

# 地盤—杭基礎系の動的特性に関する研究（1）

## （起振機実験）

### Study on Dynamic Properties of Soil - Pile Foundation (I)

#### （Forced Vibration Tests）

新井 寿昭\*\*  
Toshiaki Arai

阿世賀 宏\*  
Hiroshi Asega

長谷部 廣行\*\*  
Hiroyuki Hasebe

#### 要 約

現在、杭基礎の設計においては杭頭に作用する最大水平力を予測し、この水平力を静的に作用させた線形地盤反力法が一般的である。しかし、地盤は複雑な力学的性質を持つ非線形材料であり、杭に作用する力は、地盤—杭—構造物の動的相互関係において決定されるため、現実に即した設計とは言えない。

そこで本研究は、地盤—杭基礎系の地震時における動特性を把握する事を目的としており、その第一段階として起振実験を行った。実験結果より杭頭部入力による変位分布、ひずみ分布の応答性状が把握できた。また、1質点2自由度系の振動モデルで評価した場合のインピーダンスより群杭効果と考えられるインピーダンスの変化が確認できた。

#### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験概要
- § 3. 実験結果
- § 4. 杭基礎のインピーダンス
- § 5. まとめ
- § 6. おわりに

## § 1. はじめに

杭基礎に作用する外力の一つとして地震力がある。1996年に発生した兵庫県南部地震に見られるように、地震力

によっては杭に上下方向・水平方向ともに大きな荷重が加わり杭基礎自身、ひいては上部構造物にもさまざまな影響を及ぼす。

現在、杭基礎の設計法では設計用外力として建物慣性力のみを考慮しており、この設計に基づく杭体の応力は杭頭付近で大きな値を示す。しかし、兵庫県南部地震後、建物の解体等に伴って被災した杭基礎の詳細調査<sup>1)~4)</sup>結果や地盤—杭基礎—建物連成系の応答解析から、杭中間部や杭先端部において大きな応力を示す場合があることが明らかになってきている。これらは、動的相互作用による影響と考えられるが、現在の設計法においては積極的に考慮されておらず、設計法が妥当かどうかの議論がなされている。よって、簡略的に動的相互作用効果を取り入れた杭基礎の設計法を確立することが望まれている。

\* 技術研究所研究部

\*\* 技術研究所構造研究課

このような背景のもと、基礎的な地盤一杭基礎系の動的特性を明らかにするために起振実験を実施した。本報では、起振実験の概要および実験結果の一部について報告する。

## § 2. 実験概要

### 2-1 実験敷地

本実験は、高密度地震観測として実施されている千葉県船橋市にある習志野局<sup>5)</sup>近傍において計画・実施されたものであり、実験地における試験体配置を図-1に示す。図-1に示したボーリング調査地点No.1における土質性状を表-1に示す。地盤の表層はローム層で、約20mまでは粘土層と緩い砂層、以深には所々にシルト層を挟む堅固な砂層が続いている。杭の支持層である25m付近は、N値50以上の安定した細砂である。さらに、追加調査として地点No.2においてもボーリング調査を実施したところ実験敷地内はほぼ水平成層状態にあることが確認できた。

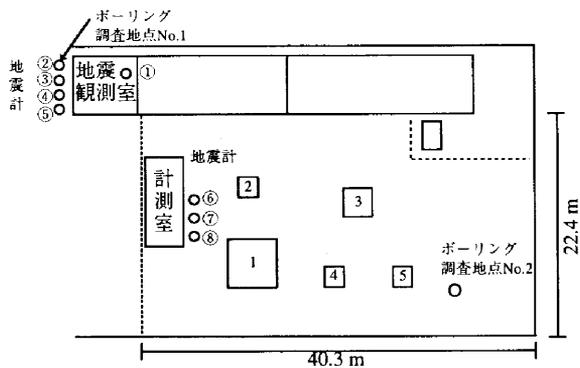


図-1 試験体配置図

### 2-2 試験体

試験体および計測器配置を図-2に、また、杭の構造諸元を表-2に示す。

Model 1の杭間隔は4m、Model 2~Model 4は1mの正方杭配列の杭基礎、Model 5は杭で支持せず埋設された独立基礎である。Model 1~Model 3においては、基礎の慣性力が直接杭のみに伝達されるよう地盤との間に間隙を設け、杭との結合は剛結とし、杭本数および杭間隔を変化させ、動的な群杭効果を検討する。また、Model 4では基礎を埋め込むことによりその埋込み効果を、Model 5では杭基礎との比較により杭の効果を検討する。

基礎には加速度計、杭体には深さ方向に加速度計およびひずみ計を設置した。また、Model 4、5においては動

表-1 土質性状

地層名	主要土質名	下限深度 (G.L.-m)	N値	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	密度 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
埋土	ローム	0.85	—	390	170	13.1	0.383
関東ローム層	ローム	2.70	2~4	390	170	13.1	0.383
常総粘土層	凝灰質粘土	7.30	3~9	720	200	15.7	0.322
木下層	細砂、粗砂	33.20	20~50	1710	360	17.9	0.477

表-2 杭諸元

杭種	鋼管杭
杭長	26 (m)
杭径	400 (mm)
肉厚	9.5 (mm)
断面係数	1149 (cm <sup>4</sup> )
重量	88.2 (kg/m)
断面積	119 (cm <sup>2</sup> )
断面2次モーメント	2.33×10 <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )
ヤング率	2.06×10 <sup>4</sup> (MPa)

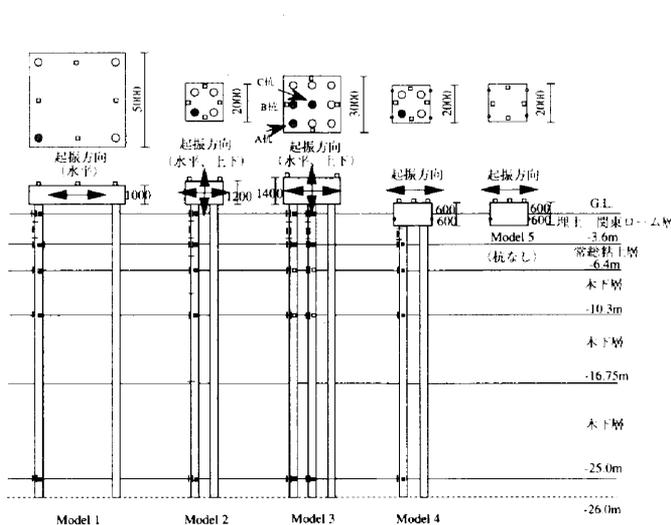


図-2 試験体および計測器配置図

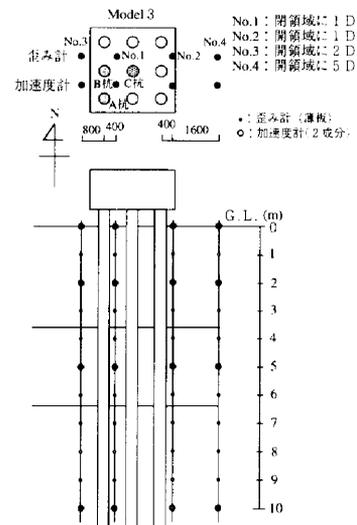


図-3 計測器配置 (影響地盤)

土圧を計測するために、基礎側面に土圧計を設置した。各試験体における杭の計測は代表して1本であるが、Model 3については隅杭(A杭)・側列中央杭(B杭)・中央杭(C杭)の計3本の計測を実施した。また、Model 3においては杭体に加え、近傍地盤への影響を検討するため、図-3に示すように閉領域に1D(D:杭径)の位置に、開領域に1D, 2D, 5Dの位置に加速度計およびひずみ計を設置し、計測を行った。

2-3 実験方法

実験方法は、基礎上に起振機を設置し、起振機から発生する外力により所定の起振力となるよう振動数を変化させながら実施した。起振は、定常状態で振動数を変化させるup起振ならびにdown起振を実施し、起振力は各試験体につき3段階設定した。表-3に詳細な実験内容を示す。なお、起振はSER 1, SER 2, SER 3の順に実施し、水平方向では各試験体ともにEW方向に起振した。Model 3ではNS・UD方向、Model 2においてはUD方向も加えて起振した。

表-3 実験内容

対象モデル	起振方向	実験名	目標起振力		
			SER 1	SER 2	SER 3
Model 1	EW	EXP1E	1.00 tf (9.81 kN)	2.00 tf (19.6 kN)	3.00 tf (29.4 kN)
			0.25 tf (2.45 kN)	0.50 tf (4.90 kN)	0.35 tf (3.43 kN)
Model 2	EW	EXP2E	0.25 tf (2.45 kN)	0.50 tf (4.90 kN)	1.00 tf (9.81 kN)
	UD	EXP2U	0.25 tf (2.45 kN)	0.50 tf (4.90 kN)	1.00 tf (9.81 kN)
Model 3	EW	EXP3E	0.50 tf (4.90 kN)	1.00 tf (9.81 kN)	0.75 tf (7.36 kN)
	NS	EXP3N	0.50 tf (4.90 kN)	1.00 tf (9.81 kN)	0.75 tf (7.36 kN)
	UD	EXP3U	1.00 tf (9.81 kN)	2.00 tf (19.6 kN)	1.50 tf (14.7 kN)
Model 4	EW	EXP4E	0.50 tf (4.90 kN)	1.00 tf (9.81 kN)	—
Model 5	EW	EXP5E	0.25 tf (2.45 kN)	0.50 tf (4.90 kN)	0.10 tf (0.98 kN)

§ 3. 実験結果

3-1 共振・位相曲線

基礎に設置した加速度計により、Model 1~Model 3の単位起振力で基準化した正弦波外力に対する起振方向の変位応答振幅ならびに起振力に対する位相遅れを図-4~図-6に示す。また図-4~図-6より求めた共振振動数および固有振動数を表-4に示す。表中に示した\*は、位相曲線にばらつきが見られるために確定的なものではない。

各試験体ともに各起振力における定常状態でのup起振およびdown起振による共振曲線の変化、また起振力の変化にともなう共振曲線の変化は見られず、ほぼ弾性領域内の起振であったことが確認できる。

基礎両端に設置した鉛直成分の記録から、各試験体の回転角共振曲線を図-7~図-9に示す。

表-4 共振・固有振動数

対象モデル	起振力	共振振動数 (Hz)	固有振動数 (Hz)	共振時の応答変位 ( $\times 10^{-2}$ cm/kN)
Model 1	1.0 tf (9.81 kN)	4.5	4.7 *	1.36
	2.0 tf (19.6 kN)	4.4	4.6 *	1.27
	3.0 tf (29.4 kN)	4.4	4.6*	1.27
Model 2	0.25 tf (2.45 kN)	8.9	8.8	1.75
	0.50 tf (4.90 kN)	8.8	8.6	1.64
	0.35 tf (3.43 kN)	8.8	8.6	1.68
Model 3	0.50 tf (4.90 kN)	8.9	8.9	0.42
	1.00 tf (9.81 kN)	8.9	8.6	0.37
	0.75 tf (7.36 kN)	9.0	8.6	0.39

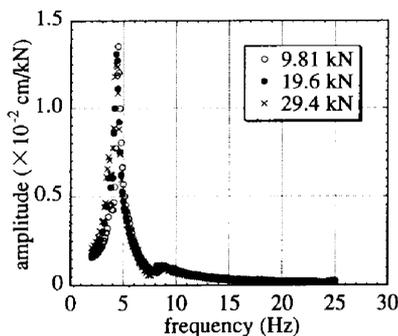


図-4 共振・位相曲線 (Model 1)

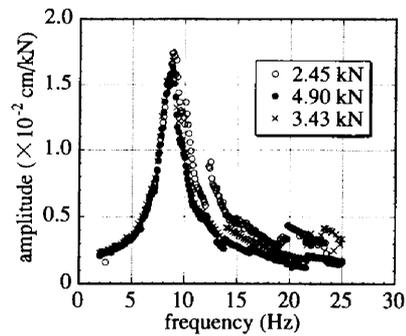


図-5 共振・位相曲線 (Model 2)

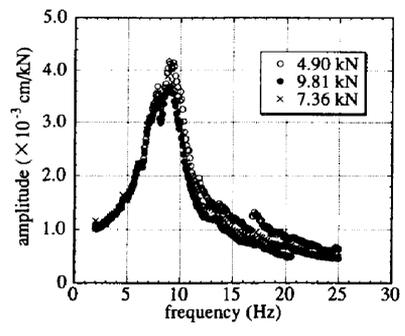


図-6 共振・位相曲線 (Model 3)

回転角の共振振動数は、図-4～図-6に示した水平方向の共振振動数とほぼ一致している。

3-2 変位分布およびひずみ分布

杭体に設置した加速度計およびひずみ計により得られた、共振時における深さ方向の変位応答振幅分布を図-10に示す。なお、図-10に示した変位応答振幅はModel 3における加速度計に不良成分が多かったため、Model 1およびModel 2のみを示す。同様に、共振時における深さ方向の曲げひずみ分布を図-11および図-12に示す。なお、Model 3における曲げひずみ分布については群杭効果および応力分担率を検討するために、計3本の杭につ

いて計測を実施した。各杭体の結果を示す。

図-10に示した変位応答振幅分布より、各試験体の深さ方向の変位応答振幅分布は地表部で最大となっており、起振の影響が小さくなるため、深さ方向に急激な減少傾向が見られ、G.L.-10.3m以深ではほとんど変位応答振幅は発生していない。

図-11, 12に示した各試験体の深さ方向の曲げひずみ分布より、特にModel 1およびModel 2における結果は互いに異なる傾向を示している。Model 1では、杭頭部における曲げひずみが最大となっており、変位応答振幅と同様、深さ方向に急激な減少傾向を示し、G.L.-

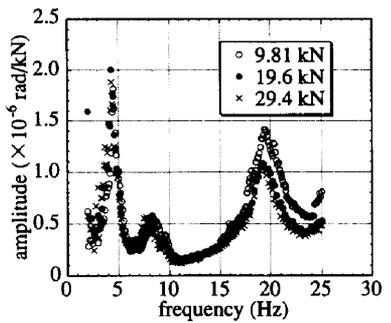


図-7 回転角共振曲線 (Model 1)

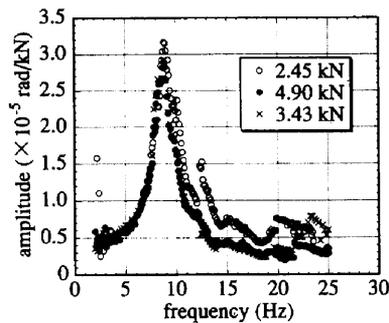


図-8 回転角共振曲線 (Model 2)

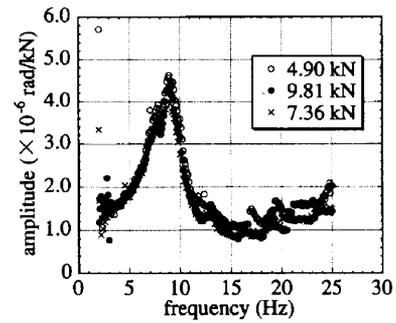
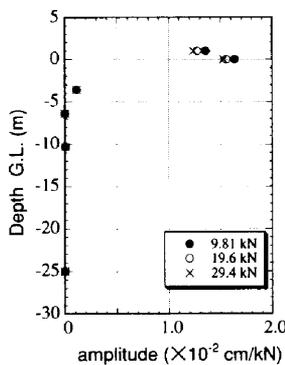
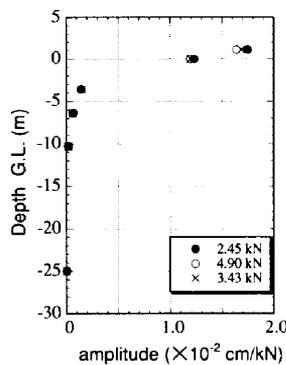


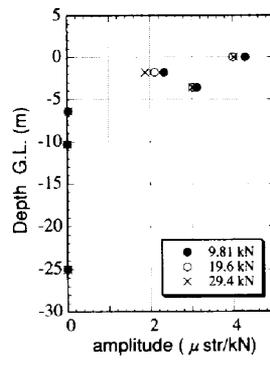
図-9 回転角共振曲線 (Model 3)



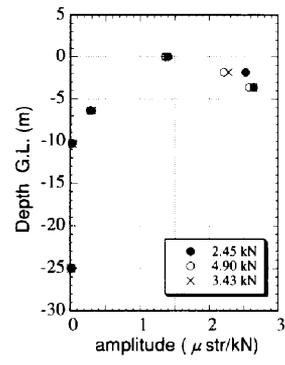
(1) Model 1



(2) Model 2



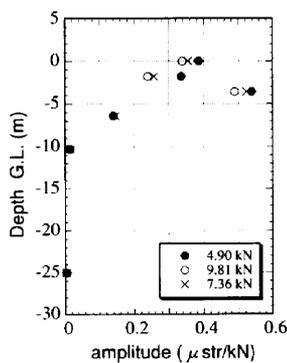
(1) Model 1



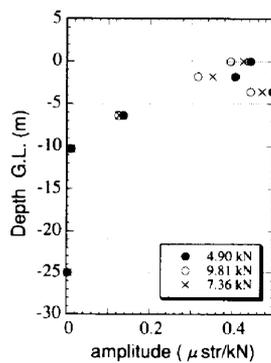
(2) Model 2

図-10 変位応答振幅分布 (共振時)

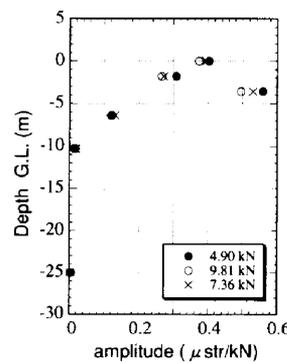
図-11 曲げひずみ分布 (共振時)



(1) A杭 (隅杭)



(2) B杭 (側列中央杭)



(3) C杭 (中央杭)

図-12 曲げひずみ分布 (Model 3, 共振時)

6.4m以深において曲げひずみはほとんど発生していない。それに対してModel 2では、杭頭部から深さ方向に増大傾向を示し、G.L.-3.6mで最大となっている。それ以深の分布についてはModel 1と同様、急激な減少傾向を示している。

これらより、Model 1では杭頭回転拘束杭、Model 2においては杭頭自由杭の応力分布と類似な傾向を示している。これは、Model 1、Model 2ともに4本の杭は基礎により連結されているが、Model 1においては杭頭の回転拘束度が強いために杭頭の曲げひずみは大きくなっている。それに対し、Model 2では杭間隔が著しく狭いために (Model 1は10D、Model 2、3は2.5D、D:杭径)、4本の杭が地盤一杭系として単杭のような働きをしているためと考えられる。

また、各試験体の変位応答振幅分布、曲げひずみ分布ともに各起振力の変化による深さ方向の分布はほぼ一致している。

Model 3の各杭に設置した深さ方向2点間の各共振時における軸ひずみ分布を、代表して起振方向EW、起振力9.80kNの結果を図-13に示す。

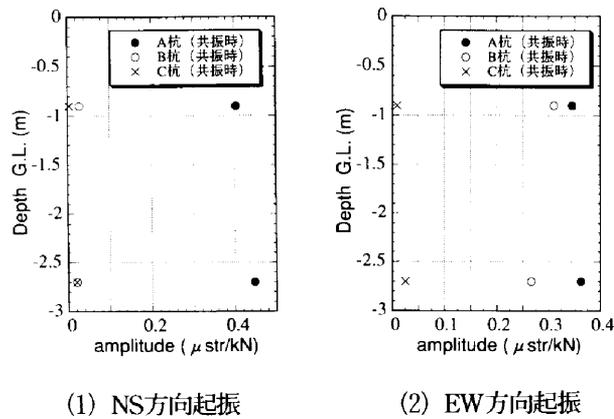


図-13 曲げひずみ分布 (共振時)

2点間における深さ方向の軸ひずみの変化はほとんど見られない。B杭に発生する軸ひずみは、NS方向起振時にはC杭と、EW方向起振時にはA杭と同様な傾向を示している。これは、起振方向と杭配列 (杭位置) の関係によるものである。

### 3-3 杭体ひずみからの応力分担

代表して起振力9.80kNにおけるC杭 (中央杭) に対する曲げひずみおよび軸ひずみの倍率と起振振動数の関係を図-14および図-15に示す。

図-14, 15よりC杭に対する曲げひずみの倍率は、振動数が大きくなるにつれ各杭の応力分担の差は小さくなっていく。一般的に9本杭基礎の場合においては、隅杭の応力分担が最大となる傾向にある<sup>11)</sup>が、今回の起振振動数および起振力範囲においてはその傾向が見られず、A杭 (隅杭) よりB杭 (側列中央杭) の分担が大きくなっている。

また、C杭 (中央杭) に対する軸ひずみの倍率はNS方向起振時のA杭において最大104倍となっており、各杭ともに共振時付近において軸ひずみが最大となっている。

## § 4. 杭基礎のインピーダンス

実験結果から得られた変位応答振幅および回転角から、図-16に示すような1質点2自由度系のモデルとして基礎底面位置における杭基礎のインピーダンスを逆算した<sup>7)</sup>。

杭基礎のインピーダンスは、水平に対しては基礎に設置した計4点の起振方向の水平成分の平均ならびに回転に対しては基礎に設置した2点 (起振方向に設置) の鉛直成分の平均から、水平・回転成分のインピーダンスを評価した。インピーダンスの実部は剛性に、虚部は減衰に関する量である。

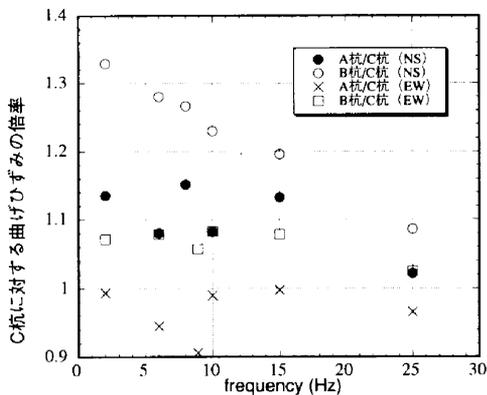


図-14 曲げひずみによる応力分担

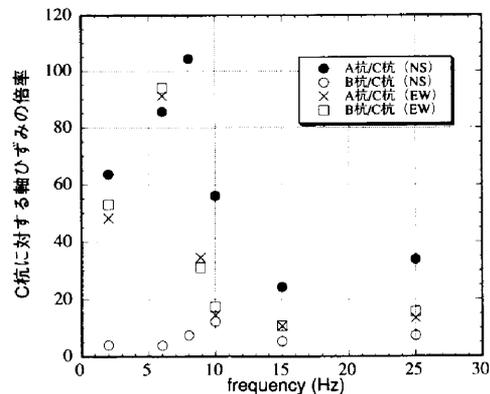


図-15 軸ひずみによる応力分担

4-1 Model 1 のインピーダンス

図-17に示したModel 1における水平インピーダンスの実部は、振動数の増加とともに増大傾向を示しており、虚部は振動数に対し増減を繰り返しているが、ほぼ一定値を示す。図-18に示した回転インピーダンスの実部、虚部ともに低振動数付近 (2.0Hz~7.0Hz付近) においてやや増大傾向を示しており、12Hz付近より振動数が増加するにしたがい、ほぼ一定値もしくはやや低下傾向を示している。

4-2 Model 2 のインピーダンス

図-19に示したModel 2における水平インピーダンスの実部は、振動数に対し低振動数付近では一定値を示しており、7 Hz付近より振動数の増加に伴い増大傾向を示している。それに対し虚部は5.0Hzの振動数でばらつきがあるが、14Hz付近まではほぼ一定値を示しており、そ

れ以降は振動数の増加に伴い増大傾向を示している。図-20に示した回転インピーダンスの実部は、10Hz付近まで

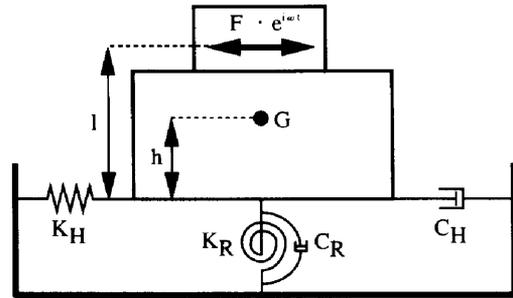
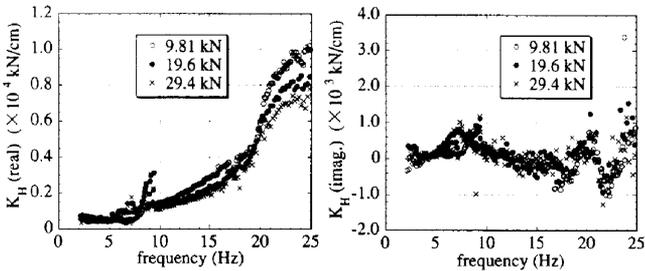


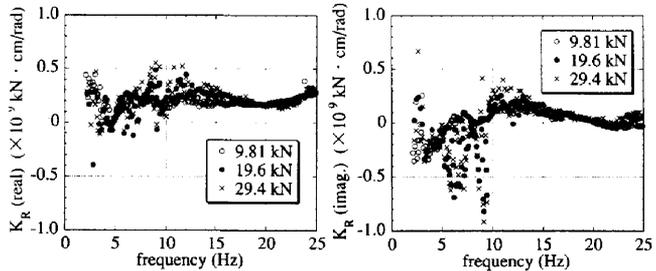
図-16 振動モデル

$K_H$ : 水平方向のばね定数,  $C_H$ : 水平方向の減衰定数,  
 $K_R$ : 回転方向のばね定数,  $l$ : 基礎底面から起振力までの高さ,  
 $h$ : 基礎底面から重心までの高さ (起振機含む),  $G$ : 重心



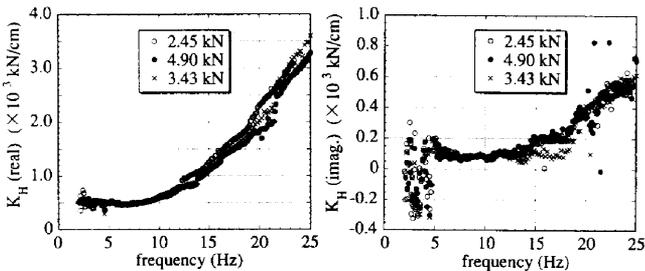
(1) 実部 (2) 虚部

図-17 水平インピーダンス (Model 1)



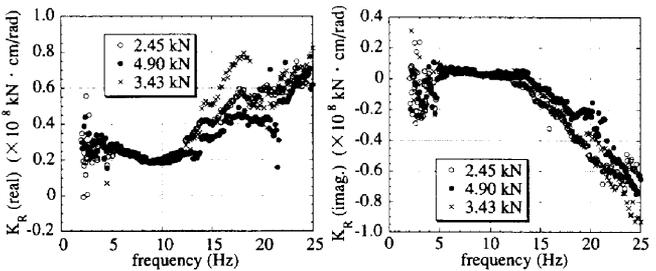
(1) 実部 (2) 虚部

図-18 回転インピーダンス (Model 1)



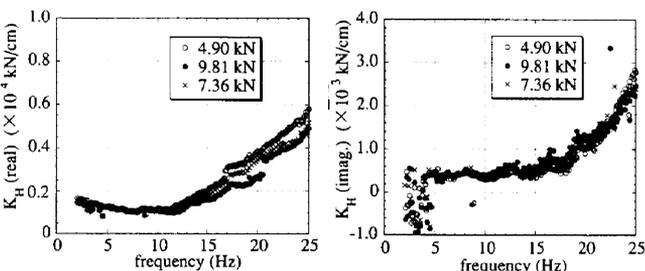
(1) 実部 (2) 虚部

図-19 水平インピーダンス (Model 2)



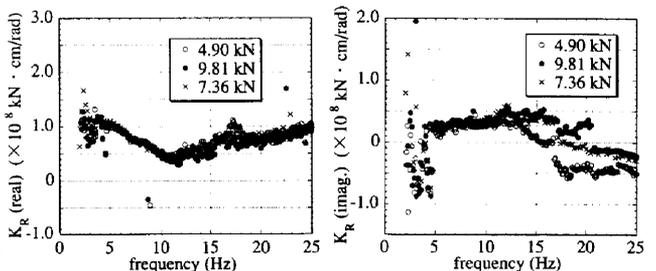
(1) 実部 (2) 虚部

図-20 回転インピーダンス (Model 2)



(1) 実部 (2) 虚部

図-21 水平インピーダンス (Model 3)



(1) 実部 (2) 虚部

図-22 回転インピーダンス (Model 3)

は減少傾向を示し、それ以降では、振動数の増加に伴い増大傾向を示している。それに対し、虚部においては12Hz付近まではほぼ一定値もしくはやや減少傾向を示しており、それ以降は急激に減少している。

4-3 Model 3のインピーダンス

図-21に示したModel 3における水平インピーダンスの実部は、11Hz付近までは振動数の増加に伴いやや減少傾向を示しており、それ以降においては増大傾向を示している。虚部では、5.0Hzの振動数でばらつきがあるが、実部と同様、11Hz付近まではほぼ一定値となっており、それ以降の振動数では増大傾向を示している。図-22に示した回転インピーダンスの実部では、11Hz付近までは振動数の増加に伴い減少傾向を示しており、それ以降の振動数においては増大傾向を示している。虚部においては、水平インピーダンスの虚部と同様に5.0Hzの振動数でばらつきがあるが、11Hz付近まではほぼ一定値を示しており、それ以降では振動数の増加に伴い緩やかな減少傾向を示している。

なお、今回実施した起振力および起振振動数範囲においては、各試験体ともに起振力によるインピーダンスの変化はないものと考えられる。

4-4 杭間隔の影響

杭間隔の影響を検討するために、Model 1とModel 2におけるSER 1のインピーダンスを図-23, 24に示す。

なお、示したインピーダンスは杭1本あたりのものである。

Model 1とModel 2におけるインピーダンスを比較すると、水平インピーダンスの実部、虚部ともに7Hz付近までは同程度の値を示しており、それ以降の振動数では実部においては杭間隔が大きい場合 (Model 1) には、狭い場合 (Model 2) より大きな値を示し、虚部では杭間隔が大きい場合において複雑に増減しているために単純な比較はできない。回転インピーダンスにおいては、実部、虚部ともに杭間隔が大きい場合には、狭い場合よりも大きな値を示している。特に、回転インピーダンスの実部において杭間隔の影響が大きいと考えられる。

4-5 杭本数の影響

杭本数の影響を検討するために、Model 2とModel 3におけるSER 1のインピーダンスを図-25, 26に示す。

Model 2とModel 3におけるインピーダンスを比較すると、水平インピーダンスの実部では、9Hz付近までは同程度の値を示しており、それ以降は杭本数が多い場合 (Model 3) には、杭本数が少ない場合より小さい値を示している。虚部においては、ほぼ同程度の値を示しているが22Hz以降では杭本数が多い場合には、少ない場合より大きい値を示している。回転インピーダンスの実部では、11Hz付近より杭本数が多い場合には少ない場合より大きめの値を示している。虚部では、杭本数が多い場合には少ない場合より大きめの値を示している。

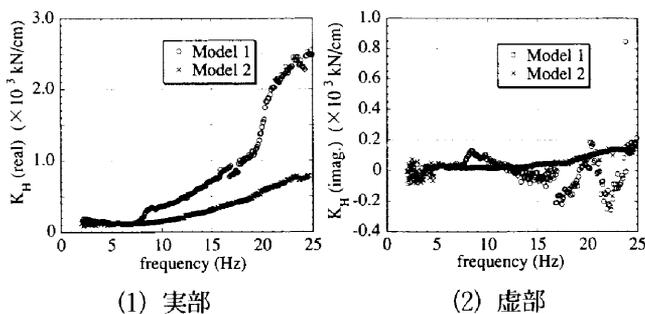


図-23 水平インピーダンス (杭間隔別)

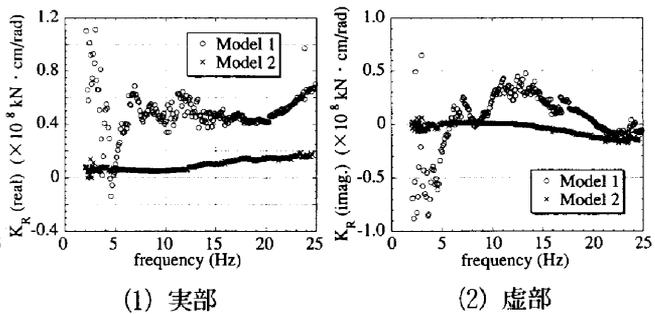


図-24 回転インピーダンス (杭間隔別)

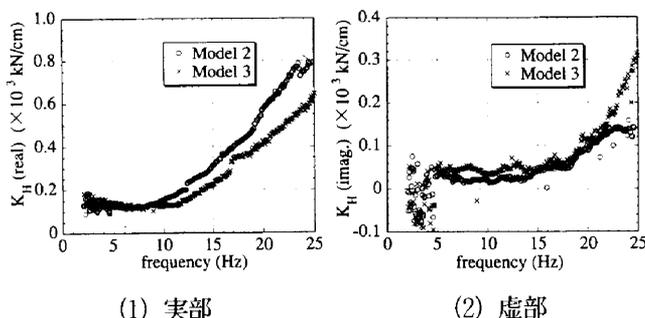


図-25 水平インピーダンス (杭本数別)

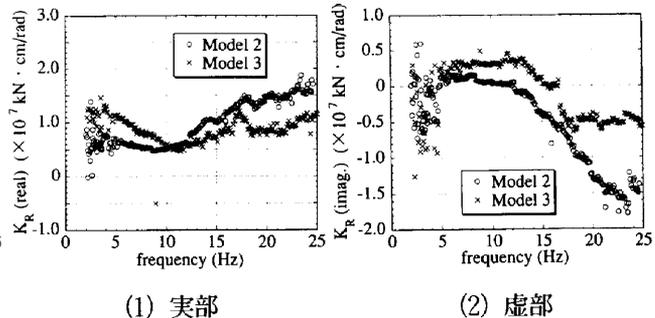


図-26 回転インピーダンス (杭本数別)

## § 5. まとめ

今回、地盤一杭基礎系の動的特性を明らかにするために起振実験を実施した。結果をまとめると以下のようである。

- ① 今回の実験範囲内においては、示した共振曲線より各試験体ともに弾性領域内の起振であった。
- ② 杭頭付近の応答は、杭間隔の違いによる影響が大きいと考えられ、杭間隔が大きい場合には杭頭回転拘束、著しく狭い場合においては杭頭自由のような傾向を示す。
- ③ Model 3における各杭間の曲げひずみおよび軸ひずみによる応力分担は、振動数依存性が確認された。
- ④ 実験結果からのインピーダンスにおいて杭間隔および杭本数による影響が確認され、杭間隔が狭い場合ならびに杭本数が多い場合における、杭1本あたりのインピーダンス実部の低下が見られた。これは、群杭効果によるものと考えられる。特に杭間隔別による回転インピーダンスの実部においてその効果が顕著であった。

## § 6. おわりに

今後は、以上に示した結果を踏まえたモデル試験体の地震観測および上部構造物を付与した起振実験等を実施する予定である。

最後に、本研究はNN研究委員会〔日本大学理工学部(地震動・耐震構造研究グループ)と西松建設(株)技術研究所との「日大・理工・船橋キャンパスにおける高密度地震観測に関する研究」<sup>5)</sup>委員会]によって計画・立案されたものであり、各委員の方々から貴重なご意見・ご指導を頂きました。記して深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会・兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書，1996。
- 2) 堀越研一，大津宏康：兵庫県南部地震により被害を

- 受けたPC杭の調査，第31回地盤工学研究発表会講演集，2分冊の1，pp.1227-1228，1996。
- 3) 時松孝次，大岡 弘，社本康弘：液状化に伴う側方流動を受けた建物基礎杭の残留変形モード，第31回地盤工学研究発表会講演集，2分冊の1，pp.1253-1254，1996。
- 4) 水野二十一，平出 努：兵庫県南部地震における杭基礎の被害―(その1)被害のパターンと被害事例―，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.1127-1128，1995。
- 5) 日本大学理工学部 地震動・耐震構造研究グループ，西松建設(株)技術研究所：習志野キャンパス地震観測システムによる地震特性に関する研究，日本大学理工学研究速報，pp.1-8，1995。
- 6) 阿世賀 宏，花田和史，塩尻弘雄，長谷部廣行，新井寿昭：地震観測に基づく上部構＝杭基礎系の動的特性に関する研究(その1：モデル構造物と起振実験の概要)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.433-434，1996。
- 7) 日下部 馨：地盤減衰の定量的評価に関する研究，昭和61年度科学研究費補助金研究成果報告書，pp.35-50，1991。
- 8) 今村 晃，太田泰博，土方勝一郎，柳下文雄，富山隆，中井正一，長谷川正幸：起振機による単杭および4本杭試験体の非線形相互作用実験(その1)～(その3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.415-420，1995。
- 9) 水野二十一，飯場正紀：杭と基礎根入れの動的効果に関する実験的研究(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.913-916，1991。
- 10) 水野二十一，飯場正紀：杭と基礎根入れの動的効果に関する実験的研究(その3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.591-592，1992。
- 11) 小林恒一，八尾真太郎：動的な水平荷重を受ける群杭基礎の挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，425号，pp.121-130，1990。