JAERI-M
85-172

VHTRサポートポスト構造の過渡応答振動試験

1985年11月

二川　正敏・菊地　賢司・橘　　勝美・武藤　　康

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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, 1985
編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　いばらき印刷㈱

VHTR サポートポスト構造の過渡応答振動試験

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・橘　勝美・武藤　康

（1985年10月12日受理）

VHTR炉心を構成する燃料体・可動反射体の黒鉛ブロックは，サポートポストによって支持されている。ポストの微小な傾斜や回転によってブロック間の水平方向相対変位を吸収するために，ポストは球面座を介して炉心構成ブロックを支えている。

ポスト軸長，炉心及び高温プレナムブロックの質量，ポストとシートの曲率半径がサポートポスト構造の振動特性に及ぼす影響について調べるために，一次元振動試験体を用いた過渡応答振動試験を行った。更に，試験結果をLagrangeの方程式より求めた解析結果と比較し，次のような結論を得た。

(1)　ポストとシートの曲率半径がサポートポスト構造の振動数に与える影響は大きい。

(2)　サポートポスト構造の振動数はLagrangeの方程式より求まった近似解によって表せる。

Indicial Response Test for the Support Post Structure of VHTR

Masatoshi FUTAKAWA, Kenji KIKUCHI, Katsumi TACHIBANA
and Yasushi MUTO

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 12, 1985)

Fuel blocks and removable reflector blocks, which constitute a core of VHTR, are supported by support posts. Each support post is in contact with a hot plenum block at the top end and with a lower plenum block at the bottom end through hemispherical seats to absorb a relative displacement generated by the lateral movement of both blocks by means of small inclination or rotation of support posts.

Indicial response tests have been carried out by using a specified one-dimensional vibration model in order to estimate the effects of the support post length, the mass of hot plenum block and the hemispherical radii of both support and post seat on the vibrational characteristics in the support post structure.

Futhermore the experimental results have been compared with the analytical ones obtained from the Lagrange's equation.

The following are the conclusions derived.

(1) The hemispherical radii of support post and post seat have a large effect on the frequency of vibration in the support post structure.

(2) The frequency of vibration in the support post structure is predictable using the Lagrange's equation.

Keywords: VHTR, Support Post, Post Seat, Core Support Structure, Post Length, Hot Plenum Block, Indicial Response, Frequency of Vibration, Lagrange's Equation.

目　　次

1. 序　　論 …… 1
2. 実験装置及び方法 …… 3
3. 解析方法 …… 6
　3.1 解析モデル …… 6
　3.2 復 元 力 …… 6
　3.3 振動方程式 …… 6
4. 結　　果 …… 10
　4.1 復元力特性 …… 10
　4.2 過渡応答 …… 10
5. 考　　察 …… 16
6. 結　　論 …… 18
　参考文献 …… 18
　付　　録 …… 19

CONTENTS

1. Introduction …… 1
2. Experimental apparatus and method …… 3
3. Analytical method …… 6
　3.1 Analytical model …… 6
　3.2 Restoring force …… 6
　3.3 Vibrational equation …… 6
4. Results …… 10
　4.1 Restoring force characteristics …… 10
　4.2 Indicial response …… 10
5. Discussions …… 16
6. Conclusions …… 18
　References …… 18
　Appendix …… 19

List of Tables and Figures

Table 1 Mechanical characteristics of IG-11 graphite used in the experimental models

Table 2 Geometrical and mass parameters examined in this experiment

Fig. 1 Core structure of VHTR

Fig. 2 Plenum region

Fig. 3 One-dimensional vibration model

Fig. 4 Block diagram of measuring system

Fig. 5 Analytical model

Fig. 6 Restoring force of support post structure (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm)

Fig. 7 Displacement-time response (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, mp=4.6 kg)

Fig. 8 Frequency response (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, mp=4.6 kg)

Fig. 9 Effect of L on frequencies of support post structure (R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, mp=4.6 kg)

Fig. 10 Effect of R1 on frequencies of support post structure (L=240.0 mm, R2=65.3 mm, mp=4.6 kg)

Fig. 11 Effect of R2 on frequencies of support post structure (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, mp=4.6 kg)

Fig. 12 Effect of mp on frequencies of support post structure (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm)

Fig. 13 Effect of mp/mp^*, L/L^*, $R1/R1^*$ and $R2/R2^*$ on F/F^* (mp^*=4.6 kg, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, L=240.0 mm, F^*=4.5 Hz in experiment and 3.5 Hz in analysis)

Fig. 14 Effect of mp/mp^*, L/L^*, $R1/R1^*$ and $R2/R2^*$ on F/F^* in VHTR detailed design (II) (mp^*=830 kg, $R1^*$=88 mm, $R2^*$=91 mm, L^*=600 mm, F^*=1.86 Hz)

Fig. 15 Schema of hot plenum component used in the bottom-core structure model (L=217.0 mm, R1=36.0 mm, R2=38.0 mm, mp=30.0 kg)

Fig. A-1 Analytical results for the standard test model (*: Displacement of hot plenum block in horizontal direction)

Fig. A-2 Analytical results for the support post structure in VHTR detailed design (II) (*: Displacement of hot plenum block in horizontal direction)

記号表

F	： 振動数
F_R	： 復元力
G_P	： 高温プレナムブロックの重心
G_S	： サポートポストの重心
g	： 重力加速度
I_{SG}	： サポートポストの重心を通る軸回りの慣性モーメント
L	： サポートポストの軸長
L_1	： ポストの重心と曲率中心間距離
L_2	： ポストとシートの曲率中心間距離
M_R	： 転倒モーメント
m_P	： 高温プレナムブロックの質量
m_S	： サポートポストの質量
m_{eq}	： 等価質量
n	： サポートポストの数
O_1	： サポートポスト端部の曲率中心
O_2	： ポストシートの曲率中心
P_h	： 高温プレナムブロックとサポートポストとの接点
P_l	： 下部プレナムブロックとサポートポストとの接点
Q	： 非保存力
q	： 一般座標系
R_1	： サポートポストの曲率半径
R_2	： ポストシートの曲率半径
R_I	： $R_1/(R_2-R_1)$
T	： 全運動エネルギ
T_{Pm}	： 高温プレナムブロックの移動の運動エネルギ
T_{Sm}	： サポートポストの移動の運動エネルギ
T_{Sr}	： サポートポストの回転の運動エネルギ
t	： 時間
U	： 全位置エネルギ
U_P	： 高温プレナムブロックの位置エネルギ
U_S	： サポートポストの位置エネルギ
x_{PG}	： 高温プレナムブロック重心のｘ方向の移動距離
x_{SG}	： サポートポスト重心のｘ方向の移動距離
y_{PG}	： 高温プレナムブロック重心のｙ方向の移動距離
y_{SG}	： サポートポスト重心のｙ方向の移動距離
θ_P	： シート曲率中心回りのポストの公転角
θ_S	： サポートポストの傾斜角

1. 序　　論

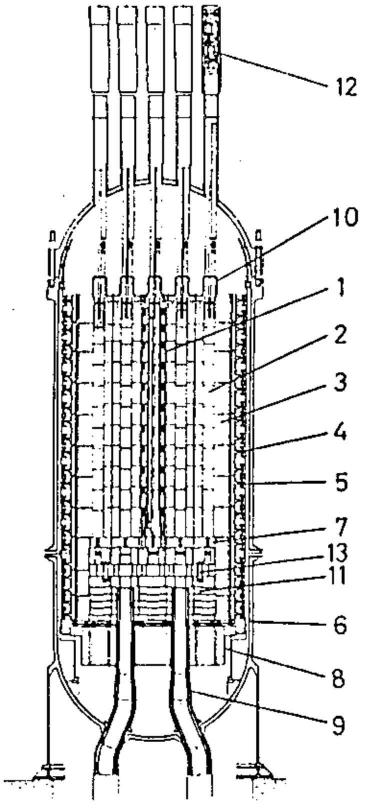
日本原子力研究所が開発を進めている多目的高温ガス実験炉（VHTR）は，Heガスを冷却材とする熱出力50MW，炉心出口ガス温度950℃の原子炉であり，Fig. 1[1]のように，その炉心を構成する燃料体，可動反射体及び高温プレナムブロックは1領域当たり3本のサポートポストにより支持されている。1領域とは，炉心上部にある流量制御装置1台で流量が制御される燃料体等の集合体を指す。炉心は全体で19領域あり，合計57本のポストが使用される。また，サポートポストにより形成される高温プレナムは，各領域より噴流となって流出してくる高温のHeガスを混合させる機能がある。

サポートポストとその両端に配置されるポストシートは，Fig. 2に示すように，球面接触構造となっている。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水平地震力による部材間の相対変位を，サポートポストの微小回転によって吸収し，ポストに曲げやせん断力が加わることを防止するためである。

サポートポスト構造は，球面接触構造による復元力や摩擦力によって特異な振動挙動を示すと予測されるため，その挙動を把握することは炉床部及び炉心の耐震設計上重要である。

幾島ら[2],[3],[4]は，地震時のVHTR 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，検討を行っている。この模型では，サポートポストを復元力や摩擦力が作用しないロールベアリングで置き換え，地震波を固定反射体を介して側方より入力させている。しかしながら，炉心の振動特性を正確に把握するには，サポートポストを介して炉心に伝ぱされる地震波の影響も考慮すべきであり，サポートポスト構造を含んだモデルについて実験，解析を行う必要がある。更に，サポートポスト自体の耐震強度も重要な課題である。

本報では，サポートポスト構造の振動特性の基礎的な知見を得るため，一次元振動試験体を用いた過渡応答振動（Indicial　response）試験結果とLagrangeの方程式を用いて求めた解析結果との比較を行い，ポストの軸長及び曲率半径，シートの曲率半径，ポストが支持するブロックの質量が振動特性に与える影響について調べた。



1 Fuel element
2 Removable 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 VHTR

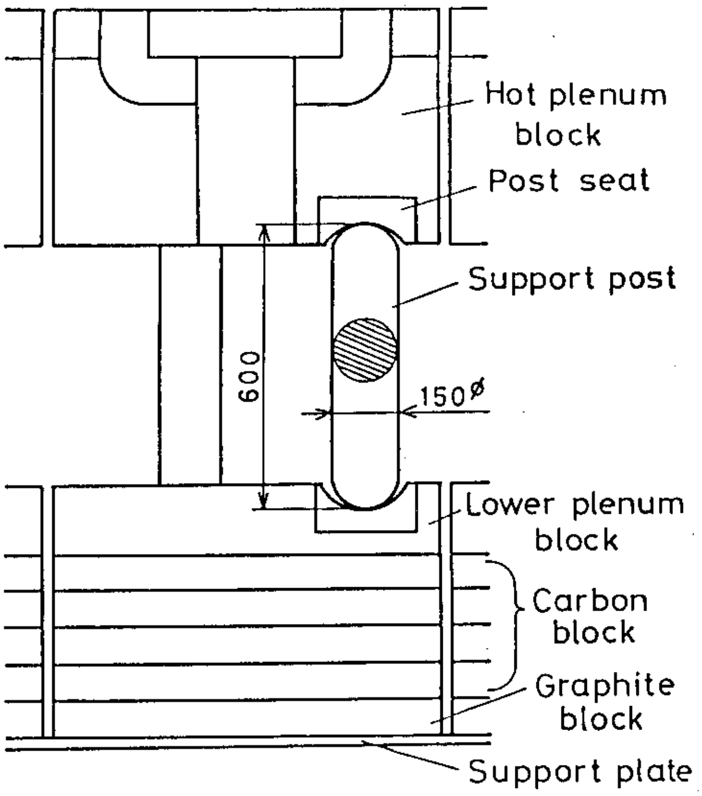


Fig. 2 Plenum region

2. 実験装置及び方法

サポートポスト構造の一次元振動試験体の形状，寸法をFig. 3に示す。本試験体は，ポストとシート間の球面接触構造によって生じるサポートポスト構造の水平一次元方向の振動特性を求めることを主眼として製作された基礎的なモデルである。試験体は2本のサポートポスト及び高温プレナムブロック，下部プレナムブロックより構成され，これらの材質は黒鉛IG－11である。なお，実機では，高温プレナム及び下部プレナムブロックにポストシートをはめ込む構造となっているが，本モデルではシートと各ブロックは一体構造となっている。試験体に用いられたIG－11の主な機械的性質をTable 1に示す。

下部プレナムブロックは水平なテーブル上に固定され，高温プレナムブロックはそのポストシート部に垂直に立てられた2本のサポートポストによって支持される。

形状は，加振試験に用いられる振動台の大きさ及び試験体の加工精度を考慮し，VHTRサポートポスト構造の1／2.5の寸法を基準（R_1＝32.0mm，R_2＝32.6mm，L＝240.0mmであり，以後これを標準試験体と呼ぶ。）として，ポスト両端の曲率半径R_1，シートの曲率半径R_2，ポストの軸長L，そして高温プレナムブロックの質量m_p（ポストの支持する質量）を変化させた（Table 2参照）。

試験は，高温プレナムブロックに水平方向の初期変位をスプリングリターン機能を持つ貫通コア型接触式変位計により設定して，その位置より急速に変位を除去してポストに過渡振動を生じさせることにより行った。なお，試験体は振動台の上に設置されているが，本試験では振動台による強制加振は行っていない。

初期変位の測定は貫通コア型接触式変位によって行い，過渡応答変位は非接触式変位計で測定した。過渡応答の振動数はFFTアナライザによる周波数分析結果から求め，応答波形は雑音成分を除去するために30Hz以下のローパスフィルタを通し，ウェイブメモリを用いてX－Yレコーダに記録した（Fig. 4参照）。

また，サポートポスト構造の水平方向変位に対する静剛性を調べるために，復元力試験を行った。静剛性は，ポスト傾斜時の高温プレナムブロックの反力すなわち復元力とポストの傾斜角を計測して求めた。反力は負荷治具先端に取り付けた小型ロードセルによって，傾斜角はダイヤルベベルプロトラクターによって測定した。

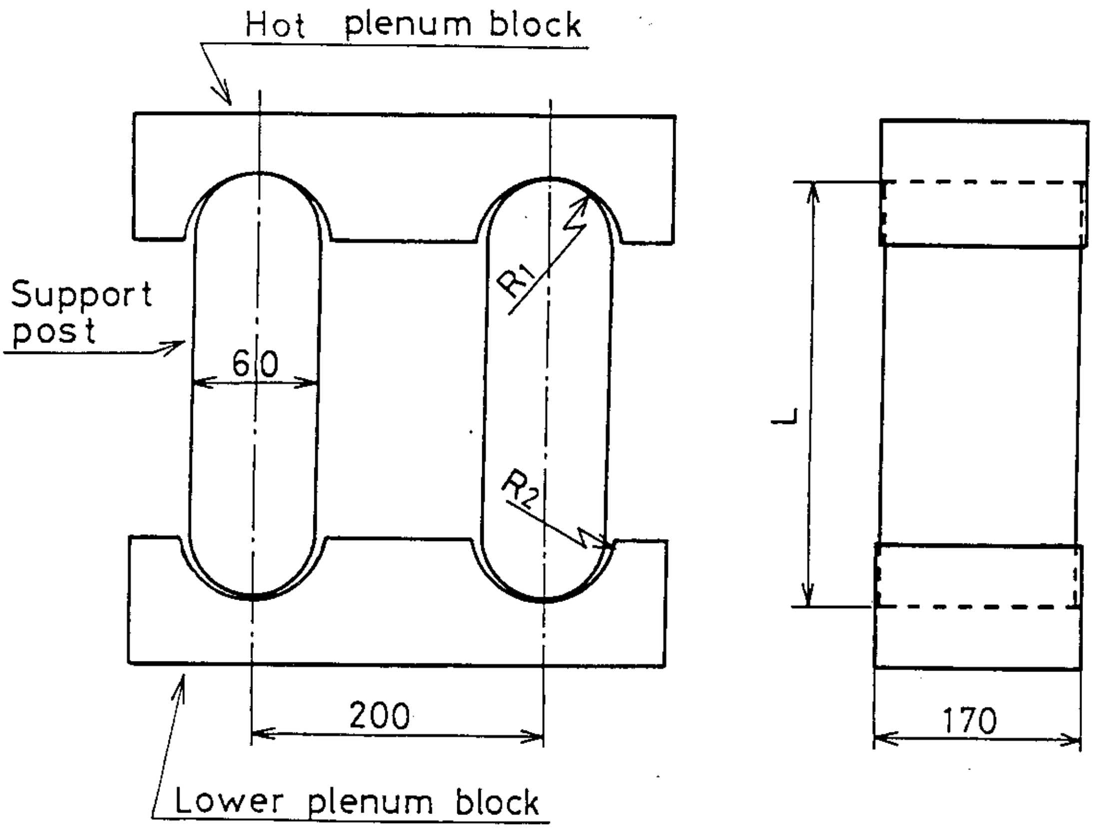


Fig. 3 One-dimensional vibration model

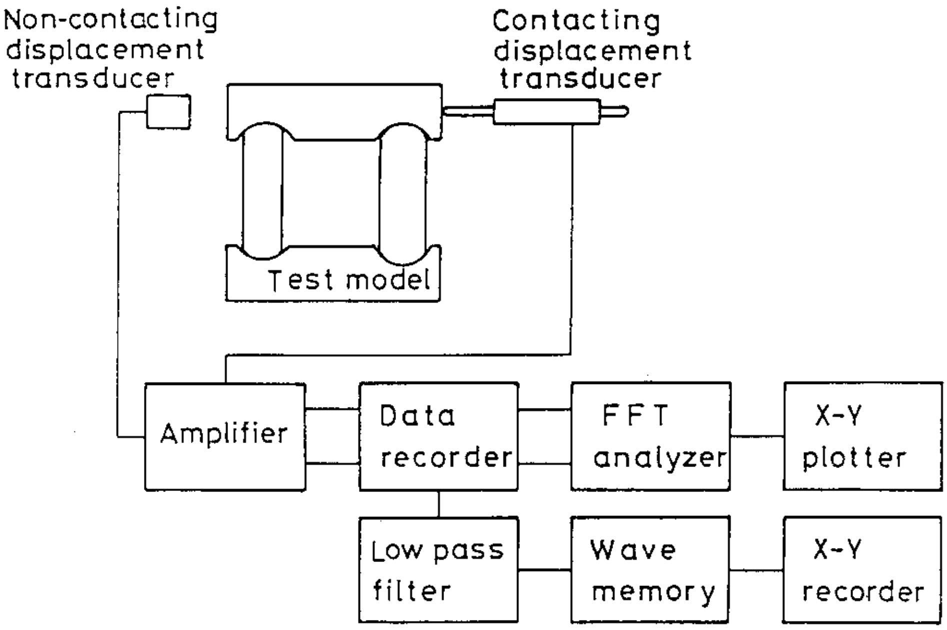


Fig. 4 Block diagram of measuring system

Table 1 Mechanical characteristics of IG-11 graphite used in the experimental models

Items	Value
Apparent density	1.78
Shore hardness	54
Bending strength (N/m^2)	3.89×10^7
Compressive strength (N/m^2)	7.50×10^7
Tensile strength (N/m^2)	2.29×10^7
Young's modulus (N/m^2)	9.90×10^9
Ash (%)	0.04
Poisson's ratio	0.14

Table 2 Geometrical and mass parameters examined in this experiment

L (mm)	R1 (mm)	R2 (mm)	Mp (kg)
120.0	32.0	32.6	4.6
180.0	32.0	32.6	4.6
300.0	32.0	32.6	4.6
240.0	32.0	32.6	4.6
240.0	32.0	32.6	7.7
240.0	32.0	32.6	15.4
240.0	32.0	36.7	4.6
240.0	36.0	36.7	4.6
240.0	36.0	49.0	4.6
240.0	48.0	49.0	4.6
240.0	64.0	65.3	4.6
240.0	48.0	65.3	4.6
240.0	36.0	65.3	4.6
240.0	30.0	32.6	4.6

3. 解 析 方 法

3.1 解析モデル

Fig.5 に解析モデルを示す。本モデルは次の仮定に従うものとする。

(1) サポートポスト及びプレナムブロックは剛体であり，ポストとシート間の接触面の局部変形は考慮しない。

(2) 運動は，二次元平面内を考慮して，水平，垂直方向変位及び回転の三自由度系とする。

(3) サポートポストは，ポストシート上で滑らずに転がる。

3.2 復 元 力

高温プレナムブロックに水平方向（x方向）に作用する復元力 $F_R(\theta_S)$ と下部プレナムブロックとポストの接点 P_1 回りの転倒モーメント $M_R(\theta_S)$ との均り合いを考える。$M_R(\theta_S)$ はポストと高温プレナムブロックの重力ポテンシャルによって生じるから，反時計回りを正とすれば，ポストとシートの接触面での転がり距離が等しいことから得られる

$$\theta_P = \frac{R_1}{R_2 - R_1} \cdot \theta_S = R_1 \cdot \theta_S \tag{1}$$

の関係より，

$$M_R(\theta_S) = -(L_1 \sin\theta_S - R_1 \sin(R_1 \cdot \theta_S))\, n \cdot m_S \cdot g \\ -2(L_1 \sin\theta_S - R_1 \sin(R_1 \cdot \theta_S)) \cdot m_P \cdot g \tag{2}$$

従って，

$$F_R(\theta_S) = \frac{M_R(\theta_S)}{2 \cdot (R_1 \cos(R_1 \theta_S) + L_1 \cos\theta_S)} \tag{3}$$

となる。

3.3 振動方程式

振動方程式は Lagrange の方程式(6),(7),(付録1)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right)-\frac{\partial T}{\partial q}+\frac{\partial U}{\partial q}=Q \tag{4}$$

によって導出した。下部プレナムブロックは固定され，高温プレナムブロックは回転運動をしないから，考慮すべき運動エネルギTは，サポートポストの回転と移動の運動エネルギT_{Sr}，T_{Sm}及び高温プレナムブロックの移動の運動エネルギT_{Pm}である。また，位置エネルギUは，サポートポストと高温プレナムブロックの重力ポテンシャルU_S，U_Pである。一般座標系qをサポートポストの傾斜角θ_Sで表すと，式(1)の関係より，

$$x_{SG}=L_2\cdot\sin(R_1\cdot\theta_S)+L_1\cdot\sin(\theta_S) \tag{5}$$

$$y_{SG}=L_2(1-\cos(R_1\cdot\theta_S))-L_1(1-\cos\theta_S) \tag{6}$$

$$\dot{x}_{SG}=L_2\cdot R_1\cdot\dot{\theta}_S\cdot\cos(R_1\cdot\theta_S)+L_1\cdot\dot{\theta}_S\cdot\cos(\theta_S) \tag{7}$$

$$\dot{y}_{SG}=L_2\cdot R_1\cdot\dot{\theta}_S\cdot\sin(R_1\cdot\theta_S)-L_1\cdot\dot{\theta}_S\cdot\sin\theta_S \tag{8}$$

$$x_{PG}=2\cdot x_{SG} \tag{9}$$

$$y_{PG}=2\cdot y_{SG} \tag{10}$$

$$\dot{x}_{PG}=2\cdot\dot{x}_{SG} \tag{11}$$

$$\dot{y}_{PG}=2\cdot\dot{y}_{SG} \tag{12}$$

となり，運動エネルギTは，

$$\begin{aligned}T&=T_{Sr}+T_{Sm}+T_{Pm}\\&=n\cdot\frac{I_{SG}}{2}\cdot\dot{\theta}_S{}^2+n\cdot\frac{M_S}{2}(\dot{x}_{SG}{}^2+\dot{y}_{SG}{}^2)+\frac{M_P}{2}(\dot{x}_{PG}{}^2+\dot{y}_{PG}{}^2)\\&=n\cdot\frac{I_{SG}}{2}\cdot\dot{\theta}_S{}^2+(n\cdot\frac{M_S}{2}\cdot\dot{\theta}_S{}^2+2\cdot M_P\cdot\dot{\theta}_S{}^2)\\&\qquad\times(L_2{}^2R_1{}^2+L_1{}^2+2L_1L_2R_1\cos(R_1\theta_S+\theta_S))\end{aligned} \tag{13}$$

また，位置エネルギUは，

$$\begin{aligned}U&=nM_S\cdot g\cdot y_{SG}+M_P\cdot g\cdot y_{PG}\\&=(nM_S+2M_P)\,g\,(L_2(1-\cos(R_1\cdot\theta_S))-L_1(1-\cos\theta_S))\end{aligned} \tag{14}$$

そこで，式(4)の左辺の第１項及び２項を式(13)を用いて，第３項を式(14)によって求めると，

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_S}\right)=\ddot{\theta}_S\left[n\cdot I_{SG}+(nM_S+4M_P)\times(L_2^2R_1^2+L_1^2+2L_1L_2R_1\cos(R_1\theta_S+\theta_S))\right]+\dot{\theta}_S^2\left[(n\cdot M_S+4M_P)(-2L_1L_2R_1(R_1+1)\sin(R_1\theta_S+\theta_S))\right] \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta_S}=\dot{\theta}_S^2\left[(n\frac{M_S}{2}+2M_P)(-2L_1L_2R_1(R_1+1)\sin(R_1\theta_S+\theta_S))\right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_S}=(nM_S+2M_P)\,g\,(L_2R_1\sin(R_1\theta_S)-L_1\sin\theta_S) \quad (17)$$

従って，外力や減衰力などの非保存力が作用しない場合（Q＝０），振動方程式は

$$\ddot{\theta}_S\left[nI_{SG}+(nM_S+4M_P)\cdot A(\theta_S)\right]+\dot{\theta}_S^2\left[(M_S+4M_P)\cdot B(\theta_S)\right]+(nM_S+2M_P)\cdot g\cdot C(\theta_S)=0 \quad (18)$$

ここで，

$$\begin{cases} A(\theta_S)=L_2^2R_1^2+L_1^2+2L_1L_2R_1\cos(R_1\theta_S+\theta_S) \\ B(\theta_S)=-L_1L_2R_1(R_1+1)\sin(R_1\theta_S+\theta_S) \\ C(\theta_S)=L_2R_1\sin(R_1\theta_S)-L_1\sin\theta_S \end{cases}$$

となる。

更に，θ_S及び$\dot{\theta}_S$がいずれも小さい微小振動と考えて，それらに関する２次以上の微小量を無視すれば，$\sin\theta\cong\theta$，$\cos\theta\cong 1$より，

$$\begin{cases} A(\theta_S)=(L_2R_1+L_1)^2 \\ C(\theta_S)=(L_2R_1^2-L_1)\theta_S \end{cases}$$

を得て，式(18)は近似的に

$$\ddot{\theta}_S\,[nI_{SG}+(nM_S+4M_P)(L_2R_1+L_1)^2]$$

$$+\theta_S\,[(nM_S+2M_P)(L_2R_1{}^2-L_1)\cdot g]=0 \tag{19}$$

となり，振動の周期τ及び振動数 f は，

$$\tau=2\pi\sqrt{\frac{nI_{SG}+(nM_S+4M_P)(L_2R_1+L_1)^2}{g\cdot(nM_S+2M_P)(L_2R_1{}^2-L_1)}} \tag{20}$$

$$f=\frac{1}{\tau} \tag{21}$$

として求められる。

なお，式(18)に Lunge－Kutta 法[8]を適用して求まる振動の周期は，本試験条件内では式(20)による近似解とほぼ一致した（付録２参照）。

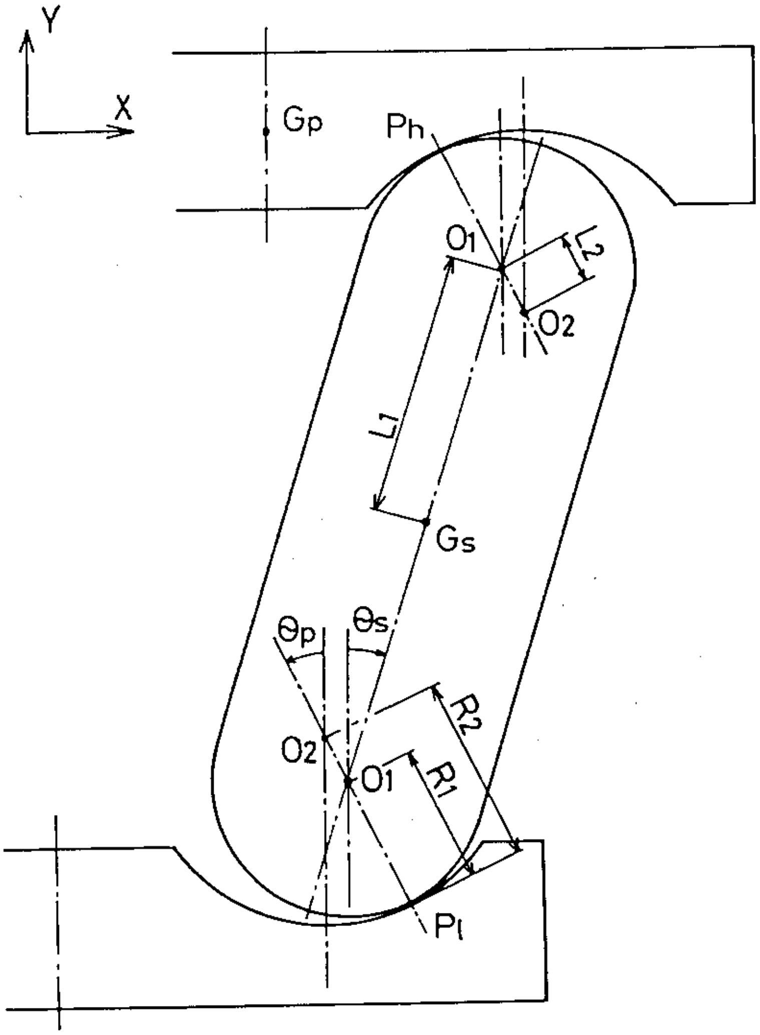


Fig. 5　　Analytical model

4. 結　　　果

4.1 復元力特性

標準試験体によるサポートポストの復元力特性試験結果を式(3)による解析結果と共にFig.6に示す。高温プレナムブロックの質量を7.7と15.4kgに変化させた。15.4kgの場合，図中O－A間では復元力はポストの傾斜角と共に増加し，転がり運動のみを考慮した解析値にほぼ一致しているが，A－B間では傾斜角の増加に従って減少し，解析値に一致していない。これより，ポストとシート間の相対運動にO－A間では転がりが，A－B間では滑りがそれぞれ支配的になっていると推測される。また，Bまで傾斜させた後で復元力が零になるまで戻した（B－C間）が，傾斜角は零にならなかった。その後，再び傾斜角を増加した場合，復元力は傾斜角減少時とほぼ同じ軌跡を描いてBまで戻り，以後B－D間ではA－B間と同じ傾きで傾斜角の増加に従って減少した。更に，C－B間の静剛性（傾斜角に対する復元力の増分）はO－A間にほぼ一致していることがわかる。

7.7kgの場合は，15.7kgと比べと静剛性が低下したが，復元力の特性は同様な傾向を示している。

4.2 過渡応答

初期変位を－0.5～－1.20mmに変化させて加振した標準試験体の過渡応答変位波形の測定例をFig.7に示す。初期変位による周期の著しい変化は見られない。初期変位－0.75と－1.20mmの結果を比較すると，両者の振幅はほぼ同じであるが，－1.20mmの変位は減衰後0mmに戻っていない。これは，1.20mmの初期変位を与えた時点で，すでにサポートポストとシート間に滑りが生じていたためであると考えられる。

標準試験体を初期変位－0.5mmで加振した場合の過渡応答波形をFFTアナライザによって周波数分析した結果をFig.8に示す。過渡応答変位波形の卓越振動数は約4.5Hzであることが分かる。

以下に，振動数の実験値を式(21)より求めた解析値と比較する。

Fig.9は，サポートポストの軸長Lによる振動数の変化について示している。本試験の初期変位内では，初期変位による振動数の変化は見られず，軸長の増加に従って振動数は減少する。解析値は実験値に比べて最大15%低下しているが，定性的には実験値を良く表している。

Fig.10は，サポートポストの曲率半径R_1による振動数の変化について示している。初期変位の変化にかかわらず，ポストの曲率半径の小さい方が振動数は低下している。解析値は実験値より幾分低めであるが，ポストの曲率半径による振動数の変化を良く表している。

Fig.11は，ポストシートの曲率半径R_2による振動数の変化を示している。曲率半径36.7mmの初期変位0.5mmの場合を除き，初期変位の変化にかかわらず振動数はほぼ一定であり，シート

の曲率半径の増加によって低下している。解析値は実験値より低下しているが，定性的には実験値を良く表している。

Fig.12は，高温プレナムブロックの質量m_Pによる振動数の変化を示している。解析値は実験値に比べて幾分低下したが，両者とも質量による振動数の変化はほとんど見られない。

以上より，サポートポストの軸長L，高温プレナムブロックの質量m_Pそしてポスト及びシートの曲率半径R_1，R_2によるサポートポスト構造の振動数の変化は，式(21)より求まる解析値によって表せることが分かった。更に，これらのパラメータの振動数に与える影響を明確にするために，$L=240.0$ mm，$m_P=4.7$ kg，$R_1=32.0$ mm，$R_2=32.6$ mmの標準試験体の値を基準として，各パラメータと振動数の変化率について図示した。Fig.13に示すように，解析値は実験値にほぼ一致しており，振動数は高温プレナムブロックの質量変化の影響をほとんど受けず，ポストの曲率半径が増加し，ポストの軸長及びシートの曲率半径が減少するに従って増加することが確認できる。また，ポストとシートの曲率半径の振動数に対する影響感度が非常に高いことが分かる。

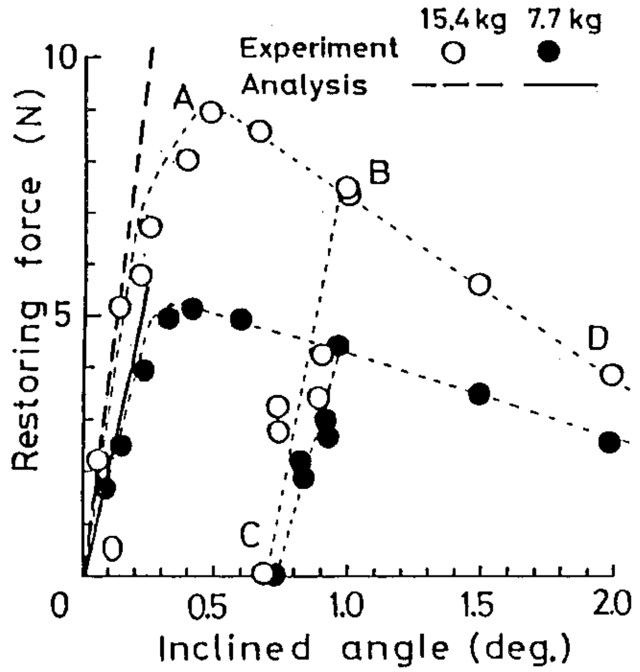


Fig. 6 Restoring force of support post structure
(L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm)

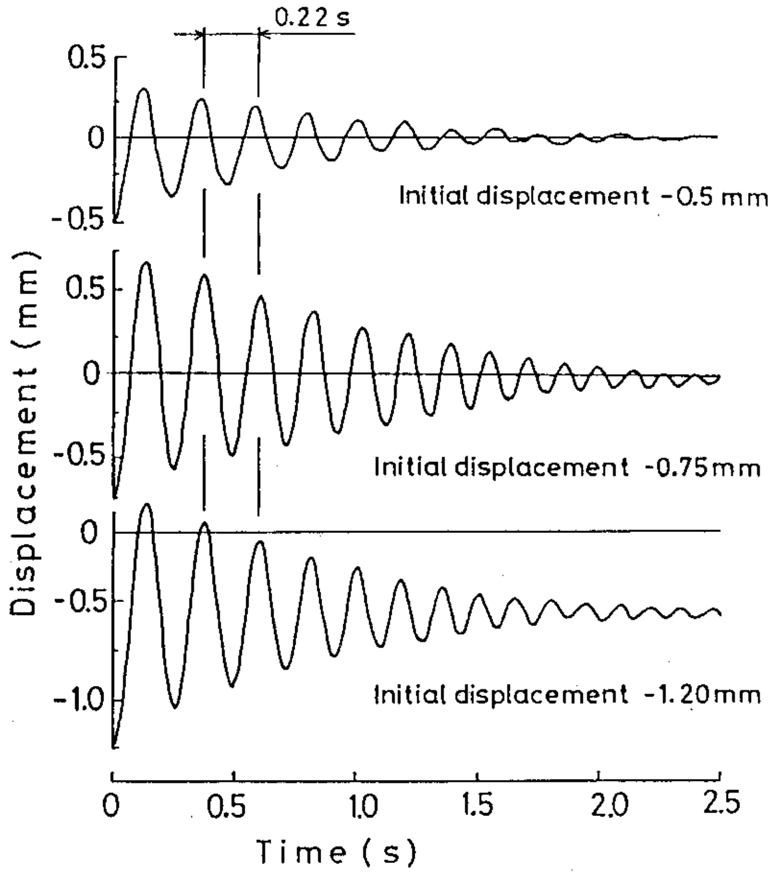


Fig. 7 Displacement-time response
(L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, mp=4.6 kg)

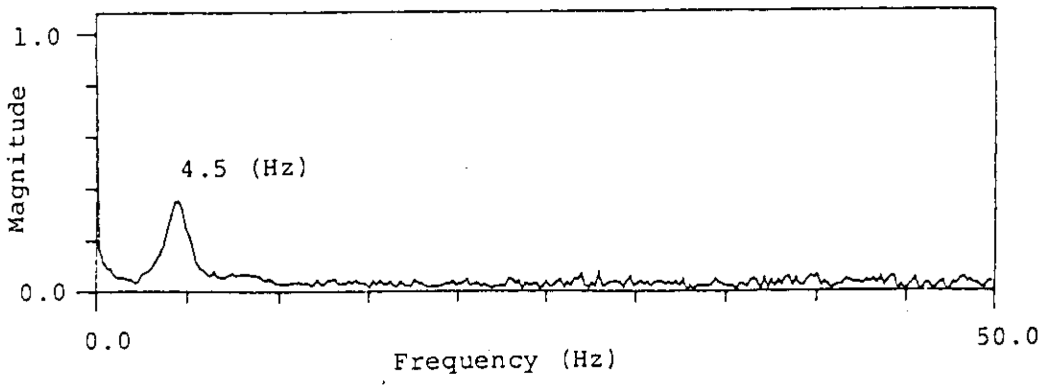


Fig. 8　Frequency response
(L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, mp=4.6 kg)

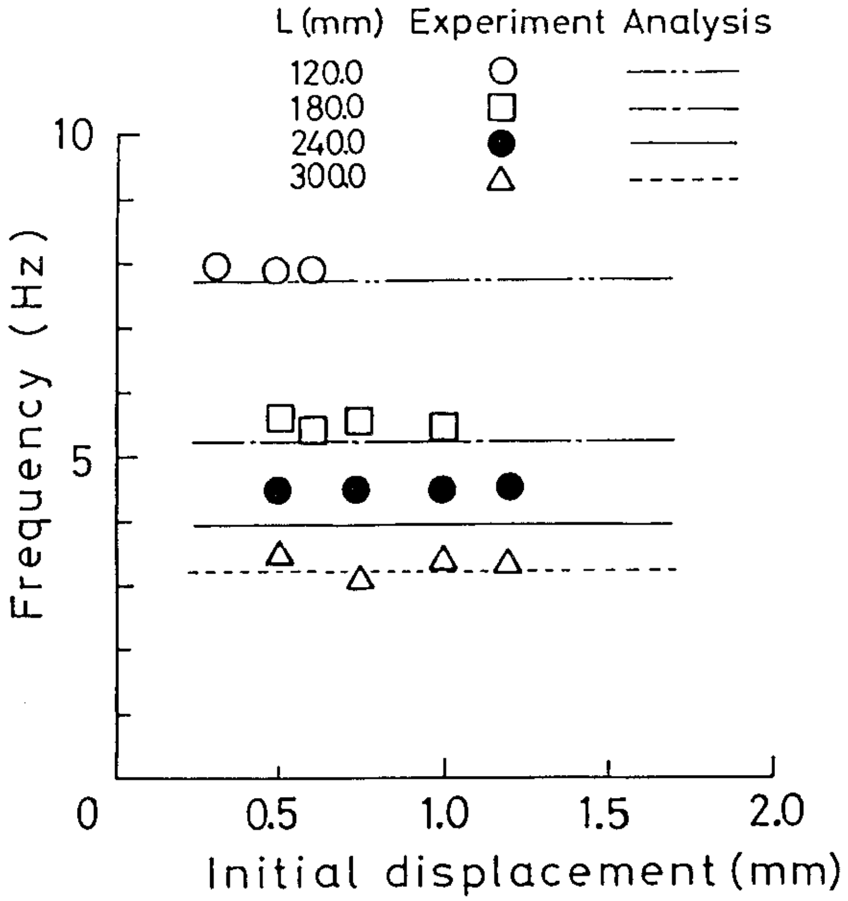


Fig. 9　Effect of L on frequencies of support post structure
(R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, mp=4.6 kg)

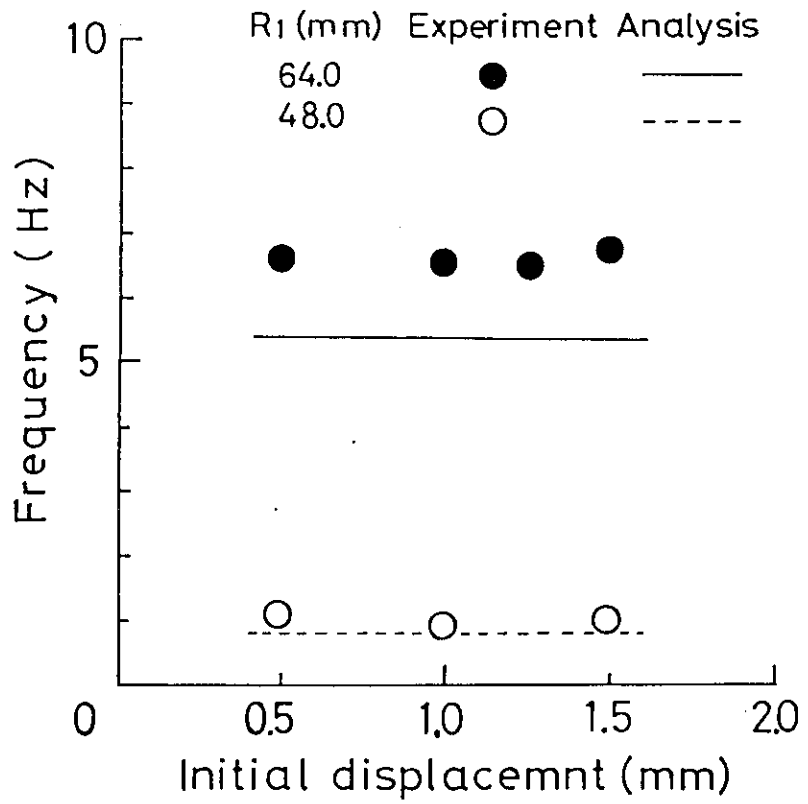


Fig. 10　Effect of R1 on frequencies of support post structure (L=240.0 mm, R2=65.3 mm, mp=4.6 kg)

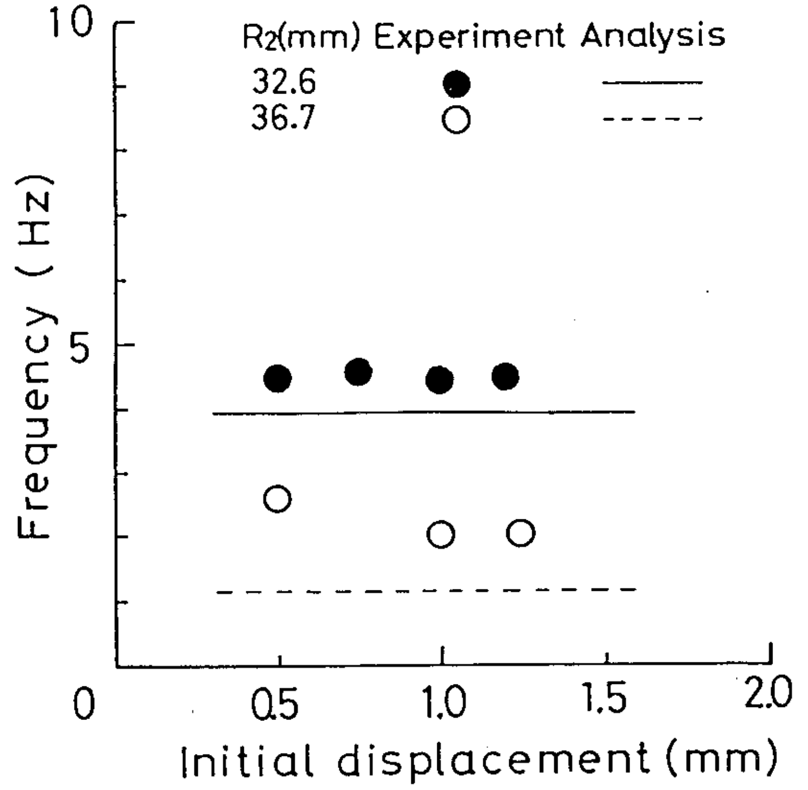


Fig. 11　Effect of R2 on frequencies of support post structure (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, mp=4.6 kg)

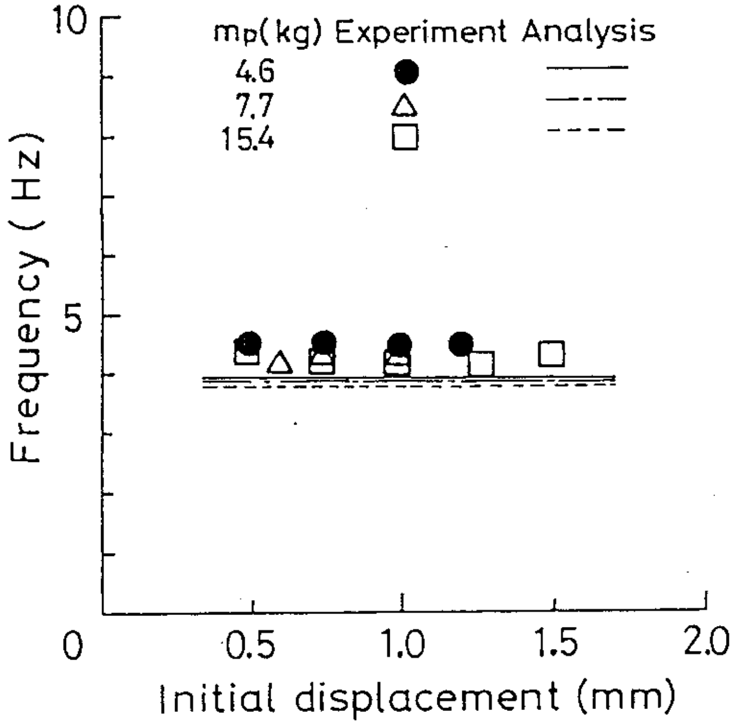


Fig. 12 Effect of mp on frequencies of support post structure (L=240.0 mm, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm)

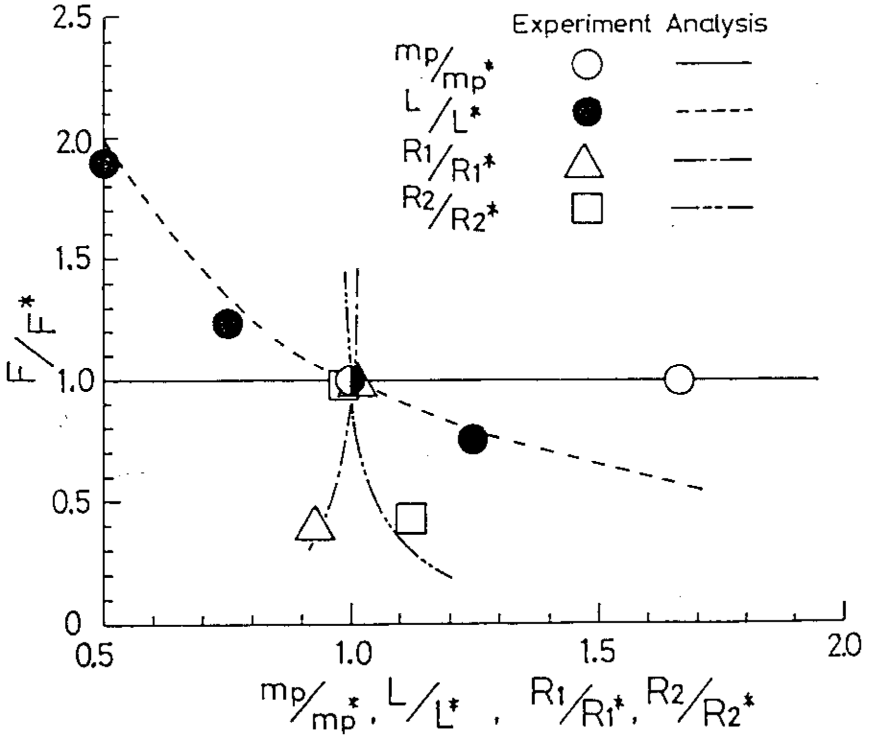


Fig. 13 Effect of mp/mp^*, L/L^*, $R1/R1^*$ and $R2/R2^*$ on F/F^* (mp^*=4.6 kg, R1=32.0 mm, R2=32.6 mm, L=240.0 mm, F^*=4.5 Hz in experiment and 3.5 Hz in analysis)

5. 考　　　察

VHTR詳細設計Ⅱ[5]のサポートポスト構造について，各パラメータと振動数の変化率との関係を式(21)によって解析した。Fig.14に示すように，各パラメータと振動数の関係は標準試験体の結果とほぼ同様な傾向を示し，振動数は高温プレナムブロックの質量変化（ポストの支持荷重の変化）の影響をほとんど受けないが，ポストとシートの曲率半径によって大きく変化することが分かる。なお，振動数が1.86Hzであったことを考慮すると，サポートポスト構造によって構成されるVHTR炉床部が地震動の卓越振動数（例えば，Ec－centro地震波[9]では，1～5Hzのスペクトル成分が高い）と共振する可能性がある。

更に，VHTRのように1体の高温プレナムブロックが3本のポストによって支持される場合でも，サポートポスト構造の一次元水平振動挙動を表すために本解析モデルが有効であることを炉床部構造試験体[10]に用いられた高温，下部プレナムブロック及びサポートポストによって確かめた。炉床部構造試験体はVHTR炉床部の1/2.75縮小モデルであり，用いた試験体の略図をFig.15に示す。水平面内の回転振動が発生しないように，初期変位の向きが高温プレナムブロックの重心を通るようにした。また，3本のポストの配列を考慮して加振方向を変化させた（Fig.15参照）。初期変位は1～5mmと変化させたが，加振方向にかかわらず，振動数は約2.7Hzでほぼ一定であった。解析値は2.45Hzであり，実験値にほぼ一致したことから，本解析モデルの有効性が確認できた。

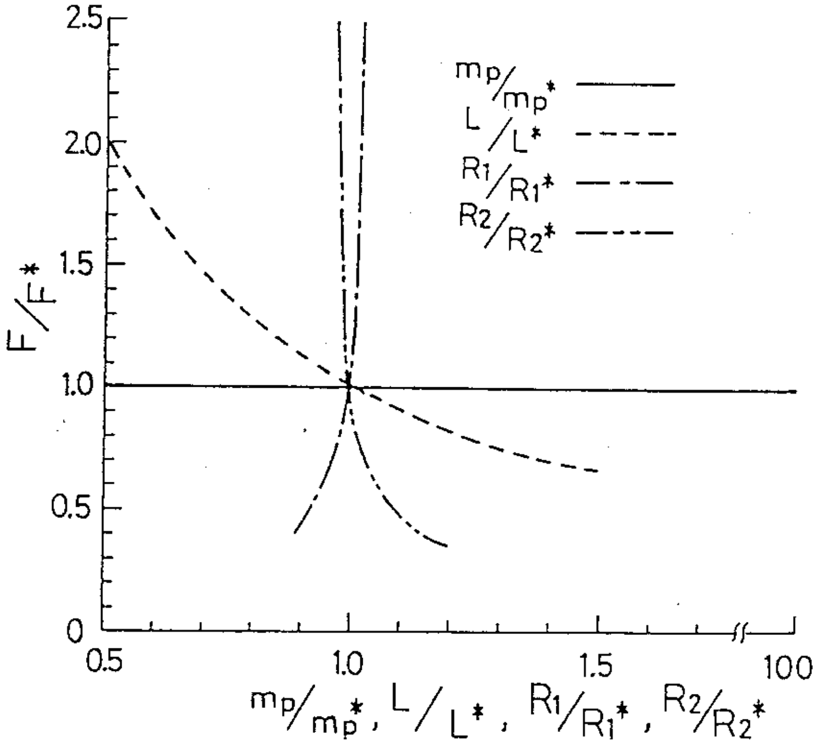


Fig. 14 Effect of mp/mp*, L/L*, R1/R1* and R2/R2* on F/F* in VHTR detailed design (II)
(mp^*=830 kg, $R1^*$=88 mm, $R2^*$=91 mm, L^*=600 mm, F^*=1.86 Hz)

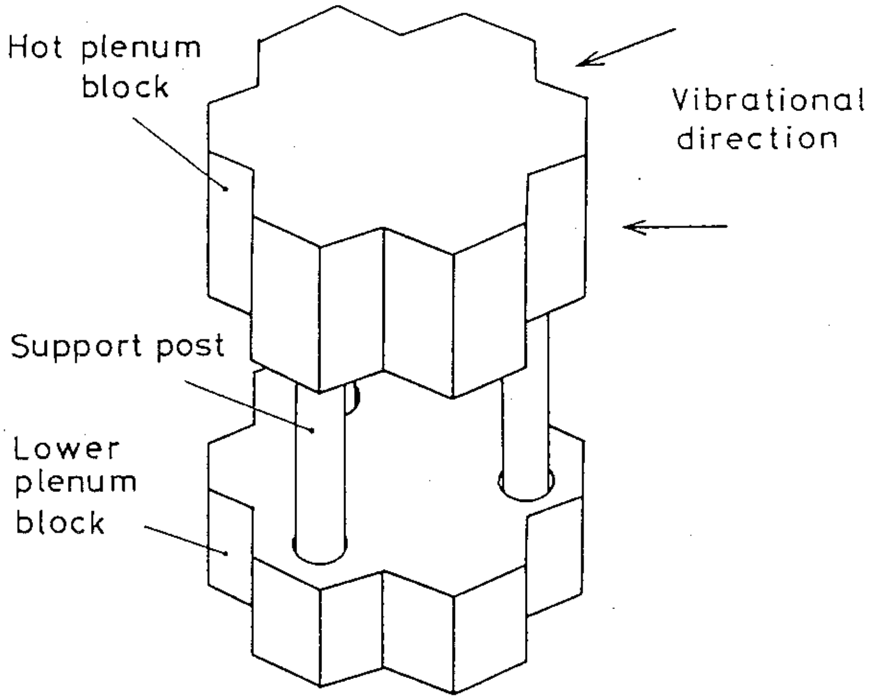


Fig. 15 Schema of hot plenum component used in the bottom-core structure model
(L=217.0 mm, R1=36.0 mm, R2=38.0 mm, mp=30.0 kg)

6. 結　　　論

サポートポスト構造の振動特性の基礎的な知見を得るために，一次元振動試験体を用いた過渡応答振動試験を行い，Lagrange の方程式より求まる解析結果と比較，検討した。その結果，次のような結論を得た。

(1) サポートポスト構造の静剛性は，高温プレナムブロックの質量（ポストの支持荷重）と共に増加する。

(2) サポートポスト構造の過渡応答の振動数は，初期変位の変化にかかわらずほぼ一定であった。

(3) 本試験範囲内では，高温プレナムブロックの質量（ポストの支持荷重）は，サポートポスト構造の振動数にほとんど影響しない。

(4) ポストの軸長が増加するに従って，振動数は低下する。

(5) ポストとシートの曲率半径の振動数に及ぼす影響は大きく，ポストの曲率半径の増加及びシートの曲率半径の減少に従って振動数は急激に増加する。

(6) Lagrange の方程式より求まった振動数は実験値にほぼ一致し，(3)，(4)，(5)の傾向を良く表した。

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”，(1984).

(2) 幾島，ほか2名，機論，47－415，C (昭56)，292.

(3) 幾島，機論，48－426，C (昭57)，229.

(4) T. Ikushima et al., Nucl. Eng. Des., 71 (1982)，195.

(5) 日本原子力研究所，“多目的高温ガス実験炉詳細設計(II)”，(1984).

(6) 例えば，加川幸雄，“振動・音響工学／基礎と応用”，(1981)，培風館.

(7) 例えば，亘理厚，“機械振動”，(1966)，丸善株式会社.

(8) 戸川隼人，“有限要素法による振動解析”，(1978)，サンエンス社.

(9) 白木，藤田，“機械工業における振動問題”，機械の研究，Vol. 30，No. 10 (1978).

(10) 菊地，二川，その他，日本原子力学会誌，26－11，(1984)，977.

6. 結　　論

サポートポスト構造の振動特性の基礎的な知見を得るために，一次元振動試験体を用いた過渡応答振動試験を行い，Lagrange の方程式より求まる解析結果と比較，検討した。その結果，次のような結論を得た。

(1) サポートポスト構造の静剛性は，高温プレナムブロックの質量（ポストの支持荷重）と共に増加する。

(2) サポートポスト構造の過渡応答の振動数は，初期変位の変化にかかわらずほぼ一定であった。

(3) 本試験範囲内では，高温プレナムブロックの質量（ポストの支持荷重）は，サポートポスト構造の振動数にほとんど影響しない。

(4) ポストの軸長が増加するに従って，振動数は低下する。

(5) ポストとシートの曲率半径の振動数に及ぼす影響は大きく，ポストの曲率半径の増加及びシートの曲率半径の減少に従って振動数は急激に増加する。

(6) Lagrange の方程式より求まった振動数は実験値にほぼ一致し，(3)，(4)，(5)の傾向を良く表した。

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”，(1984).

(2) 幾島，ほか2名，機論，47－415，C(昭56)，292.

(3) 幾島，機論，48－426，C(昭57)，229.

(4) T. Ikushima et al., Nucl. Eng. Des., 71 (1982), 195.

(5) 日本原子力研究所，“多目的高温ガス実験炉詳細設計(II)”，(1984).

(6) 例えば，加川幸雄，“振動・音響工学／基礎と応用”，(1981)，培風館.

(7) 例えば，亘理厚，“機械振動”，(1966)，丸善株式会社.

(8) 戸川隼人，“有限要素法による振動解析”，(1978)，サンエンス社.

(9) 白木，藤田，“機械工業における振動問題”，機械の研究，Vol. 30，No. 10 (1978).

(10) 菊地，二川，その他，日本原子力学会誌，26－11，(1984)，977.

付　録　1

○ Hamilton の原理と Lagrange の方程式

次式で示される1自由度の質量－ばね系の力の釣り合い式を考える。

$$m\ddot{x} + kx = f(t) \tag{A.1}$$

仮想仕事方程式は，任意の仮想変位 δx に対して

$$(m\ddot{x} + kx - f(t))\,\delta x = 0 \tag{A.2}$$

式（A.2）は任意の時刻 t で成立するから，ある時刻 t_1 から t_2 までの式（A.2）の積分値についても，同じ議論が成立すると考えられる。すなわち，

$$\int_{t_1}^{t_2} (m\ddot{x} + kx - f(t))\,\delta x = 0 \tag{A.3}$$

ここで，x の値は $t = t_1$，$t = t_2$ で規定されるので，これは一つの固定境界条件となるから，

$$\delta x(t_1) = \delta x(t_2) = 0$$

となり，式（A.3）の $m\ddot{x}$ の積分は，

$$\begin{aligned}\int_{t_1}^{t_2} m\ddot{x}\,\delta x\,dt &= m\dot{x}\,\delta x\,\Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} m\dot{x}\,\delta\dot{x}\,dt \\ &= 0 - \delta\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2}m\dot{x}^2\,dt \\ &= -\delta\int_{t_1}^{t_2} T\,dt \end{aligned} \tag{A.4}$$

ここで，T は運動エネルギである。

kx の積分は，

$$\int_{t_1}^{t_2} kx\,\delta x\,dt = \delta\int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2}kx^2\,dt$$

$$= \delta \int_{t_1}^{t_2} V\ dt \tag{A.5}$$

ここで，Vはひずみエネルギである。
f(t)の積分は，

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)\ \delta x\ dt = \delta \int_{t_1}^{t_2} W\ dt \tag{A.6}$$

ここで，Wは外部仕事である。
従って，式（A.3）は，

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (-T+V-W)\ dt = 0 \tag{A.7}$$

式（A.7）にLagrange関数

$$L = V - T \tag{A.8}$$

を導入すると

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (L-W)\ dt = 0 \tag{A.9}$$

式（A.9）をHamiltonの原理という。次にHamiltonの原理よりLagrangeの方程式を導出する。Lは（x，$\dot{x}$，t）の関数であるから，

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta L\ dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial x}\delta x\ dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\delta \dot{x}\ dt \tag{A.10}$$

式（A.10）の右辺第2項は，部分積分を用いると，

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\delta \dot{x}\ dt = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\delta x \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right)\delta x\ dt$$

$$= 0 - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right)\delta x\ dt \tag{A.11}$$

また,

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta W\,dt = \int_{t_1}^{t_2} f(t)\,\delta x\,dt \tag{A.12}$$

従って, 式 (A.11), (A.12) より式 (A.9) は

$$\begin{aligned}\delta \int_{t_1}^{t_2} (L-W)\,dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial x}\,\delta x\,dt - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right)\delta x\,dt - \int_{t_1}^{t_2} f(t)\,\delta x\,dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2}\left[\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - f(t)\right]\delta x\,dt = 0\end{aligned} \tag{A.13}$$

式 (A.13) が任意の δx で成立するためには,

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} + f(t) = 0 \tag{A.14}$$

が成り立たなければならない。これを Lagrange の方程式と言う。

付 録 2

式(18)に Lunge－Kutta 法[8]を適用して求まる θ_S の振動数と, 式(21)を用いた近似解とを比較した例を Fig.A.1 と A.2 に示す。

Fig. A－1 は標準試験体について解析した結果である。ポストの傾斜角 10^{-2} rad 以下では, 式(18)と(21)の結果に差異は見られず, 傾斜角と高温プレナムブロックの水平方向変位との関係はほぼ線形である（傾斜角 10^{-2} rad は, 2.4 mm の変位に相当する）。

Fig. A－2 は, VHTR 詳細設計Ⅱ[5]のサポートポスト構造について解析した結果である。傾斜角 2×10^{-2} rad（変位11.9 mm）以上では, 式(18)と(20)の結果はほぼ一致し, 傾斜角と変位との関係はほぼ線形となっている。

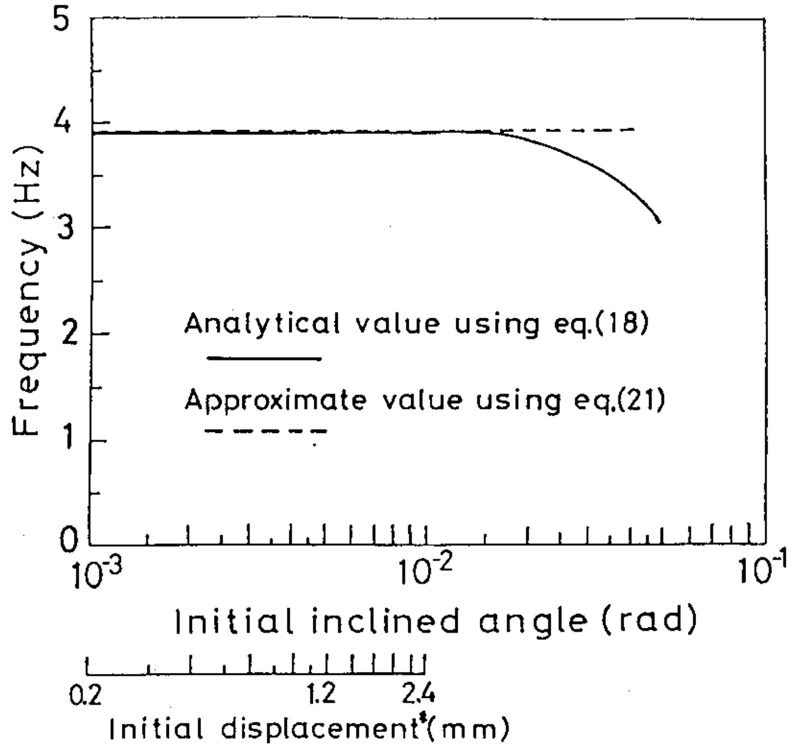


Fig. A-1 Analytical results for the standard test model
(*: Displacement of hot plenum block in horizontal direction)

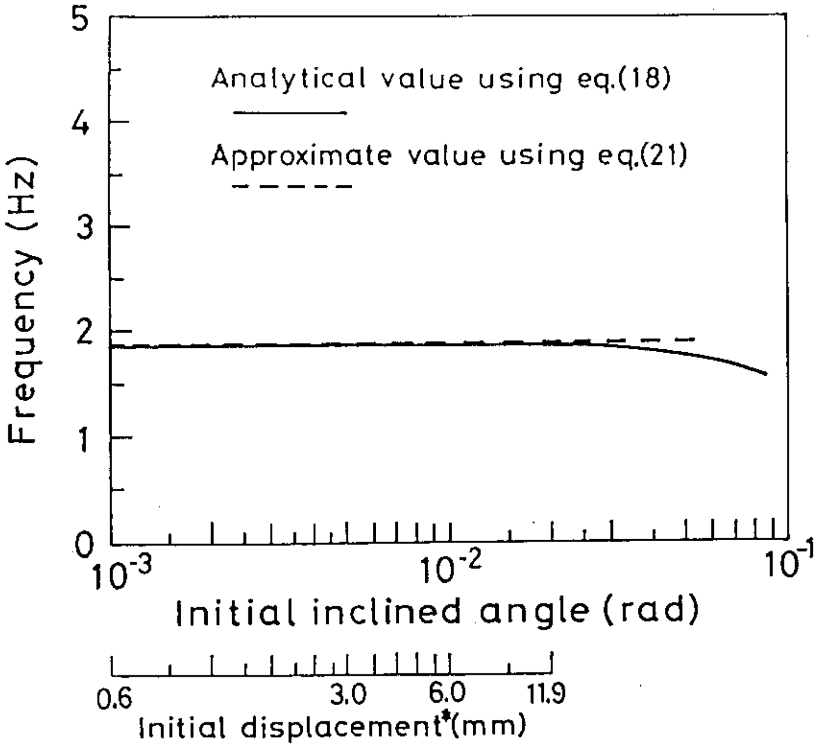


Fig. A-2 Analytical results for the support post structure in VHTR detailed design (II)
(*: Displacement of hot plenum block in horizontal direction)