

原子炉格納容器内部コンクリート構造の耐震性確認実験（その2）

——起振機による振動実験——

武田 寿一 山口 恒雄 伊藤 雅保
鈴木 哲夫 中村 勲

Horizontal Loading Tests and Vibration Tests on a 1/10 Scale Model of Inner Concrete Structure for PWR-Type Nuclear Power Plant (Part 2)

——Vibration Tests——

Toshikazu Takeda Tsuneo Yamaguchi Masayasu Ito
Tetsuo Suzuki Takashi Nakamura

Abstract

This report describes the results of vibration tests performed using a 1/10 scale model specimen of the inner concrete structure in the Tsuruga #2 prestressed concrete containment vessel. The purpose of the experiments was to grasp the dynamic characteristics of specimens by vibration tests. For the vibration tests, a shaker was installed on top of the upper-level loading slab of the specimen, and shaking was done varying the frequency with the magnitude of input acceleration constant. According to the vibration tests, the natural periods and normal modes of vibration of specimens in the elastic range agreed relatively well with results of analyses using the finite element method. Based on the above results, it was confirmed to be possible to evaluate structural characteristics of the complex structure using the finite element method.

概 要

本報告は、日本原子力発電(株)敦賀2号炉に採用されている100万kw級PWR型原子炉格納容器内部コンクリート構造の1/10縮尺模型試験体を用いて行なわれた実験結果のなかの、起振機実験結果について紹介するものである。

実験の目的は、試験体の弾性時挙動、ひびわれ発生後の剛性低下などの動的性状を把握することである。実験は、起振機を試験体上段加力スラブ上に設置し、加振することによって行なわれた。起振機実験の結果によれば、弾性時における試験体の固有周期・振動モードなどはFEMを用いた解析結果と比較的によく一致した。

従って、このような複雑な構造物でも、FEM解析などで十分評価しうることが確認された。

1. 序

本報告は、同題（その1）に記したPWR型原子炉格納容器内部コンクリート構造の1/10縮尺模型試験体を用いて行なわれた実験結果のなかの、起振機実験結果について述べたものである。

起振機実験の目的は、試験体の弾性時挙動およびひび

われ発生後の剛性低下などの動的性状を把握することである。

なお、実験は日本原子力発電(株)敦賀2号炉に採用されているPWR型100万kw級の原子炉格納容器(PCCV)内にある原子炉容器・加圧器・蒸気発生器などを支持している鉄筋コンクリート構造体（内部コンクリート構造体と称す）を対象として、その耐震性について実験的に検討を

加え、実機の耐震設計および将来の実機振動試験に資することを意図して計画されたものである。

2. 実験方法

写真一1に、静的加力用治具を取付けた状態での実験状況を示した。なお、使用した起振機は電動型加振機である。

2.1. 加振方法

写真一1および図一1、図一2に示したように、試験体上段加力スラブ上に起振機を設置し、加振板（重量は約16 kg）の入力加速度（S1）を500 gal一定にして、振動数を40~150 Hzと変化させた共振実験を行ない、振動性状を調べた。なお、この実験で試験体に入力された起振力は約8 kgである。参考までに、図一3に概略の加振システムを示した。

2.2. 実験の種類

起振機実験は下記のように、静的加力実験前、実験準備中、静的加力実験の途中の3 Case について行なった。

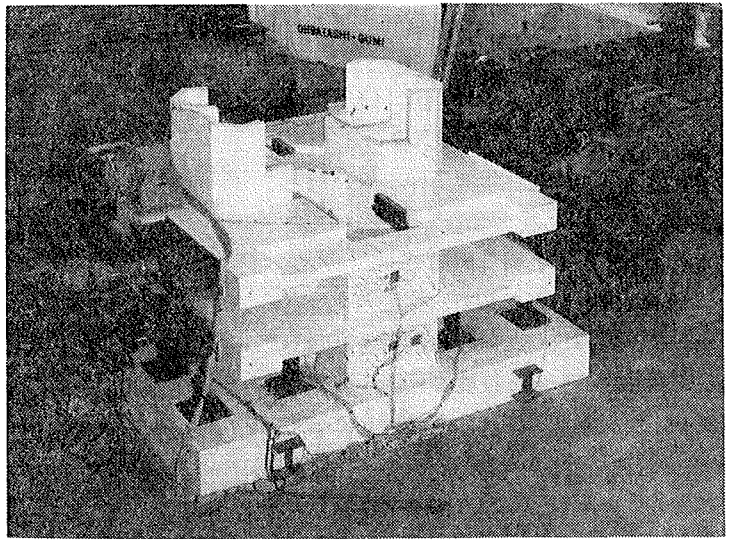
- Case 1: 弾性状態（静的加力実験前で、試験体に何も取付けられていない段階）
- Case 2: 弾性状態（静的加力実験の準備中で、加力用治具が取付けられた段階）
- Case 3: 静的加力実験（部材角1/2000まで経験）後、試験体にひびわれが発生した状態

2.3. 測定方法

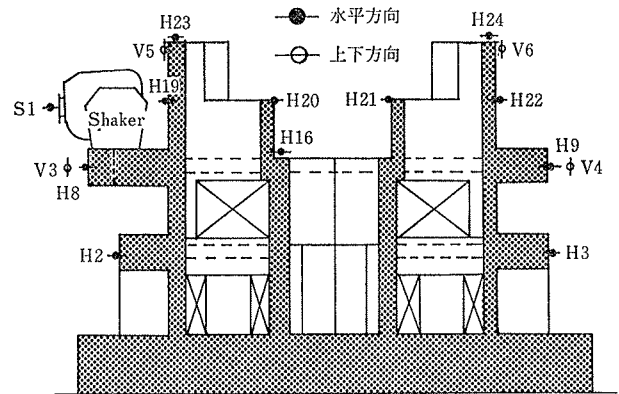
測定（試験体の水平方向24点、上下方向7点、その他3点）はすべて加速度計（定格加速度10G、測定振動数160 Hz、出力約 3,000 μ /G）を用いて行ない、加速度記録はすべてデータ・レコーダ（3台）に集録した。なお各データ・レコーダの記録の同時性の確保は、同時スタータで制御することによってなされている。図一1、図一2に代表的な測定点の位置を示した。

3. 固有値解析

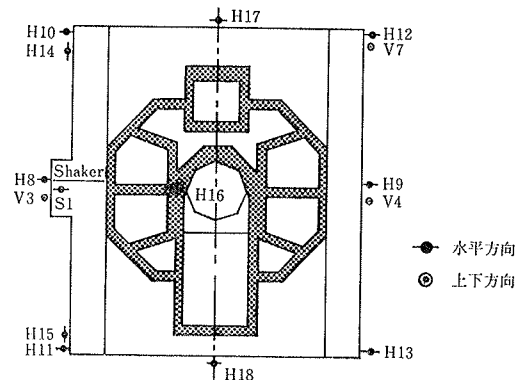
試験体（写真一1、および図一1、図一2参照）は複雑な形状をした構造物であるために固有値解析は有限要素法を用いて行なう。ただし有限要素を用いてモデル化するためには多くの要素に分割することが必要となる。従って、全体の自由度数も大きなものとなることが考えられる。そこで、構造物の対称性を利用して、全体の1/2部分についてモデル化を行ない、自由度数を減じたうえで、固有値解析を行なうことにした。その際、対称軸が加振方向と直交するために、対称軸上で対称境界条件または逆対称境界条件を用いることによって、対称形モードと逆対称形モードを別々に求めることにした。



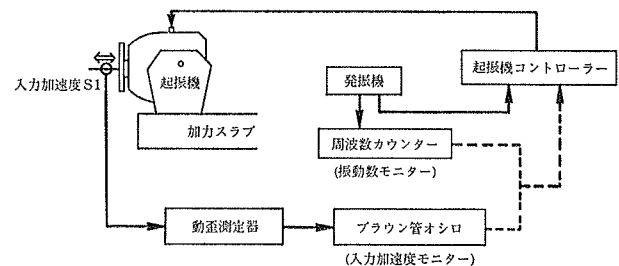
写真一1 実験状況（静的加力用治具取付後）



図一1 測定点の配置（立面）



図一2 測定点の配置（上段加力スラブ位置平面）



図一3 加振システム

3.1. 解析モデル

図-4 に解析モデルの概略の要素分割を示した。なお要素数は 301, 節点数は 384, 自由度総数は対称境界条件を用いたとき1269, 逆対称境界条件を用いたとき1,226 である。

3.2. モード形と固有周期

代表的なモードとして, 蒸気発生器室を双子系とみなしたときに, 高さ方向1次で同位相モードと反発モードを選び, 概略のモード形を図-5, 図-6 に示した。それらの図によれば, 蒸気発生器室, 加力スラブ等が起振機実験時に複雑な挙動を示すであろうと推定される。

4. 共振曲線

代表的な測点として, 試験体の全体的な応答を知ることのできる, 上段加力スラブのほぼ中央の位置にある測点 H16(図-1, 図-2 参照) を選び, 解析と実験 Case 1~Case 3 の共振曲線を示したのが図-7~図-10 である。なお, 各図の縦軸の値は H16 の応答加速度を起振

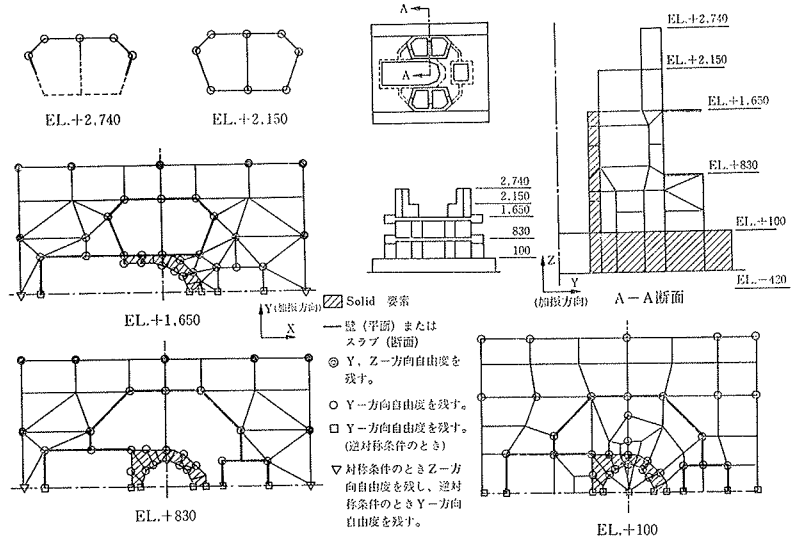


図-4 要素分割の概略

力(約 8 kg) で割った値, 即ち, 単位起振力当りの応答加速度を意味している。

4.1. 実験による共振曲線

4.1.1. Case 1 の場合 図-8 に示した共振曲線で, 47.5 Hz 付近のピークは加力スラブの上下動に起因する

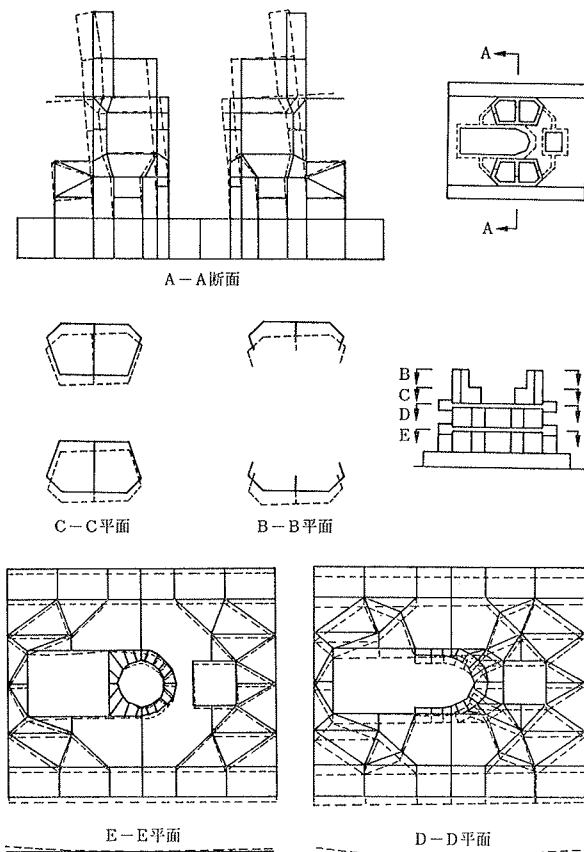


図-5 高さ方向1次同位相モード : $f=83.9\text{Hz}$

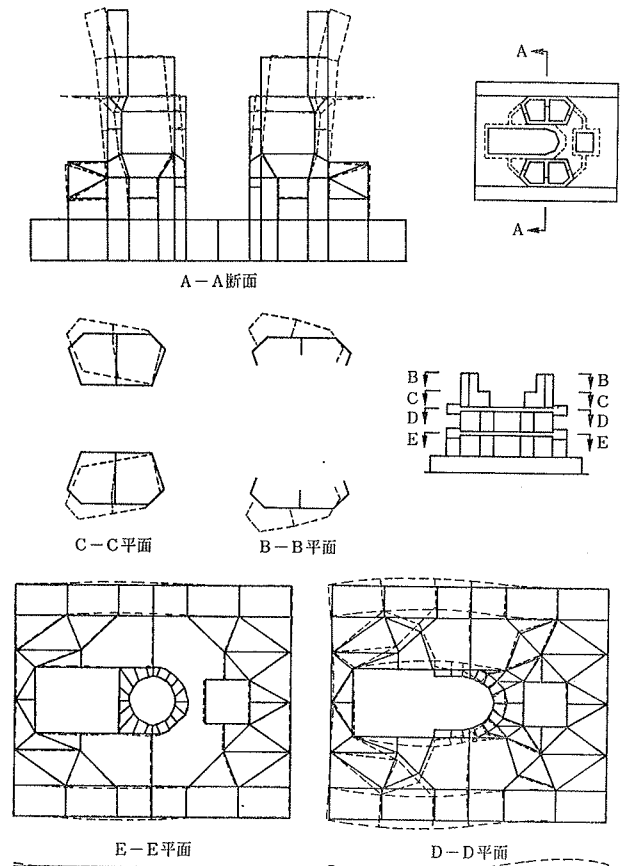


図-6 高さ方向1次反発モード : $f=117\text{Hz}$

ものであり、62.5 Hz 付近のピークは起振機の固有振動数に起因するものである。82 Hz 付近のピークは蒸気発生器室を双子系とみなしたときの高さ方向1次同位相モードが卓越したものであり、97 Hz 付近のピークは加力スラブの面外曲げモードが卓越したものである。123 Hz 付近のピークは高さ方向1次反発モードが卓越したものであり、140 Hz 付近のピークは主に高さ方向2次同位相モードが卓越したものである。

4.1.2. Case 2の場合 図-9に示した共振曲線ではCase 1の場合にみられた47.5 Hz 付近の加力スラブの上下動に起因するピークは加力用治具などの取付けで加力スラブ部分の重量が増加したことによって40 Hz 以上の振動数では生じていない。起振機の固有振動数に起因するピークは58 Hz 付近で生じている。70 Hz 付近のピークは高さ方向1次同位相モードが卓越したものであり、82 Hz 付近のピークは加力スラブの面外曲げモードが卓越したものである。121 Hz 付近のピークは高さ方向1次反発モードが卓越したものである。

4.1.3. Case 3の場合 図-10に示した共振曲線で、60.5 Hz 付近のピークは高さ方向1次同位相モードが卓越したものであるが、起振機の固有振動数もこの付近に存在するものと思われることから、その影響も含まれているものと考えられる。70 Hz 付近のピークは加力スラブの面外曲げモードが卓越したものであり、88, 102 Hz 付近のピークも同じようなモードが卓越したものである。110 Hz 付近のピークは高さ方向1次反発モードが卓越したものであり、122 Hz 付近にもほぼ同じようなモードが生じている。

4.2. 解析による共振曲線

図-7は解析によって求められた共振曲線で、実験のCase 1(図-8参照)に対応したものである。84 Hz 付近のピークは高さ方向1次同位相モードが、103 Hz 付近のピークは加力スラブの面外曲げモードが、117 Hz 付近のピークは高さ方向1次反発モードがそれぞれ卓越したものである。なお、解析では各次モード(30次モードまで考慮、 $f_{30}=212.4$ Hz)に仮定の減衰($h=0.03$ で一定)を与えて、モード合成法により求めている。また加振点が上段加力スラブより40 cm 高くなっていること(図-1参照)によって生じる曲げモーメントの影響を上下方向に置き換えることによって考慮している。

5. 実験と解析の比較

5.1. 共振曲線

実験のCase 1の場合、構造物として主要な振動数領域である75 Hz 以上の振動数については、解析(図-7)と実験(図-8)との共振曲線の形状・ピークの分布な

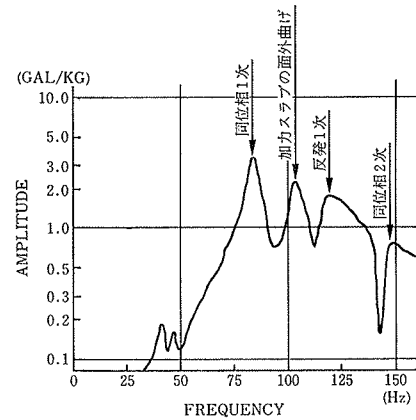


図-7 加速度共振曲線：解析 (Case 1 相当)

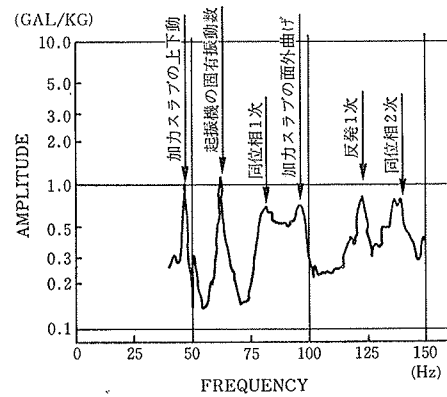


図-8 加速度共振曲線：実験 (Case 1)

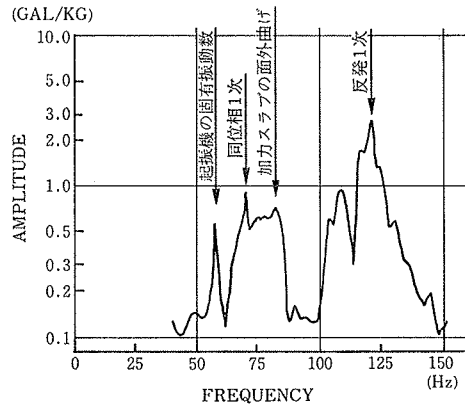


図-9 加速度共振曲線：実験 (Case 2)

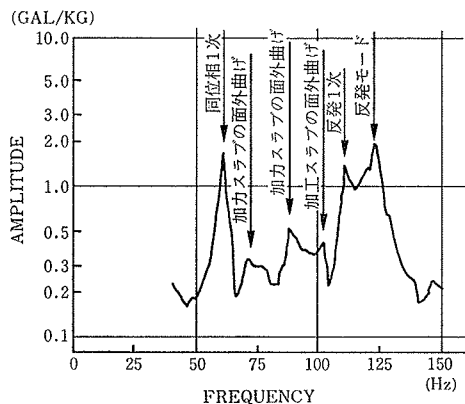
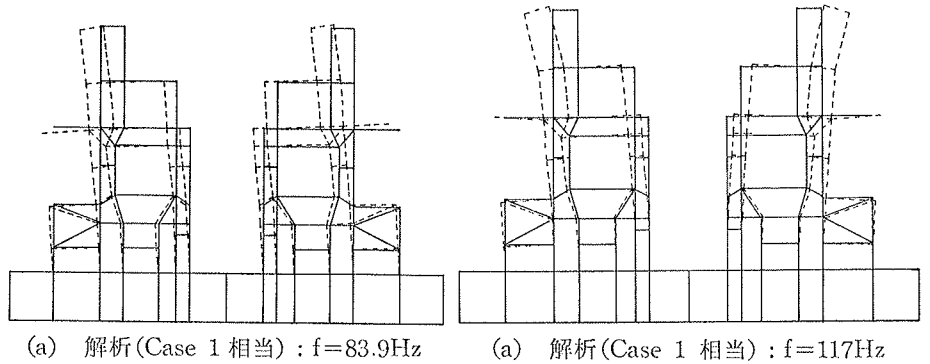


図-10 加速度共振曲線：実験 (Case 3)

どはほぼ合致している。ただし、ピークの大きさは若干異なっている。また、47.5 Hz 付近の加力スラブの上下動に起因するピークは解析が実験の約 1/5 と小さくなっている。

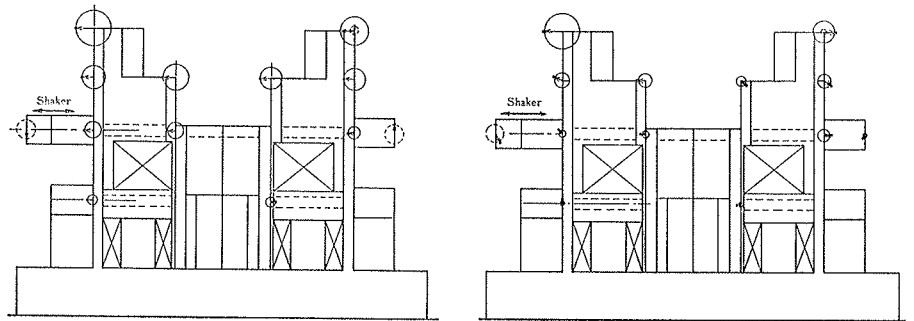
5.2. モード形と振動数

蒸気発生器室を双子系とみなしたときに、高さ方向 1 次同位相モードを図-11(a), (b)に反発モードを図-12(a), (b)に示した。高さ方向 1 次同位相モードについては、解析(図-11(a))が 83.9 Hz で実験(図-11(b))が 82 Hz となっておりモード形・振動数ともよく対応している。高さ方向 1 次反発モードについては、解析(図-12(a))が 117 Hz で、実験(図-12(b))が 123 Hz となっており、モード形・振動数ともほぼ対応している。



(a) 解析 (Case 1 相当) : f=83.9Hz

(a) 解析 (Case 1 相当) : f=117Hz



(b) 実験 (Case 1) : f=82Hz

(b) 実験 (Case 1) : f=123Hz

図-11 高さ方向 1 次同位相モード

図-12 高さ方向 1 次反発モード

5.3. 振動数の変化

共振曲線より得られた、各ケース毎の卓越するモードと振動数の関係を表-1 に示した。参考までに、計算値 (FEM 解析) も併せて示した。

	解 析 (F.E.M. Case1相当)	実 験 (Hz)		
		Case1	Case2	Case3
加力スラブの上下動	43.1	47.5	—	—
起振機の固有振動数の影響	—	62.5	58.0	60.5
高さ方向 1 次同位相モード	83.9	82.0	70.0	—
加力スラブの面外曲げ	102.6	97.0	82.0	70.0
高さ方向 1 次反発モード	117.0	123.0	121.0	110.0

表-1 振動数の変化

計算値と実験の Case 1 とを比べてみると、各モードとも振動数はかなりよく対応している。

次に、実験の Case 1 と Case 2 とを比較すると、静的加力用治具の取付け、即ち、付加重量の増加によって振動数の低下が生じていることが分かる。また、実験の Case 2 と Case 3 との比較によれば、ひびわれ発生による剛性低下によって振動数が減少していることが分かる。

6. 剛性低下

起振機実験の結果、高さ方向 1 次同位相モードの振動

数は、Case 2 の場合が 70 Hz で、Case 3 の場合が 60.5 Hz となった。ここで

K_E : 弾性剛性

K : ひびわれ後の剛性 (静的加力実験は、原点と経験最大変形点を結んだ割線剛性)

とすると、起振機実験によって得られた、ひびわれ発生による試験体の剛性低下率 (K/K_E) は

$$K/K_E = (f/f_E)^2 = (60.5/70)^2 \approx 0.75$$

となる、これは、静的加力実験によって得られた剛性低下率 (K/K_E) = 0.49 に比べて大きな値であり、剛性低下の割合が小さいことになる。この原因としては、起振力が約 8 kg と小さく、試験体の応力レベルが極めて微小であったことが考えられる。

7. まとめ

起振機実験によって原子炉格納容器内部コンクリート構造試験体の弾性時挙動およびひびわれ発生後の剛性低下等の性状を得た。また、固有振動数やモード形などの弾性時の実験結果は FEM を用いた解析結果とよく一致しており、FEM 解析などで十分評価しうることが確認された。