

厚肉積層ゴムを用いた免震・除振システムの開発（その2）

——上下用ダンパーの開発とその動特性——

寺村 彰 吉原 醇 一 中村 充
中村 嶽 安井 讓

Development of Base Isolation System for Earthquakes and Micro-vibrations

Using Laminated Thick Rubber Bearings (Part 2)

——Vertical Damper Device and its Dynamic Characteristics——

Akira Teramura Jun-ichi Yoshihara Mitsuru Nakamura
Takashi Nakamura Yuzuru Yasui

Abstract

In a base isolation system for reducing earthquake forces, laminated rubber bearings with thick natural rubber pads are applied to reduce micro-vibrations in the vertical direction, while a damper system in the vertical direction will also be required to supplement the damping performance of natural rubber. The damper system developed consists of visco-elastic dampers using high-viscosity silicon materials injected into cylindrical steel pipes and having movable joints at both ends of the pipes to follow horizontal displacements of the base isolation system. This paper describes an outline of the damper device, the calculation method of damping force studied by dynamic forced vibration tests, and the results of verification tests performed on a one-story base-isolated building.

概 要

地震入力を低減する免震構法において、厚肉タイプの積層ゴムは、水平方向には従来の積層ゴムと同様の免震・除振性能を有し、上下方向には10 Hz付近以上の高周波振動を除振する性能を有する。しかし、厚肉タイプの積層ゴムの低減衰性を補うために上下用ダンパーが必要になる。開発した上下用ダンパーは円筒形状の径の異なる複数の鋼管を組み合わせてその間に高粘度シリコン材料を注入したものである。また、免震装置の水平方向の変形に追従できるように上下端部に可動治具を設けた。本報告では上下用ダンパーの概要を紹介するとともに、その減衰力の計算方法を示し、さらに免震建物に設置して実施した検証試験の結果について述べる。

1. はじめに

天然ゴム系の厚肉タイプの積層ゴムを上下振動の除振も兼ねた免震建物に適用する場合には、水平振動に対して水平用ダンパーが配備されるように、積層ゴムの低減衰性を補うための上下用ダンパーを配備する必要がある。上下用ダンパー（以下、単にダンパーと呼ぶ）の開発に当たり配慮する厚肉積層ゴムの動特性は、水平方向については従来の免震ビルとほぼ同等に周期が数秒で強震応答の振幅が20 cm程度とし、上下方向については固有周期が0.2秒程度で、変位振幅が強震応答でも数ミリ程度である。従って、上下用ダンパーは除振対象のミクロン振幅から強震応答の数ミリ程度までの範囲に適用でき、かつ、水平方向の大きな変形にも追従できる性能が要求される。本報告は、ダンパーの概要、特性試験結果から導かれたダンパーの減衰力に関する計算方法、及び、1層RC造免震建物に装着して実施した起振機試験の結果などについて述べる。

2. 上下用ダンパーの材料と形状

2.1 粘性材料

ダンパーに用いる材料は、炭化水素 CH_3 に結合した珪素Siの連鎖が骨格を成す構造のシリコン珪素樹脂の内、比重 0.978 g/cm^3 、分子量2,000以上の高粘度60万ストークスシリコン珪素樹脂である。特徴としては、 CH_3 による有機質系としての耐水性、柔軟性などと、Siによる無機質系としての強度、耐熱性、耐寒性などの複合した性質があり、免震装置の材料として経年変化が少ない、引火点 315°C 以上で燃え難い、外気温度依存性が少ないなどの好ましい性質を有している。

2.2 ダンパーの形状

ダンパーの原理を図-1に示す単管ダンパーで説明する。ダンパーは内管 D_1 、外管 D_2 及び両管の隙間に注入された粘性流体で構成される。減衰力は両管の相対運動に対して隙間距離 Δt の粘性流体に作用するずり（せん断）速度に比

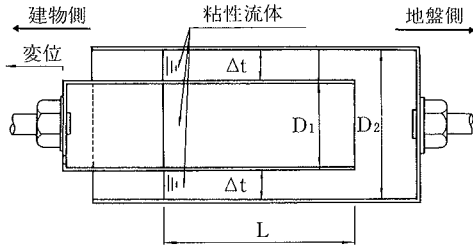


図-1 単管ダンパーの断面形状

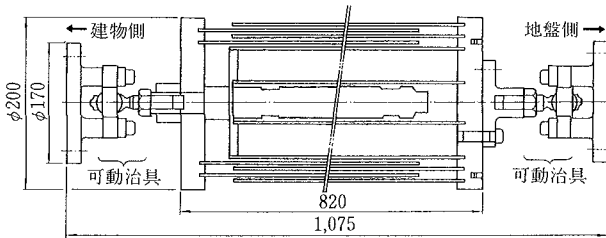


図-2 多重管ダンパーの断面形状

表-1 単管・多重管ダンパーの鋼管諸元

単管試験体	No.1	No.2	No.3	多重鋼管試験体 (外径×内径) mm×mm	隙間 (Δt) mm
D ₁ mm	17.3	34.0	42.7	165.2×155.2 152.4×142.4	— 1.4
D ₂ mm	27.6	37.2	43.8	139.8×133.8 130.0×122.0	1.3 1.4
Δtmm	5.15	1.60	0.55	119.0×110.0	1.5
Lmm	150.	140.	210.	650	

例するせん断応力として得る。より大きな減衰力を得るためには内管に相当する部分を多重管にすれば良い。免震建物に装着したダンパーは形状を図-2に示す様に、直径の異なる円筒鋼管を建物側から2本、地盤側から3本を互いに挿入しあつた多重鋼管である。また、免震建物の水平2方向の大きな変位に追従できる構造にするため、両端に許容回転角±23度の可動治具が取り付けられている。厚肉積層ゴムと併用して設置した多重管ダンパーを写真-1に示す。

3. 上下用ダンパーの特性試験

3.1 試験方法

試験体は図-1、表-1の左側に示す鋼管製のΔtの異なる3種類の単管試験体と、図-2、表-1の右側に示す多重鋼管試験体である。試験は加振機、動荷重計と相対変位計を用いて、周波数0.5~10 Hz、振幅0.01~5 mmの範囲で動荷重P~変位zの復元力特性を計測する方法で実施した。

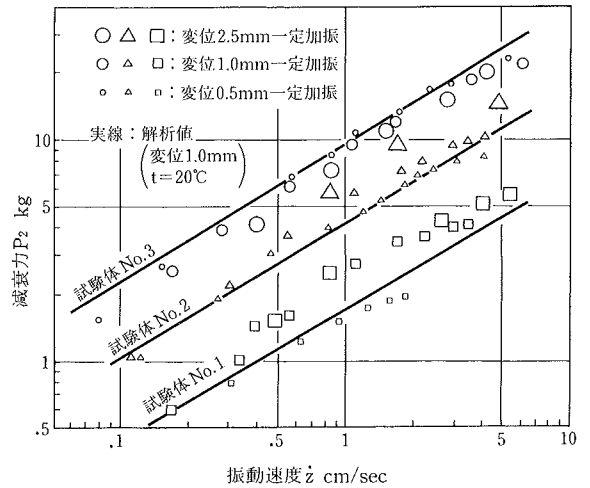


図-3 振動速度に関する減衰力特性（単管ダンパー）

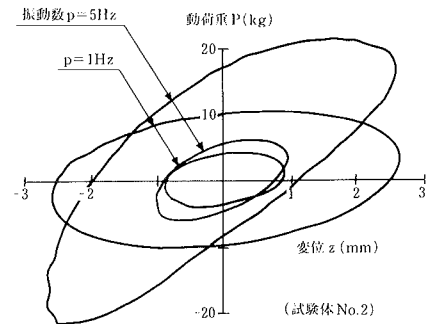


図-4 荷重P~変位zの復元力特性（単管ダンパー）

3.2 試験結果

単管ダンパー試験体の代表的な結果を図-3、図-4、多重鋼管ダンパー試験体の結果を図-5、図-6に示す。この結果、次の様な傾向を得た。

- ① 減衰力P₂は、図-3に示す両対数グラフより、主に、振動速度 $\dot{z}(=p \cdot z / \Delta t)$ に依存する傾向にある。
- ② しかし詳細に見ると減衰力P₂は、図-3より、同一速度でも変位に若干、依存する傾向が見られる。
- ③ また、動荷重P~変位z復元力特性図-4を見ると振動数pが弾性剛性 $a_1 k_1$ に及ぼす影響が強い。

以上の複雑な諸傾向は、図-5に○印破線で測定値を示すが、複素剛性 $a_2 k_2$ を縦軸に、横軸に振動速度を取り、振動数p、変位zをパラメーターにして表示することによりかなり明らかになる。つまり、ダンパーの減衰特性は変位と振動数に依存する傾向にある。また、減衰率 $\tan \delta$ は試験結果を図-6に○印で示すが、変位依存する傾向にある。なお、振動速度が10 cm/sec程度以上になると粘性体が鋼管との境界で剝離現象が観察される場合があり、当然のことながらP₂も上昇しない。

4. 減衰力に関する解析方法と解析結果

4.1 解析方法

上部構造剛体の質量mの鉛直変位zに関する運動方程

表-2 粘性材料の各係数分析結果

変位 z	1μm	10μm	100μm	1mm	5mm
粘性係数 a	0.007	0.008	0.010	0.015	0.015
振動数係数 α ₁	0.80	0.70	0.60	0.60	0.60
変位係数 α ₂	0.70	0.60	0.50	0.60	0.70
減衰 tan δ	1.5	1.5	1.5	2.0	5.0

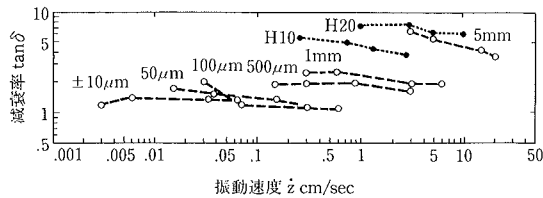


図-5 複素剛性と振動速度・変位・振動数の関係

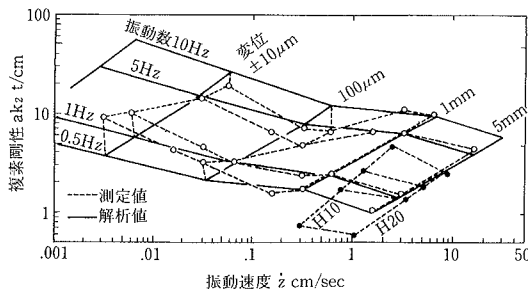


図-6 対数減衰率と振動速度・変位の関係

式(1)より、ダンパーの弾性(実数部)剛性 ${}_a k_1$ と複素(虚数部)剛性 ${}_a k_2$ は、復元力式(2)より式(3)~式(4)で表わされる。ここで、 ${}_r k_1$ 、 ${}_a k_1$ はそれぞれ積層ゴムとダンパーの弾性剛性、 ${}_r k_2$ 、 ${}_a k_2$ はそれぞれの減衰力に関する複素剛性、また、両者の剛性比が減衰率 $\tan \delta$ 式(5)である。

$$m\ddot{z} + \{({}_r k_1 + {}_a k_1) + i({}_r k_2 + {}_a k_2)\} \cdot z = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$P = ({}_a k_1 + i {}_a k_2) \cdot z = {}_a k_1 \cdot z + ({}_a k_2 / p) \dot{z} \dots\dots\dots(2)$$

$${}_a k_1 = P_1 / z_{\max} = (P_2 / \tan \delta) / z_{\max} \dots\dots\dots(3)$$

$${}_a k_2 = (p / z_{\max}) P_2 = P_2 / z_{\max} \dots\dots\dots(4)$$

$$\tan \delta = {}_a k_2 / {}_a k_1 \dots\dots\dots(5)$$

式(1)の減衰定数 h は式(6)で表わされる。

$$i({}_r k_2 + {}_a k_2)z = 2h\sqrt{m({}_r k_1 + {}_a k_1)}\dot{z}$$

$$\therefore h = \frac{1}{2} \cdot \frac{({}_r k_2 + {}_a k_2)}{({}_r k_1 + {}_a k_1)} \dots\dots\dots(6)$$

従って、ダンパーの減衰力 P_2 と減衰率 $\tan \delta$ が明らかになれば剛性 ${}_a k_1$ 、 ${}_a k_2$ が分かる。

4.2 解析結果

試験結果を分析して減衰力の計算式(7)を導いた。

$$P_2 = a \cdot \sum_i \{ S_i \cdot p^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{z}{\Delta t_i} \right)^{\alpha_2} \} e^{-\beta t} \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 P_2 : 減衰力 kg, a : 粘性係数, S_i : i 層のせん断面積 cm^2 , p : 強制円振動数, z : 変位 cm, Δt_i : i 層の隙間

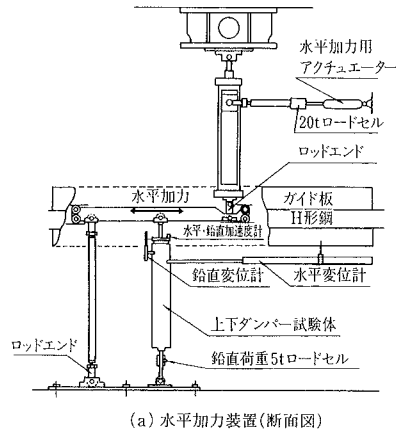


図-7 可動治具付ダンパーの水平加力試験装置

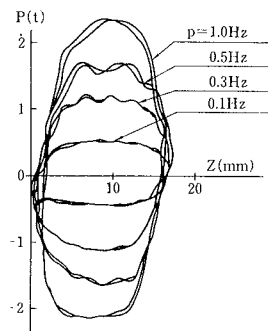


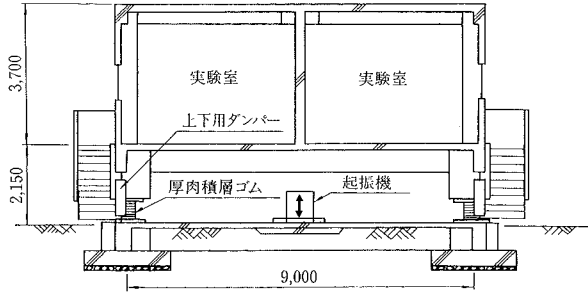
図-8 水平加力試験によるダンパー軸方向の復元力特性

cm, α_1 : 振動数依存係数, α_2 : 変位依存係数, β : 温度係数(0.0216), t : 環境温度 $^{\circ}\text{C}$ である。係数 a , α_1 , α_2 については、変位レベルを反映させる形式でまとめた結果を表-2に示す。なお、変位 0.1 mm 以下では可動治具(クリアランス 0.1 mm)の場合に、固定状態の場合と異なり、式(7)で得る減衰力 P_2 の 40~60% 値に対応した。解析は式(7)式(4)と実験時の環境温度 $t=15\sim 25^{\circ}\text{C}$ で行なった結果、図-3, 図-5 に実線で示す様にミクロン~mm の振幅範囲に渡りほぼ対応した。

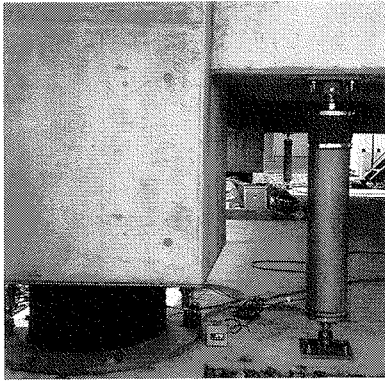
5. 水平方向の強制変位に対する特性

積層ゴムに水平変位が発生すると、上下ダンパーは傾いて軸方向に伸縮しながら積層ゴムの変形に追随する。この試験を図-7に示す水平加力試験装置を用いて、高さを一定に保ちながら水平方向に強制変位を与える方法で行なった。測定はダンパーの軸方向に作用する力と変位を検出して前記と同様にダンパーの軸方向の復元力特性を計測する方法である。

復元力特性の測定例を図-8に示す。水平方向の加力試験に対する特徴は、水平方向1往復につきダンパーは軸方向に2回伸縮すること、また、軸方向変位が片側に全振幅で表示されることにある。従って、振動数を2倍、変位を1/2にして整理すると、図-5, 図-6に●印でH10(水平



図一 9 厚肉積層ゴムと多重管ダンパーを装備した音響多目的免震実験棟 断面図



写真一 1 厚肉積層ゴムと多重管ダンパーの設置状況

加力変位 10 cm, 軸方向変位 ±2.3 mm), H20(同, 20 cm, ±8 mm)として示す通り, 上下加振の試験結果にほぼ対応する。可動治具に対する試験は強制変位 40 cm まで実施して正常に機能することを確認した。

6. 免震建物による性能試験

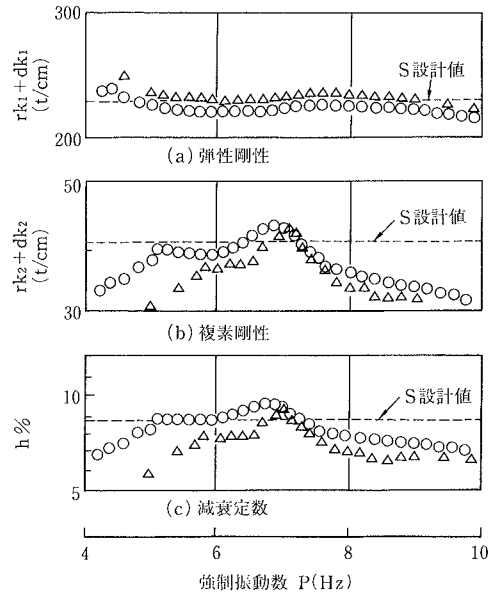
技術研究所内にある多目的音響実験棟 (RC 造 1F, 6 m×9 m, 総重量 140 t) に 40 t 厚肉積層ゴム 4 個と多重管ダンパー 4 本を, 図一 9, 写真一 1 のように配置して, 起振機で底盤を上下方向に加振する試験を行なった。剛性及び減衰の評価法は次の通りである。建物と底盤の質量をそれぞれ m_1, m_2 , 免震装置と地盤の剛性をそれぞれ k_1, k_2 とする 2 質点系モデルにおいて底盤加振力 $P=P_0 \cdot e^{ipt}$ に対する j 質点の応答は式(8)で表わせる。建物 m_1 に関する運動方程式は式(9)であるから, 免震装置の剛性 k_1 は式(10)で表わせる。

$$z_j = u_j \cdot e^{i(pt - \psi_j)} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + k_1 \cdot (z_1 - z_2) = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$k_1 = \frac{-m_1 \ddot{z}_1}{z_1 - z_2} = \frac{m_1 \cdot p^2 \cdot u_1 \cdot e^{-i\psi_1}}{u_1 \cdot e^{-i\psi_1} - u_2 \cdot e^{-i\psi_2}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

建物の既知重量 m_1 と応答測定値 u_1, ψ_1 を式(10)に代入して, 実部と虚部がそれぞれ積層ゴムとダンパー系の弾性剛性 ($r k_1 + d k_1$) と, 複素剛性 ($r k_2 + d k_2$) になり, その剛性比式(6)より減衰定数 h が求められる。



図一 10 多目的音響実験棟で調べた弾性剛性, 複素剛性と減衰定数の試験結果

試験結果を図一 10 に示す。図中, ○印と△印は起振機の偏心モーメントが $w_0 r = 192 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ と $32 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ の場合であり, 最大変位が 1~4 ミクロン程度である。設計値は積層ゴム 4 個分の弾性剛性 $r k_1 = 141 \text{ t/cm}$ ($f = 5 \text{ Hz}$), 複素剛性 $r k_2 = 5.6 \text{ t/cm}$ ($h = 2 \%$) と, ダンパー 4 本分で求めたものである。固有振動数は予測値 6.4 Hz に対して測定値 6.6 Hz, 減衰定数は予測値 $h = 8.7 \%$ に対して測定値が, 図一 10 (c) に示す通り, $h = 9 \%$ 前後にあり, ほぼ対応することが分かった。

7. おわりに

以上の結果をまとめて次に述べる。

- ① 上下方向に若干軟らかい厚肉タイプの積層ゴムに併用する上下用ダンパーとして, 鋼管パイプに高粘度シリコーンを注入する簡単な構造のダンパーを開発した。
- ② ダンパーの減衰力に関する計算法は, 粘性流体材料特有の振動数や変位依存を考慮して導いた。
- ③ 大きな水平変形に対するダンパーの可動治具の追従性に関しては水平加力試験から確認した。
- ④ 重量 140 t の免震建物にダンパーと厚肉積層ゴムを設置し, 起振機による強制振動試験を行なった結果, ダンパーの性能はほぼ当初の目標値に対応した。
- ⑤ 免震とともに微小な上下振動の除振も可能にする厚肉タイプの積層ゴムの免震構法は, 上下ダンパーの開発により実用段階に至った。

謝 辞

多重管ダンパーの製作及び性能試験においてはトキコ株式会社, また, 水平加力試験においては住友金属工業株式会社, 研究開発本部, 建築技術研究室の大竹章夫室長, 及び, 住金テクノロジーサーチ (株) 塚本雅敏氏の御協力を得ました。ここに謝意を表します。