

PWR 型原子炉建屋の振動試験

此上典文 中村 充 安井 譲
川崎 欽司 金山 敬
(本店 建築設計第7部) (本店 建築設計第7部)

Forced Vibration Tests on the Reactor Building of a PWR Type Nuclear Power Station

Norifumi Konoue Mitsuru Nakamura Yuzuru Yasui
Kinji Kawasaki Takashi Kanayama

Abstract

This report describes forced vibration tests carried out on the reactor building of Unit No. 3, Ohi Nuclear Power Station of Kansai Electric Power Company. The primary purpose of the tests was to confirm the vibration characteristics of the inner concrete of the reactor building and the prestressed concrete containment vessel (PCCV). Characteristics such as natural frequencies, damping factors, and modal shapes were obtained through the tests.

Simulation analyses were also performed and the following were obtained as results. Considering the differences of the moduli of elasticity of the actual structures from those of designs, the vibration characteristics of the PCCV can be described well with the lumped mass model used as the design model. As for the inner concrete, a model using FEM is effective in describing the complex properties of the vibration characteristics of the structure.

概要

関西電力株式会社大飯原子力発電所3号機の、内部コンクリート(I/C)・原子炉格納容器(PCCV)の振動性状を把握し、耐震安全性を確認することを目的として、起振機による強制振動試験を行なった。試験は、I/Cに設置した2台の起振機によるI/Cの強制加振振動試験と、PCCV頂部に設置した起振機によるPCCVの強制加振振動試験とを行ない、I/C・PCCVそれぞれの固有振動数、減衰定数、振動モードなどを確認することができた。

さらに、振動試験のシミュレーションを行なった結果、PCCVの振動特性に関しては、設計用質点系モデルに、試験時のコンクリート弾性係数を考慮すれば、試験結果を再現することが可能であることや、I/Cの振動特性に関しては、FEMモデルを用いると、試験結果を極めて良く再現することが可能であることなどがわかった。

1. はじめに

関西電力株式会社大飯原子力発電所3号機は、プレストレスコンクリート製格納容器(PCCV)を採用したPWR 4ループ型(118万kW)プラントである。今回、原子炉建屋の耐震安全性を確認する目的で、3号機のプラントがほぼ完成した時期に、起振機を用いた強制振動試験を実施し、試験結果のシミュレーション及びシミュレーションに基づく原子炉建屋の耐震安全性の検討を行なった。

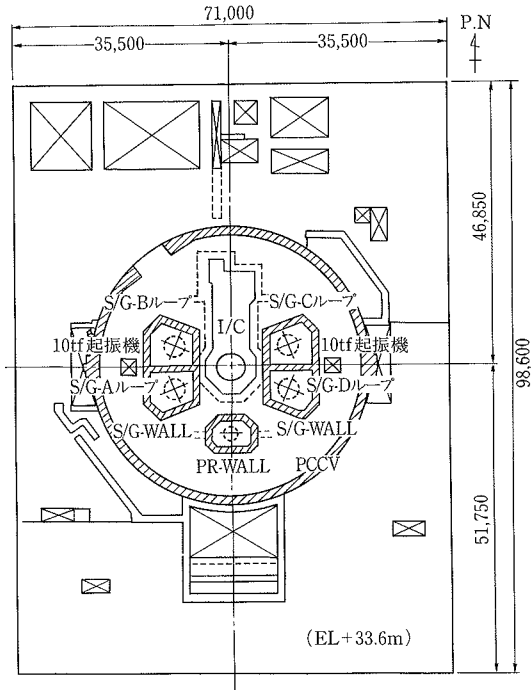
この報告は、振動試験の結果とそのシミュレーションの解析結果について述べたものである。

2. 振動試験

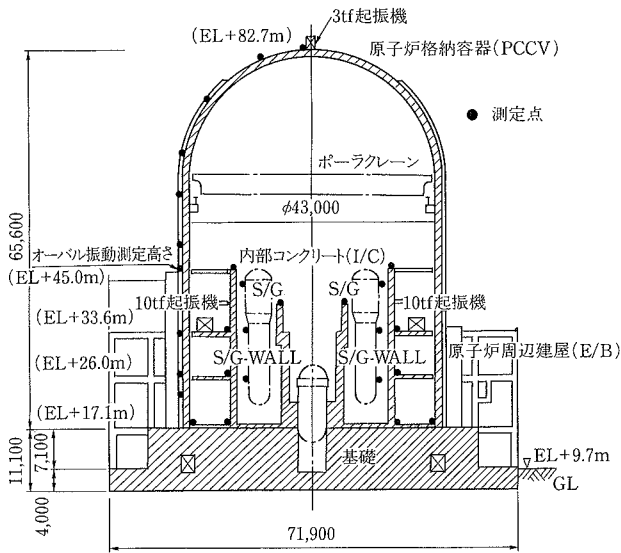
2.1 試験の概要

2.1.1 対象建屋 大飯原子力発電所3号機原子炉建屋の概要を表-1に示す。振動試験の対象は、このうちPCCV及び内部コンクリート(I/C)であり、これらは同一の基礎版(厚さ11.1m)上にそれぞれ独立して建てられている。図-1及び図-2に建屋の概略の平面図と断面図を示す。

2.1.2 使用起振機と加振方法 起振機は、榊大林組技術研究所所有の最大加振力10tfの偏心重量型起振機(EX-1,000HBL)と最大加振力3tfの建研型同期式起



図一 原子炉建屋の概略平面



図二 原子炉建屋の概略断面、起振機設置位置及び測点位置

振機 (BCS-A-200) を使用した。I/C 加振においては、既往の試験よりも大きく加振力を得るために、図一に示すように 10 tf 起振機 2 台を I/C 操作床面 (O/F EL+33.6 m) 上に、ねじれ振動が生じないように対称に設置し、連動させて使用した。加振は、ステップ加振とし、0.1 Hz の加振ピッチを基本にして測定データをみながら適宜選定し、1~25 Hz の振動数範囲について実施した。また、PCCV 加振においては、図二に示すように 3 tf 起振機 1 台を PCCV 頂部 (EL+82.7 m) に設置し、2~20 Hz の振動数範囲について、0.1 Hz の加振ピッチ

表一 原子炉建屋の概要

名称	構造	規模
原子炉格納容器	プレストレストコンクリート造	外径45.6m 地上高さ73.0m
内部コンクリート	鉄筋コンクリート造、一部鉄骨造	内径43.0m
原子炉周辺建屋	鉄筋コンクリート造、一部鉄骨造	地上7階建、地下1階建 地上高さ47.2m

表二 試験ケース一覧

加振位置	加振方向	使用起振機	加振方法	加振振動数範囲
I/C	NS	10tf, 2台連動	ステップ	1.0~25.0Hz
	EW	"	"	"
PCCV	NS	3tf, 1台単独	ステップ	2.0~20.0Hz
	EW	"	"	"

表三 振動試験工程

名称	年	1990						1991						
		月	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
振動試験														
			■ I/C加振						■ PCCV加振					
3号機 建屋 建設 工事	PCCV		▽ ドームCon 打設完了 仮開口閉鎖		▽ テンドン 緊張開始						▽ テンドン 緊張完了			
	I/C		▽ PR壁Con 打設完了											
機器工程			▽ CHT		▽ HFT		▽ SIT	▽ C/L			▽ LRT			

を基本としてステップ加振を行なった。なお、ポータークレーンは加振方向に対し直交する位置に固定した。

2.1.3 試験ケース 本試験は、表二に示すように、I/C 加振と PCCV 加振をそれぞれ NS 及び EW 方向について行なった。

2.1.4 測点配置と計測方法 測定は、I/C と PCCV を中心に行なった。図二に代表的な測定点の位置を示す。I/C 加振では、蒸気発生器 (S/G) と I/C 構造物の相互作用を適正に評価するため、S/G 支持サポートを固定し、かつ S/G 機器本体の振動計測も行なった。また、PCCV 加振では、PCCV のオーバル振動も測定できるような測点配置 (EL+45 m 位置) を考慮した。

計測は、測定データのリアルタイム処理により、結果の確認と試験管理を行ないながら実施した。

2.1.5 試験工程 振動試験は、表三に示すように、I/C 加振は 1 次系水圧試験 (CHT) の直後の 1990 年 10 月に、また PCCV 加振は、PS 工事のテンドン緊張完了かつ温態機能試験 (HFT) の直後、耐圧試験 (SIT) 前の 1991 年 1 月に実施した。

2.2 試験結果

2.2.1 I/C の振動性状 I/C の NS 加振時の共振曲線と位相曲線を一例として、図三に加圧器室 (PR 壁)

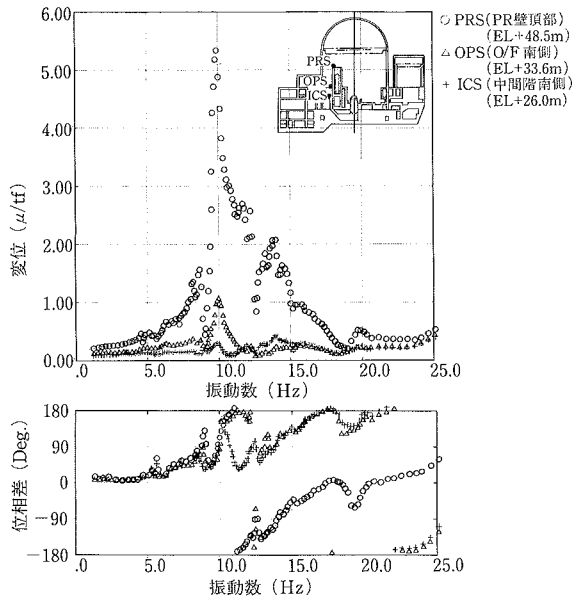


図-3 I/C 加振時の共振曲線(NS 方向・PR 壁)

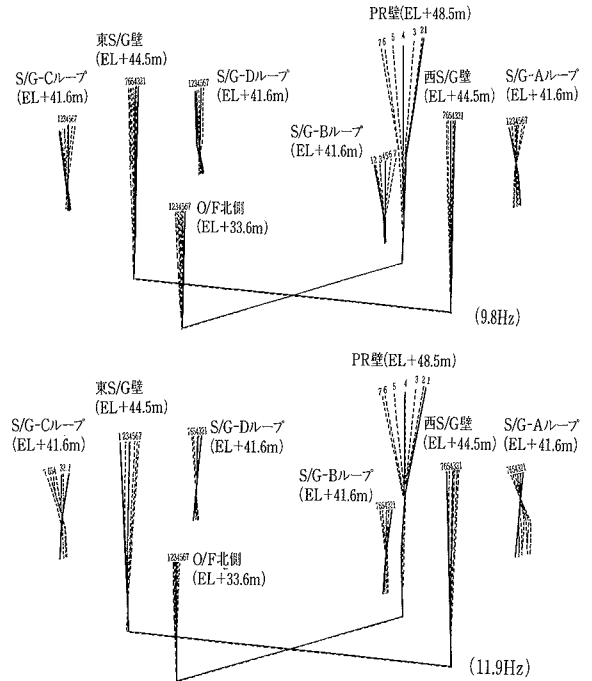


図-5 I/C 加振時の振動モード形(NS 方向)

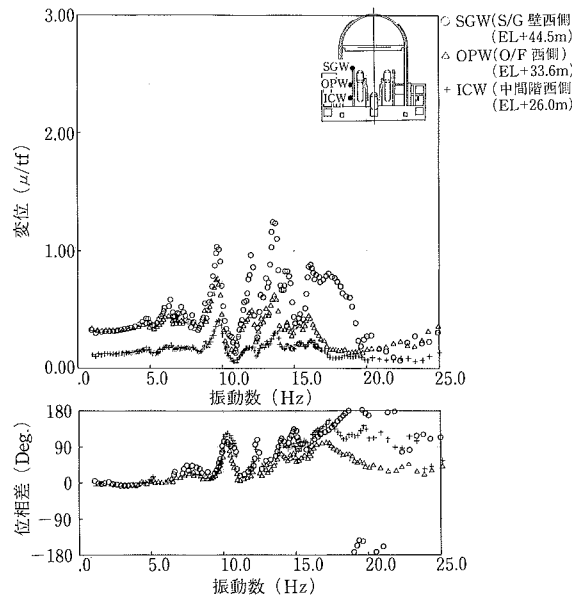


図-4 I/C 加振時の共振曲線(NS 方向・S/G 壁)

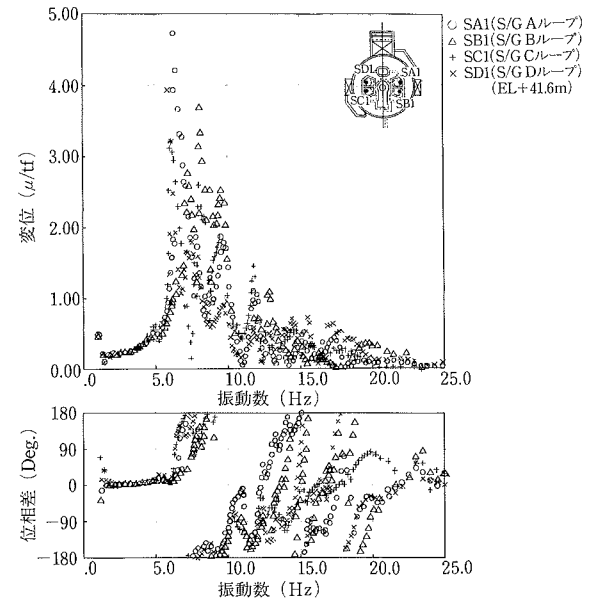


図-6 I/C 加振時の共振曲線(NS 方向・S/G 機器)

のものを、また図-4には蒸気発生器室(S/G壁)のものを示す。共振曲線の振幅値は、加振力1tfに基準化した変位である。PR壁及びS/G壁においては9.8Hz付近に顕著なピークがみられ、また11.9Hz付近及び13.9Hz付近にもピークが認められる。位相曲線から、9.8Hz付近と11.9Hz付近がI/CのNS方向ビーム振動の1次及び2次固有振動数であると考えられる。図-5は、この両振動数での振動モードであり、半周期の挙動を分割

表示したものであり、添字はその順序を示す。11.9Hzにおいては、PR壁とS/G壁とは反発したモードを示している。

図-6は、4ループのS/G機器本体の測点のうち、各ループのS/G機器本体頂部測点での共振曲線と位相曲線を示しているが、各S/Gループ毎の1次固有振動数が異なっている。表-4に、各S/Gループの共振曲線のピークから求めた1次固有振動数を示す。

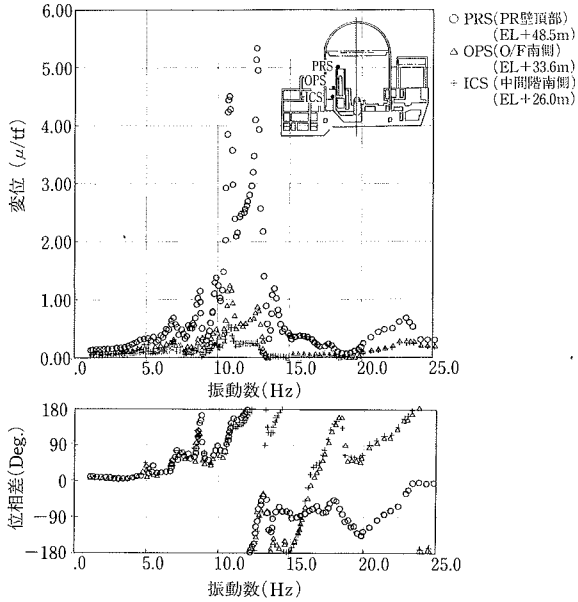


図-7 I/C 加振時の共振曲線(EW 方向・PR 壁)

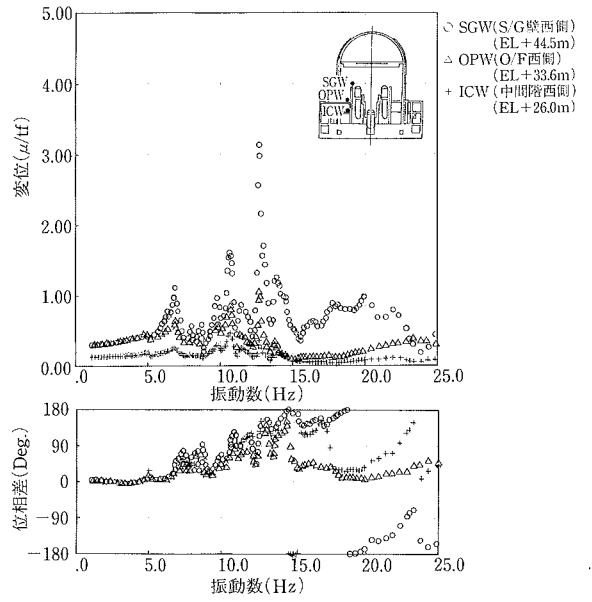


図-8 I/C 加振時の共振曲線(EW 方向・S/G 壁)

表-4 S/G 機器固有振動数

	Aループ	Bループ	Cループ	Dループ
NS方向	6.6Hz	7.4Hz	6.3Hz	6.2Hz
EW方向	6.9Hz	7.2Hz	6.4Hz	6.0Hz

表-5 I/C の試験結果

対象構造物	方向	次数	固有振動数	減衰定数
I/C	NS	1次	9.78Hz	3.0%
		2次	11.88Hz	1.8%
	EW	1次	10.62Hz	2.0%
		2次	12.69Hz	1.2%

表-6 PCCV の試験結果

対象構造物	方向	固有振動数	減衰定数	モード
PCCV	NS	5.01Hz(*)	1.7%(*)	ビーム1次(n=1)
		7.6Hz	—	オーバル n=3
		8.6Hz	—	オーバル n=2
		9.8Hz	—	オーバル n=4
		14.89Hz(*)	1.1%(*)	ビーム 2次
		20.0Hz	—	オーバル n=6
	EW	4.97Hz(*)	1.9%(*)	ビーム 1次
		14.88Hz(*)	1.7%(*)	ビーム 2次

((*)印の固有振動数, 減衰定数は回帰分析より求めたものである)

次に, I/C EW 加振試験から得られた共振曲線と位相曲線の一例を図-7 と図-8 に示す。EW 方向ビーム振動の1次及び2次固有振動数は, 10.6 Hz 付近と 12.7 Hz 付近にある。なお, 12.7 Hz での応答は非常に大きい, これは後述するように加振位置が原因と考えられる。

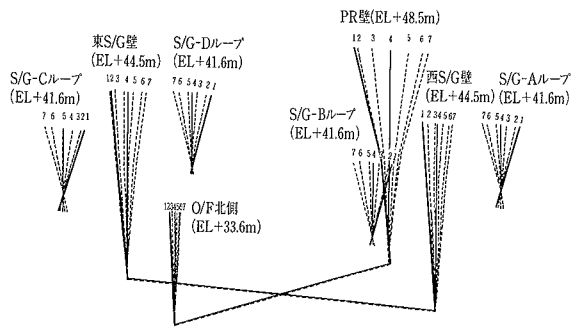


図-9 I/C 加振時の振動モード形 (EW 方向) (10.6 Hz)

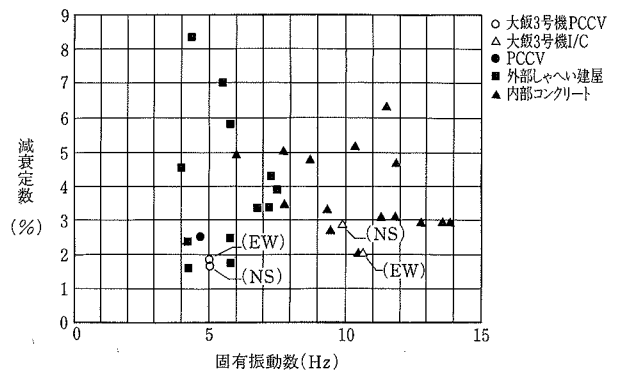


図-10 既往のPWR型原子炉建屋の振動試験との比較

図-9 は一例として, 10.6 Hz における振動モードを示す。以上, I/C 加振の振動試験の結果, 明らかになった I/C の固有振動数と減衰定数を表-5 に示す。なお, 本表に示す試験値は, 共振曲線の1質点系回帰分析により求めたものである。I/C ビーム振動の減衰定数は, 図-10 に示

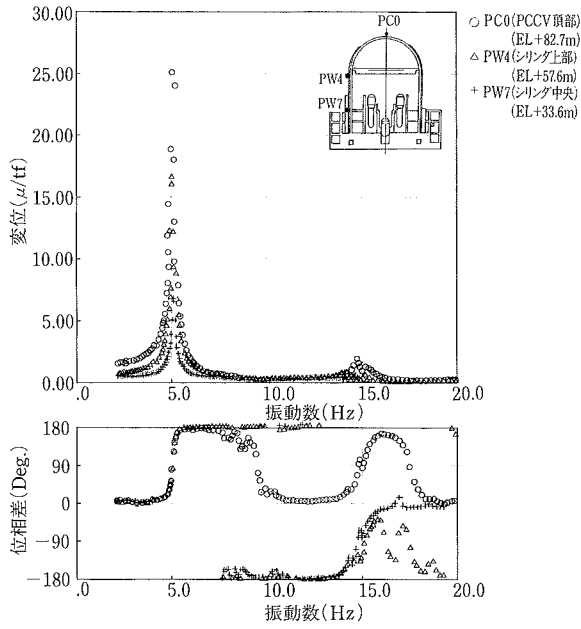


図-11 PCCV 加振時の共振曲線 (NS 方向・PCCV)

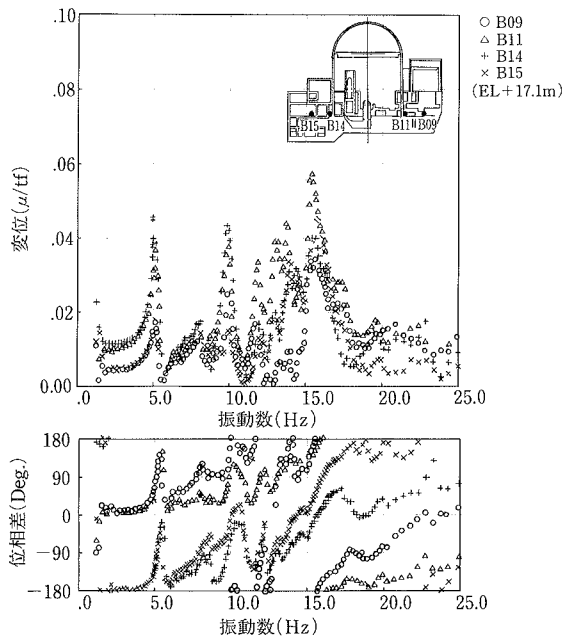


図-14 基礎版上下方向共振曲線 (I/C・NS 方向加振)

すように既往の原子炉建屋の振動試験結果とほぼ類似の傾向を示している。

2.2.2 PCCV の振動性状 PCCV の NS 方向加振時の PCCV ビーム振動についての共振曲線と位相曲線の一部を図-11に示す。同図から、5.0 Hz 付近が PCCV の 1 次固有振動数であると考えられる。また、14.9 Hz 付近にもピークがみられ、位相曲線から判断すると、この 14.9 Hz は PCCV の 2 次固有振動数であると考えられる。図-12に、PCCV ビーム振動の 1 次及び 2 次の振動モー

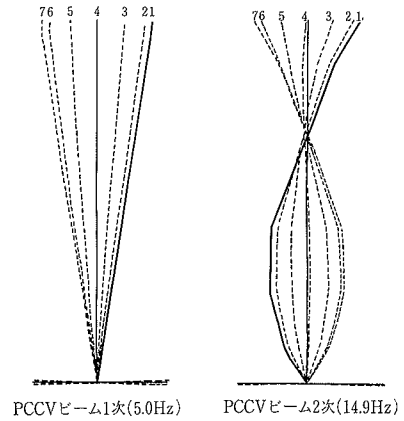


図-12 PCCV 加振時のビーム振動モード形 (NS 方向)

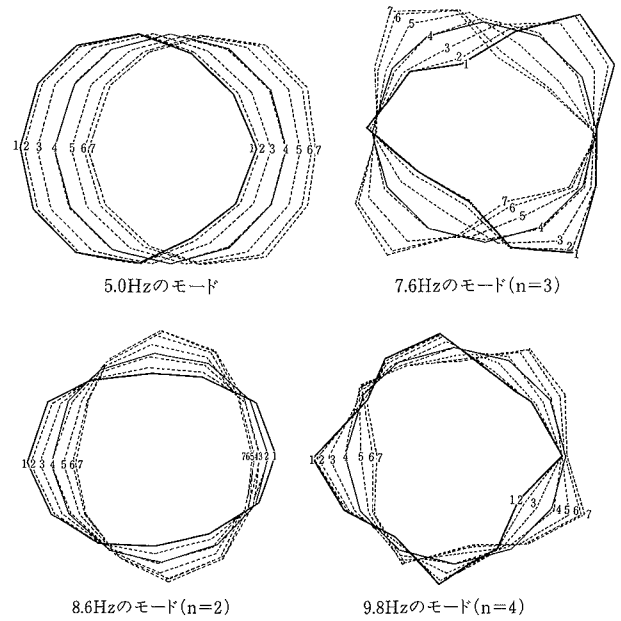


図-13 PCCV オーバルモード形

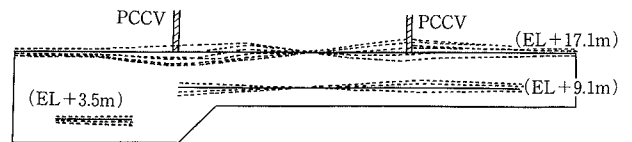


図-15 基礎版上下方向振動モード形

ドを示す。

PCCV の NS 方向加振時においては、PCCV のオーバーラップ振動を対象とした測定も行なった。図-13に、代表的なオーバーラップ振動の断面モードとして 5.0 Hz、7.6 Hz、8.6 Hz、9.8 Hz のモードを示す。

表-6 は、PCCV 加振試験の結果、明らかになった固有振動数と減衰定数を一括して示したものである。表-6 から、PCCV の EW 方向加振におけるビーム振動については、減衰定数が NS 方向加振結果と比較して若干大

きな値となっているが、固有振動数に変化がないことが確認できた。なお、PCCV ビーム振動の減衰定数は、図-10に示したように既往の原子炉建屋の振動試験結果^{1),2),3),4)}とほぼ類似の傾向を示している。

2.2.3 基礎版の振動性状 基礎版については、共振曲線において、PCCV と I/C の振動特性を反映していると思われるピークがみられる。一例として、I/C NS 加振時の基礎版上下方向の共振曲線を、図-14に示す。5.0 Hz、9.8 Hz、11.9 Hz、及び 15 Hz の付近にピークがみられ、これらは PCCV 1次、I/C 1次、I/C 2次及び PCCV 2次に対応している。図-15は、このうち PCCV ビーム 1次振動を示す 5.0 Hz における基礎版の上下方向振動モードを示しているが、PCCV 脚部においては基礎版へのめりこみがみられるなど、基礎版も弾性変形をしているようである。

3. 試験結果のシミュレーション

試験結果のシミュレーションは、質点系モデルによる PCCV 加振のシミュレーションと、内部コンクリート FEM モデルによる I/C 加振のシミュレーションとに分けて行なった。

3.1 試験時の諸定数の設定

シミュレーションに用いた建屋の諸定数については、振動試験結果及び他のいくつかの補足試験結果から決定した。

まずコンクリートの動弾性係数については、振動試験と同時期に実際の建屋で行なったコンクリートの弾性波試験の結果、及びコンクリートテストピースの静弾性係数・動弾性係数試験の結果から総合的に判断して、PCCV については $4.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、I/C については $3.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ を微小歪レベルにおける値としてシミュレーションに用いることとした。この値は設計用モデルで用いた値の約1.4倍となっている。

地盤の剛性については、I/C 加振試験結果から逆算を試みた。NS 方向のスウェイばねについての結果を、振動アドミッタンスによる計算値と比較して図-16に示す。計算に用いた地盤物性値は設計に用いられたものと同じであり、S 波速度は 2,230 m/s である。ばねは上図が実部について、下図が虚部について示してあるが、逆算結果ではばらつきはあるものの振動数依存性の傾向があることが示されている。また、理論値との比較から、基礎版底面の応力分布が一様であると仮定した場合の計算値と傾向が良く一致し、特に虚部では対応が良いことがわかる。以下のシミュレーションにおいては、この応力一様仮定によるアドミッタンスによるばねを用いることとした。

3.2 質点系モデルによる PCCV 加振のシミュレーション

ここでは、まず設計モデルを基に試験時における諸条件を考慮に入れた質点系モデルを作製して、主に PCCV 加振についての検討を行なった。

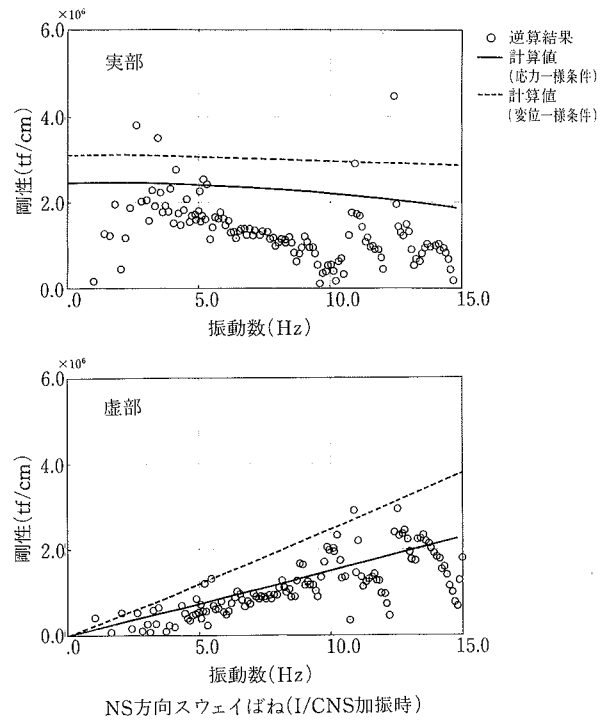


図-16 地盤剛性の逆算結果と計算値

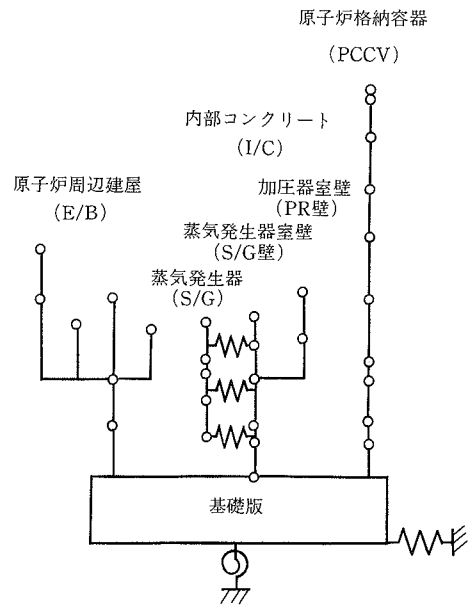


図-17 設計用質点系モデル概要図

図-17に設計用質点系モデルの概要を示す。このモデルのコンクリート弾性係数として前節に示した値を用い、材料減衰については振動試験結果より PCCV は2%、その他のコンクリートについては3%とした。

このモデルを固有値解析して得られた結果を試験結果と比較して表-7に示す。また、PCCV 1次振動数についてのモード形状の比較を図-18に、PCCV 加振時の共振曲線・位相曲線を図-19に示す。これらの結果を見ると、PCCV の1次振動数においてシミュレーション結果

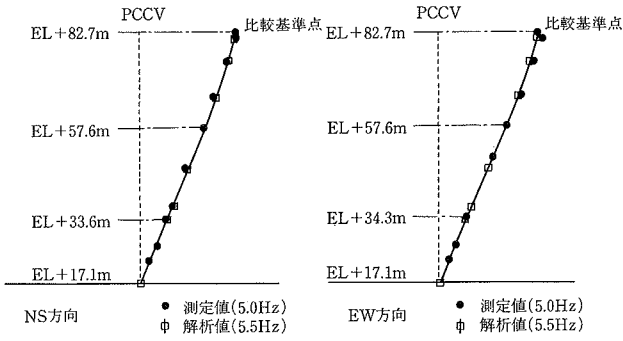


図-18 PCCV 1次振動モードのモード形状の比較

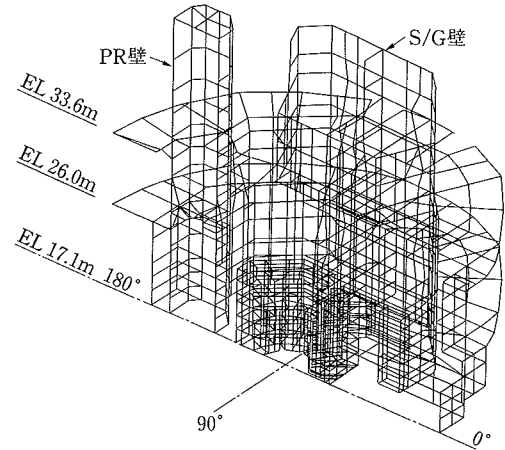


図-20 設計用内部コンクリート FEM モデル

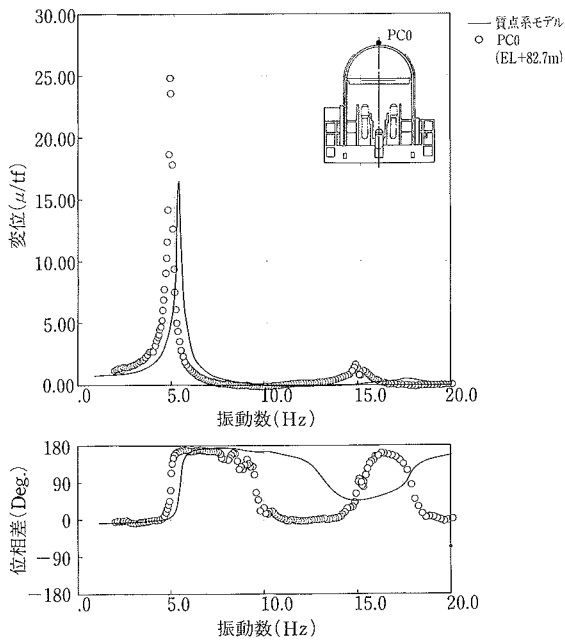


図-19 PCCV 加振時の共振曲線の比較 (NS 方向・PCCV 頂部)

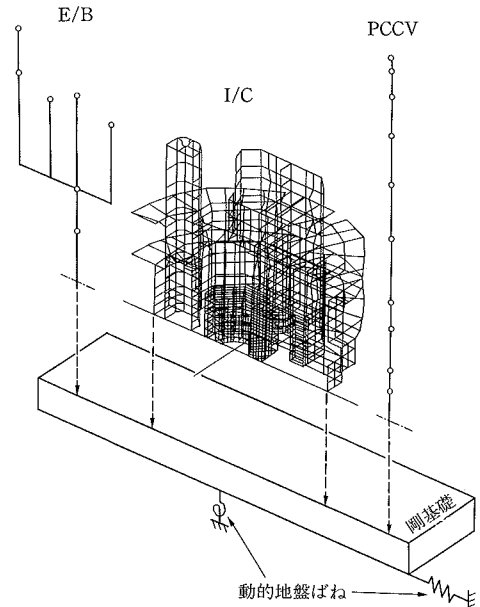


図-21 I/C 加振シミュレーションモデル 概念図

表-7 試験結果と質点系モデルの固有振動数の比較

PCCV	固有振動数(Hz)	
	NS方向	EW方向
解析値	5.5	5.5
試験値	5.0	5.0
設計値	4.7	4.7

表-8 試験結果と I/C-FEM モデルの固有振動数の比較

I/C	固有振動数(Hz)			
	NS方向		EW方向	
	1次	2次	1次	2次
解析値	9.4	12.0	10.5	12.1
試験値	9.8	11.9	10.6	12.7
設計値	8.2	—	8.5	—

と試験結果は良く一致することがわかる。2次振動数が試験結果と一致しないのは、設計モデルでは平面保持を仮定してモデル化しているのに対し、試験では2次モードにおいて立体的な変形が卓越しているためと思われる。このことは既往のプラントにおけるシミュレーションでも確認されている¹⁾。

このように、PCCV に関しては、試験時のコンクリート物性値を考慮すれば、設計モデルで試験結果を再現できることが示された。

3.3 I/C に FEM モデルを用いたシミュレーション

設計用質点系モデルは、地震入力時を対象とし、かつ操作床(O/F)より下部の構造を単純化してモデル化され

ているため、今回のようにI/C中間階であるO/Fを加振した場合のシミュレーションには適さないことが考えられる。そこで、ここではI/C加振試験結果をより詳細にシミュレーションすることを目的として、I/CにFEMモデルを用いた検討を行なった。

ここで用いたモデル(以下I/C-FEMモデルと呼ぶ)は、I/Cの設計用質点系モデル作製の際に剛性評価用及び応力解析用として作製されたFEMモデルを基に、試験時条件を考慮したS/Gモデルの組込み、試験時と設計時との重量差の評価等を行なって作製したものである。図-20に設計用内部コンクリートFEMモデルの図を示す。このモデルはNS軸を対称軸とした1/2モデルで、基礎版の上端で固定となっている。

設計用内部コンクリートFEMモデルでは、S/Gを重量としてしか評価していないが、ここでは、このモデルにS/Gモデルを組込んで検討している。S/Gのモデルは設計用の質点系モデルを基に各グループごとのモデルとして組込んだ。

S/Gのサポート剛性は、I/Cの振動特性に大きな影響を与えることが既往のプラントの例でも示されている¹⁾。振動試験時には運転時と異なり、S/G本体とサポートの間には間隙が開いており、この間隙に鋼製くさびを挿入して拘束をしているものの設計値に比べS/Gサポート剛性は低くなっていたと考えられる。そこで、ここでは試験結果からサポート剛性の値を逆算して求めたものをシミュレーションに用いた。

コンクリートの材料定数については、3.1節に示した値を用いた。減衰定数は、コンクリート部分は3%、S/G部分は1%とした。

このようにして作製したI/C-FEMモデルの固有値解析を行なった。固有値解析にあたっては、計算効率を考慮して自由度の縮小を行なった。自由度の縮小にあたってはI/Cの平面形状を考慮し、構造物の振動特性を適切に再現できるように、保存する自由度を選択した。自由度縮小後のモデルについて固有値解析した結果を、I/Cの1次・2次振動数について試験結果と比較して表-8に示す。この表から、NS・EW両方向について1次・2次振動数とも試験結果とシミュレーション結果が良く対応していることがわかる。

このI/C-FEMモデルと、設計用質点系モデルのPCCV・E/Bそれぞれの部分の基礎版上端より上部を取り出した質点系モデルを剛基礎上に設置したものに、3.1節で示した動的地盤ばねを接続して全体モデルを作製した。全体モデルの概念図を図-21に示す。

このモデルによるI/C加振シミュレーション結果の共振曲線を、試験結果と比較して図-22から図-27に示す。図-22から図-24はNS方向加振の場合で、図-25から図-27はEW方向加振の場合である。図中には、設計用モデルに同様の試験時条件を反映して作製した質点系モデルによるシミュレーション結果も併記してある。

NS方向加振の結果を見ると、まず、PR壁頂部では10

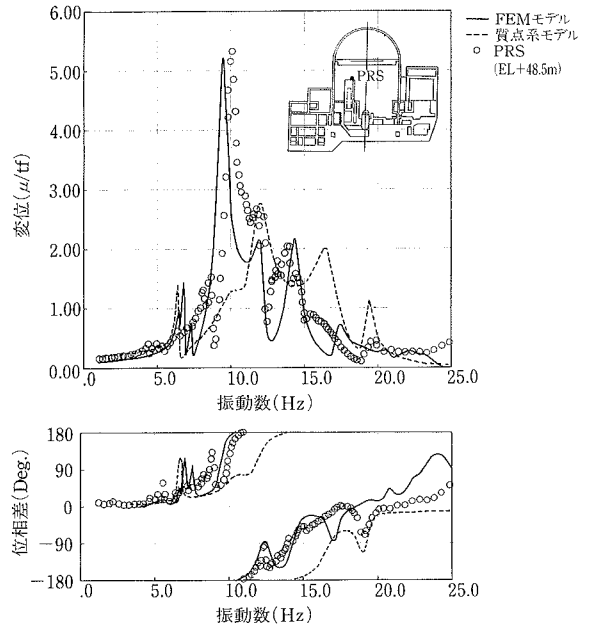


図-22 I/C加振時の共振曲線の比較 (NS方向・PR壁頂部)

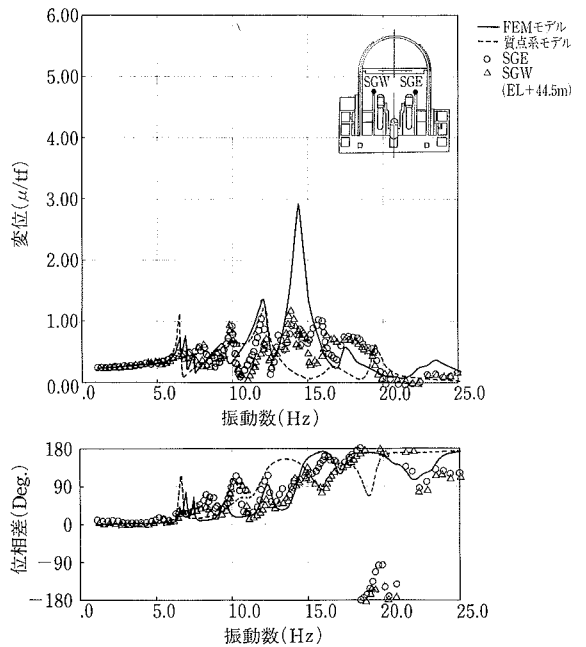


図-23 I/C加振時の共振曲線の比較 (NS方向・S/G壁頂部)

Hz付近のI/C 1次振動数において試験結果と良く対応しており、さらに25 Hzまでに至る全振動数範囲において振幅・位相いずれも試験結果の傾向を良く再現していることがわかる。S/G壁頂部においても同様の傾向であるが、シミュレーションでは14 Hz付近に試験結果には見られないピークが現れている。これはモデルを1/2モデルとして評価していることによるものと思われる。

EW方向では、試験結果において10.6 Hzと12.7 Hzの2つのピークが卓越していることが特徴であったが、

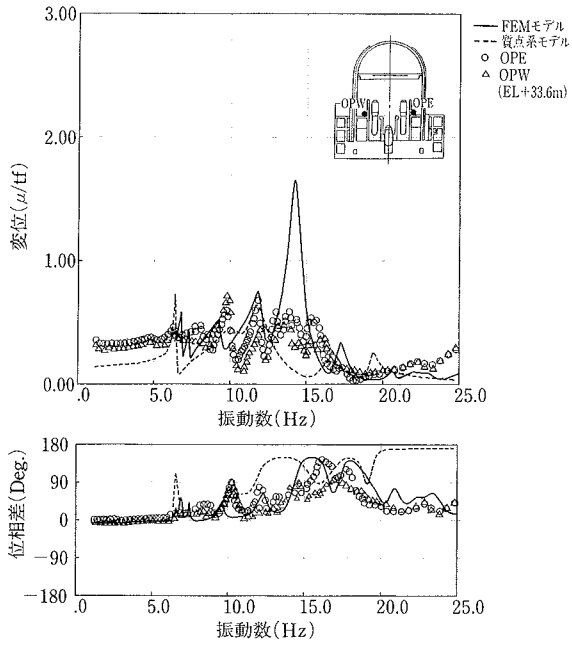


図-24 I/C 加振時の共振曲線の比較 (NS 方向・O/F)

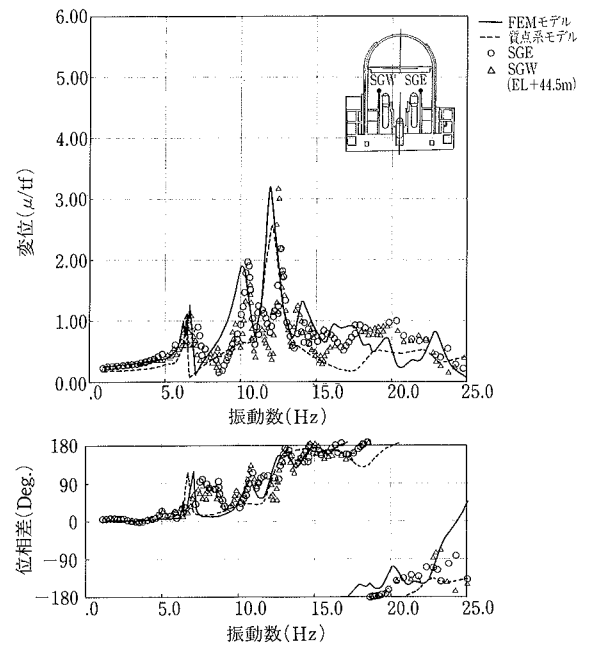


図-26 I/C 加振時の共振曲線の比較 (EW 方向・S/G 壁頂部)

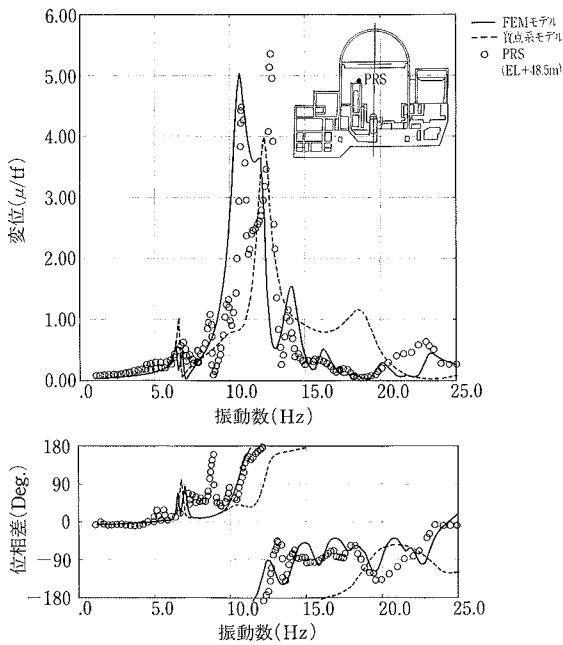


図-25 I/C 加振時の共振曲線の比較 (EW 方向・PR 壁頂部)

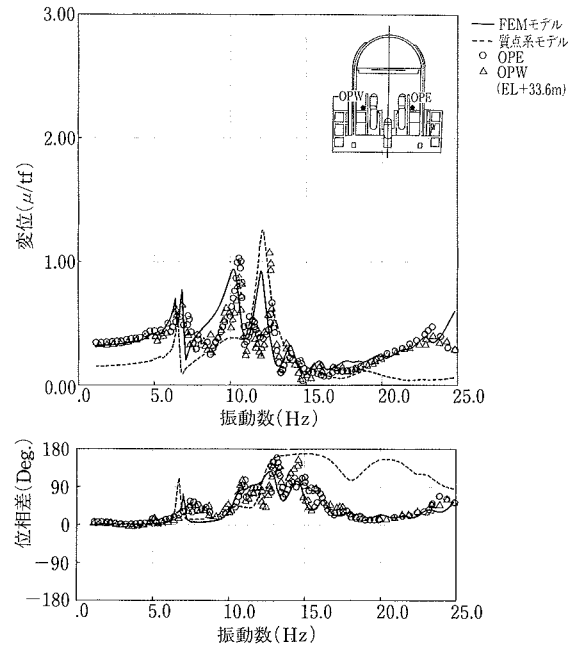


図-27 I/C 加振時の共振曲線の比較 (EW 方向・O/F)

I/C-FEM モデルを用いたシミュレーション結果では、これら 2 つのピークに加えて試験結果の 14 Hz 付近に見られたピークも再現しており、さらに 25 Hz までの全振動数範囲において振幅・位相の傾向が試験結果と極めて良く一致していることがわかる。

このように、I/C-FEM モデルを用いることにより、I/C 加振試験の結果を精度良くシミュレートすることが

できることがわかった。

3.4 地震時伝達関数による比較

前節で作製した I/C に FEM モデルを用いたモデルと設計用質点系モデルの比較を行なうため、地震時伝達関数による比較を行なった。

地震時伝達関数を作製するために、まずモデルの諸条件を振動試験時条件から運転時条件すなわち設計条件に

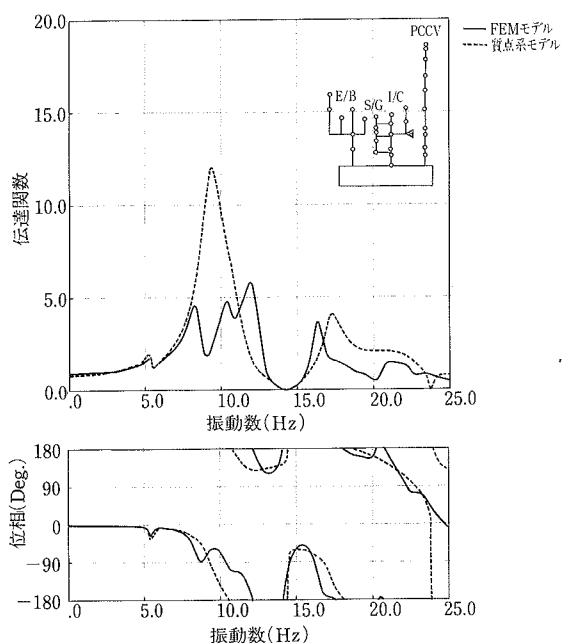


図-28 地震時伝達関数 (NS 方向・O/F)

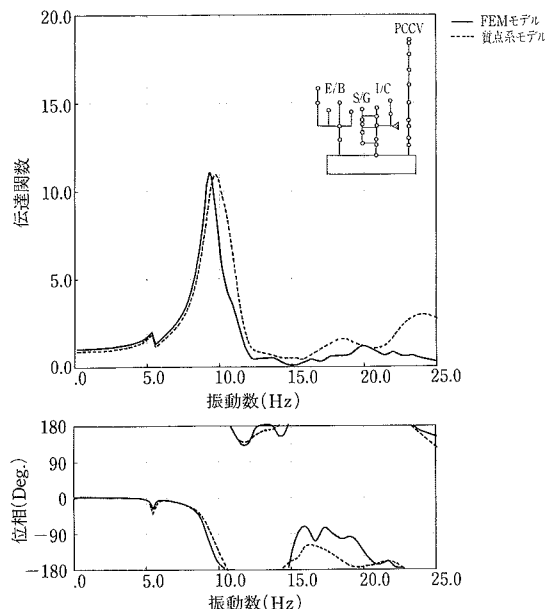


図-29 地震時伝達関数 (EW 方向・O/F)

戻した。コンクリートの弾性係数については、振動試験時と地震時の歪レベルの差を考慮して、シミュレーション用の値の1/1.1とし、PCCVについては 3.9×10^5 kgf/cm²、I/Cについては 3.4×10^5 kgf/cm²とした。この低減率は、テストピースにおける、微小歪レベルの動弾性係数と1/3割線で求められる静弾性係数との比から算定したものである。また、材料減衰については、PCCVは3%、その他のコンクリートについては5%とした。

これらのモデルによる、地震時伝達関数の比較結果を図-28と図-29に示す。この比較結果で示されるように、NS方向については質点系モデルの方が応答が大きくなっている部分もあるが、安全側の評価となっており設計上問題となる差異ではないと考えられる。また、EW方向については25 Hzまでの全振動数範囲において良く対応していることがわかる。

更に、EW方向についてはI/C加振時の共振曲線において2次のピークが1次と同様に卓越する特徴が見られたが、地震時伝達関数では1次のピークのみが卓越しており、このことからこの特徴が加振位置に起因するものであったことが示された。

まとめ

大飯原子力発電所3号機のI/C・PCCVの、起振機による強制振動試験を行なった結果、以下のようなことが明らかになった。

① I/C加振試験結果から、NS・EW両方向について1次・2次の固有振動数が得られた。また、PCCV加振試験結果では、PCCVの1次・2次振動数に加え、いく

つかのオーバル振動についての固有振動数も得られた。

② 1次モードの減衰定数は、I/Cで2~3%程度であり、PCCVで約2%であった。この結果は、既往のPWR型原子炉建屋の振動試験結果とほぼ同じ値である。

③ PCCVの振動特性については、設計用質点系モデルに、試験時のコンクリート弾性係数を考慮すれば、試験結果を再現することが可能である。

④ I/Cの振動特性に関しては、I/C-FEMモデルを用いると、試験結果を極めて良く再現することが可能である。

⑤ I/Cについて、地震時の伝達関数で見ると、設計用質点系モデルは、NS方向についてFEMモデルの結果と多少の差が生じるものの、安全側の評価となっている。

謝辞

大飯発電所3号機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関西電力株式会社の方々から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 武田, 他: 実機原子炉建屋の振動試験(その1), (その2), 大林組技術研究所報, No. 37, p. 92~105, (1988. 8)
- 2) 田中, 他: PWR型原子炉建屋の強制振動試験, 日本建築学会大会梗概集, p. 1091~1096, (1989.10)
- 3) 木佐木, 他: PWR(3ループ)型原子炉建屋の振動実験, 日本建築学会大会梗概集, p. 1571~1576, (1983. 9)
- 4) 宇都宮, 他: 原子炉建屋(PWR型)の強制振動実験と解析, 日本建築学会大会梗概集, p. 811~816, (1982.10)