円弧はりと磁気減衰を用いた免震テーブルの研究*

渡邊 晃太郎^{*1}, 下 坂 陽 男^{*2}, 大亦 絢一郎^{*2}

Isolation Table Using Circular Arc Beams and Magnetic Damping

Kotaro WATANABE, Haruo SHIMOSAKA and Kenichiro OHMATA

In this paper, a two-dimensional isolation table using circular arc beams and a magnetic damper is proposed, which has a simple construction, large loading capacity and the capability of vibration isolation in the horizontal direction. The isolation table is composed of a table board, four spring units using circular arc beams, four struts having a free ball on the top, a copper disk, rare earth magnets and a baseboard. It has approximately the same stiffness and damping coefficient in every direction in the horizontal plane. A trial isolation table was made and its frequency responses were measured using an electrohydraulic type shaking table. The experimental results were compared with the calculated results.

Key Words: Isolation Table, Magnetic Damping, Circular Arc Beam, Frequency Response, Seismic Response

1. 結 言

著者らは既報において、円弧はりとオイルダンパまたは空気ダンパを用いた三次元除振テーブル⁽¹⁾⁽²⁾、および円弧はりと磁気ダンパを用いた水平除振・免震テーブル⁽³⁾⁽⁴⁾を開発し、その静的特性および除振・免震効果を理論解析、デジタルシミュレーション並びに実験によって確かめた。この除振・免震テーブルは構造が簡単で、水平面内のどの方向にもほぼ等しいばね定数と粘性減衰係数をもつという長所をもっている反面、搭載重量をあまり大きくできない(100 kg程度が限度)という欠点をもっている。

本研究では、さらに大きな搭載重量を可能にするために、テーブル板の四隅を円弧はりを用いたばねユニットおよび上部にフリーベア付きの支柱で支持し、テーブル板の中央に磁気ダンパを取付けたタイプの水平除振・免震テーブルを試作し、その除振・免震効果を正弦波加振実験、実地震波加振実験およびデジタルシミュレーションによって確かめる。

①Table board ②Plate ③Circular arc beam
④Free bear ⑤Strut ⑥Rare-earth magnet
⑦Copper disk ⑧Case ⑨Base board

Fig. 1 Conceptual sketch of the isolation table

* 原稿受付 1995年11月27日。

^{*1} 学生員, 明治大学大学院 (〒214 川崎市多摩区東三田1-1)。

^{*2} 正員, 明治大学理工学部。

2. 免震テーブルの構造

本研究で開発した除振・免震テーブル(本研究ではおもに免震テーブルとしての性能を検討するので、以後単に免震テーブルと呼ぶ)の概念図を図1に示す。テーブル板①の四隅はばねユニットおよびフリーベア④を介して支柱⑤で支えられており、各ばねユニットは上下の正方形取付板②および取付板の対角線方向に配置され、両端を取付板に固定された4本の半円弧はり③から成っている。テーブル板の中央には銅円板⑦がつり下げ棒を介して取付けられていて、その銅円板を挟むように円形希土類磁石⑥が容器⑧の内側に取付けられている。

テーブル板が水平面内の任意の方向に振動すると銅円板に渦電流が生じ、銅円板は速度に比例した抵抗力を受けることになる。また、ばねユニットは水平面内のどの方向にもほぼ等しいばね特性をもっているので、本免震テーブルの水平方向のばね定数および粘性減衰係数は角度に関係なくほぼ一定になる。

3. 免震テーブルのばね定数と粘性減衰係数

3・1 ばね定数 図2に示すように、正方形取付板の四隅を半円弧はりで支持したばねユニットを考える。半円弧はりは取付板の対角線方向に配置され、両端を取付板に固定されている。このばねユニットの対角線方向($\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)のばね定数および取

A-A section

Fig. 2 Spring unit

付板の辺に平行な方向($\theta=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$)のばね定数は、既報⁽¹⁾の円弧はりをを用いた除振テーブルのばね定数の式において、直線部の長さを $L=0$ 、円弧はりの中心角を $\beta=\pi$ とした場合に等しく、次式で与えられる。

$$k_H = \frac{P}{\sqrt{2} \xi (3\pi R F_{y_1} - 4 R F_{z_1} - 2\pi M_{x_1})} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{R^2}{2EI} \\ F_{y_1} &= \frac{B_5}{2\sqrt{2}} P \\ F_{z_1} &= \frac{P}{2\sqrt{2}} \\ &\times \frac{B_1 B_5 B_7 + B_3 B_4 - B_3 B_5 (3\pi + B_4)}{B_3 B_6 - B_2 B_7} \\ M_{x_1} &= \frac{RP}{2\sqrt{2}} \\ &\times \frac{B_1 B_5 B_6 + B_2 B_4 - B_2 B_5 (3\pi + B_4)}{B_2 B_7 - B_3 B_6} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= -2(4R + \sqrt{2}\pi a), B_2 = 2(\pi R + 2\sqrt{2}a) \\ B_3 &= 2(4R + \sqrt{2}\pi a), B_4 = (1+3\epsilon)\pi - \frac{16\epsilon^2}{(1+\epsilon)\pi} \\ B_5 &= \frac{2\epsilon\{\pi^2(1+\epsilon) - 8\epsilon\}}{\pi(1+\epsilon)(B_4 - \pi\epsilon)}, B_6 = \frac{\pi}{\sqrt{2}R}(1+\epsilon)a - 4 \\ B_7 &= \pi(3+\epsilon), \epsilon = \frac{EI}{GI_p} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

上式で EI および GI_p は、それぞれ半円弧はりの曲げ剛性とねじり剛性を表す。本免震テーブルはばねユニ

Fig. 3 Magnetic fluxes and a conductor

ットを4個使用しているため、テーブル板の対角線方向およびテーブル板の辺に平行な方向のばね定数は次式ようになる。

$$k=4k_H \quad \dots\dots\dots (4)$$

3・2 粘性減衰係数 図3(a)は偏心のある一様円形磁束と導体円板から成る磁気ダンパを示したものである。ここで、

r ：磁束半径

e ：偏心量

b ：円板半径

v ：導体円板の相対速度

である。長屋らはこの磁気ダンパの粘性減衰係数 c を解析的に求め、次のような簡単な形で表した⁽⁵⁾。

$$c=(B^2 h \pi r^2 / \rho) c_0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

B ：磁束密度

h ：円板の厚さ

ρ ：円板の抵抗率

c_0 ：無次元減衰係数

を表す。 c_0 は e/b と r/b の値によって異なり、文献(5)の表3に与えられている。磁束が複数個ある場合は、磁束を図3(b)に示すように交互に反転して配置すると大きな磁気減衰が得られることが著者らの実験⁽⁶⁾と長屋らの理論解析⁽⁷⁾によって示されている。この場合の減衰係数は、式(5)を用いて計算した個々の磁束による c の値を加えた値にほぼ一致する。

4. 免震テーブルの地震応答解析

4・1 解析モデルと運動方程式 地震応答解析に用いた建物は、現行の設計手法により部材設計された七層鉄筋コンクリート造りの事務所ビル⁽⁸⁾であり、その振動解析モデルを図4(a)、(b)に、解析モデルの X 方向の諸元を表1に示す。この解析モデルの X 方向の一次～三次の固有振動数は、それぞれ1.82 Hz、4.81 Hz、7.84 Hzであり、建物各層の内部減衰は一

Table 1 Numerical condition of the building

Story	Mass ($\times 10^3$ kg)	Stiffness ($\times 10^3$ kN/m)
7	568	761
6	400	873
5	424	1323
4	433	1323
3	433	1364
2	461	1593
1	461	1587

次の固有振動数に対して3%の粘性形とした。

図4(b)の建物基礎部に地震入力加速度 $\ddot{z}$ が作用したときの運動方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_1 \\ + k_2 (x_1 - x_2) = -m_1 \ddot{z} \\ m_j \ddot{x}_j + c_j (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) + c_{j+1} (\dot{x}_j - \dot{x}_{j+1}) \\ + k_j (x_j - x_{j-1}) + k_{j+1} (x_j - x_{j+1}) \\ = -m_j \ddot{z} \quad (j=2 \sim 6) \\ m_7 \ddot{x}_7 + c_7 (\dot{x}_7 - \dot{x}_6) + k_7 (x_7 - x_6) = -m_7 \ddot{z} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 m_j 、 c_j 、 k_j はそれぞれ j 番めの層の質量、粘性減衰係数、ばね定数を表し、 x_j は m_j と地面の間の相対変位を表し、 $x_j = y_j - z$ (y_j ： m_j の絶対変位)である。免震テーブルは建物モデルの j 層床上(質量 m_j 上)に設置されていると考え、 j 層床上の地震応答波形 $\ddot{y}_j$ を入力して免震テーブルの応答を調べることにした。免震テーブルの解析モデルを図4(c)に示す。

図4(c)において、 m はテーブル板と機器の質量、 k は四つのばねユニットのばね定数の和、 c は磁気減衰係数、 F_0 はフリーベアとテーブル板の間のクーロン摩擦力の合計を表し、 y はテーブル板の絶対変位、 $u (=y - y_j)$ は m と j 層床の間の相対変位を表す。

免震テーブルの運動方程式は摩擦力による停滞運動を考慮すると、次の二つの場合に分けられる。

(1) 停滞時(Phase I)

(a) A plan of the building

(b) Building

(c) Isolation table

Fig. 4 Analytical model

Table 2 Vibration condition of the table

Mass m	100 kg
Stiffness k	1.034 kN/m
Damping coefficient c	120 N · s/m
Friction force F_0	49 N
Natural frequency	0.5 Hz

Table 3 Maxima of the responses

Max input accel. $ z _{\text{Max}} \text{ (m/s}^2\text{)}$		El Centro (1940) NS			Akita (1983) NS		
		0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
Max accel. at 5th floor	$ y_5 _{\text{Max}} \text{ (m/s}^2\text{)}$	1.08	2.16	4.33	1.49	2.98	5.97
Isolation table $c=120$ (Ns/m)	$ y _{\text{Max}} \text{ (m/s}^2\text{)}$	0.64	0.80	1.18	0.75	1.00	2.07
	$ u _{\text{Max}} \text{ (mm)}$	11.4	26.8	45.0	19.4	39.4	83.5

$$u = \text{const.}, \dot{u} = 0, \ddot{u} = 0 \quad \cdots \cdots (7)$$

(2) 運動時(Phase II)

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku + F_0 \text{sign}(\dot{u}) = -m\ddot{y}_j \quad \cdots \cdots (8)$$

Phase I から II への切換条件は

$$|m\ddot{y}_j + ku| > F_0 \quad \cdots \cdots (9)$$

Phase II から I への切換条件は

$$\dot{u} = 0, |m\ddot{u} + c\dot{u} + ku| \leq F_0 \quad \cdots \cdots (10)$$

ここで, $\text{sign}(\dot{u})$ は $\dot{u}$ の負, 零, 正に応じて $-1, 0, 1$ の値をとる符号関数を表す。

4.2 免震テーブルの地震応答計算例 式(6)

～(10)を連続系シミュレーション言語(FUJITSU SLCS 5)を用いてプログラムし, 建物基礎部に Imperial Valley 地震(1940)El Centro NS 成分および日本海中部地震(1983)秋田港 NS 成分を最大 0.5, 1, 2 m/s² に基準化して入力したときの五層床上の応答加速度 $\ddot{y}_5$ および五層床上に置かれた免震テーブルの応答を計算した。計算は 4 次の固定間隔ルンゲ・クッタ法の倍精度積分を用いて行った。地震応答計算に用いた免震テーブルの諸元は試作した免震テーブルの諸元に等しく, その値を表 2 に示す。

表 3 は, El Centro NS 成分および Akita NS 成分を最大 0.5, 1, 2 m/s² に基準化して入力したときの五層床上の加速度 $\ddot{y}_5$, テーブル板の加速度 $\ddot{y}$ およびテーブル板の相対変位 u の最大値を示したものである。

(a) El Centro (1940) NS

(b) Akita (1983) NS

Fig. 5 Response waves

Fig. 6 Experimental isolation table

表 3 から, テーブル板の最大加速度は五層床上の加速度の最大値の 1/2～1/3 程度に低減しており, 免震効果が認められること, およびこのときのテーブル板の相対変位の最大値は最大 2 m/s² 入力時で 40～90 mm 程度となることがわかる。

最大 2 m/s² に基準化した El Centro NS 成分および Akita NS 成分入力時の五層床上の加速度波形およびテーブル板の応答波形を図 5 に示す。

5. 実験

5.1 免震テーブル 試作した免震テーブルの外観を図 6 に示し, その諸元を表 4 に示す。半円弧はり, $\phi 3$ mm のばね鋼を用いて製作し, 磁石には直径 20 mm のサマリウム・コバルト系磁石を 16 対使用し

Table 4 Experimental condition of the table

Table board	Material Length of a side a	A2017 1000mm
Circular arc beam	Material Diameter d Radius R	SUP6 3mm 150mm
Rare-earth magnet	Material Diameter 2r Thickness Gap Number of pairs	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 20mm 5mm 10mm 16
Copper disk	Material Diameter 2b Thickness h Resistivity ρ	C1220BE 220mm 4mm $1.68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$

Fig. 7 Load displacement curve of a spring unit

た。

一つのばねユニットについて、水平面内の $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 方向に対して測定した荷重と変位の関係を図7に示す。図7から、本ばねユニットは水平面内のどの方向にもほぼ等しいばね定数をもつこと、および実験値はほぼ理論値に一致することがわかる。また、ガウスメータを用いて測定した1対の磁石のギャップと磁束密度の関係を図8に示す。

振動実験に際しては、テーブル板上に56 kgの質量(機器に相当する)を取付けて測定した。その場合の免震テーブルの振動諸元は表2に一致する。

5・2 正弦波加振実験 試作した免震テーブルを電気油圧式サーボ振動台に載せ、テーブル板上に56 kg(テーブル板との合計質量が100 kg)の集中質量とサーボ加速度計を取付け、振動台を水平方向に振幅30

Fig. 8 Magnetic flux density of a magnet

Fig. 9 Resonance curves

mmで正弦波加振して共振曲線を測定した。

加振方向が $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の場合の実験結果をまとめて図9に示す。図9から、三つの加振方向の共振曲線はほぼ一致すること、免震テーブルの固有振動数は約0.5 Hzであること、実験値は理論値にほぼ一致すること、および本免震テーブルは機械振動用除振テーブルとしても優れた性能をもっていることがわかる。

5・3 実地震波加振実験 次に、振動台にEl Centro(1940)NS成分およびAkita(1983)NS成分を最大 2 m/s^2 に基準化して直接入力し、テーブル板の絶対加速度と相対変位を測定した。絶対加速度はサーボ加速度で測定し、相対変位はインダクタンس形変位計で測定した。実験結果の最大値を計算値と比較して表5に示し、Akita NS成分入力時の応答波形を図10に示す。表5および図10から、テーブル板上の加速度は入力加速度の1/2程度に低減しており免震効果が認められること、このときのテーブル板の相対変位は45~50 mm程度であることがわかる。

Table 5 Maxima of the responses

	El Centro(1940)NS (Max = 2m/s ²)		Akita(1983)NS (Max = 2m/s ²)	
	$ \ddot{y} _{\text{Max}}$ (m/s ²)	$ u _{\text{Max}}$ (mm)	$ \ddot{y} _{\text{Max}}$ (m/s ²)	$ u _{\text{Max}}$ (mm)
Experiment	0.81	16	1.04	46
Simulation	0.69	17	1.08	51

Fig. 10 Response waves of the table (Akita NS)

6. ま と め

本研究では、構造が簡単で 100 kg 以上の重量物を搭載でき、水平面内のどの方向にも等しいばね定数と粘性減衰係数をもつ免震テーブルを得ることを目的として、円弧はり、磁気ダンパおよびフリーベアを用いた免震テーブルを開発した。デジタルシミュレーションの結果、七層建物の五層床上に本免震テーブルを

設置した場合、テーブル板の加速度は入力加速度の 1/2~1/3 に低減することがわかった。また、試作した免震テーブルを用いて実地震波加振実験を行った結果、本免震テーブルを用いることによって入力加速度を約 1/2 に低減できることがわかった。また、正弦波加振実験の結果から、本免震テーブルは水平面内のどの方向にもほぼ等しい除振効果をもつことがわかった。

本免震テーブルは磁気減衰を用いており、すべて機械部品で構成されているので、高温環境中においても使用することが可能である。

終わりに、振動実験に協力された当時の本学 4 年生の山口岳彦君および米山雄一君に謝意を表する。また、本研究は文部省科学研究費補助金および明治大学科学技術研究所総合研究費で行われたこと、および振動実験は明治大学振動実験解析棟で行われたことを付記する。

文 献

- (1) 大亦絢一郎・山本英嗣, 円弧はりを用いた除振テーブルの研究, 精密工学会誌, **56** 12(1990), 2249-2254.
- (2) Ohmata, K., Shimosaka, H. and Furuya, S., Study on a Three Dimensional Isolation Table Using Circular Arc Beams and Air Dampers, *Proc. ASIA PACIFIC VIBRATION CONFERENCE '93*, Vol. 3(1993), 1307-1312.
- (3) 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), 56-51.
- (4) 大亦絢一郎・古谷慎二郎・下坂陽男, 円弧はりと磁気減衰を用いた除振テーブルの研究(ハイブリッド磁気減衰の場合), 機講論, No. 920-55(1992), 359-364.
- (5) 長屋幸助, 円形磁石と任意形状導体より構成される磁気ダンパの研究(第 2 報), 機論, **50** 453, C(1984), 812-818.
- (6) Ohmata, K. and Yamakawa, I., Ball Screw Type Damper Using Rare earth Magnets, *Proc. 10th Int. Works. on Rare Earth Magnets and Their Applications*, Pt. II (1989), 65-73.
- (7) 長屋幸助・関口肇, 反転磁極の組合せによる高減衰磁気ダンパの開発とその解析, 機論, **57** 544, C(1991), 3800-3805.
- (8) 大亦絢一郎・近藤成仁・安井賢二, 磁気減衰器付ボールねじ式防振器を用いた免震装置の研究, 機論, **57** 535, C(1991), 734-739.