

### 3.3.7 側方流動に対する基礎の三次元数値シミュレーションの研究（その2）

#### 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15年度業務目的

##### (2) 平成15年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
  - 1) 解析対象とする実験の概要
  - 2) 解析手法
- (c) 業務の成果
  - 1) ケース14-1の数値シミュレーション
  - 2) ケース15-3の数値シミュレーション
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

##### (3) 平成16年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 側方流動に対する基礎の三次元数値シミュレーションの研究（その2）

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名	メールアドレス
基礎地盤コンサルタンツ株式会社 ジオエンジニアリングセンター	主任研究員	チュブリノ フスキー・ミ シュコ	misko.cubrinov ski@kiso.co.jp
防災部	部長	森本 巖	morimoto.iwao@ kiso.co.jp
東京理科大学	主任	亀井 祐聡	kamei.masaaki@ kiso.co.jp
工学部土木工学科	講師	塚本 良道	ytsoil@rs.noda .tus.ac.jp
中央大学	教授	石原 研而	ishihara.kenji @kiso.co.jp
工学部土木工学科			

(c) 業務の目的

現状の三次元数値シミュレーションが実験結果をどの程度予測できるかのデータを得ることを目的として、別途実施される側方流動実験を対象として数値シミュレーションによる事前予測解析を行い、解析手法の妥当性と精度を検証する。

(d) 3カ年の年次実施計画

1)平成14年度：

14年度に実施された護岸に直交する方向の加振による実験の予測解析を行う。  
低拘束圧下における土の応力～ひずみ関係のモデル化を行う。  
三次元解析に先立ち、二次元解析も行う。  
実験と解析結果を比較し精度を検討する。  
三次元解析の問題点等を検討する。

2)平成15年度：

15年度に実施された実験の予測解析を行う。  
実験と解析結果を比較し精度を検討する。  
14年度実施の解析・実験結果と比較検討する。

3)平成16年度：

16年度に実施予定の上部工を考慮した実験の予測解析を行う。  
実験と解析結果を比較し精度を検討する。  
全体のまとめを行う。

(e) 平成15年度業務目的

- 15年度に実施された実験の予測解析を行う。
- 実験と解析結果を比較し精度を検討する。
- 14年度実施の解析・実験結果と比較検討する。

(2)平成15年度の成果

(a) 業務の要約

平成15年度は次の各項目を実施した。

- 1) 独)土木研究所(以下、土研)においてに実施された杭基礎構造物を有する矢板護岸の側方流動実験(ケース14-1、15-3)を対象として、三次元有効応力解析手法を用いた数値シミュレーションを行った。シミュレーションの主な目的は液状化による地盤流動の影響を受ける杭基礎構造物の応答を予測し、その精度を検討することにある。モデル化や解析方法、解析結果については本文中に詳しく述べた。
- 2) 地盤、杭基礎、矢板の応答について、解析結果と実験結果を比較し、予測解析の精度について検討した。また実験と解析で対応しない点について触れ、課題を述べた。
- 3) 地盤と杭基礎の応答に関しては実験と解析は良い一致を示しているが、矢板の変位に関しては解析が実測を過小評価する結果となった。

(b) 業務の実施方法

1) 解析対象とする実験の概要

土研において実施された側方流動実験のうち、解析対象としたのは昨年度実施されたケース14-1<sup>1)</sup>と本年度実施されたケース15-3<sup>2)</sup>である。概要を以下に述べる。

実験モデルを図1(a)と図1(b)に示す。矢板護岸の背後地盤に杭基礎(杭の配列は3×3)

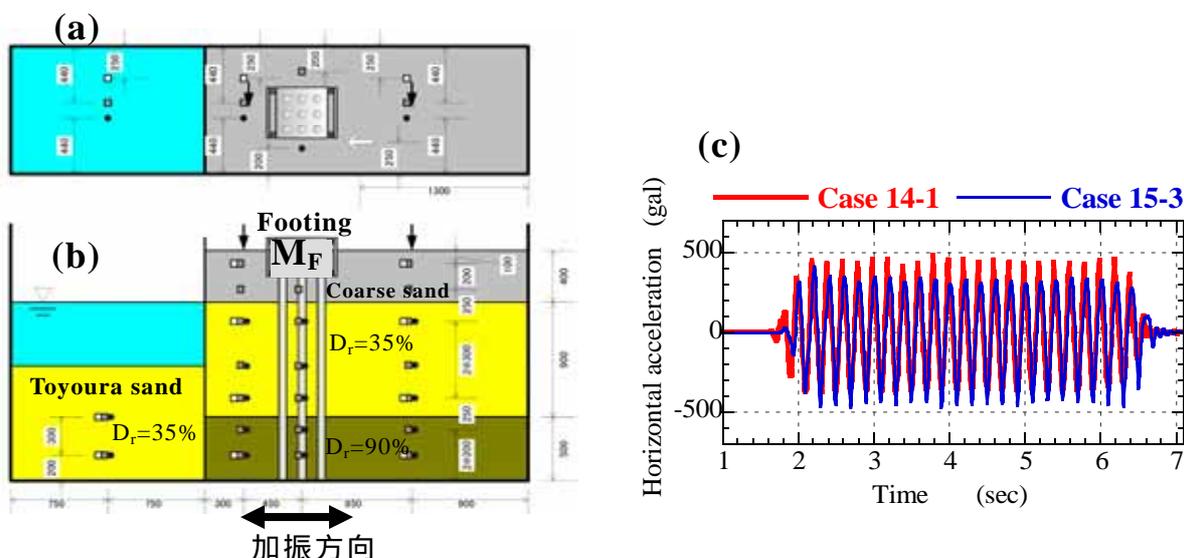


図1 解析対象とした側方流動実験のモデル: (a) 平面図; (b) 側面図; (c) 振動台波形; フーチング重量, Case 14-1:  $M_F = 21.6 \text{ kg}$ ; Case 15-3:  $M_F = 170 \text{ kg}$ ;

が設置されたモデルである。杭は直径 50.8mm、厚さ 1.5mm の鋼製で、曲げ剛性 EI は 12.8kN-m<sup>2</sup> である。杭の境界条件については、先端 (GL-165cm)、杭頭 (GL-20cm) とともに剛結である。背後地盤は 3 層構成で 1.8m の層厚を有し、表層は粗砂 (不飽和)、中間層は相対密度  $D_r=35\%$  の豊浦砂、最下層は  $D_r=90\%$  の豊浦砂となっている。護岸前面の地盤は背後地盤の中間層と同様に緩い豊浦砂で構成されている。矢板は 6mm 厚さの鋼板で、自由に動くことができる。

土槽は長さ 4m、幅 1m、高さ 2m の剛土槽であり、解析対象とする実験ケースは、護岸に直交する方向の加振である。振動台に入力する地震動は周波数 5Hz で最大振幅 480gal、20 波の正弦波である。対象としている 2 つの実験ケースでは、フーチングの質量  $M_F$  が異なり、ケース 14-1 は  $M_F = 21.7\text{kg}$ 、ケース 15-3 は  $M_F = 170\text{kg}$  である。図 1(c) に振動台波形を示す。ケース 14-1 と 15-3 で若干の違いがあるが、ほぼ似たような加速度波形である。

## 2) 解析手法

### a) 解析に用いるプログラムと土の構成則

三次元有効応力解析は昨年同様<sup>3)</sup>、有限要素法プログラム Diana-J3 を使用し、砂の構成則には Stress-Density モデル (S-D モデル) を用いた。FEM プログラムと構成則については次節以降で触れるが、構成則については文献 4)5) に詳しく示している。

### b) 解析の概要

本年度の研究は、昨年度から継続して行っている内容もあることから、昨年度分も含め本年度実施した検討の一覧を表 1 に示す。

表 1 平成 14 年度と平成 15 年度に実施した解析の概要

項目	平成14年度	平成15年度
要素シミュレーション	豊浦砂 ( $D_r = 40, 90\%$ )	粗砂 (非液状化層)
初期応力解析	二次元静的解析	平成14年度解析結果を利用
二次元動的解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 矢板護岸モデル</li> <li>・ 矢板 + 杭基礎モデル</li> </ul>	パラメトリックスタディ (メッシュのピッチ, 時間ステップ $\Delta t$ , レイリー減衰 $\beta$ )
三次元動的解析	予備解析 - 粗いメッシュ使用(フルモデル) - $\Delta t = 0.0025\text{ sec}$ - $\beta = 0.005$ - x方向の変位は左右境界で同じ変位とする(せん断土槽のようなモデル化)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ケース14-1の解析</li> <li>・ ケース15-3の解析</li> <li>- 密なメッシュ (1/2モデルとする)</li> <li>- <math>\Delta t = 0.0004\text{ sec}</math></li> <li>- <math>\beta = 0.003</math></li> <li>- 左右境界は固定とする(剛土層としてモデル化)</li> <li>・ パラメトリックスタディ (フーチングとこれに接する地盤との境界条件の設定)</li> </ul>

昨年度は、まず低拘束圧条件下における豊浦砂のモデルパラメータを設定し、続いて静的解析を行い加振前における地盤の応力状態を検討し、この応力状態を初期条件とし動的解析を行った。表に示すように、昨年度の主な検討は二次元動的解析であったが、三次元動的解析の予備解析も実施した。ただしこの予備解析に用いた有限要素メッシュはピッチが粗く、解析の時間ステップがやや大きく、設定した境界条件も実際の実験条件と少し異なるものであった。また昨年度この

解析を実施した時点では、粗砂層のパラメータについて、試験結果を反映することができなかったことから密な豊浦砂としてモデル化した。

本年度の解析概要は以下の通りである。

- ・粗砂層のモデルパラメータを室内試験結果（CD 試験）に基づき見直した（3.3.5 節参照）。
- ・解析条件を改善した（解析メッシュを細かく、境界条件を実験条件に対応するように修正、解析の時間ステップを細かく）
- ・実験ケース 14-1 と 15-3 を対象に三次元動的解析を実施した。
- ・三次元動的解析を用いたパラメトリックスタディにより、土とフーチングの境界部分のモデル化とこれが杭基礎の挙動に与える影響を調査した。また二次元動的解析により、メッシュサイズや解析の時間ステップ  $t$  やレイリー減衰 についてパラメトリックスタディを行った。

#### c) 解析に用いた砂のモデルパラメータ

護岸背後地盤の表層部に用いられている粗砂層のモデルパラメータを、三軸圧縮試験（CD 試験）結果に基づき設定した。試験より得られた拘束圧 20、40、60、80kPa 下における応力ひずみ関係を図 2(a)中の破線に示す。ただし縦軸は偏差応力  $q$  を平均応力  $P$  で除して正規化したものである。

粗砂層の上載圧を考慮して、4 種の拘束圧による試験のうち最も小さな 20kPa における応力ひずみ関係を目標として、要素シミュレーションによりモデルパラメータを設定した。結果を図 2(b)の実線に示す。図のように実験結果とシミュレーション結果は非常に良い一致を示している。

豊浦砂からなる土層に関しては、表 2 に示すように、昨年度と同じパラメータを用いた。このパラメータも、拘束圧が小さいことを十分に考慮して設定したものである<sup>3)</sup>。

#### d) 解析条件

図 3(a)、3(b)に昨年度及び本年度用いた解析モデルを示す。昨年度同様、本年度も FEM モデルは土質材料を 8 節点ソリッド要素で、杭をはり要素で構成した。またフーチングと矢板に関してもソリッド要素を用いた。さらに節点の数を保ったままメッシュを細かくするために、実験モデルを 1/2 で縦割りにし（護岸と直角な方向）節点を密にすることで、解析精度の向上を図った。

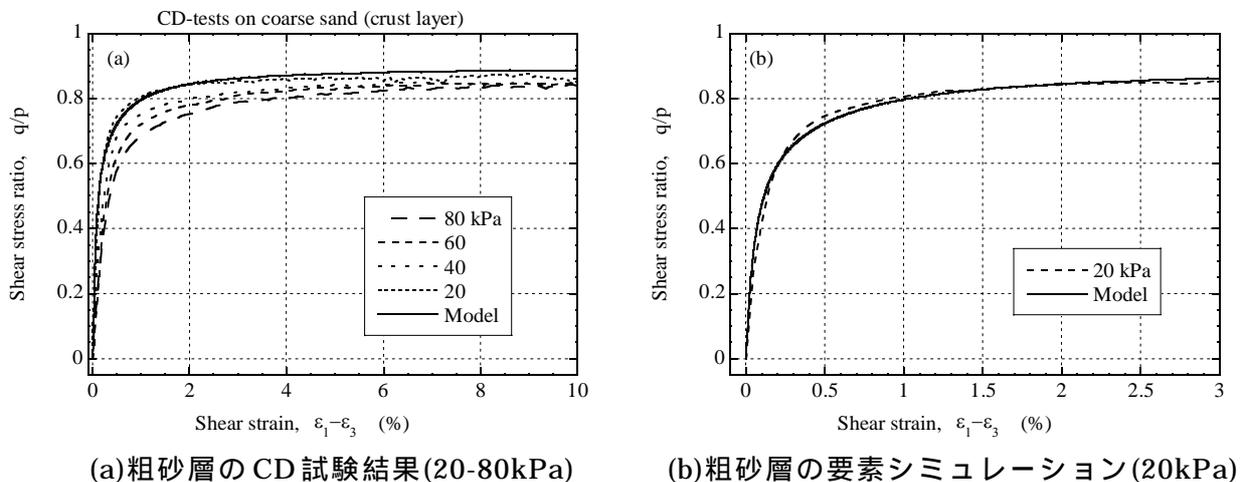


図 2 粗砂層の要素シミュレーション

表 2 解析に用いる豊浦砂のパラメータ

	パラメータ		値
弾性	せん断定数	$A$	250
	ポアソン比	$\nu$	0.15
	指数	$n$	0.60
State Index	準定常状態線		$(e, p')$ -values
応力 ~ ひずみ 関係	$(\sigma/P)_{\max}$ に関する係数	$a_1, b_1$	0.592, 0.021
	$G_{N,\max}$ に関する係数	$a_2, b_2$	291, 55
	$G_{N,\min}$ に関する係数	$a_3, b_3$	98, 13
	定数	$f$	4
ダイレタンシー	ダイレタンシー係数	$\mu_o$	0.15
	限界応力比	$M$	0.607
	ダイレタンシー - ひずみ	$S_c$	0.0055

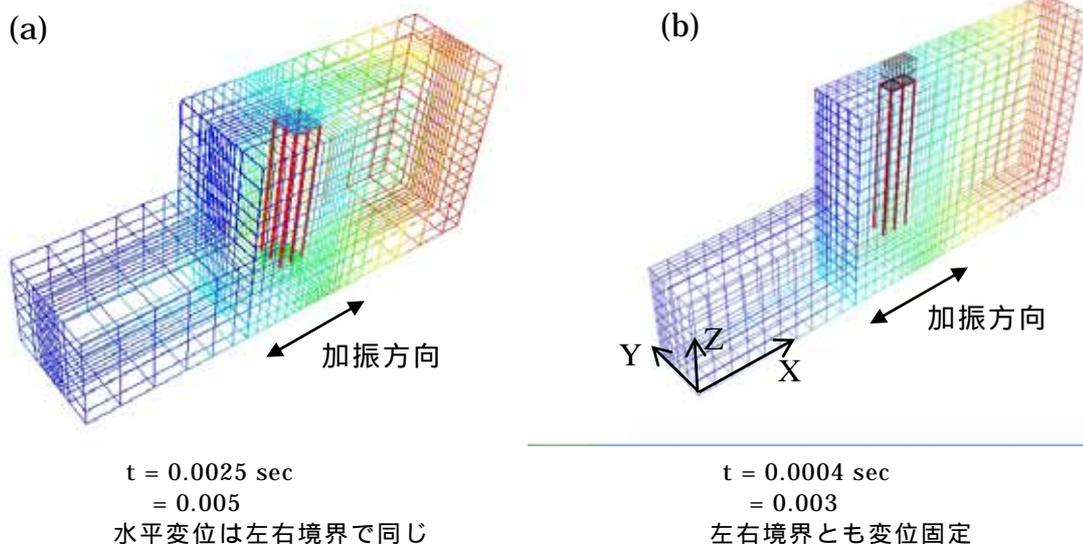
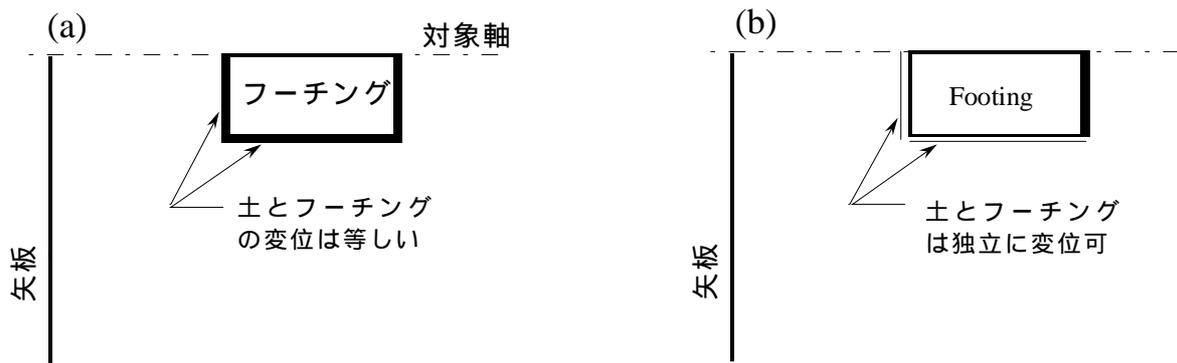


図 3 三次元解析で用いたモデル

(a) 昨年度の粗いメッシュのモデル; (b) 今年度の細かいメッシュのモデル (1/2 モデル)

右側境界と左側境界はそれぞれ加振方向を固定とすることにより剛土槽を表現した。半分にした面に位置する節点は、 $y$  方向 (護岸と平行な方向) は動かないとした。1/2 モデルとしていることからモデル化する杭の本数は 6 本となる。またこの面内の杭基礎は半分の曲げ剛性とし、 $y$  方向の変位を固定、 $Z$  軸 (鉛直軸) 廻りの回転  $\theta_z$  を固定した。

土と矢板および土と杭が接する部分の境界条件は、水平方向の変位については、土と矢板および土と杭で同じとするが、鉛直方向は相対変位が可能であるとした。土とフーチングが接する部



(a)土とフーチングの変位は等しい

(b)土とフーチングが独立に変位可

図4 フーチングと地盤が接する部分の境界条件の概念図

(水平成分について。いずれのケースも鉛直方向は相対変位可。)

分のモデル化については、図4(a)(b)に示すようにフーチングの護岸背後側の面において土とフーチングで同じ変位とするが、フーチングの護岸前面側と側面側については、同じ変位をする場合と、別々の変位をする場合の2つの境界条件を考慮して計算した。

#### e) 初期応力解析

側方流動時の地盤変位や地震時挙動は、初期せん断応力の影響を受けることが知られており、解析結果を左右する重要な要素であると考えられる。昨年度の検討では、二次元静的解析を行い、実験モデルの作成工程を考慮して、加振前における地盤内の応力状態を把握した<sup>3)</sup>。本年度の解析もこの結果を用いるものとする。

#### f) 動的解析

本年度は解析精度の向上を図るために解析の時間ステップ  $t$  を細かくし、またレイリー減衰のパラメータ  $\alpha$  を昨年度より小さく修正した。具体的には  $t$  を 0.0004 秒に、 $\alpha$  を 0.003 とした。解析は、要素間で水の移動を許す排水条件を用い、6 秒間の解析を実施した。なお本検討は加振時の地震応答が対象であり、液状化後の水圧消散過程は対象としていない。

解析対象とするフーチング質量  $M_F$  は、ケース 14-1 が 21.6kg、ケース 15-3 が 170kg である。入力波形は図 1(c)に示した振動台波形を用いた。

#### (c) 業務の成果

##### 1) ケース 14-1 の数値シミュレーション ( $M_F=21.6\text{kg}$ )

以下ではケース 14-1 の三次元解析による結果と実験結果を比較し、地盤の加速度応答、杭の曲げモーメント、フーチングと矢板の変位に着目し解析精度を検討する。

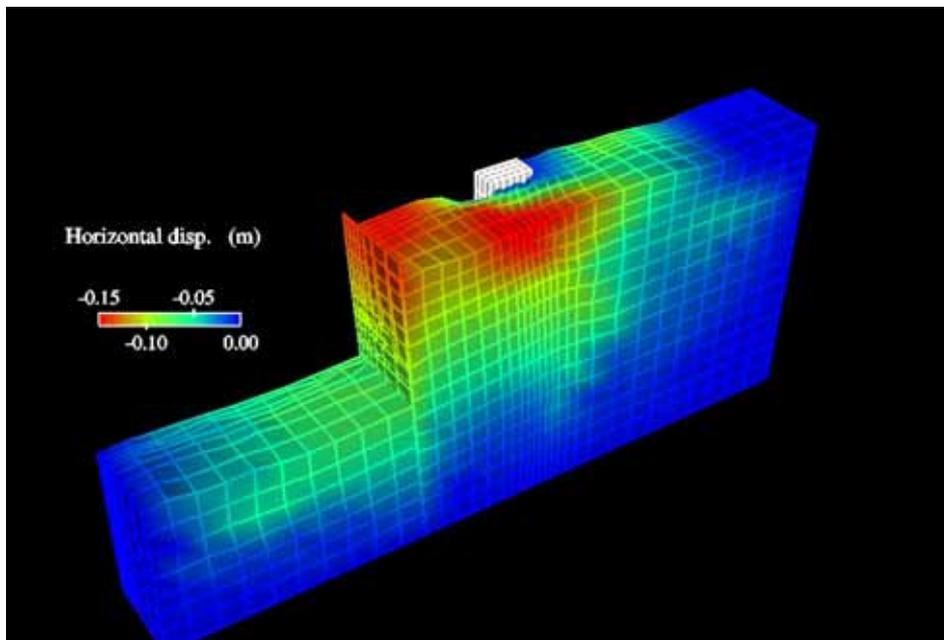
##### a) 地盤の応答

実験では、液状化に伴い矢板護岸が大きく前面へ変位し、同時に背後地盤の沈下が観測された。解析においても同様の現象を得ることができた。図 5(a)、5(b)に加振後の残留変位を示す。(a)は鳥瞰図、(b)は平面図である。図より杭基礎のまわりを地盤が護岸前面方向に流動しているような

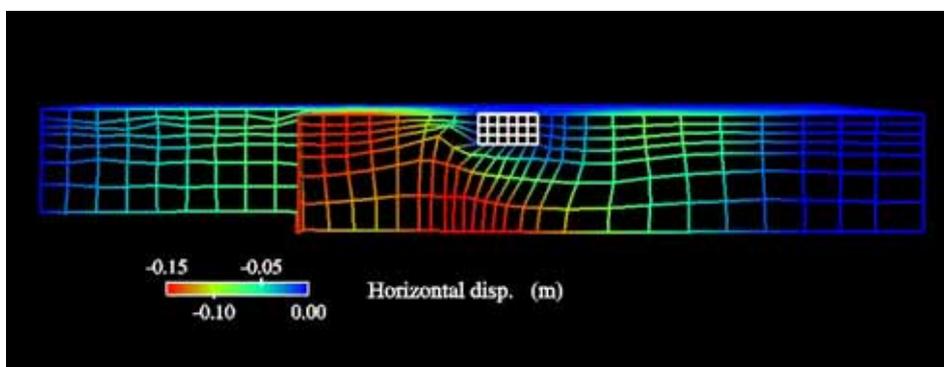
変形パターンがみられることから、三次元効果が表れているものと考えられる。杭基礎自身の変位は1cmをわずかに上回る程度であったが、地盤の変位は10～15cmと大きな変位であった。また実験では、ゆるい豊浦砂の層は1サイクルほどで液状化した。解析でも同様の結果が得られた。

背後地盤内の12箇所で計測された加速度時刻歴について実測と解析とを比較したものを図6に示す。なお加速度センサの配置は3つのアレーからなっており(1アレー4深度の計測)それぞれのアレーは、杭基礎と矢板の中央付近(センサー番号A2～A6)、杭基礎内の地盤(A9～A13)、杭基礎の背面側(A16～A20)に位置している。

図6より解析と実測は概ね一致しているといえる。密な豊浦砂の層(背後地盤の最下層)においては(A6,A13,A20)振動台波形とほぼ似たような揺れとなっているが、ゆるい豊浦砂の層は、特にA17及びA18において液状化により加速度が大きく減衰している。また表層の粗砂層ではやや増幅しているのが分かる。実測と解析で対応が良くないのはA2とA3であり、ここでは解析が実測を大きく上回っている。



(a) 鳥瞰図



(b) 平面図

図5 地盤変位の分布

この付近は、矢板及び周辺の地盤が護岸前面方向に 12～15cm 程度流動している一方で背面の杭基礎変位は 1.2cm 程度にとどまっている箇所である。メッシュのピッチ（大変形に対してメッシュのピッチが十分細かくない）や矢板とこれに接する地盤との境界条件（両者が水平方向(X 方向)に等しく変位する）の影響により、このようなずれが生じたことが考えられる。

b) 杭基礎の応答

フーチング（杭頭）の水平変位について実測と解析とを比較したものを図 7 に示す。

両者ともに最大変位を記録する 3 サイクル目まで、護岸前面方向に徐々に変位が大きくなっていく（図 7 の縦軸で負の方向）。図より最初の 10 サイクル程度まで（時間で 4 秒付近まで）実測と解析結果は良く一致している。加振終了前の 2 秒間は、実測された変位は徐々に振幅を小さくし、一旦護岸前面方向に動いた杭基礎がもとの位置に戻るような挙動をしている。解析ではこのような現象は見られず、解析と実験で加振終了時の残留変位に差が生じている。

前述のように、フーチングとその周囲の地盤とはかなり大きな相対変位が生じていることから、それらが接する部分の境界条件の設定は、これが結果に及ぼす影響を考えれば非常に重要であるといえる。境界条件が杭基礎の応答に及ぼす影響を検討するために、(1)フーチングとこれに接する地盤は独立に変位するケースと、(2)フーチングとこれに接する地盤の変位が等しいとするケースの 2 種類の解析を行った。

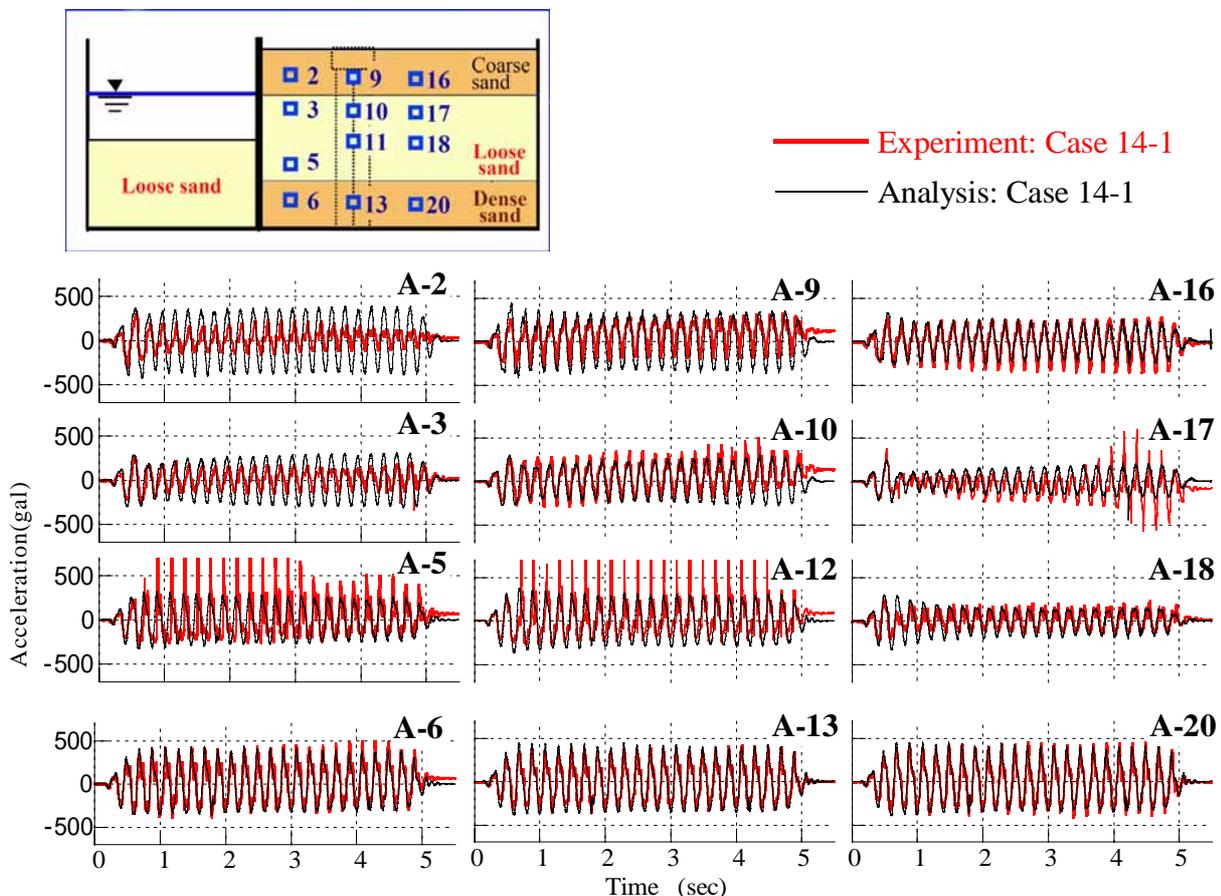


図 6 背後地盤内の 12 箇所計測された加速度時刻歴：実験と解析の比較  
(ケース 14-1)

図 8(a)、8(b)に2つのケースの加振後の変形図をそれぞれ示す。検討の結果、境界条件は杭基礎の挙動に影響するものの、それほど大きなものではないことが分かった。一般的には、フーチングの側面及び前面（護岸側）に隣合う地盤との境界条件を独立とすると、フーチングの水平変位はやや小さくなる方向に作用し、またこの条件の方が実際の現象に則していると思われる。ただしこうした境界条件を設定すると、数値計算が不安定になることも考えられる。

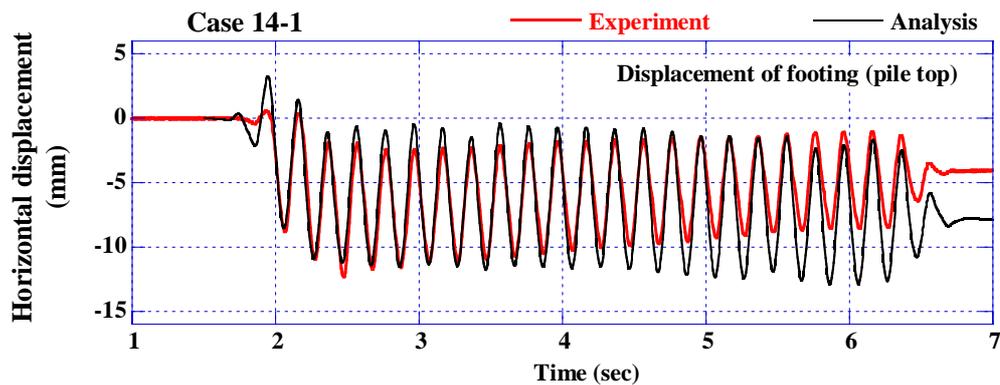
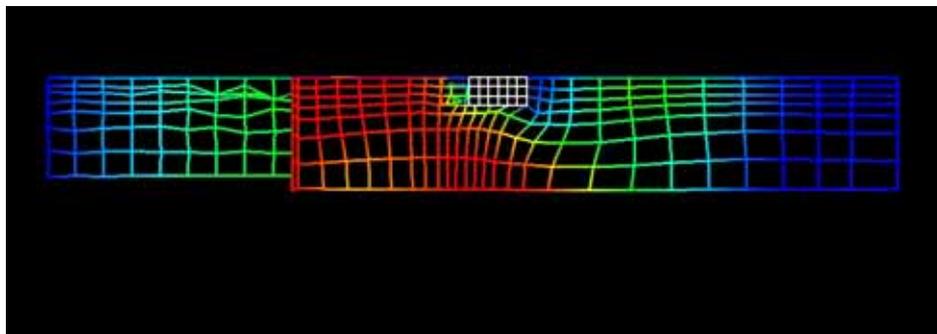
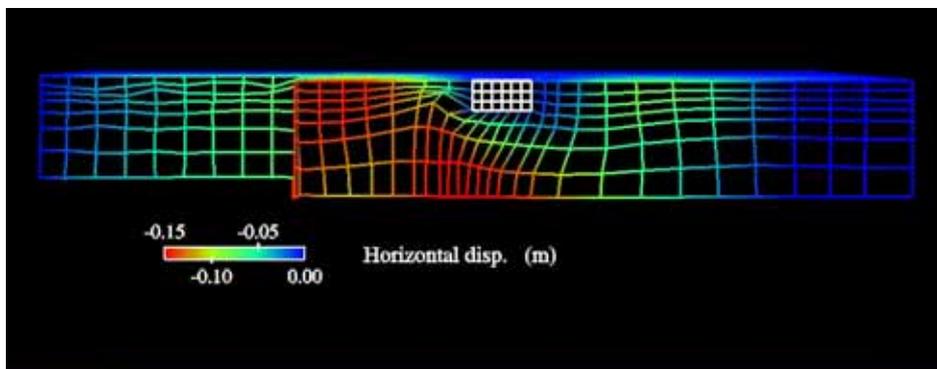


図 7 フーチングの変位時刻歴：解析と実験の比較  
(ケース 14-1)



(a)フーチングとこれに接する地盤が独立に変位するケース



(b)フーチングとこれに接する地盤の変位が等しいとするケース

図 8 フーチング周辺の地盤変位

- モデルスケールと変位スケールは 1 対 1 -

外側の杭に関する曲げモーメントの時刻歴について、実験と解析とを比較したものを図9に示す。なお図9で杭①は護岸側、杭②は背後地盤側、杭③は中央の杭を表している。最上段の図は杭頭付近に設置されたひずみゲージから、下段の2つは杭先端付近のひずみゲージから計算されたものである。実測と解析は概ね良い一致がみられる。この他、実測と解析の対応関係は、フーチング変位と同様の傾向である。

実験において最大曲げモーメントは、3サイクル目の大きな振幅となる時刻で観測されている。図10(a)に、その時刻における杭①～③に沿った曲げモーメントの深度分布を示す。同図には比較のために、フーチング質量が大きいケース15-3における実測と解析結果も重ね書きしている。杭列（杭位置）の違いによる応答の差異を検討するために、中央部の杭（杭②、③）の曲げモーメントを図10(b)に示す。検討の結果、解析精度は杭の位置によらずどの杭でも同程度であることが分かった。

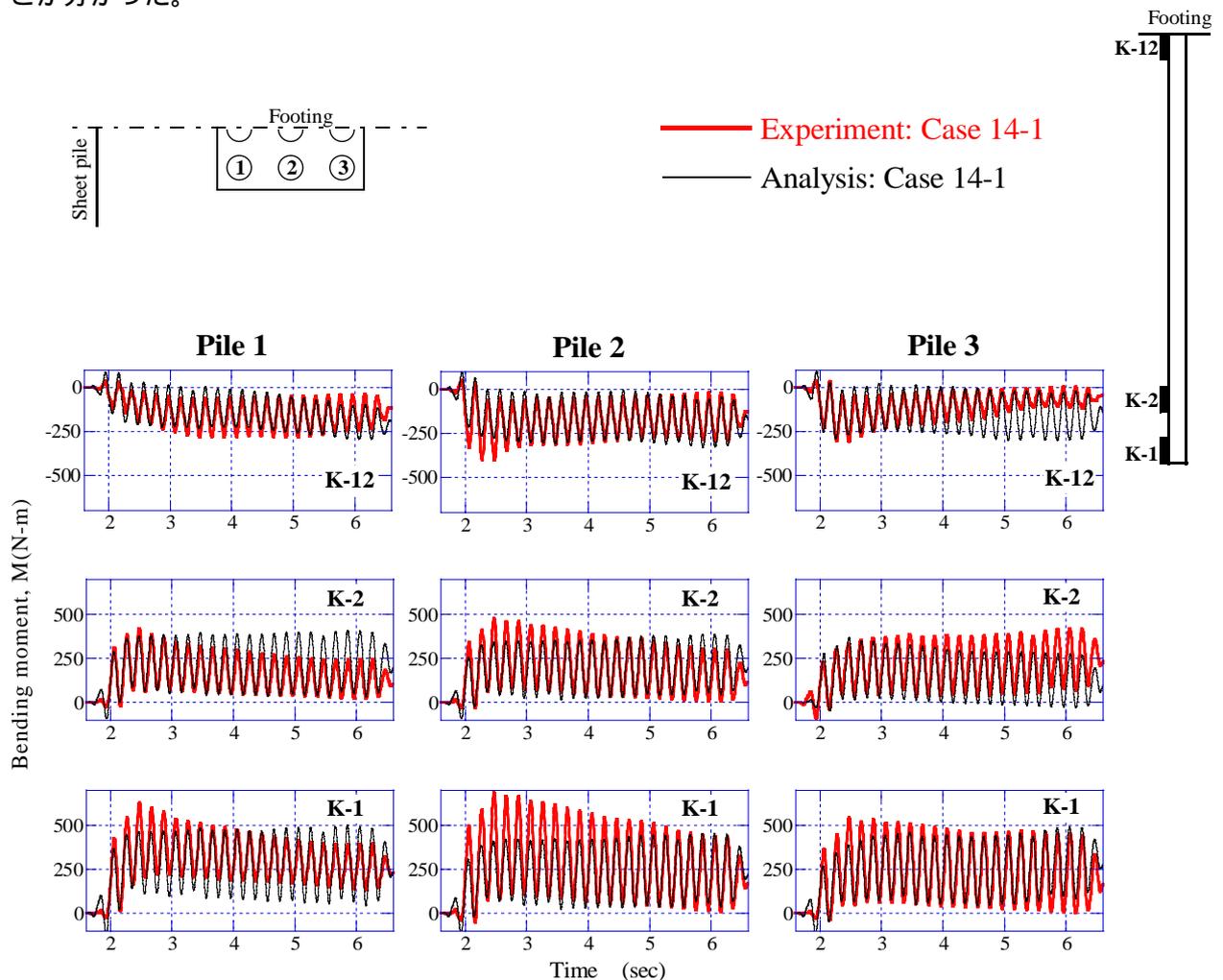
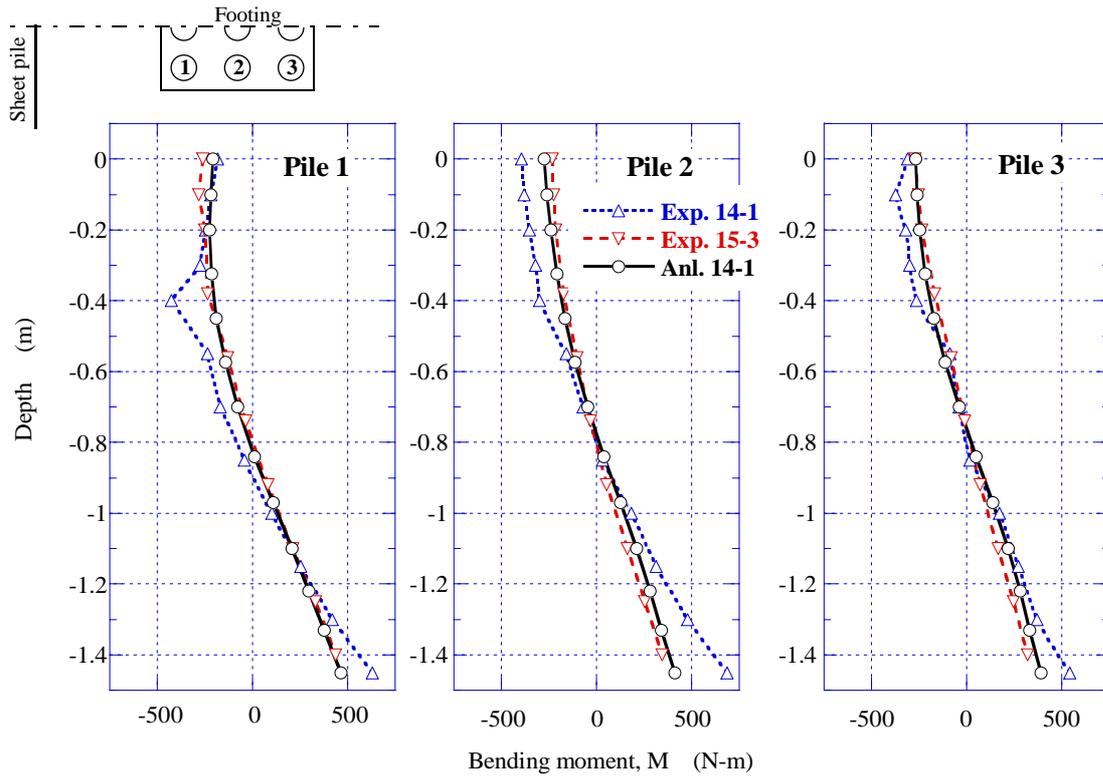
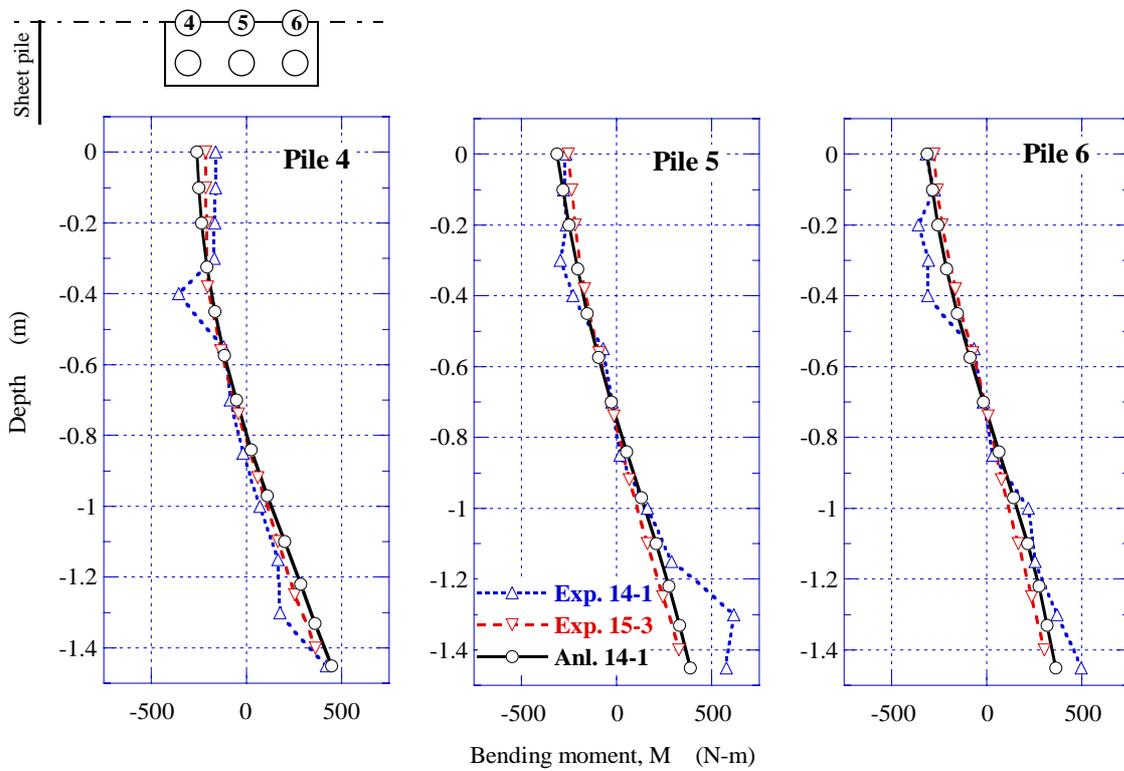


図9 曲げモーメントの時刻歴：実験と解析の比較  
(外側の杭列、ケース14-1)



(a) 外側の杭列



(b) 中央の杭列

図 10 曲げモーメントの深度分布：実験と解析の比較  
(ケース 14-1)

c) 矢板の変位

矢板頂部の変位について実測と解析とを比較した結果を図 11 に示す。三次元解析の結果得られた矢板の変位量は、設定した境界条件によるが、12~17cm となった。これは実測値の 1/3 ほどの量に相当する。ここでハンドリングの良い二次元解析を用いて、表層の影響やメッシュサイズその他、解析の時間ステップ、レイリー減衰 やガウス点の数等、数値解析的な問題を含めてパラメトリック解析を行い、実測と解析の差異の原因について検討した。ただし矢板変位の計算が目的であることから、二次元モデルにおいて、杭基礎構造物を含まない断面で検討した。この結果、細かいメッシュや小さな  $t$  を使うなど詳細な計算をした場合に、実測に対応した矢板変位量 40cm を得ることができた(図 12)。図 11 に示すように、本解析において計算された変位量は、実験ケース 14-1 に対応するものとなった。

三次元解析の結果、矢板変位量は小さく見積もることとなったが、杭基礎の応答は非常に良い精度で予測を行うことができた。杭基礎の応答を予測するためには、杭基礎周辺の地盤の応答を正確に予測することが重要であり、矢板自身の変位を正確に追う必要は必ずしも無いことが分かった。

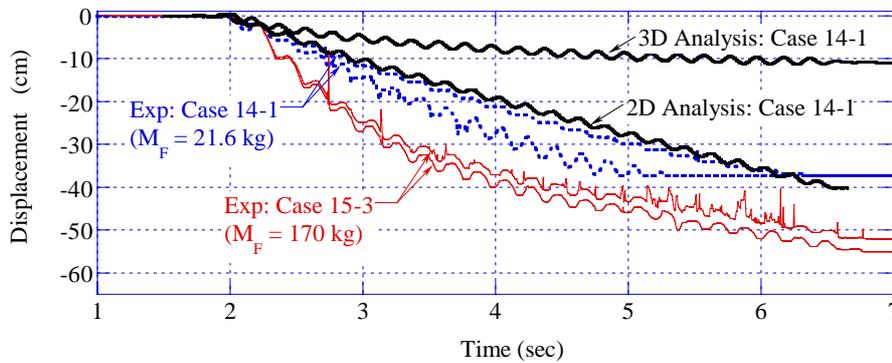


図 11 矢板変位の時刻歴

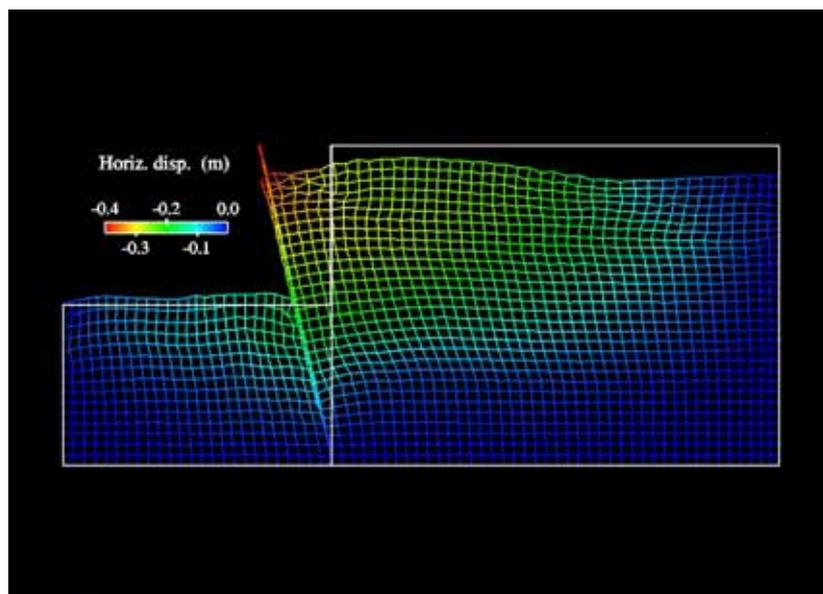


図 12 加振後の変形図(二次元解析)

- モデルスケールと変位スケールは 1 対 1 -

## 2) ケース 15-3 の数値シミュレーション ( $M_F=170\text{kg}$ )

### a) 地盤の応答と矢板の変位

ケース 15-3 における地盤の応答と矢板変位のシミュレーション結果は、ケース 14-1 の解析結果と良く似たものとなった。これは実験においても同様である。よってケース 15-3 に関しては、杭基礎の挙動に重点をおいて述べる。

### b) 杭基礎の応答

フーチングの水平変位に関して、実験と解析とを比較したものを図 13 に示す。ケース 15-3 では、フーチング質量  $M_F$  は  $170\text{kg}$  となっている（ケース 14-1 は  $M_F=22\text{kg}$ ）。

図より、2~3 秒付近で応答のピークを迎える前までの時刻については、最大応答値と変位振幅（両振幅）について実測と解析で良く対応していることが分かる。ただしその後は、解析と実験でずれが生じており、実験はゼロ線に近づき残留変位がほとんどなくなるのに対し、解析では 3 サイクル目のドリフト状態が加振終了時まで継続している。

杭 から杭 の曲げモーメントの時刻歴について実測と解析を比較したものを図 14 に示す。フーチング変位について述べたのと同様に、2~3 秒付近で応答のピークを迎えるまで、実測と解析は良く対応しているが、その後は解析と実験でずれが生じており、実験はゼロ線に近づくのに対して解析ではドリフトが継続している。

図 15(a)(b)に杭 ~ および杭 ~ の曲げモーメントの深度分布をそれぞれ示す。図に示す曲げモーメントは、実験において最大の曲げを記録した時刻におけるものである（=3 サイクル目のピーク）。どの杭でも実測と解析で概ね良い一致がみられた。

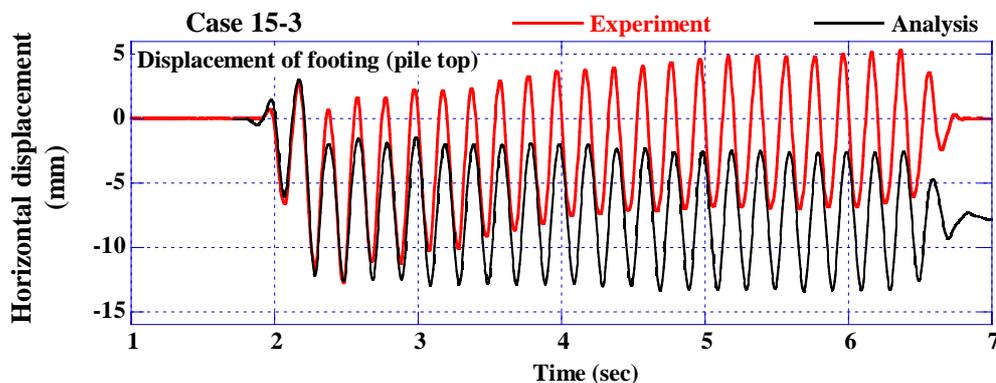


図 13 フーチングの変位時刻歴：実験と解析の比較  
(ケース 15-3)

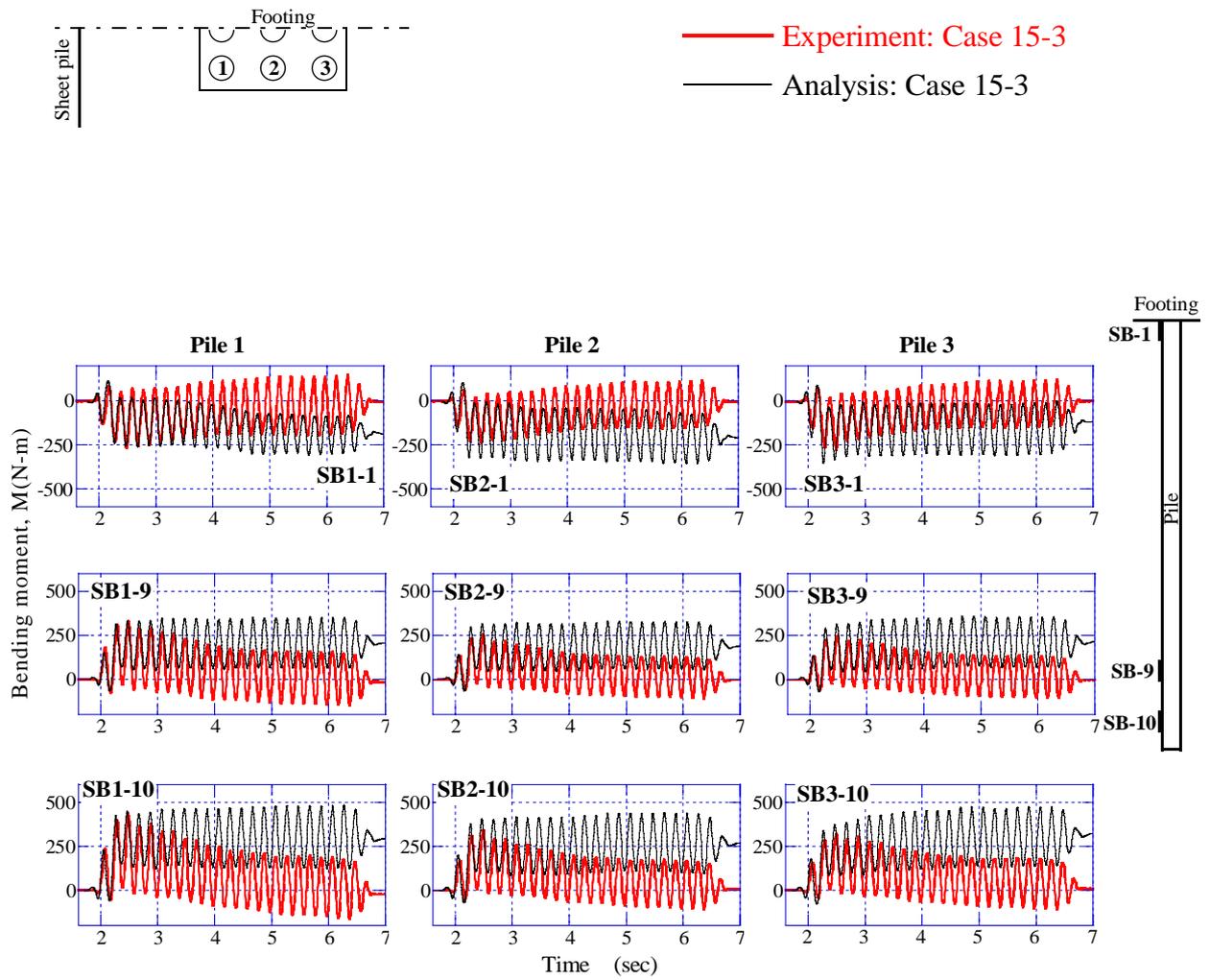
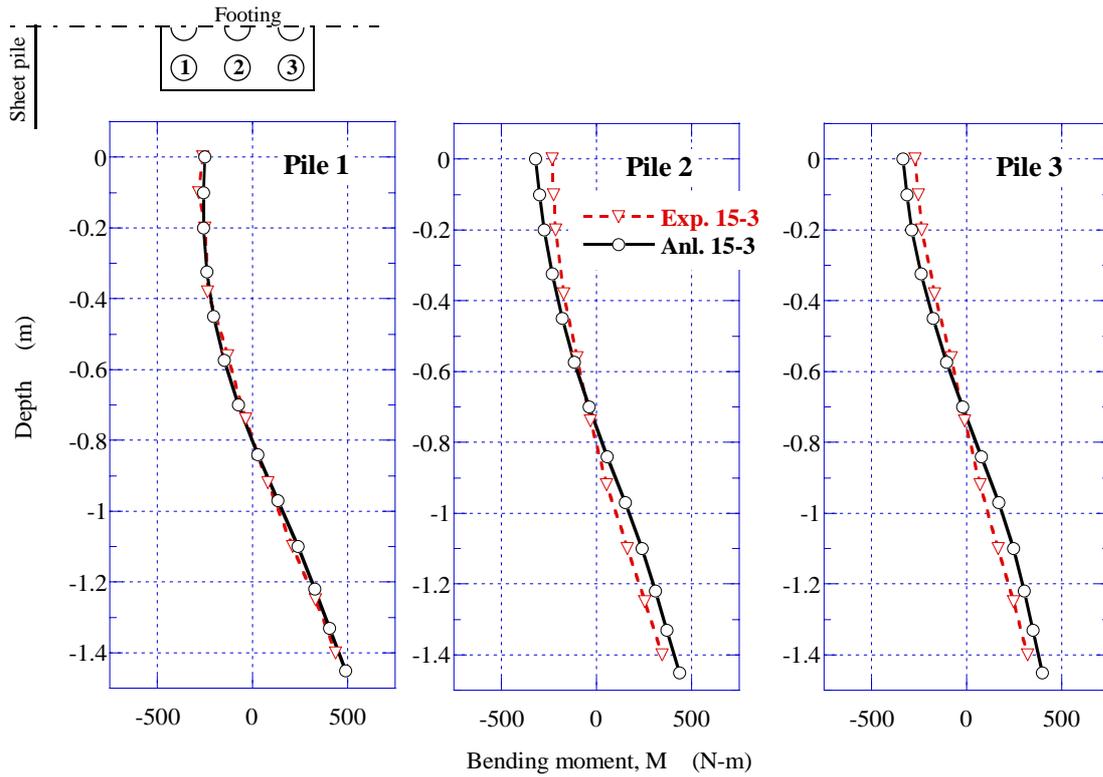
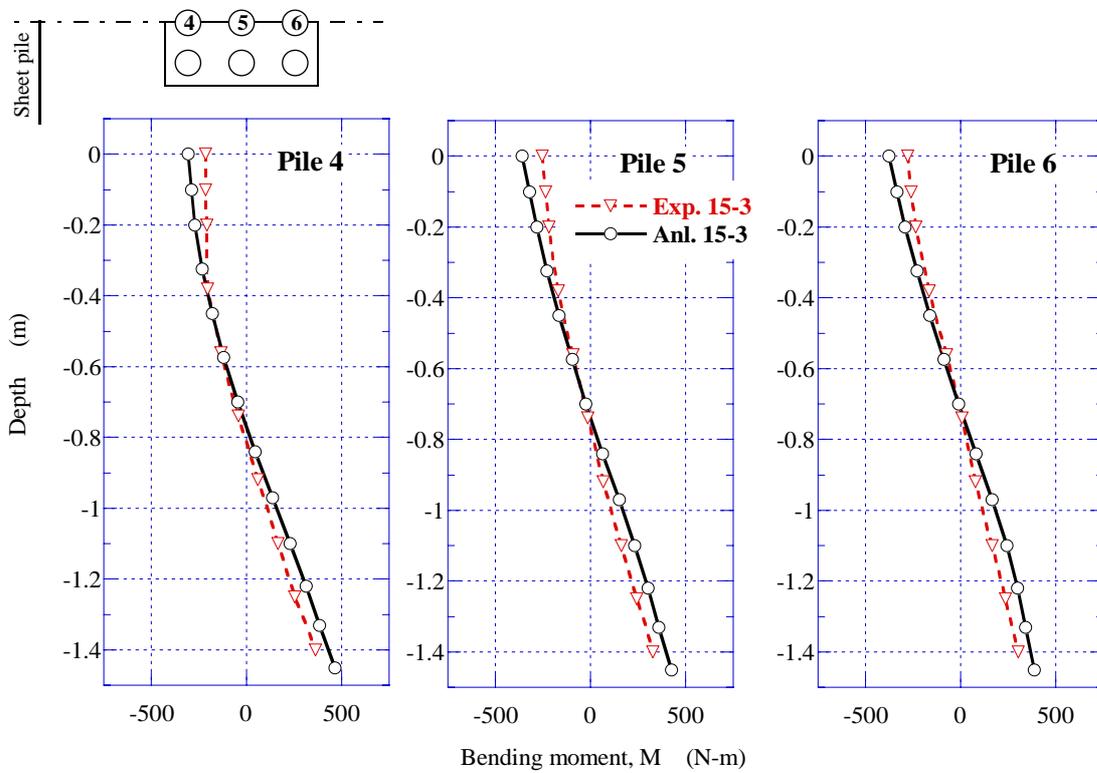


図 14 曲げモーメントの時刻歴：実験と解析の比較  
(外側の杭列、ケース 15-3)



(a)外側の杭列



(b)中央の杭列

図 15 曲げモーメントの深度分布：実験と解析の比較  
(ケース 15-3)

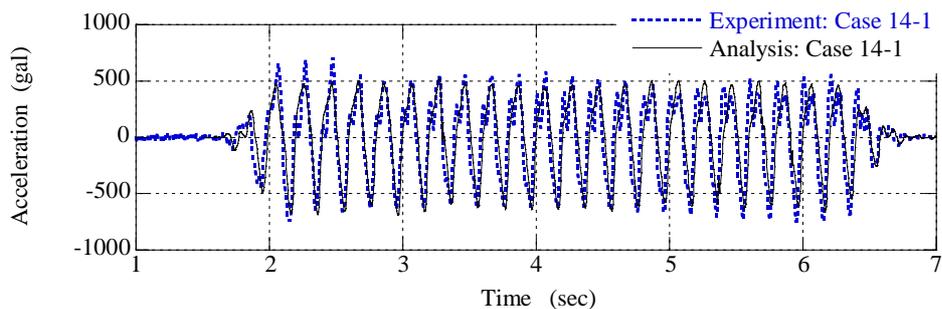
c) フーチング重量の影響

解析および実験により得られたフーチングの応答加速度をケース 14-1、15-3 についてそれぞれ図 16(a)(b)に示す。ケース 14-1 とケース 15-3 の 2 つの実験において、振動台加速度が一方の実験はプラス側に、一方に実験はマイナス側にややシフトしており(図 1(c))、フーチング重量  $M_F$  が 21.6kg から 170kg に増大した影響が観測結果に顕著に表れてこなかった。

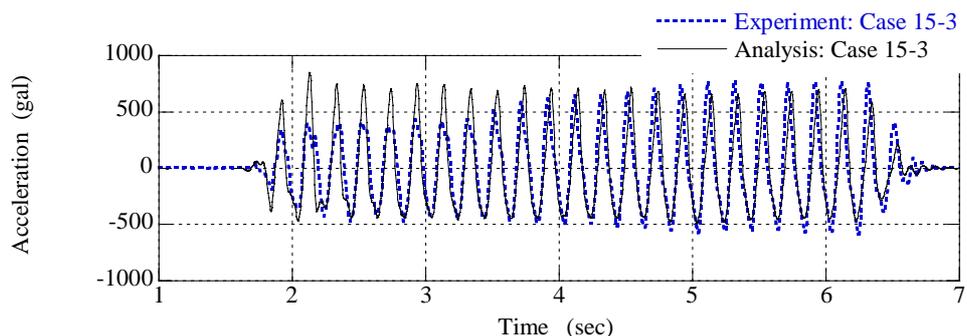
実験、解析双方とも、フーチングの最大変位は、ケース 14-1 に比べケース 15-3 の方がやや大きかった。表 3 に実験および解析で得られた最大変位を示す。実験の場合は 3 サイクル目のピークに対応した変位量であり、表中の解析の欄のカッコ内の数値はその 3 サイクル目のピーク変位量を示している。

表 3 フーチング変位のまとめ

ケース	フーチング重量 $M_F$ (kg)	フーチングの最大変位 (mm)	
		解析	実験
14-1	21.6	12.9(11.2)	12.3
15-3	170	13.4(12.6)	12.7



(a)ケース 14-1



(b)ケース 15-3

図 16 フーチングの応答加速度：実験と解析の比較

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 解析により得られた地盤の応答は、水圧上昇も含め、加速度、地盤変位とも、実験結果と良く対応していたことから、地盤全体の応答を良くシミュレーションできているものと考えられる。一部、杭基礎と矢板の間に挟まれる地盤においては実測と解析が一致しないところもあった。この部分は矢板が大きく前面に変位し、背後に控える杭基礎やその周辺地盤と非常に大きな相対変位が生じており、また矢板やフーチングとそれらに接する地盤には変位に関する境界条件を設けていることから、数値計算上、非常に厳しい部分であるといえる。こうしたことが一致しない要因と考えられる。
- 2) 杭の最大応答値（水平変位および曲げモーメント）は実験と解析で非常に良い一致がみられた。実験では杭の応答が最大になった後、応答が小さくなる傾向がみられ、加振中に一旦護岸前面方向に動いた杭基礎がもとの位置に戻るような挙動をした。このような現象は解析では再現できなかった。
- 3) 杭の最大応答値の予測は精度良くできたが、加振直後の矢板変位量については実験に対して解析結果は 1/3 程度に留まり、過小評価する結果となった。ケース 14-1 とケース 15-3 で実験により得られた矢板変位量はそれぞれ 40cm、55cm と異なるのに対し、杭の応答は両実験ケースでそれほど変わらなかった。以上より、杭基礎の応答を精度良く推定するためには、必ずしも矢板の変位量を高精度に追跡する必要はなく、杭周辺の地盤の応答変位を正確に予測することが重要であることが分かった。
- 4) 本研究により、地盤流動の影響を受ける杭基礎に関する振動台実験を精度良くシミュレーションするためには、モデル化や解析上注意する点が数多く存在することが分かった。
  - ）地盤材料のモデル化
    - ・ 杭の応答や杭と地盤の相互作用を適切に評価するためには、地盤の応答を正確に把握することが必要で、土の構成則は重要な役割を担う。本検討は小型実験が対象であることから低拘束圧条件下の室内試験に基づいて構成則のパラメータを設定した。特に表層の粗砂層のモデル化は、解析において、地盤の変形パターンに強く影響し得るため注意が必要である。
  - ）数値解析を行う際の留意点
    - ・ 地盤の変形パターンや構造物との相互作用把握するためには、ある程度細かいメッシュを使用する必要がある。時間ステップ  $\Delta t$  とレイリー減衰  $\gamma$  については通常用いる値より小さい値が適切である。
    - ・ 地盤と杭が接する境界は、地盤が沈下できるようにするのが望ましい。側方流動現象は背後地盤の沈下を伴うことから、地盤の変形モードを正確に把握するために重要な要素である。
    - ・ 杭に関しては通常用いるはり要素で良いシミュレーションができた。
- 5) 本研究は、三次元解析を E-ディフェンスの実験に適用するために、解析上発生し得る問題点を抽出し、改善すること目的としている。本研究により得られた新しい知見は、三次元シミュレーションを行う上で非常に役立つものと考えられる。具体的

には有効応力解析を次のような項目を検討するために役立てることが考えられる。

- ) 実験モデルのプロトタイプを設計し、実験条件を検討する
- ) 実験結果の説明や解釈
- ) 実際に実施される振動台実験のケースに加え、実験条件を変えたパラメトリックスタディを行い、実験ケースを見かけ上増やすことで効果的に研究を進める。

以上のように、大型振動台実験を効率的に実施するため、補足的な道具としての有効応力解析手法を確立することを今後とも積極的に推進していく必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 文部科学省・独)防災科学技術研究所, 大規模大震災軽減化特別プロジェクト II 振動台活用による構造物の耐震性向上研究, 平成 14 年度成果報告書, 3.3.5 節,2003.
- 2) 文部科学省・独)防災科学技術研究所, 大規模大震災軽減化特別プロジェクト II 振動台活用による構造物の耐震性向上研究, 平成 15 年度成果報告書, 3.3.5 節,2004.
- 3) 文部科学省・独)防災科学技術研究所, 大規模大震災軽減化特別プロジェクト II 振動台活用による構造物の耐震性向上研究, 平成 14 年度成果報告書, 3.3.7 節,2003.
- 4) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Modeling of sand behaviour based on state concept, Soils and Foundations, 38 (3), 115-127, 1998.
- 5) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: State concept and modified elastoplasticity for sand modelling, Soils and Foundations, 38 (4), 213-225, 1998.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
石原研而 チェブ・リノフスキ -・ミシコ 山口礼介	水平流動を受けた杭基礎の三次元有効応力解析	第 39 回地盤工学研究発表会、 主催：地盤工学会、開催地： 新潟市	2004 年 7 月 (発表予定)

(g) 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 16 年度業務計画案

16 年度は以下の内容について検討する。

- 1) モデル化や数値計算上のパラメータが応答に及ぼす影響についても調査し、15 年度までの検討で明らかとなった実測と解析とで差異が生じた原因について検討することで、三次元解析の精度向上を図る。
- 2) 16 年度に土研で実施される実験による解析を通じて、流動地盤内に位置する杭基礎の応答に影響を及ぼしうるパラメータについてさらに調査する。
- 3) 三次元解析のモデル化や数値計算上の問題と三次元有効応力解析をすることの有用性について、三年間の研究を通じて得られた内容をまとめる（振動台実験を対象とした三次元解析を行うための、適切なモデル化や計算条件の設定に関するマニュアル的なものとなる）。