

実機原子炉建屋の振動試験（その2）

——試験結果のシミュレーション解析——

武田 寿一	山口 恒雄	伊藤 雅保
安井 讓	栗本 修	野畑 有秀
中村 充	宮本 明倫 (本社 原子力本部技術部)	山本 幹夫 (本社 原子力本部技術部)
田中 秀樹 (本社 原子力本部技術部)	久宝 聡博 (本社 原子力本部技術部)	吉田 伸一 (本社 原子力本部技術部)

Forced Vibration Tests on the Reactor Building of a Nuclear Power Station (Part 2)

Toshikazu Takeda	Tsuneo Yamaguchi	Masayasu Itoh
Yuzuru Yasui	Osamu Kurimoto	Arihide Nohata
Mitsuru Nakamura	Akinori Miyamoto	Mikio Yamamoto
Hideki Tanaka	Toshihiro Kubo	Shin-ichi Yoshida

Abstract

Simulation analyses of forced vibration tests on the reactor building of Tsuruga Unit No. 2 Nuclear Power Station were performed in order to explain the features appearing in the test results in more detail. The analysis models were characterized by the technique to evaluate the stiffness of the Inner Concrete Structure and a three-dimensional model of the Reactor External Building. Factor analyses on the vibration characteristics of the structure were also performed using these models and a number of important properties were revealed. The effects of flexibility of the base mat on vibration characteristics of the structure were also investigated.

More reasonable design models were proposed reflecting the results of the investigations, and earthquake response analyses were performed using these new design models, which gave much better results.

概要

日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機の振動試験のシミュレーション解析を実施し、試験結果に現われた諸特徴をより良く説明できるモデルを作成した。このモデルは、内部コンクリートの剛性評価及び、外周建屋の立体化に特徴点がある。この剛基礎モデルを用い振動特性の要因分析を行なった結果、蒸気発生器のサポート剛性が内部コンクリートの振動特性に影響を与えるなど解析モデルを作成するうえで留意すべきいくつかの重要な項目が明らかになった。又、基礎版の柔性が振動特性に与える影響についても検討した。さらに、これらの成果に基づき、より合理的な耐震設計用モデルを作成し、その妥当性について検討した。この耐震設計用モデルは、剛基礎を有する集中質量系モデルであり、内部コンクリートを十手形とし、外周建屋を立体化し、さらに地盤ばねの周波数依存性を考慮したモデルである。

1. はじめに

本報(その1)においては、日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機の振動試験の結果に現われた諸特徴(立体的挙動、一部設計値との差異)について報告したが、本報では、これらの諸特徴をできるだけ精度よくシミュレーションしうる解析技術の確立を試みるとともに、その成

果をもとに、将来の合理的な耐震設計モデルを提案することを目的とする。

本研究は、五つのステップからなっている。以下にその各項目の内容について述べる。

(1) 地盤ばねの周波数依存性の検討

試験結果から地盤ばねを逆算しその周波数依存性を把握した。

(2) 剛基礎集中質点系モデルによる振動解析

内部コンクリートの剛性評価及び、外周建屋の立体化に特徴点を置いた剛基礎集中質点系モデルを作成し、振動試験のシミュレーション解析を行なった。

内部コンクリートにおける剛性評価は、3次元FEMモデルの解析を介して行なわれた。

(3) 柔性基礎集中質点系モデルによる振動解析

(2)で作成したモデルの基礎版をFEMでモデル化することにより、基礎版の柔性が振動特性に与える影響について検討した。

(4) 振動試験評価解析モデルの検討

(2)で作成したモデルを用いて、幾つかのパラメーターを取り上げて感度解析を行ない、振動特性に影響を与える要因の分析を行なった。

これらの結果をもとに、振動試験結果を最も適切に評価できる振動試験評価解析モデルを選定し、このモデルについて耐震安全性の検討を行なった。

(5) 耐震設計用モデルの提案

上記の成果を踏まえ、実用的な耐震設計モデルを提案し、その妥当性について検討した。この耐震設計モデルは剛な基礎を有する集中質点系モデルであって、内部コンクリートを十手形とし、地盤ばねは周波数依存性を考慮し(耐特委D法)、更に周辺建屋を立体化したモデルである。

2. 試験結果による逆算地盤ばねの評価

ここでは、試験結果に重要な影響を与えていると考えられる、地盤ばねの周波数依存性を把握するため、試験

結果をもとに地盤ばねを逆算することを試みた。

地盤ばねの逆算にあたっては、まず、質点系モデルを設定し、各質点の質量に、振動試験時における振幅を掛けて得られる慣性力を加算し、基礎地盤におけるベースシアを求める。この値を、試験結果における基礎底版の変位振幅で除し、水平地盤ばねの値を求める。回転ばねについても同様の手法により逆算地盤ばねを算定する。

図-1に、このようにして求めた逆算地盤ばねと、振動アドミタンス理論を用いて求めた理論値を比較して示す。

この図からは、逆算結果が、かなりばらついてはいるものの、明瞭な傾向をもって振動数依存していることがうかがえる。理論値と比較すると、地盤のせん断波速度は1200 m/s~1400 m/s程度と考えられるが、試験結果における基礎版振幅には基礎版の局所的な変形や柔性効果の影響があると考えられること、さらに現地地盤の弾性波試験による結果ではVS=1600 m/s程度という値が得られていることなどを考慮に入れて、以降のシミュレーション解析ではVS=1600 m/sの値を採用することにする。

3. 剛基礎集中質点系モデル

3.1. NS方向のモデル化

3.1.1. 内部コンクリートのモデル化 内部コンクリート(I/C)のように断面形状が複雑で各部に不連続部をもつ壁式構造体の場合、一般に平面保持の仮定は成立しないと考えられる。特に、床版に開口などがあり壁体の剛性に比べて床版の剛性がかならずしも大きくない

場合には、同一平面内でも位置により水平方向変形に差が生じることになる。振動試験結果によると、加圧器室部分の局所的な曲げ及びせん断変形も顕著に現われていることが認められる。特にNS方向の場合、EL+7.3mより上部の加圧器室の変形が大きく、その影響をうけEL+7.3mより下部の変形も加圧器室位置で大きくなっている。

このため、I/Cを便宜的に2本棒からなる

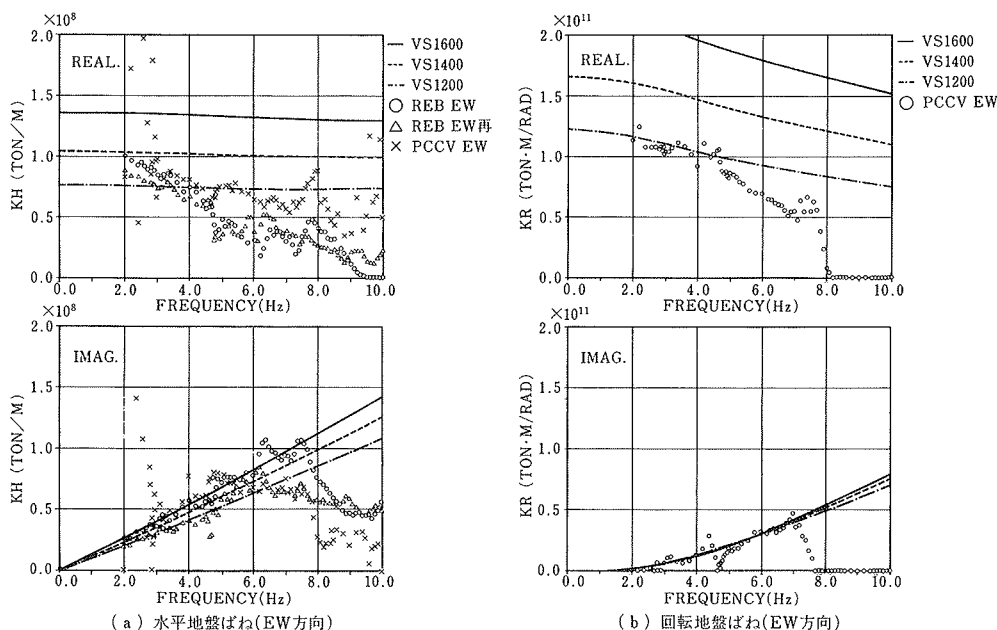


図-1 試験結果から求めた逆算地盤ばねと理論値との比較

質点系モデルに置換することを考え、加圧器室部分 (Pressurizer 壁, 以下 PR 壁と称する) 及びそれ以外の構造体 (Primary sealed + S/G 壁, 以下 PS 壁と称する) の 2 本棒に分離することにし、両者を EL+7.3 m, EL-0.3 m 位置に設けた 2 本のつなぎばりで結びつけることにする。

質点系モデルの作成に先立って、モデルの整合性を確認するために FEM 3次元モデルを作成し、固有値解析を実施した。FEM モデルは、図-2 に示すとおり、実機構造物の対称性を考慮して1/2モデルとした。

質点系モデルへの置換に当っては、まず、FEM でモデル化された I/C 各質点相当位置に各々単位力を作用させ、質点系置換モデルの質点位置に対応する位置での水平変位、回転角をそれぞれ求めた。これらの変形を、曲げ変形・せん断変形に分離し、分離された変形成分を用いて、せん断剛性及び曲げ剛性を評価した。

この剛性評価にあたっては、加圧器室壁中心位置及び S/G 壁中心位置の変形が、質点系モデルの 2 本棒それぞれの全体的な挙動を代表するものと考え、これらの位置での変形を用いて評価した。

つなぎばりの剛性についても、FEM モデルにおける単位加力による変形と等価になるように設定した。

EL+7.3 m の操作床 (O/F) 上の鉄骨スラブについても軸方向ばねとしてモデル化し、FEM 解析をもとに剛性を算定した。

S/G 機器と I/C 構造体との連成効果については、予備的な検討からその影響が無視できないことが把握されたため、S/G 機器をモデルに取り入れた。S/G 機器を支持するサポートの剛性については、振動試験時の状況を考慮して設計値を低減した値を用いた。

図-3 に I/C 質点系モデルの概要を示す。

3.1.2. 外周建屋のモデル化 外周建屋 (REB) のモ

デルは、振動試験結果に見られた、加振位置近傍と加振位置から離れた位置での振動特性の差を表現するため、3次元の質点系多本棒モデルとした。各質点の質量・剛性の評価は、部材断面から直接算出した。

3.1.3. PCCV のモデル化 PCCV のモデル化については、部材断面から直接、質量・剛性を算出したが、基礎版へのめり込み効果を考慮するため脚部に回転ばねを設けた。

3.1.4. コンクリートのヤング係数 コンクリートのヤング係数の値については、敦賀 2号機実機のコンクリートで実施した弾性波試験結果から推定した動弾性係数、品質管理のために行なわれたテストピースの圧縮強度試験結果から推定した静弾性係数及び、本報(その1)に示される PCCV の FEM 解析結果から推定された値から総合的に判断して、I/C 及び REB については 270 ton/cm², PCCV については 400 ton/cm² と、それぞれ設定することとした。

3.1.5. 地盤連成系モデル固有値解析結果 以上の手法で作成された全体質点系モデルに、地盤ばねを付与したモデルを用いて固有値解析を実施した。地盤ばねは、変位規定による離散化振動アドミッタンス理論による I/C 1次振動数における複素ばねの実部を用いた。図-4 に全体質点系モデルを示す。なお、NS 方向のモデル化については、実機構造物の対称性を考慮して1/2モデルとした。

表-1 に固有値解析の結果を試験結果と比較して示す。又、図-5 に I/C 部分の刺激関数を試験結果と比較して示す。

これらの結果より、PCCV の 1次、I/C の 1次、2次の各モードについて固有振動数が試験結果と解析結果とでよく一致していることが分かる。又、I/C の振幅は、1次、2次ともに試験結果と解析結果が良い対応を示して

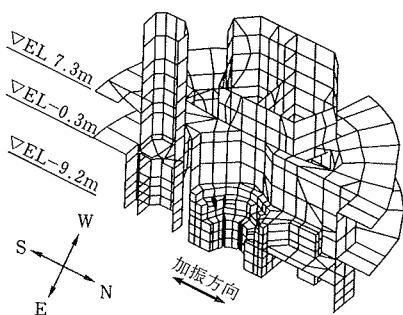


図-2 I/C FEM モデル

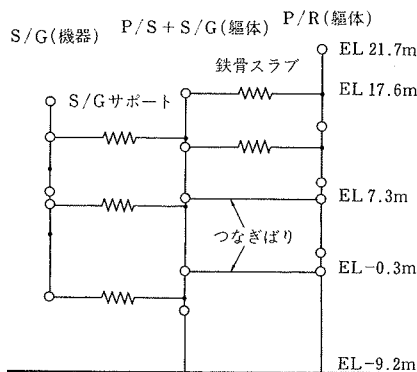


図-3 NS 方向 I/C モデル

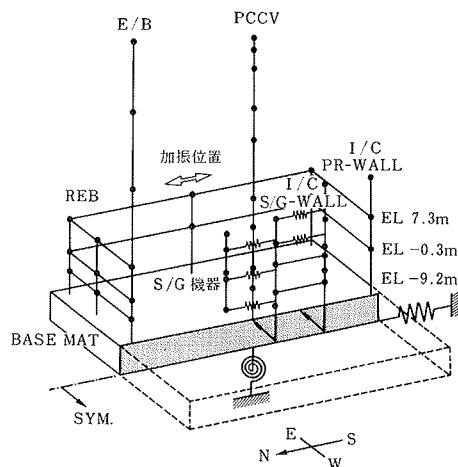


図-4 NS 方向全体モデル

いる。I/C 1次振動数における PR 壁頂部の振幅は、PS 壁頂部の振幅に対して、試験結果で約4倍、解析結果で約5倍であり、良い対応を示している。

3.1.6. 振動試験シミュレーション解析 上記の全体質点系モデルに、振動数依存型の地盤ばねを付与し、振動試験のシミュレーション解析を実施した。地盤ばねは、変位規定による振動アドミッタンス理論を用いて求めたものであり、地盤のせん断波速度は、 $V_S=1600$ m/s とした。シミュレーションに用いたコンクリートの減衰定数については、試験結果のモード減衰に一致するようパラメトリックスタディにより決定し、PCCV については2%、I/C については4%とした。

ここでシミュレーション解析の対象としたのは REB NS 加振である。図-6 にシミュレーション結果を試験結果と比較して示す。これらの図より次のようなことが分かる。

I/C の1次振動数においては PR 壁の振幅が試験結果に比べてやや大きいものの、PS 壁の振幅は試験結果と良く一致している。又、I/C の2次振

	シミュレーション(Hz)	試験結果(Hz)
PCCV 1次	4.92	4.86
I/C 1次	7.66	7.57
I/C 2次	10.57	10.61

表-1 固有振動数の比較 (NS)

動数においては、PS 壁・PR 壁とも、振幅は試験結果と良く一致している。I/C の振幅・位相は 12 Hz 付近から試験結果と大きな差が生じ始めるが、これは振動試験では、このあたりの振動数以上では I/C 全体が加振と直交方向の振動も励起しており、2次元集中質点系モデルではその振動性状を表現しきれないことによるものと思われる。

PCCV においては、低振動数から、12~13 Hz あたりまで、振幅・位相とも試験結果と良く一致している。2次振動数が試験結果と一致しないのは、このモデルでは平面保持を仮定してモデル化しているのたいて、試験結果における2次モードでは、オーバル振動と連成したモード形状で振動しているためである。

このように、この質点系モデルを用いたシミュレーション解析結果は振動試験結果と良く一致しており、この

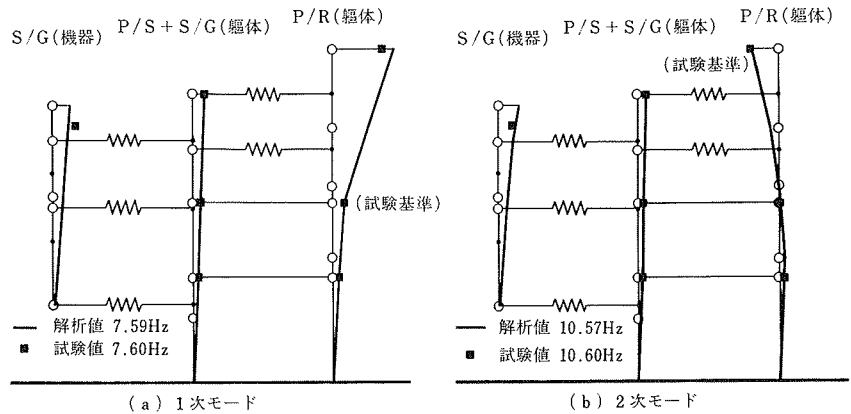


図-5 I/C モード形状の比較 (NS 方向)

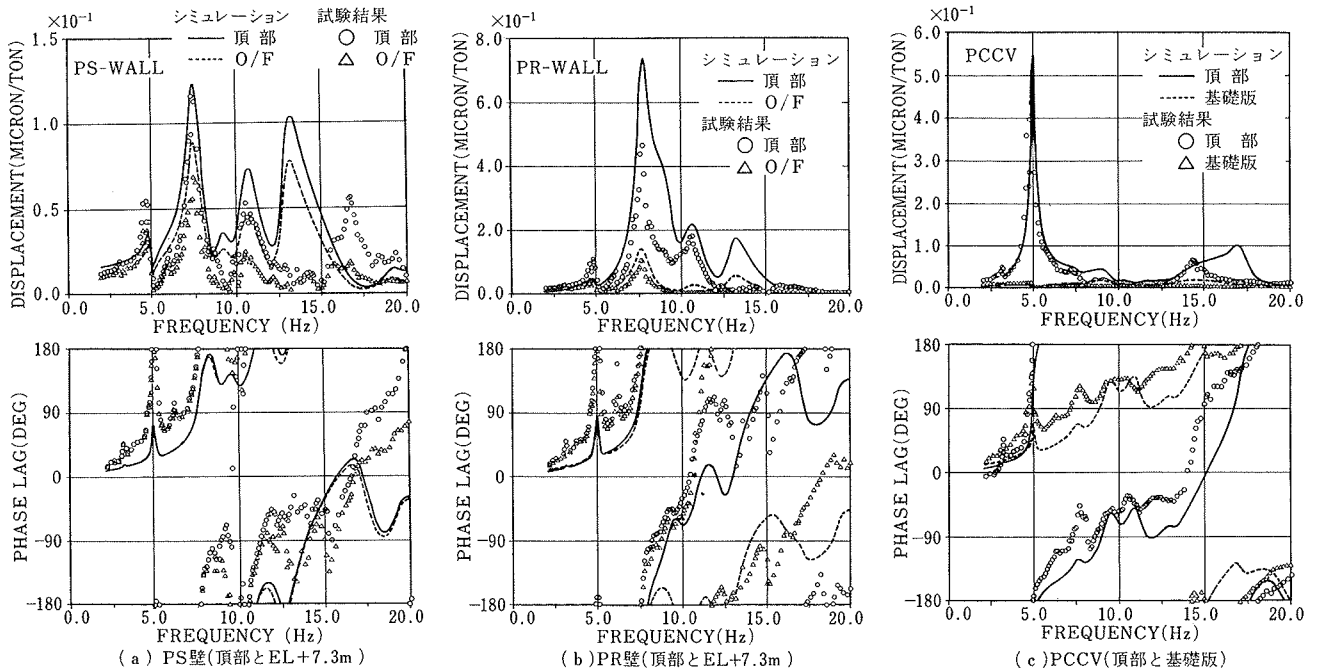


図-6 シミュレーション解析結果 (NS 方向・剛基礎モデル・REB NS 加振)

ことから、I/C 剛性評価手法、REB の立体モデル化などこのモデルの作成手法が妥当であることが示された。

3.2. EW 方向のモデル化

3.2.1. NS 方向との相違点 EW 方向についても NS 方向と同様の考え方に基いてモデル化を行なった。EW 方向について、NS 方向と異なる点は次のとおりである。

I/C については、NS 方向には生じなかった、構造体全体としてのねじれが発生する。従って、剛性評価は剛心位置と重心位置の差によるねじれ変形の影響を考慮した。EL+7.3 m より下部の壁体を 1 本の柱材で模擬し、SG 壁と PR 壁それぞれを片持ばりで模擬し、EL+7.3 m のつなぎ材で連結した十手形の構造とした。

REB については、NS 方向と同様、3次元の質点系多本棒モデルとしたが、振動試験結果に見られた東側加振位置と西側加振位置

の振動特性の差を表現するため、全体モデルとした。

3.2.2. 振動試験シミュレーション解析 EW 方向についてはシミュレーション結果についてのみ示す。図一七に全体質点系モデルを示す。

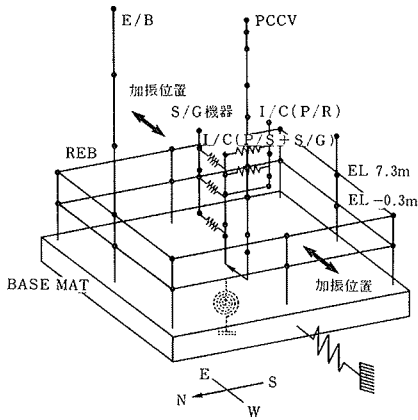
この全体質点系モデルに振動数依存型の地盤ばねを付与し、振動試験のシミュレーション解析を実施した。地盤ばね、コンクリートの減衰については、NS 方向と同様にして設定した。

ここでシミュレーション解析の対象としたのは REB EW 加振である。図一八にシミュレーション結果を試験結果と比較して示す。これらの図より次のようなことが分かる。

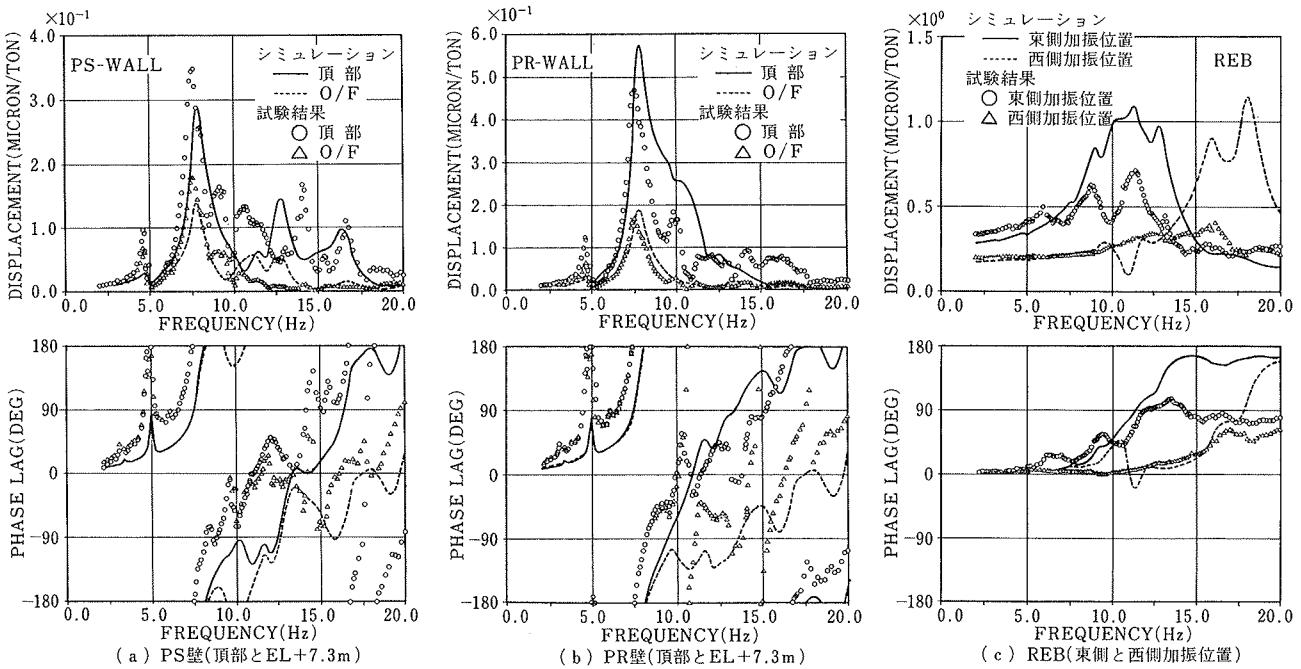
I/C の 1 次振動数においては PS 壁の振幅が試験結果にくらべてやや小さいものの、PR 壁の振幅は頂部、O/F (EL+7.3 m) とも、試験結果と良く一致している。10 Hz 付近から、NS 方向と同じ理由で試験結果と差が生じ始めるが、全体の傾向は比較的一致していると言える。

REB においては、東側加振位置と、西側加振位置での振動特性の差がシミュレーション結果にも表現されている。

このように、EW 方向についても、NS 方向と同様にシミュレーション解析結果は、振動試験結果と良く一致しており、このことから、I/C 剛性評価手法、REB の立体モデル化など、このモデルの作成手法が妥当であることが示された。



図一七 EW 方向全体モデル



図一八 シミュレーション解析結果 (EW 方向・剛基礎モデル・REB EW 加振)

4. 柔性基礎集中質点系モデル

ここでは、前章で作成したモデルの上部構造に、柔性を考慮した FEM モデルによる基礎版を接続し、基礎剛性の評価の差が、振動特性に与える影響を明らかにすることを試みた。

基礎版は、FEM シェル要素でモデル化し、基礎版の各節点には振動アドミッタンス理論による離散化地盤ばねを接続した。図-9 にモデル図を示す。

シミュレーション解析の対象としたのは REB NS 加振である。このモデルによるシミュレーション解析結果を、図-10 に示す。これらの図より次のようなことが分かる。

I/C の 1 次振動数においては、PS 壁、PR 壁とも振幅は試験結果に比べてかなり大きくなっているが、位相特性は試験結果と良く一致している。特に、位相特性に関しては 2 次振動数に至るまで、試験結果と良く一致している。

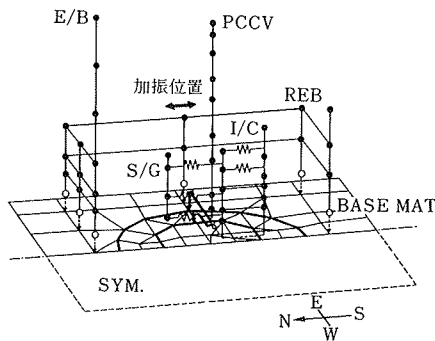


図-9 柔性基礎モデル (NS 方向)

いる。

PCCV の 1 次振動数においては、振幅が試験結果より小さめになっているが、これは、基礎版の弾性変形を考慮したこ

とにより、基礎版を介して伝達される加振力が小さくなった結果といえる。

このように、基礎版の柔性を考慮することにより、特に位相特性について顕著に改善されることが分かった。しかし、全体の傾向としては剛基礎によるシミュレーション結果と大きな差はなく、基礎版厚さ 8 m は剛性として十分大きく、大局的には剛体的挙動をしていると言える。

5. 振動試験評価解析モデルの検討

5.1. 振動特性の要因分析

この節では、3 章のモデルを作成する過程で検討された各種の要因について個別に検討を行ない、それらが振動特性に与える影響を評価する。

ここで取り上げた検討項目は以下の 7 項目である。

- (1) S/G サポート剛性の影響
- (2) 鉄骨スラブ剛性の影響
- (3) 機器重量の影響
- (4) I/C 全体ねじれ剛性の影響
- (5) 地盤せん断波速度の影響
- (6) D 法を用いたモデルの妥当性
- (7) 地盤減衰の影響

これらの検討結果より、各要因が振動特性に与える影響について以下のようなことが分かる。

(1) S/G サポート剛性については、NS 方向では 10 Hz 以上の範囲で、共振振動数、振幅に影響が見られる。又、EW 方向では I/C の 1 次振動数でも影響が現

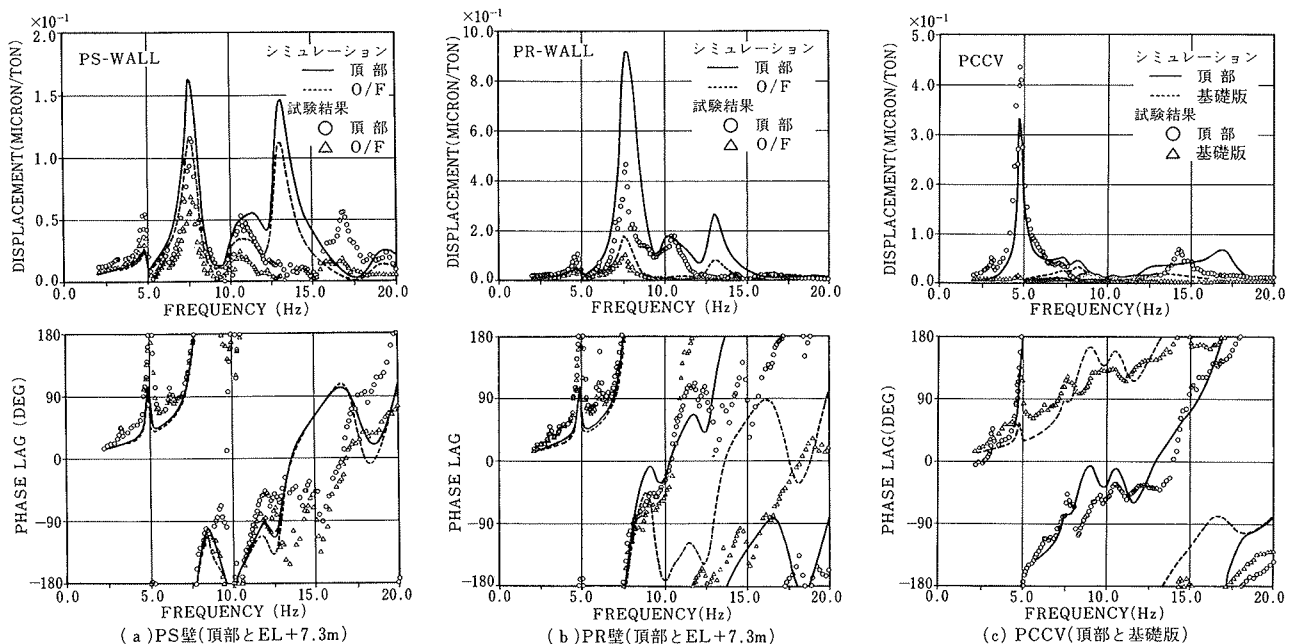


図-10 シミュレーション解析結果 (NS 方向・柔性基礎モデル・REB NS 加振)

われている。

(2) 鉄骨スラブ剛性の影響については、NS方向では7~11 Hzの範囲で影響が見られる。EW方向には、影響がほとんど見られない。

(3) 機器重量の影響については、10 Hz以上の範囲で、共振振動数、振幅に影響が見られる。

(4) I/C全体ねじれ剛性の影響については、ねじれ剛性を無限大にすると応答値がやや増加する傾向があるが、全体としてあまり影響は見られない。

(5) 地盤せん断波速度の影響については、固有振動数に与える影響は少ないが、せん断波速度が小さくなると振幅は若干大きくなる傾向がある。

(6) 地盤ばねに耐特委D法を用いたモデルについては、振動アドミタンスにより理論解を用いた3章モデルとの差がほとんど見られず、このシミュレーションの地盤ばねとしてD法を用いることの妥当性が示された。

(7) 地盤ばねの減衰を2倍したモデルでは、減衰を増加させると振幅が減少することが分かる。

この要因分析の結果、I/Cにおいては、S/Gサポート剛性や、試験時と設計用のわずかな重量の差が、振動特性に与える影響が大きいことや、逆に、鉄骨スラブ剛性や、EW方向におけるI/C全体ねじれ剛性の影響はあまりないことが、重要な知見として得られた。又、地盤に関しては、シミュレーションモデルの地盤ばねとしてD法を用いることの妥当性が示された。

3章モデルは、これらの検討結果を踏まえ作成されている。

5.2. 耐震安全性評価

設計モデルによる設計解析のレビューと実機の実際の耐震安全性の確認のために、3章で作成したモデルにより地震応答解析を実施した。

ここで用いた地震波は、設計に用いられたものと同じS1地震(365 gal)である。なお、3章のモデル化は振動試験時を対象としているため、ここでは、運転時の状況

及び地震応答の歪レベルに対応するように、重量、コンクリート弾性係数及び減衰定数などを変更した。

S1地震による応答解析結果によると、局部的にはPR壁のEL+7.3 m位置の応答曲げモーメントが、短期許容限界に近接しているが、その他各部の応答せん断力、曲げモーメントは、いずれも短期許容限界以内にある。又、ベースシア係数についても設計モデルより大きく下回り、安全評価上問題ないものと判断される。表-2にベースシア係数を示す。

6. 耐震設計用モデルの提案

ここでは、3章で作成したモデルをもとに自由度を低減した耐震設計用モデルを提案した。

6.1. モデル化の基本方針

5章の振動特性の要因分析結果を踏まえて、I/Cについては、S/G機器連成を考慮したが、鉄骨スラブ及びREBのE/Bの影響についてはほとんどないと考えられるのでモデル化は行わない。PCCVについては、3章のモデルでは脚部回転ばねを考慮したが、ここで提案するモデルでは考慮しない。又、地盤ばねとして、耐特委D法によるばねを用いることとした。

NS方向については、建屋の対称性から1/2モデルとし、EW方向は全体モデルとすることとした。

6.2. 耐震設計用モデルの工学的妥当性の評価

ここで提案する耐震設計用モデル(以下提案モデルと称する)の工学的妥当性を判断するための比較対象として、5章で耐震安全性の確認を行なったモデル(以下5章モデルと称する)即ち、3章で作成したモデルの物性値を運転時状況に変更したモデルを用いた。

提案モデルが、工学的に妥当であるか否かの判断を行なう際の評価方法として、直接応答による評価を行なうこととした。即ち、入力地震動のターゲットスペクトルを直接用いて建屋最大応答値及び床応答スペクトルを算定し²⁾、最大応答値については、5章モデルの応答値が提案モデルの応答値以下であること、又、床応答スペクトルについては、提案モデルの主要点において算定された床応答スペクトルを周期軸に関して10%拡幅を行ない、5章モデルで評価された同じ位置での床応答スペクトルがこの拡幅スペクトルにほぼ包絡されていることを満足することを条件とした。

6.3. NS方向のモデル化

以上の方針に基づき、I/Cについては5章モデルで用いた2本棒モデルと、EL+7.3 m以下を1本にモデル化した十手形モデルについて、又、REBについては5章モデルで用いた多本棒モデルと、簡略化した3本棒モデルについて、それらの組み合わせで検討した。

		5章におけるモデル	本報(その1)のモデル
NS	I/C	0.486	1.212
	PCCV	0.997	1.202
	REB	0.557	0.750
	基礎	0.362	—
EW	I/C	0.764	1.285
	PCCV	0.985	1.304
	REB	0.560	0.737
	基礎	0.354	—

注1) I/C、PCCV、REBのベースシア係数は、各々の脚部の位置での値を示す。

注2) 基礎のベースシア係数は、基礎底面での値を示す。

表-2 ベースシア係数の比較

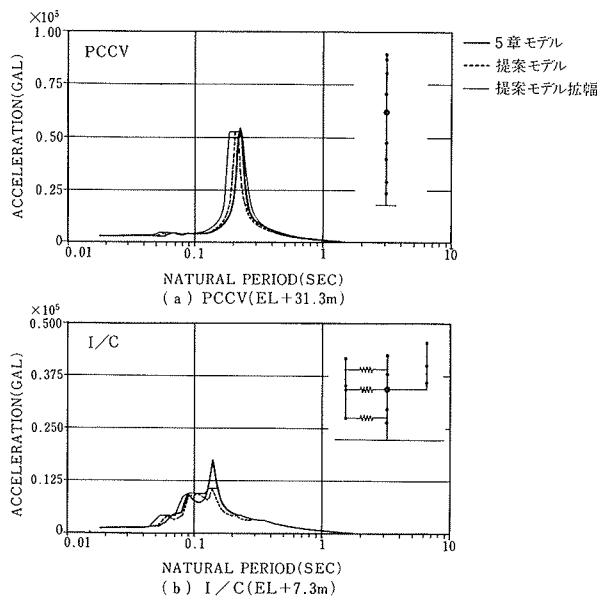


図-11 床応答スペクトル例 (NS 方向)

この結果、I/C について十手形モデルを採用し、REB については多本棒モデルを採用したものが、上記の条件を満足するモデルであることが分かった。

又、図-11には、床応答スペクトルの比較図の例を示す。

6.4. EW 方向のモデル化

EW 方向については、NS 方向における検討の結果から、REB については多本棒モデルとすることとした。

I/C については、形状は5章モデルと同じ十手形モデルとし、EL+7.3 m 以下の柱材のねじれ剛性を無限大とし、PR 壁とのつなぎ材のねじれ剛性の影響のみについて検討した結果、この剛性を無限大としたモデルを採用することとなった。

6.5. 提案モデルでの耐震安全性評価

ここで提案された耐震設計用モデルについて地震応答解析を行ない、ベースシア係数を5章モデル(図-4)及び本報(その1)で用いたモデル((その1)7章)と比較することにより、提案された耐震設計モデルの健全性と有用性について評価した。

表-3 にベースシア係数の比較を示す。

表より、提案モデルのベースシア係数は、おおむね5章モデルの値よりも大きく、本報(その1)のモデルの値よりも小さくなっていることが分かる。

7. まとめ

本研究を通じて得られた特記すべき成果をまとめて示

(a) NS 方向

	提案モデル	5章におけるモデル	本報(その1)のモデル
I/C	0.566	0.486	1.212
PCCV	1.240	0.997	1.202
REB	0.609	0.557	0.750
基礎	0.415	0.362	—

(b) EW 方向

	提案モデル	5章におけるモデル	本報(その1)のモデル
I/C	0.877	0.764	1.285
PCCV	1.241	0.985	1.304
REB	0.544	0.560	0.737
基礎	0.390	0.354	—

表-3 ベースシア係数の比較

すと以下のものである。

(1) 硬質岩盤上のPWR型の原子炉建屋の複雑な振動特性を良好にシミュレートすることができた。

(2) 内部コンクリートの様に断面形状が複雑な構造物を集中質点系に置換する方法を提案した。

(3) 構造物の剛性評価も重要であるが重量評価も重要であることが分かった。

(4) 振動試験結果を評価するための解析モデルに用いたヤング係数の値の妥当性を実機建屋のコンクリートの弾性波試験結果により裏づけた。

(5) 蒸気発生器のサポートの剛性及び重量の評価の違いが内部コンクリートの振動特性に影響を与えることが分かった。このことは、振動試験時に機器の重量とその支持状況を正確に把握しておくべきであることを示している。

謝 辞

この研究は、日本原子力発電(株)の委託により実施したものであり、研究の全体にわたって御指導を賜った、日本原子力発電(株)建設部の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沢田, 他: 原子炉建屋基礎版の柔性に関する研究(その1)~(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B 構造 I, (昭和62. 10), pp. 185~188
- 2) 安井, 他: 床応答スペクトルの直接計算法について, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986. 2), pp. 149~153