

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

MODEL VIBRATION TEST OF TOWER-PILE FOUNDATION-SOIL SYSTEMS

吉川正昭*・黒岩真彦**・山田善一***
By Masaaki YOSHIKAWA, Masahiko KUROIWA
and Yoshikazu YAMADA

1. 緒 言

構造物の耐震性には、構造物のおかれた地盤の影響が大きいことは、よく知られたところである。耐震設計に必要な耐震解析においても、構造物、基礎、地盤の相互作用について、十分な検討がなされなければならない。

大型送電鉄塔が、地震で被害を受けた場合の、国民生活に与える重要性を考えれば、地震時の安全性について一般都市内の構造物、あるいはそれ以上に慎重な検討がなされなければならない。したがって、鉄塔-基礎-地盤の相互作用を考慮に入れた考察が必要とされる。

杭と地盤の相互作用に関する解析的方法として、地盤を非保存系として取り扱う波動論による方法^{1)~3)}はエネルギー逸散の検討には適するが、非線形挙動に対しては困難が伴う。これに対し、集中質量法や有限要素法に代表される離散系モデルに置換する方法^{4),5)}では、非線形挙動に対して便利ではあるが、仮想質量を仮定しなければならないし、有限要素法では仮想境界の反射などに工夫が要求される。そのほか、薄層有限要素法においてエネルギー逸散を取り扱う方法⁶⁾もあるが、いずれの方法を用いるにしても、解析では非線形動特性と振動数に依存する問題を同時に考慮することは、きわめて困難である。

地盤-杭基礎-鉄塔全体系の動的相互作用を検討する方法として、模型実験が行われているが、この方法では、有限要素法の問題と同様に土槽境界の反射などに工夫が要求され、また地盤の相似性に問題が残されている。模型による地盤の振動実験に関する研究報告には、相似則を考慮し、地盤模型材料を弾性体として取り扱った研

究^{7)~9)}や、相似則を考慮せずに単に「一つの小さな実物」として振動性状を求めようとする論文¹⁰⁾などがある。また、実物と同じ土質材料を用い、かつ重力の加速度を人為的に変えなくとも、ひずみがあまり大きくない範囲内では、ひずみと長さの縮尺が異なっても問題とならないとして実験が行われ、結果が報告^{11),12)}されている。これらの実験はいずれも大型振動台が用いられている。

また、実測に関しては、実物鉄塔の地震時の挙動を求めるために、常時微動測定、起振機を用いた強制加振実験^{13)~15)}、地震観測などが行われている。

以上の結果から、現在のところ適用できる地盤のひずみ範囲は、 10^{-4} 程度以下であり、大ひずみ時の測定結果は求められていないようである。

本研究は、強震時に地盤の軟化が杭基礎および送電鉄塔にどのような影響を与えるかということを中心とする模型実験を振動台を用いて試みるものである。杭基礎と地盤との相互作用に関しては、それぞれの共振振動数の比較や杭基礎側面の土圧の検討を、また、鉄塔と杭基礎の連成振動に関しては、共振時の変位モードと連成振動特性図から非線形連成振動の特徴を求め、耐震設計指針の資料に供するものである。

2. 実験の目的と方法

本研究では対象構造物として、大型鉄塔(塔高 66.0 m, 根開き 18.0 m)が、4 基の独立フーチング(1 基のフーチング形状; 縦 7.0 m, 横 7.0 m, 厚さ 2.0 m)と 16 本の場所打ち杭(1 本の杭形状; 直径 1.5 m, 長さ 20.0 m, 杭間隔 4.0 m)で支持され、杭先端は N 値 50 以上の支持層に根入れされているものを考える。

対象地盤-杭基礎-鉄塔部の想定値を表-1 に示し、実物全体系に相似則(後述の表-2)を適用して、縮尺を 1/100 とした模型を、2 次元 FEM を用いた力学モデルで表わし、図-1 に示す。また、本実験に用いた鉄塔-

* 正会員 (株)奥村組技術研究所主任研究員(構造計画研究室)

** 正会員 (株)奥村組技術研究所次長(応用研究グループ)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

表-1 実物想定値と模型目標値

	単位	想定値	模型目標値
地盤部			
配合			原料ポリエチレン (PE-4) 1N: 95cm ³
堆積層厚	m	20.0	0.2
密度	g/cm ³	1.7	0.88
ポアソン比		0.45	0.45
横波速度	m/s	320.0	32.0
剛性率	MPa	174.1	0.9
ヤング率	MPa	504.8	2.6
固有振動数	Hz	4.0	40.0
減衰定数	%	2~5	2~5
鉄塔部			
高さ	m	66.0	0.66
密度	g/cm ³	7.85	2.3
周期(下端固定)	s	0.48	0.048
振動数	Hz	2.1	21.0
減衰定数	%	1~3	1~3
ヤング率	MPa	2.1×10 ⁹	602.9
ポアソン比		0.28	0.28
杭・基礎部			
長さ	m	20	0.2
密度	g/cm ³	2.4	2.0
フーチング寸法	m	7(縦), 7(横), 2(高)	0.07, 0.07, 0.02
杭断面2次モーメント	cm ⁴	2.48×10 ⁷	0.248
ヤング率	MPa	2.9×10 ⁴	245.0
減衰定数	%	3~5	3~5
ポアソン比		0.17	0.17

1 MPa=10.2 kgf/cm²

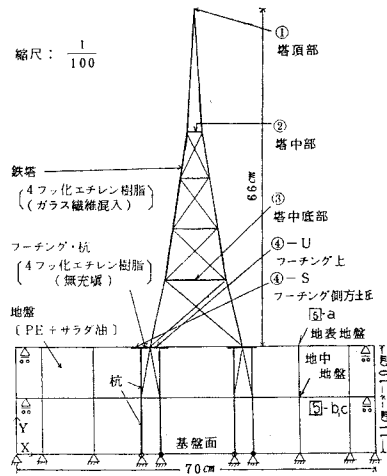


図-1 模型鉄塔

(iii) 全体系において、地盤の軟化現象が杭基礎と鉄塔の連成振動に与える影響について、杭基礎と鉄塔の連成振動特性と応答変位モードとを対照することにより明らかにする。

(iv) 全体系(地盤-杭基礎-鉄塔全体系)と単一合成系(地盤単一系と鉄塔単一系を別々に求めて合成した系)の共振時の変位モードとを比較することにより、耐震設計の資料を求める。

杭基礎3次元模型を写真-1に示す。

(1) 実験の目的

模型実験による本研究の目的を次に示す。

(i) 軟化を考慮できる人工模型材料を使用した模型地盤^{(16)~(18)}が次に示す諸非線形動特性を、一般的知見と矛盾なく発現し得るか否かを確認する。

- i. 地盤の共振曲線に現われる軟化特性
- ii. 地盤の剛性率(G_e)と減衰定数(h_e)のせん断ひずみ(τ)に依存する性質
- iii. 全体系における入力強度に依存する応答特性(共振振動数; f_n , 応答倍率; M , 減衰定数; h_e)
- iv. 全体系における連成振動特性(後述 4. (2) b)で説明)

(ii) 全体系において、地盤の軟化現象が杭基礎と地盤の相互作用に与える影響について、杭基礎と地盤との共振振動数を比較し、杭基礎側面の土圧(P)と入力加速度(a_i)の関係を検討することにより明らかにする。

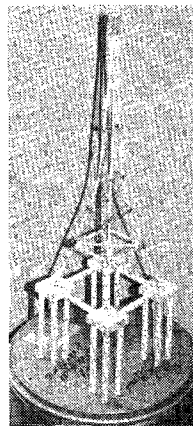


写真-1 鉄塔杭基礎模型 (地中よりは実験時取り除く)

(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)を、原料ポリエチレン[粉末材 100 gf [約 1N]]と粘性の小さなサラダ油(95cm³)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)の中に造り、ほぼせん断振動をすることを予備実験と解析で確かめた⁽¹⁷⁾。

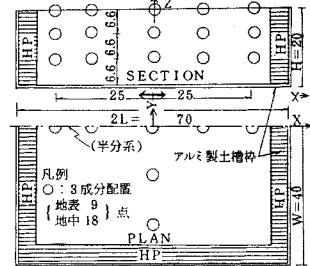


図-2 模型地盤

鉄塔-杭基礎模型(写真-1, 図-1)を、それぞれ無充填のエチレン樹脂、ガラス繊維混入の四フッ化エチレン樹脂で作製した。それぞれ鉄塔と杭基礎の剛性については、模型と実物において、1次固有振動数と曲げ剛性を相似させた。鉄塔のモデル化において、電線の効果を無視したのは、耐震上、線路直角方向がクリティカルであるとして電線を付加質量とし得るので、基本的な動特性に影響を及ぼさないことなどによっている。

表-2 相似則と相似比

量	相似則	相似比
長さ	l_m/l_p	1/100
変位	l_m/l_p	10^{-2}
体積	$(l_m/l_p)^3$	10^{-6}
密度	ρ_m/ρ_p	1/1.93
単位体積重量	$(\rho_m/\rho_p)(g_m/g_p)$	1/1.93
質量	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)^3$	$1/(1.93 \times 10^6)$
時間	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	10^{-1}
固有周期	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{-1/2}$	10^{-1}
振動数	$(l_m/l_p)^{-1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	10
速度	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	10^{-1}
弾性係数	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p) \times (\varepsilon_m/\varepsilon_p)^{-1}(\nu_m/\nu_p)$	1/193
応力	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	1/193
断面2次モーメント	$(l_m/l_p)^4$	10^{-8}
ひずみ	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$	1
ポアソン比	ν_m/ν_p	1
減衰定数	h_m/h_p	1
加速度	α_m/α_p	1

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¹⁸⁾が等しいとして求めている。

本実験では、模型と実物について G_e , h_e のひずみ r に依存する性質、横波速度 (V_s) および密度 (ρ) を近似させ、同一重力場で実験を行うので、 r , 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。

(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。振動台は小型模型に適した動電型を使用し、ピックアップ等は特に軽量小型な測定器を選定した。

測定位置は図-1に示すように、鉄塔頂部①、塔中部②、塔中底部③、杭頭フーチング上④-Up、フーチング側面④-Side、地盤地表⑤-aおよび地盤地中⑤-b, ⑤-cである。

入力波形は地盤が軟化しやすい材料のため、周期的スイープ波動(3~60 Hz, 12秒, 入力振幅一定)を使用した。スイープ波動を加速度振幅で与え、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¹⁹⁾。

また、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、加振方向は水平方向(X)(図-2)とした。

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。同図に示した黒丸印は後述の実験(図-4)の加振加速度(A, B, C, D, E, F)に相当する値であり、砂質土、粘性土の試験結果²⁰⁾を併記した。微小ひずみ領域における G_e については、衝撃的加速度正弦半波を入力して V_s を求め、 $G_e = \rho \cdot V_s^2$ を用いて算出し、 r については $r = V_D /$

表-3 振動台と測定機器仕様一覧

(a) 振動台仕様		水 平
振動方向		水 平
可動部重量		40 kgf
最 大	加振力	190 kgf
	全振幅	40 mm
	速度	40 cm/s
	加速度	4 655 cm/s ²
搭載重量		300 kgf
使用周波数		1~100 Hz
波形精度		5% 以下
テーブル寸法		700 mm × 800 mm
台支持方式		油 圧
1 kgf = 9.807 N		
1 kgf/cm ² = 98 kPa		
(b) 加速度計仕様		
振動数	低域用 (VM4112)	
周波数	1~200 Hz	
加速度	30~29 000 cm/s ²	
検出器	VP-4132	
感度	50 mV	
寸法	5 mm × 5 mm × 11.5 mm	
重量	1 gf	
共振周波数	1.5~2.5 kHz	
(c) 土圧計仕様		
高感度圧力センサ	(PSL 200 GA)	
容 量	0.2 kgf/cm ²	
出力電圧感度	0.5 mV/V	
寸法(直径×厚さ)	3 mm × 1 mm	

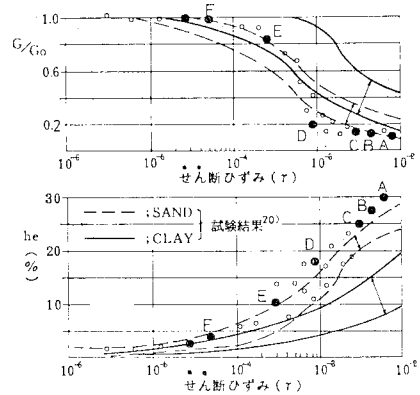


図-3 G_e , h_e の r 依存性

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、ほぼ一致した復元力を用いる}の割線勾配より G_e を求め、 r を地層厚平均せん断ひずみとし、 $r = x/L$ (x : 応答変位, L : 模型のセンサー間の地層厚)を用いて求めた¹⁸⁾。

表-4 減衰定数 (h_e) とひずみレベル

減衰定数 (%)	微小ひずみ	中ひずみ	大ひずみ
	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
① 自由振動	2~3	3~6	10~19
② 波動伝播	1~2	3~5	—
③ 復元力特性曲線	—	5~7	19~21
④ or ④' 共振曲線	—	12~14	13~15

④' は参考文献 22) 参照

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²¹⁾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。

本研究の実験種類は、単一系の地盤、鉄塔、および地盤-杭基礎-鉄塔全体系の3種類とし、それぞれの種類について2次元 FEM を用いたモード解析と、 G_e , h_e のひずみ依存性を考慮した等価線形解析を行い、後述図-6, 8の実験結果に併記した。

3. 実験結果

(1) 単一系

a) 地盤

水平加振によって生じる地盤中央付近 [5] の水平および上下応答値から求めた共振曲線を図-4 (a), (b) に示す。同図より、共振曲線の形状は、いずれも単峰型を示す。水平動では50~80ガル入力時、軟化が激しいが、上下動による軟化は水平時に比べきわめて少なく、上下動の水平動に対する共振振動数の比は、1.7 (入力小)~11.0 (入力大) 倍と大きくなる。入力117.6, 176.0ガル時のせん断応力とひずみに関する復元力特性 (深さ方向測点 ④, ⑥, ⑧, ⑩間の平均ひずみとせん断応力の関係) を図-5に示す。同図より、入力強度が小さいとき、

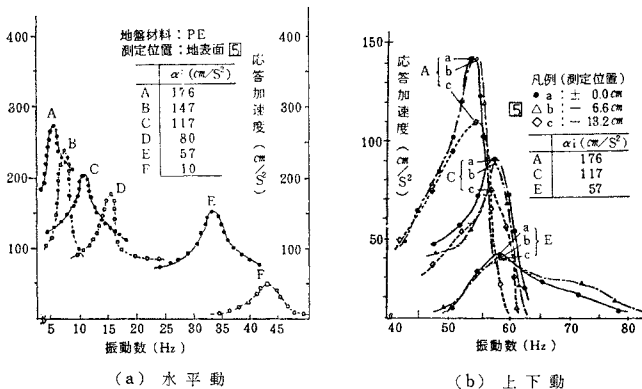


図-4 地盤の共振曲線

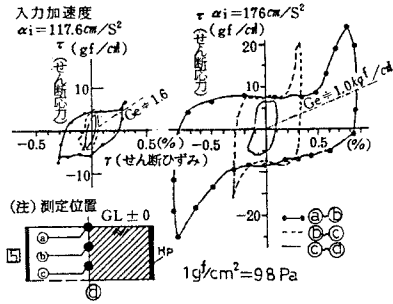


図-5 地盤の復元力特性

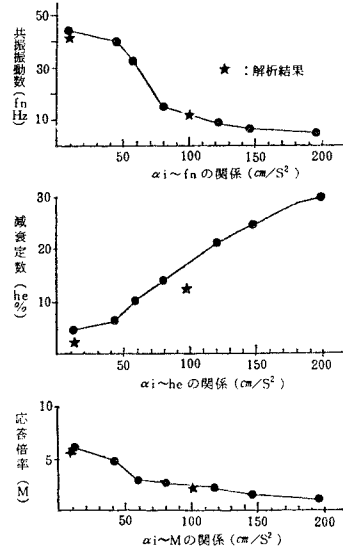


図-6 入力 (α_i) と応答 (f_n, h_e, M) の関係 (地盤)

また、底部では履歴曲線が紡錘型を示す。入力強度が大きくなると崩壊型に移行し、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り²³⁾、測点位置とひずみレベルとにより、復元力曲線の形状が異なり、履歴減衰が大きくなるのがわかる。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-6に示す。

共振時の変位モードに関して、地表と地中の測点が同位相で振動し、せん断型の1次振動に類似した振動を示すことを確かめている¹⁷⁾。

b) 鉄塔

塔頂部 ①における水平応答の共振曲線 (1次, 2次) を図-7に示す。同図より、入力を大きくしても、共振振動数 f_n は変化しないのがわかる。 f_n, h_e, M と α_i の関係を図-8に示す。同図より、 h_e がわずかに

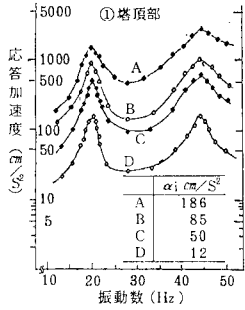


図-7 鉄塔の共振曲線（水平動）

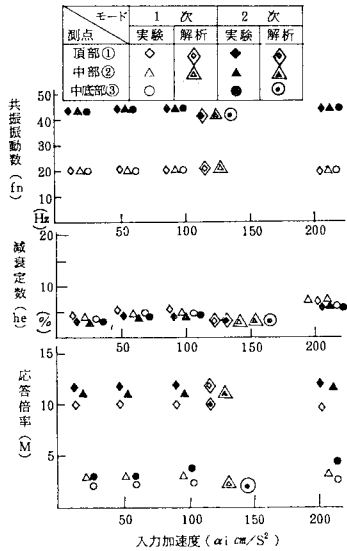


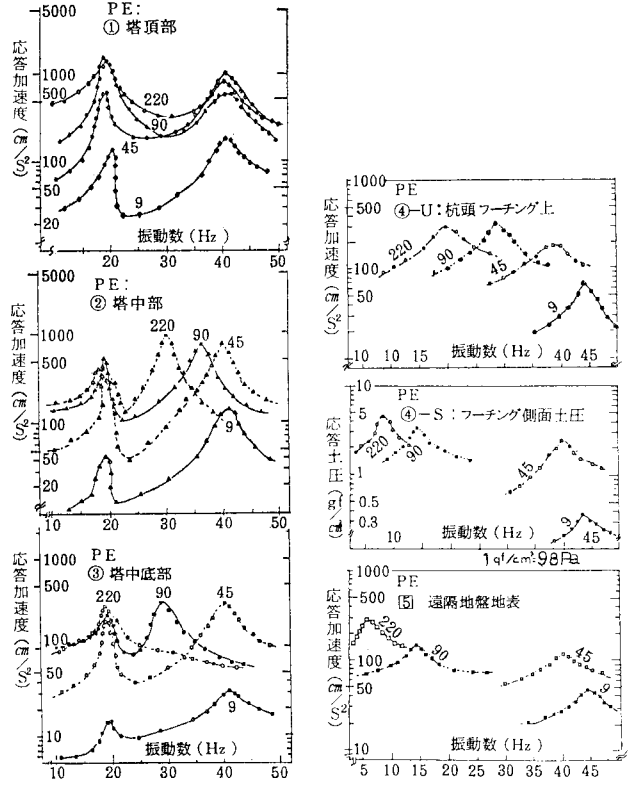
図-8 入力 (α_i) と応答 (f_n, h_e, M) の関係（鉄塔）

入力強度依存性を示すことが認められる。単一系鉄塔変位モードに関して、1次、2次のモードはそれぞれ①②③が同位相、①と②③が逆位相となり、入力強度 α_i が増加すると、変位が α_i に比例して大きくなることを確かめている¹⁷⁾。

(2) 全体系

各測点①～⑤における水平加振時の共振曲線を図-9 (a), (b) に示す。測点④-Sはフーチング側面に生ずる土圧 P を表わす。測点⑤は単一系地盤の測点と同じ位置で、外側杭から約10cm (実物で10m) 離れた地表の応答を示す。各測点の f_n, h_e と α_i, M, P と α_i の関係を図-10, 11 に示す。同図より、各応答特性 f_n, h_e, M, P について、各測点で入力増加に伴う地盤軟化による非線形連成振動の影響による関係が生じていることがわかる。

次に、共振振動数の比 f/f_g (入力調和振動数 f と地盤の共振振動数 f_g の比) と周辺地盤の G_e, h_e の関



(a) 全体系の鉄塔部 (b) 全体系の地盤 杭基礎部

図-9 共振曲線

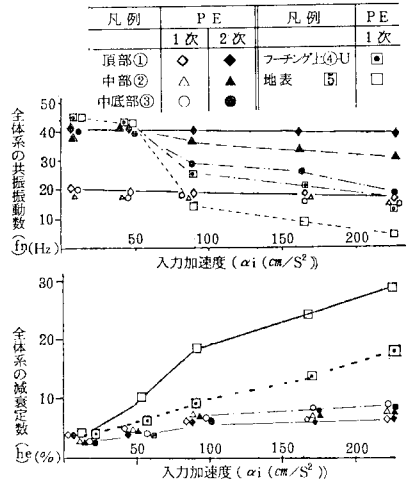


図-10 入力 (α_i) と応答 (f_n, h_e) の関係（全体系）

係を図-12 に示す。同図の入力調和振動数 f をスイープ波動入力による杭基礎の共振振動数 f_f に等しいとして求めた。それは、スイープ加振方式による共振点近傍の応答波形は、調和波動入力時における応答波形と近似することによる。同図より、地中に根入れされた構造物の複素剛性¹⁾⁻³⁾の傾向と近似していることがわかる。

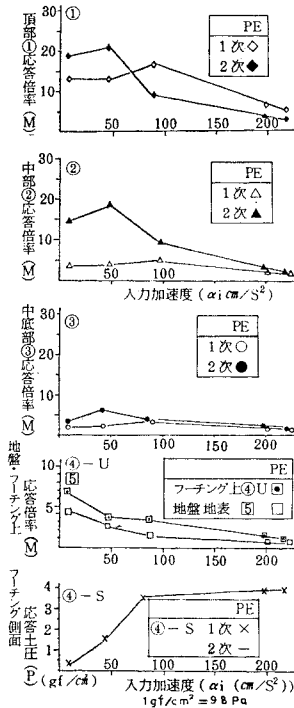


図-11 入力(α_i)と応答(M, P)の関係(全体系)

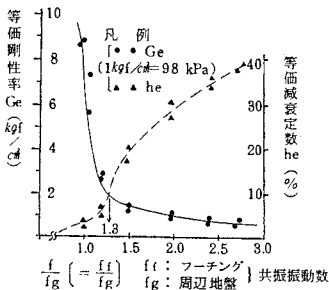


図-12 Ge, he と f/f₀ の関係(杭頭)

対し、各共振振動数の大小関係は、 $f_1 < f_2 < f_f = f_g$, $f_1 < f_2 = f_f = f_g$, $f_1 = f_g < f_f < f_2$, $f_g < f_1 < f_f < f_2$ および $f_g < f_1 = f_f < f_2$ となり、 f_1 に対し各部の共振振動数が変化する状態がわかる。

4. 考 察

(1) 単 一 系

a) 地 盤

地盤モデルの再現性と動特性について、次のように考察する。Ge と he のひずみ依存性は、実土質と模型実験材料についての比較を図-3で行った結果、模型材料は砂質土曲線と近似していることがわかる。fn, he, M の

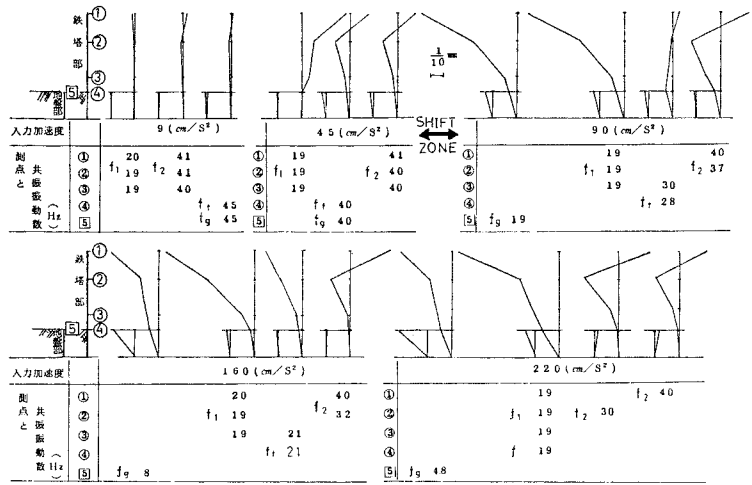


図-13 全体系変位モード(地盤-杭基礎-鉄塔全体系)

各測点の共振時の応答変位モードを、各入力加速度ごとに示し、左側に地盤のみ、右側に杭基礎-鉄塔の連成系について

図-13 に示す。同図の下に示した f₁, f₂ と f_f, f_g は鉄塔部の1,2次と杭基礎部、地盤部との共振振動数を表わしている。同図より入力強度が9, 45, 90, 160 および 220ガルに

入力強度依存性については図-6において、実験と予備解析結果⁴⁾を比較した結果、両者が近似することがわかる。同図は、入力が200ガル近傍で、fn が1/8に低下し、he は30%を越え、M は約1倍に低下することなどを示し、fn, he, M のいずれの応答特性も入力強度依存性が認められる。

土構造物あるいは地盤の実測や実験結果にも、同様の傾向がみられ^{12), 24)}、以上より人工模型地盤は実地盤の動特性をほぼ忠実にモデル化しているものと考えられる。

b) 鉄 塔

鉄塔モデルの再現性と動特性について次のように考察する。fn の入力強度依存性について、1次と2次の共振振動数は図-7, 8より20Hz, 44Hzであり、入力強度依存性はほとんど現われず、予備解析結果⁴⁾とも一致する。図-8に示したheは入力の増加により、数%から8%に増加するが、実測結果でも、減衰定数が10%を越えて入力依存性を示す結果²⁵⁾がある。また、同図のM(解析結果も含める)の値は、塔頂部④で10~13倍、塔中底部③で2~4倍を示し、各部の1次と2次の応答倍率を比べると、同じかまたは2次の方が少し大きいようである。

起振機を用いた実物実験や常時微動測定結果など^{13)~15)}も類似の傾向を示し、鉄塔モデルは実鉄塔の動特性をほぼ再現しているものと考えてよい。

(2) 全体系

全体系の動的相互作用に関して、地盤-杭基礎の相互作用に関する問題と杭基礎と鉄塔とに関する問題(地盤を杭基礎に含む)とがある。

前者については、弾性波動論による複素剛性^{1)~3)}における剛性低下を地盤の質量効果で、減衰効果を地盤中の

波動エネルギー逸散で説明し得る。しかし、地盤の非線形挙動まで、この理論を拡張することができない。

後者については、離散系モデルで求める場合、非比例減衰のため、モード解析法は有効でなく、複素固有値解析法が提案されている²⁰⁾。しかし、現状では、実鉄塔の振動試験結果の解析に適用されるに至っていない。

これらの問題について、本実験結果と解析解の特徴の類似性および相違点について次のように考察することができる。

a) 杭と地盤の相互作用

図-10~12より、次のことが明らかにされる。

(i) 入力加速度振幅 65ガル付近 (50~80ガル) は、地盤の急激な軟化により、杭基礎の共振振動数の低下、杭基礎と地盤間の応答土圧の増加、減衰定数の増加が生じ、相互作用特性の遷移領域である。

(ii) 入力強度 65ガル以下の領域では、地盤の軟化、応答土圧の発生は少なく、杭基礎の減衰定数は 4~5%と小さい。この場合、杭と地盤はほぼ同位相で振動し、地盤と杭基礎の共振振動数はほぼ等しく、杭の剛性で地盤を補強する効果は少ない。

(iii) 入力強度 65ガル以上の領域では、地盤の軟化、応答土圧の発生が大きく、地盤、杭基礎の減衰定数はそれぞれ 10~30%、5~20%に急増する。この場合、杭と地盤は位相差を生じ、杭基礎の共振振動数はかなり低下するが、剛性は杭基礎の方が地盤より大きいので、杭基礎の共振振動数は地盤の共振振動数より大きく、杭の補剛効果が大きく作用する領域である。これらの結果は剛な円柱が一様な表層地盤中に根入れされた構造物の複素剛性の実部と虚部の関係¹⁾において、 $f/f_g=1$ の近傍が、図-12より求めた遷移領域に対応するという考え方をよく説明している。

b) 鉄塔と杭基礎の非線形連成振動

全体系各部の共振曲線を求めた図-9(a),(b)より、共振曲線の形状は、周辺地盤 [5] で単峰型となり、杭基礎 ④-U と塔中底部 ③ では入力増加に対し、連峰型から単峰型に重合し、塔頂部 ①、塔中部 ② では 1, 2 次の連峰型となる。同図と図-10, 11より、塔中部 ② 以低の 2 次振動数は入力増加とともに低下し、地盤の軟化の影響による振動エネルギーが周辺地盤→杭基礎→塔中部へと伝達される状態がわかる。なお、杭基礎から離れた地表地盤 [5] の応答特性と入力強度の関係は、単一系地盤のそれ(図-6)とほぼ一致し、鉄塔応答の影響が [5] の位置(杭長の 1/2 程度)で遠へ及ばないことを示している。

また、塔頂部 ① は入力が増加しても、共振振動数が変化しないことがわかり、これは鉄塔のような柔構造物の応答特性の特徴といえよう。

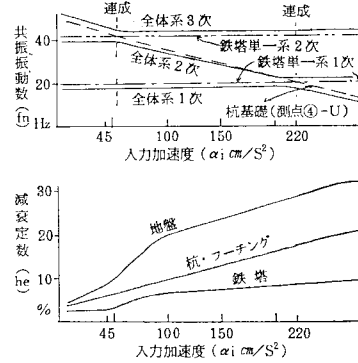


図-14 連成振動特性(模式化)

次に、a) で求めた遷移領域以上では、地盤と杭基礎が位相差を生じるため、入力強度の増加に対して、地盤の共振振動数 f_g が杭基礎の f_f を低下させることがわかる。杭基礎と鉄塔の連成振動は杭基礎の共振振動数 f_f が低下して、鉄塔部における 1, 2 次の共振振動数 f_1, f_2 に接近した結果生じるものと考えられる。したがって、図-8, 10の実験結果を模式化して図-14を求めた。すなわち、同図の $f_n-\alpha_i$ の関係については、単一系鉄塔の 1, 2 次(図-8)を 1 点鎖線, 2 点鎖線で、杭基礎の結果¹⁹⁾を点線で示した。全体系の実験結果(図-10)から、3 本の実線で、全体系 1, 2, 3 次の振動を示した。

連成振動特性図(図-14)より、全体系 1, 2, 3 次の共振振動数は、それぞれ鉄塔単一系 1 次, 杭基礎, 鉄塔単一系 2 次を主体とする共振振動数成分から表わされ、連成点が 2 か所求められることが

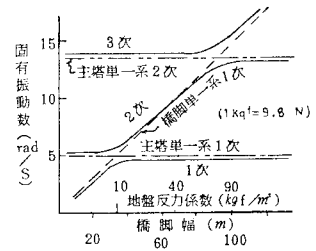


図-15 地盤反力係数(橋脚幅)と振動数の関係

わかる。図-14 は、長大吊橋主塔と橋脚の連成振動特性を示した図-15²⁶⁾と類似のものと考えてよい。図-13, 14を比較して、次のことが明らかにされる。

(i) 図-13より、入力強度が 45ガル時に、40Hz 近傍で地盤と杭基礎部の変位モードが同位相で接近する。これに、鉄塔 2 次モードが接近し、杭基礎-鉄塔間に連成振動が生じる。図-14において、同現象を全体系 2, 3 次の連成振動であるといえる。

(ii) 入力強度が 90ガル時に、19Hz 近傍で地盤と鉄塔部 1 次の変位モードが接近し、地盤と鉄塔が大きく振動する。この際、杭基礎部もそれに引きずられて振動する。また、杭基礎の共振振動数 f_f は 28Hz 付近にあるので、図-14には、連成点として現われてこない。

(iii) 入力強度 220ガル時に、19Hz 近傍で鉄塔部

1次と杭基礎の変位モードが接近し、杭基礎-鉄塔間に連成振動が生じる。図-14において、同現象を全体系1, 2次の連成振動であるといえる。また、鉄塔上部が30から40 Hz時に、2次振動モードで大きく振動するが、地盤の位相が杭基礎部に対し逆位相になるので、この際、杭基礎部の振動は小さい。

(iv) 入力強度90ガルと220ガル時において、塔頂部①の変位を比較すると、両者の変位はほとんど差がないが、加速度応答倍率 M は、90ガル時の方が大きい(図-11)。これは、90から220ガルへと、入力の増加に伴い、地盤軟化により、内部履歴減衰、逸散減衰などを含んだ地盤部の減衰定数が約20%から30%(杭頭部で約10%から20%)に増大したためである(図-14)。

次に、耐震性の観点から、杭基礎(または地盤)と鉄塔が連成しないような配慮が必要である。そのために、設計外力と鉄塔構造が与えられると、適当な杭基礎を選択して、図-14に示した連成点を移動させる必要がある。

また、耐震設計において、簡便であるため用いられている分割型設計法(単独の地盤-杭基礎部で求めた応答値を、下端固定の単独鉄塔に入力して設計する方法)と連成系設計法とを比較した。すなわち、図-13に示した全体系変位モードと単一系の地盤部、鉄塔部とで求めた変位モードを合成した単一系合成モードを比較した。その結果、変位は全体系に比べ、単一系合成の方が大きくなり、特に設計外力の大きい(200ガル以上)ときは、非線形連成振動の影響を省くわけにはいかない。したがって、全体系で耐震設計を行う方がより経済的となる。

5. まとめ

本研究で得られた非線形連成振動に関する成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 人工地盤模型で所定の軟化特性(入力強度、ひずみ、加振振動数などに依存する性質)を表現できた。

(2) 地盤と杭の相互作用に関して、入力加速度振幅65ガル付近(50~80ガル)で、地盤軟化による応答特性の遷移領域が存在する。

(3) 地震力の増大による地盤軟化に伴い、杭基礎の共振点は低振動数側へ移行するが、鉄塔上部の共振点は低下せず、地盤軟化が鉄塔上部の共振点の移行に与える影響は少ない。このことから、鉄塔のような柔構造物は剛体構造物のように、地盤軟化による減衰効果によって生ずる応答倍率の低下は期待できない。

(4) 遷移領域(50~80ガル付近)以下の微小入力時においては、杭基礎と地盤が同じ振動挙動をし、45ガル

近傍で全体系2次と3次の連成が起こる。遷移領域以上の非線形領域では、地盤と杭基礎は別々の振動挙動を示し、90ガル近傍で地盤と鉄塔の振動モードが接近し、220ガル近傍で杭基礎と鉄塔の振動モードが接近するため、鉄塔が大きく揺れる。入力が220ガル時は、90ガル時に比べて、杭基礎部の減衰定数が約10%から20%に増加するので、鉄塔頂部の加速度応答倍率は90ガル時に最大値(約17倍)を示す。

(5) 杭基礎の適切な剛性を選び、連成振動特性を調節することにより、より経済的なアプローチが可能となる。

6. あとがき

地盤と杭基礎の相互作用および杭基礎と鉄塔の連成振動に関する以上の実験結果の特徴から、解析ならびに設計上、重要な結果が得られた。

耐震設計については、入力加速度200ガル以上では、全体系解析による経済性への追求、さらに設計地震動周期特性による共振性に注目して設計する必要がある。

本研究の入力波形は、共振実験における地盤軟化の影響に注目して、スweep波形を使用したもので、実際の不規則な地震波動入力による応答は、このスweep加振方式による応答値よりかなり小さくなる。

他の土構造物の模型破壊実験²⁷⁾およびFEM解析²⁸⁾による結果から、不規則性による応答の低下率(エル・セントロNSの応答/スweepによる応答)は0.5程度となる。この低下を定常加振による正弦波の波数に換算すると1.5波入力されたときの応答値に等しくなり、通常機器の設計に使用される正弦波波数3波による入力では、かなり過大な応答値となる結果が予想される。

本実験は、小型人工模型による小型振動台を使用したもので、短期間に実験回数を数多く実施することができた。

謝辞：本実験は関西大学工業技術研究所の振動台を借用して実施した。実験を始めるにあたり建築学科浅野幸一郎助教授からは貴重なご示唆をいただいた。また、京都大学工学部耐震工学研究室の家村浩和助教授、山口大学の古川浩平助教授からご助言をいただいた。

ここに記して、以上の方々に深謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Tajimi, H.: Dynamic analysis of a structure embedded in an elastic stratum, Proc. of the 4th World Conf. on Earthq. Eng. Vol. III. A-6 pp. 54~69, 1969.
- 2) Novak, M. and T. Nogami: Soil-pile interaction in horizontal vibration, EESD, Vol. 5, pp. 263~281, 1977.
- 3) 土岐憲三: 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A, pp. 1~24, 1978-4.

- 4) 吉川正昭：鉄塔-杭基礎連成系の動的解析 (FEM による), (株) 奥村組技術研究所報告, 1981-11.
- 5) 吉川正昭ほか：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, 1978-5.
- 6) 田治見宏ほか：3 次元薄層要素による建物-地盤系の動的解析, 日本建築学会論文報告集, 第 243 号, pp. 41~51, 1976-5.
- 7) 水野二十一：建物-杭基礎-地盤系模型振動実験, 土と基礎, Vol. 28, No. 5, pp. 47~54, 1980.
- 8) 藤波健剛ほか：大型送電用鉄塔基礎の模型振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 893~894, 1981-9.
- 9) 山田善一・吉川浩平・河野健二：基礎と高橋脚橋の相互作用, 第 14 回地震工学研究発表会講演概要, pp. 133~135, 1976-7.
- 10) 樋口康三：下部構造-地盤系の模型振動実験, 橋梁と基礎, pp. 8~14, 1978-7.
- 11) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第 275 号, pp. 69~77, 1978-7.
- 12) 国生剛治ほか：軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析, 土木学会論文報告集, 第 285 号, pp. 57~67, 1979-5.
- 13) 前野陽治ほか：試験線鉄塔の架線前動的挙動, 電力中央研究所土木研究資料, pp. 93~94, 1980-11.
- 14) 花田和史ほか：赤城 UHV 試験線の基礎挙動, 電力中央研究所土木研究資料, pp. 95~96, 1980-11.
- 15) 小坪清真ほか：送電鉄塔の振動特性に及ぼす送電線の影響について, 土木学会, 第 32 回年次学術講演会講演概要集 (第 1 部), pp. 330~331, 1977-10.
- 16) 吉川正昭ほか：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, 1981-5.
- 17) 吉川正昭ほか：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, pp. 1769~1772, 1982-6.
- 18) 吉川正昭ほか：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. 117~132, 1980-8.
- 19) 吉川正昭ほか：杭基礎-地盤の非線形動的相互作用に関する実験的研究, 土質工学論文報告集 (投稿中)
- 20) 石原研而：土質動力学, 鹿島出版会, pp. 197~199, 1976.
- 21) 工藤一嘉：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), 地震探査実験, pp. 177~182, 1976.
- 22) 政尾 亨ほか：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, 1978-11.
- 23) 片田敏行ほか：液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 306 号, pp. 1~10, 1978-2.
- 24) 黒岩真彦：人工骨材を使用したロックフィルダム模型の相似性確認振動実験, 土と基礎, Vol. 26, No. 5, pp. 3~9, 1978-5.
- 25) Yamada, Y.: Studies on vibration damping of steel structures, Symposium on Resistance and ultimate deformability of structures acted on by well defined repeated loads, IABSE, pp. 101~106, 1973.
- 26) 山田善一ほか：長大つり橋主塔橋脚の振動特性と地震応答解析に関する諸考察, 土木学会論文報告集, 第 207 号, pp. 1~12, 1972-11.
- 27) 黒岩真彦ほか：ロックフィルダムの模型振動実験による安全性の検討, 関西電力総研資料, No. 77-072.
- 28) 渡辺啓行ほか：フィル・ダムの模型の共振実験からみた震動挙動, 電力中央研究所報告, p. 13, 1974-11.