

JAERI-M

9 4 4 7

垂直 2 次元炉心振動解析における
モデルの簡略化の検討

1981年4月

伊与久 達 夫

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.

垂直 2 次元炉心振動解析におけるモデルの簡略化の検討

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

(1981 年 3 月 16 日受理)

多目的高温ガス実験炉の炉心は約 2000 個のブロックを使用しており、各ブロックは地震加振状態で運動することができるので、地震時における炉心耐震性の実証は必要となる。その一環として、垂直 2 次元炉心モデルに対して数個のブロックを一体化する簡略モデル解析を実施し、その解析モデルの特徴および垂直 2 次元炉心の振動特性を調べた。得られた結論は次の通りである。

- (1) 解の精度と計算時間の面からみて、パラメーター・サーベイには 8 ブロックモデル解析が実用的であり、より詳細な解析には 10 ブロックモデル解析で十分である。
- (2) モデルを簡略化するほどコラムのソフトスプリング特性は弱まり、共振周波数は高周波数側にスライドする傾向にある。
- (3) 簡略モデル解析の実用範囲は加振加速度レベルにより制限される。
- (4) 加振周波数、加振加速度およびオリフィスギャップが振動特性に与える影響を明らかにした。

Study of Simplification of Model on Vibration Analysis
of Vertical Two-Dimensional VHTR Core

Tatsuo IYOKU

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received March 16, 1981)

Because the Experimental VHTR (very high-temperature gas-cooled Reactor) Core consists of about 2000 graphite blocks in total and each block can move individually during seismic excitation, it is important to know behavior of the core under earthquake. As a step of aseismic study, full-block-model is simplified to lump some blocks and the model analysis was conducted. The present report describes feature of simplified models and vibration characteristics of two-dimensional vertical slice core.

Results are as follow:

(1) While the 8-block-model analysis is useful for parameter survey, the 10-block-model analysis is accuracy satisfactorily for detailed analysis.

(2) The increase of simplification of analysis model decreases soft spring characteristics of the column and shifts gradually the resonance frequency to high frequency region.

(3) The practical range of simplified model analysis is limited to input wave acceleration level.

(4) It made clear that input wave frequency, acceleration and orifice gap width had effects upon vibration characteristics of the two-dimensional vertical core.

Keywords: VHTR Core, Seismic Analysis, Simplified Model, Graphite Block, Vibration Analysis, Vibration Characteristic, Orifice Gap, Two-Dimensional vertical core, Resonance Frequency

目 次

1. 緒 言	1
2. 炉心構造	2
3. 解析方法	6
3.1 解析モデル	6
3.2 運動方程式	6
3.3 簡略モデル	7
3.4 解析パラメータ	12
4. 解析結果と検討	12
4.1 予備検討	12
4.2 簡略モデルの特徴	14
4.3 入力周波数の影響	17
4.4 入力加速度の影響	18
4.5 オリフィスギャップの影響	19
5. 結 言	57
謝 辞	57
参考文献	57

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of VHTR core	2
3. Analysis method	6
3.1 Analysis model	6
3.2 Equations of motion	6
3.3 Simplified model	7
3.4 Analysis parameters	12
4. Analysis results and discussion	12
4.1 Preparatory study	12
4.2 Feature of simplified models	14
4.3 Effects of input wave frequency	17
4.4 Effects of input wave acceleration	18
4.5 Effects of orifice gap width	19
5. Concluding remarks	57
Acknowledgements	57
References	57

1. 緒 言

多目的高温ガス実験炉の炉心は、六角柱状の黒鉛製燃料体ブロックと、黒鉛製可動反射体ブロックおよびこれらのブロックを円筒状に囲む不規則形状固定反射体ブロックより成り、ブロック数の合計は約 2000個にも及ぶ。燃料体ブロックと可動反射体ブロックはダウエルピン・ソケット構造により上下方向の位置決めをしてコラムを構成している⁽¹⁾。これらのコラム間には、燃料交換のためのギャップが存在するので、ブロックを積み重ねた炉内構造物は地震時に複雑な挙動を示す。したがって、詳細な炉心耐震性の検討が必要となる。

垂直 2次元炉心耐震試験は、炉心垂直面内の振動特性を検討するために実施されている。垂直 2次元動的解析コード SONATINAは、振動試験結果と解析値の比較により十分に信頼性があることが確認されている。⁽²⁾ また、コラムあたりのブロック数を縮約する簡略モデル解析の有効性は前報⁽³⁾により明らかとなっている。前回の報告は、13個のブロックで構成されたコラムを、コラムあたりのブロック段数として8段と6段に簡略化した2ケースの検討を試みたものであり、得られた結論は次の通りである。

- (1) 簡略モデル解析を適用しても炉心垂直面内の振動特性を把握することができる。
- (2) モデルを簡略化するにつれて、
 - (i) 解の精度は落ちてくる。すなわち、簡略モデル解析で得られた各応答値(ブロック変位、ダウエルカおよび支持反力など)は、振動試験および詳細モデル解析より得られた値とずれてくる。しかし、ブロック変位に関してはあまり影響を受けない。
 - (ii) 計算時間は短縮される。8ブロックモデル解析に要する演算時間は、詳細モデル解析で要する時間の約半分以下となり、6ブロックモデルでは3分の1に短縮される。
- (3) 炉心垂直面で振動特性はほぼ左右対称である。

前回の結論(1)と(2)より、簡略モデル解析の有効性が実証された。今回報告する内容は、4ケースの簡略モデルを使用して13モデルの解析結果と比較するので、模型条件(オリフィスギャップなど)および入力波条件(加振加速度、周波数)が垂直2次元炉心振動特性にどう影響を与えるかを調べ、かつ各試験条件に最適な簡略モデルを探索なることを主目的とした。前回報告の簡略モデルは8と6ブロックモデルの2ケースであったものを、今回はその目的より10と9ブロックモデルの2ケースを追加した。

解の精度上の評価基準を次の3点に絞った。1番目として制御棒挿入性に影響を与えるブロック相対変位、2番目としてダウエルピン・ソケット構造設計に必要なダウエルカ、そして最後に炉心拘束を行なう拘束機構設計データとなる支持反力の以上3点である。また必要に応じて、ブロック衝突加速度についても検討する。

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）、原子炉压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.2.1とFig.2.2に示す。燃料体コラムでは、中央部に燃料体ブロックが7個、その上下に各々2個ずつの可動反射体ブロックがあり、最上端に流量調節用のオリフィスブロックが配置されており、コラムは計13個のブロックで成立っている。

(1) 燃料ブロック

燃料体には標準燃料体と、制御棒挿入用の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。燃料体構造をFig.2.3に示す。燃料体は平径299mm、高さ570mmの六角柱状黒鉛ブロックにけ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、初期締付位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組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。初期締付位置は、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。

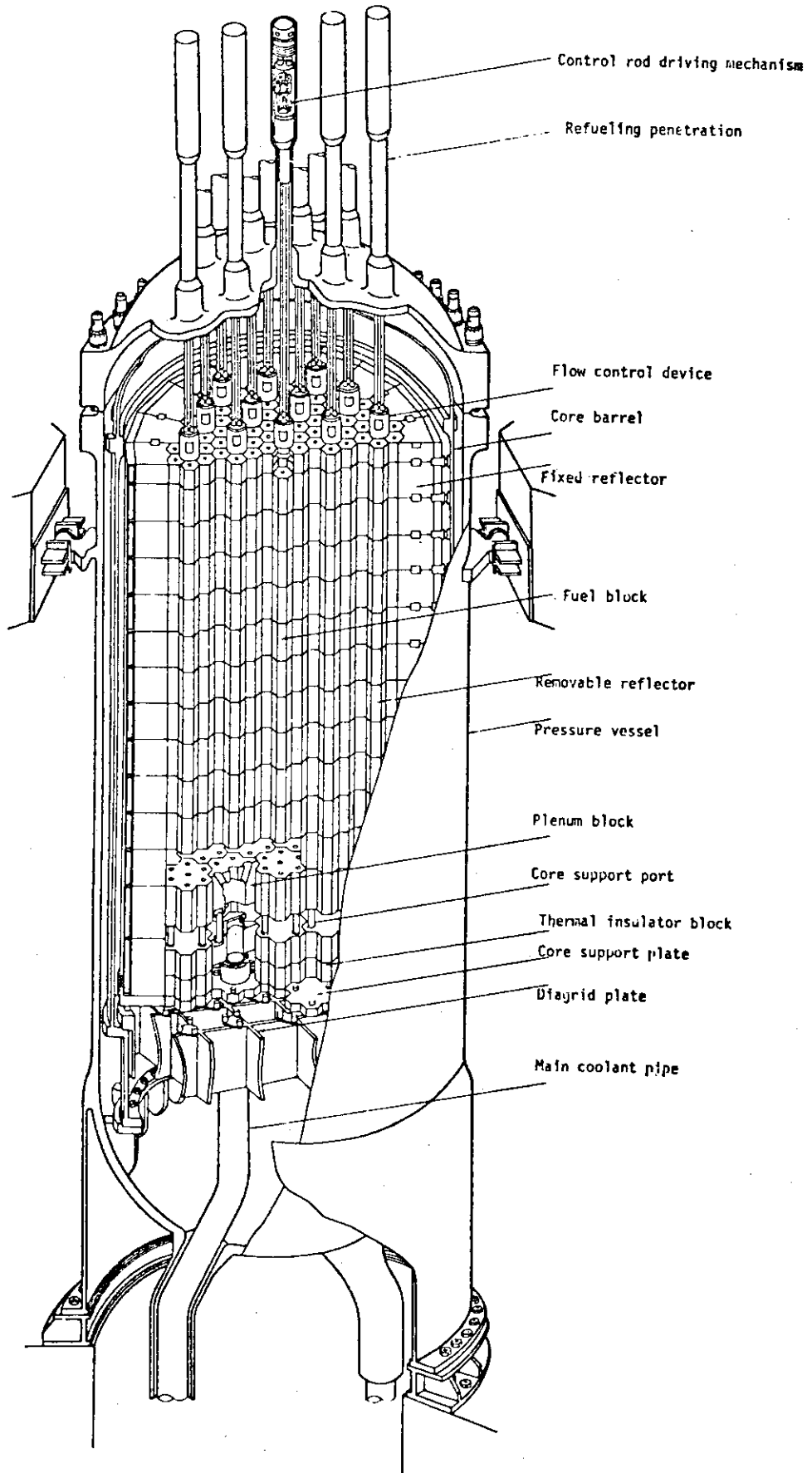


Fig. 2.1 Reactor vertical view of VHTR

- 1 Standard fuel block
- 2 Control rod fuel block
- 3 Removable reflector
- 4 Fixed reflector
- 5 Thermal insulator
- 6 Side shielding
- 7 Core restraint
- 8 Core barrel
- 9 Pressure vessel
- 10 Thermocouple guide tube
- 11 Cooling panel
- 12 Neutron counter guide tube
- 13 Thermal insulator

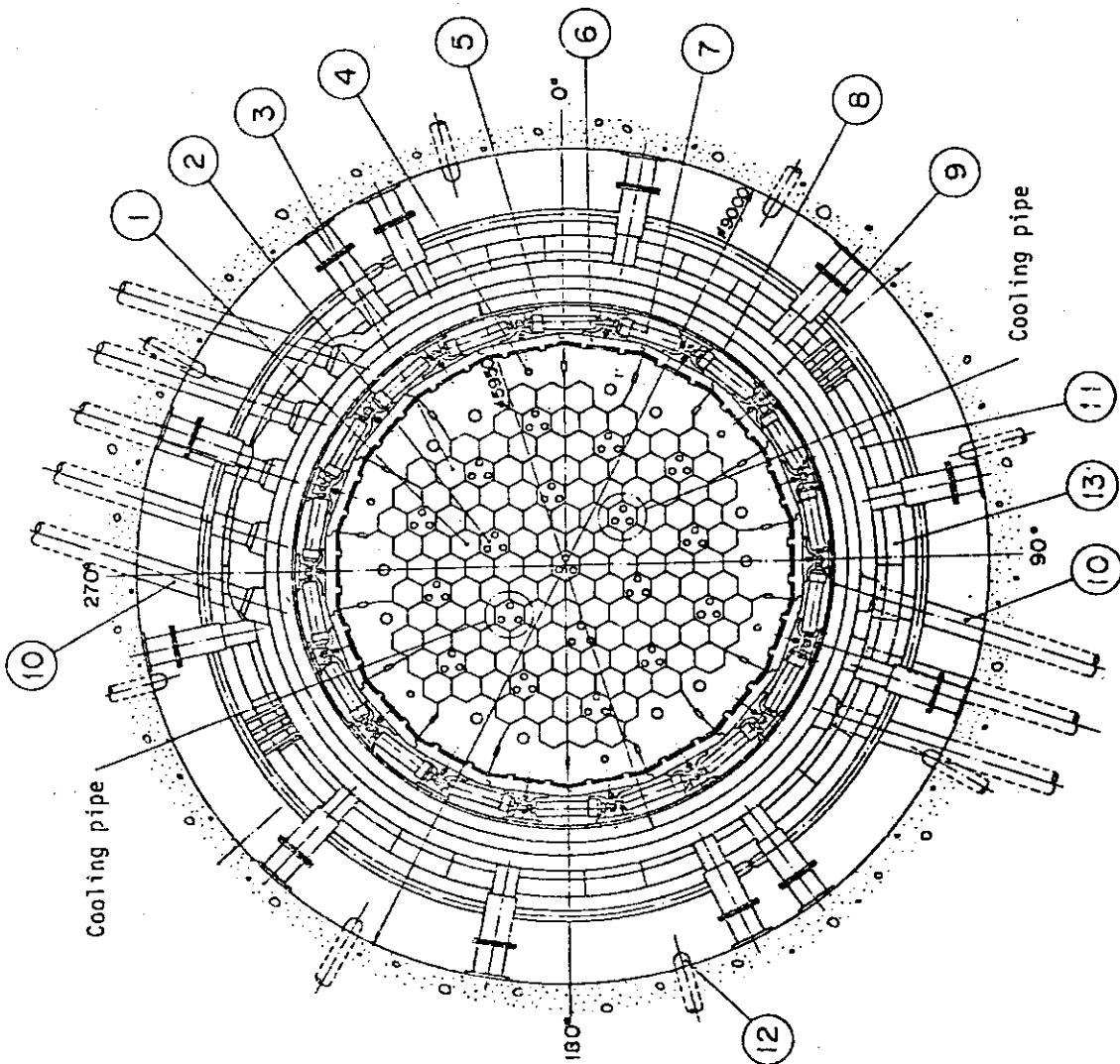


Fig. 2.2 Reactor plane view of VHTR

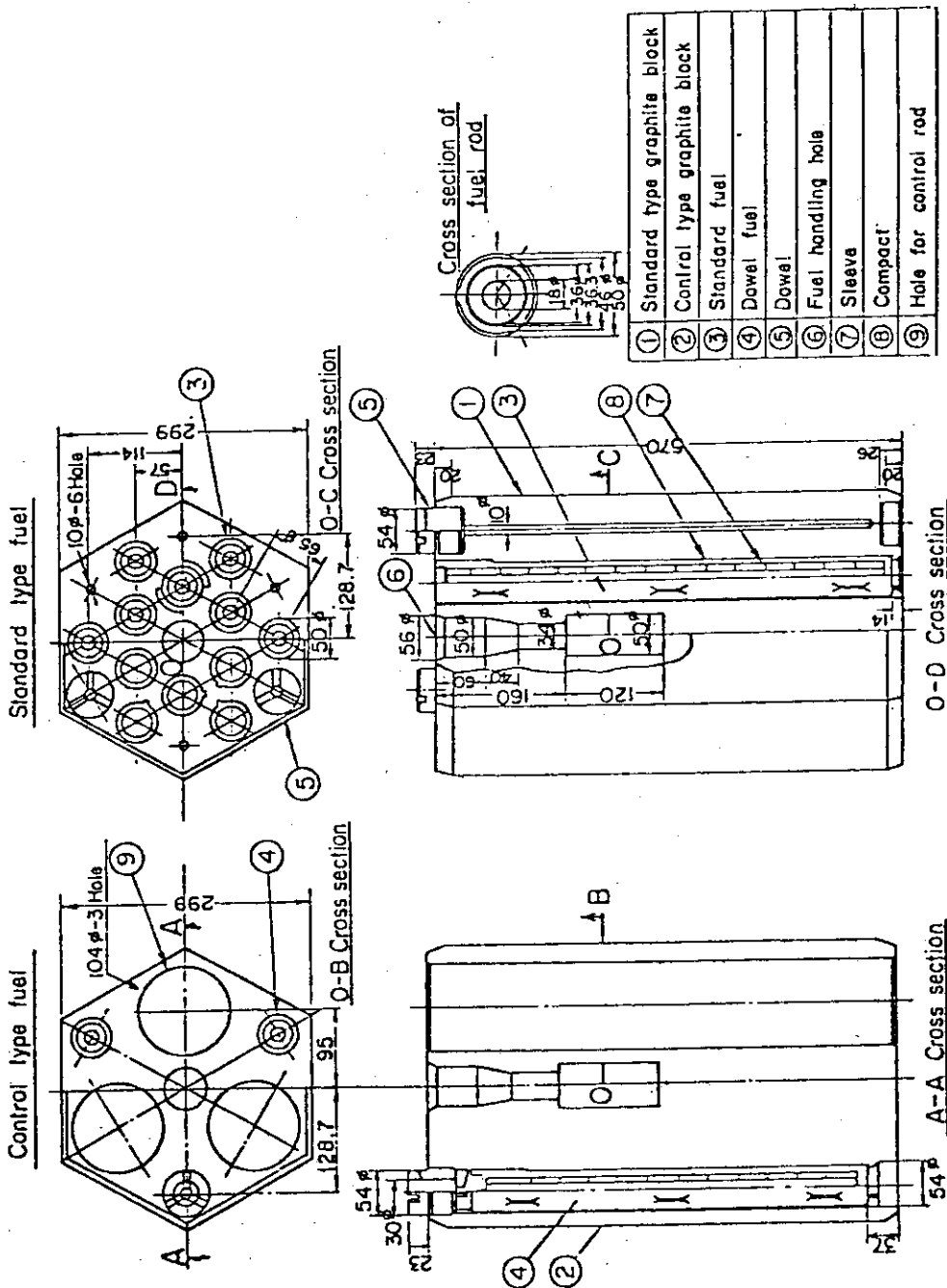


Fig. 2.3 Fuel blok

3. 解析方法

垂直2次元用解析プログラム SONATINAは、各ブロックの運動方程式をルンゲクッタージル法により数値的に解析している。なお解析モデルと運動方程式の詳細は参考文献(2)に記載してあるので、本報ではこれらの概要を述べるにする。その後、3.3節で簡略モデルについて説明することにする。簡略モデル解析に使用する計算コードは詳細モデル解析と同じ SONATINAである。

3.1 解析モデル

解析モデルは Fig. 3.1 に示すように黒鉛ブロックにより構成されるコラムがギャップをにおいて一列に並び、その両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。また、Fig. 3.2 にブロックに作用する力を示す。解析にあたり次のような仮定を設けた。

- (1) ブロックは剛体とし、その運動は2次元立面内として、水平、垂直および回転の3自由度系とする。
- (2) ブロック衝突力の伝達は、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。ダウエルピンとソケットの間にはギャップがある。ダウエルピンとソケット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りモデル化する。

3.2 運動方程式

(1) ブロックの運動方程式

3.1節の仮定から、コラムを構成するブロック(k, l)に作用する力は Fig. 3.2 のようになる。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)の運動方程式は次のように求められる。

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

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

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 はそれぞれブロックの重量と圧力差による力の上方と下方からの力を表わす。また上下間摩擦力 F^F は、摩摩擦と動摩擦の関数として取扱っている。

(2) 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説明する。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($m+2, l$)に作用する力は、ブロック間の摩擦力($F_{m+2,l}^{RE}$)、固定コラム近接のブロックによる衝突力($F_{m,l}^{TR}$, $F_{m,l}^{MR}$, $F_{m,l}^{NR}$, $F_{m,l}^{BR}$)および、拘束機構からの力 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、

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

となる。

3.3 簡略モデル

コラムあたりのブロックの段数を縮約する基本的考え方は次の通りである。⁽³⁾ 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、簡略化しないようにした。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。①から④までの考え方に従って本解析で使用する簡略モデルをFig. 3.4に示す。図中(a)は垂直2次元振動試験に沿った詳細モデルであり、Fig. 3.1の1コラムを取り出したものである。(b)と(c)の10および9ブロックモデルが今回新たに追加した簡略モデルである。この2ケースを選んだ理由は次の通りである。

(1) 前回の解析結果より、

- (i) 6ブロックモデルは精度的に劣っている。
- (ii) 8ブロックモデルでも計算時間は詳細モデルにくらべて約半分以下に短縮できる。
- (iii) コラム下段のブロックは、振動試験条件にあまり影響されず、一体となって振動する傾向

がある。

ことが判明した。

(2) オリフィスギャップとコラム間ギャップが等しくない場合、地震時における制御棒挿入性を検討する際必要となるコラム変位モードを正確に求めるため、その真下のブロック単体の振動特性を把握する必要がある。

数個のブロックを一体にすることにより、解析にあたり次のパラメーターを変更した。

- (1) 縮約されたブロックは対応するブロックの数の質量および回転慣性を持つものとした。
- (2) 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る。
- (3) ブロック衝突モデル部の粘性係数は簡略化しても変化しないとした。

しかし、ブロック衝突モデルを模擬した垂直方向と水平方向に取付けるばねおよびダウエルピンのばね定数については4.1節において検討する。

3.4 解析パラメーター

解析モデルはFig. 3.1に示す通りであり、その構成要素である各ブロックの仕様をTable 3.1に示す。Table 3.2にブロック衝突モデル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 3.3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て0.2と仮定した。なおTable 3.1からTable 3.3に示した数値は詳細モデル解析でのものであり、簡略モデル解析に際しては3.3節の(1)から(3)に沿って各パラメーターを設定した。

時刻歴応答は、ルンゲ・クッタ・ジル法により、時間刻み 2×10^{-4} 秒として計算した。

Table 3.1 Specification of each blocks

Parameters	Length (cm)	Weight (kg)	Mass (kg·s ² /cm)	Moment of inertia (kg·s ² ·cm)
Fuel blocks	28.5	19.1	0.0195	0.924
	21.4	14.3	0.0146	0.302
Oriffice blocks	28.5	15.4	0.0157	1.75
	21.4	10.2	0.0104	0.62
Side blocks	28.5	52.8	0.054	2.05
	21.4	39.0	0.040	1.60
Support block	—	357.7	0.365	—

Table 3.2 Constants with block impact model

Block type	Vertical direction		Horizontal direction	
	Spring constant (kg/cm)	Damping coeff. (kg·s/cm)	Spring constant (kg/cm)	Damping coeff. (kg·s/cm)
Fuel block	25000	10.0	12600	8.0
Oriffice block				
Support block	—	—		

Table 3.3 Calculation data of dowel pin

Spring constant (kg/cm)	Damping coefficient (kg·s/cm)	Gap between dowel pin and hole (cm)
12500	5.2	0.05

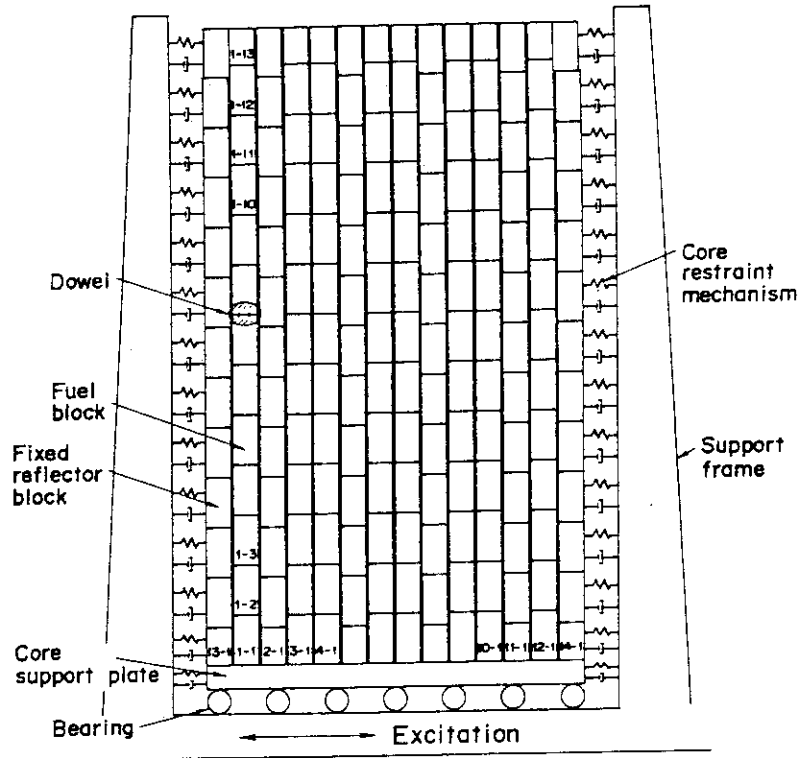


Fig. 3.1 Calculation model

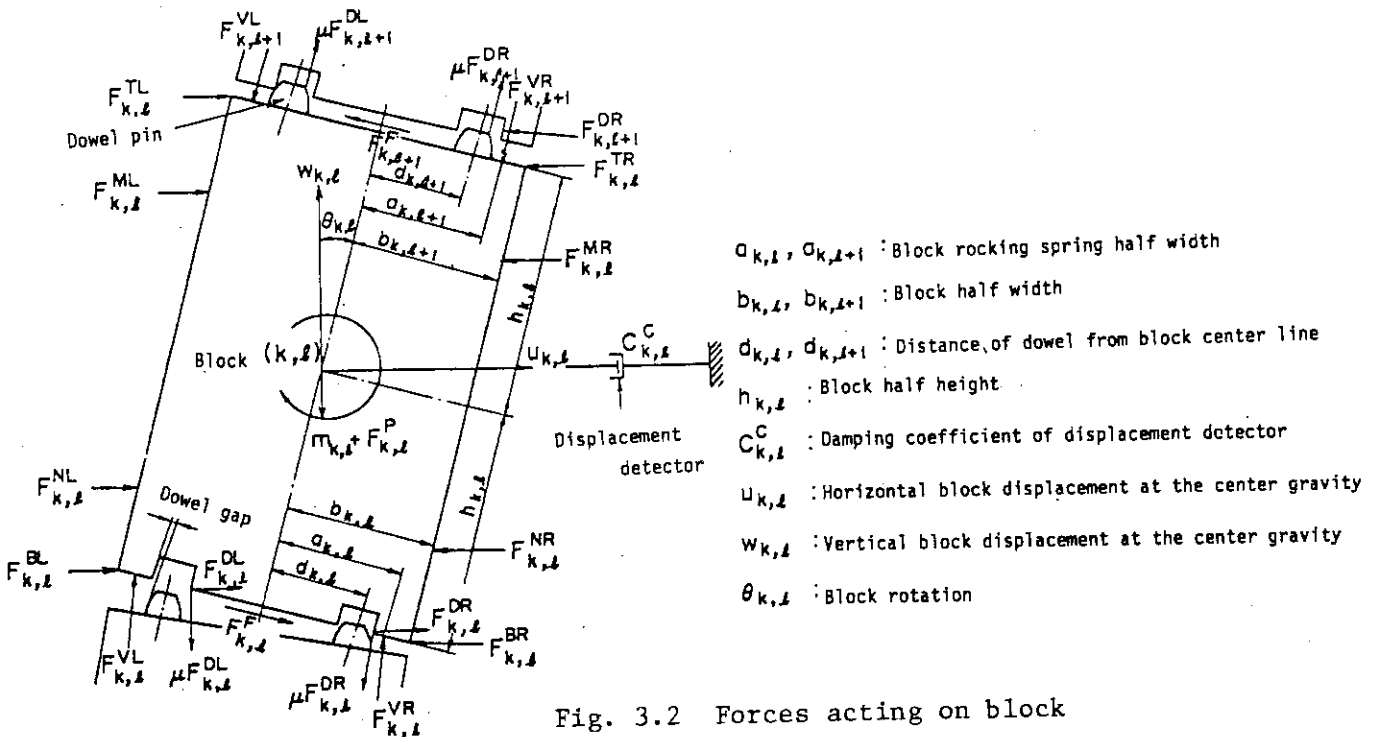


Fig. 3.2 Forces acting on block

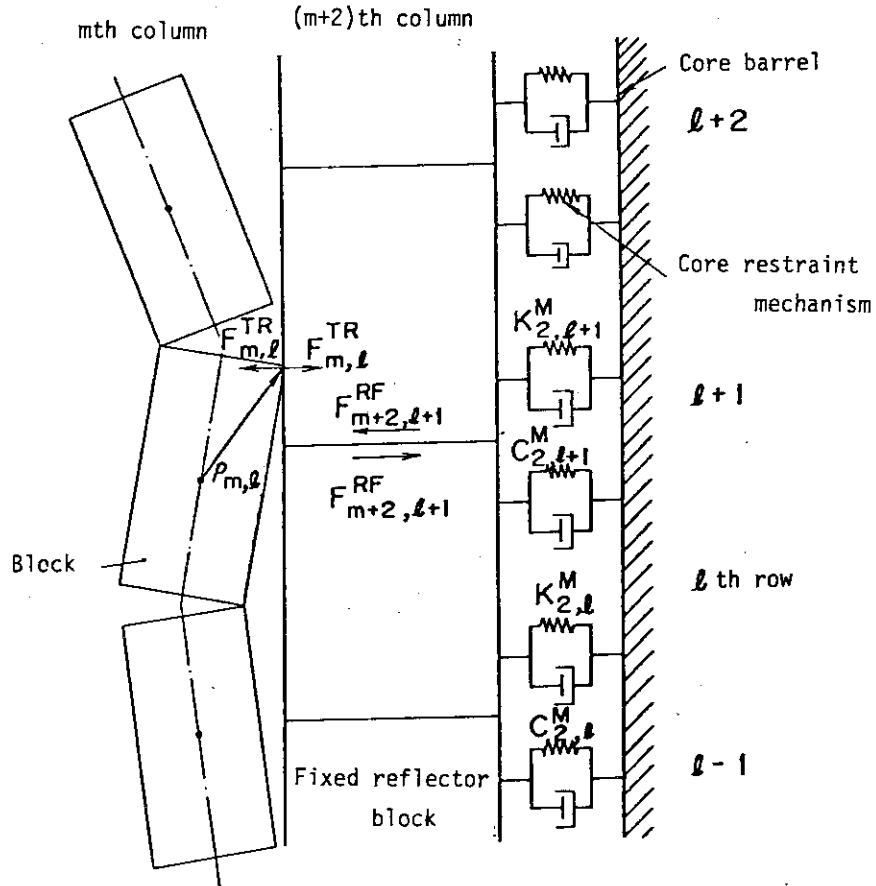


Fig. 3.3 Forces acting on side reflector blocks

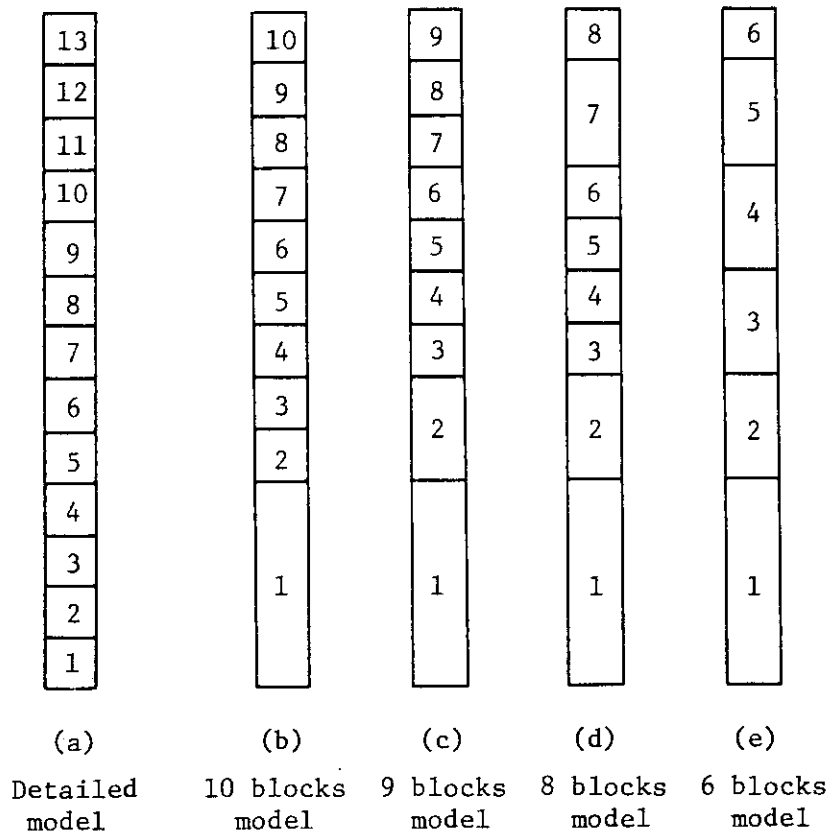


Fig. 3.4 Formation of simplified models

4. 解析結果と検討

本章における目的は、簡略モデルを使用して、模型条件（オリフィスギャップの効果）および加振入力波条件（加速度、周波数）が垂直2次元炉心振動特性にどう影響を与えるかを調べ、かつ各条件に最適な簡略モデルを探索することである。この検討に先立ち予備段階として、簡略モデルにおけるブロックおよびダウエルピン部に取付けるばね定数の検討を4.1節で行なう。4.2節では各簡略モデルの特性について論じてゆく。この節では新たに追加した10と9ブロック簡略モデルの有効性も記してある。4.3と4.4節において加振入力波の影響を調べ、4.5節でオリフィスギャップ幅の効果を論じる。

4.1 予備検討

数個のブロックを1個のブロックに縮約した場合問題となるパラメータは、ブロック衝突現象を模擬したばね-ダッシュポット部のばね定数、およびダウエルピン部のばね定数である。Fig. 4.1にn個のブロックが1個のブロックに縮約された場合の各衝突モデルを図示してある。図で縮約される前の各ばね定数は小文字（ k_{bh} , k_{bv} , k_p ）で記し、縮約されたブロックの各ばね定数は大文字（ K_{bh} , K_{bv} , K_p ）で表示している。

(1) ブロック垂直方向のばね定数

簡略モデルはFig.4.1をみても明らかなように、縦方向にブロックを1体化している。このため、縮約したブロックの垂直方向に取付けるばねの定数（ K_{bv} ）は、単純に直列ばね系として求める方法がある。この場合の K_{bv} は次のようになる。

$$K_{bv} = k_{bv} / n \quad (1-1)$$

この方法により求められる K_{bv} は、簡略化の対象となるブロック群が一体となって振動するとき正しい値となるので、(1-1)より得られる K_{bv} は本解析の考え方に沿ったパラメーター設定法である。

詳細モデル解析で求められるコラム振動モードを観察すると、簡略化の対象となるブロック群でもある程度の折点が生じている。そこで縮約したブロックに垂直方向に取付けばねのばね定数 K_{bv} の設定法を検討する目的で、次のケースを考えた。

$$K_{bv} = k_{bv} \quad (1-2)$$

(2) ブロック水平方向のばね定数

簡略化したブロックの幅の長さは個々のブロックの幅と等しくなっている。また、ブロック相互間の衝突形態は側面全体で衝突現象が発生する回数よりもブロックのコーナーで衝突する頻度が高い。⁽⁵⁾ これらの理由よりブロック水平方向に取付けるばねのばね定数 K_{bh} は、簡略化しても変わらないものと仮定した場合次式のようなになる。

$$K_{bh} = k_{bh} \quad (2-1)$$

一方、ブロック側面全体でブロックが相互に衝突する場合もある。加えて、簡略化の対象とな

る各々のブロックは加振時に左右両コラムのブロックと衝突している。このことから、ブロック水平方向に取り付けるばねのばね定数 K_{bh} は、単純に n 個のばねより成る並列系と仮定すると次式のようになる。

$$K_{bh} = k_{bh} \times n \quad (2-2)$$

(3) ダウエルピンのばね定数

Fig. 4.1 から明らかなように、ダウエルピンとソケットの衝突は水平方向である。このことより、簡略化したブロックのダウエルピンばね定数 K_p の取り扱い、ブロック水平方向のばね定数設定方法と類似している。ダウエルピン・ソケット間とブロック左右方向のコラム間にギャップが存在する。 K_{bh} を設定するさい隣接ブロックの運動（衝突現象）が問題となったが、 K_p を決めるさい簡略化の対象となる個々のブロックの運動が問題となる。

以上の理由より、次の2つの場合を設定する。

$$K_p = k_p \quad (3-1)$$

$$K_p = k_p \times n \quad (3-2)$$

(3-1) の場合は簡略化してもばね定数は変わらないとしたもので、(3-2)はダウエルピンのばねが並列系とした場合である。解析より得られるダウエル力は、(3-2)の方式によれば、簡略化したブロック数で除した値となる。

(4) ばね定数の組合せ

(1)から(3)より簡略化ブロックのばね定数の場合わけをしてきたが、ここではこれらのばね定数の組合せケースを決める。組合せとして次の3ケースを選んだ。

Case 1 (1-1), (2-2), (3-2)

Case 2 (1-2), (2-1), (3-1)

Case 3 (1-1), (2-1), (3-1)

ブロック群の簡略化とともに各ばね定数を変えるのが Case 1 で、変えないのが Case 2 である。Case 3はブロック垂直方向に取付けるばねのばね定数のみ変え他の2つのばね定数を変えない場合である。

(5) 解析モデル

解析の対象とした計算モデルの試験条件は次の通りである。

(i) 支持剛性強（実験炉相当の剛構造）

(ii) オリフィスギャップ 0.5 mm

(iii) コラム間ギャップ 2 mm

(iv) 圧力差模擬ばね無し

使用した簡略モデルは8ブロックモデルである。理由は、簡略モデルはコラム高さ方向で下部領域と上部領域でブロックの縮約化を行なっているため、コラム上部および下部の簡略ブロックに取り付けるばねのばね定数の変化がブロック振動特性にどう影響しているか検討するのに適している。加えて、前回の解析結果より8ブロックモデル解析の結果は十分信頼性を保っているが、6ブロックモデル解析は精度的に劣っている箇所があることから、前者を選定した。

(6) 解析結果と検討

Fig. 4.2 はブロック番号(1, 7)の水平方向変位周波数特性を図示したもので、加振加速度

は 250Gal である。図より各ケースによる相違はなく 3 ケースとも詳細モデル解析の値とよく一致している。次に、固定コラム隣接のコラム 1 列目と炉心中心に位置しているコラム 6 列目についてブロック最大相対変位をプロットしたのが Fig. 4.3 である。Fig. 4.3(1)は加振周波数 3 Hz で Fig. 4.3(2)は 4 Hz であり両者とも入力加速度は 250G である。図よりケース間による相違はなく 3 ケースとも詳細モデル解析の値とよく一致している。

ブロック番号 (1, 7) の垂直方向の変位周波数特性を図示したのが Fig. 4.4 である。図より次の点がわかる。①Case 1 と 3 の解析結果はほぼ一致しており詳細モデル解析の値より僅かに大きい値となっている。②Case 2 より得られた値は詳細モデル解析の値に比べかなり小さくなっている。③垂直方向には加振していないので周波数領域にわたり一定の値となっている。①と②の原因は K_{bv} に起因するものである。すなわち、加振波が水平方向から入力される時は、簡略化の対象となるブロックは垂直方向に一体となって水平方向に運動するので、ブロック垂直方向のばね定数は直列系と仮定してよいことがわかる。しかし①より、運動中において簡略化の対象となる個々のブロック上下は完全な面接触でなく一部は線（あるいはコーナー）での接触となっている。

Fig. 4.5 は左方固定コラム 8 段目に位置する側方ブロックの支持反力周波数応答である。図より各ケース間による相違はないが、詳細モデル解析での値と比べると最大支持反力を生じる周波数が僅かに高周波数側にスライドしている。しかしこのことは、各ばね定数の変化がもたらす効果はなく、8 ブロックモデルそれ自身の特性に起因するものである。Fig. 4.6 は左方固定コラムの支持反力分布を示したものである。Fig. 4.6 (1)の加振周波数が 3Hz のときは、共振以前の支持反力分布であるのでコラム全長にわたって分布がなめらかで、各ケース間による相違も少ない。Fig. 4.6 (2)は共振周波数近傍の支持反力分布である。図より、コラム 7 から 10 段目あたりの支持反力は Case 1 の値が詳細モデル解析の値に近い値を示し、コラム 11, 12 段目の支持反力値は Case 3 の値が詳細モデル解析の結果に近くなっている。

加振条件、4 Hz、250Galにおける、コラム 1 列目と 6 列目の右側ダウエルピンのダウエル力分布を図示したのが Fig. 4.7 である。Case 1 は簡略ブロックのダウエルピンばね定数を並列系として K_p を設定しているので、簡略化したブロック全体に一定の値を示すことになる。図より、①コラム 1 列目の下段において、Case 1 の解析で求められるダウエル力は詳細モデルのそれよりかなり小さめになっているが、②Case 2 と 3 の値は詳細モデル解析の値に近い、③コラム 6 列目全長にわたり Case 3 より求められたダウエル力分布は他の 2 ケースに比べ一番詳細モデル解析での分布に近いことがわかる。

(7) まとめ

(1)から(6)まで検討してきた結果をまとめると Table 4.1 のようになる。なおこれらの評価基準は、詳細モデル解析結果と比較したものである。表より、今後の解析において簡略ブロックの各ばね定数は Case 3 で設定したものを採用する。

4.2 簡略モデルの特徴

今回解析で使用する計算モデルは Fig. 3.4 に図示した 5 種類で、そのうち 4 種類が簡略モデル

である。この節では、各簡略モデルそれ自身の特徴、あるいは各簡略モデル間の相違を比較・検討してゆくことを目的としている。なお、6ブロックモデル解析は精度上やや劣っているので、ここでは8、9および10ブロックモデル解析に重点をおいた。比較項目はブロック相対変位、支持反力、ダウエル力、ブロック衝突加速度、および最大応答値である。解析の対象とするモデルの振動試験条件は4.1節(5)で記した条件とほぼ等しく、異なっている点はオリフィスギャップが2mmの場合も追加したことである。

(1) ブロック相対変位

Fig.4.8 にブロック相対変位周波数応答を示す。加速度は250Galで、オリフィスギャップは0.5mmの状態である。Fig.4.8(1)は固定コラムに隣接したコラム中段に位置しているブロックの応答で、Fig.4.8(2)は炉心中心に位置しているブロックの応答である。図より、3者の簡略モデル解析結果は詳細モデル解析の結果とよく一致しており、各簡略モデル間の相違はない。同様なことがコラム変位モードについても言える。その代表的な例をFig.4.9に示す。以上のことより次の結論が得られる。

- 。 ブロック相対変位およびコラム振動モードに関しては、6ブロックモデル解析でも十分有効性を保っている。

(2) ダウエル力

Fig.4.10にダウエル力周波数応答特性を示す。選定した3個のブロックは、コラム中段よりやや上部に位置している。図ではブロック右側ダウエル力をプロットしてあるが、解析より求められるブロック右側と左側のダウエル力はほぼ等しい値となっている。図より、ダウエル力は周波数領域において変動しており、その変動幅は炉心周辺から中心にゆくほど大きくなっている。また、ダウエル力周波数特性の傾向も各簡略モデル間による相違があるが、その中でも10ブロックモデル解析の結果が詳細モデル解析の傾向に一番近い。

Fig.4.11はコラム全長にわたるダウエル力分布を示したもので、図(1)はオリフィスギャップが0.5mmの場合で、図(2)はそのギャップが2mmの時のダウエル力分布である。前者の図より、固定ブロックに隣接したコラムのダウエル力分布は、片持りのせん断力分布に近い傾向を示す。また、解析モデルを簡略化するにつれて、コラム上段のダウエル力は大きくなってゆく。後者の図では、8、9ブロックモデル解析の結果はコラム下段で小さ目になっているが、10ブロックモデル解析ではほぼ詳細モデル解析の値に一致している。Fig.4.11の(1)と(2)はダウエル力分布の傾向は異なっている。この理由として考えられることは、入力波(周波数と加速度)やオリフィスギャップによる影響と思われる。詳しくは4.3節以降で記述する。

以上のことから、次の結論が導ける。

- 。 ダウエル力周波数応答の傾向を求めるには、8ブロックモデル解析でも十分である。しかし、コラム全長にわたるダウエル力分布、特にコラム上部および下部領域のダウエル力分布を詳しく知りたい場合は10ブロックモデルを使用すべきである。

(3) 側方支持反力

Fig.4.12は左側固定コラム8段目ブロックでの支持反力周波数応答を示したものである。図より、支持反力周波数応答の傾向はモデル間による相違はなく、最大支持反力も各々500~550kgの範囲にあるが、しかし、4Hzにおいてモデルを簡略化するほど、支持反力の値は大きく

なっているのがわかる。これらのことから、解析モデルを簡略化するほどブロック番号(13, 8)の支持反力が最大となる周波数は、除々に高周波数側にスライドしていると言える。

Fig. 4.13はオリフィスギャップ0.5mmでの固定コラム支持反力分布である。入力波条件は、Fig. 4.13(1)が加振加速度250Gal, 加振周波数4Hzで、Fig. 4.13(2)が500Gal, 4Hzである。両図を概観すると次のことがわかる。①250Gal加振では、解析モデルの簡略化に伴いコラム中段から上段にわたって、支持反力が大きくなっている。②このため、各モデルによる解析値はばらついている。特に13段目のばらつきは約200kgとなっている。③500Gal加振では、各モデルによる解析結果のばらつきは少なくなる。④両図より、簡略モデルの中で9ブロックモデル解析が精度上劣っている。⑤支持反力分布の傾向は両図とも、コラム9と10段目でピークとなり、かつ13段目でも大きくなっている。この理由は、オリフィスギャップがコラム間ギャップに比べて小さいことと、コラム1列目の変位モードに影響されるためである。

以上のことより次の結論を導ける。

- ・支持反力を評価の対象とした場合、精度上の順位は10, 8, 9ブロックモデル解析の順となるが、支持力分布の傾向と応答値を知りたいときは8ブロックモデル解析で十分である。

(4) ブロック衝突加速度

ブロック左方頂部コーナーでの衝突加速度周波数応答を図示したのがFig.4.14である。Fig.4.14(1)はコラム1列目の高さ方向による衝突加速度特性をみたものであり、Fig.4.14(2)はコラム中段に位置するブロックの径方向の特性を調べたものである。図より、共振周波数は解析モデルを簡略化するほど高周波数側にスライドしてゆく。この理由は、ルーズピン結合コラムのソフトスプリング特性はコラムの簡略化と共に弱まってゆくためである。またコラム上段にゆくほど簡略モデル解析の応答特性は、詳細モデル解析のそれと異なっている。Fig. 4.15はオリフィスギャップ2mmにおけるブロック・コーナーでの衝突加速度分布である。図より、10ブロックモデルの値はコラム下段で詳細モデルの結果と一致し、9, 8ブロックモデルの結果はコラム上段でよく一致している。この解析ケースでは、8ブロックモデル解析でも十分である。

以上のことより次の結論を導ける。

- ・簡略モデルの信頼性の検討の一環として、ブロック衝突加速度を評価の対象とした結果、8ブロックモデル解析でもかなりの有効性を保っていることがわかった。

(5) 最大応答値

代表的な入力波条件のもとで(1)から(4)まで記述してきた各応答値を表にまとめて示したのがTable 4.2である。オリフィスギャップとして、2mmのものが(a)で、0.5mmのものが(b)である。表より各モデルの解析結果は、全体的に実験結果とよく一致している。また、各モデルの特徴は(1)から(4)までに述べてきた結論とほぼ合致している。

(6) 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述べる。利用した電子計算機システムはFACOM M-200である。

一例として、加振加速度250Gal, 周波数3Hzで、各モデル解析の比較を下表に示す。この場合計算機の計算時間(cpu)を9分40秒に設定し、3.2節の運動方程式を解析する積分時間を

みたものが下表である。

	積分時間 (sec) (cpu = 580sec)	計算時間要求割合(%) (詳細モデルを規準にする。)
詳細モデル	0.254	100
10ブロック	0.497	52
9ブロック	0.550	46
8ブロック	0.624	41
6ブロック	0.827	31

すなわち、8ブロックモデル解析を実行すると、詳細モデル解析に比べて計算時間は約60%短縮できる。

(7) まとめ

以上(1)から(5)までの検討によって得られた結論を表にまとめるとTable 4.3のようになる。この表は各簡略モデル解析の信頼性を3段階に区分けして示したものである。6ブロックモデル解析は前報の結果からここでは除外した。この表より9ブロックモデル解析は、簡略モデルとしての特徴上8ブロックモデル解析に近いものである。さらに、(6)の計算時間の結果を含めて考えると、簡略モデルとして10ブロックと8ブロックモデル解析が有効的なので、4.3節以降では簡略モデルとして10と8ブロックモデル解析を使用してゆく。

4.3 入力周波数の影響

入力加速度一定のもとで、加振周波数を変化させてゆくと各応答値は、ある周波数で共振となる。ここでは、共振周波数領域と共振からずれた周波数領域での各応答値の傾向と簡略モデルの適応性を述べる。計算ケースは、オリフィスギャップ0.5mmで、入力加速度250Gal一定である。

(1) コラム変位モード

Fig. 4.16は、加振周波数をパラメーターとしてコラム1列目と6列目の変位モードを図示したものである。ブロック(1, 7)と(6, 7)の周波数応答はFig. 4.8に図示してある。Fig. 4.16で点線は初期ギャップ量の総和(オリフィス部6.5mm, 燃料ブロック部26mm)をあらわしている。図より、コラム1列目は2Hzと3Hzで、コラム6列目は2Hz, 3Hzと4Hzにおいてコラム中段よりやや上部のブロックが全初期ギャップ量(コラム間ギャップ量の総和)より大きくなっていることがわかる。これらのケースでは、炉心垂直面を構成する各コラムは一体となって群振動をしており、簡略モデル解析の値は詳細モデル解析のそれによく一致している。

低周波数領域(2~3Hz)ほど、ブロック間衝突はコラム下段のブロックまで拡がっている。2Hzではコラム4段目ブロックでも応答変位は全初期ギャップ量をこえており、詳細モデル解析の値は簡略モデル解析の結果に比べて大きい応答値となっている。この理由は、例えばコラム6列目において1段目から5段目ブロックまでの値を結ぶ線は丸みを帯びているので、この区間のブロック上下間に折点が生じ、簡略化の対象となるブロック群は一体となって運動していないためである。この傾向はコラム上段における8ブロック解析結果にもみうけられる。

共振状態をこえた周波数領域(5~6Hz)での変位応答をみてゆく。Fig. 4.16(4)と(5)に示し

である通り、炉心中心コラムほど、簡略化するにつれて応答は大きくなってゆく。特に、コラム中段より上部においてこの傾向は著しい。この理由は、簡略化するにつれてコラムそれ自身の剛性が強くなるためである。

(2) 支持反力

Fig. 4.17は、加振周波数をパラメーターとして支持反力分布を図示したものである。支持反力分布はコラム1列目の変位モードに影響されるので、ブロック共振周波数領域では支持反力は全体的に大きくなっており、共振をずれた周波数は小さくなっている。支持反力の共振周波数は3~4Hz近傍であり、この領域では簡略モデル解析値は詳細モデル解析の値から僅かにすぐれている。しかし、共振状態からずれた周波数領域は3者ともよく一致している。コラム13段目の支持反力が大きくなる理由は、オリフィスギャップがコラム間ギャップより小さいためである。

(3) ダウエル力

Fig. 4.18は、加振周波数をパラメーターとしてコラム1、4と6列目のダウエル力分布を図示したものである。図全体を概観すると、低周波数領域でダウエル力分布は、炉心中心コラムから周辺コラムにゆくにつれて弓なりの分布となってゆく。また、共振状態をこえた周波数領域での分布は、共振時の炉心中心コラムと類似した傾向を示している。このように、ダウエル力分布は大別して2通りの傾向を示す。

㊸ 片持りのせん断力分布に類似した傾向で、コラム下段のダウエル力が最大となり、コラム上部に向かって丸みを帯びた分布。

㊹ ㊸の分布をくずした形で、コラム下段あるいは上段で凸凹になる。

ダウエル力分布が㊸の形になるとき、8ブロックモデル解析の結果はコラム上段において詳細モデル解析の値に比べて大き目になっている。ダウエル力分布が㊹の形を示すときは、簡略モデル解析では正確にダウエル力分布を求められない。しかし、図をみても明らかなように簡略モデルを使用した計算結果は、詳細モデルの値とほぼ等しいので、地震時におけるダウエルピン・ソケット構造の設計データを求めるさいは簡略モデル解析を適用してもよいと言える。

4.4 入力加速度の影響

入力加速度レベルの変化は、各応答値に影響を及ぼす。本節では、加速度レベルの増加に伴い、共振状態にある各応答値はどのように変化してゆくのか、また簡略モデル解析の入力加速度レベルに対する実用範囲を明確にする。解析モデルは、4.3節と同様である。入力加速度の範囲は100~750 Galである。

(1) 変位モード

Fig. 4.19は振動試験より得られたブロック(1, 7)の変位周波数応答である。図より加振速度を増加させてゆくと変位は増加し、かつ最大変位を生じる周波数も上昇している。これはコラム間ギャップに基づくハードスプリング形の非線形特性⁽⁴⁾である。Fig. 4.20(1)~(4)およびFig. 4.16(2)~(3)は、各加速度レベルに対するコラム変位モードを図示したもので、入力周波数は共振状態およびその近傍でのものである。図より、加速度レベルを上昇させるに従いコラムの変位モードは、4.2節で述べた通り高周波数より低周波数に移動していったときの変位モード分布の傾向に

類似している。すなわち、入力加速度レベルの増加に伴い、ブロック間衝突領域はコラム下段に拡がってきている。しかし、Fig. 4.20 (4)の図では、コラム1列目の応答でも簡略モデルの値は詳細モデル解析の値に比べ大きくなっている。この傾向は今まで観察されなかったものである。このことより、簡略モデル解析の実用範囲は加速度レベルにより制限を受けられると思われる。

以上述べてきたことをまとめると次のようになる。

- 加振加速度レベルを増加させるに従い、ブロック間衝突領域はコラム下段に拡がってゆく。
- 加振加速度レベルがある値以上になると、簡略モデル解析は実用的でなくなる。

(2) 支持反力

Fig. 4.21は固定コラム中段やや上部に位置するブロック(13, 8)での支持反力周波数応答である。加振加速度レベルが支持反力応答に与える影響は(1)の変位モードと同じである。Fig. 4.22 (1)~(3)およびFig. 4.13は、各加速度レベルをパラメーターにして支持反力分布を図示したもので、周波数は共振状態およびその近傍でのものである。図より次のことが分かる。①100Gal加振では10ブロックモデル解析の値が詳細モデル解析の値に比べ小さくなっているが、②加速度レベルの増加に伴って、10ブロックモデル解析の結果は詳細モデル解析より大きくなってゆく。③同様な傾向は8ブロックモデル解析でもみられる。

①~③より、モデルを簡略化するほど最大支持反力を生ずる周波数は高周波数側にずれ、かつFig. 4.22 (3)で示される通り加速度レベルが大きくなると大きくずれている。

以上述べてきたことをまとめると次のようになる。

- 最大支持反力を生ずる周波数はモデルの簡略化と共に高周波数側にスライドする。
- 加速度レベルの増加に従い簡略モデル解析の値は詳細モデル解析の結果より大きくなってゆく。

(4) ダウエル力

加振加速度レベルがダウエル力分布に与える影響を示したのがFig. 4.23 (1)~(3)とFig. 4.18 (2)である。加振加速度レベルの増加に伴い、コラム下段のダウエル力はモデルの簡略化と合いまって大きくなってゆく。また、Fig. 4.23 (2)の750Gal加振のケースでは8ブロックモデル解析の値は大きくなり(特にコラム最下段のダウエル力)詳細モデル解析の値の倍ちかくなっている。しかし、750Gal加振でも10ブロックモデル解析はかなりよい精度を保っている。

以上のことをまとめると次のようになる。

- コラム下段のダウエル力は、加速度レベルの増加とモデルの簡略化により増加してゆく。

4.5 オリフィスギャップの影響

4.4節までは主にオリフィスギャップが0.5mmの条件で解析してきたが、ここではコラム間ギャップと等しい2mmのものについて解析し、オリフィスギャップ幅が簡略モデル解析の有効性および各応答値へ与える影響を調べてゆく。

(1) 変位モード

オリフィスギャップが0.5mmから2mmと大きくなった、コラム1列目と6列目の変位モードがどう変わるかを図示したのがFig. 4.24である。変位モードの傾向は、オリフィスギャップが

コラム間ギャップに比べ小さいときは境界条件が固定支持のほりの曲げ振動形に近く、両ギャップが等しいときは変位量が全初期ギャップ量より小さい所までは境界条件が固定-自由支持のほり曲げ振動形に近くなっている。図より、オリフィスギャップ 2mm のケースでは簡略モデル解析の結果は詳細モデル解析の結果によく一致している。この理由は、オリフィスギャップが 0.5mm のときコラム下端から $2/3$ 長付近で生じた折点がないためである。なお、参考までに Fig. 4.25 に各オリフィスギャップにおけるコラム時刻歴振動モードの一例を掲載しておく。

(2) 支持反力

Fig. 4.26 に支持反力分布を示す。図をみてわかるように、支持反力分布はオリフィスギャップ幅に影響を受け、オリフィスギャップ 2mm ではコラム最上段の支持反力が最大となり、コラム下段にゆくにつれその値は減少している。オリフィスギャップ 0.5mm の場合のようにコラム 8~10段目あたりで大きくなっておらず、このことはコラム 1 列目の変位モード (Fig. 4.24 (1)) と関連している。しかし、簡略モデル解析と詳細モデル解析のずれの傾向はオリフィスギャップ幅の影響を受けていない。

(3) ダウエル力

オリフィスギャップが 0.5mm から 2mm と大きくなった場合、コラム 1 列目と 7 列目のダウエル力分布がどう変わるかを図示したのが、Fig. 4.27 である。図より、ダウエル力分布と簡略モデル解析の傾向はほとんどオリフィスギャップの影響を受けていないことに気がつく。

以上 4.3 節から 4.5 節にわたって検討してきた結果をまとめると Table 4.4 のようになる。

Table 4.1 Evaluation of spring constants with block impact model

Item		Case 1	Case 2	Case 3
Horizontal displacement	Frequency characteristics	A	A	A
	Deflection mode of a column	A	A	A
Vertical displacement	Frequency characteristics	B	C	B
Reaction force	Frequency characteristics	B	B	B
	Distribution of reaction forces in a column	A	B	A
Distribution of dowell forces in a column		B	A	A

Note A : agree well with the detailed analysis results

B : agree approximately with the detailed analysis results

C : not agree with the detailed analysis results

Table 4.2 Maximum responses of simplified models

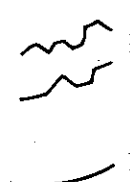
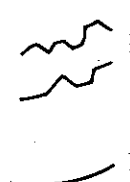
Response	Analytical model				Experiment
	13 blocks	10 blocks	9 blocks	8 blocks	
(a) Orifice gap 2mm, Sine wave ; 2Hz, 100 Gal					
Reaction force (kg), (13, 8)	118	117	117	117	150
Impact acc. (G), (1, 7)	119	166	166	141	60
Dowel force (kg) (7,13)	55.5	23.6	27.1	37.3	35
Relative dis. (mmP-P), (1, 7) (12,11)	70.3	75.8	75.4	87.9	27
	17.2	16.9	16.7	17.3	17.0
(b) Orifice gap 0.5mm, Sine wave ; 4Hz, 500 Gal					
Reaction force (kg), (13,13)	988	931	951	979	970
Impact acc. (G), (1, 7)	473	342	370	582	200
Dowel force (kg), (7,12)	190	174	181	211	—
Relative dis. (mmP-P), (1, 7)	28.9	28.4	28.6	28.4	28.6

Table 4.3 Evaluation of simplified model analysis

Item		Simplified model		
		10 blocks	9 blocks	8 blocks
Column deflection characteristics		A	A	A
Dowell force	Frequency characteristics	B	B	C
	Distribution of dowel forces in a column	A	B	B
Reaction force	Frequency characteristics	A	B	B
	Distribution of reaction forces in a column	B	C	B
Block impact acceleration	Frequency characteristics	B	-	C
	Distribution of impact acceleration in a column	B	B	A

Note A : agree well with the detailed analysis results
 B : agree approximately with the detailed analysis results
 C : not agree with the detailed analysis results

Table 4.4 Effect of input wave frequency, acceleration and orifice gap width on response values

応答	加振周波数の影響 〔加振加速度 250Gal, オリフィスギャップ 0.5mm〕		加振加速度の影響 〔共振状態 オリフィスギャップ 0.5mm〕	オリフィスギャップの影響 〔共振状態 加振加速度 100Gal〕
	共振状態	共振をこえた状態		
変位モード	<ul style="list-style-type: none"> 各コラムは群振動する傾向にある。 	<ul style="list-style-type: none"> 共振領域からはなれるに従い変位は小さくなり、かつ変位モードの折点はコラム下方に移る。 	<ul style="list-style-type: none"> 加振加速度レベルを増加させてゆくと、ブロック間衝突領域はコラム下段方向に広がってゆく。 	<ul style="list-style-type: none"> 変位モードの傾向は、オリフィスギャップが 0.5mm の時は固定支持のはり曲げ振動形に近く、そのギャップが 2mm の時は変位量が全初期ギャップより小さい所までは固定自由支持はりの振動形に近い。
	<ul style="list-style-type: none"> 支持反力はコラム全長にわたり大きい値を示す。 共振状態でコラム 8~10 段目までピークとなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 支持反力はコラム全長にわたり小さい値となる。 	100Gal → 750Gal 10 ブロック [A → A → C] 8 ブロック [A → A → C]	<ul style="list-style-type: none"> オリフィスギャップが 2mm になるとコラム最上段の支持反力が最大となり、コラム上段にゆくにつれて減少する分布となる。
支持反力	<ul style="list-style-type: none"> 支持反力はコラム全長にわたり大きい値を示す。 共振状態でコラム 8~10 段目までピークとなる。 	<ul style="list-style-type: none"> 支持反力はコラム全長にわたり小さい値となる。 	100Gal → 750Gal 10 ブロック [C → A → C] 8 ブロック [A → B → C]	<ul style="list-style-type: none"> オリフィスギャップが 2mm になるとコラム最上段の支持反力が最大となり、コラム上段にゆくにつれて減少する分布となる。
	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、炉心周辺コラムで(a)の形、炉心中心コラムで(b)の形を示す傾向にある。 	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、炉心の位置に関係なく(b)の形を示す傾向にある。 	100Gal → 750Gal 10 ブロック [C → A → C] 8 ブロック [A → B → C]	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、オリフィスギャップ幅の影響をほとんど受けていない。
ダウエル力	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、炉心周辺コラムで(a)の形、炉心中心コラムで(b)の形を示す傾向にある。 	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、炉心の位置に関係なく(b)の形を示す傾向にある。 	100Gal → 750Gal 10 ブロック [B → A → C] 8 ブロック [B → B → D]	<ul style="list-style-type: none"> オリフィスギャップが 2mm になるとコラム最上段の支持反力が最大となり、コラム上段にゆくにつれて減少する分布となる。
	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、炉心の位置に関係なく(b)の形を示す傾向にある。 	<ul style="list-style-type: none"> ダウエル力分布は、炉心の位置に関係なく(b)の形を示す傾向にある。 	100Gal → 750Gal 10 ブロック [B → A → C] 8 ブロック [B → B → D]	<ul style="list-style-type: none"> オリフィスギャップが 2mm になるとコラム最上段の支持反力が最大となり、コラム上段にゆくにつれて減少する分布となる。

(注) A : 詳細モデル解析によく一致している。
 B : 詳細モデル解析にはば一致している。
 C : 詳細モデル解析と一致しない箇所がある。
 D : 詳細モデル解析とはほとんど一致していない。

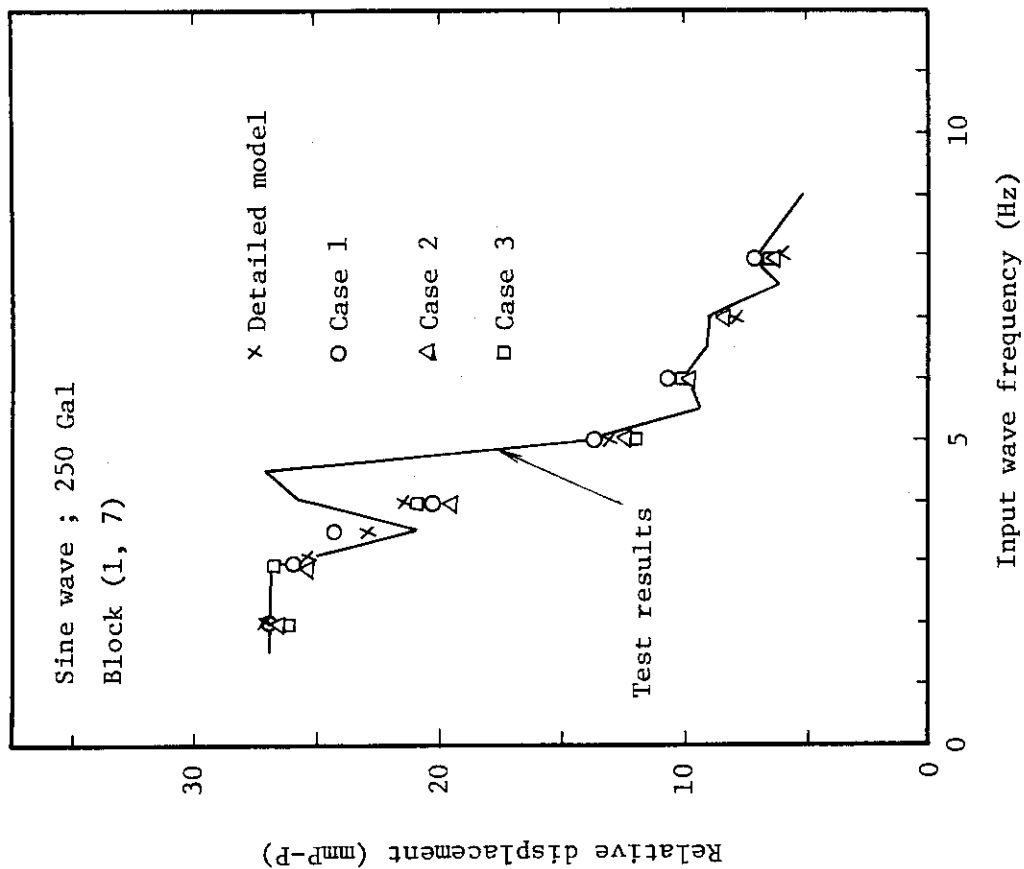


Fig. 4.2 Effect of spring constants on block relative displacement

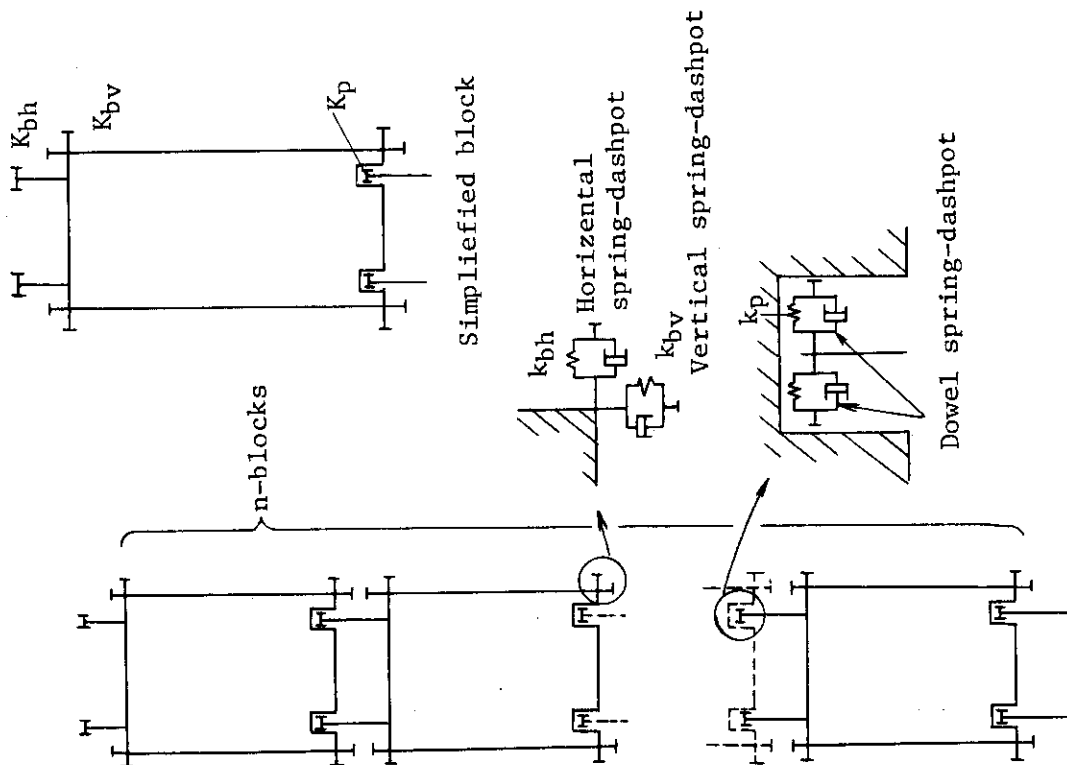


Fig. 4.1 Impact models of fuel block

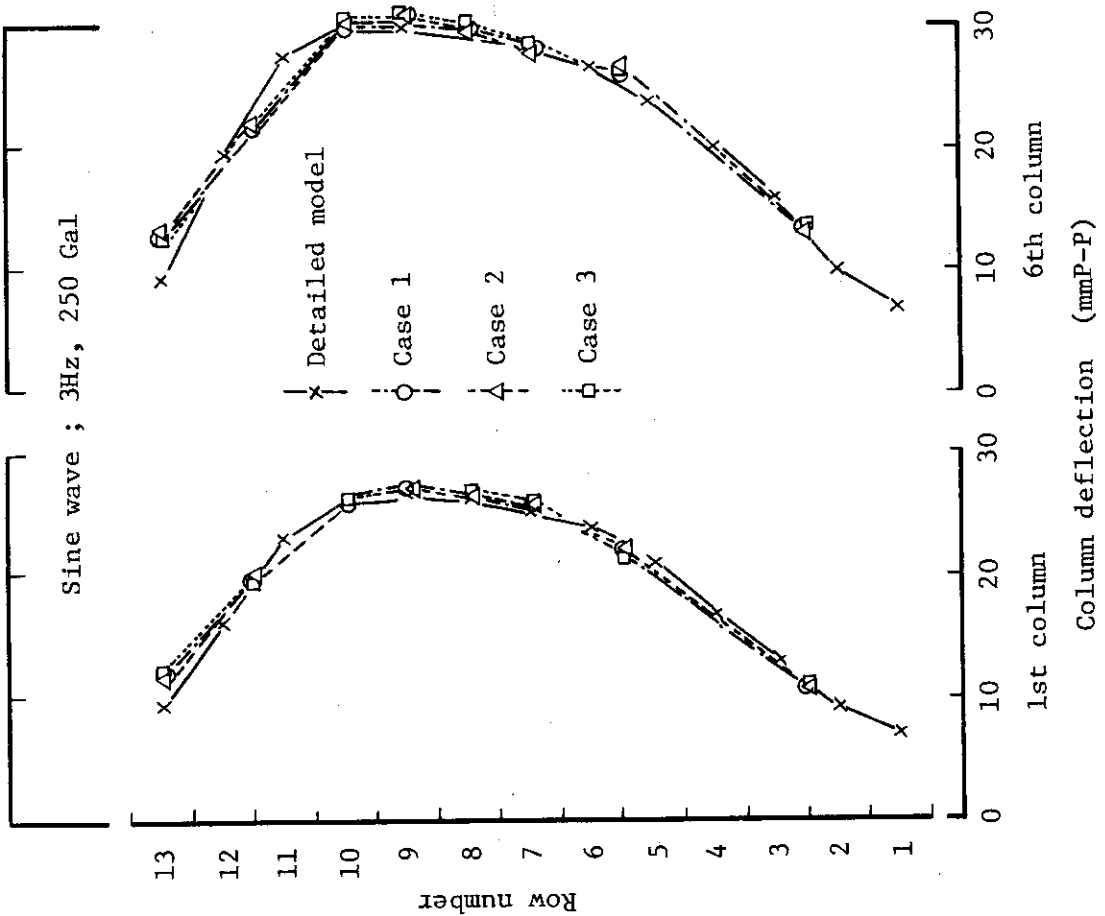
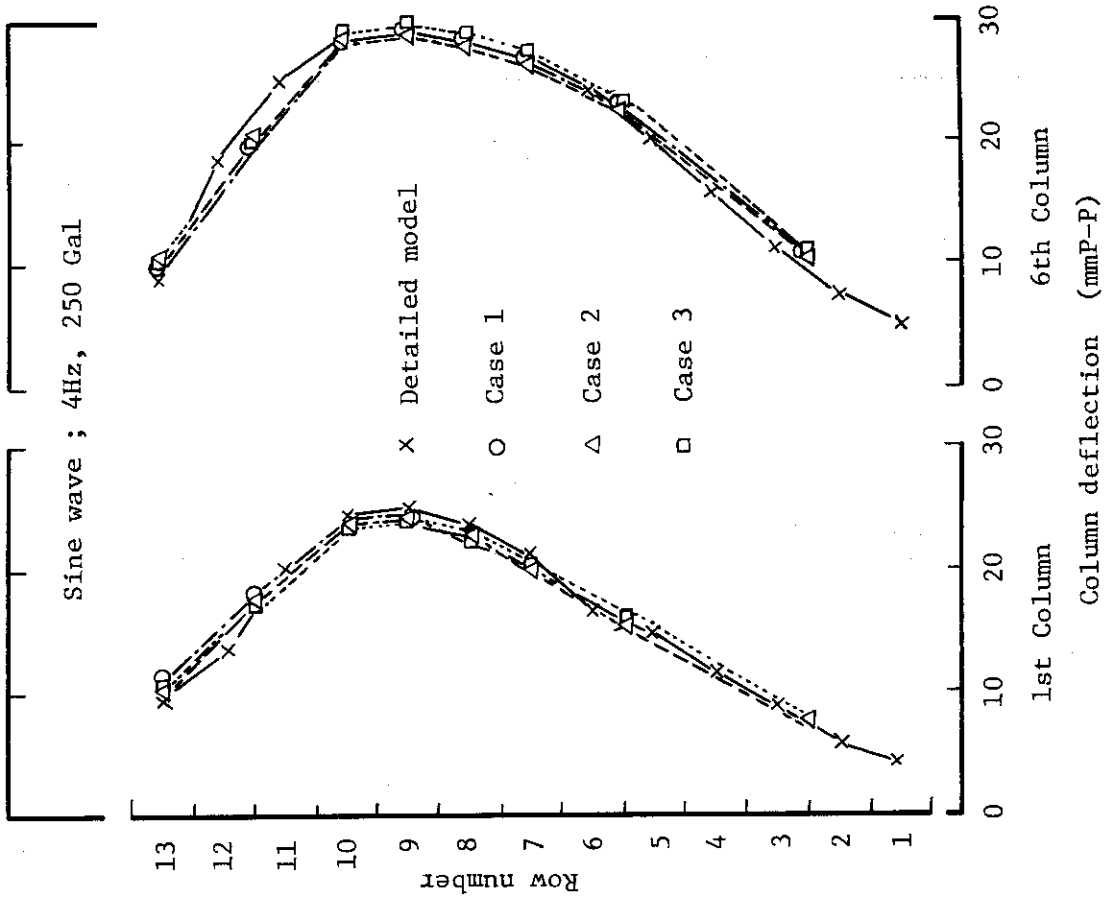


Fig. 4.3(2)

Fig. 4.3(1) Effect of spring constants on column deflection mode

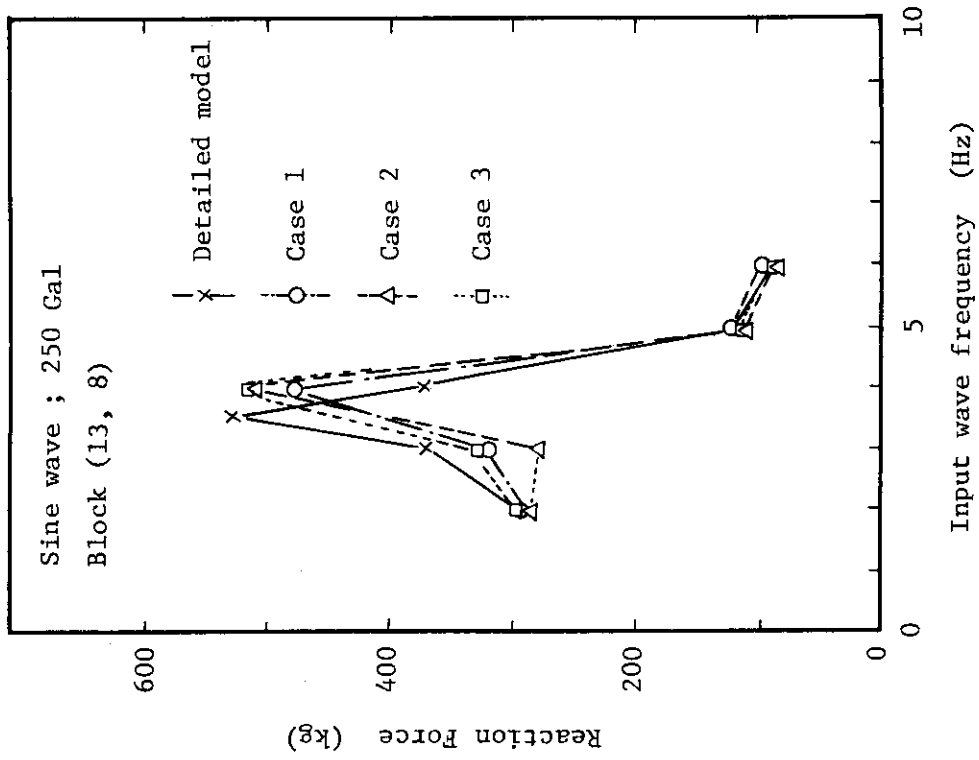


Fig. 4.5 Effect of spring constants on reaction forces

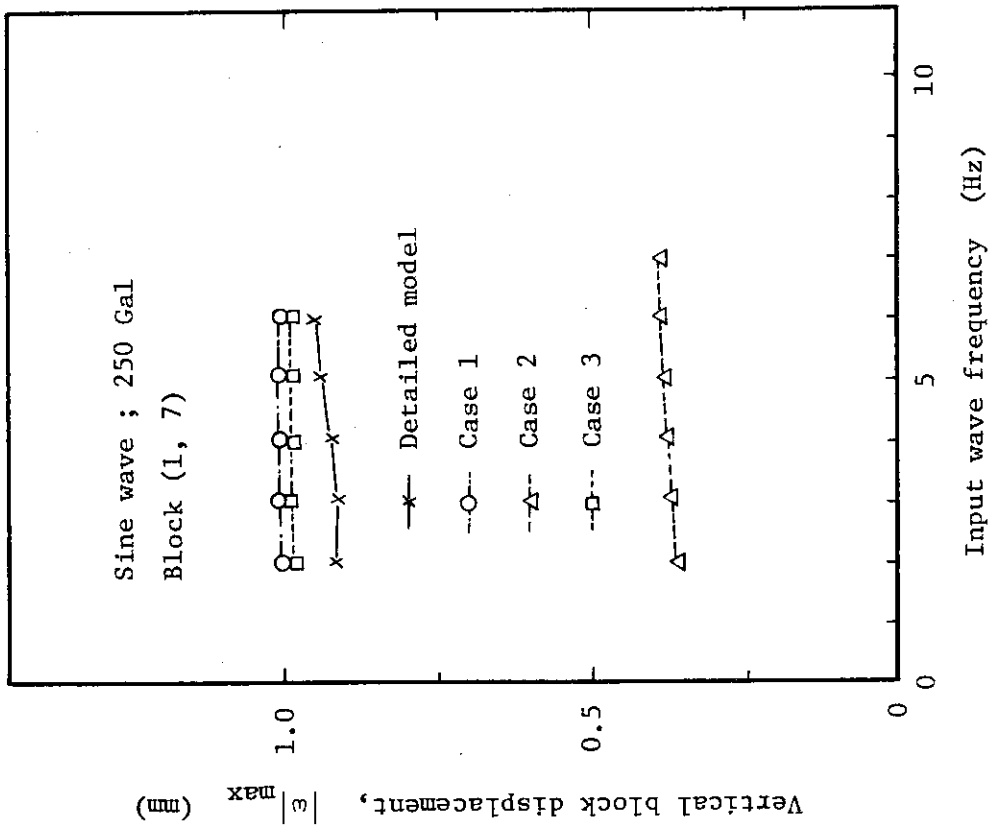


Fig. 4.4 Effect of spring constants on vertical block displacement

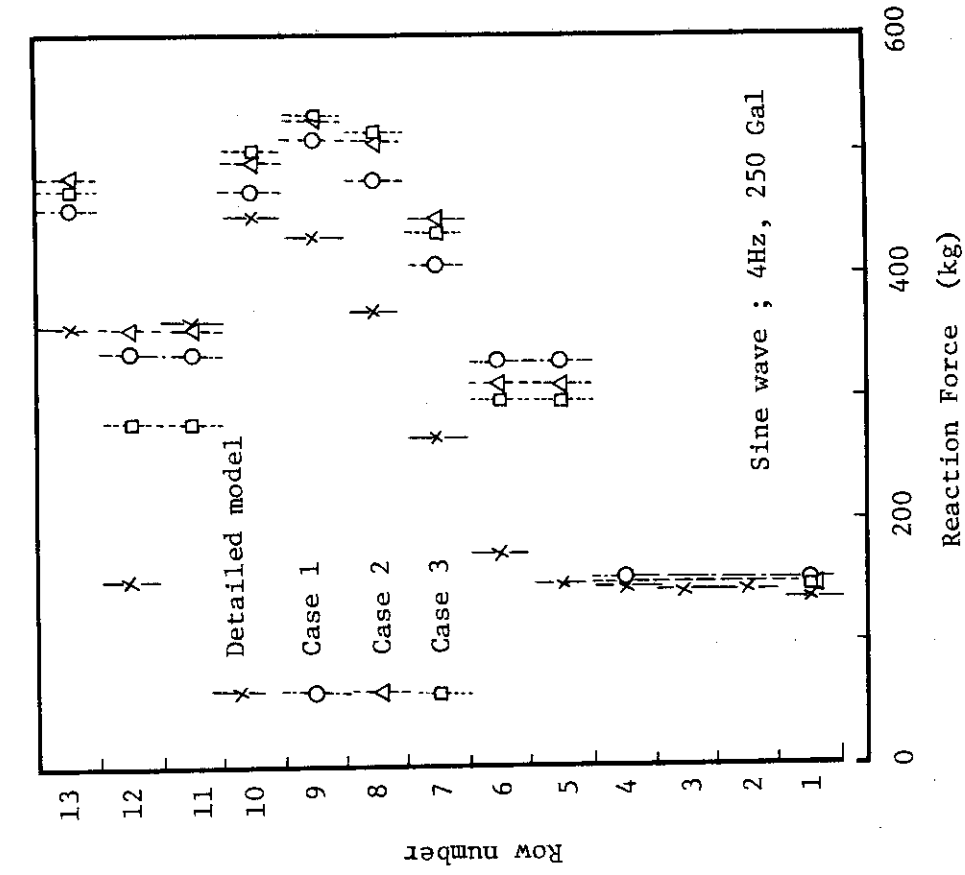


Fig. 4.6(2)

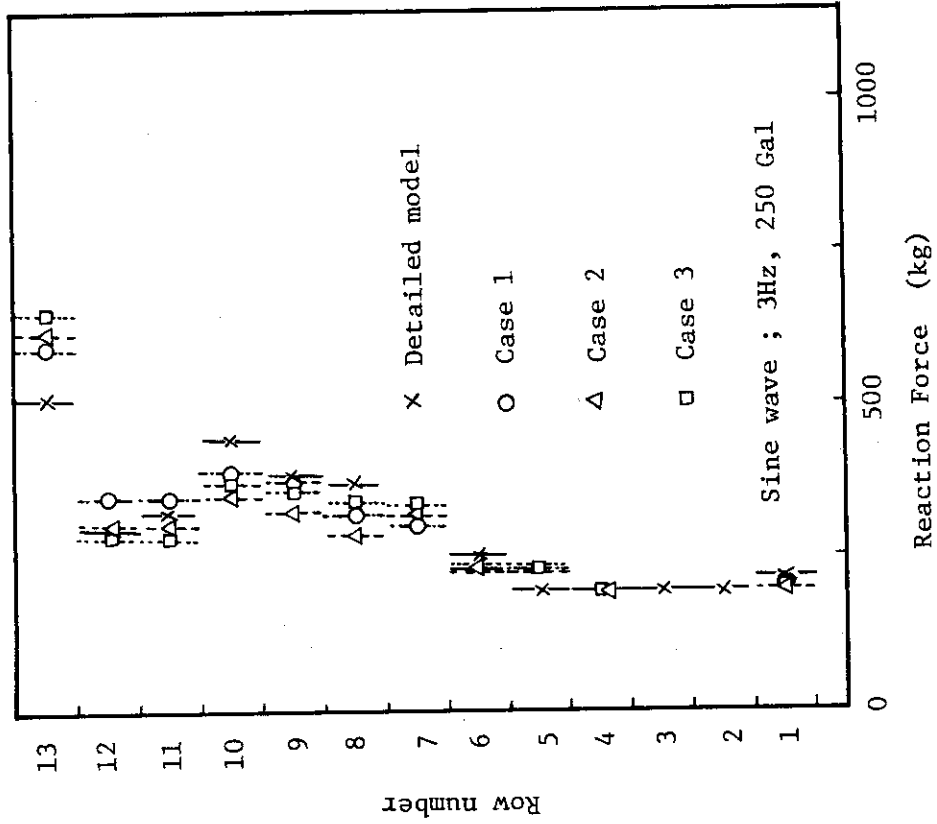


Fig. 4.6(1) Effect of spring constants on reaction force distribution

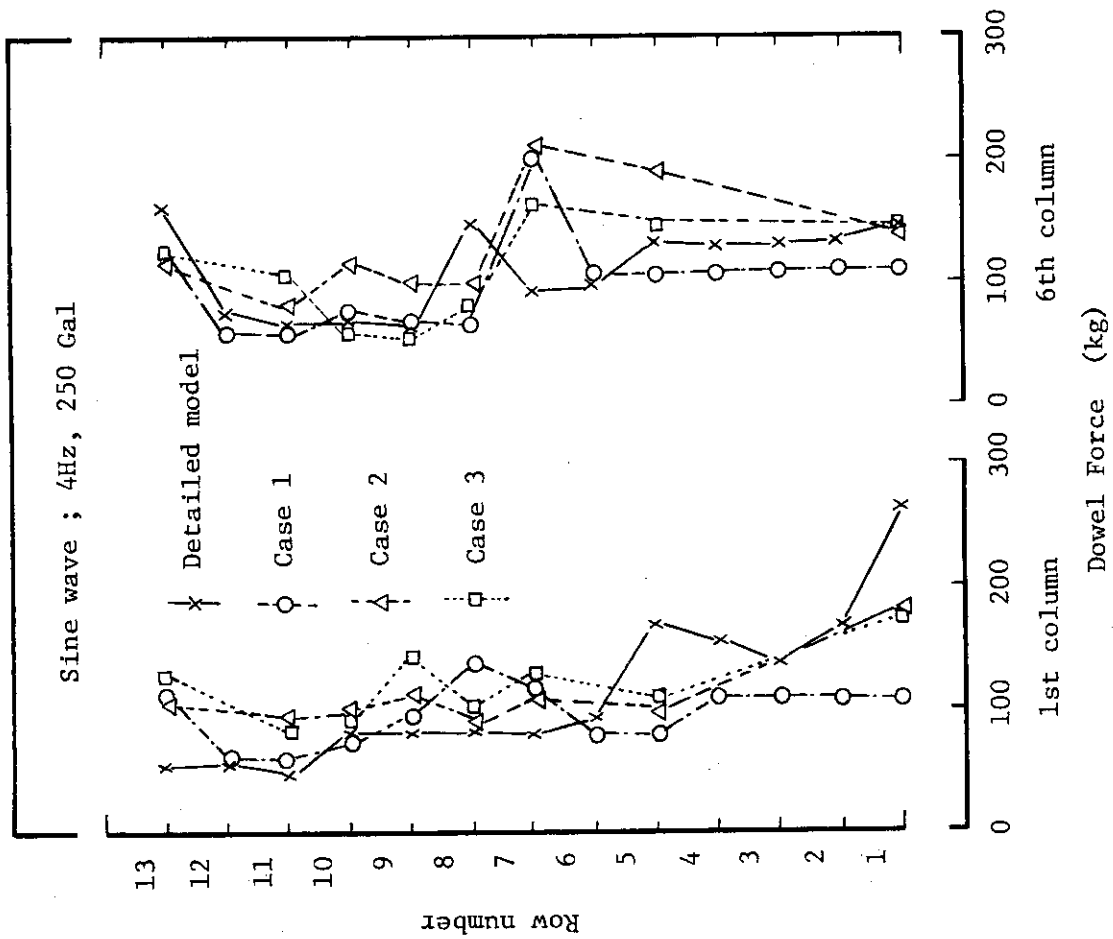


Fig. 4.7 Effect of spring constants on dowel force distribution

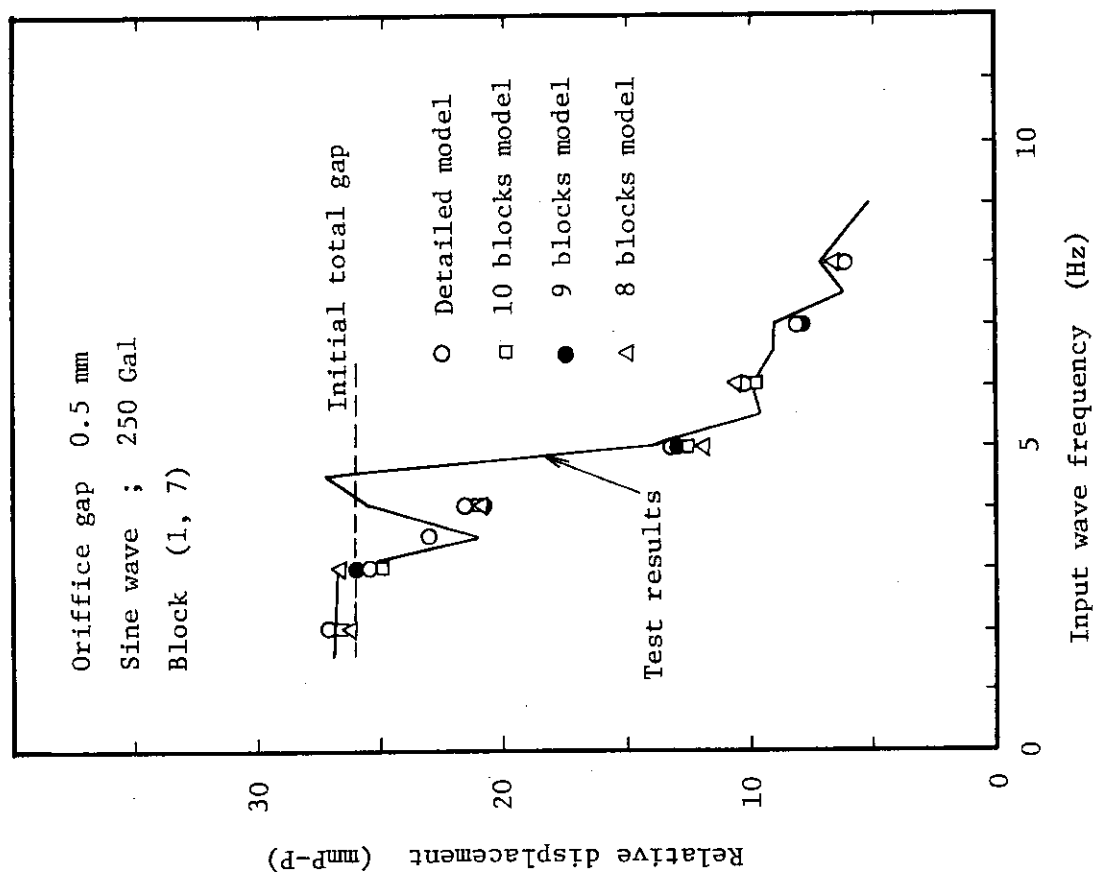
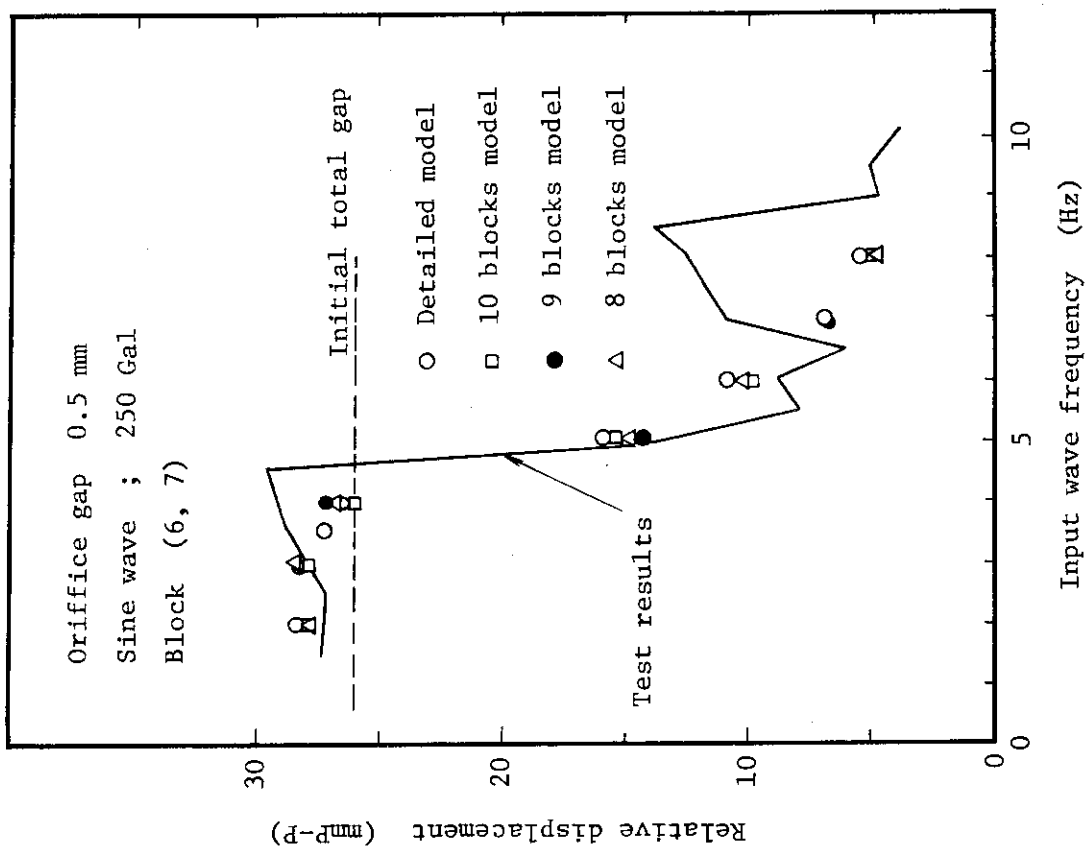


Fig. 4.8(2)

Fig. 4.8(1) Comparison between detailed and simplified model analysis on block relative displacement

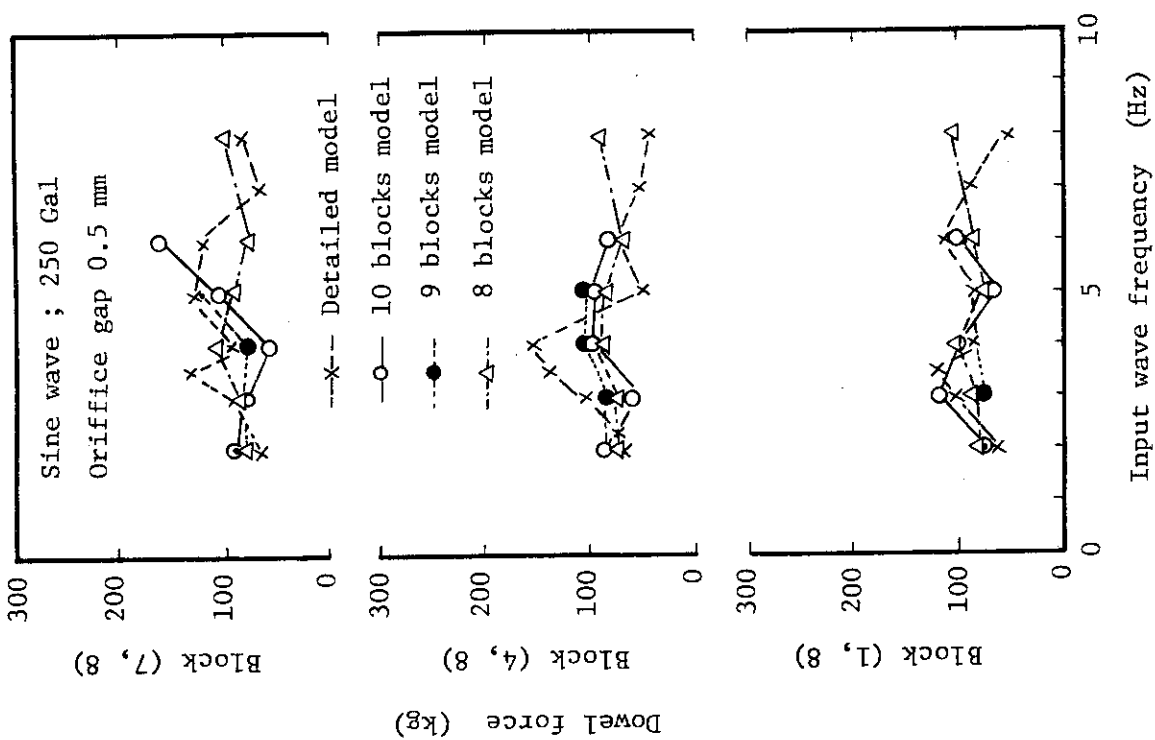


Fig. 4.10 Comparison between detailed and simplified model analysis on frequency response of dowel forces

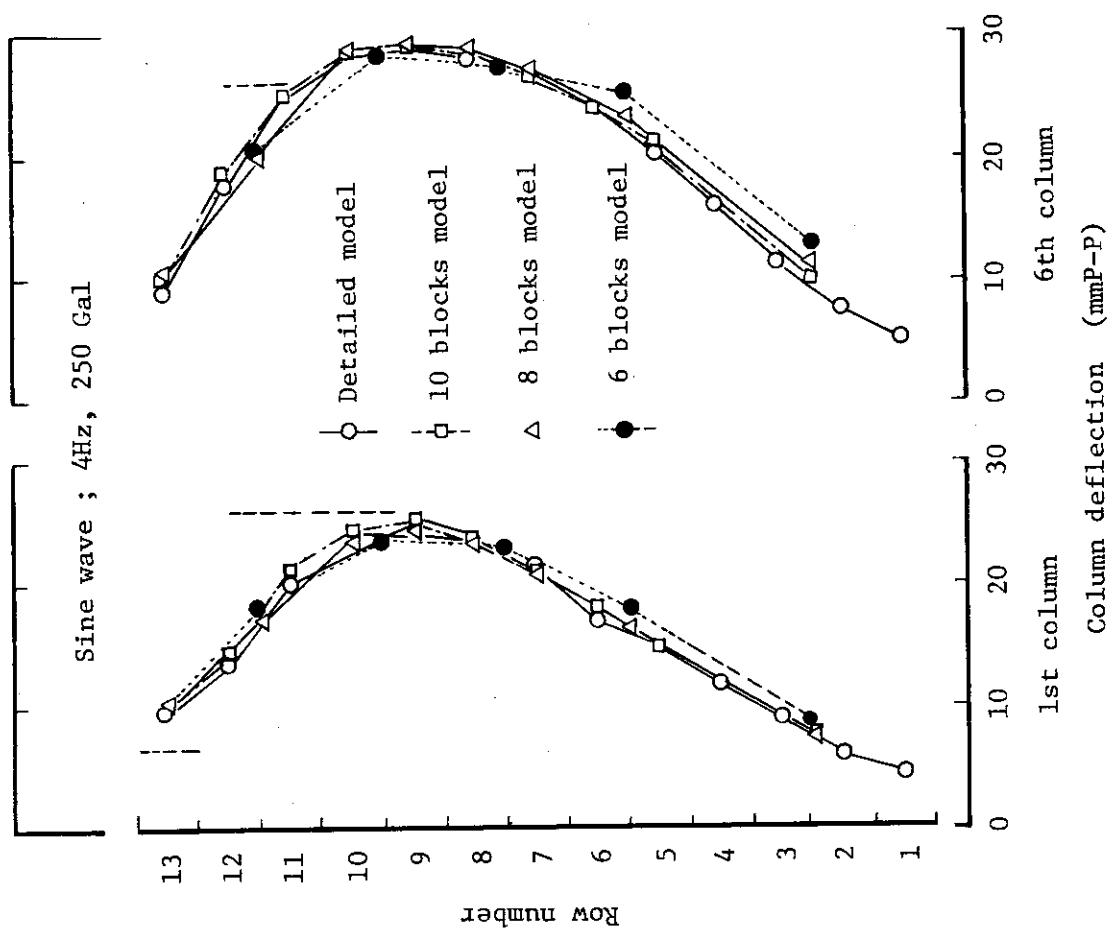


Fig. 4.9 Comparison between detailed and simplified model analysis on column deflection mode

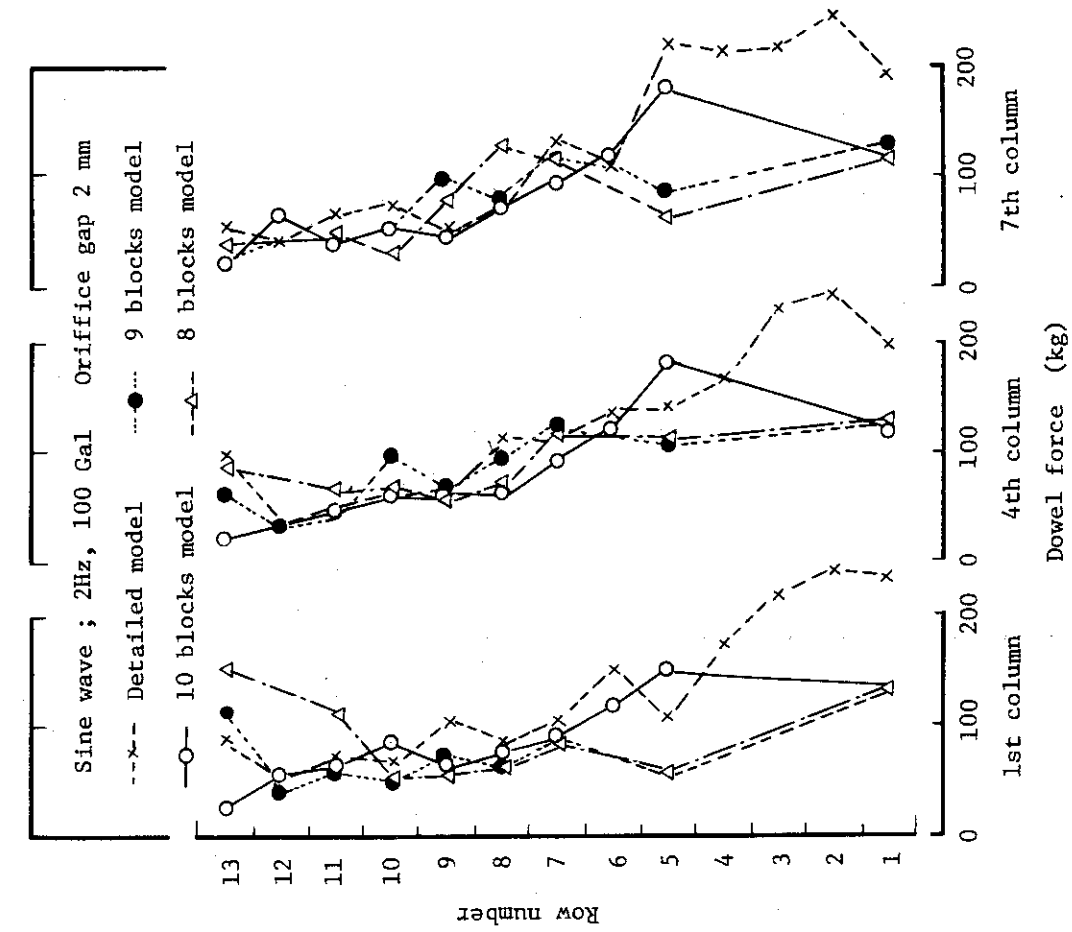


Fig. 4.11(2)

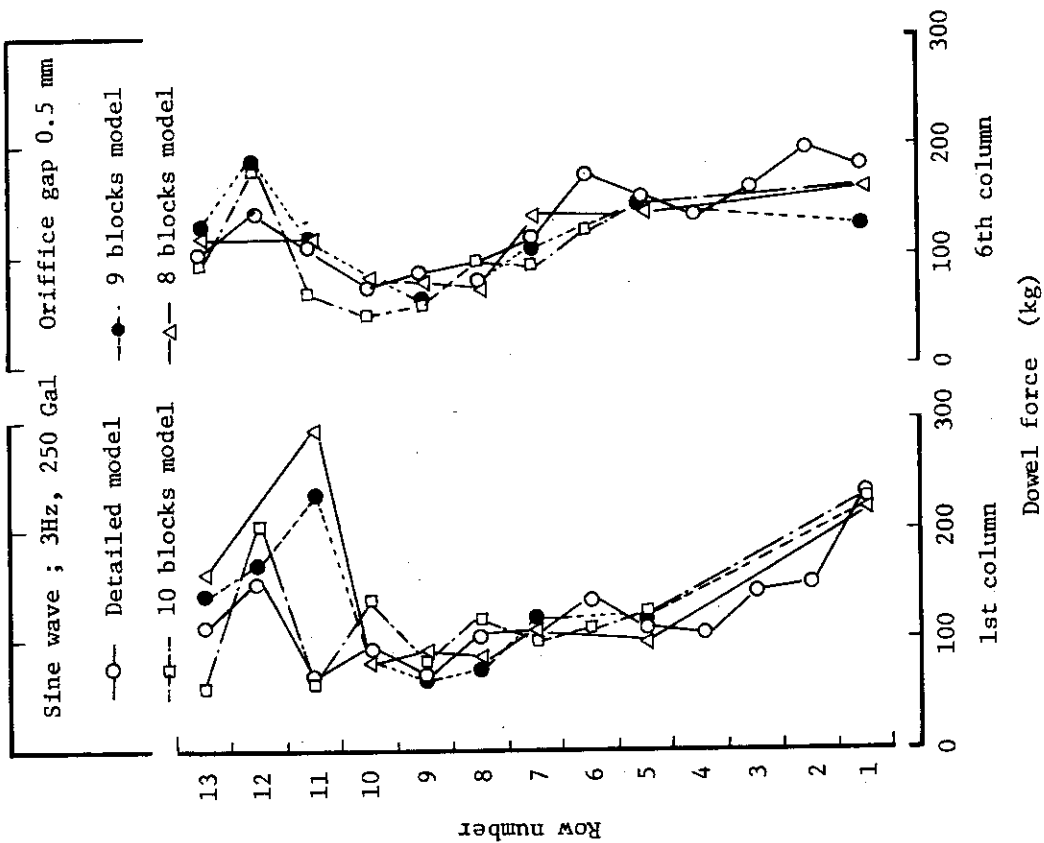


Fig. 4.11(1) Comparison between detailed and simplified model analysis on dowel force distribution in a column

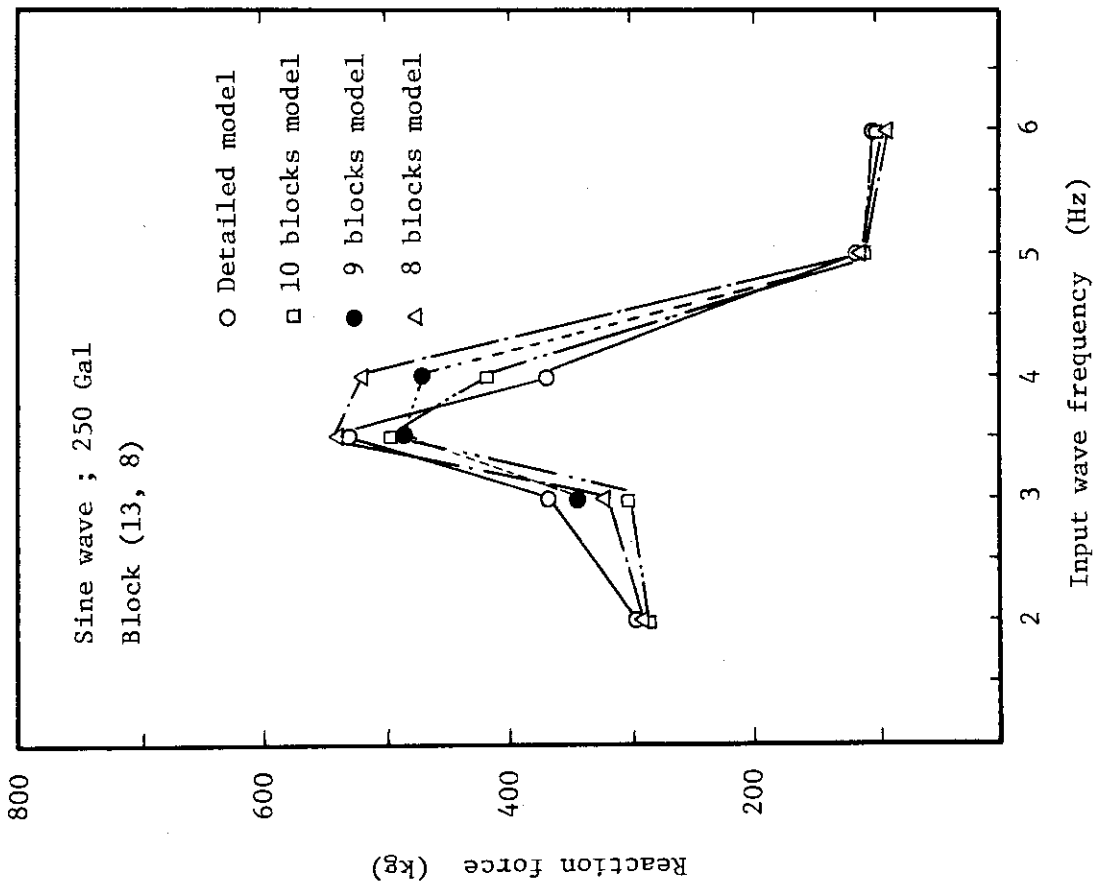


Fig. 4.12 Comparison between detailed and simplified model analysis on reaction forces

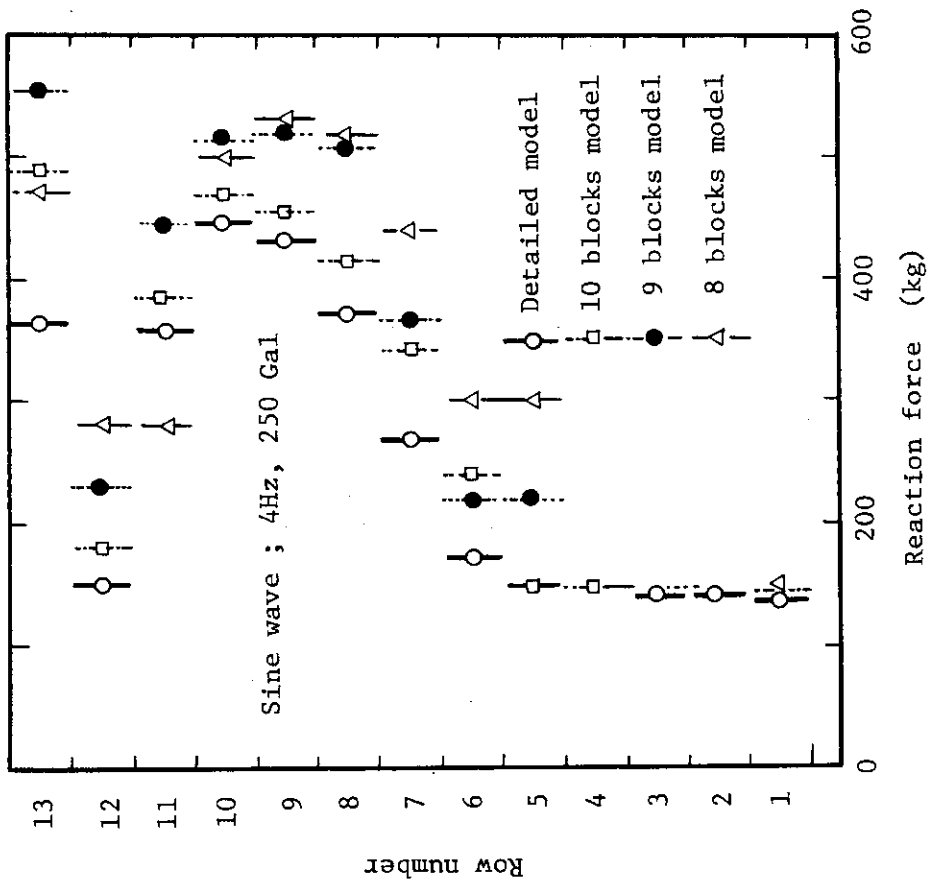
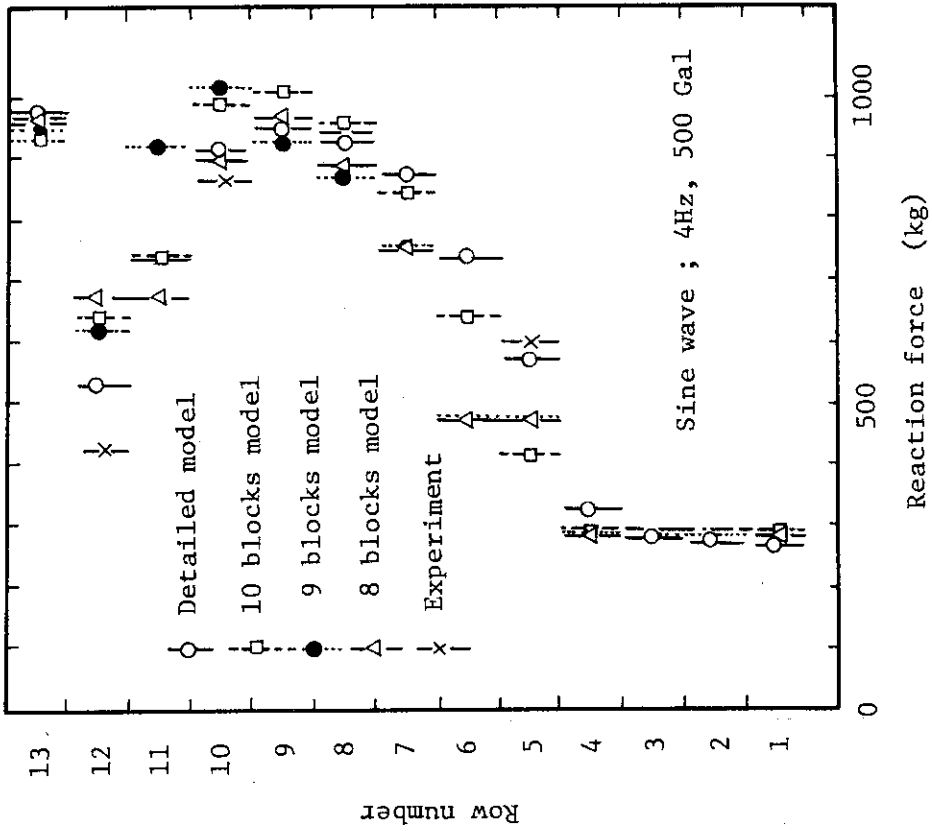


Fig. 4.13(2)

Fig. 4.13(1) Distribution of reaction forces in a column

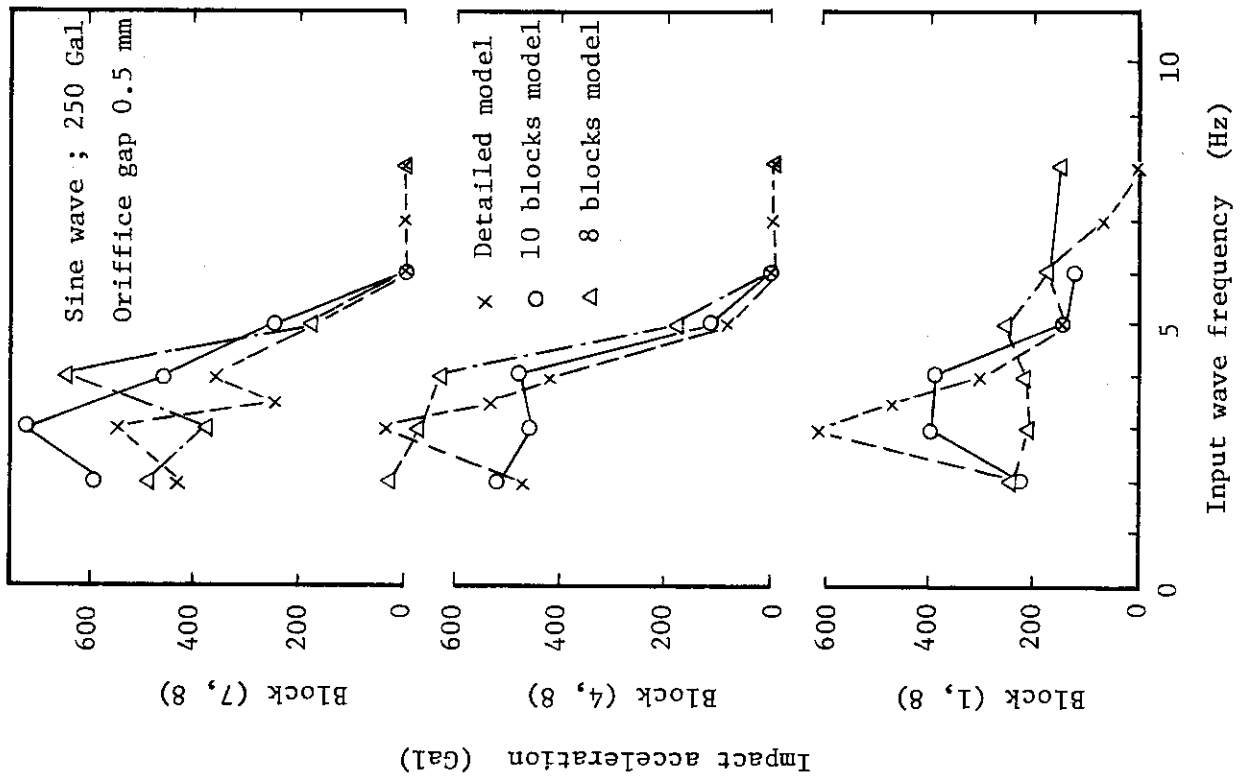


Fig. 4.14(2)

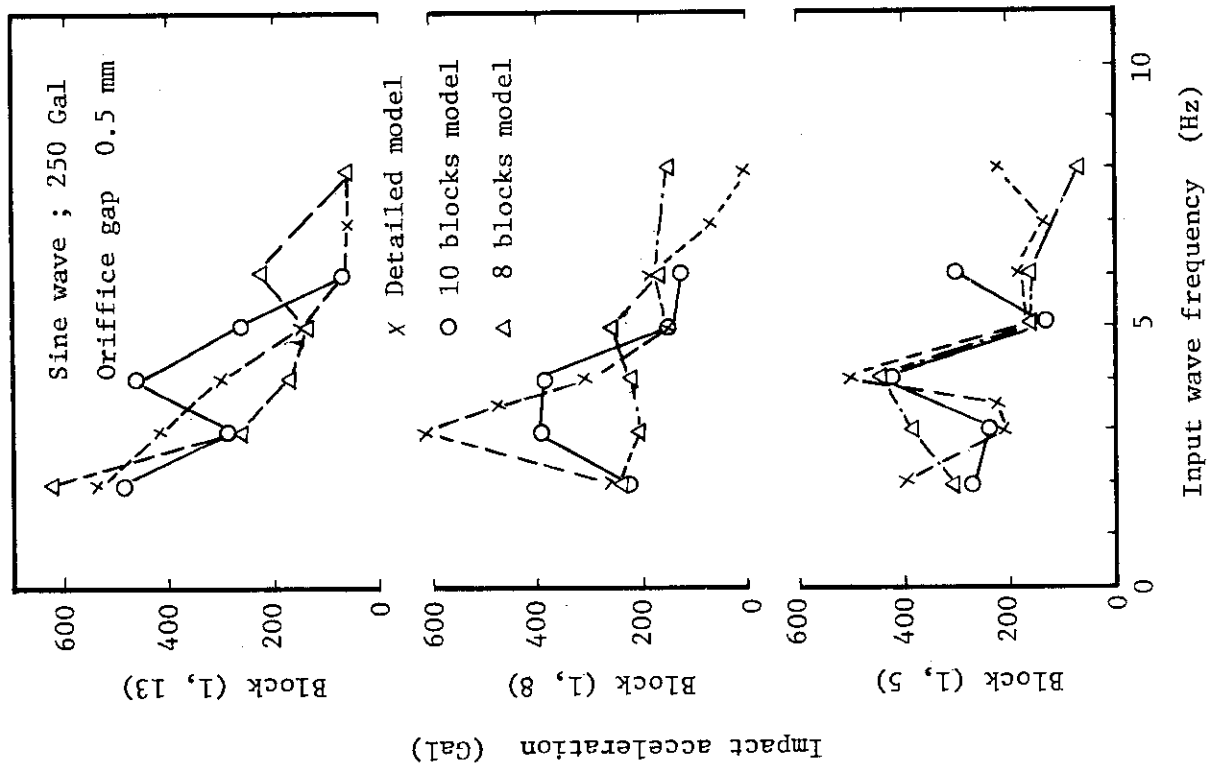


Fig. 4.14(1) Frequency characteristics of impact acceleration

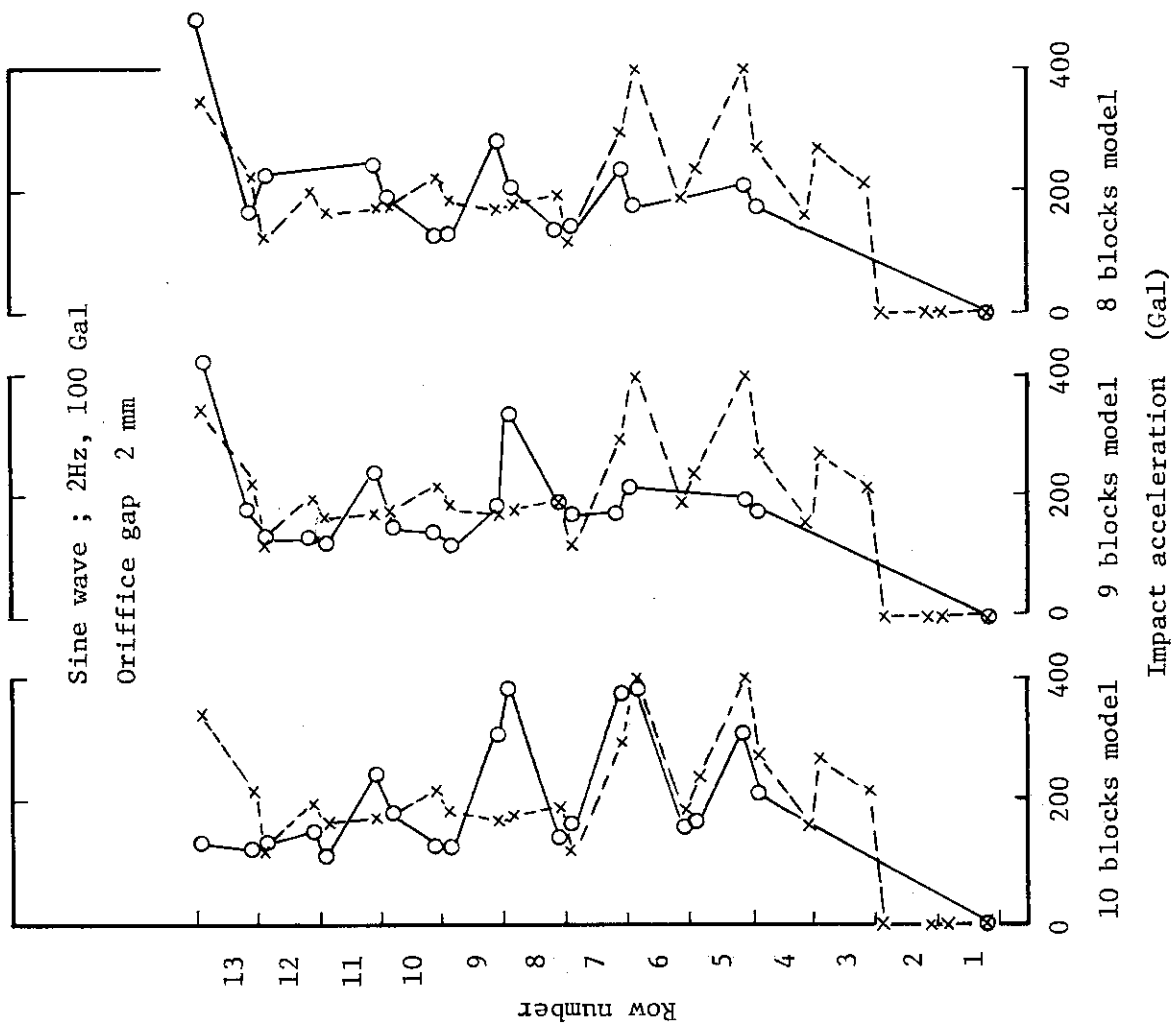


Fig. 4.15 Distribution of impact acceleration in a column

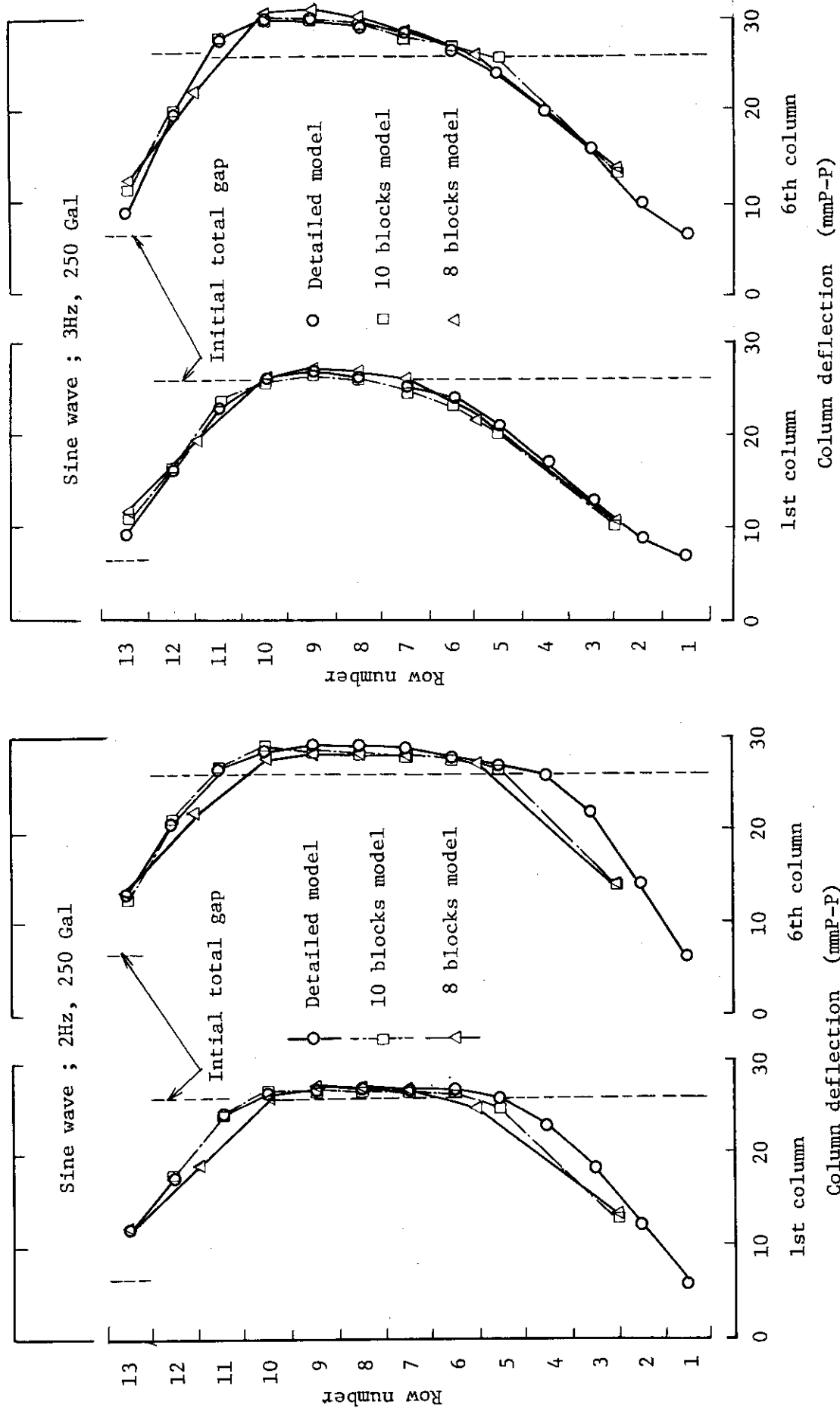


Fig. 4.16(1)

Fig. 4.16(2) Deflection mode along column

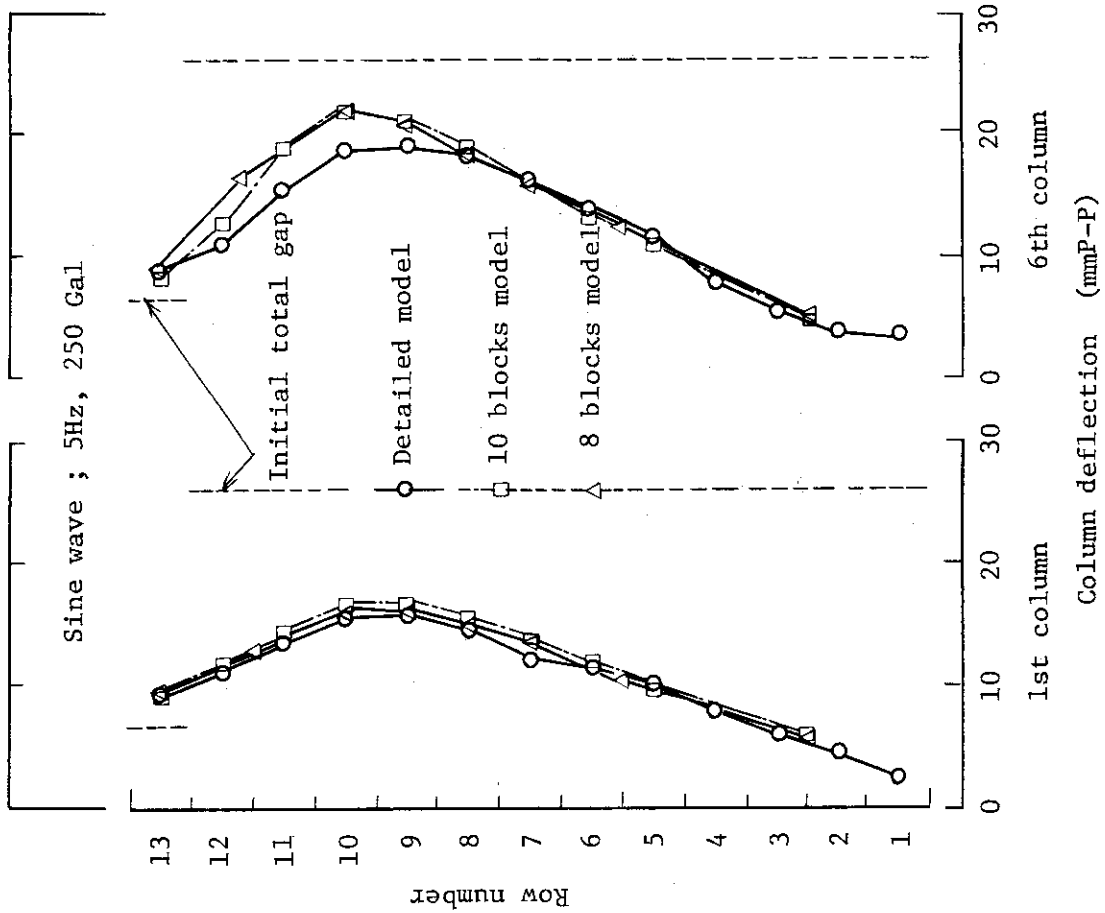


Fig. 4.16(4)

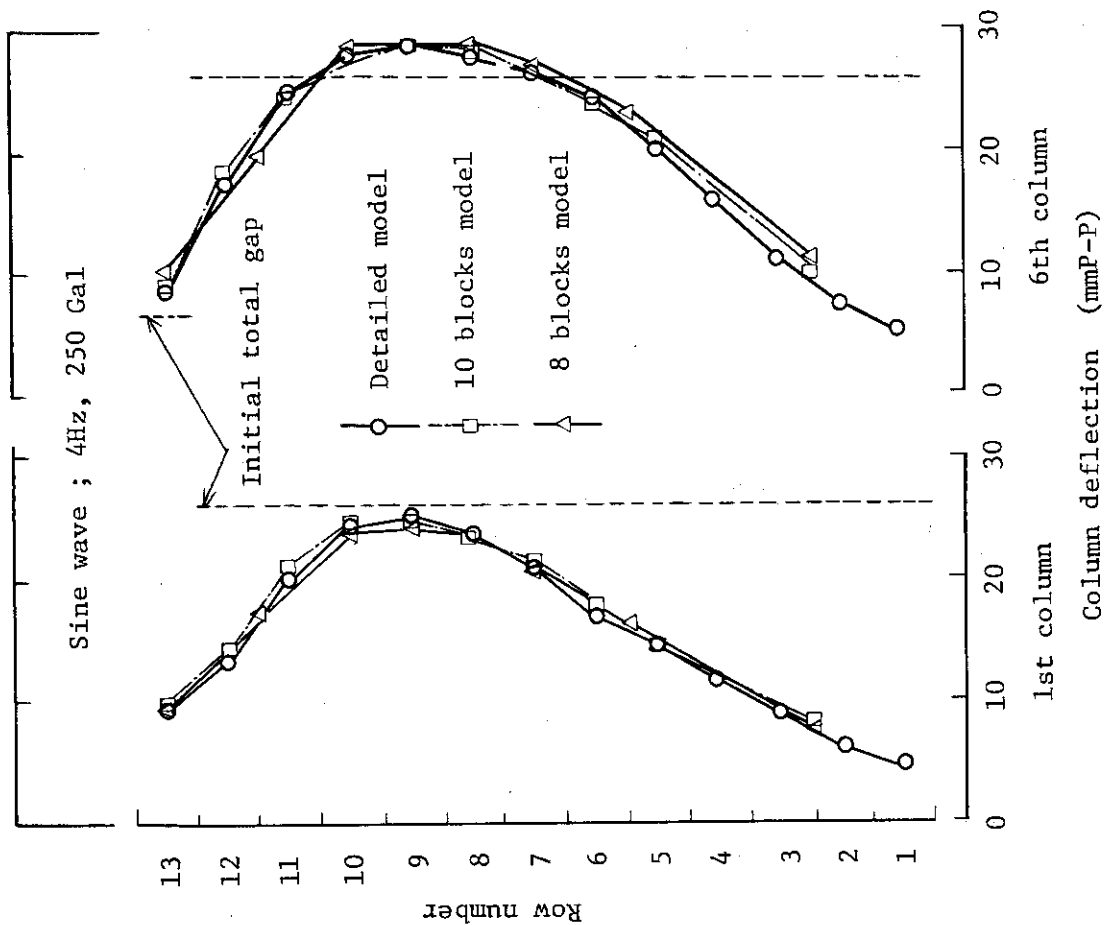


Fig. 4.16(3)

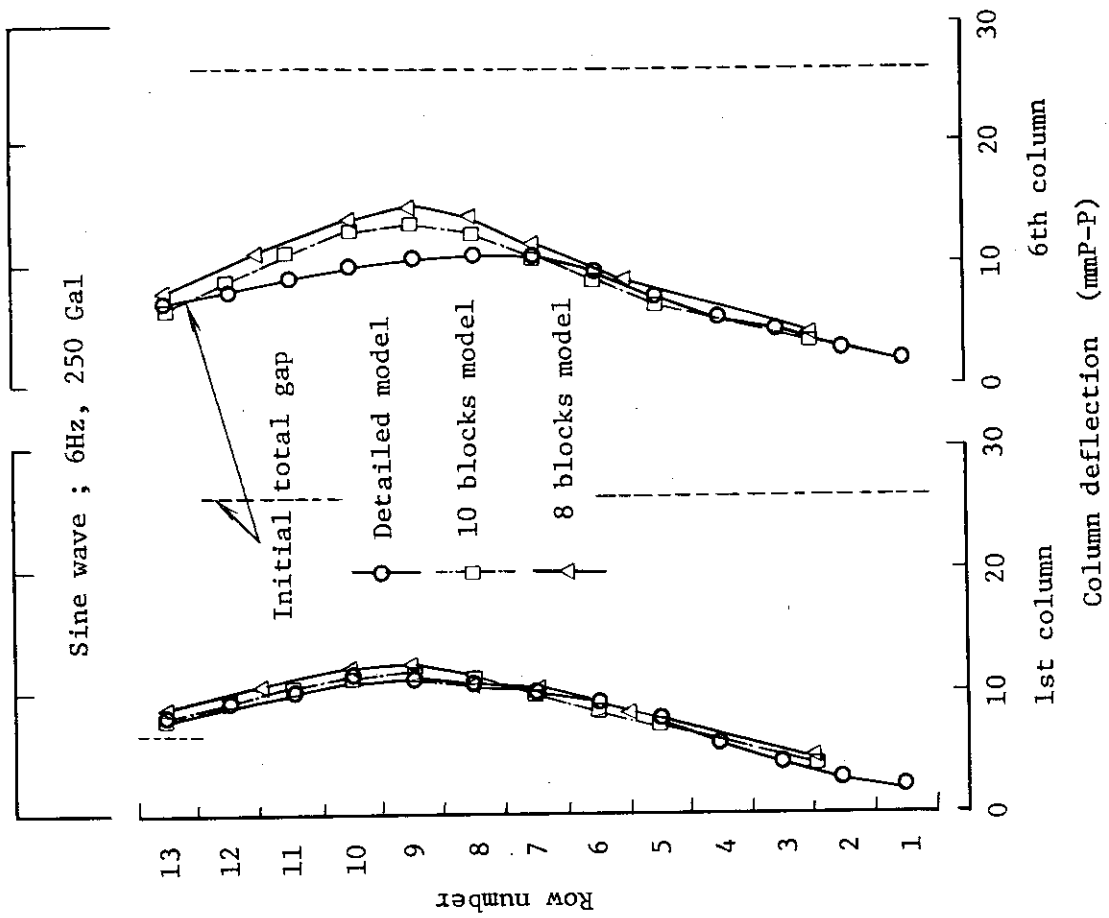


Fig. 4.16(5)

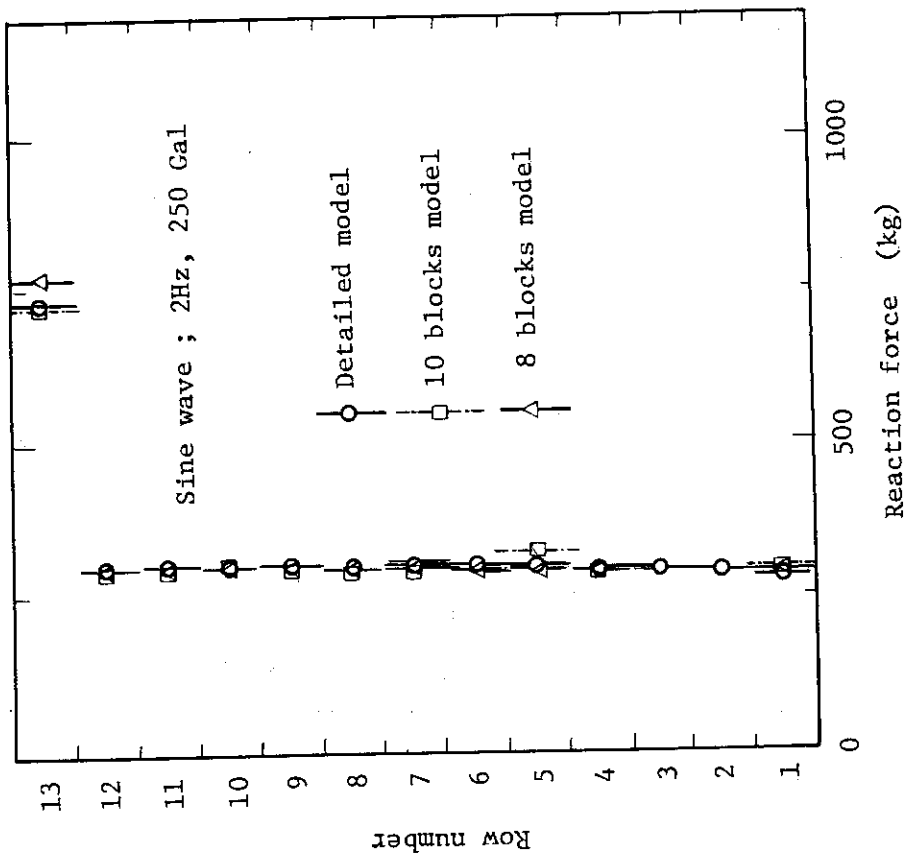
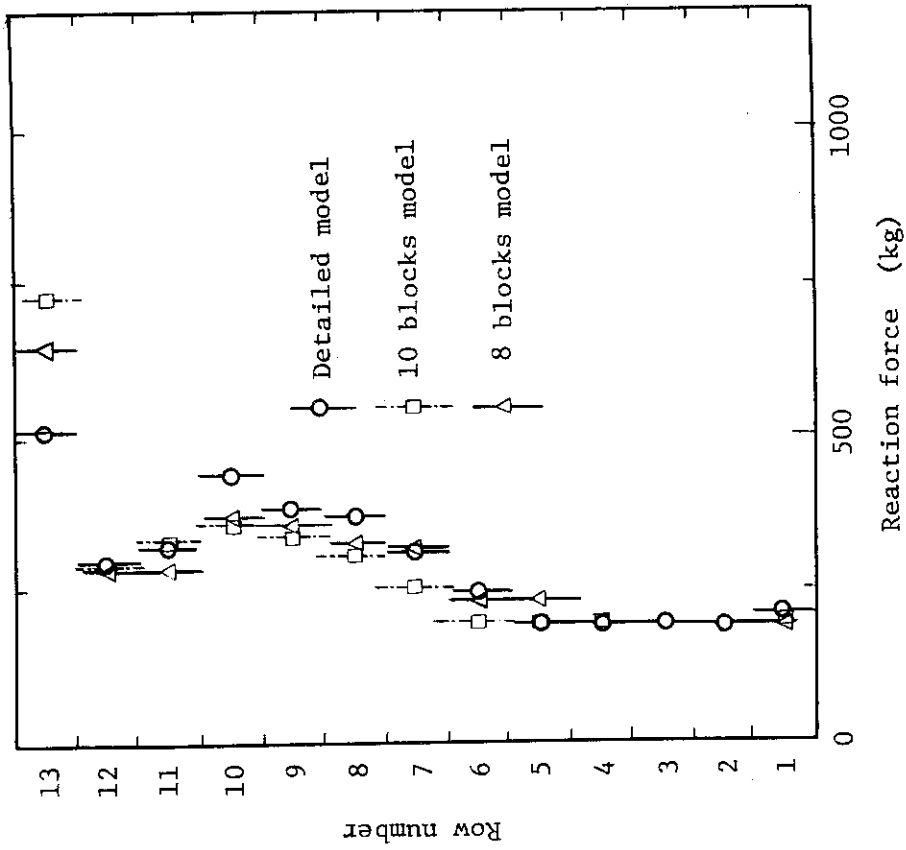


Fig. 4.17(2)

Fig. 4.17(1) Distribution of reaction forces in a column

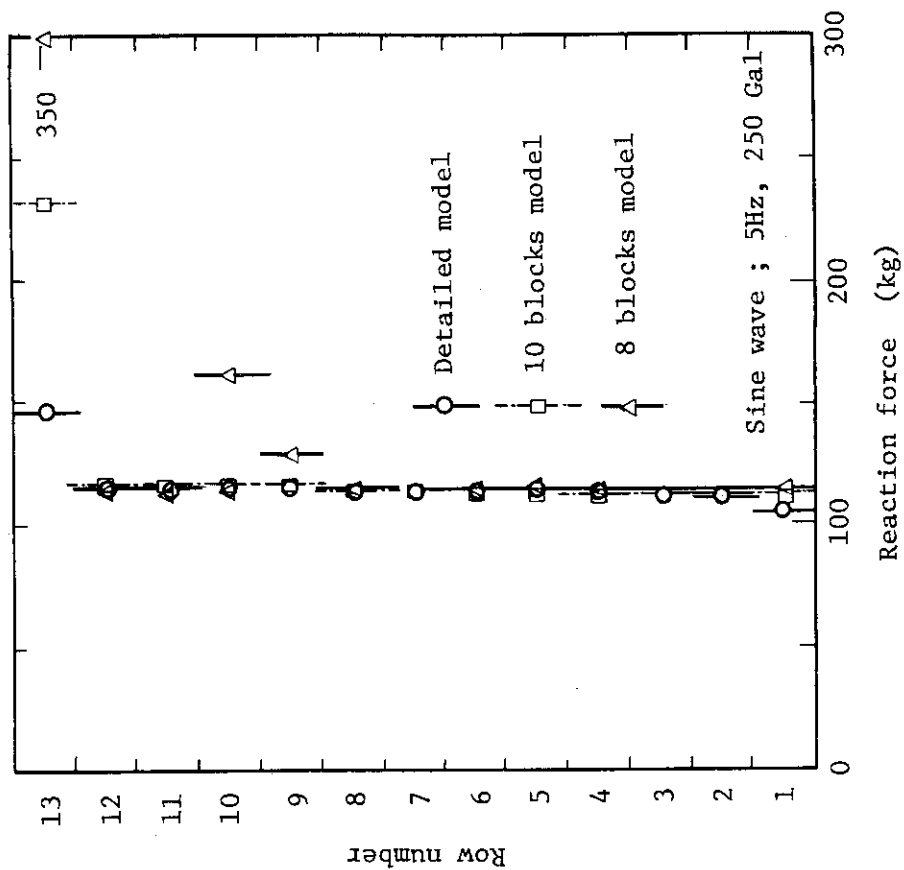


Fig. 4.17(4)

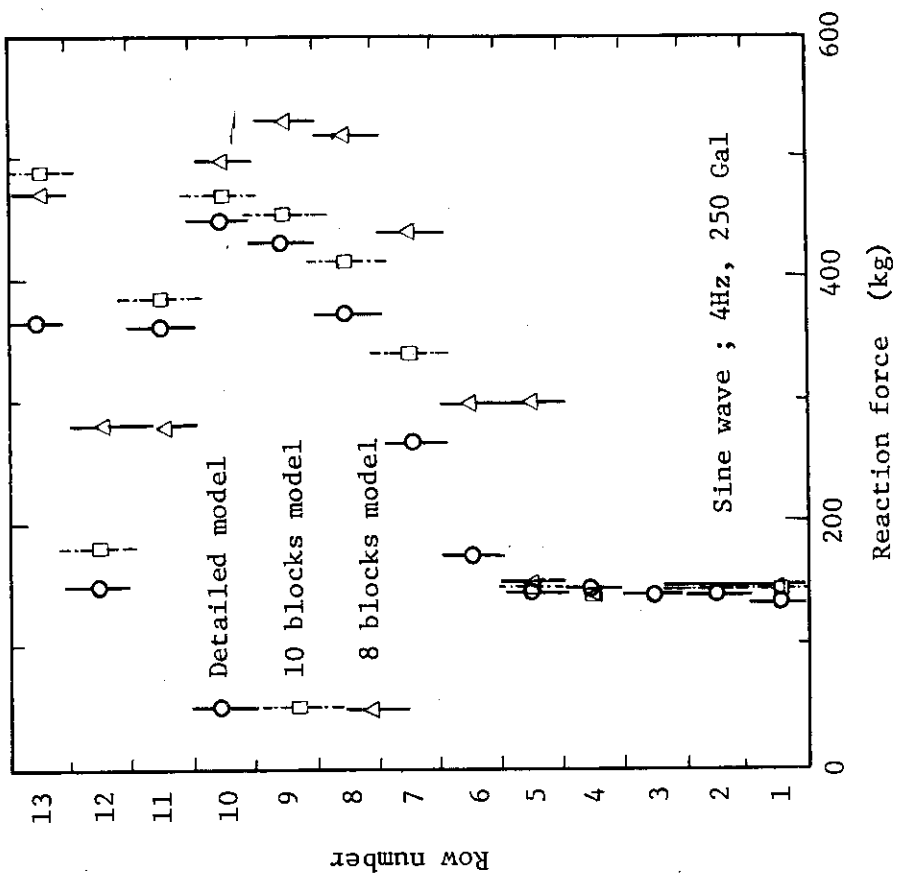


Fig. 4.17(3)

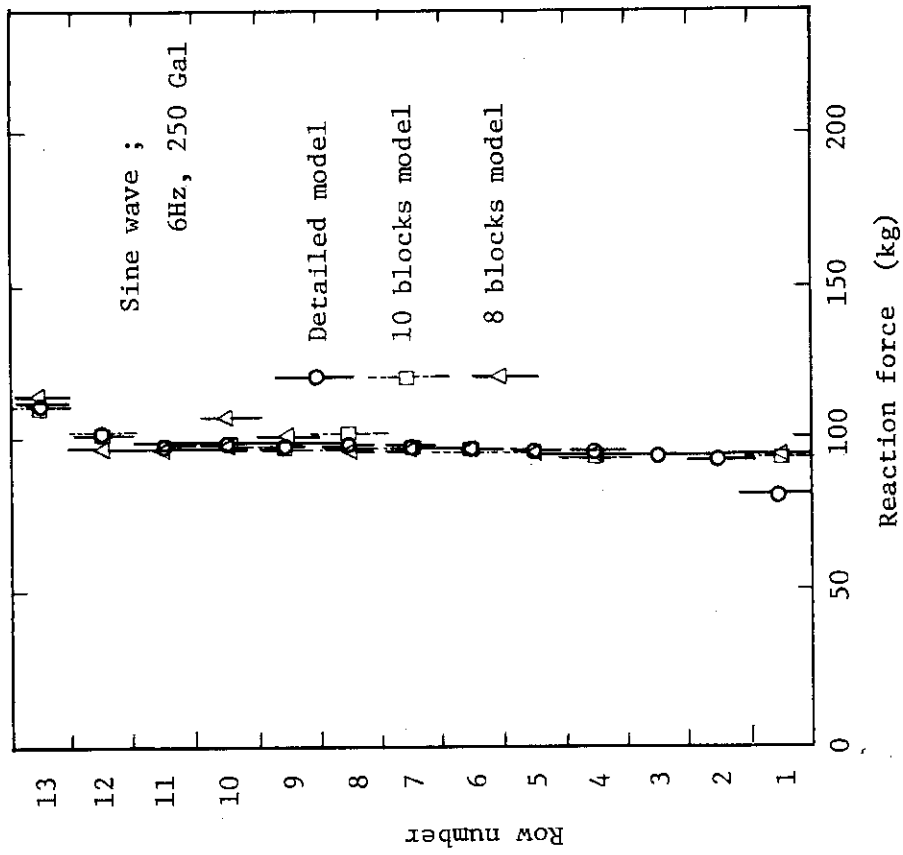


Fig. 4.17(5)

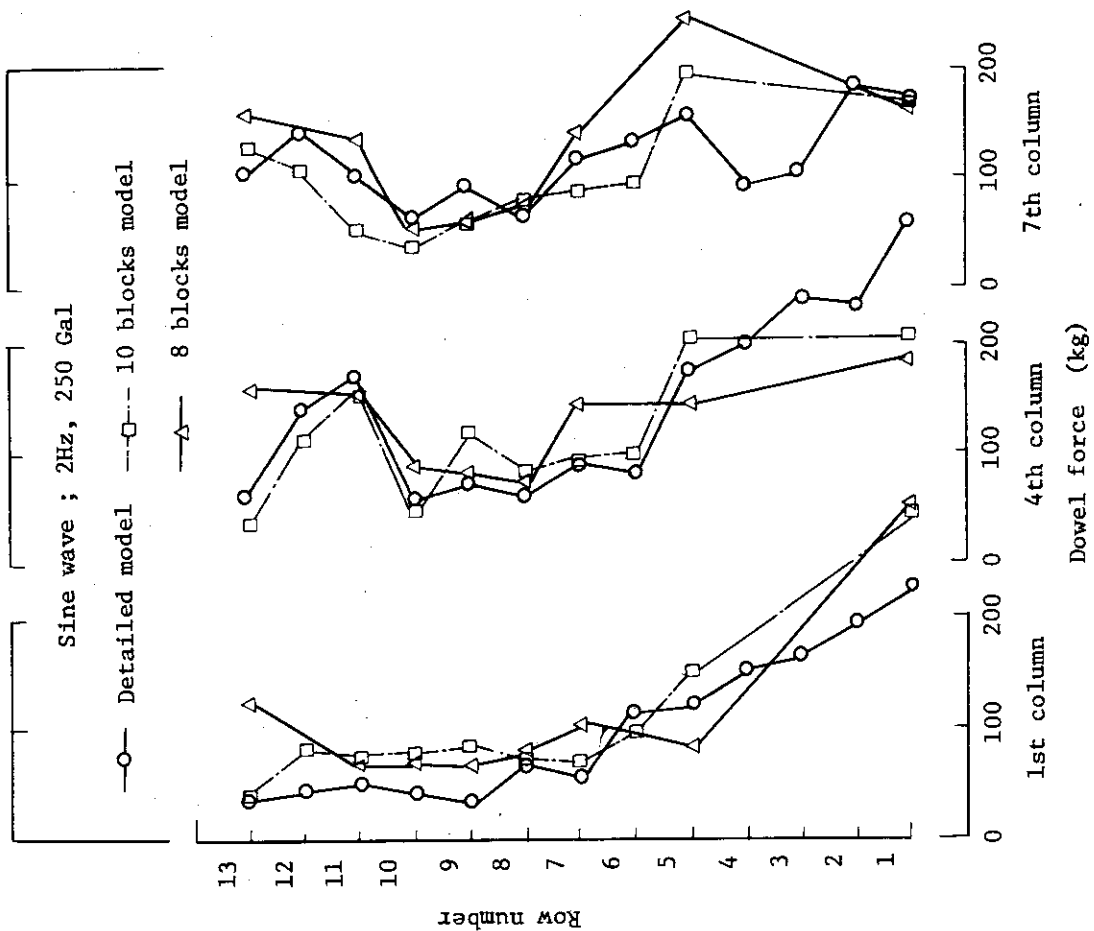
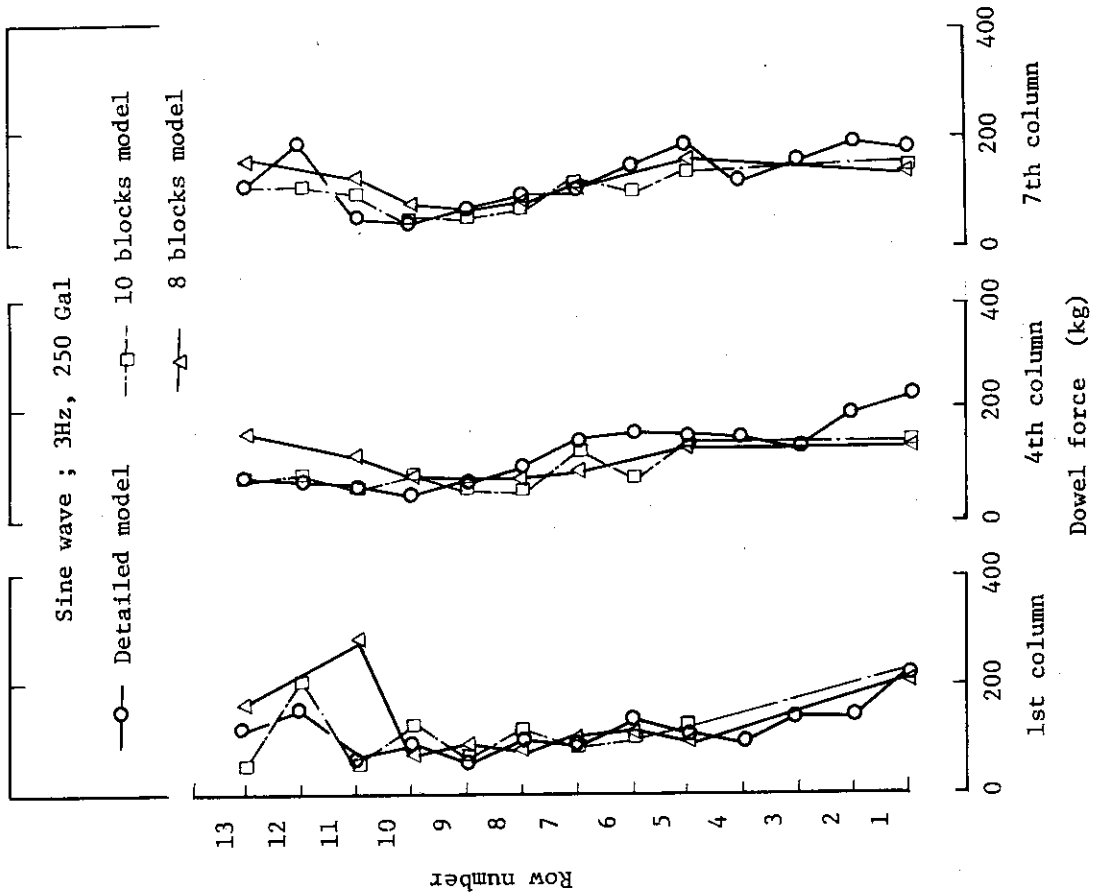


Fig. 4.18(2)

Fig. 4.18(1) Distribution of dowel forces along column

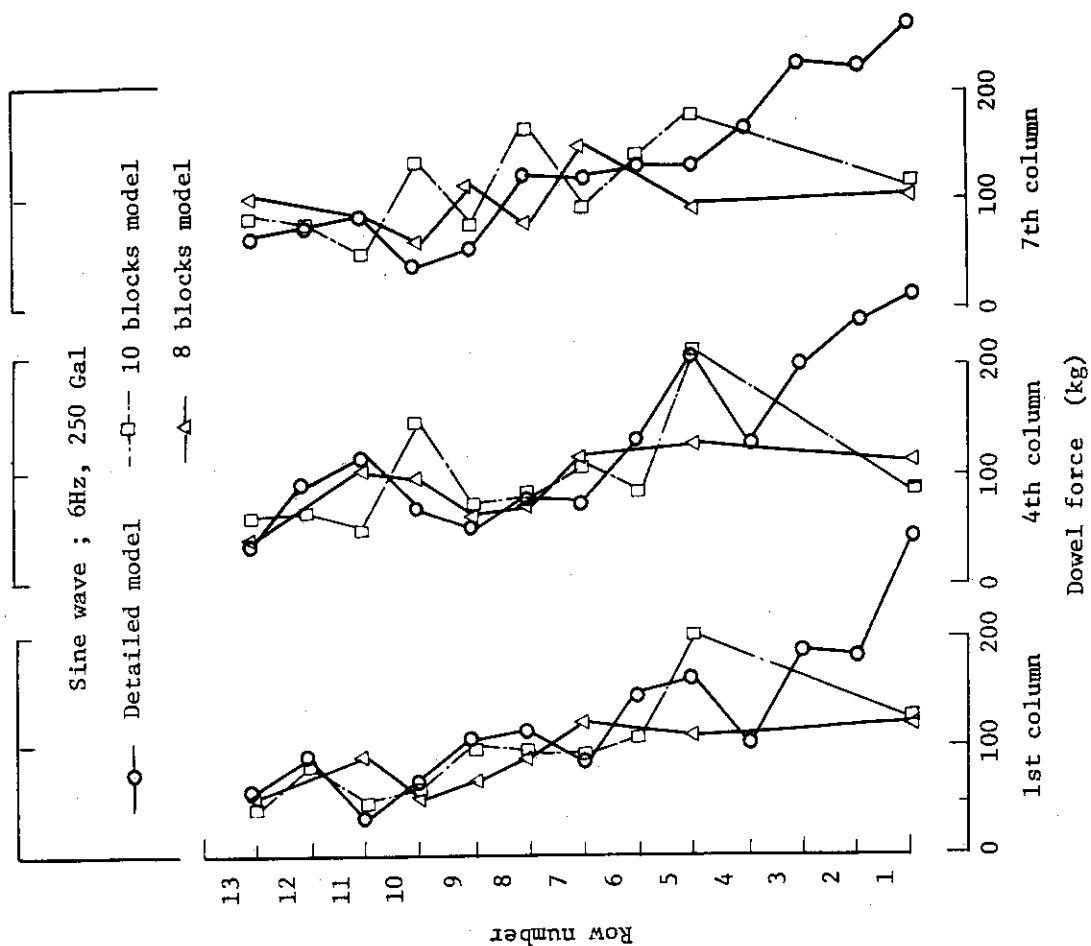


Fig. 4.18(4)

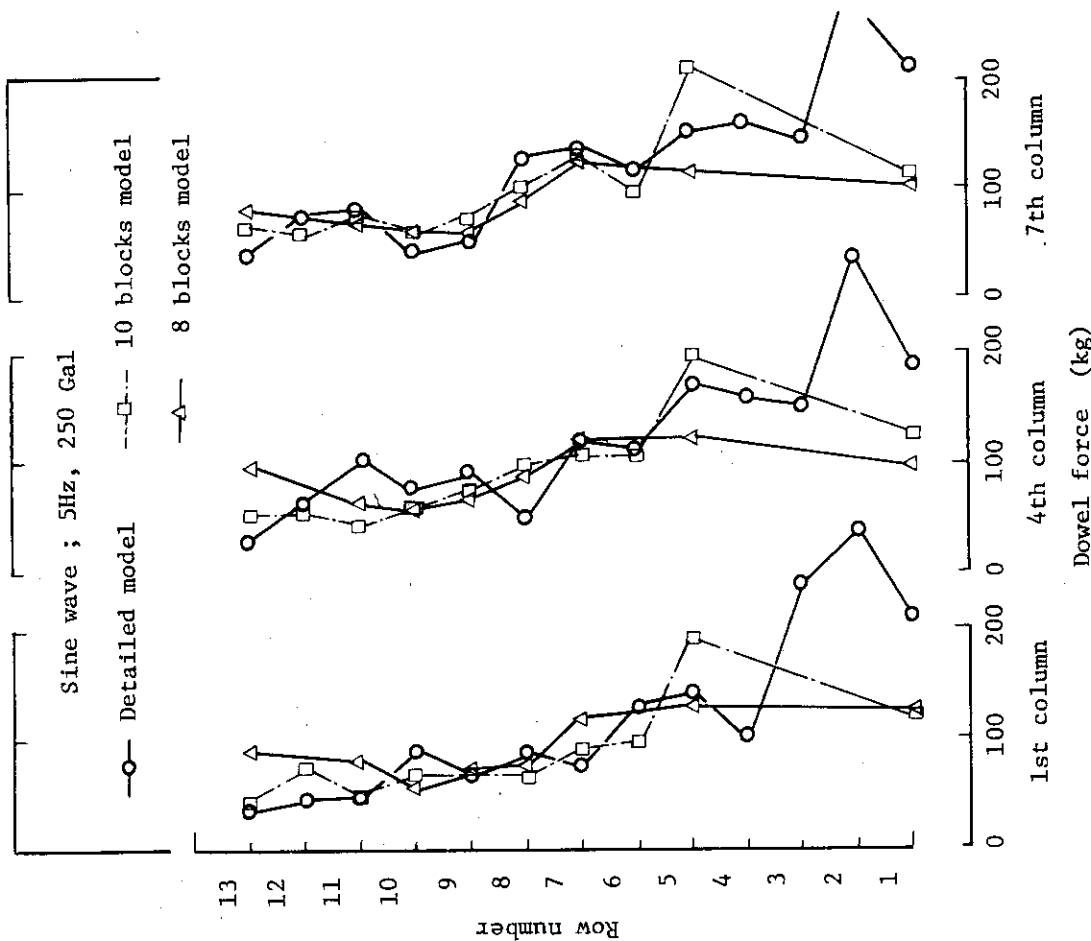


Fig. 4.18(3)

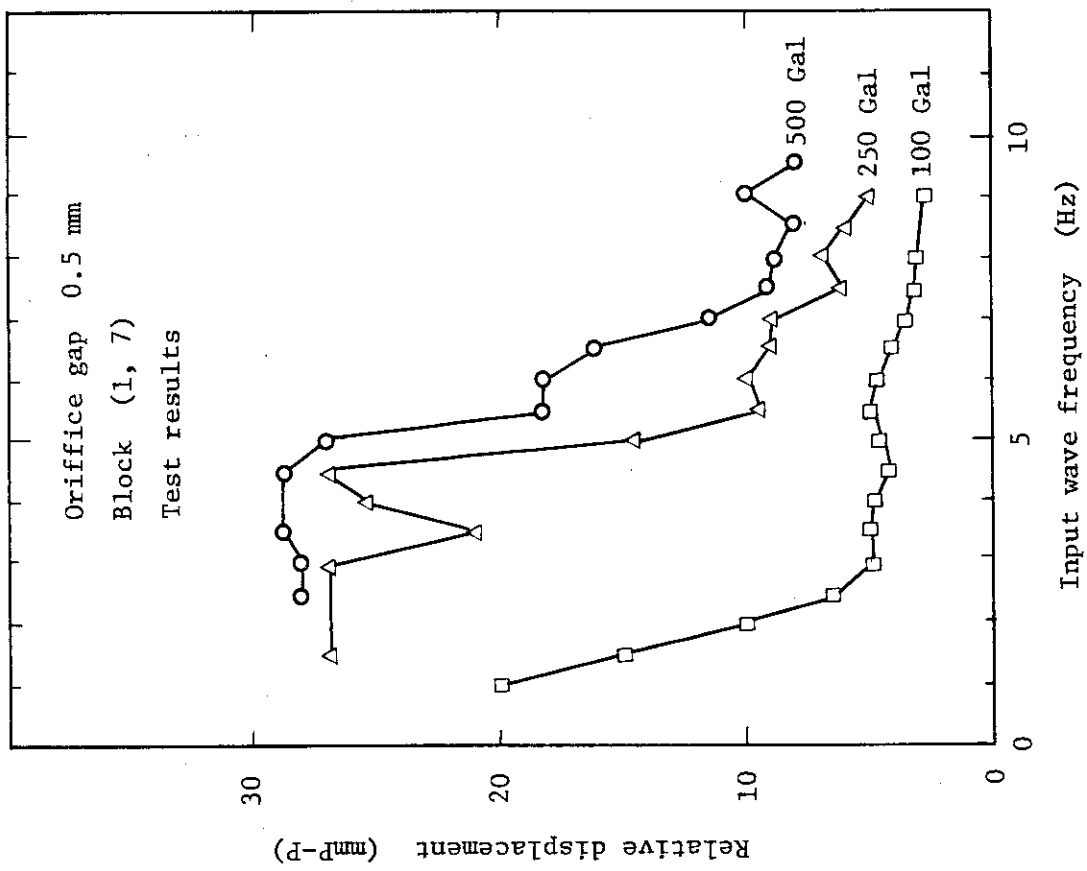


Fig. 4.19 Response curve of relative displacements

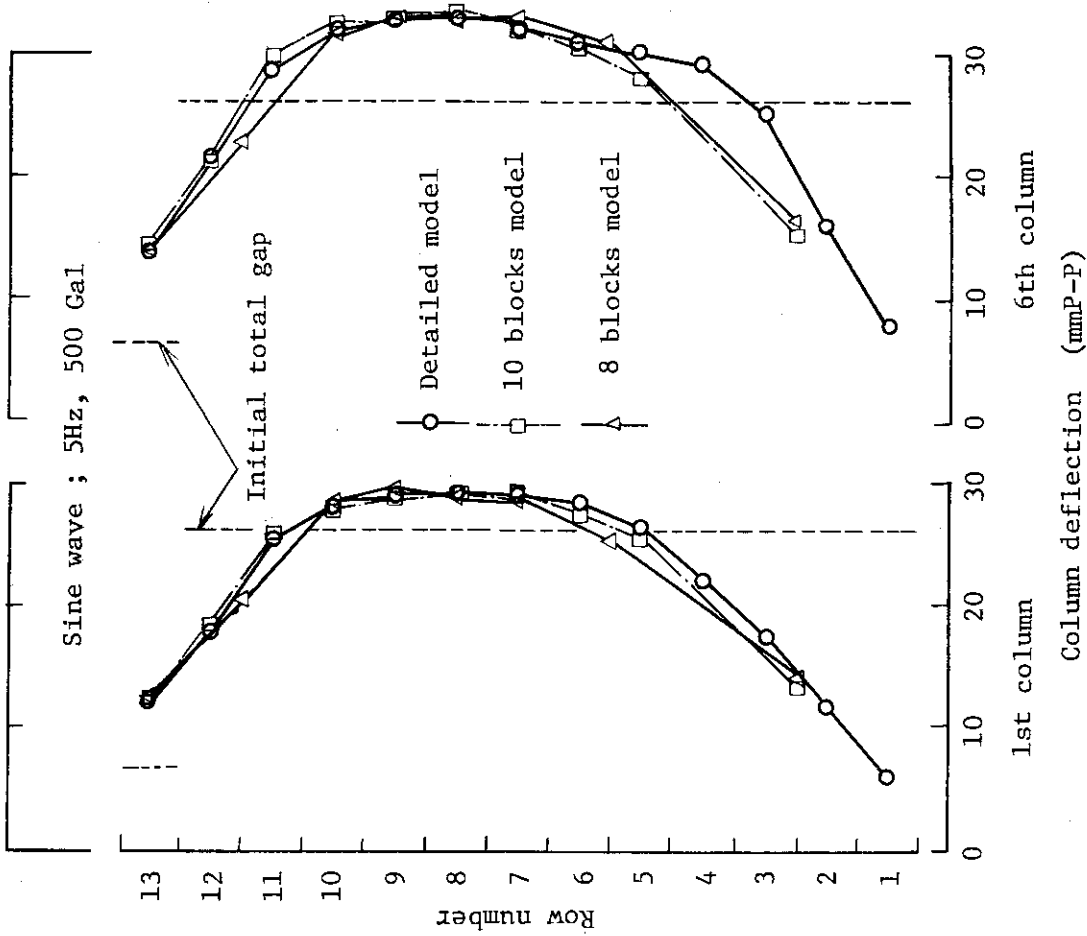


Fig. 4.20(2)

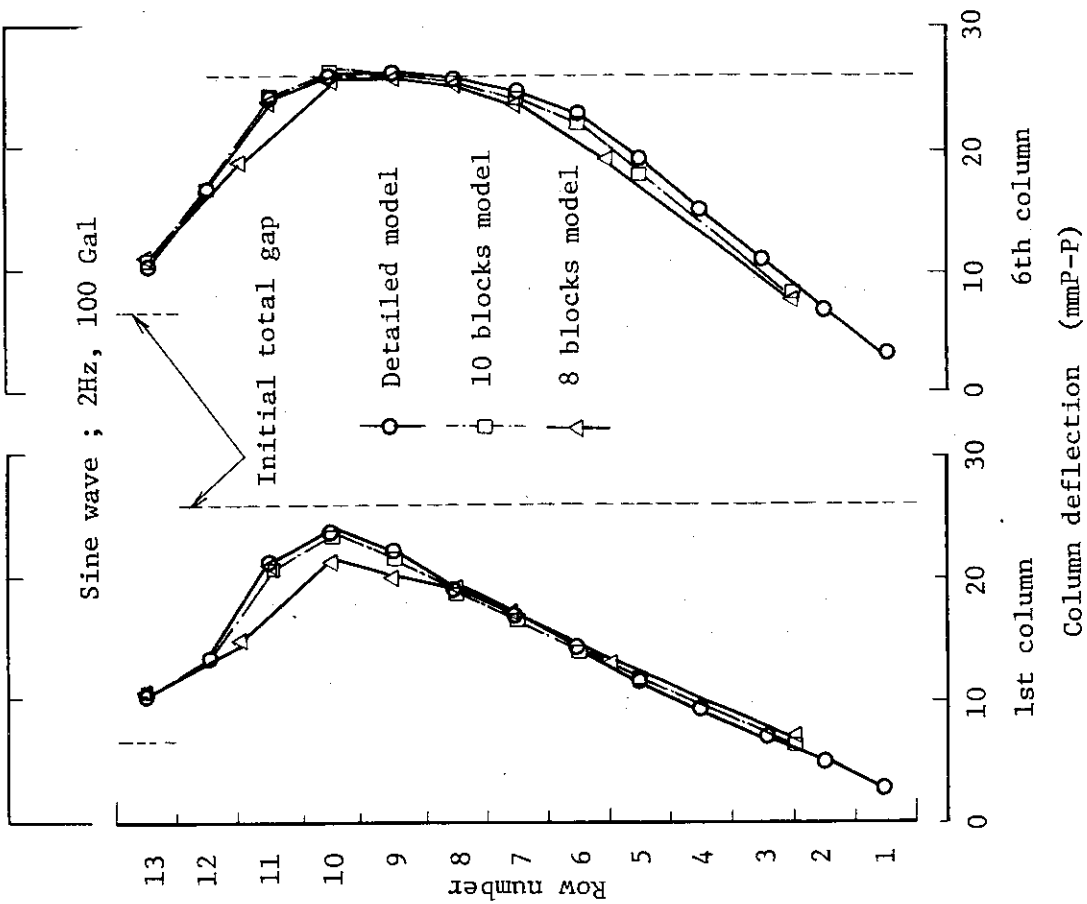


Fig. 4.20(1) Column deflection modes plotted for input acceleration as parameter

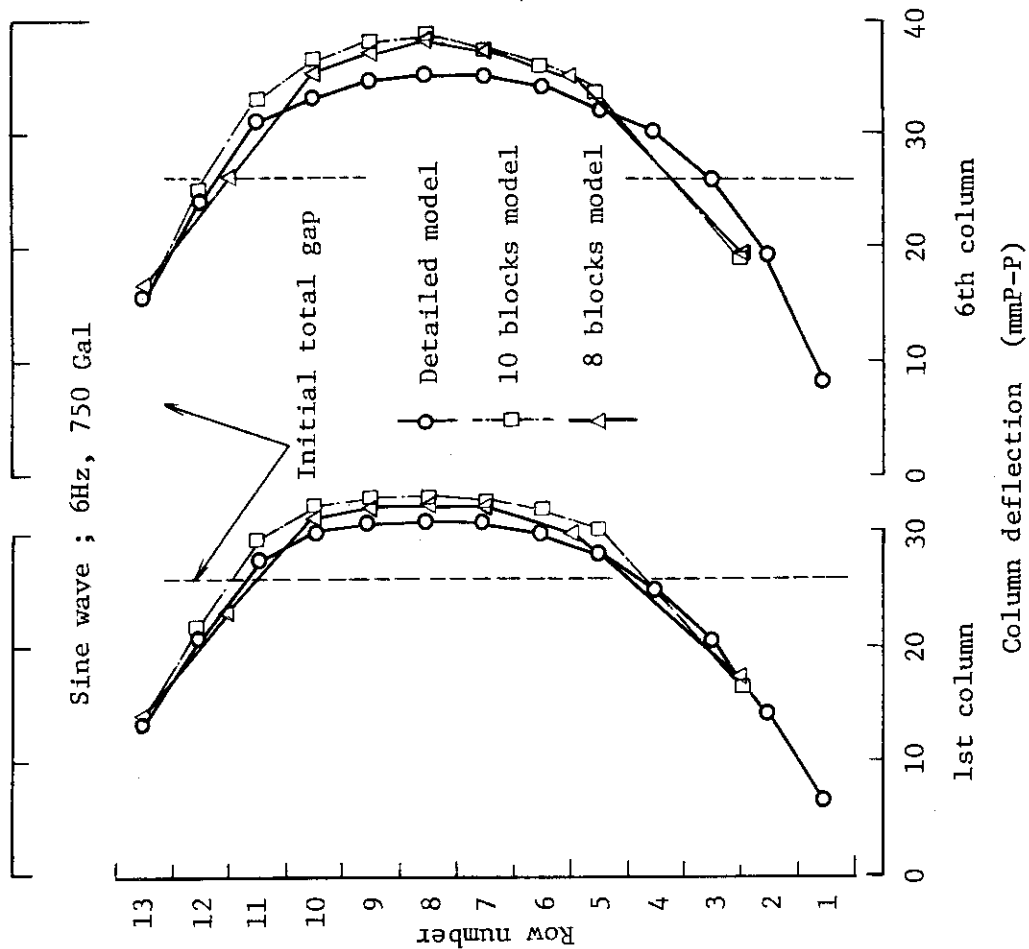


Fig. 4.20(4)

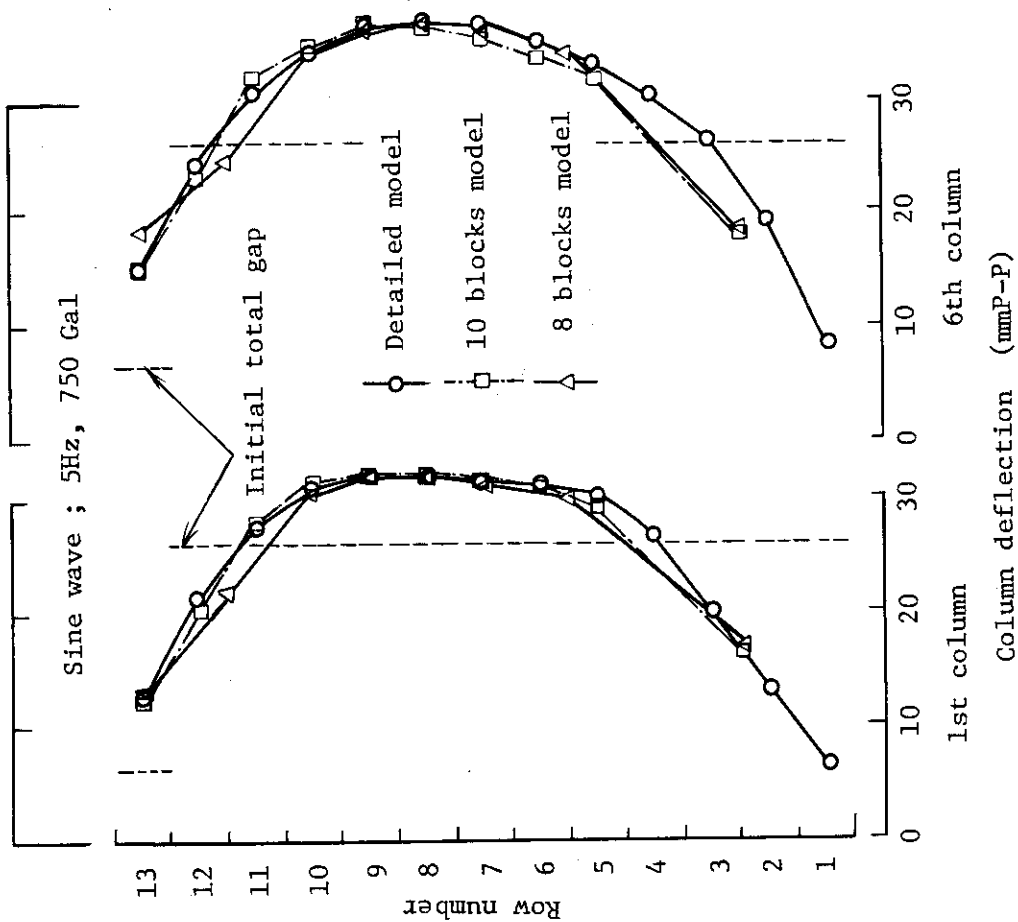


Fig. 4.20(3)

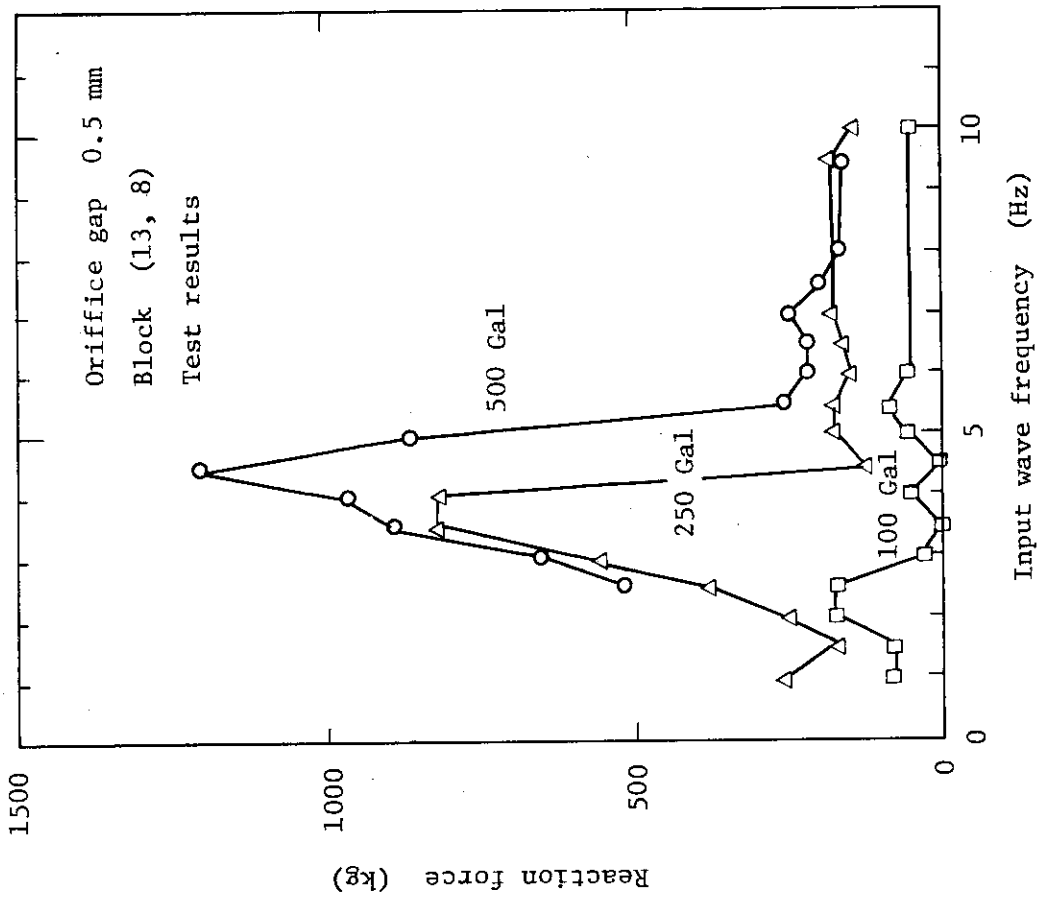


Fig. 4.21 Relation between frequency and reaction force, plotted for input acceleration as parameter

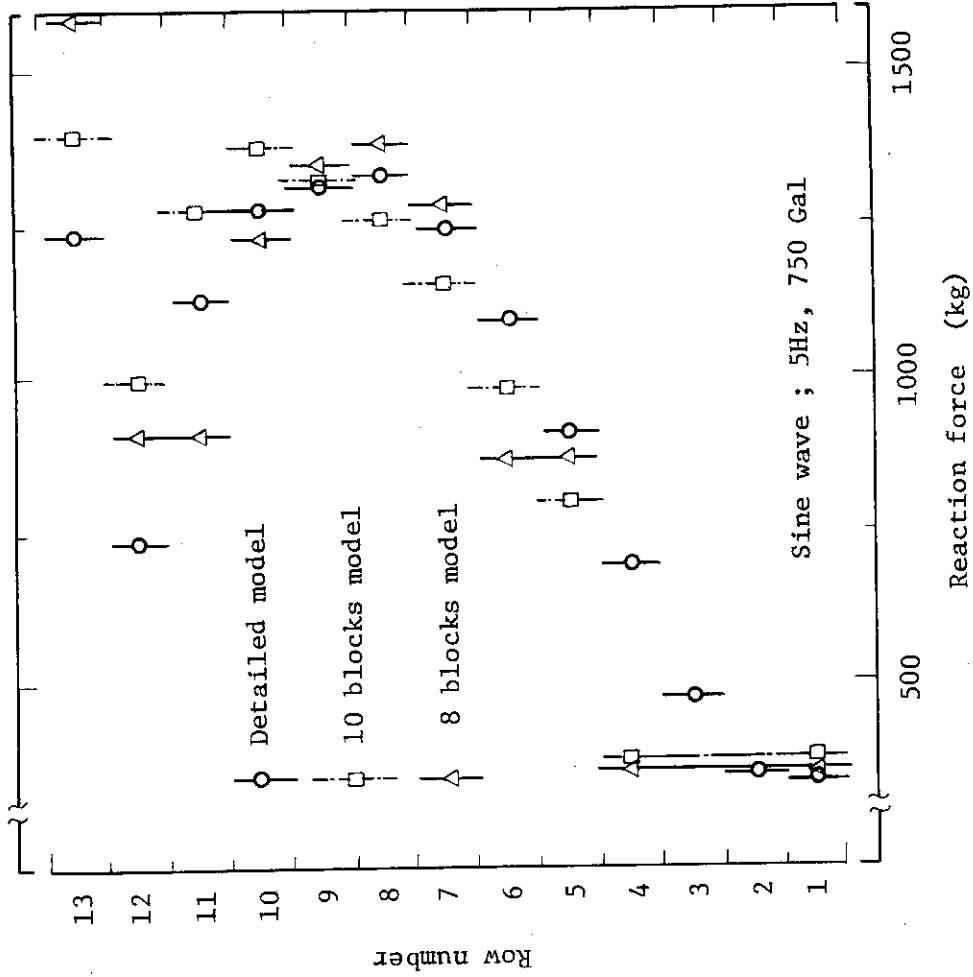


Fig. 4.22(2)

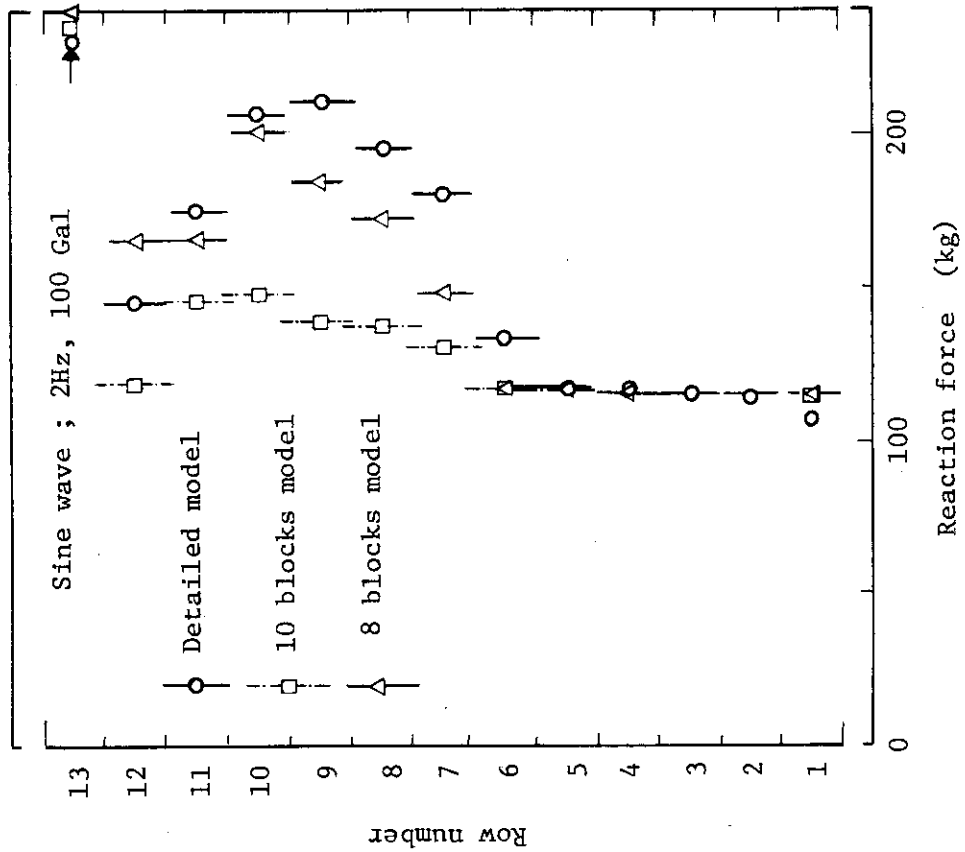


Fig. 4.22(1) Reaction force distribution plotted for input acceleration as parameter

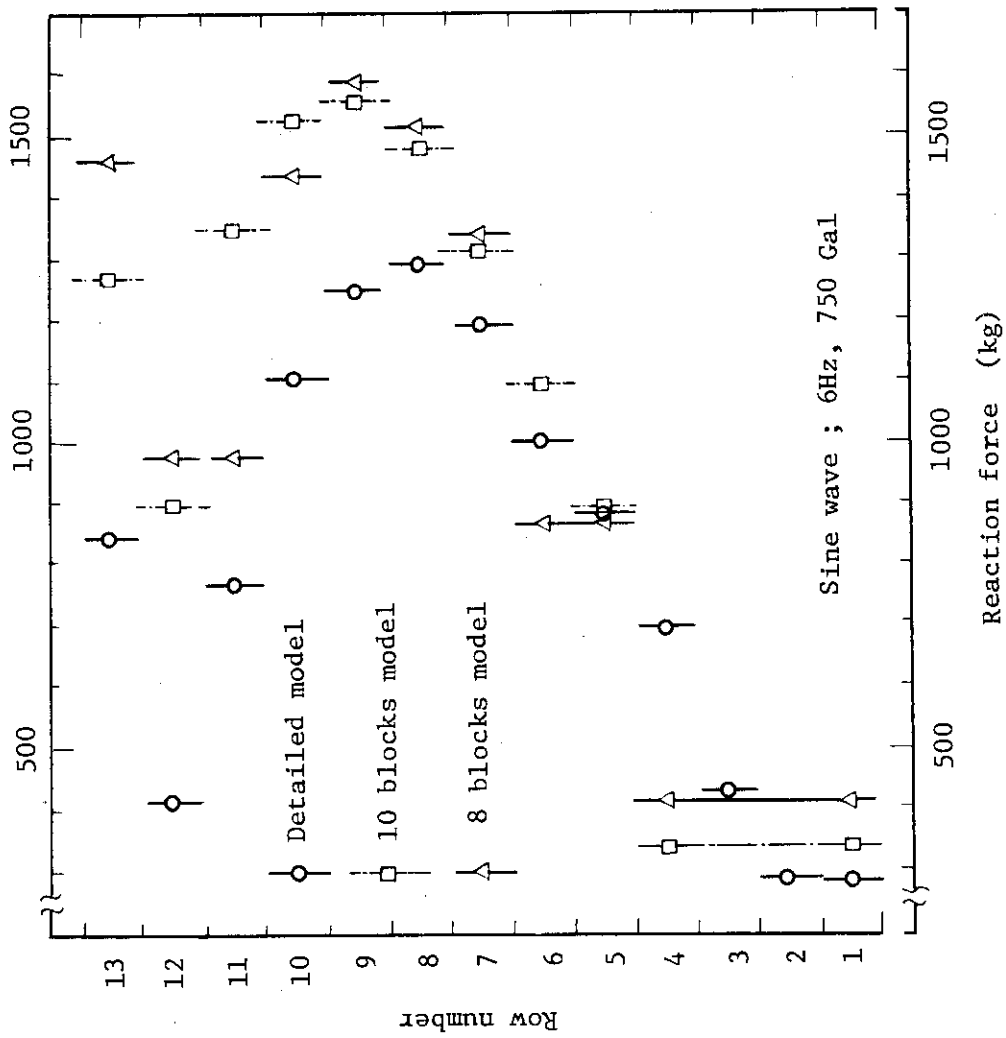


Fig. 4.22(3)

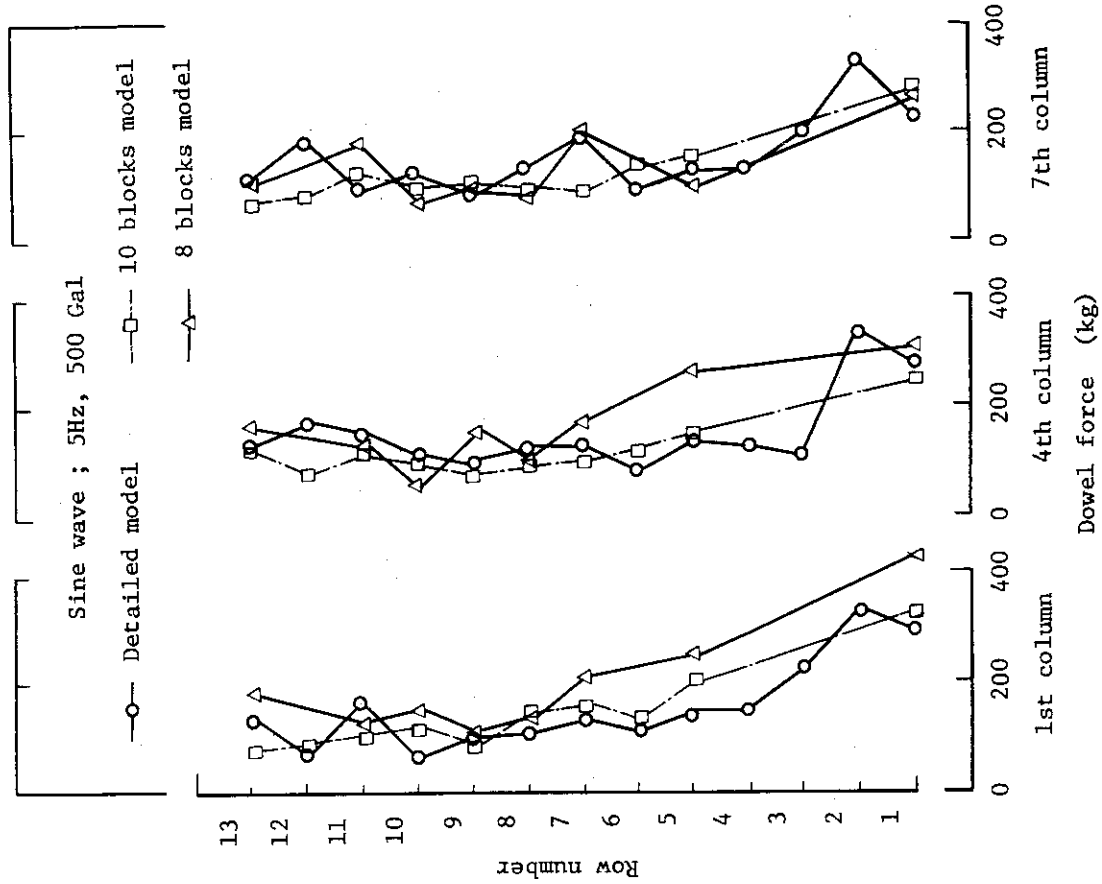


Fig. 4.23(2)

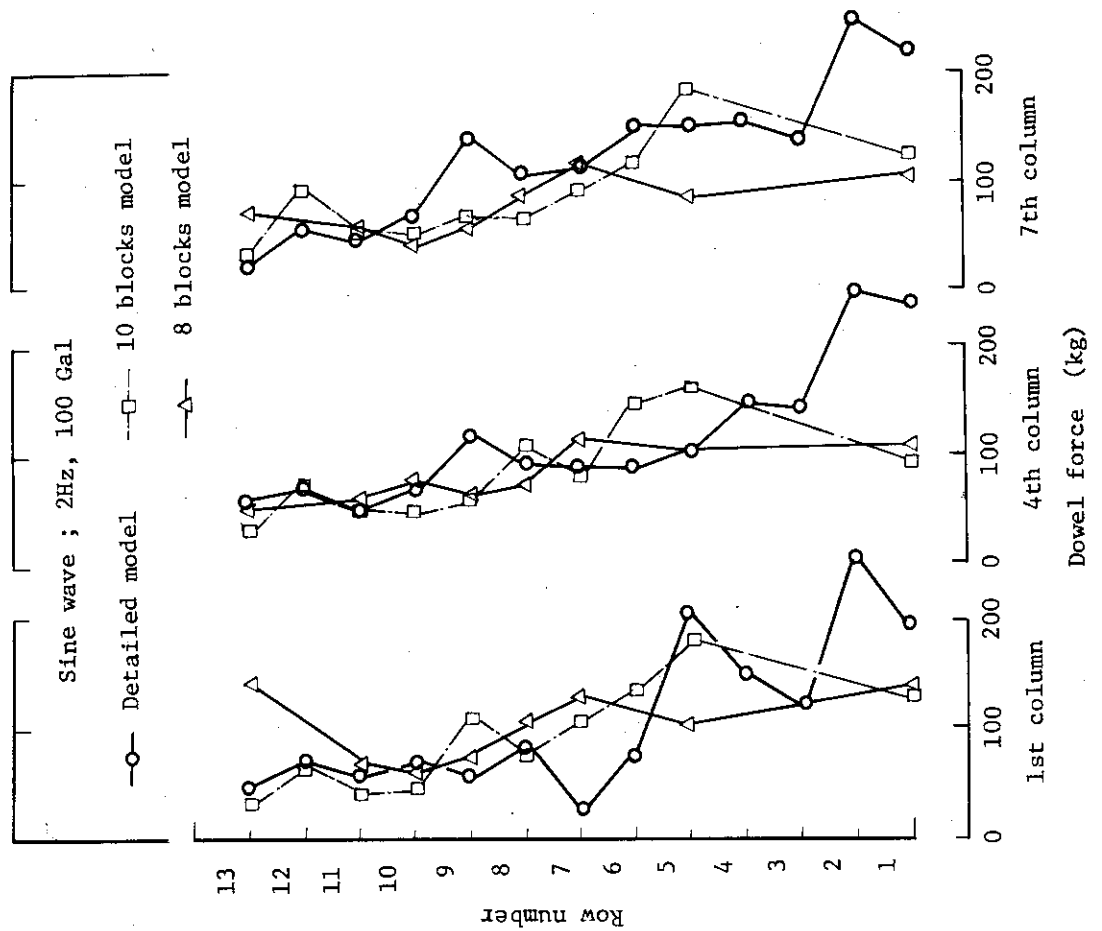


Fig. 4.23(1) Dowel force distributions plotted for input acceleration as parameter

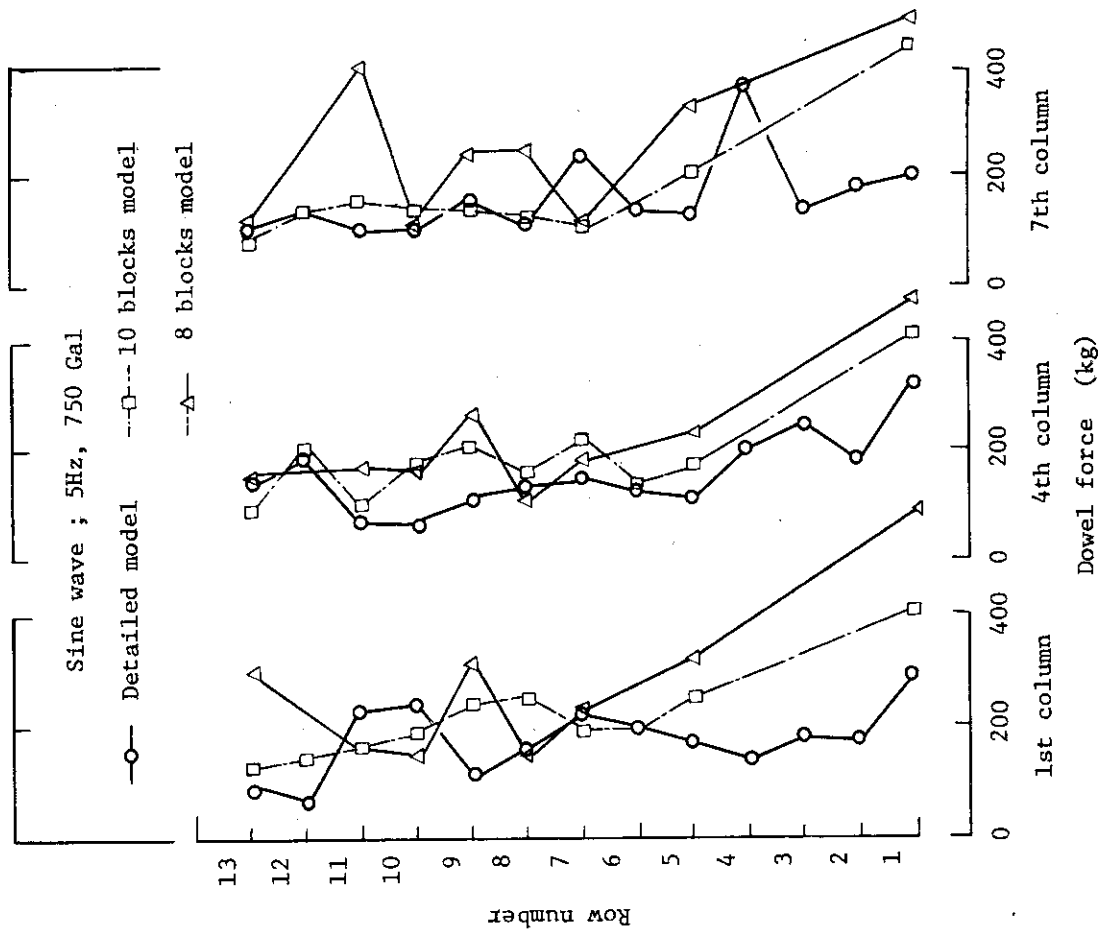


Fig. 4.23(3)

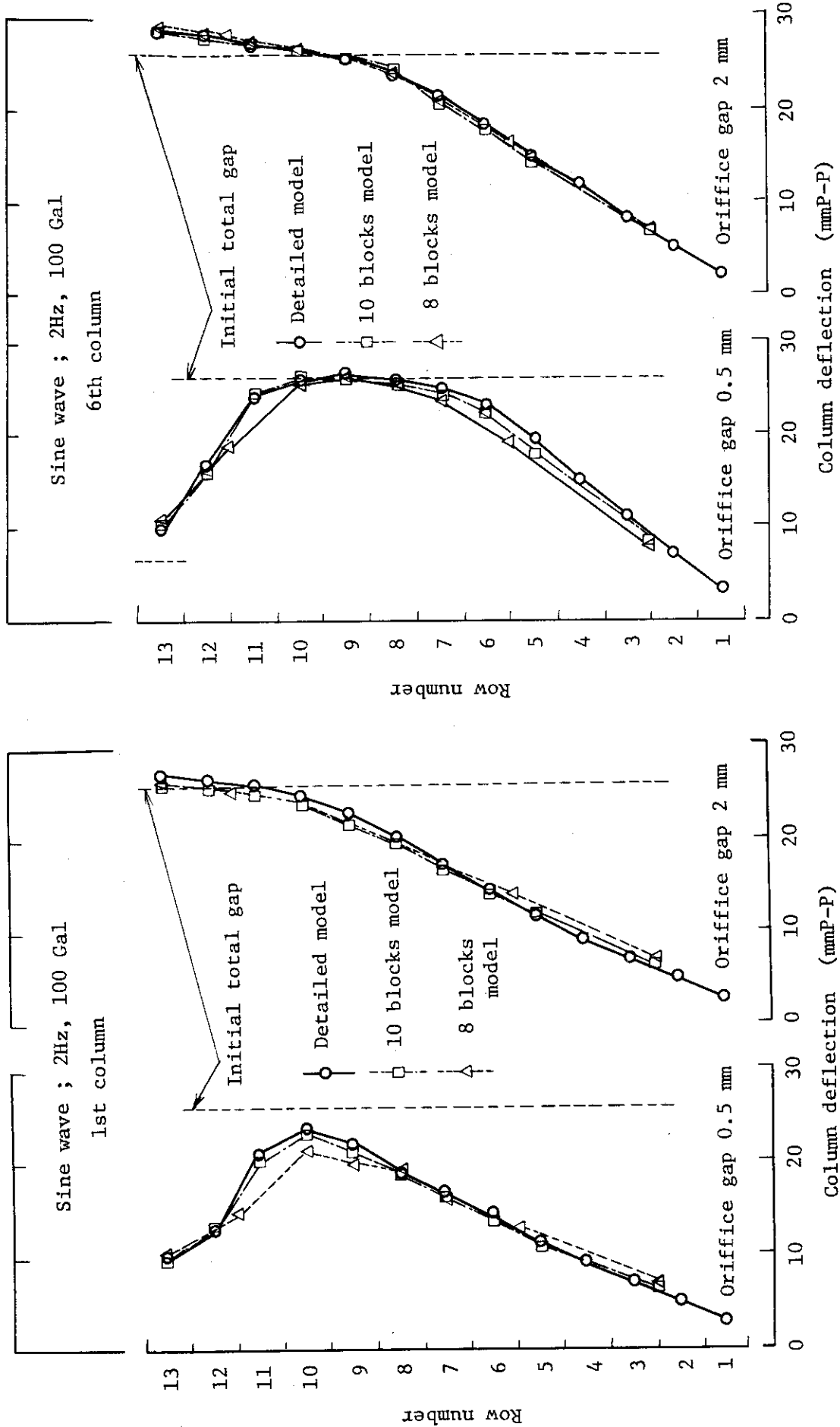
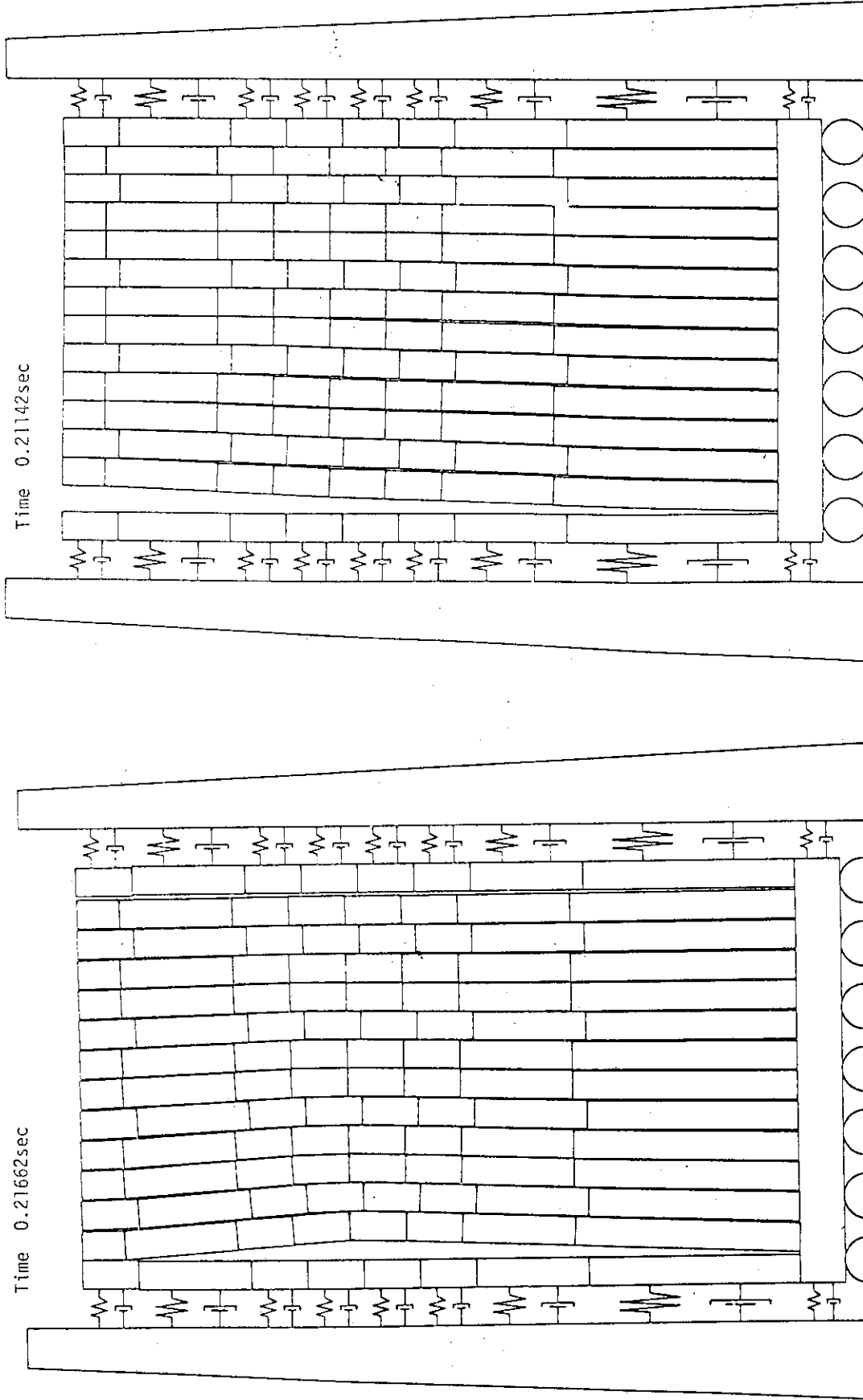


Fig. 4.24(2)

Fig. 4.24(1) Effect of orifice gap on column deflection



Sine wave ; 2Hz, 100Gal. Orifice gap 2mm

Fig. 4.25(2)

Sine wave ; 3.5Hz, 250Gal. Orifice gap 0.5mm

Fig. 4.25(1) Deflection mode of two-dimensional vertical core

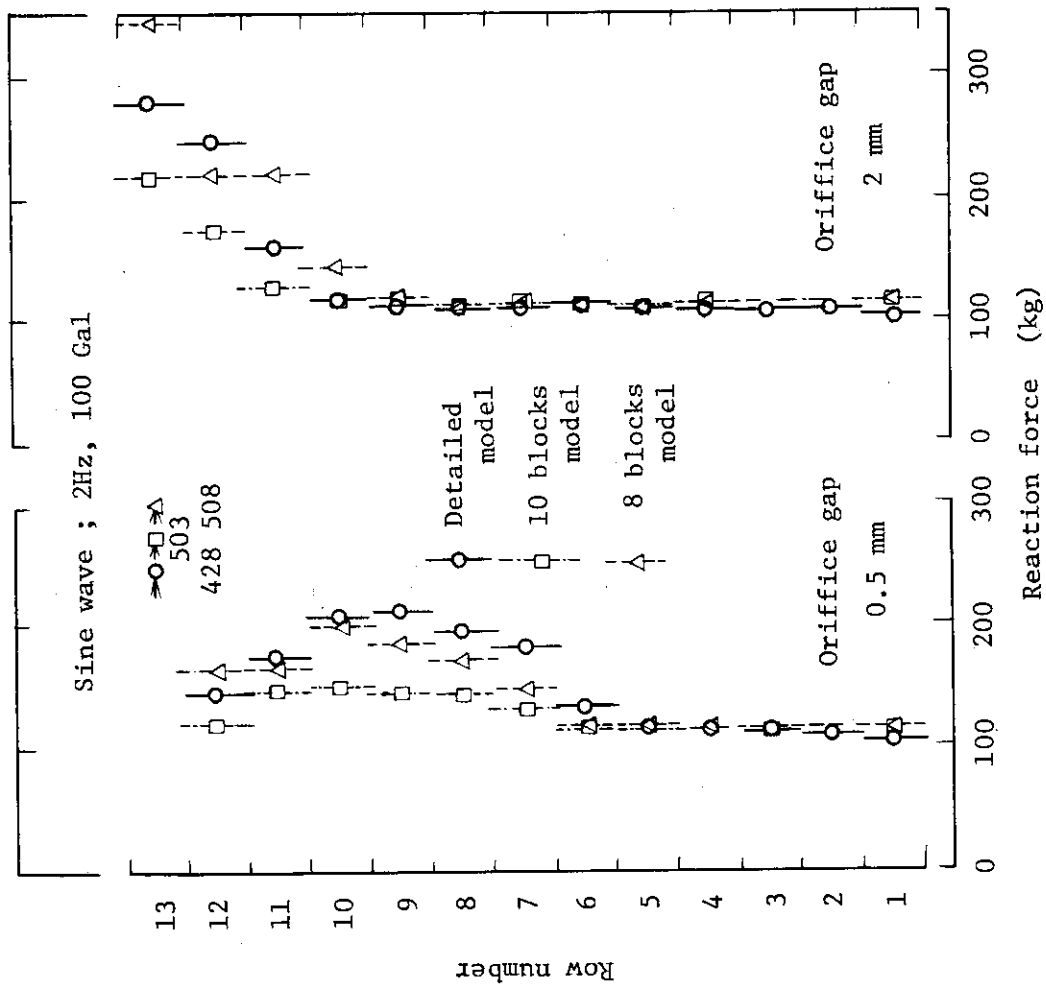


Fig. 4.26 Effect of orifice gap on reaction forces

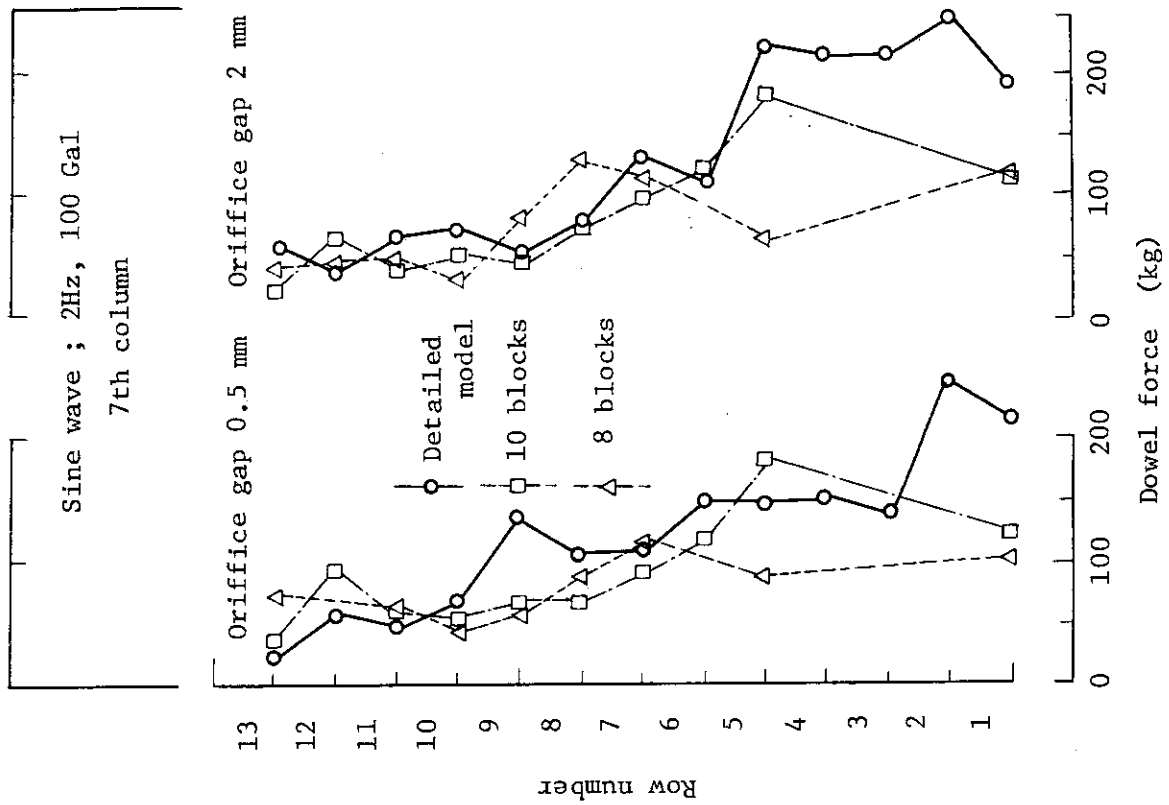


Fig. 4.27(2)

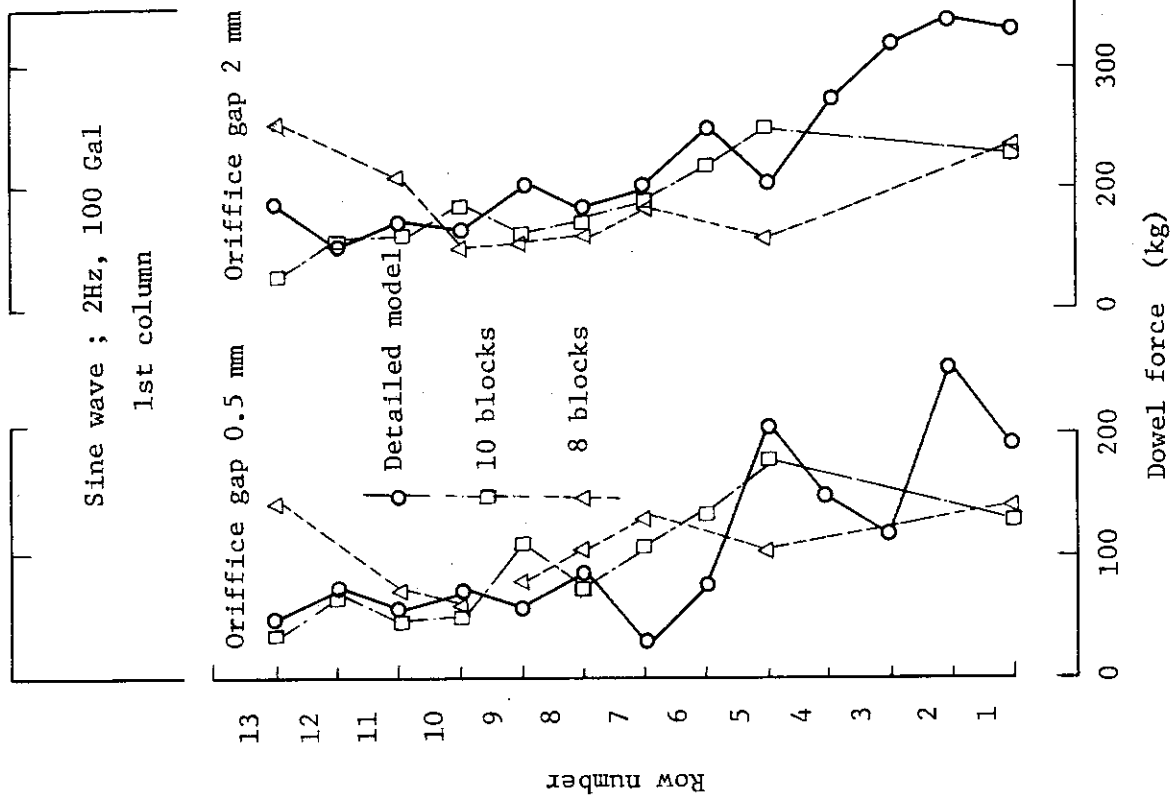


Fig. 4.27(1) Effect of orifice gap on dowel forces

5. 結 言

多目的高温ガス炉炉心の垂直2次元振動解析モデルに対して、数個のブロックを一体化する簡略モデルの検討を実施し、その解析モデルの特徴および垂直2次元炉心の振動特性を調べてきた。得られた結論は次の通りである。

- (1) 簡略化ブロックの各ばね定数設定法を明確にした。
- (2) 9ブロックモデルの特徴はほぼ8ブロックモデルの傾向に類似している。
- (3) 10ブロックモデル解析でも、詳細モデル解析に比べ計算時間は50%近く短縮できる。
- (4) 簡略モデル解析を行なう場合、解析結果の精度と計算時間の両面を考えると10と8ブロックモデルが実用的である。
- (5) 解析モデルを簡略化するほどコラム自身のソフトスプリング特性が薄れてゆき、共振周波数は高周波数側にスライドする傾向にある。

また入力波条件およびオリフィスギャップが振動特性や簡略モデル解析の有効性に与える影響をまとめた。Table 4.4より次のことがわかる。

- (6) 簡略モデル解析の実用範囲は加振加速度レベルに制限される。本解析では750Gal加振では簡略モデル解析は実用的でなくなる。
- (7) 変位モードと支持反力分布はオリフィスギャップの影響を受けるが、ダウエル力分布はほとんど影響されない。
- (8) 表と計算時間の面からみて、パラメーター・サーベイには8ブロックモデル解析が実用的であり、より詳細な解析には10ブロックモデル解析で十分である。

謝 辞

本報を作成するうえで御指導いただいた多目的高温ガス実験炉設計室 幾島 毅氏ならびに助言をいただいた同設計室 宮本 喜晟氏に深く感謝します。垂直2次元炉心耐震試験を直接実施した三菱重工業(株)の関係者に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 青地, 安野他: JAERI-M 6845 (1977)
- (2) 幾島他: 機械学会第18回シンポジウム「衝撃応力」予稿集
- (3) 伊与久, 幾島: JAERI-M 9075 (1980)
- (4) 幾島他: JAERI-M 9265 (1981)
- (5) J.E. Rakowski, GA-A 14088 (1979)

5. 結 言

多目的高温ガス炉炉心の垂直2次元振動解析モデルに対して、数個のブロックを一体化する簡略モデルの検討を実施し、その解析モデルの特徴および垂直2次元炉心の振動特性を調べてきた。得られた結論は次の通りである。

- (1) 簡略化ブロックの各ばね定数設定法を明確にした。
- (2) 9ブロックモデルの特徴はほぼ8ブロックモデルの傾向に類似している。
- (3) 10ブロックモデル解析でも、詳細モデル解析に比べ計算時間は50%近く短縮できる。
- (4) 簡略モデル解析を行なう場合、解析結果の精度と計算時間の両面を考えると10と8ブロックモデルが実用的である。
- (5) 解析モデルを簡略化するほどコラム自身のソフトスプリング特性が薄れてゆき、共振周波数は高周波数側にスライドする傾向にある。

また入力波条件およびオリフィスギャップが振動特性や簡略モデル解析の有効性に与える影響をまとめた。Table 4.4より次のことがわかる。

- (6) 簡略モデル解析の実用範囲は加振加速度レベルに制限される。本解析では750Gal加振では簡略モデル解析は実用的でなくなる。
- (7) 変位モードと支持反力分布はオリフィスギャップの影響を受けるが、ダウエル力分布はほとんど影響されない。
- (8) 表と計算時間の面からみて、パラメーター・サーベイには8ブロックモデル解析が実用的であり、より詳細な解析には10ブロックモデル解析で十分である。

謝 辞

本報を作成するうえで御指導いただいた多目的高温ガス実験炉設計室 幾島 毅氏ならびに助言をいただいた同設計室 宮本 喜晟氏に深く感謝します。垂直2次元炉心耐震試験を直接実施した三菱重工業(株)の関係者に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 青地, 安野他: JAERI-M 6845 (1977)
- (2) 幾島他: 機械学会第18回シンポジウム「衝撃応力」予稿集
- (3) 伊与久, 幾島: JAERI-M 9075 (1980)
- (4) 幾島他: JAERI-M 9265 (1981)
- (5) J.E. Rakowski, GA-A 14088 (1979)

5. 結 言

多目的高温ガス炉炉心の垂直2次元振動解析モデルに対して、数個のブロックを一体化する簡略モデルの検討を実施し、その解析モデルの特徴および垂直2次元炉心の振動特性を調べてきた。得られた結論は次の通りである。

- (1) 簡略化ブロックの各ばね定数設定法を明確にした。
- (2) 9ブロックモデルの特徴はほぼ8ブロックモデルの傾向に類似している。
- (3) 10ブロックモデル解析でも、詳細モデル解析に比べ計算時間は50%近く短縮できる。
- (4) 簡略モデル解析を行なう場合、解析結果の精度と計算時間の両面を考えると10と8ブロックモデルが実用的である。
- (5) 解析モデルを簡略化するほどコラム自身のソフトスプリング特性が薄れてゆき、共振周波数は高周波数側にスライドする傾向にある。

また入力波条件およびオリフィスギャップが振動特性や簡略モデル解析の有効性に与える影響をまとめた。Table 4.4より次のことがわかる。

- (6) 簡略モデル解析の実用範囲は加振加速度レベルに制限される。本解析では750Gal加振では簡略モデル解析は実用的でなくなる。
- (7) 変位モードと支持反力分布はオリフィスギャップの影響を受けるが、ダウエル力分布はほとんど影響されない。
- (8) 表と計算時間の面からみて、パラメーター・サーベイには8ブロックモデル解析が実用的であり、より詳細な解析には10ブロックモデル解析で十分である。

謝 辞

本報を作成するうえで御指導いただいた多目的高温ガス実験炉設計室 幾島 毅氏ならびに助言をいただいた同設計室 宮本 喜晟氏に深く感謝します。垂直2次元炉心耐震試験を直接実施した三菱重工業(株)の関係者に感謝します。

参 考 文 献

- (1) 青地, 安野他: JAERI-M 6845 (1977)
- (2) 幾島他: 機械学会第18回シンポジウム「衝撃応力」予稿集
- (3) 伊与久, 幾島: JAERI-M 9075 (1980)
- (4) 幾島他: JAERI-M 9265 (1981)
- (5) J.E. Rakowski, GA-A 14088 (1979)