

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2)

—筒体の振動実験と地震観測およびそのシミュレーション—

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 2)

—Vibration Tests and Earthquake Observations of Chimney
Superstructure and Simulation of Results—

Seiji Watanabe Yuzuru Yasui
Tomohiko Tsunoda Masataka Kaneko

Abstract

The chimney is a flue type high-rise structure 200 meters in height and consists of one external reinforced concrete flue and two inner steel flues. The outer R.C. flue supports the two inner steel flues at six points, that is, at Stage No. 1 to Stage No. 6. The authors carried out vibration tests and earthquake observations of the chimney and the results are summarized as follows. Two resonance points on the third mode of the outer R.C. flue were confirmed on the resonance curve, that is, 3.6 Hz and 4.15 Hz. The former was the third resonance point of the outer R.C. flue and the latter was the fifth vibrational mode of the inner steel flues. When carrying out forced vibration tests, a high frequency mode of the inner steel flues may be excited. However, it is probable that the vibrational characteristics of the chimney are not influenced by the inner steel flues.

概 要

この報告は、SVETHO 工法によって建設された R.C. 造 200m 煙突筒体の振動実験と竣工後の地震観測、及びそのシミュレーション解析結果について述べたものである。実験は昭和52年3月に実施したもので、その時の施工状況は筒体の躯体工事が完了しており、仕上げ塗装を残すのみであった。実験内容は、(1)引張り切断による自由振動実験、(2)起振機による強制振動実験、(3)常時微動観測であり、煙突筒体3次迄の振動性状を明らかにした。当煙突の強制振動実験結果の特徴は、共振曲線に外筒が3次形をとる2つのピークが確認されたことである。強制振動実験のシミュレーションでは内筒に着目した解析を行ない、この現象が内筒の振動により励起されたものであることを示した。更に地震観測システムにより採取した地震波を使用してシミュレーションを行ない、地震時においては、内筒の振動の影響がほとんどなく、あえて外筒と内筒を分離したモデルで解析する必要はないことを示した。地震観測は昭和54年2月現在継続中である。

1. まえがき

この報告では、煙突筒体の引張り切断による自由振動実験、起振機による強制振動実験、竣工後の地震観測、実験結果および地震観測結果のシミュレーション解析について述べ、今後の R.C. 超高煙突の動的耐震設計に参考になると思われる二、三の結果を紹介する。特に、強制振動実験において、内筒の振動励起による影響が、外筒の高次振動モードに表われているので、地震時におけ

るこの影響について考察を行なった。

2. 煙突概要

当煙突は、外筒 (R. C. 造) と二本の内筒 (S 造) から形成されており、最高地上高さ 200 m である。内筒は、内側が耐酸レンガ貼りであり、外側がグラスウールで保温されており、外筒の R. C. 部への熱影響を防止している。当煙突の基礎は、二重円筒形の R. C. 造 WALL FOUNDATION であり、先端は G. L.-23.0 m の所で N

値 100以上の風化花崗岩層に支持されている。煙突の各部寸法は、概略図-1 に示すとおりである。

3. 実験方法

3.1. 自由振動実験

1次固有周期が2.0sec以上にもなる長周期構造物の1次振動性状の把握は、起振機の加振力と振動数制御の点から強制振動実験では無理があり、引張り切断による自由振動実験を行なった。実験方法は煙突頂部をワイヤーで強制的に引張り初期変位を与えた後に、引張り力を解除して自由振動による1次固有周期と減衰を測定するものである。引張力測定用器具として今回は、16φの鉄筋にストレインゲージを貼り付け、あらかじめ歪量と力の関係を較正

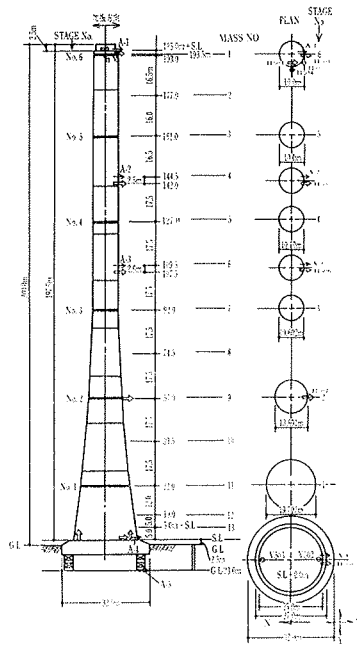


図-1 煙突の概略図

外筒の次数	1	2	3	
固有振動数(HZ)	0.39	1.65	3.6	4.15
固有周期(sec)	(2.56)	(0.61)	(0.278)	(0.241)
減衰定数(%)	0.82	1.33	1.55	4.02

表-1 固有周期と減衰定数

したものを使用した。引張用機械はブルトラーを使用し、ワイヤー方向で引張力が3.0tになった時に較正鉄筋の中央部をガスで瞬間的に切断した。この時の煙突頂部の水平力は1.27tonである。

3.2. 強制振動実験

この実験では、煙突筒体の2次、3次の振動性状を把握した。使用した起振機は、建研型同期式起振機(BCS-A-200型)*1である。起振機の設置位置は基礎上であり、2台連動で使用した。加振モーメントは2次: 380 kg・m (190 kg・m×2) であり、3次: 60 kg・m (30 kg・m×2) である。測点配置は自由振動実験時とも図-1 に示す印(水平), ⊙印(上下)であり、筒体部の測点は外筒側に設置した。使用した計器は動コイル型変位計(T₀=5.0sec)である。計測システムのフローを図-2に示す。実験記録の数値化は記録した微気テープから直接行なった¹⁾。

4. 実験結果と考察

4.1. 自由振動実験結果

自由振動減衰波形を図-3に示す。更に1次固有振動数と1次減衰定数を表-1に示す。減衰定数は1周期振幅減衰比から対数減衰率によって求めたもので

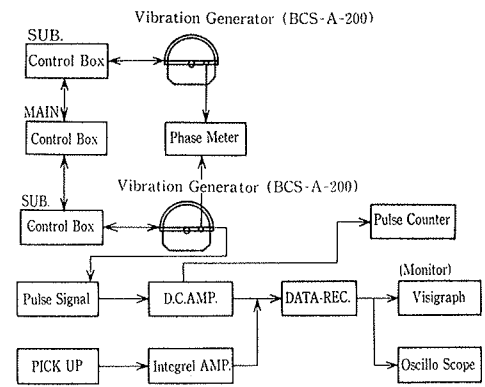


図-2 計測システム

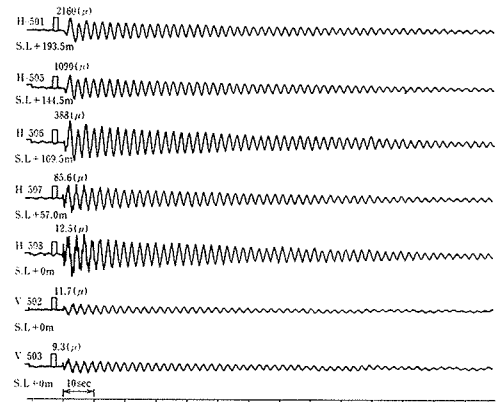


図-3 自由振動減衰波形

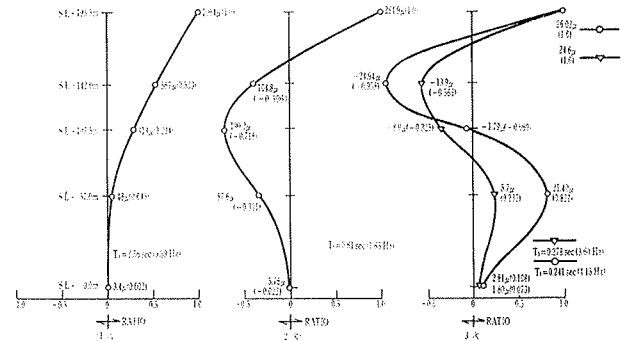
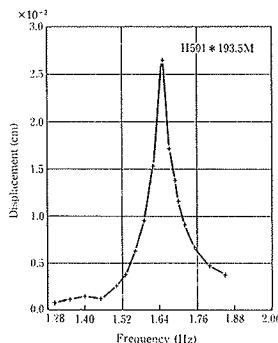
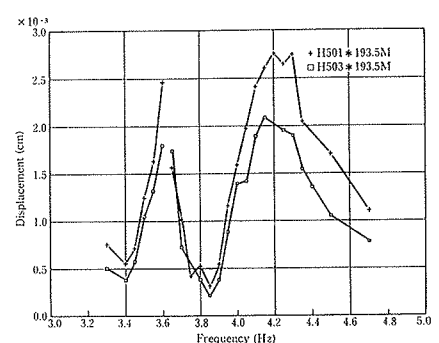


図-4 固有振動モード



*** Chuden-Shimonoseki, 3JF-190KG.M x 2.552.3.27 ***

図-5 共振曲線(外筒2次)



*** Chuden-Shimonoseki, 3JF-30KG.M x 2.552.3.23 ***

図-6 共振曲線(外筒3次)

注 *1 BCS-A-200 最大加振力: 3.0t, 加振モーメント: 2~200kg・m, 加振振動数: 0.2Hz~20Hz (但、連動時 0.2Hz~8.0Hz)

ある。1次振動モードについては、自由振動減衰波形の煙突頂部に対する筒体各測点の振幅比が安定しており、17波目の振幅を使用して図-4に示した。

4.2. 強制振動実験結果

2次、3次の固有振動数と減衰定数を表-1に示す。減衰定数は、筒体の各測点の共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法で求めたものを平均して定めたものである。共振曲線の例として、加振方向の煙突頂部のものを2次、3次について各々図-5、図-6に示す。共振時の外筒の振動モードを図-4に示す。この実験結果から次のことが言える。(1)共振曲線上に外筒が3次形を示す2つのピークが認められ、このうち4.15 Hz付近のピークは、内筒の振動が励起されたために生じたものと思われる(図-6)。(2)R. C. 超高煙突の各次減衰定数は振動数比例型とは言いがたく、高次においてもそれほど増加しない傾向がある。

4.3. 常時微動測定結果

測点配置は、強制振動実験時の測点(図-1)に同じである。超高煙突の常時微動の振動レベルは風によって大きく作用され、多少の風でも煙突頂部の振幅は100~200 μ に達する。そのためにも前述の強制振動実験は無風状態に近い時を選ぶ必要がある。参考までに、S. L+57.0 m (H 507)の常時微動波形のフーリエスペクトルを図-7に示す。この時の、同測点の最大半振幅は4.3 μ であり、煙突頂部では133.8 μ であった。

5. 地震観測

5.1. 地震観測システム

この観測システムの測点は、図-1に示した⇒印と基礎上の○印の合計8測点である。⇒印はサーボ型加速度計である。このシステムの特徴は、図-8のフローに示した如く加速度起動と速度起動を採用しており、いずれか一方が設定レベル以上になった時に作動することである。起動測点は、G. L-23.0 mの支持地盤中に埋設された上下成分の加速度計(A-5)と基礎上に設置された水平成分の変位計(H-508)である。

5.2. 地震観測結果

採取した地震波は、1977年6月28日、11時46分に九州中央部に発生したもので、震源深さ10 km、マグニチュード5.2であり、熊本で震度Ⅲ、当煙突 Site で震度Ⅰ震央距離212.8 kmである。地震波形を煙突頂部とG. L-23.0 mについて図-9に示す。同図のG. L-23.0 mの

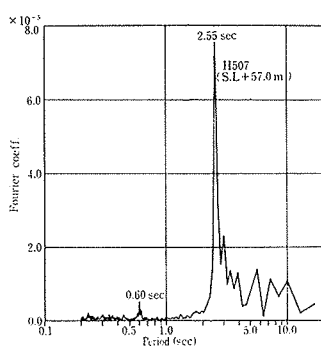


図-7 常時微動



図-8 地震観測システム

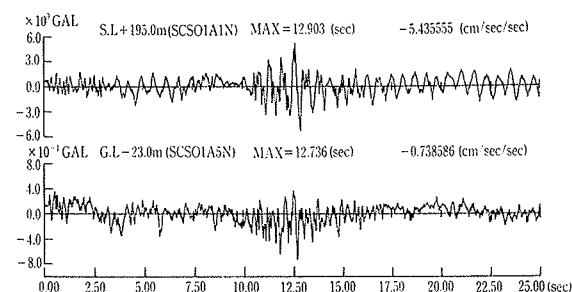


図-9 地震観測波形(修正前)

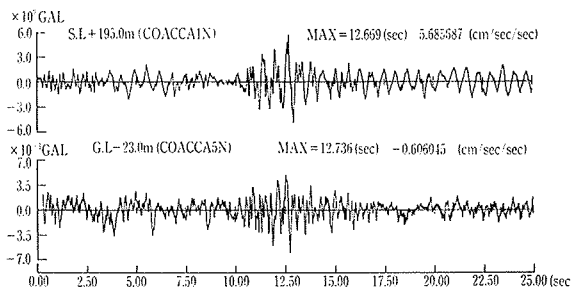


図-10 地震観測波形(修正後)

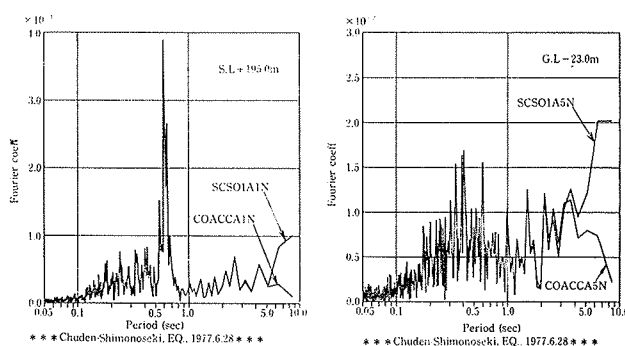


図-11, 図-12 地震観測波形の修正前後のフーリエスペクトルの比較

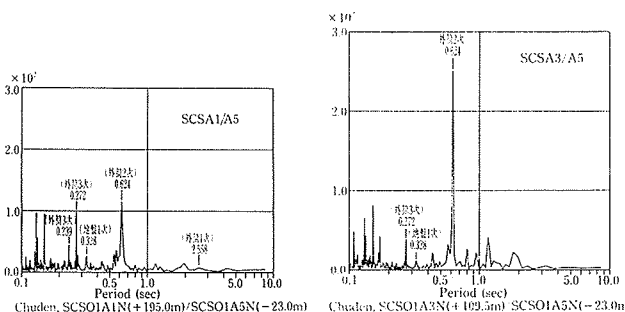


図-13, 図-14 地震観測波形のフーリエスペクトル比

地震波には、13.0~14.0 sec の長周期成分が含まれていることが明らかである。今回は、逆フーリエ変換手法によって 8.0 sec 以上の長周期成分を除き、零線補正を行った。この修正地震波を図-10に示す。更に、両者のフーリエスペクトルの比較を図-11, 図-12に示す。修正地震波のスペクトル振幅が 4.0 sec 以上の長周期側で落ちており、外筒1次 (2.56 sec) 以下の短周期側には影響がないことがわかる。従って、後述のシミュレーションでは G. L-23.0 m の修正地震波を入力波として使用した。煙突頂部 (A-1) と S. L+109.5 m (A-3) の G. L-23.0 m (A-5) に対するフーリエスペクトル比を、各々図-13, 図-14に示す。以上より、この地震観測での特徴は次のようである。(1)煙突筒体部の測点では強制振動実験でも得られた2次固有周期が卓越しており、外筒は2次振動モードで振動している。(2)G. L-23.0 m の地震波にも外筒1次の影響が多少とも含まれている。(3)地震時にも内筒の振動が励起されていることが確認できる (図-13, T=0.239 sec)。

6. 強制振動実験及び地震観測結果のシミュレーション

6.1. 解析モデルと固有値解析

ここでは、内筒の振動が外筒を含めた煙突の振動性状に与える影響を把握するために、図-15に示す2つのモデルを設定した。MODEL-A は外筒のみをモデル化したものである。MODEL-B は外筒と内筒を分離したモデルで、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。両モデルは筒体部を質点系に置換し、基礎部を単体の剛体と仮定したものである。使用した地盤のバネ定数は、振動実験の2次共振振動数、2次共振時の変位分布と基礎の回転角から計算した²⁾。この値を表-2に示す。固有周期の実験と計算との比較を表-3に示す。固有モードの解析例として、MODEL-B について図-16に示す。ここで使用した外筒のヤング係数は 329 t/cm² である。参考までに材齢3カ月 (4週まで水中放置、以後2カ月中空放置) のテストピース6本から求めたコンクリートのヤング係数の平均は 298 t/cm² であり、鉄筋による割増し率を考慮すれば妥当な値と考えられる。

6.2. 強制振動実験のシミュレーション

計算手法はモーダル法によった。2次共振曲線の計算と実験との比較例を図-17に示す。同図は MODEL-A の外筒頂部のものであり、6次モード迄を考慮した。各次減衰定数は、2次については実験と合わせ

MODEL	K _n (t/cm)	K _R (t·cm)	wI ₀ (t·cm ²)
A	9770	0.8578×10 ¹¹	0.1054×10 ¹¹
B	10724	0.9225×10 ¹¹	0.1130×10 ¹¹

表-2 地盤のバネ定数

i _A	MODEL-A	i _B	MODEL-B	外筒の次数	内筒の次数	i _{EX}	実験値
		1	13.002	(1)	1		
1	2.555	2	2.551	1	(2)	1	2.56
		3	2.253	(1)	2		
		4	0.775	(2)	3		
2	0.609	5	0.607	2	(4)	2	0.61
		6	0.391	(3)	4		
3	0.274	7	0.271	3	(5)	3	0.278
		8	0.254	(3)	5	3	0.241
4	0.196	9	0.191	4	(6)		
		10	0.174	(4)	6		
5	0.134	11	0.133	5	(7)		
		12	0.121	(5)	7		
6	0.087			6			

()内の次数：外筒と内筒の固有ベクトル比の比較における小さい方の振動モード。(単位：sec)

表-3 固有値の実験と解析の比較

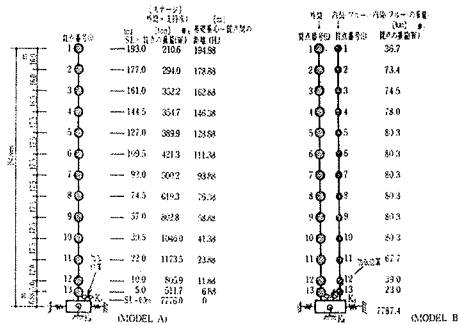


図-15 解析モデル系

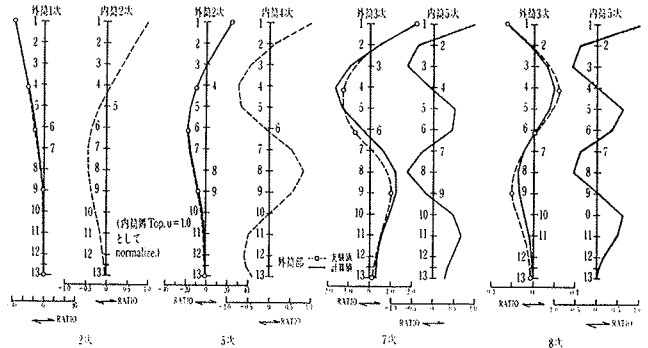


図-16 固有振動モードの実験と解析の比較 (MODEL-B)

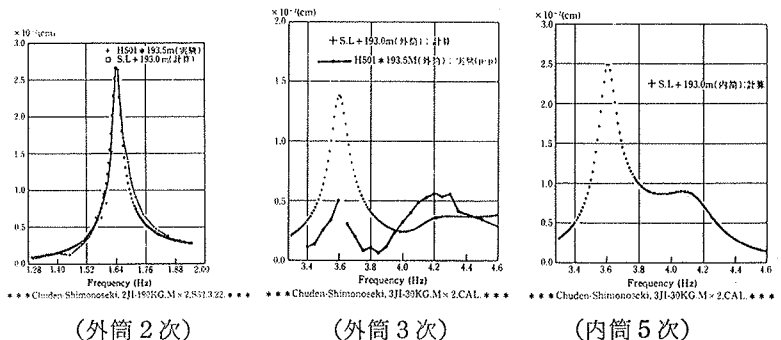


図-17, 図-18, 図-19 共振曲線の解析例

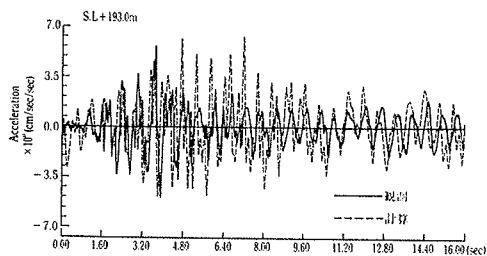


図-20 応答波形の比較(S.L.+193.0m)

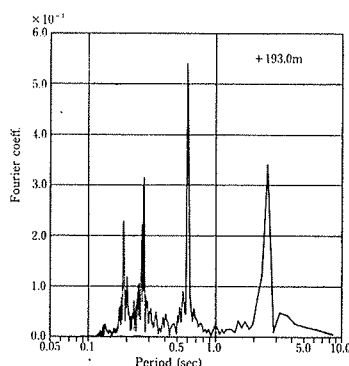


図-21 解析波(S.L.+193.0m)

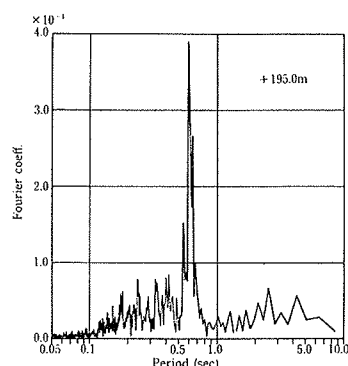


図-22 観測波(S.L.+195.0m)

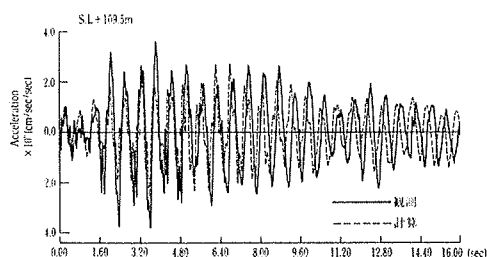


図-23 応答波形の比較(S.L.+109.5m)

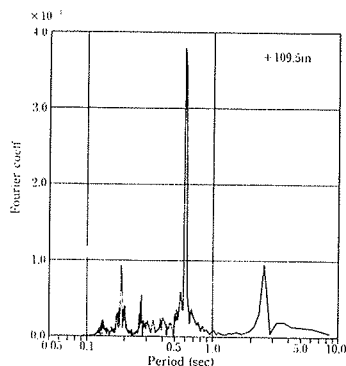


図-24 解析波(S.L.+109.5m)

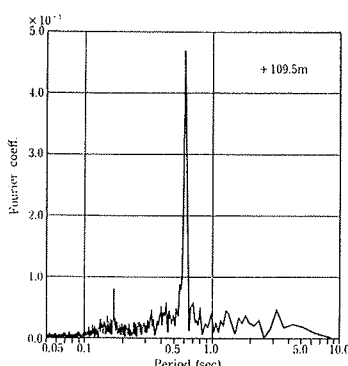


図-25 観測波(S.L.+109.5m)

るために1.22%を使用し、1次と3次は実験値を与え、4次以上については3次を基準とした振動数比例型で与えた。3次共振曲線の解析例として、MODEL-Bの場合の外筒頂部と内筒頂部のものを図-18、図-19に示す。MODEL-Bの共振曲線の解析では、基礎はスウェイのみを考慮し、モードの重ね合わせは12次迄を考慮した。各次減衰定数は外筒の1次から3次に当たる次数では実験値を使用し、4次以上はMODEL-Aと同様に振動数比例型で与えた。以上から3次共振曲線の形状は、実験結果と完全には一致しないが、実験で確認された外筒3次の2つのピークが表われることがわかる。

6.3. Siteの地震波によるシミュレーション

計算手法はRunge-Kutta 4thを使用しモーダル法によった。基礎部はMODEL-A, Bともスウェイ、ロッキングを考慮し、重ね合わせのモード次数はMODEL-Aが6次、MODEL-Bが12次である。与えた減衰定数を表-4に示す。入力地震波はG. L-23.0mの修正加速度: COA CCA5N, 0.606 GAL・MAXである。解析例として、MODEL-Bの場合の外筒頂部とS. L+109.5mの測点について、実測と計算の応答波形とフーリエスペクトルの比較を図-20から図-25に示す。又、MODEL-A, Bの最大加速度、最大剪断力、最大曲げモーメントの比較を図-26に示す。モデル化に多少の不備はあろうが、このような簡単なモデル化によっても、煙突筒体部においては観測と計算がほぼ一致している。又、地震時に

MODEL-A		MODEL-B	
i_A	$ah_i(\%)$	i_B	$ah_i(\%)$
1	0.82	1	1.32
		2	0.82
		3	1.32
		4	1.32
2	1.22	5	1.22
		6	2.61
3	1.28*	7	1.28*
		8	4.02
4	1.79	9	1.81
		10	5.86
		11	2.60
		12	8.45
		6	4.01

*実験時筒体部各測点の回帰分析による平均値

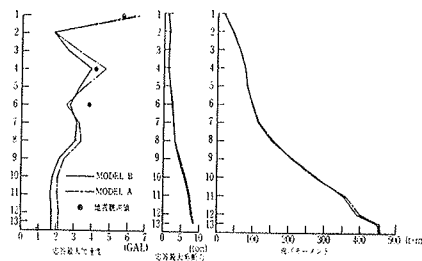


図-26 MODEL-A, Bの比較

表-4 解析時の減衰定数

ける内筒の振動の影響は、断面算定のもとになる応答応力に関しては、ほとんど表われていない(図-26)。

7. まとめ

実験および解析の結果から次のことが言える。(1)当煙突の固有周期比は、 $2.56:0.61:0.278=1.0:0.238:0.109$ であり、一般のR. C.煙突の実験式にほぼ合うものである³⁾。(2)当煙突の外筒のヤング係数は、鉄筋の割増し効果を考へて 329 t/cm^2 として解析すれば実験値に良く合う。(3)地震時においては、内筒の振動の影響はほとんど表われず、内筒と外筒を分離したモデルで解析する必要はない。(4)当煙突の3次減衰定数は解析上1.55%が妥当であり、4.02%は外筒が3次形をとり、内筒の振動が励起された時の減衰定数であると推測される。

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。実験にあたっては、当社特殊工法下関工事事務所、下関共同企業体の方々に御世話になりました。又、本研究を進めるにあたっては、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、当技術研究所材料第一研究室久保田昌吾主任研究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) 中川, 他: ある長スパンビルの振動実験, 大林組技術研究所報, No. 15, (1977)
- 2) 表, 他: 実存煙突の振動実験, 大林組技術研究所報, No. 11, (1975)
- 3) 大沢, 他: 実在煙突の振動特性 (建築物の耐震設計資料・53), 建築雑誌, (1973. 9)