

JAERI-M
9265

高温ガス炉炉心の1コラム模型による
耐震試験と解析

1981年1月

幾島 毅・石塚 宏*

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.

高温ガス炉炉心の1コラム模型による耐震試験と解析

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

幾島 毅・石塚 宏*

(1980年12月11日受理)

黒鉛ブロックから構成された多目的高温ガス実験炉炉心の耐震研究の第1段階として、炉心構成の基本要素であるコラムの1/2縮尺模型の耐震試験と解析について報告する。

- (1) コラムはブロックのロッキングに起因するソフトスプリング特性を有する。また、コラムと境界との衝突に関して、ギャップによるがた系のハードスプリング特性を有する。コラムは非線形の共振特性を有し、跳躍を伴った履歴現象を示す。
- (2) 加振振幅の増加に従って、コラムの共振振動数は降下する。
- (3) 加振加速度の増加に従って、衝撃力は増加する。
- (4) ギャップ幅の増加に従って、衝撃力は増加する。
- (5) 地震波入力に対する応答値は正弦波のその40～70%である。
- (6) コラムの減衰定数は約30%であり、コラムの振幅の増加に従って増加する。
- (7) コラム変位と衝撃力の実験値と解析値は良い一致をみた。

* 富士電機製造(株)中央研究所

Seismic Test and Analysis of HTGR Core Using
One-Stacked Block Column

Takeshi IKUSHIMA and Hiroshi ISHIZUKA*
Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received December 11, 1980)

The results of a seismic test and analysis on a 1/2 scale model of the typical stacked column, an element structure for the seismic study of the block-type fuel core of a high temperature gas cooled reactor, are described.

(1) The column has the soft spring characteristics based on the block rocking. The hard spring characteristic is observed based on the gaps between column and boundary. The column has a non-linear resonance and exhibits a hysteresis response with jump points.

(2) The column resonance frequency decreases with increasing excitation amplitude.

(3) The impact force increases with increasing input acceleration.

(4) The impact force increases with increasing boundary gap width.

(5) The maximum response of the column for seismic waves are about 40 to 75 % of that for the sinusoidal input.

(6) The column damping factor is about 30 % of critical. It increases with increasing in the column deflection amplitude.

(7) Good correlation in vibration behavior of the stacked column and impact force between test and analysis was obtained.

Keywords : Seismic Response, Seismic Test, Vibration Test, Seismic Analysis,
Dynamic Response, Nonlinear Vibration, Impact Response,
Aseismic Design, HTGR Core, HTGR Core Seismic, Block Type HTGR
Core, HTGR Core Structure, Soft Spring Characteristic,
Hard Spring Characteristic

* Fuji Electric Co., Ltd.

目 次

1. 緒 言	1
2. 多目的高温ガス実験炉の炉心構造	2
3. 試験装置と試験方法	6
3.1 試験装置	6
3.1.1 試験体	6
3.1.2 試験治具	6
3.1.3 振動台	7
3.1.4 測定装置	7
3.1.5 データ処理	7
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	10
4. 試験前検査	26
4.1 単体試験	26
4.1.1 支持枠剛性の検討試験	26
4.1.2 変位測定機構の作動試験	26
4.1.3 衝撃反力測定装置の校正	26
4.1.4 黒鉛ブロック反発係数の測定	26
4.1.5 黒鉛ブロックの摩擦係数測定	27
4.2 組立試験	27
4.2.1 コラムの自由減衰試験	27
4.2.2 コラムの復元力測定	27
4.3 支持枠振動試験	27
5. 振動試験	35
5.1 正弦波掃引試験	35
5.1.1 変位応答特性	35
5.1.2 共振特性	35
5.1.3 振動モード	35
5.2 正弦波応答試験	36
5.2.1 応答波形	36
5.2.2 衝突速度, 衝撃加速度, 衝撃反力の関係	36
5.2.3 変位の周波数特性	37
5.2.4 境界とのギャップ幅の影響	37

5.2.5	加振加速度の影響	37
5.2.6	衝撃反力最大値の分布	38
5.3	ビート波応答試験	38
5.4	地震波応答試験	38
5.5	ステップ波応答試験	39
6.	試験後検査	56
6.1	黒鉛ブロックの検査	56
6.2	試験装置の検査	56
7.	シミュレーション解析	56
7.1	解析モデルと運動方程式	57
7.2	自由減衰振動	65
7.3	正弦波応答解析	66
7.4	地震波応答解析	66
8.	考 察	77
8.1	相似則	77
8.2	試験結果から実機の実機特性検討	78
9.	結 論	78
謝 辞		79
参 考 文 献		80
付 録		81

CONTENTS

1. Introduction	1
2. VHTR core structure	2
3. Test apparatus and procedure	6
3.1 Test apparatus	6
3.1.1 Test model	6
3.1.2 Test rig	6
3.1.3 Shaking table	7
3.1.4 Instrumentation	7
3.1.5 Data aquisition	7
3.2 Test procedure	8
3.2.1 Pre-test	8
3.2.2 Vibration test	9
3.2.3 Inspection after vibration test	10
4. Pre-test	26
4.1 Element test	26
4.1.1 Test rig stiffness	26
4.1.2 Calibration of displacement detector	26
4.1.3 Calibration of impact reaction detector	26
4.1.4 Coefficient of restitution	26
4.1.5 Friction factor of graphite block	27
4.2 Assemble test	27
4.2.1 Column free vibration	27
4.2.2 Column restoring force	27
4.3 Test rig vibration test	27
5. Vibration test	35
5.1 Sinusoidal sweep test	35
5.1.1 Displacement characteristic	35
5.1.2 Resonance characteristic	35
5.1.3 Vibration mode	35
5.2 Sinusoidal response test	36
5.2.1 Response curve	36
5.2.2 Impact characteristic	36
5.2.3 Displacement characteristic	37
5.2.4 Effect of gap width	37
5.2.5 Effect of acceleration level	37
5.2.6 Distribution of impact force	38
5.3 Beat wave test	38

5.4	Seismic wave test	38
5.5	Step wave test	39
6.	Inspection after vibration test	56
6.1	Inspection of graphite block	56
6.2	Inspection of test rig	56
7.	Simulation analysis	56
7.1	Calculation model and equation of motion	57
7.2	Free vibration	65
7.3	Sinusoidal wave response	66
7.4	Seismic wave response	66
8.	Discussion	77
8.1	Similarity laws	77
8.2	Vibration response of proto-type core	78
9.	Conclusion	78
	Acknowledgements	79
	References	80
	Appendix	81

1. 緒 言

ブロック型燃料高温ガス炉の炉心は、六角状の黒鉛燃料体と反射体を積み上げたコラム群から構成されている。これらの炉心構成要素ブロックはダウエルによって垂直方向に連結されている。コラム間の水平方向には、燃料交換作業の便宜上、数mmのギャップがある。高速中性子照射によって、このギャップは燃料の炉内滞在時間とともに大きくなり、炉心支持構造物の熱膨張を考慮すれば、最大で約4mm程度にもなる。炉心内のブロックの総数は、実験炉級の小型炉心でも約2千個、発電用の大型炉心では約8千個にもなり、地震時にはブロックは相互に衝突を繰り返して、複雑な振動挙動を示す。すなわち垂直方向にルーズに結合されたブロックコラムは、水平方向にギャップを介して並んでいる隣り合うコラムと互に衝突する。

このような炉心構造系はルーズピン結合コラムのソフトスプリング特性とコラム間ギャップを有するがた系ハードスプリング特性の両特性を有する。この非線形振動特性を有する炉心の耐震設計を行うためには、地震時のコラムの振動特性と衝突特性を明らかにする必要がある。この目的のため、Neylanら⁽¹⁾、Olsenら⁽²⁾ゼネラルアトム社⁽²⁾の研究者は、1本のコラム、2～3次元炉心模型の振動実験と解析を行ない、コラムの振動挙動と衝撃力特性を明らかにしている。武藤ら⁽³⁾は2次元立面内のコラム群模型の振動実験を行ない、コラムの群振動特性や衝撃力特性に及ぼす側方支持剛性の影響を明らかにするとともに、シミュレーション解析手法の開発を行なった。石塚ら⁽⁴⁾は1～2次元炉心模型の振動実験と解析を行ない、ブロック群の運動特性や応答倍率を求めている。

しかしながら、これらの研究において、コラム間ギャップ幅、上端支持条件および上端からの圧縮力のコラム特性への影響が明らかにされていない。また模型試験結果から実際の炉心の衝突力の推定が困難であるかもしくは明らかでない。それ故、これらの研究は、ブロック型燃料高温ガス炉炉心の耐震設計への直接適用という観点からは不十分である。

そこで、多目的高温ガス実験炉の炉心耐震設計に役立てるため、筆者らは炉心耐震研究計画⁽⁵⁾を立案し、その第1段階として、1本のコラムの振動実験を実施した。そして、加振加速度、加振振動数、加振波形、六角ブロックに対する加振方向、ギャップ幅、上端ブロックの支持条件、上端ブロックの重量などの変化によるコラムの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、コラム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。なお本報告は1コラム耐震試験に関する総合報告書である。

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) 変位応答特性
 - (ii) 衝撃力応答特性
 - (iii) ギャップ幅の影響

- (V) 上端ギャップ幅の影響
 - (VI) 上端ブロック重量の影響
 - (VII) 減衰特性
 - (VIII) 反発係数
- (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⁽⁶⁾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グリッドによってその重量を支えられる構造になっている。炉心側方は炉心拘束機構によってコアバレルに結合されており、コアバレルは、ラジアルキーによって原子炉容器内側に配置される。

炉心の水平面配列は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ブロック、その上下に各々2層ず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、下部には高温プレナムを形成する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げ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リージョン）を形成している。

燃料体には、上面に3個のダウエルピン、下面には3個のダウエルソケットが設けられており、燃料体が位置決めされている。

- (Ⅳ) 上端ギャップ幅の影響
 - (Ⅴ) 上端ブロック重量の影響
 - (Ⅵ) 減衰特性
 - (Ⅶ) 反発係数
- (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⁽⁶⁾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グリッドによってその重量を支えられる構造になっている。炉心側方は炉心拘束機構によってコアバレルに結合されており、コアバレルは、ラジアルキーによって原子炉容器内側に配置される。

炉心の水平面配列は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、コラバレル、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ブロック、その上下に各々2層ず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、下部には高温プレナムを形成する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げ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リージョン）を形成している。

燃料体には、上面に3個のダウエルピン、下面には3個のダウエルソケットが設けられており、燃料体が位置決めされている。

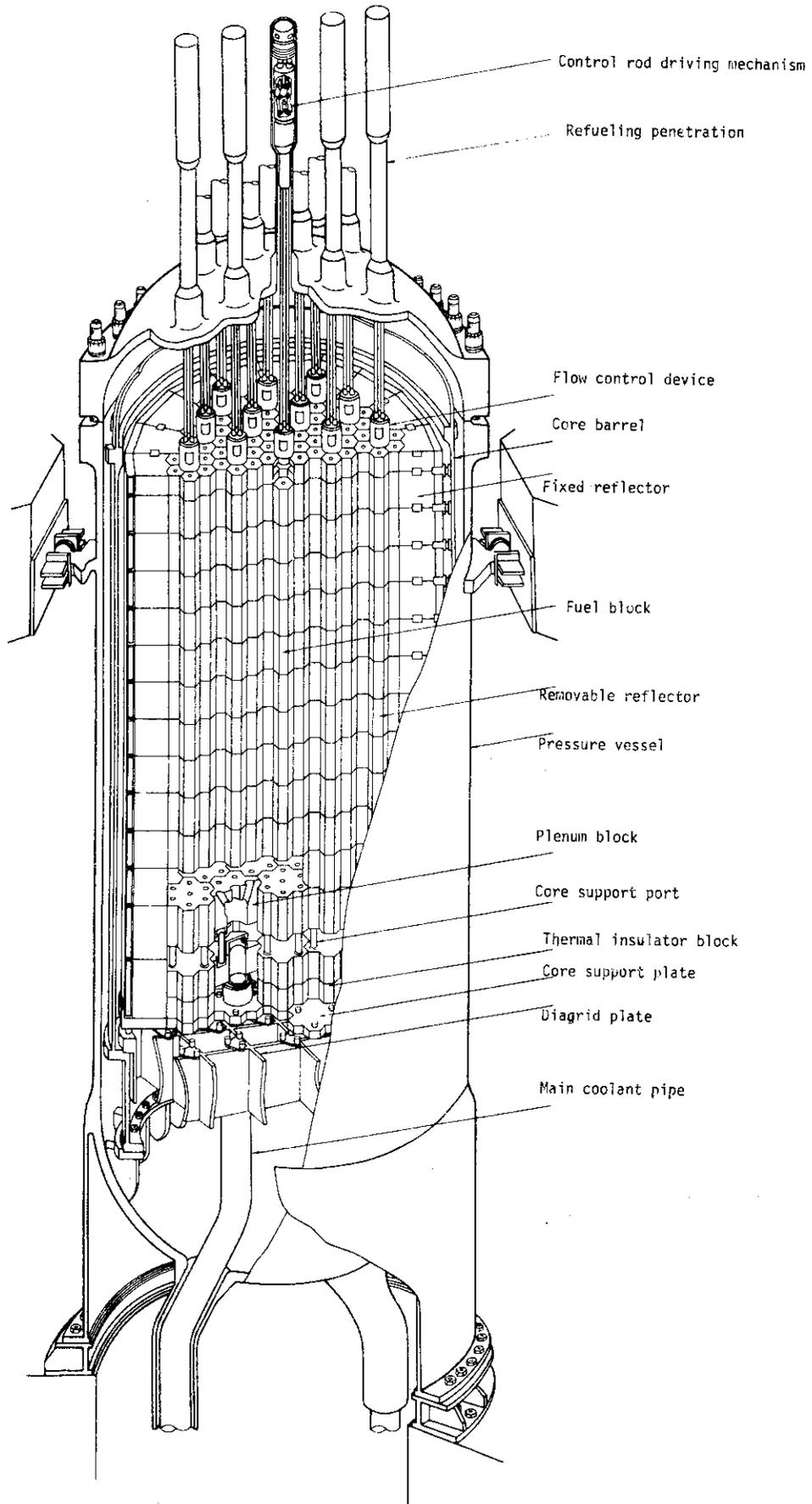


Fig. 2.1 Reactor vertical view of VHTR

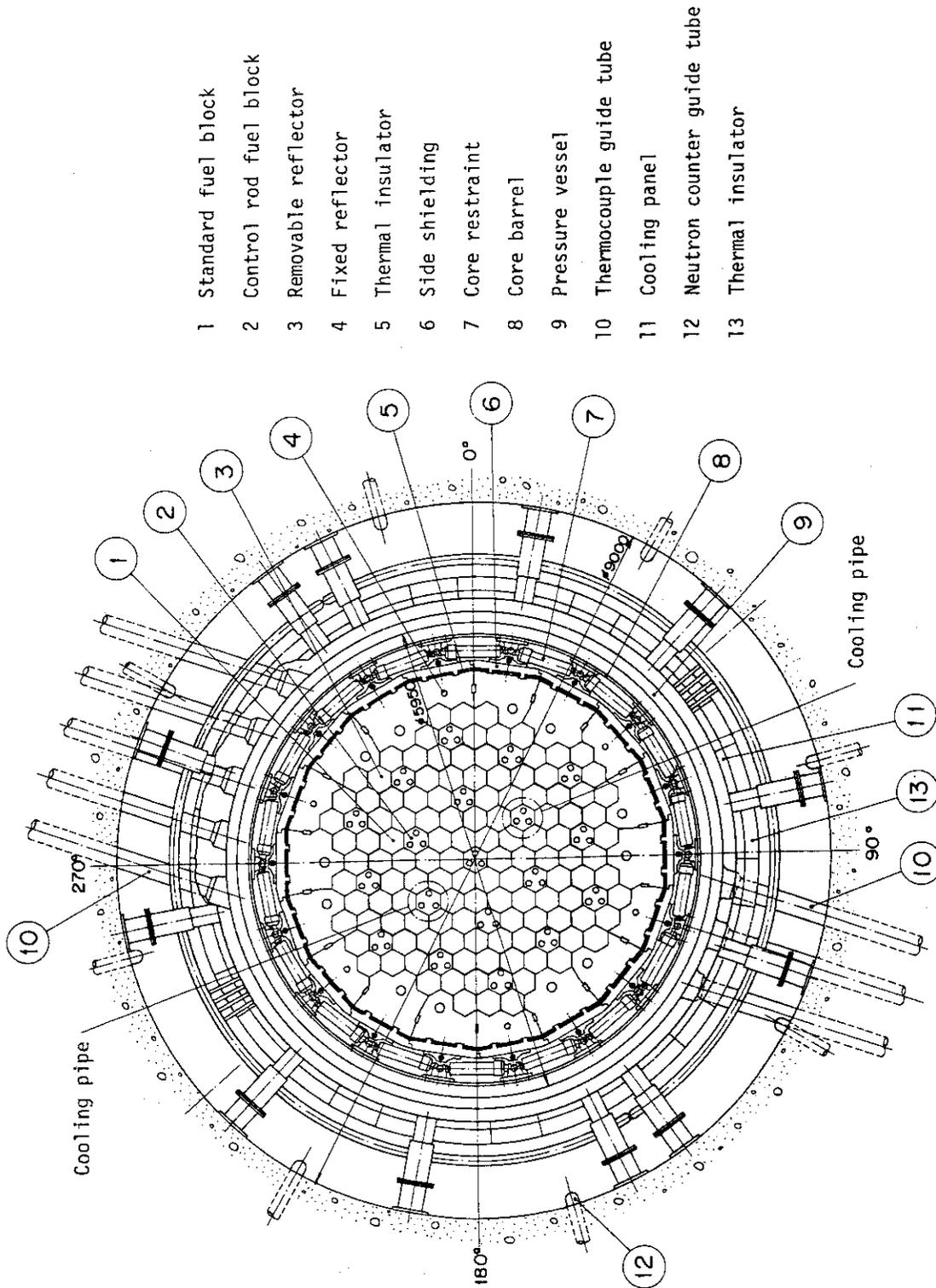


Fig. 2.2 Reactor plane view of VHTR

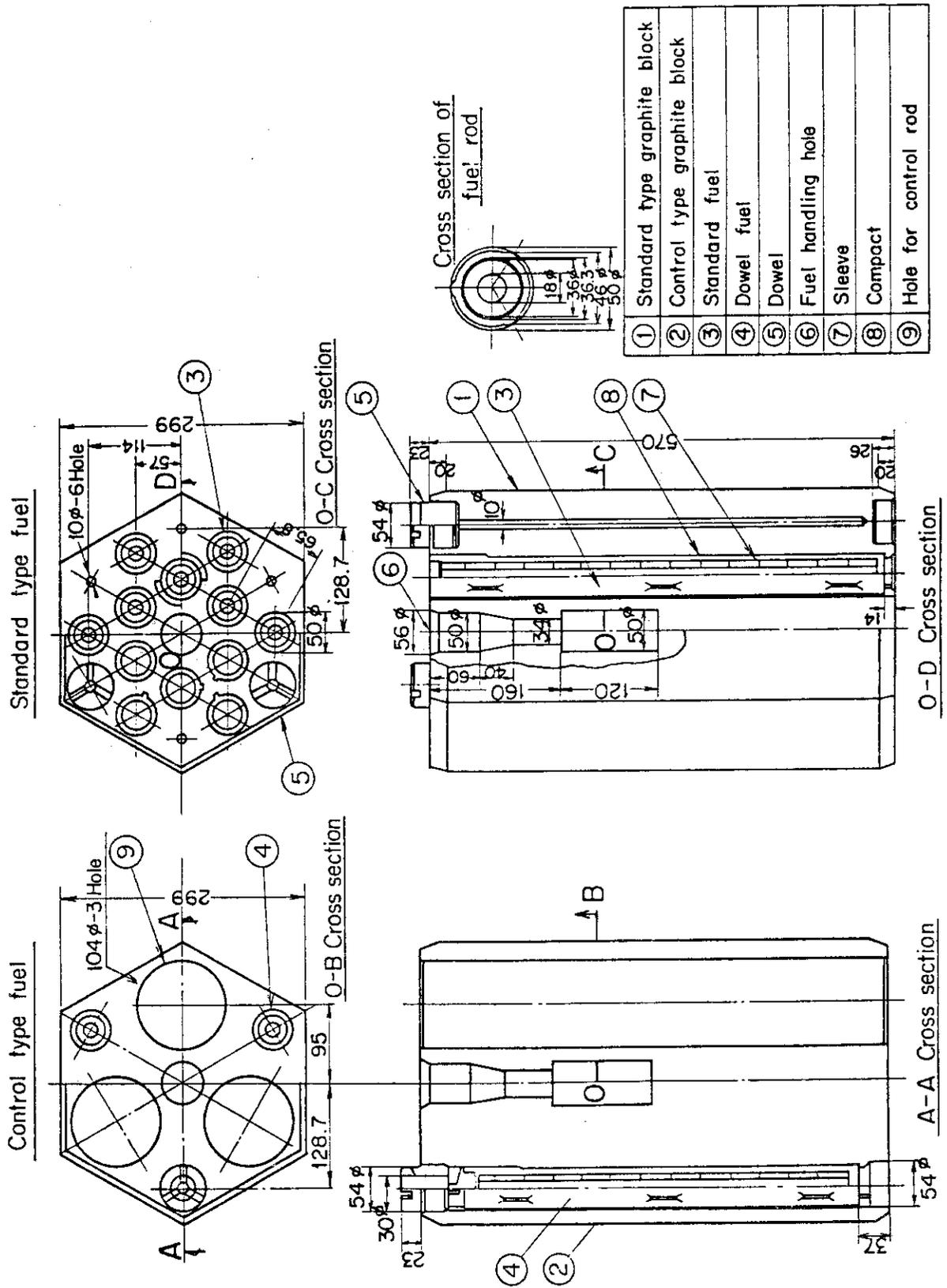


Fig. 2.3 Fuel block

3. 試験装置と試験方法

3.1 試験装置

3.1.1 試験体

試験体は多目的高温ガス実験炉の炉心のコラム1本を対象とし、Fig. 3.1 および Photo. 3.1 に示すように、 $1/2$ 縮尺模型を使用する。試験体は標準型燃料体と制御棒挿入孔付燃料体のいずれにもよらないで、均質な形状とした。このためブロックには19個の孔をあけ、燃料棒は挿入しない黒鉛ブロックを試験体を選定した。炉心の1本のコラムをモデル化するため、12個のブロックとコラム上端には鋼製のオリフィスブロックを設け、合計13段とした。オリフィスブロックの外形と重量は黒鉛ブロックと同じにした。

試験体黒鉛ブロックは実際の燃料体の $1/2$ 縮尺とし、重量は約 $1/8$ とした。よって、六角ブロックの対面距離は150mm、高さ285mm、重量約6kgである。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 3.1に示す。

ブロックの上面と下面とには、ダウエルピンとダウエルソケットがそれぞれ3個ずつ設けられている。ダウエ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、水平変位は拘束されているが、ロッキング運動は出来る。コラム下端のブロックは支持枠基板上のダウエルピンによって、水平変位拘束、回転許容の状態にある。

コラム上端の鋼製ブロックは、実際の炉心の流量調整用オリフィス・ブロックを模擬している。この鋼製ブロックには、上端からコラムに加わる圧縮力（炉心上下ガス圧力差）による振動特性への影響を調べるために、Fig. 3.2 および Photo. 3.2 に示すようにもとの重量の約9kgの約1.8倍の16.3kgまで重量を増加できるようになっている。上端ブロックは、わずかのギャップを介して衝突板にはさまれているから、コラムは自立状態にある。

3.1.2 試験治具

試験治具であるコラム周辺の支持枠はFig. 3.3 および Photo. 3.3 に示すように、鋼製の箱型構造であり、試験の加振条件（1～10Hz）よりも十分上回る固有振動数（1次の固有振動数18Hz）となるように剛に製作されている。加振方向に対して、コラムの向きをFig. 3.4 のように2方向に変更できるように製作した。コラムの各ブロックの両側には、炉心の固定反射体ブロックを模擬した境界衝突板構造物が支持枠に取付けられている。Fig. 3.5 および Photo. 3.4 に示すように、この衝突板のターンバックルを調節することによって、コラムと衝突板のギャップを変更することができる。衝突板として平板構造と谷溝型構造の2種類のもので用意され、これらはそれぞれ、X方向加振実験とY方向加振実験に使用された。衝突板構造物には、4点曲げはり構造の反力測定機構があり、ブロックが衝突板に衝突した場合の衝撃反力が、4点曲げはりに取付けられたひずみゲージによって測定することが出来る。4点曲げはりばね鋼（SCM3）で製作されており、表面は硬度を高めるために熱処理されている。このはりのばね

定数は実際の炉心の拘束構造物の剛性を参考にして $2.4 \times 10^4 \text{ kg/cm}$ に製作された。

3.1.3 振動台

振動台は溝水建設機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	12 ton
加振力	25 ton - G
最大振幅	± 100 mm
周波数範囲	0.1~30 Hz
加振波形	正弦波, 三角波, 矩形波, ランダム波
振動方向	水平 1 方向
駆動台寸法	5m×4m
駆動方式	電気油圧式

振動台の限界性能を Fig. 3.6 に示す。

3.1.4 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, 衝撃加速度, 衝撃反力および変位量の微分値の速度であり, この諸量の測定のため Table 3.2 に示すように各検出器を取付けた。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, 振動台の変位と加速度も測定した。計測器の種類は Table 3.2 に示すように, ブロックの変位については差動トランス型と摺動抵抗型とを使用し, 前者は変位が ± 25 mm 以下の場合に, 後者はそれ以上の場合に使用した。ブロックの衝撃加速度の測定は圧電型のものを, 衝撃反力は境界衝突板構造物の 4 点曲げはりに取付けたひずみゲージを使用した。変位計, 加速度計および衝撃反力計の検出器の取付図を Photo 3.5 に示す。水平 1 軸加振振動試験においてもコラム内の各ブロックの動きは, 3 次元運動をするが, 加振方向の動きが最も大きく, 加振方向の変位でもってコラムの振動特性を評価するため, この加振方向の水平 1 軸成分の変位のみを計測することにした。このため Fig. 3.9 に示すリンク機構をブロックの上面から 25 mm の位置に取付け, これに変位検出器を接続した。これはハウジングの回転とハウジングに連結された軸上を自由に滑るユニバーサルジョイントによって加振方向と直角方向および垂直方向の変位を逃るものである。すなわち, ブロックのロッキングや振廻り運動に対しても, ブロックの水平変位のみを変位検出器に伝達しようとするものである。

3.1.5 データ処理

測定データは検出器から中継ボックスを経由して, すべてデータレコーダによって磁気テープに記録された。データの記録のために 14 チャンネルのデータレコーダを 3 台使用した。磁気テープ上のデータ相互間の時刻対応を明らかにするために, 磁気テープ上の第 1 チャンネルには, すべて共通に振動台変位とスタート時刻を記録した。また, 測定時にはモニタのために電磁オシログラフとオシロスコープをそれぞれ 2 台使用した。記録されたデータは次の 2 通りの方法によってデータ処理した。

- (1) 磁気テープから電磁オシログラフに出力して波形を読み取る。
- (2) 磁気テープ上のアナログ信号をデジタル信号に変換し、これを別の磁気テープに記録し、このデジタル信号を電子計算機を使用してデータ処理する。

3.2 試験内容

試験は試験治具の特性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各測定装置の機能チェックとブロック単体の特性を調べる単体試験およびコラムを試験治具内に取付けてコラムの特性を調べる組立て試験からなる。

(1) 単体試験

(i) 支持枠剛性の検討試験

支持枠を木製ハンマでタッピングして固有振動数を求める。

(ii) 変位測定機構の作動試験

リンク機構を使用した変位測定機構の作動性と測定精度を明らかにするために、光学的測定器による測定との比較によって本測定機構をチェックする。

(iii) 衝撃反力測定装置の校正

アムスラー試験機によって衝突板に静的に圧縮荷重を加え、反力測定用の4点曲げはりのひずみと荷重の関係を求める。同時に、この装置の固有振動数と減衰定数を求める。

(iv) 黒鉛ブロック反発係数の測定

黒鉛ブロック対黒鉛ブロック、黒鉛ブロック対衝突板、ロッキング振動時のブロックの反発係数を測定する。

黒鉛ブロック対黒鉛ブロックの反発係数は振子型の反発試験治具を使用する。この振子の腕の長さは1 mであり、振子の腕に取付けられた変位計からブロックの衝突前後の速度を求めて、反発係数を求める。

黒鉛ブロックと衝突板の反発係数は黒鉛ブロック同志の反発係数試験装置を使用して、一方の振子に黒鉛ブロックを他方の振子に衝突板を取付けて測定する。

ロッキング運動時のブロックの反発係数は、ブロック2個の上下に積み重ね、上部ブロックを傾けて離して自由減衰振動を行わせて衝突前後の速度を光学変位計から求めて反発係数を算出する。この試験においてリンク機構の変位計を取付けた場合と取付けない場合との比較をもする。

(v) 黒鉛ブロックの摩擦係数測定

ダウエルピンを取外した黒鉛ブロック2個を上下に積み重ねて上部ブロックにばね秤を取付けて水平に引張り静摩擦係数と動摩擦係数を測定する。また上部ブロックを傾けて六角柱の底面の一稜で接した場合についても同様の測定を行なった。

(2) 組立て試験

組立て試験では、コラムの自由減衰振動試験とコラムの復元力特性試験をする。コラム中の特定のブロックに強制変位を与えておき、急に離してコラムを自由減衰振動させ、その時の変位の変化から減衰定数を求める。コラムの復元力特性は、コラムの特定のブロックを引張り、その時の引張荷重と引張点の変位から復元力を求める。

(3) 支持枠振動試験

振動試験の加振試験範囲において支持枠の共振によって測定データに影響を及ぼさないことが必要である。このため支持枠の1次固有振動数を試験の加振振動数範囲の上限よりもはるかに高くする必要がある。そして製作された支持枠がこの要求を満しているか否かを、タッピング試験および振動台上の加振試験によって、固有振動数を明らかにする。試験治具を振動台上に取付け、加速度一定にして加振振動数を0.8 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。

3.2.2 振動試験

振動台を使用する振動試験は、正弦波掃引試験、正弦波応答試験、ビート波応答試験、地震波応答試験およびステップ波応答試験から成る。

(1) 正弦波掃引試験

コラム固有の振動特性を調べるため、コラムと衝突板が衝突しないだけ(100 mm)大きく広げ、正弦波加振試験を行なう。ブロックの方向はX方向とY方向の2方向とし、加速度一定にして加振振動数を0.8 Hzから15 Hzまでスイープアップさせ、その後再び0.8 Hzまでスイープダウンさせる。オリフィスブロックの重量も変化させた。

(2) 正弦波応答試験

コラムとブロックの衝突特性を調べるため、コラムと衝突板を5, 15, 25 mmに変化させ、正弦波加振試験を行なう。ブロックの方向はX方向とY方向の2方向とし、加速度は100～900 Gal, 加振振動数は0.8～15 Hzの範囲に渡って振動試験を行ない、加振加速度、加振振動数、コラムと衝突板のギャップ幅の変化による応答特性を明らかにする。コラム上端のギャップ幅による応答特性への影響を明らかにするために、上端のオリフィスブロックのギャップを0 mmから10 mmに変えて試験する。また、オリフィスブロックの重量変化による応答特性を調べるため、オリフィスブロックの重量を9.0 kgから1.8倍の16.3 kgに変えて試験する。

(3) ビート波応答試験

正弦波応答と地震波応答の中間程度の応答を示すビート波による。ビート波はFig. 3.10に示すようにコラムの共振振動数領域から2.5 Hzと3.5 Hzの2波を選定し、1ビート10波、ビート間隔2秒で5サイクル繰返す。ビート波試験によって、正弦波応答および地震波応答特性との相違を明らかにする。また、今後の試験内容の検討資料を得る。ブロックの方向はX方向とY方向の2方向とし、衝突板ギャップは5と15 mmの2種類、加振加速度は250～900 Galとする。

(4) 地震波応答試験

現実の炉に対する地震波を予想することは困難であるが、ある程度予想される地震のスペク

トル範囲をカバー出来る地震波を数種選ぶことによって、地震波による応答を推定してみる必要がある。このため、次の3波による応答試験を行なう。

- (i) El Centro 1940 NS地震波による応答波
- (ii) Taft 1952 EW地震波による応答波
- (iii) Ibaragi 1964 EW(606)地震波による応答波

これらの応答波は多目的高温ガス実験炉第1次概念設計⁽⁶⁾におけるコアバレルの最大応答波形を使用し、時間軸を相似則に従って $1/\sqrt{2}$ にした。これらの入力波形と振動台の波形ならびにスペクトルをFig. 3.11～3.13に示す。試験は、ブロックの向きXとY軸2方向、衝突板ギャップ5と15mmの2種類、加振加速度250, 500, 750 Galの3種類である。

(5) ステップ波応答試験

コラムの減衰特性はコラムの自由減衰試験によっても明らかに出来るが、振動台にステップ状の振動を与えてコラムが振動を始め、その後減衰振動する波形からコラムの減衰定数を求める。入力ステップ波の振幅は16～60mmとし、コラムの向きはXとY方向の2方向とする。この場合、コラムは衝突板と衝突を起さないようにするためギャップは100mmとする。振動台の制限から完全なステップ波を入力することができないが、Fig. 3.14のような波形を使用した。

3.2.3 試験後検査

振動試験終了後に試験治具のうち境界衝突板構造物については異常の無いことを確認し、黒鉛ブロックについては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 Mechanical properties of graphite used on vibration test

Item	Value
Material	SM1-24 (Anglo Great Lakes)
Young's Modulus	$1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (//) $0.9 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ (\perp)
Compression strength	670 kg/cm^2
Apparent specific weight	1.75 g/cm^3

Table 3.2 Detectors and measuring positions

Item	Detector	Detector position	Number
Displacement	Differential transformer type	Upper part of each block	13
	Sliding resistance type		
Impact velocity	Differentiation of displacement	No. 6~10 block	5
Impact force	Strain guage type	No. 5~13 block	9
Impact acceleration	Piezoelectric type	No. 4, 6, 9, 11 block	4
Input acceleration	Strain guage type	Shaking table	1

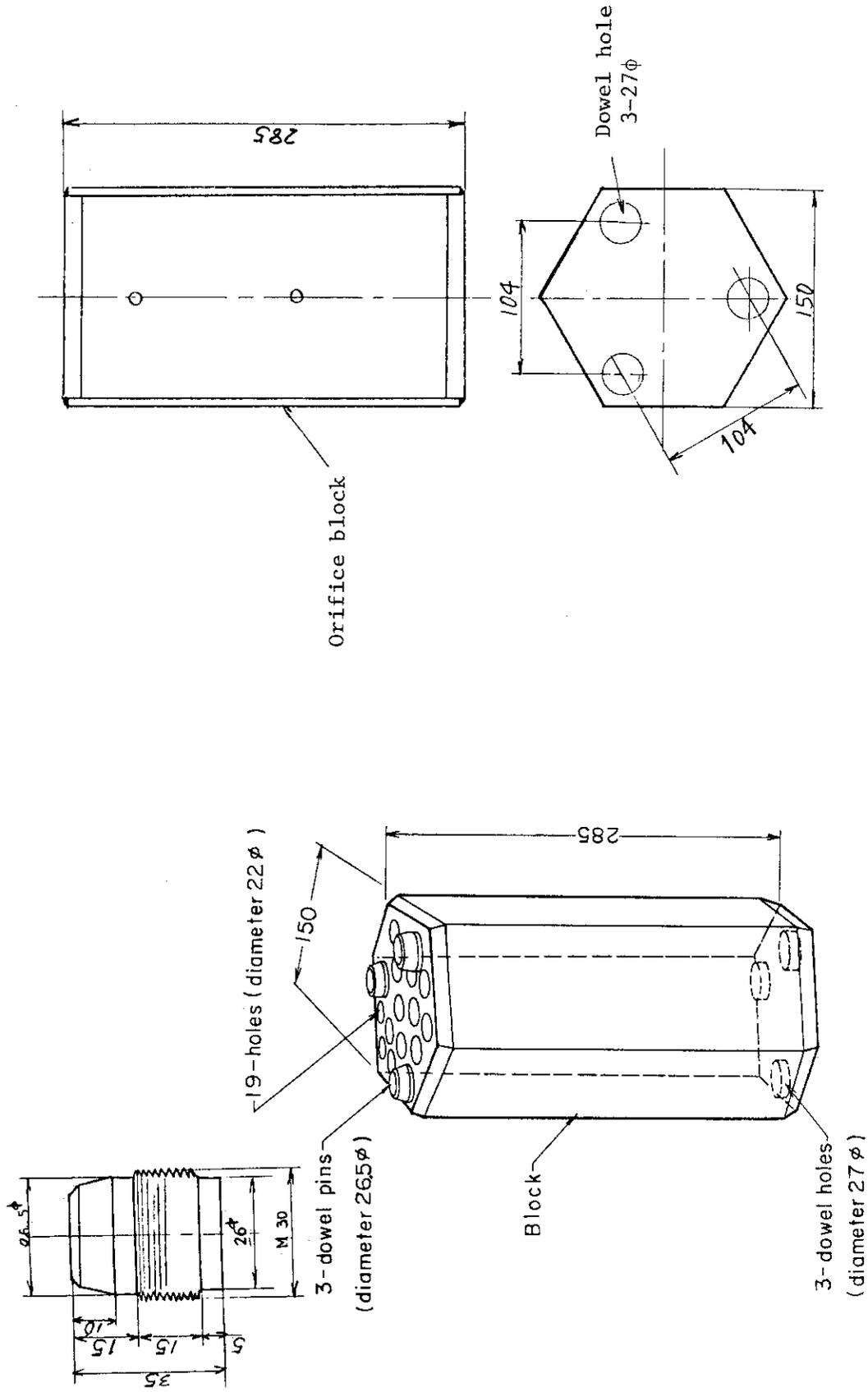


Fig. 3.1 Graphite block

Fig. 3.2 Top steel block

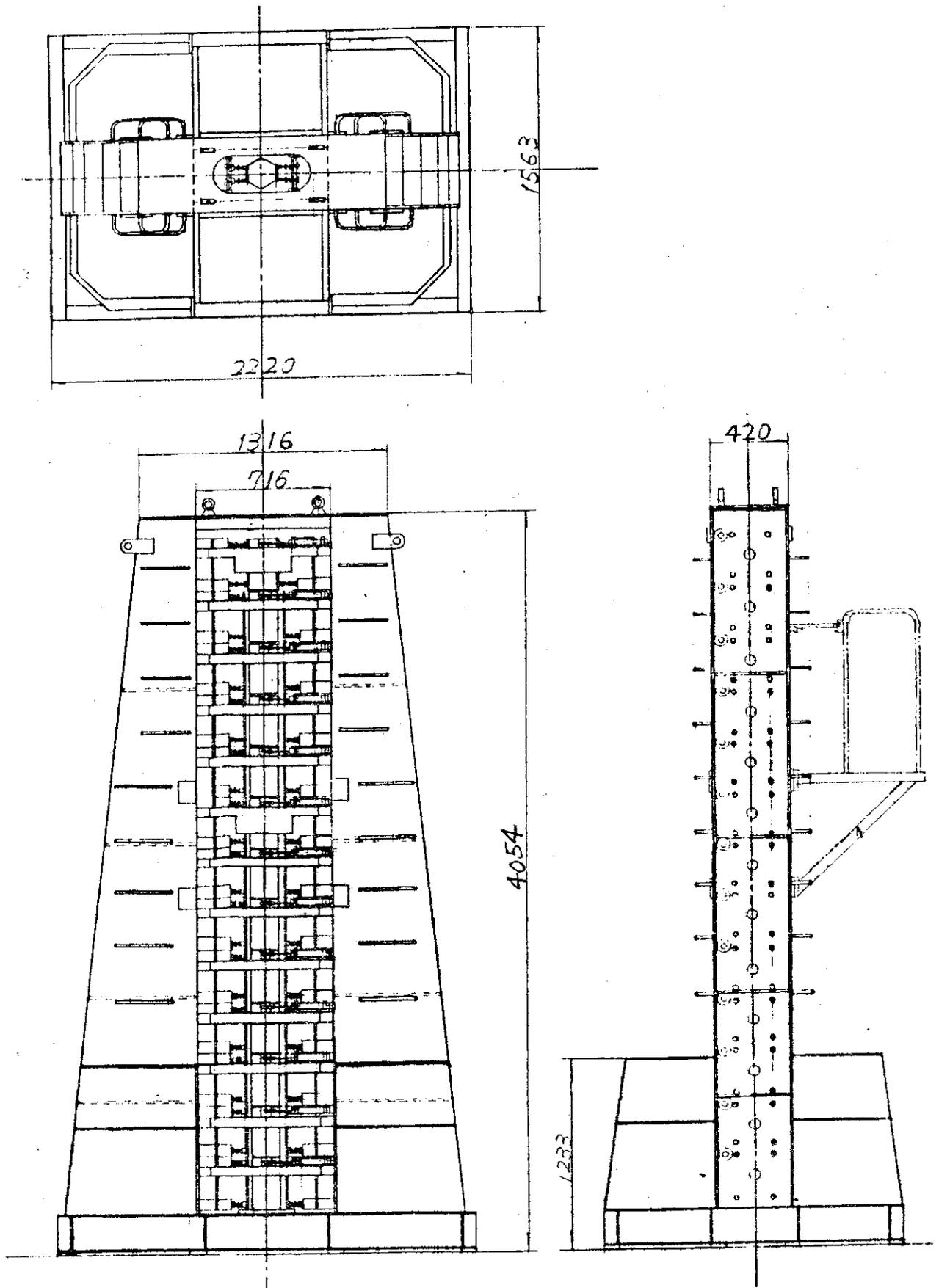


Fig. 3.3 Test rig

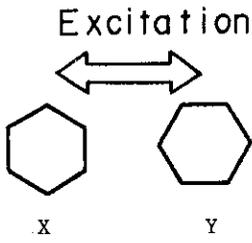


Fig. 3.4 Block direction

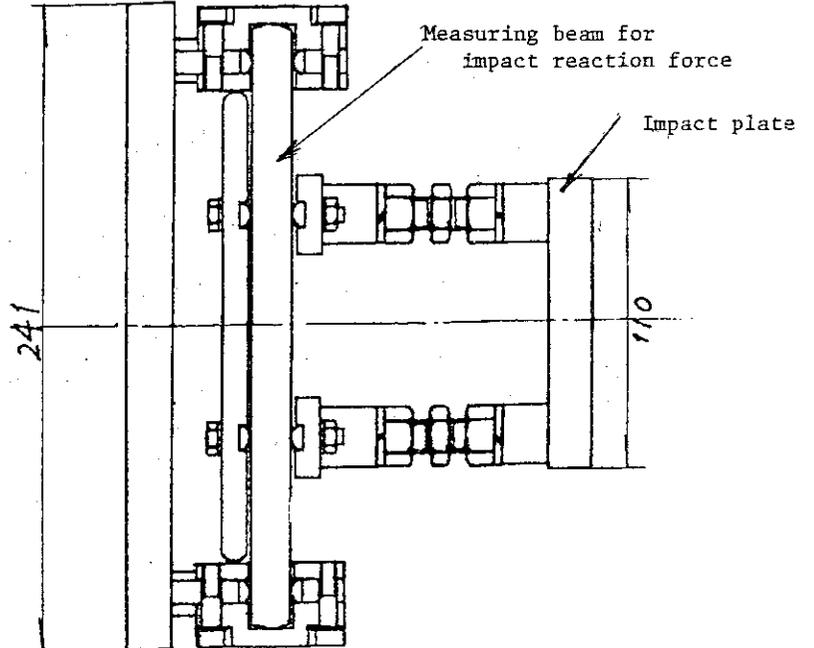
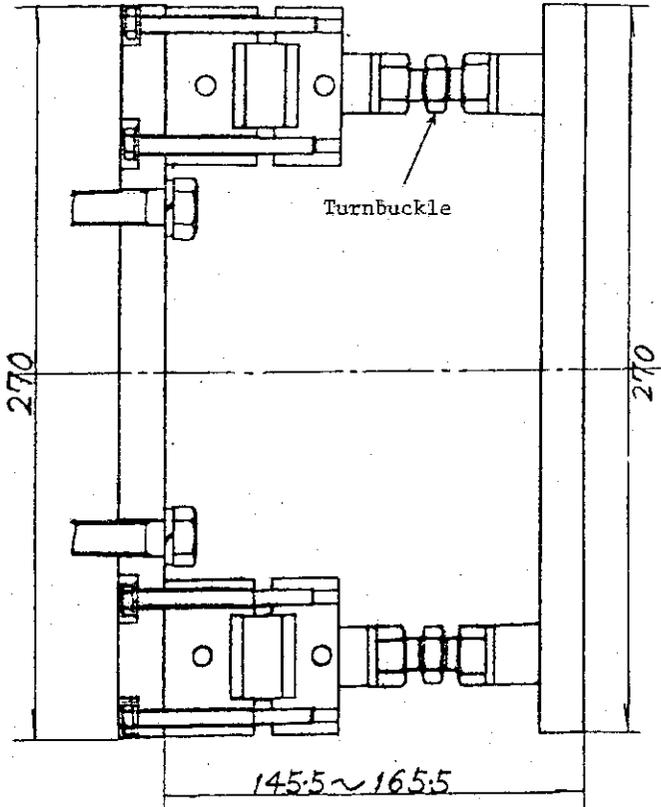


Fig. 3.5 Device of impact reaction force

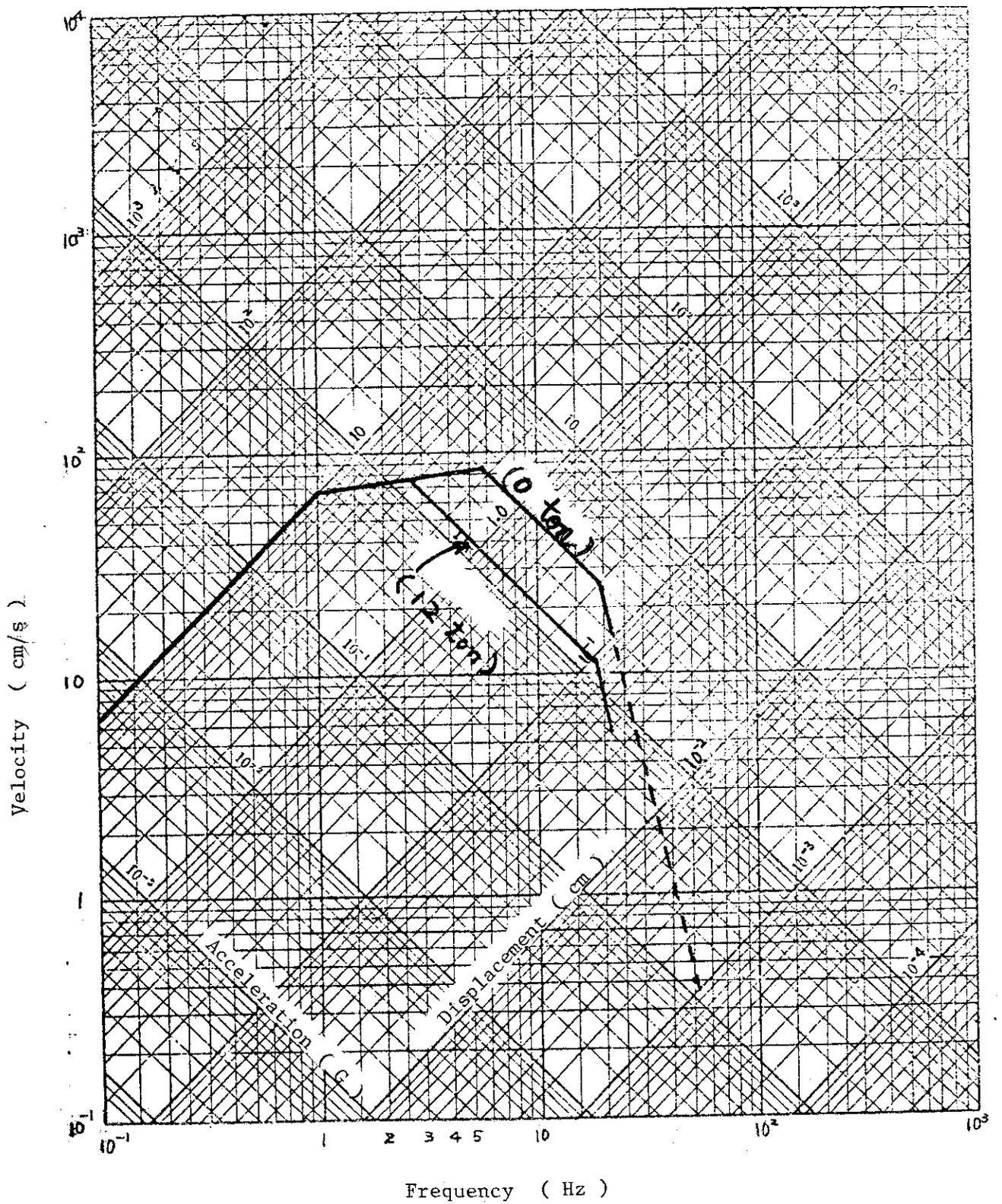


Fig. 3.6 Performance of shaking table

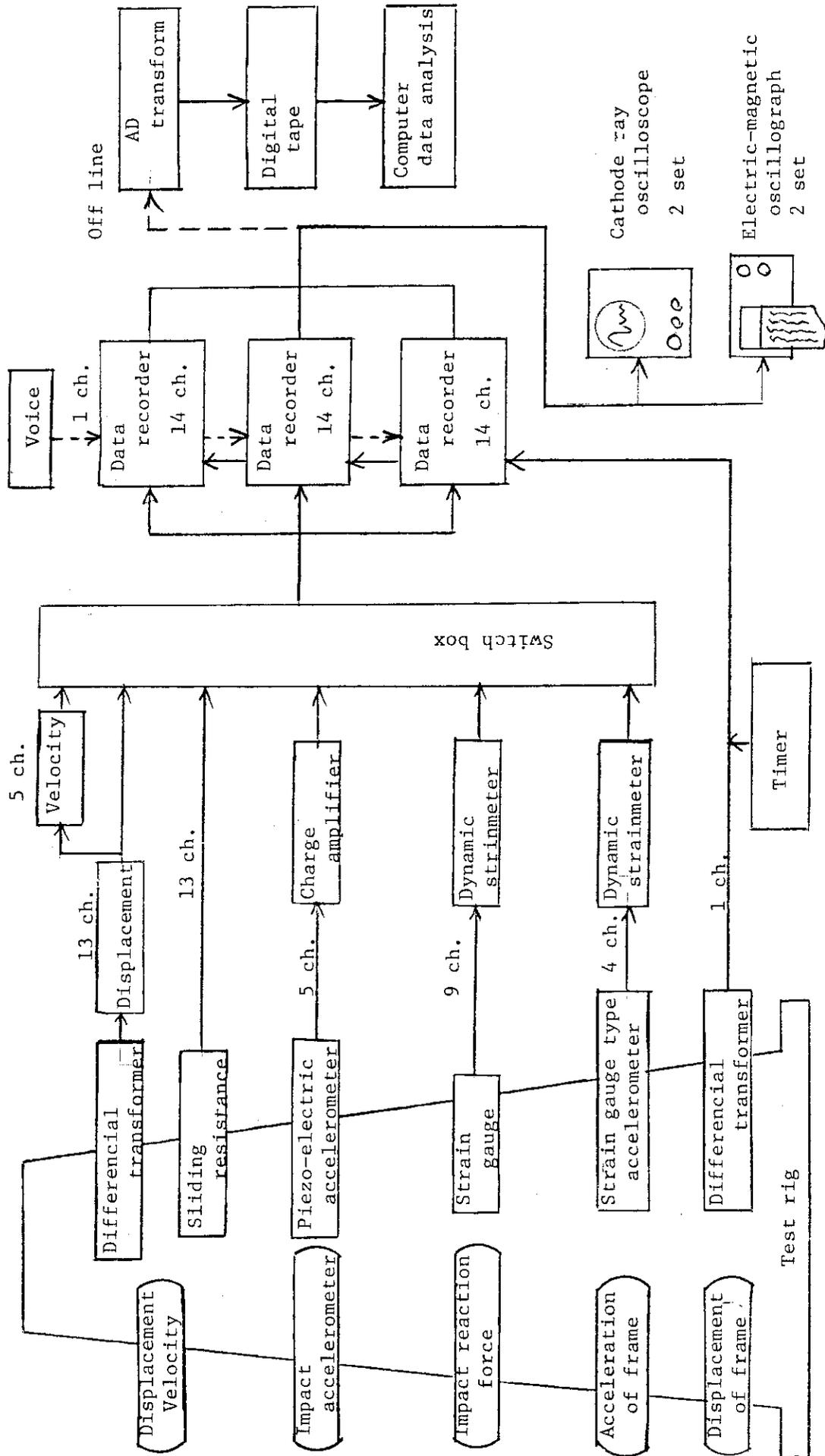


Fig.3.7 Measurement system block diagram

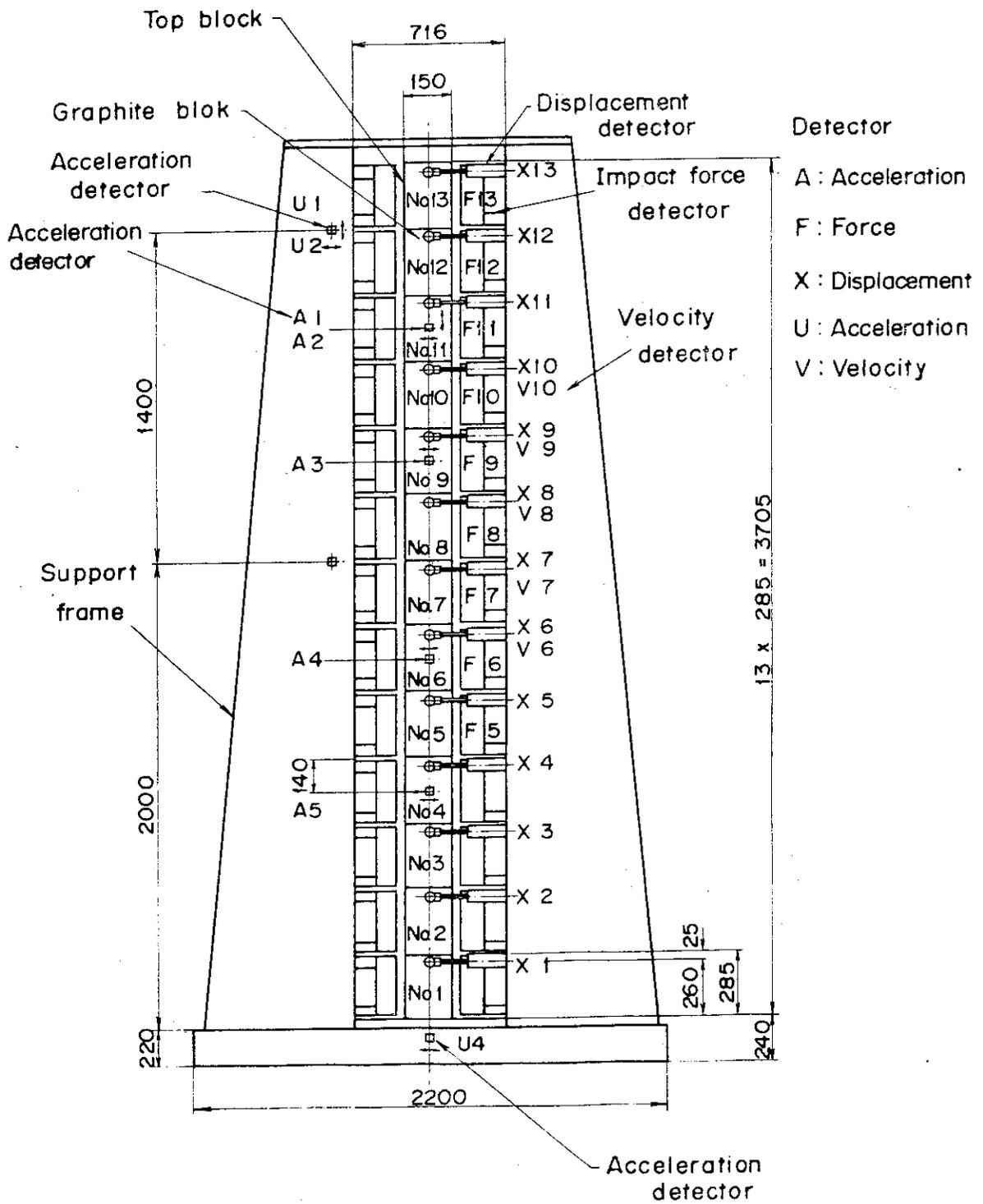


Fig. 3.8 Test apparatus for one stacked column vibration test

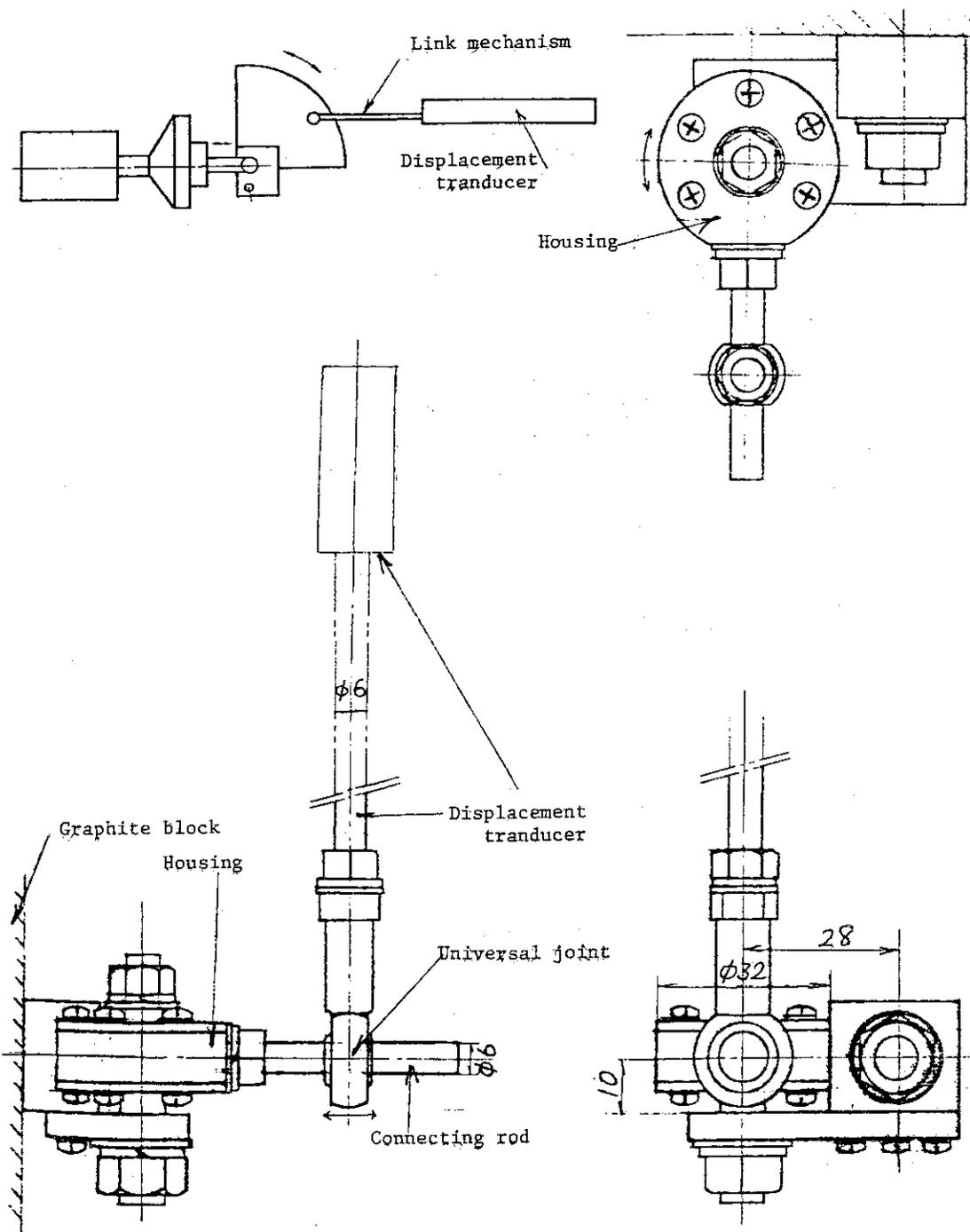


Fig. 3.9 Link mechanism of displacement measurement

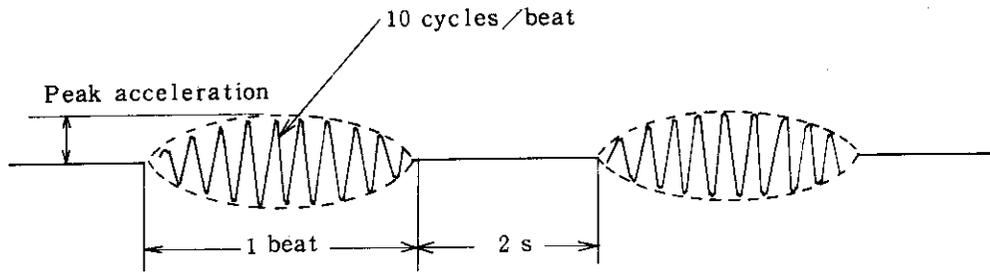


Fig. 3.10 Intermittent sinusoidal beat wave

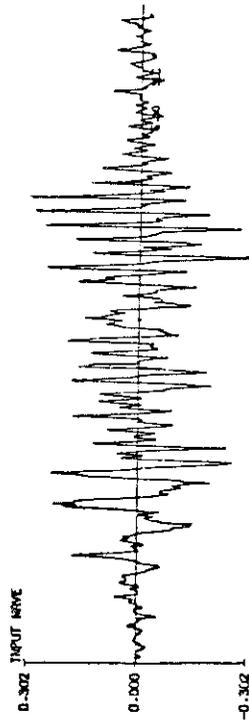


Fig. 3.14 Step wave

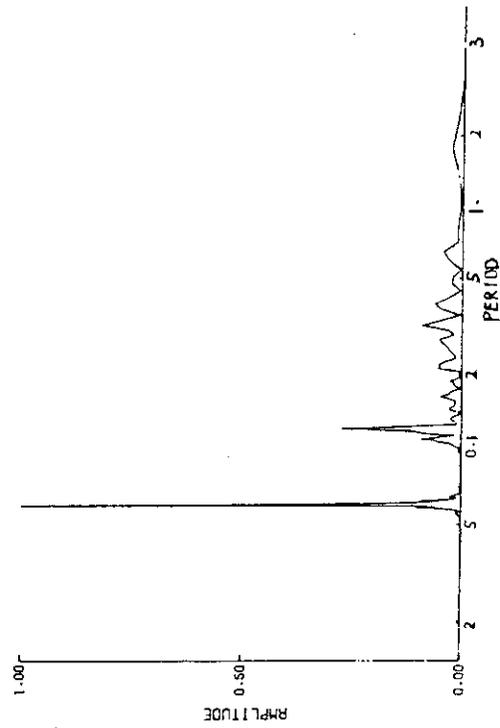
EL-CENTRO INPUT ACCELERATION



EL-CENTRO N-5 SHAKING TABLE RESPONSE ACCELERATION

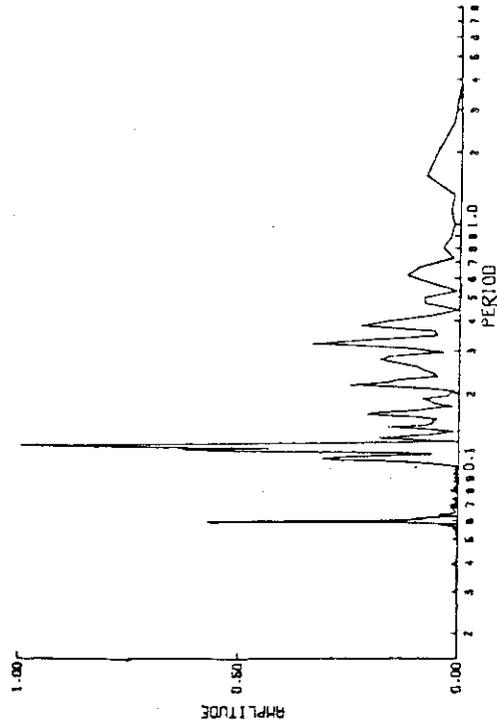


POWER SPECTRUM



(a) Input acceleration

POWER SPECTRUM



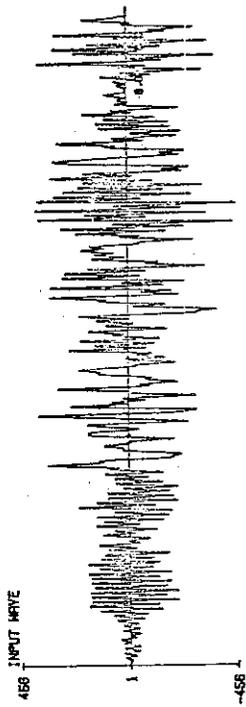
(b) Shaking table response acceleration

Fig. 3.11 Input acceleration and shaking table response acceleration and its power spectra (El Centro)

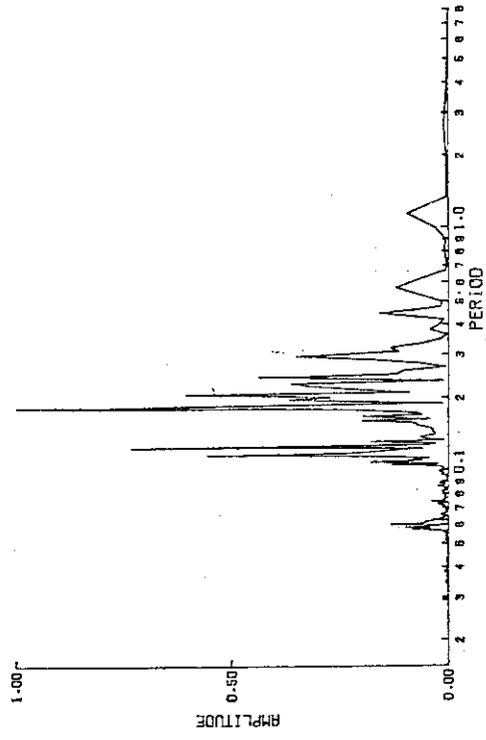
TAFT E-W SHAKING TABLE RESPONSE ACCELERATION



TAFT E-W INPUT ACCELERATION



POWER SPECTRUM



(b) Shaking table response acceleration

(a) Input acceleration

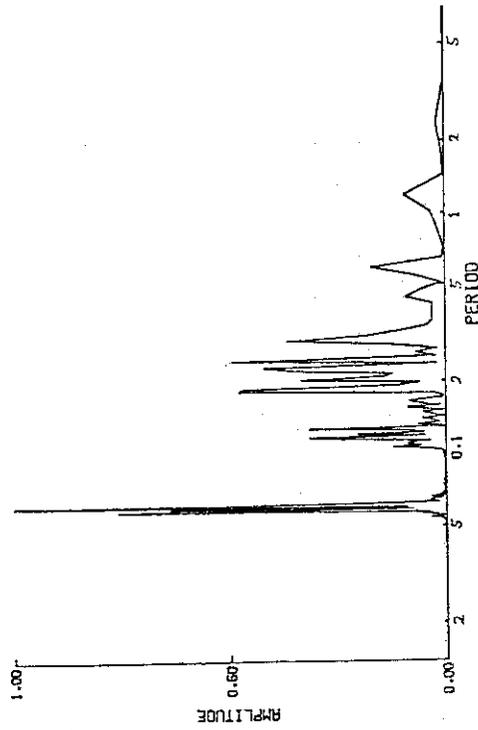
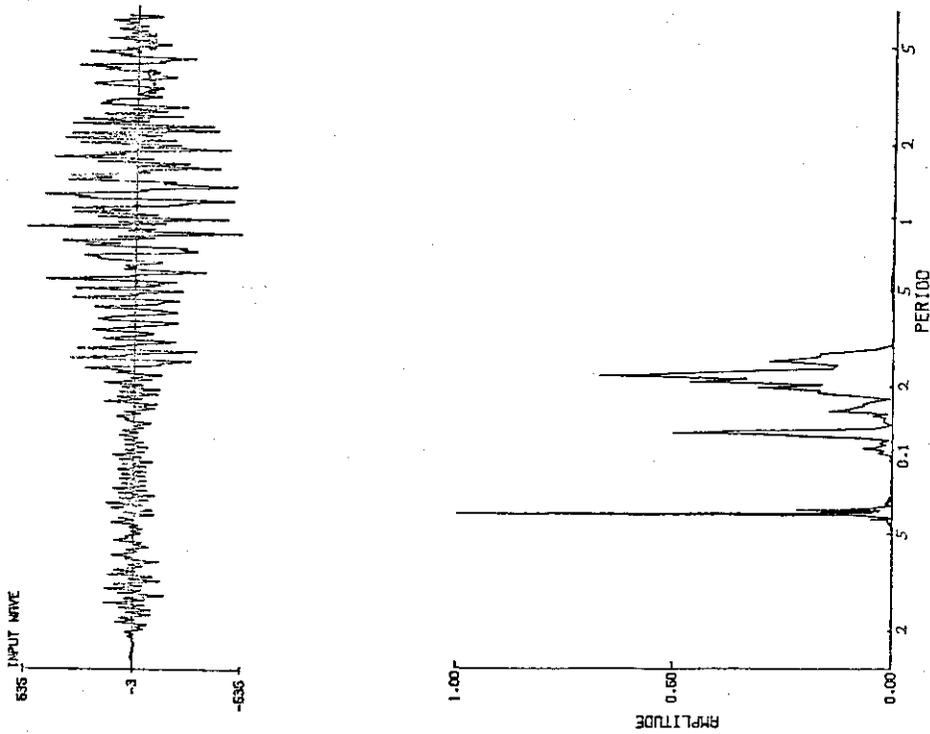


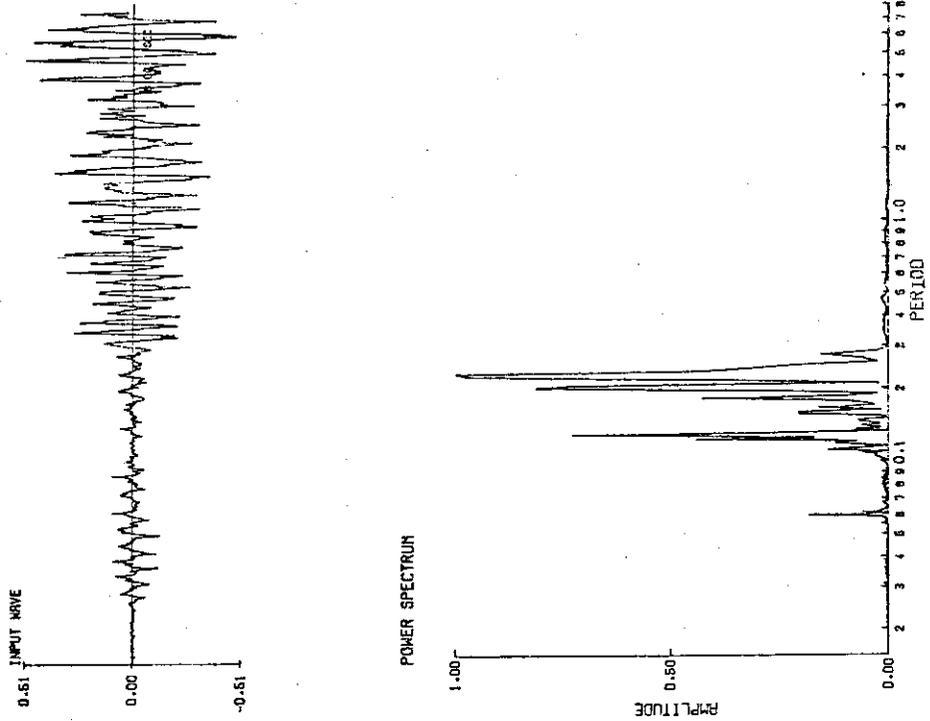
Fig. 3.12 Input acceleration and shaking table acceleration and its power spectra (Taft)

IBARAGI 606 INPUT ACCELERATION



(a) Input acceleration

IBARAGI 606 SHAKING TABLE RESPONSE ACCELERATION



(b) Shaking table response acceleration

Fig. 3.13 Input acceleration and shaking table acceleration and its power spectra (Ibaragi 606 EW)

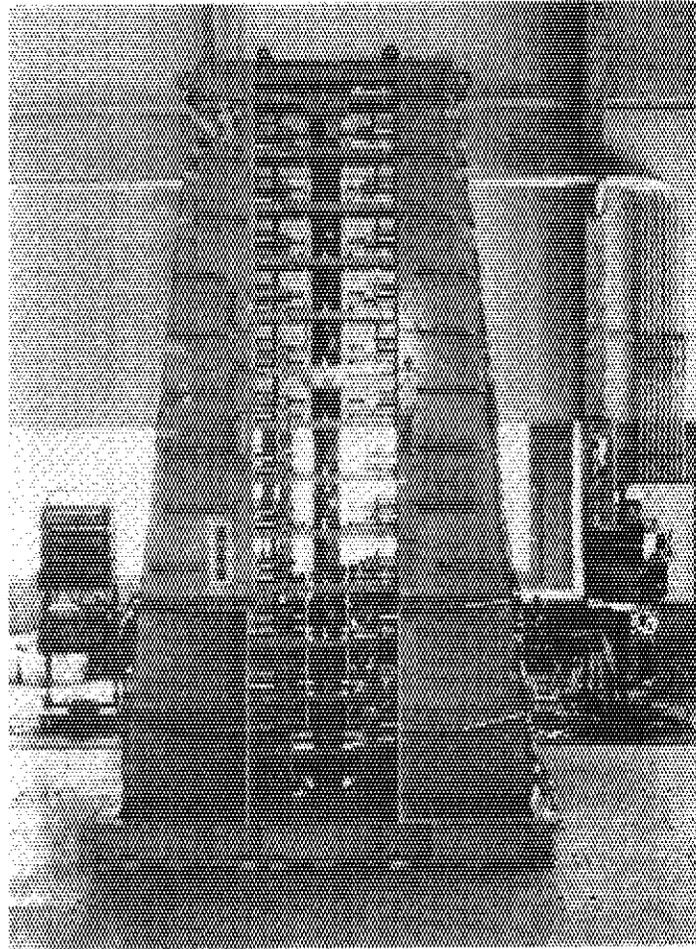


Photo 3.3 Test apparatus

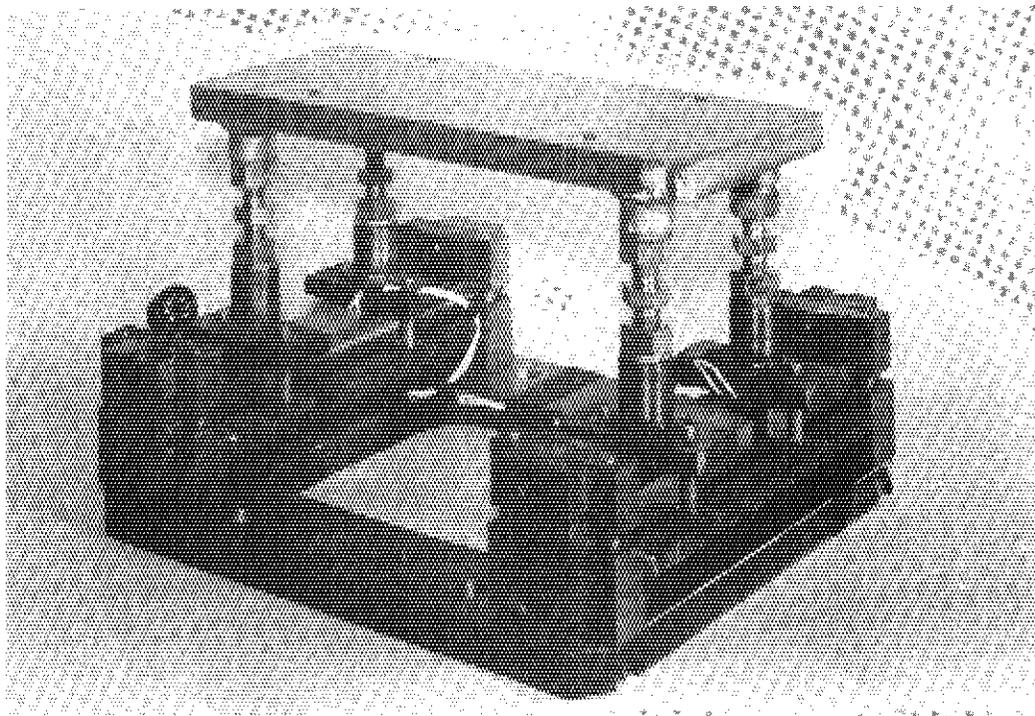


Photo 3.4 Device of impact reaction force



Photo 3.1 Graphite block

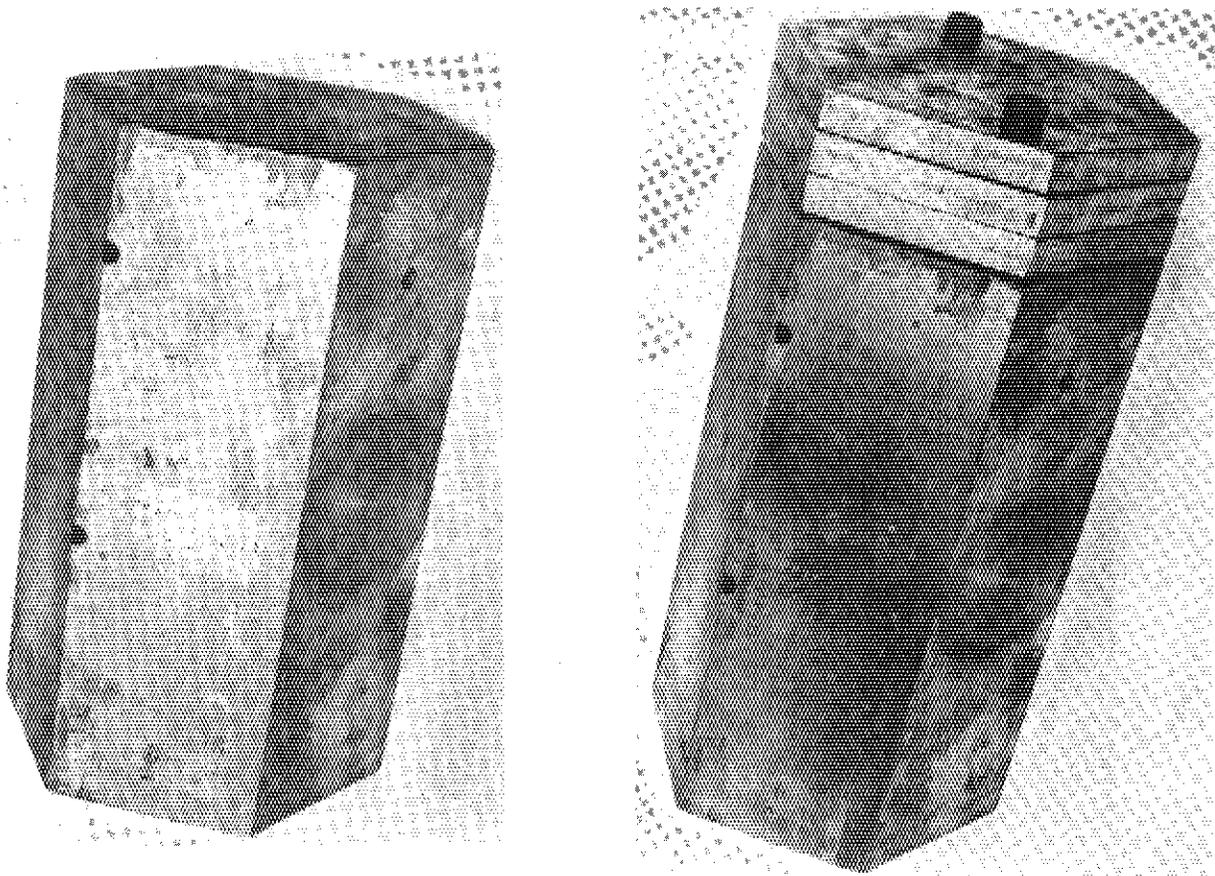


Photo 3.2 Top steel block

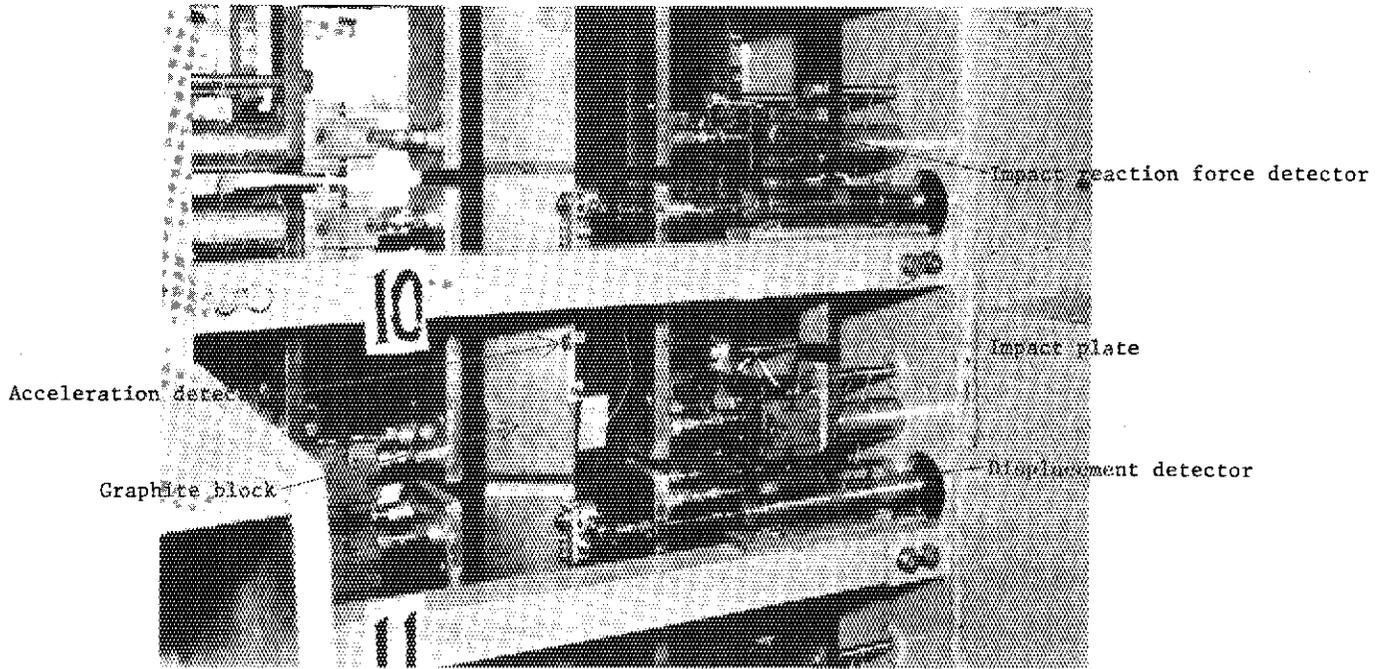


Photo 3.5 Instrumentation

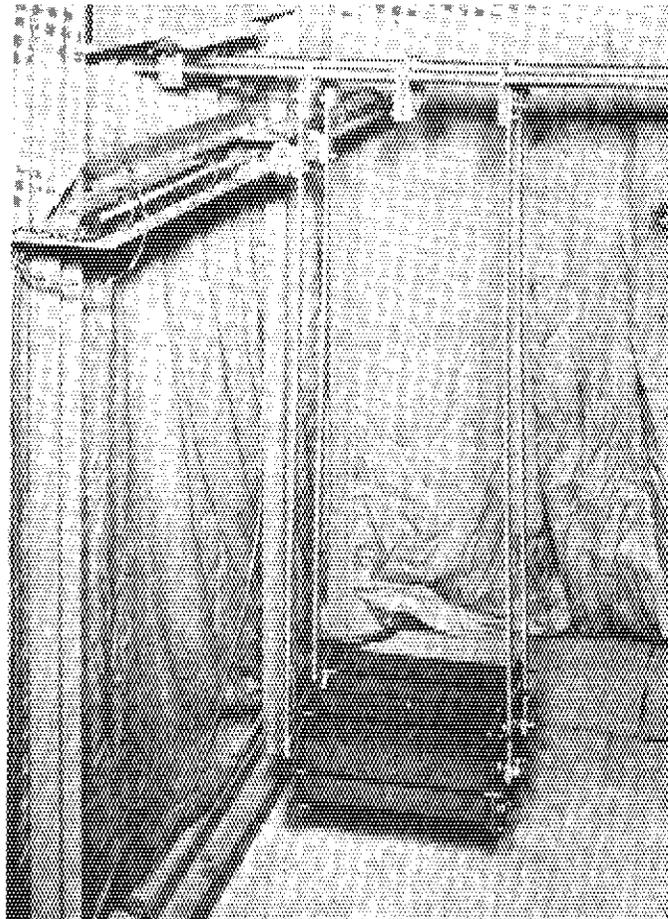


Photo 3.6 Collision test rig

4. 試験前検査

4.1 単体試験

4.1.1 支持棒剛性の検討試験

支持棒頂部を木製ハンマによってタッピングして、固有振動数を求めた。その結果、加振方向に対して 21 Hz，これと直角方向に 18 Hz の固有振動数が有ることが判った。これは、加振試験範囲の 0.8～15 Hz よりも高く、試験に対して何ら影響しないものと考えられた。

4.1.2 変位測定機構の作動試験

リンク機構を介した変位計による水平変位測定と光学的変位計による変位測定結果の 1 例を Fig. 4.1 に示す。試験は 1～20 Hz，最大水平変位 90 mm の範囲で行なった。Fig. 4.1 から明らかのように、リンク機構の追従性は良好であり、光学的変位計と機械的変位計の応答は大約一致することが判った。

変位検出器は、差動トランス型においては、コアがコイル中を、また直線変位計においては、摺動片が抵抗体上をそれぞれ摺動するので、ブロックの運動に対して摩擦による抵抗が働く。この影響を黒鉛ブロックに検出器の取付けの有無によるブロックロッキング運動の減衰と比較した。ブロック頂部の水平変位を光学式変位計によって測定して減衰定数を求めた。その結果、ブロックのロッキング自由振動に対する減衰定数は、変位計を取付けない場合 13.4%，差動トランス式変位計付の場合 15.5%，直線変位計付の場合 18.1%であった。

4.1.3 衝撃反力測定装置の校正

衝撃反力測定装置の荷重－変位曲線を Fig. 4.2 に示す。これらから次のように測定装置の特性が求められた。

荷重－歪感度 (平均)	約 3.1 kg/ μ strain
ばね定数	約 2.4×10^4 kg/cm
固有振動数	約 300 Hz
減衰定数	3～6%

4.1.4 黒鉛ブロック反発係数の測定

黒鉛ブロックの側面同志を衝突させ、衝突速度約 800 cm/s までのわたって反発係数を測定した。結果をこれまでの他の研究者の値と合せて Fig. 4.3 に示す。反発係数は、衝突速度 100 cm/s で約 0.54 であり、衝突速度の上昇に従って反発係数は低下する。

黒鉛ブロックと衝突板の反発係数は、Fig. 4.4 に示すように衝突速度 100 cm/s で約 0.38 であり、ブロック同志の反発係数と同様に、衝突速度の上昇に従って低下する。

ロッキング反発係数は Fig. 4.5 に示すように 0.8 程度であり、ブロックの反発係数よりも高

い。初期変位角より算出した衝突面の垂直衝突速度成分はかなり低く初期変位角 0.1 rad. で 15 cm/s 程度であり、衝突速度が低いので、反発係数が高かったものと考えられる。変位検出器の有無による反発係数の相違について、変位検出器を取付けたブロックの反発係数は取付けない場合よりも低い値であることが判った。すなわち、変位計の有無による反発係数は、初期変位角 0.1 rad. でそれぞれ 0.82 と 0.74 である。検出器は差動トランス式と直線変位計の 2 種類のものを使用した。これらの差異はほとんど認められなかった。

4.1.5 黒鉛ブロックの摩擦係数測定

黒鉛ブロックの静摩擦係数および動摩擦係数についてブロックの底面全体が接する場合と六角形の一陸のみが接する場合のそれぞれの値を Table 4.1 に示す。

4.2 組立試験

4.2.1 コラムの自由減衰振動試験

コラム中の 1 個所を引張り、くの字形に変形させて後に離し自由減衰した場合のブロックの変位波形を Fig. 4.6 に示す。図から、変位振幅が急速に減少しており、減衰が大きいこと、変位振幅の減少に従って周期が短くなることが判る。コラムの減衰定数をまとめて Table 4.2 に示す。変位振幅の増加に従って減衰定数が増加する。ブロックの方向による減衰定数の差はわずかである。

4.2.2 コラムの復元力の測定

コラムの復元力特性を Fig. 4.7 に示す。これはコラムの下端から 9 番目のブロックを引張り、この時の引張り荷重と引張点の変位を図示したものであり、コラムの変位 0 mm からわずかに変位した所でジャンプし、それから先は変位が増加するに従って復元力が低下する。これはソフトスプリング特性であり、コラムは非線形のソフトスプリング特性を有する。ブロックの方向による差はほとんど無かった。

4.3 支持枠振動試験

支持枠の共振特性を Fig. 4.8 と 4.9 に示す。Fig. 4.8 は加振方向と平行な方向の共振特性であり、Fig. 4.9 は加振方向と直角な方向の特性であり、これらの共振振動数は 1 次でそれぞれ 18 Hz と 22 Hz である。振動試験のデータの必要範囲は 10 Hz までであるから、これらの共振振動数は振動試験に支障がないものと判断した。

Table 4.1 Friction factor

Test condition	Static	Kinematic
Bottom face contact	0.25 ± 0.02	0.17 ± 0.02
One side contact	0.23 ± 0.02	0.16 ± 0.02

Table 4.2 Column damping factor

Test condition		Damping factor (Percent of critical damping) Column deflection (mm)		
Excitation direction	Top block gap (mm)	Column deflection (mm)		
		0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 100
X	0	25	30	35
Y	0	20	30	40
X	100		40	

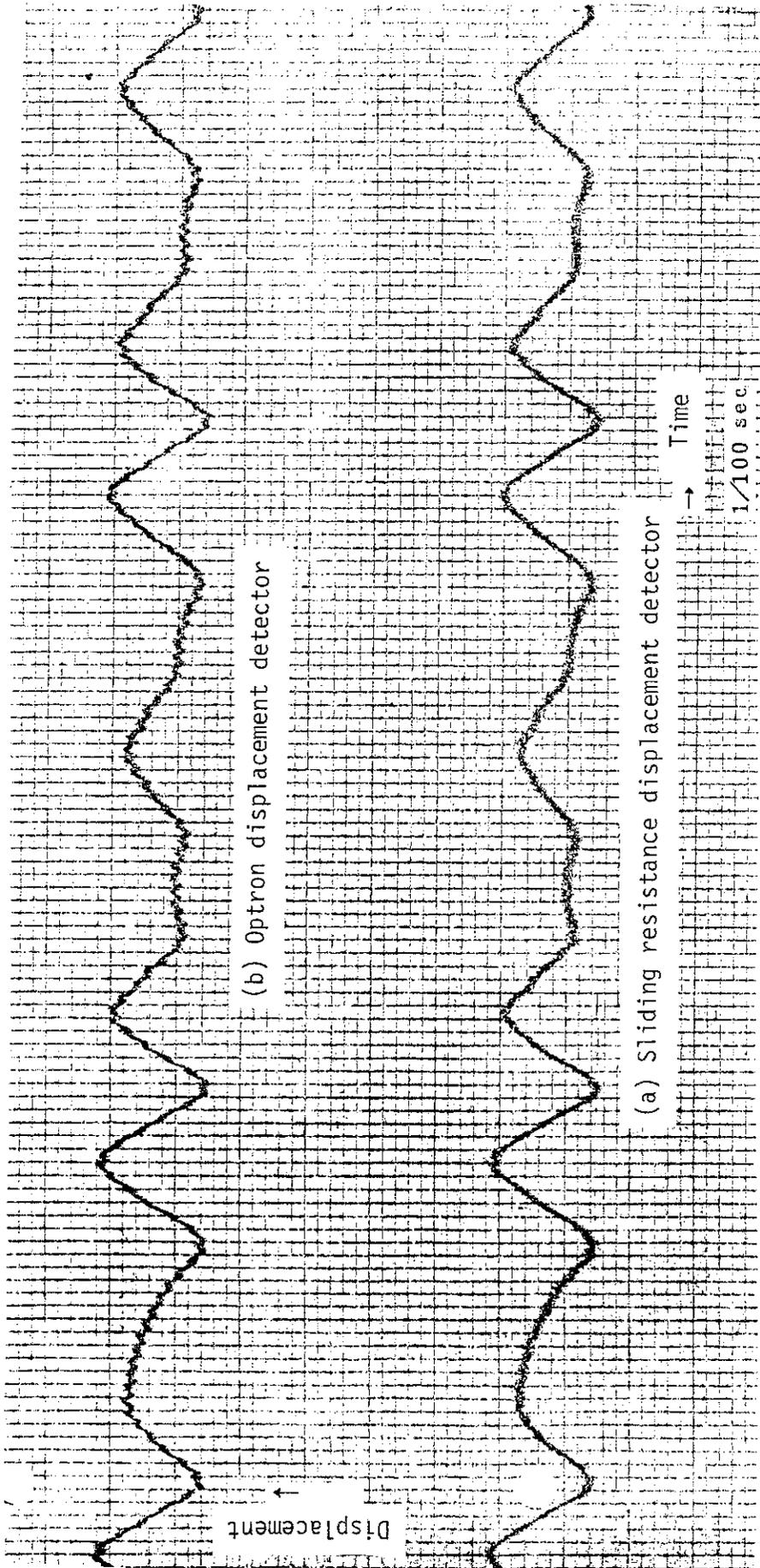


Fig. 4.1 Response displacement curves of sliding resistance and Optron displacement detectors

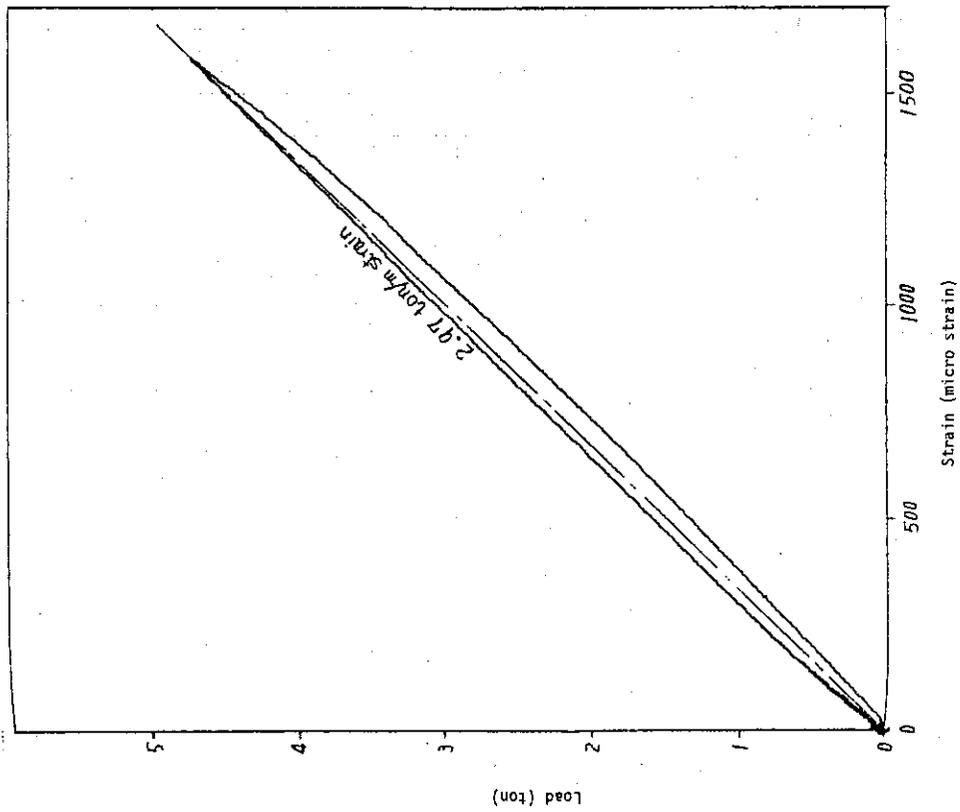


Fig. 4.2 Impact force vs. strain

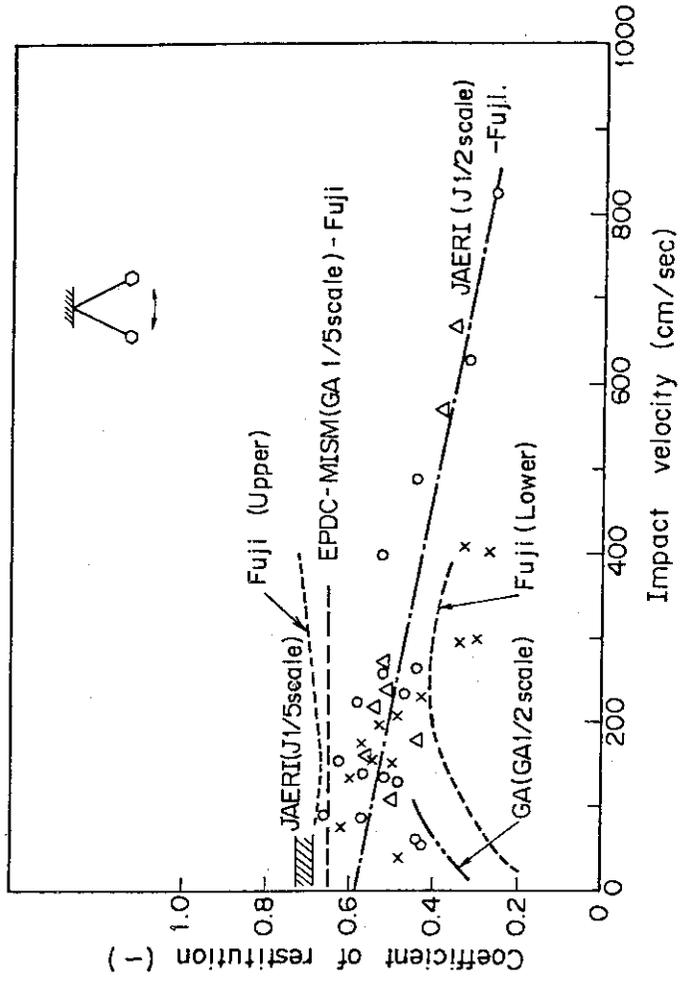


Fig. 4.3 Coefficient of restitution vs. impact velocity

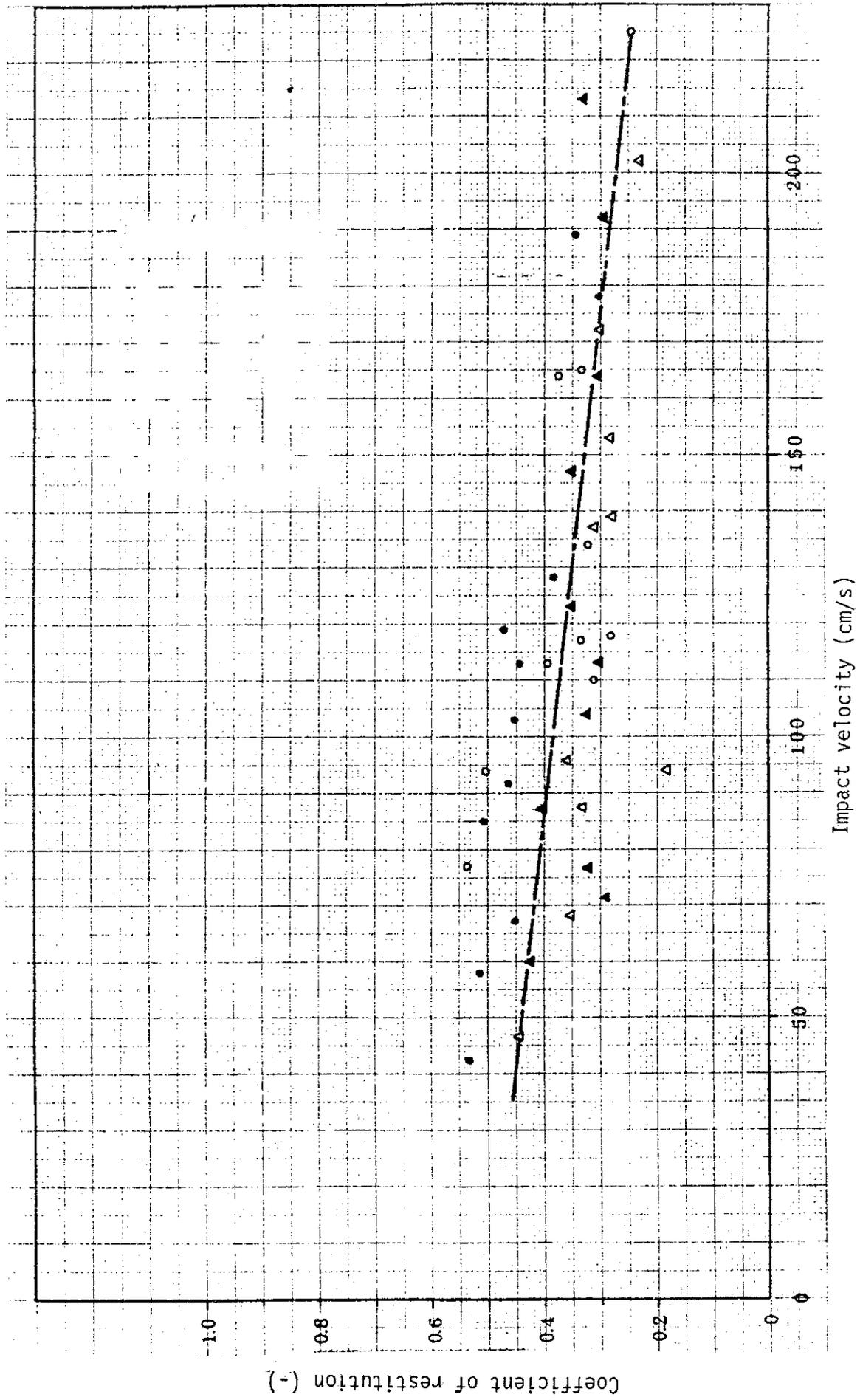


Fig. 4.4 Coefficient of restitution vs. impact velocity between block and impact plate

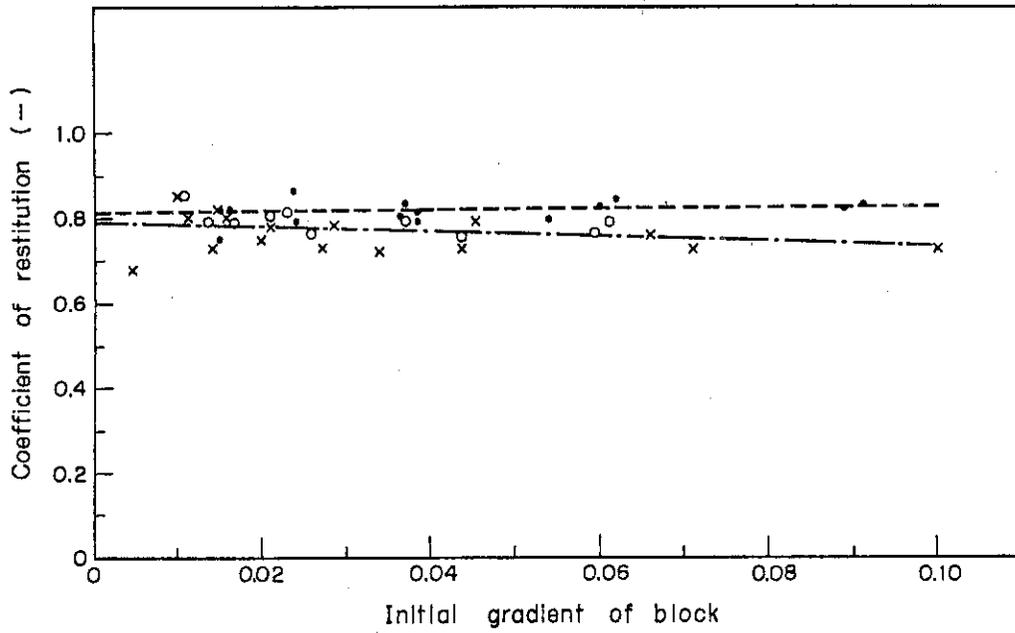


Fig. 4.5 Coefficient of restitution on block rocking motion

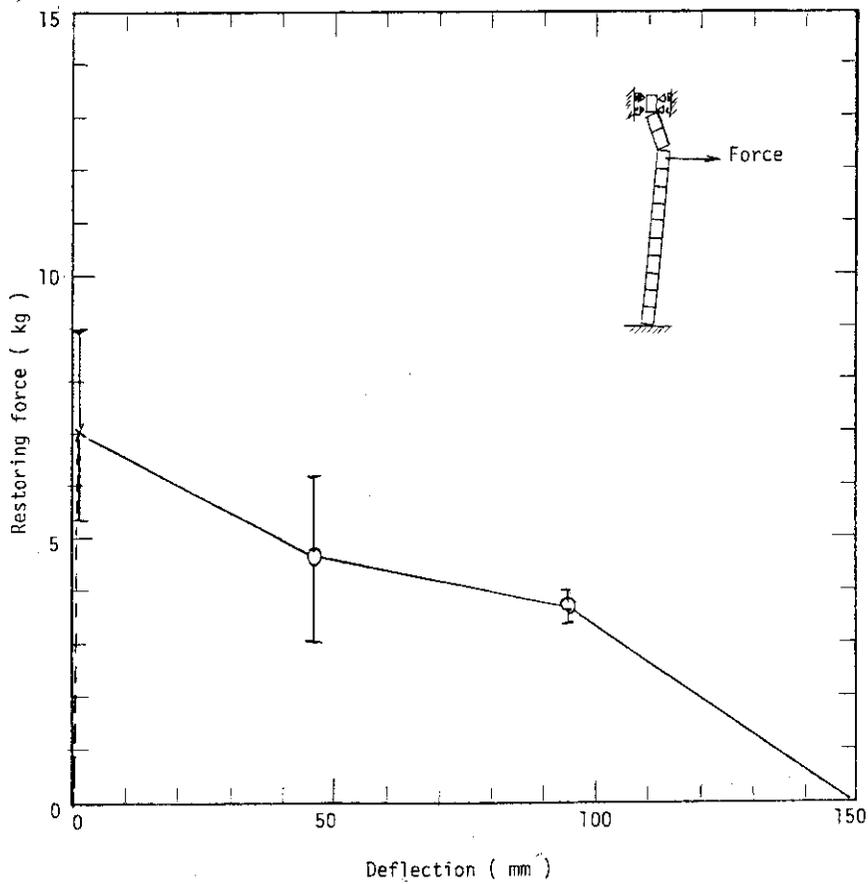
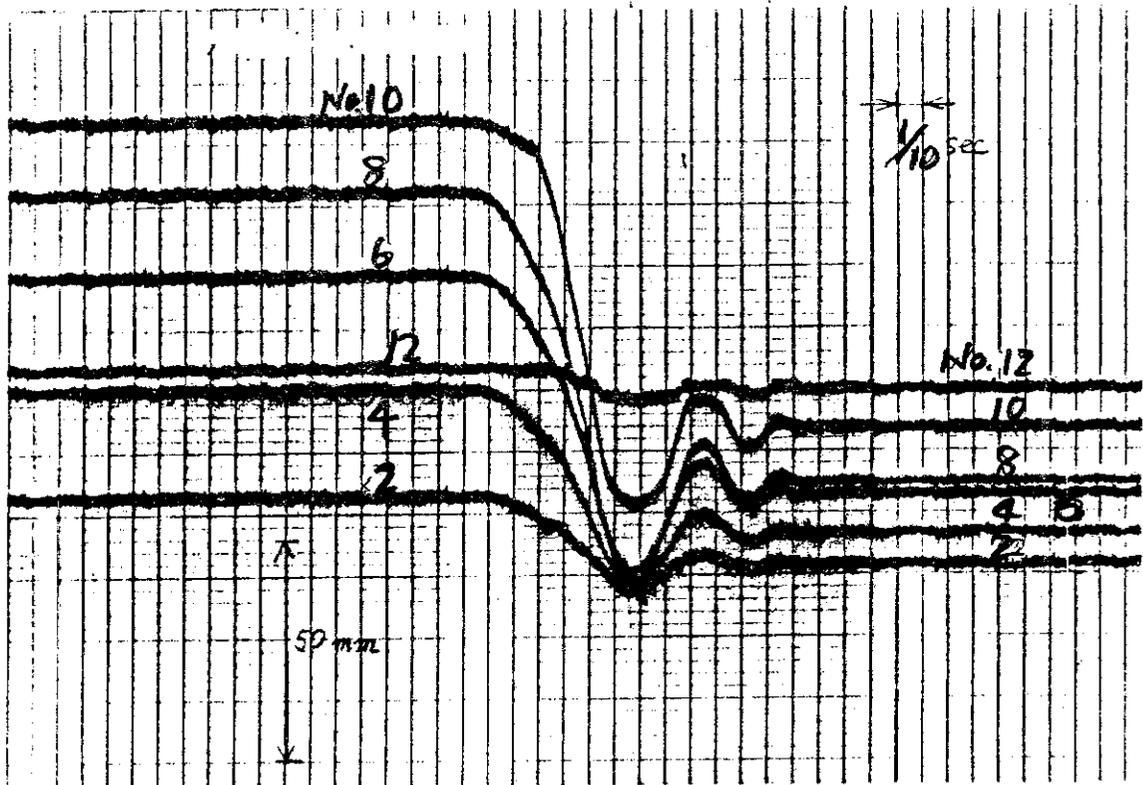
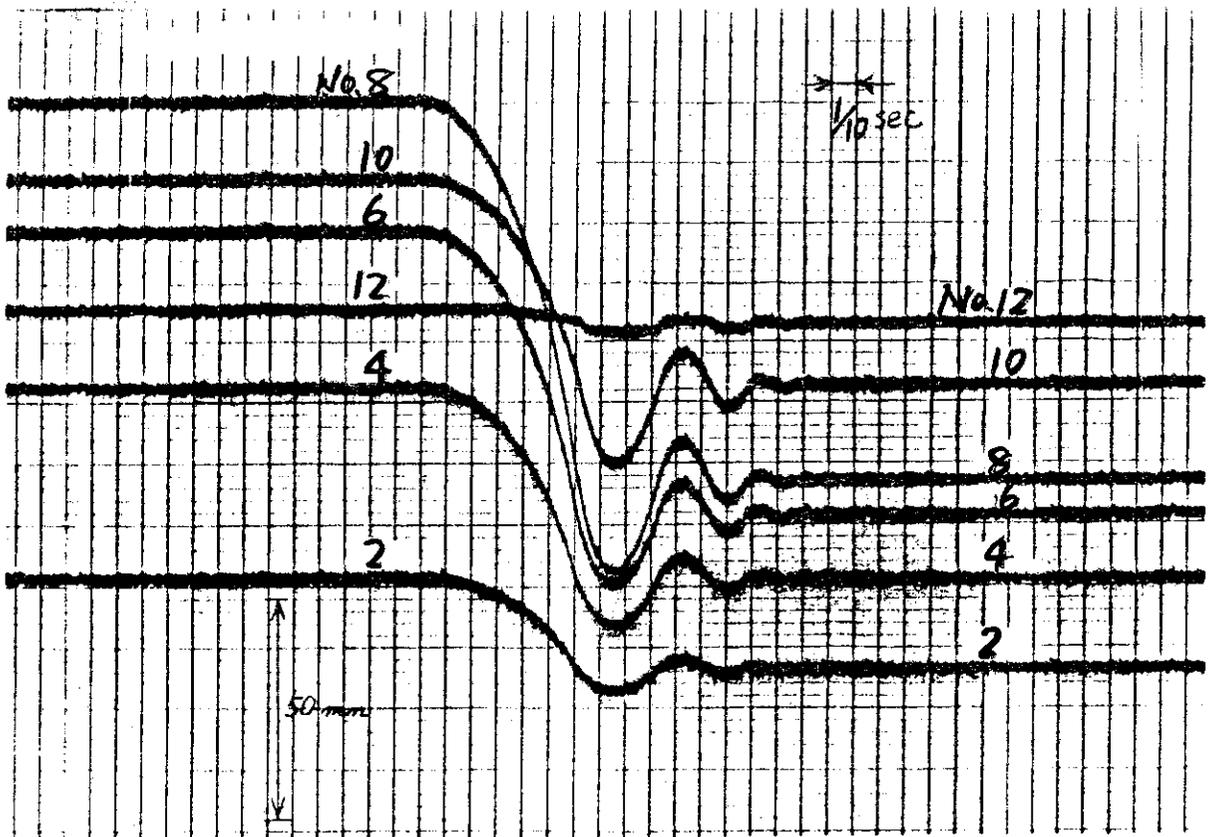


Fig. 4.7 Restorin force of column



(a) Initial displacement 68mm on block No.10



(b) Initial displacement 86mm on block No.8

Fig. 4.6 Free vibration of column

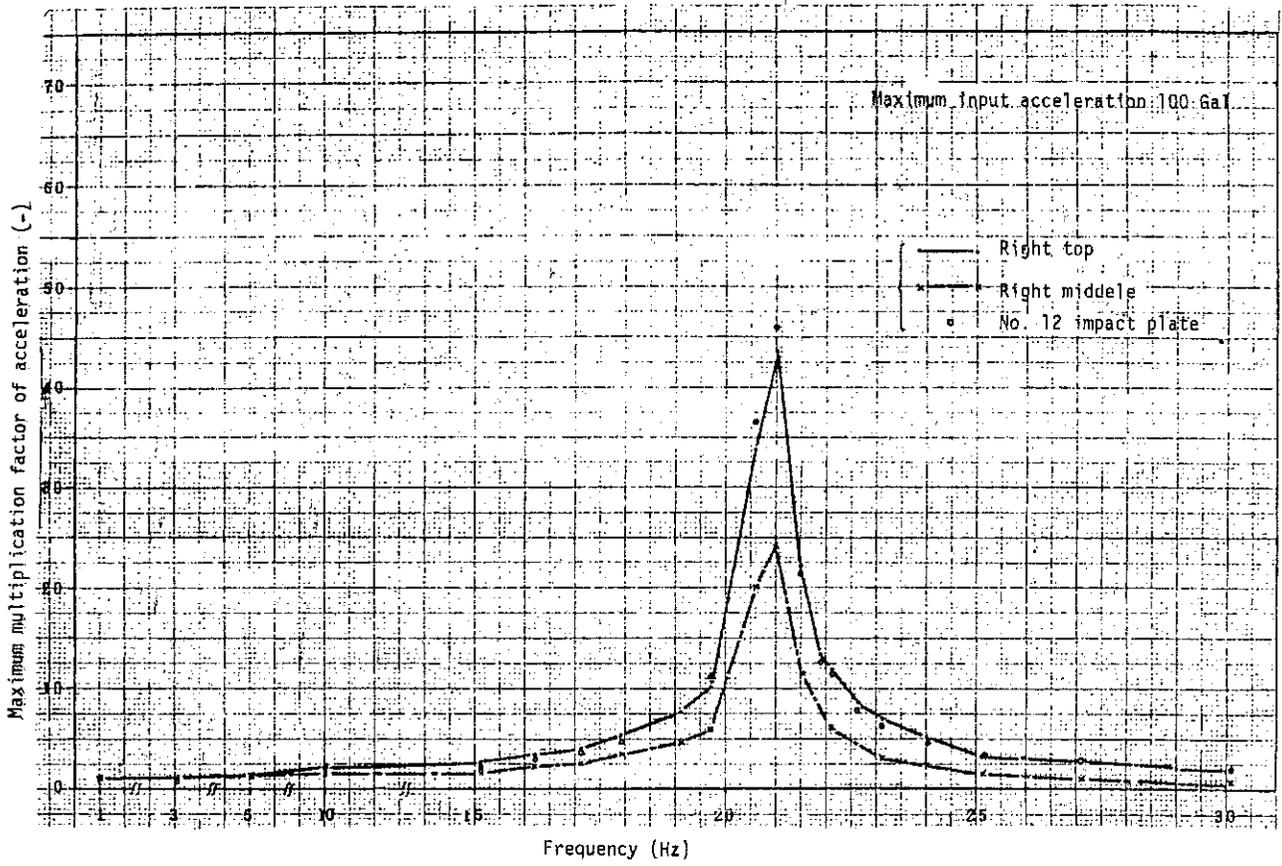


Fig. 4.8 Resonance curves of test rig (X-direction)

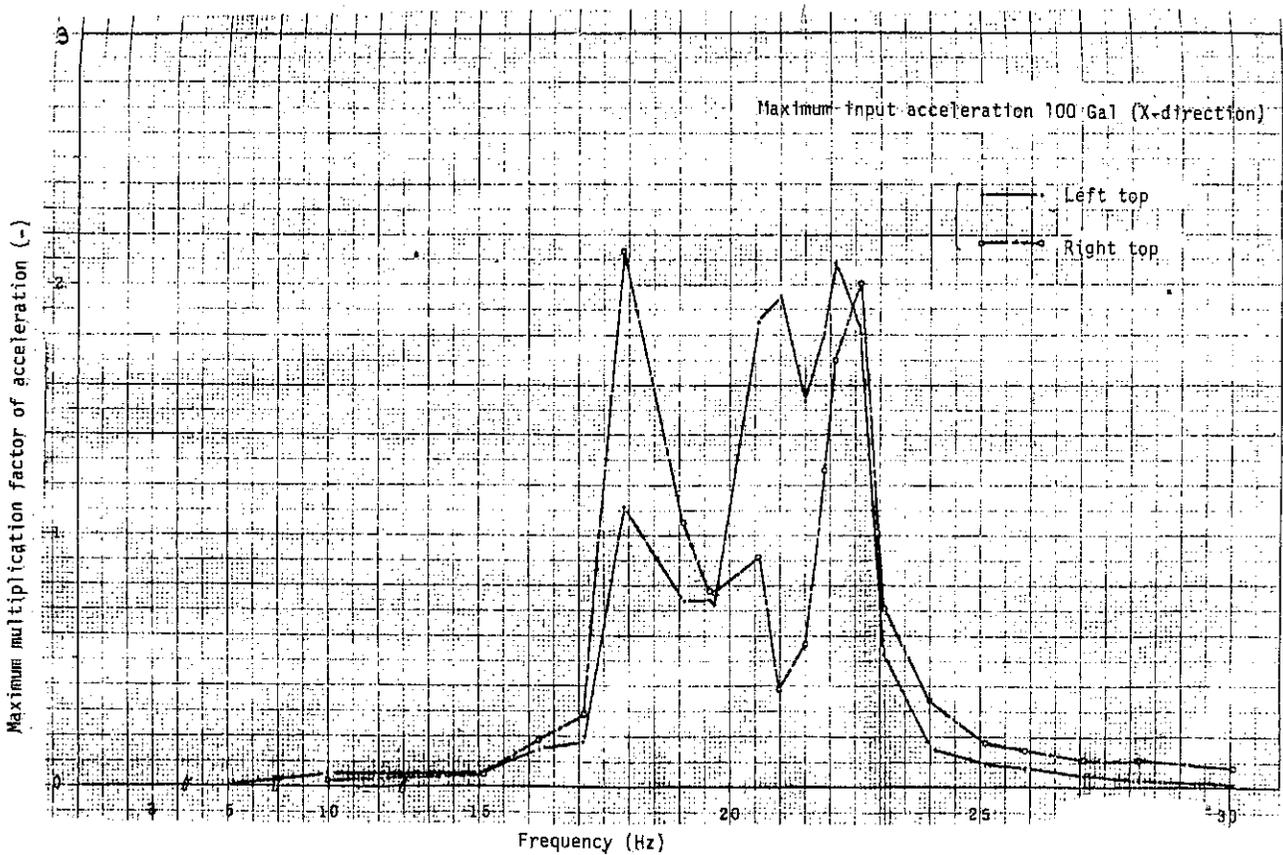


Fig. 4.9 Resonance curves of test rig (Y-direction)

5. 振 動 試 験

5.1 正弦波掃引試験

5.1.1 変位応答特性

(1) 変位応答の非線形性

Fig. 5.1 は定加速度加振におけるコラムの変位特性について、スイープアップとスイープダウンの場合を示したものであり、コラムの変位に跳躍現象が見られる。加振振動数を上昇させると、ある振動数で突然振幅が大きくなる変位の跳躍点が存在し、さらに振動数を上昇させると連続的に振幅が減少する。逆に加振振動数を高い方から低い方へ下げて行くと連続的に振幅が増大していき、スイープアップ時よりも低い振動数で急に振幅が小さくなるという履歴特性が見られる。これはコラムのロッキング運動に起因するソフトスプリング特性である。

(2) 加振加速度の影響

加振加速度の変化による変位応答特性を X 方向および Y 方向加振に対してそれぞれ Fig. 5.2 と 5.3 に示す。加振加速度 100 Gal の場合、4 ~ 5 Hz 付近においてコラムはわずかに振動するだけであるが 150 Gal 以上では、変位跳躍現象が見られ、コラムの振幅は大きくなる。さらに加振加速度を増加させると変位跳躍の振動数はさらに低下する。このように、加速度の増加に従って変位跳躍振動数は低下する。これは典型的なソフトスプリング特性であり、コラムはソフトスプリング形の非線形特性を有する。

(3) ブロックの方向の影響

ブロックの方向による変位応答特性を Fig. 5.4 に示す。X 方向と Y 方向の変位特性には大きな差は認められない。しかし、Y 方向加振ではコラムは加振方向と直角方向にも動く、いわゆる振れ回り運動が発生することが観測された。

(4) 上端ブロックギャップ幅の影響

上端ブロックギャップを 0 から 10 mm にした場合、変位応答の跳躍点は低加振振動数側へ移る。例えば加振加速度 150 Gal の場合約 1 Hz だけ低くなる。

(5) 上端ブロック重量の影響

上端ブロックの重量を 1.8 倍に増加することによって、変位応答跳躍の振動数は 0.3 Hz 程度上昇した。これはコラムの等価的なばね特性が、上端ブロック重量の増加によって上昇したものと考えられる。

5.1.2 共振特性

コラムの変位共振特性を明らかにするために、一定変位加振に対する変位応答を求め、これを Fig. 5.5 に示す。この図から、変位振動の増加に従って共振振動数が低下する様子が判る。

5.1.3 振動モード

(1) 振動モード

コラムの振動形状をFig. 5.6に示す。この図から明らかなように、コラム下端から8~10番目のブロック近辺において折点が生じ、この近辺が腹となるような振動モードを示している。全般的に見て、Fig. 5.7に示すようにブロックNo.9またはNo.10がコラムの最大変位を示す。コラムが境界と衝突する場合には、Fig. 5.7(b)に示すようにコラムの中央より少し上部を腹として多数個のブロックが境界衝突板に張り付く形状を示す。

衝突が起らない場合の振動モードは上述のFig. 5.7(a)のような形状が全般的に認められる。しかし、加振加速度レベルが低くて加振振動数が高い場合、または加振加速度レベルが高くて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。分数調波振動モードの1例をFig. 5.8に示す。また、分数調波振動波形の1例をFig. 5.9に示す。これから判るように、コラムの加振振動数の $1/2$ と $1/3$ の振動数成分が認められる。この分数調波振動の起る原因として、次のことが考えられる。これはブロックの上下連結部の摩擦やロッキング特性による非線形ソフトスプリング特性およびコラム上端支持部のギャップに起因する非対称支持条件によるものと考えられる。

(2) 上端ブロックギャップ幅の影響

上端ブロックギャップが0と10mmとの場合の振動モードを比較してFig. 5.10と5.11のそれぞれ(a)と(b)図に示す。低加振振動数で、しかも加振加速度の低い場合、コラムは上端ブロックを腹とする振動モードを示し、あたかも下端支持の片持はりのように振動する。一方、加振加速度が高い場合には、ブロックNo.10を腹とする振動モードを示す。さらに加振振動数が高くなり、コラムの振幅が小さくなった場合には、再びコラム上部が振動するモードとなる。上端ギャップの増加はコラムの最大変位点を上方へ押し上げる。また分数調波振動が低い加振振動数や低い加振加速度においても発生する。

(3) 上端ブロック重量の影響

上端ブロックの重量が9と16.3kgとの場合の振動モードを比較してFig. 5.10と5.11のそれぞれ(a)と(c)図に示す。上端ブロックの重量の増加によってコラムの最大変位点は下降する。

5.2 正弦波応答試験

5.2.1 応答波形

正弦波加振試験における時刻歴応答波形の1例をFig. 5.12に示す。この例では、ブロックの変位波形の頂部は平らにつぶれているのが認められるが、これはブロックが衝突板に衝突しているためである。また、反力の波形では、衝突反力のピーク後に減衰振動波形が見られるのは、反力が4点支持はりによって検出されるように製作された反力検出機構の減衰振動によるものである。

5.2.2 衝突速度、衝撃加速度、衝撃反力の関係

衝突速度、衝撃加速度、衝撃反力の3つの量の間には相互に近似的な比例関係があり、共振特性にも類似性がある。これらの3つの量のコラムに沿う分布も類似しており、最大値を生じ

るブロックはコラム下端から No. 8 または No. 9 である。

5.2.3 変位の周波数特性

コラムの変位の周波数特性を Fig. 5.13 に示す。加振振動数を上昇させるとある振動数までは衝突板との衝突によって最大変位はほぼ一定値(コラムと衝突板ギャップ)に制限される。さらに振動数を上昇させると衝突を生じなくなる。

5.2.4 境界とのギャップ幅の影響

衝突速度、衝撃反力は Fig. 5.14 に示すように、ギャップ幅の増加に従って衝撃値は増加する。そして最大衝撃値の生じる加振振動数は低下し、衝突の起る加振振動数範囲は狭くなるが最大値は上昇する。この特性は次のように説明できる。

衝突速度は境界とコラムとの衝突時の相対速度であり、これは、境界とコラムの衝突時の位相によって変化する。この位相を Fig. 5.15(a)の θ で定義する。この図は、正弦波半周期間の境界とコラムとの絶対座標系における変位を示している。図にみられるように、同一振動数で加振する場合には、ギャップ幅が増加するに伴って衝突する時の位相 θ は増大し、同時に、Fig. 5.15(b)に示すように衝突速度も増大する。

定加速度加振では、加振変位と加振速度はそれぞれ加振振動数の2乗と1乗に反比例する。このため加振振動数の上昇とともにコラムの応答変位と応答速度とが減少する。それゆえ、ある加振振動数以上では、コラムの応答変位がギャップ幅を下回って衝突が起らなくなる。したがって、ギャップ幅が大きいほど、衝突が起らなくなる限界振動数は低くなる。低加振振動数では、ギャップ幅が境界の変位振幅(加振変位振幅に等しい)に対して、相対的に小であるから衝突時の位相は小さい。加振振動数の上昇に従って境界の変位振幅は減除し、相対的にギャップ幅が増加したことに等価になり、衝突時の位相は増加する。このため衝突速度は振動数の上昇に伴って増大し、限界振動数付近で最大値を示す。衝撃反力は衝突速度に関連して類似の傾向を示す。

Fig. 5.14 の結果をギャップ幅を横軸にし、衝撃反力を図示すると Fig. 5.16 となる。これから明らかのように、ギャップの増加に従って衝撃値は増加するが、ある程度大きくなると一定値になって行く。

5.2.5 加振加速度の影響

Fig. 5.17 は、X方向加振試験における加振加速度レベルの変化による衝撃反力特性を示す。この図から、加振加速度の増加に従って衝撃反力が増加することが判る。また、加振加速度の増加に従って衝撃反力最大値の生じる加振振動数が上昇する様子が判る。これはガタ系特有のハードスプリング形の非線形特性である。

Y方向加振試験における加振加速度レベルの変化による衝撃反力特性を Fig. 5.18 に示す。Fig. 5.16 と 5.17 から加振方向による差を見てみる。500 Gal 以上の加振加速度において、Y方向加振の衝撃反力はX方向加振のものよりも低い値を示す。これは、Y方向加振では、X方向加振に比較してコラムの振れ回り運動が大きいいため、ブロックの衝突板の溝の片側に沿って滑りな

がら起り、滑り摩擦によって消費される運動量だけ衝撃値が小さくなったものと考えられる。しかし500 Gal以下では加振方向による有意な差は見られない。

5.2.6 衝撃反力最大値の分布

これまでに述べた実験結果のうち、衝撃反力の値は衝突ごとに発生する値のうちの最大のものであった。これらの衝撃反力は、定常振動と考えられる正弦波加振試験においてもバラツキを示す。このバラツキの程度を調べるために、衝撃反力の最大値、平均値、標準偏差および変動係数を求めた。1例として、Table 5.1に加振加速度750 Gal、X方向加振、衝突板ギャップ幅15mm、上端ブロックギャップ幅0mmの場合の衝撃反力の統計分布を示す。この表から反力の最大値を発生する加振振動数付近では、最大値を生じる頻度は少なく、この最大値には偶発性の傾向が強いことが判る。一方、加振振動数が上記の点をはずれて、最大衝撃反力が小さくなる所（ここでは加振振動数2.5 Hz）では、最大値を生じる頻度が多くなり、必然性の傾向が強くなる。このような偶発性の傾向は、加振加速度（衝撃反力）が大きい場合ほど強く現われる。これは、激しく衝突が起るような加振条件では、ブロックの回転やコラムの振れ回りに起因して、ブロックの衝突が多様なモードを取りやすいことが一つの原因と考えられる。

5.3 ビート波応答試験

加振加速度500 Gal、衝突板ギャップ15mmの場合のビート波応答波形をFig.5.19に示す。加振加速度に対する衝突速度および衝撃反力をそれぞれFig.5.20(a)および(b)に示す。これから明らかのように衝撃値は加振加速度の増加に従って増加しているが、ある加速度値以上になると飽和してくることが判る。ビート波による最大衝撃値は正弦波によるものよりも幾分低目である。

5.4 地震波応答試験

E I Centro 1940 NS波、Taft 1952 EW波および茨城1962 EW波(606)の3波による応答試験を実施した。地震波は、多目的高温ガス実験炉・第1次概念設計における原子炉炉内構造物のうちコアバレルの応答波形を使用し、試験模型の縮尺が実機の $1/2$ であるから、相似側によって時間軸を $1/\sqrt{2}$ に短縮した。

地震波応答波形のうち加振加速度500 Gal、衝突板ギャップ15mmの場合のものを、E I Centro波、Taft波、茨城波についてそれぞれFig.5.21, 5.22, 5.23に示す。地震波による応答波形と正弦波による応答波形を比較してみると、正弦波加振では、1サイクルごとに片側で1回衝突が起り、繰返されている。これに対して地震波加振では、1つの波に対して高々数回の衝突である。

加振加速度に対する衝突速度および衝撃反力をそれぞれFig.5.20(a)および(b)に示した。これから、地震波による最大衝撃値は正弦波によるものの45~70%であることが判る。

5.5 ステップ波応答試験

振動台にステップ状変位を入力してコラムの支持点に強制変位を与えて、コラムを自由減衰振動させた。応答変位の1例をFig. 5.24に示す。コラムは容易に減衰しており、減衰定数が大きいことが判る。この減衰波形から減衰定数を求めたものをTable 5.2に示す。これからコラムの減衰定数はコラムの変位振幅の増加に従って上昇する。コラムの振動方向による差はわずかである。

Table 5.1 Histograms of impact force

Input wave freq. (Hz)	2.5	3.5	5.0	
Block No.		No.9		
Impact force	max. value (kg)	822	944	907
	mean value (kg)	681	590	494
	standard deviation (kg)	138	167	148
	variation factor (%)	20	28	30

Histograms	Relative frequency distribution		
	2.5 Hz	3.5 Hz	5.0 Hz

Note (1) Max. input acceleration 750 Gal, (2) Gap width 15mm

Table 5.2 Column damping factor

Excitation direction	Top block gap (mm)	Damping factor (Percent of critical damping)		
		Max. deflection of step wave input (mm)		
		15	30	60
X	0	30	27	34
X	10	-	-	36
Y	0	29	29	37

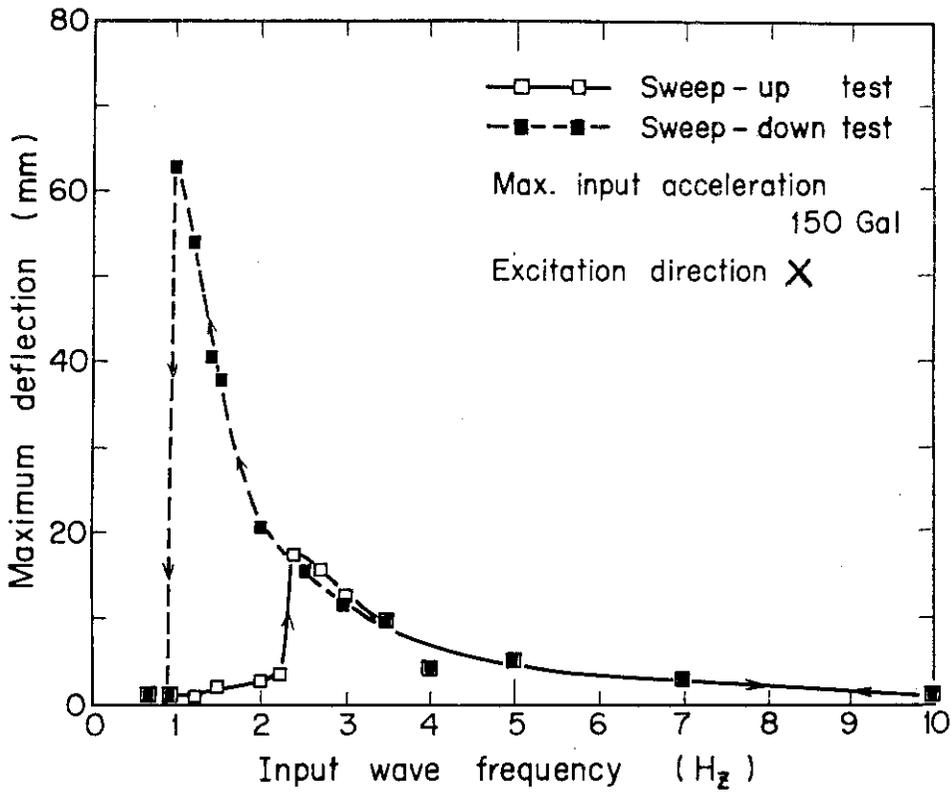


Fig. 5.1 Comparison between sweep-up and sweep-down response on column deflection

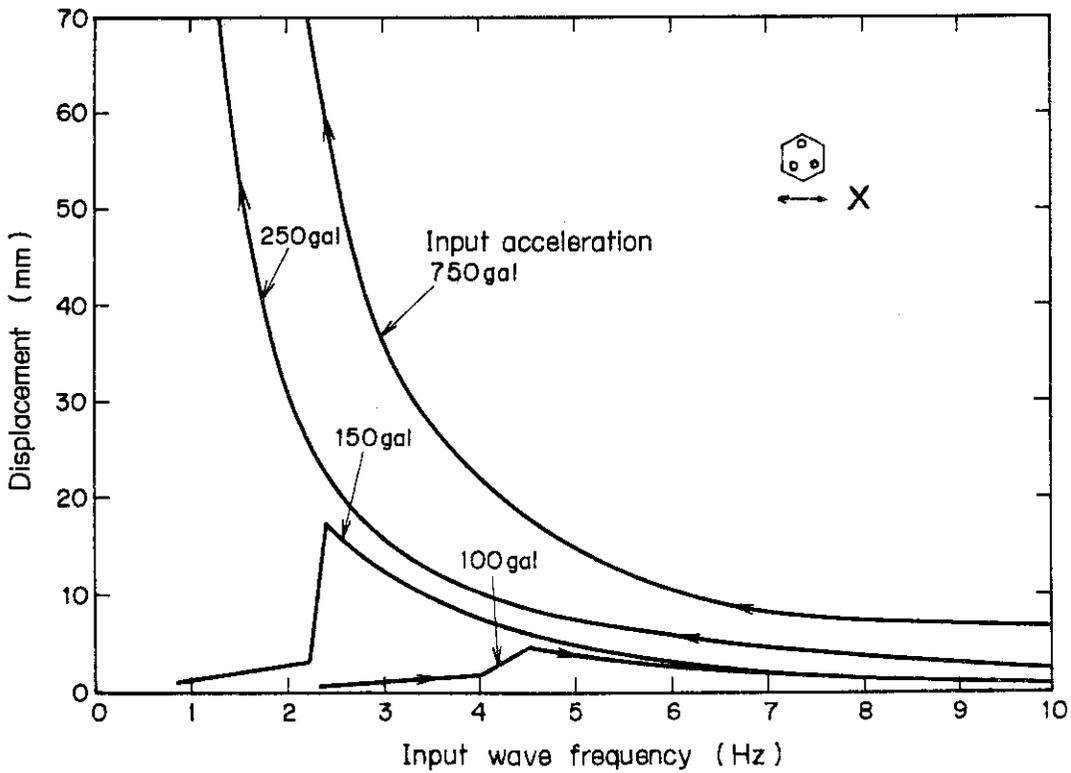


Fig. 5.2 Effect of input wave frequency and acceleration on response displacement

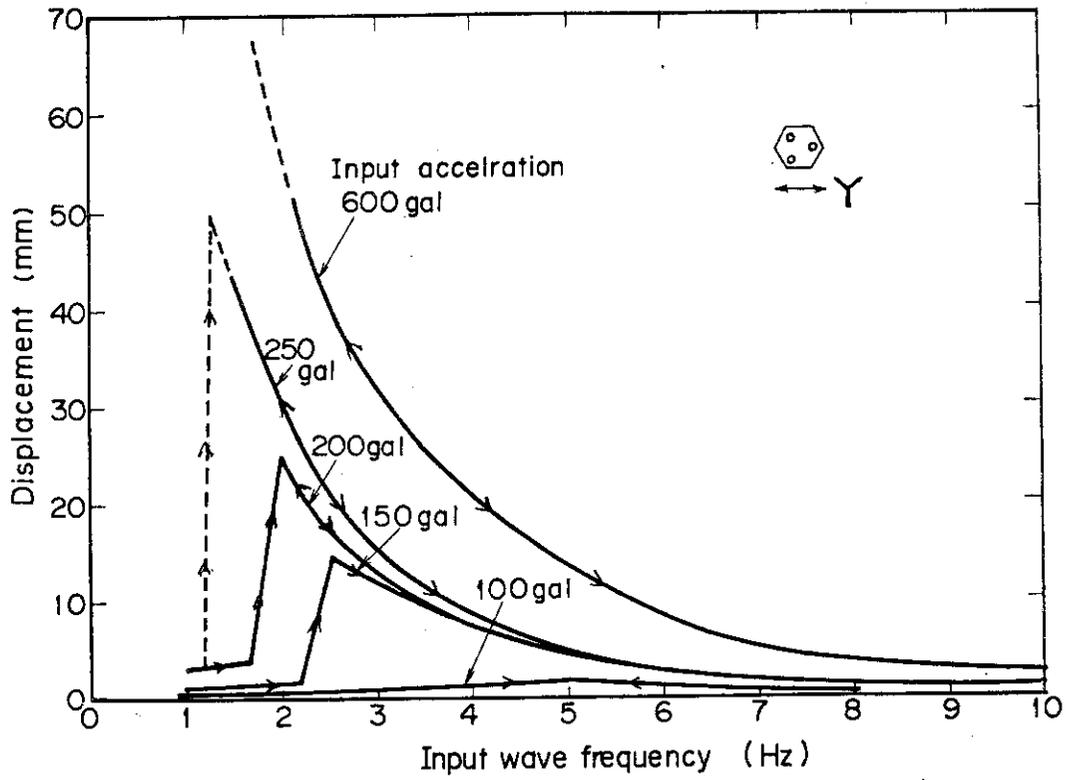


Fig. 5.3 Effect of input wave frequency and acceleration on response displacement

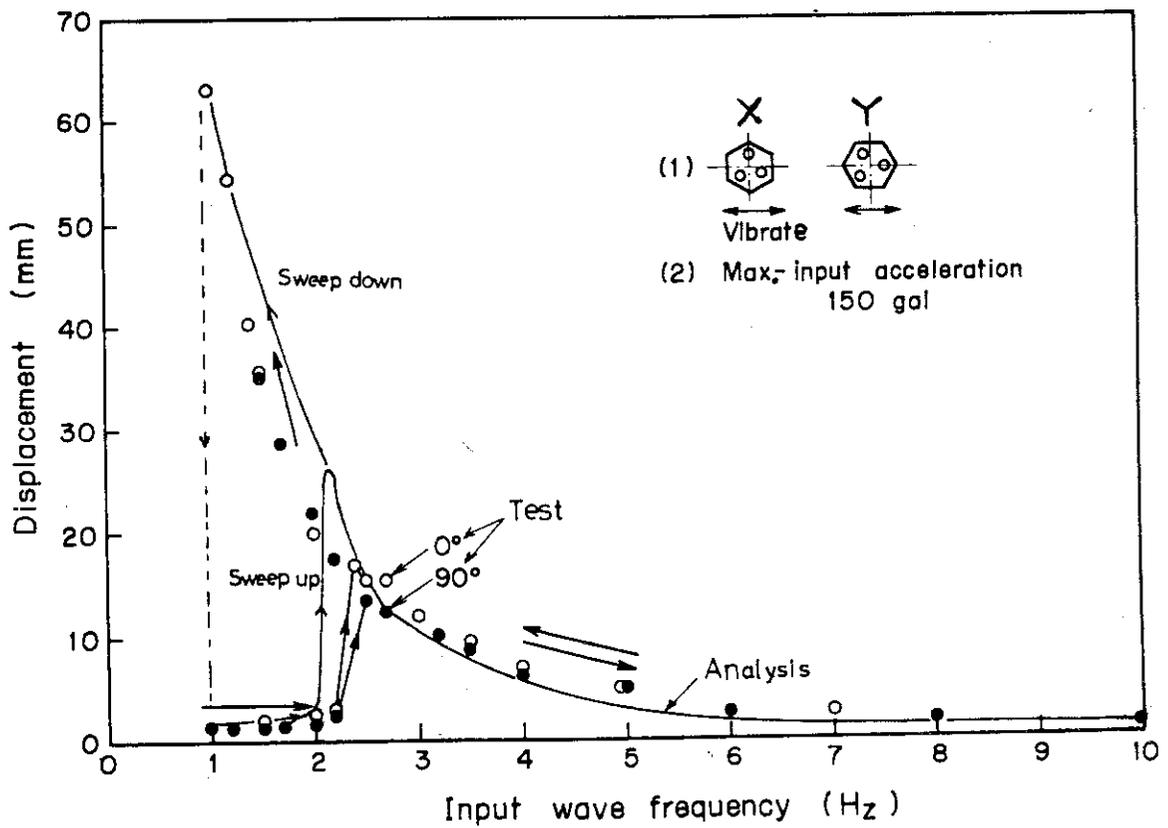


Fig. 5.4 Difference between sweep-up and sweep-down response on column

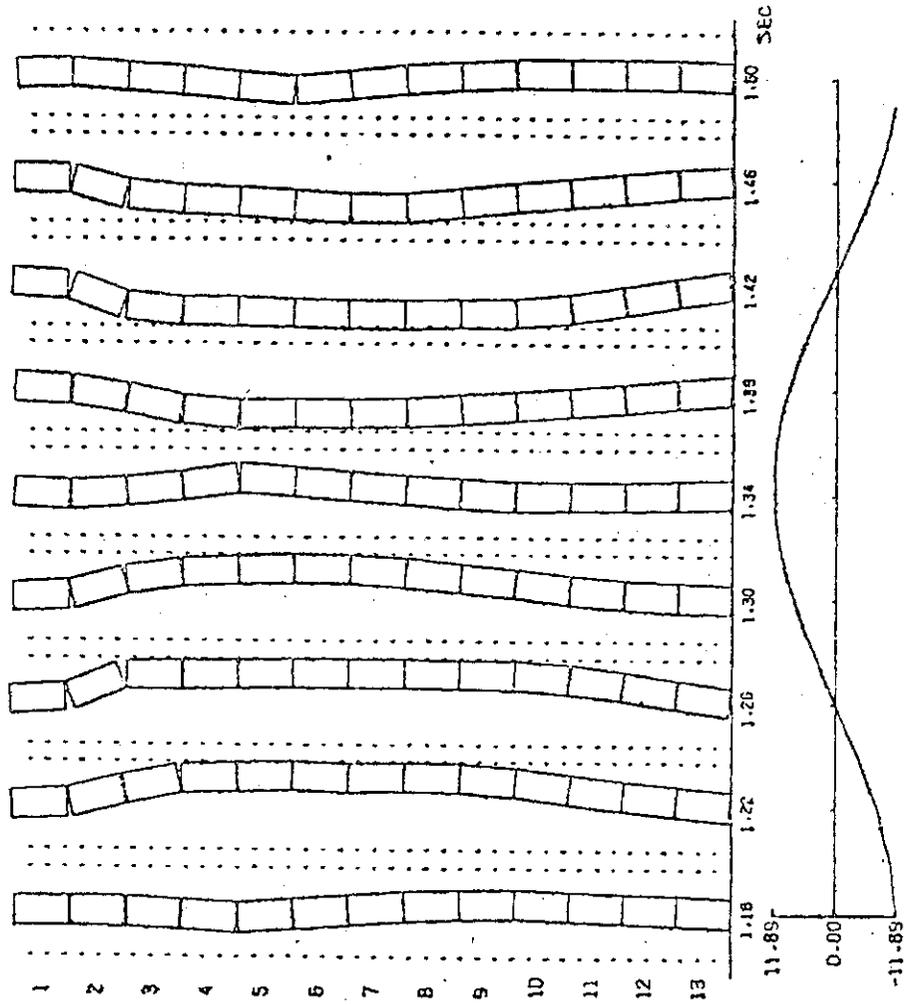


Fig. 5.6 Column vibration response

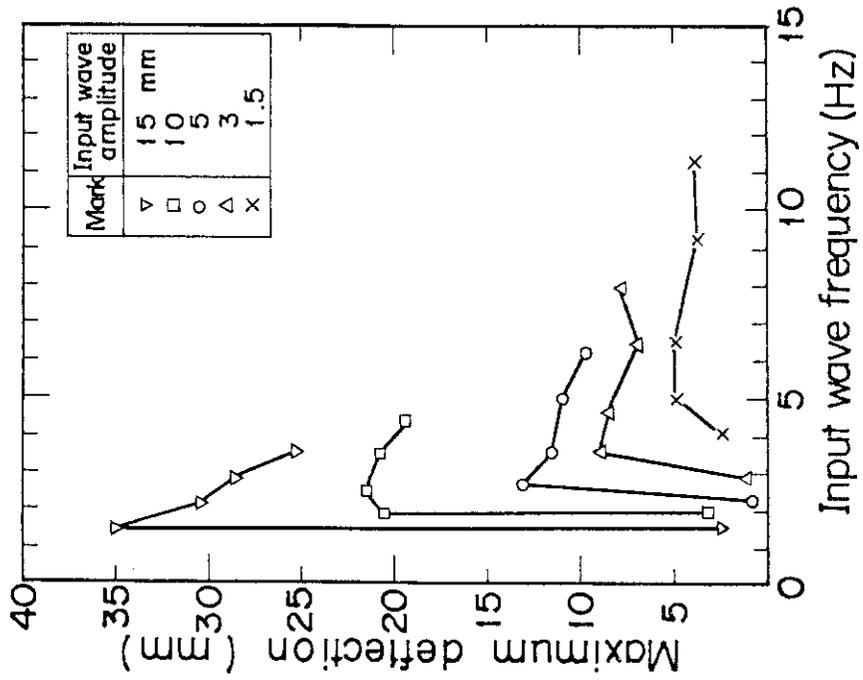


Fig. 5.5 Column deflection characteristics

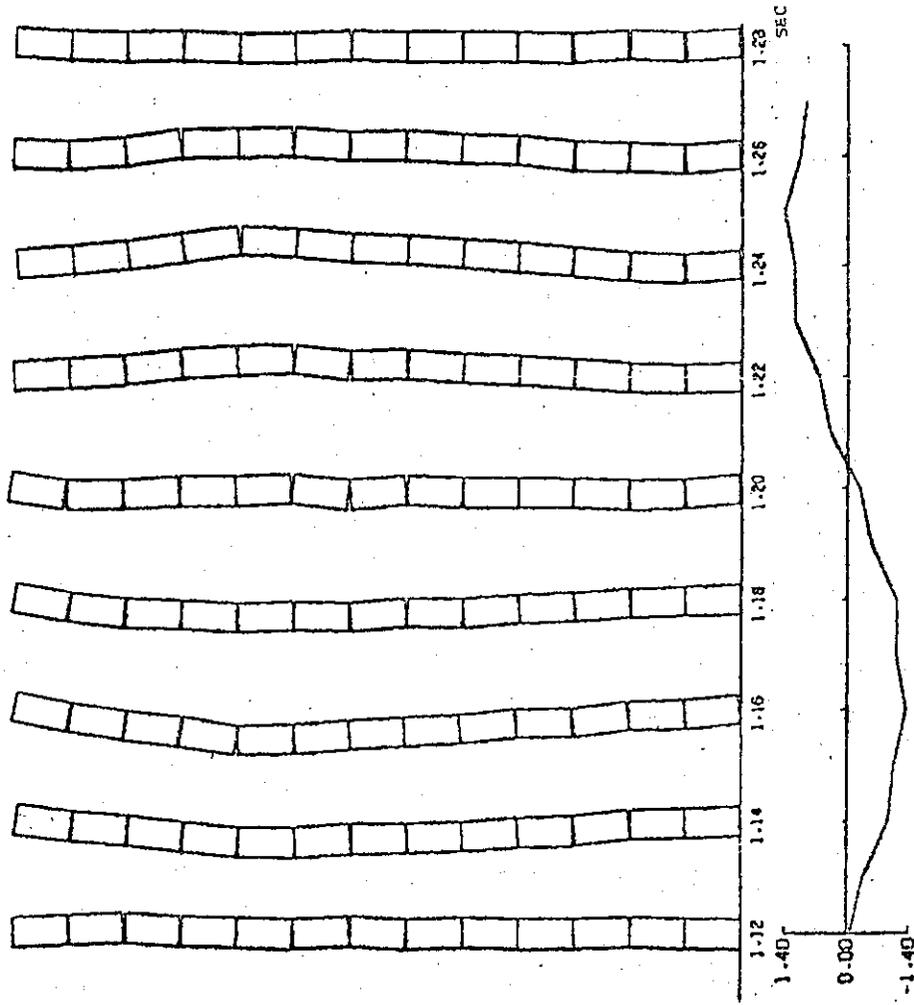
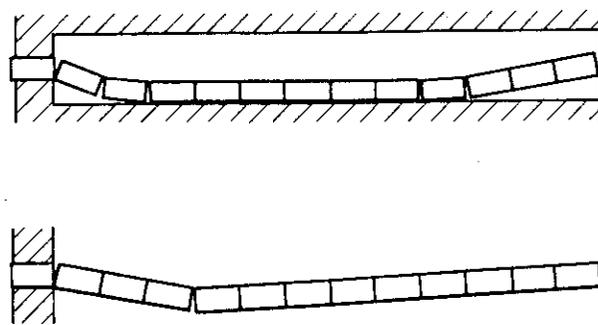


Fig. 5.8 Column vibration response (subharmonic vibration)



(a) No-impact (b) Impact

Fig. 5.7 Vibration mode of column

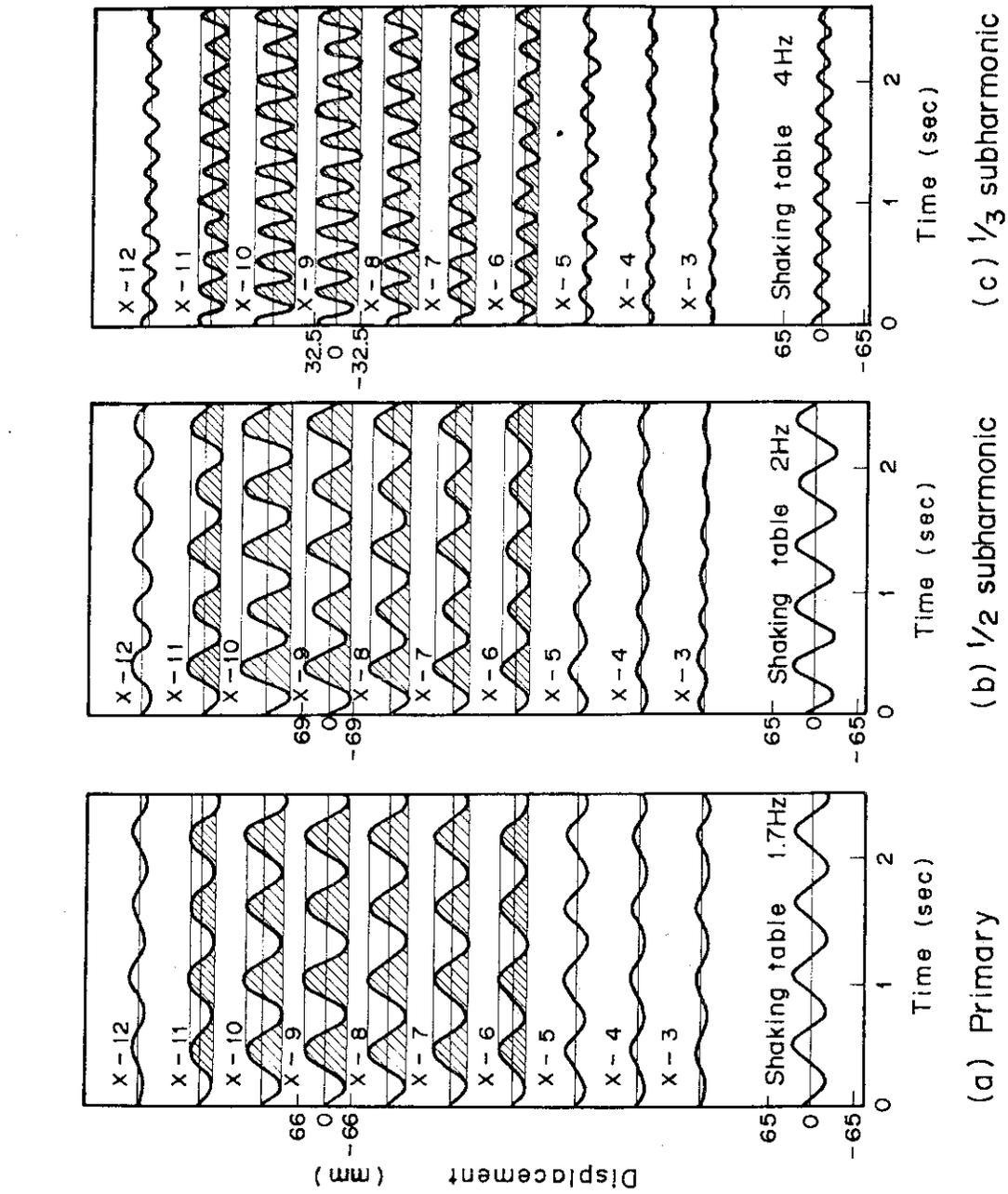
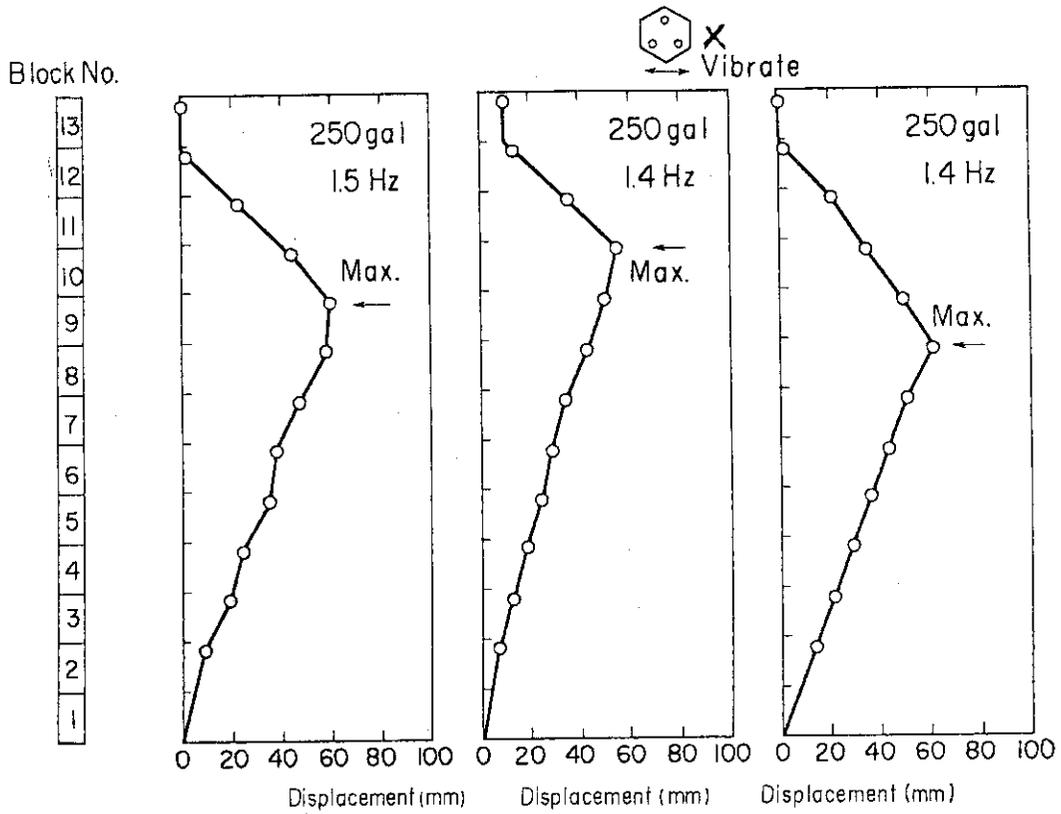
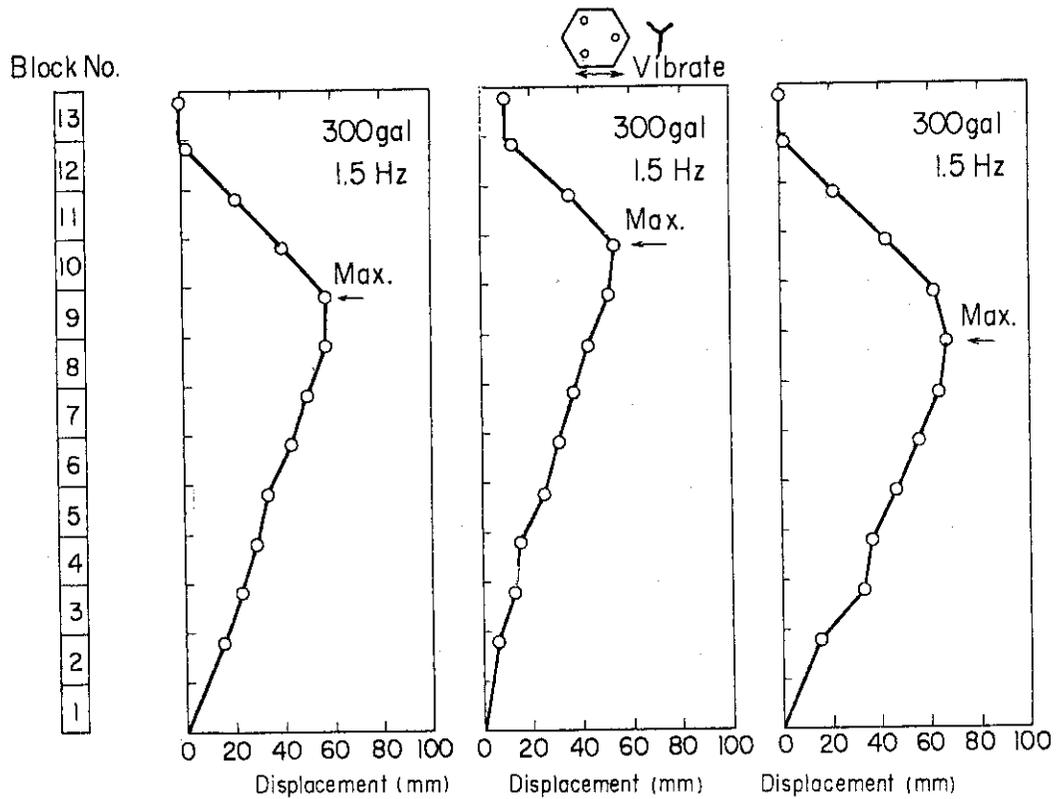


Fig. 5.9 Subharmonic vibration of column



(a) Top block gap 0mm, (b) Top block gap 10mm, (c) Top block weight 1.8 time

Fig. 5.10 Column vibration mode vs. Column and column boundary condition (Vibration direction X, sinusoidal wave test)



(a) Top block gap 0mm, (b) Top block gap 10mm, (c) Top block weight 1.8 time

Fig. 5.11 Column vibration mode vs. Column and column boundary condition (Vibration direction Y, sinusoidal wave test)

Shaking table displacement (mm)

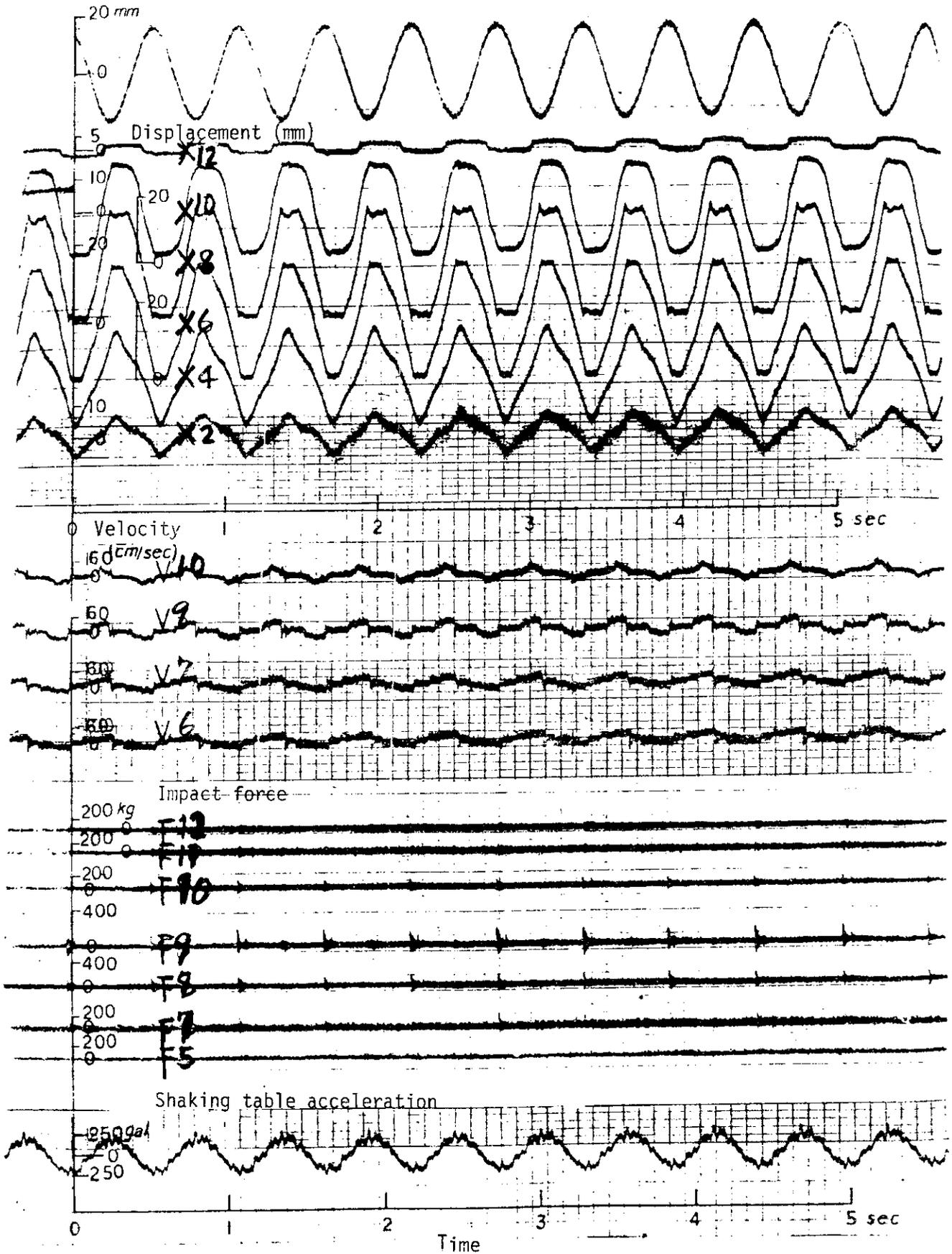


Fig. 5.12 Sinusoidal response (Max. acceleration 250 Gal, 1.8Hz, gap=15mm)

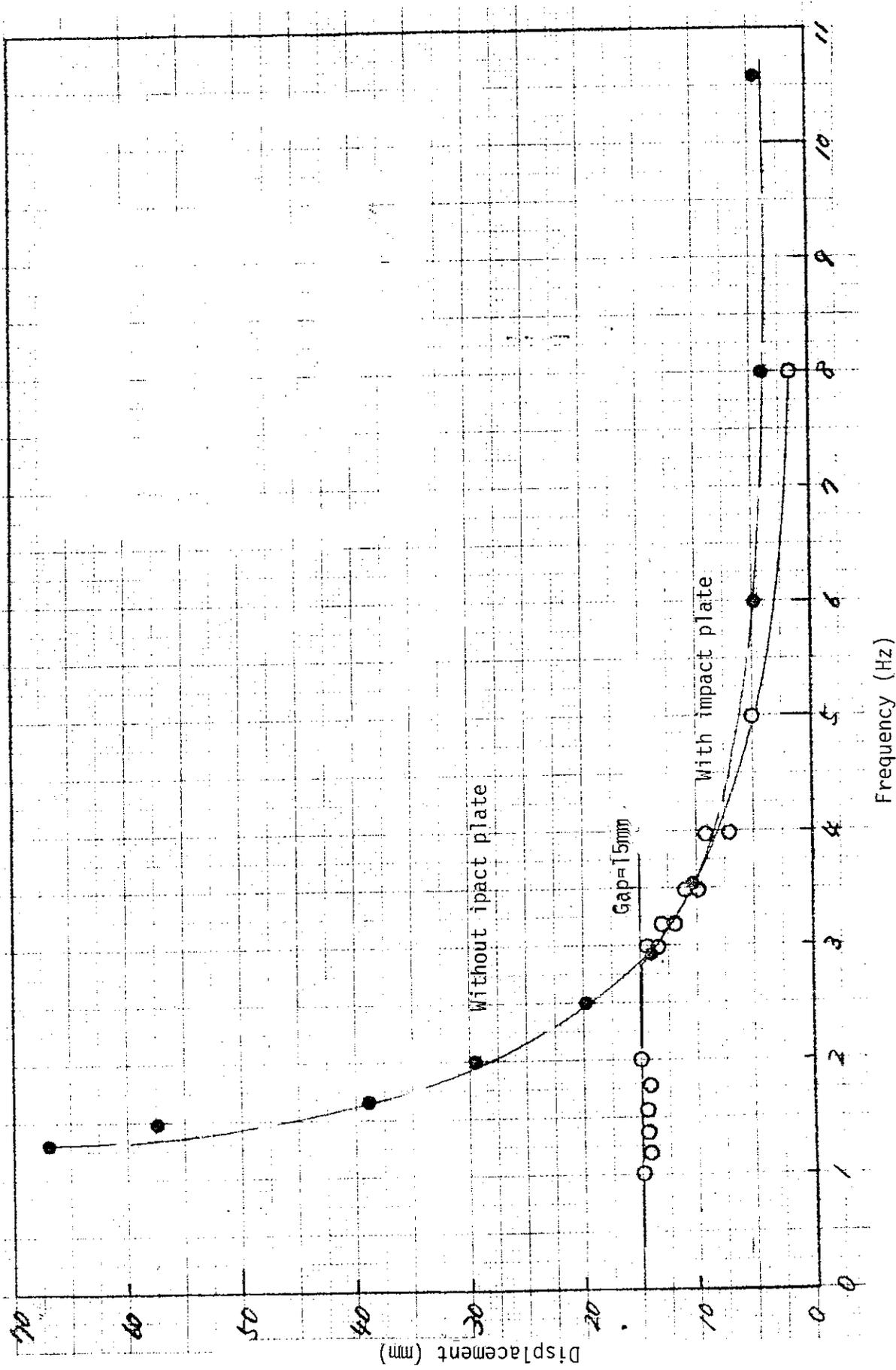


Fig. 5.13 Difference between with impact plate and without impact plate

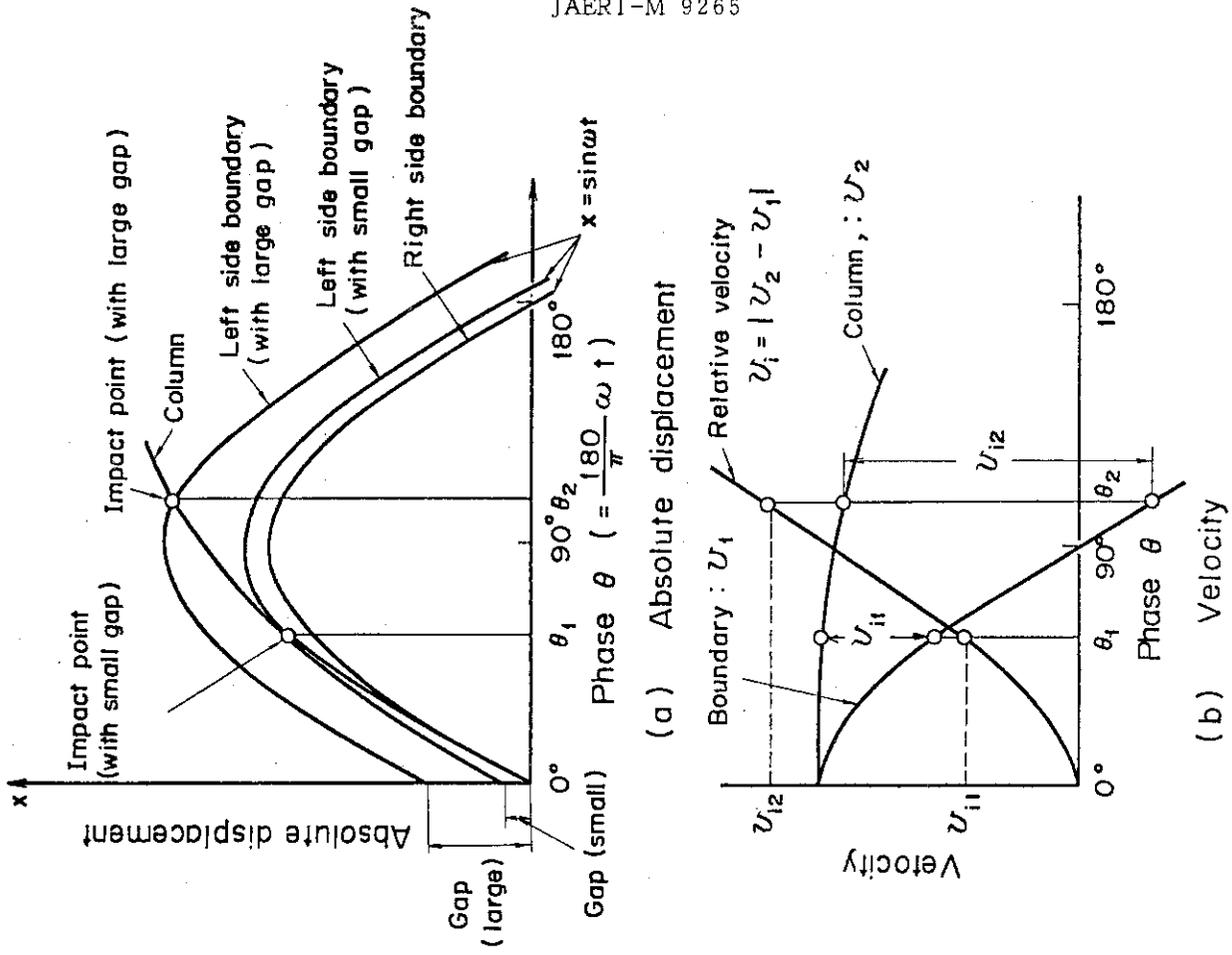


Fig. 5.15 Motion of column and boundaries

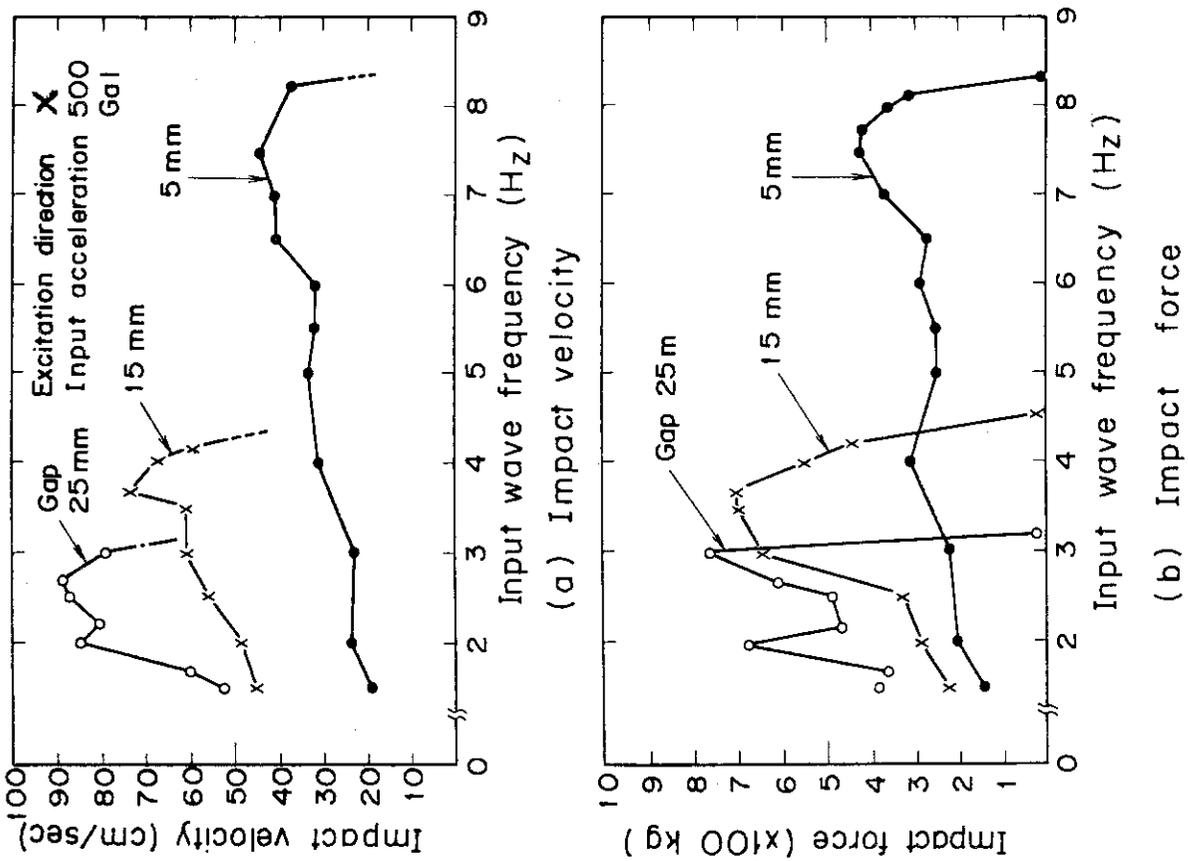


Fig. 5.14 Effect of gap width on impact velocity and impact force

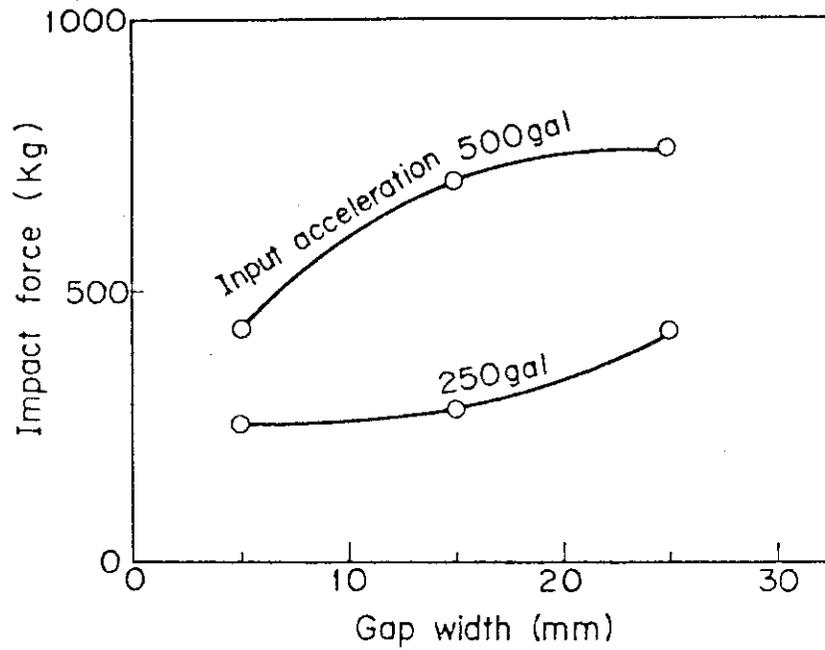


Fig. 5.16 Effect of gap width and input acceleration on impact force

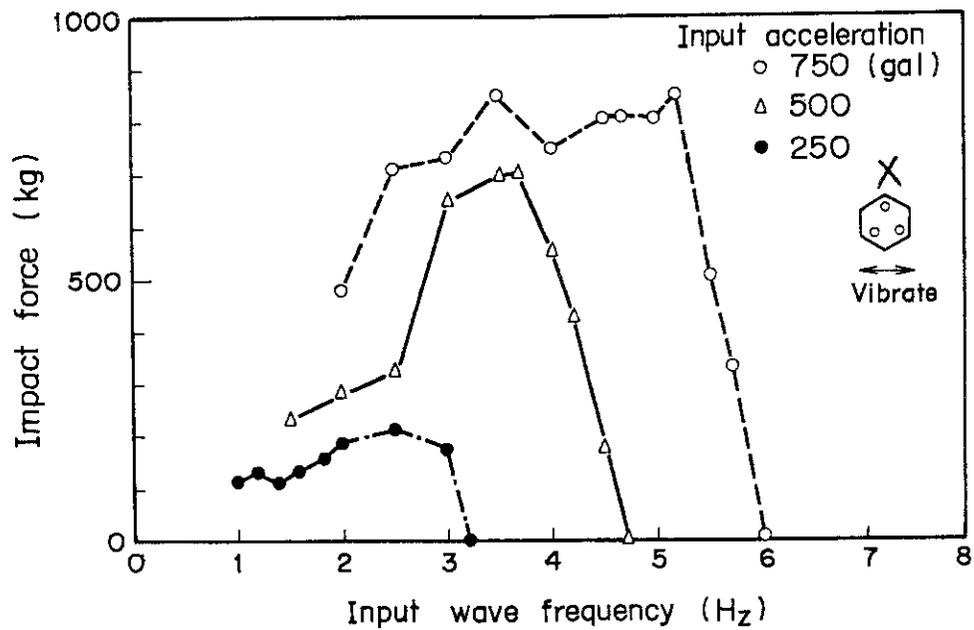


Fig. 5.17 Effect of input wave frequency and acceleration level on impact force
(Gap width 15 mm, Block impact direction X)

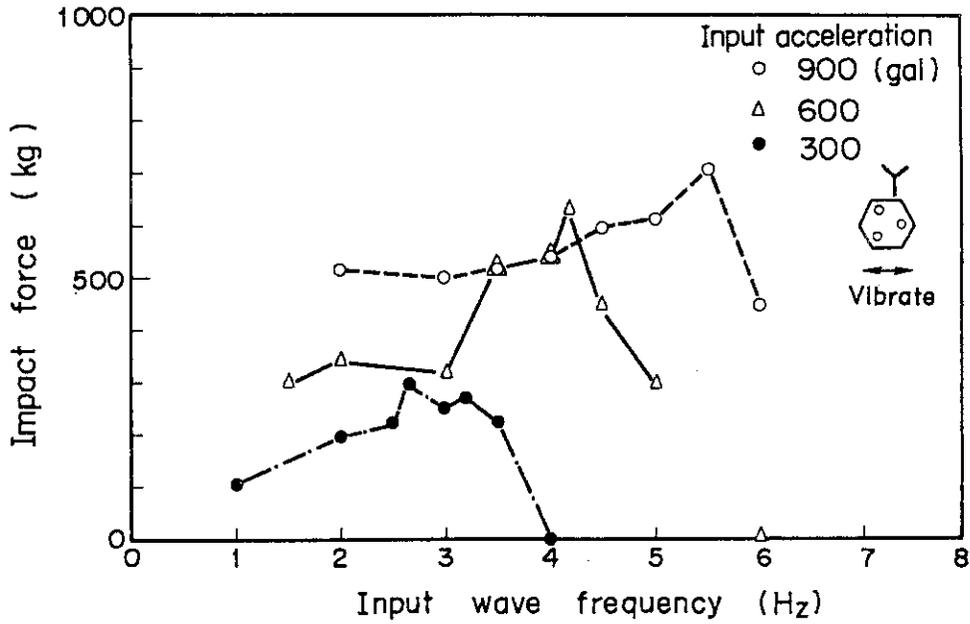
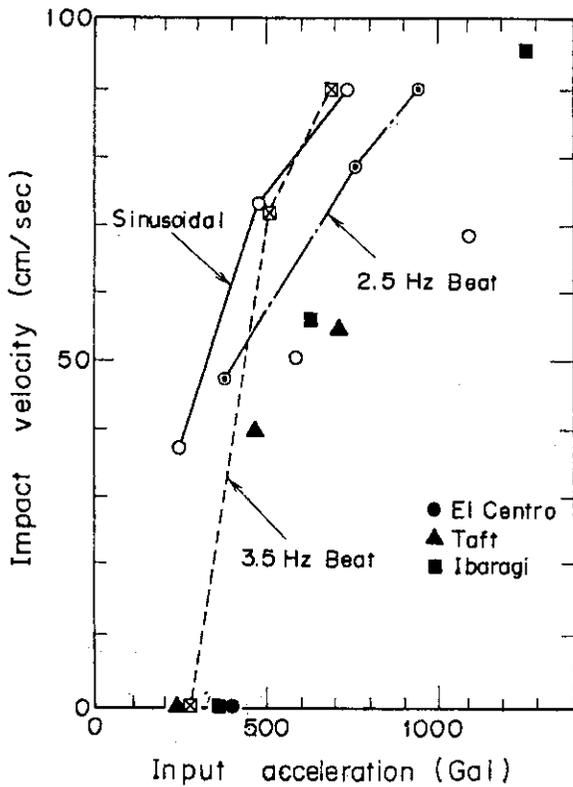
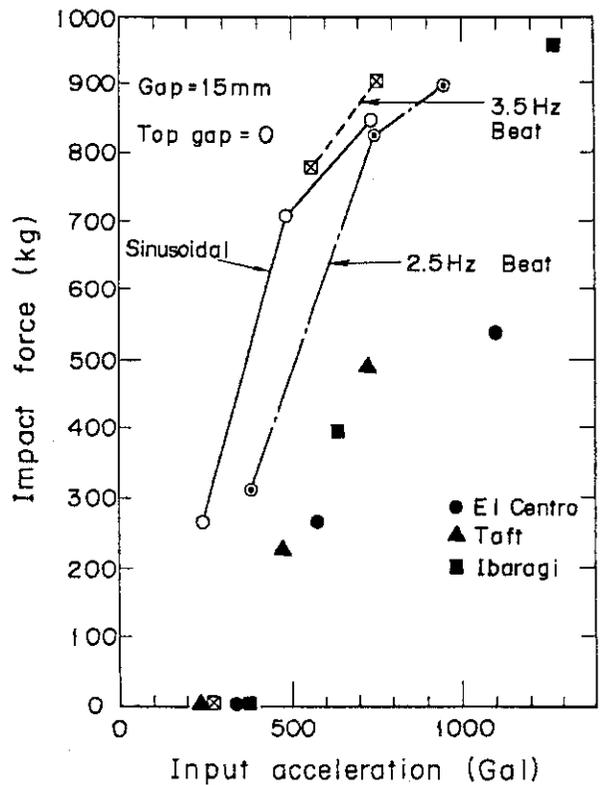


Fig. 5.18 Effect of input wave frequency and acceleration level on impact force
(Gap width 15mm, Block impact direction Υ)



(a) Impact velocity



(b) Impact force

Fig. 5.20 Effect of input wave on impact velocity and impact force

Shaking table displacement

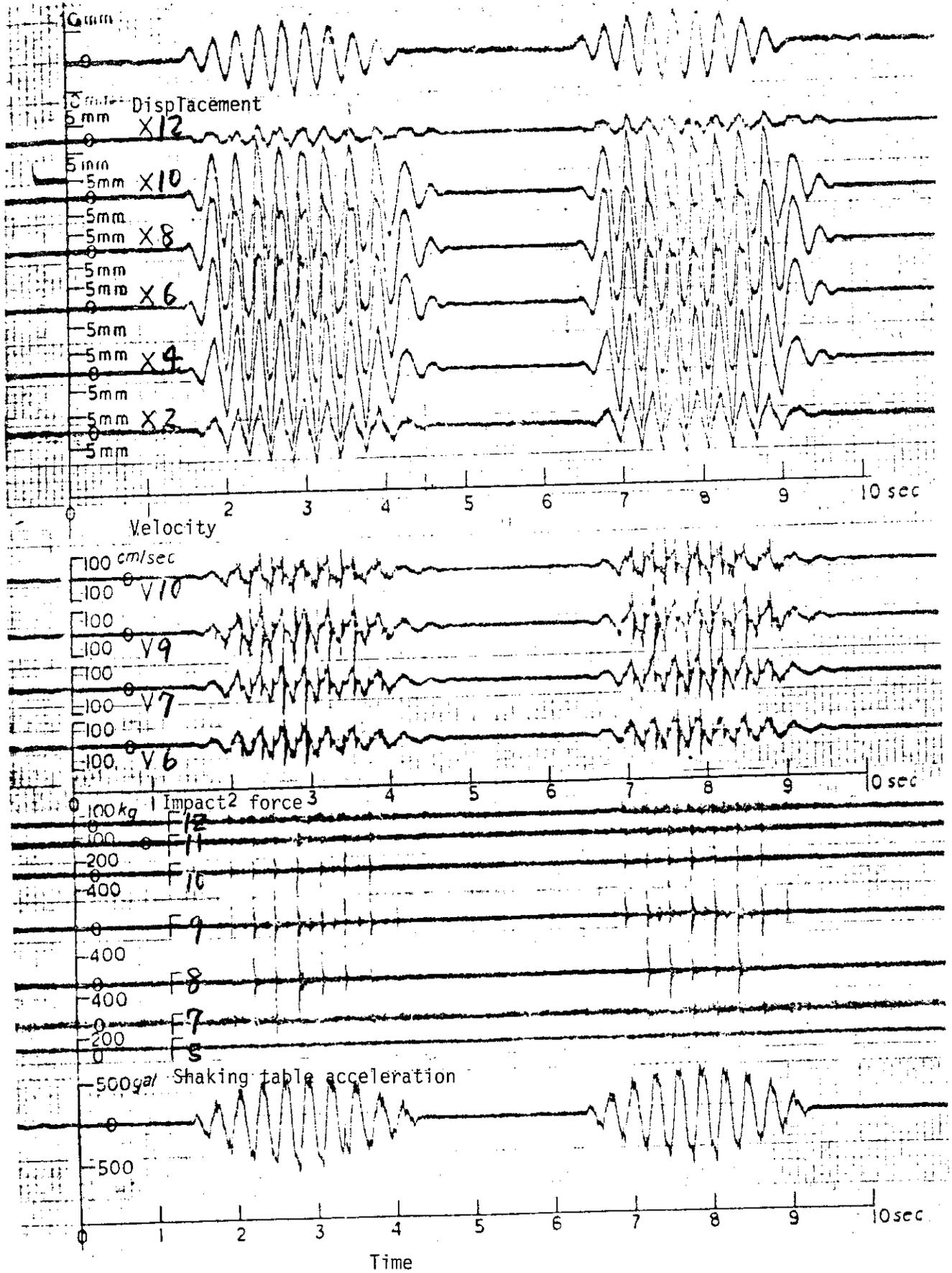


Fig. 5.19 Beat wave response (Max. acceleration 500 Gal, 3.5Hz, Gap=15mm)

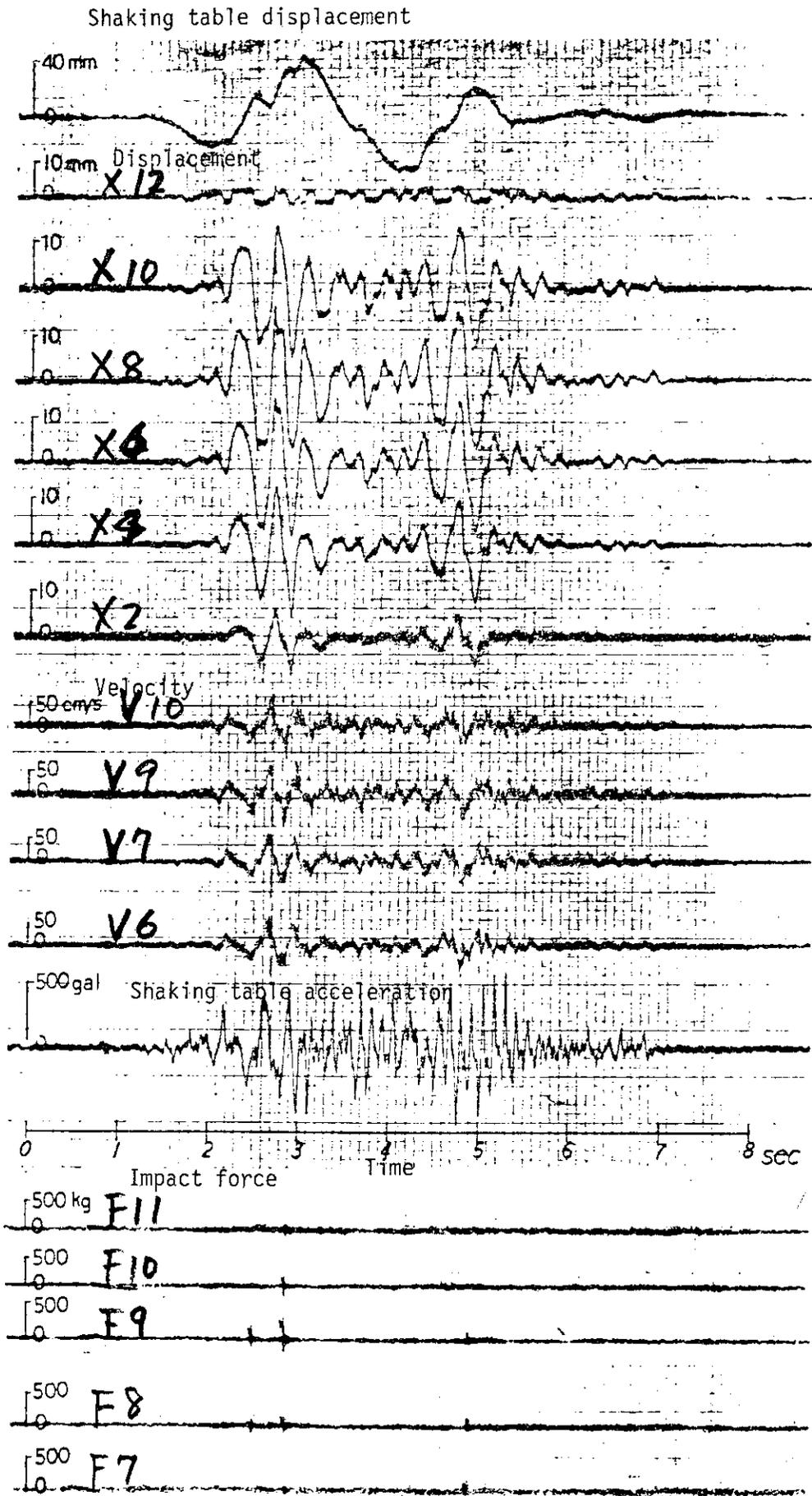


Fig. 5.21 Seismic wave response (El Centro 1940 NS, Max. acceleration 500 Gal, Gap=15mm)

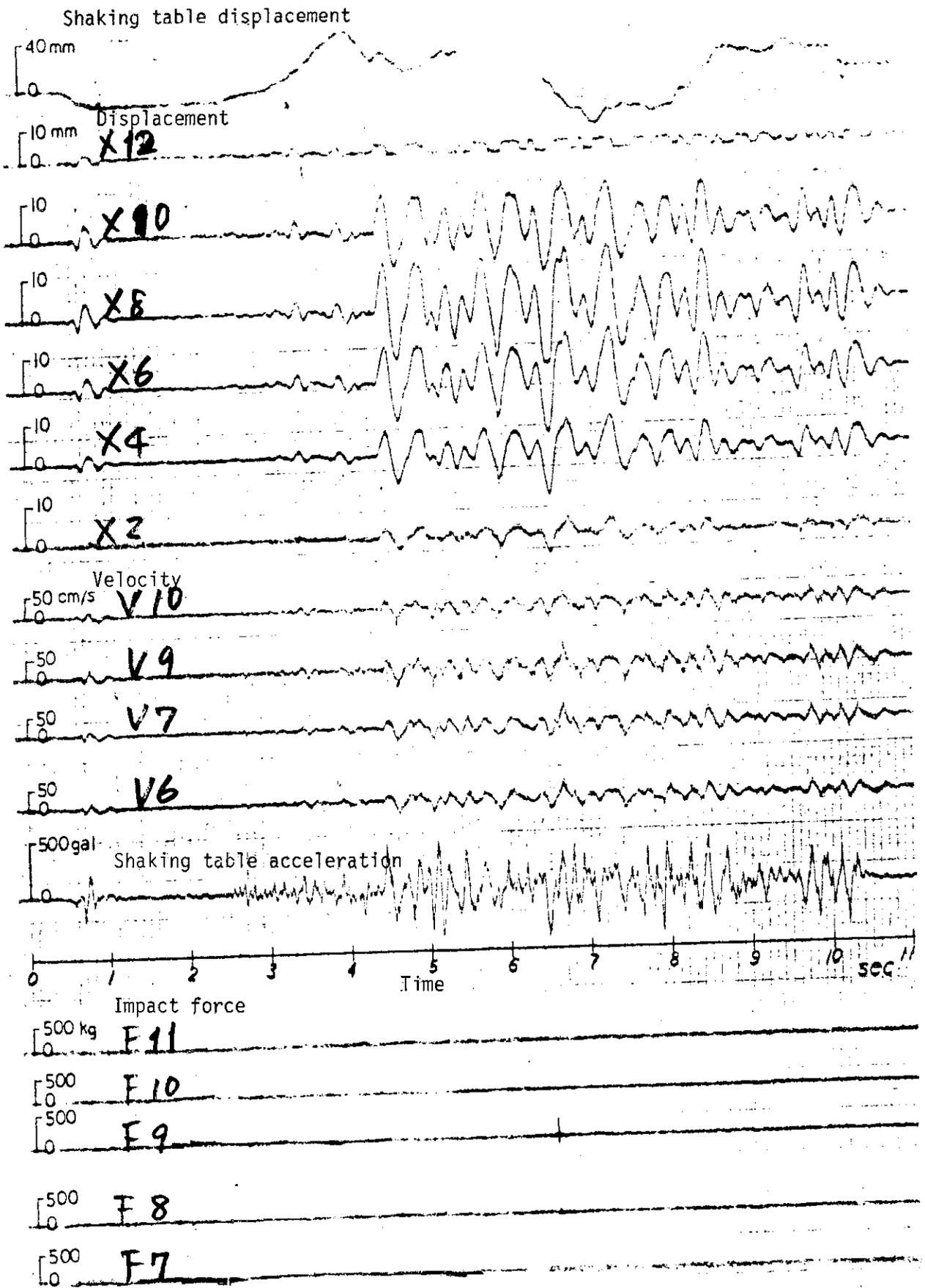


Fig. 5.22 Seismic wave response (Taft 1952 EW, Max. acceleration 500 Gal, Gap=15mm)

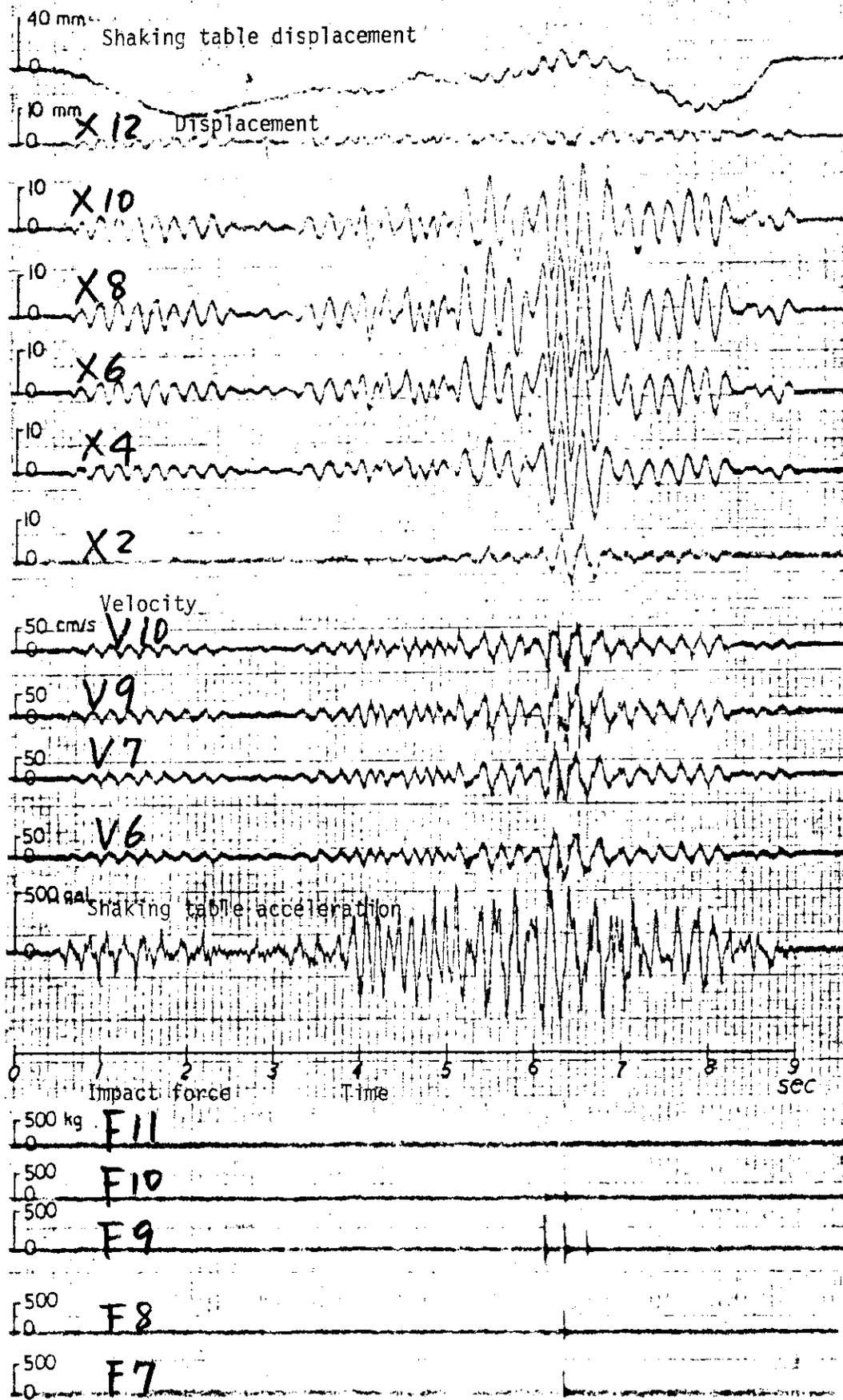


Fig. 5.23 Seismic wave response (Ibaragi 606, Max. acceleration 500 Gal, Gap=15mm)

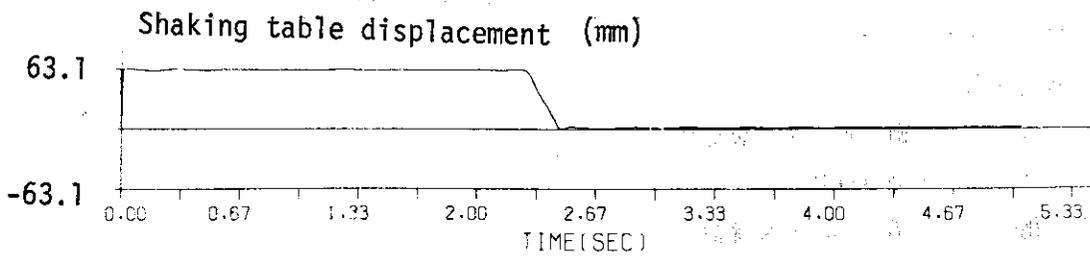
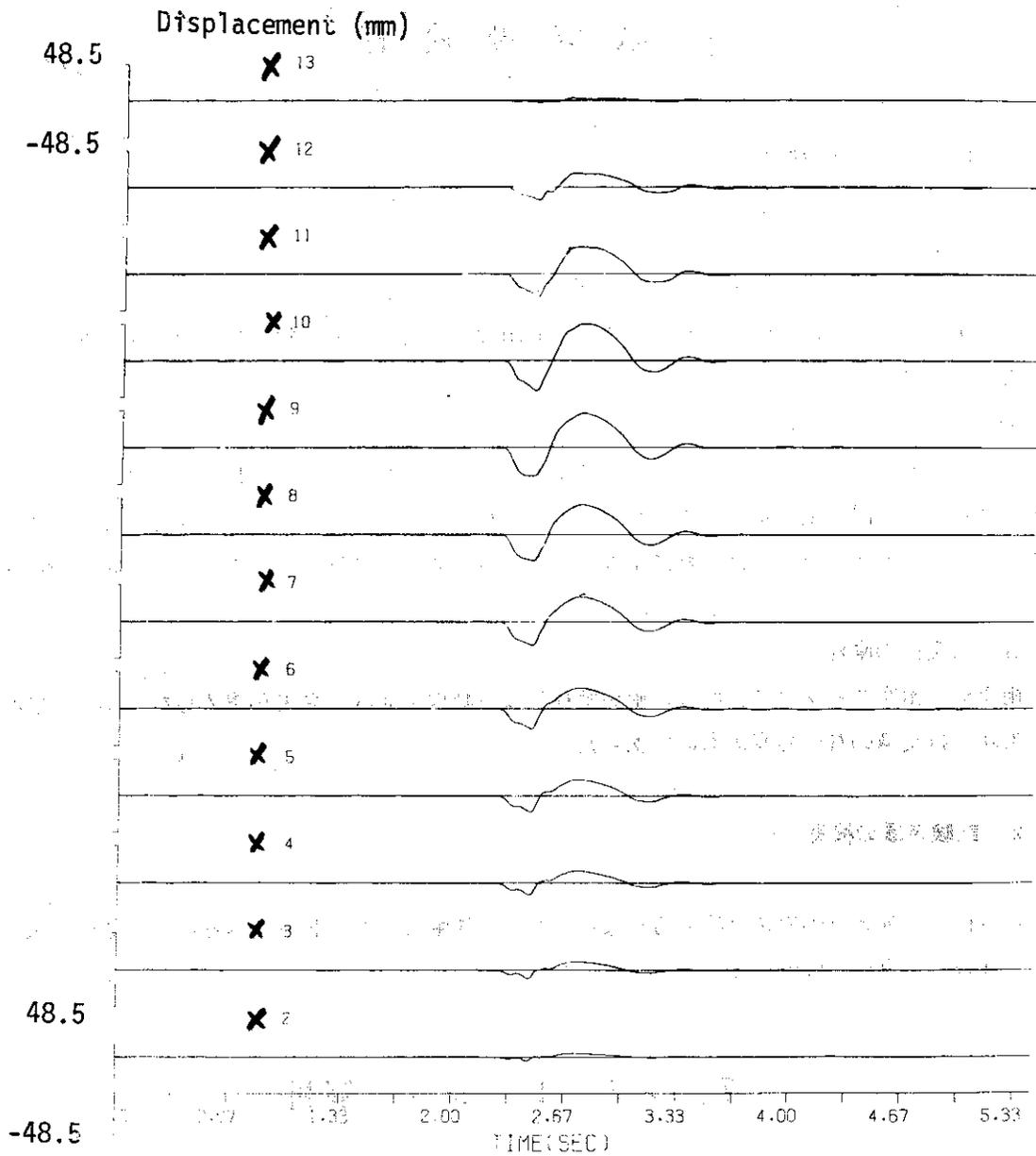


Fig. 5.24 Step wave response

6. 試験後検査

6.1 黒鉛ブロックの検査

(1) 黒鉛ブロックの損傷

通常の試験条件下では、黒鉛ブロックは衝突板と激しい衝突を繰り返したにもかかわらず破損は生じなかった。しかしながら、変位が60mm以上にもなる試験ではダウエルソケットの破損が一部に生じた。

(2) ダウエルピンの損傷

ダウエルピンはブロックのロッキングによるダウエルソケットとのすれ合いによって上面の角が摩耗して光沢が生じた。ダウエルピンの幾つかには、ピンをブロックに取付けるネジ部において、少し形崩れがあった。特に上端オリフィスブロックにはめ合いするブロックNo.12のダウエルピンにおいて、著るしかった。

(3) 衝突面の摩耗

衝突板と衝突するブロック面は、衝突摩耗による減肉や光沢の発生が認められたが、いずれも形状には支障のない程度のものであった。

6.2 試験装置の検査

試験後、試験装置の異常は認められなかったが、衝撃反力測定装置の感度については、試験前に比較して90～93%程度に低下していた。

7. シミュレーション解析

[記号]

- a : ブロック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 : ダウエルの減衰係数
- 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エルまでの距離
- 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

6. 試験後検査

6.1 黒鉛ブロックの検査

(1) 黒鉛ブロックの損傷

通常の試験条件下では、黒鉛ブロックは衝突板と激しい衝突を繰り返したにもかかわらず破損は生じなかった。しかしながら、変位が60mm以上にもなる試験ではダウエルソケットの破損が一部に生じた。

(2) ダウエルピンの損傷

ダウエルピンはブロックのロッキングによるダウエルソケットとのすれ合いによって上面の角が摩耗して光沢が生じた。ダウエルピンの幾つかには、ピンをブロックに取付けるネジ部において、少し形崩れがあった。特に上端オリフィスブロックにはめ合いするブロックφ12のダウエルピンにおいて、著るしかった。

(3) 衝突面の摩耗

衝突板と衝突するブロック面は、衝突摩耗による減肉や光沢の発生が認められたが、いずれも形状には支障のない程度のものであった。

6.2 試験装置の検査

試験後、試験装置の異常は認められなかったが、衝撃反力測定装置の感度については、試験前に比較して90～93%程度に低下していた。

7. シミュレーション解析

[記号]

- a : ブロック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 : ダウエルの減衰係数
- 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エルまでの距離
- 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} : 左側ダウエルに加わる力
 F^{DR} : 右側ダウエルに加わる力
 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 : ダウエルのばね定数
 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 : 衝突板の質量
 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

(1) 運動方程式

衝突を含むコラム系の運動は、ソフトスプリングとハードスプリングの両特性を含み、非線形振動となる。このような非線形振動の解析には、数値解を求める方が解析解よりも容易である。よって、数値解析によってコラムのシミュレーション解析を実施して、解析手法の妥当性を明らかにする。

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。衝突力の発生する部分は、上下のブロック境界面、ブロック側面と衝突板間である。
- (iii) ブロック上下間の境界には摩擦がある。
- (iv) 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との間には摩擦がある。

(M) 変位検出器の抵抗力は粘性減衰抵抗とする。

(N) 衝突板は水平 1 自由度系とする。衝突板は衝突板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、コラムの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。

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

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

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

ここで、 $M(F)$ は力 F によるブロック重心まわ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、ガス圧力差によってブロックの上方および下方からの力である。

(2) 上下ブロック間摩擦力とモーメント

$$\alpha_i = \theta_i - \theta_{i-1}$$

$\alpha_i > 0$ では

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

$i-1$ のブロックに対して

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

ここで、相対速度 v_i は

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

$i = 1$ に対して

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

ここで、 u_i と \dot{u}_i は i 番目のブロックの重心の水平方向の変位と速度である。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

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

$i - 1$ ブロックに対しては

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

ここで、相対速度は

$$v_i = \{ \dot{u}_i - (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \dot{\theta}_i \} \\ - \{ \dot{u}_{i-1} + (h_{i-1} \cos \theta_{i-1} + b_i \sin \theta_{i-1}) \dot{\theta}_{i-1} \} \quad (7.10)$$

$i = 1$ 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。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 $i-1$ との境界で垂直方向の衝突における力は、衝突面において、ばねとダッシュポットの变形を考えることによって得られる。この場合の变形と变形速度 r_i と \dot{r}_i は

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

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

$i=1$ に対して

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

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

ここで w_0 , \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

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

$i-1$ ブロックに対しては

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

同様に、 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ばね定数と減衰係数である。

(4) 境界との衝突力とモーメント

ブロックと境界との衝突による力は、衝突面においてばねとダッシュポットの变形を考えることによって得られる。この場合の变形と变形速度 ε_i と $\dot{\varepsilon}_i$ 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 は境界の変位と速度であり、 δ_i^B はブロックと境界のギャップである。ブロックの上端右側で境界と衝突する場合

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_i &> 0 \\ F_i^{TR} &= -(K_i^B \epsilon_i + C_i^B \dot{\epsilon}_i) \\ M(F_i^{TR}) &= F_i^{TR} (h_i \cos \theta_i - b_i \sin \theta_i) \end{aligned} \right\} \quad (7.23)$$

ここで K^B と C^B は境界との衝突のばね定数と減衰係数である。同様にブロック上端左側で衝突する場合

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

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

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

ブロック下端右側で衝突する場合

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

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

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

ブロック下端左側で衝突する場合

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

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

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

$$\varepsilon_i \leq 0$$

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

(5) 水平方向のダウエル力とモーメント

水平方向のダウエル力は、ダウエルピンとソケットの接触面の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 β_i と $\dot{\beta}_i$ は

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

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

$i = 1$ に対して

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

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

ここで δ_R と δ_L はそれぞれダウエルピンとソケットとの右側と左側のギャップである。右側のダウエルに加わる力とモーメントは、右側ギャップにおいて $\beta_i > 0$ 、左側ギャップにおいて $\beta_i < 0$ ならば

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

$i - 1$ 番目のブロックに対して

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

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

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

$$M(F_i^{DR}) = M(F_{i-1}^{DR}) = 0$$

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

(6) 垂直方向のダウエル摩擦力和モーメント

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

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

$i = 1$ に対しては

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

右側ダウエルの摩擦力和モーメントは

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

$i - 1$ 番目のブロックに対して

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

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、 $\alpha_{i+1} > 0$ ならば

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

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

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

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

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

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

$$W_i^l = \sum_{j=i}^n W_j + F_i^p \quad (7.53)$$

(8) 衝突板の運動方程式

右側の衝突板の運動方程式は

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

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 $\dot{\psi}_i^{BR}$ は衝突板拘束構造の変位と速度であり、

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

である。同様に左側の衝突板の運動方程式は

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

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

これらの運動方程式は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。各要素の剛性と減衰係数は、それぞれの構成要素単位の特性試験から得られた値である。

時間積分間隔は次の検討結果によって 1×10^{-4} s に選んだ。一般に、時間積分間隔 Δt は系の固有周期 T の $1/20 \sim 1/50$ にすれば満足な結果を得る。本問題における固有周期は、衝突振動について考えると、ばね定数 $K^B = K^V = K = 2.5 \times 10^4$ kg/cm, ブロック質量 $m = 0.00628$ kg \cdot s²/cm であるから

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} = 0.00315 \text{ (s)}$$

である。

適切な時間積分間隔は

$$\Delta T = \frac{T}{20 \sim 50} = 0.000157 \sim 0.000063 \text{ (s)}$$

である。ここで、時間積分間隔の変化による応答変位と衝撃力とを比較した。その結果をTable 7.2に示す。これから、衝突が無い場合には、時間積分間隔は 4×10^{-4} s 以下であればよいことが判る。一方、ブロックが境界と衝突する場合には、 2×10^{-4} s 以下であればよい。これらの結果から、本解析の時間積分間隔は 1×10^{-4} s にした。なお、この積分時間間隔 1×10^{-4} s は系の固有周期の $1/31.5$ であり、上述の望ましい積分時間間隔内 ($1/20 \sim 1/50$) であることがわかる。

7.2 自由減衰振動

ブロック1個のロッキング振動における変位を解析と試験を比較してFig. 7.3に示す。解析値は実験値と良く一致していることが判る。また、この図からロッキング振動において、変位が小さくなると周期が短くなることも判る。

コラムをくの字形に変形させ、その後離して自由減衰振動させた場合の解析と実験値を比較してFig. 7.4に示す。図では、ブロック変位の時間経過が示されている。この図から、解析値が実験値と良く一致していることが判る。また、Fig. 7.3と同時に、変位が小さくなると周期が短くなるロッキング運動特有の性質も明らかである。

7.3 正弦波応答解析

(1) コラムが境界と衝突しない場合

コラムが境界と衝突しない場合のコラムの各ブロックの時刻歴応答変位曲線を、解析結果と実験結果を比較して Fig. 7.5 に示す。この応答曲線は正弦波加振で 3.5 Hz 、最大加速度 500 Gal の場合のものであり、解析値は実験値と良く一致していることが判る。Fig. 7.6 に加振加速度をパラメータとしてコラムの応答変位特性について、解析値と実験値を示している。ほとんど全域にわたって解析値と実験値と良好な一致を見ている。このように、コラムが境界と衝突しない場合において、コラムの変位挙動を本解析法で十分に解析できることが明らかである。

(2) コラムが境界と衝突する場合

コラムが境界と衝突する場合のブロックの変位と衝撃反力の時刻歴応答曲線を Fig. 7.7 に示す。この応答曲線は、コラムと境界とのギャップは 15 mm 、上端ブロックのギャップはコラムの上下運動を妨げない程度の 0.5 mm 程度であり、加振度は 3.5 Hz の正弦波で最大加速度は 500 Gal である。この図から明らかなように、解析値の変位と衝撃反ともに実験値と良く一致しており、本解析法が衝突を含むコラムの振動挙動解析に有効であることが判る。

Fig. 7.8 はコラムの運動を解析結果と実験結果から描いたものであり、この図からも解析値が実験値と良く一致していることが判る。

コラムが境界と衝突する場合の衝撃反力のコラムに沿う分布を、計算値と実験値を比較して Fig. 7.9 (a) に示す。計算値と実験値とは最大衝撃反力では良く一致しているが、コラムに沿う衝撃反力の分布では必ずしも良好な一致をしていない。しかし、衝撃反力の測定誤差を考慮して、Fig. 7.9 のように測定値の範囲を考えれば、計算値と実験値は大約一致していると考えてよい。

7.4 地震波応答解析

地震波応答解析の入力地震波として E1 Centro 1940 NS 波を使用した。使用した入力波は多目的高温ガス実験炉第 1 次概念設計の炉心コアパレル部の応答波形を相似則に従って時間軸を $1/2$ に短縮したものを使用した。

Fig. 7.10 はコラムと境界のギャップ 15 mm 、の場合の変位と衝撃反力の時刻歴応答曲線について、計算値と実験値を比較して示す。最大変位、最大衝撃反力ともに計算値と実験値は良く一致している。しかし、応答変位曲線を見ると、計算値は実験値よりも減衰が大きく表われている。

コラムに沿う衝撃反力については Fig. 7.9 (b) に示すように、正弦波応答値と同様の傾向を示している。

加振加速度の変化による衝撃反力と衝突速度の変化を Fig. 7.11 に示す。この図から、計算値は実験値と良く一致しており、本解析法^{(7),(8),(9),(10)}が衝突を含むコラムの振動解析に有効であることが判る。

Table 7.1 Mass, moment of inertia, spring constant and damping coefficient

	Block No. 1 - 12	Top block
a (cm)		2.5
b (cm)		7.23
d (cm)		5.2
h (cm)		14.23
I (kg·sec ² ·cm)	0.524	1.36
m (kg·sec ² /cm)	0.00628	0.00918
m _B (kg·sec ² /cm)	0.00628	0.00918
δ _R , δ _L (cm)		0.025
μ _k (-)		0.2
μ _s (-)		0.2
C ^B (kg·sec/cm)		1.77
C ^C (kg·sec/cm)	0.2 ~ 0.12 (depend on column deflection)	
C ^D (kg·sec/cm)		4.2
C ^M (kg·sec/cm)		1.77
C ^V (kg·sec/cm)		1.77
K ^B (kg/cm)		2.5 × 10 ⁴
K ^D (kg/cm)		1.55 × 10 ⁴
K ^M (kg/cm)		2.5 × 10 ⁴
K ^V (kg/cm)		2.5 × 10 ⁴
P (kg/cm ²)		0.0

Table 7.2 Effect of time interval on response displacement and boundary impact force

Time interval (s)	Relative displacement (no-impact) (cm/cm)	Relative boundary impact force (kg/kg)
0.00006	0.9385	1.0042
0.00008	1.0015	1.0825
0.0001	1.0000	1.0000
0.0002	1.0886	1.0504
0.0004	1.0601	divergence
0.0005	divergence	divergence

(Input wave sinusoidal 3.5 Hz, 500 Gal)

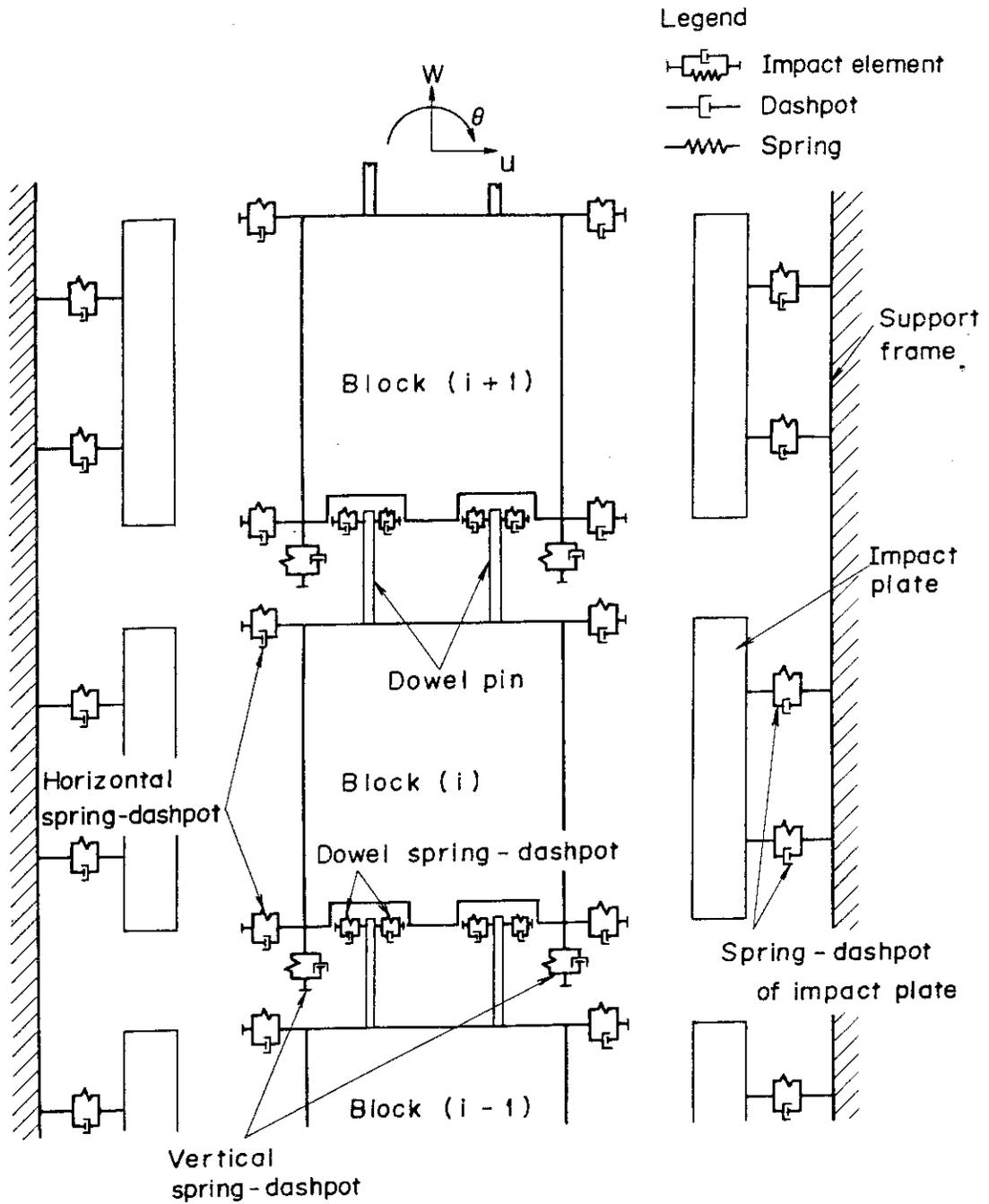


Fig. 7.2 Idealized spring-dashpot model

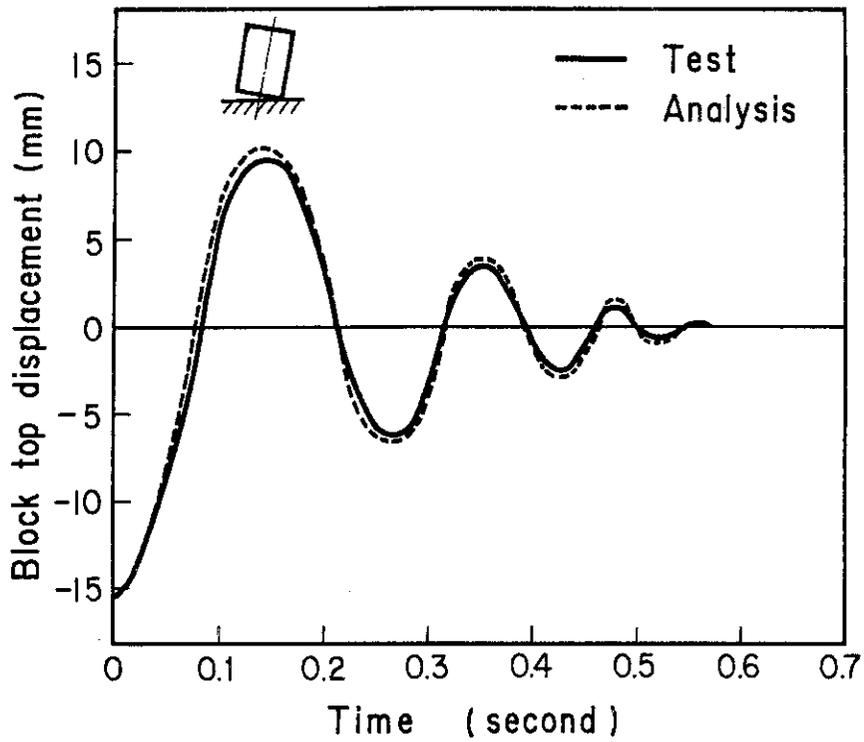


Fig. 7.3 Rocking motion of single block

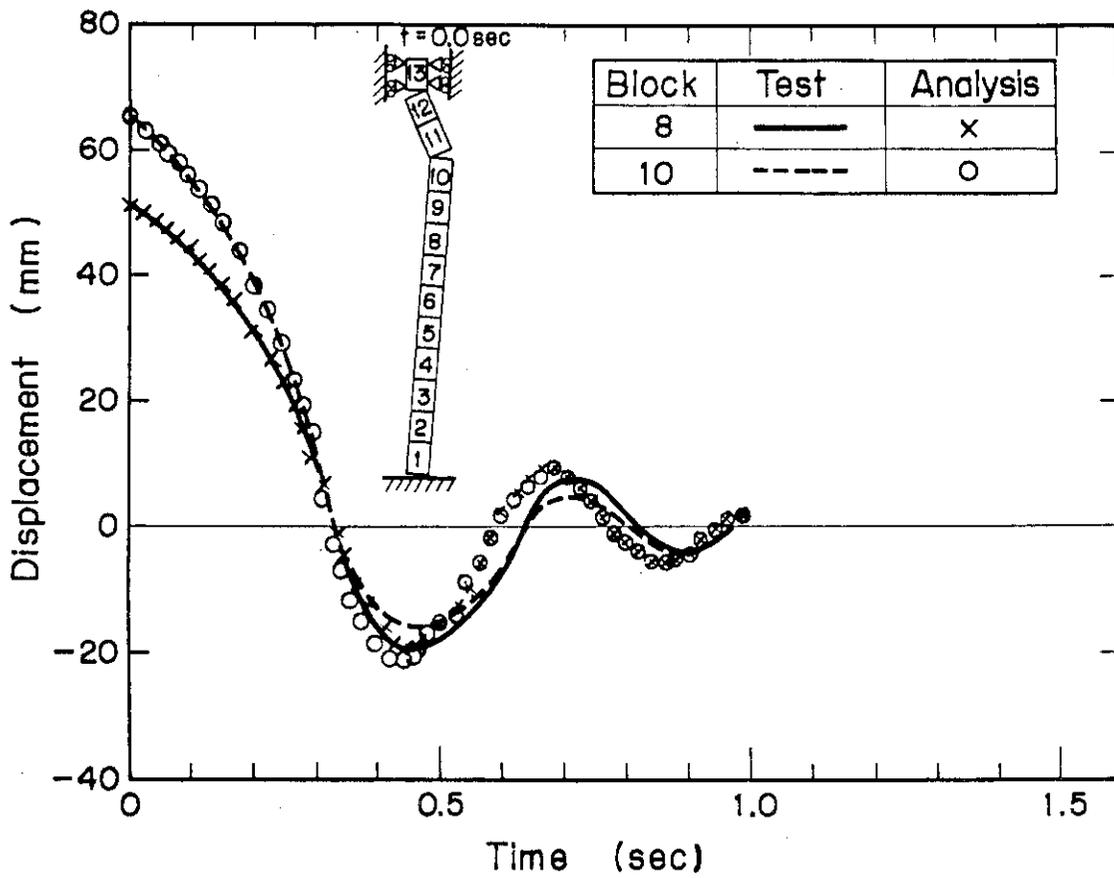


Fig. 7.4 Column free vibration

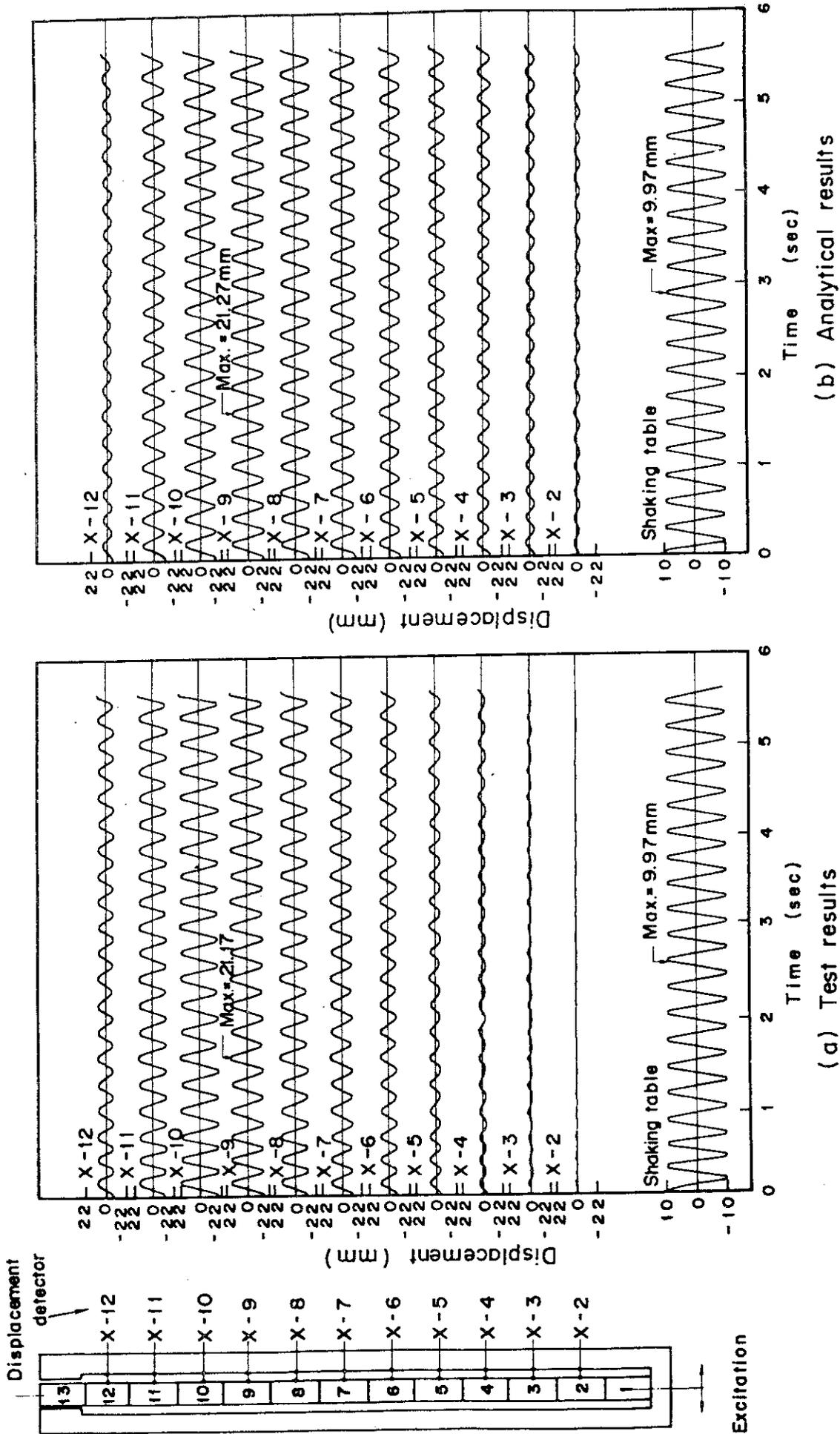


Fig. 7.5 Comparison between test and analysis of displacement
(Input wave sinusoidal 3.5 Hz, max. acceleration 500 Gal)

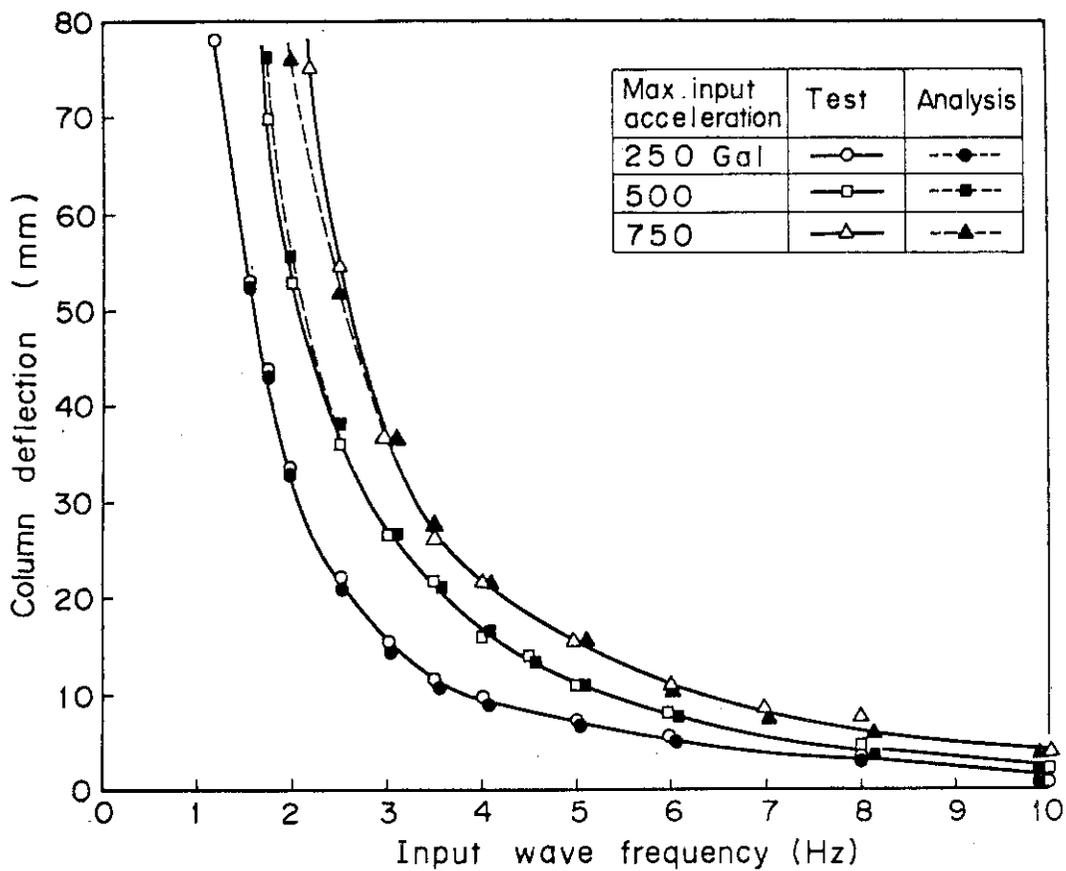
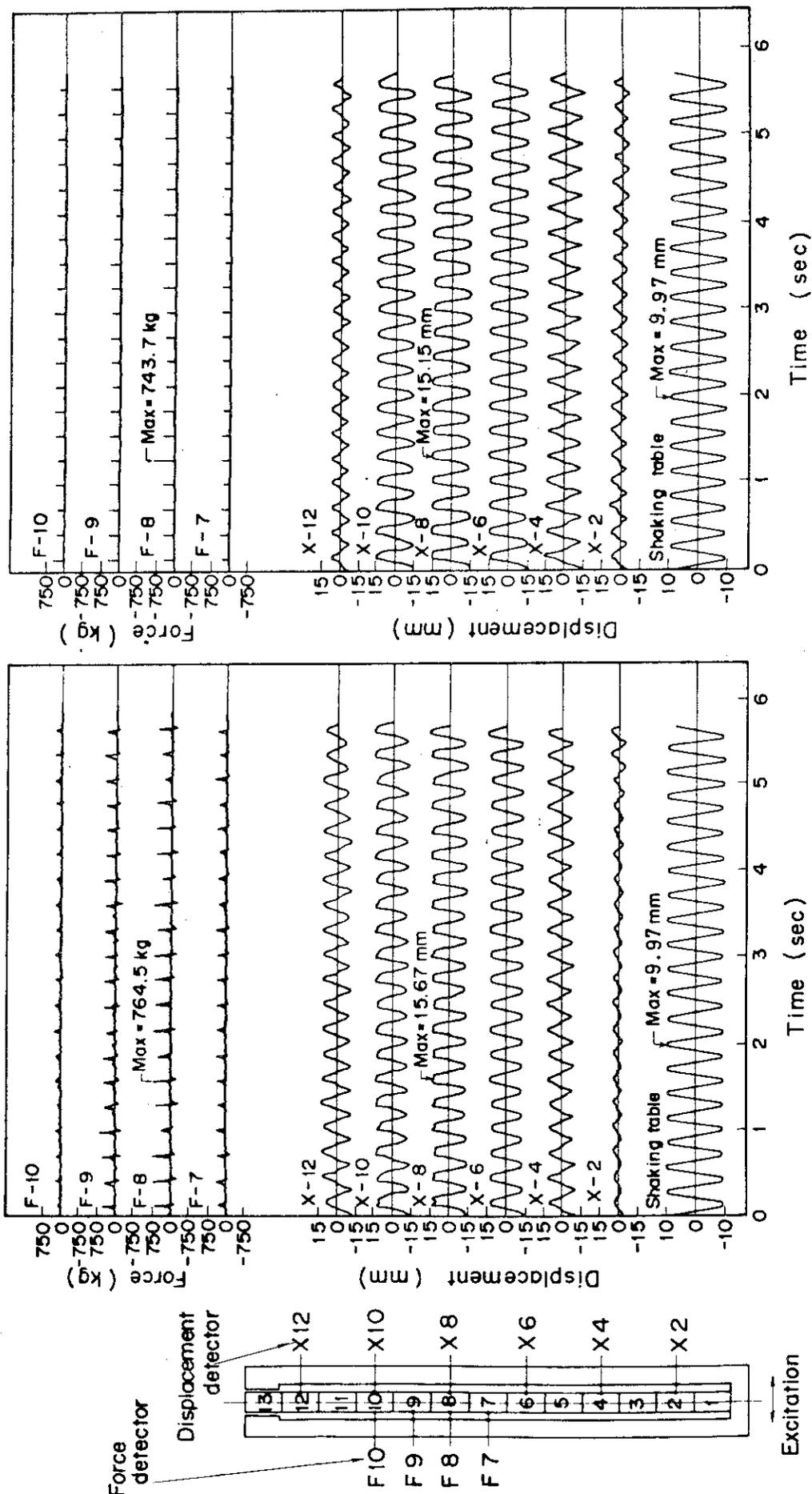


Fig. 7.6 Column deflection vs. input wave frequency



(b) Analytical results

(a) Test results

Fig. 7.7 Comparison between test and analysis of displacement and impact force
(Input wave sinusoidal 3.5 Hz, max. acceleration 500Gal)

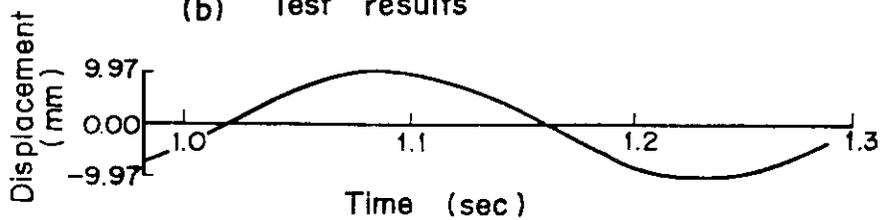
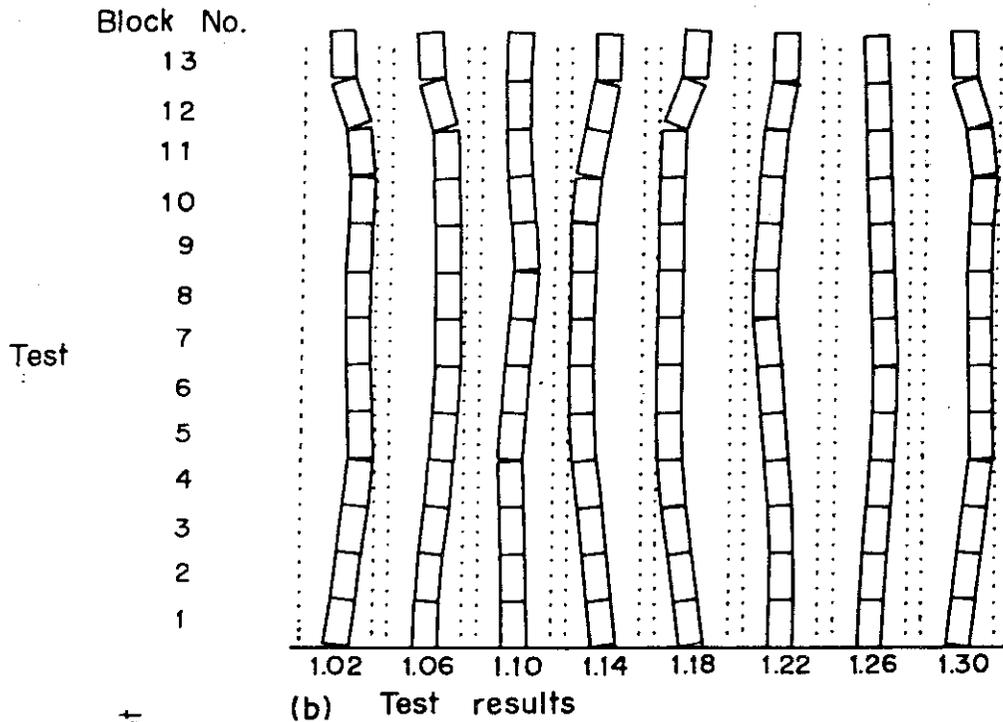
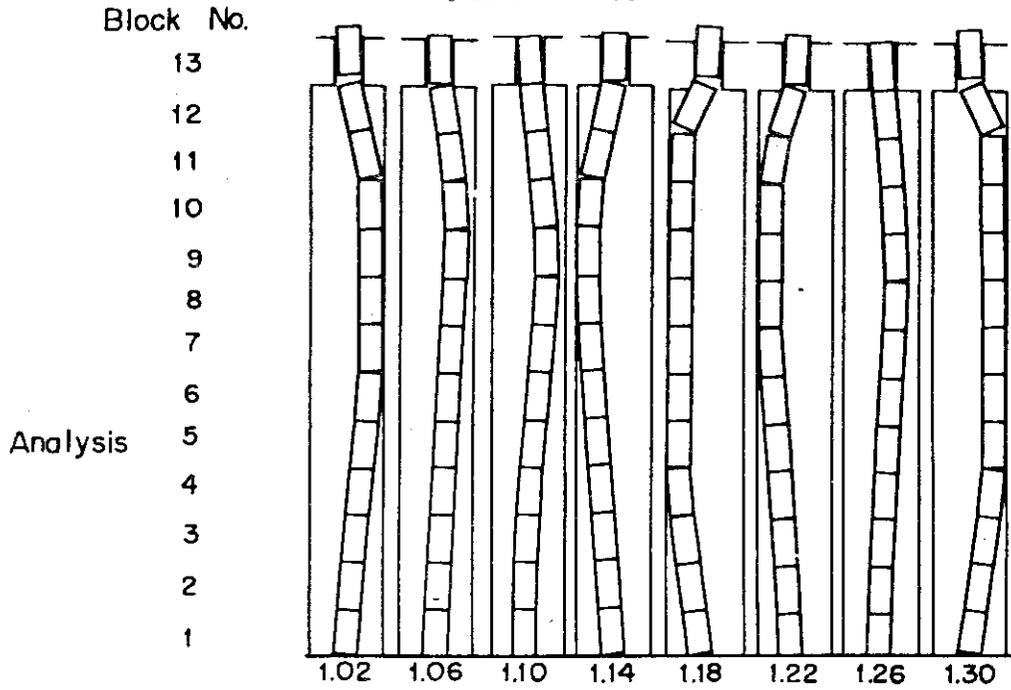


Fig. 7.8 Comparison between test and analysis of column vibration behavior
(Input wave sinusoidal 3.5 Hz, max. acceleration 500 Gal)

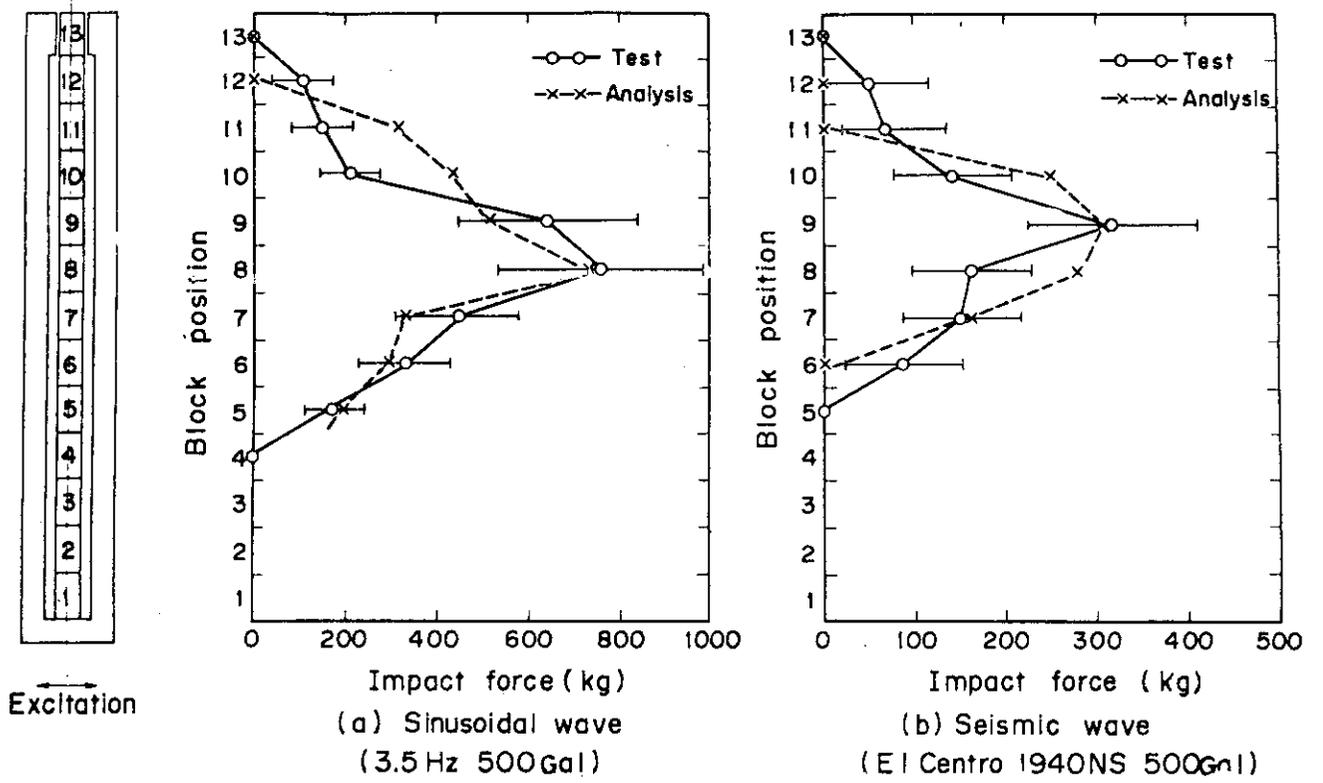


Fig. 7.9 force distribution of block along column

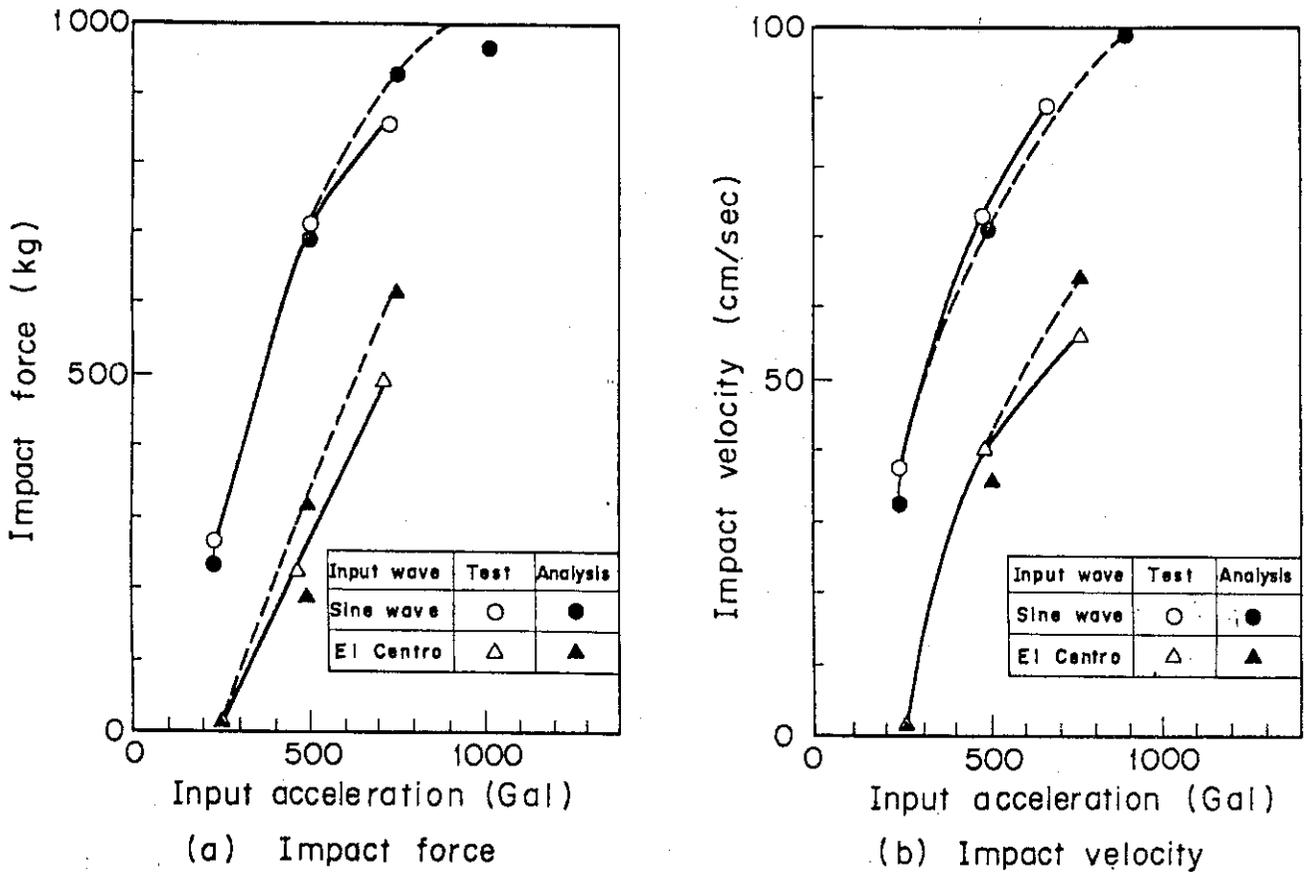
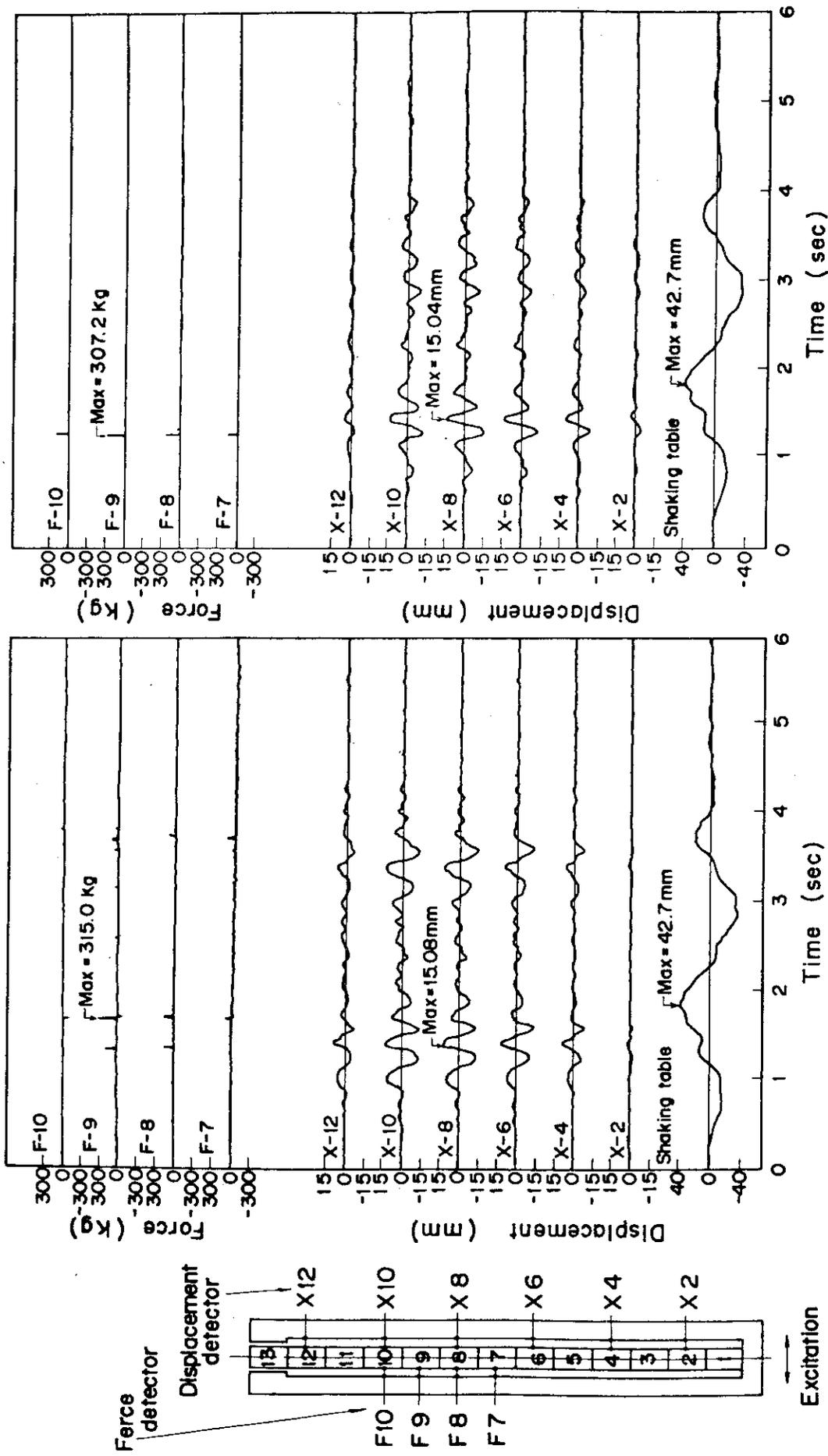


Fig. 7.11 Impact force and velocity vs. input acceleration



(a) Test results
 (b) Analytical results
 Fig. 7.10. Comparison between test and analysis of displacement and impact force
 (Input wave El Centro 1940 NS, max. acceleration 500 Gal)

8. 考 察

8.1 相似則

振動試験は $1/2$ 縮尺模型(重量は $1/8$)によって実施した。加振条件の決定および実験値から実際の炉心の地震時の挙動を推定するために、相似則を導いた。この相似則の1例としてコラムの運動に関する相似則を以下に示す。

慣性力 F_i と重力 F_g との比として無次元量 π は

$$\pi = \frac{F_i}{F_g} = \frac{\rho l^3 l / t^2}{\rho g l^3} = \frac{l}{g t^2} \quad (8.1)$$

ここで、 l , t , ρ , g はそれぞれ長さ、時間、密度、重力の加速度である。模型と実機が相似であるためには、両者について π が等しくなければならないから

$$\left. \begin{aligned} \pi_m &= \frac{l_m}{g t_m^2} \\ \pi_p &= \frac{l_p}{g t_p^2} \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

となる。ここで、添字 m と p はそれぞれ模型と実機を示す。

$$\pi_m = \pi_p \quad (8.3)$$

であるためには(8.2)式から

$$\frac{l_m}{t_m^2} = \frac{l_p}{t_p^2} \quad (8.4)$$

である。これから時間に関する相似比は

$$\begin{aligned} \frac{l_m}{l_p} &= \frac{1}{2} \\ t_m &= \frac{1}{\sqrt{2}} t_p \end{aligned} \quad (8.5)$$

となる。同様にして、振動数，速度，加速度の相似比はそれぞれ $\sqrt{2}$ ， $\sqrt{2}$ ，1である。

8.2 試験結果から実機の実機特性検討

(1) コラムに対する地震力の方向

5章で記述したように、六角ブロックの面と面が衝突する方向(X方向)からの地震力に対して最大衝撃力を示し、角と角の方向(Y方向)では最小、これらの中間の方向では両者の中間の値を示すものと予想される。よって、面と面が衝突する場合の最大衝撃値を設計に使用することによって、他のすべての方向からの地震力に対して安全側の設計となる。

(2) コラム上端のギャップ幅

5章で明らかにしたように、上端ギャップ幅を少なくすることによって、コラムは両端支持はり形の振動形状を示し、上端ギャップ幅が大きい場合よりも共振振動数を上昇させるとともに、コラムの変位量も小さくする。よって、実際の炉心では製作上および燃料交換上の要求を考慮しながら、可能な限り上端ギャップ幅を小さくするか、または上端を拘束することによって炉心の耐震性を増すことができる。

(3) コラム上端からの圧縮力

炉心上下間のガス圧力差などによるコラム上端から下方へ加わる力は、コラムの見掛けの剛性を増加させ、コラム共振振動数の上昇とコラム変位とを小さくするように作用して、耐震上有利に働く。

(4) 実際の炉心コラムの共振振動数

本模型振動試験の500Gal程度の加振加速度において、コラムの共振振動数は2.5～3.5 Hzであった。実際の炉心のコラムの共振振動数は、相似側を使用して容易に推定することができる。すなわち、模型の共振振動数に $1/\sqrt{2}$ を乗じて、実際の炉心コラムの共振振動数を求めることができ、その値は1.8～2.5 Hzとなる。

(5) 実際の炉心内のコラムの最大変位

実際の炉心部における地震動における最大加速度を500Gal程度と予想するとコラムの最大変位は20～40 mm (Fig. 5.5, 正弦波加振として最悪の場合を考慮して)にもなる。実際の炉心内のコラムでは、この値の2倍の40～80 mmとなる。実際の炉心内の最大コラムギャップを4 mm、炉心横断面のコラム数を15列と仮定すれば、積算ギャップ量は56 mmとなり、最悪の設計条件では、コラムは炉心ギャップ積算量だけたわむことが予想される。よって、地震時には最悪の条件下でも、制御棒または後備停止系によって炉は安全に停止できるように設計する必要性が明らかにされた。

9. 結 論

ブロック型燃料高温ガス炉炉心の基本構成要素である1本のコラムの振動試験を実施して、2次元立面内における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

となる。同様にして、振動数，速度，加速度の相似比はそれぞれ $\sqrt{2}$ ， $\sqrt{2}$ ，1である。

8.2 試験結果から実機の実機特性検討

(1) コラムに対する地震力の方向

5章で記述したように、六角ブロックの面と面が衝突する方向(X方向)からの地震力に対して最大衝撃力を示し、角と角の方向(Y方向)では最小、これらの中間の方向では両者の中間の値を示すものと予想される。よって、面と面が衝突する場合の最大衝撃値を設計に使用することによって、他のすべての方向からの地震力に対して安全側の設計となる。

(2) コラム上端のギャップ幅

5章で明らかにしたように、上端ギャップ幅を少なくすることによって、コラムは両端支持はり形の振動形状を示し、上端ギャップ幅が大きい場合よりも共振振動数を上昇させるとともに、コラムの変位量も小さくする。よって、実際の炉心では製作上および燃料交換上の要求を考慮しながら、可能な限り上端ギャップ幅を小さくするか、または上端を拘束することによって炉心の耐震性を増すことができる。

(3) コラム上端からの圧縮力

炉心上下間のガス圧力差などによるコラム上端から下方へ加わる力は、コラムの見掛けの剛性を増加させ、コラム共振振動数の上昇とコラム変位とを小さくするように作用して、耐震上有利に働く。

(4) 実際の炉心コラムの共振振動数

本模型振動試験の500Gal程度の加振加速度において、コラムの共振振動数は2.5～3.5 Hzであった。実際の炉心のコラムの共振振動数は、相似側を使用して容易に推定することができる。すなわち、模型の共振振動数に $1/\sqrt{2}$ を乗じて、実際の炉心コラムの共振振動数を求めることができ、その値は18～25 Hzとなる。

(5) 実際の炉心内のコラムの最大変位

実際の炉心部における地震動における最大加速度を500Gal程度と予想するとコラムの最大変位は20～40 mm (Fig. 5.5, 正弦波加振として最悪の場合を考慮して)にもなる。実際の炉心内のコラムでは、この値の2倍の40～80 mmとなる。実際の炉心内の最大コラムギャップを4 mm、炉心横断面のコラム数を15列と仮定すれば、積算ギャップ量は56 mmとなり、最悪の設計条件では、コラムは炉心ギャップ積算量だけたわむことが予想される。よって、地震時には最悪の条件下でも、制御棒または後備停止系によって炉は安全に停止できるように設計する必要性が明らかにされた。

9. 結 論

ブロック型燃料高温ガス炉炉心の基本構成要素である1本のコラムの振動試験を実施して、2次元立面内における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。本耐震試験と解析とによって得られた結果は次のように要約できる。

- (1) 炉心内のコラムは、ブロックのロッキング振動によるソフトスプリング特性と境界との衝突によるがた系のハードスプリング特性との両特性を有する。
- (2) コラムは境界と衝突しない場合には、コラム下端から $2/3$ 長付近で折点を生じ、ここが腹となる振動モードを示す。一方、衝突する場合には、コラムは中央より少し上部を腹として、複数個のブロックが境界へ張り付く振動モードを示す。
- (3) 加振加速度レベルが低く加振振動数が高い場合、あるいは加振加速度レベルが高く加振振動数が低い場合には、コラムは分数調波振動をする。
- (4) コラムは非線形の共振特性を有し、加振変位振幅の増加に従って最大応答変位を生じる加振振動数は低下する。この加振振動数は加振振動数の上昇と降下試験によって異なり、コラムの共振に跳躍現象がある。
- (5) 衝突速度、衝突加速度および衝撃反力の3者の値には相互に比例関係がある。最大衝撃値を生じる加振振動数は加振加速度の増加に従って上昇する。
- (6) ギャップ幅の増加に従って最大衝撃反力が生じる加振振動数は低下し、衝突する加振振動数範囲は狭ばまるが、最大値は大きくなる。
- (7) コラムの加振方向による振動モードおよび最大変位の差は顕著ではないが、コラムの角方向(Y方向加振)では面方向(X方向加振)に比較して、コラムの振回りが発生しやすくなり、衝撃反力も低目になる。
- (8) コラム上端のギャップ幅の増加は、コラムの最大変位点の位置を押し上げ、コラムは片持はりに近い形の振動形状を取るとともに、分数調波振動を生じやすくなる。
- (9) コラム上方からの力の増加は、コラムの最大変位点の位置を押し下げるとともにコラムの見掛けの剛性を増加させる。
- (10) 地震波による最大衝撃反力は正弦波加振の場合の40~75%の値である。ビート波では正弦波のものよりもわずかに低目か同じ程度である。
- (11) コラムの振動解析法を導びき、シミュレーション解析を実施し、計算値が実験値と良く一致することを示した。ここで示した解析法は、コラムの振動解析のため有効であることが確認できた。
- (12) 実験結果から相似則を使用して実際の炉心の地震応答値を推定した。これらのデータは実際の炉心の耐震設計に有用である。

謝 辞

本研究に当り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 哲男部長ならびに助言をいただいた東京大学生産技術研究所柴田 碧教授に深く感謝します。本研究の振動試験(11)は日本原子力研究所と富士電機製造(株)との委託研究契約に基づき、日本原子力研究所が計画し、富士電機製造(株)において実施された。本振動試験を担当した富士電機製造(株)

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。本耐震試験と解析とによって得られた結果は次のように要約できる。

(1) 炉心内のコラムは、ブロックのロッキング振動によるソフトスプリング特性と境界との衝突によるがた系のハードスプリング特性との両特性を有する。

(2) コラムは境界と衝突しない場合には、コラム下端から $2/3$ 長付近で折点を生じ、ここが腹となる振動モードを示す。一方、衝突する場合には、コラムは中央より少し上部を腹として、複数個のブロックが境界へ張り付く振動モードを示す。

(3) 加振加速度レベルが低く加振振動数が高い場合、あるいは加振加速度レベルが高く加振振動数が低い場合には、コラムは分数調波振動をする。

(4) コラムは非線形の共振特性を有し、加振変位振幅の増加に従って最大応答変位を生じる加振振動数は低下する。この加振振動数は加振振動数の上昇と降下試験によって異なり、コラムの共振に跳躍現象がある。

(5) 衝突速度、衝突加速度および衝撃反力の3者の値には相互に比例関係がある。最大衝撃値を生じる加振振動数は加振加速度の増加に従って上昇する。

(6) ギャップ幅の増加に従って最大衝撃反力が生じる加振振動数は低下し、衝突する加振振動数範囲は狭ばまるが、最大値は大きくなる。

(7) コラムの加振方向による振動モードおよび最大変位の差は顕著ではないが、コラムの角方向(Y方向加振)では面方向(X方向加振)に比較して、コラムの振回りが発生しやすくなり、衝撃反力も低目になる。

(8) コラム上端のギャップ幅の増加は、コラムの最大変位点の位置を押し上げ、コラムは片持はりに近い形の振動形状を取るとともに、分数調波振動を生じやすくなる。

(9) コラム上方からの力の増加は、コラムの最大変位点の位置を押し下げるとともにコラムの見掛けの剛性を増加させる。

(10) 地震波による最大衝撃反力は正弦波加振の場合の40~75%の値である。ビート波では正弦波のものよりもわずかに低目か同じ程度である。

(11) コラムの振動解析法を導びき、シミュレーション解析を実施し、計算値が実験値と良く一致することを示した。ここで示した解析法は、コラムの振動解析のため有効であることが確認できた。

(12) 実験結果から相似則を使用して実際の炉心の地震応答値を推定した。これらのデータは実際の炉心の耐震設計に有用である。

謝 辞

本研究に当り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 哲男部長ならびに助言をいただいた東京大学生産技術研究所柴田 碧教授に深く感謝します。本研究の振動試験(11)は日本原子力研究所と富士電機製造(株)との委託研究契約に基づき、日本原子力研究所が計画し、富士電機製造(株)において実施された。本振動試験を担当した富士電機製造(株)

の井出朗主務, 早川 均氏, 新貝和照研究員に感謝します。また振動台は清水建設(株)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清水建設(株)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・センタの中沢甫夫マネージャ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) Ishizuka, H., et al., Trans. 4th Int. Conf. SMiRT, K 7/9, (1977).
- (5) Ikushima, T., BNL-50689, 29~44 (1977).
- (6) 青地哲男他, JAERI-M 6845, (1977).
- (7) Ikushima, T., et al. JAERI-M 7727, (1978).
- (8) 幾島 毅他, 日本原子力学会誌, 22-1, 55~67 (1980).
- (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) 富士電機製造(株), 多目的高温ガス実験炉炉心耐震基礎試験報告書(委託研究), 昭和51年12月

の井出朗主務, 早川 均氏, 新貝和照研究員に感謝します。また振動台は清水建設(株)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清水建設(株)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・センタの中沢甫夫マネージャ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) Ishizuka, H., et al., Trans. 4th Int. Conf. SMiRT, K7/9, (1977).
- (5) Ikushima, T., BNL-50689, 29~44 (1977).
- (6) 青地哲男他, JAERI-M 6845, (1977).
- (7) Ikushima, T., et al. JAERI-M 7727, (1978).
- (8) 幾島 毅他, 日本原子力学会誌, 22-1, 55~67 (1980).
- (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) 富士電機製造(株), 多目的高温ガス実験炉炉心耐震基礎試験報告書(委託研究), 昭和51年12月

付 録

振動試験条件の明細と使用計測機器

振動試験条件の総括表を Table A.1 に，振動試験条件明細表を Table A.2 に，使用計測機器は Table A.3 にそれぞれ示す。

Table A.1 振動試験条件総括表

記号	試験名	主パラメータ	備考
A	支持枠の振動試験(1)		100, 200, 500, 700 gal
B	" (2)(衝突板あり)		100, 200, 500, 700 gal
C	スイープ試験 0° (予)	100, 150, 200, 350, 500gal	
D	" 90° (〃)	100, 200, 500, 800gal	
E (EA)	スイープ試験 90°	100, 150, 200, 250, 300, 350, 600, 900 gal	
FA	" (オリフィス重量増)	200, 300, 600gal	
FB	" (オリフィスギャップ10mm)	100, 150, 200, 300 gal	
G	コラム安定限界試験 90°	1.0, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0 Hz	
H	ステップ波試験 90°	ステップ波2種	
K	正弦波試験 (90°, 衝突板 gap, 15mm)	150, 300, 600, 900 gal	
L	" (0°, 衝突板 gap 25mm)	250, 500 gal	
M	" (0°, 衝突板 gap 5mm)	250, 500gal	
N	ランダム波試験 (")	250, 500 gal	
P	ビート波試験 (")	2.5Hz ビート波	5 C/beat
Q	正弦波試験 (0°, 衝突板 gap 15mm)	250, 500, 750 gal	
R	ランダム波試験 (")	250, 500, 750 gal	
S	ビート波試験 (")	2.5Hz 及 3.5Hz ビート波	10C/beat
T	定振幅正弦波試験 (")	5, 15, 25mm	
U	正弦波試験 (オリフィスギャップ増)	250, 500 gal	
V	ランダム波試験 (")	250, 500 gal	
W	ビート波試験 (オリフィスギャップ増)	2.5Hz 及 3.5Hz ビート波	10C/beat
X	コラム安定限界試験 0°	1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0Hz	
Y	ステップ波試験 0°	ステップ波2種	
YA	ランダム波試験 (0°, 衝突板ギャップ100mm)	500 gal	
Z	スイープ試験 0°	150, 250, 500, 750	
ZA	" (オリフィス重量増)	150, 250 gal	
ZC	" (オリフィスギャップ10mm)	150, 250 gal	
ZD	ステップ波試験 (")	ステップ波1種	

Table A.2 振動試験条件明細表

記号	試験名	主パラメータ	副パラメータ	データ番号
A	支持枠の特性(1)	100 gal	3~30Hz 不連続	
		200 "	5~21Hz 連続	
		500 "	" "	
		700 "	5~20Hz "	
		10 Hz	500, 1000, 1300, 1500 gal	
B	支持枠の特性(2)	100 gal	1~30Hz 不連続	
		500 "	5~19Hz 連続	
		700 "	5~18Hz "	
C	予備スイープ試験 0°方向	100 gal	1~15Hz 不連続	
		150 "	1~10Hz "	
		200 "	1~5Hz "	
			5~20Hz 連続	
		350 "	2~5Hz 不連続	
		500 "	5~17Hz 連続 5~15Hz "	
D	予備スイープ試験 90°方向	100 gal	1~10Hz 不連続	
		200 "	1~10Hz "	
			5~20Hz 連続	
		500 "	5~15Hz "	
		(800 ")		
E	スイープ試験 90°方向	100 gal	1, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 2.5, 2.7, 3.0, 3.2, 3.5, 4, 6, 8, 10, 12, 15Hz	E1~16
		150 "	1, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, (2.2, 2.5, 2.7, 3.0), 3.2, 3.5, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 5, 4, 3, 2.7, 2.5, 2.2, 2.0, 1.7, 1.5, 1.2Hz	E17~ E44
		200 "	1, 1.2, 1.5, 1.7, 2.0, 2.2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 5, 4, 3, 2.5, 2.2, 2.0, 1.7, 1.5, 1.2, 1.0, 0.8Hz	E45~ E71
		250 "	1, 1.2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 7, 12, 15, 5, 4, 3, 2.5, 2.2, 2.0, 1.7,	E72~ E91

記号	試験名	主パラメータ	副パラメータ	データ番号
E (続)		300 gal	1.5, 1.2 Hz 1, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 5, 4, 3, 2.5, 2.0, 1.7, 1.5, 1.35 Hz	E92~108
		350 "	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 5, 3, 2.5, 2.2, 2.0, 1.7, 1.5 Hz	E109~123
		600 "	15, 12, 10, 8, 6, 5, 4.5, 4, 3.5, 3, 2.5, 2.2, 2.0 Hz	E124~136
		900 "	15, 12, 10, 8, 6, 5, 4.5, 4, 3.5, 3.0, 2.7 Hz	E137~147
		150 "	2, 2.2, 2.5, 2.7, 3.0, 3.2, 3.5, 4.0 Hz	EA1~EA8
FA	スリーブ試験 90°方向, オリフィス 重量増加	200 gal	1, 1.2, 1.5, 1.7, 2, 2.2, 2.5, 2.7, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 3, 2.5, 2.2, 2, 1.7, 1.5, 1.2 Hz	FA1~20
		300 "	(1), 1, 1.1, 3, 3.5, 5, 4.5, 3, 2.5, 2, 1.7, 1.5 Hz	FA21~32
		600 "	5, 4, 3.5, 3, 2.5, 2.2, 2, (1.5) Hz	FA33~40 ()内は 310 gal
FB	スリーブ試験 90°方向, オリフィス ギャップ10mm	100 "	0.8, 1, 1.2, 1.5, 1.7, 2, 2.2, 2.5, 2.7, 3, 3.2, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7, 8, 10, 4, 3, 2.5, 2, 1.5, 1.2, 1, 0.8 Hz	FB1~27
		200 "	0.8, 6, 8, 5, 4.5, 4, 3.5, 3.2, 3, 2.7, 2.5, 2, 1.7, 1.5, 1.2, 1 Hz	FB28~43
		300 "	8, 6, 5, 4.5, 3.5, 3.2, 3, 2.7, 2.5, 2.2, 2, 1.7, 1.5, 1.2 Hz	FB44~57
		150 "	0.8, 1, 1.2, 1.5, 2, 3 Hz	FB58~63
G	コラム安定限界試験 90°方向	1.0 Hz	100~280 gal	G 1
		1.2 "	100~250 "	G 2
		1.5 "	100~280 "	G 3
		1.7 "	100~360 "	G 4
		2.0 "	100~550 "	G 5
		2.5 "	100~700 "	G 6
		3.0 "	50~950 "	G 7
3.5 "	100~900 "	G 8		

記号	試験名	主パラメータ	副パラメータ	データ番号
G (続)		4.0 Hz 5.0 "	100~900 gal 100~900 "	G 9 G 10
H	ステップ波試験 90°方向	ステップ波 加速度限定 ステップ波	最大変位~30mm " ~63mm	H 1~6 H 8~9
K	正弦波試験 90°方向, 衝突板 ギャップ 15mm	150 gal 300 " 600 " 900 "	1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 6, 10, 2.3, 2.7 Hz 1, 2, 2.5, 2.7, 3, 3.2, 3.5, 4, 6, 8 Hz 1.5, 2, 3, 3.5, 4, 4.2, 4.5, 5, 6, 8, 10 Hz 2, 3, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 8, 10 Hz	K1~8 K39~40 K9~18 K19~29 K30~38
L	正弦波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ 25mm	500 " 250 "	1.5, 1.7, 2, 2.2, 2.5, 2.7, 3, 3.2, 3.5, 4, 5, 7, 10, 4, 3.7, 3.5, 3.2, 3 Hz 1, 1.2, 1.5, 1.7, 2, 2.2, 2.5, 2.7, 3, 3.5, 5, 7, 10, 3, 2.7, 2.5, 2.2 Hz	L1~18 L19~35
M	正弦波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ 5mm	250 " 500 "	1, 1.2, 1.5, 1.7, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 5.7, 6, 6.5, 7, 8, 10, 12, 15, 8, 7, 6.5, 6, 5.7, 5.5, 5, 2, 1.7, 1.5, 1.2, 1.0 Hz 1.5, 2, 3, 4, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 7.7, 8, 8.2, 8.5, 9, 10, 12, 15, 10, 9, 8.8, 8.5, 8.2, 8, 7.5 Hz	M1~32 M33~57
N	ランダム波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ 5mm	250 gal 500 "	EL-CENTO, TAFT, 茨城修正波 " " "	N7~9 N10~12
P	ビート波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ 5mm	2.5 Hz ビー ト波(5波/ ビート)	250, 500 gal	P4~5
Q	正弦波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ 15mm	250 gal	1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 3, 3.2, 3.5, 4, 5, 8, 10, 12, 4, 3.5, 3.2, 3, 1.6, 2, 2.5, 3 Hz	Q1~22

記号	試験名	主パラメータ	副パラメータ	データ番号
Q (続)		500 gal	15, 2, 2.5, 3, 3.5, 3.7, 4, 4.2, 4.5, 4.7, 5, 6, 8, 10, 12, 4.6, 4.5, 4.4, 4.3Hz	Q23~41
		750 gal	2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 4.7, 5, 5.2, 5.5, 5.7, 6, 8, 10, 12, 5.3,	Q42~57
R	ランダム波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ15mm	250 gal	EL-CENTRO, TAFT, 茨城修正波	R1~3
		500 "	" " "	R4~6
		750 "	" " "	R11~13
S	ビート波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ15mm	2.5Hzビート波	250, 500, 750 gal	S1, 2, 4
		3.5Hzビート波	250, 500, 750 gal	S5, 7, 8
T	定振巾正弦波試験 0°方向, 衝突板 ギャップ15mm	5mm	1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 5, 3.5, 3.3, 3.1, 2.5, 2.3, 2.2, 2, 2.2, 2.3, 2.4, 3.2, 3.3Hz	T1~19
		15mm	1.5, 1.7, 2, 2.7, 3.5, 1.7, 1.6, 1.5, 1.4Hz	T20~28
		25mm	1.2, 1.3, 1.4, (2), 2, 2.5, 1.5, 1.4, 1.3, 1.2Hz	T29~38
U	正弦波試験 0°方向, 衝突板ギャップ15mm オリフィス " 10mm	250 gal	1, 1.5, 2, 2.5, 2.7, 2.8, 2.9, 3.2, 3.5, 3.7, 4, 5, 7, 10, 4, 3.7, 3.5, 3.2, 3, 2.8, 2.5, 1.7, 1.2Hz	U1~23
		500 "	1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.2, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 10, 5, 4.5, 4.2, 4Hz	U24~41
V	ランダム波試験 0°方向 衝突板ギャップ15mm オリフィス " 10mm	250 gal	EL-CENTRO, TAFT, 茨城修正波	V3~5
		500 "	" " "	V6~8
W	ビート波試験 0°方向 衝突板ギャップ15mm オリフィス " 10mm	2.5Hzビート波	250, 500 gal	W1~2
		3.5Hzビート波	250, 500 gal	W3~4

記号	試験名	主パラメータ	副パラメータ	データ番号
X	コラム安定限界試験 0°方向	1.0 Hz	~260 gal	X 1
		1.5 "	~520 "	X 2
		2 "	~300 "	X 7
		3 "	~580 "	X 6
		4 "	~700 "	X 5
		5 "	~700 "	X 3
		7 "	~900 "	X 4
Y	ステップ波試験 0°方向	ステップ波	最大変位~15mm	Y 1~2
		加速度限定 ステップ波	" ~60mm	Y 3
Y A	ランダム波試験 0°方向	500 gal	EL-CENTO, TAFT, 茨城修正波	YA 1~3
Z	スイープ試験 0°方向	150 gal	1, 1.2, 1.5, 2, 2.2, 2.4, 2.7, 3, 3.5, 4, 5, 7, 10, 12, 15, 3, 2.5, 2, 1.5, 1.4, 1.2, 1, 0.9Hz	Z 2~24
		250 "	15, 12, 10, 8, 6, 4, 3.5, 3, 2.5, 2, 1.7, (1.5), 1.5, 1.3, 1.2Hz	Z 25~39
		500 "	15, 12, 10, 8, 6, 5, 4.5, 4, 3.5, 3, 2.5, 2, 1.7, 1.5Hz	Z 40~53
		750 "	12, 10, 8, 7, 6, 5, 4, 3.5, 3, 2.5, 2.2, 2Hz	Z 54~65
Z A	スイープ試験 0°方向 オリフィス重量増加	150 gal	1, 1.5, 2, 2.5, 2.7, 3, 3.5, 4, 5, 7, 10, 15, 3.5, 3, 2.5, 2.3, 2Hz	ZA 1~17
		250 "	1, 1.2, 1.4, 1.6, 2, 2.5, 3, 4, 6, 10, 3, 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.1 Hz	ZA 18~34
Z C	スイープ試験 0°方向 オリフィスギャップ10mm	150 gal	0.8, 1, 1.5, 1.7, 2, 2.2, 2.4, 2.6, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 2.7, 2.5, 2.3, 2, 1.7, 1.5, 1.2Hz	ZC 1~21
		250 "	2, 2.2, 2.5, 2.7, 3, 3.2, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 8, 10, 3, 2.5, 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2Hz	ZC 22~41
Z D	ステップ波試験 0°方向 オリフィスギャップ10mm	加速度限定 ステップ波	最大変位 62mm	Z 2

(注) 主パラメータ、副パラメータで()で示したものは、データを取り直したもので、条件が明確でないものを示す。

Table A.4 計測システム構成機器の仕様(2)

測定項目	検出器又は測定器の仕様	個数
加 速 度	圧電型加速度計 ENDEVCO製 2220M1 周波数範囲 2Hz～20KHz (4% up) 加速度範囲 5000G	5
	チャージアンプ ENDEVCO製 2735QW 加速度レンジ 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000, 3000G	5
	ひずみ型加速度変換器 共和電業製 AS-5C 加速度範囲 5G	10
	動ひずみ計 新興通信工業製 DS-6005F 周波数範囲 0～2KHz チャンネル数 6	2
衝 撃 反 力	衝撃反力測定機構 (ひずみゲージは新興通信工業製) 最大荷重 5 ton	9

Table A.5 記録用機器の仕様

機 器 名	仕 様	個 数
データレコーダ	(1) ティアック製 R 5 6 0 チャンネル数 1 4	1
	(2) ティアック製 R 2 8 0 チャンネル数 1 4	2
	(3) ティアック製 R 2 6 0 チャンネル数 7 (ランダム波入力用に使用)	1
電磁オッシログラフ	(1) 三栄測器製 5 L - 1 6 チャンネル数 6	1
	(2) 三栄測器製 5 L - 1 7 チャンネル数 1 2	1