2 リンク・3 関節を持つアーム形ダンパの研究* (回転粘性ダンパを用いた場合)

河野 晋也^{*1}, 大亦 絢一郎^{*2}
岡野 恭久^{*3}, 松岡 太一^{*2}

A Study of an Arm-Type Damper with Two Links and Three Joints (Case in Which a Rotary Viscous Damper Is Used)

Shinya KOHNO, Kenichiro OHMATA^{*4},
Yasuhisa OKANO and Taichi MATSUOKA

^{*4} Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University,
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 214-8571 Japan

In this paper, a new type of arm-type damper consisting of two links, two joints (universal joints with friction) and a hinge (a rotary oil damper) has been developed. The damper is able to suppress six modes of vibration of a machine, three in translational modes and three in rotational modes. The trial damper was made and the resisting force characteristics in the three translational directions were discussed theoretically and experimentally. The seismic responses of a three-degree-of-freedom system and the frequency response of a one-degree-of-freedom system, which consist of a mass and four coil springs and supported by the damper, were measured using a two-dimensional electro-hydraulic type shaking table. The experimental results are compared with the calculated ones, and the effects of vibration suppression of the damper are discussed.

Key Words: Damper, Arm-Type Damper, Friction Damper, Rotary Oil Damper, Three-Dimensional Vibration, Seismic Response, Frequency Response

1. ま え が き

エンジン、モータあるいは地震や風などにより機械、配管系、構造物等に発生する振動を抑制するために、いろいろな種類のダンパが使用されている。これらのダンパの多くは、一方向のみに減衰性を持つ 1 自由度ダンパであるが、免震建物や免震床には、水平面内二方向に減衰性を持つ(二次元の)弾塑性ダンパ、鉛ダンパ、粘性ダンパ、粘性体ダンパ、摩擦ダンパなどが多く用いられている⁽¹⁾。また、いくつかの制振要素を組合わせた三次元免震装置も開発されている⁽²⁾。

著者らは、地震時における機械や配管系の複雑な振動を抑制できる 6 自由度ダンパを得ることを目的として、これまでに 3 リンク・4 関節を持つ準能動形および受動形のアーム形ダンパ⁽³⁾⁽⁴⁾、1 可変長リンク・2 関節を持つ準能動形および受動形のアーム形ダンパ⁽⁵⁾⁽⁶⁾、2 リンク・3 関節を持つ準能動形および受動形のアーム形ダンパ⁽⁷⁾⁽⁸⁾を開発した。本研究では、機械や配管

系の地震時の振動のみならず、風による振動や機械振動に対しても高い制振性能を有する 6 自由度ダンパを得ることを目的として、2 リンク・3 関節を持つ受動形アーム形ダンパ⁽⁸⁾の中央関節に、回転摩擦ダンパに代えて回転粘性ダンパを用いた場合を考える。本ダンパは、両側のユニバーサルジョイント形摩擦関節と中央の回転粘性ダンパをリンクでつないだ構造を持つ人間の腕のような形をしたダンパであり、6 自由度の運動に対して摩擦と粘性の組合わさったダンピングを与えることができる。本ダンパを試作し、直線三方向の抵抗力特性を実験と理論解析によって確かめた。次に、本ダンパを 1 質点 3 自由度系に取付けて二次元実地震波加振実験(応答は三次元)と解析を行い、本ダンパが同時に直線三方向の振動を抑制できることを確認した。また、本ダンパを 1 自由度系に取付けて周波数応答実験と解析を行い、本ダンパが制震用のみならず防振用としても有効であることを確かめた。

2. アーム形ダンパの構造

試作したアーム形ダンパの構造を図 1 に示し、関節部の詳細を図 2 に示す。また、本ダンパの初期状態における諸元を表 1 に示す。本ダンパは、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

* 原稿受付 2003 年 11 月 17 日。

^{*1} 学生員、明治大学大学院理工学研究科(〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1)。

^{*2} 正員、明治大学理工学部。

^{*3} 日産自動車(株)(〒243-0192 厚木市岡津古久 560-2)。

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

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、鋼球⑤、ばね⑥、ボルト⑦および鋼球受⑧から成るユニバーサルジョイントで、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三軸回りの運動を行うことができる。また中央の関節は、回転粘性ダンパ⑩およびダンパ取付円板⑨から成る蝶つがいであり、回転粘性ダンパの回転軸とダンパ取付円板にはリンク④がねじ止めされている。この関節は、回転粘性ダンパの回転軸回りの回転運動のみを行うことができる。両側の関節では、ばねの圧縮量を変化させることにより三軸回りの摩擦トルクを調整することができ、中央の関節では、回転粘性ダンパのオリフィス面積を変化させることにより粘性トルクを調整できる。ユニバーサルジョイント部1個当たりの最大可動範囲は、水平面内振れ角が $\pm 45^\circ$ 、鉛直面内振れ角が $\pm 45^\circ$ 、軸回転角が $\pm 180^\circ$ であり、またヒンジ部の最大可動範囲は $\pm 180^\circ$ である。

3. 荷重-変位特性の理論解析

3章では、リンクと関節の質量およびリンクの弾性

振動の影響を無視してダンパの抵抗力を解析する。

3・1 取付角度 0° の場合 図1において、ダンパの左端を固定し、右端に ξ および η 方向の力 $F_{\xi\xi}$ 、 $F_{\eta\xi}$ を与えて ξ 軸方向に ξ だけ変位させた場合、 ξ および η 方向の力 $F_{\xi\eta}$ 、 $F_{\eta\eta}$ を与えて η 軸方向に η だけ変位させた場合、 ξ および ζ 方向の力 $F_{\xi\zeta}$ 、 $F_{\zeta\zeta}$ を与えて ζ 軸方向に ζ だけ変位させた場合の抵抗力特性の理論解析結果を表2に示す。ここで、 F の左側の添字は荷重方向、右側の添字は変位方向を表す。また L はリンクの長さ、 M_A 、 M_C は両側ユニバーサルジョイント部の摩擦トルク、 C は中央関節部の回転粘性ダンパの粘性減衰係数を表し、 θ_0 、 $s_0(=2L \sin \theta_0)$ 、 $h_0(=L \cos \theta_0)$ はそれぞれアームの初期角度、初期ジョイント間隔、初期高さを表す。また、 $\text{SIGN}(\xi)$ は ξ の負、正に応じて -1 、 1 の値をとる符号関数である。

Table 1 Experimental conditions

Initial friction moment of the joints	M_A	1.23 Nm
	M_C	1.43 Nm
Damping coefficient of the rotary damper	C	0.6 Nm/srad
Length of the links	L	0.2 m
Initial angle of the links	θ_0	45°

Table 2 Resisting forces in ξ , η and ζ directions (initial angle 0°)

$F_{\xi \xi}$	$\frac{M_A + M_C}{\sqrt{4L^2 \cdot (s_0 + \xi)^2}} \times \text{SIGN}(\xi) + \frac{4C\xi}{4L^2 - (s_0 + \xi)^2}$		
$F_{\eta \eta}$	$\left[(M_A + M_C) \frac{s_0}{s_0^2 + \eta^2} - (M_A - M_C) \frac{\eta}{\sqrt{(s_0^2 + \eta^2) (4h_0^2 - \eta^2)}} \right] \times \text{SIGN}(\eta) + \frac{4C\eta^2}{(s_0^2 + \eta^2) (4h_0^2 - \eta^2)}$		
$F_{\zeta \zeta}$	$(M_A + M_C) \left[\frac{s_0}{s_0^2 + \zeta^2} + \frac{ C }{\sqrt{(s_0^2 + \zeta^2) (4h_0^2 - \zeta^2)}} \right] \times \text{SIGN}(\zeta) + \frac{4C\zeta^2}{(s_0^2 + \zeta^2) (4h_0^2 - \zeta^2)}$		
$F_{\xi \eta}$	$\left[(M_A + M_C) \frac{\eta}{s_0^2 + \eta^2} + (M_A - M_C) \frac{s_0}{\sqrt{(s_0^2 + \eta^2) (4h_0^2 - \eta^2)}} \right] \times \text{SIGN}(\eta) + \frac{4Cs_0\eta}{(s_0^2 + \eta^2) (4h_0^2 - \eta^2)}$		
$F_{\xi \zeta}$	$(M_A + M_C) \left[\frac{s_0}{\sqrt{(s_0^2 + \zeta^2) (4h_0^2 - \zeta^2)}} - \frac{ C }{s_0^2 + \zeta^2} \right] \times \text{SIGN}(\zeta) + \frac{4Cs_0\zeta}{(s_0^2 + \zeta^2) (4h_0^2 - \zeta^2)}$		
$F_{\eta \xi}$	$\frac{M_C - M_A}{s_0 + \xi} \times \text{SIGN}(\xi)$	$F_{\eta \zeta}$	$\frac{M_C - M_A}{\sqrt{s_0^2 + \zeta^2}} \times \text{SIGN}(\zeta)$
$F_{\zeta \xi}$	0	$F_{\zeta \eta}$	0

Fig. 1 Construction of the arm-type damper

Fig. 2 Details of the joint and the hinge

3・2 取付角度 θ_1 - θ_2 の場合 図3に示すように、ダンパの左端 C を床に取付け、右端 A を、線分 AC が X-Y 平面から θ_1 、X-Z 平面から θ_2 傾くようにして支えた場合を考える。この場合、ダンパの A、B、C 点を含む平面は床に垂直であるものとする。この状態からダンパの右端に X、Y、Z 軸に沿った変位を与えた場合のダンパ右端の ξ 、 η および ζ 軸方向の変位成分は次式で与えられる。

(1) X 軸方向に X だけ変位させた場合のダンパ

A 端の三軸方向変位成分

ξ 軸方向の変位成分: $X \cos \theta_1 \cos \theta_2$

η 軸方向の変位成分: $-X \sin \theta_2 \cos \theta_1$

ζ 軸方向の変位成分: $X \sin \theta_1$

(2) Y 軸方向に Y だけ変位させた場合のダンパ

A 端の三軸方向変位成分

ξ 軸方向の変位成分: $Y \sin \theta_2$

η 軸方向の変位成分: $Y \cos \theta_2$

ζ 軸方向の変位成分: 0

(3) Z 軸方向に Z だけ変位させた場合のダンパ

A 端の三軸方向変位成分

ξ 軸方向の変位成分: $-Z \sin \theta_1 \cos \theta_2$

η 軸方向の変位成分: $Z \sin \theta_1 \sin \theta_2$

ζ 軸方向の変位成分: $Z \cos \theta_1$

次に、ダンパの X、Y および Z 軸方向の力を表2の ξ 、 η および ζ 軸方向の力の成分で表すと、表3のようになる。ここで、 $F_{\xi X}$ は表2の $F_{\xi\xi}$ の ξ に(1)の $X \cos \theta_1 \cos \theta_2$ を代入することを表す。すなわちいちばん右側の添字は X、Y または Z 軸方向に変位させたことを表す。

4. 荷重-変位特性の測定実験

本ダンパの取付角度 0° - 0° の場合 ($\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=0^\circ$ の場合)における ξ 、 η 、 ζ 軸方向の抵抗力特性および取付角度 45° - 45° の場合における X、Y、Z 軸方向の抵抗力特性

Fig. 3 Initial position of the damper (initial angle θ_1 - θ_2)

を知るために、試作したダンパの一端を三分力計を介して反力壁に、他端をクランク式振動台に取付け、振動台に周波数 0.5~2.0 Hz、振幅 30 mm の正弦波状変位を与えて変位と抵抗力の履歴曲線を測定した。その際、摩擦による摩擦力の変化を少なくするために、両端の関節部には比較的柔らかいコイルばね(ばね定数 79 400 N/m)を用い、圧縮量を片側 9 mm とした。抵抗力測定に際しては、あらかじめリンクを動かして鋼球受と鋼球をなじませてから測定を行った。取付角度 0° - 0° の場合の変位と $F_{\xi\xi}$ 、 $F_{\eta\eta}$ 、 $F_{\zeta\zeta}$ 、 $F_{\xi\eta}$ および $F_{\xi\zeta}$ との履歴曲線を計算結果と併せて図4に示す。 $F_{\eta\xi}$ および $F_{\eta\zeta}$ はほぼ零であるので省略した。図4から、本ダンパの荷重-変位特性は、 ξ 方向においてはクーロン摩擦形と粘性形の複合形であり、その他の変位方向ではほぼクーロン摩擦形であることがわかる。また、実験値と計算値は定性的、定量的に似た傾向を示しており、理論式の妥当性が確かめられた。

一方、取付角度 45° - 45° の場合における本ダンパの X、Y、Z 軸方向の抵抗力特性を図5に示す。図5から、多くの方向で抵抗力が摩擦形と粘性形の複合形となることがわかる。この場合は実験値が計算値とかなりずれている部分があるが、これは主にリンク等の弾性変形および両端関節部における鋼球と鋼球受けの間の接触状態が球全体で一様でないことなどによるものと考えられる。

Table 3 Resisting forces in X, Y and Z directions (initial angle θ_1 - θ_2)

F_{XX}	$\cos\theta_1 \cos\theta_2 (F_{\xi X} + F_{\eta X} + F_{\zeta X}) - \sin\theta_2 \cos\theta_1 \times (F_{\eta X} + F_{\eta Y} + F_{\eta Z}) + \sin\theta_1 (F_{\xi Y} + F_{\xi Z} + F_{\zeta Y})$
F_{XY}	$\cos\theta_1 \cos\theta_2 (F_{\xi Y} + F_{\eta Y} + F_{\zeta Y}) - \sin\theta_2 \cos\theta_1 \times (F_{\eta Y} + F_{\eta X} + F_{\eta Z}) + \sin\theta_1 (F_{\xi X} + F_{\xi Z} + F_{\zeta X})$
F_{XZ}	$\cos\theta_1 \cos\theta_2 (F_{\xi Z} + F_{\eta Z} + F_{\zeta Z}) - \sin\theta_2 \cos\theta_1 \times (F_{\eta Z} + F_{\eta X} + F_{\eta Y}) + \sin\theta_1 (F_{\xi X} + F_{\xi Y} + F_{\zeta X})$
F_{YX}	$\sin\theta_2 (F_{\xi X} + F_{\eta X} + F_{\zeta X}) + \cos\theta_2 (F_{\eta X} + F_{\eta Y} + F_{\eta Z})$
F_{YY}	$\sin\theta_2 (F_{\xi Y} + F_{\eta Y} + F_{\zeta Y}) + \cos\theta_2 (F_{\eta Y} + F_{\eta X} + F_{\eta Z})$
F_{YZ}	$\sin\theta_2 (F_{\xi Z} + F_{\eta Z} + F_{\zeta Z}) + \cos\theta_2 (F_{\eta Z} + F_{\eta X} + F_{\eta Y})$
F_{ZX}	$-\sin\theta_1 \cos\theta_2 (F_{\xi X} + F_{\eta X} + F_{\zeta X}) + \sin\theta_1 \sin\theta_2 \times (F_{\eta X} + F_{\eta Y} + F_{\eta Z}) + \cos\theta_1 (F_{\xi Y} + F_{\xi Z} + F_{\zeta Y})$
F_{ZY}	$-\sin\theta_1 \cos\theta_2 (F_{\xi Y} + F_{\eta Y} + F_{\zeta Y}) + \sin\theta_1 \sin\theta_2 \times (F_{\eta Y} + F_{\eta X} + F_{\eta Z}) + \cos\theta_1 (F_{\xi X} + F_{\xi Z} + F_{\zeta X})$
F_{ZZ}	$-\sin\theta_1 \cos\theta_2 (F_{\xi Z} + F_{\eta Z} + F_{\zeta Z}) + \sin\theta_1 \sin\theta_2 \times (F_{\eta Z} + F_{\eta X} + F_{\eta Y}) + \cos\theta_1 (F_{\xi X} + F_{\xi Y} + F_{\zeta X})$

5. 3 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 次に、1 質点 3 自由度振動モデルを用いて本ダンパの直線三次元振動に対する制振効果を確認した。実験に用いた 3 自由度振動モデルに本ダンパを取付角度 0° で取付けたときの外観を図 6 に示す。この振動モデルは主質量 m を 4 本のコイルばね $k_1 \sim k_4$ によって立方体状フレームの対角線方向から引張った構造をしており、リニアガイドおよびリニアシャフトによって質量は三方向の直線運動のみを行い、リニアシャフト回りの回転運動は抑えられている。

本振動モデルの諸元を表 4 に示す。この振動モデルの基礎部に水平および上下方向の入力加速度 $\ddot{U}_x, \ddot{U}_y, \ddot{U}_z$ が作用するときの主質量の振動を本ダンパによって抑制する場合を考える。主質量 m の水平方向およ

Fig. 4 Resisting force characteristics of the damper (initial angle 0°)

Fig. 5 Resisting force characteristics of the damper (initial angle 45°)

び上下方向の絶対変位を X, Y, Z , 相対変位を x, y, z とし、本ダンパの x, y, z 方向の抵抗力を $F_x (= F_{xx} + F_{xy} + F_{xz})$, $F_y (= F_{yx} + F_{yy} + F_{yz})$, $F_z (= F_{zx} + F_{zy} + F_{zz})$ とする。本ダンパの抵抗力による停滯運動を考慮すると、主質量の運動方程式は次の二つの場合に分けられる。

[1] 運動量 (Phase I)

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + k_{xx}x + k_{xy}y + k_{xz}z + c_x\dot{x} + F_x &= -m\ddot{U}_x \\ m\ddot{y} + k_{yx}x + k_{yy}y + k_{yz}z + c_y\dot{y} + F_y &= -m\ddot{U}_y \\ m\ddot{z} + k_{zx}x + k_{zy}y + k_{zz}z + c_z\dot{z} + F_z &= -m\ddot{U}_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

[2] 停滯時 (Phase II)

$$\left. \begin{aligned} x &= \text{const.}, \quad \dot{x} = 0, \quad \ddot{x} = 0 \\ y &= \text{const.}, \quad \dot{y} = 0, \quad \ddot{y} = 0 \\ z &= \text{const.}, \quad \dot{z} = 0, \quad \ddot{z} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

Phase I から Phase II への切換え条件は

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} = 0 \text{ かつ } |m\dot{X} + k_{xx}x + k_{xy}y + k_{xz}z| &\leq F_x \\ \dot{y} = 0 \text{ かつ } |m\dot{Y} + k_{yx}x + k_{yy}y + k_{yz}z| &\leq F_y \\ \dot{z} = 0 \text{ かつ } |m\dot{Z} + k_{zx}x + k_{zy}y + k_{zz}z| &\leq F_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\dot{X} (= \dot{x} + \ddot{U}_x)$, $\dot{Y} (= \dot{y} + \ddot{U}_y)$ および $\dot{Z} (= \dot{z} + \ddot{U}_z)$ は、主質量の水平および上下方向の絶対加速度を表す。Phase II から Phase I への切換え条件は

$$\left. \begin{aligned} |m\dot{U}_x + k_{xx}x + k_{xy}y + k_{xz}z| &> F_x \\ |m\dot{U}_y + k_{yx}x + k_{yy}y + k_{yz}z| &> F_y \\ |m\dot{U}_z + k_{zx}x + k_{zy}y + k_{zz}z| &> F_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $k_{xx}x, k_{yy}y$ および $k_{zz}z$ は相対変位 x による

Table 4 Experimental condition of the 3 DOF model

Mass	m	6.4 kg
Stiffness	k_1	625 N/m
	k_2	588 N/m
	k_3	370 N/m
	k_4	468 N/m
Damping coefficient	c_x	3.32 Ns/m
	c_y	2.21 Ns/m
	c_z	3.45 Ns/m

Fig. 6 3 DOF model

全ばね力の x, y および z 方向の成分を表し、他の相対変位 y, z によるばね力についても同様である。これらのばね定数は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} k_{xx} &= k_1 \cos^2 \theta_{x1} + k_2 \cos^2 \theta_{x2} + k_3 \cos^2 \theta_{x3} \\ &\quad + k_4 \cos^2 \theta_{x4} \\ k_{yx} &= k_1 \cos \theta_{x1} \cos \theta_{y1} + k_2 \cos \theta_{x2} \cos \theta_{y2} \\ &\quad + k_3 \cos \theta_{x3} \cos \theta_{y3} + k_4 \cos \theta_{x4} \cos \theta_{y4} \\ &= k_{xy} \\ k_{zx} &= k_1 \cos \theta_{x1} \cos \theta_{z1} + k_2 \cos \theta_{x2} \cos \theta_{z2} \\ &\quad + k_3 \cos \theta_{x3} \cos \theta_{z3} + k_4 \cos \theta_{x4} \cos \theta_{z4} \\ &= k_{xz} \\ k_{yy} &= k_1 \cos^2 \theta_{y1} + k_2 \cos^2 \theta_{y2} + k_3 \cos^2 \theta_{y3} \\ &\quad + k_4 \cos^2 \theta_{y4} \\ k_{yz} &= k_1 \cos \theta_{y1} \cos \theta_{z1} + k_2 \cos \theta_{y2} \cos \theta_{z2} \\ &\quad + k_3 \cos \theta_{y3} \cos \theta_{z3} + k_4 \cos \theta_{y4} \cos \theta_{z4} \\ &= k_{zy} \\ k_{zz} &= k_1 \cos^2 \theta_{z1} + k_2 \cos^2 \theta_{z2} + k_3 \cos^2 \theta_{z3} \\ &\quad + k_4 \cos^2 \theta_{z4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで θ_{xi}, θ_{yi} および $\theta_{zi} (i=1\sim 4)$ は x 軸, y 軸および z 軸とばね k_i のなす角度を表す。

5・2 地震応答実験結果と解析結果 本ダンパで支持された 3 自由度振動モデルを、電気-油圧式二次元振動台に取付け、二次元実地震波加振実験(応答は三次元方向)を行って、本ダンパの三次元方向の制振効果を確かめた。実験に用いた入力地震波は、最大加

速度 3 m/s^2 に基準化した Imperial Valley 地震(1940 年) El Centro NS-EW 成分と、兵庫県南部地震(1995 年)神戸海洋気象台 NS-UD 成分である。各地震波の NS 成分と UD(または EW)成分をそれぞれ振動モデルの水平 45° 方向(対角線方向)と上下方向に同時入力し、二次元加振を行った。入力加速度および質量 m の応答加速度はサーボ形加速度計で、振動台の絶対変位はインダクタンス形変位計で測定し、アンプを通して A/D 変換を行いパーソナルコンピュータに取込んだ。また、質量 m の絶対変位は絶対加速度を積分することにより求め、 m の相対変位は m の絶対変位と振動台の絶対変位の差から求めた。

ダンパの取付角度 $0^\circ\text{--}0^\circ$ の場合および $45^\circ\text{--}45^\circ$ の場合の地震応答実験と解析によって得られた主質量の絶対加速度および相対変位の最大値をそれぞれ表 5, 6 に示す。また、神戸海洋気象台 NS-UD 成分入力時における主質量の絶対加速度時刻歴応答波形の実験結果を解析結果と比較して図 7 に示す。数値解析は、運動方程式を数学ソフト Mathematica 3.0 を用いてプログラムし、Newmark's- β の反復法を用いて行った。表 5, 6 および図 7 から、本ダンパを取付角度 $0^\circ\text{--}0^\circ$ に取付けることによって、主質量の X, Y, Z 方向の絶対加速度は El Centro NS-EW 成分入力時で $3/5\sim 4/5$ 程度に、相対変位は $3/5\sim 4/5$ 程度に低減することがわかる。また、神戸海洋気象台 NS-UD 成分入力時では、主質量の X, Y, Z 方向の絶対加速度は $1/2\sim 4/5$

Table 5 Maximum acceleration

			Maximum input acceleration 3 m/s^2			
Input acceleration			El Centro NS-EW		JMA Kobe NS-UD	
Initial angle			$0^\circ\text{--}0^\circ$	$45^\circ\text{--}45^\circ$	$0^\circ\text{--}0^\circ$	$45^\circ\text{--}45^\circ$
Without damper	Exp.	$ \ddot{X} _{\max}$	5.22	5.22	5.43	5.43
		$ \ddot{Y} _{\max}$	8.31	8.31	3.64	3.64
		$ \ddot{Z} _{\max}$	7.43	7.43	4.06	4.06
	Cal.	$ \ddot{X} _{\max}$	5.29	5.29	5.45	5.45
		$ \ddot{Y} _{\max}$	8.56	8.56	3.70	3.70
		$ \ddot{Z} _{\max}$	7.43	7.43	4.25	4.25
With damper	Exp.	$ \ddot{X} _{\max}$	3.00	4.24	2.90	3.26
		$ \ddot{Y} _{\max}$	6.80	5.86	3.48	3.21
		$ \ddot{Z} _{\max}$	4.15	4.29	3.42	2.95
	Cal.	$ \ddot{X} _{\max}$	3.06	4.32	3.03	3.28
		$ \ddot{Y} _{\max}$	6.64	5.52	3.36	3.25
		$ \ddot{Z} _{\max}$	4.26	4.46	3.56	3.11

Unit : m/s^2

Table 6 Maximum displacement

			Maximum input acceleration 3 m/s^2			
Input acceleration			El Centro NS-EW		JMA Kobe NS-UD	
Initial angle			$0^\circ\text{--}0^\circ$	$45^\circ\text{--}45^\circ$	$0^\circ\text{--}0^\circ$	$45^\circ\text{--}45^\circ$
Without damper	Exp.	$ x _{\max}$	54.3	54.3	50.0	50.0
		$ y _{\max}$	78.6	78.6	65.4	65.4
		$ z _{\max}$	57.7	57.7	51.2	51.2
	Cal.	$ x _{\max}$	52.1	52.1	48.5	48.5
		$ y _{\max}$	76.0	76.0	64.7	64.7
		$ z _{\max}$	58.1	58.1	52.0	52.0
With damper	Exp.	$ x _{\max}$	36.2	42.6	45.9	45.3
		$ y _{\max}$	72.0	73.8	52.3	35.4
		$ z _{\max}$	35.1	42.1	46.3	39.7
	Cal.	$ x _{\max}$	35.5	39.6	45.9	44.1
		$ y _{\max}$	68.5	72.5	52.6	37.8
		$ z _{\max}$	34.6	42.7	46.9	39.3

Unit : mm

程度に、相対変位は $4/5 \sim 7/10$ 程度に低減することがわかる。

また、本ダンパの取付角度を $45^\circ-45^\circ$ にすると Y 軸方向の絶対加速度および相対変位を改善することができるが、 X 軸と Z 軸方向の絶対加速度および相対変位が増加してしまうことが見られた。また、実験結果と解析結果は、定性的、定量的に似た傾向を示しており、解析の妥当性が確認された。

5.3 入力加速度および関節トルクと応答加速度の関係 次に、ダンパの両側関節の摩擦トルクおよび中央関節の回転粘性ダンパの減衰係数を実験値 (M)、その $1/2$ ($M/2$) および 2 倍 ($2M$) とした場合について、最大入力加速度を $0.5 \sim 4 \text{ m/s}^2$ に変化させて地震応答解析を行い、最大入力加速度と最大応答加速度の関係を求めた。取付角度 $0^\circ-0^\circ$ の場合における El Centro NS-EW 成分入力時および神戸海洋気象台 NS-UD 成分入力時の解析結果を図 8 に示す。図 8 には実験結果も併せて示してある。図 8 から以下のことがわか

る。

(1) 入力加速度が大きくなるほど最大応答加速度も大きくなる。

(2) 入力加速度の大きさに応じて、関節部摩擦トルクおよび回転粘性ダンパの減衰係数の最適値が存在する。

(3) 試作したダンパの関節トルクおよび回転粘性ダンパの減衰係数は、最大入力加速度が $0.5 \sim 2 \text{ m/s}^2$ 程度のときに最適値に近い値となる。

6. 1 自由度振動モデルの周波数応答実験と解析

続いて、図 6 の質点 m に本ダンパを取付け、質点 m の y, z 方向の動きを拘束し、 x 方向に振幅 4 mm 、振動数 $0.1 \sim 8 \text{ Hz}$ の正弦波状変位を与えて質点の絶対変位を測定した。その際、ダンパ先端が ξ, η または ζ 方向に振動するように取付けて、実験を繰返した。ダンパの取付角度 $0^\circ-0^\circ$ の場合の実験結果を計算結果と比較して図 9 に示す。図 9 から、共振点における振幅比は、ダンパなしの場合に比べて $1/5 \sim 1/10$ 程度に低減することがわかる。また、実験結果と計算結

Fig. 7 Input and response acceleration waves (Kobe NS-UD)

(a) El Centro NS-EW (b) JMA Kobe NS-UD

Fig. 8 Relation between maximum input and output acceleration (initial angle $0^\circ-0^\circ$)

Fig. 9 Frequency responses (initial angle $0^\circ-0^\circ$)

果は定性的、定量的に似た傾向を示しており、計算結果の妥当性が確認された。ダンパを取付けた場合に共振点付近で実験値が計算値とずれているのは、質点の y, z 方向の運動を拘束したために、摩擦力が増加したためと思われる。また、取付角度 $45^\circ-45^\circ$ の場合についても同様に実験と計算を行った結果、共振点における振幅比は $1/8 \sim 1/14$ 程度に低減することがわかった。

7. 結 論

本研究では、2 リンクと3 関節から成るアーム形ダンパを試作し、その三次元方向の抵抗力特性を実験と解析によって調べた。また、本ダンパを1 質点3 自由度振動モデルに取付けたときの三次元方向の振動抑制

効果を地震応答実験と解析によって確かめた。さらに、本ダンパを1 自由度系に取付けたときの周波数特性を実験と計算によって調べた。主な結果は以下のとおりである。

(1) 本ダンパは取付角度 $0^\circ-0^\circ$ の場合、 ξ 方向においてはクーロン摩擦形と速度比例形の複合形の抵抗力特性を有し、その他の方向ではほぼクーロン摩擦形の特性を示す。一方、取付角度 $45^\circ-45^\circ$ の場合、多くの変位方向に複合形の特徴が現れる。抵抗力の大きさは両側関節の摩擦モーメントおよび回転粘性ダンパの減衰係数を大きくするに従って増大する。

(2) 本ダンパを取付角度 $0^\circ-0^\circ$ に取付けることによって、1 質点3 自由度振動モデルの水平方向および上下方向の振動を絶対加速度において $1/2 \sim 4/5$ 程度に、相対変位において $3/5 \sim 4/5$ 程度に低減させることができる。また、本ダンパを取付角度 $45^\circ-45^\circ$ にすると Y 軸方向の絶対加速度および相対変位を改善することができるが、 X 軸と Z 軸方向の絶対加速度および相対変位は増加する。

(3) 入力加速度の大きさに応じて、関節部摩擦トルクおよび回転粘性ダンパの減衰係数の最適値が存在する。試作したダンパの関節トルクは、最大入力加速度が $0.5 \sim 2 \text{ m/s}^2$ 程度のときの最適値に近い値である。

(4) 本ダンパによって、正弦波加振を受ける1 自由度振動モデルの共振点の高さを $1/5 \sim 1/14$ 程度に低減させることができる。

(5) 数学ソフト Mathematica 3.0 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、本ダンパの製作と実験にご協力いただいた中川昭英君に謝意を表する。また、本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業(平成15年度選定)によることを付記する。

文 献

- (1) 例えば、日本免震構造協会編、免震構造入門、(1996)、156-161、オーム社。
- (2) 藤田隆史・鞍本貞之・小見俊夫、三次元免震装置の研究、機論、51-471、C(1985)、2768-2776。
- (3) Ohmata, K., Zaïke, M. and Koh, T., A Three-link arm-type vibration control device using magnetostrictive actuators, *J. ALLOYS AND COMPOUNDS*, No. 258 (1997), 74-78。
- (4) Ohmata, K., Matsuoka, T. and Ono, T., A Study of a Three-Link Arm Type Friction Damper Having Six Degrees of Freedom, *ASME Scismic Eng.*, PVP-402-1, 1 (2000), 251-255。
- (5) 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クス」シンポジウム講演論文集, (2000-6), 719-722.
- (6) 澤田昌信・大亦絢一郎, 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), 1-4.
- (7) 松岡太一・林正人・大亦絢一郎・阿部直人, 2リンク・3関節をもつアーム形制振装置の研究, 日本 AEM 学会誌, **10**-1 (2002), 91-96.
- (8) 岡野恭久・松岡太一・大亦絢一郎, 2リンク・3関節をもつアーム形摩擦ダンパの研究, 機論, **69**-678, C (2003), 335-342.
-