摩擦振り子型免震装置群の地震時挙動に関する研究*

(第3報, 3層鉄骨フレームモデルを用いた振動実験の応答解析)

岡村 茂樹^{*1}, 藤田 聡^{*2}, 荒水 照夫^{*3}
池永 雅良^{*3}, 早川 邦夫^{*4}, 舟木 秀尊^{*4}

Study on Motion Analysis of Friction Pendulum Isolation Systems during Earthquake

(3rd Report, Analysis on a 3-Storey Steel Frame Model Supported by 4 Friction Pendulum Bearings)

Shigeki OKAMURA^{*5}, Satoshi FUJITA, Teruo ARAMIZU,
Masayoshi IKENAGA, Kunio HAYAKAWA and Hidetaka FUNAKI

^{*5} Graduate School of Tokyo Denki University,
2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan

Most of non-rubber type isolation systems apply frictional force. One of the famous non-rubber type isolation systems is Friction Pendulum Bearing (: FPB) system. The superstructure supported lot of FPB systems may have produced the rotational motion from the dispersion of the frictional force. In this study, dynamic motion of the isolated structure model with 4 of Friction Pendulum Bearing systems are investigated, especially in in-plane mode, considering a variance of friction coefficient of one system, a distribution of the mass of superstructures. We carried out the shake table test using 3-storey steel-frame model. In this paper, the superstructure is considered in two models: the 4 material point frame model and the rigid body model. The experimental result of the shake table test using 3-storey steel-frame model was compared with the response analysis of those models.

Key Words: Earthquake Isolation System, Torsional Vibration, Friction Pendulum Bearing (FPB)

1. はじめに

多くの非積層ゴム系免震装置の中には, 滑りによる摩擦力をエネルギー吸収に利用しているものも多く, 摩擦力や滑りに関して様々な問題が指摘されてきた. そこで, 本研究では球面滑り支承 Friction Pendulum Bearing⁽¹⁾ (以下 FPB とする) を対象とし, 面内回転運動が生じると考えられる条件下における免震装置の地震時挙動を明確にする事を目的としている.

第1報では, 4つの免震装置で剛体スラブを支持した場合における免震装置の地震時挙動, 及び, 免震性能への影響を検討した⁽²⁾. その結果を元に, 第2報では, 4つの免震装置(免震装置群)で支持された3層からなる鉄骨フレームモデルを用いた振動実験を行ない, 回転運動と免震性能の検討した⁽³⁾.

本報では, 前報で報告した鉄骨フレームモデル(図1)を用いた振動実験の応答解析の結果を報告する. なお, 本解析では, 上部構造物を剛体スラブからなる4質点フレームモデル(図2(a))による解析と, 上部構造物を完全な剛体と仮定した, 剛体モデルによる解析(図2(b))を行なった.

2. 解析条件

先の実験では, 通常の状態に加え, 回転運動を生

* 原稿受付 2001年11月14日.

^{*1} 正員, 東京電機大学大学院(〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2).

^{*2} 正員, 東京電機大学工学部.

^{*3} 正員, オイレス工業(株)(〒326-0327 足利市羽刈町1000).

^{*4} (株)奥村組(〒300-2612 つくば市大字大砂387).

E-mail: 00gdm01@cckedpo.cck.dendai.ac.jp

じさせるために, 上部構造物の重心に偏りを持たせた場合と, 免震装置の摩擦係数にばらつきを持たせた場合の3通りの条件について実験を行なった.

等荷重 (Normal condition)

各装置に等しい鉛直荷重をかけ, 通常の状態の装置を使用した.

偏過重 (Unbalanced load condition)

上部構造物の重心に偏りを持たせ, 1つの装置に大きな鉛直荷重を加えた.

偏摩擦 (Unbalanced friction coefficient condition)

各装置の鉛直荷重は等しいが, ある一つの装置を高摩擦係数のものとした(未コーティングの装置を使用した).

fig. 1 Frame model

The frame slab model The rigid body model
fig. 2 analytical model

3. 解析

3.1 モデルの座標系 ここで、考えられるモデルの自由度は、各スラブ層で水平2自由度、ねじれ1自由度の計3自由度である。よって、フレームモデルでは、12自由度、剛体モデルでは3自由度になる。

図3に示すような、 S 層目（基礎部は b 層目）の柱 P_{si} （装置 I_i ）を取り付けたスラブ座標を考える。スラブの図心を原点とするスラブに固定された座標系 $O-XY$ において、装置 I_i の座標 (X_i, Y_i) 、柱 P_{si} の座標 (X_{si}, Y_{si}) とすると、重心 G から装置（柱）までの距離 l_{si} が X 軸となす角 α_{si} は次式のように表される。

$$l_{si} = \sqrt{(X_{si} - X_{SG})^2 + (Y_{si} - Y_{SG})^2} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\alpha_{si} = \cos^{-1} \left(\frac{X_{si} - X_{SG}}{l_{si}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{Y_{si} - Y_{SG}}{l_{si}} \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$(0 < \alpha_i < 2\pi)$

S 層目での重心の X, Y 方向変位を x_s, y_s とし、重心回りの回転角を θ_s とすると、 S 層目での装置 I_i （柱 P_{si} ）での X, Y 方向変位 u_{si}, v_{si} は次のように表される。

$$u_{si} = x_s + l_{si} \left\{ \cos(\theta_s + \alpha_{si}) - \cos \alpha_{si} \right\} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$v_{si} = y_s + l_{si} \left\{ \sin(\theta_s + \alpha_{si}) - \sin \alpha_{si} \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

3.2 運動方程式 運動方程式では装置の運動を振り子運動として取り扱い、装置自体の回転運動に対しては摩擦力が生じないものと仮定する。水平・鉛直方向地動加速度を入力した際、個々の装置

の稼動状態によって以下のような3 Phase が考えられる。

Fig.3 Model coordinates

(1) 2つ以上の装置に滑りが生じていない場合
(全ての装置に滑りが生じていない)

Phase1 : 全装置のうち、2つ以上の装置に滑りが生じず、装置が稼動していない場合。この時、上部構造物のスラブ、及び全装置は地動と同挙動を示し、装置を取り付けていない非免震と同状態である。

(2) 全装置に滑りが生じている場合

Phase2 : すべての装置に滑りが生じ、稼動している場合。この時、重心における X, Y 方向の水平2軸と回転の3自由度で表すことができる。

(3) 1つの装置のみに滑りが生じていない場合

Phase3 : 全装置中、1つの装置のみに滑りが生じていない場合。この時、スラブ、及び装置群の挙動は、滑りを生じていない非稼動の装置を中心とした回転運動が起こる。

上記のことを考慮し、装置数4つでの各 Phase における運動方程式は以下に示すようになる。ここで、 μ_i は各装置の摩擦係数（ここでは、静・動摩擦係数を等しいものとした）、 z_x, z_y は X, Y 方向の水平地動加速度、 z_v は上下方向地動加速度である。 J_{SG} を S 層目の重心まわりの慣性モーメント、 J_{bi} を基礎部の装置 I_i まわりの慣性モーメントとする。 l_{bji} は装置 I_j から装置 I_i までの距離、 α_{sij} は l_{bji} が X 軸となす角である。 M_s は S 層のスラブの質量、 K_{si}, C_{si} は S 層目の柱の剛性と減衰係数である。また、 γ_i は装置 I_i にかかる分布荷重比であり、

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1 \quad \dots \dots \dots (5)$$

を満たす。

a) 4質点フレームモデル

Phase1 : 全装置に滑りが生じていない場合
基礎部は固定状態になり、上部構造物の挙動のみになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{3 層目} \quad -x \text{ direction} - \\
 & M_3 \ddot{x}_3 + \sum_{i=1}^4 C_{3ix} (\dot{u}_{3i} - \dot{u}_{2i}) + \sum_{i=1}^4 K_{3ix} (u_{3i} - u_{2i}) = -M_3 \ddot{z}_x \\
 & \quad \quad \quad -y \text{ direction} - \quad \quad \quad \dots \dots (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & M_3 \ddot{y}_3 + \sum_{i=1}^4 C_{3iy} (\dot{v}_{3i} - \dot{v}_{2i}) + \sum_{i=1}^4 K_{3iy} (v_{3i} - v_{2i}) = -M_3 \ddot{z}_y \\
 & \quad \quad \quad - \text{rotation} - \quad \quad \quad \dots \dots (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & J_{3G} \ddot{\theta}_3 \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{3i} \left\{ -C_{3ix} (\dot{u}_{3i} - \dot{u}_{2i}) \sin(\theta_3 + \alpha_{3i}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + C_{3iy} (\dot{v}_{3i} - \dot{v}_{2i}) \cos(\theta_3 + \alpha_{3i}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{3i} \left\{ -K_{3ix} (u_{3i} - u_{2i}) \sin(\theta_3 + \alpha_{3i}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + K_{3iy} (v_{3i} - v_{2i}) \cos(\theta_3 + \alpha_{3i}) \right\} = 0 \quad \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{S 層目 (S=1,2)} \quad -x \text{ direction} - \\
 & M_S \ddot{x}_S + \sum_{i=1}^4 C_{S+lix} (\dot{u}_{Si} - \dot{u}_{S+li}) + \sum_{i=1}^4 C_{Slix} (\dot{u}_{Si} - \dot{u}_{S-1i}) \\
 & + \sum_{i=1}^4 K_{S+lix} (u_{Si} - u_{S+li}) + \sum_{i=1}^4 K_{Slix} (u_{Si} - u_{S-1i}) = -M_S \ddot{z}_x \\
 & \quad \quad \quad -y \text{ direction} - \quad \quad \quad \dots \dots (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & M_S \ddot{y}_S + \sum_{i=1}^4 C_{S+liy} (\dot{v}_{Si} - \dot{v}_{S+li}) + \sum_{i=1}^4 C_{Sliy} (\dot{v}_{Si} - \dot{v}_{S-1i}) \\
 & + \sum_{i=1}^4 K_{S+liy} (v_{Si} - v_{S+li}) + \sum_{i=1}^4 K_{Sliy} (v_{Si} - v_{S-1i}) = -M_S \ddot{z}_y \\
 & \quad \quad \quad - \text{rotation} - \quad \quad \quad \dots \dots (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & J_{SG} \ddot{\theta}_S \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{Si} \left\{ -C_{S+lix} (\dot{u}_{Si} - \dot{u}_{S+li}) \sin(\theta_S + \alpha_{Si}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + C_{S+liy} (\dot{v}_{Si} - \dot{v}_{S+li}) \cos(\theta_S + \alpha_{Si}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{Si} \left\{ -C_{Slix} (\dot{u}_{Si} - \dot{u}_{S-1i}) \sin(\theta_S + \alpha_{Si}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + C_{Sliy} (\dot{v}_{Si} - \dot{v}_{S-1i}) \cos(\theta_S + \alpha_{Si}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{Si} \left\{ -K_{S+lix} (u_{Si} - u_{S+li}) \sin(\theta_S + \alpha_{Si}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + K_{S+liy} (v_{Si} - v_{S+li}) \cos(\theta_S + \alpha_{Si}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{Si} \left\{ -K_{Slix} (u_{Si} - u_{S-1i}) \sin(\theta_S + \alpha_{Si}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + K_{Sliy} (v_{Si} - v_{S-1i}) \cos(\theta_S + \alpha_{Si}) \right\} = 0 \\
 & \quad \quad \quad \dots \dots (11)
 \end{aligned}$$

ここで,

$$u_{bi} = u_{0i} \quad \dots \dots (12)$$

$$v_{bi} = v_{0i} \quad \dots \dots (13)$$

$$\begin{aligned}
 & \text{基礎部} \quad -x \text{ direction} - \\
 & \dot{x}_b = 0, \quad x_b = \text{const} \quad \dots \dots (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \quad \quad \quad -y \text{ direction} - \\
 & \dot{y}_b = 0, \quad y_b = \text{const} \quad \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \quad \quad \quad - \text{rotation} - \\
 & \dot{\theta}_b = 0, \quad \theta_b = \text{const} \quad \dots \dots (16)
 \end{aligned}$$

Phase2: 全装置に滑りが生じている場合

水平方向の運動方程式は、慣性力と装置の復元力、

摩擦力の和で求める事ができ、回転も同様にして各項の回転成分から求める事ができる。ここで、3層目、2層目、1層目の運動方程式は、それぞれ式(6) (7) (8) (9) (10) (11)(12)(13)と等しくなり、基礎部の運動方程式が以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 & \text{基礎部} \quad -x \text{ direction} - \\
 & M_b \ddot{x}_b + M_T (g + \ddot{z}_v) \sum_{i=1}^4 \gamma_i \mu_i \frac{\dot{u}_{bi}}{\sqrt{\dot{u}_{bi}^2 + \dot{v}_{bi}^2}} + M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \sum_{i=1}^4 \gamma_i \mu_i \\
 & + \sum_{i=1}^4 C_{lix} (\dot{u}_{bi} - \dot{u}_{li}) + \sum_{i=1}^4 K_{lix} (u_{bi} - u_{li}) = -M_b \ddot{z}_x \\
 & \quad \quad \quad \dots \dots (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \quad \quad \quad -y \text{ direction} - \\
 & M_b \ddot{y}_b + M_T (g + \ddot{z}_v) \sum_{i=1}^4 \gamma_i \mu_i \frac{\dot{v}_{bi}}{\sqrt{\dot{u}_{bi}^2 + \dot{v}_{bi}^2}} + M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \sum_{i=1}^4 \gamma_i \mu_i \\
 & + \sum_{i=1}^4 C_{liy} (\dot{v}_{bi} - \dot{v}_{li}) + \sum_{i=1}^4 K_{liy} (v_{bi} - v_{li}) = -M_b \ddot{z}_y \\
 & \quad \quad \quad - \text{rotation} - \quad \quad \quad \dots \dots (18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & J_{bG} \ddot{\theta}_b - M_T (g + \ddot{z}_v) \sum_{i=1}^4 \gamma_i \mu_i \frac{l_{bi}}{\sqrt{\dot{u}_{bi}^2 + \dot{v}_{bi}^2}} \left\{ \dot{u}_{bi} \sin(\theta_b + \alpha_{bi}) - \dot{v}_{bi} \cos(\theta_b + \alpha_{bi}) \right\} \\
 & - M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \sum_{i=1}^4 \gamma_i l_{bi} \left\{ u_{bi} \sin(\theta_b + \alpha_{bi}) - v_{bi} \cos(\theta_b + \alpha_{bi}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{bi} \left\{ -C_{lix} (\dot{u}_{bi} - \dot{u}_{li}) \sin(\theta_b + \alpha_{bi}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + C_{liy} (\dot{v}_{bi} - \dot{v}_{li}) \cos(\theta_b + \alpha_{bi}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{bi} \left\{ -K_{lix} (u_{bi} - u_{li}) \sin(\theta_b + \alpha_{bi}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + K_{liy} (v_{bi} - v_{li}) \cos(\theta_b + \alpha_{bi}) \right\} = 0 \\
 & \quad \quad \quad \dots \dots (19)
 \end{aligned}$$

ここで,

$$M_T = M_b + M_1 + M_2 + M_3 \quad \dots \dots (20)$$

である。

Phase3: 1つの装置のみに滑りが生じていない場合

固定装置 (ここでは装置 I_j が停止しているものとする) 回りの回転角を θ_{bj} とすると、基礎部は、固定装置を中心とした単純振り子の状態になる。運動方程式は、先ほどと同様に慣性力と装置の復元力、摩擦力の和によって求められる。ここで、3層目、2層目、1層目の運動方程式は、それぞれ式(6) (7) (8) (9) (10) (11)(12)(13)(14)と等しくなり、基礎部の運動方程式が以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 & -J_{bj} \ddot{\theta}_{bj} - M_T (g + \ddot{z}_v) \text{sgn}(\theta_{bj}) \cdot \sum_{i=1}^4 \gamma_i l_{ji} \mu_i \\
 & - M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \text{sgn}(\theta_{bj}) \cdot \sum_{i=1}^4 \gamma_i \sqrt{u_{bi}^2 + v_{bi}^2} \cos\left(\frac{\theta_{bj}}{2}\right) l_{bji} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{bji} \left\{ -C_{lix} (\dot{u}_{bi} - \dot{u}_{li}) \sin(\theta_{bj} + \alpha_{bij}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + C_{liy} (\dot{v}_{bi} - \dot{v}_{li}) \cos(\theta_{bj} + \alpha_{bij}) \right\} \\
 & + \sum_{i=1}^4 l_{bji} \left\{ -K_{lix} (u_{bi} - u_{li}) \sin(\theta_{bj} + \alpha_{bij}) \right. \\
 & \quad \quad \quad \left. + K_{liy} (v_{bi} - v_{li}) \cos(\theta_{bj} + \alpha_{bij}) \right\} \\
 & = M_b l_j \left\{ \ddot{z}_x \sin(\alpha_j + \theta_{bj}) - \ddot{z}_y \cos(\alpha_j + \theta_{bj}) \right\} \quad \dots \dots (21)
 \end{aligned}$$

(b) 剛体モデル

剛体モデルは上部構造物を剛体としているため、以下のように、基礎部のみで運動方程式を立てることができる。

Phase1 : 全装置に滑りが生じていない場合

基礎部 - x direction -

$$\dot{x}_b = 0, x_b = \text{const} \quad \dots \dots (22)$$

- y direction -

$$\dot{y}_b = 0, y_b = \text{const} \quad \dots \dots (23)$$

- rotation -

$$\dot{\theta}_b = 0, \theta_b = \text{const} \quad \dots \dots (24)$$

Phase2 : 全装置に滑りが生じている場合

基礎部 - x direction -

$$M_T \ddot{x}_b + M_T(g + \ddot{z}_v) \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i \frac{\dot{u}_{bi}}{\sqrt{\dot{u}_{bi}^2 + \dot{v}_{bi}^2}} + M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i u_{bi} = -M_T \ddot{x}_x \quad \dots \dots (25)$$

- y direction -

$$M_T \ddot{y}_b + M_T(g + \ddot{z}_v) \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i \frac{\dot{v}_{bi}}{\sqrt{\dot{u}_{bi}^2 + \dot{v}_{bi}^2}} + M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i v_{bi} = -M_T \ddot{z}_y \quad \dots \dots (26)$$

- rotation -

$$J_{bG} \ddot{\theta} - M_T(g + \ddot{z}_v) \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i \frac{l_{bi}}{\sqrt{\dot{u}_{bi}^2 + \dot{v}_{bi}^2}} \left\{ \dot{u}_{bi} \sin(\theta_b + \alpha_{bi}) - \dot{v}_{bi} \cos(\theta_b + \alpha_{bi}) \right\} - M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \sum_{i=1}^n \gamma_i l_{bi} \left\{ u_{bi} \sin(\theta_b + \alpha_{bi}) - v_{bi} \cos(\theta_b + \alpha_{bi}) \right\} = 0 \quad \dots \dots (27)$$

Phase3 : 1つの装置のみに滑りが生じていない場合

$$\begin{aligned} & -J_{bj} \ddot{\theta}_{bj} - M_T(g + \ddot{z}_v) \text{sgn}(\dot{\theta}_{bj}) \cdot \sum_{i=1}^4 \gamma_i l_{ji} \mu_i \\ & - M_T \frac{g + \ddot{z}_v}{r} \text{sgn}(\dot{\theta}_{bj}) \cdot \sum_{i=1}^4 \gamma_i \sqrt{u_{bi}^2 + v_{bi}^2} \cos\left(\frac{\theta_{bj}}{2}\right) l_{bji} \\ & = M_T l_j \left\{ \ddot{z}_x \sin(\alpha_j + \theta) - \ddot{z}_y \cos(\alpha_j + \theta) \right\} \end{aligned} \quad \dots \dots (28)$$

Fig.4 Algorithm for phase change

3.3 Phase の切り替え条件 図4のようにそれぞれの Phase が他のどの Phase にも移行し、各

Phase の切り替え条件は、各々の装置の条件によって、その各装置の状態を検討し、全装置の挙動状態によって Phase が決定される。

(a) 4 質点フレームモデル

復元力、減衰力、慣性力から、x, y 方向の外力 F_{ex} , F_{ey} は以下ようになる。

$$F_{ex} = \sum_{i=1}^4 \left\{ -m_i(\ddot{x}_b + \ddot{z}_x) - M_T \gamma_i \frac{g + \ddot{z}_v}{r} u_{bi} - K_{lix}(u_{bi} - u_{li}) - C_{lix}(\dot{u}_{bi} - \dot{u}_{li}) \right\} \quad \dots \dots (29)$$

$$F_{ey} = \sum_{i=1}^4 \left\{ -m_i(\ddot{y}_b + \ddot{z}_y) - M_T \gamma_i \frac{g + \ddot{z}_v}{r} v_{bi} - K_{liy}(v_{bi} - v_{li}) - C_{liy}(\dot{v}_{bi} - \dot{v}_{li}) \right\} \quad \dots \dots (30)$$

ここで、 m_i は装置 I_i 上部の基礎部の質量で、以下のように表すことができる。

$$m_i = M_T \left(\gamma_i - \frac{1}{4} \right) + \frac{M_b}{4} \quad \dots \dots (31)$$

装置の運動開始条件、停止条件式は免震装置に加わる摩擦力和外力の大小関係から次式のようなになる。

運動開始条件式

$$\left| \sqrt{F_{ex}^2 + F_{ey}^2} \right| > M_T \gamma_i \mu_i (g + \ddot{z}_v) \quad \dots \dots (32)$$

運動停止条件式

$$\left| \sqrt{F_{ex}^2 + F_{ey}^2} \right| \leq M_T \gamma_i \mu_i (g + \ddot{z}_v) \quad \dots \dots (33)$$

(b) 剛体モデル

剛体モデルも同様に、運動開始条件、停止条件式は免震装置に加わる摩擦力和外力の大小関係から次式のようなになる。

運動開始条件式

$$\left| \ddot{z}_H + \frac{g + \ddot{z}_v}{r} w_{bi} \right| > \mu_i (g + \ddot{z}_v) \quad \dots \dots (34)$$

運動停止条件式

$$\left| \ddot{w}_{bi} + \ddot{z}_H + \frac{g + \ddot{z}_v}{r} w_{bi} \right| \leq \mu_i (g + \ddot{z}_v) \quad \dots \dots (35)$$

ここで、

$$\ddot{z}_H = \sqrt{\ddot{z}_x^2 + \ddot{z}_y^2} \quad \dots \dots (36)$$

$$w_{bi} = \sqrt{u_{bi}^2 + v_{bi}^2} \quad \dots \dots (37)$$

である。

フレームモデル、剛体モデル両モデルにおいて、一つの装置のみに停止している状態 (Phase3) になるためには、上部構造物の慣性力よりも、停止している装置の摩擦力が大きくないと、停止している装置が滑り出してしまうと考え、さらに、Phase3 条件式が以下のようなになる (停止している装置を I_j)。

(a) フレームモデル

$$\left| M_b \gamma_i (\ddot{w}_b + \ddot{z}_H) \right| > M_T \gamma_j \mu_j (g + \ddot{z}_v) \quad \dots \dots (38)$$

(b) 剛体モデル

$$|M_T \gamma_i (\ddot{w}_b + \ddot{z}_H)| > M_T \gamma_i \mu_j (g + \ddot{z}_v) \quad \dots (39)$$

これらの式を用い、図5に示すようなフローチャートにより Phase の決定を行う。以上の運動方程式を用いて、時刻歴応答解析を行いその実験結果との比較検討を行なった。なお、解析には Runge-Kutta-Gill 法を使用し、解析の計算刻みを 100,000Hz で行なった。

Fig.5 Determination of phase

Table 1 Parameter of analysis model

condition	Vertical Load [kg]				Friction coefficient of Device			
	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄
Normal	4103	4034	4104	4030	0.0597			0.0597
U. L.	5107	3612	3824	3723				
U. F. C.	4103	4034	4104	4030	0.1733			

Normal : normal condition

U. L. : unbalanced load condition

U. F. C. : unbalanced friction coefficient condition

Table 2 The Dimension of the Steel Frame model

	Stiffness coefficient [N/m]	Damping coefficient [N s/m]
x direction	13489300	13376
y direction	106033000	468312

Table 3 Stiffness and Damping of model

Mass	3rd layer	2970 kg	Total	13661 kg
	2nd layer	3174 kg		
	1st layer	3174 kg	Per support FPB system	3415 kg
	Base layer	4343 kg		
Column span		3.0 m	Floor height	1.5 m
Additional mass		27 kg × 52	Total	1904 kg

3.4 解析結果

解析に用いた各装置にかかる荷重と装置の摩擦係数を表1示す。解析では、各実験結果の時刻歴応答波形により摩擦係数を推定し、その結果をもとに計算した平均の摩擦係数を用いて再度解析を行った。実験前段階として行なった非免震時の振動実験より求めた各柱の剛性係数、減衰係数は、表2に示す。また、解析モデルの大きさ、質量は、表3に示す。El Centro NS(x方向), EW(y方向), 50kine(0.50m/s), UD(z方向), 25kine(0.25m/s), の3軸入力における実験とフレームモデル解析と剛体モデル解析の時刻歴応答波形を図6に示す。図6-(a)は偏荷重時、そして、図6-(b)は偏摩擦時の時刻歴波形である。図には、入力地震波、各層の応答加速度、及び基礎部の応答変位、回転角を示した。

基礎部の変位は剛体モデル、フレームモデル共に波形の傾向は一致しており、偏摩擦時での回転角においても、波形の傾向、大きさ共にほぼ一致している。上部構造物の応答加速度は、剛体解析では上部構造物を剛体としているため、当然の事ながら3層部分までの応答は再現できていないが、設計時に免震性能を概略評価する上で有効なものになると考えられる傾向は再現されている。偏荷重時では、解析において回転角は生じなかった。これは、考察でも論じるが、剛心と重心が一致するため、回転運動が生じにくいと考えられる。また、実験でも回転運動をほとんど生じていないことから、理論と同様に球面すべり支承では、装置の復元力(剛心)と構造物の重心がほぼ一致する事が確認できる。本実験では、装置単体試験時の摩擦係数 (coated:0.023~0.025, non-coated:0.136) と比較して、加振実験(解析)時の摩擦係数 (coated:0.0597, non-coated:0.1733) が、強地震をくり返して入力しているため、多少大きくなっていると考えられる。そのため、各条件によって摩擦係数の違いが生じており、解析では全体の実験結果から摩擦係数を平均化して求めているため、実験と解析に多少の誤差が生じたと思われる。しかしながら、各方向の変位、回転角ともに、概ね実験結果を再現できている。全体的の傾向から、上

Fig.6 (a) Time history unbalanced load condition
input wave El Centro (x, y direction 50[kine](0.50[m/s]), z direction 25[kine](0.25[m/s]))

Unbalanced Friction Coefficient Condition — x direction

Excitation Test

Analysis

3-story frame model

rigid slab model

Unbalanced Friction Coefficient Condition — y direction

Excitation Test

Analysis

3-story frame model

rigid slab model

Unbalanced Friction Coefficient Condition — rotation

Excitation Test

Analysis

3-story frame model

rigid slab model

Fig.6 (b) Time history unbalanced friction coefficient condition
input wave El Centro (x, y direction 50[kine](0.50[m/s]), z direction 25[kine](0.25[m/s]))

部構造物を考慮に入れたフレームモデルの方が実験に近い傾向を示しているが、変位、回転角を中心に考えた挙動解析では、剛体モデルでも十分に再現可能である。

以上のことにより、構造物のモデル化が困難な複雑なモデルでは、本実験のような回転挙動を含めた設計に際して、剛体モデル等でおおよその挙動を把握し、さらに、詳しい挙動が必要な際には、上部構造物を考慮に入れたモデルの作成を行なう方法が望ましいと考えられる。

4. 考察

回転運動は、構造物に働く装置の復元力の位置（復元力中心）、摩擦力が構造物に働く摩擦力の位置（摩擦力中心）と重心位置のずれによって生じると思われる。そこで、剛体モデルを用い、各実験条件における復元力中心、摩擦力中心と重心位置の関係を検討した。

4.1 荷重が与える影響 鉛直方向の加速度がないと仮定すると、各装置の装置の復元力 K_{bi} は

$$K_{bi} = M_T \gamma_i \ddot{x} \quad \dots (40)$$

となり、復元力中心 P_{kb} は以下のように表すことができる。

$$P_{kb} = \frac{\sum_{i=1}^n (K_{bi} \cdot I_i)}{\sum_{i=1}^n K_{bi}} = \frac{M_T \ddot{x} \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot I_i)}{M_T \ddot{x} \sum_{i=1}^n \gamma_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot I_i)}{\sum_{i=1}^n \gamma_i} \quad \dots (41)$$

この式より、復元力中心は、装置の位置と分担荷重比の積の和で表せることになり、重心と一致する。したがって、復元力中心と重心とのズレによる回転運動は生じないことが分かる。

4.2 摩擦係数が与える影響 上記と同様に鉛直方向の加速度がないと仮定すると、各装置の摩擦力は F_{bi} は

$$F_{bi} = \mu_i M_T \gamma_i \ddot{x} \quad \dots (42)$$

となり、摩擦力中心 P_{fb} は以下ようになる。

$$P_{fb} = \frac{\sum_{i=1}^n (F_{bi} \cdot I_i)}{\sum_{i=1}^n F_{bi}} = \frac{M_T \ddot{x} \sum_{i=1}^n (\mu_i \gamma_i \cdot I_i)}{M_T \ddot{x} \sum_{i=1}^n \mu_i \gamma_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \gamma_i \cdot I_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i \gamma_i} \quad \dots (43)$$

ここで、偏荷重時のように各装置の摩擦係数が等しいとすると、式(44)は次のようになる。

$$P_{fb} = \frac{\mu \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot I_i)}{\mu \sum_{i=1}^n \gamma_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot I_i)}{\sum_{i=1}^n \gamma_i} \quad \dots (44)$$

式(45)は先ほどと同様に重心位置と一致する。よって、荷重のばらつきがあっても、摩擦係数にばらつきがない場合、復元力中心と摩擦力中心は重心位置

と一致し、回転運動は生じないことが分かる。実験でも、偏荷重状態で回転運動をほとんど生じていないことから、理論と同様に球面すべり支承では、装置の復元力中心、摩擦力中心と構造物の重心が一致する事が確認できる。

5. 結論

通常の状態に加え、回転運動を生じさせるために、上部構造物の重心に偏りを持たせた場合と、免震装置の摩擦係数にばらつきを持たせた場合の3通りの条件について、2つの解析モデルを用い応答解析を行ない、実験結果と比較検討した。

- (1)基礎部の変位は剛体モデル、フレームモデル共に波形の傾向は一致しており、偏摩擦時での回転角においても、波形の傾向、大きさ共にほぼ一致している。
- (2)フレームモデルでは、剛体解析では再現しきれなかった細かな加速度を再現している。
- (3)上部構造物を考慮に入れたフレームモデルの方がより忠実に実験を再現しているが、変位、回転角を中心に考えた挙動解析では、剛体モデルでも十分に再現可能である。
- (4)荷重のばらつきがあっても、摩擦係数にばらつきがない場合、復元力中心と摩擦力中心は重心位置と一致し、回転運動は生じない。
- (5)したがって、本装置（球面すべり支承）は荷重のばらつき（重心の偏り）による影響は受けにくい。

本実験のような回転挙動を含めた設計に際して、比較的簡易な剛体モデル等でおおよその挙動を把握し、さらに、詳しい挙動が必要な際には、上部構造物を考慮に入れたモデルの作成を行ない、その挙動を検討する方法が望ましいと考えられる。

今後は、剛体モデル等を用い、実在構造物に球面すべり支承を用いた際における地震時の挙動を、モンテカルロシミュレーション等の確率論の観点より検討していく予定である。

6. 参考文献

- (1)藤田 聡, 他4名, 球面すべり支承を用いた機器免震装置に関する研究, 機論, 59-557, C, (1993), pp. 11-16.
- (2)岡村 茂樹, 藤田 聡, 摩擦振り子型免震装置群の地震時挙動に関する研究(第1報), 機論, 67-660, C, (2001), pp. 62-69.
- (3)岡村 茂樹, 藤田 聡, 摩擦振り子型免震装置群の地震時挙動に関する研究(第2報),