高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究*

(第2報, ダンパの加力実験と設計に関する考察)

藤田 聡^{*1}, 古屋 治^{*2}, 藤田隆史^{*3}, 水津洋二^{*4}
笠原康宏^{*4}, 寺本隆幸^{*5}, 北村春幸^{*5}Vibration Control of High-Rise Buildings Using
High-Damping Rubber Damper
(2nd Report, Loading Tests and Design Formula for Cylinder-Type
High-Damping Rubber Damper)Satoshi FUJITA, Osamu FURUYA, Takafumi FUJITA, Yoji SUIZU,
Yasuhiro KASAHARA, Takayuki TERAMOTO and Haruyuki KITAMURA

This paper describes high-damping rubber damper used for vibration control of high-rise buildings. This damper aims at decreasing the wide vibration range from earthquake motion to wind-induced vibration input to a high-rise building. In general, highly molecular material like high-damping rubber has large temperature dependence of mechanics characteristics. In order to consider the dependences of the damper on the temperature, the test sample was enclosed in a constant-temperature oven to keep the temperature constant. The experimental results were compared with the design formula of the damper proposed in this study. The design formula enables to express the damping force characteristics of this damper qualitatively and quantitatively. Moreover, the damping characteristics of the damper was examined with the Voigt model.

Key Words: Vibration Control, High-Damping Rubber Damper, Earthquake, Wind-Induced Vibration

1. ま え が き

近年, 高層建物の設計段階では, 大地震による建物耐震健全性のみでなく, 当該建物内設置機器の機能維持やその財産保護が重要視されている。さらに, 居住性向上の観点から通常吹いている風や発生頻度の高い弱地震動により生じる建物の微小振幅振動の低減といった付加価値的な要素も考慮される場合が多い。このような要求に対応するためには, 建物自体の減衰のみで入力振動エネルギーを消費する設計では不十分であり, 付加的な減衰装置を建物に設置する制振構造⁽¹⁾を用いる必要があると考えられる。

本研究では, 前述のような大地震から微少振幅振動までのさまざまな入力レベルに対応する層間設置形式の高減衰ゴムダンパの研究開発を行っている⁽²⁾。今回,

著者らは, 前報で良好な制振性能を有することを確認した高減衰ゴム材料をシリンダ状に成形することで, 建物のさまざまな部位(例えば室内)への装着を可能にする構造のダンパを新たに開発した。本報では, 静的加力実験による特性調査結果とその設計特性式について報告する。

2. シリンダ型高減衰ゴムダンパ

2.1 ダンパの構造 図1は実験に用いた高層建物制振用のシリンダ形高減衰ゴムダンパである。ダンパは, シャフト(内筒), シリンダ(中筒), アウタケース(外筒), および高減衰ゴム材料により基本的に構成されている。高減衰ゴム材料は, 外径 32 mm, ゴム厚 10 mm, ゴム長さ 76.5 mm の形状でシャフトとシリンダ間に溶融接着されており, また, シャフト, シリンダ間の両端にゴムブッシュを設けることで, シャフト自重による高減衰ゴムの圧縮変形とせん断変形時のシャフト傾斜を避ける構造となっている。なお, 両ロッドエンドにはユニバーサルジョイントを使用し, 軸直角方向変位を吸収する構造となっている。

2.2 高減衰ゴム材料 今回使用した高減衰ゴムは, 前報で使用した材料配合を改良することでさらなる低弾性係数・高減衰効果を実現している(図2, 3 参

* 原稿受付 平成6年6月15日。

^{*1} 正員, 東京電機大学工学部 (〒101 東京都千代田区神田錦町2-2)。^{*2} 正員, 東京電機大学大学院。^{*3} 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)。^{*4} 正員, (株)ブリヂストン研究開発本部 (〒187 小平市小川東町3-1-1)。^{*5} 日建設計(株)東京構造・設備事務所 (〒112 東京都文京区後楽1-4-27)。

照)。なお、本高減衰ゴム材料は一般的な加硫高減衰ゴム材料とは異なり未加硫状態で弾性を有することを特徴としている。

図2, 3は、環境温度20°C、加振周波数0.2 Hzの正弦波加力による材料試験結果である。図中には今回ダンパに使用した未加硫高減衰ゴム材料、前報において使用した材料、そして積層ゴムなどに使用する加硫高減衰ゴム材料の特性を示すが、本高減衰ゴム材料が極めて低剛性かつ高エネルギー吸収能力を基本的に有していることは明白である。また、微小変形領域において加硫高減衰ゴム材料はせん断弾性係数が大幅に増大するが、本高減衰ゴム材料ではほぼ一定の値となっている。このことは、微小振幅振動領域において、本ダンパの系への剛性寄与が少なく、エネルギー吸収機能が十分に期待できることを示すものである。なお、図中の実線は本材料のせん断ひずみ振幅依存性近似式であり、後述する設計特性式に用いたものである。

図4, 5は、本高減衰ゴム材料のせん断弾性係数と損

図1 シリンダ型高減衰ゴムダンパ

図2 せん断弾性係数のせん断ひずみ依存性

図3 損失係数のせん断ひずみ依存性

失係数の周波数と温度依存性である。周波数をパラメータとした試験ではせん断ひずみ振幅5%、環境温度20°C、また、温度をパラメータとした試験ではせん断ひずみ振幅5%、加振周波数0.2 Hzの試験条件で正弦波加力実験を行っている。なお、結果は後出のダンパの設計特性式への使用を考慮し、図4では0.2 Hzにおける特性値、図5では20°Cにおける特性値で各依存特性を正規化し補正係数として無次元化した。

損失係数はせん断ひずみに対する特性同様、周波数および温度による影響はあまり見られずほぼ一定の値を示している。しかし、せん断弾性係数は温度が低く、周波数が高いほど増大する傾向がみられ、特に温度に対する依存性は顕著である。

以上で述べた材料特性を後述の設計特性式に用いるために、せん断弾性係数 G と損失係数 $\tan \delta$ を式(1), (2)に示すような材料特性近似式として整理した。各式は、せん断ひずみ振幅依存性を近似した $G(\gamma)$ および $\tan \delta(\gamma)$ を基に、無次元化した周波数補正係数 $C_{G(f)}$, $C_{\tan \delta(f)}$ 、温度補正係数 $C_{G(T)}$, $C_{\tan \delta(T)}$ を掛け合わせることで求めた。なお、これらの補正係数は実験値を対数近似することで導出した。

$$G = G(\gamma) \times C_{G(f)} \times C_{G(T)} \dots \dots \dots (1)$$

$$\tan \delta = \tan \delta(\gamma) \times C_{\tan \delta(f)} \times C_{\tan \delta(T)} \dots \dots \dots (2)$$

3. シリンダ型ダンパの設計特性式

本研究では、加力実験による性能・特性調査とともに実大ダンパ設計時の設計指標となる設計特性式を提案する。ここで、指標とするダンパの力学特性は剛性と減衰係数であり、ともにダンパ形状寸法を代入する

図4 せん断弾性係数および損失係数の周波数依存性

図5 せん断弾性係数および損失係数の温度依存性

ことにより求まる形式とする。

ダンパのせん断剛性と形状の関係は、図6のような筒形ダンパに軸方向せん断力を受けるものとして以下のように求まる⁽³⁾。

軸力 P 、軸方向変位 w には以下の関係が成立する。

$$P = 2\pi r L \tau \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\tau = G \frac{dw}{dr} \quad \cdots \cdots (4)$$

式(3)、(4)より、

$$\frac{dw}{dr} = \frac{P}{2\pi GL} \frac{1}{r} \quad \cdots \cdots (5)$$

となるため、これより、軸変位は、

$$\begin{aligned} \delta_a &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{P}{2\pi GLr} dr \\ &= \frac{P}{2\pi GL} \log_e \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad \cdots \cdots (6) \end{aligned}$$

と求められる。ただし、 δ_a は軸変位、 P は軸力、 G はせん断弾性係数、 L はゴム部長さ、 r_1 はゴム部内半径、 r_2 はゴム部外半径である。

ゆえに、求めるダンパの軸方向せん断剛性 K は、

$$\begin{aligned} K &= \frac{2.73 G_{ap} L}{\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)} \\ &= \frac{2.73 G \sqrt{1 + \tan^2 \delta} L}{\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)} \quad \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

と導かれる。ただし、 D はゴム部外径、 d はゴム部内径である。なお、 G_{ap} は見かけのせん断弾性係数で以下のような関係にある。

$$G_{ap} = G \sqrt{1 + \tan^2 \delta}$$

ここで、 $\tan \delta$ は損失係数である。

ダンパの減衰係数と形状の関係は、振動の1サイクルでダンパが消費するエネルギーに着目して導く。

まず、1サイクルでダンパが消費するエネルギーとダンパ形状の関係を以下のように求める⁽⁴⁾。

せん断ひずみ γ が、

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad \cdots \cdots (8)$$

で与えられ、せん断応力 τ は以下のように与えられる

ものとする。

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \\ &= \tau_0 (\sin \omega t \cos \delta + \cos \omega t \sin \delta) \quad \cdots \cdots (9) \end{aligned}$$

ここで、 γ_0 はひずみ振幅、 τ_0 はせん断応力振幅である。

また、せん断ひずみとせん断応力の関係は次式で与えられる。

$$\tau = \gamma_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad \cdots \cdots (10)$$

ただし、貯蔵せん断弾性係数 G' 、損失せん断弾性係数 G'' は、

$$G' = \tau_0 \cos \delta / \gamma_0$$

$$G'' = \tau_0 \sin \delta / \gamma_0$$

である。

式(8)、(9)、(10)より、ダンパが1サイクルで消費する単位体積当たりのエネルギーは以下のように示される。

$$E_0 = \int_0^{2\pi/\omega} \tau \dot{\gamma} dt = \pi \gamma_0^2 G'' \quad \cdots \cdots (11)$$

ゆえに、全ダンパ容量 V で1サイクル当たりに消費するエネルギー E_D とダンパ形状の関係は、

$$V = \frac{\pi(D^2 - d^2)L}{4} \quad \cdots \cdots (12)$$

$$\begin{aligned} E_D &= E_0 V \\ &= \pi \gamma_0^2 G'' V \\ &= \frac{\pi^2 x_0^2 G''}{4 t_r^2} (D^2 - d^2) L \quad \cdots \cdots (13) \end{aligned}$$

となる。

ただし、 x_0 は加振振幅、 t_r はゴム厚である。

次に、減衰係数と1サイクルでダンパが消費するエネルギーの関係を導く。

加振振幅 x が次式で与えられるものとする。

$$x = x_0 \sin \omega t \quad \cdots \cdots (14)$$

前報の結果より、本ダンパは極めて線形粘性減衰に近い減衰特性を有していると考えられる。よって、ここではダンパの減衰を形式的に線形粘性減衰と仮定し、減衰力を求めると、

$$F_D = C \dot{x} \quad \cdots \cdots (15)$$

となる。これより、粘性減衰仮定を用いたダンパが1サイクルで消費するエネルギー E_D' は次式で表すことができる。

$$E_D' = \int_0^{2\pi/\omega} F_D dx = \pi C \omega x_0^2 \quad \cdots \cdots (16)$$

よって、式(13)より求まる E_D と式(16)より求まる E_D' が等価であると仮定することにより減衰係数とダンパ形状の関係が導かれる。

$E_D = E_D'$ より、

図6 軸方向変位を受ける筒形ダンパ

$$\frac{\pi^2 x_0^2 G''}{4 t_f^2} (D^2 - d^2) L = \pi C \omega x_0^2$$

ゆえに、減衰係数とダンパ形状の関係は、

$$C = \frac{\pi G''}{4 \omega t_f^2} (D^2 - d^2) L \dots\dots\dots (17)$$

となる。ここで、貯蔵せん断弾性係数と損失係数の関係を上式に代入して本ダンパの減衰係数に関する設計特性式を得る。

$$C = \frac{G \tan \delta}{8 f t_f^2} (D^2 - d^2) L \dots\dots\dots (18)$$

なお、ダンパの剛性および減衰係数の設計特性式で必要となるせん断弾性係数 G と損失係数 $\tan \delta$ は、式(1)、(2)で示したゴム材料の各依存性を考慮した材料特性近似式を代入することで求める。実験で使用したシリンダ型ダンパの形状寸法を式(7)、(18)に代入し整理した設計特性式は以下のように示され、これを用いて加力実験結果との比較を行った。

$$K = 0.4903 \{ G(\gamma) \times C_{G(f)} \times C_{G(T)} \times \sqrt{1 + [\tan \delta(\gamma) \times C_{\tan \delta(f)} \times C_{\tan \delta(T)}]^2} \} \dots\dots\dots (19)$$

$$C = \frac{0.08415}{f} \{ G(\gamma) \times C_{G(f)} \times C_{G(T)} \times \tan \delta(\gamma) \times C_{\tan \delta(f)} \times C_{\tan \delta(T)} \} \dots\dots\dots (20)$$

4. 静的加力実験装置および実験方法

一般的に、高減衰ゴム材料などの高分子材料は、その力学特性の温度依存性が大きいとされる。このため本実験では、図7に示すように供試体周辺部をポリウ

図7 加力実験装置

図8 復元力特性の振幅依存性

レタン製の恒温槽で覆い、その中の環境温度をエアコンディショナを用いて管理することとした。実験では恒温槽内の温度を常環境温度と考えられる 22°C に設定し、その環境下で加振せん断ひずみ振幅、加振周波数を変化させて正弦波加力実験を行った。計測項目は、ダンパの変位、復元力および実験中の高減衰ゴム材料、シャフト、シリンダ表面の温度変化である。なお、環境温度を変化させた加力実験による本ダンパの温度依存性の考察については、次報で詳細に検討を加えるものとする。

5. 実験結果

5.1 復元力特性 図8は、環境温度 22°C、加振周波数 0.2 Hz 時の復元力特性である。各復元力特性ループとも、だ円形状を示し、加振せん断ひずみ振幅の増大とともに復元力切片の値が比例的に増大することから、本ダンパの減衰特性が粘性減衰特性に極めて近いものであることが示されている。しかしながら、振幅の増大に伴い、剛性(傾き)は低下していくことから、復元力特性のせん断ひずみ振幅依存性が確認できる。図9は、同環境温度、加振せん断ひずみ振幅 20% の条件における復元力特性を加振周波数の変化について示したものである。加振周波数の増大につれ、復元力特性ループの傾きは大きくなり、また、ループ面積は増大することから、復元力特性の周波数依存性も確認できる。

5.2 剛性と減衰 実験で得られた復元力特性よ

図9 復元力特性の周波数依存性

図10 剛性および等価減衰係数の算出方法

り剛性, 減衰係数を, 図 10 および以下の式により算出する。

$$K_D = F_m / X_m \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$C_D = \frac{E_D}{2\pi^2 f X_m^2} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ここで, F_m は最大加振振幅時の荷重, f は加振周波数, E_D はダンパが 1 サイクルで消費するエネルギーである。

図 11 は, 周波数をパラメータとした剛性のせん断ひずみ振幅依存性である。図中では, プロットが実験値を, 実線および点線が設計特性式(19)より得られた特性を示している。ダンパの剛性は, 加振せん断ひずみ振幅の増大に伴い低下し, また, その周波数依存性も減少する傾向が認められる。微小せん断ひずみ領域では材料特性実験において見られなかった剛性の増大傾向がやや見られるが, これはシリンダ両端に設置したゴムブッシュの影響によるところが大きいものと考えられる。したがって, 実用段階では微小振幅振動に対しても有効にエネルギー吸収が行えるよう考慮し, 摩擦等の少ないシャフト支持機構を考案する必要があると考えられる。実線で示す設計値は, 微小振幅時および 50% を越えるせん断ひずみ領域において定量的な精度が低下するものの, 特性を設計時に把握するうえでは有効な設計特性式であると判断できる。

図 12 は, 減衰係数のせん断ひずみ振幅依存性を示したものである。減衰係数は, せん断ひずみ 50% 程度まで, ほぼ一定とみなせるものの, それ以降やや低下する傾向が認められる。これは, 本ダンパがせん断ひ

図 11 剛性のせん断ひずみ振幅依存性

図 12 減衰係数のせん断ひずみ依存性

ずみ 100% 付近の振幅領域において履歴ダンパ的な特性を示すことに起因すると考えられる(図 8 参照)。図 13 は, 減衰力の速度依存性で, 減衰力がほぼ速度に比例する粘性減衰力特性に極めて近い特性を本ダンパの減衰特性が有していることが示された。なお, 本図の速度は実験時の最大加振振幅を速度に換算したもので最大速度値になる。ダンパの減衰に関する設計値は, 本図が示すようにダンパの減衰特性を定性的, 定量的に表現しており, 実大ダンパの設計指標として十分適用し得る精度を有することを確認した。

6. 粘性減衰力特性の検討

以上で, シリンダ型高減衰ゴムダンパは, その減衰力特性において粘性減衰に極めて近い特性を有する線形性の強いダンパであることを示した。ここでは, さらに粘弾性材料のモデル化において一般的によく用いられている Voigt モデル(図 14)を用いて, ダンパの減衰力特性を粘性減衰と仮定した有効性を評価検討する。

Voigt モデルの応力に関する基礎式⁽⁵⁾は式(23)で与えられる。

$$\sigma = K\gamma + C \frac{d\gamma}{dt} \quad \dots\dots\dots (23)$$

振幅 γ_0 の正弦波変位入力を仮定して,

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (24)$$

とすると, ダンパの復元力特性は,

$$\sigma = K\gamma_0 \sin \omega t + C\gamma_0 \omega \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (25)$$

となる。さらに, 剛性補正係数 m と速度乗項 n を導入し次式を仮定する。

$$\sigma = (K + m)\gamma_0 \sin \omega t + C(\gamma_0 \omega \cos \omega t)^n \quad \dots\dots\dots (26)$$

本式は, 式(19), (20)より求まる剛性 K および減衰係

図 13 減衰力の速度依存性

図 14 Voigt モデル

図 15 復元力特性の評価

数 C の各値を代入することで、各要素が線形特性を有する Voigt モデルに対して材料自体が有する非線形性を加味表現することを可能にするものである。さらに、剛性に関する設計値の補正とともにダンパに用いた粘性減衰仮定の有効性を確認することを定量的に評価することが可能となる。

図 15 は、環境温度 22°C、加振周波数 0.5 Hz におけるせん断ひずみ振幅 20%での復元力特性である。本図が示すように、式(26)で得られる復元力特性は m と n の値を適当に取ることによって実験値と良好な一致を得ることができる。また、本補正方法により剛性と減衰に関する設計特性式の定量的評価が可能となる。図 16, 17 は式(26)の速度乗項 n と補正係数 m のせん断ひずみ振幅依存性を加振周波数をパラメータとしてまとめたものである。速度乗項 n は、ほぼ 1.0 近傍に存在しダンパの減衰力特性が粘性減衰に極めて近いことを改めて示すものである。剛性補正係数の振幅依存性では、大変形領域において設計値と実験値との近似精度の低下が示されているが、設計値としての復元力特性を把握する観点からはあまり大きな問題とはならないと考えられる。

7. あとがき

本報では、新たに開発したシリンドラ型高減衰ゴムダンパの加力実験結果とともに、実大ダンパ設計時にその設計指標となるシリンドラ型ダンパの設計特性式を提案した。本ダンパは、線形性の強い力学特性を有し、特にその減衰力特性においては粘性減衰に極めて近いも

図 16 速度乗項 n のせん断ひずみ振幅依存性 図 17 補正係数 m のせん断ひずみ振幅依存性

のであることを確認した。また、粘性減衰を仮定した減衰に関する設計特性式は、ダンパの減衰特性を定性的、定量的に表現しており実大ダンパの設計指標として十分用いることができると考えられる。なお、次報では環境温度を変化させた特性調査とともに、繰返し加力の際に生じるゴム材料の温度上昇がダンパの特性に及ぼす影響を検討した本ダンパの温度依存性に関する考察について詳しく報告する。

最後に、本研究を実施するにあたり、ご協力いただいた元東京電機大学学生、笠原守氏、五月女隆氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 藤田, 機械の研究, 43-12 (1991), 1275.
- (2) 藤田・ほか 4 名, 機論, 59-565, C (1993), 2636.
- (3) 防振ゴム研究会編, 防振ゴム, (1975), 100-106, (社)日本鉄道車両工業会.
- (4) Zhang, R-H., ほか 2 名, *Int. J. Earthqu. Engng. Struct. Dyn.*, 18 (1989), 389.
- (5) 井本, 概説レオロジー(上), (1972), 72-77, (株)東京科学同人.