

### 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ヵ年の年次実施計画
- (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14～16年度業務のまとめ

## (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

所属機関	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.cubrinovs ki@kiso.co.jp
防災部	部長	森本 巖	morimoto.iwao@k iso.co.jp
	主任	亀井 祐聡	kamei.masaaki@k iso.co.jp
東京理科大学 理工学部土木工学科	講師	塚本 良道	ytsoil@rs.noda. tus.ac.jp
中央大学 理工学部土木工学科	教授	石原 研而	ishihara.kenji@ kiso.co.jp

(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（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：

- ① 実験模擬に必要となる、低拘束圧条件下における土の要素シミュレーションを行った。
- ② 静的FEM解析を行い加振前の土の応力状態を計算した。
- ③ 二次元動的有効応力解析を行い、加振中における地盤や矢板の挙動、加振後における矢板護岸の変形量を計算した。
- ④ 三次元動的有効応力解析を行い、加振中および加振後の地盤や杭の挙動を計算した。

2) 平成15年度：

- ① 15年度実施の実験を対象として三次元動的有効応力解析（予測解析含む）を行った。
- ② 地盤、杭基礎、矢板の応答について実験と解析を比較し、予測解析の精度を検討した。
- ③ 杭基礎と地盤の応答は実験と解析の対応が良いが、矢板変位は解析が実測を過小評価する結果となった。

3) 平成16年度：

- ① 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。
- ② 実験と解析結果を比較し精度を検討する。
- ③ 全体のまとめを行う。

(e) 平成16年度業務目的

- ① 16年度に実施された実験の予測解析を行う。

- ② 実験と解析結果を比較し精度を検討する。
- ③ 3年間の解析・実験結果についてまとめる。

## (2)平成16年度の成果

### (a) 業務の要約

平成16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(16年度実施の2ケース)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本年度実施のケース H 16-2 およびケース H16-3 である (3.3.5 節参照)。概要を以下に述べる。

ケース H 16-2 における実験モデルを図 1 に示す。杭の配列は  $3 \times 3$  で計 9 本、フーチングの質量  $M_F$  は 357.9kg (設計質量は 320kg) の杭基礎モデルからなっている。両者の結合条件は剛結である。振動台に入力する地震動は、最大加速度 500gal の正弦波である。なお本ケースはフーチング質量が杭基礎の応答に及ぼす影響を調査するための一連の実験であり、ケース H14-1<sup>1)</sup>では  $M_F=21.6\text{kg}$ 、ケース H15-3<sup>2)</sup>では  $M_F=185\text{kg}$  で実施されている。

ケース H16-3 における実験モデルを図 2 に示す。杭の配列は  $2 \times 2$  で計 4 本、フーチングの質量  $M_F$  は 145kg (設計質量は 140kg) の杭基礎モデルからなっている。もう一方のケースと同様に両者の結合条件は剛結である。振動台に入力する地震動は、最大加速度 1200gal の正弦波である。なお本ケースの目的は、入力地震動の振幅レベルを上げて杭の非線形挙動を検討することにある。

その他の実験条件は両ケースで同じであり、杭は直径 50.8mm、厚さ 1.5mm のステンレス鋼製で、曲げ剛性  $EI$  は  $12.8\text{kN}\cdot\text{m}^2$  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。杭の間隔は杭径の 2.5 倍、 $d=128\text{mm}$  とされている。

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  $Dr=35\%$  の豊浦砂、最下層は  $Dr=90\%$  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 20 波の正弦波である。その他実験の詳細については、3.3.5 節に示されている。

## Test: H16-2

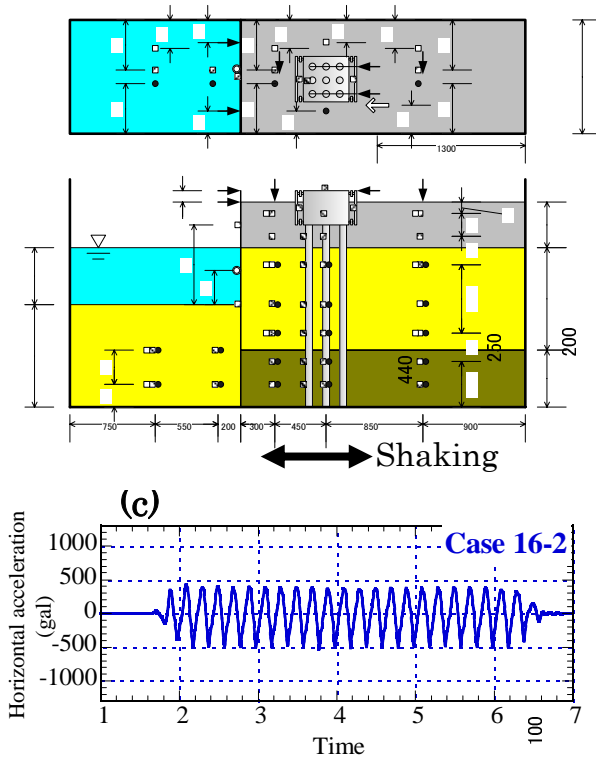


図1 解析対象とした側方流動実験のモデル  
ケース H16-2。杭列：3×3  
(a) 平面図; (b) 側面図; (c) 振動台波形;

## Test: H16-3

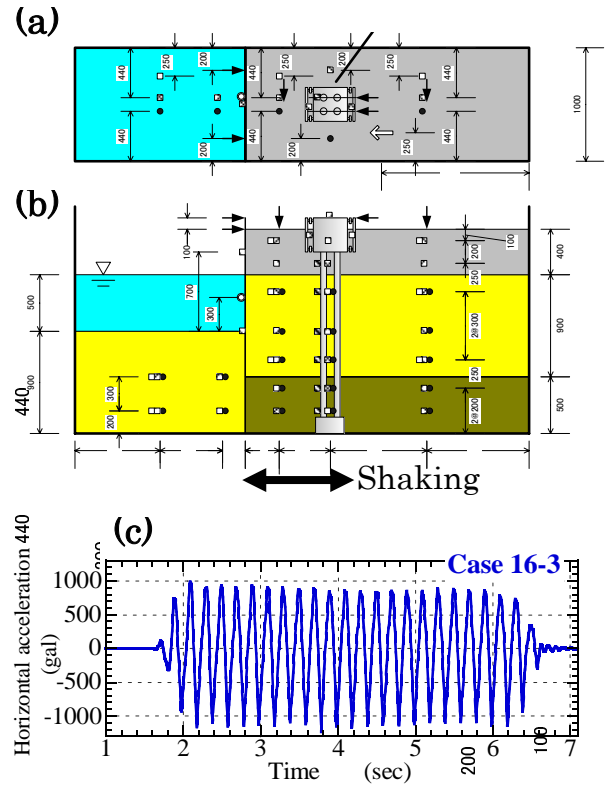


図2 解析対象とした側方流動実験のモデル  
ケース H16-3。杭列：2×2  
(a) 平面図; (b) 側面図; (c) 振動台波形;

### 2)解析手法

#### ①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<sup>4)5)</sup>に詳しく示されている。

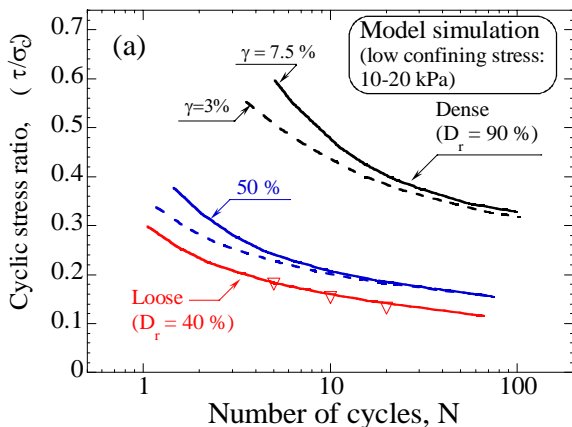
#### ②解析に用いた砂のモデル化

豊浦砂からなる土層に関しては、表 1 に示すように、昨年度および一昨年度と同じパラメータを用いた。これらのパラメータは非常に多くの室内試験結果 (ねじり試験) を参考に、拘束圧や密度等さまざまな条件を考慮してモデル化したものである<sup>4)5)</sup>。また実験モデル図からも分かるように、実地盤と比較して拘束圧が非常に小さいという点に特に注意して、砂のパラメータを設定した。モデル化の詳細は 2003 年報告書 3.3.7 節<sup>6)</sup>に示したとおりである。

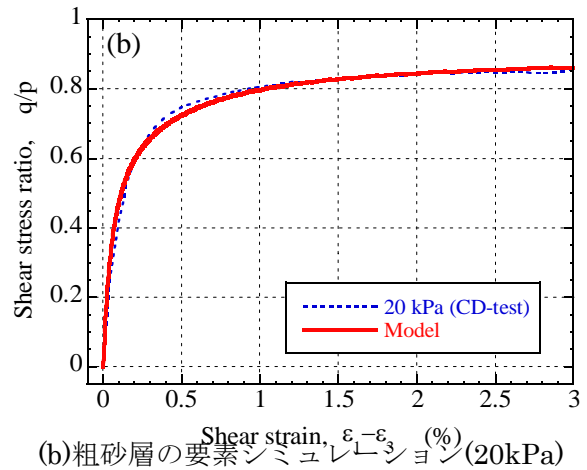
護岸背後地盤の表層部に用いられている粗砂層のモデルパラメータは、昨年の報告(2004 年報告書 3.3.7 節<sup>7)</sup>)に示すように、三軸圧縮試験 (CD 試験) 結果に基づき設定した。粗砂層の上載圧を考慮して、4 種の拘束圧による試験のうち最も小さな 20kPa における応力ひずみ関係を目標として、要素シミュレーションによりモデルパラメータを設定した。結果を図 3(b)の実線に示す。図のように実験結果とシミュレーション結果は非常に良い一致を示している。

表 1 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	$(\tau/P)_{\max}$ 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



(a)粗砂層の CD 試験結果(20-80kPa)



(b)粗砂層の要素シミュレーション(20kPa)

図 3 粗砂層の要素シミュレーション

### ③解析モデル

FEM モデルは、土部分は 8 節点のソリッド、杭体はビーム要素で構成した。ソリッド要素は、矢板とフーチングに関しても用いた。計算機容量の制約上、より細かいメッシュを作成するために、護岸直角方向に関してモデル中心を通るように分割した 1/2 モデルとした。ケース H16-2 とケース H16-3 の解析モデルを図 4 に示す。

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ケース H16-2 で 6 本、ケース H16-3 で 2 本となる。またこの面内に位置する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分のモデル化については、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（昨年度<sup>7)</sup>と同様のモデル化）。

### ④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。一昨年度の検討では、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>6)</sup>。本年度の解析もこの結果を用いるものとする。

### ⑤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  $\Delta t$  を 0.0004 秒に、レイリー減衰のパラメータ  $\alpha$  は 0、 $\beta$  は 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。ケース H16-3 の解析では、同実験で得られた振動台加速度波形を用いて解析

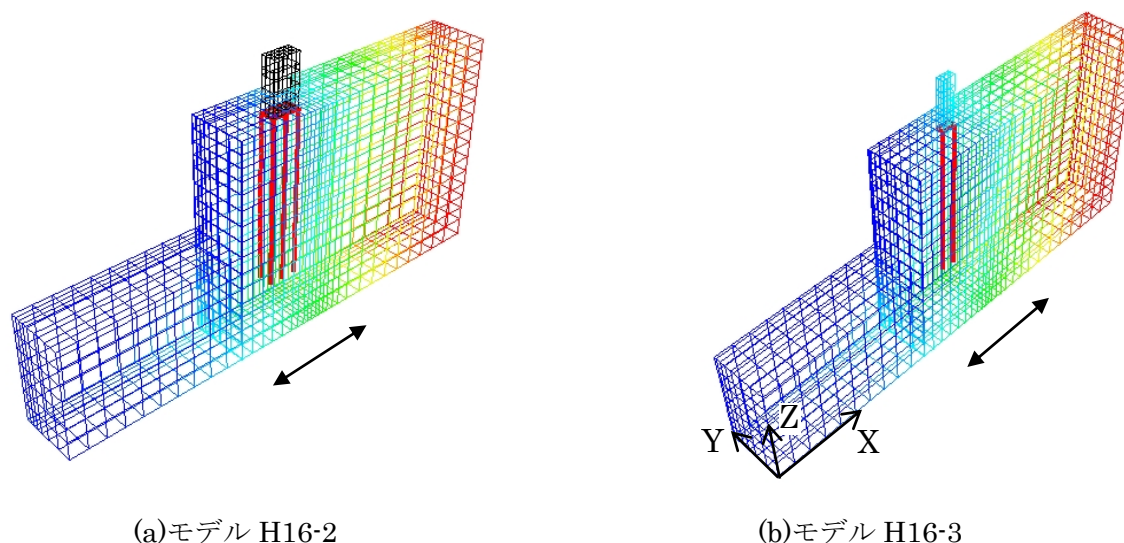


図 4 三次元解析に用いたモデル

した。一方ケース H16-2 については、実験が実施される前に、予測解析という形で解析を実施した (Class-A) ことから、入力にはケース H15-3 の振動台記録を用いた。ケース H16-2 の実際の振動台記録は、ケース H15-3 のものと非常に波形が似ているが、最大振幅がケース H15-3 に比べ 10%ほど低かった。

(c) 業務の成果

1) ケース H16-2 の数値シミュレーション

前述のようにケース H16-2 は、フーチング質量が杭基礎の応答に及ぼす影響を調査するための一連の実験で、フーチング質量  $M_F$  は、ケース H14-1<sup>1)</sup>では  $M_F=21.6\text{kg}$ 、ケース H15-3<sup>2)</sup>では  $M_F=185\text{kg}$  に対し、本ケースでは  $M_F=358\text{kg}$  と最も大きい。

以下ではケース H16-2 の三次元解析 (予測解析) 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精度を検討する。

①全体的な地盤の応答と矢板の変位

図 5 に矢板頂部における変位の比較を示す。実験では、強い加振が始まると護岸前面方向へ大きく変位した。最初の 2 サイクル ( $t=2.0\sim 2.4$  秒) で 25cm の変位を生じ、加振終了時 ( $t=6.5$  秒) において 55cm に達している。一方予測解析では、このような急激なそして大きな変位は発生せず、変形は徐々に進む形で、最終的に約 10cm 程度の値となった。

昨年の報告では、矢板の大変形等、解析結果に影響を及ぼしうる解析条件について検討した。計算機容量の制約上、比較的粗いメッシュで解析せざるを得ず、これに加え要素積分点を  $2\times 2\times 2$  (=計 8 のガウス点) としているため、要素が変形しにくくなっている。積分点数が低いほど複雑な (いびつな) 変形が起こりやすいことは知られている。昨年度、要素内に 1 点および 4 点のガウス点で結果を比較検討したところ、1 点は 4 点に比べ、2 倍の変形量となった<sup>7)</sup>。残念ながら三次元解析では、計算の安定性がなくなることで、砂時計モードが発生するため使用できない。結果として、三次元解析で矢板の大変形を予測することは非常に難しい問題であることが分かった。ただし次節に述べるように、杭基礎の応答に関しては非常に良い精度で計算を行うことができた。

実験では、液状化に伴い矢板護岸が大きく前面へ変位し、同時に地盤の流動と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。ただし、変形量が実測よりも小さいこと、杭基礎と矢板に挟まれる地盤の応答が実測と対応しないのが異なる点である。昨年度

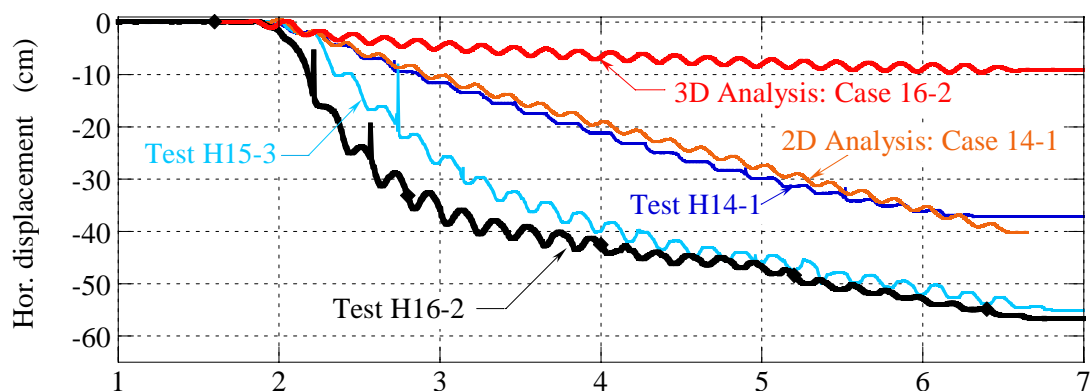


図 5 矢板頂部Time (sec)と変位比較



までの検討と同様に、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、三次元効果を表現できているものと考えられる。杭基礎自身の最大変位は 2cm 以下と小さく、一方地盤の変位は 10cm かそれ以上と大きな変位であり、両者には大きな相対変位が生じる結果となった。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 9 箇所における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、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 AG1-2～AG1-7）、杭基礎内の地盤（AG2-2～AG2-7）、杭基礎の背面側（AG3-2～AG3-7）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（AG1-7,AG2-7,AG3-7）振動台波形とほぼ似たような揺れとなっているが、ゆるい豊浦砂の層では明らかに液状化により加速度が減衰している（AG1-4,AG2-4,AG3-4）。また表層の粗砂層ではやや増幅しているのが分かる（AG1-2,AG2-2,AG3-2）。実測と解析で対応が良くないのは AG1-2 と AG1-1 であり、ここでは解析が実測を大きく上回っている。

この付近は、矢板及び周辺の地盤が護岸前面方向に大きく流動している一方で背面の杭基礎変位は非常に小さく、大きな相対変位が生じている領域であること、また設定した杭基礎や矢板とこれに接する地盤との変位の境界条件の影響が現れる部分で、解析対象としては厳しいといえる。

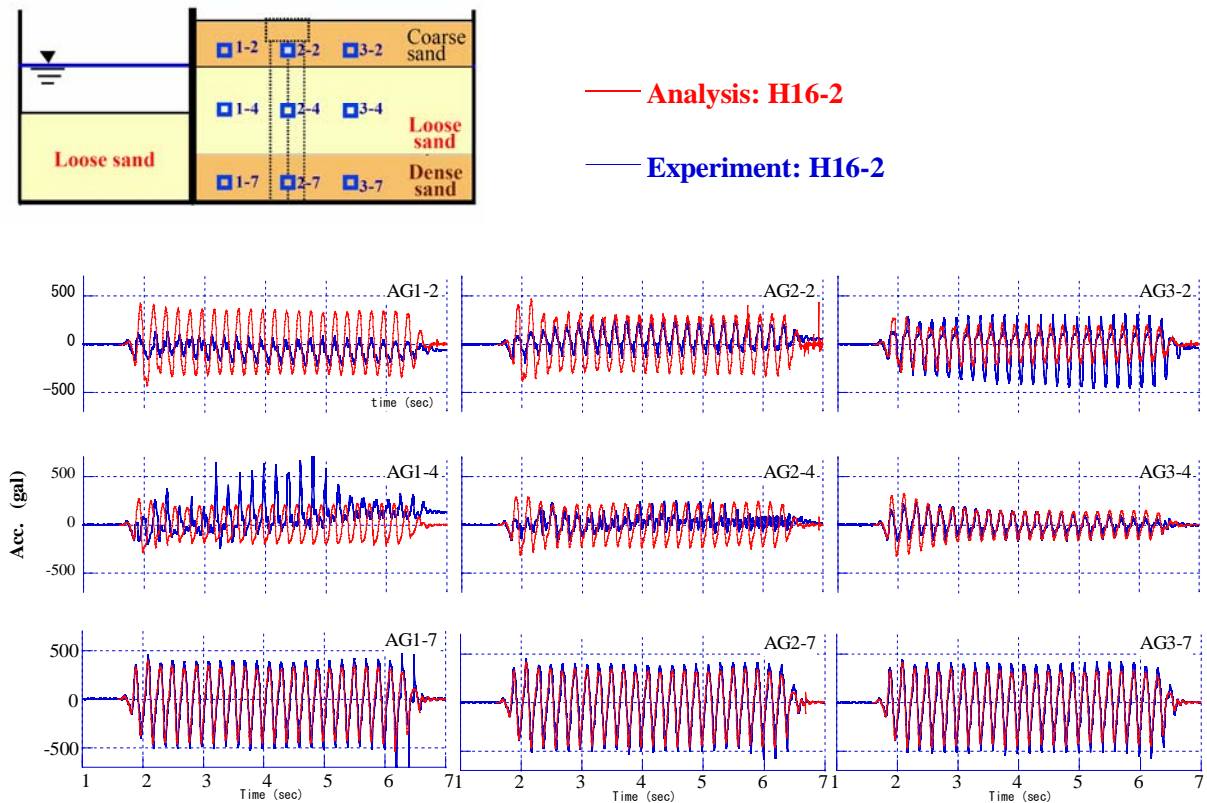


図 6 背後地盤内 9 箇所の加速度時刻歴：実験と解析の比較  
(ケース H16-2)



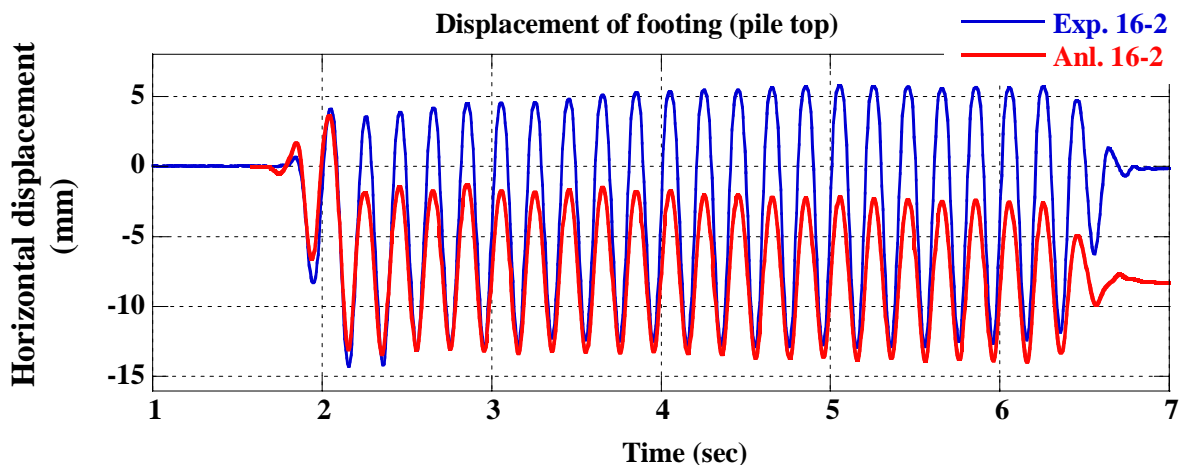


図7 フーチングの変位時刻歴：解析と実験の比較  
(ケース H16-2)

## ②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）。最大応答変位は実測と解析結果で良く一致している。一方、両振幅と残留変位には実験と解析で違いが見られる。これまで実施した他のケースにおいて、残留変位にはいくらか違いがみられるものがあったが、両振幅に大きな違いがみられたのは本ケースのみであった。

昨年の検討において、フーチングとこれが接する部分の地盤との境界条件の設定が応答に影響を及ぼしうることから、(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<sup>7)</sup>。本年度も2種類の条件で計算を試みたが、結果の差異が明確でないため、本ケースでは議論しないこととした。

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8に示す。なお図8で杭①は護岸側、杭③は背後地盤側、杭②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9(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。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④、⑤、⑥）の曲げモーメントを図9(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良好であることが分かった。

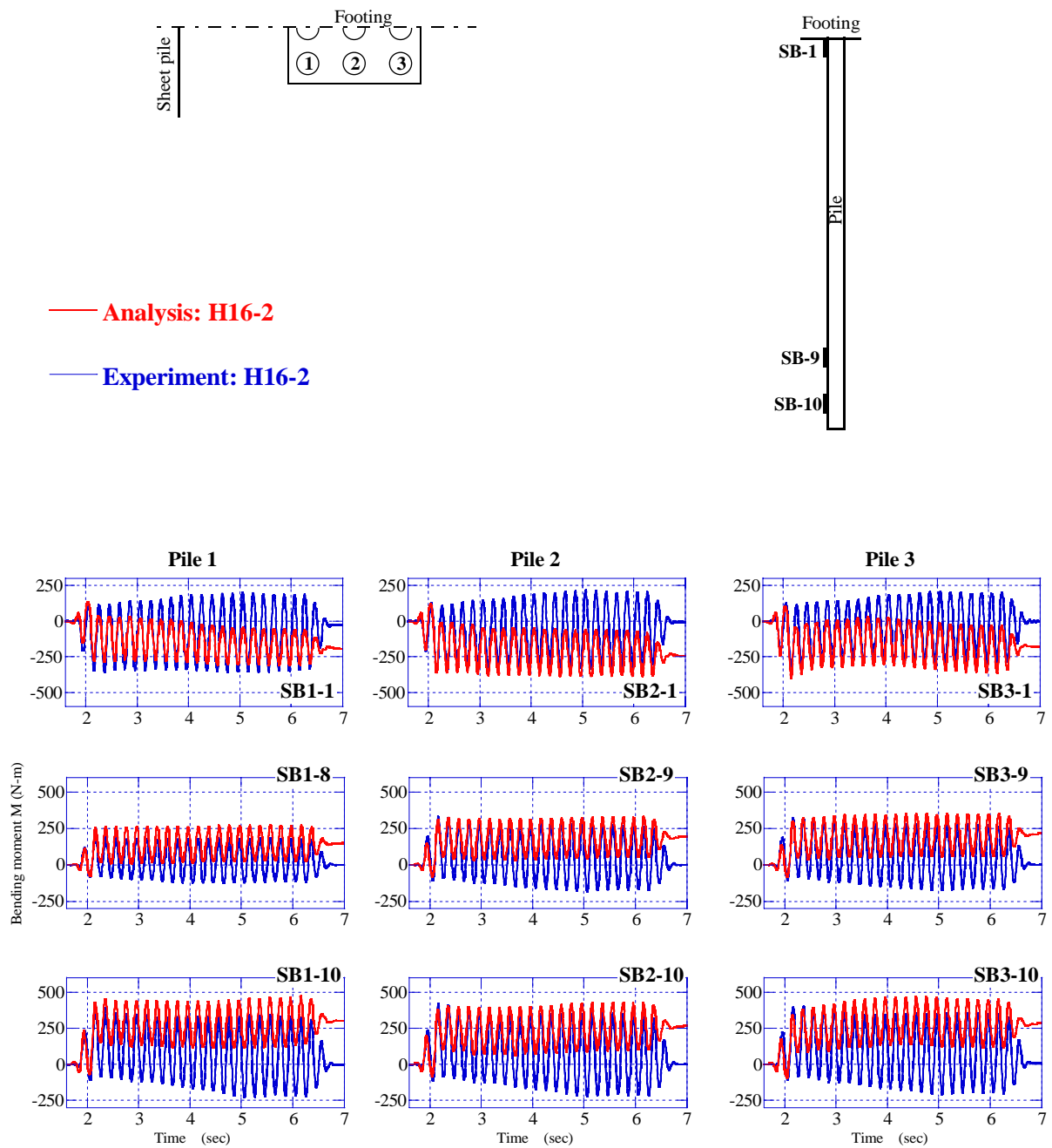
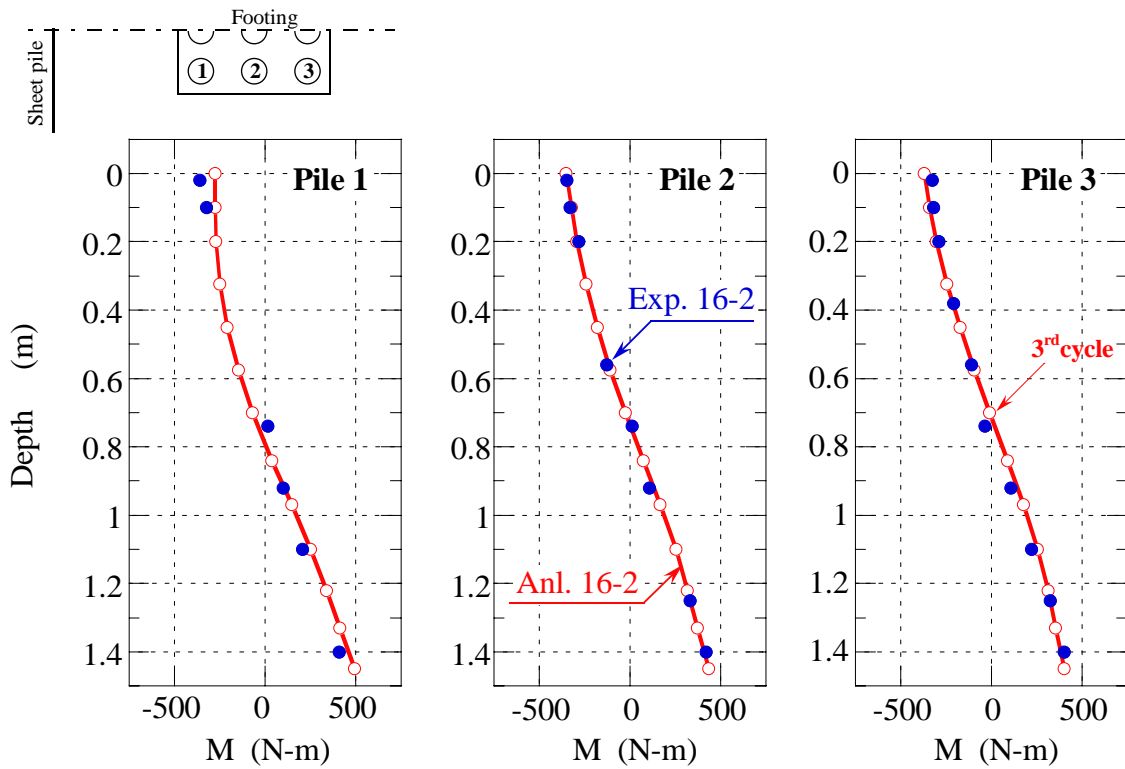
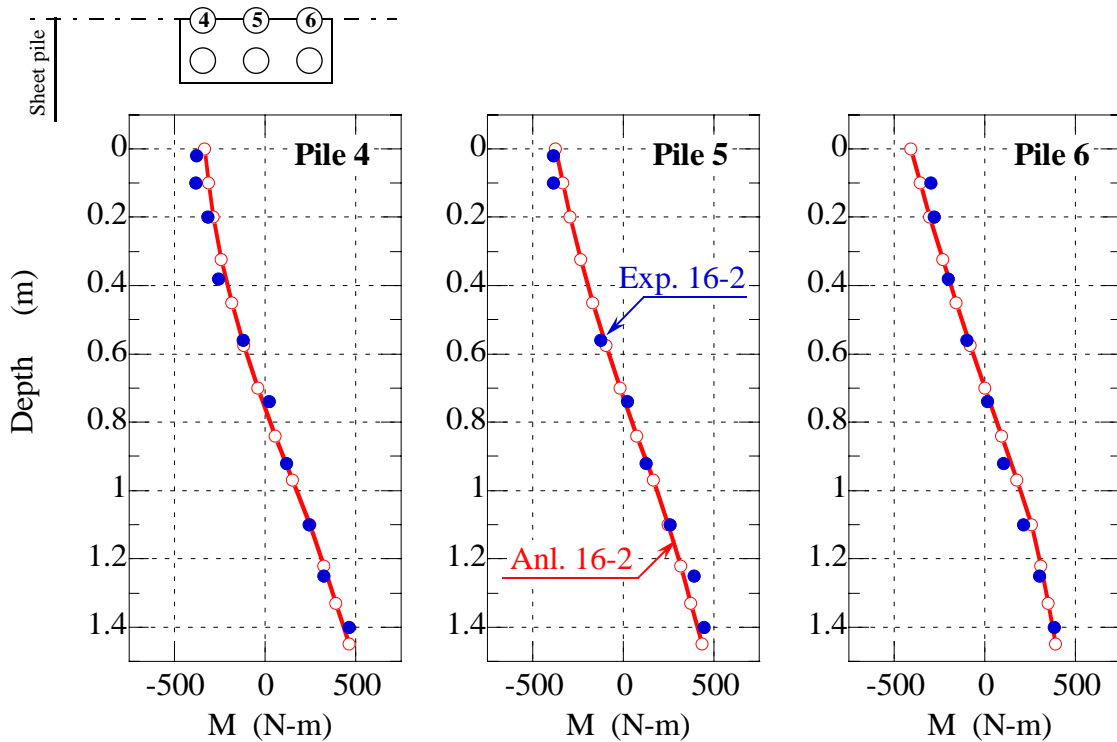


図8 曲げモーメントの時刻歴：実験と解析の比較  
(外側の杭列、ケース 16-2)



(a) 外側の杭列 (杭 ①, ② and ③)



(b) 中央の杭列 (杭 ④, ⑤ and ⑥)

図 9 曲げモーメントの深度分布：実験と解析の比較  
(ケース H16-2、杭頭で最大応答となった時刻の分布)

## 2) ケース H16-3 の数値シミュレーション

前述のように、ケース H16-3 の基礎モデルは 2×2 の 4 本杭で構成されており、1200gal という非常に強い加振を受けた。しかし杭の応答は降伏レベルに達しておらず、杭の応力ひずみ関係にはこれまで同様、弾性体として計算した。

### ①地盤の応答と矢板の変位

非常に強い地震動で加振することから、最初の 2 サイクルで矢板は大きく前面へ傾くとともに背後地盤も大きく流動・沈下した。護岸前面の貯水がスロッシングし、背後地盤側へ流れ込む様子も観測された。このような極端な条件下であることを考慮して、応答を評価する。

図 10 に示すように、最初の 2 サイクル ( $t=2.0\sim 2.4$  秒) で 30cm 以上、矢板が前面に変位した。加振終了時 ( $t=6.5$  秒) では矢板の変位量は 62cm に達した。一方予測解析では、このような急激なそして大きな変位は発生しなかったが、最終的には 18cm 程度と他ケースに比べ大きな変位となった。解析と実験の差異の原因はケース H16-2 で述べたとおりである。

液状化に伴い矢板が前面に傾き、地盤が側方流動することで、周辺地盤は大きくゆがみ、背後地盤は大きく形を変える。特に護岸流動量が大きい場合には、これに伴って背後地盤も大きく沈下する。当実験ケースでは、数サイクル強い加振を受けて、20cm 程度沈下した。加振前は表層の粗砂層に基礎が 20cm 根入れされていたが、20cm の沈下により、地盤とのコンタクトを失うこととなる。こうなると初期の杭基礎—地盤モデルの形状と比べるとはや別のモデルとなってしまうフーチングと地盤の相互作用も変化するため、大変形理論でなく初期の座標系を維持した一般的な解析をすると、実際の挙動を再現することが困難となる。

背後地盤内の 9 箇所における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 11 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、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 AG1-2~AG1-7)、杭基礎内の地盤 (AG2-2~AG2-7)、杭基礎の背面側 (AG3-2~AG3-7) に位置している。

図 11 より解析と実測は概ね一致しているといえる。実測と解析で対応が良くないのは矢板と基礎で挟まれた浅い地盤部分 (AG1-2) で、良く対応しているのは矢板や背後地盤の大変形の影響をそれほど受けない基礎背後の地盤である。ゆるい豊浦砂の層では軟化および液状化により明らかに加速度が減衰している (AG1-4,AG2-4,AG3-4)。

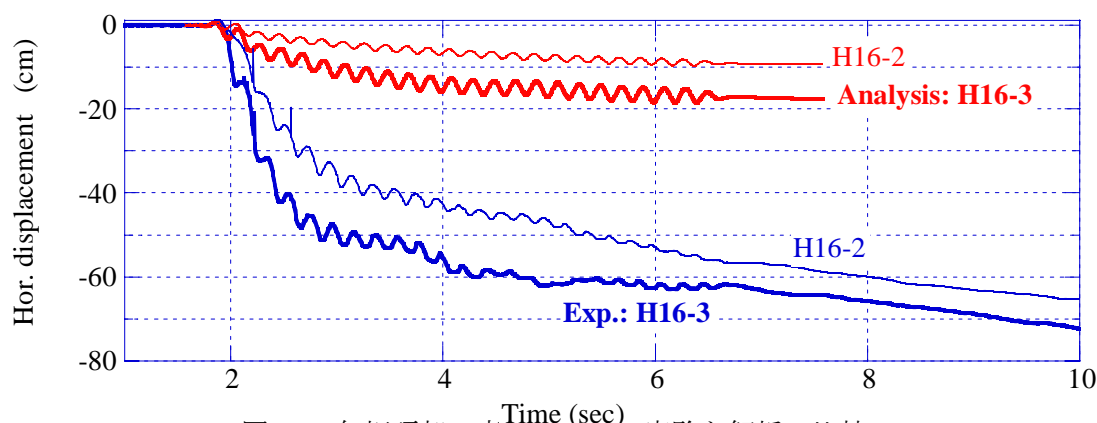


図 10 矢板頂部の変位時刻歴：実験と解析の比較  
(ケース H16-3)

## ②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 12 に示す。加振が始まると解析、実測とも変位が急増し、最初の 3 サイクルで最大振幅を記録している。この最大振幅は解析と実測で良い一致をみせているが、残留変位については差異がみられる。

昨年のケースと同様に、土とフーチングが接する部分のモデル化については、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。ケース H16-3 の解析では

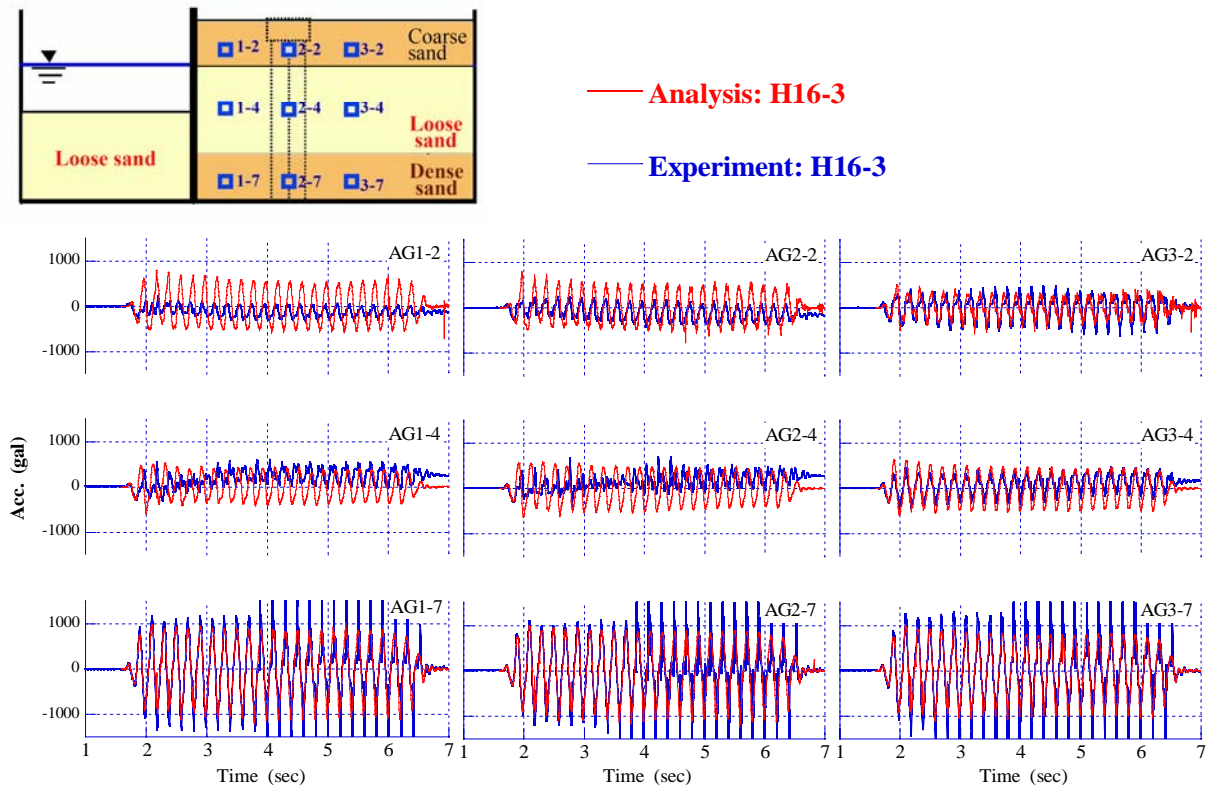


図 11 背後地盤内 9 箇所加速度時刻歴：実験と解析の比較（ケース H16-3）

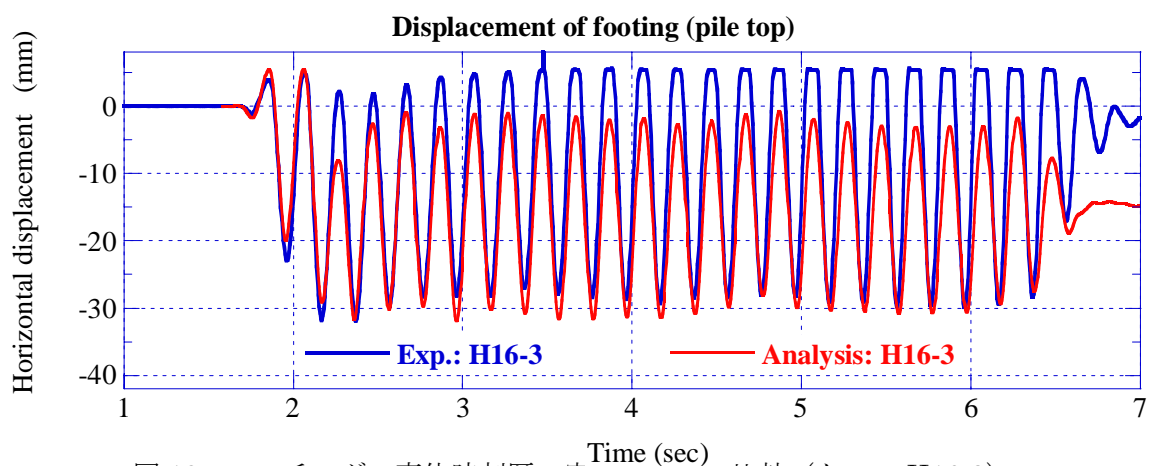


図 12 フーチングの変位時刻歴：実験と解析の比較（ケース H16-3）

両境界条件で違いがみられ、特に残留変位の差が顕著であった。図 12 に示すケースはフーチングとこれに接する土が独立の変位をするとした場合であるが、同じ変位をするとした場合よりも、実測との対応がやや良好であった。

杭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 13 に示す。杭①は護岸側の杭で、杭②が背後側の杭である。

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 14 に、その時刻における杭①および杭②の曲げモーメントの深度分布を示す。図より実測と解析は良い一致をみせている。地盤が破壊するほどの強い加振であったことを考慮すれば、解析結果は妥当であったと考えられる。

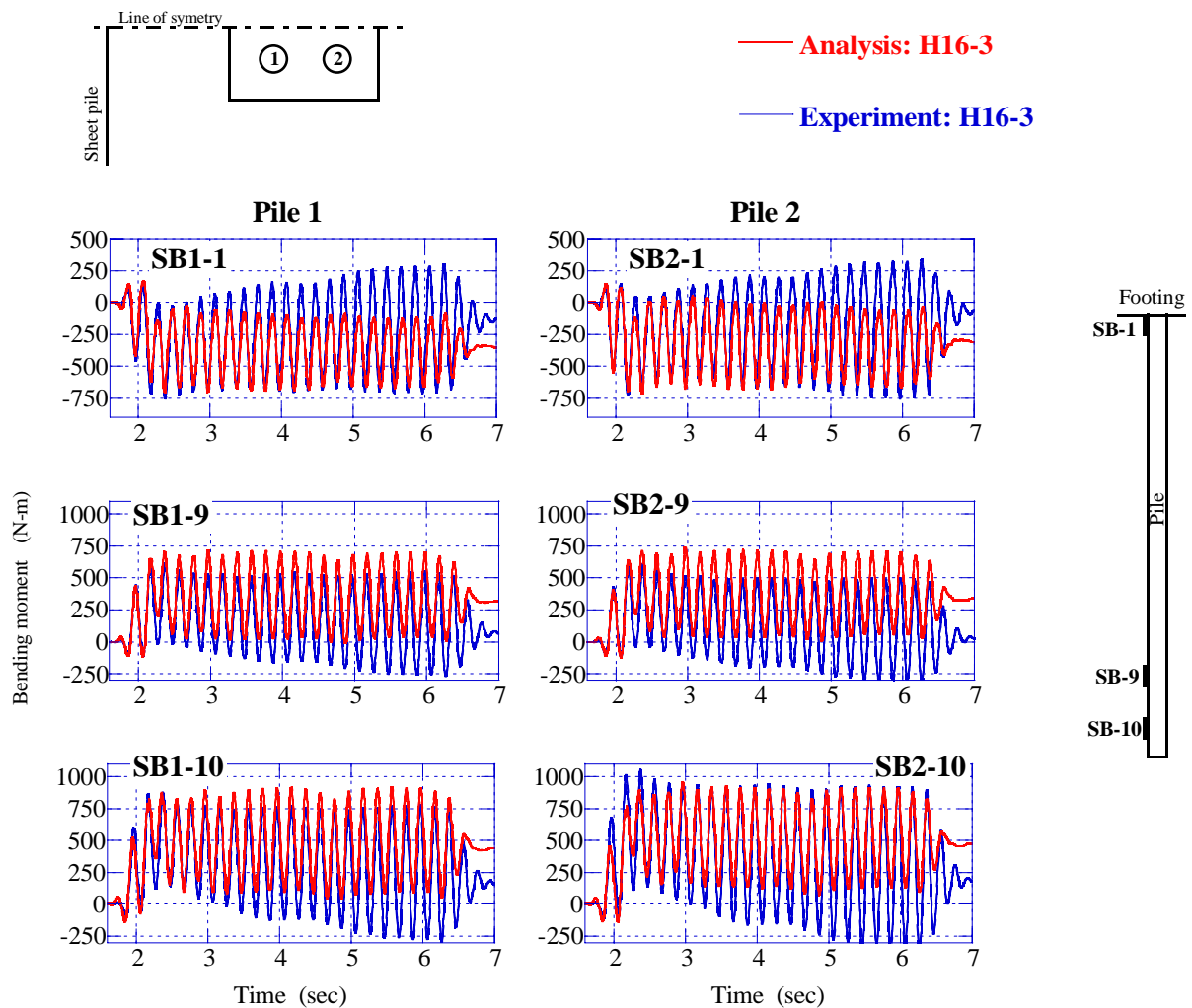


図 13 曲げモーメントの時刻歴：実験と解析の比較(ケース H16-3)



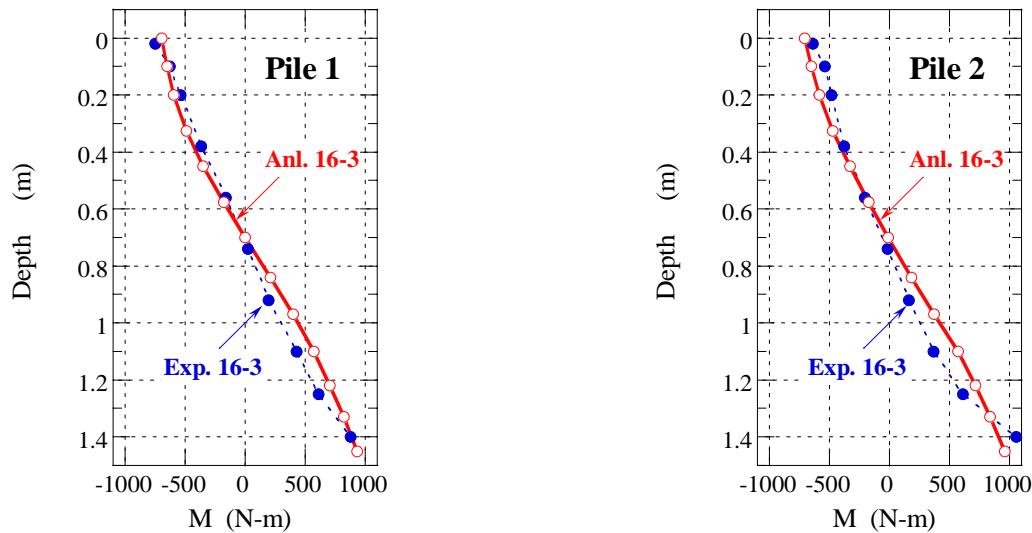


図 14 曲げモーメントの深度分布：実験と解析の比較  
(実験で最大応答が観測された時刻の分布図；ケース H16-3)

(d) 結論ならびに今後の課題

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、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予測解析を行った結果、以下のことが分かった。

- 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の浅い部分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、すぐ背後に控える杭基礎および近傍地盤と大きな相対変位が生じているため数値計算上、非常に厳しい部分であったものと考えられる。また矢板とこれに接する地盤および、背後のフーチングとこれに接する地盤には境界条件（変位の拘束条件）を設けており、距離的にも近いことから両者が応答に影響を及ぼしている可能性がある。
- 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、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。解析では元に戻るような挙動を再現できず、残留変位が生じた。
- 3) 杭の最大応答値の予測について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 1/4 程度に留まり、過小評価する結果となった。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いことが分かった。これは全てのケースにおいて正しい分けでは無いかもしれないが、杭基礎の変位が周辺地盤の変位に比べて小さい場合には、解析により杭基礎の応答を精度良くシミュレート可能であると考えられる。
- 4) 本研究では、三次元解析を E-ディフェンスの実験に適用するために、数値シミュレーションを実施する上での留意点や、その解析精度を明らかにした。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。

- i) 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



- ii) 実験結果の説明や解釈
- iii) 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 15 年度成果報告書, 3.3.7 節,2005.
- 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.
- 6) 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.
- 7) 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, 3.3.7 節,2004.

(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
鎌田敏幸・チェ ブリノフスキー コ・石原研 而・亀井祐聡	地盤流動を受ける杭基礎構造物 の三次元有効応力解析	第 40 回地盤工学研究発表会 (2005 年), 主催:地盤工学会, 開催地:函館市	2005 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 14～16 年度業務のまとめ

#### 1) 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、別途実施された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。また三次元数値シミュレーションを E-ディフェンスの実験に適用する上での留意点を明らかにする。

#### 2) 解析対象とした実験ケース

土研において実施された側方流動実験を対象として、数値シミュレーションを実施した。図 15a、図 15b に実験モデルを、表 2 に解析対象とした実験ケースを示す。大きくは図に示す 2 種類の実験モデルを用いて解析した。

実験ケース H14-1、H15-3 および H16-2 は 9 本の杭（3×3 の群杭）からなる杭基礎モデルである（図 15a）。表 2 に示すようにそれぞれのモデルでフーチング質量が異なる。その他の実験条件は同じであり、基礎質量が杭基礎の応答に及ぼす影響を把握するための実験となっている。

実験ケース H16-3 においては 4 本の杭（2×2 の群杭）からなる杭基礎モデルである。振動台に入力する加速度は 1200gal と非常に大きい（図 15b）。この実験の目的は、地盤の大変形と杭の非弾性応答を検討することにある。

#### 3) 解析の概要

三次元有限要素法解析プログラム Diana-J3 および砂の構成則として Stress-Density モデルを用いた三次元有効応力解析を実施した。まず要素シミュレーションを行い応力ひずみ関係を表す構成則のパラメータを設定し、加振前の初期応力状態を解析した後、動的解析を行った。

構成則のパラメータについて、豊浦砂層は過去に実施された多くの試験結果をもとにして設定した。地下水面より上に位置する粗砂層のパラメータは、当該土層の試料を使って実施された排水三軸試験に基づき設定した。最近では低拘束圧条件下での土の挙動に関する研究もなされてきており、1G 場の振動台実験を行う場合、地盤モデルの作成時には非常に重要であるものと考えられる。

初期応力解析では、実験モデルの作成工程を考慮して、複数の解析ステップを設けた静的解析を行い、加振前における地盤内の応力状態を把握した。ここで計算した各要素の応力は、動的解析における初期応力となる。

表 2 に示すそれぞれの実験について、三次元動的解析を行った。これに加えケース 14-3 では 2 次元解析を実施し、土とフーチングの変位に関する境界条件やメッシュのサイズ、解析時間間隔  $\Delta t$ 、減衰パラメータ  $\beta$  についてパラメトリックスタディを行い、これら数値解析パラメータが結果に及ぼす影響について検討した。ケース H16-2 の三次元解析およびケース H14-3 の二次元解析は、実験が実施される前に、予測解析（Class-A）として行った。

表 2 解析対象とした実験ケース

Test	Foundation	Mass at pile top (kg)	Peak base acc. (gal)
H14-1	3x3 pile group	22	470
H15-3	-- " --	170 (185)	470
H16-2	-- " --	320 (358)	500
H16-3	2x2 pile group	140 (145)	1200

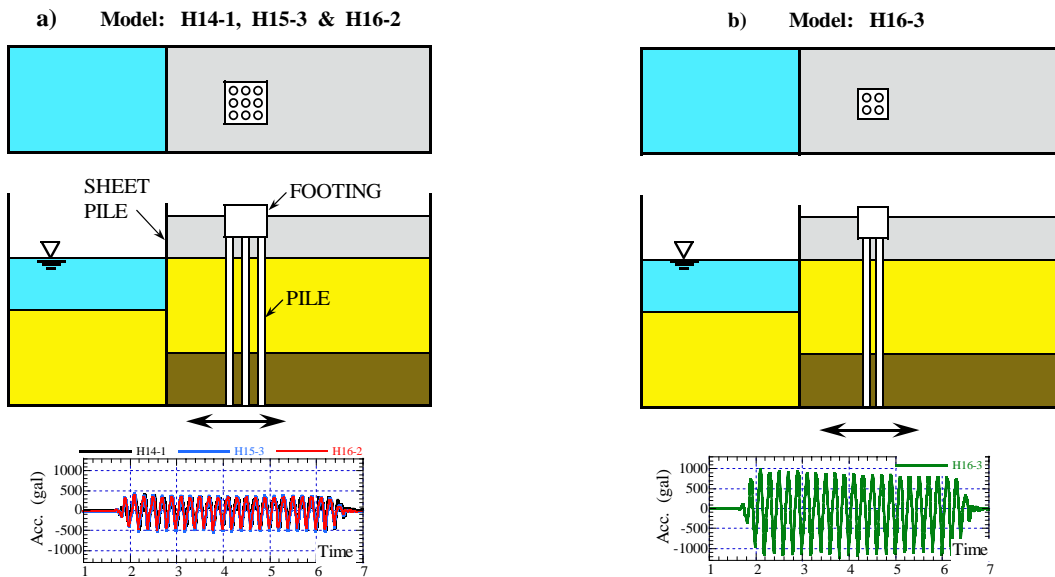


図 15 実験モデルと入力地震動

#### 4) 解析条件

FEM モデルは、土部分は 8 節点のソリッド、杭体はビーム要素で構成した。ソリッド要素は、矢板とフーチングに関しても用いた。計算機容量の制約上、より細かいメッシュを作成するために、護岸直角方向に関してモデル中心を通るような 1/2 モデルとした。

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。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分のモデル化については、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。

解析の時間ステップ  $\Delta t$  は 0.0004 秒、レイリー減衰のパラメータ  $\alpha$  は 0、 $\beta$  は 0.003 とした。一つの要素あたり  $2 \times 2 \times 2$  で計 8 点の積分点 (8 ガウス点) で計算した。解析は、要素間で水の移動を許す排水条件を用い、u-U Formulation による定式化 (液相の変位と固相の変位が未知数) に基づいて計算した。

### 5) 解析結果の検討

全てのケースにおいて共通に、豊浦砂からなる緩い砂層は1~2サイクル目の加振で液状化する。水圧の上昇過程や液状化の程度は解析と実験で非常に良く一致した。地盤の加速度応答についても水圧と同様に解析と実験で非常に良く一致した。実験では、液状化に伴い矢板護岸が大きく前面へ変位し、同時に地盤の流動と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。また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三次元変形パターンが解析においてもみられた。ただし、解析で得られた背後地盤の変形量は実測よりも小さい傾向にあった。

矢板変位に関して、解析は実験を過小評価する結果となった。図16に示すように、実験では矢板頂部の加振終了後における水平変位量は40~60cmであるが、三次元解析で得られる変位量は10~20cm程度であった。これは計算機容量の制約上、比較的粗いメッシュで解析せざるを得ず、これに加え要素積分点を $2 \times 2 \times 2$  (=計8のガウス点)としているため、要素が変形しにくくなったことが原因であると考えられる。このことは2次元解析を用いて、要素内に1点および4点のガウス点で結果を比較検討し、1点は4点に比べ、2倍の変形量となったことから三次元解析においても同様のことが生じているものと思われる。結果として、三次元解析で矢板の大変形を予測することは非常に難しいことが分かった。

杭基礎の水平変位や曲げモーメントについては、全てのケースで高精度な解析を行うことができた。図17に示すようにフーチング (=杭頭) の最大応答変位は実験と解析で非常に良い一致を示している。表3に変位量の数値をまとめた。

図18に杭①(外側の杭列かつ前面側)における曲げモーメントの深度分布図を示す。図はフーチング変位が最大となった時刻の分布である。図より実験と解析で非常に良い一致をみせていることが分かる。

数サイクル程度の強い加振を受けた後に背後地盤は15~20cm程度沈下した。これにより加振前において表層の粗砂層に根入れされていた基礎が、沈下により根入れが浅くなってしまうこととなる。よって加振時には初期の杭基礎—地盤モデル

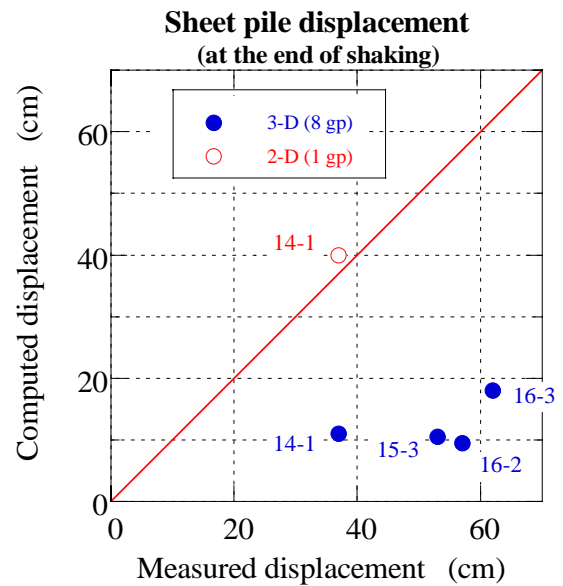


図16 加振終了時の矢板変位 (解析と実測の比較)

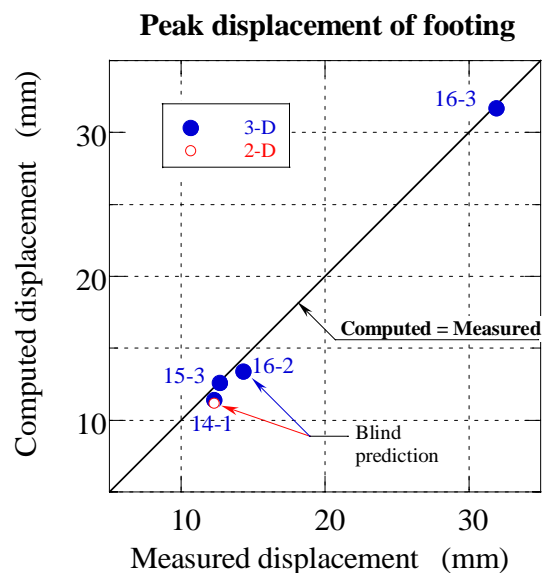


図17 フーチングの最大水平変位 (解析と実測の比較)

表3 フーチングの最大変位量まとめ (解析と実測の比較)

	TEST (Unit:mm)			
	H14-1	H15-3	H16-2	H16-3
Measured	12.3	12.7	14.3	31.9
Computed	11.4	12.6	13.4	31.7

の形状とは異なるモデルとなり、基礎の応答性状が加振の過程で変化することも考えられる。当解析は大変形理論でなく初期のモデル座標系を維持した一般的な解析をしていることから、実際の挙動を正確には再現できていない可能性がある。

土とフーチングが接する部分のモデル化については、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。ほとんどのケースでその差はそれほど顕著でなく、時には境界条件を設けたために計算が不安定化することもあった。こういった解析条件は解析ケースごとにその都度評価しながら設定する必要がある。

本研究において技術的に難易度が高い点は、解析対象が地盤の大変形問題であることや、予測解析をする必要がある（全解析ケースのうち2ケース）ことが挙げられる。一方三次元有効応力解析により、杭基礎構造物を含む側方流動実験で観測された挙動を良くシミュレートすることができ、中でも杭の最大応答値は実測と解析で非常に良い一致を示した。本研究の成果を踏まえ、三次元有効応力解析を用いて、Eディフェンスプロジェクトにおける実験モデルの設計や実験結果の評価、パラメトリックスタディを行うことで、効率的に大型振動台実験を実施することができると考えられる。

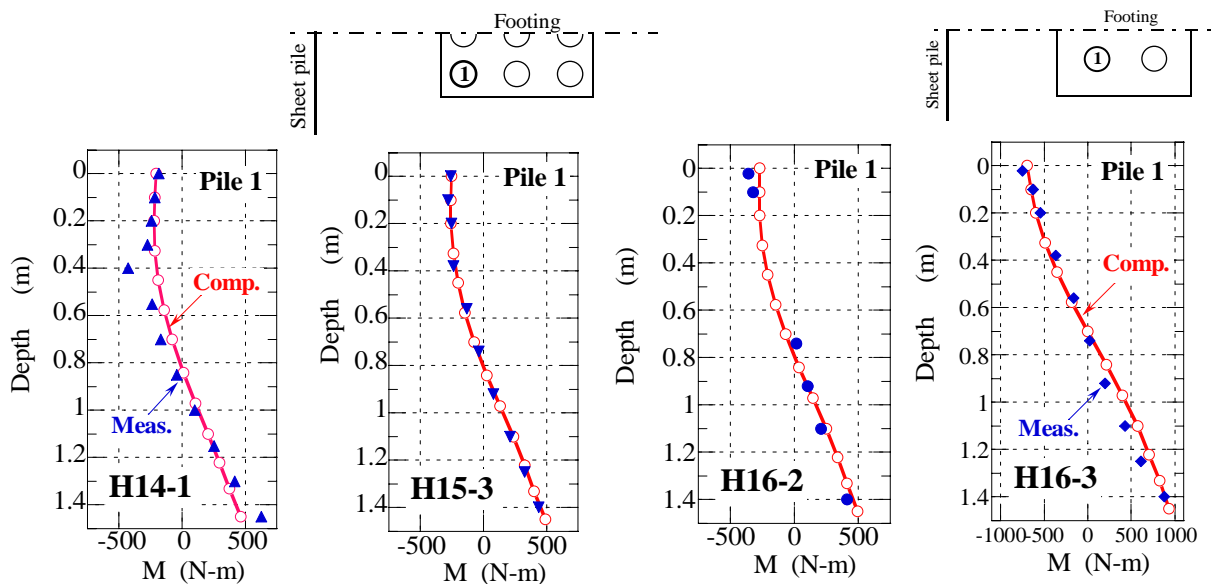


図 18 曲げモーメントの深度分布の比較—杭①—  
(最大応答が観測された時刻での分布)