

# W. F. ギイの振動特性について

中 川 恭 次      安 井      讓  
渡 辺 清 治      金 子 正 孝  
藤 谷 芳 男

(本社建築本部設計第三部)

## Dynamic Properties of W.F. Pile

Kyoji Nakagawa      Yuzuru Yasui  
Seiji Watanabe      Masataka Kaneko  
Yoshio Fujitani

### Abstract

In order to obtain information about the interaction between cast-in-situ underground walls built by the OWS-SOLETANCHE METHOD (hereinafter called W.F. pile) and ground, the authors conducted tests on footings with W.F. piles. These tests consisted of free vibration tests and forced vibration tests. Experimental results were obtained on natural frequencies, damping coefficients, vibrational modes of W.F. piles and earth pressure modes. One of the interesting phenomena is the apparent difference in dynamic properties between in-plane of the W.F. pile and out-of-plane. The authors analyzed an interaction model using interaction springs corresponding to dynamical Mindlin's solutions and springs derived by integrating those solutions. It was found that calculated results show good correlation with observed test results in terms of trends.

### 概 要

本報告は OWS-SOLETANCHE 工法で施工した場所打ち鉄筋コンクリートギイと地盤との相互作用に関する資料を得る目的で行なった振動実験結果とその解析結果について述べたものである。実験は自由振動実験と起振機実験からなっている。これらの実験から地中壁と地盤の連成系の固有振動数、減衰定数、共振時の壁体の振動モード、土圧モードを求めた。固有振動数と減衰定数については地中壁の面外方向と面内方向ではきわだった違いが見られた。解析は動的な Mindlin 解に相当するものとそれを積分して求めた面加振解から定めた地中壁と地盤との相互作用ばねを用いた連成モデルによって行なった。解析の結果、実験に現われた特性を良く再現でき、その解析手法の妥当性が確認できた。

## 1. 序

WALL FOUNDATION ギイ (OWS-SOLETANCHE 工法で施工した場所打ち鉄筋コンクリートギイ、以下 W. F. ギイと呼ぶ) と地盤との相互作用を考慮した連成系モデルを作成する際の検討用資料を得ることを目的として、自由振動試験および起振機実験を行なった。本報告ではこれらの実験結果の特徴を述べるとともに、現在当社で開発途上にある解析手法を用いて実験結果を解析することによってその妥当性を検討することとする。

## 2. W. F. ギイおよび地盤の概要

図-1 に W. F. ギイの配置を示した。A ギイ、B ギイとも断面形状は幅 600mm、長さ 2,200mm の小判型で、クイ頭部にフーチング基礎 (2,200×3,000×1,500mm) を有している。試験条件を単純にするた

めに、フーチング基礎底面と地表面との間に 15cm の間隙を設け、基礎底面のまさつの影響を除去した。埋め込み長さは、A ギイが 21.5m、B ギイが 14m である。W. F. ギイには後に述べる加速度計と土圧計を埋設した。

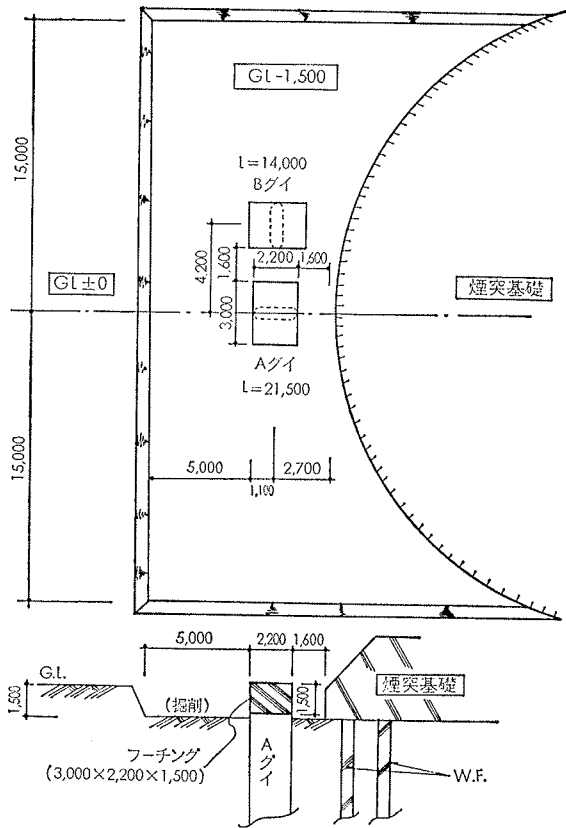
試験地点付近の地盤断面構成を図-2 に示した。本地盤の地下水位は G. L. -3.5m ~ -6m であった。本地盤の弾性波速度の詳細については文献 1) を参照されたい。なお、試験はこの地盤の上部 1.5m を図-1 に示す範囲にわたって掘削した状態で行なった。

## 3. 実験方法

### 3.1. 実験概要

A, B 両ギイについて実験を行なった。また各々のクイについて面内方向と面外方向について実施した。

自由振動実験は次の要領で行なった。即ち、長さ約 2m の 5 寸角の棒を用いて、フーチング基礎に衝撃を与



図一1 W. F. ギイの配置図

えその衝撃によって生じる自由振動波形を、基礎上に設置した水平加速度計により検出し、データ・レコーダとビジグラフに記録した。

起振機実験は、起振機をフーチング基礎先端に据え付け、次の要領で行なった。起振機は起振能力が異なる中型起振機と大型起振機の2台を用いた。偏心モーメントは前者については 32 kg・cm、後者については 200 kg・cm と 400 kg・cm の2種類を用いた。測定の記録は各起振振動数毎に行なった。なお、起振機の重量は中型起振機で 0.6ton、大型起振機で約 2ton である。

### 3.2. 計測器とその配置

起振機実験における測定項目は次の様である。A ギイについてはW. F. 壁体の振動モードをみるための水平加速度および土圧、更に基礎のロッキングモードをみるための上下および水平の加速度である。B ギイについては、基礎のロッキングモードをみるための水平および上下加速度と、W. F. 尖端の上下方向加速度である。図一3に測点と測点 No. を示した。測点 No. の頭文字Aは加速度を、Eは土圧を示す。測点 No. 末尾のXは面内方向を、Yは面外方向を、Vは鉛直方向を示す。図一3には起振機の力の正の方向と、加速度計の正方向も示してある。

柱状図	地質名	層番号	層厚 H (m)	土質密度 ρ (g/cm <sup>3</sup> )	S波速度 Vs (m/sec)	P波速度 Vp (m/sec)	Vp/Vs	ポアソン比 ν
0m	砂質土	第1層	4.4	(1.73)	176	455	2.585	0.412
2.10 2.70	砂質土							
4.40	粘柱土	第2層	7.1	1.635	143	1,330	9.301	0.494
10	(粘柱土)							
11.50	風化岩	第3層	12.5	(2.10)	365	3,544	0.459	
20		(風化岩)						
30	第4層	11.0	(2.10)	556	1,300	3.237	0.447	
	(風化岩)							

図一2 地盤構成図

## 4. 実験結果とその考察

### 4.1. データ処理方法

起振機実験記録は当技術研究所振動研究室で開発したデータ処理システムにより一貫処理した。即ち、データ・レコーダに収録された電気アナログ量は、D. C. アンプ、マルチスキャナー、A-D コンバーターを通して数値化し、起振力と同期した基準信号と、ピックアップで測定した信号との相互相関々数を計算して、振巾と位相差を求める。なお、自由振動実験に対しては波の手読みで処理した。

### 4.2. 自由振動実験結果

自由振動波形から求めた固有振動数と減衰定数を表一1に示した。この表から、面内方向の方が面外方向に比べて、減衰定数、固有振動数とも大きいことがわかる。なお、Bギイの値は、図一1のクイの配置から考えて煙突基礎による波の反射の影響を受けることが予想される。従って、Bギイに関する実験結果を考察する際にはこのことを考慮しておく必要がある。

	A. ギイ		B. ギイ	
	面内	面外	面内	面外
固有振動数(Hz)	13	10.8	16.1	11.2
減衰定数(%)	13~15	8~9	12.3	6~9

表一1 自由振動実験結果

### 4.3. 共振曲線

図一4と図一5に、例として、A. ギイの基礎尖端の

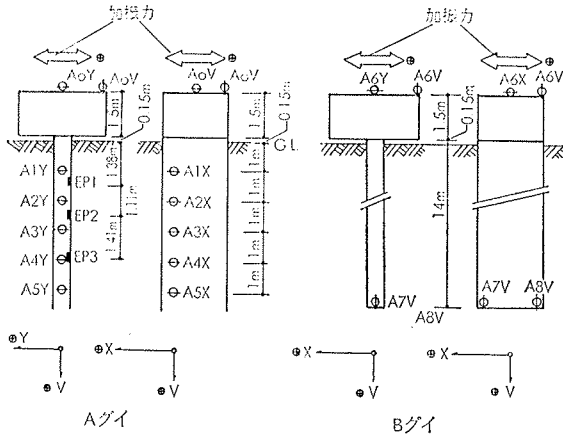


図-3 測点と測点 No.

水平加速度の共振曲線を示した。図-4 が面内加振の場合であり、図-5 が面外加振の場合である。Bグイについても同様の傾向を有する共振曲線を得ている。これらの図を見ると偏心モーメントが増すにつれて共振々動数が小さくなっており、地盤の非線型性の影響がうかがわれる。また面内加振の場合と面外加振の場合とでは共振曲線の形に大きな違いが見られる。図-6 には土圧の共振曲線の例を示した。偏心モーメント  $32\text{kg}\cdot\text{cm}$  の場合である。

4.4. 振動モード

振動モード図は、基礎天端の加速度の起振力に対する位相差が  $-90^\circ$  になる振動数において作成した。図-7, 8 に壁体の振動モード図の1例を、図-9 に土圧のモード図を示した。これらの図の右側は振幅の最大値を示し、左側の図は、加振力に対する位相差を示す。壁体のモードは測点が深くなるにつれて、基礎天端との位相差が大きくなる様子を呈している。図-9 の土圧のモードについて言えば、EP1 が EP2, 3 に対して逆相であることに特色がある。

4.5. 減衰定数

方向	偏心モーメント (kg-cm)	共振々動数 (Hz)	減衰定数 (%)	重心加速度 (gal)	重心変位 (mm)	回転角 (radian) $\times 10^3$	ロッキング中心距離 (m)	水平変位 $(10^{-4}\text{m}) \times 10^4$	回転変位 $(10^{-4}\text{m}) \times 10^4$
A 面内	32	13.2	15.2	32.7	49	11	4.46	2.02	5.42
	200	11.5	13.1	203	419	67.5	6.20	1.40	5.64
	400	10.3	10.4	372	898	132	6.77	1.15	5.05
A 面外	32	8.8	7.67	32.1	103	22.1	4.76	0.909	2.91
	200	7.25	7.5	137	661	153	4.32	0.637	1.80
	400	6.65	6.02	277	1540	346	4.4	0.546	1.61
B 面内	32	14.0	---	18.1	23.4	3.36	6.97	2.59	5.0
	200	13.0	---	116	174	18.8	9.31	2.12	4.71
	400	12.0	---	207	354	37.9	9.64	1.80	4.08
B 面外	32	9.0	6.53	39.9	125	28	4.46	0.97	2.86
	200	7.7	5.41	145	574	158	3.64	0.824	1.99
	400	7.0	4.48	289	1350	350	3.85	0.662	1.53

表-2 起振機実験結果の一覧表

減衰定数は基礎天端の加速度の共振曲線を起振円振動数の自乗で除して作成した変位共振曲線から  $1/\sqrt{2}$  法により求めた。図-10 に減衰定数を共振々動数に対してプロットしたものを示した。減衰は粘性減衰型を示しているようである。なお、面内方向の減衰の方が面外方向のものに比べて大きい。

4.6. 見掛の動的K値

見掛の動的K値,  $K_H$ ,  $K_R$  は次式により定めた。

$$K_H = \omega_0^2 m_0 \left\{ 1 + \frac{H_G}{H_T} \left( \frac{\ddot{y}_B}{\ddot{y}_T} - 1 \right) \right\}$$

$$K_R = \omega_0^2 I_0' \left\{ 1 + \frac{H_G}{H_T} \cdot \frac{H_T^2}{i_0'^2} \cdot \frac{1}{\frac{\ddot{y}_T}{\ddot{y}_B} - 1} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\omega_0$ ; 共振々動数,  $K_H$ ; 水平ばね定数,  $K_R$ ; 回転ばね定数,  $m_0$ ; 基礎の質量,  $i_0'^2 = \frac{I_0'}{m_0}$ ,  $I_0'$ ; 基礎底面の中立軸に関する質量慣性モーメント,  $H_G$ ; 底面より重心までの高さ,  $H_T$ ; 基礎天端までの高さ,  $\ddot{y}_T$ ; 基礎天端の加速度,  $\ddot{y}_B$ ; 基礎底面の加速度である。なお、 $\omega_0$  として、変位共振曲線においてピークを示す振動数、あるいは基礎天端の水平加速度と起振力との位相差が  $-90^\circ$  になる振動数を用いた。図-11 と図-12 にこうして求めた  $K_H$  と  $K_R$  と基礎重心に作用する水

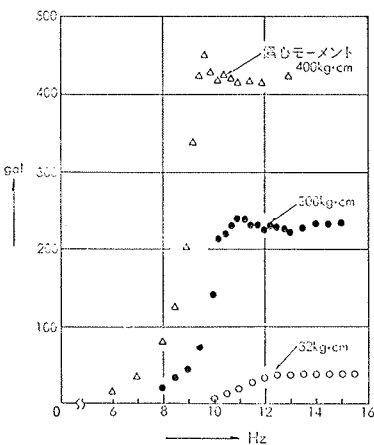


図-4 共振曲線 (AOX)

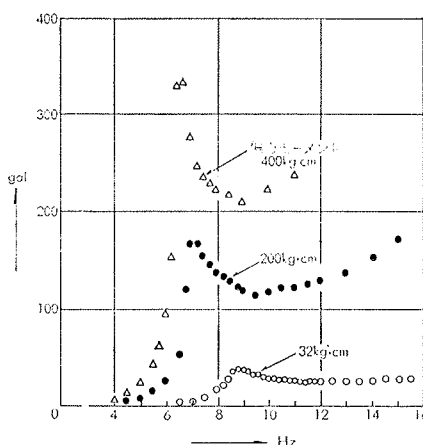


図-5 共振曲線 (AOY)

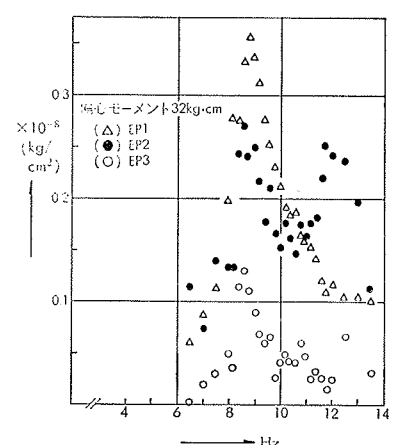


図-6 共振曲線 (土圧)

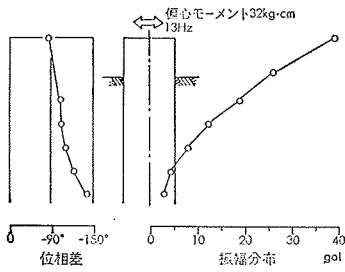


図-7 振動モード (面内方向)

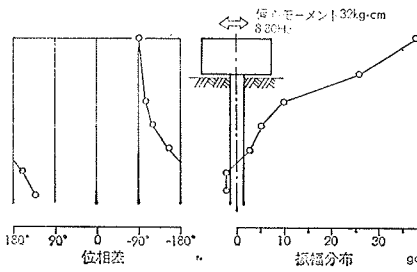


図-8 振動モード (面外方向)

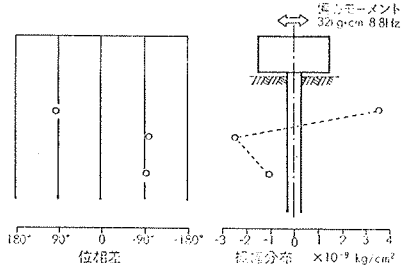


図-9 土圧モード

平力Qと、モーメントMとの関係を示した。QとMは次式により定めた。

$$Q = m_0(\ddot{y}_T + \ddot{y}_B)/2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$M = \omega_0^2 \theta I_G$$

ここにθは回転角であり、I<sub>G</sub>は基礎の重心回りの質量回転慣性モーメントである。図-11、12をみると、面内方向の方が面外方向より大きいこと、QとMの増大につれて概して減少する傾向にあることがわかる。

4.7. 実験結果のまとめ

以上の実験結果をまとめて表-2に示してある。実験から得られた特色をまとめると次の様である。W. F. グイの面内方向の剛性は面外方向に比べて約2倍強大きい。また減衰定数は面内方向の方が面外方向に比べて大きく、共振々動数に比例する粘性減衰型を示した。更に振動モードの特色は基礎、壁体が同時に共振現象を示さないこと、壁体の位相が逆転する位置より浅いところで土圧の位相が逆転すること等に要約できる。なお、これらの特徴のほかにも実験結果には土の非線型性の影響も現われたこと、Bグイ下端には上下振動は生じなかったことなども付記しておく。

5. 解析手法について

次に、以上に現われた実験結果を現在当社設計部において開発中である解析手法一波動論によるW. F. と地盤の連成解析<sup>2)</sup>で解析してみる。この手法の原理の詳細については文献2)を参照されたい。ここではこ

の手法の概要を説明しておく。いまW. F. グイに支持された基礎が図-13(a)のようにロッキング振動しているとする。このとき、この基礎の運動方程式は次式となる。

$$-\omega^2(mu_0 + H_G \cdot \theta_0) \cdot e^{i\omega t} + \tilde{Q} \cdot e^{i\omega t} = P \cdot e^{i\omega t}$$

$$\{-\omega^2(mu_0 + H_G \cdot \theta_0) \cdot \tilde{H}_G - \omega^2 I_0' \theta\} \cdot e^{i\omega t} + \tilde{M} \cdot e^{i\omega t} = P \cdot \tilde{H}_T \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、u<sub>0</sub>、θ<sub>0</sub>はW. F. グイ頭部の水平変位、回転角である。(3)式中の $\tilde{Q}$ 、 $\tilde{M}$ はW. F. グイから基礎に伝えられるせん断力とモーメントであり、次式で与えられる。

$$\tilde{Q} = f_{HH} \cdot u_0 + f_{HR} \cdot \theta_0 \quad \dots\dots\dots(4a)$$

$$\tilde{M} = f_{RH} \cdot u_0 + f_{RR} \cdot \theta_0 \quad \dots\dots\dots(4b)$$

ここに、f<sub>ab</sub>(a, b=H, R)はW. F. グイと地盤との相互作用を考慮したクイ頭部での動的ばねであり複素量である。このf<sub>ab</sub>は次の様にして求める。図13(b)のように曲げせん断変形をする梁が集中荷重群 {p}・e<sup>iωt</sup>、クイ頭集中荷重  $\tilde{Q} \cdot e^{i\omega t}$  を受けて振動しているとする。このとき、集中荷重作用点位置の梁の変位を {u<sup>w</sup>}・e<sup>iωt</sup> で表わすと、変位と荷重との関係は次式で与えられる。

$$\{u^w\} = [c] \{p\} + \{\tilde{c}\} \tilde{Q} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、[c]、{c̃}は慣性項を含んだ影響係数である。さて、一方で図-13(c)に示した様に、集中荷重 p<sub>i</sub> が作用する点を中心とした 2y<sub>0</sub>×2z<sub>0</sub> の受圧面を考える。ある受圧面 (i) に合力 p<sub>i</sub>(=4・q・y<sub>0</sub>・z<sub>0</sub>) なる等分布荷重 e<sup>iωt</sup> が作用したときに生ずる各受圧面の中心変位

{u<sup>s</sup>}<sub>i</sub>・e<sup>iωt</sup> と p<sub>i</sub> との関係を求め、まとめて次の様に表わしておく。

$$\{u^s\} \equiv \sum_i \{u^s\}_i = [D] \{p\} \quad \dots\dots(6)$$

この[D]は複素量であり、(6)式の誘導過程が本解析

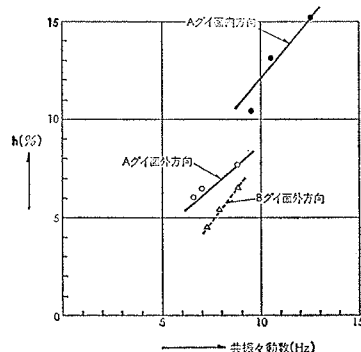


図-10 減衰定数～共振々動数

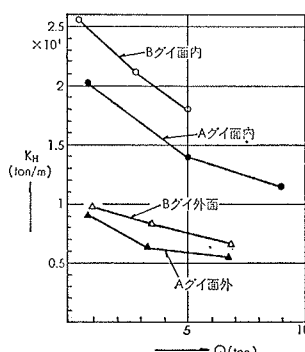


図-11 見掛の動的K値(K<sub>H</sub>)

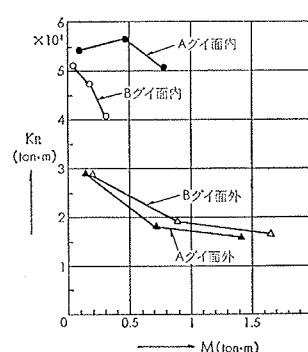


図-12 見掛の動的K値(K<sub>R</sub>)

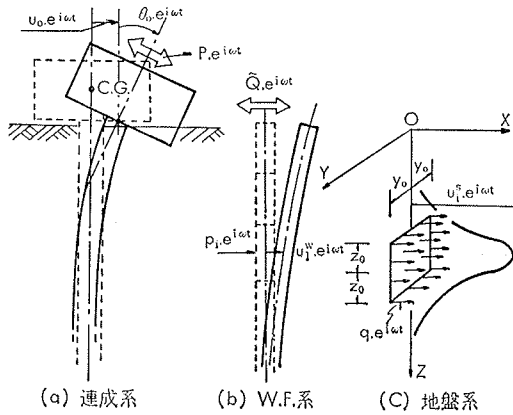


図-13

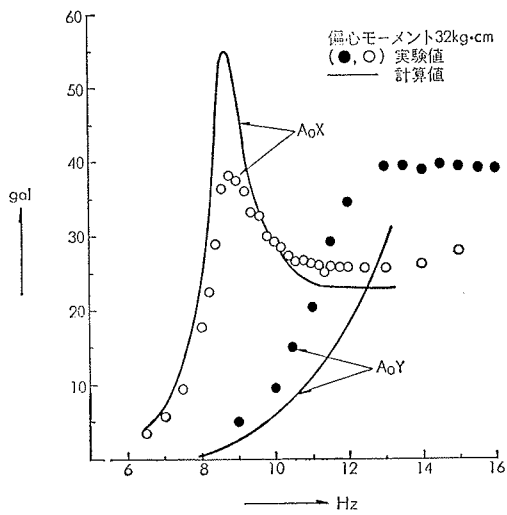


図-14 実験値と計算値の比較 (共振曲線)

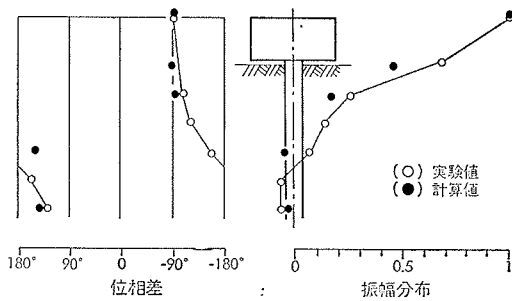


図-15 実験値と計算値の比較 (振動モード)

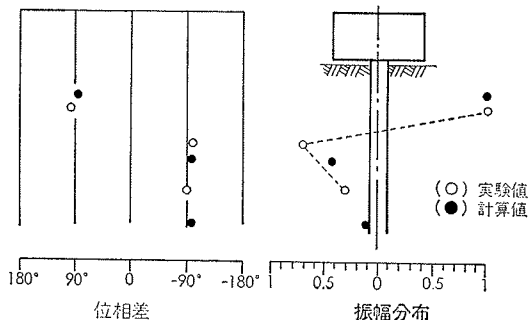


図-16 実験値と計算値の比較 (土圧モード)

手法の特色をなすところである。  $D_{ij} (i \neq j)$  については動的な Mindlin 解から定め  $D_{ii}$  はその解を受圧面 (i) について面積分して定める。次に変位の連続条件  $\{uW\} = \{uS\}$  を適用することにより未知接地圧分布  $\{p\}$  が  $\tilde{Q}$  の関数として求まる。結果として、 $\tilde{Q}$  が  $u_0, \theta_0$  の関数として表現でき、(4a)式が求まることになる。 $\tilde{M}$  に関する (4b)式も同様にして求めることができる。こうして、 $\tilde{Q}$  と  $\tilde{M}$  が  $u_0, \theta_0$  の関数として定まると (3)式と (4)式を連立させることにより  $u_0, \theta_0$  の周波数応答を求めることができる。

### 6. 数値計算結果と実験値との比較

計算例として、クイ長 15m のものを考えた。(6)式の  $[D]$  は  $y_0 = z_0 = 1.035m$  として計算した。また、地盤自身が有する減衰効果を考慮するために、逸散減衰とは別に、減衰マトリクス  $[CS]$  を各振動数毎に作成し、(3)式に付加した。この  $[CS]$  は (3)式の  $\tilde{Q}, \tilde{M}$  の虚数部を零とおいたときの各次のモーダル減衰が 3% となるように作成した。地盤の密度は  $1.7ton/m^3$ 、ポアソン比は  $1/3$  と仮定し、せん断波速度  $V_s$  をいくつか変えて試算してみた。この様な仮定のもとに計算した結果と実験値とを比較したものを図-14, 15に示した。計算値として  $V_s = 200m/sec$  の場合のものを採用した。図-14は基礎天端の水平加速度の共振曲線の比較である。面外方向と面内方向の特性の相違が良く再現できている。図-15は面外加振の場合の壁体の振動モードと土圧の振動モードの比較の例である。図中の振幅値は  $A_0Y, EP1$  を 1 として基準化して表現してある。実測値に表われた位相特性、振幅分布等は計算により求めたものとよく似ている。

以上の考察から、この解析手法は W. F. グイのように面的に拡がりのあるクイと地盤との連成解析に充分適用可能であると判断される。

### 謝 辞

本実験は中国電力(株)と当技術研究所との共同研究として実施されたものである。また、実験にあたり、当社特殊工法工事々務所、下関共同企業体、当技術研究所の土質基礎研究室の方々の御協力を願った。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 角田他：中国電力(株)下関発電所煙突工事地盤調査報告書，大林組技研報告書，(1974)
- 2) 木田他：波動論による地中壁体と地盤の連成解析，その1，その2，建築学会東海大会，(1976)