

JAERI - M
88-085

水平二次元炉心模型による高温ガス炉の
炉心耐震試験と解析

1988年5月

幾島 毅・本間 敏秋*

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

水平二次元炉心模型による高温ガス炉の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 毅⁺・本間敏秋^{*}

(1988年4月6日受理)

ブロック型燃料で構成された高温ガス炉の炉心は、地震に対する耐力が十分に明らかでない。そこで、高温ガス炉が高地震地域に建設される場合には、十分な耐震性を明らかにしなければならない。

本報告は、炉心の水平断面一層燃料群と側方固定反射体群から構成された水平二次元炉心の縮尺模型による耐震試験と解析によって得られた結果をまとめたものであり、得られた成果の要約は次のとおりである。

- (1) 一軸加振の六角ブロックの角方向の加振条件および二軸同時加振条件において、炉心は楕円運動をする。低加振振動数において炉心は一体となって運動する。
- (2) 炉心周辺から中心方向へ炉心を締め付けることによって変位および側方支持反力を小さくできる。
- (3) 最大変位は二軸同時加振条件において発生する。最大側方支持反力は一軸加振の六角ブロックの平方向の加振条件において発生する。
- (4) 垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の試験結果から実際の炉心の応答特性は垂直二次元炉心模型の応答値から推定できる。
- (5) 地震波による側方支持反力は正弦波の場合の60%以下である。
- (6) 炉心の応答特性について試験結果と解析結果は良く一致した。

Two-dimensional Horizontal Model Seismic
Test and Analysis for HTGR Core

Takeshi IKUSHIMA⁺ and Toshiaki HONMA^{*}

Department of Power Reactor Projects
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received, April 6, 1988)

The resistance against earthquakes of high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) core with block-type fuels is not fully ascertained yet. Seismic studies must be made if such a reactor plant is to be installed in areas with frequent earthquakes.

The paper presented the test results of seismic behavior of a half scale two-dimensional horizontal slice core model and analysis. The following is a summary of the more important results.

- (1) When the core is subjected to the single axis excitation and simultaneous two-axis excitations to the core across-corners, it has elliptical motion. The core stays lumped motion at the low excitation frequencies.
- (2) When the load is placed on side fixed reflector blocks from outside to the core center, the core displacement and reflector impact reaction force decrease.
- (3) The maximum displacement occurs at simultaneous two-axis excitations. The maximum displacement occurs at the single axis excitation to the core across-flats.
- (4) The results of two-dimensional horizontal slice core model was compared with the results of two-dimensional vertical one. It is clarified that the seismic response of actual core can be predicted from the results of two-dimensional vertical slice core model.

⁺ Department of Nuclear Fuel Safety

^{*} Takasago Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries Co., Ltd.

- (5) The maximum reflector impact reaction force for seismic waves was below 60 percent of that for sinusoidal waves.
- (6) Vibration behavior and impact response are in good agreement between test and analysis.

Keywords: Seismic Test, Seismic Response, Vibration Test, HTGR Core, Block Type Fuel, Aseismic Design, Impact Response, Seismic Analysis, Nonlinear Vibration, Two-dimensional Horizontal Model

目 次

1. 緒 言	1
2. 炉心構造と試験模型	3
2.1 炉心構造	3
2.2 試験模型	3
3. 試験装置と試験内容	8
3.1 試験装置	8
3.1.1 相似則	8
3.1.2 試験模型	9
3.1.3 振動試験治具	10
3.1.4 振動台	10
3.1.5 一列ブロック模型および三列ブロック模型	11
3.1.6 測定装置	11
3.1.7 データ処理	12
3.2 試験内容	12
3.2.1 試験前検査	12
3.2.2 振動試験	13
3.2.3 試験後検査	15
4. 試験前検査	54
4.1 燃料ブロック変位測定器の校正試験	54
4.2 側方固定ブロック支持反力測定器の校正試験	54
5. 振動試験	58
5.1 正弦波応答試験	58
5.1.1 応答の一般的傾向	58
5.1.2 側方固定ブロック間キーの影響	59
5.1.3 加振加速度の影響	60
5.1.4 加振形式の影響	61
5.1.5 側方固定ブロック支持剛性の影響	66
5.1.6 側方固定ブロックのプリロードの影響	68
5.1.7 側方固定ブロック支持反力と燃料ブロック変位の相互関係	69
5.1.8 炉心の減衰特性	70
5.1.9 一列ブロック模型と三列ブロック模型の比較	70
5.2 地震応答試験	71
6. 試験後検査	153

7. シミュレーション解析	155
7.1 計算モデルと運動方程式	155
7.1.1 計算モデル	155
7.1.2 運動方程式	156
7.2 応答解析	171
8. 実際の炉心の応答特性	196
9. 結 論	219
謝 辞	222
参考文献	222

Contents

1. Introduction	1
2. Core structure and test model	3
2.1 Core structure	3
2.2 Test model	3
3. Test apparatus and procedure	8
3.1 Test apparatus	8
3.1.1 Similarity laws	8
3.1.2 Test model	9
3.1.3 Vibration test rig	10
3.1.4 Shaking table	10
3.1.5 Single-row model and three-row model	11
3.1.6 Instrumentation	11
3.1.7 Data aquisition	12
3.2 Test procedure	12
3.2.1 Pre-test	12
3.2.2 Vibration test	13
3.2.3 Inspection after vibration test	15
4. Pre-test	54
4.1 Stiffness test of displacement device	54
4.2 Side restraint stiffness test	54
5. Vibration test	58
5.1 Sinusoidal response test	58
5.1.1 Response characteristic	58
5.1.2 Effect of tied key between side blocks	59
5.1.3 Effect of input acceleration	60
5.1.4 Effect of excitation direction	61
5.1.5 Effect of side restraint stiffness	66
5.1.6 Effect of pre-load on side block	68
5.1.7 Relationship between side reaction force and fuel block displacement	69
5.1.8 Damping characteristic	70
5.1.9 Comparison between single-row model and three-row model	70
5.2 Seismic response test	71
6. Inspection after vibration test	153

7. Simulation analysis	155
7.1 Calculation model and equation of motion	155
7.1.1 Calculation model	155
7.1.2 Equations of motion	156
7.2 Response analysis	171
8. Estimation of response for proto-type core	196
9. Conclusion	219
Acknowledgements	222
References	222

List of Tables

Table 3.1	Similarity laws of the model
Table 3.2	Mechanical properties of graphites used on vibration test
Table 3.3	Detectors and measurement position
Table 3.4	Test instrumentation list
Table 3.5	Test scope
Table 5.1(a)	Resonant frequency and maximum displacement in the case of X-direction excitation
Table 5.1(b)	Resonant frequency and maximum displacement in the case of Y-direction excitation
Table 5.2(a)	Resonant frequency and maximum impact reaction force in the case of X-direction excitation
Table 5.2(b)	Resonant frequency and maximum impact reaction force in the case of Y-direction excitation
Table 5.3(a)	Resonant frequency maximum acceleration in the case of X-direction excitation
Table 5.3(b)	Resonant frequency and maximum acceleration in the case of X-direction excitation
Table 5.4	Resonant frequency
Table 5.5	Resonant frequency on displacement
Table 5.6(a)	Relative displacement in the case of X-direction excitation
Table 5.6(b)	Relative displacement in the case of Y-direction excitation
Table 5.6(c)	Relative displacement in the case X-Y circular excitation

Table 5.6(d)	Relative displacement in the case of X-Y elliptic excitation
Table 5.6(e)	Relative displacement in the case of X-Y 45° elliptic excitation
Table 5.6(f)	Relative displacement in the case of X-Y 45° axis excitation
Table 5.7	Maximum relative displacement
Table 5.8	Resonant frequency on impact reaction force
Table 5.9	Peak frequency and frequency at phase shift 90°
Table 5.10(a)	Damping ratio in case of hard support (Max. acceleration 250 Gal)
Table 5.10(b)	Damping ratio in case of intermediate support (Max, acceleration 250 Gal)
Table 5.10(c)	Damping ratio in case of pre-load support (Max, acceleration 250 Gal)
Table 5.10(d)	Damping ratio in case of soft support (Max. acceleration 250 Gal)
Table 5.11(a)	Maximum displacement in the case of seismic X-direction excitation
Table 5.11(b)	Maximum displacement in the case of seismic Y-direction excitation
Table 5.12(a)	Maximum impact force in the case of seismic X-direction excitation
Table 5.12(b)	Maximum impact force in the case of seismic Y-direction excitation
Table 5.13	Comparison of sinusoidal and seismic waves on relative displacement
Table 5.14	Comparison of sinusoidal and seismic waves on impact reaction force

Table 5.15	Comparison of sinusoidal and seismic waves on impact acceleration
Table 7.1	Calculation constant
Table 8.1	Multiplication factor for predicting seismic response values of actual HTGR core

List of Figures

Fig. 2.1	HTGR core and seismic test model
Fig. 2.3	Test model for horizontal two dimensional core
Fig. 3.1	Fuel block
Fig. 3.2	Detail of fuel block
Fig. 3.3	Fuel block (Photograph)
Fig. 3.4	Side reflector blocks
Fig. 3.5	Side reflector block (Photograph)
Fig. 3.6	Test rig and core model
Fig. 3.7	Test rig and core model (Photograph)
Fig. 3.8	Side reflector block support structure
Fig. 3.9	Side reflector block support structure (Photograph)
Fig. 3.10	Shaking table
Fig. 3.11	Performance of shaking table
Fig. 3.12	Three test models to investigate interaction of surrounding blocks
Fig. 3.13	Three-row and single row test models
Fig. 3.14	Test facility and data acquisition diagram
Fig. 3.15(a)	Instrument locations (I)
Fig. 3.16(b)	Instrument locations (II)
Fig. 3.16	Method for fuel block displacement measurement

- Fig. 3.17 Displacement measuring device for fuel block
 (Photograph)
- Fig. 3.18 Displacement measuring device for side reflector block
- Fig. 3.19 Displacement measuring device for side reflector block
 (Photograph)
- Fig. 3.20 Accelerometer location in fuel block
- Fig. 3.21 In-core load and acceleration measuring devices
 (Dimension in mm)
- Fig. 3.22 In-core load and acceleration measuring fuel block
 (Photograph)
- Fig. 3.23 Side reflector reaction measurement
- Fig. 3.24 Side reflector reaction measurement (Photograph)
- Fig. 3.25 Method for spring constant measurement of fuel block
 restoring characteristic
- Fig. 3.26 Method for spring constant measurement of side
 reflector block support
- Fig. 3.27 Two-axis excitation modes
- Fig. 3.28 Seismic wave and response spectrum
 (El Centro 1940 NS wave)
- Fig. 3.29 Seismic wave and response spectrum
 (El Centro 1984 EW wave)
- Fig. 3.30 Seismic wave and response spectrum
 (JAERI PR Hall 1964 NS wave)
- Fig. 3.31 Seismic wave and response spectrum
 (JAERI PR Hall 1964 EW wave)
- Fig. 3.32 Random wave and response spectrum (White noise)
- Fig. 3.33 Input wave and response spectrum (Single axis wave)
- Fig. 3.34 Input wave and response spectrum (Two-axis simultaneous
 wave)

- Fig. 3.35 Input wave and acceleration locus (I)
(El Centro 1940 NS, EW waves)
- Fig. 3.36 Input wave and acceleration locus (II)
(JAERI PR Hall 1964 NS, EW waves)
- Fig. 3.37 Input wave and acceleration locus (III)
(JAERI PR Hall 1964 NS, EW waves)
- Fig. 3.38 Location number of fuel blocks and side reflector blocks
- Fig. 4.1 Displacement-strain relationship of block center bar
(Block No. 8-1)
- Fig. 4.2 Displacement-strain relationship of block center bar
(block No. 8-6)
- Fig. 4.3 Displacement-strain relationship of block center bar
(Block No. 8-11)
- Fig. 4.4 Load-strain relationship of side support bar in case
of hard support condition
- Fig. 4.5 Load-strain relationship of side support bar in case
of intermediate support condition
- Fig. 4.6 Load-strain relationship of side support bar in case
of soft support condition
- Fig. 5.1 Sinusoidal wave response (4.1 Hz, Max. acceleration
250 Gal, X-direction, Hard support, With reflector
key)
- Fig. 5.2 Sinusoidal wave response (4.0 Hz, Max. acceleration
250 Gal, Y-direction, Hard support, With reflector
key)
- Fig. 5.3 Sinusoidal wave response (3.9 Hz, Max. acceleration
250 Gal, Two-axes X-Y Hard support, With reflector
key)

- Fig. 5.4 Sinusoidal wave response (3.8 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.5 Sinusoidal wave response (3.9 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y (i) Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.6 Sinusoidal wave response (4.0 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y (j) Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.7 Response characteristics (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.8 Impact acceleration and impact reaction force of reflector block (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.9 Impact acceleration and impact force of block (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.10 Total gap of each row of core
- Fig. 5.11 Comparison between with reflector block key and without reflector key (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)
- Fig. 5.12 Impact reaction force as a function of reflector key (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)
- Fig. 5.13 Relative displacement characteristics (Sinusoidal wave, With reflector key)
- Fig. 5.14 Effect of input acceleration on relative displacement (With reflector key)

- Fig. 5.15 Impact reaction force characteristics (Sinusoidal wave,
With reflector key)
- Fig. 5.16 Effect of input acceleration on impact reaction force
(With reflector key)
- Fig. 5.17 Impact acceleration characteristics (Sinusoidal wave,
With reflector key)
- Fig. 5.18 Effect of input acceleration on impact acceleration
(With reflector key)
- Fig. 5.19 Relationship between input acceleration and resonant
frequency (With reflector key)
- Fig. 5.20 Displacement characteristics (Hard support, With
reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.21 Resonance frequency as a function of input acceleration
(Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.22 Comparison core behavior and reaction force among
excitation direction (Sinusoidal 3.9 ~ 4Hz, Max.
acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.23 Effect of input acceleration on relative displacement
of resonant frequency (Hard support, With reflector
key)
- Fig. 5.24 Impact reaction force characteristics (Hard support,
With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.25 Input acceleration vs. resonance frequency
(Hard support, with reflector key)
- Fig. 5.26 Impact reaction force distribution around the core
(Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, With
reflector key)
- Fig. 5.27 Effect of input acceleration on impact reaction force
(Hard support, With reflector key)

- Fig. 5.28 Impact reaction force as a function of input
 acceleration (Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.29 Effect of input acceleration on impact reaction force
 of vector direction (Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.30 Impact acceleration characteristics (Hard support,
 With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.31 Effect of excitation direction on impact acceleration
 (Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, With
 reflector key)
- Fig. 5.32 Effect of input acceleration on impact acceleration
 (Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.33 Impact acceleration as a function of input
 acceleration in case of sinusoidal excitation
- Fig. 5.34 Effect of support stiffness on relative displacement
 characteristics (Sinusoidal wave, Max. acceleration
 250 Gal, Excitation X-direction, With reflector key)
- Fig. 5.35 Relative displacement as a function of input
 acceleration (With reflector key)
- Fig. 5.36 Maximum displacement vs. side support stiffness
 (Max. acceleration 250 Gal, With reflector key)
- Fig. 5.37 Effect of support stiffness on impact reaction force
 characteristics (Sinusoidal wave, Max. acceleration
 250 Gal, Excitction X-direction, With reflector key)
- Fig. 5.38 Impact reaction force as a function of input
 acceleration (With reflector key)
- Fig. 5.39 Maximum impact reaction force vs. side support
 stiffness (Max. acceleration 250 Gal, With reflector
 key)

- Fig. 5.40 Effect of support stiffness on impact acceleration characteristics (Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, Excitation X-direction, With reflector key)
- Fig. 5.41 Impact acceleration as a function of input acceleration (With reflector key)
- Fig. 5.42 Maximum impact acceleration vs. side support stiffness (Max. acceleration 250 Gal, With reflector key)
- Fig. 5.43 Effect of pre-load on relative displacement (With reflector key)
- Fig. 5.44 Effect of pre-load on impact reaction force (With reflector key)
- Fig. 5.45 Effect of pre-load on impact acceleration (With reflector key)
- Fig. 5.46 Relationship between displacement and reaction force and between displacement and acceleration (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 5.47 Comparison between two-dimensional horizontal core model, three row model and single row model on relative displacement (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)
- Fig. 5.48 Comparison between two-dimensional horizontal core model, three row model and single row model on impact reaction force (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)
- Fig. 5.49 Seismic wave response (El Centro 1940 NS Max. acceleration 500 Gal, X-direction Hard support, With reflector key)

- Fig. 5.50 Seismic wave response (El Centro 1940 NS Max.
acceleration 500 Gal Y-direction Hard support, with
reflector key)
- Fig. 5.51 Seismic wave response (El Centro 1940 NS, EW, Max.
acceleration 500 Gal, Two-axes, Hard support, with
reflector key)
- Fig. 5.52 Seismic wave response (JAERI PR Hall 1964 EW, Max.
acceleration 500 Gal, X-direction, Hard support,
With reflector key)
- Fig. 5.53 Seismic wave response (JAERI PR Hall 1964 EW, Max.
acceleration 50 Gal, Y-direction, Hard support, With
reflector key)
- Fig. 5.54 Seismic wave response (JAERI PR Hall 1964 EW, 1964 NS,
Max. acceleration 500 Gal, Two-axes excitation, Hard
support, With reflector key)
- Fig. 5.55 Seismic wave response (White noise, Max. acceleration
500 Gal, X-direction, Hard support, With reflector
key)
- Fig. 5.56 Seismic wave response (White noise, Max. acceleration
500 Gal, Y-direction, Hard support, With reflector
key)
- Fig. 5.57 Relative displacement vs. input acceleration (Random
wave response, Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.58 Impact reaction force vs. input acceleration (Random
wave response, Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.59 Impact force vs. input acceleration (Random wave
response, Excitation X-direction, Hard support, With
reflector key)

- Fig. 5.60 Impact acceleration vs. input acceleration (Random wave response, Hard support, With reflector key)
- Fig. 5.61 Effect of input wave on relative displacement and impact reaction force distribution in core (Max. acceleration 500 Gal)
- Fig. 5.62 Maximum displacement vs. support stiffness and seismic wave (Excitation X-direction, Max. acceleration 500 Gal)
- Fig. 5.63 Maximum impact reaction force vs. support stiffness and seismic wave (Excitation X-direction, Max. acceleration 500 Gal)
- Fig. 6.1 Positions of defect block after test
- Fig. 6.2 Defect blocks
- Fig. 7.1 Two-dimensional horizontal core analytical model (I)
- Fig. 7.2 Two-dimensional horizontal core analytical model (II)
- Fig. 7.3 Block arrangement and impact model
- Fig. 7.4 Side reflector block model
- Fig. 7.5 Sign of displacement, force and moment
- Fig. 7.6 Block displacement
- Fig. 7.7 Gap between blocks
- Fig. 7.8 Determination of block impact
- Fig. 7.9 Undefined case of block impact
- Fig. 7.10 Impact force components
- Fig. 7.11 Location number of fuel blocks and side reflector blocks
- Fig. 7.12 Seismic behavior of two-dimensional horizontal slice core model (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

- Fig. 7.13 Displacement of block on X-axis position (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.14 Displacement of block on Y-axis position (Excitation x-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.15 Impact acceleration of block on X-axis position (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.16 Impact acceleration of block on Y-axis position (Excitation X-direction, 4.1 Hz Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.17 Impact reaction force distribution of reflector block (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.18 Impact reaction force distribution of reflector block (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.19 Calculation model of three-row core
- Fig. 7.20 Seismic behavior of Three-row model (Excitation X-direction, 3.8 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.21 Displacement of block (Excitation X-direction, 3.8 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.22 Impact acceleration of block (Excitation X-direction 3.8, 3.9 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.23 Displacement of block (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 7.24 Impact reaction force of reflector block (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

- Fig. 8.1 Comparison between vertical core and horizontal core
models on relative displacement (Excitation
X-direction, Hard support, With reflector key, Max.
acceleration 250 Gal)
- Fig. 8.2 Restoring force of two-dimensional vertical core
column and two-dimensional horizontal core block
- Fig. 8.3 Comparison between vertical core and horizontal core
models on impact acceleration (Excitation X-direction,
Hard support, With reflector key, Max. acceleration
250 Gal)
- Fig. 8.4 Comparison between vertical core and horizontal core
models on impact reaction force (Excitation
X-direction, Hard support, With reflector key, Max.
acceleration 250 Gal)
- Fig. 8.5 Comparison between vertical core and horizontal core
models (Excitation X-direction, Hard support, With
reflector key, Max. acceleration 250 Gal)
- Fig. 8.6 Effect of support stiffness on relative displacement
- Fig. 8.7 Effect of support stiffness on impact reaction force
- Fig. 8.8 Effect of input wave on relative displacement, impact
acceleration and impact reaction force distribution
along column
- Fig. 8.9 Effect of input wave on relative displacement and
impact reaction force distribution in core (Max.
acceleration, Sinusoidal wave 250 Gal, El Centro wave
500 Gal, White noise wave 500 Gal)
- Fig. 8.10 Dowel force as a function of side support stiffness
- Fig. 8.11 Effect of excitation frequency on dowel force
distribution along column

- Fig. 8.12 Dowel force distribution along column
- Fig. 8.13 Dowel force distribution along column vs. column
position in core
- Fig. 8.14 Fuel elements and model
- Fig. 8.15 Comparison between similarity laws and computer
prediction on relative displacement
- Fig. 8.16 Comparison between similarity laws and computer
prediction on impact reaction force
- Fig. 8.17 Dowel force vs. input acceleration
- Fig. 8.18 Core radial load distribution along axial direction
- Fig. 8.19 Core circumferential load distribution
- Fig. 8.20 Impact reaction force vs. input acceleration

1. 緒 言

ブロック型燃料高温ガス炉炉心は、六角柱状の燃料体と可動反射体を積み上げたコラムによって炉心部を構成し、その周辺に側方固定反射体を積み上げたコラムが配置されている。炉心部は黒鉛を主要構成材料として製作されている。コラム間には、燃料交換を容易にするために、炉心の初期状態において、あらかじめ小さなギャップが設けられている。高速中性子照射によって黒鉛材料は収縮するから、燃料体と反射体は中性子照射量に従って収縮する。よって、コラム間ギャップは炉の運転時間に従って増加する。そして、このギャップは最大2～4 mmになることがある。

コラム中の燃料体と可動反射体の六角柱状ブロックはダウエルによって上下方向に連結されている。このダウエルはブロックの水平方向の層間ずれを制限するが、垂直方向の変位とロッキング運動を許容する形状となっている。このようにルーズに結合されたブロックを積み上げたコラム群から構成された炉心では、地震荷重によってコラムは曲がり、コラム相互間で衝突を繰り返す。ブロックのロッキング運動によっても、上下のブロック間で衝突を繰り返す。

炉心内のブロックの総数は、実験炉級の小型炉心では約千個、実用炉の大型炉心では約8千個にもなる。地震時には、炉心内のブロック衝突を繰り返して、複雑な振動挙動を示す。このような炉心が想定される最大地震動に対して

- (a) 炉心構成要素が健全であり、
- (b) 余熱除去が可能な炉心配列が維持され、
- (c) 炉停止機能の保持と炉安全停止状態を維持できる、

ことが要求される。これらの要求を炉心が満足していることを評価するには、次の三つの方法がある。

- (1) 実際の炉心模型による耐震試験によって耐震性を確認する。
- (2) 相似則に合わせた縮尺模型による耐震試験を実施して、その試験結果に相似則を適用して実際の炉心の耐震性を推定する。
- (3) 炉心地震解析法と計算プログラムの開発、計算プログラムの有効性と入力データの確かさを縮尺模型による耐震試験によって検証し、そして実証された計算プログラムによって実際の炉心の地震解析を実施し、実際の炉心の耐震性を推定する。

これらの方法のうち第一の方法を採用する場合には、実際の炉心の設計変更が無いこと、使用可能な振動試験装置によって実規模の耐震試験が可能であることが必要である。第二の方法を採用する場合には、実際の炉心の設計変更が無いことが必要である。第三の方法を採用する場合には、実際の炉心の設計変更を許容できるような耐震試験計画を立案でき、耐震試験成果が広範囲の炉心設計に応用できる。

このように炉心構造の変更が生じた場合にも研究成果が容易に生かされること、ブロック型燃料炉心から構成された高温ガス炉一般の炉心耐震研究に寄与できることから上述の第三の方法による耐震試験計画を作成した。そして、一本のコラム模型および7本のコラムから構成された一

領域炉心模型による耐震試験と解析を実施した。その結果、コラムのソフトスプリング特性とコラム衝突のハードスプリング特性^{1),2)} およびコラムの振れ回り運動^{3),4)}を開発した。その結果コラムの振動特性が明らかになった。

しかし、実際の炉心は三次元的な広がりを持つので、三次元炉心模型による耐震試験によって炉心の耐震性を明らかにすることが望ましい。三次元炉心模型による試験は費用が多額になること、炉心内の変位計測が困難であることから、適切な二次元炉心模型による試験結果から、三次元炉心の振動特性を推定することが望ましい。このような考えに基づいて、垂直二次元炉心模型による耐震試験を実施した。そして、炉心の変位特性、側方支持反力特性、ダウエルカ特性、応答特性に及ぼす側方支持剛性の影響についてのデータ^{7),8)}を得るとともに垂直二次元炉心の地震応答解析プログラムの開発についてのデータを得た。^{9)~12)}

水平二次元炉心模型による耐震試験について、Olsen ら^{13)~16)}は水平一軸および二軸加振試験を実施して、炉心の変位特性と衝突特性および一軸加振と二軸加振による応答特性の差を明らかにした。武藤ら¹⁷⁾は水平一軸加振試験を実施して、炉心側方固定反射体の支持反力特性および六角形状ブロックに対する加振方向変化による支持反力変化を明らかにした。しかし、これらの研究において、炉心側方固定反射体の支持剛性の変化による支持反力の変化については明らかにされていない。

そこで、高温ガス実験炉炉心の $\frac{1}{2}$ 縮尺の水平二次元炉心耐震試験模型を製作し、これを振動台上に設置して、正弦波および地震波などのランダム波による水平方向加振試験を実施した。そして、支持剛性の変化による炉心変位特性や支持反力特性、一軸と二軸加振および二軸加振の加振形式の変化による炉心の変位特性や支持反力特性の変化について試験によって明らかにした。さらに、シミュレーション解析を行い、計算値と実験値を比較して解析法の妥当性を明らかにした。

なお、試験体は昭和52年当時の高温ガス実験炉の炉心の $\frac{1}{2}$ 縮尺模型であるが、ここで得られた炉心の耐震性に関する基本的特性（例えば、変位特性、側方支持反力特性、入力波の影響、減衰特性など）、垂直2次元炉心と水平2次元炉心の地震挙動特性の差、および炉心地震応答解析手法開発などの成果は、炉心構成が異なる場合でも、炉心耐震設計や耐震安全性評価に役立つ有用な資料となるものと考えられる。

2. 炉心構造と試験模型

2.1 炉心構造^(*)

ブロック型燃料高温ガス炉の炉心は¹⁸⁾ Fig. 2.1 に示すように、燃料体、可動反射体、側方固定反射体、炉心支持ブロック、炉心支持ポスト、炉床部などの炉心を構成する黒鉛ブロック群（炭素レンガを含む）および炉心支持構造物、炉心拘束構造物、コアバレルなどの炉心を支持する鋼構造物から構成される。炉心の下部は原子炉圧力容器内に取り付けられたダイヤグリッド板によって支持される。炉心の側方拘束構造物はコアバレルに取り付けられ、コアバレルはラジアルキーによって原子炉圧力容器内の定められた場所に配置される。

炉心コラムは炉心支持黒鉛ブロック上に配置される。炉心コラムのうち燃料体コラムは、下段の2層の黒鉛製可動反射体、その上7層の燃料体、さらにその上2層の黒鉛製可動反射体、そして最上段には流量調整用の鋼製のオリフィスブロックから構成される。燃料体コラム周辺の可動反射体コラムは、黒鉛製可動反射体11層と最上段のオリフィスブロックから構成される。炉心支持要素下部の炉心支持用の黒鉛ポストは、炉床部の黒鉛ブロックおよび炭素レンガによって支持される。炉心支持ポスト部分の空間は、炉心から流出する高温のヘリウムガスを合流させる高温プレナムを形成する。炉床部は、黒鉛ブロックと炭素レンガなどの断熱効果の良好な耐熱材料によって多重層を形成しており、これらは炉心支持板を介してダイヤグリッドによって炉心の所定の位置に配置される。

炉心は7列のコラム単位で制御棒領域および燃料交換領域を形成しており、7列コラムの中央コラムは制御棒と後備停止系用のチャンネルとなっている。炉心支持要素上面の可動反射体、燃料体、オリフィスブロックはそれぞれ三個のダウエルによって位置決めされる。このダウエルのせん断面が同一平面に揃うことを避けるために、制御棒の挿入コラムのブロック上下境界面は、周辺の6列のコラムのものよりも少し下方になるように、コラム最下段のブロックを標準の可動反射体よりも短かく設計している。

7列コラムの一領域単位ごとに一個の炉心支持要素があり、これを三本の炉心支持ポストが支える。炉心支持ポストの両端は球面状に形成されており、炉心支持ポストは炉床部ブロック上面の球面座と炉心支持ブロック下面の球面座の間に配置されている。

2.2 試験模型

試験模型は Fig. 2.2 に示すように炉心を水平方向に切った水平二次面において、燃料体の一層分を取り出したものである。燃料体と可動反射体は同じ試験体の黒鉛ブロックで模擬し、これを

(*) 本文の炉心構成は昭和52年当時の高温ガス炉設計のものを耐震研究の炉心としたものであり、現在の高温工学試験研究炉とは異なる。

炉心燃料ブロックと呼ぶ。炉心燃料ブロックの周辺には、側方固定反射体を模擬した黒鉛ブロックを配置する。以下、実際の炉心と対照しながら試験模型について記述する。

実際の炉心コラムは11層の燃料体と可動反射体から構成され、上下に三個のダウエルによって互に拘束している。一本のコラムを一個の燃料ブロックで模擬するため、コラム特性を付加することにする。このコラム特性は、コラムの一次固有振動モードに相当する固有振動数に合せて、燃料ブロックの中央にばね棒を取り付ける。このばね棒によって燃料ブロックはコラムの復元力特性を有することになる。炉心内の燃料体コラムと可動反射体コラムは、同一の試験体で模擬する。炉心燃料ブロックの運動抵抗を少なくするために、ブロックの下面には三個のボールベアリングを取付け、支持枠台上を滑らかに動くようにする。

実際の炉心はコラム7本単位で一つの制御棒領域を形成しているが、水平二次元炉心模型では、制御棒領域については考慮しないことにした。

実際の炉心の周辺には側方固定反射体があり、これらは炉心拘束構造物によってコアバレルに取付けられている。この側方固定反射体を模擬して、黒鉛の側方固定ブロックを炉心燃料ブロックの周辺に配置する。実際の炉心の拘束構造物を模擬して、試験模型では側方固定ブロックは4点支持ばねによって支持枠に取り付ける。側方固定ブロックの運動抵抗を少なくするために、ブロックの下面には4個のボールベアリングを取り付け、支持枠台上を滑めらかに動くようにする。側方固定ブロックを支持枠に取り付ける4点支持ばねの剛性を変えることによって炉心支持剛性を変化させることができる。

以上の考慮のもとに製作される試験模型の概念を示すと Fig. 2.3 のようになる。

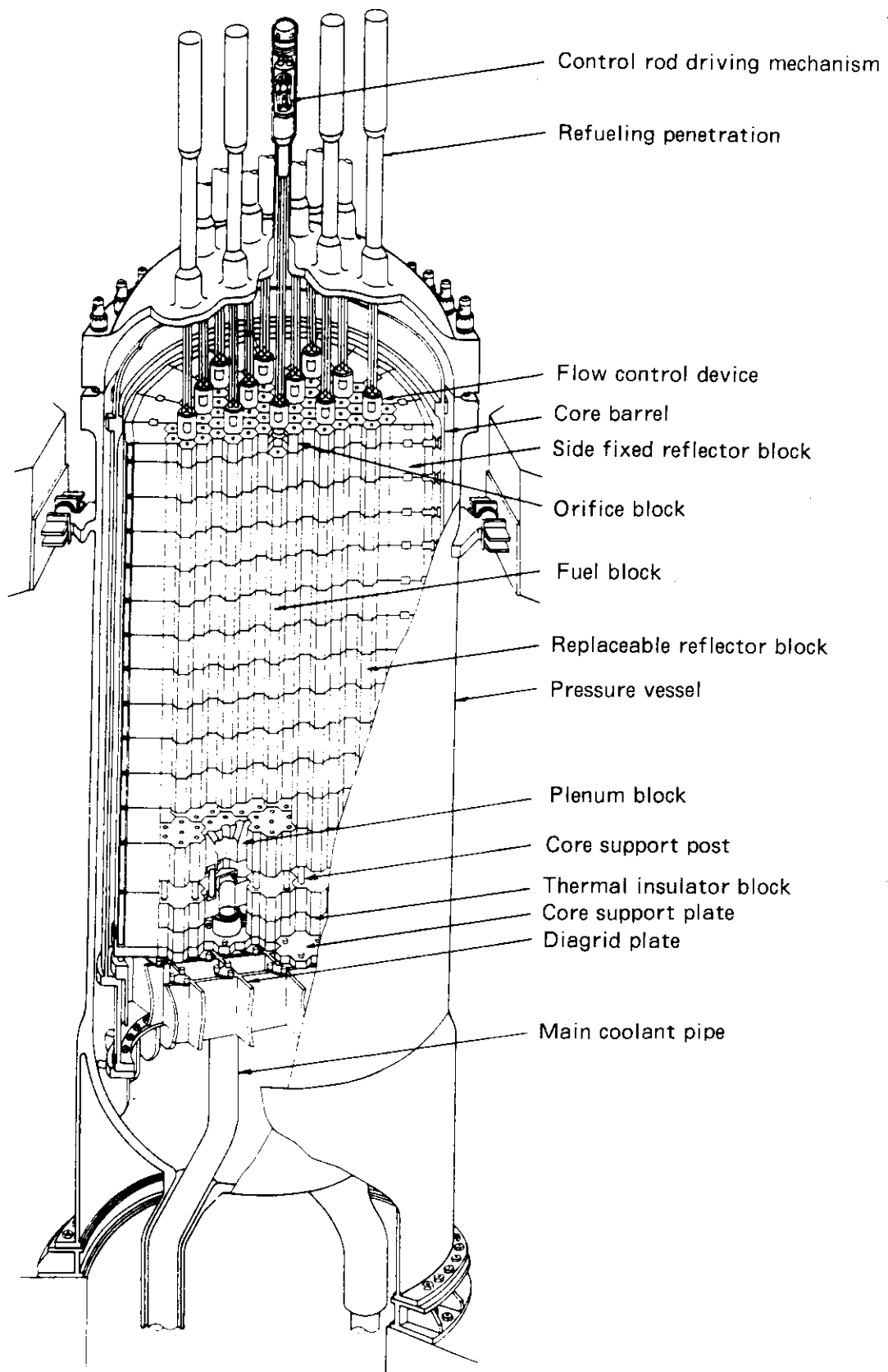


Fig. 2.1 Vertical view of an experimental HTGR

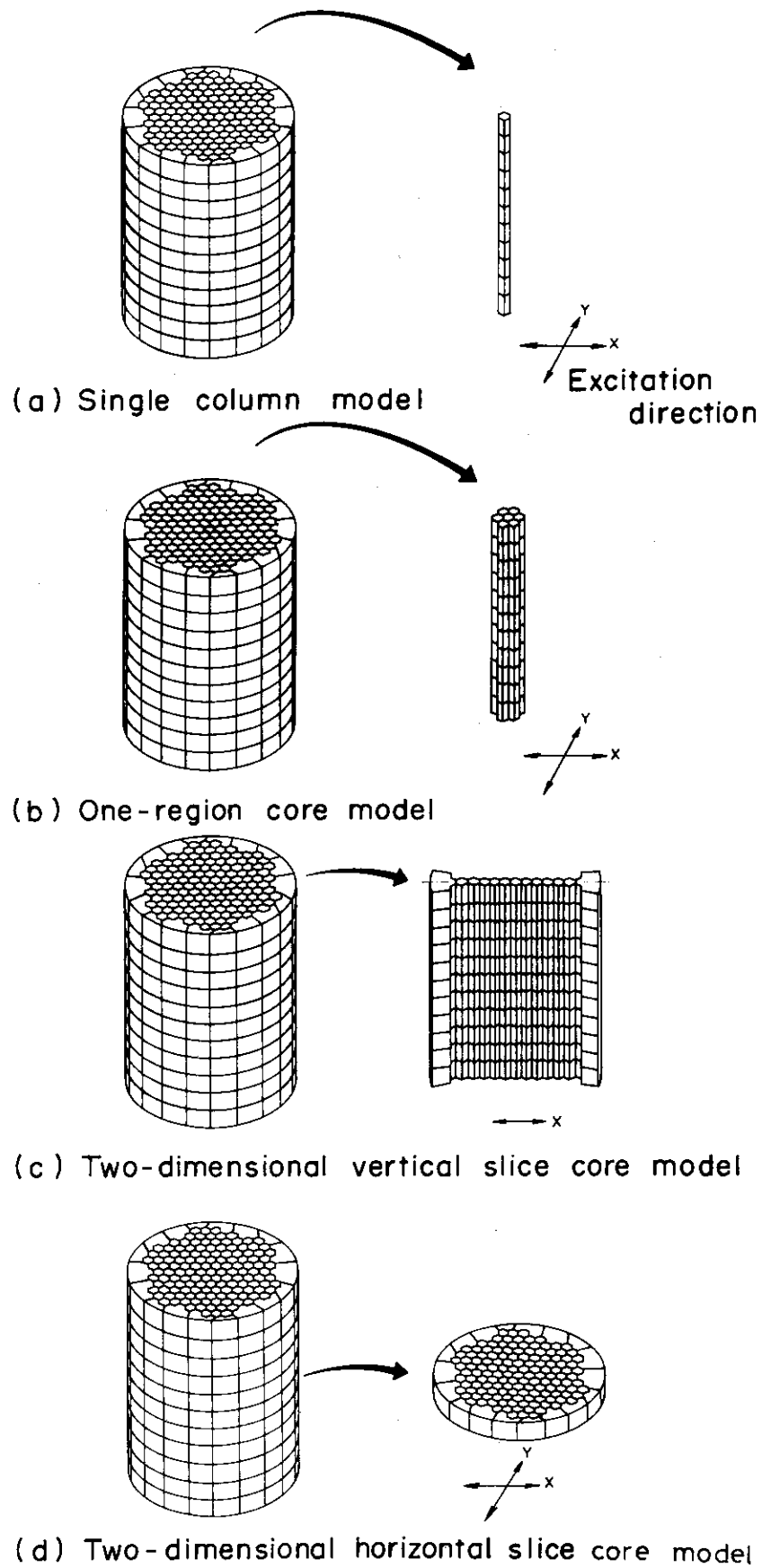


Fig. 2.2 HTGR core and seismic test model

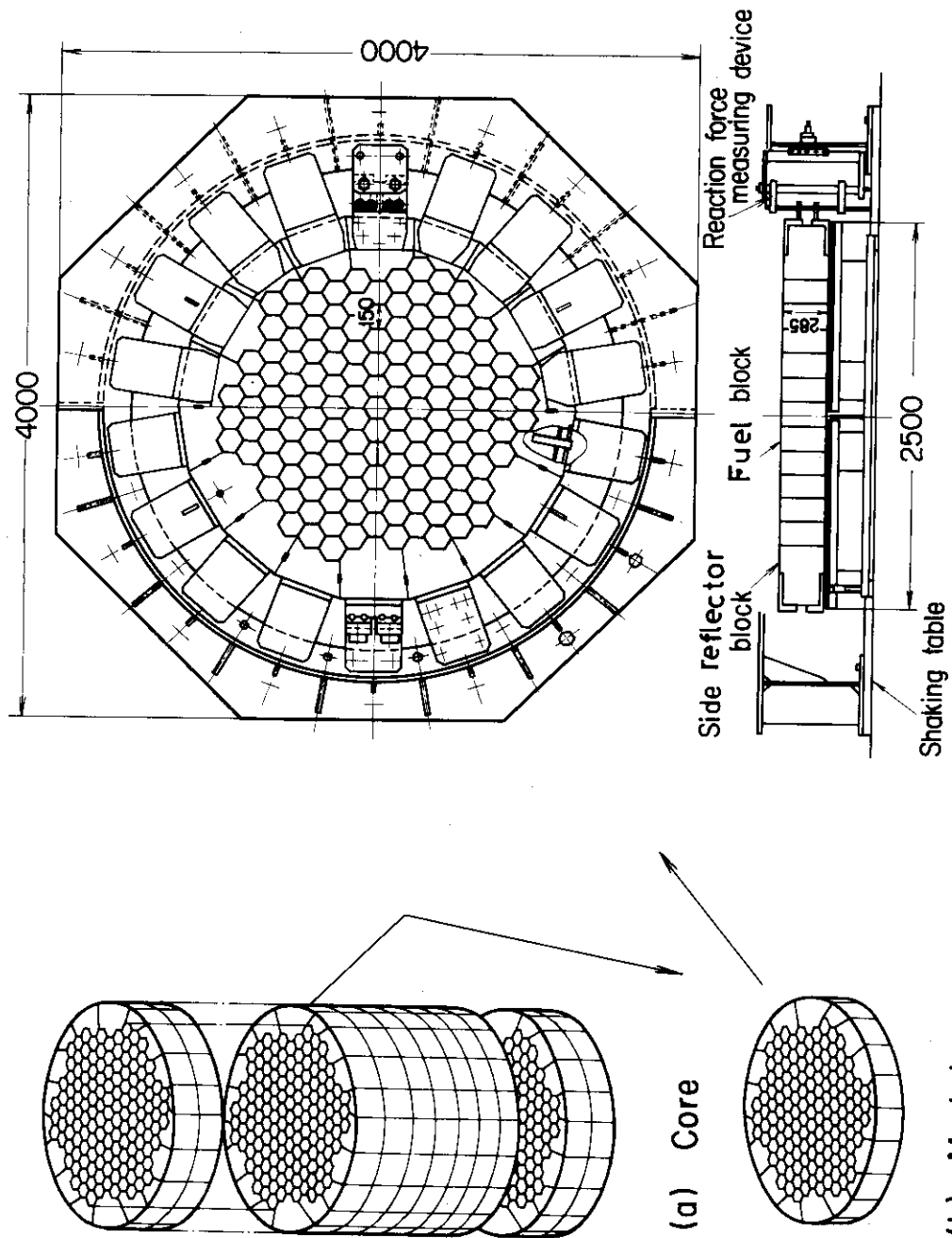


Fig. 2.3 Test model for horizontal two dimensional core

3. 試験装置と試験内容

3.1 試験装置

3.1.1 相似則

第1章において記述したように、実際の炉心の地震時の挙動は、模型試験によって検証された計算プログラムを使用して推定することを基本にして耐震試験計画を立案した。しかし、縮尺模型による耐震試験結果からも、直接に相似則を適用して実際の炉心の応答特性を推定できるようにした。この計画に添うように、試験模型は実際の炉心と相似則を合せて製作することにした。このため以下のような相似則を設定した。

試験模型（以下模型と略）は Buckingham の π 定理に基づく無次元積が模型と実際の炉心（以下実機と略）とで等しいという関係から Table 3.1 の相似則が求められる。寸法係数を λ とすると、長さ l と変位 x について模型と実機とで次の関係が成立する。

$$\frac{l_p}{l_m} = \frac{x_p}{x_m} = \lambda \quad (3.1)$$

ここで、添字 m と p はそれぞれ模型と実機を示す。模型と実機に使用する黒鉛材料を同一とすれば、ヤング率 E_m と E_p は等しいから

$$\frac{E_p}{E_m} = 1 \quad (3.2)$$

となる。ブロックのロッキング運動に主要な影響を及ぼす重力加速度は、模型と実機では変更することができないから、加速度比は

$$\frac{\alpha_p}{\alpha_m} = 1 \quad (3.3)$$

である。よって Table 3.1 の加速度の相似則は

$$\alpha_m = \lambda \frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{E_m}{E_p} \alpha_p \quad (3.4)$$

であり、この式は次のように書き直すことができる。

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_p} \cdot \frac{E_p}{E_m} \quad (3.5)$$

式(3.2)と(3.3)を(3.5)へ代入すれば、密度比は

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6)$$

となる。いま、式(3.1)の寸法係数 $\lambda = 2$ とすれば、密度比は式(3.6)から

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{1}{2} \quad (3.7)$$

となり、模型の材料密度は実機の二倍となるような材料を選ばよい。しかし、模型の使用材料を実機と同じ黒鉛材料とすると式(3.7)は成立しない。よって、このような場合には、模型に付加質量を取り付けて、模型の平均的な密度が実機の二倍になるようにする。このようにして、模型をTable 3.1に示すような相似則に合わせることができる。

Table 3.1の相似則から明らかなように、この相似則に基づく模型の試験結果から実機の応答を推定するには、実機の変位は模型の変位を二倍すればよく、同様にして、速度では $\sqrt{2}$ 倍、力では4倍、振動数では $1/\sqrt{2}$ 倍すればよい。一方、実機に加わる地震波を模擬して模型を加振する場合には、実機の入力地震波の時間軸を $1/\sqrt{2}$ 倍にしなければならない。

3.1.2 試験模型

(1) 炉心燃料ブロック

炉心燃料ブロックは、高温ガス実験炉の炉心燃料体を参考にして、寸法で $1/4$ 縮尺模型を使用する。3.1.1において述べたように、縮尺試験模型の燃料ブロックと実際の炉心の燃料体の相似則を合せるためにFig. 3.1, 3.2および3.3に示すように炉心燃料ブロックの中央に鉛製の円筒をはめ込み接着剤で固定した。よって、炉心燃料ブロックの重量は実際の燃料体の約 $1/4$ になる。炉心燃料ブロックの回転慣性は、重量補正用円筒が黒鉛ブロックの中央に位置するために、実際の燃料体に対して厳密に相似則を合せることができない。しかし、Fig. 3.1に示すように相似則から大きく離れないように、試験模型を設計した。炉心燃料ブロックの形状は、六角対面距離150 mm、高さ285 mm、重量19.1 kg、重心回りの回転慣性は $0.365 \text{ kg s}^2 \text{ cm/rad}$ である。

炉心燃料ブロックの下面には、三個のボール・ベアリングが取付けられており、摩擦力を少なくし、炉心燃料ブロックの中央に取付けたばね棒の復元力だけが加振力に対抗するように製作した。このばね棒はコラムの復元力特性を模擬したものであり、ばね棒の固有振動数は2.5 Hzになるように、ばね定数を 4.8 kg/cm にした。

燃料ブロックに使用する黒鉛材料は原子炉級のものであり、その機械的性質はTable 3.2に示されている。燃料ブロックのコラム復元力を模擬するばね棒の材質はばね用鋼線である。

(2) 側方固定ブロック

側方固定反射体を模擬する側方固定ブロックは、Fig. 3.4およびFig. 3.5に示すように、その高さは燃料ブロックと同じとし、また側方固定反射体の相似重量に相当するように厚さを決める。実際の炉心の側方固定反射体の高さは燃料体の約二倍であるが、試験模型の側方固定ブロックの高さは燃料ブロックと同じにする。

側方固定ブロックはFig. 3.4に示すように、支持構造物によって試験装置支持枠に取り付けら

れている。側方固定ブロックは形状の異なる3種類のブロックA, B, Cがあり、重量はそれぞれ97.2, 115.5, 142.8 kg, 重心回りの回転慣性はそれぞれ9.0, 14.9, 15.6 kg s² cm/radである。側方固定ブロックの材料はTable 3.3に示す黒鉛材料であり、側方固定ブロックに取り付けられたアームは鋼製である。

3.1.3 振動試験治具

(1) 支持棒

試験治具の主要構成要素である支持棒は、Fig. 3.6および3.7に示すように鋼製の構造物であり、これが振動台上に取り付けられる。支持棒の中央部には燃料ブロック、その周辺部には側方固定ブロックが配置される。支持棒は加振試験の振動数範囲1~10 Hzにおいて、支持棒の振動が試験結果に影響を及ぼさないようにするために、十分に剛な箱型構造とする。振動台床面の変形による試験への影響を無くするために、振動台床面には厚い鋼板を敷きこの上に試験治具を設置する。

(2) 側方固定ブロック支持構造物

実際の炉心の側方固定反射体は、炉心拘束構造物によってコアパレルに取り付けられている。炉心拘束構造物の剛性変化による炉心振動特性に及ぼす影響を明らかにするため、試験模型では側方固定ブロックを試験治具に取り付け、支持構造物の支持ばね定数を、強、中、弱の三種類およびプリロード（ばね定数は中）に容易に変更できるようにする。

側方固定ブロックの支持構造物をFig. 3.8および3.9に示す。支持剛性が強の場合には、Fig. 3.8(a)に示すように、支持構造物の直径18 mmのばね棒外側支持点を中央寄りに取り付ける。支持剛性が中の場合には、Fig. 3.8(b)に示すように、支持構造物の直径18 mmのばね棒外側支持点を外側へ移動する。支持剛性がプリロードの場合には、Fig. 3.8(c)に示すように、支持剛性が中の場合と同じばね棒とし、さらにばね棒の外側支持点に荷重を与える。支持剛性が弱の場合には、Fig. 3.8(d)に示すように、支持構造物のばね棒として直径4.8と18 mmの二種類のものを使用して二段ばねを構成する。支持剛性が弱支持の場合、側方固定ブロックの変位が小さい領域では弱支持となり、変位が大きくなると強支持となる。

3.1.4 振動台

振動試験に使用する振動台は、三菱重工業株式会社高砂研究所に設置されている大型水平二方向振動台であり、振動台の容量は次のとおりである。

- | | |
|-------------|-------------------|
| (1) 加 振 力 | 水平二方向それぞれ50 ton・G |
| (2) 最 大 振 幅 | ±50 mm |
| (3) 載荷台寸法 | 6 m × 6 m |
| (4) 載荷台自重 | 21 ton |
| (5) 載 荷 重 量 | 最大 100 ton |
| (6) 加振振動数 | 0.1~50 Hz |
| (7) 加 振 波 形 | 任意波形 |
| (8) 制 御 方 式 | 電気・油圧サーボ式 |

振動台の概略寸法と性能曲線を Fig. 3.10 および 3.11 に示す。

3.1.5 一列ブロック模型および三列ブロック模型

垂直二次元炉心模型および水平二次元炉心模型による試験結果から実際の炉心の応答特性を推定するための基礎資料を得るため、Fig. 3.12 および 3.13 に示すように一列ブロック模型および三列ブロック模型による振動試験を行う。

3.1.6 測定装置

測定装置のブロックダイアグラムを Fig. 3.14 に示す。試験における測定項目は、燃料ブロックと側方固定ブロックの変位、燃料ブロックと側方固定ブロックの衝撃加速度、側方固定ブロックの支持反力である。検出器の使用個数は Table 3.3 に示すように、燃料ブロックの変位測定用ひずみゲージ22組、側方固定ブロック相互間の変位測定用渦電流型非接触変位計三個、燃料ブロックと側方固定ブロックの衝撃加速度測定用圧電型加速度計26個、側方固定ブロックの支持反力測定用ひずみゲージ18組、振動台入力加速度測定用ひずみゲージ型加速度計二個である。さらに炉心内の燃料ブロック相互間の衝突力測定用にフォースゲージを4個取り付け付けた計測ブロックを使用する。これらの検出器の配置図を Fig. 3.15 に示す。計測器の性能を Table 3.4 に示す。

(1) 燃料ブロックの変位測定

燃料ブロックの変位計測は、Fig. 3.16 および 3.17 に示すように、燃料ブロックの中心線上に設けられた燃料コラム特性を模擬したばね棒の下部に互に直角にひずみゲージをはり付け X 軸方向および Y 軸方向の変位を測定する。ひずみゲージの出力は動ひずみ計によって増幅された後、磁気テープ及びペンレコーダによって記録される。

(2) 側方固定ブロック間の変位測定

側方固定ブロック相互間の相対変位は Fig. 3.18 および 3.19 に示すように、渦電流型の非接触式変位計によって測定する。この変位検出器からの出力は増幅器によって増幅された後、磁気テープおよびペンレコーダによって記録される。

(3) 衝撃加速度測定

燃料ブロックの衝撃加速度は、Fig. 3.20 に示すように、燃料ブロックの上方にボルトとナットによって取り付け付けた圧電型の加速度計によって測定する。この加速度検出器からの出力はチャージアンプによって増幅された後、磁気テープおよび電磁オシログラフによって記録される。

(4) 燃料ブロックの衝撃力測定

炉心内の燃料ブロックの衝撃力を直接測定するために Fig. 3.21 および 3.22 に示すように、燃料ブロックの六角形の一つの面にフォースゲージを4個取り付け付けた計測ブロックを製作する。この計測ブロックを炉心の任意の場所に取り付けて、炉心内の衝撃力の分布を測定する。使用するフォースゲージは圧電型である。このフォースゲージの出力はチャージアンプによって増幅された後、磁気テープおよび電磁オシログラフによって記録される。

(5) 側方固定ブロックの支持反力測定

側方固定ブロックの支持反力は Fig. 3.23 および 3.24 に示すように、側方固定ブロックの支持構造物の4点支持ばねに互に直角にはり付けられたひずみゲージによって、炉心に対して径方向

および接線方向の支持反力成分として測定される。このひずみゲージからの出力は動ひずみ計によって増幅された後、磁気テープおよび電磁オシログラフに記録される。

3.1.7 データ処理

Fig. 3.14 に示したように測定データは検出器から増幅器を経由して、中継ボックスに至りデータレコーダによって磁気テープに記録される。測定データのうち変位はペンレコーダ、加速度、支持反力および衝突力は電磁オシログラフによっても記録される。加速度、支持反力および衝突力の信号はローパスフィルタを使用して 800 Hz 以上の高周波成分はノイズとみなしてカットする。振動試験時にはオシロスコープによって振動台の加振状態および燃料ブロックの変位をモニターする。磁気テープに記録されたデータはデータ処理装置によって図形処理される。

3.2 試験内容

試験は変位および支持反力の校正試験や試験治具の特性試験などの振動試験前検査、振動台上の試験模型を加振する振動試験および試験後の試験模型の異常の有無を調べる試験後検査から構成される。

3.2.1 試験前検査

(1) 燃料ブロック変位測定装置の校正

燃料ブロックの変位はブロックの中央に設けられたコラムを模擬したばね棒の下部に取り付けられたひずみゲージによって測定される。振動試験を行う前に燃料ブロックの変位とひずみゲージのひずみの関係を求めておく必要がある。このために Fig. 3.25 に示すような試験治具によって、燃料ブロックの変位とひずみの関係を求める。

(2) 側方支持反力測定装置の校正

側方固定ブロックの支持反力は側方固定ブロック支持構造物の 4 点支持ばね棒に取り付けられたひずみゲージによって測定される。振動試験を行う前に側方固定ブロックに加わる力とひずみゲージのひずみの関係を求めておく必要がある。このため Fig. 3.26 に示すような試験治具によって、側方固定ブロックに加わる力とひずみの関係を求める。Fig. 3.26 からわかるように、油圧シリンダによって側方固定ブロックに荷重を加え、その時の 4 点支持ばねのひずみおよび側方固定ブロックの変位をダイヤルゲージで測定し、荷重とひずみおよび変位とひずみの関係を求める。

(3) 試験治具の振動試験

試験治具製作完了時に支持棒を木製ハンマーでタッピングして、試験治具の概略の固有振動数を求める。さらに、振動台上に設置して加振試験を行い、試験治具の固有振動数を求め、振動試験の結果に影響を及ぼさない程度の剛性を有することを確認しておく。

(4) 形状と重量の検査

燃料ブロックおよび側方固定ブロックの形状、寸法および重量を測定する。

3.2.2 振動試験

振動試験における主要なパラメータは次の三種類である。試験全体の内容を Table 3.5 に示す。

(i) 側方支持剛性

側方固定ブロックの支持剛性を強, 中, 弱およびプリロード (支持剛性中) の 4 種類に変える。

(ii) 加振形式

加振形式は一軸加振では X 軸方向と Y 軸方向とし, 二軸同時加振では X 軸方向と Y 軸方向の振幅と位相遅れによって 4 種類の加振形式を採用する。二軸同時加振の振動台の運動軌跡は Fig. 3.27 に示すように, 円形軌道, X 軸方向長軸楕円軌道, X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道, X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道の 4 種類である。

(iii) 加振波形

正弦波および地震波などのランダム波を使用する。

これらのパラメータを組合せた試験条件を Table 3.5 に示す。

(1) 正弦波応答試験

振動台の加振加速度を一定 (50, 100, 250 Gal) にして加振振動数を 1~10 Hz の範囲でスイープアップおよびスイープダウンさせて正弦波応答試験を実施する。試験模型条件 (支持剛性を変える), 加振形式 (一軸加振, 二軸同時加振), 加振加速度, 加振振動数をパラメータとして, 変位, 衝撃加速度, 支持反力および衝撃力を調べる。さらに, 試験模型を正弦波加振した状態から急激に振動台を停止させて, 炉心を自由減衰振動状態にして, その時の応答波形から炉心の等価減衰比を求める。

(2) 地震波応答試験

実際の炉心に対して想定される地震波は原子炉の敷地や建家, 原子炉の設計が完了した後でなければ決まらない。しかし, 想定される地震波のスペクトル範囲を予測し, このスペクトル範囲を含むように数種類の地震波を選び, これらの地震波による炉心の応答特性から正弦波と地震波による比較をすることによって耐震性がより明確にできる。このために次の三種類のランダム波による応答試験をする。

(i) エルセントロ 1940 年 NS 地震波

エルセントロ 1940 年 EW 地震波

(ii) 茨城 1964 年 NS 地震波 (原研 PR ホール 1964 年 2 月 5 日の観測波)

茨城 1964 年 EW 地震波 (原研 PR ホール 1964 年 2 月 5 日の観測波)

(iii) 1~10 Hz のスペクトル成分を有するホワイトノイズ波

Fig. 3.28 および 3.29 はエルセントロ 1940 年 NS 波およびエルセントロ 1940 年 EW 波の加速度波形とその応答スペクトルを示す。Fig. 3.30 および 3.31 は茨城 1964 年 NS 波及び茨城 1964 年 EW 波の加速度波形とその応答スペクトルを示す。Fig. 3.32 はホワイトノイズ波の加速度波形とその応答スペクトルを示す。

これらのランダム波のうち, エルセントロ 1940 年 NS 波およびエルセントロ 1940 年 EW 波, 茨城 1964 年 NS 波および茨城 1964 年 EW 波については, 第 2 章に記述したように相似則に合わせるために, 時間軸を $1/\sqrt{2}$ に縮小した加速度波形を振動試験の入力波に使用する。

Fig. 3.33 は振動試験に使用するランダム波三波について、最大加速度 250 Gal, 減衰定数 0.05 の場合の応答スペクトルを示す。この応答スペクトルを求めるために使用した地震波は Fig. 3.28 ~ 3.32 に示す波形の時間軸を $1/\sqrt{2}$ に縮小したものである。Fig. 3.34 は振動試験に使用する地震波二波について、二軸の合ベクトル値の応答スペクトルを示す。減衰定数は 0.05, 最大加速度は次のとおりである。

エルセントロ 1940 年 NS 波	250 Gal
エルセントロ 1940 年 EW 波	171.4 Gal
原研 PR ホール 1964 年 NS 波	250 Gal
原研 PR ホール 1964 年 EW 波	207 Gal

この加速度応答曲線を求めるために使用した地震波は、Fig. 3.28 ~ Fig. 3.32 の波形の時間軸を $1/\sqrt{2}$ に縮小したものである。

Fig. 3.35 は、エルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波原形波（時間軸が観測波形のもの）による二軸同時加振状態における振動台の入力波形と振動台の軌跡を示す。この加速度波形の特徴は次のとおりである。

- (a) 時刻 0 ~ 3.5 秒の間（試験用加振波形換算 0 ~ 2.5 秒の間）では、軌跡は円形と X 軸方向に長軸となる楕円形との中間形となる（NS 波が最大加速度となる）。
- (b) 時刻 6.4 ~ 8.5 秒の間（試験用加振波形換算 4.5 ~ 6.0 秒の間）では、軌跡は円に近い形となる。
- (c) 時刻 16.3 ~ 17.7 秒の間（試験用加振波形換算 11.5 ~ 12.5 秒の間）では、軌跡は Y 軸方向に長軸となる楕円形となる（EW 波が最大加速度となる）。

Fig. 3.36 および 3.27 は、原研 PR ホール 1964 年 NS 波と EW 波原形波による二軸同時加振状態における振動台の入力波形と振動台の軌跡を示す。この加速度波形の特徴は次のとおりである。

- (a) 時刻 0 ~ 1.4 秒の間（試験用加振波形換算 0 ~ 1.0 秒の間）では、軌跡は Y 軸方向が長軸となる楕円形状となる。
- (b) 時刻 1.4 ~ 3.0 秒の間（試験用加振波形換算 1.0 ~ 2.0 秒の間）では、軌跡は Y 軸方向一軸加振に近い形状となる（EW 波が最大加速度となる）。
- (c) 時刻 3.0 ~ 4.0 秒の間（試験用加振波形換算 2.1 ~ 2.8 秒の間）では、軌跡は円に近い形状となる。
- (d) 時刻 4.0 ~ 4.9 秒の間（試験用加振波形換算 2.8 ~ 3.5 秒の間）では、軌跡は X 軸方向が長軸となる楕円形状となる（NS 波が最大加速度となる）。

なお、エルセントロ 1940 年 NS 波の最大加速度を示す時刻は約 2 秒（試験用加振波形換算 1.4 秒）、エルセントロ 1940 年 EW 波は 24.8 秒（試験用加振波形換算 17.5 秒）、原研 PR ホール 1964 年 NS 波と EW 波 はともに 1.4 ~ 3.5 秒の間（試験用加振波形換算 1.0 ~ 2.5 秒の間）である。

上述の地震波による一軸加振試験では、エルセントロ 1940 年 NS 波および原研 PR ホール 1964 年 EW 波を使用する。二軸同時加振試験では、次のように使用する。

(a) エルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波

X 軸方向：エルセントロ 1940 年 NS 波

Y 軸方向：エルセントロ 1940 年 EW 波

(b) 原研 PR ホール 1964 年 NS 波と EW 波

X 軸方向：原研 PR ホール 1964 年 NS 波

Y 軸方向：原研 PR ホール 1964 年 EW 波

3.2.3 試験後検査

振動試験後、黒鉛製炉心燃料ブロックおよび側方固定ブロックの破損状態を調べる。なお、試験および解析結果の説明のため、ブロックには Fig. 3.38 に示すように番号を付ける。

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	$\ell_m = \frac{1}{\lambda} \cdot \ell_p$	$\ell_m = \frac{1}{2} \cdot \ell_p$
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

E : Young's Modulus

ρ : density

Table 3.2 Mechanical properties of graphites used on vibration test

Item	Value	
	Fuel block	Reflector block
Material	ASI-F-500 (SIGRI)	IG-11 (Toyo Carbon)
Young's modulus (kg/cm ²)	8.67×10^4	1.07×10^3
Compression strength (kg/cm ²)	510	870
Apparent specific weight (g/cm ³)	1.74	1.8

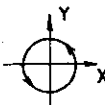
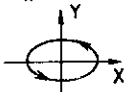
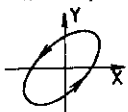
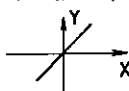
Table 3.3 Detectors and measurement position

Measurement item	Detector	Position (Block number in Fig. 3.38)	Number
Relative displacement of fuel block	Strain gauge	(1-2), (3-1), (4-1), (4-6), (6-1), (8-1), (8-3), (8-6), (8-11), (13-1), (15-1) each of them X-direction and Y-direction	22
Relative displacement between reflector blocks	Eddy current type	(RB-1 and RB-18), (RB-2 and RB-3), (RB-4 and RB-5)	3
Impact acceleration of block	Piezoelectric type	X-direction: (1-2), (3-1), (4-1), (4-3), (4-6), (6-1), (6-4), (6-7), (8-1), (8-3), (8-6), (8-11), (RB-14) Y-direction: (1-2), (2-3), (3-1), (4-1), (4-6), (6-1), (8-1), (8-3), (8-6), (11-1), (15-1), (RB-8), (RB-10)	26
Impact force of block	Piezoelectric type force gauge	In core	1
Impact reaction force	Strain gauge	(RB-1), (RB-2), (RB-3), (RB-4), (RB-5), (RB-6), (RB-7), (RB-8), (RB-9) each of them X-direction and Y-direction	18
Input acceleration	Strain gauge type accelerometer	Shaking table X-direction : 1 Y-direction : 1	2

Table 3.4 Test instrumentation list

Measurement item	Detector, amplifier or recorder	Manufacturer	Model No.	Range	Number
Relative displacement of fuel block	Strain gauge	Tokyo Sotsuki	FLA-2-1L	0~1kHz	22
	Dynamic strainmeter	Kyowa Dengyo	DMP-6E	0~1kHz	
Relative displacement between reflector blocks	Eddy current type	Shinkawa Denki		0~15mm	3
Impact acceleration of block	Piezoelectric type accelerometer	Brüel & Kjær	4344	1~10,000G 4~10kHz	26
	Charge amplifier	ENDEVCO	2721A	0.1~3,000G 5~10kHz	
Impact force of block	Piezoelectric type force gauge	PCB		0~2268kg	4
	Charge amplifier	ENDEVCO	2721A	5~10kHz	
Impact reaction force	Strain gauge	Tokyo Sotsuki	FLA-3-1L	0~1kHz	18
	Dynamic strainmeter	Kyowa Dengyo	DMP-6E	0~1kHz	
Input acceleration	Strain gauge type accelerometer	Shinko Tsushin	UG2G	0~2G	2
	Dynamic strainmeter	Kyowa Dengyo	DMP-6E	0~1kHz	
Data recording	Data recorder	Kyowa Dengyo	RTP-160A6	DC~10kHz	2
	Data recorder	TEAC	R200	DC~10kHz	1
	Electric-magnetic oscillograph	Sanei Sotsuki	5L-33		1
	Pen recorder	Watanabe Sotsuki	WTR-281H	0~80Hz	4

Table 3.5 Test scope

No.	Test model condition			Single axis excitation				Two-axis excitation		Note
	Side block support stiffness	Side block fixed key	Preload	X-axis (flat dir.)		Y-axis (corner dir.)		X-Y axis simultaneous		
				Sinu-soidal	Seismic	Sinu-soidal	Seismic	Sinu-soidal	Seismic	
1A	Hard	With	With-out	50Gal 100Gal 250Gal	100Gal 250Gal 500Gal	50Gal 100Gal 250Gal	100Gal 250Gal 500Gal	100Gal 250Gal 500Gal	(1) X-Y Sinusoidal g; $A_y/A_x = 1.0, \phi = 90^\circ$  $h: A_y/A_x = 0.5, \phi = 90^\circ$  $i: A_y/A_x = 1.0, \phi = 45^\circ$  $j: A_y/A_x = 1.0, \phi = 0^\circ$ 	
1B		With-out		50Gal 100Gal 250Gal		50Gal 100Gal 250Gal		100Gal 250Gal		
2	Inter-mediate	With		50Gal 100Gal 250Gal	100Gal 250Gal 500Gal	50Gal 100Gal 250Gal	100Gal 250Gal 500Gal			
3		With		50Gal 100Gal 250Gal 350Gal 400Gal	100Gal 250Gal 500Gal	50Gal 100Gal 250Gal	100Gal 250Gal 500Gal			
4	Soft	With-out	50Gal 100Gal 250Gal	100Gal 250Gal 500Gal	100Gal 250Gal 500Gal	250Gal 500Gal				
5	Hard	Three-row model	50Gal 100Gal 250Gal							
6		Single row model	50Gal 100Gal 250Gal							

(2) Seismic
(i) EL Centro 1940 NS, EW
(ii) JAERI PR Hall (-Kanto 601-1) 1964 NS, EW

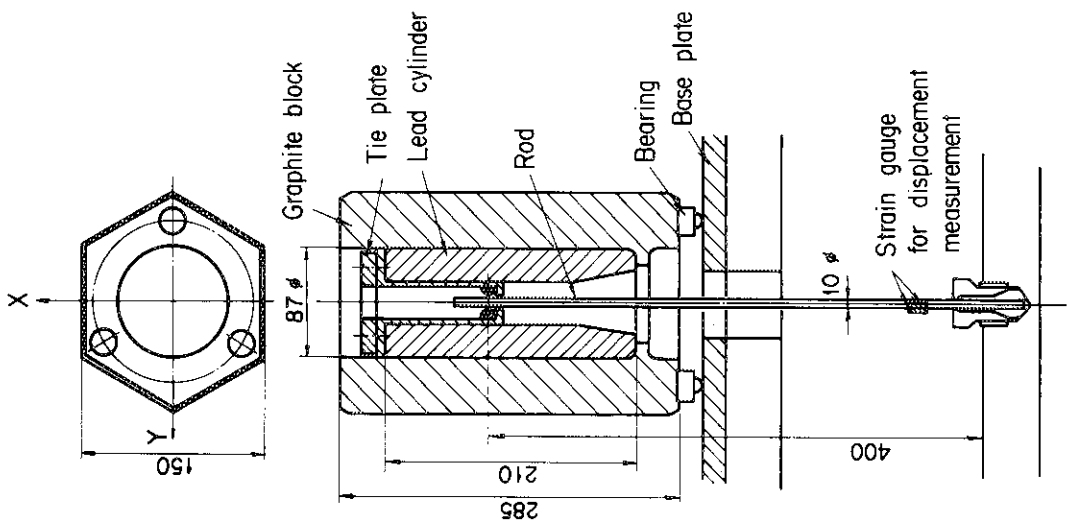


Fig. 3.1 Fuel block

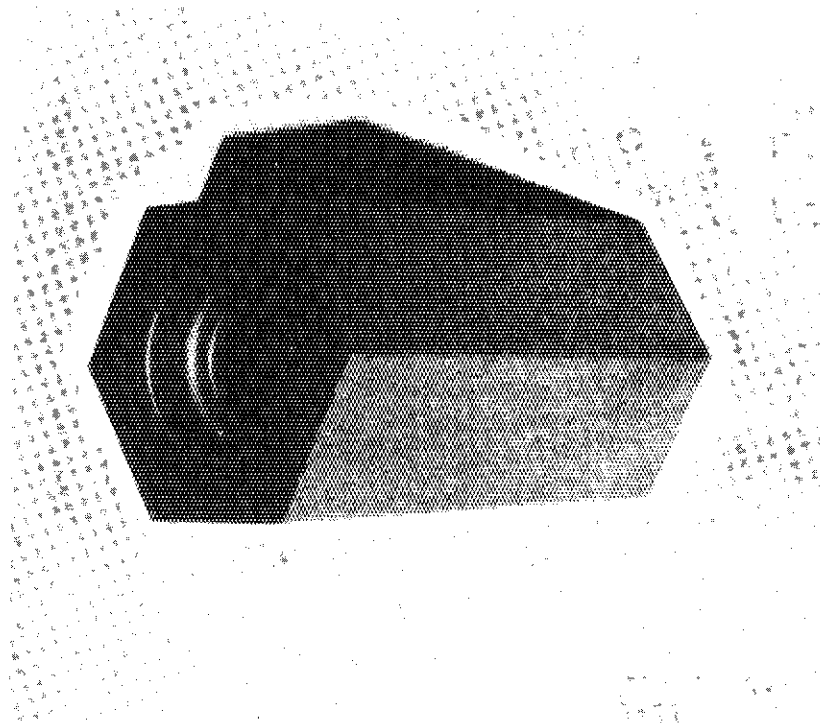


Fig. 3.3 Fuel block (Photograph)

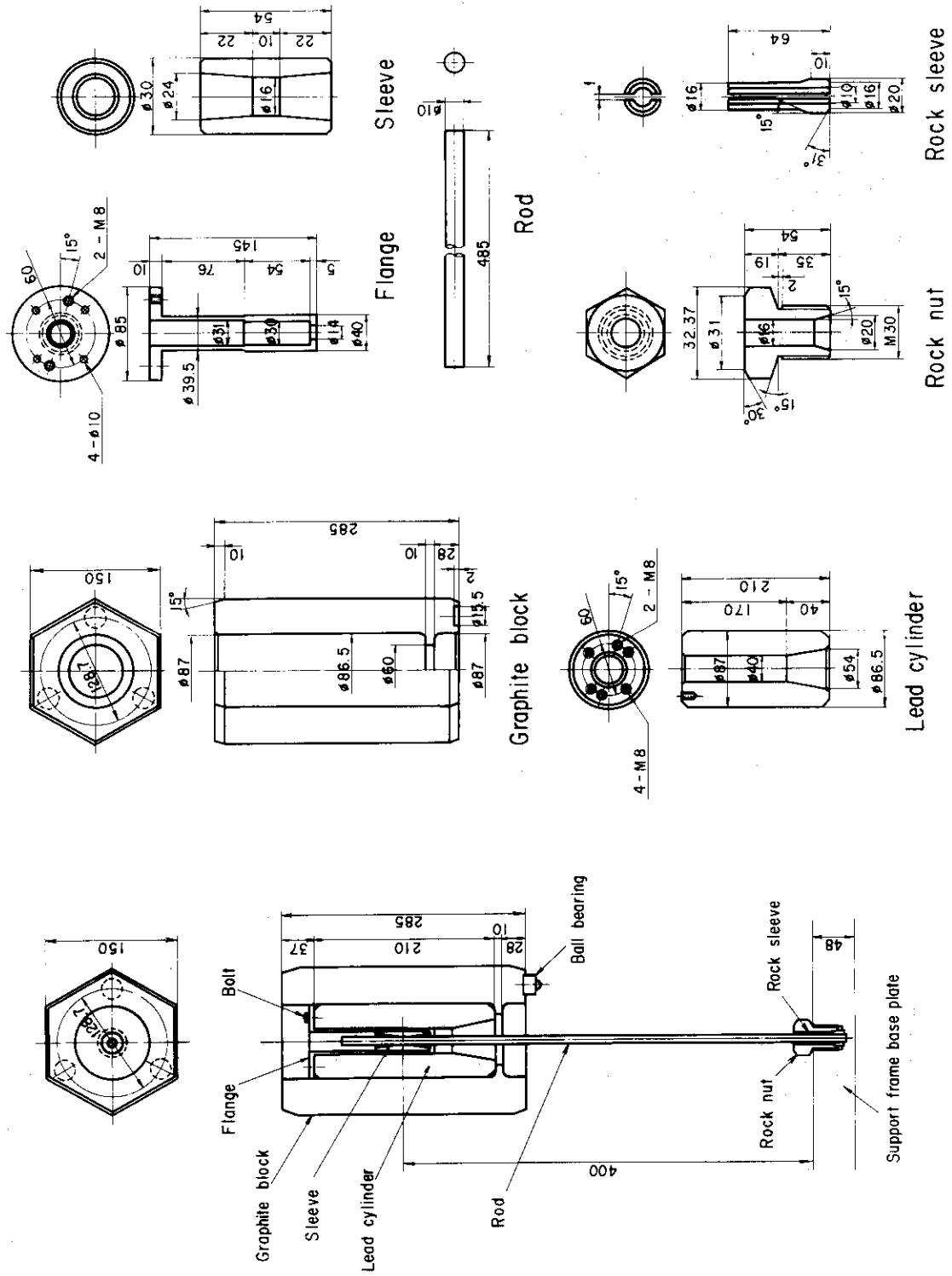


Fig. 3.2 Detail of fuel block

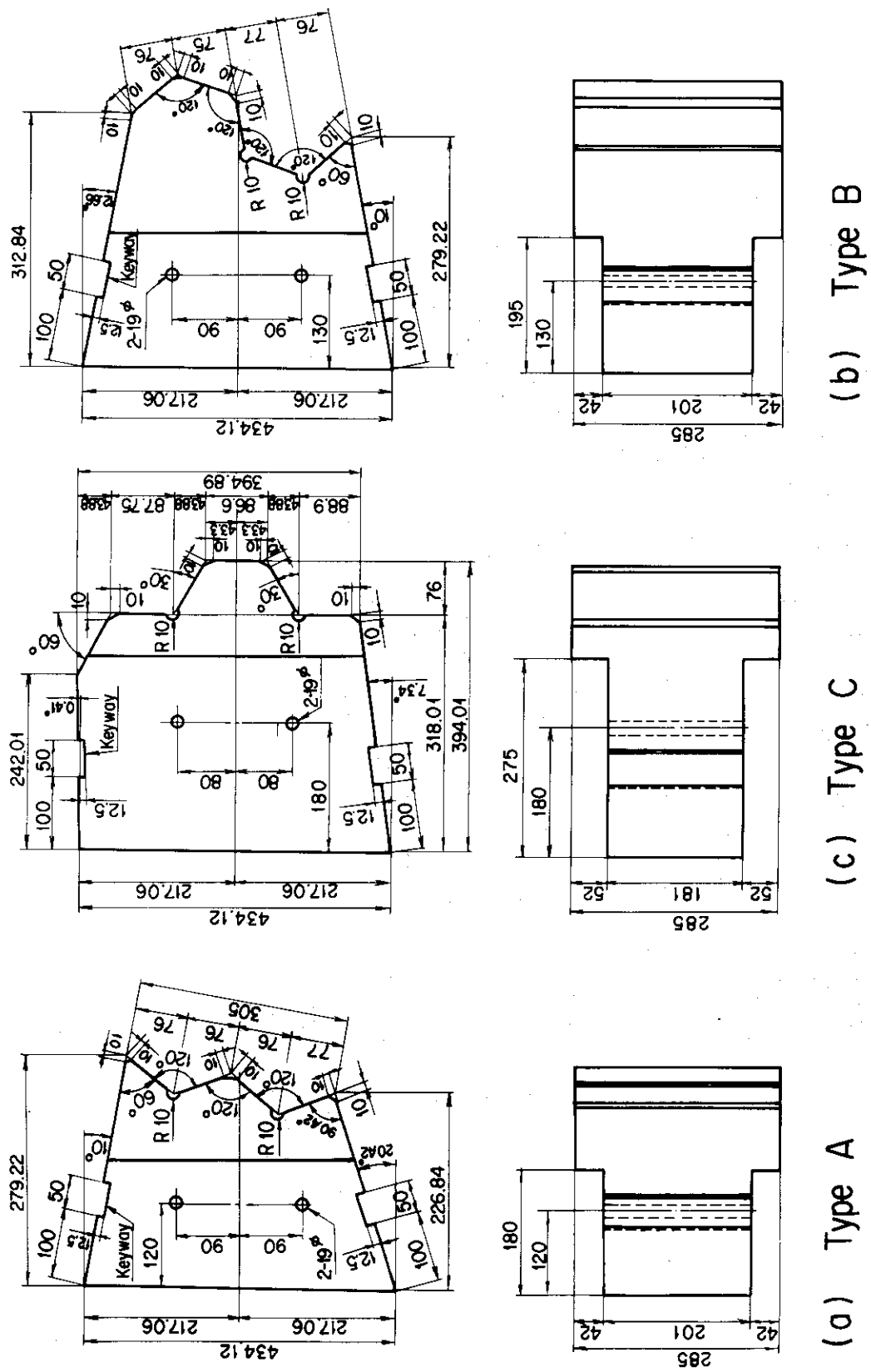


Fig. 3.4 Side reflector blocks

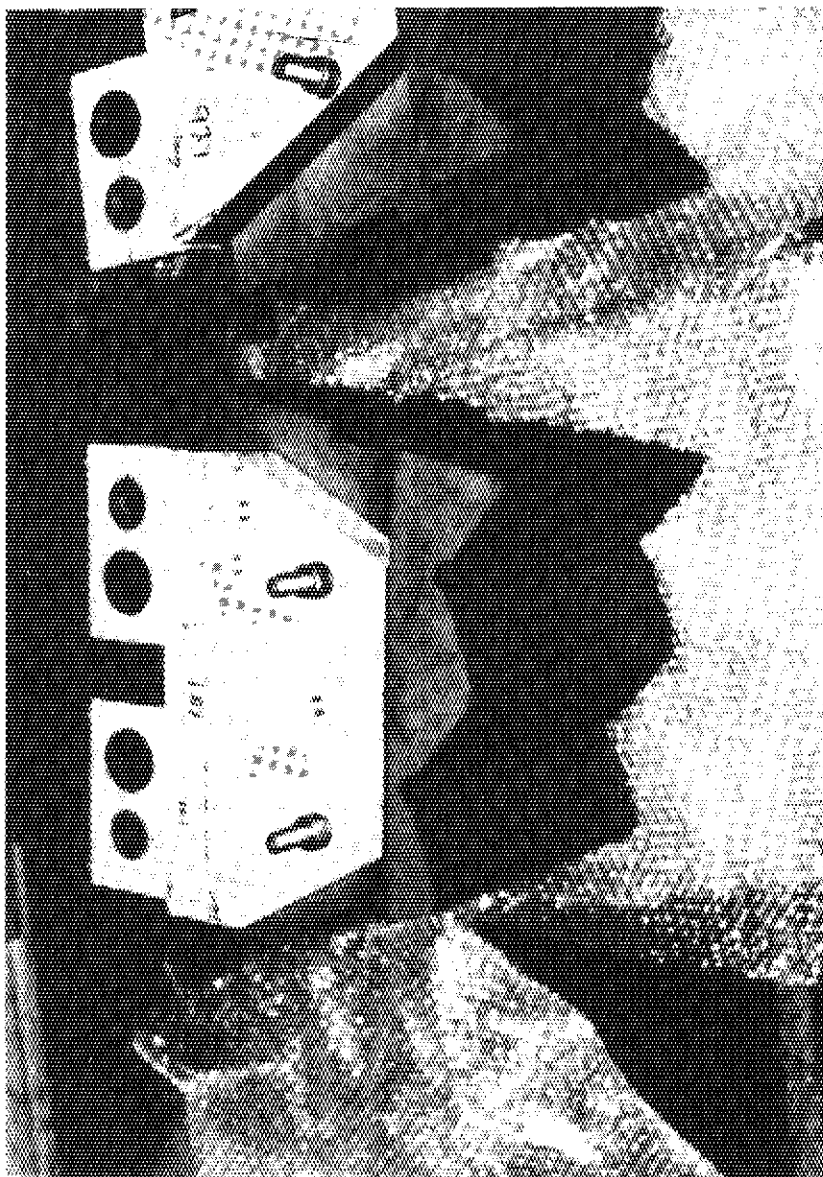


Fig. 3.5 Side reflector block (Photograph)

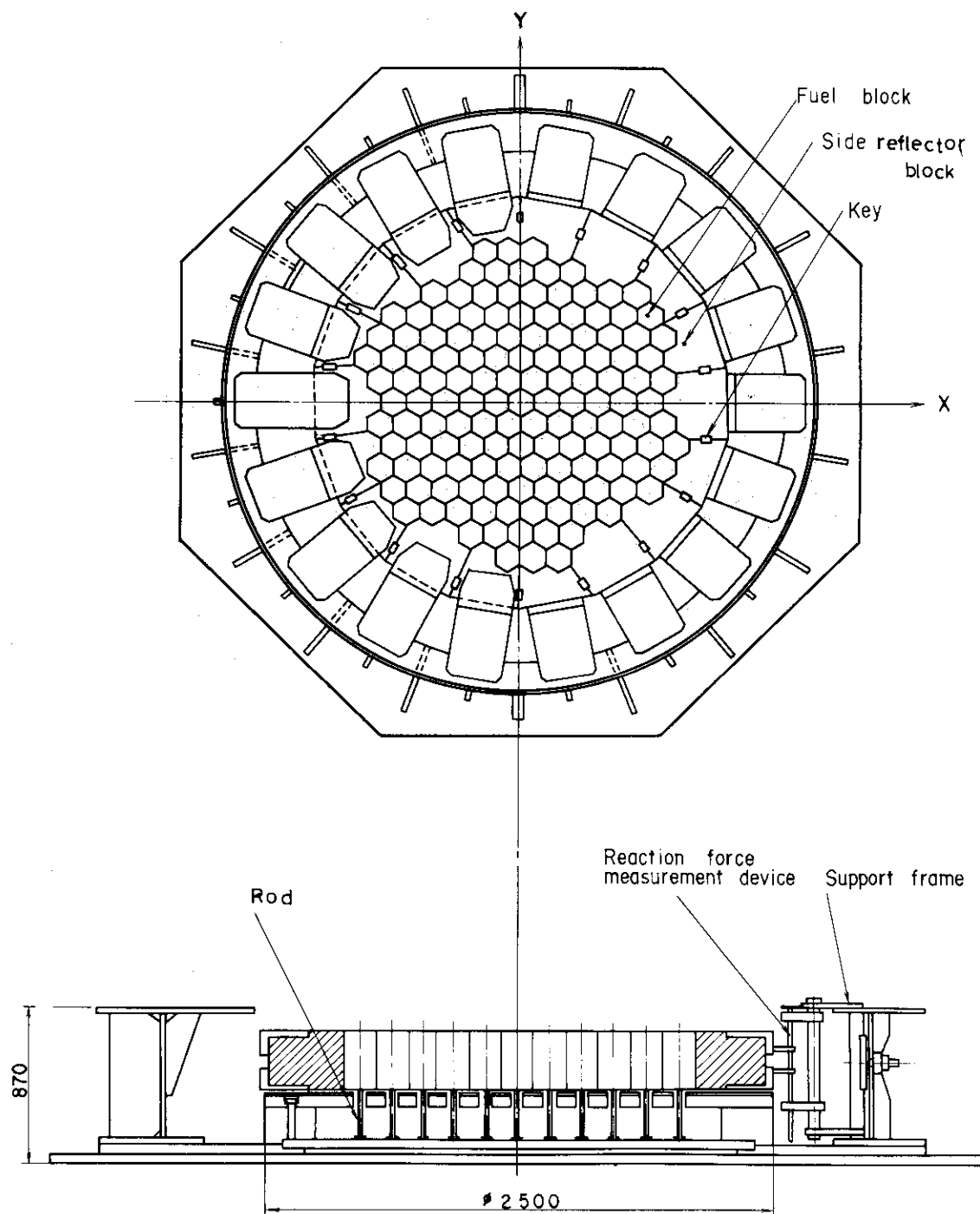


Fig. 3.6 Test rig and core model

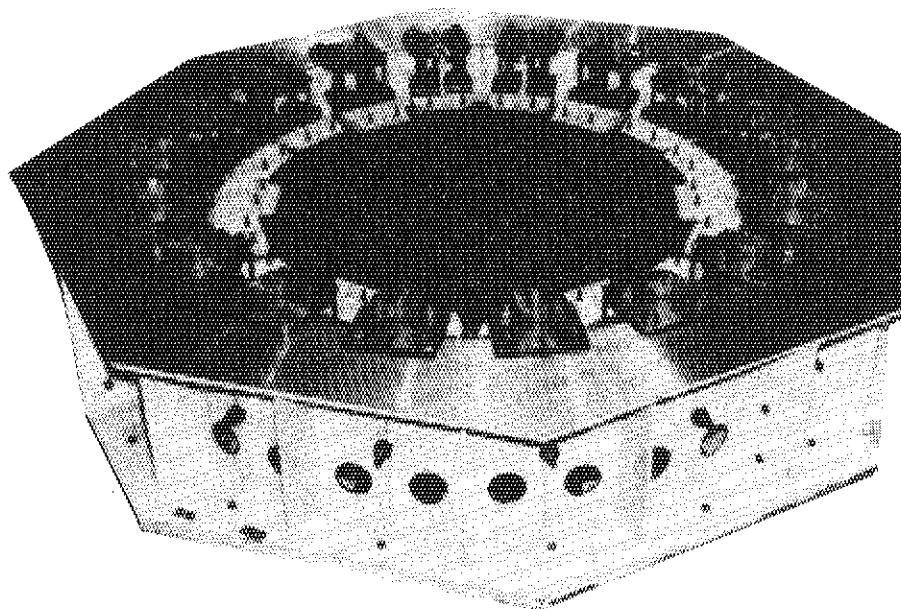


Fig. 3.7 Test rig and core model (Photograph)

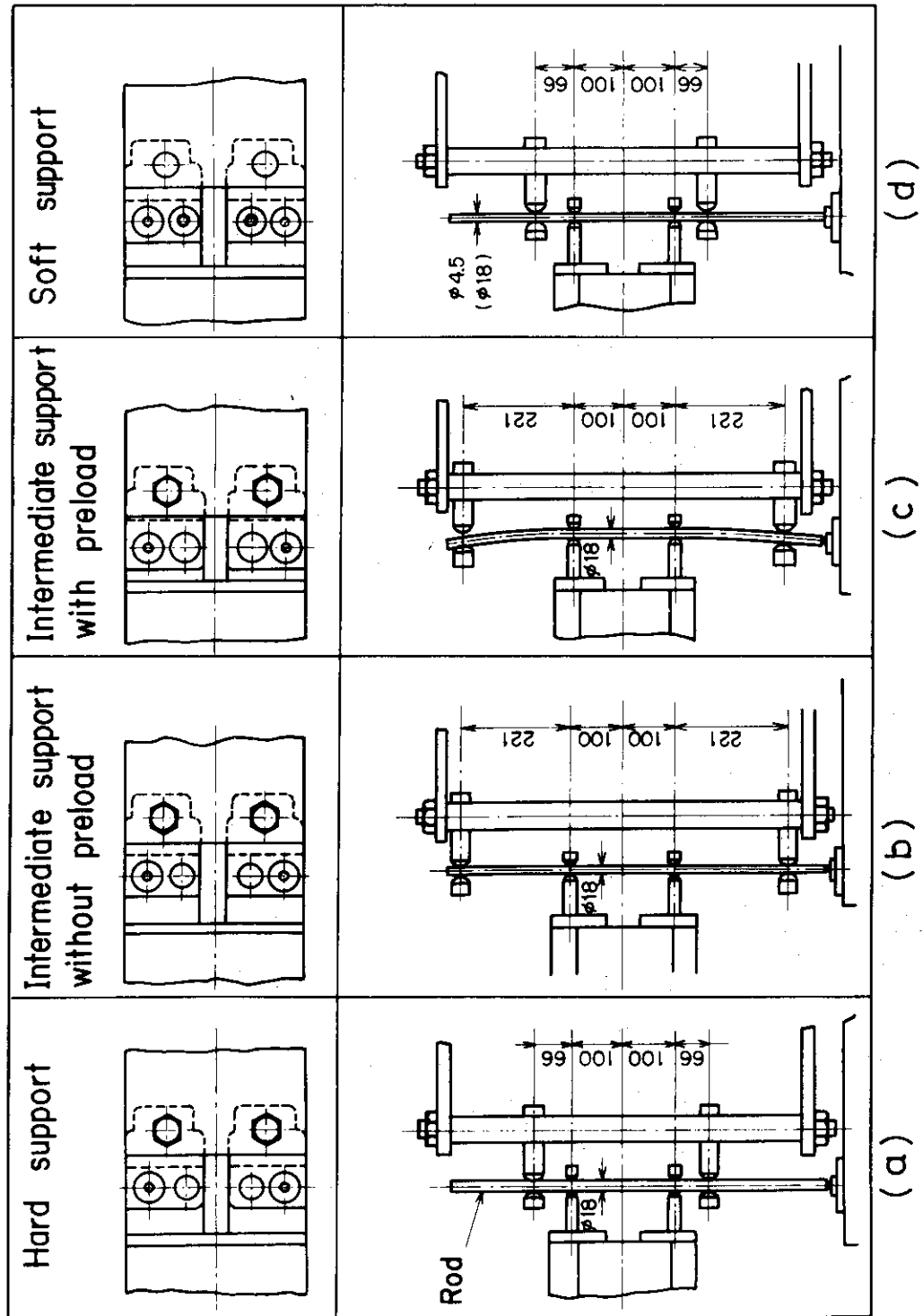


Fig. 3.8 Side reflector block support structure

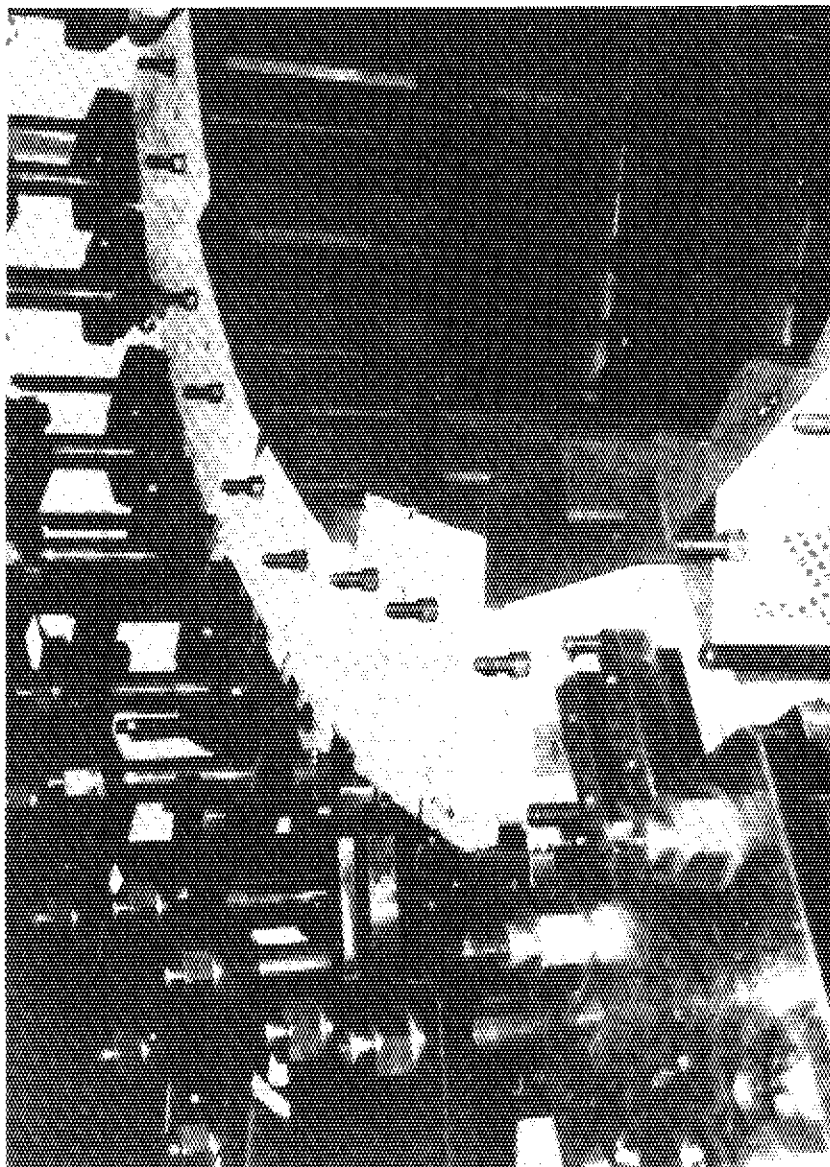


Fig. 3.9 Side reflector block support structure (Photograph)

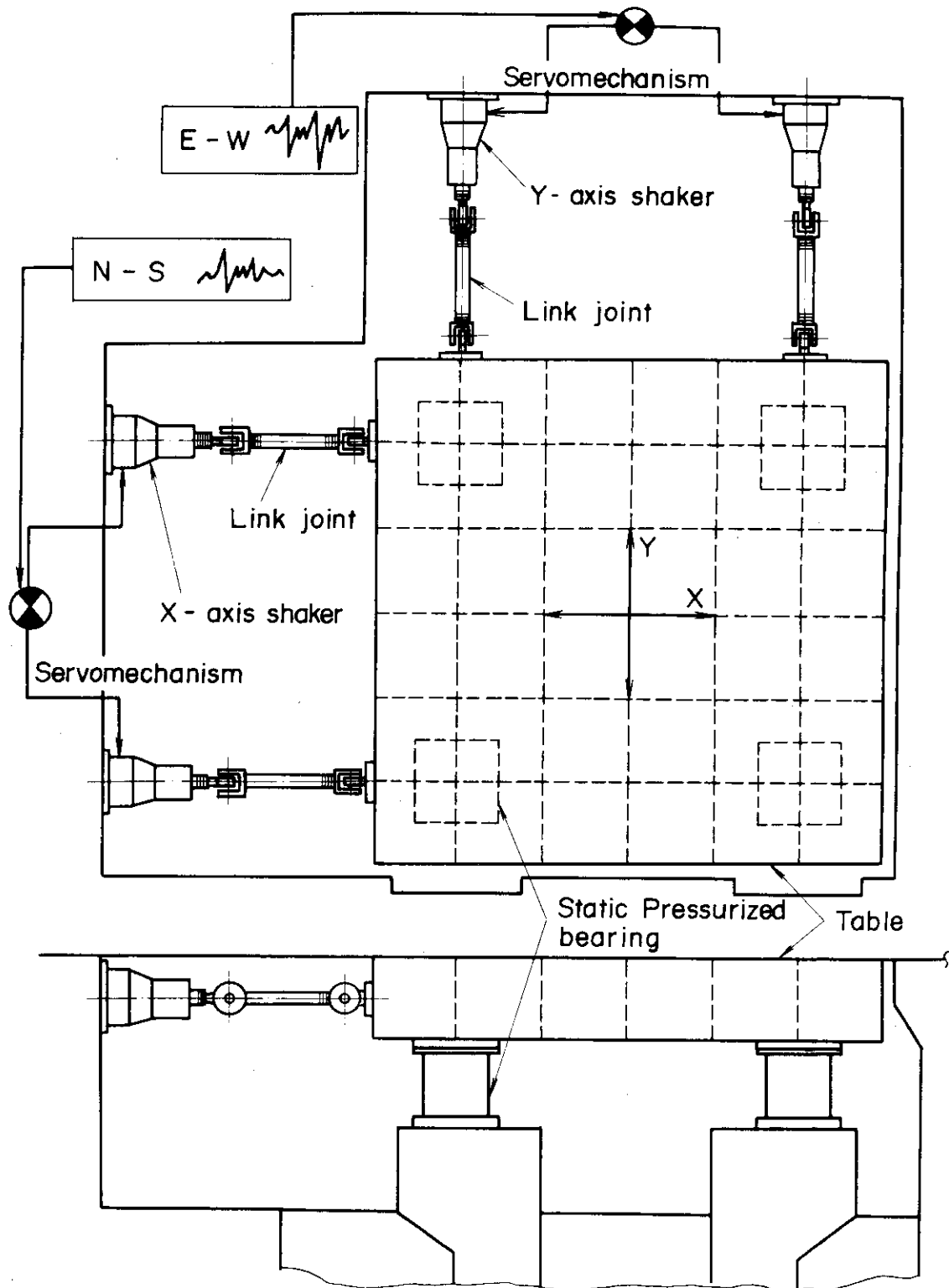


Fig. 3.10 Shaking table

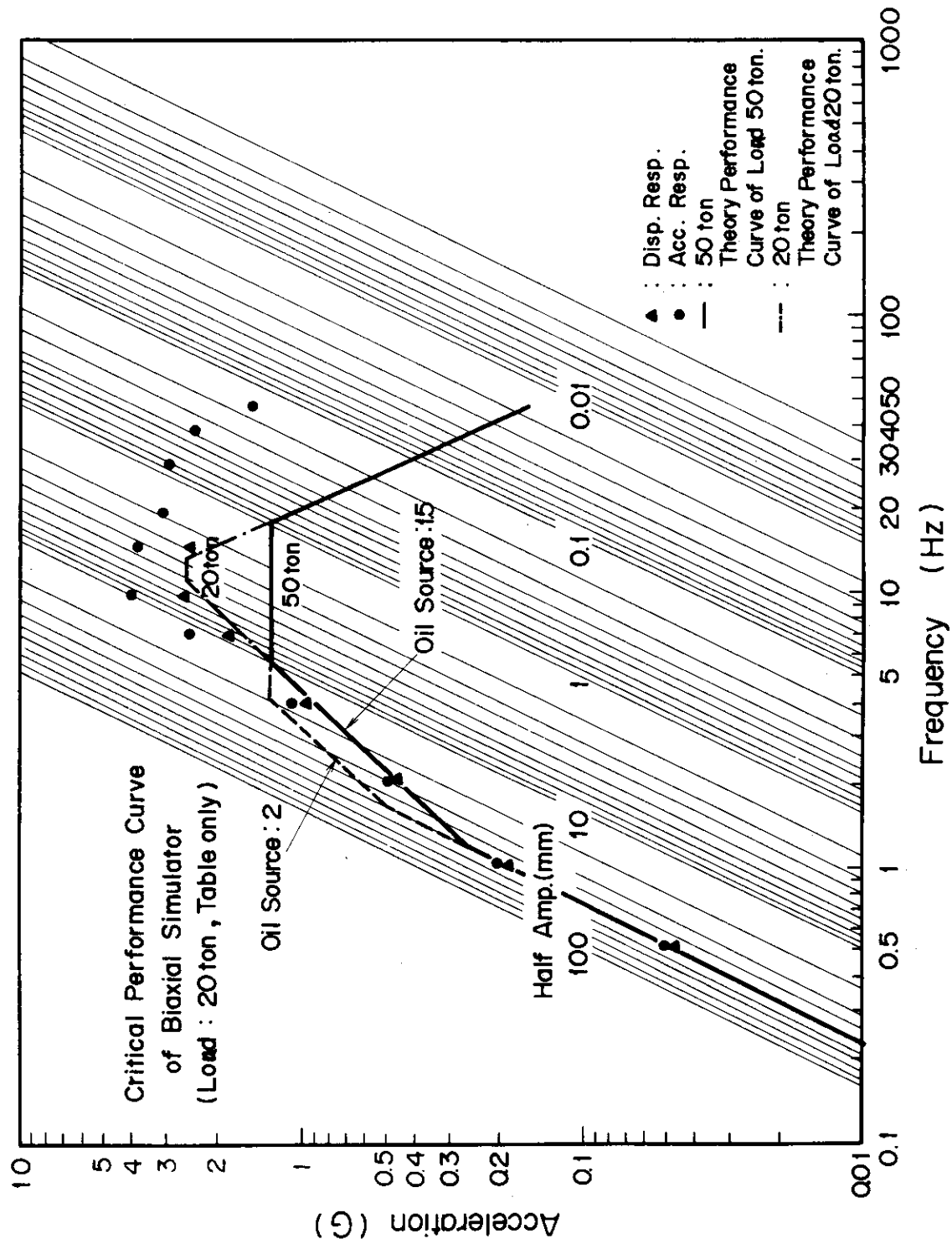


Fig. 3.11 Performance of shaking table

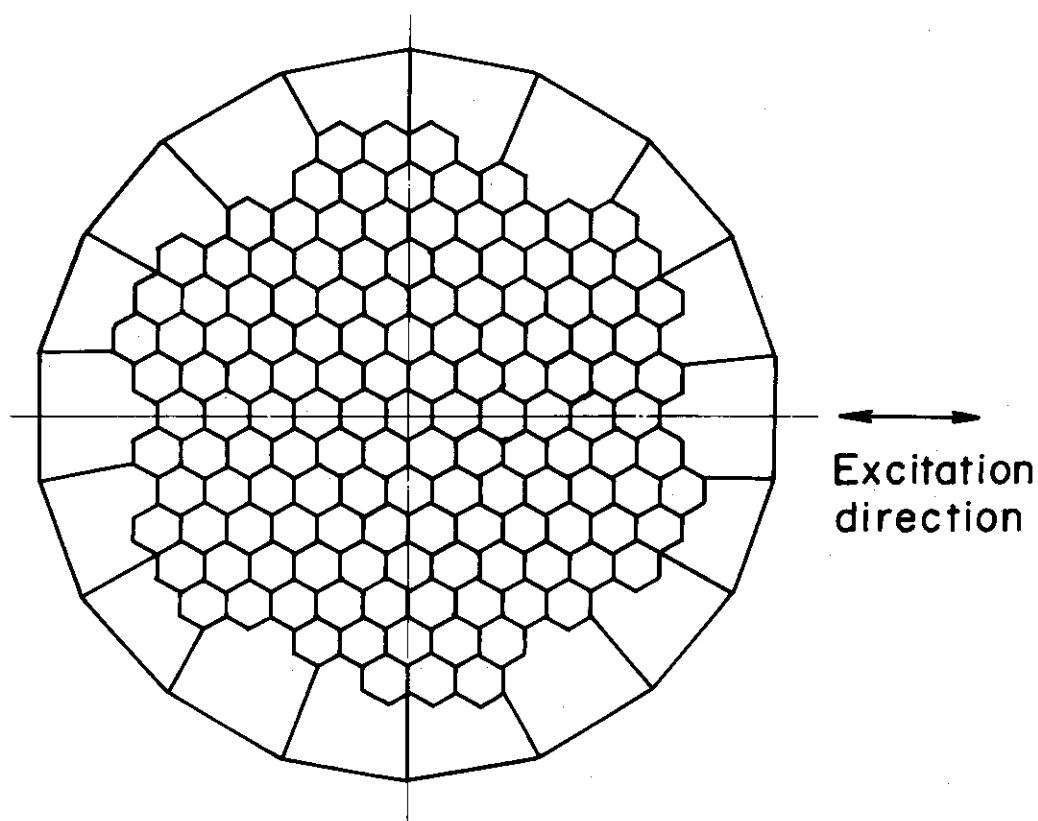
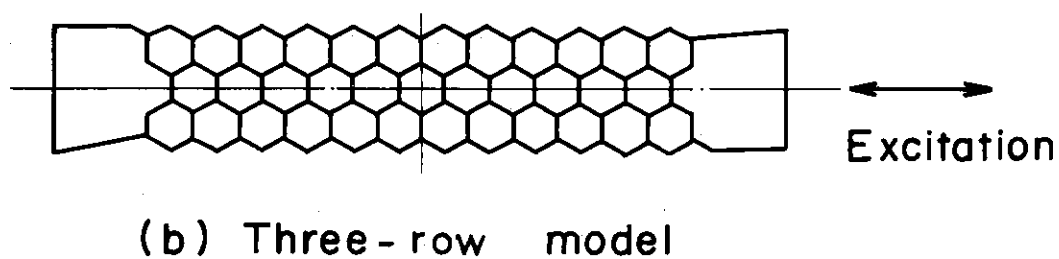
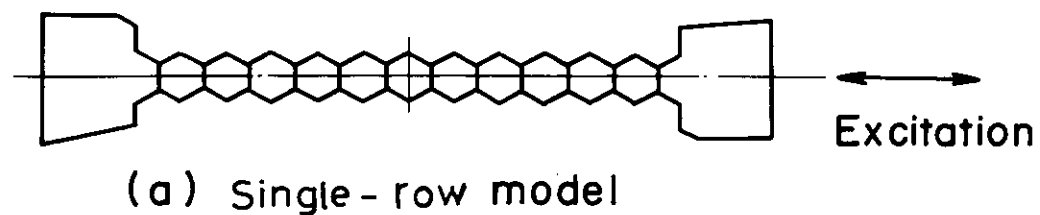
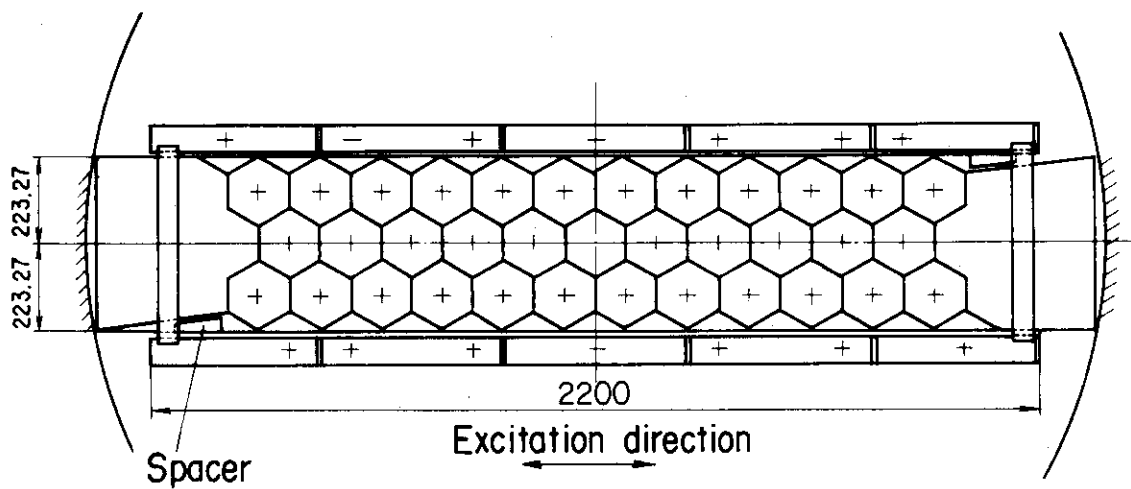
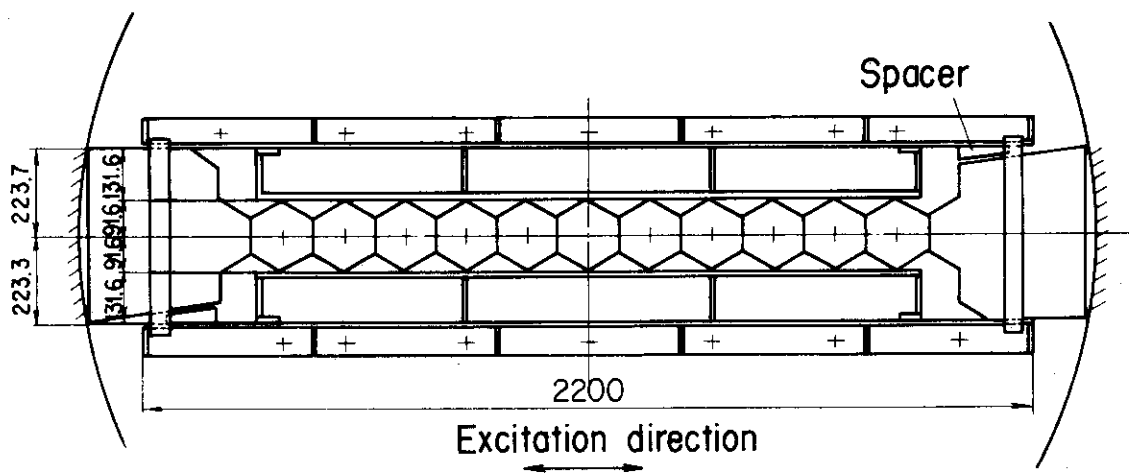


Fig. 3.12 Three test models to investigate interaction of surrounding blocks



(a) Three - row model



(b) Single - row model

Fig. 3.13 Three-row and single row test models

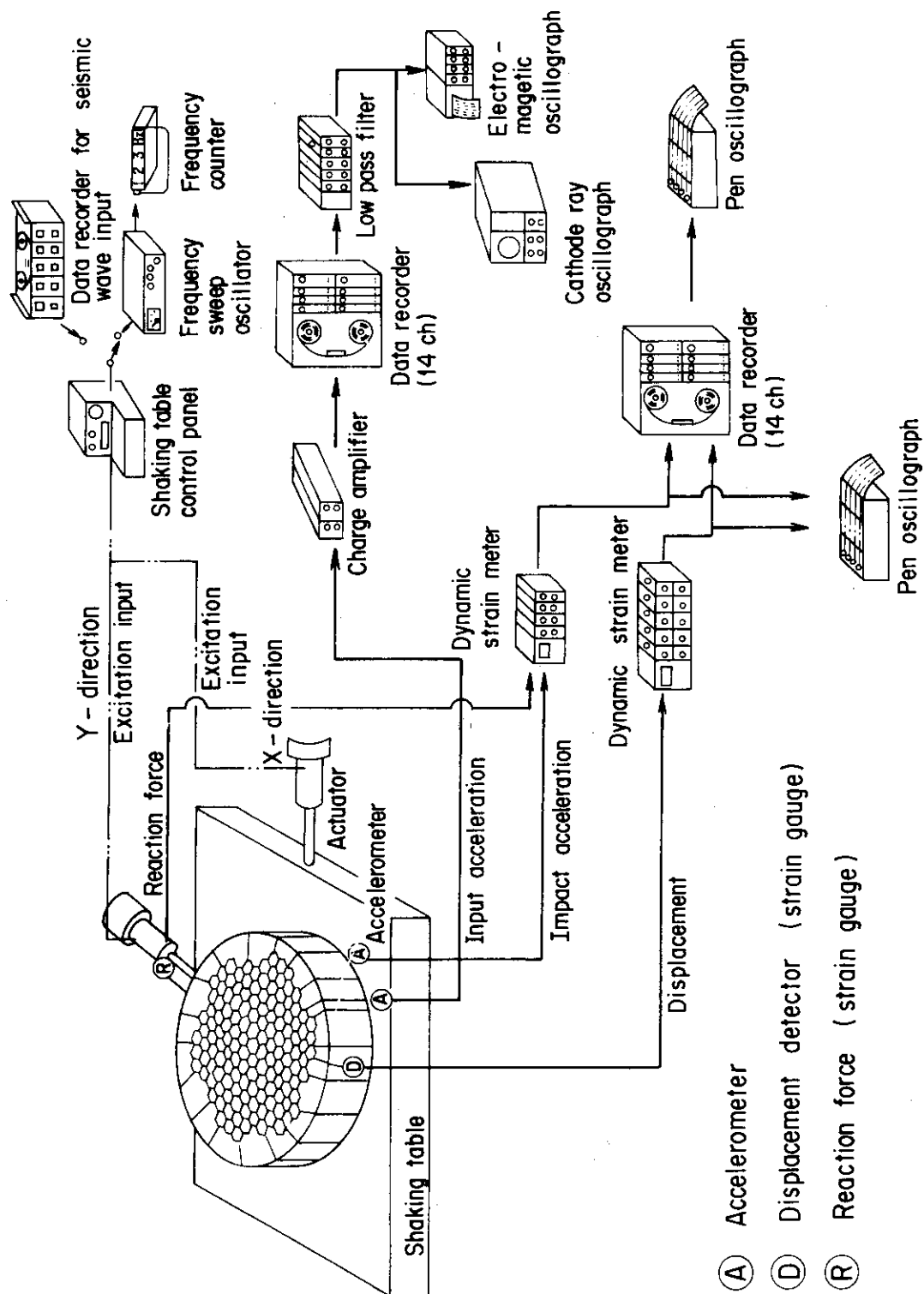
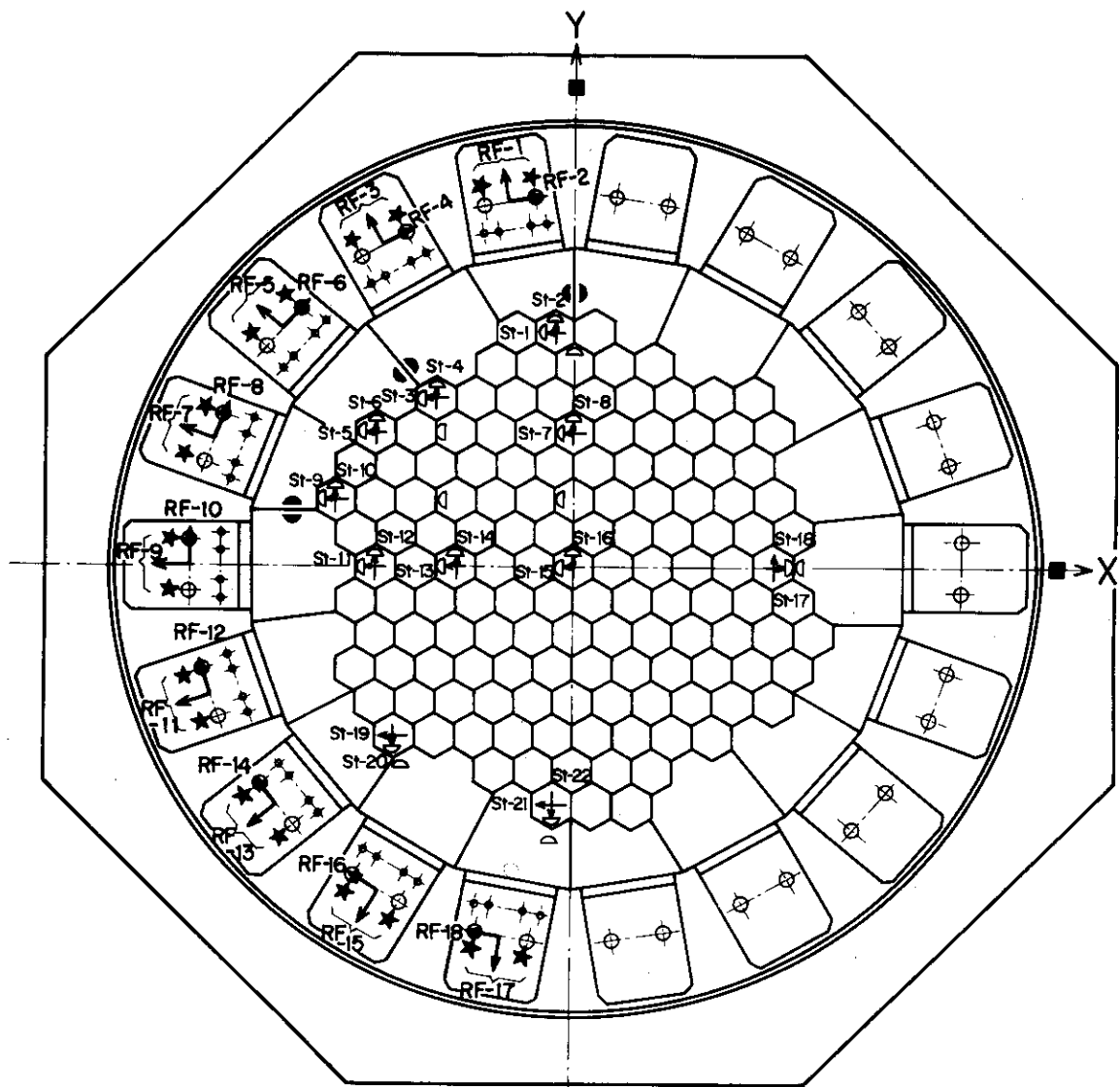


Fig. 3.14 Test facility and data acquisition diagram



- Displacement detector (3)
- ⊗ Impact accelerometer (26)
- RF * } Reaction force gauge (18)
- St ↑ Displacement detector (22)
- Accelerometer (Shaking table, 2)

Fig. 3.15(a) Instrument locations (I)

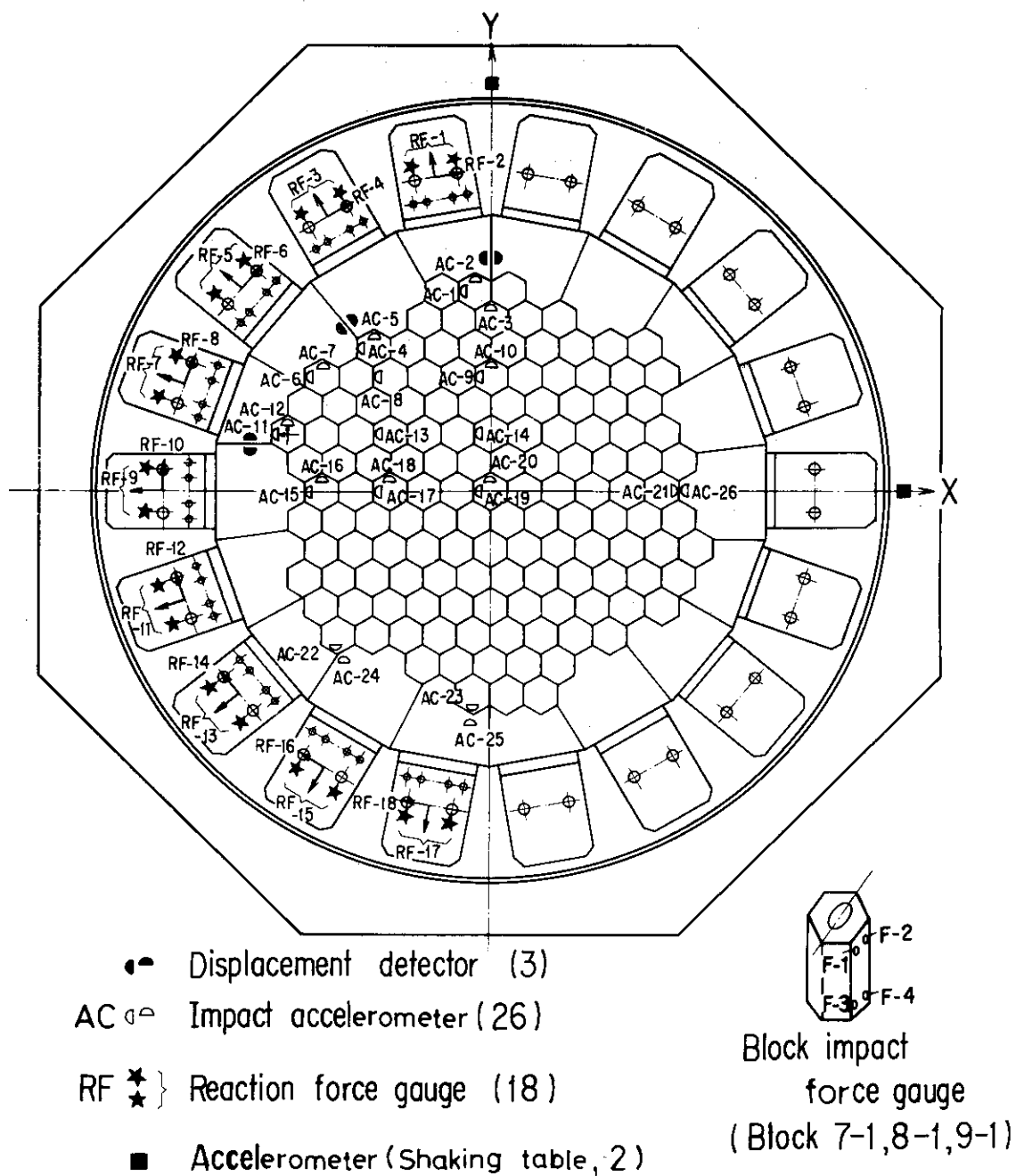


Fig. 3.15(b) Instrument locations (II)

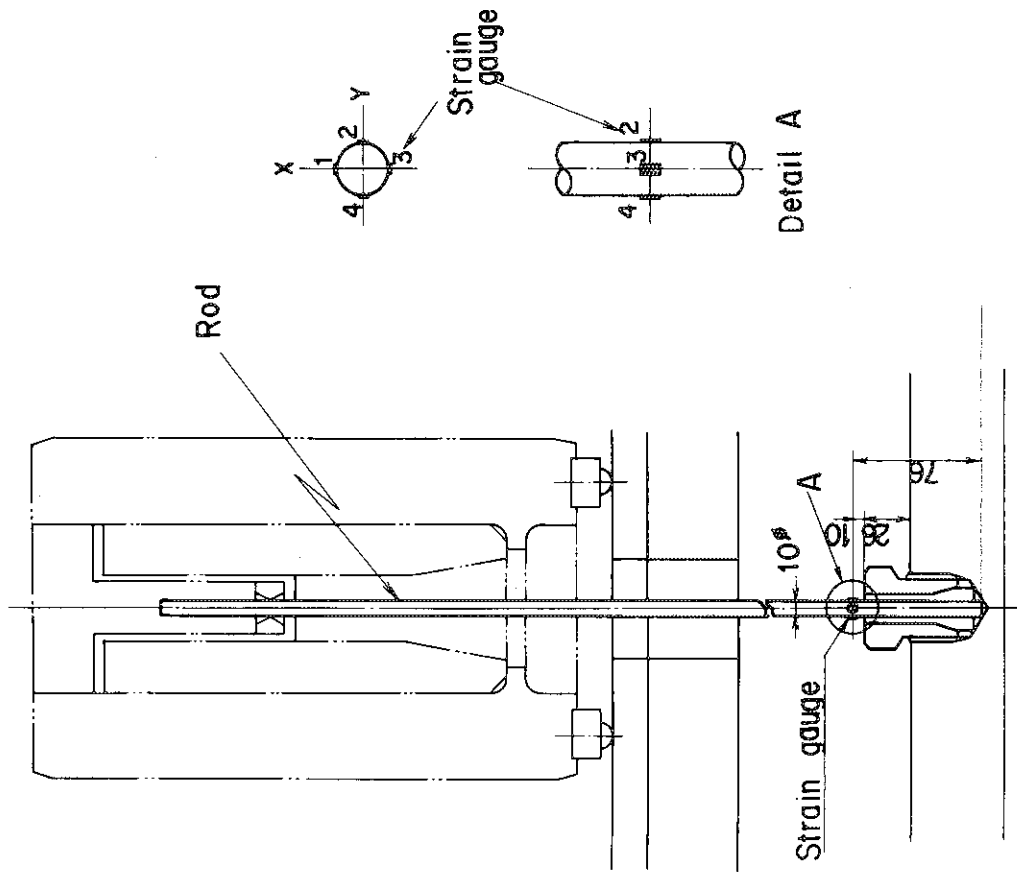


Fig. 3.16 Method for fuel block displacement measurement

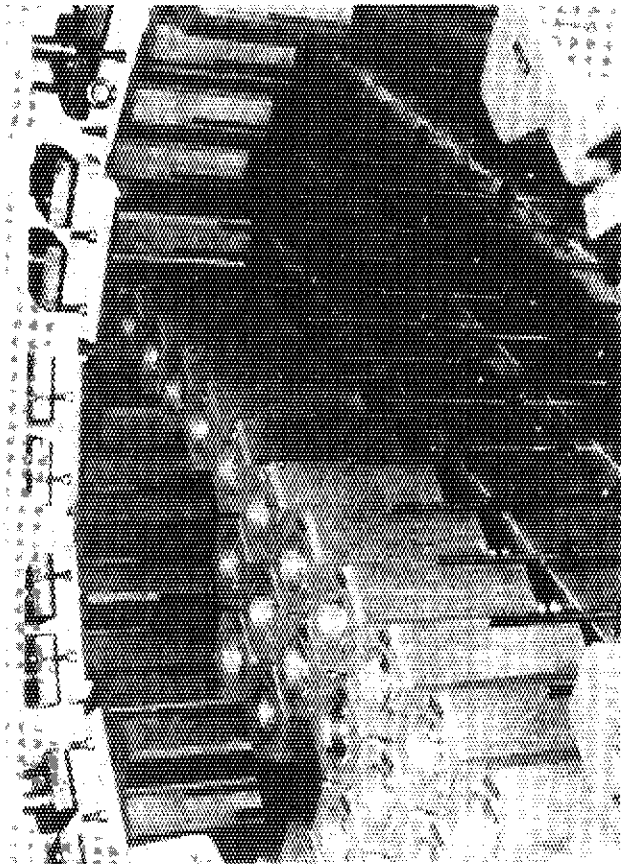


Fig. 3.17 Displacement measuring device for fuel block (Photograph)

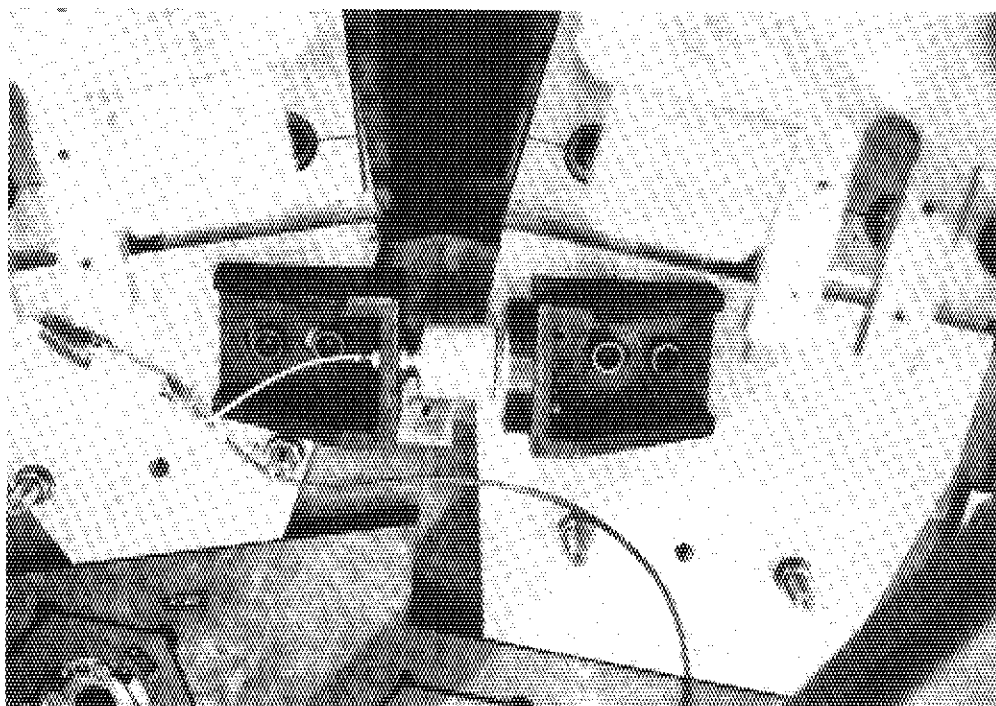


Fig. 3.19 Displacement measuring device
for side reflector block
(Photograph)

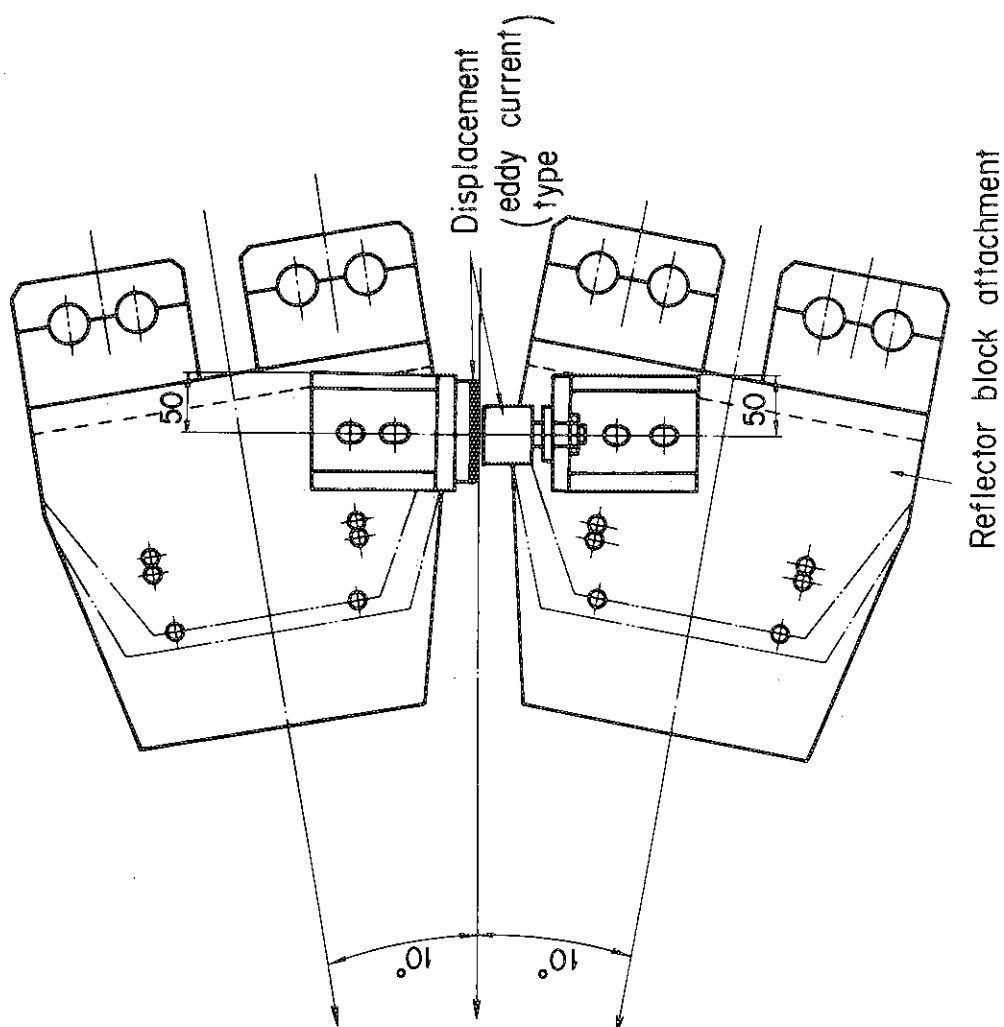
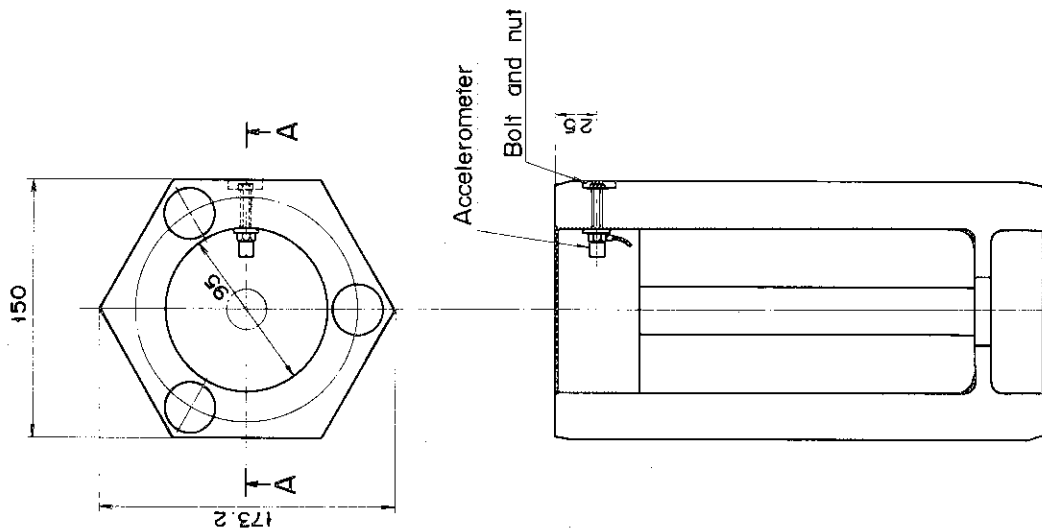


Fig. 3.18 Displacement measuring device for side
reflector block



Section A-A

Fig. 3.20 Accelerometer location in fuel block

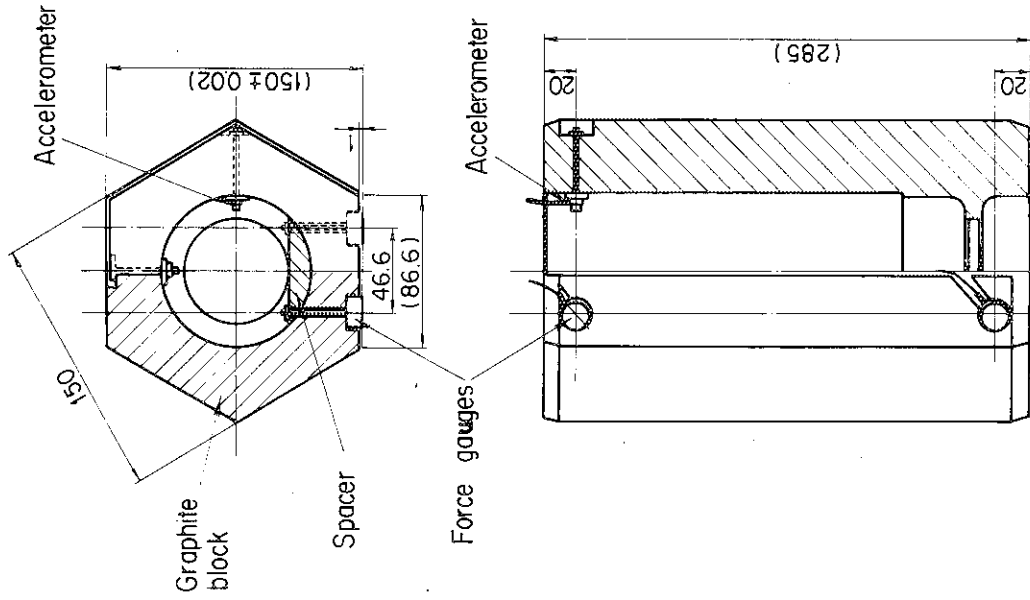


Fig. 3.21 In-core load and acceleration measuring devices (Dimension in mm)

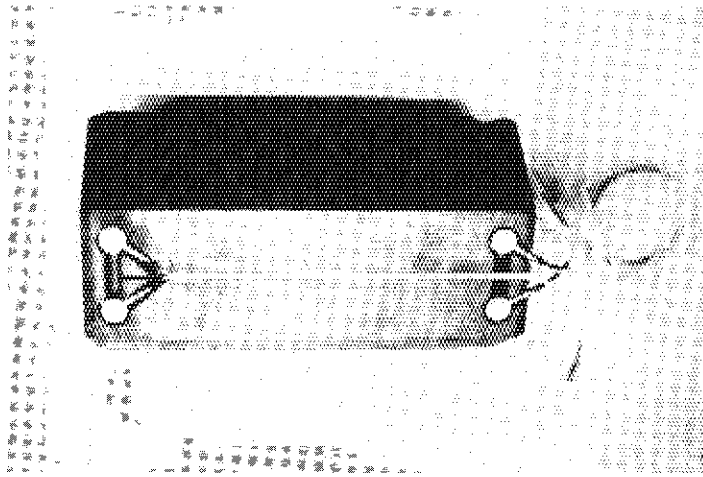


Fig. 3.22 In-core load and acceleration measuring fuel block (Photograph)

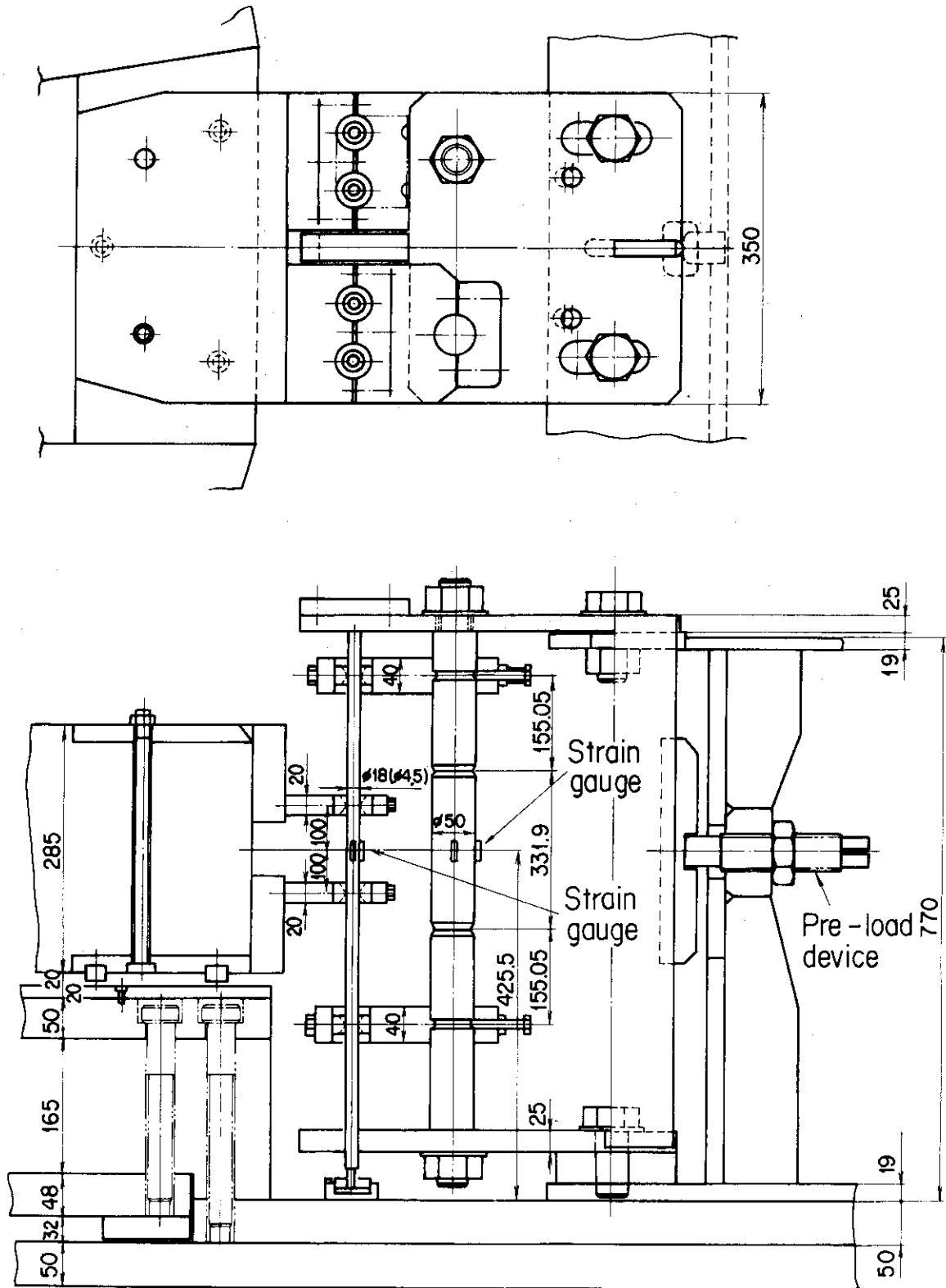


Fig. 3.23 Side reflector reaction measurement

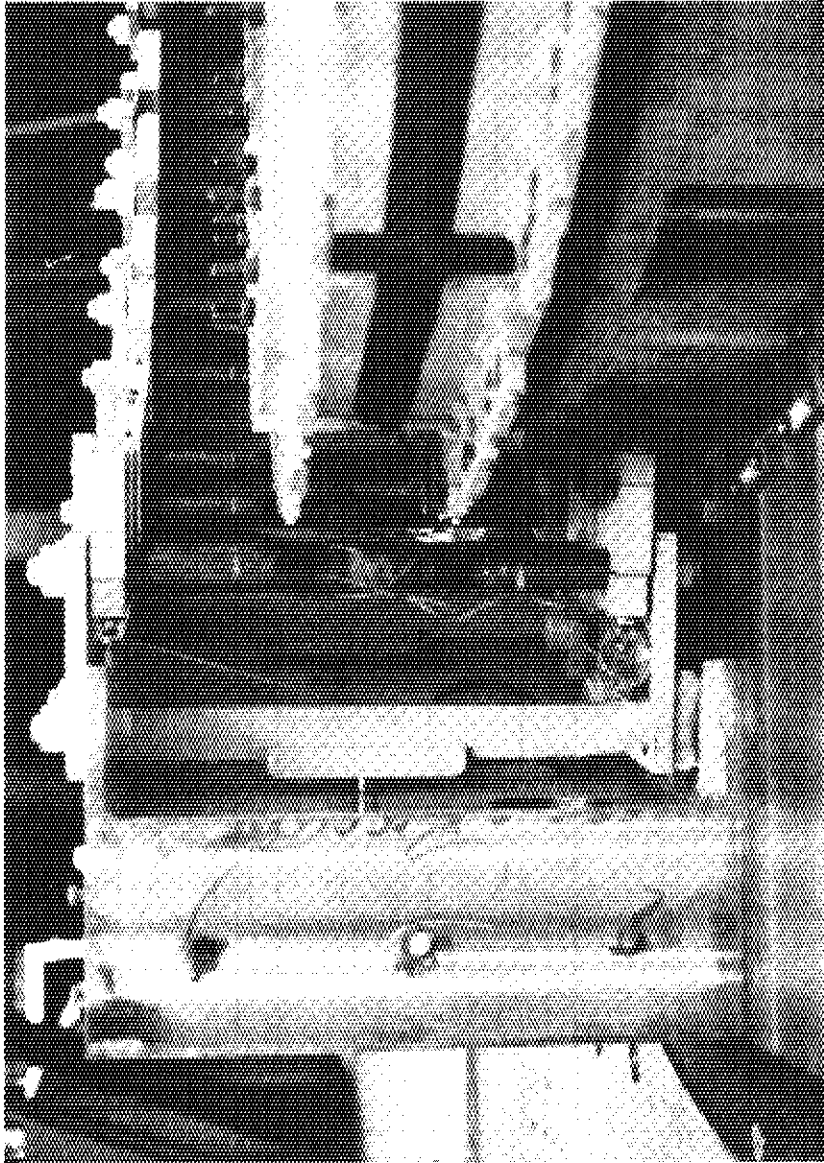


Fig. 3.24 Side reflector reaction measurement (Photograph)

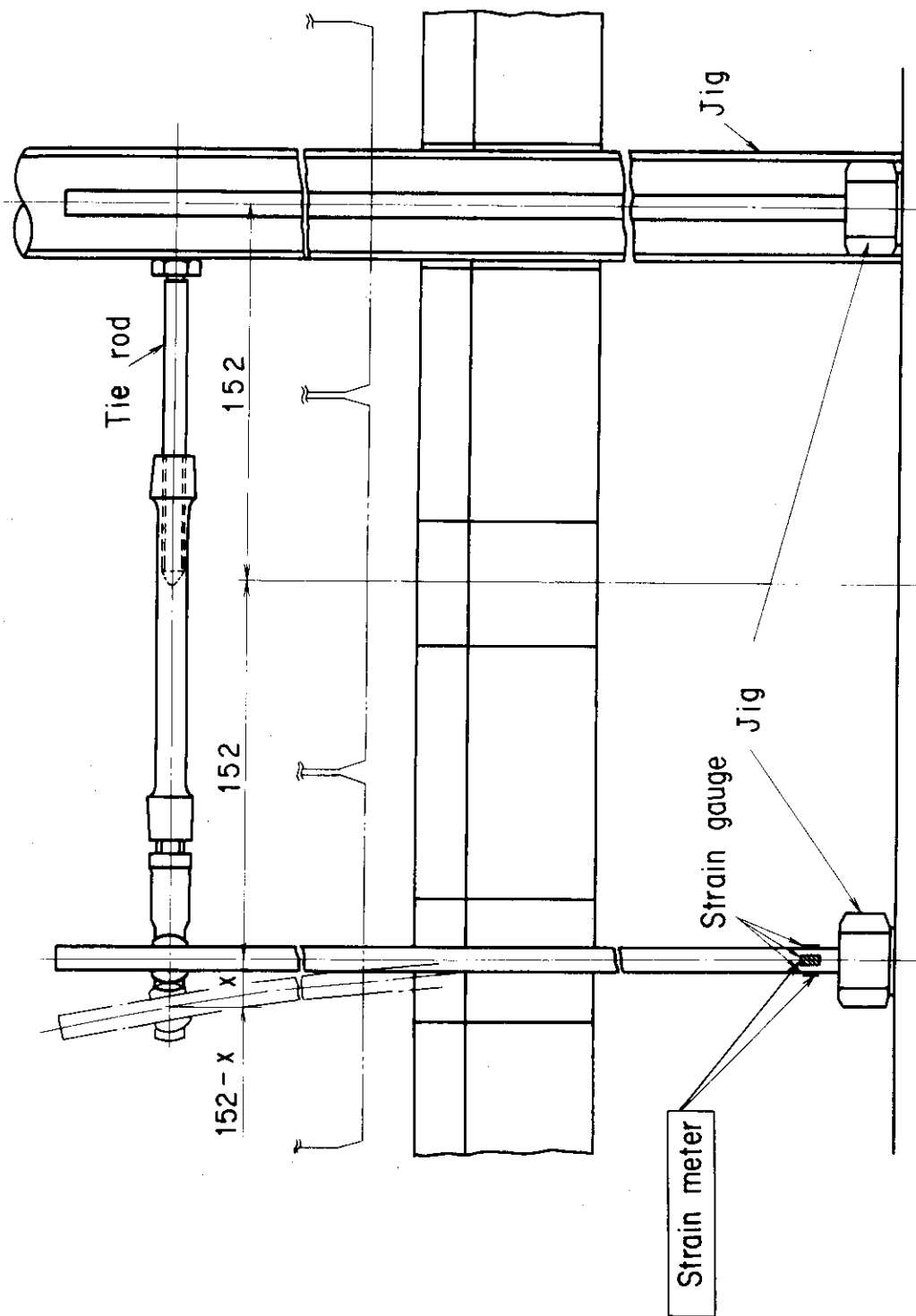


Fig. 3.25 Method for spring constant measurement of fuel block restoring characteristic

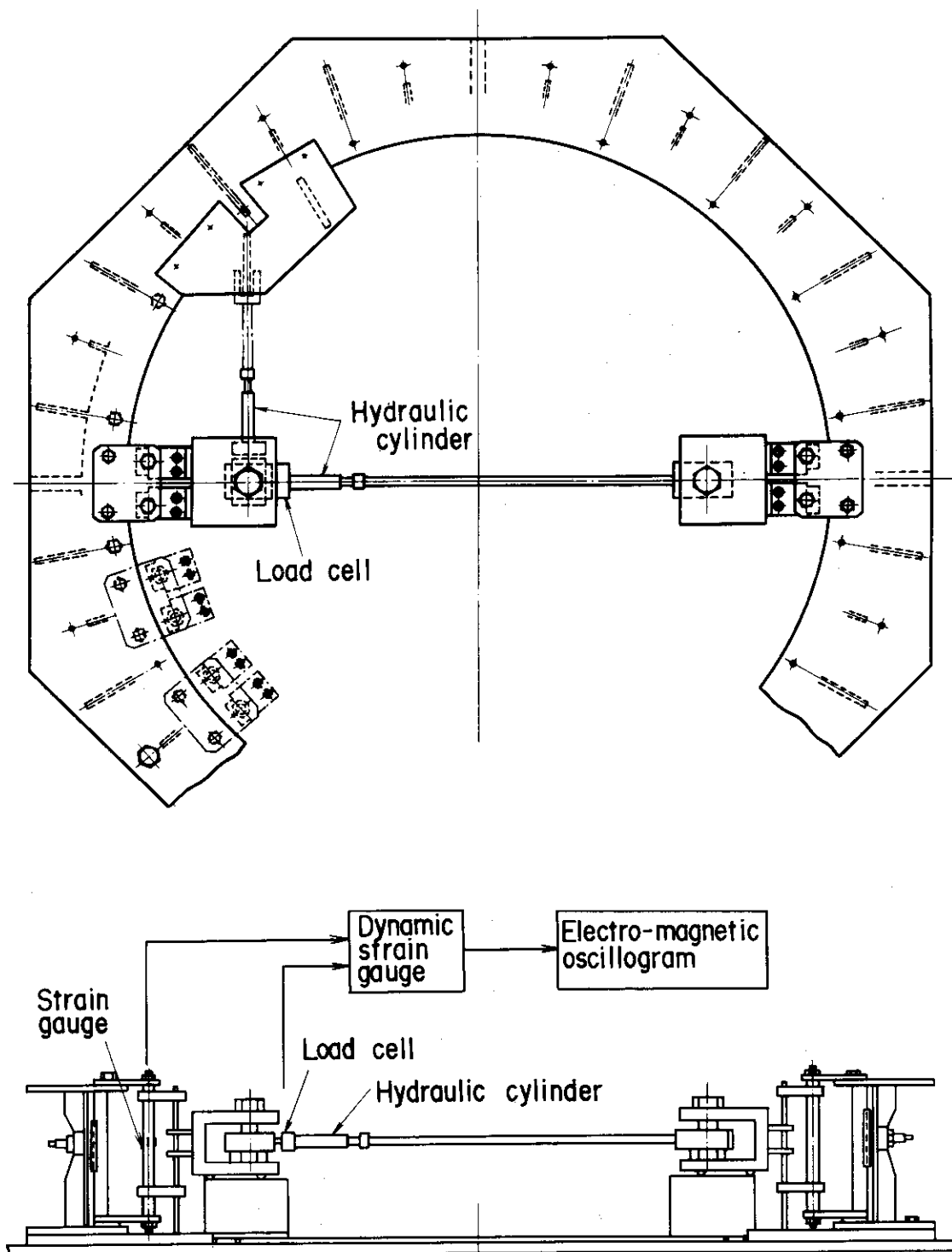
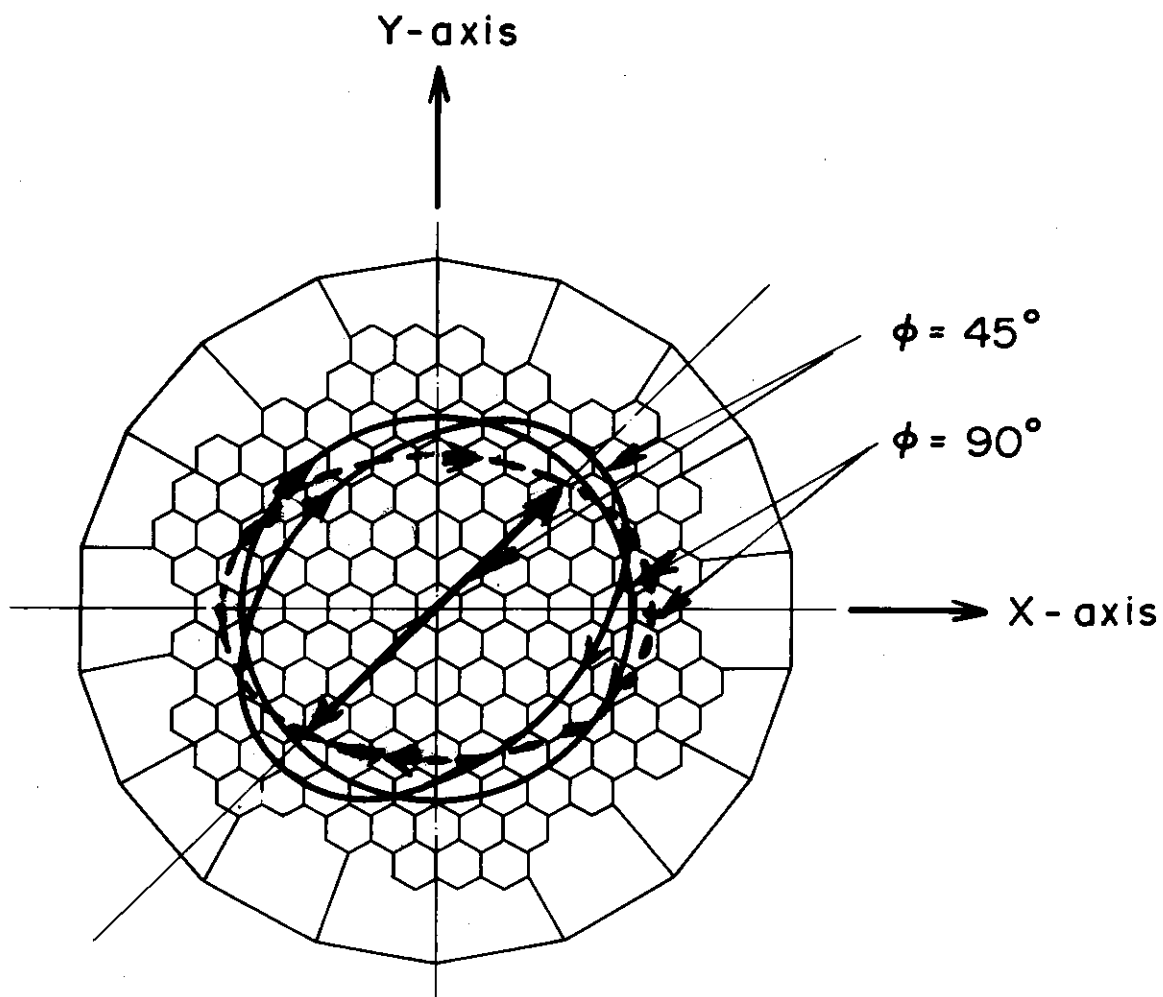


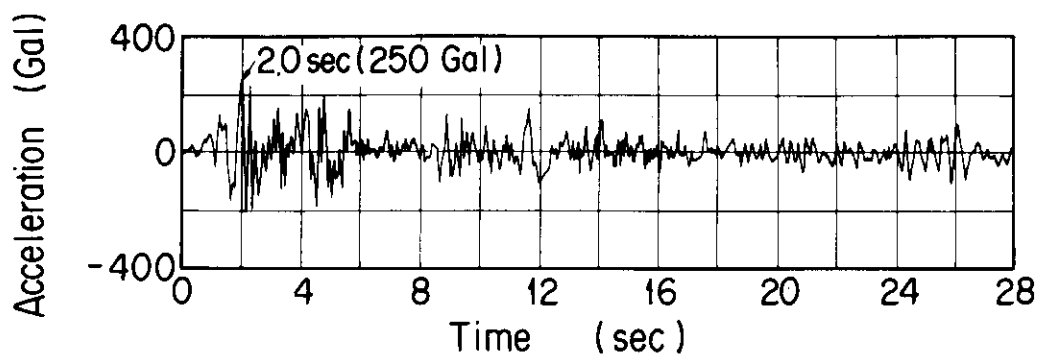
Fig. 3.26 Method for spring constant measurement of side reflector block support



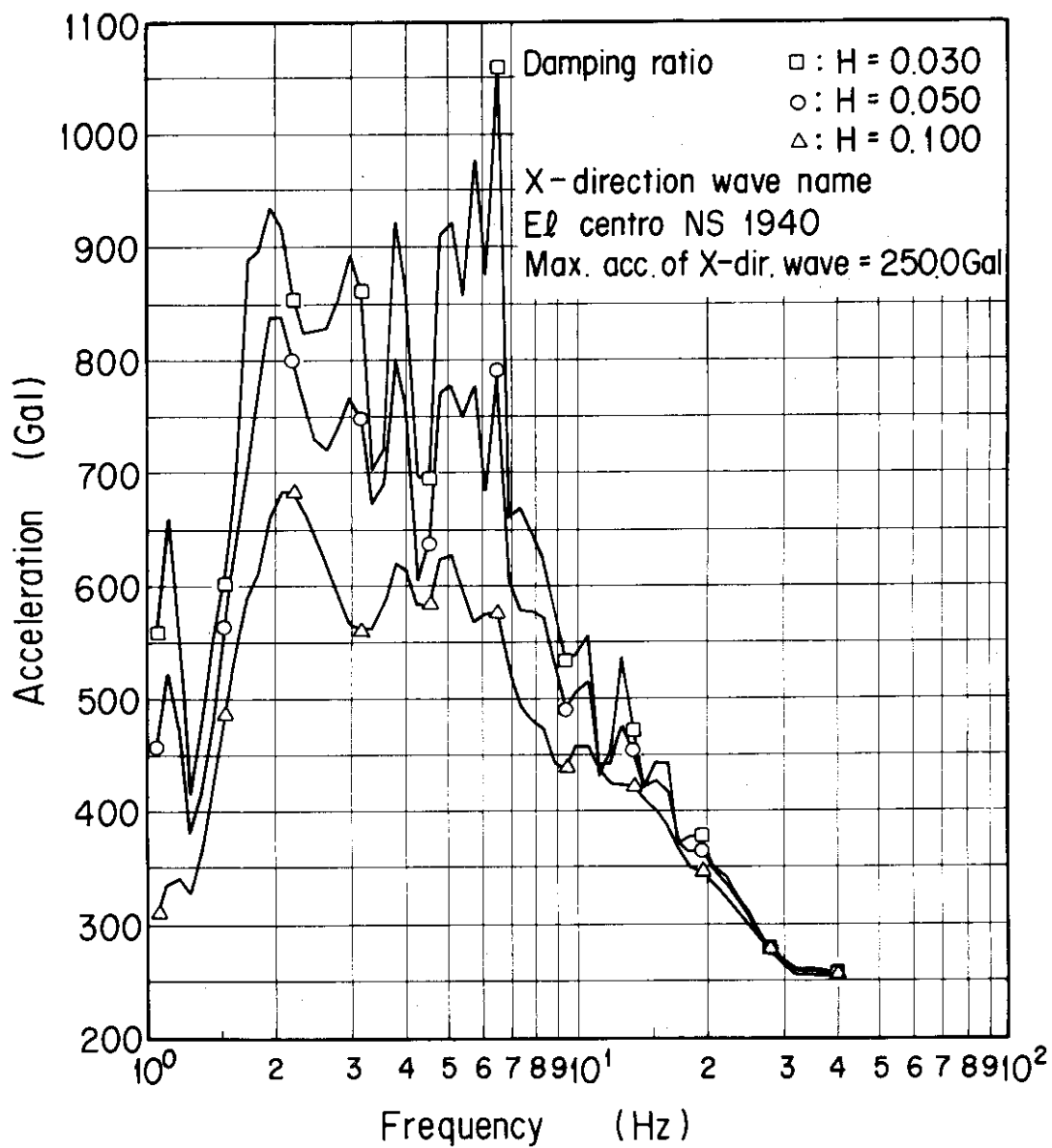
$$X = A_1 \sin (2 \pi f)$$

$$Y = A_2 \sin (2 \pi f + \phi)$$

Fig. 3.27 Two-axis excitation modes

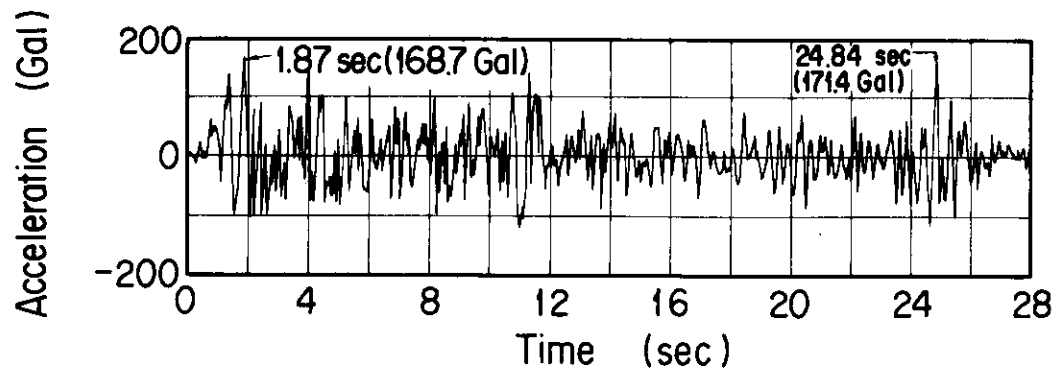


(a) Input wave

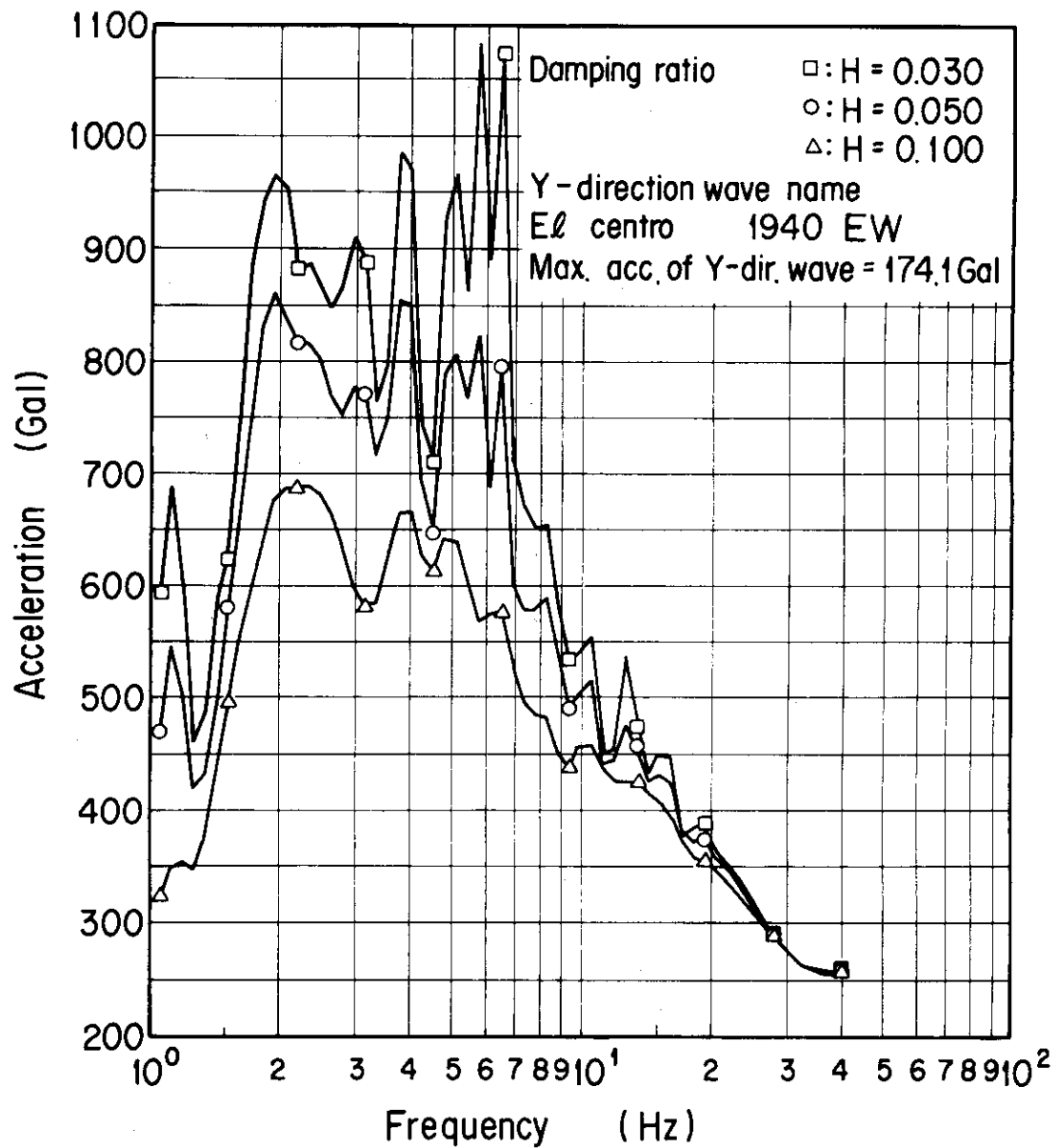


(b) Response spectrum

Fig. 3.28 Seismic wave and response spectrum
(El Centro 1940 NS wave)

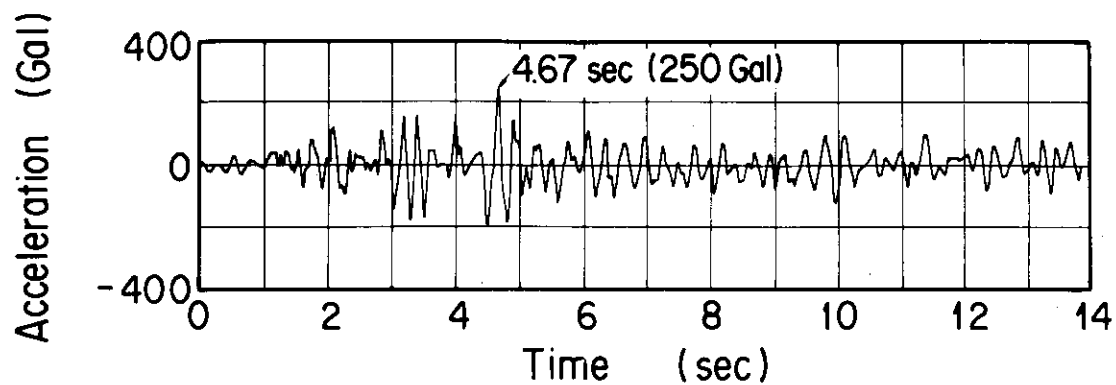


(a) Input wave

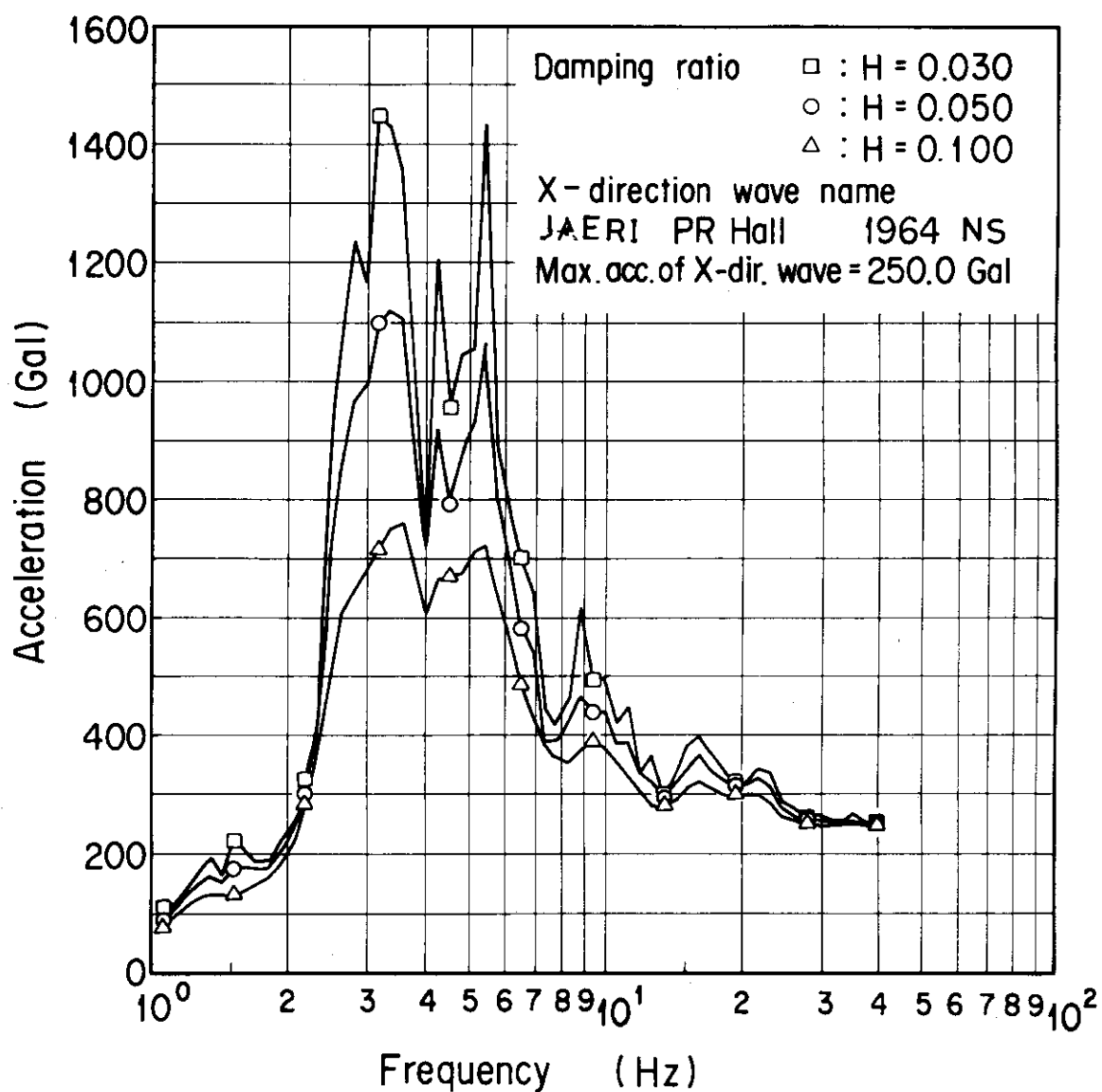


(b) Response spectrum

Fig. 3.29 Seismic wave and response spectrum
(El Centro 1984 EW wave)

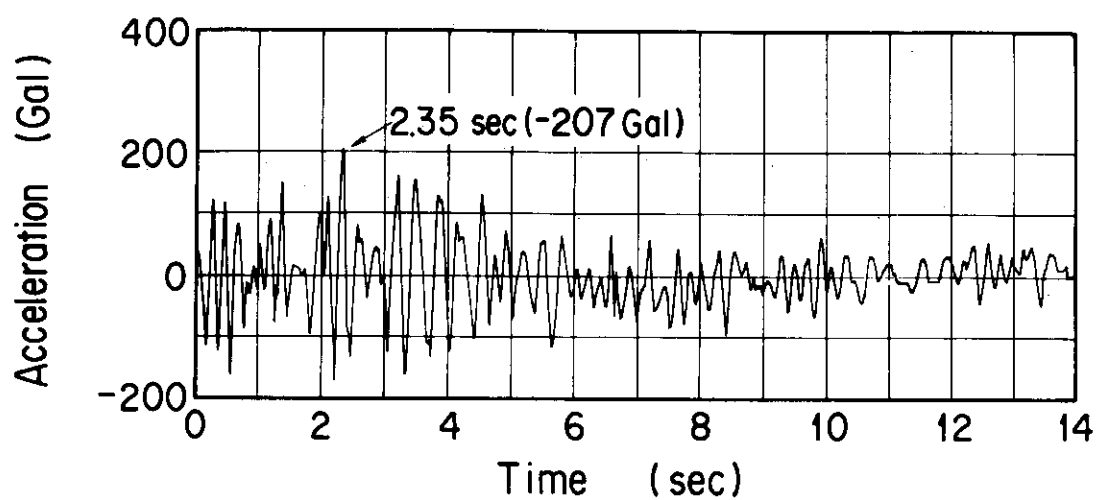


(a) Input wave

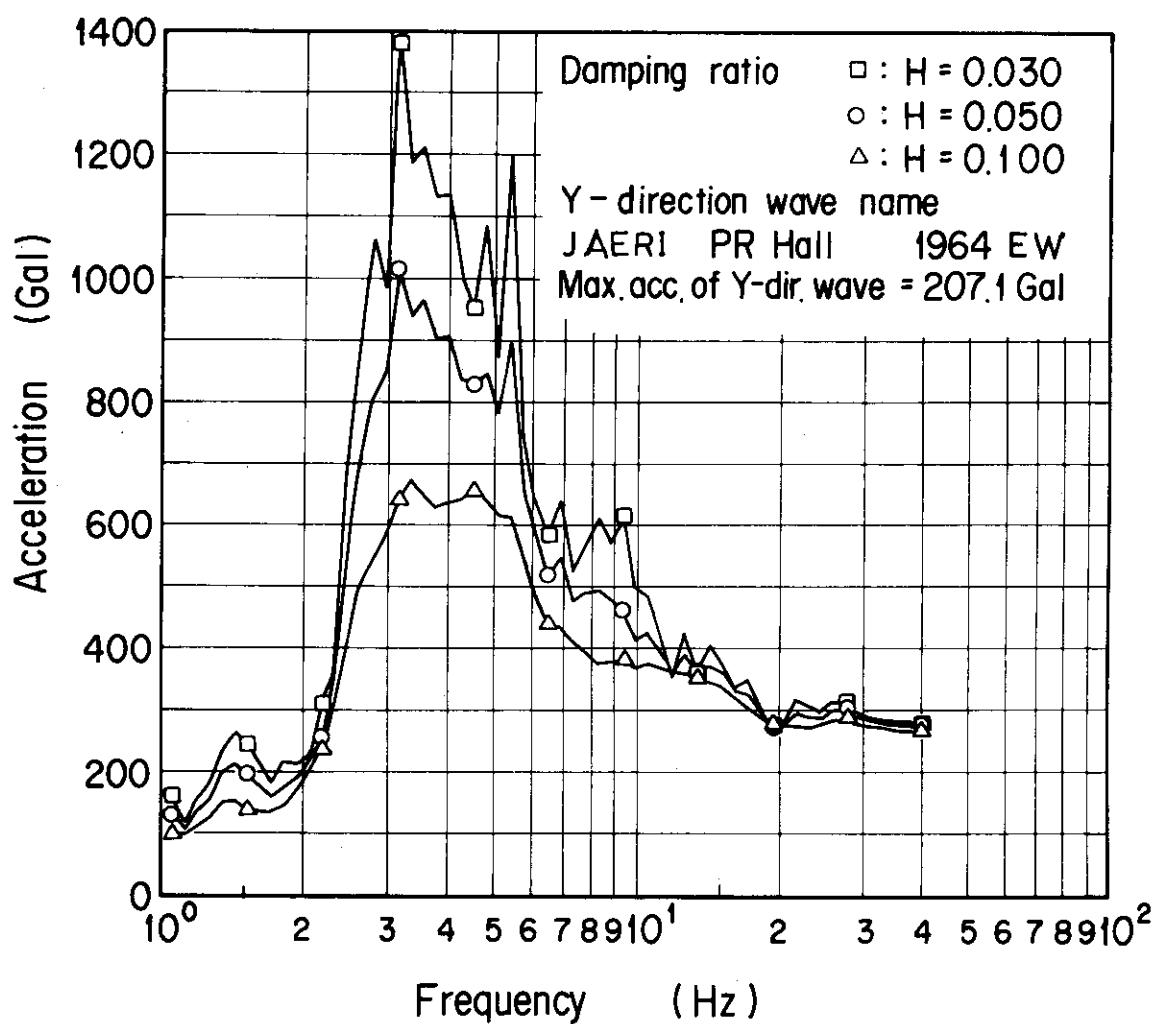


(b) Response spectrum

Fig. 3.30 Seismic wave and response spectrum
(JAERI PR Hall 1964 NS wave)

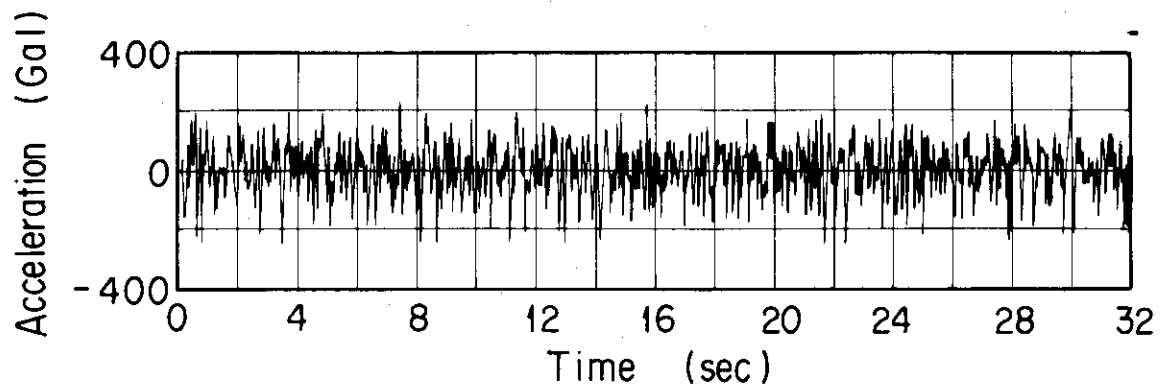


(a) Input wave

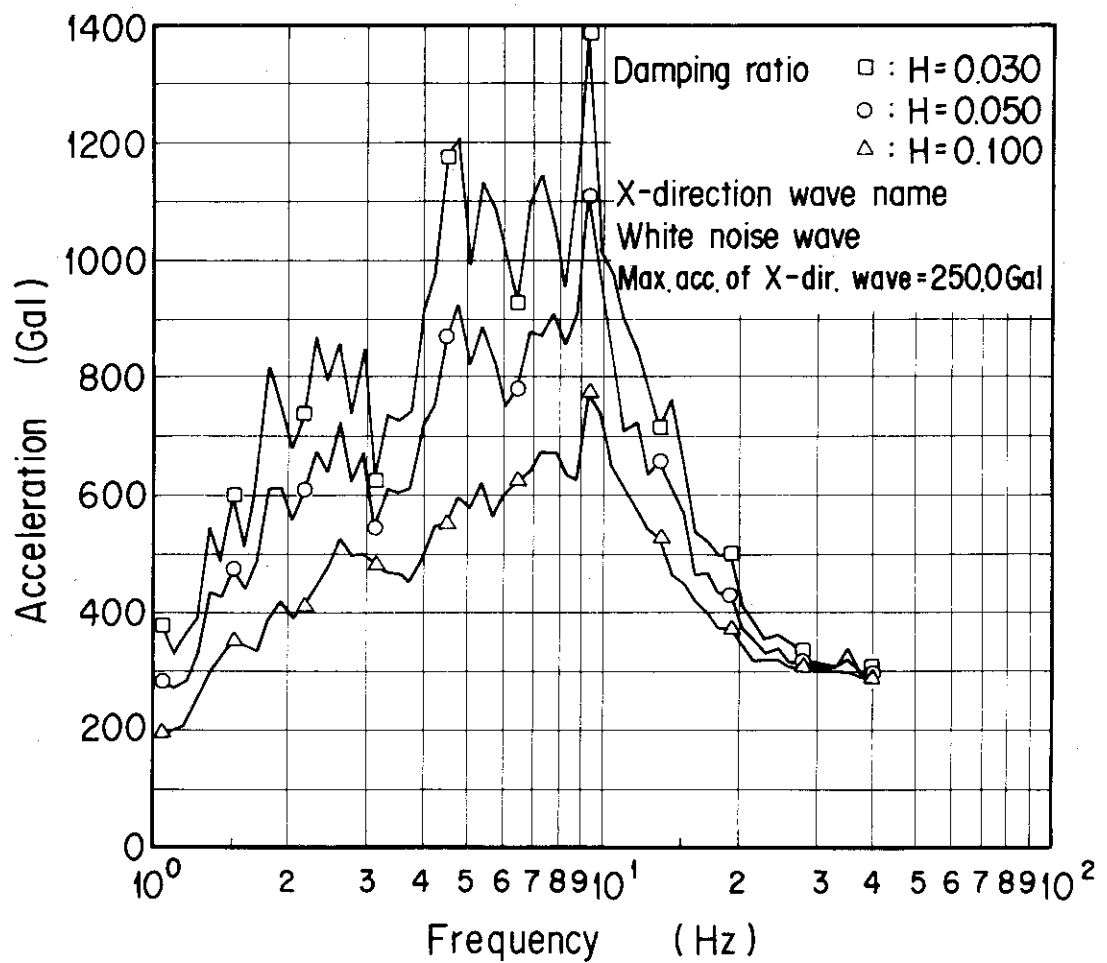


(b) Response spectrum

Fig. 3.31 Seismic wave and response spectrum
(JAERI PR Hall 1964 EW wave)



(a) Input wave



(b) Response spectrum

Fig. 3.32 Random wave and response spectrum (White noise)

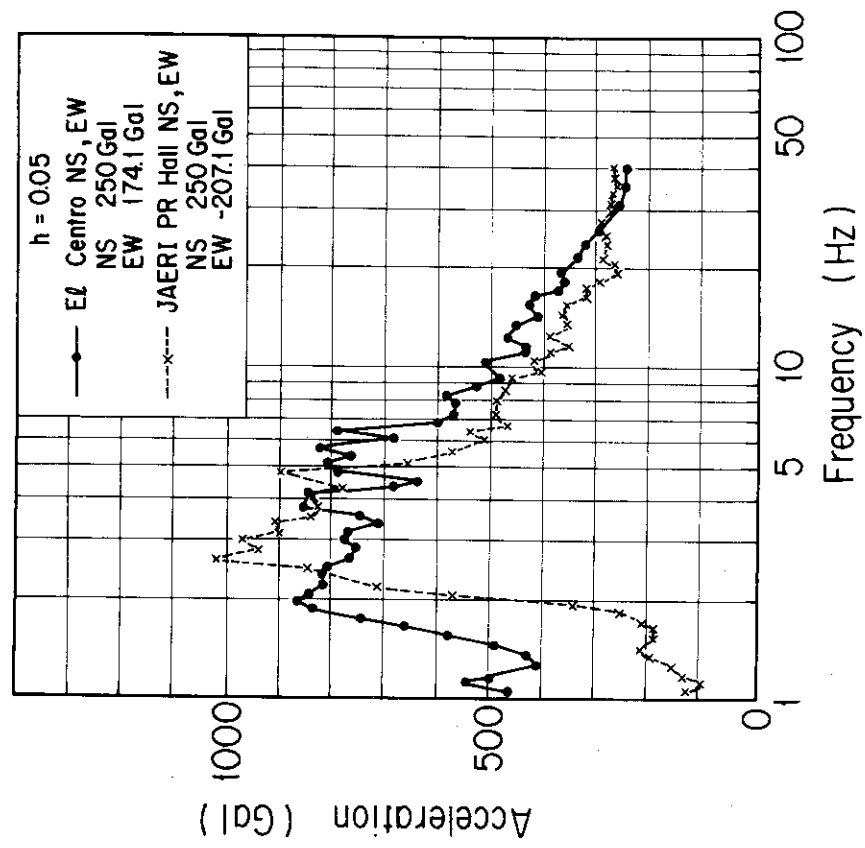


Fig. 3.34 Input wave and response spectrum
(Two-axis simultaneous wave)

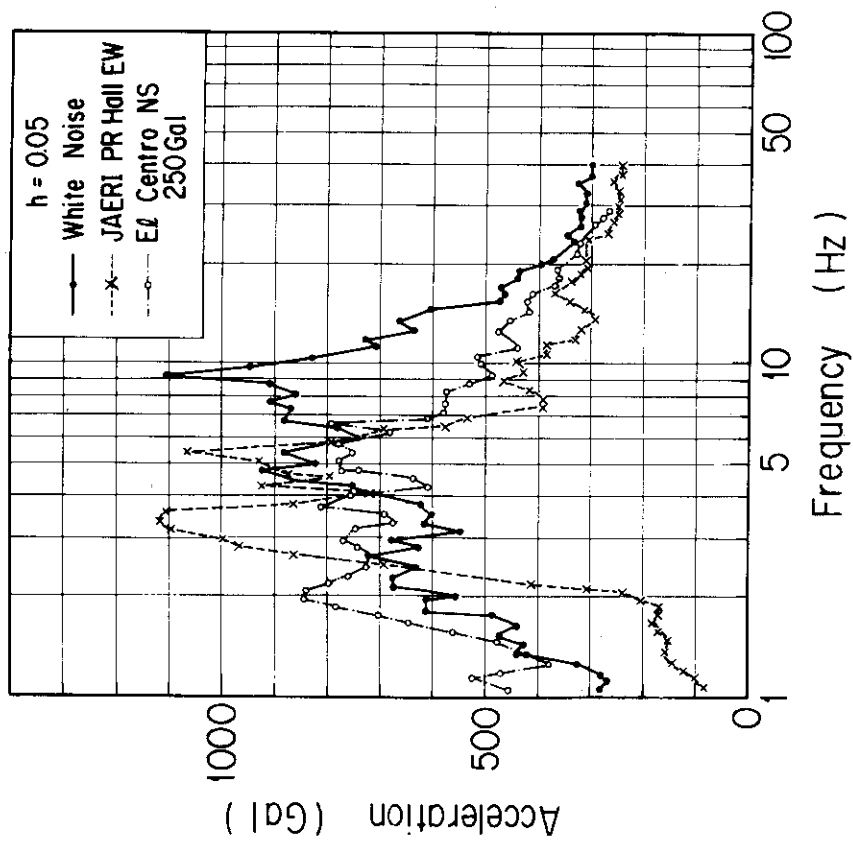


Fig. 3.33 Input wave and response spectrum
(Single axis wave)

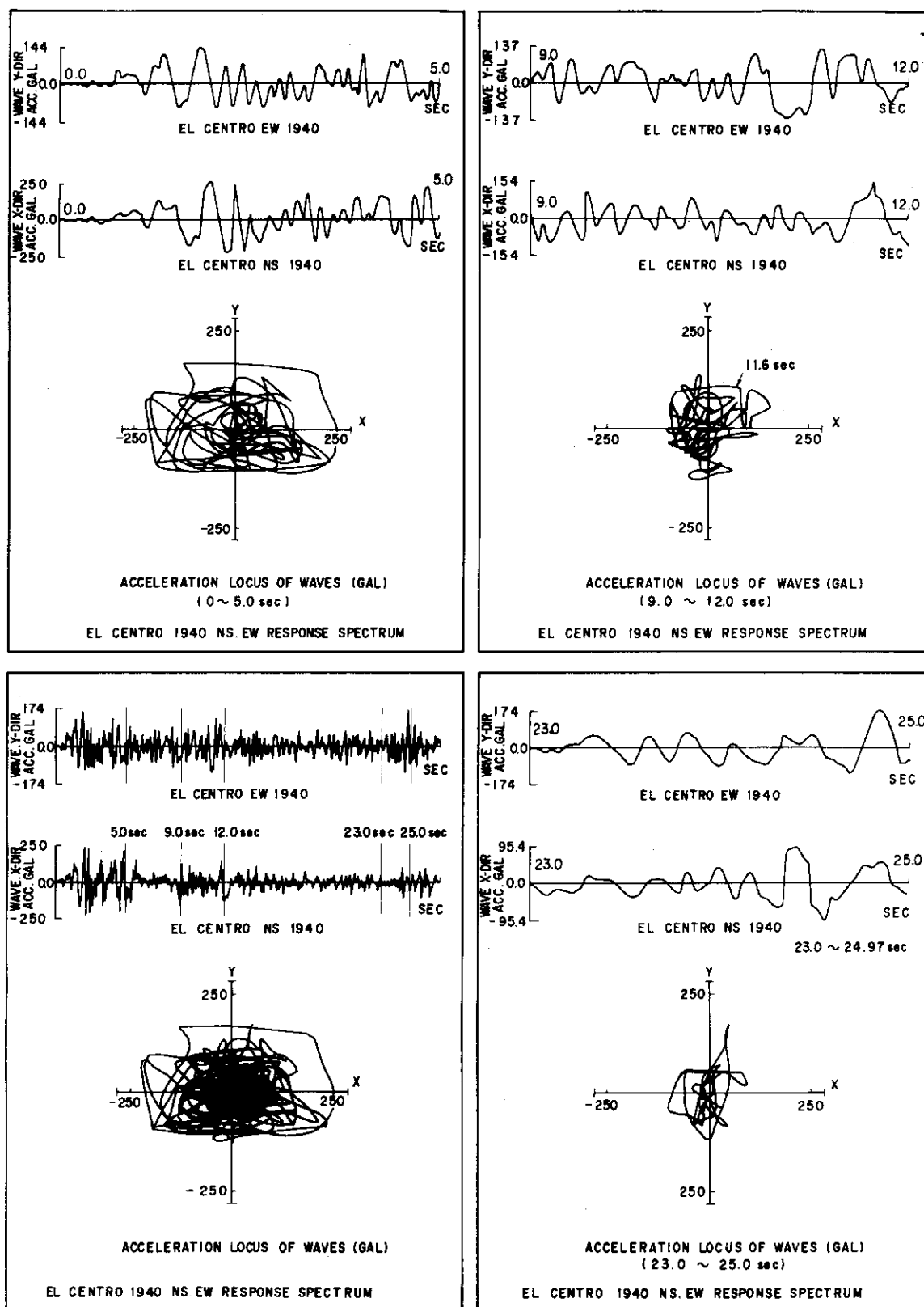


Fig. 3.35 Input wave and acceleration locus (I)
(El Centro 1940 NS, EW waves)

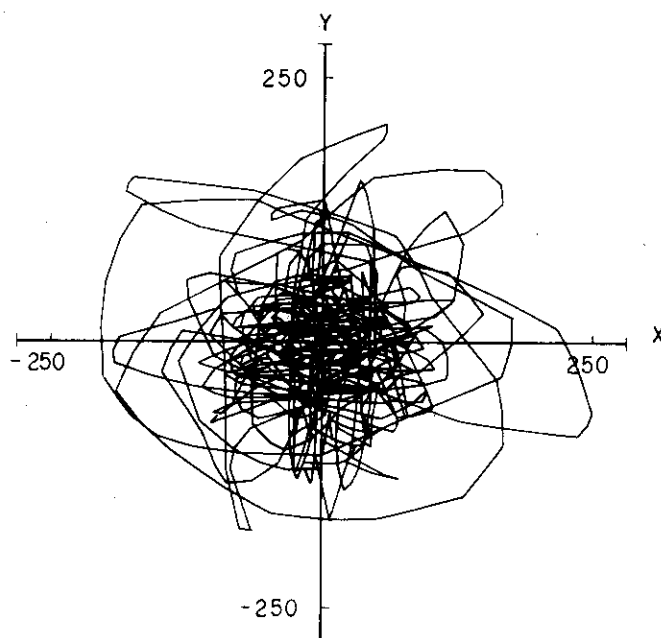
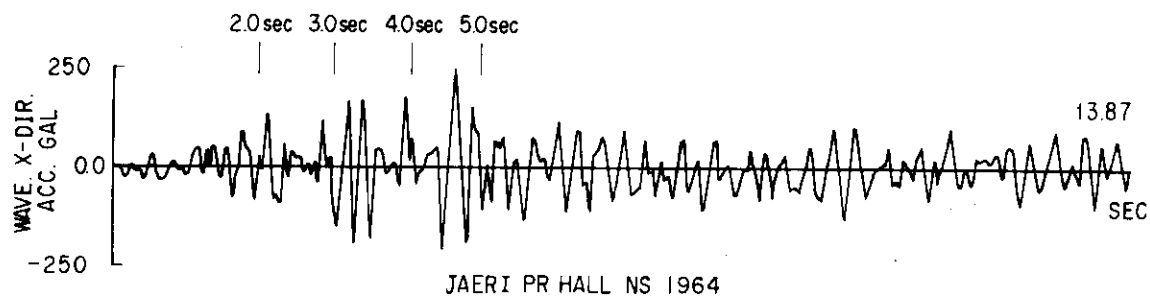
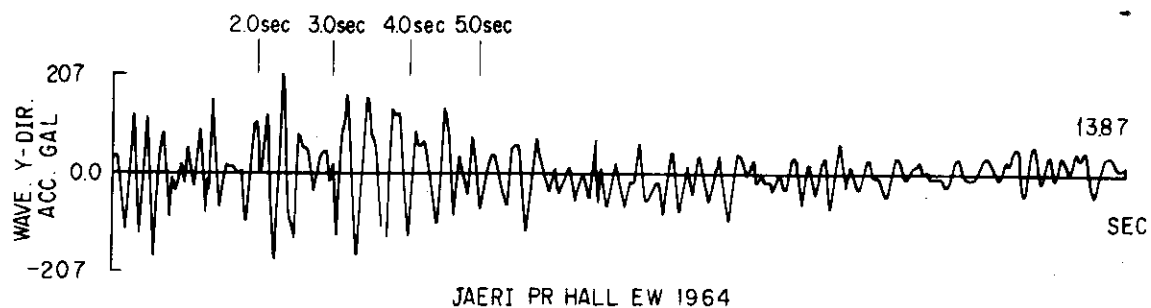


Fig. 3.36 Input wave and acceleration locus (II)
(JAERI PR Hall 1964 NS, EW waves)

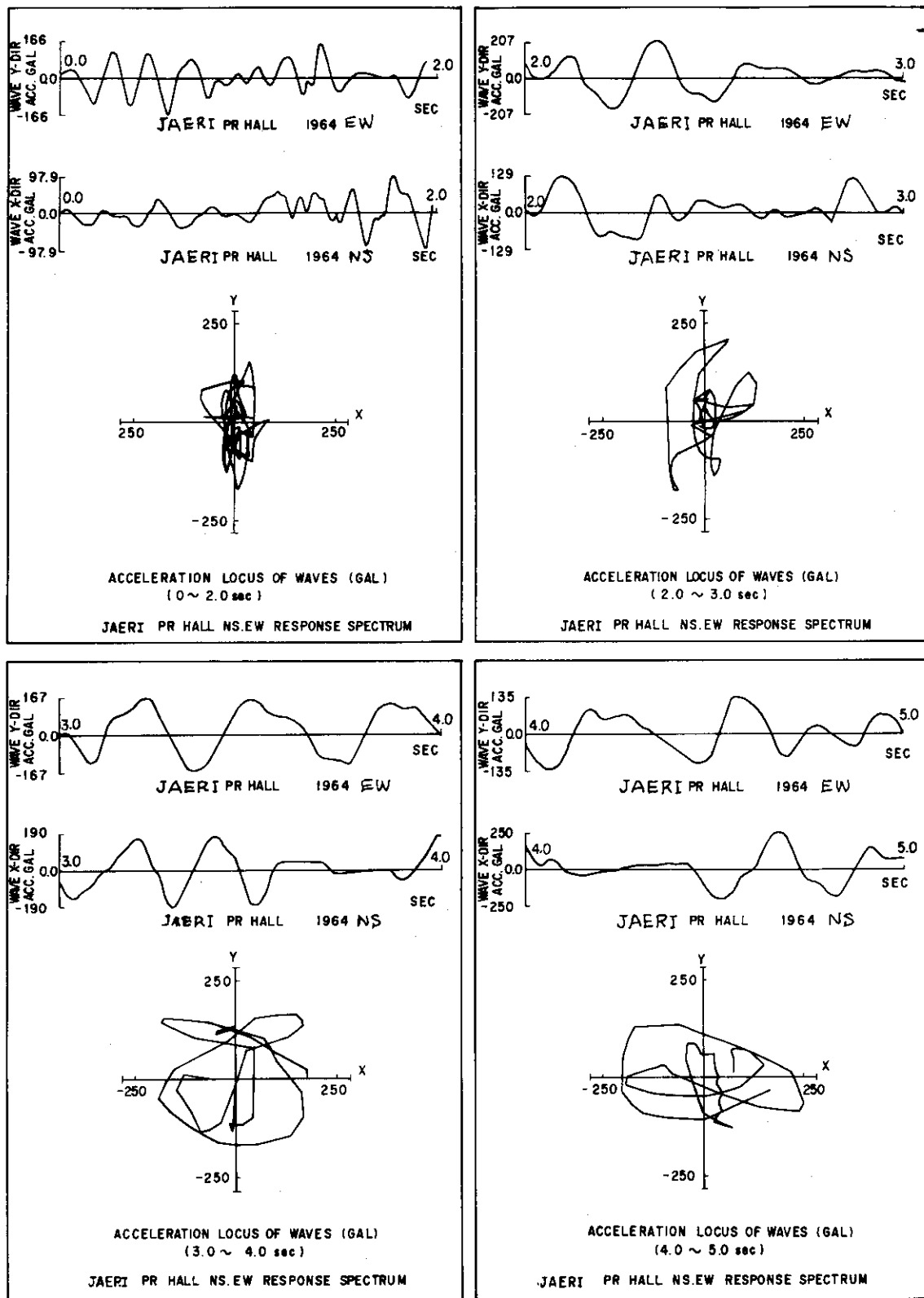
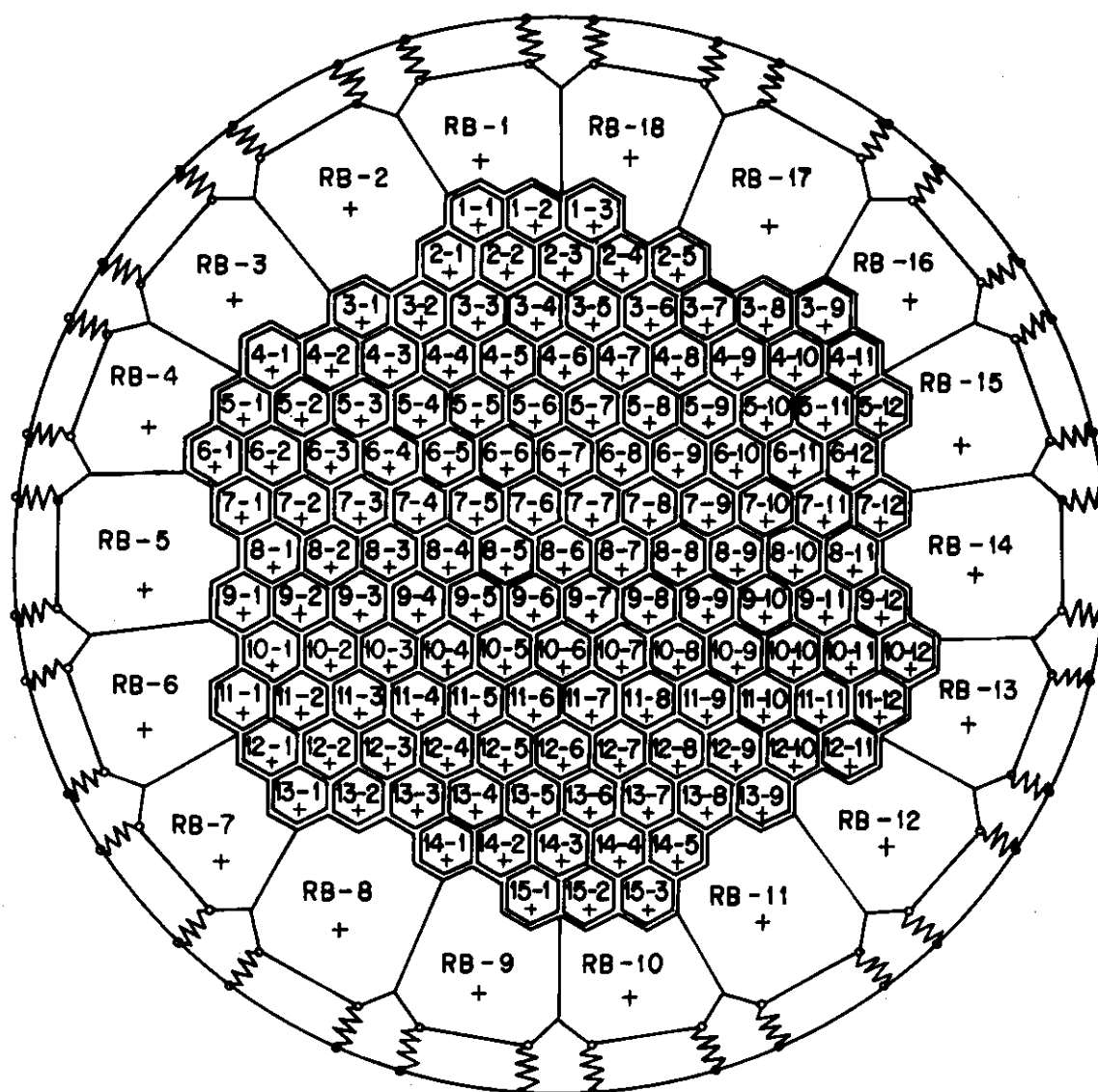


Fig. 3.37 Input wave and acceleration locus (III)
(JAERI PR Hall 1964 NS, EW waves)



Fuel blocks 1-1 ~ 15-3
 Reflector blocks RB-1 ~ RB-18

Fig. 3.38 Location number of fuel blocks and side reflector blocks

4. 試験前検査

4.1 燃料ブロック変位測定器の校正試験

燃料ブロックのX軸方向およびY軸方向の変位測定のため、燃料ブロック中央のばね棒に取り付けられたひずみゲージの校正試験結果の一例を Fig. 4.1～4.3 に示す。図から明らかなように、変位量とひずみ量との間には線形性が保たれている。例示した三個の燃料ブロックの変位量とひずみ量との関係がほとんど同じである。これによって燃料ブロックのばね棒のひずみ量と変位量の関係は、すべての燃料ブロックについて同じとみなして変位を計測する。

4.2 側方固定ブロック支持反力測定器の校正試験

側方固定ブロックの支持反力の径方向および接線方向の成分を測定するため、側方固定ブロック支持構造物のばね棒に取り付けられたひずみゲージの校正試験結果の一例を Fig. 4.4～4.6 に示す。図から明らかなように、荷重とひずみ量との間には線形性が保たれている。例示した三個の側方固定ブロック支持構造物のばね棒にかかる荷重とひずみ量との関係がほとんど同じである。これによって側方固定ブロック支持構造物のばね棒のひずみ量とかかる荷重との関係は、すべての側方固定ブロックについて同じとみなして荷重を計測する。

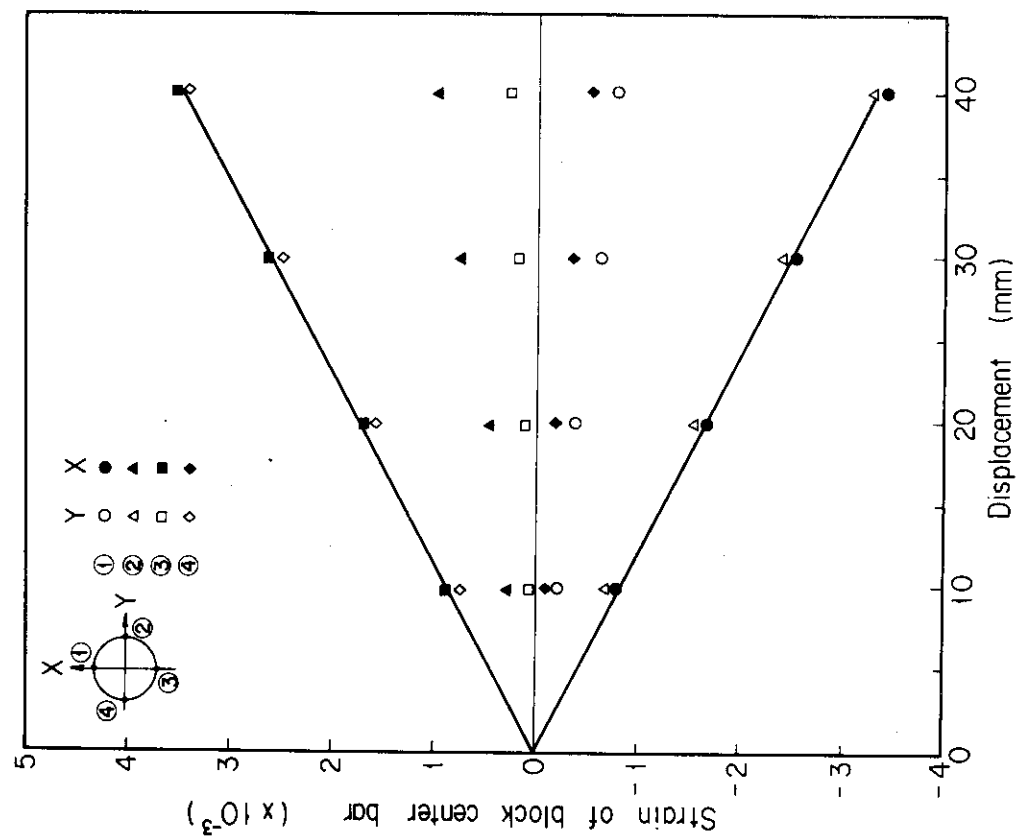


Fig. 4.2 Displacement-strain relationship of block center bar (block No. 8-6)

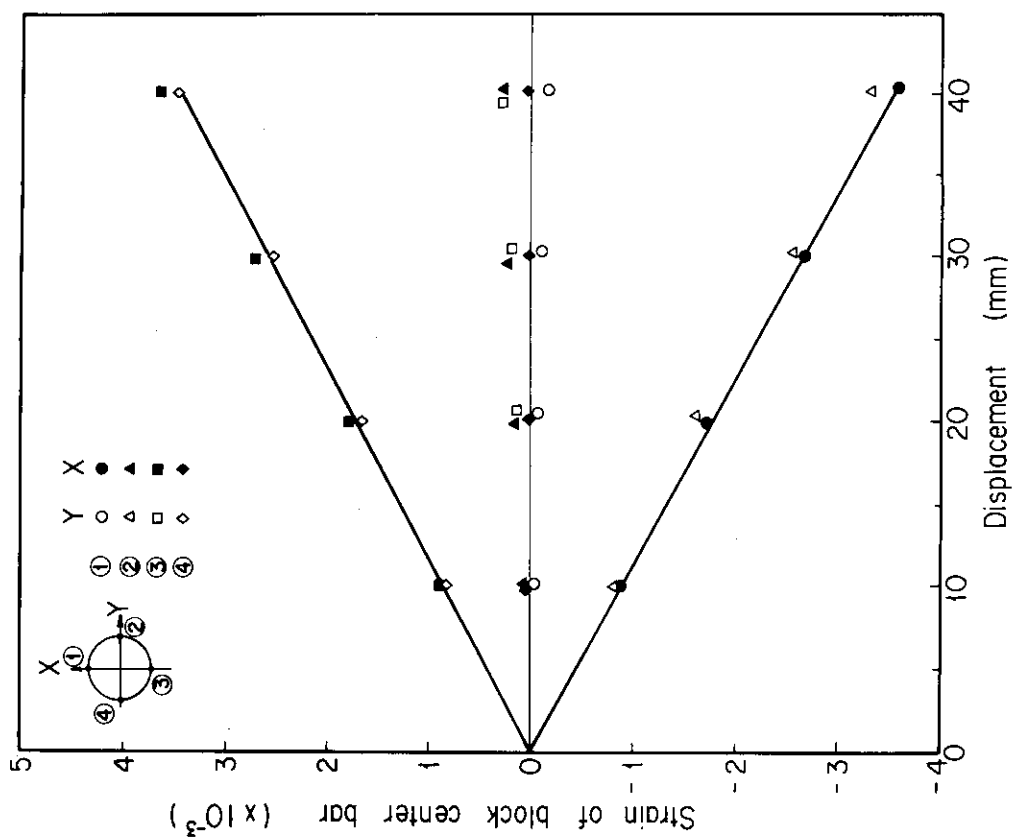


Fig. 4.1 Displacement-strain relationship of block center bar (Block No. 8-1)

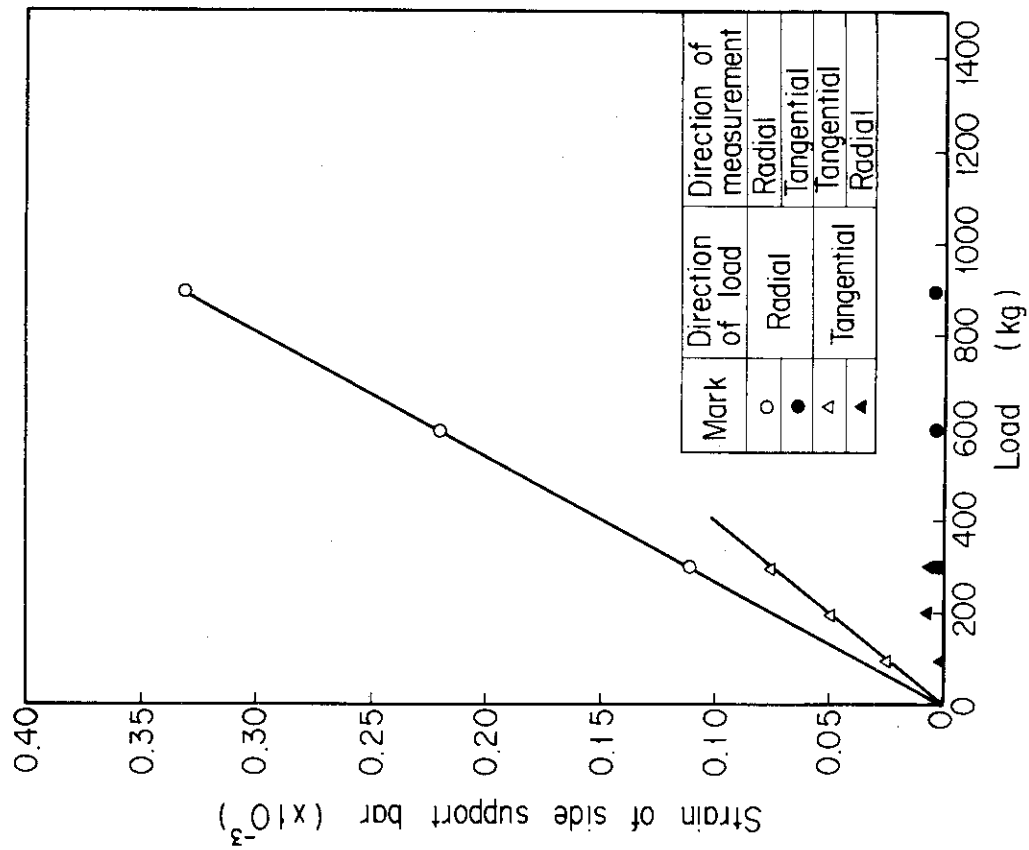


Fig. 4.4 Load-strain relationship of side support bar in case of hard support condition

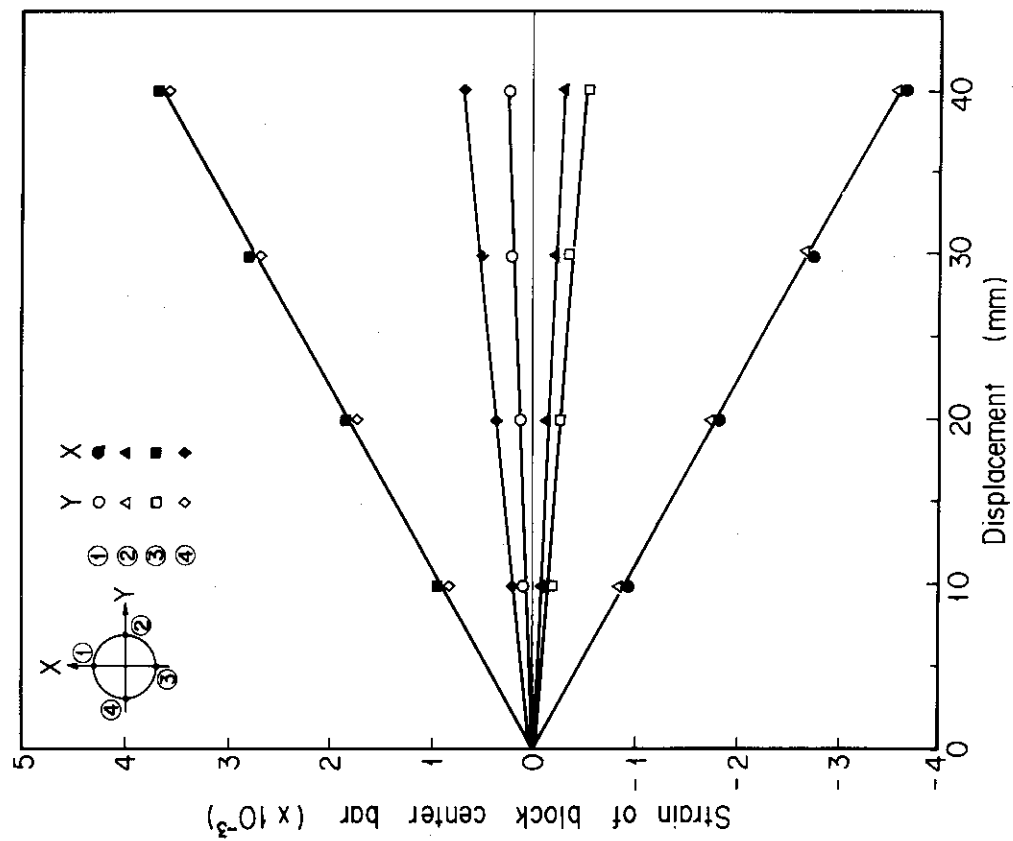


Fig. 4.3 Displacement-strain relationship of block center bar (Block No. 8-11)

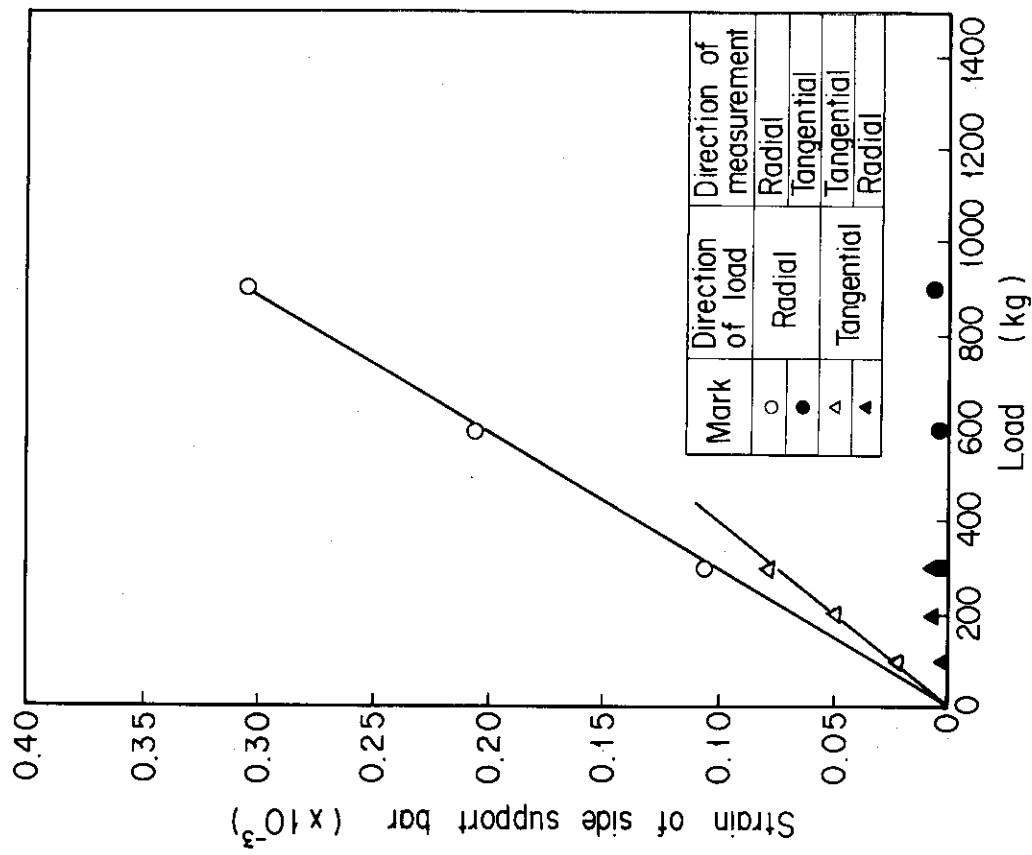


Fig. 4.6 Load-strain relationship of side support bar in case of soft support condition

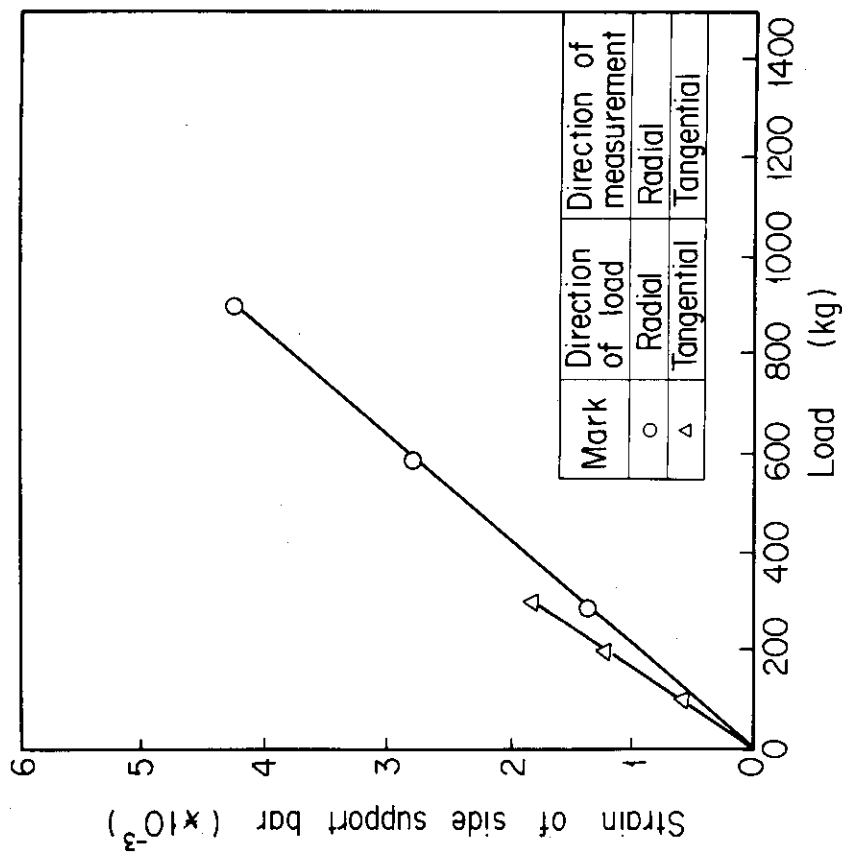


Fig. 4.5 Load-strain relationship of side support bar in case of intermediate support condition

5. 振 動 試 験

5.1 正弦波応答試験

5.1.1 応答の一般的傾向

(1) 応答波形

Fig. 5.1～5.6 は側方固定ブロックの支持剛性が強、最大入力加速度 250 Gal, 加振振動数 4 Hz 付近の種々の加振形式による時刻歴応答波形を示す。燃料ブロックの変位波形は正弦波からひずんだ波形となっている。側方固定ブロックに近接した燃料ブロックの変位波形は衝突によって矩形波形となっている。燃料ブロックと側方固定ブロック間の衝突加速度波はパルス状になっている。側方固定ブロックの支持反力波もパルス状であり、片側に大きな応答値となっている。

(2) 応答特性

Fig. 5.7 は側方固定ブロックの支持剛性が強、X 軸方向一軸加振、最大加振加速度 250 Gal, スイープアップ条件における応答値を示す。応答値が急激に低下する加振振動数（この振動数を主共振振動数と呼ぶ）は、側方固定ブロック支持反力では 4.3 Hz, 燃料ブロックの衝突力および衝突加速度では 4.2 Hz, 燃料ブロックの変位では 4.1 Hz である。

Fig. 5.7 の変位応答曲線から明らかなように、加振振動数 1.8 Hz と 3.9 Hz において応答値のピークが見られる。1.8 Hz のピークは燃料ブロックのコラム復元力模擬ばねの振動によるものと考えられる。なぜならばこの模擬ばねの固有振動数は 2.5 Hz であるから、また、3.9 Hz のピークは燃料ブロックと側方固定ブロックとの衝突によるものと考えられる。

変位応答曲線によると垂直二次元炉心模型においてみられた分数調和振動は、水平二次元炉心模型では現われていない。これは垂直二次元炉心模型の燃料コラムの復元力特性が非線形であるのに対して、水平二次元模型の燃料ブロックのコラム復元力模擬ばねは線形であることによると考えられる。

Fig. 5.7 の変位応答曲線から、加振振動数が 4.1 Hz を越えると変位が急速に低下していることがわかる。これから炉心は 4.1 Hz までは群振動をしているが、4.1 Hz を越えると群振動がなくなること示している。4.1 Hz を越え 5.1 Hz までの変位は中程度を保っているが、これは燃料ブロックと側方固定ブロックとの衝突があるためと考えられる。

(3) 衝突加速度波形および側方支持反力波形

Fig. 5.8 は加振振動数 2.3, 2.8, 3.7 および 4.1 Hz における燃料ブロックの衝突加速度波形および側方固定ブロックの支持反力波形を示す。燃料ブロックが側方固定ブロックに衝突する際に大きな衝突加速度が発生し、衝突後加速度波形に遅れて支持反力が漸時増加している。加振振動数 4.1 Hz における燃料ブロックの衝突加速度は 114 G であり、この加速度に燃料ブロックの重量 (19.1 kg) を乗じた衝突力は 2200 kg となる。

Fig. 5.9 は、燃料ブロックの衝突加速度および計測ブロックに取り付けられた 4 個のフォースゲージによる衝突力の応答波形を示す。4 個のフォースゲージによる衝突力の合計は 1320 kg で

あり、上に述べたように衝突加速度から推定した衝突力に比較して低い。これは衝突加速度計は燃料ブロックの頂部に取り付けられており、燃料ブロックは衝突時に頂部で大きく振れるため、衝突加速度が局部的に大きくなり、従って加速度から推定した衝突力がフォースゲージによって測定した衝突力よりも大きくなったものと考えられる。

Fig. 5.9の燃料ブロックの衝突力波形から、衝突継続時間は約36msであることがわかる。そしてこの時間内に数回の衝突がある。一方、側方固定ブロックの支持反力波から見られる衝突継続時間は39～43msである。この時間は側方固定ブロックの質量と側方支持剛性から決まる固有周期の半分と考えてよい。燃料ブロックと側方固定ブロックの衝突継続時間はほぼ一致している。また衝突による接触時間は1.4～2msであり、これは垂直二次元炉心模型の場合とほとんど同じである。

(4) 変位応答分布形

燃料ブロック間および燃料ブロックと側方固定ブロック間のギャップはすべて2mmであり、Fig. 5.10に示すようにX軸方向およびY軸方向の各列のギャップ積算量は、ブロック列を構成する燃料ブロックの数によって異なり、炉心中央線上から端へ行くに従ってギャップ積算量は小さくなる。

炉心の変位応答分布形については5.1.4節の加振形式による応答特性の項目において詳述するが、ここでは一般的な変位応答分布形について述べる。X軸方向およびY軸方向加振の共振時には炉心は群振動をする。この場合の燃料ブロックの変位は、炉心の中央線上から端へ行くに従って少くなる、すなわち各列の燃料ブロックの変位は同一でないので、燃料ブロックは各列間で干渉し合う。その結果X軸方向加振の場合には、燃料ブロックは回転を起し、Y軸方向加振の場合には、燃料ブロックは加振方向への変位のみならず加振方向と直角方向へも大きく変位し、燃料ブロックは楕円軌道を描いて振動する。

5.1.2 側方固定ブロック間キーの影響

側方固定ブロック間の連結キー（Fig. 3.6参照）による応答特性に及ぼす影響について、キー付きとキー無しの応答値の比較をする。

Fig. 5.11は側方固定ブロックの支持剛性が強、X軸方向一軸加振、最大加振加速度250 Galの場合の燃料ブロックの変位振動数応答曲線を、側方固定ブロック間連結キーの有無による比較をしたものである。キーの有無による応答変位の差はわずかである。

Fig. 5.12はキーの有無による側方支持反力振動数応答曲線を示す。キー付きの場合の側方支持反力は、キー無しの場合よりもわずかに大きい。側方固定ブロックは側方支持構造物によって支持されている。隣り合う側方固定ブロックは互に接触面で拘束し合う。燃料ブロックが一個の側方固定ブロックに衝突した際、衝突力は隣り合う側方固定ブロックにも接触面から伝わり、衝突力は分散されるとともに、衝突力は接触面の摩擦力として一部消費される。この接触面にキーを設けて、側方固定ブロック間をタイトに連結すると、キー無しの場合には接触面の滑りによって消費された力だけ側方支持反力が大きくなるものと考えられる。

以上は側方支持剛性が強の場合の結果であり、強支持では側方固定ブロックは互に十分な拘束状態にあるためさらに連結キーを付けてもその影響は少ないものと考えられる。しかしながら、

側方支持剛性が弱くなると、キー無しの場合に比べてキー付きの場合は側方固定ブロック間の拘束効果が大きくなり、燃料ブロックの変位は低くなり、側方支持反力は上昇すると予想できる。

5.1.3 加振加速度の影響

(1) 燃料ブロックの変位応答

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.13 は燃料ブロック変位の振動数応答曲線を、最大加振加速度 50, 100, 250 Gal の場合について示す。Fig. 5.13 (a-1) は側方支持剛性が強で X 軸方向一軸加振, Fig. 5.13 (a-2) は側方支持剛性が強で Y 軸方向一軸加振, Fig. 5.13 (b) は側方支持剛性が中で X 軸方向及び Y 軸方向一軸加振, Fig. 5.13 (c) は側方支持剛性がプリロードで X 軸方向および Y 軸方向一軸加振, Fig. 5.13 (d) は側方支持剛性が弱で X 軸方向および Y 軸方向一軸加振のそれぞれの燃料ブロックの振動数応答曲線である。側方支持剛性の種類の違いにかかわらず、燃料ブロックの変位は加振加速度の増加に従って増加するとともに主共振動数も上昇する。Fig. 5.13 (d) から明らかなように、側方支持剛性が弱で Y 軸方向一軸加振の場合、燃料ブロックとそのコラム模擬ばねから決まる固有振動数 2.5 Hz 付近で加振方向と直角方向 (X 軸方向) の変位が大きく、燃料ブロックは大きな楕円軌道を描いて振動していることがわかる。

Table 5.1 は主要な計測位置における側方支持剛性および加振加速度に対する燃料ブロック変位主共振振動数および最大変位を示す。

(ii) 加振加速度の影響

Fig. 5.14 は主要な計測位置における 4 種類の側方支持剛性について、燃料ブロックの最大変位を加振加速度に対して示す。Fig. 5.14 (a) は X 軸方向一軸加振, Fig. 5.14 (b) は Y 軸方向一軸加振の場合についてそれぞれ示す。いずれの側方支持剛性においても、加振加速度の増加に従って燃料ブロックの最大変位は増加する。X 軸方向一軸加振と Y 軸方向一軸加振の加振方向による燃料ブロックの最大変位の加振加速度に対する変化傾向は同じである。

(2) 側方支持反力応答

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.15 は側方固定ブロックの支持反力振動数応答曲線を、最大加速度 50, 100, 250 Gal の場合について示す。Fig. 5.15 (a-1) は側方支持剛性が強で X 軸方向一軸加振, Fig. 5.15 (b) は側方支持剛性が中で X 軸方向および Y 軸方向一軸加振, Fig. 5.15 (c) は側方支持剛性がプリロードで X 軸方向および Y 軸方向一軸加振, Fig. 5.15 (d) は側方支持剛性が弱で X 軸方向および Y 軸方向一軸加振のそれぞれの側方支持反力振動数応答曲線である。いずれの側方支持剛性においても、加振加速度の増加に従って側方支持反力は増加するとともに主共振振動数も上昇する。Fig. 5.15 (d) の側方支持剛性が弱で Y 軸方向一軸加振では、燃料ブロックの質量とその支持ばねから決まる燃料ブロックの固有振動数 2.5 Hz 付近において、加振方向と直角方向 (X 軸方向) の側方支持反力が多い。燃料ブロックは大きな楕円軌道を描いて運動し、衝突を起しているものと考えられる。

Table 5.2 は主要な計測位置における側方支持剛性および加振加速度に対する側方支持反力主共振振動数および最大側方支持反力を示す。

(ii) 加振加速度の影響

Fig. 5.16 は主要な計測位置における 4 種類の側方支持剛性について、加振加速度に対する最大側方支持反力を示す。Fig. 5.16(a) は X 軸方向一軸加振、Fig. 5.16(b) は Y 軸方向一軸加振の場合についてそれぞれ示す。いずれの側方支持剛性においても、加振加速度の増加に従って側方支持反力の最大値は増加する。X 軸方向一軸加振と Y 軸方向一軸加振の加振方向による最大側方支持反力の加振加速度に対する変化傾向は同じである。

(3) 燃料ブロックの衝突加速度応答

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.17 は燃料ブロックの衝突加速度の振動数応答曲線について、最大加振加速度 50, 100, 250 Gal の場合について示す。Fig. 5.17(a) は側方支持剛性が強で X 軸方向および Y 軸方向一軸加振、Fig. 5.17(b) は側方支持剛性の中で X 軸方向および Y 軸方向一軸加振、Fig. 5.17(c) は側方支持剛性がプリロードで X 軸方向および Y 軸方向一軸加振、Fig. 5.17(d) は側方支持剛性が弱で X 軸方向および Y 軸方向一軸加振のそれぞれの燃料ブロック衝突加速度振動数応答曲線である。側方支持剛性の違いにかかわらず、燃料ブロックの衝突加速度は加振加速度の増加に従って増加するとともに主共振振動数も上昇する。

Table 5.3 は主要な計測位置における側方支持剛性および加振加速度に対する燃料ブロック衝突加速度主共振振動数および最大衝突加速度を示す。

(ii) 加振加速度の影響

Fig. 5.18 は主要な計測位置における 4 種類の側方支持剛性について、加振加速度に対する燃料ブロック衝突加速度の最大値を示す。Fig. 5.18(a) は X 軸方向一軸加振、Fig. 5.18(b) は Y 軸方向一軸加振の場合についてそれぞれ示す。いずれの側方支持剛性においても、加振加速度の増加に従って燃料ブロックの最大衝突加速度は増加する。X 軸方向一軸加振と Y 軸方向一軸加振の加振方向による燃料ブロックの最大衝突加速度の加振加速度に対する変化傾向は同じである。

(4) 主共振振動数

Table 5.4 は側方支持剛性および加振加速度に対して、燃料ブロック変位、側方支持反力および燃料ブロック衝突加速度の主共振振動数および最大応答量となる加振振動数を示す。Fig. 5.19 は 4 種類の側方支持剛性について、燃料ブロック変位、側方支持反力および燃料ブロック衝突加速度の主共振振動数を加振加速度に対して示す。Table 5.4 および Fig. 5.19 から明らかなように、側方支持剛性の種類の違いにかかわらず、共振振動数は加振加速度の増加に従って増加する。

5.1.4 加振形式の影響

正弦波を使用して X 軸方向および Y 軸方向一軸加振および 4 種類の二軸同時加振による燃料ブロックの変位特性、側方固定ブロックの支持反力特性および燃料ブロックの衝突加速度特性について述べる。これから説明する図の加振形式の記号は次のとおりである。

一軸加振

- | | |
|------------|---|
| (i) X 軸方向 | X |
| (ii) Y 軸方向 | Y |

二軸同時加振

- | | |
|-------------------------|---------|
| (i) 円形軌道 | X-Y (g) |
| (ii) X軸方向長軸楕円軌道 | X-Y (h) |
| (iii) X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道 | X-Y (i) |
| (iv) X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道 | X-Y (j) |

(1) 燃料ブロックの変位応答

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5. 20 は 6 種類の加振形式について、加振加速度 250 Gal の場合の燃料ブロックの変位振動数応答曲線を示す。いずれの加振形式においても主共振振動数を越える加振振動数では燃料ブロックの変位は急激に低下する。燃料ブロックの変位主共振振動数を Table 5. 5 に示す。加振加速度が 250 Gal において変位の主共振振動数は 3.9 ~ 4.1 Hz にある。Fig. 5. 21 は加振加速度と変位共振振動数の関係を示す。加振加速度の増加に従って変位主共振振動数は上昇する。また、両者の間にはほぼ比例関係がある。

(ii) 変位分布

Fig. 5. 22 は 6 種類の加振形式について、加振加速度 250 Gal の場合、それぞれの加振形式の主共振振動数における燃料ブロックの変位軌跡および側方支持反力分布を示す。Table 5. 6 は Fig. 5. 22 に対応する燃料ブロックの変位を、一周を 4 分割してそれぞれの X 軸方向、Y 軸方向および合ベクトルで示す。以下に Fig. 5. 22 をもとに 6 種類の加振形式の変位応答分布の特徴を説明するのに必要な炉心内のギャップ積算量を Fig. 5. 10 に示す。これは炉心内の X 軸方向および Y 軸方向のブロック列のギャップ積算量を示したものである。X 軸方向よりも Y 軸方向のギャップ積算量が大きいことがわかる。

(a) X 軸方向一軸加振

Fig. 5. 22(a) に示すように X 軸方向一軸加振において、燃料ブロックは加振方向と直角方向にも変位し、その運動軌跡は X 軸方向を長軸とする楕円軌道となる。これは Fig. 5. 10 に示したように加振方向のブロック列ごとの燃料ブロックの個数が異なるため、各列のギャップ積算量が異なる。隣り合うブロック列間においてギャップ積算量が異なるので、燃料ブロックは隣り合うブロック列間では逆位相の運動を起し、その結果、互に衝突し、回転を生じるとともに加振方向と直角方向にも変位する。しかし、加振方向と直角方向の変位は小さい。

水平二次元炉心模型では、燃料ブロックは断面円形のばね棒によってコラム復元力特性を模擬している。一方、実際の炉心では、燃料コラム内の燃料ブロックは上下にダウエルピンとダウエルソケットによって位置決めされている。ダウエルピンとダウエルソケットの間にはギャップがあるので、燃料ブロックはこのギャップ分だけ回転することができる。水平二次元炉心模型の燃料ブロックのコラムの支持ばね棒はコラムの復元力特性を模擬しているが、コラムの回転に対して十分な模擬をしていない。しかし、定性的には模擬しているとみなしてよい。

(b) Y 軸方向一軸加振

Fig. 5. 22(b) に示すように Y 軸方向一軸加振において、燃料ブロックは加振方向と直角方向にも変位し、その運動軌跡は Y 軸方向を長軸とする楕円軌道となる。これは X 軸方向一軸加振の場合と同じ傾向で同じ理由によるものと考えられる。しかし、X 軸方向一軸加振の場合に比較して

Y軸方向一軸加振の場合には、加振方向と直角方向の変位は大きい。これはY軸方向一軸加振では燃料ブロックの衝突はくさび状の六角ブロックの側面で起り、衝突面において燃料ブロックは互に滑り、このため加振方向と直角方向にも大きく変位するものと思われる。

(c) 円形軌道二軸同時加振

Fig. 5.22(c)に示すように円形軌道二軸同時加振において、燃料ブロックの運動軌跡は円形ではなく、Y軸方向を長軸とする楕円軌道を描く。これはX軸方向のブロック列のギャップ積算量よりもY軸方向のブロック列のものが大きいため、燃料ブロックはギャップ量の多いY軸方向へより多く変位するからと考えられる。

(d) X軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

Fig. 5.22(d)に示すようにX軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振において、燃料ブロックの運動軌跡はX軸方向を長軸とする楕円軌道ではなく、X軸と 20° ～ 30° 傾斜した軸を長軸とする楕円軌道を描く。これはX軸方向のブロック列のギャップ積算量よりもY軸方向のブロック列のものが多いため、燃料ブロックはギャップ量の多いY軸方向へより多く変位しようとするからと考えられる。

(e) X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

Fig. 5.22(e)に示すようにX-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振において、燃料ブロックの運動軌跡はX-Y 45° 軸方向を長軸とする楕円軌道ではなく、長軸がY軸の方へ更に 25° ～ 35° 傾き、X軸から 70° ～ 80° 傾斜した軸を長軸とする楕円軌道を描く。これはX軸方向のブロック列のギャップ積算量よりもY軸方向のブロック列のものが多いため、燃料ブロックはギャップ量の多いY軸方向へより多く変位しようとするからと考えられる。

(f) X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

Fig. 5.22(f)に示すようにX-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振において、燃料ブロックの運動軌跡はX-Y 45° 軸方向を長軸とする楕円軌道ではなく、長軸がY軸の方へ更に 15° 傾きX軸から 60° 傾斜した軸を長軸とする楕円軌道を描く。これはX軸方向のブロック列のギャップ積算量よりもY軸方向のブロック列のものが多いため、燃料ブロックはギャップ量の多いY軸方向へより多く変位しようとするからと考えられる。

(iii) 加振形式による変位応答量の比較

Fig. 5.23は6種類の加振形式について燃料ブロックのX軸方向変位、Y軸方向変位およびベクトル方向変位を加振加速度に対して示す。ベクトル値はX軸方向変位とY軸方向変位のそれぞれの二乗の和の平方根である（ベクトル値 $=\sqrt{X^2+Y^2}$ 、X：X軸方向変位、Y：Y軸方向変位）。

Fig. 5.23(a)に示す一軸加振におけるX軸方向加振の場合のX軸方向変位およびY軸方向加振の場合のY軸方向変位は、変位がブロック列のギャップ積算量以下では、加振加速度に比例して増加しており、燃料ブロックはブロック列間の衝突および側方固定ブロックとの衝突の影響が少いことを示している。一方、X軸方向加振の場合のY軸方向変位およびY軸方向加振の場合のX軸方向変位は、燃料ブロック間の衝突に大きく依存するため、燃料ブロックの変位は加振加速度に比例しない。

Fig. 5.23(b)に示す一軸加振における燃料ブロックのベクトル方向変位と加振加速度との関係においても、上に述べたと同じ傾向を示しており、X軸方向加振の場合のX軸方向変位およびY軸方向加振の場合のY軸方向変位が卓越している。ここで示した主共振振動数における炉心の振

動は、側方固定ブロックに隣接する燃料ブロックを除き、全体として群振動していると考えられる。

Fig. 5.23 に示したように二軸同時加振においても燃料ブロックの変位は加振速度に比例して増加することがわかる。

Table 5.7 は 6 種類の加振形式において主要な応答ピークとなる燃料ブロックの変位を示す。6 種類の加振形式のうち燃料ブロックの変位の大きい順序は次のとおりである（これは片振幅値の比較であり、両振幅値の比較では少し異なる）。

- I. Y 軸方向一軸加振
- II. X 軸方向一軸加振
- III. X 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
円形軌道二軸同時加振
- IV. X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
- V. X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

一方、6 種類の加振形式のうちベクトル方向の変位の大きい順序は次のとおりである（これは片振幅値の比較であり、両振幅値の比較では少し異なる）。

- I. Y 軸方向一軸加振
- II. X 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
- III. 円形軌道二軸同時加振
- IV. X 軸方向一軸加振
- V. X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
- VI. X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

(2) 側方固定ブロックの支持反力応答

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.24 は 6 種類の加振形式について加振加速度 250 Gal の場合、側方固定ブロック支持反力の振動数応答曲線を示す。加振形式の違いによらず、炉心径方向の支持反力は主共振振動数を越えると急激に減少する。一方、炉心接線方向の支持反力については、炉心径方向支持反力値のように主共振振動数が必ずしも明確ではない。

Table 5.8 は 6 種類の加振形式について、側方支持反力が最も大きい計測位置における主共振振動数を示す。加振加速度が 250 Gal において、側方支持反力の主共振振動数は 2.8～4.2 Hz にある。

Fig. 5.25 は加振加速度と側方支持反力主共振振動数との関係を示す。加振加速度の増加に従って側方支持反力共振振動数は上昇し、これら両者の間には比例関係がある。

(ii) 側方支持反力分布

Fig. 5.26 は 6 種類の加振形式について、加振加速度 250 Gal の場合の主共振振動数における側方支持反力の分布を示す。計測した 9 個所の側方固定ブロックの位置を横軸に、縦軸には側方支持反力の炉心径方向成分、炉心接線方向成分およびこれらのベクトル値を示す。ここでベクトル値は炉心径方向成分と炉心接線方向成分のそれぞれの二乗の和の平方根である（ベクトル値 = $\sqrt{R^2 + T^2}$ ，R：炉心径方向支持反力，T：炉心接線方向支持反力）。加振形式による側方支持

反力の特徴について以下に述べる。

(a) X 軸方向一軸加振

Fig. 5.26(a) に示すように X 軸方向一軸加振において、計測位置 RF-7, RF-9, RF-11 (X 軸上の側方固定ブロックとその近接ブロック) の炉心径方向の支持反力が卓越している。

(b) Y 軸方向一軸加振

Fig. 5.26(b) に示すように Y 軸方向一軸加振において、計測位置 RF-17 (Y 軸上近接側方固定ブロック) の炉心径方向の支持反力が卓越している。

(c) 円形軌道二軸同時加振

Fig. 5.26(c) に示すように円形軌道二軸同時加振において、側方固定ブロックの支持反力は全体にほぼ同じ大きさで分布している。

(d) X 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

Fig. 5.26(e) に示すように X 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振において、計測位置 RF-9, RF-11 (X 軸上の側方固定ブロックとその近接ブロック) の炉心径方向の支持反力が卓越している。

(e) X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

Fig. 5.26(f) に示すように X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振において、計測位置 RF-3, RF-5, RF-7 (X 軸から 45° 傾斜した軸付近の側方固定ブロック) の炉心径方向の支持反力が卓越している。

(f) X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

Fig. 5.26(g) に示すように X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振において、計測位置 RF-1, RF-3, RF-5 (X 軸から 60° 傾斜した軸付近の側方固定ブロック) の炉心径方向の支持反力が卓越している。

(iii) 加振形式による側方支持反力の比較

Fig. 5.27 は 6 種類の加振形式について、側方固定ブロックの支持反力の炉心径方向成分及び炉心接線方向成分に分けて加振加速度に対して示す。側方支持反力は炉心径方向成分および炉心接線方向成分のいずれも加振加速度に比例して増加している。

Fig. 5.28 は 6 種類の加振形式について、最大炉心径方向支持反力を加振加速度に対して示す。6 種類の加振形式のうち、側方支持反力の大きい順序は次のとおりである。

I. X 軸方向一軸加振

X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

II. Y 軸方向一軸加振

X-Y 45°

III. 円形軌道二軸同時加振

X 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

Fig. 5.29 は 6 種類の加振形式について、側方支持反力のベクトル値を加振加速度に対して示す。Fig. 5.29(a) は主要な計測位置における側方支持反力であり、Fig. 5.29(b) は最大の側方支持反力である。加振形式の違いにかかわらず側方支持反力のベクトル値は加振加速度の増加に従って増加する。6 種類の加振形式のうち、側方支持反力のベクトル値の大きい順序は、炉心径方向成

分と同じである。側方支持反力は炉心径方向成分が支配的であることがわかる。

(3) 燃料ブロックの衝突加速度

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.30 は 6 種類の加振形式について、加振加速度 250 Gal の場合、燃料ブロックの衝突加速度振動数応答曲線を示す。燃料ブロックの変位および側方支持反力とは異なり、燃料ブロックの衝突加速度は主共振振動数を越えても急激に減少しない。これは応答変位が小さくなる高い加振振動数領域においても、燃料ブロックの回転によって、燃料ブロックは互に衝突を起しているためであると考えられる。

(ii) 衝突加速度分布

Fig. 5.31 は 6 種類の加振形式について、加振加速度 250 Gal の場合の主共振振動数における燃料ブロックの X 軸方向および Y 軸方向の衝突加速度分布を示す。計測器の位置を横軸にとり、縦軸には X 軸方向および Y 軸方向の衝突加速度を示す。6 種類の加振形式による炉心内の燃料ブロック衝突加速度の分布の特徴について以下に述べる。

(a) X 軸方向一軸加振

X 軸方向一軸加振において炉心中央及び側方固定ブロックに隣接する燃料ブロックの衝突加速度が大きく炉心は群振動している。

(b) Y 軸方向一軸加振

Y 軸方向一軸加振において炉心内で特別に高い衝突加速度を発生する燃料ブロックは存在しない。これは衝突に際し、六角形ブロックの側面が滑りながら衝突するからと考えられる。

(c) 二軸同時加振

4 種類の二軸同時加振において炉心内で特別に高い衝突加速度を発生する燃料ブロックは存在しない。これは衝突に際し、六角形ブロックの側面が滑りながら衝突するからと考えられる。

(ii) 加振形式による比較

Fig. 5.32 は 6 種類の加振形式について、燃料ブロックの衝突加速度を加振加速度に対して示す。加振形式の違いにかかわらず燃料ブロックの衝突加速度は加振加速度の増加に従って増加する。

Fig. 5.33 は 6 種類の加振形式について、燃料ブロックの最大衝突加速度を加振加速度に対して示す。6 種類の加振形式のうち、燃料ブロックの衝突加速度の大きい順序は次のとおりである。

I. X 軸方向一軸加振

II. 円形軌道二軸同時加振

X 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

III. Y 軸方向一軸加振

X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

IV. X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振

5.1.5 側方固定ブロック支持剛性の影響

(1) 変位応答特性

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.34 は最大加振加速度 250 Gal, X 軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プ

リロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロック変位振動数応答曲線を示す。側方支持剛性の低下（側方支持剛性が強から弱へ変る）に従って燃料ブロックの変位は大きくなる。燃料ブロックの変位が急激に低下する加振振動数も低下する。

(ii) 加振加速度の影響

Fig. 5. 35 はX軸方向およびY軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロックの最大変位を加振加速度に対して示す。いずれの側方支持剛性においても、加振加速度の増加に従って燃料ブロックの最大変位が増加している。X軸方向一軸加振とY軸方向一軸加振の加振方向による燃料ブロックの最大変位の加振加速度に対する変化傾向は同じである。

(iii) 側方支持剛性の影響

Fig. 5. 36 は最大加振加速度 250 Gal, X軸方向およびY軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロックの最大変位を示す。燃料ブロックの最大変位は側方支持剛性が弱, 中, プリロード, 強の順で小さくなる。X軸方向一軸加振とY軸方向一軸加振の加振方向による燃料ブロックの最大変位の側方支持剛性に対する変化傾向は同じである。

側方支持剛性が強の場合、燃料ブロックの変位が最も小さい。よって、制御及び安全停止装置の炉心内への挿入性を炉心構造設計において優先させるならば、側方支持剛性を剛支持にすることが望まれる。

(2) 側方支持反力応答特性

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5. 37 は最大加振加速度 250 Gal, X軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の側方支持反力振動数応答曲線を示す。側方支持剛性の低下（側方支持剛性が強から弱へ変る）するに従って側方支持反力が急激に低下する加振振動数が低い方へ移動する。側方支持反力は側方支持剛性がプリロード, 中, 強, 弱の順で大きくなる。

(ii) 加振加速度の影響

Fig. 5. 38 はX軸方向およびY軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の最大側方支持反力を加振加速度に対して示す。いずれの側方支持剛性においても、加振加速度の増加に従って最大側方支持反力は増加している。X軸方向一軸加振とY軸方向一軸加振の加振方向による最大側方支持反力の加振加速度に対する変化傾向は同じである。

(iii) 側方支持剛性の影響

Fig. 5. 39 は最大加振加速度 250 Gal, X軸方向およびY軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の最大側方支持反力を示す。最大側方支持反力は側方支持剛性が弱, 強, 中, プリロードの順に小さくなる。側方支持剛性が強から中へ低下するに従って側方支持反力は低下するが、弱では逆に強の場合よりも少し高くなっている。これは側方支持剛性が弱の場合、二段ばねを採用しており、側方固定ブロックの変位が小さい場合には第一段目の弱いばねが作用する。この変位がある値を越えると第二段目の強いばねが作用する。この強いばねは側方支持剛性が強の場合と同じものであり、大きな側方支持反力は第二段目のばねが作用する所で発生しており、その値は側方支持剛性が強の場合とほぼ同じであることが理解で

きる。

側方支持剛性がプリロードの場合の側方支持反力が最も小さく、プリロード荷重 352 kg を加えた側方支持反力は他の側方支持剛性の場合よりも小さい。このように側方支持反力を小さくするには、側方固定ブロックの外側から炉心の中心方向へ荷重を掛け、炉心をたが締め状態にすることによって側方支持反力を低くすることができる。

(3) 衝突加速度特性

(i) 振動数応答曲線

Fig. 5.40 は最大加振加速度 250 Gal, X 軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロックの衝突加速度振動数応答曲線を示す。この図から側方支持剛性の変化による燃料ブロックの衝突加速度の変化は明確ではない。しかし、側方支持剛性の低下（側方支持剛性が強から弱へ変る）するに従って燃料ブロックの衝突加速度が急激に低下する加振振動数が低い方へ移動していることがわかる。

(ii) 加振加速度の影響

Fig. 5.41 は X 軸方向および Y 軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロックの衝突加速度を加振加速度に対して示す。加振加速度が低い場合（50, 100 Gal の場合）には、側方支持剛性の変化による燃料ブロックの衝突加速度の差は少い。加振加速度が高い場合（250 Gal の場合）には、側方支持剛性が弱の場合のみ燃料ブロックの衝突加速度が大きくなっている。これは側方支持剛性が弱の場合の二段ばねの第一段目と第二段目のばね定数の差が大き過ぎるために生じたものと思われる。

(iii) 側方支持剛性の影響

Fig. 5.42 は最大加振加速度 250 Gal, X 軸方向および Y 軸方向加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロックの最大衝突加速度を示す。最大衝突加速度は側方支持剛性が、弱, 中, 強, プリロードの順に小さくなる。X 軸方向一軸加振と Y 軸方向一軸加振の加振方向による燃料ブロックの最大衝突加速度の側方支持剛性に対する変化傾向は同じである。

5.1.6 側方固定ブロックのプリロードの影響

(1) 変位応答特性

Fig. 5.43 は X 軸方向および Y 軸方向の一軸加振において、燃料ブロックの変位を加振加速度に対して示す。図では側方支持剛性が中の場合、燃料ブロック変位に及ぼす側方固定ブロックのプリロードの影響を示している。プリロードによって側方固定ブロックの変位は拘束され、従って燃料ブロックの変位はプリロードが無い場合よりも小さい。これはプリロードによって炉心が拘束されているからである。

(2) 側方支持反力特性

Fig. 5.44 は X 軸方向および Y 軸方向において、側方支持反力を加振加速度に対して示す。図では側方支持剛性が中の場合、側方支持反力に及ぼす側方固定ブロックのプリロードの影響を示している。プリロードの有る場合の側方支持反力はプリロードの無い場合よりも小さい。これについて側方支持反力の大きい計測位置 RF-9 および RF-11 (Fig. 3.15(b)参照, X 軸上および

その近傍側方固定ブロックの径方向支持反力)のプリロードの有無による比較について考察する。プリロード有りの場合加振加速度 350 Gal を境に側方支持反力の傾向が変化している。すなわち加振加速度 350 Gal 以下では加速度の増加に従って側方支持反力は緩やかに上昇しているが、350 Gal を越えると増加傾向は急になり、プリロード無しの場合のものと同じ傾向を示す。プリロード有りの場合の加振加速度 350 Gal の側方支持反力は Fig. 5.44(a) から 350 kg である。これはプリロード荷重 350 kg と同じである。これからプリロード荷重以下の加振加速度条件ではすべての側方固定ブロックは一体となって振動しているが、プリロード荷重以上の加振加速度条件では、側方固定ブロックの一体化が失なわれているものと思われる。側方固定ブロックがプリロードによってたが締めされることによって、燃料ブロックとの衝突による力は衝突した側方固定ブロックの隣りのものへ伝えられ、側方支持反力が分散され、その結果ピーク値が低下するものと考えられる。

(3) 衝突加速度特性

Fig. 5.45 は X 軸方向および Y 軸方向の一軸加振において、燃料ブロックの衝突加速度を加振加速度に対して示す。図では側方支持剛性が中の場合、燃料ブロックの衝突加速度に対する側方固定ブロックのプリロードの影響を示している。プリロードの有る場合の燃料ブロックの衝突加速度はプリロードが無い場合よりも小さい。これはプリロードによって炉心がたが締めの状態にあることによるものと考えられる。

5.1.7 側方固定ブロック支持反力と燃料ブロック変位の相互関係

Fig. 5.46 は側方支持剛性が強、最大加振加速度 250 Gal, X 軸方向一軸加振において、燃料ブロック変位と振動台加速度の位相、燃料ブロック変位と側方固定ブロックの支持反力の位相関係を示す。これらの位相関係は、それぞれの応答値からトラッキングフィルタを使用し、0.2 Hz 間隔で求めたものである。Table 5.9 は、応答のピーク値および位相が 90° となる加振振動数を示す。Fig. 5.46 および Table 5.9 から明らかなように、応答量の位相が 90° となる加振振動数よりも応答量がピークとなる加振振動数が高い。燃料ブロック変位および側方支持反力の応答は次に述べるように、加振振動数の増加とともに変化する。

- (1) 加振振動数 4.1 Hz において、燃料ブロック変位と振動台加速度との位相が 90° であり、燃料ブロックは共振している。
- (2) 加振振動数 4.3 Hz において、燃料ブロックの変位は最大となる。
- (3) 加振振動数 4.3 ~ 4.6 Hz において、側方支持反力の応答値が急減し、燃料ブロックの変位も急激に低下する。
- (4) 加振振動数 4.4 Hz において、燃料ブロックの変位と側方支持反力の位相が 90° となる。
- (5) 加振振動数 4.6 Hz において、燃料ブロックの変位と側方支持反力の比は最大となる。
- (6) さらに加振振動数が上昇すると、燃料ブロックの変位と側方支持反力の比は急激に低下する。

Table 5.4 から明らかなように、燃料ブロックの衝突加速度が最大となる加振振動数は、側方支持反力の主共振振動数よりも少し低い。主共振振動数は、燃料ブロック衝突加速度、側方支持反力、燃料ブロック変位の順で高くなる。

5.1.8 炉心の減衰特性

Table 5.10 は水平二次元炉心模型を正弦波加振している状態から急激に停止した場合の側方固定ブロックの支持反力の自由減衰波形とそれから算定した減衰比を示す。振動台停止後は、ほとんど衝突振動は継続しないので、衝突振動の減衰比を求めることができない。そこで Table 5.10 に示した側方固定ブロックとその支持構造物系の自由減衰波形から側方支持構造部の減衰比を求めてみた。減衰比の概略値は次のようになる。

- | | |
|--------------------|--------|
| (1) 側方支持剛性強の場合 | 5～11% |
| (2) 側方支持剛性中の場合 | 12～16% |
| (3) 側方支持剛性プリロードの場合 | 15～17% |
| (4) 側方支持剛性弱の場合 | 算出できず |

これらの減衰比には側方固定ブロック下面、側方支持構造物、隣接する側方固定ブロック間における減衰を含んでおり、実際の炉心の減衰比とは幾分異なるものである。しかし、これから実際の炉心の側方支持構造物の減衰比を推定する資料となり、その値は10%程度と考えられる。

5.1.9 一列ブロック模型と三列ブロック模型の比較

(1) 変位応答特性

Fig. 5.47 は水平二次元炉心模型（側方固定ブロックの結合キー無し）、三列ブロック模型および一列ブロック模型による燃料ブロック変位の振動数応答曲線を比較して示す。この振動数応答曲線は、側方支持剛性が強、最大加振加速度 250 Gal、X 軸方向一軸加振におけるものである。変位検出器の炉心内の位置は、St-11 および St-17 は側方固定ブロックに隣接する燃料ブロック、St-15 は炉心中心の燃料ブロックに設けられたものである。Fig. 5.47 において、三種類の模型について、炉心中心における燃料ブロックの変位を比較する。一列ブロック模型による変位が最も大きく、次に三列ブロック模型によるものであり、水平二次元炉心模型による変位が最も小さい。三列ブロック模型では、X 軸中心軸上のブロック列の運動は、両側のブロック列に干渉されるが、一列ブロック模型では、このような干渉はない。それ故、三列ブロック模型の中心部の燃料ブロック変位は一列ブロック模型のものよりも小さい。水平二次元炉心模型では、X 軸中心線上のブロック列の運動は、両側のブロック列のみならず炉心周辺のブロック列までの干渉を受ける。それ故、水平二次元炉心模型の中心部の燃料ブロック変位は三列ブロック模型のものよりも小さい。一方、側方固定ブロックに隣接する燃料ブロックの変位は、三つの模型による差はほとんどない。これは、炉心中心部の燃料ブロックに比較して、炉心周辺部の燃料ブロックでは両側のブロック列の干渉が少いためと考えられる。

(2) 側方支持反力応答特性

Fig. 5.48 は水平二次元炉心模型（側方固定ブロックの結合キー無し）、三列ブロック模型および一列ブロック模型による側方支持反力の振動数応答曲線を比較して示す。この振動数応答曲線は、側方支持剛性が強、最大加振加速度 250 Gal、X 軸方向一軸加振におけるものである。側方支持反力検出器の位置 RF-9 は、X 軸方向一軸加振の X 軸線上の炉心径方向の反力を測定するために設けられたものである。Fig. 5.48 において、三種類の模型について、側方支持反力を比較する。一列ブロック模型による側方支持反力は、三列ブロック模型のものの $\frac{1}{3}$ であり、この側方支

持反力の比率は、ブロック個数の比率と一致する。一列ブロック模型の側方支持反力を3倍すれば三列ブロック模型の側方支持反力にほぼ等しい。これは三列ブロックを両側の側方固定ブロックが支持することを意味する。三列ブロック模型と水平二次元炉心模型の側方支持反力はほぼ等しい。これは三列ブロック模型と水平二次元炉心模型では、両側の側方固定ブロックの支持する燃料ブロックが同じ個数であることから理解できる。

5.2 地震応答試験

(1) 時刻歴応答波形

Fig. 5.49～5.56は側方支持剛性が強、最大加振加速度500 Galのランダム波による、燃料ブロック変位および側方支持反力の時刻歴応答波形を示す。Fig. 5.49はエルセントロ1940年NS波によるX軸方向一軸加振の時刻歴応答波形を示し、Fig. 5.50はエルセントロ1940年NS波によるY軸方向一軸加振、Fig. 5.51は茨城1964年EW波によるX軸方向一軸加振、Fig. 5.52は茨城1964年EW波によるY軸方向一軸加振、Fig. 5.53はホワイトノイズ波によるX軸方向一軸加振、Fig. 5.54はホワイトノイズ波によるY軸方向一軸加振、Fig. 5.55はエルセントロ1940年NS波とEW波によるX軸方向とY軸方向の二軸同時加振、Fig. 5.56は茨城1964年NS波とEW波によるX軸方向とY軸方向の二軸同時加振による時刻歴応答波形を示す。

時刻歴応答波形から明らかなように、入力波の最大加速度を示す時刻と最大応答値となる時刻がほとんど同じである。燃料ブロック変位波形から、炉心中央付近のものは両振れをしているが、炉心周辺の側方固定ブロックに隣接するものは片振れをしている。地震波形は立上り部分、強振部分および減衰部分から成る。応答の最大値は入力地震波の立上り後の強振部分において発生し、一つの地震波に対して数回の大きな応答値がみられる。ホワイトノイズ波では他の二つの地震波に比較して、継続時間が約40秒間の長い入力波を使用しているため、大きな応答値を示しているものと思われる。

(2) 入力地震波による影響

(i) 変位応答

Fig. 5.57およびTable 5.11は燃料ブロックの変位を加振加速度に対して示す。Fig. 5.57(a)はエルセントロ1964 NS波、茨城1964年EW波およびホワイトノイズ波による、X軸方向およびY軸方向のそれぞれ一軸加振による燃料ブロックの最大変位である。加振加速度の増加に従って燃料ブロックの変位は増加する。三種類の入力波による燃料ブロックの変位はホワイトノイズ波、エルセントロ1940年NS波、茨城1964年EW波の順で小さくなる。ホワイトノイズ波による燃料ブロックの変位が他の二つの地震波によるものよりも大きくなるのは、大きな加速度ピークの多くあるホワイトノイズ波が長い時間(約35秒間)にわたって炉心模型を加振することによるものと考えられる。二種類の地震波のうちエルセントロ1964年NS波による変位が、茨城1964年EW波によるものよりも大きい。二種類の地震波による応答変位の差は、地震応答スペクトルから共振振動数の範囲の差を調べることによって説明できる。

エルセントロ1940年NS波の共振域は2.0～6.5 Hz (Fig. 3.33 参照)であり、一方、茨城1964年EW波の共振域は3.5～5.5 Hzである。燃料ブロックの質量とコラム模擬支持ばね棒か

ら決まる固有振動数は 2.5 Hz である。よってエルセントロ 1940 年 NS 波では燃料ブロックの共振域に入るのに対して、茨城 1964 年 EW 波では共振域からはずれる。

Fig. 5.57(b) はエルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波および茨城 1964 年 NS 波と EW 波を用い NS 波を X 軸方向に EW 波を Y 軸方向に同時に二軸に入力し加振した場合の燃料ブロックの変位を加振加速度に対して示す。変位は加振加速度の増加に従って増加する。一軸加振の場合と同様に、エルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振の場合の燃料ブロックの変位が、茨城 1964 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振のものよりも大きい。これは一軸加振の場合と同じ理由によるものと思われる。すなわち、エルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振の共振域は 2.0～6.5 Hz であり (Fig. 3.34 参照)、燃料ブロックは共振域に入る。一方、茨城 1964 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振の共振域は 2.7～4.9 Hz であり、燃料ブロックの共振域からはずれる。

(ii) 側方支持反力応答

Fig. 5.58 および Table 5.12 は側方支持反力を加振加速度に対して示す。Fig. 5.58(a) はエルセントロ 1940 年 NS 波、茨城 1964 年 EW 波およびホワイトノイズ波による X 軸方向および Y 軸方向のそれぞれ一軸加振における側方支持反力である。加振加速度の増加に従って側方支持反力は増加する。三種類の入力波による側方支持反力は、ホワイトノイズ波、エルセントロ 1940 年 NS 波、茨城 1964 年 EW 波の順で小さくなる。X 軸方向一軸加振による側方支持反力は、Y 軸方向一軸方向加振によるものよりも大きい。この傾向は一軸加振における燃料ブロックの変位の傾向と同じであり、同じ理由によるものと考えられる。

Fig. 5.58(b) はエルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波および茨城 1964 年 NS 波と EW 波を用い、NS 波を X 軸方向に EW 波を Y 軸方向に同時に二軸入力して加振した場合の側方支持反力を加振加速度に対して示す。加振加速度の増加に従って側方支持反力は増加する。エルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振の場合の側方支持反力は、茨城 1964 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振のものよりも大きい。この傾向は二軸同時加振における燃料ブロックの変位の傾向と同じであり、同じ理由によるものと考えられる。

(iii) 燃料ブロック衝突力

Fig. 5.59 はエルセントロ 1940 年 NS 波、茨城 1964 年 EW 波およびホワイトノイズ波による X 軸方向一軸加振の燃料ブロックの衝突力を加振加速度に対して示す。燃料ブロックの衝突力はブロック番号 8-1 (Fig. 3.38 参照) の場所に、Fig. 3.21 で示した計測ブロックを配置して測定したものである。Fig. 5.59 の F-1 から F-4 は計測ブロックに取り付けられたフォースゲージを示し、図中にはそれぞれのフォースゲージによって測定された衝突力とこれら 4 個の合計衝突力を示している。加振加速度の増加に従って燃料ブロックの衝突力は増加する。しかし、エルセントロ 1940 年 NS 波による衝突力では、加振加速度の増加に従って 4 個の衝突力のうちの一つ (F-2) の値が減少している。これは燃料ブロックが衝突した後に回転してフォースゲージ F-2 の衝突力が減少したものと考えられる。フォースゲージ 4 個の衝突力の合計は加振加速度の増加に従って増加している。

三種類の入力波による燃料ブロックの衝突力は、ホワイトノイズ波、エルセントロ 1940 年 NS 波、茨城 1964 年 EW 波の順で小さくなる。この傾向は一軸加振における側方支持反力の傾向と

同じであり、同じ理由によるものと考えられる。

(iv) 燃料ブロック衝突加速度

Fig. 5.60 は燃料ブロックの衝突加速度を加振加速度に対して示す。Fig. 5.60(a) はエルセントロ 1940 年 NS 波、茨城 1964 年 EW 波およびホワイトノイズ波による X 軸方向および Y 軸方向のそれぞれ一軸加振における燃料ブロックの衝突加速度である。加振加速度の増加に従って燃料ブロックの衝突加速度は増加する。三種類の入力波による燃料ブロックの衝突加速度は、ホワイトノイズ波、エルセントロ 1940 年 NS 波、茨城 1964 年 EW 波の順で小さくなる。この傾向は一軸加振における燃料ブロックの変位および側方支持反力の傾向と同じであり、同じ理由によるものと考えられる。

Fig. 5.60(b) はエルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波および茨城 1964 年 NS 波と EW 波を用い、NS 波を X 軸方向に EW 波を Y 軸方向に同時に二軸入力して加振した場合の燃料ブロックの衝突加速度を加振加速度に対して示す。加振加速度の増加に従って燃料ブロックの衝突加速度は増加する。エルセントロ 1940 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振の場合の燃料ブロックの衝突加速度は、茨城 1964 年 NS 波と EW 波による二軸同時加振によるものよりも大きい。この傾向は二軸同時加振における燃料ブロックの変位および側方支持反力の傾向と同じであり、同じ理由によるものと考えられる。

(3) 応答分布形

(i) 変位分布

Fig. 5.61 は最大加振加速度 500 Gal において、燃料ブロックの変位分布および側方支持反力分布を、入力地震波および加振形式によって整理して示す。燃料ブロックの変位分布は正弦波による加振の場合と類似の傾向がみられる。すなわち、Y 軸方向一軸加振の燃料ブロックの変位は X 軸方向一軸加振の場合よりも大きい。一軸加振の場合にも加振方向と直角方向にも燃料ブロックは運動し、その運動軌跡は楕円形となる。二軸同時加振の場合よりも Y 軸方向一軸加振の場合の燃料ブロックの変位は大きい。

(ii) 側方支持反力分布

Fig. 5.61 から明らかなように加振形式による側方支持反力の分布は正弦波加振の場合と類似の傾向がみられる。すなわち、X 軸方向一軸加振の場合の側方支持反力は Y 軸方向一軸加振の場合よりも大きい。二軸同時加振の場合よりも X 軸方向一軸加振の場合の側方支持反力は大きい。

(4) 側方支持剛性の影響

(i) 変位特性

Fig. 5.62 は最大加振加速度 500 Gal, X 軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の燃料ブロックの最大変位を比較して示す。入力地震波の種類によって応答値は異なるが、応答変位が大きくなるエルセントロ 1940 NS 波およびホワイトノイズ波では、側方支持剛性が強およびプリロード支持において燃料ブロックの最大変位は小さい。この傾向は正弦波加振の場合とほとんど同じである。

(ii) 側方支持反力特性

Fig. 5.63 は最大加振加速度 500 Gal, X 軸方向一軸加振において、側方支持剛性を強, 中, プリロードおよび弱に変えた場合の最大側方支持反力を比較して示す。側方支持剛性と側方支持反

力の関係は、正弦波加振の場合とほぼ同じ傾向を示し、側方支持剛性がプリロードで最大側方支持反力が最も小さく、側方支持剛性が強および弱において大きい。

(5) 正弦波と地震波による応答値の比較

Table 5.13 は正弦波加振および地震波加振による燃料ブロックの最大変位を比較して示す。地震波加振では最大加振加速度が 250 Gal、地震波加振では最大加振加速度が 500 Gal の場合である。Table 5.14 は側方支持反力について、Table 5.15 は燃料ブロックの衝突加速度について、Table 5.13 と同じように正弦波加振と地震波加振の応答値を比較したものである。これらの結果から地震波加振による応答値は正弦波加振によるものの約 $\frac{1}{2}$ である。

Table 5.1(a) Resonant frequency and maximum displacement in the case of X-direction excitation

Support stiffness Input acceleration	Frequency-Hz (Displacement-mm)														
	Hard			Intermediate			Pre-load			Soft					
	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal
St-1(X)	2.8 (3.6)	3.2 (4.0)	4.1 (5.0)	—	—	—	3.8 (7.7)	2.8 (3.6)	3.1 (5.5)	—	—	—	2.7 (17.6)	3.0 (17.2)	3.7 (19.4)
Max. response	2.8 (3.6)	3.2 (4.0)	4.1 (5.0)	2.4 (4.5)	2.5 (5.0)	3.7 (8.5)	2.7 (3.7)	3.1 (5.8)	3.2 (7.1)	2.7 (17.6)	2.9 (18.4)	3.4 (19.8)	—	—	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St-2(Y)	2.8 (1.2)	3.2 (1.8)	4.1 (3.0)	3.3 (1.2)	—	—	3.8 (4.1)	—	—	—	—	—	2.8 (2.3)	3.0 (3.1)	—
Max. response	2.8 (1.2)	3.2 (1.8)	4.1 (3.0)	2.9 (1.3)	3.3 (1.5)	3.8 (4.1)	2.6 (1.6)	1.9 (2.2)	3.4 (2.3)	2.8 (2.3)	2.8 (5.3)	3.0 (15.9)	—	—	—
St-11(X)	2.8 (4.5)	3.2 (7.7)	4.1 (17.7)	2.8 (7.2)	3.1 (13.8)	3.8 (33.0)	2.8 (5.0)	3.2 (12.2)	3.8 (23.3)	2.7 (20.2)	—	—	3.5 (33.2)	—	—
Max. response	2.8 (4.5)	3.2 (7.7)	4.1 (17.7)	2.7 (8.1)	3.0 (15.3)	3.7 (33.6)	2.8 (5.0)	2.2 (12.2)	3.7 (24.1)	2.7 (20.2)	2.9 (24.2)	3.2 (33.8)	—	—	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St-12(Y)	2.8 (1.0)	3.2 (2.0)	4.1 (3.0)	2.8 (2.3)	3.1 (3.1)	3.8 (3.6)	—	—	—	—	—	—	2.7 (3.3)	2.9 (8.1)	3.0 (16.0)
Max. response	2.8 (1.0)	3.2 (2.0)	4.1 (3.0)	2.8 (2.3)	3.1 (3.1)	3.8 (3.6)	2.9 (2.2)	3.4 (2.5)	—	2.7 (3.3)	2.9 (8.1)	2.9 (16.4)	—	—	—
St-15(X)	2.8 (10.5)	3.2 (11.0)	4.1 (12.3)	2.8 (12.0)	3.1 (15.1)	3.8 (24.3)	2.9 (10.0)	3.3 (10.9)	3.9 (13.3)	2.7 (24.6)	2.9 (28.5)	3.5 (30.0)	—	—	—
Max. response	2.8 (10.5)	3.2 (11.0)	—	2.7 (12.9)	3.0 (16.1)	3.7 (25.8)	2.5 (10.8)	3.2 (12.7)	3.4 (16.3)	2.7 (29.6)	2.9 (28.5)	3.4 (30.6)	—	—	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St-16(Y)	2.8 (3.2)	3.2 (3.2)	4.1 (3.2)	2.8 (2.1)	3.1 (2.7)	3.8 (2.3)	2.9 (1.9)	3.3 (2.0)	—	2.7 (2.4)	2.9 (2.9)	3.1 (16.9)	—	—	—
Max. response	2.8 (3.2)	3.2 (3.2)	3.4 (5.0)	2.7 (3.0)	3.0 (3.2)	3.7 (3.0)	2.6 (3.1)	2.8 (3.7)	2.8 (5.0)	2.7 (2.4)	2.7 (4.8)	3.0 (19.1)	—	—	—
St-17(X)	2.8 (5.4)	3.2 (7.8)	4.1 (16.6)	2.7 (9.0)	3.1 (14.4)	3.8 (30.3)	2.8 (4.4)	3.2 (11.1)	3.5 (25.3)	2.7 (18.1)	2.9 (21.1)	3.5 (30.5)	—	—	—
Max. response	2.8 (5.4)	1.7 (8.5)	2.2 (18.5)	2.7 (9.0)	3.0 (16.1)	3.8 (30.3)	2.7 (4.8)	3.2 (11.1)	3.8 (25.0)	2.7 (18.1)	2.9 (21.1)	3.1 (31.9)	—	—	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St-18(Y)	—	—	—	2.8 (3.1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Max. response	3.0 (1.7)	3.3 (3.2)	3.2 (3.4)	2.8 (3.1)	3.0 (3.8)	2.7 (10.4)	2.7 (1.8)	3.2 (2.9)	—	2.7 (6.6)	2.7 (8.7)	3.1 (18.5)	—	—	—
St-21(X)	—	—	—	2.7 (4.7)	—	—	3.8 (9.8)	2.8 (5.4)	3.1 (6.0)	—	—	—	2.7 (19.0)	3.0 (17.3)	3.7 (18.2)
Max. response	1.9 (3.8)	2.2 (6.3)	3.8 (7.9)	2.5 (4.7)	2.9 (7.3)	3.7 (10.6)	2.4 (5.6)	3.1 (6.0)	3.0 (7.8)	2.7 (19.0)	2.8 (20.0)	3.0 (23.5)	—	—	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St-22(Y)	—	—	—	4.1 (3.2)	2.8 (1.7)	3.1 (3.4)	3.8 (4.9)	2.9 (2.7)	—	—	—	—	—	—	—
Max. response	2.2 (2.0)	3.1 (2.9)	4.1 (3.2)	2.8 (1.7)	3.1 (3.4)	3.8 (4.9)	2.9 (2.7)	3.2 (3.3)	3.9 (5.2)	2.8 (5.0)	2.9 (7.6)	2.9 (19.6)	—	—	—
Max. displacement (mm)	10.5	11.0	18.5	12.9	16.1	33.6	10.8	12.7	25.8	24.6	28.5	33.8	—	—	—

Detector

Table 5.1(b) , Resonant frequency and maximum displacement in the
case of Y-direction excitation

Support stiffness Input acceleration	Frequency-Hz (Displacement-mm)											
	Hard			Intermediate			Pre-load			Soft		
	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal	50Gal	100Gal	250Gal
St-1(X)												
Resonance	—	3.1 (2.5)	3.9 (3.8)	—	3.1 (1.9)	3.9 (2.8)	—	—	—	—	2.8 (7.8)	3.1 (12.1)
Max. response	2.6 (2.5)	3.1 (2.5)	3.9 (3.8)	2.7 (1.2)	3.1 (1.9)	3.1 (3.6)	3.2 (1.4)	2.5 (1.6)	3.6 (2.7)	2.7 (9.5)	2.9 (12.7)	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	3.1 (9.3)	3.9 (18.5)	2.7 (7.0)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-2(Y)												
Resonance	—	3.1 (9.0)	3.9 (18.1)	2.7 (6.9)	3.0 (12.4)	3.8 (32.4)	3.1 (3.7)	3.2 (7.9)	3.7 (19.1)	2.9 (22.6)	3.4 (27.1)	—
Max. response	2.6 (5.4)	1.9 (9.6)	2.3 (21.8)	2.7 (6.9)	3.0 (12.4)	3.7 (32.7)	2.6 (4.8)	3.1 (8.6)	3.5 (20.9)	2.8 (23.0)	3.0 (30.0)	—
St-11(X)												
Resonance	3.0 (2.8)	—	—	2.8 (3.3)	3.1 (5.2)	3.8 (10.2)	2.9 (2.5)	—	3.6 (8.6)	2.7 (11.4)	3.4 (11.7)	—
Max. response	3.0 (2.8)	3.5 (2.8)	4.0 (6.0)	2.8 (3.3)	3.1 (5.2)	3.8 (10.2)	2.9 (2.5)	3.0 (3.7)	3.5 (9.4)	2.7 (11.4)	2.8 (15.6)	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	3.1 (10.6)	3.8 (20.3)	—	—	—	—	—	—
St-12(Y)												
Resonance	2.8 (7.2)	—	3.9 (10.3)	2.7 (8.2)	3.1 (9.2)	3.8 (17.5)	2.8 (6.4)	3.2 (7.6)	3.7 (11.4)	3.1 (16.0)	3.4 (24.5)	—
Max. response	2.8 (7.2)	3.0 (8.0)	2.5 (10.7)	2.7 (8.2)	3.0 (9.8)	3.8 (17.5)	2.6 (6.7)	3.1 (7.9)	3.4 (12.6)	2.8 (21.6)	3.0 (26.6)	—
St-15(X)												
Resonance	—	3.1 (5.5)	4.0 (6.1)	2.8 (2.3)	3.1 (2.5)	—	—	3.2 (3.2)	3.9 (3.2)	2.8 (12.6)	3.1 (21.8)	—
Max. response	2.7 (4.0)	2.8 (9.1)	3.6 (9.0)	2.8 (2.8)	3.1 (2.5)	3.1 (6.3)	2.8 (1.9)	3.2 (3.2)	3.9 (3.2)	2.7 (15.4)	3.2 (19.5)	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	3.1 (14.8)	4.0 (15.2)	2.8 (13.8)	3.1 (18.3)	—	—	3.2 (14.3)	—	—	—	—
St-16(Y)												
Resonance	2.8 (13.2)	3.1 (13.7)	4.0 (13.9)	2.8 (13.6)	3.1 (18.1)	3.9 (22.4)	2.8 (11.6)	3.2 (13.9)	3.8 (15.7)	2.9 (25.3)	3.4 (29.5)	—
Max. response	2.5 (14.1)	2.6 (14.9)	2.9 (16.4)	2.7 (14.6)	3.0 (19.0)	3.8 (26.1)	2.7 (12.0)	3.0 (14.6)	3.4 (17.6)	2.6 (26.4)	3.4 (29.5)	—
St-17(X)												
Resonance	—	—	—	2.7 (2.7)	2.8 (4.3)	3.8 (10.1)	2.5 (3.4)	3.2 (4.0)	—	2.9 (7.1)	3.1 (13.0)	—
Max. response	2.3 (3.0)	2.5 (3.7)	2.7 (7.2)	2.3 (3.4)	2.7 (4.5)	3.8 (10.1)	2.5 (3.4)	3.0 (5.1)	3.5 (9.7)	2.7 (8.3)	2.8 (13.4)	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	2.7 (6.9)	—	3.8 (20.6)	—	3.2 (7.8)	—	2.9 (22.4)	3.1 (31.1)	—
St-18(Y)												
Resonance	—	—	4.0 (9.8)	2.7 (6.3)	3.1 (8.3)	3.8 (18.0)	2.8 (4.9)	3.2 (6.7)	3.2 (12.3)	2.9 (21.3)	3.3 (27.8)	—
Max. response	2.4 (5.7)	2.8 (7.1)	4.0 (9.8)	2.7 (6.3)	2.9 (9.0)	3.7 (18.0)	2.7 (5.1)	3.2 (6.7)	3.2 (12.3)	2.8 (22.9)	3.1 (28.3)	—
St-21(X)												
Resonance	—	—	—	—	—	—	2.8 (1.9)	3.2 (1.9)	—	2.8 (9.5)	3.1 (15.4)	—
Max. response	2.6 (2.3)	2.7 (4.4)	3.9 (6.1)	1.8 (2.4)	3.0 (2.7)	3.1 (5.9)	2.8 (1.9)	3.1 (2.1)	3.2 (3.4)	2.7 (11.7)	3.0 (16.4)	—
$\sqrt{X^2+Y^2}$	—	—	—	—	—	—	2.8 (10.3)	3.2 (14.1)	—	—	—	—
St-22(Y)												
Resonance	2.8 (6.2)	—	4.0 (17.5)	2.8 (8.4)	3.1 (14.2)	3.8 (34.1)	2.8 (10.1)	3.2 (14.0)	3.7 (24.4)	2.9 (26.9)	3.4 (33.4)	—
Max. response	2.8 (6.2)	3.0 (9.5)	2.3 (21.3)	2.7 (9.0)	3.0 (14.7)	1.9 (21.4)	2.8 (10.1)	3.0 (14.8)	3.3 (27.2)	2.6 (25.4)	3.3 (35.8)	—
Max. displacement (mm)	14.1	14.9	21.8	14.6	19.0	34.1	12.0	14.8	27.2	26.9	35.8	—

Detector

Table 5.2(a) Resonant frequency and maximum impact reaction force
in the case of X-direction excitation

Support stiffness Input acceleration	Frequency-Hz (Force-kg)																		
	Hard			Intermediate			Pre-load			Soft			Soft						
	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	350 Gal	400 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	350 Gal	400 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal
RF-3 Resonance	2.8(50)	---	---	2.8(18.7)	---	---	2.8(14.3)	3.2(51.0)	3.8(70.8)	4.4(82)	4.6(123)	2.7(60.8)	2.9(162.7)	---	---	---	---	---	---
(R) Max. response	2.8(50)	2.4(100)	---	2.8(18.7)	2.9(43.4)	3.8(123.5)	2.4(17.0)	3.2(51.0)	3.1(83.9)	3.0(99.4)	4.6(123)	2.7(60.8)	2.9(162.7)	3.4(528.6)	---	---	---	---	---
RF-4 Resonance	2.7(60)	---	---	2.7(33.9)	3.1(56.5)	3.8(141.3)	2.8(20.0)	3.2(75.0)	3.8(116.5)	4.3(165.0)	4.6(178.3)	2.7(177.5)	---	---	---	---	---	---	---
(T) Max. response	2.7(60)	2.6(117)	2.5(230)	2.7(33.9)	3.0(58.9)	3.7(146.1)	2.5(24.4)	3.2(75.0)	3.4(146.3)	4.3(166.8)	4.4(183.6)	2.7(177.5)	---	---	---	---	---	---	---
RF-5 Resonance	2.8(90)	3.1(170)	4.3(280)	2.7(41.6)	---	---	2.8(22.3)	3.2(73.5)	3.8(140.5)	4.4(183.6)	4.6(178.3)	2.7(177.5)	---	---	---	---	---	---	---
(R) Max. response	2.6(100)	2.9(207)	2.7(416)	2.7(41.6)	3.1(113.2)	3.8(361.3)	2.4(23.4)	3.2(73.5)	3.5(162.3)	3.0(195.1)	3.2(222.7)	2.7(274.9)	2.9(633.3)	2.7(944.4)	---	---	---	---	---
RF-6 Resonance	---	3.1(144)	---	---	2.9(60.0)	3.5(173.2)	2.8(19.0)	3.2(62.9)	3.8(100.4)	4.2(137.5)	4.6(131.6)	2.7(275.0)	2.9(613.9)	3.7(661)	---	---	---	---	---
(T) Max. response	---	2.7(153)	4.2(456)	2.6(30.0)	2.6(64.0)	3.7(162.6)	2.5(22.4)	3.2(62.9)	3.3(119.0)	4.2(143.3)	4.6(149.2)	2.7(275.0)	2.9(613.9)	2.6(806)	---	---	---	---	---
RF-9 Resonance	2.8(180)	3.1(407)	4.3(950)	2.7(117.2)	3.0(255.2)	3.8(722.4)	2.8(33.0)	3.2(120.8)	3.8(258.6)	4.3(422)	4.6(537.4)	2.7(332)	2.9(640)	3.4(1158)	---	---	---	---	---
(R) Max. response	2.6(268)	2.8(515)	3.9(1126)	2.6(119.4)	2.9(260)	3.7(734.3)	2.8(33.0)	3.2(120.3)	3.5(287.7)	4.2(424)	4.6(537.4)	2.7(332)	2.9(640)	3.4(1158)	---	---	---	---	---
RF-10 Resonance	---	3.1(190)	4.3(383)	2.8(14.7)	3.1(32.3)	3.8(113.7)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
(T) Max. response	2.4(110)	2.3(279)	2.7(480)	2.8(14.7)	3.1(32.3)	3.8(113.7)	2.5(6.3)	3.0(140)	3.8(39.3)	4.1(125.4)	4.2(132)	2.7(75.6)	2.9(248.9)	3.4(582)	---	---	---	---	---
RF-11 Resonance	2.8(150)	3.1(300)	4.3(800)	2.7(97.1)	3.0(225.8)	3.8(605.9)	2.8(29.0)	3.2(103.9)	3.8(193.1)	4.3(341.8)	4.6(462.9)	2.7(172)	2.9(474)	3.4(1022)	---	---	---	---	---
(R) Max. response	2.6(193)	2.9(405)	4.1(1018)	2.7(97.1)	2.9(228.8)	3.7(614.6)	2.8(29.0)	3.2(103.9)	3.5(222.4)	4.0(365.7)	4.5(496)	2.7(172)	2.9(516)	3.3(1202)	---	---	---	---	---
RF-12 Resonance	---	3.1(100)	4.3(295)	2.7(34.0)	3.0(81.2)	3.8(188.8)	2.8(20.4)	3.2(69.7)	3.8(137.3)	4.4(141.2)	4.6(169.2)	2.7(110)	2.9(223)	3.4(342)	---	---	---	---	---
(T) Max. response	3.3(85)	2.6(136)	3.7(349)	2.7(34.0)	2.9(86.8)	3.5(230.3)	2.8(20.4)	3.2(69.7)	3.5(165.6)	3.1(197.1)	3.2(205.5)	2.6(141)	2.7(254)	3.3(428)	---	---	---	---	---
RF-17 Resonance	---	---	---	2.7(32.3)	3.1(61.5)	3.8(188.9)	2.8(11.9)	3.2(34.5)	3.8(74.8)	4.3(92.6)	4.6(115)	2.7(43.2)	2.9(532)	---	---	---	---	---	---
(R) Max. response	---	---	---	2.7(32.3)	3.0(66.0)	3.8(188.9)	2.7(13.6)	3.0(36.2)	3.0(85.9)	4.1(94.9)	4.5(126)	2.7(43.2)	2.9(532)	3.0(285)	---	---	---	---	---
RF-18 Resonance	2.8(110)	3.2(150)	4.3(516)	2.7(29.7)	3.1(50.1)	3.8(144.8)	2.8(22.6)	3.2(74.4)	3.8(120.0)	4.4(133)	4.6(175.9)	2.7(80.9)	2.9(350.6)	---	---	---	---	---	---
(T) Max. response	2.6(145)	2.8(273)	3.5(625)	2.7(29.7)	3.0(55.0)	3.8(144.3)	2.5(24.8)	3.2(74.4)	3.2(145.2)	3.1(174)	4.5(197.5)	2.7(80.9)	2.9(350.6)	3.0(912)	---	---	---	---	---
Max. force (kg)	268	515	1126	119.0	260	734.3	33.0	120.3	287.7	424	597	332	640	1206	---	---	---	---	---

Detector

Table 5.2(b) Resonant frequency and maximum impact reaction force
in the case of Y-direction excitation

		Frequency-Hz (Force-kg)											
Support stiffness		Hard			Intermediate			Pre-load			Soft		
Input acceleration		50	100	250	50	100	250	50	100	250	100	250	
		Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	Gal	
Detector	RF-3 Resonance	2.7(125)	3.0(223)	—	2.7(81.5)	3.1(174.1)	3.9(491.0)	2.6(34.4)	3.1(97.0)	3.5(241)	3.1(427)	3.4(902)	
	(R) Max. response	2.5(140)	2.4(299)	2.9(792)	2.6(83.7)	2.7(178.6)	3.8(571.8)	2.6(34.4)	3.1(97.0)	3.5(241)	2.9(642)	2.5(1211)	
	RF-4 Resonance	2.7(70)	3.0(123)	—	2.8(26.5)	3.1(61.9)	3.9(135)	2.7(11.5)	3.2(22.9)	3.8(51.2)	2.9(657)	3.4(707)	
	(T) Max. response	2.7(70)	2.7(123)	2.0(366)	2.7(28.9)	3.1(61.9)	3.6(159)	2.6(13.2)	3.2(22.9)	3.4(70.0)	2.9(657)	3.0(764)	
	RF-5 Resonance	—	3.0(180)	4.0(280)	2.7(68.0)	3.1(155.5)	3.9(450)	2.7(19.2)	3.2(47.1)	3.6(149.2)	3.1(187)	3.6(486)	
	(R) Max. response	2.5(125)	2.5(263)	2.2(549)	2.7(68.0)	3.1(155.5)	3.8(499)	2.6(20.8)	3.1(54.3)	3.6(149.2)	2.6(377)	3.0(663)	
	RF-6 Resonance	2.7(60)	3.0(104)	4.0(235)	2.7(32.7)	3.1(62.0)	3.9(130)	2.7(23.0)	3.2(46.6)	3.8(111.2)	2.9(483)	—	
	(T) Max. response	2.7(60)	2.6(218)	2.8(416)	2.7(32.7)	3.0(64.7)	3.8(143)	2.6(26)	3.1(50.5)	3.4(158)	2.9(483)	2.4(806)	
	RF-9 Resonance	—	—	—	2.8(13.0)	3.1(41.1)	3.9(170)	2.6(8.4)	3.2(27)	3.5(95)	3.1(118)	—	
	(R) Max. response	—	3.1(60)	3.7(160)	2.8(13.0)	3.1(41.1)	3.8(196)	2.6(8.4)	3.1(36)	3.5(95)	3.0(159)	3.6(827)	
	RF-10 Resonance	—	3.1(161)	4.0(331)	2.7(38.0)	3.1(64.7)	3.9(149)	2.7(25.4)	3.2(57.4)	3.8(158)	2.9(570)	3.4(922)	
	(T) Max. response	5.9(123)	3.1(161)	1.9(422)	2.7(38.0)	3.0(71.8)	3.8(159)	2.6(28.2)	3.1(64.6)	3.4(163.7)	—	3.4(922)	
	RF-11 Resonance	2.7(90)	3.0(150)	3.9(336)	2.8(14.4)	3.1(43.3)	3.9(176)	2.6(23)	3.2(44)	3.8(97)	2.8(183)	—	
	(R) Max. response	2.7(90)	2.7(162)	3.9(336)	2.7(16.0)	3.1(43.3)	3.8(198)	2.6(23)	3.1(51)	3.2(112)	2.7(195)	3.1(836)	
	RF-12 Resonance	—	—	3.9(284)	2.7(50.0)	3.0(96.3)	3.9(196.8)	2.7(30)	3.2(76)	3.8(187)	—	3.4(478)	
	(T) Max. response	—	2.7(138)	3.6(327)	2.7(50.0)	3.0(96.3)	3.8(222.7)	2.6(32)	3.1(83)	3.4(206)	2.7(417)	2.9(618)	
	RF-17 Resonance	2.7(189)	3.0(339)	4.0(733)	2.7(116)	3.1(226)	3.9(520)	2.6(38)	3.2(86)	3.8(155)	2.8(466)	3.6(749)	
	(R) Max. response	2.7(189)	2.8(425)	3.8(869)	2.7(116)	2.9(247)	3.8(565)	2.6(38)	3.1(91)	3.4(191)	2.8(466)	2.7(894)	
	RF-18 Resonance	—	—	—	2.7(13.7)	3.1(31.6)	3.9(91.1)	2.7(7.7)	3.2(21.2)	3.8(53.2)	3.1(187)	3.6(291)	
	(T) Max. response	—	—	4.0(200)	2.7(13.7)	3.1(31.6)	3.8(98.2)	2.4(8.6)	3.1(24.4)	3.6(67.7)	3.0(202)	3.8(571)	
Max. force (kg)		189	425	869	116	247	571.8	38	97	241	657	1211	

Table 5.3(a) Resonant frequency maximum acceleration in the case of X-direction excitation

Support stiffness	Frequency-Hz (Acceleration-G)															
	Hard				Intermediate				Pre-Load				Soft			
	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	350 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	500 Gal
Input acceleration	2.7(17.0)	3.5(29)	3.8(110.0)	2.9(11.0)	4.1(23.1)	3.7(63.3)	3.2(10.3)	3.2(35.0)	—	—	—	—	4.3(120.0)	2.7(17.0)	3.0(37.0)	3.8(56.7)
AC-1 Resonance	2.7(17.0)	3.5(29)	3.8(110.0)	2.9(11.0)	4.1(23.1)	3.7(63.3)	3.2(10.3)	3.2(35.0)	—	—	—	—	4.3(120.0)	2.7(17.0)	3.0(37.0)	3.8(56.7)
AC-1 Max. response	2.7(17.0)	3.5(29)	3.8(110.0)	2.9(11.0)	4.1(23.1)	3.7(63.3)	3.2(10.3)	3.2(35.0)	—	—	—	—	4.3(120.0)	2.7(17.0)	3.0(37.0)	3.8(56.7)
AC-4 Resonance	2.7(17.0)	3.5(29)	3.8(110.0)	2.9(11.0)	4.1(23.1)	3.7(63.3)	3.2(10.3)	3.2(35.0)	—	—	—	—	4.3(120.0)	2.7(17.0)	3.0(37.0)	3.8(56.7)
AC-4 Max. response	2.7(17.0)	3.5(29)	3.8(110.0)	2.9(11.0)	4.1(23.1)	3.7(63.3)	3.2(10.3)	3.2(35.0)	—	—	—	—	4.3(120.0)	2.7(17.0)	3.0(37.0)	3.8(56.7)
AC-6 Resonance	2.8(31.6)	3.0(43.0)	2.7(90.0)	2.6(21.0)	3.0(37.0)	3.8(76.7)	2.8(17.7)	3.1(33.0)	3.4(86.7)	3.8(143.3)	2.7(31.0)	2.9(63.3)	3.7(63.3)	3.2(113.3)	3.2(113.3)	3.2(113.3)
AC-6 Max. response	2.8(31.6)	3.0(43.0)	2.7(90.0)	2.6(21.0)	3.0(37.0)	3.8(76.7)	2.8(17.7)	3.1(33.0)	3.4(86.7)	3.8(143.3)	2.7(31.0)	2.9(63.3)	3.7(63.3)	3.2(113.3)	3.2(113.3)	3.2(113.3)
AC-8 Resonance	2.8(31.0)	3.2(66.0)	3.9(103.3)	2.7(20.0)	3.1(30.0)	3.8(76.7)	2.8(19.0)	3.2(30.0)	3.6(83.3)	4.2(114.9)	2.7(33.0)	2.9(70.0)	3.1(140.0)	3.1(140.0)	3.1(140.0)	3.1(140.0)
AC-8 Max. response	2.8(31.0)	3.2(66.0)	3.9(103.3)	2.7(20.0)	3.1(30.0)	3.8(76.7)	2.8(19.0)	3.2(30.0)	3.6(83.3)	4.2(114.9)	2.7(33.0)	2.9(70.0)	3.1(140.0)	3.1(140.0)	3.1(140.0)	3.1(140.0)
AC-9 Resonance	2.9(22.0)	3.0(44.0)	2.6(76.7)	2.7(19.0)	3.0(35.0)	3.7(63.3)	2.7(16.3)	2.9(31.0)	3.6(96.7)	3.6(96.7)	2.7(23.0)	2.8(50.0)	3.2(70.0)	3.2(70.0)	3.2(70.0)	3.2(70.0)
AC-9 Max. response	2.9(22.0)	3.0(44.0)	2.6(76.7)	2.7(19.0)	3.0(35.0)	3.7(63.3)	2.7(16.3)	2.9(31.0)	3.6(96.7)	3.6(96.7)	2.7(23.0)	2.8(50.0)	3.2(70.0)	3.2(70.0)	3.2(70.0)	3.2(70.0)
AC-11 Resonance	2.7(17.7)	3.0(37.0)	3.7(140.0)	2.7(16.0)	3.0(21.0)	3.7(36.7)	2.8(13.7)	3.1(27.0)	3.9(36.7)	3.0(56.7)	2.7(17.0)	2.8(31.0)	3.4(76.7)	3.4(76.7)	3.4(76.7)	3.4(76.7)
AC-11 Max. response	2.7(17.7)	3.0(37.0)	3.7(140.0)	2.7(16.0)	3.0(21.0)	3.7(36.7)	2.8(13.7)	3.1(27.0)	3.9(36.7)	3.0(56.7)	2.7(17.0)	2.8(31.0)	3.4(76.7)	3.4(76.7)	3.4(76.7)	3.4(76.7)
AC-13 Resonance	2.7(29.0)	2.8(49.0)	2.6(83.3)	2.7(25.0)	2.9(49.0)	3.0(60.0)	2.5(18.0)	3.2(35.0)	3.8(76.7)	4.4(113.3)	2.7(33.0)	2.9(63.0)	3.2(90.0)	3.2(90.0)	3.2(90.0)	3.2(90.0)
AC-13 Max. response	2.7(29.0)	2.8(49.0)	2.6(83.3)	2.7(25.0)	2.9(49.0)	3.0(60.0)	2.5(18.0)	3.2(35.0)	3.8(76.7)	4.4(113.3)	2.7(33.0)	2.9(63.0)	3.2(90.0)	3.2(90.0)	3.2(90.0)	3.2(90.0)
AC-14 Resonance	2.7(28.3)	3.0(35.0)	2.3(130.0)	2.7(17.0)	3.0(33.0)	3.8(50.0)	2.7(18.7)	2.9(29.0)	3.3(46.7)	2.2(70.0)	2.7(21.0)	2.7(25.0)	3.3(63.3)	3.3(63.3)	3.3(63.3)	3.3(63.3)
AC-14 Max. response	2.7(28.3)	3.0(35.0)	2.3(130.0)	2.7(17.0)	3.0(33.0)	3.8(50.0)	2.7(18.7)	2.9(29.0)	3.3(46.7)	2.2(70.0)	2.7(21.0)	2.7(25.0)	3.3(63.3)	3.3(63.3)	3.3(63.3)	3.3(63.3)
AC-15 Resonance	—	3.2(39.0)	2.7(116.7)	2.7(11.0)	3.1(18.0)	3.7(43.3)	2.8(15.0)	3.2(25.0)	3.9(43.3)	4.4(73.3)	2.7(17.0)	2.8(32.0)	3.2(63.3)	3.2(63.3)	3.2(63.3)	3.2(63.3)
AC-15 Max. response	—	3.2(39.0)	2.7(116.7)	2.7(11.0)	3.1(18.0)	3.7(43.3)	2.8(15.0)	3.2(25.0)	3.9(43.3)	4.4(73.3)	2.7(17.0)	2.8(32.0)	3.2(63.3)	3.2(63.3)	3.2(63.3)	3.2(63.3)
AC-17 Resonance	2.8(29.0)	3.1(51.0)	3.8(229.9)	2.7(35.0)	2.8(70.0)	3.7(236.6)	2.5(22.6)	3.2(37.0)	3.7(193.3)	3.7(203.3)	2.7(37.0)	2.9(64.0)	3.3(500.0)	3.3(500.0)	3.3(500.0)	3.3(500.0)
AC-17 Max. response	2.8(29.0)	3.1(51.0)	3.8(229.9)	2.7(35.0)	2.8(70.0)	3.7(236.6)	2.5(22.6)	3.2(37.0)	3.7(193.3)	3.7(203.3)	2.7(37.0)	2.9(64.0)	3.3(500.0)	3.3(500.0)	3.3(500.0)	3.3(500.0)
AC-19 Resonance	2.7(25.6)	3.1(51.0)	—	2.6(23.0)	3.1(34.0)	3.6(113.3)	2.8(21.0)	3.0(26.0)	3.3(56.7)	4.2(150.0)	2.7(26.0)	2.8(71.0)	3.3(450.0)	3.3(450.0)	3.3(450.0)	3.3(450.0)
AC-19 Max. response	2.7(25.6)	3.1(51.0)	—	2.6(23.0)	3.1(34.0)	3.6(113.3)	2.8(21.0)	3.0(26.0)	3.3(56.7)	4.2(150.0)	2.7(26.0)	2.8(71.0)	3.3(450.0)	3.3(450.0)	3.3(450.0)	3.3(450.0)
AC-21 Resonance	2.7(22.3)	2.9(49.0)	3.8(236.6)	2.8(13.0)	3.0(19.0)	3.7(96.7)	2.8(17.3)	2.9(30.0)	2.6(53.8)	4.3(166.7)	2.6(21.0)	2.9(33.0)	3.2(123.3)	3.2(123.3)	3.2(123.3)	3.2(123.3)
AC-21 Max. response	2.7(22.3)	2.9(49.0)	3.8(236.6)	2.8(13.0)	3.0(19.0)	3.7(96.7)	2.8(17.3)	2.9(30.0)	2.6(53.8)	4.3(166.7)	2.6(21.0)	2.9(33.0)	3.2(123.3)	3.2(123.3)	3.2(123.3)	3.2(123.3)
Max. acceleration (G)	31.6	54.0	236.6	35.0	70.0	256.6	22.6	40.0	193.3	610	39.0	71.0	500.0	39.0	71.0	500.0

Detector

Table 5.3(b) Resonant frequency and maximum acceleration in the case of X-direction excitation

Support stiffness	Frequency-Hz (Acceleration-G)														
	Hard					Intermediate					Pre-load				
	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal	50 Gal	100 Gal	250 Gal
Input acceleration															
AC-2 Resonance	—	—	—	3.1(17.0)	3.0(33.0)	3.8(110.0)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.5(30.6)	3.0(37.0)	3.7(126.7)	2.7(22.3)	2.7(34.0)	3.6(123.3)	1.9(20.0)	3.7(27.0)	3.6(90.0)	3.8(76.7)	3.1(26.0)	3.2(96.7)	2.7(43.0)	3.2(96.7)	3.2(96.7)
AC-3 Resonance	—	—	—	2.7(20.3)	3.1(26.3)	3.8(100.0)	2.7(13.7)	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.7(31.3)	2.9(41.0)	2.4(76.7)	2.6(21.0)	2.9(33.0)	3.7(110.0)	2.7(13.7)	2.5(23.0)	3.7(73.3)	3.6(83.3)	2.8(78.0)	3.4(103.3)	2.8(78.0)	3.4(103.3)	3.4(103.3)
AC-5 Resonance	—	—	—	2.7(19.7)	3.1(37.0)	3.8(83.3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.6(27.0)	3.0(39.0)	4.0(70.0)	2.5(18.3)	2.9(57.0)	3.7(86.7)	2.7(14.0)	2.3(26.0)	3.6(83.3)	3.9(80.0)	2.8(81.0)	3.3(123.3)	2.8(81.0)	3.3(123.3)	3.3(123.3)
AC-7 Resonance	—	—	—	2.7(17.3)	3.1(27.0)	3.9(75.7)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.8(23.6)	3.6(35.0)	4.8(70.0)	2.7(17.3)	2.9(26.0)	3.7(75.7)	2.5(14.3)	3.1(23.0)	3.2(60.0)	3.9(80.0)	2.8(81.0)	3.3(123.3)	2.8(81.0)	3.3(123.3)	3.3(123.3)
AC-10 Resonance	—	—	—	2.8(23.0)	3.1(41.0)	3.7(136.7)	2.7(21.0)	2.9(35.0)	4.0(40.0)	3.2(63.3)	2.8(43.0)	3.4(63.3)	2.8(43.0)	3.4(63.3)	3.4(63.3)
(Y) Max. response	2.8(27.0)	3.1(46.0)	3.6(76.7)	2.7(25.0)	2.9(44.0)	3.7(136.7)	2.7(21.0)	2.9(35.0)	4.0(40.0)	3.2(63.3)	2.8(43.0)	3.4(63.3)	2.8(43.0)	3.4(63.3)	3.4(63.3)
AC-12 Resonance	—	—	—	2.7(18.0)	3.1(33.0)	3.8(190.0)	2.2(15.7)	3.7(20.0)	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.7(19.3)	2.5(39.0)	—	2.7(18.0)	2.9(44.0)	3.6(236.6)	2.2(15.7)	3.1(23.0)	3.4(70.0)	3.0(38.0)	3.3(73.3)	3.0(38.0)	3.3(73.3)	3.0(38.0)	3.3(73.3)
AC-16 Resonance	—	—	—	2.7(27.0)	3.0(45.0)	3.9(90.0)	2.7(18.3)	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.6(37.3)	2.9(39.0)	3.6(86.7)	2.7(27.0)	3.0(45.0)	3.9(90.0)	2.5(20.3)	2.7(31.0)	3.8(126.7)	2.8(39.0)	3.3(83.0)	3.0(25.0)	3.3(83.0)	3.0(25.0)	3.3(83.0)
AC-18 Resonance	—	—	—	2.8(11.3)	3.1(18.0)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.8(23.0)	2.7(34.0)	2.0(86.7)	2.8(11.3)	3.9(19.0)	3.8(36.7)	2.7(12.7)	2.8(27.0)	3.8(43.3)	2.8(29.0)	3.3(63.3)	2.8(29.0)	3.3(63.3)	2.8(29.0)	3.3(63.3)
AC-20 Resonance	—	—	—	2.8(13.7)	3.0(30.0)	3.7(63.3)	2.8(14.0)	3.1(25.0)	3.9(36.9)	2.8(31.0)	3.3(56.7)	2.8(31.0)	3.3(56.7)	2.8(31.0)	3.3(56.7)
(Y) Max. response	2.8(31.6)	2.9(40.0)	3.2(76.7)	2.7(15.3)	3.0(30.0)	3.7(63.3)	2.7(17.3)	2.8(27.0)	3.6(36.7)	2.8(31.0)	3.3(56.7)	2.8(31.0)	3.3(56.7)	2.8(31.0)	3.3(56.7)
AC-22 Resonance	—	—	—	2.7(21.7)	3.0(39.0)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.4(23.0)	2.9(40.0)	3.2(61.0)	2.7(21.7)	3.0(39.0)	3.8(63.3)	2.7(16.7)	2.7(23.0)	3.5(70.0)	2.8(47.0)	3.2(113.8)	2.8(47.0)	3.2(113.8)	2.8(47.0)	3.2(113.8)
AC-23 Resonance	—	—	—	2.8(20.3)	3.1(47.0)	3.8(100.0)	2.8(21.0)	3.2(30.0)	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.8(29.6)	2.9(57.0)	3.5(166.7)	2.7(27.6)	3.0(50.0)	3.8(100.0)	2.6(21.3)	3.1(34.0)	3.5(96.7)	2.9(41.0)	3.3(96.7)	2.9(41.0)	3.3(96.7)	2.9(41.0)	3.3(96.7)
AC-24 Resonance	—	—	—	2.7(10.3)	3.0(18.0)	3.8(30.0)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	2.7(8.1)	2.8(13.6)	2.0(23.8)	2.7(10.3)	2.9(21.0)	3.8(30.0)	2.7(8.3)	3.1(11.0)	3.5(30.0)	2.9(25.0)	3.2(60.0)	2.9(25.0)	3.2(60.0)	2.9(25.0)	3.2(60.0)
AC-25 Resonance	—	—	—	2.8(5.3)	3.1(9.0)	3.9(30.0)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(Y) Max. response	4.0(11.0)	2.8(25.4)	3.3(63.3)	2.7(5.7)	3.0(12.0)	3.7(36.7)	2.6(5.7)	3.1(9.0)	3.6(33.5)	2.8(18.0)	3.3(36.7)	2.8(18.0)	3.3(36.7)	2.8(18.0)	3.3(36.7)
Max. acceleration (G)	37.3	57.0	166.7	27.6	57.0	236.6	21.3	35.0	126.7	78.0	143.3	78.0	143.3	78.0	143.3

Detector

Table 5.4 Resonant frequency

		Resonant frequency (Hz)													
Support stiffness		Hard			Intermediate			Pre-load					Soft		
Input acceleration (Gal)		50	100	250	50	100	250	50	100	250	350	400	50	100	250
Relative displacement	X-direction	2.8	3.2	4.1 (2.2)	2.8 (2.7)	3.1 (3.0)	3.8 (3.7)	2.9 (2.5)	3.2 (3.8)	3.5 (3.8)	—	—	2.7	2.9	3.5 (3.2)
	Y-direction	2.8 (2.5)	3.1 (2.6)	3.9 (2.3)	2.8 (2.7)	3.1 (3.0)	3.8	2.8 (2.7)	3.2 (3.0)	3.7 (3.3)	—	—	—	2.9 (2.6)	3.4 (3.3)
Impact reaction force	X-direction	2.8 (2.6)	3.1 (2.8)	4.3 (3.9)	2.7 (2.6)	3.0 (2.9)	3.8 (3.7)	2.8	3.2 (3.5)	3.8 (4.2)	4.3 (4.5)	4.6 (4.5)	2.7	2.9	3.4
	Y-direction	2.7	3.0 (2.8)	4.0 (3.3)	2.7	3.1 (2.9)	3.9 (3.8)	2.6	3.1 (3.4)	3.8 (3.4)	—	—	—	2.8 (2.9)	3.4 (2.5)
Impact acceleration	X-direction	(2.8)	(3.2)	(3.8)	2.8 (2.7)	3.0 (2.8)	3.7	2.8 (2.5)	3.2 (2.6)	3.8 (3.7)	4.4 (4.1)	—	2.7	2.9 (2.8)	3.3
	Y-direction	(2.6)	(2.9)	(3.5)	2.7	3.1 (2.9)	3.8 (3.6)	2.8 (2.6)	2.9 (2.6)	3.9 (3.8)	(3.8)	—	—	2.8	3.4 (3.3)

Note: Value in parenthesis means frequency of maximum response.

Table 5.5 Resonant frequency on displacement

Excitation type	Resonant frequency (Hz)			Excitation locus
	50 Gal	100 Gal	250 Gal	
X	2.8	3.2	4.1	
Y	2.8	3.1	4.0	
X - Y (g)		3.1	3.9	
X - Y (h)		3.0	3.9	
X - Y (i)		3.0	3.9	
X - Y (j)		3.0	4.0	

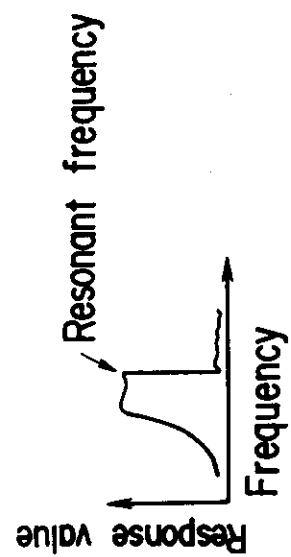


Table 5.6(a) Relative displacement in the case of X-direction excitation

Detector	Displacement (mm)							
	①		②		③		④	
	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
St-1(X)	20	22	-28	30	32	32	-36	39
St-2(Y)	-08		12		0		16	
St-3(X)	0	04	-68	71	12	20	-52	56
St-4(Y)	-04		-20		-16		-20	
St-5(X)	23	28	-74	84	20	34	-47	48
St-6(Y)	-16		-39		-27		-10	
St-7(X)	79	80	-100	100	04	24	-45	53
St-8(Y)	-12		04		-24		28	
St-9(X)	16	26	-125	129	-35	55	-51	53
St-10(Y)	-20		-31		-43		-16	
St-11(X)	-04	18	-151	151	-51	53	-75	75
St-12(Y)	18		08		16		12	
St-13(X)	37	38	-167	167	0	12	-65	66
St-14(Y)	07		-12		12		-04	
St-15(X)	92	92	-112	112	23	24	-19	22
St-16(Y)	04		-08		08		-12	
St-17(X)	167	168	-36	43	60	60	60	60
St-18(Y)	20		24		04		-04	
St-19(X)	-		-		-		-	
St-20(Y)	-		-		-		-	
St-21(X)	0	06	-76	77	08	14	-32	40
St-22(Y)	06		-12		12		-24	

Note : Excitation X-direction, 250 Gal.

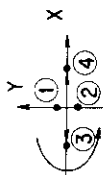


Table 5.6(b) Relative displacement in the case of Y-direction excitation

Detector	Displacement (mm)							
	①		②		③		④	
	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
St-1(X)	-05	28	08	112	0	04	04	64
St-2(Y)	28		-112		-04		-64	
St-3(X)	-08	22	24	108	-04	06	-12	12
St-4(Y)	20		-105		-04		0	
St-5(X)	09	15	-08	89	08	18	-04	04
St-6(Y)	12		89		-16		0	
St-7(X)	-16	70	-04	108	-12	27	08	96
St-8(Y)	68		-108		24		-96	
St-9(X)	-24	34	-27	77	-20	23	-20	26
St-10(Y)	24		-72		-12		16	
St-11(X)	-36	96	-44	78	-48	49	-12	54
St-12(Y)	89		-65		08		53	
St-13(X)	-61	120	24	115	-12	17	-12	12
St-14(Y)	103		-112		12		0	
St-15(X)	-19	110	62	125	23	40	-23	37
St-16(Y)	108		-108		33		-29	
St-17(X)	16	51	10	74	0	12	28	29
St-18(Y)	48		-73		-12		-08	
St-19(X)	-		-		-		-	
St-20(Y)	-		-		-		-	
St-21(X)	-20	168	-04	41	-04	36	-24	29
St-22(Y)	167		-44		36		16	

Note : Excitation Y-direction, 250 Gal.

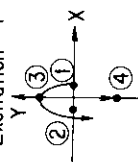


Table 5.6(c) Relative displacement in the case X-Y circular excitation

Detector	Displacement (mm)							
	①		②		③		④	
	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
St-1(X)	20	3.1	-4.4	88	-28	92	0.4	2.0
St-2(Y)	-24		-7.6		-88		2.0	
St-3(X)	12	23	-100	134	-20	91	0.4	2.4
St-4(Y)	-20		-89		-89		2.4	
St-5(X)	31	37	-98	110	-20	65	2.0	2.0
St-6(Y)	-21		-50		-62		0.4	
St-7(X)	83	86	-91	181	12	129	-0.8	5.7
St-8(Y)	-24		-156		-128		56	
St-9(X)	24	37	-75	79	-16	36	-1.6	2.0
St-10(Y)	-28		-24		-32		12	
St-11(X)	05	07	-115	118	-48	64	-63	11.7
St-12(Y)	-05		-28		-43		98	
St-13(X)	57	58	-106	146	-04	103	-65	11.2
St-14(Y)	-12		-100		-103		91	
St-15(X)	96	96	-69	116	-31	121	-19	11.1
St-16(Y)	0		-93		-11.7		109	
St-17(X)	131	131	-36	48	80	11.7	32	6.2
St-18(Y)	05		-32		-85		53	
St-19(X)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-20(Y)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-21(X)	02	63	-44	47	-16	39	0	9.5
St-22(Y)	63		-16		-36		9.5	

Note : Excitation X-Y circular, 250 Gal.

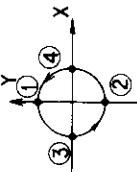


Table 5.6(d) Relative displacement in the case of X-Y elliptic excitation

Detector	Displacement (mm)							
	①		②		③		④	
	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
St-1(X)	-32	32	2.4	25	2.4	24	-28	30
St-2(Y)	0		0.8		0		-12	
St-3(X)	-120	136	-0.4	0.4	0	0.8	-32	5.1
St-4(Y)	-64		0		0.8		-40	
St-5(X)	-100	109	2.0	22	1.6	16	0	4.4
St-6(Y)	-44		-0.8		0		-44	
St-7(X)	-108	130	-0.4	36	7.2	79	44	5.7
St-8(Y)	-72		3.6		32		-36	
St-9(X)	-96	103	-0.4	0.4	1.6	16	-0.4	3.2
St-10(Y)	-36		0		0		-32	
St-11(X)	-136	150	-1.2	73	1.2	49	-20	41
St-12(Y)	-64		7.2		48		-36	
St-13(X)	-128	160	-3.2	58	5.6	67	24	5.4
St-14(Y)	-96		4.8		3.6		-48	
St-15(X)	-96	120	0.8	45	11.2	120	60	68
St-16(Y)	-72		4.4		4.4		-32	
St-17(X)	-28	29	4.8	48	12.8	128	104	109
St-18(Y)	-08		0		-0.8		-32	
St-19(X)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-20(Y)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-21(X)	-48	49	1.2	49	0	16	-24	43
St-22(Y)	-08		4.8		1.6		-36	

Note : Excitation X-Y elliptic, 250 Gal.

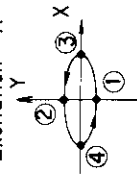


Table 5.6(e) Relative displacement in the case of
X-Y 45° elliptic excitation

Detector	Displacement (mm)							
	①		②		③		④	
	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
St-1(X)	-4.0	10.0	-1.6	7.4	0.8	2.5	0.4	1.3
St-2(Y)	-9.2		-7.2		2.4		1.2	
St-3(X)	-4.0	12.6	-7.2	12.0	0	2.8	0	0.4
St-4(Y)	-12.0		-9.6		2.8		0.4	
St-5(X)	-8.0	12.5	-10.0	12.3	2.8	3.4	1.6	1.6
St-6(Y)	-9.6		-7.2		2.0		0	
St-7(X)	-3.2	14.8	-6.8	13.1	1.6	7.8	2.8	5.9
St-8(Y)	-14.4		-11.2		7.6		5.2	
St-9(X)	-4.4	6.5	-7.2	8.0	0	2.4	1.2	1.3
St-10(Y)	-4.8		-3.6		2.4		0.4	
St-11(X)	-7.2	9.6	-8.8	10.2	0	8.0	0.4	6.0
St-12(Y)	-6.4		5.2		8.0		6.0	
St-13(X)	-3.6	12.9	-6.8	13.8	0	10.4	2.0	7.9
St-14(Y)	-12.4		-12.0		10.4		7.6	
St-15(X)	-1.2	14.4	-4.4	11.3	1.6	12.9	3.6	10.3
St-16(Y)	-14.4		-10.4		12.8		9.6	
St-17(X)	-2.0	6.7	-2.0	4.1	6.4	8.8	7.6	9.2
St-18(Y)	-6.4		-3.6		6.0		5.2	
St-19(X)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-20(Y)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-21(X)	-1.6	3.6	-2.0	3.1	0.8	8.0	0.8	8.0
St-22(Y)	-3.2		-2.4		8.0		8.0	

Note : Excitation X-Y 45° elliptic, 250 Gal.



Table 5.6(f) Relative displacement in the
case of X-Y 45° axis excitation

Detector	Displacement (mm)							
	①		②		③		④	
	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$	X, Y	$\sqrt{X^2+Y^2}$
St-1(X)	2.4	2.9	0.2	1.2	-2.4	7.6	3.2	4.3
St-2(Y)	1.6		-1.2		-7.2		-2.8	
St-3(X)	0	2.4	-0.8	0.9	-7.2	14.7	-3.6	8.4
St-4(Y)	2.4		-0.4		-12.8		-7.6	
St-5(X)	2.4	2.9	0.4	1.3	-10.4	16.5	-5.2	7.4
St-6(Y)	1.6		-1.2		-12.8		-5.2	
St-7(X)	5.2	8.2	2.0	3.8	-11.2	15.3	-3.6	7.3
St-8(Y)	6.4		3.2		-10.4		-6.4	
St-9(X)	0.8	2.2	-0.4	0.6	-10.8	15.3	-6.8	7.9
St-10(Y)	2.0		-0.4		-10.8		-4.0	
St-11(X)	0.8	8.0	-0.8	3.7	-12.0	15.4	4.8	4.9
St-12(Y)	8.0		3.6		-9.6		-0.8	
St-13(X)	3.6	9.5	1.6	3.2	-8.0	15.1	-4.0	6.2
St-14(Y)	8.8		2.8		-12.8		-4.8	
St-15(X)	6.4	12.6	5.6	7.4	-5.2	13.8	-2.8	3.4
St-16(Y)	10.8		4.8		-12.8		-2.0	
St-17(X)	10.8	12.6	10.4	12.2	-3.2	4.5	0.4	0.6
St-18(Y)	6.4		6.4		-3.2		-0.4	
St-19(X)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-20(Y)	—	—	—	—	—	—	—	—
St-21(X)	0	5.6	-1.6	4.3	-6.4	6.8	0.4	3.2
St-22(Y)	5.6		4.0		-2.4		3.2	

Note : Excitation X-Y 45° axis, 250 Gal.



Table 5.7 Maximum relative displacement

Excitation type	Excitation frequency (Hz)	Relative displacement (mm)									
		X		Y		$\sqrt{X^2+Y^2}$		X		Y	
		St-1	St-2	St-1	St-2	St-11	St-12	St-15	St-16	St-15	St-16
X	4.1	5.1	1.8	17.7	2.6	5.4	17.9	12.4	3.2	12.4	12.8
	1.8	4.7	1.6	19.0	3.0	5.0	19.2	11.3	2.6	11.3	11.6
	4.0	3.5	17.3	6.0	9.9	17.7	11.6	7.6	13.9	7.6	15.9
Y	2.3	3.5	21.7	4.1	10.3	22.0	11.1	3.8	15.2	3.8	15.6
	3.9	5.8	10.5	13.5	10.7	12.0	17.2	11.8	13.5	11.8	17.9
	2.0	6.2	18.0	16.8	11.9	19.1	20.6	10.8	14.3	10.8	17.9
X-Y (g)	3.9	4.7	4.7	13.6	8.1	6.6	15.8	10.7	11.8	10.7	16.0
	2.1	5.2	9.1	18.2	11.2	10.4	21.4	11.2	11.2	11.2	15.8
	3.9	4.6	11.5	8.9	9.1	12.4	12.7	9.4	14.4	9.4	17.2
X-Y (i)	2.3	5.1	15.4	14.1	10.6	16.2	17.7	10.8	13.5	10.8	17.2
	4.0	4.8	10.0	12.2	11.5	11.1	16.8	7.6	13.7	7.6	15.7
	2.3	4.6	11.6	3.8	10.9	12.5	11.5	10.4	12.1	10.4	16.0

Note: Max. input acceleration 250 Gal.

Table 5.8 Resonant frequency on impact reaction force

Excitation type	Resonant frequency (Hz)			Excitation locus
	50 Gal	100 Gal	250 Gal	
X	2.8	3.1	4.2	
Y	2.7	3.0	4.0	
X - Y (g)		3.1	4.0	
X - Y (h)		3.0	4.0	
X - Y (i)		2.9	3.9	
X - Y (j)		3.0	4.0	

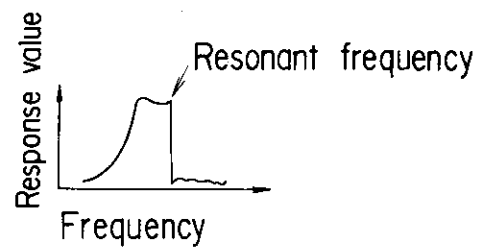


Table 5.9 Peak frequency and frequency at phase shift 90°

Detector	Peak frequency (Hz)	Frequency at phase shift 90° (Hz)
St - 15	4.3 (4.3)	
St-15/Table	4.3 (4.3)	4.1
St-15/RF-9	4.6	4.4
St - 11	4.3 (4.3)	
St-11/Table	4.3 (4.3)	3.9
St-11/RF-9	4.6	4.4

Note (1) Value in parenthesis means resonant frequency.

(2) Hard support, Excitation X-direction,
Max. acceleration 250 Gal.

Table 5.10(a) Damping ratio in case of hard support
(Max. acceleration 250 Gal)

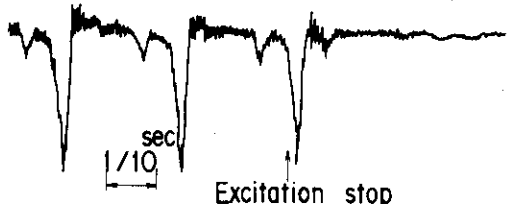
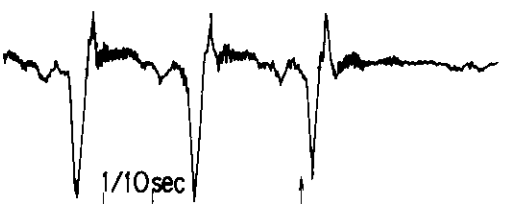
Resonant frequency (Hz)	Damping ratio (-)	Detector position	Damping wave (reaction force)
44.5	0.11	RF-7	
36.7	0.05	RF-9	
40.8	0.092	RF-11	

Table 5.10(b) Damping ratio in case of intermediate support
(Max. acceleration 250 Gal)

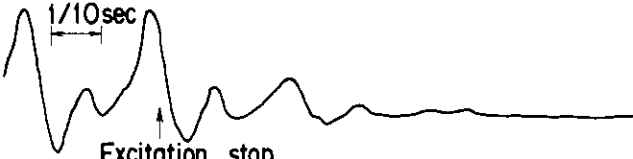
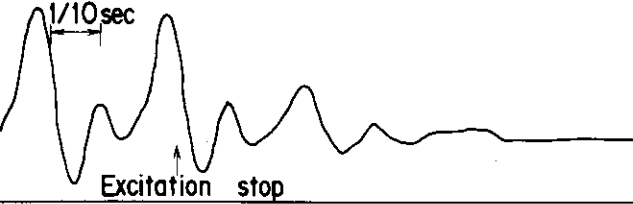
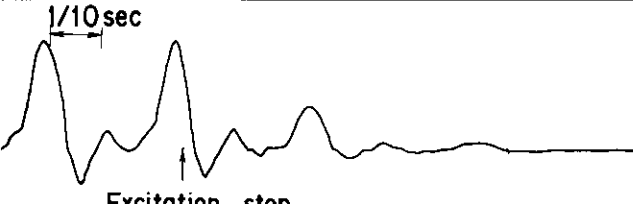
Resonant frequency (Hz)	Damping ratio (-)	Detector position	Damping wave (reaction force)
11.8	0.146	RF-7	
9.7	0.124	RF-9	
10.8	0.156	RF-11	

Table 5.10(c) Damping ratio in case of pre-load support
(Max. acceleration 250 Gal)

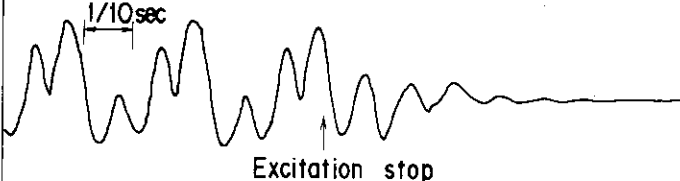
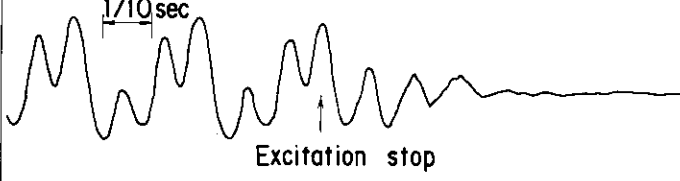
Resonant frequency (Hz)	Damping ratio (-)	Detector position	Damping wave (reaction force)
9.7	0.166	RF-9	
11.8	0.146	RF-7	

Table 5.10(d) Damping ratio in case of soft support
(Max. acceleration 250 Gal)

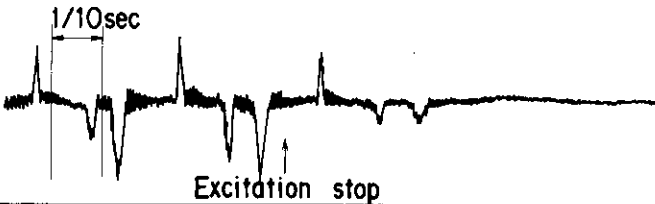
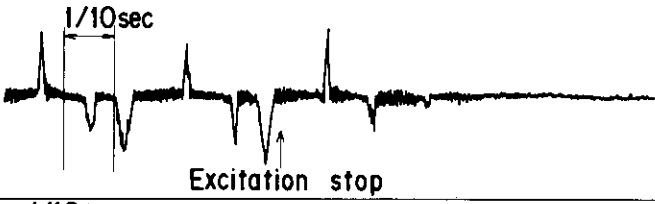
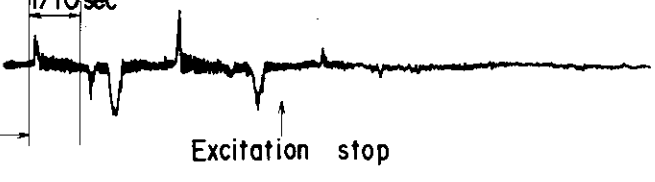
Resonant frequency (Hz)	Damping ratio (-)	Detector position	Damping wave (reaction force)
2.4	—	RF-9	
2.7	—	RF-11	
3.0	—	RF-7	

Table 5.11(a) Maximum displacement in the case of seismic
X-direction excitation

Detector	Support stiffness Input acceleration	Displacement (mm)														
		Hard					Intermediate					Pre-load				
		100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal
St-1 (X)	E ℓ Centro	3.1	3.8	4.4	4.1	5.1	7.2	3.8	4.7	6.3	8.6	16.7	19.7			
	JAERI PR Hall	2.1	4.1	4.3	2.4	4.2	5.9	2.2	3.9	4.7	1.7	5.0	9.8			
	White Noise	3.5	4.0	4.3	3.4	4.8	6.3	3.3	5.0	6.4	8.3	16.5	20.1			
St-2 (Y)	E ℓ Centro	1.3	1.7	2.0	0.9	1.4	2.6	1.5	2.0	1.7	1.9	4.1	4.3			
	JAERI PR Hall	0.9	1.9	1.9	1.0	1.7	1.8	1.1	2.3	1.8	0.4	1.1	1.6			
	White Noise	0.9	2.1	2.0	1.0	1.9	3.0	1.8	2.1	2.1	1.7	3.7	5.5			
St-11 (X)	E ℓ Centro	4.0	12.0	20.6	4.1	15.8	30.3	4.1	12.2	21.8	7.7	18.0	27.6			
	JAERI PR Hall	2.1	5.9	10.7	2.0	5.8	10.8	2.3	5.9	12.1	2.0	5.2	10.4			
	White Noise	3.7	12.4	23.2	2.9	11.4	24.5	2.6	7.5	17.9	8.9	16.0	26.9			
St-12 (Y)	E ℓ Centro	0.9	1.7	1.9	1.7	3.0	3.3	1.5	3.2	3.5	1.4	2.1	3.3			
	JAERI PR Hall	0.7	1.8	2.4	1.1	1.4	3.0	1.1	1.9	3.1	0.5	0.9	1.9			
	White Noise	1.0	2.3	2.7	1.0	2.7	3.3	0.98	1.8	3.4	1.3	2.4	4.1			
St-15 (X)	E ℓ Centro	6.8	11.9	11.7	8.5	17.5	23.7	8.6	13.0	15.7	7.1	25.7	30.9			
	JAERI PR Hall	2.2	5.8	11.1	1.7	4.7	10.6	2.4	5.5	10.6	2.0	5.6	10.6			
	White Noise	9.8	11.9	13.6	7.4	15.6	21.5	6.4	12.2	14.9	9.0	24.4	29.3			
St-16 (Y)	E ℓ Centro	1.0	1.7	1.9	1.5	3.7	4.6	1.6	2.8	3.1	1.4	3.6	4.9			
	JAERI PR Hall	0.7	0.9	1.4	0.6	1.4	2.2	0.6	1.1	2.3	0.6	1.5	1.6			
	White Noise	1.1	2.1	2.1	1.4	3.4	4.8	1.9	2.7	3.6	1.3	3.9	5.1			
St-17 (X)	E ℓ Centro	5.5	13.6	20.4	6.4	15.9	32.9	5.8	13.3	21.8	7.7	21.3	31.9			
	JAERI PR Hall	2.4	6.3	12.4	2.1	4.6	12.0	2.9	6.1	11.9	1.9	4.7	9.5			
	White Noise	4.5	11.2	19.0	4.1	13.1	29.9	4.1	13.1	29.9	3.3	10.6	32.7			
St-18 (Y)	E ℓ Centro	0.9	2.3	3.6	1.4	1.9	4.9	0.7	1.7	2.8	1.8	4.4	5.6			
	JAERI PR Hall	0.8	1.5	2.6	0.9	0.9	1.8	0.6	2.0	2.2	0.6	1.5	2.2			
	White Noise	1.1	2.2	3.6	0.9	1.9	3.9	0.8	1.7	3.8	2.1	5.2	6.1			
St-21 (X)	E ℓ Centro	2.0	6.8	7.7	4.8	6.8	8.6	3.4	5.3	6.5	8.9	19.3	20.4			
	JAERI PR Hall	2.7	7.8	8.3	1.8	4.2	6.0	1.5	4.6	4.6	2.3	6.3	10.9			
	White Noise	3.7	8.4	8.9	3.5	6.2	9.0	3.0	5.8	6.8	9.3	17.8	21.5			
St-22 (Y)	E ℓ Centro	0.8	1.9	1.6	2.3	4.0	6.3	1.5	4.3	4.8	2.2	5.9	7.9			
	JAERI PR Hall	1.1	2.1	3.2	1.0	2.9	5.0	0.9	2.2	5.1	0.5	1.5	2.7			
	White Noise	1.1	2.8	3.8	1.3	2.7	6.3	1.2	2.7	5.5	2.0	6.3	7.8			

Seismic wave;

E ℓ Centro : ElCentro 1940 NS wave

JAERI PR Hall : JAERI PR Hall 1964 EW wave

Table 5.11(b) Maximum displacement in the case of seismic
Y-direction excitation

Support stiffness	Input acceleration	Displacement (mm)					
		Hard			Soft		
		100Gal	250Gal	500Gal	250Gal	500Gal	
St-1 (X)	E/C Centro	0.6	0.6	1.1	1.3	2.5	
	JAERI PR Hall	0.4	1.1	1.3	1.1	1.3	
	White Noise	1.0	1.1	2.0	1.5	1.7	
St-2 (Y)	E/C Centro	4.6	12.6	20.6	18.4	30.3	
	JAERI PR Hall	2.3	6.7	11.3	5.9	9.1	
	White Noise	6.1	14.5	24.5	17.0	25.8	
St-11 (X)	E/C Centro	1.6	4.9	4.1	3.5	6.1	
	JAERI PR Hall	0.5	2.7	4.3	1.1	1.7	
	White Noise	2.4	3.6	5.0	3.1	4.7	
St-12 (Y)	E/C Centro	6.4	8.8	9.9	21.1	24.5	
	JAERI PR Hall	3.0	7.4	8.6	6.5	11.3	
	White Noise	6.3	8.6	10.2	20.6	23.7	
St-15 (X)	E/C Centro	0.9	2.1	3.0	3.5	4.3	
	JAERI PR Hall	0.6	0.9	1.5	1.3	1.3	
	White Noise	1.3	2.4	3.6	3.6	3.7	
St-16 (Y)	E/C Centro	8.1	15.7	16.4	26.7	28.9	
	JAERI PR Hall	2.5	7.2	11.7	5.8	10.2	
	White Noise	12.2	16.0	17.1	25.8	30.2	
St-17 (X)	E/C Centro	1.7	3.5	4.8	5.6	5.8	
	JAERI PR Hall	1.0	3.7	5.1	1.4	1.8	
	White Noise	2.2	5.0	6.6	6.5	5.8	
St-18 (Y)	E/C Centro	4.7	6.7	8.2	21.9	24.2	
	JAERI PR Hall	2.1	5.4	7.8	6.8	11.1	
	White Noise	6.4	6.9	8.6	22.4	25.4	
St-21 (X)	E/C Centro	1.8	2.5	2.1	3.5	4.3	
	JAERI PR Hall	1.1	2.0	2.5	1.4	2.1	
	White Noise	3.1	2.9	3.5	4.4	4.4	
St-22 (Y)	E/C Centro	6.4	15.2	21.2	25.9	36.1	
	JAERI PR Hall	2.7	7.8	13.8	6.8	10.8	
	White Noise	5.8	13.1	20.9	25.3	33.9	

Seismic wave;

El Centro : ElCentro 1940 NS wave
JAERI PR Hall : JAERI PR Hall 1964 EW wave

Table 5.12(a) Maximum impact force in the case of seismic
X-direction excitation

Support stiffness Input acceleration	Detector	Force (kg)														
		Hard			Intermediate			Pre-load			Soft					
		100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal	100Gal	250Gal	500Gal
RF-3	E _l Centro	34.6	101.8	184.3	24.7	44.0	142.6	10.1	51.1	55.5	23.3	111.3	291.6			
	JAERI PR Hall	43.5	64.3	151.2	21.7	47.7	72.1	8.6	25.2	52.4	12.7	10.9	25.1			
	White Noise	40.3	78.7	138.2	15.5	42.0	100	6.7	30.4	61.0	16.0	48.6	401.5			
RF-4	E _l Centro	40.6	124.7	289.8	26.6	87.9	156.2	17.8	86.3	143.2	34.6	160.1	583.1			
	JAERI PR Hall	50.7	107.5	188.1	27.0	58.1	85.8	15.8	37.8	87.9	14.2	24.2	34.5			
	White Noise	47.8	125.4	232.1	24.7	57.5	141.5	14.0	63.1	114.3	31.2	72.9	596.4			
RF-5	E _l Centro	50.4	256.2	403.5	40.2	135.3	298.8	20.5	109.2	175.3	47.3	480.2	787.2			
	JAERI PR Hall	50.9	132.3	179.1	22.8	52.9	92.7	16.5	43.8	92.1	11.9	19.6	57.3			
	White Noise	55.9	176.0	306.0	17.0	64.1	209.6	12.9	70.9	129.6	31.9	253.5	1066.7			
RF-6	E _l Centro	31.8	171.5	320.5	20.1	64.3	176.6	13.8	63.4	111.0	43.1	542.8	451.9			
	JAERI PR Hall	28.6	92.1	155.6	22.3	54.0	84.1	11.8	27.2	59.5	16.8	37.6	45.5			
	White Noise	38.1	127.0	256.4	19.4	50.8	99.5	11.5	49.5	96.6	39.9	316.0	814.4			
RF-9	E _l Centro	77.1	858.8	1176.6	64.9	388.2	679.1	25.5	176.2	292.2	70.6	535.8	1457.8			
	JAERI PR Hall	62.9	107.3	318.2	53.0	103.8	171.6	22.7	57.7	120.4	22.6	41.4	78.5			
	White Noise	46.9	720.0	1199.7	48.5	221.0	523.9	17.5	112.6	254.1	72.6	340.3	1147			
RF-10	E _l Centro	44.1	162.7	414.2	5.2	23.7	54.3	4.0	30.0	43.8	15.5	118.3	262.4			
	JAERI PR Hall	90.2	183.7	230.5	5.8	8.3	22.3	3.5	9.8	12.8	18.8	15.5	27.5			
	White Noise	83.5	273.9	300.6	5.8	17.7	31.4	3.7	23.6	61.0	21.1	145.8	412.9			
RF-11	E _l Centro	95.9	706.8	961.4	50.6	280.7	590.8	21.0	144.5	239.6	65.7	327.1	1107.9			
	JAERI PR Hall	50.8	129.0	291.9	39.8	91.3	149.3	16.5	45.1	103.4	19.1	41.8	55.7			
	White Noise	86.7	670.5	1011.6	34.0	183.4	455.8	13.3	94.6	213.4	67.5	173.6	1101.1			
RF-12	E _l Centro	27.5	148.2	334.6	16.2	60.9	108.7	17.0	102.2	175.3	17.7	139.2	233.2			
	JAERI PR Hall	34.7	53.4	82.8	14.3	28.0	53.2	16.5	45.7	87.9	10.4	15.5	25.9			
	White Noise	37.4	141.5	268.8	16.0	44.2	78.6	10.3	57.4	122.0	23.2	59.0	344.1			
RF-17	E _l Centro	11.6	39.8	84.4	22.7	81.2	135.8	6.1	33.5	43.8	12.7	70.0	131.2			
	JAERI PR Hall	17.8	30.7	66.2	22.8	68.5	99.5	6.5	15.9	28.3	12.7	9.2	14.9			
	White Noise	21.0	43.6	76.9	15.5	48.6	146.7	5.8	24.8	55.9	10.9	52.1	206.5			
RF-18	E _l Centro	68.0	262.1	392.2	25.3	81.2	169.8	18.1	95.1	149.0	50.1	695.9	714.3			
	JAERI PR Hall	33.3	92.2	176.6	28.1	60.2	101.2	16.2	45.1	94.9	24.9	32.6	45.5			
	White Noise	61.4	243.2	402.5	23.8	59.7	131.0	13.1	60.8	109.3	45.7	309.0	848.8			

Seismic wave;

E_l Centro : ElCentro 1940 NS wave

JAERI PR Hall : JAERI PR Hall 1964 EW wave

Table 5.12(b) Maximum impact force in the case of seismic
Y-direction excitation

Detector	Support stiffness Input acceleration	Force (kg)					
		Hard			Soft		
		100Gal	250Gal	500Gal	250Gal	500Gal	
RF-3	El Centro	79.4	576.5	752.6	877.3	1558.3	
	JAERI PR Hall	41.6	98.3	206.0	23.7	52.6	
	White Noise	65.3	524.2	729.6	558.3	1274	
RF-4	El Centro	40.6	179.8	307.6	535.2	592.3	
	JAERI PR Hall	49.3	84.1	171.1	22.9	37.3	
	White Noise	40.6	171.1	337.2	340.6	548.7	
RF-5	El Centro	40.7	374.4	558.2	342.1	857.3	
	JAERI PR Hall	38.7	93.6	142.5	17.2	34.7	
	White Noise	44.1	373.8	557.4	184.2	723.3	
RF-6	El Centro	54.0	238.1	346.1	429.9	436.5	
	JAERI PR Hall	50.8	98.4	177.8	30.3	49.4	
	White Noise	57.2	266.7	375.8	139.6	548.7	
RF-9	El Centro	24.1	50.0	81.0	184.2	109.1	
	JAERI PR Hall	27.8	53.7	68.5	18.4	22.1	
	White Noise	23.7	62.1	103.0	61.4	299.3	
RF-10	El Centro	95.4	171.1	280.6	736.9	857.3	
	JAERI PR Hall	125.0	187.5	306.0	4.1	46.8	
	White Noise	95.4	266.5	307.3	139.6	960.2	
RF-11	El Centro	28.8	100.7	182.8	70.2	155.9	
	JAERI PR Hall	43.8	79.2	131.4	33.9	37.9	
	White Noise	66.7	196.0	253.5	78.2	199.5	
RF-12	El Centro	62.2	189.4	274.3	149.1	389.7	
	JAERI PR Hall	67.6	140.7	210.9	28.6	41.6	
	White Noise	81.1	198.4	296.2	83.7	361.6	
RF-17	El Centro	36.5	375.2	551.2	456.2	654.7	
	JAERI PR Hall	45.5	119.4	176.9	18.0	38.9	
	White Noise	48.6	367.2	716.6	240.1	673.4	
RF-18	El Centro	36.3	134.9	212.8	228.1	311.8	
	JAERI PR Hall	56.7	124.7	337.4	17.6	22.6	
	White Noise	70.8	110.1	230.9	100.5	261.9	

Seismic wave;

El Centro : ElCentro 1940 NS wave

JAERI PR Hall : JAERI PR Hall 1964 EW wave

Table 5.13 Comparison of sinusoidal and seismic waves on relative displacement

Displacement - mm (Frequency Hz)												
Input acceleration (Gal)	Excitation type	Detector										Max. value
		St-2	St-7	St-8	St-11	St-13	St-17	St-21	St-22			
Sinusoidal wave 250	Sine.X	1.8(4.1)	12.4(4.1)	4.9(4.1)	17.7(4.1)	17.2(4.1)	16.6(4.1)	7.7(4.1)	3.8(4.1)	17.7		
	Sine.Y	17.3(4.1)	6.1(4.0)	18.0(4.0)	6.0(4.0)	5.8(4.0)	4.6(4.0)	3.4(4.0)	17.5(4.0)	18.0		
	Sine.X-Y(g)	10.5(3.9)	15.6(3.9)	17.8(3.9)	13.5(3.9)	15.8(3.9)	13.8(3.9)	6.0(3.9)	15.0(3.8)	15.8		
	Sine.X-Y(h)	4.7(3.9)	10.9(3.9)	9.6(3.9)	13.6(3.9)	15.5(3.9)	14.3(3.9)	5.2(3.9)	6.5(3.9)	15.5		
	Sine.X-Y(i)	13.4(3.9)	9.2(3.9)	15.5(3.9)	11.3(3.7)	11.0(3.9)	9.7(3.9)	4.2(3.9)	9.4(3.9)	15.5		
	Sine.X-Y(j)	10.0(4.0)	11.3(4.0)	7.4(4.0)	12.2(4.0)	11.8(4.0)	13.6(4.0)	6.9(4.0)	7.5(4.0)	13.6		
Seismic wave 500	E& Centro NS X	1.9	—	3.5	20.6	—	20.0	7.7	1.6	20.6		
	JAERI PR Hall EW X	1.8	—	2.0	10.7	—	12.0	8.3	3.2	12.0		
	White Noise X	2.0	—	3.0	23.2	—	18.0	5.0	8.0	23.2		
	E& Centro NS Y	20.9	—	20.0	4.1	—	4.8	2.1	21.0	21.0		
	JAERI PR Hall EW Y	11.3	—	20.0	4.3	—	5.1	2.5	14.0	20.0		
	White Noise Y	24.5	—	22.0	5.0	—	6.6	3.5	20.0	24.5		
	E& Centro NS,EW X-Y	15.1	—	18.0	11.8	—	18.0	7.5	17.0	18.0		
	JAERI PR Hall NS,EW X-Y	8.9	—	12.0	9.8	—	7.7	7.0	8.0	12.0		

Note : Hard support.

Table 5.14 Comparison of sinusoidal and seismic waves on impact reaction force

Force - kg (Frequency-Hz)																
Input acceleration (Gal)	Excitation type	Detector														Max. value
		RF-1	RF-3	RF-5	RF-9	FR-11	RF-7	RF-17	RF-2	RF-4	RB-6	RF-10	RF-12	RF-14	RF-18	
Sinusoidal wave 250	Sine. X	118.7 (3.9)	116 (3.9)	416 (2.7)	1126 (3.9)	1018 (4.1)	1020 (3.7)	68.6 (3.9)	295 (4.3)	173 (3.9)	456 (4.2)	480 (2.7)	349 (3.7)	116 (3.9)	625 (3.5)	
	Sine. Y	545 (3.3)	792 (2.9)	549 (2.4)	122 (3.9)	336 (3.9)	189 (3.9)	869 (3.3)	250 (4.0)	366 (2.0)	416 (2.8)	1122 (1.9)	327 (3.6)	121 (3.9)	136 (3.9)	
	Sine. X-Y(g)	565 (2.7)	710 (3.8)	653 (3.1)	688 (3.7)	653 (3.4)	560 (3.8)	639 (2.4)	262 (3.8)	347 (3.7)	350 (3.9)	395 (2.8)	461 (3.6)	104 (3.8)	402 (3.8)	
	Sine. X-Y(h)	245 (3.3)	652 (3.5)	662 (3.6)	636 (3.0)	730 (3.3)	520 (3.3)	258 (3.3)	220 (3.3)	244 (3.3)	244 (3.5)	318 (3.0)	209 (3.3)	102 (3.3)	321 (3.3)	
	Sine. X-Y(i)	432 (3.5)	820 (3.9)	761 (3.6)	435 (2.3)	436 (2.8)	559 (3.5)	390 (2.5)	238 (3.5)	277 (2.7)	462 (3.7)	363 (2.5)	214 (3.5)	112 (3.5)	273 (2.5)	
	Sine. X-Y(j)	767 (3.5)	1143 (3.5)	943 (3.8)	170 (3.5)	151 (3.5)	470 (3.5)	404 (3.6)	337 (3.5)	331 (2.6)	519 (3.8)	489 (2.0)	161 (3.5)	140 (3.5)	167 (3.5)	
Seismic wave 500	E& Centro NS X	102	184	404	1177	-	933	84	245	-	321	414	-	144	392	
	JAERI PR Hall EW X	95	151	179	318	-	307	66	203	-	156	230	-	91	177	
	White Noise X	106	138	306	1200	-	847	77	230	-	256	310	-	118	403	
	E& Centro NS Y	558	600	558	81	-	224	551	179	-	346	281	-	92	213	
	JAERI PR Hall EW Y	230	200	143	69	-	490	177	107	-	178	306	-	88	337	
	White Noise Y	674	600	557	103	-	175	717	194	-	876	307	-	131	231	
	E& Centro NS, EW X-Y	446	555	623	456	-	405	694	196	-	266	306	-	109	205	
	JAERI PR Hall NS, EW X-Y	189	216	175	142	-	168	170	205	-	145	253	-	111	184	

Note : Hard support

Table 5.15 Comparison of sinusoidal and seismic waves on impact acceleration

		Acceleration - G (Frequency-Hz)											Mox. value
Input acceleration (Gal)	Excitation type	Detector											
		ACC-1	ACC-2	ACC-10	ACC-15	ACC-16	ACC-19	ACC-20	ACC-21	ACC-23			
Sinusoidal Wave 250	Sine. X	110(3.8)	30(3.8)	43(3.8)	230(3.8)	47(3.8)	237(3.8)		110(3.8)	25(3.8)	237		
	Sine. Y		127(3.7)	77(3.6)		87(3.6)		77(3.2)		167(3.5)	167		
	Sine. X-Y(g)	77(2.6)	90(2.6)	77(3.7)	197(2.9)	73(3.5)	67(3.9)	57(3.2)			197		
	Sine. X-Y(h)	63(3.7)	57(3.9)	50(4.0)	197(4.0)	60(3.2)	140(2.0)	70(3.6)		46.7(3.5)	197		
	Sine. X-Y(i)	70(3.1)	77(3.5)	57(3.4)	50(3.0)	53(2.0)	60(2.4)	57(2.4)		90(3.3)	77		
	Sine. X-Y(j)	90(2.9)	83(2.7)	57(2.3)	164(2.2)	57(3.9)	60(2.3)	73(3.4)		39(3.3)	164		
Seismic wave 500	El Centro NS X	34	16	-	90	29	100	63	84	21	100		
	JAERI PR Hall EW X	49	17	-	34	22	26	12	50	26	50		
	White Noise X	60	29	-	153	47	76	34	80	48	153		
	El Centro NS Y	57	93	-	23	47	27	33	23.3	57	93		
	JAERI PR Hall EW Y	34	43	-	28	49	16	20	21	52	52		
	White Noise Y	57	93	-	43	73	40	50	33.3	73	93		
	El Centro NS, EW X-Y	37	42	-	76	62	35	42	46	55	76		
	JAERI PR Hall NS,EW X-Y	29	29	-	50	57	18	23	20	26	57		

Note : Hard support.

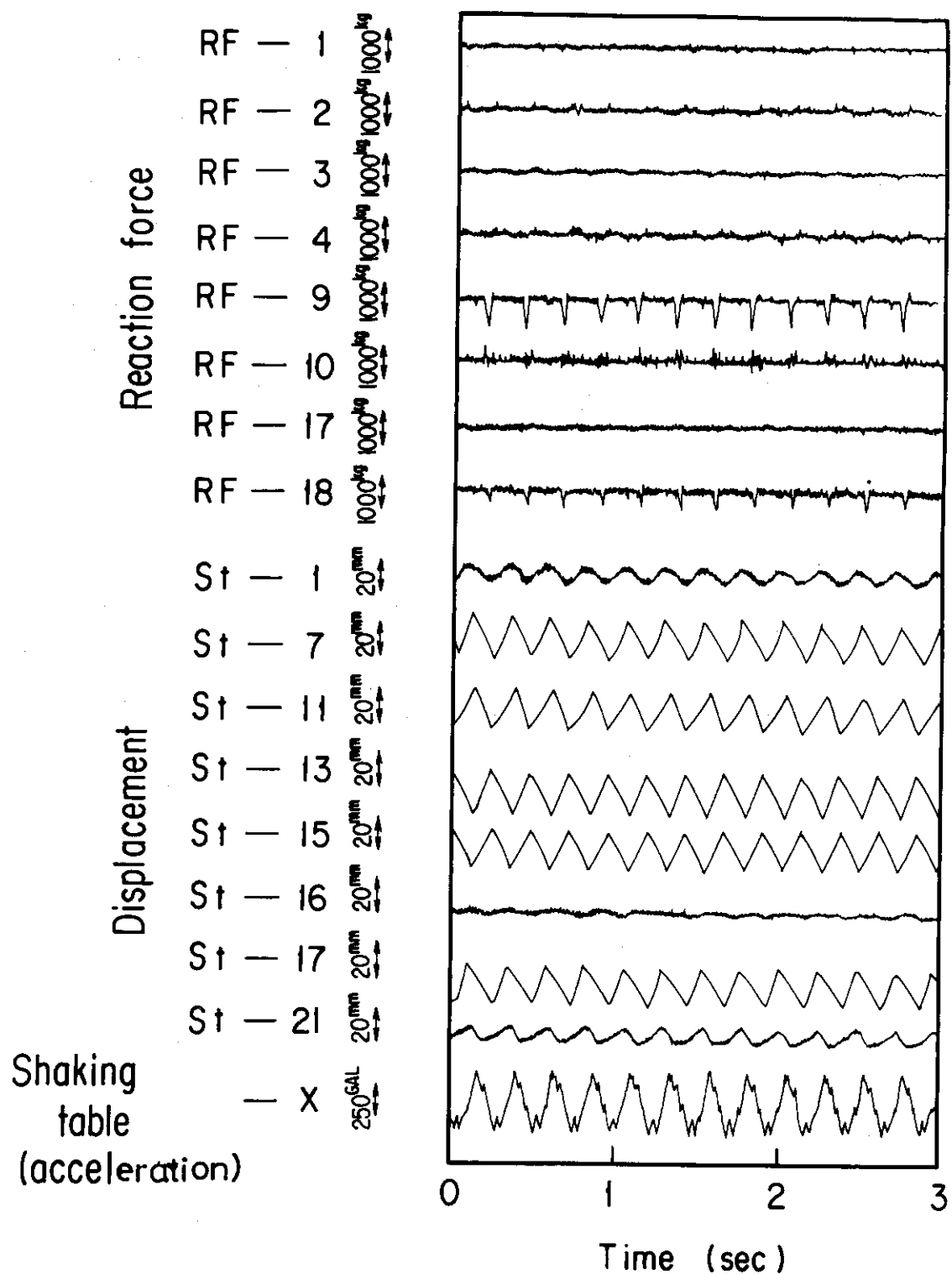


Fig. 5.1

Sinusoidal wave response (4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal, X-direction, Hard support, With reflector key)

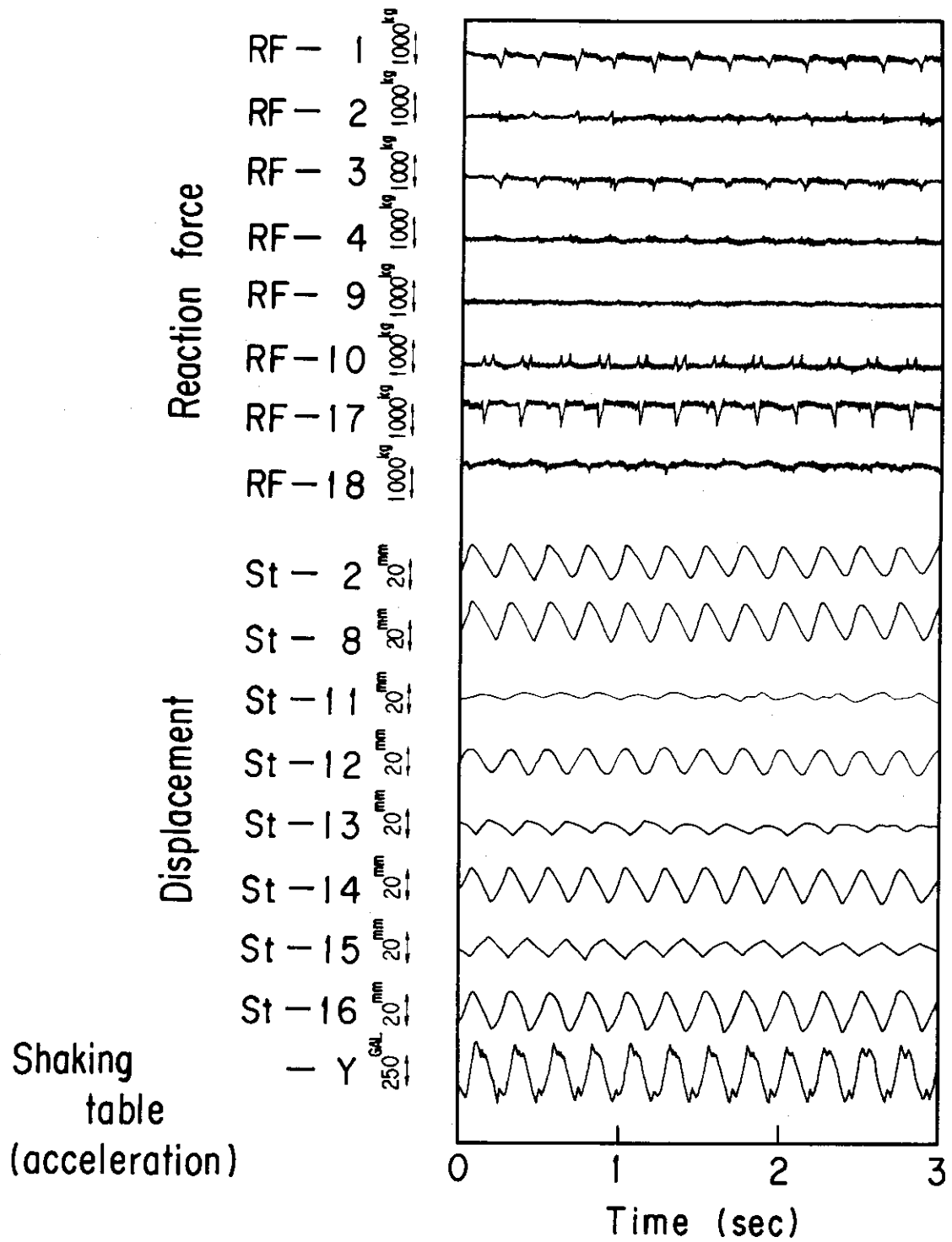


Fig. 5.2

Sinusoidal wave response (4.0 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Y-direction, Hard support, With reflector key)

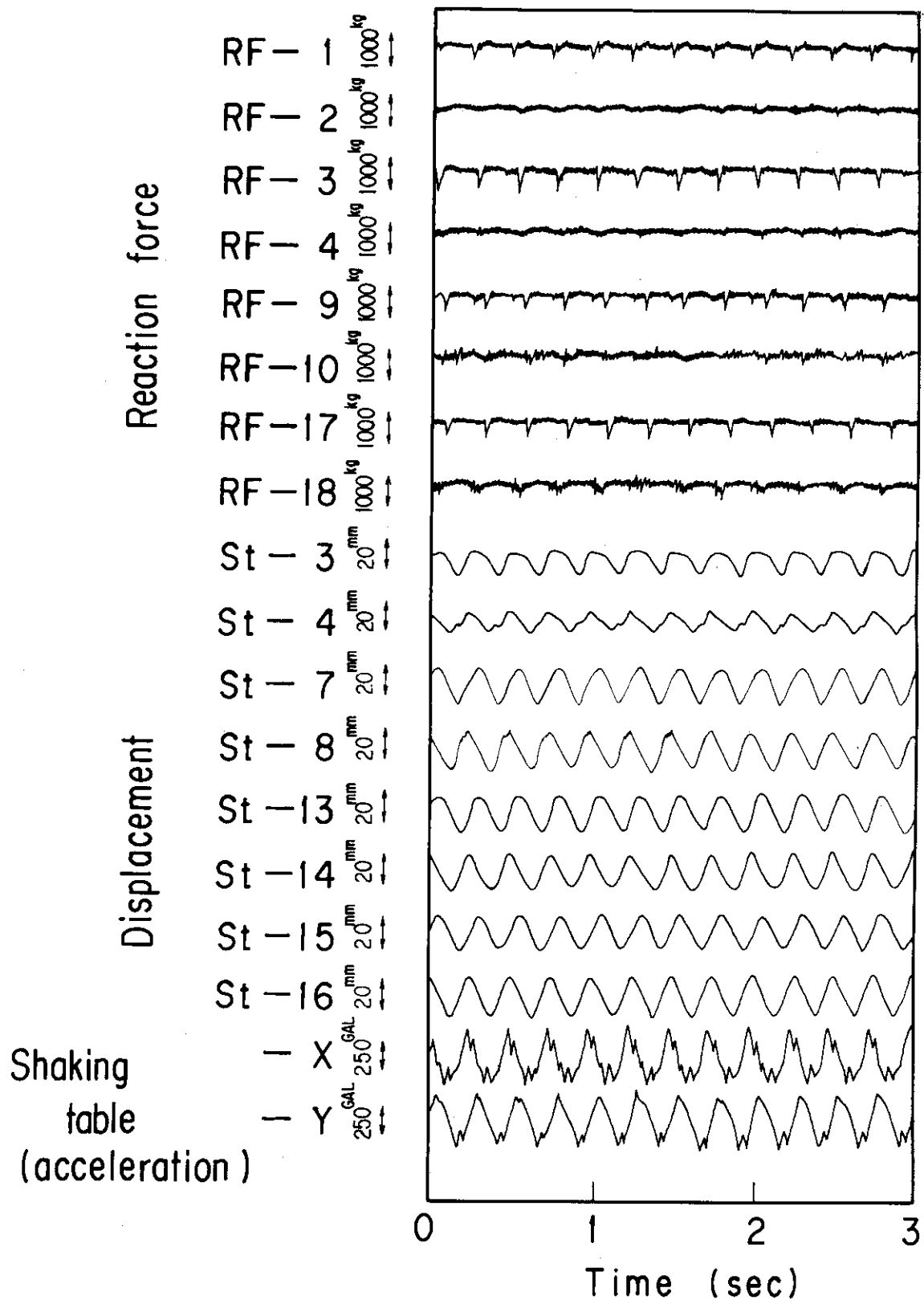


Fig. 5.3

Sinusoidal wave response (3.9 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y Hard support, With reflector key)

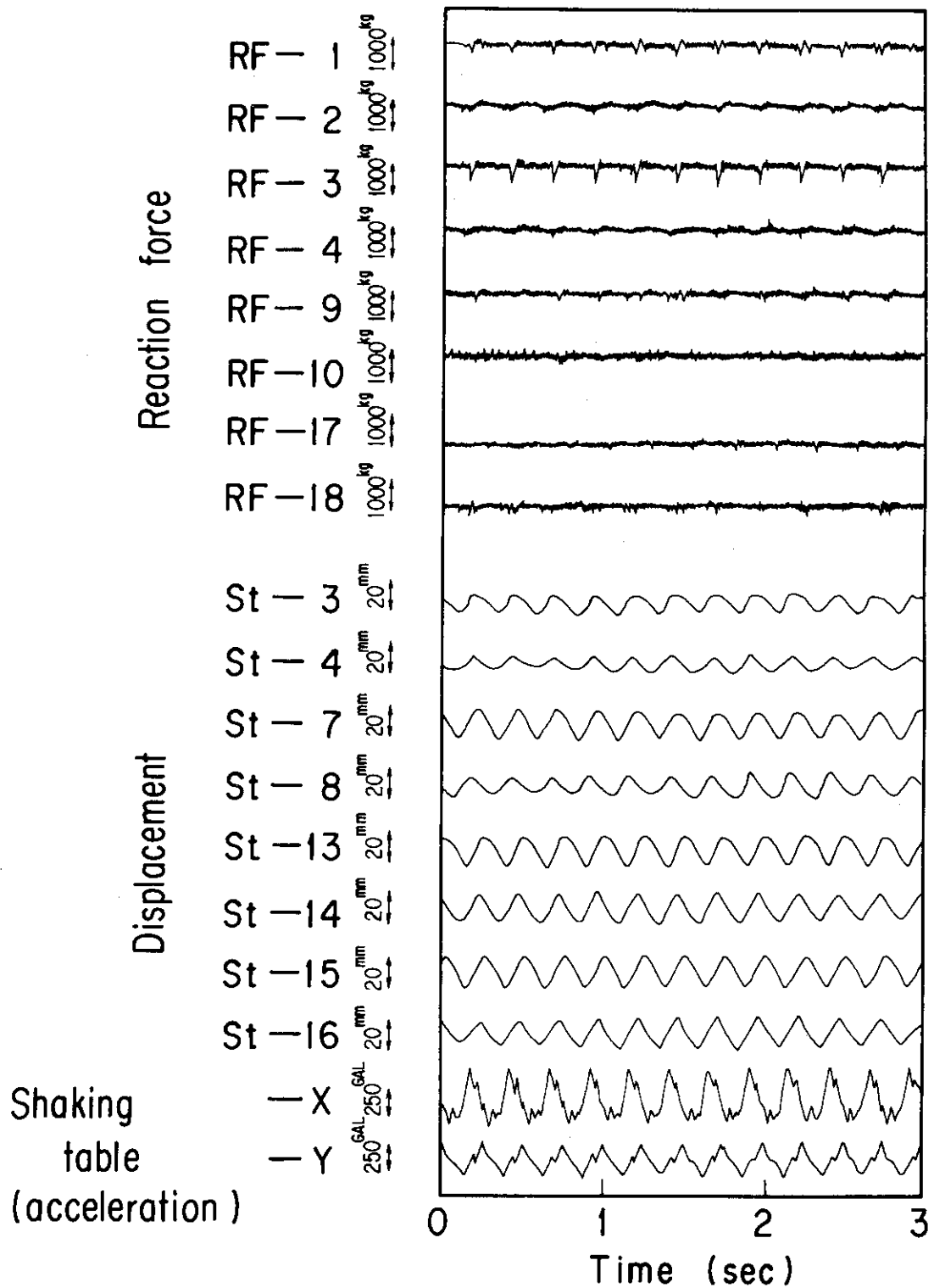


Fig. 5.4

Sinusoidal wave response (3.8 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y Hard support, With reflector key)

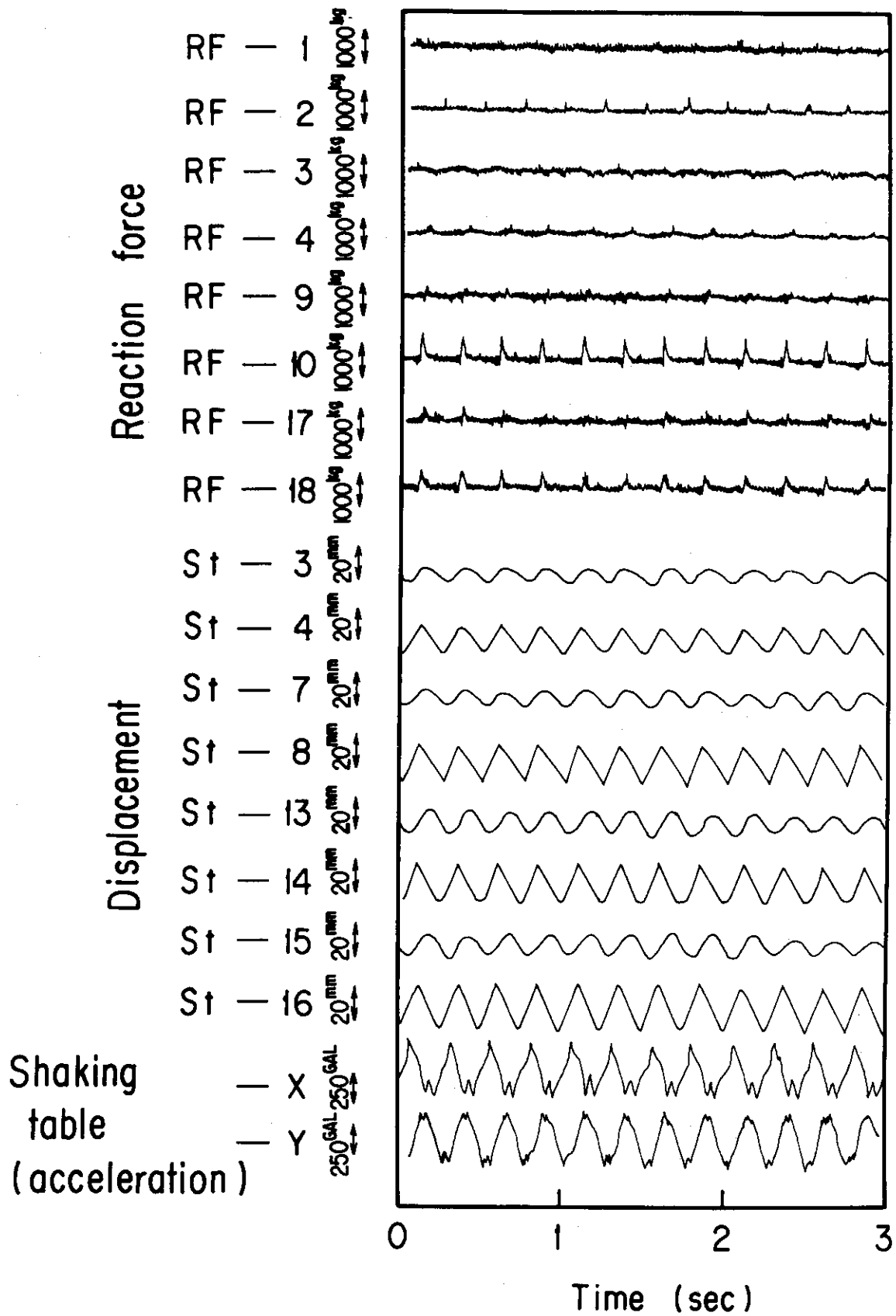


Fig. 5.5 Sinusoidal wave response (3.9 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y (i) Hard support, With reflector key)

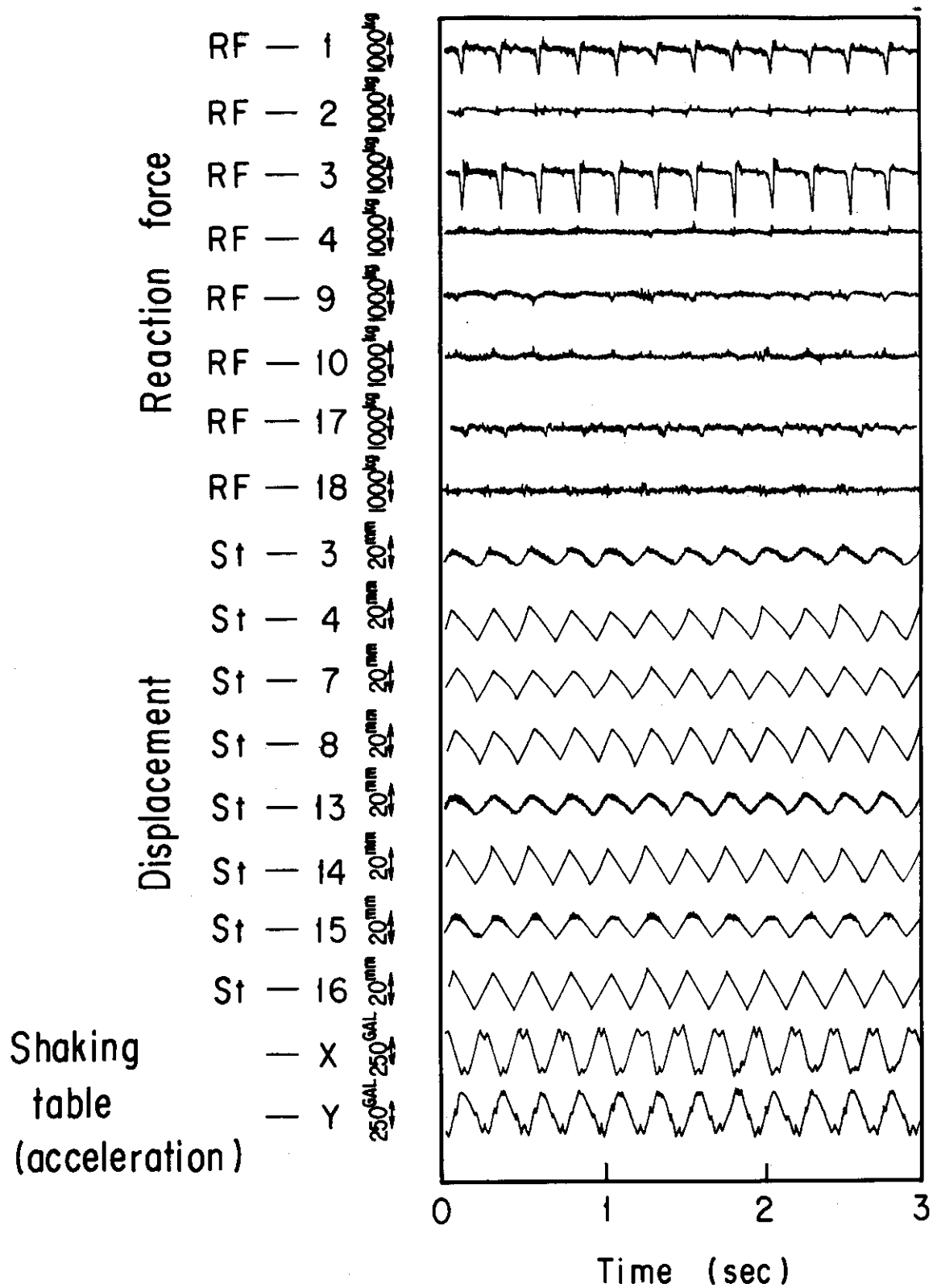


Fig. 5.6

Sinusoidal wave response (4.0 Hz, Max. acceleration 250 Gal, Two-axes X-Y (j) Hard support, With reflector key)

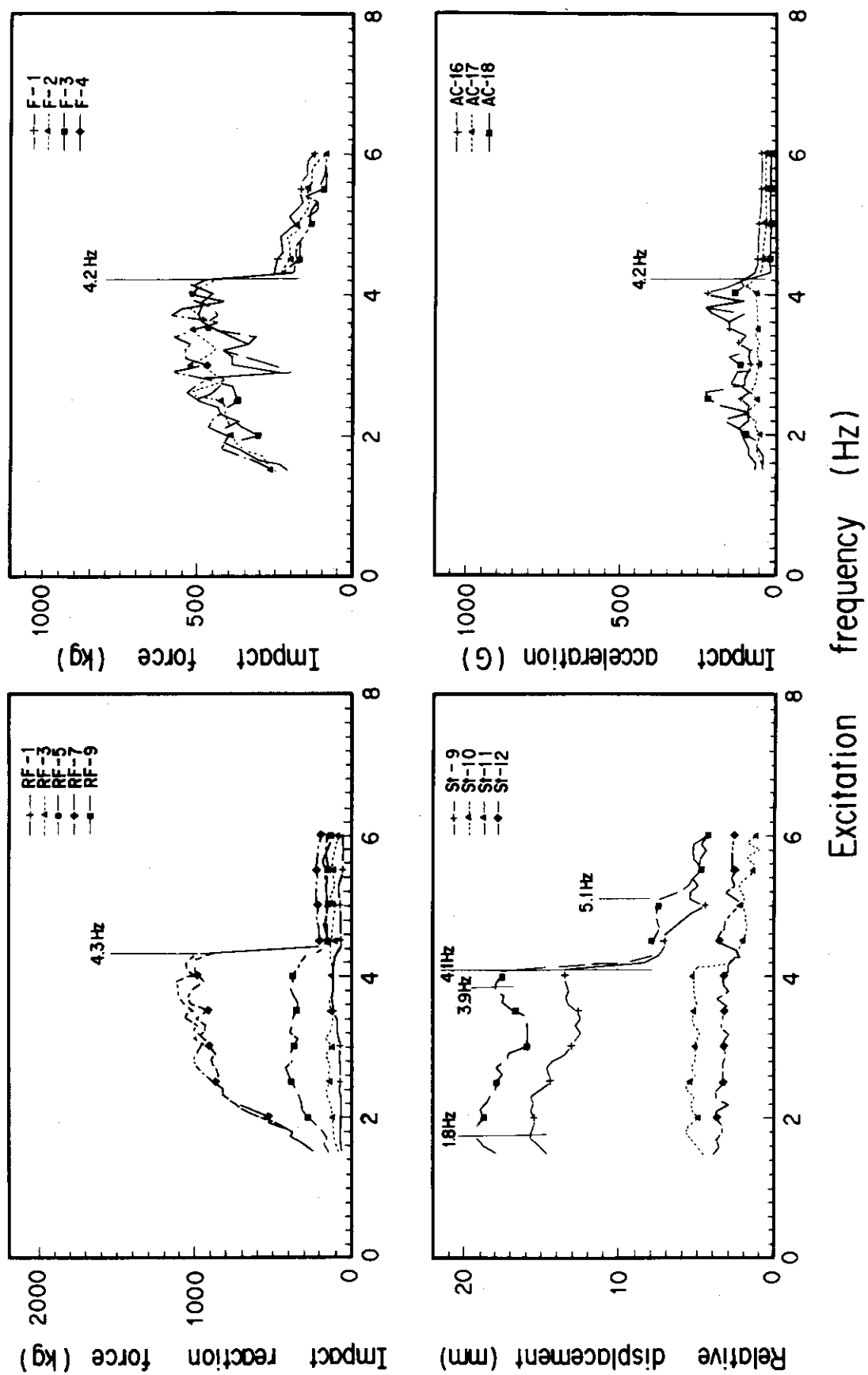
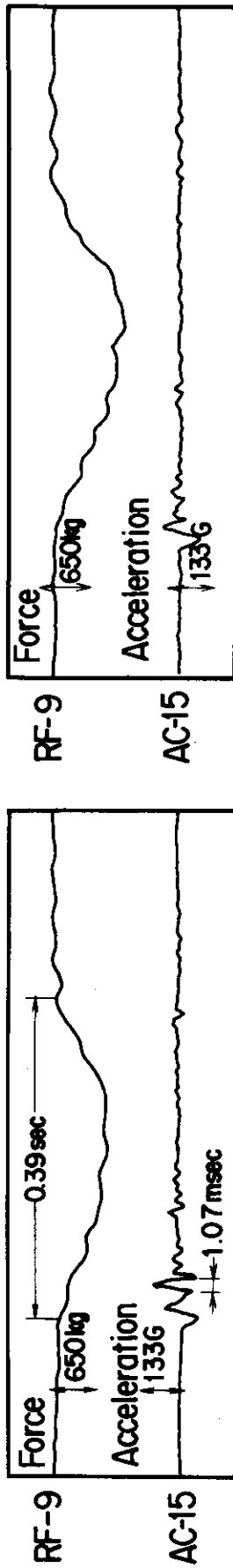
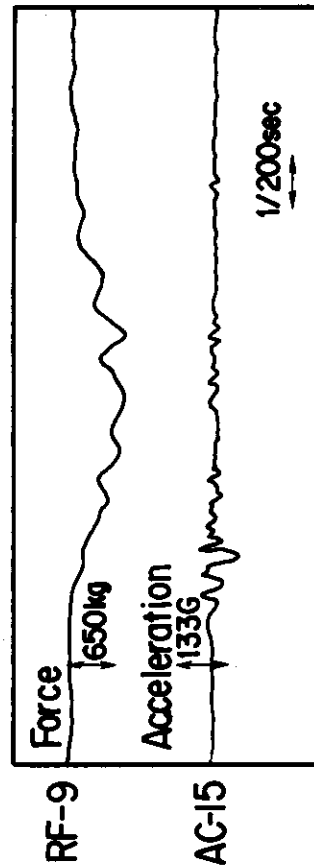


Fig. 5.7 Response characteristics (Excitation X-direction,
Hard support, With reflector key, Max. acceleration
250 Gal)

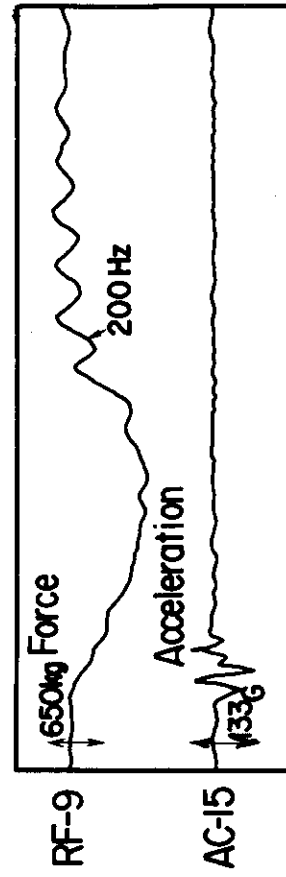


(a) Excitation frequency 2.8 Hz

(c) Excitation frequency 3.7 Hz



(b) Excitation frequency 2.3 Hz



(d) Excitation frequency 4.1 Hz

Fig. 5.8 Impact acceleration and impact reaction force of reflector block (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

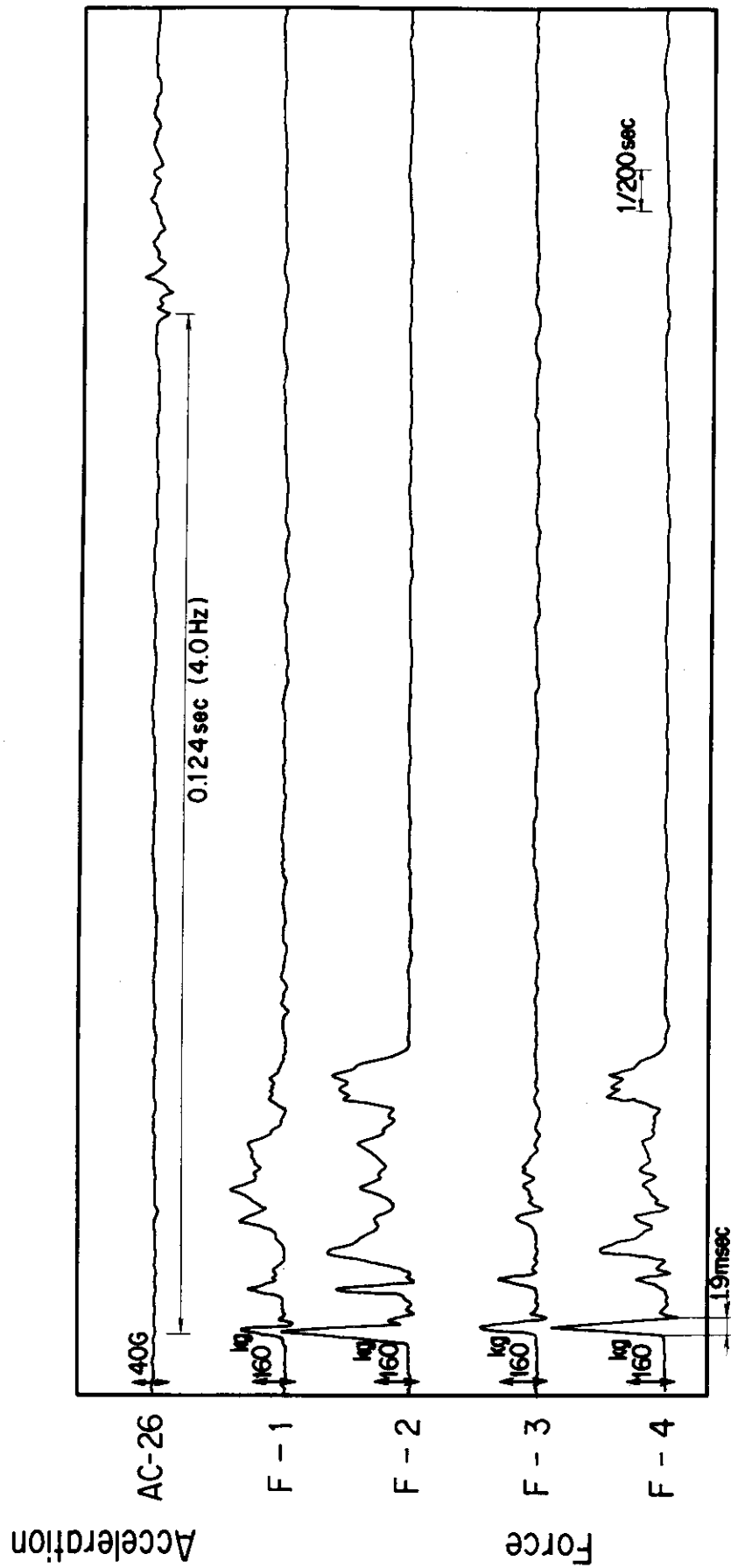


Fig. 5.9 Impact acceleration and impact force of block
(Excitation X-direction, Hard support, With reflector
key, Max. acceleration 250 Gal)

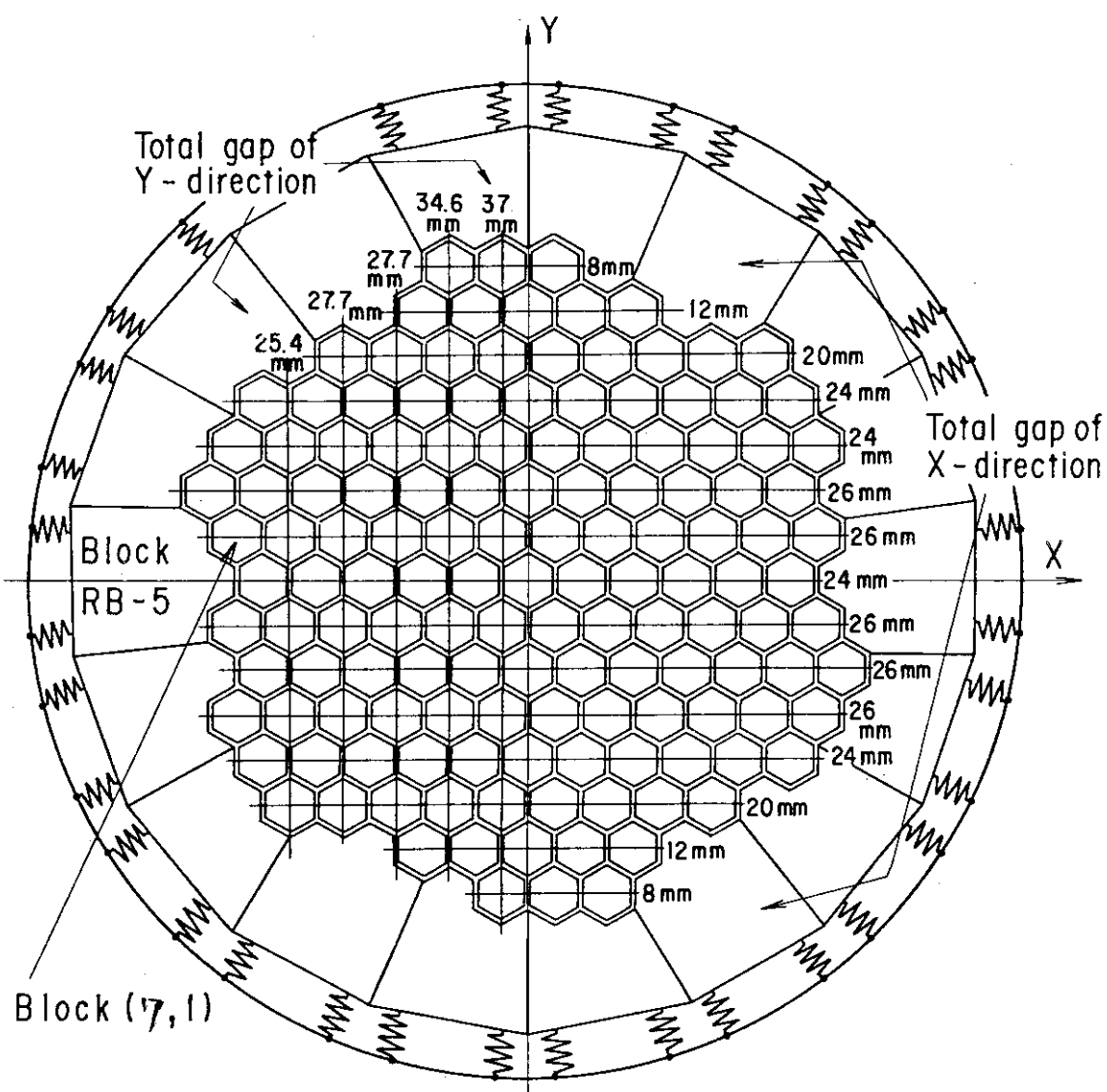


Fig. 5.10 Total gap of each row of core

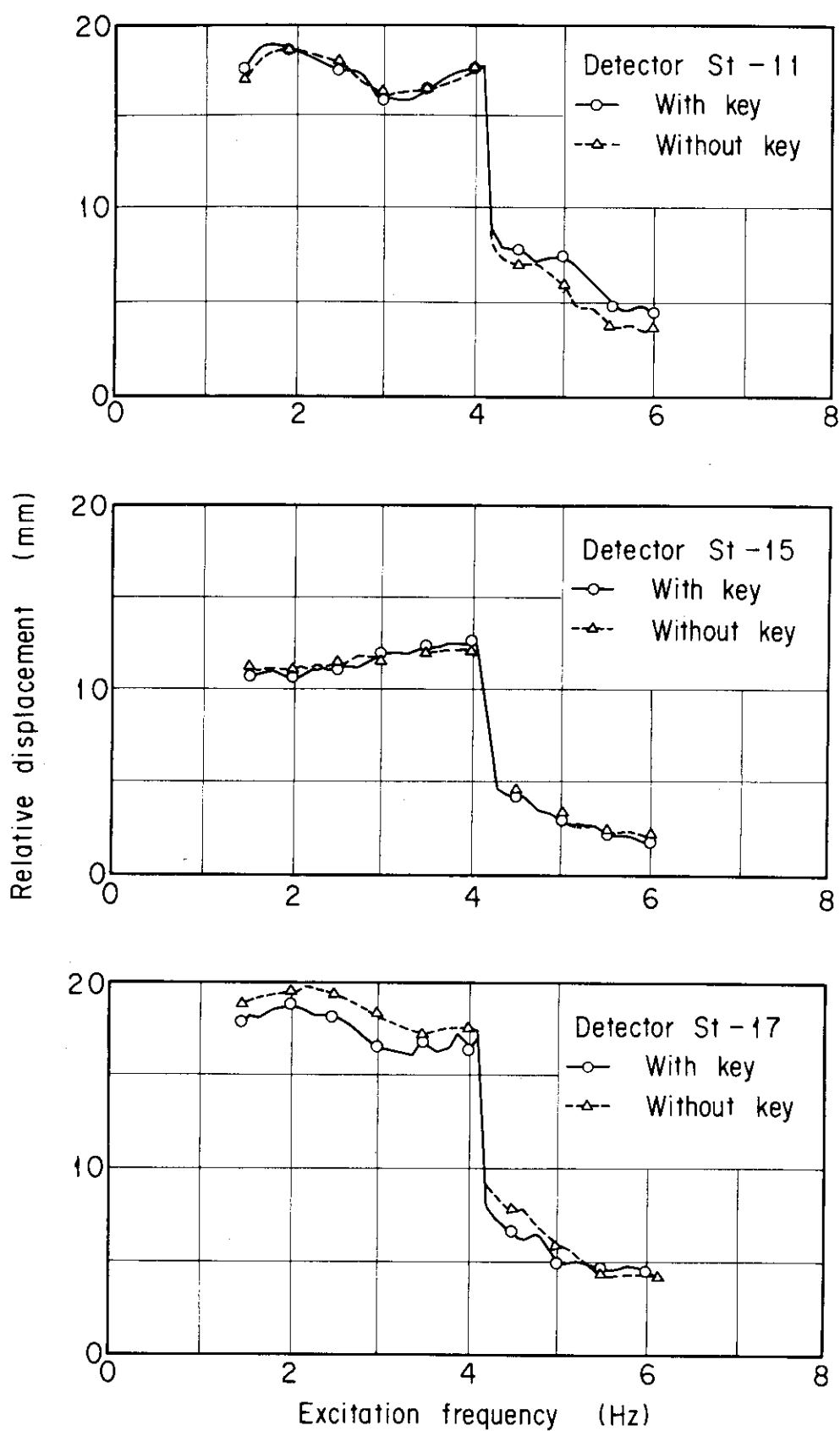


Fig. 5.11 Comparison between with reflector block key and without reflector key (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)

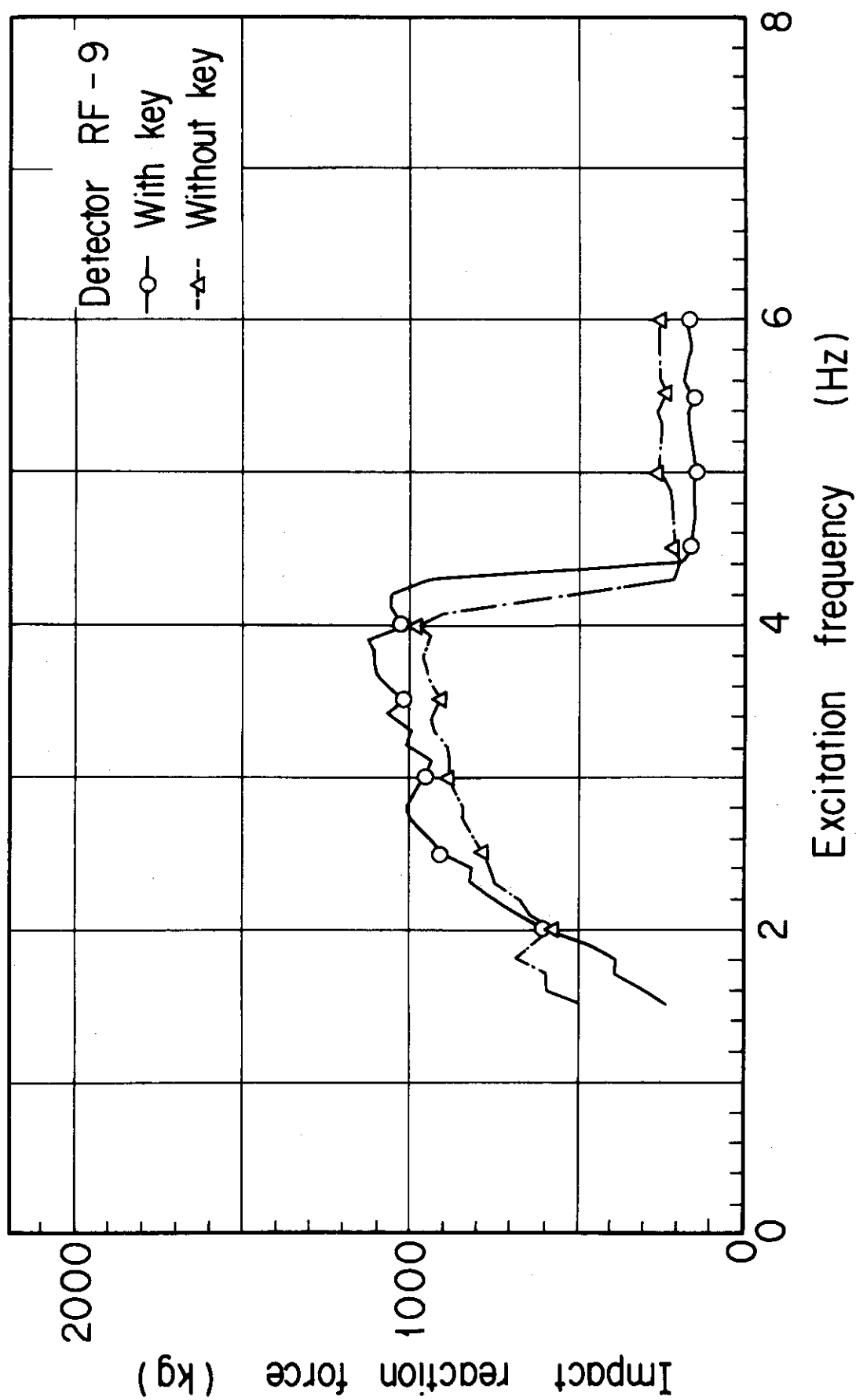


Fig. 5.12 Impact reaction force as a function of reflector key
(Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal,
Hard support)

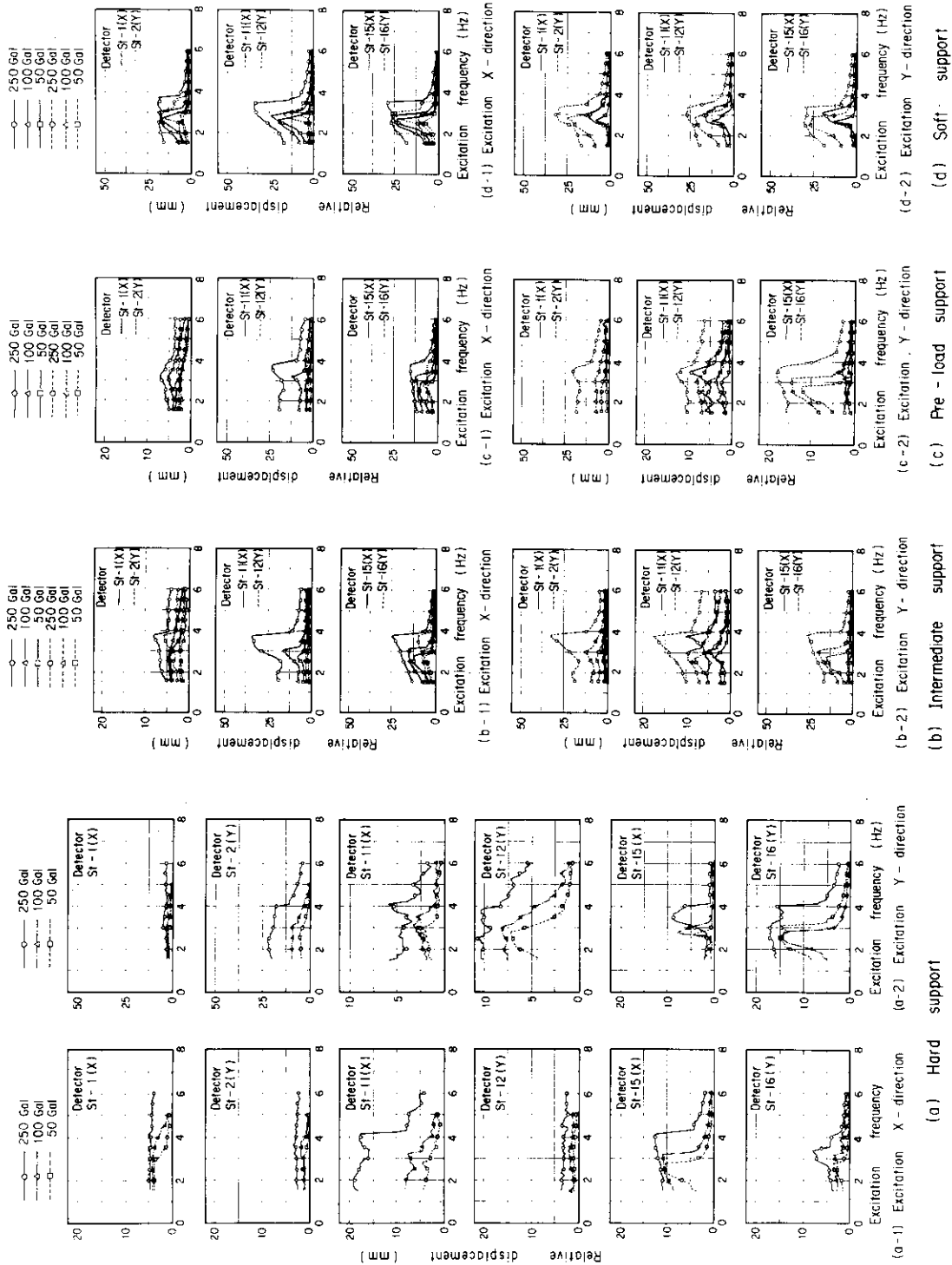


Fig. 5.13 Relative displacement characteristics (Sinusoidal wave, With reflector key)

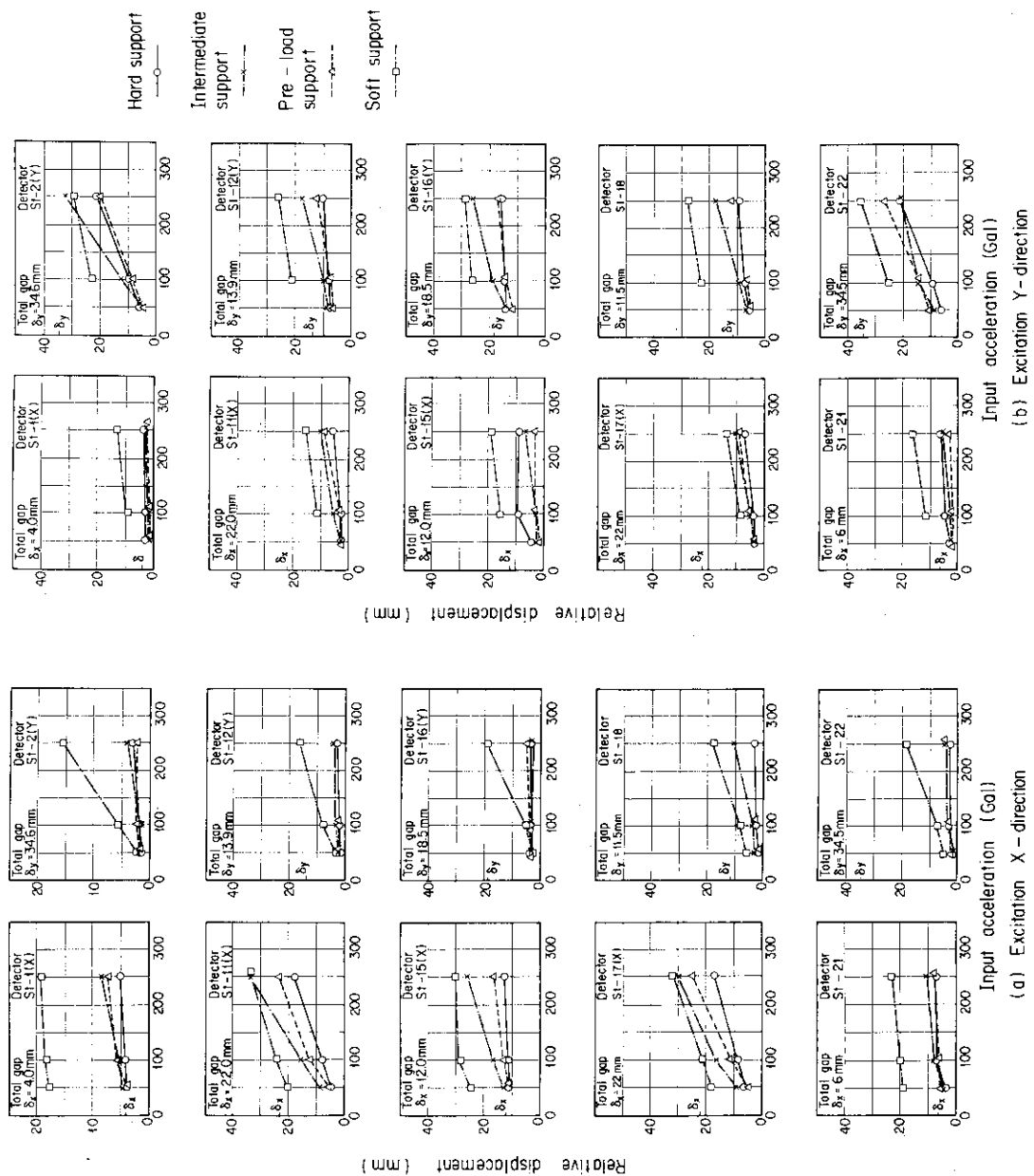


Fig. 5.14 Effect of input acceleration on relative displacement
(With reflector key)

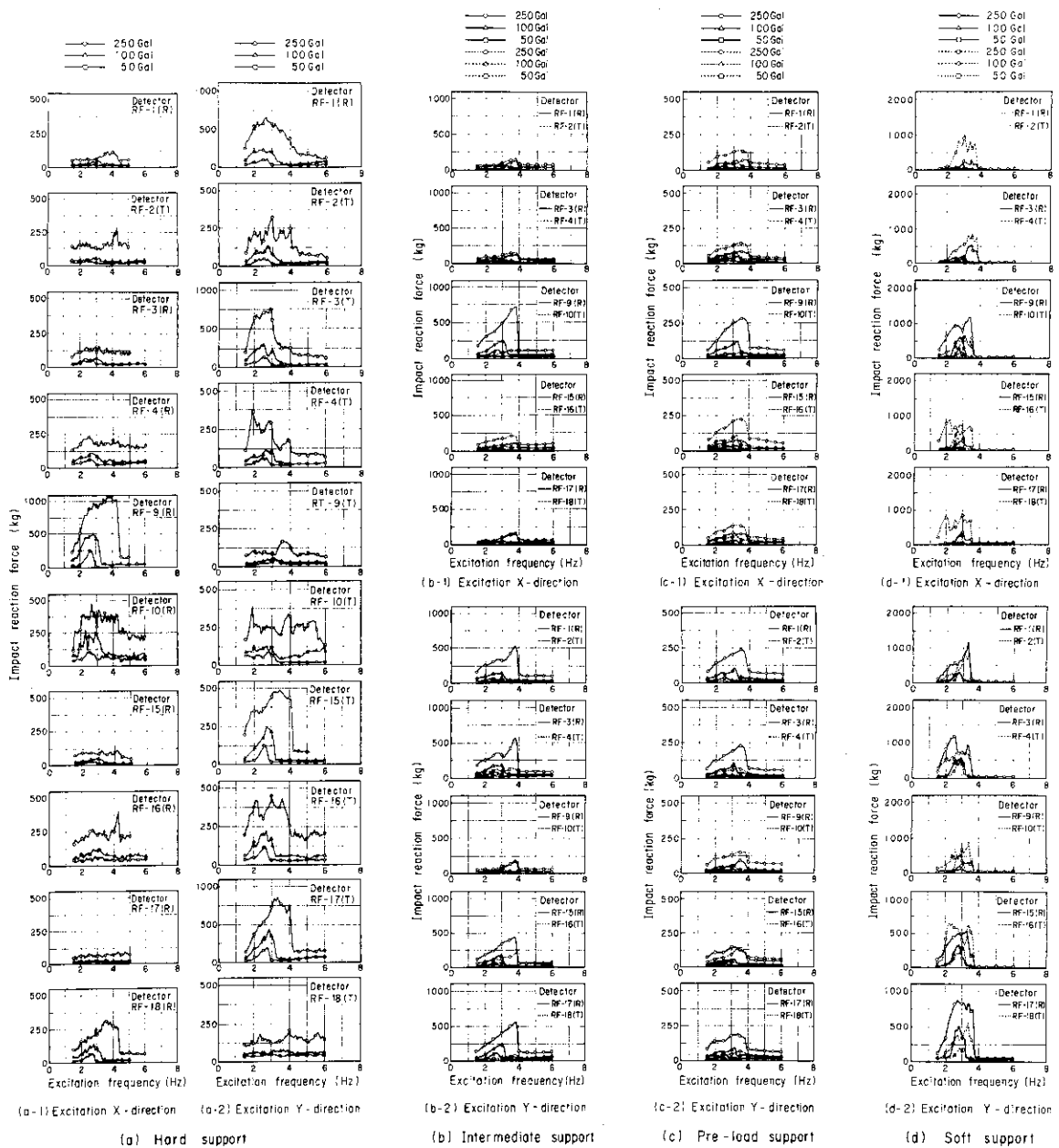


Fig. 5.15 Impact reaction force characteristics (Sinusoidal wave, With reflector key)

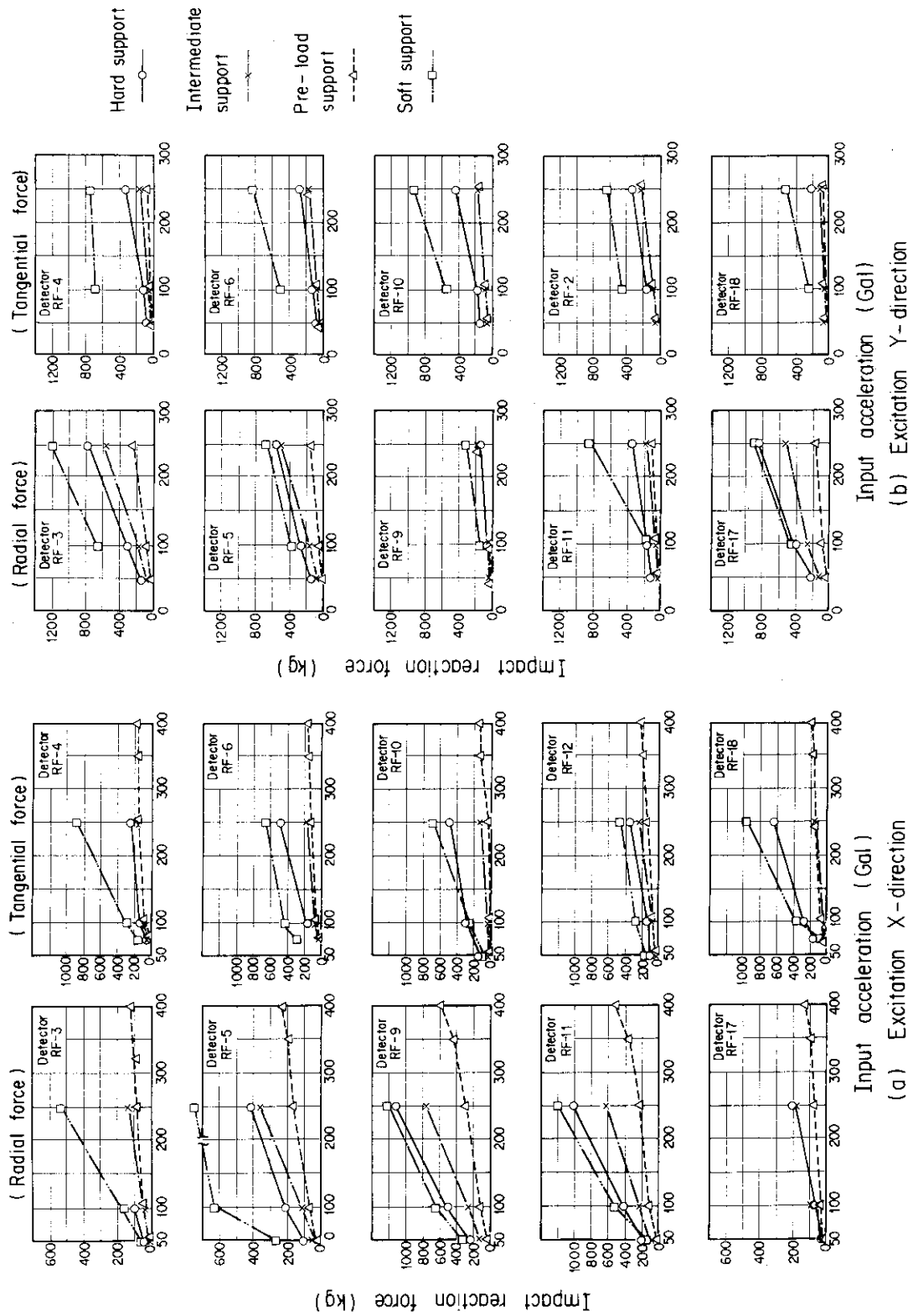


Fig. 5.16 Effect of input acceleration on impact reaction force
(With reflector key)

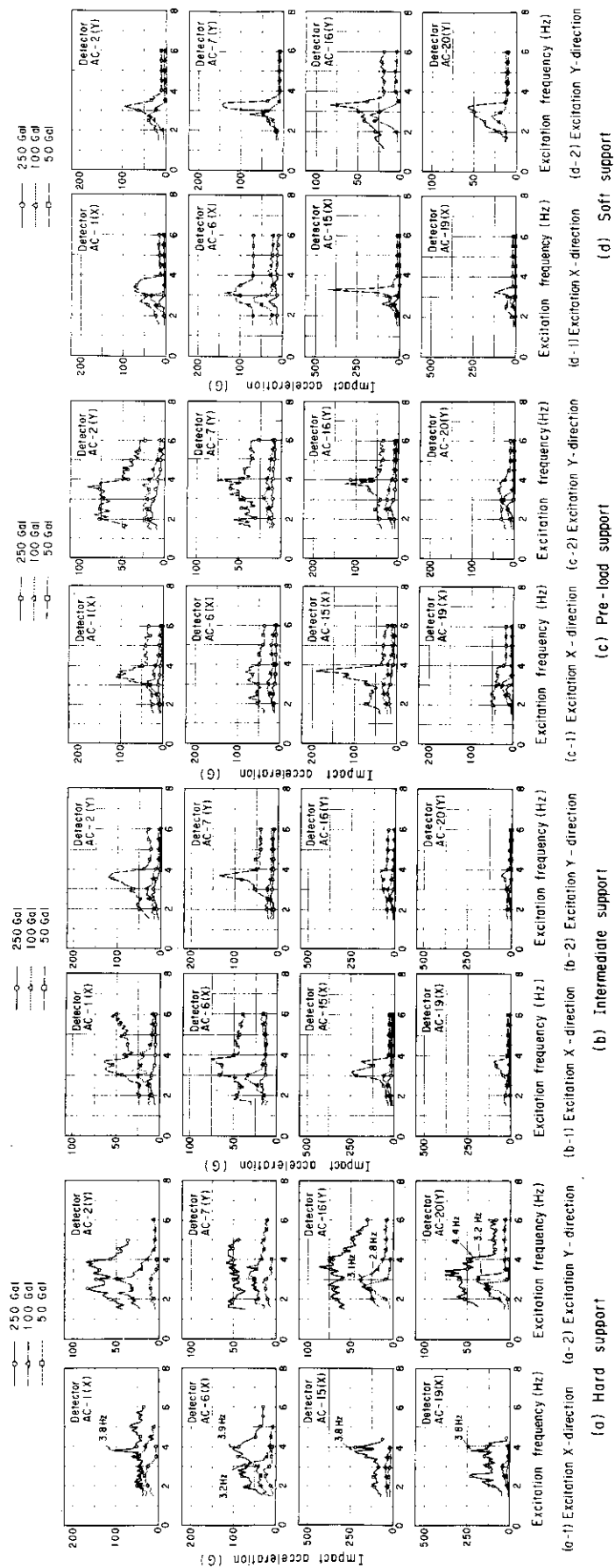


Fig. 5.17 Impact acceleration characteristics (Sinusoidal wave,
With reflector key)

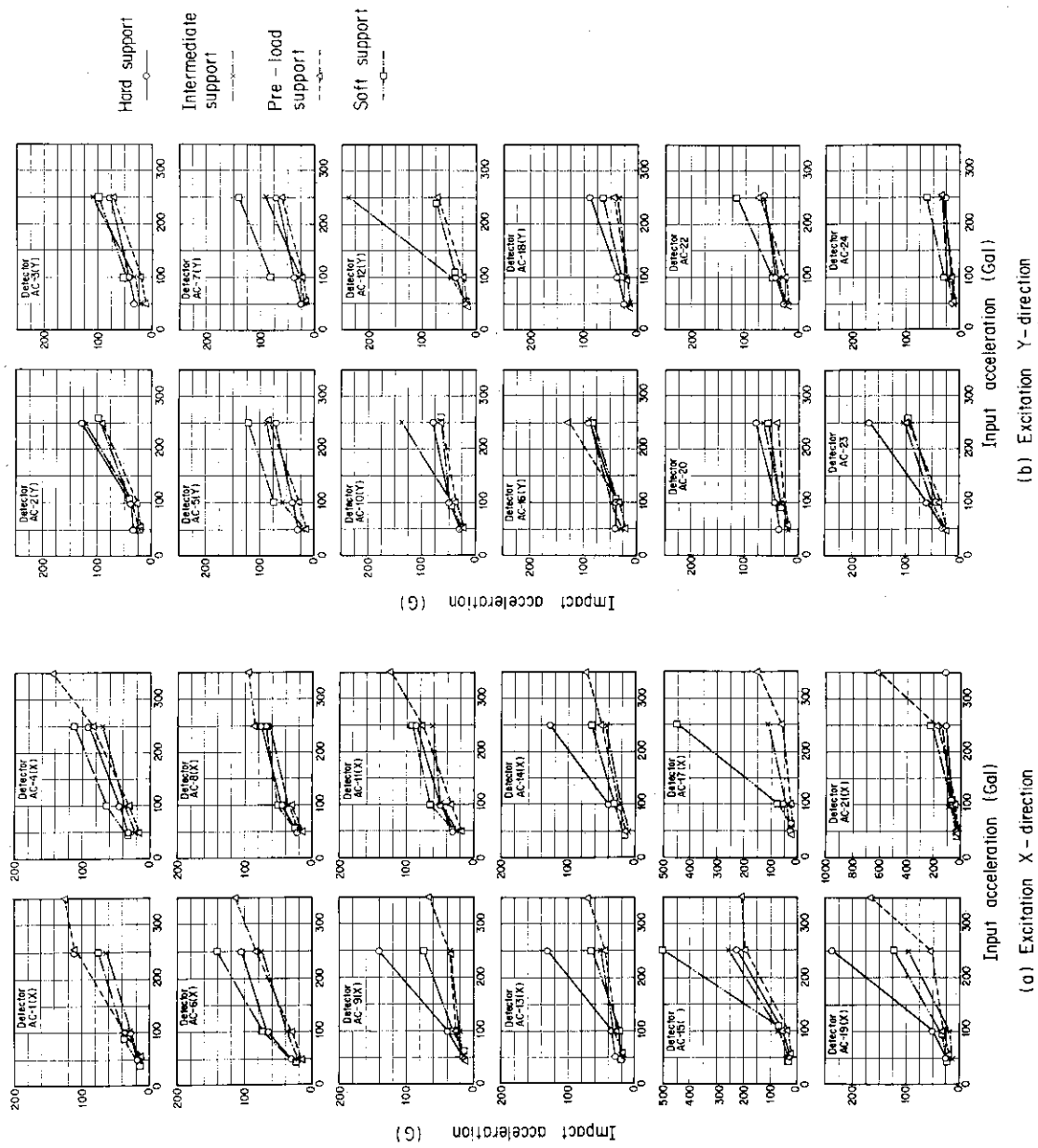


Fig. 5.18 Effect of input acceleration on impact acceleration
(With reflector key)

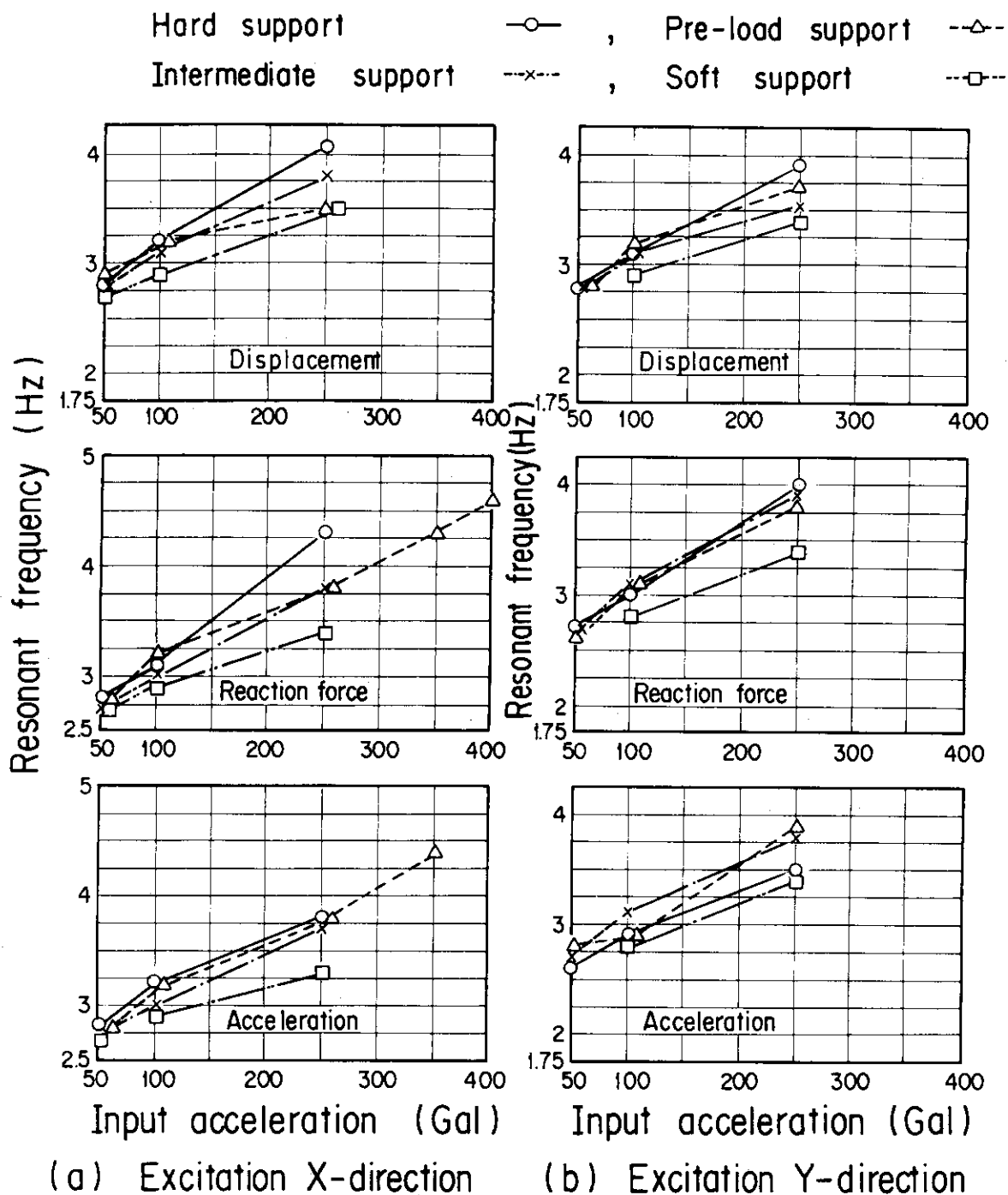


Fig. 5.19 Relationship between input acceleration and resonant frequency (With reflector key)

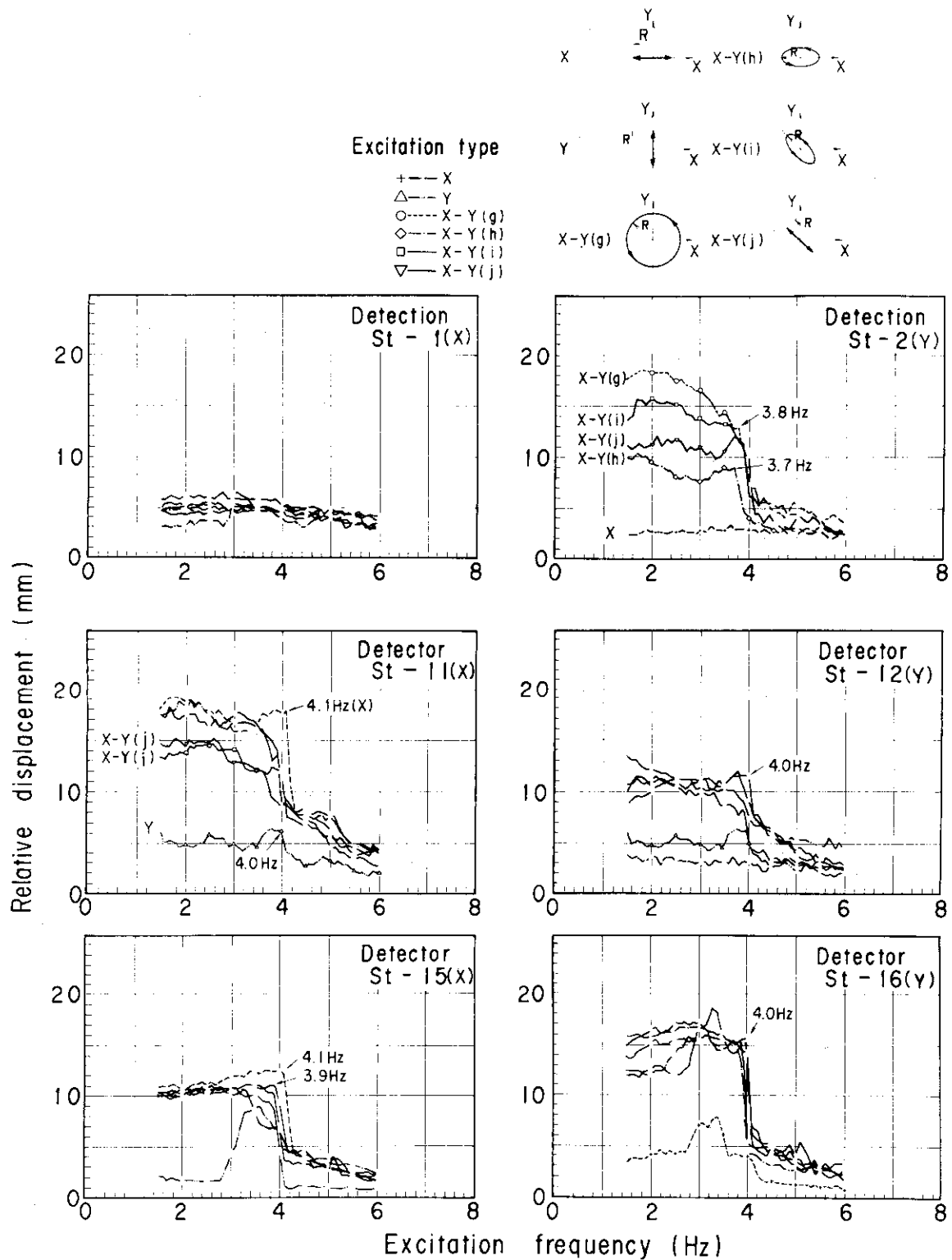


Fig. 5.20 Displacement characteristics (Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

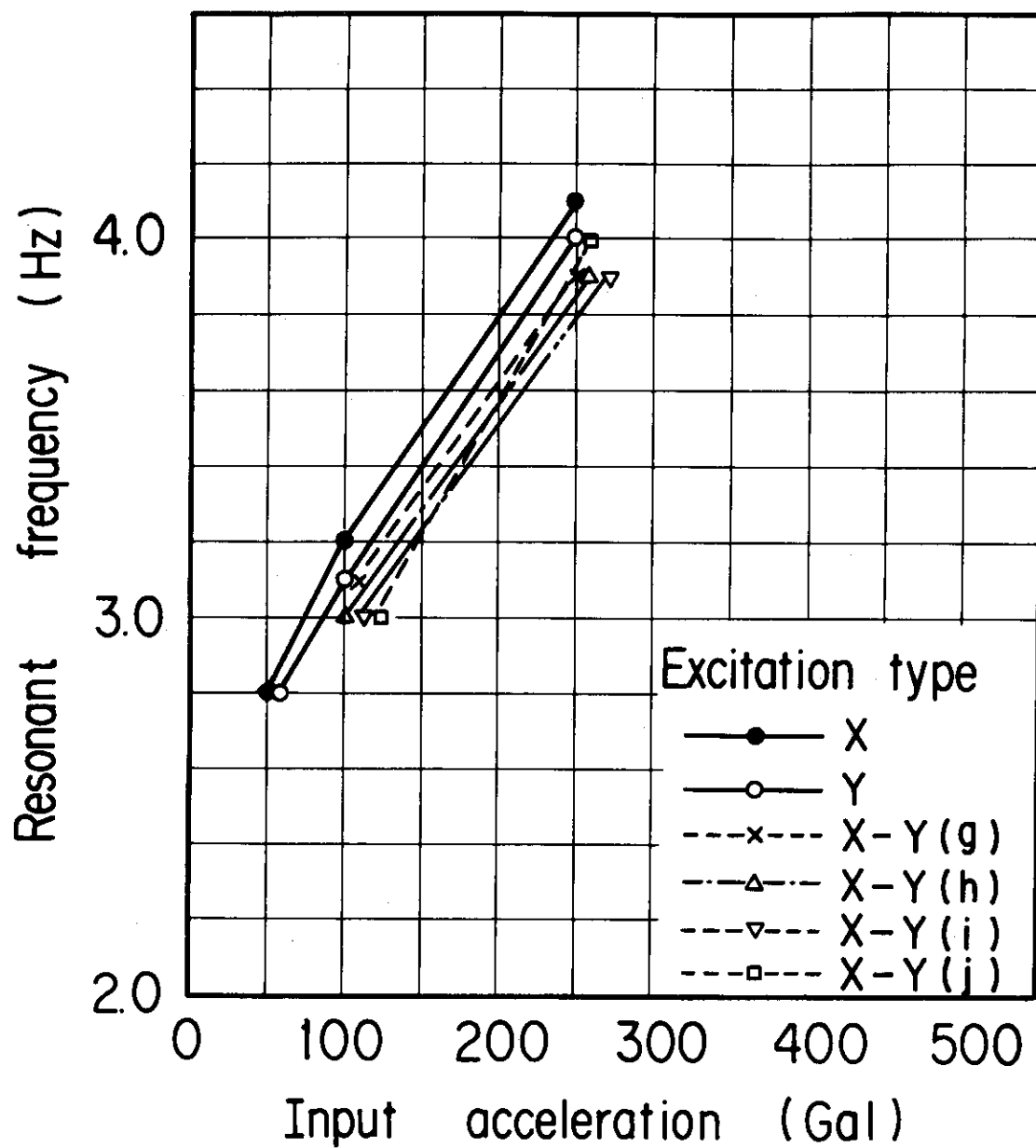


Fig. 5.21

Resonance frequency as a function of input acceleration
(Hard support, With reflector key)

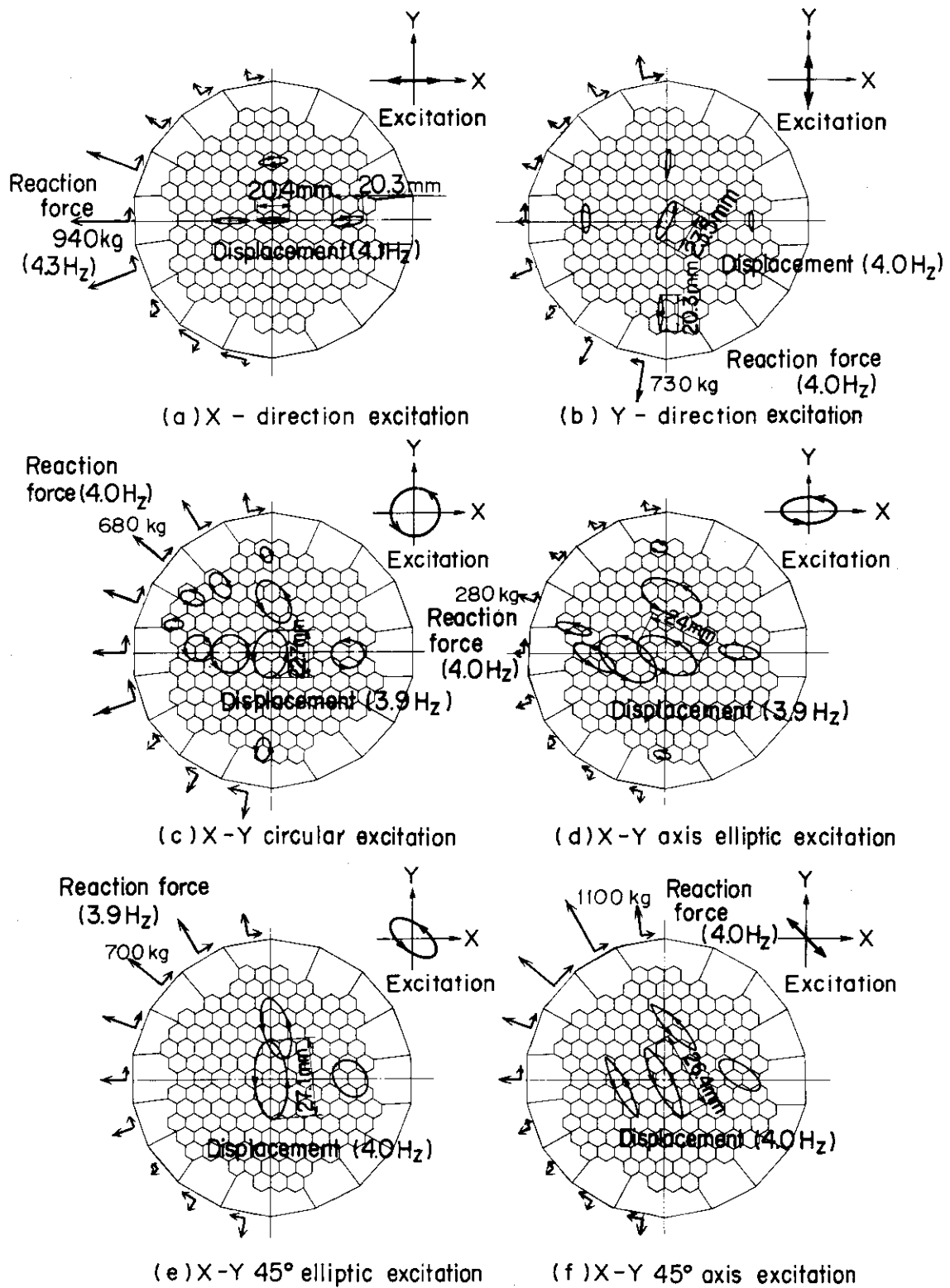


Fig. 5.22 Comparison core behavior and reaction force among excitation direction (Sinusoidal 3.9 ~ 4 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

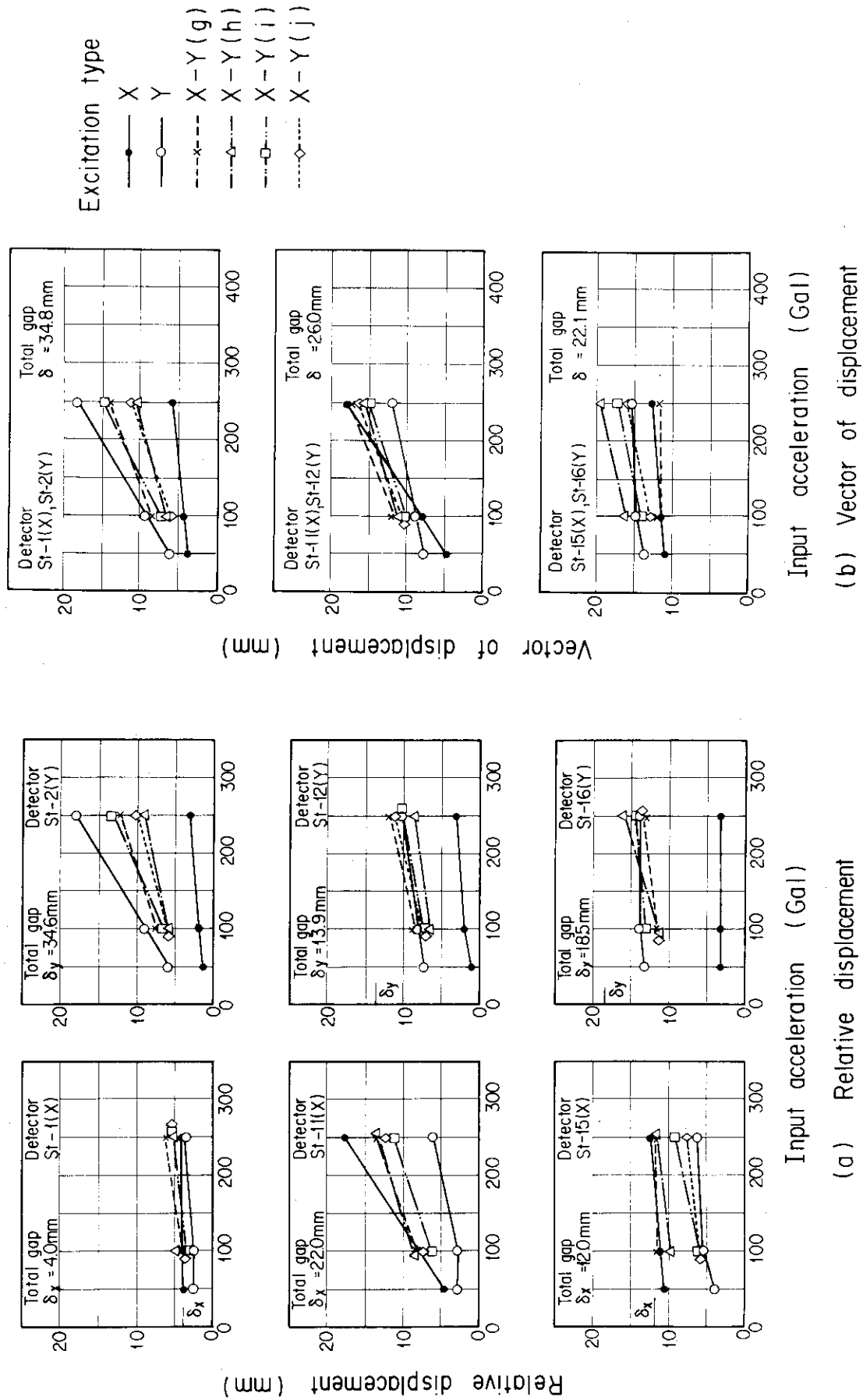


Fig. 5.23 Effect of input acceleration on relative displacement of resonant frequency (Hard support, With reflector key)

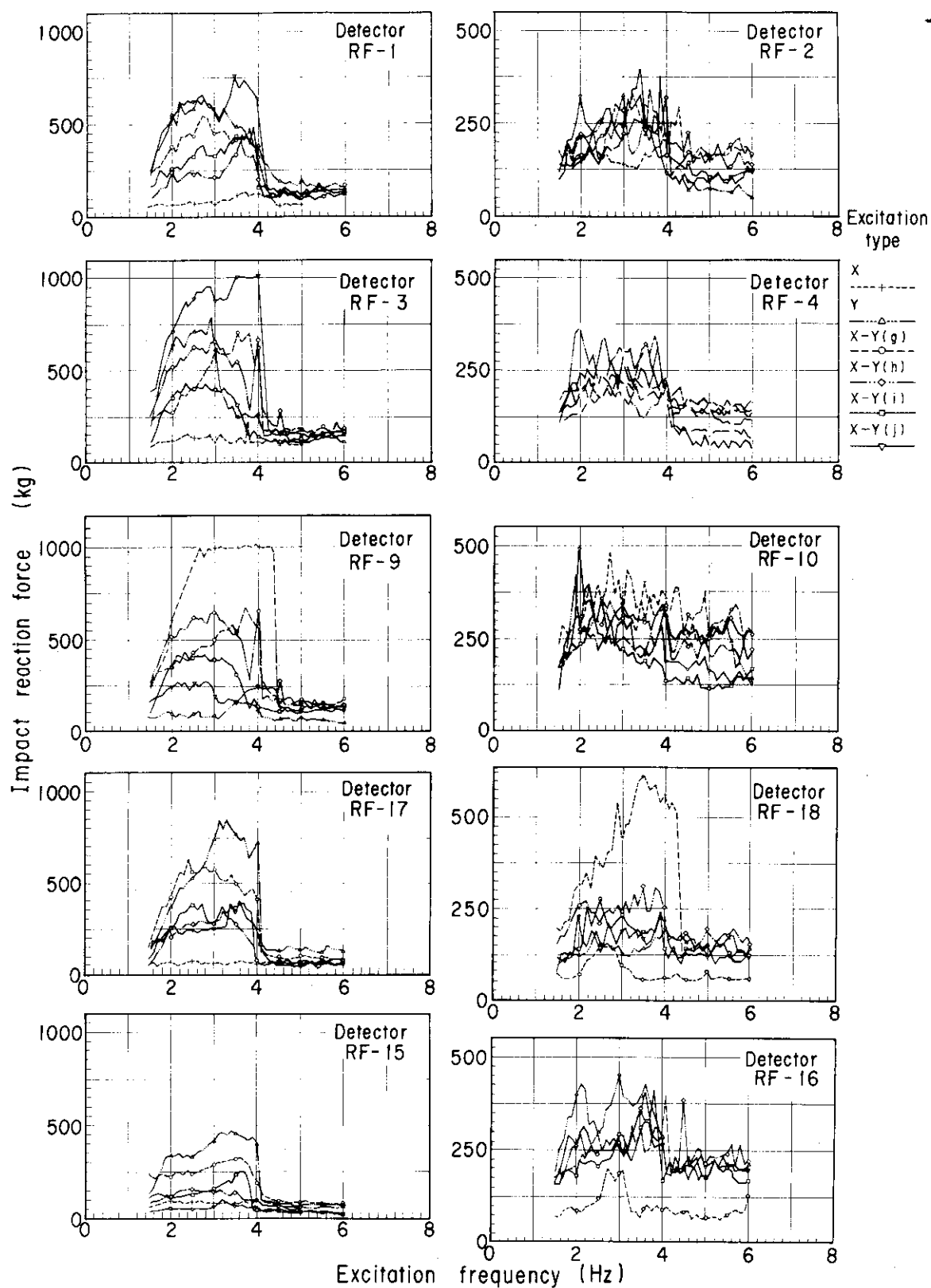
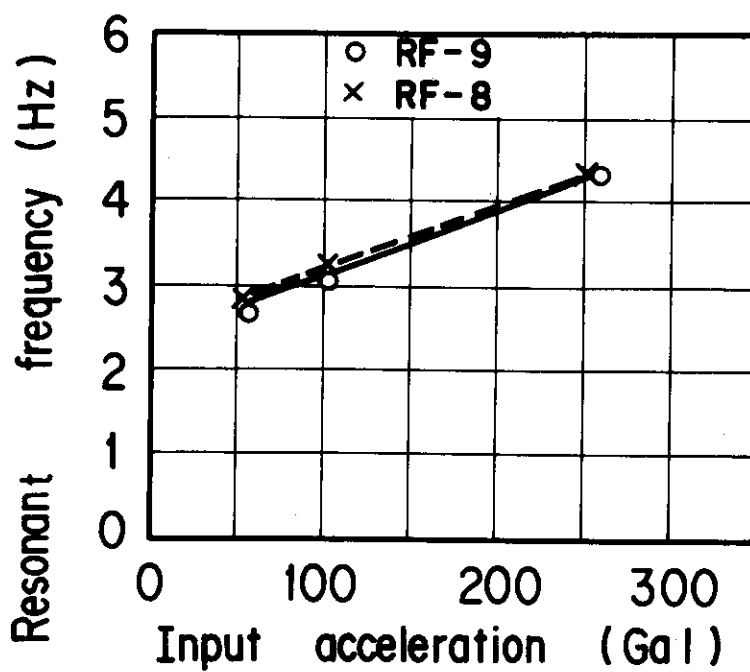
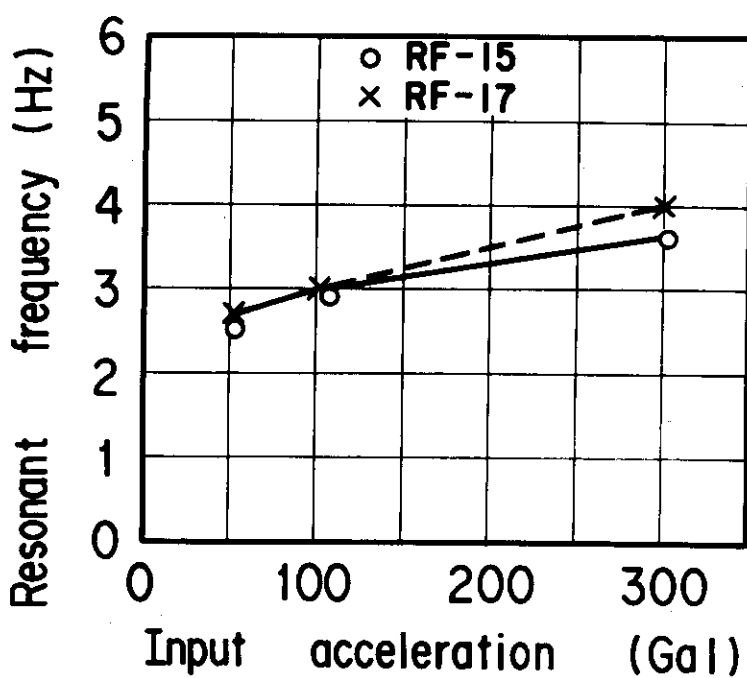


Fig. 5.24 Impact reaction force characteristics (Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)



(a) Excitation X-direction



(b) Excitation X-direction

Fig. 5.25 Input acceleration vs. resonance frequency
(Hard support, with reflector key)

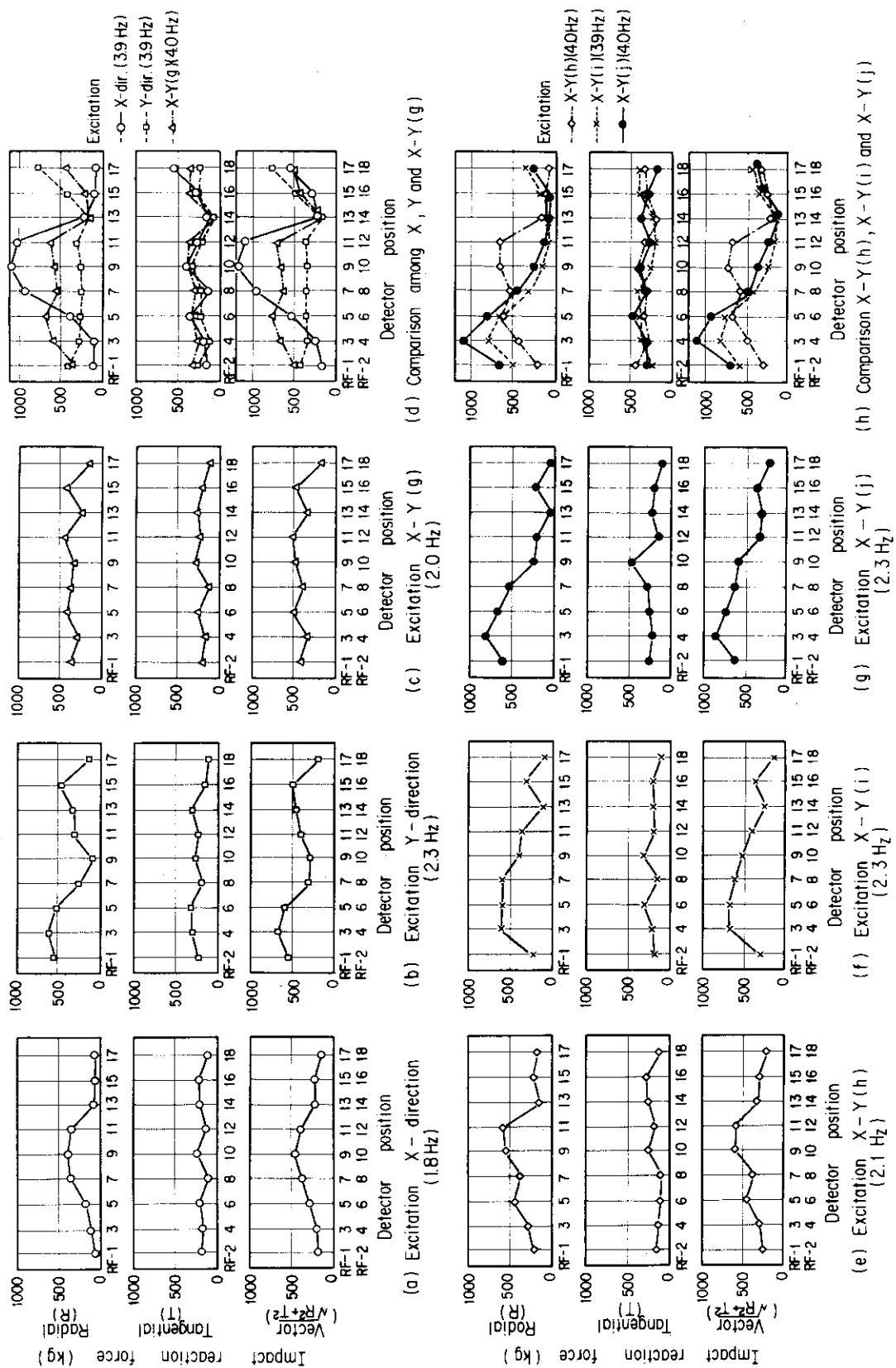


Fig. 5.26 Impact reaction force distribution around the core
(Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, With reflector key)

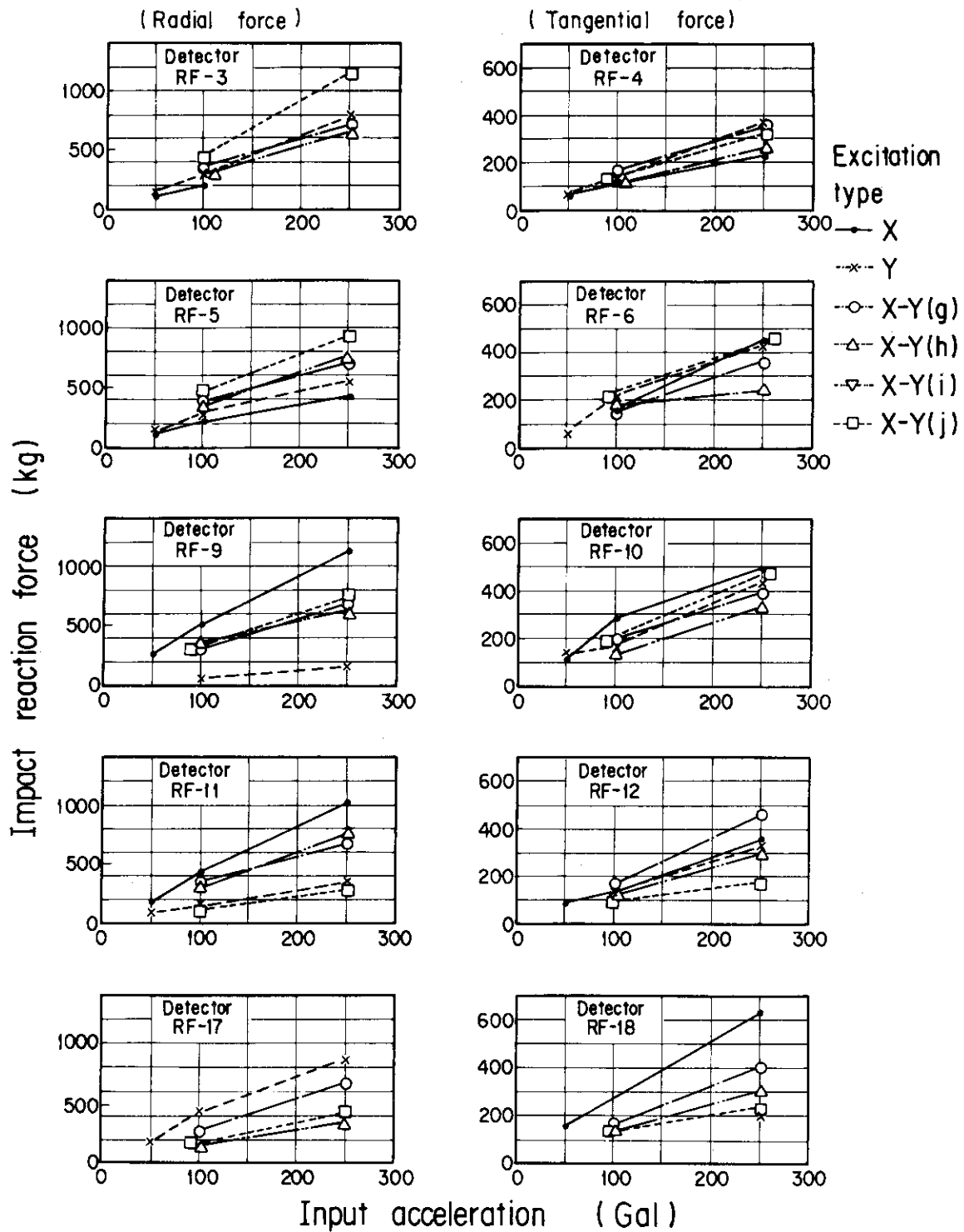


Fig. 5.27 Effect of input acceleration on impact reaction force
(Hard support, With reflector key)

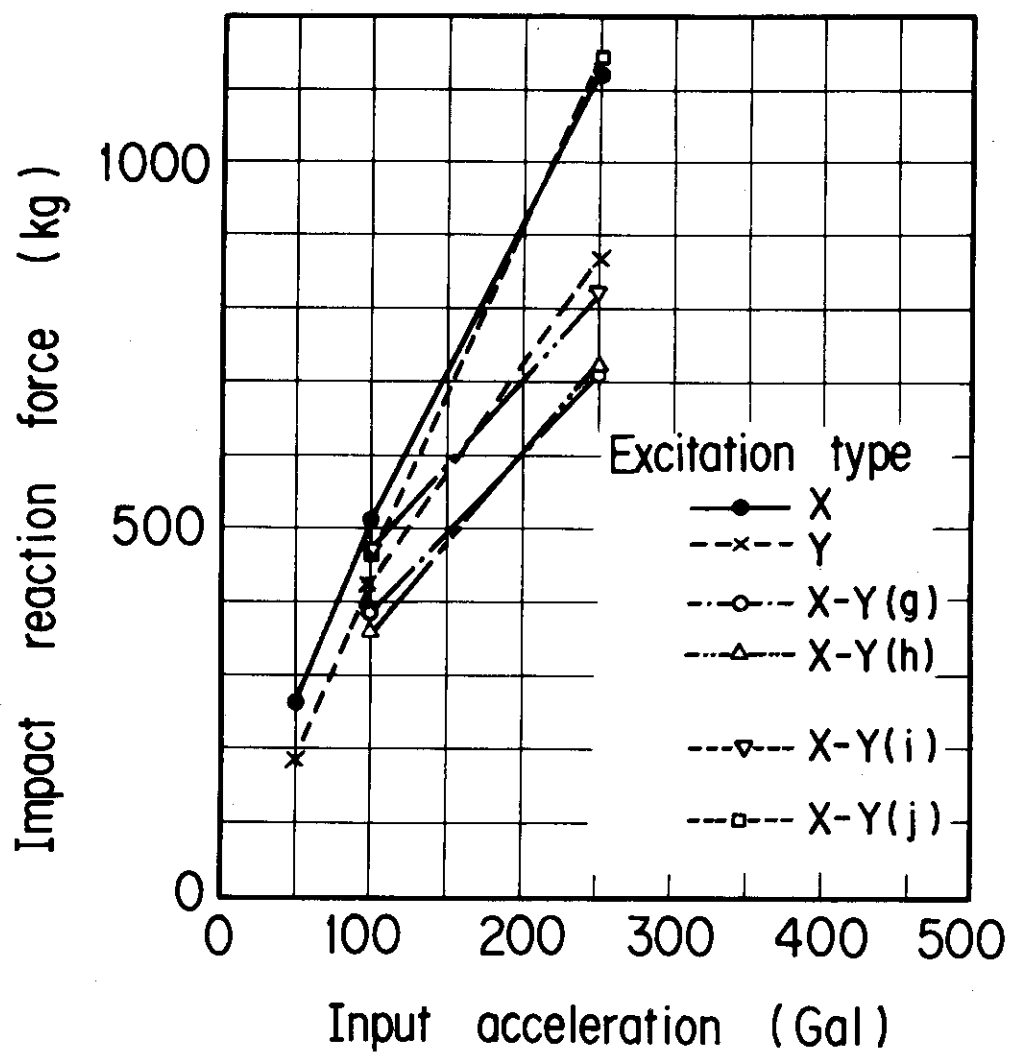


Fig. 5.28

Impact reaction force as a function of input acceleration (Hard support, With reflector key)

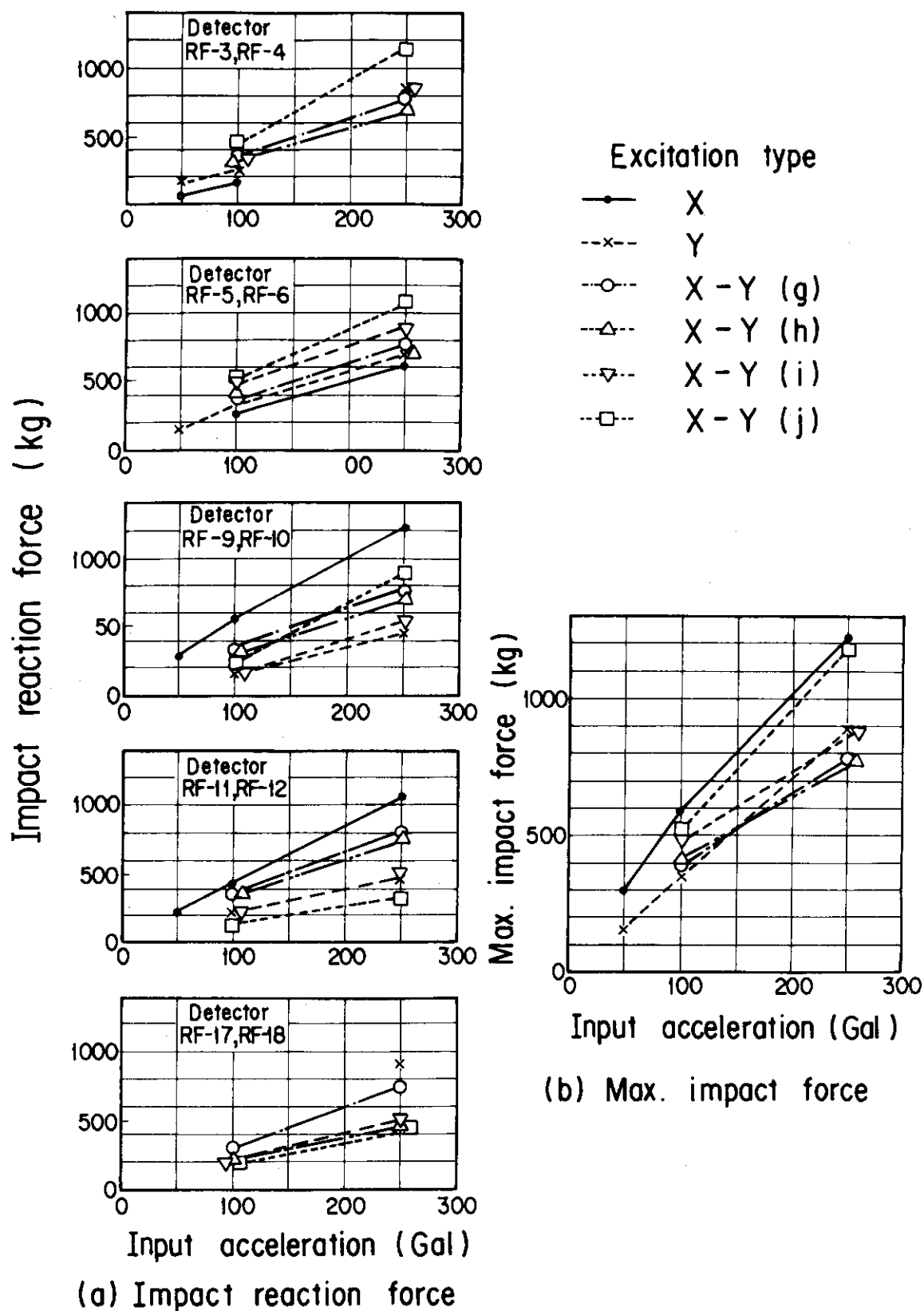


Fig. 5.29 Effect of input acceleration on impact reaction force of vector direction (Hard support, With reflector key)

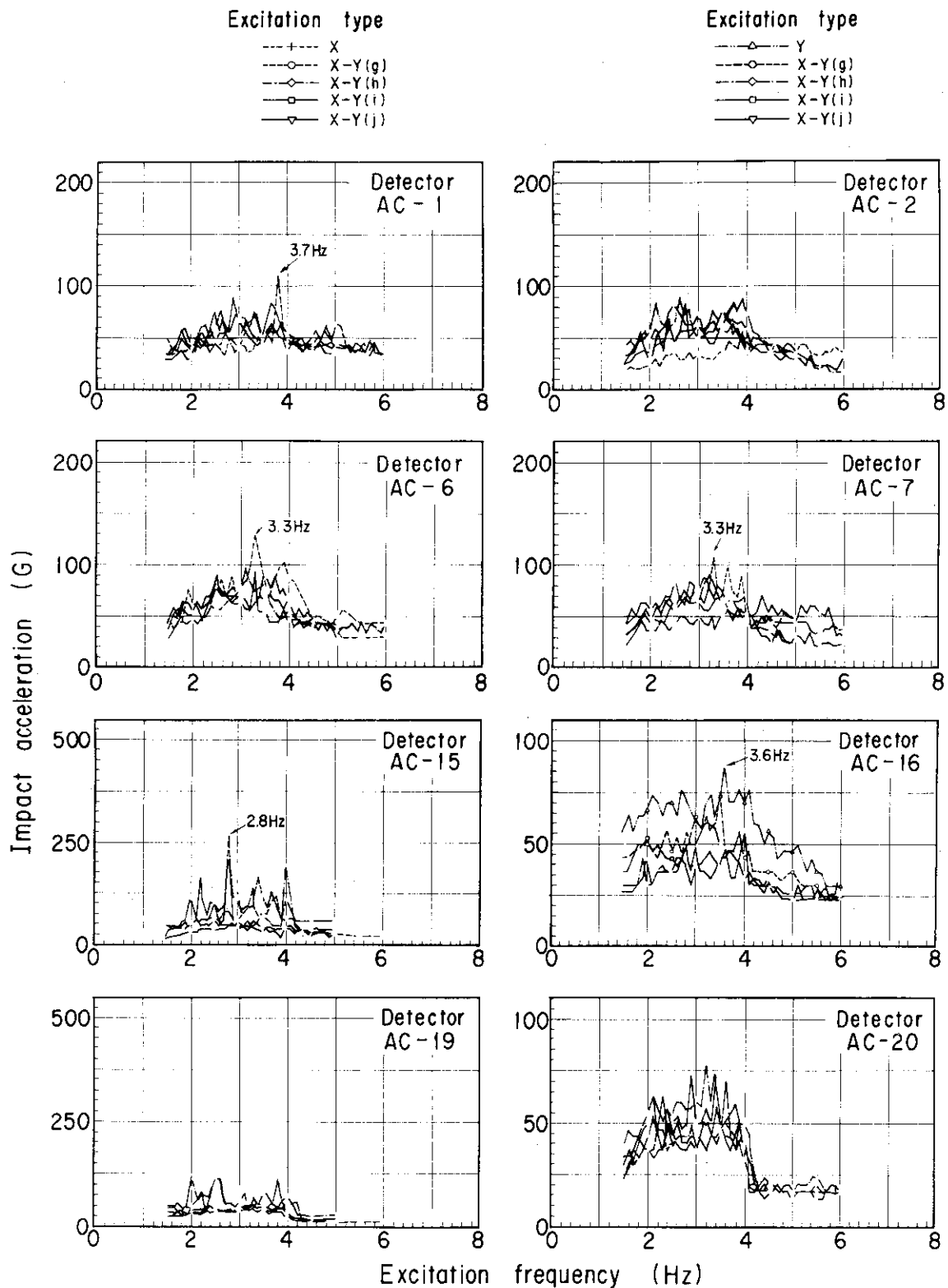


Fig. 5.30 Impact acceleration characteristics (Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

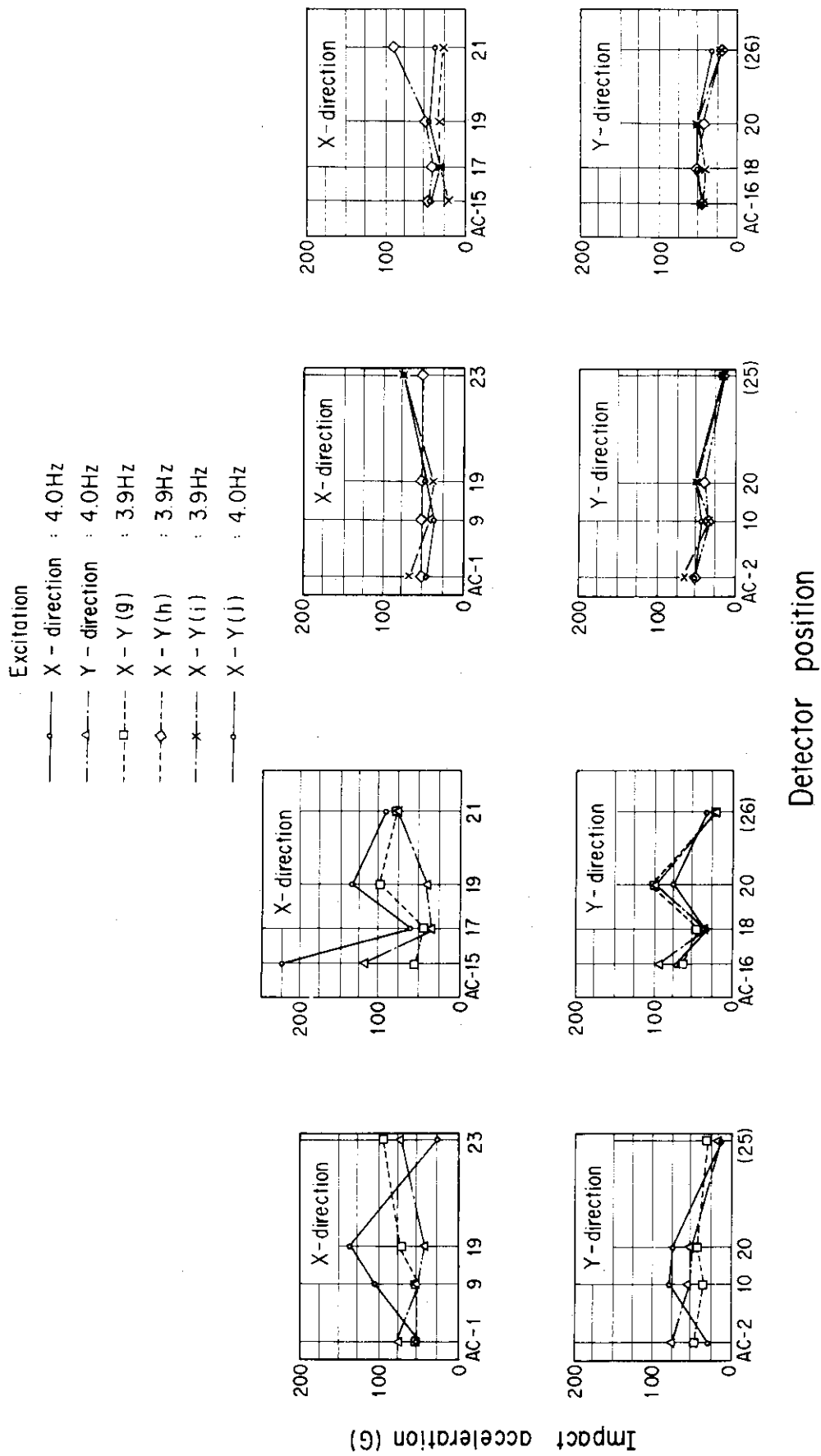


Fig. 5.31 Effect of excitation direction on impact acceleration
(Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, With
reflector key)

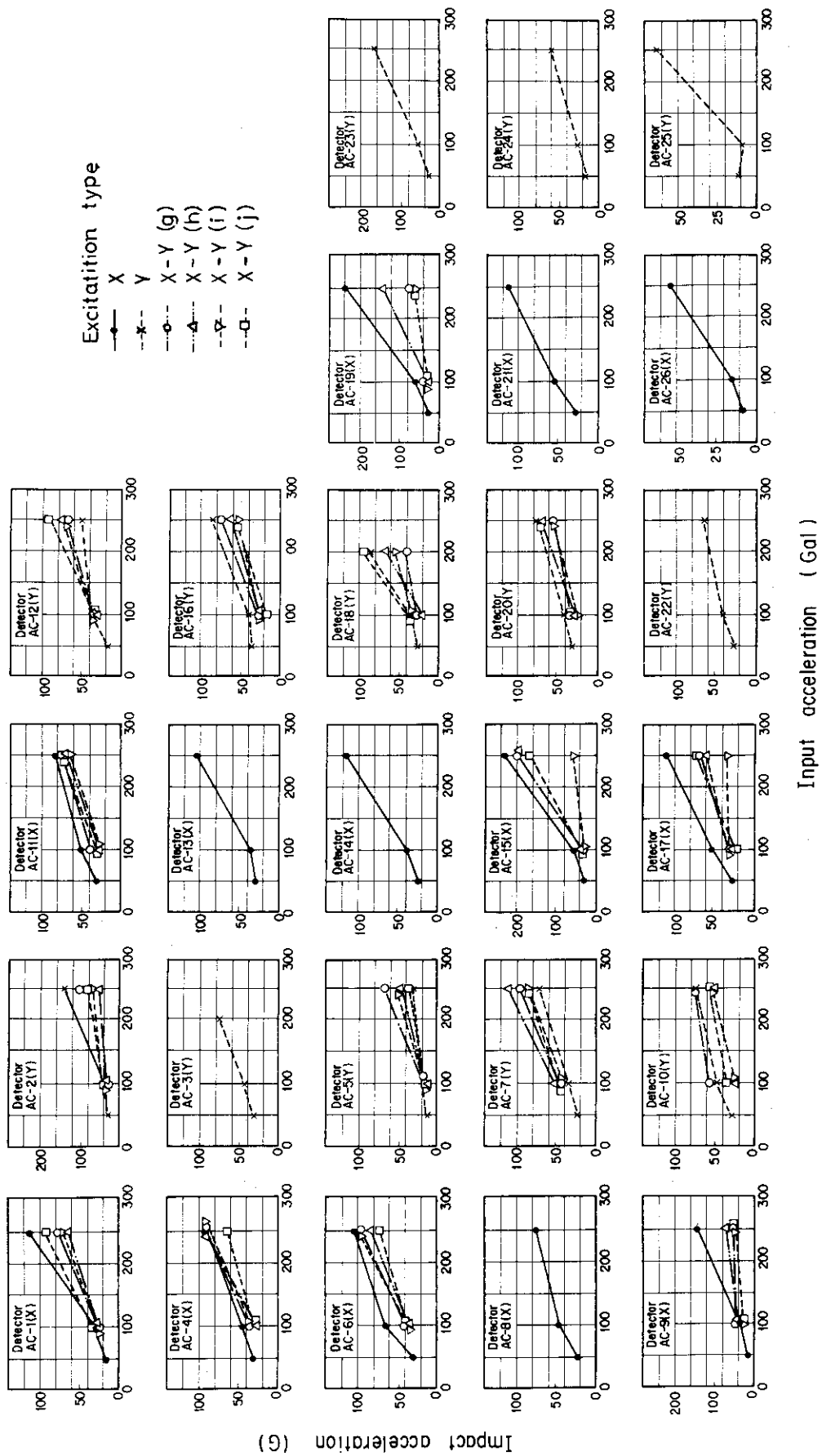


Fig. 5.32 Effect of input acceleration on impact acceleration
(Hard support, With reflector key)

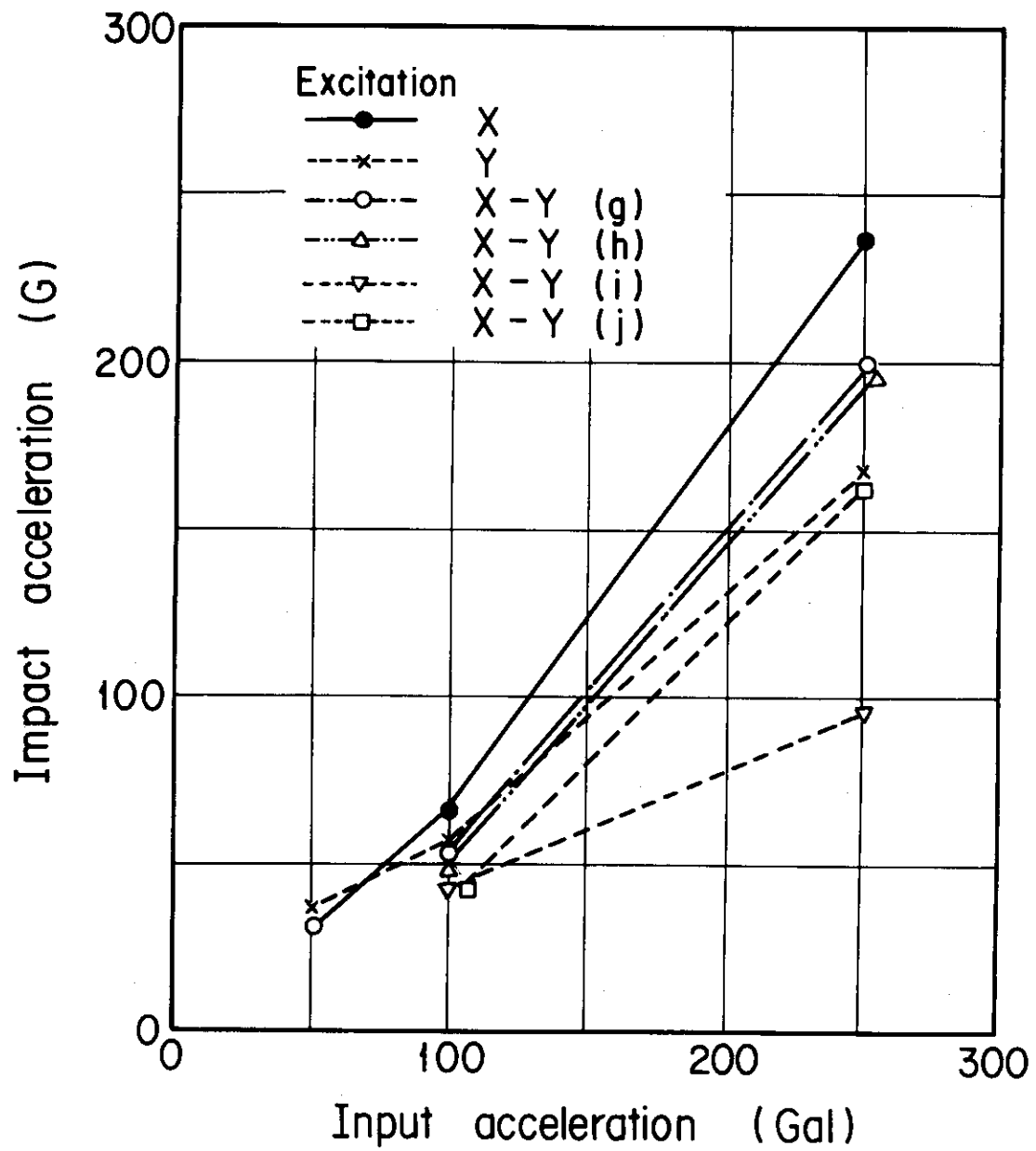


Fig. 5.33 Impact acceleration as a function of input acceleration in case of sinusoidal excitation

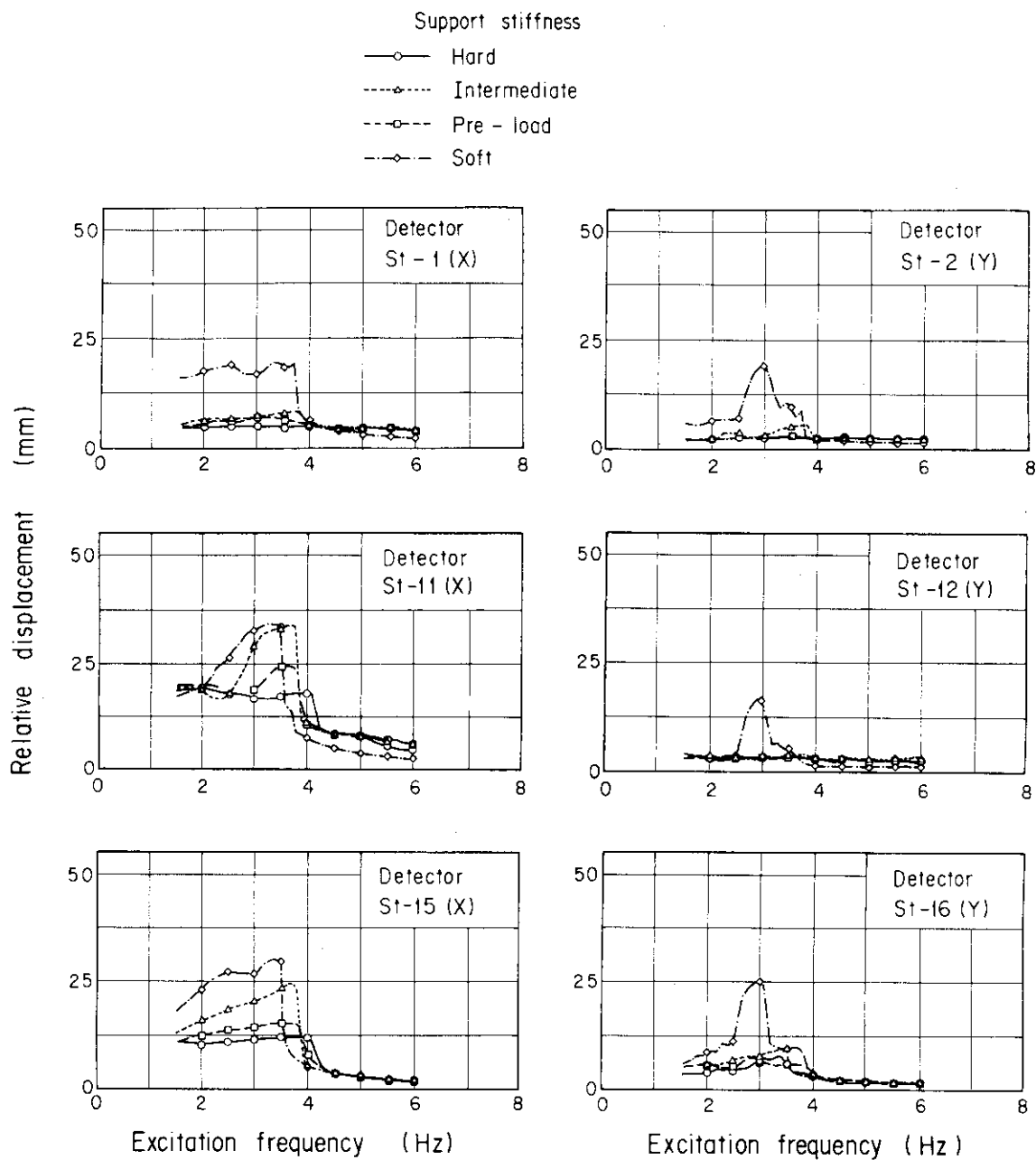


Fig. 5.34 Effect of support stiffness on relative displacement characteristics (Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, Excitation X-direction, With reflector key)

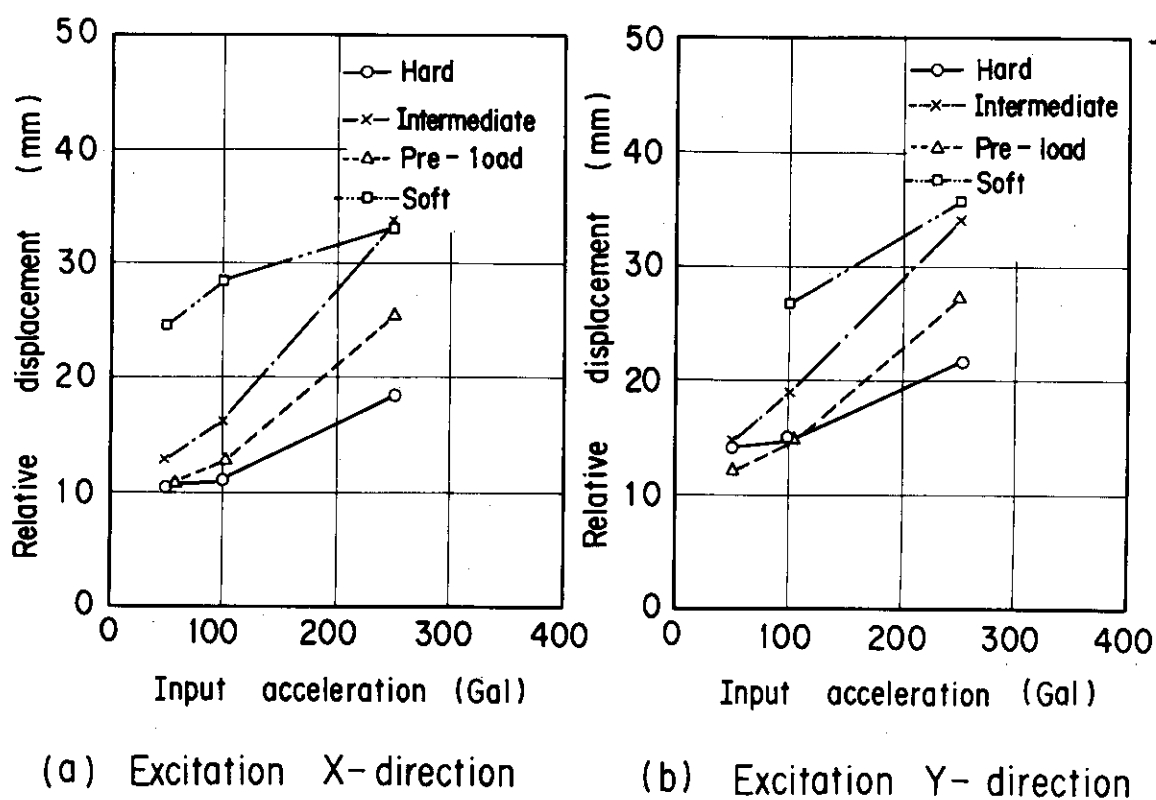


Fig. 5.35 Relative displacement as a function of input acceleration (With reflector key)

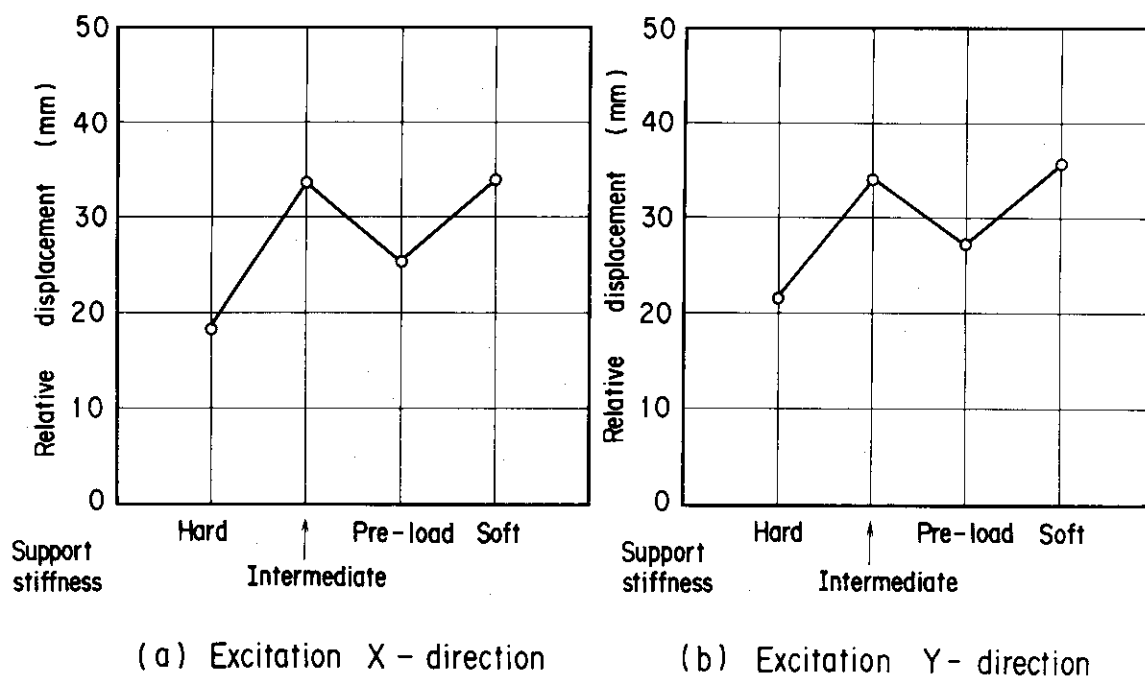


Fig. 5.36 Maximum displacement vs. side support stiffness (Max. acceleration 250 Gal, With reflector key)

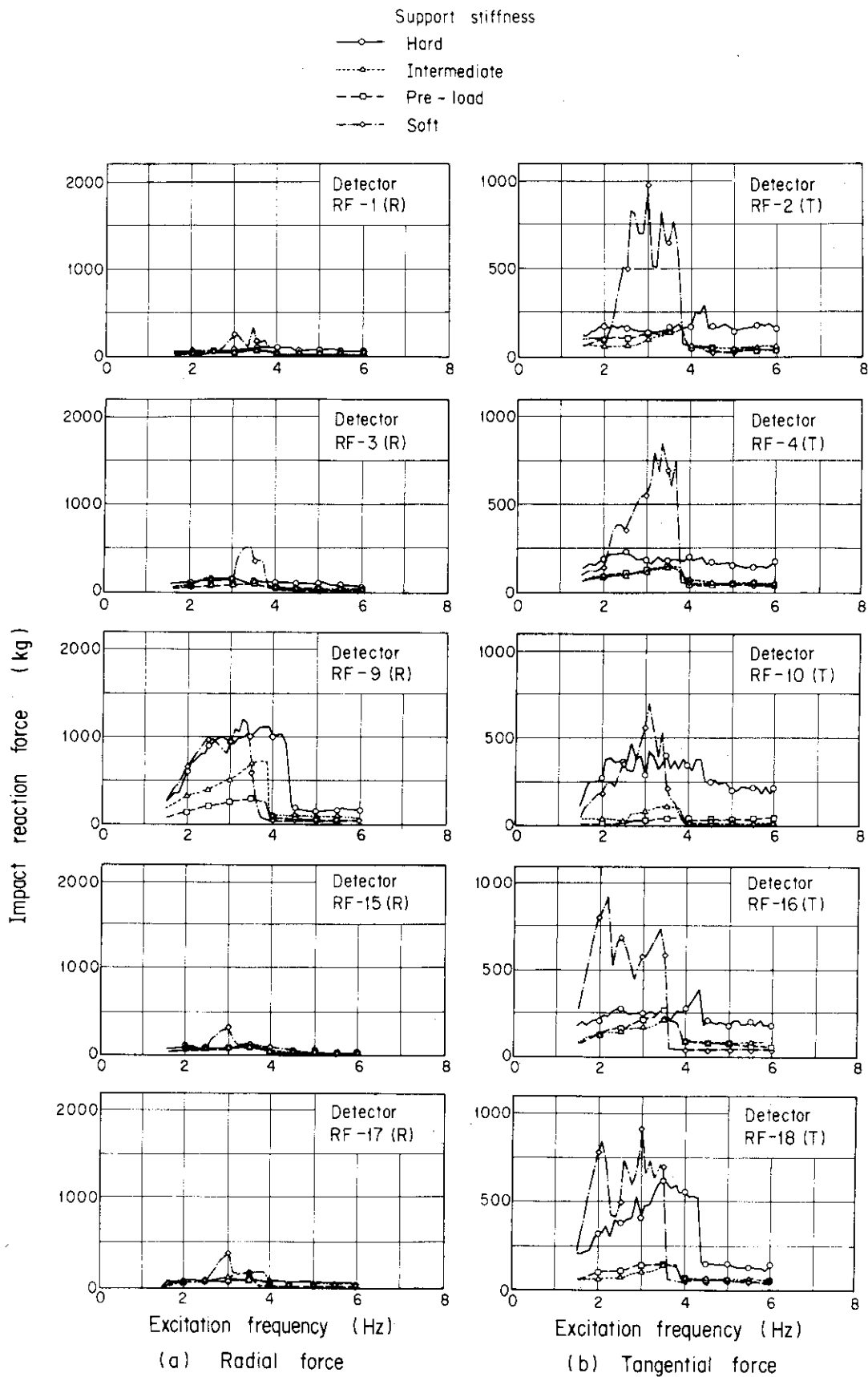


Fig. 5.37 Effect of support stiffness on impact reaction force characteristics (Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, Excitction X-direction, With reflector key)

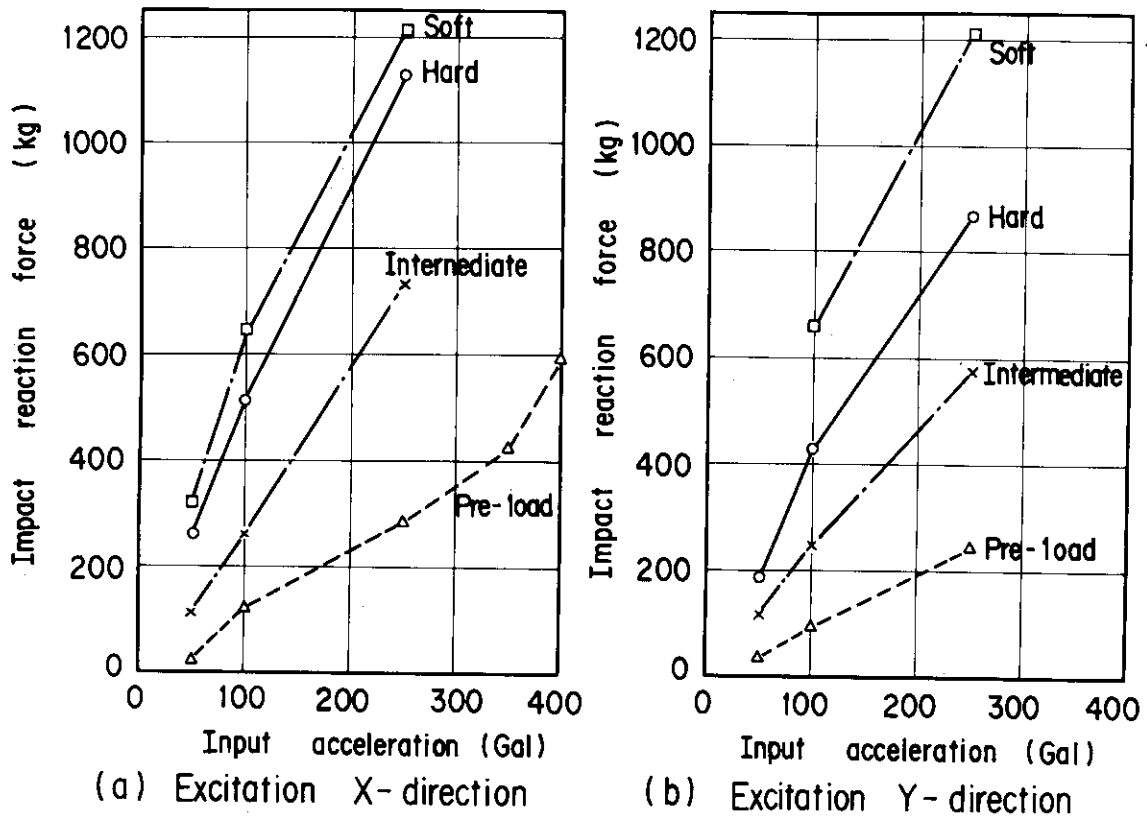


Fig. 5.38 Impact reaction force as a function of input acceleration (With reflector key)

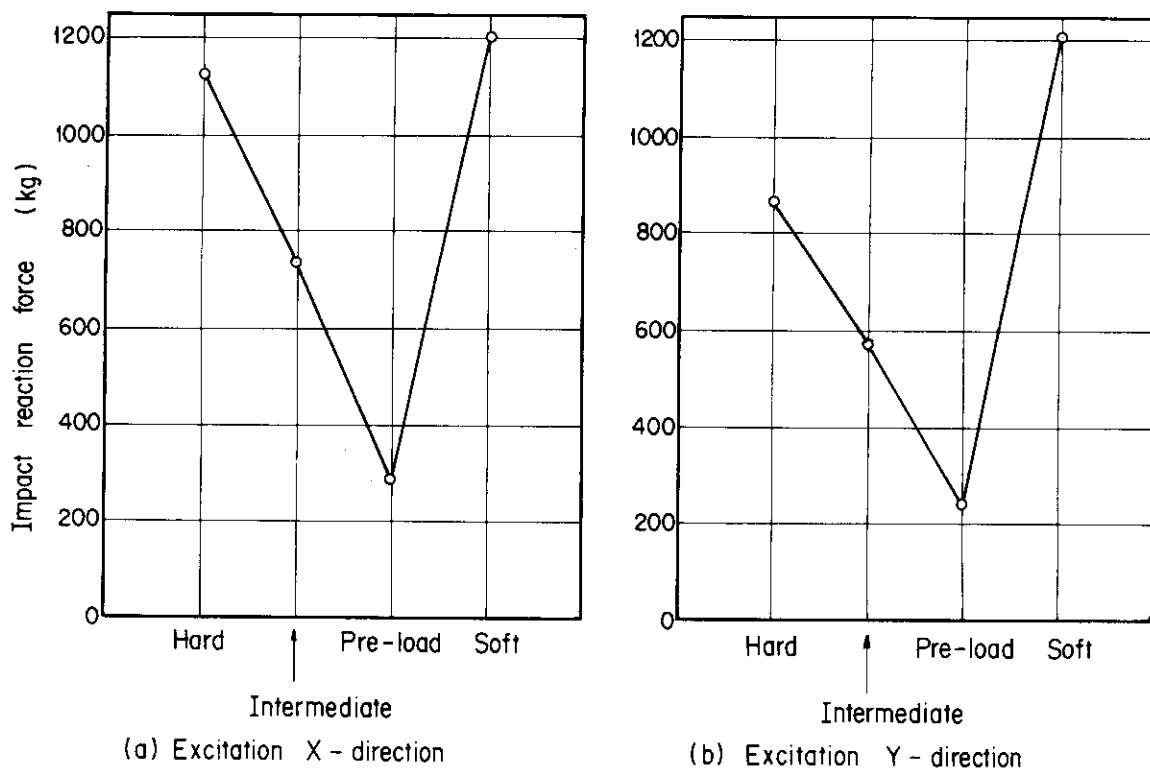


Fig. 5.39 Maximum impact reaction force vs. side support stiffness (Max. acceleration 250 Gal, With reflector key)

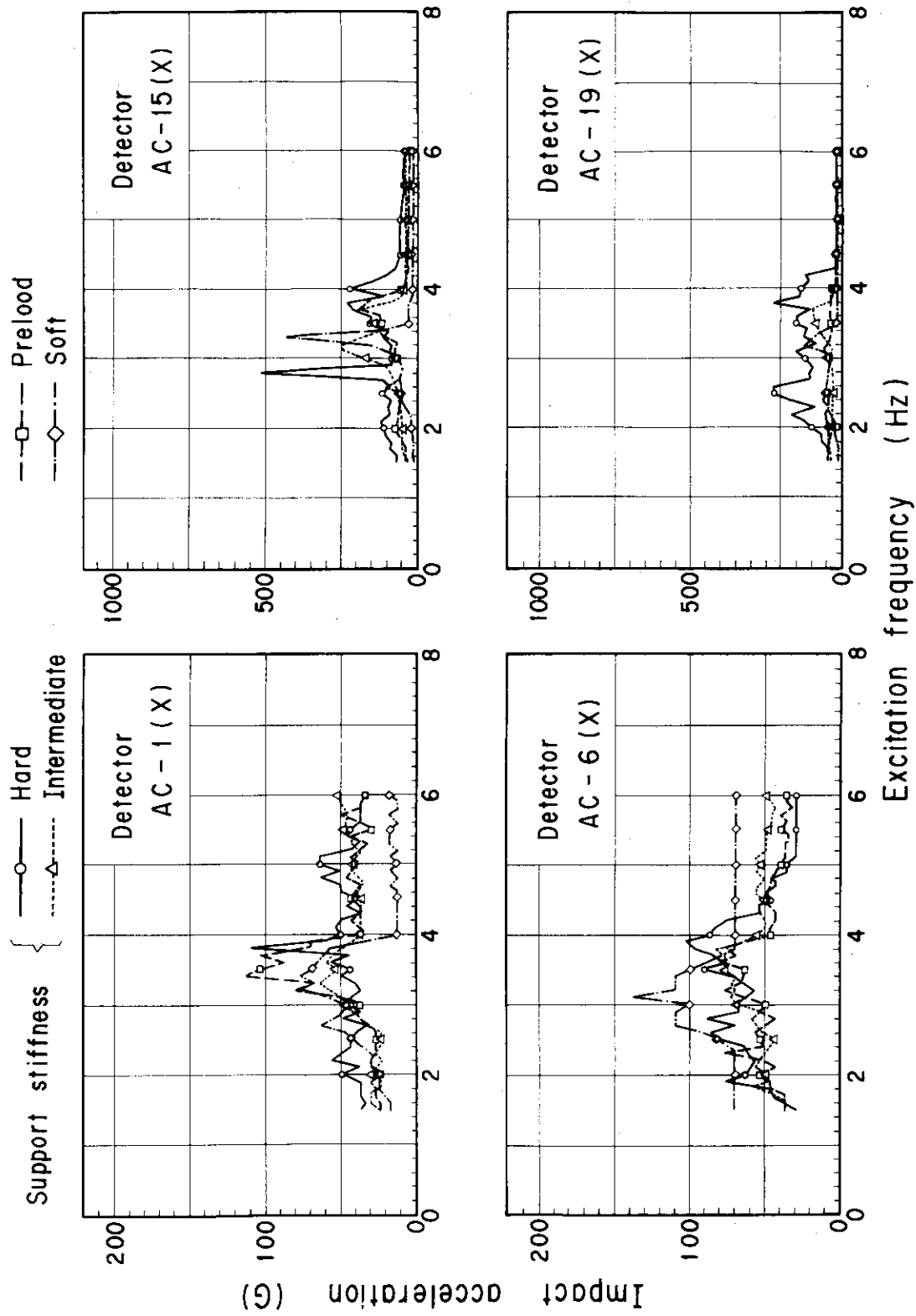


Fig. 5.40 Effect of support stiffness on impact acceleration characteristics (Sinusoidal wave, Max. acceleration 250 Gal, Excitation X-direction, With reflector key)

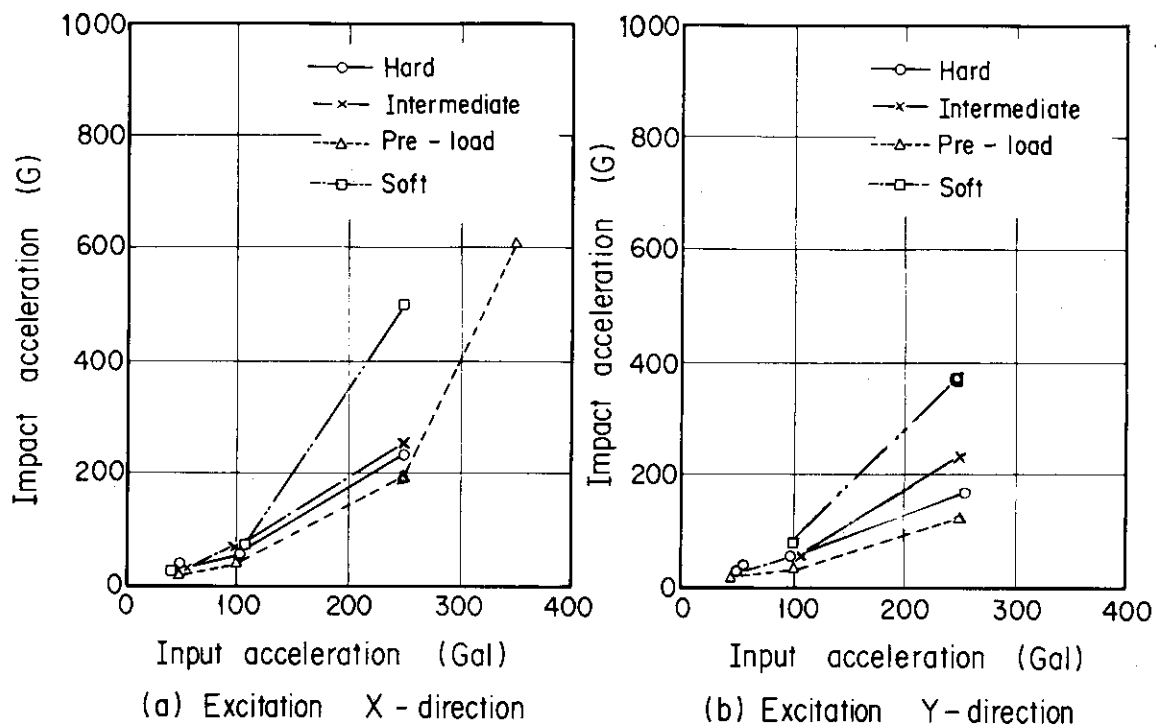


Fig. 5.41 Impact acceleration as a function of input acceleration
(With reflector key)

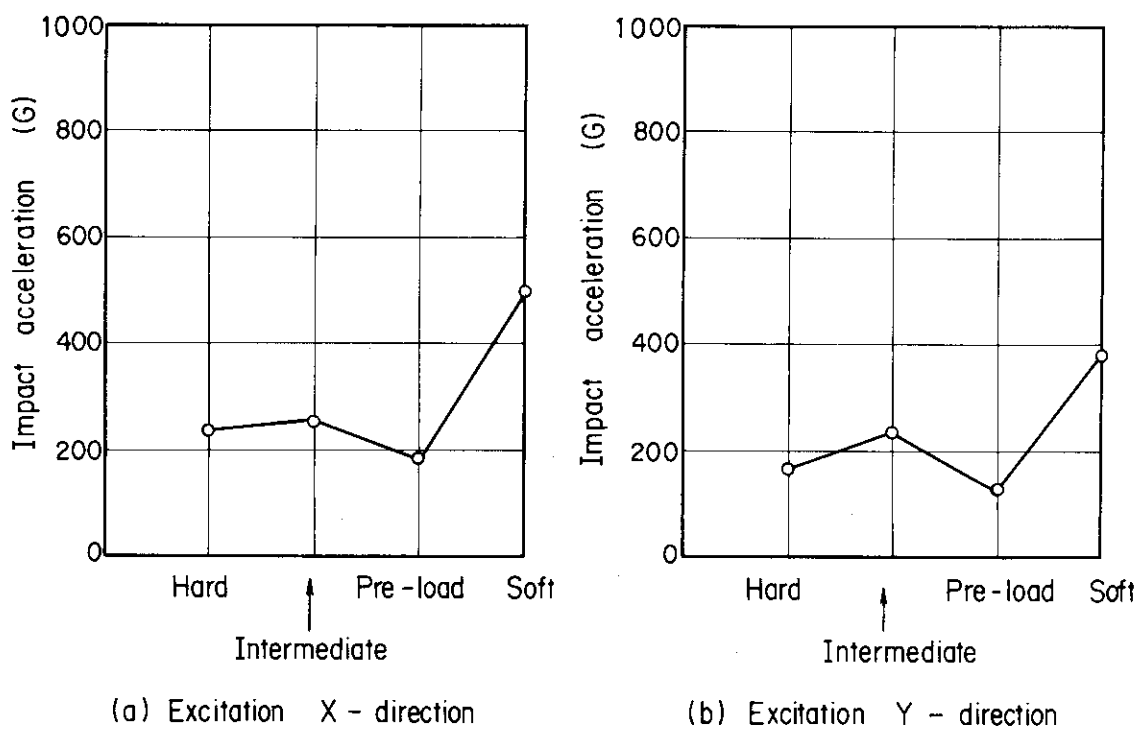


Fig. 5.42 Maximum impact acceleration vs. side support stiffness
(Max. acceleration 250 Gal, With reflector key)

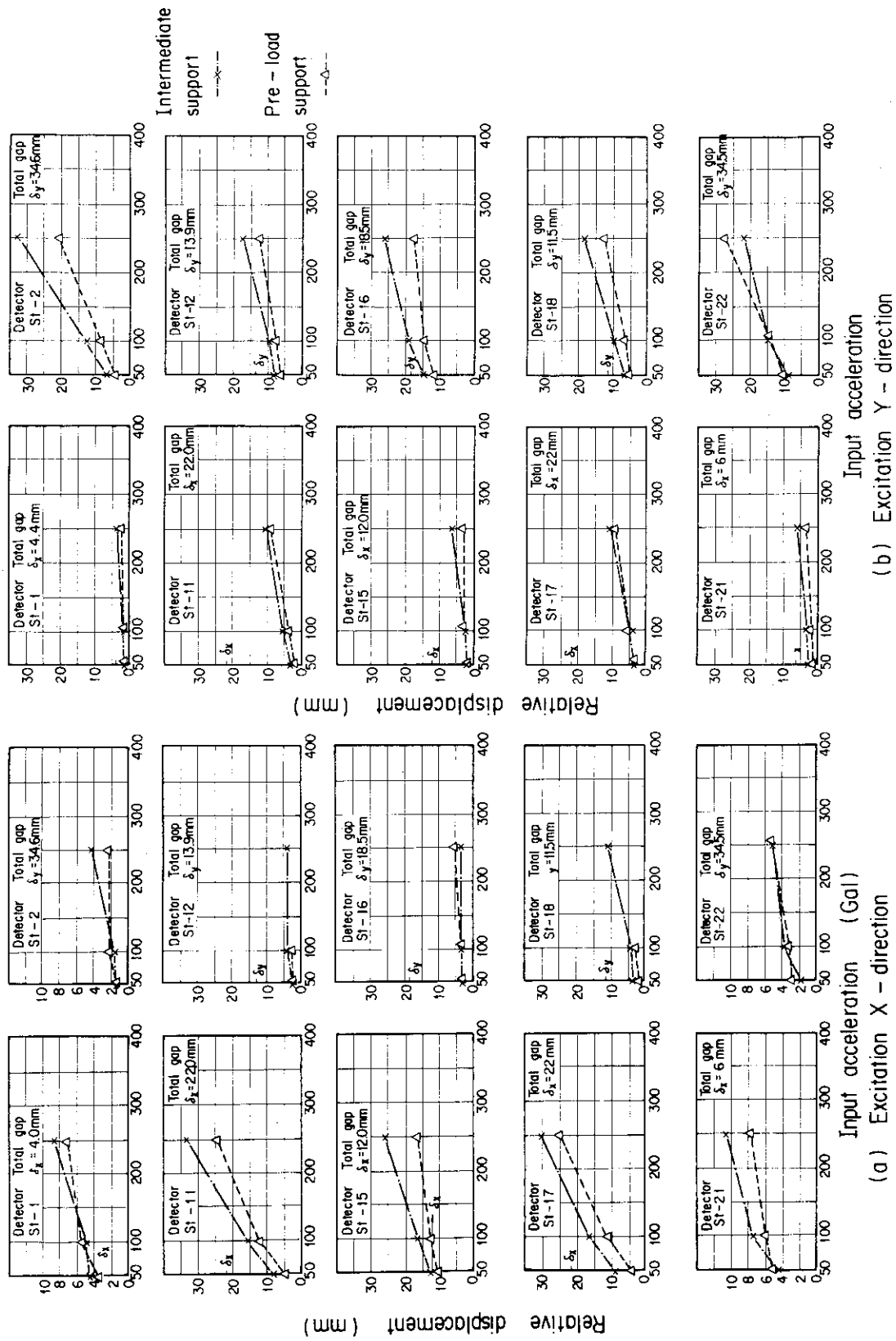


Fig. 5.43 Effect of pre-load on relative displacement (With reflector key)

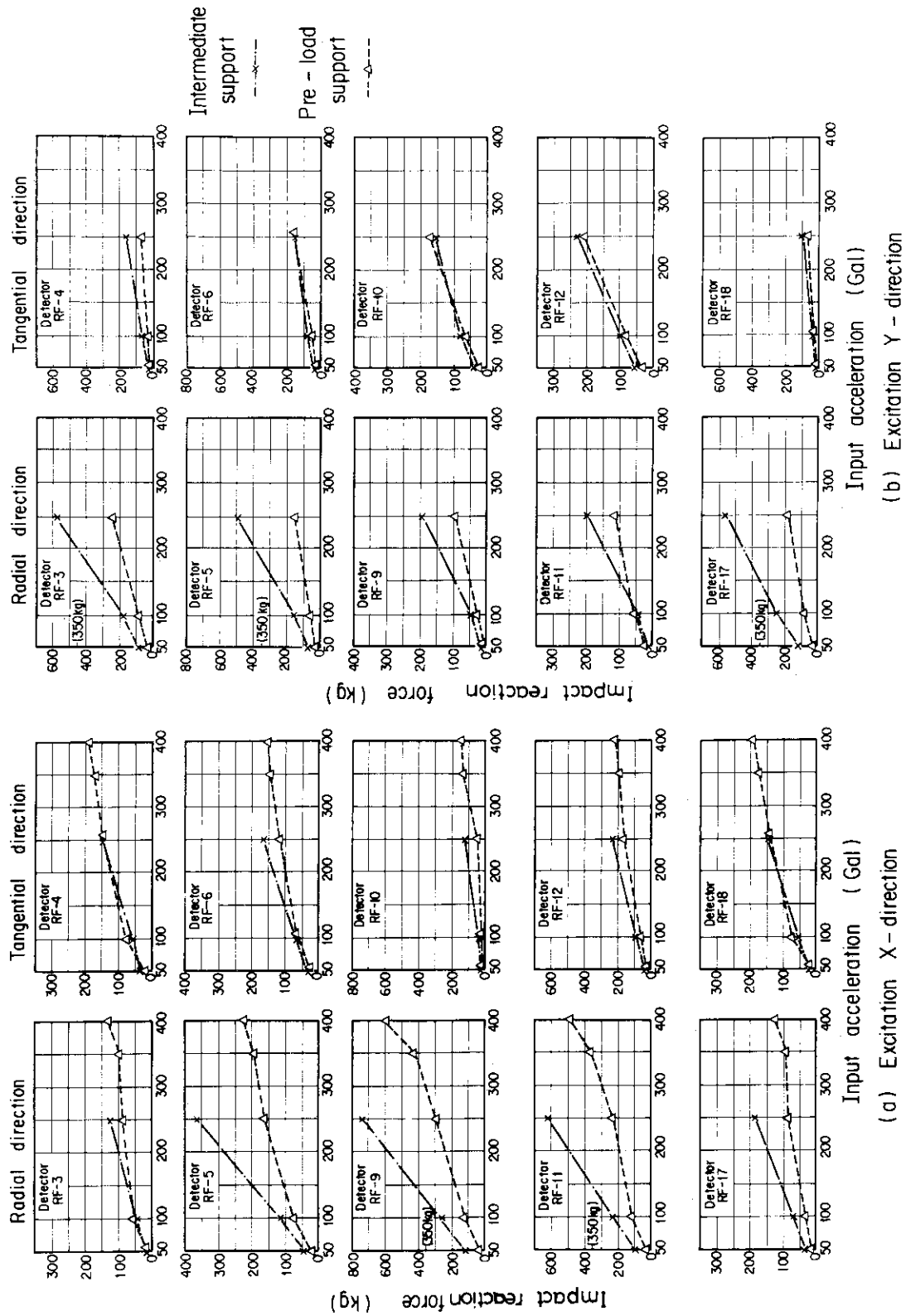


Fig. 5.44 Effect of pre-load on impact reaction force (With reflector key)

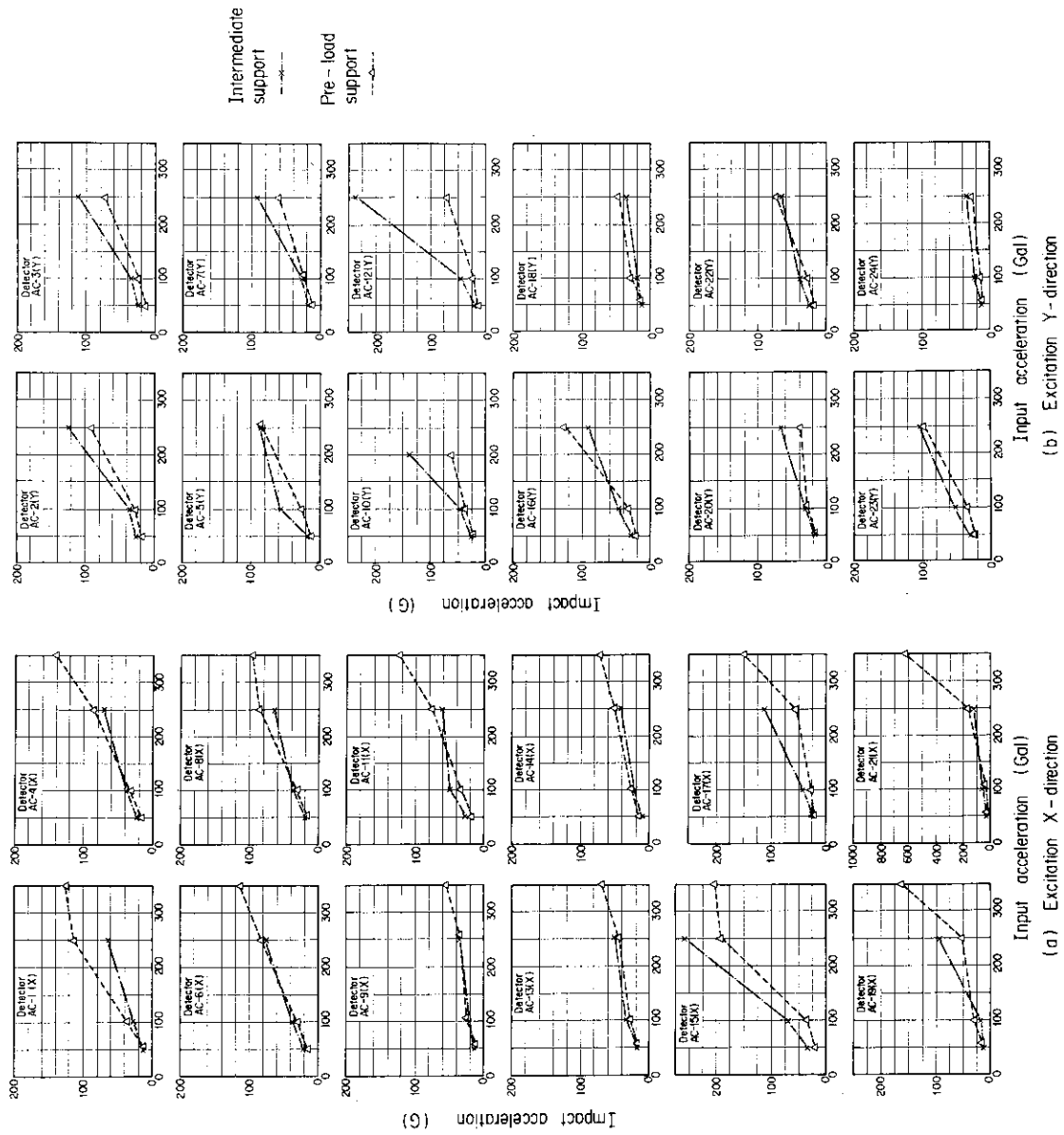


Fig. 5.45 Effect of pre-load on impact acceleration (With reflector key)

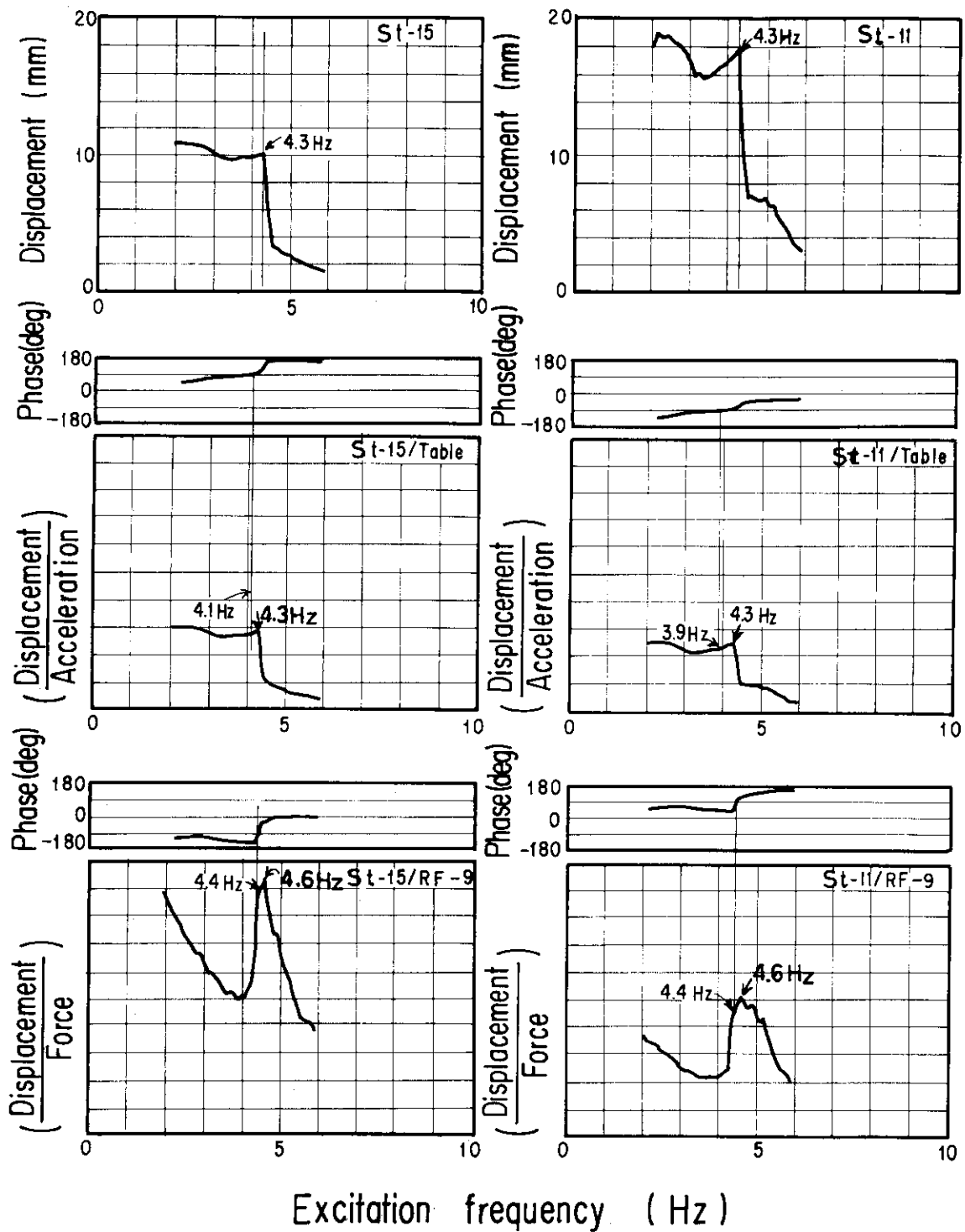


Fig. 5.46

Relationship between displacement and reaction force and between displacement and acceleration (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

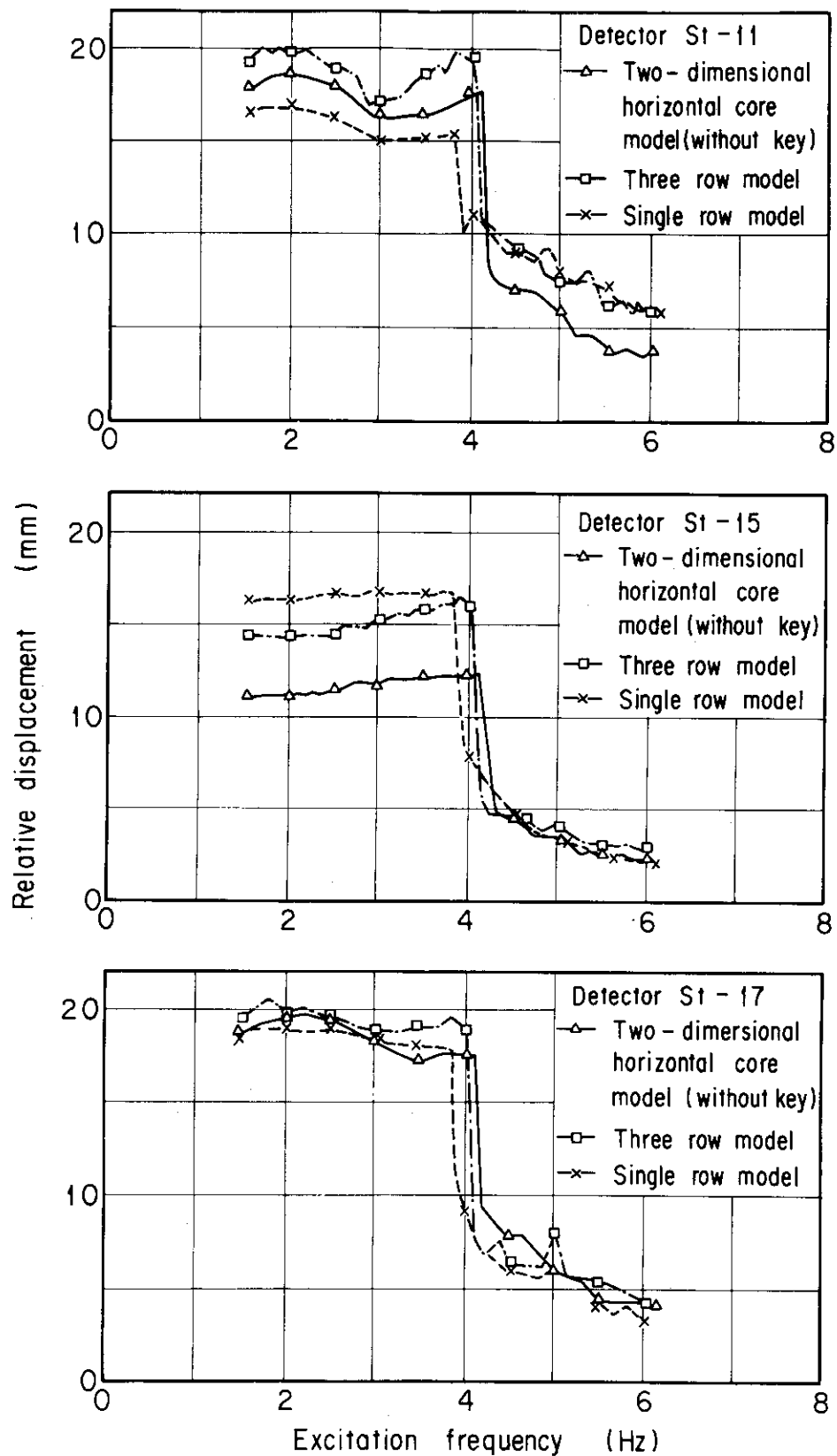


Fig. 5.47 Comparison between two-dimensional horizontal core model, three row model and single row model on relative displacement (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)

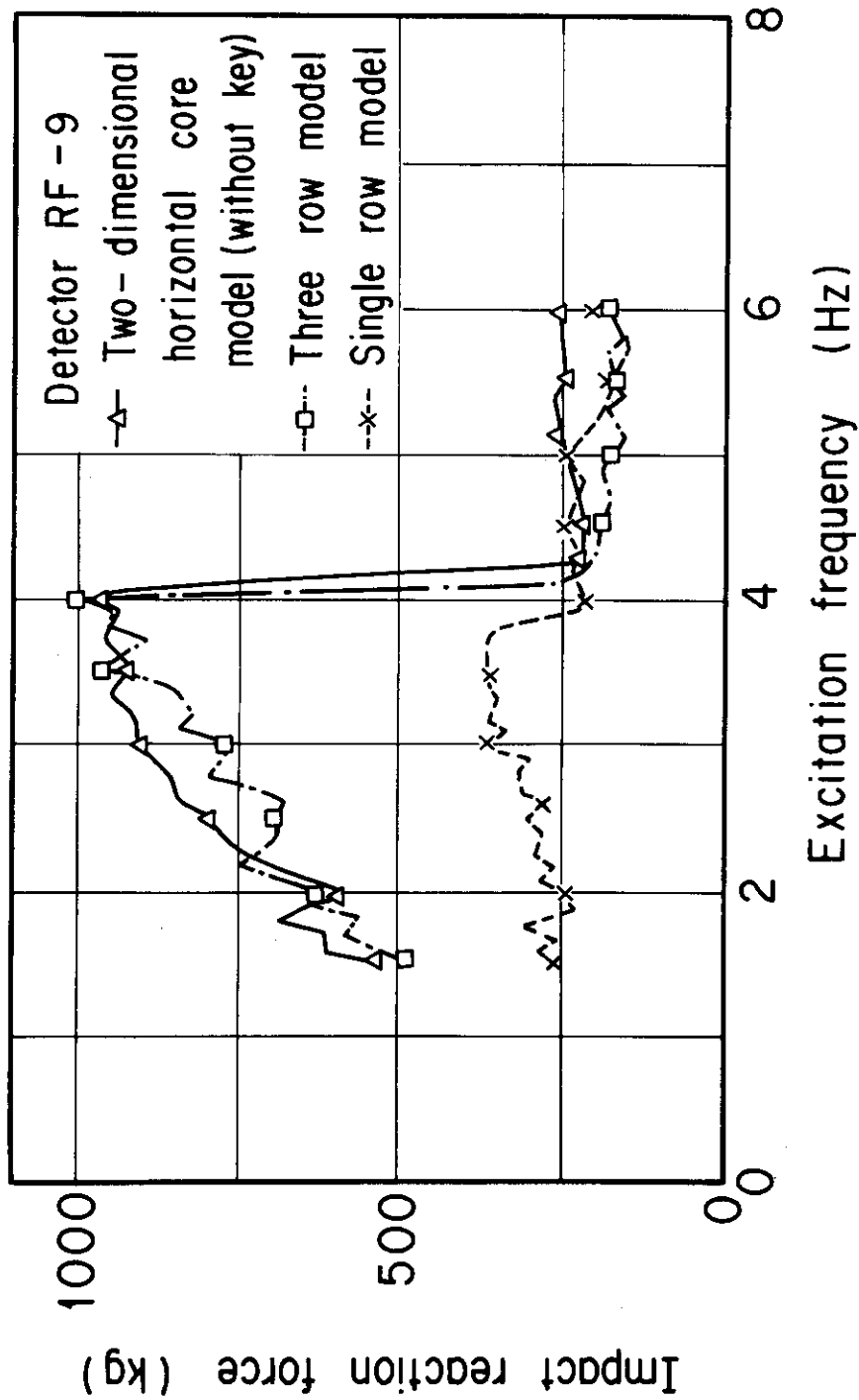


Fig. 5.48 Comparison between two-dimensional horizontal core model, three row model and single row model on impact reaction force (Excitation X-direction, Max. acceleration 250 Gal, Hard support)

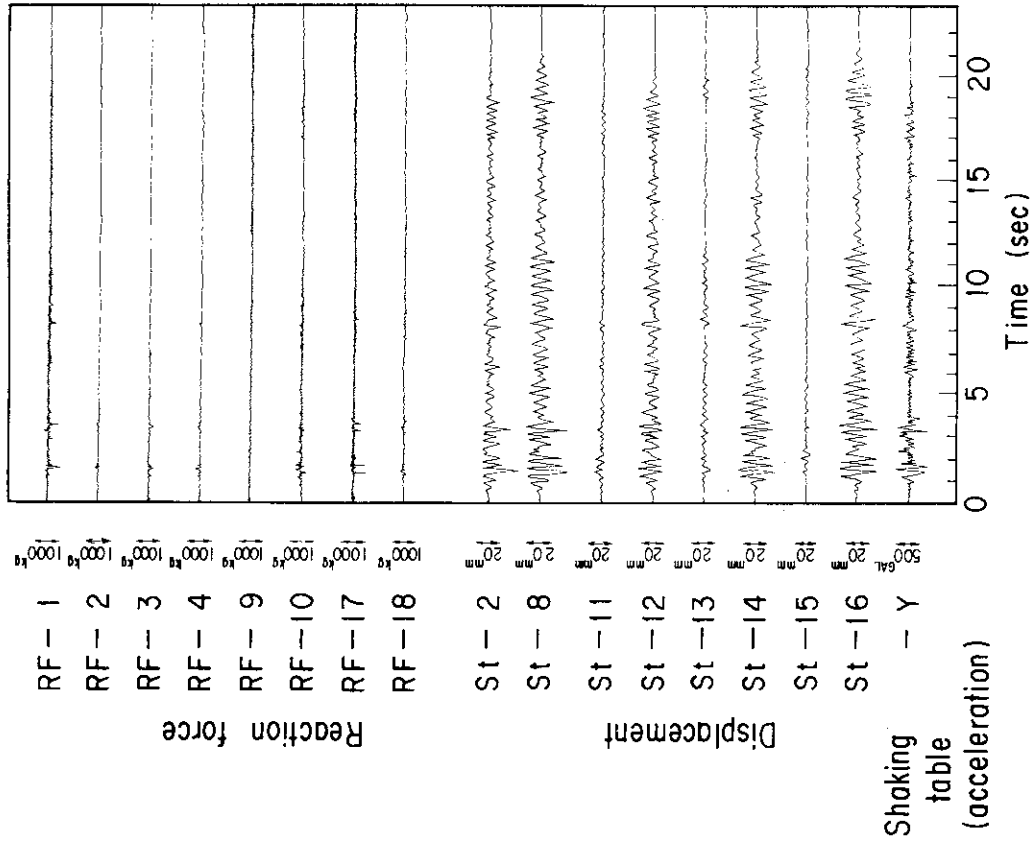


Fig. 5.50 Seismic wave response (El Centro 1940 NS Max. acceleration 500 Gal Y-direction Hard support, with reflector key)

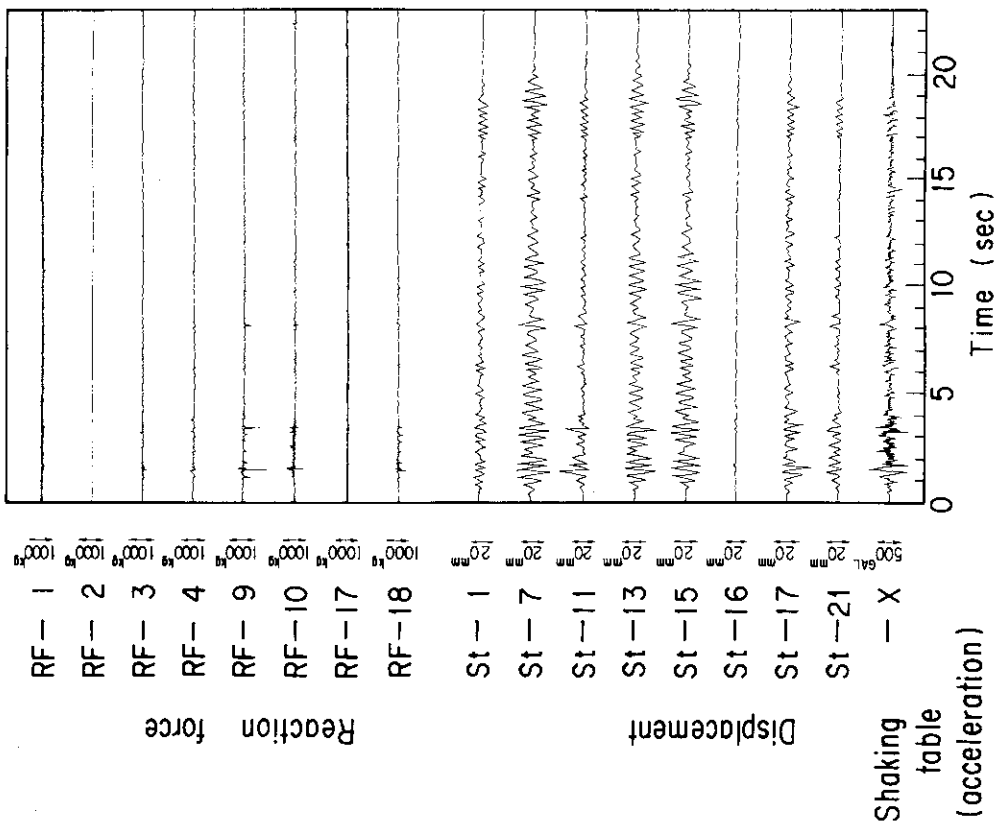


Fig. 5.49 Seismic wave response (El Centro 1940 NS Max. acceleration 500 Gal, X-direction Hard support, with reflector key)

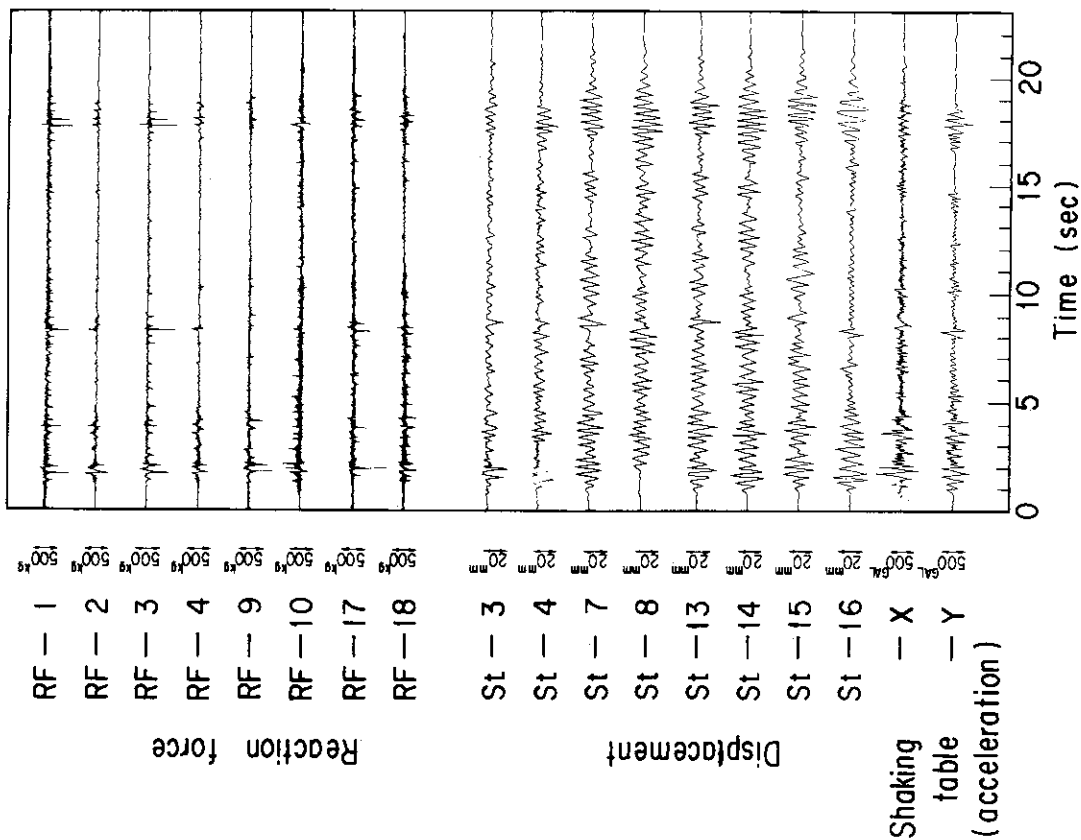


Fig. 5.51 Seismic wave response (E1 Centro 1940 NS, EW, Max. acceleration 500 Gal, Two-axes, Hard support, with reflector key)

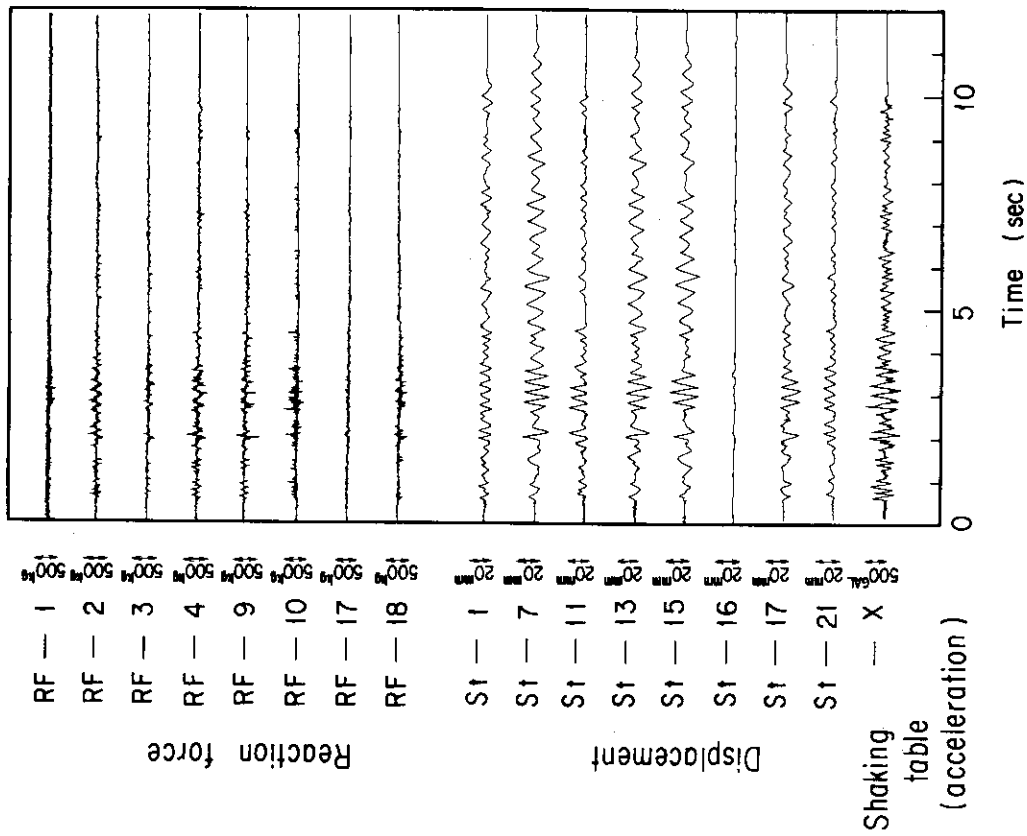


Fig. 5.52 Seismic wave response (JAERI PR Hall 1964 EW, Max. acceleration 500 Gal, X-direction, Hard support, With reflector key)

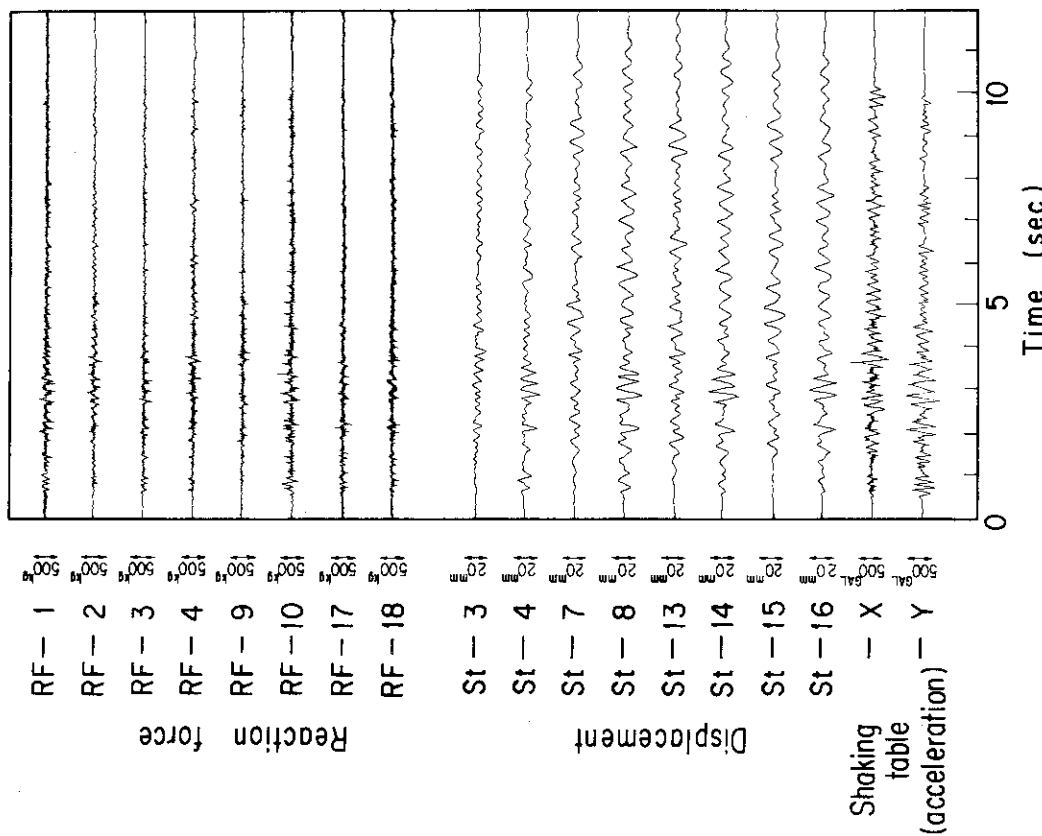


Fig. 5.54 Seismic wave response (JAERI PR Hall 1964 EW, 1964 NS, Max. acceleration 500 Gal, Two-axes excitation, Hard support, With reflector key)

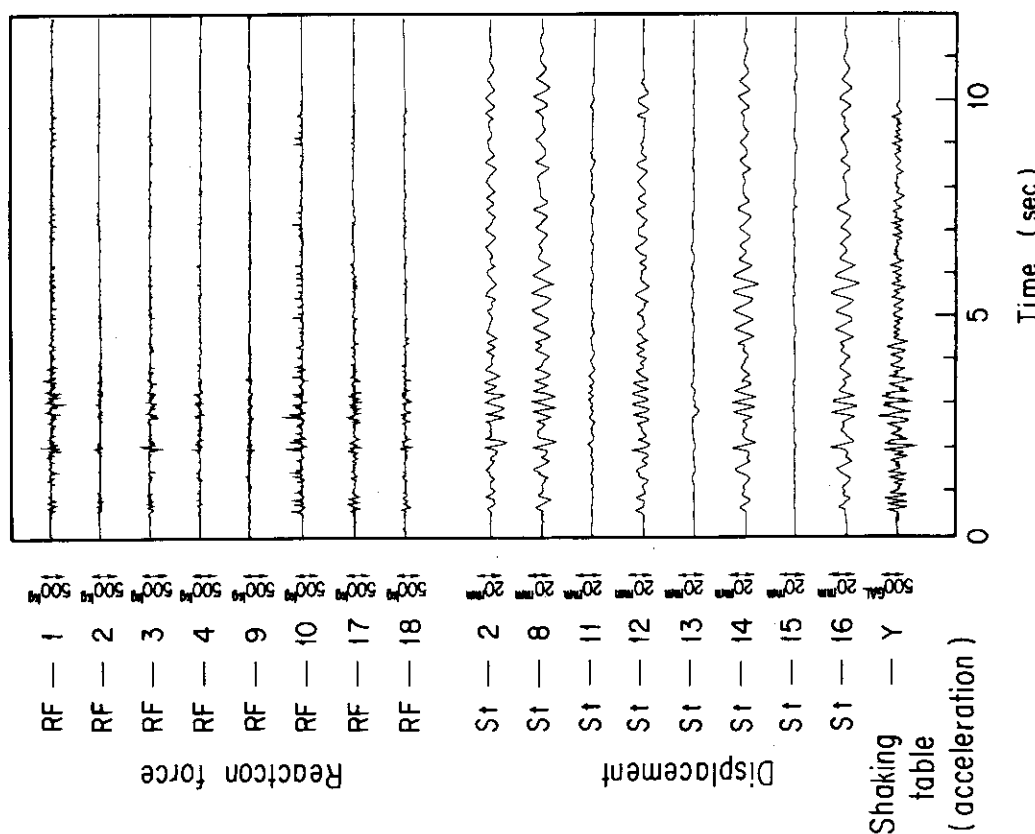


Fig. 5.53 Seismic wave response (JAERI PR Hall 1964 EW, Max. acceleration 50 Gal, Y-direction, Hard support, With reflector key)

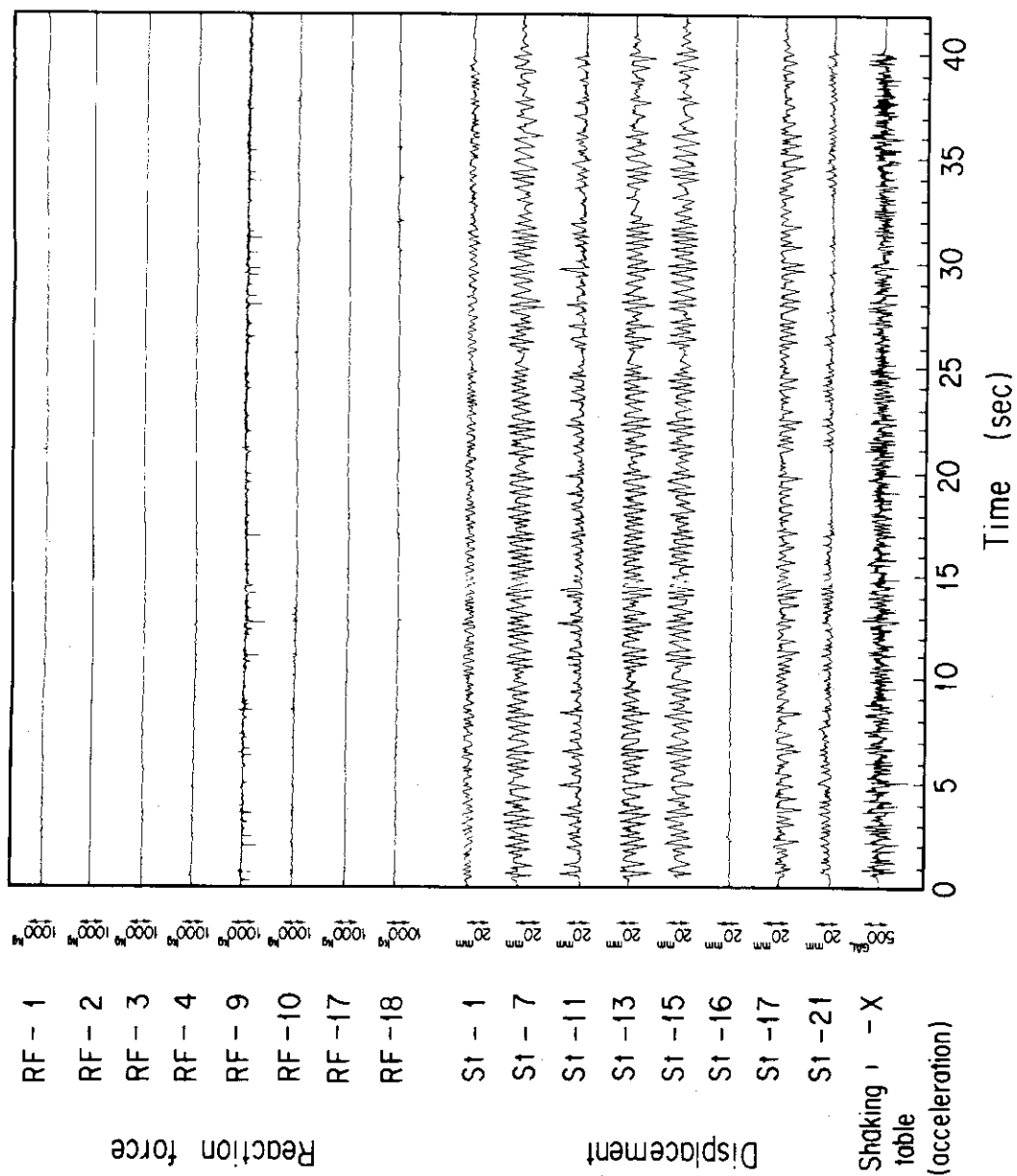


Fig. 5.55 Seismic wave response (White noise, Max. acceleration 500 Gal, X-direction, Hard support, with reflector key)

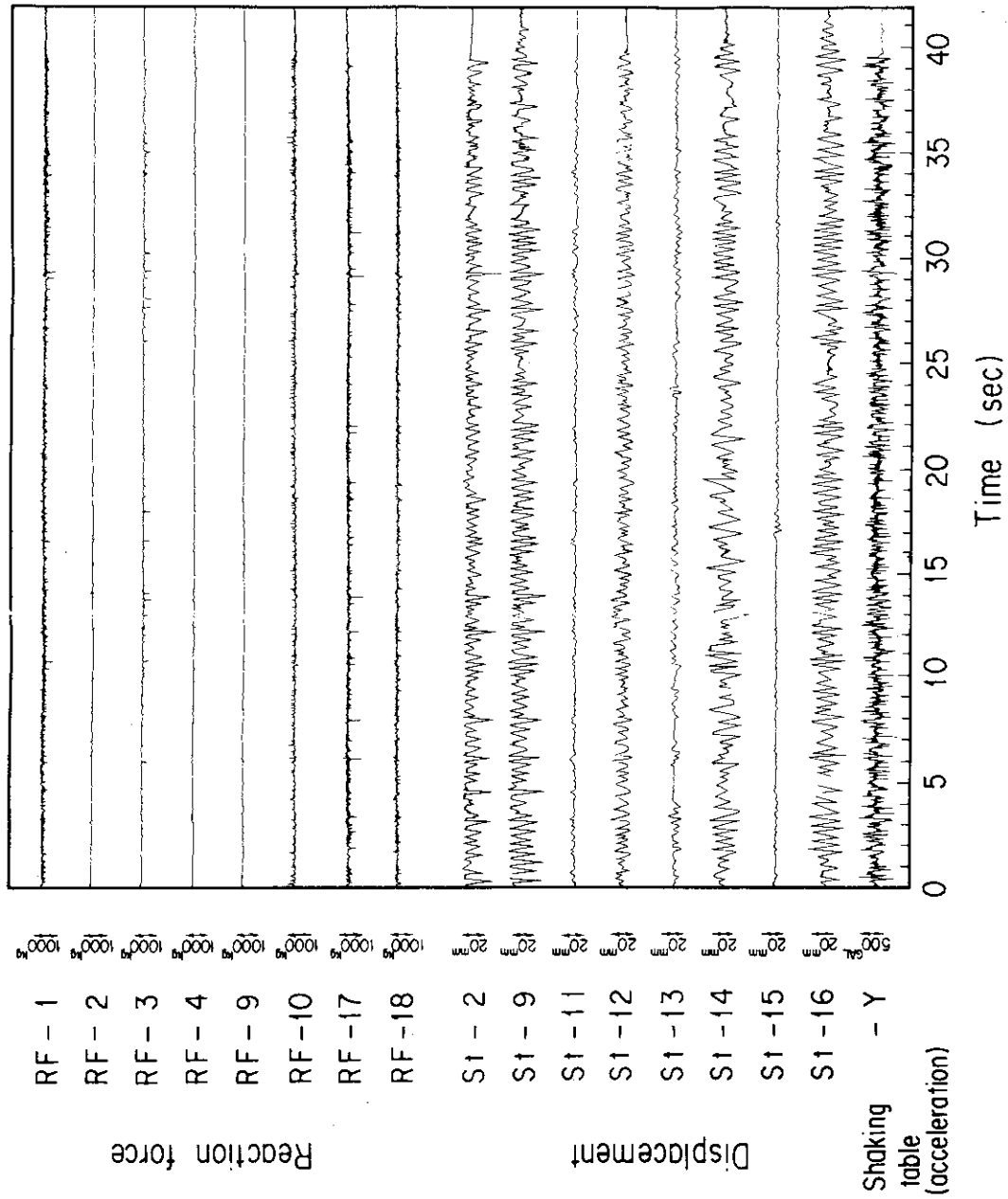
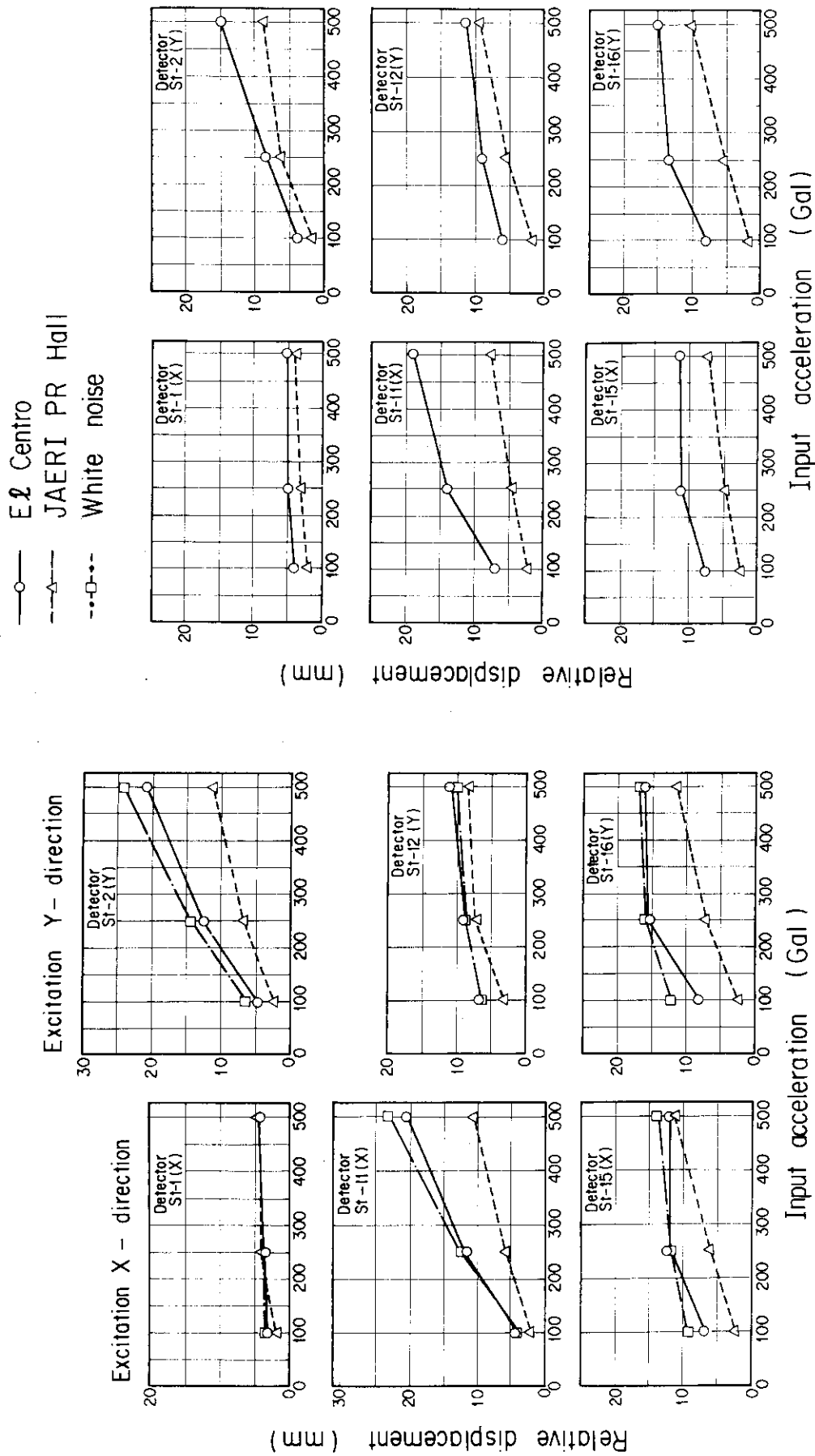


Fig. 5.56 Seismic wave response (White noise, Max. acceleration 500 Gal, Y-direction, Hard support, With reflector key)



(a) Single - axis excitation

(b) Two - axis simultaneous excitation

Fig. 5.57 Relative displacement vs. input acceleration (Random wave response, Hard support, With reflector key)

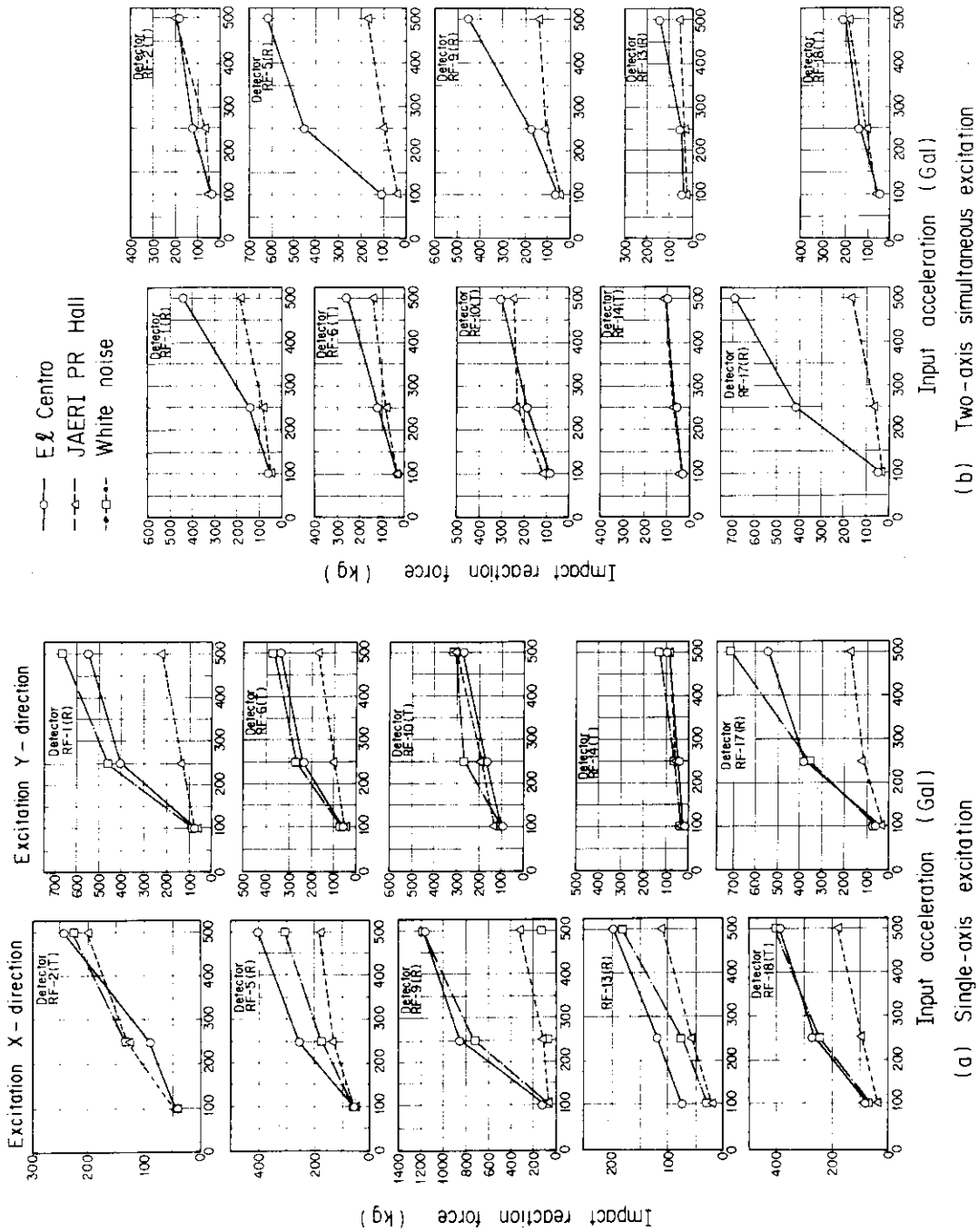


Fig. 5.58 Impact reaction force vs. input acceleration (Random wave response, Hard support, With reflector key)

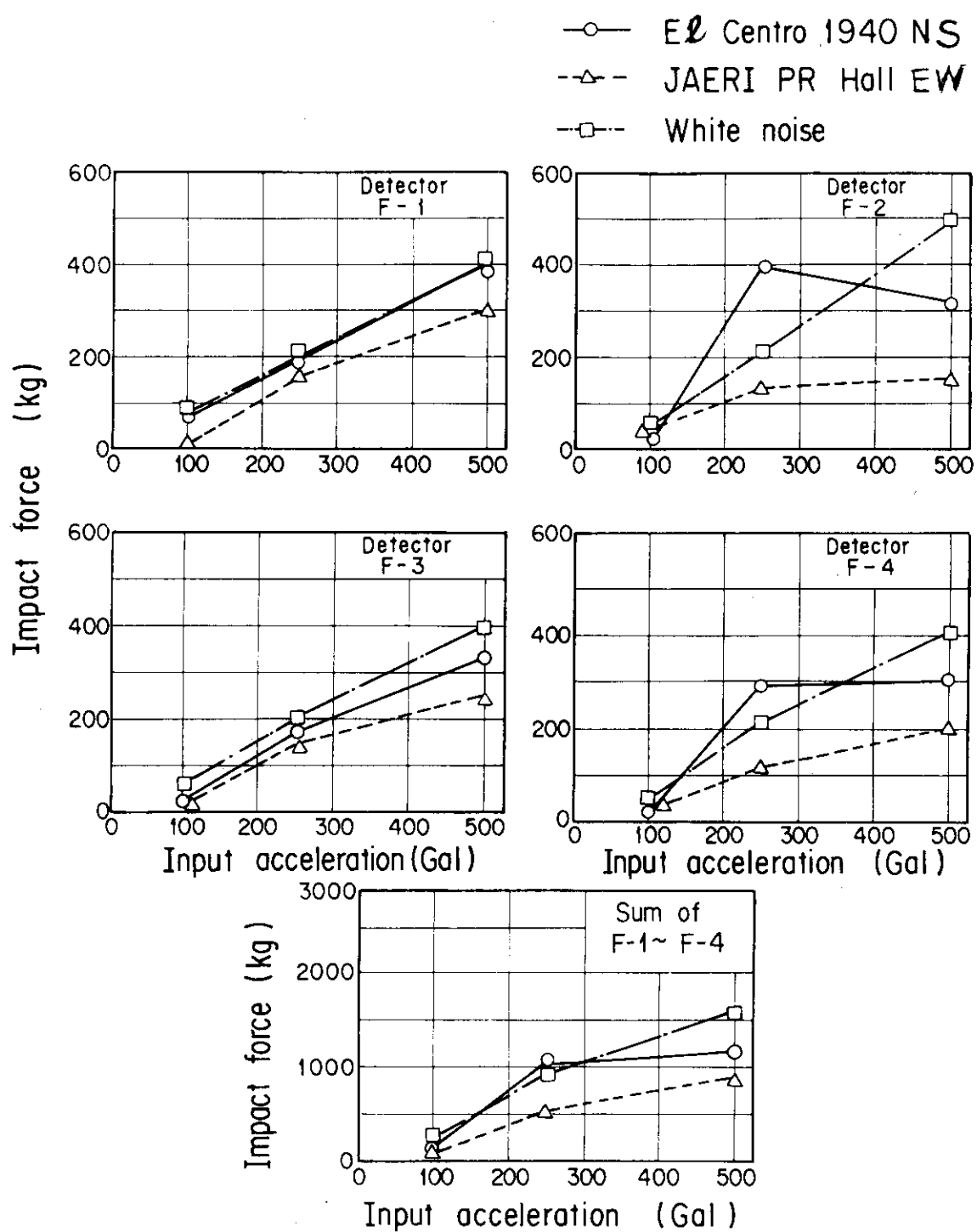
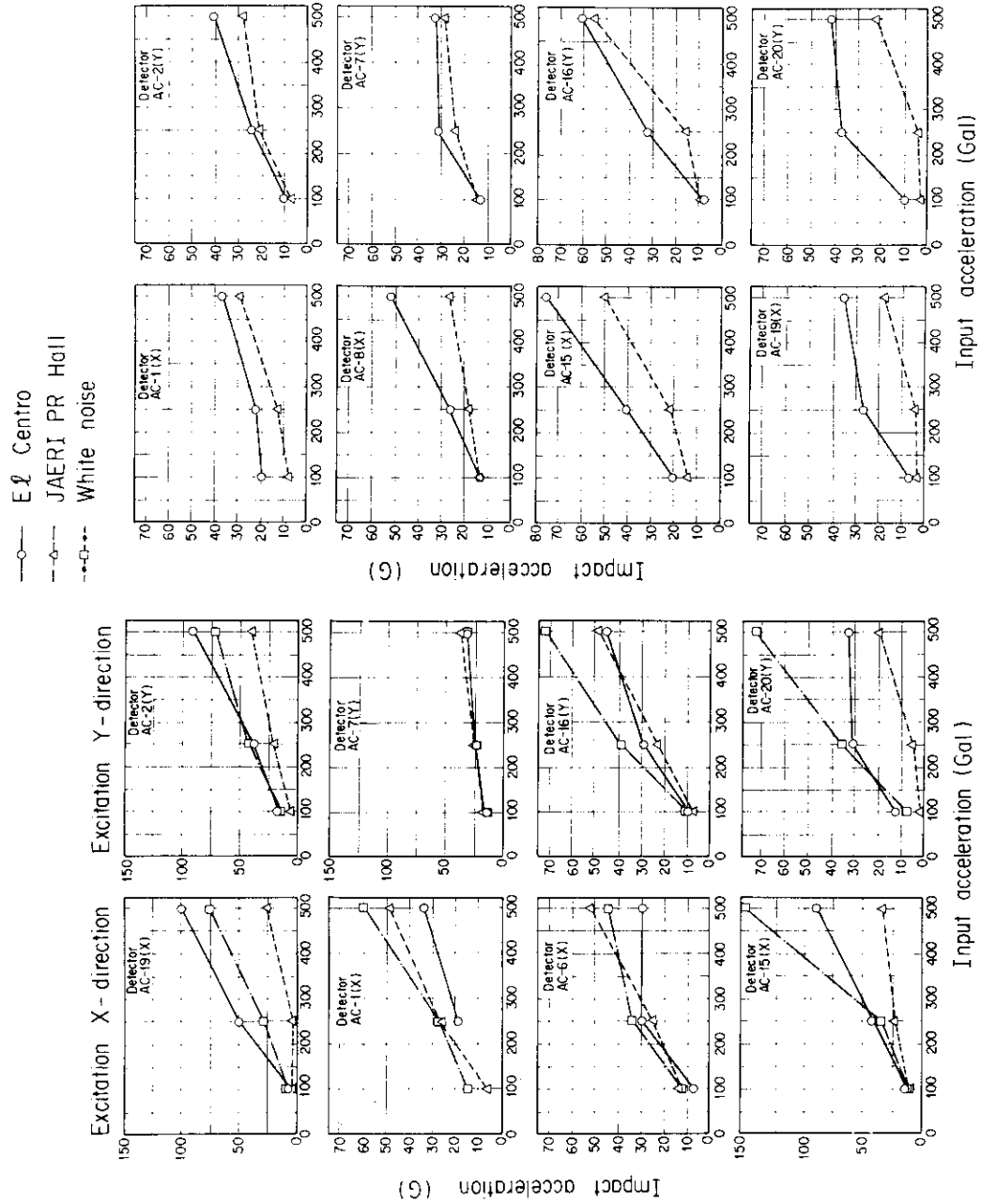


Fig. 5.59

Impact force vs. input acceleration (Random wave response, Excitation X-direction, Hard support, With reflector key)



(a) Single-axis excitation
 (b) Two-axis simultaneous excitation

Fig. 5.60 Impact acceleration vs. input acceleration (Random wave response, Hard support, With reflector key)

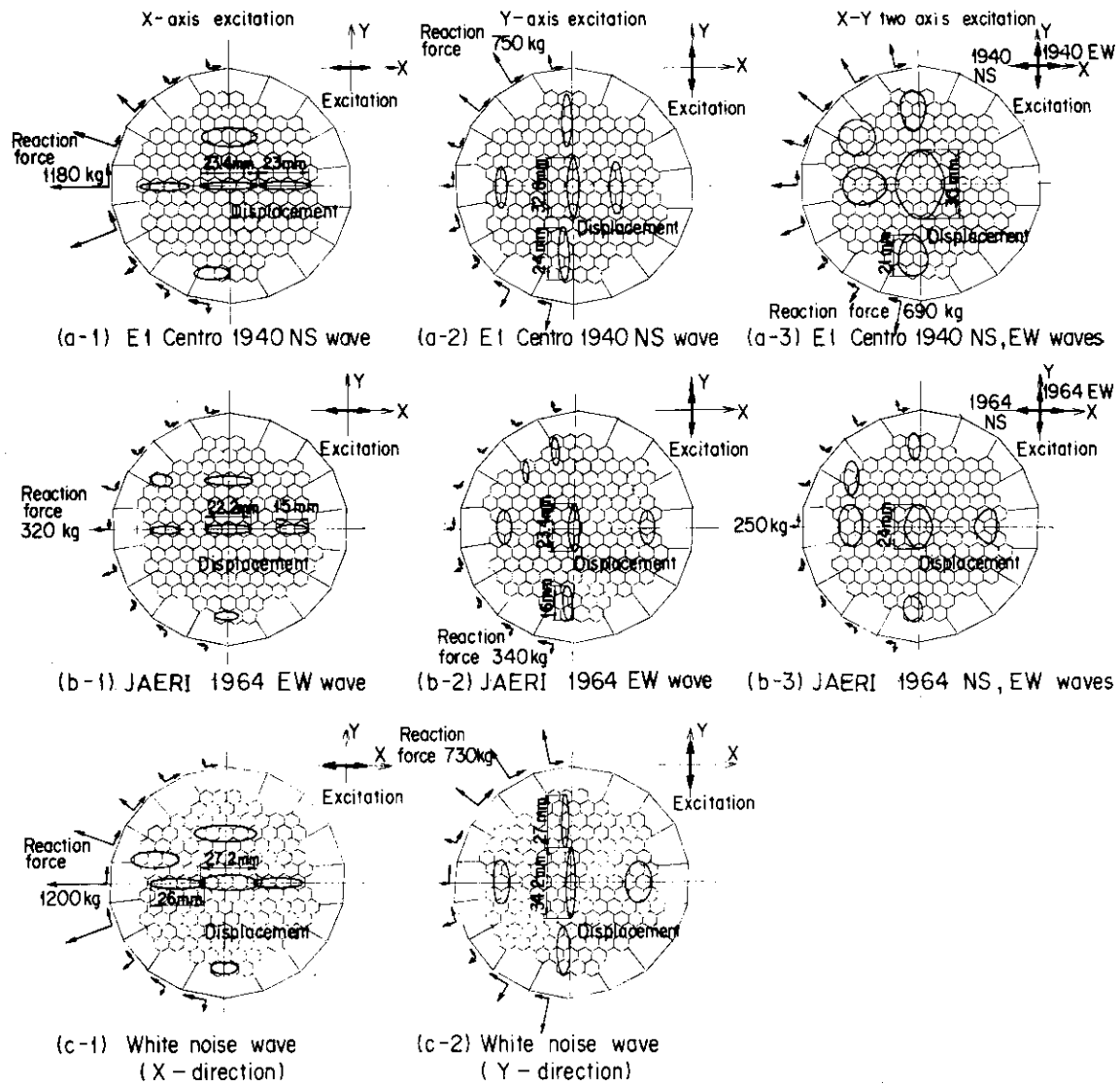


Fig. 5.61 Effect of input wave on relative displacement and impact reaction force distribution in core (Max. acceleration 500 Gal)

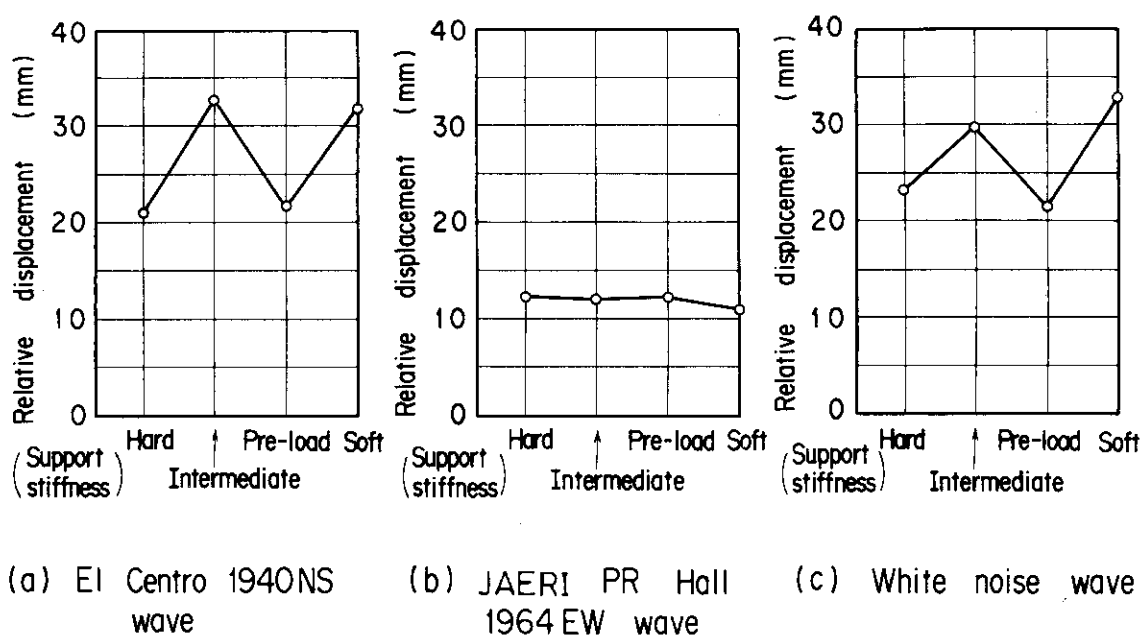


Fig. 5.62 Maximum displacement vs. support stiffness and seismic wave (Excitation X-direction, Max. acceleration 500 Gal)

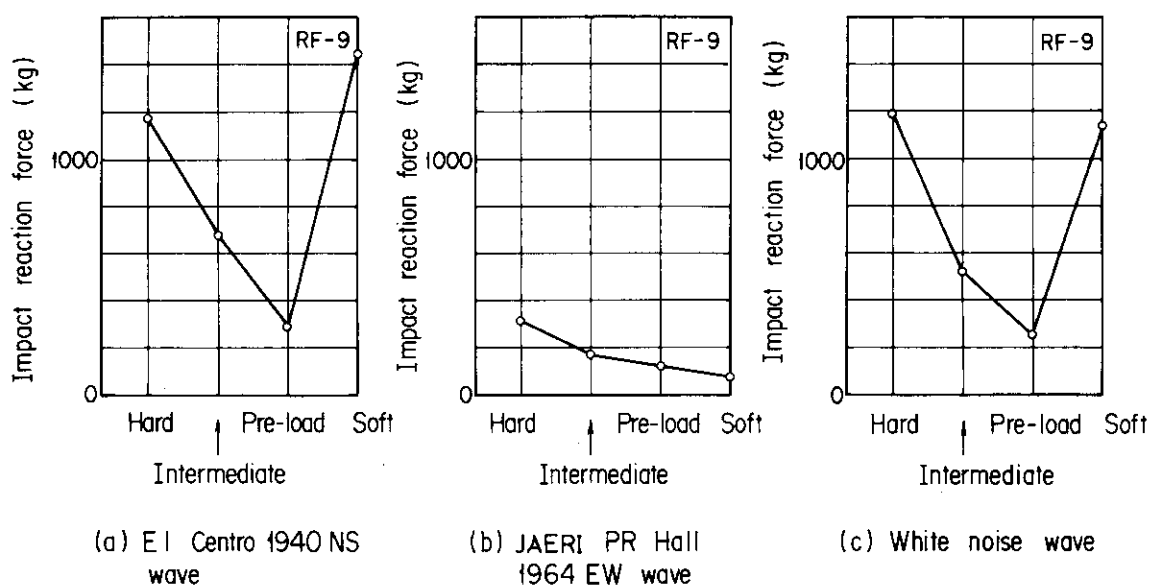


Fig. 5.63 Maximum impact reaction force vs. support stiffness and seismic wave (Excitation X-direction, Max. acceleration 500 Gal)

6. 試験後検査

振動試験によって炉心周辺の側方固定ブロックの一部が損傷した。Fig. 6.1 は試験模型における損傷ブロックの位置を示す。損傷ブロックの炉心内の位置は次のとおりである。

- (1) 炉心燃料ブロックと衝突する側方固定ブロック（ブロック番号 RB-12；損傷箇所 Fig. 6.1 の C）
- (2) 側方固定ブロック間のキー溝（ブロック番号 RB-15；損傷箇所 Fig. 6.1 の A およびブロック番号 RB-14，損傷箇所 Fig. 6.1 の B）

Fig. 6.2 は損傷した側方固定ブロックの破損状態を図示したものであり，破損場所はブロックのコーナ部分，特に鋭角の場所に発生している。

損傷が発生したと考えられる試験条件は，試験模型については，側方固定ブロックの支持剛性が弱の場合であり，加振条件は最大加振加速度 250 Gal の正弦波加振における場合であり，最大の衝突力が作用する場合であろう。これらの損傷は次の原因によるものと考えられる。(1)試験模型を製作するため，実際の側方固定ブロックの寸法よりも高さ方向に薄く製作したことによる。(2)実際には考えられない数万回のくり返し荷重によって疲労破損した。よって実際の炉心では，このような損傷は生じないものと考えられる。

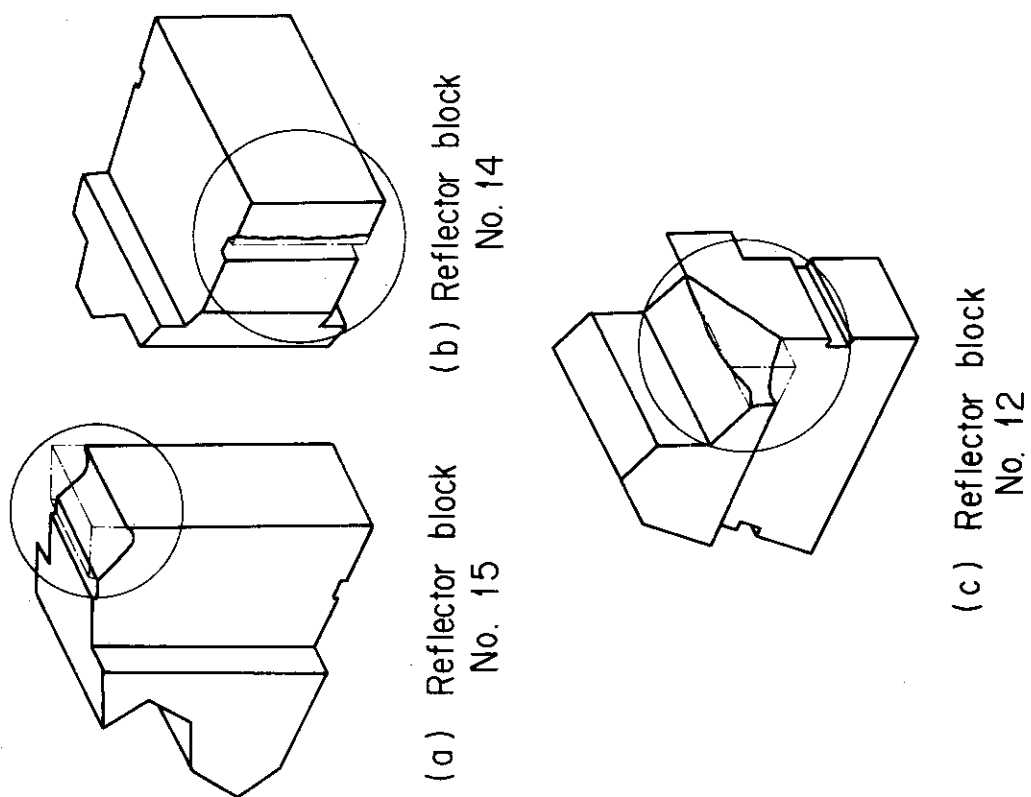


Fig. 6.2 Defect blocks

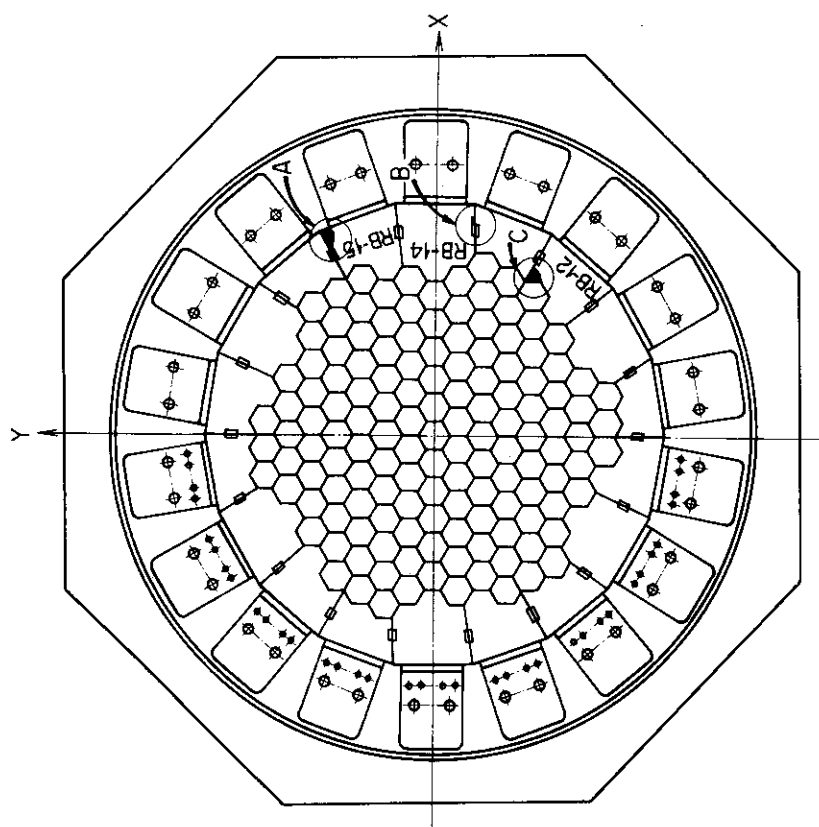


Fig. 6.1 Positions of defect block after test

7. シミュレーション解析

7.1 計算モデルと運動方程式

7.1.1 計算モデル

水平二次元炉心の地震応答解析モデルは Fig. 7.1 および 7.2 に示すように実際の炉心の燃料ブロック層分を取り出したものであり、燃料ブロック、側方固定ブロックおよび側方拘束構造物から構成される。側方拘束構造物はコアバレルと原子炉圧力容器に相当する剛壁から支持されているものとする。側方固定ブロック相互間にはキーがあるとする。以下に計算の仮定について述べる。

(1) 自由度

燃料および側方固定ブロックは剛体として取り扱い、これらの運動は水平二次元平面を考慮して、水平二方向移動 (X, Y) および X - Y 平面に直交軸の回転 (θ_z) の三自由度系とする。

(2) 衝突モデル

燃料ブロック相互間、側方固定ブロック相互間、燃料ブロックと側方固定ブロックおよび側方固定ブロックとキーの衝突を取り扱うため、粘弾性モデルを採用する。減衰係数は反発係数と衝突モデルのばね定数、質量および接触時間から求められる。

(3) 燃料ブロック

燃料ブロックは Fig. 7.3 に示すように剛体とし、六角ブロックのそれぞれの角には、衝突特性を模擬するばねとダッシュポットを仮定して衝突現象を取り扱う。また、衝突面には摩擦モデルを加え、摩擦力も考慮できるようにする。燃料ブロックには燃料コラムの復元力特性を模擬し、Fig. 2.2 に示したように、ばねとダッシュポットによって炉心支持ブロックに取り付けられているものとする。

(4) 側方固定ブロック

側方固定ブロックは Fig. 7.4 に示すように剛体とし、多角形ブロックの衝突場所には、衝突特性に相当するばねとダッシュポットを仮定して衝突現象を取り扱う。また、衝突面には摩擦モデルを加え、摩擦力も考慮できるようにする。側方固定ブロックには側方固定コラムの復元力も取り扱えるようにする。側方固定ブロックの拘束構造物はばねとダッシュポットによって模擬する。側方固定ブロック間にある連結キーはばねとダッシュポットによってキーの特性を取り扱う。側方固定ブロックの間にはギャップが存在するものとする。

(5) 炉心支持

炉心支持ブロックは Fig. 7.2 に示したように、水平二次元平面内において、水平二方向の運動 (X, Y) の 2 自由度系とする。また、水平運動において、拘束構造物によって X 方向および Y 方向に拘束を受けているが、剛体の周辺上には摩擦のないローラ支持とする。炉心支持ブロックの拘束構造物はばねとダッシュポットによって模擬する。

これらの仮定に従って燃料ブロック、側方固定ブロックおよび炉心支持要素の運動方程式を導く。

7.1.2 運動方程式

運動方程式を導くために次のような全体座標系と3種類の局所座標系を用い、それぞれの座標系の記号を次のようにする。

- (i) 炉心全体座標系 (XR, YR)
- (ii) ブロック重心を原点とする局所座標系 (ただし、座標値は全体座標系で表示する)
 - (a) ブロック重心の初期の座標系 (XI, YI)
 - (b) ブロック重心の変位後の座標系 (XB, YB)
- (iii) ブロックの重心を原点として回転する局所座標系 (XBT, YBT)

このように座標系を決めるとブロックの重心およびブロックの表面座標は次のように表わされる。

- $(\overline{XR}_n, \overline{YR}_n)$: n 番目のブロックの重心変位
- (XBT_{pn}, YBT_{pn}) : n 番目のブロックの表面 p の局所座標値
- (XR_{pn}, YR_{pn}) : n 番目のブロックの表面 p の変位
- $(XB_{n pn}, YB_{n pn})$: 変位後のブロック n の重心を原点とし、n 番目のブロックの表面 p の座標値
- $(XB_{i pn}, YB_{i pn})$: 変位後のブロック n の重心を原点とし、i 番目のブロックの表面 p の変位後の座標値

なお、変位、力、モーメントの正負は Fig. 7.5 のように決める。

- (1) ブロック重心の変位と速度およびブロック表面の変位と速度

燃料ブロックと側方固定ブロックの重心変位と速度は類似の式となるので、ここでは燃料ブロックについてのみ示す。Fig. 7.6 に示すように、n 番目のブロックの重心が $\bar{O}_2$ から $\bar{O}_3$ へ移動するとともに θ_n だけ回転したとする。n 番目のブロックの表面 p の座標系における位置 XR_{pn} , YR_{pn} は次の式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \overline{XR}_{pn} &= \overline{XR}_n + YBT_{pn} \cdot \sin \theta_n - XBT_{pn} (1 - \cos \theta_n) \\ \overline{YR}_{pn} &= \overline{YR}_n - XBT_{pn} \cdot \sin \theta_n - YBT_{pn} (1 - \cos \theta_n) \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

n 番目のブロックの重心が速度 $(\dot{\overline{XR}}_n, \dot{\overline{YR}}_n, \dot{\theta}_n)$ で移動する場合のブロック表面上の点 P の速度は式 (7.1) から次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\overline{XR}}_{pn} &= \dot{\overline{XR}}_n + (YBT_{pn} \cdot \cos \theta_n - XBT_{pn} \cdot \sin \theta_n) \dot{\theta}_n \\ \dot{\overline{YR}}_{pn} &= \dot{\overline{YR}}_n - (XBT_{pn} \cdot \cos \theta_n - YBT_{pn} \cdot \sin \theta_n) \dot{\theta}_n \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

変位後の n 番目のブロックの重心を原点とする座標系 (XB, YB) で表わしたブロック表面 P の座標は Fig. 7.6 から明らかなように、次の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} XB_{n pn} &= XBT_{pn} + \overline{XR}_{pn} - \overline{XR}_n \\ YB_{n pn} &= YBT_{pn} + \overline{YR}_{pn} - \overline{YR}_n \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

式 (7.2) を (7.3) へ代入して整理すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XB_{n pn} &= YBT_{pn} \cdot \sin \theta_n + XBT_{pn} \cdot \cos \theta_n \\ YB_{n pn} &= -XBT_{pn} \cdot \sin \theta_n + YBT_{pn} \cdot \cos \theta_n \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

全体座標系からブロックの回転局所座標系による n 番目ブロックの表面 P の座標を表わすことができる。すなわち式 (7.4) から XBT_{pn} と YBT_{pn} について解くと次の式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} XBT_{pn} &= XB_{n pn} \cdot \cos \theta_n - YB_{n pn} \cdot \sin \theta_n \\ YBT_{pn} &= XB_{n pn} \cdot \sin \theta_n + YB_{n pn} \cdot \cos \theta_n \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

ブロックの重心を原点とする座標系 (XI, YI) において n 番目のブロックの表面 P の変位後の座標 $(XI_{n pn}, YI_{n pn})$ がわかっている場合には、式 (7.5) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XBT_{pn} &= XI_{n pn} \cdot \cos \theta_n - YI_{n pn} \cdot \sin \theta_n \\ &\quad - XR_n \cdot \cos \theta_n + YR_n \cdot \sin \theta_n \\ YBT_{pn} &= -XI_{n pn} \cdot \sin \theta_n + YI_{n pn} \cdot \cos \theta_n \\ &\quad + XR_n \cdot \sin \theta_n - YR_n \cdot \cos \theta_n \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

ここで、座標 $(XB_{n pn}, YB_{n pn})$ と $(XI_{n pn}, YI_{n pn})$ の間には次の関係が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} XB_{n pn} &= XI_{n pn} - XR_n \\ YB_{n pn} &= YI_{n pn} - YR_n \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

(3) ブロックの衝突力とそのモーメント

ブロックの衝突力とそれによる重心まわりのモーメントを求める。燃料ブロックと側方固定ブロックの衝突力とそのモーメントは類似の式となるので、ここでは燃料ブロックについてのみ示す。ブロック間のギャップ量を計算する手順を Fig. 7.7 に示す図に従って求める。 n 番目のブロックの角①と i 番目のブロックの辺④-⑤を例にして示す。

(i) n 番目のブロックの変位後の角①と②の座標

n 番目のブロックの変位後の重心位置をブロック重心を原点とする座標系で表わすと次のようになる。

(a) 角①の座標

$$\left. \begin{aligned} XB_{n1n} &= \overline{XR}_{1n} + XI_{1n} - \overline{XR}_n \\ YB_{n1n} &= \overline{YR}_{1n} + YI_{1n} - \overline{YR}_n \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

(b) 角②の座標

$$\left. \begin{aligned} XB_{n2n} &= \overline{XR}_{2n} + XI_{2n} - \overline{XR}_n \\ YB_{n2n} &= \overline{YR}_{2n} + YI_{2n} - \overline{YR}_n \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

(ii) i 番目のブロックの変位後の角④と⑤の座標

i 番目のブロックの変位後の重心位置をブロック重心を原点とする座標系で表わすと次のようになる。

(a) 角④の座標

$$\left. \begin{aligned} XB_{i4i} &= \overline{XR}_{4i} + XI_{4i} - \overline{XR}_i \\ YB_{i4i} &= \overline{YR}_{4i} + YI_{4i} - \overline{YR}_i \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

(b) 角⑤の座標

$$\left. \begin{aligned} XB_{i5i} &= \overline{XR}_{5i} + XI_{5i} - \overline{XR}_i \\ YB_{i5i} &= \overline{YR}_{5i} + YI_{5i} - \overline{YR}_i \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

式(7.10)と(7.11)をn番目のブロックの変位後の重心位置を原点とする座標系で表わすと次のようになる。

(c) 角④の座標

$$\left. \begin{aligned} XB_{i4n} &= XB_{i4i} + (\overline{XR}_i - \overline{XR}_n) + (XR_i - XR_n) \\ &= XI_{4i} + \overline{XR}_{4i} - \overline{XR}_n + XR_i - XR_n \\ YB_{i4n} &= YI_{4i} + \overline{YR}_{4i} - \overline{YR}_n + YR_i - YR_n \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

(d) 角⑤の座標

$$\left. \begin{aligned} XB_{i5n} &= XI_{5i} + \overline{XR}_{5i} - \overline{XR}_n + XR_i - XR_n \\ YB_{i5n} &= YI_{5i} + \overline{YR}_{5i} - \overline{YR}_n + YR_i - YR_n \end{aligned} \right\} \quad (7.13)$$

(iii) n番目のブロックの辺①-②およびi番目のブロックの辺④-⑤の直線の方程式

n番目のブロックの角①および②の座標をそれぞれ (XB_{n1n}, YB_{n1n}) および (XB_{n2n}, YB_{n2n}) ,
i番目のブロックの角④および⑤の座標をそれぞれ (XB_{i4n}, YB_{i4n}) および (XB_{i5n}, YB_{i5n})
とし,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= XB_{i4n} - XB_{i5n} \\ A_2 &= YB_{n1n} - YB_{n2n} \\ A_3 &= YB_{i4n} - YB_{i5n} \\ A_4 &= XB_{n1n} - XB_{n2n} \end{aligned} \right\} \quad (7.14)$$

とおく。

(a) n番目のブロックの辺①-②の直線の方程式

 $A_4 \neq 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} y &= a_1 x + b_1 \\ a_1 &= \frac{A_2}{A_4}, \quad b_1 = YB_{n1n} - XB_{n1n} \cdot \frac{A_2}{A_4} \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$

 $A_4 = 0$ の場合

$$x = XB_{n1n} \quad (7.16)$$

(b) i 番目のブロックの辺④-⑤の直線の方程式

$A_1 \neq 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} y &= a_2 x + b_2 \\ a_2 &= \frac{A_3}{A_1}, \quad b_2 = YB_{i4n} - XB_{i4n} \cdot \frac{A_3}{A_1} \end{aligned} \right\} \quad (7.17)$$

$A_1 = 0$ の場合

$$x = XB_{i4n} \quad (7.18)$$

(iv) n 番目のブロックの角①を通り, n 番目のブロックの辺①-②と直角な直線と i 番目のブロックの辺④-⑤との交点座標

(a) ブロックの交点座標

n 番目のブロックの辺①-②と i 番目のブロックの辺④-⑤が直交する場合, n 番目の角①を通り, 辺①-②と直角な直線と i 番目のブロックの辺④-⑤との交点が存在しない, すなわち, n 番目のブロックの角①は, i 番目のブロックの辺④-⑤と衝突しない条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} A_2 \neq 0, A_4 \neq 0 \text{ であつ, } -\frac{A_4}{A_2} &= \frac{A_3}{A_1} \text{ の場合} \\ A_2 = 0, A_4 \neq 0 \text{ であつ, } A_1 &= 0 \text{ の場合} \\ A_2 \neq 0, A_4 = 0 \text{ であつ, } A_1 \neq 0, A_3 &= 0 \text{ の場合} \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

(b) $A_2 \neq 0, A_4 \neq 0$ の場合

n 番目のブロックの角①を通り, 辺①-②と直角な直線の方程式は, 傾きは a_1 で角①座標 (XB_{n1n}, YB_{n1n}) を通るから,

$$\left. \begin{aligned} y &= a_3 x + b_3 \\ a_3 &= -\frac{A_4}{A_2}, \quad b_3 = YB_{n1n} + \frac{A_4}{A_2} XB_{n1n} \end{aligned} \right\} \quad (7.20)$$

式 (7.20) と式 (7.17), (7.18) との交点 (X_{DN1}, Y_{DN1})

$A_1 \neq 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} X_{DN1} &= \left(-b_3 + YB_{i4n} - XB_{i4n} \frac{A_3}{A_1} \right) / \left(a_3 - \frac{A_3}{A_1} \right) \\ Y_{DN1} &= a_3 X_{DN1} + b_3 \end{aligned} \right\} \quad (7.21)$$

$A_1 = 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} X_{DN1} &= XB_{i4n} \\ Y_{DN1} &= a_3 XB_{i4n} + b_3 \end{aligned} \right\} \quad (7.22)$$

(c) $A_2 = 0, A_4 \neq 0$ の場合

n 番目のブロックの角①を通り, 辺①-②と直角な直線方程式

辺①-②の直線が, x 軸と平行となるため, この直線と直角で角①を通る直線は次のようになる。

$$x = XB_{n1n} \quad (7.23)$$

式(7.23)と式(7.17), (7.18)との交点(X_{DN1} , Y_{DN1})

$A_1 \neq 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} X_{DN1} &= XB_{n1n} \\ Y_{DN1} &= \frac{A_3}{A_1} X_{DN1} + YB_{i4n} - XB_{i4n} \frac{A_3}{A_1} \end{aligned} \right\} \quad (7.24)$$

$A_1 = 0$ の場合

式(7.19)の条件によって交点がない。

(d) $A_4 = 0$, $A_2 \neq 0$ の場合

n 番目のブロックの角①を通り、辺①-②と直角な直線方程式

辺①-②の直線が y 軸と平行となるため、これと直角で角①を通る直線は次のようになる。

$$y = YB_{n1n} \quad (7.25)$$

式(7.25)と式(7.17), (7.18)との交点(X_{DN1} , Y_{DN1})

$A_1 \neq 0$, $A_3 \neq 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} X_{DN1} &= \frac{A_1}{A_3} \left(Y_{DN1} - YB_{i4n} + \frac{A_3}{A_1} XB_{i4n} \right) \\ Y_{DN1} &= YB_{n1n} \end{aligned} \right\} \quad (7.26)$$

$A_1 = 0$ の場合

$$\left. \begin{aligned} X_{DN1} &= XB_{i4n} \\ Y_{DN1} &= YB_{i4n} \end{aligned} \right\} \quad (7.27)$$

(v) n 番目のブロックの角①と i 番目のブロックの辺④-⑤のギャップ

$$\delta_{n1} = \sqrt{(XB_{n1n} - X_{DN1})^2 + (YB_{n1n} - Y_{DN1})^2} \quad (7.28)$$

(4) ブロックの衝突の判定

Fig. 7.7 に示したように、 n 番目のブロックの角①と i 番目のブロックの辺④-⑤との間で衝突の有無を判定する場合、次の配置上の条件による。

(i) 配置上の判定

(a) 変位前(初期状態)において、ブロックの衝突する角と相手のブロックが隣接する位置にあること。例えば、Fig. 7.8 において、 n 番目のブロックの角①と i 番目のブロックとの辺④-⑤および辺⑤-⑥との位置関係によって衝突の有無を判定する。

(b) 衝突するブロックの角と相手ブロックの衝突する辺は、相対する位置にあること。例えば Fig. 7.8 において、 n 番目のブロックの角①と i 番目のブロックの辺④-⑤との位置関係によって衝突の有無を判定する。

(c) 衝突するブロックの角がある辺に直角な直線と相手ブロックの衝突する辺との交点が存在すること。例えば、Fig. 7.7 の n 番目のブロックの辺①-②に直角な直線と i 番目のブロックの辺④-⑤との交点が存在するか否かによって衝突の有無を判定する。Fig. 7.7 に示したように、 n 番目のブロックの角①と i 番目のブロックの辺④-⑤との交点が求められない条件は次のとお

りである。

$$\left. \begin{aligned} A_2 \neq 0, A_4 \neq 0, -\frac{A_4}{A_2} = \frac{A_3}{A_1} \text{ の場合} \\ A_1 = 0, A_2 = 0, A_4 \neq 0 \text{ の場合} \\ A_1 \neq 0, A_2 \neq 0, A_3 = 0, A_4 = 0 \text{ の場合} \end{aligned} \right\} \quad (7.29)$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= XB_{i4n} - XB_{i5n} \\ A_2 &= YB_{n1n} - YB_{n2n} \\ A_3 &= YB_{i4n} - YB_{i5n} \\ A_4 &= XB_{n1n} - XB_{n2n} \end{aligned} \right\} \quad (7.30)$$

(ii) 衝突ブロックの角と相手ブロックの辺との衝突位置条件

衝突ブロックの角から角のある辺と直行する直線と相手ブロックの衝突する辺との交点座標の位置関係から、次の二つの条件を満たせば衝突する。

(a) 上記の交点座標が、衝突相手の i 番目のブロックの辺④-⑤の間にあること。すなわち、次の二つの条件が満たされる場合には衝突が起る。

$$\left. \begin{aligned} (X_{DN1} - XB_{i4n})(X_{DN1} - XB_{i5n}) < 0 \\ (Y_{DN1} - YB_{i4n})(Y_{DN1} - YB_{i5n}) < 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.31)$$

(b) 上記の交点座標が、衝突する n 番目のブロックの外縁内にある場合に衝突していることになる。よって、衝突の条件は次のようになる。

$$R_2 \geq R_1 \quad (7.32)$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(X_{DN1})^2 + (Y_{DN1})^2} \\ R_2 &= \sqrt{(XB_{n1n})^2 + (YB_{n1n})^2} \end{aligned} \right\} \quad (7.33)$$

側方固定ブロックのように、燃料ブロックに比較して複雑な形状のものでは、上記の条件のみでは衝突の有無を判定できない。このような場合には、次の衝突判定条件が必要とされる。

Fig. 7.9 に示すように、燃料ブロックと側方固定ブロックが衝突する条件を導く。 n 番目のブロックの辺①-⑦が、原点 $\bar{O}_{n1}$ からの直線 $\bar{O}_{n1}-A$ および $\bar{O}_{n1}-B$ の線上にあって、次の条件を満たす場合に衝突する。

$$YB_{n1n} \cdot XB_{n7n} - XB_{n1n} \cdot YB_{n7n} = 0 \quad (7.34)$$

ここで、位置 (XB_{n7n}, YB_{n7n}) は n 番目のブロックの角⑦の座標を示す。

式 (7.34) を満たす場合、Fig. 7.9 に示すように、衝突位置 A および B と原点 $\bar{O}_{n1}$ との距離 $\bar{O}_{n1}-A$ および $\bar{O}_{n1}-B$ が等しくなる場合があり、距離の大小関係のみで衝突の有無の判定ができない。このような場合には、原点 $\bar{O}_{n1}$ と交点を結ぶ直線と x 軸との傾斜角で衝突の有無を判定

する。

Fig. 7.9 に示すように、 n 番目のブロックの衝突する辺①-⑦の直線方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} y &= ax + b \\ a &= \frac{YB_{n1n}}{XB_{n1n}}, \quad b = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.35)$$

n 番目のブロックの重心と角①との距離 R_1 と R_2 および重心と衝突位置との距離 R_2 は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R'_1 = \sqrt{(X_{DN1})^2 + (Y_{DN1})^2} = \sqrt{(X'_{DN1})^2 + (Y'_{DN1})^2} \\ R_2 &= \sqrt{(XB_{n1n})^2 + (YB_{n1n})^2} \end{aligned} \right\} \quad (7.36)$$

ここで、位置 (X'_{DN1}, Y'_{DN1}) は、 i 番目のブロックの衝突位置座標を示す。

衝突判定条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \tan^{-1} \left| \frac{Y_{DN1}}{X_{DN1}} \right| \\ \theta_2 &= \tan^{-1} \left| \frac{YB_{n1n}}{XB_{n1n}} \right| \\ \theta'_1 &= \tan^{-1} \left| \frac{Y'_{DN1}}{X'_{DN1}} \right| \end{aligned} \right\} \quad (7.37)$$

n 番目のブロックの辺①-⑦に垂直な線と i 番目のブロックの辺との交点が A 点の場合の条件、これは衝突しない条件で次のようになる。

$$\left| \frac{YB_{n1n}}{XB_{n1n}} \right| < \left| \frac{Y'_{DN1}}{X'_{DN1}} \right| \quad (7.38)$$

n 番目のブロックの辺①-⑦に垂直な線と i 番目のブロックの辺との交点が B 点の場合の条件、これは衝突する条件で次のようになる。

$$\left| \frac{YB_{n1n}}{XB_{n1n}} \right| \geq \left| \frac{Y'_{DN1}}{X'_{DN1}} \right| \quad (7.39)$$

(5) ブロック間の衝突力とそのモーメント

(i) ブロック衝突辺の傾斜角

Fig. 7.10 に従って、 n 番目のブロックの衝突する角に属する辺の傾斜角 θ_{en} を求める。ブロックの角 i および $i+1$ の変位後の座標値を (x_i, y_i) および (x_{i+1}, y_{i+1}) とすると、ブロックの辺の直線方程式は次のようになる。

(a) $x_i - x_{i+1} \neq 0$ の場合

$$y = a_i x + b_i$$

$$\text{ただし, } i \neq 6 \text{ の場合, } a_i = \frac{y_i - y_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \quad (7.40)$$

$$i = 6 \text{ の場合, } a_6 = \frac{y_6 - y_1}{x_6 - x_1}$$

$$\theta_{\ell n} = \tan^{-1} a_i \quad (7.41)$$

(b) $x_i - x_{i+1} = 0$ の場合

$$x = x_i \quad (7.42)$$

$$\left. \begin{array}{l} y_i - y_{i+1} < 0 \text{ の場合, } \theta_{\ell n} = \frac{\pi}{2} \\ y_i - y_{i+1} > 0 \text{ の場合, } \theta_{\ell n} = -\frac{\pi}{2} \end{array} \right\} \quad (7.43)$$

(ii) ブロック間の相対速度

衝突する n 番目のブロックと i 番目のブロックとの相対速度を VRE とし, この相対速度の x 方向成分と y 方向成分をそれぞれ VRE_x および VRE_y とする。

$$\left. \begin{array}{l} VRE_x = VR_{xpn} - VR_{xpi} \\ VRE_y = VR_{ypn} - VR_{ypi} \end{array} \right\} \quad (7.44)$$

ここで,

VR_{xpn} : n 番目ブロックの衝突する角の x 方向速度

VR_{ypn} : n 番目ブロックの衝突する角の y 方向速度

VR_{xpi} : i 番目ブロックの衝突位置の x 方向速度

VR_{ypi} : i 番目ブロックの衝突位置の y 方向速度

式 (7.44) の衝突速度は式 (7.2) から計算できる。 n 番目ブロックの衝突する角に衝突辺

(Fig. 7.10 の場合, n 番目のブロックの辺②-③に相当) に垂直な方向の速度成分 VV_x および VV_y は次のようになる。

(a) x 方向速度成分

$$\left. \begin{array}{l} y_2 - y_1 \neq 0 \text{ の場合, } VV_x = \left| VRE_x \right| \cdot \left| \sin (\theta_{\ell n} + \theta_n) \right| \left| \frac{B_x}{|B_x|} \right| \\ y_2 - y_1 = 0 \text{ の場合, } VV_x = 0 \end{array} \right\} \quad (7.45)$$

(b) y 方向速度成分

$$\left. \begin{array}{l} x_2 - x_1 \neq 0 \text{ の場合, } VV_y = \left| VRE_y \right| \cdot \left| \cos (\theta_{\ell n} + \theta_n) \right| \left| \frac{B_y}{|B_y|} \right| \\ x_2 - x_1 = 0 \text{ の場合, } VV_y = 0 \end{array} \right\} \quad (7.46)$$

よって, n 番目の角の衝突辺に垂直な方向の相対速度 VV は次のようになる。

$$VV = VV_x + VV_y \quad (7.47)$$

ここで、

x_1 : n 番目ブロックの角①の重心からの x 座標

y_1 : n 番目ブロックの角①の重心からの y 座標

x_2 : n 番目ブロックの角②の重心からの x 座標

y_2 : n 番目ブロックの角②の重心からの y 座標

B_x : 衝突するブロックの角に属する辺の直線と x 軸の交点との x 座標

B_y : 衝突するブロックの角に属する辺の直線と y 軸の交点との y 座標

$$\left. \begin{aligned} B_x &= x_1 - y_1 \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \\ B_y &= y_1 - x_1 \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \end{aligned} \right\} \quad (7.48)$$

θ_n : n 番目のブロックの回転角

(iii) ブロックの衝突力

n 番目のブロックと i 番目のブロックの衝突力 FR_{n1} は、二つのブロックの衝突点の相対変位 δ_{n1} によるばね力 FK および二つのブロックの衝突位置における衝突前の相対速度による減衰力 FC から求められる。

$$FR_{n1} = FK_{n1} + FC_{n1} \quad (7.49)$$

ここで、衝突力 FR_{n1} はブロック内へ向う力を正とする。衝突のばね力および減衰力は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} FK_{n1} &= K_{n1} \delta_{n1} \\ FC_{n1} &= C_{n1} VV \end{aligned} \right\} \quad (7.50)$$

ここで、

K_{n1} : 衝突点のばね定数

C_{n1} : 衝突点の減衰係数

衝突の判定は前節(4)の判定条件によるが、粘弾性モデルを使用するために、次の条件も含めて判定する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} FR_{n1} &\geq 0 : \text{衝突有} \\ FR_{n1} &< 0 : \text{衝突無} \end{aligned} \right\} \quad (7.51)$$

(iv) i 番目ブロックの衝突力

Fig. 7.10 に示すように、衝突によって i 番目のブロックに加わる力のうち衝突面直角方向の力 FR_{i10} は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} FR_{i10} &= FR_{n1} \cdot \cos \theta_{i0} \\ FT_{i10} &= FR_{n1} \cdot \sin \theta_{i0} \end{aligned} \right\} \quad (7.52)$$

ここで、

$$\theta_{i0} = \theta_{i1} - \theta_{n1}$$

$$\theta_{i1} = \theta_{\ell i} + \theta_i$$

$$\theta_{n1} = \theta_{\ell n} + \theta_n$$

(V) i 番目のブロックの衝突面と平行な力

i 番目のブロックの衝突面の摩擦力 FFT_{i10} は、摩擦係数を μ とすると次のようになる。

$$FFT_{i10} = \mu \cdot FR_{i10} \quad (7.53)$$

衝突面と平行な力 FTD_{i10} は、摩擦力を越える力では、スリップが発生して FFT_{i10} 以上の力にはならない。従って、次の条件を満足する。

$$\left. \begin{array}{l} |FT_{i10}| \geq FFT_{i10} \text{ の場合, } FTD_{i10} = FFT_{i10} \\ |FT_{i10}| < FFT_{i10} \text{ の場合, } FTD_{i10} = FT_{i10} \end{array} \right\} \quad (7.54)$$

衝突力と摩擦力の合力は反力 FRD_{n1} となり、これは次のようになる。

$$FRD_{n1} = FR_{i10} \cdot \cos \theta_{i0} + FTD_{i10} \cdot \sin \theta_{i0} \quad (7.55)$$

(VI) 衝突力による x 方向, y 方向成分とモーメント

式 (7.55) の衝突力による n 番目のブロックの x 方向成分力および y 方向成分力を以下に示す。

(a) x 方向成分

$y_2 - y_1 \neq 0$ の場合

$$FX_{n1} = FRD_{n1} \cdot \left| \sin (\theta_{\ell n} + \theta_n) \right| \frac{B_x}{|B_x|} \quad (7.56)$$

$y_2 - y_1 = 0$ の場合

$$FX_{n1} = 0$$

(b) y 方向成分

$x_2 - x_1 \neq 0$ の場合

$$FY_{n1} = FRD_{n1} \cdot \left| \cos (\theta_{\ell n} + \theta_n) \right| \frac{B_y}{|B_y|} \quad (7.57)$$

$x_2 - x_1 = 0$ の場合

$$FY_{n1} = 0$$

式 (7.56) および (7.57) の衝突力による n 番目のブロックの重心まわりのモーメント AM_{n1} は次のようになる。

$$AM_{n1} = -FX_{n1} \cdot YB_{npn} + FY_{n1} \cdot XB_{npn} \quad (7.58)$$

式 (7.55) の衝突力による i 番目のブロックの x 方向成分力および y 方向成分力を以下に示す。

(a) x 方向成分

$y_5 - y_4 \neq 0$ の場合

$$FX_{i10} = FRD_{n1} \cdot \left| \sin (\theta_{i0} + \theta_{i1}) \right| \frac{B_x}{|B_x|} \quad (7.59)$$

$y_5 - y_4 = 0$ の場合

$$FX_{i10} = 0$$

(b) y 方向成分

 $x_5 - x_4 \neq 0$ の場合

$$FY_{i10} = FRD_{n1} \cdot \left| \cos(\theta_{i0} + \theta_{i1}) \right| \cdot \frac{B_y}{|B_y|} \quad \left. \vphantom{\frac{B_y}{|B_y|}} \right\} \quad (7.60)$$

 $x_5 - x_4 = 0$ の場合

$$FY_{i10} = 0$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} B_x &= x_4 - y_4 \cdot \frac{x_5 - x_4}{y_5 - y_4} \\ B_y &= y_4 - x_4 \cdot \frac{y_5 - y_4}{x_5 - x_4} \end{aligned} \right\} \quad (7.61)$$

 x_4 : i 番目ブロックの角④の重心からの x 座標 y_4 : i 番目ブロックの角④の重心からの y 座標 x_5 : i 番目ブロックの角⑤の重心からの x 座標 y_5 : i 番目ブロックの角⑤の重心からの y 座標

式(7.59)および(7.60)の衝突力による i 番目のブロックの重心まわりのモーメント AM_{i10} は次のようになる。

$$AM_{i10} = -FX_{i10} \cdot YB_{ipi} + FY_{i10} \cdot XB_{ipi} \quad (7.62)$$

(6) 燃料ブロックの支持力

燃料ブロックはコラム復元力特性を模擬したばね棒によって支持されている。また、燃料ブロックの下部にはボールベアリングが取付けられ、支持板上を滑る。このような状態を線形のばねと粘性減衰をもってモデル化し、ばねと粘性減衰によって、燃料ブロックの運動に抵抗する力を燃料ブロック支持力と呼ぶ。燃料ブロック支持力は、支持ばね棒のばね定数を KS 、支持ばね棒の減衰係数および燃料ブロックと支持板との間の摩擦を考慮した全体的な減衰係数を CS とすると、燃料ブロックの支持力の x 方向成分 FSX および y 方向成分 FSY は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} FSX &= KS \cdot D_x + CS \cdot V_x \\ FSY &= KS \cdot D_y + CS \cdot V_y \end{aligned} \right\} \quad (7.63)$$

ここで,

 D_x : ブロックの重心の x 方向変位 D_y : ブロックの重心の y 方向変位 V_x : ブロックの重心の x 方向速度 V_y : ブロックの重心の y 方向速度

(7) 側方固定ブロックの支持反力とモーメント

側方固定反射体ブロックの支持構造物の支持剛性は x 方向および y 方向ともに同じであると仮定する。支持構造物のばね定数および減衰係数をそれぞれ $KFRB$ および $CFRB$ とすると側方固定ブロックの支持反力の x 方向成分および y 方向成分をそれぞれ FRX および FRY は次のよう

になる。

$$\left. \begin{aligned} FRX &= KFRB \cdot D_x + CFRB \cdot V_x \\ FRY &= KFRB \cdot D_y + CFRB \cdot V_y \end{aligned} \right\} \quad (7.64)$$

式(7.64)の力による側方固定ブロックの重心まわりのモーメント AMR は次のようになる。

$$AMR = FRX (D_y + Y_0) - FRY \cdot (D_x + X_0) \quad (7.65)$$

ここで,

X_0 : 側方固定ブロックの静止状態(初期状態)での側方支持構造物の支持位置の x 座標

Y_0 : 側方固定ブロックの静止状態(初期状態)での側方支持構造物の支持位置の y 座標

(8) 側方固定ブロック間のキー反力

側方固定ブロック間のキーのせん断力に基づく反力を求める計算式を導く。簡単化のため、側方固定ブロックのキー溝とキーの間の摩擦力は無視する。

n 番目のブロックの移動後の重心を原点とするキーの取付辺の角の座標 (XC_{n1n}, YC_{n1n}) および (XC_{n2n}, YC_{n2n}) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XC_{n1n} &= XCO_{n1n} + \overline{XCR}_{1n} - \overline{XR}_n \\ YC_{n1n} &= YCO_{n1n} + \overline{YCR}_{1n} - \overline{YR}_n \\ XC_{n2n} &= XCO_{n2n} + \overline{XCR}_{2n} - \overline{XR}_n \\ YC_{n2n} &= YCO_{n2n} + \overline{YCR}_{2n} - \overline{YR}_n \end{aligned} \right\} \quad (7.66)$$

ここで,

$XCO_{n\ell n}$: n 番目のブロックのキー取付辺の角のブロック重心を原点とする x 座標 ($\ell = 1, 2$, ℓ は角の番号)

$YCO_{n\ell n}$: n 番目のブロックのキー取付辺の角のブロック重心を原点とする y 座標 ($\ell = 1, 2$, ℓ は角の番号)

$\overline{XCR}_{\ell n}$: n 番目のブロックのキー取付辺の角の x 方向変位 ($\ell = 1, 2$, ℓ は角の番号)

$\overline{YCR}_{\ell n}$: n 番目のブロックのキー取付辺の角の y 方向変位 ($\ell = 1, 2$, ℓ は角の番号)

n 番目のブロックの移動後の重心を原点とする i 番目ブロックのキー取付辺の角の座標 (XC_{i1n}, YC_{i1n}) および (XC_{i2n}, YC_{i2n}) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XC_{i1n} &= XCO_{i1i} + \overline{XCR}_{1i} + XR_i - (XR_n + \overline{XR}_n) \\ YC_{i1n} &= YCO_{i1i} + \overline{YCR}_{1i} + YR_i - (YR_n + \overline{YR}_n) \\ XC_{i2n} &= XCO_{i2i} + \overline{XCR}_{2i} + XR_i - (XR_n + \overline{XR}_n) \\ YC_{i2n} &= YCO_{i2i} + \overline{YCR}_{2i} + YR_i - (YR_n + \overline{YR}_n) \end{aligned} \right\} \quad (7.67)$$

ここで,

$XCO_{i\ell i}$: i 番目のブロックのキー取付辺の角のブロック重心を原点とする x 座標 ($\ell = 1, 2$, ℓ は角の番号)

$YCO_{i \ell} : i$ 番目のブロックのキー取付辺の角のブロック重心を原点とする y 座標 ($\ell = 1, 2$, ℓ は角の番号)

n 番目のブロックの移動後のキー取付位置の n 番目のブロックの重心を原点とする座標 (XK_{nn}, YK_{nn}) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XK_{nn} &= XKO_{nn} + \overline{XK}_n - \overline{XR}_n \\ YK_{nn} &= YKO_{nn} + \overline{YK}_n - \overline{YR}_n \end{aligned} \right\} \quad (7.68)$$

ここで,

XK_{nn} : 移動後の n 番目のブロックの重心を原点とする n 番目のブロックのキー取付位置の x 座標

YK_{nn} : 移動後の n 番目のブロックの重心を原点とする n 番目のブロックのキー取付位置の y 座標

XKO_{nn} : 移動前の n 番目のブロックの重心を原点とする n 番目のブロックのキー取付位置の x 座標

YKO_{nn} : 移動前の n 番目のブロックの重心を原点とする n 番目のブロックのキー取付位置の y 座標

$\overline{XK}_n$: n 番目のブロックのキー取付位置の x 方向変位

$\overline{YK}_n$: n 番目のブロックのキー取付位置の y 方向変位

i 番目のブロックの移動後のキー取付位置の n 番目のブロックの重心を原点とする座標 (XK_{in}, YK_{in}) は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} XK_{in} &= XKO_{in} + \overline{XK}_i + XR_i - (XR_n + \overline{XR}_n) \\ YK_{in} &= YKO_{in} + \overline{YK}_i + YR_i - (YR_n + \overline{YR}_n) \end{aligned} \right\} \quad (7.69)$$

ここで,

XK_{in} : 移動後の n 番目のブロックの重心を原点とする i 番目のブロックのキー取付位置の x 座標

YK_{in} : 移動後の n 番目のブロックの重心を原点とする i 番目のブロックのキー取付位置の y 座標

XKO_{in} : 移動前の n 番目のブロックの重心を原点とする i 番目のブロックのキー取付位置の x 座標

YKO_{in} : 移動前の n 番目のブロックの重心を原点とする i 番目のブロックのキー取付位置の y 座標

n 番目のブロックのキー取付辺の傾斜角は次のようになる。

$XC_{n1n} - XC_{n2n} \neq 0$ の場合

$$\theta_{pn} = \tan^{-1} \frac{YC_{n1n} - YC_{n2n}}{XC_{n1n} - XC_{n2n}}$$

$XC_{n1n} - XC_{n2n} = 0$ の場合

$$\theta_{pn} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{YC_{n1n} - YC_{n2n}}{|YC_{n1n} - YC_{n2n}|}$$

(7.70)

i 番目のブロックのキー取付辺の傾斜角は次のようになる。

$XC_{i1n} - XC_{i2n} \neq 0$ の場合

$$\theta_{pi} = \tan^{-1} \frac{YC_{i1n} - YC_{i2n}}{XC_{i1n} - XC_{i2n}}$$

$XC_{i1n} - XC_{i2n} = 0$ の場合

$$\theta_{pi} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{YC_{i1n} - YC_{i2n}}{|YC_{i1n} - YC_{i2n}|}$$

(7.71)

側方固定ブロックのキー溝とキーとのギャップの大きさを δ_G とすると x 方向ギャップおよび y 方向ギャップ δ_{Gx} および δ_{Gy} は、それぞれ次のようになる。

$$\delta_{Gx} = \frac{\delta_G}{|\cos \theta_{pi}|}$$

$$\delta_{Gy} = \frac{\delta_G}{|\sin \theta_{pi}|}$$

(7.72)

側方固定ブロックのキー溝とキーとの間のばね定数の x 方向成分および y 方向成分 KK_x および KK_y は、キーのばね定数を KK とすると、それぞれ次のようになる。

$$KK_x = |KK \cdot \cos \theta_{pn}|$$

$$KK_y = |KK \cdot \sin \theta_{pn}|$$

(7.73)

側方固定ブロックのキー溝とキーとの間の減衰係数の x 方向成分および y 方向成分 CK_x および CK_y は、キーの減衰係数を CK とすると、それぞれ次のようになる。

$$CK_x = |CK \cdot \cos \theta_{pn}|$$

$$CK_y = |CK \cdot \sin \theta_{pn}|$$

(7.74)

側方固定ブロック間のキー反力の x 方向成分 FKX は次のようになる。

$|XK_{nn} - XK_{in}| \geq \delta_{Gx}$ の場合

$$FKX = KK_x \cdot \left\{ (XK_{nn} - XK_{in}) - \frac{XK_{nn} - XK_{in}}{|XK_{nn} - XK_{in}|} \cdot \delta_{Gx} \right\}$$

$$+ CK_x \cdot (VK_{nx} - VK_{ix})$$

$|XK_{nn} - XK_{in}| < \delta_{Gx}$ の場合

$$FKX = 0$$

(7.75)

側方固定ブロック間のキー反力の y 方向成分 FKY は次のようになる。

$|YK_{nn} - YK_{in}| \geq \delta_{Gy}$ の場合

$$FKY = KK_y \cdot \left\{ (YK_{nn} - YK_{in}) - \frac{YK_{nn} - YK_{in}}{|YK_{nn} - YK_{in}|} \cdot \delta_{Gy} \right\}$$

$$+ CK_y \cdot (VK_{ny} - VK_{iy})$$

$|YK_{nn} - YK_{in}| < \delta_{Gy}$ の場合

$$FKY = 0$$

(7.76)

側方固定ブロック間のキー反力のせん断力成分（キーの取付辺と平行な力）およびそれと直角方向成分 FK_l および FK_r はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} FK_l &= FK_x \cdot \cos \theta_{pn} + FK_y \cdot \sin \theta_{pn} \\ FK_r &= -FK_x \cdot \sin \theta_{pn} + FK_y \cdot \cos \theta_{pn} \end{aligned} \right\} \quad (7.77)$$

n 番目のブロックの重心まわりのモーメントは次のようになる。

$$AMK = -FK_y \cdot XK_{nn} + FK_x \cdot YK_{nn} \quad (7.78)$$

ここで、式 (7.75) および (7.76) の VK_{nx} , VK_{ny} , V_{ix} , V_{iy} はそれぞれ次のとおりである。

VK_{nx} : n 番目のブロックの x 方向速度

VK_{ny} : n 番目のブロックの y 方向速度

VK_{ix} : i 番目のブロックの x 方向速度

VK_{iy} : i 番目のブロックの y 方向速度

(9) 運動方程式

(i) 燃料ブロックの運動方程式

燃料ブロックの運動方程式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} M_n \cdot (\ddot{\overline{XR}}_n + \ddot{\overline{XRO}}_n) + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 FX_{nij} + \sum_{i=1}^6 FXI_i + FSX_n &= 0 \\ M_n \cdot (\ddot{\overline{YR}}_n + \ddot{\overline{YRO}}_n) + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 FY_{nij} + \sum_{i=1}^6 FYI_i + FSY_n &= 0 \\ I_n \cdot \ddot{\theta}_n + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 AM_{nij} + \sum_{i=1}^6 AMI_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.79)$$

ここで

$\ddot{\overline{XR}}_n$: n 番目のブロックの重心の加速度の x 方向成分

$\ddot{\overline{YR}}_n$: n 番目のブロックの重心の加速度の y 方向成分

$\ddot{\overline{XRO}}_n$: x 方向入力加速度

$\ddot{\overline{YRO}}_n$: y 方向入力加速度

θ_n : n 番目のブロックの重心まわりの回転加速度

M_n : n 番目のブロックの質量

I_n : n 番目のブロックの回転慣性

(ii) 側方固定ブロックの運動方程式

側方固定ブロックの運動方程式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} M_n \cdot (\ddot{\overline{XR}}_n + \ddot{\overline{XRO}}_n) + \sum_{i=1}^{NCR} \sum_{j=1}^2 FX_{nij} + \sum_{i=1}^{NCR} FXI_i + FSX_n \\ + \sum_{i=1}^2 FRX_{ni} + \sum_{i=1}^2 FKX_{ni} &= 0 \\ M_n \cdot (\ddot{\overline{YR}}_n + \ddot{\overline{YRO}}_n) + \sum_{i=1}^{NCR} \sum_{j=1}^2 FY_{nij} + \sum_{i=1}^{NCR} FYI_i + FSY_n \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & + \sum_{i=1}^2 \text{FRY}_{ni} + \sum_{i=1}^2 \text{FKY}_{ni} = 0 \\ I_n \cdot \ddot{\theta}_n + \sum_{i=1}^{\text{NCR}} \sum_{j=1}^2 \text{AM}_{nij} + \sum_{i=1}^{\text{NCR}} \text{AMI}_i + \sum_{i=1}^2 \text{AMR}_{ni} \\ & + \sum_{i=1}^2 \text{AMK}_{ni} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.80)$$

ここで、NCR は側方固定ブロックの角の数。

(iii) 炉心支持ブロックの運動方程式

炉心支持ブロックの運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_s (\ddot{\overline{X}}R_s + \ddot{\overline{X}}R\overline{O}_n) - \sum_{i=1}^{\text{NB}} \text{FSX}_i - \sum_{i=1}^{\text{NR}} \text{FRX}_i + \text{FBX} &= 0 \\ M_s (\ddot{\overline{Y}}R_s + \ddot{\overline{Y}}R\overline{O}_n) - \sum_{i=1}^{\text{NB}} \text{FSY}_i - \sum_{i=1}^{\text{NR}} \text{FRY}_i + \text{FBY} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.81)$$

ここで、

$\ddot{\overline{X}}R$: 炉心支持ブロックの重心の加速度の x 方向成分

$\ddot{\overline{Y}}R$: 炉心支持ブロックの重心の加速度の y 方向成分

M_s : 炉心支持ブロックの質量

FSX : 炉心支持ブロックの支持反力の x 方向成分

FSY : 炉心支持ブロックの支持反力の y 方向成分

$$\left. \begin{aligned} \text{FSX} &= \text{KRB}P \cdot \overline{X}R_s + \text{CRBP} \cdot \dot{\overline{X}}R_s \\ \text{FSY} &= \text{KRB}P \cdot \overline{Y}R_s + \text{CRBP} \cdot \dot{\overline{Y}}R_s \end{aligned} \right\} \quad (7.82)$$

KRBP: 炉心支持ブロック支持構造物のばね定数

CRBP: 炉心支持ブロック支持構造物の減衰係数

$\overline{X}R_s$: 炉心支持ブロックの重心の x 方向変位

$\overline{Y}R_s$: 炉心支持ブロックの重心の y 方向変位

$\dot{\overline{X}}R_s$: 炉心支持ブロックの重心の x 方向速度

$\dot{\overline{Y}}R_s$: 炉心支持ブロックの重心の y 方向速度

7.2 応答解析

(1) 水平二次元炉心模型

Fig. 7.11 は水平二次元炉心模型の計算体系を示す。燃料ブロック 139 個、側方固定ブロック 18 個およびその拘束構造物から計算体系は構成される。拘束構造物の支持壁は剛体壁とする。計算に用いるデータは Table 7.1 に示している他、燃料ブロック相互間および燃料ブロックと側方固定ブロックの間には 2mm のギャックがある。計算時間刻みは 2.0×10^{-4} 秒とする。数値計算はルンゲ・クッタ・ギル法による。

応答計算は側方固定ブロックの支持条件が強い場合、最大加振加速度 250 Gal, 4.1 Hz の正弦

波によるX軸方向一軸加振条件の場合について行った。

(i) 変位応答形

Fig. 7.12は応答計算の各時刻における炉心内の燃料ブロックと側方固定ブロックの変位状態を示す。燃料ブロックは加振方向への移動のみならず加振方向と直角方向への移動あるいは燃料ブロックの中心軸まわりに回転していることがわかる。第5章において記述したように、燃料ブロックは加振方向への移動のみならず、加振方向と直角方向への移動や回転は、振動試験においても認められており、計算結果と試験結果は同じ現象を示していることがわかる。

(ii) 最大変位

Fig. 7.13はX軸上の燃料ブロックおよび側方固定ブロックの最大変位について計算結果と試験結果を比較して示す。X軸上ブロック列のX軸方向変位のうち側方固定ブロックに近い燃料ブロックの変位について計算値と試験値を比較すると、計算値が試験値よりも小さい。これは応答計算は0～0.424秒(1.5周期)の時間であり、このような短い時間では炉心は定常応答の状態に至っていないので、定常応答状態にある試験結果よりも計算結果は低い値になったものと考えられる。Fig. 7.13にはブロック間の衝突モデルにおける摩擦の考慮の有無($\mu = 0.0$: 摩擦無し, $\mu = 0.2$: 摩擦係数0.2)による応答変位の比較を示すが、摩擦の影響は大きくない。

Fig. 7.14はFig. 7.13の加振条件におけるY軸上の燃料ブロックおよび側方固定ブロックの最大変位について計算結果と試験結果を比較して示す。計算値と試験値は良い一致を示している。ブロック間の摩擦の有無による最大変位の差は大きくない。

(iii) 最大衝突加速度

Fig. 7.15はX軸上の燃料ブロックおよび側方固定ブロックの最大衝突加速度について計算結果と試験結果を比較して示す。X軸上ブロック列の加振方向の衝突加速度について計算値と試験値を比較すると、計算値は試験値の約1/2である。これは応答変位の比較において述べたように、短い応答計算時間によって炉心は十分な加振状態にないため、試験値に比較して計算値が低くなったものと考えられる。Fig. 7.15からブロック間の摩擦の考慮の有無による最大衝突加速度への影響は大きくないことがわかる。

Fig. 7.16はY軸上の燃料ブロックおよび側方固定ブロックの最大衝突加速度について計算結果と試験結果を比較して示す。Y軸上ブロック列の加振方向(X軸方向)の衝突加速度について計算値と試験値を比較すると、計算値は試験値の約1/2である。これは、上で述べたように、応答計算時間が少ないため炉心は十分な加振状態にないため、試験値に比較して計算値が低くなったものと考えられる。Fig. 7.16からブロック間の摩擦の有無による最大衝突加速度への影響は大きくない。

(iv) 側方固定ブロックの最大支持反力

Fig. 7.17は側方固定ブロックのX軸方向およびY軸方向の最大側方支持反力の計算結果について、ブロック間の摩擦の考慮の有無による差は大きくない。

Fig. 7.18は炉心の径方向、接線方向およびこれらのベクトル和の最大側方支持反力について、計算結果と試験結果を比較して示す。最大側方支持反力の計算値は試験値よりも大きい。これは積分時間刻みを大きく取り過ぎたためと考えられる。

(2) 三列ブロック模型

水平二次元炉心模型の計算値は試験値と比較して、変位および衝突加速度では小さく、側方支持反力では大きい。前者の原因は応答計算時間が短く、炉心は十分な定常応答状態に至っていないものと考えられる。後者の原因は積分時間刻みが大き過ぎたものと考えられる。この推定が妥当であるか否かを確認するために、三列ブロック模型による応答計算を行った。

三列ブロック模型の計算モデルはFig. 7.19に示すように、X軸上とその両側の三列の燃料ブロック35個および両端の側方固定ブロック2個から構成される。燃料ブロック列の外側の二列のブロックには、Y軸方向への移動（横振れ）を防止するために案内板が設けられている。計算に使用するデータは加振振動数以外は水平二次元炉心模型の応答計算の場合と同じである。

(i) 変位応答形

Fig. 7.20は応答計算の各時刻における燃料ブロックと側方固定ブロックの変位状態を示す。燃料ブロックは加振方向へ移動しているが、加振方向と直角方向の移動及び回転はわずかである。水平二次元炉心模型の変位応答と比較すると、三列ブロック模型では加振方向と直角方向の移動および回転が少い。

(ii) 最大変位

Fig. 7.21はX軸上のブロック列の最大変位について計算結果と試験結果を比較して示す。燃料ブロックの変位について計算値と試験値を比較すると、計算値は試験値よりも小さい。これは、三列ブロック模型においても、水平二次元炉心模型と同じように、模型は十分な加振状態に至るまで計算が進んでないので、計算による最大変位が試験によるものよりも小さい値になっているものと考えられる。

(iii) 最大衝突加速度

Fig. 7.22はX軸上のブロック列の最大衝突加速度について計算結果と試験結果を比較して示す。燃料ブロックの衝突加速度について計算値と試験値を比較すると、計算値は試験値よりも小さい。これは、三列ブロック模型においても、水平二次元炉心模型と同じように、模型は十分な定常応答状態に至るまで計算が進んでないので、計算による最大衝突加速度が試験によるものよりも小さい値になっているためと考えられる。

(3) 水平二次元炉心模型と三列ブロック模型の比較

水平二次元炉心模型と三列ブロック模型の応答計算結果を比較することによって、水平二次元炉心模型についての計算値と試験値の相違の原因を明らかにする。

Fig. 7.23は水平二次元炉心模型における応答計算結果と試験結果についてX軸上のブロックのX軸方向最大変位を比較して示す。図では応答時間が0～0.18秒（入力波形の1.5波目まで）と0～0.424秒（入力波形の2.5波目まで）とに分けて示す。応答時間が短い場合（0～0.18秒の応答結果）、計算値と試験値の差は大きい、応答時間が長くなると（0～0.424秒の応答結果）計算値と試験値との差は小さくなる。これから(1)項において記述したように、最大変位および最大衝突加速度は応答計算時間を十分長く取ることによって計算値は試験値に近づくものと考えられる。

Fig. 7.24は水平二次元炉心模型における最大側方支持反力の計算結果と試験結果および三列ブロック模型における最大側方支持反力の計算結果を比較して示す。応答時間の長さによる影響

を明らかにするために、応答時間を 0～0.18 秒の場合および 0～0.424 秒の場合についてそれぞれ示している。応答時間が短い場合（0～0.18 秒の応答結果），水平二次元炉心模型の計算値と試験値および三列ブロック模型の計算値はほぼ同じ値となっている。応答時間が長い場合（0～0.424 秒の応答結果），水平二次元炉心模型の試験値と三列ブロック模型の計算値に比較して，水平二次元炉心模型の計算値は大きくなる。特に，接線方向荷重が作用する側方固定ブロック RB-1，RB-8 および RB-9 において，水平二次元炉心模型の最大側方支持反力の計算値は試験値よりもかなり大きい。これは燃料ブロックが側方固定ブロックに回転しながら衝突し，燃料ブロックの六角形の一つの角が側方固定ブロックに鋭く食い込み，その結果として大きな力となって計算されるものと考えられる。これは積分時間刻みを小さくすることによって，試験値に近い値になるものと考えられる。

Table 7.1 Calculation constant

Item	Unit	Fuel block	Fixed side reflector block			Core base plate
			Type A	Type B	Type C	
Mass	$\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$	—	0.0992	0.1178	0.146	
Spring constant	Impact	12600	12600			—
	Support	4.8	7760			7760
Damping coefficient	Impact	7.84	7.84			—
	Support	0.061	2.8	3.0	3.4	6.8
Spring constant of reflector key		12600 kg/cm				
Damping constant of reflector key		7.84 $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}$				

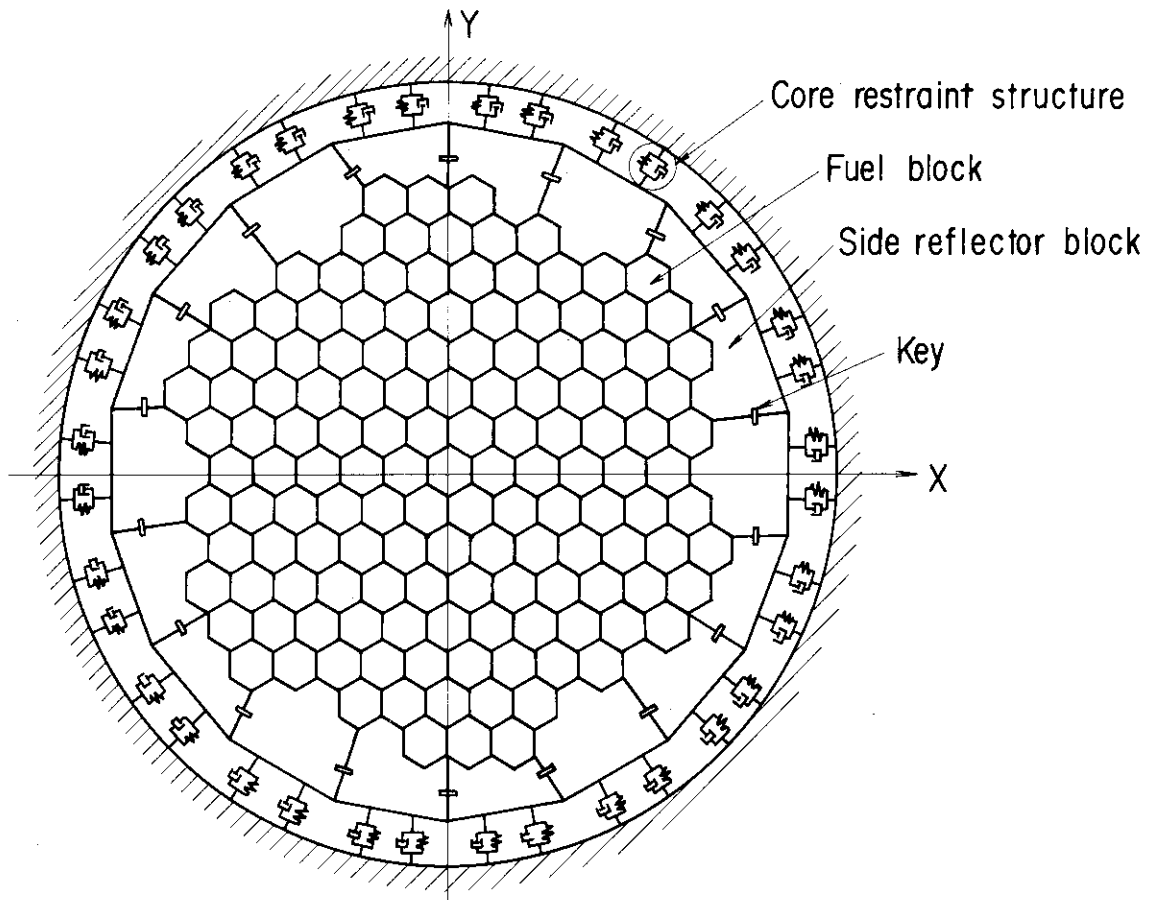


Fig. 7.1 Two-dimensional horizontal core analytical model (I)

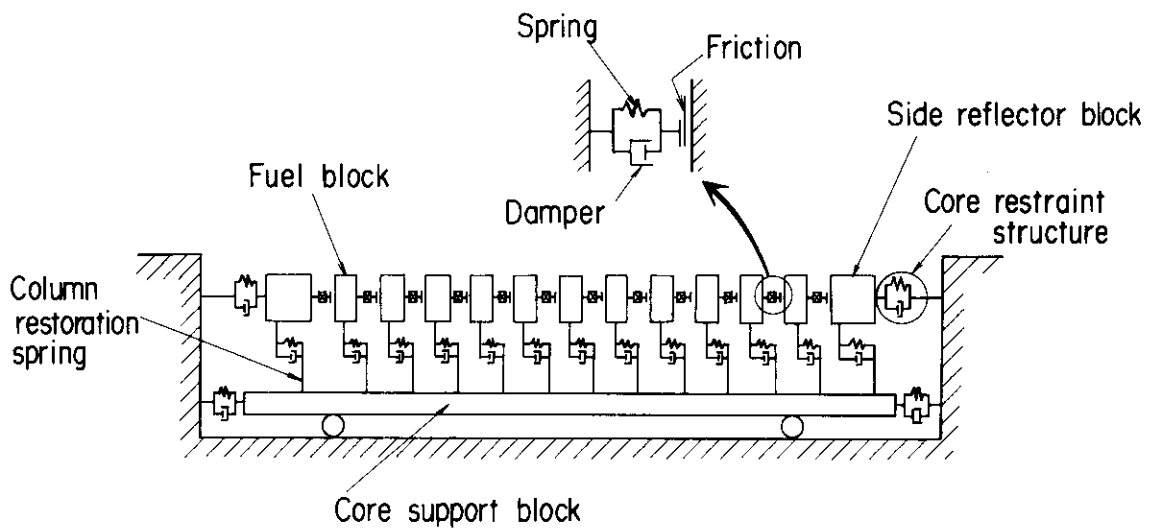


Fig. 7.2 Two-dimensional horizontal core analytical model (II)

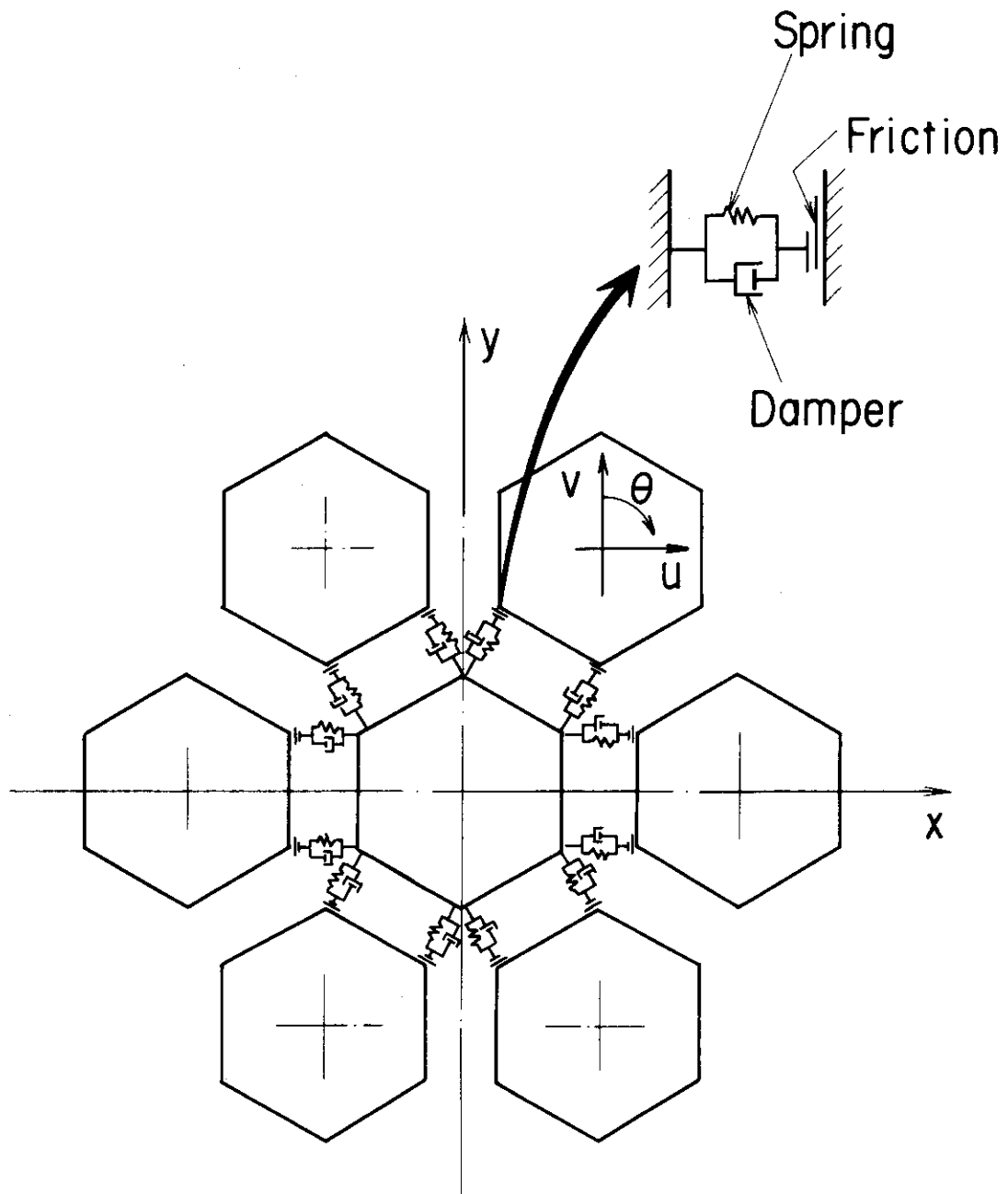


Fig. 7.3 Block arrangement and impact model

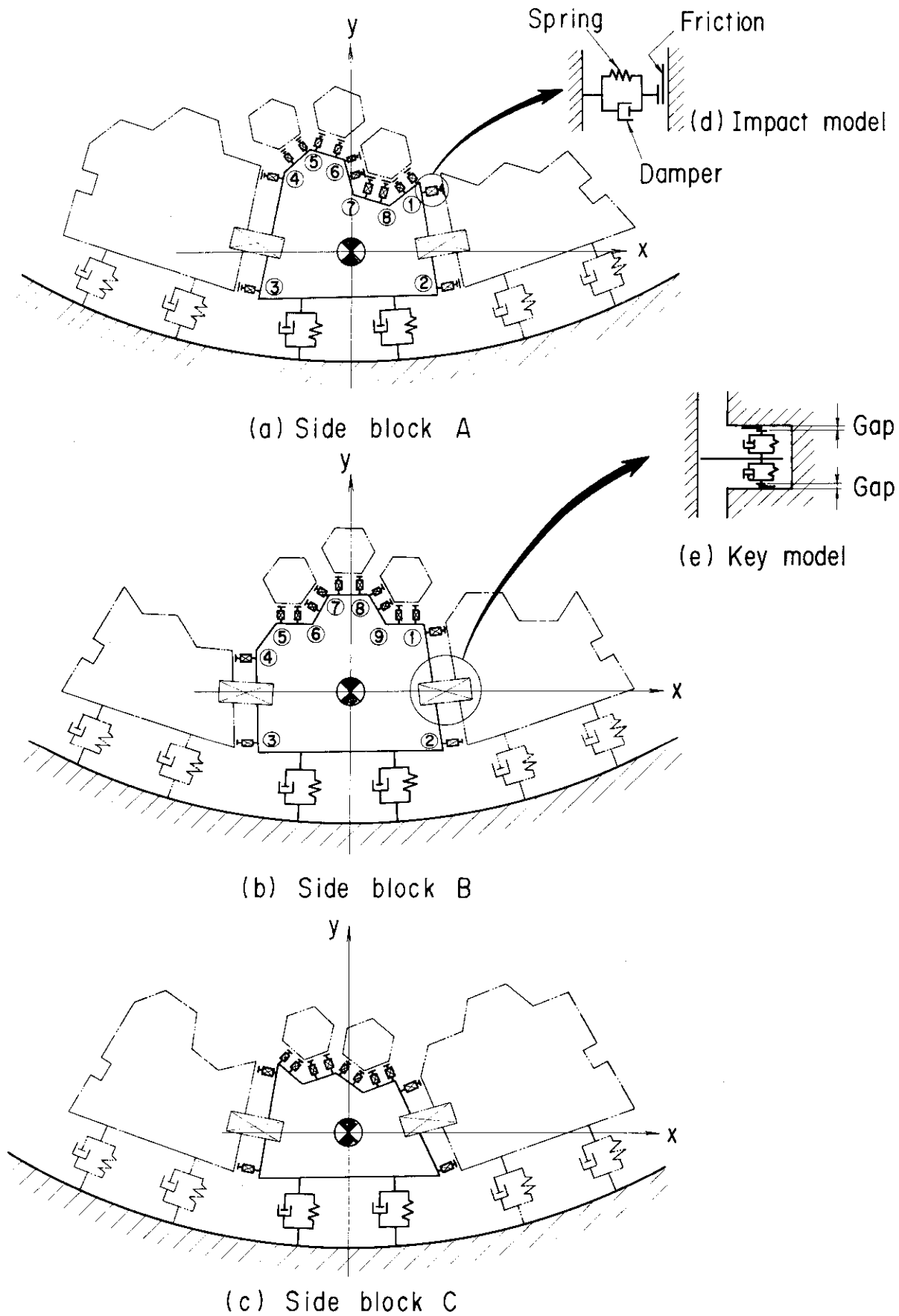


Fig. 7.4 Side reflector block model

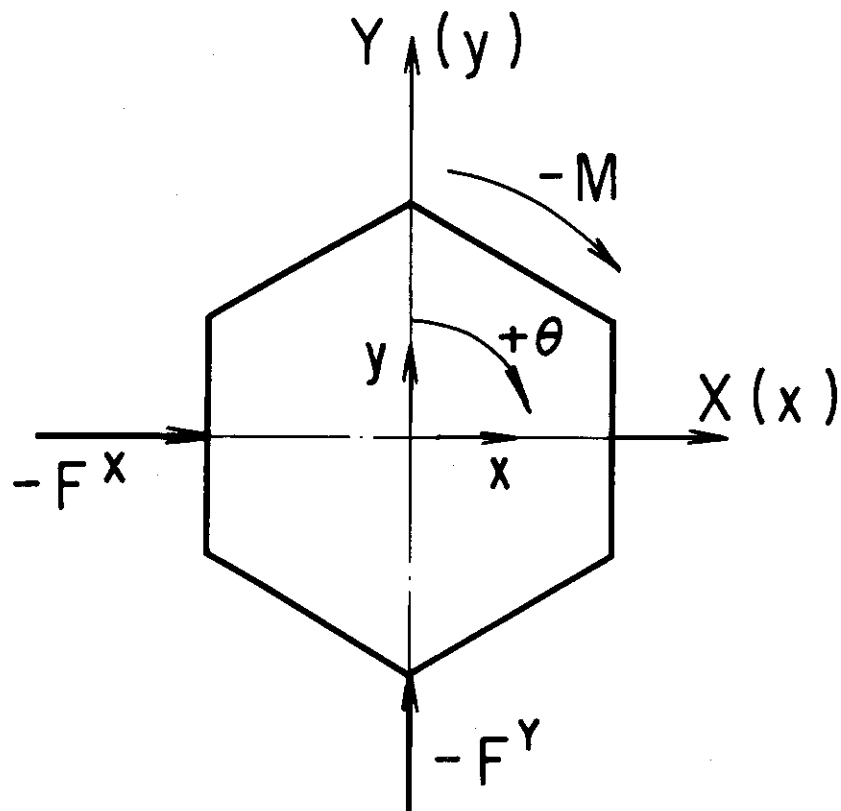


Fig. 7.5 Sign of displacement, force and moment

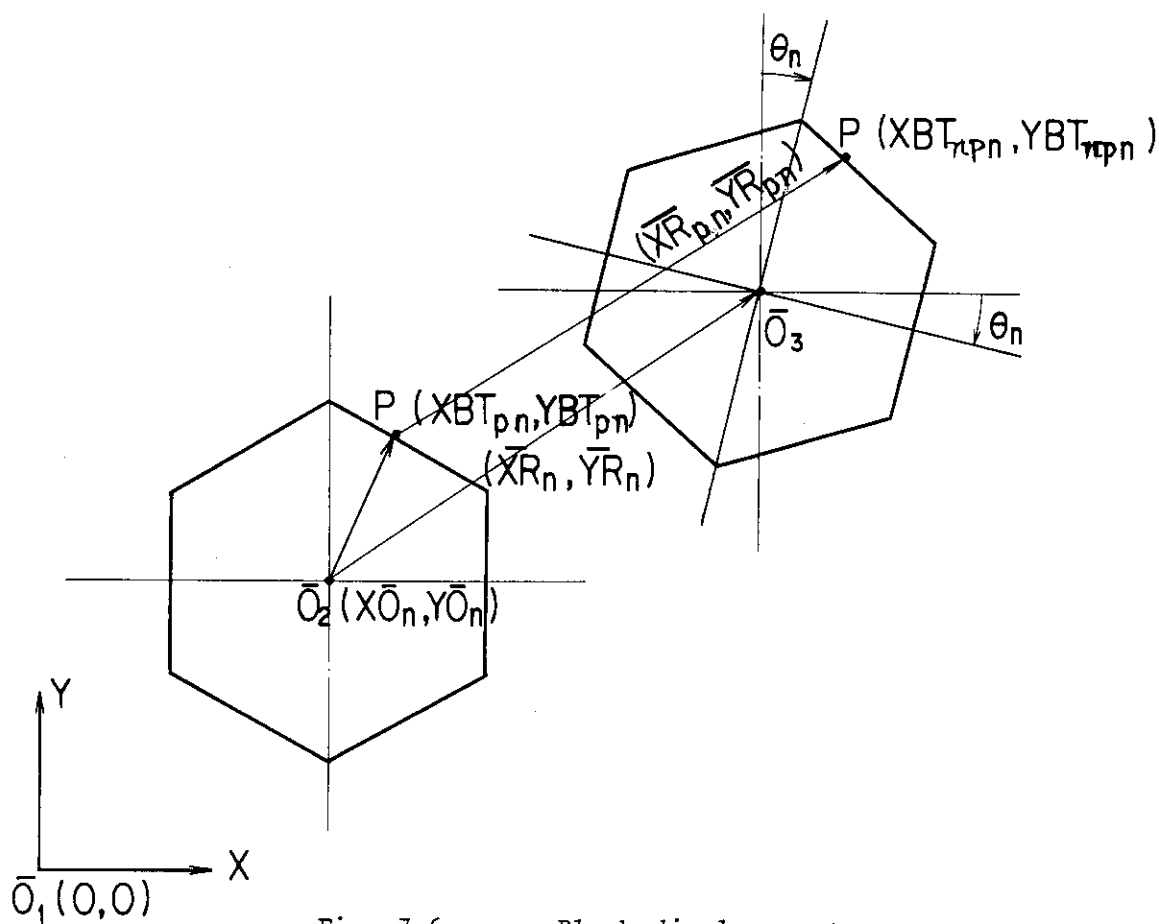


Fig. 7.6 Block displacement

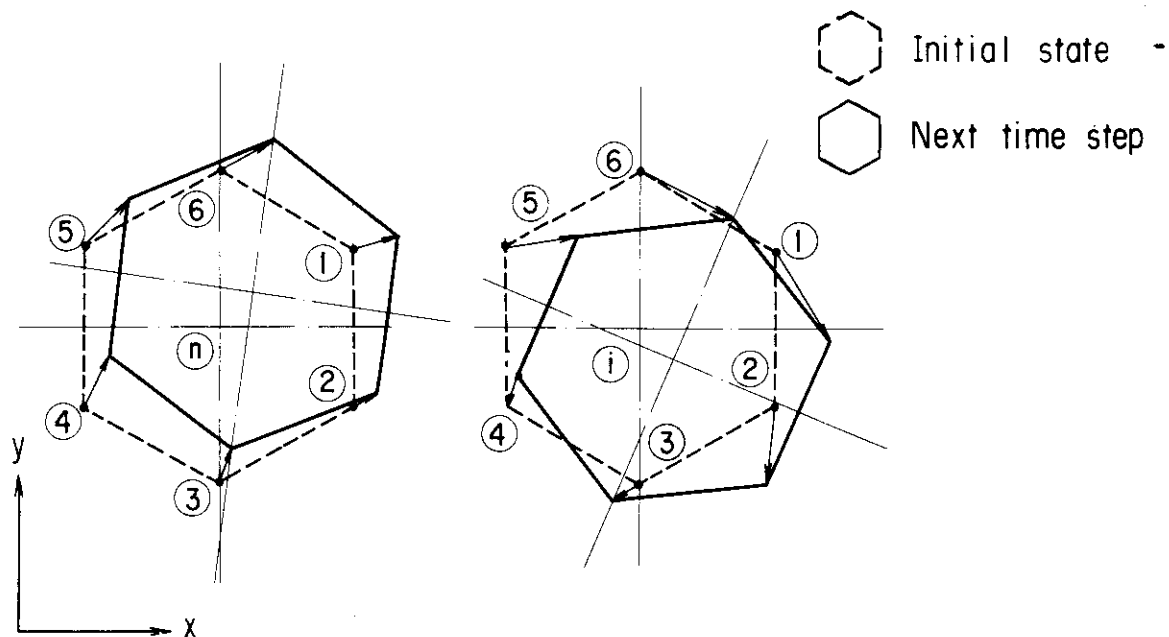


Fig. 7.7 Gap between blocks

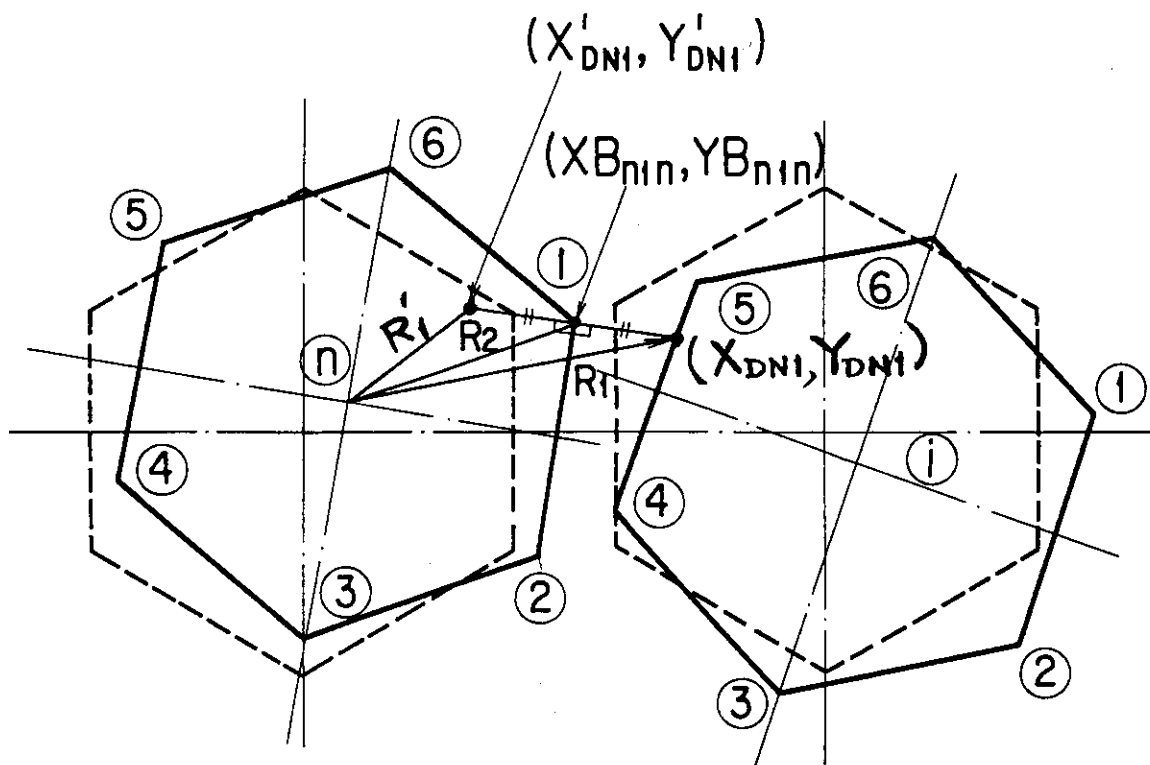


Fig. 7.8 Determination of block impact

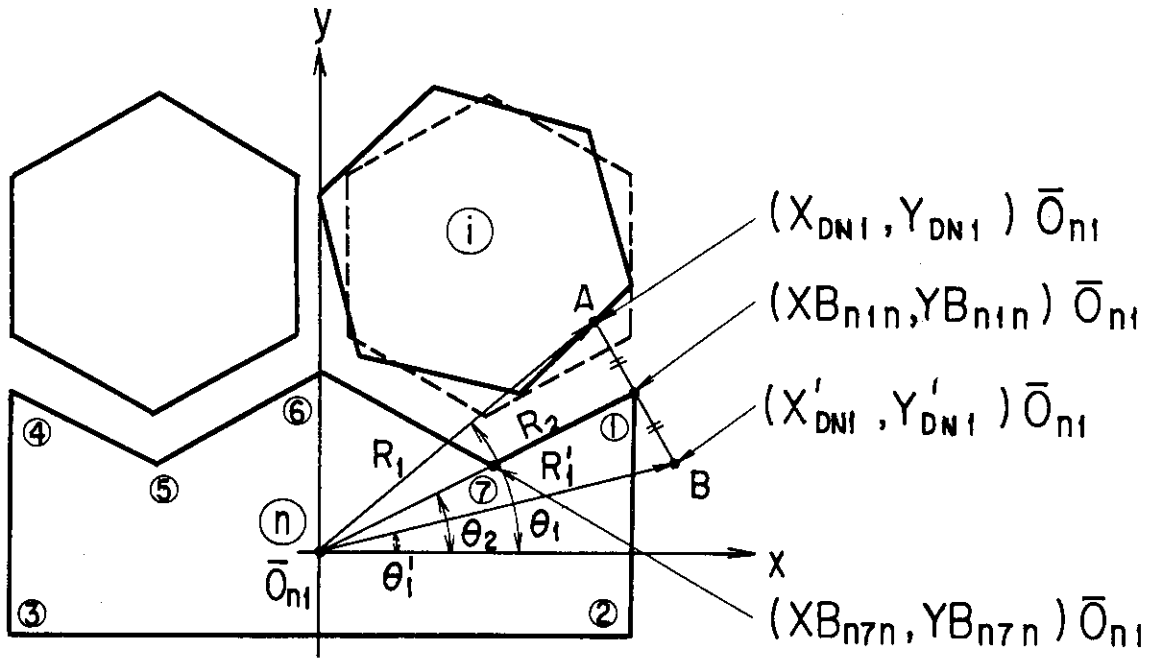


Fig. 7.9 Undefined case of block impact

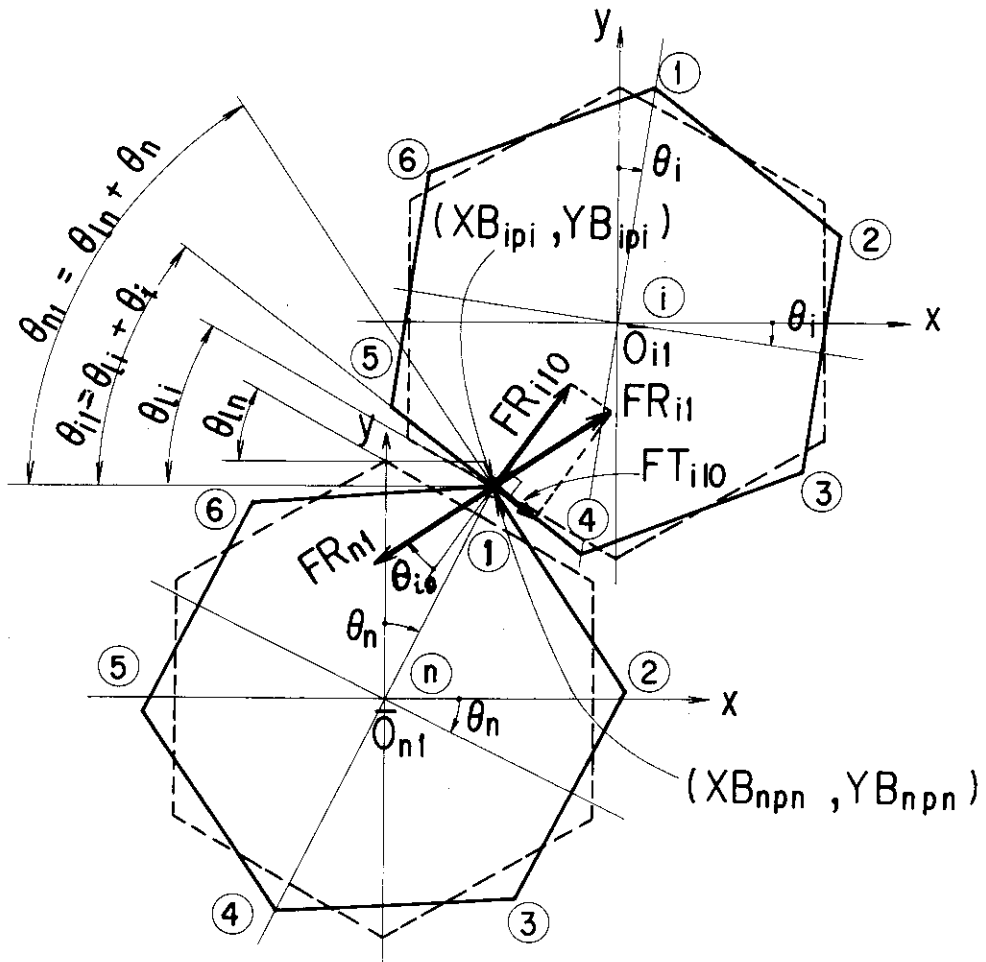


Fig. 7.10 Impact force components

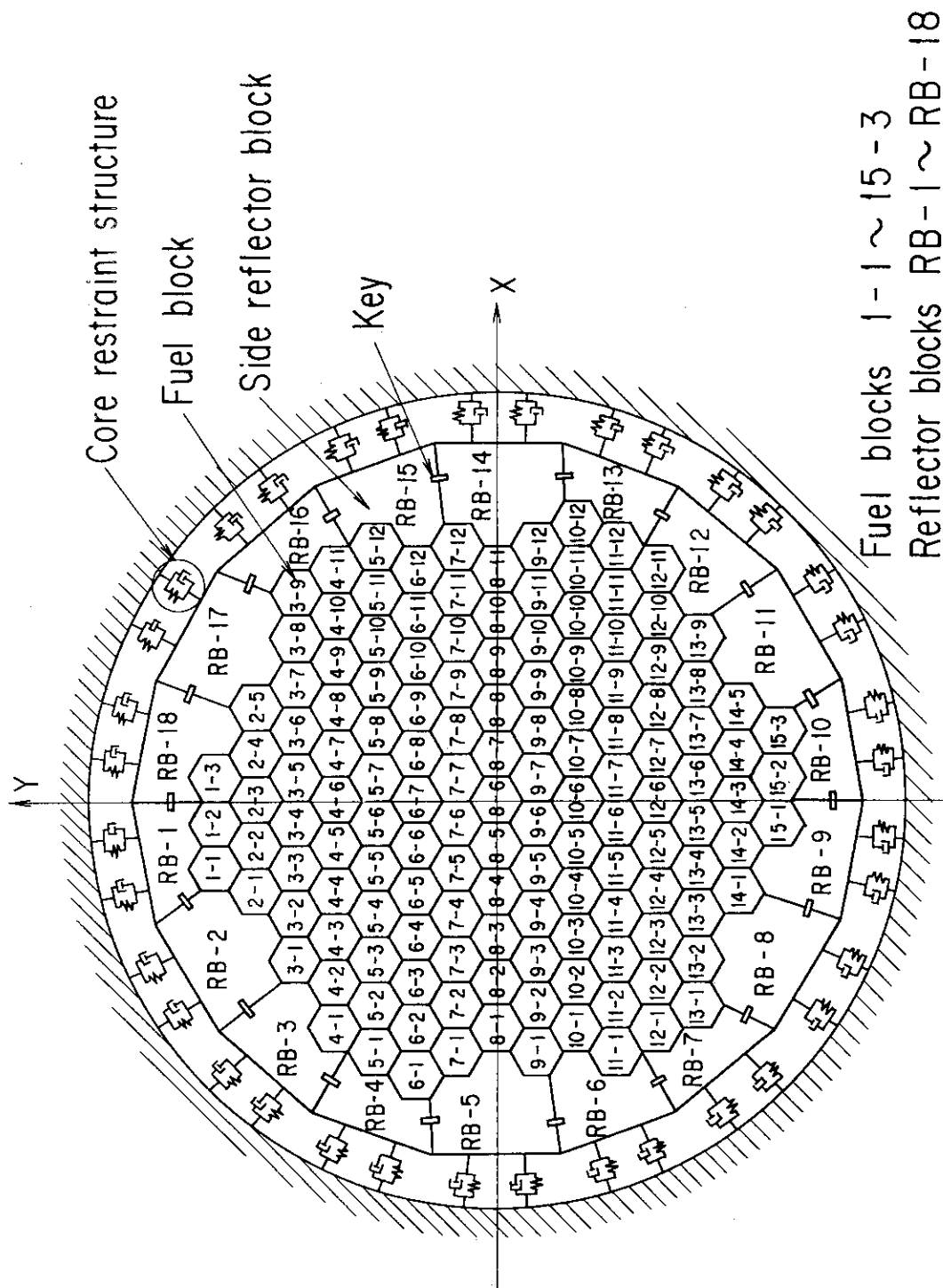


Fig. 7.11 Location number of fuel blocks and side reflector blocks

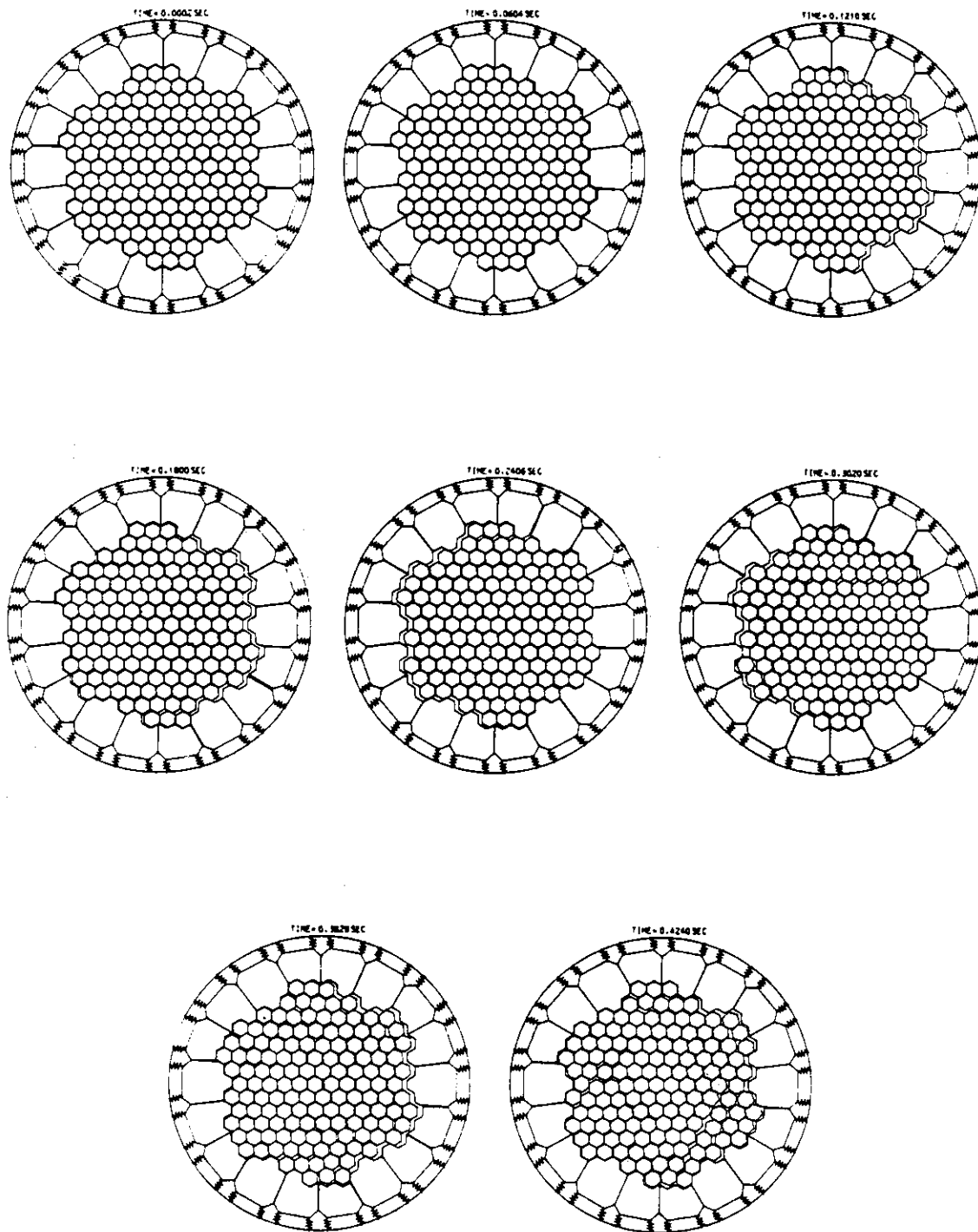


Fig. 7.12 Seismic behavior of two-dimensional horizontal slice core model (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

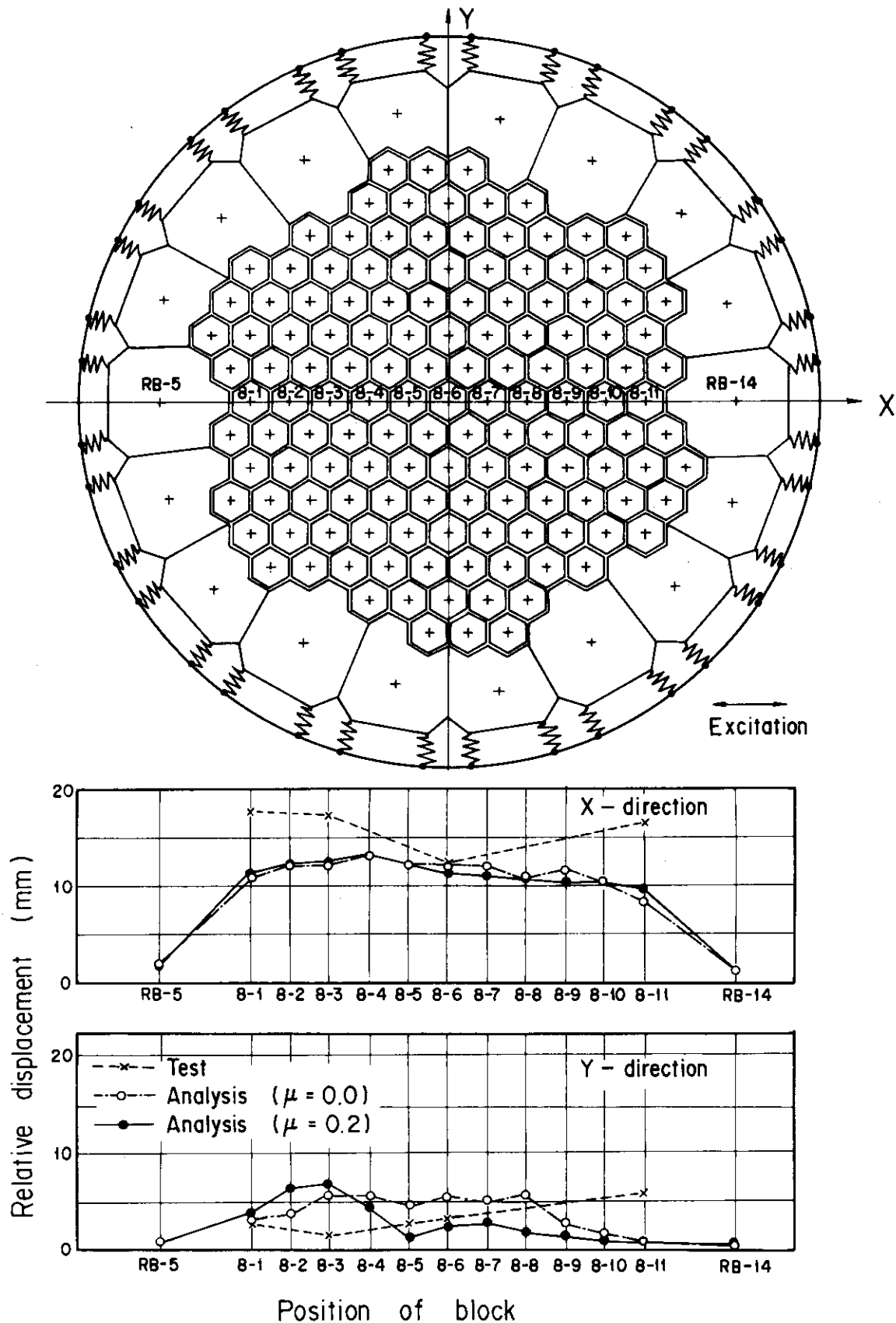


Fig. 7.13 Displacement of block on X-axis position (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

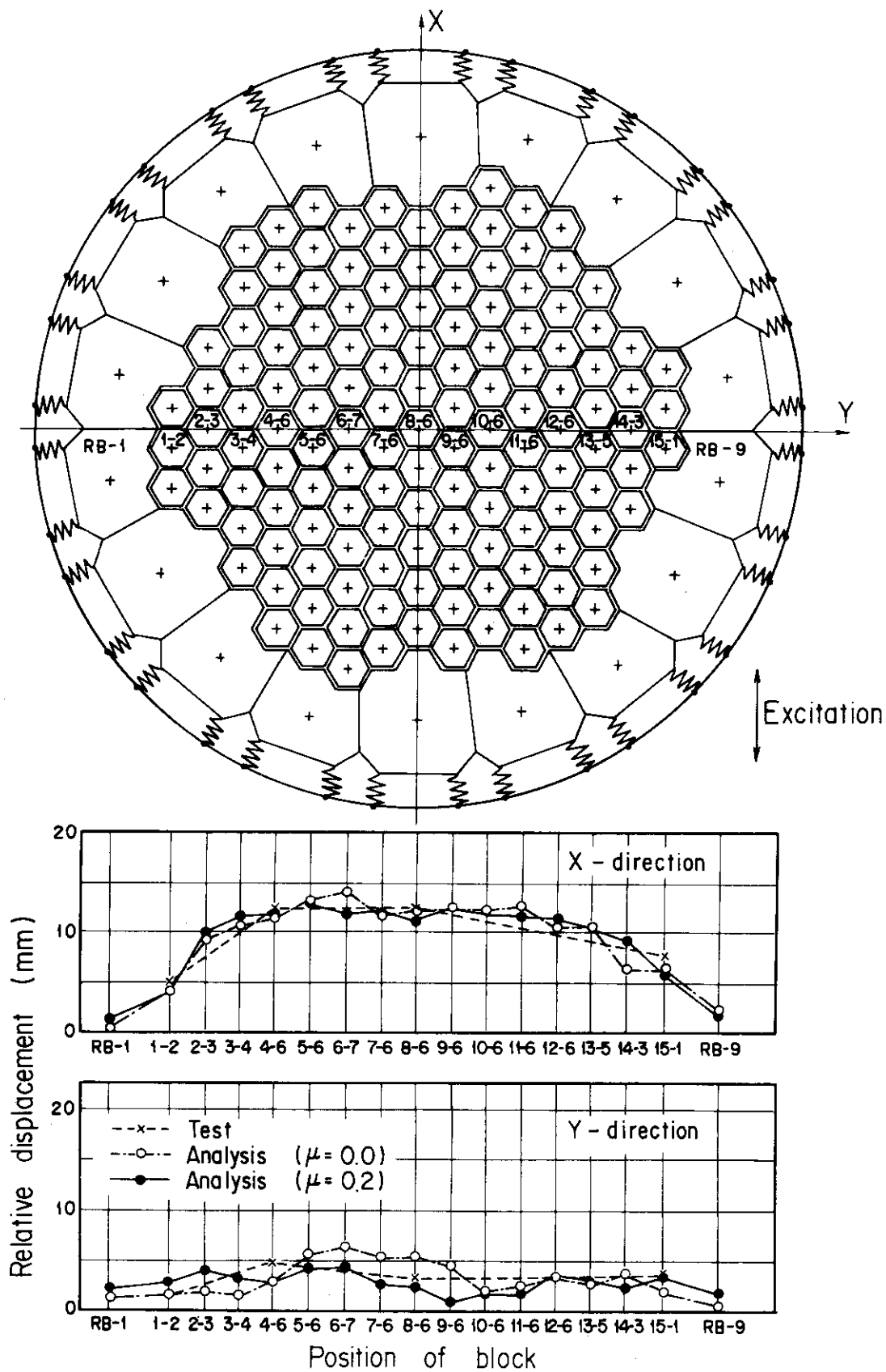


Fig. 7.14 Displacement of block on Y-axis position (Excitation x-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

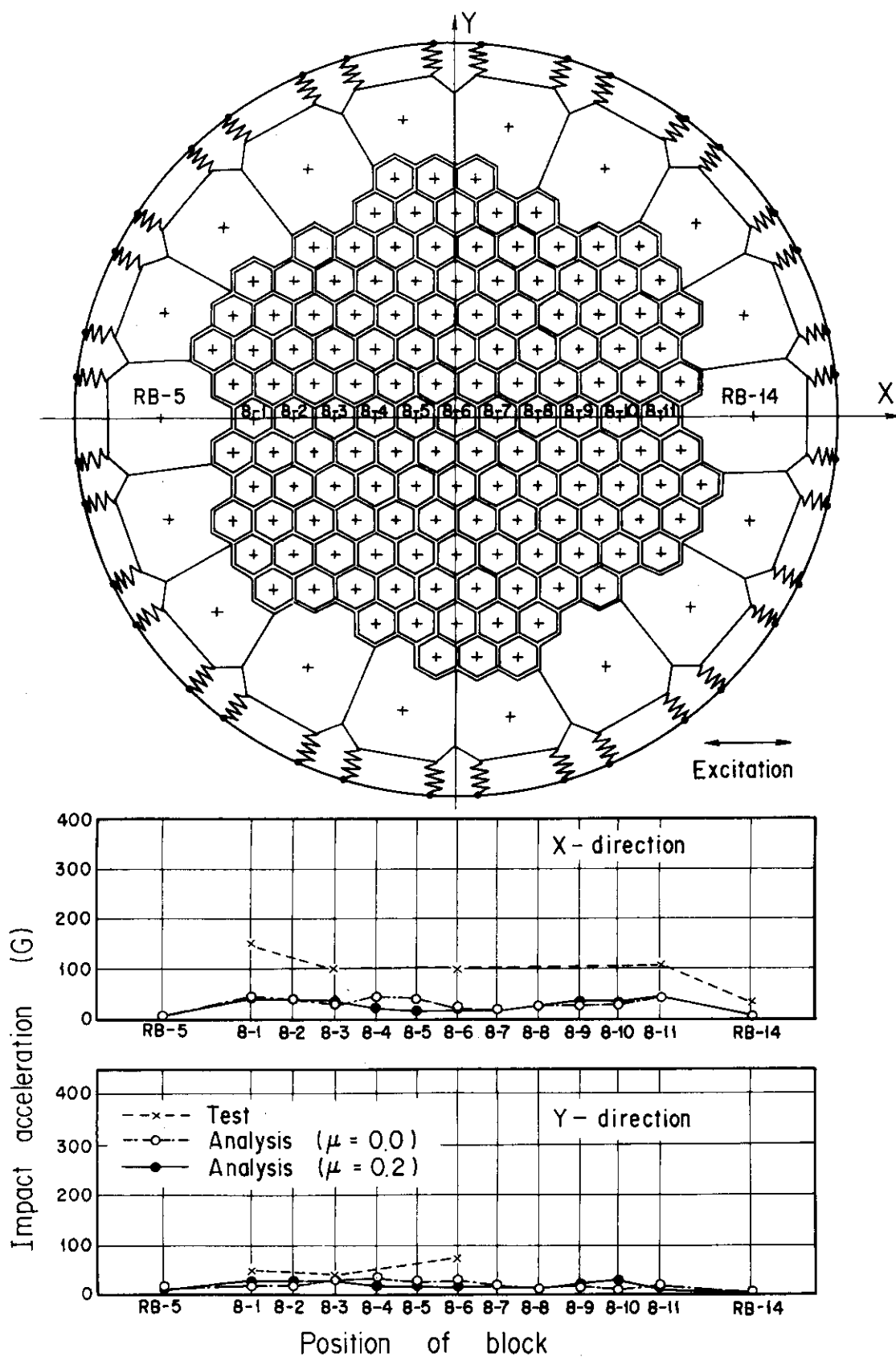


Fig. 7.15 Impact acceleration of block on X-axis position
(Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max acceleration 250 Gal)

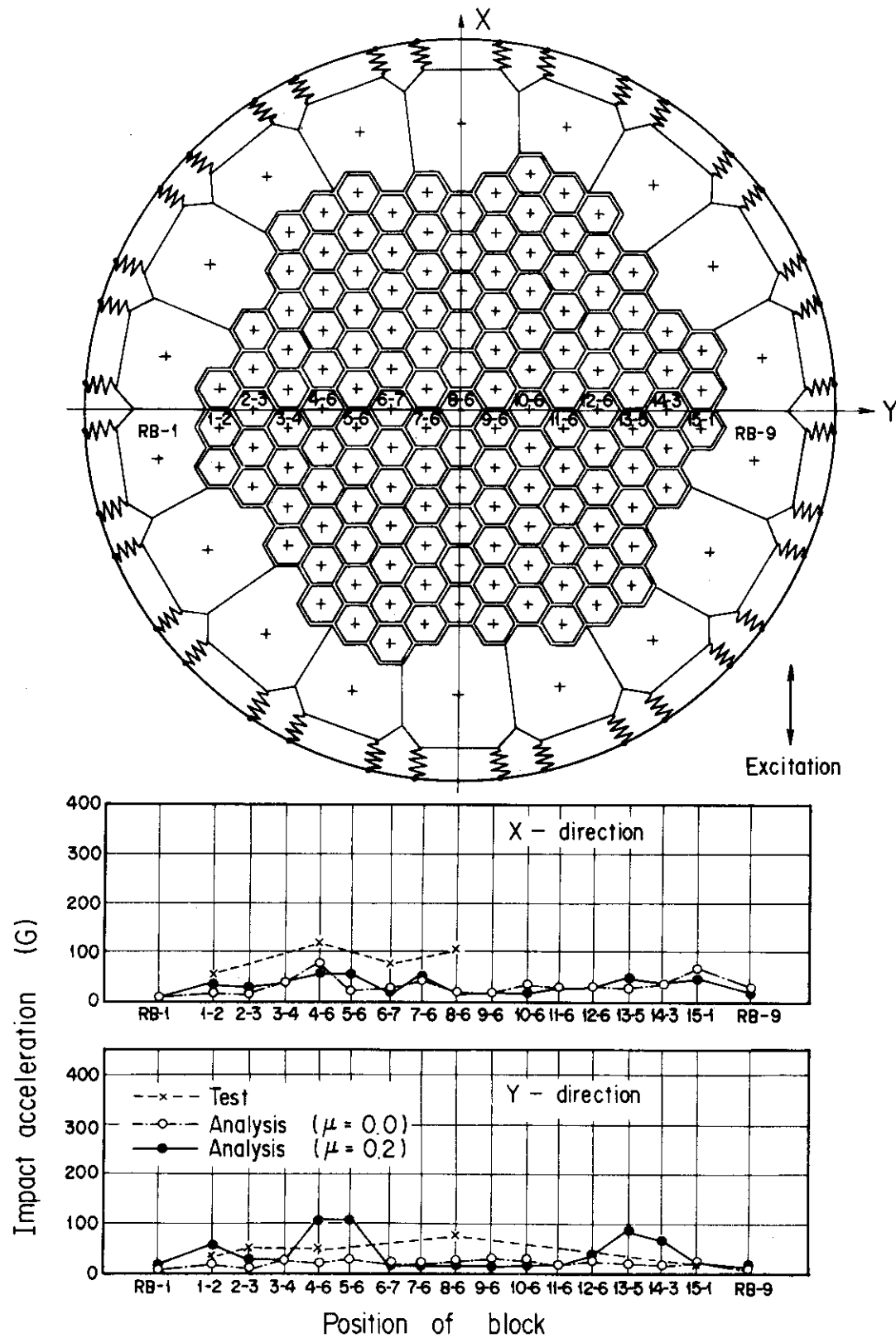


Fig. 7.16 Impact acceleration of block on Y-axis position
(Excitation X-direction, 4.1 Hz Max. acceleration 250 Gal)

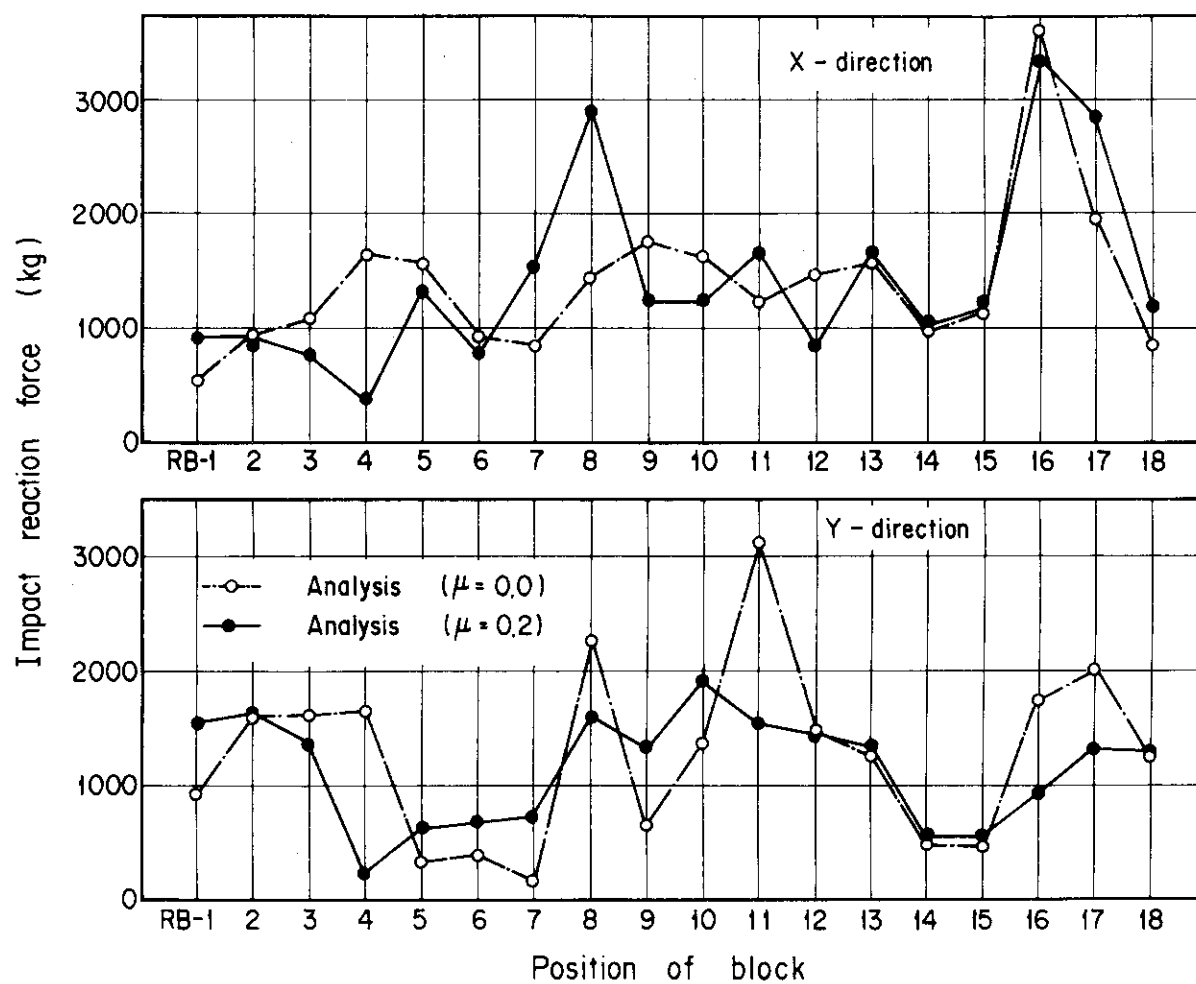


Fig. 7.17 Impact reaction force distribution of reflector block
(Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

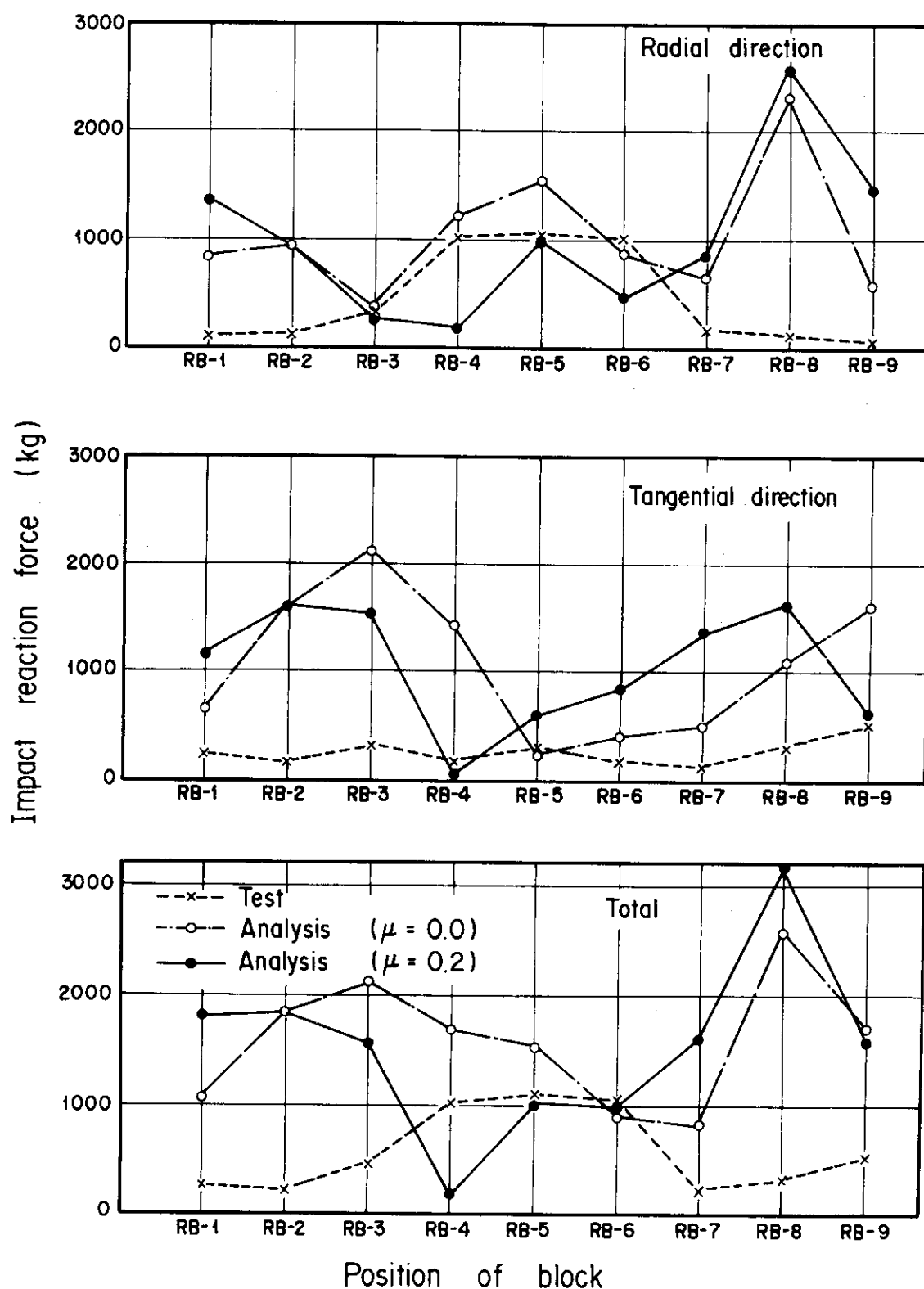


Fig. 7.18 Impact reaction force distribution of reflector block
 (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

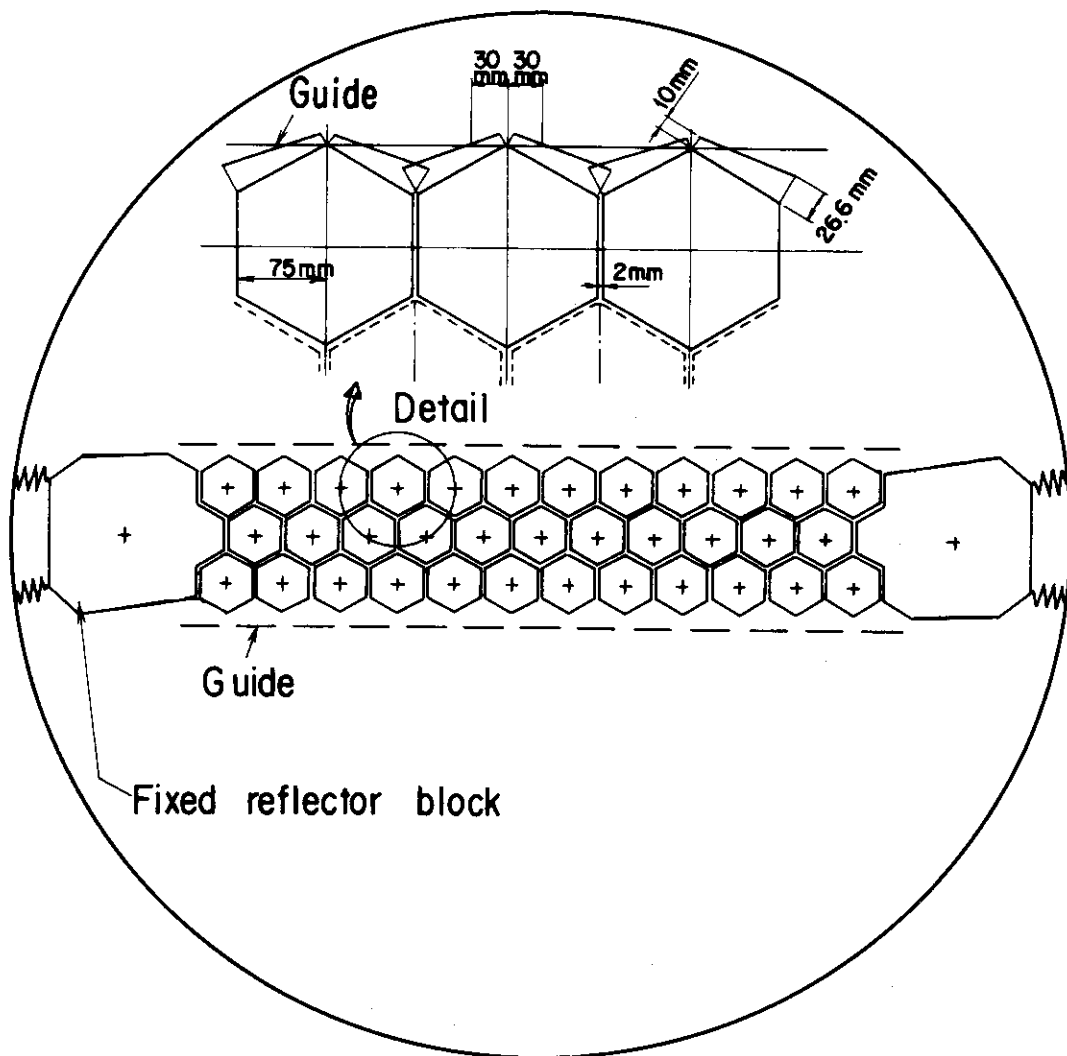


Fig. 7.19 Calculation model of three-row core

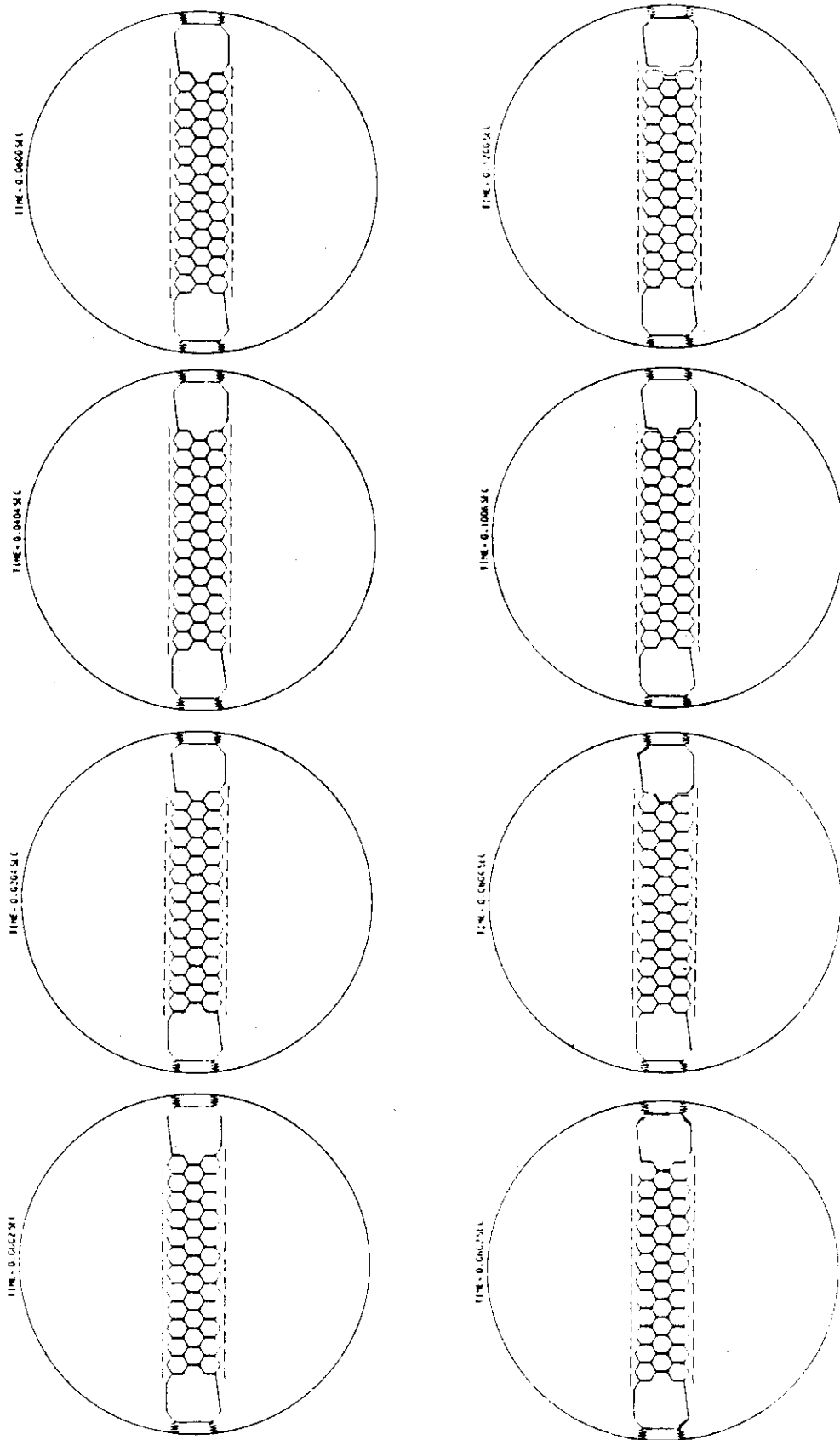


Fig. 7.20 Seismic behavior of Three-row model (Excitation X-direction, 3.8 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

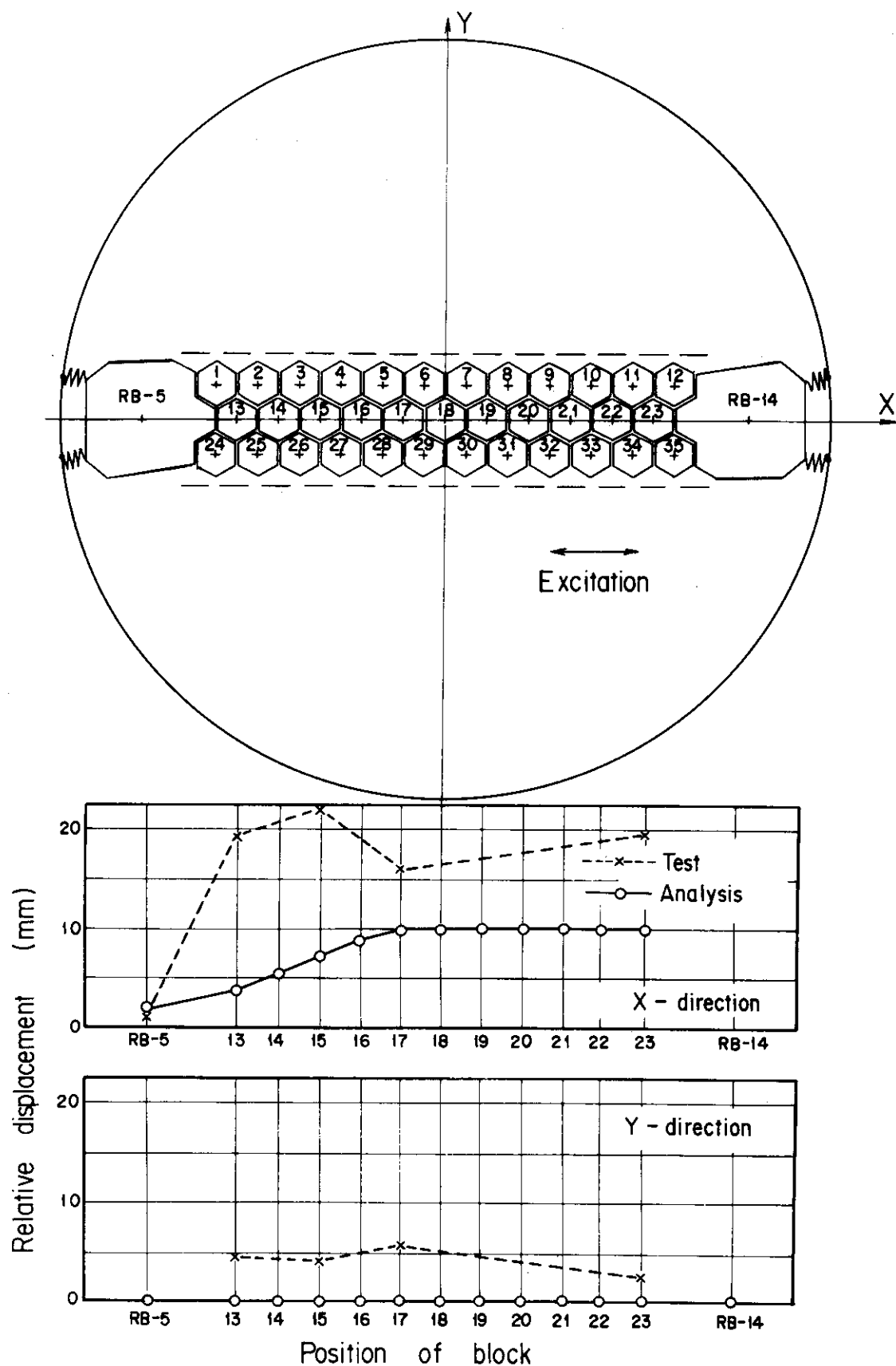


Fig. 7.21 Displacement of block (Excitation X-direction, 3.8 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

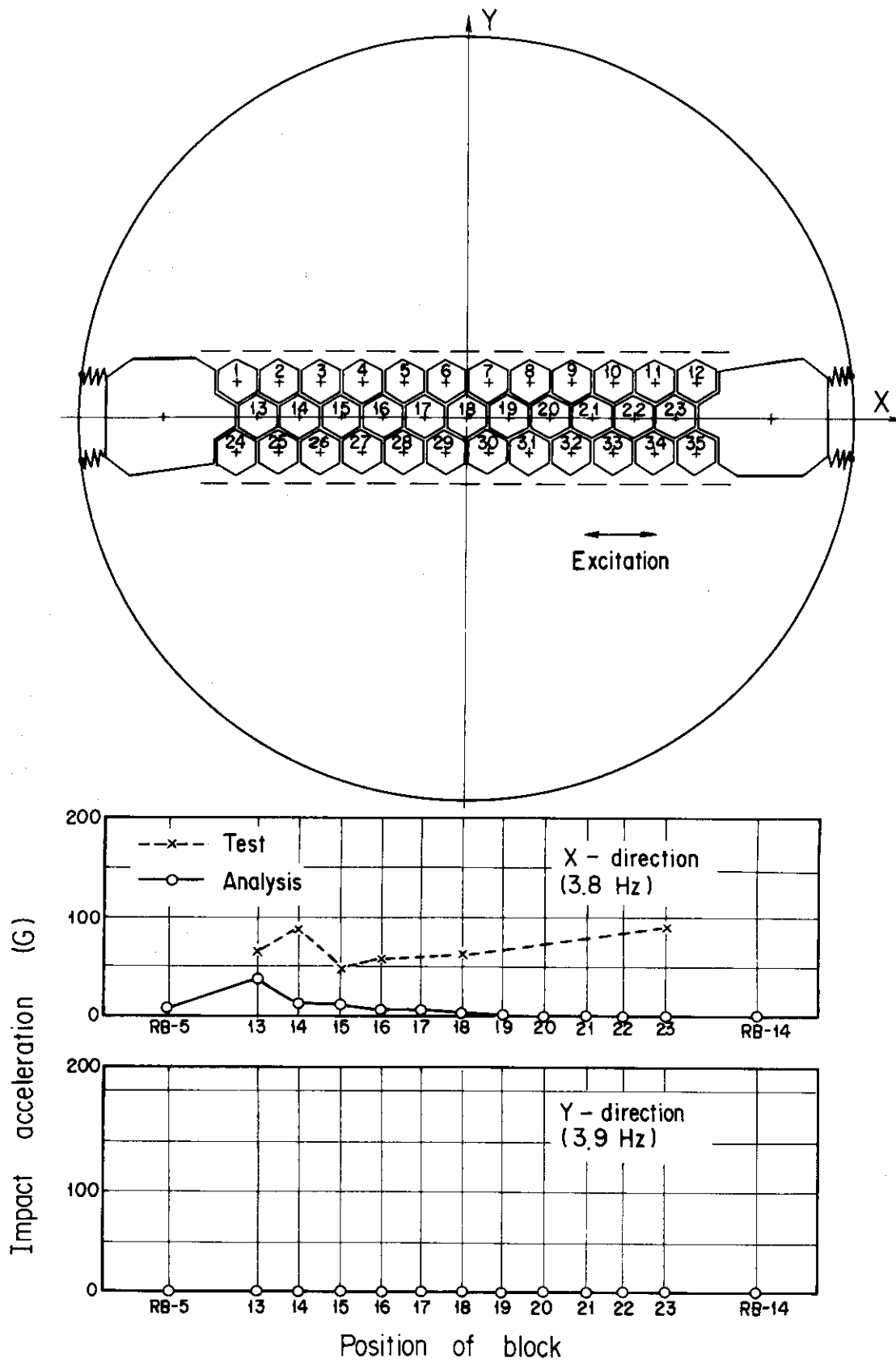


Fig. 7.22 Impact acceleration of block (Excitation X-direction 3.8, 3.9 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

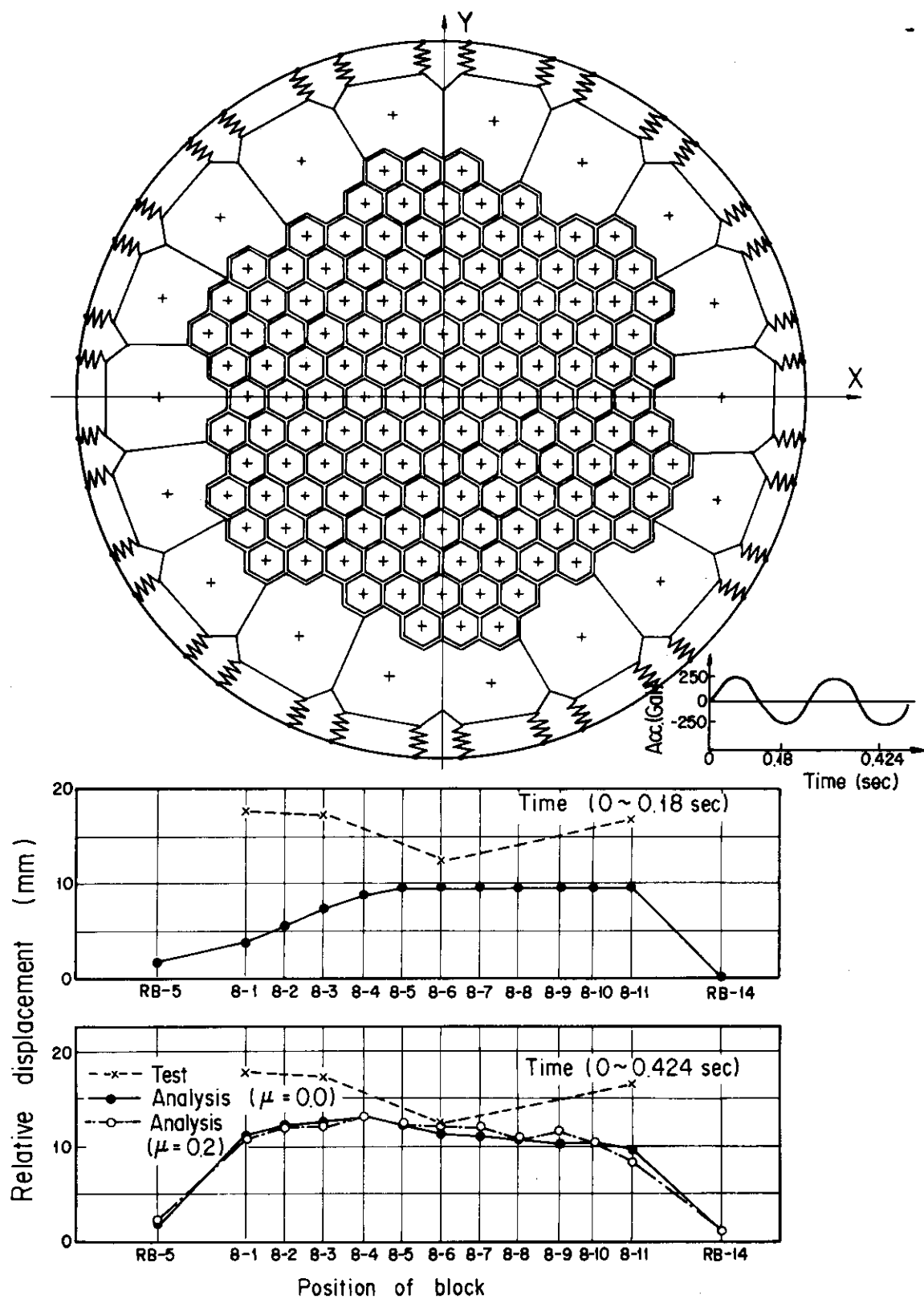


Fig. 7.23 Displacement of block (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

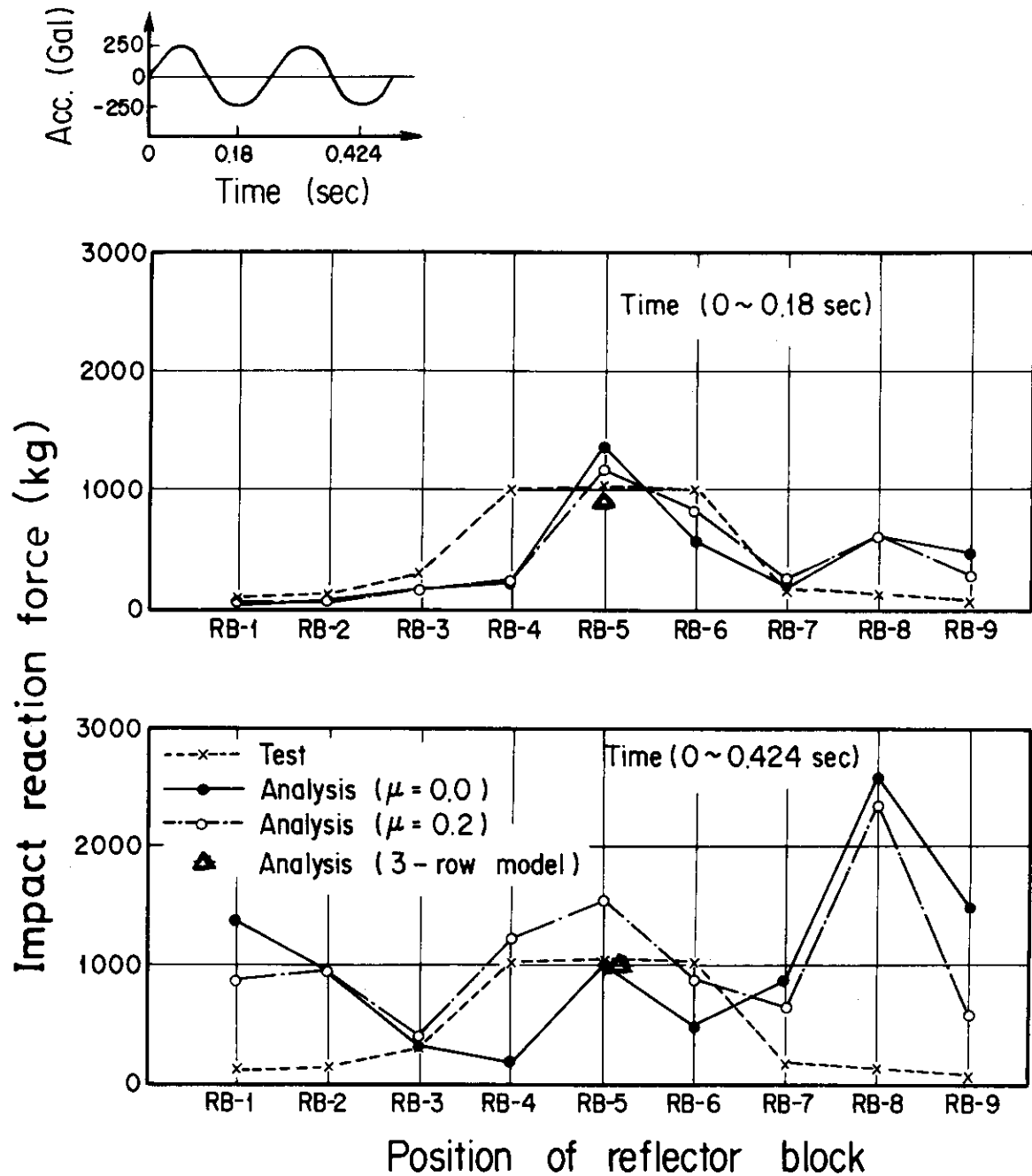


Fig. 7.24 Impact reaction force of reflector block (Excitation X-direction, 4.1 Hz, Max. acceleration 250 Gal)

8. 実際の炉心の応答特性

炉心を垂直にコラム一列分を取り出した垂直二次元炉心模型⁸⁾ および炉心を水平に一層分を取り出した水平二次元炉心模型による耐震試験と解析から、三次元的な広がりをもつ実際の炉心の地震応答特性について考察する^{19,20)}

垂直二次元炉心模型および水平二次元炉心模型の耐震試験において、炉心周辺の側方固定ブロックの支持剛性は、強、中、弱と変化させて応答特性を調べた。地震時の炉心の変位を少くし、制御・安全停止装置の作動を容易にするためには、炉心周辺の支持剛性が強の場合が望ましいと考えられる。ここでは、支持剛性が強の場合の耐震試験と解析結果を中心にして比較検討をする。

(1) 変位応答特性

Fig. 8.1 は、垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の互に対応する場所における変位応答曲線を示す。垂直二次元炉心模型のコラム間ギャップは、上端のブロック間ギャップ 0.5 mm 以外はすべて 2 mm であり、両端の側方固定コラムの間には 12 本のコラムがあるから、ギャップ積算量は 26 mm である。一方、水平二次元炉心模型のブロック間ギャップは 2 mm であるから、ギャップ積算量は、Fig. 5.10 で示したように、X 軸上において、両端の側方固定ブロックの間には 11 個の燃料ブロックがあるから、ギャップ積算量は 24 mm である。

Fig. 8.1 (a) の垂直二次元炉心模型の変位応答曲線から、炉心の中央部と周辺部の燃料ブロックの変位は、加振振動数 5 Hz 以下では、いずれもギャップ積算量を越えており、炉心は群振動していることがわかる。一方、Fig. 8.1 (b) の水平二次元炉心模型の変位応答曲線から、炉心の中央部と周辺部の燃料ブロックの変位は、垂直二次元炉心模型の変位特性と類似の傾向を示しているものの相対的に変位が小さいことがわかる。

この原因として二つのことが考えられる。その第一は燃料コラムまたは燃料ブロックの復元力特性の相違によるものであり、第二は燃料コラムまたは燃料ブロック相互の干渉効果である。最初に復元力特性について考えてみる。

垂直二次元炉心模型の燃料コラムの復元力特性および水平二次元炉心模型の燃料ブロックの復元力特性を Fig. 8.2 に示すように、変位の小さい所では線形であり変位の増加に従って復元力は増加する。しかし、ある変位を越えると復元力は急速に減少する。一方、水平二次元炉心模型のコラム復元力模擬ばねのばね定数は線形であり、復元力は燃料ブロックの変位に比例して増加する。これらの復元力を比較すると、変位が小さい範囲では垂直二次元炉心模型のコラムの復元力の方が大きい、変位が 28 mm を越えると水平二次元炉心模型のブロックの復元力が大きくなる。これから水平二次元炉心模型のブロック変位は 28 mm 以下であるから、垂直二次元炉心模型のコラムの変形の場合よりも大きな復元力は受けてない。よって、水平二次元炉心模型の燃料ブロック変位が、垂直二次元炉心模型の燃料コラムの変位よりも小さいのは復元力の相違によるものではないことがわかる。

次に、燃料コラムまたは燃料ブロック相互間の干渉について考えてみる。垂直二次元炉心模型では一本の燃料コラムには両側に一本ずつのコラムがある、また、これらの炉心コラムはほとん

と同じような復元力特性を有するので、炉心コラムは群振動を生じ易い。一方、水平二次元炉心模型では一個の燃料ブロックは通常6個の燃料ブロックに囲まれており、また、振動方向に対して各列の燃料ブロックの数が異なり積算ギャップ量が異なる。よって水平二次元炉心模型の燃料ブロックは群振動を制限され易い。

このように水平二次元炉心模型では、周辺の燃料ブロックとの相互干渉によって炉心の群振動が抑えられ、燃料ブロックの変位が垂直二次元炉心模型のものよりも小さくなるものと考えられる。

実際の炉心に比較して垂直二次元炉心模型の燃料コラムは、周辺の燃料コラムとの相互干渉が少く、その結果変位が大きめであると考えられる。一方、水平二次元炉心模型の燃料ブロックのコラム模擬ばねは、燃料コラム特性を十分に模擬していないので、変位特性が実際の炉心と相似ではない。しかし、周辺の燃料ブロックとの相互干渉は模擬できている。これらを総合して考えると、実際の炉心の変位特性は、垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型のそれぞれの変位特性の間にあるものと推測される。炉心耐震設計上安全側にとるならば、実際の炉心の最大変位は燃料コラムのギャップ積算量と側方固定反射体の最大支持反力時の変位量を加えたものを考えればよい。

(2) 加速度応答特性

Fig. 8.3は垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の互に対応する場所における衝突加速度応答曲線を示す。Fig. 8.3 (a)から明らかなように、垂直二次元炉心模型では炉心中央部よりも周辺部の燃料コラムの衝突加速度が大きい。これは炉心コラムは群振動を起こしている結果であると考えられる。一方、水平二次元炉心模型では、Fig. 8.3 (b)にみられるように、加振振動数4 Hz付近を除いて炉心周辺部よりも中央部の燃料ブロックの衝突加速度が大きく、群振動よりも隣接する燃料ブロックと相互に激しく衝突をくり返しているものと考えられる。

垂直二次元炉心模型の燃料コラム間の衝突において、燃料ブロックの垂直中心軸まわりの回転を与える力は少ない。一方、水平二次元炉心模型の燃料ブロックは隣接する6個の燃料ブロックのうち少なくとも4個との衝突によって回転力を与えられる。さらに、各列のブロック数が異なり各列のギャップ積算量が異なるから、群振動が制限され、あるいは隣接する燃料ブロックは逆位相で衝突が発生し、その結果大きな加速度が発生するものと考えられる。

水平二次元炉心模型の衝突加速度が、垂直二次元炉心模型のものよりも大きな値となる他の一つの原因として次のことが考えられる。垂直二次元炉心模型では、燃料ブロックを積み上げて燃料コラムを形成している。燃料コラムの振動運動において、燃料ブロックの上下境界面における摩擦およびダウエル部の摩擦によって運動エネルギーが消費される。このエネルギー消費によって垂直二次元炉心模型の衝突加速度が水平二次元炉心模型のものよりも小さくなったものと考えられる。

これらを総合して考えると、実際の炉心の衝突加速度は垂直二次元炉心模型は衝突加速度特性に近いものと推測される。炉心耐震設計上安全側にとるならば、実際の炉心の最大衝突加速度は垂直二次元炉心模型によって得られた値に相似側による倍数を掛け、さらに水平二次元炉心模型と垂直二次元炉心模型の最大値の比、約1.3倍を乗じたものを考えればよい。

(3) 炉心側方支持反力特性

Fig. 8.4 は垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の互に対応する場所における側方支持反力応答曲線を示す。Fig. 8.4 (a) は垂直二次元炉心模型の側方固定コラム最上段と下端から約 $\frac{2}{3}$ 長の位置における側方支持反力応答曲線である。Fig. 8.4 (b) は水平二次元炉心模型の加振方向およびその直角方向における側方支持反力応答曲線である。Fig. 8.4 (a) から燃料コラム最上段の応答値のうち加振振動数 3 Hz におけるピークは、燃料コラム上端の鋼製ブロックの共振振動によるものであり、燃料コラム下端から $\frac{2}{3}$ 長の応答値のうち加振振動数 4 Hz におけるピークは、黒鉛製の燃料ブロックの共振振動によるものである。Fig. 8.4 (b) から加振方向の支持反力応答曲線のピークは 4 Hz 付近にあることがわかる。これら 4 Hz のピーク値について、垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型とを比較すると、後者は前者の 1.3 倍である。これについて以下に考察する。

垂直二次元炉心模型では、燃料コラムと側方固定コラムの衝突時に、衝突力はコラム内ブロックの上下境界面の摩擦力として一部分は消費され、その結果として支持反力が水平二次元炉心模型のものよりも小さくなると考えられる。これは垂直二次元炉心模型のコラム最上段の最大支持反力と水平二次元炉心模型の最大支持反力が同じ程度であることから類推できる。

これらを総合して考えると、実際の炉心の側方支持反力は垂直二次元炉心模型の側方支持反力特性に近いものと推測される。炉心耐震設計上安全側をとれば、実際の炉心の最大側方支持反力は垂直二次元炉心模型によって得られた値に相似則による倍数を掛け、さらに水平二次元炉心模型と垂直二次元炉心模型の最大値の比約 1.3 倍を乗じたものを考えればよい。

(4) 変位、加速度、支持反力分布

Fig. 8.5 は垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の変位、衝突加速度及び側方支持反力についてそれぞれ炉心内の分布を示す。Fig. 8.5 (a) の垂直二次元炉心模型の応答値の分布では、衝突加速度および側方支持反力がピークを示す二つの振動モード、すなわち加振振動数 3 Hz と 4 Hz の応答値を示している。Fig. 8.5 (b) の水平二次元炉心模型の応答値の分布では、衝突加速度および側方支持反力がピークを示す加振振動数領域の一つである 3.8 Hz の応答値を示している。以上の結果から垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の応答値は互に対応がとれていることがわかる。また応答の最大値もほとんど同じ程度であり、二つの炉心模型による試験結果は、実際の炉心の応答値を推定する上で相補的なものである。

(5) 炉心側方支持剛性の影響

垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型について、炉心側方支持剛性の変化による最大変位の変化を Fig. 8.6 に示す。Fig. 8.6 (a) の垂直二次元炉心模型の試験結果から、側方支持剛性が弱から強になるに従って変位は小さくなることがわかる。Fig. 8.6 (b) の水平二次元炉心模型の試験結果から、側方支持剛性が弱から強になるに従って変位は小さくなるが、垂直二次元炉心模型のように大きな変化がない。この結果からすでに述べたように、垂直二次元炉心模型では炉心は群振動をしているが、水平二次元炉心模型では炉心の群振動は垂直二次元炉心ほどではない。また側方支持剛性を高めると炉心の変位が小さくなる。

Fig. 8.6 (b) の水平二次元炉心模型の試験結果には、側方支持剛性が中の場合のプリロードの有無による燃料ブロックの最大変位を比較している。側方固定ブロックを外側から炉心中心方向

へ締め付けた、いわゆるプリロードをかけることによって変位を小さくできる。

Fig. 8.7 は垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型について、炉心側方支持剛性の変化による側方支持反力の最大値を示す。Fig. 8.7 (a) の垂直二次元炉心模型の試験結果から、側方支持剛性が強よりも弱の場合の側方支持反力が小さく、また側方支持反力を小さくするような側方支持剛性 (Fig. 8.7 (a) の側方支持剛性が中の場合) が存在することがわかる。一方、Fig. 8.7 (b) の水平二次元炉心模型の試験結果から、側方支持剛性が強よりも弱の場合の側方支持反力が大きく、また側方支持反力を小さくするような側方支持剛性 (Fig. 8.7 (b) の側方支持剛性が中の場合) が存在することがわかる。さらに、プリロードを与えることによって側方支持反力を小さくできる。

垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の試験結果を比較すると、側方支持剛性の変化による応答値の変化の傾向は同じである。

これらの結果を実際の炉心の耐震設計に利用する場合には、耐震上の考慮のみならず熱流動特性や製作性、耐久性など総合的な考慮のもとで行われるべきものであろう。しかし、すでに述べたように地震時の炉心変位を小さくし、制御・安全停止装置の作動を容易にでき、設計を単純化できるので、側方支持反力が過大にならない範囲で側方支持剛性を剛にすることが望ましいと考える。

なお、Fig. 8.7 には正弦波応答値と合せて地震波応答値を示しているが、地震波による応答特性については次に詳述するので、ここでは地震波入力の場合にも正弦波入力の場合とほぼ同じ傾向を示すことだけを述べるに留める。

(6) 地震波応答特性

これまで入力波形として最大加速度 250 Gal の正弦波による応答特性について述べた。しかし実際の炉心にはランダムな地震波が作用するのでランダム波による応答特性を明らかにしておく必要がある。垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型については正弦波のみならずランダム波による振動試験も実施した。使用したランダム波は観測地震波が二つとホワイトノイズ波が一つであり、これらについては第3章に述べている。

Fig. 8.8 は垂直二次元炉心模型の変位分布、側方支持反力分布に及ぼす入力波形の影響を示す。Fig. 8.8 (a) は正弦波入力の場合の応答値を示したものであり、加振振動数は 4 Hz、最大加速度は 250 Gal である。Fig. 8.8 (b) はエルセントロ 1940 年 NS 波、Fig. 8.8 (c) は茨城 1964 年 EW 波、Fig. 8.8 (d) はホワイトノイズ波の入力の場合の応答値を示したものであり、これらの入力波の最大加速度はすべて 500 Gal である。Fig. 8.8 から茨城 1964 年 EW 波による応答値を除いて、他の 3 つの入力波による最大応答値はほぼ同じである。茨城 1964 年 EW 波による応答値が他の 3 つの入力波による応答値よりも低いのは、第5章で述べたように茨城 1964 年 EW 波は他の三波に比較して短周期成分波を含むからである。これは Fig. 8.1 及び 8.4 に示したように正弦波応答特性において加振振動数が 5 Hz 以上の短周期波では応答値が急激に低下していることから容易に理解できる。

最大加速度 500 Gal のエルセントロ 1940 年 NS 波およびホワイトノイズ波による応答値と最大加速度 250 Gal の正弦波による応答値はほぼ同じである。これから地震波による応答値は正弦波による応答値の約半分、高めに見積っても 60% 以下⁸⁾ と言ってよい。よって正弦波による応答

値から地震波による応答値をある程度推定できる。

Fig. 8.9 は水平二次元炉心模型の変位分布，側方支持反力に及ぼす入力波の影響を示す。Fig. 8.9 において，正弦波入力の場合の最大加速度は 250 Gal，一方，地震波入力の場合の最大加速度は 500 Gal である。二軸同時加振の場合の最大加速度は原形波の加速度値の高い成分が 500Gal になるように入力波加速度を決めている。Fig. 8.9 (a) は正弦波による一軸および二軸同時加振の場合の応答値を，Fig. 8.9 (b) はエルセントロ 1940 年 NS 波および EW 波による一軸および二軸同時加振の場合の応答値を，Fig. 8.9 (c) はホワイトノイズ波による一軸加振の場合の応答値を示す。ここで示したものは，変位および側方支持反力ともに大きな値となる入力波および加振形式についての応答分布である。

Fig. 8.8 と 8.9 を比較すると，水平二次元炉心模型による応答値は垂直二次元炉心模型によるものと類似の傾向がある。すなわち，最大加速度 250 Gal の正弦波入力による応答値は，最大加速度 500 Gal の地震波入力による応答値にほぼ同じである。これから地震波による応答値は正弦波による応答値の半分程度と言ってよい。

Fig. 8.9 から加振方向が六角形ブロックの平らな方向で衝突する場合（X 軸方向および二軸同時加振における X-Y 45° 軸方向等価一軸加振）において側方支持反力が最大になることがわかる。一方，炉心の最大変位は，ギャップ積算量が大い方向，すなわち Y 軸方向加振の場合に発生する。これから実際の炉心の最大変位は，六角形ブロックの角の方向（Y 軸方向）のギャップ量が大いので，この方向の変位が大きくなることが予想される。耐震設計上安全側をとれば，実際の炉心の最大変位はブロックの角方向（Y 軸方向）のコラム間ギャップ積算量と側方固定反射体要素の最大変形量を加えたものを考えればよい。

Fig. 8.9 から最大側方支持反力は六角形ブロックの平らな面で衝突する場合に発生する。これは垂直二次元炉心模型の場合の燃料コラムの衝突方向である。よって，垂直二次元炉心模型の応答値から実際の炉心の応答値を推定することができる。さらに地震波による応答値は正弦波による応答値の 50～60% であることから，正弦波による応答値から地震波による応答値を推定できる。

(7) ダウエル反力

Fig. 8.10 はダウエル反力の応答曲線について，垂直二次元炉心模型の試験結果と計算結果を比較して示す。Fig. 8.10 において側方支持剛性が強の場合のダウエル反力が測定されていないので，計算値を参考にして推測すると，側方支持剛性が中の場合，ダウエル反力が最も小さい。

燃料コラムに沿うダウエル反力の分布の計算結果を Fig. 8.11 に示す。Fig. 8.11 からダウエル反力の最大値は加振振動数にかかわらず燃料コラムの最下端に存在する。一方，ダウエル反力の最小値は，加振振動数が低い領域では燃料コラム下端から約 $\frac{2}{3}$ 長の場所にあるが，加振振動数が 4 Hz 以上になると燃料コラム上部になる。これは低い加振振動数では燃料コラムは両端支持はりの振動モードとなっているが，加振振動数が 4 Hz 以上になると下端を支点とした片持はりの振動モードとなっているためと考えられる。なお，垂直二次元炉心模型の燃料コラム最下段のブロックは，炉心支持ブロックを模擬したものであり，実際の炉心の燃料コラムは二段目から始まるので，ダウエル反力の最大値は一段目と二段目の燃料ブロック間のダウエル反力である。

Fig. 8.12 は燃料コラムの炉心場所におけるダウエル反力の分布を示す。図中の燃料コラムの番号は左端の側方固定反射体コラムの隣の燃料コラムから番号付けされている。炉心の場所によ

るダウエル反力の傾向は、データが分散して明確ではない。しかし、燃料コラム番号 2, 5, 8, 11 のダウエル反力は他の燃料コラムのものよりも大きい。これらの燃料コラムは制御棒コラムを模擬したものであり、他の燃料コラムに対して燃料ブロックの境界面を少し下げて、ダウエルピンのせん断面を炉心全体で同一平面にならないようにしている。

Fig. 8.12 のダウエル反力について、制御棒コラム（コラム番号 2, 5, 8, 11）と標準燃料コラム（コラム番号 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12）とに分類して、ダウエル反力の平均値とその分散値を Fig. 8.13 に示す。Fig. 8.13 から標準燃料コラムと制御棒コラムのダウエル反力に差があることがわかる。この差は二種類のコラムの数によるものと考えられる。すなわち、制御棒コラム 4 本に対して標準燃料コラム 8 本であり、コラムの屈曲点となる燃料ブロックの境界面のダウエルピンに対して、標準燃料コラムのものよりも大きなダウエル反力が制御棒コラムのものに作用するものと考えられる。このようにダウエル反力は制御棒コラムにおいて最大となるので注意を払う必要がある。

(8) 実際の炉心の応答値

第 3 章の相似則において記述したように、縮尺模型による試験結果から実際の炉心の応答値を推定するには、試験結果に相似則を適用して求める方法と模型試験をもとに検証された計算プログラム¹¹⁾を使用して求める方法の二つがある。そこでこれらの二つの方法によって実際の炉心の応答値を求め、いずれの方法によっても実際の炉心の応答値が推定できることを示してみる。

対象とした炉心は日本原子力研究所において設計研究されている高温ガス実験炉¹⁸⁾の MARK-II 炉心である。この MARK-II 炉心に対して、耐震試験模型はこれまで述べてきたように、寸法で $\frac{1}{2}$ 、重量で $\frac{1}{4}$ となっている。またこの模型は Fig. 8.14 に示すように、米国のゼネラル・アトムック社（GA 社）の実用型高温ガス炉の炉心に対して、寸法で $\frac{1}{2.5}$ 、重量で $\frac{1}{6.2}$ となっている。これから模型による試験結果から実際の炉心の応答値を求めるには、Table 8.1 に示すように試験結果に相似則を掛ければよい。高温ガス実験炉の炉心に対して、試験結果に力は 4 倍、加速度は 1 倍、速度は $\sqrt{2}$ 倍、振動数は $1/\sqrt{2}$ 倍すればよい。以下に高温ガス実験炉の炉心の応答特性を、相似倍率によって求めたものと、試験結果をもとに検証された計算プログラムによって求めたものを比較する。

Fig. 8.15 は高温ガス実験炉の MARK II 炉心の変位応答曲線について相似倍率で求めたものと計算プログラムで求めたものを比較して示す。Fig. 8.15 から相似倍率から求めた応答値と計算プログラムで求めた応答値はほぼ一致している。

Fig. 8.16 は Fig. 8.15 と同じ炉心に対する側方支持反力応答曲線について相似倍率で求めたものと計算プログラムで求めたものを比較して示す。Fig. 8.16 から相似倍率から求めた応答値と計算プログラムで求めた応答値は良く一致している。

これまで記述した結果を総合して、高温ガス実験炉の MARK II 炉心の設計用最大側方支持反力を入力加速度に対して示すと Fig. 8.17 のようになる。Fig. 8.17 から入力加速度に対する設計用の最大側方支持反力が求まる。コラムに沿う側方支持反力分布は Fig. 8.5 に示したように凹凸があり、また入力波の種類によって側方支持反力分布が異なる。設計に用いる側方支持反力分布は単純な形状のものが望ましい。そこで予想される地震波による側方支持反力分布の相違を包絡する Fig. 8.18 のような設計用側方支持反力分布形状を考えた。この分布形状は最大値を 1 とし

た相対値で示しているので、最大値が推定できれば分布値が得られる。

側方支持反力の円周方向の分布も耐震設計のために必要とされる。この分布形状は地震波に対して時々刻々変化するが、設計用分布形状としては、Fig. 8.19に示すように、最大値を1とした相対値で余弦波分布を考えることにする。この分布はFig. 8.8に示した水平二次元炉心模型のX軸方向加振の場合の半径方向の側方支持反力分布に類似していることがわかる。

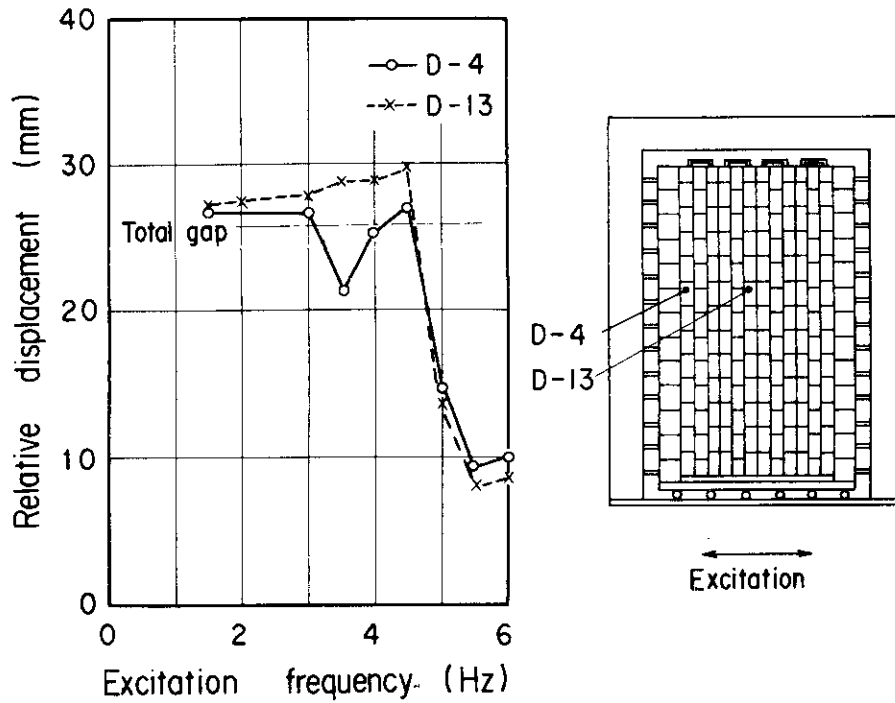
耐震設計用の最大ダウエル反力は、高温ガス実験炉のMARK-II炉心について、入力加速度に対してFig. 8.20のようになる。Fig. 8.20によって設計用の最大ダウエル反力が求められる。

実際の炉心の設計用最大変位は、すでに述べたようにコラム間ギャップ積算量と側方固定反射体の最大変位量を加えたものを考えればよい。

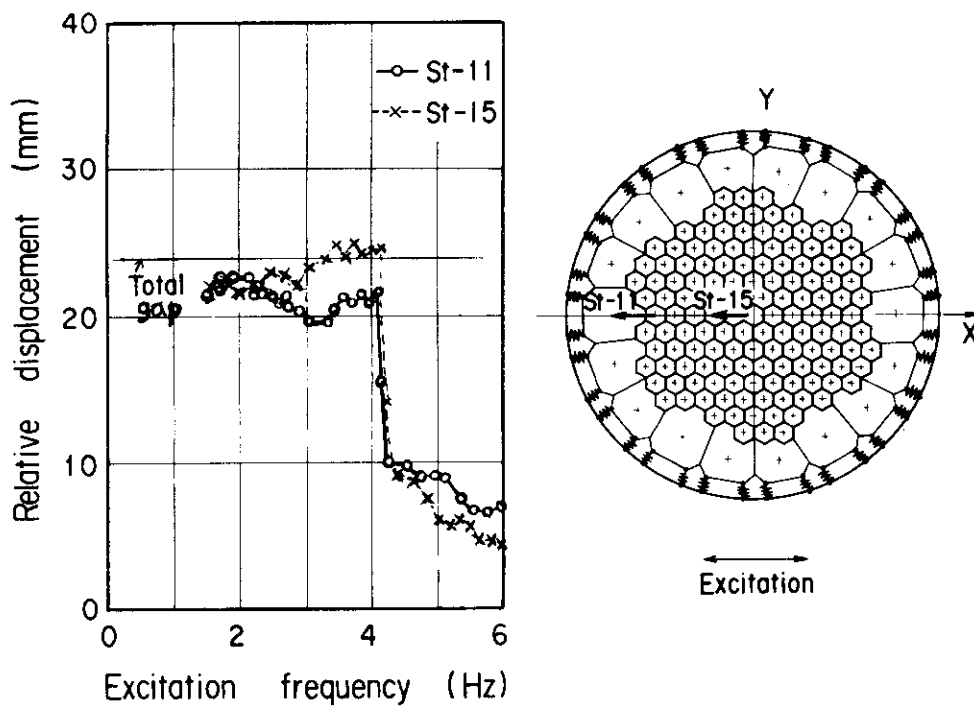
以上、垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型による試験結果および計算結果から実際の炉心、ここでは高温ガス実験炉のMARK-II炉心を対象に、耐震設計について述べた。

Table 8.1 Multiplication factor for predicting seismic response
values of actual HTGR core

Item	Multiplication factor		
	Experiment	JAERI- HTGR	GA-HTGR
Displacement	1	2	2.5
Force	1	4	6.2
Acceleration	1	1	1
Velocity	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2.5}$
Frequency	1	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2.5}$



(a) Two - dimensional vertical core model



(b) Two - dimensional horizontal core model

Fig. 8.1 Comparison between vertical core and horizontal core models on relative displacement (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

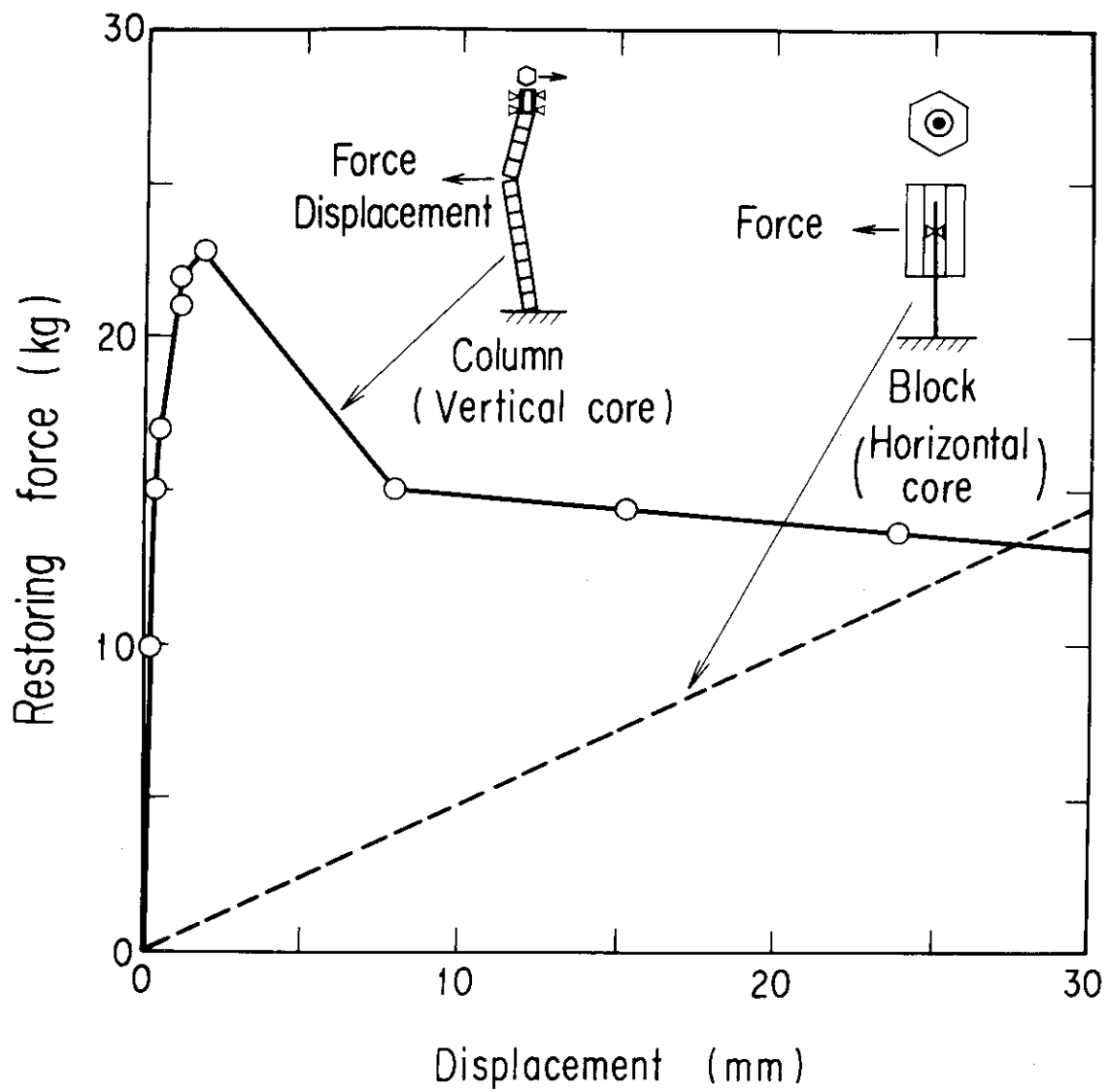


Fig. 8.2 Restoring force of two-dimensional vertical core column and two-dimensional horizontal core block

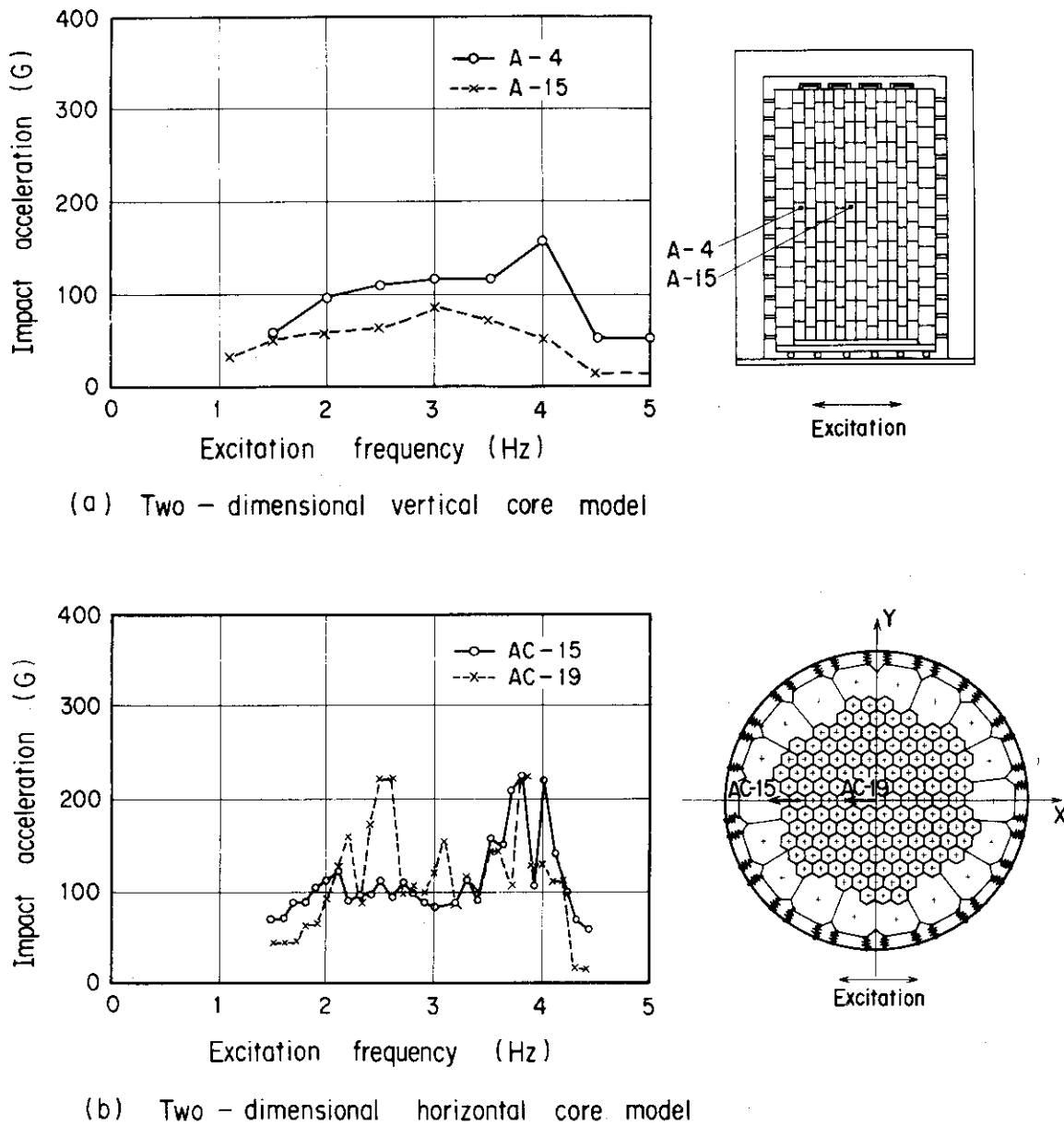
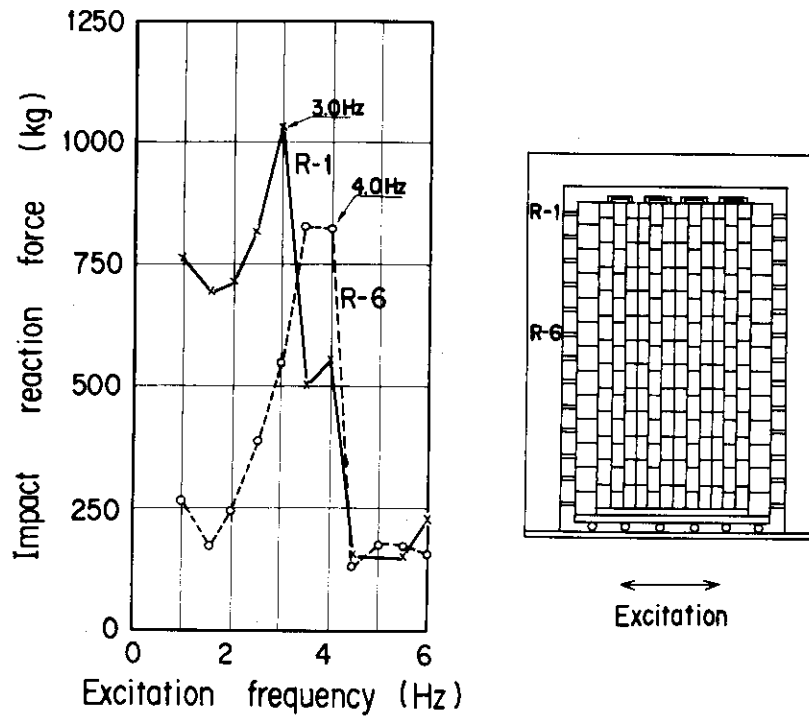
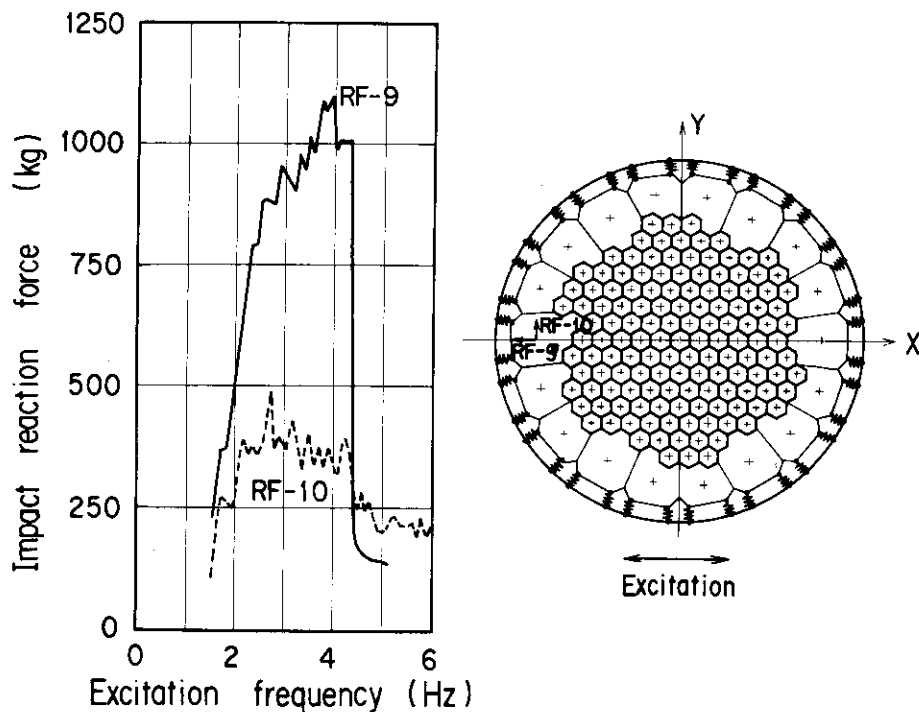


Fig. 8.3 Comparison between vertical core and horizontal core models on impact acceleration (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

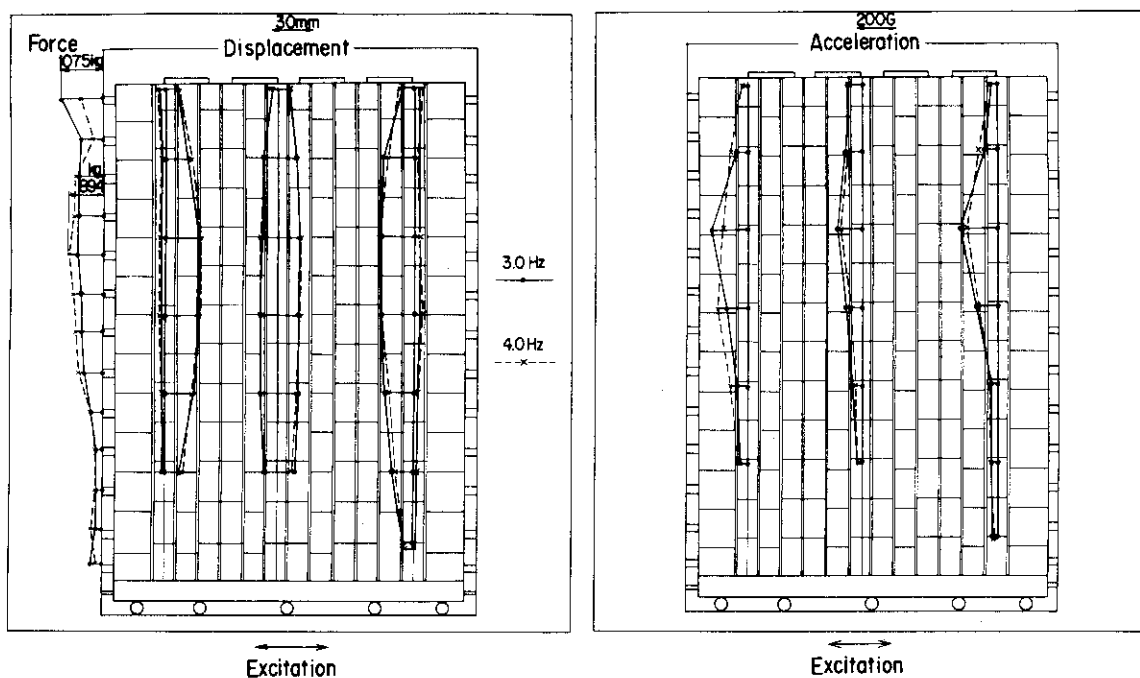


(a) Two - dimensional vertical core model

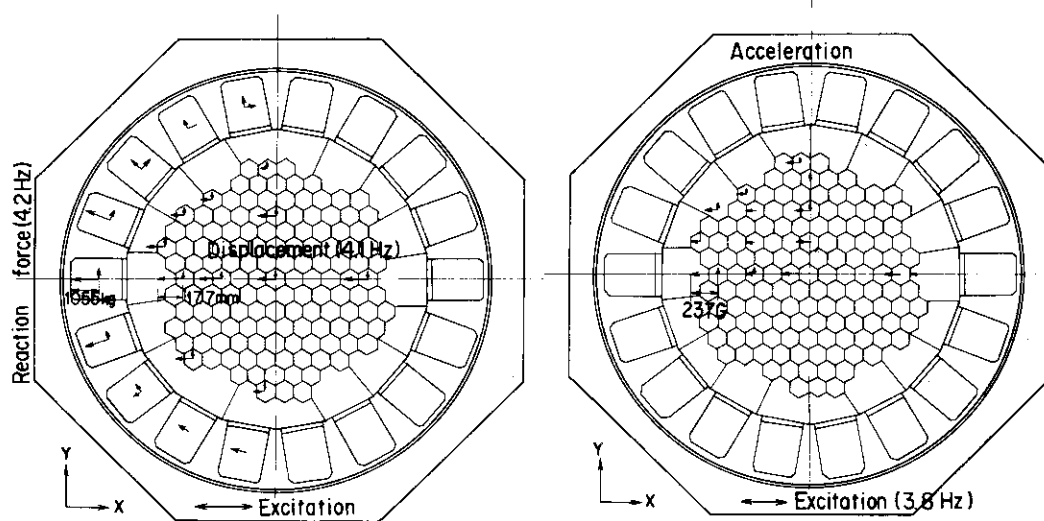


(b) Two - dimensional horizontal core model

Fig. 8.4 Comparison between vertical core and horizontal core models on impact reaction force (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)

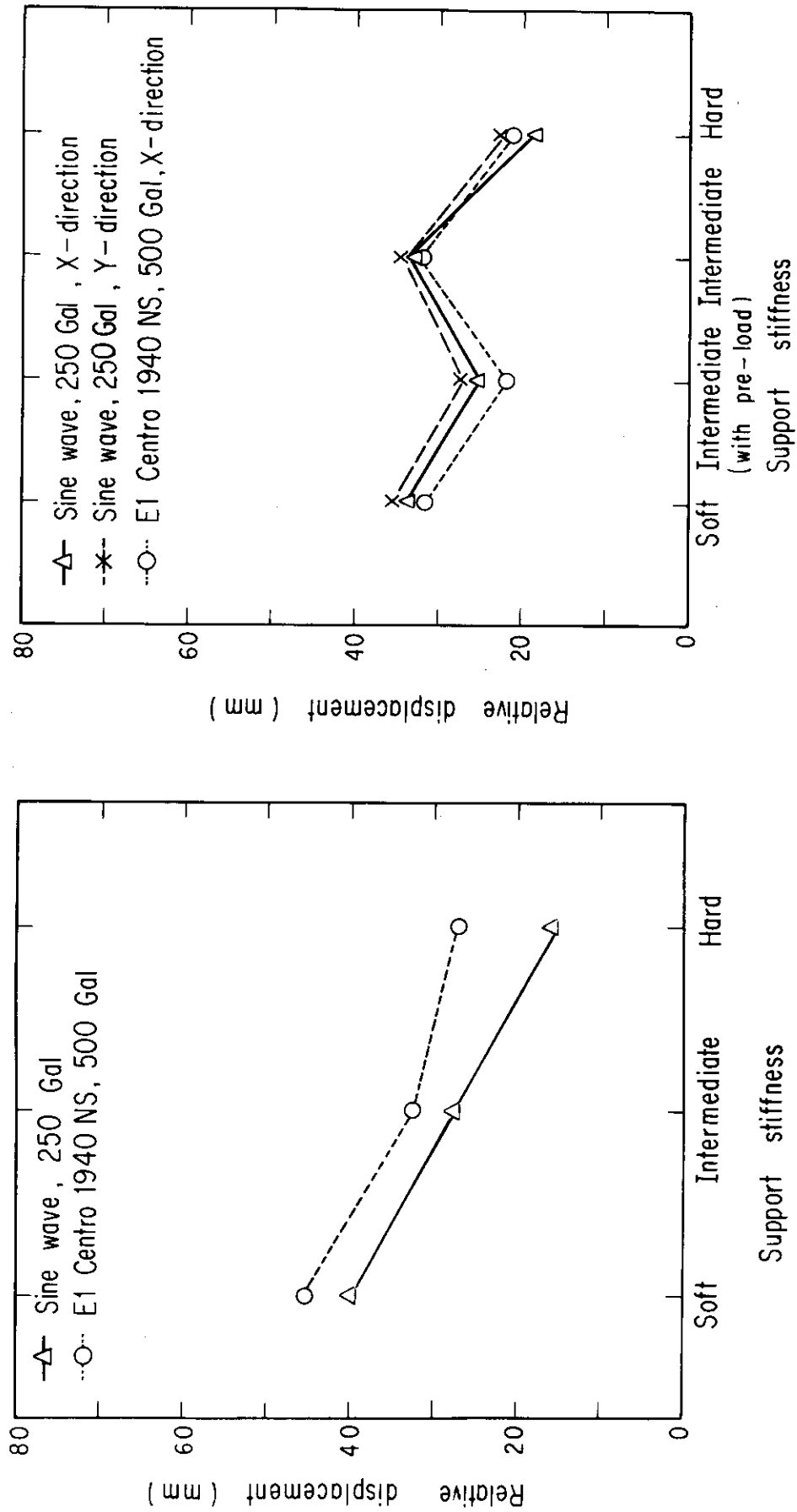


(a) Two-dimensional vertical core model



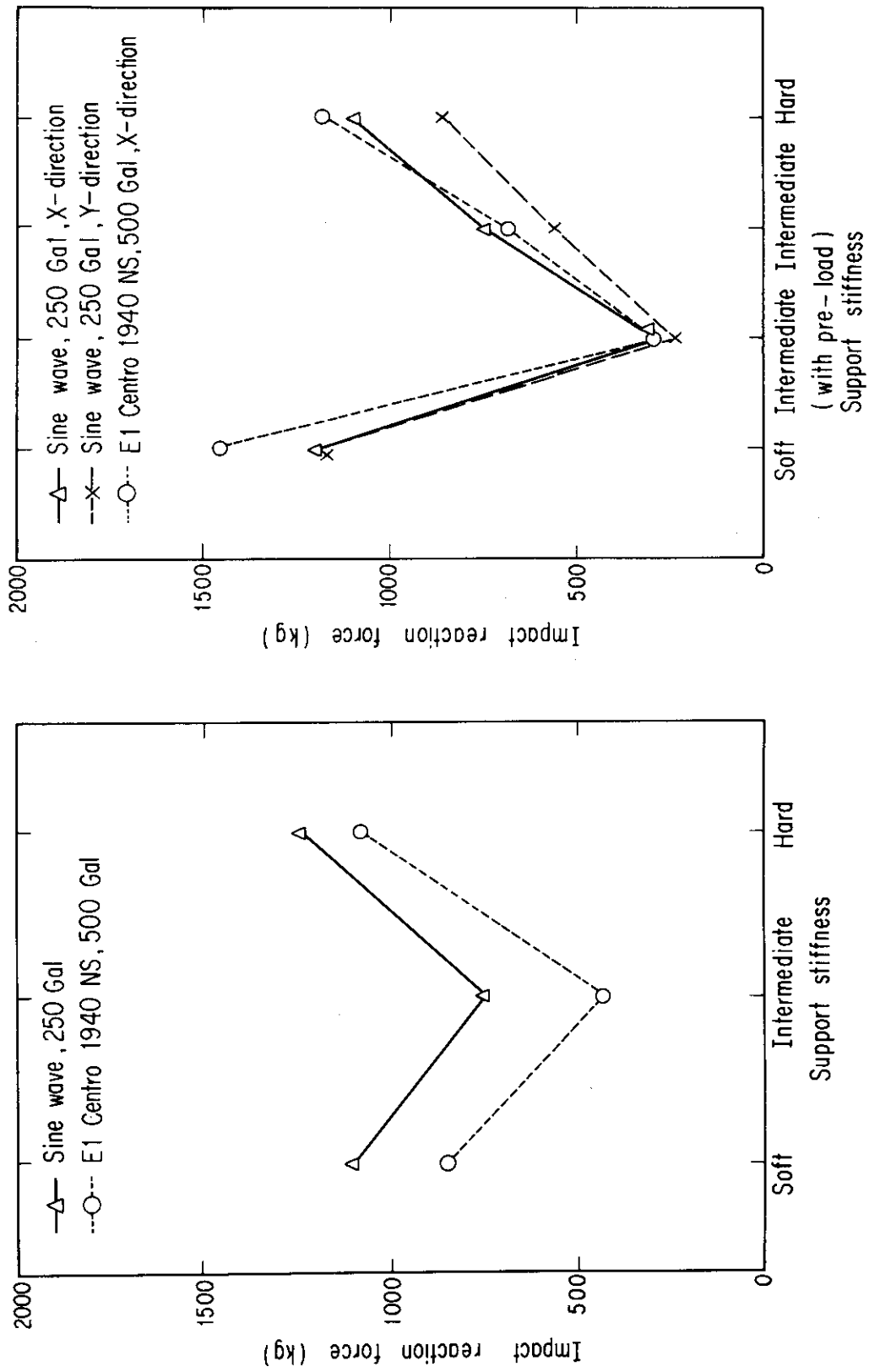
(b) Two-dimensional horizontal core model

Fig. 8.5 Comparison between vertical core and horizontal core models (Excitation X-direction, Hard support, With reflector key, Max. acceleration 250 Gal)



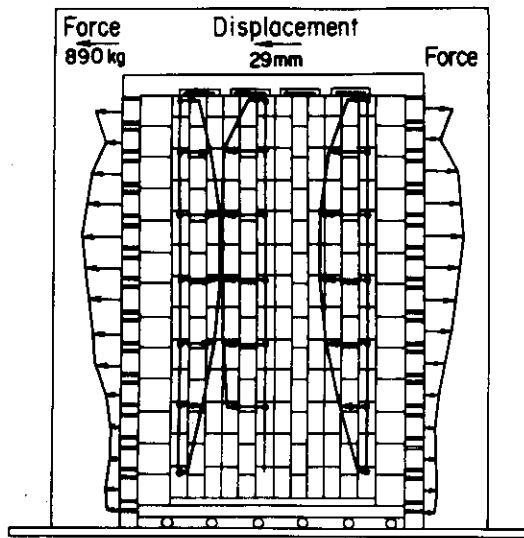
(a) Two-dimensional vertical core model (b) Two-dimensional horizontal core model

Fig. 8.6 Effect of support stiffness on relative displacement

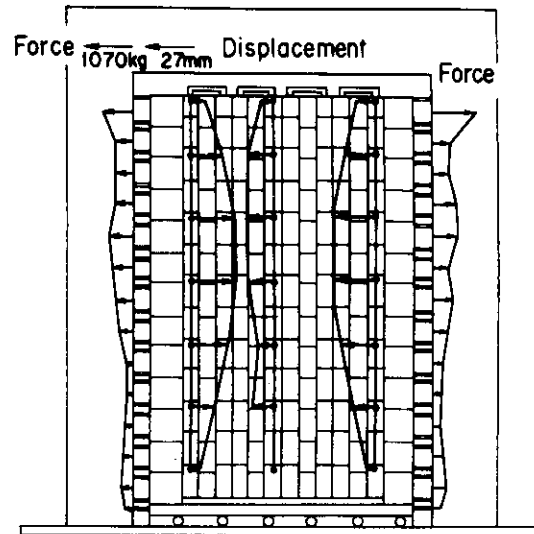


(a) Two-dimensional vertical core model (b) Two-dimensional horizontal core model

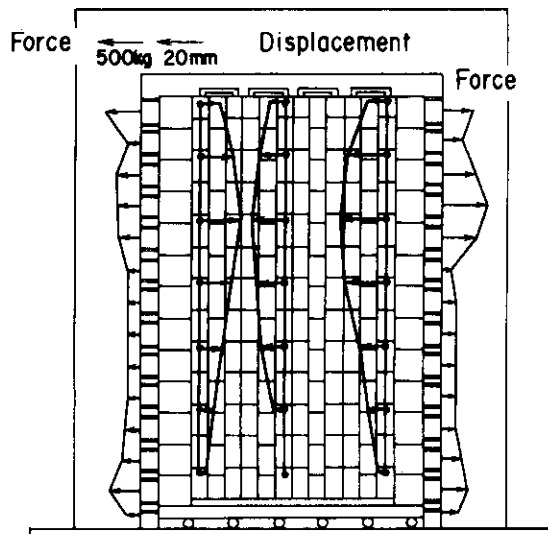
Fig. 8.7 Effect of support stiffness on impact reaction force



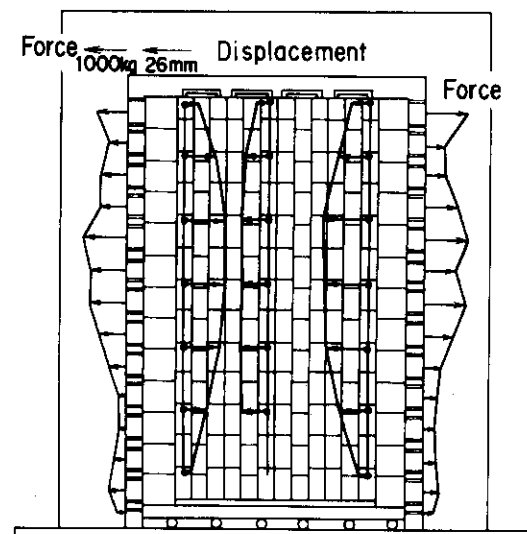
(a) Sinusoidal wave 4 Hz
(Max. acceleration 250 Gal)



(b) El Centro 1940 NS wave
(Max. acceleration 500 Gal)



(c) JAERI 1964 EW wave
(Max. acceleration 500 Gal)



(d) White noise wave
(Max. acceleration 500 Gal)

Fig. 8.8 Effect of input wave on relative displacement, impact acceleration and impact reaction force distribution along column

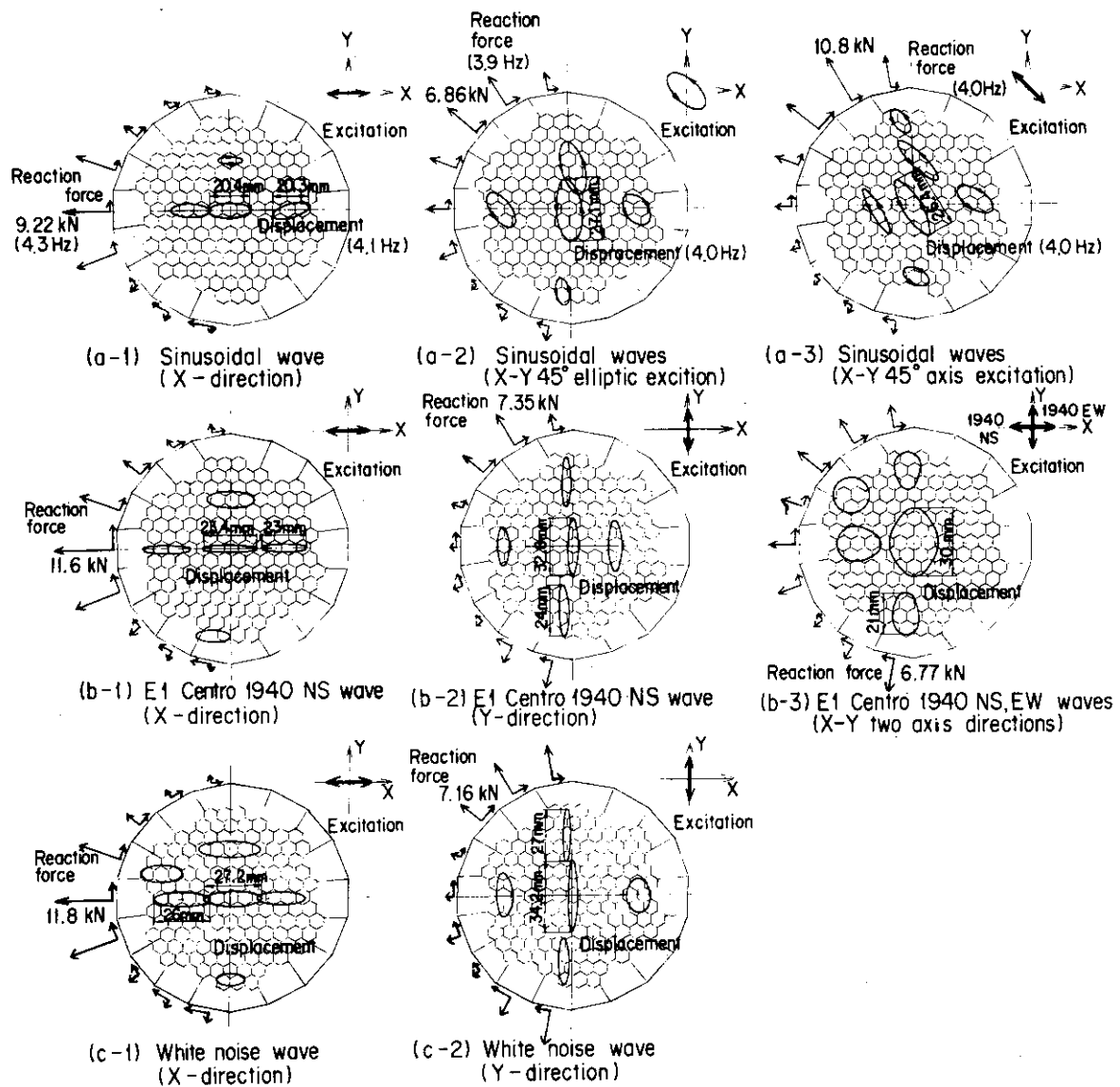


Fig. 8.9 Effect of input wave on relative displacement and impact reaction force distribution in core (Max. acceleration, Sinusoidal wave 250 Gal, E1 Centro wave 500 Gal, White noise wave 500 Gal)

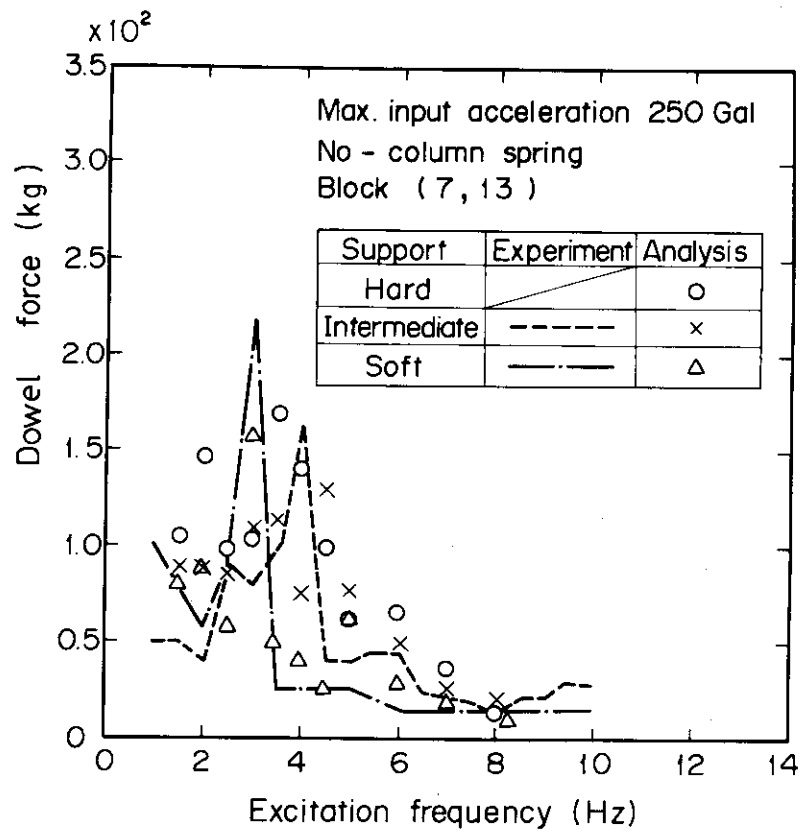


Fig. 8.10 Dowel force as a function of side support stiffness

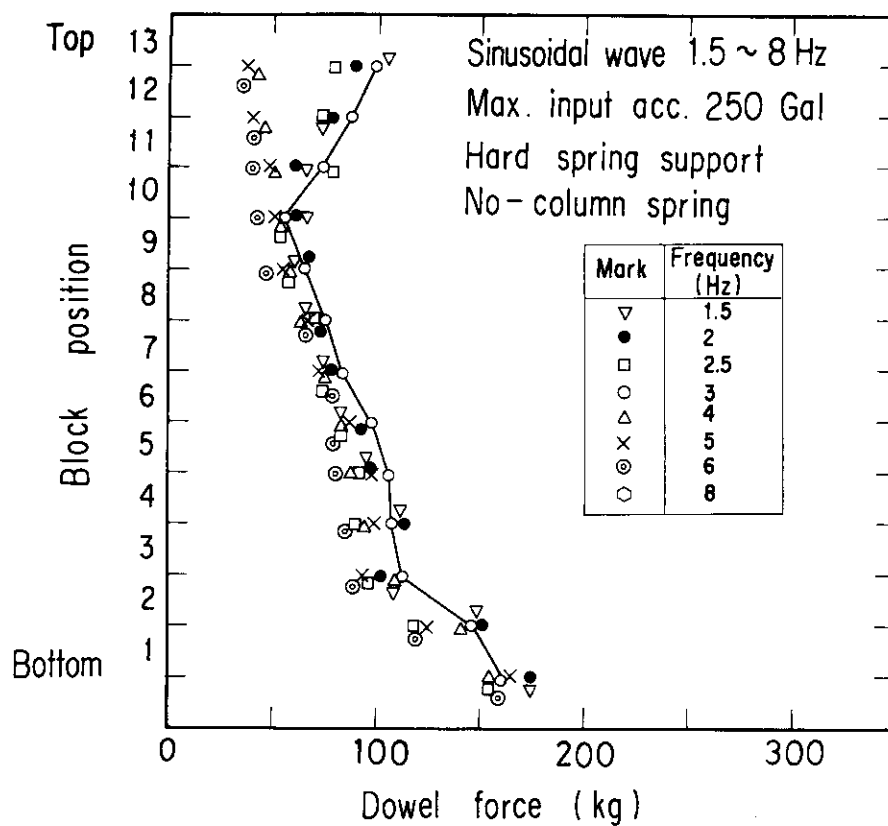


Fig. 8.11 Effect of excitation frequency on dowel force distribution along column

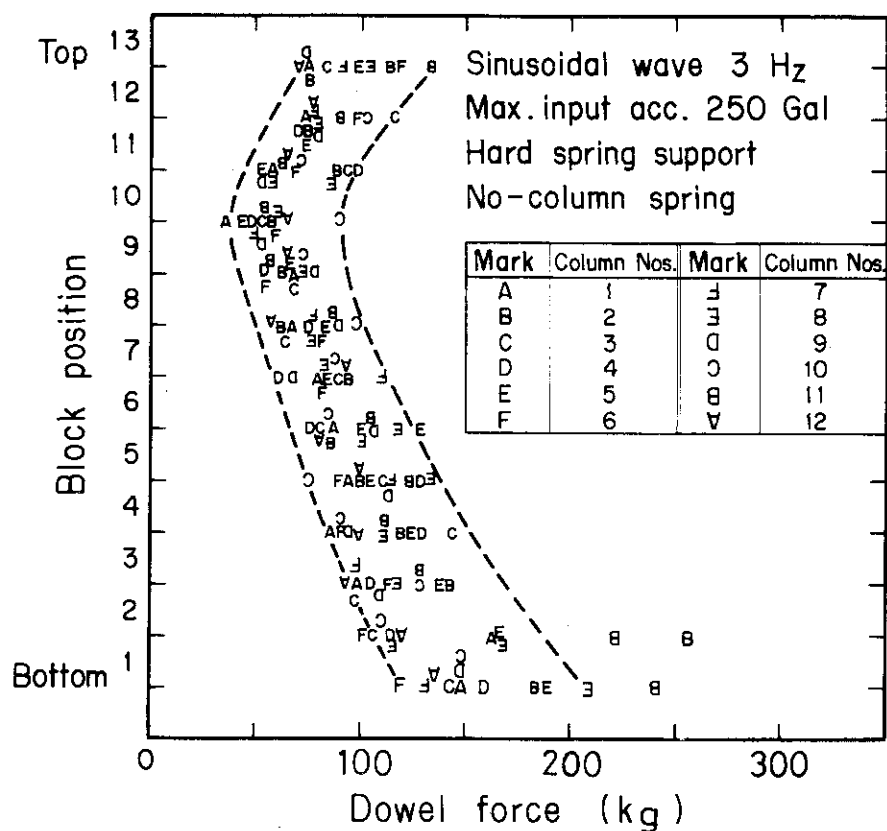


Fig. 8.12 Dowel force distribution along column

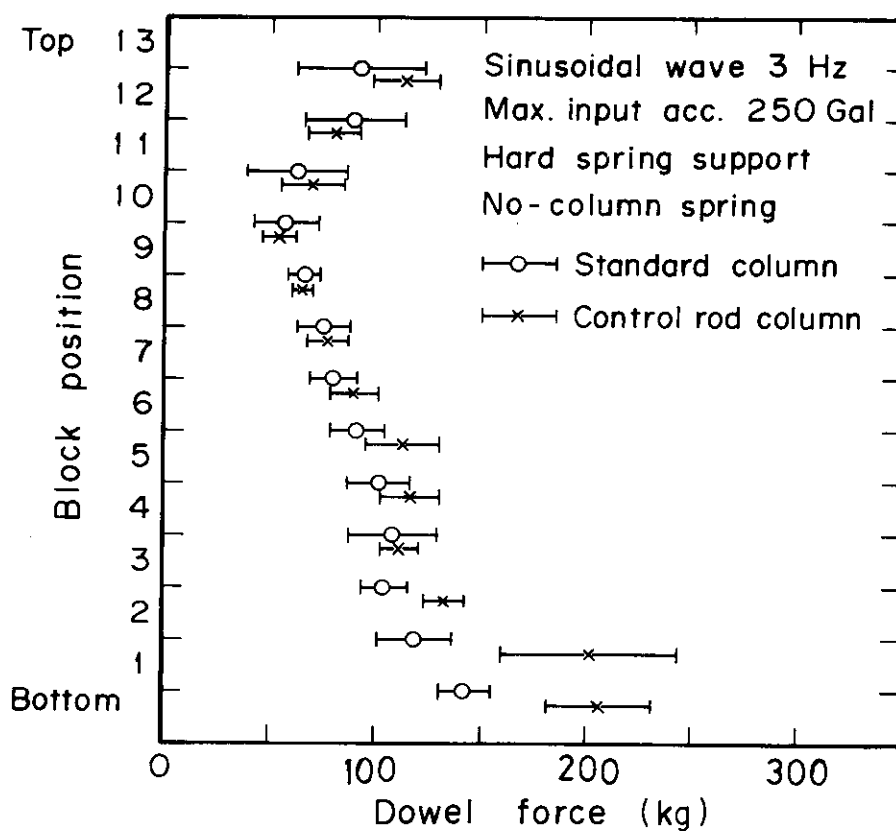


Fig. 8.13 Dowel force distribution along column vs. column position in core

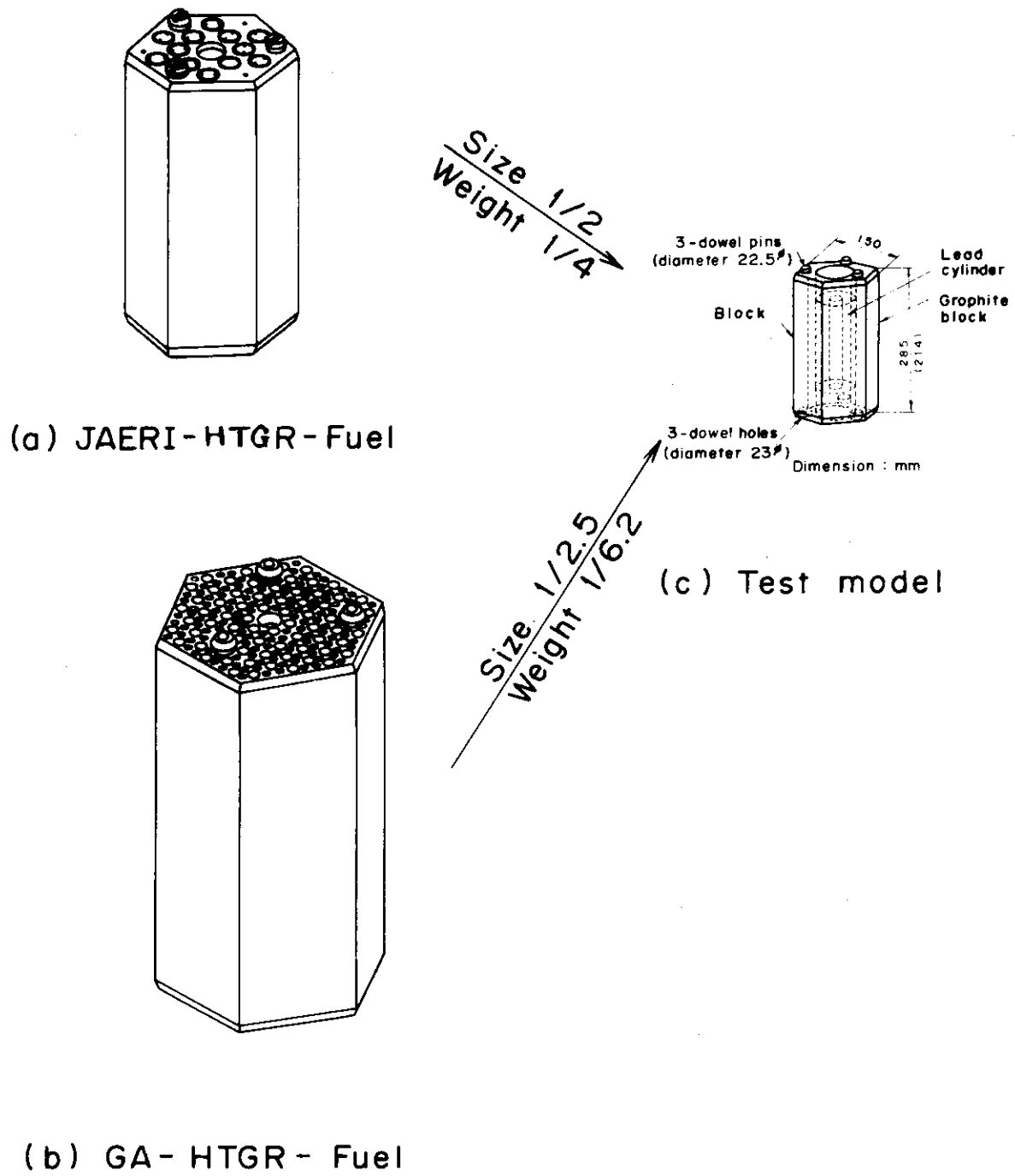


Fig. 8.14 Fuel elements and model

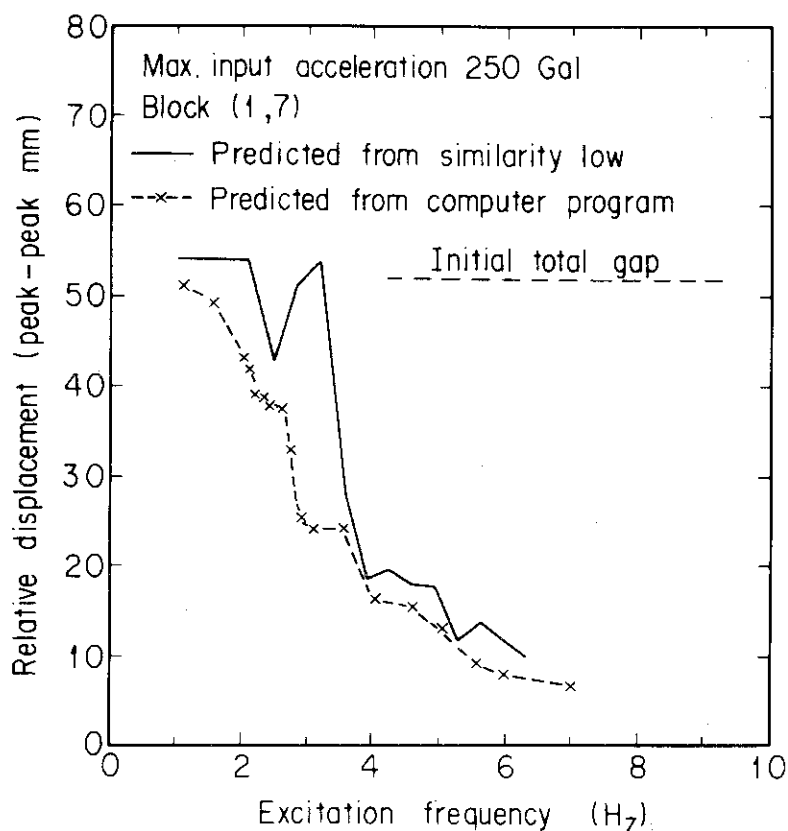


Fig. 8.15 Comparison between similarity laws and computer prediction on relative displacement

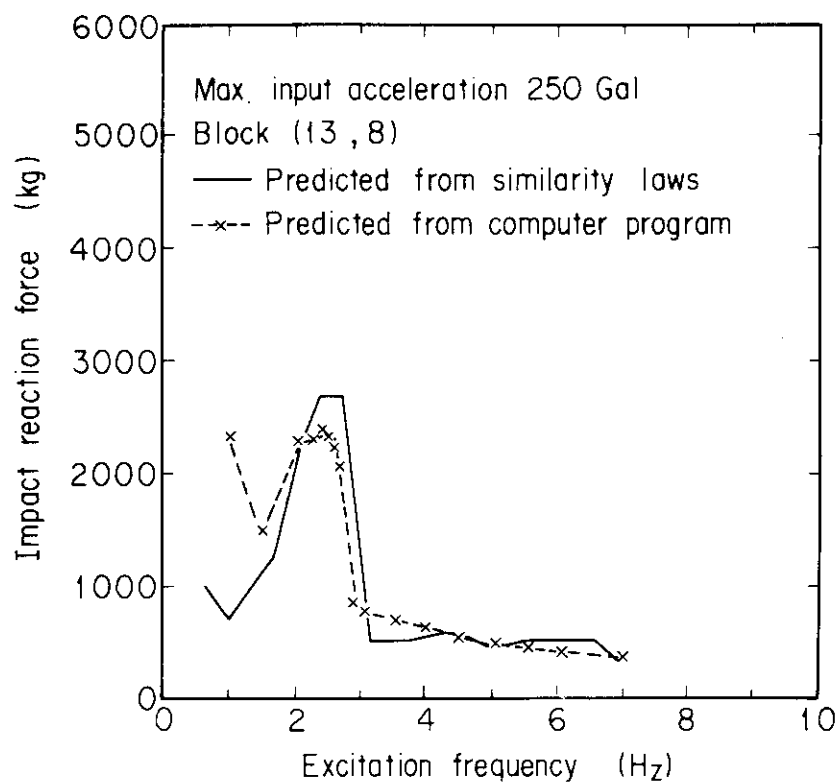


Fig. 8.16 Comparison between similarity laws and computer prediction on impact reaction force

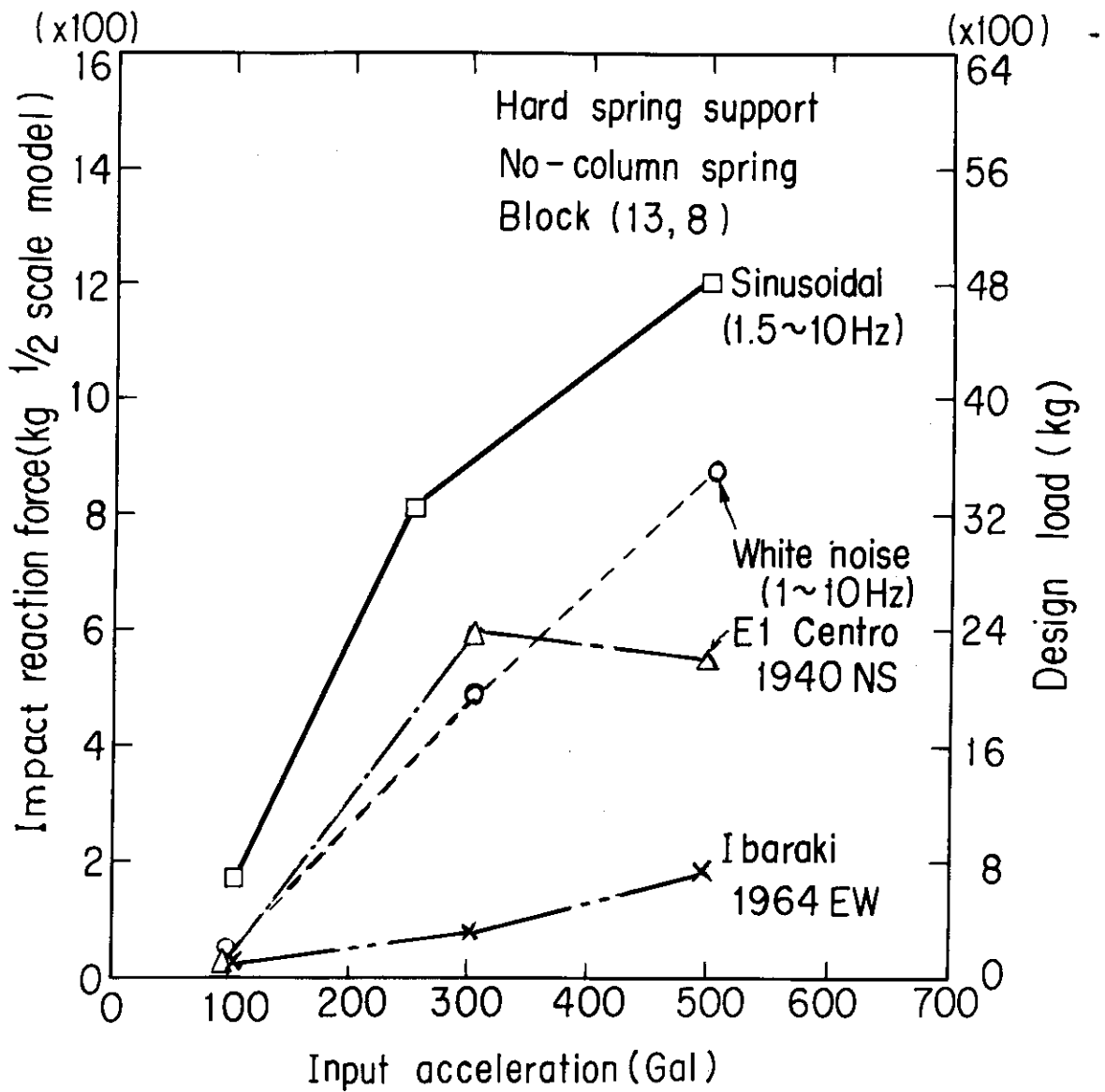


Fig. 8.17 Dowel force vs. input acceleration

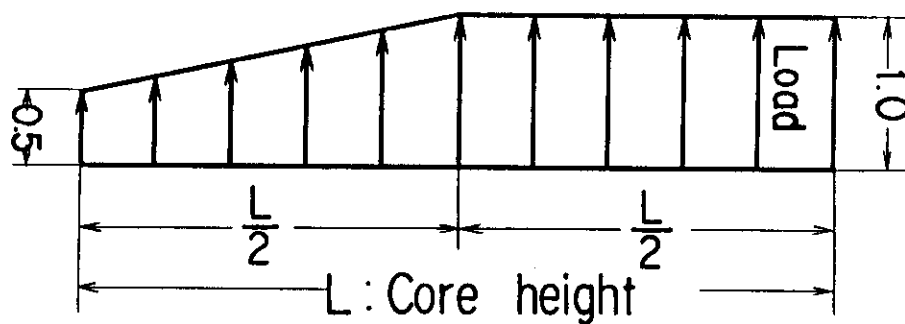


Fig. 8.18 Core radial load distribution along axial direction

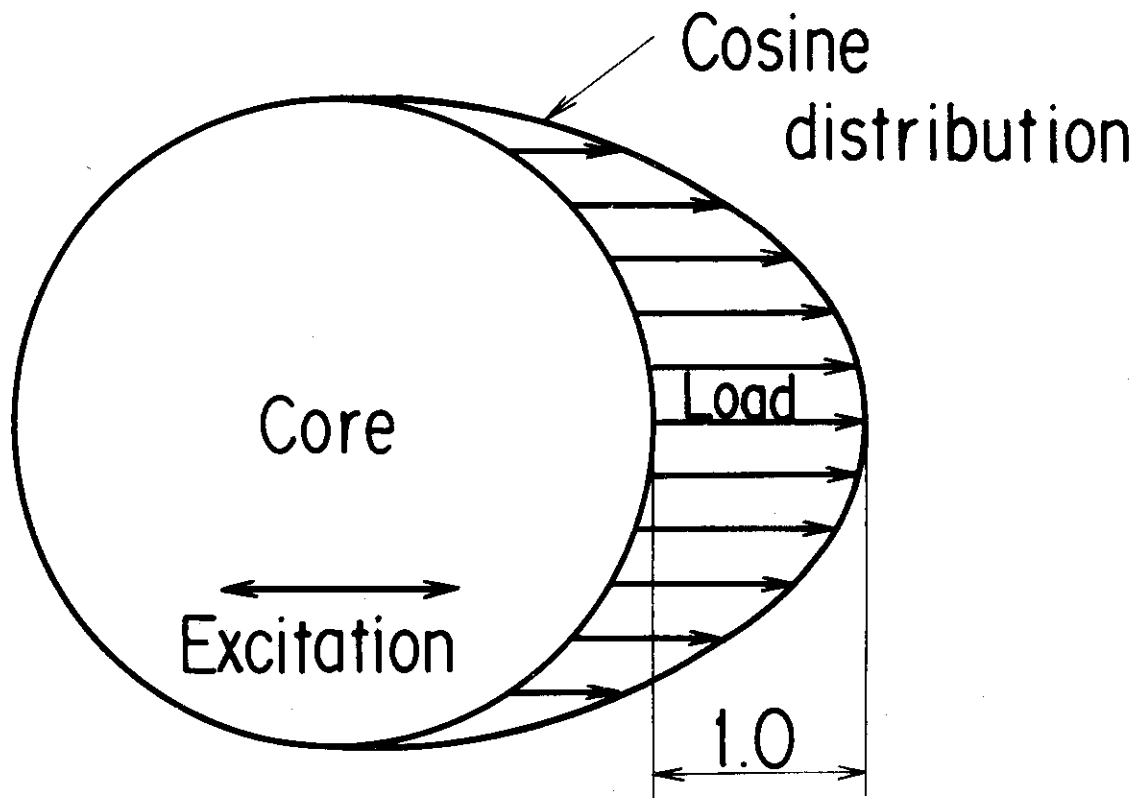


Fig. 8.19 Core circumferential load distribution

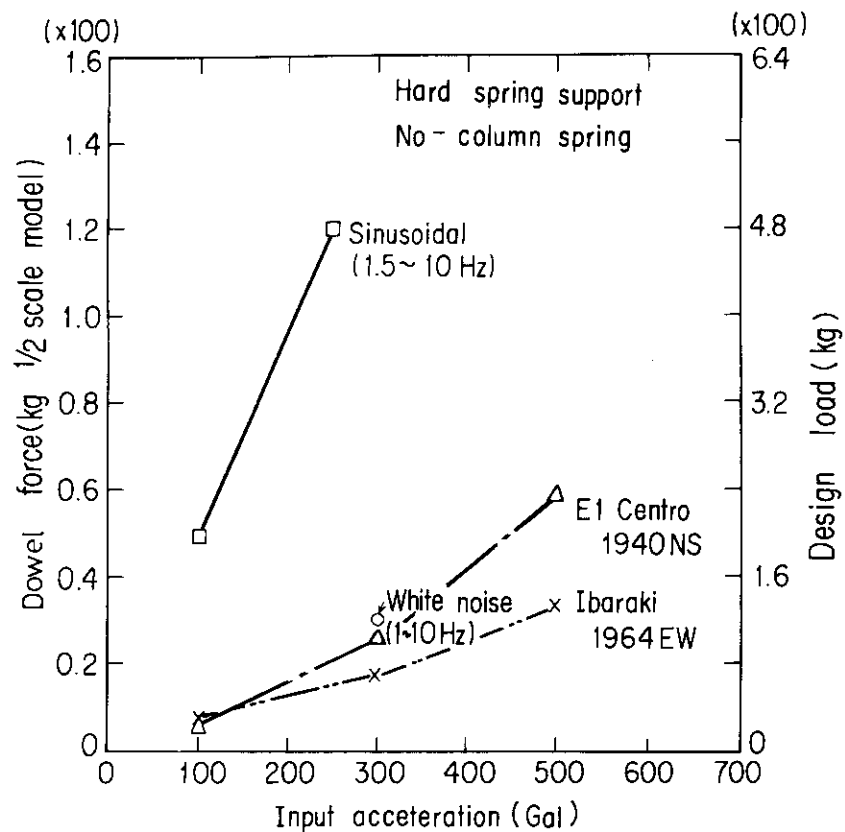


Fig. 8.20 Impact reaction force vs. input acceleration

9. 結 論

ブロック型燃料から構成される高温ガス炉の炉心の耐震性を明らかにするために、炉心を水平面で燃料要素一層分取り出した水平二次元炉心の $\frac{1}{2}$ 縮尺模型を使用して耐震試験を実施した。水平一軸加振および水平二軸同時加振による試験を行い、炉心の応答特性、変位特性、衝突力特性、側方支持反力特性、衝撃加速度特性を明らかにした。水平二次元炉心模型および垂直二次元炉心模型による試験結果を比較して実際の炉心の地震応答特性を推定する方法を検討した。炉心の地震シミュレーション解析を行い、計算値と試験値を比較して解析法と計算プログラムの妥当性を明らかにし、計算プログラムの開発に役立つ資料を得た。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〕 正弦波応答試験結果

(1) 応答の一般的傾向

(i) 振動数応答曲線

燃料ブロックの変位と衝突加速度および側方支持反力の振動数応答曲線は、いずれもブロック間ギャップに基づくハードスプリング形の非線形振動特性を示す。加振振動数の上昇に従って応答量が急激に低下する直前の加振振動数（ここでは主共振振動数と呼ぶ）は、燃料ブロックの変位応答よりも側方支持反力応答の方が高い。

(ii) 応答波形

燃料ブロックの衝突時の接触時間は1.4～2 msである。燃料ブロックの衝突加速度波形はパルス状である。側方支持反力波形は側方固定ブロックの質量と支持剛性から決まる固有周期の $\frac{1}{2}$ の周期の波形である。

(iii) 応答分布形

加振方向の各列の燃料ブロック数から定まる総ギャップ量が異なるため、燃料ブロックは隣り合う列のものに干渉され回転する。低加振振動数において炉心は一体となって運動する。

(2) 加振加速度の影響

加振加速度の増加に従って燃料ブロックの変位と衝突加速度、側方支持反力は、いずれも増加するとともにそれぞれの主共振振動数も上昇する。

(3) 側方固定ブロック間キーの影響

側方支持剛性が強の場合、側方固定ブロック間の連結キーの有無によって、燃料ブロックの応答変位に及ぼす影響はほとんどない。また、側方支持反力の応答量に及ぼす影響もわずかである。

(4) 加振形式による影響

(i) 燃料ブロックの変位

(a) 応答分布形

X軸方向一軸加振では燃料ブロックは加振方向と直角方向への運動および燃料ブロック相互間の衝突によって回転しようとする。

Y軸方向一軸加振では燃料ブロックは加振方向と直角へも動き、運動軌跡はY軸を長軸とする

細長い楕円形となる。

円形軌道二軸同時加振では燃料ブロックは円形に近いY軸を長軸とする楕円形の運動軌跡を描く。

X軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振では燃料ブロックはX軸から 20° ～ 30° Y軸方向へ傾いた軸を長軸とする楕円形の運動軌跡を描く。

X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振では、燃料ブロックはX軸から 70° ～ 80° Y軸方向へ傾いた軸を長軸とする楕円形の運動軌跡を描く。

X-Y 45° 軸等価一軸軌道二軸同時加振では、燃料ブロックはX軸から 60° Y軸方向へ傾いた軸を長軸とする楕円形の運動軌跡を描く。

(b) 加振形式による応答量の比較

燃料ブロックの変位の大きい加振形式は次の順序である（これは片振幅値の比較であり、両振幅値の比較では少し異なる）。

- I. Y軸方向一軸加振
- II. X軸方向一軸加振
- III. X軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
円形軌道二軸同時加振
- IV. X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
- V. X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

同様にベクトル方向変位の大きい加振形式は次の順序である。

- I. Y軸方向一軸加振
- II. X軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
- III. 円形軌道二軸同時加振
- IV. X軸方向一軸加振
- V. X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振
- VI. X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振

(ii) 側方支持反力

(a) 応答分布形

主共振振動数における側方支持反力分布形について各加振形式ごとに以下に述べる。

X軸方向一軸加振ではX軸上付近の径方向支持反力が卓越する。Y軸方向一軸加振ではY軸上付近の径方向支持反力が卓越する。円形軌道二軸同時加振では側方支持反力は全体にほぼ一様に分布する。X軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振では、X軸上およびX軸と 60° 方向径方向支持反力が卓越する。X-Y 45° 軸方向長軸楕円軌道二軸同時加振ではX軸から 45° 方向の径方向支持反力が卓越する。X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振ではX軸から 45° 方向の径方向支持反力が卓越する。

(b) 加振形式による応答量の比較

側方支持反力の大きい加振形式は次の順序である。

- I. X-Y 45° 軸方向等価一軸軌道二軸同時加振
X軸方向一軸加振

Ⅱ. Y 軸方向一軸加振

X-Y 45° 軸方向長軸橢円軌道二軸同時加振

Ⅲ. 円形軌道二軸同時加振

X 軸方向長軸橢円軌道二軸同時加振

燃料ブロックの変位が最大となる加振形式は六角ブロックの角方向が加振方向と一致する加振条件である。側方支持反力が最大となる加振形式は六角ブロックの平方向が加振方向と一致する加振条件である。

(5) 側方支持剛性の影響

(i) 燃料ブロック変位

燃料ブロック変位の大きい側方支持剛性は次の順序である。

- | | |
|---------|-----------|
| Ⅰ. 支持剛性 | 弱 |
| Ⅱ. 支持剛性 | 中 |
| Ⅲ. 支持剛性 | プリロード (中) |
| Ⅳ. 支持剛性 | 強 |

(ii) 側方支持反力

側方支持反力の大きい側方支持剛性は次の順序である。

- | | |
|---------|-----------|
| Ⅰ. 支持剛性 | 弱 |
| Ⅱ. 支持剛性 | 強 |
| Ⅲ. 支持剛性 | 中 |
| Ⅳ. 支持剛性 | プリロード (中) |

燃料ブロックの変位を小さくするには、側方支持剛性と強支持にすればよい。側方支持反力を小さくするには適切な側方支持剛性を選択すればよい。また側方固定ブロックの外側から炉心中心方向へ荷重を加えること (プリロード) によって側方支持反力を小さくできる。

(6) 減衰特性

側方固定ブロック及び支持構造物の減衰比は 5 ~ 17% である。

〔2〕地震波による応答量

地震波による側方支持反力は正弦波の場合の 60% 以下である。

〔3〕実際の炉心の応答特性の推定

垂直二次元炉心模型と水平二次元炉心模型の試験結果から実際の炉心の応答値は垂直二次元炉心模型の応答値から推定できる。

〔4〕炉心地震解析

炉心地震シミュレーション解析²¹⁾を行い、炉心の変位、側方支持反力、衝突加速度について計算値と試験値は良い一致を示した。本解析に使用した解析法および計算プログラムの妥当性を明らかにすることができ、計算プログラムの開発をさらに発展させることができた。

〔5〕まとめ

本耐震試験に用いた試験体は、昭和52年当時の高温ガス実験炉の炉心の $\frac{1}{2}$ 縮尺模型であるが、ここで得られた炉心の耐震性に関する基本的特性 (変位特性、側方支持反力特性、入力波の影響、減衰特性、プリロードの影響など)、垂直 2 次元炉心と水平 2 次元炉心の地震挙動特性の差、お

よび炉心地震応答解析手法開発などの成果は、炉心構成が異なる場合でも、ブロック型燃料高温ガス炉の炉心特有の耐震設計や耐震安全性評価に役立つ有用な資料を提供することができた。

謝 辞

本研究の耐震試験は日本原子力研究所が計画し、委託研究計画に基づき三菱重工業株式会社において実施した。試験模型の製作と耐震試験を担当した三菱重工業株式会社の関係者の方々に深く感謝します。本研究に際してご支援をいただいた日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部の関係者の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 幾島 毅他：“ブロック型燃料高温ガス炉炉心の地震応答特性(I)，コラムの振動実験”，日本原子力学会誌，22，15（1980）。
- 2) 幾島 毅，石塚 宏：“高温ガス炉炉心の一コラム模型による耐震試験と解析”，JAERI-M 9265（1981）。
- 3) 幾島 毅，本間敏秋：“一領域炉心模型による高温ガス炉炉心耐震試験と解析”，JAERI-M 9199（1980）。
- 4) Ikushima, T. and Honma, T. : "Seismic Response of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (II), Three-dimensional Vibration Characteristics of Stacked Block Column", J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 17, 655 (1980).
- 5) Ikushima, T. and Nakazawa, T. : "A Seismic Analysis Method for a Block Column Gas-cooled Reactor Core", Nucl. Eng. Des. 55, 331 (1980).
- 6) Ikushima, T. : "SONATINA-1, A Computer Program for Seismic Response Analysis of Column in HTGR Core", JAERI-M 9165 (1979).
- 7) Ikushima, T. and Honma, T. : "Seismic Response of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (III), Vibration Experiment of Two-dimensional Vertical Slice Core Model", J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 18, 514 (1981).
- 8) 幾島 毅，本間敏秋：“垂直二次元炉心模型による高温ガス炉炉心耐震試験と解析”，JAERI 1282（1983）。
- 9) 幾島 毅：“ブロック状燃料高温ガス炉炉心耐震研究（第2報，コラム群の二次元振動解析法）”，日本機械学会誌，48-426，229（1982）。

よび炉心地震応答解析手法開発などの成果は、炉心構成が異なる場合でも、ブロック型燃料高温ガス炉の炉心特有の耐震設計や耐震安全性評価に役立つ有用な資料を提供することができた。

謝 辞

本研究の耐震試験は日本原子力研究所が計画し、委託研究計画に基づき三菱重工業株式会社において実施した。試験模型の製作と耐震試験を担当した三菱重工業株式会社の関係者の方々に深く感謝します。本研究に際してご支援をいただいた日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部の関係者の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 幾島 毅他：“ブロック型燃料高温ガス炉炉心の地震応答特性(I)，コラムの振動実験”，日本原子力学会誌，22，15（1980）。
- 2) 幾島 毅，石塚 宏：“高温ガス炉炉心の一コラム模型による耐震試験と解析”，JAERI-M 9265（1981）。
- 3) 幾島 毅，本間敏秋：“一領域炉心模型による高温ガス炉炉心耐震試験と解析”，JAERI-M 9199（1980）。
- 4) Ikushima, T. and Honma, T. : "Seismic Response of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (II), Three-dimensional Vibration Characteristics of Stacked Block Column", J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 17, 655 (1980)。
- 5) Ikushima, T. and Nakazawa, T. : "A Seismic Analysis Method for a Block Column Gas-cooled Reactor Core", Nucl. Eng. Des. 55, 331 (1980)。
- 6) Ikushima, T. : "SONATINA-1, A Computer Program for Seismic Response Analysis of Column in HTGR Core", JAERI-M 9165 (1979)。
- 7) Ikushima, T. and Honma, T. : "Seismic Response of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (III), Vibration Experiment of Two-dimensional Vertical Slice Core Model", J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 18, 514 (1981)。
- 8) 幾島 毅，本間敏秋：“垂直二次元炉心模型による高温ガス炉炉心耐震試験と解析”，JAERI 1282（1983）。
- 9) 幾島 毅：“ブロック状燃料高温ガス炉炉心耐震研究（第2報，コラム群の二次元振動解析法）”，日本機械学会誌，48-426，229（1982）。

よび炉心地震応答解析手法開発などの成果は、炉心構成が異なる場合でも、ブロック型燃料高温ガス炉の炉心特有の耐震設計や耐震安全性評価に役立つ有用な資料を提供することができた。

謝 辞

本研究の耐震試験は日本原子力研究所が計画し、委託研究計画に基づき三菱重工業株式会社に於いて実施した。試験模型の製作と耐震試験を担当した三菱重工業株式会社の関係者の方々に深く感謝します。本研究に際してご支援をいただいた日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部の関係者の方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 幾島 毅他：“ブロック型燃料高温ガス炉炉心の地震応答特性(I)，コラムの振動実験”，日本原子力学会誌，22，15（1980）。
- 2) 幾島 毅，石塚 宏：“高温ガス炉炉心の一コラム模型による耐震試験と解析”，JAERI-M 9265（1981）。
- 3) 幾島 毅，本間敏秋：“一領域炉心模型による高温ガス炉炉心耐震試験と解析”，JAERI-M 9199（1980）。
- 4) Ikushima, T. and Honma, T. : "Seismic Response of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (II), Three-dimensional Vibration Characteristics of Stacked Block Column", J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 17, 655 (1980).
- 5) Ikushima, T. and Nakazawa, T. : "A Seismic Analysis Method for a Block Column Gas-cooled Reactor Core", Nucl. Eng. Des. 55, 331 (1980).
- 6) Ikushima, T. : "SONATINA-1, A Computer Program for Seismic Response Analysis of Column in HTGR Core", JAERI-M 9165 (1979).
- 7) Ikushima, T. and Honma, T. : "Seismic Response of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (III), Vibration Experiment of Two-dimensional Vertical Slice Core Model", J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo), 18, 514 (1981).
- 8) 幾島 毅，本間敏秋：“垂直二次元炉心模型による高温ガス炉炉心耐震試験と解析”，JAERI 1282（1983）。
- 9) 幾島 毅：“ブロック状燃料高温ガス炉炉心耐震研究（第2報，コラム群の二次元振動解析法）”，日本機械学会誌，48-426，229（1982）。

- 10) Ikushima, T. : "Aseismic Study of High Temperature Gas-cooled Reactor Core with Block-type Fuel (2nd Report, An Analytical Method of Two-dimensional Vibration of Interacting Columns)", Bulletin of JSME, 208, 16 (1982).
- 11) Ikushima, T. : "SONATINA-2V, A Computer Program for Seismic Analysis of Two-dimensional Vertical Slice HTGR Core", JAERI-1279 (1982).
- 12) Ikushima, T., Honma, T. and Ishizuka, H. : "Seismic Research on Block-type HTGR Core", Nucl. Eng. Des. 70, 194 (1982).
- 13) Olsen, B.E., Neylan, A.J. and Gorholt, W. : "Seismic Test on a One-fifth Scale HTGR Core Model", Nucl. Eng. Des. 36, 355 (1976).
- 14) Peterson, D. and Olsen, B.E. : "One-Fifth-Scale and One-Half-Scale Two-Dimensional Seismic Tests", GA-A14087 (1978).
- 15) Waldman, L. and Olsen, B.E. : "One-Half-Scale, Two-Dimensional, Two-Axis Seismic Tests", GA-A14548 (1978).
- 16) Olsen, B.E. et al. : "Core Seismic Methods Verification Method", GA-A-14812 (1979).
- 17) Muto, K., Motohashi, S. and Kuroda, K. : "Two-dimensional Vibration Test and Its Simulation Analysis for A Horizontal Slice Model of HTGR Core", Proceeding of International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, K 12/2, Paris (1979).
- 18) 青地哲男他 : "多目的高温ガス実験炉第1次概念設計", JAERI-M 6845 (1976).
- 19) 幾島 毅, 本間敏秋 : "ブロック型燃料高温ガス炉炉心の地震応答特性, (IV)二次元炉心模型による実際の炉心の応答特性の推定, 日本原子力学会誌, 27-2, 145 (1985).
- 20) 幾島 毅, 本間敏秋 : "ブロック状燃料高温ガス炉炉心耐震研究(第3報, 加振形式と支持剛性の変化による応答特性の変化), 日本機械学会論文集, 51-464 C, 746 (1985).
- 21) Ikushima, T. : "SONATINA-2H, A Computer Program for Seismic Analysis of Two-dimensional Slice HTGR Core", JAERI-M (to be published).