

3.3.3 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

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 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
- (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 16 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
株式会社 竹中工務店 技術研究所 先端研究開発部	主任研究員 研究主任	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。

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15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、飽和地盤・密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) 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) 静的解析

シミュレーション解析に用いる三次元FEMによるモデルの検討を、静的解析より行った。

3) 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。

4) 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。

- ・ 飽和地盤 密詰めモデル 最大 250Gal / 125Gal 入力 水平二方向加振
- ・ 飽和地盤 密詰めモデル 最大 250Gal 入力 水平一方向加振

(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。

- ・ 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。
- ・ 杭の排除体積分を考慮して地盤のモデル化を行った。

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MuDIAN¹⁾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

図 1 に平成 14 年度の検討に用いた解析モデルの概要を示す。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。深さ方向の分割はせん断土槽の厚さと等しく 50mm とした。解析モデルは約 20,000 節点、18,000 要素である。

平成 14 年度の検討では杭による地盤の排除体積分は考慮せずにモデル化を行い、杭芯の位置に梁要素として定義した。しかし水平加振した場合には杭は地盤を杭の有効断面幅で押すため、排除体積分を考慮しない場合は集中荷重が線上に地盤に作用することになる。そのため地盤の塑性を考慮した解析を行う場合に杭の有効幅を考慮せずにメッシュ形状を作成すると、メッシュを細かくすればするほど局所的な破壊が進み、実現象から離れた解析を行ってしまう可能性がある。

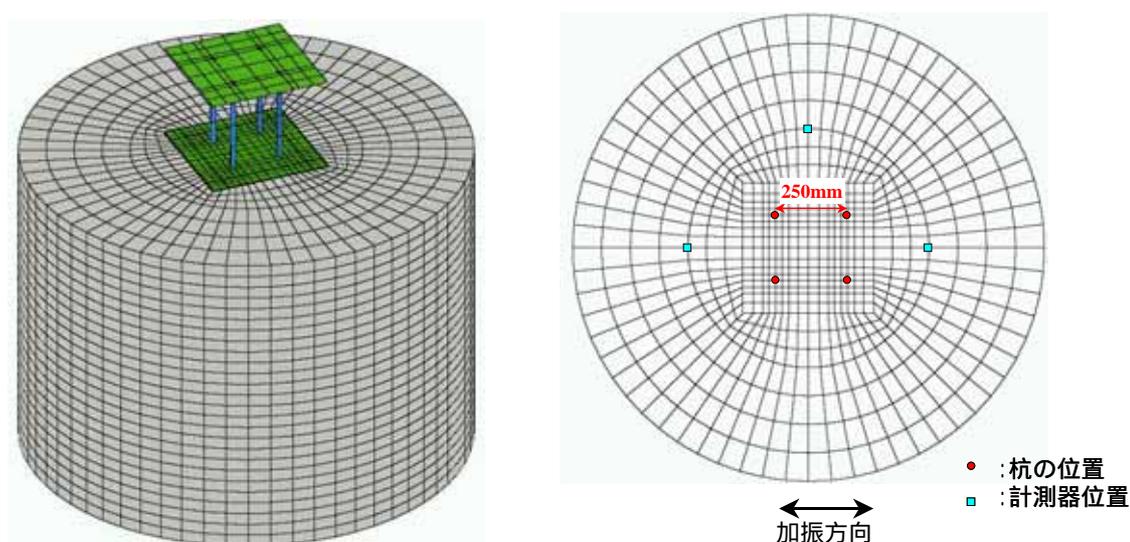


図 1 平成 14 年度検討の解析モデルの概要

そこで平成 15 年度の検討では、事前解析として地盤の塑性化を考慮した静的解析を行い、振動台実験のシミュレーションに適切な FEM モデルの形状検討を行った。検討方法は次の 2 方法である。

メッシュの平面形状と深さ方向の分割を細かくした場合と粗い場合との比較

杭による排除体積を考慮した場合と の結果との比較

の場合の検討用モデルを図 2 に示す。平面方向は杭近傍を杭径と同程度に分割したモデル A タイプと、杭近傍を A タイプの 2.5 倍に分割した B タイプを作成した。また深さ方向の分割はせん断土槽の厚さと等しくした 50mm タイプとその 2 倍とした 100mm タイプとを行った。図 3 に解析条件と解析結果を示す。

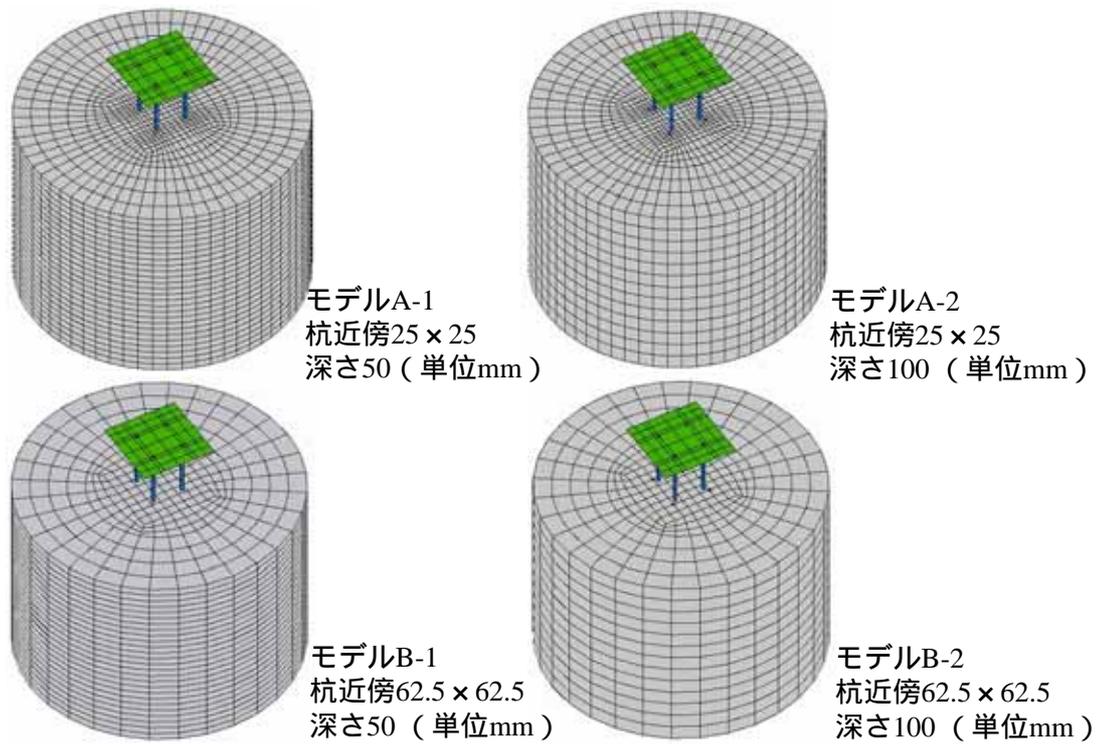
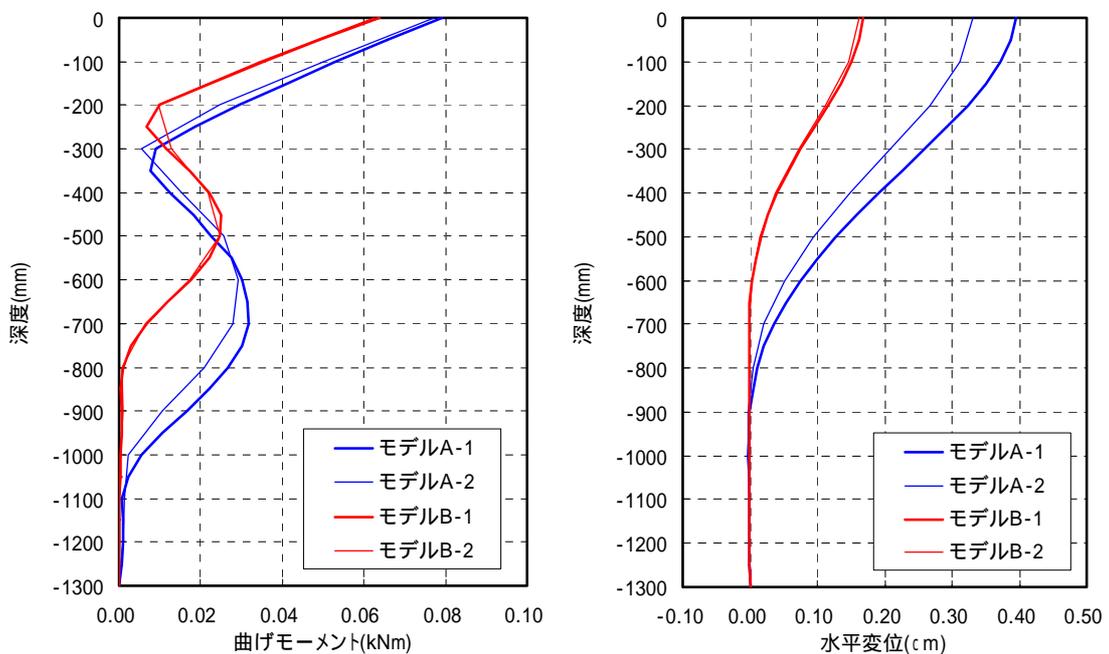


図 2 三次元 FEM による解析モデル図

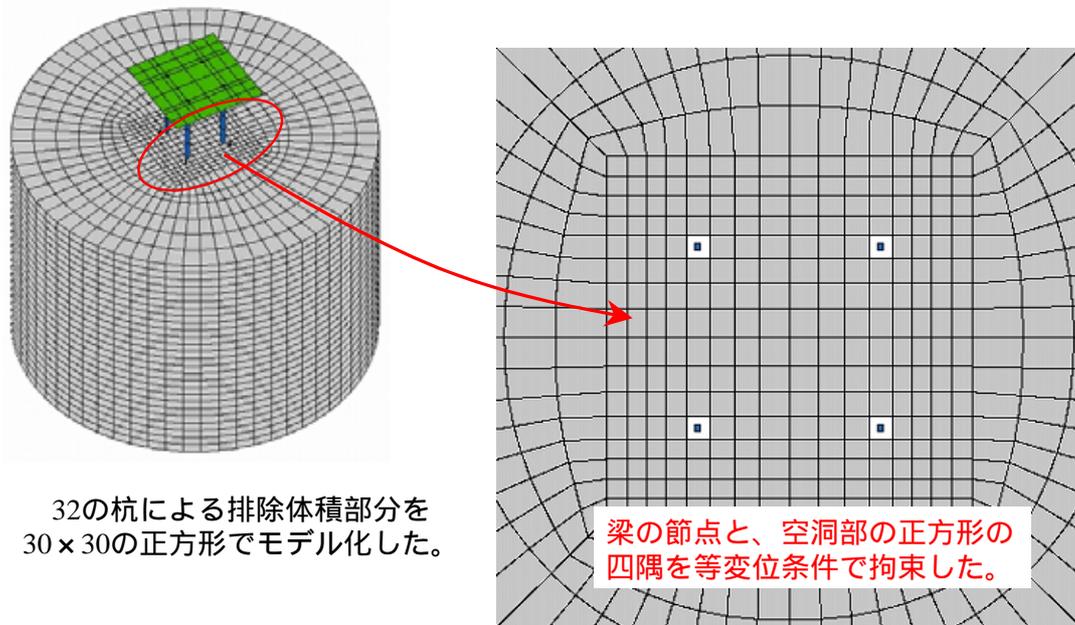


- 【地盤条件】 相対密度 D_r 50%相当 Mohr-Coulombの降伏規準に従う非線形材料
せん断剛性 $G=55\text{MPa}$ (平均有効拘束圧 49kPa) 内部摩擦角 $= 27.3^\circ$
- 【载荷条件】 上部構造物を $1.0(\text{kN})$ で水平方向に载荷

図 3 静的解析結果によるメッシュ形状の比較

図 3 より、地盤の塑性化を考慮した解析を行う場合には杭近傍メッシュの分割によって杭変位、モーメントの分布が変わる事が判る。また深さ方向の分割について見ると、今回のメッシュでは比較的差異は小さいと言える。

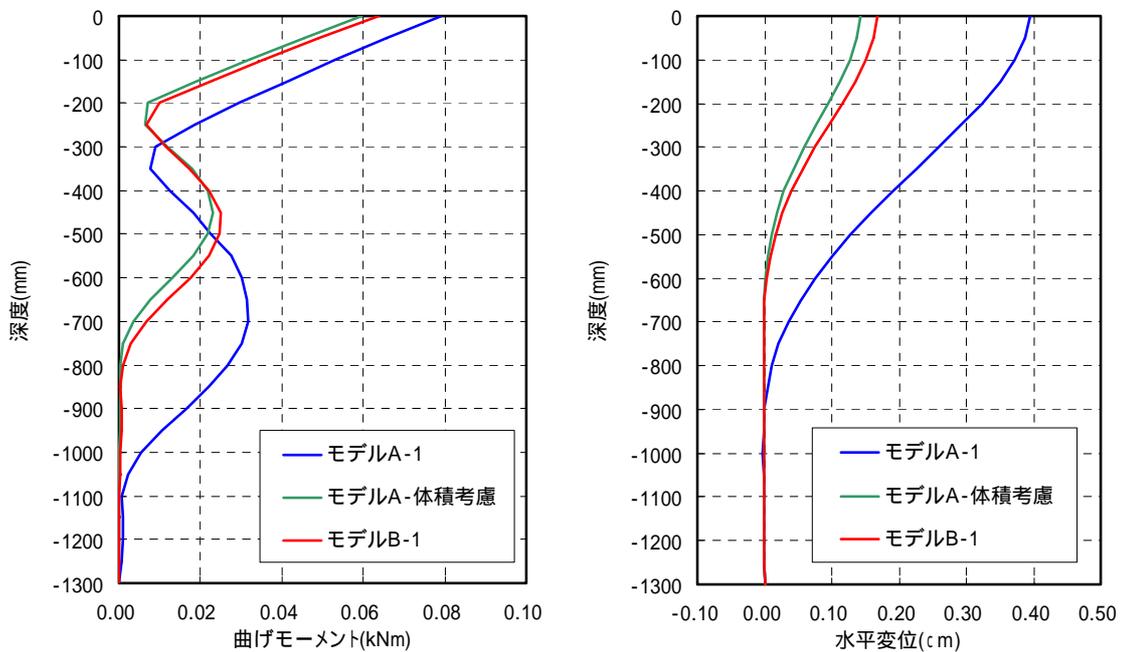
次に杭体積を考慮したモデルと考慮しないモデルとで比較を行った。図 4 に杭体積を考慮した場合のモデル化の概要を、図 5 に静的解析結果の比較を示す。



32の杭による排除体積部分を
30×30の正方形でモデル化した。

梁の節点と、空洞部の正方形の
四隅を等変位条件で拘束した。

図 4 杭体積を考慮した場合のモデル化



- 【地盤条件】 相対密度 D_r 50%相当 Mohr-Coulombの降伏規準に従う非線形材料
せん断剛性 $G=55\text{MPa}$ (平均有効拘束圧 49kPa) 内部摩擦角 $= 27.3^\circ$
- 【载荷条件】 上部構造物を $1.0(\text{kN})$ で水平方向に载荷

図 5 杭体積を考慮した場合と無視した場合との比較

2) 解析対象の地盤のモデル化

平成 15 年度の振動実験は、より実際の構造物挙動に近づけるために土層の地盤を液状化層と非液状化層の二層地盤からなるモデルが採用された。液状化地盤は相対密度が 75～85% 程度の密な砂地盤とし、非液状化地盤は碎石を締め固めた砂礫層となっている。

a) 液状化層

密な砂地盤をモデル化するために豊浦砂相対密度 80% の土質試験結果を用いた。表 1 に土質試験結果から設定した物性値を示す。

表 1 設定した地盤物性のパラメータ

	土粒子の比重 Gs	単位体積重量 (kN/m ³)	間隙率 n	内部 摩擦角	透水係数 (cm/s)	せん断剛性 (MPa)
砂層	2.41	18.2	0.3924	42	1.293×10 ⁻⁴	7.59

有効拘束圧 7.3 kPa の場合

砂地盤の液状化挙動のモデル化は Zienkiwicz らの MC-Densification モデル²⁾を用いた。MC-Densification モデル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三次元にも適用可能な簡便な構成式である。

MC-Densification モデルでは累積せん断により発生するダイレイタンシー量をコントロールするモデルパラメータ A, B, を、単純せん断試験や繰り返し三軸試験結果等の要素シミュレーションより求める。ここでダイレイタンシー特性を表す損傷パラメータ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。図 6 は今回の要素シミュレーションに用いた液状化強度と、要素シミュレーションの結果である。表 2 は設定した Densification モデルのパラメータである。

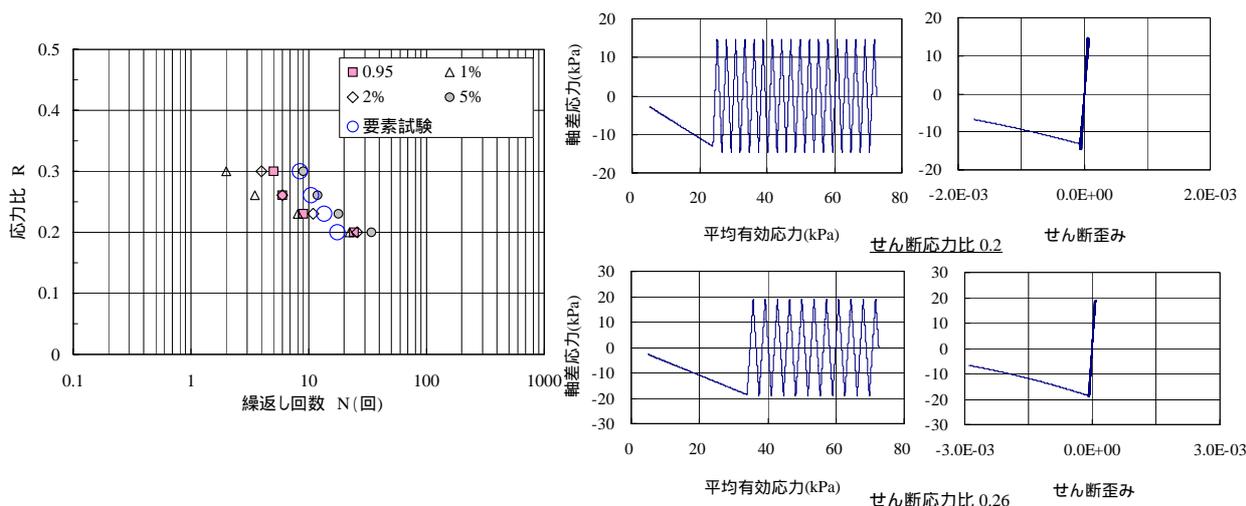


図 6 設定した液状化強度と有効応力経路、応力歪み曲線

表 2 設定した地盤物性のパラメータ

A	B	
0.03	1	0.1

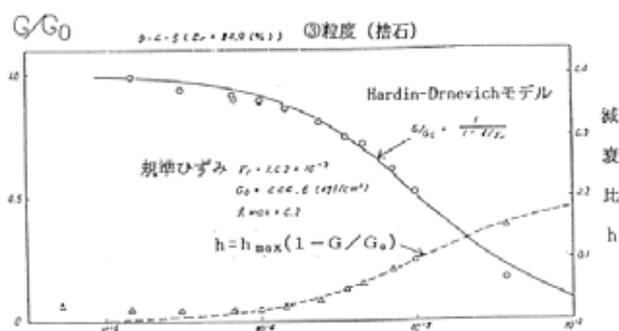
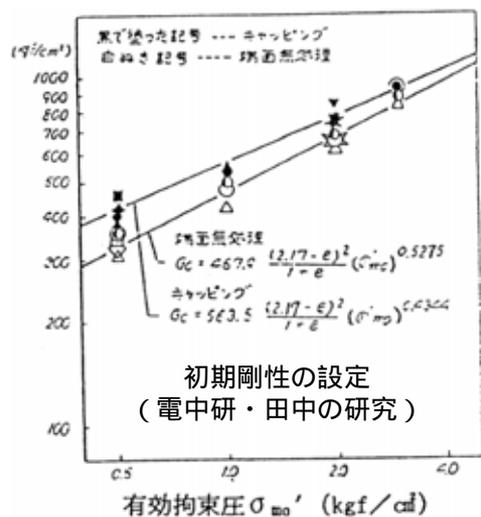
b)非液状化層

非液状化層は締め固めた碎石により作られている。そこで田中らの研究³⁾で提案されているせん断剛性の設定法を用いて初期せん断剛性をモデル化した。モデル化の概要を図 7 に示す。碎石層は線形材料としてモデル化し、実験装置で想定される土被り圧からせん断剛性の値を設定した。

表 3 設定した地盤物性のパラメータ

	土粒子の比重 Gs	単位体積重量 (kN/m ³)	間隙率 n	内部 摩擦角	透水係数 (cm/s)	せん断剛性 (MPa)
砂礫層	-	21.5	-	-	-	38.4

有効拘束圧7.3kPaの場合



$$G_0 = 563.5 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_{m0})^{0.434} \quad \sigma'_{m0} = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_v \quad (\text{ただし単位はkg/cm}^2)$$

図 7 碎石層のモデル化

c)構造物のモデル化

杭、および上部構造物の形状を図 8 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 4 に、板要素で用いた質量を表 5 に示す。

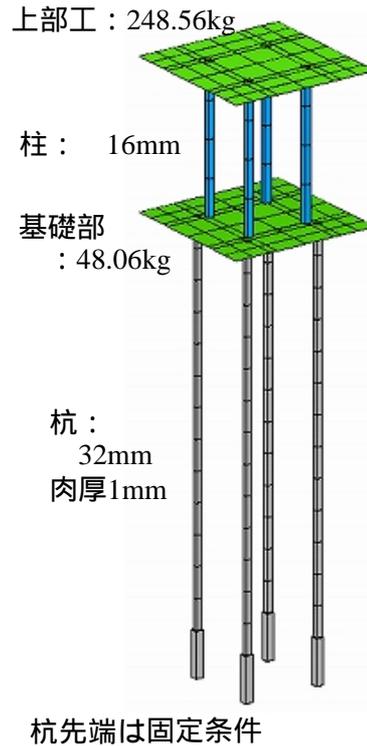


図 8 構造物模型の形状

表 4 設定した構造物のパラメータ

	外径 (m)	内径 (m)	断面積 (m ²)	断面二次 モーメント (m ⁴)	E (kN/m ²)	
杭	0.032	0.0304	7.8414E-05	9.5477E-09	2.0580E+08	0.3
柱	0.016	0	2.0106E-04	3.2170E-09	2.0580E+08	0.3

表 5 構造物模型の質量

	質量(kg)	高さ(m)
基礎側	48.06	0
上部構造物	248.56	0.49

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 1) の三次元 FEM モデル化の検討結果より、深さ方向の分割がせん断リングの厚さ (50mm) の 1 倍と 2 倍とで結果が大きく変わらないと判断出来たので、深さ方向の分割は 100mm 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) の 2 倍を外周の節点数で等分して設定した。

3) 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 6 に解析結果を示す。図 9 は実験モデル全体と土槽部分をモデル化した場合の水平 1 次の固有モード図である。

表 6 固有値解析結果

(1)モデル全体

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	4.91	0.2040	1.540E+0	8.709E-13	1.540E+0
2	19.00	0.0526	2.460E+0	9.055E-14	2.460E+0
3	39.20	0.0255	-1.023E-6	-1.720E+0	-1.023E-6
4	40.50	0.0247	-1.704E-10	1.625E-5	6.132E-9
5	44.40	0.0225	-2.920E+0	-1.340E-5	-2.920E+0

(2)建屋のみ / 地盤のみのモデル

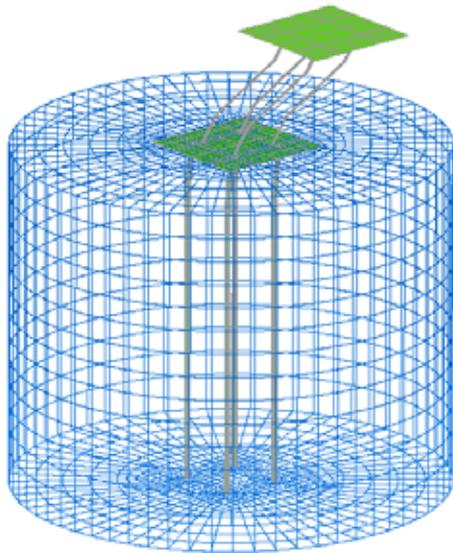
モード 次数	周波数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数 h(x)	刺激係数 v(y)	刺激係数 h(z)
建屋1次	5.23	0.1910	1.530E+0	-1.227E-14	1.530E+0
地盤1次	19.10	0.0523	7.220E-1	3.026E-9	7.220E-1
地盤2次	38.10	0.0263	-3.580E-7	1.600E+0	-3.580E-7
地盤3次	49.10	0.0204	4.340E-1	-5.219E-8	4.340E-1

刺激係数の添字 v が上下方向

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

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (1)$$

添字の i は i 次モードを意味し、 h_i は各要素ごとに i 次モードで設定する減衰である。今回は全ての要素で $h=0.02$ として α と β を設定した。ただしモード図より、建屋は建屋のみが卓越する 1 次と土槽部分の水平 1 次（全体で 2 次）から、土槽部分は土槽部分の水平 1 次と 2 次（全体の 2 次と 5 次）から設定した。



杭 - 上部工
 1次 4.91Hz
 2次 19.0Hz
 上部工のみ 1次 5.23Hz



せん断土層のみ
 1次 19.1Hz
 2次 49.1Hz
 自由地盤1次19.8Hz

図 9 固有モード図 (水平 1 次モード)

4) 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。入力地震動は実験で用いられたテーブル波 (実験番号 CASE31 ; HCXYW31-1) を用いた。実験での入力波形は時間刻み (0.002sec) であるが、解析では時間刻みはさらに 2 分割 (0.001sec) して行った。時間積分は Newmark の法を用いた。

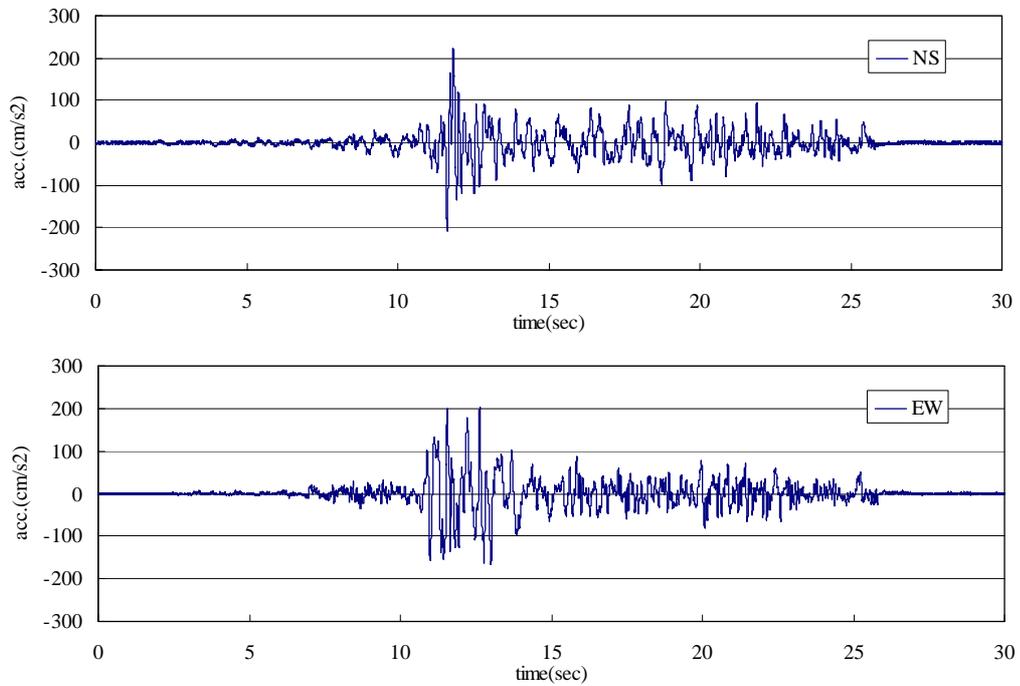


図 10 入力波形 (実験 : HCXYW31c1)

平成 15 年度に実施した解析ケースを表 7 に示す。表 7 中のメッシュ形状で、標準とは図 2 のモデル B-2 タイプを示し、細かいとはモデル A-2 タイプを示している。

表 7 解析ケース

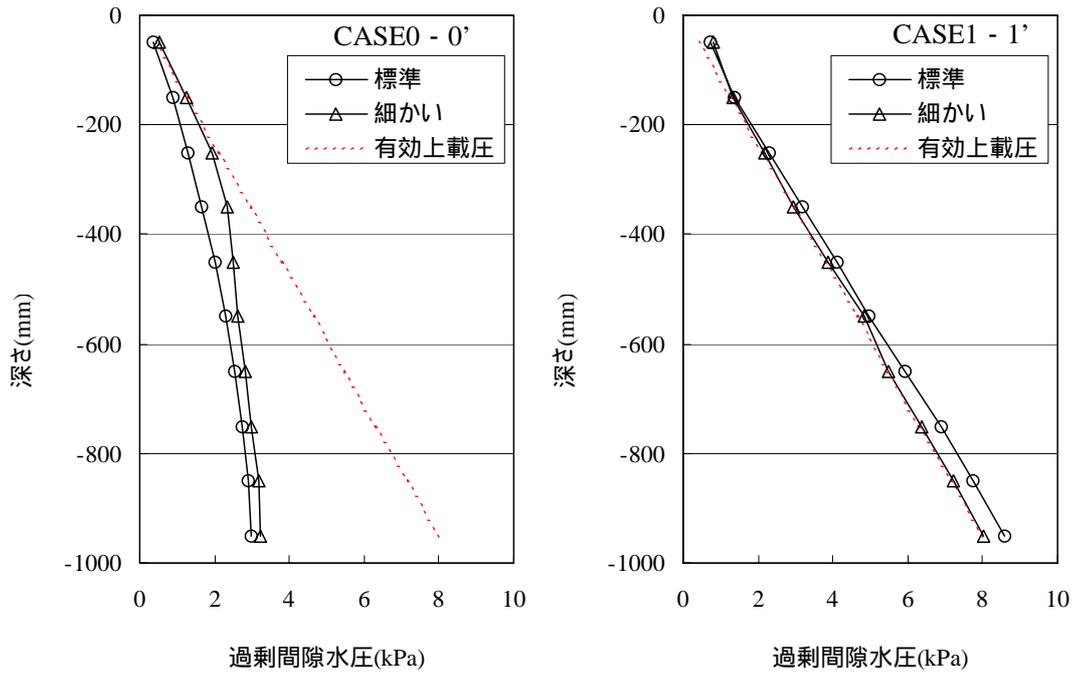
解析ケース	メッシュ	入力動 (HCXY31c1)
CASE0	標準	NS 成分 + EW 成分(入力 0.5 倍)
CASE0	細かい	"
CASE1	標準	NS 成分 + EW 成分
CASE1	細かい	"
CASE2	標準	NS 成分のみ
CASE3	標準	EW 成分のみ

a)メッシュ形状の比較

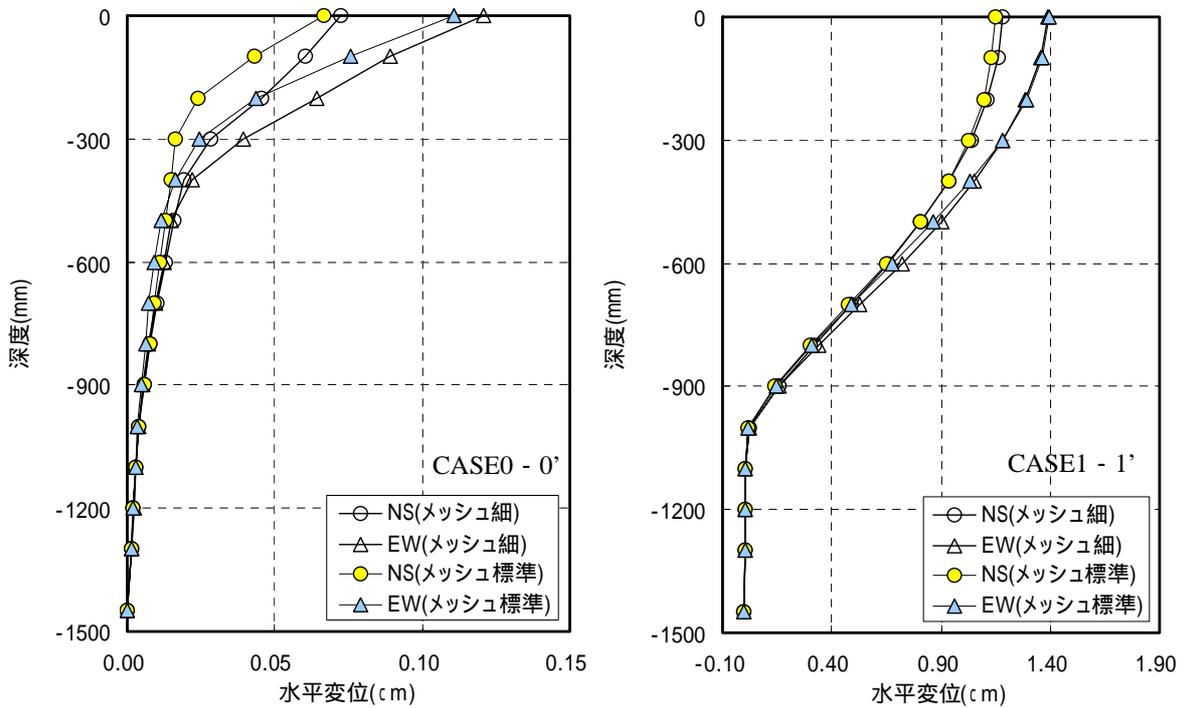
図 12 は CASE0 と 0'、CASE1 と 1'の応答解析結果の最大値分布の比較である。

図 12(1)は過剰間隙水圧の最大値分布の比較であるが、CASE0、0'では過剰間隙水圧の最大値分布は表層のみで水圧比が 1.0 になる程度である。一方 CASE1、1'では水圧比はほぼ全層で 1.0 となっている。CASE0 は CASE1 の入力レベルを半分にしたものであり全体的に液状化による非線形性程度が弱い。水圧分布を比較すると入力レベルの小さい CASE0 の方がメッシュによる差異が大きくなっている。なお CASE1 の分布で有効上載圧より大きな過剰間隙水圧が発生している深度があるが、これは杭と液状化した地盤との相互作用で発生する動水圧的な成分から来る最大値である。

図 12(2)は杭の最大応答変位分布の比較、(3)は杭に発生する最大曲げモーメントの比較である。CASE0 ではメッシュ形状による変位分布の差異が表層付近で大きく、モーメント分布にもメッシュ形状による違いが発生している。これは静的解析で示した結果(図 3)と同様の傾向がある。一方、CASE1 になるとメッシュ形状による違いは CASE0 と比較すると明瞭に現れず、よく似た最大値分布を示している。地盤が完全液状化する強非線形の場合には、液状化に到る過程が大きく変らなければ杭の応答にメッシュ形状が与える影響は小さいが、完全液状化に至らない非線形性がやや弱い場合はメッシュ形状を適切に設定しないと応答値を過大評価する場合は考えられる。

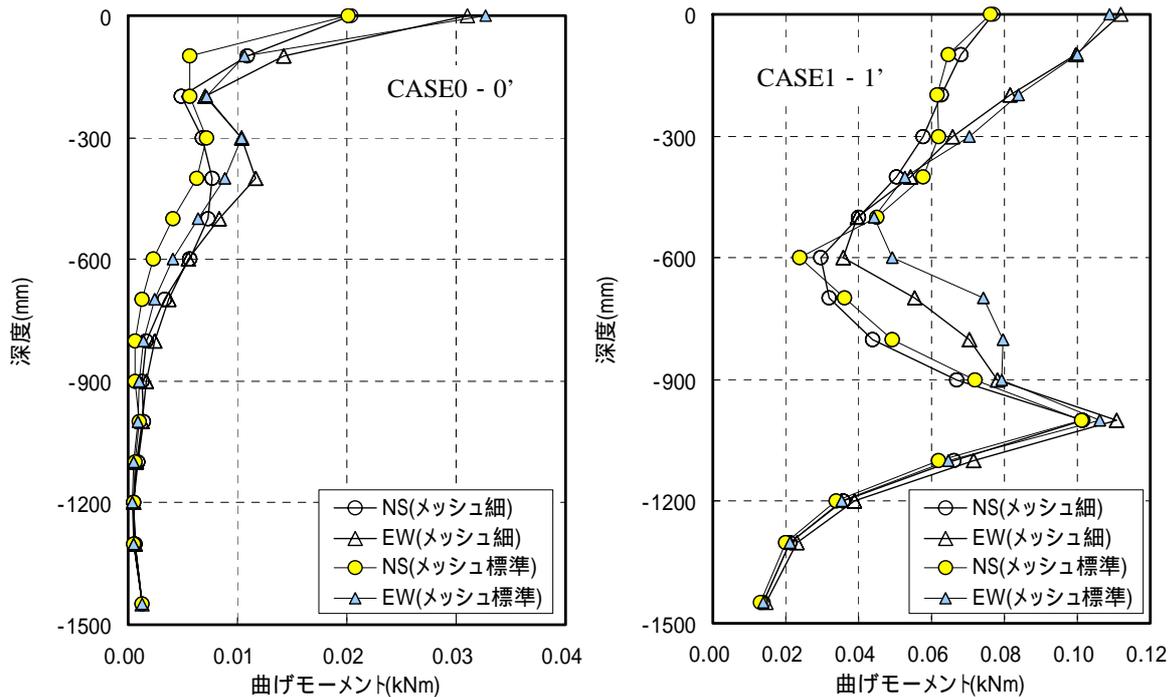


(1)発生する過剰間隙水圧の最大値の深度分布の比較



(2)杭の最大応答変位分布の比較

図 11 メッシュ形状の違いによる最大応答値分布の比較



(3) 杭の最大曲げモーメント分布の比較

図 11 メッシュ形状の違いによる最大応答値分布の比較

b) 実験結果との比較

図 12～図 16 は標準メッシュを用いたシミュレーション結果を実験と比較したものである。図 12 はせん断土槽部分の最大応答加速度の深度分布、図 13 はせん断土槽部分の最大応答変位の深度分布の比較である。深さ 1000(mm)以深の碎石層部分より以浅の応答で NS 方向、EW 方向とも実験結果との差異が大きくなる。特に変位分布では深さ 800mm 以浅で大きく伸びる変位量が再現できていない。そのため図 14 の最大曲げモーメント分布も杭頭部での最大値が実験結果の 0.5～0.8 倍程度となっている。

図 15 は杭頭部分の応答加速度の時刻歴、図 16 は過剰間隙水圧の時刻歴の比較である。図 16 の水圧の時刻歴では 11 秒付近からの大きな地震入力により急激に上昇している。解析結果もこの傾向は概ね再現しているが、15 秒付近から水圧が徐々に下がり始め、入力成分がほとんど無い 26 秒付近から急速に水圧が消散している。一方、実験結果の方は水圧は消散せず上がりきったままになっている。この水圧の違いによる応答の違いが図 15 の杭頭部分の応答加速度の時刻歴にも出ており、解析結果では 15 秒後にも高振動数成分がのった波形となっている。

この水圧の上昇から消散過程のモデル化を修正することにより、杭、建物の応答をより実験値に近づけることが可能になると考えられる。

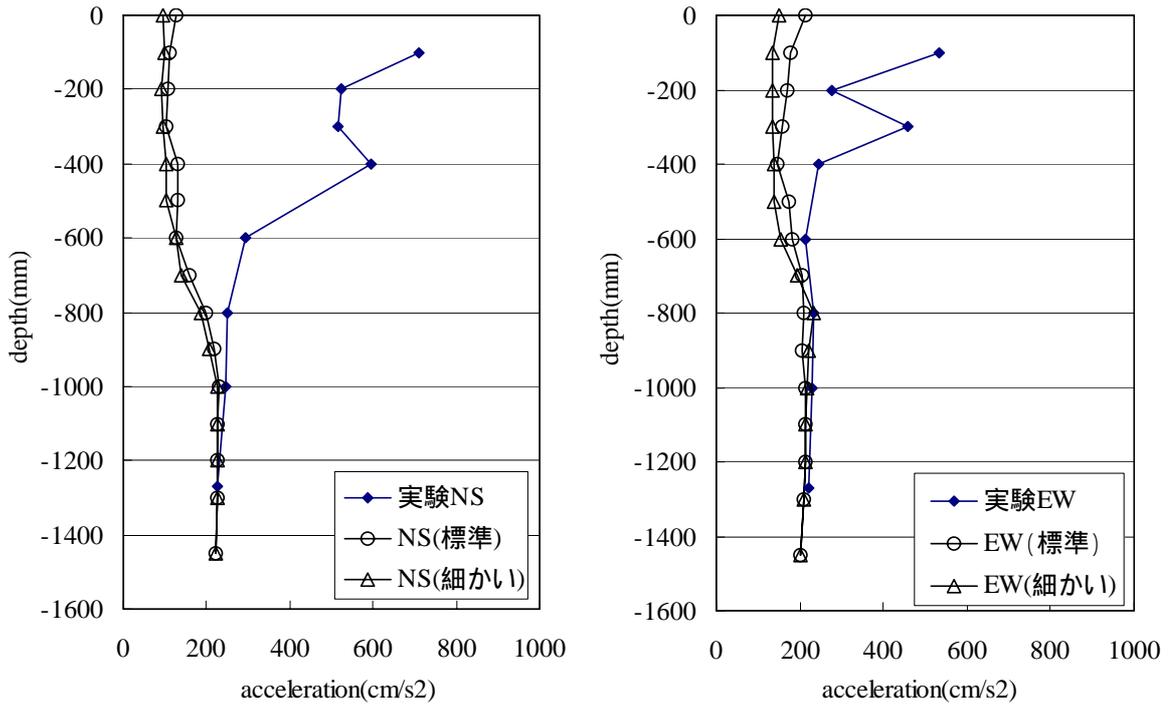


図 12 せん断リングの最大応答加速度の深度分布の比較 (Case1、1')

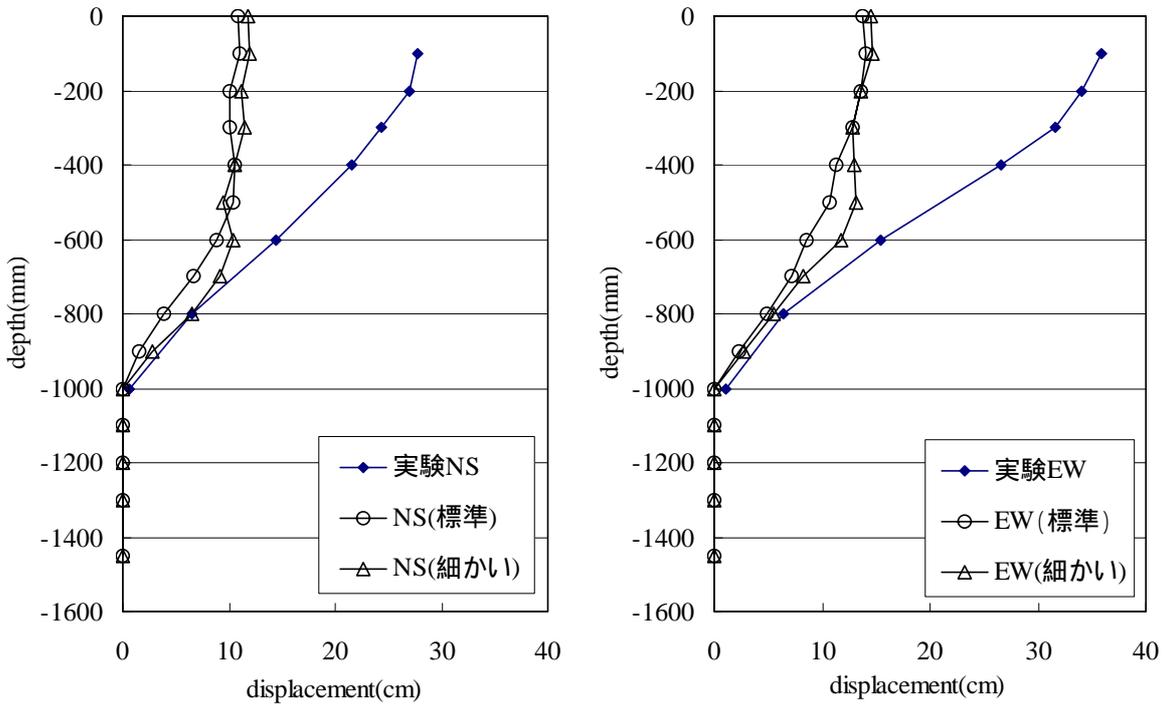


図 13 せん断リングの最大応答変位の深度分布の比較 (Case1、1')

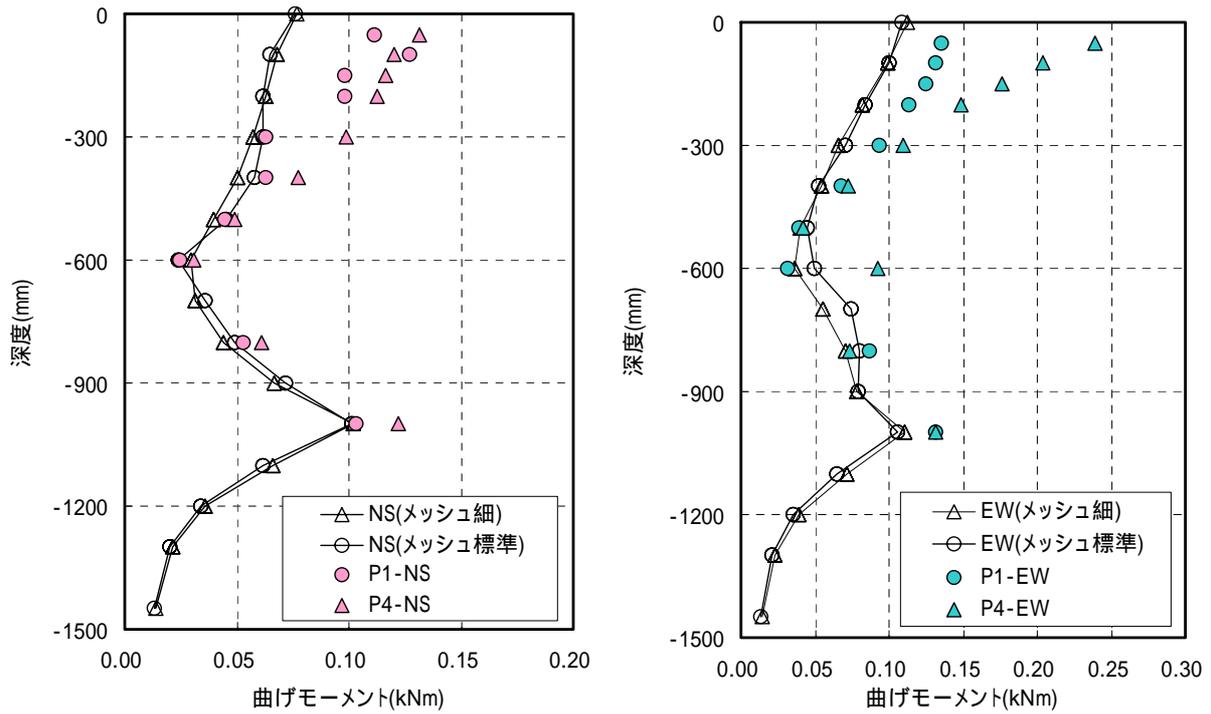


図 14 杭の最大モーメントの深度分布 (Case1、 1)

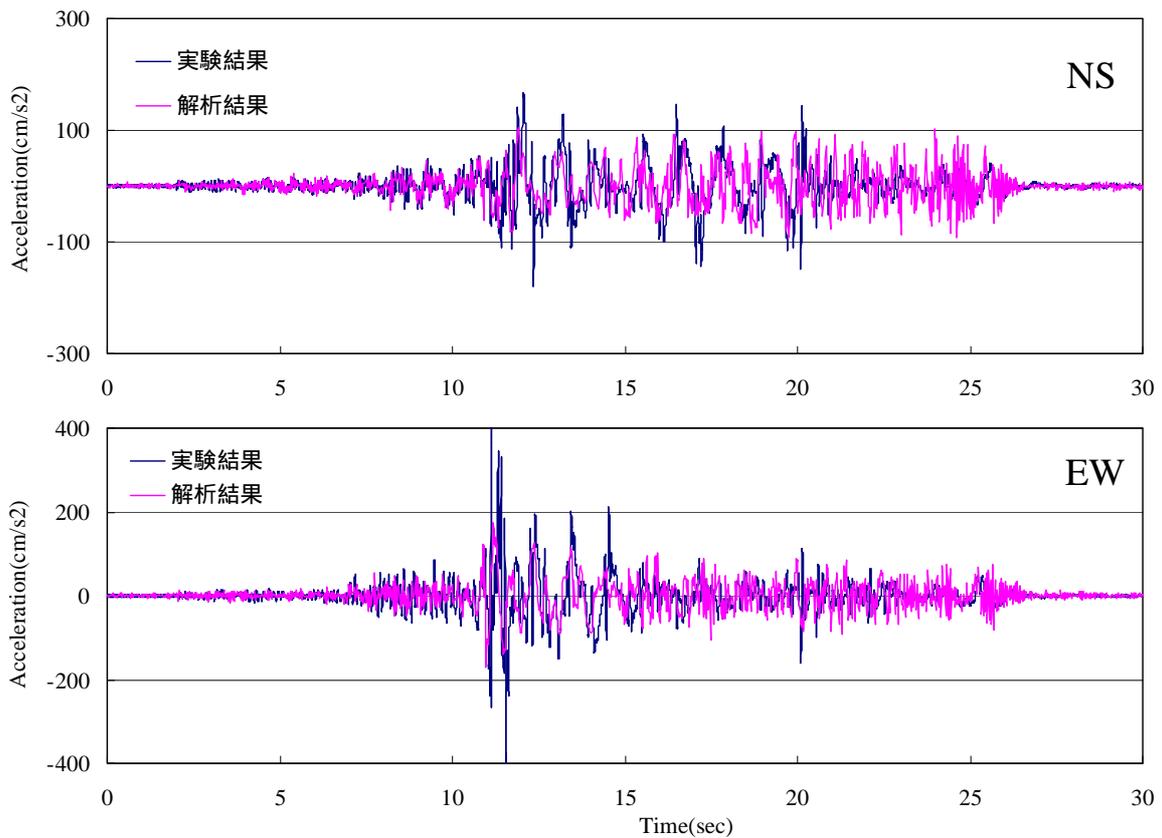
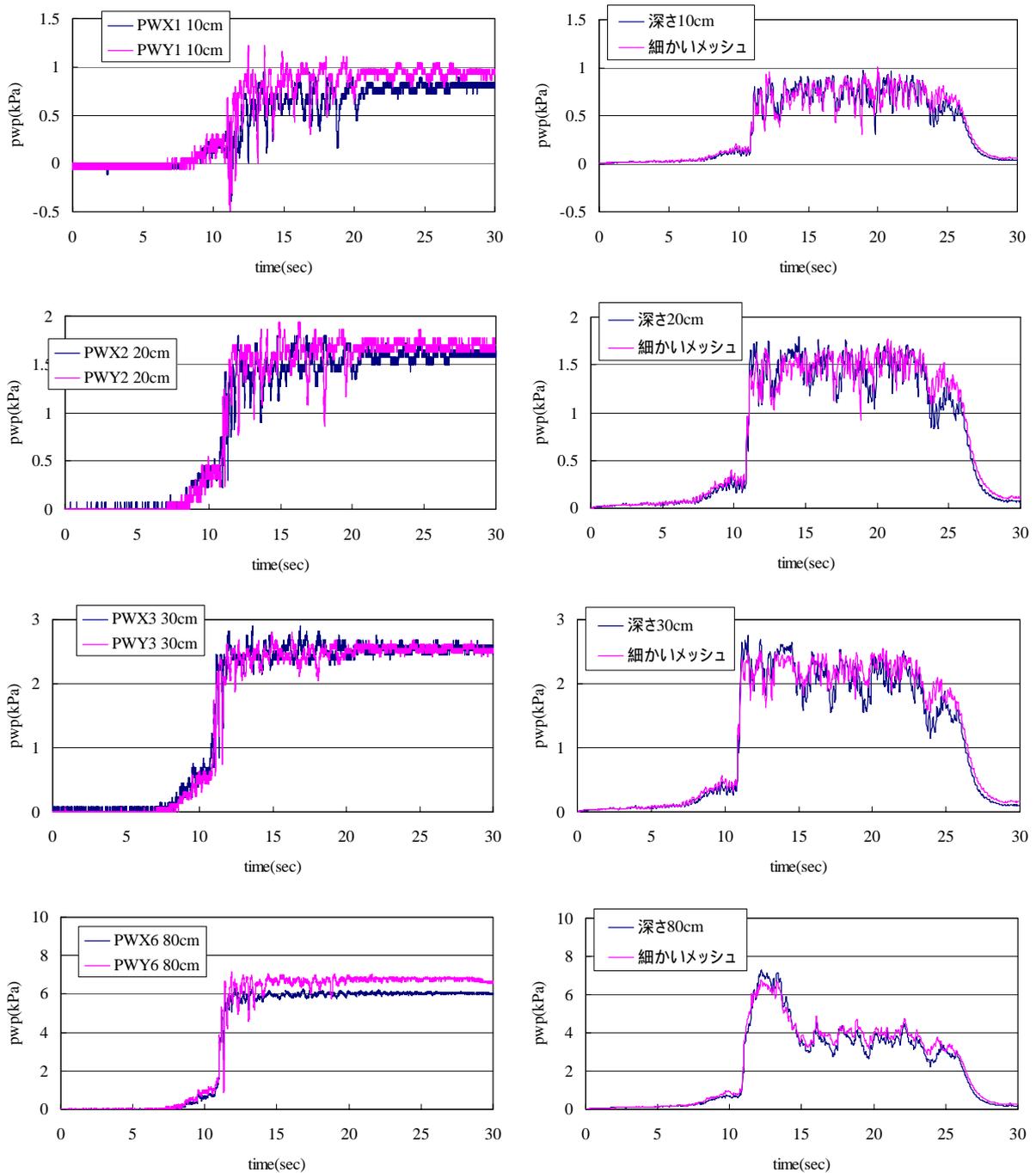


図 15 応答加速度時刻歴の比較 (Case1)



(1)実験結果

(2)解析結果

図 16 過剰間隙水圧の時刻歴の比較 (CASE1,1')

c) 多方向入力の影響の比較

図 17 は多方向入力の影響を比較するために、標準モデルに NS 方向 + EW 方向の入力を入れた場合と、NS、EW それぞれ単独で入力した場合の、杭の最大曲げモーメント、最大応答変位の比較である。

また図 18 は自由地盤モデルに対して、NS 入力、EW 入力、NS+EW 入力、NS+EW+UD 入力した場合の水圧の立ち上がり方を比較したものである。UD 成分は水の圧縮剛性により伝達するため、過剰間隙水圧にその振動成分が乗った波形となるが水圧比の絶対値は大きく変わらない。また水平一方向入力と水平二方向入力を比較すると、水平二方向入力では水圧の立ち上がりが早く、またその絶対値も大きい。図 17 の最大値分布の違いも水圧の立ち上がり等の液状化による非線形性の強弱が影響していると考えられる。

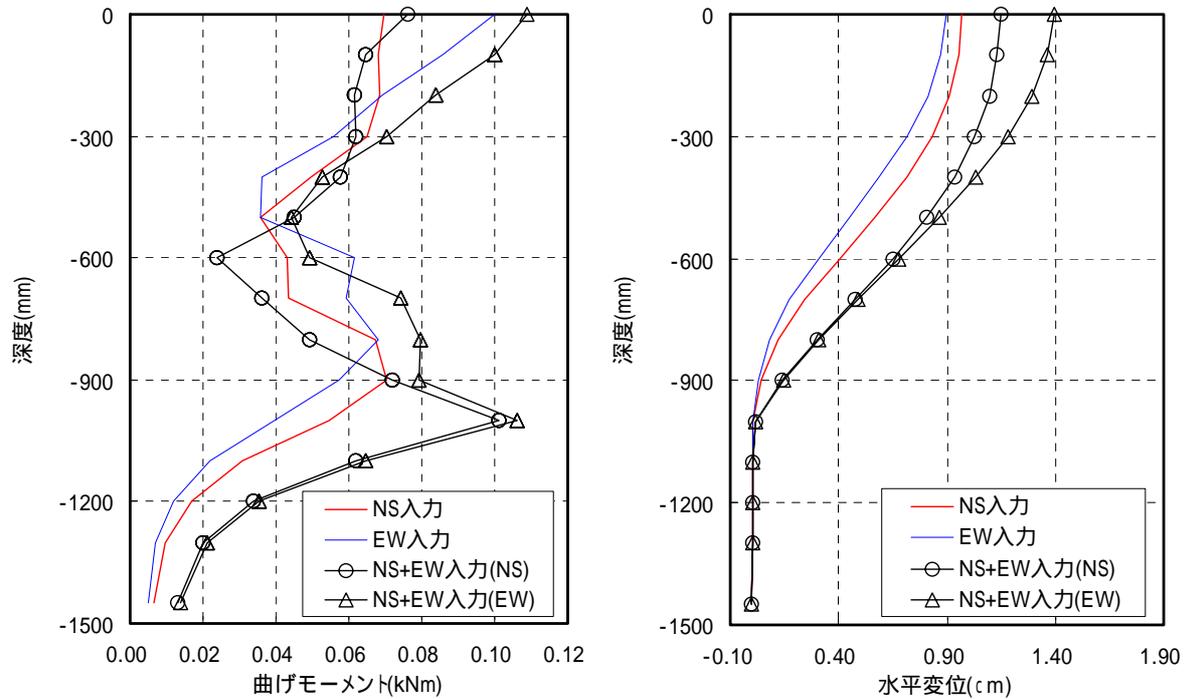


図 17 二方向入力と一方向入力の比較 (CASE1, 2,3 の比較)

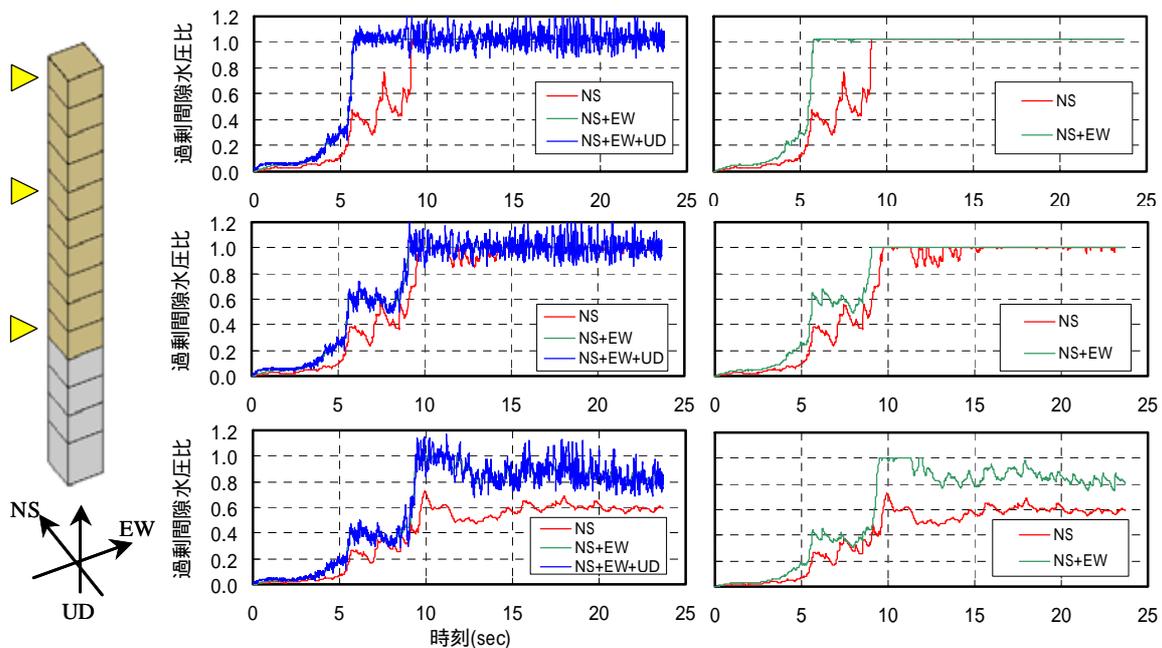


図 18 自由地盤の応答解析結果による多方向入力の効果 (入力波 十勝沖地震・八戸波)

d) 結論ならびに今後の課題

- 1)非液状化層（碎石層）と密詰め砂（相対密度 80%相当）からなる二層地盤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（125Gal、250Gal）行った。
- 2)非線形解析では解析モデルに用いる FEM 解析のメッシュ形状により解析結果の違いが生じる可能性がある。1G 場での有効土被り圧が小さい実験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違ってくる。これを適切に評価するためには、杭による地盤の排除体積分を考慮した FEM のモデル化が必要である。杭の排除体積分をそのままモデル化する場合や、または集中応力により局所破壊が生じないようにメッシュサイズを適切に広げる等の措置が考えられる。
- 3)ほぼ全層が液状化する様な場合には土層全体の破壊が進行するため、メッシュサイズの違いによる集中応力の発生の差異が杭の応答に与える影響は小さかった。実物大の地盤 - 杭 - 建物系の三次元解析を行う際に最低限必要となるメッシュサイズの定量的な評価手法の構築や、適切な境界条件の設定方法の開発が望まれる。

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
- 3) 田中幸久：礫の工学的性質と液状化地盤への適用に関する研究

f) 成果の論文発表・口頭発表等

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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 16 年度業務計画案

(a) 平成 15 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 15 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 15 年度に作成した解析モデルとの差異を確認する。
- 2)3 次元 FEM 解析を用いて、杭 - 地盤 - 建物連成振動系をシミュレーションする際に、精度の高い解析を行うために最低限必要となるモデル化に関する目安の設定を行う。

(c) 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。

- 1)平成 16 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)シミュレーション結果と実験との比較により、3 次元 FEM 解析によるシミュレーションの精度を検証し、実構造物への適用に関して検証する。
- 3)3 次元 FEM 解析を用いて、杭 - 地盤 - 建物連成振動系の解析を行う場合の留意点をまとめる。