

3.3.8 地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予測解析
(水平地盤中の杭基礎解析、その 1)

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2 カ年の年次実施計画
- (e) 平成 1 7 年度業務目的

(2) 平成 1 7 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) 解析ケース
 - 3) 地盤のモデル化
 - 4) 固有値解析結果
 - 5) 地震応答解析と入力波
 - 6) 地震応答解析結果
- (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 1 8 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 地盤・基礎実験における三次元数値シミュレーションによる実験の予備解析（水平地盤中の杭基礎解析、その1）

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
清水建設（株）技術研究所	上席研究員	大槻 明	ohts@shimz.co.jp
清水建設（株）技術研究所	主任研究員	福武毅芳	kiyoshi.fukutake@shimz.co.jp

(c) 業務の目的

最新の解析手法により実物大の杭基礎構造物が破壊するまでの過程を三次元条件下の解析で予測し、構造物の耐震性の向上に役立てることを主目的とする。また、E-ディフェンスによる実験条件として、適切な加振波の選択と最適な液状化実験の条件や、群杭基礎の加振方向の影響および三次元効果を検討し、防災科研殿が目標としている「数値震動台」の一部となる地盤の三次元数値シミュレーション手法（有効応力解析を含む）の開発・高度化に資するデータとする。

(d) 2 カ年の年次実施計画

1) 平成17年度：

乾燥砂地盤における群杭模型を対象として、大加振時の挙動を解析し、杭の損傷を評価する。また入力地波は水平1方向加振に加え、水平2方向加振、さらに上下動も考慮した3方向を考慮し、その影響が応答性状や杭の損傷に及ぼす効果を検討する。

2) 平成18年度：

飽和砂地盤における群杭模型を対象として、大加振時の挙動を解析し、杭の損傷を評価する。また入力地波は水平1方向加振に加え、水平2方向加振、さらに上下動も考慮した3方向を考慮し、その影響が液状化の程度や杭の損傷に及ぼす効果を検討する。

(e) 平成17年度業務目的

本業務の目的は、解析によって実験に適切な入力レベルやフーチング根入れの有無について事前検討する。その結果、模型実験において杭が損傷する入力レベルや加振方向、フーチング根入れの有無、地盤剛性などを想定することにある。

実施にあたっては、まず三次元FEMにより、実験模型をモデル化し、固有値解析ならびに地震応答解析を種々の条件で実施する。着眼点は、地盤の剛性(1次固有周期)、加振入力方向の影響、杭体の非線形の影響(M-関係) フーチング埋込みの有無の影響、などである。

解析は以下の手順で実施した。1) 解析対象の三次元有限要素法(FEM)によるモデル化。2) 地盤材料定数(非線形パラメータ)の設定。3) 固有値解析による解析モデルの基本特性の把握。4) 地震応答解析による上述した ~ の実験条件の想定。

(2) 平成 17 年度の成果

(a) 業務の要約

本業務の目的は、解析によって実験に適切な入力レベルやフーチング根入れの有無について事前検討し考察することにある。その結果、模型実験において杭が損傷する入力レベルや加振方向、フーチング根入れの有無、地盤剛性などを想定し、その条件下における地震時応答を詳細に検討する。

実施にあたってはまず、三次元非線形 FEM により、実験模型をモデル化し、固有値解析ならびに地震応答解析を種々の条件で実施する。着眼点は、地盤の剛性(1 次固有周期)、加振入力方向の影響、杭体の非線形の影響 (M - 関係) フーチング埋込みの有無の影響、などである。

解析結果より以下の成果を得た。

- ・地盤の相対密度を 70~80%とした場合、1 次固有周期は 8Hz~10Hz となる。
- ・フーチング根入れが無いモデルに鷹取波の原波を 3 方向入力した場合、杭頭と GL - 1.5m 付近の 2 箇所損傷した(これは実験結果とも整合する)
- ・フーチング根入れが有るモデルでは無いモデルに比べて杭応力は非常に小さく、大加振時でも杭は損傷しなかった。
- ・3 方向入力した場合と水平成分を 2 方向入力した場合とでは、応答に顕著な差異は見られなかった。水平 1 方向入力と 2 方向入力では差異は見られた。

(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

模型全体をせん断土槽リングも含めて三次元 FEM でモデル化した。地盤は六面体ソリッド要素を用い Ramberg-Osgood モデルで表現した。非線形パラメータは動的変形試験結果による $G/G_0 \sim$, $h \sim$ 関係より設定した。杭体ははり要素と杭自体の体積を考慮してモデル化した。杭体の非線形特性 (M - 関係) はファイバーモデルを用いてノーマルトリリニアアモデルとした。メッシュ分割は、3.3.9 節と同じである。初期応力は自由地盤(一次元地盤)の自重解析で K_0 値を 0.5 として求めた。

2) 固有値解析

清水建設株式会社保有の三次元非線形有限要素プログラム HiPER^{1), 2)}を用いて行った。このときせん断土槽リングの影響についても検討した。

3) 地震応答解析

清水建設株式会社保有の三次元非線形有限要素プログラム HiPER^{1), 2)}を用いて行った。加振入力方向の影響、杭体の非線形の影響 (M - 関係) フーチング埋込みの有無の影響に着目して検討した。

(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

三次元 EFM の概要を図 1 に示す。メッシュ分割は 3.3.9 節と同じである。以下に解析条件を示す。

a) 側方境界と土槽せん断リング

側方境界は、周面水平変位(x, y 変位)が同変位条件になるように、剛な梁要素を設定した。表面に付いている緑の線部材が剛な梁要素である。せん断土層の重量は、側面の全節点に振り分けて設定した。

b) 構造物のモデル化

i) 杭のモデル化

杭は、梁要素でモデル化した。長さは 5.516m で杭下端はピンとした。杭体積を考慮するため、地盤中に直径 152mm の円筒に外接する八角柱の空洞(杭による排除体積に相当)を作る。そして図 2 に示すように、杭をはり要素でモデル化し、同一深度にある地盤の角柱内のり節点とはり要素の節点とを同変位条件で結ぶ。このとき、断面内で平面保持を満足するように、MPC 機能を用いて周りの地盤要素と線形結合関係する³⁾。線形結合は同図の「方法 2」を採用した。「方法 1」では曲げモーメント分布が不連続となるが、「方法 2」では連続になるためである。

表 1 には杭に用いたはり要素の断面定数を示す。

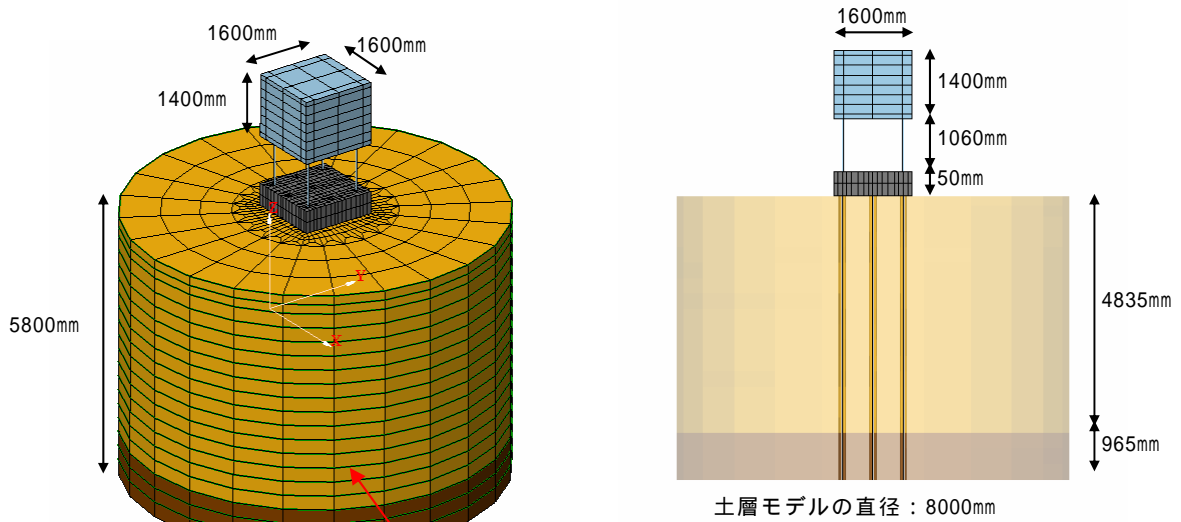
表 1 杭に用いたはり要素の断面定数

	記号	値	単位	備考
ポアソン比		0.25		
ヤング率	E	2.10E+08	kN/m ²	
せん断弾性係数	G	84000000	kN/m ²	
単位体積重量		77.0	kN/m ³	
杭径		152.4	mm	1
肉厚	t	2.0	mm	1
断面積	A	9.4499E-04	m ²	2
断面2次モーメント	I	2.6725E-06	m ⁴	2
ねじりモーメント	J	5.3449E-06	m ⁴	2
断面2次モーメント	I'	2.4830E-06	m ⁴	3

1 鋼管杭 メッシュモデルでは $t=150\text{mm}$ となっているが、そのままとした。

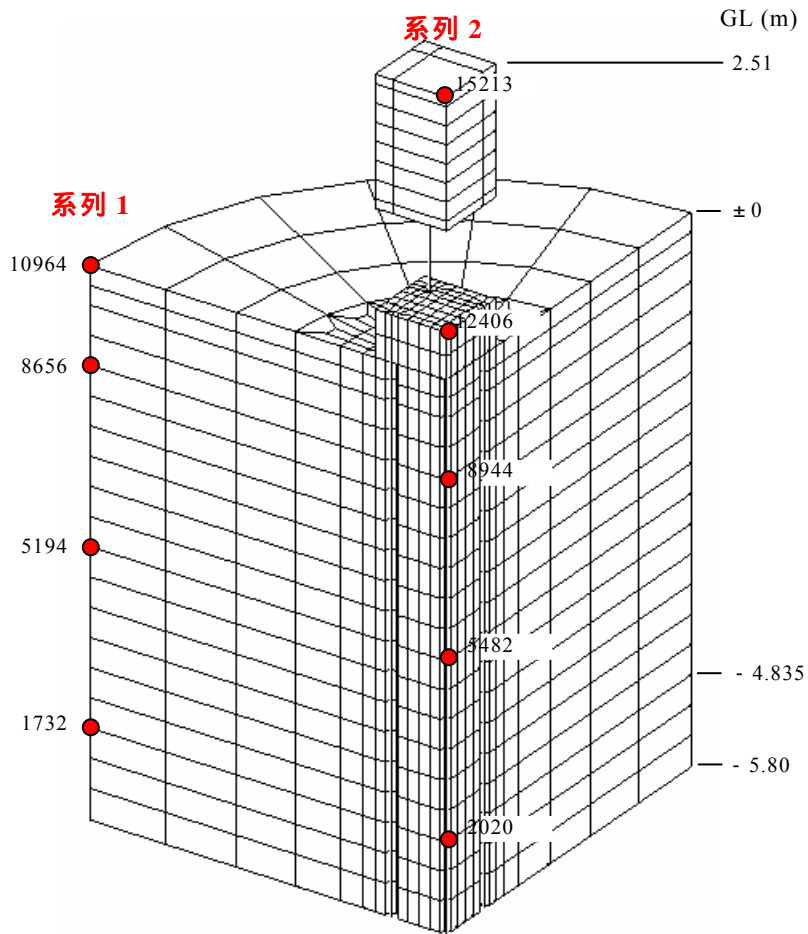
2 断面諸元は、実際の寸法 ($d=152.4\text{mm}$) で算出。

3 M- 関係から算出。



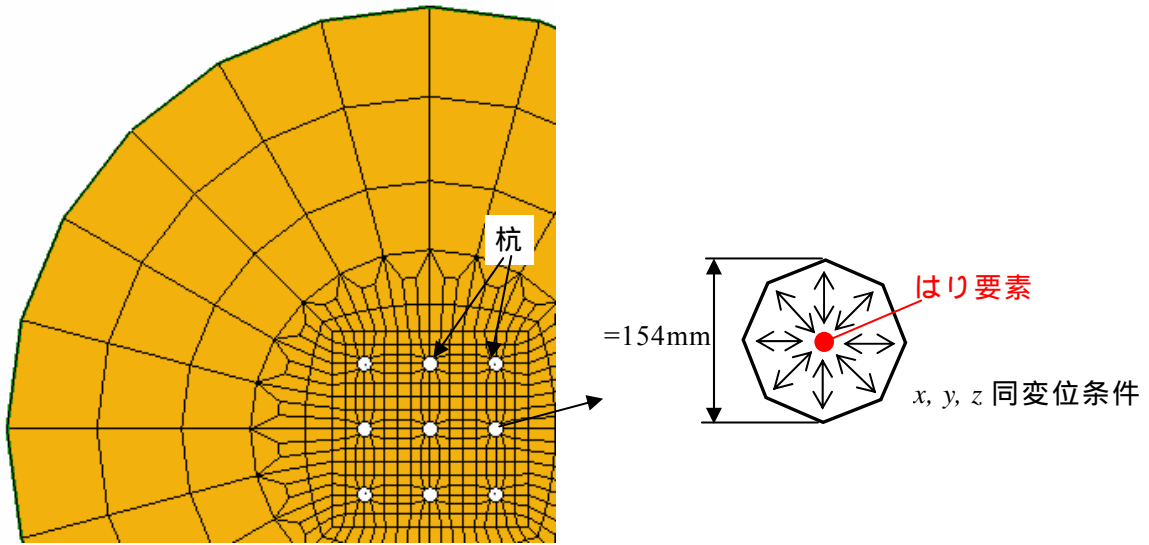
側面：周面変位が同変位条件になるように、剛な梁要素を設定。表面に付いている緑の線部材が剛な梁要素。

(a) FEM 全体モデルと側方境界

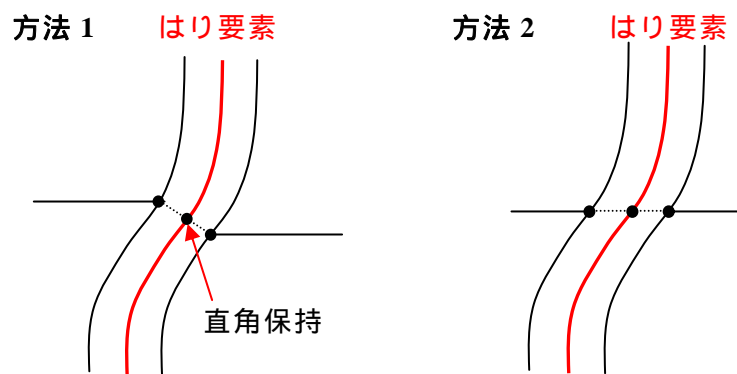


(b) 1/4 切断面と時刻歴出力箇所 (印)

図 1 三次元 FEM による解析モデル



(a) ソリッド要素に八角形の円筒状の穴を作りその中心にはり要素を設置



(b) はり要素とソリッド要素の結合方法（方法 2 を採用）

図 2 杭の体積を考慮したモデル化

表 2 軸力 42.0kN 下での M- 関係

	記号	値	単位	備考
第一折れ点	M1	7.300	kN・m	1
	1	0.014	1/m	
第二折れ点	M2	9.540	kN・m	2
	2	0.022	1/m	
第三折れ点	M3	10.750	kN・m	3
	3	0.064	1/m	
初期剛性	M1/ 1	521.43	kN・m ²	
	E・I	561.22	kN・m ²	
M- 換算断面2次	I	2.4830E-06	m ⁴	
降伏後の勾配率	1	0.53699		
	2	0.05525		

- 1 鋼管圧縮縁降伏時の曲げモーメント：圧縮側の縁応力が 259 N/mm²。
 - 2 鋼管引張縁降伏時の曲げモーメント：引張側の縁応力が 259 N/mm²。
 - 3 鋼管圧縮縁におけるひずみが式(1)の ϵ_s' に達した時の曲げモーメント(局部座屈)
- SKK400 降伏 (パイリニャーでの折れ点): 235N/mm² 短期許容応力の場合は「ばらつき」を考慮して 1.1 倍となるので、 $\sigma_a = 235 \times 1.1 = 259 \text{ N/mm}^2$ となる。

杭の非線形特性は、平面保持を仮定しファイバーモデルにより断面解析を実施して M- 関係を図 3 のように設定した。(さびしろ 1mm を考慮) 変動軸力の影響は無視し、常時の断面力として、軸力 42.0kN を与えた。履歴則はノーマルトリリニアーとした。終局状態を超える領域はそのままの勾配で延長して解析した。

$$\epsilon_s' = 0.44t/D \tag{1}$$

ここで、 ϵ_s' は鋼管の局部座屈の限界ひずみに対応する^{4), 5)}。

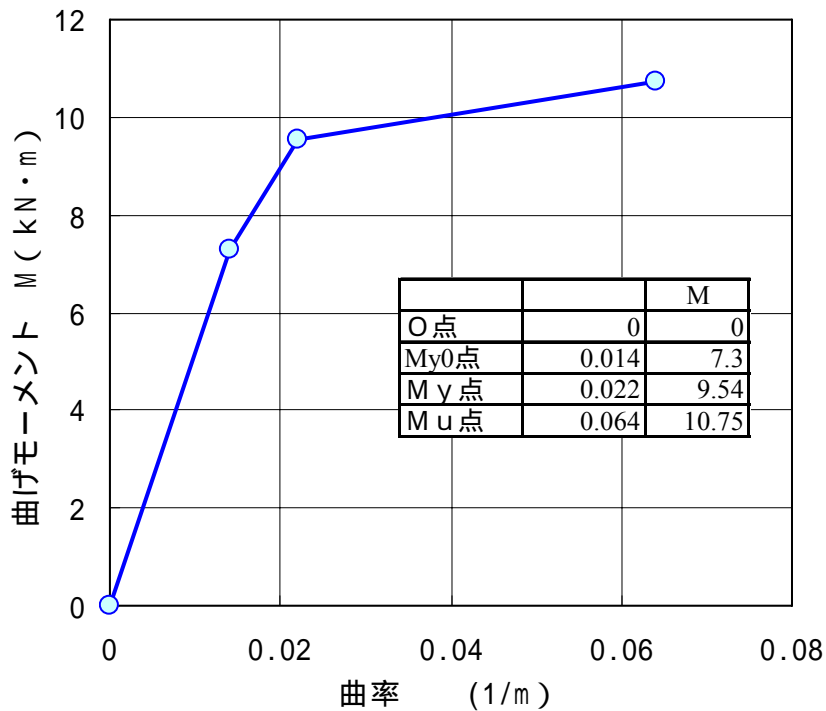


図 3 鋼管杭の M- 関係 (ノーマルトリリニアー)

ii) 上部構造物、柱、フーチングのモデル化

上部構造物、柱、フーチング(1600mm×1600mm、高さ 500mm)の諸元を表 3～5 に示す。上部構造物は柱下端固定条件で固有周期は 14Hz である。

杭～上部工柱の結合条件は、杭・上部工の柱がフーチングで剛結にするために、フーチングに 1 要素埋め込んでモデル化する。但し、上記の節点は、柱と杭が結合されているため、ピンの条件とする。(図 4(a)の緑の点)

表 3 上部構造物ウエイト(1600mm×1600mm、高さ 50mm)の諸元

	記号	値	単位
ポアソン比		0.25	
ヤング率	E	2.10E+08	kN/m ²
せん断弾性係数	G	84000000	kN/m ²
単位体積重量		77.0	kN/m ³

表 4 上部構造物(高さ 1060mm(フランジ 30mm + 柱 1000mm + フランジ 30mm))の諸元

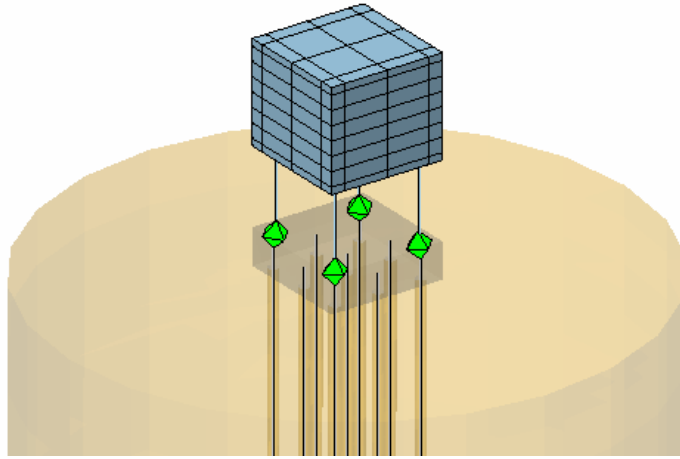
	記号	値	単位
ポアソン比		0.25	
ヤング率	E	2.10E+08	kN/m ²
せん断弾性係数	G	84000000	kN/m ²
単位体積重量		77.0	kN/m ³
外径		267.4	mm
肉厚	t	5.8	mm
断面積	A	4.7667E-03	m ²
断面2次モーメント	I	4.0796E-05	m ⁴
ねじりモーメント	J	8.1591E-05	m ⁴

表 5 フーチング(1600mm×1600mm、高さ 500mm)の諸元

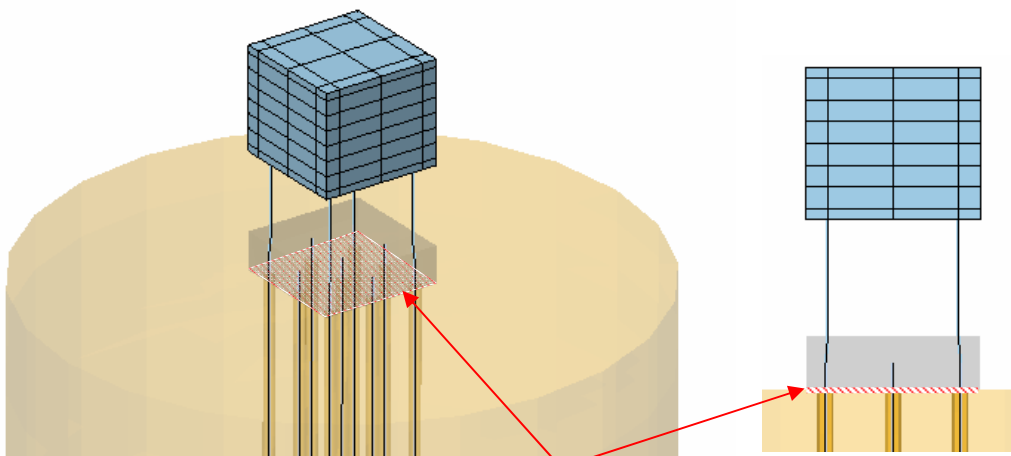
	記号	値	単位
ポアソン比		0.25	
ヤング率	E	2.10E+08	kN/m ²
せん断弾性係数	G	84000000	kN/m ²
単位体積重量		77.0	kN/m ³

iii) 減衰

減衰は、剛性比例減衰で評価し、地盤と構造物は別々の係数を使用した。構造物は、構造物だけの固有値解析より、1 次振動数 (14Hz) で 1% になるように設定した。地盤は、1 次元の地盤の固有値解析より、1 次振動数 (10Hz) で 0.2% になるように設定した。これは加速度波形にひげ上の高振動成分を取除くためである。



(a) 柱と杭の結合：ピン



フーチングと地盤は独立：不連続
杭頭節点とフーチング節点は連続

(b) フーチング底面と地盤の境界条件

図4 フーチングに関するモデル化

2) 解析ケース

実施した解析ケースを以下に示す。

- ・地盤のみの解析
- ・フーチングの埋込みがある場合と無い場合
- ・フーチングの埋込みが無い場合で、NS成分、NS+EW成分、NS+EW+UD成分
(これが本解析の中心ケース)
- ・フーチングの埋込みが無い場合で、杭体が線形の場合と非線形の場合
(入力は、NS成分、NS+EW成分、NS+EW+UD成分)

3) 地盤のモデル化

地盤(アルバニー珪砂)の基本物性を表 6 に示す。表層のせん断弾性係数については、1 柱モデルの固有値解析を実施し、地盤の 1 次固有振動数が、8.5Hz になるように設定した。表層の相対密度 D_r は約 70% である。初期応力は自由地盤(一次元地盤)の自重解析で K_0 値を 0.5 として求め、三次元モデルの同じ深度の要素に用いた。すなわち初期せん断応力は作用していない。

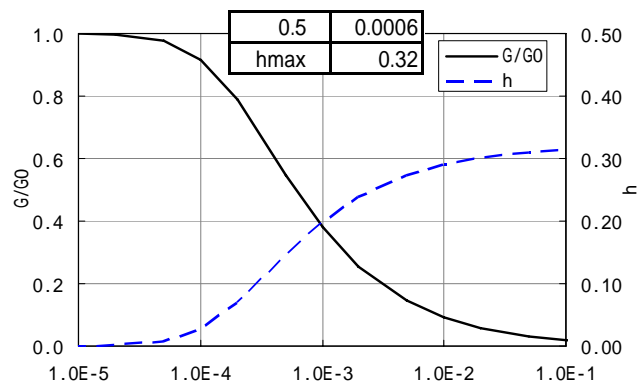
表 6 地盤構成とアルバニー珪砂の基本物性

No	深さ (m)	層厚 H (m)	物性区分	ポアソン比	せん断弾性 係数 G (kN/m ²)	単位 体積重量 (kN/m ³)	せん断波 速度 Vs (m/s)	鉛直応力 v (kN/m ²)
1	-4.835	4.84	表層	0.33	57196	17.3	180.0	41.8
2	-5.800	0.97	支持層	0.33	165306	18.0	300.0	92.3

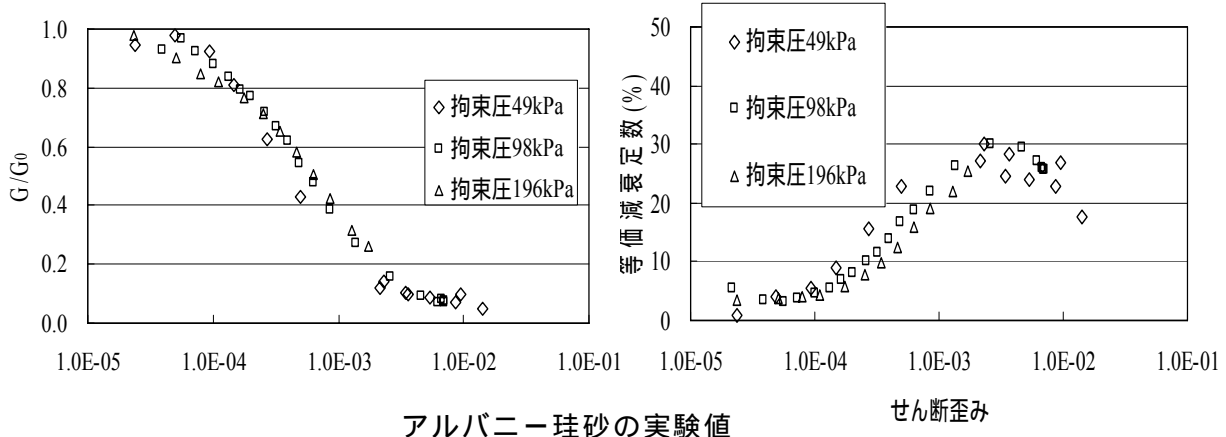
地盤の非線形特性は、三次元に拡張した Ramberg-Osgood(R-O)モデル^{2), 6)}により表現した。その土質パラメータを表 7 に示す。このうち基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ と最大減衰定数 h_{max} は砂試料の動的変形試験結果である $G/G_0 \sim h \sim$ 関係へのフィッティングより求めた。試験結果とフィッティング状況を図 5 に示す。初期せん断剛性 G_0 と基準ひずみ $\epsilon_{0.5}$ は有効拘束応力 σ'_m の 0.5 乗に比例する。よって表中の G_0 と $\epsilon_{0.5}$ は、1.0kN/m² の値(G_{0i} 、 $\epsilon_{0.5i}$)を示している。また G_0 は V_s より算出した値を土層モデルの層中心の平均有効応力での値として算出した。

表 7 地盤の構成式のパラメータ

No	R-Oモデルのパラメータ		
	最大減衰 定数 hmax	基準ひずみ $\epsilon_{0.5i}$	せん断弾性 係数 Goi (kN/m ²)
1	0.32	0.00006	10832
2	0.32	0.00006	21070



R-O モデルによる曲線



アルバニー珪砂の実験値

せん断歪み

図 5 $G/G_0 \sim h \sim$ 関係

4) 固有値解析結果

全体モデルの固有値解析結果を表 8 と図 6 に示す(モード減衰 0.02)。1 次モードは地盤の 1 次周期が卓越するモードで、4 次モードは上部構造物が卓越するモードである。またせん断土層リングの重量の影響は小さいことがわかる。これは既往の論文⁷⁾で述べられている「地盤とせん断土層リングの重量の比が 7:1 以上離れていれば応答に影響が無い」と整合している。

表 8 全体モデルの固有値解析結果

(a) せん断土層の重量を考慮

モード 次数	振動数 (Hz)	周期 (Sec)	有効質量比		
			水平 X方向	水平 Y方向	鉛直 Z方向
1	5.753	0.174	0.020	0.566	0.000
2	5.754	0.174	0.566	0.020	0.000
3	8.346	0.120	0.000	0.000	0.000
4	9.428	0.106	0.002	0.090	0.000
5	9.428	0.106	0.090	0.002	0.000

(b) せん断土層の重量を無視

モード 次数	振動数 (Hz)	周期 (Sec)	有効質量比		
			水平 X方向	水平 Y方向	鉛直 Z方向
1	5.884	0.170	0.481	0.095	0.000
2	5.884	0.170	0.095	0.481	0.000
3	8.904	0.112	0.000	0.000	0.000
4	9.571	0.105	0.109	0.000	0.000
5	9.572	0.105	0.000	0.109	0.000

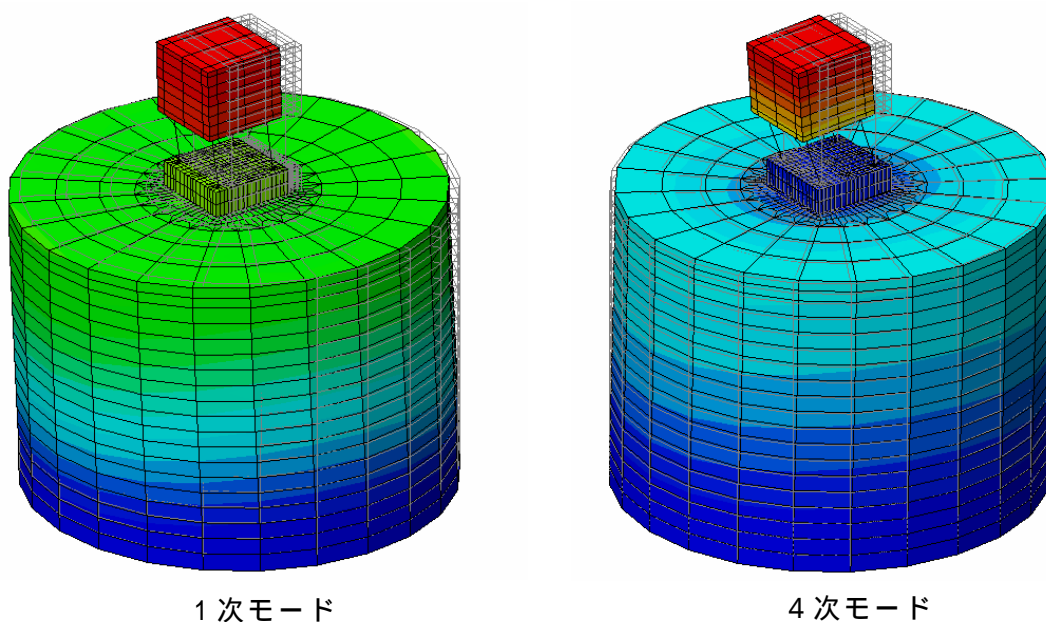


図 6 せん断土層リングの重量を考慮したモード図

5) 地震応答解析と入力波

地震応答解析は三次元非線形有限要素プログラム HiPER^{1), 2)}を用いて行った。解析の積分時間間隔は 0.002 秒であり、時間積分は Newmark の法を用いた。非線形の収斂方法は初期剛性法である。

入力地震波は、図 7 に示す実験の最後の加振で予定されている兵庫県南部地震の JR 鷹取で観測された加速度(原波)である。振幅の大きな 10 秒間を入力した。(試し解析で 15 秒間入力しているが、応答の最大値は 10 秒以降では生じていない)

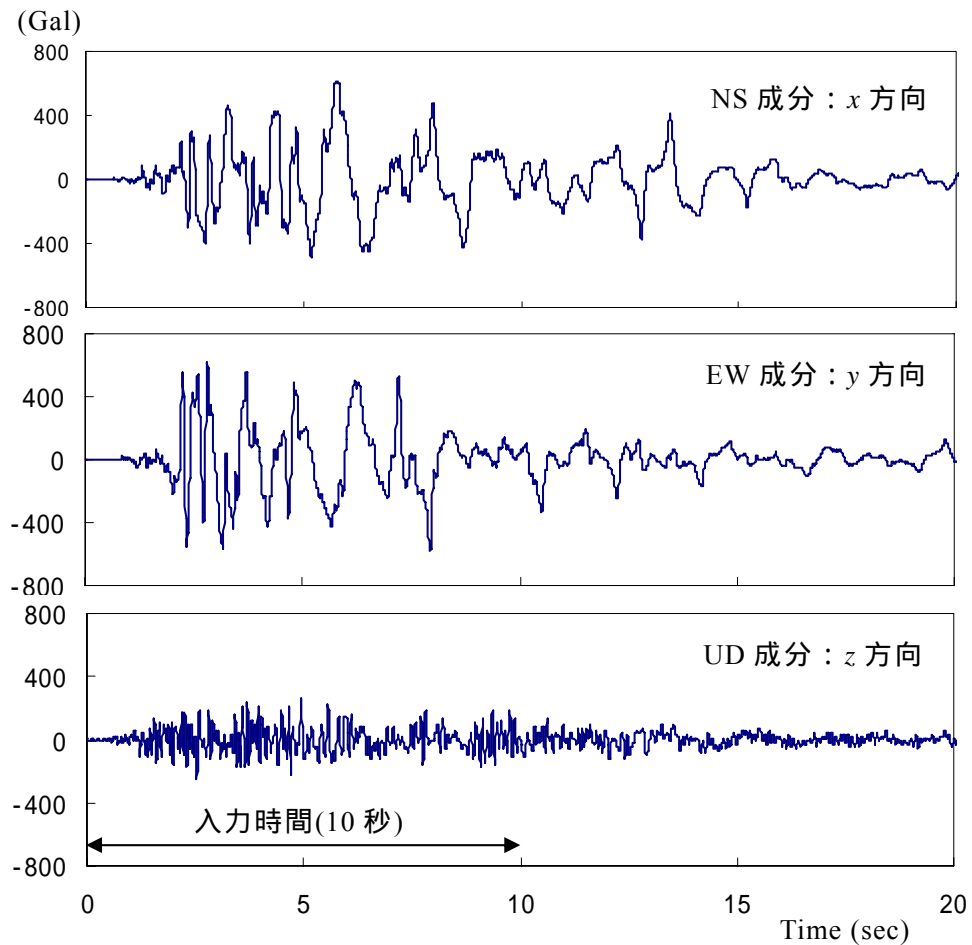


図 7 入力地震波 (JR 鷹取の観測記録)

6) 地震応答解析結果

図 8 には最大水平加速度の深度分布を示す。応答値は、 x 方向(NS 成分)より y 方向(EW 成分)の方が大きい。地盤(系列 1)の加速度は表層付近で増幅しており、この傾向は入力方向に依存しない。モデル中心位置(系列 2)における加速度は、深度 5m 付近の杭上部で差異が見られる。これは波形に現れるひげ状の短周期成分のためである。応答の大きさは、1 方向加振が最も小さいが、3 方向加振の方が 2 方向加振よりも小さくなっている。フーチングから上の上部構造物の増幅はあまり小さくなく、入力方向の影響も小さい。応答値は、 x 方向(NS 成分)より y 方向(EW 成分)の方が大きい。

図 9 には最大水平変位の深度分布を示す。応答値は、 x 方向(NS 成分)より y 方向(EW 成分)の方が大きい。地盤(系列 1)の x 方向の分布を見ると、1 方向加振が僅かに小さくなっているが、大きな差異は見られない。モデル中心位置(系列 2)における x 方向変位は、1 方向加振が最も小さく、2 方向と 3 方向の差異はない。 y 方向変位は 3 方向加振の方が 2 方向加振よりも小さくなっている。地表の最大変位は地盤 x 方向で 6cm、 y 方向で 7cm である。基礎近傍では x 方向で 7cm(1 方向加振)と 9cm(2 方向・3 方向加振)、 y 方向で 11.5cm(3 方向加振)と 13cm(2 方向加振)である。基礎近傍では遠方地盤(系列 1)より大きな変位を示しており、基礎～建屋系の震動が大きいことがわかる。

図 11 には隅杭と中央杭の曲げモーメント M の最大深度分布を示す。加振方向と M_y 、 M_z の関係や杭位置は、図 10 を参照されたい。 M は、 x 方向(NS 成分)加振による M_z より y 方向(EW 成分)加振による M_y の方が大きい。モーメント M の値が大きくなる箇所は 3 箇所あり、一番大きいのが杭頭で、次に杭頭から 1.5m 下の箇所、支持層と表層の境界部の順になっている。杭頭では全ての杭で局部座屈が生じている(第三折れ点を越えている)。杭頭から 1.5m 下の箇所に着目すると、1 方向加振では線形範囲に収まっている。2 方向と 3 方向加振では、第一折れ点を越えており、 y 方向の加振ではほぼ第三折れ点に近い状態になっている(M_y)。中央杭よりも隅杭の方が M は大きくなっている。これらの傾向は加振方向によらず共通している。加振方向に着目した M の大きさは、1 方向加振が最も小さいが、3 方向加振の方が 2 方向加振よりも小さくなっている。隅杭では 1 方向(x 方向)加振においても y 方向の M が生じている。

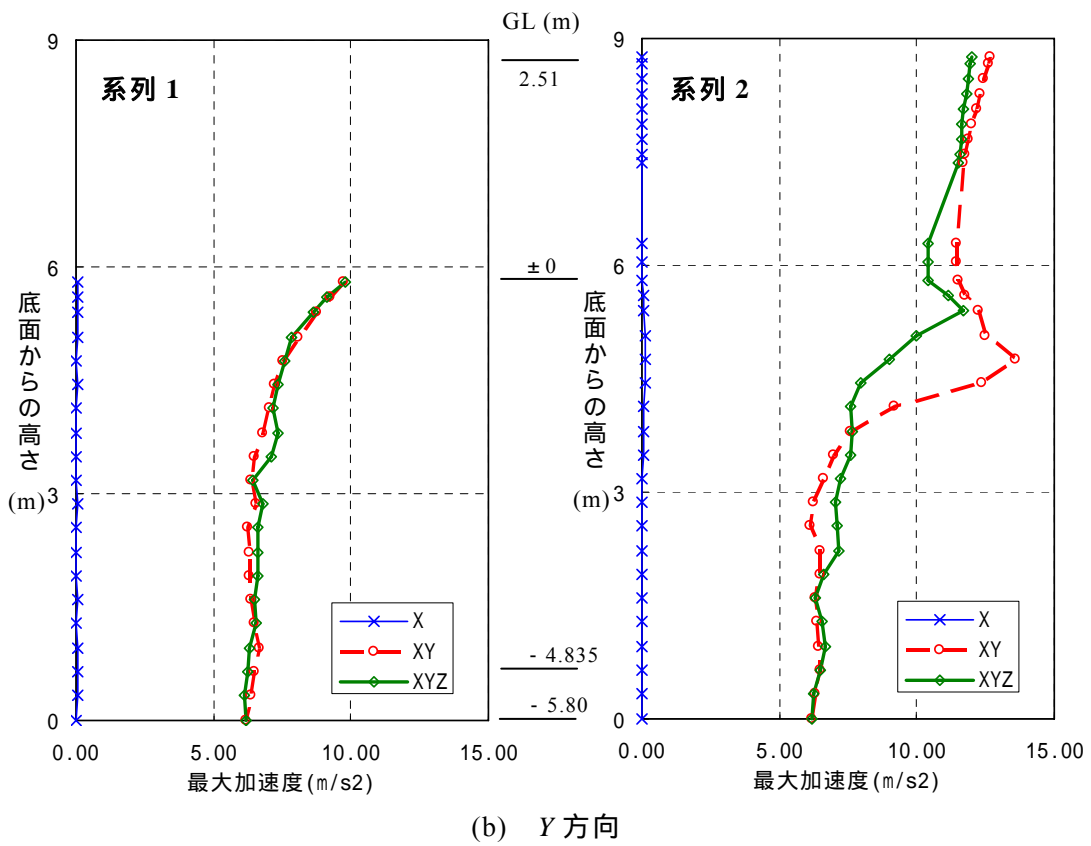
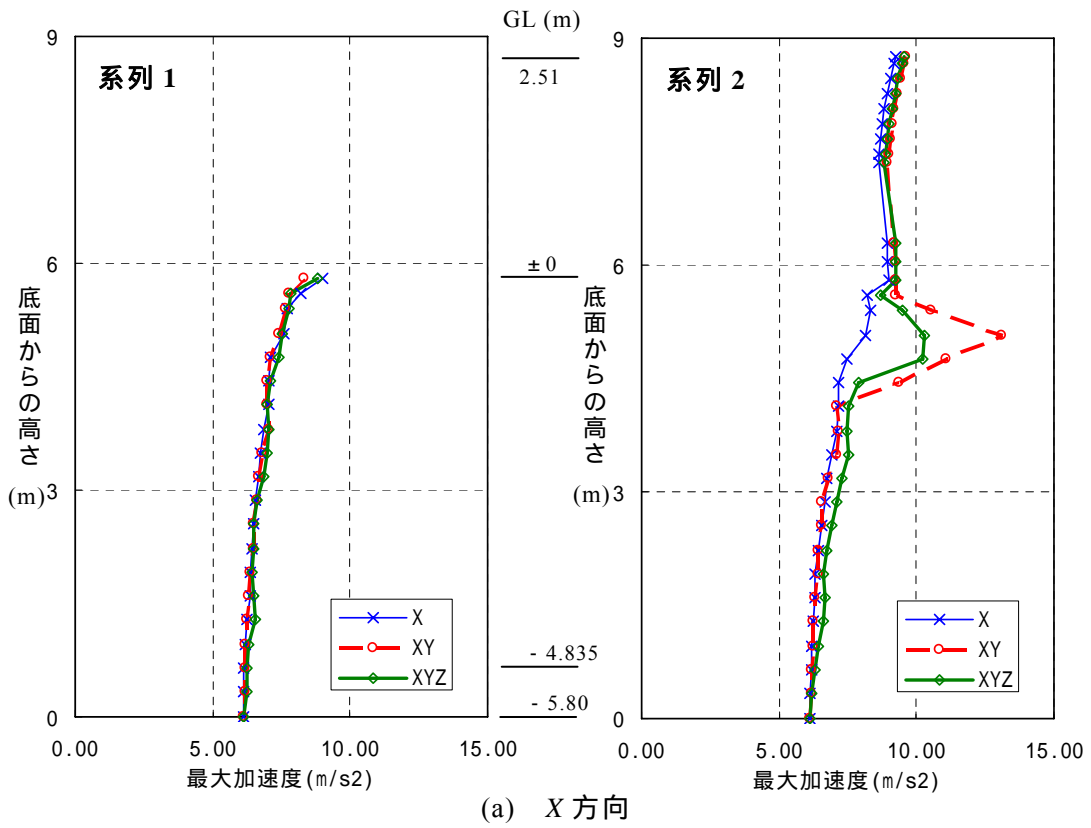


図 8 最大水平加速度の深度分布

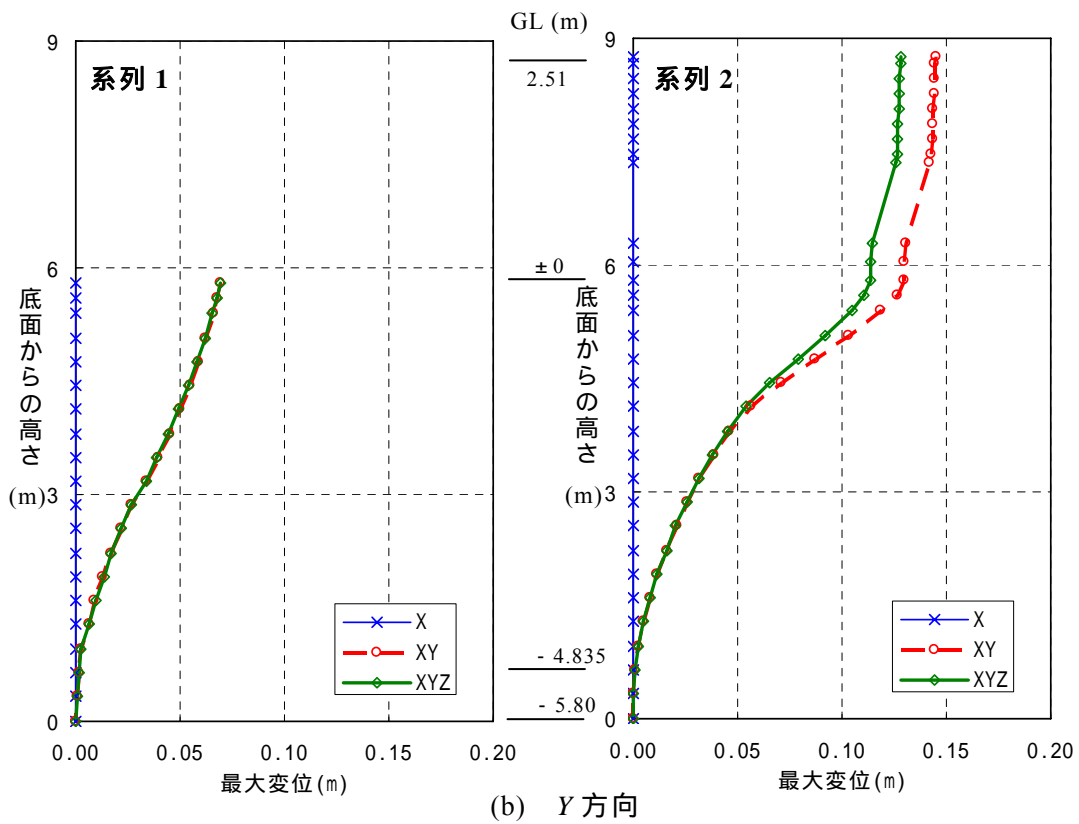
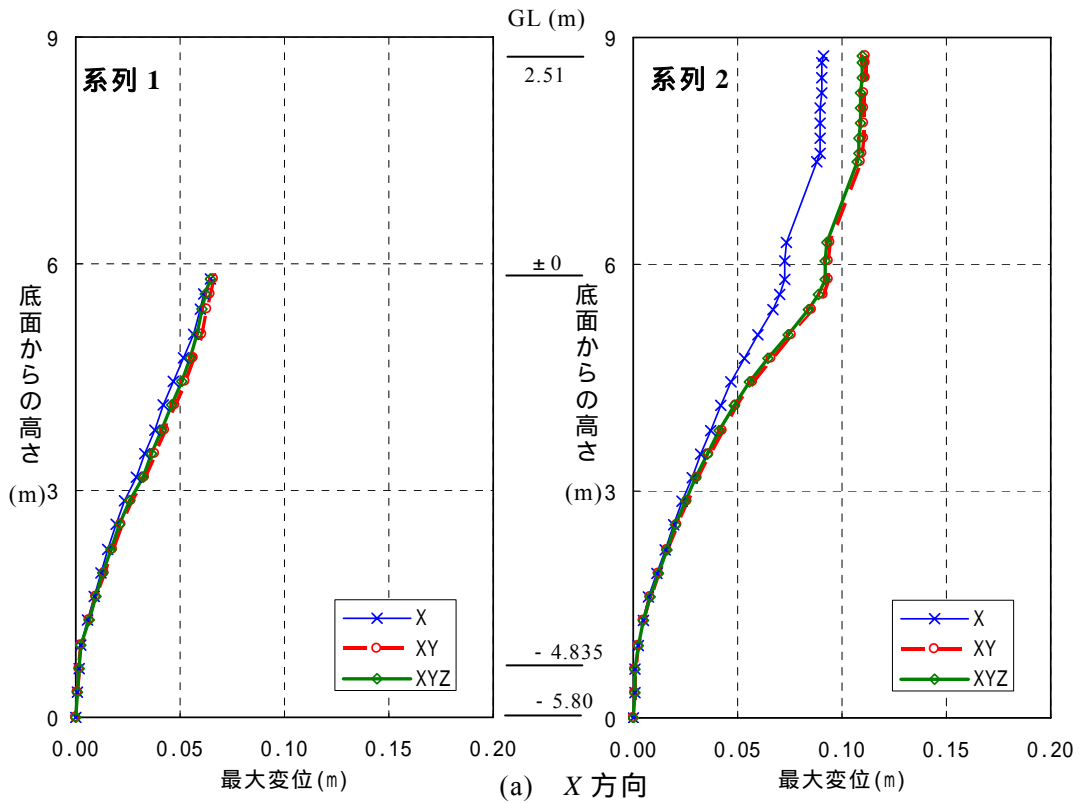
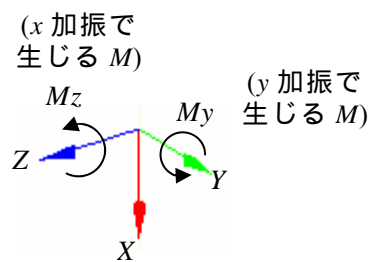
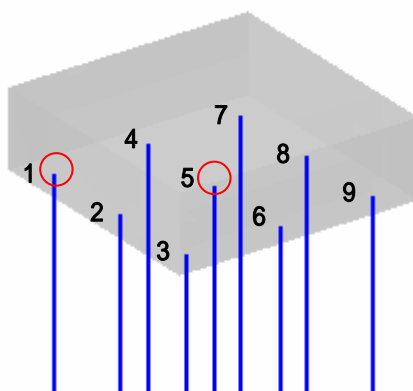
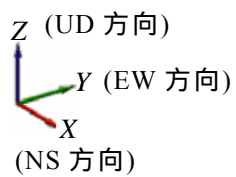


図 9 最大水平変位の深度分布

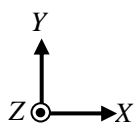
全体座標系



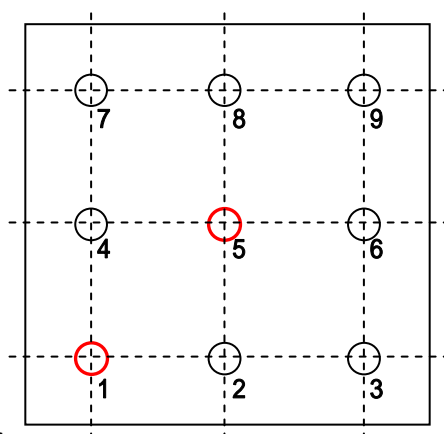
要素座標系

全体座標系

(EW 方向)

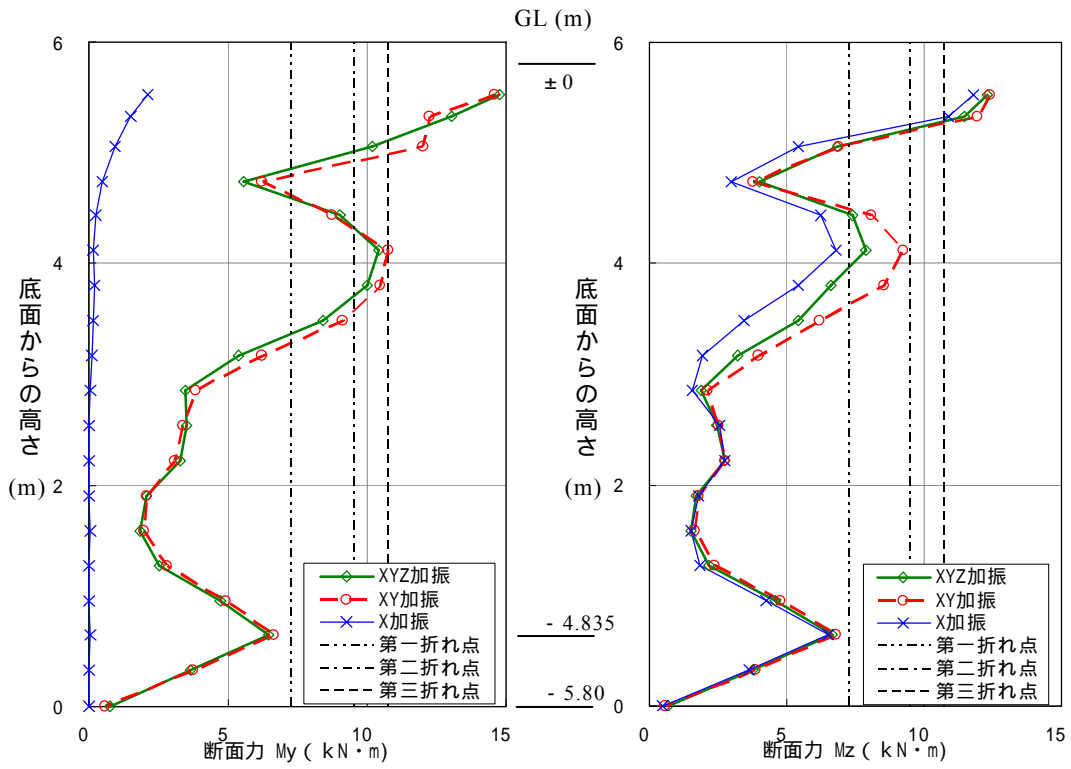


(UD 方向) (NS 方向)

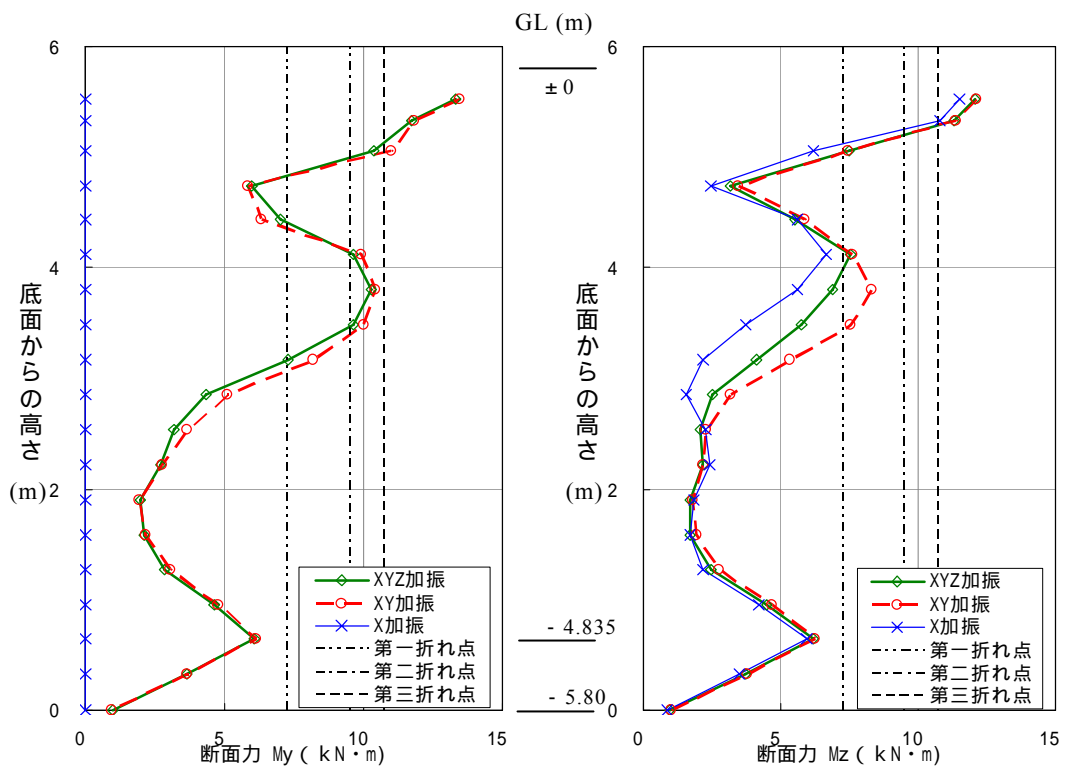


○ 深度分布着目杭

図 10 杭位置と要素座標系における曲げモーメントの定義



杭（偶杭）



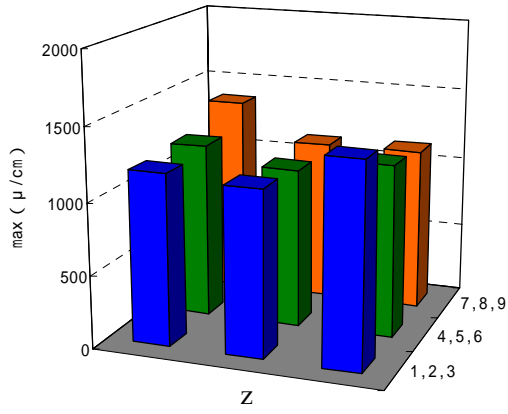
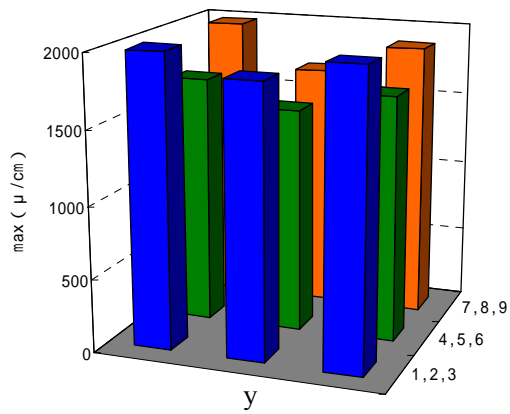
杭（中央杭）

図 11 杭の曲げモーメントの最大深度分布

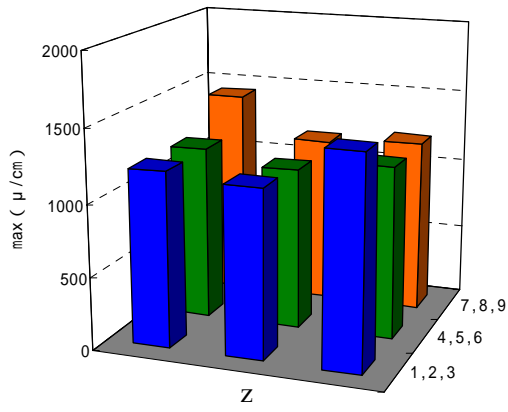
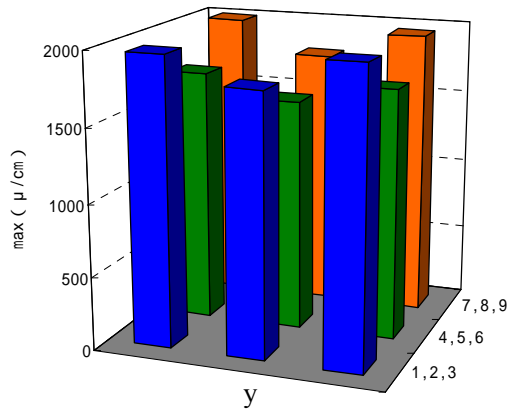
図 12 には各杭頭における最大曲率 を示す。隅杭で大きく中央杭で小さくなる傾向が見られるが、1 方向加振ではその傾向が小さい。

図 13 には 3 方向加振における杭頭の M - 関係を示す。履歴ループは対称ではなく、が正の方向へシフトしている。

・ XYZ 方向加振



・ XY 方向加振



・ X 方向加振

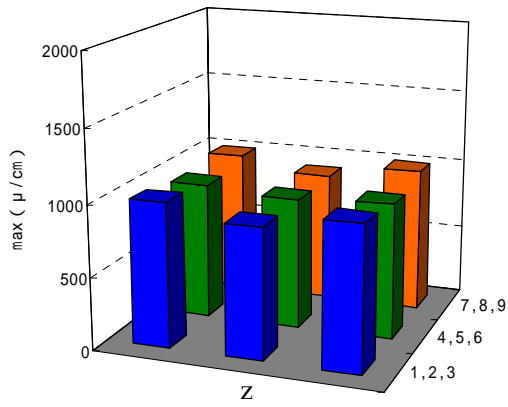
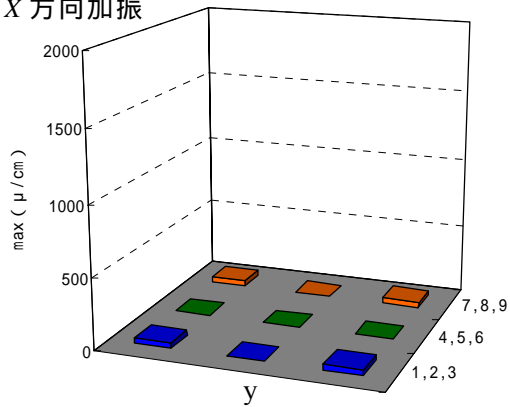


図 12 各杭頭における最大曲率

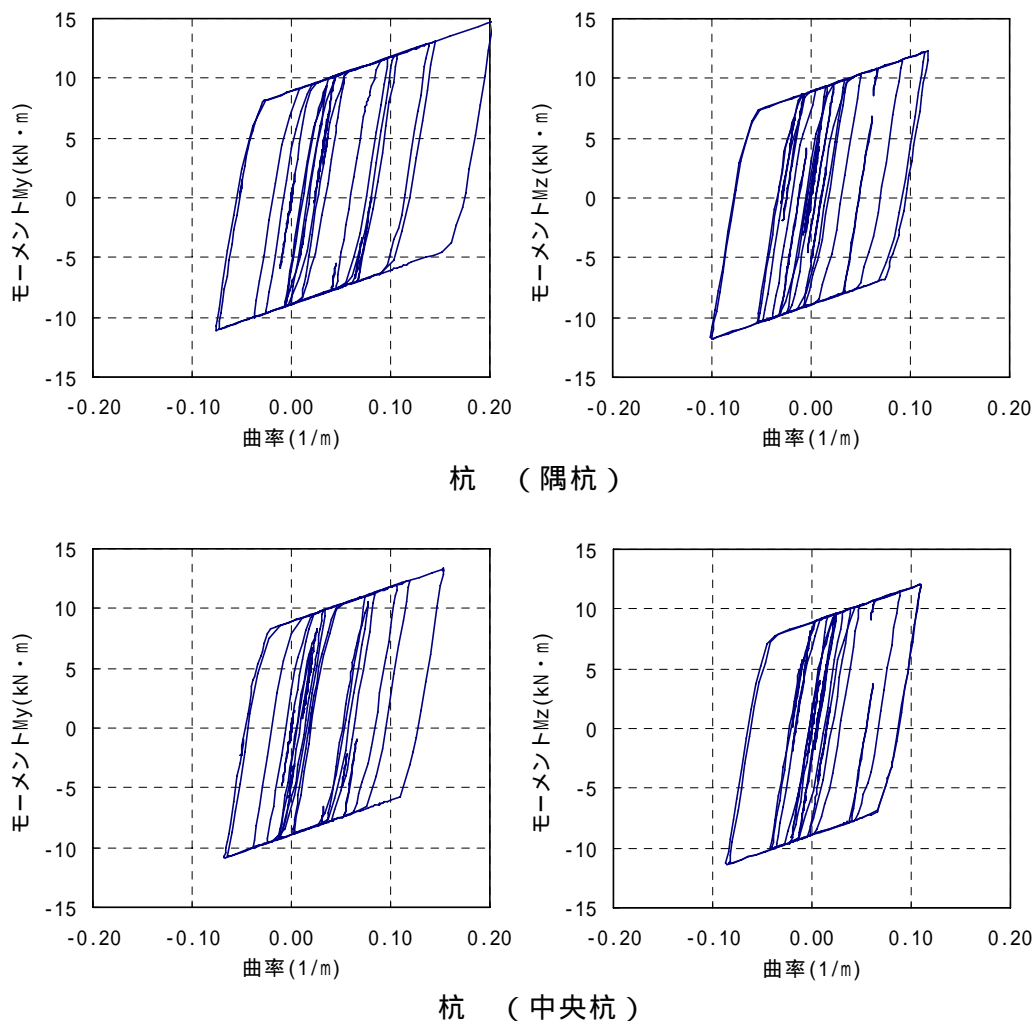


図 13 杭頭の M- 関係 (3 方向加振)

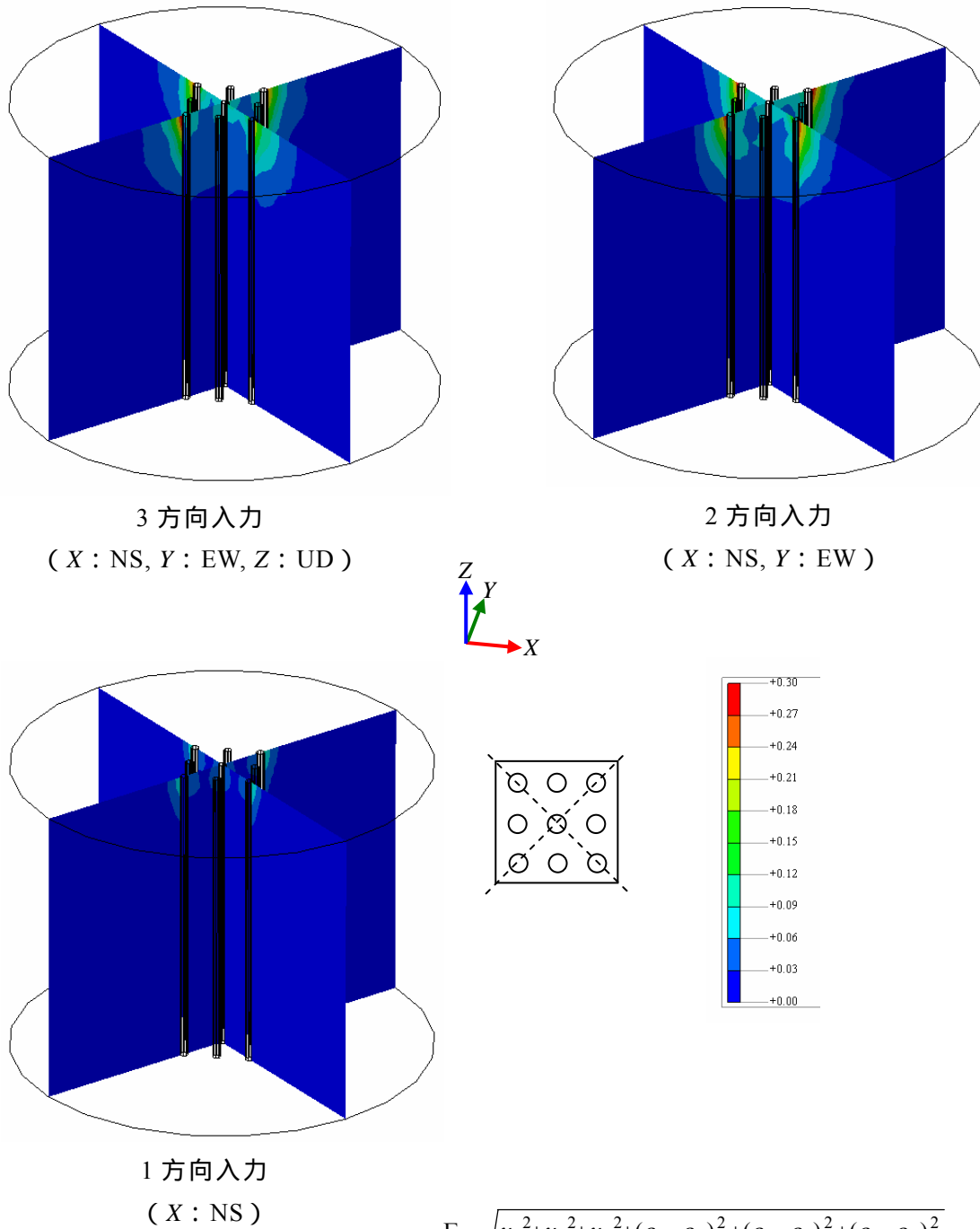
図 14 には合せん断ひずみ の最大値コンターを基礎対角線断面で切断したパネルダイヤグラム形式で示す。ここでは次式で表される。

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (2)$$

地盤のひずみは杭頭付近で局所的に大きくなっている。2 方向・3 方向加振では杭頭付近の外側近傍で特におおきなひずみが生じており、最大で =30%以上に達する。杭の間では小さい。1 方向加振では加振軸方向にやや大きなひずみが生じているが 2 方向・3 方向加振と比べると小さい。

図 15 の上方にはフーチンク近傍の地表面の合せん断ひずみ の最大値分布を示す。群杭近傍では地盤ひずみの大きさの分布は複雑である。隅杭の外側で最も値が大きく、は 30%以上に達している。次に大きい箇所が杭の外周に沿った部分である。杭の間や中心杭の近傍の地盤ではそれほど大きくない。杭の間では小さく杭頭付近でも 5%程度である。方向で見れば y 軸方向のひずみが大きい。同図の下方には、隅杭近傍におけるせん断応力 ~ せん断ひずみの履歴曲線を示す。図 16 に示す x 方向や y 方向の単純せん断ひずみ(ε_{zx}

γ_{zy} よりも、面内のせん断ひずみ γ_{xy} が卓越している。これは杭近傍では杭が地盤より大きく変位していることによる。以上の結果より、地盤水平ばねの寄与率を概算できる可能性がある。(今回は実施していない)



$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

図 14 合せせん断ひずみ の最大値コンター
(パネルダイヤグラムで表示)

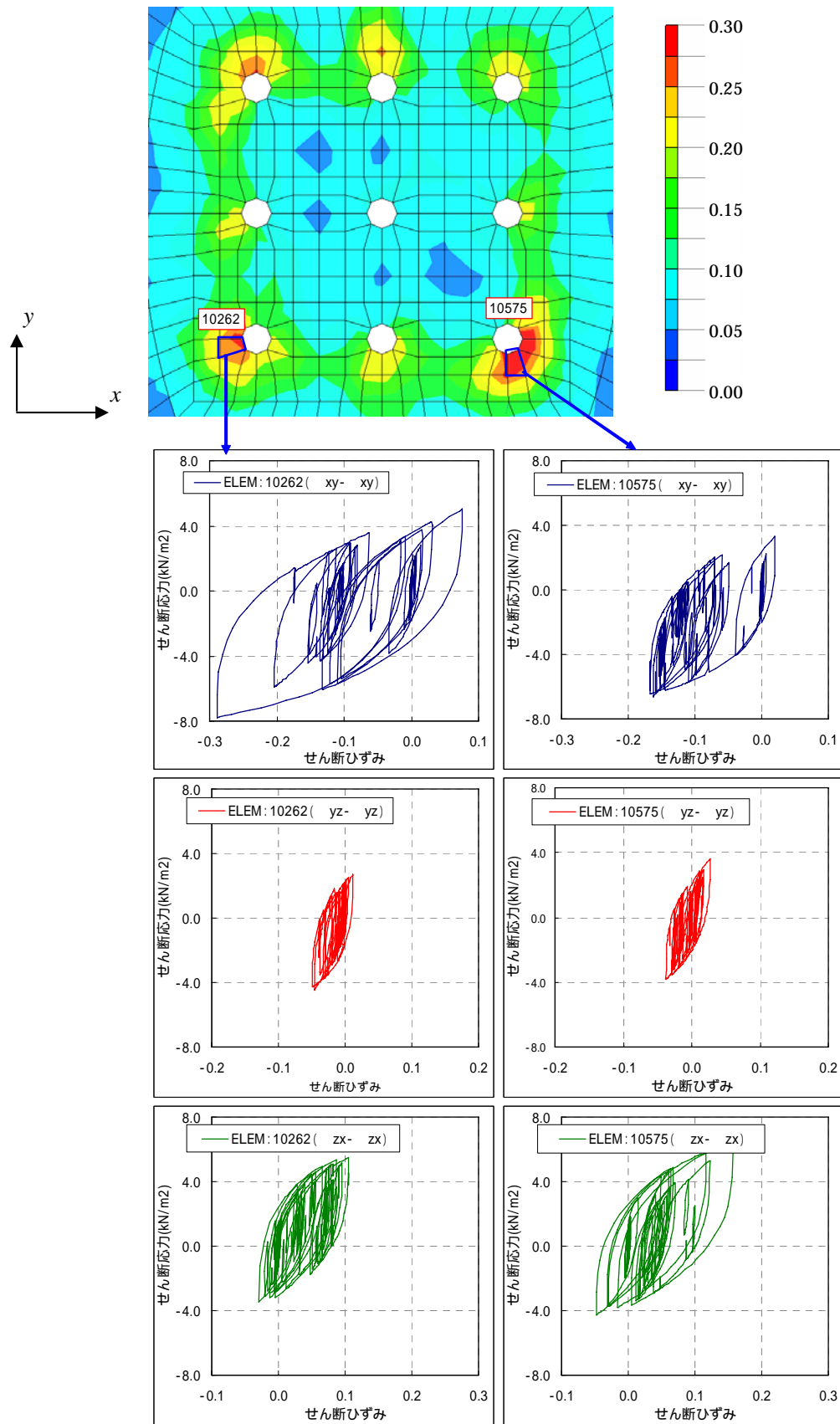


図 15 フーチンク近傍地表面の合せん断ひずみ の最大値分布と
せん断応力～せん断ひずみ関係（3 方向加振）

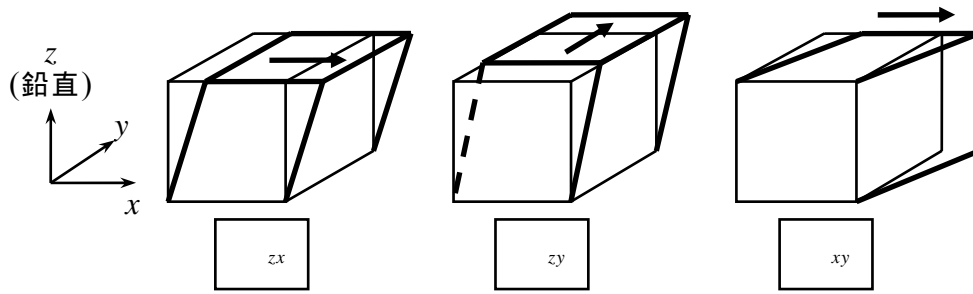


図 16 各せん断ひずみ成分（図 15 では xy が卓越）

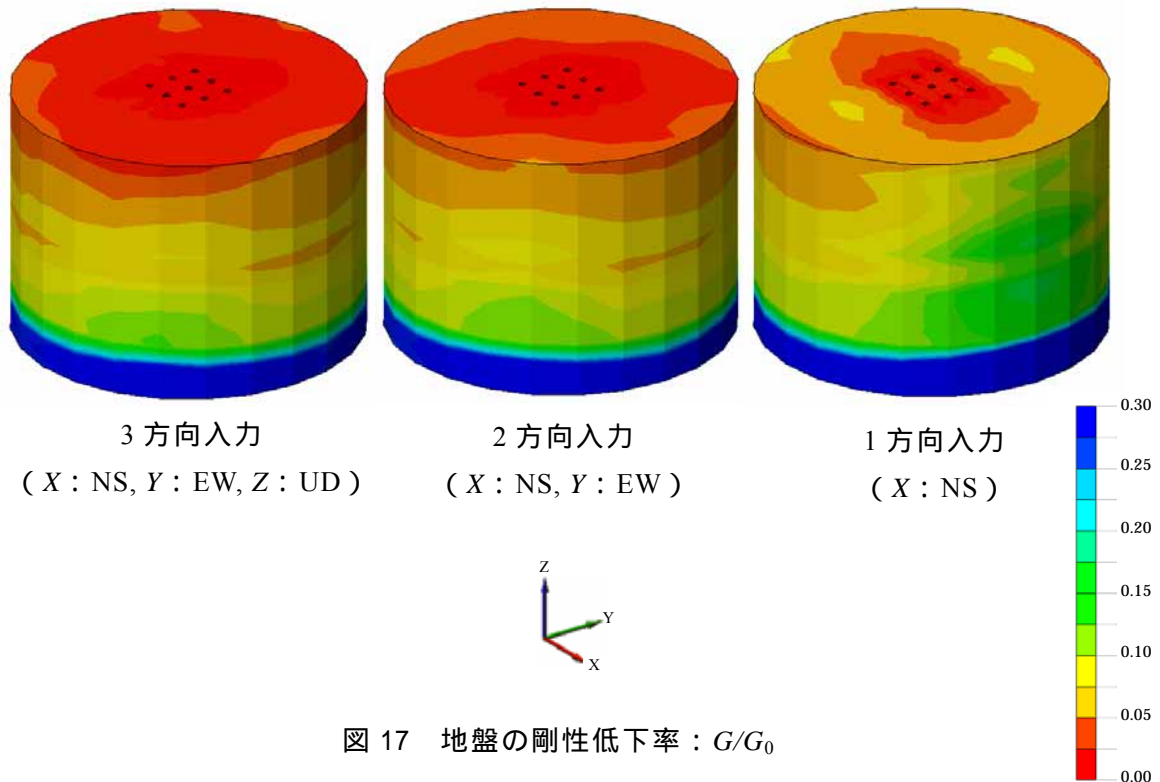


図 17 地盤の剛性低下率： G/G_0

図 17 には地盤の剛性低下率： G/G_0 を示す。2方向と3方向加振ではあまり差異はなく、表層下部では0.1、地表付近では0.01程度、支持層では0.3である。割線剛性は支持層で $G \times 0.3 = 165306 \times 0.3 = 50000 \text{ kN/m}^2$ 、表層下部で $G \times 0.3 = 57196 \times 0.1 = 5700 \text{ kN/m}^2$ となり、剛性比が約9倍となる。このことより、層境界部で曲げモーメントが大きくなったと思われる。1方向加振の基礎近傍では加振軸方向に剛性低下の顕著な領域が分布しており、加振直行方向では剛性低下はやや小さい。

図 18、図 19 には3方向入力時の加速度の時刻歴と変位時刻歴を示す。地表(節点 10964)とフーチング(節点 12406)を比較すると、加速度に関しては入力損失効果によってフーチング上で短周期成分が無くなっている。変位は地盤に比べてフーチングは大きく動いており、特に y 方向で顕著である。

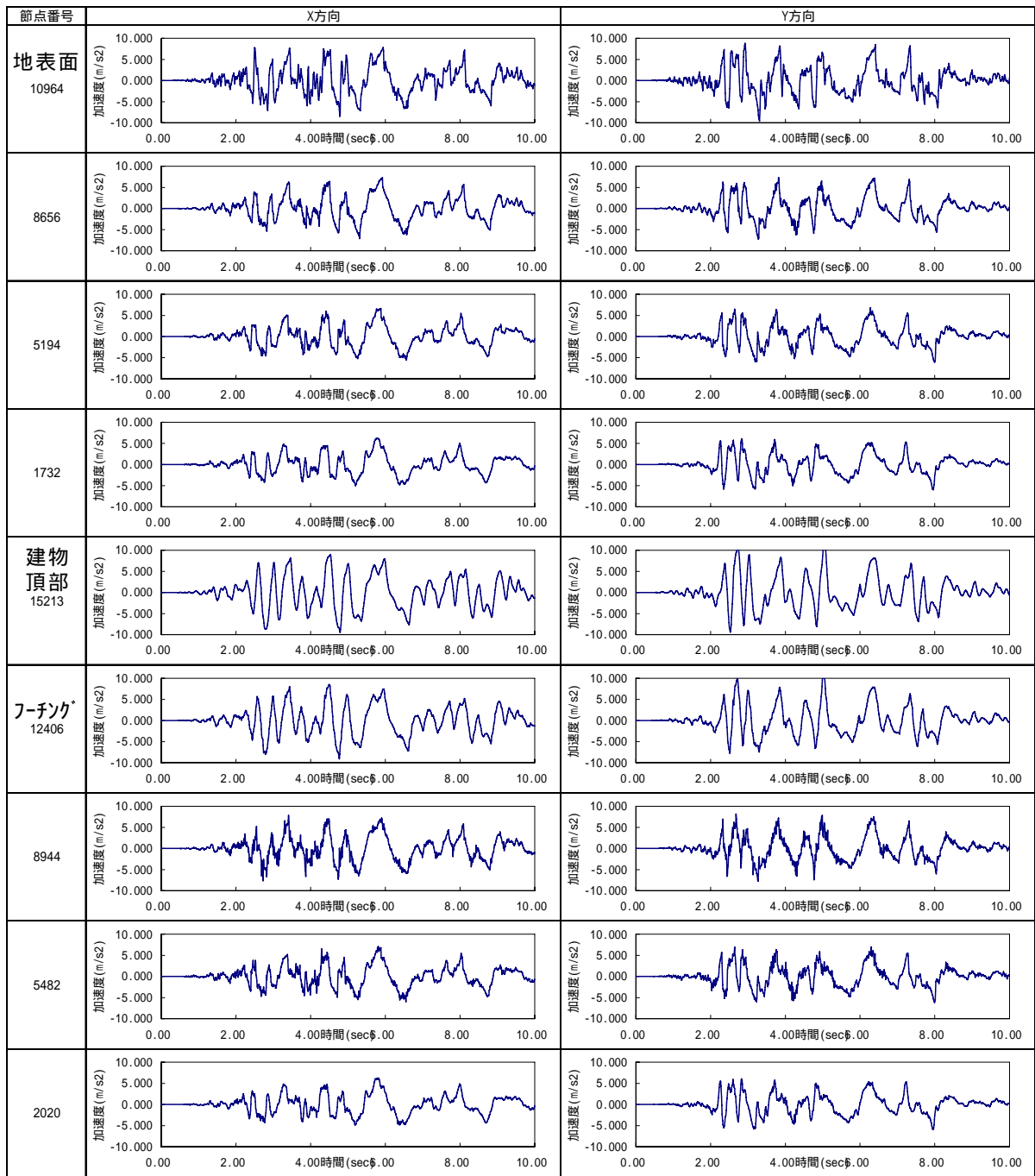


図 18 加速度の時刻歴 (3 方向入力)

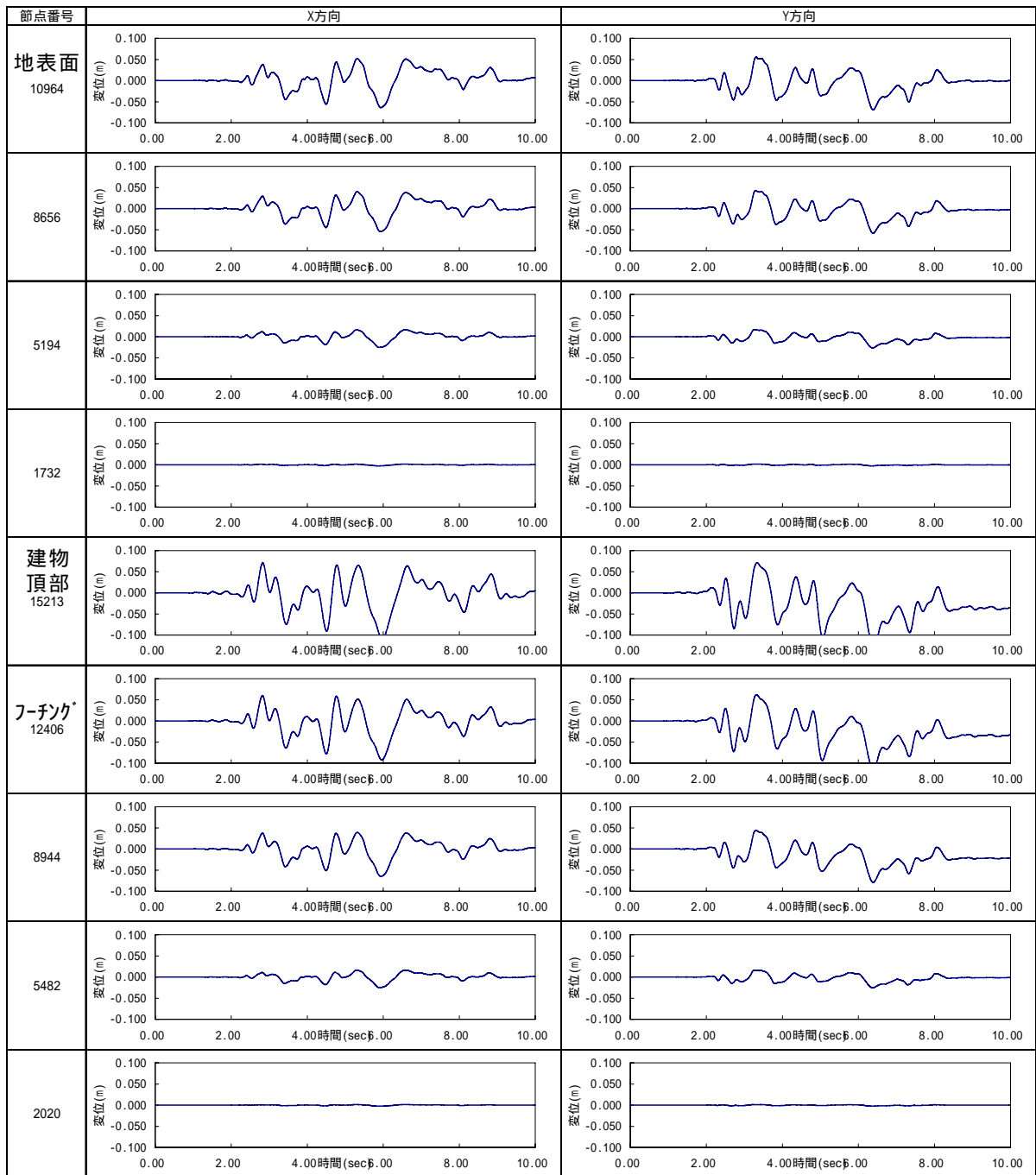


図 19 変位の時刻歴 (3 方向入力)

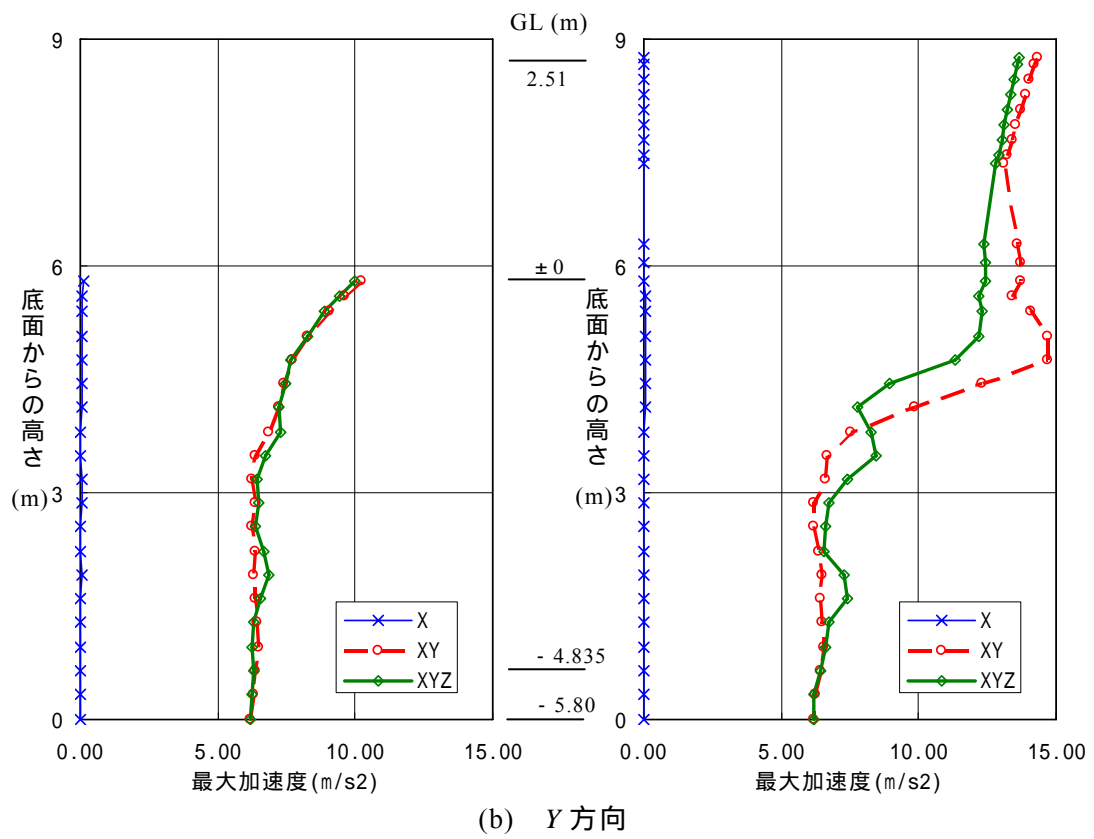
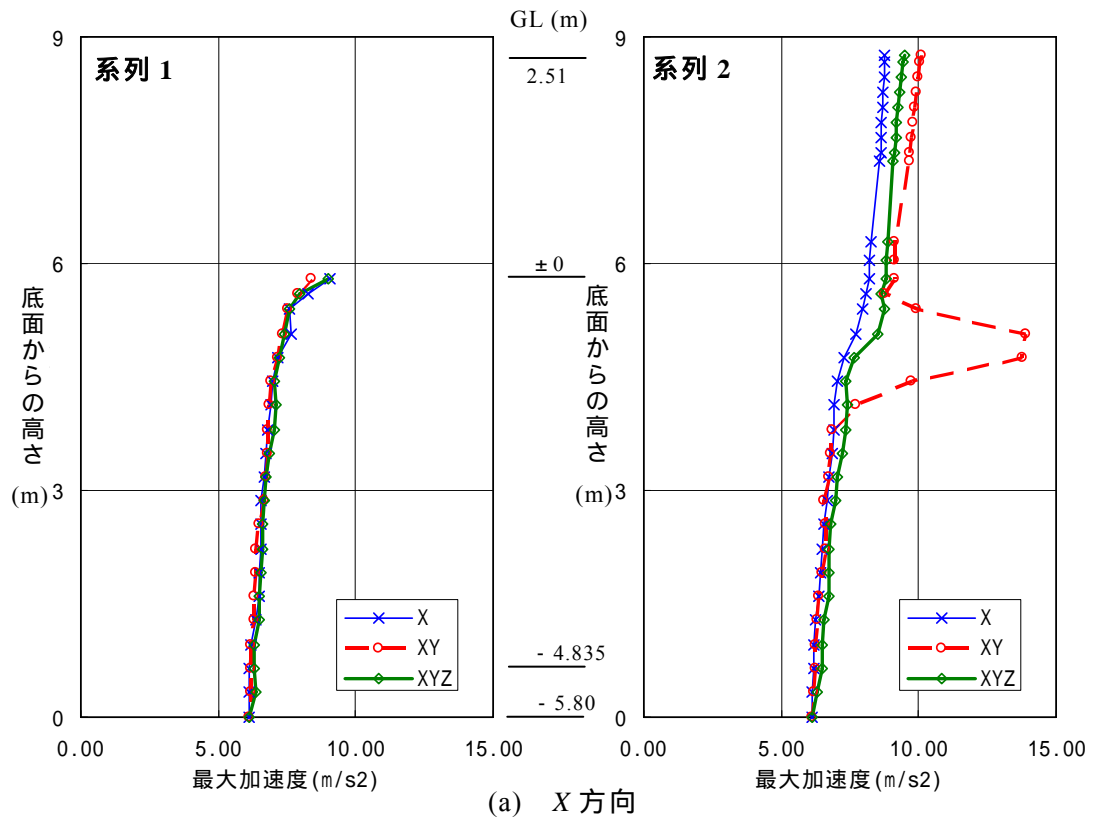


図 20 最大加速度の深度分布 (杭：線形)

図 20 には杭を線形としたときの最大加速度の深度分布を示す。杭が線形の場合は上部構造物の加速度は大きく、杭が非線形の場合は上部構造物の加速度は小さくなった。すなわち、杭は損傷すれば上部構造物に作用する力は小さくなり損傷を免れる可能性があるが、杭基礎が健全でしっかりしていれば大きな力が作用する。これは兵庫県南部地震における基礎被害と上部構造物の被害との関連で言えば、基礎に大きな被害があった建物では、上部構造物の被害は小さかったことに相当する。すなわち、損傷が上部構造か基礎のどちらかに集まるエネルギー保存則どおりの被害様相を示している。

また図には示していないが、フーチングの根入れが有る場合には、地盤が硬く(平均 $V_s=240\text{m/s}$, 1 次固有振動数 10Hz)パラメータなどは根入れが無い場合とは異なり同じ土俵で比較はできないが、最大曲げモーメントが $3\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度であり、相当小さい。よって根入れ効果は大きいといえる。

(d) 結論ならびに今後の課題

解析結果より得られた結論を以下にまとめる。

- 1) フーチング根入れが無いモデルに鷹取波の原波を入力した解析結果によると、2 方向入力および 3 方向入力では杭基礎は杭頭と杭頭から約 1.5m 下の 2 箇所損傷した。1 方向入力では杭頭のみで損傷した。杭頭では全ての杭で局部座屈が生じた。
- 2) 3 方向入力した場合と水平成分を 2 方向入力した場合とでは、応答に顕著な差異は見られなかった。すなわち上下同は地盤応答や杭の損傷に大きな影響を与えない。水平 1 方向入力と 2 方向入力では差異は見られた(地盤非線形や杭損傷の程度は小さい)。
- 3) 地盤のひずみは、隅杭の杭頭外側近傍で局所的に大きな値となったが、杭間ではやや小さい値であった。
- 4) フーチング根入れが有るモデルでは、無いモデルに比べて杭応力は小さく、大加振時でも杭は損傷しなかった。これはフーチング側面に作用する受働土圧の増加や土被り圧の減少により、杭に作用する応力が小さくなったためと考えられる。(埋込み効果は大きい)
- 5) 杭体の線形と非線形の比較：
上部構造物の加速度は、杭が非線形の場合に比べ線形の場合に大きくなった。すなわち、杭が損傷すれば上部構造物に作用する力は小さくなり損傷を免れる可能性があるが、杭基礎が健全でしっかりしていれば大きな力が作用する。これは兵庫県南部地震における基礎被害と上部構造物の被害との関連で言えば、基礎に大きな被害があった建物では、上部構造物の被害は小さい傾向にあったことと対応する。すなわち、損傷が上部構造か基礎のどちらかに集まるエネルギー保存則どおりの被害様相を示している。
- 6) せん断土槽リングの重量が応答に及ぼす影響は小さい。

今後の検討すべき課題を以下に示す。

- 1) フーチングの根入れが杭応答に及ぼす影響の詳細な検討。(基礎根入れ部作用する地震時土圧の評価など)
- 2) 乾燥地盤と飽和地盤の挙動の違いの検討。(過剰間隙水圧や地盤変形が杭基礎に及ぼす影響など)

- 3) 一旦損傷を受けた杭基礎が続く地震でどのような挙動をするかといった検討。
 - 4) 杭剛性や杭種を変えた場合の検討。例えばコンクリート杭など。
 - 5) 群杭の形式の違いによる影響。すなわち、杭本数、杭間隔(杭径)、
 - 6) 杭の配置(正方配置以外)など。
 - 7) 杭長さが異なる基礎や異種基礎(直接基礎と杭基礎の併用など)。
 - 8) 地層構成が傾斜した地盤や、支持地盤が傾斜した地盤の検討。
 - 9) 上部構造物の違いによる影響。例えば偏心構造物など。
- 6)~9)の検討によって、1方向加振の入力方向や、1方向入力と2方向入力違いが顕著になる。また、杭損傷を軽減する対策工についても検討していく必要があると思われる。

(e) 引用文献

- 1) 大槻 明・福武毅芳・藤川 智・佐藤正義：液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析,土木学会論文集, No.495/I-28, pp.101-110, 1994
- 2) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1997
- 3) 福武毅芳・太田泰博・中村紀吉・勝沢勝栄・鈴木康夫：建屋 - 杭 - 地盤系の有効応力解析のモデル化の研究その 5, 3次元解析と2次元解析の比較・杭体積考慮の影響, 日本建築学会大会学術講演概要集, B-2 構造, pp.465-466, 1996
- 4) 加藤勉、秋山宏他：軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力、日本建築学会論文報告集、第 204 号、pp.9-17、1973.
- 5) 建設省総合技術開発プロジェクト「新構造体系の開発」性能評価分科会基礎 WG 最終報告書、2000.3
- 6) 龍岡 文夫・福島 伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力～ひずみ関係のモデル化について(1)、生産研究、第 30 巻 9 号、pp.26-29、1978
- 7) 福武毅芳・大槻 明・佐藤正義・社本康広・亀岡裕行：遠心載荷振動台実験のシミュレーションとせん断土槽フレームの影響, 第 28 回土質工学研究発表会, pp.1151-1154, 1993

(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 18 年度業務計画案

平成 18 年度に実施予定の飽和地盤 - 杭基礎 - 構造物の大型模型実験を対象に三次元数

値シミュレーションを実施する。解析手法は有効応力法に基づいたものであり、過剰間隙水圧の影響を考慮する。地盤のモデルは三次元に拡張した Ramberg-Osgood モデルとダイレイタンスモデル(おわんモデル)を併用して用いる。

解析は以下の手順で実施する。

- ・ 解析条件、解析ケースの設定。
- ・ 要素試験結果に基づいた土質パラメータ設定。
- ・ 固有値解析。
- ・ 地震応答解析の実施と考察（地盤のみの解析も実施）。

地震応答解析は以下の項目に着目する。

- ・ 入力レベルや地盤密度と液状化の程度。
- ・ 液状化の程度（過剰間隙水圧の大きさ）が杭応力に及ぼす影響。（過剰間隙水圧の程度と構造物の応答特性）
- ・ 加振方向と液状化の程度、杭損傷の影響。
- ・ 群杭周辺の過剰間隙水圧やせん断ひずみの挙動。
- ・ フーチングの根入れの有無が杭応力に及ぼす影響。
- ・ 平成 18 年度に実施した乾燥砂地盤のケースとの比較。

以上の考察をまとめて報告書の作成を行う。