

耐震ダンパーに関する研究

Development of Aseismic Damping Mechanism for Structures

第 2 報 起振実験および振動台実験

—Report No. 2: Forced Vibration and Vibration Table Tests—

川 股 重 也*・米 田 護*・半 谷 裕 彦*・金 沢 京 子*

Shigeya KAWAMATA, Mamoru YONEDA, Yasuhiko HANGAI and Kyoko KANAZAWA

1. ま え 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、耐震ダンパーの開発研究をおこなっている。その目的は、耐震ダンパーを構造物に組み込み、質量効果と減衰効果により、構造物の

- 1) 固有周期の調節
- 2) 振動応答の絶対値の低減
- 3) 共振時応答倍率の低下

を可能にし、制震機能を発揮させようとするものである。

第 1 報において、耐震ダンパーの基礎的性質、このダンパーを骨組構造に取り付けた場合の自由振動実験および強制振動実験結果などを報告し、この形式の耐震ダンパーの有用性を示唆した。

その後、鉄骨フレームの改良、新しい耐震ダンパーの開発をおこない、起振機による強制振動実験および千葉実験所に新設された振動台を用いた振動台実験を実施したので、ここでは、それらの実験結果の概要を報告するとともに、耐震ダンパーを組み込んだ振動系の性質について、理論的な説明をおこないたい。

2. 振動モデルの応答

今、図 1 に示すように、耐震ダンパーを一層のフレームに斜材で組み込むものとする。斜材の変形を無視すると、フレームの水平変位 X 、ペローズの伸び d 、管中の液体の移動距離 x の間には、第 1 報 [1] で説明したように次のような関係が成立している。

$$d = \alpha X, \quad \alpha = \cos\theta \tag{1}$$

$$x = -\beta d, \quad \beta = A/a \tag{2}$$

ここに、 A : ペローズの有効断面積、 a : 連結管の面積である。

次に、管中の液体に加わる力 P 、斜材軸力 N 、およびはりのレベルにおける斜材軸力の水平成分 N' の間に、次のような関係が成立している。

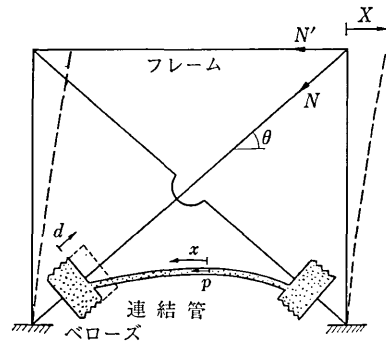


図 1 骨組の振動モデル

$$N = \beta P \tag{3}$$

$$N' = \alpha N \tag{4}$$

以上の 4 個の関係式から、2つのペローズが管で連結されている場合、管中の質量 m なる液体の変位 x は、フレームの水平変位 X との間には

$$x = -\beta d = -\alpha\beta X = -\gamma X, \quad \gamma = \alpha\beta \tag{5}$$

の関係を保って運動すること、および、管中の液体の運動に伴う慣性力 $m\ddot{x}$ は、

$$N' = \alpha N = -\alpha\beta (m\ddot{x}) = -\gamma (m\ddot{x}) \tag{6}$$

として、はりのレベルに伝えられること、がわかる。

このような変位条件と釣合条件を満たす振動モデルとして、図 2 が考えられる。ここで

M, K, C : フレームの質量、バネ定数 (ペローズのバネを含む)、減衰係数

m, c : 管中の液体の質量、液体の運動にともなう減衰係数

1) 外力に対する振動モデルの応答

外力 F が作用するとき、図 2 で示す振動モデルに対す

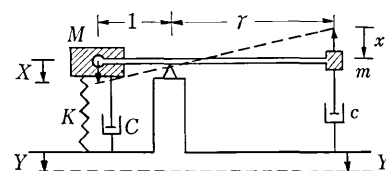


図 2 振動モデル

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

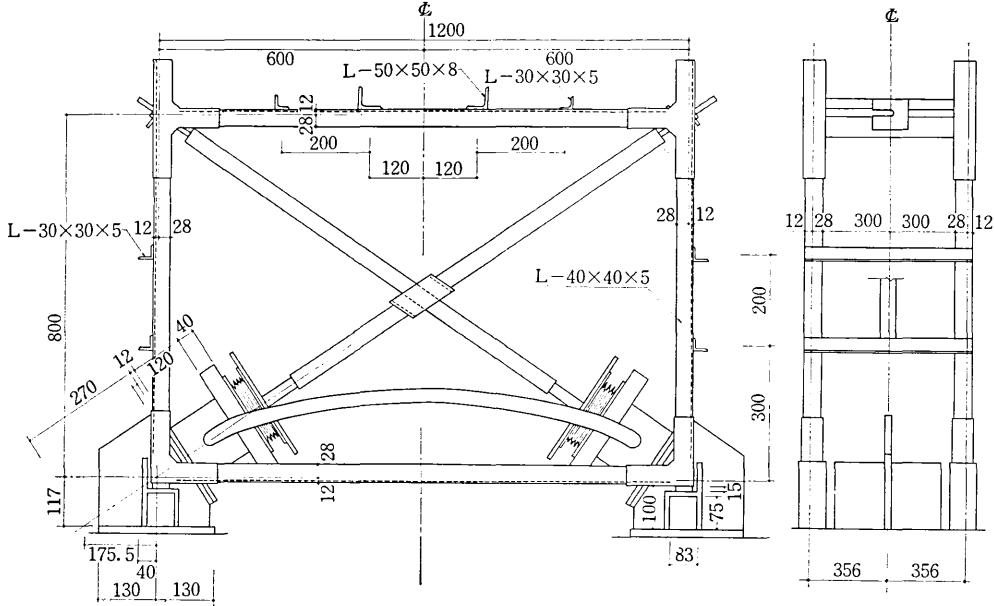


図 3 試験体の形状・寸法

る振動方程式は、減衰を粘性減衰と仮定すると、テコの支点でのモーメントの釣合いから、

$$(M + \gamma^2 m) \ddot{X} + (C + \gamma^2 c) \dot{X} + KX = F \quad (7)$$

上式において

$$\bar{M} = M + \gamma^2 m, \quad \bar{C} = C + \gamma^2 c \quad (8)$$

とおくと、

$$\bar{M} \ddot{X} + \bar{C} \dot{X} + KX = F \quad (9)$$

以上から、 \bar{M} 、 \bar{C} が有効質量、有効減衰を表わしており、 $\gamma^2 m$ 、 $\gamma^2 c$ が耐震ダンパーによる質量効果および減衰効果を表わしていることがわかる。

(9) 式から、系の非減衰固有振動数は

$$\bar{\omega}_0 = \sqrt{K/\bar{M}} \quad (10)$$

が得られるが、これはダンパーによる質量効果によってフレーム本来の固有周期が延びることを意味している。

また、この系の有効減衰定数は、

$$\bar{h} = \bar{C}/2\bar{M}\bar{\omega}_0 \quad (11)$$

となる。したがって、外力に対する応答は、有効質量 \bar{M} 、有効減衰定数 \bar{h} をもつ 1 質点系として計算すればよいことになる。

たとえば、起振モーメント $m_0 r$ なる起振機の正弦波出力に対する変位応答の振幅は、

$$X_d = \frac{m_0 r}{\bar{M}} \cdot \frac{\left(\frac{\omega}{\bar{\omega}_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}_0}\right)^2\right\}^2 + 4\bar{h}^2 \left(\frac{\omega}{\bar{\omega}_0}\right)^2}} \quad (12)$$

となり、耐震ダンパーをもたないフレームのみの場合に

比べて M/\bar{M} 倍に減少する。

2) 地動に対する振動モデルの応答

地動 Y を受ける場合を考える。図 2 より

$$\left. \begin{aligned} \text{フレームの絶対変位: } X + Y \\ \text{液体の絶対変位: } x + Y = -\gamma X + Y \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となるから、運動方程式は次のようになる。

$$(M + \gamma^2 m) \ddot{X} + (C + \gamma^2 c) \dot{X} + KX = -(M - \gamma m) \ddot{Y} \quad (14)$$

つまり

$$\ddot{X} + \frac{\bar{C}}{\bar{M}} \dot{X} + \frac{K}{\bar{M}} X = -\frac{M - \gamma m}{M + \gamma^2 m} \ddot{Y} > -\frac{M}{\bar{M}} \ddot{Y} \quad (15)$$

すなわち、地動に対する応答（相対変位）は、 $\bar{\omega}_0$ 、 \bar{h} をもつ系に、地動加速度 $(M/\bar{M}) \ddot{Y}$ が作用する場合よりも小さい。すなわち耐震ダンパーの質量効果により、地動応答は、フレームのみの場合の M/\bar{M} 以下に減少する。

3. 実験概要と結果

1) 試験体

試験体として、図 3 に示すような 1.2 m × 0.8 m の口型の鉄骨フレームを採用した。このフレームの上端の水平変位に対するバネ常数は、639 kg/cm、自由振動試験から求めた固有振動数は 17.2 Hz、減衰定数 $h = 0.005$ である（起振機を含めた質点の重量：53 kg）。

この鉄骨フレームに 2 本の斜材を設け、斜材と基礎との間に、表 1 で示す諸性状をもつベローズを用いた耐震ダンパー A、B を組み込み、ダンパーに水および油を封

表 1 ダンパーに用いたベローズの諸元

	ダンパー A	ダンパー B
材 質	SUS 304	SUS 304
内 径	105 mm	79 mm
外 径	135 mm	109 mm
有効断面積	113 cm ²	69.4 cm ²
山 数	12	12
自 由 長	25 mm	25 mm
バネ定数	3.6 kg/mm	2.9 kg/mm

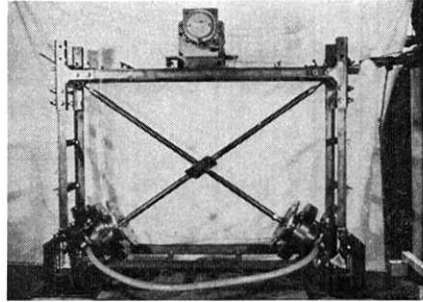


写真 1 起振実験中の試験体

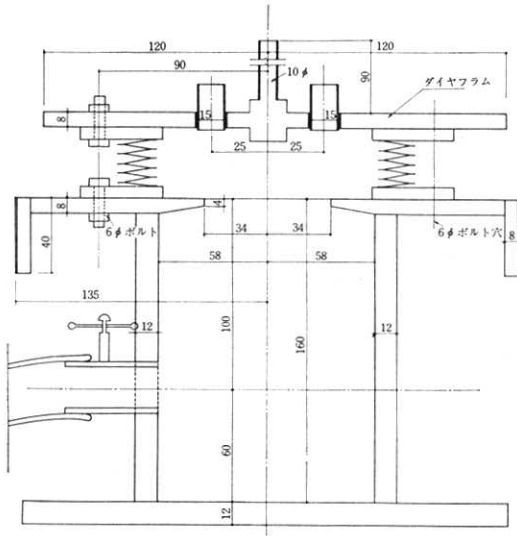


図 4 耐震ダンパーの断面図

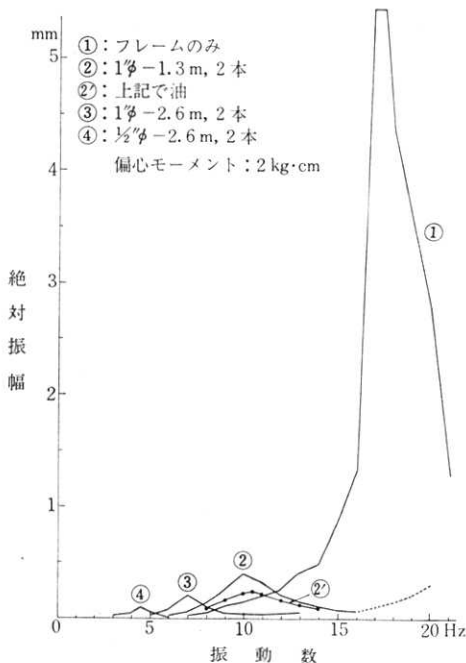


図 5 起振実験結果一振幅の絶対値

入して起振実験をおこない、また油を封入して振動台実験を実施した。耐震ダンパーの構造は図 4 の断面図に示すとおりであり、さらに、耐震ダンパー (No. A) を組み込んだフレームのバネ定数は 744.0 kg/cm であった。

2) 起振実験の結果

耐震ダンパー A を鉄骨フレームに取り付け、上部に起振機 (偏心モーメント: 2 kg・cm) を載せて実施した。実験の様子を写真 1 に示す。耐震ダンパーの開口径および連結管の長さを種々に変化させた場合の起振実験の結果を図 5、図 6 に示す。図 5 は、振動数と絶対振幅との関係を図示したもので、耐震ダンパーの質量効果により、フレームのみの場合と比較して、共振振動数が低下し、振幅の絶対値が全振動数帯にわたって著しく低下していることがわかる。図 6 の共振曲線は、有効質量 \bar{M} に対して変位倍率 $X_d / \frac{m_0 r}{\bar{M}}$ を求めたものである。共振点の変位倍率から逆算すると、フレームのみの場合の減衰定数 $h=0.025$ が水を封入した耐震ダンパーを用いた場合 $h=0.1$ 程度に、油の場合 $h=0.2 \sim 0.6$ 程度に増大していることがわかる。

図 6 の共振曲線の点線は、20 Hz 以上の振動数の高い部分に耐震ダンパーの効果が減少するようなもうひとつの共振点の存在を示唆しているが、この共振点およびその点での変位倍率などは、次の振動台実験でとらえられている。

3) 振動台実験

耐震ダンパー A、B を用い、各ダンパーごとに連結管の開口径および長さの 7 種類の組合わせに対して、変位制御 (± 0.2 mm, ± 1.0 mm)、加速度制御 (± 0.15 g, ± 0.3 g) で振動数 0 ~ 35 Hz 間の正弦波に対する応答を調査した。その結果の一部を図 7、図 8 に示す。(図中 1''φ-1.3 m、2 本は、円孔が 1''φ で長さが 1.3 m の連結管を 2 本用いたことを示す)

図 7 は、耐震ダンパー A を用い、変位制御 (± 0.2 mm) で加振したときの変位応答倍率 (フレーム上端の変位振幅 / 振動台の変位振幅) を描いたもので、たとえば、円孔が 1''φ で長さが 1.3 m の連結管を 2 本用いた場合の

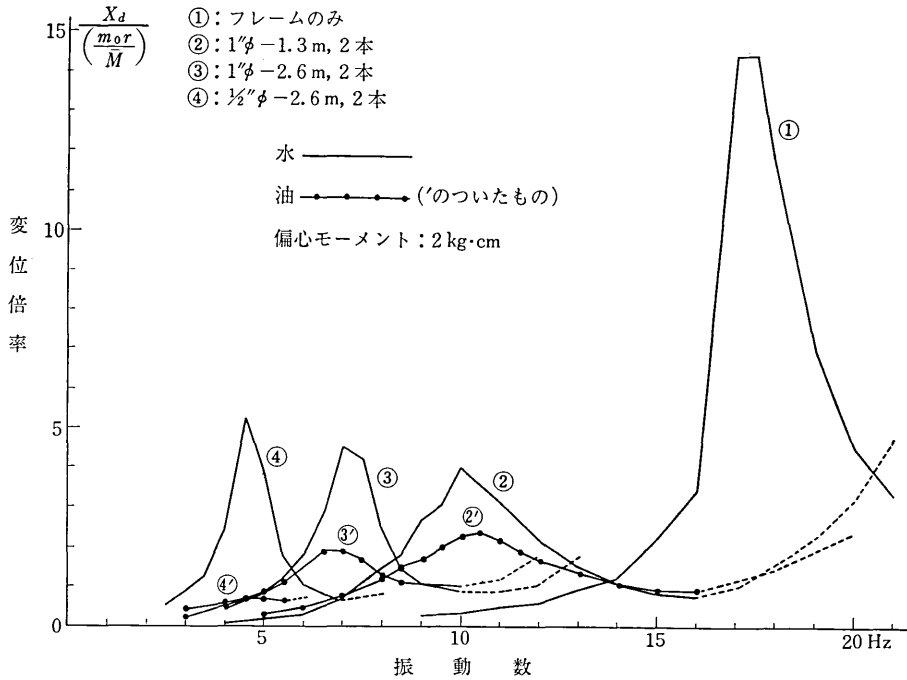


図 6 起振実験結果—共振曲線

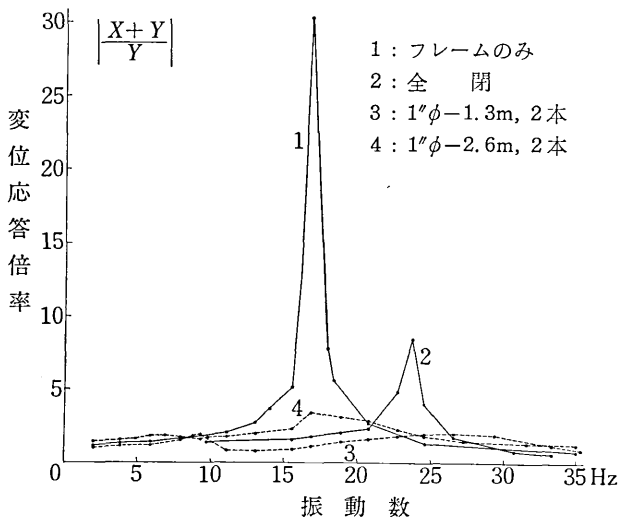


図 7 耐震ダンパーAを用いたときの変位応答倍率

共振点の応答倍率は、約2以下となっており、フレームのみの場合の30に比べて約 $\frac{1}{15}$ に減少していることがわかる。実線2は、耐震ダンパーに油を満たし、連絡管とダンパーとの間のコック(図4参照)を閉じた場合(図中の“全閉”)の結果を示したものである。振動系の質量は、この場合液体の移動はないから、ダンパーのあるなしにかかわらず共通であり、しかも振動数がフレームのみの場合の16.9 Hzから23.8 Hzに増加した。こ

れは、液体を密封したベローズと斜材によって、系のバネ定数が、638 kg/cmから1265 kg/cmに増大したことを意味する。

ここで使用している耐震ダンパーには、高振動数帯に入ると、液体の粘性によって全閉に近い状態が顕著に出現されることが予想され、このことが耐震ダンパーを用いたときに2個所で共振点が発生する原因と考えられる。このことを考慮した振動系のモデルとして図9のような質量効果をもつ3要素モデルが考えられる。ここで k_1 はダンパーのコックを全閉した時のバネ定数であり、 k_1 と k_2 を直列に結合したものがコックを明けた場合のバネ定数である。このモデルの振動応答が2つの共振点を含めて十分に小さければ、耐震ダンパーの目的は達せられると考えてよい。ここで示した実験結果では、広い振動数にわたって平坦で、低い応答倍率となっており、有効な耐震ダンパーが設計可能であることを示している。

図8は、耐震ダンパーBを用い、変位制御(± 0.2 mm)で加振したときの変位応答曲線を図示したものである。ダンパーのベローズ面積が小さいために、ダンパーAに比べると応答の低減効果は落ちるが、ダンパーのない場合に比べるとなおかつ有効であるといえる。

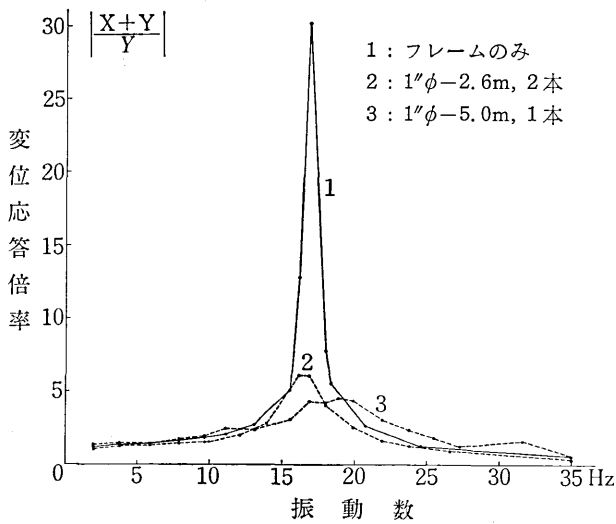


図 8 耐震ダンパーBを用いたときの変位応答倍率

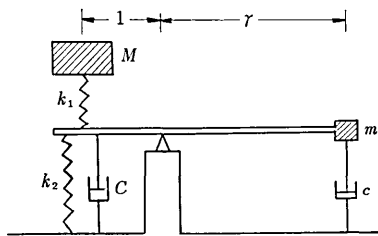


図 9 質量効果をもつ3要素モデル

3. 結 び

耐震ダンパーを組み込んだ振動系の性質について、理論的な説明をおこなうとともに、一層鉄骨フレームを用いた起振実験および振動台実験の結果を報告した。それらの結果から、質量効果、減衰効果ともに顕著であることが判明し、この形式の耐震ダンパーが十分な制震機能を発揮することが実証された。
(1973年8月27日受理)

参 考 文 献

- 1) 川股重也, 米田謨, 半谷裕彦「耐震ダンパーに関する研究, 第1報 自由振動試験および起振実験」生産研究第25巻第3号, 昭和48年3月
- 2) 川股重也, 半谷裕彦, 米田謨, 金沢京子「制振機構に関する研究
その1: 原理および自由振動試験
その2: 起振実験
その3: 受動質量をもつ系の固有振動」
日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和48年10月

正 誤 表 (10月号)

頁	段	行	種 別	正	誤
3		上から 7	内容梗概	パワー・スペクトル	パワースペクトル
3	右	" 14	本 文	電動機などの	電動などの
4	"	下から 6	"	必要となる	必要となる
7	左	" 5	"	変位の関係, コンプライアンス	変位の関係コンプライアンス
9	右	上から 6	"	本来の特性が...	本来特性が...
10	"	下から 15	"	$I_e = \dots$	$I_e = \dots$
13	"	" 18	"	パワー・スペクトル	パワースペクトル
15	"	上から 9	参考文献	J. C. Maltback	J. C. Matbaek
15	"	下から 5	"	Block	BLOCK
60	"	上から 16	本 文	3,6'-ジベンゾアントロニル	3,6'-ジベンゾアントロン