

3.3.9 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 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) 2 か年の年次実施計画
- (e) 平成 18 年度業務目的

(2) 平成 18 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) 地盤のモデル化
 - 3) 杭のモデル化
 - 4) 準備解析
 - 5) 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

(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測解析（水平地盤中の杭基礎解析、その２）

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
株式会社竹中工務店 技術研究所先端技術研究部	主任研究員	吉澤 睦博
	主席研究員	塩見 忠彦
	主任研究員	鬼丸 貞友

(c) 業務の目的

E - ディフェンスで実施される実大スケールの地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの震動台実験の予備検討解析を行い、実験でのケーススタディの絞込みに資する。また、予備検討解析結果および震動台実験結果の分析から、「数値震動台」の一部となる地盤の3次元数値シミュレーション手法の開発・高度化で課題となる地盤の構成モデルの設定、杭構造の非線形特性のモデル化、および減衰の設定に関する知見を得る。

(d) 2か年の年次実施計画

1) 平成 17 年度：

E - ディフェンスで実施する実大スケールの地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの震動台実験のうち、乾燥砂を用いた震動台実験の予測解析を行うための3次元FEMによるモデルを作成する。準備解析を行った後、必要に応じてモデルの修正を行う。

地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの震動台実験の予測解析を行う際に重要となる地盤の構成モデルの設定を行う。必要に応じて構成モデルの改良を行う。

動的有効応力解析の定式化に基づく3次元FEM解析を竹中工務店所有の計算機により行う。

2) 平成 18 年度：

E - ディフェンスで実施する実大スケールの地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの震動台実験のうち、湿潤砂を用いた震動台実験の予測解析を行うための3次元FEMによるモデルを作成する。準備解析を行った後、必要に応じてモデルの修正を行う。

地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの震動台実験の予測解析を行う際に重要となる地盤の構成モデルの設定を行う。必要に応じて構成モデルの改良を行う。

動的有効応力解析の定式化に基づく三次元FEM解析を竹中工務店所有の計算機により行う。解析結果を整理するとともに、解析結果と震動台実験結果の分析から、「数値震動台」の一部となる地盤の3次元数値シミュレーション手法の開発・高度化で課題となる地盤の構成モデルの設定について、主に湿潤砂の液状化時の挙動に着目した知見の抽出を行う。

(e) 平成 18 年度業務目的

E - ディフェンスで実施する実大スケールの地盤 - 杭基礎 - 構造物モデルの震動台実験のうち、湿潤砂を用いた震動台実験の予測解析を行うための三次元 FEM による地震応答解析を行う。入力地震動の入力レベルの違いによる杭体の損傷レベルを予測し、震動実験での入力レベルの検討に資する。また震動実験結果と解析結果の比較により、地盤 - 基礎 - 構造物系の解析で必要となる知見を抽出する。

(2) 平成 18 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 18 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。

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。入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取波を用いた。実施した解析ケースは以下の通りである。

- ・湿潤砂 Dr70%相当 基礎埋め込みあり JR 鷹取波の水平二方向加振
入力レベル 原波の 0.125 倍 (75cm/s^2)、0.3 倍 (180cm/s^2)、0.4 倍 (240cm/s^2)

(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、杭による砂の排除体積分を考慮したメッシュを用いた。またせん断リングの質量が振動系に与える影響が小さいことを確認し、せん断リングは剛な梁要素で地盤要素をつないでモデル化した。

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 を用いた計算を行った。

(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

三次元 FEM によるモデル化は杭を線形の梁要素でモデル化し、地盤を六面体のソリッド要素でモデル化した。杭による地盤の排除体積分をモデル化した。図 1 に本検討で用いた解析モデルのメッシュ図と設定した解析条件を示す。図 2 は杭とその周辺の地盤のモデル化である。

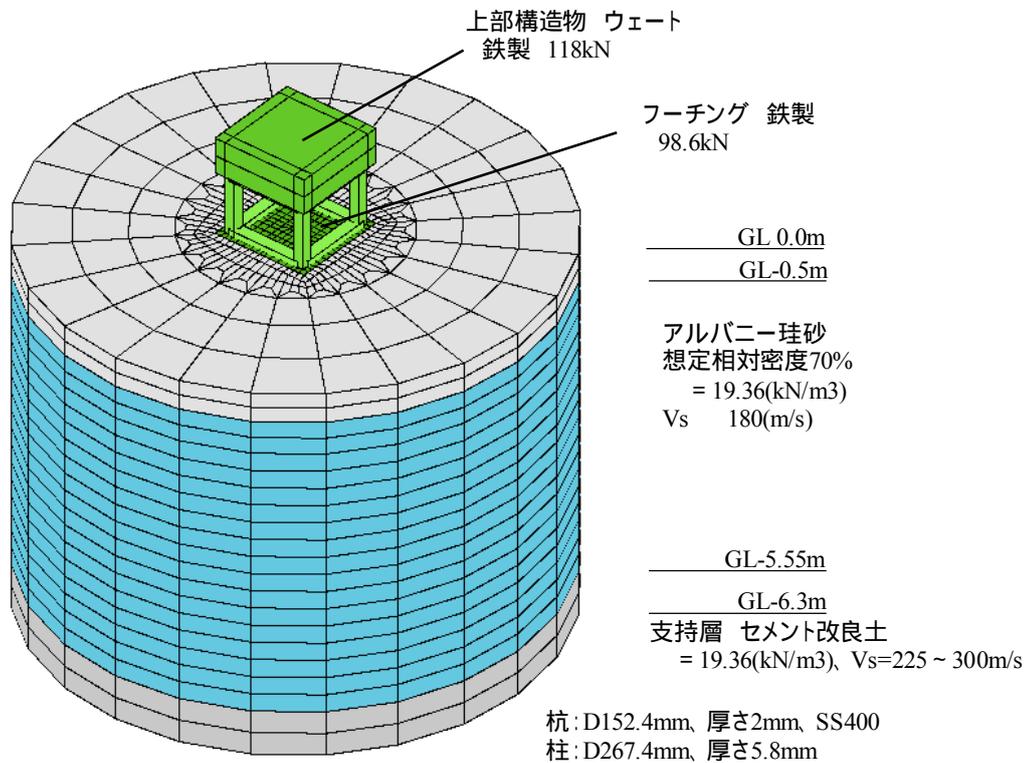


図 1 三次元 FEM による解析モデルの概要

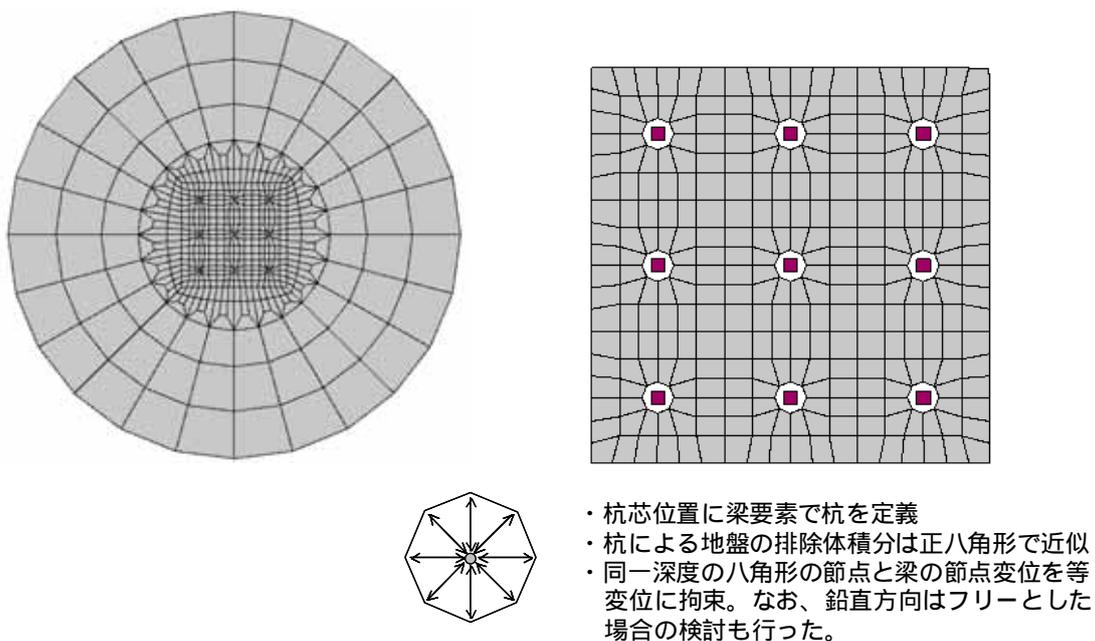


図 2 FEM による平面方向のモデル化

図 3 は杭頭 - 上部構造物の取り付け部のモデル化である。発生する杭の応力分布は杭頭と杭先端の境界条件に大きく依存する。杭先端は土槽底面深さの位置でピン支持とし、杭頭は厚さ 0.5m のフーチングを 0.25m に分割し、メッシュつ分の厚さだけ梁要素を飲み込ませた。したがって杭頭の固定度はメッシュ形状とフーチングの剛性（一般鋼材の物性とした）より決まる。実際の試験体は高強度コンクリートにより杭とフーチングが一体化されている。図 4 はフーチング埋め込み部の境界条件である。フーチングの側面は面に対して平行方向をローラー条件とした。フーチング底面とその下の地盤面とは別個に節点を定義し、拘束条件は設定しなかった。

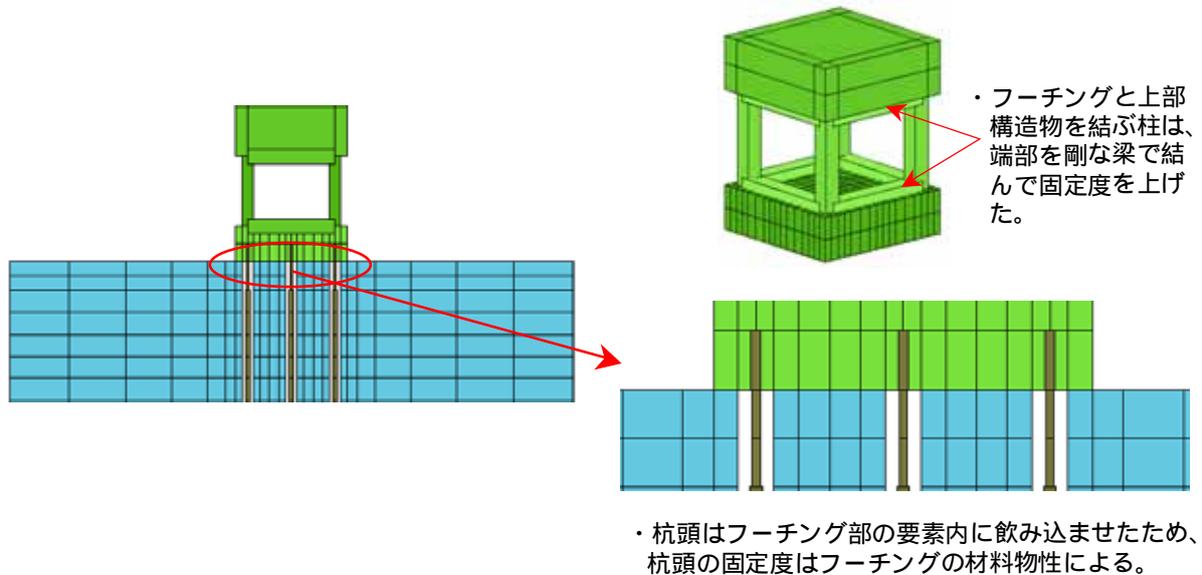


図 3 FEM による構造物の取り付け部分のモデル化

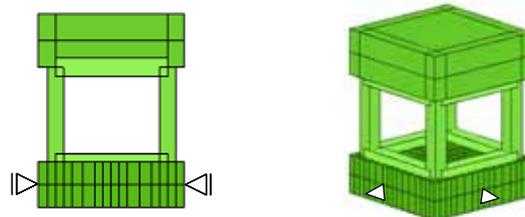


図 4 埋め込み部の土とフーチング部の境界条件

2) 地盤のモデル化

振動実験で用いるアルバニー珪砂の物性の設定は、Dr70 相当の湿潤砂で実施されている試験結果を元にモデル化した。参考にした試験結果を図 5～図 7 に示す。

図 5 は動的変形試験の際に求められた初期せん断剛性と拘束圧の関係（清水建設）である。一般に砂のせん断剛性の拘束圧依存特性の係数を 0.5 とすることが多いが、今回はこの式を用いて 0.695 乗に比例することとした。図 6 は図 5 の動的変形試験結果に東北大で排水条件で実施された動的変形試験結果を重ね合せたものである。

図 7 は低拘束圧条件下で実施された液状化強度試験（東京電機大学）の中から 20kPa の拘束圧下で実施された結果をまとめた液状化強度曲線である。この液状化強度曲線を Densification モデルを用いてモデル化した。図 7 中に土質試験結果と Densification モデルによるシミュレーション結果を合せて示す。

解析に用いた地盤定数の一覧を表 1 に、液状化部分をモデル化した Densification モデルのパラメータを表 2 に示す。

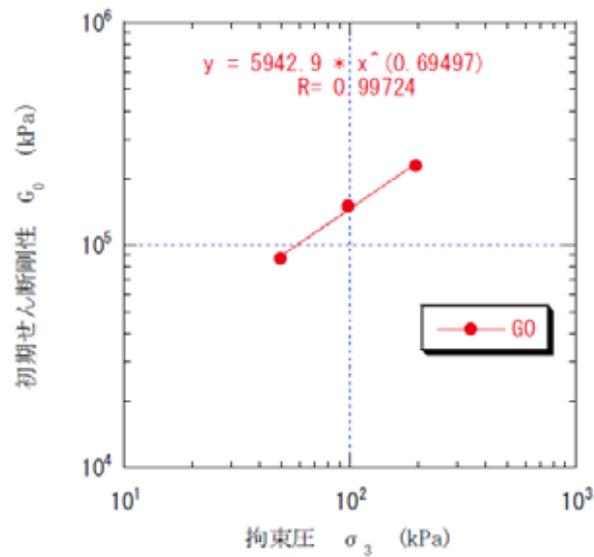


図 5 アルバニー珪砂 Dr75%初期せん断剛性と拘束圧の関係（清水建設）

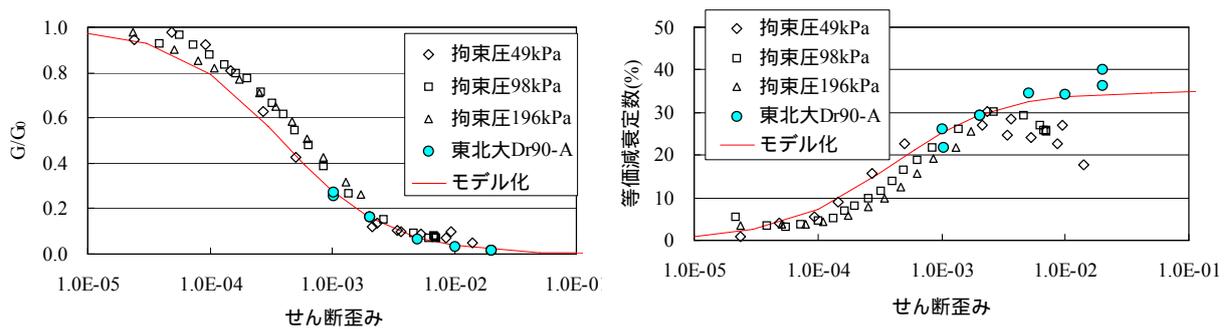


図 6 提供されたアルバニー珪砂のせん断歪み特性

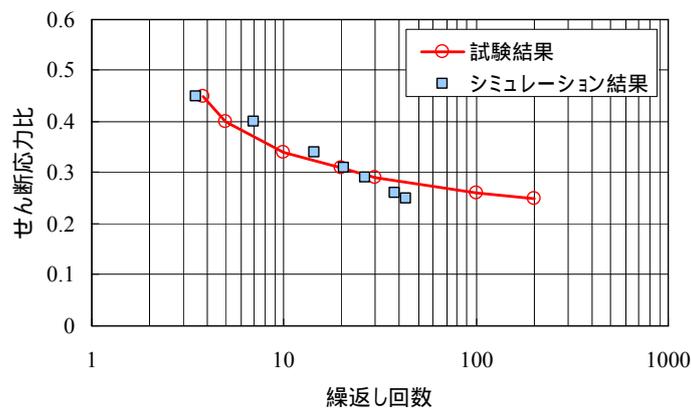


図 7 アルバニー珪砂の液状化強度曲線（拘束圧 20kPa）

表 1 設定した地盤定数

(1) 液状化地盤		(2) 支持地盤	
Dr70% 単位体積重量	1.976	単位体積重量	1.976
土粒子密度	2.63	土の質量密度 ρ_s	2.7
emax	0.738	G(kN/m ²)	100023
emin	0.513	参照応力(kN/m ²)	-
e(Dr70相当)	0.6705	粘着力(kN/m ²)	49
間隙率n	0.4014	内部摩擦角	0
土の質量密度 ρ_s	0.2684	ポアソン比 ν	0.333
水の質量密度 ρ_w	0.1020		
G(kN/m ²)	54882		
参照応力(kN/m ²)	24.50		
ポアソン比 ν	0.333		
内部摩擦角	40		

表 2 設定した Densification モデルのパラメータ

パラメータ	A	0.0045
	B	1.0
	r	5.0
透水係数(m/s)		1.00E-04

3) 杭のモデル化

図 8 は杭の M - ϕ 関係の非線形特性を比較した図である。図中の \circ は杭断面が破壊に至るまで平面保持をすると仮定して鋼管を放射状に等分割したファイバーモデルの断面解析結果であり、図中の実線は平成 17 年度報告書からトリリニア型でモデル化した骨格曲線である。上部構造物の重量が平成 17 年度より軽くなった分だけ骨格曲線は線形領域が大きくなるが、概ね両者が対応しているため、平成 17 年度のトリリニア型を用いることとした。

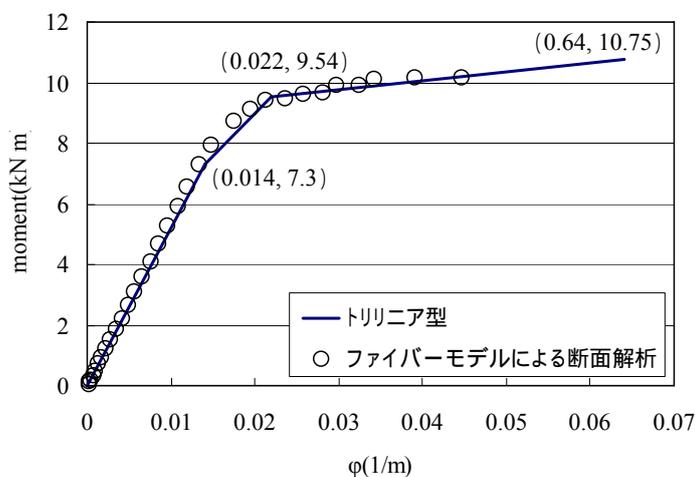


図 8 設定した杭の非線形モデル (M - ϕ 関係)

4) 準備解析

a) 自由地盤の応答解析

震動実験で用いるアルバニー珪砂の応答特性を把握するために、震動実験の土槽を土柱にモデル化し三次元の自由地盤の応答解析を行った。入力地震動は図 9 に示す鷹取波を 0.125 倍 (75cm/s²)、0.3 倍 (180cm/s²) および 0.4 倍 (240cm/s²) して水平二方向に入力する場合を行った。結果を図 10 および図 11 に示す。0.3 倍の 180cm/s² 入力の場合でも最大せん断歪みが 5%を超える深度があり、液状化が発生するものと予想される。また 0.4 倍の 240cm/s² の入力の場合には、180cm/s² に比べてより深い位置より歪みが大きくなり液状化程度が大きくなっている。

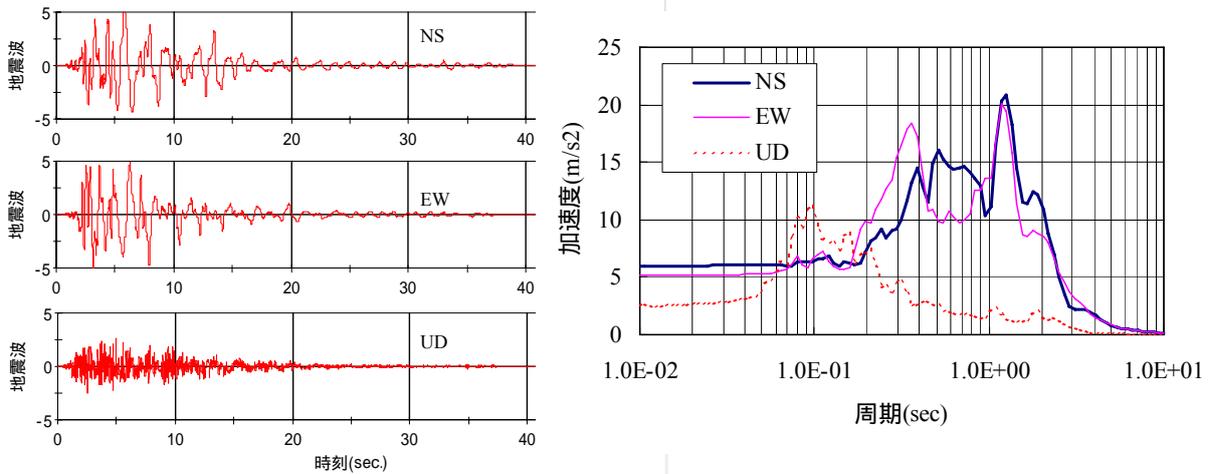


図 9 入力地震動 (1995 年兵庫県南部地震・鷹取波)

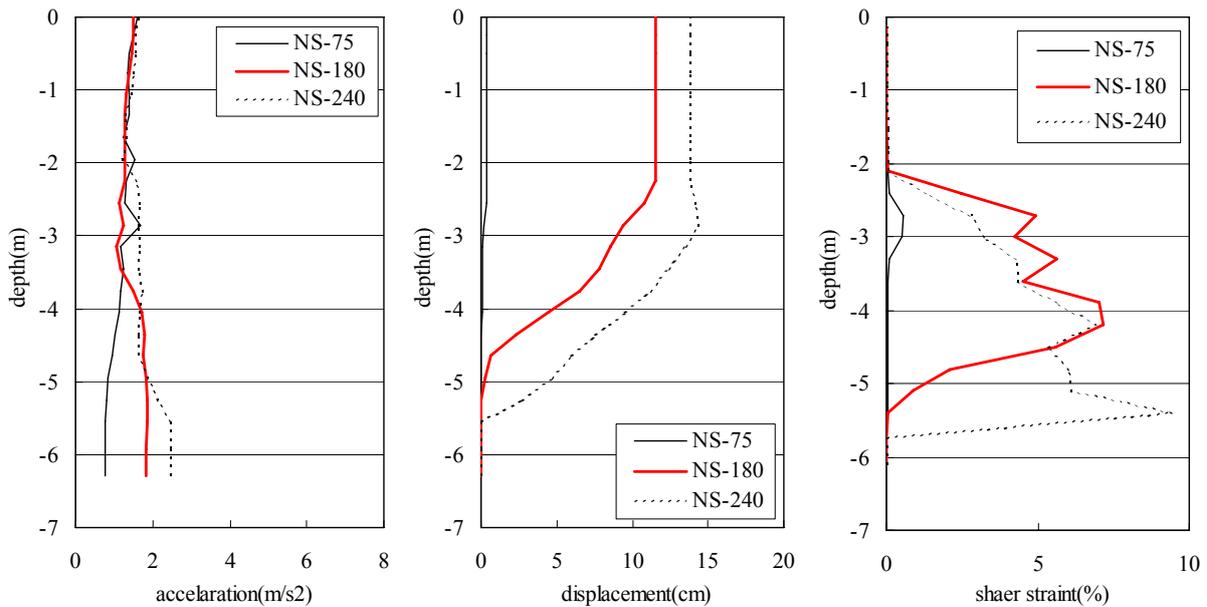


図 10 自由地盤の応答解析結果 NS 方向成分最大応答値

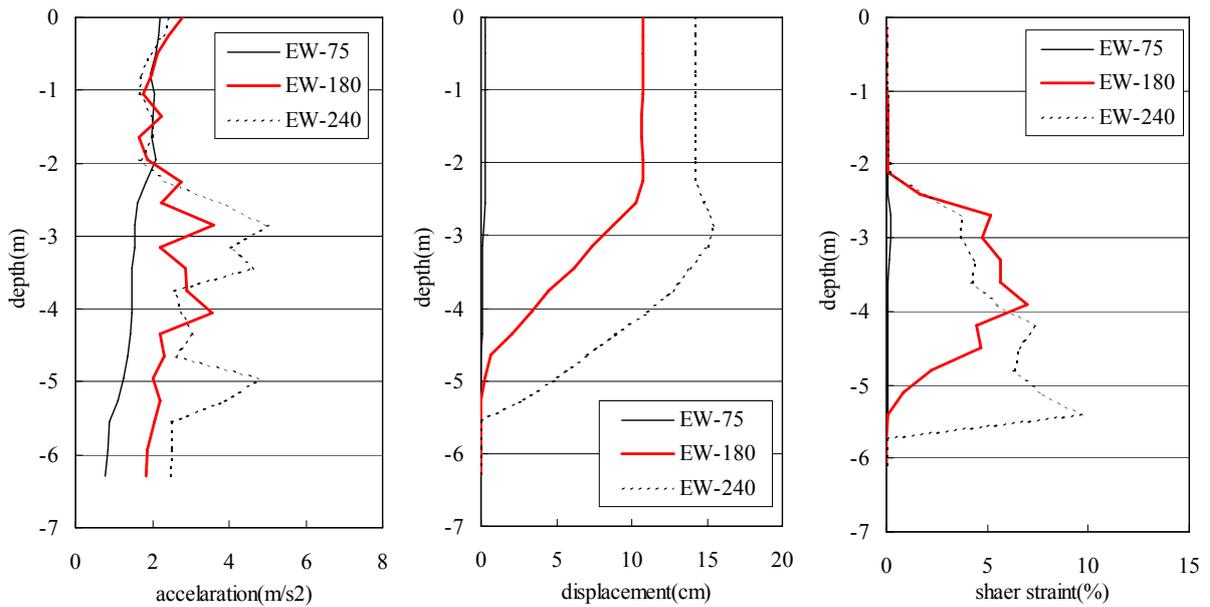


図 11 自由地盤の応答解析結果 EW 方向成分最大応答値

b) 固有値解析結果

地震応答解析で用いるレイリー減衰のパラメータを設定するために固有値解析を行った。表 3 に結果の一覧を示す。フーチングと周辺地盤との接続条件の違い、せん断リングの質量を考慮する場合としない場合とを検討した。フーチングと周辺地盤との接続条件の違いの概念図を図 12 に示す。フーチング周りの根入れがあること、及び構造物重量が軽くなっていることから、フーチングと周辺地盤との接続条件の違いによる固有振動数の違いは比較的小さい。

レイリー減衰のパラメータ および を設定するための固有値解析モデルは、フーチング底面と周辺地盤を別個の節点とし、せん断リングの質量は考慮しない場合とした。1 次水平 6.78Hz , 2 次水平 9.61Hz となった。レイリー減衰のパラメータ および は 1 次と 2 次の振動数で $h=0.02$ となるように設定した。また上部構造物は剛性比例型減衰として を 1 次振動数から $h=0.02$ となるように設定した。

表 3 固有値解析結果一覧 (単位 Hz)

構造物なし			7.33
フーチングとその周囲の地盤	同一節点	せん断リングなし	6.85
	別個の節点	なし	6.78
		あり	6.65
上部構造物のみ			22.4

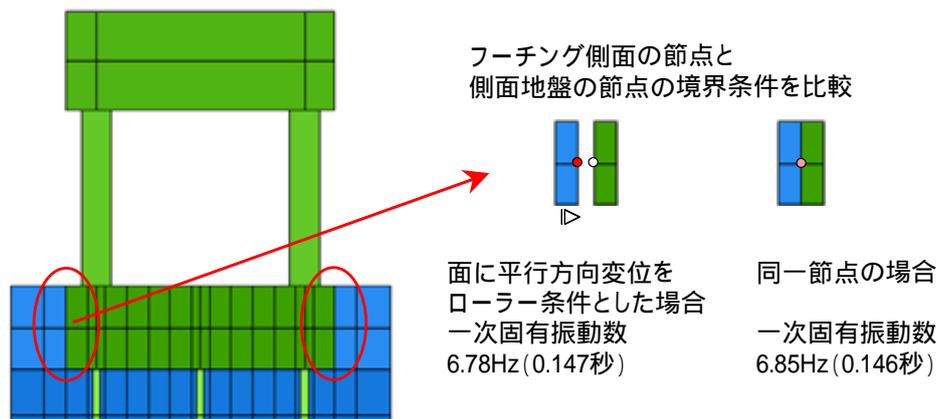


図 12 フーチング部分と地表面地盤要素の接続条件の検討

5) 地震応答解析

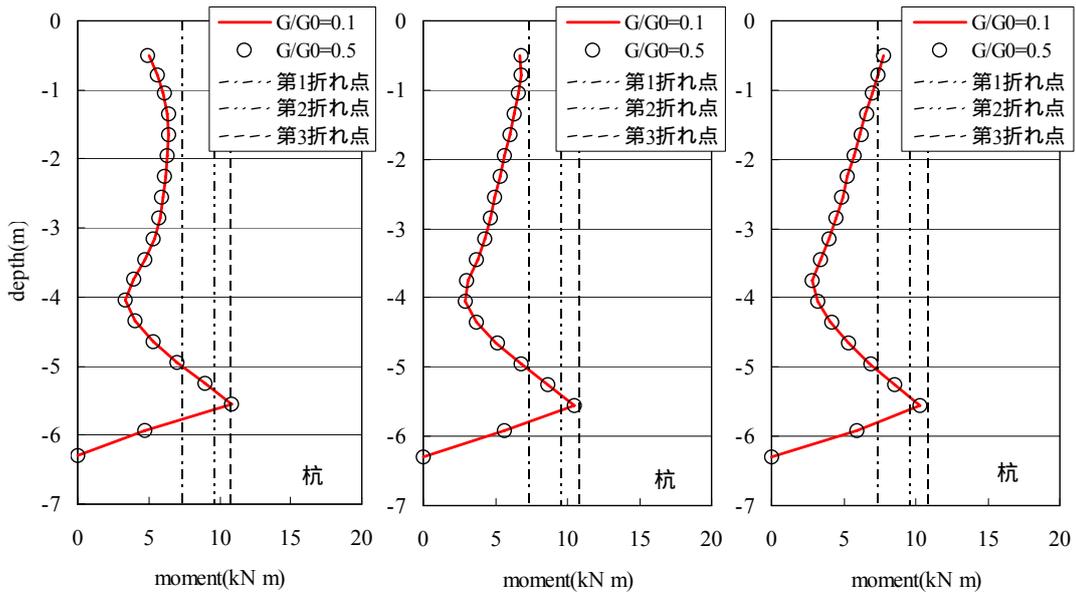
三次元 FEM モデルによる地震応答解析の準備解析として表 4 に示すケーススタディを行った。入力地震動は自由地盤の応答解析結果より鷹取波の 0.3 倍 (180cm/s²) とした。

Case1 は地下水位以浅の表層部分を等価線形物性に置き換えた場合のケーススタディである。本来は液化化部分の $D_r70\%$ 相当の飽和地盤と同様のせん断強度を持つ材料として解析することが望ましいが、剛なフーチングとの境界部分の収束性度が悪く計算時間がかかるため、等価線形に置き換えた。等価線形物性は表層のせん断剛性を 0.1 倍および 0.5 倍とし等価減衰は図 6 より $h=10\%$ となるようにレイリー減衰を設定した。発生する杭応力の比較を図 13 に示す。表層地盤の等価線形物性のモデル化の違いによる影響はほとんど無いいため、以降の解析では表層地盤は 0.1 倍の等価剛性で行うこととした。

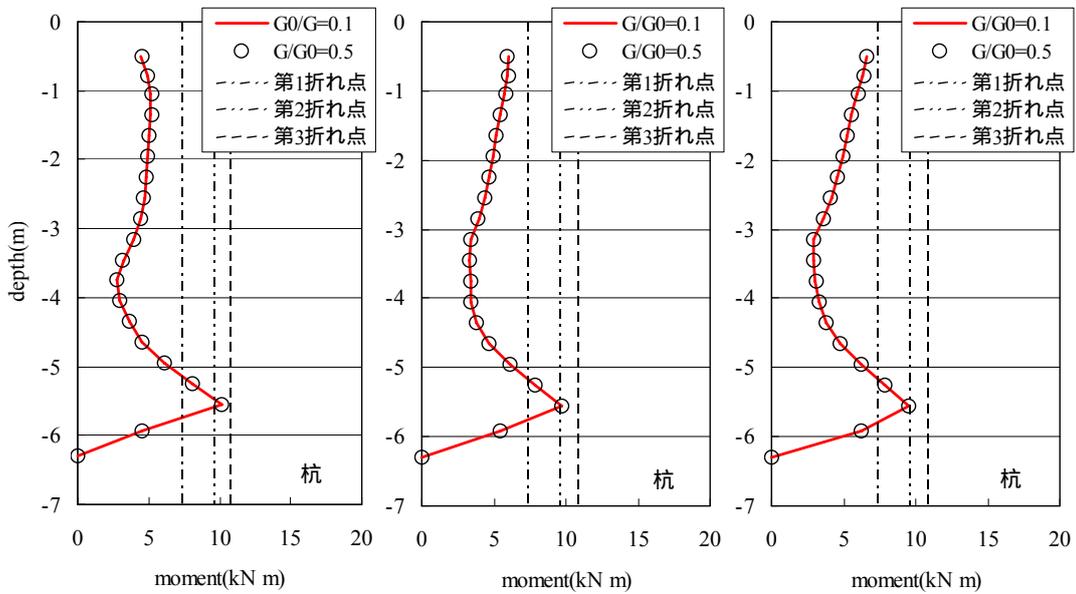
次に Case2 および Case3 では杭先端部分の支持層のモデル化を検討した。Case2 では支持層部分の初期剛性を $V_s=300\text{m/s}$ と 225m/s の線形とした場合の比較であり、Case3 では初期剛性を $V_s=225\text{m/s}$ で固定し、せん断強度の粘着力 C を仮定した Mohr-Coulomb 型の非線形モデルの違いによる比較である。図 14 より支持層が線形の場合には周辺地盤の応答加速度や杭の曲げモーメントの値に有意な違いは無い。図 15 より支持層の非線形特性の違いによる影響も大きくないことが判る。そこで以降の解析では Case3 の $C=49\text{kN/m}^2$ の場合を用いて検討を行った。

表 4 三次元地震応答解析モデルのケーススタディ

	杭先端地盤	表層	入力動
Case1	線形 $V_s=225\text{m/s}$	等価線形 $G/G_0=0.1, 0.5$	鷹取波 $\times 0.3$ 倍
Case2	線形 $V_s=225\text{m/s}, 300\text{m/s}$	等価線形 $G/G_0=0.1$	鷹取波 $\times 0.3$ 倍
Case3	非線形 $V_s=225\text{m/s}$ $C=49\text{kN/m}^2, 24.5\text{kN/m}^2$	等価線形 $G/G_0=0.1$	鷹取波 $\times 0.3$ 倍



(1) NS 方向曲げモーメント M_z



(2) EW 方向曲げモーメント M_y

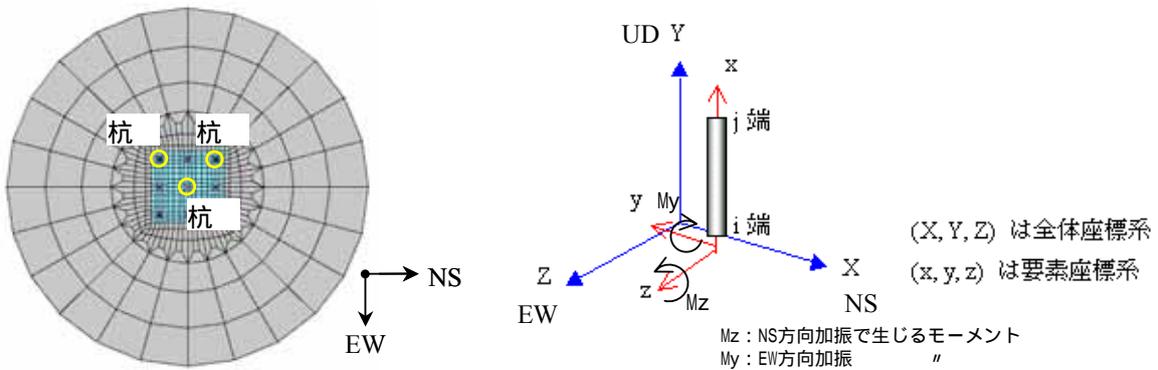
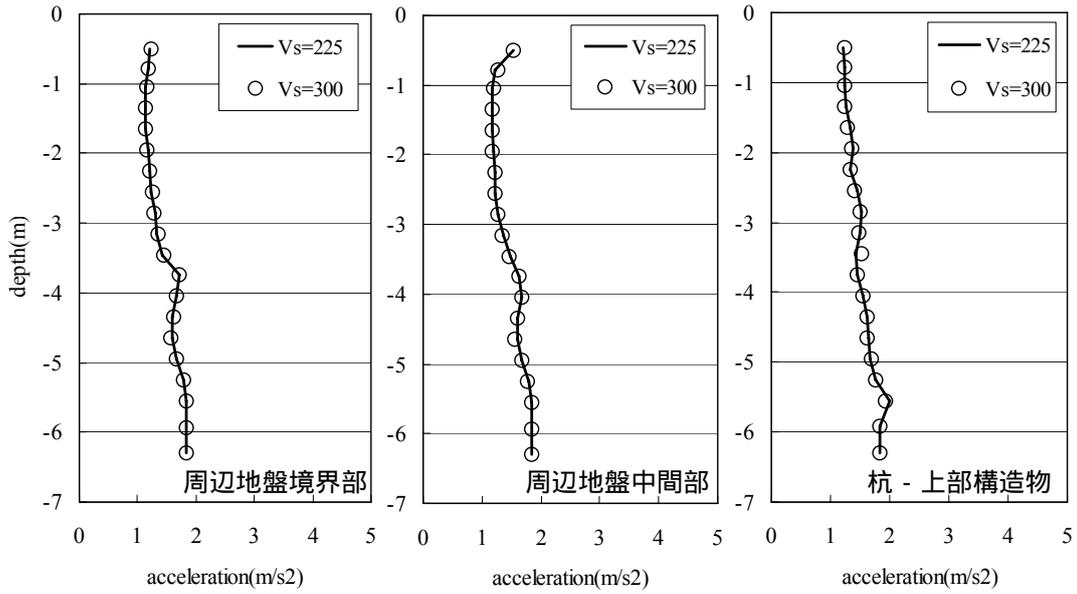
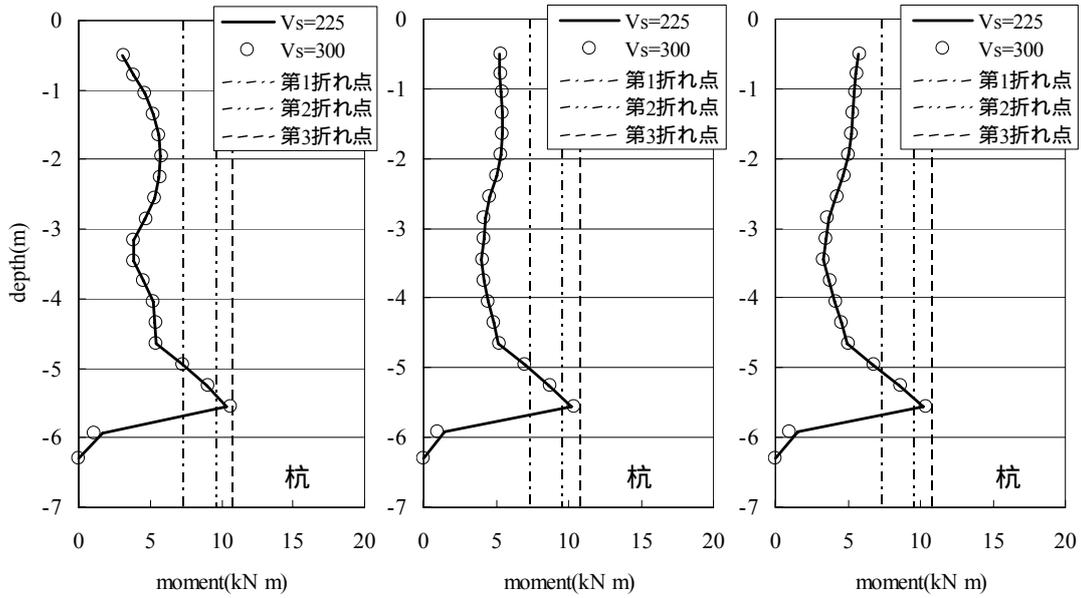


図 13 表層地盤の等価線形物性の設定の違いによる杭の最大モーメントの比較



(1) NS 方向最大応答加速度分布



(1) NS 方向最大曲げモーメント M_z 分布

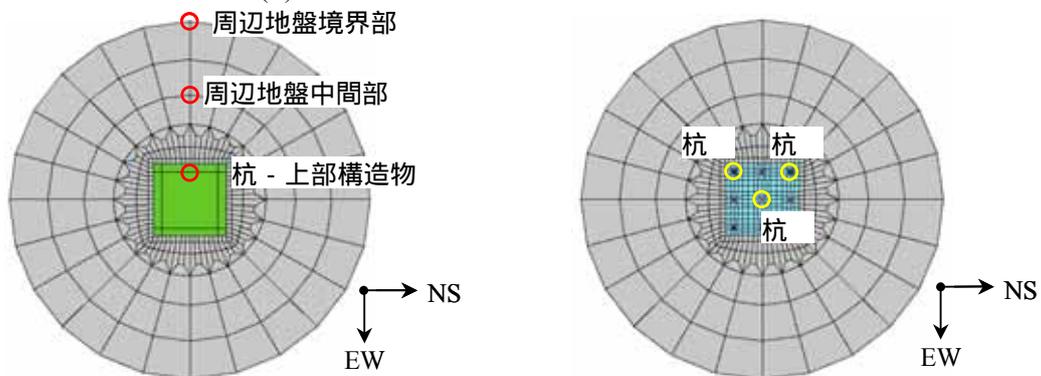
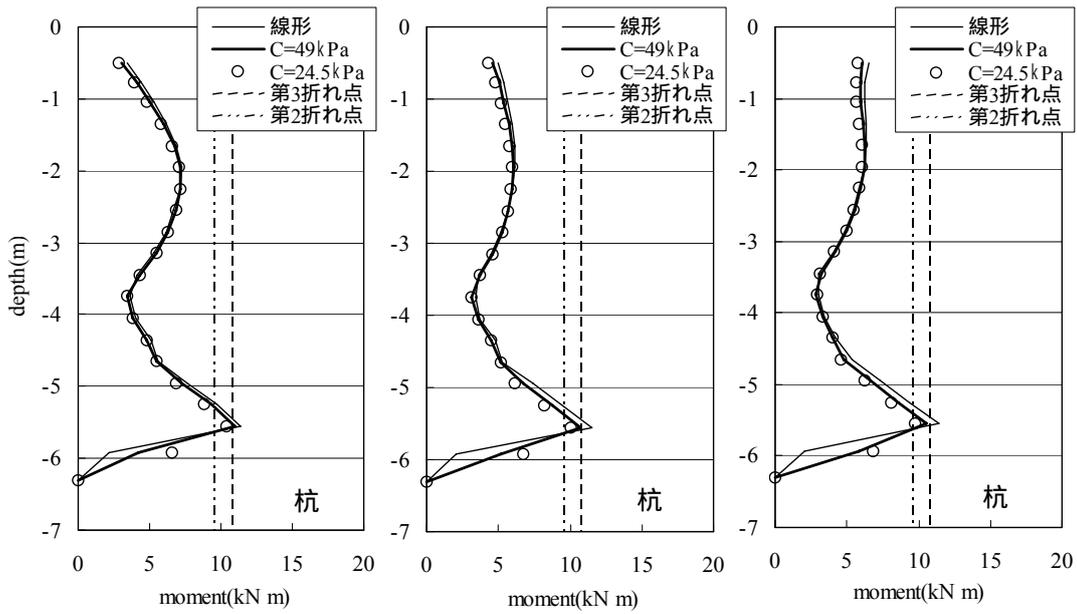
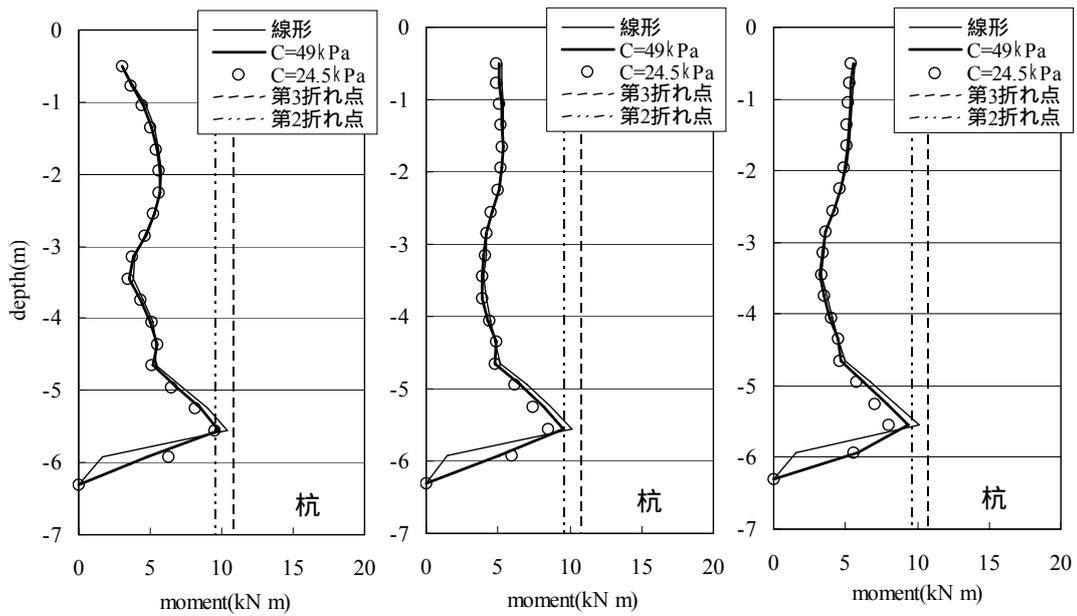


図 14 杭先端地盤が線形の場合のせん断波速度による NS 方向の最大応答値の比較



(1)NS 方向曲げモーメント M_z



(2)EW 方向曲げモーメント M_y

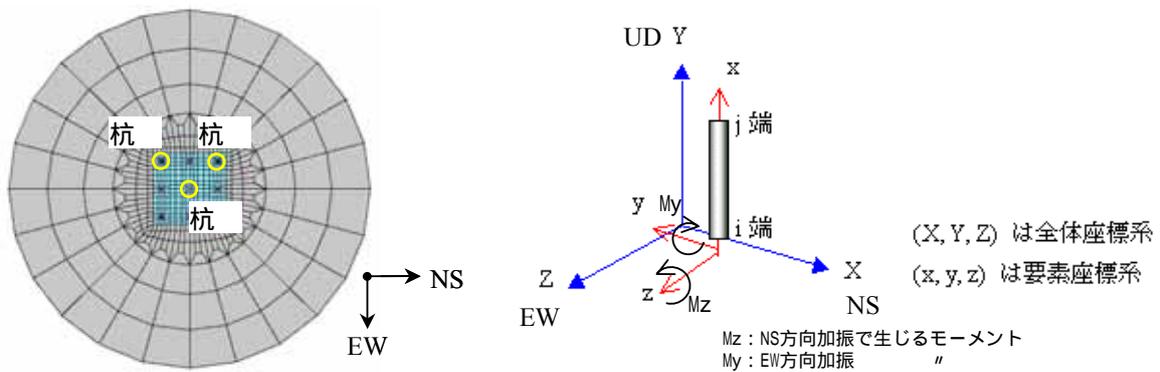


図 15 杭先端地盤の線形 / 非線形の違いによる杭応力の最大応答値の比較

以降では表層地盤の等価線形物性の等価剛性を 0.1 倍、支持地盤は $V_s=225\text{m/s}$ で $C=49\text{kN/m}^2$ とした場合のモデルを用いて検討した。なお解析結果表示で用いたの杭の配置と、座標系の正方向を図 16 に示す。

まず入力地震動の大きさの違いの検討結果を図 17～図 21 に示す。周辺地盤の最大応答加速度分布の比較を図 17 に、最大応答変位の比較を図 18 に示す。最大応答変位の値はさら地条件の図 10 及び図 11 に比べるとやや小さい傾向がある。図 19 は中心杭から上部構造物へのラインの応答の比較、図 20 および図 21 は杭に発生する最大曲げモーメント分布の比較である。図 20 および図 21 より、入力加速度を 180cm/s^2 以上とすれば、杭頭部および支持地盤との層境界で杭のモーメントが塑性領域に入ることが判る。そこで以降では 180cm/s^2 入力とした場合の応答結果について述べる。

図 22 は上部構造物の応答加速度と応答変位の時刻歴である。変位波形及びオービットを見ると 6 秒付近に大きな変位が NS 方向及び EW 方向で生じるため、約 45 度方向へ大きく土槽が震動している。図 23 は杭間地盤と周辺地盤部分での過剰間隙水圧比の時刻歴である。地下水位が浅および支持層部分への部分排水があるため液状化層の上下で水圧比が地震応答の後半で下がって来るが概ね全層で水圧比が 1.0 に達した状態である。

図 24～図 32 は杭の発生応力を時刻断面で比較した結果である。杭の配置は「 --- 」
「 --- 」 --- 」の 3 つのラインで比較した。過剰間隙水圧が大きくなる前にフーチングで大きな加速度をとる 2.45 秒では杭頭部で大きなモーメント分布となり、また杭配置による差異は小さい。次に液状化が進み変位波形も大きくなる 6.00 秒では、支持層との境界でモーメントが第二折れ点を超える大きな値を生じる。杭配置による差では、45 度方向で比較した --- と --- ラインで、中央の杭と端部の杭とで応力分布が変わってくる。6.00 秒の直後の --- ライン方向に変位が最大となる 6.27 秒時には、杭 --- では杭配置による差異は小さいが、杭 --- のモーメント分布では杭頭よりも 1m 程度下付近での値が大きくなっている。180Gal 入力の場合の全体的な傾向としては、杭頭周辺および支持層との層境界で杭の塑性化が発生する。また杭配置による応力分布の差はあまり大きくは無いが、変位の卓越する方向と直交するライン上の杭で応力分布の違いが見られた。

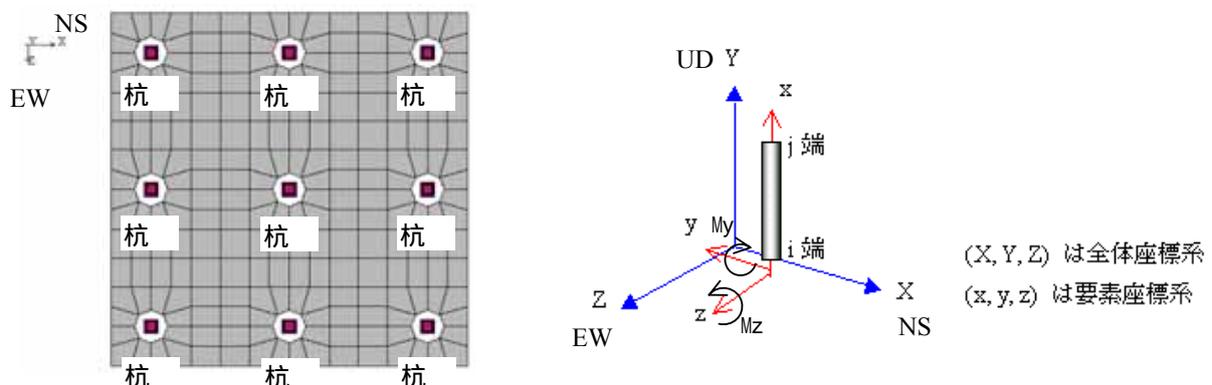
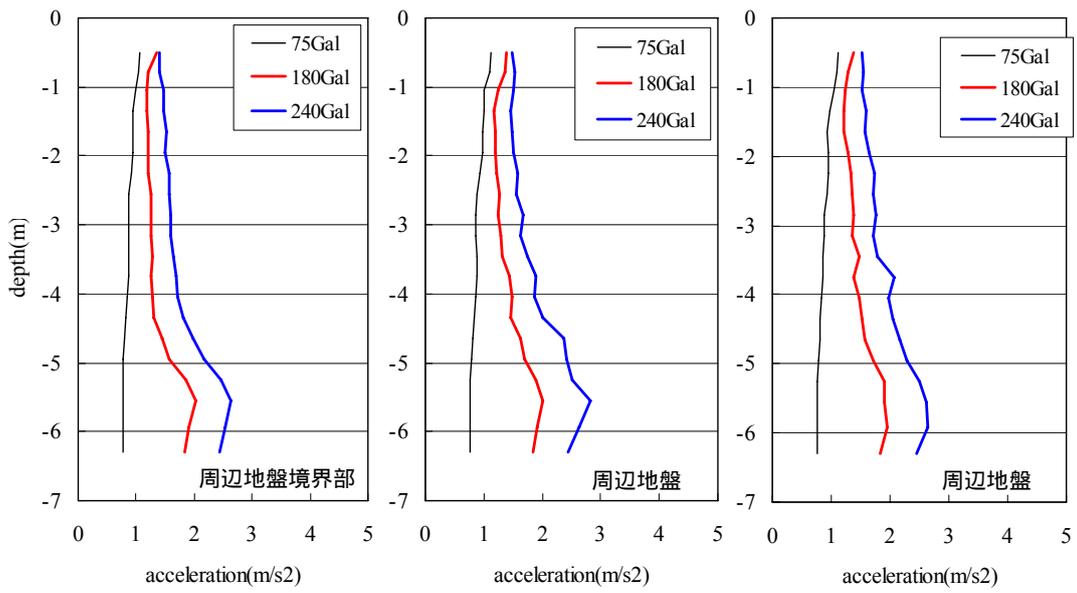
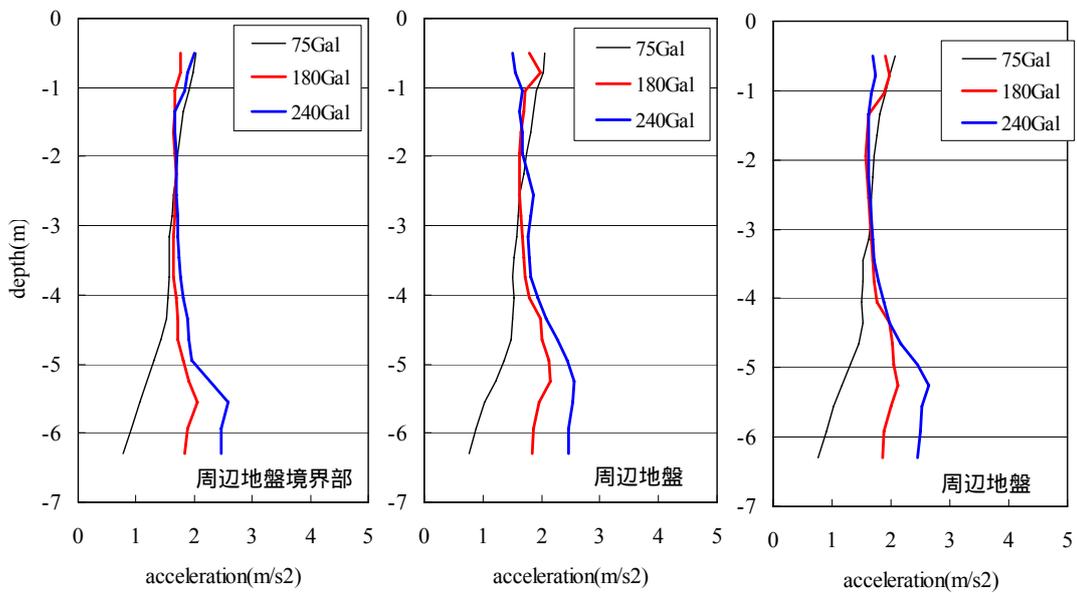


図 16 解析結果表示で用いた杭配置と座標系の正方向



(1) NS 方向成分



(2) EW 方向成分

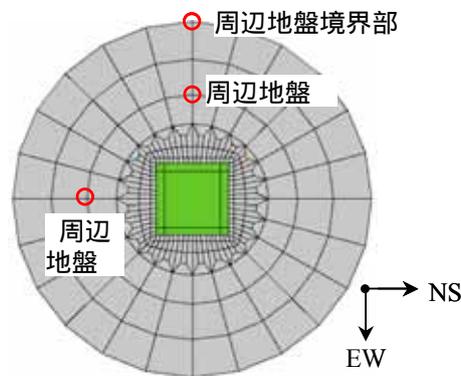
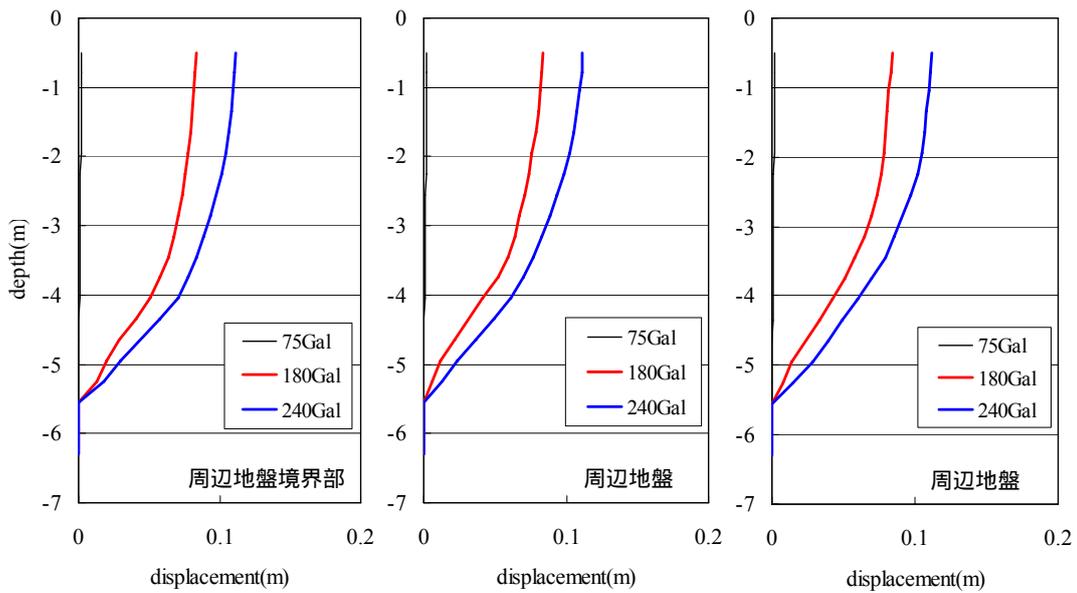
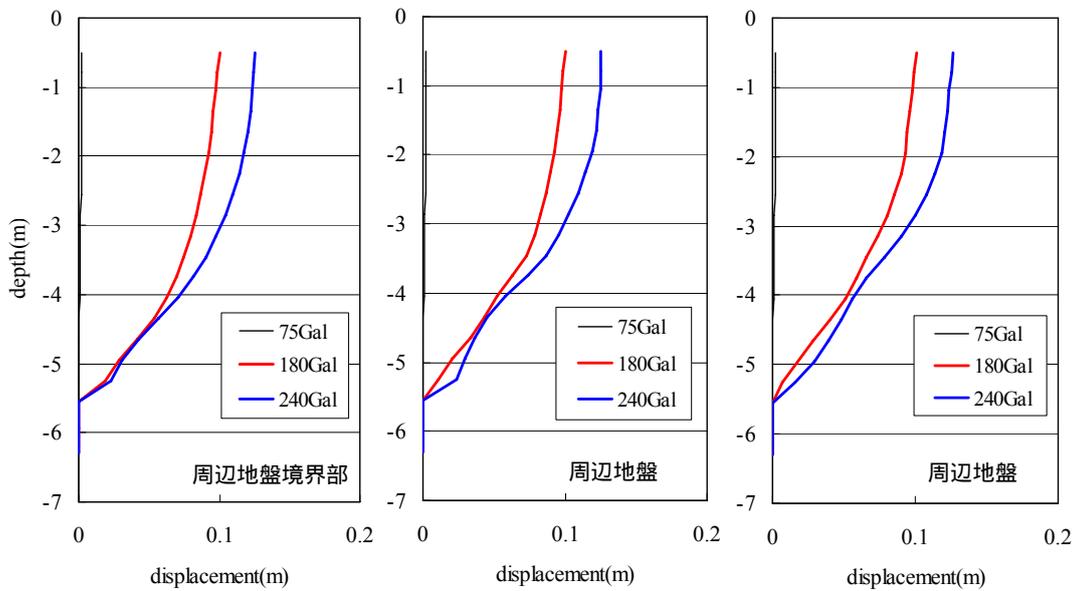


図 17 周辺地盤の最大応答加速度の深度分布の比較



(1) NS 方向成分



(2) EW 方向成分

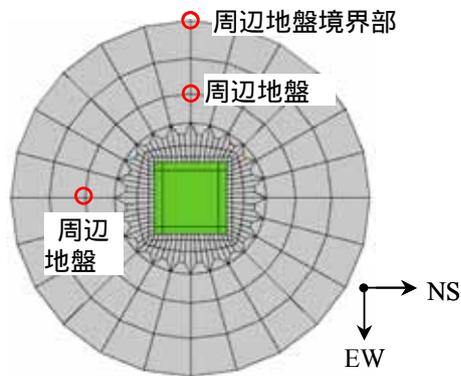
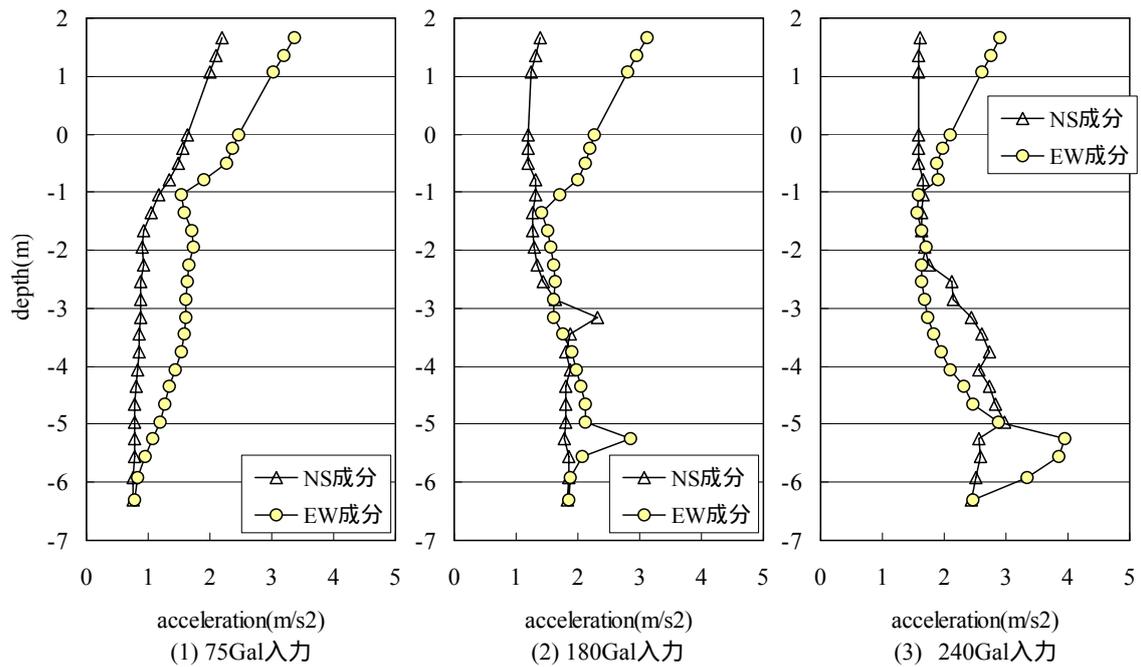
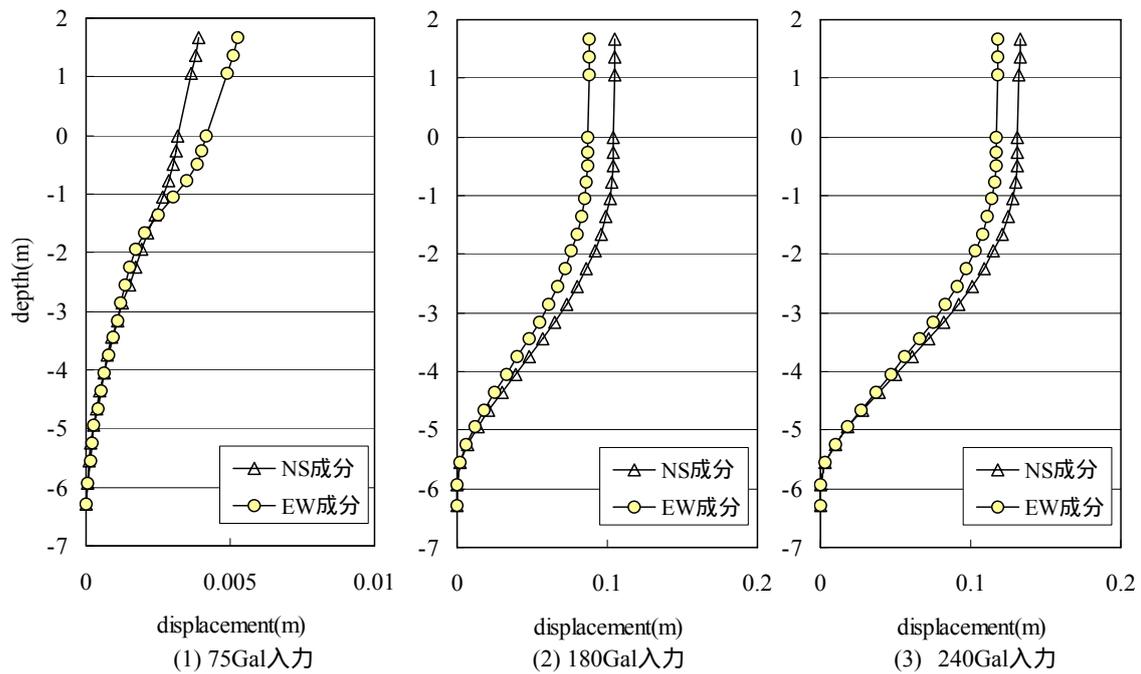


図 18 周辺地盤の最大応答変位の深度分布の比較



(1) 最大応答加速度



(2) 最大応答変位

図 19 中心杭 - 建屋の列の最大応答値分布

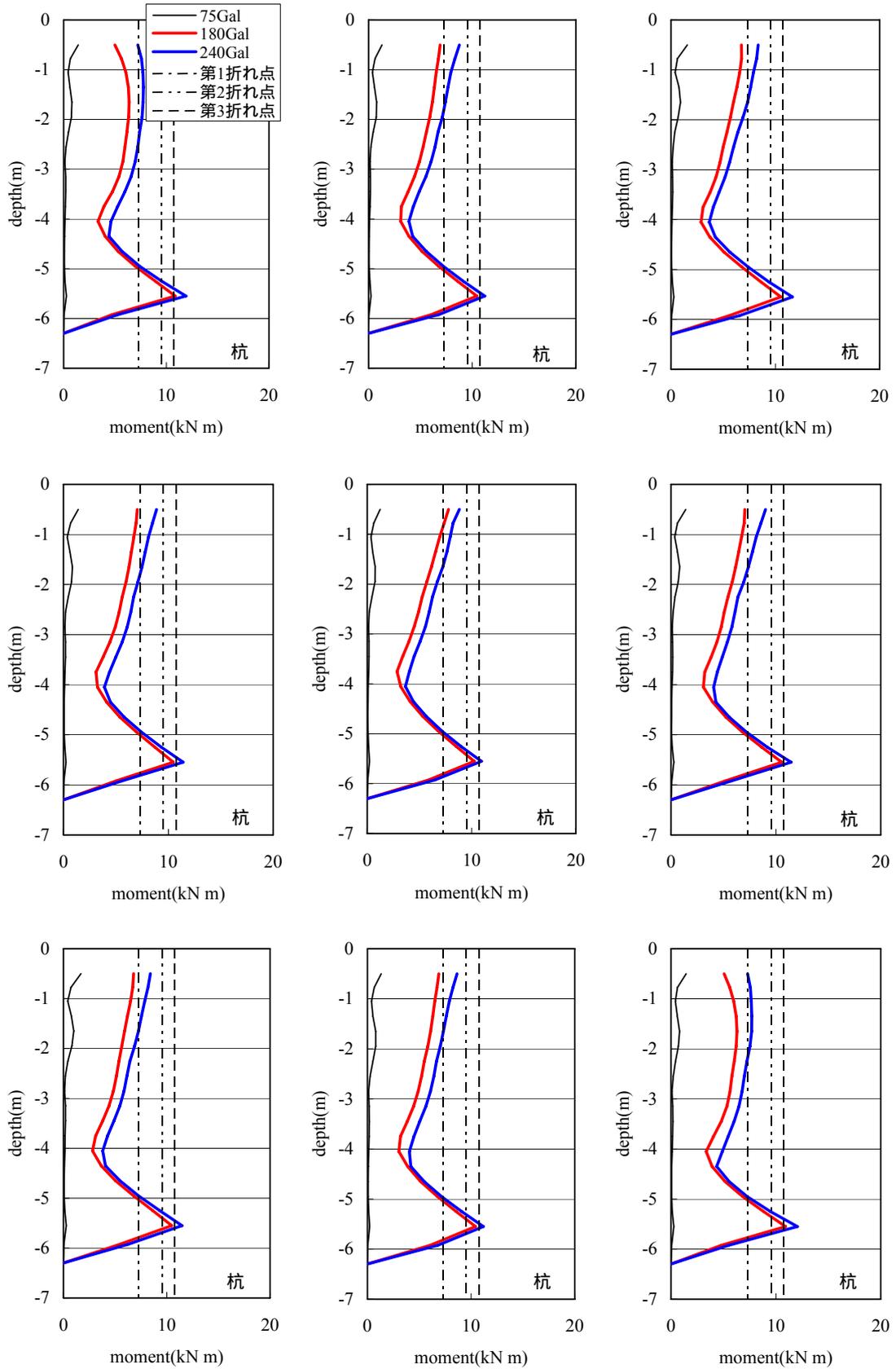


図 20 最大曲げモーメントの深度分布 (NS 方向成分 M_z)

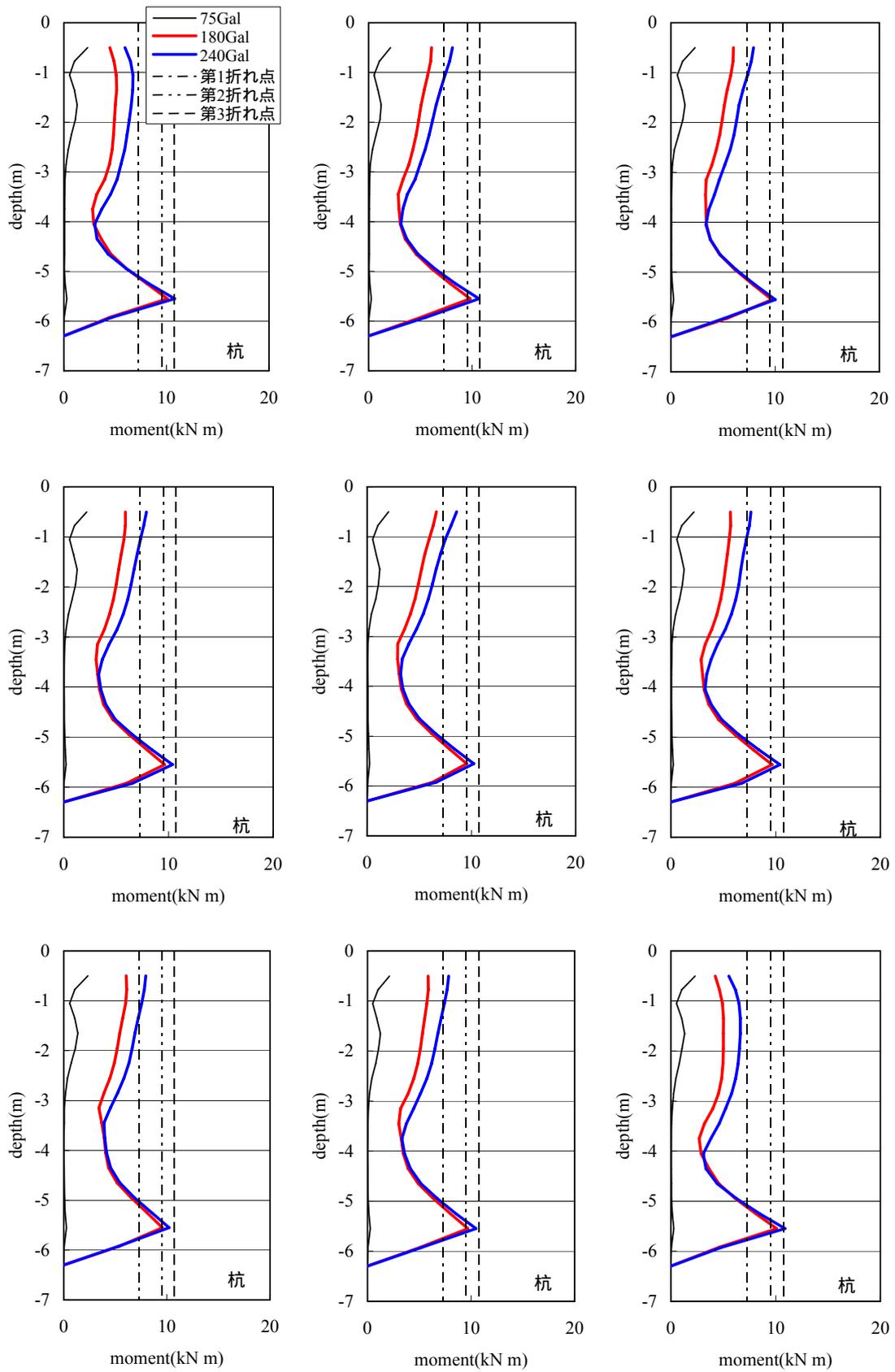
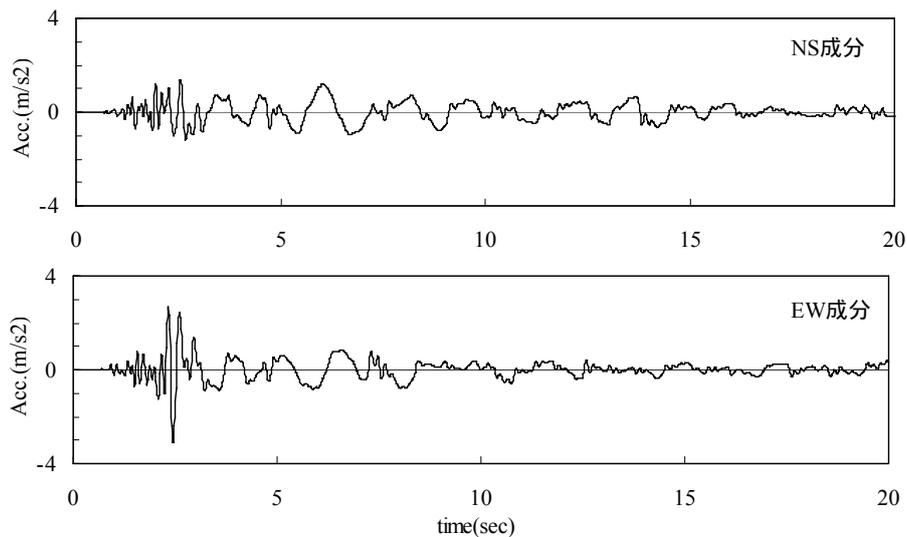
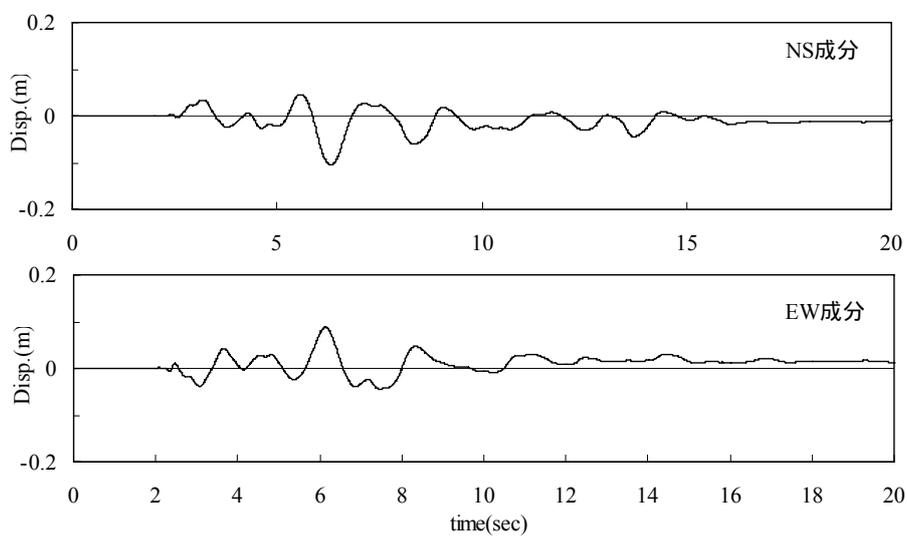


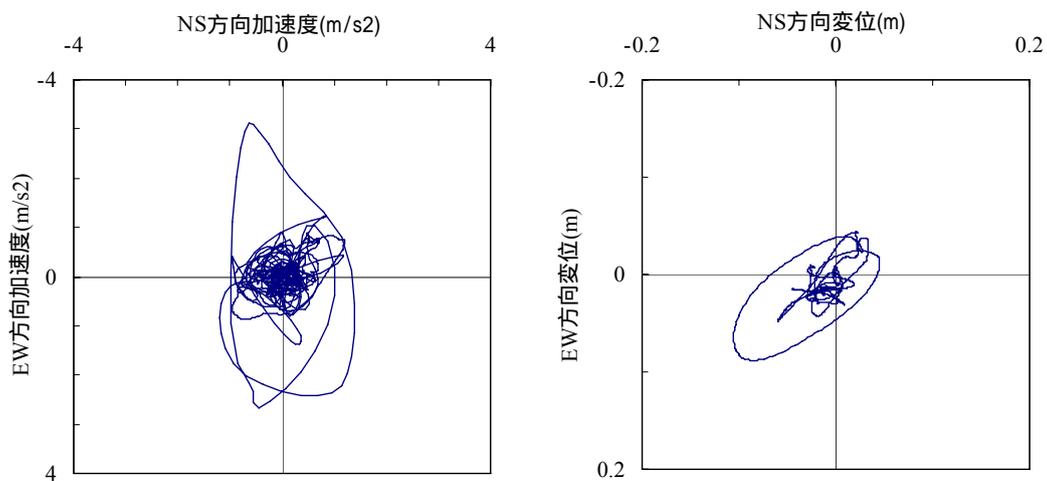
図 21 最大曲げモーメントの深度分布 (EW 方向成分 M_y)



(1) 応答加速度



(2) 応答変位



(3) オービット

図 22 上部構造物の応答の時刻歴

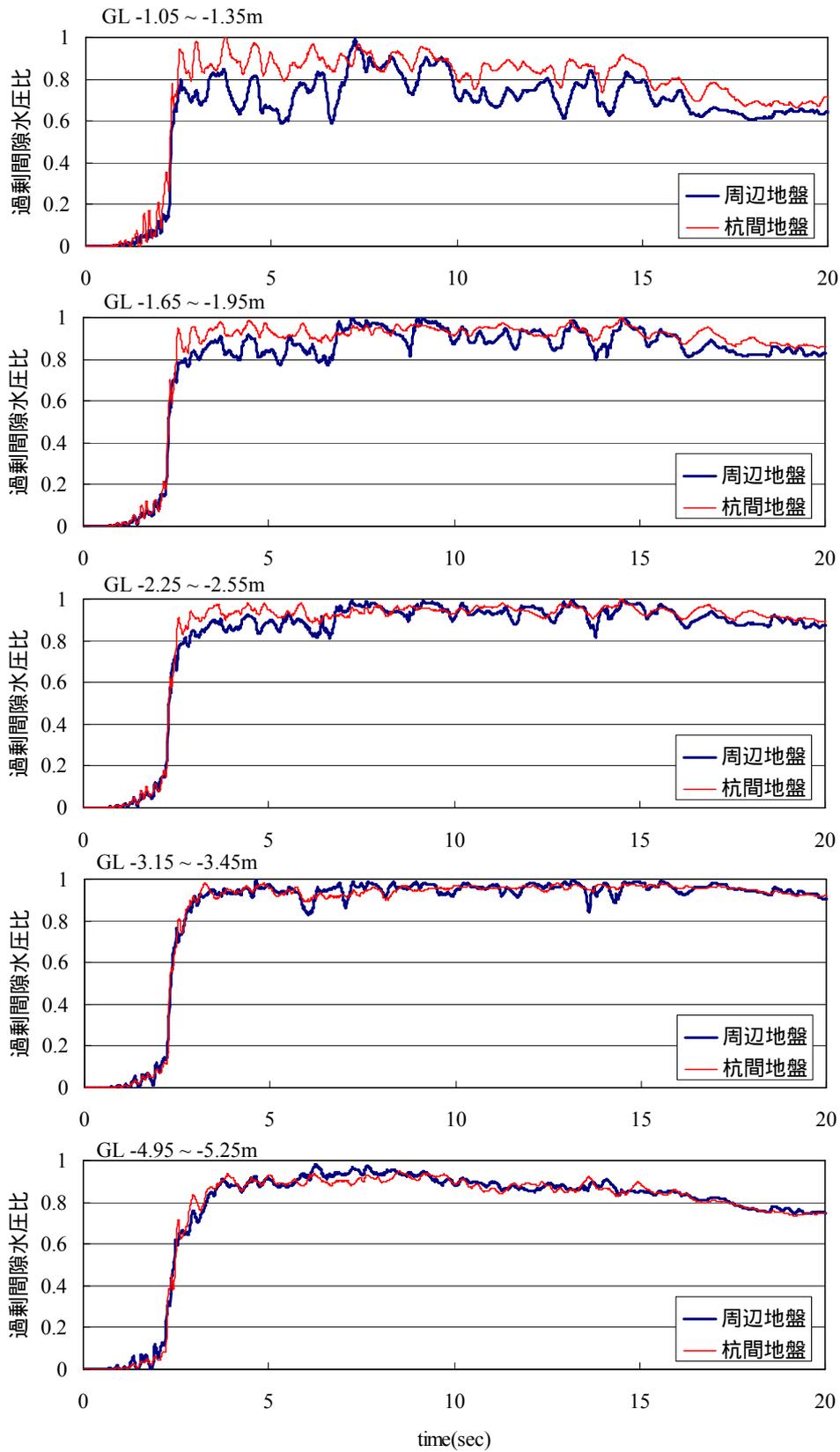
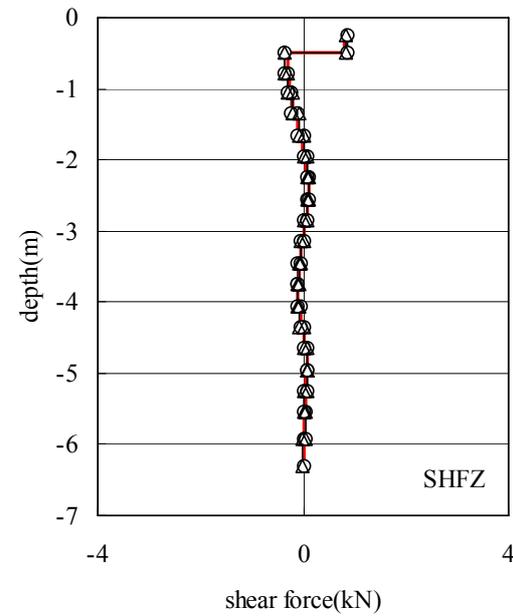
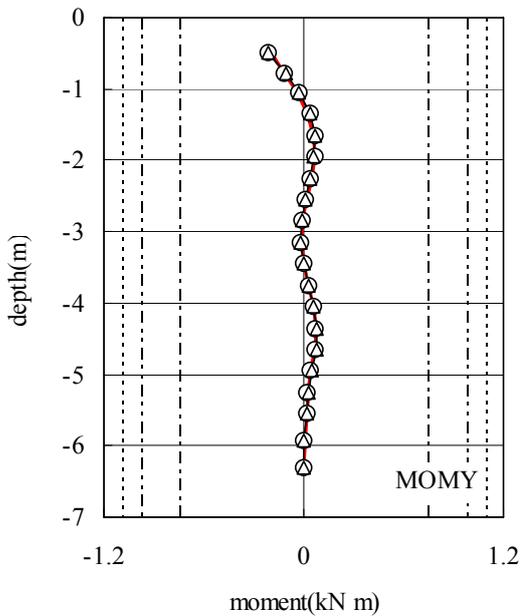
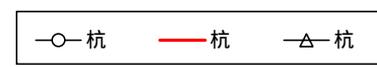
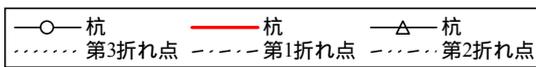
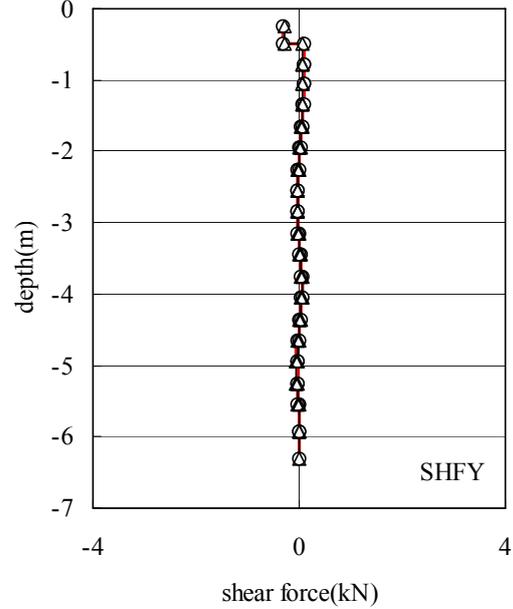
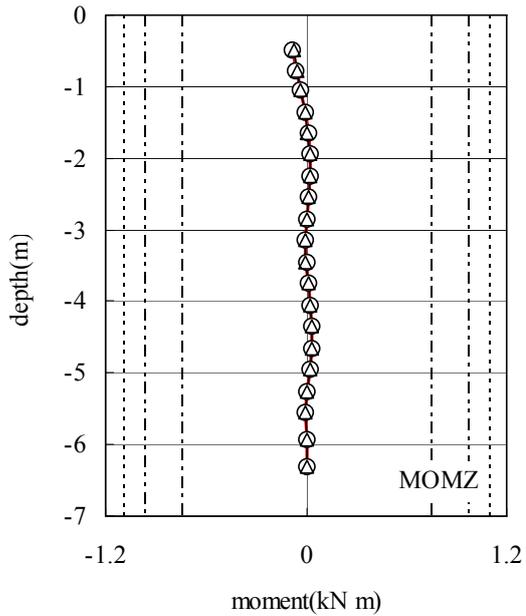
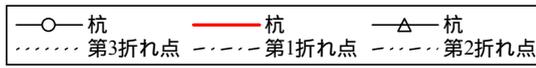
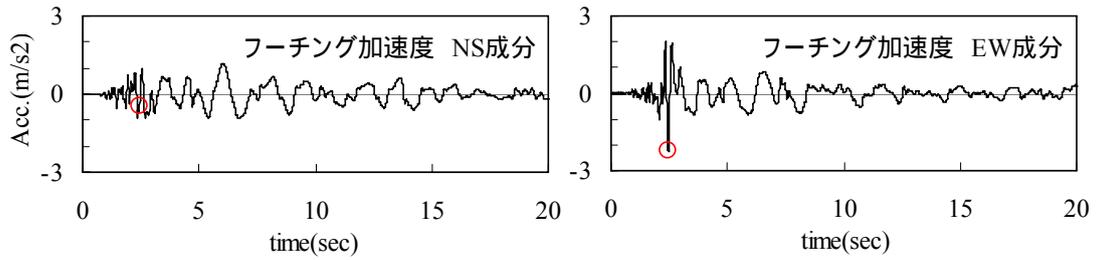
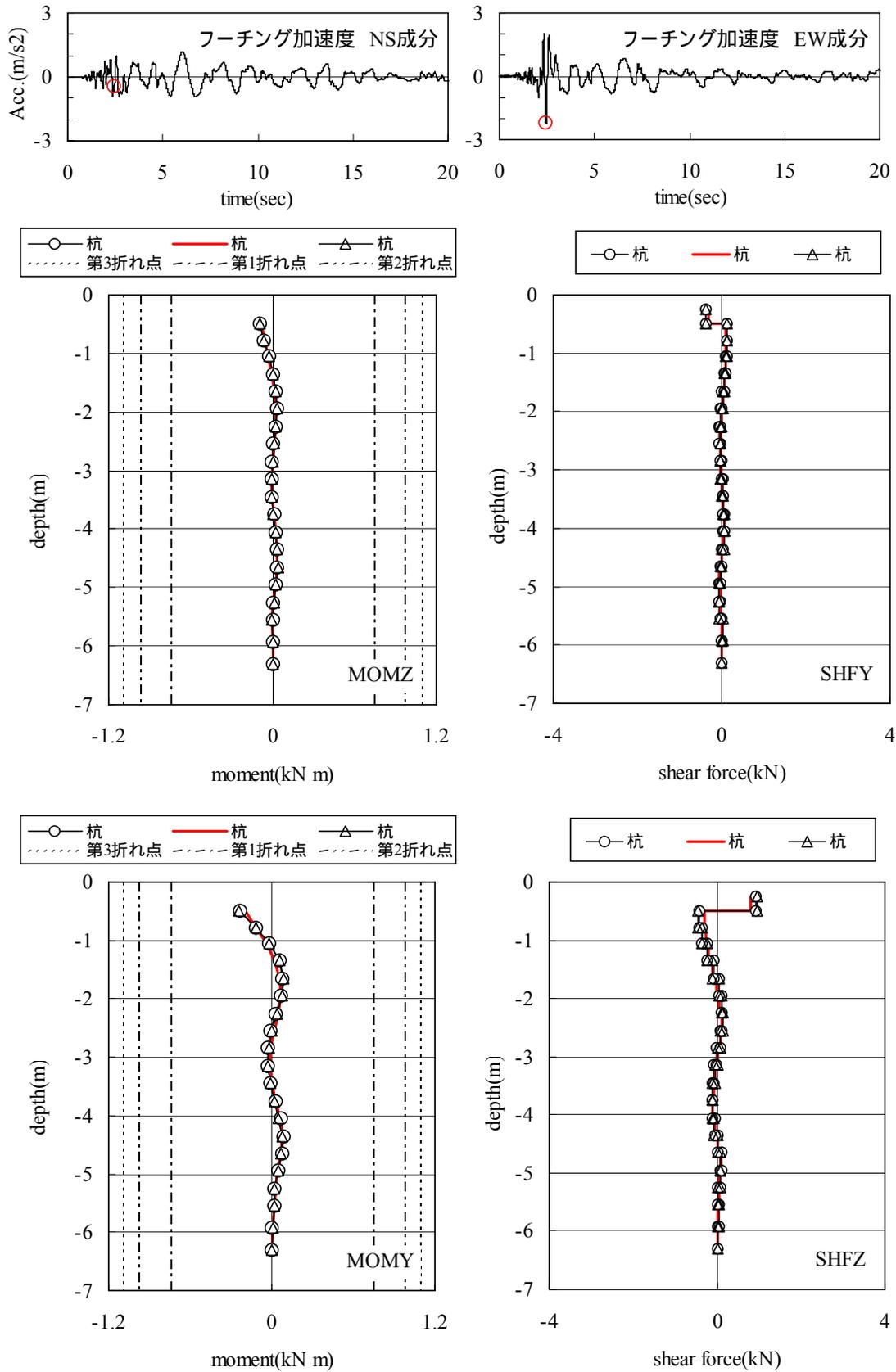


図 23 過剰間隙水圧比の時刻歴



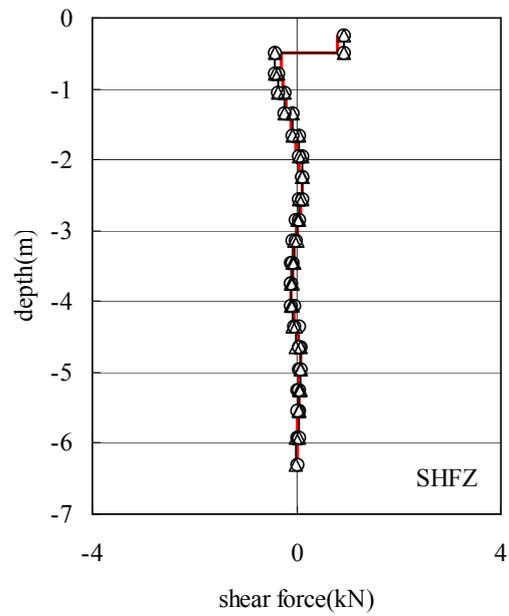
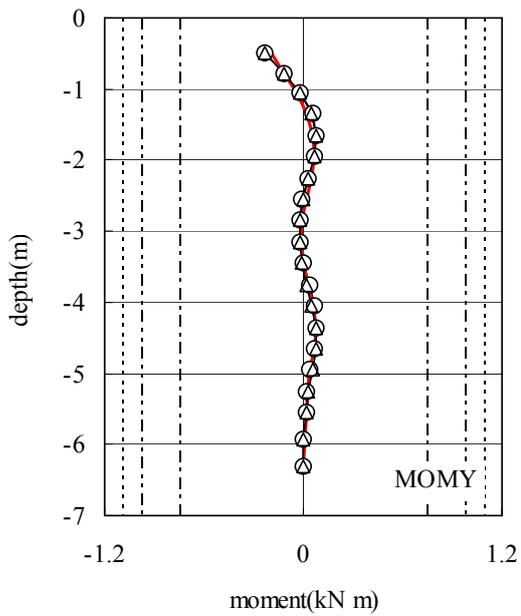
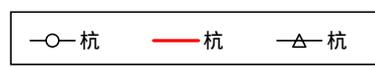
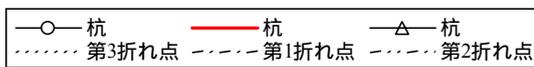
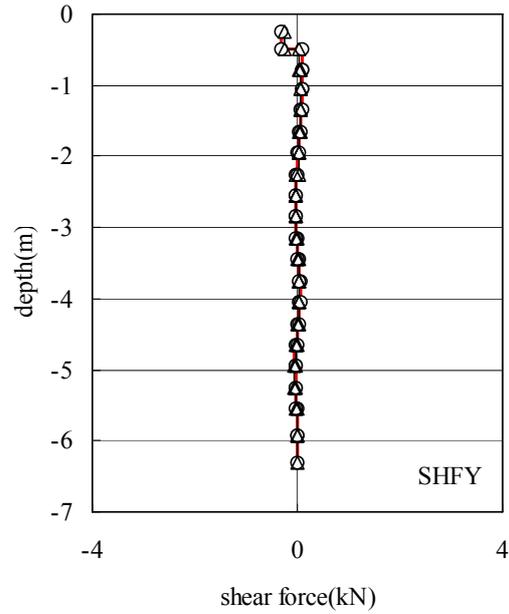
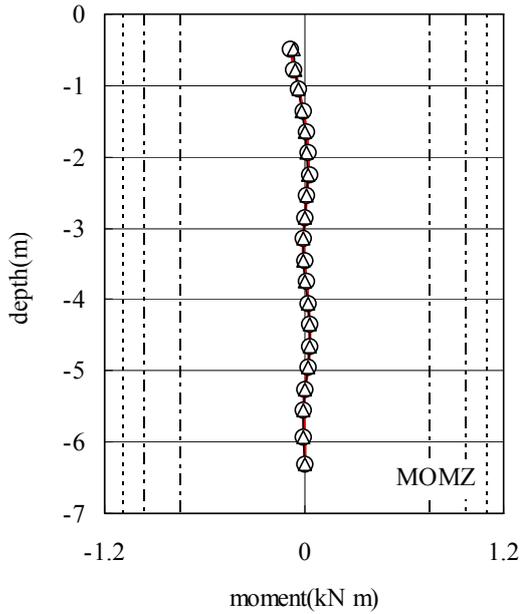
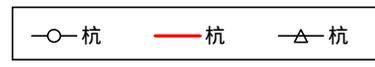
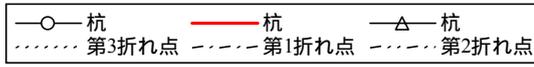
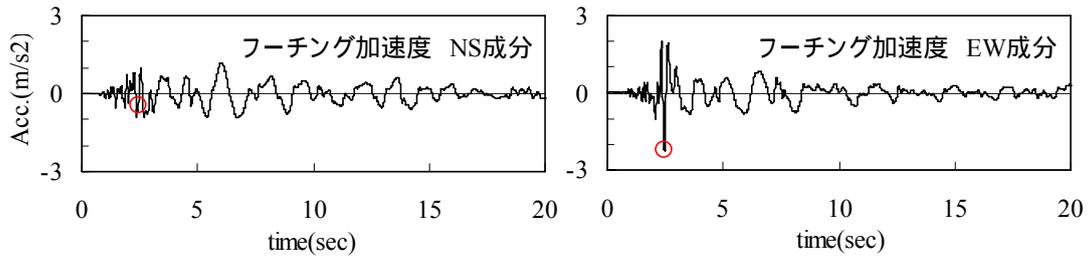
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 24 杭応力の時刻断面 (2.45 秒) における深度分布 杭 - -



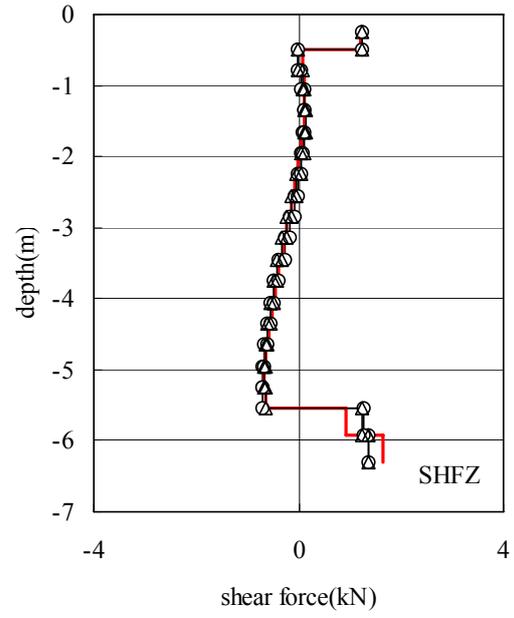
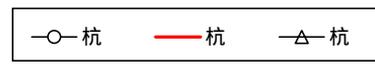
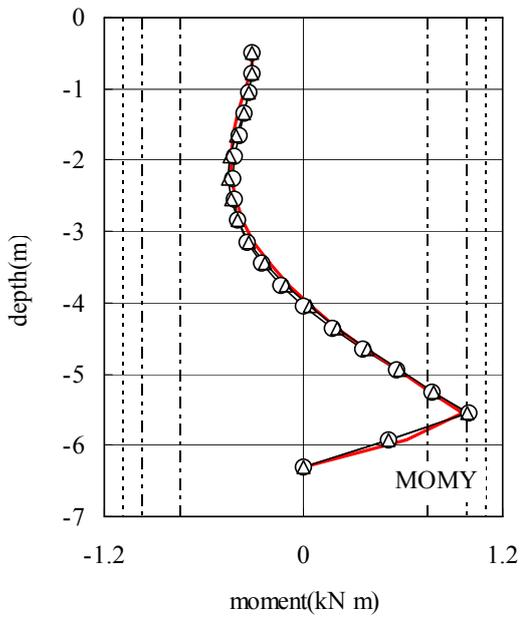
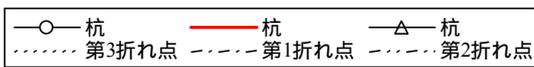
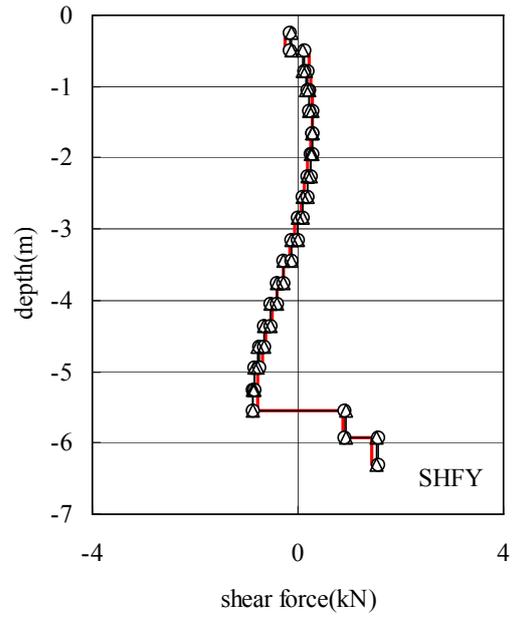
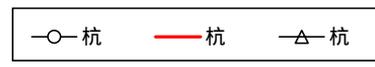
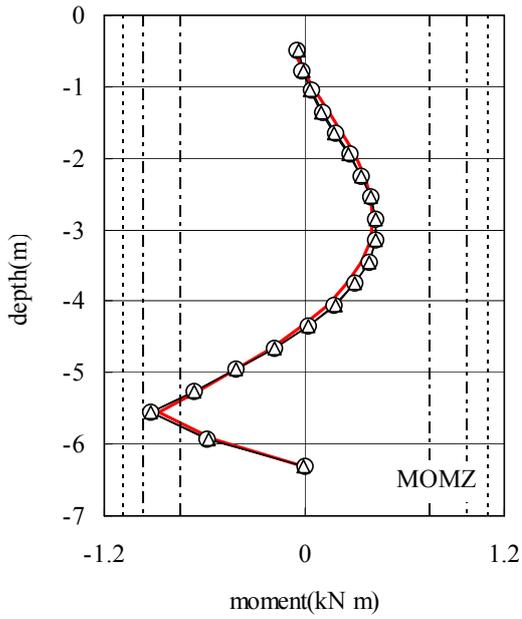
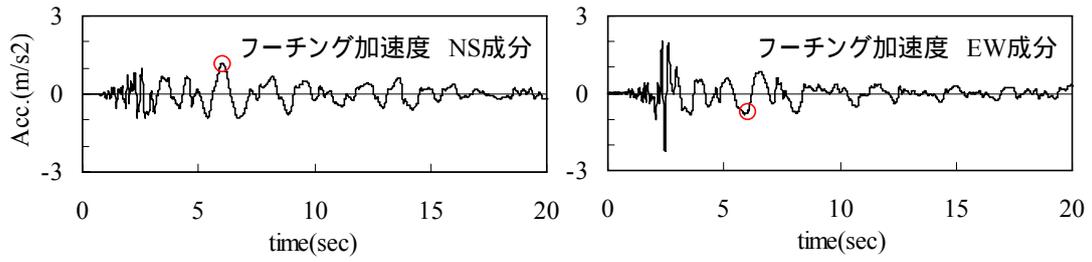
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 25 杭応力の時刻断面 (2.45 秒) における深度分布 杭 - -



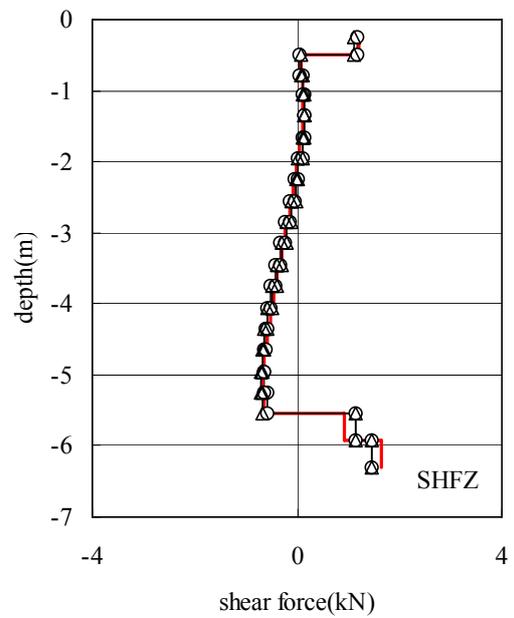
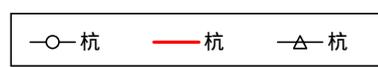
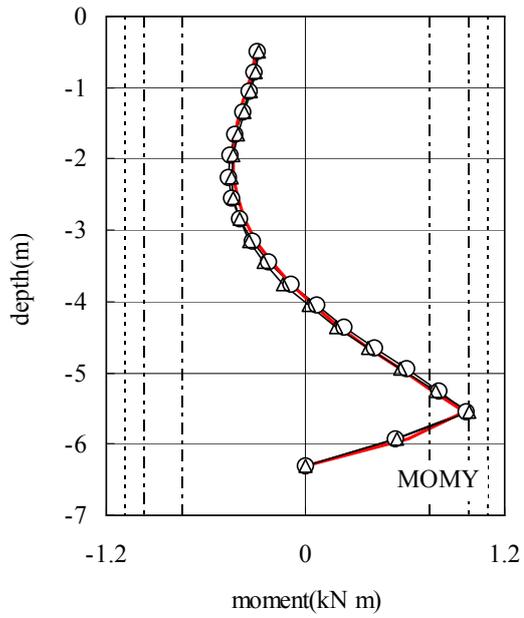
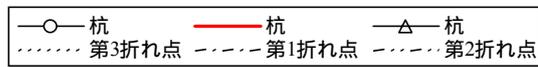
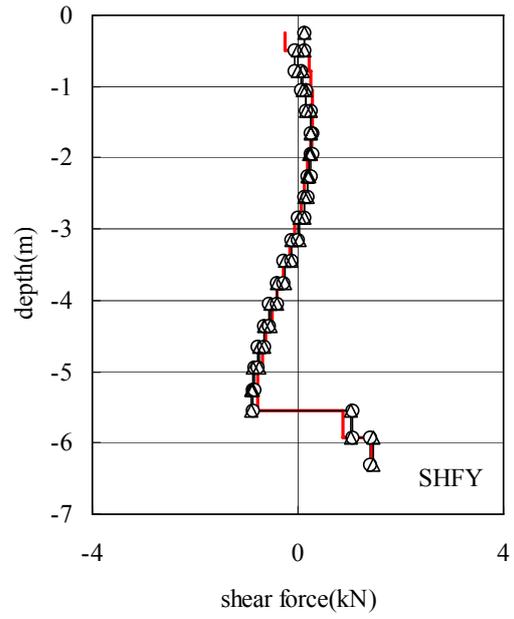
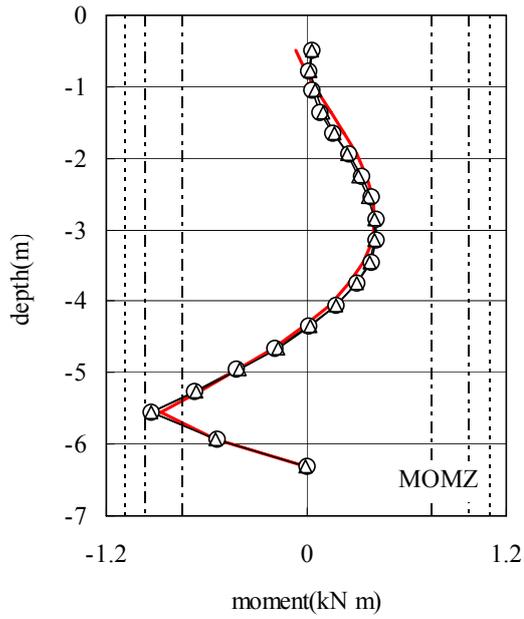
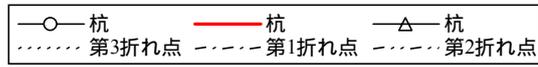
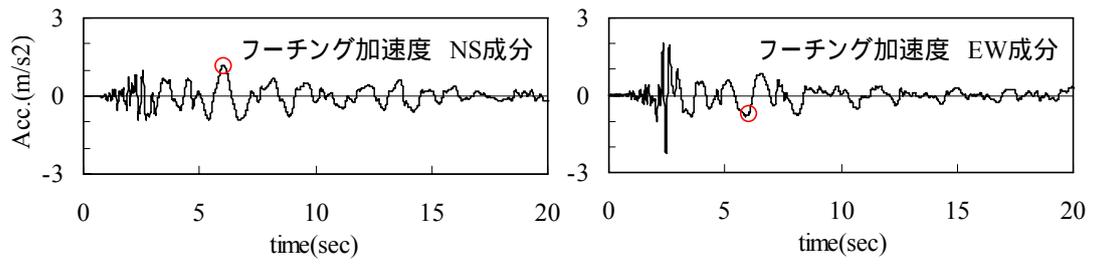
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 26 杭応力の時刻断面 (2.45 秒) における深度分布 杭 - -



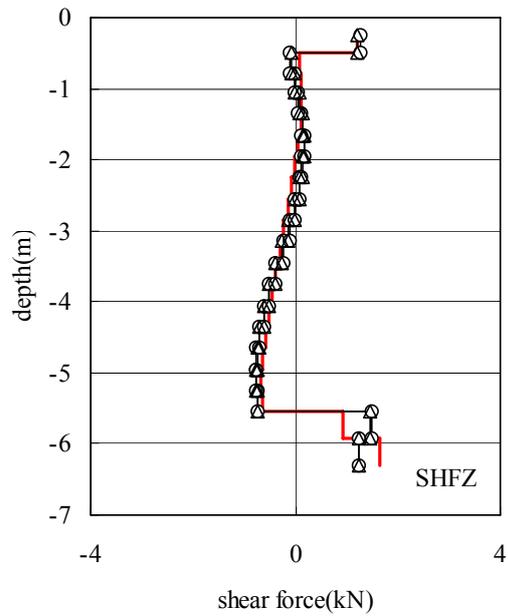
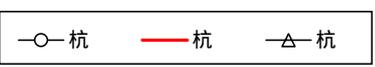
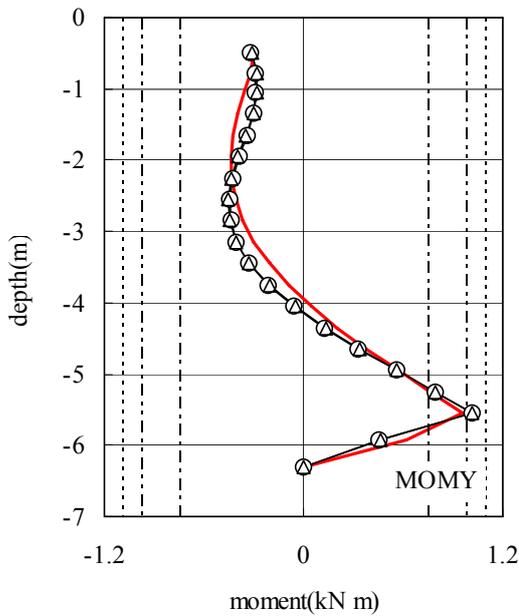
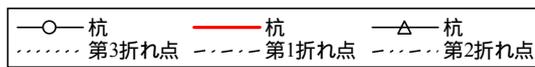
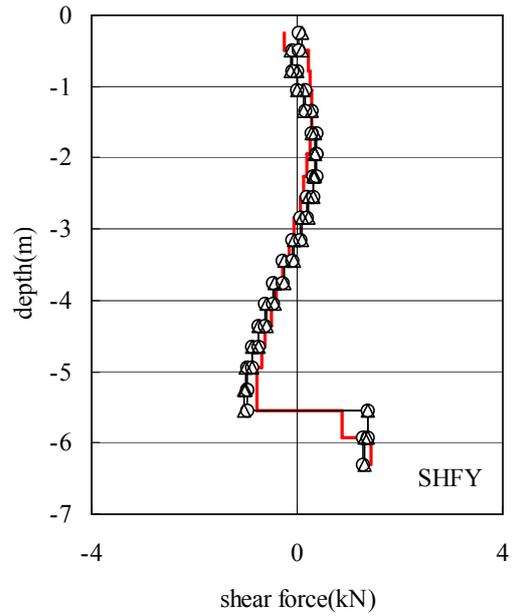
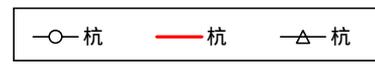
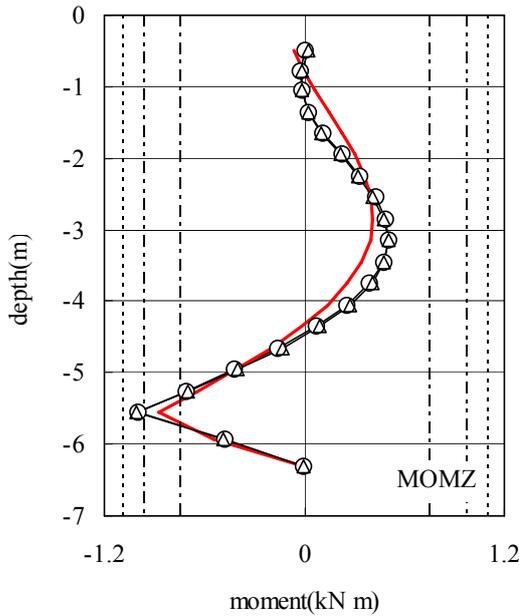
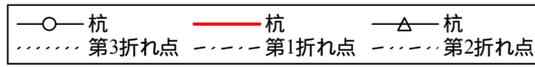
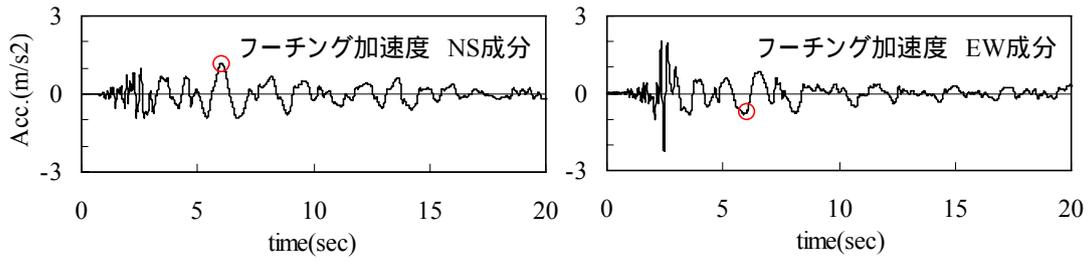
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 27 杭応力の時刻断面 (6.00 秒) における深度分布 杭 - -



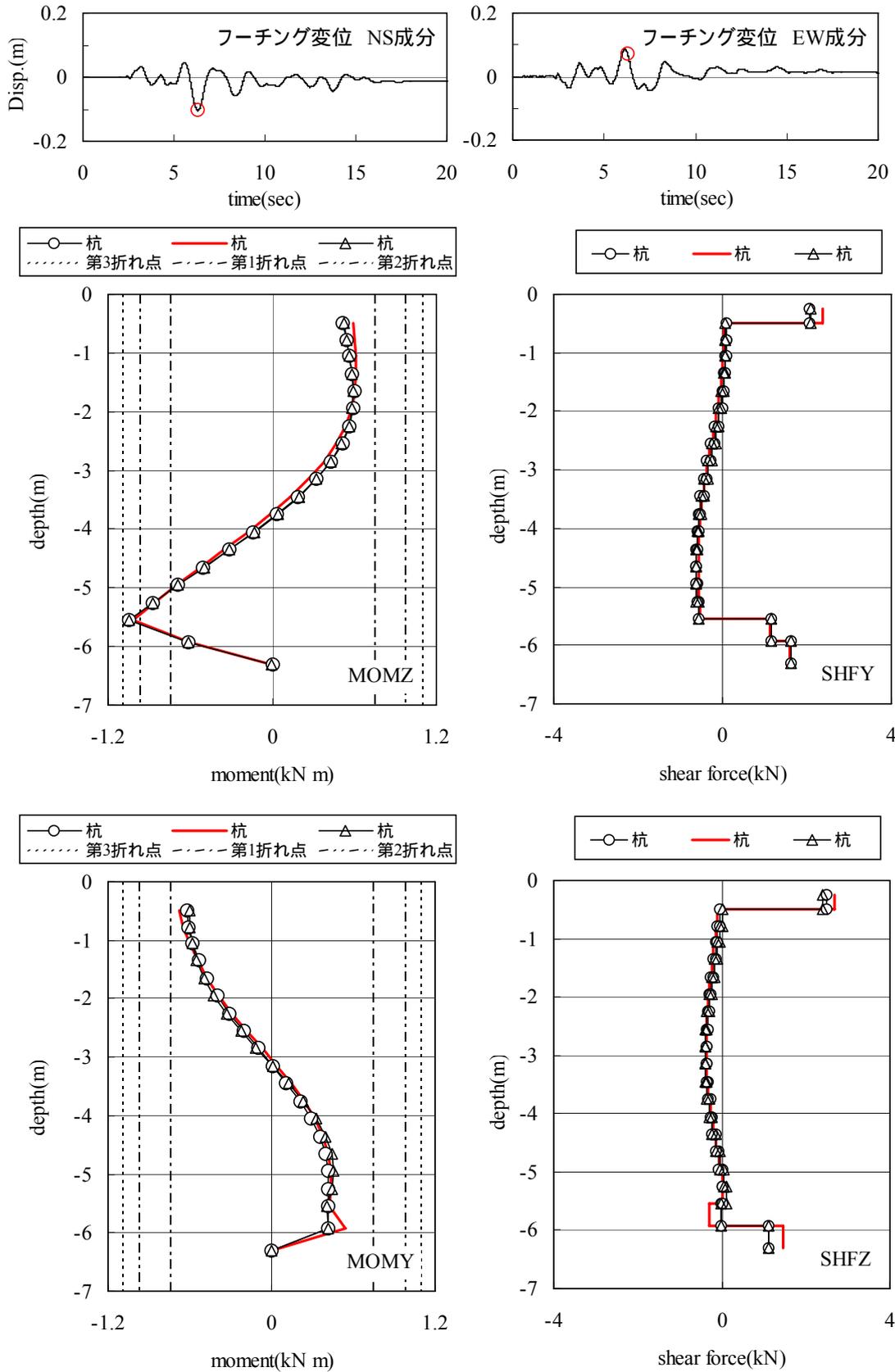
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 28 杭応力の時刻断面 (6.00 秒) における深度分布 杭 - -



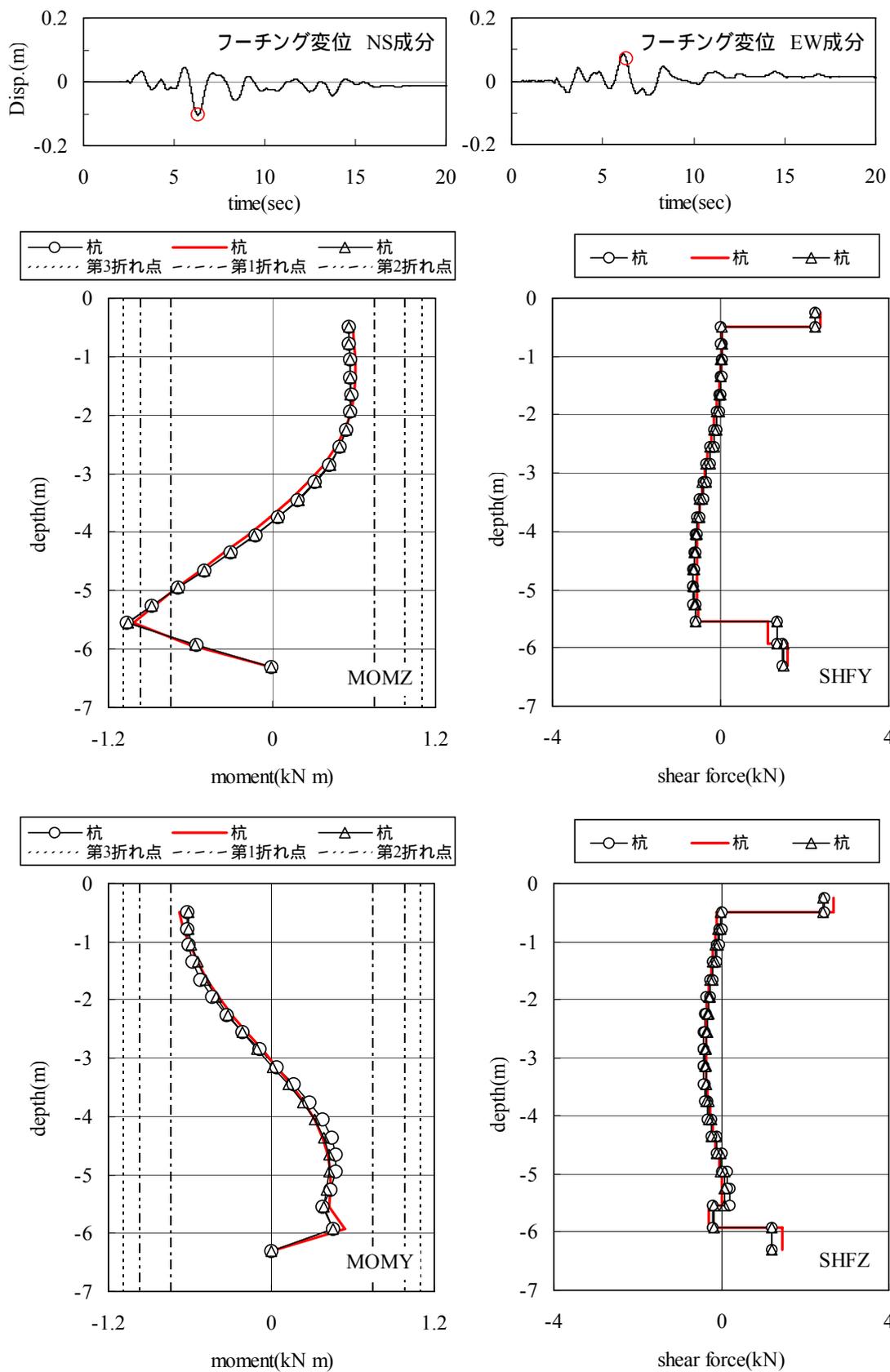
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 29 杭応力の時刻断面 (6.00 秒) における深度分布 杭 - -



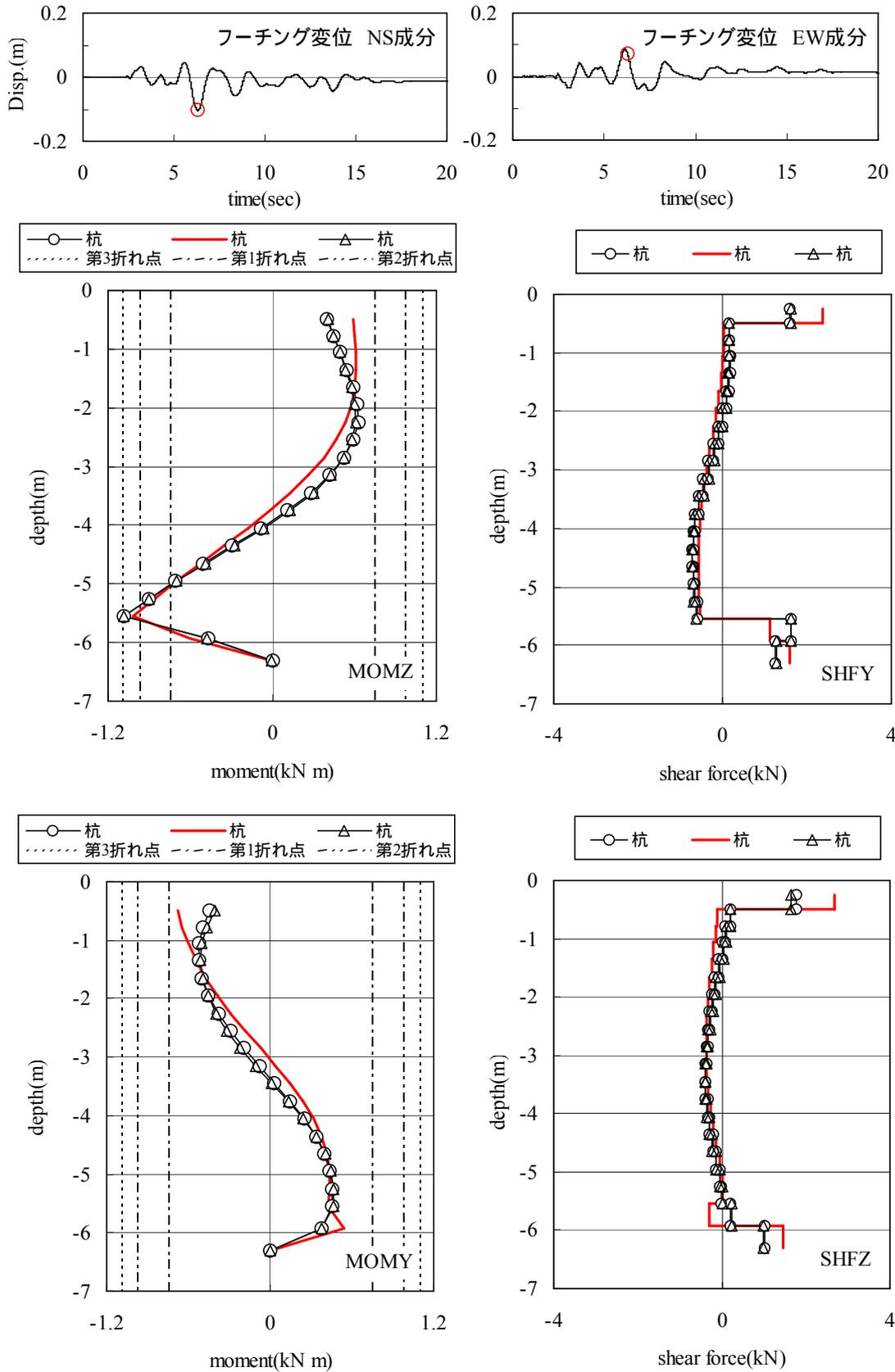
MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 30 杭応力の時刻断面 (6.27 秒) における深度分布 杭 - -



MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 31 杭応力の時刻断面 (6.27 秒) における深度分布 杭 - -



MOMZ, SHFY : NS 方向成分 MOMY, SHFZ : EW 方向成分

図 32 杭応力の時刻断面 (6.27 秒) における深度分布 杭 - -

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 18 年度の研究を通して得られた結論および課題を以下に示す。

- 1) E - ディフェンスで実施される湿潤砂を用いたせん断土槽中の杭の震動実験で用いる入力地震動レベルを検討するために、三次元 FEM を用いた地震応答解析を実施した。その結果、JR 鷹取波の 0.3 倍 (180cm/s²) の入力を入れた場合に、ほぼ液状化対象層で液状化すると予測された。また、杭に発生するモーメントにより杭頭部および支持層境界で塑性化が進むと予測された。
- 2) 杭に発生するモーメントに与える杭配置の影響は比較的小さかった。しかし液状化が進み地盤変形が大きくなる場合には杭配置による応答の違いが大きくなることが考えられる。
- 3) 杭に発生するモーメントの M - 関係の非線形特性を、NS 方向と EW 方向にそれぞれトリリニア型で設定した応答解析を行った。今回の入力地震動では NS 方向および EW 方向でほぼ同時刻に大きな変形が生じると予想されたため、45 度方向に大きな変形が発生した。しかし杭の塑性化はそれぞれ NS、EW 方向で定義しているため、45 度方向で塑性化が進んだ場合には解析が過小評価している可能性がある。
- 4) 地盤の液状化特性のモデル化ではサイクリックモビリティを考慮していないモデルを用いたため、地盤変形が杭の発生応力に大きく影響する結果となった。歪みが大きく伸びてからの有効応力の回復による加速度が杭応力に与える影響などを、実験結果のシミュレーション等と合わせて検証する必要がある。

(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

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

