杭基礎—地盤の非線形動的相互作用に関する実験的研究

(Model Vibration Test of Non-Linear Interaction for Ground-Pile Complex)

吉 川 正 昭* (Masaaki Yosikawa)
安 倍 勇** (Isamu Abe)
山 田 善 一*** (Yoshikazu Yamada)

キーワード：基礎／杭／減衰／次元解析／振動／耐震／動的／波動／模型実験 (IGC : E 4/E 8)

1. 緒 言

杭基礎は建設工事における最も重要な基礎工法の一つであり、多くの研究が報告され、杭と地盤の相互作用で議論されねばならないことは周知の事実である。

杭基礎に静的な水平荷重を加えた場合、杭自身の曲げ剛性と地盤の反力によって抵抗すること、杭頭固定群杭では杭頭自由の場合に比べ、構造形式相違のため、深度方向の地盤反力分布が異なり、杭頭固定のほうが杭頭自由の場合よりも小さな変位を示すこと、群杭では各杭の反力が互いに干渉し合い各杭の荷重分担率が異なること等が知られている^{1),2),3)}。

一方、動的な水平荷重に対する杭の水平抵抗については、杭は地盤から地震力を受けるとともに、構造物の運動が地盤にフィードバックされる。この複雑な現象すなわち動的相互作用に関しては、強震時に地盤が非線形性を示す場合、基礎の埋込効果や群杭効果についての研究が報告^{4),5),6)}されているが、一般的な結論を得るに至っていない。更に、1978年6月28日の宮城県沖地震では大規模な杭の被害を経験し、杭被害の重大さが再認識され、地震時の杭の水平抵抗が見直されている。

杭基礎—地盤間の動的相互作用を実験により検討する方法には、実物杭基礎を起振機を用いて行う方法と振動台を用いた縮小模型実験による方法とが一般に行われている。実物杭基礎の起振機実験について、杭基礎と直接基礎とを、基礎の根入れ条件の相違に対して比較し、群杭基礎は回転運動に対する抵抗機能を有するなどの結果を示している⁷⁾。しかし、実用に供する杭基礎を用いた実験であるため、地盤が著しい非線形性を示す大ひずみ領域の結果は求められていない。

一方、縮小模型実験について、弾性人工模型材料（アクリル・アミド系グラウト剤）を用いて、1層一様地盤を作製し、杭模型は地盤に対する相対的な剛性度の異なる3種類の杭を対象に実験し、単杭と4本群杭を比較検討している⁸⁾。実験結果と、力学模型による数値解析ならびに実物構造物の観測結果との対比などがなされ、実物への適用について示されている。しかし、この実験は応答特性に大きな影響をもつ実地盤の減衰効果を模型地盤で再現していない。また、杭先端の条件は固定と自由で実験を行っているが、基礎の埋込については埋込のない場合しか行われていない。

地盤変位が上部構造物の慣性力よりも重要となる構造物に対して杭基礎を用いる場合、地盤の変位を考慮した杭基礎の耐震設計法（応答変位法）を提案し、その設計法の妥当性を検討するために、模型振動実験⁹⁾を行っている。この実験では、模型地盤について、表層には上述の材料⁸⁾を改良した人工材料（アクリル・アミド系グラウト剤にベントナイト、珪藻土を加えて水で練る）を用い、支持層は砂を用いている。この振動台による実験結果と群杭模型起振機実験を比較し、起振機模型実験から地盤主働と杭基礎主働の固有振動数が得られるのに対し、振動台実験では地盤主働の固有振動数しか明確に求められないとし、応答変位法の妥当性を示している。

以上、いずれの模型振動実験においても、強震時に生じると考えられる地盤軟化現象に対して、杭基礎と地盤がどのような非線形動的相互作用を示すかという観点から検討されていない。

そこで、本研究は模型地盤を用いた振動台実験から、強震時の地盤軟化現象がそれぞれ基礎の根入れ状態の相違した突出と埋込の単杭ならびに群杭に与える影響を求め、杭基礎の耐震設計に供しようとするものである。

2. 実験の目的と方法

本研究では対象構造物として4本群杭基礎（基礎形状は縦7.0m、横7.0m、厚さ2.0m、場所打ち杭は杭径1.5m、杭長20.0m、杭間隔は直径の2.5倍の3.75m

* (株)奥村組技術研究所 主任研究員 (大阪市住之江区浜口西 3-5-8)

** (株)奥村組技術研究所 室長

*** 京都大学工学部土木工学教室 教授 (京都市左京区吉田本町)
(1982.11.29 原稿受付・討議期限 1984.7.1)

表-1 実物想定値と模型目標値

	Unit	Prototype	Model Aim
SOIL			
Comp-mixed(Surface)			Poly-Ethy.: Oil 100 g : 95cm ³
Soil Layer Depth	m	18 or 22	0.18 or 0.22
Density	g/cm ³	1.7	0.88
Poisson's Ratio		0.45	0.45
S-Wave Velocity	m/s	320.0	32.0
Shear Modulus	MPa	174.1	0.9
Young's Modulus	MPa	504.8	2.6
Natural Frequency	Hz	5 or 4	50 or 40
Damping Constant	%	2~5	2~5
Bearing Soil Layer Comp-mixed (Base)			Poly-Ethy.: Oil 100 g : 35cm ³
Soil Layer Depth	m	1.5	0.015
Density	g/cm ³	1.8	0.93
Poisson's Ratio		0.4	0.40
S-Wave Velocity	m/s	500	50.0
Damping Constant	%	2~3	2~3
PILE FOUNDATION			
Length	m	20	0.2
Diameter	m	1.5	0.015
Density	g/cm ³	2.4	1.6
Footing Shape	m	7(L), 7(W), 2(H)	0.07, 0.07, 0.02
Moment of Inertia	cm ⁴	2.48×10^7	0.248
Young's Modulus	MPa	2.9×10^4	245.0
Flexural Rigidity	MPa·cm ⁴	7.19×10^{11}	37.3
Damping Constant	%	3~5	3~5
Poisson's Ratio		0.17	0.17

1 MPa=10.2kgf/cm²

図-1 地盤一杭模型と測点

とし、4本を正方形配置とする)と単杭基礎{基礎形状は4本群杭基礎を1本杭で分担する大きさ(縦3.5m, 横3.5m, 厚さ2.0m)とし、杭は4本群杭の1本の形状と同じとする}を用いる。柔構造物を支える杭基礎について、既に報告^{10),11),20)}したので、上部構造は剛性が大きく、基礎と同一挙動をする単純構造とし、杭先端は支持層に根入れされた支持杭とする。

対象地盤一杭基礎の実物想定値を表-1に示し、実物

全体系に相似則(後述の表-2)を適用し、縮尺を1/100とした模型を図-1に示す。模型杭底面には実物条件を理想的に表現するため、杭径と同じ深さだけ支持層地盤を作製し、土槽に杭先端をヒンジで拘束した。

2.1 実験の目的

強震時に杭基礎の振動性状に与える重要な要因として基礎の埋込状態ならびに単杭と群杭の挙動の相違などがある。そこで、実地盤の振動挙動を再現できる模型地盤^{10),11),12),13)}を用いて、地盤の軟化特性が杭基礎と地盤の非線形相互作用を与える影響に関して、基礎埋込状態の相違した単杭と群杭において、次に示す事柄を明らかにする。

(i) 地盤と杭基礎の共振振動数と応答変位モードを対照することにより、地盤一杭基礎系の非線形相互作用特性を明らかにする。

(ii) 基礎埋込状態の相違について、各入力加速度に対する地盤と杭基礎間の相互影響度、剛性低下の割合および群杭効率の関係を検討することにより明らかにする。

(iii) 単杭、群杭両基礎の非線形相互作用時の減衰特性を入力加速度との関係で求め、モデル化の容易な地盤一単杭基礎連成系の減衰定数を、変位振幅と入力加速度に対する位相遅れを用い、振動数の関数として求め、埋込土の減衰効果の影響を明らかにする。

2.2 模型材料および模型と実物との相似則

地盤模型材料(以下PEと略称)は表-1に示したように原料ポリエチレン(粉末材100g)とサラダ油(表層地盤95cm³, 支持層35cm³)とを練り混ぜて作製した。地盤模型を図-2に示す地盤収納箱の側壁に設けられた厚さ5cmの発泡スチロール製チップ(以下HPと略称)の層(粘性境界に相当)の中に造る。地盤模型は深さ方向での位相差を示さず、せん断振動をすることを予備実験と解析で確かめた¹⁰⁾。したがって、測定結果は内部減衰、履歴減衰、逸散減衰などの個々に評価することの難しい減衰効果¹⁰⁾を複合した形で計測したことになる。

杭と基礎模型(図-1)をそれぞれ無充てんのエチレン

図-2 模型地盤と土槽

表-2 相似則と相似比

Function	Similar Systems	Scale Factor
Length	l_m/l_p	1/100
Deflection	l_m/l_p	10^{-2}
Volume	$(l_m/l_p)^3$	10^{-6}
Density	ρ_m/ρ_p	1/1.93
Unit Weight	$(\rho_m/\rho_p)(g_m/g_p)$	1/1.93
Mass	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)^3$	$1/(1.93 \times 10^6)$
Time	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	10^{-1}
Period	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	10^{-1}
Frequency	$(l_m/l_p)^{-1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	10
Velocity	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	10^{-1}
Elastic Modulus	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	1/193
Stress	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	1/193
Moment of Inertia	$(l_m/l_p)^4$	10^{-8}
Strain	ϵ_m/ϵ_p	1
Poisson's Ratio	ν_m/ν_p	1
Damping Constant	h_m/h_p	1
Acceleration	α_m/α_p	1

表-3 振動台と測定機器仕様一覧

(a) Shaking Table		
Vibrational Direction		Horizontal
Movable Part Weight		40kg
Max.	Force	1 863N
	Disp. Ampl.	40mm
	Velocity	40cm/s
	Acceleration	4 655cm/s ²
	Movable W.	300kg
Frequency Region		1~100Hz
Wave Shape Accu.		less than 5%
Table Size		700mm × 800mm
Table Support		Oil
1N=0. 102kgf 1kPa=10. 2gf/cm ²		
(b) Accelerometer		
Frequency		for low frequency (VM 4112)
Frequency	1~200Hz	
Acceleration	30~29 000cm/s ²	
Pickup type	VP-4132	
Sensitivity	50mV	
Size	5mm × 5mm × 11. 5mm	
Weight	1g	
Reso. Frequency	1. 5~2. 5kHz	
(c) Earth Pressure		
High Sensitive P.		(PSL 200 GA)
Capacity	19. 6kPa	
Output Voltage	0. 5mV/V	
Size	3mm × 1mm	

樹脂, ガラス繊維混入の四フッ化エチレン樹脂で製作した。杭と基礎の剛性については, 模型と実物との曲げ剛性に対して, 近似的に相似則を満足させた。基礎模型について, 上部構造を基礎の付加質量で取扱える場合には, 地盤—杭基礎間の動的相互作用を求める目的に対し, 基本的な動特性に影響を及ぼさないと考え, 図-1 に示

すように基礎形状を立方体, 質量を 50g (単杭の質量 54g にほぼ等しくし, 4 本群杭基礎は 4 倍の 200g) にした。実物の杭頭と基礎の結合方法には, 杭頭の回転による拘束の度合に応じ, 固定, 半固定, 自由などがある。本実験では, 杭頭と基礎を剛結した杭頭固定を用いている。

相似則と相似比の関係を表-2 に示し, これを用いて表-1 に示した実物想定値から, 模型目標値を求めて表-1 に併記する。相似則は模型と実物について, 物理現象に関連する主要 π 値^{10), 11), 13)} が等しいとして求めた。

本実験では, 模型と実地盤との剛性率 (G_e) と減衰定数 (h_e) のせん断ひずみ (γ) 依存性, 横波速度 (V_s) および密度 (ρ) に対して近似的に相似則を満足させた。同一重力場で実験を行うので, γ , h_e , ポアソン比 (ν) および加速度の相似比を 1 としている。

2.3 実験設備と実験条件

使用振動台, 測定機器の仕様を表-3 に示す。測定位置は図-1 に示すように, 杭基礎上④-u(p), 地盤地表⑤-a (全体系では杭側面から 10cm), 地盤地中⑤-b および杭近傍地盤地表⑥-a (杭側面から 1cm) とし, 加速度計を配置した。なお, 測定値の信頼性を高めるため, 埋込基礎側面④-s(side) に土圧計を配置し, 杭頭部 (基礎頂部より 3cm 下) に箔ひずみゲージ (KFC-5-C₁-11) を貼付し, 加速度計で求めた共振振動数と対照した。

入力波形は地盤が軟化しやすい材料のため, スウィープ加振方式 {3~60Hz, 12秒 (定常状態に近い共振振動数が求められる継続時間), 入力振幅一定} を使用した。スウィープ波動を加速度振幅 {5 ケース: A (10ガル), B (50ガル), C (100ガル), D (150ガル), E (220ガル)} で与え, 各測点で応答加速度のピーク値を求めた。本研究では, このピーク値を与える振動数を共振振動数 f_n と称することとした^{10), 11)}。

また, 振動台の加振方向は水平方向 (X) (図-2) とし, 共振時の変位については, 共振点の応答加速度波形を 2 回積分して求めた。

本実験の模型地盤材料の G_e , h_e とひずみの関係は次に示す方法を用いて求め, 結果を図-3 に示す。同図に, 砂質土, 粘性土の実験結果¹⁴⁾を併記した。微小ひずみ領域における G_e については, 加速度の正弦半波 (200Hz) を振動台に入力して V_s を求め, $G_e = \rho \cdot V_s^2$ を用いて算出し, γ については $\gamma = V_D/V_s$ (V_D : 振動速度) を用いて算出した。中ひずみ領域以上では, 復元力特性曲線 $\{kx = -m(\ddot{x} + \ddot{z}) - c\dot{x}$, c は共振曲線から求められる h_e を用いて, $c = 2h_e \cdot m \cdot \omega_0$, (ω_0 : 共振時の固有円振動数) を初期値として採用し, 復元力を求め, 履歴ループから求めた減衰定数と初期値を比較して, ほぼ一致した復元

図-3 剛性率 (G_e), 減衰定数 (h_e) のひずみ (γ) 依存性

表-4 減衰定数 (h_e) とひずみ (γ) レベル

Damping Constant(%)	STRAIN REGION			
	Microscopic	Middle		Large
	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
(1) Free Vibration	2~3	3~6	10~19	
(2) Wave Propagation	1~2	3~5		
(3) Restoring Force Curve		5~7	19~21	28~32
(4) or (4)' Resonance Curve		12~14	13~15	18~23

(4)' See Reference 16)

力を用いる} の割線勾配より G_e を求め, γ を地層厚平均せん断ひずみとし, $\gamma = u/H$ (u : 応答変位, H : 模型センサ間の地層厚) を用いて求めた^{10),13)}。

h_e については4種類の方法より求めて表-4に示す。同表より, h_e については微小ひずみ領域では, 衝撃的入力波動のエネルギー消費¹⁵⁾より, 中ひずみ領域以上では, 前述した方法を用いて, 復元力履歴ループより求めることにした。なお, 杭基礎でも同様の考え方を採用した。

本研究の実験種類は単一系の地盤(層厚 18cm と 22cm), 単一系杭基礎(単杭基礎は不安定で固有値をもたず, 4本群杭基礎のみ行う), および地盤一杭基礎連成の3種類とした。地盤一杭基礎連成系において, 単杭突出基礎 {S(single)-O(ut)} と埋込基礎 {S(single)-U(nder)} および群杭突出基礎 {G(roup)-O(ut)} と埋込基礎 {G(roup)-U(nder)} の4ケースの実験を行っている。

3. 実験結果

3.1 単一系

(1) 地盤

水平加振によって生じる地盤中央付近 ⑤-a の水平応答値から求めた共振曲線(層厚 18cm, 22cm)を図-4に示し, 共振振動数 f_n , 減衰定数 h_e , 応答加速度倍率 M と入力加速度振幅 α_i の関係を図-5に示す。同図より, 共振曲線の形状はいずれも単峰型を示し, 入力加速

図-4 共振曲線(単一系地盤)

図-5 f_n, h_e, M と α_i の関係(単一系地盤と4本群杭基礎)

図-6 模型地盤の復元力特性

図-7 共振曲線(単一系4本群杭基礎)

度を大きくすると共振振動数の低下すなわち軟化することがわかる。なお, 上下動応答^{10),11)}は水平動応答のように大きな軟化をしない。また, 層厚 18cm と 22cm (両者とも同じ材料で $V_s = 34 \text{ m/s}$ を用いる) の共振振動数 f_{18} と f_{22} は, 10ガル入力時, それぞれ 54.6 Hz,

44.8 Hz を示し、層が厚いほど低振動数となる。 f_{18}/f_{22} は 1.2 となり、1/4 波長則で求めた値とほぼ一致する。一方、220 ガル入力時、軟化現象により f_{18}, f_{22} はそれぞれ 5.6 Hz, 5.4 Hz を示し、両者の共振振動数には、ほとんど差がなくなる。

せん断応力とひずみに関する復元力特性(深さ方向測点 ④⑤, ⑥⑦間の平均ひずみとせん断応力の関係)を、入力 100, 150 ガル時、層厚 22 cm について、図-6 に示す。同図より、入力加速度が小さいとき、地表、底部とも紡錘型を示し、入力加速度が大きくなると地盤の剛性低下のため紡錘型がくずれ、液状化時にみられる逆 S 字型状となり、応答速度が 0 に近づき、ひずみが反転する近傍ではひずみ硬化の現象が求まる。測点位置とひずみレベルとにより、復元力曲線の形状すなわち履歴減衰が異なることがわかる。

(2) 杭基礎

単杭は杭先端ヒンジ固定のため、周辺地盤がない場合不安定構造となり、固有値をもたない。4 本群杭基礎 ④-u における水平応答の共振曲線を図-7 に示し、 f_n, h_e, M と α_i の関係を図-5 に点線で示す。同図より、群杭の共振曲線は単峰型で、入力を大きくしても f_n が変化しないこと、 h_e がわずかに入力強度依存性を示すこと、 M がほとんど変化しないことなどがわかる。

3.2 地盤-杭基礎連成系

各測点(④-u, ⑥-a)における水平加振時の共振曲線を図-8(a), (b), (c), (d) に示し、 f_n, h_e, M と α_i の関係を図-9(a), (b), (c), (d) に示す。同図より、入力増加に伴う地盤軟化による非線形動的相互作用の影響による関係が、各応答特性 f_n, h_e, M に生じていることがわかる。なお、杭から約 10 cm (実物で 10 m) 離れた地表の応答を求めるため、単一系地盤と同じ位置に配置した測点 ⑤-a の結果は、単一系地盤の結果とほぼ一致したので、全体系遠隔地盤の応答特性は、図-4.5 で表される。この現象は杭長 1/2 以遠の地表へは杭基礎応答の影響が及ばない結果¹¹⁾と一致する。

共振時の応答変位モードについて、各入力加速度別に遠隔地盤 ⑤-a, 近傍地盤 ⑥-a, 基礎 ④-u の順に求め、図-10(a), (b), (c), (d) に示す。同図に各測点の共振振動数 $\{f_{d(istance)}: \text{遠隔地盤}, f_g: \text{近傍地盤},$

$f_f(\text{ooting}): \text{基礎}\}$ と応答変位を併記した。このときの入力加速度による各共振振動数 f_d, f_g, f_f の大小関係を表-5 にまとめた。これらの結果から、各入力加速度に

図-8(a) 共振曲線(S-O, S-U at ⑥-a)

図-8(b) 共振曲線(S-O, S-U at ④-u)

図-8(c) 共振曲線(G-O, G-U at ⑥-a)

図-8(d) 共振曲線(G-O, G-U at ④-u)

図-9(a) f_n, h_e, M と α_i の関係 (S-O, S-U at ⑥-a)

図-9(b) f_n, h_e, M と α_i の関係 (S-O, S-U at ④-u)

図-9(c) f_n, h_e, M と α_i の関係 (G-O, G-U at ⑥-a)

図-9(d) f_n, h_e, M と α_i の関係 (G-O, G-U at ④-u)

図-10(a) 応答変位モード (S-O)

図-10(b) 応答変位モード (S-U)

図-10(c) 応答変位モード (G-O)

図-10(d) 応答変位モード (G-U)

表-5 入力強度 (α_i) と共振振動数

CASE	S-O	S-U	G-O	G-U
Input Intensity (cm/s²)				
10	$f_f < f_g < f_d$	$f_f < f_g = f_d$	$f_f < f_g = f_d$	$f_f < f_g = f_d$
50	$f_f < f_g < f_d$	$f_f < f_g = f_d$	$f_f < f_g = f_d$	$f_d < f_g < f_f$
100	$f_f = f_g < f_d$	$f_f = f_g < f_d$	$f_d < f_g = f_f$	$f_d < f_g < f_f$
150	$f_f = f_g < f_d$	$f_d < f_g < f_f$	$f_d < f_g < f_f$	$f_d < f_g < f_f$
220	$f_d < f_f = f_g$	$f_d < f_g < f_f$	$f_d < f_g < f_f$	$f_d < f_g < f_f$

対し、遠隔地盤、周辺地盤と埋込状態の相違した単杭、群杭の共振時の振動挙動が変化する状態がわかる。

4. 考察

4.1 単一系

(1) 地盤

本実験に用いた模型地盤材料は、図-3, 6, 表-4 に示した結果から、入力加速度が220ガル近傍で f_n が 1/8 に低下し、 h_e が 30% を越え、 M は約1倍に低下することなどを示し、 f_n, h_e, M のいずれの応答特性も入力加速度依存性が認められる。地盤あるいは土構造物の実験結果や実測値にも同様の傾向がみられる^{10), 11), 12), 13)}。

(2) 杭基礎

本実験に用いた模型4本群杭基礎の動特性について、

次のように考察する。共振振動数（図-5, 7 より 24.3 Hz）の入力加速度依存性はほとんど現れず, FEM を用いた予備解析結果とも一致する。減衰定数は入力増加により, 3%から6%に増加する。実測結果にも, 減衰定数が10%を越え, 入力依存性を示す場合¹¹⁾がある。応答倍率は約6倍を示す。

4.2 地盤—杭基礎連成系

軟化現象を示す周辺地盤と基礎の埋込状態の相違した単杭と群杭とからなる連成系の非線形動的相互作用について, 地盤と杭の相互作用特性¹¹⁾, 埋込効果および減衰特性の問題などがある。これらの問題について, 本実験結果を次のように考察する。

(1) 相互作用特性

一般に, 地盤—杭基礎の相互作用は弾性波動論による複素剛性において, 相互作用ばね係数（実数部）の振動数依存性を地盤の付加質量効果として表現し, 相互作用ばね係数の虚数部を地盤中の波動エネルギー逸散による減衰効果として表現できる^{17),18),19)}。

この理論の非線形地盤挙動への拡張は難しいが, 実験結果を次図（図-11 と 図-12(a), (b)）のようにまとめることにより, 類似点が認められる。

周辺地盤 ⑥-a の G_e, h_e と杭基礎の共振振動数 f_f と地盤の共振振動数 f_g の比 f_f/f_g の関係を 図-11 に示す。

次に, 図-5, 9(a), (b), (c), (d) をまとめて図-12(a), (b) に示す。同図の点線は単一系地盤（層厚 18 cm と 22 cm）, 1 点鎖線は単一系群杭基礎を表す。 $f_n - \alpha_i$ の関係において, 共振曲線が連峰型の場合, f_n に g, f と注記し, 地盤の振動モードか, 杭基礎の振動モードかを区別した。 $h_e - \alpha_i$ の関係において, 単一系の地盤, 4 本群杭基礎および連成系の単杭, 群杭基礎の減衰定数を h_g, h_f および h_{TS}, h_{TG} とし, 本研究で同図を相互作用特性図と称する。

群杭連成系の相互作用について同図 (b), 図-10(c) (d), 11 より次のことが明らかになる。

(i) 入力加速度振幅 80 ガル（埋込, 突出基礎で 75 ガル, 85 ガル）付近は, 地盤の急激な軟化により, 共振

図-11 G_e, h_e と f_1/f_g の関係

図-12 相互作用特性図

振動数の低下と減衰定数の増加を生じ, 相互作用特性の遷移領域である。遷移領域では地盤と群杭基礎の変位モードが接近し, 地盤—群杭基礎間に連成振動が生じ, 両者が大きく振動する。なお, 遷移領域^{11),20)}とは, ある入力加速度を境に急激に地盤が軟化し, 減衰定数が増加する領域のことで, この境界領域のことを本実験で遷移領域と称する。

(ii) 入力強度 80 ガル以下の領域では, 地盤の軟化は小さく, 群杭基礎の減衰定数は 4~6%と小さい。この場合, 群杭と地盤はほぼ同位相で振動し, 連成系 1 次と 2 次のモードは単一系の群杭基礎と地盤の振動を主体とし, 杭の剛性で地盤を補強する効果は比較的少ない。

(iii) 入力強度 80 ガル以上の領域では, 地盤の軟化が大きく, 地盤と群杭基礎の減衰定数は 15~30% と 10~20%に急増する。この場合, 群杭と地盤は位相差を生じ, (ii)と逆に連成系 1 次と 2 次のモードは単一系の地盤と群杭基礎の振動を主体とし, 両者の共振振動数に差が生じる。剛性は群杭基礎のほうが地盤より大きいため, 群杭基礎の制振効果が大きく作用する領域である。

(iv) 剛な円柱が一樣な表層地盤中に根入れされた構造物の複素剛性の特徴¹⁷⁾に類似していることが上記(i), (ii), (iii)の考察結果より説明できる。

単杭連成系の相互作用について, 図-12(a), 10(a), (b), 11 より次のことが明らかになる。

(i) 入力加速度振幅 50 ガル（埋込, 突出基礎で 60

図-13 相互影響度 sE_p , pE_s と α_i の関係

ガル, 50ガル) 付近以下の領域では, 地盤の軟化は小さく, 単杭基礎と地盤はほぼ同位相で振動し, 群杭基礎(ii)の場合とはほぼ同様のことがいえる。

(ii) 入力加速度振幅 50 ガル以上の領域でも, 単杭基礎は地盤の軟化に伴い, ほぼ同位相で振動し, 地盤に対する制振効果はなく, $f_f/f_g > 1$ の領域が存在せず(図-11), 遷移領域が明確に現れない。

(2) 相互影響度と埋込効果

相互作用の評価について, 集中質量法⁶⁾では, 周辺地盤に比べて杭基礎に支持される構造物の振動エネルギーがそれほど大きくないとし, 構造物の振動による地盤の振動は無視し得るとし, 群杭効果を, 低減率考慮の等価剛性で評価する実用的な方法を用いる。しかし, 適用可能範囲の明確さを欠くため, 共振曲線が地盤と杭基礎主働の連峰型の場合, 杭基礎から地盤への影響と動的群杭効率とについて考察する。

地盤が杭基礎に与える影響度 sE_p と逆に杭基礎が地盤に与える影響度 pE_s とを次式より求め, 図-13 に示す。

$$sE_p = \frac{\text{杭基礎 ④-u の地盤振動による応答値}}{\text{近傍地盤 ⑥-a の地盤振動による応答値}}$$

$$pE_s = \frac{\text{近傍地盤 ⑥-a の杭基礎振動による応答値}}{\text{杭基礎 ④-u の杭基礎振動による応答値}}$$

sE_p または pE_s が入力増加に対してどの程度の剛性低下のもとで生じたかを検討するため, 杭基礎における地盤主働または地盤における杭主働の共振振動数の減少量を低下前の共振振動数で除した割合 E または P を求め, 表-6 に示す。

図-13, 11, 表-6 から次のことが明らかになる。

(i) 遷移領域(単杭は 50 ガル)以下で, 地盤が杭基礎 sE_p に与える影響と杭基礎が地盤に与える影響 pE_s とは, 単杭, 群杭両基礎とも埋込のほうが突出基礎より

表-6 入力強度増加と共振振動数の低下割合

Input Intensity		S-O	S-U	G-O	G-U
Small 10→50(cm/s²)	E	0.58	0.26	0.27	0.20
	P	0.58	0.25	0.14	0.03
Large 150→220(cm/s²)	E	0.16	0.20	0.39	0.42
	P	0.20	0.19	0.05	0.04

E : Soil to Pile
P : Pile to Soil

図-14 群杭効率と周辺地盤固有値との関係

大きく, また埋込基礎周辺地盤の剛性についても同様のことがわかる(図-11)。剛性低下の割合 E, P は逆に突出のほうが埋込基礎より大きい。したがって, 埋込効果として, 基礎周辺地盤の剛性が影響することがわかる。

(ii) 遷移領域(単杭は 50 ガル)以上で, 単杭の場合が sE_p, pE_s 埋込, 突出両基礎で差がなく 1 近傍を示し, 埋込効果がなくなる。群杭の場合, sE_p は埋込のほうが突出基礎より大きく, pE_s は両者でほぼ等しい。周辺地盤の剛性は両基礎とも低下して差がなくなり(図-11), 群杭においても, 埋込基礎が突出基礎とほぼ同じ状態になる。

(iii) 地盤が杭基礎に与える影響 sE_p のほうが杭が地盤に与える影響 pE_s より, 遷移領域以下では大きい。しかし, 遷移領域以上では $sE_p \approx pE_s \approx 1$ (単杭, 群杭埋込), または $sE_p < pE_s$ (群杭突出)となり, 群杭突出では杭基礎から地盤に与える影響を考慮する必要がある。なお, 埋込効果による減衰特性は後述(4.2(3))する。

次に, 杭基礎主働振動時の動的群杭効率 e を応答変位比 e_s ¹⁾と等価 1 自由度力学モデルの剛性比 e_d とにより求め, 静的な群杭効率¹⁾と比較し, 周辺地盤共振振動数との関係を図-14 に示す。

$$e_s = y_s / (ny_g) \text{ および } e_d = K_g / (nK_s)$$

ここに, e_s, e_d は変位比と剛性比とにより求めた動的群杭効率, n は杭本数とし, 以下単杭 S と群杭 G とにおいて y_s, y_g は同荷重に対する変位, K_s, K_g は剛性で次式より求める。 $K_s = (2\pi f_s)^2 (M_s + M_{es})$, $K_g = (2\pi f_g)^2 (M_g + M_{eg})$: M_s, M_g と M_{es}, M_{eg} は質量と有効質量, f_s, f_g は杭基礎主働の共振振動数とする。なお, M_{es}, M_{eg} は水平載荷試験(以下 **TS** と略す)より求まるばね定数と f_s, f_g を用いて逆算した結果, 杭基礎の質量 M_s, M_g ($M_g = 4M_s$) に比べて小さい。また同図に入力加速度(10~220), $e_s = 0.25$ (群杭としての機能を発揮せず, 単杭と同じ機能しか有しない)と **TS** による結果(static)を併記すると次のことが明らかになる。

(i) e_s, e_d は遷移領域を境に異なり, 遷移領域以下(動的実験の地盤ひずみ $3 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-3}$, **TS** の変位 0.2~0.4 mm)で, 埋込のほうが突出より大きく, それ

以上（動の実験の地盤ひずみ $5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$, **TS** の変位 1.1~2.9mm）で両基礎による差はなくなり、埋込効果が入力増加につれてなくなることがわかる。

(ii) e_s, e_d は入力加速度依存性を示し、 e_s, e_d が 220 ガル入力時に 1 を越えるのは、群杭に比べ単杭基礎が周辺地盤の軟化による影響を大きく受けるためである。

(iii) e_s, e_d と **TS** との比較から、遷移領域以下では動的なほうが静的群杭効率より小さく、遷移領域以上では、逆になる。これは **TS** では杭基礎の共振状態を取扱えないことや、載荷重の算出方法（振動台実験結果の地表面応答加速度から水平震度を求め、これに基礎自重を掛けて水平載荷重を定めた）などによっている。

(3) 減衰特性

減衰定数は耐震設計で、応答結果に大きく影響し、物理性質で分類すると、内部摩擦による粘性減衰、塑性挙動による履歴減衰、杭基礎から地中へのエネルギー逸散減衰などが支配的となり、これらの複合した本実験結果（図-11, 12(a), (b)）より、次のことが明らかとなる。

(i) 周辺地盤の $f_f/f_g - h_e$ の関係（図-11）から、単杭基礎には $f_f/f_g > 1$ の領域がない。さらに、同図はスウィープ波入力によるため、入力加速度に依存した性質が、振動数依存と混合して含まれる。

(ii) 単一系、連成系の減衰定数と入力加速度の関係（図-12(a), (b)）から、遷移領域以下で、連成系単杭 h_{TS} 、群杭 h_{TG} ：単一系地盤 h_g 、4 本群杭基礎 h_f の大小は、ほぼ等しい。遷移領域以上で、 $h_f < h_{TG} < h_{TS} < h_g$ となり、単杭のほうが群杭基礎より大きい。同様に、埋込基礎のほうが突出基礎よりも大きい結果が求められる。

そこで、相互作用時に大きく寄与する地下逸散減衰^{17),18),19)}について、図-11 より入力による依存性を排除するため、比較的モデル化が容易に行える単杭連成系を選びだす。単杭連成系は入力加速度 100 ガル時に、応答変位モードより第 1 次近似として等価 1 自由度の力学モデル化ができ、図-15 に動揺運動の力学モデルを示す。単杭連成系の共振曲線と位相曲線（図-16）を用いて、次式から複素剛性（実部 K_1 、虚部 K_2 ）を求め（図-17）、埋込効果について考察する。

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= J\omega^2 + M \cos \theta / \phi \\ K_2 &= -M \sin \theta / \phi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 J は杭先端回りの質量慣性モーメントで動揺運動系の定数とする。 M は杭先端回転軸回りの作用モーメント ($M = F \cdot L = m\alpha_i L$, L : 杭先端から基礎頂部までの距離), ω は入力円振動数, ϕ は応答回転角 ($\tan \phi \doteq \phi \doteq u/L$), θ は入力に対する応答の位相遅れとする。

これを用いて等価減衰定数 $h_{ec} = K_2 / (2\omega\sqrt{JK_1})$ を求め、図-18 に示す。同図より、実験結果は弾性波動論による複素剛性の特徴^{17),18),19)}と類似していることがわか

図-15 地盤—単杭系力学モデル

図-16 変位振幅と位相差（単杭全体系、100ガル入力時）

図-17 複素剛性（1 自由度モデルによる）

図-18 等価粘性減衰定数（複素剛性）

る。なお、図-17 で K_1 が周辺地盤の共振振動数の付近まで漸減し、それ以上の振動数領域で定まった傾向がみられず、本実験結果で負値を示した。Novak¹⁸⁾等の解析

表-7 減衰定数の比較

Damping Constant	S-O	S-U	NOTE
h_g	28.0	31.0	Eq. (2)
h_{ec} (%)	21.0	25.0	Fig.-18
h_{TS}	15.0	17.0	Fig.-12(a)
h_e	16.0	18.0	Fig.-11

手法による結果でも負値を示す場合があり、本実験では、 K_1, K_2 が独立でなく、複素数全体として意味をもつとして、負値のときは絶対値を用いて、 h_{ec} を求めた。図-11 で $f_f > f_g$ (前述) が求まらないことにも関連があり、(1)式の適用にも限界があると考えられる。

次に、波動が広がる時の減衰定数 $h_g^{15)}$ を連成系単杭基礎において次式より求め、表-7 に示す。

$$u_R(f, x) = u_0(f, 0) \exp\{-\delta(f) \cdot x\}$$

$$h_g = \delta(f) \cdot V_S / \omega_p \quad (2)$$

ここに、 $u_R(f, x)$ 、 $u_0(f, 0)$ は、近傍地盤⑥、単杭基礎④の応答変位振幅、 $\delta(f)$ は平面波動減衰係数、 x は④と⑥の距離 (1cm)、 ω_p は基礎の共振円振動数とすると h_g は振動数に比例して大きくなる。同表に、前述した減衰定数 (h_e : 周辺地盤の履歴減衰、 h_{TS} : 単杭基礎上の履歴減衰、 h_{ec} : 地下逸散減衰) を同一条件のもとに示す。これらの比較結果から、各値が相違し、上述の手法により、複雑な減衰定数を正確に抽出することの困難なことを再確認^{10), 11)} した。しかし、埋込基礎の減衰定数のほうが突出のそれより大きく、地下逸散減衰などによる減衰効果が、基礎の埋込によって期待できる。

5. ま と め

本研究で得た非線形動的相互作用の成果を要約する。

(1) 地盤と杭基礎の相互作用に関して、群杭では入力加速度振幅 80 ガル付近で地盤軟化による応答特性の遷移領域が存在し、地盤と群杭基礎の変位モードが接近し、連成振動を生じる。一方、単杭では遷移領域が明確に現れず、周辺地盤振動挙動に依存した振動を行う。

(2) 遷移領域以下で、埋込、突出両基礎とも、地盤が杭基礎に与える影響のほうが杭が地盤に与える影響より大きい。遷移領域以上で、両者の影響度が同一で1近傍を示すか、または群杭突出基礎の場合、杭から地盤に与える影響のほうが大きくなり、耐震設計手法で杭から地盤へのフィードバックの必要性が示唆される。

(3) 基礎に対する周辺地盤の埋込による補剛効果は単杭、群杭とも、遷移領域 (単杭は 50 ガル) 以下で認められ、遷移領域以上ではなくなるなどが、動的群杭効率を求めることによって示される。

(4) 動的群杭効率は静的試験によって求めた静的群杭効率よりも入力加速度に依存し、静的群杭効率で杭基礎の耐震性の評価は難しい。

(5) 粘性、履歴、地下逸散など複合した減衰定数 (連成系単杭 h_{TS} 、群杭 h_{TG} : 単一系地盤 h_g 、4 本群杭 h_f) の大小は、遷移領域以下ではほぼ等しく、それ以上で $h_f < h_{TG} < h_{TS} < h_g$ となり、単杭のほうが群杭基礎より大きく、また、埋込基礎のほうが突出基礎よりも少し大きい。

(6) 振動数依存の地下逸散減衰定数 (単杭基礎で入力100ガル時) は波動論による複素剛性の特徴と類似し、埋込、突出両基礎の減衰定数を同一条件で求めた幾何学的減衰、履歴減衰と比較した結果、各手法により値はばらつくが、埋込のほうが突出基礎より大きくなり、埋込効果として地下逸散減衰などを期待できることがわかる。

6. あ と が き

以上の考察から地盤-杭基礎の非線形動的相互作用に関して、既報告^{10), 11)} の長周期構造物を有する杭基礎の非線形連成振動実験結果の考察と同様、解析ならびに耐震設計上重要な結果を得ることができた。

本研究では、基礎周辺土の埋込効果は側面土の受働または主働土圧による補剛効果と基礎底面の摩擦抵抗、周辺地盤の履歴、地下逸散などの減衰効果とにより生じるとして、その効果について考察した。埋込基礎は埋込土の軟化による剛性低下により突出基礎と同じ状態になり、多少減衰定数が小さくなることを予想したが、結果は埋込のほうが突出より大きい。地盤の履歴減衰が大きくなるためであろう。また、天然材料でなく、人工模型材料を用いたのは、地盤所定の軟化現象が可能で、相似性に有利と考えたからである。もし、天然材料を使用すれば、剛性が強すぎ、所定どおり軟化が現れないことがわかる。人工材料を用いたため短期間に数多く実験できた。

本研究の入力波形は、軟化現象を適確に把握するためスウィープ波を使用した。実地震波 (エル・セントロ NS) と比較すると、両者の応答において、卓越振動数は近似するが、応答倍率は不規則性のために実地震波のほうがスウィープ波よりも 0.3~0.5 倍と小さくなる。したがって、実際の現象は本研究結果より小さな応答値となる。

謝辞: 本実験のまとめにあたり御助言をいただいた京都大学工学部耐震工学研究室家村浩和助教授に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 脇田英治(1979): 水平力を受ける群杭基礎の2次元有限要素法による解析, 「土と基礎」, Vol.27, No.9, pp.35~42.
- 2) 玉置 修・三橋晃司・今井常雄(1971): 水平抵抗における群杭効果の研究, 「土木学会論文報告集」, 第192号, pp.79

- ～89.
- 3) 柴田 徹・北口 清・他(1982): 群杭の杭間隔と水平抵抗に関する実験的研究(その1), 「第17回土質工学研究発表会講演集」, pp. 2269～2272.
 - 4) 土岐憲三・三浦房紀(1981): 非線形震動解析による群杭効果の評価, 「土木学会第36回年次学術講演会講演概要集」, 第1部, pp. 556～557.
 - 5) 土岐憲三・三浦房紀(1981): 杭基礎構造物の地震応答に及ぼすフーチングの根入れ効果, 「土木学会第36回年次学術講演会」, 第1部, pp. 558～559.
 - 6) 吉川正昭・釜谷幸夫・森尾 敏(1978): 地上式タンク地震応答解析—主として相互ばねの評価について—, 「第13回土質工学研究発表会」, pp. 1037～1040.
 - 7) 塩見 哲(1981): 杭の動的効果—基礎の動的挙動に与える杭の響響—, 「電力中央研究所研究報告」, No. 381002.
 - 8) 栗林栄一・他(1978): 杭基礎の動的特性に関する模型実験, 「土木研究資料」, 建設省土木研究所, 第1426号.
 - 9) 西村昭彦・高橋良輝(1981): 軟弱地盤中基礎の模型振動実験(1), 「構造物設計資料」, No. 68, pp. 8～11.
 - 10) 吉川正昭・黒岩真彦(1982): 模型地盤を用いた鉄塔—杭基礎の連成振動実験, 「第17回土質工学研究発表会講演集」, pp. 1769～1772.
 - 11) 吉川正昭・黒岩真彦・山田善一(1983): 模型地盤を用いた鉄塔—杭基礎—地盤の非線形連成振動に関する実験的研究, 「土木学会論文報告集」, 第334号, pp. 53～61.
 - 12) 吉川正昭・黒岩真彦(1981): 軟弱地盤模型材料の動特性, 「第16回土質工学研究発表会」, pp. 1257～1260.
 - 13) 吉川正昭・黒岩真彦(1980): 地下タンクの動的模型実験に使用する地盤材料の選定実験, 「(株)奥村組技術年報」, No. 6, pp. 117～133.
 - 14) 石原研而(1976): 「土質動力学」, 鹿島出版会, pp. 197～199.
 - 15) 工藤一嘉(1976): 波動の減衰測定—野外実験(地震波の生成, 伝播に関する実験)—, 「地震探鉱実験」, p. 177～179.
 - 16) 政尾 享・他(1978): 深い基礎の振動特性に関する実験的研究, 「第5回日本地震工学シンポジウム」, pp. 409～416.
 - 17) Tajimi, H. (1969): "Dynamic analysis of a structure embedded in an elastic stratum," Proc. 4th WCEE, Vol. III, A-6, pp. 54-69.
 - 18) Novak, M., Nogami, T. (1977): "Soil-pile interaction in horizontal vibration," EESD, Vol. 5, pp. 263-281.
 - 19) 土岐憲三(1978): 橋梁基礎の地震応答解析と耐震設計, 「京都大学防災研究所年報」, 第21号, pp. 1～24.
 - 20) 吉川正昭・黒岩真彦・山田善一(1982): 地盤・杭基礎・鉄塔の非線形連成系に関する模型実験, 「土木学会第37回年次学術講演会講演概要集」, 第1部, pp. 569～570.