

一体系動的解析手法による斜杭群杭基礎の動的挙動に関する数値シミュレーション

大川 賢紀¹・亀井 宏之²・張 鋒³・木村 亮⁴

¹正会員 工修 三菱重工業(株)高砂研究所(〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1)

²正会員 工修 三菱重工業(株)神戸造船所(〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

³正会員 工博 岐阜大学 助教授 流域圏科学研究センター(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

⁴正会員 工博 京都大学大学院 助教授 工学研究科都市社会工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

著者らは海上橋基礎への斜杭群杭基礎の適用を想定し、今までに動的遠心模型実験により直杭のみからなる群杭基礎と比較して斜杭を有する群杭基礎の動的挙動を把握している。本論文では、それらの群杭基礎の動的遠心模型実験のプロトタイプを対象として、3次元静的・動的弾塑性有限要素解析コード DGPPILE-3D を用いた地盤・杭基礎・上部構造一体系の動的解析を行い、同手法の妥当性を検証するとともに、杭の変形や断面力の評価において、従来手法である分離法や応答変位法に対する有効性を示した。さらに、一体系動的解析により、杭間隔や杭の傾斜角が群杭の動的挙動に与える影響を詳細に調査した。

Key Words : pile foundation, pile group, inclined pile, dynamic centrifuge model test, dynamic analysis, separated method, seismic deformation method

1. まえがき

ジャケット式鋼管杭基礎は、従来の重力式基礎のフーチングの代わりにジャケット構造を用いて、杭基礎と上部構造を一体化することにより、上部構造の自重や地震時の水平力を大幅に低減できる基礎形式¹⁾である。さらに、同基礎は水平外力に抵抗しやすい斜杭をメインパイルとして配置しやすい基礎構造の一つである。しかしながら、軟弱地盤における斜杭を有する群杭基礎(以下斜杭群杭基礎と記す)の動的挙動はまだ十分明らかにされておらず、海上橋などの重要構造物に適用された実績がないことから、斜杭群杭基礎の動的挙動に関する詳細な調査が必要とされている。

大平ら²⁾は、軟弱地盤中の斜杭を有する道路橋基礎について、実観測記録に基づいた振動特性の調査を行うとともに、2次元有限要素解析により上部工の応答特性や杭体の挙動について考察している。若井ら³⁾は、連続高架橋を対象とした地盤-直杭群杭基礎-橋脚-上部構造の3次元有限要素解析により、大規模地震に対する非線形解析を行っている。また、室野ら⁴⁾は、軟弱地盤における杭の設計において、上部構造の慣性力を地盤に伝える Inertial な相互作用と、地震動を上部構造に伝える Kinematic な相互

作用を静的荷重に置き換えて、骨組モデルにてそれらを考慮する応答変位法による検討を行い、設計指針⁵⁾に反映している。しかしながら、これらの研究では、水平力作用下での群杭の挙動において重要なパラメータである杭間隔や杭の傾斜角と、群杭の動的挙動の関係について十分考察されていない。また、解析における地盤や構造物の非線形性の取り扱いや、特に斜杭を有する群杭基礎における地盤と杭の動的相互作用に関する課題が残されている。

著者らは、今までに、斜杭群杭基礎の支持力特性や終局挙動について、3次元静的弾塑性有限要素解析コード GPILE-3D と遠心模型実験により詳細に調査し⁶⁾、杭の配置や斜杭の傾斜角などのパラメータを設計的にうまく取り入れることにより、従来よりも合理的な杭基礎構造を構築できる見通しを得ている。また、動的遠心模型実験により、直杭のみの群杭基礎と斜杭群杭基礎の動的力学特性の違いについても実験的に把握している⁷⁾。

本論文では、最近開発された3次元静的・動的弾塑性有限要素解析コード DGPPILE-3D⁸⁾により、動的遠心模型実験のプロトタイプを対象とした地盤・杭基礎・上部構造一体系の動的解析を行い、一体系動的解析の妥当性を検証した。また、杭の変形や断面力の評価において、従来手法である分離法や応答変

位法との比較検討を行い、一体系動的解析手法の有効性を示した。さらに、同手法を用いた数値シミュレーションにより、群杭基礎の設計パラメータである杭間隔や斜杭の傾斜角が群杭の動的挙動に与える影響を詳細に調査した。

2. 一体系動的解析手法の検証対象

図-1に示す直杭のみの群杭 (Type A) と、基礎の内側に直杭、外側に傾斜角 10° の斜杭を配置した群杭 (Type B) を用いた動的遠心模型実験⁷⁾により、

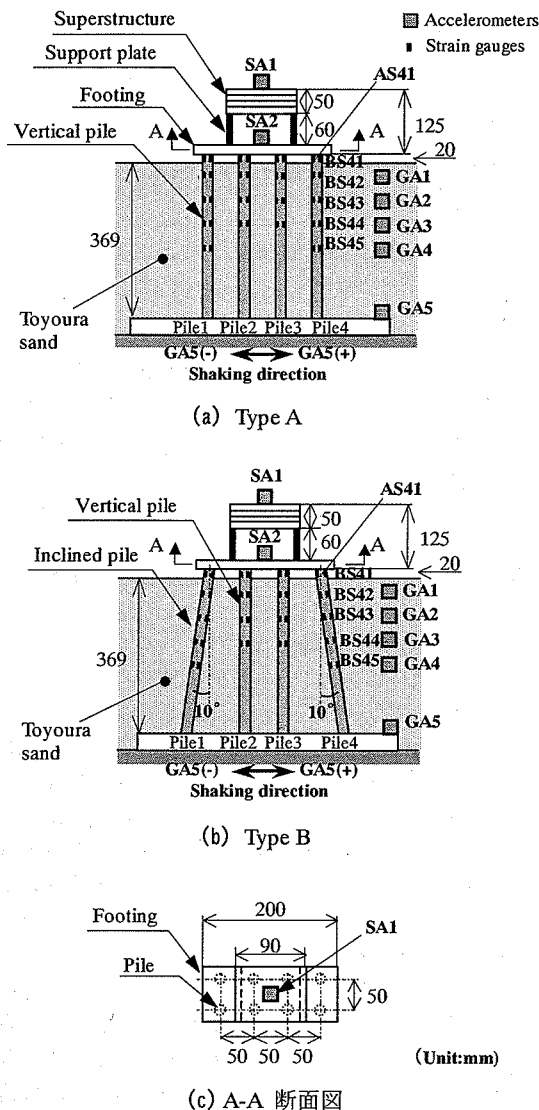


図-1 群杭の実験模型

一体系動的解析手法の妥当性を検証した。群杭の模型は、鋼管杭を想定した外径 20mm、板厚 1mm のアルミパイプ 8 本 (4 本×2 列) の模型杭を十分剛な鋼製治具 (以下フーチングと記す) で固定し、その上に上部構造を模擬したウエイトを剛結したものである。本論文では、杭の変形挙動において、慣性力の影響だけでなく、地盤変位の影響を同位相で考慮する必要がある場合、すなわち地盤の固有周期が構造物の固有周期よりも長くなる⁴⁾ような場合を想定して、上部構造の諸元を設定した。杭間隔はすべて $2.5D$ (D : 杭径、以下杭径を D と記す) とした。杭下端はせん断土槽の底面に杭径分挿入されており、杭先端の支持条件は、押込み側で拘束、引抜き側で自由となっている。模型地盤は、乾燥状態の豊浦砂 ($D_{50}=0.16\text{mm}$) を用いて、緩詰め状態 (相対密度 27%、初期間隙比 0.85) に作成されたものであり、その寸法は、高さ 369mm、幅 510mm、奥行き 330mm である。杭および構造物の諸元と、それらのプロトタイプ換算値を表-1に示す。解析にはプロトタイプ換算値を使用した。図-2に解析に使用した入力地震波を示す。同波形は、遠心加速度 $45g$ 下で行われた動的遠心模型実験の入力加速度をプロトタイプ換算したものである。実験では、兵庫県南部地震時に観測された東神戸大橋周辺地盤の実観測波を模型の縮尺にあわせて振幅およびサンプリングを調整した⁷⁾。

表-1 群杭模型およびプロトタイプの諸元

	Unit	Model	Prototype [*]
Pile			
Length	m	0.389	17.5
Diameter	m	0.02	0.9
Thickness	m	0.001	0.045
Young's modulus	GPa	70.8	70.8
Bending rigidity	Nm ²	1.912×10^2	7.845×10^8
Structure			
Mass of superstructure	kg	3.716	338.6×10^3
Mass of footing	kg	2.097	191.1×10^3
Mass of support plate	kg	0.187	17.1×10^3
Bending rigidity of support plate	Nm ²	1.125×10^2	4.615×10^8
Natural period of superstructure	s	3.18×10^{-3}	0.143

* Model のプロトタイプ換算値を示す。

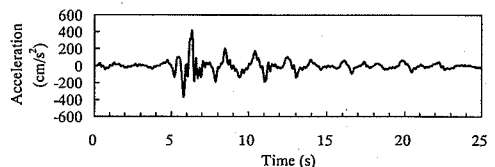


図-2 一体系動的解析に使用した入力地震波

3. 解析手法の概要

(1) 一体系動的解析手法

DGPiLE-3Dにより地盤・杭基礎・上部構造一体系のモデル化を行い、3次元動的解析を行った。群杭の挙動は地盤と杭の相互作用の取り扱いが重要であるため、ハイブリッド要素⁹⁾により地盤中の杭の体積効果を表現した。動的遠心模型実験では、杭が弾性範囲内で応答していたため、杭は弾性要素としてモデル化した。フーチングには弾性ソリッド要素、上部構造には弾性梁要素を用い、上部構造の重量は集中マスで与えた。地盤の構成モデルには t_{ij} -sand model⁹⁾を用いた。 t_{ij} -sand modelの本動的解析における妥当性は、既に実施した地盤および単杭の動的遠心模型実験で得られた地中中部の加速度、杭の曲げひずみおよび杭頭部の加速度の各時刻歴応答との比較により検証¹⁰⁾している。なお、地盤の材料パラメータは表-2に示すとおりである。解析モデルは解析対象の系を2分割し、4本1列群杭とした。例として、Type Bの3次元有限要素メッシュを図-3に示す。節点数は8170、要素数は6804である。構造物、地盤の減衰はそれぞれ5%、10%とした。地盤の境界条件は、底面が固定、側面は等変位境界とした。解析手法はNewmark- β 法による時刻歴動的解析とし、時間刻みは0.01s、2000stepの計20s間の解析を行った。入力地震波には図-2の波形を使用した。

表-2 解析に使用した地盤材料パラメータ

	Symbol	Value
Dry unit weight	γ_d	14.3kN/m ³
Poisson's ratio	ν	0.30
Initial void ratio	e_0	0.85
Strain increment ratio at failure	D_f	-0.60
Principal stress ratio at failure	R_f	4.0
Compression index	C_c	0.009
Expansion index	C_e	0.003
Coefficient about the characteristic of the soil	m	0.30
	α	0.85

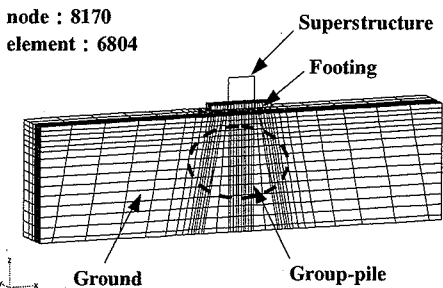


図-3 解析に使用した斜杭群杭基礎の有限要素メッシュ

(2) 分離法

まず、図-4に示すように、地盤・杭基礎一体系をS-R (Sway-Rocking) モデルに置き換えるため、DGPiLE-3Dにより3次元静的弾塑性有限要素解析を行い、地盤・杭基礎相互作用の非線形等価ばね (k_x : 水平方向, k_z : 鉛直方向, $k_{\theta y}$: 回転方向) を求める。ただし、水平方向の等価ばねは図-5に示すように非線形性が強いいため、静的解析で得られた水平方向の荷重-変位関係をトリリニアモデルで近似した。各方向のばね値一覧を表-3に示す。本解析に用いた有限要素メッシュは、図-3の上部構造を省いた地盤・杭基礎一体系モデルであり、解析で使用した物性値は前述の一体系動的解析と同じである。次に、

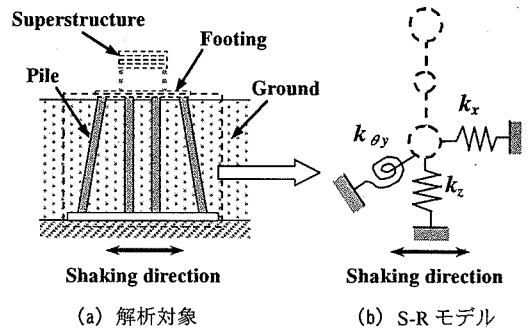


図-4 S-Rモデルへの簡略化

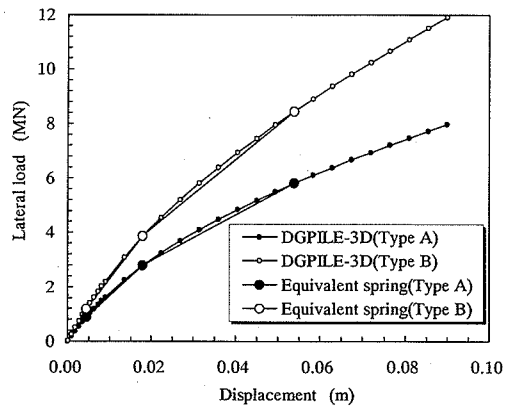


図-5 水平方向の荷重-変位関係とトリリニアモデルによる水平方向の等価ばね

表-3 等価ばねの数値一覧

Unit	Displacement	Type A	Type B	
k_x	MN/m	up to 0.45cm	1.98×10^2	2.67×10^2
	MN/m	0.45~1.8cm	1.55×10^2	2.14×10^2
	MN/m	1.8~5.4cm	1.07×10^2	1.56×10^2
k_z	MN/m	—	3.14×10^3	3.17×10^3
$k_{\theta y}$	MN·m/rad	—	2.94×10^4	2.58×10^4

上記静的解析で得られた等価ばねと上部構造の骨組モデルを結合し、簡略化された S-R モデルの動的解析を行う。動的解析により上記等価ばねの最大発生力を求め、得られたそれぞれの発生力を外力として、再度 DGPIL-3D を用いて、静的弾塑性有限要素解析により各杭の断面力を求める。動的解析における等価ばね、梁要素の減衰はそれぞれ 10%, 5% とした。S-R モデルによる動的解析において、モデルの下端に入射する地震動としては、基盤波ではなく、地表面位置における地震波を採用する。したがって、本解析では、図-6 に示す動的遠心模型実験で得られた地表面加速度を用いた。他の解析条件は一体系動的解析と同じである。また、地震力は水平力が支配的になるため、静的解析の外力として用いられる等価ばねの最大発生力は、水平ばね反力が最大になる時の各ばね反力に設定した。

(3) 応答変位法

応答変位法による解析手順を図-7 に示す。まず成層地盤を仮定し、地盤の 1 次元地震応答解析を行

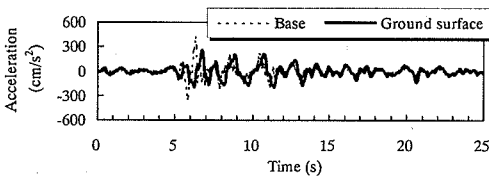


図-6 動的遠心模型実験で得た地表面加速度

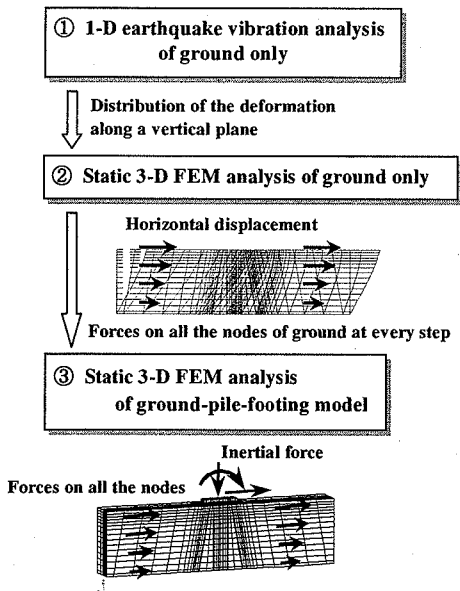
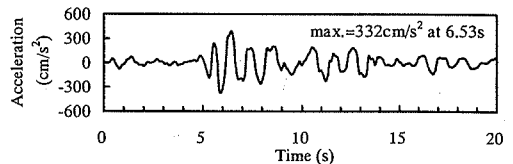
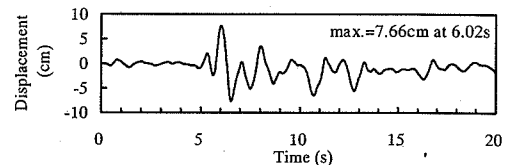


図-7 応答変位法による解析手順

い、地表面の変位が最大になる時刻 (6.02s) の地盤変位の鉛直方向分布を求める。図-8 に地表面の加速度および変位の時刻歴を、図-9 に 6.02s における地盤変位の鉛直方向分布を示す。地盤の材料パラメータおよび入力地震波は一体系動的解析と同じとし、地盤の境界条件は、底面が固定、側面は等変位境界とした。次に、図-3 のモデルの上部構造を取り除き、地盤中の杭要素をすべて地盤要素に置き換えた地盤要素のみの 3 次元有限要素モデルの各節点に、1 次元地震応答解析で求めた地盤変位分布を分割して与え、解析領域における地盤の全節点の節点力を求めた。さらに、杭、フーチング、地盤からなる有限要素モデルの地盤の各節点に上記節点力を与えると同時に、S-R モデルを用いた動的解析で得た水平、鉛直、回転方向のばね反力を群杭基礎に作用する慣性力として静的に与えることにより、杭の断面力を評価した。地盤変位による荷重と構造物の慣性力は、前述のモデルの考え方にに基づき、同位相で基礎に作用させた。



(a) 加速度



(b) 変位

図-8 地震応答解析で得た地表面の加速度および変位

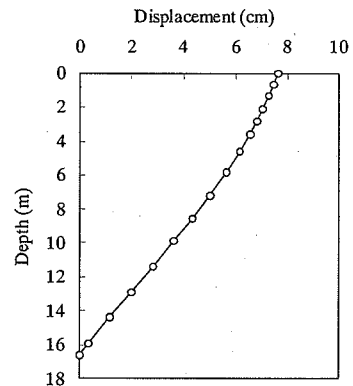


図-9 地表面変位が最大の時の地盤変位分布

4. 一体系動的解析による動的遠心模型実験の数値シミュレーション

(1) 地盤および構造系の加速度の時刻歴

図-10 および図-11 に、それぞれ Type A と Type B の上部構造、フーチング、地盤中の加速度の時刻歴について、動的遠心模型実験と一体系動的解析を比較して示す。いずれの観測点においても、全観測時間にわたって実験と解析が概ね対応した結果となっている。応答加速度の振幅レベルは動的遠心模型実験に対し一体系動的解析の方がやや大きいのが、杭に対する外力としては安全側に評価できているため、実用上問題ない。各観測点の最大加速度が発生する時刻 6s から 7s 付近に着目すると、Type A は上部構造やフーチングの加速度が地表面付近の地盤加速度

よりも増幅されているに対し、Type B はほとんど増幅されおらず、基礎の両端に斜杭を配置することにより上部構造の応答が抑制される傾向が実験でも解析でも同様に示されている。これは、後に示す杭頭の軸力の結果に見られるように、群杭に水平外力が作用したとき、Type B では、Type A よりも杭に軸力が導入されやすく、作用した外力に対して、曲げ抵抗に加えて軸力で抵抗できるためである。

(2) 杭の曲げモーメントおよび軸力の時刻歴

図-12 および図-13 に、それぞれ Type A と Type B の杭頭部から地中部における杭の曲げモーメントの時刻歴について、加速度と同様に実験と解析を比較して示す。これらの図には、基礎の内側および外側に配置された杭として、それぞれ杭 3 と杭 4 を選

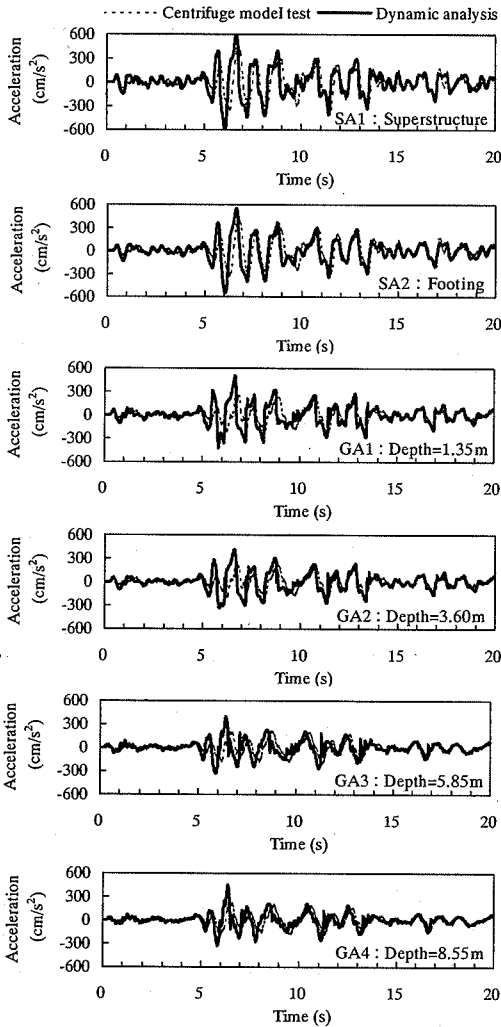


図-10 Type A の上部構造、フーチングおよび地盤の加速度の時刻歴

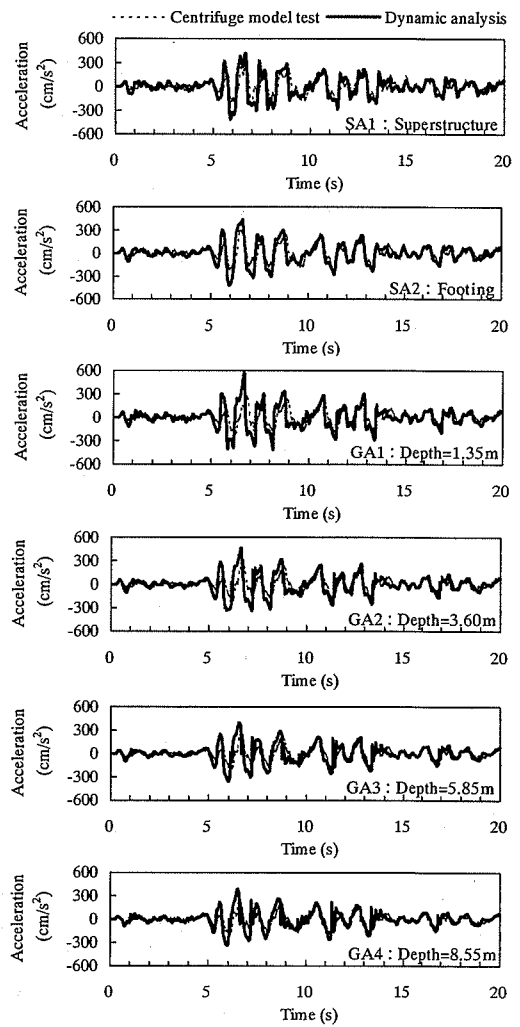
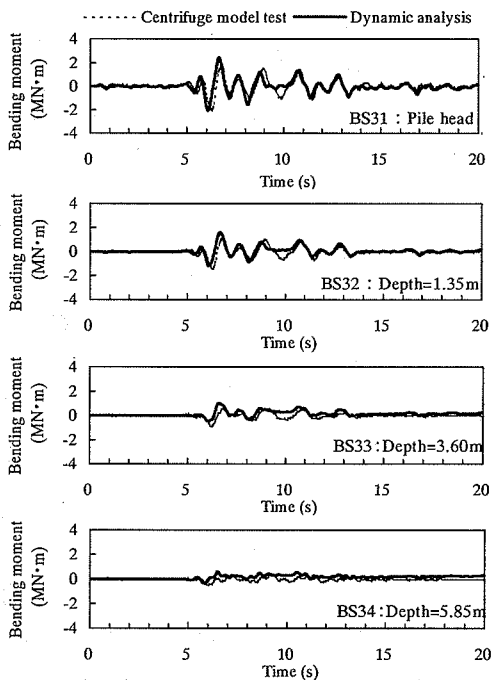
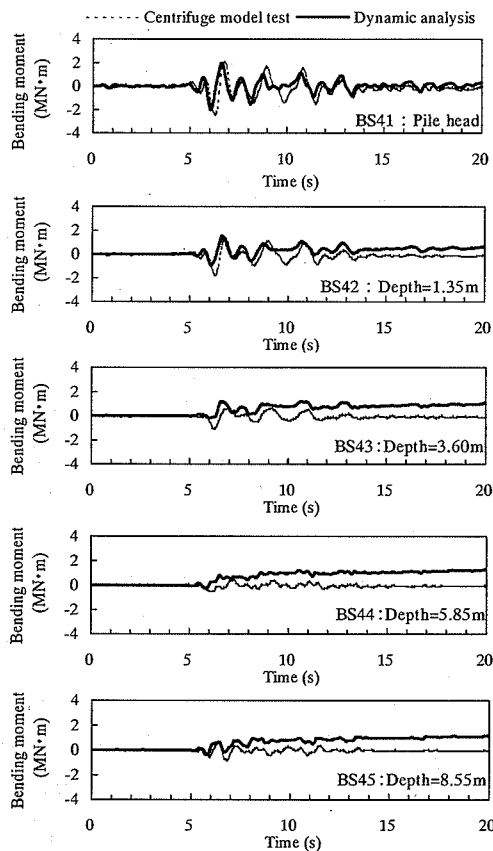


図-11 Type B の上部構造、フーチングおよび地盤の加速度の時刻歴

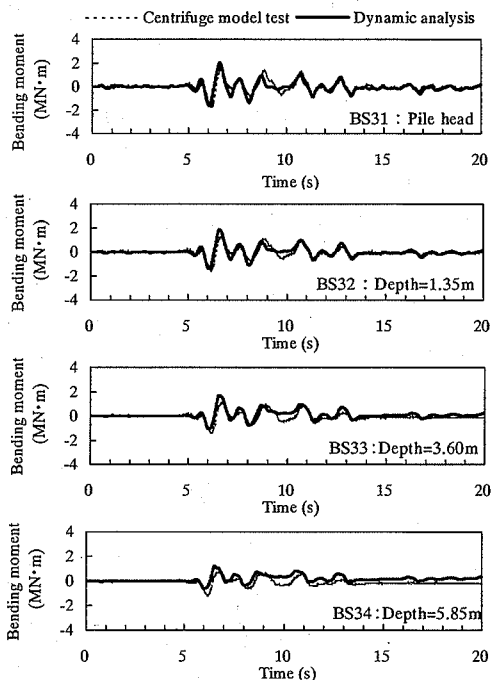


(a) 基礎内側の杭 3

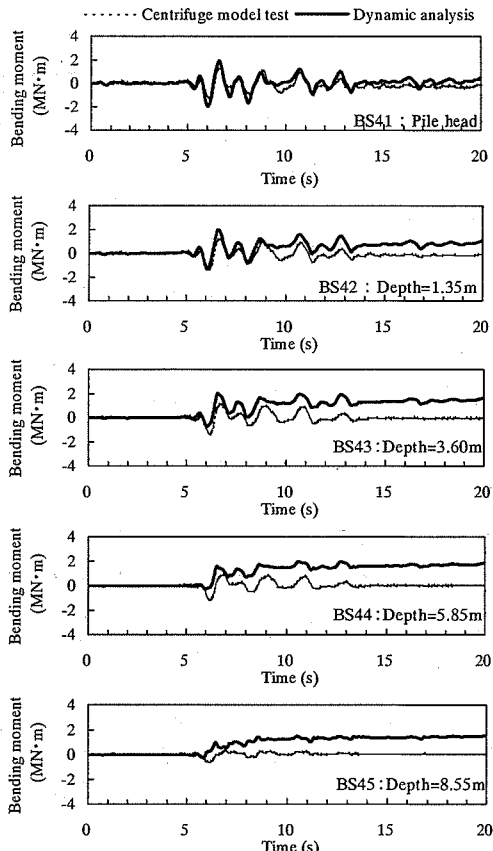


(b) 基礎外側の杭 4

図-12 Type A の杭の曲げモーメントの時刻歴



(a) 基礎内側の杭 3



(b) 基礎外側の杭 4

図-13 Type B の杭の曲げモーメントの時刻歴

んだ。Type A、Type B ともに、いずれの杭においても杭頭部の曲げモーメントが最も大きく、地中深くなるにつれてモーメントが小さくなることや、Type Bの方が地中部でのモーメントが大きくなることなど、実験結果を本解析は良好にシミュレートしている。ただし、基礎外側の杭4の地中部における応答に着目すると、解析結果では残留ひずみが大きく発生している点が実験結果と異なる。これは、実験で使用しているせん断土槽のアルミ枠のはずれ防止用のラバーが最大加速度付近で加振している場合は、地盤のせん断振動にそれほど影響を与えずスムーズに変形するが、実験後半の加振加速度が小さい時間領域においては、変位した枠がラバーの復元力で地盤の残留ひずみを抑えてしまうため、外側の杭に発生するはずの残留ひずみが実験では抑えられた結果となっていると推定される。内側の杭は後述のとおり基礎外側よりも内側の杭にはさまれた領域の地盤変位は小さいために、その分、杭の残留ひずみに対する寄与度は小さいと考えられる。なお、杭1および杭2の傾向はそれぞれ杭4および杭3と同様の傾向を示すため本論文では省略した。

図-14 および図-15 に、Type A と Type B の各杭の杭頭部における軸力の時刻歴について、実験と解析を比較して示す。図中の軸力は、圧縮側が正、引張側が負である。Type A では、基礎外側の杭1およ

び杭4の軸力が大きく、基礎内側の杭2および杭3の軸力が小さくなることや、Type Bでは、各杭の軸力はほぼ同等で、例えば6.5s付近における軸力の発生方向は、杭1から順に圧縮、引張、圧縮、引張となるなど、軸力発生パターンを本解析は適切にシミュレートしている。このType Bの軸力発生パターンは、基礎が変位する方向に対し、前方の斜杭が突っ張り、フーチングが反り上がることによって生じる。これは斜杭群杭基礎の特徴的な支持力特性である。

(3) 杭の変形挙動に地盤変位が与える影響

群杭の動的挙動における地盤変位の影響を解析的に把握するため、地盤・杭基礎・フーチング・上部構造全体モデル (Full system) と、全体モデルから上部構造を取り除いた地盤・杭基礎モデル (Ground + Foundation) の一体系動的解析を Type A と Type B について行った。図-16~図-18 に、杭頭部の曲げモーメントが最大になるときの各杭の水平変位、曲げモーメント、軸力の分布について、両モデルを比較して示す。地盤・杭基礎モデルでは、全体モデルと同様にソリッド要素でモデル化したフーチングで杭頭部を固定しているが、フーチングの質量を極力小さくし慣性力の影響が無視できるようモデル化した。なお、これらの分布図は、Type A は時刻 6.65s、Type B は 6.62s における結果を示し、それぞれの時刻に

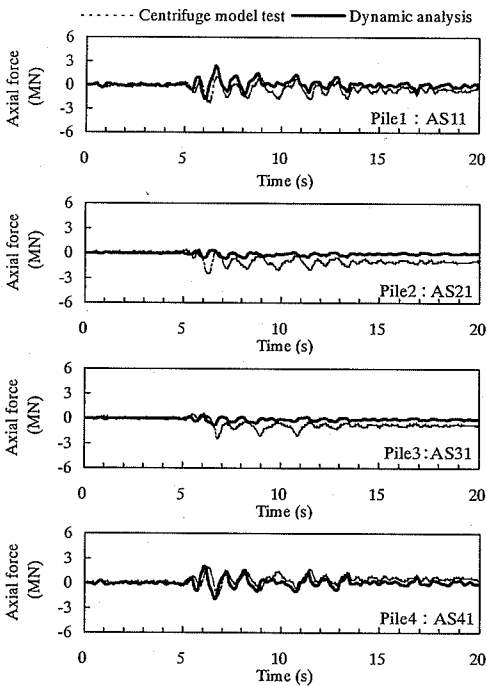


図-14 Type A の杭頭部軸力の時刻歴

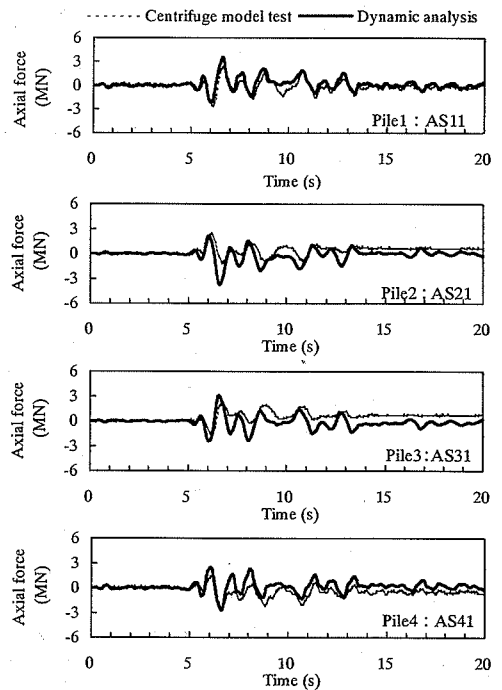
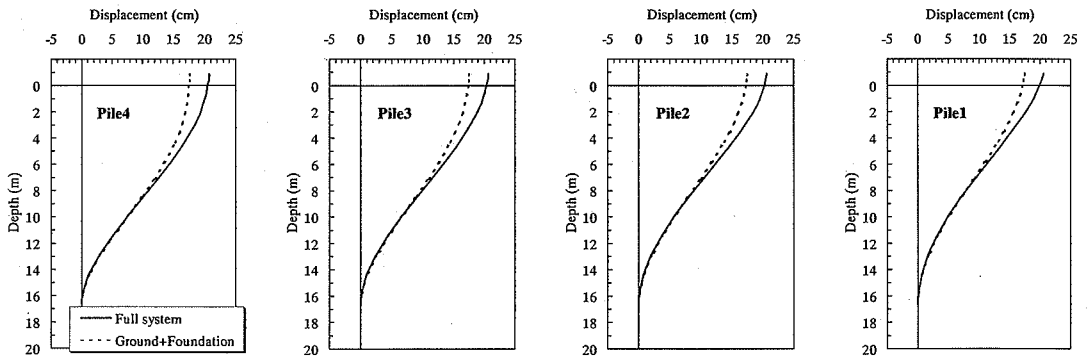
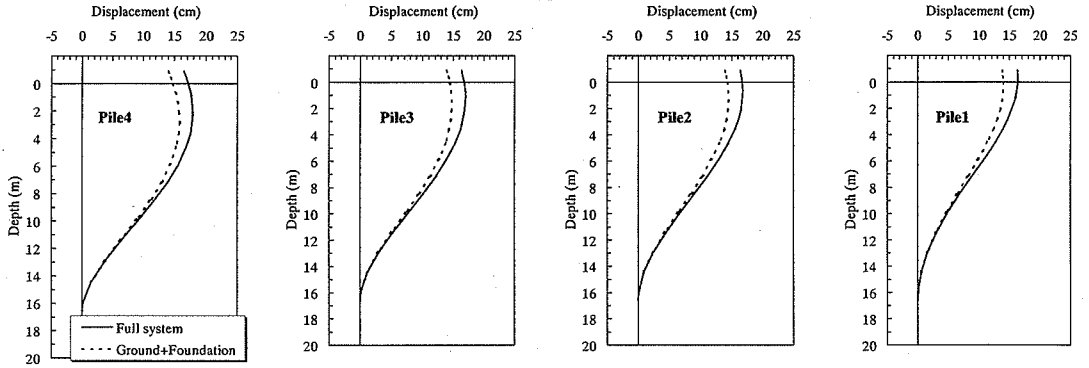


図-15 Type B の杭頭部軸力の時刻歴

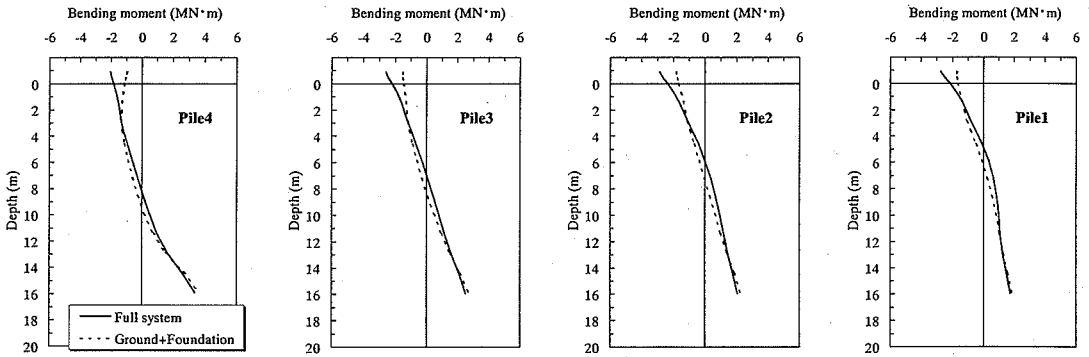


(a) Type A

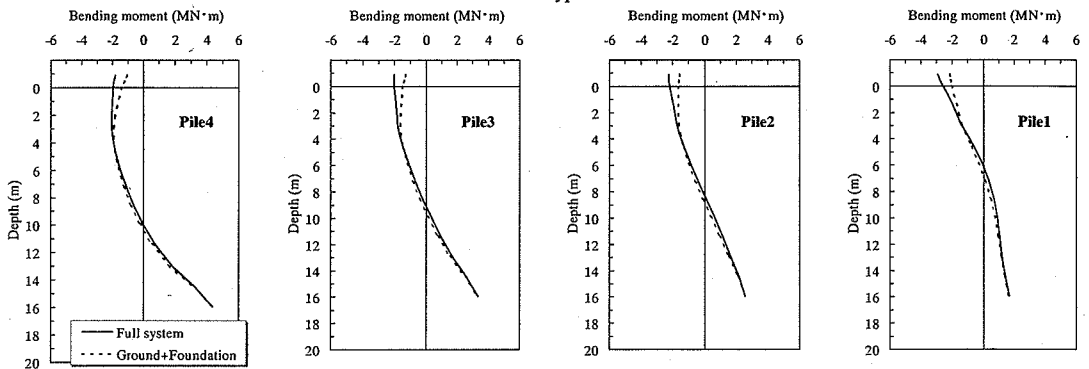


(b) Type B

図-16 杭頭曲げモーメント最大時の各杭の水平変位分布における上部構造の慣性力の影響



(a) Type A



(b) Type B

図-17 杭頭曲げモーメント最大時の各杭の曲げモーメント分布における上部構造の慣性力の影響

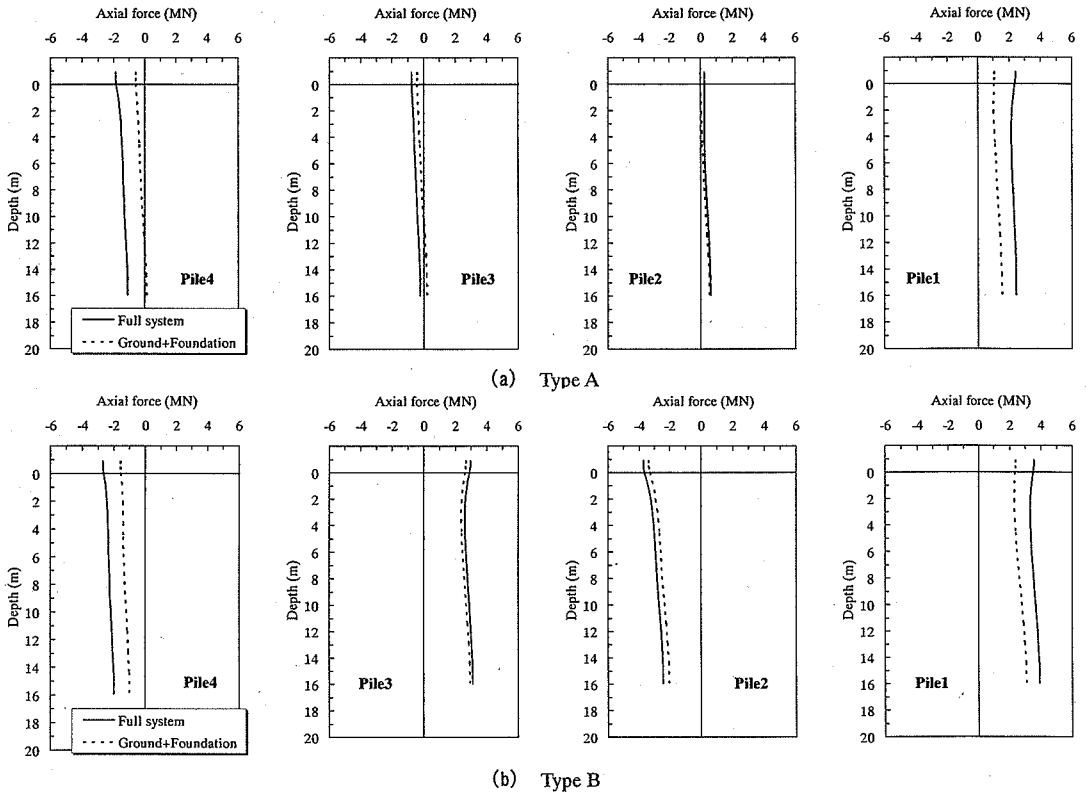


図-18 杭頭曲げモーメント最大時の各杭の軸力分布における上部構造の慣性力の影響

における全体モデルでの上部構造の加速度は、 597cm/s^2 、 410cm/s^2 である。

図-16に示す変位分布図より、地表面付近の変位に着目すると、Type A、Type Bともに、地盤・杭基礎モデルにおける杭の応答変位は、全体モデルにおける杭の応答変位の約80%になっており、杭頭部の曲げモーメント最大時における地表面付近の杭の変位は、上部構造の慣性力よりも地盤変位の影響が支配的になっていることがわかる。また、Type Aでは、深さ8m付近から浅いところで、全体モデルと地盤・杭基礎モデルの変位に差が生じているのに対し、Type Bでは、深さ10m付近から上でその差が生じている。このように、地中部の杭の変形において、Type AよりもType Bの方が地盤変位による変形が占める割合が大きくなるのは、前節の軸力発生パターンの説明で述べたように、Type Bでは、上部構造の慣性力が作用する方向に対して、前方に位置する斜杭が突っ張ることにより杭頭の変位を小さくできるためである。

図-17に示す曲げモーメント分布図より、杭頭部に発生する曲げモーメントは、慣性力よりも地盤変位の影響が支配的であり、全体モデルで発生する最大モーメントの約60~70%の値になっている。全体

モデルの解析で得られた曲げモーメント分布を見ると、曲げモーメントの最大値は、Type A、Type Bとも同程度である。

図-18に示す軸力分布図より、地盤・杭基礎モデルと全体モデルにおける各杭の軸力の差は、Type A、Type Bともに、基礎外側の杭1および杭4で大きい。これは、上部構造の慣性力に抵抗する杭の軸方向成分は、主に外側の杭に生じることを示しており、過去に検討した群杭の静的支持力特性⁶⁾と一致する。ただし、軟弱地盤で斜杭群杭基礎を用いる場合には、地盤変位の影響だけで、基礎内側の杭にも外側の杭と同レベルの軸力が発生するため、内側の杭の軸力を低減する必要がある場合には、後述に示すように杭間隔を適切に選ばなければならない。

以上より、軟弱地盤で斜杭群杭基礎を用いる場合、杭の変形、断面力の評価においては、地震時の地盤変位が杭に与える影響を動的に考慮した数値解析による検討が重要であることがわかる。

5. 従来手法と一体系動的解析手法の比較

図-19および図-20に、従来手法である分離法お

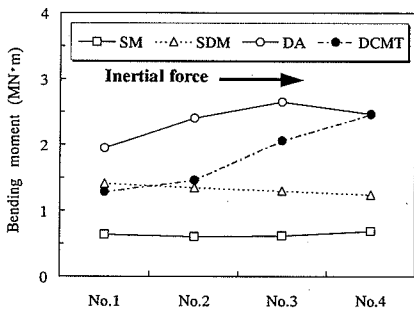
よび応答変位法、一体系動的解析ならびに動的遠心模型実験で得られた各杭の杭頭部における断面力の分布を示す。図の横軸に示す杭の No.は、上部構造の慣性力が作用する方向に対して最も後方に位置する杭を No.1 として順に番号を付けた。分離法および応答変位法は最大外力作用時の各断面力を、動的遠心模型実験と一体系動的解析は杭の曲げモーメントが最大になる時の各断面力をプロットした。動的遠心模型実験は Type A が 6.30s, Type B が 6.17s, 一体系動的解析は Type A が 6.61s, Type B が 6.59s における値を示す。なお、図中の凡例は、分離法, 応答変位法, 一体系動的解析, 動的遠心模型実験の順に, SM, SDM, DA, DCMT と記した。

分離法では、上部構造およびフーチングの慣性力が作用外力となっており、地震時の地盤変位が杭に与える影響は考慮されていないため、他の手法と比較して、いずれの断面力も過小評価されている。特に、地盤が軟らかい場合には、4.(3)に示したように、断面力に地盤変位が与える影響が大きくなるため、分離法では適切な評価が困難である。また、今回行った応答変位法は、杭と地盤の相互作用を3次元で静的に考慮した FEM 応答変位法になる。したがって、地震時の地盤変位が杭に与える影響を静的

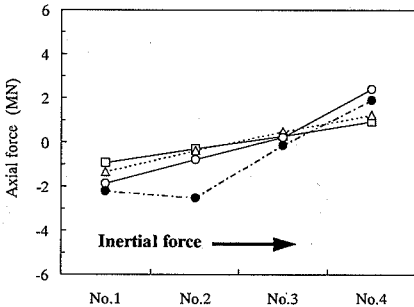
な荷重に置き換えて考慮した分、分離法より実験値との対応が良くなっている。実験結果との差は、応答変位法では、地盤変位の影響を杭とは独立した地盤だけの系で評価したものを杭に作用させているため、地盤と杭の動的相互作用の影響を考慮できていないことによるものと推定される。一方、一体系動的解析は、実験結果よりも過大に評価している部分もあるが、いずれの基礎形式においても実験結果と最も良好に対応しており、各杭の断面力を安全側に評価できる。また、斜杭の安全性を検証する上で、杭の軸力分布を把握することは重要であるが、一体系動的解析によれば、軸力の大きさや方向についても実験結果と良好に対応しており、斜杭群杭基礎の動的挙動を適切に評価できることがわかった。

図-21~図-23に、杭頭曲げモーメント最大時の各杭の水平変位、曲げモーメントならびに軸力の分布について、各解析手法の結果を比較して示す。曲げモーメントおよび軸力は、動的遠心模型実験の結果もあわせて示した。なお、図中の杭の番号は、図-19 および図-20と同様に決めている。

図-21に示す変位分布図より、慣性力主体の設計法である分離法は、地盤変位の影響を考慮した応答変位法や一体系動的解析よりもかなり小さい値を示

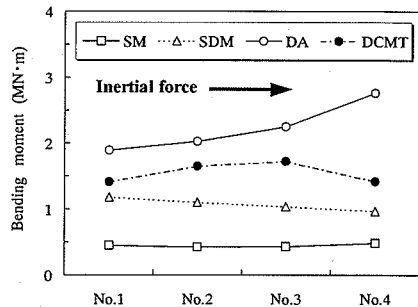


(a) 曲げモーメント

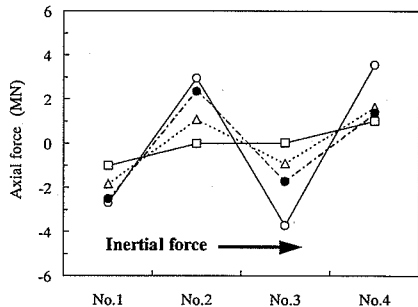


(b) 軸力

図-19 Type A の杭頭曲げモーメント最大時における杭頭部の断面力分布の実験と解析の比較



(a) 曲げモーメント



(b) 軸力

図-20 Type B の杭頭曲げモーメント最大時における杭頭部の断面力分布の実験と解析の比較

すため、本検討のような地盤条件での適用は適切ではない。また、図-22 および図-23 に示す曲げモーメント分布、軸力分布からも同様のことがいえる。

図-22 に示す曲げモーメント分布図より、いずれの基礎形式においても、一体系動的解析が曲げモーメントのレベル、分布形状ともに、最も動的遠心模型実験と良好に対応している。ただし、分布形状に着目すると、Type A の場合は、応答変位法も一体系動的解析も、動的遠心模型実験で得られた分布形状とほぼ対応するが、Type B の場合には、応答変位法と一体系動的解析で得られた分布形状が異なり、後者の方が実験結果と良く対応している。既に4.(3)で述べたように、Type B では、基礎が変位する方向に対して、前方の斜杭が突っ張ることにより、フーチングの変位を小さく抑えられるため、地震時に地盤変位が大きくなる軟弱地盤では、杭頭変位に対する地中部での変位の割合が Type A より大きくなる。したがって、斜杭群杭基礎における杭の曲げモーメント分布は、直杭群杭基礎のように、杭頭部で最大、かつ地中部にむかって線形に変化するモーメント分布形状にはならず、地表面から地中部において、杭の最大変位が発生する位置くらいまでは、杭頭部の

モーメントと同程度かそれ以上の大きな値を示す。本結果より、一体系動的解析手法は、従来手法よりも、軟弱地盤における斜杭群杭基礎の動的挙動を評価する上で有効な手法であることがわかった。

6. 一体系動的解析によるパラメトリックスタディ

(1) 検討ケース

上述のとおり一体系動的解析手法は、従来の解析手法に比べて、群杭基礎の動的遠心模型実験結果と良好に対応し、地盤と杭の動的相互作用を適切に考慮できる。また、斜杭を組み合わせた群杭基礎特有の変形挙動や断面力特性についても、本手法により検討することで、従来手法ではシミュレートできなかった動的な挙動を把握するのに役立った。ここでは、一体系動的解析手法を用いて、図-24 に示す動的遠心模型実験のプロトタイプを対象に、基礎外側に位置する杭1と杭4の傾斜角 θ や杭間隔(s_1, s_2)をパラメータとして数値シミュレーションを行い、これらのパラメータが構造物の応答特性や杭の断面

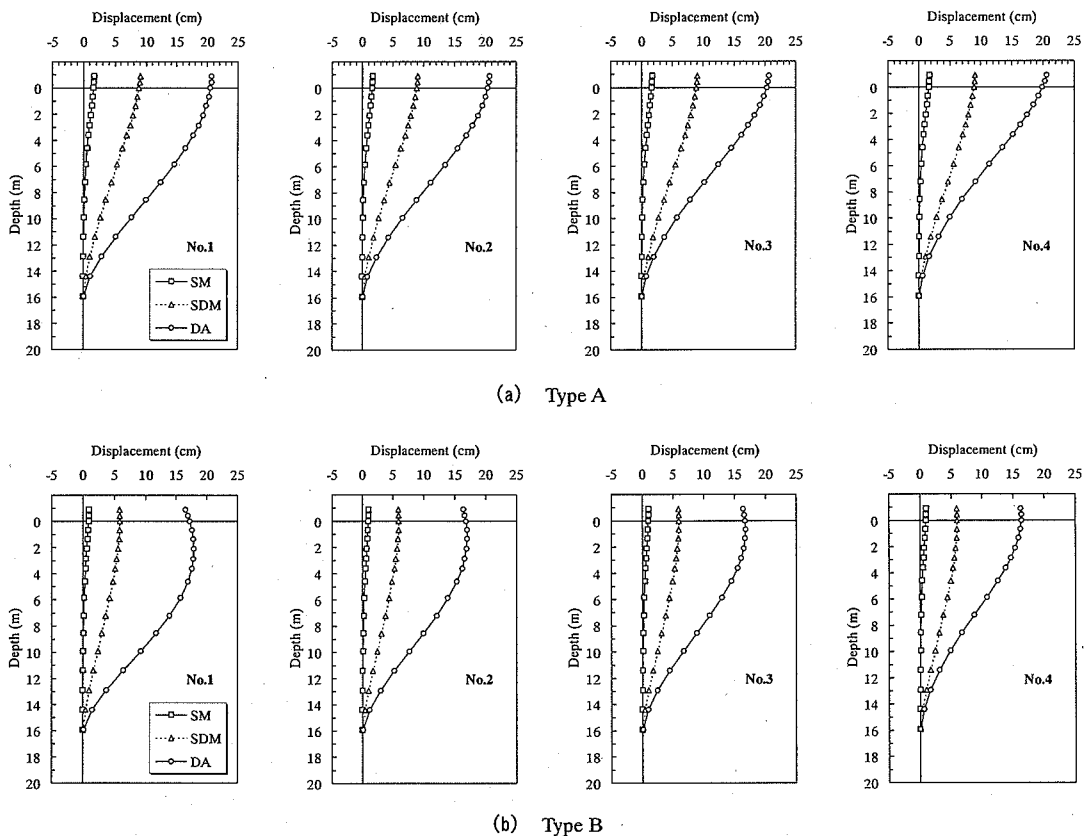
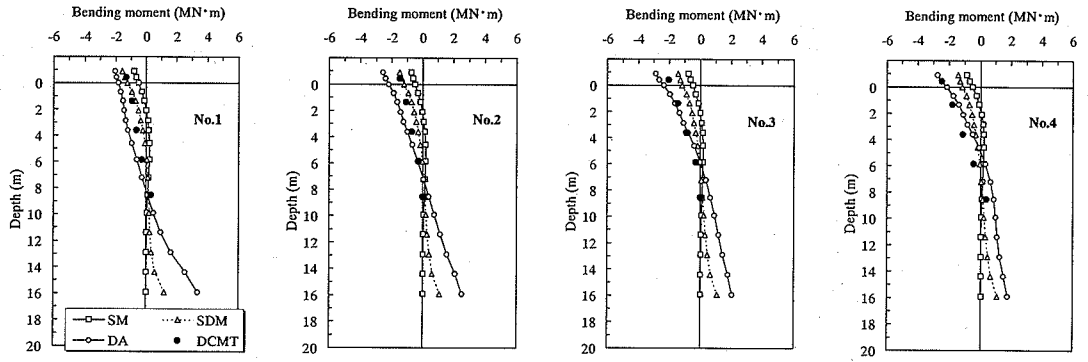
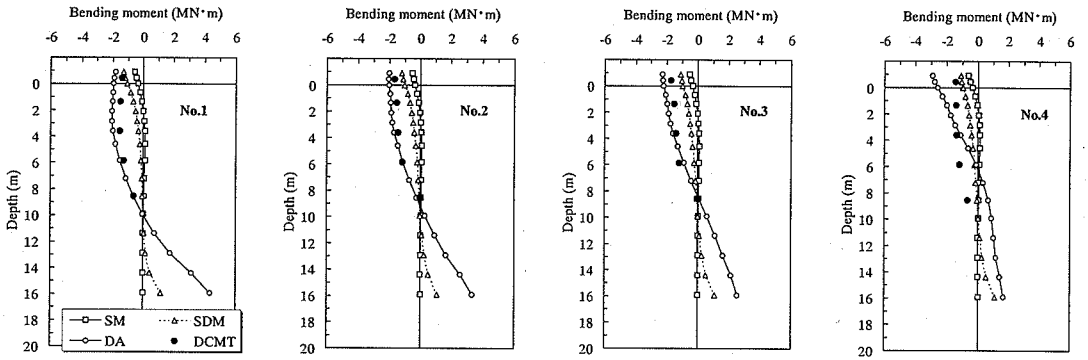


図-21 杭頭曲げモーメント最大時の各杭の水平変位分布における各解析手法の比較

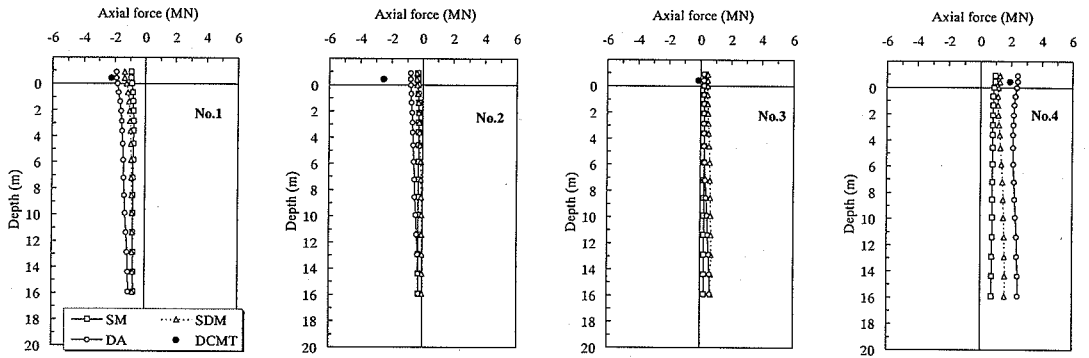


(a) Type A

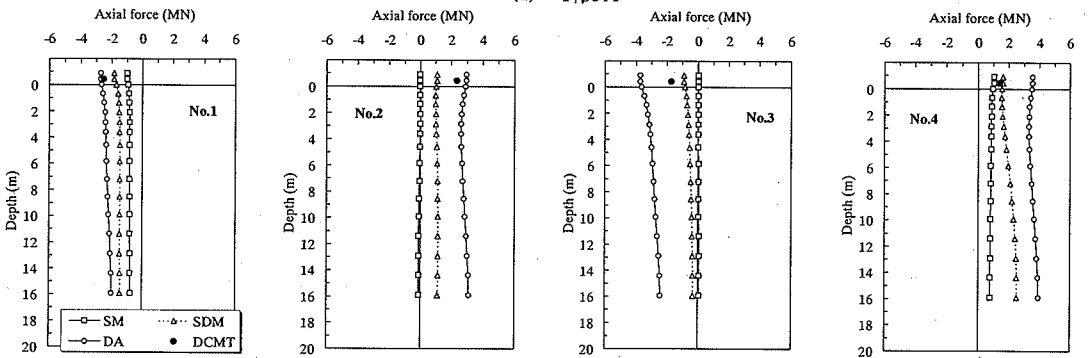


(b) Type B

図-22 杭頭曲げモーメント最大時の各杭の曲げモーメント分布における各解析手法の比較



(a) Type A



(b) Type B

図-23 杭頭曲げモーメント最大時の各杭の軸力分布における各解析手法の比較

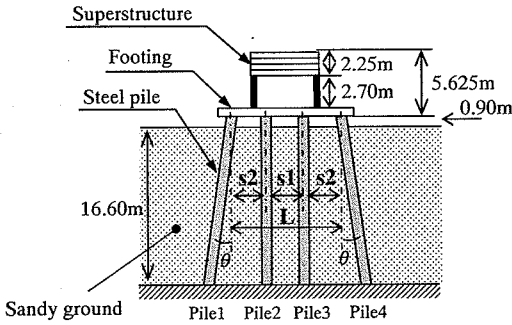


図-24 シミュレーションモデル

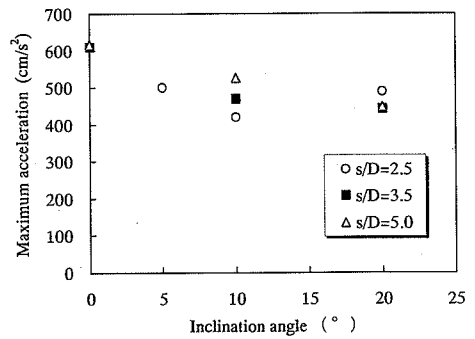
表-4 パラメトリックスタディにおける解析ケース

	Inclination angle	Spacing between piles		
	θ (°)	s1/D	s2/D	L/D
Case1	0	2.5	2.5	7.5
Case2	0	3.5	3.5	10.5
Case3	0	5.0	5.0	15.0
Case4	5	2.5	2.5	7.5
Case5	10	2.5	2.5	7.5
Case6	10	3.5	3.5	10.5
Case7	10	5.0	5.0	15.0
Case8	10	2.5	4.0	10.5
Case9	10	4.5	3.0	10.5
Case10	10	5.5	2.5	10.5
Case11	20	2.5	2.5	7.5
Case12	20	3.5	3.5	10.5
Case13	20	5.0	5.0	15.0
Case14	20	2.5	4.0	10.5
Case15	20	5.5	2.5	10.5

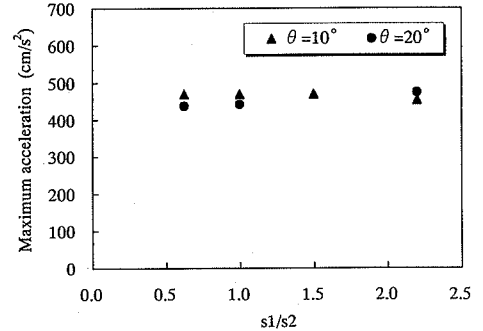
力特性に与える影響を解析的に検討する。なお、シミュレーションモデルの上部構造および地盤は、上記パラメータによらずすべて同じとし、それらの諸元および物性値は表-1 および表-2 に示したとおりである。また、フーチングは十分剛なソリッド要素でモデル化し、フーチングの質量はすべてのケースで同じになるようソリッド要素の密度を調整した。入力地震波は、図-2 に示した地震波を用いた。解析ケースを表-4 に示す。本解析で得られた結果は、①杭間隔 s_1, s_2 が同じ場合（等間隔）、②両端の杭中心間隔 L （=杭径の 10.5 倍）を一定とし、杭頭中心間隔 s_1, s_2 を変えた場合に分類して評価した。

(2) 上部構造およびフーチングの応答特性の比較

図-25 に、シミュレーションで得られた上部構造の水平方向の最大加速度を示す。杭間隔が等間隔の場合、直杭群杭基礎より斜杭群杭基礎の方が応答加速度は小さく、上部構造の慣性力の影響は低減できる。杭間隔の影響は、ばらつきもあり顕著な傾向は見られない。杭間隔 s_1, s_2 が異なる場合は、間隔比

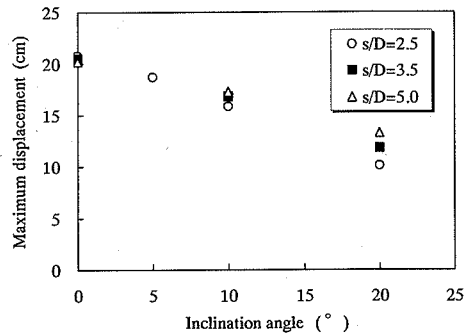


(a) 杭間隔が等間隔の場合

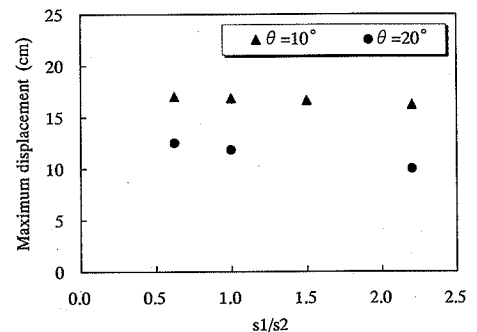


(b) 杭間隔 s_1, s_2 が異なる場合

図-25 上部構造の水平方向の最大加速度の比較

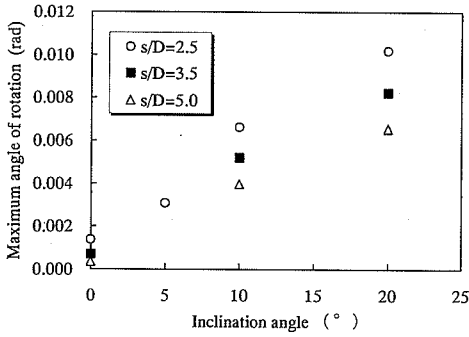


(a) 杭間隔が等間隔の場合

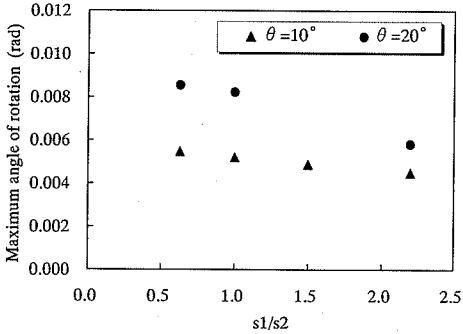


(b) 杭間隔 s_1, s_2 が異なる場合

図-26 フーチングの水平方向の最大変位の比較

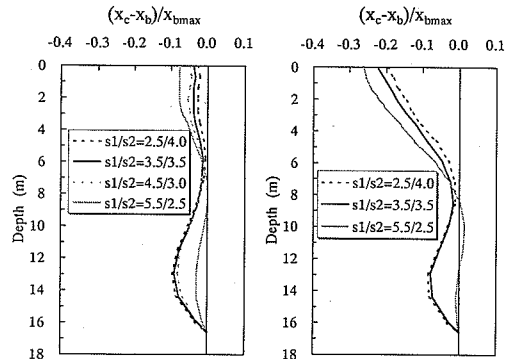


(a) 杭間隔が等間隔の場合



(b) 杭間隔 s1, s2 が異なる場合

図-27 フーチングの最大回転角の比較



(a) $\theta = 10^\circ$

(b) $\theta = 20^\circ$

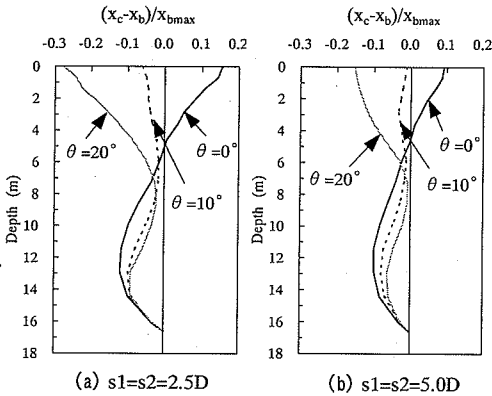
図-29 杭間隔 s1, s2 が異なる場合の遠方地盤と基礎中央の地盤変位の差 (境界部最大変位で無次元化)

に作用する水平外力に対し、斜杭の軸力でも大きく抵抗するため、直杭群杭基礎よりも水平変位を小さくできるが、軸力で分担しきれない外力が杭の曲げ抵抗成分を発生させることにより、フーチングの変位方向に対し上向きに反り上がる回転方向の抵抗に置き換わると考えられる。ただし、杭間隔比 $s1/s2$ を大きくすることにより、水平変位は同程度かやや低減させながら回転角を低減できる。これは傾斜角が大きい方が杭間隔比 $s1/s2$ に対する感度は良い。

(3) 地盤変位に対する拘束効果

杭間隔がすべて 2.5D, 5.0D を例に、フーチングの水平変位が最大のときの、遠方地盤 (基礎外側に位置する杭の杭頭中心から約 26m 離れた位置)、基礎中央におけるそれぞれの地盤変位 x_b , x_c の差 ($x_c - x_b$) を遠方地盤の地表面最大変位 x_{bmax} で無次元化し、深さ方向の分布として図-28 に示す。これは、図中横軸のプラス方向の値が大きいほど基礎の応答によって遠方地盤より地盤変位が増幅されることを示し、マイナス方向の値が大きいほど、基礎が地盤変位を低減する効果が大きいことを示す。図-28 より、地表面付近では、直杭群杭基礎 ($\theta = 0^\circ$) の場合、基礎中央の方が遠方地盤よりも大きい、斜杭群杭基礎 ($\theta = 10^\circ, 20^\circ$) の場合は、遠方地盤よりも基礎中央の方が小さい。すなわち斜杭群杭基礎は直杭群杭基礎よりも地震時の地盤変位を低減する効果が大きく、その効果は、斜杭の傾斜角が大きいほど、杭間隔は小さいほど大きい。

斜杭群杭基礎の杭間隔 $s1, s2$ が異なる場合について、図-28 と同様の無次元量 $(x_c - x_b) / x_{bmax}$ の分布を図-29 に示す。杭間隔比 $s1/s2$ が大きくなるほど、斜杭の傾斜角が大きいほど地表面付近の地盤変位が大きく低減される。ただし、傾斜角 20° の斜杭群杭



(a) $s1=s2=2.5D$

(b) $s1=s2=5.0D$

図-28 杭間隔が同じ場合の遠方地盤と基礎中央の地盤変位の差 (境界部最大変位で無次元化)

$s1/s2$ による最大加速度の差はほとんどない。

次に、フーチングの水平方向の最大変位を図-26 に、最大回転角を図-27 に示す。なお、最大回転角は、直杭群杭基礎の場合、フーチングの変位方向に基礎が倒れる方向の角度を、斜杭群杭基礎の場合は基礎が反り上がる方向の角度を示す。杭間隔が等間隔の場合、基礎外側の杭の傾斜角が大きくなるほど、フーチングの最大変位は減少するが、逆に最大回転角は増加する。これは、斜杭群杭基礎の場合、基礎

基礎では、地盤変位を低減する効果が增加する位置が傾斜角 10° の場合より深い位置になっており、地中部において杭の負担が大きいと考えられる。

これらの結果より、杭の傾斜角が大きい場合には、構造物の応答を低減することができるが、杭を設計する時には、地盤変位が杭に及ぼす影響を十分調査した上で、杭の補強位置などを検討する必要がある。

(4) 断面力に対する杭の傾斜角および杭間隔の影響

今回検討した中で、最も傾斜角が大きい 20° の斜杭群杭基礎の例として、Case11 の杭の断面力分布を図-30 に示す。同図は、時刻 6.62s における解析結

果である。図-22 で示した直杭群杭基礎や傾斜角 10° の斜杭群杭基礎が杭頭部で最大モーメントが発生していたのに対し、傾斜角 20° の斜杭群杭基礎では、地中部でモーメントが最大になっていることがわかる。これは、傾斜角が大きいほど、フーチング部すなわち杭頭変位が小さく抑えられることで、その分、杭頭変位に対する地中部での杭の変位が相対的に大きくなるためである。

杭間隔が等間隔の場合について、杭頭部で最大曲げモーメントが発生した時の各杭の杭頭部における曲げモーメントおよび軸力を図-31 に示す。ただし、傾斜角 20° の斜杭群杭基礎では、図-30 に示したように、地中部で曲げモーメントが最大になったため、その値も図中に (underground) として示した。

直杭群杭基礎の場合、杭間隔によらず、曲げモーメントは No.3, No.4, No.2, No.1 の順に大きく、その分担は内側の杭の方が外側の杭より大きい。また、杭間隔が大きいほどモーメントは大きくなる。以上の結果は、慣性力作用方向に対して、最前列の杭から順に分担が大きくなり、杭間隔を広げることによりモーメントが小さくなる静的水平力作用下での傾向⁶⁾と異なる。ただし、軸力は、No.4 が圧縮側で最大、後方の No.1 が引張側で最大で、内側の杭の軸力はそれらに比べて小さいことや、間隔が大きいほど軸力は小さくなる点は静的水平力作用下での軸力分担特性⁶⁾と同じである。

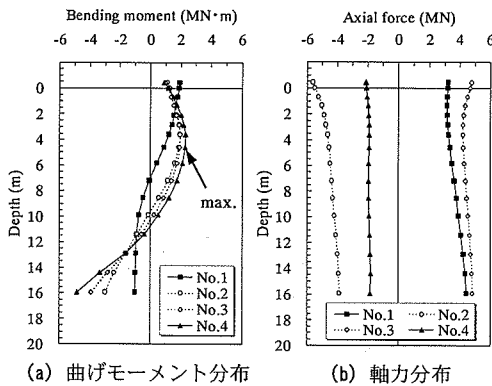


図-30 Case11 の最大モーメント発生時の杭の断面力分布 (杭間隔: 2.5D, 傾斜角: 20°)

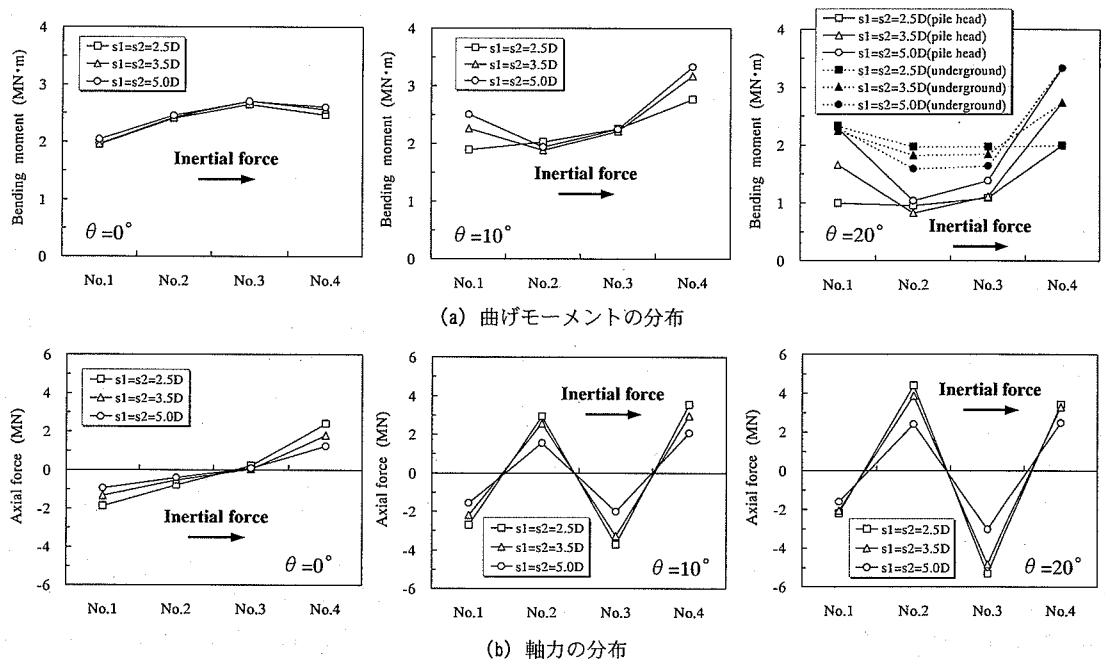


図-31 杭間隔 s_1, s_2 が同じ場合の断面力の分布

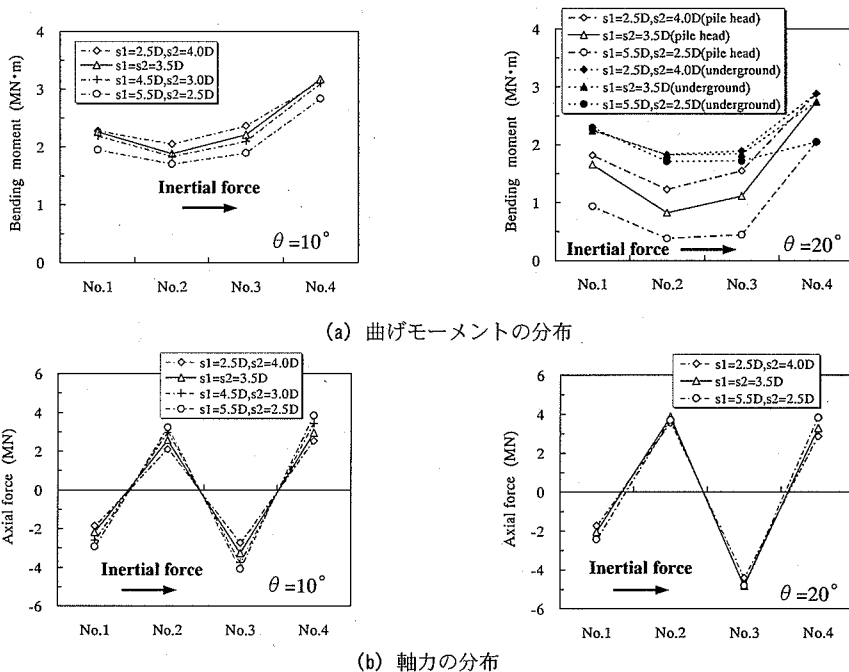


図-32 杭間隔 s_1, s_2 が異なる場合の断面力の分布

一方、斜杭群杭基礎の場合、杭の曲げモーメントは、No.4, No.1, No.3, No.2の順に大きく、その分担は直杭群杭基礎の場合と異なり、基礎内側の杭よりも外側の杭の方が大きい。外側の杭の傾斜角を大きくすると、内側の杭の杭頭部モーメントは顕著に下がるが、軸力は外側の杭の分担がほとんど変化せず、内側の杭のみ増加する傾向を示す。ただし、傾斜角 20° の斜杭群杭基礎の場合、No.4 以外の杭は地中部でモーメントが最大になり、その位置におけるモーメントは 10° の斜杭の杭頭部モーメントと大差はないため、杭の傾斜角が大きい場合に、上述の如く杭頭モーメントが低下しても杭の設計には有利に働かない。杭間隔が杭の曲げモーメントに与える影響については、直杭群杭基礎の場合には比較的小さかったが、斜杭群杭基礎の場合にはそれが顕著になる。最大モーメントが生じる No.4 の杭に着目すると、杭間隔が小さいほどモーメントが小さく、静的支持力特性⁹⁾の傾向と異なる。また、外側の杭の傾斜角を大きくしたときのモーメント低減量は杭間隔が小さい方が大きくなる。静的支持力特性と異なる要因は、本検討では軟弱地盤に杭基礎が設置されることを想定して地盤と杭の動的相互作用を考慮したことによるもので、図-28 に示したように、杭基礎内部の地盤変位は杭間隔が大きいほど変位が大きく、杭の変形に大きく影響するためと考えられる。

図-31 と同様に、杭間隔 s_1, s_2 が異なる場合の杭頭部における断面力の分布を図-32 に示す。なお、地中部で曲げモーメントが最大になったケースはその値も示した。最大モーメントが生じる杭 No.4 に着目すると、杭間隔比 s_1/s_2 が大きいほど、軸力は増加するが、断面力として支配的な曲げモーメントを低減でき、斜杭の傾斜角が大きいほどその低減量は大きい。したがって、斜杭群杭基礎で基礎幅に制約がある場合は、杭間隔比 s_1/s_2 を大きくすることにより断面力を調整できる。

7. まとめ

群杭の動的遠心模型実験を対象に、地盤・杭基礎・上部構造一体系動的解析手法による数値シミュレーションを行い、実験結果や従来手法との比較による検証を行った。また、パラメトリックスタディにより、杭間隔や斜杭の傾斜角が群杭の動的挙動に与える影響を詳細に調査した。結果を以下にまとめる。

- (1) 地盤・杭基礎・上部構造一体系動的解析は、動的遠心模型実験で得られた地盤および構造系の加速度の時刻歴や杭頭部の曲げモーメントおよび軸力の時刻歴と良好に対応した。ただし、解析において、基礎外側に位置する杭は地中部に

- において残留ひずみ(曲げ成分)が発生しており、実験結果との差が見られるが、これは実験土槽の枠のはずれ防止用ラバーの影響と考えられる。
- (2) 地盤・杭基礎・上部構造一体系モデルによる動的解析と、その一体系モデルにおいて、上部構造の質量を無視できるほど小さくした解析を比較し、杭の変形および断面力に地盤変位が与える影響を評価した。その結果、動的遠心実験の地盤条件では、杭の変形挙動に地盤の動的変位が大きく影響することを確認できた。
 - (3) 杭の断面力に関し、従来手法である分離法や応答変位法と、一体系動的解析手法を比較した。一体系動的解析手法は他の手法よりも実験と良く対応し、杭の断面力を安全側に評価できた。また、斜杭群杭基礎において、地中部での変位やモーメントが大きくなるなど、直杭群杭基礎とは異なる特徴的な力学挙動についても妥当に評価でき、軟弱地盤における斜杭群杭基礎の動的挙動を評価する上で有効な手法であることを検証した。
 - (4) 一体系動的解析手法により、杭間隔や斜杭の傾斜角が群杭の動的挙動に与える影響をパラメトリックに検討し、軟弱地盤に設置される斜杭群杭基礎の応答特性、断面力特性における設計上の有効性と問題点を指摘した。さらに、杭間隔が杭の支持力特性に与える影響について、既に報告した静的水平支持力特性⁹⁾との差異を示し、合理的な斜杭群杭基礎の設計をする上で、杭間隔や杭の傾斜角の設定に関して注意すべき点を示した。

今後、さらに DGPILE-3D を用いた一体系動的解析手法による実大構造の検討を行う予定である。

謝辞： 解析実施にあたり多大なご支援を頂いた京都大学大学院博士課程盧之偉氏に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岡部俊三：海上橋の明日を拓く—新しい基礎形式の提案—, 土木学会誌, Vol.83, pp.16-18, 1998.
- 2) 大平彰, 田蔵隆, 中松新, 清水勝美: 軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 362 号 / I-4, pp.417-426, 1985.
- 3) Wakai, A., Ugai, K. and Matsuda, T.: Seismic analysis of a bridge system excited in the axial direction of the bridge, Proc. of the 6th Int. Symp. Numerical Models in Geomechanics, pp.709-712, Montreal: Balkema, 1997.
- 4) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性と耐震設計への応用, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.631-640, 1998.
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 1999.
- 6) 木村亮, 牧野洋志, 大川賢紀, 亀井宏之, 張鋒: 斜杭を有する群杭基礎の静的水平支持力特性, 土木学会論文集, No.722/Ⅲ-61, pp.97-107, 2002.
- 7) 大川賢紀, 亀井宏之, 木村亮, 張鋒: 斜杭を有する群杭基礎の動的挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.729/Ⅲ-62, pp.31-41, 2003.
- 8) Kimura, M. and Zhang, F.: Seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.40, No.5, pp.113-132, 2000.
- 9) Nakai, T.: An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.119-137, 1989.
- 10) 盧之偉, 張鋒, 木村亮, 大川賢紀, 亀井宏之: ジャケット式鋼管杭基礎の地震時挙動に関する研究(その2), 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.861-864, 2001.

(2002.11.8 受付)

NUMERICAL SIMULATION ON DYNAMIC BEHAVIOR OF A PILE FOUNDATION WITH INCLINED PILES BY DYNAMIC ANALYSIS ON A FULL SYSTEM

Katsunori OKAWA, Hiroyuki KAMEI, Feng ZHANG and Makoto KIMURA

The dynamic behavior of a group-pile foundation with inclined piles in loose sand has been investigated by conducting dynamic centrifuge model tests. And the dynamic features of it have been evaluated. In this paper, the centrifuge model tests are simulated by dynamic finite element analyses, in which the deformation of the piles is carefully investigated, and those analyses are compared with the current method such as separated method and seismic deformation method, and then it was found that dynamic analyses are effective for the seismic design of group-pile foundation with inclined piles. Moreover the relations between the dynamic behavior of group-pile foundation and the design parameters such as pile spacing and inclination angle of pile were investigated by dynamic analyses.