高減衰ゴムダンパの微小変位振幅領域における減衰特性に関する研究*

正 木 信 男^{*1}, 太 田 雅 巳^{*1}
藤 田 聡^{*2}, 山 家 弘 行^{*1}Damping Force Characteristics of High-Damping Rubber Damper
in Small Shear Strain RegionsNobuo MASAKI, Masami OHTA,
Satoshi FUJITA and Hiroyuki YAMBE

In this study we discuss the applicability of a high-damping rubber damper, which is composed of micro-networks and viscous material, as the damping device in microvibration-isolation devices or tables. For those purposes, damping force characteristics of the high-damping rubber damper were measured using a new measuring device. We could estimate damping force characteristics to a shear displacement amplitude of 2.5×10^{-6} m, and this high-damping rubber damper was found to have energy-absorption capacity in the regions of very small shear displacement amplitude. Also, the damping force characteristics of a viscous shear damper using silicone oil, which is the most popular damper for vibration-isolation devices, were measured. On comparing the damping force characteristics, our high damping rubber damper was found to have a larger energy absorption ability than the viscous shear damper. Furthermore, the rubber dampers were installed to the vibration isolation table which can mainly isolate microvibrations in horizontal direction. Through microvibration-isolation tests it was confirmed that this high damping rubber could be applied to microvibration-isolation devices.

Key Words: Damping, Damping Material, Vibration Isolation, High-Damping Rubber Damper, Micro-vibration

1. ま え が き

微振動による製品の歩留り低下や精度低下をさけるために、半導体製造工場などに代表される超精密過程において、微振動除振技術が注目されている。このような有害な微振動を絶縁するために空気ばねを用いた除振台や多段積層ゴムを用いた除振・免震装置が開発され実用化されている^{(1)~(3)}。これらの除振・免震装置には、装置の固有振動数付近の共振による振動を低減する目的で粘性せん断形ダンパやオイルダンパなどの減衰機構が空気ばねや多段積層ゴムなどのばね要素とは別に用いられるのが普通である。しかしながら、これらのダンパの微小振幅領域(変位振幅で μm オーダー程度)での減衰特性を系統的に研究した例はほとんどないと思われる。従来、微振動に対する除振性能の予測はデバイスの設計値や通常の試験結果などから経験的に行われてきている。パッシブ除振装置を設計するときに、これらの多段積層ゴムや粘性せん断ダンパの微小振幅領域における剛性や減衰特性を把握してお

くことは、除振性能を予測する上で極めて重要である。

著者らは、高層建物制振用高減衰ゴムダンパを開発し、微小振幅領域の振動に対する制振効果があることを実験的に確認している⁽⁴⁾。

本研究では高減衰ゴムダンパの除振装置への適用の可能性を調べるため、高減衰ゴムダンパの微小振幅領域における減衰特性を新たに開発した装置を用い実験的に検討し従来除振装置に多く用いられているシリコンオイルを用いた粘性せん断形ダンパの減衰特性との比較を試みた。さらに多段積層ゴムと高減衰ゴムダンパを適用した主に水平方向の微振動の除去を目的とした除振装置を試作し常時微動に対する除振効果を実験的に検討した。

2. 高減衰ゴムダンパ

図1は実験に用いた高減衰ゴムダンパである。高減衰ゴムダンパは図2に示すように少量の熱可塑性エラストマが三次元網目構造を形成し、高粘性流体を保持補強している特殊な構造を有している。このため、従来の粘弾性体からなるダンパと比較して、変形能力、高温形状保持性および形状記憶性などにすぐれている。今回の実験では後述の多段積層ゴムを用いた除振

* 原稿受付 1996年7月25日。

^{*1} 正員, (株)ブリヂストン (〒244 横浜市戸塚区柏尾町1)。^{*2} 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)。

High damping rubber material ($50 \times 50 \times 10^T$)

Fig. 1 High damping rubber damper

Fig. 2 Micro-structure of high damping rubber damper

Fig. 3 Viscous shear type damper

台の臨界減衰比が大振幅領域で約 15% になるように大きさ $50 \times 50 \times 10^T$ mm のゴム板 ($a \times a \times Th$) を鋼板の間にはさみ込み 90°C で約 15 分間加圧接着する構造を採用した。ダンパの形状率(せん断面積を自由面積で除した値)は 1.25 であった。

3. 粘性せん断形ダンパ

図 3 に実験に用いた粘性せん断形ダンパを示す。粘性体は微振動除振装置のダンパに多く用いられているシリコンオイルとした。シリコンオイルの粘性係数は 10^6 cP/at 25°C で抵抗板のせん断断面積は 5.20×10^{-2} m^2 , 抵抗板と容器のギャップは 4.1×10^{-3} m である。実験では前述の高減衰ゴムダンパと等しい臨界減衰比を得るようにせん断面積とギャップを決めた。

4. 基本特性実験

4.1 実験装置 図 4 におもに大振幅領域の高減衰ゴムダンパと粘性せん断形ダンパの復元力特性を把

Fig. 4 Restoring force measurement device (for large shear strain amplitude)

Fig. 5 Restoring force characteristics of high damping rubber damper in large shear strain amplitude

握するために用いた実験装置を示す。本実験装置では試験体はアクチュエータのシリンダに一方の側を取付けられ他の一方を基礎側に取付けられている。実験ではアクチュエータに取り付けられたロードセルと変位計によりダンパの変位量と復元力を計測した。実験装置は特に恒温槽などにはいれなかったが室温を実験開始前と終了後で計測し実験中に極端な雰囲気温度変化が生じないことを確認している。ここではおもにダンパのせん断剛性の変位振幅依存性と減衰力の速度依存性について検討した。

4.2 高減衰ゴムダンパの復元力特性 図 5 は前述の高減衰ゴムダンパ復元力特性の一例でアクチュエータの加振周波数 1.0 Hz, 雰囲気温度 16°C のときのものである。変位振幅は最大で 9.57 mm でせん断ひずみ(変位振幅をゴム厚みで除したもの)に換算すると 0.957 となる。この復元力特性からわかるように本高減衰ゴムダンパはせん断ひずみ 0.5 程度以下では粘性的な減衰をした円形状の履歴特性を有すること, また減衰を等価減衰係数で 0.4 程度もつことが確認された。せん断ひずみが 0.5 を越えると履歴特性が弾塑性的になることがわかった。この傾向は, 加硫ゴムの傾向とほぼ同じである⁽⁵⁾。

5. 微小変位振幅特性実験

5.1 特性試験の概要 微小変位振幅特性試験では、図6に示すような多段積層ゴム4基で定盤を支持する構造を有する除振台に水平加振器をのせ、その加振器の反力によって除振台の定盤に微小変位振幅を生じさせて、図6の拡大図に示すように取付けられたダンパの復元力と変位をひずみゲージ式荷重変換器(ロードセル)と非接触式変位計で測定しデジタル記録計で記録した。なお、収録時にはノイズをカットするためにアナログフィルタを用い0.1~10 Hzのバンドパスフィルタをかけた。実験では、加振振動数を1、

Fig.6 Damping force measuring device for smaller shear strain

1.5 Hzとし、加振振幅を2.5, 5.0, 10, 20, 50, 100 μm とした。ひずみゲージ式荷重変換器は、定格負荷98 Nで非直線性とヒステリシスは定格負荷に対し0.01%以下であることが保証されている。非接触式変位計は、0.1 μm ~4 mmまで測定可能である。計測器の仕様から、振幅1 μm までの復元力特性を測定できたが振幅2.5 μm 以下では床振動の影響を受けたため解析は振幅2.5 μm 以上のデータに限定した。

5.2 高減衰ゴムダンパの減衰力特性 図7(a), (b)は高減衰ゴムダンパの雰囲気温度16°Cにおける変位振幅2.5~100 μm までの復元力特性(図7中実線で示す)で、加振振動数1 Hzと1.5 Hzのものである。

(1) せん断剛性の変位振幅依存性

復元力特性のヒステリシスループの正負の最大変位点を結んだ直線の傾きとして求められたせん断剛性の変位振幅依存性を図8(a)に示す。加振振動数の違いによって剛性の変化がみられるが、せん断剛性は両者ともよい線形性(振幅によって剛性が変化しない)を示すことがわかった。この剛性の線形性は高減衰ゴム

(a) 1 Hz

(c) 1 Hz

(b) 1.5 Hz

(d) 1.5 Hz

High Damping rubber damper

Viscous shear type damper

Fig.7 Force-displacement loops for high damping rubber damper and viscous shear type damper (16°C)

(a) High damping rubber damper

(c) Viscous shear type damper

Shear displacement dependency of shear stiffness

(b) High damping rubber damper

(d) Viscous shear type damper

Velocity dependency of damping force

Fig. 8 Damping force characteristics of high damping rubber damper and viscous shear type damper (16°C)

(a) High damping rubber damper

(c) Viscous shear type damper

Shear displacement dependency of shear stiffness

(b) High damping rubber damper

(d) Viscous shear type damper

Velocity dependency of damping force

Fig. 9 Damping force characteristics of high damping rubber damper and viscous shear type damper (25°C)

ダンパを微小振動用ダンパに適用する場合極めて重要である。すなわち、通常の高減衰ゴム⁽⁶⁾など加硫ゴムの場合、剛性はひずみに対して非線形性を有し通常は変位振幅の減少に伴って急激に大きくなってゆく。したがって通常の高減衰ゴムで減衰を付与しようとする微小振幅での固有振動数を上昇させてしまい除振装置に適用するのは好ましくないからである。また、微小振幅領域から大振幅領域まで減衰特性が変わらないことが確認された。

(2) 速度依存性

高減衰ゴムダンパの減衰力の速度依存性を検討したのが図8(b)である。図においてせん断速度は振幅と加振振動数から計算している。減衰力は復元力特性の変位零における荷重とした。図8より減衰力は明確な速度依存性があり、その依存性は速度の一乗に比例するものであった。

(3) 温度依存性

図9(a), (b)は高減衰ゴムダンパの雰囲気温度25°Cにおける復元力特性である。実験条件は雰囲気温度16°Cの場合と同じである。本高減衰ゴムダンパは、剛性と減衰ともに温度依存性を有することがわかる。25°Cにおけるダンパの剛性は、16°Cの剛性の約1/3に低下している。また減衰も1/2に低減している。したがって本高減衰ゴムダンパを適用する場合、使用温度を十分考慮する必要がある。

5.3 粘性せん断形ダンパの減衰力特性 図7(c), (d)は粘性せん断形ダンパの雰囲気温度16°Cにおける変位振幅2.5~100 μm までの復元力特性で、加振振動数1 Hzと1.5 Hzのものである。これらの実験条件は前述の高減衰ゴムダンパのものと同じである。

(1) せん断剛性の変位振幅依存性

復元力特性より、本粘性せん断形ダンパは剛性を有することがわかった。復元力特性から求めたせん断剛性の変位振幅依存性を図8(c)に示す。せん断剛性は加振振動数の違いによって剛性の変化がみられるが、両者ともによい線形性(振幅によって剛性が変化しない)を示すことがわかった。この傾向は高減衰ゴムダンパと同じである。ただし、粘性せん断形ダンパの剛性の大きさは、高減衰ゴムダンパの1/3程度である。したがって、減衰付与による固有振動数の上昇の割合は高減衰ゴムダンパを用いる場合より小さい。

(2) 速度依存性

粘性せん断形ダンパの減衰力の速度依存性を検討したのが図8(d)である。図8より減衰力はほぼ速度の一乗に比例することがわかった。

(3) 温度依存性

図9(c), (d)は粘性せん断形ダンパの雰囲気温度25°Cにおける復元力特性である。実験条件は雰囲気温度16°Cのものと同じである。本粘性せん断形ダンパは、剛性と減衰ともに通常温度範囲(室温付近の使用を想定)では極めて温度依存性が小さいダンパであることがわかる。

6. 除振特性解析

6.1 モデルリング

後述の微振動応答解析を行うに際し、ダンパの復元力と減衰力をモデル化する。モデル化は特性試験でえられたせん断剛性-変位線図と減衰力-速度線図より剛性は大変形時において剛性が低下する傾向を表現できるように変位振幅(ひずみ)依存性を、減衰力は速度依存性をそれぞれ考慮できるように以下の近似式を仮定し、そのパラメータを求めた。

$$F_t = F_k + F_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 F_t はダンパが発生する力、 F_k はダンパの剛性による復元力、 F_c はダンパの減衰力である。 F_k は、せん断ひずみ依存性を考慮し、 $F_k = K(X)X$ とした。ただし、 $K(X) = A_p \cdot \exp(B_p X)$ 、ここで A_p 、 B_p は実験的に定まる定数、 X は水平変位である。減衰力は速度依存性を考慮し、 $F_c = C_p \dot{X}^{D_p}$ とした。ここで C_p 、 D_p は実験的に定まる定数である⁽⁴⁾。なお、 A_p 、 B_p 、 C_p 、 D_p は、温度および加振振動数を限定した条件で求めた。

図7(a), (b)は、高減衰ゴムダンパのヒステリシス特性の実験結果(図7中の実線)とモデルより計算された結果(図7中の破線)を比較したものである。図7より本高減衰ゴムダンパの復元力/減衰力特性は、剛性をせん断ひずみ依存形、減衰を速度依存形とするモデルで表現できることがわかる。また、解析範囲を微小振幅領域に限定すれば、剛性のせん断ひずみ依存性を考慮する必要もなくなる。したがって、微小振幅領域における解析はより簡単になる。

粘性せん断形ダンパのモデルについても、高減衰ゴムダンパと同様なモデル化を行った。図7(c), (d)は実験結果(図7中の実線)とモデルを用いた解析結果(図7中の破線)で両者はよく一致している。

6.2 多段積層ゴムの微小変位振幅特性

本除振台はすでに図6に示したような構造を有しており、おもに水平方向のみの除振を目的にしている。この除振台は図6に示すように多段積層ゴム4基で支持されている。多段積層ゴムは、1段あたり4個の要素積層ゴム(直径30 mm, ゴム厚0.5 mm×層数31)を安定板

(2) 解析モデルによる応答シミュレーション

前述の基本特性試験によるモデル化によって得られたパラメータを用いて微振動応答シミュレーションを実施した。解析モデルは、除振台の水平方向のロッキングを考慮できるように図 14 のようにした。モデルの運動方程式は以下のとおりである。なおこのとき、除振台の応答変位が非常に微小であること、および減衰力が速度の一乗にほぼ比例することを考慮して、多段積層ゴム、高減衰ゴムダンパおよび粘性せん断形ダンパの剛性と減衰係数を定数としている。すなわち、剛性を Ap 、減衰係数を Cp としている。

水平方向：

$$\begin{aligned} m(\ddot{x} + \ddot{z}_H) + C_{TH}(\dot{x} - h_3\dot{\theta}) \\ + C_{DH}(\dot{x} - (h_3 + h_1 - h_2)\dot{\theta}) + K_{TH}(x - h_3\theta) \\ + K_{DH}(x - (h_3 + h_1 - h_2)\theta) = 0 \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

回転方向：

$$\begin{aligned} -J\ddot{\theta} - C_{TV}L_1\dot{\theta}L_1 + K_{TV}L_1\theta L_1 + C_{DV}L_2\dot{\theta}L_2 \\ - K_{DV}L_2\theta L_2 + C_{TH}(\dot{x} - h_3\dot{\theta})h_3 \\ + K_{TH}(x - h_3\theta)h_3 \\ + C_{DH}(\dot{x} - (h_3 + h_1 - h_2)\dot{\theta})(h_3 + h_1 - h_2) \\ + K_{DH}(x - (h_3 + h_1 - h_2)\theta)(h_3 + h_1 - h_2) = 0 \\ \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

解析に用いたパラメータを以下に示す。多段積層ゴムに関するものとして、

水平剛性： $K_{TH}=7.88 \times 10^4$ N/m

鉛直剛性： $K_{TV}=3.55 \times 10^7$ N/m

水平減衰係数： $C_{TH}=1.78 \times 10^4$ Ns/m

鉛直減衰係数： $C_{TV}=4.06 \times 10^4$ Ns/m

高減衰ゴムダンパに関するパラメータは、

剛性： $K_{DH}=K_{DV}=7.56 \times 10^5$ N/m

減衰係数： $C_{DH}=C_{DV}=4.83 \times 10^4$ Ns/m

同様に、粘性せん断形ダンパは、

剛性： $K_{DH}=K_{DV}=2.30 \times 10^5$ N/m

減衰係数： $C_{DH}=C_{DV}=2.91 \times 10^4$ Ns/m

である。実験では減衰が一致するように試みたが、結果として粘性せん断形ダンパのほうが減衰係数が小さくなった。高減衰ゴムダンパを用いた場合と粘性せん断形ダンパを用いた場合の応答解析結果を測定結果と比較して、図 11～13 の(a)に示す。なお、解析にあたっては入力加速度は、測定された床加速度を用いた。実験結果より両者ともに除振台上の応答加速度を入力加速度の 1/4 程度に小さくすることができている。計

算結果は、最大値のオーダはほぼ一致したものの精度的にはまだ十分とはいえないが、応答変位振幅を予測するには十分な精度である。

7. あ と が き

ゴム系材料を基本とした高減衰ゴムダンパを開発し、おもに微小変位振幅領域での基本特性試験を行い以下の結論を得た。

(1) 本高減衰ゴムダンパは、微小領域から大変形領域まで(せん断ひずみで 2.5×10^{-4} から 1 まで)エネルギー吸収効果をもつことが実験的に確認された。

(2) 高減衰ゴムダンパの減衰力は速度依存性を有し、減衰力はほぼ速度の一乗に比例するものであった。また、剛性は大ひずみ領域でひずみ依存性を有するが、微小ひずみ領域ではほぼ一定の値となり線形として取扱えることがわかった。

(3) 高減衰ゴムダンパの復元力特性は、剛性のひずみ依存性と減衰力の速度依存性を考慮するモデルにより実験結果を良好に再現することができた。

(4) 高減衰ゴムダンパの剛性と減衰力には温度依存性があり、比較のため検討した粘性せん断形ダンパ(粘性体はシリコンオイル)のそれより大きいものであった。

(5) 提案された解析モデルは、比較的単純なものであるが微振動応答を再現させるに十分なものであった。

本高減衰ゴムダンパは、温度依存性ならびに剛性を有するなど克服しなければならない課題もあるが、非常に小さな容量で微小振動の抑制に必要な減衰を確保できることがわかった。今後、温度依存性や剛性などの課題を解決し、ダンパの最適化をはかりたい。

文 献

- (1) 藤田隆史・森文男・正木信男・水津洋二、機論, 53-490, C (1987), 1147-1152.
- (2) 藤田隆史・井上直樹・浅見欽一郎・鶴田頭・竹下章治、機論, 53-496, C (1987), 2521-2528.
- (3) 藤田隆史・服部忍・竹下章治・鶴田頭・福井伊津志・石山日出男、機論, 56-521, C (1990), 43-48.
- (4) 藤田聡・古屋治・藤田隆史・寺本隆幸・北村春幸・森川尚一・水津洋二、機論, 59-565, C (1993), 2636-2642.
- (5) 例えば、日本鉄道車輛工業会編、改訂防振ゴム、(1975), 22, 現代工学社.
- (6) 水津洋二・須藤千秋・鈴木重信・福森建至、土木学会第 48 回年次学術講演会講演梗概集第 1 部, (1993), 906-907.