

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

Pile-group Effects on Seismic Response of Pier System with Pile Foundation under Level2 Earthquake

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

Itaru HASHIMOTO, Toshiro HAYASHIKAWA, Takashi OBATA, Kazuya JURAKU

^{*}正会員 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)^{**}フェロー会員 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)^{***}正会員 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)^{****}正会員 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 level2 earthquake motion in a bridge structure. The analytical method adopted is a simplified 3-D analysis. This method is 2-D frame model for a pier-system with a pile foundation, 2-D FEM model for the ground separately, and connects the nodes of soil and the nodes of pile with the interaction spring in consideration of the 3-D effects. By this model a dynamic analysis and a monotonic loading analysis were conducted. Major findings from these analyses are as follows: (1) The pile rows and the soils deployed perpendicular to the load direction show a different displacement. (2) The difference is proportional to the spacing of pile rows perpendicular to the load direction, and has more influences on a rocking displacement mode as compared with a sway displacement mode of a structure-foundation system. (3) These are considered to be the causes of the pile-group effects, and it not only affects behaviors of the pile-foundation, but they affect the force responses of a bridge pier.

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

1. はじめに

高架橋など地上構造物は地震動が地盤および基礎を介して構造物に伝達し、その応答による慣性力が生じる。同時に、構造物周囲の地盤振動は構造物の応答により基礎を介してその影響を受ける。このような力のやりとりは構造物-基礎-地盤系の相互作用と呼ばれる。レベル2地震動に対して高架橋など地上構造物の耐震性を適切に照査するためには、構造物の損傷過程に立ち入った照査を行うだけでなく、構造物応答の照査に地盤のひずみレベルの増大にともなう基礎・地盤の非線形挙動を反映させる必要があると考えられる¹⁾。

地震時において、基礎-地盤系は上部工および下部工などの躯体の応答による慣性力を受けるだけでなく、地盤の振動変位による影響(キネマティック相互作用)を受け、レベル2地震動下においてその影響が顕著となることが知られている。1995年兵庫県南部地震による杭基礎の被災を経験し、大型せん断土槽を用いた加振実験²⁾や動的解析による動的相互作用のメカニズム、設計手法の研究が行われている。そうした中で、杭基礎は組杭として用いられるのが一般であり、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)が顕著となり、群杭効果の評価が基礎部材の断面力の照査だけでなく、杭基礎を有する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³⁾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、これら補正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”(図-1)による影響範囲の考え方^{4),5),6),7)}により設定されたものであり、キネマティック相互作用による影響が反映されていないものと考えられる。

さらに、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⁸⁾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し、橋全体系の耐震性照査において基礎-地盤系の動的相互作用における組杭の群杭効果の評価がより重要となるものと考えられる。

本研究は杭基礎で支持された鋼製橋脚を有する橋梁構造を対象とし、基礎-地盤系の静的水平載荷解析および構造物-基礎-地盤系の動的相互作用解析を行い、組杭の杭配置や基礎変位が群杭効果に与える影響、基礎の挙動、さらに橋梁構造全体系の応答に与える影響を検討し、地盤と構造物との地震時相互作用を考慮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。解析は、構造物-基礎-地盤系の動的解析手法に関する近年の

知見^{8),9)}を踏まえ、構造物、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-地盤の三次元挙動を考慮した相互作用バネ^{10),11),12)}で結合する一体解析手法を用いた。

2 解析条件および方法

2.1 対象とする構造物と地盤

検討の対象とする橋梁構造および杭基礎構造を周辺地盤条件とともに図-2に示す。これは弾性支承を地震力分散支承として用いた多径間連続桁橋の一つの鋼製橋脚を取り出したものである。鋼製橋脚躯体および弾性支承の諸元、上部工反力条件などは参考文献¹³⁾により、鋼管杭基礎の諸元は道示による試設計を行い決定した。なお、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種地盤に分類され、地盤と杭との相対剛性を表す特性値 β は 0.297m^{-1} である。

2.2 解析モデル

(1) 概要

上部工、支承、橋脚躯体、杭基礎および地盤で構成される全体系を構造物-基礎系と地盤系とに別々にモデル化する。杭と地盤の間には相互の相対変位を考慮するため、杭節点と隣接する地盤節点を水平および鉛直方向の相互作用バネを用いて連結する。本モデル化手法は、2次元FEM解析ではあるが、奥行き方向に隣接する組杭（以後、「隣接列組杭」と呼ぶ）間にある地盤との相対変位、いわゆる“すり抜け現象”⁹⁾の簡易的な評価が可能となる。なお、解析コードは「FLIP」（研究会版）¹⁴⁾を用い、過剰間隙水圧の上昇による影響を無視した全応力解析とした。

(2) 構造物-基礎系

構造-地盤系は2次元骨組みでモデル化した。対象とする橋梁構造は弾性支承を採用し、上部構造が並進振動する一次振動モードが支配的となり、また、脚基部に塑性化が生じるものと考えられる。そこで、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バネ（ $M-\theta$ 関係）を設けた。また、基礎部材は線形弾性体とし、底版部材は剛部材でモデル化した。なお、構造物-基礎系は組杭1列当たりについてモデル化し、上部工、支承、橋脚躯体および底版の質量および剛性を全橋脚の1/4とした。

表-1にそれらパラメータ定数を示す。

(3) 地盤

地盤は2次元FEMでモデルした。その水平方向幅は杭基礎幅の10倍である90mとし、高さは地表から杭下端下方2.0mまでの19.5mとした。モデルの左右端には

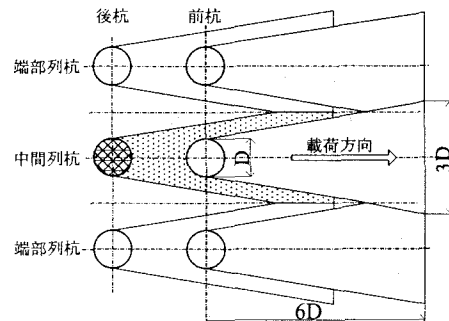


図-1 抵抗エリアの相互干渉⁶⁾に加筆

表-1 構造物-基礎系のパラメータ値（1基当たり）

弾性支承バネ	K_B : 40,212 kN/m
上部工重量	W_U : 9,260 kN
橋脚上梁重量	W_{PI} : 981 kN
橋脚脚柱重量	W_{P2} : 255 kN
底版重量	W_F : 8,486 kN
底版回転慣性重量	W_{FR} : 94,264 kN m ²
鋼管杭（ $\phi 800$, $t=12\text{mm}$ ）杭1本当たり：	
	$A_p=0.0272\text{ m}^2$, $I_p=0.0021\text{ m}^4$
脚基部非線形バネ K_p ：	
降伏剛性	K_f : $1.353 \times 10^7\text{ kN m}^2$
降伏曲げモーメント	M_y : 75,256 kN m
二次剛性	K_2 : $= 0.0769 K_f$

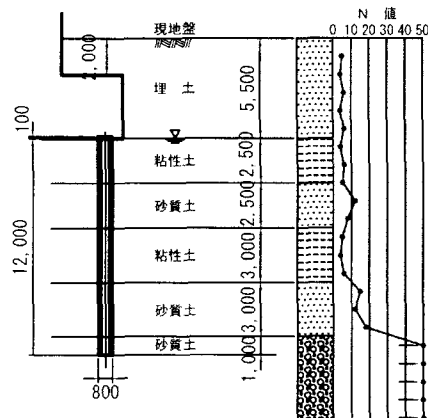
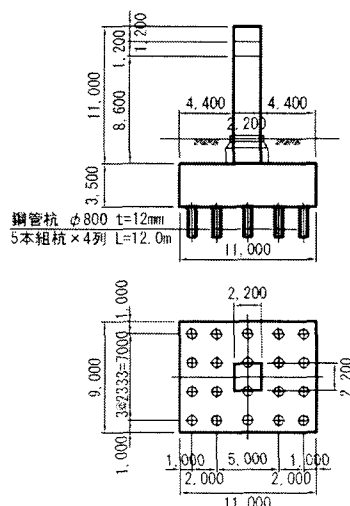


図-2 検討対象とする橋脚と地盤

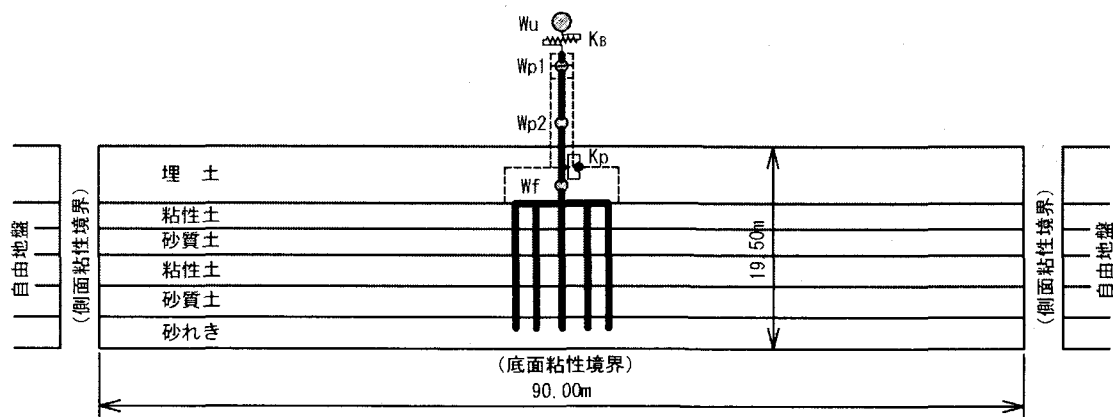


図-3 解析モデルの全体概略

表-2 地盤の種々パラメータ値

		埋土	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層
土性		砂質土	粘性土	砂質土	粘性土	砂質土	砂質土
層厚	m	5.50	2.50	2.50	3.00	3.00	3.00
N値		5	5	10	5	15	50
基準有効拘束圧 σ_{m0}'	kN/m ²	98.0	77.6	98.0	109.1	98.0	98.0
σ_{m0}' に対応する初期せん断剛性 G_{m0}	kN/m ²	60,633.0	50,722.8	69,133.0	50,722.8	79,414.0	176,258.0
σ_{m0}' に対応する体積弾性係数 K_{m0}	kN/m ²	158,121.0	132,277.0	180,288.0	132,277.0	207,098.0	459,654.0
パラメータ m_K, m_G		0.5	同左	同左	同左	同左	同左
ポアソン比 ν		0.33	同左	同左	同左	同左	同左
質量密度 ρ_t		1.734	1.734	1.734	1.734	1.937	1.937
間隙率 n		0.45	同左	同左	同左	同左	同左
間隙水の体積弾性係数 K_f	kN/m ²	2.20E+06	同左	同左	同左	同左	同左
減衰定数 h_{max}		0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3
粘着力 C	kN/m ²	0.0	0.0 注1	0.0	0.0 注1	0.0	0.0
内部摩擦角 ϕ_t		38.70	30.00	39.05	30.00	39.47	42.88

注1. 粘性土は、そのせん断強度に対応する等価な内部摩擦角で表す。

注2. 任意の有効拘束圧 σ_m' に対する初期せん断剛性 G_0 および体積弾性係数 K_0 は、次式により評価する。

$$G_0 = G_{m0} (\sigma_m' / \sigma_{m0}')^{m_G} \quad K_0 = K_{m0} (\sigma_m' / \sigma_{m0}')^{m_K}$$

粘性境界 (Lysmer 境界) を介して自由地盤を設け、底面には粘性境界 (Joyner 境界) を設けた (図-3)。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¹⁵⁾を採用し、各スプリングは高レベルひずみ応答に伴う減衰力の過剰評価の問題¹⁶⁾を考慮して修正 Masing 則に従う双曲線モデル¹⁷⁾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¹⁸⁾により決定し、表-2 のとおりである。地盤の奥行き方向幅は組杭の列間隔とし、2.333m (2.92D, D: 杭径) である。

(4) 相互作用バネ

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に設置した相互作用バネ (図-4) は、ウィンクラー型の水平バネ (水平方向地盤反力係数に相当) と鉛直バネ (杭軸方向周面摩擦バネに相当) の二つで構成される。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バネを設置した。

水平方向の相互作用バネは参考文献^{10), 11), 12)}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

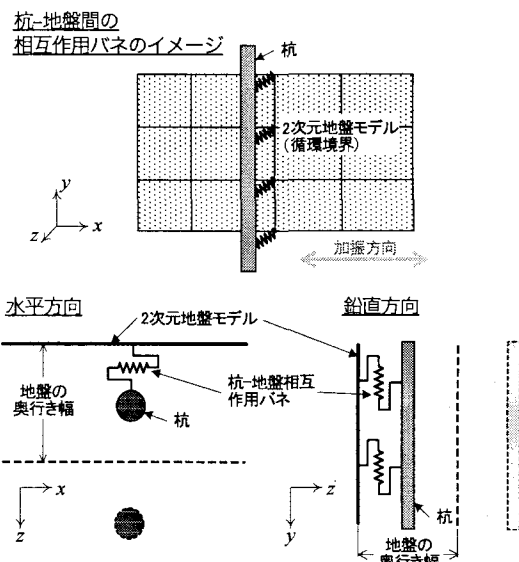


図-4 相互作用バネの概念図

相互作用バネは参考文献¹⁹⁾により単杭としての摩擦バネを算定し、群杭効果を考慮するためのそのバネ値を1/10 (経験値) に低減した。本解析は基礎的研究であり、

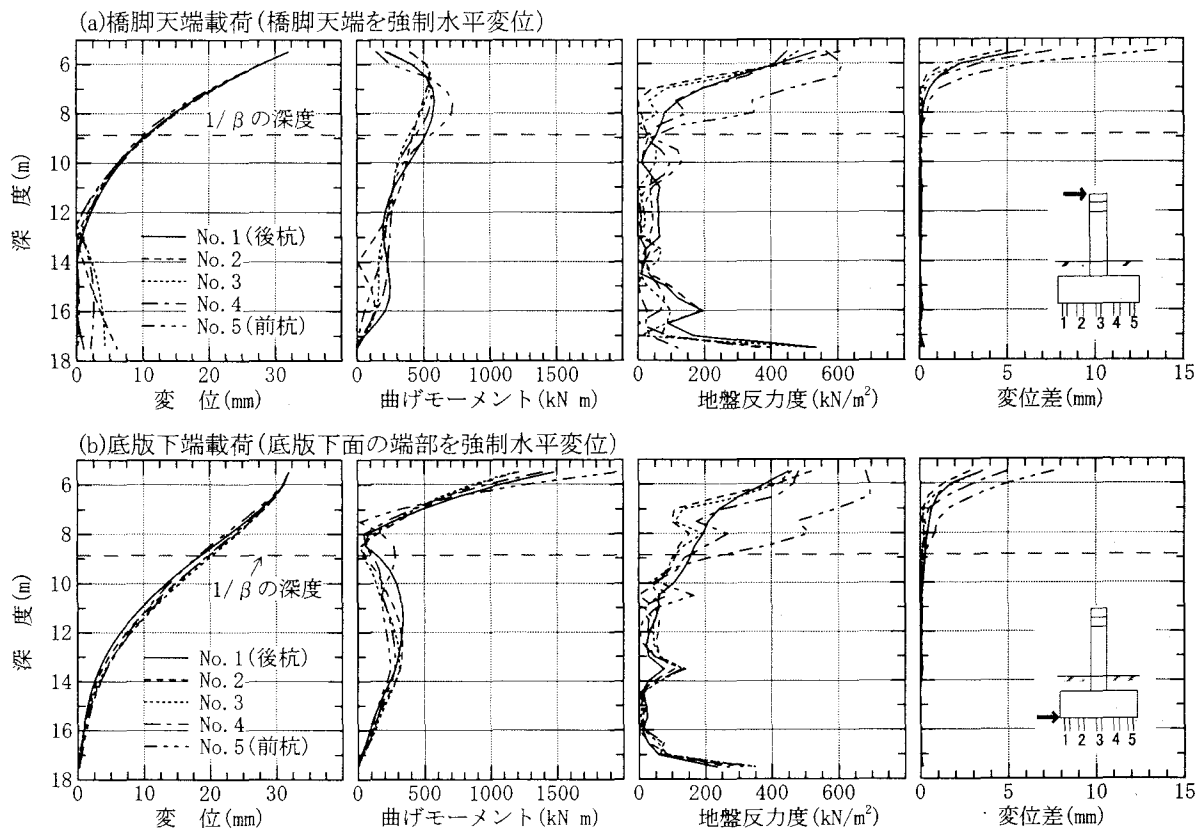


図-6 荷重位置の違いによる杭の変位、曲げモーメント、水平地盤反力度及び変位差の深度方向分布（杭頭変位=32mm）

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は考慮しないものとした。また、杭と地盤との相互作用バネは地表面からの深さの影響が考えられるが、今回のモデルは地表から杭頭までの深さが 5.5m と大きく、その影響を考慮しないものとした。

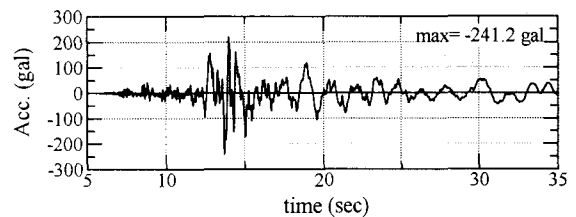


図-5 入力地震動

2.3 入力地震波

入力地震動は各機関の設計規準類においてレベル2設計地震動の中でプレート内地震として多用されている1995年兵庫県南部地震における観測波を用いる。本研究においては、関西電力技術研究所地点のGL-24.9m地中観測記録²⁰⁾の東西成分(図-5)をモデル底面の粘性境界の下面から入力する。なお、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図に基づいた応答解析により入射成分の抽出を行い、それを入力地震波とした。

3. 解析結果および考察

3.1 静的水平荷重解析

組杭基礎の大変位時における群杭効果を検討するため、図-3のモデルを用いて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て静的水平荷重解析を実施した。モデル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ステップ）による強制変位とし、荷重位置は上部工が応答し構造物-基礎系のロッキング変位モードを想定した橋脚天端（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ー変位モードを想定したの底版下端部の杭頭高さ（以後、「底版下端荷重」と呼ぶ）との2ケースとした。

(1) 杭の変位、断面力および地盤反力度

杭頭水平変位が杭径の4% (=32mm) 時における杭の変位、曲げモーメント、水平方向地盤反力度、および地盤との水平変位差の深度方向分布を図-6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、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る。また、橋脚天端荷重は底版下端部荷重に比較して底版の回転が大きく、最大曲げモーメントは橋脚天端荷重で地中部に

において、底版下端部載荷で杭頭部において生じることが分かる。

杭の地盤反力度は両載荷ケース共に、載荷方向前方のNo.5（前杭）が他の杭より大きい。また、杭と地盤との変位差は橋脚天端載荷の方が大きく、No.5が他の杭より大きな変位差を生じている。この変位差は当該杭と隣接列組杭の中間地盤との相対変位を表しており、列組杭の間の地盤は載荷により杭と相対変位を伴って変位するが、その相対変位量は橋脚天端載荷の方が底版下端載荷に比較して大きい。言い換えると、橋脚天端載荷は底版下端載荷に比較して組杭列間の杭頭付近の地盤がより“すり抜ける”ことを意味する。

変位差は両載荷ケース共に深度 $1/\beta$ 範囲が顕著であり、それ以深は地盤と概ね同じ変位である。また、杭前面の地盤反力度も深度 $1/\beta$ 範囲が主であり、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。

(2) 杭頭の水平力分担

両載荷ケースの各杭頭に作用する水平力をそれが最大となるNo.5（前杭）の水平力で正規化した水平力分担比を図-7に示した。底版下端載荷による分担比は杭頭水平変位に関して概ね一定であり、0.5～0.6である。これは既往の組杭に対する水平載荷試験^{4),6)}と同じ結果となっている。一方、橋脚天端載荷は底版下端載荷に比較して水平力分担比が小さいだけでなく、杭頭変位の増大とともに水平力分担比が小さくなる。これは、力が作用する組杭基礎における各杭の水平力分担比が基礎の変位モ

ードにより影響を受けることを示している。構造物-基礎系がロッキングモードで変位する場合に、水平載荷試験で評価される水平力分担比より小さくなり、基礎の変位の増大に伴ってより顕著になるものと考えられる。なお、載荷方向後方のNo.1（後杭）は両載荷ケースともにNo.2～No.4の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^{4),6)}ではNo.1（後杭）<No.2～No.4（中間杭）<No.5（前杭）の関係が報告されている。これは、組杭の載荷方向後方地盤に引っ張り領域が形成されること、また、後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る。

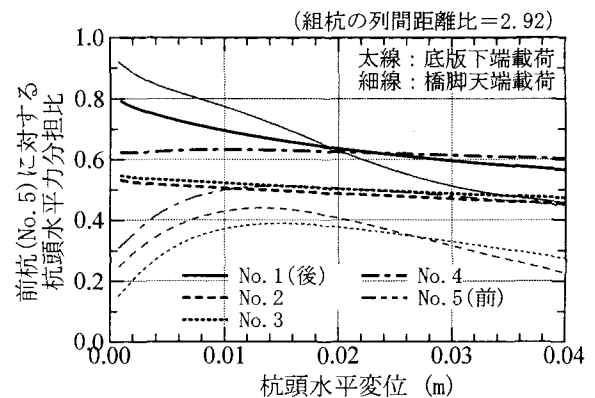


図-7 載荷位置の違いによる各杭の水平力分担比

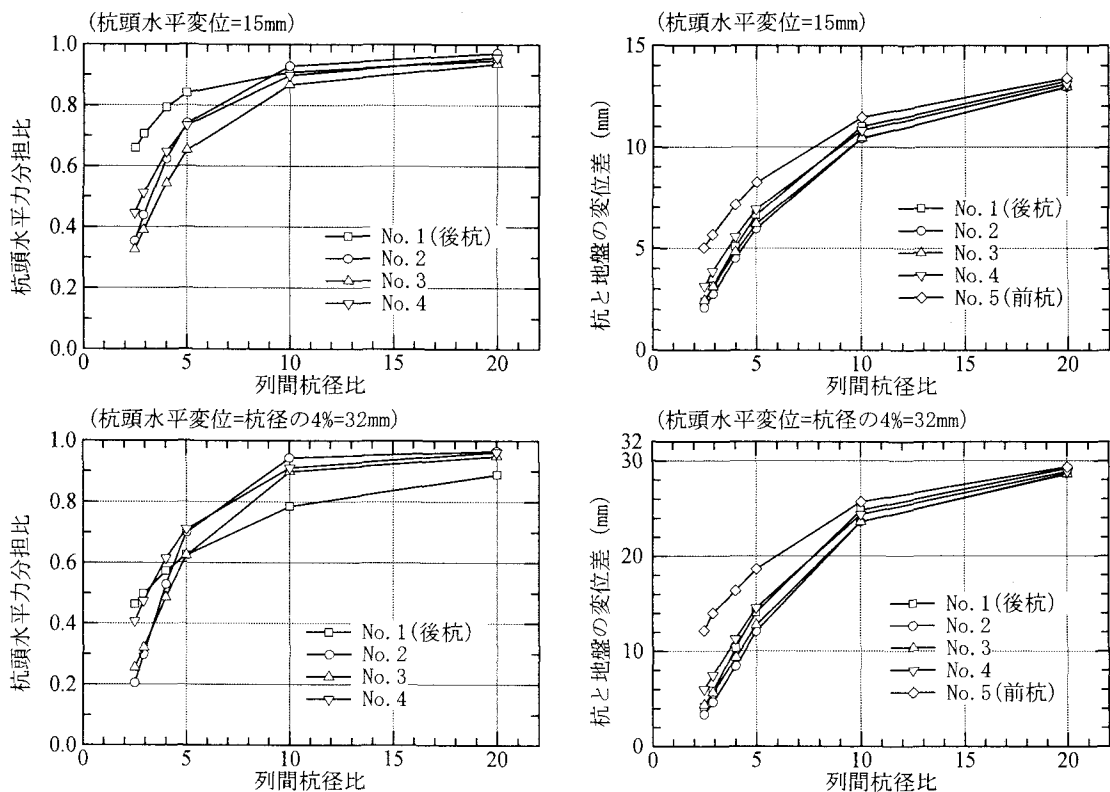


図-8 組杭の列間杭径比と各杭の水平力分担比、地盤の変位差

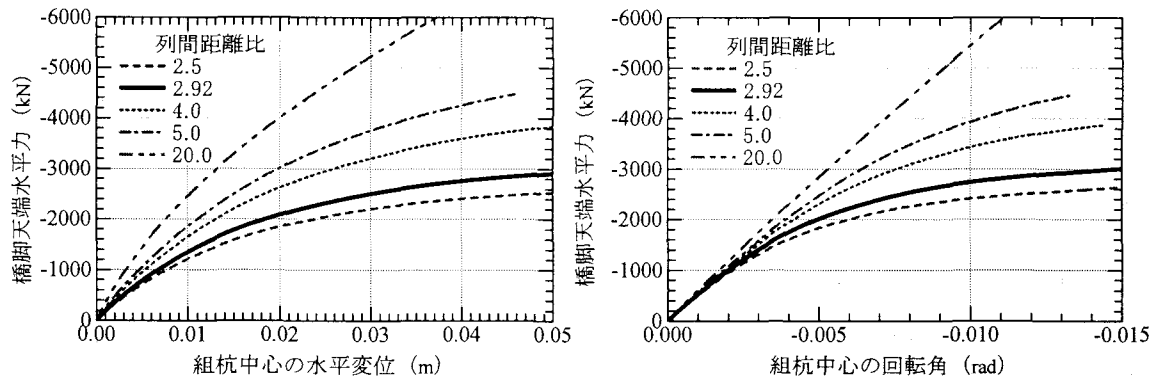


図-9 組杭間隔と基礎変位

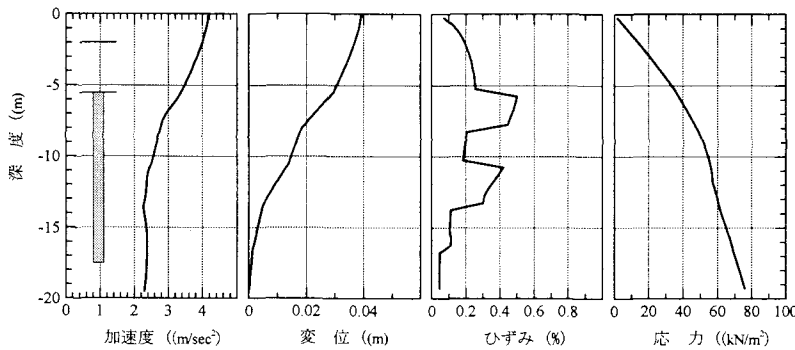


図-10 自由地盤の最大加速度、最大変位、最大せん断ひずみ

および最大せん断応力の深度方向分布

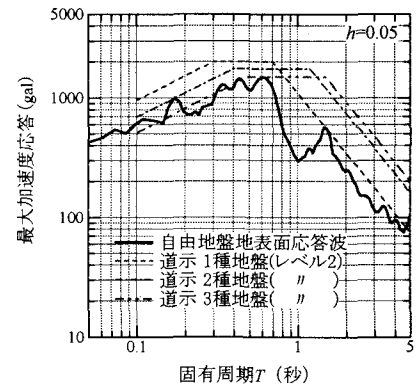


図-11 弾性加速度応答スペクトル

(3) 組杭基礎の水平力と水平変位

図-8 は橋脚天端載荷における各杭の水平力分担比と杭頭位置における地盤との変位差を隣接する列組杭との距離を杭径で除した値（以後、「列間杭径比」と呼ぶ）に対して示したものである。橋脚天端載荷における水平力と基礎の変位との関係を図-9 に示した。同図の実線は図-2 の列間距離比 2.92 に対するものである。列間杭径比が大きくなると、同じ作用力に対し組杭の水平変位および回転角ともに小さくなる。即ち、組杭基礎の水平および回転方向の剛性が高くなることが分かる。本研究では 2 次元解析を採用しており杭基礎の奥行き幅は無限大である。列間杭径比により基礎の剛性が変化するのには組杭列間の地盤のすり抜け（図-8）の影響により、基礎としての見掛けの載荷（基礎）幅²¹⁾が変化することによるものと考えられる。組杭列間比が十分大きい場合、組杭列間の地盤は十分すり抜け（図-8 で列間距離比が大きくなると杭頭変位量は変位差と同値に向かう）、組杭列間比が 1 の場合、列間の距離が零となり、組杭列間の地盤はすり抜け不可となる（図-8 で列間距離比が 1 に向かうと変位差が零に向かう）ことから分かる。

3.2 動的相互作用解析

組杭基礎のレベル 2 地震動下における群杭効果を検討するため、図-3 のモデルに図-5 の入力地震動を基盤入力

し動的解析を実施した。

(1) 自由地盤の応答

構造物-基礎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-10 に示す。加速度は絶対値であり、変位はモデル底面（粘性境界の上面）に対する相対値である。自由地盤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加速度応答波の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-11 に示す。解析モデルの地盤応答は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、線形応答となった。

(2) 構造物-基礎-地盤系の時刻歴応答

構造物-基礎-地盤系の主な箇所の加速度応答と変位応答の時刻歴を 4 秒～20 秒間について図-12 に示した。

自由地盤は 8 秒前後で最大応答を示す。8.17 秒で最大加速度、8.18 秒で最大変位となり、位相は逆となる。上部工は地盤および基礎との連成振動により応答し、13.95 秒に最大加速度、最大変位を示す。

組杭列間の地盤において、加速度応答は全時間にわた

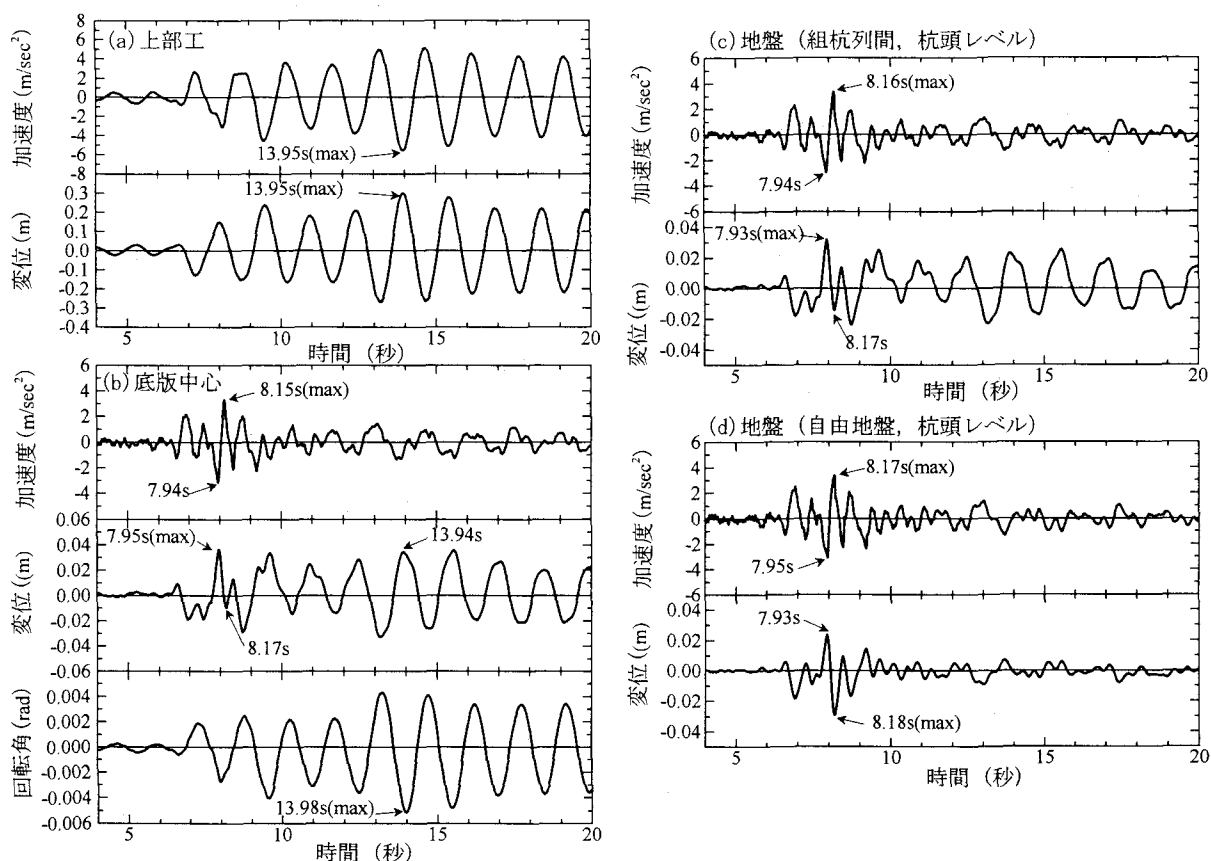


図-12 構造物-基礎-地盤系の主な箇所の時刻歴応答波

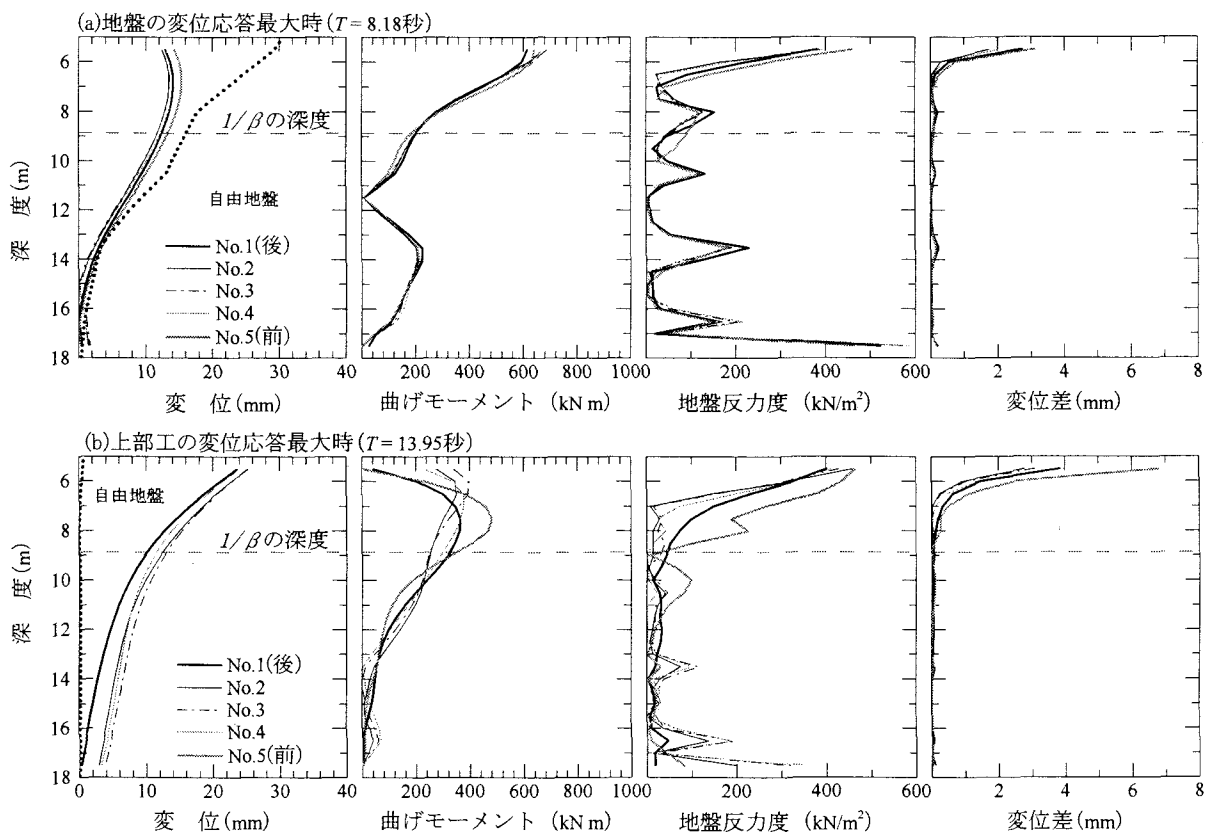


図-13 地盤および上部工の最大変位応答時の杭変位, 曲げモーメント, 地盤反力度, 変位差

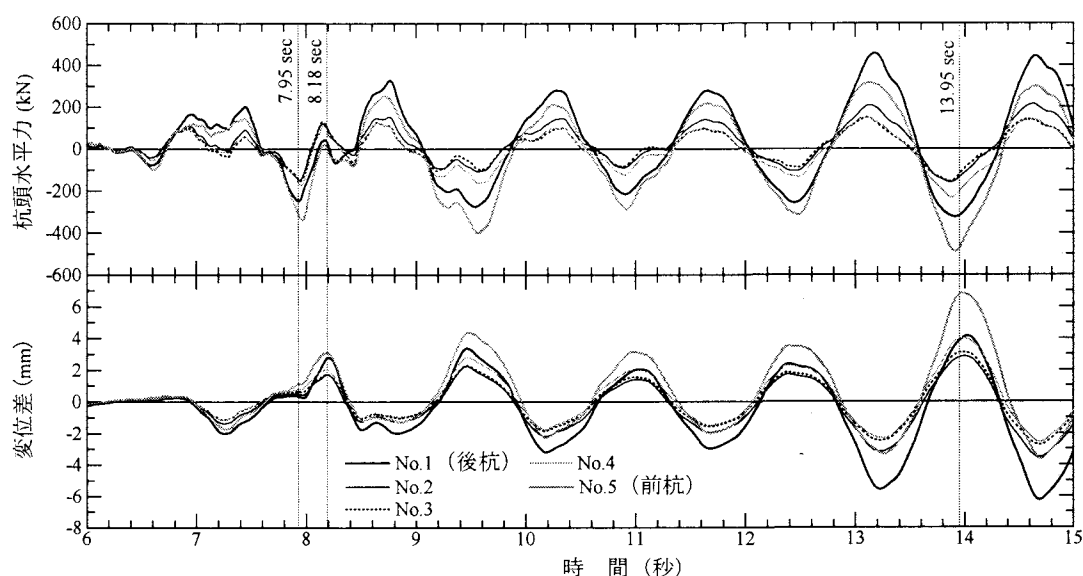


図-14 杭頭水平力および杭-地盤間変位差の時刻歴

り自由地盤の加速度応答と概ね同じ振動性状を示す。一方、変位応答は自由地盤が最大応答を示す8秒前後まで自由地盤と概ね同じ振動性状を示す。それ以降、上部工の応答による影響（質量相互作用）が大きくなり構造物-基礎系と同じ振動性状で応答し、その変位振幅は自由地盤より大きい。即ち、杭間の地盤は自由地盤が最大応答を示すまで自由地盤と概ね同じ振動性状を示し、構造物-基礎系の応答時には、それと概ね同じ振動性状を示し、自由地盤と異なる変位振幅で振動することが分かる。

(3) 地盤 上部工の最大応答時における杭基礎の応答

自由地盤が変位最大応答を示す時間 $T=8.18$ 秒と上部工が変位最大応答を示す時間 $T=13.95$ 秒の各杭の変位、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-13に示す。

$T=8.18$ 秒では、杭の変位応答は自由地盤の変位応答に比較して小さく、基礎周囲の地盤が杭とそれに囲まれた地盤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。各杭に生じる曲げモーメントは深度方向に概ね同じであり、地盤との変位差は杭頭から1m範囲で生じ、最大で3mm程度である。また、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。これが原因して杭頭の曲げモーメントは地中部のそれより大きい。地中部における地盤反力度のピーク発生位置は土層境界にあたり、地盤応答が卓越する中で地盤と各杭との相互作用により生じたものと考えられる。地盤と杭との変位差においてもわずかなピークが現れている。

一方、 $T=13.95$ 秒では、杭の変位応答が自由地盤の変位応答に比較して十分大きく、慣性力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。杭の変位、曲げモーメント、杭前面の地盤反力度および地盤との変位差の深さ方向分布形状は、3.1の静的水平載荷解析で示し

表-3 各時刻の杭頭水平力分担比

	No.1	No.2~No.4	No.5
$T=7.93$ 秒	0.81	0.47~0.56	1.00
$T=13.95$ 秒	0.67	0.26~0.43	1.00

た橋脚天端載荷（図-6(a)）に酷似している。しかし、図-8の杭頭水平変位が32mmに対する変位差が前杭で約14mm、他の杭で6mm程度である。一方、動的相互作用解析は杭頭水平変位が約25mmに対する変位差が前杭で約7mm、他の杭で3mm程度（図-13(b)）であり、杭頭変位量に対する比率が小さい。言い換えると、すり抜け量が小さい。これは杭の地盤に対する載荷速度の差によるものであり、地盤パネの履歴形状、すなわち履歴減衰によるものと考えられる。

(4) 杭頭水平力分担

各杭の杭頭水平力および地盤との変位差の時刻歴を図-14に示した。地盤が最大応答を示す8秒前後で、杭頭水平力は自由地盤が最大応答変位を示す $T=8.18$ 秒に比較し、底版が最大応答水平変位を示す $T=7.95$ 秒の方が大きい。これは杭と地盤の変位差が $T=8.18$ 秒時比較して $T=7.95$ 秒時に小さいことから、 $T=8.18$ 秒時には後続する構造物-基礎系による応答の影響があるものと考えられる。 $T=13.95$ 秒において、構造物-基礎系のロッキング振動変位が最大応答を示し、杭頭水平力は最大になる。

杭頭水平力分担比は、表-3のとおりであり、3.1(2)と同様に、卓越する振動モードにより影響されることが分かる。上部工が応答し、質量相互作用が卓越する振動モードでは、水平載荷試験により設定される水平力分担比に比較して小さく、端部の杭（ここではNo.5）が水平力をより多く分担する。一方、地盤が応答し、キネマチック相互作用が卓越する振動モードでは、水平載荷試験で評価される水平力分担比と類似したものとなる。

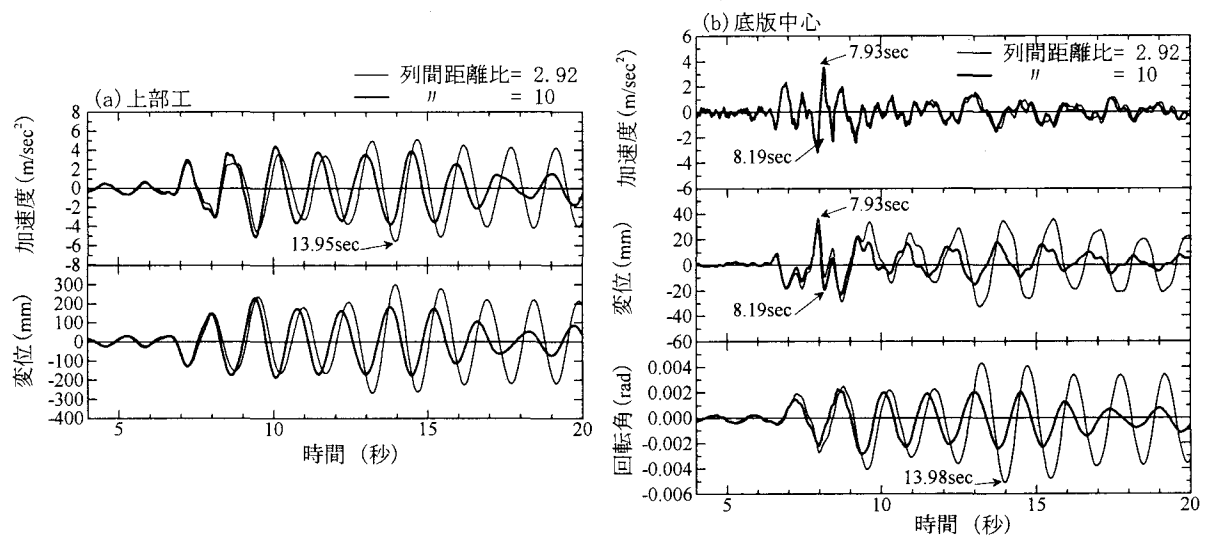


図-15 杭の列間距離比と構造物-基礎系の時刻歴応答波

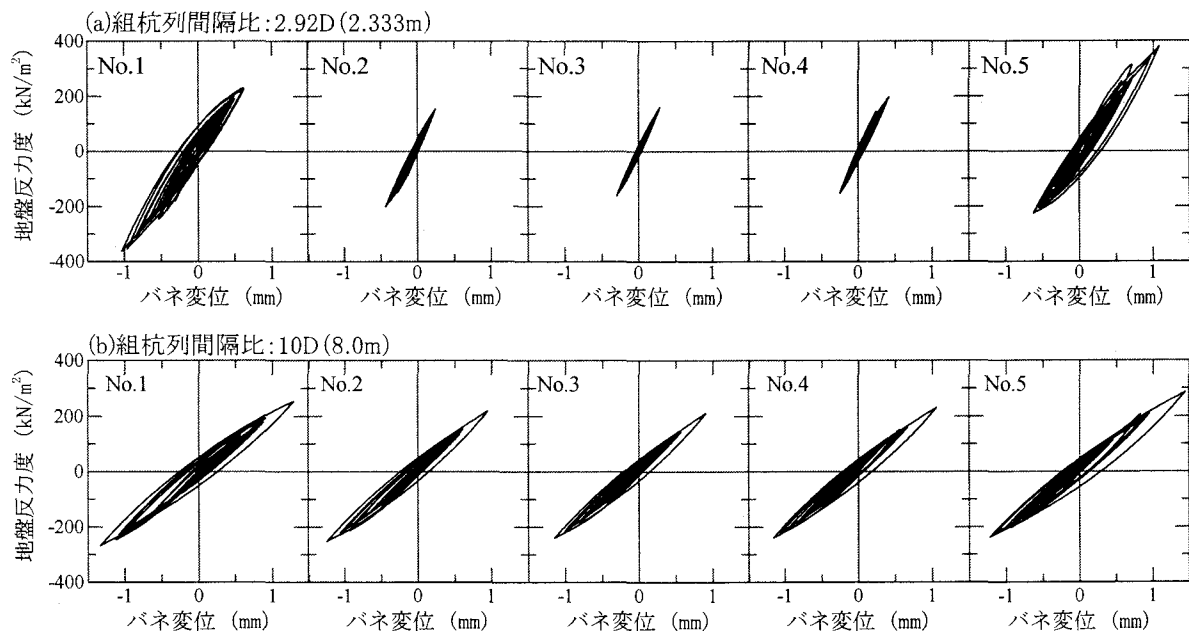


図-16 杭の列間距離比と杭の地盤反力度の履歴（杭頭から1m下方のバネ）

(5) 組杭の列間距離と構造物-基礎系の応答

組杭の列間距離（地盤のすり抜け）が、構造物-基礎系の応答に与える影響を検討する。説明を容易にするため、列間距離比を10（組杭の列間隔は8m）と大きくした場合の上部工および底版における加速度応答および変位応答の時刻歴を図-12に重ね書きし、図-15に示す。また、各杭の杭頭から1m下方位置における地盤反力の履歴を図-16に示す。

キネマティック相互作用が卓越する約8秒までの上部工および底版の加速度および変位応答（図-15）は、列間距離比2.92と10との差が小さく、組杭の列間距離比による影響が小さいことが分かる。一方、上部工が応答し、質量相互作用の卓越する時間帯には加速度および変位ともに組杭の列間距離比による影響が現れる。これは列間距離比が大きくなると組杭の列間地盤のすり抜けが大き

くなり、各杭の地盤反力度の均等化と中間杭の履歴減衰の増大（図-16）、見掛け上基礎幅が小さくなり組杭基礎として水平および回転方向の剛性が増大し振動特性が変化することにより構造物-基礎系の応答が減少したものと考えられる。

4. 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バネにより連結する2次元FEM解析手法を用いて、静的水平載荷解析および動的相互作用解析により杭基礎の群杭効果を中心に検討した。本研究で得られた知見を要約すると以下のものである。

- (1) 静的水平載荷解析において、杭の大変位時における杭の水平力分担比は構造物-基礎の変位モードによる影響を受ける。上部工が最大応答することを想定したロッキング変位モードは杭の水平載荷試験で実施されることの多いスウェイ変位モードに比較し、中間～後杭の水平力分担比が小さい。また、杭頭変位の増大とともに小さくなる。これは、列間隔が大きくなると“地盤のすり抜け”が顕著になる。杭頭の水平力分担はこのこれにより決定されるものと考えられる。
- (2) また、列間隔は組杭基礎としての水平および回転方向の剛性に影響し、列間隔が大きくなる（“地盤のすり抜け”が大になる）と基礎の剛性も大きくなる。
- (3) 動的相互作用解析において、杭列間の地盤は構造物-基礎系と概ね同周期・同位相で振動するが変位差をとまなう。上部工が応答するロッキング振動モードで変位差が大きく、杭頭における中間～後杭の水平力分担比が小さくなる。一方、地盤の応答が大きいスウェイ振動モードが卓越する場合に変位差が小さくなり、杭頭における中間～後杭の水平力分担比が大きくなる。
- (4) また、組杭列間隔は構造物-基礎系の応答に影響を与える。これは、(2)の原因の他に、各杭の地盤反力の均等化と相互作用バネの履歴減衰の変化によるものと考えられる。

杭と地盤との相互作用の三次元効果を反映した解析は、動的解析だけでなく静的大変形解析にも有効と考えられる。本解析は一つの事例であり、地盤にパーセントオーダーのひずみが生じる場合や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) 王海波，室野剛隆，西村昭彦：大型せん断土槽を用いた杭基礎と地盤との動的相互作用に関する実験的検討，土木学会論文集，No.661/I-53，pp.57-69,2000。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2002。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992。
- 15) 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。
- 16) 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。
- 17) 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。
- 18) 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。
- 19) Randolph M.F., Wroth C.P. : Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles, *J. Geot. Divns*, ASCE, 104, No. GT12, pp.1465-1488, 1978。
- 20) 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。
- 21) 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4月15日受付)