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*

大亦 絢一郎^{*1}, 近 藤 成 仁^{*2}, 安 井 賢 二^{*3}

A Seismic Isolator Using the Ball Screw-Type Damper with Magnetic Damping

Kenichiro OHMATA, Naruhito KONDO and Kenji YASUI

In the previous paper, a new type of seismic base isolator consisting of rubber bearings and ball screw-type dampers with magnetic damping was proposed, and the earthquake responses of a 7-story building isolated by this isolator were calculated. As a result, it was shown that this isolator was effective for suppressing the relative displacement in the base of the building by the working of the ball screw-type damper. The adjusting conditions of the isolator, however, were obtained by trial and error in the previous paper. In this paper, the adjusting conditions are determined theoretically and the effect of vibration isolation of the isolator is confirmed experimentally. The earth-quake responses of the building isolated by the isolator with optimum conditions are also calculated and compared with those of the nonisolated building.

Key Words: Damper, Seismic Motion, Isolation, Multidegree-of-Freedom System, Simulation, Seismic Isolator, Magnetic Damping

1. ま え が き

中低層の鉄筋コンクリート造り建物の基礎部を免震装置で支持する免震構法の研究が近年急速に発展し、すでに実用化の段階に至っている⁽¹⁾⁽²⁾。免震装置は一般に積層ゴムと減衰機構から成り、減衰機構としては弾塑性ダンパ、オイルダンパ、水平粘性体ダンパ、摩擦ダンパ、および積層ゴムと一体化した鉛入り積層ゴムや高減衰ゴムなどが開発されている。建物をこのような免震構造とすることにより、地震時における応答加速度を従来の耐震構造の場合に比べて大幅に低減できることが、実際の免震建物での地震観測やデジタルシミュレーションによって明らかにされている。しかし、このときの免震点(建物基礎部)の相対変位および残留変位はかなり大きくなることがあり⁽³⁾、これらを常に一定範囲内に抑制することが必要となる。

著者らは既報⁽⁴⁾において、建物の応答加速度を従来の免震装置と同程度に低減でき、しかも免震点の相対変位および残留変位を一定範囲内に抑制できる免震装

置を得ることを目的として、積層ゴムと磁気減衰器付ボールねじ式防振器(以下、ボールねじ式防振器または単に防振器と呼ぶ)から成る免震装置を提案し、この免震装置で支持された免震建物の地震応答シミュレーションを行ってその効果を明らかにした。しかし、このときの防振器の調整値は試行錯誤により適当に定められたもので、防振器の取付方法や調整値に対する理論的な検討は行われていない。本報では、ボールねじ式防振器を免震装置の減衰機構に適用する際の効果的な取付方法および最適調整値について理論的に検討し、振動台によるモデル実験によって最適調整された防振器の有効性を確かめる。また、この免震装置で支持された七層建物の地震応答シミュレーションを行い、その振動抑制効果を非免震の場合と比較検討する。

2. 防振器の構造と建物モデル

2・1 防振器の構造⁽⁵⁾ 本研究で用いるボールねじ式防振器の構造およびアルミニウム円板(または銅円板)と磁束を図1(a), (b)に示す(本報では、図1のはずみ車を取り除いた場合についても検討を行う)。両端の取付孔間に相対直線運動を与えると、ねじ軸およびその先端に取付けたはずみ車とアルミニウム円板

* 平成2年6月13日 第2回電磁力関連のダイナミックスシンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成2年7月31日。

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

^{*2} 学生員、明治大学大学院。

^{*3} 日本ビクター(株)(〒221 横浜市神奈川区守屋町3-12)。

が回転し、アルミニウム円板には回転速度に比例した渦電流制動トルクが、またはずみ車には回転加速度に比例した慣性トルクが生じる。これらの抵抗トルクを相対変位 u を用いて直線方向の抵抗力の形で表すと次式ようになる。

$$F = \beta(C\dot{u} + J\ddot{u}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\beta = 4\pi^2/L^2$

ここで、 L はボールねじのリード、 J ははずみ車の慣性モーメントである。また、 C は磁気減衰によるねじりの粘性減衰定数を表し、近似的に次式で与えられる。

$$C = nB^2hA\mu s^2/\rho \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 n ：磁束の個数、 B ：磁束密度、 h ：円板の厚さ、 $A = bq$ ：磁束 1 個当たりの面積、 μ ：磁束および導体の形状によって定まる無次元表示の減衰定数、 s ：円板中心から磁束の中心までの距離、 ρ ：円板の抵

図 1 防振器の構造

図 2 解析建物の平面図

抗率である。磁束は、図 1 (b) に示すように、その方向が交互に逆になるように対称的に配置するのがよい⁽⁶⁾。

2.2 建物モデル 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の事務所ビルであり、その平面図を図 2⁽³⁾に示す。解析は x 方向について行い、この建物の基礎部に積層ゴムとボールねじ式防振器から成る免震装置を施した場合と非免震（耐震構造）の場合について行った。これらの免震、非免震構造をせん断形ばね-質点系に置き換えた振動解析モデルを図 3 に示す。図 3 において、(a) は非免震の場合 [Case A]、(b) は高振動数領域における応答を改善するためにばね k_s を介して防振器を建物基礎部に取付けた場合 [Case B]、(c) は防振器を建物基礎部に直接取付けた場合 [Case C, Case D] であり、Case D は防振器のはずみ車を取り除いた場合である。図 3 の振動系の防振器以外の諸元を表 1 に示す。

2.3 運動方程式と固有モード 図 3 (b) に示す Case B の免震構造が地震入力加速度 $\ddot{x}$ を受けたときの運動方程式は次式で与えられる⁽⁴⁾。

表 1 解析モデルの諸元

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
0	900	39

(a) Case A

(b) Case B

(c) Case C, Case D ($J=0$)

図 3 解析モデル

$$\left. \begin{aligned}
 \beta J \ddot{u} + \beta C \dot{u} + k_s(u - x_0) &= 0 \\
 m_0 \ddot{x}_0 + c_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_1(x_0 - x_1) \\
 &+ k_s(x_0 - u) + k_0 x_0 = -m_0 \ddot{z} \\
 m_i \ddot{x}_i + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + c_{i+1}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) \\
 &+ k_i(x_i - x_{i-1}) + k_{i+1}(x_i - x_{i+1}) = -m_i \ddot{z} \\
 &\quad (i=1, 2, \dots, 6) \\
 m_7 \ddot{x}_7 + c_7(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) + k_7(x_7 - x_6) &= -m_7 \ddot{z}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 m_0 は建物基礎部の質量、 k_0 は積層ゴムのばね定数、 $m_i, c_i, k_i (i=1 \sim 7)$ はそれぞれ i 番めの層の質量、内部粘性減衰定数、ばね定数を表し、 u は防振器の相対変位、 x_i は m_i と地面の間の相対変位を表す。

表1の数値を用いて図3に示した四つの解析モデルの三次までの固有周期と固有モードを求めると、表2および図4のようになる。ここで、ボールねじ式防振器の慣性モーメント J と支持ばねのばね定数 k_s は、次章に示す調整条件① ($k_s = k_0, J = M/8\beta, M = \sum_{i=0}^7 m_i$) を満足する場合を考えている。表2から、はずみ車の慣性モーメントは免震構造の固有周期を長期化する効果をもつことがわかる。また図4からわかるように、免震時の一次モードは刺激関数 $\beta_n u_n$ が各層ともほぼ1の直線形となり、二次および三次モードの刺激性はかなり小さい。したがって、次章で述べる防振器の調整値を求めるに当たっては、解析モデルの上部

構造を剛体とみなし、建物全体を1質点系に置き換えて近似的に解析することにする。

3. 防振器の調整値

免震装置の設計に際しては、建物上部の絶対加速度をできるだけ小さくし、かつ基礎部の相対変位をある範囲（一般に ± 25 cm 程度⁽²⁾）以下に抑えることが必要となる。そこで本章では、図3(b)の建物モデルを図5のような1質点系に置き換えて、防振器のはずみ車の慣性モーメント J と磁気減衰定数 C および支持ばねのばね定数 k_s の調整値を求めることにする。

3.1 変位加振を受ける場合

3.1.1 絶対加速度曲線に対する最適条件 最初に、図5の振動系が壁に正弦波状の変位入力 $z = a \times \cos \omega t$ を受けた場合を考える。主質量 M の絶対変位を y 、防振器の相対変位を u とすると運動方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 \ddot{y} + \nu_1^2(y - z) + k\nu_1^2(y - z - u) &= 0 \\
 \ddot{u} + 2\alpha\dot{u} - \nu_s^2(y - z - u) &= 0
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\nu_1 = \sqrt{\frac{k_0}{M}}, \nu_s = \sqrt{\frac{k_s}{\beta J}}, k = \frac{k_s}{k_0}, \alpha = \frac{C}{2J} \dots\dots\dots (5)$$

式(4)より定常状態における主質量 M の絶対加速度を求めると

表2 解析モデルの固有周期

Order	Period (sec)			
	Case A	Case B	Case C	Case D
1 st	0.548	2.944	2.190	2.077
2 nd	0.208	0.509	0.364	0.399
3 rd	0.127	0.336	0.186	0.178

図4 解析モデルの固有モード

図5 解析モデル

図6 絶対加速度曲線

$$\ddot{y} = H_1 \cos(\omega t - \phi_1) \dots\dots\dots (6)$$

の形で与えられ、この加速度振幅 H_1 を無次元形で表すと次式のようなになる。

$$G_1 = g^2 \sqrt{\frac{\{f^2 - (1+k)g^2\}^2 + 4(1+k)^2 h^2 g^2}{\{(1-g^2)(f^2 - g^2) - kg^2\}^2 + 4h^2 g^2 (1+k - g^2)^2}} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$G_1 = \frac{H_1}{a\nu_1^2}, f = \frac{\nu_s}{\nu_1}, h = \frac{a}{\nu_1}, g = \frac{\omega}{\nu_1} \dots\dots\dots (8)$$

$k=1.09, f=3.11$ で、 $h=0, 2.04, 3.29$ の三つの場合に対する主質量の絶対加速度曲線を描くと図6のようなになる。図6から、加速度曲線は、 h の値に関係なくすべてP, Q点を通ることがわかる。したがって、広い振動数範囲にわたり加速度曲線の高さをできるだけ低くするためには、動吸振器の定点理論⁽⁷⁾と同様に、P, Q点の高さが等しくなるように f の値を選び、P, Q両点のごく近くで加速度曲線が極大となるように h の値を選べばよい。 $h=0$ および $h=\infty$ のときの加速度振幅比は

$$h=0: G_1 = \frac{\{f^2 - (1+k)g^2\}^2}{(1-g^2)(f^2 - g^2) - kg^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$h=\infty: G_1 = \frac{(1+k)g^2}{1+k-g^2} \dots\dots\dots (10)$$

式(9), (10)を用いて定点理論により、P, Q両点の高さを等しくする f の値およびそのときのP, Q点の横座標と高さを求めると

$$\left. \begin{aligned} f &= (1+k) \sqrt{\frac{2}{2-k}} \\ \frac{g_P^2}{g_Q^2} &= \frac{1+k}{2-k} (2 \mp \sqrt{2k}) \\ |G_1|_{P,Q} &= (1+k) \sqrt{\frac{2}{k}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

また、 $dG_1/dg=0$ より、P, Q両点の高さが等しく、しかもPまたはQ点で加速度曲線が極大になるための h

の値を求めると

$$\frac{h_P^2}{h_Q^2} = \frac{k(k+1)}{4(2-k)^2} (6 \mp \sqrt{2k}) \dots\dots\dots (12)$$

これより、 h の最適値を次式のように定める。

$$h = \sqrt{\frac{h_P^2 + h_Q^2}{2}} = \frac{1}{2-k} \sqrt{\frac{3}{2} k(1+k)} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、式(11)で与えられる $|G_1|_{P,Q}$ が極小になる k の値を求めると

$$k=1 \dots\dots\dots (14)$$

式(14)を式(11), (13)に代入すると、防振器の最適調整値は次式のようなになる。

$$f=2\sqrt{2}, h=\sqrt{3} \dots\dots\dots (15)$$

3・1・2 相対変位曲線に対する最適条件 式(4)の運動方程式を壁に対する主質量の相対変位 x を用いて表すと

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} + \nu_1^2 x + k\nu_1^2 (x-u) &= -\ddot{z} \\ \ddot{u} + 2\alpha\ddot{u} - \nu_s^2 (x-u) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

式(16)の定常解を求め、相対変位振幅を無次元形で表すと次式のようなになる。

$$X_1 = g^2 \sqrt{\frac{(f^2 - g^2)^2 + 4h^2 g^2}{\{(1-g^2)(f^2 - g^2) - kg^2\}^2 + 4h^2 g^2 (1+k - g^2)^2}} \dots\dots\dots (17)$$

ただし、

$$X_1 = E_1/a \quad (E_1: \text{相対変位振幅}) \dots\dots\dots (18)$$

$k=1.09, f=2.09$ で、 $h=0, 0.85, 1.85$ の三つの場合に対する主質量の相対変位曲線を描くと図7のようなになる。図7から、相対変位曲線も h の値に関係なく必ず通る二つの定点P, Qをもつことがわかる。そこで前項と同様な手順によりこの場合の防振器の最適調整

表3 防振器の調整条件

	Optimum values for acceleration curves G_1, G_2	Optimum values for displacement curves X_1, X_2
Input displacement $Z = a \cos \omega t$	Condition ①: $k=1$ $f=2\sqrt{2}$ $h=\sqrt{3}$ $(G_1)_{P,Q}=2\sqrt{2}$	Condition ②: $f=1+k$ $h=\sqrt{\frac{3}{8}k(1+k)}$ $(X_1)_{P,Q}=\sqrt{\frac{2+k}{k}}$
Input acceleration $\ddot{Z} = \bar{a} \cos \omega t$	Condition ③: $f=(1+k)\sqrt{\frac{2}{2+k}}$ $h=\sqrt{\frac{3k(1+k)}{4(2+k)}}$ $(G_2)_{P,Q}=\sqrt{\frac{2+k}{k}}$	Condition ④: $f=\sqrt{1+k}$ $h=\sqrt{\frac{3k(1+k)}{4(2+k)}}$ $(X_2)_{P,Q}=\sqrt{\frac{2}{k(1+k)}}$

図7 相対変位曲線

表 4 基礎部相対変位および七層絶対加速度の最大値

Case	Adjusting condition			Akita (1983) NS		El Centro (1940) NS	
	C (N·s·m/rad)	J (kg·m ²)	Table 3	(x_0) _m (cm)	($\ddot{y}_7$) _m (m/s ²)	(x_0) _m (cm)	($\ddot{y}_7$) _m (m/s ²)
A	—	—	—	—	10.88	—	13.09
B	13.87	1.292	①	23.7	3.78	13.4	1.83
	13.87	2.583	②	24.4	3.95	12.6	1.94
	16.99	3.876	③	22.8	4.35	10.9	2.00
	22.65	5.168	④	22.5	4.62	9.9	2.00
C	13.87	1.292	①	26.4	3.01	13.8	1.85
	13.87	2.583	②	26.6	3.49	13.8	2.30
	16.99	3.876	③	22.0	3.74	11.9	3.13
	22.65	5.168	④	16.8	3.84	9.3	3.92
D	13.87	0	—	26.2	3.09	13.7	1.81
	16.99	0	—	24.6	3.05	12.4	1.78
	22.65	0	—	22.6	3.28	11.8	2.12

値を求めると、表3の調整条件②のようになる。

3.2 加速度加振を受ける場合 次に、図5の振動系が壁に正弦波状の加速度入力 $\ddot{z} = \bar{a} \cos \omega t$ を受けた場合を考える。式(4)および式(16)を用いてこの場合の定常状態における絶対加速度振幅 H_2 および相対変位振幅 E_2 を求め、

$$G_2 = H_2 / \bar{a}, X_2 = E_2 / (\bar{a} / \nu_1^2) \dots \dots \dots (19)$$

なる記号を用いて無次元形で表すと、次の2式のようになる。

$$G_2 =$$

$$\sqrt{\frac{\{f^2 - (1+k)g^2\}^2 + 4(1+k)h^2g^2}{\{(1-g^2)(f^2 - g^2) - kg^2\}^2 + 4h^2g^2(1+k-g^2)^2}} \dots \dots \dots (20)$$

$$X_2 =$$

$$\sqrt{\frac{(f^2 - g^2)^2 + 4h^2g^2}{\{(1-g^2)(f^2 - g^2) - kg^2\}^2 + 4h^2g^2(1+k-g^2)^2}} \dots \dots \dots (21)$$

式(20)、(21)を用いて定点論理により、 G_2 および X_2 曲線に対する防振器の最適調整値を求めると、それぞれ表3の調整条件③および④のようになる。

4. 地震応答解析

図3および表1に示した4種類の七層建物モデル [Case A~D] に日本海中部地震 (1983年) 秋田港 NS 成分および Imperial Valley 地震 (1940年) El Centro NS 成分を入力したときの地震応答シミュレーションを行い、免震装置の振動抑制効果を調べた。シミュレーションは運動方程式を連続系シミュレーション言語 (FACOM SLCS-4) 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を用いて行った。

図 8 七層の加速度波形

なお、建物上部構造の減衰は、非免震時、免震時とも、非免震時の一次固有振動数に対して5%の内部粘性形とした。また、支持ばねのばね定数は、 $k_s = k_0$ とし、防振器は表3の条件①~④に調整されている場合を考えた ($L=10$ mm と仮定した)。

各地震波を最大 4 m/s^2 に基準化して入力したときの建物基礎部の相対変位の最大値 (x_0)_m および最上層 (七層) の絶対加速度の最大値 ($\ddot{y}_7$)_m をまとめて表4に示す。また、El Centro 波入力時の七層加速度波形の一例を図8に示す。表4から以下のことがわかる。

(1) 建物を免震構造とすることにより、最大応答

表 5 実験装置の諸元

Primary system	Mass m_0	51 kg
	Stiffness k_0	2.12×10^4 N/m
Damper	Moment of inertia J	1.57×10^{-5} kg·m ² *1
	Damping coefficient c	3.23×10^{-5} kg·m ² *2
	Lead of ball screw L	10 mm
	Stiffness k_s	2.31×10^4 N/m

*1 Adjusting condition ①

*2 Adjusting condition ②

加速度を耐震構造の場合の $1/3 \sim 1/7$ 程度に低減でき、基礎部の相対変位を ± 25 cm 以下（最大 4 m/s^2 入力時）に抑えることができる。

(2) 防振器の磁気減衰が小さいときは、はずみ車を併用することにより、基礎部相対変位を許容値以下に抑えることができる。

(3) はずみ車を使用するときは防振器を Case B のように弾性支持し、調整条件①に調整することが望ましい。

(4) 防振器の減衰を大きくできるときは、はずみ車を取り除き、防振器を建物基礎部に直接取付けたほうがよい。

5. 実 験

3章で求めた Case B の場合の調整値の正しさを確かめるために、図 1 に示すような防振器を試作し、これを図 5 に示すような振動系に取付けて振動台により変位加振を行い、主質量の相対変位曲線および絶対加速度曲線を測定した。実験装置の諸元を表 5 に示し、実験結果を図 9、図 10 に示す。これらの図において、実線と黒丸印は防振器を条件①に調整した場合であり、点線と白丸は条件②に調整した場合である。

図 9、図 10 からわかるように、条件①は絶対加速度曲線に対して、また条件②は相対変位曲線に対してほぼ最適調整となっており、表 3 の調整条件の正しさが確認できた。また、実験値と理論値のわずかなずれは、主振動系の減衰の影響と思われる。

6. ま と め

磁気減衰とはずみ車より成る防振器を免震装置の減衰機構に用いる場合の防振器の取付方法と調整条件およびこの免震装置の免震効果を、理論解析とモデル実験およびデジタルシミュレーションによって検討した。主な結果は以下のとおりである。

(1) 防振器の磁気減衰が小さいときは、はずみ車

図 9 相対変位曲線

図 10 絶対加速度曲線

が免震点の相対変位を低減させるのに役立つ。この場合、ばねを介して防振器を建物基礎部に取付け、調整条件①に調整することが望ましい。

(2) 防振器の磁気減衰を大きくできるときは、はずみ車を取り除き、防振器を建物基礎部に直接取付けるほうがよい。

(3) 本免震装置を用いると、七層建物の最大応答加速度を耐震構造の場合の $1/3 \sim 1/7$ 程度に低減でき、免震点の相対変位を ± 25 cm 以下に抑えることができる（最大 4 m/s^2 入力時）。

(4) 実験値は理論値にかなりよく一致し、調整値の正しさが確認できた。

実験は振動実験解析棟で行われたことを付記する。

文 献

- (1) 藤田, 機論, 51-461, C(1985), 1.
- (2) 武田編, 構造物の免震・防振・制振, (1988), 25, 技報堂.
- (3) 荒川・ほか 4 名, 第 7 回日本地震工学会議論文集, (1986), 272.
- (4) Shimosaka, H., ほか 4 名, Proc. 9th WCEE, 7-10-12(1988), V-827.
- (5) 大亦・ほか 2 名, 機論, 51-471, C(1985), 3034.
- (6) Ohmata, K. and Yamakawa, I., Proc. 10th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, 2(1989), 65.
- (7) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibrations, (1956), 123, McGraw-Hill.