

JAERI-M  
87-082

HTTR サポートポスト構造の強制振動試験

1987年6月

二川 正敏・菊地 賢司・武藤 康・橋 勝美

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。  
入手の問合わせは、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、お申しこしてください。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 日立高速印刷株式会社

HTTR サポートポスト構造の強制振動試験

日本原子力研究所東海研究所高温工学部  
二川 正敏・菊地 賢司・武藤 康・橋 勝美

(1987年5月11日受理)

HTTR 炉床部を構成するサポートポスト構造の振動特性について調べるために、強制振動試験を二次元振動試験体を用いて行った。試験結果を Lagrange 式より導出した振動方程式による解析結果と比較、検討した結果、次のような結論を得た。

- (1) サポートポスト構造の復元力特性は、転がり運動では正、滑り運動では負の剛性となる倒壊型を示す。
- (2) サポートポスト構造の転がりと滑り運動から成る非線形強制振動特性は、過渡応答波形より求まった減衰比を用いた解析結果によって良く表せる。

Forced-vibrational Test for  
the Support Post Structure of HTTR

Masatoshi FUTAKAWA, Kenji KIKUCHI, Yasushi MUTO  
and Katumi TACHIBANA

Department of High Temperature Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 11, 1987)

In order to evaluate the vibrational characteristics of the support post structure which constitutes a bottom-core structure in HTTR, a forced-vibrational test has carried out by using a two-dimensional model for the support post structure. The experimental results have been compared with the analytical ones obtained from the Lagrange's equation.

The following are the conclusions derived:

- (1) The restoring force characteristics of the support post structure are able to be described by two spring constants, in which positive and negative constants represent rolling and sliding motions, respectively.
- (2) The forced-vibrational behavior which includes both the rolling and sliding motions can be predicted by using the analytical result obtained from the Lagrange's equation.

Keywords: HTTR, Support Post, Post Seat, Forced-Vibrational Test, Vibrational Characteristic, Resonance Frequency, Lagrange's Equation, Earthquake Vibration.

## 目 次

1. 序 論 .....	1
2. 実験装置及び方法 .....	1
3. 解析方法 .....	2
3.1 解析モデル .....	2
3.2 復元力 .....	2
3.3 振動方程式 .....	3
4. 結 果 .....	5
4.1 復元力 .....	5
4.2 強制振動 .....	5
5. 討 論 .....	6
6. 結 論 .....	8
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	8

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Experimental apparatus and method .....	1
3. Analytical method .....	2
3.1 Analytical model .....	2
3.2 Restoring force .....	2
3.3 Vibrational equation .....	3
4. Results .....	5
4.1 Restoring force .....	5
4.2 Forced vibration .....	5
5. Discussions .....	6
6. Conclusions .....	8
References .....	8

## Tables and Figures List

- Table 1 Range of geometrical and mass parameters varied throughout the experiment
- Table 2 Reduction of damping ratios  $\Delta\zeta$  by the mass supported by post  $m_u$
- Fig.1 Core structure of HTTR
- Fig.2 Support post structure in plenum region
- Fig.3 Two-dimensional vibration model
- Fig.4 Vibration table
- Fig.5 Chart of maximum vibrational power
- Fig.6 Block diagram of measuring system
- Fig.7 Analytical model of support post structure
- Fig.8 Restoring force of support post structure
- Fig.9 Hysteresis curve for restoring force
- Fig.10 Relation between damping ratio and initial displacement
- Fig.11 Amplitude-frequency response
- Fig.12 Displacement-time response indicating both rolling and sliding motions
- Fig.13 Relation between radius of seat and maximum horizontal displacement due to rolling motion

## 〔主な記号〕

C	減衰定数	$R_1$	$r_p / (r_s - r_p)$
F	外力	$R_2$	$r_s r_p / (r_s - r_p)$
$F_R$	復元力	$r_p$	ポスト端曲率半径
$f_n$	固有振動数	$r_s$	シート曲率半径
$f_r$	共振振動数	T	全運動エネルギー
G	重心	$T_r$	回転運動エネルギー
g	重力加速度	$T_t$	移動運動エネルギー
$I_G$	慣性モーメント	t	時間
$l$	ポストの軸長	U	位置エネルギー
$l_p$	$l/2$	$x_G$	重心の x 軸方向変位
M	モーメント	$y_G$	重心の y 軸方向変位
m	質量	$\theta_i$	ポストの傾斜角
n	ポストの数	$\theta_{i0}$	$\theta_i$ の初期角
$O_p$	ポスト端の曲率中心	$\theta_{im}$	$F_R$ の最大値での $\theta_i$
$O_s$	シートの曲率中心	$\theta_r$	$O_s$ 回りのポストの回転角
Q	非保存力	$\theta_{r0}$	$\theta_r$ の初期角
q	一般座標	$\theta_f$	黒鉛／黒鉛の摩擦角

## 添 字

h	上部 (端)
$l$	下部 (端)
p	サポートポスト
u	上部シートブロック



## 1. 序 論

原研で開発が進められている HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor) の炉心を構成する燃料体、可動反射体及び高温プレナムブロックは一領域当たり 3 本のサポートポストによって支持されている (Fig. 1)。また、サポートポストは、各領域より噴流となって流出する高温の He ガスを混合する機能を持つ高温プレナムを形成する〔1〕。

サポートポストはその両端に配置されるポストシートと球面で接触する構造となっている (Fig. 2)。これは、原子炉の起動、停止に伴って生じる黒鉛や炭素などの部材と鋼製の構造部材との間の相対熱膨張差や地震力による部材間の水平相対変位を、球面接触構造によるサポートポストの微小回転 (傾斜) によって、ポストに曲げやせん断を加えることなく吸収するためである。

地震時の炉心の健全性と安全性の確証を得ることを目的として、炉心模型による耐震試験、解析モデルの開発、検討が幾島らによって行われた〔2, 3〕。しかしながら、この模型ではサポートポストをロールベアリングで置換えているため、サポートポストを介して炉心に伝播される地震波の影響が考慮されない。サポートポスト構造は、球面接触構造により生じる転がりや滑り運動によって特異な復元力や振動特性を示し、その挙動は炉床部や炉心の耐震性ばかりでなく制御棒の挿入性や炉心ブロック配列にも影響を及ぼすと考えられる。また、サポートポスト自体の耐震強度も重要な課題である。

これまでに、サポートポスト構造の振動特性の基礎的な知見を得ることを目的とした垂直二次元振動試験体による過渡応答振動試験を行い、ポスト軸長、ポスト端曲率半径、シート曲率半径及びポスト支持質量によるサポートポスト構造の固有振動数の変化について調べた。また、実験結果をエネルギー平衡状態に関する Lagrange の式より求まる解析結果と比較した。その結果、転がり運動が支配的な微小角振動の範囲では、固有振動数の変化は、解析結果に良く一致しポスト軸長やポストとシート曲率半径により変化するが、ポスト支持質量に影響されないことが明らかになった〔4〕。

そこで、滑り運動を誘発するような比較的大きな振動が生じた場合のサポートポスト構造の挙動について調べるために、加振テーブルを用いた強制振動試験を行った。また、滑り運動を考慮したポストの振動解析を行い、その結果を実験結果と比較検討した。さらに、HTTR サポートポストとシートの曲率半径について、共振振動数と復元力特性との関係から検討を加えた。

## 2. 実験装置及び方法

サポートポスト構造の垂直二次元振動試験体の形状及び寸法を Fig. 3 に示す。試験体は、垂直立面内の挙動を把握するために製作されたモデルであり、2 本のサポートポスト、上部シートブロック及び下部シートブロックより構成される。各要素の材質は HTTR サポートポスト用

## 1. 序 論

原研で開発が進められている HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor) の炉心を構成する燃料体、可動反射体及び高温プレナムブロックは一領域当たり 3 本のサポートポストによって支持されている (Fig. 1)。また、サポートポストは、各領域より噴流となって流出する高温の He ガスを混合する機能を持つ高温プレナムを形成する〔1〕。

サポートポストはその両端に配置されるポストシートと球面で接触する構造となっている (Fig. 2)。これは、原子炉の起動、停止に伴って生じる黒鉛や炭素などの部材と鋼製の構造部材との間の相対熱膨張差や地震力による部材間の水平相対変位を、球面接触構造によるサポートポストの微小回転 (傾斜) によって、ポストに曲げやせん断を加えることなく吸収するためである。

地震時の炉心の健全性と安全性の確証を得ることを目的として、炉心模型による耐震試験、解析モデルの開発、検討が幾島らによって行われた〔2, 3〕。しかしながら、この模型ではサポートポストをロールベアリングで置換えているため、サポートポストを介して炉心に伝播される地震波の影響が考慮されない。サポートポスト構造は、球面接触構造により生じる転がりや滑り運動によって特異な復元力や振動特性を示し、その挙動は炉床部や炉心の耐震性ばかりでなく制御棒の挿入性や炉心ブロック配列にも影響を及ぼすと考えられる。また、サポートポスト自体の耐震強度も重要な課題である。

これまでに、サポートポスト構造の振動特性の基礎的な知見を得ることを目的とした垂直二次元振動試験体による過渡応答振動試験を行い、ポスト軸長、ポスト端曲率半径、シート曲率半径及びポスト支持質量によるサポートポスト構造の固有振動数の変化について調べた。また、実験結果をエネルギー平衡状態に関する Lagrange の式より求まる解析結果と比較した。その結果、転がり運動が支配的な微小角振動の範囲では、固有振動数の変化は、解析結果に良く一致しポスト軸長やポストとシート曲率半径により変化するが、ポスト支持質量に影響されないことが明らかになった〔4〕。

そこで、滑り運動を誘発するような比較的大きな振動が生じた場合のサポートポスト構造の挙動について調べるために、加振テーブルを用いた強制振動試験を行った。また、滑り運動を考慮したポストの振動解析を行い、その結果を実験結果と比較検討した。さらに、HTTR サポートポストとシートの曲率半径について、共振振動数と復元力特性との関係から検討を加えた。

## 2. 実験装置及び方法

サポートポスト構造の垂直二次元振動試験体の形状及び寸法を Fig. 3 に示す。試験体は、垂直立面内の挙動を把握するために製作されたモデルであり、2 本のサポートポスト、上部シートブロック及び下部シートブロックより構成される。各要素の材質は HTTR サポートポスト用

候補材料のIG-11である。形状は、振動台の容量やテーブルの大きさ及び試験体の加工精度を考慮してHTTRサポートポスト構造の1/2.5の寸法を基準に、Table 1に示した範囲で変化させた。なお、ポスト曲率半径 $r_p=32.0$  mm、シート曲率半径 $r_s=32.6$  mm、及びポスト全長 $l=240.0$  mmの基準寸法を持ち、並びにポスト支持質量 $m_p=4.6$  kgである試験体を標準試験体と呼ぶ。

振動台は動電型振動発生機、制御器及び水平テーブル(1 m×1 m)から構成されている(Fig. 4)。振動台の能力線図をFig. 5に示す。この線図の範囲内で水平一軸方向に加速度、速度、変位の何れかを制御しながら加振可能である。

試験は、下部シートブロック上にポストを垂直に立てた試験体に対して、2～7 Hzの正弦波掃引加振を変位一定で行った。計測系のブロック線図をFig. 6に示す。加速度は、試験体、テーブル及び試験体支持治具に取り付けられた歪みゲージ型加速度計で測定される。また、試験体支持治具とテーブルに取り付けられた非接触型変位計により、上部シートブロックと支持治具(加振テーブル)間の相対変位及びテーブルの絶対変位が測定される。これらの測定信号は、データレコーダーに収録後、30 Hzのローパスフィルターで雑音成分を除去し、ウェイブメモリー、X-Yレコーダー及びフォトコーダーにより記録される。なお、試験体支持治具の一次固有振動数が100 Hz以上であり試験振動数範囲が10 Hz以下であることから、支持治具は十分剛であるといえる。

また、サポートポスト構造の水平方向変位に対する復元力の変化について調べるために、静荷重負荷試験を行った。ポスト傾斜時の上部シートブロックからの反力すなわち復元力は負荷治具先端に取り付けた小型ロードセルにより、水平変位は非接触型変位計により測定した。

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析モデル

解析モデルをFig. 7に示す。本モデルは次の仮定に従うものとする。

- ポスト及び各ブロックは剛体であり、ポストとシート間の局部変形は考慮しない。
- 運動は、二次元垂直面内を考慮して、水平、垂直及び回転の三自由度系とする。
- ポストは、シート上(下)で転がりまたは滑り運動を行う。

#### 3.2 復元力

上部シートブロックにX方向に作用する復元力 $F_R$ は、ポストの傾斜による上部シートブロック及びポストの位置エネルギーの増加から生じる。 $F_R$ によるポストの回転モーメント $M_{FR}$ は、次式で表せる。

$$M_{FR} = M_{mp} + M_{mu} \quad (1)$$

候補材料のIG-11である。形状は、振動台の容量やテーブルの大きさ及び試験体の加工精度を考慮してHTTRサポートポスト構造の1/2.5の寸法を基準に、Table 1に示した範囲で変化させた。なお、ポスト曲率半径 $r_p=32.0$  mm、シート曲率半径 $r_s=32.6$  mm、及びポスト全長 $l=240.0$  mmの基準寸法を持ち、並びにポスト支持質量 $m_p=4.6$  kgである試験体を標準試験体と呼ぶ。

振動台は動電型振動発生機、制御器及び水平テーブル(1 m×1 m)から構成されている(Fig. 4)。振動台の能力線図をFig. 5に示す。この線図の範囲内で水平一軸方向に加速度、速度、変位の何れかを制御しながら加振可能である。

試験は、下部シートブロック上にポストを垂直に立てた試験体に対して、2~7 Hzの正弦波掃引加振を変位一定で行った。計測系のブロック線図をFig. 6に示す。加速度は、試験体、テーブル及び試験体支持治具に取り付けられた歪みゲージ型加速度計で測定される。また、試験体支持治具とテーブルに取り付けられた非接触型変位計により、上部シートブロックと支持治具(加振テーブル)間の相対変位及びテーブルの絶対変位が測定される。これらの測定信号は、データレコーダーに収録後、30 Hzのローパスフィルターで雑音成分を除去し、ウェーブメモリー、X-Yレコーダー及びフォトコーダーにより記録される。なお、試験体支持治具の一次固有振動数が100 Hz以上であり試験振動数範囲が10 Hz以下であることから、支持治具は十分剛であるといえる。

また、サポートポスト構造の水平方向変位に対する復元力の変化について調べるために、静荷重負荷試験を行った。ポスト傾斜時の上部シートブロックからの反力すなわち復元力は負荷治具先端に取り付けた小型ロードセルにより、水平変位は非接触型変位計により測定した。

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析モデル

解析モデルをFig. 7に示す。本モデルは次の仮定に従うものとする。

- ・ポスト及び各ブロックは剛体であり、ポストとシート間の局部変形は考慮しない。
- ・運動は、二次元垂直面内を考慮して、水平、垂直及び回転の三自由度系とする。
- ・ポストは、シート上(下)で転がりまたは滑り運動を行う。

#### 3.2 復元力

上部シートブロックにX方向に作用する復元力 $F_R$ は、ポストの傾斜による上部シートブロック及びポストの位置エネルギーの増加から生じる。 $F_R$ によるポストの回転モーメント $M_{FR}$ は、次式で表せる。

$$M_{FR} = M_{mp} + M_{mu} \quad (1)$$

ここで、

$$M_{FR} = 2 F_R (r_p \cos \theta_r + (\ell_p - r_p) \cos \theta_i) \quad (2)$$

$$M_{mp} = nm_p g (r_p \sin \theta_r - (\ell_p - r_p) \sin \theta_i) \quad (3)$$

$$M_{mu} = 2 m_u g (r_p \sin \theta_r - (\ell_p - r_p) \sin \theta_i) \quad (4)$$

したがって、復元力  $F_R$  は、

$$F_R = \frac{(nm_p + 2m_u) g (r_p \sin \theta_r - (\ell_p - r_p) \sin \theta_i)}{2 (r_p \cos \theta_r + (\ell_p - r_p) \cos \theta_i)} \quad (5)$$

となる。 $\theta_i$  と  $\theta_r$  の関係はポストがシート上(下)で滑るか、転がるかに依る。すなわち、 $\theta_r < \theta_f$  のとき、ポストは転がり、転がり距離弧  $\widehat{P_1 Q_{p1}}$  ( $\widehat{P_h Q_{ph}}$ ) は弧  $\widehat{P_1 Q_{s1}}$  ( $\widehat{P_h Q_{sh}}$ ) に等しくなるので、 $\theta_i$  と  $\theta_r$  の関係は次式で表せる。

$$\theta_r = R_1 \theta_i \quad (\theta_i < \theta_f / R_1) \quad (6)$$

ここで、

$$R_1 = r_p / (r_s - r_p) \quad (7)$$

一方、ポストが滑り運動するときの  $\theta_r$  は、滑り摩擦力が最大静止摩擦力に等しいとすれば、

$$\theta_r = \theta_f \quad (\theta_i \geq \theta_f / R_1) \quad (8)$$

となる。

### 3.3 振動方程式

サポートポスト構造の振動方程式は、エネルギーの釣り合いより得られる次のような Lagrange の式から導出した。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} = Q \quad (9)$$

サポートポスト構造の全運動エネルギー  $T$  は、ポストの移動と回転のエネルギー  $T_{tp}$ 、 $T_{rp}$  及び上部シートブロックの移動のエネルギー  $T_{tu}$  から成る。全ポテンシャルエネルギー  $U$  は、上部シートブロック  $U_u$  とポスト  $U_p$  である。また、 $Q$  は外力、減衰力を含む非保存力である。ここでは、一般化座標  $q$  にポストの傾斜角  $\theta_i$  を用いる。

$T$  と  $U$  は次式で表せる。

$$\begin{aligned} T &= T_{rp} + T_{tp} + T_{tu} \\ &= nI_{Gp} / 2 \dot{\theta}_i^2 + nm_p / 2 (\dot{x}_{Gp}^2 + \dot{y}_{Gp}^2) + nm_u / 2 (\dot{x}_{Gu}^2 + \dot{y}_{Gu}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 U &= U_p + U_u \\
 &= nm_p g y_{Gp} + m_u g y_{Gu}
 \end{aligned} \tag{11}$$

ここで,

$$x_{Gp} = (r_s - r_p) \sin \theta_r + (\ell_p - r_p) \sin \theta_i \tag{12}$$

$$y_{Gp} = (r_s - r_p) (1 - \cos \theta_r) - (\ell_p - r_p) (1 - \cos \theta_i) \tag{13}$$

$$x_{Gu} = 2 x_{Gp} \tag{14}$$

$$y_{Gu} = 2 y_{Gp} \tag{15}$$

ポストがシート上で転がる時は  $\theta_r$  と  $\theta_i$  の関係は,

$$\theta_r = \theta_{r_0} + R_1 (\theta_i - \theta_{i_0}) \tag{16}$$

$$|\theta_i - \theta_{i_0}| \leq \theta_f / R_1$$

となり, 滑べるときは,

$$\theta_r = \theta_f \quad |\theta_i - \theta_{i_0}| > \theta_f / R_1 \tag{17}$$

である。式(9)に式(10), (11)で表される T, U を代入し, 式(12)~(17)を用いて変位  $x_{Gp}$ ,  $y_{Gp}$ ,  $x_{Gu}$ ,  $y_{Gu}$ ,  $\theta_r$  を一般化座標  $\theta_i$  で表すと, 求める振動方程式が得られる〔4〕。

さらに,  $\theta_i$  及び  $\dot{\theta}_i$  が小さくそれらに関する2次以上の微小量を無視できるとすると, 式(9)は近似的に次式で表せる。

$$\begin{aligned}
 \{ n I_{Gp} + (nm_p + 4 m_u) \ell_p^2 \} \ddot{\theta}_i \\
 + \{ (nm_p + 2 m_u) (R_2 - \ell_p) g \} \theta_i = Q
 \end{aligned} \tag{18}$$

ここで,

$$R_2 = r_p r_s / (r_s - r_p) \tag{19}$$

また, 減衰力を等価粘性減衰力  $C \dot{\theta}_i$  で表し, かつ外力  $F(t)$  が作用するとした場合,

$$Q = F(t) - C \dot{\theta}_i \tag{20}$$

となり, 次のようなサポートポスト構造の強制振動に関する式が得られる。

$$\begin{aligned}
 \{ n I_{Gp} + (nm_p + 4 m_u) \ell_p^2 \} \ddot{\theta}_i + C \dot{\theta}_i \\
 + \{ (nm_p + 2 m_u) (R_2 - \ell_p) g \} \theta_i = F(t)
 \end{aligned} \tag{21}$$

また、式(18)において  $Q = 0$  とした固有振動に関する式よりサポートポスト構造の固有振動数は、

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(nm_p + 2m_u)(R_s - \ell_p)g}{nI_{Gp} + (nm_p + 4m_u)\ell_p^2}} \quad (\text{Hz}) \quad (22)$$

となる。

なお、式(9)から得られる厳密式及び式(21)の近似式は、Lunge-Kutta法を用いた数値計算によって解かれ、転がり運動だけで振動する微小角の範囲では両者はほぼ一致した。数値計算に用いた1ステップ当りの時間増分は  $10^{-2}$  秒である。

## 4. 結 果

### 4.1 復元力

上部シートブロックの水平方向変位  $x_{Gu}$  に対する復元力  $F_R$  を Fig. 8 に示す。復元力は傾斜角と共に急速に増加するが、ポストが滑り始める位置より徐々に減少する。最大摩擦角  $\theta_f$  に傾斜法による実測値(=  $13^\circ$ 〔5〕)を式(5)に用いた解析結果は、転がりの範囲では良く実験結果に一致しているが、滑り運動の範囲では傾斜角の増加に伴って実験値を徐々に上回るようになる。これは、滑り摩擦力が最大静止摩擦力より低下し、接触点  $P_1$  ( $P_2$ ) が滑りながら移動するためであると考えられる。また、ポストの支持質量により復元力の最大値は増加するが、滑り開始角は変化しない。

ループ面積が比較的小さい場合の復元力ヒステリシスループを Fig. 9 に示す。解析値は実験値を良く表しており、AB, CD, EF 間は転がり運動、BC, DE, FB 間は滑り運動である。これより、サポートポスト構造は、転がり運動では正の勾配を持つばね定数となるが滑り運動では負の勾配のばね定数となる倒壊形復元力特性〔6〕を示すことが分かる。したがって、振動により滑りが発生した場合、ポストは急激に傾斜して転倒する恐れがある。

### 4.2 強制振動

上部シートブロックの水平方向変位の振動数応答は、加振テーブルの振幅を一定とし 2 ~ 7 Hz まで振動数を掃引する振動数スイープ試験法によって調べた。スイープ速度は応答が十分成長するために必要な加振時間及び試験効率を考慮して選択した〔7〕。解析で用いた減衰比は、自由減衰振動波形から FFT (Fast Fourier Transform) アナライザーによって求めた値の平均値を用いた (Fig. 10 参照)。なお、Fig. 10 より減衰比は初期変位によらずポストの支持質量によって増加する傾向があるといえる。これに関する考察を5章にて行う。

Fig. 11 は比較的小さな振幅である 0.1 mm 一定として加振した場合のサポートポスト構造の共振応答倍率である。ポストは転がり運動によってのみ振動し、加振後も直立を保っている。

また、式(18)において  $Q=0$  とした固有振動に関する式よりサポートポスト構造の固有振動数は、

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(nm_p + 2m_u)(R_2 - \ell_p)g}{nI_{Gp} + (nm_p + 4m_u)\ell_p^2}} \quad (\text{Hz}) \quad (22)$$

となる。

なお、式(9)から得られる厳密式及び式(21)の近似式は、Lunge-Kutta法を用いた数値計算によって解かれ、転がり運動だけで振動する微小角の範囲では両者はほぼ一致した。数値計算に用いた1ステップ当りの時間増分は  $10^{-2}$  秒である。

## 4. 結 果

### 4.1 復元力

上部シートブロックの水平方向変位  $x_{Gu}$  に対する復元力  $F_R$  を Fig. 8 に示す。復元力は傾斜角と共に急速に増加するが、ポストが滑り始める位置より徐々に減少する。最大摩擦角  $\theta_f$  に傾斜法による実測値(=  $13^\circ$ 〔5〕)を式(5)に用いた解析結果は、転がりの範囲では良く実験結果に一致しているが、滑り運動の範囲では傾斜角の増加に伴って実験値を徐々に上回るようになる。これは、滑り摩擦力が最大静止摩擦力より低下し、接触点  $P_1$  ( $P_2$ ) が滑りながら移動するためであると考えられる。また、ポストの支持質量により復元力の最大値は増加するが、滑り開始角は変化しない。

ループ面積が比較的小さい場合の復元力ヒステリシスループを Fig. 9 に示す。解析値は実験値を良く表しており、AB, CD, EF 間は転がり運動、BC, DE, FB 間は滑り運動である。これより、サポートポスト構造は、転がり運動では正の勾配を持つばね定数となるが滑り運動では負の勾配のばね定数となる倒壊形復元力特性〔6〕を示すことが分かる。したがって、振動により滑りが発生した場合、ポストは急激に傾斜して転倒する恐れがある。

### 4.2 強制振動

上部シートブロックの水平方向変位の振動数応答は、加振テーブルの振幅を一定とし 2~7 Hz まで振動数を掃引する振動数スイープ試験法によって調べた。スイープ速度は応答が十分成長するために必要な加振時間及び試験効率を考慮して選択した〔7〕。解析で用いた減衰比は、自由減衰振動波形から FFT (Fast Fourier Transform) アナライザーによって求めた値の平均値を用いた (Fig. 10 参照)。なお、Fig. 10 より減衰比は初期変位によらずポストの支持質量によって増加する傾向があるといえる。これに関する考察を5章にて行う。

Fig. 11 は比較的小さな振幅である 0.1 mm 一定として加振した場合のサポートポスト構造の共振応答倍率である。ポストは転がり運動によってのみ振動し、加振後も直立を保っている。



式(9)より求まる共振振動数及び共振振幅は実験値にはほぼ一致し、解析結果は実験結果を良く表わしている。

Fig. 11 の場合より入力振幅を増加させて転がりと滑り運動を生じさせた変位応答波形を Fig. 12 に示す。約 4 Hz の共振振動数付近で振幅が急激に増加し、ポストは傾斜した。これは、共振振動数に近づくと従って増加する  $\theta_i$  が  $\theta_f/R_1$  より大きくなったため滑り運動が発生して、一時的にサポートポスト構造の剛性が負に変化したからであると考えられる (Fig. 9 参照)。その後、加振振動数が共振振動数から離れるに従い振幅は減少し、ポストは再び転がり運動だけの傾斜を伴った振動をする。このような場合においても、式(9)から得られる振動方程式による解析結果は実験結果を良く表すことができる。また、解析から見積もられた摩擦角  $\theta_f$  は、傾斜試験から実測された最大静止摩擦角の約  $1/2$  であった。

入力振幅をさらに増加させた場合には、ポストは転倒した。

## 5. 討 論

HTTR サポートポスト構造〔1〕の共振振動数は式(22)より、約 2 Hz と見積もられる〔4〕。一般に地震振動のスペクトラムは 1～5 Hz に集中しているので、HTTR サポートポスト構造は地震時に共振すると考えられる。さらに、共振振動数が 1.4～2.8 Hz であると推測される炉心〔2,3〕はサポートポストと共振するため、ポストの振動挙動が炉心の挙動さらに制御棒の挿入性に悪影響を与える可能性がある。

また、サポートポストはその微小回転により上部プレナムと下部プレナムブロック間の相対水平変位を吸収する必要がある。サポートポスト構造は、Fig. 9 に示すように、上部プレナムブロックの水平移動によりポスト/シート間で滑り運動が発生すれば、剛性が負となる倒壊形復元力を示す。倒壊形復元力となった場合にはサポートポストの傾きは残留されるため、上部プレナムブロック間のすき間分布には偏りが生じる。一旦傾いたポストは直立状態に比べ傾斜し易くなるため、分布の偏りは一層増加される。このようなプレナムブロック間のすき間分布の偏りは、燃料ブロックのカラム間のすき間にも波及し、炉心全体の冷却材流量配分に影響を与えたり、カラムフラクチュエーション〔8〕を誘発する可能性もある。

振動時のポストの滑り開始角が最大静止摩擦角（常温大気中と 1000°C 原研  $\beta$  ガス中での IG-11/IG-11 の摩擦係数には顕著な差異はない〔9〕。）の約  $1/2$  であり、本試験体が  $1/2.5$  スケールであることを考慮すると、HTTR サポートポスト構造ではプレナムブロックが約 1.5 mm 以上の片振幅で振動すればポストはシート上で滑り振動を起して傾斜する。HTTR プレナムブロック間のすき間は運転停止時に平均約 5 mm と計画されているから、地震振動によりポストは容易に傾斜すると考えられる。

そこで、サポートポスト構造の地震時の共振を回避し、かつ上/下プレナムブロック間の相対水平変位をポストの転がりだけで吸収するためには、式(14)と及び式(22)の関係よりサポートポスト構造の各寸法を決める必要がある。特にポスト端及びシートの曲率半径  $r_p$ ,  $r_s$  の固有振動数に与える影響が大きい〔4〕ので、ここでは  $r_s$ ,  $r_p$  について検討する。

式(9)より求まる共振振動数及び共振振幅は実験値にほぼ一致し、解析結果は実験結果を良く表わしている。

Fig. 11 の場合より入力振幅を増加させて転がりと滑り運動を生じさせた変位応答波形を Fig. 12 に示す。約 4 Hz の共振振動数付近で振幅が急激に増加し、ポストは傾斜した。これは、共振振動数に近づくに従って増加する  $\theta_1$  が  $\theta_1/R_1$  より大きくなったため滑り運動が発生して、一時的にサポートポスト構造の剛性が負に変化したからであると考えられる (Fig. 9 参照)。その後、加振振動数が共振振動数から離れるに従い振幅は減少し、ポストは再び転がり運動だけの傾斜を伴った振動をする。このような場合においても、式(9)から得られる振動方程式による解析結果は実験結果を良く表すことができる。また、解析から見積もられた摩擦角  $\theta_f$  は、傾斜試験から実測された最大静止摩擦角の約  $1/2$  であった。

入力振幅をさらに増加させた場合には、ポストは転倒した。

## 5. 討 論

HTTR サポートポスト構造〔1〕の共振振動数は式(22)より、約 2 Hz と見積もられる〔4〕。一般に地震振動のスペクトラムは 1～5 Hz に集中しているので、HTTR サポートポスト構造は地震時に共振すると考えられる。さらに、共振振動数が 1.4～2.8 Hz であると推測される炉心〔2,3〕はサポートポストと共振するため、ポストの振動挙動が炉心の挙動さらに制御棒の挿入性に悪影響を与える可能性がある。

また、サポートポストはその微小回転により上部プレナムと下部プレナムブロック間の相対水平変位を吸収する必要がある。サポートポスト構造は、Fig. 9 に示すように、上部プレナムブロックの水平移動によりポスト/シート間で滑り運動が発生すれば、剛性が負となる倒壊形復元力を示す。倒壊形復元力となった場合にはサポートポストの傾きは残留されるため、上部プレナムブロック間のすき間分布には偏りが生じる。一旦傾いたポストは直立状態に比べ傾斜し易くなるため、分布の偏りは一層増加される。このようなプレナムブロック間のすき間分布の偏りは、燃料ブロックのカラム間のすき間にも波及し、炉心全体の冷却材流量配分に影響を与えたり、カラムフラクチュエーション〔8〕を誘発する可能性もある。

振動時のポストの滑り開始角が最大静止摩擦角（常温大気中と 1000°C 原研  $\beta$  ガス中での IG-11/IG-11 の摩擦係数には顕著な差異はない〔9〕。）の約  $1/2$  であり、本試験体が  $1/2.5$  スケールであることを考慮すると、HTTR サポートポスト構造ではプレナムブロックが約 1.5 mm 以上の片振幅で振動すればポストはシート上で滑り振動を起して傾斜する。HTTR プレナムブロック間のすき間は運転停止時に平均約 5 mm と計画されているから、地震振動によりポストは容易に傾斜すると考えられる。

そこで、サポートポスト構造の地震時の共振を回避し、かつ上/下プレナムブロック間の相対水平変位をポストの転がりだけで吸収するためには、式(14)と及び式(22)の関係よりサポートポスト構造の各寸法を決める必要がある。特にポスト端及びシートの曲率半径  $r_p$ ,  $r_s$  の固有振動数に与える影響が大きい〔4〕ので、ここでは  $r_s$ ,  $r_p$  について検討する。

一般に、減衰効果を等価粘性減衰で表すと共振振動数  $f_r$  と固有振動数  $f_n$  の関係は次式で表せる〔10〕。

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (23)$$

サポートポスト構造の減衰比  $\zeta$  は比較的小さいので、 $f_r \approx f_n$  と見なしてよい。従って、 $R_2 (= r_s r_p / (r_s - r_p))$  は、式(22)より

$$R_2 = f_r^2 \frac{4\pi^2 (nI_{Gp} + (nm_p + 4m_s) \ell_p^2)}{(nm_p + 2m_u) g} + \ell_p \quad (24)$$

と表せる。一方、転がりによって吸収可能な上部プレナムブロックの水平最大変位  $x_{um}$  は、式(8)の関係より  $\theta_r = \theta_f$ 、 $\theta_i = \theta_f / R_1$  としたときの式(12)、(14)から求まる。

$$x_{um} = 2 [(r_s - r_p) \sin \theta_f + (\ell_p + r_p) \sin \theta_f / R_1] \quad (25)$$

ここで、式(25)の  $R_1$ 、 $r_p$  は、式(7)及び式(19)より

$$R_1 = r_s / R_2 \quad (26)$$

$$r_p = r_s R_2 / (r_s + R_2) \quad (27)$$

と表せる。さらに、式(24)を式(26)、(27)に用いて式(25)を整理すれば、式(25)より  $x_{um}$ 、 $f_r$  及び  $r_s$  の関係を知ることができる。従って、 $f_r$  か  $x_{um}$  のいずれかを既値とすれば、 $r_s$  と  $x_{um}$  あるいは  $f_r$  の関係を一義的に求めることができる。HTTR サポートポスト構造について、 $f_r$  を既値として 4～10 Hz まで変化させた場合の  $r_s$  と  $x_{um}$  の関係を Fig. 13 に示す。これより、 $f_r$  と  $x_{um}$  を増大させるには、 $r_s$  を増加する必要があることが分かる。なお、ここでは  $\theta_f = 13^\circ$  としている。また、 $r_p$  は式(27)より求めればよい。

サポートポスト構造の減衰比は支持質量により低下する傾向が見られた。減衰定数が一定であると仮定した場合、減衰比  $\zeta$  は等価質量  $m_e$  及び等価剛性  $k_e$  と次のような関係が成立する〔10〕。

$$\zeta \propto 1 / \sqrt{m_e k_e} \quad (28)$$

ここで、サポートポスト構造の  $m_e$  と  $k_e$  は、式(22)より

$$m_e = nI_{Gp} + (nm_p + 4m_u) \ell_p^2 \quad (29)$$

$$k_e = (nm_p + 2m_u) (R_2 - \ell_p) g \quad (30)$$

と表せる。ポスト支持質量による減衰比の変化を標準試験体の減衰比に対する割合として表示した結果を Table 2 に示す。実験値は Fig. 10 に示した平均値から、また解析値は式(28)から求めた。これより、両者は良く一致し、ポスト支持質量の増加に従って減衰比は低下することが確認できる。

## 6. 結 論

サポートポスト構造の基礎的な振動特性を調べるために、垂直二次元振動試験体を用いた強制振動試験を行った。更に、試験結果を Lagrange の式より導出した振動方程式に基づく解析結果と比較・検討し、次のような結論を得た。

- (1) サポートポスト構造の復元力特性は、転がり運動では正であるが、滑り運動では負の剛性となる倒壊型を示す。
- (2) サポートポスト構造の減衰比は、ポストの支持質量の増加により低下する傾向がある。
- (3) 滑り運動が生じたサポートポストは傾斜及び転倒し易くなる。
- (4) サポートポスト構造の共振振動数は、Lagrange の式を用いた解析結果に良く一致する。
- (5) サポートポスト構造の転がりと滑り運動から成る非線形強制振動特性は、過渡応答波形より求まる減衰比を用いた解析結果によって良く表せる。

## 謝 辞

本研究の遂行に当たり、有益な御助言と御討論を頂いた日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部 佐野川好母部長並びに同燃料安全工学部プラント安全解析室 幾島毅主任研究員、及び同動力炉開発・安全性研究管理部多目的高温ガス実験炉設計室 伊与久達夫研究員に謝意を表す。

## 参考文献

- 〔1〕 日本原子力研究所；多目的高温ガス炉研究開発の現状，（1972 - 1985）。
- 〔2〕 幾島毅，本間敏秋；垂直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，JAERI-1282（1982）。
- 〔3〕 幾島毅；SONATINA-2V 高温ガス炉垂直二次元炉心の地震解析プログラム，JAERI-1279（1981）。
- 〔4〕 二川正敏，菊地賢司，橘勝美，武藤康；VHTR サポートポスト構造の過渡応答振動試験，JAERI-M 85-172（1985）。
- 〔5〕 二川正敏，菊地賢司；炉床部構造試験体による傾斜試験，JAERI-M 85-054（1985）。
- 〔6〕 日本建築学会；建築物の耐震設計資料（1981）。
- 〔7〕 斉藤修，小林信之；振動特性に及ぼすスリープ速度の影響，幾論（C論），52-484（1986），PP. 3115-3020。
- 〔8〕 滝塚貴和；Fort St. Vrain 炉の炉心温度変動，JAERI-M 85-055（1985）。
- 〔9〕 三菱重工（株）；高温ヘリウムガス雰囲気における材料の摺動試験（Ⅲ）試験報告書，

## 6. 結 論

サポートポスト構造の基礎的な振動特性を調べるために、垂直二次元振動試験体を用いた強制振動試験を行った。更に、試験結果を Lagrange の式より導出した振動方程式に基づく解析結果と比較・検討し、次のような結論を得た。

- (1) サポートポスト構造の復元力特性は、転がり運動では正であるが、滑り運動では負の剛性となる倒壊型を示す。
- (2) サポートポスト構造の減衰比は、ポストの支持質量の増加により低下する傾向がある。
- (3) 滑り運動が生じたサポートポストは傾斜及び転倒し易くなる。
- (4) サポートポスト構造の共振振動数は、Lagrange の式を用いた解析結果に良く一致する。
- (5) サポートポスト構造の転がりと滑り運動から成る非線形強制振動特性は、過渡応答波形より求まる減衰比を用いた解析結果によって良く表せる。

## 謝 辞

本研究の遂行に当たり、有益な御助言と御討論を頂いた日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部 佐野川好母部長並びに同燃料安全工学部プラント安全解析室 幾島毅主任研究員、及び同動力炉開発・安全性研究管理部多目的高温ガス実験炉設計室 伊与久達夫研究員に謝意を表す。

## 参考文献

- 〔1〕 日本原子力研究所；多目的高温ガス炉研究開発の現状，（1972 - 1985）。
- 〔2〕 幾島毅，本間敏秋；垂直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，JAERI-1282（1982）。
- 〔3〕 幾島毅；SONATINA-2V 高温ガス炉垂直二次元炉心の地震解析プログラム，JAERI-1279（1981）。
- 〔4〕 二川正敏，菊地賢司，橘勝美，武藤康；VHTR サポートポスト構造の過渡応答振動試験，JAERI-M 85-172（1985）。
- 〔5〕 二川正敏，菊地賢司；炉床部構造試験体による傾斜試験，JAERI-M 85-054（1985）。
- 〔6〕 日本建築学会；建築物の耐震設計資料（1981）。
- 〔7〕 斉藤修，小林信之；振動特性に及ぼすスリープ速度の影響，幾論（C論），52-484（1986），PP. 3115-3020。
- 〔8〕 滝塚貴和；Fort St. Vrain 炉の炉心温度変動，JAERI-M 85-055（1985）。
- 〔9〕 三菱重工（株）；高温ヘリウムガス雰囲気における材料の摺動試験（Ⅲ）試験報告書，

原研所内資料。

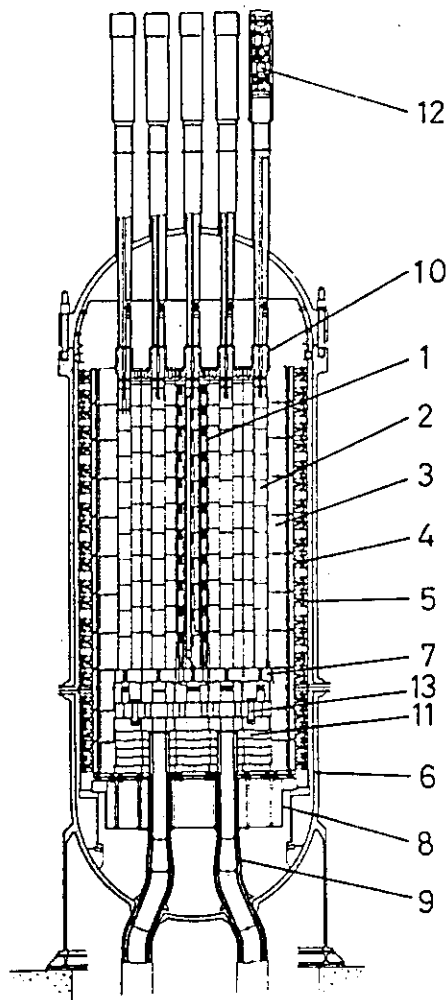
- [10] 例えば，田中基八郎，三枝省三；振動モデルとシミュレーション（1984），応用技術出版。

Table 1 Range of geometrical and mass parameters varied throughout the experiment

Parameter	Range
Length of post (mm)	120 ~ 300
Radius of post (mm)	32.0 ~ 64.0
Radius of seat (mm)	32.6 ~ 65.3
Mass of upper block (kg)	4.6 ~ 15.4

Table 2 Reduction of damping ratios  $\Delta\zeta$  by the mass supported by post  $m_u$

$m_u$ (kg)	$\Delta\zeta$	
	Experiment	Analysis
4.6	1	1
7.7	0.8	0.7
15.4	0.5	0.4



- 1 Fuel element
- 2 Replaceable reflector
- 3 Fixed reflector
- 4 Core restrainer
- 5 Core barrel
- 6 Reactor pressure vessel
- 7 Hot plenum block
- 8 Diagrid
- 9 Coolant outlet duct
- 10 Flow rate control devices
- 11 Thermal barrier block
- 12 Control rod devices
- 13 Support post

Fig.1 Core structure of HTTR

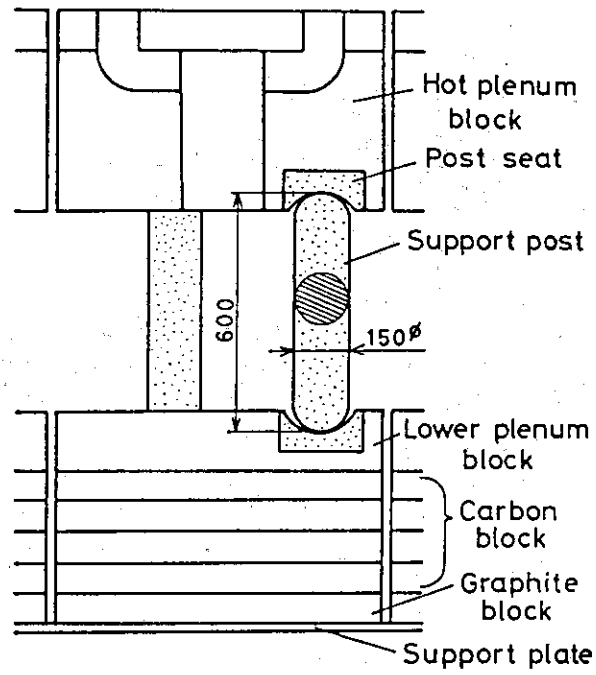


Fig.2 Support post structure in plenum region

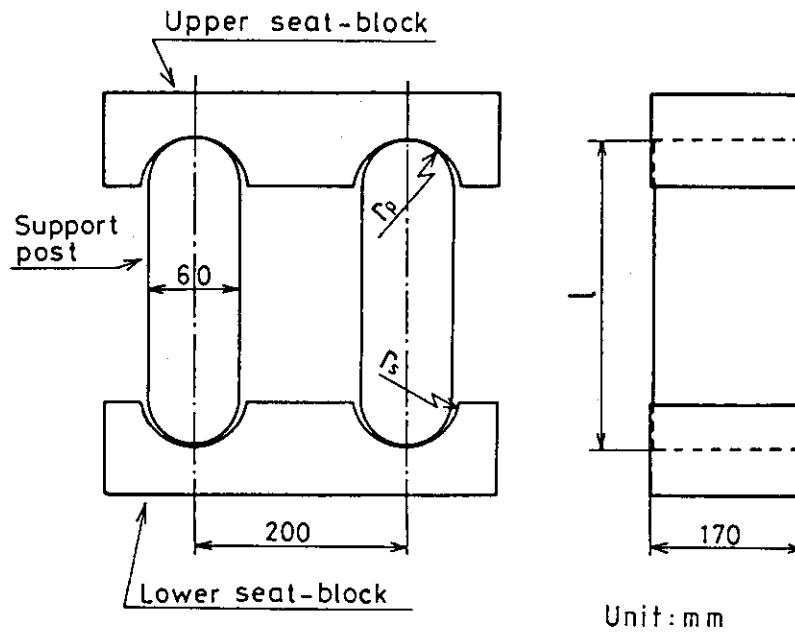


Fig.3 Two-dimentional vibration model



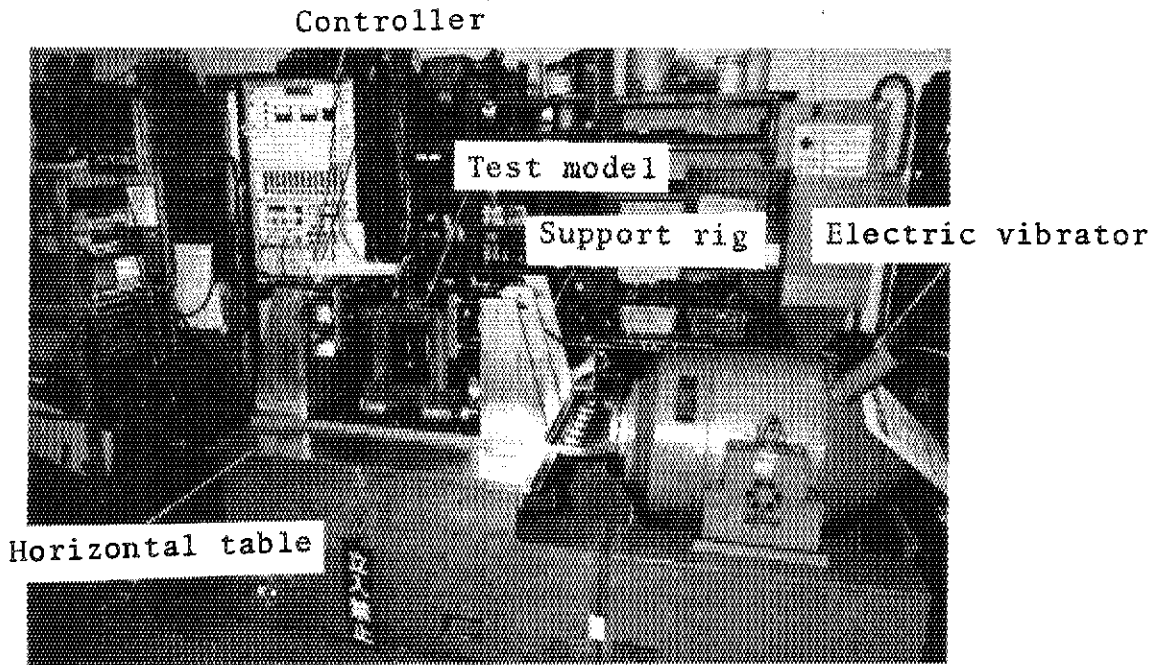


Fig.4 Vibration table

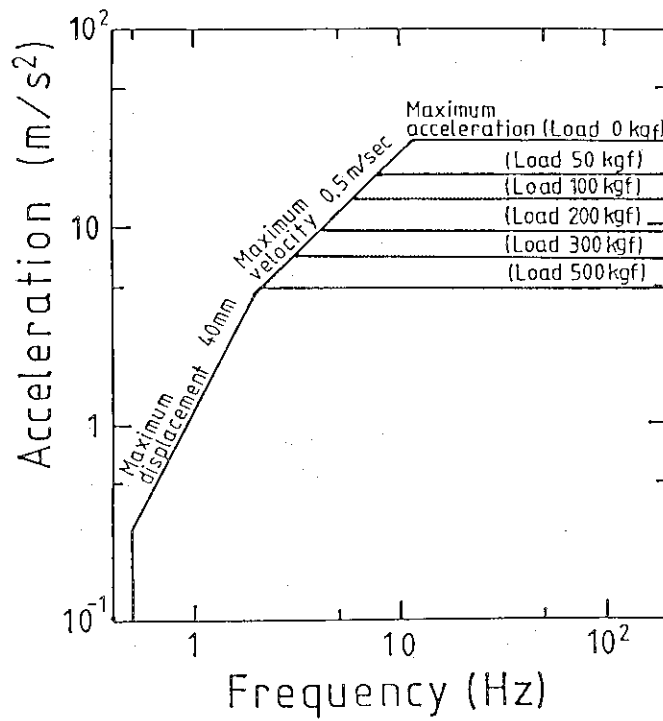


Fig.5 Chart of maximum vibrational power

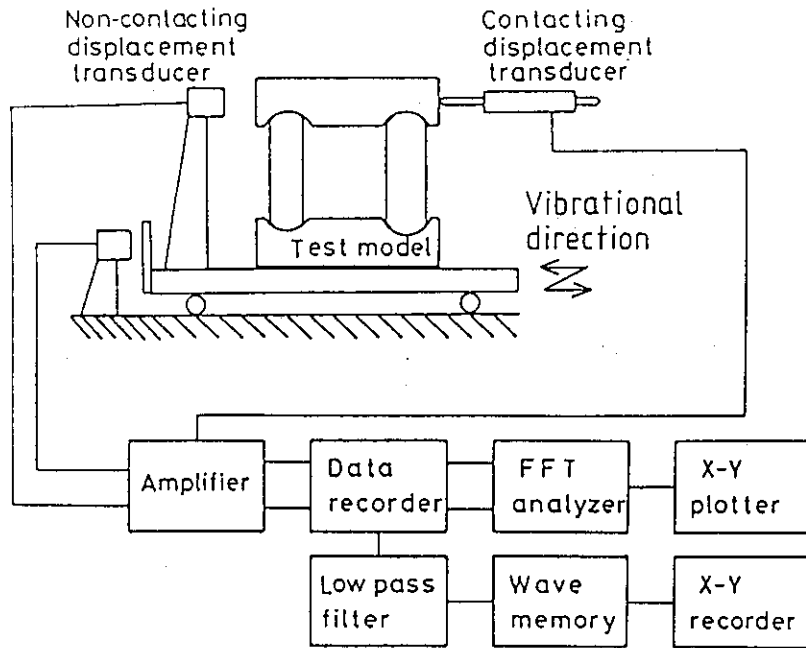


Fig.6 Block diagram of measuring system

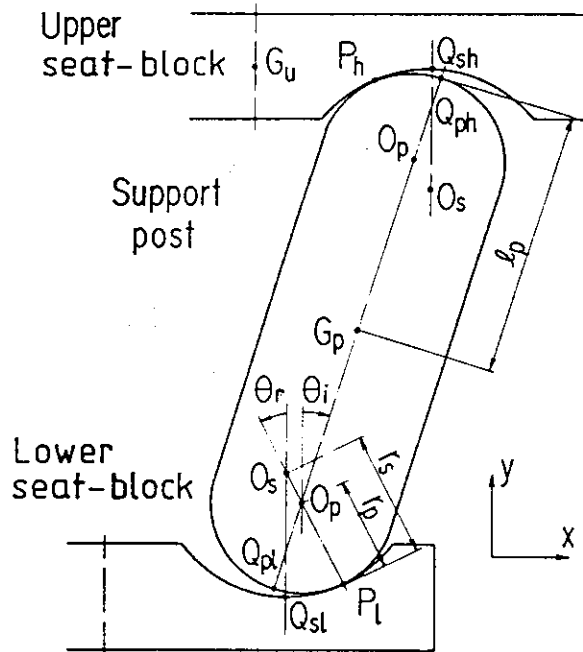


Fig.7 Analytical model of support post structure

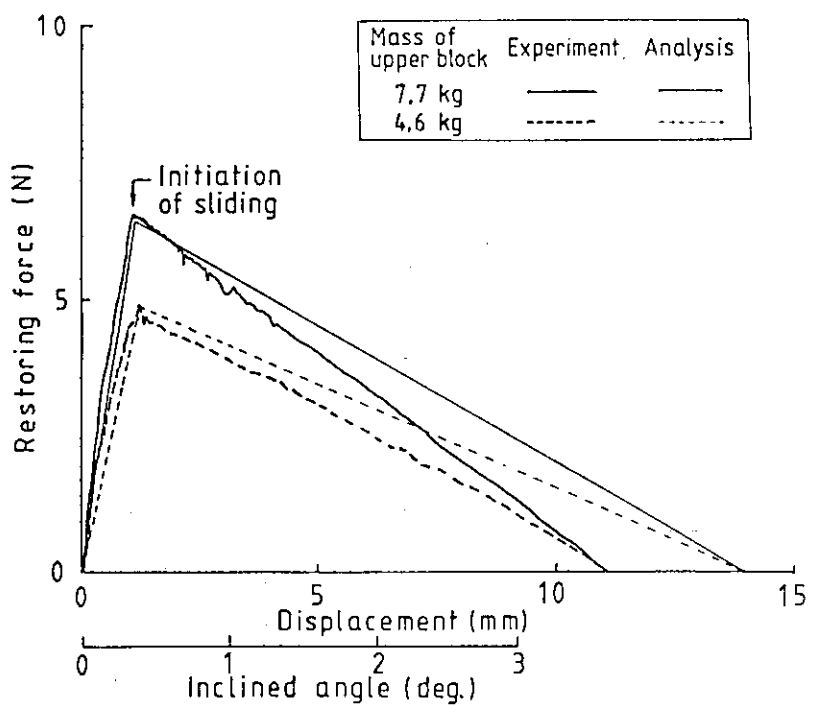


Fig.8 Restoring force of support post structure

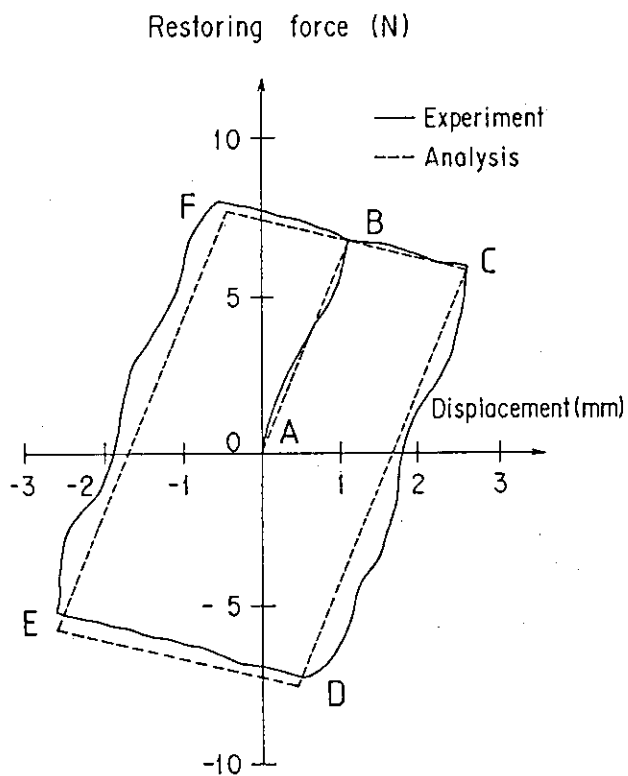


Fig.9 Hysteresis curve for restoring force

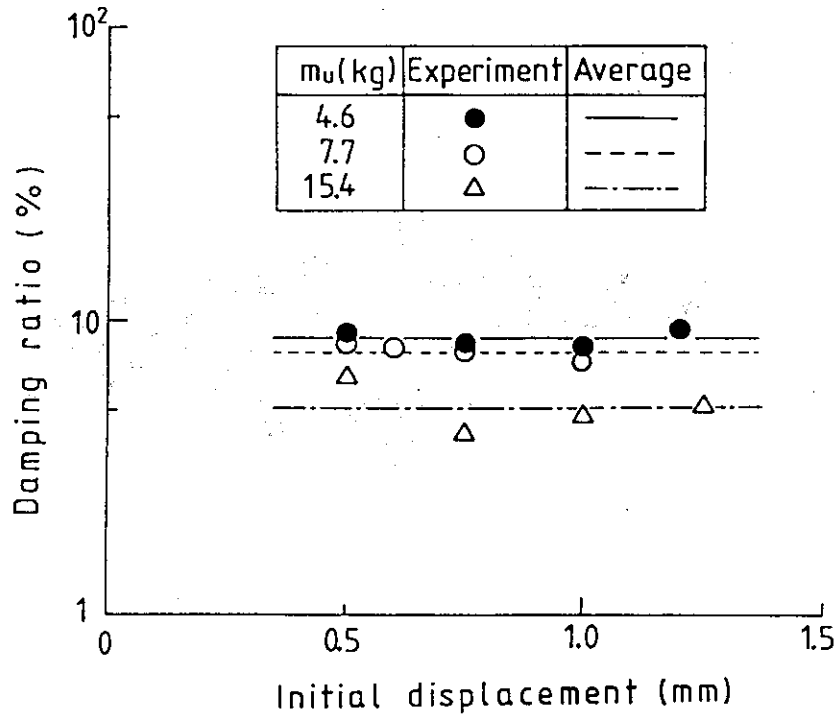


Fig.10 Relation between damping ratio and initial displacement

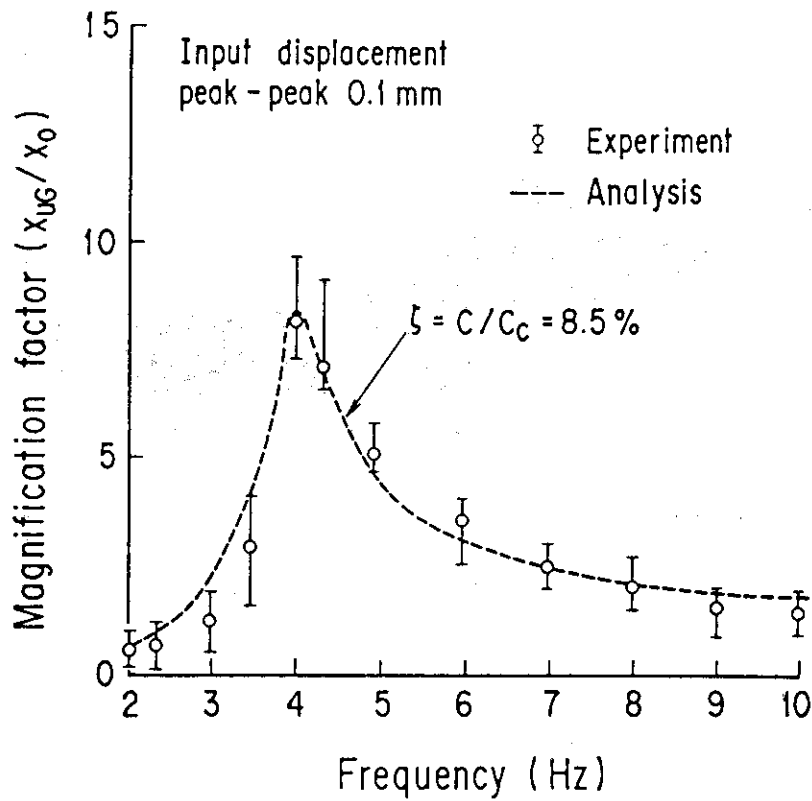
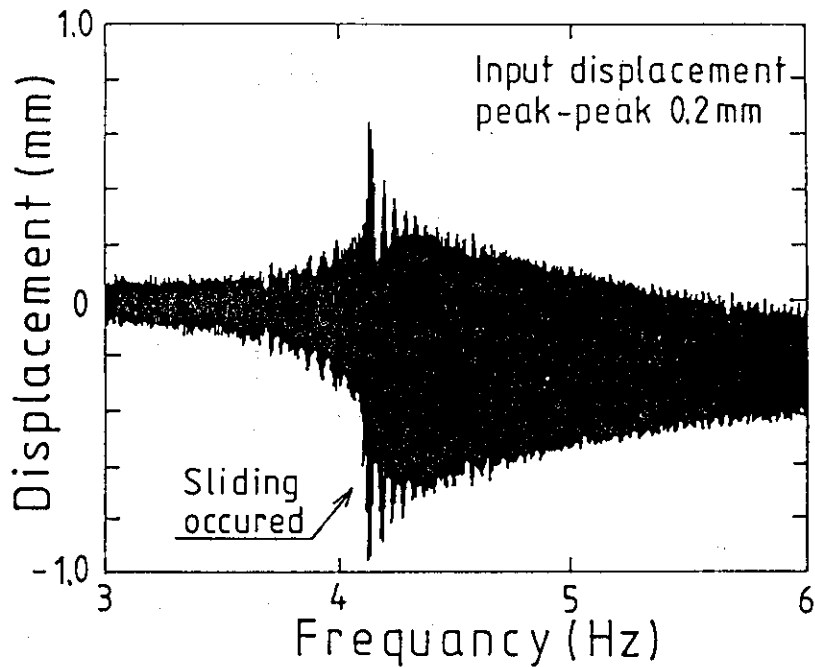
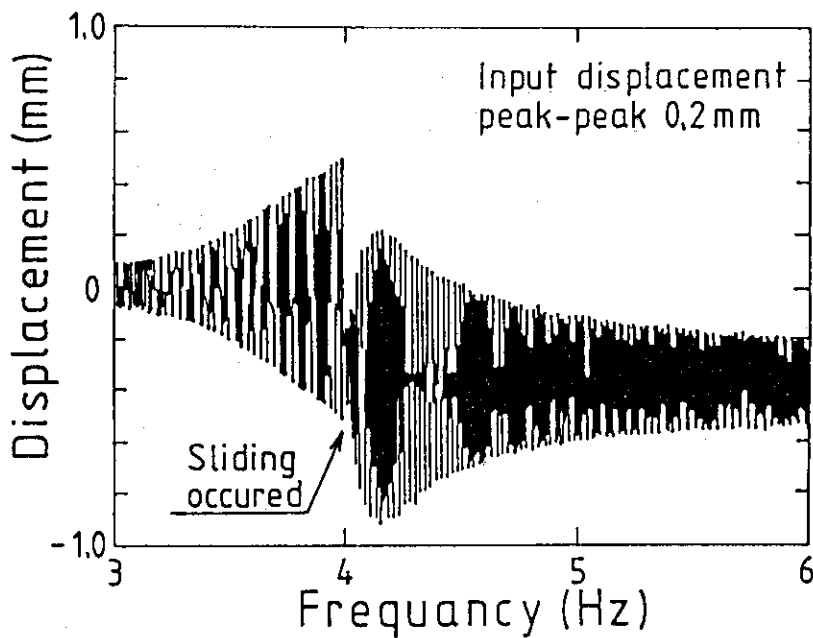


Fig.11 Amplitude-frequency response



(a) Experimental result



(b) Analytical result

Fig.12 Displacement-time response indicating both rolling and sliding motions

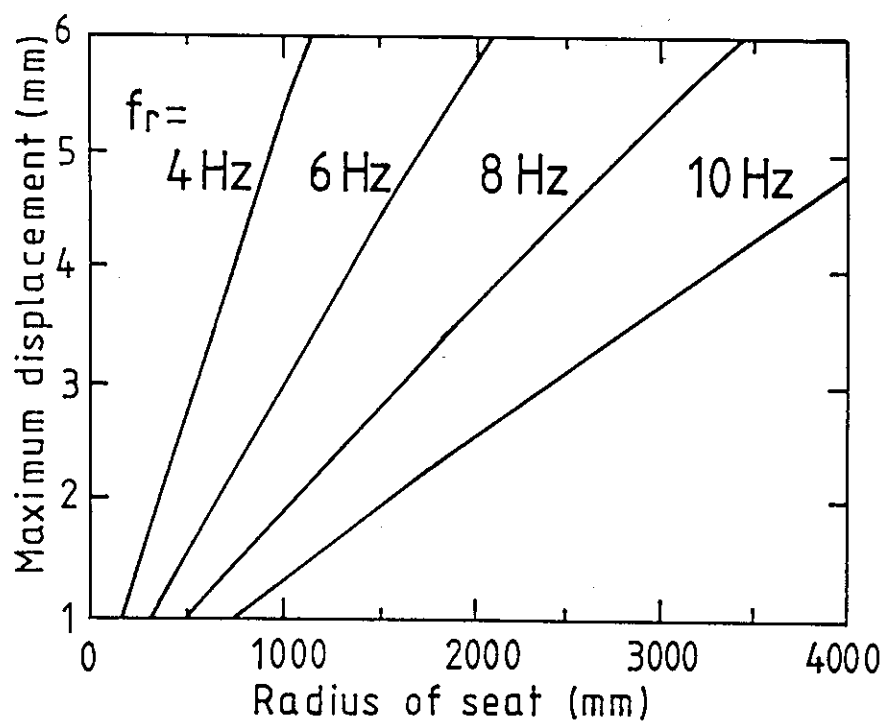


Fig.13 Relation between radius of seat and maximum horizontal displacement due to rolling motion ( $f_r$ : resonance frequency of support post structure)