

# 予引張あるいは予圧縮ばねを利用した免震床の研究

## (第7報 実大免震床についての解析—その2—)

An Earthquake Isolation Floor Using Pre-Tensioned or Pre-Compressed Springs

(7th Report: Analysis for Actual Earthquake Isolation Floors—Part 2—)

藤田 隆 史\*・服 部 忍\*

Takafumi FUJITA and Shinobu HATTORI

### 1. ま え が き

前報<sup>3)</sup>では実大免震床の設計パラメータの値を検討するための一自由度系モデルによる解析について述べた。本報では、実大免震床の地震時挙動をより詳細に解析するため、建物の三次元床応答入力に対する免震床の並進(二方向)と回転の運動を記述する三自由度系モデルによる解析について述べる。

### 2. 三自由度系モデルによる解析

#### 2.1 三自由度系解析モデル

図1に示すように、 $n$ 個の免震装置  $I_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )、 $n'$ 個のサポート  $S_j$  ( $j=1, 2, \dots, n'$ ) および  $l$ 個のダンパ  $D_k$  ( $k=1, 2, \dots, l$ ) を持つ免震床を考える。免震床の図心を原点とする座標系  $0-XY$  (免震床に固定) において、免震装置  $I_i$  の中心を  $I_i(X_{I_i}, Y_{I_i})$ 、サポート  $S_j$  の取付点を  $S_j(X_{S_j}, Y_{S_j})$ 、ダンパ  $D_k$  の免震床側取付点を  $D_k(X_{D_k}, Y_{D_k})$ 、搭載機器を含めた系の重心  $G$  の位置を  $G(X_G, Y_G)$  で表すと、重心  $G$  から免震装置  $I_i$  までの距離  $r_{I_i}$ 、 $\overline{GI_i}$  が  $X$  軸となす角  $\theta_{I_i}$  は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} r_{I_i} &= \sqrt{(X_{I_i} - X_G)^2 + (Y_{I_i} - Y_G)^2} \\ \theta_{I_i} &= \cos^{-1} \frac{X_{I_i} - X_G}{r_{I_i}} = \sin^{-1} \frac{Y_{I_i} - Y_G}{r_{I_i}} \\ (0 \leq \theta_{I_i} < 2\pi) \end{aligned} \right\} (1)$$

サポート  $S_j$  およびダンパ  $D_k$  についての  $r_{S_j}$ 、 $\theta_{S_j}$ 、 $r_{D_k}$ 、 $\theta_{D_k}$  についても式(1)と同様に与えられる。

次に、床スラブに固定した座標系  $0-xy$  (免震床の静止状態では  $0-XY$  と一致) において、重心  $G$  の  $x$ 、 $y$  方向変位をおのおの  $x$ 、 $y$  とし、免震床の重心  $G$  まわりの回転角を  $\varphi$  とすると、免震装置  $I_i$  の  $x$ 、 $y$  方向変位  $u_{I_i}$ 、 $v_{I_i}$  は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} u_{I_i} &= x + r_{I_i} \{ \cos(\varphi + \theta_{I_i}) - \cos \theta_{I_i} \} \\ v_{I_i} &= y + r_{I_i} \{ \sin(\varphi + \theta_{I_i}) - \sin \theta_{I_i} \} \end{aligned} \right\} (2)$$

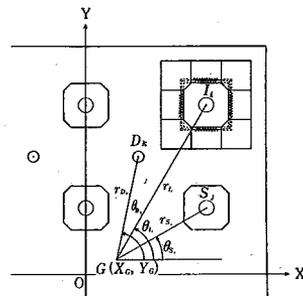


図1 三自由度系モデル

サポート  $S_j$  およびダンパ  $D_k$  の  $x$ 、 $y$  方向変位 ( $u_{S_j}$ 、 $v_{S_j}$ )、( $u_{D_k}$ 、 $v_{D_k}$ ) も式(2)と同様に表現される。

免震床の三自由度系としての運動方程式は、回転角を微小なものとし、免震装置の回転剛性を無視すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + \mu M(g + \ddot{z}_v) & \left( \sum_{i=1}^n r_{I_i} \frac{u_{I_i}}{\sqrt{u_{I_i}^2 + v_{I_i}^2}} + \sum_{j=1}^{n'} r_{S_j} \frac{u_{S_j}}{\sqrt{u_{S_j}^2 + v_{S_j}^2}} \right) + C \sum_{k=1}^l \frac{u_{D_k} (u_{D_k} \dot{u}_{D_k} + v_{D_k} \dot{v}_{D_k})}{u_{D_k}^2 + v_{D_k}^2 + h^2} \\ & + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F(u_{I_i}) = -M\ddot{z}_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M\ddot{y} + \mu M(g + \ddot{z}_v) & \left( \sum_{i=1}^n r_{I_i} \frac{v_{I_i}}{\sqrt{u_{I_i}^2 + v_{I_i}^2}} + \sum_{j=1}^{n'} r_{S_j} \frac{v_{S_j}}{\sqrt{u_{S_j}^2 + v_{S_j}^2}} \right) + C \sum_{k=1}^l \frac{v_{D_k} (u_{D_k} \dot{u}_{D_k} + v_{D_k} \dot{v}_{D_k})}{u_{D_k}^2 + v_{D_k}^2 + h^2} \\ & + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F(v_{I_i}) = -M\ddot{z}_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I\ddot{\varphi} - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{r_{I_i}}{n} \{ F(u_{I_i}) \sin(\varphi + \theta_{I_i}) - F(v_{I_i}) \cos(\varphi + \theta_{I_i}) \} + \mu M(g + \ddot{z}_v) \frac{r_{I_i} r_{I_i}}{\sqrt{u_{I_i}^2 + v_{I_i}^2}} \right. \\ \left. \{ u_{I_i} \sin(\varphi + \theta_{I_i}) - v_{I_i} \cos(\varphi + \theta_{I_i}) \} \right] \end{aligned}$$

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

$$\begin{aligned}
 & -\mu M(g + \ddot{z}_v) \sum_{j=1}^{n'} \frac{r_{s_j} r_{s_j}}{\sqrt{\dot{u}_{s_j}^2 + \dot{v}_{s_j}^2}} \left\{ \dot{u}_{s_j} \sin(\varphi + \theta_{s_j}) \right. \\
 & \left. - \dot{v}_{s_j} \cos(\varphi + \theta_{s_j}) \right\} \\
 & - \frac{C}{l} \sum_{k=1}^l \frac{(u_{D_k} \dot{u}_{D_k} + v_{D_k} \dot{v}_{D_k}) r_{D_k}}{u_{D_k}^2 + v_{D_k}^2 + h^2} \left\{ u_{D_k} \sin(\varphi + \theta_{D_k}) \right. \\
 & \left. - v_{D_k} \cos(\varphi + \theta_{D_k}) \right\} = 0 \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$F(x) = \begin{cases} \beta M + K(x - \beta M/k) : x \geq \beta M/k \\ kx : |x| \leq \beta M/k \\ -\beta M + K(x + \beta M/k) : x \leq -\beta M/k \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $M$ は免震床と搭載機器の総質量、 $I$ は重心まわりの慣性モーメント、 $\mu$ は免震床の動摩擦係数、 $C$ はダンパの総減衰定数、 $h$ はダンパの取付け高さ、 $K$ は予引張ばねの $x$ 、 $y$ 方向の総ばね定数、 $k$ は緩衝ゴムの $x$ 、 $y$ 方向の総ばね定数、 $\beta M$ は予引張ばねの $x$ 、 $y$ 方向の総予引張力、 $g$ は重力加速度、 $\ddot{z}_x$ 、 $\ddot{z}_y$ は床の $x$ 、 $y$ 方向の加速度、 $\ddot{z}_v$ は床の鉛直方向加速度である。

運動開始条件： $\sqrt{\ddot{z}_x^2 + \ddot{z}_y^2} \geq \mu(g + \ddot{z}_v)$  (6)

ただし、 $r_{I_i}$ 、 $r_{S_j}$ は免震装置 $I_i$ 、サポート $S_j$ に加わる鉛直荷重の分担比を表し、

$$\sum_{i=1}^n r_{I_i} + \sum_{j=1}^{n'} r_{S_j} = 1 \quad (7)$$

である。また、 $F(x)$ は免震装置の非線形復元力を表し、次式で与えられる。

2.2 実大モデルによる実験結果との比較

第4、5報<sup>1)2)</sup>で述べた実大モデルによる地震波二方向加振実験の結果によって三自由度系解析モデルの妥当性を検討する。この場合の加振入力は3種の実地震記録(El Centro, 八戸, 東北大学)をもとに作成した中低層建物の床応答の模擬波(固有振動数2 Hz, 臨界減衰比3

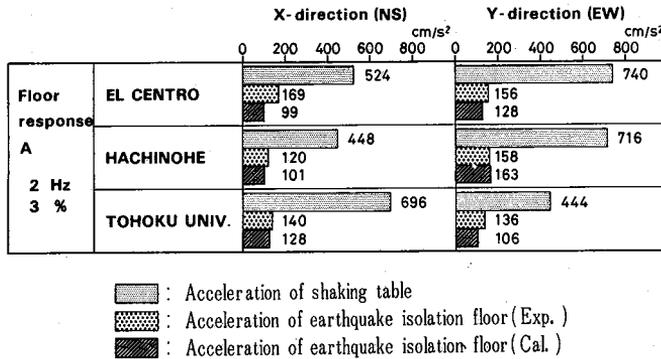


図2 水平二方向加振による応答加速度(実験と解析)

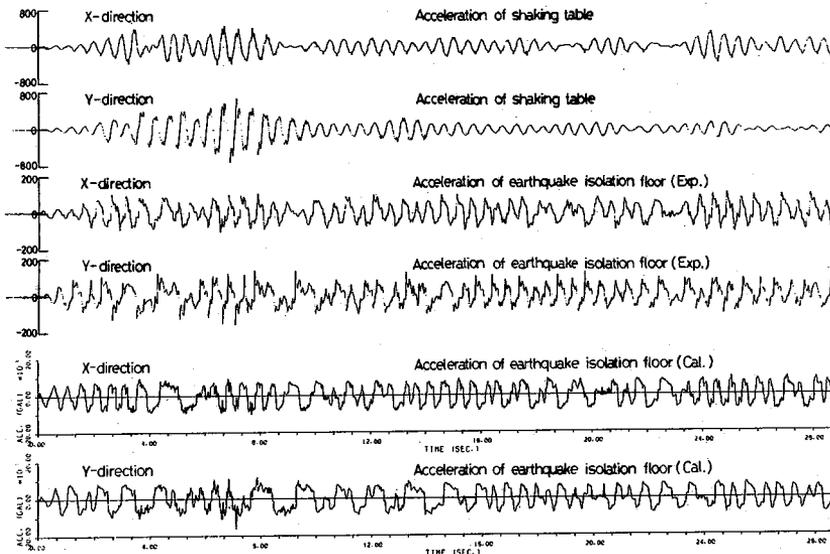


図3 八戸波の床応答Aによる応答波形(実験と解析)

研究速報

の一質点系の応答加速度—床応答A)であり、 $x$ 、 $y$ 方向入力として各々のNS、EW方向成分を用いており、免震床上(0-XY系)の点(-2.6cm, 11.7cm)での $X$ 、 $Y$ 二方向の応答加速度を計測している。この実大モデルでは4個の免震装置を用い、サポート、ダンパは使用していない。主要なパラメータの値は以下の通りである。

$$M = 2965 \text{ kg}, I = 7.62 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \mu = 0.026,$$

$$C = 0 \text{ N} \cdot \text{s/m}, h = 30 \text{ cm}, K = 6.05 \text{ kN/m}, k = 752 \text{ kN/m}, \beta M = 1.68 \text{ kN}, (X_c, Y_c) = (10.1 \text{ cm}, 54.4 \text{ cm}),$$

$$r_{I_1} = 0.313, r_{I_2} = 0.285, r_{I_3} = 0.197, r_{I_4} = 0.205$$

図2は3種の加振入力に対する免震床の最大応答加速度の実験値と解析値を比較したものである。図3は八戸波の床応答Aを加振入力に用いた場合の、 $x$ 、 $y$ 方向の入力加速度、実験と解析による免震床の $X$ 、 $Y$ 方向の応答加速度の波形を示したものである。これらの結果によると、最大応答加速度は実験値の方が少し大きい。これは、実験では免震装置の可動部が拘束部材に衝突すると

きのスパイク状の加速度を記録しているのに対して、解析ではこのことが考慮されていないためであると思われる。しかし、このようなスパイク状の加速度は搭載機器にはほとんど影響を与えないと考えられ、この解析モデルにより免震床の地震時挙動や免震性能を解析してさしつかえないと考えられる。

3. 実大免震床の解析例

実大免震床の解析例として図4に示す15m×15m(外周の大梁の中心線間距離)の免震床を対象に、東北大学9階および1階での実地震記録を用いて解析した結果について述べる。

この免震床では6個の免震装置、36個のサポート、8個のダンパを用いており、免震床上の電算機システムは実例を元に配置されている。免震床と周辺の床との間の隙間は免震床外周の特別大のパネルが覆い、中央部の柱との間の隙間は柱に固定されたパネルが覆う構造になっている。この免震床の設計パラメータは、前報<sup>3)</sup>での一自由度系モデルによる解析結果から、

$$T = 6 \text{ s}, \beta = 50 \text{ Gal}, \zeta = 2.0, \omega / 2\pi = 15 \text{ Hz}$$

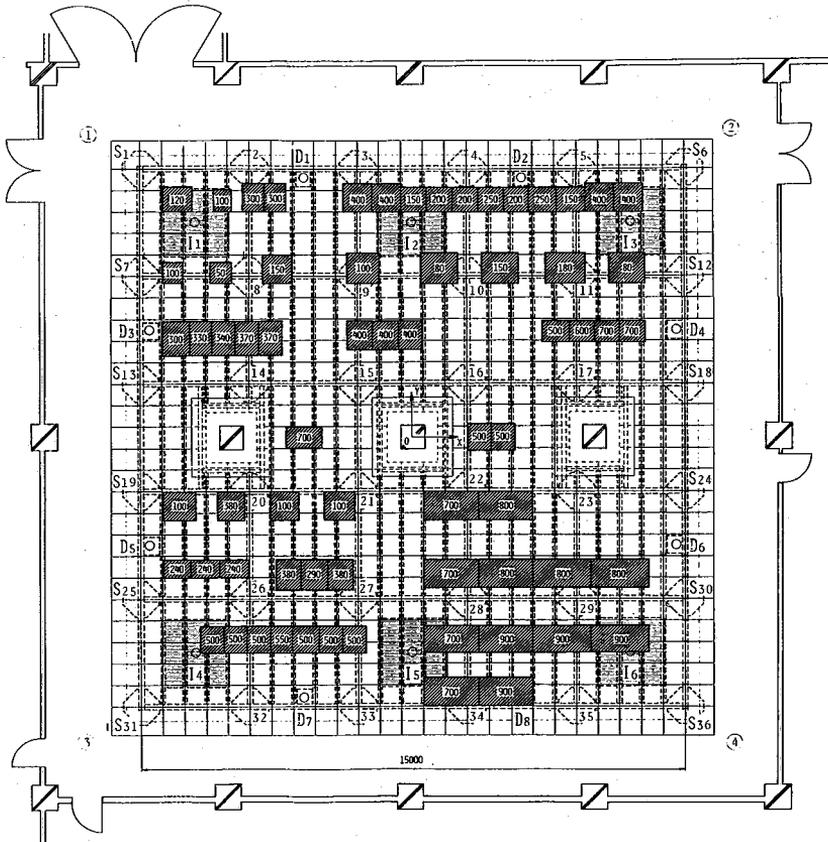


図4 実大免震床の解析例

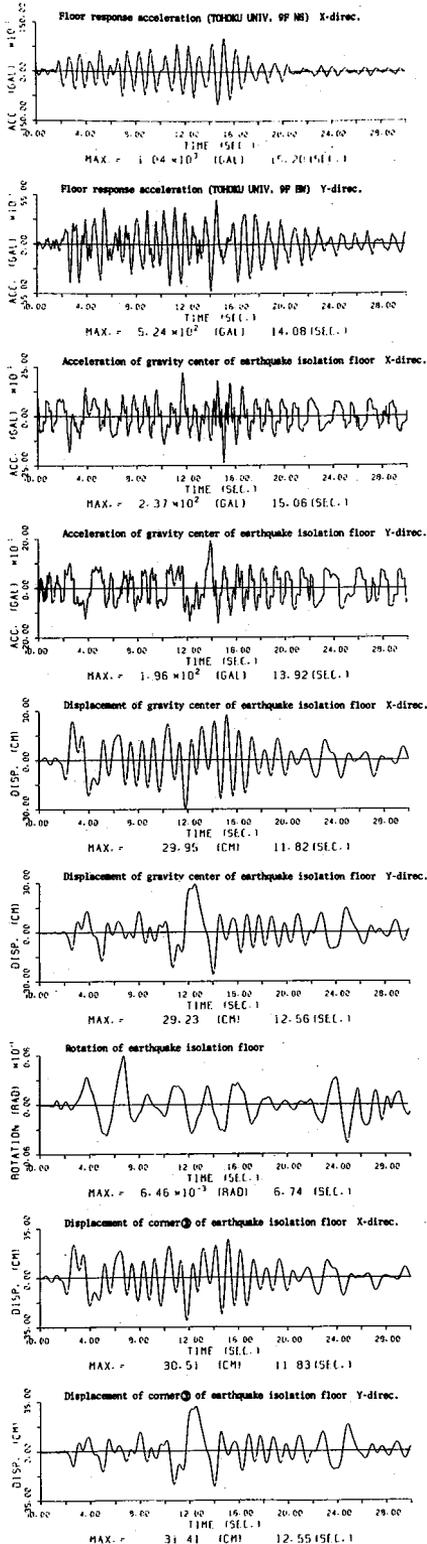


図5 東北大学9階の三次元床応答入力に対する応答

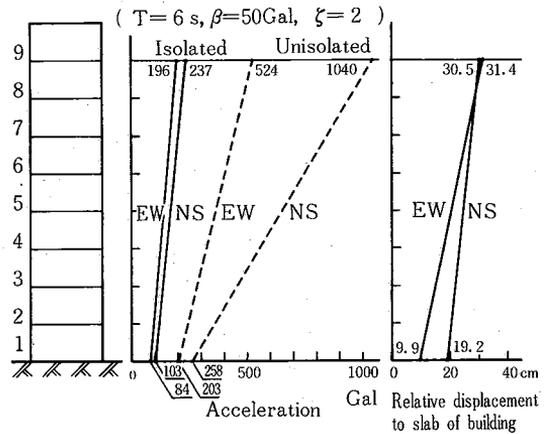


図6 東北大学での記録による免震床の性能

となるように決定されており、諸元は次のとおりである。  
 $M = 48,300 \text{ kg}$ ,  $I = 1.79 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $K = 52.9 \text{ kN/m}$ ,  $k = 4.29 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ,  $\beta M = 24.2 \text{ kN}$ ,  $C = 202 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ ,  $\mu = 0.026$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ,  $(X_G, Y_G) = (23.0 \text{ cm}, -57.6 \text{ cm})$ ,  $r_{ri} = r_{sj} = 0.0238$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ;  $j = 1, 2, \dots, 36$ )

図5は、この免震床の東北大学9階の床応答記録に対する応答を三自由度系モデルで解析した結果である。この場合、免震床の③の隅が最大相対変位を示す。図6は、同様に東北大学1階での記録に対する応答を解析し、中間階での応答を直線補間することにより、この免震床を各階に設置したときの加速度と相対変位を図示したものである。図6を、一自由度系モデルによる解析から得られた前報<sup>3)</sup>図7と比較すると、応答加速度はほぼ同じ、NS方向にはむしろ少し小さくなるが、相対変位は免震床のわずかな回転の影響で大きくなる。この解析により、東北大学9階の床応答を設計地震動とする場合には、上述の隙間は少なくとも40cmが必要となる。図4の免震床はこの値で設計されている。また、この値は一自由度系モデルによる最大相対変位の約1.5倍に相当する。

4. あとがき

前報と本報に述べた解析モデルをそれぞれ一次設計、二次設計に用いることにより、免震床の合理的な設計が可能となる。

(1981年11月17日受理)

参考文献

- 1) 藤田, 石田, 服部; 生産研究, Vol. 33, No. 2 (1981).
- 2) 藤田, 服部, 石田; 生産研究, Vol. 33, No. 2 (1981).
- 3) 藤田, 服部; 生産研究, Vol. 33, No. 7 (1981).