

地震時における杭基礎で支持された構造物の群杭効果に関する解析的研究

Pile-group Effects on Seismic Response of Pier System with Pile Foundation

橋本至^{*}・林川俊郎^{***}・小幡卓司^{****}・寿楽和也^{*****}

Itaru HASHIMOTO, Toshiro HAYASHIKAWA, Takashi OBATA, Kazuya JURAKU

^{*}工修 株式会社ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目)^{***}工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)^{****}博(工) 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)^{*****}株式会社ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目)

This study aims to evaluate the pile-group effects of the pile foundation structure analytically under earthquake motion in a bridge structure. The analytical modelings used in this study is 2-D frame model for a pier-system with a pile foundation, 2-D FEM model for the ground, and connects the nodes of soil and the nodes of pile with the interaction spring in consideration of the 3-D effects. The dynamic analysis and the static monotonic loading analysis are conducted by this model. Major findings from these analyses are as follows: (1) The pile rows and the soils deployed perpendicular to the load direction are the different displacement. (2) This difference is proportional to the spacing of pile rows perpendicular to the load direction, and have more influence on a rocking displacement mode as compared with a sway displacement mode of a structure-foundation system. (3) These are the causes of the pile-group effects, and it not only affects behaviors of the pile-foundation, but also they affect the response forces of the bridge pier.

Key Words: pile group effect, soil-pile interaction, seismic nonlinear response analysis, semi-3D analysis

キーワード: 群杭効果, 杭と地盤との相互作用, 非線形応答解析, 簡易 3 次元解析

1. はじめに

道路橋など地上構造物の耐震性を適切に照査するには、構造物の損傷過程に立ち入った照査を行うだけでなく、地盤のひずみレベルの増大にともなう基礎-地盤系の非線形挙動を反映する必要があると考えられる¹⁾。

道路橋の基礎として直接基礎に次いで多用される杭基礎は組杭として用いられるのが一般である。杭基礎が大きな変位応答を示すレベル 2 地震動下において各杭の相互干渉による影響(群杭効果)は顕著となり、群杭効果の評価が基礎の安定や部材の断面照査だけでなく、杭基礎で支持された構造物全体の地震時挙動の照査にも重要であると考えられる。現行の道路橋示方書(以後、道示と呼ぶ)においても、レベル 2 地震動に対する杭基礎の照査法²⁾の中で、その群杭効果を反映するために水平地盤反力係数や水平地盤反力度の上限値に係る種々補正係数などを導入している。しかし、これら種々係数は国内で実施された組杭の大変位水平載荷実験などを元に“地盤抵抗エリアの相互干渉による影響範囲”の考え方^{3),4),5)}により設定されたものであり、地盤の振動変位による影響(キネマチック相互作用)や基礎の変位モードが反映されていないものと考えられる。

設計実務においては、基礎寸法の縮小やコスト縮減な

どの面から高性能杭を採用するケースが多くなり、また、限定的ではあるが、杭基礎の許容水平変位量を緩和する方向⁶⁾にある。これらは地震時における基礎の変位が従前に比較して大きくなる方向にあることを意味する。また、既設杭基礎の補強計画および設計において、その耐震性評価手法も今日的な課題となっている。

筆者らは杭基礎で支持される鋼製橋脚を有する橋梁を対象とし、杭-地盤の三次元挙動を考慮した相互作用バネを導入した二次元 FEM モデルを用いて構造物-基礎-地盤系の動的相互作用解析や基礎-地盤系の静的水平載荷解析を行い、組杭の支持力性能や基礎変位が基礎の挙動、さらに橋梁構造全体系の応答に与える影響などについて報告^{7),8)}している。本研究はそれらを集約するとともに、組杭の杭配置、基礎変位および振動モードと組杭の群杭効果、また、構造全体系の応答との関係を明らかにし、地盤と構造物との動的相互作用を反映した実務的設計手法構築に向けた基礎資料とすることを目的とする。

2. 解析条件および方法

2.1 対象とする構造物と地盤

対象とする橋梁構造および杭基礎構造および地盤条件を図-1 に示す。これは弾性支承を地震力分散支承として

採用した多径間連続桁橋の杭基礎で支持された一基の鋼製橋脚を取り出したものである。基礎は打込み工法による鋼管杭基礎（以後、Model-1 と呼ぶ）と杭軸方向の支持力性能が高い鋼管ソイルセメント杭基礎（以後、Model-2 と呼ぶ）の2つのモデルを対象とする。地盤の特性値 T_G は 0.408 秒であり、道示による耐震設計上の地盤種別は2種地盤である。地盤と杭との相対剛性を表す特性値 β は鋼管杭で 0.297m^{-1} 、鋼管ソイルセメント杭で 0.301m^{-1} である。橋脚躯体および支承の諸元、上部構造の反力条件などは参考文献⁹⁾を参照し、杭基礎の種々諸元は道示による試設計を行い決定した。

各モデルの固有周期は表-1 に示すとおりである。両モデルともに全体1次固有周期 T_{s1} が地盤の固有周期 T_G の関係にあるが、Model-2 は支持力性能の高い杭を採用していることによりコンパクトな杭基礎となっているため、全体1次固有周期および基礎1次固有周期ともにModel-1 に比較してやや長周期となっている。

2.2 解析方法とモデル

(1) 概要

解析は構造物-基礎-地盤系の動的相互作用解析手法に

関する最近の知見^{10),11)}を踏まえて、上部構造、橋脚、底版および基礎杭を骨組モデルに、地盤を2次元FEMモデルに各々別にモデル化し、基礎杭と地盤を杭-地盤の3次元挙動を反映した相互作用バネで結合して一体化する簡易3次元解析手法を用いる。

本手法は基本的に2次元解析であるが、奥行き方向に隣接する組杭の列間にある地盤との相対変位、いわゆる“すり抜け”¹¹⁾の評価を可能とする。解析コードは「FLIP」（研究会版）¹²⁾を用いる。なお、本論文では、解析モデルの考え方を記述するものとし、具体的定数などは参考文献⁷⁾を参照されたい。

(2) 構造物-基礎系

上部構造-橋脚-基礎系（以後、構造全体系と呼ぶ）は2次元骨組みでモデル化する。対象とする構造全体系は一次振動モードが支配的であり、橋脚基部に塑性化が生じ

表-1 対象モデルの固有周期

	Model-1	Model-2	備考
全体1次	1.211 秒	1.341 秒	—
基礎1次	0.181 秒	0.215 秒	回転モード
基礎2次	0.098 秒	0.096 秒	並進モード

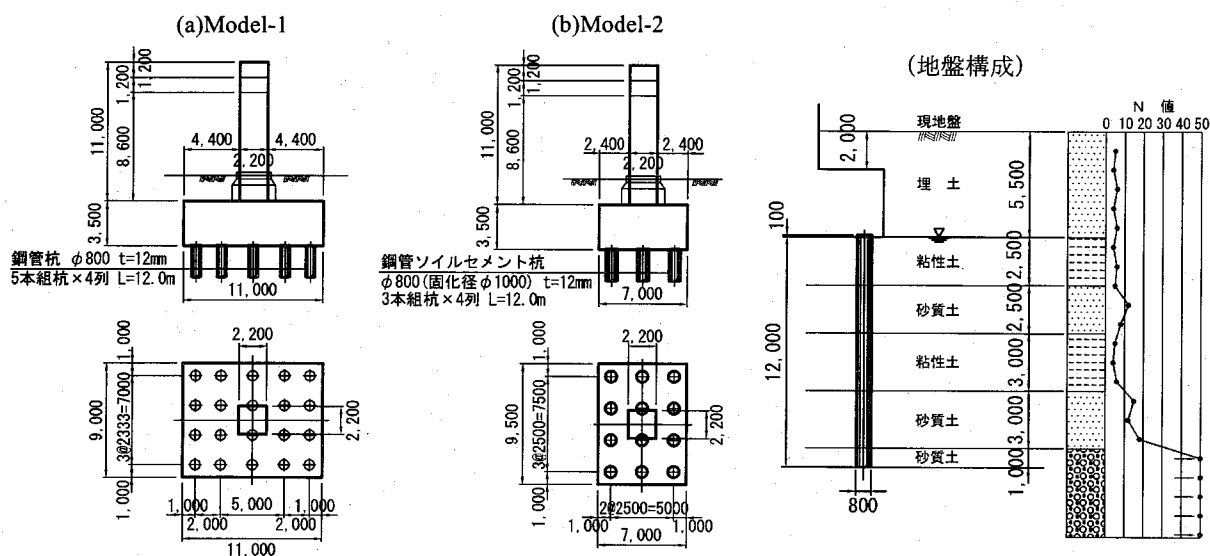


図-1 検討対象とする橋脚および地盤

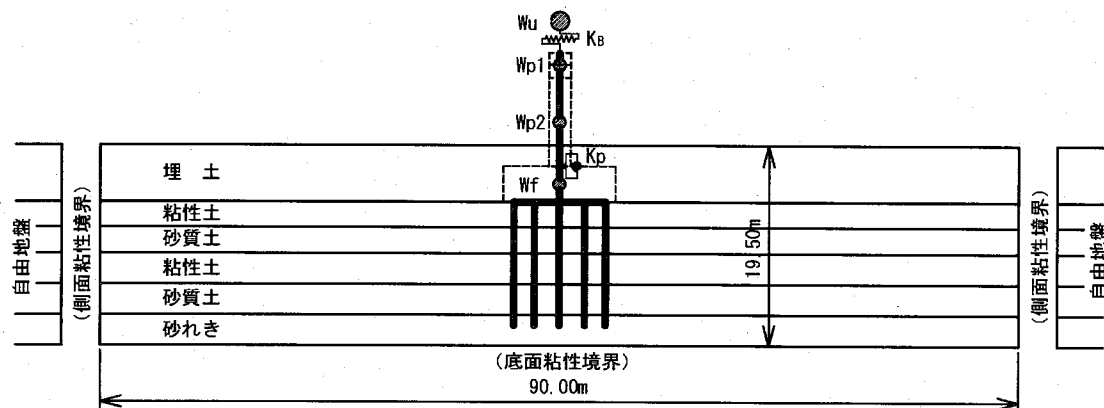


図-2 解析モデルの全体概略 (Model-1 の場合)

るものと考えられる。橋脚脚柱は剛部材でモデル化し、橋脚基部に脚柱の復元力特性を表す移動硬化則に従うバイリニア型のパネ ($M \sim \theta$ 関係) を設けた。また、基礎部材は線形部材とし、底版部材は剛部材でモデル化した。

(3) 地盤

地盤は2次元FEMでモデル化し、杭の列間隔を奥行き方向幅とした。Model-1で $2.333\text{m}=2.916D$ (D : 杭径)、Model-2で $2.50\text{m}=2.5D$ である。モデルの水平方向幅は基礎幅の10倍の90mとし、高さは杭下端下方2.0mまでの19.5mである。モデルの左右端には粘性境界を介して自由地盤を配置し、底面には粘性境界を設けた(図-2)。土の応力~ひずみ関係は地盤内の主応力軸の回転が考慮できるマルチスプリングモデル¹³⁾を用いる。各スプリングは高レベルひずみ応答にともなう減衰力の過剰評価の問題¹⁴⁾を考慮して修正 Masing 則に従う双曲線モデル¹⁵⁾を適用した。地盤の変形特性の非線形性を規定する定数は参考文献¹⁶⁾により設定した。

(4) 相互作用パネ

2次元FEMモデルの地盤節点と骨組モデルの杭節点との間を結合する相互作用パネ(図-3)はウィンクラー型の水平パネ(水平方向地盤反力係数に相当)と鉛直パネ(杭軸方向周面摩擦パネに相当)の二つで構成される。

水平方向の相互作用パネは参考文献^{17),18),19)}により、積分時間ステップ毎に隣接する地盤要素の応力~ひずみ関係を参照してその特性値を更新している。鉛直方向の相互作用パネは参考文献²⁰⁾により単杭としての摩擦パネを算定し、群杭効果を考慮するためのその算定値に1/10(経験値)を乗じ低減した。また、杭下端には先端地盤の軸方向引抜き抵抗が杭に作用しないようにバイリニア型の非線形パネを設置した。なお、本解析は基礎研究であり、底版の底面や側面、橋脚の地盤埋没部と地盤との連成振動、また、地表から杭頭までの深度が大きく、杭と地盤の相互作用パネの地表面からの深さによる影響を考慮しないものとした。

2.3 入力地震波

1995年兵庫県南部地震で観測された関西電力技術研究所地点のGL-24.9m地中記録²¹⁾の東西成分(図-4)を用いる。

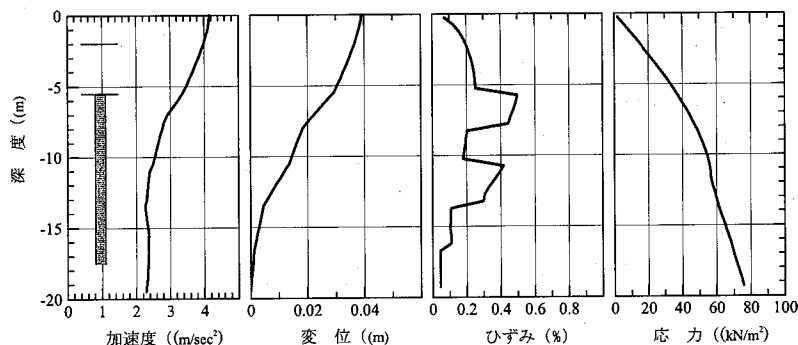


図-5 自由地盤の最大加速度、最大変位、最大せん断ひずみおよび最大せん断応力の深度方向分布

用いる。地中で観測された記録波は入射波と反射波との複合波であり、反射波は観測地点の表層地盤の応答の影響を受けていると考えられる。そこで、観測地点の土質柱状に基づいた応答解析により入射成分(E)を抽出し、それを2倍($2 \times E$)してモデル底面の粘性境界の下面から入力する。

3. 動的応答解析結果と考察

3.1 自由地盤の動的応答

構造全体系の振動による影響を受けない自由地盤における最大応答値の深度方向分布を図-5に示す。自由地盤

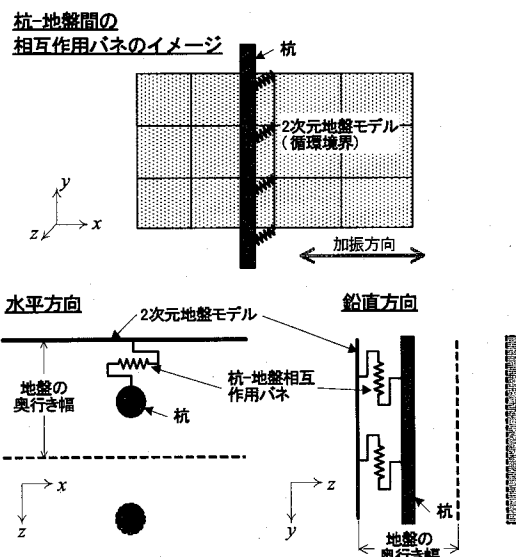


図-3 相互作用パネの概念図

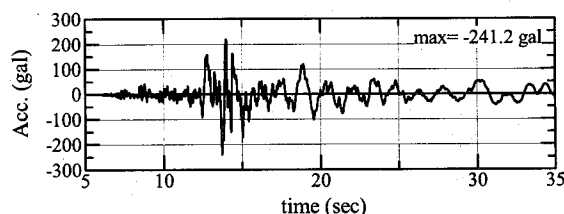


図-4 入力地震動

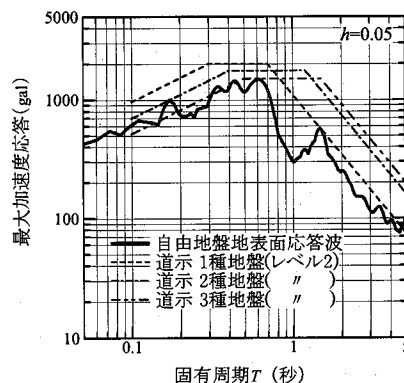


図-6 弾性加速度応答スペクトル

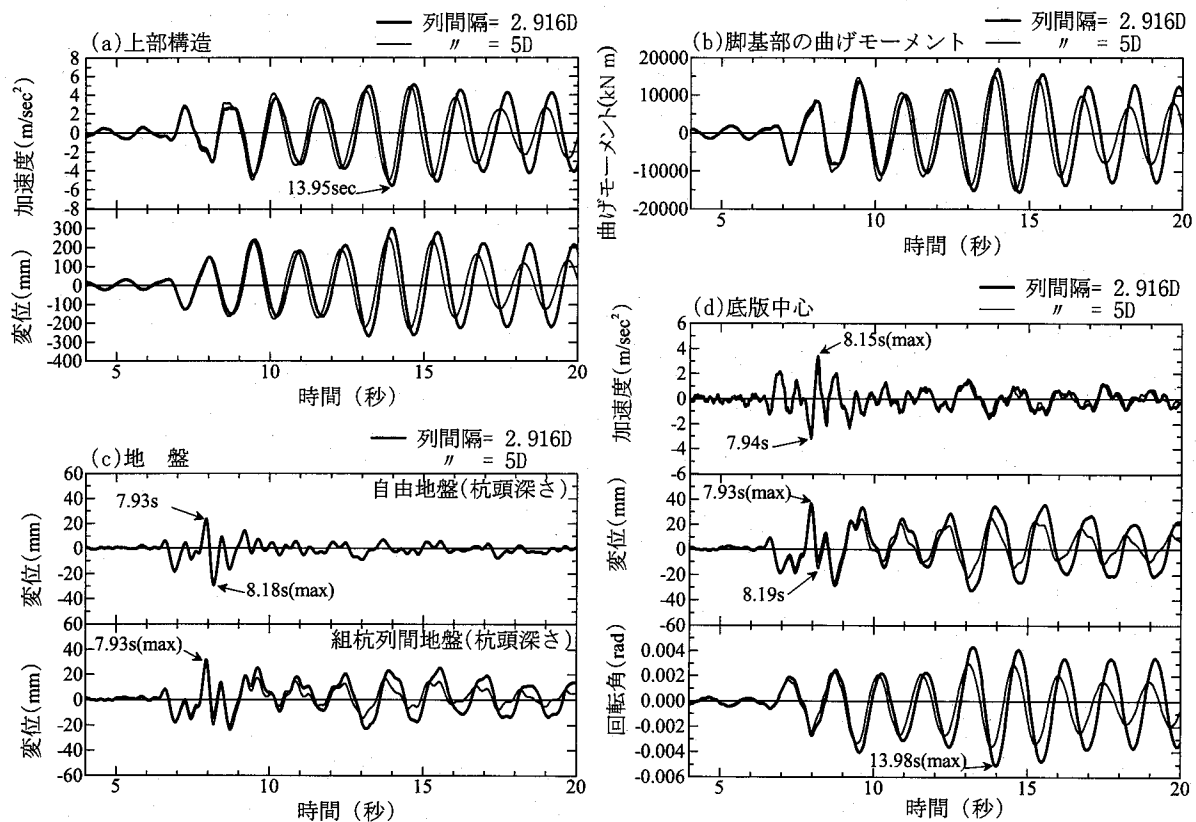


図-7 主要箇所の時刻歴応答 (Model-1)

地表面の最大加速度は 417gal, 最大変位は 39mm, 杭頭深さでは各々 336gal, 29mm である。地盤の最大ひずみは杭頭深さ位置の粘性土層で生じ, 約 0.5% である。また, 地表面位置における応答加速度波の弾性加速度応答スペクトルを算定し, 構造モデルの諸元設定 (試設計) に用いた設計地震動 (道示で規定されるレベル 2, タイプ II 地震動) とともに図-6 に示す。解析モデルの地盤応答倍率は小さく, 弾性加速度応答スペクトルで見ると設計地震動に比較して短周期側でやや小さく, 長周期側で小さい。その結果, 後述の動的相互作用解析において, 橋脚基部の最大応答は降伏曲率の 95% であり, 上部構造および橋脚は線形応答となった。

3.2 構造全体系および地盤の動的応答

Model-1 と Model-2 の動的応答特性は定性的に同一であり, Model-1 の動的応答について考察する。Model-2 の動的応答の詳細は参考文献⁸⁾を参照されたい。

(1) 動的応答の概要

構造全体系および地盤の主要箇所における加速度応答と変位応答を $T=4\sim 20$ 秒について図-7 に示した。同図には後述する杭列間隔を 5D (4.00m) とした場合の時刻歴応答を重ね書きしている。

自由地盤の応答は $T=8.18$ 秒で最大変位となり, それ以降, 振幅を減じながら変位振動を継続する。上部構造, 橋脚は地盤-基礎系との連成振動により応答し, $T=13.95$ 秒で最大加速度, 最大変位となる。橋脚基部の曲げモー

メントも同時刻に最大応答を示している。

一方, 底版および組杭の列間地盤 (杭と奥行き方向に隣接する杭との間の地盤) は自由地盤の変位応答が最大になる前の $T=7.93$ 秒において最大となる。また, それらの変位応答は自由地盤が最大応答を示す約 8 秒まで自由地盤と概ね同じ振動特性で応答するのに対し, それ以降は上部構造および橋脚の応答による影響 (質量相互作用) が大きくなり構造全体系と同じ振動性状で応答し, 組杭の列間地盤の変位振幅は自由地盤の変位振幅より大きい。

(2) 着目時刻における杭基礎の応答

底版と組杭の列間地盤, 自由地盤, および上部構造と脚基部の変位応答が最大となる時刻における各杭の変位, 曲げモーメント, 杭の地盤反力度, および地盤との変位差を図-8 に示す。ここで, 杭変位は地盤モデル底面に対する相対値である。変位差は当該杭と隣接する杭の列間地盤との水平方向の相対変位であり, 地盤の杭列間の“すり抜け”量を表す。

$T=7.93$ 秒では, 構造全体系と地盤が同位相で変位応答し, 杭の変位モードは自由地盤の変位モードに類似している。また, 杭と列間地盤との変位差は小さく, 自由地盤の変位が杭の変位に比較して大きいことから, 杭基礎周囲の地盤が杭とそれに囲まれた地盤 (仮想ケーソン) を強制変位している, 即ち, キネマティック相互作用が卓越している振動モードにあることが分かる。一方, $T=13.95$ 秒では, 杭の応答変位が自由地盤の変位応答に比較して十分大きく, 上部構造, 橋脚などの慣性力によ

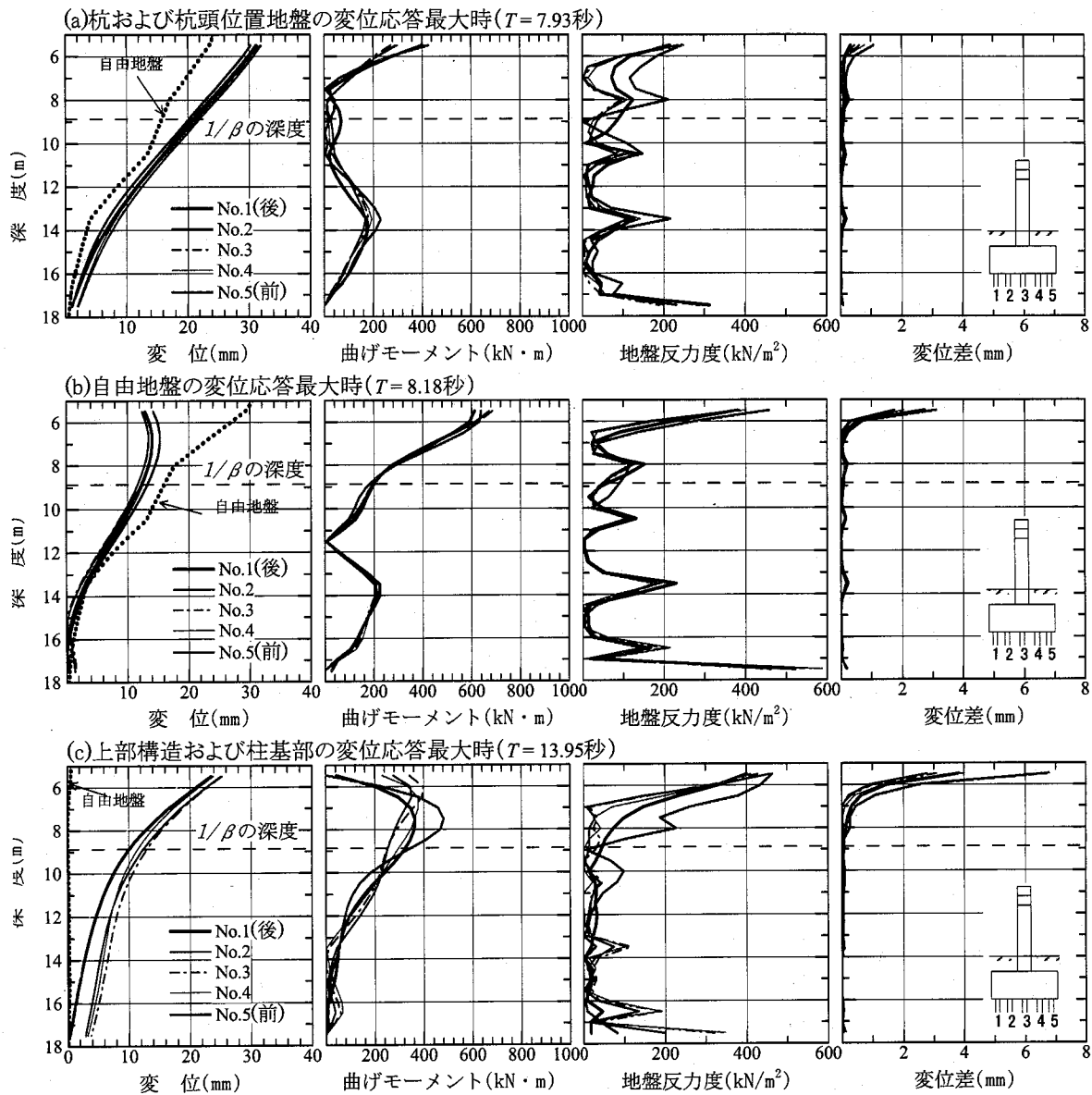


図-8 杭頭、自由地盤および上部構造の変位応答最大時の杭基礎の応答 (Model-1)

る相互作用が卓越している振動モードであることが分かる。変位差は $T=7.93$ 秒に比較し大きく、変位方向前方の杭 No.5 の変位差が他の杭に比較して大きい。杭の曲げモーメント分布は杭毎に異なるモードを示し、組杭の群杭効果が顕著になっているものと考えられる。

$T=8.18$ 秒では、自由地盤の変位モードに対して、杭頭の傾斜角から底版が反時計回りの回転になっていることが分かる。これは Model-1 において、地盤と構造物全体系の固有周期が $T_{sl} > T_G$ の関係であり、地盤と構造物全体系の振動に位相差が生じていることによる²²⁾と考えられる。このため、杭頭の曲げモーメントが地中部のそれより大きくなり、また、変位差は $T=7.93$ 秒と $T=13.95$ 秒との中間的なものとなっている。

(3) 組杭の列間隔と構造物全体系と地盤系の応答

杭と列間地盤との変位差 (すり抜け) による構造物全体系の応答に与える影響を検討するため、Model-1 の杭列

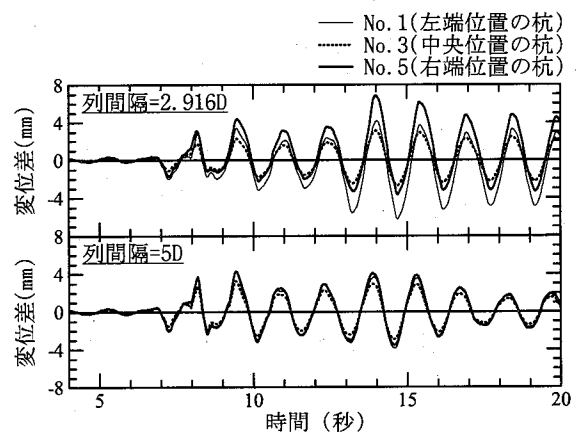


図-9 変位差の時刻歴応答 (Model-1)

間隔を変えて動的応答解析を行った。説明を容易にするため、列間隔を 5D (=8.0m) とする場合の時刻歴を図-7

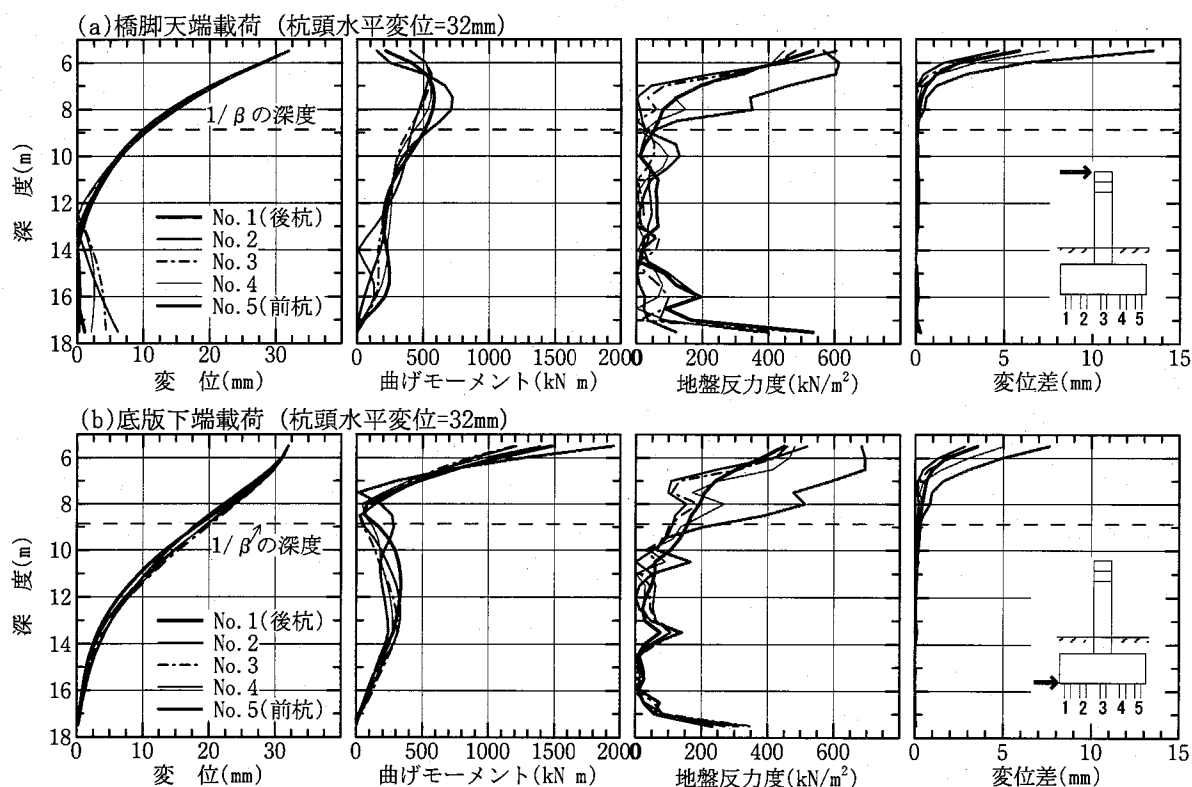


図-10 2つの荷重方法による杭の変位、曲げモーメント、地盤反力度及び変位差の深度分布(Model-1)

に重ね書きした。同図から、地盤の変位応答が最大となる（構造全体系の応答は小さい） $T=8$ 秒付近まで、構造全体系および杭列間地盤の変位応答は組杭の列間隔による影響が小さい。一方、構造物全体系の応答が大きくなる時間帯では、自由地盤の変位応答が相対的に小さくなる時間帯では、構造物および杭列間地盤の変位応答は組杭の列間隔による影響が大きいことが分かる。これは杭の列間隔が大きくなると列間地盤の変位挙動に対する列組杭の影響が小さくなり、列間地盤と各杭との変位差（すり抜け）は均等化し（図-9）、変位方向の中間および後方に位置する杭が杭基礎の剛性に寄与するようになり、組杭基礎として水平および回転方向の剛性が変化するためと考えられる。（2）で着目した時刻における各杭の杭頭水平力分担比は、表-2のとおりである。列間隔が大きくなると、各杭が分担する水平力は偏りが小さくなることから組杭基礎として水平および回転方向の剛性が変化することが考えられる。

4. 静的水平荷重解析による動的解析結果の考察

4.1 解析方法

杭基礎の動的応答時の群杭効果を検討するため、図-2のモデルを用いて静的水平荷重解析を実施した。左右端および底面の粘性境界を固定境界に、橋脚基部を弾性バネに変更し。その他の諸定数は動的相互作用解析と同一である。荷重方法は変位増分方式（増分量：0.05mm/1ス

表-2 杭列間隔と杭頭水平力分担比

列間隔	時間(秒)	No. 1	No. 2,3,4	No. 5
2.916D	7.93	0.81	0.47~0.52	1.00
	8.18	1.00	2.40~2.79	0.39
	13.95	0.67	0.26~0.44	1.00
5D	7.93	0.83	0.55~0.64	1.00
	8.18	1.00	1.57~1.82	0.69
	13.85	0.96	0.46~0.60	1.00

テップ）による強制変位とし、構造全体系が全体1次モード（ロッキング変位モード）で応答することを想定した橋脚天端の強制変位（以後、「橋脚天端荷重」と呼ぶ）と杭の水平荷重試験で実施されるスウェイ変位モードを想定した底版下端部の杭頭高さの強制変位（以後、「底版下端荷重」と呼ぶ）の2ケースとした。

4.2 組杭の列間隔と杭の水平力分担比

(1) 杭の変位、断面力および地盤反力度

Model-1において、杭頭水平変位が32mm（=杭径の4%）における杭の変位、曲げモーメント、水平方向地盤反力度、および列間地盤との変位差の深度分布を図-10に示す。同図には、杭の水平抵抗に係わる地盤深さの指標となる杭の特性値の逆数 $1/\beta$ （=3.367m）の深度を記した。

橋脚天端荷重は組杭に水平力だけでなく曲げモーメントも作用し、底版下端部荷重に比較して底版の回転が大きい。橋脚天端荷重と底版下端荷重では杭頭水平変位が同じであっても杭の変位モードが異なり、杭の最大曲げ

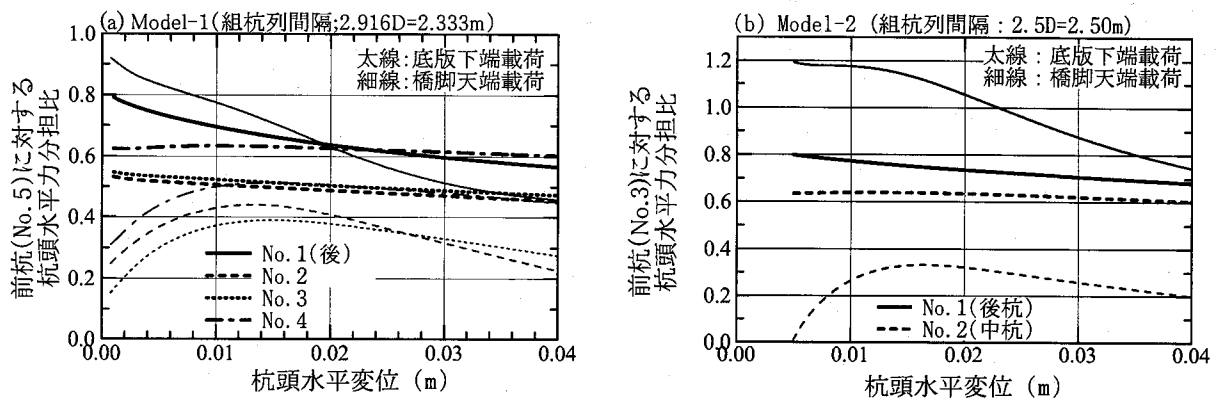


図-11 荷重位置の違いによる各杭の水平力分担比

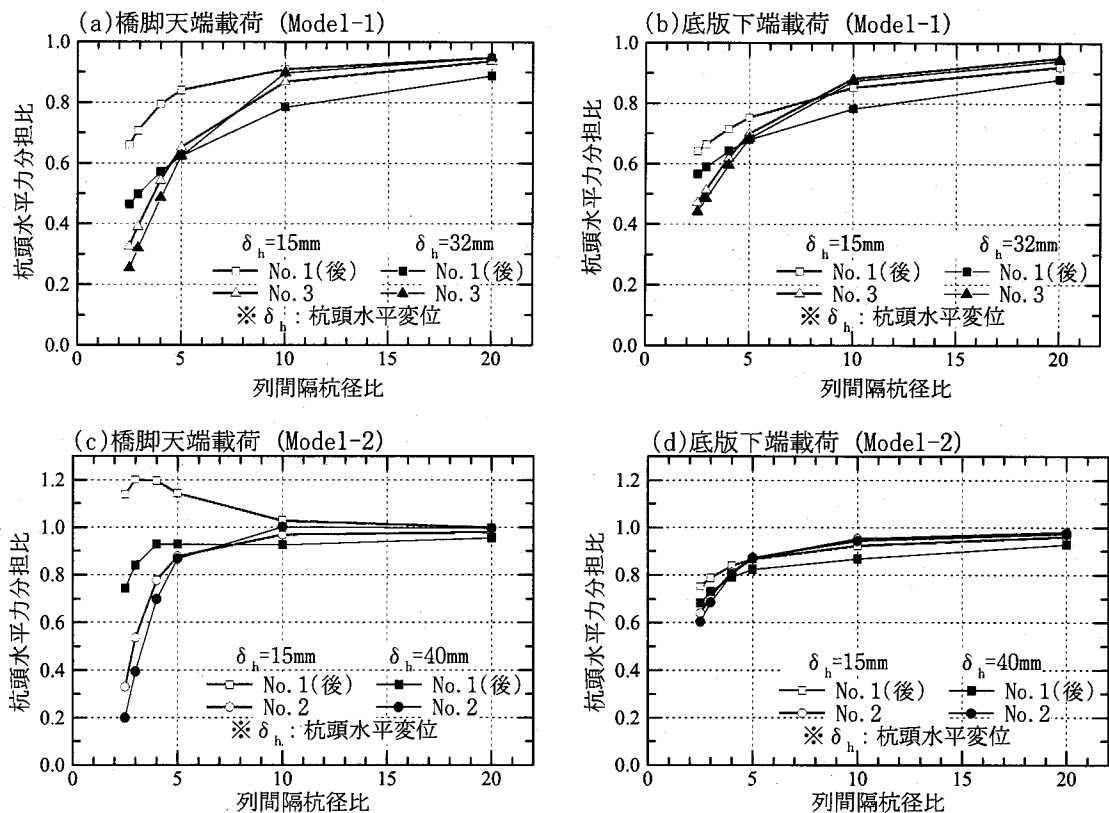


図-12 組杭列間隔と各杭の水平力分担比

モーメントは橋脚天端荷重の場合に地中部において、底版下端荷重の場合に杭頭部において生じる。

杭と列間地盤との変位差は底版下端荷重に比較して橋脚天端荷重の方が大きく、変位方向の前杭 (No.5) が他の杭に比較して大きな変位差を生じる。杭列間の地盤は荷重により杭基礎とともに変位するが、杭と列間の地盤との間には相対変位が生じる。それは橋脚天端荷重の方が底版下端荷重に比較して大きく、特に、変位方向の前杭で顕著となる。言い換えると、橋脚天端荷重は底版下端荷重に比較して杭列間の杭頭付近の地盤がより“すり抜ける”，また、変位方向の前方杭は特に“すり抜ける”ことを意味する。変位差は両荷重ケース共に深度 $1/\beta$ 範囲が顕著であり、杭基礎と地盤との相互作用は杭頭から

$1/\beta$ 範囲で主に生じるものと考えられる。

動的応答解析による $T=13.95$ 秒における杭の変位、曲げモーメント、水平方向地盤反力度、および列間地盤との変位差の深度分布 (図-8(c)) は橋脚天端荷重による解析結果 (図-10(a)) に酷似している。動的応答解析では、杭頭水平変位が約 25mm に対して前方杭の変位差が 7mm、他の杭で 3mm 程度である。一方、静的水平荷重解析では、杭頭水平変位が 32mm に対して前方杭の変位差が 14mm、他の杭で 6mm である。杭頭水平変位が異なるものの、杭頭水平変位に対する変位差の比率は動的応答解析に比較して静的水平荷重解析が大きい。即ち、同じ杭頭変位に対し静的水平荷重解析の方が“すり抜け”が大きい。これは杭の地盤に対する荷重速度の違いによるも

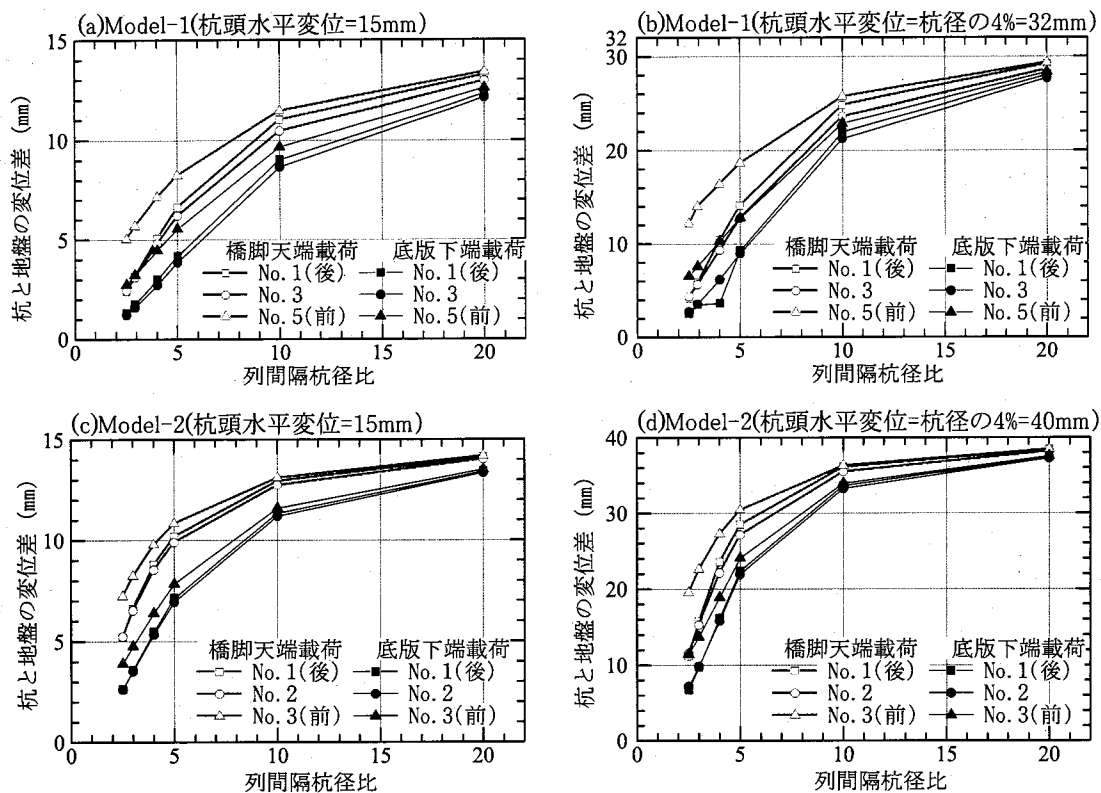


図-13 組杭列間隔と各杭における列間地盤との変位差

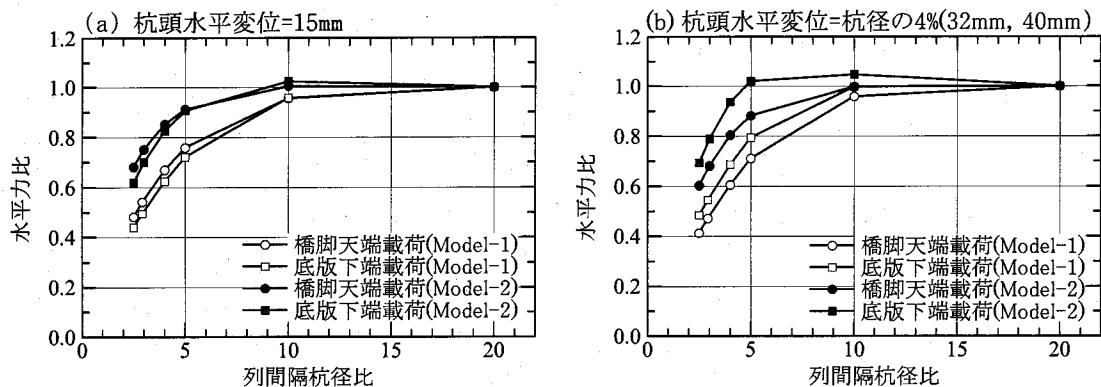


図-14 基礎の水平力と組杭列間隔

のであり、相互作用バネの履歴減衰によるものと考えられる。

(2) 杭頭の水平力分担比

Model-1 および Model-2 において、橋脚天端載荷および底版下端載荷による各杭頭に作用する水平力をそれが最大となる前杭 (Model-1 で No.5, Model-2 で No.3) の水平力で正規化した水平力分担比を図-11 に示した。底版下端載荷の場合、水平力分担比は杭頭水平変位量に係わらず概ね一定であり、Model-1 で 0.5~0.6, Model-2 でやや大きく、0.6~0.7 である。既往の組杭に対する水平載荷試験^{3),4)}による水平力分担比と同様となっている。一方、橋脚天端載荷の場合、底版下端載荷に比較して後杭の水平力分担比が大きく、中間の杭のそれは小さい。

また、杭頭変位の増大とともに水平力分担比が小さくなり、前杭の水平力を分担する割合が大きくなる。Model-2 は 3 本組杭であり、5 本組杭である Model-1 に比較して回転変位し易く、中杭の水平力分担比がより小さくなっている。これらから、構造物全体系が回転変位を伴って変位する場合 (ロッキング変位振動モード)、変位方向の後方および中間に位置する杭の水平力分担比は水平載荷試験 (底版下端載荷) によるものに比較して小さくなり、基礎の水平変位の増大に伴いさらに小さくなるものと考えられる。

列間隔による水平力分担比に与える影響を杭頭水平変位が $\delta_h=15\text{mm}$ と杭径の 4% の場合について図-12 に示した。図の横軸は隣接する列間隔を杭径で除したものであ

り（以後、列間隔杭径比と呼ぶ）、Model-1 については端杭 No.1 と中央杭 No.3 を示した。水平力分担比は列間隔杭径比 10 程度から影響が現れ、実基礎で多い 5 以下で顕著となる。底版下端載荷では、Model-1 と Model-2 において列間隔杭径比に対し同程度の分担比、列間隔杭径比に対する同じ低下傾向を示し、杭頭水平変位による影響も小さい。橋脚天端載荷では、列間隔杭径比が小さい場合、Model-1 と Model-2 は異なる水平力分担比を示し、杭頭水平変位による影響も大きい。基礎の回転変位の大きい Model-2 は後杭（No.1）の水平力分担は前杭（No.3）より大きく、列間隔杭径比が 2.5、杭頭水平変位 $\delta_h=15\text{mm}$ の場合に、全水平力の約 50% を後杭が分担する。回転変位が小さい Model-1 は前杭の水平力分担が他の杭（No.2,3,4）より大きい。

なお、底版下端載荷において、Model-1 および Model-2 ともに変位方向の後方に位置する No.1（後杭）が中間に位置する杭に比較して水平力分担比が大きい。一方、既往の組杭に対する水平載荷試験^{3),5)}では後方杭<中間杭<前方杭の関係が報告されている。これは、組杭の変位方向後方の背面地盤に引っ張り領域が形成されること、また、後方杭の引き抜き変位挙動にともない接する地盤が局所的にせん断変形を受けるなど、2 次元解析で評価できない群杭効果による可能性が考えられ、また、杭軸方向の摩擦パネの群杭効果を反映するために設定した低減率の問題も考えられる。

次に、組杭列間隔と各杭の列間地盤との変位差を図-13 に示す。Model-1 および Model-2 ともに、変位差は列間隔が大きくなると大きくなる。即ち、組杭列間地盤は基礎変位に影響されて変位しにくいことが分かる。また、橋脚天端載荷が底版下端載荷に比較して大きいことから、変位差は基礎の変位モードに影響されることが分かる。

(3) 組杭の列間隔と基礎剛性

基礎に作用する水平力と基礎変位の関係を、隣接する列組杭との干渉が極めて小さいと考えられる列間隔が 20D の水平力で正規化し、杭頭水平変位が 15mm と杭径の 4% について図-14 に示す。列間隔杭径比が小さくなると、同一水平変位を得るために必要とする水平力比が小さくなり、組杭基礎の水平方向の剛性が小さくなることが分かる。それは列間隔杭径比が 10 程度から影響が現れ、5 以下で顕著となり、Model-1 が Model-2 に比較してより顕著である。また、杭頭水平変位が大きくなる（図-14(b)）と、基礎の回転による変位の比率が高い橋脚天端載荷で水平力比が小さくなることが分かる。動的応答解析において、杭の列間隔を大きくしたことによって応答値が変わる（図-7）のは、組杭の列間隔により基礎の剛性が変化することによると考えられる。

本研究では 2 次元解析であり、杭基礎の奥行き幅は無限大である。列間隔杭径比が小さい場合は奥行き幅が無限大の仮想ケーソンとしての剛性となり、列間隔杭径比が十分に大きい場合は n 本 1 列の組杭としての剛性とな

る。列間隔杭径比により基礎の剛性が変化するのは組杭列間の地盤のすり抜け量やすり抜け量の杭位置毎の分布が影響し、仮想ケーソンとしての基礎剛性と n 本 1 列組杭として見掛けの載荷（基礎）幅²³⁾を有したの基礎剛性との間で列間隔杭径比に依存して変化することによると考えられる。

5. まとめ

本研究では、鋼管杭基礎で支持される橋梁構造物を対象とし、杭と地盤とを三次元挙動を考慮した相互作用パネにより連結する 2 次元 FEM 解析手法を用いて、杭基礎の群杭効果を主に検討した。本研究で得られた知見を要約すると以下のようである。

- (1) 地震時において、杭基礎の杭に囲まれた杭列間の地盤は構造全体系と概ね同周期・同位相で変位振動する。地盤の変位応答（キネマチック相互作用）が卓越する時間帯では杭と列間地盤の変位差（すり抜け）が小さく、杭と杭の囲まれた地盤が仮想ケーソンとして変位振動する。一方、構造全体系の変位応答（質量相互作用）が卓越する時間帯では杭頭から $1/\beta$ の範囲において杭と列間地盤に変位差（すり抜け）をとともなう。この変位差が組杭の群杭効果の原因と考えられ、基礎の応答だけでなく構造全体系の応答にも影響を与える。
- (2) 杭と列間地盤の変位差は組杭の列間隔や変位方向の杭本数（基礎幅）に影響される。列間隔が大きくなると、杭と列間地盤の変位差が大きくなり杭基礎として水平および回転変位に対する剛性が大きくなる。
- (3) 構造全体系が回転変位（ロッキング振動）する場合、並進変位（スウェイ振動）する場合に比較して変位方向前杭の変位差が他の杭より大きくなり、水平力分担比が大きい。各杭位置毎に生じる変位差の違いが各杭の水平力分担比の原因と考えられる。
- (4) 構造全体系の回転変位（ロッキング変位振動モード）により上部構造、橋脚などの断面が決定される場合、組杭の水平載荷試験で設定される群杭効果を現すパラメータは適合性が低く、ロッキング変位振動モードを反映した群杭効果を表すパラメータを用いるのが望ましい。

杭と地盤との相互作用パネの三次元挙動を反映した解析は、動的相互作用解析だけでなく静的大変形解析にも有効と考えられる。本解析は一例であり、地盤にパーセントオーダーのひずみが生じる場合、本研究の入力地震動と振動特性の異なるプレート境界型の地震動や地盤と構造物の固有周期の関係に対する検討が必要と考えている。また、杭の引き抜き挙動に影響する鉛直方向の相互

作用バネ（摩擦バネ）の群杭効果については今後の研究課題とする。

参考文献

- 1) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，2000.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2002.
- 3) 岡原美智夫，木村嘉富，高木繁，大堀裕康：群杭の水平載荷試験およびシミュレーション解析，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1371-1384，1993.
- 4) 木村亮，幸左賢二，伊藤恭平，坂本眞徳：場所打ち杭の大変形水平挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1385-1394，1993.
- 5) 幸左賢二，鈴木直人，木村亮，木村嘉富，森田悠紀夫：終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験，土木学会論文集，No.596/Ⅲ-43，pp.249-260，1998.
- 6) 西谷雅弘，龍田昌毅：水平変位の制限を緩和した杭基礎の設計例，基礎工，Vol.30，No.5，pp.55-57，2002.
- 7) 橋本至，林川俊郎，小幡卓司，寿楽和也：レベル2地震動下における杭基礎の群杭効果に関する解析的考察，応用力学論文集，Vol.8，pp.1027-1036，2005.
- 8) 橋本至，林川俊郎，小幡卓司：鋼製橋脚における高性能杭を用いた組杭の群杭効果に係る解析検討，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.17-24，2005.
- 9) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 4. 鋼製橋脚を用いた場合の設計計算例，1997.
- 10) 土木学会 杭基礎耐震設計研究小委員会：杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書（杭基礎の耐震設計ガイドライン(案)），2001.
- 11) 地盤工学会 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関する研究委員会：液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム 発表論文集（委員会報告 4. 液状化地盤中の杭の実用的解析），2004.
- 12) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 13) Towhata, I., Ishihara, K. : Modeling soil behaviour under principle stress axes rotation, *Proc. 5th International conference on numerical method in geomechanics*, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.
- 14) 橋本至，林川俊郎：地盤の動的変形特性のモデル化が鋼製橋脚の応答値に与える影響，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.39-46，2004.
- 15) Ozutsumi, O., Iai, S. : Adjustment method of the hysteresis damping for multiple shear spring model, *Proc. of the 4th International Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Eng. and Soil Dynamics*, San Diego, 2001.
- 16) 森田年一，井合進，一井康二：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.
- 17) 三輪滋，小堤治，溜幸生ほか：2次元水平断面モデルを用いた液状化地盤における杭-地盤系の相互作用の検討，第38回地盤工学研究発表会，2003.
- 18) 寿楽和也，一井康二，篠崎晴彦ほか：2次元解析における杭-地盤相互作用ばねを用いた群杭効果の評価手法の検討，第58回土木学会年次学術講演会，2003.
- 19) 小堤治，溜幸生，岡由剛，井合進，梅木康之：2次元有効応力解析における杭-液状化地盤の動的相互作用のモデル化，第38回地盤工学研究発表会，2003.
- 20) Randolph M.F., Wroth C.P. : Analysis of deformation of vertically loaded piles, *J. Geot. Divns*, ASCE, 104, No. GT12, pp.1465-1488, 1978.
- 21) 財) 震災予防協会 強震動アレー観測記録データベース推進委員会：強震動アレー観測 No.3，1998.
- 22) 室野剛隆，西村昭彦：地盤と構造物の動的相互作用を考慮した応答変位法，鉄道総研報告，Vol.13, No.2, pp.41-46，1999.
- 23) 岡原美智夫，高木章次，茶林一彦：地中連続壁基礎の支持機構，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1301-1307，1989.

(2005年9月10日受付)