

# 耐震ダンパーに関する研究

Development of Aseismic Damping Mechanism for Structures

——第 1 報 自由振動試験および起振実験——

Report No. 1: Free Vibration and Forced Vibration Tests

川 股 重 也\*・米 田 護\*・半 谷 裕 彦\*

Shigeya KAWAMATA, Mamoru YONEDA and Yasuhiko HANGAI

## 1. は し が き

臨時事業「都市における災害・公害の防除に関する研究」の一環として、振動減衰機構（耐震ダンパー）の開発研究を行なっている<sup>1)2)</sup>。この耐震ダンパーは、液圧で作動するダンパーを構造物に組み込み、その振動エネルギー吸収能力を利用して構造物の地震応答を低減することを目的としている。

液圧ダンパーの試作を行ない、ダンパーの基礎的性質と、ダンパーを骨組構造に取り付けた場合の振動特性を知るために、一連の自由振動および強制振動実験を行なった。この実験は予備的なもので、実験結果の理論的解明と、実際の構造物への適用までには多くの課題が残されているが、実験結果にはいくつかの興味ある事実が含まれており、この形式の耐震ダンパーの有用性を示唆するものと思われるので取りあえず実験の概要とその結果を報告する。

## 2. 実 験 概 要

### (1) 試験体

試験体は、図 1 に示すような 1.5 m × 1.0 m の鉄骨フ

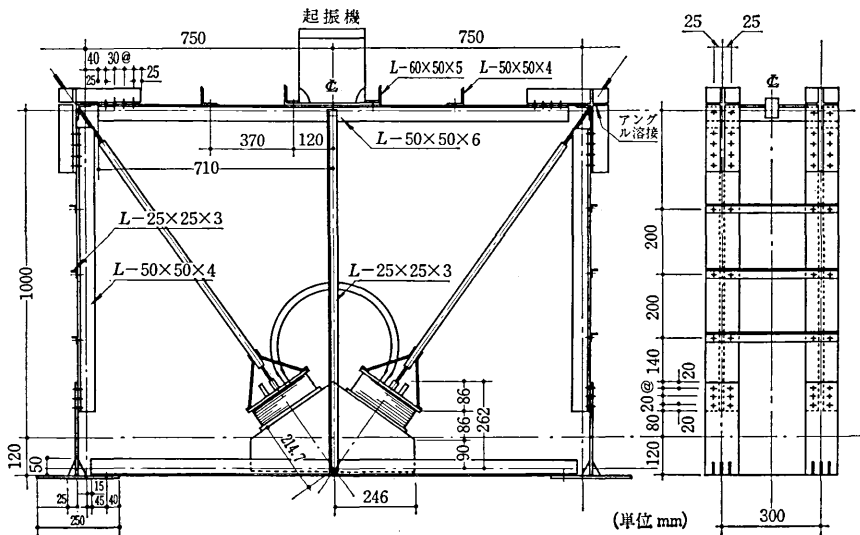


図 1 試験体の形状・寸法

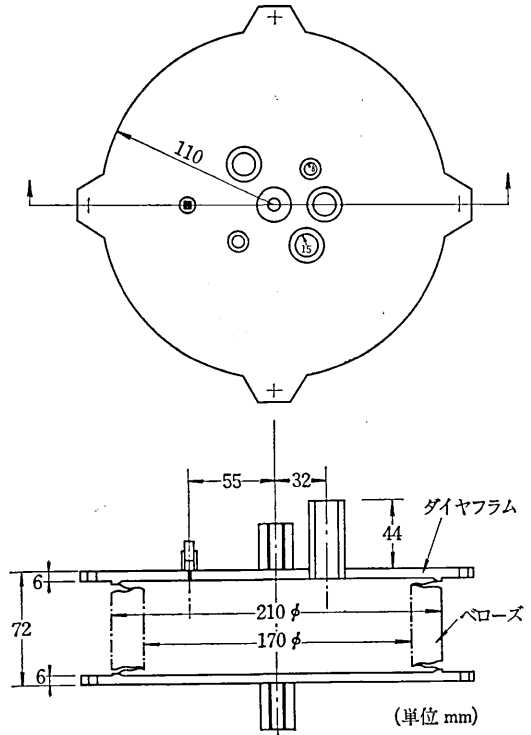


図 2 ダンパーの形状・寸法

レームに 2 本の斜材を設け、斜材と基礎の間に液圧ダンパーを取り付けたものである。

鉄骨フレームは、柱とはりりが剛に接合され、柱脚は薄鉄板による板バネで支持されており、柱脚がピンに近い長方形ラーメンを形成している。

ダンパーは、図 2 に示すようなステンレス製のベローズの両端を鉄板のダイヤフラムで閉じたもので、一端のダイヤフラ

\* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

表 1 ダンパーの諸元

ベローズ		
材 質		SUS 27
内 径		170 mm
外 径		210 mm
板 厚		0.25 mm
ピ ッ チ		2.8 mm
山 数		20
自 由 長		56 mm
バネ定数		0.785 kg/mm
有効面積		283 cm <sup>2</sup>
	日本バルカー KK 製	
ダイヤフラム		
材 質		軟鋼
板 厚		6.0 mm

表 2 起振機の諸元

寸 法		380×320×250 mm
重 量		29.5 kg
振 動 数		1~25 Hz
起振モーメント		1, 2, 3, 4 kg·cm
最大起振力		100 kg f
型 式		伊藤精機 KK, EX-2 型

ムには、径の異なる数種の円孔があけてある。表 1 にダンパーの諸元を示す。

斜材およびダンパーのない状態での鉄骨フレームを図 3 のような 1 質点の振動モデルと見なした時

$$\left. \begin{aligned} \text{質点の重量: } w &= 101 \text{ kg} \\ \text{バネ定数: } k &= 179 \text{ kg/cm} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

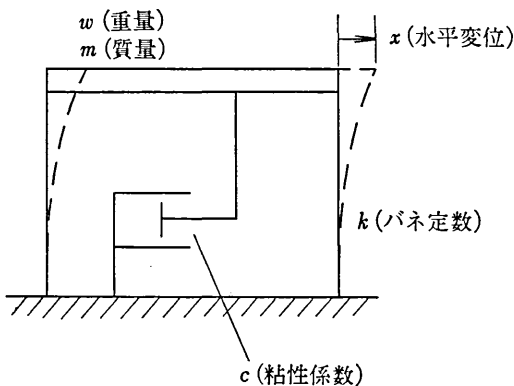
である。重量は強制振動試験に用いる起振機の重量を含む値であり、またバネ定数は静的な加力試験による実測値で、測定範囲の  $x=2.0 \text{ mm}$  までは完全な線形弾性を示した。これより鉄骨フレームのみの非減衰固有振動数は次のように計算される。

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{179 \times 980}{101}} = 6.64 \text{ Hz} \quad (2)$$

これに対して、ダンパーを取付けないフレームのみの自由振動により観測された振動数は 6.66 Hz、また振幅 0.6 mm 以下における減衰定数は

$$h = \frac{c}{2m\omega_0} = 0.005 \sim 0.006 \quad (3)$$

であった。



(2) 行なった試験

鉄骨フレームに水平振動が生じると、2本の斜材は交互に周期的な伸びと縮みを繰り返すことになる。この場合ダンパーに流体を満たしておけば、液体はダイヤフラ

ムに設けられた円孔（オリフィス）を通して高速で運動するから、これにともなう運動エネルギーの消費と粘性抵抗によって振動の減衰効果が生じる。この実験では、取り扱い易さから、ダンパーには水を満たした。

このダンパーの効果を見るために次の試験を行なった。

- I. 自由振動試験……重錘を用いてフレームに水平変位を生じさせ、重錘を切断することにより生じる自由振動の変位を記録する。（起振器は質量として取り付ける。）
- II. 強制振動試験……フレームのほりに偏心回転質量方式の小型起振機を取り付け、正弦波外力による強制振動を行ない、変位を記録した。起振機の諸元を表 2 に示す。

ダンパーの状態として、次の 3 種を設定して上の試験を行なった。

(a) 水なしダンパー……図 4 (a)

ダンパーに水を満たす前の状態で、ダイヤフラムの円孔を通じて空気が出入することになる。

(b) 満水独立ダンパー……図 4 (b)

2つのダンパーにそれぞれ水を満たし、円孔先端に短いビニール管を立ち上げ、水の移動にともなってダンパー内に空気が流入しないだけの水頭を与えた。

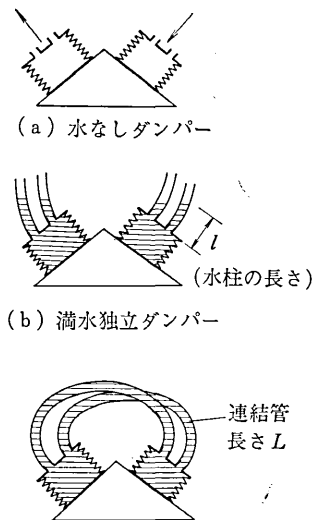


図 4 ダンパーの状態

研 究 速 報

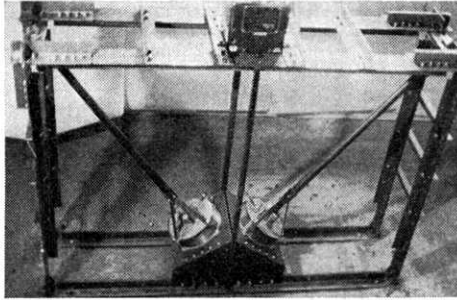


写真 1 試験装置

(c) 満水連結ダンパー……図 4 (c)

2つのダンパーの対応する円孔をビニール管で連結し、ダンパーと管に水を満たした。2つのダンパーは一方が縮小過程にある時他方が伸張過程にあるので、水は連結管の中を左右に高速で振動する。

(b), (c) の満水ダンパーの実験は、ダイヤフラム円孔の径および連結管の長さを変えた次の5種の場合について行なった。(表 3)

試験体と試験装置の全景を写真 1 に示す。

表 3

満水独立 ダンパー	記号	開口(オリフィス)	水柱の長さ <i>l</i>
	(b)-1	15 mmφ×2	12 cm
(b)-2	8 mmφ×2	21 cm	

満水連結 ダンパー	記号	開口(オリフィス)	連結管の長さ <i>L</i>
	(c)-1	15 mmφ×2	100 cm
	(c)-1'	15 mmφ×2	145 cm
(c)-2	8 mmφ×2	100 cm	

3. 実 験 結 果

(1) 自由振動試験の結果

(a) 水なしダンパーの場合

振動数は 7.0 Hz であった。減衰定数 *h* には振幅により多少変化があり、振幅 0.6 mm 以下で 0.007~0.012 であった。ダンパーなしのフレームの実験結果に比べて減衰効果はあまりない。

(b), (c) 満水ダンパーの場合

ダンパーに水を満たした自由振動では、振動数は振幅にかかわらずほぼ一定であるが、フレームのみの場合および水なしダンパーの場合と比較して特徴的なことは、

- 1) 固有振動数が極端に低下し、極めて長周期の振動となること
- 2) 減衰に強い振幅依存性が見られ、減衰力と変位速度にかなりの非線形性が予測されることである。

1) については、後で考察するように、ダイヤフラムの円孔を通して運動する水の質量効果によるものと推定される。表 4 に、非減衰振動系で成立する関係式

$$m = k/\omega^2 \tag{4}$$

に、水なしダンパーの場合のバネ定数  $k=184 \text{ kg/cm}$  (実測値) と、観測された振動数  $\omega$  を代入して得られる値を有効質量  $\bar{m}$ 、また  $\bar{w} = g\bar{m}$  を有効重量として表示した。

2) の減衰特性については、大振幅において減衰が大きく、微小振幅では大体粘性減衰の場合の一定な減衰比を示していることから、減衰力が

$$F(x) = a\dot{x} + b\dot{x}|x|^n \tag{5}$$

のような形をとるものと推定されるが、そのべき数 *n* と係数 *a, b* を確定するまでに到っていない。表 4 では、種々の振幅における見かけの減衰定数を

$$h = \frac{1}{2\pi} \log_e \left( \frac{X_i}{X_{i+1}} \right) \tag{6}$$

$X_i$ :  $i$  サイクルの変位振幅

として算出したものを掲げる。なお、この *h* は有効質量  $\bar{m}$  をもつ系に対する減衰定数を意味する。

(2) 強制振動試験の結果

起振機の偏心(重量)モーメントを 1 kg·cm から 3 kg·cm まで3段階(水なしダンパーについては2段階)に変えて強制振動を行なった。

(a) 水なしダンパーの場合および (b)-1 満水独立ダンパー(開口 15φ×2)の場合の共振曲線を図 5 に示す。この2つの場合は比較的に大きな振幅が生じたので、偏心モーメントが大きい程、変位倍率が小さくなり、減衰効果の非線形性が表われている。

他のタイプの満水ダンパーを用いた場合は、固有振動数が低いことと、減衰効果が大いいために変位振幅が小

表 4 満水ダンパーの場合の自由振動

ダンパーの 状態	記号	開 口	水柱または 連結管の長さ (cm)	固有振動 数 (Hz)	有効質量 <i>m</i> (kg· sec <sup>2</sup> /cm)	有効重量 <i>w</i> (kg)	減衰定数 (振幅)		
満水独立	(b)-1	15 mmφ×2	12	4.0	0.29	290	0.077(0.83 mm)	0.032(0.26 mm)	0.030(0.16 mm)
	(b)-2	8 mmφ×2	21	2.0	1.17	1,140	0.115(0.48 mm)	0.096(0.23 mm)	0.104(0.13 mm)
満水連結	(c)-1	15 mmφ×2	100	2.3	0.86	850	0.069(2.43 mm)	0.033(0.66 mm)	0.030(0.35 mm)
	(c)-1'	15 mmφ×2	145	2.0	1.12	1,100	0.047(1.15 mm)	0.034(0.40 mm)	0.041(0.21 mm)
	(c)-2	8 mmφ×2	100	1.5	2.03	1,990	0.087(0.56 mm)	0.067(0.32 mm)	0.065(0.21 mm)

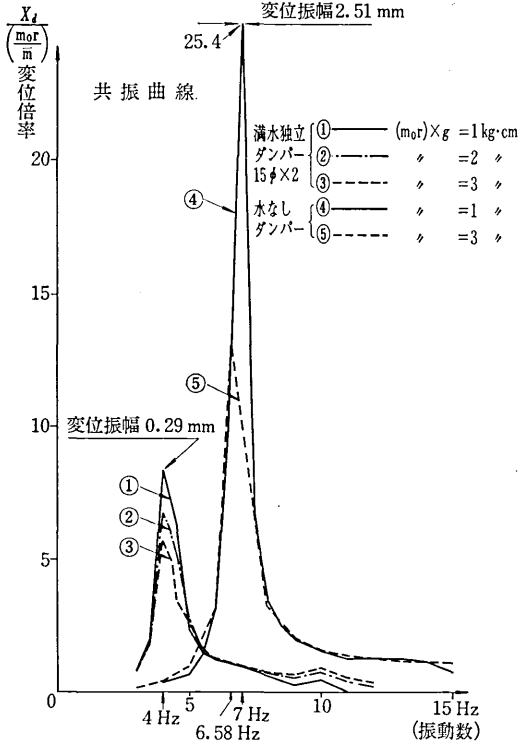


図 5 水なしダンパーと満水独立 (15φ×2) ダンパーの変位共振曲線

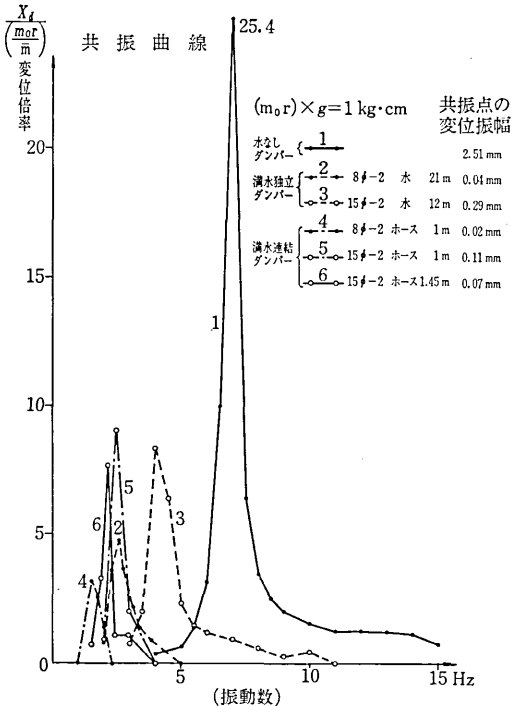


図 6 変位共振曲線の比較

さく、減衰効果の非線形性が表われておらず、偏心モーメントの値いかにかわらず、ほぼ同じ変位倍率が得られた。

図 6 は、偏心モーメント 1 kg·cm の場合の共振曲線をすべてのタイプのダンパーについて比較したものである。縦軸の変位倍率  $X_d / \frac{mor}{m}$  は、変位振幅を、共振時における回転質量の加振力  $f = mor\omega^2$  を構造物に静的に加えて生じる変位で割ったものであるが、図 5、図 6、では  $mor/m$  の質量  $m$  として、前節で求めた有効質量  $\bar{m}$  を用いて計算してある。

#### 4. 考察と結論

満水したダンパーの効果として最も顕著なことは、大きな質量効果があり、結果としてフレームの固有周期が極端に長くなることである。その理由について考える。

図 7 に示すように、フレーム上端に水平変位  $x$  が生じ

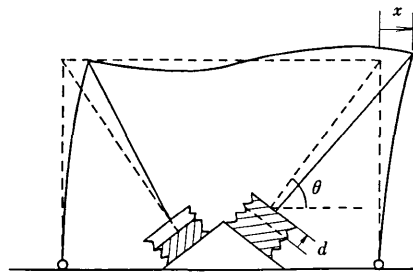


図 7 フレームの変位とダンパーの変位

ると、幾何学的関係からダンパーのベローズの先端は  $d = \alpha x$ ,  $\alpha = \cos\theta = 0.573$  (7)

だけ変位する。

次にベローズ先端が  $d$  だけ変位すると、ベローズ断面積を  $A$  として、 $d \times A$  だけの容積の水がダイヤフラムの円孔を通して出入する(図 8)。この時の水の移動速度  $\dot{X}$  は、円孔面積の合計を  $a$  とすれば

$$\dot{X} = \frac{A}{a} \dot{d}, \quad \dot{d} = \frac{\partial}{\partial t} \quad (8)$$

である。

ベローズ断面と円孔の面積比を

$$\beta = \frac{A}{a} \quad (9)$$

とおけば、(7)、(8) 式より

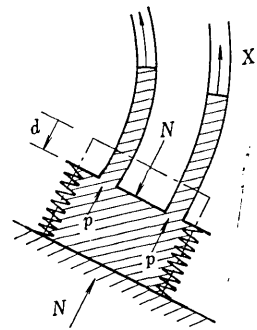


図 8 ベローズ変位と水の移動

研 究 速 報

$$\dot{X} = \beta \dot{d} = \alpha \beta \dot{x} \quad (10)$$

となる。現行のペローズ ( $A = 283 \text{ cm}^2$ ) について  $\beta$  を求めると

$$\left. \begin{aligned} \text{円孔 } 15 \text{ mm}\phi \times 2 \text{ の場合: } \beta &= \frac{283}{3.53} = 80.2 \\ \text{円孔 } 8 \text{ mm}\phi \times 2 \text{ の場合: } \beta &= \frac{283}{1.005} = 237 \end{aligned} \right\} (11)$$

となる。

対応する 2 つのダンパーの円孔を管で連結した場合、一方の水の押し出しと他方の吸引が完全に連動しているから、パイプの中の水の変位は

$$X = \alpha \beta x = \gamma x, \quad \gamma = \alpha \beta, \quad (12)$$

であると考えてよい。……図 9

一方、図 8 に示すように、フレーム斜材からダンパーに伝えられる力を  $N$  とし、液圧が円孔を通じて連結管の

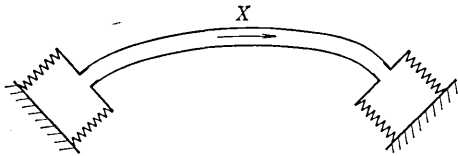


図 9 連結管の中の水の変位

中の水を押し出す力を  $p$  とすると、内圧と開口面積の関係から

$$p = a \cdot \frac{N}{A} = \frac{N}{\beta} \quad (13)$$

または

$$N = \beta p \quad (14)$$

が得られる。

ダンパーの減衰力としては、円孔まわりと連結管壁周辺の粘性抵抗 ( $\dot{x}$  に比例すると推定される) と、ペローズ中の静止液体が  $\dot{X} = \alpha \beta \dot{x}$  なる速度まで加速されるために消費される仕事に相当するもの ( $\dot{X}|\dot{X}|$  に比例) の両者が考えられる。これらの抵抗をまとめて  $C(\dot{X})$  とすると、円孔面積に作用する液圧  $p$  が、従ってまた斜材軸力  $N = \beta p$  がこの抵抗  $C(\dot{X})$  に打ち克たなければならない。

以上のような変位関係と力の釣合条件を満たす振動モデルとして、図 10 が考えられる。ここで

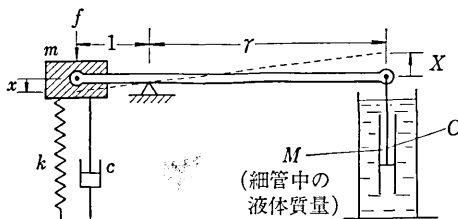


図 10 ダンパー効果のモデル

$m$ : 構造物の質量

$k$ : 構造物のバネ定数 (ペローズと斜材を含む)

$c$ : 構造物に本来備わっている減衰力の係数

$f$ : 構造物に作用する外力

$M$ : ダンパーの連結管の中を移動する水の質量

$C = C(\dot{X})$ : ダンパーの減衰力

$\alpha = d/x$ : ペローズ先端の変位/構造物の水平変位

$\beta = A/a$ : ペローズの断面積/ダイヤフラム開口の面積

$\gamma = \alpha \beta$

この振動モデルについて、振動方程式を立てると、この支点まわりのモーメントの釣合から

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \gamma\{M\dot{X} + C(\dot{X})\} = f \quad (15)$$

となる。ここで (12) 式の関係を用いると

$$(m + \gamma^2 M)\ddot{x} + \{c\dot{x} + \gamma C(\gamma\dot{x})\} + kx = f \quad (16)$$

を得る。これを

$$\bar{m}\ddot{x} + \bar{c}(\dot{x}) + kx = f \quad (17)$$

とおくと、

$$\bar{m} = m + \gamma^2 M \quad (18)$$

$$\bar{c}(\dot{x}) = c\dot{x} + \gamma C(\gamma\dot{x}) \quad (19)$$

はそれぞれフレームの水平変位に対する有効質量および有効減衰力を表す。

有効質量の試算を行なって見よう。ここではわかり易くするために、質量を重量でおき代えた計算を行なう。

1) 円孔が  $15 \text{ mm}\phi \times 2$ 、連結管の長さが  $1.0 \text{ m}$  の場合

$$\begin{aligned} M = aL &= 1 \text{ gr/cm}^3 \times 3.53 \text{ cm}^2 \times 100 \text{ cm} = 353 \text{ gr} \\ &= 0.353 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\gamma = \alpha\beta = 0.573 \times 80.2 = 45.9$$

$$\bar{m} = m + \gamma^2 M = 101 \text{ kg} + 45.9^2 \times 0.353 \text{ kg}$$

$$= (101 + 2107 \times 0.353) \text{ kg} = (101 + 744) \text{ kg} = 845 \text{ kg}$$

2) 円孔が  $8 \text{ mm}\phi \times 2$ 、連結管の長さが  $1.0 \text{ m}$  の場合

$$\begin{aligned} M = aL &= 1 \text{ gr/cm}^3 \times 1.005 \text{ cm}^2 \times 100 \text{ cm} = 100.5 \text{ gr} \\ &= 0.1005 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\gamma = \alpha\beta = 0.573 \times 237 = 135.8$$

$$\bar{m} = m + \gamma^2 M = 101 \text{ kg} + 135.8^2 \times 0.1005 \text{ kg}$$

$$= (101 + 18,442 \times 0.1005) \text{ kg} = (101 + 1,854) \text{ kg}$$

$$= 1955 \text{ kg}$$

この計算は、本来  $101 \text{ kg}$  である構造物の質量が、連結管を高速運動する水の質量効果のために、振動中には見かけ上  $845 \text{ kg}$  および  $1,955 \text{ kg}$  に増加することを意味する。上の試算が正しいことは、自由振動実験から逆算した表 4 の有効重量の値と比べればわかる。

次に満水ダンパーを用いた場合有効減衰力  $\bar{c}(\dot{x})$  によって変位倍率が低下することは図 6 の共振曲線を比べれば明らかである。この場合、独立ダンパーよりも連結ダンパーが、またダイヤフラム開口が小さい程、減衰効果が強いことが注目される。

減衰力と変位速度との関係の非線形性の解明は、今後

の課題として残った。

以上、今回の実験により、ベローズに満たした液体の運動を利用したダンパーは、顕著な質量効果と減衰効果により

- 1) 構造物の周期を大幅に長くする
- 2) 共振々幅を小さくする

ことが判明し、構造物の地震応答を小さくするための耐震ダンパーとして有望であると推定される。

(1973年1月6日受理)

引 用 文 献

- 1) 久保慶三郎・岡田恒男・川股重也，“都市構造物の耐震強度の調査研究”，生産研究，24巻3号，pp. 8—17，昭47年3月。
- 2) 川股重也，“免震構造は可能か”，臨時事業委員会報告：都市における災害・公害の防除に関する研究，1—5，昭47年3月。



正 誤 表 (2月号)

ページ	段	行	種 別	正	誤
53	右	9		$R_{\infty} = \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}$ (10)	$R_m = \sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}$ (10)
53	右	11		$-\pi K e^{K(z+z_m)} \{ \dots \}$ (12)	$-\pi K e^{(Kz+z_m)} \{ \dots \}$ (12)
54	左	7		$\frac{\partial}{\partial n} [e^{Kz} J_0(Kr)]$ (15)	$\frac{\partial}{\partial n} [e^{KZ} J_0(Kr)]$ (15)
54	左	13		$\frac{\partial}{\partial n} [e^{Kz} J_0(Kr)]$ (20)	$\frac{\partial}{\partial n} [e^{KZ} J_0(Kr)]$ (20)