学術論文

2リンク・3関節をもつアーム型制振装置の研究

A study of an arm-type vibration control device consisting of two links and three joints

松岡 太一	(明治大院)	林 正人	(明治大院)
大亦絢一郎	(明治大)	阿部 直人	(明治大)
	Taichi MATSUOKA	Student Member	
	Masato HAYASHI		
	Kenichiro OHMATA	Member	
	Naoto ABE		

In this paper, a new type of arm-type vibration control device consisting of two links and three joints incorporating giant magnetostrictive actuators has been developed. The vibration control device is able to suppress six modes of vibrations of a machine, three in translational modes and three in rotational modes. The trial vibration control device was made and the resisting force characteristics in the three translational directions were discussed theoretically and experimentally. The seismic responses of a two-degree-of-freedom system consisting of a mass and four coil springs and supported by the vibration control device were measured using a two-dimensional electrohydraulic type shaking table. The experimental results are compared with the calculated ones, and the effects of vibration suppression of the vibration control device are discussed.

Key Words: Giant magnetostrictive actuator, vibration control device, arm-type, two links, three joints.

1 まえがき

近年,免震建物用2次元ダンパとして,粘性体や鋼 棒,滑り支承を用いたダンパが開発されている[1]-[3]. また,機器免震用の3次元免震装置も開発されている が[4],これはいくつかの制振要素を組み合わせて作 られている.地震やいろいろな方向からの風を受けた とき,構造物,機器,配管系はいろいろな方向の直線 振動や回転振動を行うことになる.しかしながら,3 次元あるいは6次元の振動に効果があるダンパは見あ たらないのが現状である.

そこで著者らは、機械や配管系の複雑な振動を一つ

の制振装置によって抑制することを目的として、3 リ ンク・4 関節をもつセミアクティブ型とパッシブ型の アーム型制振装置 [5][6],および1可変長リンク・2 関節をもつセミアクティブ型とパッシブ型のアーム型 制振装置 [7][8]を開発した.これらのアーム型制振装 置は人間の腕に似た形をしており、関節部並びに可変 長リンク部の摩擦によって、機械や配管系の6自由度 の運動 (3 軸方向の直線運動および3 軸周りの回転運 動)に対してダンピングを与えることができる.

本研究では、より人間の腕に近いアーム型制振装置 を得ることを目的として、2リンク・3 関節をもつセ ミアクティブ型のアーム型制振装置を提案する.本制 振装置を試作し、その3軸直線方向の抵抗力を実験と 解析によって確かめた.次に、本制振装置を1 質点2 自由度系に取り付けて二次元実地震波加振実験と地震

91

連絡先: 松岡 太一, 〒 214-8571 川崎市多摩区東三 田 1-1-1, 明治大学理工学部機械情報工学科, email: mat-suoka@isc.meiji.ac.jp

応答解析を行い,本制振装置が同時に二方向の振動を 抑制できることを確認した.

2 アーム型制振装置の構造



Mounting plate (2) Universal joint
 Hinge (4) Link

Fig. 1 Construction of the vibration control device.



Fig. 2 Details of the joint and the hinge.

試作したアーム型制振装置の構造を Fig.1 に示し, 関節部の詳細を Fig.2 に示す.本制振装置は,両端の 取付板①,両側の関節②,中央の関節③および各関節 をつなぐ2本のリンク④によって構成されている.両 側の関節は,超磁歪アクチュエータ⑤,弾性ヒンジ付 きレバー機構⑥,鋼球受⑦および鋼球⑧から成り,鋼 球にはリンク④がねじ止めされている.この場合,リ ンクは鋼球を中心に3軸周りの運動を行うことができ る.また中央の関節は,超磁歪アクチュエータ⑨,摩 擦板⑩,内側円筒⑪および両側に底板⑫を有する外側 円筒⑬から成り,内側の円筒には右側のリンクが,外 側の円筒には左側のリンクがねじ止めされている.中 央の関節では,両側のリンクが超磁歪アクチュエータ 周りの回転運動のみを行うことができる.

超磁歪アクチュエータに電流を加えるとアクチュ エータが伸び,両側の関節では鋼球受⑦が鋼球⑧に押 し付けられて関節部の3軸周りの摩擦トルクが増大し, 中央の関節では摩擦板⑩が底板⑫に押し付けられて回 転方向の摩擦トルクが増大する.

3 荷重一変位特性の理論解析

最初に、Fig.3(a) に示すように、A 点 [n] 方向の $力 <math>F_{\eta\eta}$ と ξ 方向の力 $F_{\eta\xi}$ が作用し、 $A 点 i \pi \eta$ の正の 方向に移動する場合 ($\dot{\eta} > 0$ の場合)を考える、 η が 正の場合 [Fig.3(a) の実線の場合] には、リンクの自 由物体図は Fig.3(b) のようになる、リンク \overline{AB} の B点まわりのモーメントのつり合いから



Fig. 3 Free-body diagrams of the links.

$$-F_{\eta\eta}L\cos(\phi+\gamma) + F_{\eta\xi}L\sin(\phi+\gamma) + M_A - M_B = 0$$
(1)
リンク BC の C 点まわりのモーメントのつり合いから

$$-F_{\eta\eta}L\cos(\phi-\gamma) - F_{\eta\xi}L\sin(\phi-\gamma) + M_B + M_C = 0$$
(2)

式(1),(2)より

$$F_{\eta\eta} = \frac{1}{2L} \left[(M_A + M_C) \frac{\cos\gamma}{\cos\phi} - (M_A - 2M_B - M_C) \frac{\sin\gamma}{\sin\phi} \right]$$
(3)

$$F_{\eta\xi} = -\frac{1}{2L} \left[(M_A + M_C) \frac{\sin\gamma}{\cos\phi} + (M_A - 2M_B - M_C) \frac{\cos\gamma}{\sin\phi} \right]$$
(4)

Fig.3(a) の幾何学的関係から

$$2L\cos\phi\sin\gamma = \eta 2L\cos\phi\cos\gamma = 2L\cos\phi_0$$
 (5)

ここで、 ϕ_0 は静止時 ($\gamma=0$ のとき) の ϕ の値を表 す. 式 (5) より

$$\begin{aligned}
\cos\gamma &= \frac{\cos\phi_0}{\cos\phi} = \frac{s_0}{\sqrt{s_0^2 + \eta^2}} \\
\sin\gamma &= \frac{\eta}{2L\cos\phi} = \frac{\eta}{\sqrt{s_0^2 + \eta^2}} \\
\cos\phi &= \frac{\cos\phi_0}{\cos\gamma} = \frac{\sqrt{s_0^2 + \eta^2}}{2L} \\
\sin\phi &= \sqrt{1 - \cos^2\phi} = \frac{\sqrt{4h_0^2 - \eta^2}}{2L}
\end{aligned}$$
(6)

ここで、 $s_0(=2L \cos \phi_0)$ はアームの初期ジョイン ト間隔を表し、 $h_0(=L \sin \phi_0)$ はアームの初期高さを 表す (Fig.1 参照). 式 (6) を式 (3)、(4) に代入すると

$$F_{\eta\eta} = (M_A + M_C) \frac{2Ls_0}{s_0^2 + \eta^2} - (M_A - 2M_B - M_C) \frac{2L\eta}{\sqrt{(s_0^2 + \eta^2)(4h_0^2 - \eta^2)}}$$
(7)

$$F_{\eta\xi} = -\left[(M_A + M_C) \frac{\eta}{s_0^2 + \eta^2} + (M_A - 2M_B - M_C) \frac{s_0}{\sqrt{(s_0^2 + \eta^2)(4h_0^2 - \eta^2)}} \right]$$
(6)

次に, Fig.3(a) の点線の状態 ($\eta < 0$ の場合)を考 えて $F_{\eta\eta}$ および $F_{\eta\xi}$ の値を求めると,式(7),(8)の M_B の符号を逆にした場合に等しくなる.また,A点 に逆向きの力を加え、A点が逆方向に運動する場合 ($\dot{\eta}$ < 0 の場合) についても同様に解析し、これらの結果 を一つの式で表すと、Table 1 の $F_{\eta\eta}$ および $F_{\eta\xi}$ のよ うになる.また、A点が ξ 、 ζ 方向に運動する場合の解 析結果も併せて Table 1 に示す.ただし、 $F_{\xi\zeta}$ および $F_{\eta\zeta}$ は明らかに零となるので、省略してある。Table 1 において、SIGN(v) はvの正、零、負に応じて 1、 0、-1 の値をとる符号関数である。

Table 1Relations between force and displace-ment.



 $M_A = M_C = 1$ Nm, $M_B = 1$ Nm, L = 0.3 m, $\phi_0 = \pi/4$ とし, A 点を ξ , η , ζ 方向にそれぞれ振幅 20 mm で正弦波加振したときの各方向の抵抗力履歴 曲線を計算すると, Fig.4 のようになる. Fig.4 から, ⁸⁾ $F_{\eta\eta}$, $F_{\zeta\zeta}$, $F_{\eta\xi}$ の大きさは同程度であるが, $F_{\xi\xi}$, $F_{\zeta\xi}$ はこれらの値の約 2 倍の大きさになることがわかる.

93



Fig. 4 Resisting force characteristics.

Table 2 Exp	erimental	conditions
-------------	-----------	------------

Initial friction moment	MA	0.56 Nm
of joints	MB	1.32 Nm
5	$M_{\rm C}$	0.61 Nm
Length of link	Ł	0.2 m
Initial angle of link	θ_0	π /4 radian
		/

4 荷重一変位特性の測定実験

試作した制振装置の初期状態における諸元を Table 2 に示す. 超磁歪アクチュエータには、米国 ETREMA 社製の 50/6 N タイプを使用した.

この制振装置の ξ , η , ζ 方向の抵抗力特性を知るた めに、制振装置の一端をロードセルを介して反力壁に、 他端を振動台に取り付け、振動台に周波数 1 Hz, 振 幅 30 mm の正弦波状変位を与えて荷重と変位の関係 を測定した. その際、すべての超磁歪アクチュエータ に同時に一定強さの電流を加え、その大きさを 0, 0.5, 1.0, 1.5 A の 4 種類とした. Fig.5 は ξ 方向の抵抗 力測定状況を示す. 制振装置の取り付け方向を変える ことにより、 η および ζ 方向についても同様な実験を 行った. F_{$\xi\xi$}, F_{$\eta\eta$} および F_{$\zeta\zeta$} と変位の履歴曲線をそ れぞれ Fig.6(a), (b), (c) に示す. Fig.6 における理 論値は電流 1.5 A に対するものである.



Fig. 6 Resisting force characteristics.

Fig.6 から,制振装置の荷重-変位特性はほぼク-ロン摩擦型であることがわかる.電流1.5 A のときの 理論値と実験値は定性的,定量的にある程度似た傾向 を示しており,理論式の妥当性が確かめられた.左上 部および右下部における理論値と実験値の違いは,主 にリンク部の弾性変形によるものと考えられる.

5 2 自由度振動モデルの地震応答実験と解析

5.1 解析モデルと運動方程式

平面内に置かれた 4 個のばね $k_1 \sim k_4$ と本制振装置 によって支えられた主質量 m が、基礎に水平および 上下方向の入力加速度 \ddot{U}_X 、 \ddot{U}_Y を受けたときの二次 元的な振動を、本制振装置によって抑制する場合を考 える、その解析モデルを Fig.7 に示す、Fig.7 におい

日本AEM学会誌 Vol. 10, No. 1 (2002)



Table 3Experimental condition.

Mass		m	4.5 kg
		\mathbf{k}_1	555 N/m
Stiffness		$\mathbf{k_2}$	$588 \mathrm{N/m}$
		$\mathbf{k_3}$	$250 \mathrm{~N/m}$
		k_4	$286 \mathrm{~N/m}$
Damping	coefficient	cx	3.02 Ns/m
		c_y	2.86 Ns/m

て, *X*, *Y* は主質量の水平および上下方向の絶対変 位, *x*, *y* は主質量の水平および上下方向の相対変位, $F_x(=F_{\xi\xi}+F_{\eta\xi})$ および $F_y(=F_{\eta\eta}+F_{\xi\eta})$ は制振装 置が主質量におよぼす *x* および *y* 方向の抵抗力, k₁ ~k₄ はコイルばねのばね定数を表し, c_x, c_y はリニ アガイドのクーロン摩擦とばね材料の内部減衰の等価 粘性減衰係数を表す.制振装置の取付方向は,シミュ レーションで最も高い制振効果が得られた, ξ 方向が *x* 方向に, η 方向が *y* 方向に一致する方向とした. 主 質量 *m* の運動方程式は,制振装置の摩擦力による停 滞運動を考慮すると,次の二つの場合に分けられる.

[1] 運動時 (Phase I)

$$\frac{m\ddot{x} + k_{xx}x + k_{yx}y + c_x\dot{x} + F_x = -m\ddot{U}_X}{m\ddot{y} + k_{xy}x + k_{yy}y + c_y\dot{y} + F_y = -m\ddot{U}_Y}$$

$$(9)$$

ここで、 $k_{xxx}x$ および $k_{xy}x$ は相対変位 x による全ば ね力の x および y 方向の成分、 $k_{yy}y$ および $k_{yx}y$ は 相対変位 y による全ばね力の y および x 方向の成分 を表し、

$$k_{xx} = k_1 \cos^2 \theta_1 + k_2 \cos^2 \theta_2 + k_3 \cos^2 \theta_3 + k_4 \cos^2 \theta_4$$

$$k_{xy} = k_{yx} = k_1 \cos \theta_1 \sin \theta_1 + k_2 \cos \theta_2 \sin \theta_2$$

$$+ k_3 \cos \theta_3 \sin \theta_3 + k_4 \cos \theta_4 \sin \theta_4$$

$$k_{xy} = k_1 \sin^2 \theta_1 + k_2 \sin^2 \theta_2 + k_3 \sin^2 \theta_3 + k_4 \sin^2 \theta_4$$
(10)

[2] 停滞時 (Phase II)

$$\begin{array}{ccc} x = const. & , & \dot{x} = 0 & , & \ddot{x} = 0 \\ y = const. & , & \dot{y} = 0 & , & \ddot{y} = 0 \end{array} \right\}$$
(11)

Phase I から Phase II への切り換え条件は

$$\dot{x} = 0 \quad \mathscr{N} \supset |m\ddot{X} + k_{xx}x + k_{yx}y| \le F_{\xi\xi} + F_{\eta\xi} \\ \dot{y} = 0 \quad \mathscr{N} \supset |m\ddot{Y} + k_{xy}x + k_{yy}y| \le F_{\eta\eta} + F_{\xi\eta}$$

$$(12)$$

ここで、 $\ddot{X}(=\ddot{x}+\ddot{U}_X)$ および $\ddot{Y}(=\ddot{y}+\ddot{U}_Y)$ は、主 質量の水平および上下方向の絶対加速度を表す. Phase から Phase への切り換え条件は

$$\frac{|m\ddot{U}_X + k_{xx}x + k_{yx}y| > F_{\xi\xi} + F_{\eta\xi}}{|m\ddot{U}_Y + k_{xy}x + k_{yy}y| > F_{\eta\eta} + F_{\xi\eta}}$$

$$(13)$$

5.2 地震応答実験結果と解析結果

4本のコイルばねを用いて Fig.7 に示すような 1 質 点 2 自由度振動モデルを試作し, 質点に本制振装置を 取り付け, 電気-油圧式サーボ振動台を用いて二次元 実地震波応答実験を行って,本制振装置の制振効果を 確かめた.振動モデルの諸元を Table 3 に示す.

実験に用いた入力地震波は、最大加速度 3 m/s² に 基準化した Imperial Valley 地震 (1940) El Centro NS – UD 成分と、宮城県沖地震 (1978) 東北大学 NS – UD 成分である.各地震波の NS、UD 成分を、 それぞれ振動台の x, y 方向に同時入力して二次元加 振を行い、主質量 m の x, y 方向の絶対加速度を調 べた.その際、三つの超磁歪アクチュエータには、同 時に水平方向と上下方向の入力加速度の合成値に比例 した電流 I を加えた.すなわち、

$$I = P\sqrt{\ddot{U}_X^2 + \ddot{U}_Y^2} \tag{14}$$

ここで、Pは試行錯誤により定めた比例定数であり、 $P= 1.4 \text{ As}^2/\text{m}$ とした. また、Iは 1.5 A を上限と した. 加速度はサーボ型加速度計で測定し、アンプを 通し A/D 変換を行ってパソコンに取り込んだ.

測定結果の最大値を計算結果と共に Table 4 に示し, 東北大学 NS - UD 成分入力時の入力加速度,制振装 置なしの場合と制振装置を取り付けた場合の主質量の 絶対加速度,および電流 I の時刻歴波形を計算結果と 比較して Fig.8 に示す.数値計算は式 (9)~(13)を連 続系シミュレーション言語 (FUJITSU SLCS V)を 用いてプログラムし,4次の固定間隔ルンゲ・クッタ の倍精度積分法を用いて行った.

Table 4 および Fig.8 からわかるように,本制振装 置を用いることによって,主質量の水平方向と上下方 向の絶対加速度を同時に 1/2~3/4 程度に抑制するこ とができる.また,実験結果と計算結果は似た傾向を 示しており,理論解析の妥当性が確認された.

Table 4Maxima of the experimental and calculated results.





With the damper

Time [sec]

6 結論

- 本制振装置は三次元方向に対してクーロン摩擦型の抵抗力特性を有し、抵抗力の大きさは超磁歪アクチュエータに加える電流が大きくなるに従って 増大する。
- 2. 本制振装置によって、1 質点2自由度モデルの水
 平方向および上下方向の振動を同時に1/2~3/4
 程度に抑制することができる.
- 3. 連続系シミュレーション言語による地震波応答解 析結果は、実験結果と定量的、定性的に似た傾向 を示し、解析の妥当性が確認された.

終わりに,制振装置の製作と実験に御協力いただい た新井健一君に謝意を表する.また,本研究は文部科 学省科学研究費補助金によることを付記する.

(2001年8月27日受付)

参考文献

- 藤田聡,藤田隆史,佐々木恒夫,藤本滋,成川昇,鶴谷千明,産業施設に適した建物免震構造の基礎的研究 第2 報,粘性ダンパを用いた場合の免震性能,日本機械学会 論文集,53巻,491号,C編(1987),pp.1410-1416.
- [2] 日本免震構造協会編, 免震構造入門, オーム社, (1996), pp.156-159.
- [3] 藤田聡, 森川裕一, 下田郁夫, 長田修一, 下坂陽男, 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, 免震支持された系についての振動実験と応答解 析, 日本機械学会論文集, 59巻, 557号, C編 (1993), pp.11-16.
- [4] 藤田隆史, 鞍本貞之, 小見俊夫, 三次元免震装置の研究, 日本機械学会論文集, 51 巻, 471 号, C 編 (1985), pp.2768-2776.
- [5] Ohmata, K., Zaike, M., Koh, T., A Three-Link arm-type vibration control device using magnetrostrictive actuators, *Journal of Alloys and Compounds*, No.258, (1997), pp.74-78.
- [6] Ohmata, K., Matsuoka, T., Ono, T., A Study of a Three-Link Arm Type Friction Damper Having Six Degrees of Freedom, ASME PVP-Vol.402-1, Seismic Engineering, Vol.1 (2000), pp.251-255.
- [7] 澤田昌信,伊沢直紀,大亦絢一郎,阿部直人,可変長1
 リンクと2関節をもつアーム形制振装置の研究,第12
 回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム講演
 論文集,(2000), pp.719-722.
- [8] 澤田昌信, 大亦洵一郎, 可変長 1 リンクと 2 関節から 成るアーム形摩擦ダンパの研究, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2000, CD-ROM 論文集, 656 (2000), p.6.

60

Time [sec]