X-Y テーブルとうず巻ばねを用いた免震テーブルの研究*

大 亦 絢一郎^{*1}, 近 藤 洋 文^{*2}
下 坂 陽 男^{*1}, 下 田 博 一^{*1}

A Study of an Isolation Table Using an X-Y Table and Spiral Springs

Kenichiro OHMATA^{*3}, Hirofumi KONDO,
Haruo SHIMOSAKA and Hirokazu SHIMODA^{*3}School of Science and Technology, Meiji University,
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 214-8571 Japan

In this paper, a new type of isolation table using an X-Y table and spiral springs was developed. The damping of the isolation table is given by the friction force and the viscous damping of the X-Y table, and the stiffness is given by the spiral springs. The trial isolation table was made and its resisting force characteristics were measured. The seismic responses of the isolation table having a weight or a 3-story tower-like structure on board were also measured using an electrohydraulic type shaking table. The experimental results are compared with the calculated results, and the effects of vibration suppression of the table and the overturn moment acting on the table are discussed.

Key Words: Isolation Table, X-Y Table, Spiral Spring, Tower-Like Structure, Seismic Response

1. ま え が き

電子機器や美術工芸品などを地震による振動・転倒から守るために、いくつかのタイプの免震テーブルや免震床が開発されている^{(1)~(6)}。また著者らは、構造が簡単で安価な免震テーブルを得ることを目的として、円弧はりと磁気減衰を用いた免震テーブルを開発し⁽⁷⁾⁽⁸⁾、続いて重心が高く重量のある機器・備品にも適用できる免震テーブルとして、X-Y テーブル(二方向テーブル)とワイヤロープ防振器を用いた免震テーブルを開発した⁽⁹⁾。この X-Y テーブルを用いた免震テーブルは、テーブルの背が低く、重量物を搭載することができ、かつ大きな転倒モーメントに耐えることができる反面、ワイヤロープ防振器を多数用いているため値段が高くなるという欠点をもっている。

本研究では、X-Y テーブルを用いた免震テーブルの価格低下を目的として、ワイヤロープ防振器の代わりにうず巻ばねを用いた免震テーブルを提案する。こ

の免震テーブルを試作し、その抵抗力特性を実験によって調べた。次に、テーブル板に集中質量または重心の高い三層塔状構造物モデルを搭載したときの実地震波加振実験と地震応答解析を行い、本免震テーブルの免震効果を調べた。また、塔状構造物モデルに作用する転倒モーメントを実験と計算によって求め、本免震テーブルが大きな転倒モーメントに耐えられることを確認した。

2. 免震テーブルの構造

試作した免震テーブルの構造を図1に示す。二組の X 方向直動転がり軸受⑥に固定された2枚の荷重板②にはそれぞれうず巻ばね取付板④が固定されていて、うず巻ばね⑧の先端はテーブル板①の左右の端に取付けられた取付アングル⑤に固定されている。同様に、二組の Y 方向用直動転がり軸受⑥'に固定された2枚の荷重板②'にもそれぞれうず巻ばね取付板④'が固定されていて、うず巻ばね⑧'の先端は基礎板③の前後の端に取付けられた取付アングル⑤'に固定されている。4個のうず巻ばねは初期引張変位を与えられているので、引張・圧縮方向に同じ程度の変位を受けることができる。

* 原稿受付 2001年3月21日。

^{*1} 正員, 明治大学理工学部(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)。

^{*2} 学生員, 明治大学大学院。

E-mail: ohmata@isc.meiji.ac.jp

3. 免震テーブルの基本特性

3.1 うず巻ばねのばね特性 図2に示すような実験装置を用いて、うず巻ばねのばね特性を測定した。うず巻ばねにはサミニ社製ゼンマイを使用した。実験結果を図3に示す。図3から、本うず巻ばねはほぼ線形ばね特性を示し、そのばね定数は $k_u=392$ N/mであることがわかる。このうず巻ばねを免震テーブルに使用するには、30 mmの初期変位を与えて、免震テーブルの変位が零の状態であうず巻ばねの変位がC点の位置に来るようにして使用した。

①Table board ②②' Load plate ③Base board
④④' Spring attachment ⑤⑤' Angle-shape plate
⑥⑥' Linear ball bearing ⑦⑦' Rail ⑧⑧' Spiral spring

Fig. 1 Isolation table

Fig. 2 Experimental apparatus

Fig. 3 Resisting force characteristics of the spiral spring

3.2 免震テーブルの減衰特性 次に、X-Y テーブルの基礎板を水平振動台に取付け、テーブル板の一边の midpoint をロードセルを介して反力壁に固定し、振動台に 0.5, 1.0, 2.0 Hz の正弦波状変位を与えて免震テーブルの減衰特性を測定した。実験はうず巻ばねを取付けない場合と二重に重ねて取付けた場合について行い、X 方向および Y 方向について行った。実験装置を図4に示し、テーブル板上にテーブル板の質量を含めて 100 kg の重りを載せたときの実験結果を図5(a), (b)に示す。振動台の変位の測定にはインダクタンス形変位計を用いた。図5(a)の履歴曲線を、長方形とだ円形を重ね合わせた図で近似すると、X-

①Load cell ②Weight ③Table board
④Base board ⑤Displacement transducer

Fig. 4 Experimental apparatus

Fig. 5 Resisting force characteristics of the isolation table

Y テーブルは X 方向に動摩擦力 $f_0=11$ N (動摩擦係数 $\mu=0.011$) と $c_0=60$ Ns/m 程度のダンピングを有し, Y 方向に $f_0=19$ N ($\mu=0.013$) と $c_0=66$ Ns/m 程度のダンピングを有することがわかる. また, 図 5(b) は近似的に図 5(a) をこう配 k_0 だけ傾けた図であると考え, 免震テーブルの X, Y 方向のばね定数 k_0 はほぼ $4k_u$ に等しいことがわかる.

4. 地震応答解析

4.1 解析モデルと運動方程式 免震テーブル上に背が高く重心が高い機器または塔状構造物を載せた場合を想定して, 図 6 に示すような解析モデルを考える(図 6 は X 方向の解析モデルを表す). 図 6 において, 塔状構造物は基礎部をテーブル板に固定された三つの集中質量を有する片持ばりで表されている. ここで, m_0 はテーブル板の質量を含む塔状構造物基礎部の質量, $m_1 \sim m_3$ は塔状構造物の 1~3 層の質量, f_0, c_0 は X-Y テーブルの X 方向動摩擦力および粘性減衰係数, k_0 はラズ巻ばねのばね定数を表し, u_0 は地面に対するテーブル板の相対変位, $u_1 \sim u_3$ はテーブル板に対する 1~3 層の相対変位を表す.

この解析モデルの基礎部に X 方向の入力加速度 $\ddot{z}_H$ が作用したときの運動方程式は, X-Y テーブルの摩擦による停滯運動を考慮すると, 以下の二つの場合に分けられる.

(1) 停滯時

$$\begin{aligned} \ddot{u}_0=0, \dot{u}_0=0, u_0=\text{constant} \\ \{\ddot{u}\} = -[m]^{-1}[\alpha]^{-1}\{u\} - \{\ddot{z}_H\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(2) 運動時

$$\begin{aligned} \ddot{u}_0 = -[m_1\ddot{u}_1 + m_2\ddot{u}_2 + m_3\ddot{u}_3 + c_0\dot{u}_0 + k_0u_0 \\ + f_0 \text{sign}(\dot{u}_0)] / (m_0 + m_1 + m_2 + m_3) - \ddot{z}_H \\ \{\ddot{u}\} = -[m]^{-1}[\alpha]^{-1}\{u\} - \{\ddot{u}_0\} - \{\ddot{z}_H\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 6 Analytical model

ただし

$$\begin{aligned} \{u\} &= \{u_1, u_2, u_3\}^T, \{u_0\} = \{u_0, u_0, u_0\}^T \\ \{\ddot{z}_H\} &= \{\ddot{z}_H, \ddot{z}_H, \ddot{z}_H\}^T \\ [m] &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, [\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

停滯時から運動時への切換え条件は

$$\begin{aligned} |(m_0 + m_1 + m_2 + m_3)\ddot{z}_H + m_1\ddot{u}_1 + m_2\ddot{u}_2 \\ + m_3\ddot{u}_3 + k_0u_0| \geq f_0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

運動時から停滯時への切換え条件は

$$\begin{aligned} |(m_0 + m_1 + m_2 + m_3)(\ddot{u}_0 + \ddot{z}_H) + m_1\ddot{u}_1 + m_2\ddot{u}_2 \\ + m_3\ddot{u}_3 + k_0u_0| \leq f_0 \quad \text{かつ} \quad \dot{u}_0 = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

テーブル板が受ける転倒モーメントは

$$\begin{aligned} M_x = L\{3m_3(\ddot{u}_3 + \ddot{u}_0 + \ddot{z}_H) + 2m_2(\ddot{u}_2 + \ddot{u}_0 + \ddot{z}_H) \\ + m_1(\ddot{u}_1 + \ddot{u}_0 + \ddot{z}_H)\} / 3 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, α_{ij} は影響係数であり, $\text{sign}(\dot{u}_0)$ は $\dot{u}_0$ の負, 零, 正に応じて $-1, 0, 1$ の値を取る符号関数である.

Y 方向に地震入力作用した場合も, 同様な運動方程式が得られる. また, テーブル板上の機器が 1 個の集中質量とみなせる場合は, u_0 に関する運動方程式のみを用い, $u_1 = u_2 = u_3 = 0$ とおけばよい. これらの運動方程式を連続系シミュレーション言語(FUJITSU SLC S5)を用いてプログラムし, 四次の固定間隔ルンゲ・クッタの倍精度積分法を用いて数値計算を行った.

4.2 応答スペクトル

免震テーブルに搭載する機器の質量の大小によって免震効果がどのように変化するかを調べるために, テーブル板と機器の合計質量が 20~810 kg の場合(免震テーブルの固有周期が 0.78~5 s の場合)について, 固有周期と最大加速度の関係を求めた(これは免震テーブルの応答スペクトルを計算したことに相当する).

計算は, 最大加速度を 4 m/s^2 に基準化した Imperial Valley 地震(1940)EI Centro NS 成分および日本海中部地震(1983)秋田港 NS 成分が免震テーブルの X 方向に作用する場合について行った. その際, 免震テーブルの動摩擦係数 μ の値は, 試作した免震テーブルの値($\mu=0.011$)およびその 1/2, 2 倍の値とした.

計算結果を図 7, 8 に示す. 図 7, 8 から, 免震テーブルに搭載する機器の質量が変化しても応答加速度比(最大応答加速度/最大入力加速度)は 0.1~0.5 程度になっており, 本免震テーブルは搭載質量の広い範囲で免震効果をもつことがわかる.

Table 1 Maxima of the responses (EI Centro NS)

Input direction	$(\ddot{z}_H)_m$ (m/s ²)	1.0		2.0		3.0		4.0	
		Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
X	$(\ddot{x}_0)_m$ (m/s ²)	0.18	0.20	0.22	0.23	0.31	0.28	0.36	0.40
	$(u_0)_m$ (mm)	19.6	15.5	20.7	18.5	31.7	32.0	42.9	36.9
Y	$(\ddot{y}_0)_m$ (m/s ²)	0.18	0.20	0.22	0.24	0.22	0.26	0.38	0.38
	$(v_0)_m$ (mm)	12.1	13.4	13.8	16.5	30.3	26.5	42.1	38.4

Table 2 Maxima of the responses (Akita NS)

Input direction	$(\ddot{z}_H)_m$ (m/s ²)	1.0		1.5		2.0		2.5	
		Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
X	$(\ddot{x}_0)_m$ (m/s ²)	0.40	0.40	0.49	0.48	1.01	0.88	1.10	0.98
	$(u_0)_m$ (mm)	52.1	46.2	60.5	62.1	81.0	76.5	92.8	86.6
Y	$(\ddot{y}_0)_m$ (m/s ²)	0.44	0.39	0.40	0.42	1.01	0.82	1.20	1.03
	$(v_0)_m$ (mm)	48.0	44.6	55.9	50.4	80.6	77.5	91.4	85.8

Fig. 7 Response spectrum (EI Centro NS)

Fig. 8 Response spectrum (Akita NS)

5. 実地震波加振実験

5・1 集中質量を搭載した場合 試作した免震テーブルを電気油圧式振動台に取付け、テーブル板上に $m_0=100$ kg になるような重りを載せ、免震テーブルの X 方向および Y 方向に実地震波を入力して、テーブル板の絶対加速度 $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0$ と相対変位 u_0, v_0 を測定した。絶対加速度と相対変位の測定には、サーボ加速度計とインダクタンス形変位計を用いた。実験装置を図9に示す。

振動台に最大加速度 1, 2, 3, 4 m/s² に基準化した EI Centro(1940) NS 成分を入力したとき、および 1, 1.5, 2, 2.5 m/s² に基準化した秋田港(1983) NS 成分を入力したときの応答の最大値を計算値と比較して表1および表2に示す。また、4 m/s² に基準化した EI Centro NS 成分および 2.5 m/s² に基準化した秋田港 NS 成分入力時の応答波形を図10(a), (b)に示す。表1, 2および図10から、以下のことがわかる。

(1) 本免震テーブルは X 方向と Y 方向で同じ

①Table board ②Weight ③Accelerometer
④Displacement transducer ⑤Shaking table

Fig. 9 Experimental apparatus

ような免震効果を示し、テーブル板上の重りの最大加速度は EI Centro NS 成分入力時で入力加速度の 1/5~1/10 程度に低減し、秋田港 NS 成分入力時で 1/2~1/4 程度に低減する。

(2) 計算結果は実験結果と似た傾向を示す。ただし、相対変位の時刻歴波形の正負が実験値と計算値で逆になっているが、これはインダクタンス形変位計の取付方向を逆にして取付けたためと思われる。

5.2 塔状構造物モデルを搭載した場合 次に、免震テーブル上に背が高く重心が高い機器または塔状構造物を搭載した場合を想定して、片持ばり状三層モデルを取付け、 X 方向および Y 方向に実地震波を入力して最上層の絶対加速度 $\ddot{x}_3, \ddot{y}_3$ と基礎部(テーブル板)の相対変位 u_0, v_0 および基礎部に作用する転倒モーメント M_x, M_y の値を測定した。転倒モーメントは、はりの根元にひずみゲージを貼付けて測定した。三層モデルは、長さ $L=2$ m、直径 $d=30$ mm の軟鋼棒およびその両端と中間 2 箇所に取り付けられた外径 300 mm、厚さ 30 mm の軟鋼製円板から成っている。実験装置を図 11 に示し、その振動諸元を表 3 に示す。なお、50, 100, 150 kg の重りを用いて測定した X - Y テーブルの動摩擦係数の値はほぼ同じであったので、転倒モーメントに基づく動摩擦係数の変化はないものとした。

振動台に最大加速度 1, 2, 3, 4 m/s^2 に基準化した El

Centro NS 成分を入力したとき、および 1, 1.5, 2, 2.5 m/s^2 に基準化した秋田港 NS 成分を入力したときの応答の最大値を計算値と比較して、表 4 および表 5 に示す。また、2.5 m/s^2 に基準化した秋田港 NS 成分を X 方向に入力したときの応答波形を図 12 に示す。表 4, 5 および図 12 から以下のことがわかる。

(1) 本免震テーブルは、 X 方向と Y 方向で同じような免震効果を発揮し、塔状構造物モデル最上層の最大加速度は、非免震時に比べて El Centro NS 成分入力時で $1/3 \sim 1/14$ 程度に低減し、秋田港 NS 成分入力時で $1/5 \sim 1/11$ 程度に低減する。

(2) 塔状構造物モデル基礎部に作用する転倒モーメントは、4 m/s^2 に基準化した El Centro NS 成分入力時で $1/12 \sim 1/14$ 程度に低減し、2.5 m/s^2 に基準化した秋田港 NS 成分入力時で $1/6$ 程度に低減する。この低減された転倒モーメントは、 X - Y テーブルの許容転倒モーメントの $1/11 \sim 1/17$ 以下であり、本塔

(a) El Centro NS

(b) Akita NS

Fig. 10 Response waves

Table 3 Experimental condition

Tower-like structure model	Mass	m_0	135 kg
		$m_1 \sim m_3$	10 kg
	Length	L	2 m
	Flexural rigidity	EI	$8.18 \times 10^3 \text{ Nm}^2$
Isolation table	Stiffness	k_0	1568 N/m
	Frictional coef.	$(\mu)_x$	0.011
		$(\mu)_y$	0.013
	Damping coef.	$(c_0)_x$	60 Ns/m
		$(c_0)_y$	66 Ns/m
	Allowable overturn moment	M_x	1840 Nm
		M_y	1840 Nm

Fig. 11 Experimental apparatus

Table 4 Maxima of the responses (EI Centro NS)

	Direction	$(\ddot{x}_H)_m$ (m/s ²)	1.0		2.0		3.0		4.0	
			Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
Without isolation	X,Y	$(\ddot{x}_3)_m$ (m/s ²)	3.26	3.23	6.97	7.14	11.71	10.99	20.01	19.90
		$(M_x)_m$ (N·m)	---	---	---	---	---	---	1225	1253
With isolation	X	$(\ddot{x}_3)_m$ (m/s ²)	1.19	1.11	1.19	1.25	1.48	1.44	1.78	2.06
		$(u_0)_m$ (mm)	10.8	12.6	18.4	22.3	27.1	26.4	41.5	47.4
		$(M_x)_m$ (N·m)	---	---	---	---	---	---	104	110
	Y	$(\ddot{y}_3)_m$ (m/s ²)	0.89	0.99	1.04	1.15	1.33	1.25	1.36	1.39
		$(v_0)_m$ (mm)	7.7	8.9	17.9	20.5	25.8	26.9	43.8	47.0
		$(M_y)_m$ (N·m)	---	---	---	---	---	---	88	106

Table 5 Maxima of the responses (Akita NS)

	Direction	$(\ddot{x}_H)_m$ (m/s ²)	1.0		1.5		2.0		2.5	
			Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
Without isolation	X,Y	$(\ddot{x}_3)_m$ (m/s ²)	5.33	5.54	8.30	8.98	12.30	11.78	15.70	15.28
		$(M_x)_m$ (N·m)	---	---	---	---	---	---	990	989
With isolation	X	$(\ddot{x}_3)_m$ (m/s ²)	0.89	0.77	1.04	0.95	1.19	1.18	3.11	3.06
		$(u_0)_m$ (mm)	39.5	39.3	60.5	58.3	65.3	67.5	92.8	94.8
		$(M_x)_m$ (N·m)	---	---	---	---	---	---	167	156
	Y	$(\ddot{y}_3)_m$ (m/s ²)	0.89	0.72	0.89	0.88	1.10	1.16	2.96	2.60
		$(v_0)_m$ (mm)	40.5	38.6	50.2	45.5	65.8	69.8	92.2	85.0
		$(M_y)_m$ (N·m)	---	---	---	---	---	---	167	149

(a) Without isolation

(b) With isolation

Fig. 12 Response waves (Akita NS)

状構造物モデルの全質量を最上層に集中したとしても十分使用に耐えることができる。

(3) 計算結果は実験結果と似た傾向を示す。

6. ま と め

X-Y テーブルとうず巻ばねから成る機器・装置用免震テーブルを試作し、テーブル板に重りおよび三層塔状構造物モデルを搭載したときの免震効果を実地震波加振実験と地震応答解析によって調べた。主な結果は以下のとおりである。

(1) 本免震テーブルの減衰作用は、X-Y テーブルの摩擦力と粘性減衰によって与えられ、ばね作用はうず巻ばねの線形ばね作用によって与えられる。

(2) 本免震テーブルは、搭載する重り(機器)質量の広い範囲にわたって、入力加速度を1/2以下に低減させる免震効果をもつ。

(3) 実地震波加振実験を行った範囲内(最大加速度1~4 m/s²)では、三層塔状構造物モデルを本免震テーブル上に設置すると、床に直接設置した場合に比べて、最上層の加速度は1/3~1/14程度に低減する。

このとき三層構造物モデルの基礎部に作用する転倒モーメントは、 $1/6 \sim 1/14$ 程度に低減する。

(4) 本免震テーブルは高い許容転倒モーメントを有する。したがって、背が高く重心の高い機器・塔状構造物の免震にも適用できる。

(5) 地震応答解析結果は実験結果と似たような傾向を示し、解析の正しさが確認された。

本研究に際してご厚意をいただいた THK 株式会社並びに実験に協力していただいた吉添孝直君に謝意を表する。また、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 B)で行われたこと、および振動実験は明治大学理工学部振動実験解析棟で行われたことを付記する。

文 献

- (1) 藤田隆史・服部忍, 予引張りばねを利用した免震床の研究(第3報), 機論, 49-441, C (1983), 745-754.
- (2) 柏崎昭宏・田中元章・徳田直明・榎本孝雄, 空気ばねと積層ゴムを組合せた免震・除振床システムの開発, 機論, 55-512, C (1989), 847-852.
- (3) 藤田隆史・ほか5名, 多段積層ゴムを用いた三次元免震・除振床の研究(第2報), 機論, 56-521, C (1990), 43-48.
- (4) 藤田隆史・ほか4名, 鉛直免震のための振動方向変換機構を用いた三次元免震床の開発, 機論, 56-526, C (1990), 1377-1380.
- (5) Yaghoubian, J., Isolation Building Contents from Earthquake Induced Floor Motion, *Earthquake Spectra*, 7-1 (1991), 127-143.
- (6) 藤田聡・ほか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(第1報), 機論, 59-557, C (1993), 11-16.
- (7) 古谷慎二郎・大亦絢一郎・下坂陽男, 円弧はりと磁気減衰を用いた除振テーブルの開発, 機論, 58-545, C (1992), 56-61.
- (8) 渡辺晃太郎・下坂陽男・大亦絢一郎, 円弧はりと磁気減衰を用いた免震テーブルの研究, 機論, 62-599, C (1996), 2571-2576.
- (9) 大亦絢一郎・永井教雄・下坂陽男・下田博一, X-Y テーブルとワイヤーロープ防振器を用いた免震テーブルの研究, 機論, 65-639, C (1999), 4293-4298.