

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3)

—各部減衰を考慮したモデルによる減衰性状の検討—

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 3)

—Investigation on Damping Properties of a Model Possessing Nonproportional Damping—

Seiji Watanabe Yuzuru Yasui
Tomohiko Tsunoda Masataka Kaneko

Abstract

In the previous paper (Part 2) the authors described vibration tests and earthquake observations of a chimney superstructure and simulation of the results by a classical modal method for an undamped system. The chimney superstructure consists of one outer reinforced concrete flue and two inner steel flues, and the base mat is supported by a wall foundation. The ratios of their total weights are 1.0 (7,482 ton) : 0.12 (874 ton) : 1.04 (7,787 ton). Therefore, the authors suspected the chimney possessed nonproportional damping for each structural part. Accordingly, in this paper, the authors created a model possessing nonproportional damping assuming internal viscous damping and carried out simulation of vibration tests and observational earthquake waves by a complex modal method for a damped system.

概 要

前報¹⁾(その2)では、非減衰仮定の固有値を使用した通常のモーダル法によって振動実験と Site 地震波のシミュレーションを実施し、当超高煙突の振動性状について述べた。当煙突は、外筒が R.C. 造で内筒が S 造、基礎は R.C. 造であり、構造材質が異なる上部構造(外筒、内筒)と下部構造(基礎—地盤)を考えた場合、これら各部の減衰量が異なることが考えられる。この報告では、(1)内部粘性減衰を仮定した非比例減衰系として、振動実験と Site 地震波のシミュレーションを実施し、(2)通常のモーダル法による解析結果との比較検討、(3)内部粘性減衰を仮定した場合の非比例減衰系の各次減衰性状、および(4)当超高煙突の持つ各部減衰係数について述べたものである。

1. まえがき

一般に、原子炉建屋等の極一部の複合構造物を除いては、各部減衰を考慮した解析はあまり行なわれていない。従来の超高構造物においても上部構造が柔であり、減衰が小さいこと、および各部構造部材の減衰性が一樣であること、等によって同様である。このように、振動系の振動性状が重量、剛性によってほとんど決定され、振動系各部の減衰が非常に小さく、比例減衰分布を有する場合には、非減衰仮定の固有値を使用した通常のモーダル法が適用できる。当超高煙突は、R.C. 造の外筒と

本の S 造の内筒(煙道)、および WALL FOUNDATION によって支持された R.C. 造の基礎から形成されており、外筒、内筒、基礎の全重量比は、7,482 t : 874 t : 7,787 t = 1.0 : 0.12 : 1.04 である。このため、各部別の減衰評価の影響が表われることが考えられる。本報告ではその影響がどの程度の割合であるかを確認するために、外筒、内筒、基礎(SWAY, ROCKING)の各部に内部粘性減衰を仮定して、各部減衰を考慮した非比例減衰系として振動実験と Site 地震波のシミュレーションを行ない、通常のモーダル法による解析結果との比較検討を行なった。

2. 解析モデル

外筒(R.C.部), 内筒(S部)および基礎-地盤(SWAY, ROCKING)の各部減衰を考慮するために, 図-1に示すモデルを設定した。このモデルは前報¹⁾(その2)で述べた MODEL-B と同一のものであり, 外筒と内筒を分離し, 剛体と見做した基礎上に各々が独立して並列系を成しているものである。

3. 固有振動解析

一般座標を用いて, n 自由度系の運動方程式は (3-1) 式のように表わせる。

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = \{F\} \quad \dots\dots(3-1)$$

ここで, 減衰マトリックス[C]が比例減衰型であれば減衰項, 強制外力項を零として固有値解析を行なえばよいが, 非比例減衰型の場合は直接解析法か, 又は減衰付固有値解析法によって各部別の減衰量を評価する必要がある。

本報告では, 各次振動別に固有モード, 減衰量を評価することから後者の複素固有値解析法を使用した。運動方程式は, (3-1)式にマトリックス恒等式を添加した (3-2)式で表わせる。

$$\begin{bmatrix} [0] & [M] \\ [M] & [C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{X}\} \\ \{X\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -[M] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{X}\} \\ \{X\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{F\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(3-2)$$

ここで, 減衰付固有値を求める場合には (3-2) 式の外力項を零と置き, 変位および速度を e^{pt} の形に置くことによって, 剛性マトリックス[K]が独立である場合を除いては, (3-3) 式が成り立ち, この式を解けばよいことがわかる。

$$\begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[K]^{-1}[M] & -[K]^{-1}[C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{X}\} \\ \{X\} \end{Bmatrix} = \frac{1}{P} \begin{Bmatrix} \{\dot{X}\} \\ \{X\} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(3-3)$$

ここで, [I]: n×n の単位マトリックス。

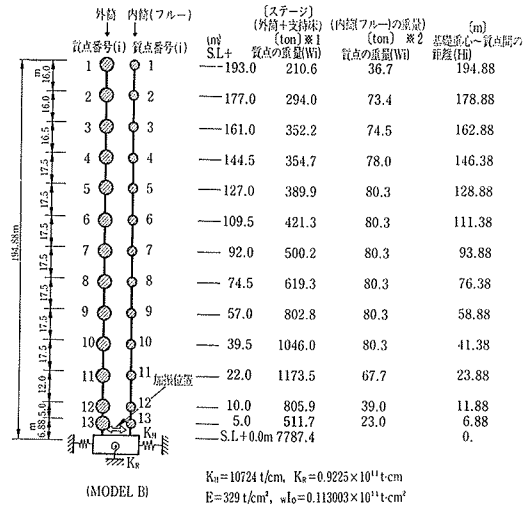


図-1 解析モデル

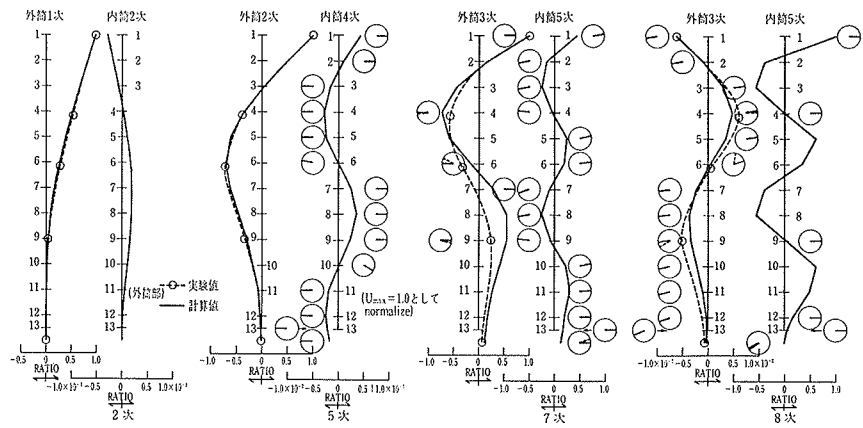


図-2 減衰付固有モードの実験と解析の比較 (CASE 1)

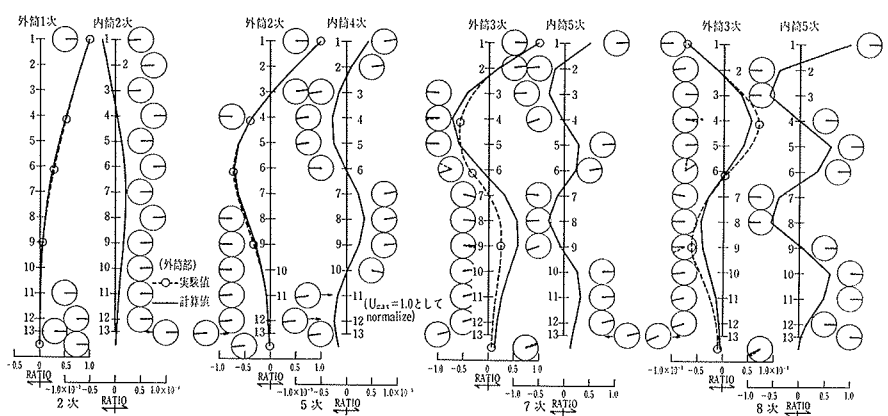


図-3 減衰付固有モードの実験と解析の比較 (CASE 2)

[K]⁻¹[M]: 非減衰系の n×n の動的マトリックス。

解析モデル (図-1) に与えた各部減衰は, 次の2ケースを考えた。(CASE 1) 一般に, 超高構造物は上部構造が柔であるため低次振動モードでは地盤の影響を受けにくいと考え, このケースの上部構造の各部減衰は, 振動実験値を参考にして与えた。外筒部に対しては, 地震

時に2次振動モードが卓越しているので、外筒2次の減衰定数(1.22%)を基礎固定時の外筒2次非減衰固有周期(0.5755 sec)に対して与えた。内筒部に対しては、5次振動モードが卓越しているとして、4.02%を基礎固定時の内筒5次非減衰固有周期(0.2545 sec)に対して与えた。地盤の各部減衰はSWAYのみを考え、解析上の各次減衰定数がほぼ実験値をシミュレートするように与えた。このような与え方は、上部構造の各部減衰として地盤との連成モードの減衰を与えていることになるため、上部構造の各部減衰が過大評価され、地盤の各部減衰が過少評価されることが多少とも考えられる。

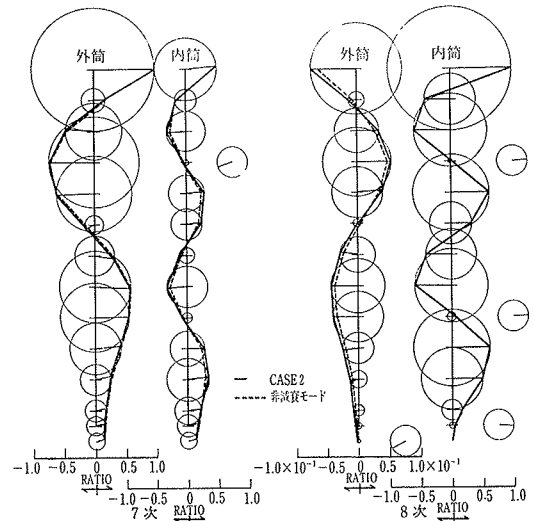
この連成モードの減衰に含まれる地盤の減衰の影響を見るために、次に述べる与え方を行なった。

(CASE 2) 当煙突の基礎については、二重円筒形のWALL FOUNDATIONの内、外部の土を考慮した時の回転および剪断の粘性減衰係数に相当する値が弾性波動論によって求まっている。回転については、基礎が剛体でその底部の中心線を回転軸として回転すると仮定した剛体一表層地盤系の解であり、剪断については、地下構造物(WALL FOUNDATION)が剪断変形のみをすると仮定した解である。CASE 2では、この解を使用して基礎マットを含めた地下構造物の各部減衰を強制的に決めた。その結果、外筒1次、2次の振動数域に対しては、SWAYとROCKINGを考慮した外筒1次の非減衰固有周期(2.551 sec)に対してSWAY=1.11%、ROCKING=2.34%を得たので、この値を地盤の各部減衰として与えた。

このケースの上部構造に対しては上述の地盤の各部減衰量を使用し、上部構造の各部減衰量を零として減衰付固有値解析を行ない連成モードの各次減衰定数を算出し、実験時の各次減衰定数と比較して上部構造のみの各部減衰量を推定した。

以上、2ケースの各部減衰の与え方で、解析モデルに与えた各部減衰係数を表一に示す。この減衰付固有値解析結果を実験値と比較して表二に示す。

固有モードの解析例として、実験との比較をCASE 1とCASE 2について図一、図二に示す。固有モードに関して、両ケースの差は少ないことがわかる。更に、CASE 2の外筒3次モードに関して、非減衰固有モードと比較したものが図四である。また表二の各次固有振動数と減衰定数の関係を図五に示す。同図より、内部粘性減衰を仮定した場合の各次減衰性状として次のことが云える。(1) 連成モードの各次減衰定数は、ほぼ振動数に比例して大きくなる。但、SWAY, ROCKINGが卓越している振動モードでは、地盤に与えた各部減衰量が大きく影響し、前述した傾向にない場合がある。(2)



図一 非減衰固有モードとの比較 (CASE 2)

	外筒 (R.C造)	内筒 (S造)	地 盤	
			SWAY	ROCKING
CASE 1	0.0022	0.0033	0.0021	0
CASE 2	0.00083	0.0031	0.0090	0.019

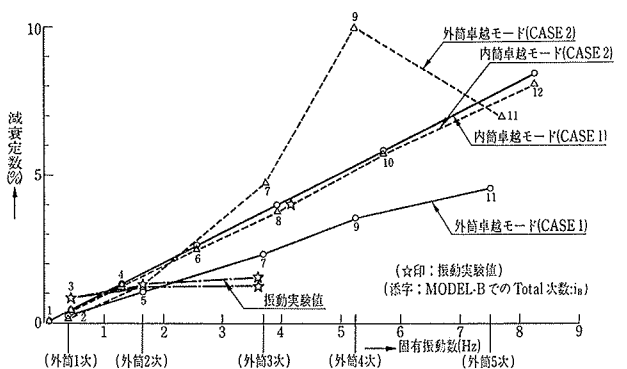
単位(sec⁻¹)

表一 各部減衰係数

i _n	CASE 1		CASE 2		次 数	i _{ex}	実 験 値		
	Ti (sec)	hi (%)	Ti (sec)	hi (%)			Ti (sec)	hi (%)	
1	13.002	0.079	13.002	0.074	(1)	1	—	—	
2	2.551	0.266	2.551	0.181	1 (2)	1	2.56	0.82	
3	2.253	0.454	2.253	0.429	(2)	2	—	—	
4	0.775	1.319	0.775	1.249	(2)	3	—	—	
5	0.607	1.060	0.606	1.288	2 (4)	2	0.61	1.33~1.22 ¹	
6	0.391	2.614	0.391	2.477	(3)	4	—	—	
7	0.271	2.338	0.268	4.753	3 (5)	3	0.278	1.55~1.28 ²	
8	0.255	3.989	0.254	3.757	(3)	5	3	0.241	4.02
9	0.191	3.555	0.192	9.978	4 (6)	—	—	—	
10	0.175	5.806	0.175	5.686	(4)	6	—	—	
11	0.133	4.574	0.130	6.967	5 (7)	—	—	—	
12	0.121	8.440	0.121	8.032	(5)	7	—	—	

*1 モーダル法による外筒2次の共振曲線シミュレート時に与えた減衰定数
*2 振動実験時の筒体部測点の回転分析による平均値

表二 減衰付固有周期と減衰定数



図二 減衰付固有振動数と減衰定数の関係

超高 R.C. 煙突の各次減衰定数は振動数比例型とは言えないため、内部粘性減衰では説明のつかない点がある。

4. 強制振動実験のシミュレーション

ここでは、(3-2) 式の強制外力項{F}に(4-1)式で表

わす起振機による正弦波加振力を与えて、共振曲線のシミュレーションを行なった。

$$\{F\} = \{I\} m_{0r} \omega^2 e^{i\omega t} \quad \dots\dots(4-1)$$

ここで、 $\{I\}$: 外力分布ベクトル(加振点1,その他0)
 m_{0r} : 質量加振モーメント (kg・sec²)

計算手法は、3章で求めた減衰付固有値を使用した複素モーダル法であり、考慮した振動モード次数は12次迄である。使用した加振モーメントは、外筒2次: 38.776 kg・sec² (380 kg・m) であり、外筒3次: 6.122 kg・sec² (60 kg・m) である。ここで減衰付固有値の複素刺激係数について簡単に述べる。(3-2)式に(4-1)式の外力が作用した場合、(3-2)式の右边は(4-2)式で表わすことができる(注意: マトリックス記号 $[]$, ベクトル記号 $\{ \}$ は以後、必要以外省略)。

$$\frac{m_{0r} \omega^2}{v_{iB} m_i} \cdot \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots(4-2)$$

ここで、複素刺激係数 β は、(4-3)式で定義すれば、(4-4)式で表わすことができる⁴⁾。

$$\begin{Bmatrix} I \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} UP \\ U \end{bmatrix} \cdot [P]^{-1} \cdot \{\beta\} \quad \dots\dots(4-3)$$

$$\{\beta\} = \frac{\{U^T M I\} \cdot [P]}{\begin{bmatrix} UP \\ U \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} UP \\ U \end{bmatrix}} \quad \dots\dots(4-4)$$

一方、非減衰固有値における通常の刺激係数は、周知のように(4-5)式で表わせる²⁾。

$$\{\beta\}^* = \frac{\{U^T M I\}}{[U]^T \cdot [M] \cdot [U]} \quad \dots\dots(4-5)$$

(4-4)式および(4-5)式から刺激係数を算出し、両者の刺激係数比を比較したものが図-6である。ここで刺激係数比とは、各次刺激係数を外筒の振動モードが卓越する次数については外筒3次 ($i_B=7$)、内筒の振動モードが卓越する次数については内筒5次 ($i_B=8$) を1.0としてnormalizeし、刺激係数の比率として表わしたものである。尚、図-6の複素刺激係数比は絶対値をとり算出している。同図より次のことが言える。(1) 各部減衰の与え方による外筒の卓越次数への影響は微少である。(2) 外筒に関しては、非減衰固有値における刺激係数比と、ほとんど差がない。

共振曲線の解析例として、CASE 2の外筒2次について、外筒側のS.L. +193.0m (TOP) 位置の実験との比較を図-7に示す。外筒3次の共振曲線の形状は、通常のモーダル法による場合とほとんど変わらず、前報¹⁾(その2)で示したように、外筒3次の二つのピークを確認したのに留まった。

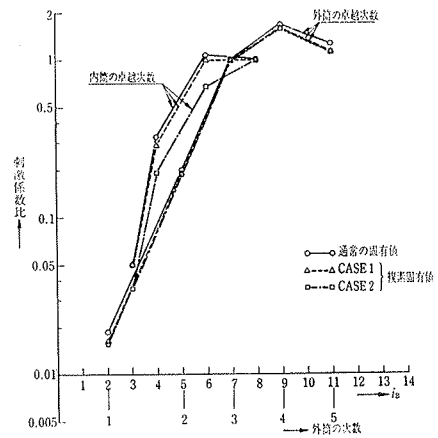


図-6 刺激係数比の比較

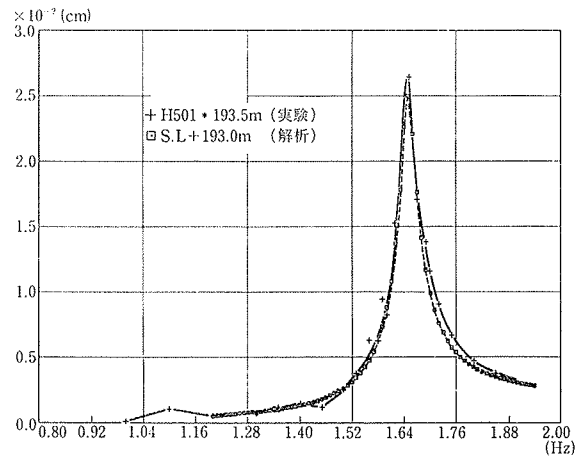
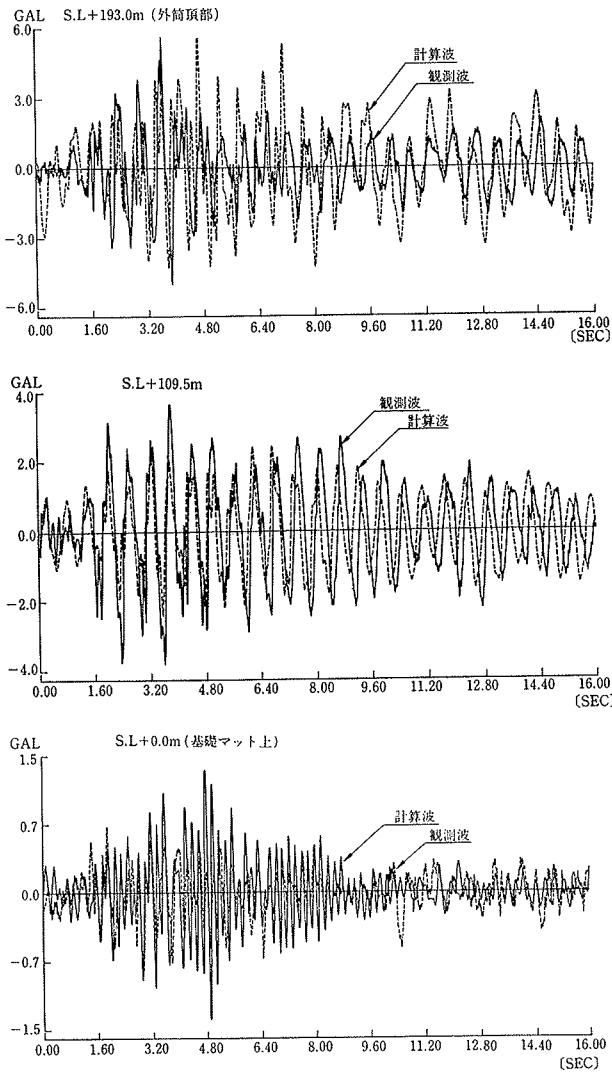


図-7 共振曲線の解析例

5. Siteの地震波によるシミュレーション

計算手法は複素モーダル法によった。振動モードの重ね合わせ次数は12次である。入力地震波は、前報¹⁾(その2)で紹介した1977年6月28日、11時46分に九州中央部に発生したもので、G.L. -23.0mの修正加速度: COACCA5N, 0.606GAL・MAXである。解析例としてCASE 1の応答波と観測波との比較を、S.L. +193.0m (外筒頂部) からS.L. +0.0m (基礎マット上) までの3測点について図-8に示す。次に、固有値解析結果で各質点間の位相差が+, -表示できない度合いが強かったCASE 2について、複素モーダル法と通常のモーダル法による最大加速度, 最大剪断力, 最大曲げモーメントの比較を、図-9に示す。同図より、当超高煙突の場合、各質点間の位相差を考慮してもその影響は応答力に関して、ほとんど表われていない。更に、複素モーダル法によるCASE 1とCASE 2の応答結果を比較したものが図-10である。各部減衰の与え方によって、固有値解析結果の各次減衰定数が異なり、その応答力には、おのずから差が表われている。各部減衰の与え方は、充分注意

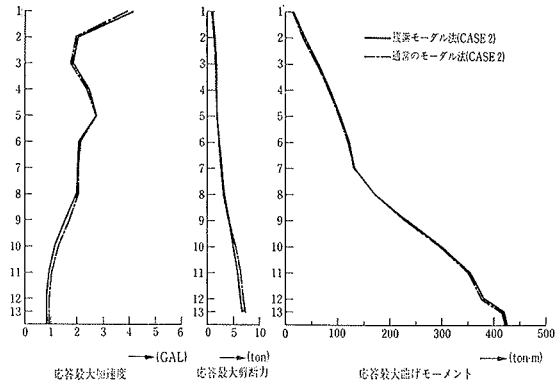


図—8 応答波形の比較

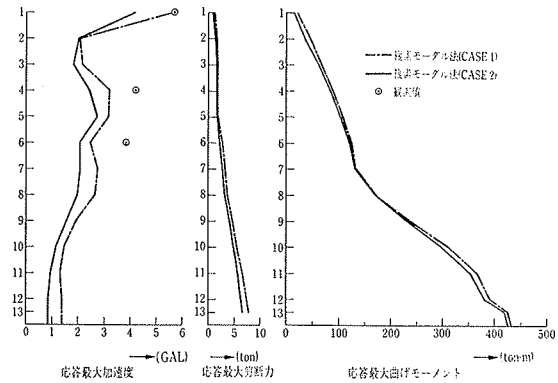
する必要があることがわかる。

6. まとめ

以上、述べてきたことをまとめると、次のことが言える。(1) 内部粘性減衰を仮定した非比例減衰系の各次減衰定数はほぼ振動数に比例して大きくなるが、SWAY、ROCKING が卓越する振動モードではその傾向にない場合がある。(2) 当煙突は、本報告に使用した地震では外筒 2 次振動モードが顕著に卓越しているため、この次数に着目することによって、ほぼ各次減衰定数をシミュレートできる。しかし、一般に超高 R.C. 煙突の各次減衰定数は振動数比例型とは言えないため、内部粘性減衰仮定では説明できない点がある。(3) 当煙突においては、各部減衰を考慮してもその応答力に与える影響は微少であった(図—9)。(4) 非比例減衰系として各部減衰を考慮する場合、その与え方によって応答力に差が表われるので注意する必要がある(図—10)。



図—9 複素モーダル法と通常のモーダル法による応答力の比較 (CASE 2)



図—10 複素モーダル法による CASE 1 と CASE 2 の応答力の比較

謝辞

この調査研究は、中国電力株式会社と当技術研究所との共同研究の一端として実施されたものである。本研究を進めるにあたっては、当技術研究所申川恭次所長より御指導をいただき、更に、本店建築設計第三部小菅与三課長より有用な示唆を受け、同・福本早苗職員、本社機械計算部三橋英二職員に御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺清治, 他: 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, その2), 大林組技術研究所報, No. 18, (1979)
- 2) 田治見 宏: 建築振動学, コロナ社, (昭和44)
- 3) W. C. Hurty, M. F. Rubinstein: Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., (1964)
- 4) 小林俊夫, 他: 各部別減衰振動系のモーダルアナリシス法, 日本建築学会論文報告集, No. 204 (昭和48.2)