ゴムの減衰機構と制振特性*

飯田一嘉**

Damping Mechanism and Characteristics of Rubber / Kazuyoshi IIDA

Key words : damping, damping material, rubber isolator, damping mechanism, noise, structure-borne sound, air-borne sound, electric rheological fluid, polymer, viscoelastic properties, vibration

1. はじめに

産業の高度化に伴って自動車をはじめ産業機械、家庭用電気機器、OA 機器、車両など広い分野で騒音や振動の低減技術が必要となっており、ますますその重要性が高まってきている。

騒音の低減技術は図1に示すように低減したい対象によって色々な方法があるが、ここでは振動、さらには振動に起因する騒音、いわゆる固体伝搬音の低減のために広い分野で用いられており、ゴムがベースになっている防振材料のうち防振ゴムと制振材を取り挙げ、役割などその技術の概要とその中での減衰の意味、機構、特性などについて述べてみたい。

2. 防振の方法

一般に防振材料を用いた振動の低減の方法は、図2に示すように、振動絶縁、制振および動的吸振とに大別される。動的吸振は共振ピークの抑制として用いられるような場合には、制振の中に含まれることもある¹⁾。

これらの方法はそれぞれに特徴があり、低減しようとする振動の性状を十分把握した上で、適切な方法を選択する必要があるし、場合によってはいくつかの方法を組み合わせ、総合的な効果をねらうことも必要である。

3. 振動絶縁材料

3.1 振動絶縁材料の役割

* 原稿受付 平成元年 11 月 2 日

** (株)ブリヂストン (小平市小川東町 3-1-1)

図1 騒音の低減技術

図2 防振材料を用いた振動の低減方法

図3 ばねの種類

振動絶縁とは図2に示すように振動発生している機械と床との間に適切なばねを挿入することにより、振動源から床への振動を遮断する役割を果たすことである。これによって振動やそれに伴って発生する固体伝搬音の低減を図ることができる。

この振動絶縁に用いられるばねは一般に図3に示すように分類されるが、最近では床衝撃音の低減に用いられているグラスウールなど多孔質材料や磁石を利用した除振台なども現れてきている。

ここでは、自動車をはじめ色々な分野で用いられるようになってきているゴム系ばね、いわゆる防振ゴムについて述べる。

3.2 防振ゴムの種類とメカニズム

一般に、ばねによる振動絶縁特性は、図4に示すように防振支持対象の質量 m とばねの動的ばね定数 k_d と損失係数 ($\eta = C/\sqrt{mk_d}$) とで定まり、振動伝達率 $\tau (=|X|/|X_0|)$ は、図4(b)のような1自由度系の場合は次式で与えられることはよく知られている。

$$\tau = \frac{|X|}{|X_0|} \sqrt{\frac{1 + \eta^2(f/f_0)^2}{\{1 - (f/f_0)^2\}^2 + \eta^2(f/f_0)^2}} \quad (1)$$

振動絶縁とは図4(a)に比較し、図4(b)に示すように外力の振動数 f に対し振動伝達率が1以下になるように系の固有振動数 $f_0 (=1/2\pi \cdot \sqrt{k_d/m})$ を決定することになる。しかし、式(1)より、減衰がない、つまり $\eta=0$ の場合は振動伝達率が外力 f が系の固有振動数 f_0 に一致するいわゆる共振時に無限大になる

図4 振動絶縁の意味

ことがわかり、こうした場合、機械や構造物が破損に至ることもあり、ばねに適度な減衰を付与することは大切である。

通常 f_0 は外力の周波数 f の1/3程度になるように選ぶのが普通であり、損失係数 η が大きくなるにつれて、図4(b)に示すように、共振ピークは抑制されるが防振域の振動伝達率は悪化の方向に行くので振動対象により適切な減衰つまり損失係数のものを選ぶ必要がある。

以上のようなことから、振動絶縁材料として適切な内部減衰をもつ防振ゴムが広く用いられているが、その種類は図5に示すような色々なタイプがあり、設計対象により適切なものを選択することができる。

特にソリッド型の防振ゴムの場合には、ゴムとして用いられるポリマーの粘弾性挙動によって損失係数と動的ばね定数が大きく異なることから、ポリマーの選択は重要な意義を有する。

高分子材料は粘弾性材料であり、応力はゆがみと変

図5 防振ゴムの種類

図6 プリ(n-オクチルメタクリレート)の粘弾性挙動²⁾

表1 防振ゴム用ポリマーの減衰係数

	減衰係数
天然ゴム	0.05~0.15
クロロブレン	0.15~0.3
ニトリルゴム	0.25~0.4
SBR	0.15~0.3
ブチルゴム	0.25~0.4

形速度の両方に大きく依存する。高分子材料の力学的挙動を温度あるいは変形速度を広い範囲にとると、図6の模式図²⁾に示すように4つの領域に分けられる。防振ゴムは大変形を印加して使用することからゴム状領域で使われることが多い。一般の防振ゴムとして使われるポリマーは、耐破壊性、耐疲労性などの耐久性を考慮し、ジエン系の汎用ゴムに、カーボンブラック、マイカなどの補強剤を混合して加硫した配合ゴムが用いられる。表1に現在一般的に用いられているポリマーを例示する。ブチル系ゴムは損失係数も大きくばね定数を広範に設計できるものの、破壊特性が劣るなどの理由により、通常は天然ゴムあるいはスチレンブタジエン共重合ポリマー（SBR）が良く使われる。

3.3 流体封入型防振ゴム

最近の防振ゴムの新しい流れをリードしているものに自動車用防振ゴムがある。

この自動車用防振ゴムは、振動、騒音を低減するだけでなく、操縦安定性など自動車の運動性能にも影響するパーツとしてますます重要度を高めている。その中で、エンジンマウントはエンジンからの振動、騒音の伝達を遮断する目的で使用されるため、特に動的性質に対する要求が厳しく、ゴム材料の動的性質の最適化あるいは構造面で液体、空気などの性質を応用した複合構造化などの研究開発が進んでいる。このエンジンマウントの例を取り上げてゴム材料と構造設計の面

図7 ゴムの動特性マップ³⁾ 図8 流入封入エンジンマウントの例³⁾

からその傾向について述べる。一般にエンジンマウントは主にエンジンシェイクに関連する7~15 Hzの周波数帯域の振動伝達率を抑え、かつ、こもり音などの車室内騒音に関連する、100 Hz以上の周波数帯域での振動伝達率を小さくすることが要求される。これは図7に示す自動車用防振ゴムの動特性マップ³⁾では右下の方向になり、この領域の特性を満足するためには、ゴム単一材料のソリッド型防振ゴムと材料面の改良のみでは困難であり、構造型としての流体封入マウント³⁾が開発され、実用化されている。この流体封入マウントの例を図8に示すが、ゴム状弾性体により形成される中空室をオリフィスを有する仕切板により2室に分割し、エチレングリコールなどの流体が封入されている。

この構造のマウントの動特性の例を図9に示すが、

図9 流入封入マウントの動特性の例³⁾

10 Hz 付近で高い損失係数（ロスファクタ）を示しており、シェイク対策に有効なことがわかる。

このことは、単一ゴム材料ではロス（損失係数）を大きくすると共振は抑えられるが防振域は悪化するという図4(b)に示した特性が、共振域ではロスが大きくなり、防振域ではロスを小さくできることから図10に示すような理想的な振動絶縁特性を示すことを意味し、モータなど回転機械のように始動から常用状

図10 流入封入型防振ゴムの振動伝達特性のパターン

態に至るまでに必ず共振域を通過するような場合や広帯域の不規則振動をもつ外力の場合に対して有効な防振ゴムであり、今後自動車以外の分野においても広く用いられるようになると思われる。

さらに最近では、アクティブに動特性をコントロールする目的で図11に示すような電気粘性流体を利用したエンジンマウント⁴⁾も開発されつつある。この電気粘性流体は電場内に置くと電場の強さに比例して粘性が変化する性質をもち、その反応は可逆的で反応時間が数 ms と短いため、これまでのメカニカルな制御にかわって可変ダンパのほか色々な応用が期待されている。

4. 制振材料

4.1 制振材料の役割

制振材料の役割は、振動源と伝達部位との間に防振ゴムなど適切なばね材を挿入して振動の絶縁、遮断を図る方法に対し、図1に示すように振動伝達部位に直接内部ロスの高い材料を貼りつけたり、ロスを付与する構造体を装着することにより、振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、共振を抑え、振動や固体伝搬音の低減を図ることにある。

4.2 制振材料の種類とメカニズム

建築構造物や機械構造物のケーシングなどのパネル類は広帯域の周波数領域に多くの共振現象を起こす要素をもっており、共振周波数に合った振動、広帯域の不規則振動や衝撃などが印加されると共振状態が励起され、大きな鋭い振動やそれに伴う固体伝搬音を発生する。こうした状態の場合、制振材料を付与することにより、図12に示すように共振現象を抑制することができ⁵⁾、自由振動の減衰波形も鋼板のみの場合には減衰が遅いのに対し、制振処理した場合は急激に減衰し、振動やそれに起因する固体伝搬音が低減する。

構造物に制振機能を付与する方法としては、制振材

図11 電気粘性流体制御型エンジンマウントの例⁴⁾

図12 多質点系構造体の制振¹⁾

料を貼りつける，異種材料を複合する．磁気ダンパを利用する，動吸振器を付与する，構造体自体を制振性のある複合材料や合金で構成する方法など色々となるが，ここでは最も一般的である高分子材料の概要について述べることにする．

4.3 高分子材料系による制振

制振材料には，シート状，タイル状や塗布型のものなど，施工法に応じて種々の材料があるが，主要な構成材料としては，ゴム，プラスチックやアスファルトなどの高分子とマイカなどの充てん材料である．これら高分子材料においてもっとも有効な制振性能を発揮するのは，図6で示したガラス転移温度に近い遷移

図13 制振材の構成と変形挙動

領域での粘弾性挙動である．この領域では，損失係数が大きくて振動エネルギーが熱エネルギーに変換されて逸散される．しかしながら，実際に制振が必要とされる温度，周波数にこの遷移領域を有するポリマーは少ないので，種々のガラス転移点を有するポリマーをブレンドしたり，ポリマーに充てん剤や可塑剤を混合して減衰特性を改良している．高分子系の材料の一つであるゴム系のものであれば防振ゴムのところで述べた内部ロスの大いブチルゴムをベースにしたものが多い．

制振材料のタイプは大別すると制振性能を付与したい構造に制振材料を単体で使用する非拘束型と剛性の高い拘束板でサンドイッチ構造になるようにした拘束型の2種類があり，図13にその構成と変形挙動を示す．

非拘束型の場合には，曲げは振動するときに基板上の制振材料が図13に示すように伸縮変形を発生し，振動エネルギーが減衰する．制振材料のヤング率が小さい場合には，損失係数 η は次式で記述される⁵⁾．

$$\eta \approx \eta_2 \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \quad (2)$$

ここに， η_2 は制振材料の損失係数， E_1, E_2 はそれぞれ基板と制振材料のヤング率， h_1, h_2 は基板と制振材料の厚さである．

例として，ブチル系のシート状制振材料の損失係数の周波数依存性，温度依存性を図14に示す．使用温

図14 シート状制振材料の特性の例

図 15 制振処理による振動と音の低減量の比較¹⁾

度、周波数で減衰特性が最大になるように、軟化剤、充てん剤などに工夫をした組成物が用いられている。

拘束型の場合には、拘束板によって拘束するため、制振材料へのせん断曲げ力が大きく作用し、非拘束型より薄く、軽量になることが多いので、構造物の設計荷重、施工性などの点で有利になる。

以上述べてきたように、構造体が機械的励振により複雑な共振を誘発し、固体伝搬音を発生している場合には制振処理が有効であるが、その場合の低減量 ΔL は、制振処理前後の損失係数 η_0 および η とすると共振状態のところでは、式 (1) を利用すれば次式で与えられる¹⁾。

$$\Delta L = 20 \log_{10} \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \sqrt{\frac{1+\eta_0^2}{1+\eta^2}} \quad (3)$$

しかし、実際にはランダムな加振を受ける場合が多く、その場合はランダム入力の応答問題として取り扱えば次式のようになる¹⁾。

$$\Delta L = 10 \log_{10} \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \sqrt{\frac{1+\eta_0^2}{1+\eta^2}} \quad (4)$$

一般にランダム振動を受けている鋼構造物の場合の制振処理による振動の低減量は 10～20 dB 程度になる場合が多い。振動の低減に基づく固体伝搬音の低減量もほぼ式 (3)、(4) で推測できるが、制振処理により音響放射効率がやや変化することがあり、普通、制振処理による振動の低減量より音の低減量がやや少なくなることが多く、固体伝搬音の低減をねらった制振処理の場合には考慮する必要がある。図 15 に鋼板 (1 mm 厚) に、ブチル系制振材料 (2 mm 厚) を接着した場合の振動の低減量を例示する。

5. お わ り に

振動の低減の方法として、振動絶縁、制振の役割に

ついて述べ、特に減衰という面から防振ゴム、制振材料について触れた。ゴム材料を含め、これらの高分子材料はすべてポリマー単体で使われているのではなく、目的や使用条件に応じて設計された組成物で複合化されて材料となっている。

さらに、最近の動きとして、流体封入型防振ゴムのようにより構造により減衰を付与する工夫がなされてきており、材料特性のみに依存した技術開発ではなくなってきた。

一方では、マイクロエレクトロニクスの発展に伴って、電子制御によってアクティブにコントロールしようとするものも開発されつつある。

また、積層ゴムのようにより地震に対する免震や半導体などの超精密加工や高分解能の電子顕微鏡など微振動の水平方向の除振に対応するものも開発されつつあり、防振の対象分野も広がってきている。

このような高度な要求に対して、新しい材料、装置や制御技術、さらにはそれを支える評価解析技術が発展していくことが期待される。

引 用 文 献

- 1) 飯田一嘉：制振材料とその適用法，機械設計，28 (1984) 36.
- 2) J. D. Ferry：Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons, (1980).
- 3) 見田 晃ほか：自動車用防振ゴムの現状，自動車技術，40, 10 (1986) 1288.
- 4) 日産自動車株式会社，Feel the Best, 東京モーターショウ資料 (1987) 45.
- 5) L. Cremer et al.：Structure-Borne Sound, Springer-Verlag.