考察

図 2 に各ケースの地盤の最終変形図を示す。この図に示す格子状の実線は、地盤内に設置した色砂の分布を観察した結果である。Case3 の変形図を見ると、抑止杭の背後地盤では水平変位が発生していないことがわかる。従って、過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下のみが一様に生じたことを示している。

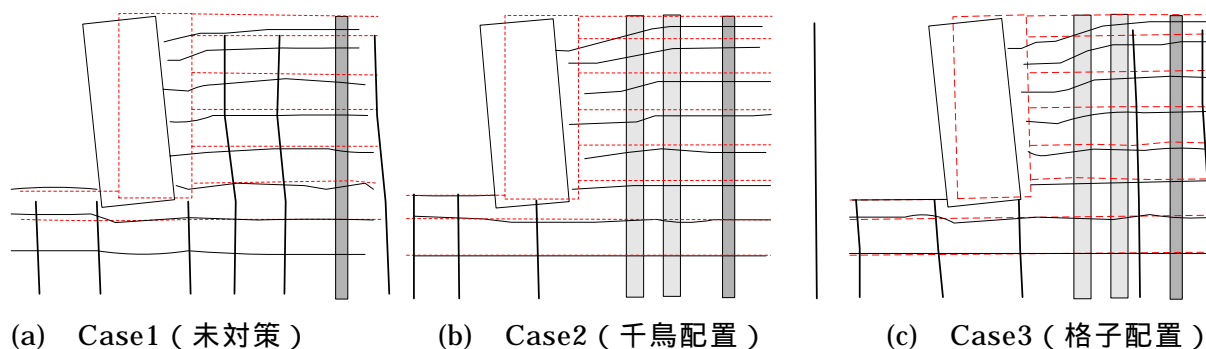


図 2 地盤の最終変形図

図 3 にはケーソン護岸の重心における水平変位量及び回転量の時刻歴を示す。なお、これ以降のスケールは実物換算したものである。抑止杭の設置により、ケーソン護岸の水平変位は約 3 割弱、回転量については約 5 割の低減効果が確認された。なお、今回のケースでは、曲げ剛性が高い杭を密に設置したため、抑止杭の配置方法の違いによる差は見られなかった。

図 4 と図 5 に基礎杭と抑止杭の杭頭水平変位の時刻歴を示す。抑止杭を設置したケース 2 とケース 3 の両ケースには、基礎杭と抑止杭における杭頭変位の時刻歴に一致が見られる。従って、抑止杭と基礎杭が表層の不飽和地盤と一体化して移動することがわかる。未対策地盤と対策地盤の結果を比較すると、対策地盤では基礎杭の杭頭変位に約 6 割強の低減効果が見られる。

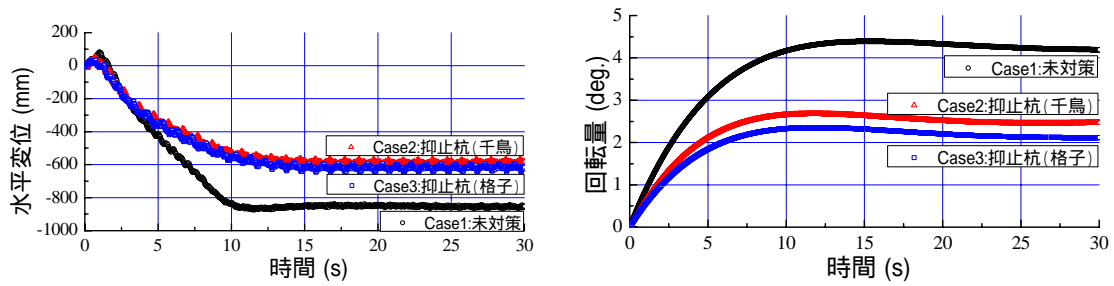


図3 ケーソン重心の水平変位と回転量の時刻歴

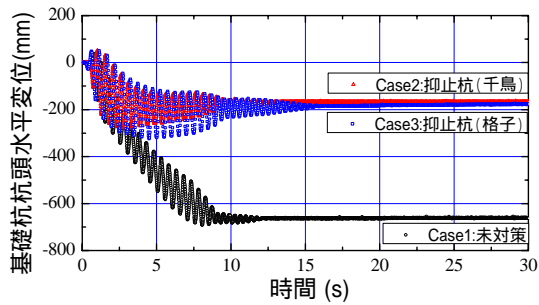


図4 基礎杭の杭頭変位の時刻歴

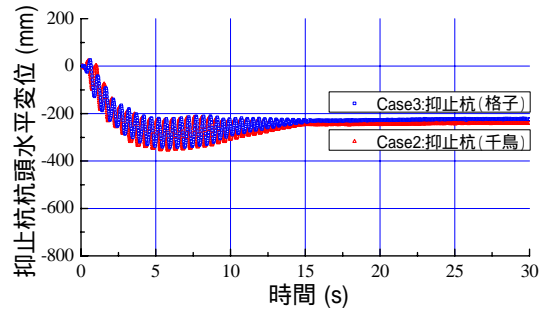
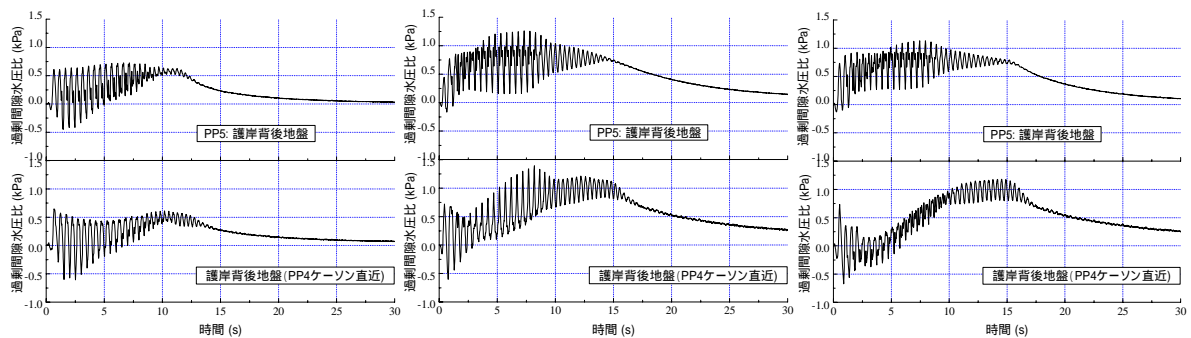


図5 抑止杭の杭頭変位の時刻歴

次に、護岸背後地盤の過剰間隙水圧比を図6に示す。なお、ケーソン海側は過剰間隙水圧比が1まで上昇したが、ケーソン直下では0.5 - 0.6の範囲であり、液状化状態に達していない。抑止杭を設置したCase2とCase3では、抑止杭の背後地盤において間隙水圧比が1.0まで上昇し、液状化状態に達している。ケーソン直近の間隙水圧計PP4の値の推移を見ると、加振直後に過剰間隙水圧比が約0.7まで一旦上昇した後、加振開始から約4秒まで低下していることが分かる。これは、加振直後に慣性力によってケーソンが海側に移動したためにケーソン背後にて過剰間隙水圧の低下が発生したためと考えられる。そして、加振開始5秒後からケーソンの水平変位及び回転の勢いがおさまると(図3)、過剰間隙水圧にも大きな増加が見られる。また対策ケースでは加振開始5秒後に基礎杭及び抑止杭の杭頭変位の増加が終了していること(図4と図5)から、地盤のせん断変形が抑えられたためにダイラタンシーに伴う有効応力の回復が起こらずに間隙水圧は増加したと考えられる。一方、未対策地盤ではケーソンが海側に大きく変位し続けたため、せん断変形に伴う有効応力の回復が発生し、結果として結果として過剰間隙水圧比が0.5程度までしか上昇



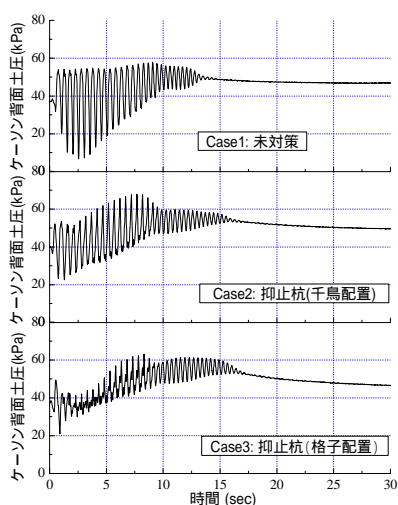
Case1 未対策 Case2 抑止杭(千鳥配置) Case3 抑止杭(格子配置)

図6 護岸背後地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴

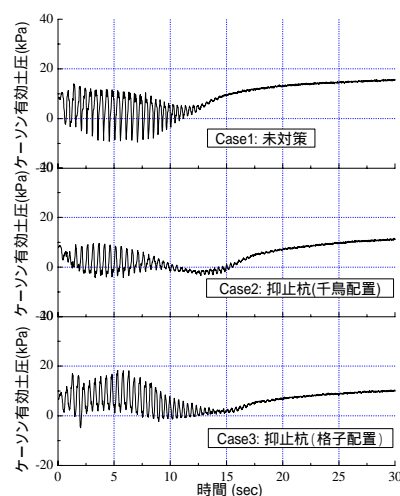
していない。

次に、ケーソンの水平変位とケーソン背面に作用した土圧の関係性を考察する。図7はケーソン背面の全土圧及び有効土圧の時刻歴を示す。ケーソン背面の全土圧は土圧計で計測した値であり、水平方向の有効応力成分と水圧成分の和である。そして、全土圧からPP4の間隙水圧を差し引いたものが有効土圧である。有効土圧の初期値は主働土圧に近い値となっている。その原因は遠心加速度の上昇時にケーソン護岸が海側に若干前傾したためである。その結果、加振後には有効土圧に若干の増加が見られる。ここで、未対策地盤と抑止杭による対策地盤の全土圧分布を比較すると、両分布には明確な差が見られない。むしろ、対策地盤において過剰間隙水圧の上昇量に増加が見られ、全土圧は高く現れている。従って、ケーソンの背面土圧の大小関係からケーソンの移動量の差を説明することはできない。

そこで、図8に護岸直近の不飽和層の地表面加速度の時刻歴を示す。未対策地盤では加速度が相対的に陸側へ片振りしている様子が見られる。加速度と変位の位相差を考慮すると、不飽和層は海側に変位していることを意味する。一方、抑止杭を設置したケースでは、陸側と海側に同程度の振幅が見られる。以上より、未対策地盤では護岸変位に不飽和層が追随するために、護岸の海側への変位が大きく発生することがわかった。一方、抑止杭を設置による対策を施したケースでは、不飽和層の変位が抑止杭によって抑えられる。不飽和層が護岸変位に追随しないため、護岸の水平変位は低減されることがわかった。



a) 全土圧



b) 有効土圧

図7 ケーソン背面の全土圧・有効土圧

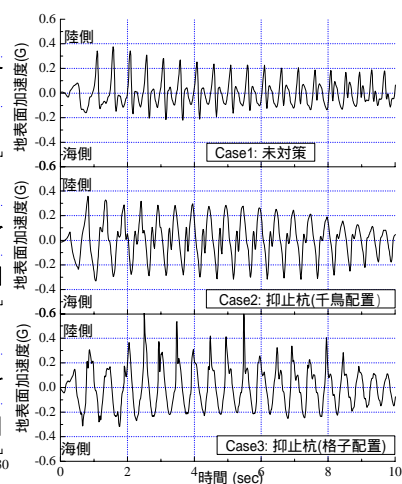


図8 地表面加速度の時刻歴

L2地震により液状化する地盤条件について抑止杭の効果を検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- i) 抑止杭の設置により、基礎杭の杭頭変位は約 1/3 に低減できるとともに、ケーソン背後地盤の地表面沈下は約 2/3 に低減できる。
- ii) 抑止杭の配置方法の違いによる抑止効果の差は見られなかった。これは、剛性の高い鋼管杭 (φ70cm、t16mm) を密に配置したためと考えられる。
- iii) 抑止杭の設置はケーソンの側方変位を約 30%低減するとともに、傾斜確度を約 50%



低減できることが確認された。

- iv) ケーソンの変位量とケーソン背面の土圧には関係が見られなかった。
- v) 未対策地盤では、不飽和層がケーソンを海側に変位させる挙動が見られた。一方、抑止杭を設置した地盤では、抑止杭が不飽和層の海側への変位を抑止し、不飽和層はケーソンの変位に追随しないことがわかった。

c) 1G 中型模型振動台実験と動的遠心模型実験の比較

次に、1G 場の中型模型振動台実験と 50G 場の遠心模型実験における未対策地盤の結果の比較を行う。実験条件の決定に際しては、1G 場の模型振動台実験では井合の相似則<sup>1)</sup>を、遠心模型実験では香川の相似則<sup>2)</sup>を用いている。しかしながら、これらの相似則は振動問題を対象としており、本研究のように地盤の液状化時の流動変形は必ずしも適用範囲ではない。そこで、この節では 1G 場の模型振動台実験と 50G 場の遠心模型実験の結果の比較を行うことで、それぞれの相似則の適用範囲と問題点を抽出し、実物大振動台実験での検証実験に反映させることとする。

表 2 に各模型実験で用いた模型スケールと相似則を示す。また、表 3 には各模型実験の加振条件と主な地盤条件として相対密度を示す。なお、表 3 において実験条件が異なっているのは、各実験シリーズにおいて地盤の流動化の対策工の効果を明確に把握するためにある程度の変形量が得られる加振条件と地盤条件を設定したためである。具体的には、1G 場の実験では、過剰間隙水圧の消散が早いので周波数を小さくすることで液状化状態を維持するようにしている。また、遠心実験では土粒子の寸法効果によって大変形時に大きいダイレタンシーが起きることから、液状化状態を維持させるために相対密度を 40%とした。

表 2 模型実験の相似則

	1G 場	遠心場
模型スケール	1/15	1/50
重力	1G	50G
項目 (相似則)	模型 / 実物	模型 / 実物
土の密度	1	1
長さ	1/15	1/50
ひずみ	$(1/15)^{0.5}$	1
加速度	1	50
変位	$(1/15)^{1.5}$	1/50
時間	$(1/15)^{0.75}$	1/50
応力	1/15	1
間隙の粘性係数	1	50

表 3 加振条件と地盤条件

	1G 場-1	1G 場-2	遠心場
波形	正弦波	正弦波	正弦波
加速度 (gal)	400 (400)	400 (400)	20,000 (400)
波数	20	20	20
周波数 (Hz)	3 (0.394)	8 (1.05)	100 (2)
相対密度	50%	50%	40%

( )は実物換算

図 9 に各模型実験の入力波形を実物換算にて示す ( 加速度の方向は何れのケースにおいても海側を正の方向としている )。各実験の入力周波数が違うために加振の継続時間 ( 実物換算 ) が大きく異なっており、時間軸に対して各実験の加速度応答や間隙水圧応答、ケーソン護岸の変位量を直接比較することは困難である。そこで、本節では横軸に入力波数を



採用し、比較することにした。図 10 は入力波数と入力加速度の関係である。

図 11 にケーソン天端の加速度応答とケーソン直下の過剰間隙水圧比を、図 12 にケーソン天端の加速度応答とケーソン背面直近の過剰間隙水圧比を示す。これらの図において細い実線が加速度応答、太い実線が過剰間隙水圧比である。まず、ケーソン天端の加速度応答を見ると、1G の模型実験の 3 - 5 波目の入力の間に入力波よりも大きな応答が得られ、1G-3Hz のケースでは 6 波目以降から応答が小さくなるのが特徴的である。一方、遠心実験では一様な応答が継続していた。この理由として、1G 場の模型実験のケースのみがケーソン直下にて負の過剰間隙水圧が発生していることから、1G 場では入力周波数が小さいためにケーソンの揺れ幅が大きくなり、ケーソン直下にてダイランシーが起こることによって底面での摩擦が増加したことが要因と考えられる。その後、1G - 3Hz のケースでは液状化状態に達して天端の加速度応答が小さくなったと考えられる。これに対して、1G - 8Hz と遠心場でのケースでは過剰間隙水圧比がさらに上昇することはなかった。

次に、ケーソン背面直近の過剰間隙水圧(図 12)を見ると、加振開始直後はケーソンの変位と過剰間隙水圧がよく連動していることが分かる。つまり、ケーソンが陸側に移動するとき水圧が上昇し、海側に移動するとき水圧が低下する挙動が明確に見られている。そして 6 波目以降に、1G-3Hz のケースでは過剰間隙水圧比が 1 までに達し、1G-8Hz のケースでは 0 から 0.8 の範囲を変動し、遠心場でのケースでは 0 から 0.6 の範囲を変動した。このように、遠心場にて過剰間隙水圧があまり上昇しなかった理由として次のことが挙げられる。今回の入力加速度が 400gal と大きいためにケーソンが慣性力によって海側へ移動し、ケーソンは背面にて負の過剰間隙水圧が生じている。そして、遠心場での実験では水の粘性係数の 50 倍のシリコンオイルを用いているために透水性が低く、負の過剰間隙水が発生しても間隙水の周り込みが少ないためであろう。

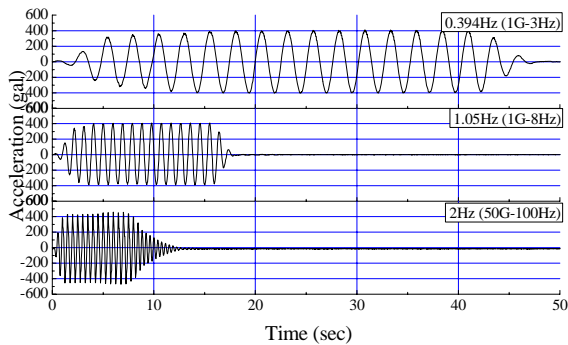


図 9 入力加速度の時刻歴

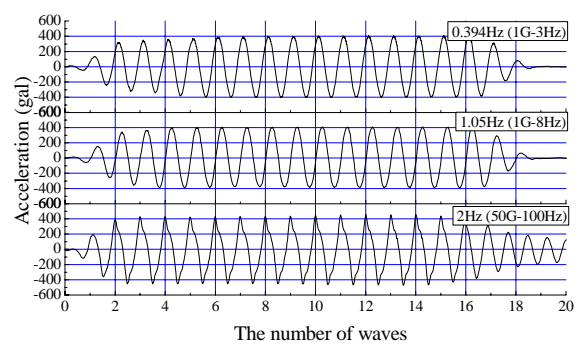


図 10 入力波数と入力加速度の関係

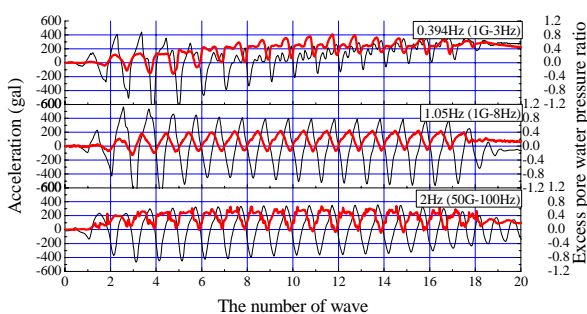


図 11 ケーソン天端の加速度応答とケーソン直下の過剰間隙水圧比

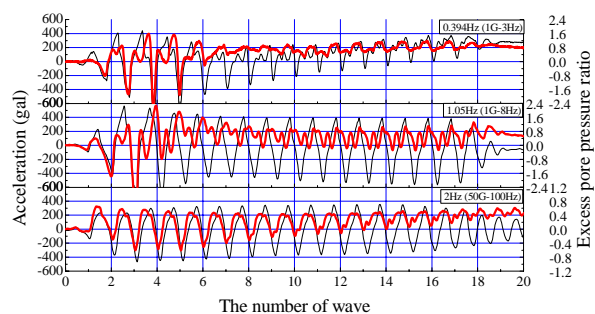


図 12 ケーソン天端の加速度応答とケーソン背面直近の過剰間隙水圧比

図 13 に 3 ケースの地盤の最終変形図と 1G-3Hz のケースについては加振入力 7 波目の変形状況も併せて示す。この図から、1G-8Hz と遠心場のケースのケーソンの最終変形量と傾斜は模型スケールにおいて非常によく一致している。1G-3Hz のケースでは、8 波目以降にケーソン直下においても過剰間隙水圧が高くなったため、ケーソンが掬われるような変形が生じている。そこで、ケーソン直下の過剰間隙水圧が高まった直後の変形状況(図中の(a))を見ると、ケーソンは海側に前傾しており、他のケースの最終変形図と良く一致していることが分かる。

図 14 にケーソン重心の水平変位量の実物換算値を示す。図 14 において、1G - 3Hz のケースは 7 波目以降に計測器の限界を超えたために振り切れている。図 14 において、ケーソンの水平変位量は周波数の二乗に反比例しているように見える。例えば、1G-8Hz と遠心場の最終変位量を比較すると、遠心場(実物換算 2Hz)のケースでは 840mm、1G-8Hz (実物換算 1.05Hz) のケースでは 2300mm (周波数の二乗に反比例するとして遠心場の変位量から求めると、3000mm) となっている。1G-3Hz と遠心場の 7 波目の時点の変位量を比較すると、遠心場のケースでは 280mm、1G-3Hz のケースでは 5000mm (周波数の二乗に反比例するとして遠心場の変位量から求めると、7000mm) となっている。このようにケーソンの変位量が周波数の二乗に反比例しているように見えるということは、各繰返し载荷時の残留変形の蓄積がケーソンの変位につながったと考えることができる。

ケーソンの傾斜量を図 15 に示す。1G 場の実験では、加振開始後に陸側に傾く傾向が見られているが、3 ケースとも海側への最大傾斜は約 5 度であり、一致している。このときの地盤の変形状況は図 13 の通りである。

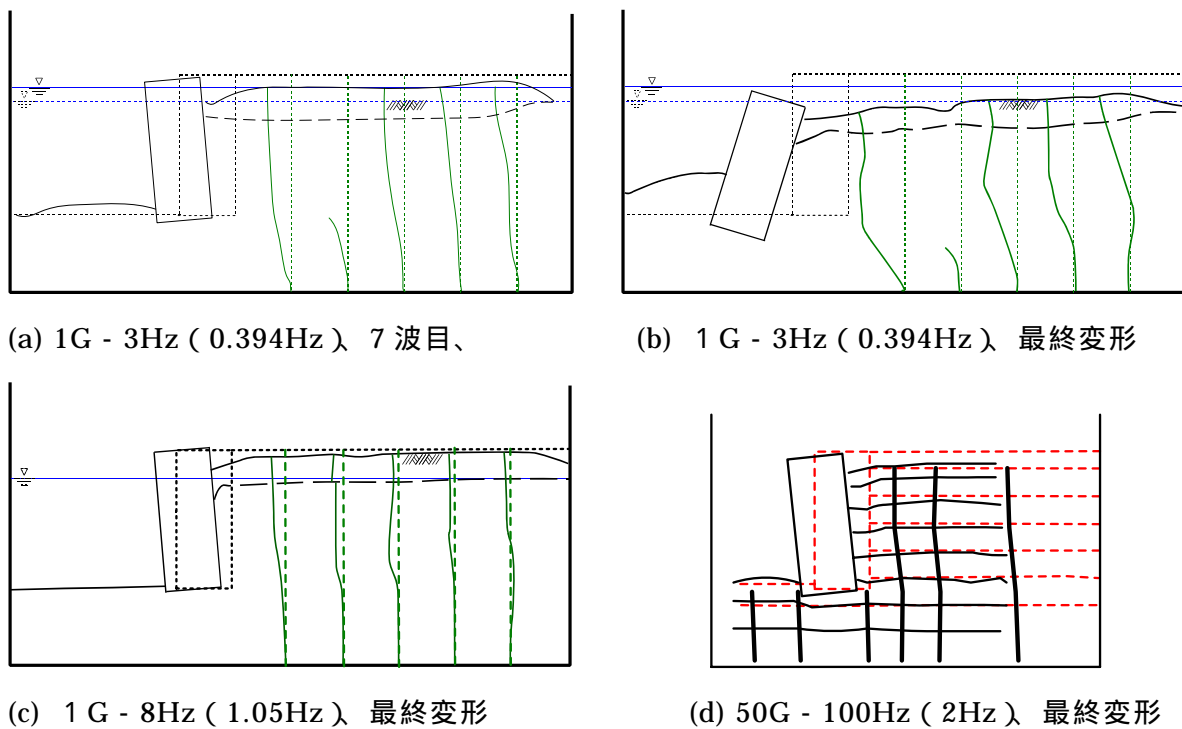


図 13 地盤の変形状況 (括弧内の数値は実物換算の周波数である)

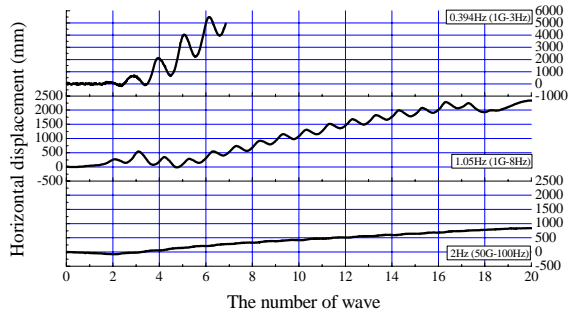


図 14 ケーソン中心の水平変位量

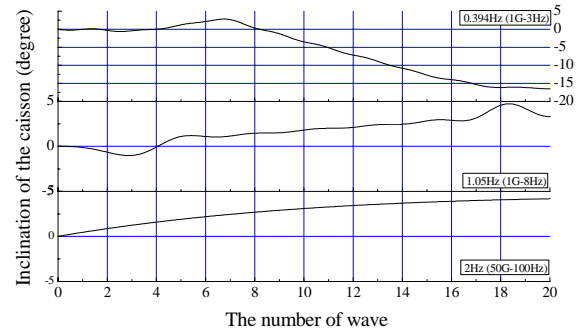


図 15 ケーソンの回転量

以上の 3 つの実験結果の比較から、次のような傾向があることが分かった。

- i) ケーソン及び地盤挙動には、3 つのケースにおいて定性的に共通した挙動が確認された。それは、慣性力によってケーソンが海側に移動し、ケーソン背面では負の過剰間隙水圧が発生するという挙動である。また模型スケールにおける地盤の変形量もおおよそ一致した。
- ii) 入力加速度の周波数の違いにより、低い周波数を用いた 1G-3Hz のケースでは地盤全体に生じる過剰間隙水圧が高くなり、7 波目以降にケーソンがさらわれるような変位を示した。この理由として、1G 場での模型実験は排水距離が短いために間隙水の回り込みが起こり、高い間隙水圧の状態を保ったこと挙げられる。これに対して、1G-8Hz と遠心場の模型実験では、加振時間が短くなるために間隙水の回り込みが少なく、初期段階の液状化状態を保っていた。
- iii) ケーソン中心の水平変位量を比較すると、周波数の二乗に反比例しているように見られることもできる。このことから、各繰返し載荷時の残留変形の蓄積がケーソンの変位につながったと考えることができる。しかしながら、比較のデータ数が不足しているので結論には至っていない。そこで、今後周波数を揃えた小型模型実験などを行い、定量的な検討を行う必要がある。そして、最終的には実物大実験での検証も必要である。

## 2) 1G 場における杭基礎変位低減に関する振動台実験

### a) 実験概要

昨年度に引き続き、護岸背後地盤が液状化して流動が生じた場合、護岸近傍にある杭基礎に対する被害を軽減するために杭基礎の下流側に流動対策工法を施し、1G 中型振動台を用いた模型振動実験を行った。対策工法としては「変形抑制型」に分類される抑止杭による対策工法を選択した。

### b) 実験内容

本実験では未対策ケースの他、抑止杭による対策および連続壁による対策を施したケースを行った。抑止杭を用いた対策工はその本数や配置をいくつか変えて実施した。実施した実験ケースと抑止杭の配置平面図をそれぞれ表 4 と図 16 に示す。なお全ての実験にお

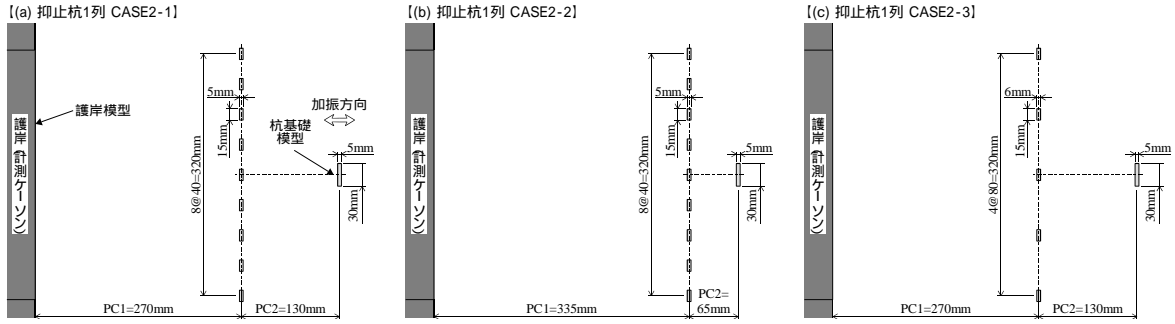


図 16(a) 1G 中型振動台実験で実施した対策工の平面図

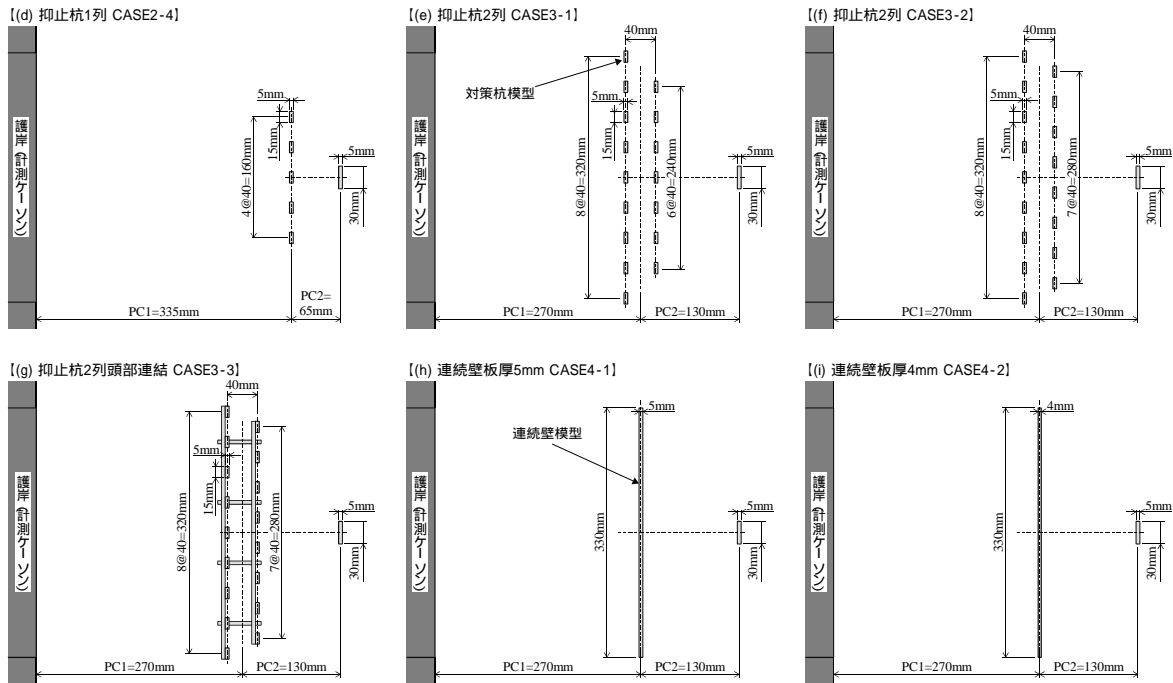


図 16(b) 1G 中型振動台実験で実施した対策工の平面図

表 4 1G 中型振動台実験で実施した実験ケース

実験ケース	対策工の種類	対策工板厚 (mm)	対策工列数 (列)	対策工本数 (本)	設置距離 (mm)	対策工幅 (mm)	対策工間隔 (mm)	参照平面図	備考
CASE1	未対策								
CASE2-1	抑止杭	5	1	9	130	335	40	図9(a)	曲げ剛性E/はほぼ等しい
CASE2-2	抑止杭	5	1	9	65	335	40	図9(b)	
CASE2-3	抑止杭	6	1	5	130	335	80	図9(c)	
CASE2-4	抑止杭	5	1	5	65	175	40	図9(d)	
CASE3-1	抑止杭	5	2	16	130	335	40	図9(e)	矩形配置
CASE3-2	抑止杭	5	2	17	130	335	40	図9(f)	千鳥配置
CASE3-3	抑止杭	5	2	17	130	335	40	図9(g)	千鳥配置, 頭部を連結
CASE4-1	連続壁	5	1	1	130	330		図9(h)	
CASE4-2	連続壁	4	1	1	130	330		図9(i)	

いて、対策工は杭基礎の下流側に設置した。また加振は土槽長手方向に振幅 400Gal、波数 20 波（前後 3 波テーパ付き）正弦波で入力した。

実験で用いた振動台や土槽、護岸模型、杭基礎模型は昨年度と同じものを使用した。液状化層として使用した試料は、前節の遠心場振動台実験で使用したものと同一材料で、比較的均一な粒径を有する栃木県産の珪砂を使用した。表層の不飽和層には粒径 2~10mm の礫を使用した。また計測項目や箇所も昨年度と同様である。

### c) 実験結果と考察

まず未対策の CASE1 と抑止杭を 1 列設置した CASE2-1~2-4 までの比較を行う。図 17~図 19 に杭基礎の変位量をプロットした図を示す。各実験ケースによって護岸変位量が多少異なるため、杭基礎の最大変位量・残留変位量を護岸の重心位置における残留水平変位量で除して正規化し、尚且つ未対策時の最大・残留値が 1 となるようにした。つまり縦軸の値は対策工の設置によって図られた杭基礎変位量の低減率を表している。

図 17 に抑止杭の対策幅と打設間隔が同一の対策工（抑止杭）で、杭基礎からの設置距離の違う CASE2-1 と CASE2-2 の正規化杭基礎変位量を示す。設置距離が短くなるほど杭基礎の最大値及び残留値が小さくなっており、対策効果が大きくなっていることが分かる。これは、対策工の距離が杭基礎に近いので対策工が受ける流動力が小さくなり、地盤変位を小さくすることができたため、杭基礎変位が小さくなったと考えられる。また杭基礎と対策工の距離が近いと、それらが一体となって作用し変位が小さくなったとも考えられる。

図 18 に抑止杭の対策幅と設置距離が同一の対策工で、抑止杭の打設間隔の異なる CASE2-1 と CASE2-3 の正規化杭基礎変位量を示す。打設間隔が狭くなるほど杭基礎の最大値及び残留値が小さくなっており、対策効果が大きくなっていることが分かる。これは対策杭の打設間隔が広くなると液状化した地盤が対策杭間をすり抜け易くなるため、杭基礎の変位が大きくなると考えられる。

図 19 に抑止杭の設置距離と打設間隔が同一の対策工で、抑止杭の対策幅が異なる CASE2-2 と CASE2-4 の正規化杭基礎変位量を示す。対策幅が広くなるほど杭基礎の最大値及び残留値が小さくなっており、対策幅が広いほど対策効果が大きくなっていることが分かる。今回の実験では、対策工の単位幅当たりの曲げ剛性を同一としたため対策幅が広

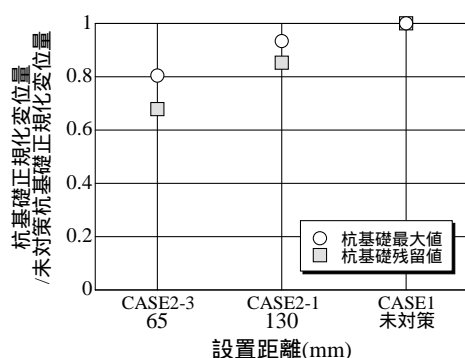


図 17 抑止杭の設置距離の違いによる杭基礎正規化変位量

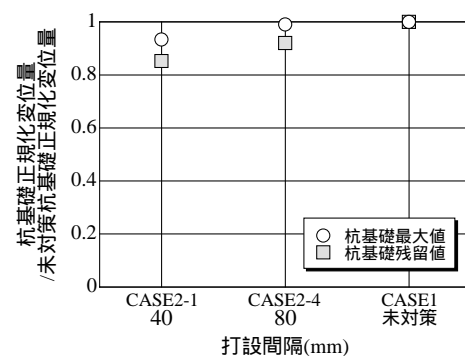


図 18 抑止杭の打設間隔の違いによる杭基礎正規化変位量

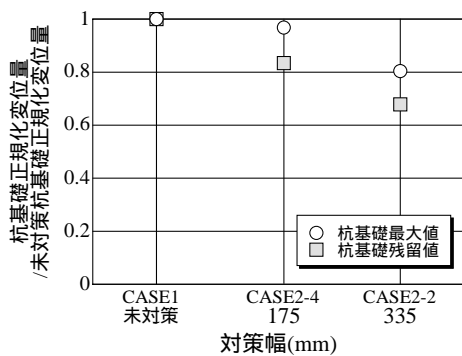


図 19 抑止杭の対策幅の違いによる杭基礎正規化変位量

CASE3-3、矩形に配置した CASE3-1 の順に小さくなっている。矩形に配置した CASE3-1 は地盤が流動することのできる間隔が最も大きいため杭の最大・残留変位量が最も大きかったと考えられる。

写真 1 に加振後の抑止杭の状況を示す。矩形に配置した CASE3-1 と千鳥に配置した CASE3-2 では、実験時に撮影した映像で確認すると、加振開始から杭基礎が最大変位を生じるまでの間は、設置間隔を維持したまま海側への変位を生じていた。その後配列は崩れ始め、海側に近い抑止杭は陸側へ近いそれよりも大きく陸側へ戻り、写真 1 のように加振後には設置間隔はなくなり 1 列になった。アーチ状に並んでいるようにも見え、抑止杭の変位量は設置した場所により異なっていた。連結杭は全ての抑止杭が連結されているため、それらが個々に別々の挙動をすることはなく、加振中も設置間隔は常に保たれている。液状化発生直後には護岸の移動や地盤の流動に伴い、対策工や杭基礎も海側へ変位する。この時点では抑止杭間地盤のすり抜けは大きく生じていないので抑止杭が擬似的な壁の役割を果たし、地盤の流動を縁切りすることにより、対策杭より背面の地盤の変位量は減少する。ゆえに、未対策の場合と比較して杭基礎の最大変位量は低減する。その後、抑止杭間で顕著な地盤のすり抜けが生じることにより、対策杭を拘束する外力は減り、海側へ変位した抑止杭は自身の復元力により陸側へ戻ろうとする。そのことで抑止杭は加振中に生じ続ける地盤の流動に対し抵抗し、対策杭背面の地盤の変位量はさらに減少する。その影響は杭基礎周辺の地盤にも及び、それに伴い杭基礎の復元力も発揮されたため、残留変位は最大変位よりもより減少したと考えられる。

抑止杭を千鳥に配置し頭部を連結した CASE3-3 は、抑止杭を連結することにより対策工としての剛性は大きくなるため、抑止杭背面の地盤の変位をより低減し、最大変位量が小さくなった。残留変位量の差は抑止杭間の地盤のすり抜け量の差にあると考えられる。千鳥に配置した CASE3-2 では徐々に設置間隔が狭まることにより地盤がすり抜けられる隙間が小さくなる。一方、千鳥に配置し頭部を連結した CASE3-3 は常に一定の設置間隔が確保されるため、地盤はその隙間をよりすり抜けることができる。つまり抑止杭背面の地盤変位は千鳥に配置した CASE3-2 よりも大きく生じたため、抑止杭を千鳥に配置し頭部を連結した CASE3-3 は千鳥に配置した CASE3-2 と比較して杭基礎の残留変位量が大きくなったと考えられる。

くなるほど対策工全体の剛性が大きくなったため、杭基礎の変位を小さくなったと考えられる。

次に未対策の CASE1 と 2 列の抑止杭を設置した CASE3-1 ~ 3-3 までの比較を行う。図 20 に杭基礎の変位量をプロットした図を示す。最大変位量は抑止杭を千鳥に配置し頭部を連結した CASE3-3 が最も小さく、続いて矩形に配置した CASE3-1、千鳥に配置した CASE3-2 の順に小さくなっている。一方、残留変位量では千鳥に配置した CASE3-2、千鳥に配置し頭部を連結した



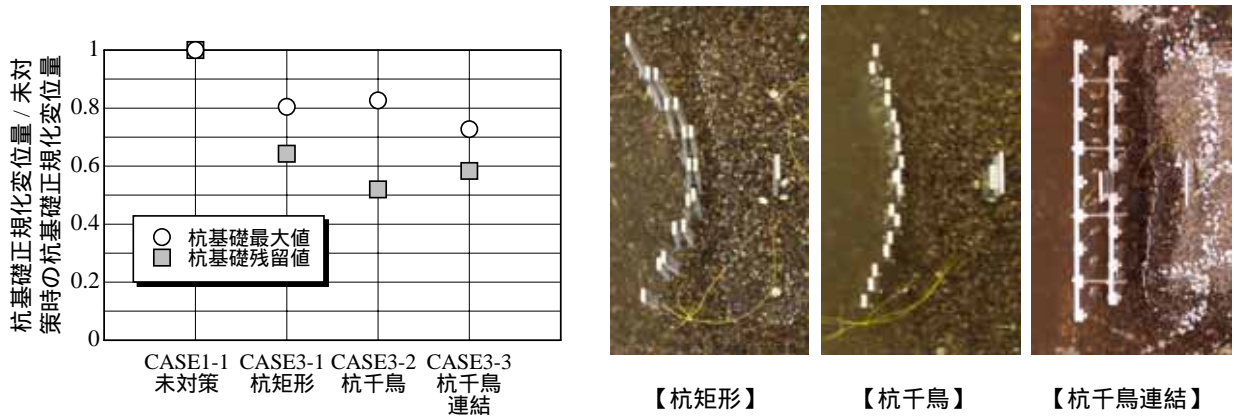


図 20 未対策と抑止杭 2 列配置における杭基礎正規化変位量の比較 写真 1 加振後における抑止杭の変位状況

次に未対策の CASE1 と 2 種類の板厚の連続壁を設置した CASE4-1 ~ 4-2 までの比較を行う。ここでは抑止杭を千鳥に配置した CASE3-2 を比較として挙げている。図 21 に各実験における抑止杭や連続壁の設置による杭基礎変位の割合を示したが、この纏め方では板厚 4mm の連続壁を用いた CASE4-2 の最大変位量は未対策の CASE1 よりも大きくなった。これは板厚 4mm の連続壁の有する曲げ剛性が他の対策工のそれと比較して約 3 割ほど小さいことによると考える。また時刻歴を見ると残留値はさほど変わらないが、変位の振動成分が未対策の CASE1 と比べて大きいことも理由の一つである。

抑止杭を千鳥に配置した CASE3-2 と板厚 5mm の連続壁を用いた CASE4-1 における杭基礎頭部の最大・残留変位量を比較すると、後者のほうが変位低減割合は大きい。千鳥に配置した CASE3-2 との差は約 1 割程度である。板厚 5mm の連続壁を用いた CASE4-1 は抑止杭を千鳥に配置した CASE3-2 と比較して、対策工全体の曲げ剛性が約 3 割程度大きいことを勘案すると、抑止杭を非連続的に千鳥に設置することでも杭基礎変位を低減する効果は十分に得られると言える。言い換えると非連続的に設置する対策杭の曲げ剛性は、連続壁よりも小さくても変位低減効果が得られる可能性があることを示唆している。

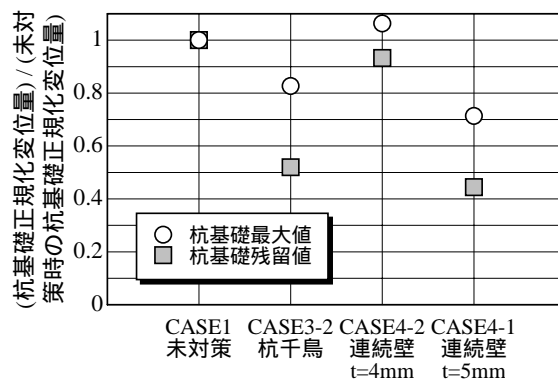


図 21 未対策と連続壁と抑止杭 2 列配置における杭基礎正規化変位量の比較



### 3) 1G 場における杭基礎に作用する流動荷重低減に関する振動台実験

#### a) 実験概要

過去の地震において、杭構造物が地盤の液状化に起因した流動によって破壊する事例が多く報告されている。本研究では、流動時の杭への荷重低減法として、流動発生を完全に止めるのではなく、抑止壁によって杭近傍の地盤変位だけを抑える方法について、模型振動実験により検討を行った。

#### b) 実験内容

本実験では、水中振動台上に上下端を固定した荷重計測杭を設置し、層厚 1350mm の飽和砂地盤を水中落下法により作成した。図 22 に模型地盤と荷重計測杭の概要図を示す。砂は、平均粒径約 0.1mm の珪砂 6 号を用いた。荷重計測杭は、剛な芯材に外径 170mm の半円状のカバーを取り付け、その間にロードセルを設置することで杭に作用する上流側、下流側の荷重を直接計測できる。受圧板の内側と芯材の間は水で浸されており、杭への荷重はこの静水圧分を差し引いた値を計測していることとなり、静的な状態ではほぼ有効応力成分に等しい。ただし、振動に伴う水圧の増減や液状化による水圧上昇は受圧板の内側ではほぼ無いため、周囲地盤部でのこれらの増分はロードセル計測値に含まれる事となる。

実験で用いられた流動抑止壁は、実スケールで想定する流動層厚と抑止壁曲げ剛性によって、模型スケールでの曲げ剛性は異なる。ここでは両ケースとも実物スケールでの流動層厚を 7.5m にし、流動抑止壁を case-2 では軽量鋼矢板、case-3 では矢板 w 型と想定した。その曲げ剛性について相似則を考慮して、case-2 では 3.2mm、case-3 では 16mm 厚の鋼板を実験で用いることとした。この流動抑止壁は下端のみを回転固定としており、剛な基盤へに根入れした状態とした。

加振は、まず 5Hz、300Gal で 1sec.加振して液状化を発生させ、その後 5Hz、100Gal で 9sec.加振を行う間に可動壁の固定を解除して側方流動を起こした。可動壁は、土圧により側方に自動的に平行移動する仕組みとなっている。

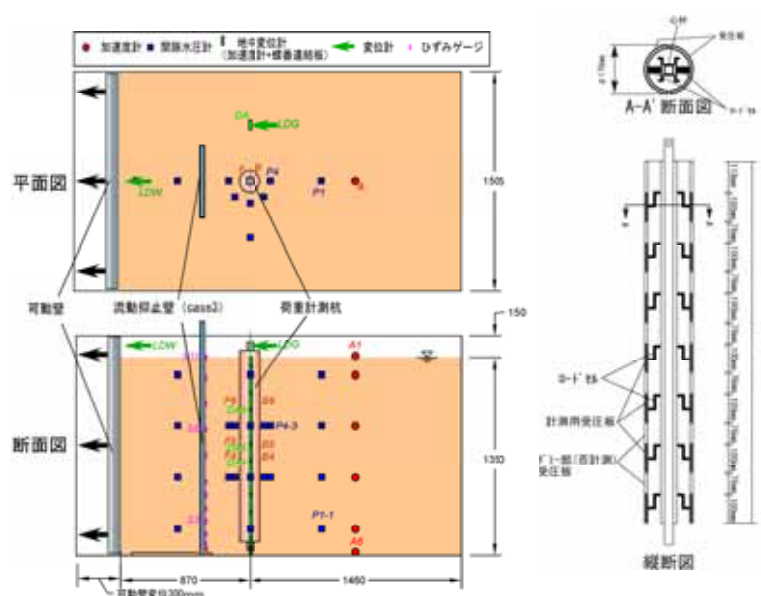


図 22 模型地盤および荷重計測杭の概要図

図 23、24 に各ケースにおける加速度、過剰間隙水圧比、可動壁変位、杭への作用荷重、流動抑止壁のたわみの時刻歴をそれぞれ示す。各計測位置は図 1 に示すとおりである。いずれのケースにおいても模型地盤は加振開始とほぼ同時に過剰間隙水圧比は約 1.0 に達し、地表に振動は伝わらず (A1) 完全に液状化している。可動壁 (LDW) は加振が 300Gal から 100Gal に移った後に平行移動させ、約 4~5sec で 300mm に達している。前述のように可動壁は土圧に押されて自動的に動き、その制御等は行っていないため、各ケースで可動壁の移動速度にやや違いはある。

杭への荷重は、杭の上流側 (B) 下流側 (F) それらの合計 (BF) をあわせて表示した。作用荷重は加振開始と同時に上・下流側ともに液状化によって増加し、若干の誤差は見られるものの、その増加量は上・下流側でほぼ等しく、それらの合計はゼロに近い。可動壁移動時では、杭上流側では荷重が増加し、下流側では減少して、合計で杭に下流向きに荷重が作用した。

抑止壁は完全に剛ではないため、両ケースにおいても流動による荷重が杭に作用したが、厚さ 3.2mm の薄い抑止壁を設置した case-2 (図 23) では、可動壁移動直後に基礎杭へ荷重が加わっているのに対し、厚さ 16mm の厚い抑止壁を設置した case-3 (図 24) では荷重に対し抑止壁が抵抗し基礎杭への荷重が低減されている。抑止壁のたわみにおいては case-3 の方が小さく、荷重および杭近傍の地盤変位も抑制された事が分かる。

図 23、24 の P4\_3 に示されるように両ケースとも可動壁の変位とともに過剰間隙水圧比が 0 近くまで減少しており、地盤の剛性が復活したことが杭への荷重について影響しているものと考えられる。

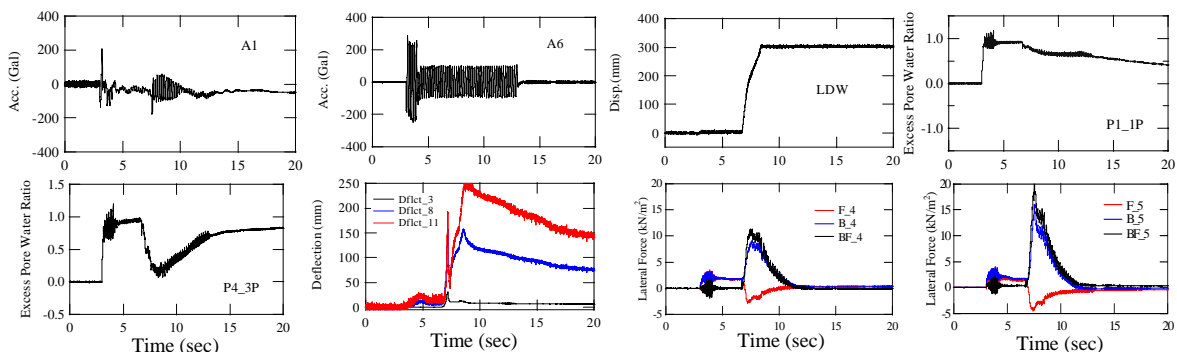


図 23 厚さ 3.2mm の抑止壁を用いた実験で得られた時刻歴

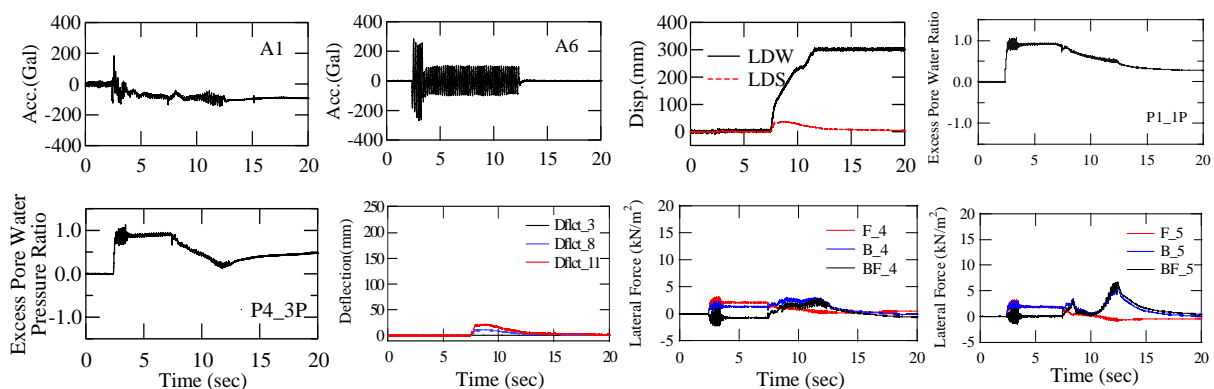


図 24 厚さ 16mm の抑止壁を用いた実験で得られた時刻歴

図 25 には case-2、case-3 での杭への荷重と地盤変位の関係 (BF4、BF5、BF6) を示す。地盤変位については、杭側方に置いた蝶番で連結した複数のアクリル板 (図 1、DA) について、それぞれに設置した加速度計から求めた傾きを下方から積分することにより、鉛直方向の水平変位分布を求めている。また、道路橋示方書では完全に液状化した層の流動力として鉛直全応力に相当する圧力を考慮しており、この値を合わせて図中に示す。BF5、BF6 では鉛直全応力より大きい値を示しているが、これは、前述したように過剰間隙水圧が低下し、剛性が回復したことに起因していると考えられる。液状化層中心位置の BF4、BF5 においては case-2 の方が杭への荷重は大きくなった。比較的浅い箇所の BF6 では、両ケースともほぼ同様の値を示す結果となった。

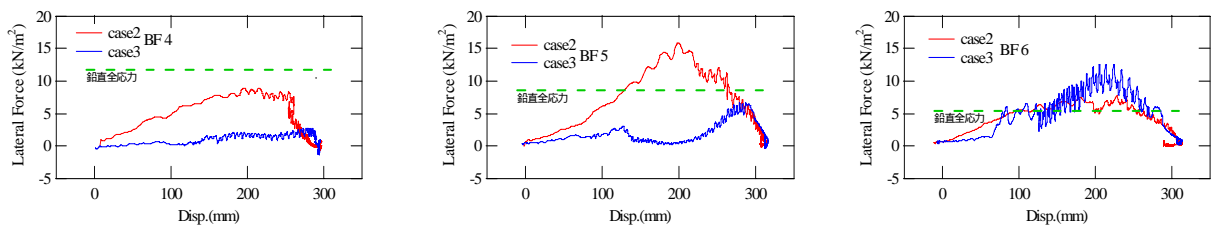


図 25 杭へ作用する荷重と地盤変位の関係

#### 4) 2 種類の対策工による流動対策に関する 3 次元残留変形解析

##### a) 解析概要

液状化に伴う護岸背後地盤の流動を再現するため、3 次元の残留変形解析を実施した。抑止杭および連続壁による 2 種類の対策工の設置による護岸背後地盤中の杭基礎の変位および地盤の変位低減効果を検討した。

##### b) 解析内容

解析モデルは 1G 中型振動台実験で行った実験模型モデルを 15 倍した寸法で、実際に存在する地盤モデルではない。全体幅は 30m、高さ 11.6m、奥行き 6m で、節点・要素数低減のため奥行き方向の半断面の 1/2 対称モデルを適用した。杭基礎周辺地盤の変形を再現するためメッシュを細かく切り、全節点数は約 9.5 万点となった。地下水面は GL-1.5m にあり、地盤は全層まさ土による埋土とした。境界条件は底面 3 方向固定で、側面は鉛直方向自由である。解析モデル図と物性値をそれぞれ図 26 と表 5 に示す。

護岸の背後には杭基礎を有し、RC 杭 450mm と同じ曲げ剛性を有している。対策工は 2 種類行い護岸と杭基礎の間に設置した。その模式図を図 27 に示す。一つは抑止杭を千鳥に 17 本設置した対策工、もう一つは連続壁による対策工である。対策杭 1 本の曲げ剛性は杭基礎のその半分に設定した。連続壁の曲げ剛性は抑止杭 17 本分のそれと同じになるように設定した。つまり対策工全体の曲げ剛性は抑止杭と連続壁で同一にしてある。

残留変形解析は図 28 に示す流れで行った。液状化後の地盤のせん断剛性は地下水位以深の全層で 1/1000、表層の不飽和層で 1/40、地盤剛性が低下すると仮定した。なお、今回の解析では地盤や杭基礎・対策工の非線形性は考慮せず線形弾性体とした。また、過剰間隙水圧の消散による地盤の沈下については考慮していない。

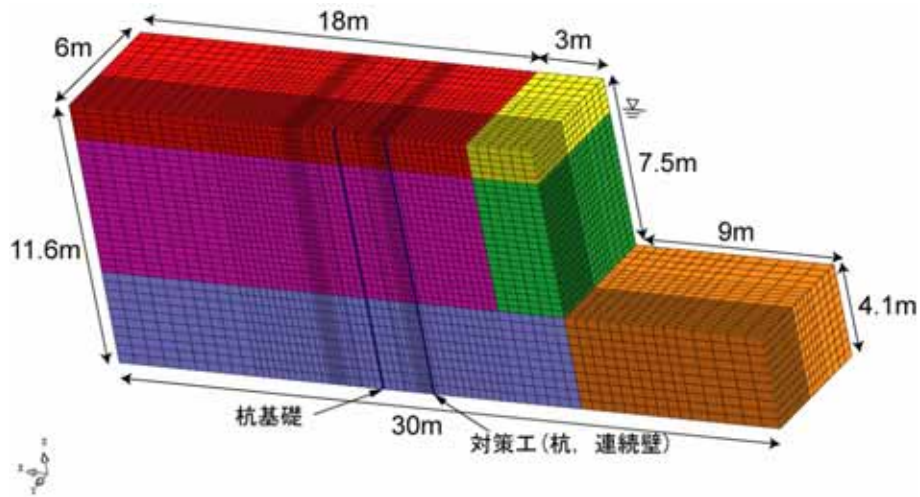


図 26 解析モデル図

表 5 解析物性値

層区分	色	深度 (GL-m)	単体 (kN/m <sup>2</sup> )		ヤング率E (kN/m <sup>2</sup> )		ポアソン比	
			以浅	以深	液化前	液化後	液化前	液化後
不飽和層	赤	0-0.15	16.67	-	159066.75	3976.67	0.3333	0.4953
背後地盤	桃	1.5-7.5	-	9.81	159066.75	159.07	0.3333	0.4998
下層地盤	紫	7.5-11.6	-	9.81	219829.44	219.83	0.3333	0.4998
下層地盤	黄土	7.5-11.6	-	9.81	96674.04	96.67	0.3333	0.4998
ケーソン	緑	0-7.5	20.59	10.79	3.100E+07	-	0.2000	-
杭基礎	青	0-11.6	24.50	14.69	1.872E+09	液状化前と同じ	0.1667	液状化前と同じ
対策杭	青	0-11.6	24.50	14.69	1.872E+09	-	0.1667	-
連続壁	青	0-11.6	77.22	67.41	1.273E+09	-	0.3000	-

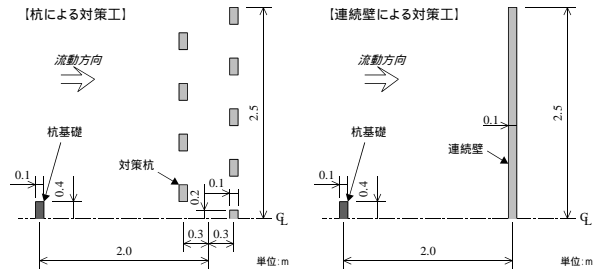


図 27 2種類の対策工の平面図

未対策ケースと抑止杭および連続壁による対策ケースの変形図をそれぞれ図 29～31 に示す。変位スケールはモデルスケールの2倍になっている。護岸は下にさらわれるような形態で海側に変位し、沈下も生じている。杭基礎も護岸の移動や地盤の変形に伴い、頭部で約 31cm 海側へ変位している。それに対し、抑止杭による対策ケースでは護岸の移動量は減少し、未対策ケースほど傾いていない様子が伺える。杭基礎の変位量も約 26cm 程度で抑止杭の設置により変位量は低減できている。連続壁による対策ケースでも杭基礎の変位量は約 26cm 程度で、抑止杭設置時のそれとほぼ同じ値であった。

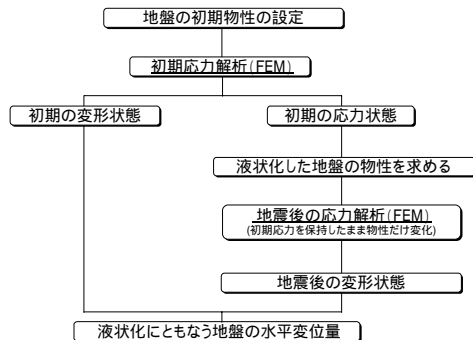


図 28 残留変形解析の流れ

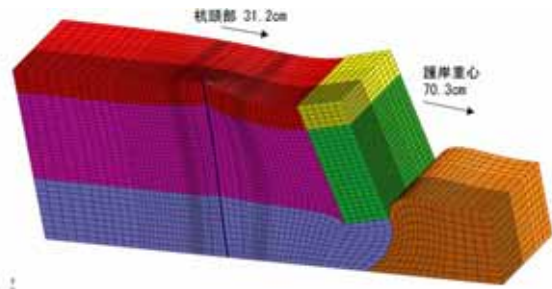


図 29 変形図 (未対策)



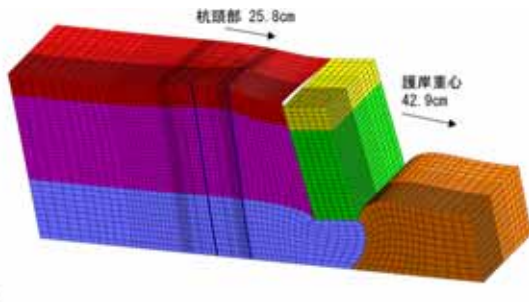


図 30 変形図（抑止杭）

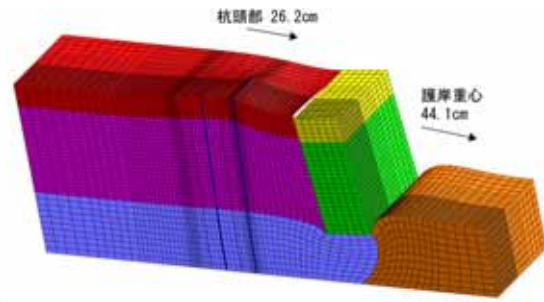


図 31 変形図（連続壁）

図 32 には各ケースにおける杭基礎とそこから 0.4m 離れた地盤節点の変位深度分布を示す。未対策時に着目すると、液状化層内では杭基礎よりも地盤変位が大きくなっており、地盤のすり抜け変位が表現できている。それに対して抑止杭および連続壁による対策を施したケースでは杭基礎自体の変位量が小さくなっており、またその近傍地盤の変位量は杭基礎のそれより若干大きい程度である。対策工を設置することで杭基礎やその近傍地盤の変位量を低減することができている。今回実施した解析では対策工の種類による変位量の差異は見られなかった。

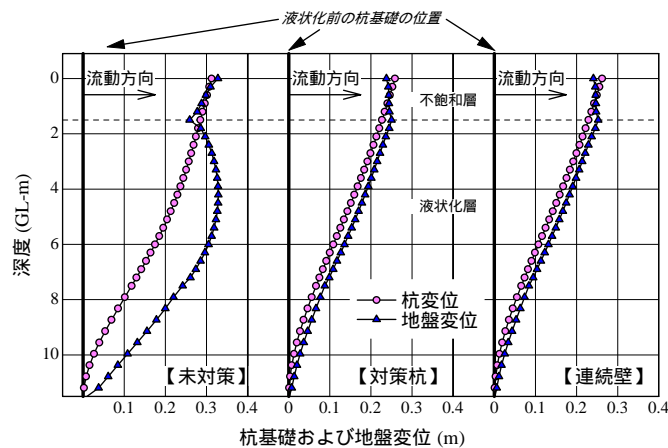


図 32 杭基礎およびその近傍地盤の変位深度分布

### 5) 流動対策工の提案

これまでの 1G 場模型振動実験，遠心模型実験を通して，流動抑止型の対策工を中心にその対策効果を定量的に評価することを試み，効率的な対策工の配置についても検証実験を実施した。さらに，数値解析によって 3 次元的效果の検討を行って来た。

実験で対象とした対策工法は主として，抑止杭，連続壁といった構造的対策を中心としてきたが，流動力に抵抗し得るだけの剛性や強度を満たすことができれば，既存の地盤改良型の対策工法も十分に流動対策となり得る。

図 33 には，護岸ならびに護岸近傍の基礎を対象に，効果が期待できる流動対策の模式

図を示す。側方流動対策に対する目的，基本的な考え方は，液状化対策と同じく，液状化そのものを発生させないようにする，液状化が発生しても大きな流動が生じないようにする，流動が生じても構造物の側で対処する，の3つに分けられる。 に関しては，液状化対策を施すことによって地盤の液状化を抑止し，結果的に流動による大変形も抑止しようとする考え方である。従って，特別な流動対策を必要とせず，従来からの液状化対策工法を適用すればよい。ただし，側方流動の場合には，その影響も面的に広範囲に及んでいるため，流動の発生が危惧される全ての領域に，従来の液状化対策を施すことは，物理的にも，経済的にも，必ずしも有効であるとは限らない。従って，安価で，より経済的な対策工を開発する必要がある。また，液状化対策を施さなかった領域で仮に，側方流動による大変形が生じても，構造物に被害をもたらすことのないような対策の範囲を十分に検討する必要がある。 の考え方にもとづく対策を考える場合には，側方流動の発生要因やメカニズムを把握することが必要になってくる。特に，液状化が生じても，側方流動が発生するか否かの境界はどこに有るのかを吟味することが重要で，地盤の強度問題と境界条件の両方向からの検討が必要であろう。例えば，室内液状化試験やその後の強度変形特性試験の結果をみると，地盤が液状化しても，その後の変形特性は地盤の密度や有効拘束圧によって大きく異なってくるようである。特に，比較的密な地盤が液状化した場合には，流動が生じ始めても，すぐに強度が回復して変形が止ってしまうのに対して，緩い地盤の場合には，地震動の継続中に与えられたひずみ履歴以上に大きな変形が生じることが明らかにされている。つまり，液状化（Cyclic mobility も含めて）が発生するクライテリアと側方流動が発生するクライテリアが異なっていることを意識した対策が必要である。

一方，地盤の境界条件を考えると，神戸の震災で多く見られたような護岸タイプの地盤では，護岸が健全であれば，仮に液状化が発生しても側方流動は生じなかったであろうと考えられるのに対して，日本海中部地震の際の能代市や新潟地震の際の大形小学校周辺で生じた側方流動の事例は，地盤全体が緩やかに傾斜していたために生じたもので，何らかの流動対策を施す以外には，被害を食い止めることは出来なかったであろうと予想される。つまり，液状化の発生条件を緩和させて側方流動が生じないようにするのか，流動発生のトリガーとなった要因を取り除いてやるのかによって，対策工の考え方は異なってくる。

の考え方にもとづく対策は，コストを度外視すれば，対象としている構造物を堅牢に構築することが最も確実な方法であるが，既設の構造物でコストもそれほど掛けられない，或いは周辺環境に制約条件があるといった場合には，流動力を別の方法で逃してしまうような処理を行なえば理想的ではある。

さらに，敢えて批判を恐れず論じると，人的被害の有無，構造物の重要度と復旧に要する費用，時間を勘案して，敢えて流動対策を行なわないという判断も時には必要であると考えられる。ただし，その場合には，十分な外力および流動量の評価と被害規模の予測が可能であることは言うまでもない。

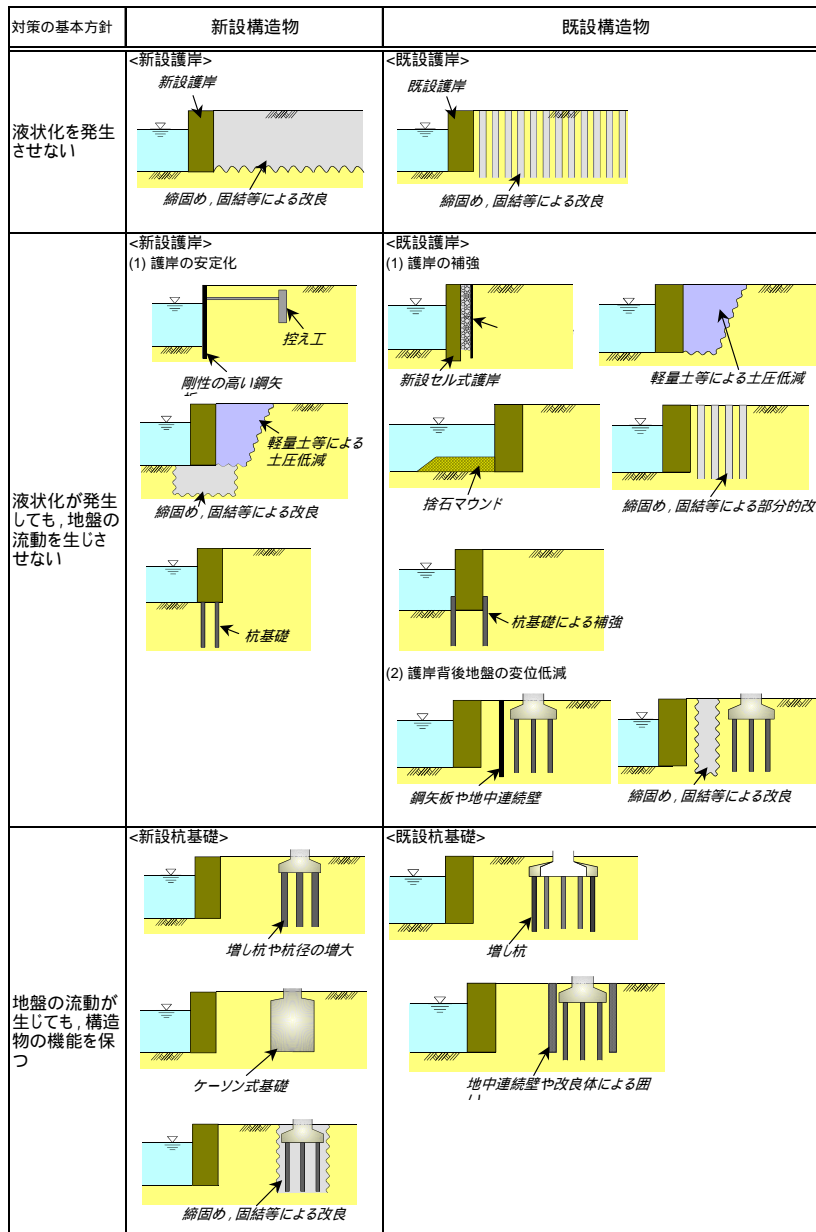


図 33 岸壁・護岸背後地盤の流動に対する対策工法の概念図<sup>1)</sup>

(c) 結論ならびに今後の課題

- 1) 遠心場における杭基礎変位低減に関する振動台実験では以下のような結論が得られた。
- 抑止杭の設置により、基礎杭の杭頭変位は約 1/3 に低減できるとともに、ケーソン背後地盤の地表面沈下は約 2/3 に低減できる。
  - 抑止杭の配置方法の違いによる抑止効果の差は見られなかった。これは、剛性の高い鋼管杭（70cm、t16mm）を密に配置したためと考えられる。
  - 抑止杭の設置はケーソンの側方変位を約 30%低減するとともに、傾斜確度を約 50%低減できることが確認された。
  - ケーソンの変位量とケーソン背面の土圧には関係が見られなかった。
  - 未対策地盤では、不飽和層がケーソンを海側に変位させる挙動が見られた。一方、



抑止杭を設置した地盤では、抑止杭が不飽和層の海側への変位を抑止し、不飽和層はケーソンの変位に追随しないことがわかった。

- 2) 1G 場における杭基礎変位低減に関する振動台実験では以下のような結論が得られた。
  - a) 杭基礎と護岸との間に対策杭のような非連続的な対策工を設置すると、杭基礎や地盤の変位量は低減した。
  - b) 今回実施した実験では抑止杭を千鳥に配置することにより大きな杭基礎変位低減効果が得られた。ただし、その頭部を連結すると抑止杭間隔が固定されてしまい、液状化した地盤がすり抜け易くなるため変位低減効果は少なくなる。
  - c) 対策工は杭基礎からの設置距離が近いほど杭基礎の変位は低減した。その理由は杭基礎と対策工とが一体となって流動力に対し抵抗すると考えられるが、詳細なメカニズムは今後の課題である。
  - d) 対策工の幅は広いほど、またその打設間隔は狭いほど杭基礎の変位は低減した。
- 3) 1G 場における杭基礎に作用する流動荷重低減に関する振動台実験では、抑止壁を杭基礎の下流側に設置すると、杭基礎に作用する流動荷重を大きく低減することが確認された。
- 4) 2 種類の対策工による流動対策に関する 3 次元残留変形解析では、今回の解析モデルにおいて、対策工は護岸や杭基礎の変位を低減する効果が得られた。また、対策杭を設置することでも連続壁と同様の低減効果が得られた。ただし、今回実施した解析では液状化後の物性設定も大まかである上に、過去に被災した実在するモデルではない。残留変形解析手法を用いることによる変位量そのものの妥当性の確認は今後の課題となる。

(d) 引用文献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法、地盤工学・実務シリーズ 18、pp.188-195、2004.7.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
本多 剛・東畑郁生	矢板壁による側方流動抑制に関する個別要素法解析	第 39 回地盤工学研究発表会	2004 年 7 月
田中智宏・安田 進 石井隆志	液状化に伴う護岸背後地盤の流動対策に関する振動台実験	第 39 回地盤工学研究発表会	2004 年 7 月
安田 進・田中智宏 石井隆志	抑止杭を用いた液状化に伴う流動低減に関する振動台実験	土木学会第 59 回年次学術講演会	2004 年 9 月
M. J. Alam, I.Towhata, T. Honda, S. Fukui S. Tamate	Mechanism of liquefaction process under embankment without and with a mitigation studied by dynamic centrifuge testing	The 15th Southeast Asian Geotechnical Conference (15th SEAGC)	2004 年 11 月
S. Yasuda, T. Tanaka	Adaptability of Pile Installation Method as a	The 15th Southeast Asian Geotechnical	2004 年 11 月

T. Ishii	countermeasure Against Liquefaction-induced Flow	Conference (15th SEAGC)	
田中智宏・安田 進 石井隆志	護岸背後地盤中の杭基礎変位低減に関する対策方法	液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム	2004年12月
本多 剛・佐藤宏樹 Alam M. J・東畑郁生・玉手 聡・田中智宏	液状化によるケーソン護岸及び背後地盤の被害低減に関する模型実験	日本地震工学会大会2004	2005年1月
小濱英司・横田正樹 伊藤忠・規矩大義 枝秀紀・菅野高弘	杭近傍の変位抑制による側方流動地盤中の杭への荷重低減に関する模型振動実験	JGS-Kanto2005	2005年3月
本多剛・東畑郁生 玉手聡	液状化に伴う河川堤防の地盤変形に関する個別要素法解析	第40回地盤工学研究発表会	2005年7月 (投稿中)
佐藤宏樹・本多剛 M.J. Alam・東畑郁生 玉手聡・田中智宏 小林義和	地盤構造物の液状化対策に関する遠心模型実験と流動対策の評価	第40回地盤工学研究発表会	2005年7月 (投稿中)
横田正樹・伊藤忠 規矩大義・小濱英司 菅野高弘・枝秀紀	杭近傍の地盤変位抑制による杭への側方流動荷重の低減法に関する振動台実験	第40回地盤工学研究発表会	2005年7月 (投稿中)
田中智宏・安田進 石井隆志	2種類の流動対策杭を用いた護岸背後地盤の流動対策に関する振動台実験	第40回地盤工学研究発表会	2005年7月 (投稿中)
安田進・田中智宏 石井隆志	護岸背後地盤の流動対策に関する振動台実験	第40回地盤工学研究発表会	2005年7月 (投稿中)

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成 14～16 年度業務のまとめ

- 1) 遠心場における杭基礎変位低減に関する振動台実験では以下のような結論が得られた。
  - a) 抑止杭の設置により、基礎杭の杭頭変位は約 1/3 に低減できるとともに、ケーソン背後地盤の地表面沈下は約 2/3 に低減できる。
  - b) 抑止杭の配置方法の違いによる抑止効果の差は見られなかった。これは、剛性の高い鋼管杭（70cm、t16mm）を密に配置したためと考えられる。
  - c) 抑止杭の設置はケーソンの側方変位を約 30%低減するとともに、傾斜確度を約 50%低減できることが確認された。
  - d) ケーソンの変位量とケーソン背面の土圧には関係が見られなかった。
  - e) 未対策地盤では、不飽和層がケーソンを海側に変位させる挙動が見られた。一方、抑止杭を設置した地盤では、抑止杭が不飽和層の海側への変位を抑止し、不飽和層はケーソンの変位に追随しないことがわかった。
- 2) 1G 場における杭基礎変位低減に関する振動台実験では以下のような結論が得られた。
  - a) 杭基礎と護岸との間に対策杭のような非連続的な対策工を設置すると、杭基礎や地盤の変位量は低減した。
  - b) 今回実施した実験では抑止杭を千鳥に配置することにより大きな杭基礎変位低減効果が得られた。ただし、その頭部を連結すると抑止杭間隔が固定されてしまい、液状化した地盤がすり抜け易くなるため変位低減効果は少なくなる。
  - c) 対策工は杭基礎からの設置距離が近いほど杭基礎の変位は低減した。その理由は杭基礎と対策工とが一体となって流動力に対し抵抗すると考えられるが、詳細なメカニズムは今後の課題である。
  - d) 対策工の幅は広いほど、またその打設間隔は狭いほど杭基礎の変位は低減した。
- 3) 1G 場における杭基礎に作用する流動荷重低減に関する振動台実験では、抑止壁を杭基礎の下流側に設置すると、杭基礎に作用する流動荷重を大きく低減することが確認された。
- 4) 2 種類の対策工による流動対策に関する 3 次元残留変形解析では、今回の解析モデルにおいて、対策工は護岸や杭基礎の変位を低減する効果が得られた。また、対策杭を設置することでも連続壁と同様の低減効果が得られた。ただし、今回実施した解析では液状化後の物性設定も大まかである上に、過去に被災した実在するモデルではない。残留変形解析手法を用いることによる変位量そのものの妥当性の確認は今後の課題となる。

