

実機原子炉建屋の振動試験（その1）

——試験結果及び設計値との比較——

武田 寿一	角田 智彦	若松 邦夫
金子 正孝	中村 充	久納 俊雄
村橋 久弘		(本社 原子力本部)
(本社 原子力本部)		技術部
企画調査部		

Forced Vibration Tests on the Reactor Building of a Nuclear Power Station (Part 1)

Toshikazu Takeda	Tomohiko Tsunoda	Kunio Wakamatsu
Masataka Kaneko	Mitsuru Nakamura	Toshio Kunoh
Hisahiro Murahashi		

Abstract

Tsuruga Unit No. 2 Nuclear Power Station of the Japan Atomic Power Company is the first PWR-type 4-loop plant constructed in Japan with a prestressed concrete containment vessel (PCCV). This report describes forced vibration tests carried out on the reactor building of this plant. The following were obtained as results: (1) The results of the forced vibration tests corresponded well on the whole with the design values. (2) The vibration characteristics of the PCCV observed in the tests after prestressing are no different from the ones before prestressing. This shows that the vibration properties of the PCCV are practically independent of prestressing loads. (3) A seismic response analysis of the design basis earthquake was made on the design model reflecting the test results. The seismic safety of the plant was confirmed by this analysis.

概要

日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機は日本で初のプレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)を採用したPWR4ループ・プラントである。この報告は、本プラントの原子炉建屋に対して行なわれた強制振動試験結果について述べたものである。その結果、以下のことが明らかとなった。(1) 試験結果は設計値と全般的には良い整合性を示した。(2) テンドン緊張前後のPCCVの振動性状はほとんど変化なく、緊張の有無による有意な差は無いことが認められた。(3) 試験結果を反映させた設計モデルによる応答解析の結果、耐震安全上問題ないことが確認された。

1. はじめに

日本原子力発電株式会社敦賀発電所2号機は、日本で初のプレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)を採用したPWR型4ループ・プラント(出力1100MWe)である。この報告は、プラントの原子炉建屋に対して行なわれた起振機による強制振動試験とその結果に基づいた耐震安全性評価について述べたものである。

強制振動試験は、敦賀発電所2号機原子炉格納施設のうち、PCCV及び内部コンクリート(I/C)の固有振動特性を、原子炉外周建屋(REB)に設置した2台の150トン起振機及びPCCV頂部に設置した3トン起振機によって求めたものである。なお、PCCV加振に関しては、

テンダンの緊張前後について実施し、振動特性に及ぼす影響を把握した。

2. 原子炉建屋の概要

振動試験の対象である原子炉建屋は、同一の基礎版(厚さ8m)上に、それぞれ独立して建てられているPCCV、I/C、REB、及びREB上に立上がる鉄骨造のエンクロージャ棟(E/B)からなる構造物である。図-1に原子炉建屋の概要を示す。

3. 振動試験の概要

3.1. 使用起振機

振動試験に使用した起振機は、REB加振試験時には、

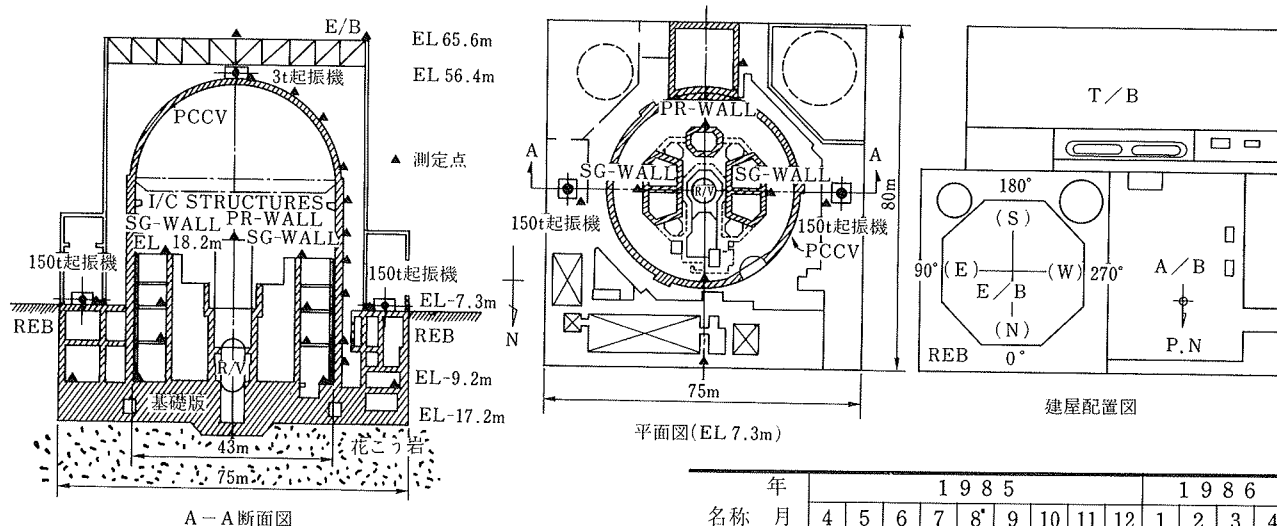


図-1 原子炉建屋概要、起振機設置位置及び測定点位置図

試験No.	加振位置	加振方向	使用起振機	加振方法	加振振動数範囲
①	REB	EW	150t, 2台連動	ステップ	2.0~20.0Hz
②	REB	NS	"	"	"
③	REB	上下	"	"	"
④	PCCV	EW	3t, 1台単独	"	"

表-1 試験ケース一覧

電力中央研究所所有の最大加振力150トンの偏心重量式起振機（150トン起振機）を2台連動で使用した。更に、PCCV 頂部加振試験時には、(株)大林組技術研究所所有の最大加振力3トンの建研型同期式起振機(BCS-A-200型)を1台使用した。

3.2. 起振機設置位置及び加振方向

起振機は図-1に示したごとく、150トン起振機についてはREBのEL+7.3mレベルの90°(E)と270°(W)位置におおの1台ずつ、また3トン起振機についてはPCCV 頂部のEL+56.4mレベルに1台設置した。

加振方向は、150トン起振機がEW, NSの水平2方向及び上下方向であり、3トン起振機がEW方向である。

3.3. 試験手順及び加振方法

試験は概略の振動特性を知る為にスイープ加振による予備試験を実施した後、ステップ加振（段階的加振）による本試験を実施した。

加振は2Hz~20Hz迄の振動数範囲において、0.05Hz~0.2Hzピッチの加振ステップで実施した。

3.4. 試験ケース

本試験は表-1に示したごとく、四つの加振ケースに分けられる。このうち試験No.④のPCCV加振については、テンドン緊張が振動特性に与える影響を調べるために、PCCVのテンドン緊張の前後におおの試験を实

年	1985												1986			
	名称	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4		
振動試験																
	I/C加振															
建屋建設工程	PCCV															
	機器工程															

表-2 振動試験工程表

施した。

なお、PCCVの加振方向については、PCCVの対称性からEW方向のみについて実施した。

3.5. 測点配置及び計測方法

測定はI/CとPCCVを中心に行なったが、REB, E/B, さらに隣接各建屋にも参考として測定点を設けた。又、PCCVにはオーバル振動測定用の測定点も設け、立体的な振動性状が把握できるように考慮した。図-1に代表的な測定点の位置を示す。

計測方法は、コンピュータを搭載した移動計測車によった。測定データはリアルタイムで処理し、結果を確認・管理しながら試験を実施した。

3.6. 試験工程

本振動試験は表-2に示すように、プラントがほぼ完成した1985年10月から1986年3月にかけて実施した。

4. 試験結果

4.1. I/Cの振動性状

REB NS加振時のI/C代表的測点の共振曲線を図-2, 図-3に示す。これらの図は、それぞれI/Cのうち蒸気発生器室(SG壁)と加圧器室(PR壁)の各高さ方向におけるものである。これらの共振曲線は加振力を1トンに規準化して示してある。両図より、7.6Hz,

10.6 Hz に明瞭な卓越振動数が認められる。両振動数でのモード形を図-4 に示した。この図は、各測点の1サイクルについての立体的な動きを分解して示したものである。同図より、7.6 Hz は全体並進の1次であり、10.6 Hz はSG壁とPR壁が反ばつて振動するモードである。SG壁はせん断変形卓越型のモード形を呈しているが、PR壁は上部で曲げ変形が卓越しているのが認められる。

REB EW 加振時の共振曲線を図-5、図-6 に示す。これらの図より、7.6 Hz にSG, PR 両壁に共通する卓越振動数が認められる。そのモード形を図-7 に示す。同図より、7.6 Hz はEW 方向の並進1次であることが分かる。なお、NS, EW 方向とも全体変形に対する基礎のス

ウェイの割合は非常に小さいことが認められる。

また、上下振動については明確な固有振動数は認められなかった。

4.2. PCCVの振動性状

テンドン緊張前のPCCV EW 加振時の共振曲線を図-8 に示した。同図よりPCCVのビーム振動としての固有振動数は1次4.7 Hz, 2次14.4 Hzと考えられる。1次及び2次の立断面モード形を図-9 に示した。両者とも単純なビームモード形を示している。オーバル振動については、PCCVの若干の非対称性により、応答振幅は極めて小さいものの低次から高次にわたる幾つかの固有振動が確認された。それらの固有振動数を後述する表-3に、また、代表的平断面モードを図-10に示す。同表

より、立断面1次(m=1)のオーバル振動は2次(n=2)から6次までが確認され、m=2についても幾つか認められた。テンドン緊張前後の各試験で確認されたすべての固有振動数を比較して表-3に一括して示した。同表にみられるように、テンドン緊張によりPCCVの固有振動数は高振動数側でわずかながら高くなるが、非常に微細なものであり、全体的

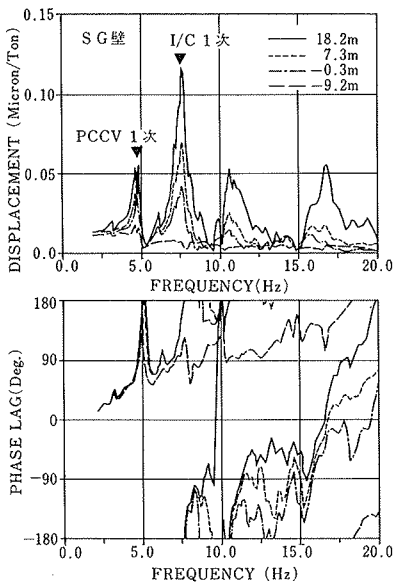


図-2 I/C SG壁 NS 共振曲線

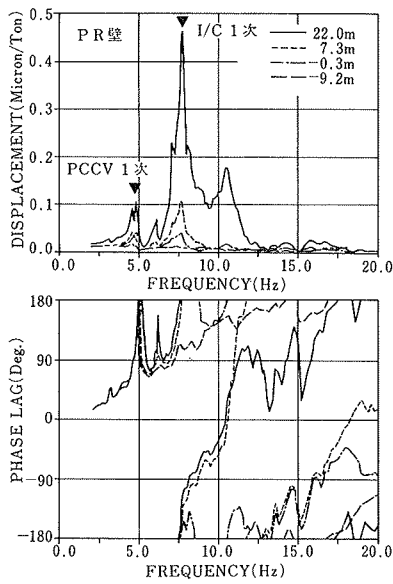


図-3 I/C PR壁 NS 共振曲線

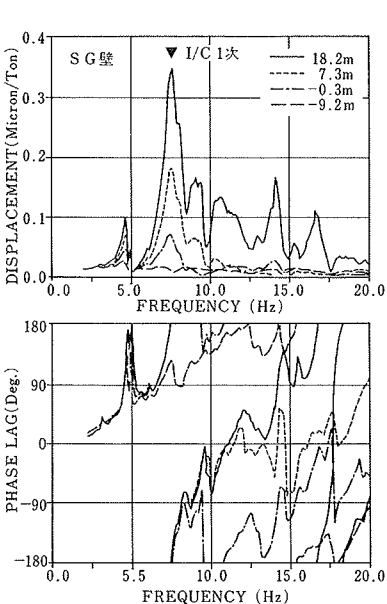


図-5 I/C SG壁 EW 共振曲線

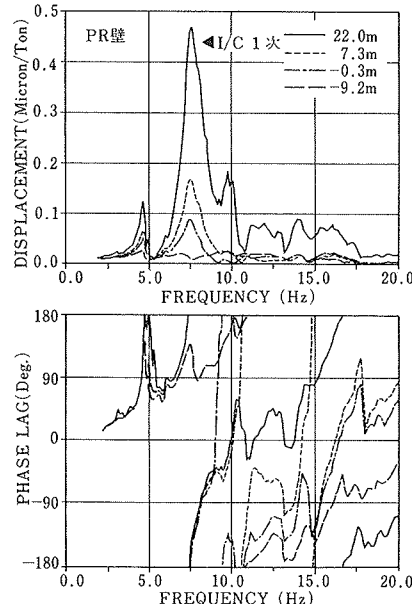


図-6 I/C PR壁 EW 共振曲線

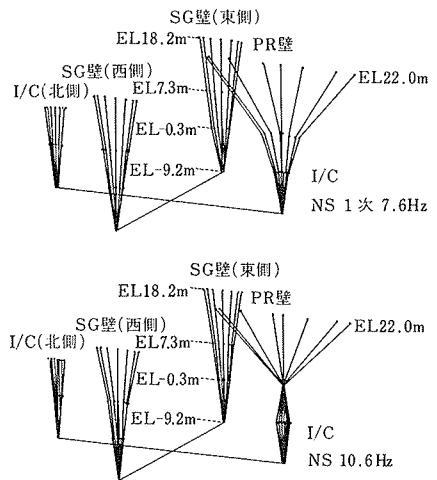


図-4 I/C NS モード形

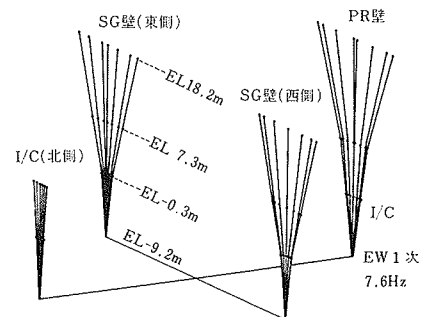


図-7 I/C EW モード形

にはテンドン緊張の有無による有意な振動性状の差はないものと考えられる。

REB UD 加振時の共振曲線を図-11に示す。同図より、上下方向の1次固有振動数は14.0 Hzと考えられ、そのモード形を図-12に示す。PCCV 脚部に地盤連成の影響が若干認められる。

4.3. E/B 及び REB の振動性状

REB NS 加振時の E/B における共振曲線を図-13に示す。同図より、3.15 Hz, 6.3 Hz に卓越振動数が認められる。高振動数領域では振幅、位相とも複雑な形状を示しており、鉄骨フレームとしての立体振動の影響と思われるピークがいくつか認められる。3.15 Hz, 及び 6.3 Hz のモード形を描いたのが図-14である。同図より、それらは E/B の1次及び2次と考えられ、脚部の REB 部分はほとんど振動していないのが分かる。なお、E/B に関しては建屋頂部での人力加振による試験においても1次に関しては十分な精度でその振動特性が確認された。

E/B 屋根スラブの上下振動は高次まで比較的明瞭に認められ、その1次固有振動数は3.48 Hzであった。1次モード形を図-15に示す。

REB については耐震壁方向と平面的に90°異なる耐震壁面外方向とでは異なる振

モード	PCCV加振		REB加振
	テンドン緊張前	テンドン緊張後	
ビーム 1次	4.7Hz	4.7Hz	4.86(NS) 4.62(EW)
オーバル _{n=3}	7.4	7.5	—
オーバル _{n=2}	8.2	8.2	8.1Hz
オーバル _{n=4}	9.5	9.6	9.3
ねじれ	10.3	10.4	10.3
オーバル _{n=5}	13.7	14.0	—
上下	—	—	14.0
ビーム 2次	14.4	14.7	14.36(NS) 14.55(EW)
オーバル _{m=2} ⁿ⁼⁴	14.8	—	—
オーバル _{m=2} ⁿ⁼⁵	18.0	18.4	—
オーバル _{n=6}	19.0	19.6	—

表-3 PCCV の固有振動数

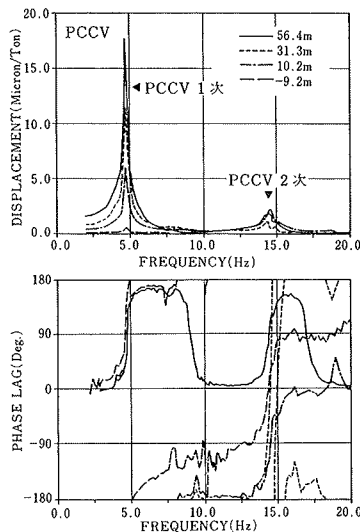


図-8 PCCV EW 共振曲線

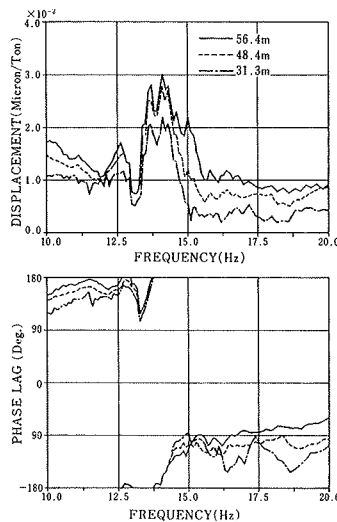


図-11 PCCV 上下共振曲線

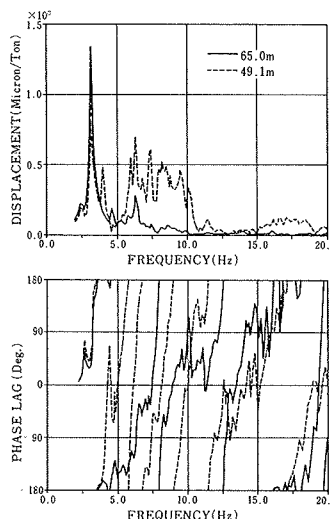


図-13 E/B NS 共振曲線

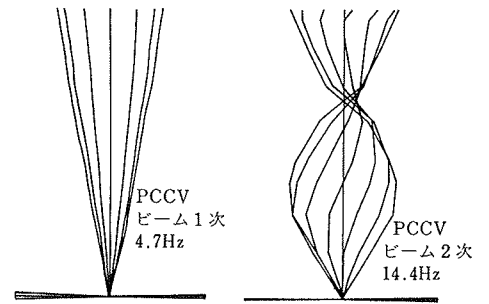


図-9 PCCV 立断面モード形

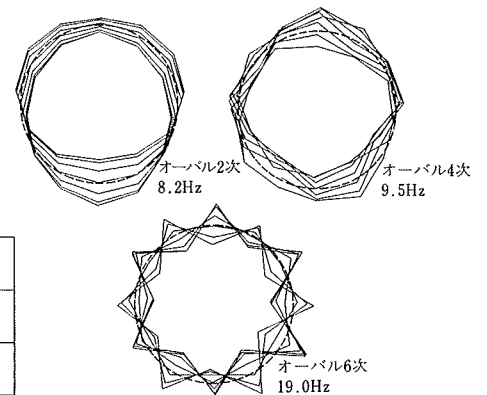


図-10 PCCV 平断面モード形

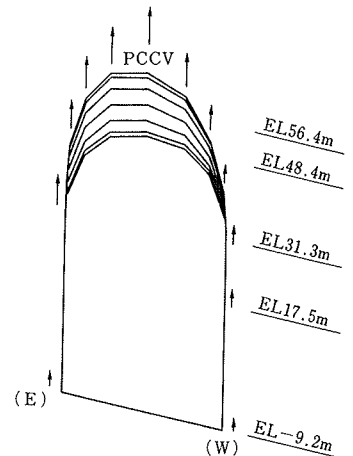


図-12 PCCV 上下モード形

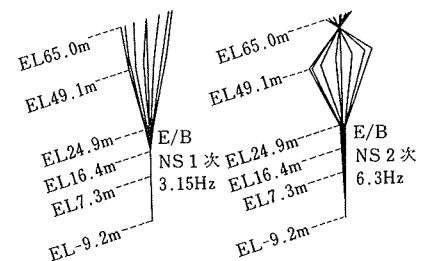


図-14 E/B NS モード形

動性状を示し、剛床仮定による集約化モデルでは表現することが困難な特性が認められた。

4.4. 常時微動による建屋の振動性状の確認

PCCV, I/C 及び E/B の各構造物頂部における NS 方向の常時微動記録に対するフーリエスペクトルを図-16に示す。これらの図より、PCCV や E/B のように比較的構造形式が単純で、かつ固有振動数の低い構造物については常時微動からも固有振動数の確認は可能であるが、I/C のように複雑でかつ固有振動数の高いものになると常時微動から明確な固有振動数の把握は難しいといえる。

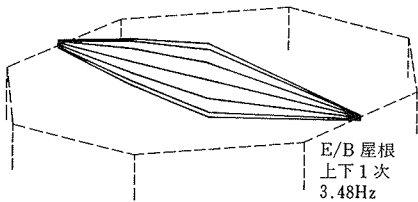


図-15 E/B 屋根上下モード形

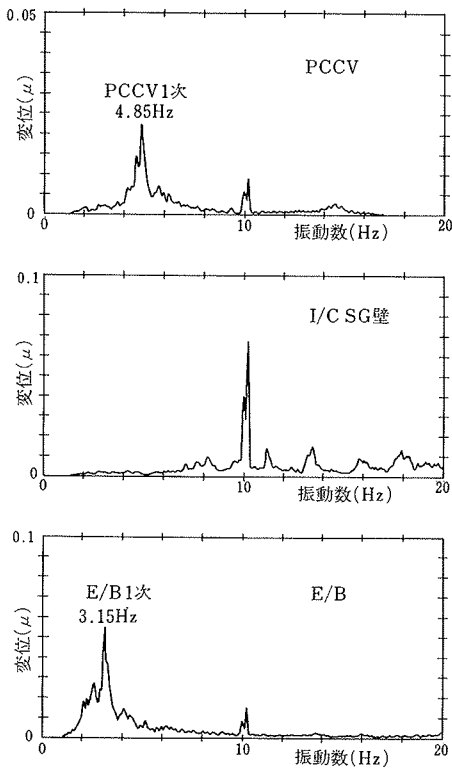


図-16 常時微動記録のフーリエスペクトル

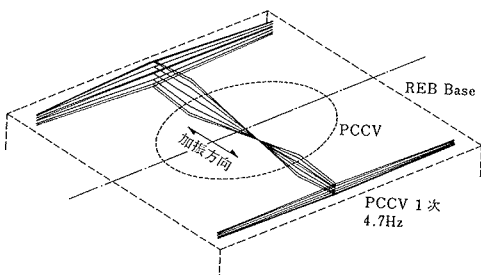


図-17 基礎版表面の変形例

4.5. 基礎版表面の変形

PCCV 1次共振点での基礎版表面の上下方向変形分布を図-17に示す。同図より、基礎版表面は卓越して振動するPCCV脚部で大きな振幅を示し

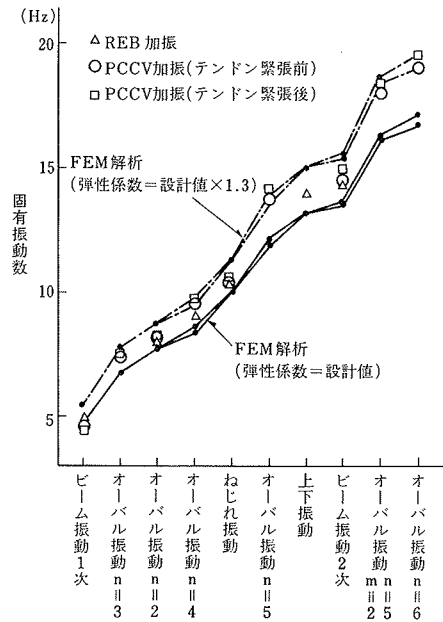


図-18 PCCV 固有値解析結果と試験結果の比較

ており、基礎版へのめり込みが認められる。PCCV 脚部のめり込み量より求めた局所的な回転バネは全体地盤回転バネの約1/5程度の値を示した。また、高振動数領域では振動数の変化に伴って基礎版表面は非常に複雑な変形モードを示すことが認められた。

5. PCCV の3次元 FEM モデルによる固有値解析

PCCV の3次元振動モードを評価するために、バット

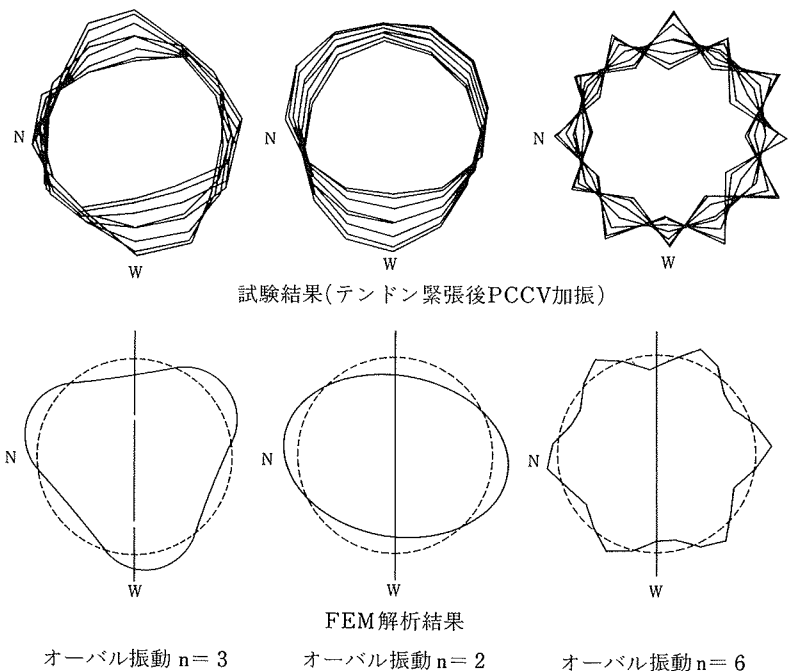


図-19 PCCV 平面モード形状の比較

レス、機器搬入口、ポーラークレーン重量などを考慮した脚部固定のFEMモデルにより、固有値解析を行なった。解析結果と試験結果の比較を図-18に示す。

オーバル振動においては、解析で用いたコンクリートの弾性係数を設計値（304 ton/cm²）の1.3倍とした時の固有値が、試験結果と高い次数まで良く一致することが分かる。このことから、実機の微小歪レベルにおけるコンクリートの弾性係数は、約400 ton/cm²と推定される。

ビーム振動、ねじれ振動、上下振動などのモードは、試験結果が解析結果よりやや低い固有振動数を示している。これは、このモデルで考慮していないPCCVの基礎版への弾性めり込み効果、及び地盤ばねとの相互作用の影響によるものと考えられる。

図-19には、EL+22 mにおける平断面モード形状を、解析結果と試験結果とを比較して示す。

6. 設計値との比較

振動試験の結果得られた代表的な固有振動数を設計値と比較して表-4に示した。ここで示した設計値は基本設計時における評価値である。試験値は各構造物の代表的測点での共振曲線を1自由度系の最適化手法を用いて評価した場合の平均値である。同表より、固有振動数は両者比較的良好な対応を示しているが、一部に若干の差が認められる。減衰定数に関しては歪レベルの影響により試験値は設計値に比べると若干小さい値を示した。

			試験値		設計値	
			固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
I / C	NS	1次	7.57	3.4	9.64	6.3
	EW	1次	7.59	5.0	9.39	5.9
PCCV	EW	1次	4.72	2.5	4.62	3.3
		2次	14.70	1.6	14.80	3.2
E / B	NS	1次	3.15	2.2	2.79	2.1
		2次	6.31	1.8	7.26	2.4

表-4 試験結果と設計値の比較

7. 設計モデルによる耐震安全性評価

固有値に関する試験結果と設計値はおおむね一致しているものの若干の差が認められる。そこで、実施設計時に用いた設計モデルを脚部のめり込みなど試験結果を反映させた形で評価モデルを再構築し、耐震安全性の確認を行なった。設計で使用した最大加速度365 galの基準地震動を入力したときのNS方向のベースシアー係

数を表-5に示す。最大応答値はせん断力、曲げモーメントとも設計許容値以下であり耐震安全性の上で問題ないことが確認された。なお、本耐震安全性評価は参考文献1)より引用したものである。

構造物	評価モデルによる 応答値	設計許容値
I / C	1.212	1.550
PCCV	1.202	1.872
REB	0.750	0.926

表-5 ベースシアー係数

8. まとめ

原子炉格納施設の振動試験の結果、以下の事柄が明らかとなった。

(1) 固有振動数に関しては試験結果は設計値と全般的に良い整合性を示したが、一部については若干の差が認められた。

(2) 減衰定数はPCCV 1次で2.5%、I/C 1次で3~5%程度であり既往のPWR型原子力発電所の振動試験結果とほぼ同等の値が得られた。

(3) テンドン緊張前後のPCCVの振動性状はほとんど変化なく、緊張の有無による有意差はないものと考えられる。

(4) 試験で確認されたビーム、オーバリング、ねじれ及び上下の各振動はFEM解析による結果と良好な対応を示した。

(5) 特に、地盤との連成効果が小さいと考えられるオーバリング振動の固有振動数が、コンクリート弾性係数を設計時の1.3倍としたものに極めて良く一致した。

(6) 試験結果を反映させた設計モデルによる応答解析の結果、各部の応答せん断力、曲げモーメントは許容値以内であり耐震安全上問題はないものと判断された。

謝辞

実機原子炉建屋の振動試験を委託され、更に当所報への発表を快諾して下さいました日本原子力発電(株)建設部の方々に心から感謝申し上げます。また、試験時に多くの便宜を図って頂いた三菱重工業(株)及び原電敦賀建築共同企業体の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤宗明, 他: 実機原子炉建屋の強制振動試験(その3), 日本建築学会大会梗概集(B), (昭和62, 10), pp. 279~280