

一体系動的解析による軟弱地盤に打設された 鋼管杭基礎の耐震性評価

大川 賢紀¹・亀井 宏之²・木村 亮³・廬 之偉⁴・張 鋒⁵

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丁目1番1号)

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丁目1番1号)

³正会員 工博 京都大学大学院助教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴学生会員 京都大学大学院博士後期課程(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 工博 岐阜大学工学部助教授(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

鋼管をトラス状に組み立てたジャケットを海底面に鋼管杭で固定するジャケット式基礎は、トップヘビ一な従来基礎に対し、杭基礎の負担を軽減できる構造である。ジャケット式基礎は、その構造上軟弱地盤上にも地盤改良を省略して設置可能であるが、杭基礎が軟弱地盤に設置される場合には、地震時の地盤変位と上部構造の慣性力が杭に与える影響を考慮した設計が必要になる。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DGPILE-3Dにより、8本群杭の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・上部構造一体系動的解析を行うとともに、従来手法である分離法や応答変位法との比較検討を併せて行うことにより、本手法の妥当性を検証した。

Key Words : *Steel pile foundation, dynamic interaction, dynamic analysis, separated method, responding displacement method, dynamic centrifuge model test*

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に変えて、鋼管をブレースでつなぎ合わせたジャケット構造を設けることにより、杭が支持する上部構造からの鉛直荷重および地震時の水平力を大幅に低減できる基礎形式である¹⁾。したがって、杭基礎の合理化が可能となるとともに、基礎を軟弱地盤上に設置する場合にも地盤改良を省略できるメリットがある。しかしながら、杭基礎を軟弱地盤上に設置する場合には、従来から指摘されているように、上部構造の慣性力(Inertialな相互作用)だけでなく、地震時の地盤変位が杭に及ぼす影響(Kinematicな相互作用)を考慮した評価が重要になる²⁾。これらを考慮するため、骨組解析モデルをベースとした応答変位法³⁾が既に設計的に取り入れられているが、杭基礎の合理的な構造を検討する上では、地盤や構造物の非線形性、地盤と杭の3次元動的相互作用、構造物・地盤連成系の動的挙動下における位相差などの評価が難しく、適切な耐震設計手法の開発が望まれている。

最近、対象構造物の地震時挙動に関し、地盤・構造物一体系において動的解析が可能な3次元静的・動的弾塑性有限要素解析コードDGPILE-3Dが開発

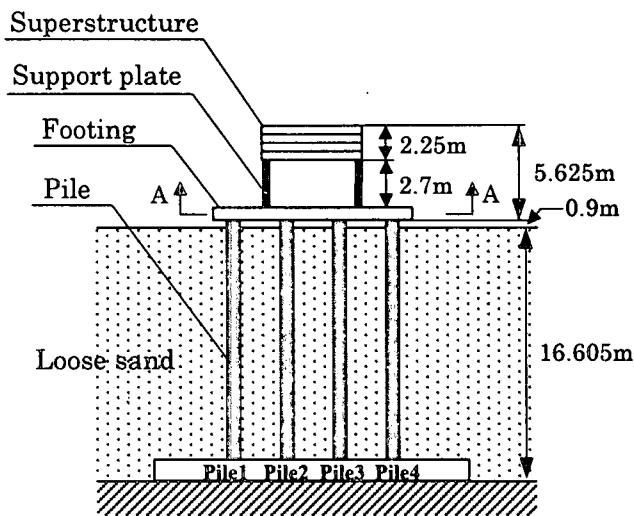
された⁴⁾。著者らは、今までに、斜杭を含む群杭基礎の支持力特性や終局挙動について、3次元静的弾塑性有限要素解析コードGPILE-3Dと遠心模型実験により詳細に調査し報告してきた^{5)~9)}。また、軟弱地盤上に設置されるジャケット式鋼管杭基礎の耐震性評価を目的に、8本群杭基礎の動的遠心模型実験を行い、その力学挙動を把握した¹⁰⁾。そこで、本論文では、動的遠心模型実験のプロトタイプモデルを対象として、地震時の上部構造の加速度応答特性や杭の断面力について解析し、一体系動的解析手法の妥当性を検証するとともに、従来手法の分離法や応答変位法との比較検討を行った。

2. 解析対象

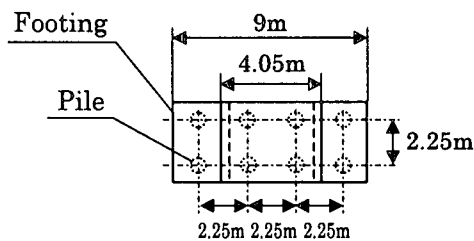
著者らは既に緩詰め状態の砂地盤上に設置した8本群杭の動的遠心模型実験を実施した¹⁰⁾。今回は、この動的遠心模型実験のプロトタイプモデルを対象として、異なる耐震設計手法による検討を行う。

動的遠心模型実験では、鋼管杭を想定した外径φ20mm、板厚1mmのアルミパイプ8本(4本×2列)の模型杭を鋼製治具で固定し、その上に上部構造を模擬したウエイトを剛結した模型を使用した。

杭間隔はすべて杭径の 2.5 倍とし、杭下端は土槽基盤に固定した。地盤は、群杭模型をせん断土槽に据え付けた後、乾燥状態の豊浦標準砂を用いて緩詰め状態（相対密度 27%）になるよう作成した。模型地盤の寸法は、高さ 369mm、幅 510mm、奥行き 330mm である。計測項目は、地盤中及び上部構造の加速度、杭の曲げ歪み、軸歪みとした。動的遠心模型実験のプロトタイプモデルを図-1 に、杭および上部構造の諸元を表-1 および表-2 に示す。なお、動的遠心模型実験は遠心加速度 45g 下で行い、入力地震波は、図-2 に示す東神戸大橋周辺地盤の観測波を調整したものを使用した。解析には、実験値を解析の時間刻みにあわせて補間して使用した。



(a) 断面図



(b) A-A 断面

図-1 解析対象

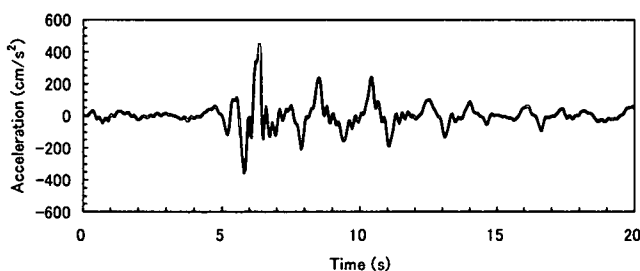


図-2 入力地震波

表-1 杭の諸元

項目	諸値
杭長	16.6 m
杭径	0.9 m
板厚	0.045 m
ヤング率	70.8 GPa
断面二次モーメント	$1.108 \times 10^{-2} \text{ m}^4$

表-2 上部構造の諸元

項目	諸値
上部構造質量	390.9 ton
杭固定部質量	191.1 ton
支持板曲げ剛性	$4.615 \times 10^2 \text{ MNm}^2$

3. 地盤・杭基礎・上部構造一体系動的解析

(1) 解析モデル

3次元静的・動的弾塑性有限要素解析コード DGPILE-3D により地盤・杭基礎・上部構造の一体系動的解析を行った。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⁴⁾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、杭が弾性変形範囲内で応答していることが確認されているため、杭は弾性要素としてモデル化した。杭固定部には弾性ソリッド要素を、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置き換えた。地盤の構成モデルには t_{ij} -sand model¹¹⁾を用いた。モデル化の妥当性は、地盤および単杭の動的遠心模型実験により検証した¹²⁾。地盤の材料パラメータは表-3のとおりである。

解析モデルは系を2分割し、4本1列群杭とした。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・地盤全体系の減衰は、系の1次、2次モードに対して、それぞれ5%、10%とし、構造物の1次、2次モードに対して、それぞれ0.2%、0.5%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20秒間について解析した。入力地震波は図-2の観測波を使用した。

表-3 地盤の材料パラメータ

項目	記号	諸値
密度	ρ	1.43 g/cm^3
ポアソン比	ν	0.30
初期間隙比	e_0	0.85
破壊時グレイソン-勾配	D_f	-0.60
破壊時主応力比	R_f	4.0
圧縮指数	C_t	0.009
膨潤指数	C_e	0.003
土質特性に関する係数	m	0.30
	α	0.80

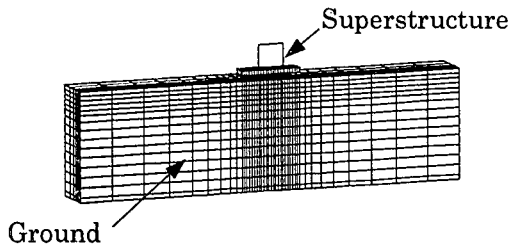


図-3 有限要素メッシュ

(2)地盤および構造物の加速度応答特性

上部構造(最上部), 杭固定部, 深さ 1.35m, 3.60m, 5.85m, 8.55m における地盤の加速度時刻歴を図-4 に示す. 解析値は, 応答レベル, 位相とも, ほぼ全加振時間にわたって遠心模型実験の各応答と良好に対応していることがわかる.

(3)杭の応答特性

杭頭 (GL+0.45m), 地中深さ 1.35m, 3.60m, 5.85m, 8.55m における杭の曲げモーメントの時刻歴を図-5 に示す. 杭頭部において, 解析値が実験値よりもやや大きい, 前述の加速度と同様, 応答

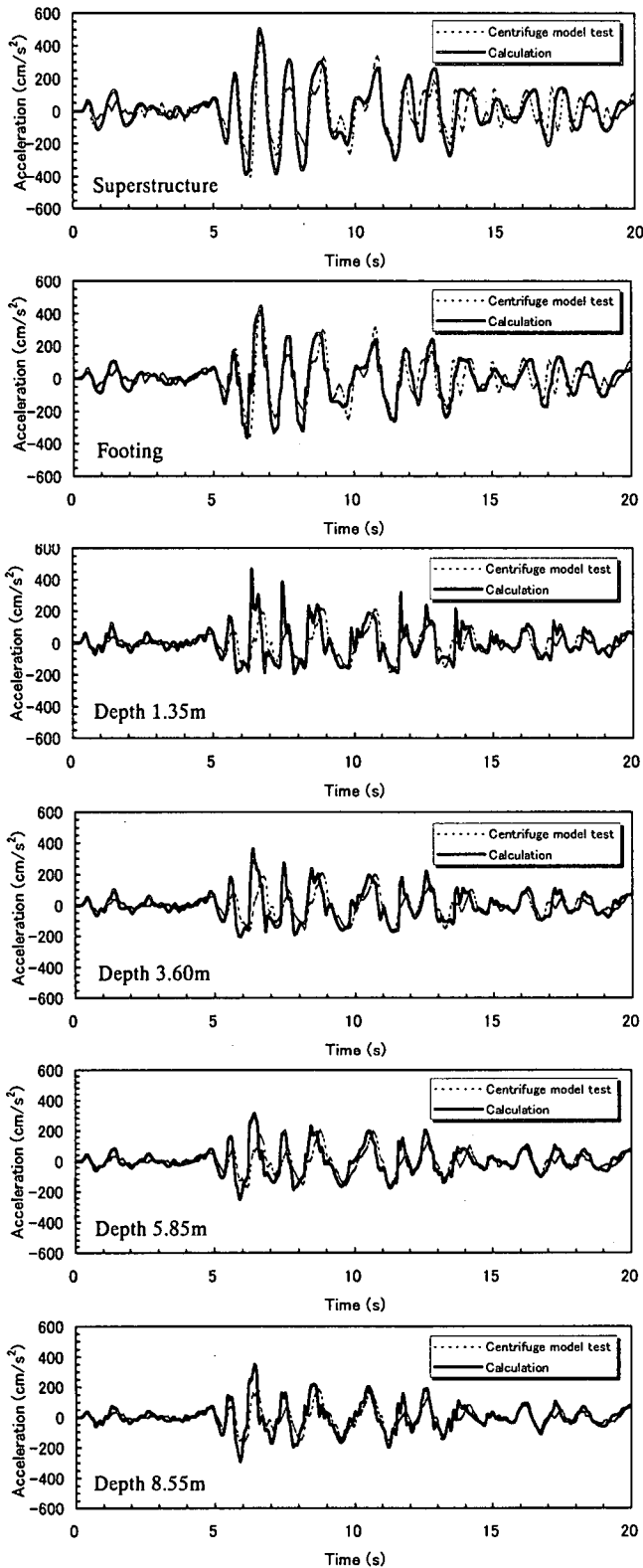


図-4 地盤および上部構造の加速度時刻歴

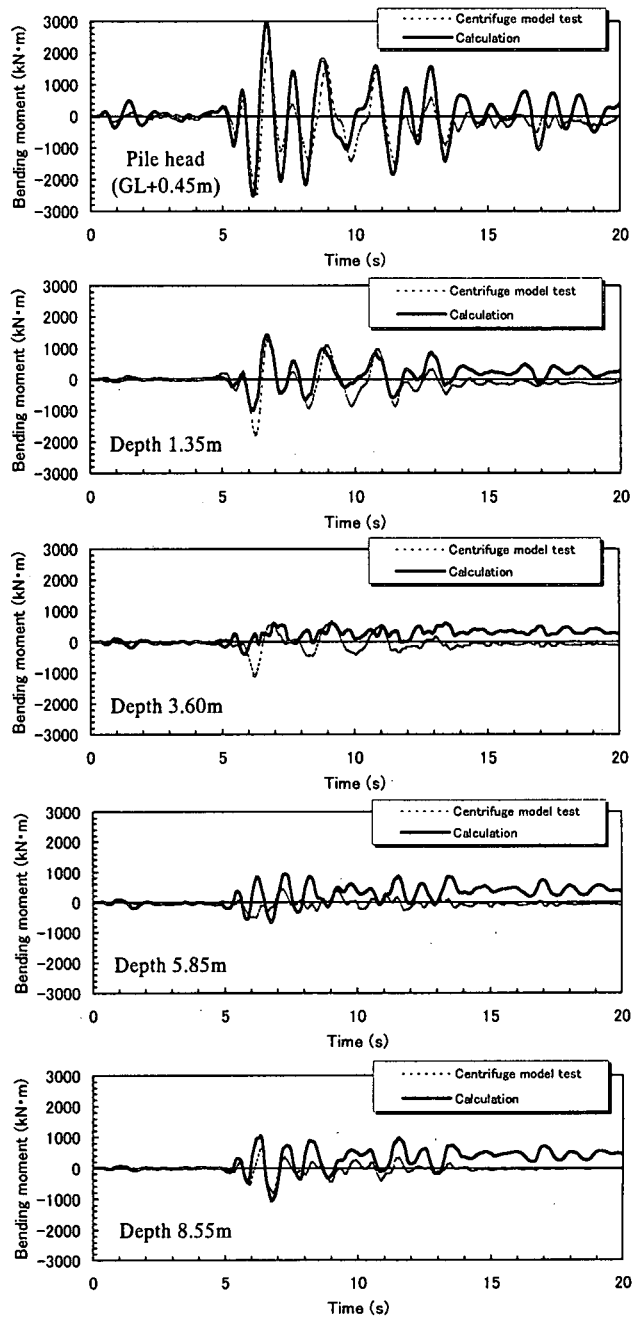


図-5 杭 (Pile4) の曲げモーメントの時刻歴

レベル，位相とも良好に対応しており，地中深さ方向のモーメントも妥当な結果を示している．杭頭および杭下端における軸力の時刻歴を図-6に示すが，軸力についても妥当な結果が得られた．

(4) 杭頭断面力と上部構造の慣性力との関係

杭頭部の曲げモーメントおよび軸力と，上部構造の慣性力との関係を図-7および図-8に示す．各々の履歴形状や，外側の杭 (Pile4) と内側の杭 (Pile3) の最大断面力の大小において，解析値と実験値はほぼ対応しており，本解析手法は，非線形な地盤中において，杭頭の断面力を適切に評価し得ると言える．図-7において，履歴特性がややループを描いているが，杭が弾性変形範囲で応答していることから，地盤変位の影響によるものと考えられる．

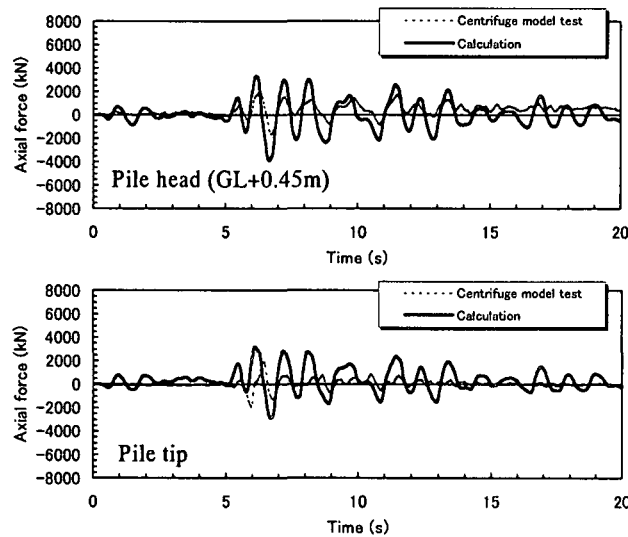
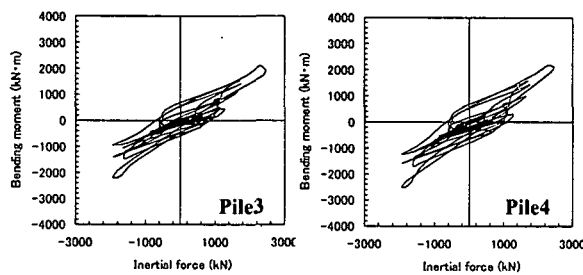
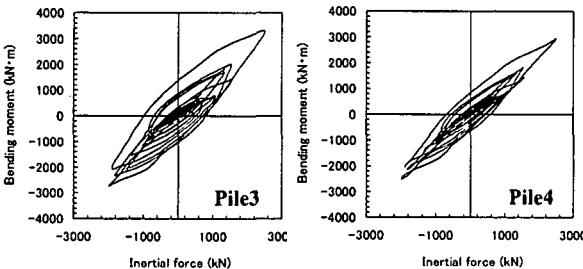


図-6 杭 (Pile4) の軸力の時刻歴



(a) 動的遠心模型実験



(b) 一体系動的解析

図-7 慣性力と杭頭部の曲げモーメントの関係

4. 従来手法との比較

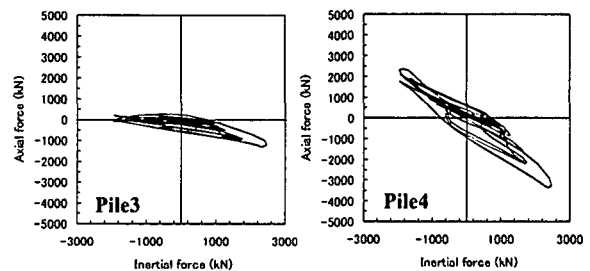
前節で，動的遠心模型実験により，一体系動的解析の妥当性が検証された．ここでは，従来の杭基礎の耐震設計手法として頻用されている分離法および応答変位法と，一体系動的解析の比較検討を行い，従来手法の妥当性を評価する．

(1) 従来の耐震解析手法

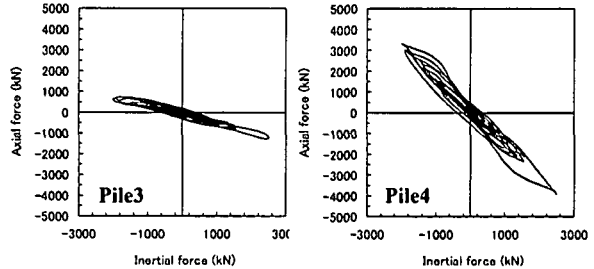
a) 分離法

まず，図-9に示すように，地盤・群杭基礎一体系をS-R (Sway-Rocking) モデルに置き換える．ここでは，杭間隔の影響を考慮できる3次元静的弾塑性有限要素解析手法を用いて，杭固定部に強制変位あるいは強制荷重を与えることにより，地盤と群杭基礎の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．解析に用いる有限要素メッシュは，図-3において上部構造を省いたものであり，杭の諸元および地盤の材料パラメータはそれぞれ表-1 および表-3 と同じとした．静的解析により求めた水平荷重-変位曲線を図-10に示す．骨組動的解析では，図-10中に示すように，静的解析により求めた非線形ばねをトリリニア近似してS-Rモデルに置き換えた．各方向のばねの数値一覧を表-4に示す．

次に，上記地盤・群杭基礎一体系のばねと上部構造の骨組モデルを結合し，動的解析を行った．減衰定数は，系の1次，2次モードに対し，それぞればね要素が2%と10%，梁要素が0.2%と0.5%とした．



(a) 動的遠心模型実験



(b) 一体系動的解析

図-8 慣性力と杭頭部軸力の関係

入力地震波は図-11に示す動的遠心模型実験で得られた地表面加速度を0.01s刻みで補間して使用した。解析手法、時間刻み、解析時間は、一体系動的解析と同じである。上部構造、杭固定部の加速度時刻歴を図-12に示す。また、水平および回転方向のばね反力の時刻歴を図-13に示す。ただし、鉛直ばね反力はほとんど無視できる程小さい値であったため記載は省略した。

地震力は水平力が支配的になるため、水平ばね反力が最大の時の各ばね反力を杭固定部に作用させ、杭基礎の耐震性の照査を行うこととした。作用力は、表-5に示すばね反力を用いた。同表には、構造物の加速度も併せて示す。

表-4 等価ばね数値一覧

記号	諸値	
k_x	$x_1=0.45$ cm	$P_1=890$ kN
	$x_2=1.8$ cm	$P_2=2781$ kN
	$x_3=5.4$ cm	$P_3=5802$ kN
k_z	3.144×10^6 kN/m	
$k_{\theta y}$	2.936×10^7 kN · m/rad	

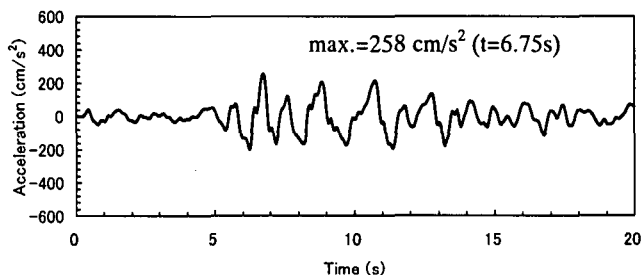


図-11 骨組動的解析の入力地震波

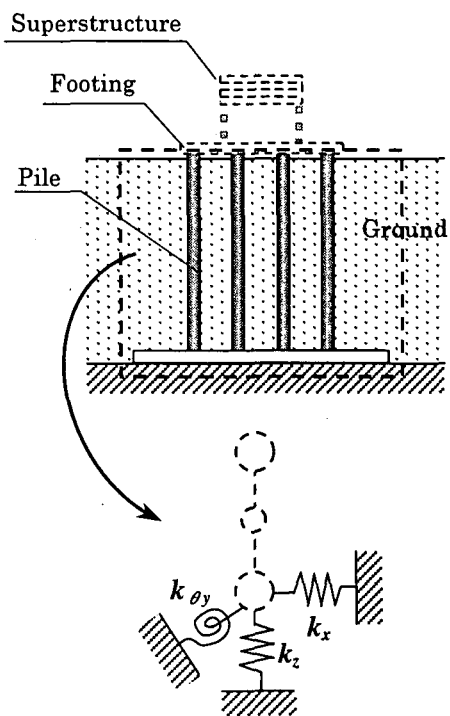


図-9 S-Rモデルによる地盤・群杭基礎一体系の簡略化

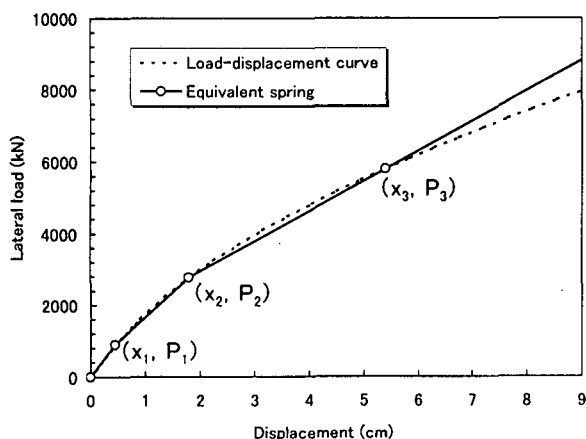


図-10 群杭基礎の水平荷重-変位曲線

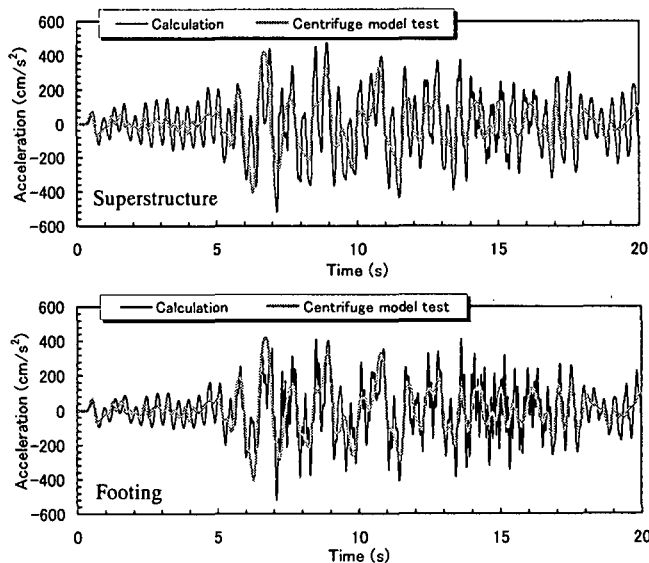


図-12 上部構造および杭固定部の加速度時刻歴

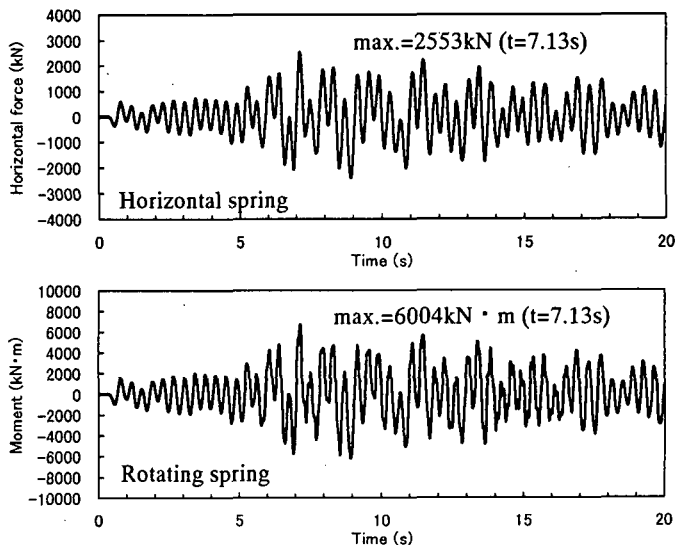


図-13 水平および回転方向のばね反力時刻歴

表-5 各ばね反力および構造物加速度

項目	諸値
水平方向ばね反力	2553 kN
鉛直方向ばね反力	-2.029×10 ⁷ kN
回転方向ばね反力	6004 kN・m
上部構造加速度	-464cm/s ² (max.=517 cm/s ²)
杭固定部加速度	-496cm/s ² (max.=517 cm/s ²)

b)FEM 応答変位法

軟弱地盤に杭基礎を設置する場合、地震時に軟弱層が基盤に対して大きな相対変位を生じ、杭基礎がこの影響を受けると考えられる。このような現象に対し、地盤変位の影響を基礎の設計に考慮する手法として応答変位法がある。ここでは、3次元静的弾塑性有限要素解析により地盤、杭を詳細にモデル化し、下記手順で応答変位法による解析を行った。

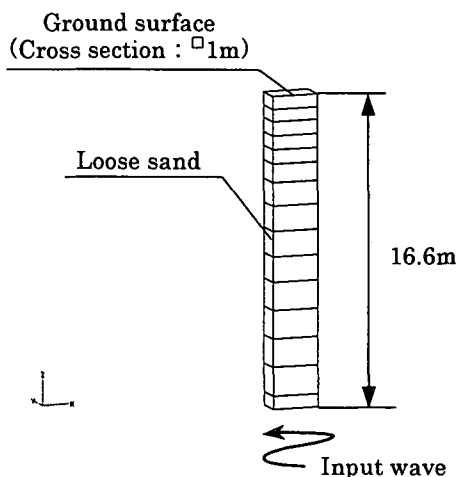


図-14 地盤の地震応答解析の有限要素メッシュ

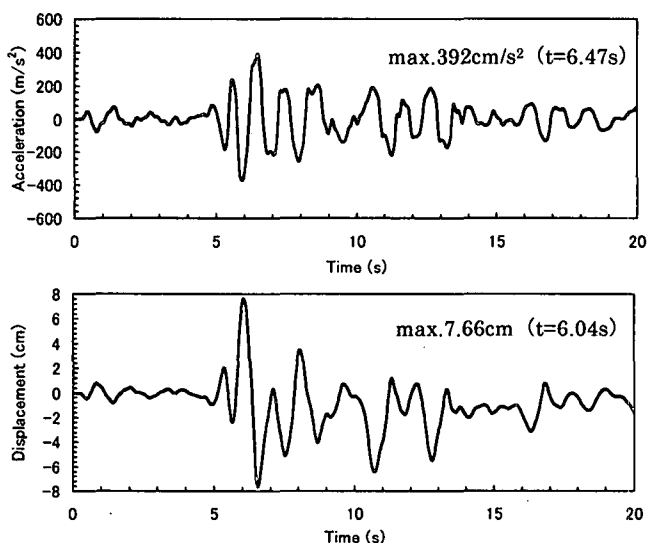


図-15 地表面の加速度および水平変位の時刻歴

- ・ Step1: 自由地盤の1次元地震応答解析
- ・ Step2: Step1で得た最大地盤変位分布を与える地盤節点力解析
- ・ Step3: 地盤節点力と構造物による作用力による応答変位解析

Step1では、成層地盤を仮定し、図-14に示す地盤のみの有限要素モデルを用いて1自由度の地震時応答解析を行い、地表面の変位が最大になる時の地盤変位の鉛直方向分布を求めた。解析モデルの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である。また、地盤の境界は、底面が固定で、側面は等変位境界とした。地表面の加速度および変位の時刻歴を図-15に示す。また、地表面変位が最大となる時の地盤変位の鉛直方向分布を図-16に示す。

次に、図-16の地盤変位の鉛直方向分布をそれぞれの深さにおける地震時の地盤変位の最大値として、地盤のみで構成される3次元有限要素モデルの各節点に対し上記最大値を分割して強制的に変位を与え、各ステップ毎に出力される全節点の節点力を求めた。有限要素メッシュは図-3のモデルにおいて、上部構造を取り除き、地盤中の杭要素を地盤要素に置き換えたものとした。

群杭基礎の耐震性は、この節点力を地盤中の各節点に与える同時に、SRモデルを用いた動的解析で得た表-5に示す水平、鉛直、回転方向のばね反力を基礎への作用力として杭固定部に与えることにより評価した。なお、地盤変位と構造物の作用力は同位相で基礎に作用するものとした。

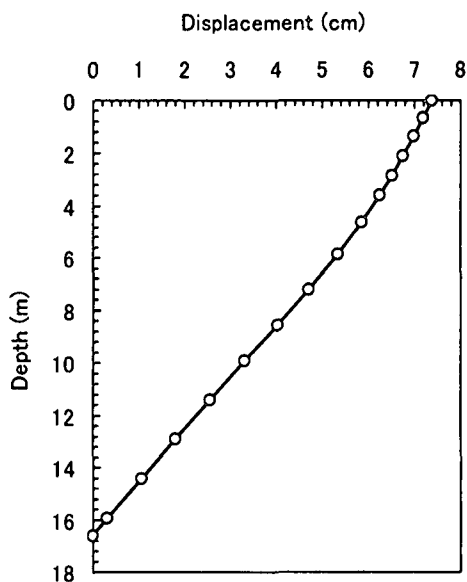


図-16 地表面変位最大時の地盤変位分布

(2)従来手法に基づく解析内容

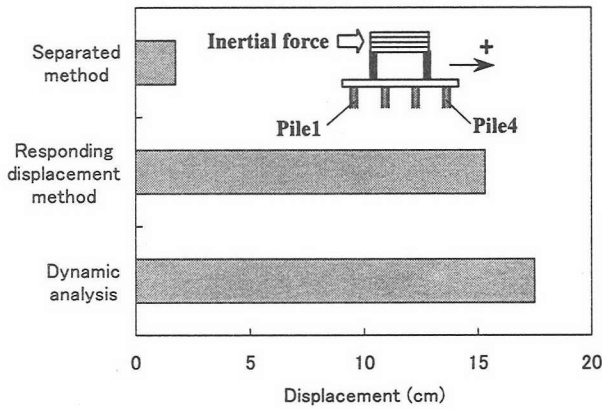
a)基礎の安定性

基礎の水平変位および回転角について、一体系動的解析と分離法、応答変位法を比較して図-17に示す。一体系動的解析の結果は、杭頭モーメントが最大となる時刻 ($t=6.66s$) の各応答値を示した。

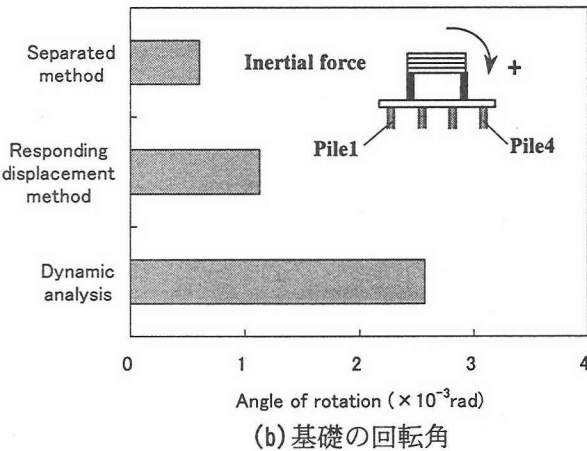
分離法は地盤変位の影響を考慮していないため、他の手法と比較して、水平変位、回転角ともに過小評価となる。水平変位については、応答変位法と一体系動的解析はほぼ対応した結果となっているが、回転角については、前者の方が過小評価している。今回の応答変位法では、基礎の水平変位と独立に、基礎中心周りに上部構造による回転方向の作用力のみを与えているが、実際には変位に伴う回転も生じるためと考えられ、この点において、一体系動的解析は適切なモデル化となっていると言える。

b)杭の断面力

各杭の杭頭部断面力を図-18に示す。図-18には、各手法による解析結果と動的遠心模型実験結果をあわせて示す。実験値は杭頭モーメントが最大となる時刻 ($t=6.30s$) の各応答値を示した。



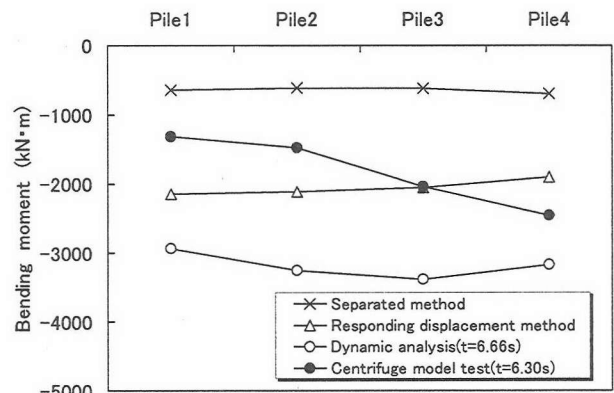
(a) 基礎の水平変位



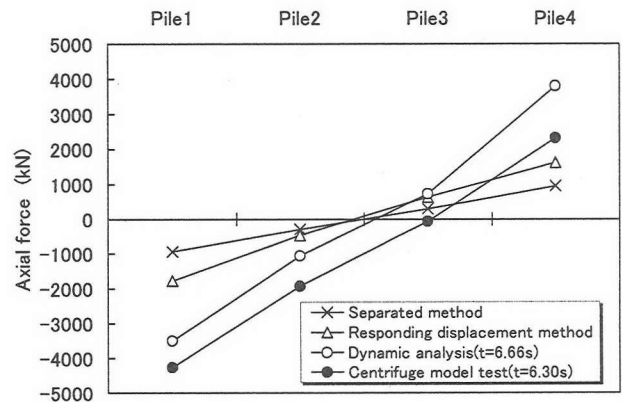
(b) 基礎の回転角

図-17 基礎の安定性の比較

分離法はいずれの断面力も過小評価している。応答変位法は、曲げモーメントは比較的対応した結果を示すが、軸力の分担が各杭ともに低めの値を示す。一体系動的解析は曲げモーメントをやや高めの値を示しているものの、各断面力ともほぼ妥当な結果である。また、地中深さ方向の杭の曲げモーメント分布を図-19に示すが、一体系動的解析によれば、内側の杭 (Pile3)、外側の杭 (Pile4) ともに、曲げモーメントを適切に評価できることが確認できた。



(a) 曲げモーメント



(b) 軸力

図-18 杭頭部断面力の比較

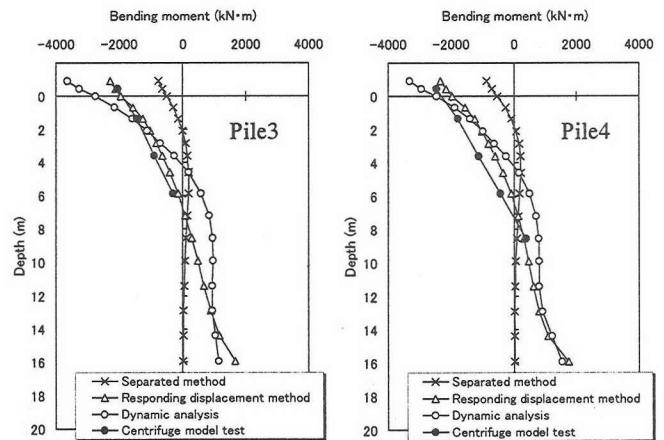


図-19 杭の曲げモーメントの比較

5. 結論

直杭のみの8本群杭の動的遠心模型実験モデルを対象に、3次元静的・動的弾塑性有限要素解析コードDGPILE-3Dにより、地盤・杭基礎・上部構造の一体系動的解析を行った。また、従来の杭基礎の耐震設計手法である分離法および応答変位法と比較検討をした。結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 一体系動的解析は、上部構造の応答加速度、杭の断面力の時刻歴において、緩詰め状態の砂地盤における直杭群杭の動的遠心模型実験結果を良好にシミュレートできた。また、杭頭部における断面力と上部構造の慣性力との履歴関係においても、配置位置による各杭の分担特性を適切に評価できることがわかった。
- (2) 分離法は地盤変位の影響を考慮していないため、軟弱地盤において、基礎の水平変位・回転角や杭の断面力を危険側に評価する可能性がある。DGPILE-3Dによる応答変位法は、今回の検討対象のように、地盤変位と慣性力の位相差を容易に設定できる場合は適用性が高いが、系が複雑になると評価が難しくなる。この点において、一体系動的解析は有効な手法と言える。

現在、斜杭を含む群杭の動的遠心模型実験についても、一体系動的解析手法による検討を実施中である。今後、さらに実地盤、実構造への適用性を検討し、本手法の妥当性を検証していく。

参考文献

- 1) 岡部：海洋橋の明日を拓く，土木学会誌，Vol.83，pp.16-18，1998.
- 2) 土木学会：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法，技報堂出版，pp.111-117，1989.

- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，1999.
- 4) Kimura, M. and Zhang, F. : 'Seismic Evaluations of Pile Foundations with Three Different Methods Based on Three-Dimensional Elastic-Plastic Finite Element Analysis', Soils and Foundations, Vol.40, No. 1, pp. 113-132.
- 5) 木村亮，牧野洋志，吉田敦，岡部俊三，大石善啓，大川賢紀，亀井宏之：斜杭を有する群杭基礎の水平抵抗に関する遠心模型実験，第33回地盤工学研究発表会概要集，pp.1499-1500，1998.
- 6) 木村亮，牧野洋志，岡部俊三，大石善啓，大川賢紀，亀井宏之：斜杭を含む鋼管杭基礎の支持力特性の調査，第34回地盤工学研究発表会概要集，1999.
- 7) 木村亮，牧野洋志，吉田敦，岡部俊三，大石善啓，大川賢紀，亀井宏之：斜杭を含む群杭の水平荷重分担と軸力分担に関する実験的研究，第53回土木学会年次学術講演会概要集，1998.
- 8) 大川賢紀，岡部俊三，大石善啓，亀井宏之，木村亮：斜杭を有する群杭基礎の水平支持力解析，第54回土木学会年次講演会概要集，1999.
- 9) 木村亮，岡二三生，牧野洋志，大川賢紀，亀井宏之：繰り返し水平荷重下における斜杭の群杭の変形特性，第35回地盤工学研究発表会概要集，pp. 1771-1774，2000.
- 10) 大川賢紀，亀井宏之，張鋒，木村亮：ジャケット式鋼管杭基礎の動的遠心模型実験，第56回土木学会年次学術講演会概要集，2001. 投稿中
- 11) Nakai, T. 1989. An Isotropic Hardening Elastoplastic Model for Sand Considering the Stress Path Dependency in Three-Dimensional Stresses, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp119-137.
- 12) 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) - 単杭の動的遠心模型実験の数値シミュレーション - ，第26回地震工学研究発表会講演論文集，2001. 投稿中.

SEISMIC EVALUATIONS OF STEEL PILE FOUNDATION ON THE SOFT GROUND BY DYNAMIC ANALYSIS ON A FULL SYSTEM

Katsunori Okawa, Hiroyuki KAMEI, Makoto KIMURA, Chih-Wei LU and Feng ZHANG

A jacket-type steel-pile foundation has a feature that can reduce the load acting on the piles drastically because the foundation and the superstructure are connected continuously by the jacket that is much lighter than a conventional top-heavy foundation. The structure fixed with piles needs no improvement of the seabed. But it's necessary to consider the influence of the deformation of the ground and the inertial force of the superstructure during the earthquake. In this paper, a dynamic analysis on a full system by DGPILE-3D, which is newly developed finite element analytical code, is conducted about a dynamic centrifuge model test of 8 group-pile foundation, and is compared with separated method and responding displacement method. Then, it was found through these analyses that a dynamic analysis is effective method for the seismic design of pile foundation.