

JAERI-M
9199

1領域炉心模型による高温ガス炉炉心
耐震試験と解析

1980年11月

幾島 肇・本間 敏秋*

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、複製などのお問合せは、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.

1 領域炉心模型による高温ガス炉炉心
耐震試験と解析

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部
幾島 豊・本間 敏秋*

(1980年10月24日受理)

ブロック型燃料高温ガス炉炉心耐震設計において、炉心構成要素であるコラムやブロックの動きや力を推定する必要がある。そこで、コラムの3次元振動特性と衝突応答を明らかにするために、縮尺模型の1領域炉心(7本コラム)による振動試験を実施し、次の結果を得た。

- (1) コラムはロッキング運動によるソフトスプリング特性を有する。
- (2) コラムは振れ回り運動をする。
- (3) 炉心のガス圧力差模擬ばねによるコラムの圧縮力は、コラムの共振振動数を上昇させる。
- (4) コラムの振動特性と衝突応答値についての解析値は実験値と良く一致した。

One-Region Core Model Seismic Test and Analysis for HTGR Core

Takeshi IKUSHIMA and Toshiaki HONMA*
Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received October 24 ,1980)

For the aseismic design of a high temperature gas-cooled reactor (HTGR) with block-type fuel, it is necessary to predict the motion and force of core columns and blocks. To reveal column vibration characteristics in three-dimensional space and impact response, column vibration tests were carried out with a scale model of a one-region section (seven columns) of the HTGR core.

The results are as follows:

- (1) the column has a soft spring characteristic based on blocks due to rocking motion,
- (2) the column has whirling phenomena,
- (3) the compression spring force simulating the gas pressure has the effect of raising the column resonance frequency, and
- (4) the vibration behavior of the stacked block column and impact response of the surrounding columns show agreement between experiment and analysis.

KEYWORDS: Seismic Response, Seismic Test, Vibration Test, Nonlinear Vibration Impact Response, Aseismic Design, Softening Characteristic, Hardening Charct-eristic HTGR Core, HTGR Core Seismic, Block Type Fuel HTGR

* Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Co.

目 次

1. 緒 言	1
2. 多目的高温ガス実験炉の炉心構造	2
3. 試験装置と試験内容	6
3.1 試験装置	6
3.1.1 相似則	6
3.1.2 試験体	6
3.1.3 試験治具	7
3.1.4 振動台	7
3.1.5 測定装置	8
3.1.6 データ処理	8
3.2 試験内容	8
3.2.1 試験前検査	8
3.2.2 振動試験	9
3.2.3 試験後検査	9
4. 試験前検査	23
4.1 支持枠振動試験	23
4.2 コラム静剛性試験	23
5. 振動試験	25
5.1 正弦波掃引試験	25
5.2 正弦波応答試験	26
5.2.1 変位応答特性	26
5.2.2 衝突応答特性	28
5.3 ランダム波応答試験	29
6. 試験後検査	44
7. シミュレーション解析	44
7.1 解析モデルと運動方程式	45
7.2 応答解析	53
8. 考 察	58
9. 結 論	58
謝 辞	59
参考文献	60
付 錄	61

CONTENTS

1. Introduction	1
2. VHTR core structure	2
3. Test apparatus and procedure	6
3.1 Test apparatus	6
3.1.1 Similarity laws	6
3.1.2 Test model	6
3.1.3 Test rig	7
3.1.4 Shaking table	7
3.1.5 Instrumentation	8
3.1.6 Data aquisition	8
3.2 Test procedure	8
3.2.1 Pre-test	8
3.2.2 Vibration test	9
3.2.3 Inspection after vibration test	9
4. Pre-test	23
4.1 Test rig shaking test	23
4.2 Column static stiffness	23
5. Vibration test	25
5.1 Sinusoidal sweep test	25
5.2 Sinusoidal response test	26
5.2.1 Displacement characteristic	26
5.2.2 Impact characteristic	28
5.3 Random wave test	29
6. Inspection after vibration test	44
7. Simulation analysis	44
7.1 Calculation model and equation of motion	45
7.2 Response analysis	53
8. Discussion	58
9. Conclusion	58
Acknowledgements	59
References	60
Appendix	61

1. 緒 言

ブロック型燃料高温ガス炉の炉心は、六角柱状の黒鉛燃料体、六角柱状の黒鉛可動反射体および周辺のブロック状固定反射体などが数千個とこれらを取りまく炉心周辺構造体から構成されている。これらのブロック間にはギャップが存在し、地震時には、複雑な衝突を含む振動挙動を示す。

この炉心に対して、想定最大地震動に対しても、次の事項が要求される。

- (1) 炉心構成要素が健全であること。
- (2) 余熱除去が可能な炉心配列が維持されること。
- (3) 炉停止機能の保持と炉安全停止状態を維持できること。

炉心がこれらの要求を満足していることを評価するには、

- (1) 炉心地震挙動解析法と計算プログラムの開発、
- (2) 計算プログラムの振動試験による実証、
- (3) 実証された計算プログラムを使用した炉心地震応答値が炉心構成要素の強度基準や変位基準などの耐震設計基準内

にあることを確認しなければならない。

このため、炉心構成要素試験、模型炉心振動試験、解析法と計算プログラムの開発、制御棒挿入試験などを実施する必要があり、Neylanら⁽¹⁾、Olsenら⁽²⁾ ゼネラルアトミック社の研究グループは、ブロックの衝突現象の解明から始まり、コラムの振動、3次元炉心振動試験まで、およびそれらの解析を含めた広範囲な研究を行なっている。武藤ら^{(3),(4)}は2次元立面および平面模型炉心による振動試験と解析法の開発を行なっている。著者ら^{(5)~(7)}は、すでに2次元立面内のコラムの振動と衝突特性を明らかにした。

しかしながら、以上の研究において、コラムの振れ回りや炉心上下間の圧力差によるコラムの振動特性への影響は明らかにされてない。実際の炉心では、コラムは加振方向に対して直角方向にも動く、いわゆる振れ回り運動（3次元運動）をすることが予想される。また、実際の炉心では、冷却ガスは上方から下方へ向って流れるので、炉心の上下間にはガス圧力差が生じる。この圧力差によって、炉心の各コラムは上方から押し付けられている。このように実際の炉心耐震設計のためには、コラムの振れ回り運動特性ならびにコラム上下間の圧力差によるコラムの変位と衝突特性を明らかにする必要がある。そこで、コラム7本を組み合せた1領域炉心模型を使用して、振動試験を実施し、コラムの振れ回りやコラム上下間の圧力差模擬ばね圧縮力による振動特性と衝突特性を実験的に明らかにするとともにシミュレーション解析を行ない計算値と実験値とを比較して解析法の妥当性を明らかにした。

本報告は、1領域炉心の振動試験と解析とによって得られた結果を述べたものである。

本試験と解析の目的は次の項目を明らかにすることである。

(1) 試 験

(i) コラムの振れ回り運動

(Ⅱ) ガス圧力差の影響

(Ⅲ) 変位応答特性

(Ⅳ) 衝撃応答特性

(V) ギャップ幅の影響

(Vi) 分数調波振動

(Vii) 減衰特性

(Viii) コラム静剛性

(2) 解析

(Ⅰ) 計算プログラムの検証

(Ⅱ) 計算入力データの検討

2. 多目的高温ガス実験炉の炉心構造

実験炉の炉心⁽⁸⁾はFig.2.1に示すように、燃料体ブロック、可動反射体ブロック、固定反射体ブロックなどの炉心構成要素、炉心下部構造と炉心支持構造物、炉心側方拘束構造物、流量調整用オリフィスブロックから構成されている。炉心は原子炉容器内に取付けられたダイヤクリッドによって、その重量を支えられる構造となっている。炉心の側方は炉心拘束機構によってコアバレルに取付けられており、コアバレルはラジアルキーによって原子炉容器内に配置される。

炉心の水平配列はFig.2.2に示すように、77本の燃料体コラムとその周辺に66本の可動反射体コラム、さらにその周辺に18本の固定反射体コラム、コアバレル、炉心拘束機構の順に並べられている。燃料体コラムでは、中央部に燃料体が7層、その上下に各々2層づつの可動反射体があり、最上端には流量調節用オリフィスブロック、下部には、高温ブレナムを形成する炉心支持黒鉛ブロックと熱遮蔽体が配置されている。

燃料体はFig.2.3に示すように正六角柱状の黒鉛ブロックにあけられた冷却チャンネルに燃料棒を挿入したいわゆるピン・イン・ブロック型である。燃料体には2種類あり、標準型燃料体と制御棒挿入孔付燃料体である。標準型燃料体はブロック内に12個の冷却チャンネルと燃料棒が挿入されており、制御棒挿入孔付燃料体には、3個の冷却チャンネルおよび2個の制御棒挿入孔と1個の後備停止系挿入孔がある。制御棒挿入孔付燃料体の1コラムとその周辺にある標準型燃料体の6コラムの合計7コラムで1燃料交換領域(1領域炉心)を形成している。燃料体には、上面に3個のダウェルピン、下面には3個のダウェルソケットが設けられており、燃料体が位置決めされる。

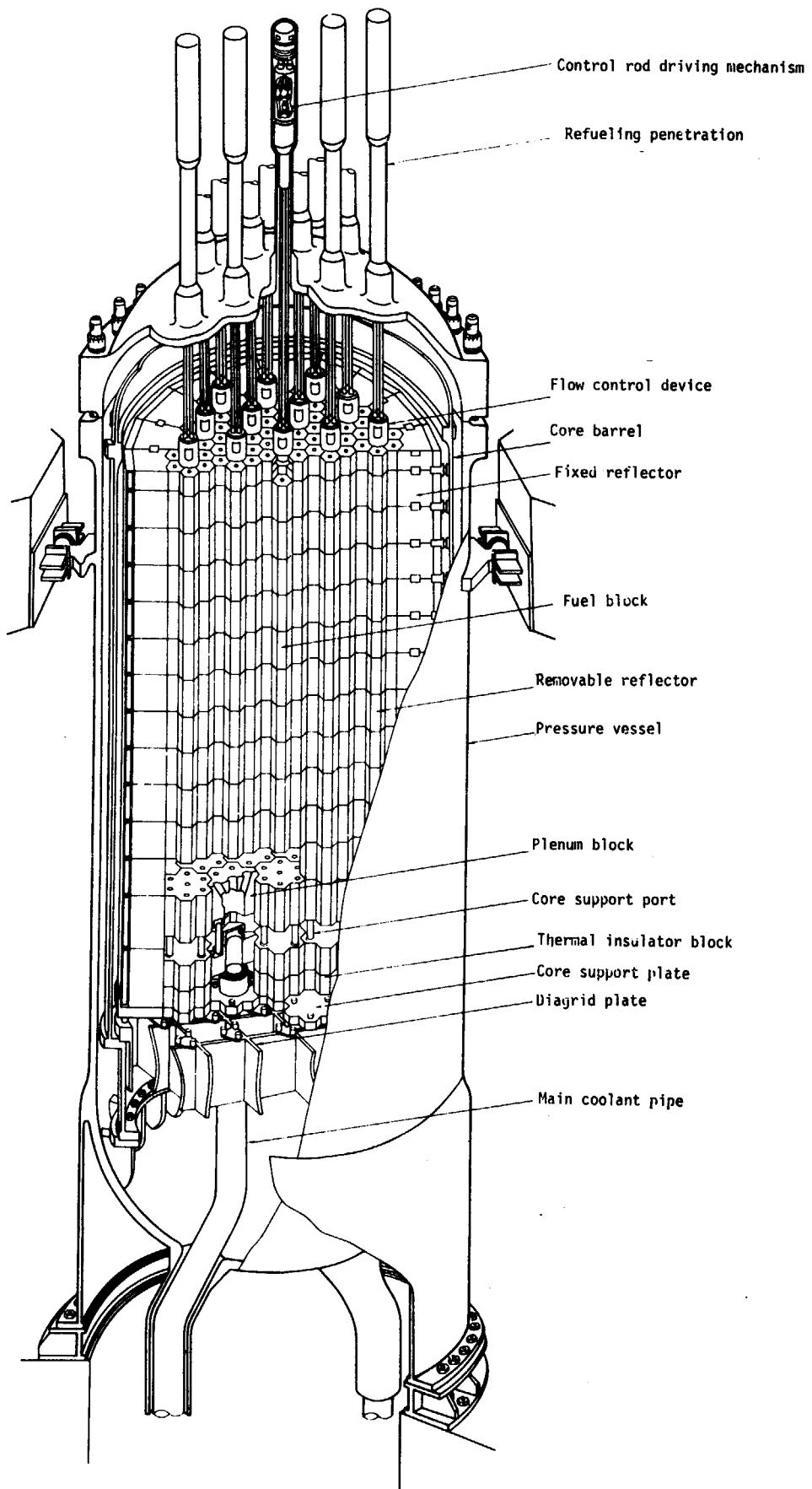


Fig. 2.1 Reactor vertical view of VHTR

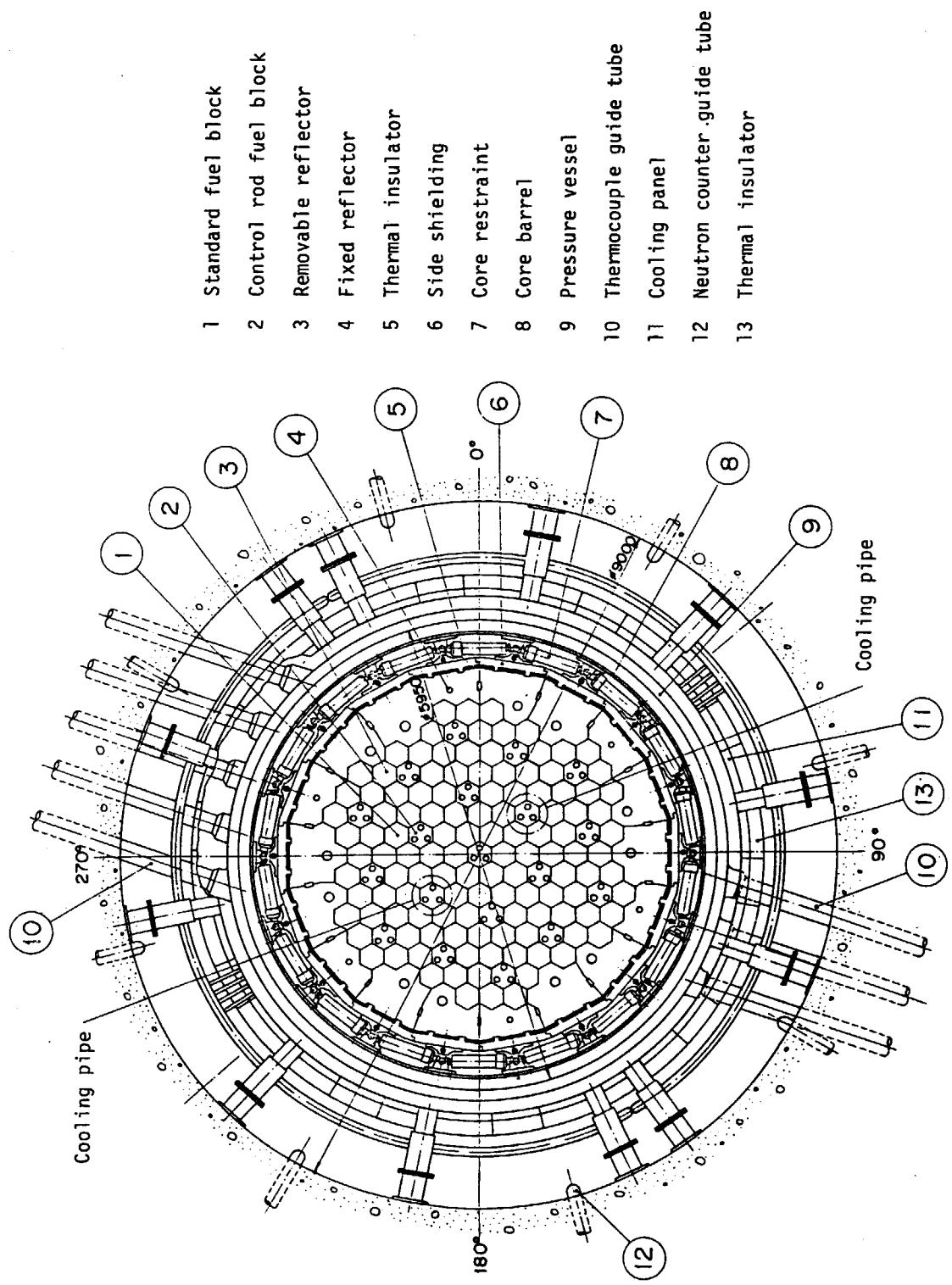


Fig. 2.2 Reactor plane view of VHTR

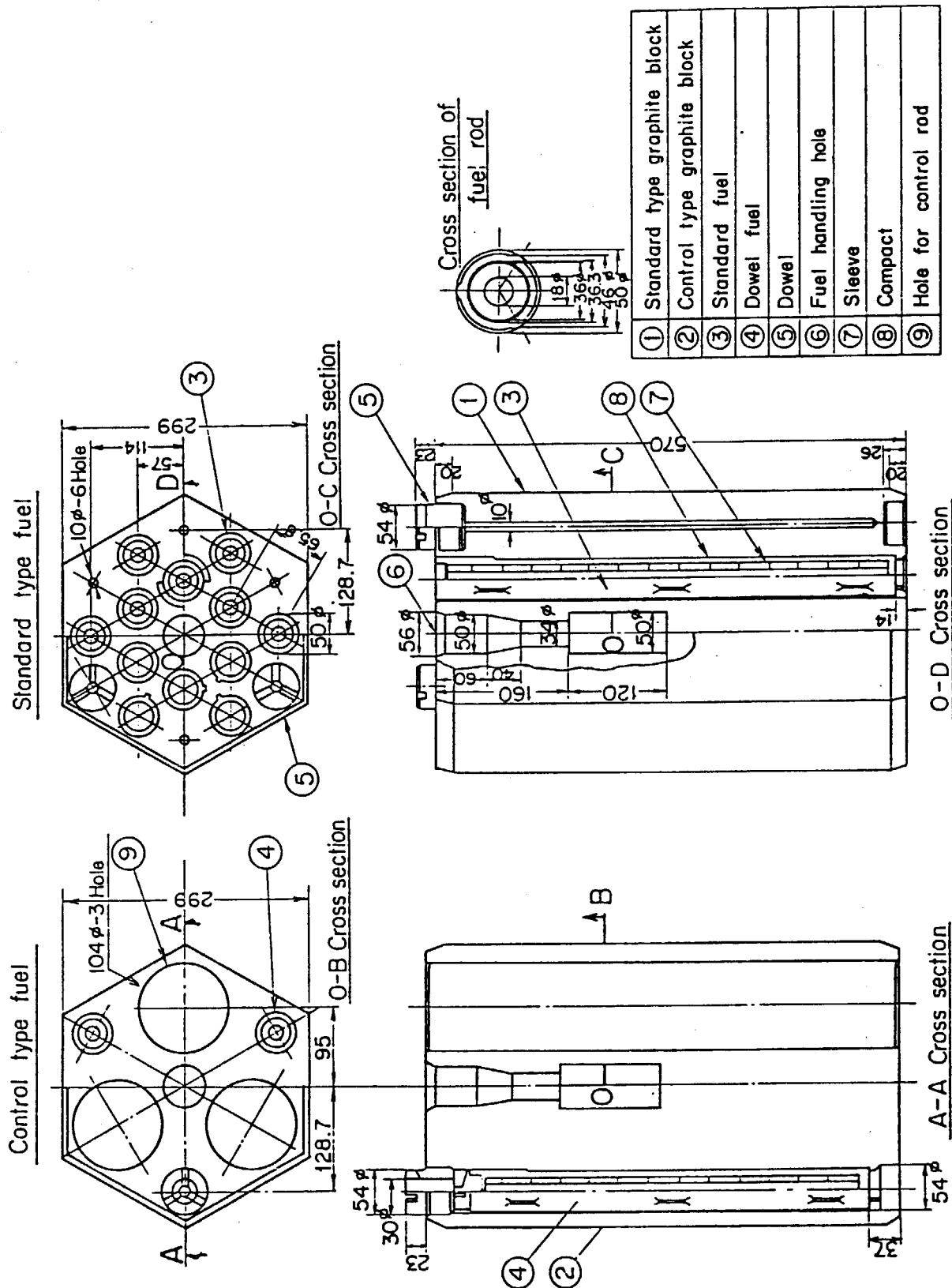


Fig. 2.3 Fuel block

3. 試験装置と試験内容

3.1 試験装置

3.1.1 相似則

縮尺模型による振動試験結果から実際の炉心の振動挙動を推定する上で、模型は実機との相似則に従って製作する必要がある。このため以下のように相似則を検討した。模型の相似則は Buckingham の π 定理に基づく無次元積が模型と実機で等しいという関係から Table 3.1 のように決められた。模型の規模は縮尺 $1/2$ とし、ブロックのロッキング運動に影響を与える重力加速度を模型と実機で一致するように重量を $1/4$ になるようにする。このため、模型の黒鉛ブロックに付加重量を取付けることにした。

長さに関する相似比は

$$\frac{\ell_m}{\ell_p} = \frac{1}{2} \quad (3.1)$$

である。ここで ℓ は長さ、添字 m と p はそれぞれ模型と実機を示す。Table 3.1 から力に関する相似比は

$$\frac{F_m}{F_p} = \frac{1}{4} \quad (3.2)$$

加速度については

$$\frac{a_m}{a_p} = 1 \quad (3.3)$$

時間については

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

となる。よって実機の変位は模型の変位の 2 倍、力は 4 倍となる。一方、模型の時間軸は実機の $1/\sqrt{2}$ に縮少しなければならない。

3.1.2 試験体

試験体は多目的高温ガス実験炉の炉心の 1 領域炉心（7 本コラム）を対象とし、Fig.3.1, 3.2 および Photo 3.1 に示すように $1/2$ 縮尺模型を使用する。3.1.1 で記述したように、相似則を合わせるため黒鉛ブロック中央に鉛製の円筒をはめ込み接着剤で取付けた。よって重量は実際の燃料ブロックの $1/4$ となった。従って、試験体の黒鉛ブロックの六角の対面距離は

150 mm, 高さ 285 mm (中央コラムの最下段ブロックのみ 214 mm), 重量 19.1 kg (14.3 kg) である。ブロックの上面と下面にはそれぞれダウェルピンとダウェルソケットが 3 個づつ取付けられている。ダウェルピンはテーパ状に加工されているので、コラム内の各ブロックは水平変位拘束、ロッキング運動許容の状態にある。コラム下端のブロックは支持枠基板上に敷かれた平板状の黒鉛板上のダウェルピンによって、水平変位拘束、ロッキング運動許容の状態にある。試験体に使用した黒鉛ブロックは原子炉級黒鉛であり、その機械的性質は Table 3.2 に示す。

コラムは炉心内のコラムを模擬して、12 個の黒鉛ブロックと上端の鋼製オリフィスブロックとの合計 13 段積とした。このブロックは、実際の炉心の流量調整用のオリフィスブロックを模擬している。オリフィスブロックの外形は Fig.3.3 と Photo 3.2 に示すように、黒鉛ブロックと同一とした。オリフィスブロックの下面にはダウェルソケットが 3 個設けられ、下段の黒鉛ブロックのダウェルピンとはめ合いされる。オリフィスブロックの重量は黒鉛ブロックと同等とした。

実際の炉心では、冷却ガスは炉心上方から下方へ流れるので、炉心コラムの上下面には圧力差が生じ、コラムは上方から下方へ押し付けられている。このガス圧力差による圧縮力を模擬するために、コラムの中央部にワイヤーを通し、コラム上端のオリフィスブロック部に設けられたスプリングをネジで締める構造とした。この構造を Fig.3.4 に示す。スプリングのはね力は、炉心上下の圧力差を 0.5 kg/cm^2 と仮定して決め、ばね定数は 13.79 kg/cm 、取付時のばね力は 136.5 kg とした。

中央のコラムは下端で試験治具との間でダウェルピンで取付けられ、上端では周辺の 6 本のコラムとの間のギャップが 0.5 mm あり、コラムは自由状態にある。周辺のコラム 6 本は試験治具の支持枠に一体として組み込まれている。周辺コラム間に設けられた 6 個所の鋼製の板（シム）の厚さを変更することによって、中央コラムと周辺コラム間のギャップを変化させることができる。

3.1.3 試験治具

試験治具であるコラムの支持枠は Fig.3.5 および Photo 3.3 に示すように、試験の加振条件（1 ~ 10 Hz）よりも十分上回る固有振動数（1 次の固有振動数 24 Hz）となるように剛に製作されている。ブロックの加振方向による影響を明らかにするために、試験治具全体は振動台上で 2 方向（Fig.3.5 の X 方向と Y 方向）に変更して取付けられるように製作された。コラム間ギャップを変更するためのシムは 2, 4, 7 mm の 3 種類用意した。コラムの大変位加振試験の場合には、周辺のコラム 6 本を取り除いて、中央の 1 本コラムで試験した。

3.1.4 振動台

振動台は株式会社大林組技術研究所のものを使用した。振動台の容量は次のとおりである。

積載荷重	10 ton
加振力	10 ton·G
最大振幅	±100 mm

周波数範囲	0.1~50 Hz
加振波形	正弦波、ランダム波
振動方向	水平1方向
振動台寸法	3×3 m
駆動方式	電気油圧式

振動台の限界性能を Fig.3.6 に示す。

3.1.5 測定装置

測定装置の構成は Fig.3.7 に示す。測定項目は変位と衝撃加速度であり、この諸量の測定のため Table 3.3 に示すように検出器を取り付けた。検出器の配置図を Fig.3.8 に示す。測定データを検討するためには、振動台と支持枠の加速度も測定した。計測器の種類は Table 3.3 に示すように、ブロックの変位については渦電流式の非接触型を使用し、ブロックの衝撃加速度の測定は圧電型のものを使用した。支持枠と振動台上に取付けた加速度計はひずみゲージ型のものであり、これによって加振条件を記録した。

変位測定において、コラムの振れ回り運動を測定するために、変位計を六角形の二辺（相互に 120° 離れて）に取付けた。衝撃加速度計はブロックの水平および垂直方向の加速度を測定するために、ブロックの側面と上面に取付けた。なお、ブロックの上面に取付けた加速度計の衝突加速度波形から、ブロックのロッキング運動時の接触時間の測定も行なった。

3.1.6 データ処理

測定データのうち増幅器を経由してペンレコーダおよび磁気テープに記録された。衝撃加速度はチャージアンプによって増幅された後、電磁オシログラフおよび磁気テープに記録された。衝撃加速度は必要に応じて、周波数分析された。周波数分析のために信号はローパスフィルタによってノイズ（800 Hz 以上）をカットした。測定時には、モニタのためオシロスコープを使用した。ペンレコーダおよび電磁オシログラフ上の記録データは読み取って整理するとともに、磁気テープ上のデータは周波数分析器によって解析もした。

3.2 試験内容

試験は、試験治具や試験体の特性を調べるための試験前検査、振動台を使用する振動試験および試験後の試験体の異常の有無を調べる試験後検査からなる。

3.2.1 試験前検査

この検査は振動台を使用しないで行なった。検査は外観検査、支持枠の振動試験およびコラムの静剛性試験から成る。

(1) 支持枠振動試験

振動試験において加振試験範囲全域にわたって支持枠の共振が発生しないことが望まれる。このためには、支持枠の固有振動数がこの範囲に無いようにする必要がある。試験の加振範囲

が1~10 Hz程度であるから、支持枠の1次の固有振動数が20 Hzまたはそれ以上であればよい。このため、製作された支持枠がこの要求を満たしているか否かを確認するために、振動台によって加振試験をして、固有振動数を明らかにする。試験治具に試験体を組み込み、最大加速度50 Gal程度で一定として0.5 Hzから30 Hzまで正弦波掃引加振し、支持枠に取付けた加速度計によって応答値を求める。

(2) コラム静剛性試験

コラムの下から8番目のブロックを加力し、Fig.3.9に示すようにコラムの変形量をダイヤルゲージで求め、コラム荷重変位曲線を作成し、コラム振動の単純化モデルデータとなす。

3.2.2 振動試験

振動試験は、正弦波掃引試験、正弦波応答試験およびランダム波応答試験から成る。

(1) 正弦波掃引試験

コラムの固有の振動特性；コラムの応答倍率、共振振動数および減衰比を調べるために、コラム上端のオリフィスブロックの部分にのみ0.5 mmのギャップを設け、その他の周辺のコラムのブロックは全て取り除き、中央のコラムだけにして、正弦波掃引試験を行なう。

(2) 正弦波応答試験

コラムの運動特性と衝突特性を調べるために、中央コラムと周辺コラムとのギャップを2, 4, 7 mmに変化させて、正弦波加振試験を実施する。この場合、上端のオリフィスブロックのギャップは0.5 mmとする。加振方向はX方向とY方向の個別の2方向とする。最大入力加速度は50~500 Gal、加振振動数は1 Hzから15 Hzとする。加振加速度、加振振動数、ギャップ幅、加振方向の変化による応答特性を明らかにする。また、中央コラムに取付けられたガス圧力差模擬ばねの有無による試験を行ない、ガス圧力差がコラムの応答特性に与える影響を明らかにする。

(3) ランダム波応答試験

予想される地震のスペクトル範囲をカバー出来るように、3種類のランダム波を選び、これによって応答試験を実施した。この3つのランダム波は、次のとおりである。

- (i) E 1 Centro 1940 NS 地震波
- (ii) Ibaragi 1964 EW(606) 地震波
- (iii) 1 Hzから10 Hzまでの成分を含むホワイトノイズ波

E 1 Centro 波は実時間波を使用し、Ibaragi 波は時間軸を $1/\sqrt{2}$ に縮少した波形を使用する。上記の3波の時刻歴加速度波形およびパワースペクトルをFig.3.10~3.12に示す。最大加速度は100~500 Gal、ギャップ幅は2, 4, 7 mm、加振方向はX軸方向とする。そして、正弦波応答値と比較して地震波の応答特性を明らかにする。

3.2.3 試験後検査

振動試験終了後、黒鉛ブロックの破損の有無および表面状態の変化について調べる。

Table 3.1 Similarity laws of the model

Physical Quantities	Dimension	Similarity Laws	Similarity laws under the condition of $\frac{E_p}{E_m} = 1, \frac{\rho_p}{\rho_m} = 1, \lambda = 2$
Length	l cm	$l_m = \frac{1}{\lambda} \cdot l_p$	$l_m = \frac{1}{2} \cdot l_p$
Displacement	x cm	$x_m = \frac{1}{\lambda} \cdot x_p$	$x_m = \frac{1}{2} \cdot x_p$
Velocity	v cm/s	$v_m = \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{E_m}{E_p}} \cdot v_p$	$v_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v_p$
Acceleration	α cm/s ²	$\alpha_m = \lambda \cdot \frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot \alpha_p$	$\alpha_m = \alpha_p$
Time	t s	$t_m = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_p}} \cdot t_p$	$t_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot t_p$
Force	F kg	$F_m = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot F_p$	$F_m = \frac{1}{4} \cdot F_p$
Frequency	f 1/s	$f_m = \lambda \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{E_m}{E_p}} \cdot f_p$	$f_m = \sqrt{2} \cdot f_p$
Stress	σ kg/cm ²	$\sigma_m = \frac{E_m}{E_p} \cdot \sigma_p$	$\sigma_m = \sigma_p$
Spring constant	k kg/cm	$k_m = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{E_m}{E_p} \cdot k_p$	$k_m = \frac{1}{2} \cdot k_p$
Mass	m kgs ² /cm	$m_m = \frac{1}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot m_p$	$m_m = \frac{1}{4} \cdot m_p$

suffix

m: model ,

p: prototype ,

 λ : scale factor

Table 3.2 Mechanical properties of graphite
used on vibration test

Item	Value
Material	ASI-F-500 (SIGRI)
Young's modulus	8.67×10^4 kg/cm ²
Compression strength	510 kg/cm ²
Apparent specific weight	1.74 g/cm ³

Table 3.3 Detectors and measuring positions

Item	Detector	Detector position	Number
Block deflection	Eddy current type	Block No.7,9,11,13 (Horizontal) Block No.7 (Vertical)	10
Impact acceleration	Piezoelectric type	Block No.4,6,8,10,12,13	12
Frame acceleration	Strain guage type	Frame	3
Shaking table acceleration	Strain guage type	Table	1

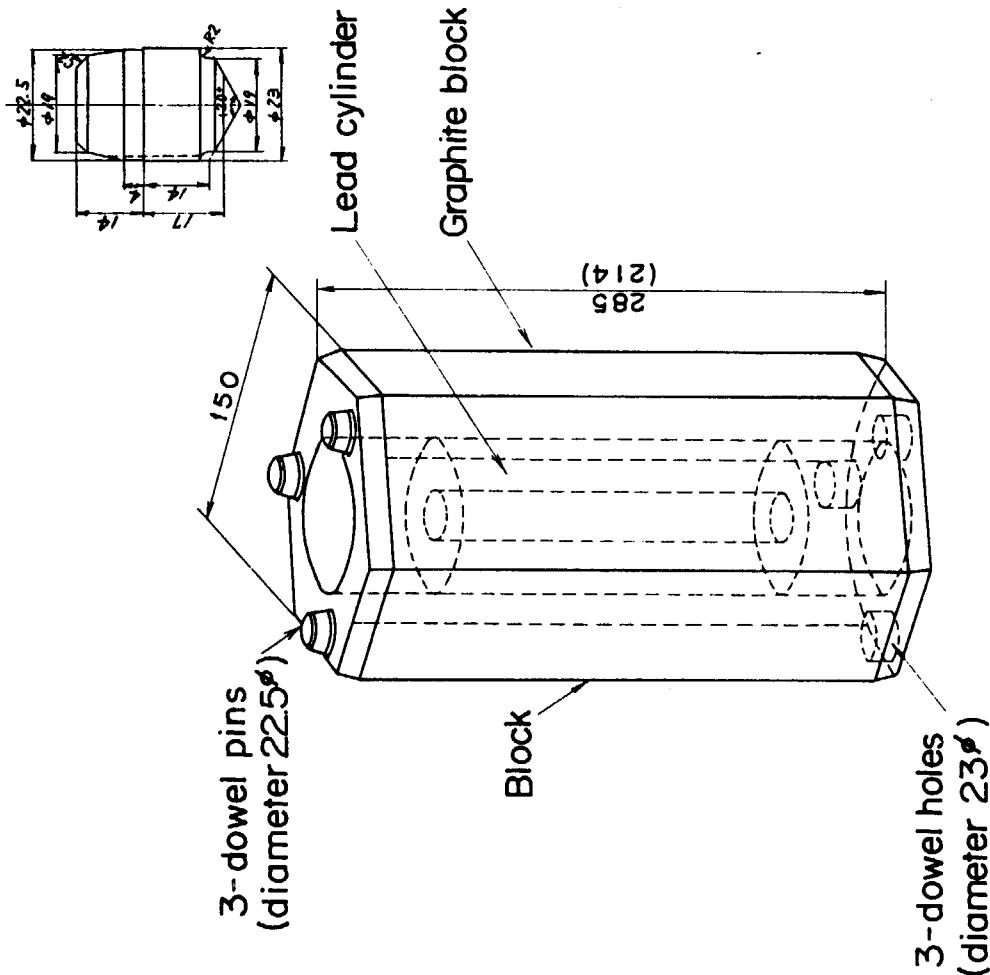


Fig. 3.1 Graphite block
 Dimension : mm
 Weight : 285mm 19.1kg
 214mm 14.3kg

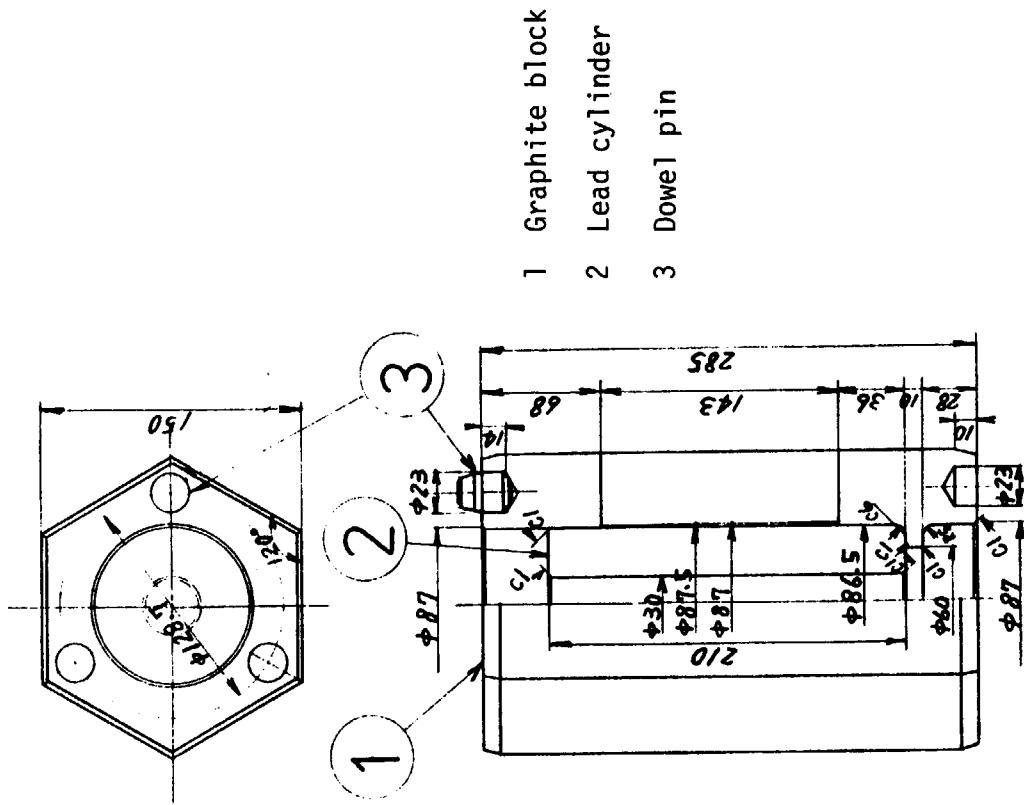


Fig. 3.2 Graphite block

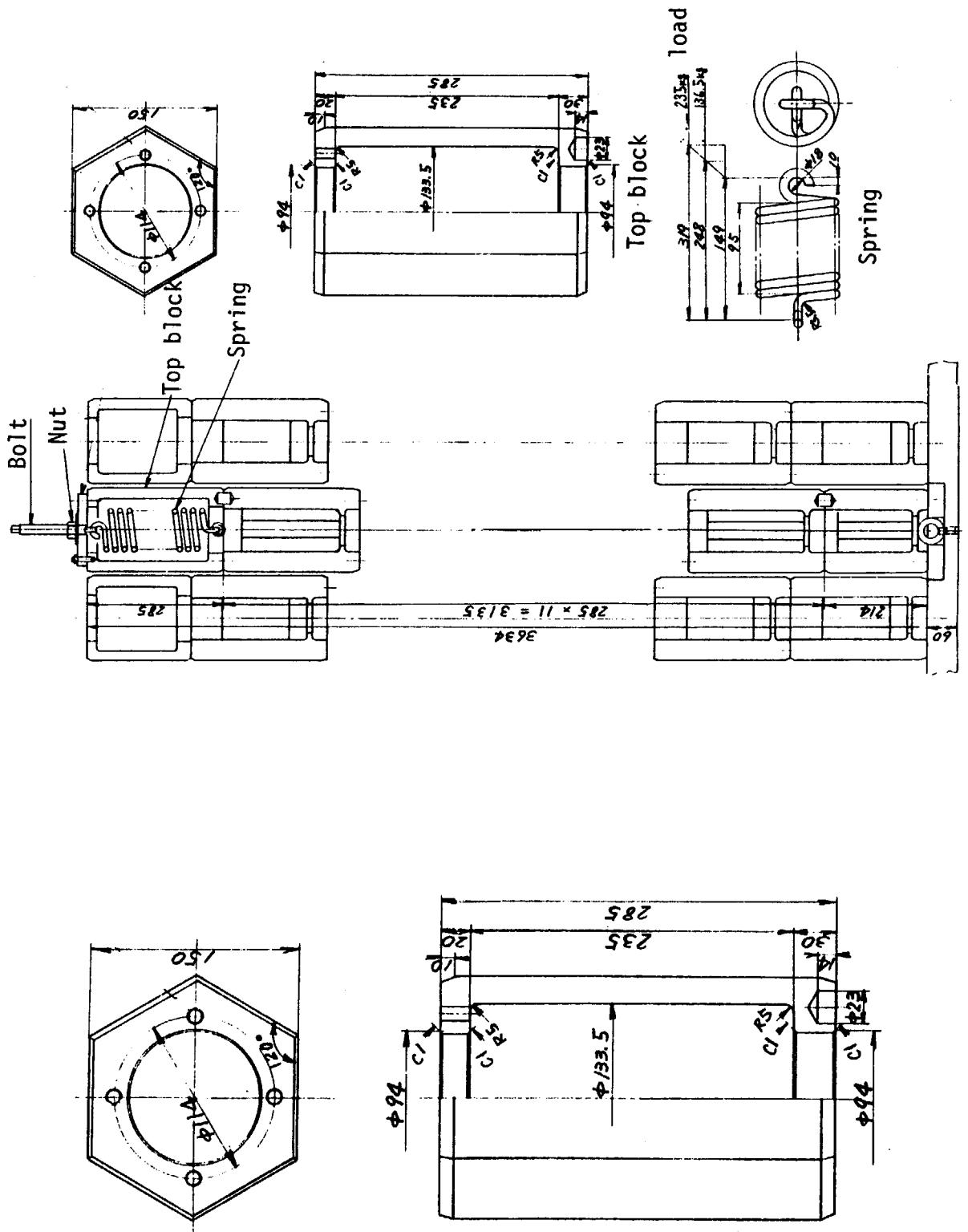


Fig. 3.3 Top steel block

Fig. 3.4 Column arrangement and gas pressure imitate spring

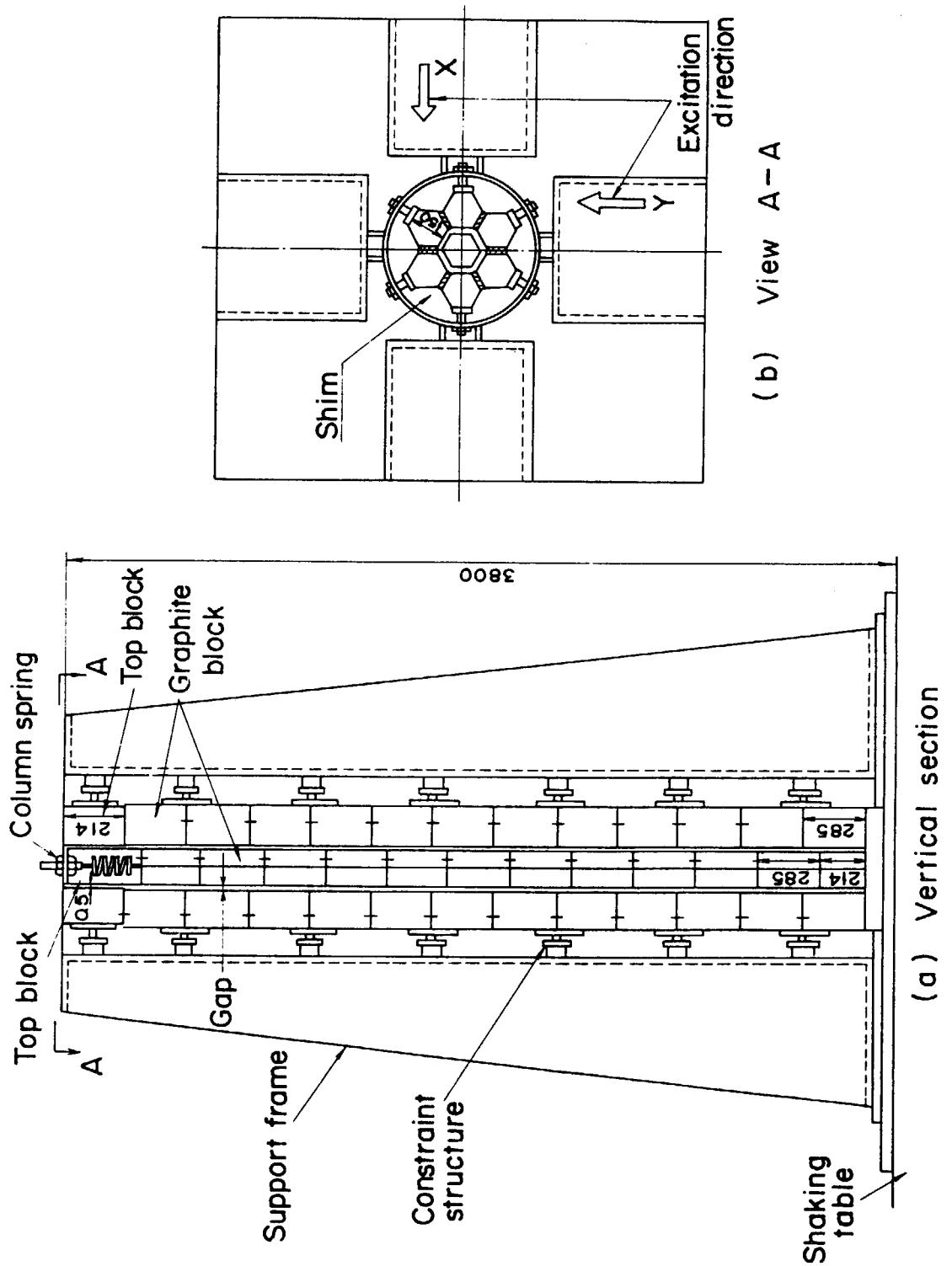


Fig. 3.5 Experimental apparatus for one-region core model

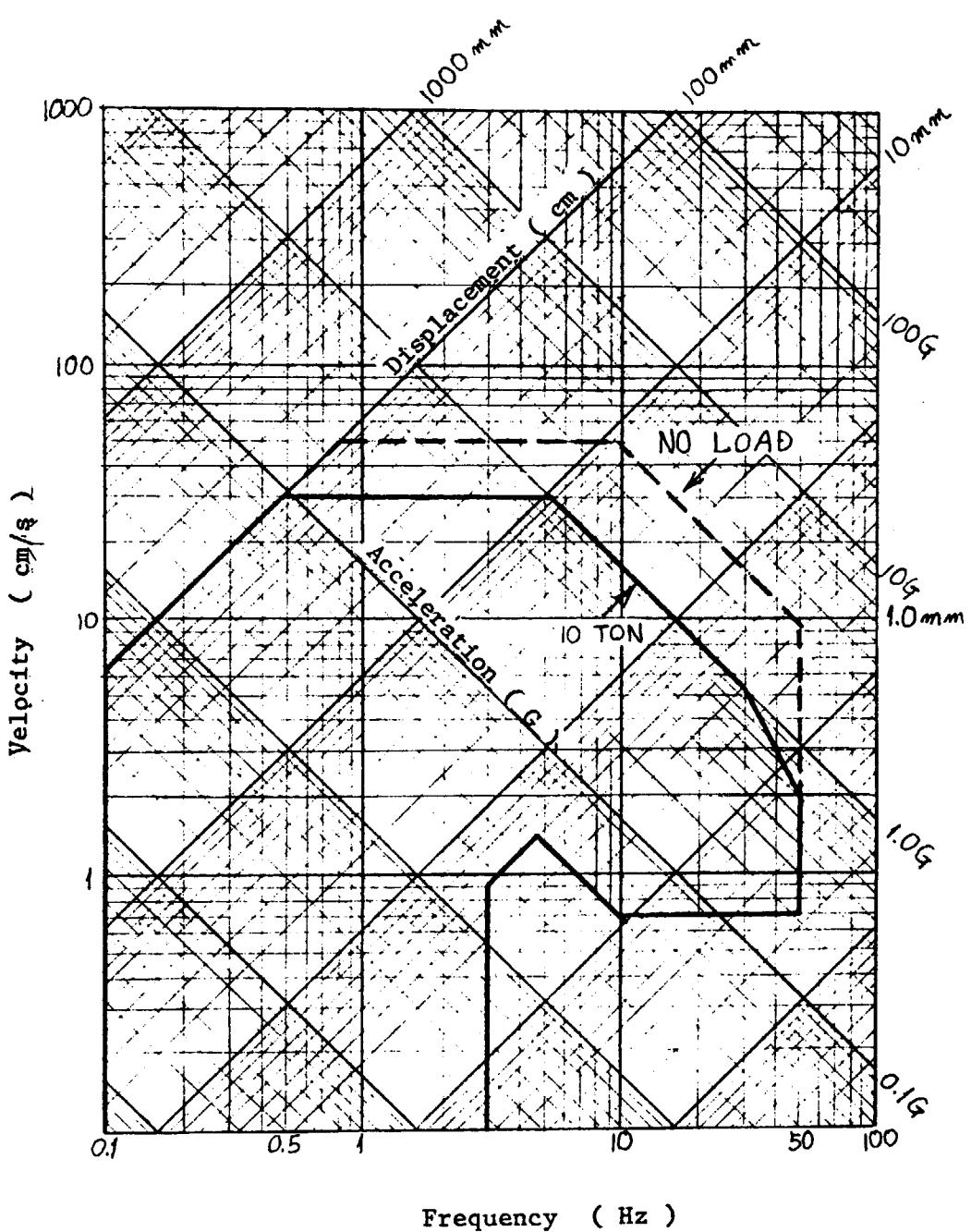


Fig. 3.6 Performance of shaking table

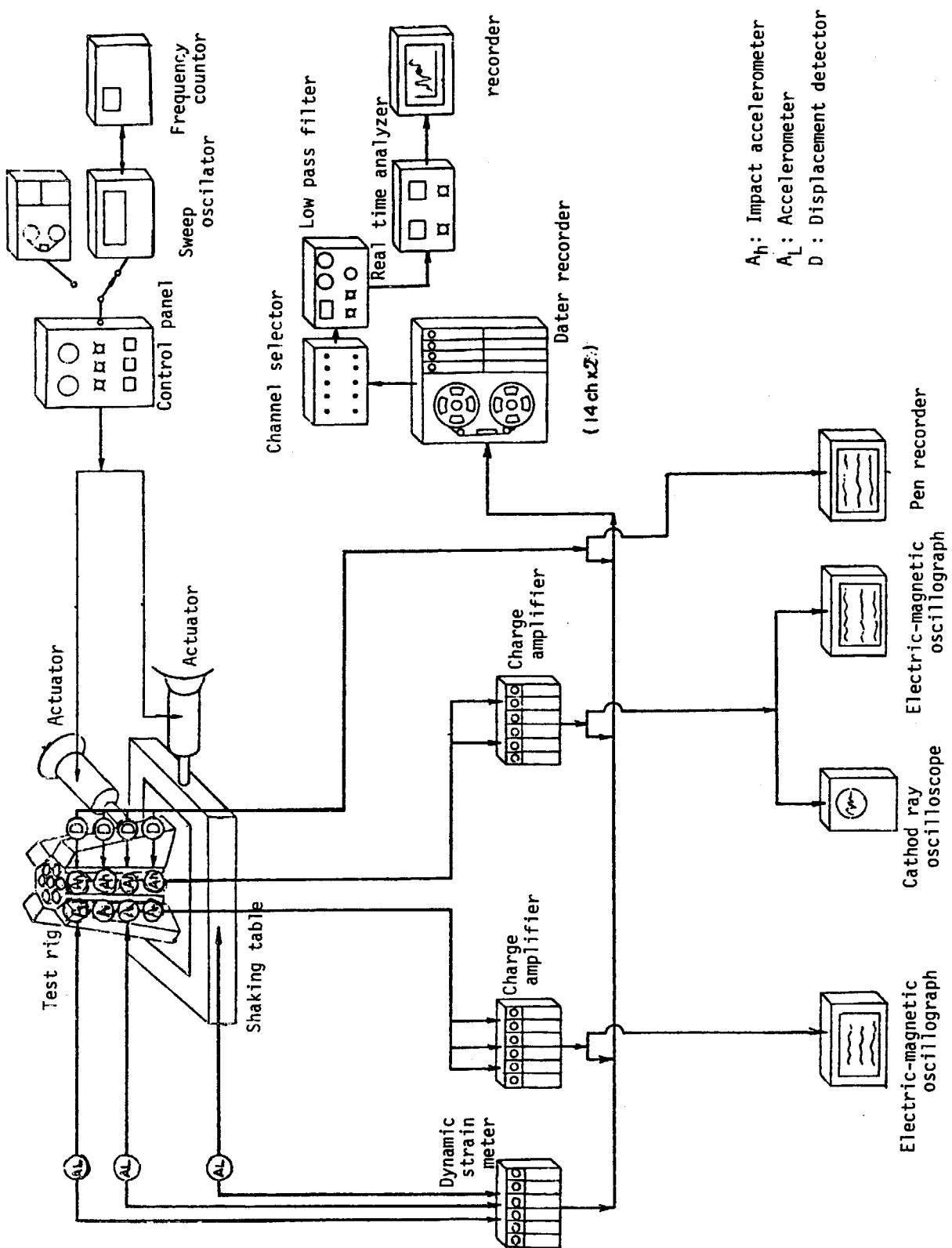


Fig. 3.7 Measurement system block diagram

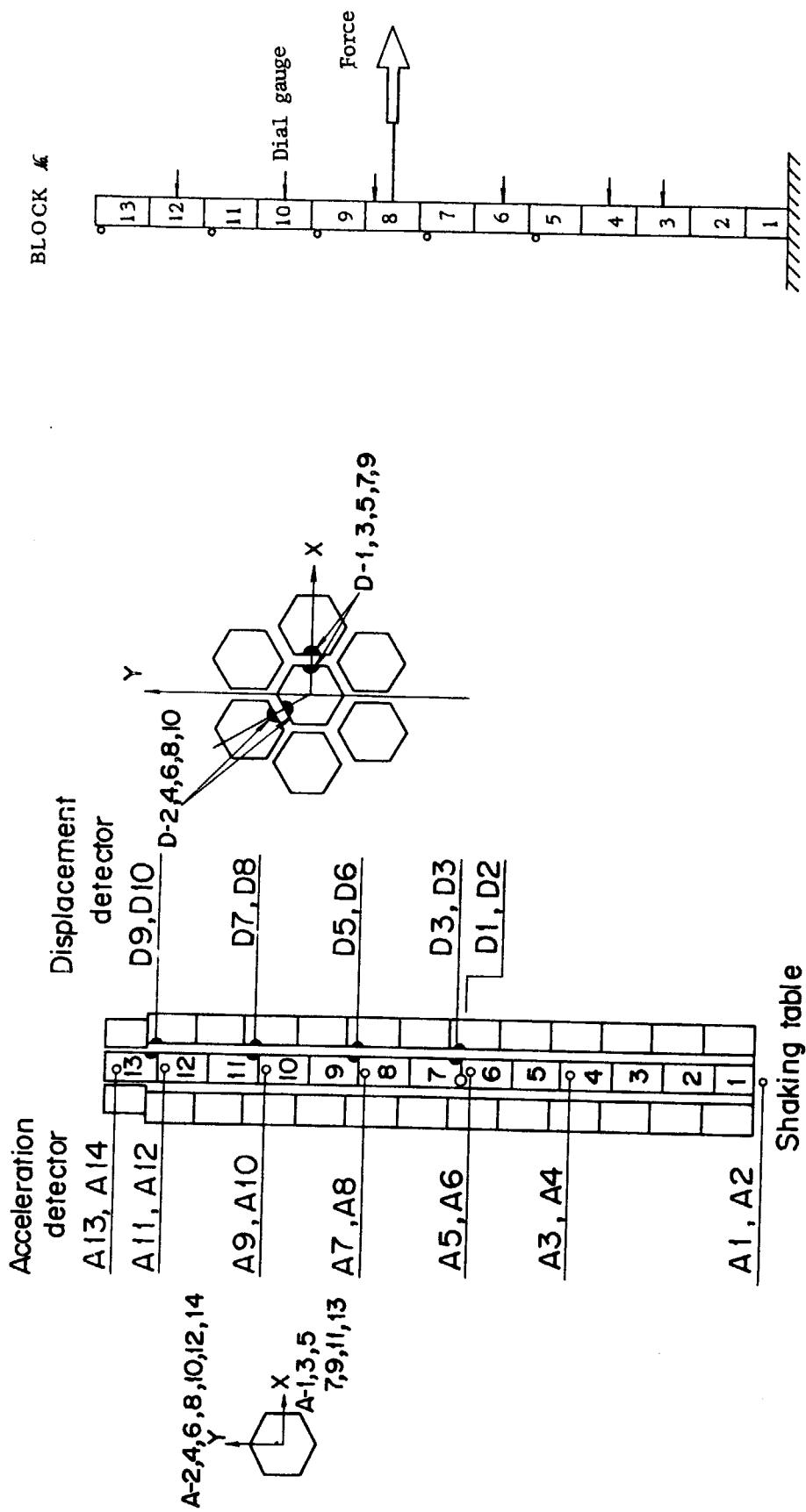


Fig. 3.8 Instrumentation

Fig. 3.9 Column static stiffness test

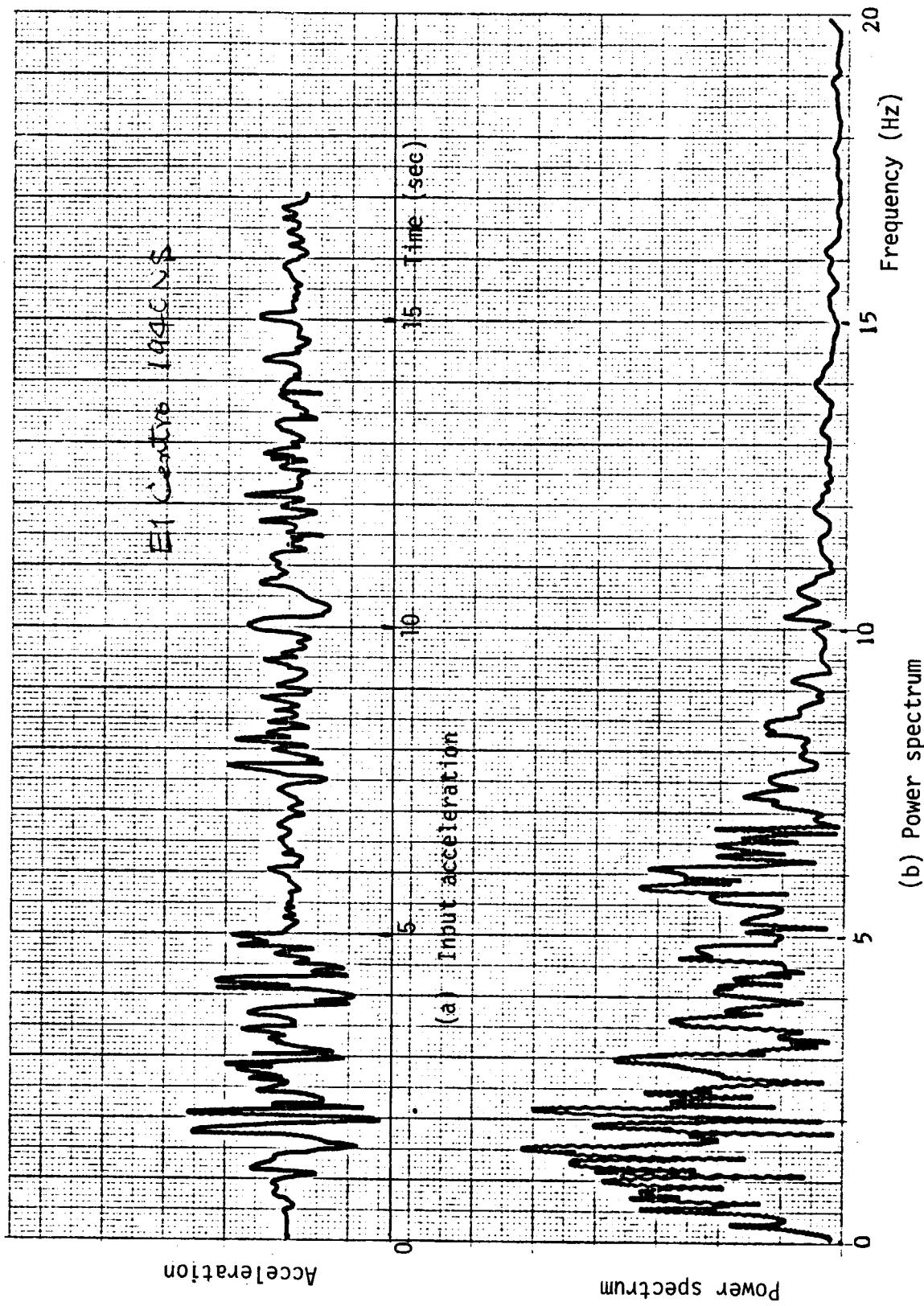


Fig. 3.10 Input acceleration and its power spectrum (E1 Centro 1940 NS wave)

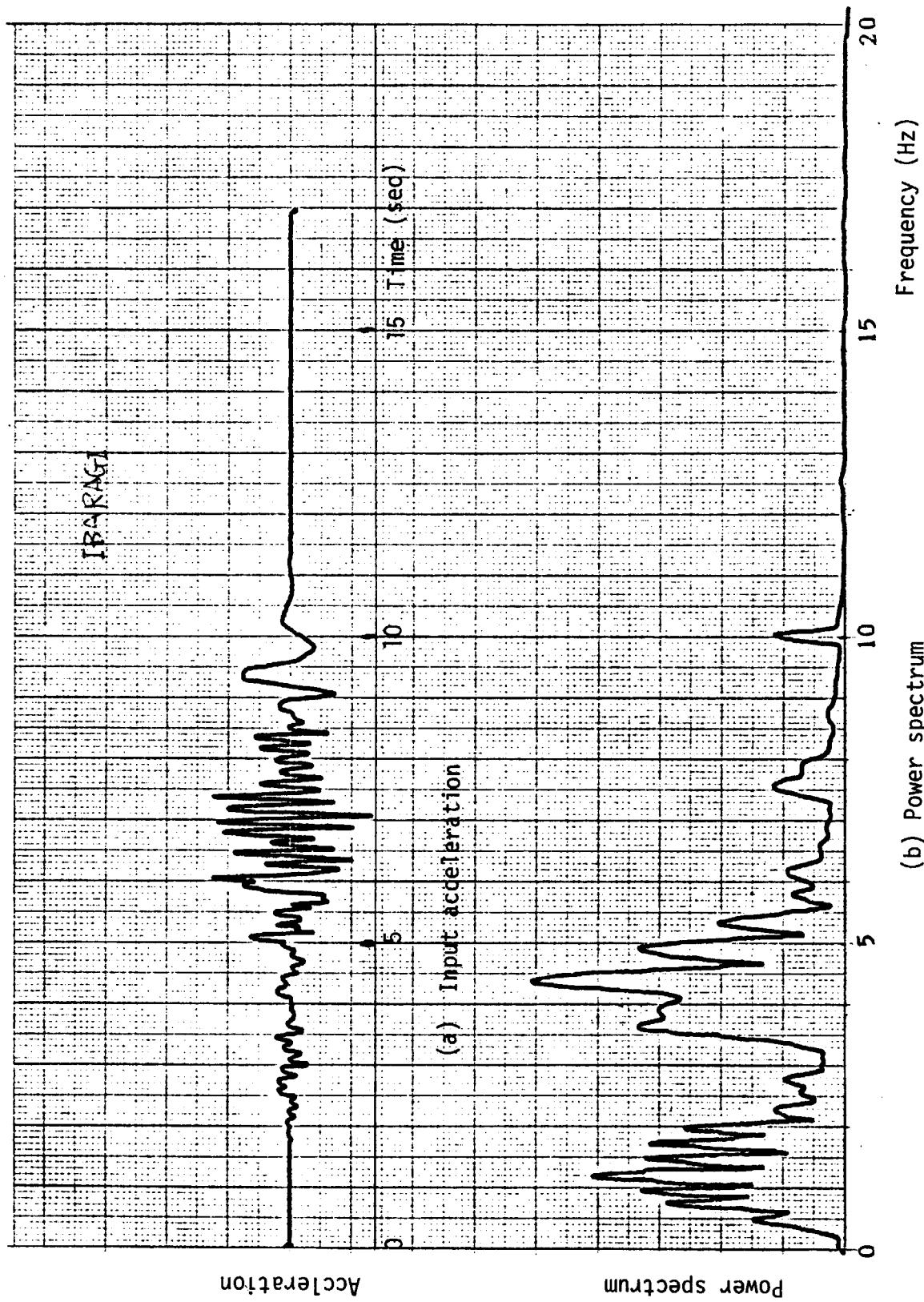


Fig. 3.11 Input acceleration and its power spectrum (Ibaragi 606 wave)

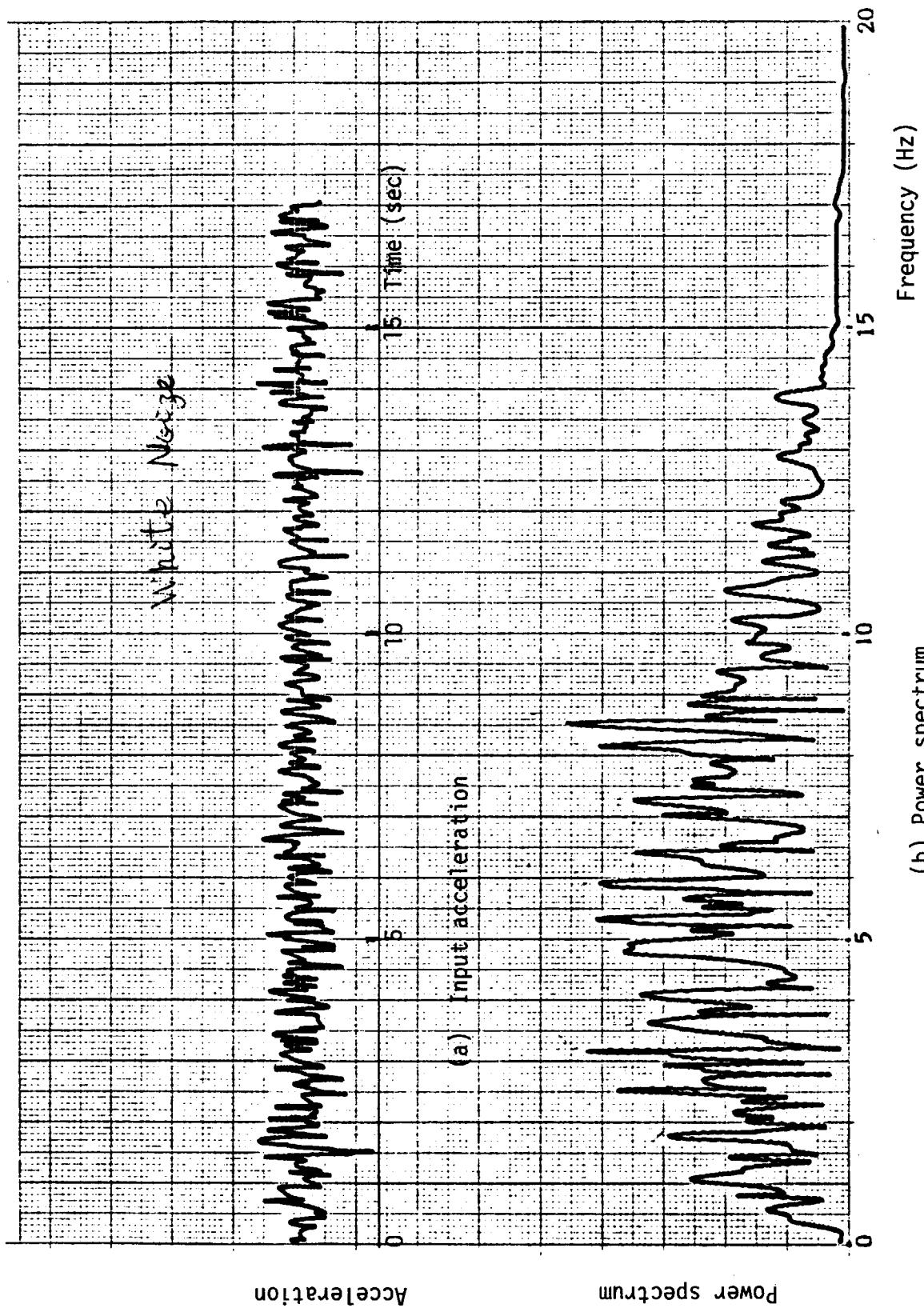


Fig. 3.12 Input acceleration and its power spectrum (White noise)

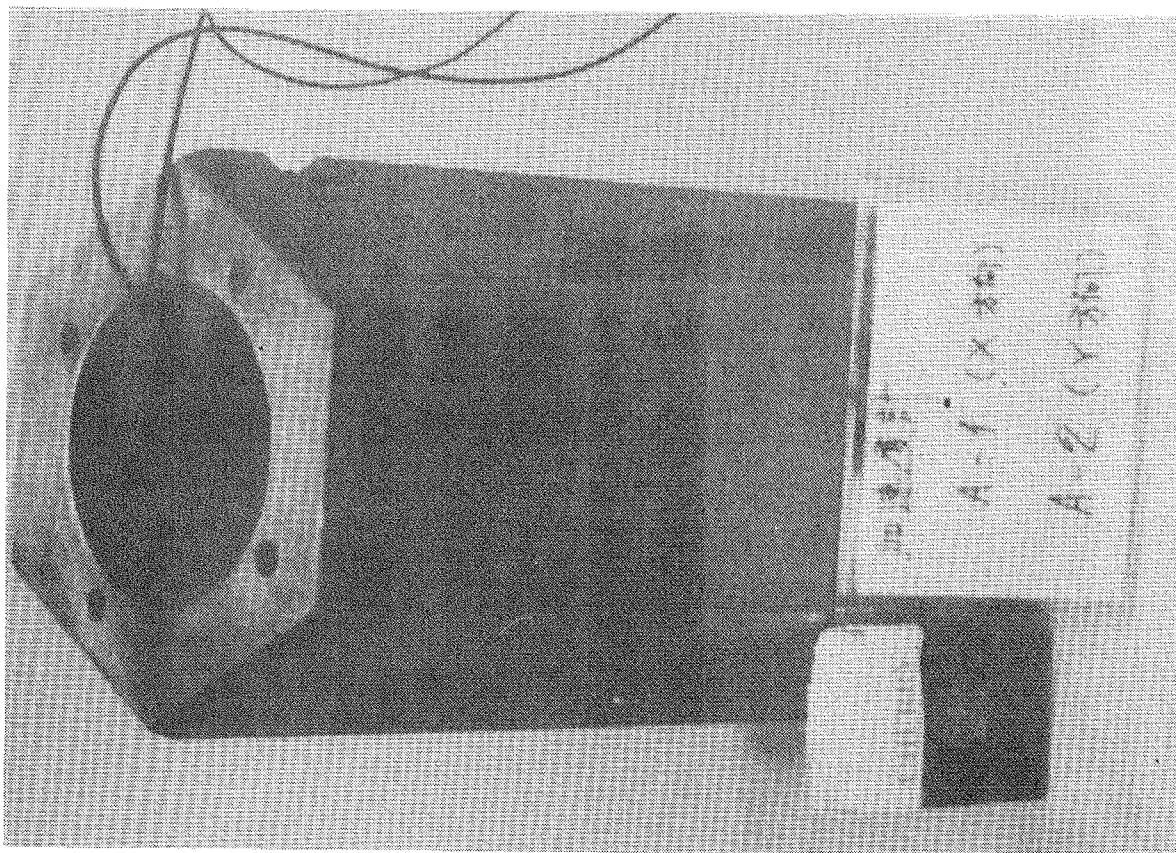


Photo. 3.2 Orifice block

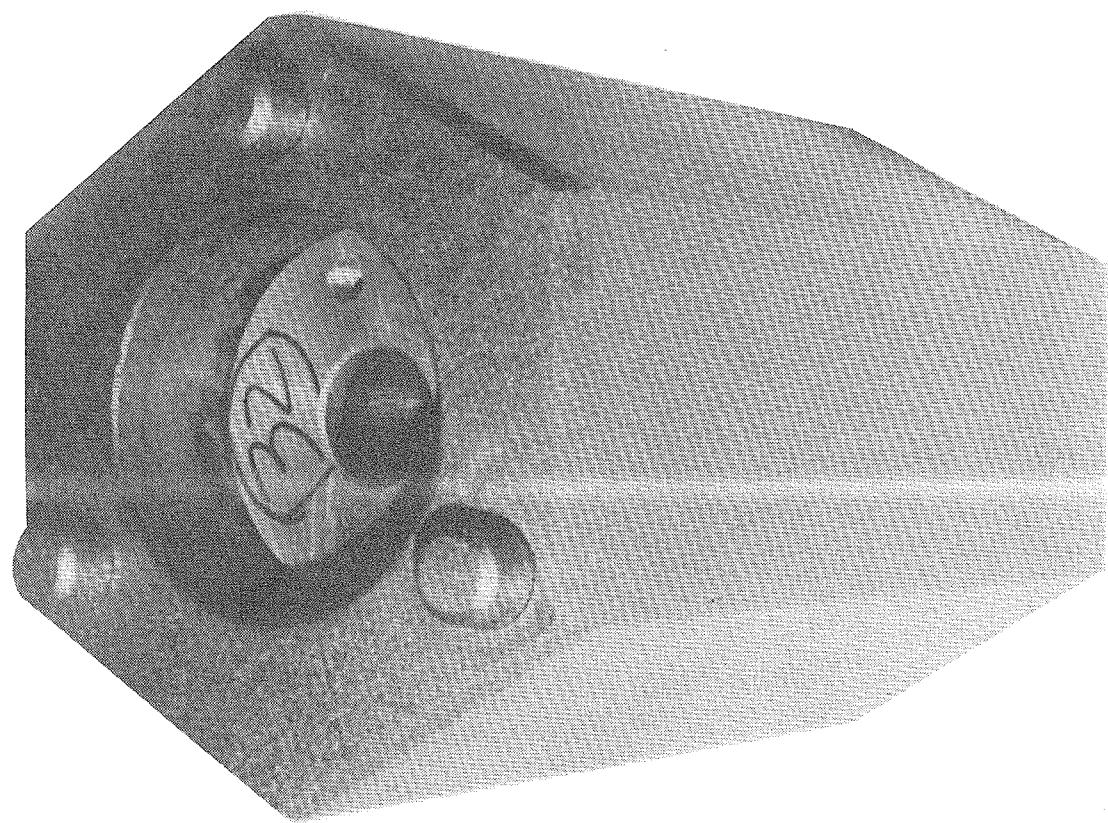
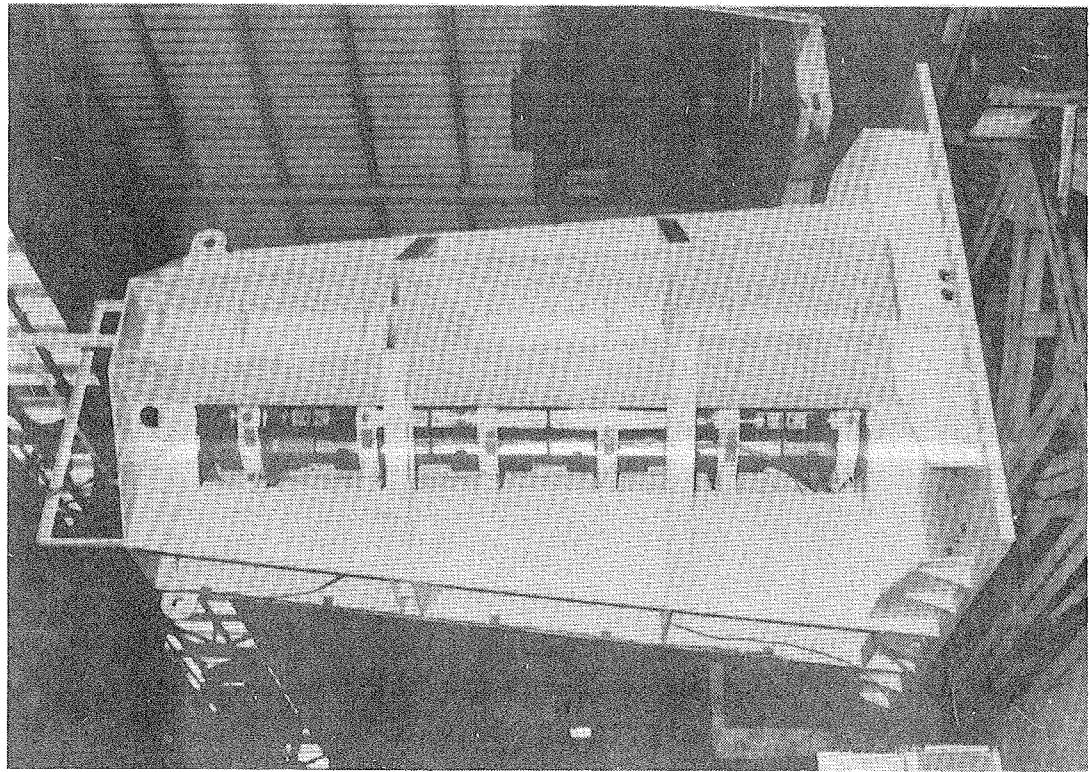
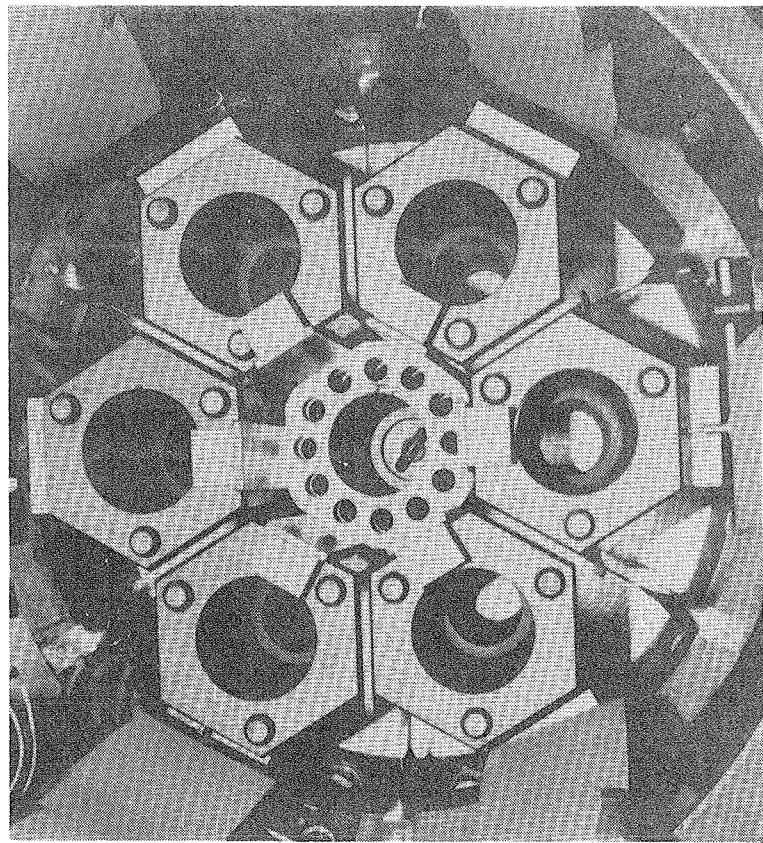


Photo. 3.1 Graphite block



(a) Vertical view

Photo. 3.3 Experimental apparatus



(b) Horizontal view

4. 試験前検査

4.1 支持枠振動試験

支持枠の共振特性を Fig.4.1 に示す。この共振特性は加振方向と平行な加速度応答倍率を示したものであり、共振振動数は 24 Hz、共振時の応答倍率は約 30 倍であった。振動試験範囲は 1 Hz ~ 15 Hz であり、支持枠の共振は本試験に支障がないものと判断できる。

4.2 コラムの静剛性試験

コラム下端から 8 番目のブロックを引張った場合のコラムの荷重変位曲線を Fig.4.2 に示す。荷重変位曲線は、O → A、C → B の順序で求めた。O → A 間では、コラム中のブロック間ではすき間がなく、コラムは梁状に変形する領域である。A 点ですき間が発生し始めて、コラム中の 1 個所で口を開き始め、A → B 間では静的にコラムを一定の状態に保持することが困難な領域であり、コラムが梁状からくの字状に変形する状態への移行領域で不安定な領域である。よって、A → B 間の荷重変位曲線の詳細なデータを得ることができなかった。そこで、逆に C → B へと変化させて荷重変位曲線を得ようとしたが、B 点にくると、急に A 点まで変形した。よって、B → A 間の詳細なデータを得ることもできなかった。B → C 間では、コラムの 1 個所に口が開き、コラムは静的に安定した領域である。

これらの荷重変位曲線に基づいて、コラムの復元ばね定数を求めて、上述の Fig.4.2 に示している。この図から明らかのように、コラムのソフトスプリング特性が明らかである。

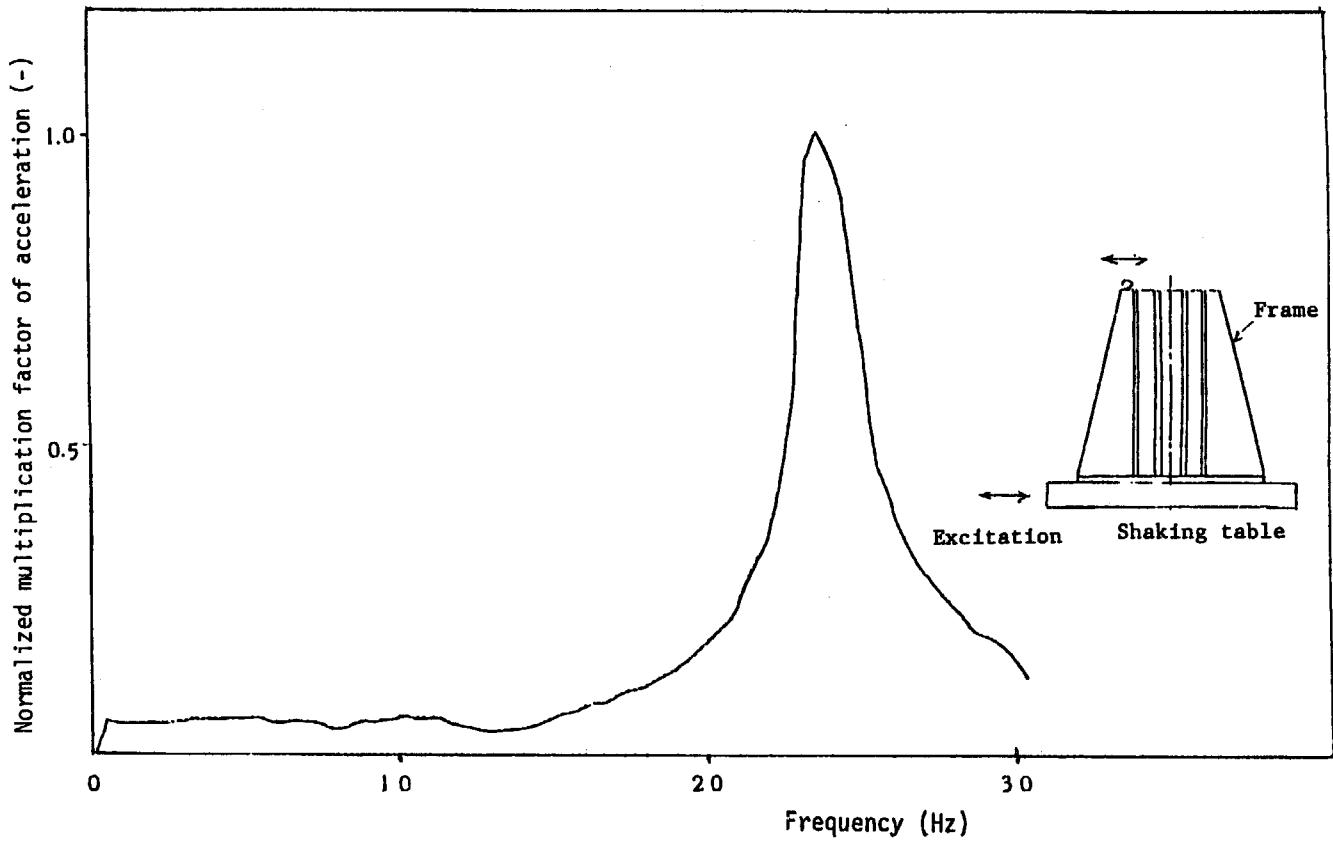


Fig. 4.1 Resonance curves of test rig (X-direction)

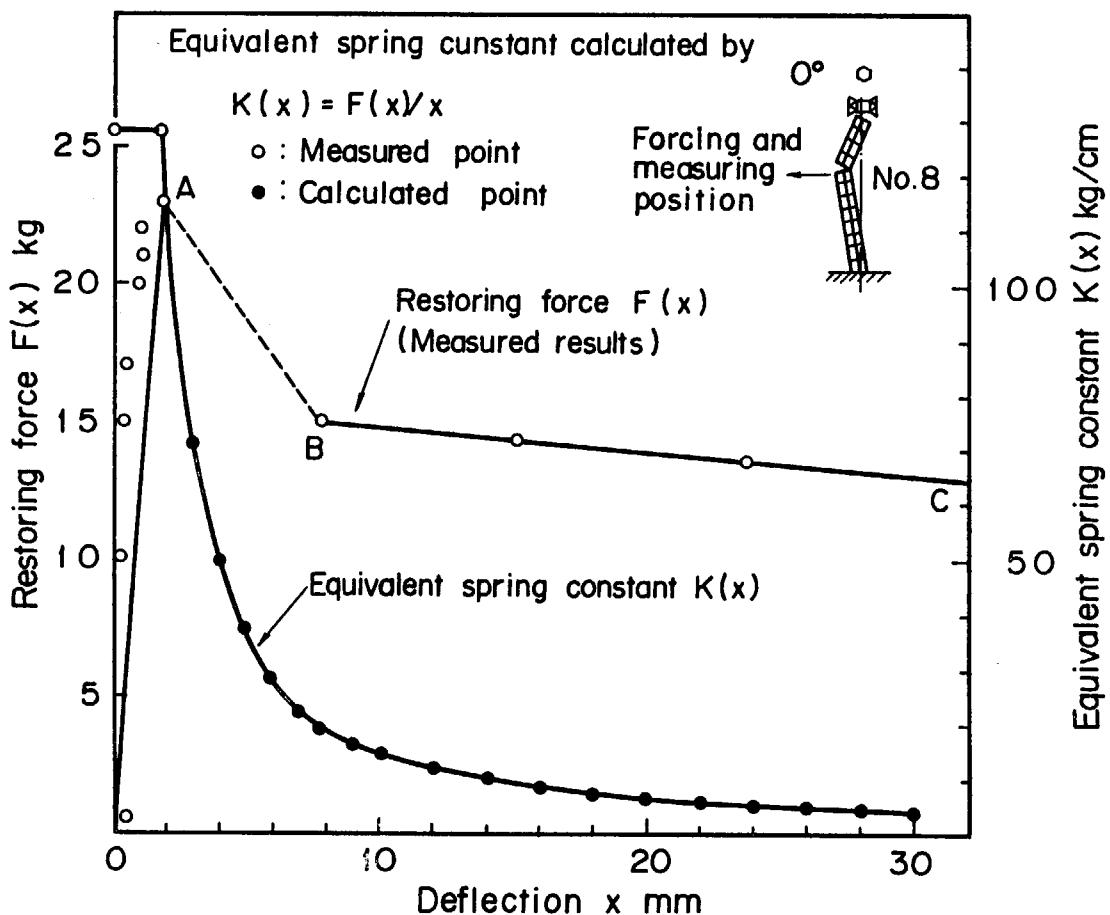


Fig. 4.2 Column restoring force

5. 振動試験

5.1 正弦波掃引試験

コラムの変位はブロックに取付けられた加速度波形から逆算して求めた。コラムの変位特性を Fig.5.1 に示す。この図から明らかのように、加振加速度の増加に従って、共振振動数が低下する、いわゆるソフトスプリング特性が存在することがわかる。

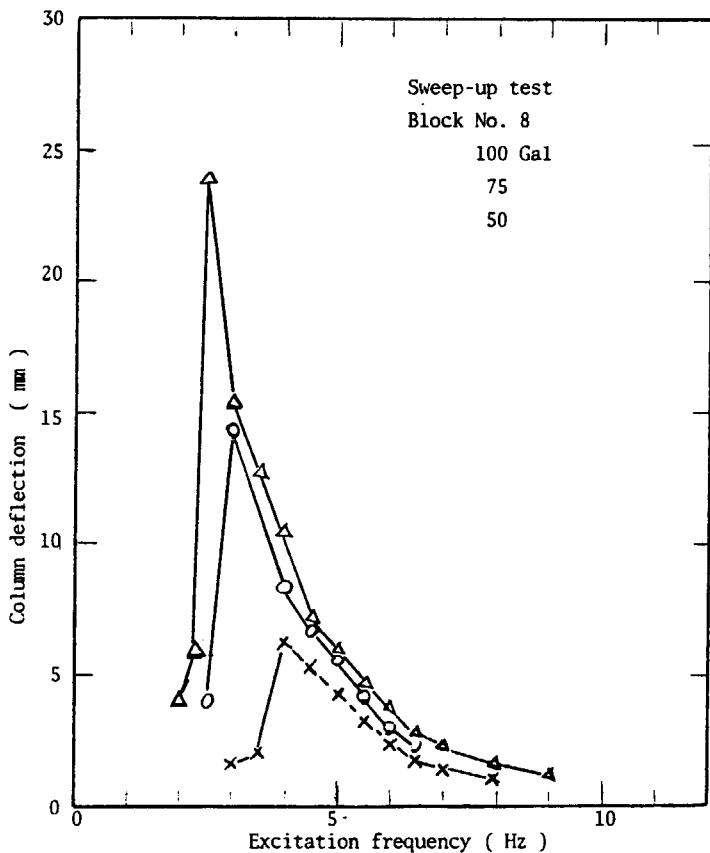


Fig. 5.1 Column deflection characteristic

(2) 共振特性

コラムの変位応答曲線から、共振倍率を求めると Table 5.1 のようになる。これから減衰比を次の式によって求めて、同表に示す。

$$h = \frac{1}{2Q}$$

ここで、

h : 減衰比

Q : 応答倍率

表から、コラムの変位共振倍率は約3～4倍であり、変位共振時の減衰比はコラムの変位量に従って増加し、コラムの変位6～16 mmにおいて約13～17%である。

Table 5.1 Column vibration characteristics

Input acceleration (Gal)	Response amplitude (-)	Resonance frequency (Hz)	Damping factor (%)
50	4.0	4	13
75	3.3	3	15
100	3.0	2.5	17

5.2 正弦波応答試験

5.2.1 変位応答特性

(1) 振動モード

コラムの振動モードの1例をFig.5.2に示す。これはコラム間ギャップ2 mm、最大加速度100 Galの場合の加振振動数の変化によるコラムの最大変位を示したものである。加振振動数が低い場合には、中央のコラムは周辺のコラムと衝突しない。加振振動数の上昇に従って中央コラムの振幅は増加し、ついには周辺コラムと衝突する。さらに振動数が上昇すると、振幅が急激に低下して、ついには衝突しなくなる。中央コラムが周辺のコラムと衝突しない場合、コラム下端から2/3長の所、13段ブロックの下から8～10段の間で1個所だけ口を開く形で振動する。一方、衝突する場合、中央コラムは下端より2/3長付近を腹として多数個のブロックが周辺コラムに張り付く振動モードとなる。

(2) コラムの振れ回り

Fig.5.3と5.4はコラムがY方向加振（ブロックのロッキングの支点が六角形ブロックの六角の角となるような加振条件）の場合のブロックNo.9の振れ回り運動を加振振動数ごとに示している。図は、加振正弦波1サイクル間のブロック中心の移動軌跡を示している。Fig.5.4において加振振動数が低い場合、振れ回り運動は大きく発生していない。加振振動数の上昇に従って、振れ回りが大きくなり、7.5 Hzにおいて最大の振れ回りが発生している。この振れ回りについて、加振方向に近い加振方向と30°方向の変位と加振方向と直角方向の変位特性をFig.5.5に示す。この図から明らかのように、加振方向（Y方向）の変位のピークが7 Hzで現われ、次に加振方向の応答変位が低下してから加振方向と直角方向（X方向）の変位ピークが7.5 Hzで現われ、振れ回りが発生している様子が判る。さらに加振振動数が上昇すると、加振方向およびそれと直角方向の応答変位は低下してくる。Table 5.2は急激に変位が上昇お

より降下する振動数を加振方向別に示している。これから明らかなように、Fig.5.5の条件に相当するもので、Y方向加振では7Hz、X方向加振では7.5Hzであり、振れ回り運動時の急激な降下振動数の少し低い加振振動数で最も大きな振れ回りが発生することが判る。

このように振れ回り運動が発生する条件は、Y方向(六角ブロックの角方向)に加振し、かつ、X方向(六角ブロックの平方向)のコラムの共振振動数で加振した場合である。

この振れ回り運動の原因として次の事が考えられる。六角ブロックの角を支点とするロッキング運動では、六角の辺を支点とする場合よりもブロックの位置ポテンシアルが高いはずである。よって角を支点とするロッキング運動は、よりポテンシアルの低い辺を支点とするロッキング運動へ移行しようとして振れ回りが発生する。それ故、Y方向加振では、X方向加振の場合よりも振れ回りが発生し易い。

(3) 分数調波振動

加振加速度レベルが低く加振振動数が高い場合、または加速度レベルが高く加振振動数が低い場合のいずれかにおいて分数調波振動が見られる。Fig.5.6は前者の場合の1例であり、加振振動数6.5Hzと9.5Hzにおいて、それぞれ1/2と1/3の分数調波振動が観測された。これらの波形をトラッキングフィルタによって分析した。その結果をFig.5.7と5.8に示す。これからも上述の分数調波振動が確かめられる。この分数調波振動の原因として、ブロック上下面の摩擦の不可逆性、コラム上端のギャップの非対称支持条件によるものと考えられるが、最も大きな要因は後者によるものであろう。

(4) コラムの変位特性

Fig.5.9は加振レベルの変化によるコラムの変位応答特性を示している。同図(a)は変位一定加振条件下的変位特性を示しており、加振振幅の増加に従ってコラムの変位振幅が急激に増加する振動数、すなわち立上り振動数が低下していることが判る。これはブロックのロッキング運動(ブロック上下間摩擦を含む)によるものであり、コラムはソフトスプリング形の非線型ばね特性を持っているためと考えられる。

同図(b)は加速度一定加振条件下的コラムの変位特性である。加振加速度の増加に従ってコラムの変位振幅が急激に減少する振動数、すなわち降下振動数が上昇することが判る。

これらの結果をまとめてTable 5.3に示す。

(5) 加振振動数の上昇時と降下時の変位特性

加振振動数の上昇時(スイープアップ試験)と降下時(スイープダウン試験)におけるコラムの変位応答特性をFig.5.10に示す。同図(a)は変位一定加振の場合の変位特性を示したものであり、コラム振幅の急激な立上り振動数は、スイープアップ時ではスイープダウン時よりも高くなっていることが判る。同図(b)は加速度一定加振の場合の変位特性を示したものであり、コラム振幅の急激な降下振動数は、スイープアップ時ではスイープダウン時よりも高くなっていることが判る。このようにコラムの非線形ソフトスプリング特性に起因して、Fig.5.11に示すようにコラムの変位応答特性には跳躍点のある履歴現象が見られる。

(6) ギャップ幅の影響

ギャップ幅の変化によるコラムの変位応答特性をFig.5.12に示す。ギャップ幅が大きくなるに従って高い振動数領域において、周辺のコラムとの衝突が起らなくなり、衝突する振動数

領域が狭くなる。ギャップ幅の変化による変位の立上り振動数および降下振動数を Table 5.4 に示す。これから、ギャップ幅の増加に従って、降下振動数が低下することが判る。この原因に関しては、すでに 1 コラムの振動試験の報告書^{(5),(7)}において詳述している。

(7) ガス圧力差模擬ばねの影響

ガス圧力差模擬ばねの有無によるコラムの変位応答特性を Fig.5.1 3 に示す。同図(a)は変位一定加振条件下の変位特性を示している。ガス圧力差模擬ばねを取り付けたコラムは、ばね無しのものに比較して、コラムの変位振幅の立上り振動数が上昇している。同図(b)は加速度一定加振条件下の変位特性を示す。ばね有りコラムは、ばね無しのものに比較して、コラムの変位振幅の降下振動数が上昇している。この様子は Table 5.5 にも一覧して示す。

このようにガス圧力差模擬ばね有りコラムは、ばね無しコラムに比較して、変位上昇振動数と降下振動数の両方とも上昇していることが判る。また、ばね有りコラムでは、ばね無しのものに比較して、共振時の変位応答量も低下している。これは、ばねの圧縮力がコラムに加えられることによって、ブロック上下間接触面の摩擦力が増加することによるものと考えられる。

(8) 加振方向による差

加振方向による変位振幅の立上り振動数と降下振動数について、すでに Table 5.2 に示した。X 方向加振では Y 方向加振に比較して、これらの振動数はいずれも上昇している。

5.2.2 衝突特性

(1) 加振加速度レベルの影響

変位一定加振条件における衝撃加速度応答値を Fig.5.1 4 に示す。この図で示した衝撃力はブロックの質量と衝撃加速度との積である。図から明らかなように、低加振加速度レベルでは、衝突が起らないから衝撃値は零である。加振速レベルの上昇に従って、衝突が発生し始め、加速度の増加に従って衝撃値は増加する。共振振動数である 5.5 Hz においてピーク値を示す。

(2) コラム間ギャップ幅の影響

ギャップ幅の変化による衝撃応答値は Fig.5.1 5 に加振加速度のパラメータとして示されている。図から、ギャップ幅の増加に従って衝撃値が増加していることが判る。これは、ギャップ幅の増加に従って、衝突前のブロックの速度が増加しているからと考えられる。

(3) ロッキング運動時の接触時間

衝突を含む振動現象を数値解析によってシミュレートするためには、衝突時の接触時間を明らかにするとともに、必要に応じてこの接触時間や衝突波形から衝突ばね定数や減衰係数を設定する必要がある。このため、ブロック 2 個の衝突試験を行ない、衝突速度や衝突様式の変化による接触時間を測定している。しかし、より現実的には、炉心を構成したブロック間の衝突接触時間を測定して、その平均値を解析に使用して行く必要がある。そこで、本振動試験において上下間のブロックの衝突時の加速度波形からロッキング運動時の接触時間を求めた。

接触時間の特性を Table 5.6 に示す。この表から明らかなように本試験範囲（衝突速度 5 ~ 15 cm/sec）では $2 \sim 4 \times 10^{-3}$ 秒である。衝突速度による接触時間への影響は、データのはらつきが大きく明らかにすることはできなかった。しかし、解析データとして接触時間の平均的な値を知ることができた。

(4) コラムの一方向衝突

中央コラムと周辺コラムとのギャップ幅が不均一の場合、コラムは一方向とだけ衝突する。または、一方の面が他の面よりも強く衝突する。これらのことことが観測された。

(5) コラム衝撃加速度分布

コラムに沿う衝撃加速度の分布図を Fig.5.1 6 に示す。図から明らかなように、ギャップ幅が小さい場合には、衝撃加速度はコラム下端から $2/3$ 長付近になだらかな丘形の分布となる。一方、ギャップ幅が大きくなるに従って、コラム下端から $2/3$ 長付近に最大値を有する山形の分布となる。この分布は、コラムの最大変位モードと同じ傾向である。

5.3 ランダム波応答試験

Fig.5.1 7 に、E 1 Centro 波、ホワイトノイズ波および Ibaragi 波によるコラムの衝撃加速度のコラムに沿う分布を示す。衝撃値の分布は正弦波の場合と良く一致している。しかし、最大値は正弦波の場合の $1/4$ 程度となっている。

Table 5.2 Effect of excitation direction on jump frequency

Model condition			Jump up frequency (Hz)				Jump down frequency (Hz)			
Excitation direction	Column spring	Gap (mm)	Input displacement (mm)				Input acceleration (Gal)			
			0.5	1	2	4	75	100	300	400
Y	With spring	5.5	5.5	4.5	3.5	7.0	7.0	9.0	9.0	9.5
		2	8.0	6.5	5.5	3.6	-	7.5	-	13.5
X										

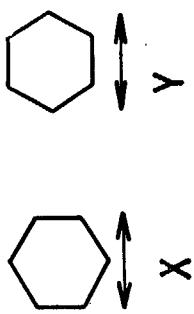


Table 5.3 Jump frequencies (resonance frequencies)

Model condition			Jump up frequency (Hz)				Jump down frequency (Hz)			
Excitation direction	Column spring	Gap (mm)	Input displacement (mm)				Input acceleration (Gal)			
			0.5	1	2	4	75	100	300	400
Y	With spring	5.5	5.5	4.5	3.5	7.0	7.0	9.0	9.0	9.5
		2	8.0	6.5	5.5	3.6	-	7.5	-	13.5
X	Without spring	5.0	5.0	4.0	3.0	5.5	6.0	10.5	12.0	
		4	4.0	3.3	2.8	2.5	4.5	7.0	7.5	
		7	4.5	3.5	2.5	2.8	4.0	5.0	5.5	

Table 5.4 Effect of gap width on jump frequency

Model condition			Jump up frequency (Hz)				Jump down frequency (Hz)		
Excitation direction	Column spring	Gap (mm)	Input displacement (mm)			Input acceleration (Gal)			
			0.5	1	2		75	100	300
X	Without spring	2	5.0	5.0	4.0	3.0	5.5	6.0	10.5
		4	4.0	3.3	2.8	2.5	4.5	4.5	7.0
		7	4.5	3.5	3.5	2.5	2.8	4.0	5.0

Table 5.5 Effect of column spring on jump frequency

Model condition			Jump up frequency (Hz)				Jump down frequency (Hz)		
Excitation direction	Column spring	Gap (mm)	Input displacement (mm)			Input acceleration (Gal)			
			0.5	1	2		75	100	300
X	With	2	8.0	6.5	5.5	3.6	-	7.5	-
		Without	5.0	5.0	4.0	3.0	5.5	6.0	10.5

Table 5.6 Contact duration time

		$(\times \frac{1}{1000})$ (sec)												
		Frequency (Hz)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	6.0	6.5	8.0	8.5	9.0
		X-direction	A - 10	-	2.7	2.3	2.0	2.3	2.8	2.8	3.0	3.0	3.2	
$\delta = 2$		A - 8	-	-	3.8	3.9	3.6	3.3	3.5	3.5	4.0	4.1	4.2	
400 gal														
		X-direction	A - 10	2.7	2.9	2.8	3.2	3.5	-	4.0	-	-	-	-
$\delta = 4$		A - 8	3.8	2.3	2.3	3.0	-	-	-	-	-	-	-	
400 gal														
		X-direction	A - 10	3.0	3.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\delta = 7$		A - 8	3.0	3.1	3.9	-	4.2	-	2.5	3.5	-	-	-	-
400 gal														
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
A - 10	A - 10	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	A - 8	

BLOCK #

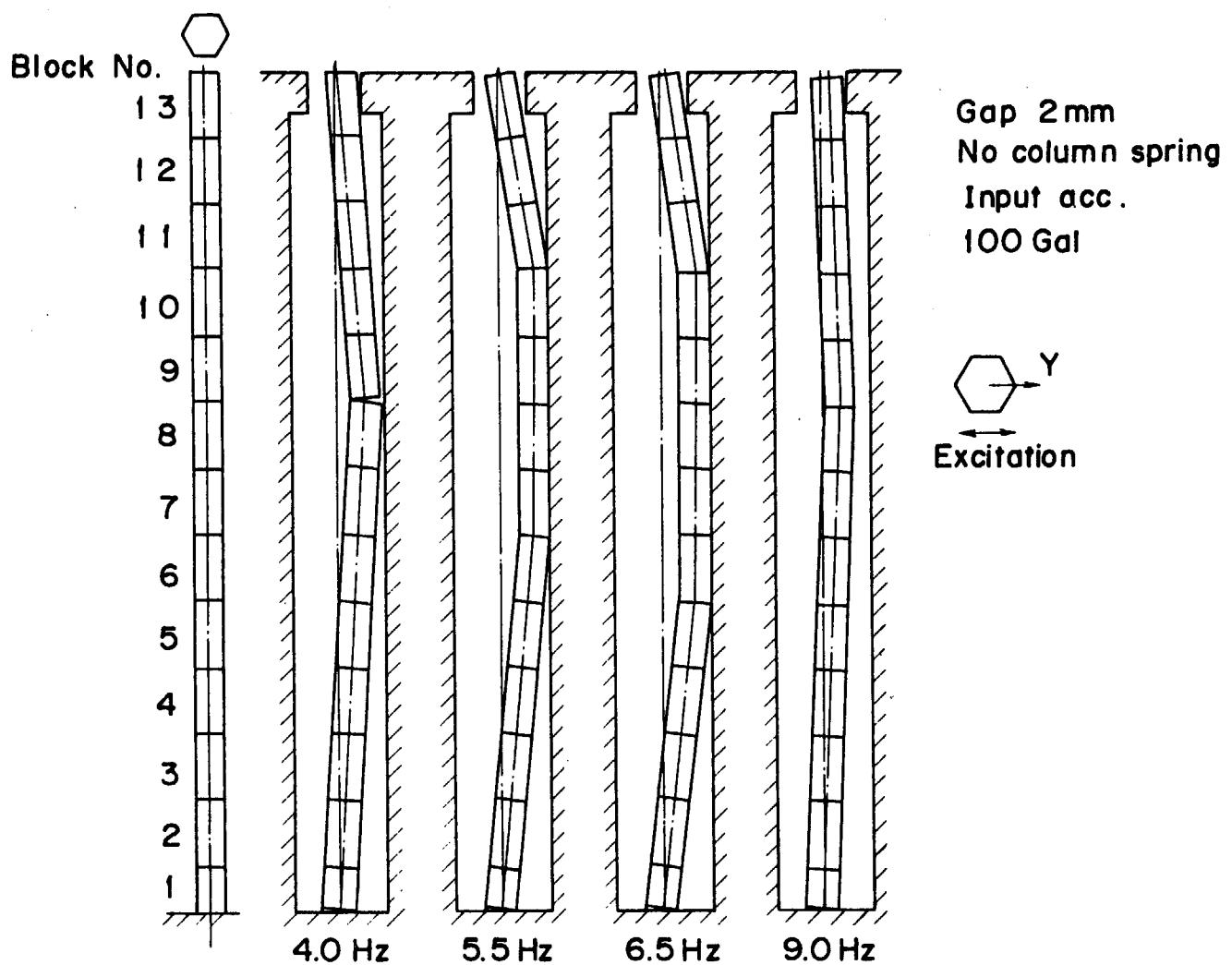


Fig. 5.2 Vibration mode of column

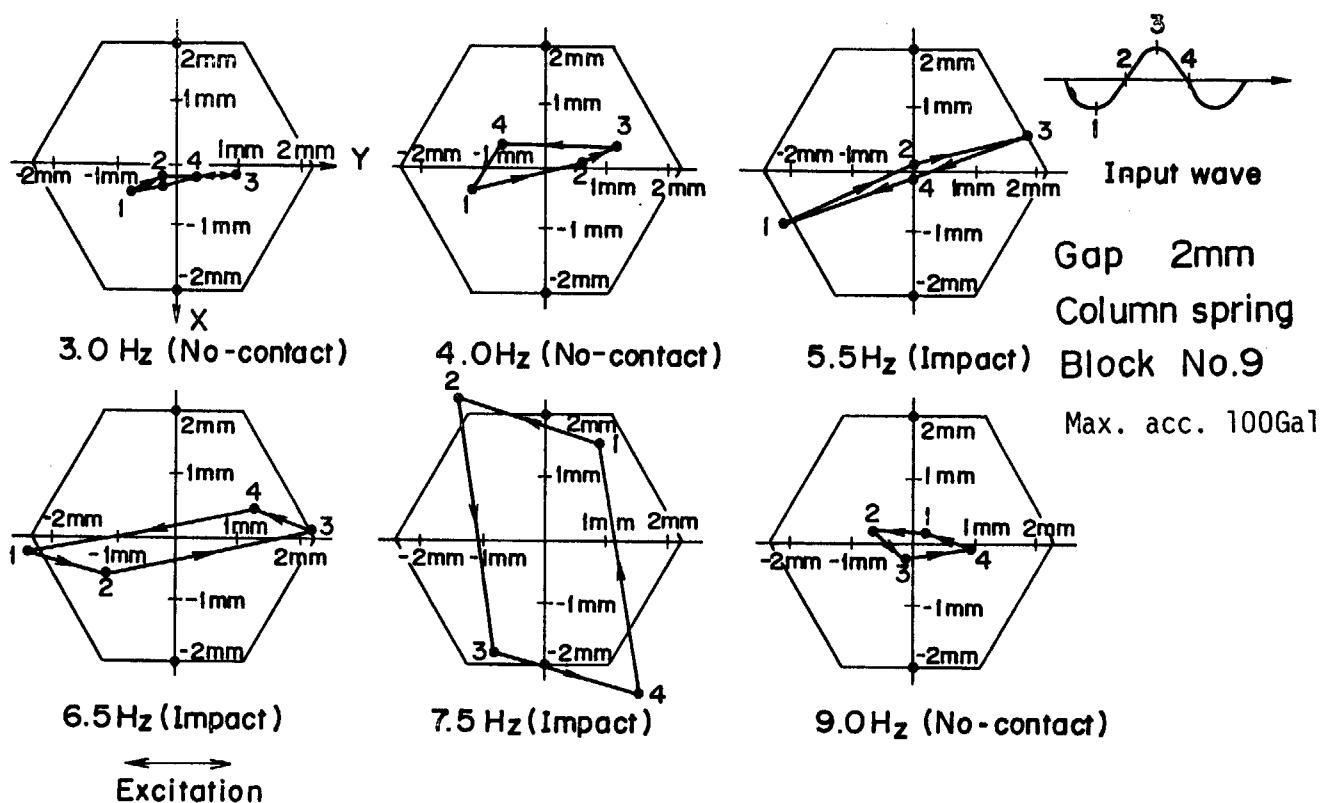


Fig. 5.3 Locus of block center

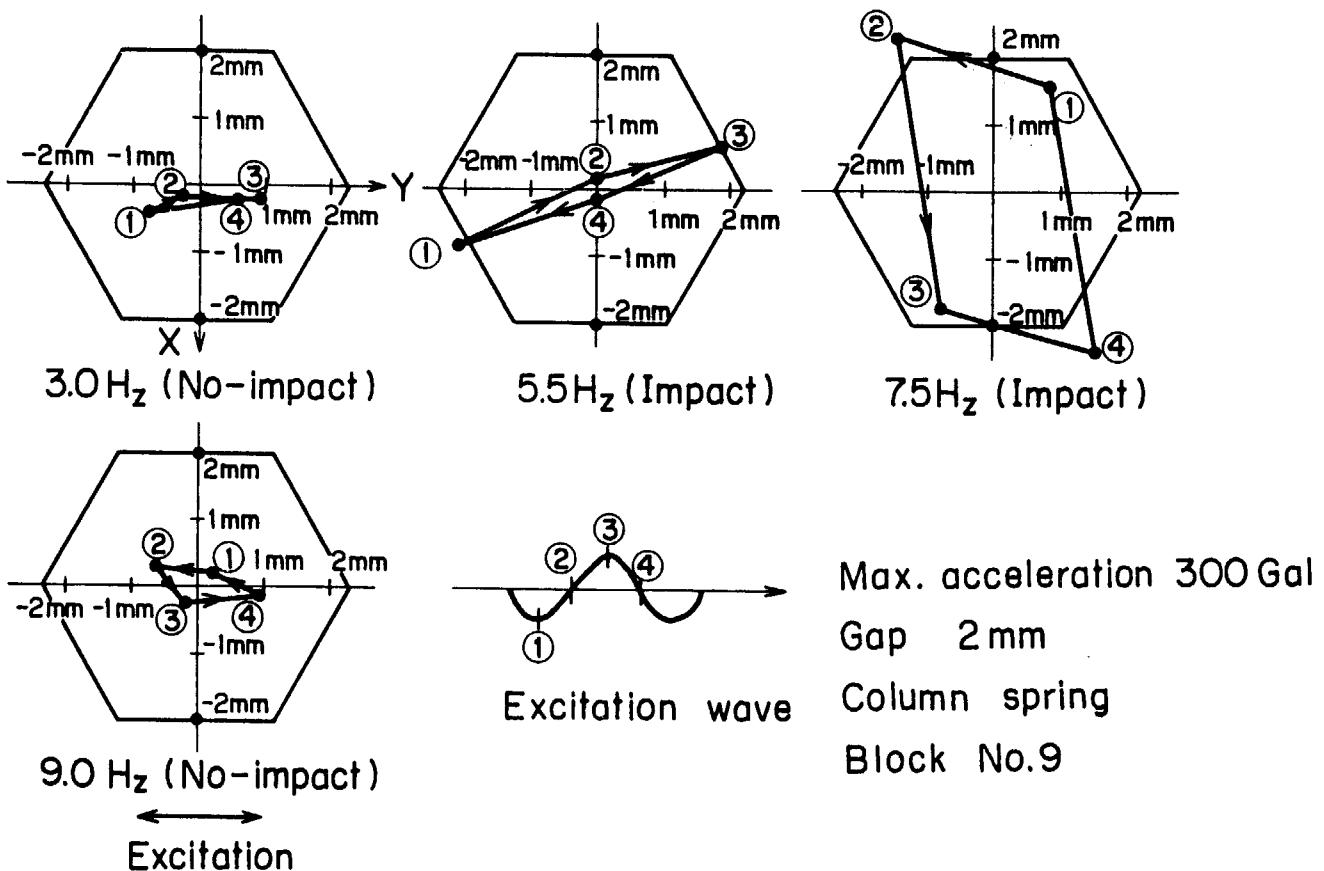


Fig. 5.4 Locus of block center

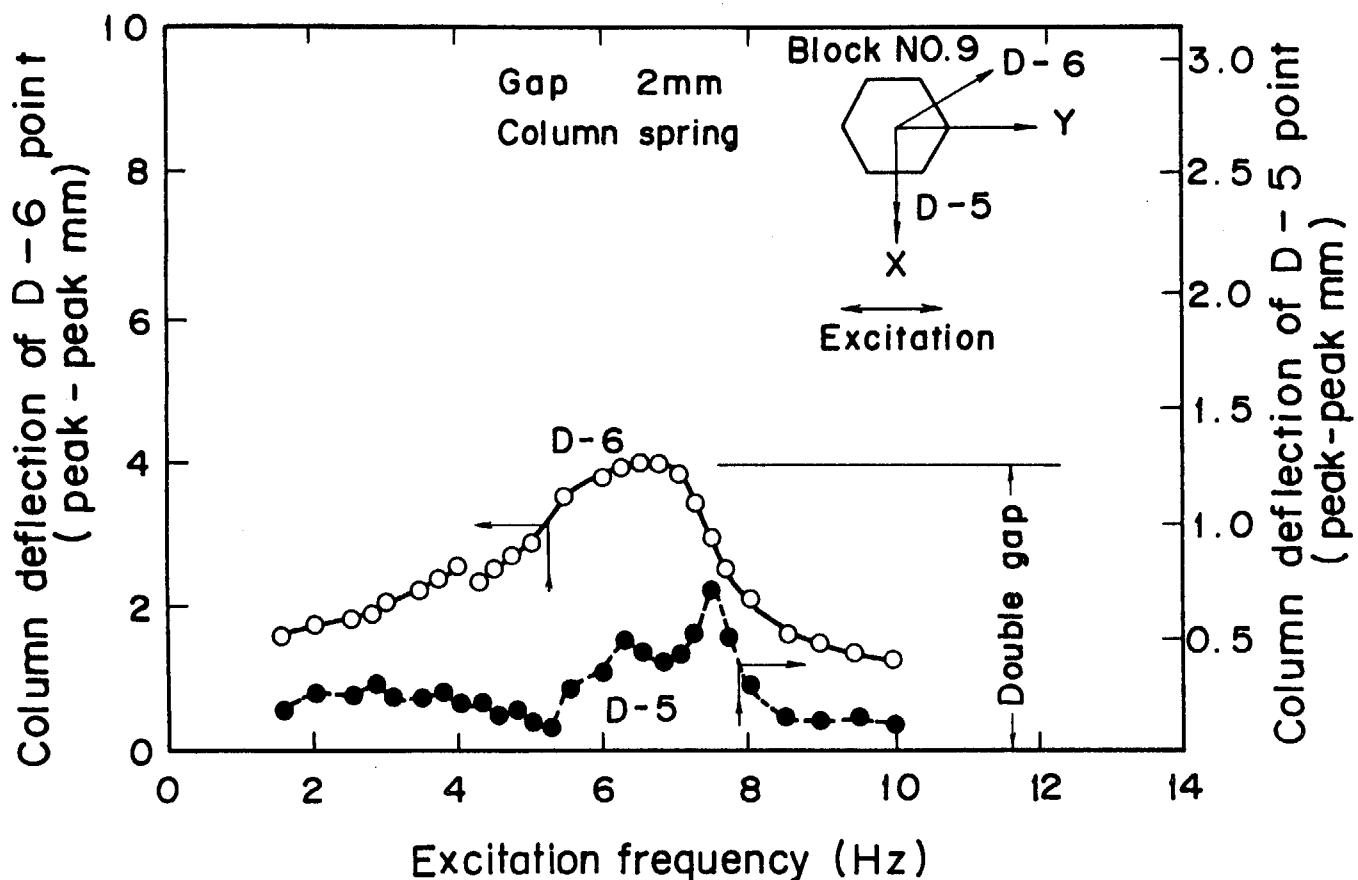


Fig. 5.5 Column whiling response

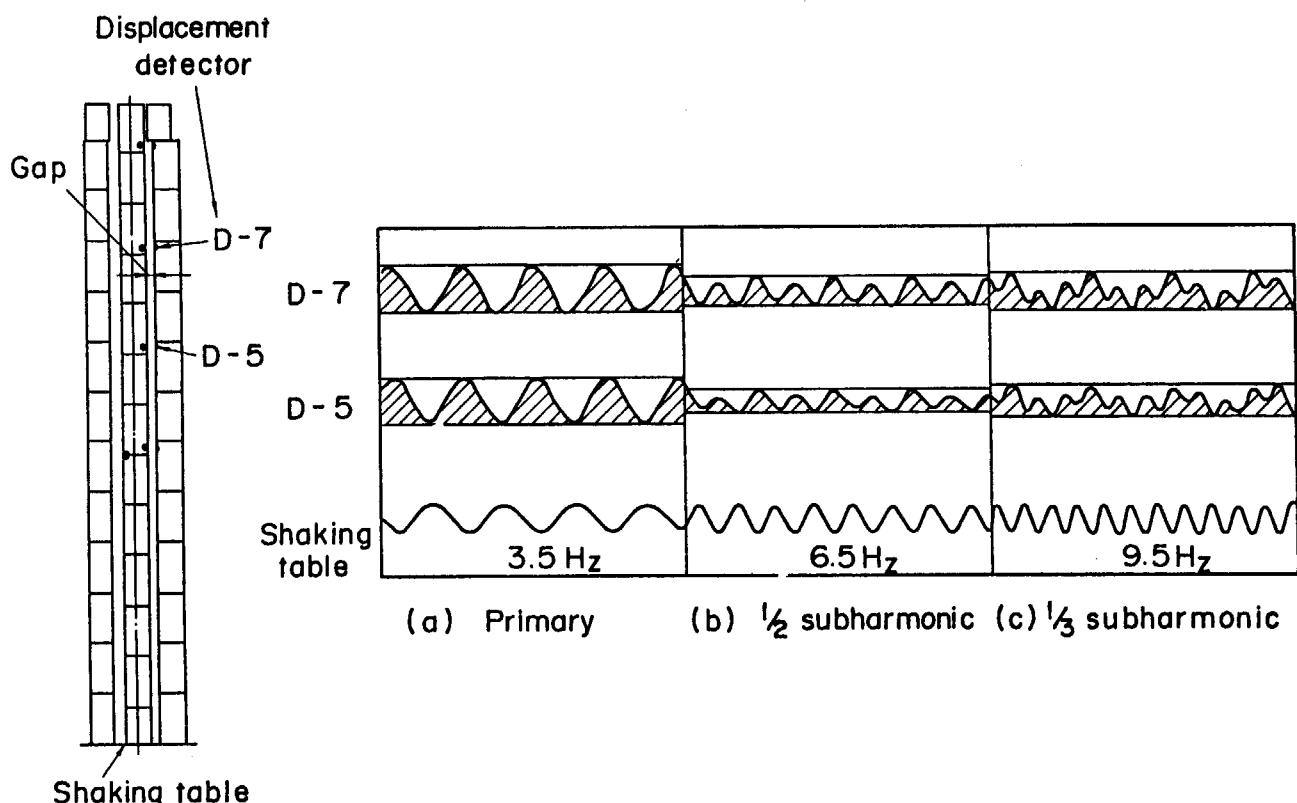


Fig. 5.6 Subharmonic vibration of column

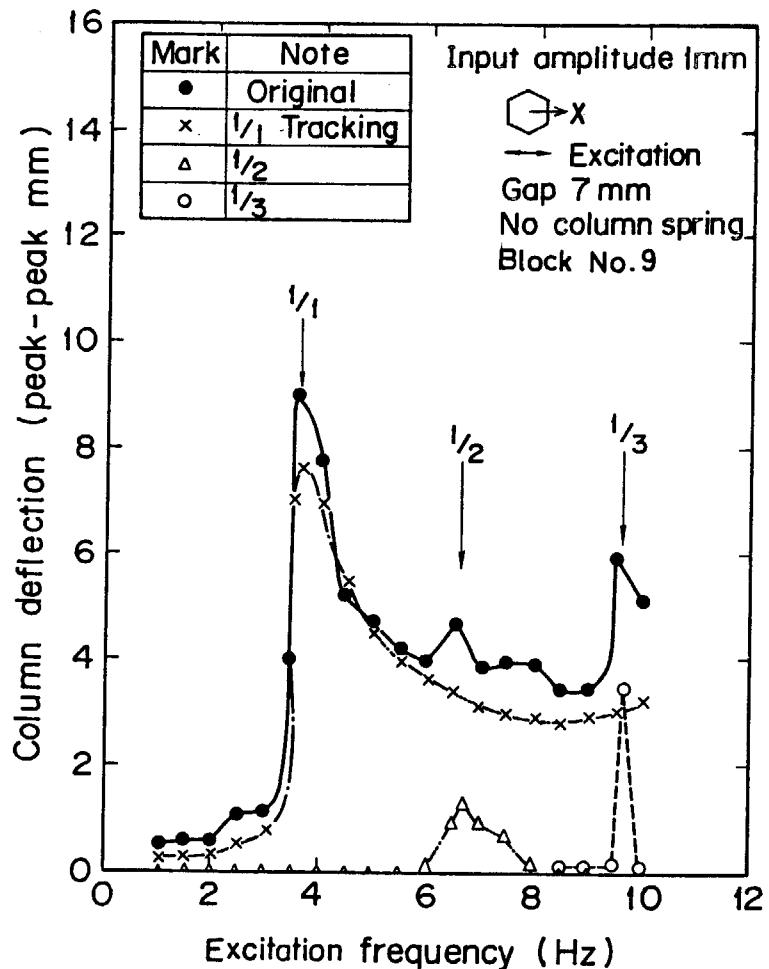


Fig. 5.7 Tracking analysis

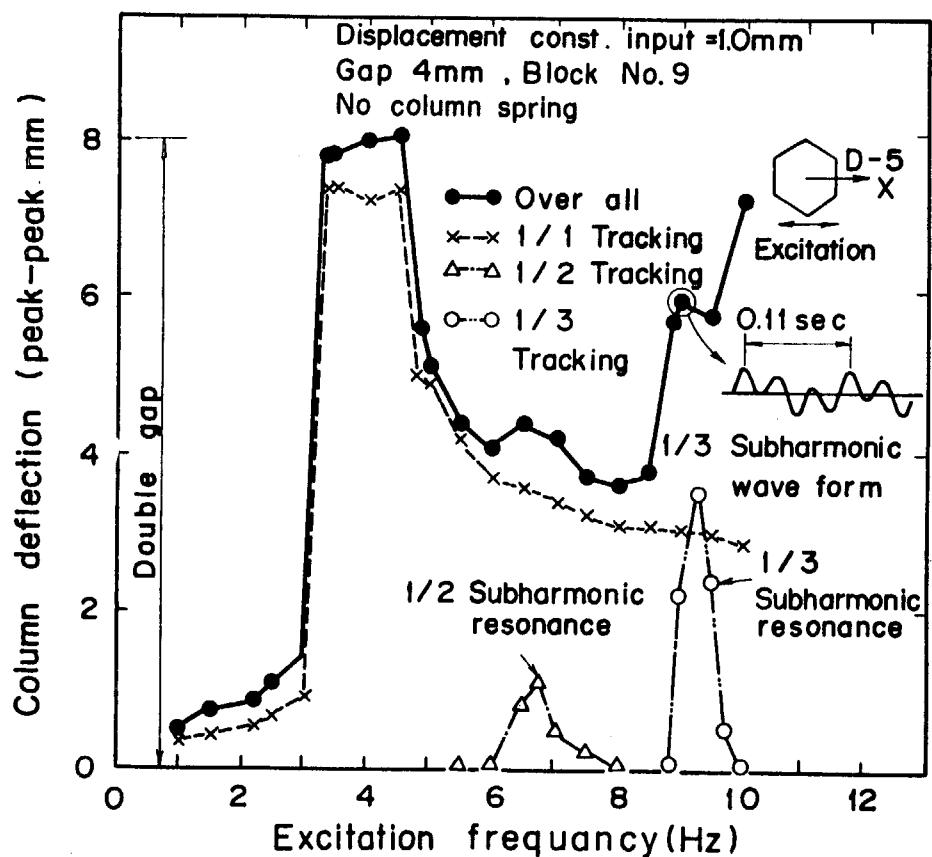


Fig. 5.8 Tracking filter analysis

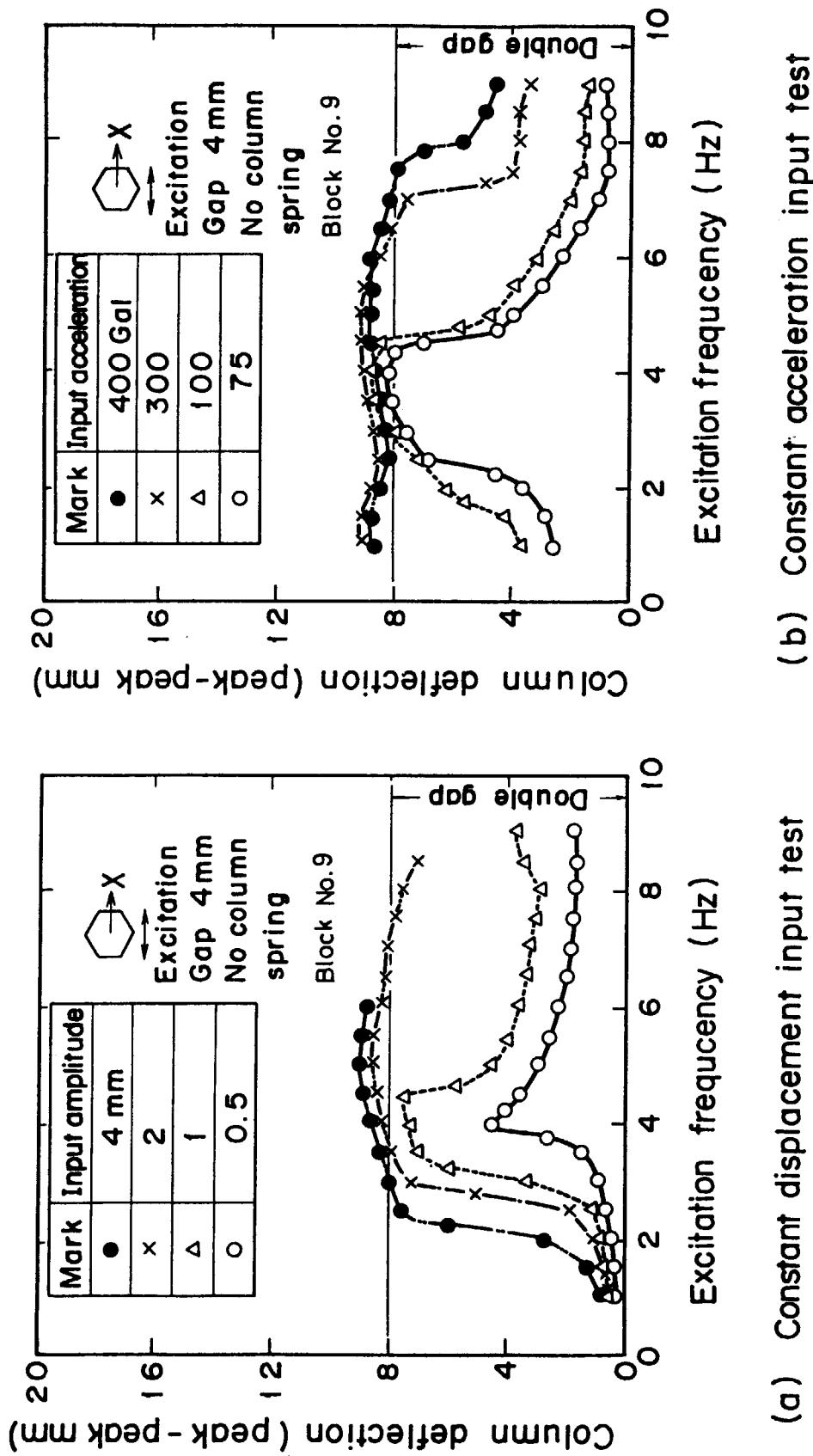
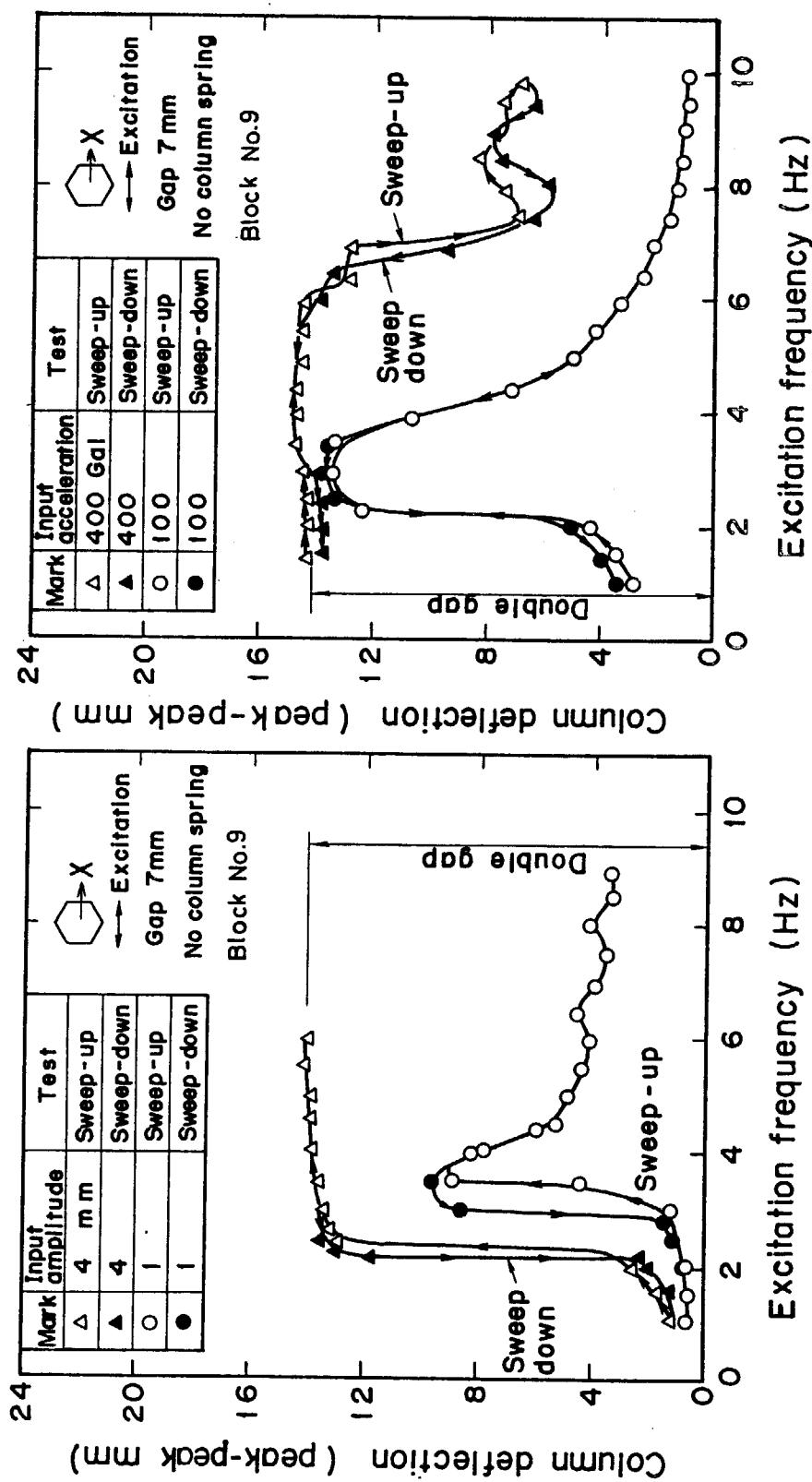


Fig. 5.9 Displacement response characteristics



(a) Constant displacement input test (b) Constant acceleration input test

Fig. 5.10 Comparison between sweep-up and sweep-down response

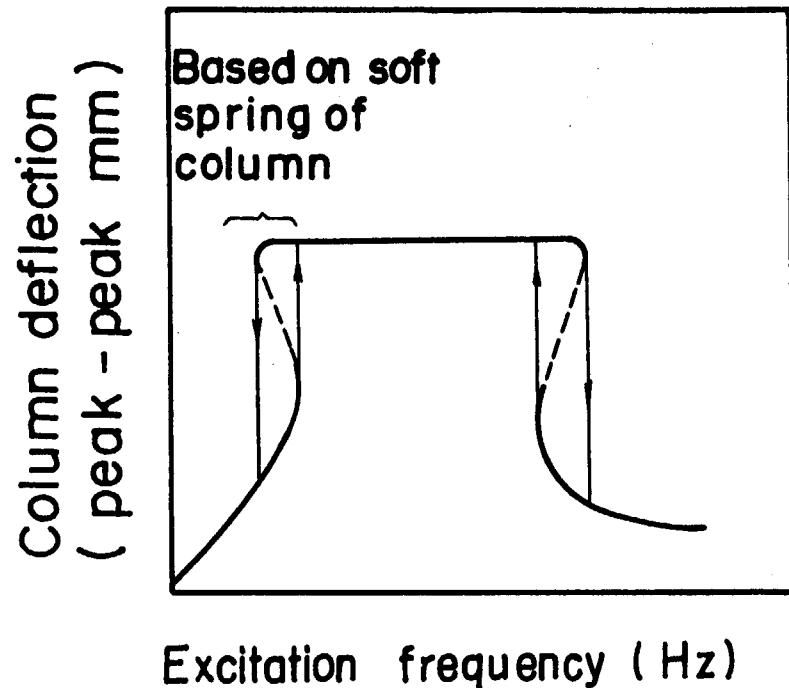


Fig. 5.11 Column nonlinear response of a system with softening

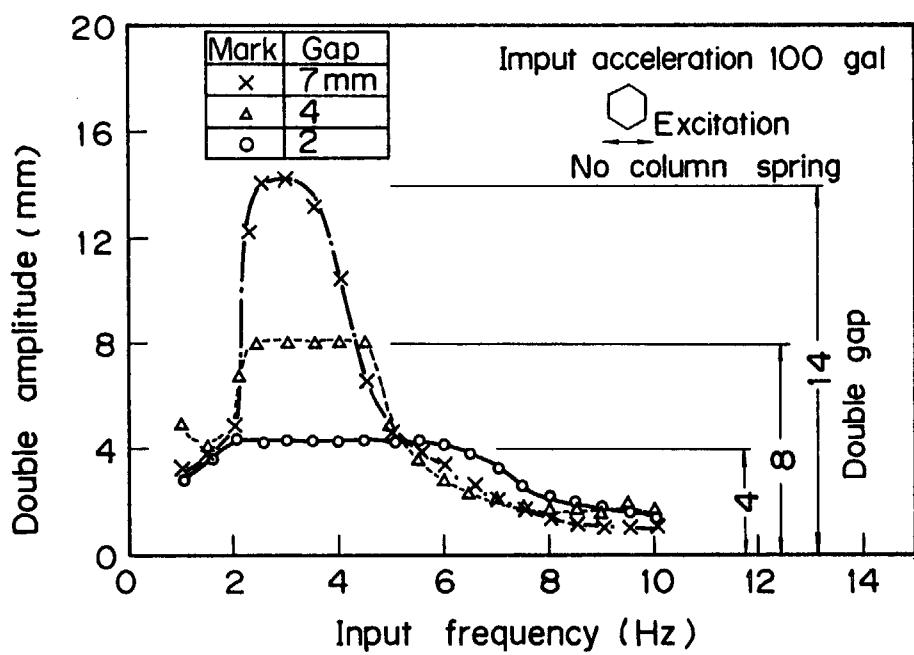
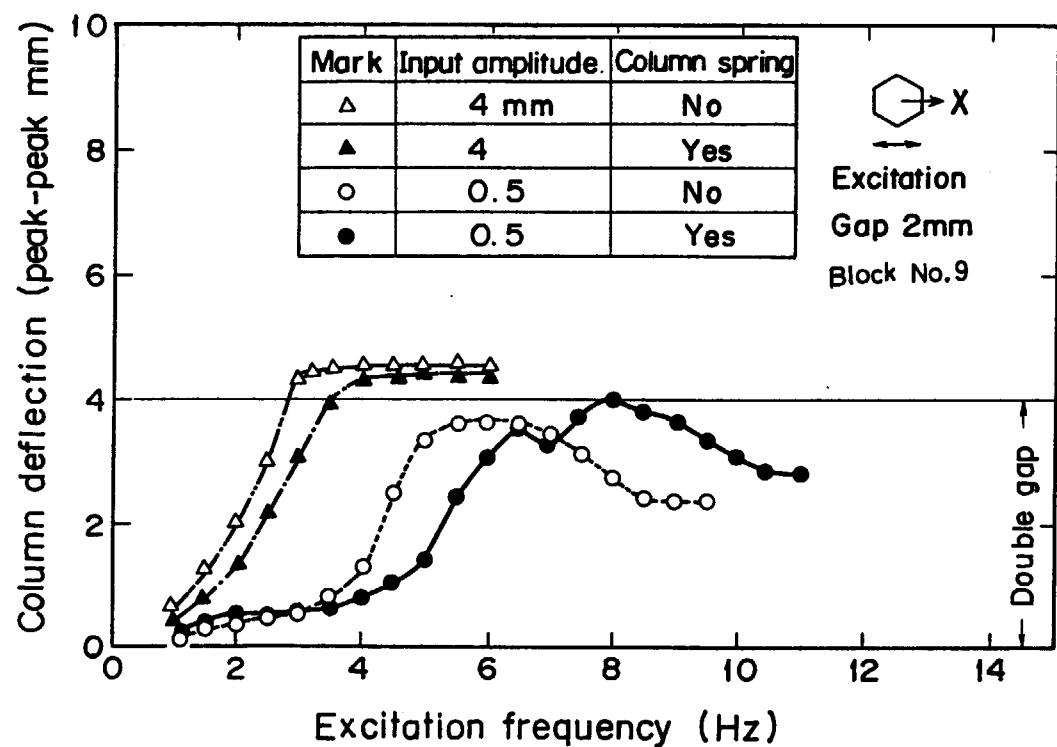
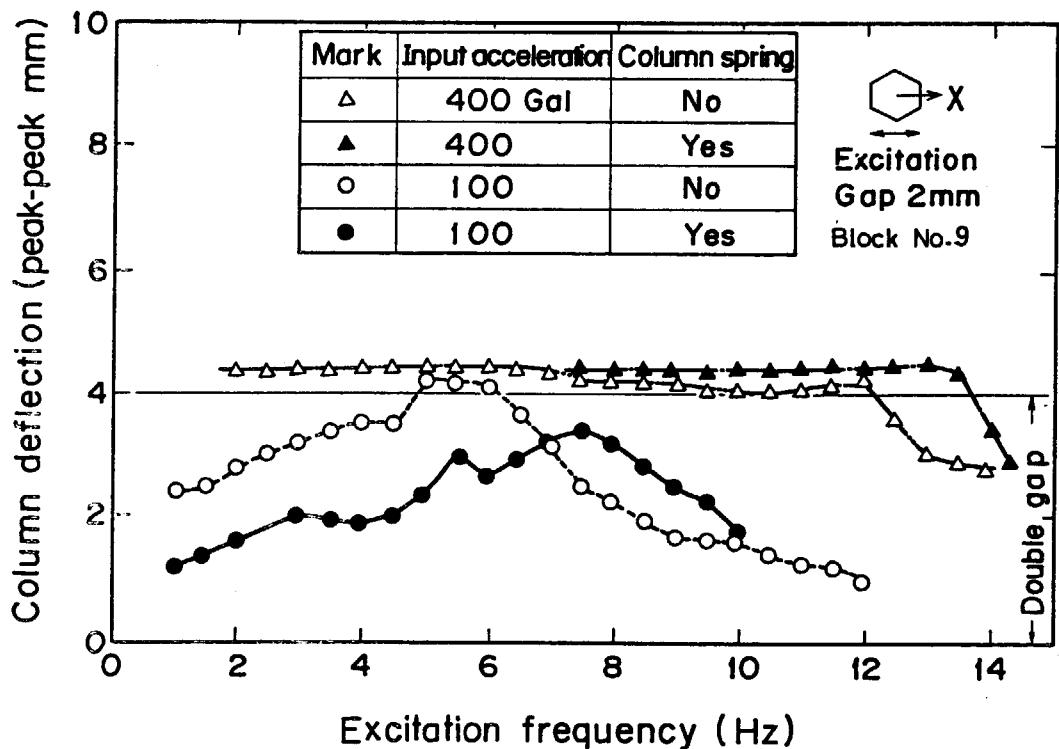


Fig. 5.12 Effect of gap width on column deflection



(a) Constant displacement input test



(b) Constant acceleration input test

Fig. 5.13 Effect of column spring on column deflection

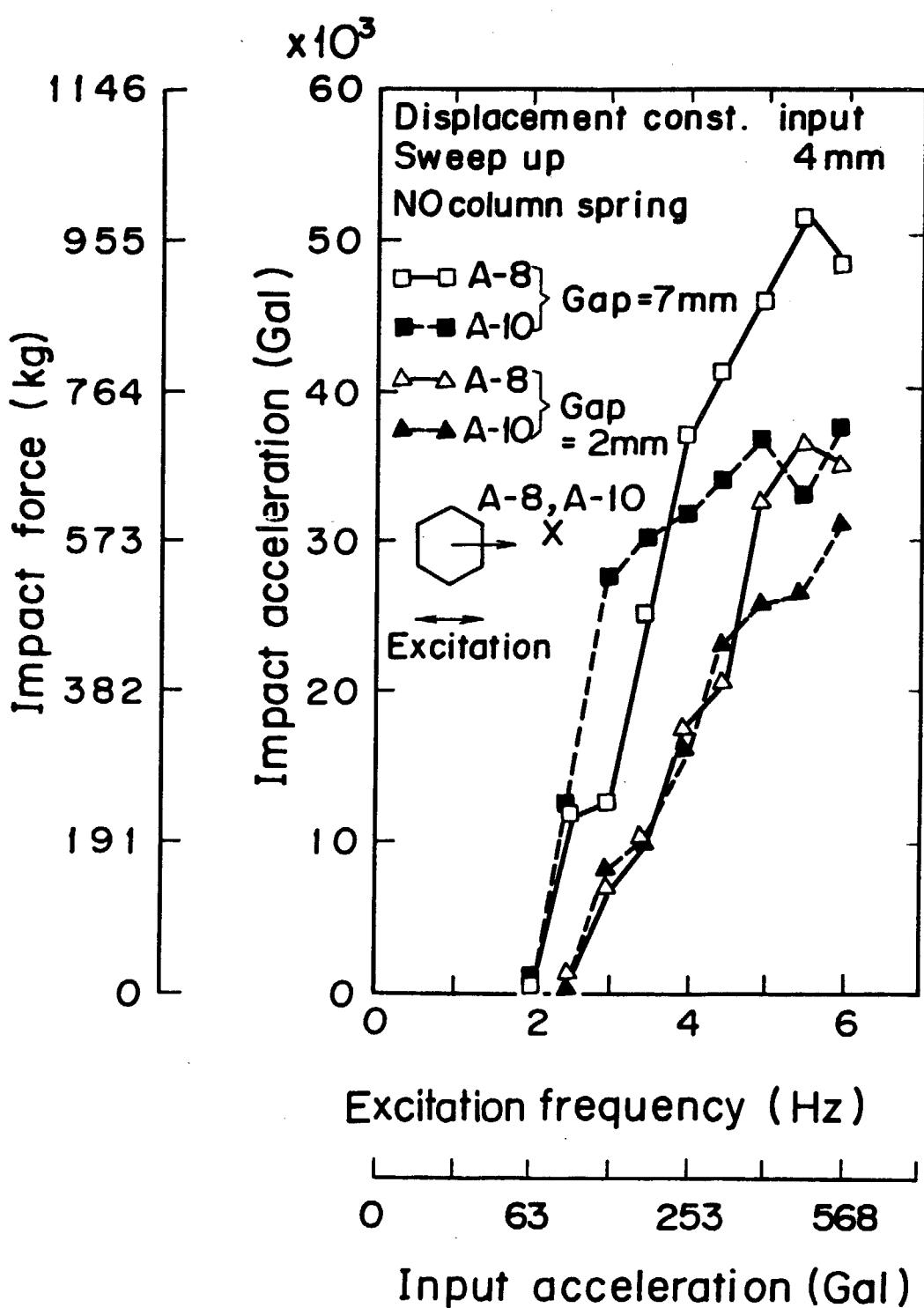


Fig. 5.14 Impact response as a function of excitation level

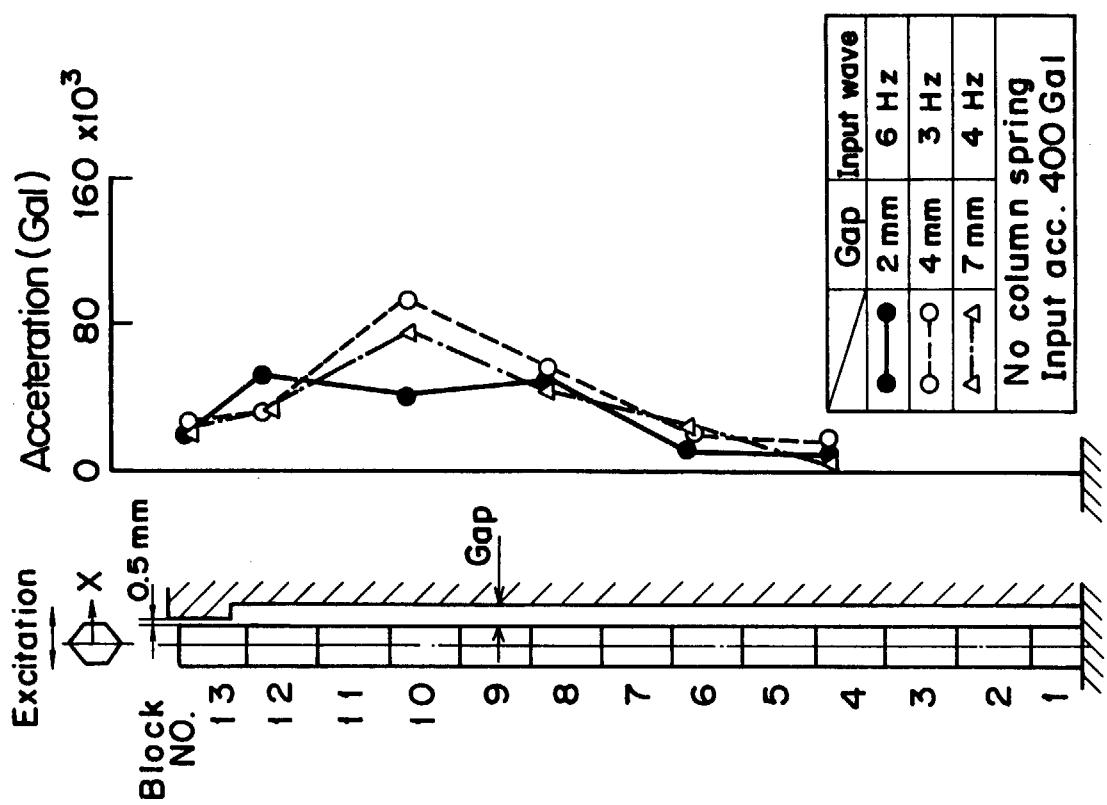


Fig. 5.16 Impact acceleration distribution of block along column

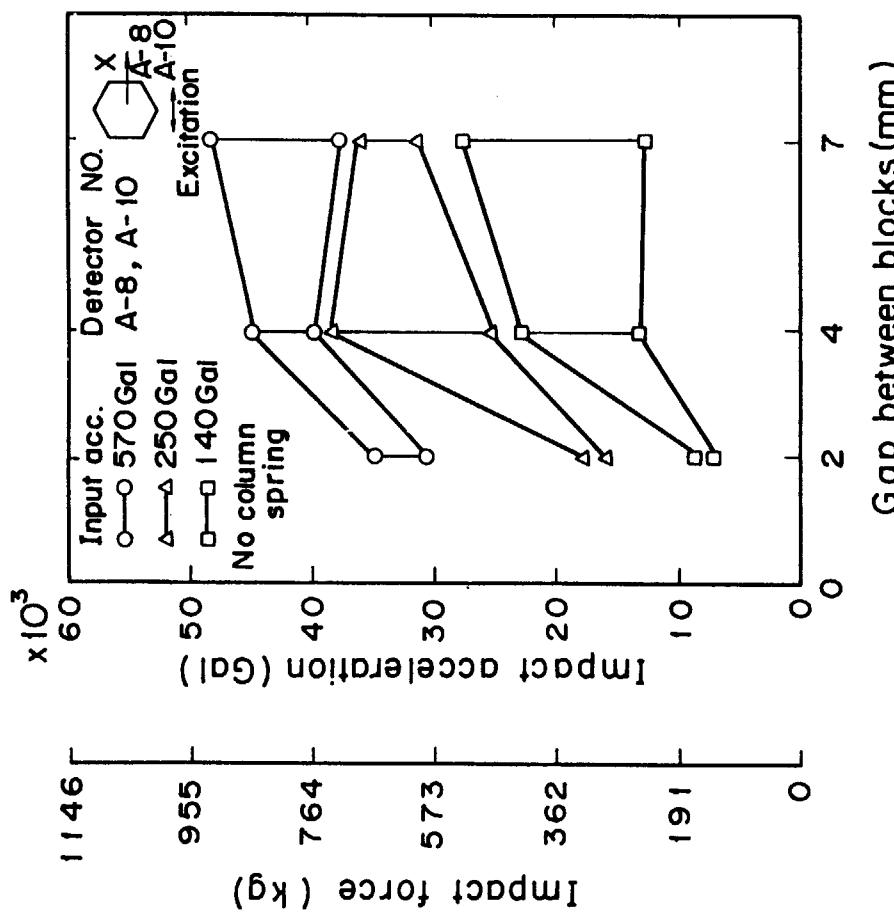


Fig. 5.15 Effect of gap width on impact response

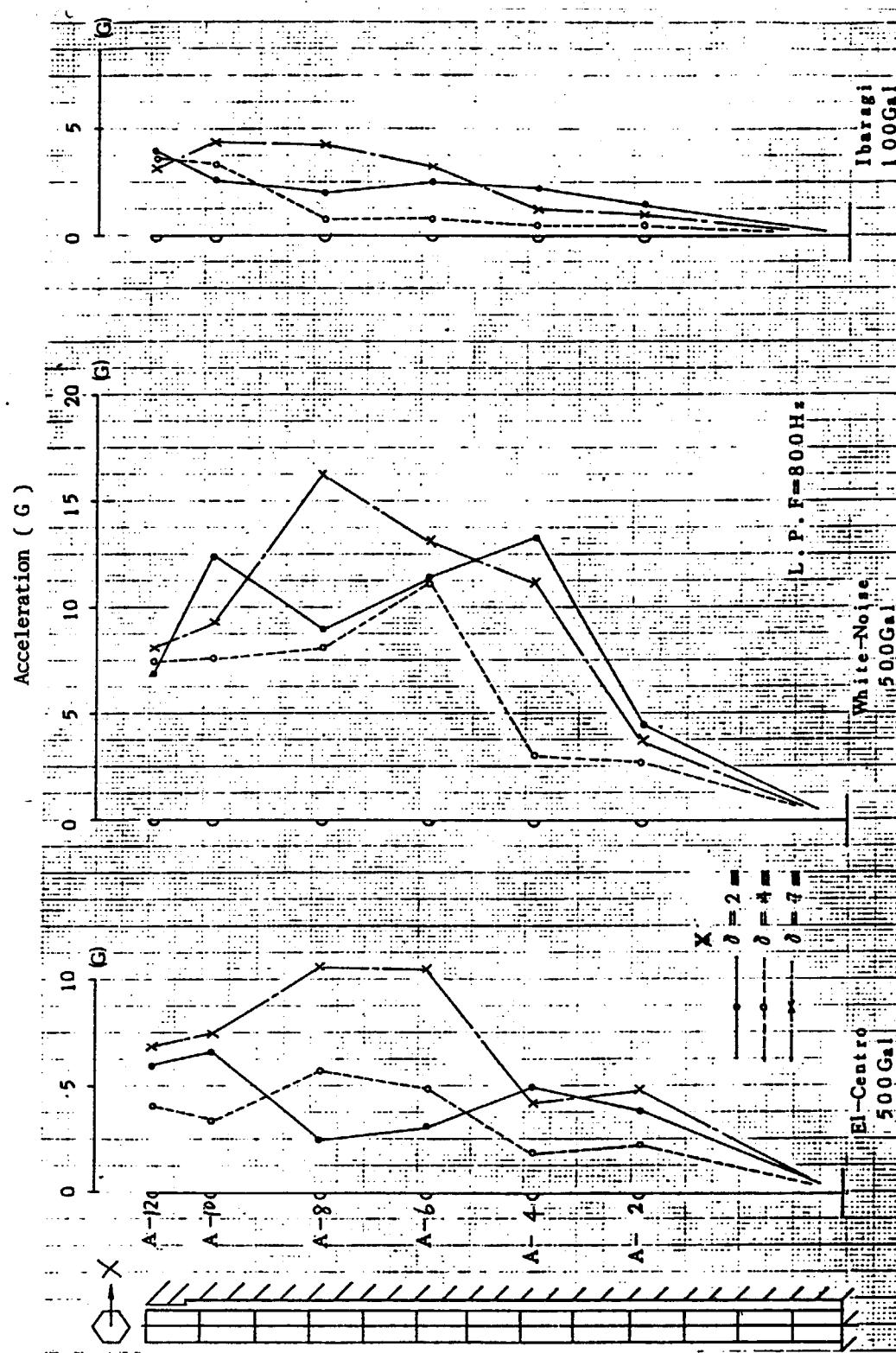


Fig. 5.17 Impact acceleration distribution of block along column (random wave)

6. 試験後検査

(1) 黒鉛ブロックの検査

黒鉛ブロックは試験後、損傷状態や表面状態を検査した結果、黒鉛ブロックの割れ、欠けおよびダウェルピンやソケットの異常は認められなかった。中央コラムと周辺コラムの衝突ブロックの表面では光沢が認められた。

(2) 周辺ブロック対面距離の検査

ブロック間ギャップを変更するため、コラムを組換える。このコラム組換えの分解組立時に試験開始前後における周辺ブロック対面距離を検査した。その結果、ブロック間衝突が最も激しいブロック No. 7 と 8 との対面距離の変化が最も大きく、その量は 0.3 mm 程度であった。

7. シミュレーション解析

〔記号〕

- a : ブロックの中心線からロッキング・スプリング位置までの距離
- b : ブロック幅の半分,
- C : 減衰係数
- C^B : ブロックと衝突板との減衰係数
- C^D : ダウェルの減衰係数
- C^M : 衝突板支持構造物の減衰係数
- C^V : 垂直方向ブロック衝突の減衰係数
- d : ブロック中心からダウェルまでの距離
- F^{BL} : ブロック下端左側の境界衝突力
- F^{BR} : ブロック下端右側の境界衝突力
- F^{DL} : 左側ダウェルに加わる力
- F^{DR} : 右側ダウェルに加わる力
- F^F : ブロック間境界の摩擦力
- F^P : ガス圧力差による力
- F^{TL} : ブロック上端左側の境界衝突力
- F^{TR} : ブロック上端右側の境界衝突力
- F^{VL} : ブロック左側の垂直方向衝突力
- F^{VR} : ブロック右側の垂直方向衝突力
- g : 重力の加速度
- h : ブロック高さの半分
- I : ブロックの慣性モーメント
- K : ばね定数
- K^B : 境界との衝突のばね定数

K^D	ダウェルのばね定数
K^M	衝突板支持構造物のばね定数
K^V	垂直方向のブロック衝突のばね定数
m	ブロックの質量,
m^B	周辺ブロックの質量
n	コラムのブロックの個数
u	水平方向の変位,
w	垂直方向の変位
θ	ブロックの重心まわりの回転角
μ	摩擦係数

7.1 解析モデルと運動方程式

変位応答特性および衝撃応答特性を求めるために、垂直2次元面のコラムの振動解析を実施する。本解析に使用される計算プログラム SONATINA-1^{(9)~(11)}は、本報告とは別に報告されるので、解析モデルと運動方程式は簡単に記述する。

衝突を含むコラムの運動は、ソフトスプリングとハードスプリングの両特性を含むから非線形振動となる。このような非線形振動の解析には、解析解は求めることはほとんど不可能に近い。そこで数値解によって、コラムのシミュレーション解析をすることが容易と考えられる。シミュレーション解析を実施し、解析手法と計算プログラムの検討ならびに入力データを確認して、今後の計算プログラムの開発に役立てる。

(1) 運動方程式

解析モデルは Fig.7.1 および 7.2 に示すように次の仮定に従うものとする。

- (i) ブロックは剛体として取扱い、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。
- (ii) 衝突力現象は衝突特性に相当するばねとダッシュポットによってモデル化する。衝突する場所は上下ブロック境界面、中央コラムと周辺コラム間のブロックの水平衝突である。
- (iii) ブロック上下間の境界には摩擦を考慮する。
- (iv) ダウェルピンはたわみうる。ダウェルピンとソケットの間には摩擦を考慮する。
- (v) 変位検出器の抵抗力は粘性減衰抵抗とする。
- (vi) 周辺コラムのブロックは支持枠からの拘束機構に相当するばねとダッシュポットによって支持枠に取付けられている。

以上の仮定から、コラム任意の位置のブロック i の運動方程式は、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 m_i \ddot{u}_i &= F_i^{DR} + F_i^{DL} - F_{i+1}^{DR} - F_{i+1}^{DL} + F_i^F - F_{i+1}^F \\
 &\quad - F_i^{BR} + F_i^{BL} + F_i^{TR} + F_i^{TL} - C_i^C \dot{u}_i
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\mathbf{w}}_i &= F_i^{VR} + F_i^{VL} - F_{i+1}^{VR} - F_{i+1}^{VL} - \mu F_i^{DR} - \mu F_i^{DL} \\ &\quad + \mu F_{i+1}^{DR} + \mu F_{i+1}^{DL} - m_i g - F_i^P \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} I_i \ddot{\theta}_i &= -M(F_i^{DR}) - M(F_i^{DL}) - M(F_{i+1}^{DR}) - M(F_{i+1}^{DL}) \\ &\quad - M(F_i^F) - M(F_{i+1}^F) + M(F_i^{BR}) - M(F_i^{BL}) \\ &\quad - M(F_i^{TR}) + M(F_i^{TL}) - M(F_i^{VR}) + M(F_i^{VL}) \\ &\quad + M(F_{i+1}^{VR}) - M(F_{i+1}^{VL}) + M(\mu F_i^{DR}) - M(\mu F_i^{DL}) \\ &\quad - M(\mu F_{i+1}^{DR}) + M(\mu F_{i+1}^{DL}) + M(W_i^U) + M(W_i^L) \end{aligned} \quad (7.3)$$

ここで、 $M(F)$ は力 F によるブロックの重心周りのモーメントを表わす。 W^U と W^L はブロックの重量とガス圧力差模擬ばねによってブロックの上下および下方からの力である。

(2) 上下ブロック間の摩擦力とモーメント

ブロック*i*と*i-1*の上下面におけるブロック*i*に加わる摩擦力とモーメントは
 $\alpha_i > 0$ ($\alpha_i = \theta_i - \theta_{i-1}$) では

$$\left. \begin{aligned} F_i^F &= \text{sign}(v_i) F(v_i) \\ M(F_i^F) &= F_i^F (-h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

ブロック*i-1*に對しては

$$\left. \begin{aligned} F_{i-1}^F &= \text{sign}(v_i) F(v_i) \\ M(F_{i-1}^F) &= F_{i-1}^F (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} - b_{i-1} \sin \theta_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

ここで相対速度 v_i は

$$\begin{aligned} v_i &= \{ \dot{u}_i - (h_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i \} \\ &\quad - \{ \dot{u}_{i-1} + (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} - b_{i-1} \sin \theta_{i-1}) \dot{\theta}_{i-1} \} \end{aligned} \quad (7.6)$$

$i=1$ についても

$$v_1 = \dot{u}_1 - (h_1 \cos \theta_1 + b_1 \sin \theta_1) \dot{\theta}_1 - \dot{u}_0 \quad (7.7)$$

ここで、 u_i と \dot{u}_i はそれぞれ i 番目のブロックの重心の水平方向変位と速度である。また、 \dot{u}_0 はコラムの基板の水平方向の速度である。

$\alpha_i \leq 0$ では

$$\left. \begin{aligned} F_i^F &= -\text{sign}(v_i) F(v_i) \\ M(F_i^F) &= F_i^F (-h_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

ブロック $i-1$ については、

$$\left. \begin{aligned} F_{i-1}^F &= \text{sign}(v_i) F(v_i) \\ M(F_{i-1}^F) &= F_{i-1}^F (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} + b_{i-1} \sin \theta_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

ここで、相対速度は

$$\left. \begin{aligned} v_i &= \{ \dot{u}_i - (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i \} \\ &\quad - \{ \dot{u}_{i-1} + (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} + b_{i-1} \sin \theta_{i-1}) \dot{\theta}_{i-1} \} \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

$i=1$ では

$$v_1 = \dot{u}_1 - (h_1 \cos \theta_1 - b_1 \sin \theta_1) \dot{\theta}_1 - \dot{u}_0 \quad (7.11)$$

ここで、 $F(v_i)$ は摩擦力であり、静摩擦と動摩擦の関数として次のようにおく。

$$F(v_i) = F_i^F \{ \mu_s + f(v_i, v_i^2, v_i^3) \} \quad (7.12)$$

ここで関数 $F(v_i, v_i^2, v_i^3)$ は動摩擦係数に関係するよう決める。垂直方向の力は

$$F_i^F = \sum_{j=1}^n m_j g + F_i^P \quad (7.13)$$

となる。

(3) 垂直衝突力とモーメント

ブロック i と $i-1$ の境界で垂直方向衝突による力は、衝突面において衝突ばね—ダッシュ ポットの変形を考慮して得られる。この場合の変形と変形速度 r_i と \dot{r}_i は

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{1}{2} \{ w_{i-1} - h_{i-1} (1 - \cos \theta_{i-1}) - a_i \sin \theta_{i-1} \} \\ &\quad - \frac{1}{2} \{ w_i + h_i (1 - \cos \theta_i) - a_i \sin \theta_i \} \end{aligned} \quad (7.14)$$

$$\begin{aligned}\dot{r}_i &= \frac{1}{2} \{ \dot{w}_{i-1} - (h_{i-1} \sin \theta_{i-1} + a_i \sin \theta_{i-1}) \dot{\theta}_{i-1} \} \\ &\quad - \frac{1}{2} \{ \dot{w}_i + (h_i \sin \theta_i - a_i \cos \theta_i) \dot{\theta}_i \} \end{aligned}\quad (7.15)$$

$i = 1$ について

$$r_1 = \frac{1}{2} [w_0 - \{ w_1 + h_1 (1 - \cos \theta_1) - a_1 \sin \theta_1 \}] \quad (7.16)$$

$$\dot{r}_1 = \frac{1}{2} [\dot{w}_0 - \{ \dot{w}_1 + (h_1 \sin \theta_1 - a_1 \cos \theta_1) \dot{\theta}_1 \}] \quad (7.17)$$

ここで、 w_0 と \dot{w}_0 はコラム基板の垂直方向の変位と速度である。垂直方向の力とモーメントは $r_i > 0$ では

$$\left. \begin{aligned} F_i^{VR} &= -K_i^V r_i + C_i^V \dot{r}_i \\ M(F_i^{VR}) &= -F_i^{VR} (h_i \sin \theta_i - a_i \cos \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.18)$$

ブロック $i-1$ については

$$\left. \begin{aligned} F_{i-1}^{VR} &= K_i^V r_i + C_i^V \dot{r}_i \\ M(F_{i-1}^{VR}) &= F_{i-1}^{VR} (h_i \sin \theta_{i-1} + a_i \cos \theta_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

同様にして、 F_i^{VL} , F_{i-1}^{VL} , $M(F_i^{VL})$, $M(F_{i-1}^{VL})$ が求められる。

$r_i \leq 0$ では

$$F_i^{VR} = F_{i-1}^{VR} = M(F_i^{VR}) = M(F_{i-1}^{VR}) = 0 \quad (7.20)$$

ここで、 K_i^V と C_i^V はそれぞれ垂直衝突のはね定数と減衰係数である。

(4) 水平衝突力とモーメント

ブロックの水平衝突による力は、衝突面においてばねとダッシュポットの変形を考慮することによって得られる。この場合の変形と変形速度 ϵ_i と $\dot{\epsilon}_i$ は

$$\epsilon_i = u_i + h_i \sin \theta_i - b_i (1 - \cos \theta_i) - u_i^B - \delta_i^B \quad (7.21)$$

$$\dot{\epsilon}_i = \dot{u}_i + (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i - \dot{u}_i^B \quad (7.22)$$

ここで u_i^B と \dot{u}_i^B は周辺コラムの変位と速度であり、 δ_i^B は中央コラムと周辺コラムのギャップ幅である。

プロックの上端右側で周辺と衝突する場合

$$\varepsilon_i > 0$$

$$\left. \begin{aligned} F_i^{TR} &= - (K_i^B \varepsilon_i + C_i^B \dot{\varepsilon}_i) \\ M(F_i^{TR}) &= F_i^{TR} (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.23)$$

ここで K_i^B と C_i^B は周辺との衝突のばね定数と減衰係数である。

プロック上端左側で衝突する場合

$$\varepsilon_i = -u_i - \{ h_i \sin \theta_i + b_i (1 - \cos \theta_i) \} + u_i^B - \delta_i^B \quad (7.24)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = -\dot{u}_i - (h_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i + \dot{u}_i^B \quad (7.25)$$

$$\left. \begin{aligned} F_i^{TL} &= K_i^B \varepsilon_i + C_i^B \dot{\varepsilon}_i \\ M(F_i^{TL}) &= F_i^{TL} (h_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.26)$$

プロック下端右側で衝突する場合

$$\varepsilon_i = u_i - \{ h_i \sin \theta_i + b_i (1 - \cos \theta_i) \} - u_i^B - \delta_i^B \quad (7.27)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \dot{u}_i - (h_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i - \dot{u}_i^B \quad (7.28)$$

$$\left. \begin{aligned} F_i^{BR} &= - (K_i^B \varepsilon_i + C_i^B \dot{\varepsilon}_i) \\ M(F_i^{BR}) &= - F_i^{BR} (h_i \cos \theta_i + b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.29)$$

プロック下端左側で衝突する場合

$$\varepsilon_i = -u_i + \{ h_i \sin \theta_i - b_i (1 - \cos \theta_i) \} + u_i^B - \delta_i^B \quad (7.30)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = -\dot{u}_i + (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i + \dot{u}_i^B \quad (7.31)$$

$$\left. \begin{aligned} F_i^{BL} &= K_i^B \varepsilon_i + C_i^B \dot{\varepsilon}_i \\ M(F_i^{BL}) &= - F_i^{BL} (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.32)$$

一方, $\varepsilon_i \leq 0$

$$\left. \begin{aligned} F_i^{TR} &= F_i^{TL} = F_i^{BR} = F_i^{BL} = 0 \\ M(F_i^{TR}) &= M(F_i^{TL}) = M(F_i^{BR}) = M(F_i^{BL}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.33)$$

(5) 水平方向のダウェル力とモーメント

水平方向のダウェル力は、ダウェルピンとソケットの接触面のはねとダッシュポットの変形を考えることによって得られる。この場合の変形と変形速度 β_i と $\dot{\beta}_i$ は

$$\begin{aligned} \beta_i &= \{ u_{i-1} + h_{i-1} \sin \theta_{i-1} - d_{i-1} (1 - \cos \theta_{i-1}) \} \\ &\quad - \{ u_i - h_i \sin \theta_i - d_i (1 - \cos \theta_i) \} \mp \delta_{R,L} \end{aligned} \quad (7.34)$$

$$\begin{aligned} \dot{\beta}_i &= \dot{u}_{i-1} + (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} - d_{i-1} \sin \theta_{i-1}) \dot{\theta}_{i-1} \\ &\quad - \{ \dot{u}_i - (h_i \cos \theta_i + d_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i \} \end{aligned} \quad (7.35)$$

$i=1$ については

$$\beta_1 = u_0 - \{ u_1 - h_1 \sin \theta_1 - d_1 (1 - \cos \theta_1) \} \mp \delta_{R,L} \quad (7.36)$$

$$\dot{\beta}_1 = \dot{u}_0 - \{ \dot{u}_1 - (h_1 \cos \theta_1 + d_1 \sin \theta_1) \dot{\theta}_1 \} \quad (7.37)$$

ここで δ_R と δ_L はダウェルピンとソケット間のそれぞれ右側と左側のギャップである。右側のダウェルに加わる力とモーメントは、右側ギャップにおいて $\beta_1 > 0$, 左側ギャップにおいて $\beta_1 < 0$ ならば

$$\left. \begin{aligned} F_i^{DR} &= K_i^D \beta_i + C_i^D \dot{\beta}_i \\ M(F_i^{DR}) &= -F_i^{DR} (h_i \cos \theta_i + d_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.38)$$

ブロック $i-1$ については

$$\left. \begin{aligned} F_{i-1}^{DR} &= -K_i^D \beta_i - C_i^D \dot{\beta}_i \\ M(F_{i-1}^{DR}) &= F_{i-1}^{DR} (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} - d_i \sin \theta_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (7.39)$$

右側ギャップにおいて $\beta_1 < 0$, 左側ギャップにおいて $\beta_1 > 0$ ならば

$$\left. \begin{aligned} F_i^{DR} &= F_{i-1}^{DR} = 0 \\ M(F_i^{DR}) &= M(F_{i-1}^{DR}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.40)$$

ここで、 K_i^D と C_i^D はそれぞれダウェルピンのばね定数と減衰係数である。

(6) 垂直方向のダウェル摩擦力とモーメント

垂直方向のダウェル摩擦力とモーメントは、ダウェルピンとソケットの相対速度が求まれば、ダウェル力とによって計算することができる。相対速度 ω_i は

$$\begin{aligned} \omega_i &= \dot{w}_i + (h_i \sin \theta_i - d_i \cos \theta_i) \dot{\theta}_i \\ &- \{ \dot{w}_{i-1} - (h_{i-1} \sin \theta_{i-1} + d_{i-1} \cos \theta_{i-1}) \dot{\theta}_{i-1} \} \end{aligned} \quad (7.41)$$

$i=1$ について

$$\omega_1 = \dot{w}_1 + (h_1 \sin \theta_1 - d_1 \cos \theta_1) \dot{\theta}_1 - \dot{w}_0 \quad (7.42)$$

右側ダウェルの摩擦力とモーメントは

$$\left. \begin{aligned} \mu F_i^{DR} &= - \text{sign}(\omega_i) \cdot |F_i^{DR}| \cdot f(\mu) \\ M(\mu F_i^{DR}) &= - \mu F_i^{DR} (h_i \sin \theta_i + d_i \cos \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.43)$$

ブロック*i-1*について

$$\left. \begin{aligned} \mu F_{i-1}^{DR} &= \text{sign}(\omega_i) \cdot |F_i^{DR}| \cdot f(\mu) \\ M(\mu F_{i-1}^{DR}) &= - \mu F_{i-1}^{DR} (h_{i-1} \sin \theta_{i-1} + d_{i-1} \cos \theta_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (7.44)$$

ここで $f(\mu)$ は静摩擦係数と動摩擦係数に関する係数である。

(7) 重量とガス圧力差によるモーメント

ブロックの重量とガス圧力差によってブロック*i*に加わる上方からのモーメントは

$a_{i+1} > 0$ ならば

$$M(W_i^U) = W_i^U (h_i \sin \theta_i + b_i \cos \theta_i) \quad (7.45)$$

$a_{i+1} = 0$

$$M(W_i^U) = W_i^U h_i \sin \theta_i \quad (7.46)$$

$$\alpha_{i+1} < 0$$

$$M(W_i^U) = W_i^U (h_i \sin \theta_i - b_i \cos \theta_i) \quad (7.47)$$

ここで

$$W_i^U = \sum_{j=i+1}^n W_j + F_i^P \quad (7.48)$$

$j=0$ では

$$M(W_n^U) = 0 \quad (7.49)$$

となる。下方からのモーメントは

$$\alpha_i > 0$$

$$M(W_i^L) = W_i^L (h_i \sin \theta_i - b_i \cos \theta_i) \quad (7.50)$$

$$\alpha_i = 0$$

$$M(W_i^L) = W_i^L h_i \sin \theta_i \quad (7.51)$$

$$\alpha_i < 0$$

$$M(W_i^L) = W_i^L (h_i \sin \theta_i + b_i \cos \theta_i) \quad (7.52)$$

ここで

$$W_i^L = \sum_{j=1}^n W_j + P_{i+1}^P \quad (7.53)$$

(8) 周辺ブロックの運動方程式

周辺ブロックの運動は水平 1 自由度系とする。右側のブロックの運動方程式は

$$m_i^{BR} \ddot{u}_i^{BR} = -F_i^{MR} + F_i^{TR} + F_i^{BR} \quad (7.54)$$

ここで

$$F_i^{MR} = K_i^{MR} \Psi_i^{BR} + C_i^{MR} \dot{\Psi}_i^{BR} \quad (7.55)$$

であり、 Ψ_i^{BR} と $\dot{\Psi}_i^{BR}$ は周辺ブロックの拘束構造の変位と速度であり

$$\left. \begin{aligned} \Psi_i^{BR} &= u_B - u_i^{BR} \\ \dot{\Psi}_i^{BR} &= \dot{u}_B - \dot{u}_i^{BR} \end{aligned} \right\} \quad (7.56)$$

同様に左側の周辺ブロックの運動方程式は

$$m_i^{BL} \ddot{u}_i^{BR} = F_i^{ML} - F_i^{TL} - F_i^{BL} \quad (7.57)$$

ここで

$$F_i^{ML} = K_i^{ML} \Psi_i^{BL} + C_i^{ML} \dot{\Psi}_i^{BL} \quad (7.58)$$

(9) 数値計算法

(7.1)～(7.3), (7.54), (7.57)式をルンゲクッタ法によって数値的に解くことによって各要素の変位、速度、加速度、力およびモーメントが得られる。計算に使用した値は Table 7.1 に一覧して示す。時間積分間隔はすでに実施された計算結果⁽⁵⁾から 1×10^{-4} 秒を選んだ。

7.2 応答解析

(1) 変位応答

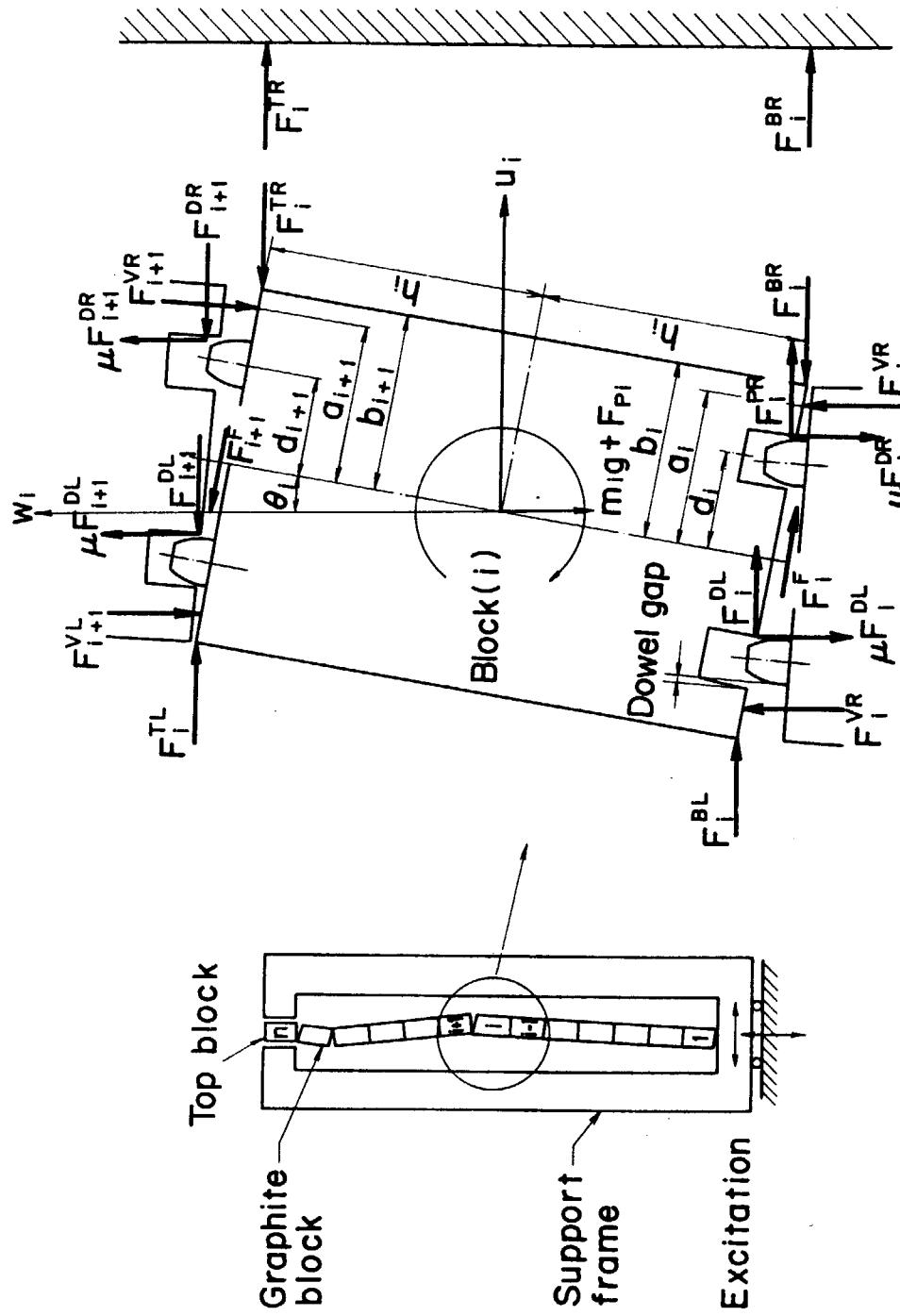
Fig.7.3 は最大加速度 100 Gal におけるコラムの変位応答解析値を実験値と比較して示す。この図から明らかなように、解析値は実験値に良く一致している。

(2) 衝撃応答

Fig.7.4 は加速レベルの変化による衝撃応答加速度を実験値と比較して示す。この図から明らかなように、衝撃実験値は大幅にばらついている。これはブロックの衝突様式が種々のモードをとるためと考えられる。計算値は実験値の中央値を示しており、計算値はほぼ妥当なものと考えられる。

Table 7.1 Calculation data

Items		Bottom block	Block No. 2 ~ 12	Top block
Block rocking spring half width	a (cm)	2.5		
Block geometric half width	b (cm)	7.23		
Distance of dowel from block center line	d (cm)	5.2		
Block half height	h (cm)	10.7	14.25	
Block mass moment of inertia	I (kg sec ² /cm)	0.3015	0.924	1.747
Block mass	m (kg sec ² /cm)	0.0146	0.0195	0.0178
Surrounding block mass	m ^B (kg sec ² /cm)	0.0195		
Gap between dowel pin and hole	δ ^{R,L} (cm)	0.025		
Kinematic coefficient of friction	μ ^K (→)	0.2		
Static coefficient of friction	μ ^S (→)	0.2		
Damping coefficient of boundary impact	c ^B (kg sec/cm)	7.32	8.46	8.09
Damping coefficient of dowel pin	c ^D (kg sec/cm)		5.2	
Damping coefficient of surrounding block support	c ^M (kg sec/cm)	7.32	8.46	8.09
Damping coefficient of vertical block impact	c ^V (kg sec/cm)	8.81	10.1	9.7
Spring constant of boundary impact	k ^B (kg/cm)		1.26 × 10 ⁴	
Spring constant of dowel pin	k ^D (kg/cm)		6.3 × 10 ³	
Spring constant of surrounding block support	k ^M (kg/cm)		1.26 × 10 ⁴	
Spring constant of vertical block impact	k ^V (kg/cm)		1.37 × 10 ⁵	
Gas pressure	p (kg/cm ²)	0.0		



(a) Column model

(b) Forces acting on a fuel block

Fig. 7.1 Column calculation model and forces acting on a fuel block

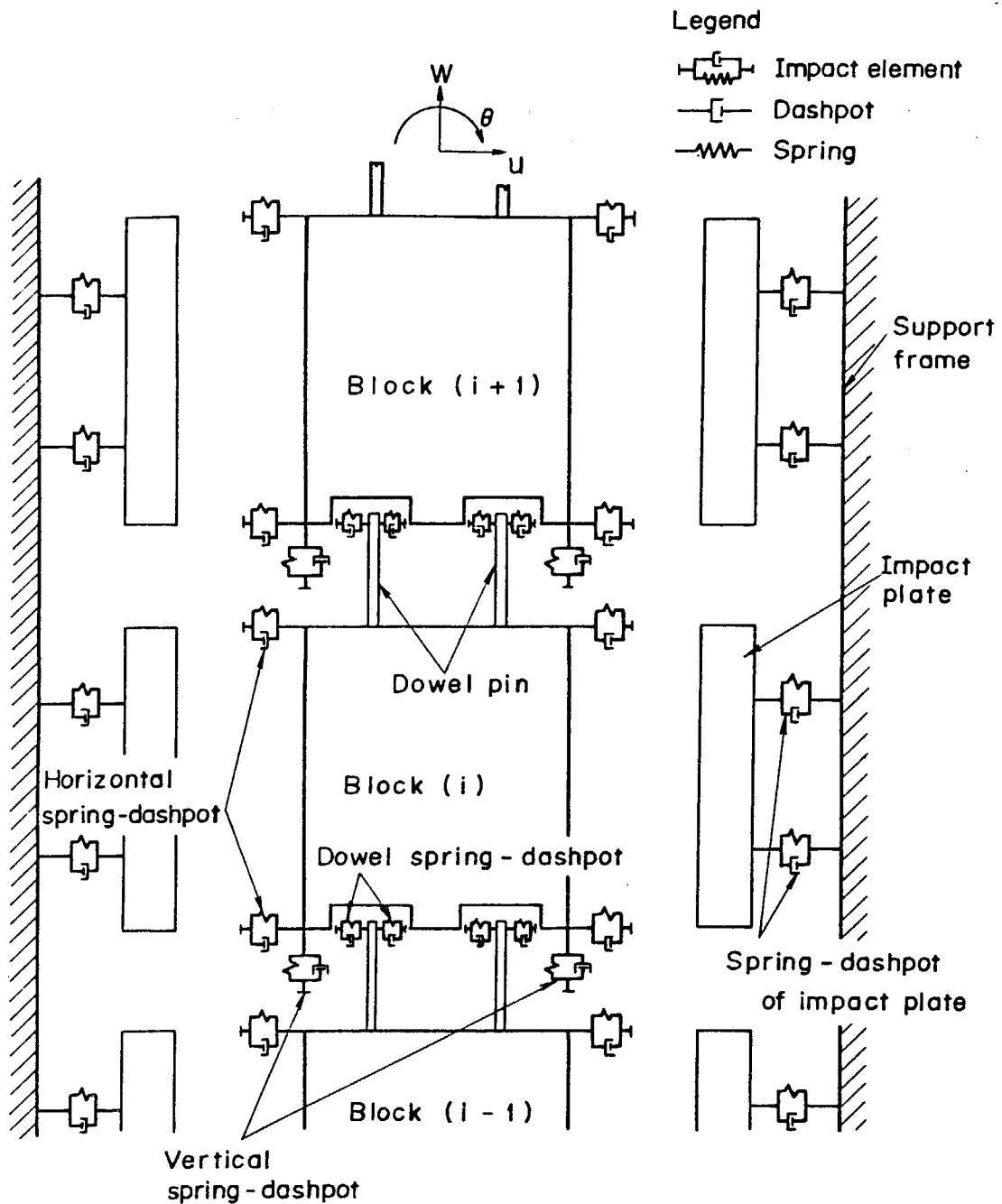


Fig. 7.2 Idealized spring-dashpot model

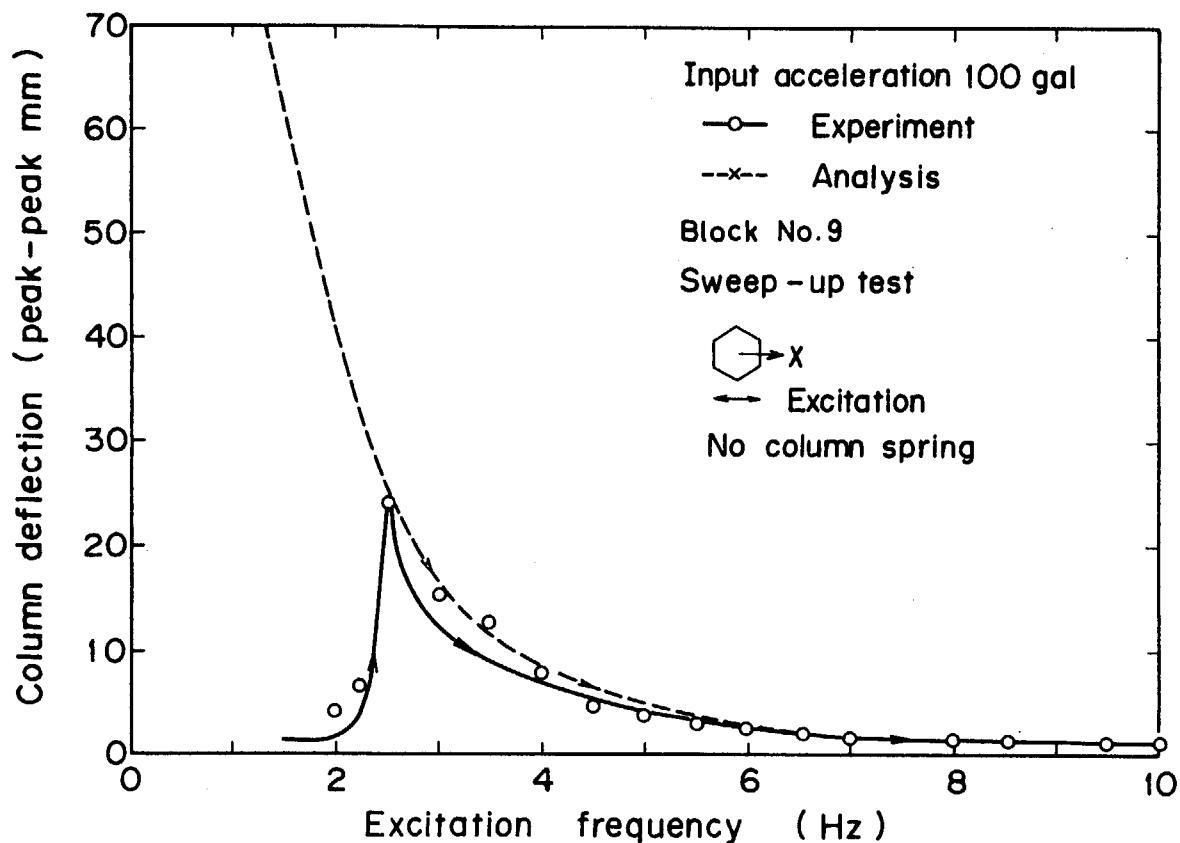


Fig. 7.3 Comparison between analytical and experimental values on column deflection

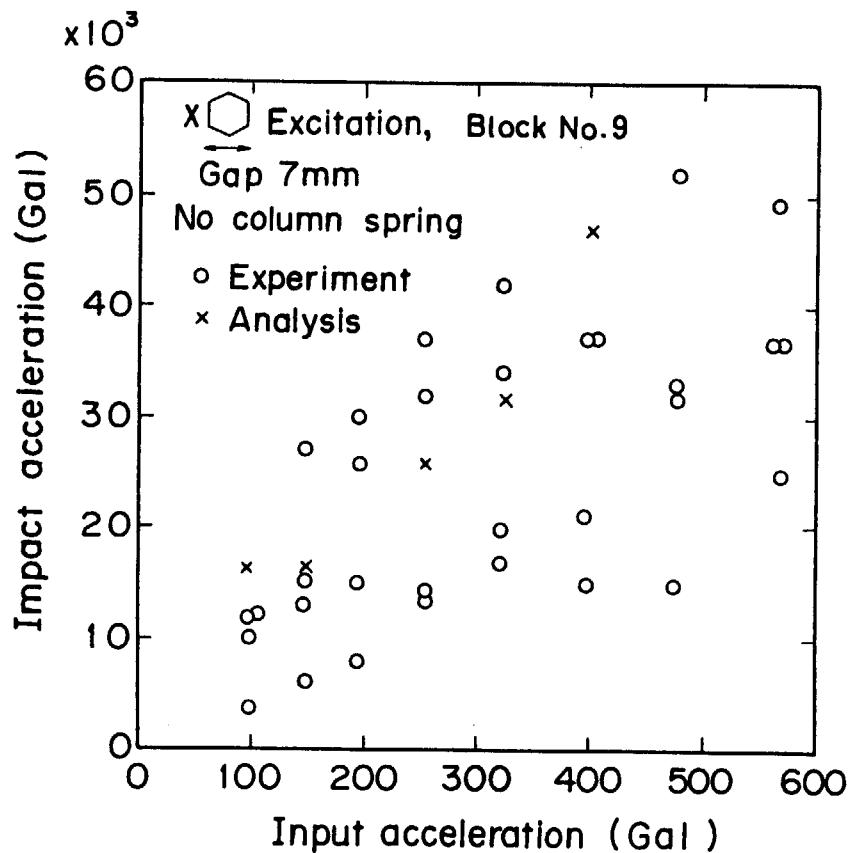


Fig. 7.4 Comparison between analytical and experimental values on impact acceleration

8. 考 察

(1) 実機の衝撃力

模型試験から実際の炉心の地震応答特性を推測してみる。模型は実際の炉心の寸法で $1/2$, 重量で $1/4$ であるから, 実機の変位は第3章の相似則に従って模型試験結果の2倍すればよいし, 同様に衝撃力は4倍すればよい。いま地震波による応答最大衝撃値を推定してみる。

Fig. 5. 1 7 から最大加速度を 16000 Gal とすれば, ブロックの質量は $0.0195 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$ であるから, 衝撃力は 312 kg となる。実機の衝撃力は4倍して 1.25 ton となる。この値はギャップ幅がかなり狭い場合であり, 実際の大きなギャップの場合にはさらに大きくなることが予想される。

(2) 振れ回り運動の影響

第5章で述べたように, 振れ回り運動は高い加振振動数領域(7 Hz 程度)で大きくなる。実機では相似則によって $1/\sqrt{2}$ 倍すれば 5 Hz 程度において振れ回りが大きくなると予想される。一方, 地震波の卓越振動数は $2 \sim 4 \text{ Hz}$ 程度と予想されるので, 問題にならない。また, 振れ回り運動によって衝撃力が上昇するとも考えられないので, 振れ回り運動が炉心耐震上特に問題になるとは考えられない。

(3) 分数調波振動の影響

$1/2$ 分数調波振動は 7 Hz 程度で発生する。上述のように, これは実機換算で 5 Hz 程度であり, 地震波から考えて, 問題にならない。

(4) ガス圧力差の影響

ガス圧力差によってコラムの変位は少なくなり, 耐震上有利に作用すると考えられる。

9. 結 論

ブロック型燃料高温ガス炉炉心の基本構成領域である7本コラムによる振動試験を実施して, 3次元空間におけるコラムの振動特性と衝突特性を明らかにするとともに, シミュレーション解析を行ない, 計算値と実験値とを比較して解析法の妥当性を明らかにし, 解析法の開発に役立つ資料を得ることができた。本耐震試験と解析によって得られた結果は次のように要約できる。

- (1) コラムの静剛性を調べた結果, ブロックのロッキングに基づくソフトスプリング形の非線形ばね特性を有することが明らかになった。
- (2) コラムの応答変位が最大となる応答変位共振振動数は加振加速度の増加とともに低下する, いわゆるソフトスプリング特性を明らかにすることができた。
- (3) コラムの変位共振倍率は約 $3 \sim 4$ 倍である。変位共振時の減衰比はコラムの変位量に従って増加し, コラムの変位 $6 \sim 16 \text{ mm}$ において約 $13 \sim 17\%$ である。

- (4) 中央コラムが周辺コラムと衝突しない場合には、13段ブロックのうち下から8段目と9段目の間が口を開くモードであるが、周辺ブロックと衝突する場合には、コラムの下から2/3長付近のブロックが周辺のブロックにへばり付く形となる。
- (5) ブロックのロッキング運動の支点が、六角の1角となる加振条件では、コラムは振れ回り運動をする。
- (6) ブロック上下接触面の摩擦力やコラム上端の非対称支持条件に起因して、分数調波振動が発生する。
- (7) コラムには、ブロックのロッキング運動に基づくソフトスプリング特性と、コラム間ギャップに基づくギャップ系のハードスプリング特性が存在する。
- (8) スイープアップとスイープダウンにおける応答最大変位となる振動数には差があり、コラムの共振に履歴現象が存在する。これはコラムの非線形ばね特性による。
- (9) コラム上下間の圧力差などによるコラムの上方から力の付加は、ブロック上下接触面の摩擦力を増加させ、コラムの共振振動数を上昇させる。
- (10) ブロックのロッキング運動の支点が六角の角となる加振条件では、支点が辺となる場合に比較して、コラムの共振振動数は低下する。
- (11) コラム間ギャップ幅の増加に従ってコラムの共振振動数は低下する。これはコラムのソフトスプリング特性による。
- (12) ブロックの衝撃加速度は加振加速度の増加に従って増加する。
- (13) コラム間ギャップ幅の増加に従ってコラムの衝突する振動数範囲は狭まるが、衝撃加速度は増加する。
- (14) ブロックのロッキング運動における衝突接触時間は $2 \sim 4 \times 10^{-3}$ 秒程度である。
- (15) コラム周辺のギャップ幅が不均一の場合、コラムはギャップ幅の最も小さい側とのみ衝突するか、あるいはギャップ幅の小さい側と強く衝突する。
- (16) コラム軸方向に沿っての衝撃加速度分布はコラムの振動モードと類似しており、コラムの最大変位点（コラム下端から2/3長）付近で最大となる傾向を示す。

謝 評

本研究の実施に際し、ご援助をいただいた日本原子力研究所東海研究所高温工学部青地哲男部長に感謝します。本研究の振動試験⁽¹²⁾は日本原子力研究所と三菱重工業㈱との委託研究契約に基づき、日本原子力研究所が計画し、三菱重工業㈱において実施された。本振動試験を担当した三菱重工業㈱高砂研究所・振動騒音研究室の白木万博室長、同所第2実験課の池上保彦氏および実験課の方々に感謝します。使用した振動台は㈱大林組・技術研究所所有のものを使用した。振動台の使用の便宜を計っていただいた㈱大林組・技術研究所の関係者に感謝します。本解析に使用した計算プログラムは、センチュリ・リサーチ・センタの中沢甫夫氏によって作成されたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Neylan, A. J., Gorholt, W., Nucl. Eng. Design, 29, 231~242(1974).
- (2) Olsen, B. E., et al., ibid., 36, 355~365(1976).
- (3) 武藤 清他, 日本原子力学会誌, 19-12, 853~861(1977).
- (4) Muto, K., et al., Trans. 5 th Int. Conf. SMiRT, K 12/2, (1979).
- (5) 幾島 豊他, 日本原子力学会誌, 22-1, 55~67(1980).
- (6) Ikushima, T. et al., JAERI-M7727, (1978).
- (7) 幾島 豊, 石塚 宏, “高温ガス炉炉心の1コラム模型による耐震試験と解析”, JAERI-M(to be published).
- (8) 青地哲男他, JAERI-M6845(1977).
- (9) Ikushima, T., Nakazawa, T., Nucl. Eng. Design, 55, 331~342(1979).
- (10) Ikushima, T., “SONATINA-1 : A Computer Program for Seismic Response Analysis of Column in HTGR Core”, JAERI-M Report(to be published).
- (11) Ikushima, T., Honma, T., Nucl. Sci. Tech. 17-9, 600~612(1980).
- (12) 三菱重工業(株), 多目的高温ガス実験炉炉心耐震基礎試験：1領域炉心振動試験委託報告書, 昭和53年3月.

付 錄

使用計測機器一覧表

振動試験に使用した計測機器の性能を Table A.1 に示す。

Table A.1 使用計器一覧表

	計器名称	型 式	測定範囲または性能	精度・感度	電源付属品	概略寸法・重量
検出器	衝撃加速度計	圧電素子型	4~10 kHz 0~1,000g	1kgで1%	—	3 g
	加速度計 (応答加速度計)	歪ゲージ型	0~85Hz 0~10 g	直線性 1%FS 単位出力電圧 ±1mV/V	—	20×20×22mm 重量 17 g
	変位計	渦電流型	0~10 kHz	—	—	—
増幅器	チャージアンプ	I C 型	2~20 kHz 0.1~300 g	—	AC100V	—
	動歪計	DMP-8E	応答周波数 0~1000 Hz	直線性 電流±0.5% 電圧±1%	DC 12V AC100V	434×238×145mm 重量 11 kg
記録器	ペン書きオシロ	WTR-281H	記録幅±20mm 記録方式、インク式 直線書き 周波数特性 0~80Hz 送り速度最大 250mm/s	直線性 2.5%以下	AC100V 50/60Hz	—
	電磁オシロ	5L-32	記録幅最大 203mm 測定範囲 100μV~200V	1.0mV/cm 直線性 ±1% (203mm)	—	430×250×450mm 重量 28 kg
	データレコーダ	RTP-110A	チャンネル数14ch テープ速度 4.75~7.6cm/s 周波数範囲 最高 DC~10kHz 記録時間 15分~240分	—	DC 12V AC100V	500×549×307mm 重量 36 kg
分析器	リアルタイム・ アナライザー	SD-330A	周波数範囲 0.15Hz~20kHz	周波数直線性 ±0.4% 振幅直線性 ±0.5%	AC 105~125V 50~400Hz	2223×485 ×486mm 重量 20.7 kg
その他	発振器	SD104A-S S R -1型	発信周波数 0.005Hz~50kHz	0.005% Full Range	AC100V 50/60Hz	—
	周波数カウンタ	TR-5104 4F	測定範囲 DC~50MHz	—	—	240×85×293mm
	プラウン管 オシロ	VP-5464	周波数特性 DC DC~SMHz AC 5Hz~5MHz	±3 %	90, 100, 110V 50/60Hz	195×285×415mm 重量 10 kg
	ローパス フィルタ	L P -2型	遮断周波数 0.1~5 kHz 減衰傾度 24 dB/Oct ±2 dB/Oct	—	—	400×138.5 ×500mm 重量 0.8 kg