

3次元FEMによるPWR型原子炉建物の振動シミュレーション

大堀道広 金子正孝 安井 讓
 遠藤 学 小松義明 久納俊雄
 (本社 原子力本部設計部) (本社 原子力本部設計部) (本社 原子力本部技術部)

概 要

振動試験のシミュレーション解析は、水平動に対する耐震設計モデルの妥当性を検証するために、これまで重要な役割を果たしてきた。しかし、実機原子炉建物の上下加振時の振動試験結果を本格的にシミュレーション解析した例はこれまで見られない。本研究において、まず、PWR型4ループの実機原子炉建物を対象として、水平加振試験および上下加振試験を行い、振動特性を把握できる有益なデータを得た。次に、3次元FEMモデルによる振動試験のシミュレーション解析を行い試験結果の再現を試みた。同モデルによるシミュレーション解析結果は、水平加振および上下加振のそれぞれの試験結果に良く一致した。今後設計用質点系モデルの作成法を確立していくためには、振動試験結果を模擬する質点系モデルの作成が必要であるが、それに先立ち3次元FEMモデルの有効性を実証した点に本研究の意義がある。

1. はじめに

振動試験のシミュレーション解析は、水平動に対する耐震設計モデルの妥当性を検証するために、これまで重要な役割を果たしてきた^{例えば1)~3)}。したがって、上下動に対する適切な振動モデルの作成においても、地震応答解析に先立ち振動試験のシミュレーション解析による検証を出発点とすることが自然である。しかし、実機原子炉建物の上下加振時の振動試験結果を本格的にシミュレーション解析した例はこれまで見られない。

こうした状況を背景として、振動試験のシミュレーション解析によるモデルの妥当性を確認した上で、上下動に対する耐震設計モデルを構築するための基礎的な研究を行った。具体的には、九州電力玄海原子力発電所第3号機であるPWR型4ループ原子炉建物(1,180MWe)を対象として行った水平加振および上下加振の試験結果について述べた後に、3次元FEMによるシミュレーション解析結果について述べる。

2. 振動試験の概要

2.1 加振対象

対象とする原子炉建物の概略平面と断面をFig.1に示す。振動試験の加振対象は、プレストレストコンクリート製格納容器(PCCV)と内部コンクリート(I/C)であり、これらは同一の基礎版(厚さ9.8m)上にそれぞれ独立して建てられている。

2.2 加振方法

振動試験においてはI/C加振とPCCV加振を行った。I/C加振では、NS、EW、上下の三方向加振試験を順に行った。いずれの加振試験も、Fig.1(a)に示すようにI/C操作床上(EL+11.3m)に起振機を1台設置し、1~30Hzの振動数範囲において定常加振を行った。このとき水平加振試験においては加振力を一定(最大10tf)とし、上下加振試験においては加振モーメントを一定(最大15kgf m)とした。PCCV加振では、Fig.1(b)に示すようにPCCV頂部(EL+60.4m)に起振機を1台設置し、1~20Hzの振動数範囲において加振モーメントを一定(最大10kgf m)とする定常加振を行った。ただし、加振方向はNS方向のみである。I/C加振およびPCCV加振のいずれの試験においても、振動数ピッチは0.1Hzを基本とした。なお、水平加振試験の際にはボーラクレーンを加振方向と直交する位置に固定した。

2.3 測点位置

測定は、I/C加振においてはI/Cを、PCCV加振においてはPCCVを中心に行った。ただし、建物全体の挙動を把握するために加振対象構造物以外にも測点を配置している。Fig.1(b)に、代表的な測点を示す。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、かつ参考としてS/G機器本体の振動計測も行った。また、PCCV加振では、PCCVのビーム振動ばかりでなくオーバル振動も測定できるような測点配置(EL+21.5m)とした。

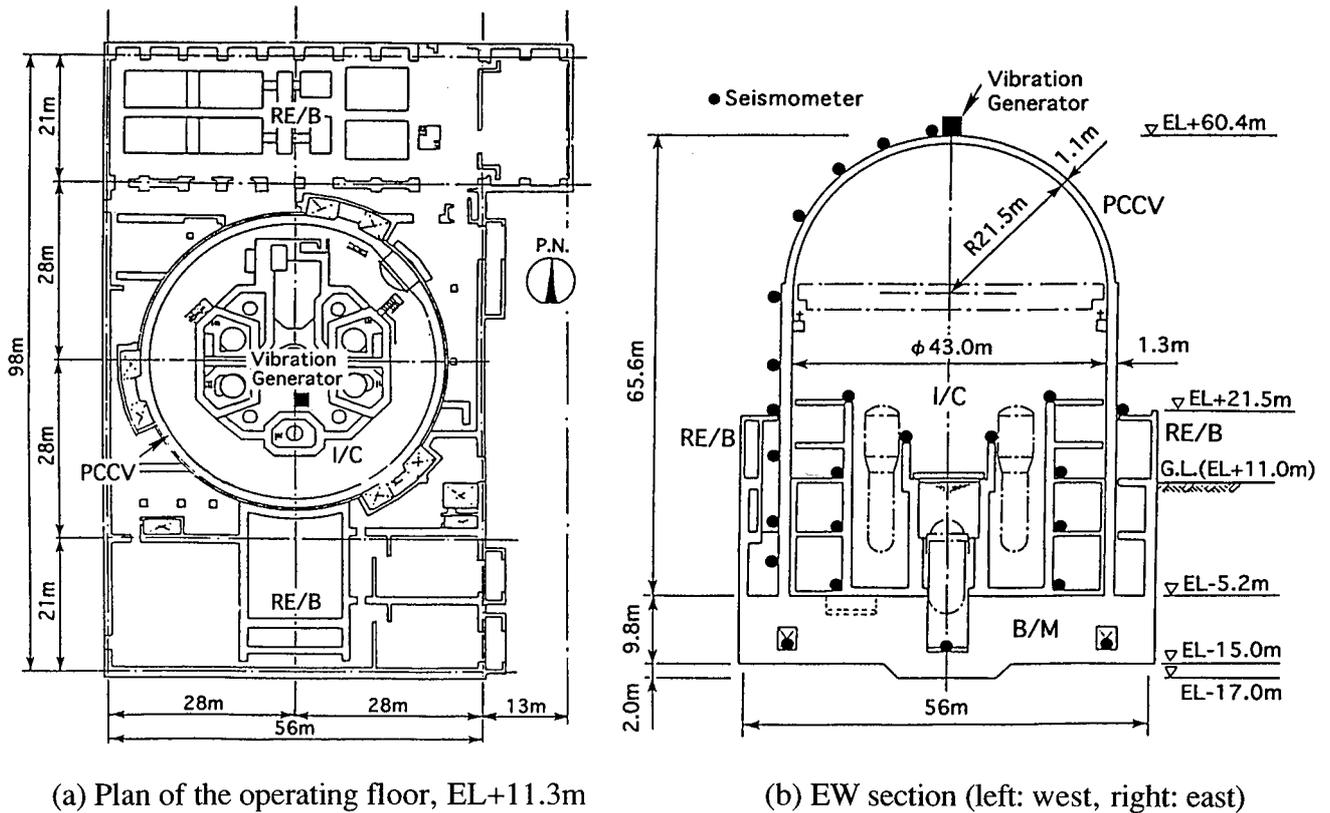


Fig. 1 原子炉建物の概略
Outline of the Reactor Building

2.4 試験工程

振動試験は、I/C加振については1次系水圧試験 (CHT) と温態機能試験 (HFT) の間に、PCCV加振についてはテンドン緊張後で構造性能確認試験 (SIT) 直前の時期を選び、建設作業の終了した夜間に構内の振動規制を行い実施した。

3. 振動試験の結果

3.1 I/C加振試験の結果について

水平加振については、加振方向による差異は顕著ではないので、ここではNS方向加振に着目して述べる。まず、共振曲線と位相曲線の一例をFig.2に示す。Fig.2 (a)にPCCV頂部における結果を○印で、Fig.2 (b)にI/Cの操作床 (EL+11.3m)における結果を○印 (S側) および□印 (N側) で表す。共振曲線の縦軸は、加振力1tonf当たりの変位を表している。これより、PCCVについては、5.0Hz、9.65Hz、15.3Hzに顕著なピークが見られる。また、I/Cについては9.65Hzに顕著なピークが見られる。PCCVの5.0HzとI/Cの9.65Hzのそれぞれの振動モードをFig.3に示す。これより、それぞれの振動数がPCCVおよびI/Cのビーム1次モードに対応していることがわかる。同様に15.3HzはPCCVのビーム2次モードに対応していることを確認した。また、PCCVの9.65Hzに見られる卓越振動はI/Cの1次振動に誘発されたものである。Table 1には、

1質点系回帰分析より明らかになったPCCVおよびI/Cの固有振動数と減衰定数をまとめて示す。

上下加振における共振曲線と位相曲線の一例をFig.4に示す。Fig.4 (a)にはPCCV頂部における結果を、Fig.4 (b)にはI/Cの操作床 (S側)における結果を、それぞれ○印で表す。これより、PCCVについては、14.6Hz、24.6Hzに顕著なピークが見られる。また、I/Cについては10.1Hz、13.0Hz、23.0Hz、29Hzに顕著なピークが見られる。PCCVについては他の測点の結果も含めて検討した結果、14.6Hz、24.6HzがそれぞれPCCVの軸方向1次モード、軸方向2次モードに対応することが確認された。一方、I/Cに関しては、限られた測点からは同定できないほど、振動モードが複雑であった。

3.2 PCCV加振試験の結果

PCCV加振より得られたPCCVのビーム振動の特性は、I/C加振時に得られたそれと同様であるので、ここでは共振曲線と位相曲線は省略して、オーバル振動も含めた振動モードに着目する。Fig.5には代表的なオーバル振動として、5.0Hz、7.9Hz、8.6Hzの平面モードを示す。これらは、順にPCCVのビーム1次モード、オーバル3次モード、オーバル2次モードに対応している。この他、オーバル4次モードが10.3Hzに、オーバル5次モードが14.5Hzに、ビーム2次モードが14.9Hzに観察された。これらの振動数をPCCVを独立系とする3次元FEMモデルの立体固有

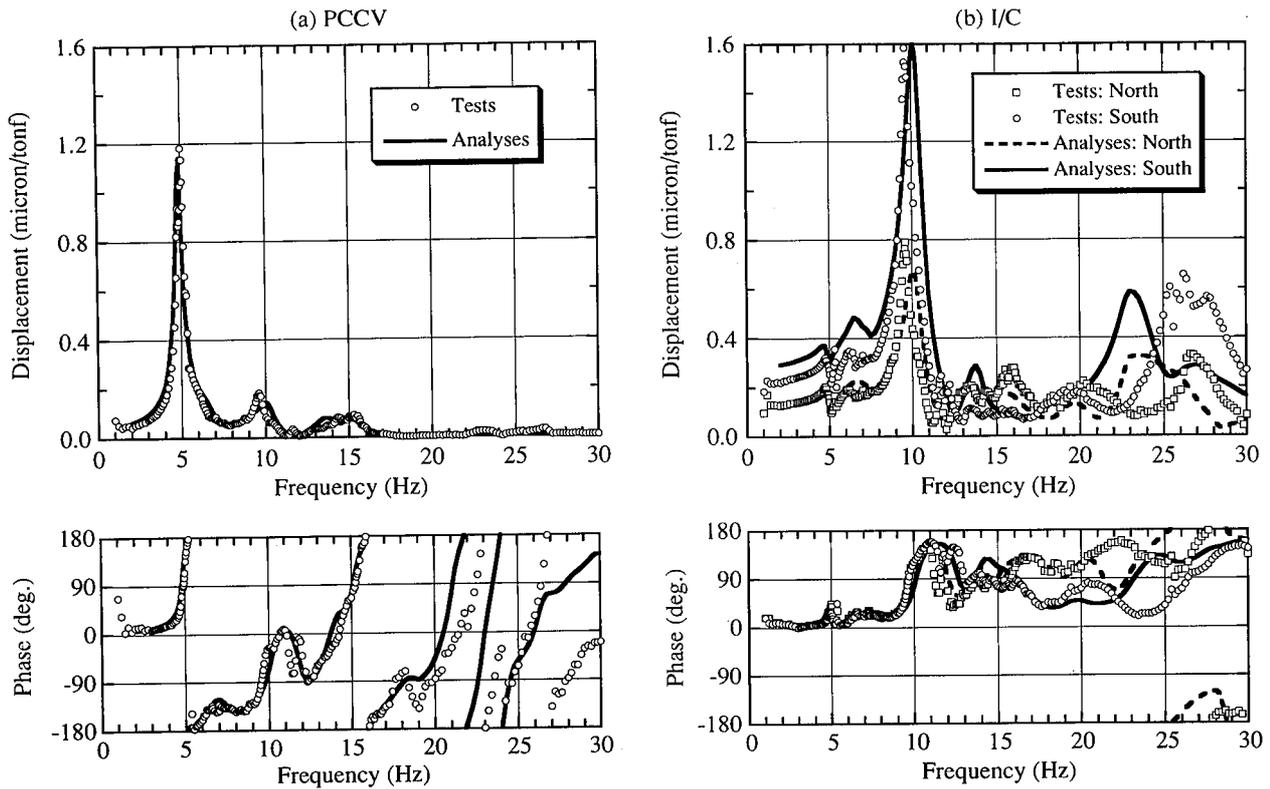


Fig. 2 I/C NS 加振の共振曲線・位相曲線
Resonance Curves and Phase Lag Curves of I/C NS Excitation

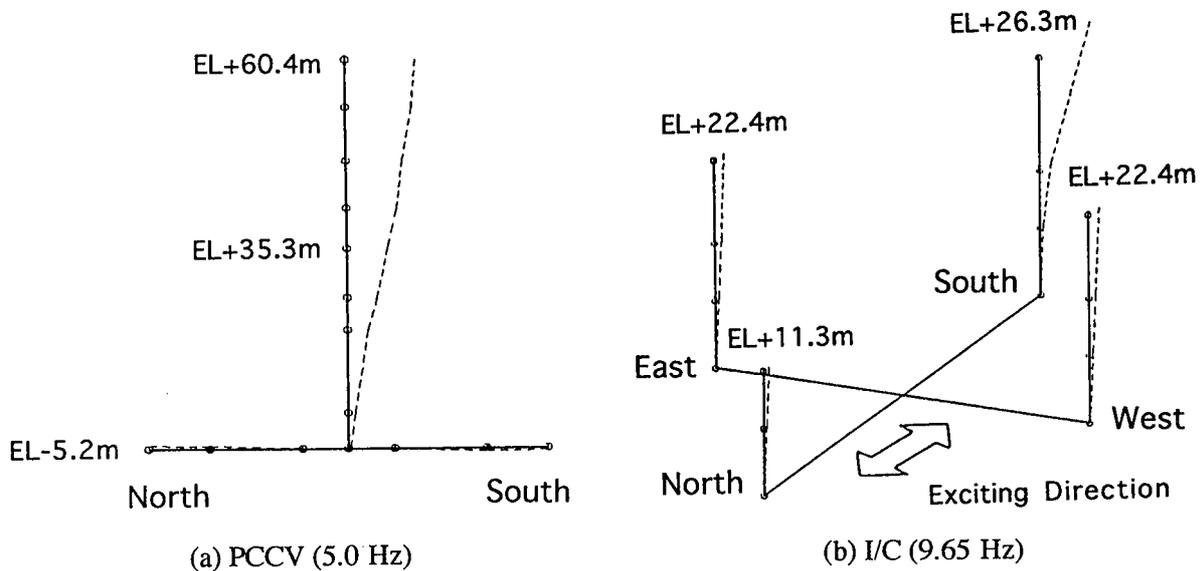


Fig. 3 I/C NS 加振試験時のビーム振動モード
Modal Shapes of Beam Vibration from Tests of I/C NS Excitation

値解析より得られる固有振動数と比較したところ、Fig.6に示すように両者はほとんど一致した。なお、解析モデルの設定条件は、後述する振動試験のシミュレーション解析と同様である。

以上、PCCV加振試験より明らかになった固有振動数を

Table 2にまとめて示す。なお、同表中において、PCCVのビーム振動モードについては1質点系回帰分析による固有振動数と減衰定数を示し、オーバル振動モードについては共振曲線のピークを与える振動数を示している。

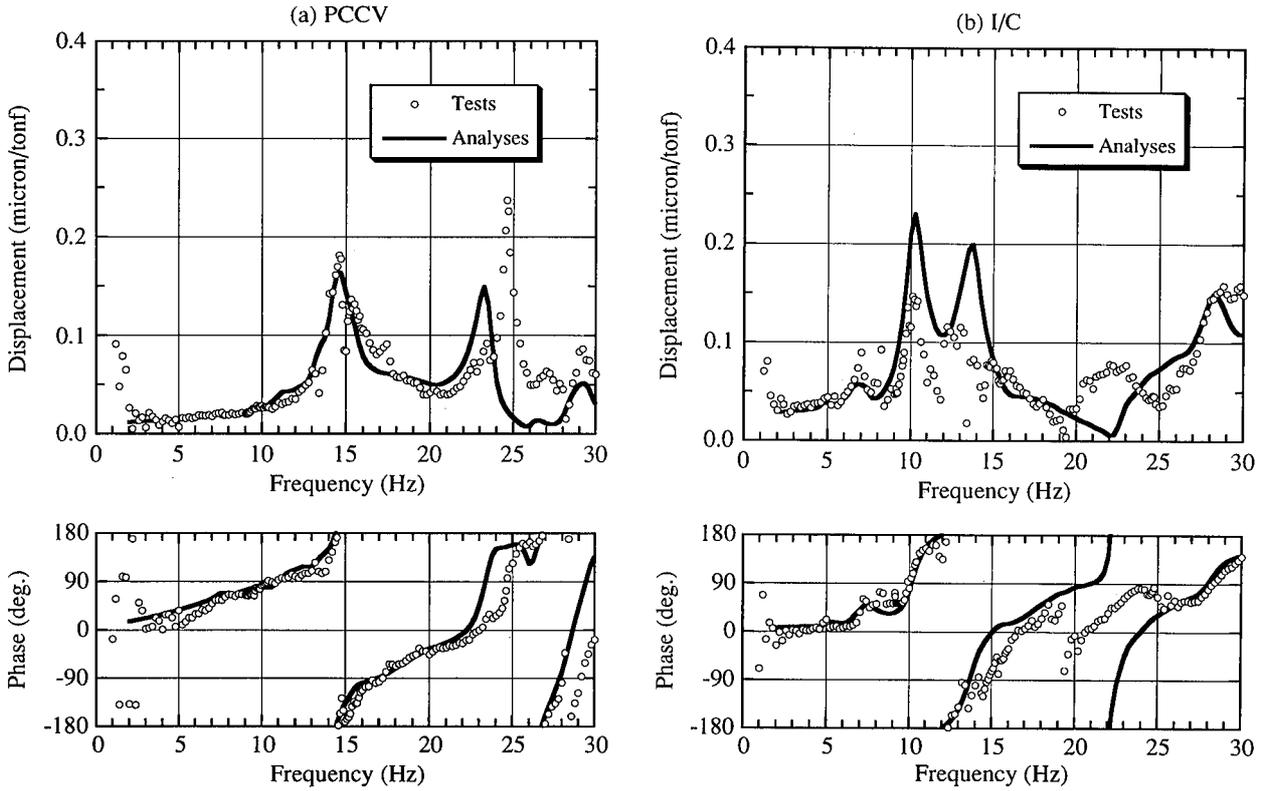


Fig. 4 I/C上下加振の共振曲線・位相曲線
Resonance Curves and Phase Lag Curves of I/C UD Excitation

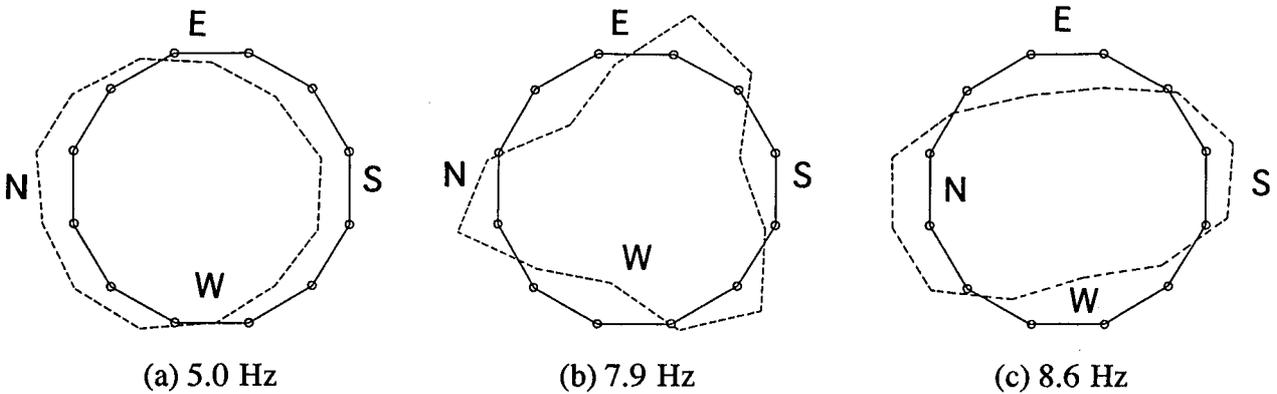


Fig. 5 PCCVのオーバル振動モード
Modal Shapes of Oval Vibration from Tests of PCCV NS Excitation

4. 3次元FEMによるシミュレーション解析

4.1 解析方針

シミュレーション解析では、原子炉建物の振動特性をできるだけ忠実に再現するために、地盤との連成を考慮した3次元FEMモデルを用いる。モデル化にあたり、建物および基礎は対象とする原子炉建物を東西対称の条件を仮定した3次元FEM（総節点数1,593、総要素数1,692）を用いる。また、地表面基礎とし、その下方に広がる地盤

の半無限性を考慮するために薄層要素を用いる。3次元FEMモデルの概略をFig.7に示す。シミュレーション解析はI/C加振を対象とし、Fig.7には解析上の加振位置も記載している。Table 3には、モデルの主な設定条件を示す。コンクリートの弾性係数は、振動試験と同時期に行った原子炉建物における動弾性試験⁴⁾の結果に基づいて設定している。また、減衰定数はTable 1に示した1質点系モデルによる回帰分析結果を参考にして設定している。

Table 1 I/C加振試験より得られた固有振動数と減衰定数
Natural Frequencies and Damping Factors from Tests of I/C Excitation

| Direction | Mode | Natural Frequency | Damping Factor |
|-----------|----------------|-------------------|----------------|
| NS | PCCV beam 1st | 5.0* Hz | 2.2* % |
| | I/C beam 1st | 9.6* Hz | 3.0* % |
| EW | PCCV beam 1st | 4.7* Hz | 1.8* % |
| | I/C beam 1st | 9.7* Hz | 3.8* % |
| UD | PCCV axial 1st | 14.6 Hz | — |

[Note] Values with star (*) were obtained from test data regression analyses.

Table 2 PCCV加振試験より得られた固有振動数と減衰定数
Natural Frequencies and Damping Factors from Tests of PCCV Excitation

| Mode | Natural Frequency | Damping Factor |
|--------------------|-------------------|----------------|
| PCCV beam 1st (NS) | 5.0* Hz | 2.6* % |
| PCCV oval (n=3) | 7.9 Hz | — |
| PCCV oval (n=2) | 8.6 Hz | — |
| PCCV oval (n=4) | 10.3 Hz | — |
| PCCV oval (n=5) | 14.5 Hz | — |
| PCCV beam 2nd (NS) | 14.9* Hz | 1.9* % |

[Note] Values with star (*) were obtained from test data regression analyses.

4.2 水平加振試験のシミュレーション解析

試験のシミュレーション解析を行った。ここではNS方向加振の解析結果をFig.2に示す。先に述べたように、同図中には試験結果を○印および□印で表しているが、対応する解析結果を実線および点線で表す。Fig.2 (a)より、PCCVについての解析結果は試験結果に良く一致していることがわかる。また、Fig.2 (b)より、I/Cの操作床上の二点における試験結果には、起振機に近いS側と遠いN側では10Hz付近におけるピーク位置の振幅レベルが異なっていたり、広い振動数帯域において共振曲線・位相曲線の形状が見られる。こうした試験結果の複雑な振動性状を、解析結果は良く再現していることがわかる。NS加振におけるこの他の測点でも、解析結果と試験結果の対応が良いことを確認している。また、EW方向加振についても同様の結果を得ている。

以上より、3次元FEMモデルによるシミュレーション解析により原子炉建物の水平加振の試験結果を精度良く再現できると言える。

4.3 上下加振試験のシミュレーション解析

上下加振試験のシミュレーション解析を行った結果をFig.4に示す。先に述べたように、同図中には試験結果を○印で表しているが、対応する解析結果を実線で表す。Fig.4 (a)より、PCCV頂部についての解析結果は、広い振

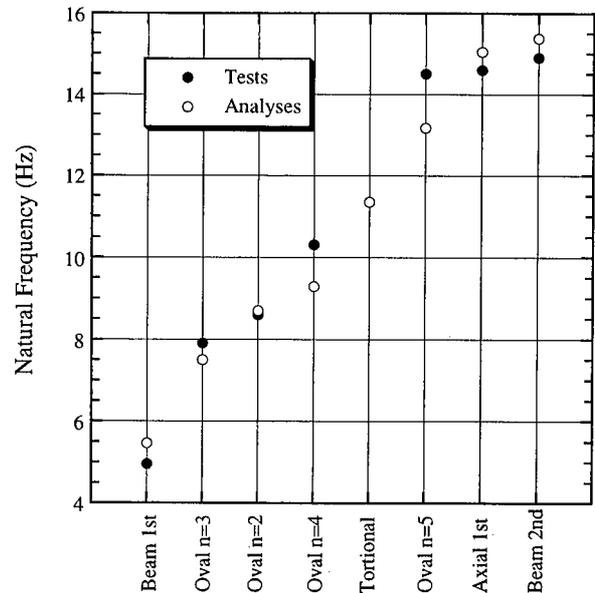


Fig. 6 PCCVの固有振動数
Natural Frequencies of PCCV from Tests of PCCV Excitation

動数帯域にわたり、試験結果を良く再現していることがわかる。また、Fig.4 (b)より、I/Cの操作床上においても、

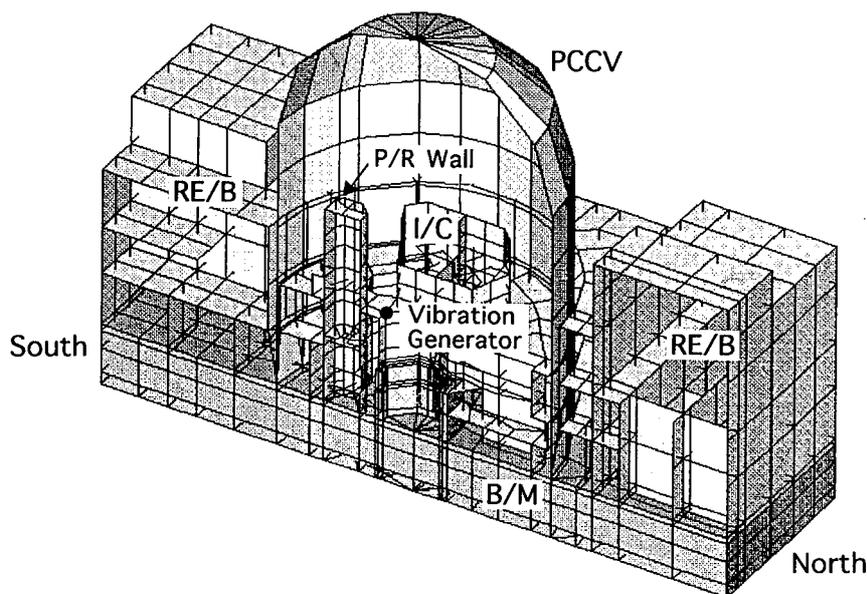


Fig. 7 3次元FEMモデルの概略
Outline of 3-D FEM Model

Table 3 3次元FEMモデルの主な設定条件
Material Properties of 3-D FEM Model

| | | Young's Modules | Poisson Ratio | Damping Factor |
|-----------|----------|---|---------------|----------------|
| PCCV | | 3.80×10^6 (tf/m ²) | 0.167 | 2 % |
| I/C, RE/B | Concrete | 3.80×10^6 (tf/m ²) | 0.167 | 3 % |
| | Steel | 2.1×10^7 (tf/m ²) | 0.167 | 1 % |
| Soil | | 1.2×10^6 (tf/m ²) | 0.373 | 2 % |

[Note] The density of soil is 2.35t/m³

解析結果は試験結果を良く再現していることがわかる。上下加振におけるこの他の測点においても良好な結果が得られていることから、3次元FEMモデルによるシミュレーション解析により原子炉建物の上下加振試験結果を精度良く再現できると言える。

5. まとめ

設計用質点系モデルの作成法は、水平方向に関してはすでに確立された感があるが、上下方向に関してはまだ緒についたばかりであり、まずは可能な限り詳細なモデルを用いて振動試験結果を再現できることを明らかにしておく必要がある。したがって、実機PWR型原子炉建物を対象とした強制振動試験のシミュレーション解析を通して、3次元FEMモデルにより水平方向に加えて上下方向の振動特性をも一貫して精度良く表せることを示す実証例の一つとして、本研究を位置付けすることができる。

謝 辞

当所所報への発表を快諾して下さいました九州電力株式会社の方々から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Kato, M., Kato, A. et al. : Forced Vibration Tests on the Reactor Building of Tsuruga Unit No.2 Nuclear Power Plant, 第10回原子炉構造力学会議, Vol. K1, p.497~502, (1987)
- 2) 此上, 中村, 他: PWR型原子炉建屋の振動試験, 大林組技術研究所報, No.45, p.65~74, (1992)
- 3) 平野, 安井, 他: FBR原子炉建物の振動特性に関する研究, 大林組技術研究所報, No.48, p.43~48, (1994)
- 4) 野畑, 中村, 他: 原子炉建屋における動弾性係数の測定方法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造2, p.1099~1100, (1996)