

### 3.3.3 地盤 - 杭基礎 - 構造物の三次元数値シミュレーションの研究

## 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 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 14 年度業務目的

### (2) 平成 14 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
  - 1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化
  - 2) 固有値解析
  - 3) 地震応答解析
- (c) 業務の成果
  - 1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化
  - 2) 固有値解析
  - 3) 地震応答解析
- (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 15 年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 地盤 - 基礎 構造物系の三次元数値シミュレーションの研究

(b) 担当者

所 属	役 職	氏 名
(株)竹中工務店 技術研究所 先端研究開発部	主任研究員 担当研究員	鬼丸 貞友 吉澤 睦博

(c) 業務の目的

液状化地盤中の杭基礎構造物の動的挙動に関して、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に、せん断土槽を用いた杭基礎構造物の模型振動台実験について、実験実施に先立ち数値シミュレーションによる予測解析を行う。解析結果と実験結果の対応をもとに評価手法の妥当性と課題を明確にする。

(d) 3 ヶ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

農工研で実施するせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物の振動台実験を対象に3次元有限要素法の解析モデルの作成と材料定数の設定を行う。

固有値解析等により作成した解析モデルの基本的な特性を把握する。

本年度実施される実験の内、乾燥地盤・緩詰めモデルと飽和地盤・緩詰めモデルを選びシミュレーション解析を実施する。

2) 平成15年度：

平成14年度に実施した解析結果と実験結果の対応を確認し、差異が見られる場合にはその原因を分析する。

上記の結果に基づき、3次元FEMモデル及び材料定数の設定に関する見直しを実施する。

平成15年度に実施する振動台実験から代表的なケースを選び、シミュレーション解析を実施する。

解析結果から多方向入力の影響に関して整理し、実験との対応を調べる。

3) 平成16年度：

平成15年度の結果を踏まえ、必要に応じ解析条件等の見直しを実施する。

平成16年度に実施する振動台実験から代表的なケースを選び、シミュレーション解析を実施する。

解析結果から群杭の場合における多方向入力の影響に関して整理し、実験との対応を調べる。

液状化地盤における杭基礎構造物の地震時挙動に関して、平成14年～平成16年の解析結果及び実験結果の対応を基に、多方向入力の影響やその際の群杭効果に関して得られた

知見を整理する。合せて、数値解析手法の適用性と課題を明確にし、今後の研究課題を整理する。

(e) 平成14年度業務目的

農工研で実施するせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物の振動台実験を対象に、実験結果を適切にシミュレーションできるように3次元有限要素法の解析モデルの作成と材料定数の設定を行う。

固有値解析等により作成した解析モデルの基本的な特性を把握し、適切なモデルとなっていることを確認する。

本年度実施される実験の内、乾燥地盤・緩詰めモデルと飽和地盤・緩詰めモデルを選びシミュレーション解析を実施し、作成した3次元モデルによりせん断土槽を用いた地盤-杭基礎-構造物系の地震挙動を適切に評価できることを確認する。

## (2)平成14年度の成果

### (a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

#### 1) 解析対象の三次元有限要素法（FEM）によるモデル化

実験に用いるせん断土槽および杭基礎、上部構造物を三次元 FEM でモデル化した。

#### 2) 固有値解析

三次元 FEM モデルの固有値解析を行い実験モデルの振動特性の予測を行った。水平方向一次固有振動数は、乾燥地盤・緩詰めモデルは 20.6Hz、飽和地盤・緩詰めモデルは 17.2Hz であった。

#### 3) 地震応答解析

三次元 FEM モデルの地震応答解析を実施し、実験結果の予測を行った。行った解析ケースは以下の通りである。

- ・乾燥地盤 緩詰めモデル 最大 25Gal / 150Gal 入力 一方向加振
- ・飽和地盤 緩詰めモデル 最大 25Gal 入力 一方向加振

### (b) 業務の実施方法

#### 1) 解析対象の三次元有限要素法（FEM）によるモデル化

三次元 FEM で用いる解析モデルの作成では次の点に留意した。

- ・実験ではせん断土槽を用いるため、深さ方向の分割はせん断土槽の厚さと等しくした。
- ・杭は梁要素でモデル化を行い、地盤は六面体のソリッド要素でモデル化を行った。

#### 2) 固有値解析

株式会社竹中工務店技術研究所保有の三次元非線形有限要素法解析プログラム MuDIAN<sup>1)</sup>の固有値解析機能を用い、同研究所の EWS を用いて行った。

#### 3) 地震応答解析

株式会社竹中工務店技術研究所保有の三次元非線形有限要素法解析プログラム MuDIAN の地震応答解析機能を用い、同研究所の EWS を用いて行った。

(c) 業務の成果

1) 解析対象の三次元有限要素法 (FEM) によるモデル化

a) 三次元 FEM による要素分割

解析モデル図を図 1 に示す。深さ方向の分割はせん断土槽の厚さと等しく 50mm とした。また、せん断土槽は外周部の節点に水平方向のみに作用する集中質量でモデル化を行い、外周上の同一深度の節点変位を等変位に拘束した。

地盤は六面体のソリッド要素で、杭および上部構造物の柱は梁要素で、上部構造物の板要素でモデル化を行った。杭周辺の地盤の要素分割を粗くすると、ソリッド要素が梁要素の変形を拘束する可能性があるため、杭周辺の要素は出来る限り小さく分割した。図 2 に平面図を示す。解析モデルは約 20,000 節点、18,000 要素である。

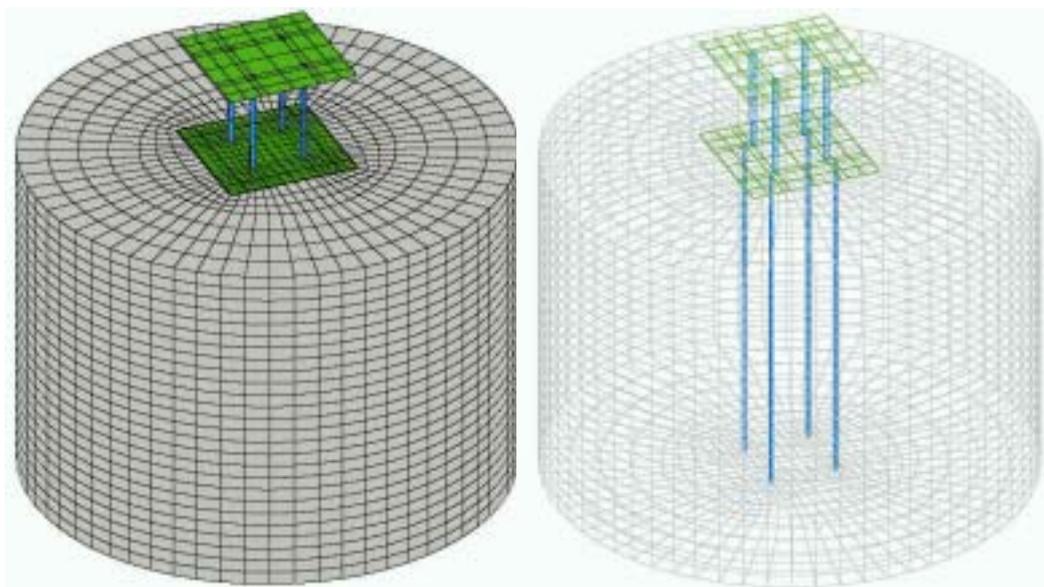


図 1 三次元 FEM による解析モデル図

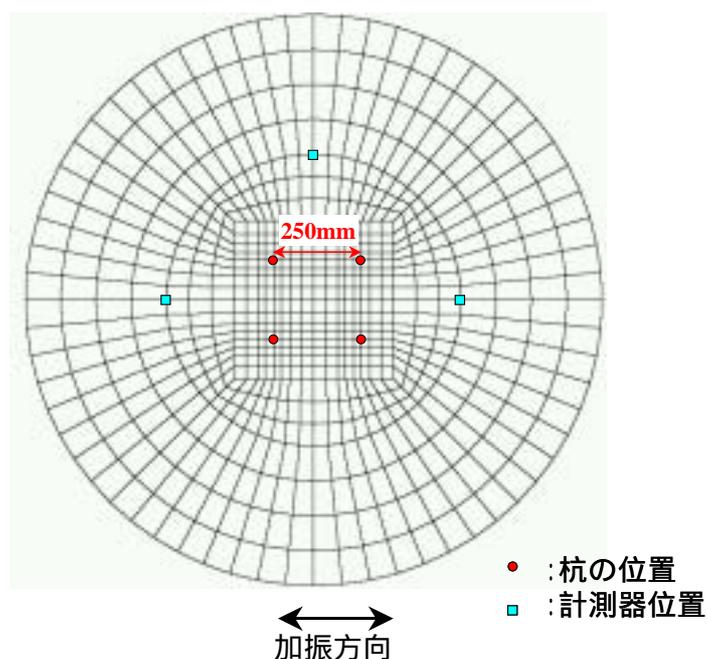


図 2 解析モデルの平面の分割

b) 地盤のモデル化

緩詰め地盤は豊浦砂相対密度 50%を想定した。豊浦砂相対密度 50%の材料定数は、既往の土質試験結果を用いて設定した。表 1 に物性値の一覧を示す。

内部摩擦角  $\phi$  は、動的変形試験結果から得られる豊浦砂の割線剛性の歪み依存曲線から  $\gamma_{50}$  (せん断剛性が初期剛性  $G_0$  の 0.5 倍となるせん断歪み) を求め、(1)(2)式から逆算して設定した。

$$\tau_{\max} = G_0 \cdot \gamma_{50} \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \sigma'_c \cdot \tan \phi \quad (2)$$

ここで  $G_0$  は  $\sigma'_c = 49(\text{kPa})$  のとき  $55(\text{Mpa})$ 、 $\gamma_{50} = 4.5 \times 10^{-4}$

乾燥砂の解析では表 1 のせん断強度を有する Mohr-Coulomb 型の降伏基準に従う材料として解析を行った。飽和地盤の解析では、Zienkiwicz らの MC-Densification モデル<sup>2)</sup>を用いた。MC-Densification モデルでは、せん断特性を非関連流れ則を用いた Mohr-Coulomb 型の降伏基準でモデル化し、ダイレイタンシー特性を繰り返しせん断によるせん断歪みから算出される累積損傷度によりモデル化した構成式である。

累積せん断により発生するダイレイタンシー量を Densification モデルでは自生体積歪み  $\varepsilon_v^0$  を用いて表し、 $\varepsilon_v^0$  より発生する間隙水圧を次式のように定義している。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - \delta_{kl} d\varepsilon_v^0 / 3) \quad (3)$$

$$dp = \frac{1}{n/K_f + 1/K_T} d\varepsilon_v^0 \quad (4)$$

ここで  $K_R$   $K_T$  はそれぞれ水と土骨格の体積弾性係数であり、 $n$  は間隙率である。自生体積歪みの増分  $d\varepsilon_v^0$  は(5)式で定義され、偏差歪みの 2 次不変量と偏差応力の 2 次不変量の関数となっている。

$$d\varepsilon_v^0 = -\frac{Ad\kappa}{1+B\kappa} \quad (5)$$

$$\kappa = e^{r\theta} \xi \quad d\kappa = e^{r\theta} (r\xi d\theta + d\xi) \quad = \frac{\bar{\sigma}'_1}{\sigma'_{mo}} \quad d\xi = (1/2 d e_{ij} d e_{ij})^{1/2}$$

$A$  ,  $B$  ,  $\gamma$  は液状化過程をコントロールするモデルパラメータで、単純せん断試験や繰り返し三軸試験結果等を要素シミュレーションして求める。ここで  $e_{ij}$  は偏差歪み、 $\gamma$  は損傷パラメータと呼ばれている。ダイレイタンシー特性を表す損傷パラメータ  $\gamma$  がせん断歪みの累積値の関数になっているため、歪みの大きな範囲で有効応力が回復するサイクリックモビリティ挙動はモデル化していない。

既往の土質試験結果より得られた液状化強度を図 3 に示す。実験の液状化強度のうち、特に 15 ~ 20 回付近の繰り返し回数に対する液状化強度を再現するように、Densification モデルのパラメータを要素シミュレーションにより設定した。シミュレーションで用いたパラメータの値を表 1 に、要素シミュレーションで得られた液状化強度を図 3 に 印で併記した。

表 1 設定した地盤物性のパラメータ

土粒子の比重 Gs	間隙率 n	内部 摩擦角	透水係数 (cm/s)	せん断剛性 (MPa)
2.64	0.44	27.3	1.42×10 <sup>-4</sup>	55

Densificationモデルのパラメータ

A	B	$\gamma$
0.075	1	1

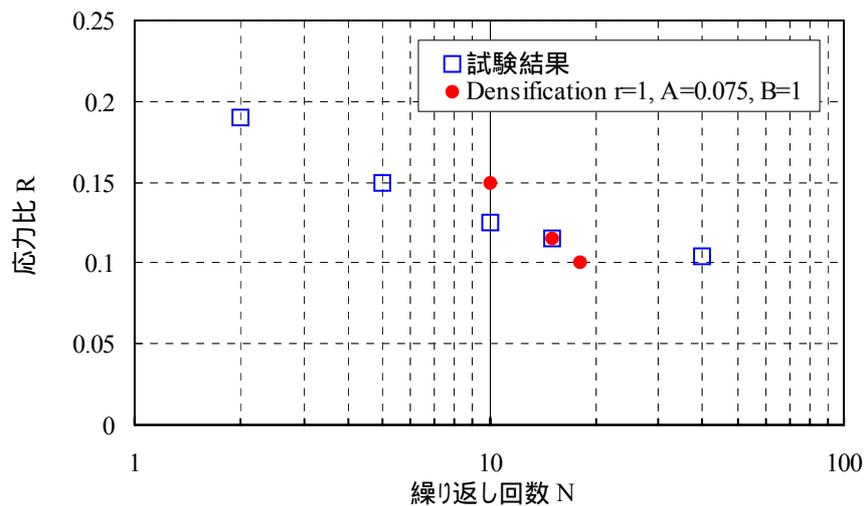


図 3 設定した液状化強度と試験結果の比較

c) 構造物のモデル化

杭及び上部構造物の形状を図 4 に示す。柱要素は実験体のプロポーションを持つ梁材として、柱以外の上部構造物及び基礎版は剛な板要素でモデル化した。板要素の質量密度は、鋼板部分の重量に柱の重量を上下に等分して振り分けて算出した。柱及び杭の材料定数を表 2 に、板要素で用いた重量を表 3 に示す。

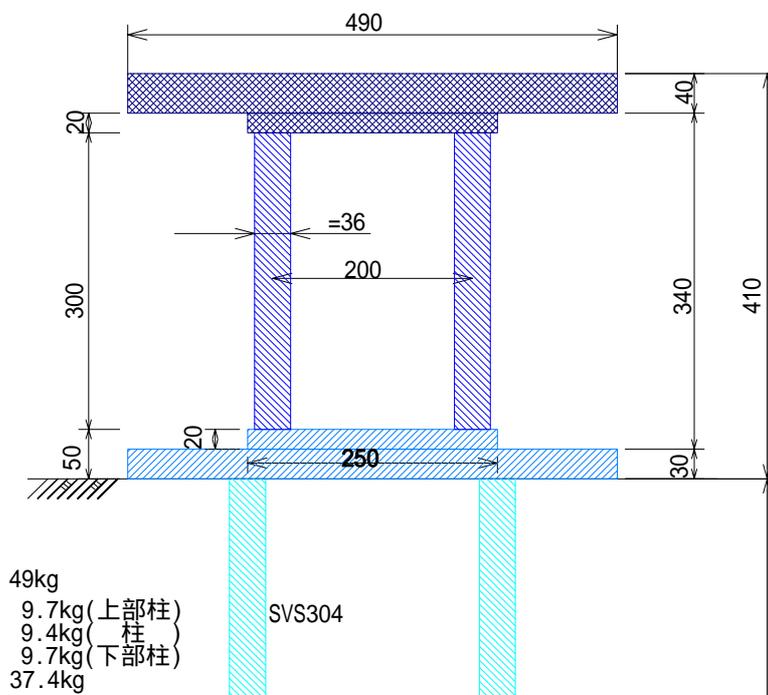


図 4 構造物模型の形状

表 2 設定した構造物のパラメータ

	外径 (m)	内径 (m)	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面二次 モーメント (m <sup>4</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	v
杭	0.032	0.0304	7.8414E-05	9.5477E-09	2.0580E+08	0.3
柱	0.036	0	1.0179E-03	8.2448E-08	2.0580E+08	0.3

表 3 構造物模型の重量

	質量(kg)	高さ(m)
上部構造物	63.4	0.39
基礎側	51.8	0

d) せん断リングのモデル化

解析モデルの深さ方向の分割はせん断リングの厚さ（50mm）毎とした。せん断リングは解析モデルの外周の節点に水平方向にのみ作用する集中質量としてモデル化した。集中質量はリング 1 枚の質量（17.8kg）を外周の節点数で等分して設定した。

## 2) 固有値解析

地震応答解析で用いる数値減衰のレイリー減衰のパラメータを設定するために、解析モデルの固有値解析を行った。固有値解析は解析モデルの底面の変位を固定条件として行った。表 4 に解析結果を示す。また図 5 は飽和砂の場合の水平 1 次、2 次の固有モード図である。

解析モデルの地盤のせん断剛性は初期平均有効応力の 0.5 乗に比例させて分布させている。なお、建屋のみ取り出した場合の一次固有振動数は 72.6(Hz)であった。

表 4 固有値解析結果

### (1)乾燥砂 緩詰めモデル

モード 次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
1	20.60	0.0486	1.480E+0	6.303E-13	1.480E+0
2	30.80	0.0325	-1.720E+0	3.805E-12	-1.720E+0
3	32.70	0.0306	6.583E-6	1.063E-14	6.575E-6
4	45.70	0.0219	3.101E-16	1.520E+0	-4.207E-13
5	56.60	0.0177	7.370E-1	-1.361E-12	7.370E-1

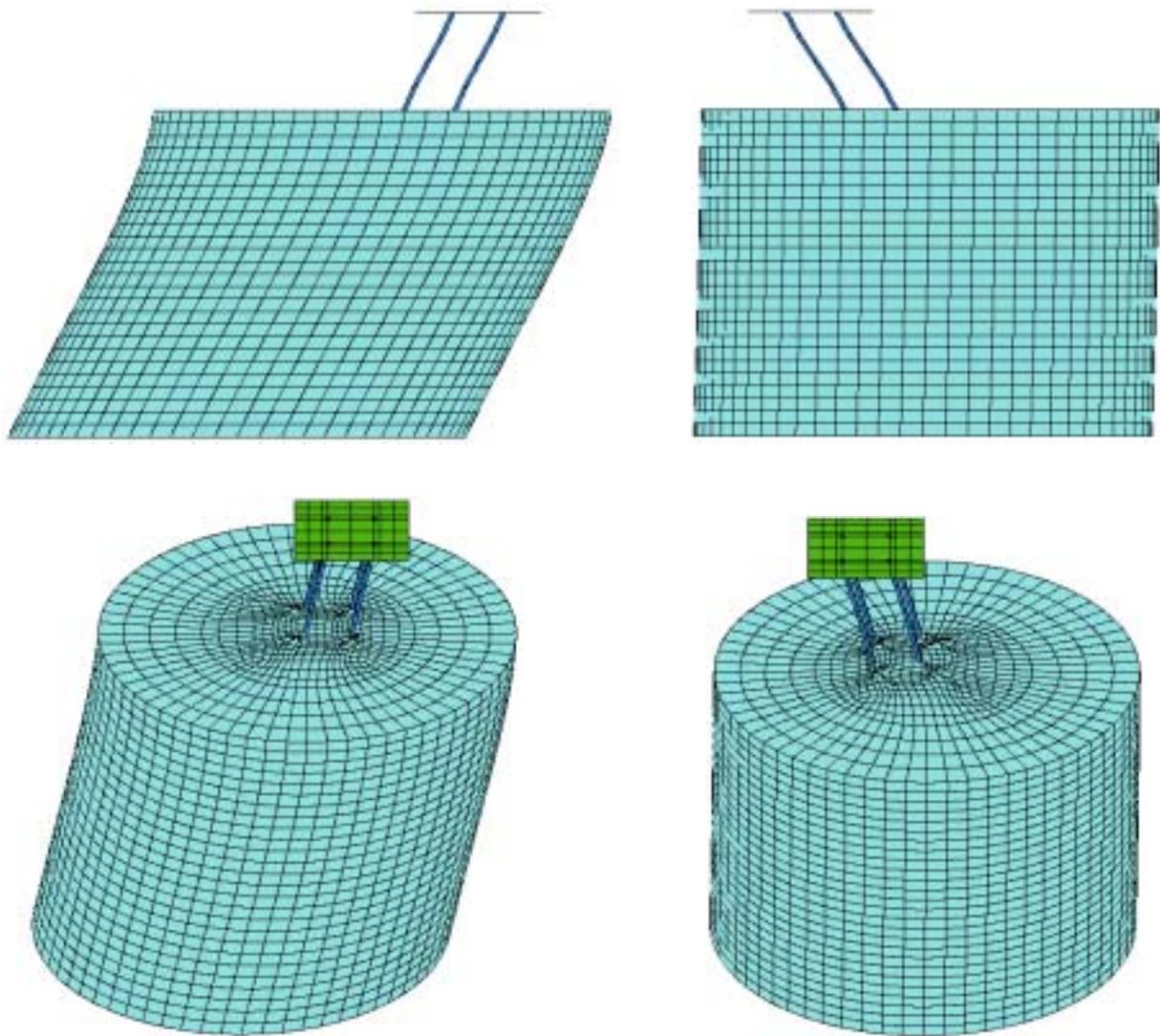
### (2)飽和砂 緩詰めモデル

モード 次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
1	17.20	0.0582	1.150E+0	1.885E-13	1.150E+0
2	28.00	0.0357	-1.470E+0	3.520E-11	-1.470E+0
3	29.90	0.0335	1.174E-6	-4.895E-15	1.175E-6
4	38.20	0.0262	6.233E-7	1.530E+0	6.233E-7
5	47.30	0.0212	6.470E-1	1.634E-12	6.470E-1

地震応答解析用いるレイリー減衰の係数  $\alpha$  と  $\beta$  は、表 4 に示した水平の 1 次および 2 次の固有振動数から、(6)式より算出した。

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (6)$$

ここで、添字の  $i$  は  $i$  次モードを意味し、 $h_i$  は要素ごとに  $i$  次モードで設定する減衰である。液状化地盤は  $h=0.002$ 、そのほかの要素は  $h=0.02$  として  $\alpha$  と  $\beta$  を算出した。



(1) 1次モード

(2) 2次モード

図 5 固有モード図 (飽和砂の場合)

### 3) 地震応答解析

地震応答解析は 3 次元有効応力解析コード MuDIAN を用いた。入力地震動は十勝沖地震 (NS 成分) の水平一方向入力を行った。解析は地震動記録の時間刻み (0.01sec) をモデル縮尺の平方根 ( 5) で割った時間刻みを、さらに 10 分割 (0.004472sec) して行った。時間積分は Newmark の法を用いた。平成 14 年度に実施した解析ケースを表 5 に示す。

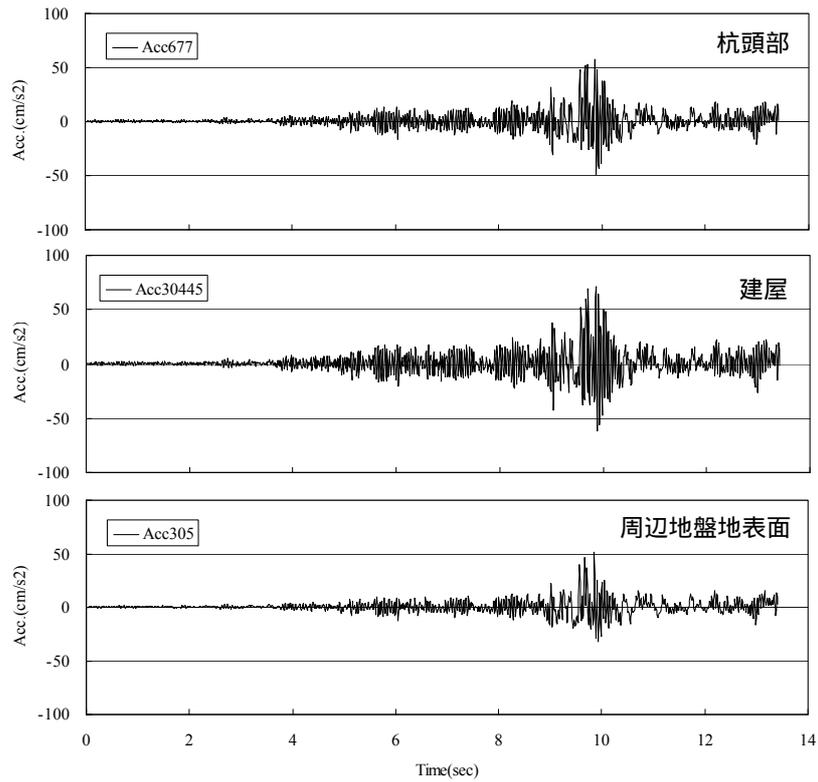
表 5 解析ケース

解析ケース	地盤条件	入力地震波	最大加速度	非線形モデル
Case1	乾燥砂 緩詰め	十勝沖地震 NS 成分	25Gal	Mohr-Coulomb
Case2	"	"	150Gal	Mohr-Coulomb
Case2'	"	"	"	線形
Case3	飽和砂 緩詰め	"	25Gal	Densification
Case3'	"	"	25Gal	線形

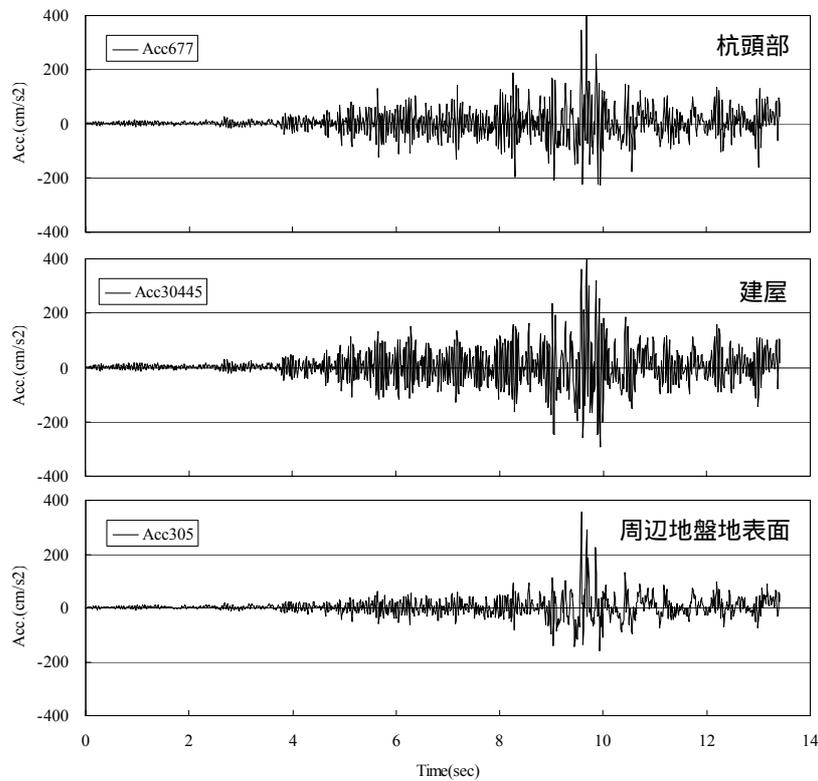
#### a) 乾燥砂 緩詰めの場合 (Case1、Case2、Case2')

緩詰め乾燥砂を用いた地震応答解析結果を図 6~図 10 に示す。図 6 は杭頭部、建屋頂部、周辺地盤の地表面の応答加速度である。入力地震動が最大となる 9.6 秒後にどの時刻歴も最大値をとっている。図 7 はせん断土槽部分と建屋 - 杭列部分の最大応答加速度分布である。参考までに 150Gal 入力時に線形計算した結果 (Case2') を追記した。建屋 - 杭の列では杭の表層付近で 600Gal 程度の大きな値が発生しており、これは杭周辺地盤の局所的な非線形化が進んだ影響と思われる。入力位置からの加速度応答倍率は入力レベルによらず約 2.3~2.5 程度である。

図 8 は杭に発生する最大断面力分布であり、図 9 はせん断土槽部分と建屋 - 杭列の最大応答変位分布、図 10 は地盤に発生する最大せん断歪分布である。150Gal 入力時には GL-0.3m 付近から杭変位が大きくなり始め、杭周辺地盤の歪は 15% を越える大きな値となったが、土層中央部の歪みレベルは 0.10% 程度であった。

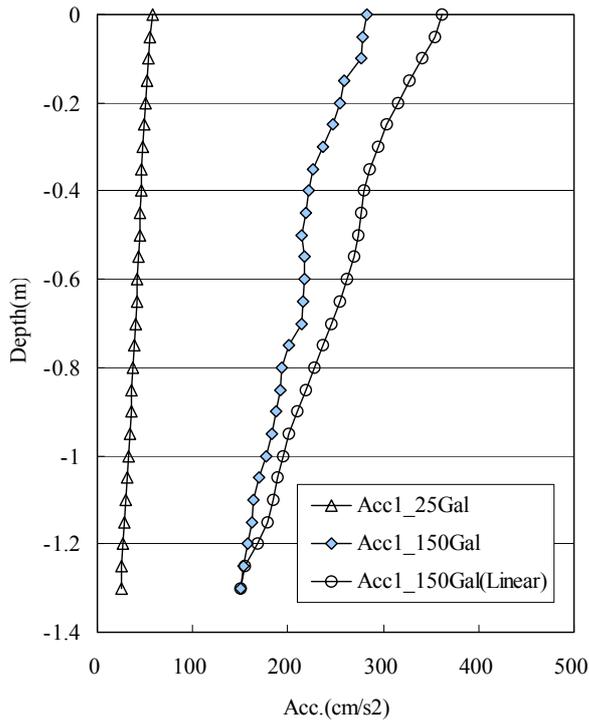


(1) 25Gal 入力

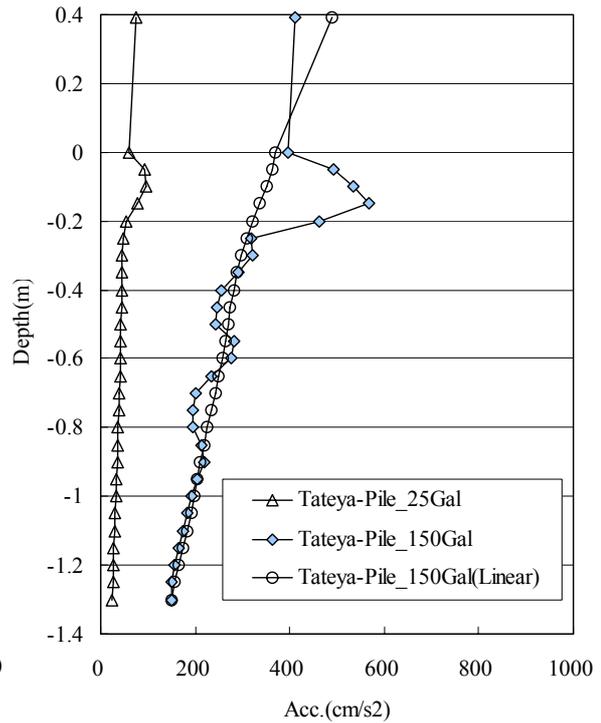


(1) 150Gal 入力

図 6 応答加速度時刻歴の比較 (乾燥砂・緩詰め)

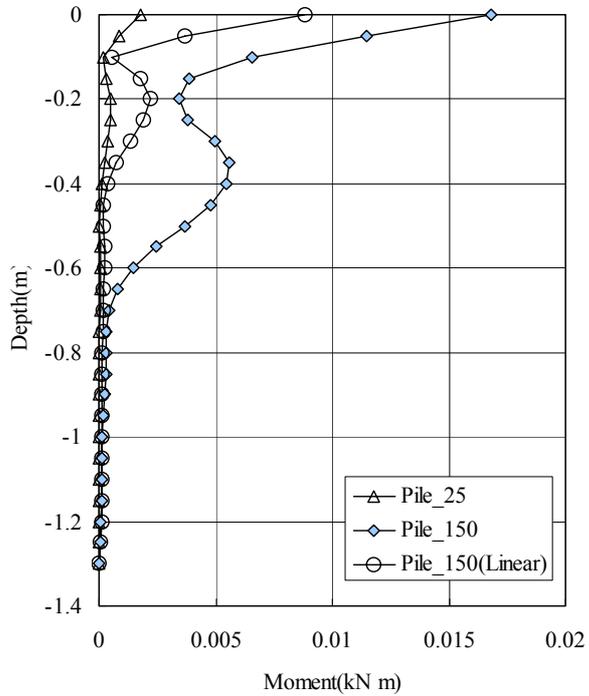


(1)せん断土槽部分

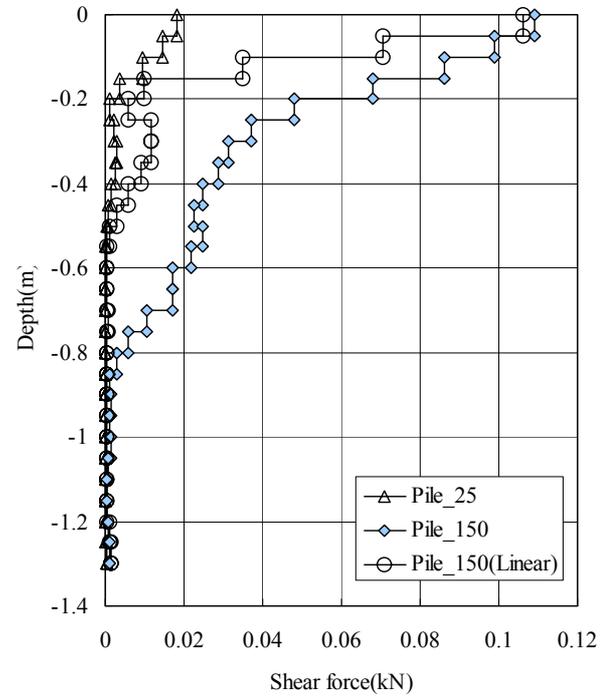


(2)建屋 - 杭列

図 7 最大応答加速度の深度分布の比較 (乾燥砂・緩詰め)

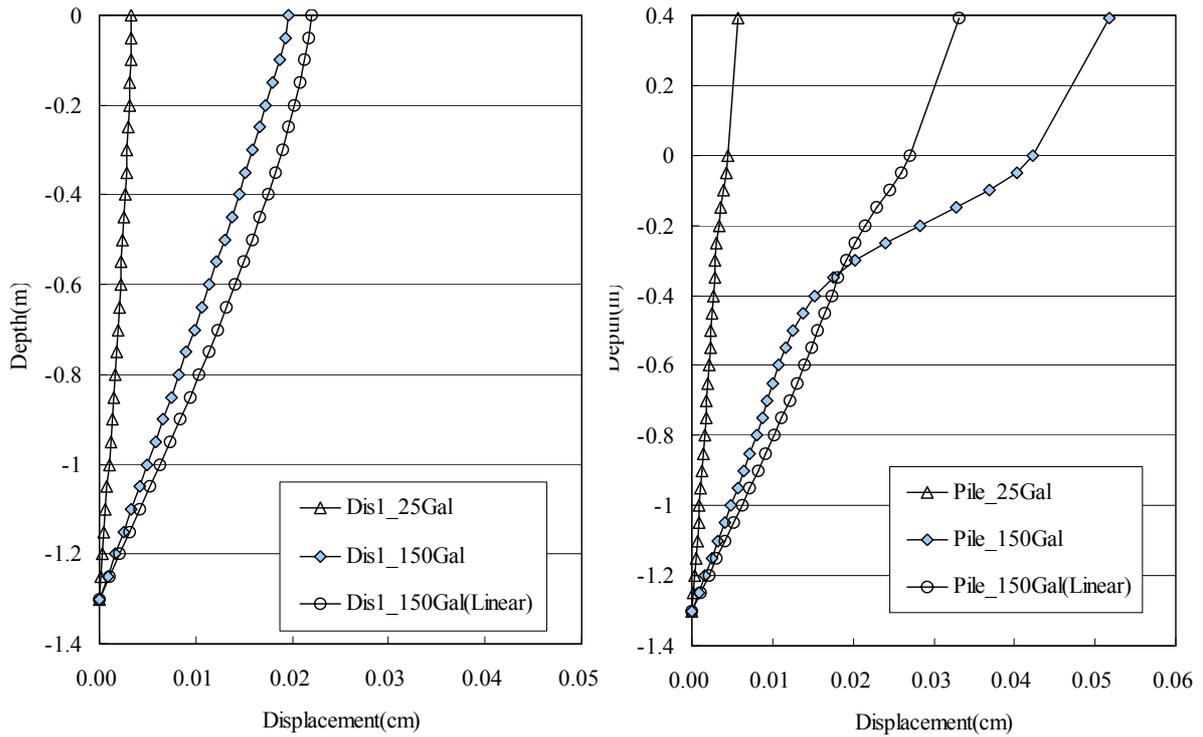


(1)モーメント



(2)せん断力

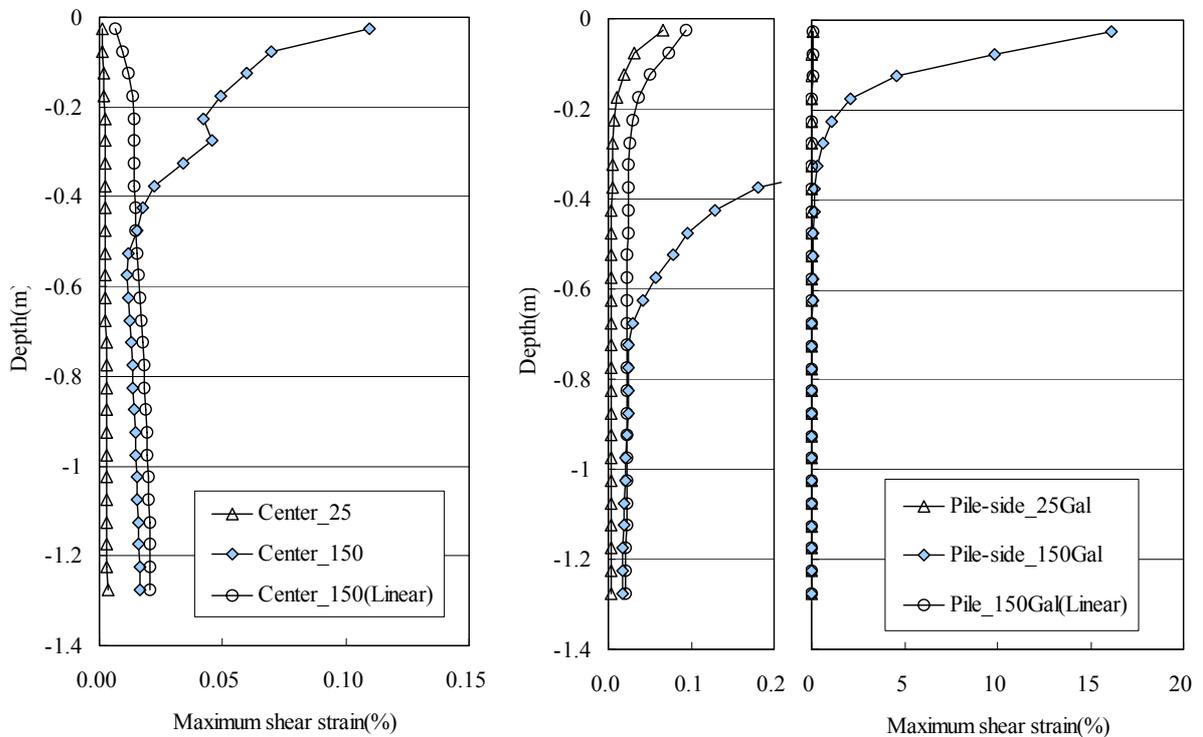
図 8 杭の最大断面力の深度分布 (乾燥砂・緩詰め)



(1)せん断土槽部分

(2)建屋 - 杭列

図 9 最大応答変位の深度分布の比較



(1)土層中央の要素

(2)杭横の要素

図 10 最大せん断歪みの深度分布の比較

b) 飽和砂 緩詰めの場合 (Case3、Case3')

緩詰め飽和砂を用いた地震応答解析結果を図 11～図 16 に示す。図 11 は Case3 の応答加速度時刻歴である。また図 12 は発生する過剰間隙水圧比の時刻歴である。水圧比は表層 (GL-0.025m) の要素で最大 0.9 程度に上がっているが、それ以深では 0.6 以下程度に収まっている。図 13 は応答加速度の最大値分布である。表層から GL-0.6m 付近までは、杭周辺の最大応答加速度が周辺地盤部分と比べて大きめの値をとっている。この傾向は乾燥砂でも同様であったが、飽和砂の場合の方が初期拘束圧が小さく地盤剛性が小さいことに加えて、過剰間隙水圧の上昇により有効拘束圧が小さくなるため、より深い深度まで影響が出ている。

図 14 は杭に発生する最大断面力分布、図 15 は最大応答変位分布、図 16 は最大せん断歪みの最大値分布である。表層付近は初期有効拘束圧が小さく、また過剰間隙水圧により有効拘束圧が下がるため、乾燥砂に比べて表層の剛性が小さくなり、応答が増大する傾向が顕著になっている。

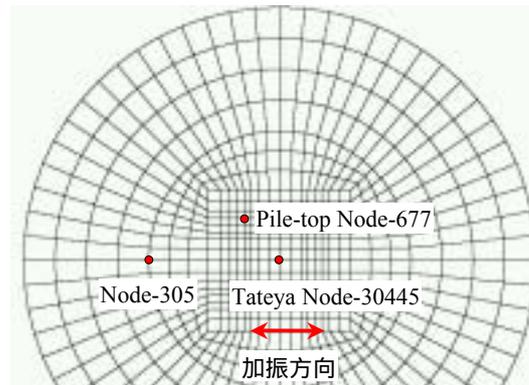
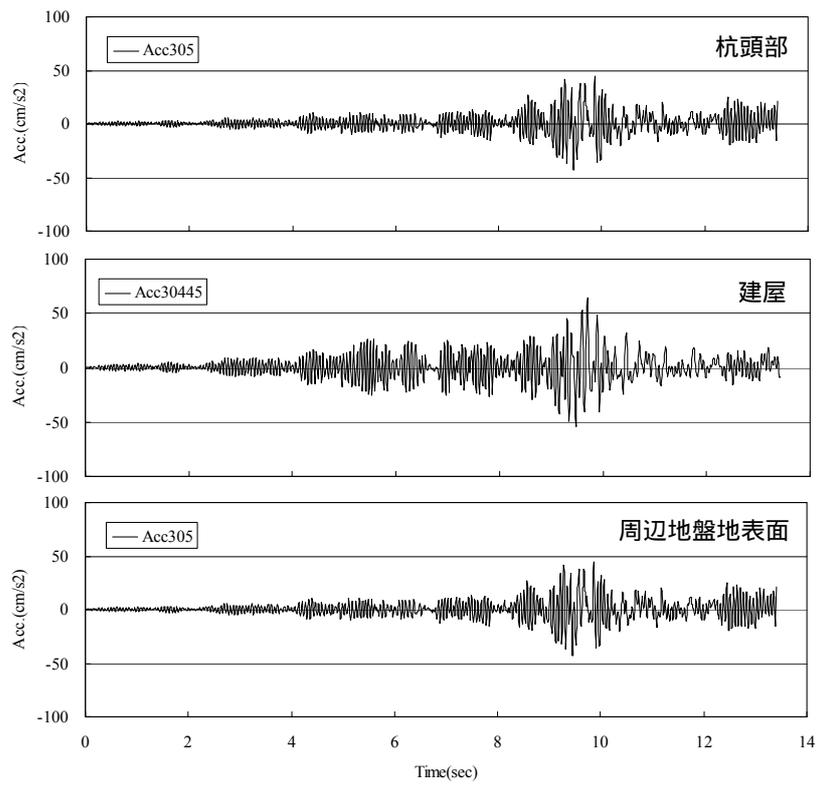


図 11 応答加速度時刻歴の比較（飽和砂・緩詰め、25Gal 入力）

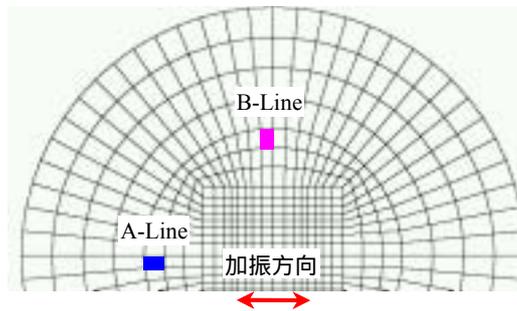
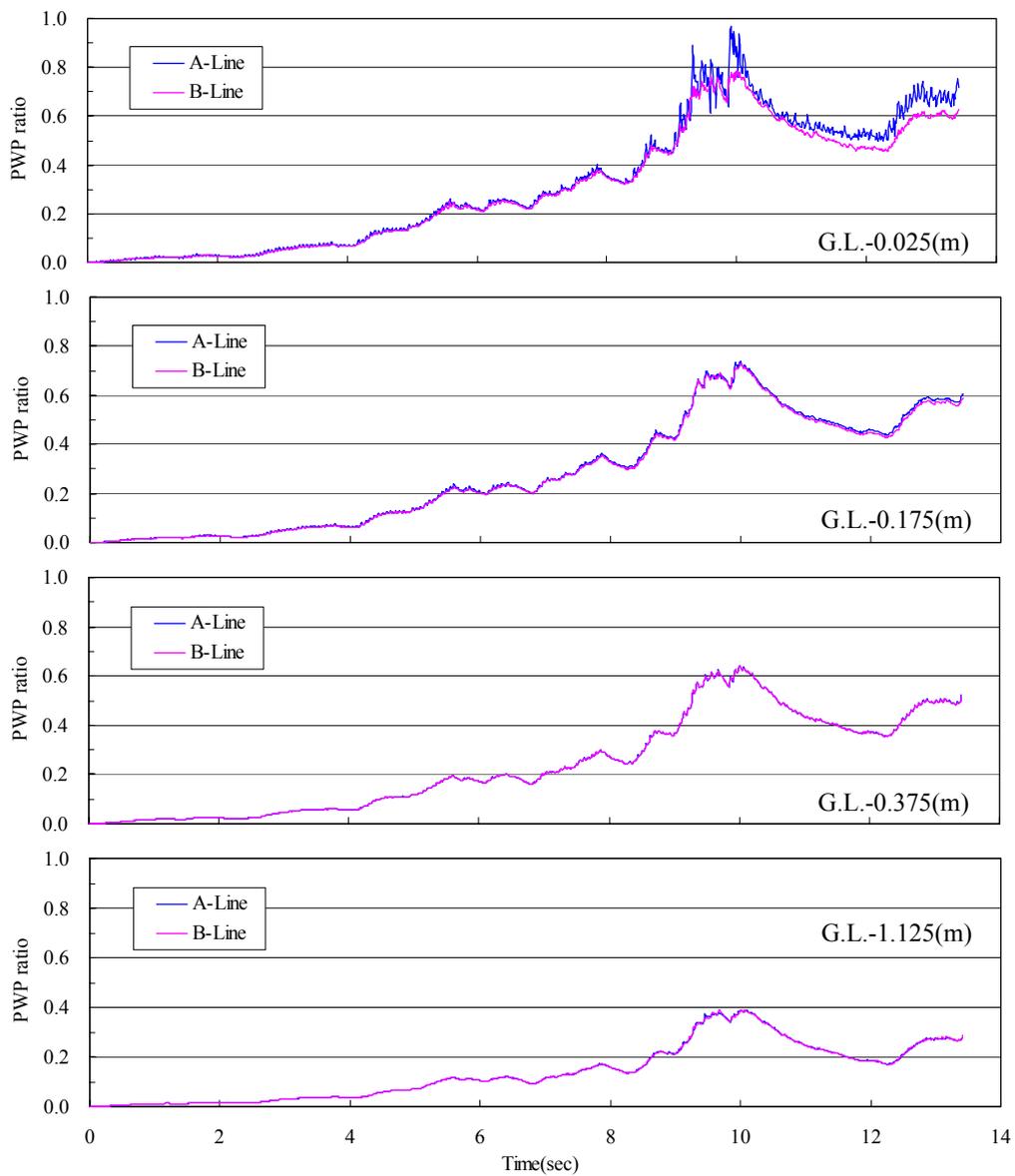
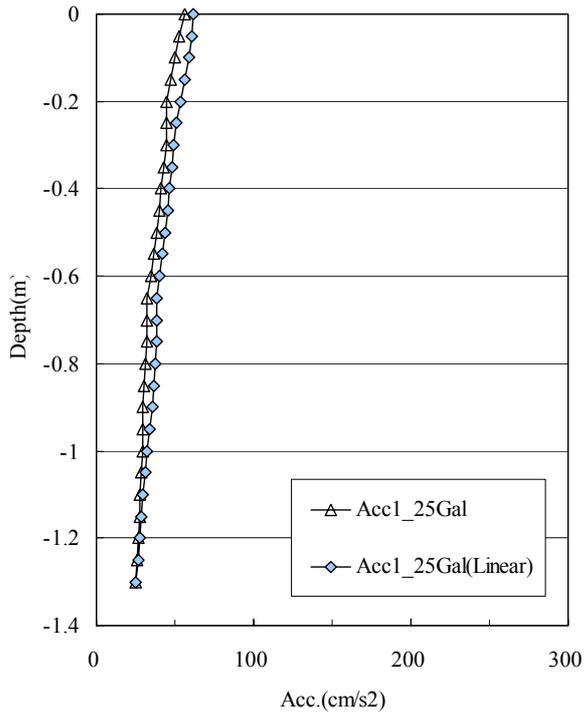
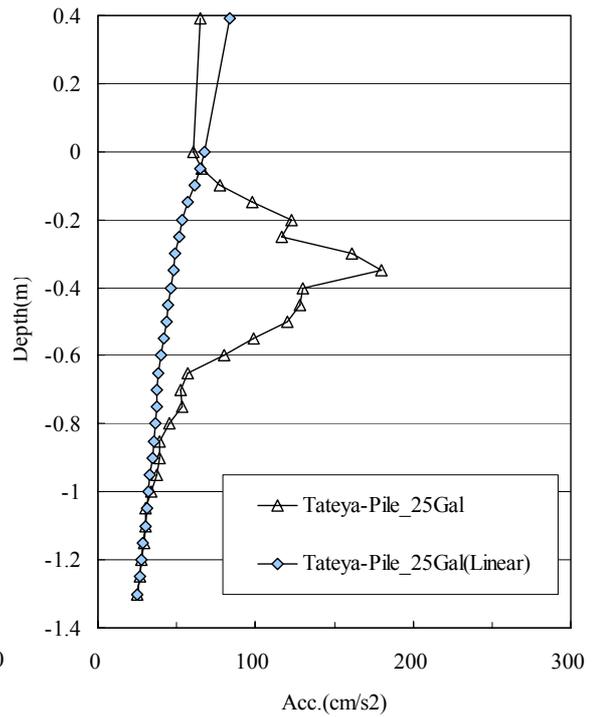


図 12 過剰間隙水圧比の時刻歴（飽和砂・緩詰め、25Gal 入力）

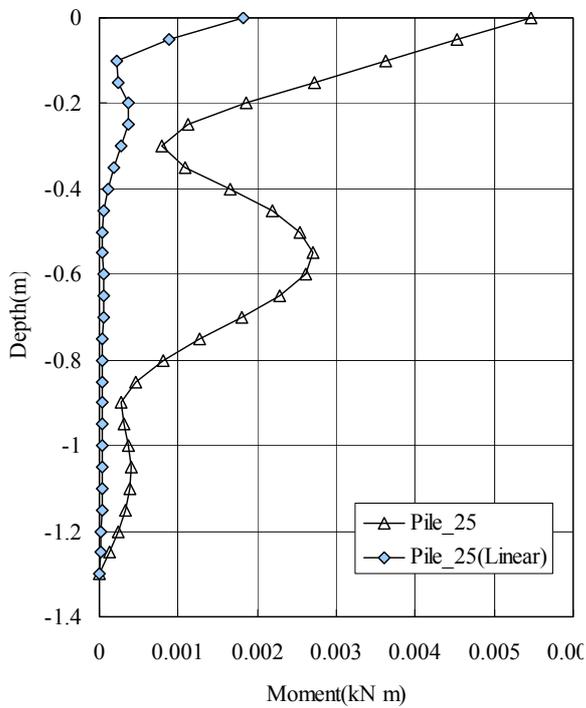


(1)せん断土槽部分

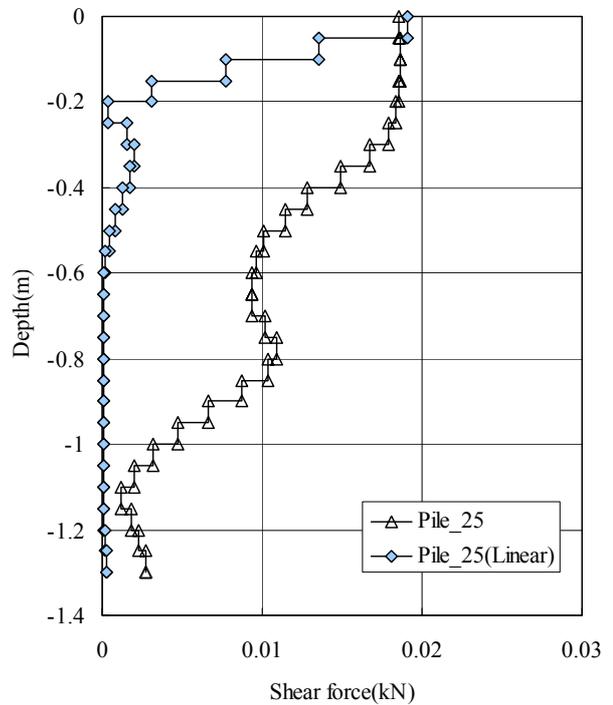


(2)建屋 - 杭列

図 13 最大応答加速度の深度分布の比較（飽和砂・緩詰め）

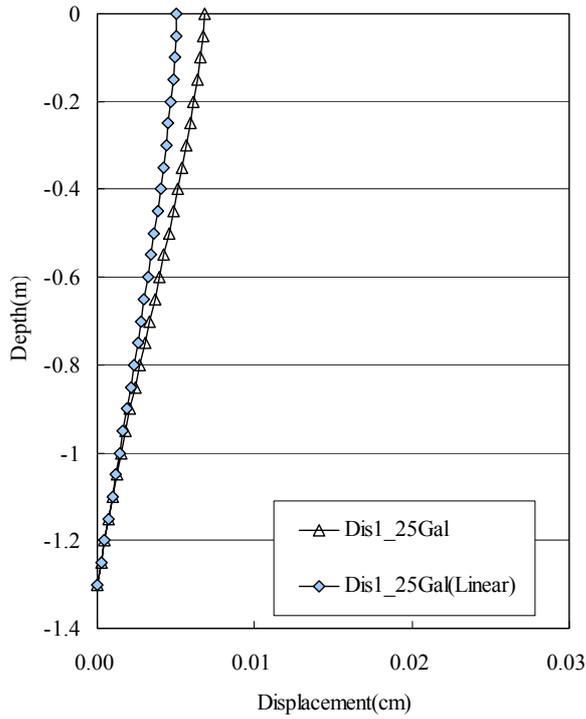


(1)モーメント

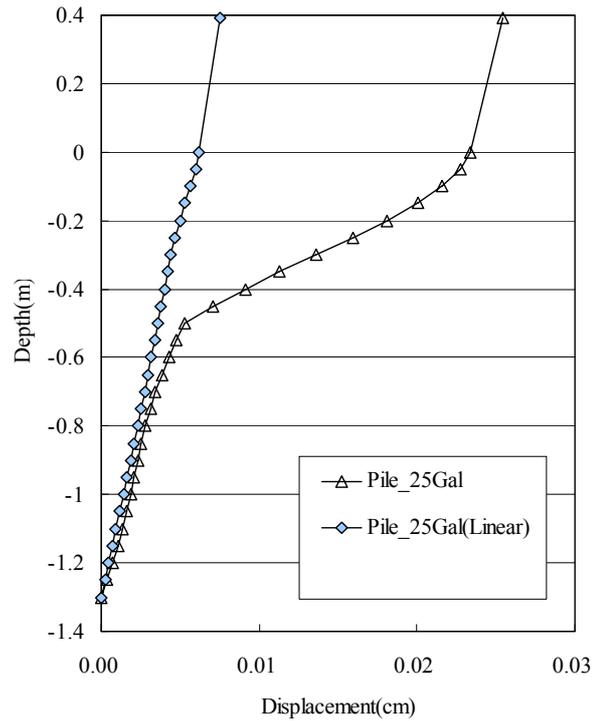


(2)せん断力

図 14 杭の最大断面力の深度分布（飽和砂・緩詰め）

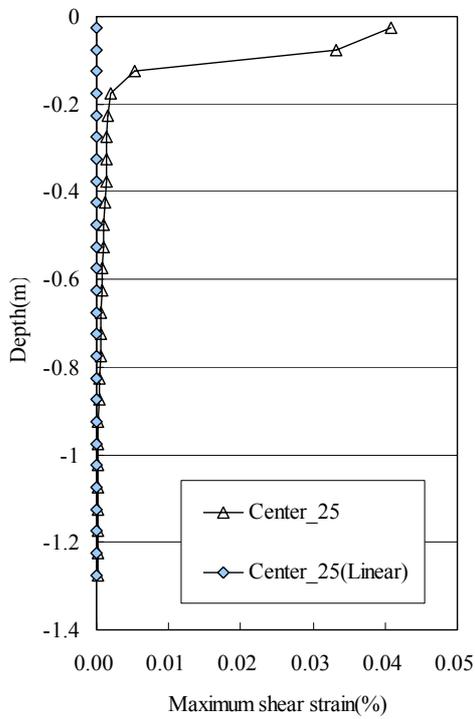


(1)せん断土槽部分

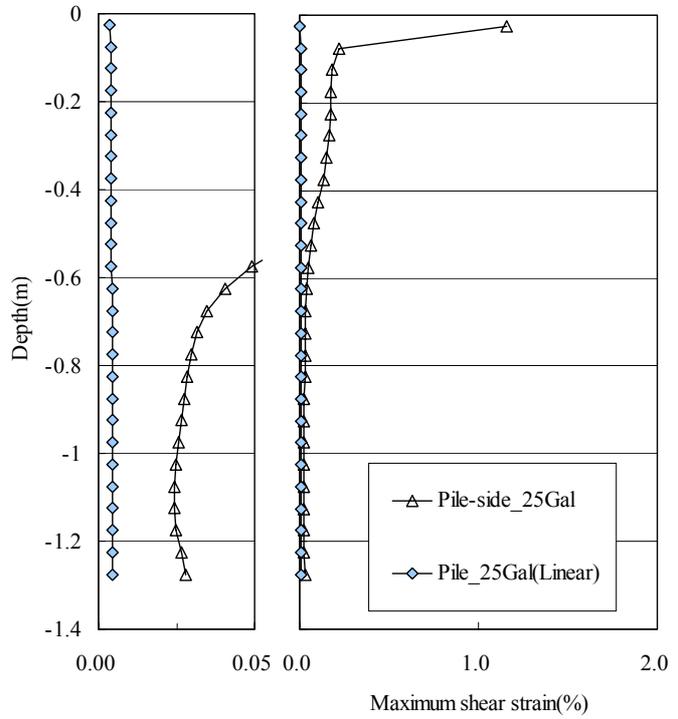


(2)建屋 - 杭列

図 15 最大応答変位の深度分布の比較 (飽和砂・緩詰め)



(1)土層中央の要素



(2)杭横の要素

図 16 最大せん断歪みの深度分布の比較 (飽和砂・緩詰め)

(d) 結論ならびに今後の課題

- 1) 緩詰め砂（相対密度 50%相当）の乾燥砂および飽和砂の振動実験の予測シミュレーション解析を、入力レベルを変えて（25Gal, 150Gal）行った。
- 2) 1G 場での有効土被り圧が小さい実験モデルのシミュレーションのため、特に表層近くの杭周辺地盤の非線形性が強く出る応答解析結果となった。その非線形性が杭応力や応答加速度、応答変位に与える影響が大きい。
- 3) 液状化する場合を模擬したシミュレーション解析は、入力レベルの一番小さい 25Gal の場合を実施した。これは液状化する飽和砂モデルの方が乾燥砂モデルよりも初期有効上載圧が小さく 2)の非線形性が出やすいことに加えて、過剰間隙水圧の上昇を考慮しているため、乾燥砂モデルよりも解析が困難であったためである。
- 4) 飽和砂モデルで全層液状化した場合には、せん断土槽をモデル化しているため、杭の水平抵抗が非常に小さくなる。そのためモデル下端面から入力が入る杭を解く際に不安定化する場合がある。これを緩和するために液状化しにくい支持層を設定することが考えられる。また、表層近くの非線形挙動を抑えるために、表層に不飽和層を設定することも考えられる。
- 5) 約 18,000 要素の地震応答解析を行った場合に、土と水との連成を考慮する有効応力解析の場合には CPU 時間が増大する。これはせん断土槽を試験体のままモデル化したために要素数が増えたためである。三次元入力などを実施した場合にはさらに厳しくなることが予想されるため、せん断土槽の変形特性を損なわない範囲で要素数を減らしたパラメータスタディモデルを作成した検討が必要と考えられる。

(e) 引用文献

- 1) 塩見忠彦, 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 津國正一: 地盤と構造物の非線形挙動を考慮した構造解析システムの開発, 竹中技術研究報告 No.54, 1998
- 2) Zienkiewicz, O.C. and et al. ' Non-linear seismic response and liquefaction ', Int. J. Num. and Anal. Meth. in Geomech., Vol.2, No.4, pp381-404, 1978

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
なし			

(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 15 年度業務計画案

(a) 平成 14 年度に実施した解析結果と実験結果の対応を確認し、差異が見られる場合にはその原因を分析する。

- 1) 平成 14 年度に実施したシミュレーション解析と実験結果を詳細に比較し、両者の対応を確認する。
- 2) 解析と実験の差異に関して整理し、その原因を検討する。検討は解析的な見地から見た実験結果の分析と要素レベルの解析を実施することにより考察する。

(b) 上記の結果に基づき、3次元 FEM モデル及び材料定数の設定に関する見直しを実施する。

- 1) 上記の検討で明らかとなった要因に関して、3次元 FEM モデルの見直し、材料定数の見直しを実施し、平成 14 年度に作成した解析モデルとの差異を確認する。

(c) 平成 15 年度に実施する振動台実験から代表的なケースを選び、シミュレーション解析を実施する。

- 1) 平成 15 年度に実施する振動台実験から、多方向入力の影響が明確になるように、代表的な実験ケースを選択し、シミュレーション解析を実施する。
- 2) 実験で観測される項目を中心に、解析結果を整理するとともに、応答の把握を容易にするために全体挙動のアニメーションを作成する。

(d) 解析結果から多方向入力の影響に関して整理し、実験との対応を調べる。

- 1) 1 方向入力の場合と多方向入力の場合の杭基礎-構造物系の応答を比較することにより、両者の差異の程度とその要因を分析し、多方向入力の場合の影響を明確にする。実験から得られた結果との対応を確認し、数値解析の多方向入力に対する適用性を確認する。