

JAERI-M

9075

簡略モデルによる垂直2次元炉心耐震解析

1980年9月

伊与久達夫・幾島 毅

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

簡略モデルによる垂直 2 次元炉心耐震解析

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

伊与久達夫・幾島 毅

(1980 年 8 月 18 日受理)

本報告書は、多目的高温ガス実験炉炉心を垂直面で切った垂直 2 次元振動特性に関するものである。特に、炉心要素である 1 コラムのブロック数を縮約した簡略モデル解析の有効性を述べたものである。

得られた結論は次の通りである。

- (1) 詳細モデル解析より得られた応答値は実験値とよく一致している。
- (2) 8 ブロックモデルの応答値は詳細モデルのそれとかなりよく一致している。
- (3) 8 ブロックモデルの計算所要時間は詳細モデルの約半分となる。
- (4) 炉心垂直面で振動特性はほぼ左右対称である。

Aseismic Analysis of Vertical Two-Dimensional VHTR Core  
with Simplified Models

Tatsuo IYOKU, Takeshi IKUSHIMA  
Division of Power Reactor Projects, JAERI  
(Received August 18, 1980)

This report is concerned with the vertical two-dimensional vibration analysis of very high-temperature gas-cooled reactor ( VHTR ) core. In particular, the effectiveness of simplified models is described.

Results are as follows:

(1) Good correlation in response values between vibration test and detailed model analysis was obtained.

(2) The response values of the 8-blocks model are fairly in good agreement with those of the detailed model.

(3) The running time ( cpu ) for the 8-blocks model is about one half of that for the detailed model.

(4) Vibration characteristics of two-dimensional vertical slice core are almost symmetry within vertical surface.

Keywords: VHTR Core, Aseismic Analysis, Simplified Model, Detailed Model  
Two-Dimensional Vibration Analysis, Vertical Slice, Vibration Test  
Vibration Characteristics

## 目 次

1. まえがき	1
1.1 概 要	1
1.2 炉心構造	1
2. 振動試験	6
2.1 模型の構造	6
2.2 各部の構造及び形状	6
3. 解析方法	9
3.1 計算モデル	9
3.2 ブロックの運動方程式	10
3.3 側方ブロックの運動方程式	12
3.4 簡略モデル	12
3.5 パラメーターの設定	13
4. 簡略モデル解析の有効性	17
4.1 周波数特性	17
4.2 ブロック変位の図形表示	18
4.3 計算時間	19
4.4 モデル選定	19
5. まとめ	32
参考文献	32

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
1.1 General description .....	1
1.2 Structure of VHTR core .....	1
2. Vibration test .....	6
2.1 Structure of model .....	6
2.2 Structures and forms of components .....	6
3. Analysis .....	9
3.1 Analysis model .....	9
3.2 Equations of motion for the fuel block .....	10
3.3 Equations of motion for the fixed block .....	12
3.4 Simplified model .....	12
3.5 Constants of analysis model .....	13
4. Effectiveness of simplified model analysis .....	17
4.1 Frequency characteristics .....	17
4.2 Graphic representation of vibration behavior .....	18
4.3 Calculating time .....	19
4.4 Selection of model .....	19
5. Conclusion .....	32
Reference .....	32

# 1. ま え が き

## 1.1 概 要

多目的高温ガス実験炉（VHTR）炉心は、燃料体、オリフィスブロック、と可動反射体を含めると約 2000 個の六角ブロック型黒鉛で構成されており、また燃料交換のために、コラム間にはギャップが設けられている<sup>(1)</sup>。したがって、炉内構造物は地震時に複雑な挙動を示す。そこで、強地震帯の我が国においては、炉心耐震性の実証が必要となる。

現在、日本原子力研究所（原研）では、実験炉炉心耐震研究を継続中である。今までに、水平 1 次元炉心振動試験<sup>(2)</sup>、1 コラム炉心振動試験<sup>(3)</sup>、1 領域炉心振動試験<sup>(4)</sup> の研究項目を終了させて来た。今回報告するのは、炉心を垂直面で切った垂直 2 次元炉心振動試験に関する解析検討結果である。

垂直 2 次元用解析プログラム SONATINA<sup>(5)</sup> は、各ブロックの運動方程式を Runge - Kutta - Gill 法等の数値解析を行なっているが、1 コラムあたりのブロック段数が実際の 13 の詳細モデルで解析しようとする、計算時間は長くなり不経済となる。この理由より、本報においては 1 コラムあたりのブロック段数を減少した簡略モデル解析を試み、垂直 2 次元炉心模型による振動試験結果と比較して有効性を明らかにした。なお、垂直 2 次元炉心振動試験は原研からの委託研究として、三菱重工業(株)で実施されたものであり、解析法の妥当性評価のため試験結果を参照した。

## 1.2 炉心構造

原子炉本体は建屋の中心に位置し、コンクリートの 1 次遮蔽体に固定されている。構成要素は炉心構成物（燃料体、可動反射体、中性子源など）、炉内構造物（炉心支持部、環状円筒部、流量調節装置、側部固定反射体）、原子炉圧力容器および反応度制御系である。原子炉縦断面と横断面をそれぞれ Fig 1.1 と Fig 1.2 に示す。炉心は 73 個の燃料コラムから成り、各コラムは高さ方向 7 段の燃料体から構成される。

### (1) 燃料ブロック

燃料体には標準燃料体と、制御棒挿入用と後備停止素子挿入用のための 3 つの孔を設けた制御棒孔付燃料体がある。燃料体構造図を Fig 1.3 に示す。燃料体は半径 299 mm、高さ 570 mm の六角柱状黒鉛ブロックにあげられた冷却チャンネルに燃料棒を挿入するいわゆるピン-イン-ブロック型であり、上下部にはそれぞれ 3 個のダウエルとソケットがあり、これによって燃料コラム上下方向の位置決めが行なわれる。

### (2) 炉心拘束機構

炉心拘束機構はシステム総合設計によると、固定反射体、側部遮蔽体の外側にあつて、炉心構造物の地震等による変位を拘束する機構で、その構成要素は、拘束バンド、初期締付装置および

コアバレルに取付けられたラジアルキーである。

拘束バンドは、18ユニットをピン連結して、固定反射体の外周をとりまくとともに、固定反射体1段について、2本1対ずつ上端層から下端層まで配し、各層毎に、初期締付装置、側部遮蔽体を介して、固定反射体を締付け、拘束している。初期締付装置は、炉組立時に拘束バンドに締付力を与えるものであり、側部遮蔽体と一体化されており、スライドジャッキ機構によって、バンド連結部を押し、締付力を発生させる構造である。ラジアルキーは、コアバレルに取付けられており、拘束バンドの連結部がこれにはまり込み、拘束バンドの周方向変位を拘束している。

### (3) 炉心支持構造

炉心下部構造は、高温プレナム部、炉心支持板、ダイヤグリッド、冷却材出口管などから構成される。高温プレナム部は各流量調節単位毎に高温ヘリウムをプレナムに導びいて混合させるもので主として黒鉛材料でできている。

炉心の支持方式は、炉容器下鏡に設けられたブランケットを介してコアバレルを自立させ、このコアバレルの内側に炉心部と反射体領域を設けた構造としている。この場合、耐震上の配慮からコアバレル上部の周上24箇所には振れ止めキーを設けている。炉心の重量は、この下にある炉心支持板からダイヤグリッドへ伝達され、コアバレルを通して炉容器に至る。



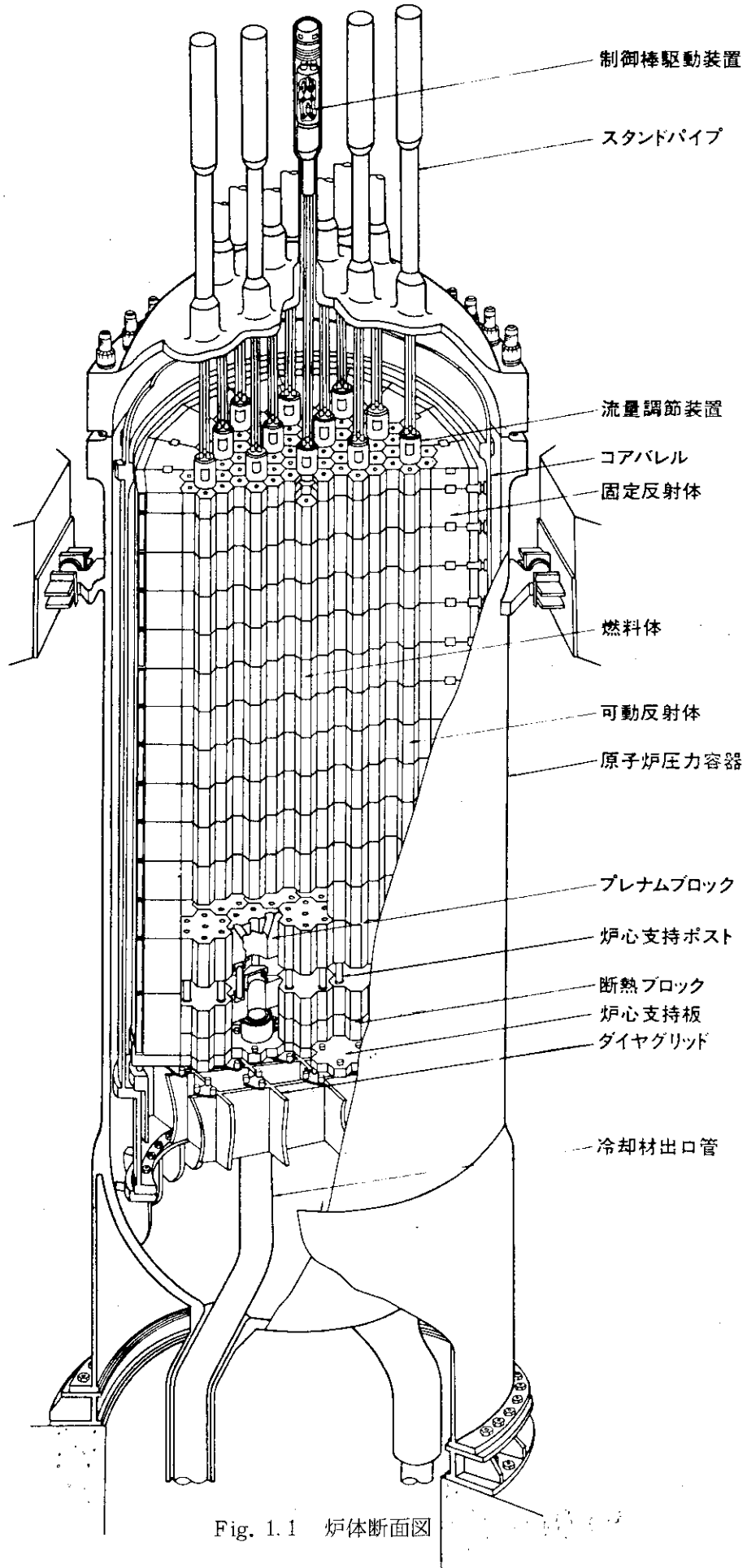


Fig. 1.1 炉体断面図

番号	名称	炉体
1	標準型燃料体	燃料体
2	可動型燃料体	燃料体
3	固定型燃料体	燃料体
4	固定型燃料体	燃料体
5	固定型燃料体	燃料体
6	固定型燃料体	燃料体
7	固定型燃料体	燃料体
8	固定型燃料体	燃料体
9	固定型燃料体	燃料体

孔番号	用途	個数
H1	サーベイランス用孔	3
H2	中性子深層用孔	3
H3	起動領域中性子計測用孔	3
H4	炉内中性子計測用孔	3
H5	"	2
H6	炉内中性子計測用孔	3

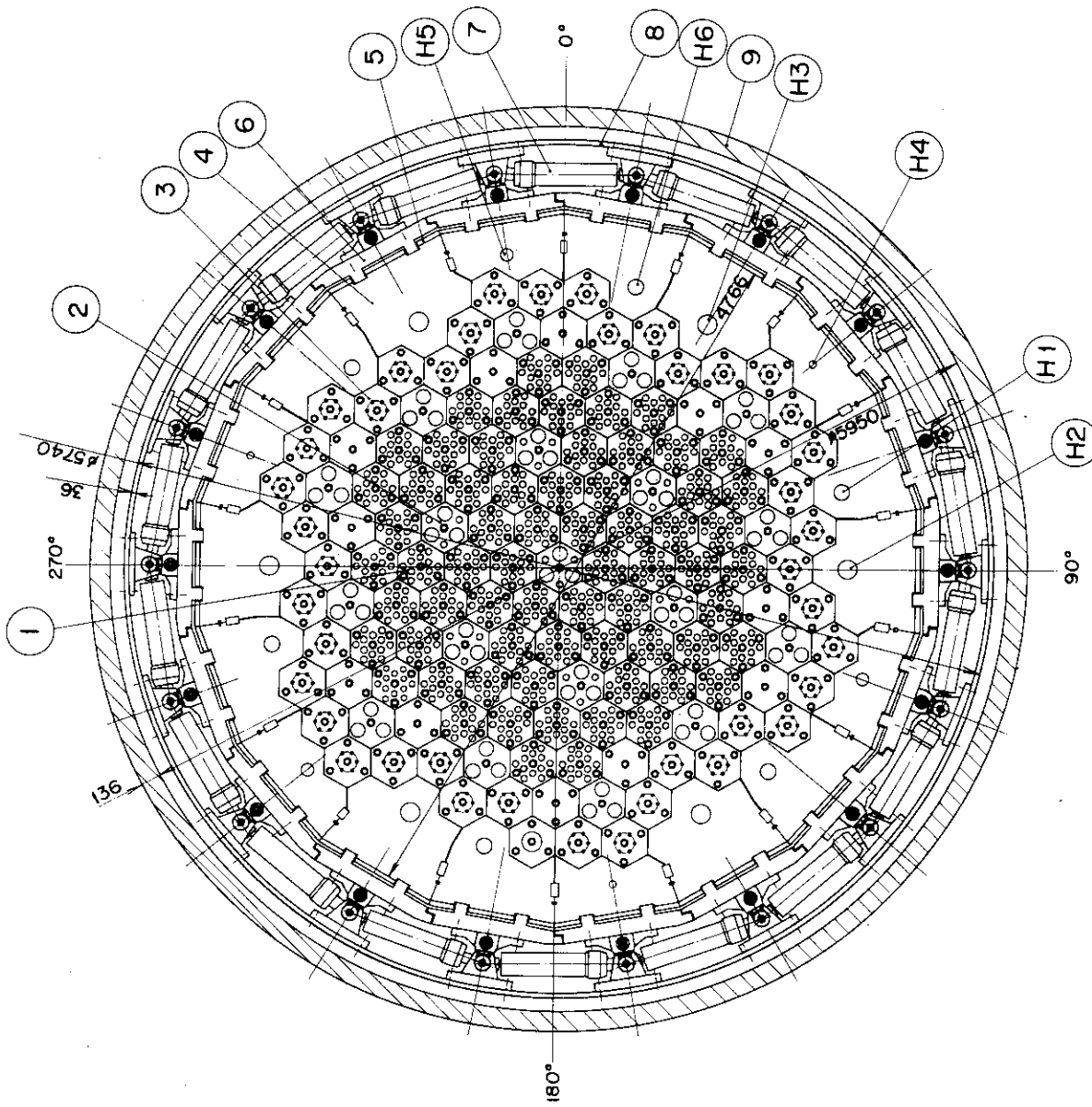


Fig. 1.2 炉心平面図

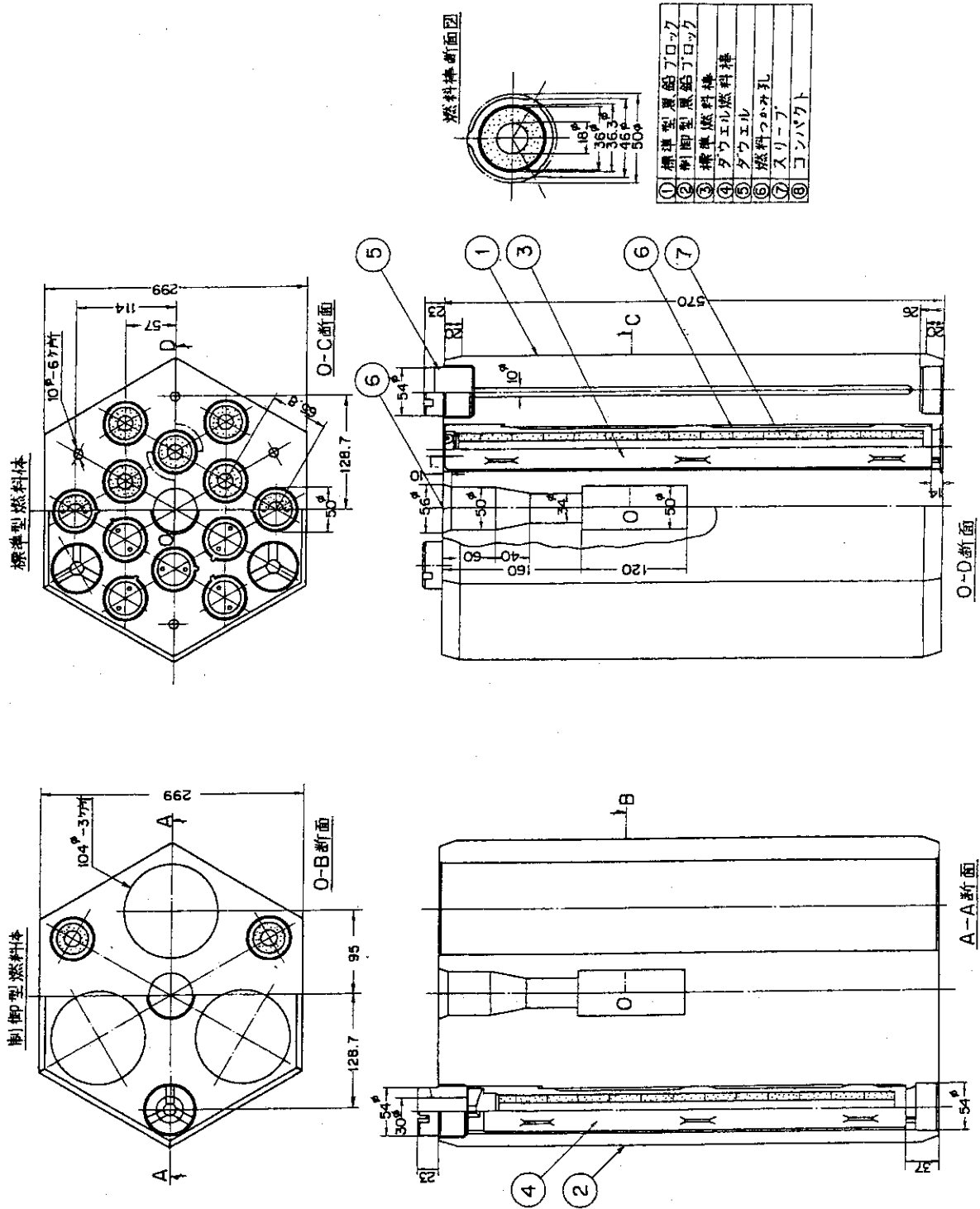


Fig. 1.3 燃料体構造図

## 2. 振 動 試 験

### 2.1 模型の構造

簡略モデルによる解析の有効性を明らかにするために、垂直 2 次元振動試験データを用いる。この試験は、実機の 1/2 縮尺モデルで行なわれており、その試験装置の概要を Fig 2.1 に示す。なお、装置の特徴は次の通りである。

- (1) 模型ブロックの配列は、最大列を取出し 12 列とした。各コラムは、12 段の黒鉛ブロックと一段の鋼製オリフィスブロックから構成されている。
- (2) ブロックは、1 体のサポートブロック上に設置され、サポートポストを模擬し、水平移動可能なようにローラ支持している。
- (3) 側方ブロックには拘束機構を模擬した側方ブロック支持ばねを取り付け、また、サポートブロックにもサポートブロック支持ばねを取り付けている。
- (4) 各コラムには、炉心上下のガス圧力差による圧縮力を模擬するためのガス圧力差模擬ばねを取り付けている。
- (5) オリフィスブロックには、1 燃料領域の周辺 6 コラム間に設けられたキーの効果を模擬したオリフィスブロックキー模擬部材が設けられている。

### 2.2 各部の構造及び形状

黒鉛ブロックの重量、形状は、実験炉第 1 次概念設計に準拠し、模型の相似則に基づき決定している。ダウエルピンの形状は、中実とし、せん断剛性が相似則に合うよう直径を小さくし、ブロックがロッキングした場合に、ダウエルピンの高さの関係からロッキングを拘束しないようにテーパをとってある。

オリフィスブロックの外形は、黒鉛ブロックと同一とした。ただし圧力模擬ばねを内包できる構造とした。オリフィスブロック間ギャップは、0.5 mm と 2 mm に設定できるようになっている。

側方ブロックは、実験炉の永久反射体を模擬し、ブロックコラム 1 列に対応する永久反射体重量と等価になるように重量を調整している。

Table 2.1 に、各ブロックの仕様をまとめて掲載しておく。

側方ブロック支持ばね、サポートブロック支持ばねは、炉心拘束機構を模擬したものであり、ばねの剛性は実験炉相当の剛構造（剛性強）GA 型炉で採用された柔構造（剛性弱）及び両者の中間剛性（剛性中）の 3 種に変更できる構造とした。Table 2.2 に各ばね定数を示す。

支持棒は、炉心のコアバレルを模擬している。また、ガス圧力差模擬ばねのばね定数は、13.79 kg/cm とした。

Table 2.1 ブロックの仕様

項 目	ブロックの種類		オリフィスブロック		側方ブロック	
	黒鉛ブロック					
ブロック長さ cm	28.5	21.4	28.5	21.4	28.5	21.4
質 量 $\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$	0.0195	0.0146	0.0157	0.0104	0.054	0.040
回 転 慣 性 $\text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{cm}$	0.924	0.302	1.75	0.620	2.05	1.60
材 質	SIGRI TYPE NO. ASI 2 - F - 500		S 25 C		(1)	

(1) 側方ブロックは、黒鉛ブロックと支持棒から構成されている。支持棒の材質は S S 41。

Table 2.2 ブロック支持ばねのばね定数

項目	ばね種類	ばね1本のばね定数 (kg/cm)		
		計 画 値	実測平均値	
実験炉相当の剛構造 (剛性强)	側方ブロック支持ばね	$4.5 \times 10^3$	4153	
	サポートブロック支持ばね	$6.0 \times 10^3$	—	
中間条件 (剛性中)	側方ブロック支持ばね	280	295	
	サポートブロック支持ばね	367	—	
GA型炉相当の柔構造 (剛性弱)	一段目	側方ブロック支持ばね	18.5	20.6
		サポートブロック支持ばね	24.3	—
	二段目	側方ブロック支持ばね	377.3	418
		サポートブロック支持ばね	518.5	—

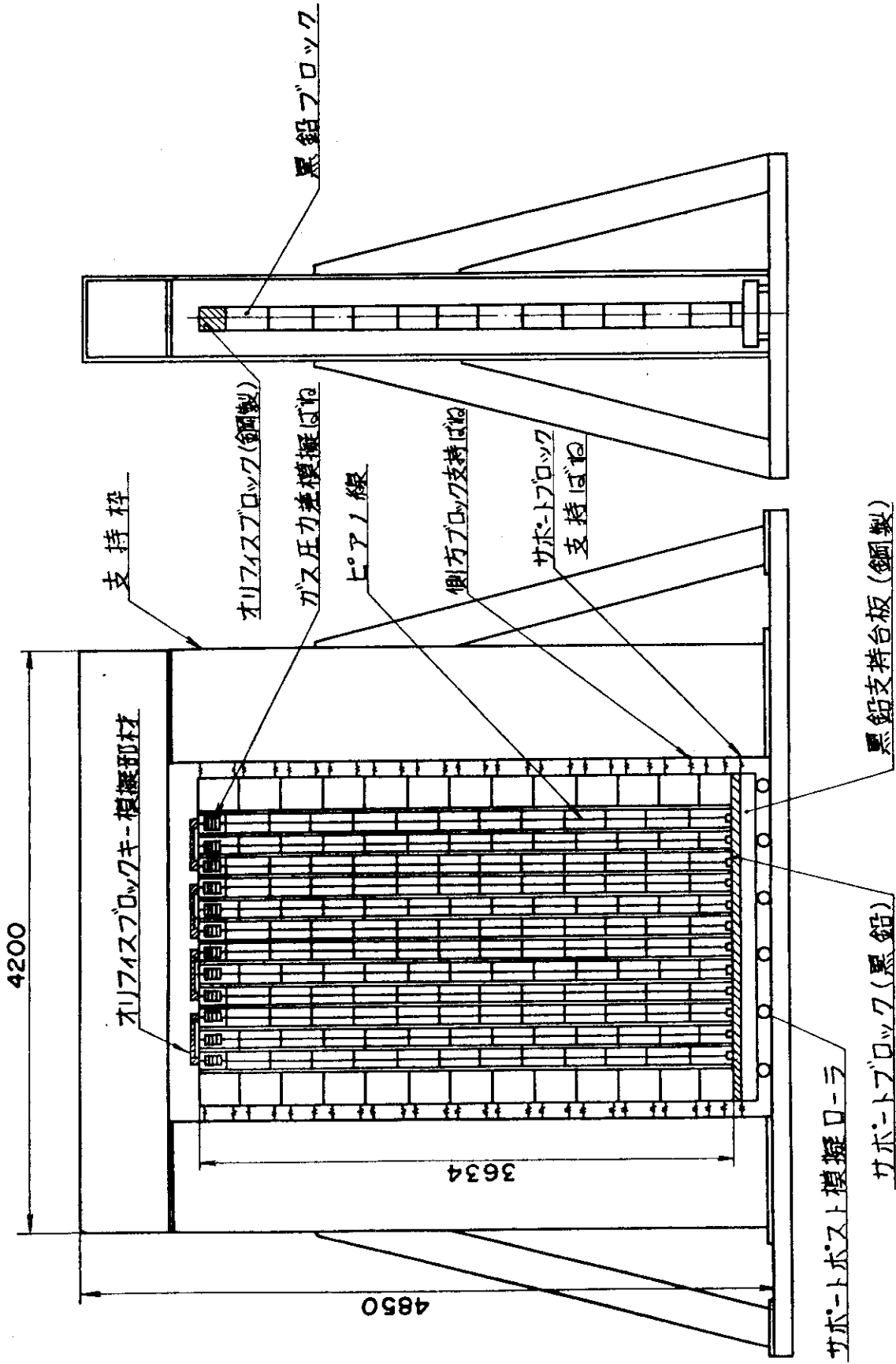


Fig. 2.1 垂直2次元炉心模型構造

### 3. 解析方法

詳細モデル解析および簡略モデル解析で使用する計算コードはSONATINAである。SONATINAはVHTR炉心の垂直断面について、その地震応答を計算するコードである。対象とするモデルはFig. 3.1に示すように複数の黒鉛ブロックにより構成されるコラムがギャップをおいて一列に並び、その側面に固定ブロックコラムが位置しており、固定ブロックは拘束機構により支持されているモデルである。計算モデルについては3.1節で述べる。簡略モデルは、詳細モデルにおけるコラムあたりのブロック段数を縮約したもので詳しくは3.4節で記す。計算に必要なパラメータの設定については3.5節に述べてある。

#### 3.1 計算モデル

計算モデルはFig. 3.1に示すように、次の仮定にしたがう。

- (1) ブロックは剛体とし、運動は2次元立面内とし、水平、垂直および回転の3自由度系とする。
- (2) 衝突力の伝達は、衝突特性に相当するばねとダッシュポットによって行なわれる。
- (3) ダウエルピンはたわむことができる。ダウエルピンと孔との間にはギャップがある。ダウエルピンと孔との間には摩擦力が働く。
- (4) ブロック上下間の境界には摩擦力が働く。
- (5) 変位検出器の抵抗力は粘性減衰抵抗力とする。
- (6) 側方ブロックは支持枠に取付けられており、この取付部はばねとダッシュポットによってモデル化する。

次に、(1)から(6)までの仮定に基づき、各運動方向に作用する力を以下に示す。

##### (a) 水平（ $u$ 方向）力

- (i) コラム間水平衝突による力
- (ii) 上下ブロック間摩擦力
- (iii) ダウエルに加わる水平方向の力
- (iv) 上端ブロック間の拘束力
- (v) 変位検出器の抵抗力

##### (b) 垂直（ $w$ 方向）力

- (i) 垂直方向のブロック間衝突による力
- (ii) ダウエルに加わる摩擦力
- (iii) ブロックの重量と圧力差による力

##### (c) モーメント

- (i) 水平力(i)から(iii)までの力により生ずるモーメント
- (ii) 垂直力(i)から(iii)までの力により生ずるモーメント

## 3.2 ブロックの運動方程式

コラムを構成するブロック (k, l) に作用する力を Fig. 3.2 のように表示する。ブロック (k, l) の重心点の支持構造物に対する相対変位を  $u_{k,l}$ ,  $w_{k,l}$ , 重心点回りの回転を  $\theta_{k,l}$  とすれば、ブロック (k, l) の運動方程式は次式のように求められる。

$$m_{k,l} \ddot{u}_{k,l} = F_{k,l}^{TL} + F_{k,l}^{ML} + F_{k,l}^{NL} + F_{k,l}^{BL} + F_{k,l}^{TR} + F_{k,l}^{MR} + F_{k,l}^{NR} + F_{k,l}^{BR} + F_{k,l}^F \\ + F_{k,l+1}^F + F_{k,l}^{DL} + F_{k,l}^{DR} + F_{k,l+1}^{DL} + F_{k,l+1}^{DR} + F_{k,l}^{OP} + C_{k,l}^C \dot{u}_{k,l}$$

$$m_{k,l} \ddot{w}_{k,l} = F_{k,l}^{VL} + F_{k,l}^{VR} + F_{k,l+1}^{VL} + F_{k,l+1}^{VR} + \mu F_{k,l}^{DL} + \mu F_{k,l}^{DR} + \mu F_{k,l+1}^{DL} \\ + \mu F_{k,l+1}^{DR} + W_{k,l}^U + W_{k,l}^L$$

$$I_{k,l} \ddot{\theta}_{k,l} = M(F_{k,l}^{TL}) + M(F_{k,l}^{ML}) + M(F_{k,l}^{NL}) + M(F_{k,l}^{BL}) + M(F_{k,l}^{TR}) \\ + M(F_{k,l}^{MR}) + M(F_{k,l}^{NR}) + M(F_{k,l}^{BR}) + M(F_{k,l}^F) + M(F_{k,l+1}^F) \\ + M(F_{k,l}^{DL}) + M(F_{k,l}^{DR}) + M(F_{k,l+1}^{DL}) + M(F_{k,l+1}^{DR}) + M(F_{k,l}^{VL}) \\ + M(F_{k,l}^{VR}) + M(F_{k,l+1}^{VL}) + M(F_{k,l+1}^{VR}) + M(\mu F_{k,l}^{DL}) + \\ + M(\mu F_{k,l}^{DR}) + M(\mu F_{k,l+1}^{DL}) + M(\mu F_{k,l+1}^{DR}) + M(W_{k,l}^U) \\ + M(W_{k,l}^L)$$

ここで、 $M(F)$  は力  $F$  によるモーメントを表わし、 $W^U$  と  $W^L$  はブロックの重量と圧力差による力の上と下からの力をそれぞれ表わす。また上下間摩擦力  $F^F$  は、静摩擦と動摩擦の関数として取扱っている。例として、垂直方向のブロック間衝突による力とモーメント、および、ダウエルに加わる水平方向の力とモーメントについて記す。

- (1) 垂直方向のブロック間衝突による力とモーメントブロックの衝突箇所は 4 箇所考えられる。ここでは代表的に右端の下端で衝突する場合、 $F_{k,l}^{VR}$  とそのモーメント  $M(F_{k,l}^{VR})$  について示す。

ブロック (k, l) と (k, l-1) の間で衝突が生じているが、いないかを判別する式  $r_{k,l}$  を次下のように導入する。

$$r_{k,l} = \frac{1}{2} \{ w_{k,l-1} - h_{k,l-1} (1 - \cos \theta_{k,l-1}) - a_{k,l} \sin \theta_{k,l-1} \}$$



$$-\frac{1}{2} \{ w_{k,l} + h_{k,l} (1 - \cos \theta_{k,l}) - a_{k,l} \sin \theta_{k,l} \}$$

ここで、衝突モデルは、ばね-ダッシュポット系であるから、 $F_{k,l}^{VR}$  と  $M(F_{k,l}^{VR})$  は、

$r_{k,l} > 0$  のとき、

$$F_{k,l}^{VR} = -K_{k,l}^V r_{k,l} - C_{k,l}^V \dot{r}_{k,l}$$

$$M(F_{k,l}^{VR}) = -F_{k,l}^{VR} (h_{k,l} \sin \theta_{k,l} - a_{k,l} \cos \theta_{k,l})$$

$r_{k,l} \leq 0$  のとき

$$F_{k,l}^{VR} = M(F_{k,l}^{VR}) = 0$$

他の3隅についても、上と同様な方法で求められる。垂直衝突のばね定数  $K^V$  と減衰係数  $C^V$  は、非線形性を考慮すれば多項式で表わすとよい。

$$K_{k,l}^V = \sum_{j=0}^m K_{k,l,j}^V \cdot r_{k,l}^j$$

$$C_{k,l}^V = \sum_{j=0}^m C_{k,l,j}^V \cdot \dot{r}_{k,l}^j$$

以下すべてのばねとダッシュポットを上述の式で表示する。

(2) ダウエルに加わる水平方向の力とモーメント

ダウエル・ソケット構造はブロック水平方向のずれを一定量（ダウエルピンと孔との間の右側と左側のギャップ量  $\delta_{R,L}$ ）以下に制限する役目を担っている。そのためダウエルに水平方向（u方向）に力が作用する。Fig. 3.2において、右側のピンに加わる力（ $F_{k,l}^{DR}$ ）について示す。また、ダウエルピンと孔との接触を判別するためにパラメータ  $\beta_{k,l}$  を導入する。

$$\beta_{k,l} = \{ u_{k,l-1} + h_{k,l-1} \sin \theta_{k,l-1} - d_{k,l-1} (1 - \cos \theta_{k,l-1}) \} \\ - \{ u_{k,l} - h_{k,l} \sin \theta_{k,l} - d_{k,l} (1 - \cos \theta_{k,l}) \} \mp \delta_{R,L}$$

$\beta_{k,l} > 0$  のとき：ダウエル右側ギャップにおいて

$\beta_{k,l} < 0$  のとき：ダウエル左側ギャップにおいて

$$F_{k,l}^{DR} = K_{k,l}^D \beta_{k,l} + C_{k,l}^D \dot{\beta}_{k,l}$$

$$M(F_{k,\ell}^{\text{DR}}) = -F_{k,\ell}^{\text{DR}} (h_{k,\ell} \cos \theta_{k,\ell} + d_{k,\ell} \sin \theta_{k,\ell})$$

$\beta_{k,\ell} \leq 0$  のとき：ダウエル右側ギャップにおいて

$\beta_{k,\ell} \geq 0$  のとき：ダウエル左側ギャップにおいて

$$F_{k,\ell}^{\text{DR}} = M(F_{k,\ell}^{\text{DR}}) = 0$$

上式で、 $K^D$  と  $C^D$  はダウエルピンのばね定数と減衰係数である。

### 3.3 側方ブロックの運動方程式

次に、側方ブロックの運動方程式について考える。側方ブロックは水平一方向の1自由度系とする。Fig. 3.3 にコラムと固定コラムの衝突形態を図示してある。側方ブロック ( $m+2, \ell$ ) に作用する力は、ブロック間の摩擦力 ( $F_{m+2,\ell}^{\text{RF}}$ )、固定コラム近接のブロックによる衝突力 ( $F_{m,\ell}^{\text{TR}}, F_{m,\ell}^{\text{MR}}, F_{m,\ell}^{\text{NR}}, F_{m,\ell}^{\text{BR}}$ ) および、拘束構造からの力  $F^M$  である。このことより、右側のブロックの運動方程式は

$$m_{m+2,\ell} \ddot{u}_{m+2,\ell} = F_{m+2,\ell}^{\text{RF}} + F_{m,\ell}^{\text{TR}} + F_{m,\ell}^{\text{MR}} + F_{m,\ell}^{\text{NR}} + F_{m,\ell}^{\text{BR}} + F_{2,\ell}^{\text{M}}$$

となる。

燃料ブロックと固定ブロックの運動方程式を数値微分 (Runge - Kutta - Gill 法) によって解析する。

### 3.4 簡略モデル

1 コラムあたりのブロック段数を縮約するには、1 コラム振動試験の結果<sup>(3)</sup>、Fig. 3.1 に示してある詳細モデルでの解析結果、および縮約モデルについて検討している井出、早川の文献<sup>(6)</sup>より検討した。その結果モデル化にさいして考慮した事項は、

- (1) オリフィスブロックはそのままにしておく。
- (2) コラム最下段より中段にかけて、ブロックは一体となって振動する傾向にある。このため、この位置では、荒く縮約した。
- (3) コラム中段よりやや上部のブロックは、ブロックの振動特性を把握する目的があるので、簡略化しないことにした。
- (4) コラム全体にわたってブロックの段数を縮約した。固定コラムについても、燃料コラム同様にブロック段数を縮約した。

Fig. 3.4 に本解析で使用した簡略モデルの構成図を示す。図中 (a) は縮尺模型実験に沿った計算モデルで、Fig. 3.1 の1 コラムを取り出したものである。(b) と (c) は各々1 コラムあた

りのブロック数が8個と6個の場合である。

1 コラムあたりのブロック数を減少させることにより、解析においてブロックのばね定数などのパラメータを次のように変更した。

- i) 縮約されたブロックは対応するブロックの数に相当する質量、ばね定数を持つものとした。垂直方向に取付けるばねは直列ばね系としてばね定数を定めた。
- ii) ブロックの回転慣性は一体となったブロックについて計算した。
- iii) 拘束機構のばね定数は並列ばね系としてばね定数を定めた。
- iv) ダウエルピンのばね定数も対応するブロックの数に相当する値とした。

しかし、摩擦係数と反発係数は変りないものとして取扱った。ブロックの減衰比は反発係数より求められるため、簡略モデル化しても減衰比は変化しない。

### 3.5 パラメーター設定

ブロック衝突モデルのばね定数や減衰係数などの諸定数の設定について記す。衝突現象は、衝突時の衝撃力と逸散減衰の面からとらえることができる。ばね-ダッシュポット系においては、衝突時の逸散エネルギーが反発係数表示の場合と等しくなるように粘性係数 $C$ を決定し、ばね定数 $k$ は、Herzの理論から決定される局所変形ばね定数を使用し、モデルの諸定数を定めることができる。修正粘弾性モデルの反発係数 $e$ は、減衰比を $h$ とおくと次のように与えられる<sup>(7)</sup>

$$e = \frac{1}{2h^2 - 1} \cos \left( \tan^{-1} \frac{2h\sqrt{1-h^2}}{2h^2 - 1} \right) \cdot \exp \left( - \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{2h\sqrt{1-h^2}}{2h^2 - 1} \right)$$

ここで、 $h = C/C_0$  : 減衰比  
 $C_0 = 2\sqrt{mk}$  : 臨界減衰係数 (kg・s/cm)  
 $m$  : 質量 (kg・s<sup>2</sup>/cm)  
 $k$  : ばね定数 (kg/cm)  
 $c$  : 減衰係数 (kg・s/cm)

Table 3.1 にブロックのばね定数および減衰係数を示す。

ダウエルピンのばね定数は、ダウエルピンせん断変形、ダウエルソケットの変形を考慮して算定した。Table 3.2 にダウエルピンのばね定数と減衰係数を示す。

ブロック上下間の摩擦係数は、黒鉛-鋼の摩擦係数を参考にし<sup>(8)</sup> 0.2と仮定した。

時刻歴応答は、Runge-Kutta-Gill法により、時間刻みは、ブロック反発試験時に計測したブロック接触時間が、補正質量有りの場合、 $6 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-4}$ 秒であることから、 $2 \times 10^{-4}$ 秒とした。

Table 3.1 ブロック衝突モデルの諸定数

ブロックの種類	ブロック材質	ブロック垂直方向		ブロック水平方向	
		ばね定数 (kg/cm)	減衰係数 (kg·s/cm)	ばね定数 (kg/cm)	減衰係数 (kg·s/cm)
黒鉛ブロック	黒鉛	25000	10.0	12600	8.0
オリフィスブロック	鋼				
支持ブロック	黒鉛	—	—		

Table 3.2 ダウエルピンの諸定数

ばね定数 (kg/cm)	減衰係数 (kg·s/cm)	ダウエルピン・ソケット 間のギャップ (cm)
12500	5.2	0.05

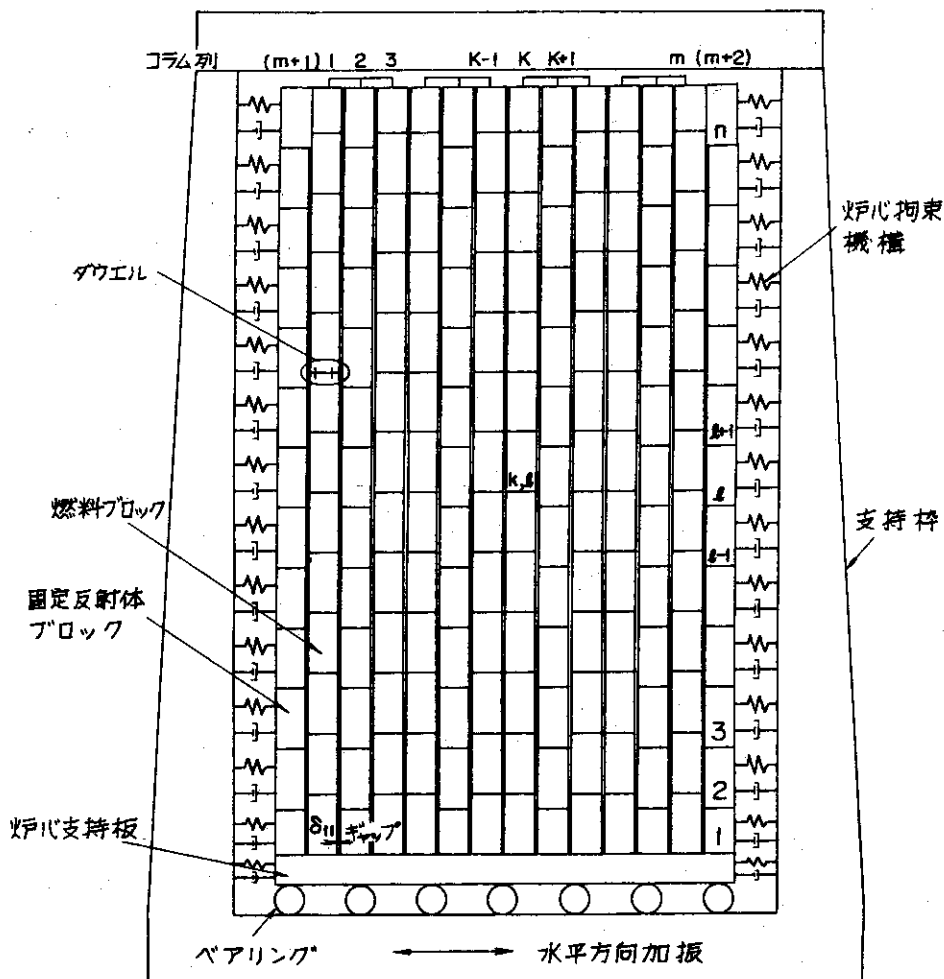


Fig. 3.1 計算モデル

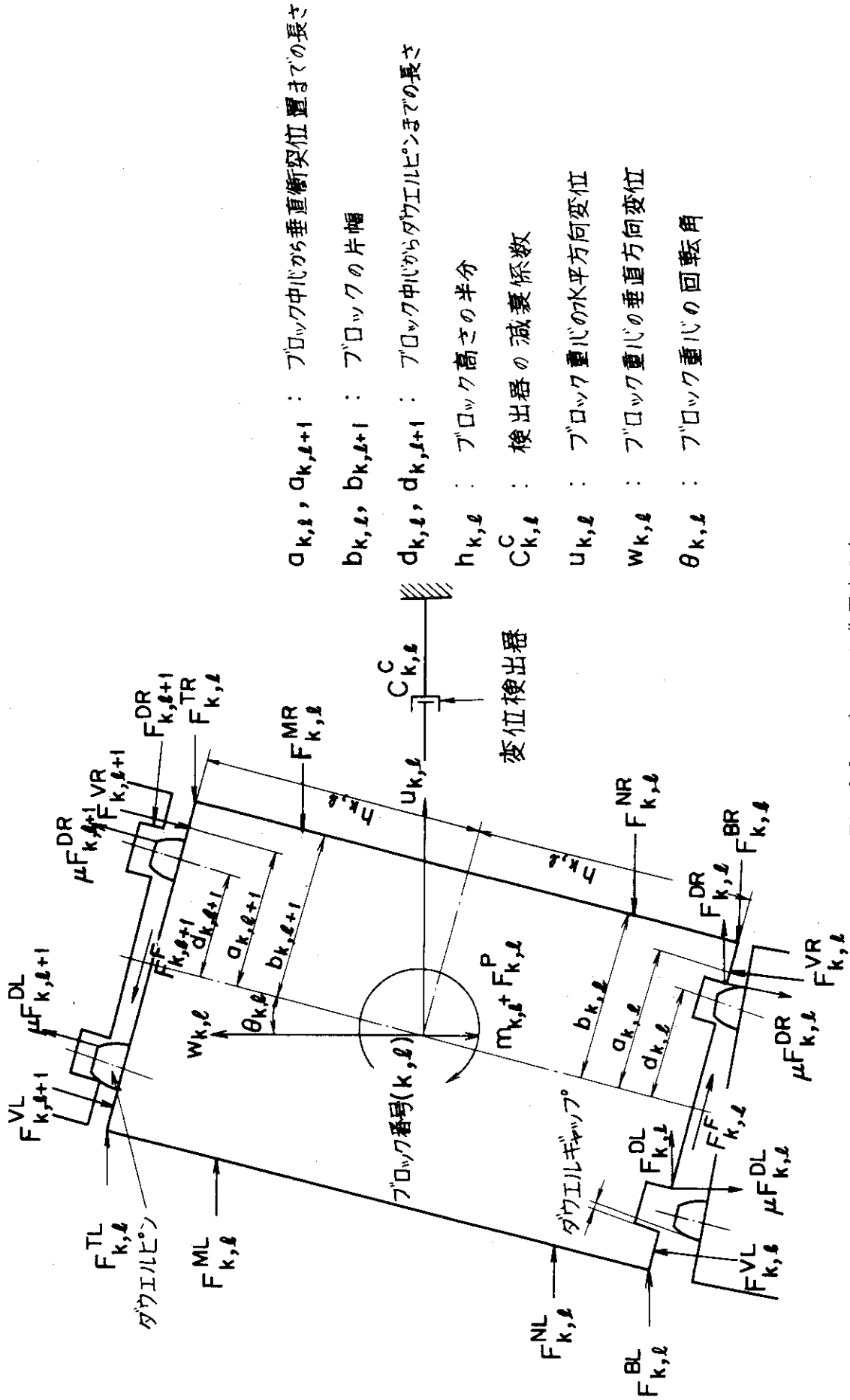
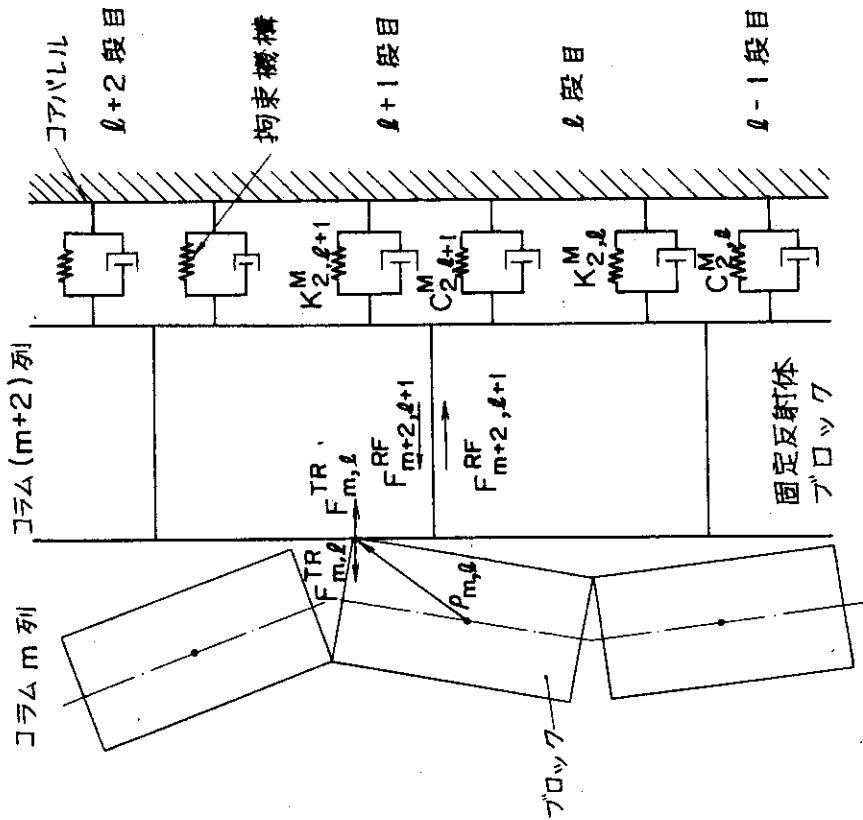
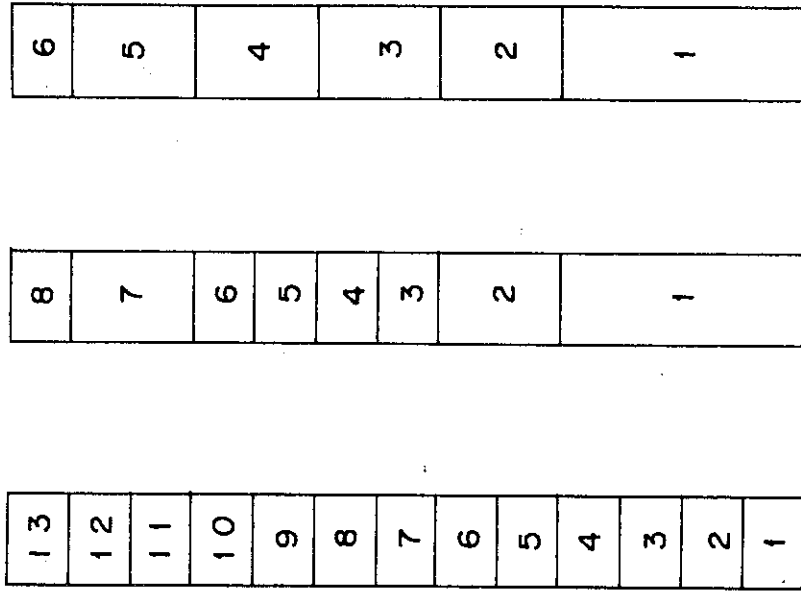


Fig. 3.2 ブロックに作用する力



右側の固定反射体コラム

Fig. 3.3 コラムと固定コラムの衝突



(a) 13段ブロックモデル (b) 8段ブロックモデル (c) 6段ブロックモデル

Fig. 3.4 簡略モデル

## 4. 簡略モデル解析の有効性

簡略モデルによる計算時間は詳細モデルより短くなるが、一方、計算モデルを簡略化する程解の精度は落ちる恐れがある。このことより、簡略モデル解析の有効性を実証し、Fig. 3.4 に示してある1コラムあたりのブロックが何段（8段か6段）のものが最適であるかを検討することにする。

なお、使用する垂直2次元解析プログラム（SONATINA）の有効性は明らかとなっている。<sup>(5)</sup>

### 4.1 周波数特性

簡略モデル解析より得られる各周波数応答値を、振動実験および詳細モデル解析より求められる値と比較・検討してゆくことにする。4章で簡略モデル解析の有効性を検討するために、垂直2次元振動試験データのうち以下の試験条件のものを用いた。

- (i) 支持剛性強（実験炉相当の剛構造）
- (ii) 圧力模擬ばね無
- (iii) オリフィスギャップ 0.5 mm

Fig. 4.1 から Fig. 4.3 は、コラム1列、6列および12列の各ブロック中段（7段目）に位置している燃料ブロックの相対変位周波数応答である。入力波条件は、正弦波加振；加振加速度 250 Gal である。スイープアップ時の応答値を実線で結び、スイープダウン時のそれを鎖線で結んである。ブロック（1，7）と（12，7）は固定コラムに隣接しており、ブロック（6，7）は炉心中心にある。

まず、実験データに注目すると次のことがわかる。

- (1) 履歴特性を示している。
- (2) 分数調波共振が発生している。
- (3) 低周波数領域でブロックは衝突している。
- (4) 炉心中央部のコラムと固定コラムに隣接するコラムの1次の共振振動数における応答変位はほぼ等しい。
- (5) ブロック相対変位は、共振状態から急激に減少している。
- (6) コラム1列（Fig. 4.1）と12列（Fig. 4.3）の変位周波数特性は類似している。

次に、解析値と実験値を照らし合わせてみると以下のことに気が付く。

- (7) 詳細モデル解析結果（丸印）は実験値とよく一致している。
- (8) 解析モデルを簡略化するほど応答変位は周波数全域にわたり増加する。特に、6ブロックモデルでの値はかなり大きくなっている。
- (9) 8ブロックモデル解析の応答値は、詳細モデル解析のそれとかなりよく一致している。

(1)より、各ブロックはコラム間のギャップに基づくハードスプリング特性を示している。Fig. 4.1において、実験値では4.5 Hzに $\frac{1}{2}$ 分数調波共振が発生している。これはダウエルピンばね

定数の非線形性に起因しているもので、解析においてはそれを線形化しているために再現されていない。(4)と(6)より、加振加速度 250 Gal で、ブロックは群振動しており、炉心垂直面内で左右対称の振動モードとなっている。(8)の理由は 1 コラム 6 ブロックモデルの 7 段目ブロックは 8 段目ブロックと一体となっているために、8 段目ブロックの振動特性が介入することによるものである。ブロックの相対変位応答からみると、(9)より 8 ブロックモデル解析で十分な精度がでていることがわかる。

Table 4.1 は、振動試験と解析より得られた各応答値をまとめたものである。(a)は入力加速度 500 Gal，加振動数は 4 Hz であり、(b)は入力加速度 250 Gal，加振動数が 3.5 Hz の正弦波を入力した時の応答結果を示している。Fig. 4.4 は、Table 4.1(a)と同一の入力波条件のもとでの支持反力分布である。Table 4.1 と Fig. 4.4 より、まず支持反力に注目すると次のことが言える。

- (10) Fig. 4.4 より、固定ブロック (13, 13) は反力分布で最高値を示している。
- (11) 詳細モデル解析の結果は実験値とよく一致しており、コラム高さ方向で弓なりの分布を示している。
- (12) モデルを簡略化するに従い、コラム上段ブロックの支持反力は増加してゆく。特に、6 ブロックモデル解析での支持反力分布は弓なりの分布を示さず、コラム上段にゆく程増加する分布となっている。
- (13) ブロック 4 段目までの支持反力はほぼ一定の値を示している。

13 段目ブロックの支持反力が大きくなるのは、オリフィスブロック間ギャップは 0.5 mm で、燃料コラム間ギャップの 2 mm に比べて狭くなっているためである。(11)より、反力分布はコラムの振動モードに類似していることがわかる。(13)より、モデルを簡略化するに際し、コラム 4 段目までのブロックを一体とすることは、支持反力分布からみて妥当性のあることが確認された。支持反力について言えば、1 コラム 8 ブロックモデル解析で十分信頼性を保ちえることがわかった。

Table 4.1 より、ダウエル力とブロック衝突加速度について検討してみる。ダウエル力の計測位置は、炉心中心コラム、オリフィスブロック直下のブロックで、左側のダウエルピンでのものである。簡略モデル解析の値は、詳細モデル解析の値からずれてはいるが許容できる範囲にある。衝突加速度については、計算値は実験値に比べ約 2 倍の値となっている。しかし、各モデル間での差はあまりない。

Fig. 4.5 と Fig. 4.6 に、支持反力および衝突加速度の周波数特性を示す。Fig. 4.5 は、固定コラム 8 段目ブロックの支持反力周波数特性である。図より、詳細モデル解析の値は実験値によく一致しており、共振周波数も同じ 4.5 Hz である。しかし、8 ブロックモデルでの共振状態は 4.5 Hz より大きくなっているが、周波数全域を通して 8 ブロックモデルは実験値によく一致している。各モデルの衝突加速度周波数特性を比較した Fig. 4.6 より、衝突加速度の 1 次の共振振動数は簡略モデルになると低周波数側にスライドしている。しかし、周波数全域にわたる特性としては同じ傾向を有している。

## 4.2 ブロック変位の図形表示

グラフィック・コムを利用して、燃料ブロックの時刻歴波（変位波形と衝突力波），および多



コラムモデルの時刻歴振動モードを、解析モデル間で比較したものがFig. 4.7からFig. 4.9である。3図とも入力波条件は同じで、正弦波、加振加速度 500 Gal、加振振動数 4 Hz である。Fig. 4.7は変位波形であり、選定したブロックは各コラム列（1列、6列と、12列）に対してコラム中段よりやや上部（ブロック8段目）に位置している。コラム1列と12列は固定コラム近傍で、燃料コラムと固定コラムのギップは2 mmより、片側振幅は最大2 mmの応答波となっている。簡略モデルの燃料ブロック番号もFig. 3.4からわかるように、詳細モデルでのブロック8段目にそれぞれ対応している。図より、解析モデルによる相違はみられない。Fig. 4.8はFig. 4.7と同一の燃料ブロックにおける衝突力波形である。衝突力波はパルスの的に発生しており、変位波形と異なり解析モデルによる相違が少しずつ出ている。6ブロック解析モデルでは、8段目ブロックと7段目ブロックが一体となっている都合上、単に詳細モデルの波形と比較できない。全体的に、3者とも衝突の発生時刻は一致しているが、衝突力の大きさは一致していない箇所も存在する。Fig. 4.9より、時刻歴振動モードは解析モデル間による相違はない。図より、多コラムの時刻歴振動モードを解析より求めたい場合は、6ブロックモデルで十分である。

#### 4.3 計算時間

ここでは、解析モデルを簡略化すると計算時間はどの位短縮されるかを記す。利用した電子計算機システムはFACOM M-200である。

詳細モデル解析で要する計算時間を1と規格化すると、8ブロックモデルと6ブロックモデルでそれぞれ要する計算時間は0.44および0.32となる。すなわち、8ブロックモデルで解析することにより、計算時間は半分以下になる。

#### 4.4 モデル選定

4.1節の周波数特性からみて、8ブロックモデルはかなりの信頼性を有していることが明らかとなった。また、計算時間の面からみても、6ブロックモデルとの差はあまりないこともあるので、1コラムあたりのブロックを8段に縮約したモデルを中心に垂直2次元炉心解析を進めることが有効である。

Table 4.1 ブロックの最大応答値

応答	解析モデル			実験結果
	13ブロック	8ブロック	6ブロック	
(a) 正弦波：4 Hz, 500 Gal				
支持反力 (kg), (13,13)*	988	979	1059	970
衝突加速度 (Gal), (1,7)	473	582	581	200
ダウエル力 (kg), (7,12)	190	211	238	—
相対変位 (mmP-P), (1,7)	28.9	28.4	28.7	28.6
(b) 正弦波：3.5 Hz, 250 Gal				
支持反力 (kg), (13,13)	495	618	759	500
衝突加速度 (Gal), (6,7)	242	396	380	160
ダウエル力 (kg), (7,12)	169	101	215	—
相対変位 (mmP-P), (1,7)	23.1	24.1	25.6	21.0

\* (13, 13) はコラム13列で13段目のブロック

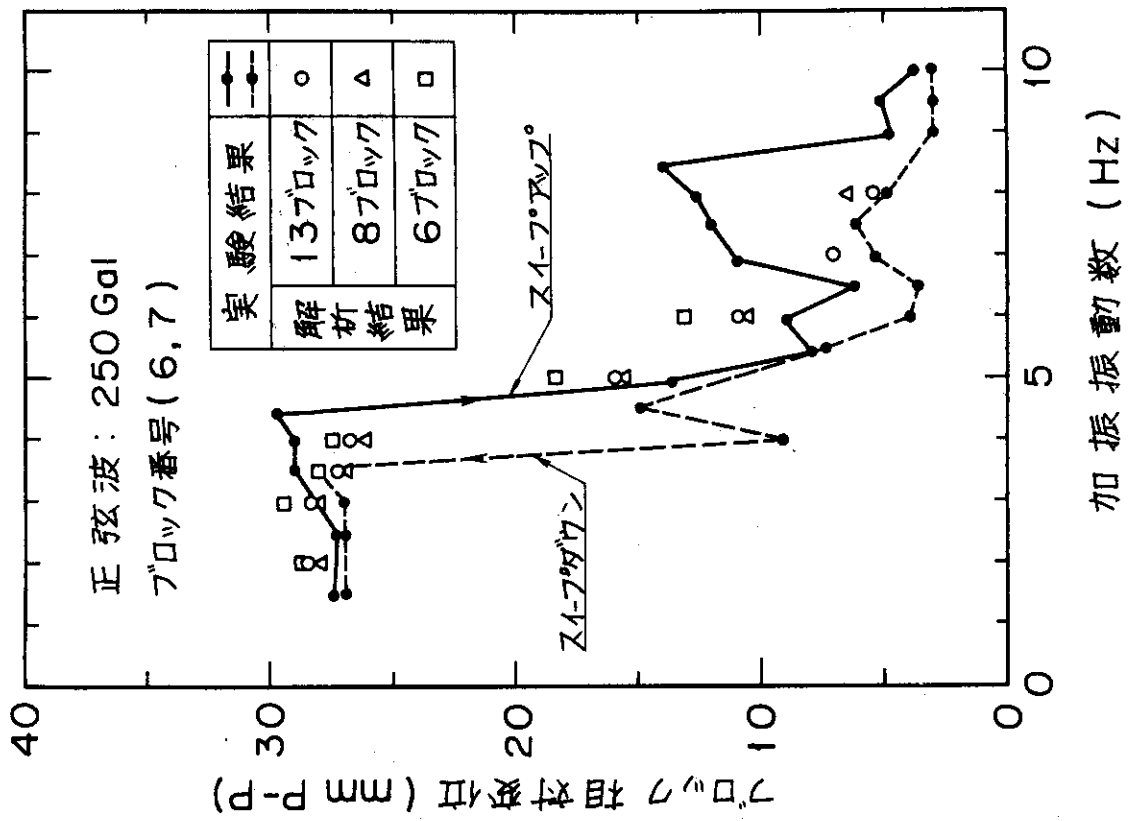


Fig. 4.2 ブロック相対変位周波数応答

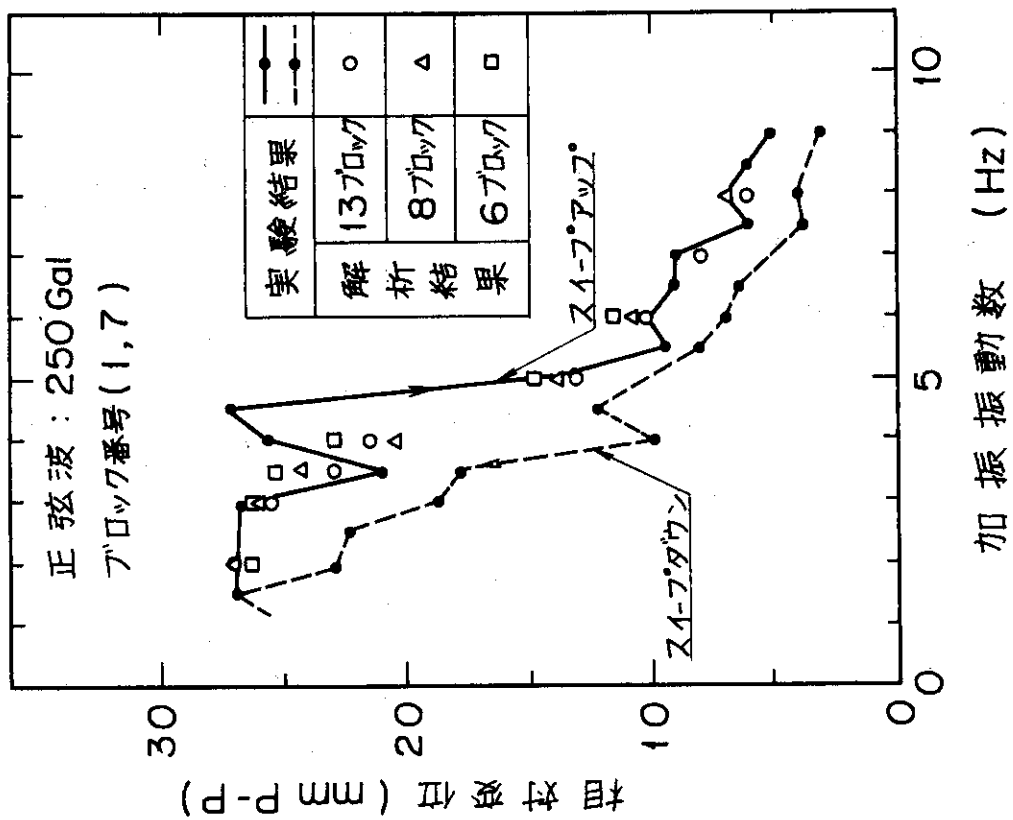


Fig. 4.1 ブロック相対変位周波数応答

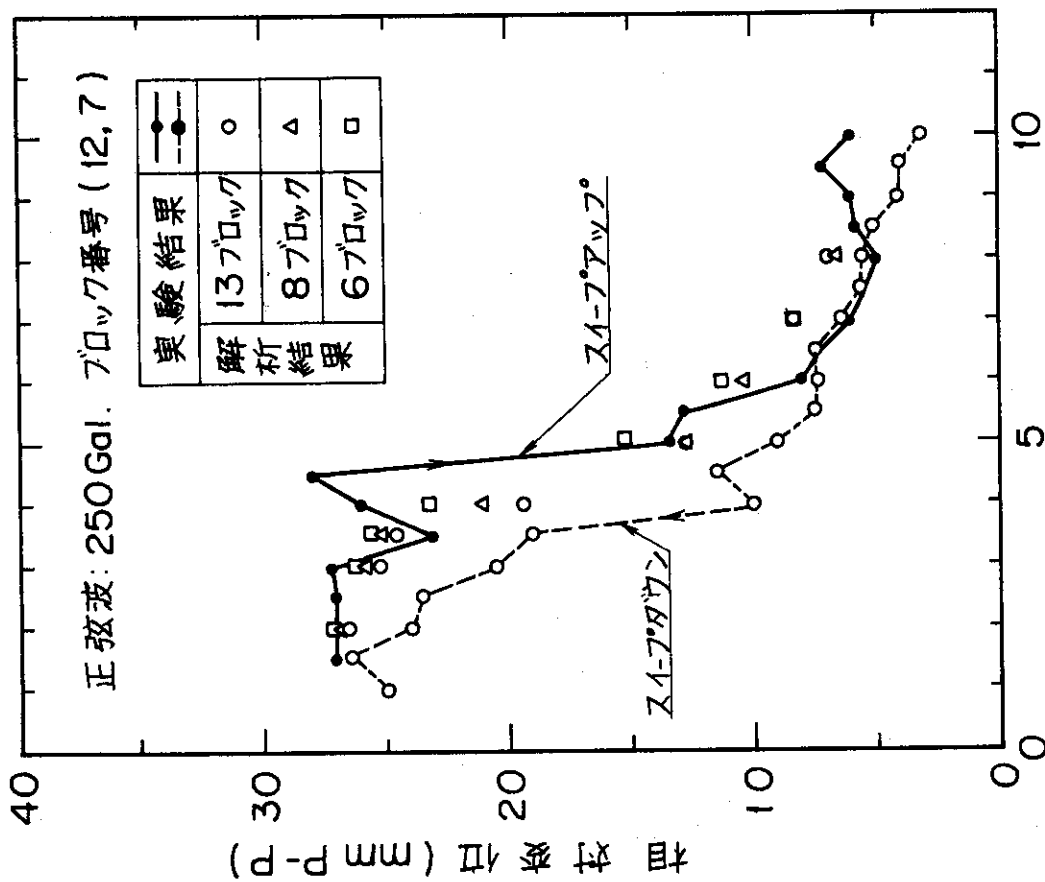


Fig. 4.3 ブロック相対変位周波数応答

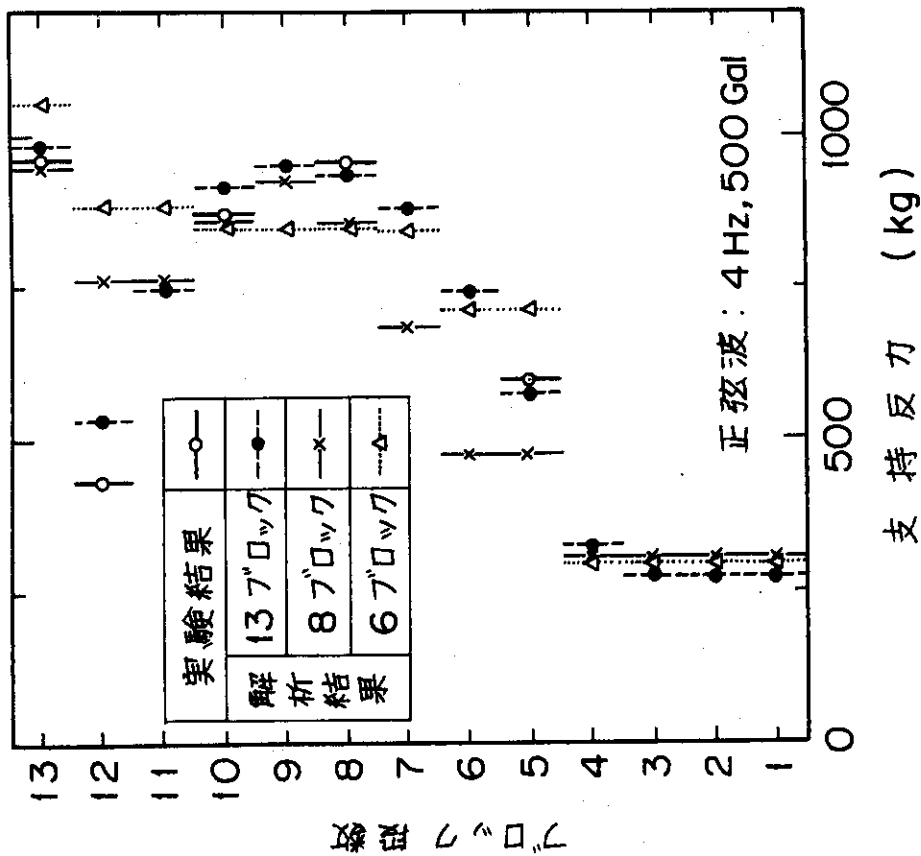


Fig. 4.4 コラムの反力分布

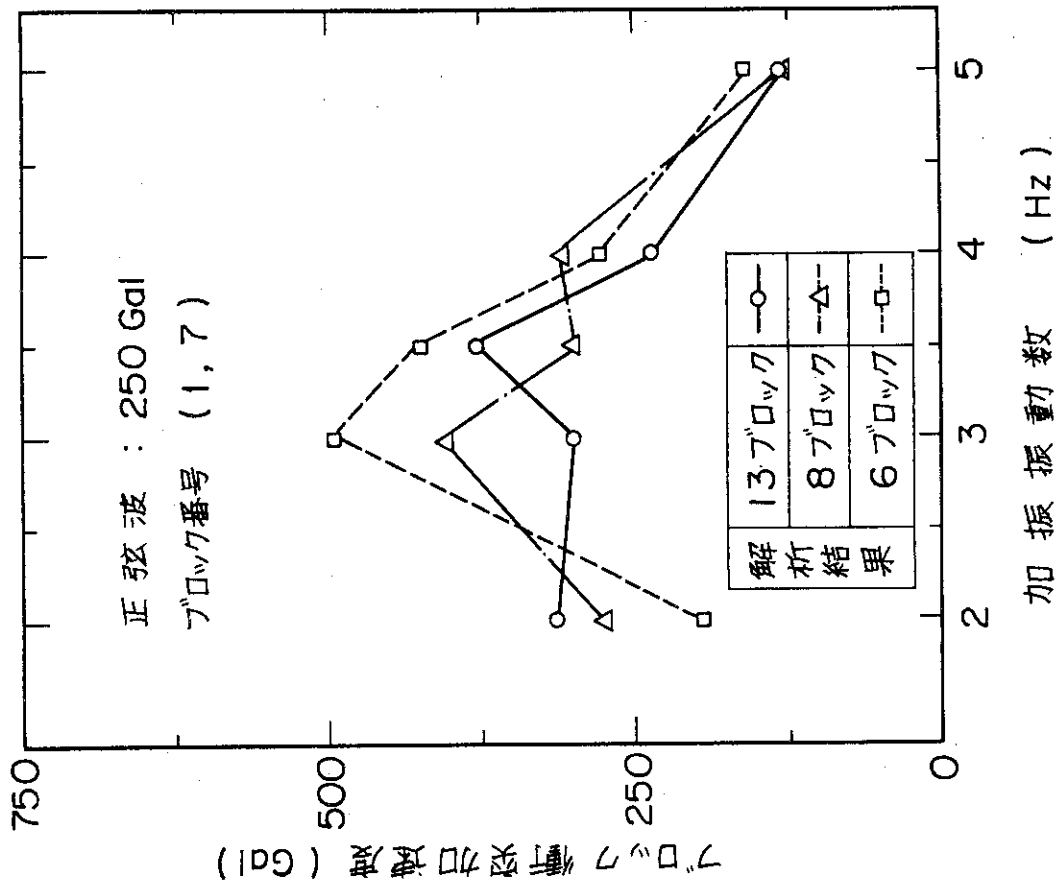


Fig. 4.6 ブロックコーナーの衝突力応答

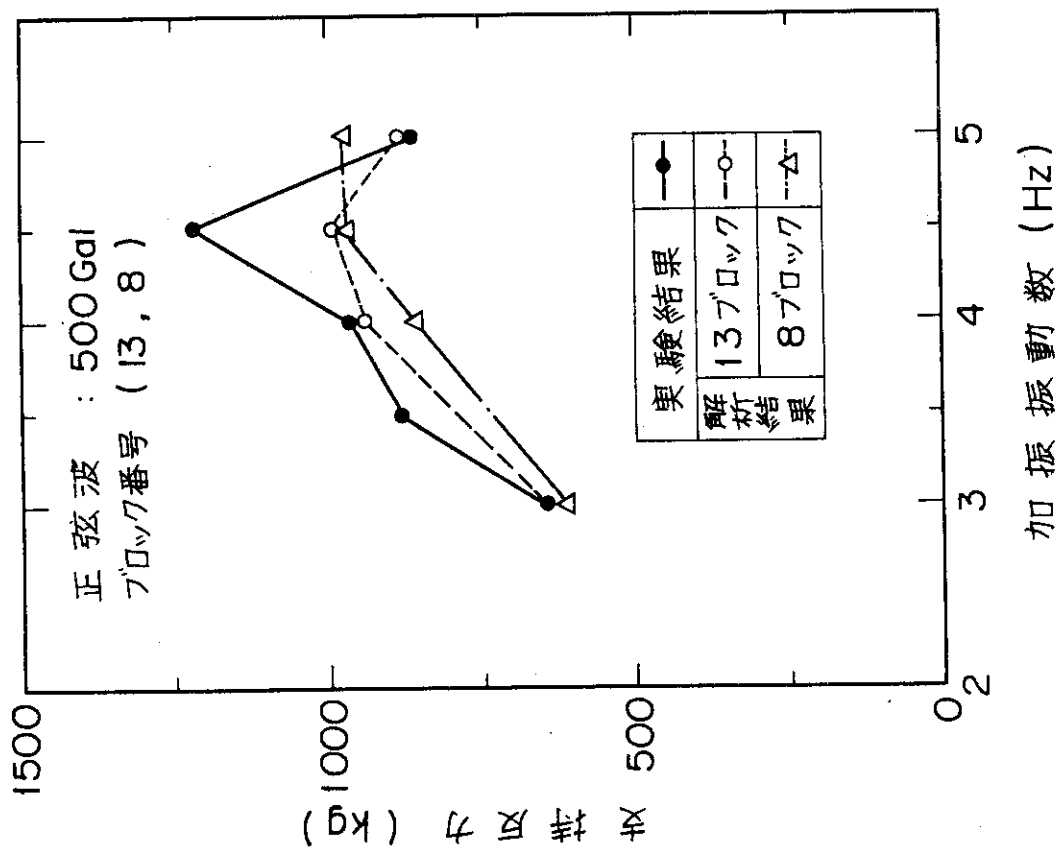
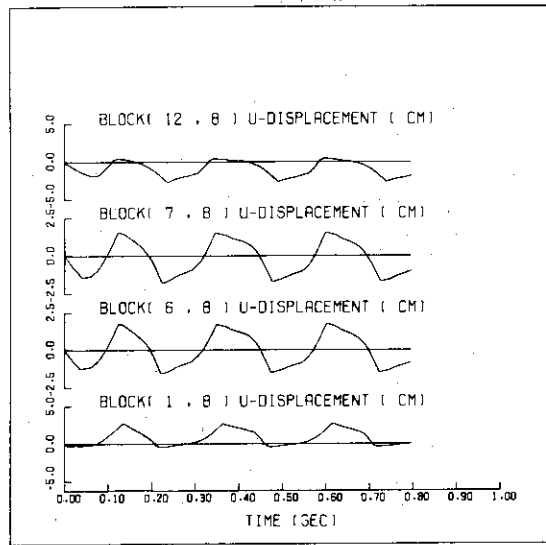
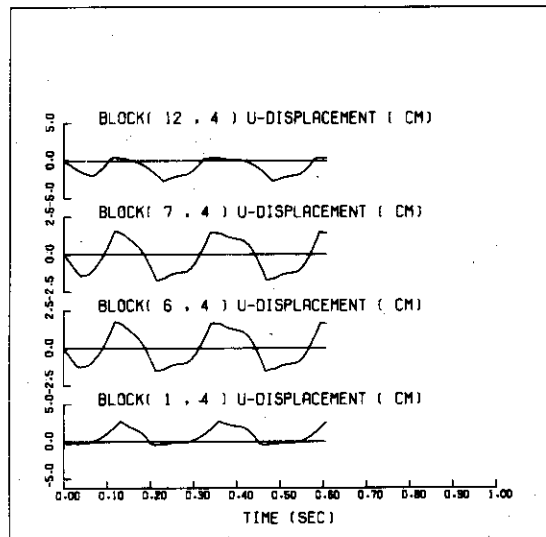


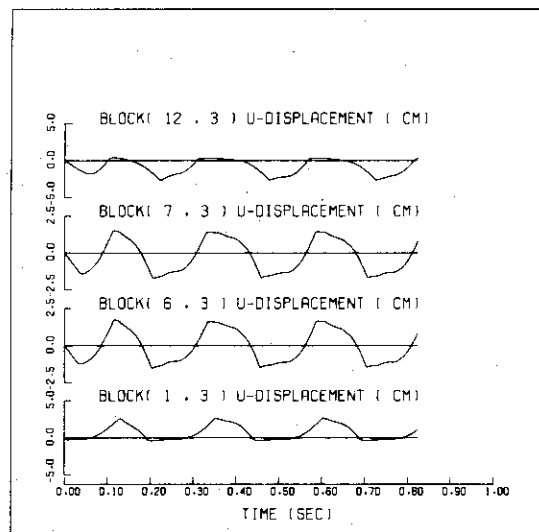
Fig. 4.5 支持反力周波数応答



(a) 13ブロックモデル

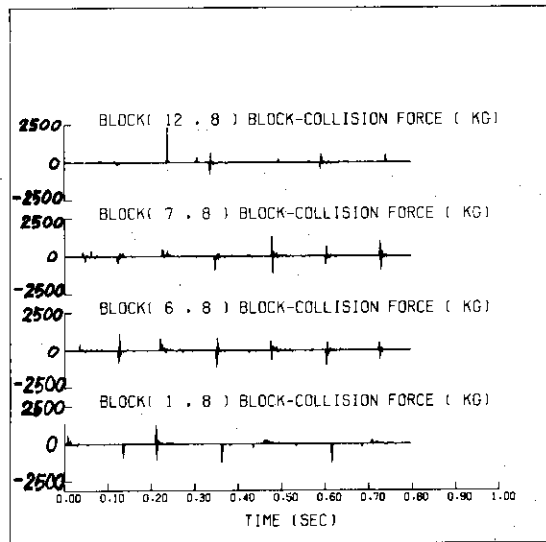


(b) 8ブロックモデル

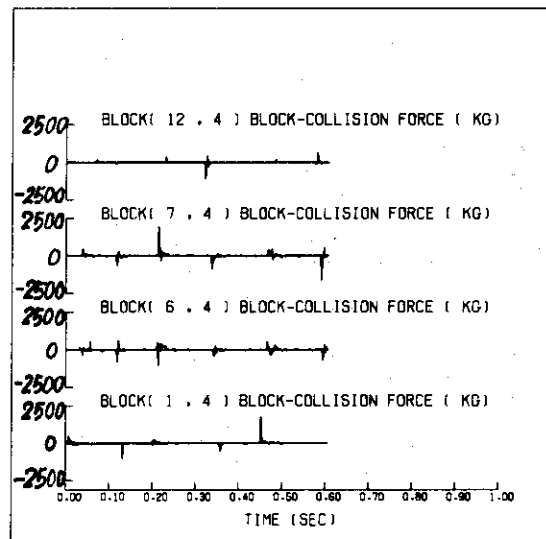


(c) 6ブロックモデル

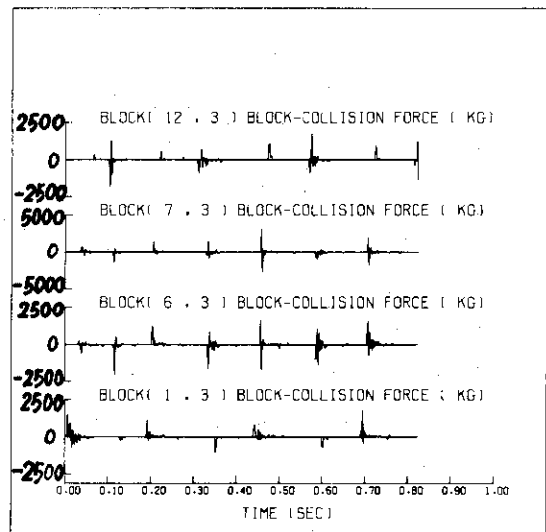
Fig. 4.7 時刻歴応答曲線, 変位波形 (正弦波加振: 4 Hz, 500 Gal)



(a) 13 ブロックモデル



(b) 8 ブロックモデル



(c) 6 ブロックモデル

Fig. 4.8 時刻歴応答曲線, 衝突力波形 (正弦加振; 4 Hz, 500 Gal)

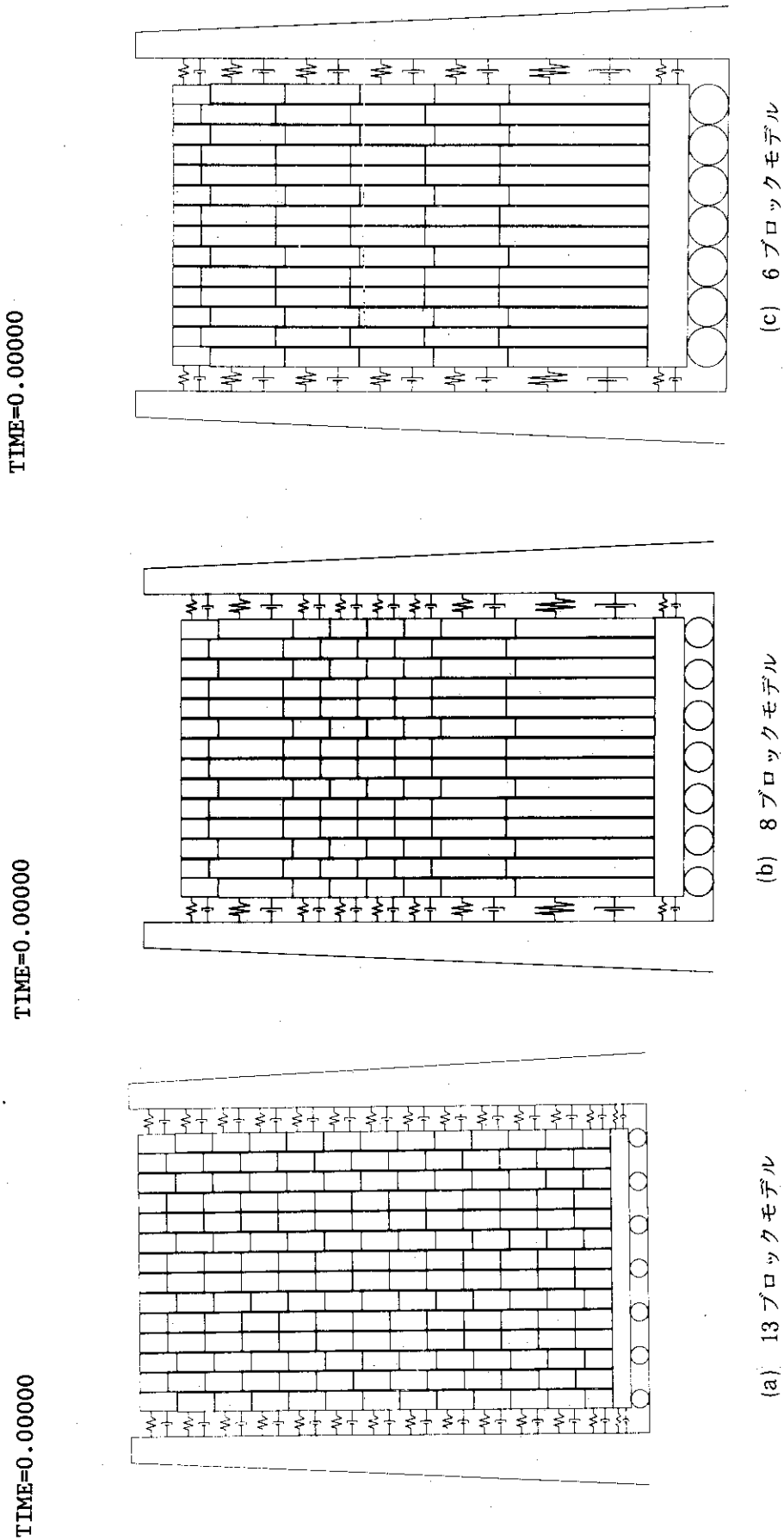
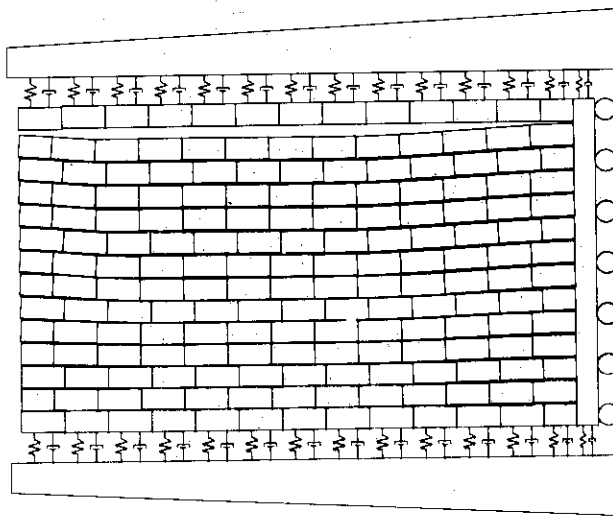


Fig. 4.9(1) 多コラムモデルの時刻歴振動モード (正弦波加振 ; 4 Hz, 500 Gal)

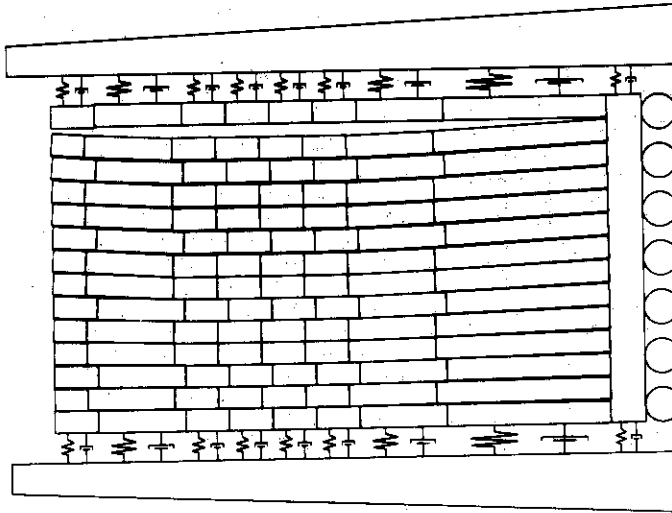


TIME=0.03672



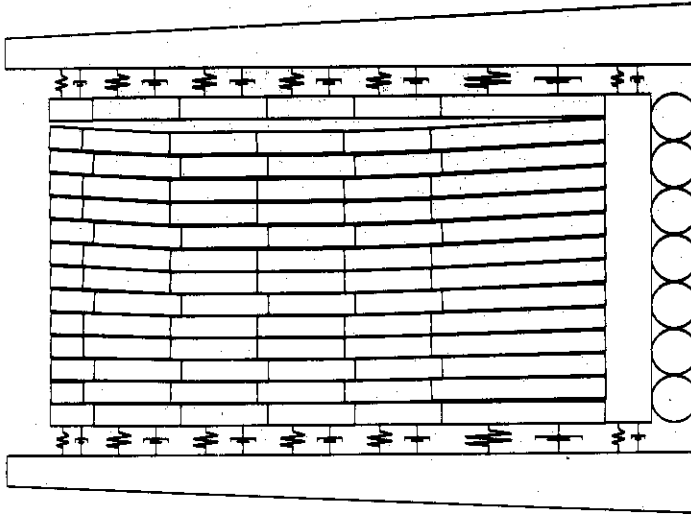
(a) 13ブロックモデル

TIME=0.03860



(b) 8ブロックモデル

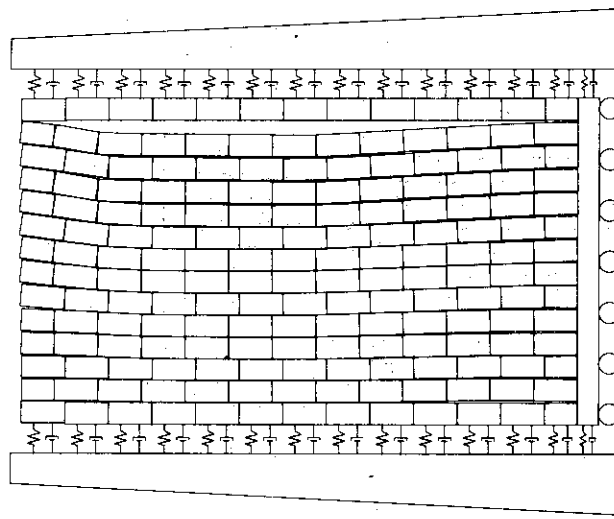
TIME=0.03880



(c) 6ブロックモデル

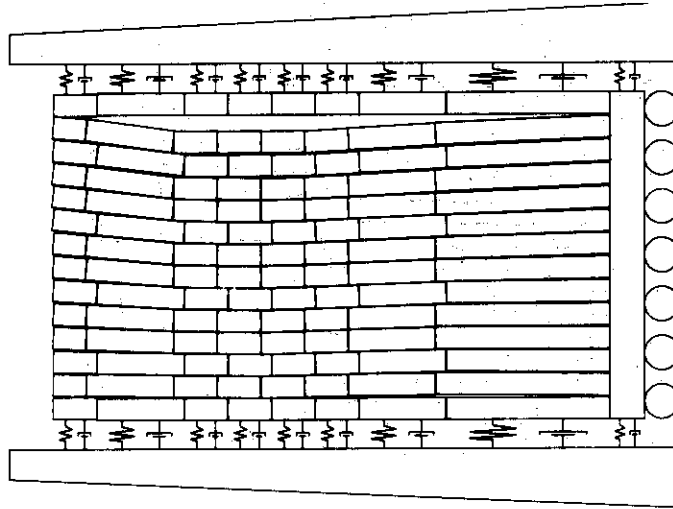
Fig. 4.9(2) 多コラムモデルの時刻歴振動モード (正弦波加振: 4 Hz, 500 Gal)

TIME=0.05378



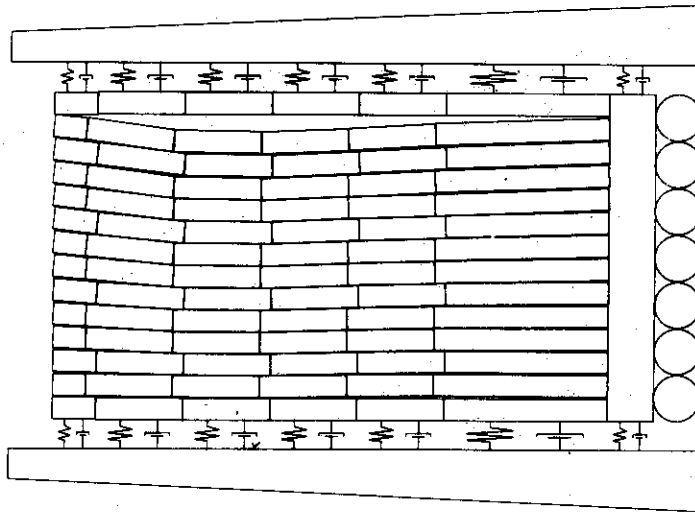
(a) 13ブロックモデル

TIME=0.05838



(b) 8ブロックモデル

TIME=0.05873



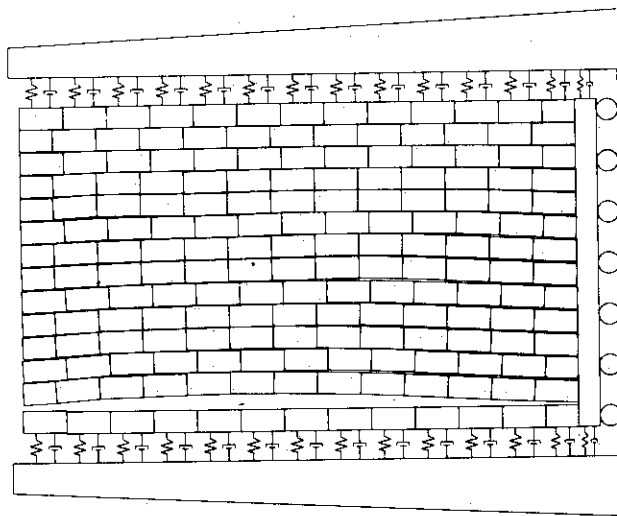
(c) 6ブロックモデル

Fig. 4.9 (3) 多コラムモデルの時刻歴振動モード (正弦波加振; 4 Hz, 500 Gal)

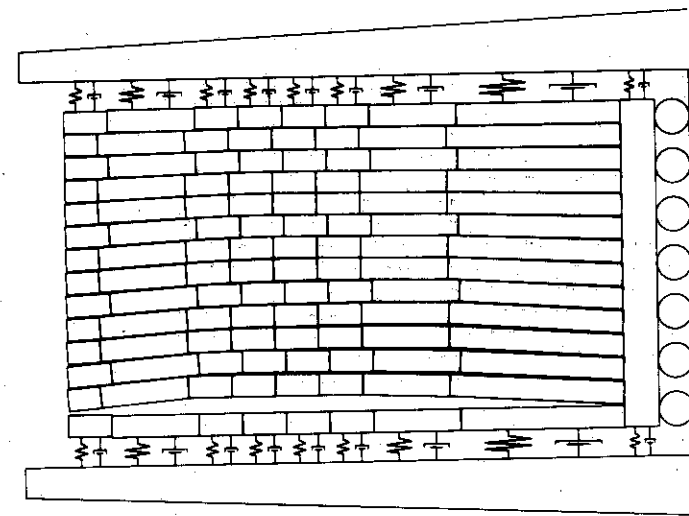
TIME=0.11683

TIME=0.11766

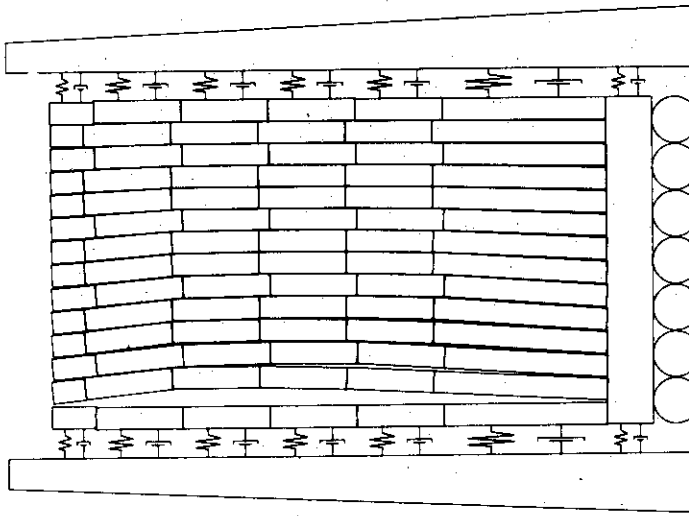
TIME=0.11807



(a) 13ブロックモデル



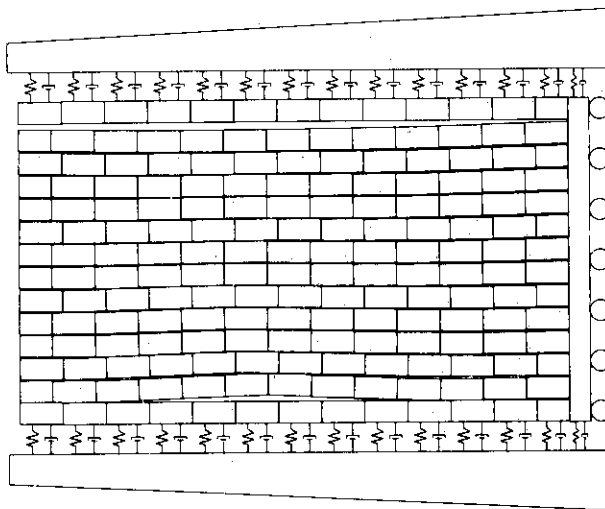
(b) 8ブロックモデル



(c) 6ブロックモデル

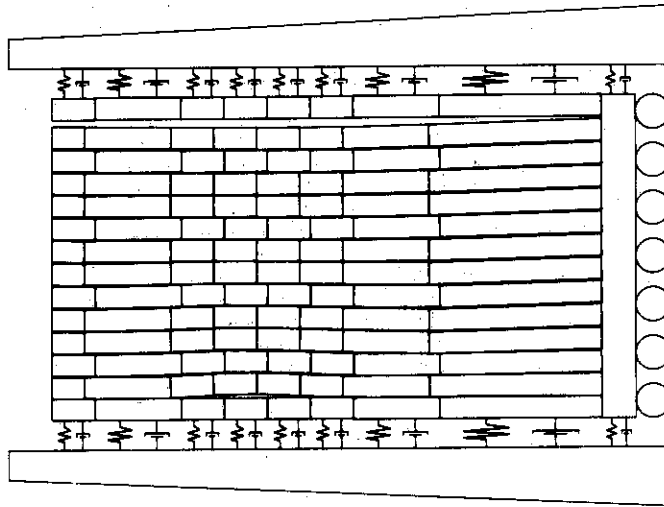
Fig. 4.9(4) 多コラムモデルの時刻歴振動モード (正弦波加振: 4 Hz, 500 Gal)

TIME=0.19883



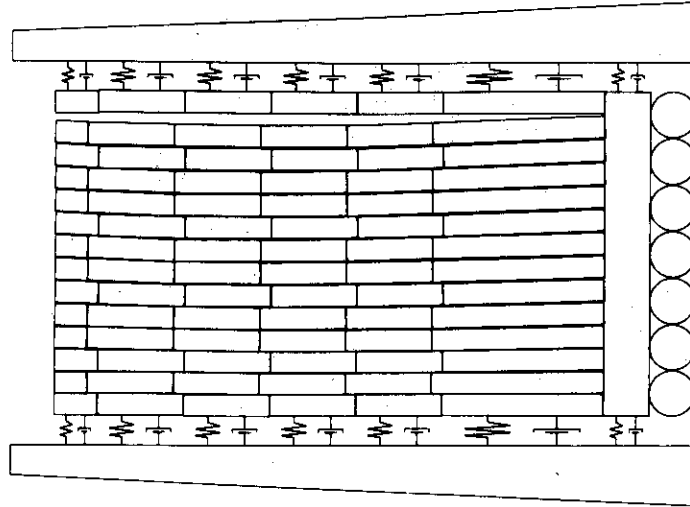
(a) 13ブロックモデル

TIME=0.19586



(b) 8ブロックモデル

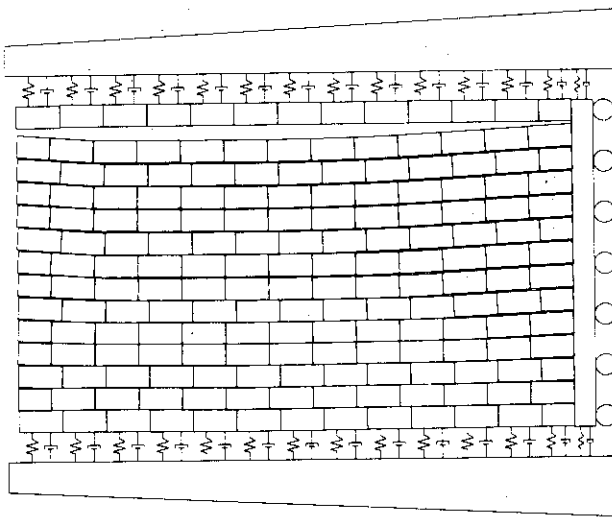
TIME=0.19692



(c) 6ブロックモデル

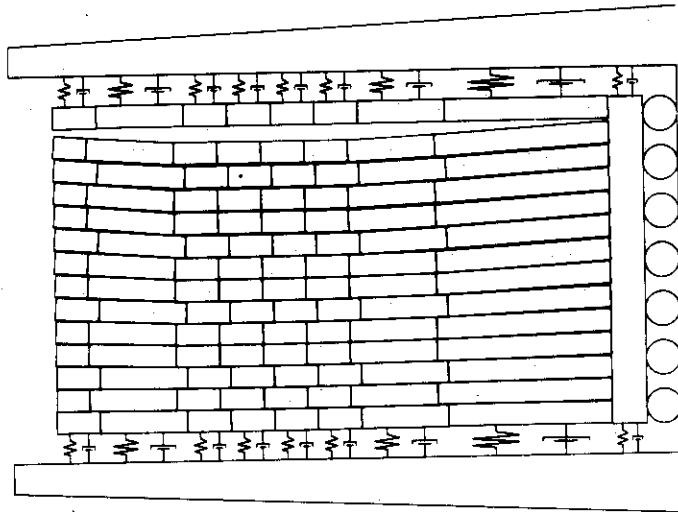
Fig. 4.9(5) 多コラムモデルの時刻歴振動モード (正弦波加振; 4 Hz, 500 Gal)

TIME=0.21866



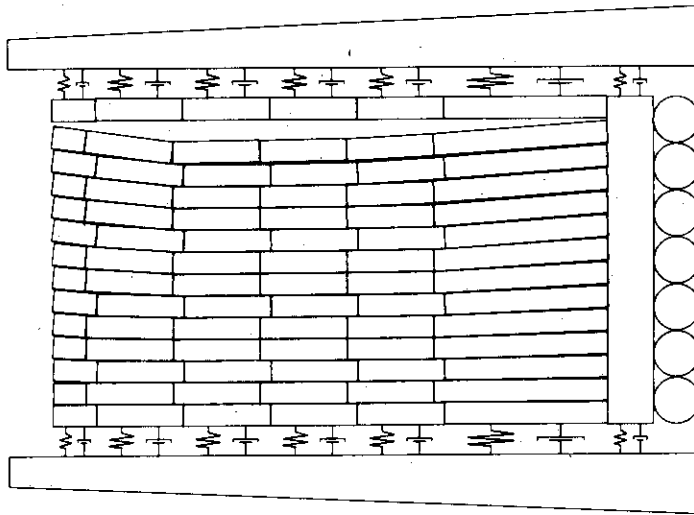
(a) 13ブロックモデル

TIME=0.21586



(b) 8ブロックモデル

TIME=0.21692



(c) 6ブロックモデル

Fig. 4.9 (6) 多コラムモデルの時刻歴振動モード (正弦波加振: 4 Hz, 500 Gal)

## 5. ま と め

垂直 2 次元地震応答特性の予測に関して、簡略モデル解析の有効性について検討した。結果は次のとおりである。

- (1) 振動試験より得られた応答値と詳細モデルより得られた値がかなりよく一致していることから、解析モデルの妥当性を示している。
- (2) 簡略モデルでも十分炉心垂直 2 次元内の振動特性を把握することができる。特に、1 コラム 8 ブロックモデル解析が解の精度と計算時間の面からみて適している。
- (3) 炉心垂直面内の各コラムは、コラム間のギャップに基づくハードスプリング特性を有しており、ダウエルピンばね定数の非線形性に基づく分数調波共振を発生させている。1 コラム振動試験でもこの現象は存在している。このことより、炉心垂直面を構成する各コラムは、コラム自身の振動特性を備えている。
- (4) 炉心垂直面で振動特性はほぼ左右対称である。

本報告より、簡略モデル解析の有効性が明らかとなったので、今後、振動試験条件（側方支持剛性、オリフィスギャップ、圧力模擬ばね）、および加振加速度レベルによる各応答値に対する効果を調べてゆく予定である。

最後に、本研究を実施するにあたり検討に参加された当研究室の関係者ならびに垂直 2 次元炉心耐震試験を直接実施した三菱重工業(株)の関係者に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 青地, 安野他, JAERI - M 6845 (1977)
- (2) Ikushima, T. and Kawakami, M., Trans. 3rd Int. Conf. S MiRT, K 8/7, (1975)
- (3) 幾島毅他, JAERI - M 7727 (1978)
- (4) 幾島他, 原子力学会誌, 22 {1}, 55 ~ 67 (1980)
- (5) 幾島他, 機械学会第 18 回シンポジウム「衝撃応答」予稿集
- (6) 井出朗他, FAFIG, 91.
- (7) 白木, 幾島他, 三菱重工技報. Vol. 16, No 5, (1979 - 9)
- (8) 機械工学便覧第 4 版 p 3 ~ 35.

## 5. ま と め

垂直 2 次元地震応答特性の予測に関して、簡略モデル解析の有効性について検討した。結果は次のとおりである。

- (1) 振動試験より得られた応答値と詳細モデルより得られた値がかなりよく一致していることから、解析モデルの妥当性を示している。
- (2) 簡略モデルでも十分炉心垂直 2 次元内の振動特性を把握することができる。特に、1 コラム 8 ブロックモデル解析が解の精度と計算時間の面からみて適している。
- (3) 炉心垂直面内の各コラムは、コラム間のギャップに基づくハードスプリング特性を有しており、ダウエルピンばね定数の非線形性に基づく分数調波共振を発生させている。1 コラム振動試験でもこの現象は存在している。このことより、炉心垂直面を構成する各コラムは、コラム自身の振動特性を備えている。
- (4) 炉心垂直面で振動特性はほぼ左右対称である。

本報告より、簡略モデル解析の有効性が明らかとなったので、今後、振動試験条件（側方支持剛性、オリフィスギャップ、圧力模擬ばね）、および加振加速度レベルによる各応答値に対する効果を調べてゆく予定である。

最後に、本研究を実施するにあたり検討に参加された当研究室の関係者ならびに垂直 2 次元炉心耐震試験を直接実施した三菱重工業(株)の関係者に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 青地, 安野他, JAERI-M 6845 (1977)
- (2) Ikushima, T. and Kawakami, M., Trans. 3rd Int. Conf. S MiRT, K 8/7, (1975)
- (3) 幾島毅他, JAERI-M 7727 (1978)
- (4) 幾島他, 原子力学会誌, 22〔1〕, 55~67 (1980)
- (5) 幾島他, 機械学会第 18 回シンポジウム「衝撃応答」予稿集
- (6) 井出朗他, FAPIG, 91.
- (7) 白木, 幾島他, 三菱重工技報. Vol. 16, No 5, (1979-9)
- (8) 機械工学便覧第 4 版 p 3~35.