産業施設に適した建屋免震構造の基礎的研究*

(第 1 報, 履歴ダンパを用いた場合の免震性能)

藤田 聡^{*1}, 藤田 隆 史^{*1}, 佐々木 恒夫^{*2}
藤本 滋^{*2}, 成川 昇^{*2}, 鶴谷 千明^{*3}Fundamental Study of Earthquake Isolation Systems
Suitable for Buildings of Industrial Facilities
(1st Report, Performance of Earthquake Isolation Systems
Using Hysteretic Dampers)Satoshi FUJITA, Takafumi FUJITA, Yukio SASAKI,
Shigeru FUJIMOTO, Noboru NARIKAWA, and Chiaki TSURUYA

For industrial facilities, such as computer centres, semiconductor manufacturing factories and fast breeder reactor power stations, earthquake isolation systems used for buildings should not only attenuate the seismic response of the buildings but also reduce the response of the internal equipment. From this point of view, isolation systems using various types of damper have been evaluated through both experimental tests of a 0.3 scale model of a building supported by rubber bearings and theoretical analysis, to find the most suitable systems for industrial facilities. The performance of two types of isolation system using friction dampers and lead shear dampers respectively was examined. The results showed that both systems using these hysteretic dampers could attenuate the response accelerations of the building and limit the excessive deflexion of rubber bearings. However neither system, particularly the system using friction dampers, was less effective in reducing the response acceleration of the internal equipment.

Key Words: Vibration, Earthquake Isolation of Building, Industrial Facilities, Rubber Bearing, Hysteretic Damper

1. ま え が き

コンピュータセンタ, 半導体製造工場, 原子力プラントなどの産業施設において, 機器設備に対する地震入力低減の要求から, 施設建屋の免震支持を行うことが注目されている⁽¹⁾.

産業施設に適した建屋免震構造を検討する際には, 建屋自体の地震応答加速度を低減させるのはもちろんのこと, 最終的な免震対象である建屋内部の機器設備への免震効果に注目しなくてはならない. エネルギー吸収装置 (地面との相対変位をある範囲に押さえるために必要不可欠である) の選択が, この観点からの免震性能に影響すると考えられる. 本研究ではエネルギー吸収装置として, 履歴ダンパ (摩擦ダンパと弾塑性ダンパ) を使用する場合, 粘性ダンパを使用する場合, そして両者を併用する場合に分類し, これらを系統的に検討する.

本報では, 履歴ダンパを用いた場合の免震性能を検

討するために行った縮尺モデルによる振動実験と応答解析の結果について報告する. なお, 第 2 報では粘性ダンパを用いた場合について検討し, 第 3 報では両者を併用した場合を含め総合的な検討を行う.

2. 対象とした履歴ダンパ

履歴ダンパは, 摩擦や鋼棒などの弾塑性変形を利用したものが代表的である. 非常に効率良く系に減衰を与え, かつその強い非線形性を利用することで, 免震系の一次固有周期での過大な擬共振を防ぐことに効果的である.

本研究で使用した摩擦ダンパは, 建屋が地面と相対変位を起こす際のトリガとして機能するとともに, ヒステリシスループを描くことで系の運動エネルギーを吸収する. 一般に免震系一次の固有周期が長いほど免震効果が大いだが, 摩擦ダンパは水平剛性を増加させないため, この面からの免震性能への悪影響はない.

一方, 弾塑性ダンパは, そのヒステリシスループの形状が摩擦ダンパのものに比べて丸味をおびている. したがって免震時に, 衝撃的な力を上部構造物へ与えず, 系の高次振動を励起しにくい点では, 摩擦ダンパより優れていることが予想される. なお, 降伏後の水平剛性は免震性能上, 上述したようにできるだけ小さ

* 昭和 62 年 3 月 13 日 関西支部第 62 期定期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 5 月 13 日.

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1).

^{*2} 正員, (株)東芝総合研究所機械研究所 (〒210 川崎市川崎区浮島町 4-1).

^{*3} 正員, オイレス工業(株) (〒252 藤沢市桐原町 8).

いことが望ましい。本研究においては、この点に留意し、鉛のせん断変形を利用したダンパ（鉛せん断形ダンパ）を試作し使用した。

3. 振動実験の供試体と実験方法

3・1 供試体と相似則 50 t用積層ゴム⁽²⁾（定格搭載質量 50 000 kg に対して、固有振動数が水平に 0.53 Hz、鉛直に 17 Hz となる剛性を持つ）4 個で支持された建屋を想定し、縮尺比 0.3 の積層ゴムと建屋モデルを実験供試体として製作した。表 1 は本縮尺モデル実験での代表的な相似則を示したもので、縮尺系においては、応答変位は 0.3 倍になり、固有振動数や応答加速度は 3.3 倍となる。ただし、応答速度や積層ゴムのせん断ひずみなどは実大系の場合と変化なく同一に保たれる。

図 1 は免震支持された建屋の縮尺モデルである。本縮尺建屋モデルの総質量は 5 700 kg、固有振動数は一次が 13.3 Hz、二次が 28.5 Hz である。これらを相似則に従い実大系に換算すると、表 2 に示すように総質量は定格より少し大きく 211 000 kg となり、固有振動数は一次が 4 Hz、二次が 8.5 Hz となる。また、本縮尺建屋モデルは鋼製溶接構造のため、構造減衰は非常に小さい。したがって、実験結果の検討にあたっては、この点に留意した。

表 1 に示した相似則に従い製作した 50 t 用積層ゴムの縮尺モデルは、直径 134 mm、厚さ 1.5 mm のゴ

ム板と厚さ 0.9 mm の鉄板を交互に 30 層積層したものである。建屋モデルを積層ゴムのみで支持した場合の水平一次固有振動数は、表 2 に示したように、1.75 Hz（実験値）であり、実大系に換算すると 0.53 Hz となり、本縮尺積層ゴムは、相似則をほぼ満足していた。一方、鉛直方向の固有振動数は 33.3 Hz であったが、これを実大系に換算しても 10 Hz にしかならず、実大系の目標値である 17 Hz に比較してかなり低い剛性しか有していない。これは、極めて小さな圧縮ひずみ条件下で縮尺積層ゴムを使用していたことに起因する。すなわち、一般に積層ゴムの鉛直剛性は材料非線形のハード・スプリング（定格搭載荷重以上では、ほぼ線形となる）傾向を有しており、低圧縮ひずみ下では、所定の剛性が得られないからである。したがって、鉛直方向の振動実験は、実際の使用条件を想定したものとならず、ロッキング振動が生じやすいなど、免震にとっては不利な条件での実験となった。しかし後述するように、応答の顕著な増幅などは特に見られなかった。

3・2 履歴ダンパの実験モデル 図 2 は実験に用いた摩擦ダンパである。ピッチの細かいウォームギヤを回転すると、リンクにより下部および中央内円筒（凹状の断面を有し、両者の間には押付力測定用のロードセルが設けられている）が、外円筒（ケーシング）内を上へスライドする。さらに、コイルスプリングを介して上面に摩擦材（焼結合金）を取付けた上部内円筒（逆凹状の断面を持つ）が縮尺建屋モデルの底面に設けられたステンレス鋼板に押し付けられ、系に適当

表 1 代表的な相似則

	Scale model	Full size
Length	$l_m = 0.3 l_f$	l_f
Time	$t_m = 0.3 t_f$	t_f
Frequency	$f_m = f_f / 0.3$	f_f
Mass	$m_m = 0.3^3 m_f$	m_f
Acceleration	$a_m = a_f / 0.3$	a_f

図 1 免震支持された縮尺建屋モデル

表 2 縮尺モデルと実大系の比較

	Scale model	Full size
Mass of superstructure	5700 kg	211000 kg
Natural frequency of superstructure	1st: 13.25 Hz 2nd: 28.45 Hz	1st: 3.98 Hz 2nd: 8.45 Hz
Natural frequency of isolated superstructure	1.75 Hz	0.53 Hz

図 2 実験に用いた摩擦ダンパ

な摩擦力を与えることが可能となる。本実験では、摩擦力を8.4 kN (建屋重量に対して見かけの摩擦係数は $\mu_k=0.15$ となる)程度に調整した。しかし、しゅう動面の状態の変化により、特に4 cm 以上の変位では摩擦力が5.1 kN 程度に低下する場合もあった。

図3は同じく実験に用いた鉛せん断形ダンパである。本ダンパは、降伏変位および降伏後の剛性を極力小さくすることを目標に、ニュージーランドで開発された鉛プラグ入り積層ゴムの設計法⁽³⁾を参考に設計した。また、その構造は、水平変形時にダンパ自体が有効に純せん断変形できるように、曲げ変形を拘束するための鋼製を組み込んだ構造となっている。縮尺建屋モデルへの取付けは、せん断変形時のダンパの幾何学的伸縮を、シリンダ部の上下スライドである程度吸収しうる構造のダンパ取付け台 (ほぼ摩擦ダンパと同じ構造である) を介して行い、初期位置で0.98 kN の押付力 (面圧0.5 MPa) を加えた。試作したダンパは、降伏力14.3 kN, 初期剛性33.3 MN/m, そして降伏後の剛性は無視しえるものであった。

図3 実験に用いた鉛せん断形ダンパ

図4 供試体と計測箇所

3.3 実験方法 正弦波加振実験 (水平, 鉛直独立加振), 地震波加振実験 (水平, 鉛直同時加振) では, まず縮尺建屋モデルを振動台上に直に固定した場合, 積層ゴムのみで支持した場合 (地震波加振実験は行っていない), そして摩擦ダンパあるいは鉛せん断形ダンパを用いた場合の実験を行った。また, 摩擦ダンパおよび鉛せん断形ダンパの特性を, 油圧シリンダによる静的加力試験で随時確認した。

地震波加振実験での加振波は, 地動の実地震波を用いたが, 相似則に基づき時間軸を0.3倍に圧縮した。また加速度値は, 実大系での 3 m/s^2 に相当する水平方向 10 m/s^2 , 鉛直方向はその半分を加振目標とした。実験に用いた地震波は El Centro (Imperial Valley 地震, 1940 年), Taft (Kern County 地震, 1952 年), 八戸 (十勝沖地震, 1968 年), 秋田 (日本海中部地震, 1983 年) での各水平2方向および鉛直方向記録の合計8波である。

振動実験の計測は, 図4に示すように, 振動台および縮尺建屋モデルの各質量の水平・鉛直方向加速度と積層ゴムの水平変形量を測定した。

4. 解析モデル

免震支持された建屋の解析モデルとして, 図5に示すように, 建屋モデルの各質量の水平変位と建屋モデル全体の回転 (剛体回転) を考慮した四自由度系モデルを考え, 摩擦ダンパを用いた場合と鉛せん断形ダンパを用いた場合のおのおのについて運動方程式を求めた。ただし, 回転角は微小とし, 鉛直方向運動は無視した。

4.1 摩擦ダンパの場合

(1) 摩擦ダンパのすべりが無い場合—Phase I

$$m_3 \ddot{x}_3 + c_2 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2 - h_3 \dot{\phi})$$

図5 解析モデル

$$+k_2(x_3-x_2-h_3\phi)=-m_3\ddot{z}_H \cdots \cdots (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2-c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+c_1\{\dot{x}_2-(h_1+h_2)\dot{\phi}\}-k_2(x_3-x_2-h_3\phi)+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)=-m_2\ddot{z}_H \cdots \cdots (2)$$

$$x_1-h_1\phi=\text{const.}, \dot{x}_1-h_1\dot{\phi}=0 \cdots \cdots (3)$$

$$\sum_{i=1}^3 J_i \ddot{\phi} - \{c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+k_2(x_3-x_2-h_3\phi)\}h_3 - [c_1\{\dot{x}_2-(h_1+h_2)\dot{\phi}\}+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)] \times (h_1+h_2) + (L^2 C_V + C_\phi)\dot{\phi} + (L^2 K_V + K_\phi)\phi = -m_1(h_1\ddot{\phi} + \ddot{z}_H)h_1 \cdots \cdots (4)$$

(2) 摩擦ダンパのすべりがある場合—Phase II

$$m_3\ddot{x}_3+c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+k_2(x_3-x_2-h_3\phi)=-m_3\ddot{z}_H \cdots \cdots (5)$$

$$m_2\ddot{x}_2-c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+c_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1-h_2\dot{\phi})-k_2(x_3-x_2-h_3\phi)+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)=-m_2\ddot{z}_H \cdots \cdots (6)$$

$$m_1\ddot{x}_1-c_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1-h_2\dot{\phi})+C_H(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})-k_1(x_2-x_1-h_2\phi)+K_H(x_1-h_1\phi)+F_K \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})=-m_1\ddot{z}_H \cdots \cdots (7)$$

$$\sum_{i=1}^3 J_i \ddot{\phi} - \{c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+k_2(x_3-x_2-h_3\phi)\}h_3 - \{c_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1-h_2\dot{\phi})+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)\}h_2 - \{C_H(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})+K_H(x_1-h_1\phi)+F_K \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})\}h_1 + (L^2 C_V + C_\phi)\dot{\phi} + (L^2 K_V + K_\phi)\phi = 0 \cdots \cdots (8)$$

(3) Phase I と Phase II の切換条件

しゅう動面において、建屋モデルから加わる合力が静摩擦力を超えると滑り出す。逆に、しゅう動速度が零となり、かつ建屋モデルから加わる合力が静摩擦力以下になると Phase I に戻る。すなわち、

$$|-m_1(h_1\ddot{\phi} + \ddot{z}_H) + c_1\{\dot{x}_2-(h_1+h_2)\dot{\phi}\} + k_1(x_2-x_1-h_2\phi) - K_H(x_1-h_1\phi)| > F_s$$

のとき、Phase I → Phase II $\cdots \cdots (9)$

$$\dot{x}_1-h_1\dot{\phi}=0 \text{ かつ,}$$

$$|-m_1(\ddot{x}_1+\ddot{z}_H)+c_1\{\dot{x}_2-(h_1+h_2)\dot{\phi}\}+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)-K_H(x_1-h_1\phi)| \leq F_s$$

のとき、Phase II → Phase I $\cdots \cdots (10)$

ここで、 x_1, x_2, x_3 はおのおの建屋モデル各質量の重心の地表面に対する相対変位、 ϕ は建屋モデル全体の回転角、 m_1, m_2, m_3 はおのおの建屋モデル各階相当の質量、 J_1, J_2, J_3 はおのおの各質量の重心まわりの慣性モーメント、 k_1, c_1, k_2, c_2 はおのおの1層、2層の柱のばね定数、減衰係数、 K_H, C_H はおのおの積層ゴムの水平方向ばね定数、減衰係数、 K_V, C_V はおのおの積層ゴムの鉛直方向ばね定数、減衰係数、 K_ϕ, C_ϕ はおのおの積層ゴムの回転に対するばね定数、減衰係数、 F_K ,

F_s はおのおの摩擦ダンパの動摩擦力、静摩擦力、 h_1 は摩擦面(積層ゴム上面側取付面)と質量 m_1 の重心間距離、 h_2, h_3 はおのおの質量 m_1 と m_2 、質量 m_2 と m_3 の各重心間距離、 $2L$ は水平方向の積層ゴム取付位置間距離、 $\ddot{z}_H$ は地表面の水平方向加速度である。

4・2 鉛せん断形ダンパの場合 図6は静的加力実験によって得られた復元力特性と解析に用いた復元力特性を示したものである。本復元力特性には積層ゴムの剛性も含まれており、これを差し引くと降伏後の復元力はほぼ一定となった。したがって、本ヒステリシスループ形状は完全弾塑性形をもって十分に近似できると思われる。解析においては、以下に示すような微分方程式の形で表現される復元力特性⁽⁴⁾を用いた。本法はヒステリシス形状を簡単に描けない(図6は実際にシミュレーションを行った結果である)などの不便さもあるが、数値計算時間はパイリニアモデルを用いた場合の1/4~1/3であった。

$$\dot{F}_D(t) = K_{D0}(\dot{x}_1 - h_1\dot{\phi}) \left[1 - \text{sgn}(\dot{x} - h_1\dot{\phi}) \times \left\{ \frac{F_D(t)}{F_{D0}} - S(t) \right\}^n \right] \cdots \cdots (11)$$

$$S(t) = \alpha \{ (x_1 - h_1\phi) / X_Y - F_D(t) / F_{D0} \} \cdots \cdots (12)$$

$$K_{D0} = F_{D0} / X_Y \cdots \cdots (13)$$

$$K_{DY} = K_{D0} \cdot \alpha / (1 + \alpha) \cdots \cdots (14)$$

ここで、 F_D は鉛せん断形ダンパの復元力、 K_{D0} は初期剛性、 F_{D0} は降伏力、 X_Y は降伏変位、 K_{DY} は降伏後の剛性、 α は降伏後のこう配を決定するパラメータ、 n はヒステリシスループ形状の丸味(弾性から塑性への移り方)を決定するパラメータ(正の奇数)であり、 $n \rightarrow \infty$ のときパイリニアとなる。ここでは、ヒステリシスループ形状および応答波形を最も良く表現する $n=1$ を採用した。実験で使用した鉛ダンパは、降伏後の剛性は零と考えることができ、 α の値は零となる。以下にこの場合の運動方程式を示す(図5参照)。

$$m_3\ddot{x}_3+c_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})$$

図6 鉛せん断形ダンパの復元特性

$$+k_2(x_3-x_2-h_3\phi)=-m_3\ddot{z}_H \cdots \cdots (15)$$

$$m_2\ddot{x}_2-C_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+C_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1-h_2\dot{\phi})$$

$$-k_2(x_3-x_2-h_3\phi)+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)=-m_2\ddot{z}_H$$

$$\cdots \cdots (16)$$

$$m_1\ddot{x}_1-C_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1-h_2\dot{\phi})+C_H(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})$$

$$-k_1(x_2-x_1-h_2\phi)+K_H(x_1-h_1\phi)$$

$$+F_D=-m_1\ddot{z}_H \cdots \cdots (17)$$

$$\sum_{i=1}^3 J_i \ddot{\phi} - \{C_2(\dot{x}_3-\dot{x}_2-h_3\dot{\phi})+k_2(x_3-x_2-h_3\phi)\}h_3$$

$$-\{C_1(\dot{x}_2-\dot{x}_1-h_2\dot{\phi})+k_1(x_2-x_1-h_2\phi)\}h_2$$

$$-\{C_H(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})+K_H(x_1-h_1\phi)+F_D\}h_1$$

$$+(L^2C_V+C_\phi)\ddot{\phi}+(L^2K_V+K_\phi)\phi=0$$

$$\cdots \cdots (18)$$

$$\dot{F}_D=K_{D0}(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})\{1-\text{sgn}(\dot{x}_1-h_1\dot{\phi})\}$$

$$\times (F_D/F_{D0}) \cdots \cdots (19)$$

5. 実験および解析結果

5.1 正弦波加振の場合 図7は縮尺建屋モデルが積層ゴムのみで支持された場合の固有値解析(減衰は省略)を行い, その固有モードと固有振動数について実験結果と比較したものである。ここで, 添字 m は

縮尺モデルを示し, 添字 f は相似則により実大系に変換したものを示す。一次モードは積層ゴムだけがせん断変形し, 建屋はほぼ剛体のように挙動するモードである。二次および三次モードは地震動によって励起される振動数領域に固有振動数を持っており, また建屋底部の変位(積層ゴムの変形)が小さく, 免震にとって不利なものと言えよう。このことは程度の差こそあれ, 一般の免震建屋にも十分考えられることであり, 注意を要する。四次モードは積層ゴムによる回転が大きく出るモードであるが, 振動台の加振性能限界を超えた振動数のため, 実験では確認できなかった。

次に摩擦ダンパあるいは鉛せん断形ダンパを用いた場合の実験および解析結果について述べる。図8は入力加速度振幅一定(10 m/s²)の場合の, 質量 m_3, m_2 の応答加速度(図5参照)と積層ゴムの変形量についての共振曲線である。二次共振点(15 Hz), 三次共振点(29 Hz)のピークは建屋モデル自体のおおの一次, 二次モードに相当する。解析に用いる減衰定数を決定するために, 質量 m_3 の応答に関してはモードの卓越する二次のピークを中心に, 質量 m_2 の応答に関しては三次のピークを中心に合わせた。しかし解析モデル

図7 積層ゴムのみで支持された場合の固有モードと固有振動数

図8 免震支持された場合の応答加速度と応答変位に関する共振曲線

における建屋モデルの減衰を層間のみで働く粘性減衰と仮定したため、応答のピーク値を正確に表現しきれず、結果として質量 m_3 の三次のピークと質量 m_2 の二次のピークは解析のほうが大きな値をとったものと思われる。二次、三次共振点のピークのほかにも、特に 3, 5, 10 Hz で加振した際に非線形系の応答の特徴である高調波共振によるピークが顕著に表れている。実験で用いた鉛せん断形ダンパのヒステリシスループ

は、摩擦ダンパのそれとみなすと、ほぼ $\mu_{eq}=0.26$ という大きな見かけの摩擦係数を有していた。一般に、摩擦力を大きく系に与えるほど、免震効果は低下するが、二次、三次共振点のピークを見ても、むしろ鉛せん断形ダンパを用いた場合のほうが免震効果が優れている。今回試作した鉛せん断形ダンパは摩擦ダンパに比べてヒステリシスループの形状が丸味をおびていた。すなわち、変形が弾性域から塑性域へなめらかに

図 9 地震波加振実験での免震性能

図 10 摩擦ダンパの場合の地震応答波形例

図 11 鉛せん断形ダンパの場合の地震応答波形例

進行するため、高次振動を励起しにくかったものと考えられる。

ところで、本報で仮定した解析モデルでは、各次のモード減衰を直接求めることはできない。そこで、本縮尺建屋の各次モードの振動一周期で減衰により吸収されるエネルギー量を求め、次に、基準座標系で表した各次モードに対応する一自由度系の運動方程式より、振動一周期で減衰により吸収されるエネルギー量

を求めて、両者を等しいと置くことにより、各次モードの減衰比を形式的に算出した。その結果、一次モードで $\zeta_{MOD1}=0.0018$ 、二次モードで $\zeta_{MOD2}=0.0069$ と、本縮尺建屋モデルは小さな構造減衰しか有していなかった。

5・2 地震波加振の場合

図9は地震波加振による全実験結果を示したもので、実線は免震された場合、破線は免震されない場合の最大応答加速度と積層ゴム

図12 床応答スペクトルでの免震性能 (El Centro NS)

図14 建屋の減衰を増加した場合の床応答スペクトル (El Centro NS)

図13 床応答スペクトルでの免震性能 (秋田 NS)

図15 建屋の減衰を増加した場合の床応答スペクトル (秋田 NS)

の最大変形量を表している。ただし、免震されない場合(建屋モデルを振動台に直に固定)の結果は、実際には水平 2 m/s^2 、鉛直 1 m/s^2 を加振目標にして得られたものを対応する免震された場合の実験の入力レベルに一致するように、入力比で結果を線形倍したものである。免震された場合の応答加速度は入力地震波によらずおおむね同じ値となるが、八戸 EW 波や秋田 NS 波(免震系の一次固有周期付近に卓越する成分を持っている)を入力した場合、応答変位(積層ゴムの変形量)はかなり大きくなり、また応答加速度の低減率は低下した。したがって入力波の性質が免震性能の評価に大きく影響するものと考えられる。なお、鉛せん断形ダンパを用いた場合のほうが5・1節で述べたように減衰が大きく、総じて積層ゴムの変形量は小さく押さえられている。しかし、その割に応答加速度は増大されておらず、地震波加振実験においてもヒステリシスループ形状の違いによる応答の差が表れたと考えられる。鉛直方向に関しては、前述したように、実大系での応答を忠実に模擬したものではないが、それにもかかわらず免震をしたことによる応答の増幅などの顕著な悪影響は特に見られなかった。

図 10, 11 はそれぞれ摩擦ダンパを用いた場合、鉛せん断形ダンパを用いた場合に対し、El Centro NS 波を入力した際の応答波形の解析結果と実験結果を比較したものであるが、両者とも良く一致している。ただし、摩擦ダンパを用いた場合の積層ゴムの変形量に若干の差があるが、これは3・2節で述べたように実験と解析で用いた摩擦係数の差(ばらつき)による誤差が計算結果に影響したためである。

5・3 床応答スペクトルでの免震性能 産業施設用の建屋免震構造においては、内部の機器設備への免震効果に注意しなくてはならない。ここでは、床応答スペクトルを用いて、この観点からの免震性能を検討した。図 12, 13 はそれぞれ El Centro NS 波、秋田 NS 波に対する、免震された場合の床応答スペクトルを、おのおの摩擦ダンパを用いた場合と鉛せん断形ダンパを用いた場合について比較したものである。なお、機器の減衰比は1%として計算した。どちらのダンパを用いた場合でも、床応答スペクトルでの免震効果はほぼ同程度である。しかしながら、積層ゴムの変形も小さく、ダンパとしての性能は鉛せん断形ダンパの方が良い。これも、5・2節で述べたように、ヒステリシスループ形状の違いによるものと考えられる。

本縮尺建屋モデルは、減衰が非常に小さく、一般建屋の応答として評価しにくい面がある。そこで、通常のコンクリート造建屋を想定し、前述した手法に基づ

き、建屋モデルの一次、二次モード減衰が5%程度になるよう、減衰定数を決定し作成した床応答スペクトルを図 14, 15 に示す。ここでは、鉛せん断形ダンパを用いた場合に対してのみ計算を行った。El Centro NS 波に対してだけではなく、免震にとって不利な長周期成分を多く含む秋田 NS 波に対しても、実大系における機器の固有振動数が約 5 Hz (周期 0.2 s で縮尺モデルでは 0.06 s) 以上になると免震効果は大きくなる。しかし、5 Hz 程度以下の機器に対しての免震効果は十分ではない。このように、履歴ダンパを用いた免震構造では、次報で述べる粘性ダンパを用いた場合のように広い振動数範囲で良好な免震性能を期待できない。しかしながら、図 15 に示されるように、秋田 NS 波に代表される長周期成分を多く含む地震波が入力された場合にも、免震系一次周期における過大な擬共振は良く押さえられており、この点が履歴ダンパを用いた場合の利点となろう。以上により、免震支持を行う際に、そのエネルギー吸収をすべて履歴ダンパで行うことには問題があり、機器設備にとって十分な免震効果を期待できない可能性がある。

6. あ と が き

本報では、産業施設に適した建屋免震構造を検討するため、まず履歴ダンパ(摩擦ダンパ、鉛せん断形ダンパ)に関して報告したが、その結果を要約すると次のようになる。

(1) 今回対象とした履歴ダンパの内では、免震性能の面から評価すると、摩擦ダンパより鉛せん断形ダンパのほうが有利であった。これは、ダンパの描くヒステリシスループの形状が摩擦のものに比べて丸味をおびていることに起因すると考えられる。

(2) しかしながら、本実験では、鉛せん断形ダンパを用いた場合においても、機器設備にとっての免震効果は十分に満足しうるものではなかった。このことは、一般の弾塑性ダンパの場合にも、ある程度あてはまる可能性を持っていると思われる。

(3) 一方、免震系の一次周期における過大な擬共振現象を押さえるためには、履歴ダンパのような強い非線形を有するエネルギー吸収装置が有利である。したがって、産業施設用の建屋免震構造の場合には、機器設備への免震効果の低下の妥協を計りながら、履歴ダンパを使用することが望ましいと考えられる。

最後に、本実験で用いた積層ゴムに関して多大なるご協力をいただいた(株)ブリヂストン開発本部の諸氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 藤田, 機論, 51-461, C (昭60), 1.
 (2) 藤田・ほか3名, 機論, 53-485, C (昭62), 71.

- (3) Robinson, W. H., *Int. J. Earthqu. Engng. Struct. Dyn.*, 10-4 (1982), 593.
 (4) Bhatti, M. A. and Pister, K. S., *Int. J. Earthqu. Engng. Struct. Dyn.*, 9-6 (1981), 557.

討 論

〔質問〕 藤田 勝久・田中 守
 (三菱重工(株)高砂研究所)

(1) 図10の解析結果と実験結果の差異の原因として摩擦係数のばらつきを挙げておられるが, 具体的には3・2節で述べておられる摩擦係数の空間的変動を指しておられるのか, それとも滑り速度や面圧による摩擦係数の変化までを指しておられるのかご教授願いたい。

(2) 図12, 13の応答スペクトルでは解析と実験で入力波のスペクトル自体に若干の差異が認められる。この事より解析の入力は振動台上の実測波ではなく, 原波形をスケールしたものをを用いたと推定される。特に摩擦ダンパの場合には入力波の若干の相異によって滑り状態と静止状態の遷移状況が異なり, その積分値ともいえる変位波形には無視できない差異を生じる可能性があるものと考えられる。質問(1)に述べた図10の解析評価誤差をこのような観点から検討されてはいかがか。

(3) 鉛せん断形ダンパについて, 振動時の発熱による能力低下の影響はどうか。

〔回答〕 (1) 3・2節で述べたように, 摩擦係数の空間的変動を指している。また, その変動のしかたには, 特に再現性はなく, しゅう動回数により摩擦面の状態が変化し, 摩擦特性に影響したものと考えられる。

(2) ご指摘の入力波のスペクトルの差異(図12, 13の鉛せん断形ダンパを用いた場合, 特に顕著である)は, 非免震時のスペクトルが, 本来水平方向入力加速度約 2 m/s^2 で行った実験結果を, 免震時の入力加速度約 10 m/s^2 に一致させるように応答値を含め線形倍して作成したことに起因する。なお, 免震時の応答解析には, 実験時の振動台上の実測波を使用した。

(3) 実験中, ダンパの温度計測は行わなかったが, 実験後, フランジへの固定部に生じたクラック部に, 鉛が酸化した形跡が見られた。したがって, 鉛ダンパ

内部の一部では融点(327°C)程度に発熱したことが推察される。しかしながら, 地震波加振実験においてダンパ全体が発熱し, それにより特性が変化することは認められなかった。

〔質問〕 浅見 敏彦 (姫路工業大学)

複雑な現象を詳細に検討されたことに敬意を表す。
 以下の点について質問させていただく。

建屋の免震構造の性能にはダンパの特性が大きな影響を与えると結論されているが, 論文ではダンパ自身の減衰特性, 例えば減衰係数の振幅依存性, 周波数依存性などが示されていない。免震構造の性能をこのようなダンパの減衰特性と関連づけて論ずれば, どのような特性をもつダンパを設計すればよいかが明らかになると思うが, いかがか。

〔回答〕 摩擦ダンパについては, 文献(付1, 付2)で述べたように, その減衰力(摩擦力)の速度依存性, 振幅依存性等は無視しうるものであった。

鉛せん断形ダンパは, 部材の弾塑性変形を利用して減衰力を生じるため, 本質的に減衰力の振幅依存性がある。すなわち, 降伏点に至らない場合のヒステリシスループは細長い形状で, そのエネルギー吸収量は小さいが, 降伏点を過ぎある程度の振幅に達すると所定の減衰力を生じる。また, 一定振幅で周波数を変化させても, ヒステリシスループ形状の変化は微少であり, 動的解析に際し, 静的加力試験で得られた復元力特性を用いても大きな誤差は生じないと考え(図11参照)。

いずれにせよ, 本ダンパの実用化にあたっては, 実大スケールの供試体を製作し, ご指摘の点を含めて検討し, 免震構造に適したダンパの設計法を開発していくことが今後の課題であると考えられる。

- (付1) 藤田・ほか2名, 機論, 50-454, C (昭59), 933.
 (付2) 藤田・ほか3名, 機論, 51-461, C (昭60), 17.