

FBR 原子炉建物の振動特性に関する研究

平野 欣郎 安井 謙 安田 司郎 金子 正孝
(動力炉・核燃料開発事業団) (本社 原子力本部設計部)
大堀 道広 石川 理都子 秋山 和則
(本社 原子力本部設計部)

Forced Vibration Tests on the Reactor Building of the prototype FBR Monju

Kinro Hirano Yuzuru Yasui Shiro Yasuda Masataka Kaneko
Michihiro Ohori Ritsuko Ishikawa Kazunori Akiyama

Abstract

The Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation's reactor, Monju, is a prototype fast breeder reactor (FBR) power plant of 280-MWe capacity. This paper reports the results of forced vibration tests on the reactor building at this plant, simulation analyses for vibration tests, and evaluation of aseismic safety.

Some conclusions have been obtained as follows. ① The vibration tests showed up the dynamic characteristics of the I/C and A/B. The natural frequencies and damping ratios obtained from the tests agreed with design values. ② The simulation analyses with a lumped mass model reproduced almost exactly the resonance and phase curves obtained from the tests. ③ The seismic response analyses made it clear that the reactor building has a sufficient aseismic safety.

概 要

動力炉・核燃料開発事業団の高速増殖炉（FBR）原型炉「もんじゅ」の原子炉建物の安全性を確認する目的で、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、振動試験のシミュレーション解析ならびに地震応答解析に基づく耐震安全性の検討を行った。その結果、以下のような知見を得た。① 振動試験より得られた原子炉建物の固有振動数・減衰定数は設計値とほぼ同様の値であった。② 質点系モデルによるシミュレーション解析を行った結果、試験時の建物の状況や微小振動レベルでのコンクリート特性を考慮することにより、振動試験結果をほぼ再現できることを確認した。③ プラント運転時の条件および地震時のひずみレベルを考慮してシミュレーションモデルを修正し、設計用地震波を入力とする地震応答解析を行った結果、原子炉建物が十分な耐震安全性を有することがわかった。

1. はじめに

動力炉・核燃料開発事業団の「もんじゅ」は、高速増殖炉（FBR）原型炉（280 MWe）である。もんじゅの全景を写真-1に示す。今回、原子炉建物の安全性を確認する目的で、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、振動試験のシミュレーション解析ならびに地震応答解析に基づく耐震安全性の検討を行ったので報告する。

2. 振動試験の概要

2.1 対象構造物

建物の概略を図-1に示す。振動試験の対象となる構造物は、同一基礎版（B/M）の上に各々独立に建てられ



写真-1 もんじゅの全景

ている原子炉建物であり、内部コンクリート構造物 (I/C)、外部しゃへい壁 (O/S)、鋼製格納容器 (C/V)、および原子炉補助建物 (A/B) から構成される。なお、A/B と O/S は一体化した構造となっている。

2.2 加振方法および測定方法

図-1 に示すように、振動試験は 2 台の 10 tf 起振機を用いて、これらを I/C の運転床上 (EL+43.0 m) に設置する I/C 加振と A/B の床上 (EL+50.5 m) に設置する A/B 加振を実施した。加振方法はステップ加振とし、2 台の起振機を同期させて、それぞれの加振位置において水平 2 方向 (NS 方向, EW 方向) の試験を行った。起振力は、2Hz から 5 Hz では起振機 1 台当たりの加振モーメントを 100 kgfm 一定に、5Hz から 30 Hz では加振力を 10 tf 一定とした。なお、起振機の性能曲線は文献⁹⁾を参照されたい。

I/C の振動特性は I/C 加振により、また A/B の振動特性は A/B 加振により把握することを基本とするが、振動試験を通じて得られる構造物の動特性が加振位置の違いによってどのように影響されるのかを知るために、また起振機試験特有の局所的な振動が生じているのか否かを判断するために、加振する構造物ばかりでなくそれ以外の構造物の測定も行った。測定点は I/C および A/B を中心として各試験ケースとも総数 93 点の同時計測を行った。測定データはリアルタイム処理により、各振動数ごとに結果の確認と試験管理を行いながら実施した。

2.3 試験の工程

振動試験は原子炉建物の躯体工事が完了し、各種設備も設置された時期に行った。ただし、冷却材ナトリウム (約 1,700 tf) は未充填であった。表-1 には試験の概略工程を示す。なお、試験に先立ち常時微動測定を行っているが、これは試験が総合機能試験 (SKS) 工程内で実施されるため、設備機器振動との S/N 比を検討することと原子炉建物の固有振動特性を予め把握することを目的として行ったものである。

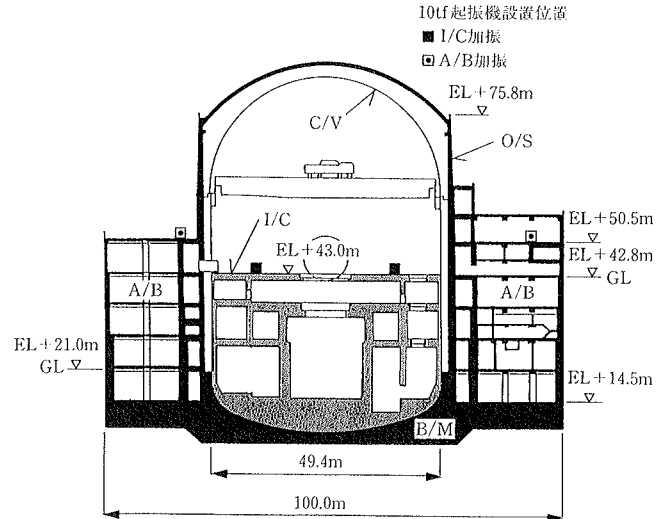
3. 試験結果

I/C 加振および A/B 加振において、加振方向による差異は顕著ではなかったことから、ここでは EW 方向加振の試験結果について述べることにする。

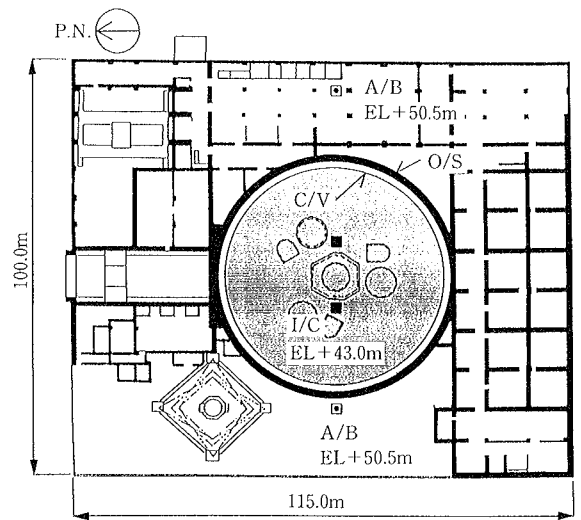
3.1 I/C の振動特性

図-2 には、I/C 加振時の I/C の代表的な共振線・位相曲線を示す。○は運転床 (EL+43.0 m) の結果、+は基礎版 (EL+14.5 m) の結果を表す。なお、本報告での共振曲線は、振幅を加振力 1 tf あたりに基準化したものである。共振曲線は 9.1 Hz においてピークを示し、このとき位相角もほぼ 90° となっている。従って、I/C の EW 方向ビーム振動の 1 次固有振動数は 9.1 Hz 付近にあると考えられる。

次に、9.1 Hz における振動モードを、図-3 および図-5 に示す。図-3 は I/C、A/B、C/V、B/M の全体連成系モードを表している。また、図-5 は I/C の N 側、



(a) W-E 断面図



(b) 平面図 (EL+43.0 m および EL+50.5 m)

図-1 原子炉建物の概略

表-1 試験の概略工程

	常時微動測定	I/C加振	A/B加振
原子炉建物 振動試験	▽ □	▽ ▽	▽ ▽
原子炉建物 建設工程	躯体工事了		
プラント総合 機能試験工程 (SKS)	1ヵ月		

S 側, E 側, W 側の各位置における振動モードを同時に表している。なお、振動モードは半周期を 8 分割し、各時刻における振動モードに順番に 0 から 8 までの数字をつけて表している。これより、I/C 全体が 9.1 Hz において 1 次モードの形状で振動していることがわかる。

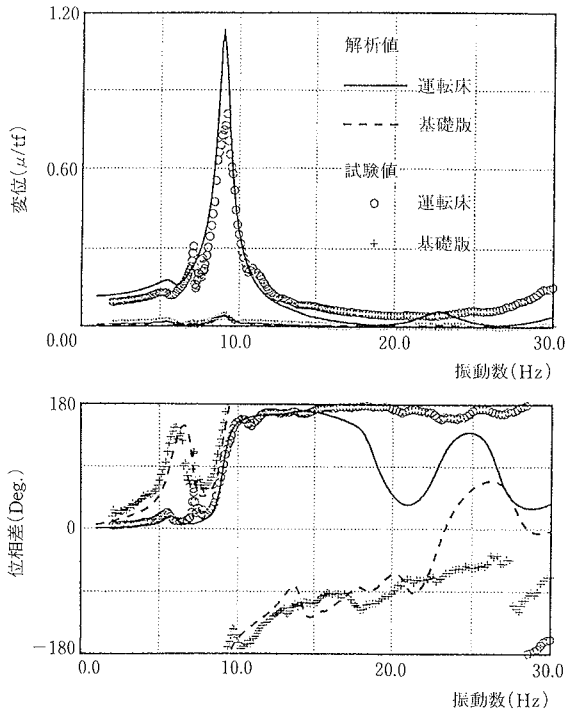


図-2 I/C 加振時の I/C 共振曲線・位相曲線

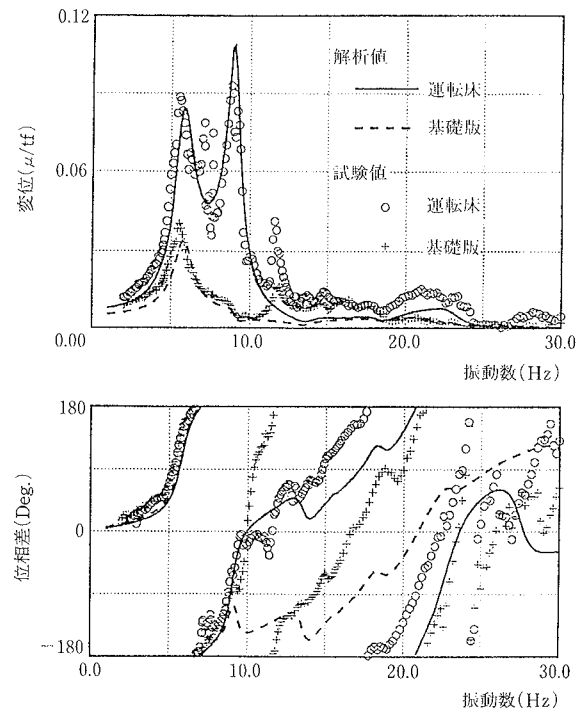


図-4 A/B 加振時の I/C 共振曲線・位相曲線

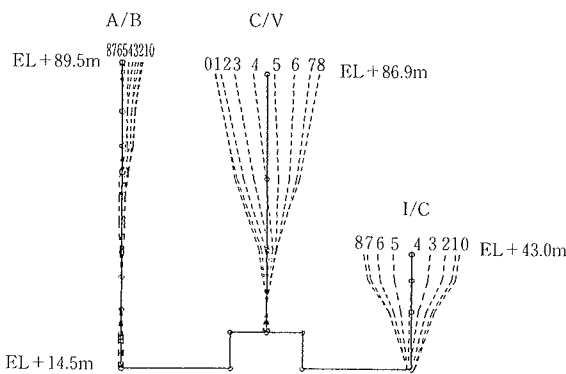


図-3 I/C 加振時の全体系振動モード (9.1 Hz)

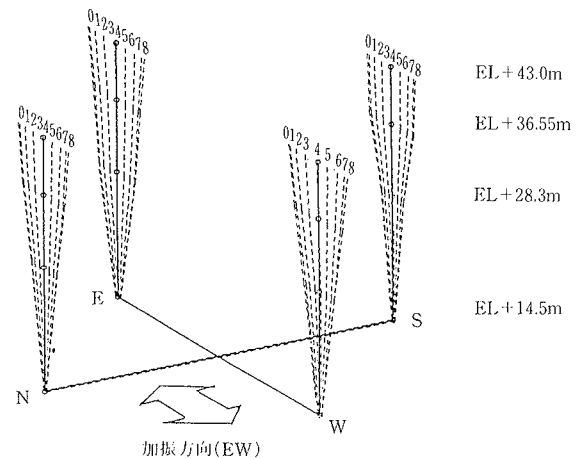


図-5 I/C 加振時の I/C 振動モード (9.1 Hz)

図-4 には、A/B 加振時の I/C の代表的な共振曲線・位相曲線を示す。共振曲線のピーク振動数は 8.8 Hz を示し、I/C 加振の場合とほぼ同じ値を示している。

共振曲線に対する 1 質点系モデルによる回帰分析により得られた 1 次固有振動数ならびに減衰定数を、設計値とともに表-2 に示す。I/C 加振時の共振曲線より、I/C の EW 方向の 1 次固有振動数と減衰定数としてそれぞれ 9.1 Hz, 5.4% が得られた。一方、A/B 加振時の I/C の共振曲線においては、ピーク振動数を越えた 9.0 Hz 付近で振幅が急激に変化するため、回帰分析を用いて 1 次固有振動数および減衰定数を評価することはしなかった。

3.2 A/B の振動特性

図-6 には、A/B 加振時の A/B の代表的な共振曲線・位相曲線を示す。○は O/S 頂部 (EL+75.8 m) の結果、+ は基礎版 (EL+14.5 m) の結果を表す。共振曲線は

5.5 Hz においてピークを示す。さらに、このとき位相角もほぼ 90° となっている。従って、A/B の EW 方向のビーム振動の 1 次固有振動数は 5.5 Hz 付近にあると考えられる。

次に、5.5 Hz における振動モードを、図-7 および図-9 に示す。図-7 は全体連成系モードを表している。また、図-9 は A/B の N 側、S 側、E 側、W 側の各位置における振動モードを同時に表している。これより、A/B 全体が 5.5 Hz において 1 次モードの形状で振動していることがわかる。

なお、O/S 頂部の共振曲線より 11.6 Hz において顕著なピークが見られる。図-10 に 11.6 Hz における A/B の振動モードを示す。起振機のある E 側および W 側の振

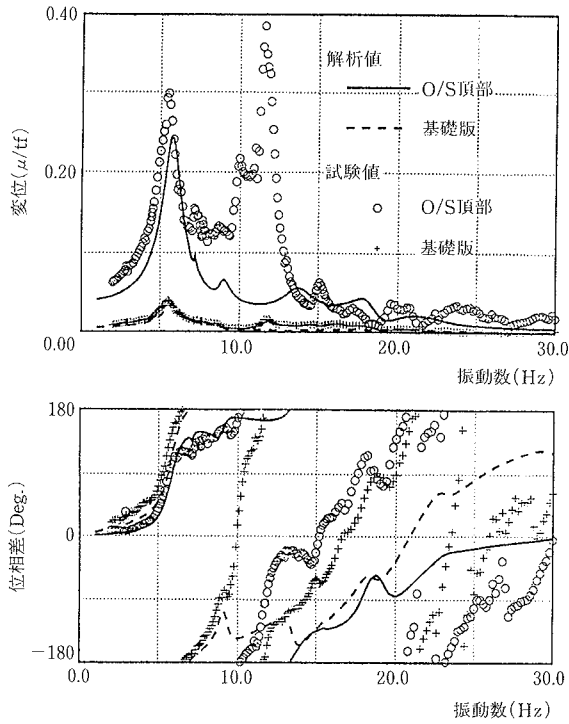


図-6 A/B加振時のA/B共振曲線・位相曲線

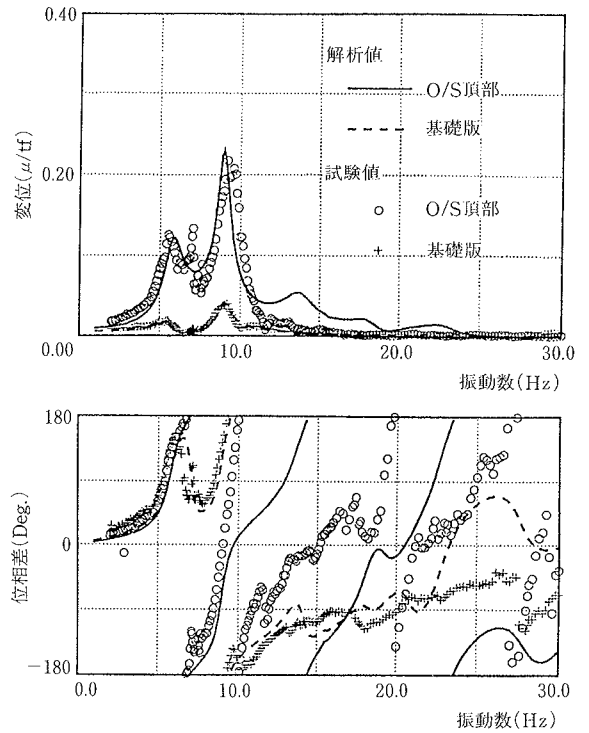


図-8 I/C加振時のA/B共振曲線・位相曲線

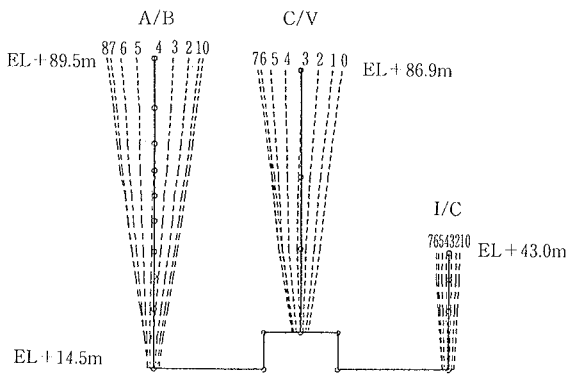


図-7 A/B加振時の全体系振動モード (5.5 Hz)

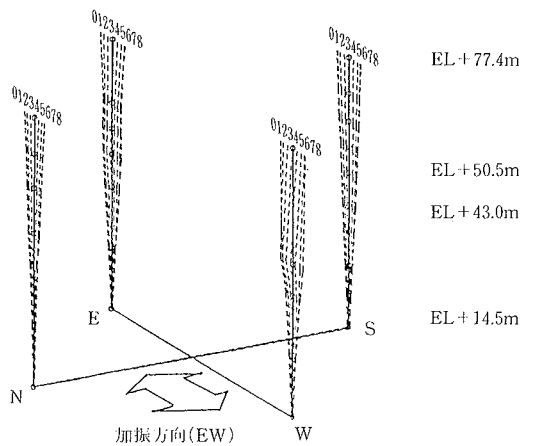


図-9 A/B加振時のA/B振動モード (5.5 Hz)

動形が、起振機のないN側およびS側の振動形と異なる様子わかる。E側とW側ではO/S頂部が加振位置を腹として大きく振動していることから、起振機試験のように構造物を点加振する場合に見られる特有の局所的な振動性状であることが予想される。

図-8には、I/C加振時のA/Bの代表的な共振曲線・位相曲線を示す。共振曲線のピーク振動数は5.3 Hzを示し、これはA/B加振の場合とほぼ同じ値である。なお、A/B加振において見られたO/S頂部における12 Hz付近の顕著なピークはここでは見られない。

A/B加振時の共振曲線に対して回帰分析を行った結果、表-2に示すように、A/BのEW方向の1次固有振動数と減衰定数は、それぞれ5.5 Hz、9.1%が得られた。また、I/C加振時の共振曲線に対して回帰分析を行った

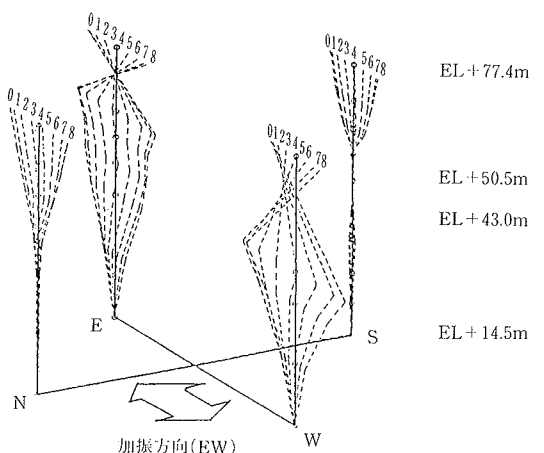


図-10 A/B加振時のA/B振動モード (11.6 Hz)

表-2 固有振動数と減衰定数

対象 構造物	加振位置	方向	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	I/C	NS	9.0	5.3	7.7	5.1
		EW	9.1	5.4	7.6	5.1
A/B	A/B	NS	5.4	7.7	5.5	6.0
	I/C		5.6	6.9		
	A/B	EW	5.5	9.1	5.3	5.9
	I/C		5.6	8.2		

注) 設計値の減衰定数はモーダル減衰を表す。

結果、A/BのEW方向の1次固有振動数と減衰定数は、それぞれ5.6 Hz、8.2%が得られた。

3.3 考察

表-2より、I/CおよびA/Bの固有振動数および減衰定数について、設計値と試験値を比較する。A/Bについては両者の固有振動数はほぼ一致しているが、減衰定数は試験値の方が設計値に比較してかなり大きいことがわかる。一方、I/Cについては固有振動数は試験値の方が設計値よりも高めで、減衰定数はほぼ一致していることがわかる。これらの特徴は、①図-7より、A/Bの1次振動モードにおいてベースマットのスウェイ成分が大きいことから地盤と建物の相互作用の効果が大きく現れていること、②同時期に行ったコンクリートの動弾性試験より、ヤング係数が設計値よりも高くなっていることの2点から説明できる。

また、表-2より対象構造物の振動特性は、加振位置の違いによって固有振動数および減衰定数にわずかな違いが生じているものの概ねよく対応している。また、地震入力時と異なり、限られた起振力による加振試験では、対象構造物の頂部を直接加振することが効果的であることがわかる。しかし、後述するように、振動試験特有の加振点付近の局所的な振動性状なのか、それとも地震時にも共通する建物全体の振動性状なのかどうかを見極めるために、加振位置を変えた試験もしくは他点加振の有効性も否定できない。

4. シミュレーション解析

4.1 解析モデルの作成

解析モデルは、試験時の建物の状況や微小振幅レベルでのコンクリート特性などの諸条件を考慮して作成した。また、地盤ばねは地盤表面のゆるみ層(厚さ1m)を考慮して成層構造に対する振動アドミタンス理論により算出した動的地盤ばねを用いた。解析モデルを図-11に示すとともに、その設定条件を表-3の解析-1項に示す。また、図-12にはシミュレーション解析に用いた動的地盤ばねの一例として、EW方向の水平成分について試験結果より算出した値と比較して示す。これより、理論値は試験値に見られる振動数依存性をよく再現して

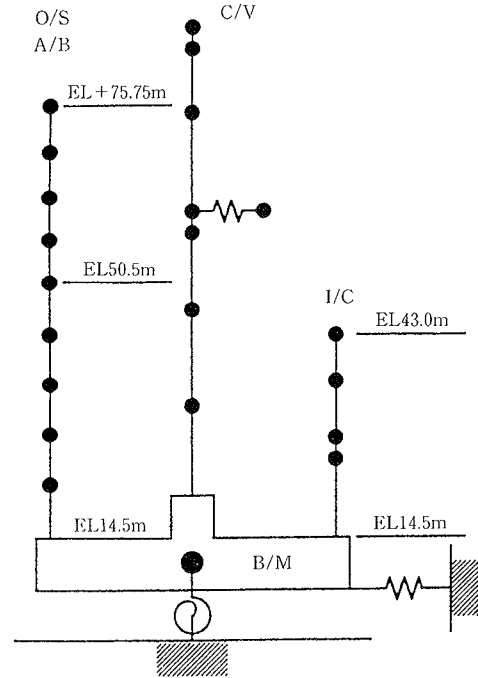


図-11 解析に用いる質点系モデル

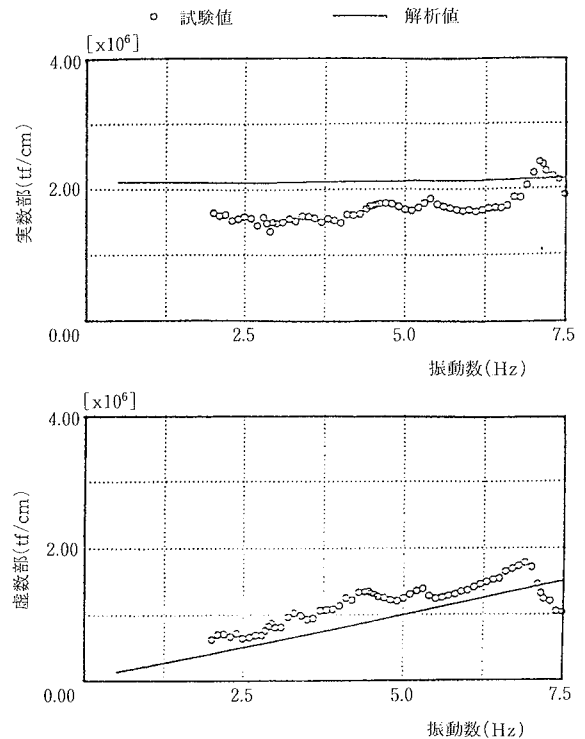


図-12 試験値より逆算した地盤ばね

いることがわかる。

4.2 I/Cのシミュレーション

図-2に、シミュレーション解析によって得られたI/C加振時のI/Cの共振曲線を試験結果と比較して示す。運転床および基礎版のいずれにおいても、解析結果は試験結果によく一致していることがわかる。なお、シミュ

レーション解析によって得られる振動モードは、試験結果のそれとよく一致している。

一方、図-4に、シミュレーション解析によって得られたA/B加振時のI/Cの共振曲線を試験結果と比較して示す。運転床および基礎版のいずれにおいても、解析結果は試験結果によく一致していることがわかる。

4.3 A/Bのシミュレーション

図-6に、シミュレーション解析によって得られたA/B加振時のA/Bの共振曲線を試験結果と比較して示す。全体として解析結果は試験結果をよく再現していることがわかる。しかし、試験値に現れたO/S頂部における12Hz付近のピークをシミュレーション解析では再現できなかった。

一方、図-8に、シミュレーション解析によって得られたI/C加振時のA/Bの共振曲線を試験結果と比較して示す。これより、振動試験に見られる顕著なピークがシミュレーション解析によってうまく再現されていることがわかる。また、図-6に見られるO/S頂部における12Hz付近の顕著なピークが試験結果にもシミュレーション解析結果にも現れていないことがわかる。

以上より、A/B加振時にO/S頂部において見られた12Hz付近で卓越する振動性状は、加振位置に依存する局所的な振動性状であると考えられる。この特徴をシミュレーション解析により再現するには、より詳細なモデル化が必要となる。

5. 耐震安全性評価

質点系モデルによる地震応答解析に基づき耐震安全性評価を行った。使用したモデルは、シミュレーションモデルの諸元のうち、質点重量およびコンクリートの材料定数のみを変更して作成した。質点重量はプラント運転時の重量を用いている。また、コンクリートの材料定数は、地震時のひずみレベルを考慮して、表-3の解析-2項のように設定した。入力地震波は設計に用いた人工地震波形であり、最大加速度は280galである。

解析結果によると、各部位の最大応答せん断力および曲げモーメントは設計値を下回る値となった。ベースシア係数の設計値との比較を表-4に示す。以上より、原子炉建物および原子炉補助建物の耐震安全性を確認することができた。

6. まとめ

本研究を通して得られた知見を以下にまとめる。

① 振動試験よりI/CおよびA/Bの振動特性を把握することができた。また、得られた固有振動数および減衰定数はほぼ設計値と同様の値であった。

表-3 コンクリートの物性値

部 位	項 目	解析-1*	解析-2**
コンクリート	ヤング係数(tf/cm ²)	310	280
	せん断剛性(tf/cm ²)	125	120
	減衰定数(%)	3.0	5.0
地 盤	S波速度 (km/sec)	表 層	0.7
		基盤層	1.9
	P波速度 (km/sec)	表 層	1.6
		基盤層	4.3

(備考)*解析-1:シミュレーション解析, **解析-2:耐震安全性解析

表-4 ベースシア係数の比較

	NS方向		EW方向	
	解析値	設計値	解析値	設計値
A/B	0.577	0.756	0.592	0.781
I/C	0.546	0.669	0.534	0.700
B/M	0.464	0.560	0.449	0.554

② 試験時の条件を考慮してシミュレーション解析を行った結果、振動試験で得られたI/CおよびA/Bのビーム振動特性は、試験時の建物の状況や微小振動レベルでのコンクリート特性を考慮することにより、質点系モデルを用いた解析によって再現することができた。

③ プラント運転時の条件および地震時のひずみレベルを考慮してシミュレーションモデルを修正した上で設計用地震波を入力した応答計算を行った結果、原子炉建物が十分な耐震安全性を有することがわかった。

④ 基礎がかなり剛ならば、対象構造物を直接加振する試験に加えて、同一基礎上の他の構造物を加振して対象構造物を間接的に振動させる試験を行うことにより、構造物の振動特性を総合的に検討することが可能となることがわかった。

謝 辞

本研究の遂行に当たりご指導いただきました日本原子力発電株式会社の方々に深謝致します。

参考文献

- 1) 平野, 他: FBR 原子炉建物の強制振動実験 (その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1141~1144, (1992)
- 2) 平野, 他: FBR 原子炉建物の強制振動実験 (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 1579~1580, (1993)
- 3) Hirano, K, et al.: Forced Vibration Tests on the Reactor Building of the proto-type FBR Monju, 12th-SMIRT, Div. K1, p. 319~324, (1993)