

火力発電所ボイラー建家の振動特性に関する実験的研究 (その3)

—地震観測とそのシミュレーション解析—

中川 恭次 渡辺 清治
角田 智彦 安井 譲
金子 正孝

Experimental Study on Vibrational Characteristics of Boiler Building of Thermoelectric Power Plant (Part 3)

—Earthquake Observations and Simulation of Results—

Kyoji Nakagawa Seiji Watanabe
Tomohiko Tsunoda Yuzuru Yasui
Masataka Kaneko

Abstract

In the previous paper (Part 2) the authors described the modelling process of a boiler building superstructure for dynamic analysis, and investigated the propriety of this dynamic model. In this paper, the authors describe the results of earthquake observations and explain the vibration properties of the boiler building. Simulation analyses of observed seismic waves are carried out and the propriety of the dynamic model is investigated anew. It is therefore considered that this model is appropriate as a dynamic analysis model for the boiler building. In a modelling process, the dynamic properties of the outer vessel of the boiler must be considered carefully because the vibrational characteristics of a boiler building are influenced by these properties.

概 要

前報^{1),2)}までに、実機ボイラー建家の一連の振動実験の概要とその結果について述べ、これらの結果を踏まえて作成した動的解析モデルを提案した。この報告では、ボイラー建家の稼働時の地震観測結果について述べ、地震時の振動性状を明らかにした。更に、前報²⁾で述べた動的解析モデルを使用して観測地震波のシミュレーション解析を行ない、モデル化の妥当性を検討した。

その結果、地震時にも、ボイラー建家の全体1次振動モードとボイラー本体の振子振動モードが、卓越することが確認された。更に解析モデルは、ボイラー建家の動的解析モデルとしてほぼ妥当であり、シミュレーション解析にあたっては、ボイラー本体外箱の動特性が、ボイラー建家全体の、地震時の応答特性に影響を与えるので、ボイラー外箱の動特性を十分に考慮する必要があることが確認できた。

1. まえがき

この火力発電所のボイラー建家は、ボイラー本体とそれを屋上より吊り下げるボイラー支持鉄骨フレームで構成されている。このボイラー本体と支持鉄骨フレーム間には、ストッパー²⁾が設置されており、地震時に作用するボイラー本体の水平力を直接、支持鉄骨フレームに伝達する役割を果たしている。竣工後のボイラー稼働状態においては、ボイラー本体の熱膨張によって、このストッパー部で、ボイラー本体がボイラー支持鉄骨フレームと

接触する現象が実際に観察される。起振機実験¹⁾では、この接触した状態も想定して、実験を実施している(ライナー^④)。竣工後のボイラー稼働状態において、ボイラー建家の固有振動特性が、実際に、どのように変化するのは一つの興味あることである。

この報告では、この点に着目して、竣工後の地震観測結果から、ボイラー建家の地震時の振動性状が、過去に実施した一連の振動実験結果と比較して、どのように変化しているのかを述べる。

更に、前報²⁾で述べた動的解析モデルを使用して、採

取地震波のシミュレーション解析を行ない、モデル化の妥当性を検討する。

2. 地震観測

このボイラー建家では、竣工後の昭和56年9月から地震観測を実施している。その結果、昭和57年4月、5月、12月に各1回の地震を採取することができた。ここでは、この観測結果の一部を紹介し、竣工後のボイラー建家の振動性状について述べる。

2.1. 地震観測システム

観測システムの測点配置を図-1から図-3に示す。図-1は、ボイラー建家の全体平面配置と地盤系の測点配置を示す。図-2と図-3は、ボイラー建家及び杭中の測点配置を示す。更に、図-4に、観測システムのフロー図を示す。

以上の図に示した如く、この地震観測システムは、A-1からA-12までの12測点と、スタータ測点のS-1とS-2の2測点から成る。A-1からA-5までは、ボイラー支持鉄骨フレームの測点で、A-6及びA-7は、ボイラー本体外箱の測点である。A-8からA-10は、杭中の測点で、A-11とA-12は、各々、地表と地中の測点である。S-1は、ボイラー建家の基礎マット上に設置された水平成分(速度)の起動測点であり、S-2は、G.L.-50.0mの風化花崗岩中に埋設された上下成分(加速度)の起動測点である。

この様に、このシステムの起動検知方式は、加速度及び速度による起動方式を採用しており、いずれか一方が設定レベル以上の地震動を感知した時に作動するようになっている。

使用した計器は、S-1測点の動電速度変換方式による動コイル型速度計($f_0=1\text{Hz}$)を除いて、すべて、サーボ型加速度計($f_0=500\text{Hz}$)である。

測定方向は、S-2測点の上下方向を除いて、起振機実験時と同じく、すべて、NS方向である。

2.2. 地震観測結果

採取した地震波の諸元を、表-1に示す。この表において、オリジナル波とは、採取された加速度波形のA.D処理後、無修正の波形を言う。更に、修正波とは、オリジナル波をフーリエ変換し、10Hzから20Hzで、COS曲線的にフーリエ係数をカットして、機械振動による20Hz以上の周波数成分を取り除いた加速度波形を言う。この際に、位相は、元の波形のまま固定している。

採取地震波の例として、表-1の最も加速度の大きい、地震番号3のA-1からA-6測点の記録波形(修正波)を図-5に示す。この記録波形のうち、A-1とA-6測点のフーリエスペクトルを各々、図-6と図-7に示

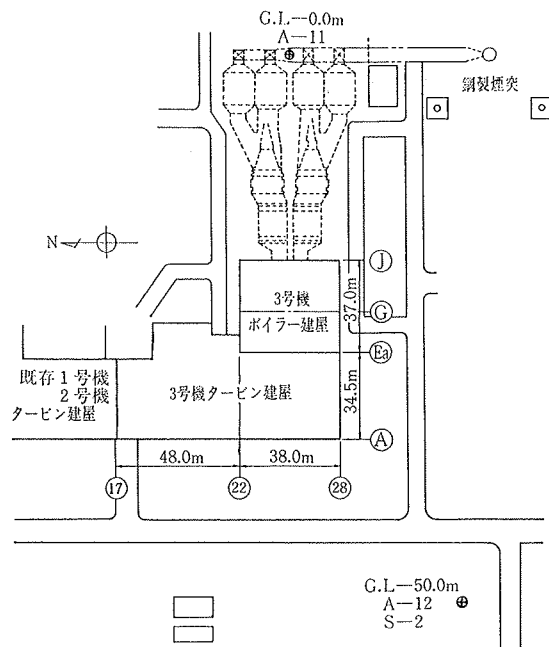


図-1 ボイラー建家の全体配置図

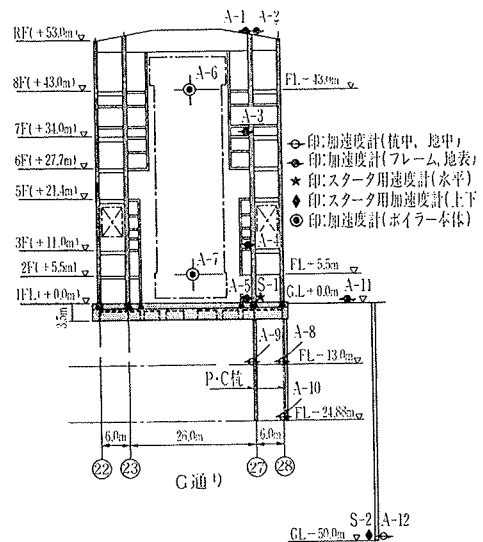


図-2 ボイラー建家の測点配置 (G通り)

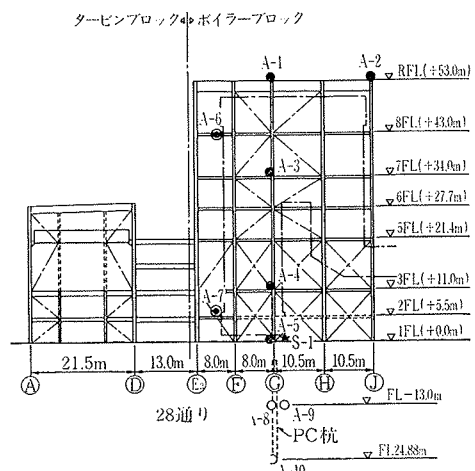


図-3 ボイラー建家の測点配置 (28通り)

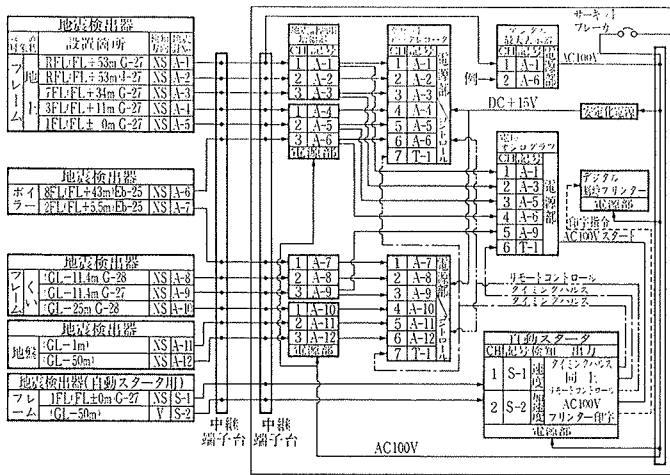


図-4 計測システムのブロック図

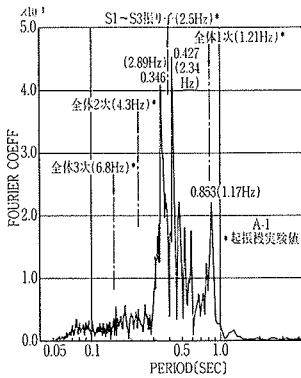


図-6 フーリエスペクトル (A-1測点)

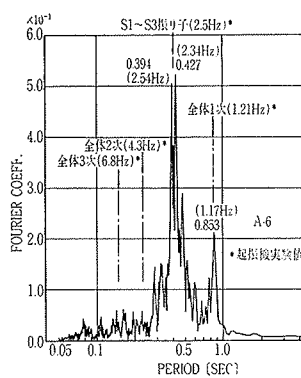


図-7 フーリエスペクトル (A-6測点)

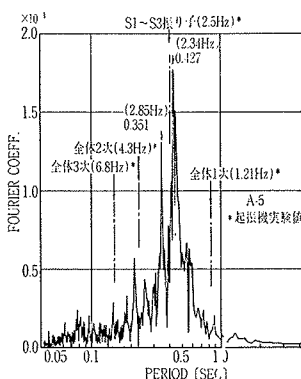


図-8 フーリエスペクトル (A-5測点)

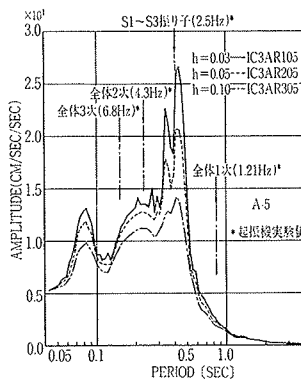


図-9 レスポンススペクトル (A-5測点)

す。更に、図-8および図-9に各々、後述するシミュレーション解析で入力地震波として使用した、A-5測点(修正波)のフーリエスペクトルとレスポンススペクトルを示す。

図-6から図-9には、起振機実験¹⁾で求めた代表的な共振振動数も示した。この起振機実験時の共振振動数と観測波のフーリエスペクトルのピークから、地震時

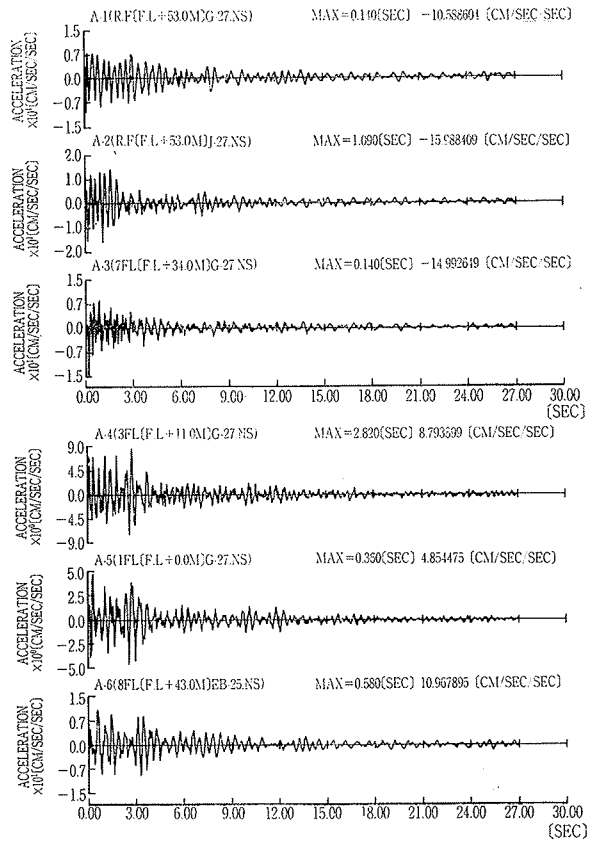


図-5 観測地震波(地震番号3のA-1~A-6測点)

地震番号	地震発生年月日	地震名(震源地域名等)	マグニチュード	震源深度	震度	震央距離	最大加速度(g)				起動タイプ
							原国	上段	下段	修正波	
1	S57年4月5日13時33分	伊予灘	小区域	4.6	II	50	7.65	2.23	2.31	1.12	X
2	S57年5月31日21時38分	伊予灘	局発	3.4	I	50	2.06	1.20	1.29	0.62	X
3	S57年12月10日9時32分	安芸灘	小区域	4.9	III	50	9.2	4.96	3.69	---	X

表-1 地震観測システムによる採取地震波

実験手法	測定時の状態	測定方向	全体1次振動モード		振り子振動モード	
			固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
人力加振実験	ボイラー吊り下げ前(支持フレームのみ)	NS	1.7	0.9	-	-
人力加振実験	ボイラー吊り下げ前(支持フレームのみ)	EW	1.8	0.9	-	-
起振機実験	ボイラー吊り下げ後(ライナー無し)	NS	1.16	2.8	2.3	2.92
起振機実験	ボイラー吊り下げ後(ライナー有り)	NS	1.21	1.4	2.5	2.4
地震観測	竣工後	地震NO.①	1.25	-	2.34	-
		地震NO.②	1.22	-	2.77	-
		地震NO.③	1.17	-	2.44	-

表-2 ボイラー建家の固有振動数の推移

にも、ボイラー建家の全体1次振動モードとボイラー本体外箱の振り子振動モードが、卓越していることがわかる。ここで、全体1次振動モードとは、ボイラー支持鉄骨フレームが1次型を取り、ボイラー建家全体が一体となって振動するモードであり、MODE-No. ①¹⁾に対応す

階名	タービン建屋		ボイラー支持鉄骨フレーム										ボイラー本体の外箱				ボイラー本体の内部パネル				
	A~D通り		Ea通り		F通り		G通り		H通り		J通り		S1~S3部		S10, S11部		EV, R-3a, 等		S, R-7, S-8部		
	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	質点番号	重量 (ton)	
R F			6	258	14	246	20	240	26	214	32	85									
8 F			7	166	15	93	21	129	27	118	33	78	38	215	42	264				46	881
7 F			8	174	16	80	22	93	28	104	34	68	39	200	43	200					
6 F	1	1107	9	195	17	273	23	270	29	180	35	92	40	264	44	295	45	1567			
5 F	2	1254	10	1202	18	328	24	167	30	185	36	183									
4 F	3	714	11	978																	
3 F	4	2129	12	1201	19	429	25	214	31	224	37	161	41	380							
2 F	5	1580	13	526																	

表-3 動的解析モデルの各質点の重量

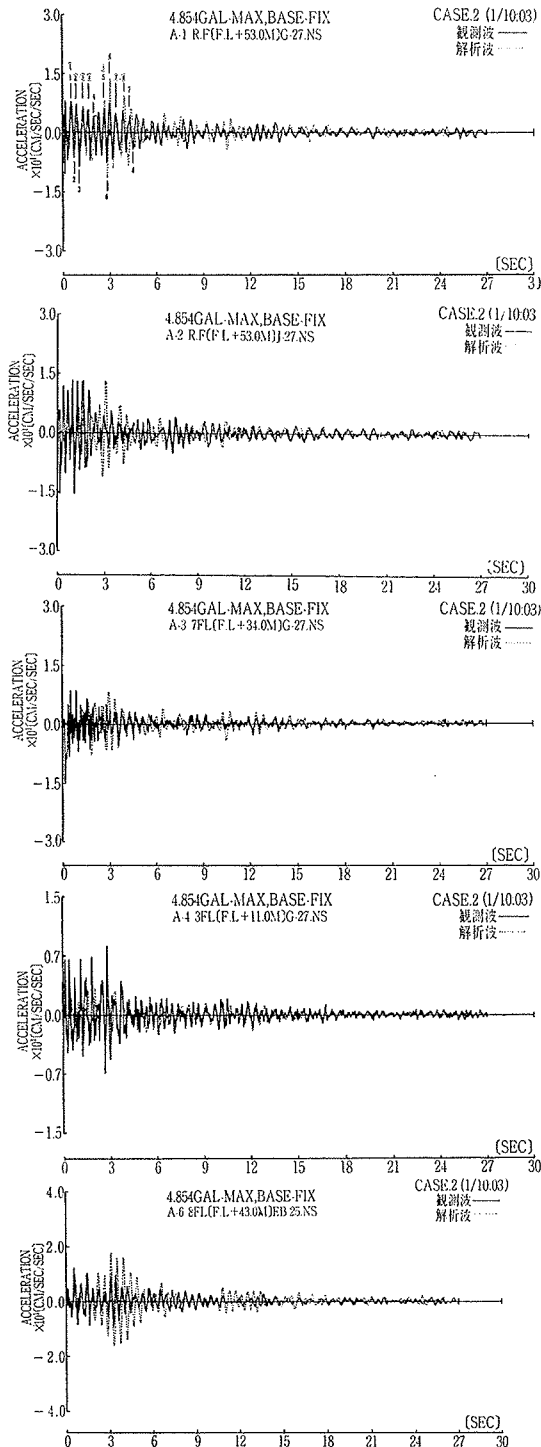


図-10 観測波と解析波の比較

起振機 実験値	・ライナー④ (Hz)	1.16	1.85	2.3	4.2	5.0	6.6														
	h (%)	2.82	2.57	2.92	3.82	3.33	2.64														
・ライナー⑤ (Hz)	1.21	1.83	2.5	4.3	5.15	6.8															
	h (%)	1.42	1.57	2.4	4.03	****	3.74														
・モードの特徴	全体	フレームのみ	S1~S3	全体	S10,11	全体															
	1次	タービン建屋	振り子	2次	振り子	3次															
地震観測値	地震NO.1 fo (Hz)	1.25			2.34																
					2.77																
	地震NO.2 fo (Hz)	1.22			2.44																
地震NO.3 fo (Hz)	1.17			2.34																	
				2.89																	
解析値	解析上の次数	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次	12次										
	解析上のモードの特徴	全体	ボイラー	タービン	S1~S3	全体	タービン	S1~S3	全体	S10,11	全体	S10,11									
	CASE.2(ライナー④)fo(Hz)	1.19	1.92	2.27	2.92	4.60	5.02	5.52	6.43	6.66	7.17										
	ライナー⑤に相当)h(%)	1.5	3.0	7.0	6.0	4.03	3.0	3.0	3.74	3.0	3.0										

*解析上の1次、2次は、ボイラー本体内部パネルの固有振動数であり、E-5パネル群が約3sec、S-1パネル群が約2secである。

表-4 固有振動数の比較及び応答解析時の各次減衰定数

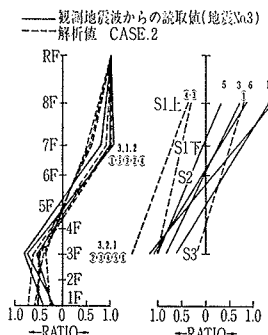


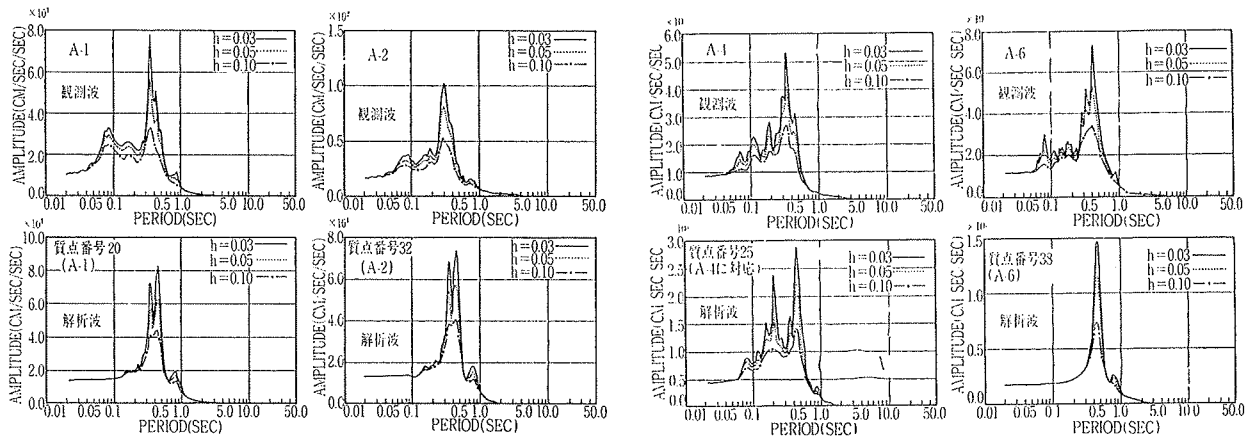
図-11 振り振動モードの比較

るものである。更に、振り子振動モードとは、ボイラー本体外箱のS1~S3部が振り子振動を呈するモードであり、MODE-No. ④¹⁾に代表されるモードである。ここで、当ボイラー建家の固有振動数及び減衰定数の推移を、過去の振動実験結果¹⁾と比較して、表-2に示す。地震時における卓越振動モードの固有振動数は、起振機実験値とほぼ同じ値を示したことが確認できる。更に、強て言えば全体1次振動モードの固有振動数は、地震番号1, 2ではライナー④の状態に近く、地震番号3ではライナー⑤に近い。これは、地震番号3の発生日時においては、定期検査中であり、ボイラーが移動していなかったことに起因すると推測される。

3. 観測地震波のシミュレーション解析

3.1. 解析モデル

ここで使用したボイラー建家の動的解析モデルは、合計46質点の曲げせん断系基礎固定モデルである。このモデルに使用した各質点の重量を、表-3に示す。詳細については、前報²⁾を参照されたい。



図一12 レスポンススペクトルの比較 (A-1, A-2, A-4, A-6測点)

3.2. シミュレーション解析結果

解析に使用した地震波は、地震番号3の地震である。応答解析手法は、通常のモーダル法を使用し、線形微分方程式の数値解析は、Runge-Kutta 4次を使用した。応答計算時に重ね合わせたモード次数は、18次迄である。

入力地震波は、ボイラー建家の基礎上のA-5測点の地震波(修正波)である。

解析では、各次減衰定数として、起振機実験値を基準に与えてケーススタディを行なった。このうち、前報の起振機実験のライナー⑥の状態に相当する、CASE 2の固有値解析結果と応答解析時に与えた各次減衰定数を、起振機実験値及び地震観測結果と比較して、表一4に示す。CASE 2では、ストッパー部のバネ定数として、前報の解析で求めたバネ剛性の1/10を使用している²⁾。

CASE 2の応答波と観測地震波の比較例を、A-1, A-2, A-3, A-4, A-6の測点について図一10に示す。この時のボイラー建家の振動モードについて、観測と解析を比較したものを、図一11に示す。同図より、ボイラー本体外箱の振り子振動モードが卓越していることがわかる。

更に、観測地震波と応答解析波のレスポンススペクトルの比較を、A-1, A-2, A-4, A-6の測点について、図一12に示す。同図より、スペクトル形状については、ほぼ良い対応を示していることがわかる。しかし、その応答振幅は、特にボイラー本体の測点(A-6)においては、振り子振動の固有振動数領域において、約2倍の差があり解析の方が大きい。これは、ストッパー部のバネ剛性の効き方の分布状態が、起振機実験時と比べてかなり変動しているためと推測される。従って、ストッパー部のバネ定数の分布を変化させ、解析する必要があると考える。

以上の解析結果から、地震時の各次減衰定数として、少なくとも、全体1次振動モードに対して2%, 振り子振動モードに対しては7%前後のモーダル減衰量がある

ことがわかった。

4. まとめ

地震時のボイラー建家の挙動は、全体1次振動モードとボイラー本体の振り子振動モードが卓越していた。特に、振り子振動モードの卓越は顕著であった。

ボイラー建家の動的解析モデルによる結果を地震観測結果と比較・検討した結果、この解析モデルは、ほぼ妥当であることがわかった。この解析結果より、振り子振動モードのモーダル減衰量は、7%前後であった。これは、解析時のモーダル減衰量として、仮にボイラー建家の全体1次振動モードに対して、3%を与えた場合の振動数比例型に匹敵する量である。

以上述べたように、ボイラー建家の動的モデル化にあたっては、地震観測結果からも、ボイラー本体外箱の動特性を十分に考慮する必要があることがわかった。

謝辞

この調査研究は、中国電力(株)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。地震観測を実施するにあたっては、中国電力(株)土木部建築担当、中国電力(株)岩国発電所保修課の多数の方々のお世話になりました。又、本研究を進めるにあたり、実験計画の当初から、日本大学生産工学部顧問金井清教授より有用な示唆を受けました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺, 他: 火力発電所ボイラー建家の振動特性に関する実験的研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 24, (1982), pp. 47~56
- 2) 渡辺, 他: 火力発電所ボイラー建家の振動特性に関する実験的研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 26, (1983), pp. 56~60
- 3) 田村, 他: 火力発電所ボイラー建屋の振動特性に関する実験的研究(その6), (その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和58.9), pp. 947~950