

# R.C. 超高煙突の基礎および筒体の振動実験と地震観測 (その1)

—基礎の振動実験と基礎構造体のモデルの検討—

渡 辺 清 治      安 井      讓  
角 田 智 彦      金 子 正 孝

## Vibration Tests and Earthquake Observations of High-rise R.C. Chimney and its Foundation (Part 1)

—Vibration Tests of Foundation and Examination on Models of Foundation Structure—

Seiji Watanabe      Yuzuru Yasui  
Tomohiko Tsunoda      Masataka Kaneko

### Abstract

The authors conducted vibration tests of a foundation. A high-rise R.C. chimney was built up on this foundation later on. The foundation is supported by an embedded cylindrical wall which surrounds a soil surface layer. Resonance curves gained from the test had plural peaks. The authors analyzed the resonance curves using a dynamic model simulating the foundation-embedded wall-inner or outer soil surface layer system, and showed the above plural peaks were caused by vibration effects of the inner soil. The authors next examined the influences of foundation structures on seismic responses of the high-rise chimney. Four types were considered as foundation structures. It was found that for first three modes of the chimney, the seismic responses were not affected by the foundation structure type, but there was severe effect at the fifth mode of the chimney.

### 概 要

煙突基礎が出来上がった段階で基礎の起振機実験を行なった。基礎は表層を貫ぬいて打設された円筒形の地中壁により支持されている。その円筒形の地中壁は表層地盤を取り囲んでいる。共振曲線には、地中壁に囲まれた内部の土の影響と思われる複数個の共振点が現われた。弾性波動理論解を利用して作成した基礎—地中壁—内外部の表層地盤系の相互作用モデルで解析することにより上記の現象が地中壁内部の土に起因するものであることを示した。続いて、四つの基礎構造体のモデルを想定して、基礎構造体のモデル化の違いにより、上部筒体の地震応答に如何なる差が現われるかを検討した。その結果本煙突の場合、筒体の1次～3次の主要なモードに対しては基礎構造体のモデル化の相異なる影響は現われないこと、筒体の5次のモードについては筒体の最大応答値でその差が2倍強にもなり得ることがわかった。

#### 1. まえがき

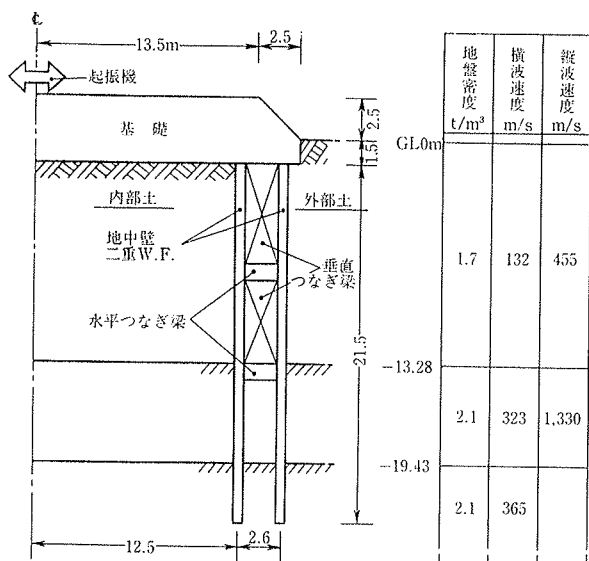
設計時点で仮定した諸定数の確認を行なう目的で、次の様な一連の実験を実施した。(1) 施工前の Site の地盤調査, (2) 煙突基礎完成時の基礎のみに関する起振機実験, (3) 煙突完成時の同筒体の振動実験, (4) 竣工後の地震観測。本報告では、まず上記(2)の実験結果について述べる。次に、その実験結果に現われた特徴ある現象が、地中壁に囲まれた内部の土に起因するものであることを示す。続いて、基礎構造体の解析用のモデル化の相異が、

上部筒体の地震時の応答に及ぼす影響について考察する。

#### 2. 地盤および基礎構造体の概要

図—1に基礎構造体と地盤の概要を示した。地盤は軟弱な表層地盤とその下に拡がった硬質な地盤とからなる。表層地盤は砂質土、粘性土あるいはシルトを含んだ土質から成っている。下方硬質地盤は風化花崗岩であって約13mの深さから始まる。

基礎構造体は基礎および二重の WALL FOUNDA-



図一 地盤と基礎構造体の概要

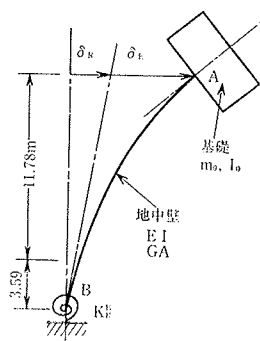
諸元	断面積 A (m <sup>2</sup> )	断面 二次モーメント I (m <sup>4</sup> )	曲げ剛性 EI (ton·m <sup>2</sup> )	せん断剛性 GA (ton)
値	123	13,800	4.83 × 10 <sup>10</sup>	2.86 × 10 <sup>8</sup>

表一 地中壁の断面性状と剛性

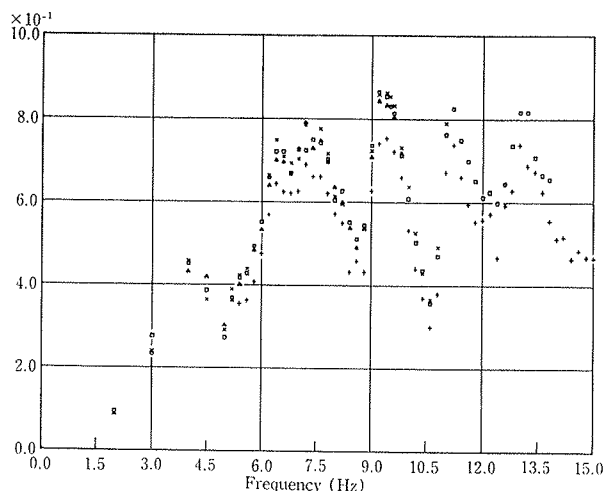
TION (以下 W. F. と略す) とからなっている。W. F. の先端は G. L. -23 m に位置する。この円筒形の二重 W. F. は水平および垂直のつなぎ梁により結合されている。表一に、二重 W. F. の断面性状を示した。本基礎構造体の形式は、地震時に表層地盤が流動化しても基礎構造体のみで自立できることを目的として考案されたものである。この基礎構造体の特色は、その水平剛性が高いこと、また、二重 W. F. がその内部に土を取り囲んでいること等である。

### 3. 起振機実験結果

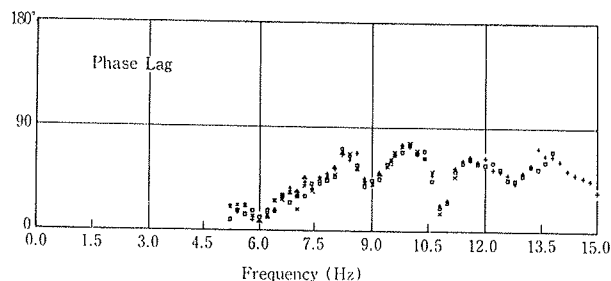
煙突基礎が出来上がった段階で基礎単独の起振機実験を行った。起振機は建研型同期式起振機 (BCS-A-200 型) で、図一の基礎天端中央に据えつけた。偏心モーメントは 2, 4, 6, 8 kg·m を用いた。測定は基礎天端で動コイル型 (T<sub>0</sub> = 2 sec) 変位計を用いて行った。



図一 2, 3 に実験結果の 1 図一4 基礎構造体のモデル



図一2 基礎上の水平変位の共振曲線



図一3 基礎上の水平変位の位相(遅)曲線

例を示した。図一 2 は基礎天端の水平変位に関する共振曲線であり、図一 3 はその水平変位の起振力に対する位相 (遅れ) 曲線である。いずれの図も横軸は加振振動数である。共振曲線の縦軸の値は実振幅を  $m_0 \cdot r / m_0$  で除した無次元量である。この  $m_0 \cdot r$  は上記偏心モーメントを重力加速度で除した値であり、 $m_0$  は基礎の質量であって、787 ton·sec<sup>2</sup>/m である。

これらの図から共振曲線には複数個の共振点があることがわかる。これらの共振点はおそらく、W. F. に囲まれた内部の土が暴れることによって生じたものであろう。以後、この点に的を絞って考察、解析を進めること

諸元	水平変位 (μ)	水平力 (ton)	回転角 (radian)	転倒モーメント (ton·m)
値	4.453	5.52	0.327 × 10 <sup>-6</sup>	301

表一2 基礎底面に加わる力と変位

次数	固有振動数 (Hz)	ロッキング (%)	弾性変形 (%)	
			せん断	曲げ
1	10.2	78.5	13.4	8.1
2	16.1	65.9	33.1	1

表一3 基礎構造体の固有値と変形特性

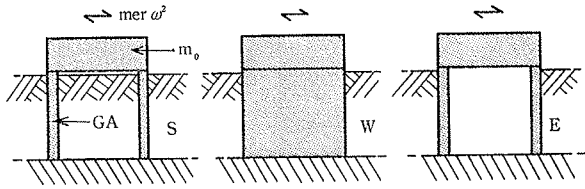


図-5 解析モデル

とする。

#### 4. 起振機実験結果の解析

##### 4.1. 基礎構造体の振動特性

基礎構造体—表層地盤系モデルで実験結果を解析するに先立って、W. F. 内外部の表層地盤を無視した基礎構造体だけの特性を掴んでおく。表-3に基礎構造体の固有振動数と変形特性を示した。この値は図-4のモデルに対して得られた値である。図-4のモデルは表-1, 2に示した諸値から定めたものである。表-2の値は、その(2)で報告する筒体の振動実験結果(筒体2次の共振点, 1.65 Hz)をもとに定めたもので、基礎底面での水平力と水平変位, 基礎の回転角と転倒モーメントの値を示す。図-4中の  $I_0$  は基礎の質量回転慣性である。その値は  $51,450 \text{ ton}\cdot\text{sec}^2\cdot\text{m}$  である。また、 $K_R^B$  は同図中B点での回転抵抗ばねでその値は  $1.57 \times 10^9 \text{ ton}\cdot\text{m}$  である。

##### 4.2. 解析モデルと運動方程式

次に、W. F. 内外部の表層地盤に弾性波動理論を適用して求まる解を応用して実験結果の解析を試みる。図-5に解析モデルを示した。W. F. の内部および外部の表

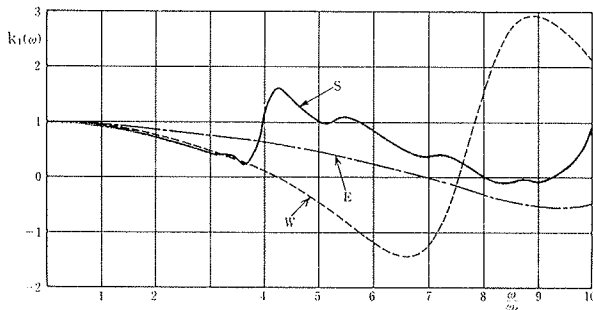


図-7 ばねの動的因子

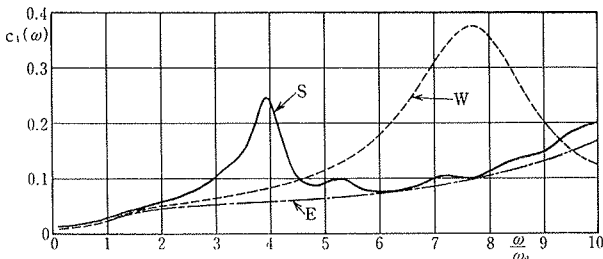


図-8 減衰の動的因子

層土を考慮したモデル(S)のほか、参考のため、内部の土を重量としてのみ考慮したモデル(W), 内部の土を無視したモデル(E)も考える。W. F. は内半径  $a_i = 12.2 \text{ m}$ , 外半径  $a_o = 15.4 \text{ m}$  の円筒型とし、その高さ  $H$  は内外部の表層地盤の厚さと同じく  $11.78 \text{ m}$  とする。また、W. F. はせん断変形するものとしその剛性  $GA$  は、頭部に  $m_0$  を有する W. F. の1次の固有振動数が4.1で定めた1次の固有振動数と等しくなる様に定める。このとき  $GA = 3.8 \times 10^7$

ton となる。

図-5のモデルの基礎に起振力  $m_0 \cdot r \omega^2 e^{i\omega t}$  が作用するときの運動方程式は次の様になる。

$$m_0 \ddot{U}_0 + K_s(i\omega) U_0 = m_0 \cdot r \omega^2 \dots \dots (1)$$

ここに、 $U_0$  は基礎  $m_0$  の基礎に対する相対変位であり、 $K_s(i\omega)$  は W. F. 頭部での動的ばねである。この  $K_s$  は W. F. の外側あるいは内側の表層地盤に弾性波動理論を適用して求める。

##### 4.3. 解析仮定と波動理論解の概要

パラメーター	値
$H/a_i$	0.763
$a_o/a_i$	0.794(S)
$\mu\pi a_i^2/GA$	0.06
$\rho_c/\rho$	0.48, 1.11(W)
$h_c$	0.05
$h_r, h_l$	0.03
$h_e$	0.211
$C_r/C_l$	0.29

表-4 パラメーターとその値

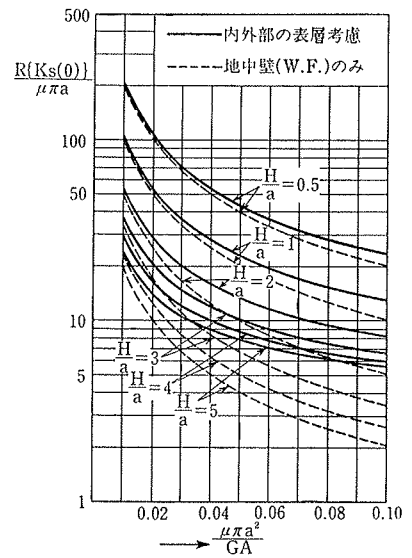


図-6 静的な水平抵抗ばね

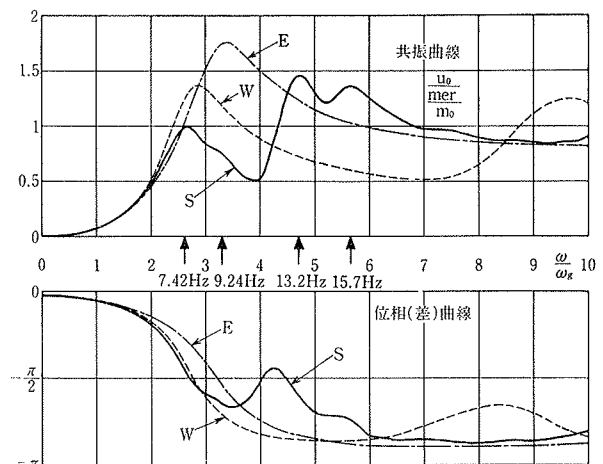


図-9 共振曲線と位相(差)曲線

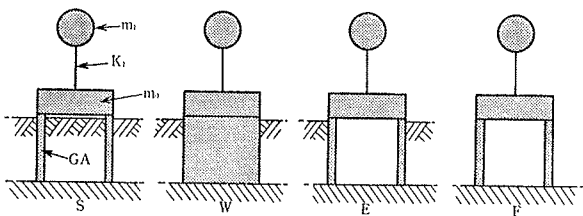


図-10 解析モデル

$K_s(i\omega)$  および後出する  $G_s(i\omega)$  は W. F. の外側あるいは内側の表層地盤に弾性波動理論を適用して求める<sup>1)2)</sup>。ここに  $G_s(i\omega)$  は地震応答計算をする際必要となる量で (3), (4)式参照), W. F. の

次数	$m_1/m_0$	$\omega_1/\omega_g$
1	0.299	0.161
2	0.192	0.7
3	0.114	1.68
4	0.077	3.06
5	0.047	4.97

表-5 上部質点の定数

内壁あるいは外壁に加わる震動土圧の効果を表わす。  $K_s(i\omega)$ ,  $G_s(i\omega)$  を求めるときの仮定は次の様である。(1)地盤は単一の弾性表層と基盤とからなる。(2)地中壁は外半径  $a_e$ , 内半径  $a_i$  の円筒形でせん断変形するものとする。(3)表層と基盤と仮定した下層地盤との波動インピーダンス比に基づく減衰は外部粘性減衰 ( $h_e$ ) として、土自体が有する減衰は材料減衰 ( $h_r, h_L$ ) として表層地盤に与える。(4)地中壁内部の土の上面は基礎底面と縁が切れているものとする。(5)表層において上下変位は無視する。(6)地震入力を考える場合、入力は基盤において水平方向正弦波  $U_g \cdot e^{i\omega t}$  とする。

解,  $K_s(i\omega)$ ,  $G_s(i\omega)$  は,  $\omega/\omega_g$  および表-4に示した諸パラメーターの関数となる。ここに,  $\omega_g$ : 表層の1次の固有円振動数,  $h_e$ : W. F. の材料減衰,  $\rho_c$ : W. F. の内実断面に換算された単位体積あたりの質量,  $C_T$ : 表層のS波の速度,  $C_L$ : 表層のP波の速度,  $\rho$ : 表層の単位体積あたりの質量,  $\mu$ : 表層のせん断剛性。

$K_s(i\omega)$  の計算例を図-6~8に示した。図-6は,  $\text{Real}\{K_s(0)\}$  であり静的ばねに相当する。図-7には  $k_1(\omega)$  を示した。この  $k_1(\omega)$  は, ばね定数の振動数に対する変化の割合を示す因子である。図-8には  $c_1(\omega)$  を示した。この  $c_1(\omega)$  は粘性減衰係数の振動数に対する変化の割合を示す因子である。これらの因子は  $K_s(i\omega)$  と, 次式によって関係づけられるものである。

$$K_s(i\omega) = \text{Real}\{K_s(0)\} \cdot (1+i2\beta) \times \{k_1(\omega) + (\omega/\omega_g) \cdot c_1(\omega)\} \dots\dots(2)$$

図-11に  $G_s(i\omega) / (\omega_s/\omega_g)^2$  絶対値 (上段) と入力に対する位相差 (下段) を示しておいた。ここに  $\omega_s = \sqrt{\text{Real}\{K_s(0)\}/m_0}$  である。

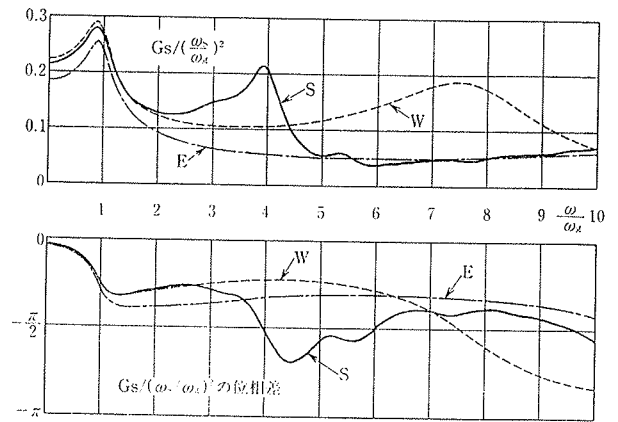


図-11 側壁からの地震入力効果

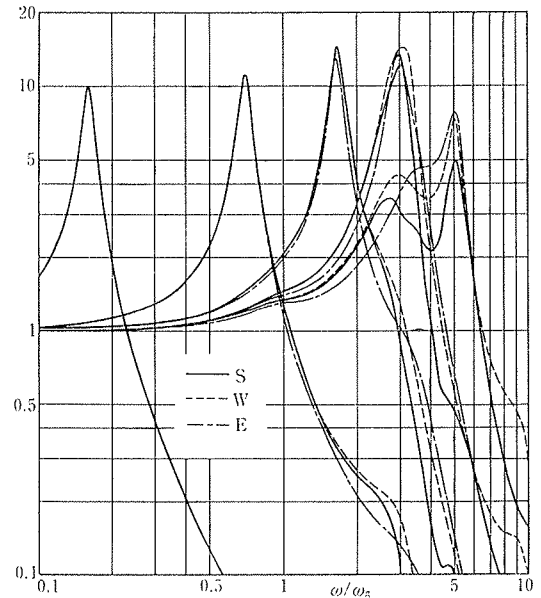


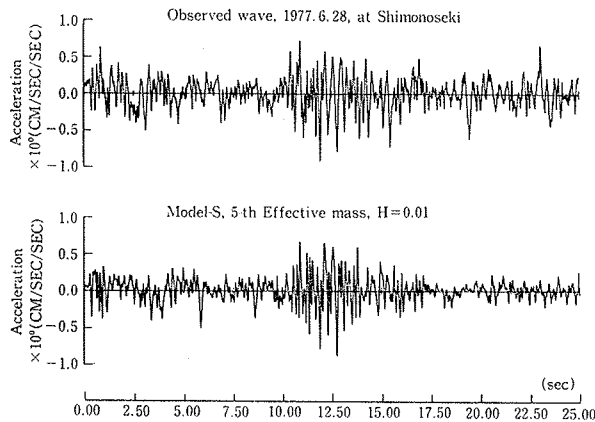
図-12 上部質点の地震応答倍率

#### 4.4. 計算結果

図-9に(1)式を用いて計算した共振曲線 (上段) と位相差曲線 (下段) を示した。横軸は  $\omega/\omega_g$  である。モデルSによる計算値が実験に現われた特徴を良く再現していることがわかる。実験で現われた 11.5 Hz のピークが計算では再現できていない。これは、地中壁先端及び頭部での回転を拘束したこと、基礎底面と内部の土の縁を切ったこと等の仮定に帰因するものであろう。この計算結果により、内部の土が暴れることにより、共振曲線上に複数個のピークが現われ得ることがわかった。同種の基礎、例えば大口径のケーソン等の振動実験を行なう際注意する必要がある。

#### 5. 上部筒体の地震応答に関する考察

W. F. に囲まれた内部の土が暴れることは設計時点では予期しなかったことである。そこで、内部の土を考慮



図一13 観測波と計算波の比較(基礎天端)

した場合と、しない場合とでは上部筒体の地震応答にどのような差が現われるかについて検討してみる。

### 5.1. 解析モデルと運動方程式

図一10に示した四つのモデルを検討の対象とする。4つのモデルは基礎構造のモデル化に相異がある。即ち、W. F. の内部の土を弾性体として考慮した場合(S), 内部の土を無視した場合(E), 内部の土を重量としてのみ考慮した場合(W), 内外部の土を無視した場合(F)の四つである。これらのモデルの基盤に正弦波加速度  $\ddot{U}_g \cdot e^{i\omega t}$  が入射した場合の運動方程式は次の様に表わされる。

$$[m] \{\ddot{U}\} + [K] \{U\} = -[m'] \{\ddot{U}_g\} \quad \dots\dots(3)$$

ここに  $\{U\}^T = \{U_1, U_0\}$ ,  $\{U_g\}^T = \{U_g, U_g\}$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_s(i\omega) \end{bmatrix} \quad \dots\dots(4)$$

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_0 \end{bmatrix}, [m'] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & \{1 + G_s(i\omega)\} m_0 \end{bmatrix}$$

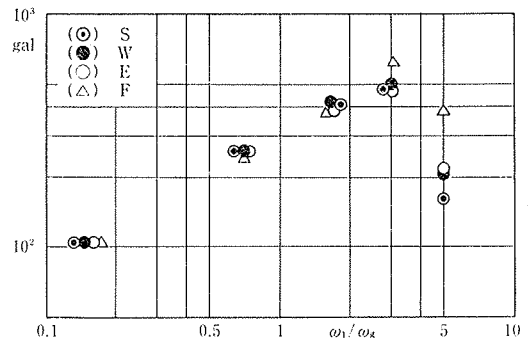
$m_1$ : 上部質点の質量,  $K_1$ : 上部質点のばね定数(複素ばね),  $U_1$ : 上部質点の基盤に対する相対変位,  $U_0$ : 基礎の基盤に対する相対変位,

$m_1, \omega_1 (= \sqrt{\text{Real}(K_1)/m_1})$  は筒体基礎固定の場合の1次~5次の換算質量と固有円振動数を用いた。これらの値を表一5に示した。

### 5.2. 計算結果

図一12に上部質点の絶対応答倍率を示した。 $h_1 = \text{Image}(K_1)/\{2 \text{Real}(K_1)\} = 0.05$  の場合である。図一12から、この煙突では筒体の4次迄については、下部構造のモデル化の相異の影響を受けないことがわかる。なお、基礎の応答倍率は、表一5の五つの質点に対して殆んど同じ値を示すことがわかっていてる。

次に、Siteで採取された地震波を入力として時系列応答を計算してみる。計算方法は次の様である。先ず入力波をフーリエ変換する。その結果と地震応答倍率の積を逆フーリエ変換することにより時系列応答を求める。フ



図一14 上部質点の最大応答値

ーリエ変換および逆フーリエ変換の計算はFFTによった。入力波として報告(その2)の図一10に示してあるW. F. 先端(GL-23 m)のものをを用いた。 $h_1$  は0.01とした。

先ず、Sモデルの信頼性をみるために基礎上の観測波と計算波の比較を行なう。図一13がその比較である。上部質点として5次を考えた場合である。主要動付近では良くあっていると見えよう。

入力の最大値が100 galになる様に拡大して応答計算した結果が図一14である。上部質点の最大応答値である。 $h_1 = 0.01$  とした。筒体の5次は基礎構造のモデル化の相異の影響を大きく受ける様である。特に、FモデルはSモデルの応答の2倍強にもなり得ることがわかる。今後、上部筒体を多質点でモデル化して基礎構造のモデル化の相異が、応答に如何なる割合で影響を与えるか検討する必要がある。

### まとめ

- (1) W. F. に囲まれた内部の土が基礎の共振曲線に影響を与えることがあることを示した。
- (2) Siteで採取された地震波を用いて応答計算した結果、本煙突の1次~3次のモードの応答は基礎構造のモデルの相異の影響を受けないが、5次のモードではその影響を大きく受けることがわかった。
- (3) 今後、W. F. が受ける地震力にも着目して検討を進める必要がある。

### 参考文献

- 1) 田治見 宏: 基礎構造の地震応答, 日大理工学部, (1966. 3)
- 2) T. Tajime, K. Miura: Vibrations of Underground Structure or of Revised Ground Portion Due to Earthquake and Those Influences to the Surrounding Ground, V-W. C. E. E., Rome, (1973)