制振材料に関する一般知識と材料データ

竹 内 文 人

Fundamentals and Technical Data of Dumping Materials

Fumito TAKEUCHI (Elastmer Department, Polymeric Materials Laboratory, R&D Center, Mitsui Chemicals, Inc., 3, Chigusa-Kaigan, Ichihara-City, Chiba 299-0108, Japan) Fumito.Takeuchi@mitsuichemicals.com

This article gives an overview of the fundamentals of polymeric materials for vibration damping. Based on vibration transmissibility of single degree of freedom systems, the differences between vibration isolation and vibration damping are described. Mechanism and materials design of the vibration damping materials are outlined with viscoelastic properties and those structures. As an example of controlling loss factor in viscoelastic properties, the formulations of EPDM with carbon black are described.

(Received on April 29, 2016)

Key Words : Polymeric Materials for Vibration Damping, Transmissibility, Viscoelastic Properties, Storage Modulus, Young's Modulus, Loss Factor, $\tan\delta$, EPDM

1. はじめに

制振材料とは、対象物の振動エネルギーを熱に変化させ、振動エネルギーを吸収して、振動を減衰または抑制する能力の高い材料をさす。今回の特集，“防音ゴム材料の考え方”という観点から制振材料を捉えれば、対象物の振動が音として空気中に放射される際、その振動を速やかに減衰させることにより、音として放射されるエネルギー量を小さくすることが、制振材料の機能として期待される。

制振材料は、高分子系制振材料、制振金属・合金、制振銅板等に分類できるが、本稿では、高分子系制振材料について触れる。なお、制振材料全般の詳説については、成書を参照されたい¹⁾。

本稿では、防振と制振の基本的な解釈、制振機能を発現するメカニズム、EPDM配合と粘弾性特性について紹介する。

2. 防振と制振について

筆者が良く受ける質問として、制振と防振の違いに関する内容が多いため、振動伝達率 τ を用いて概説する。こ

ではモデルケースとして、図1に一自由度振動系のモデルを示した。

図2～4は、参考文献²⁾を基に作成したグラフで、基準の条件では共振周波数が100 Hzに存在するモデルを仮想

損失係数一定型(制振材、防振ゴム)

図1 一自由度振動系モデル

竹内 文人；三井化学株式会社 研究開発本部 高分子材料研究所 エラストマーグループ (〒299-0108 千葉県市原市千種海岸3番地) 主席研究員。平成13年千葉大学大学院 自然科学研究科 物質工学専攻 修了。同年三井化学(株)入社。現在に至る。専門は、高分子化学、高分子物性、光機能性高分子、接着・封止技術、音響・振動制御材料。日本音響学会会員、制振工学研究会会員。

した。横軸は加振周波数、縦軸は振動伝達率 τ である。図2に示すとおり、共振周波数100 Hz付近では、損失係数の増大による振動減衰効果が大きく観測され、振動伝達率を低減することが可能となる。この効果が制振と呼ばれる。一方、図3のように、ばね定数を大きく（材料を硬く）すると共振周波数が高周波数側へシフトし、反対に、ばね定数を小さく（材料を柔らかく）すると共振周波数は低周波数側へシフトする。また、図4に示したとおり、対象物の質量 m が増加した場合には、共振周波数が低周波数側へ

図2 損失係数が変化した場合の振動伝達率

図3 ばね定数が変化した場合の振動伝達率

図4 質量が変化した場合の振動伝達率

シフトする。このように共振周波数をシフトさせて振動伝達率を低減させることを防振と呼ぶ。なお、着目すべきは、ばね定数や対象物の質量の変更は、共振の周波数をシフトさせるが、共振時の振動伝達率はほぼ変わらない点である。

すなわち加振源から対象物への振動伝達を制御する場合、共振周波数付近で振動エネルギーを吸収させてその周波数での振動を減衰させる制振機能を考慮するのか、共振周波数を他の周波数帯にシフトさせてその周波数での振動を低減させる防振機能を考慮するのか、理解することが、適切な防音設計を行ううえで基本的な考え方となる。

このように、共振周波数における振動を極力小さく抑える、あるいは対象物の振動を減衰させることが制振材料の機能である。図2に示したように、振動伝達率 τ が1以上の共振周波数領域に対して、損失係数が大きい制振材料を適用することが振動を減衰させる場合に効果的である。言い換えれば、振動しているパネルを加振源と捉え、対象物を空気とし、そのあいだに制振材料が介在すれば、空気へ伝達される振動を低減することができる。振動・騒音の観点から制振機能を解釈すれば、共振周波数による振動減衰/放射音抑制、打撃音の低減、自励振動防止などが期待できる。

一方、防振（防振ゴム）設計の基本は、ばね定数と質量の関係に基づき、実使用環境下において、加振源から対象物への振動伝達率 τ が1未満となるように設計する。すなわちモーターやポンプ等の回転機器において、実使用環境での特定周波数が分かっている場合、計算上求められる共振周波数を特定周波数よりも十分に小さく設計することにより、加振源から対象物への振動伝達を抑制することが可能となる。防振技術は「振動絶縁」が求められる機能である。

これら防振と制振の機能は、明確に区別して使用する必要がある。例えば、優れた制振材料であっても、間違っ

図5 制振材料の構造的分類

3. 制振機能を発現するメカニズム

3.1 非拘束型と拘束型

高分子系制振材料が用いられる構造として、二層構造の非拘束型と、三層構造の拘束型に大別される。どちらも高分子系材料の粘弾性特性を利用して振動減衰性を発現する。

非拘束型は対象物（振動する基材）に単層の高分子系材料を貼り付け、その高分子系材料の伸び縮みによって振動エネルギーを吸収し、熱エネルギーへ変換する。したがって曲げ変形の場合、高分子系材料層の伸び変化量は、その層の厚さに比例することになり、薄い場合には変形が少なく得られる振動減衰性も小さい。高分子系材料の層を厚くするほど振動減衰性が高くなるため、非拘束型において実用的な振動減衰性を得るためには、高分子系材料層の厚さを対象物と同等程度以上確保することが望ましいと考えられている。制振材料が貼り付けられた対象物全体の結合損失係数 η は、式1に示した近似式¹⁾で表される。式(1)より、非拘束型の制振材料に用いられる高分子系材料の粘弾性特性として、損失係数が高いことに加え、貯蔵弾性率（縦弾性係数あるいはヤング率とも表現される）も高いことが望ましいことが導かれる。

$$\text{結合損失係数 (近似式)} \quad \eta = 14 \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^2 \eta_2 \quad (1)$$

E_1 : 基材の貯蔵弾性率 E_2 : 制振材料の貯蔵弾性率
 H_1 : 基材の厚さ H_2 : 制振材料の厚さ
 η_2 : 制振材料の損失係数

三層構造は表面の拘束層によって中間層の高分子系材料すなわち粘弾性材料がズレやせん断ひずみを生じる際に振動を減衰させるものである。制振材料が貼り付けられた系全体の結合損失係数の考え方は、式1に示した近似式と同様であり、制振材料の損失係数、厚み、貯蔵弾性率が高いほど、振動減衰性も高くなる。ただし、高分子系材料の貯蔵弾性率はガラス領域では高い値を示すが、ガラス転移点付近で急激に減少する。すなわち、高分子系材料の粘弾性特性において、貯蔵弾性率と損失係数はトレードオフの関係にある。そこで、拘束型制振材料は、高弾性率を拘束層に、高損失係数を中間層に配分することによって、より軽くて薄い制振材料を設計できる点がメリットとして挙げられる。

3.2 高分子系制振材料の粘弾性特性

次に、高分子系制振材料の設計要素について触れる。高分子系制振材料を設計する上で、粘弾性特性の把握が基本かつ重要となる。一例として、酢酸ビニル含有量33 wt%のエチレン-酢酸ビニル共重合体（以下、EVA）の固体粘弾性特性について、図6に温度依存性、図7には周波数

図6 EVA樹脂の固体粘弾性（温度依存性）

図7 EVA樹脂の固体粘弾性（周波数依存性）

依存性を示した。図7は図6で得られた粘弾性特性を式(2)に示すWLF式³⁾によって換算した。ガラス転移温度を基準温度とし、 C_1 、 C_2 はそれぞれ、17.4、51.6を用いた。

$$\log \alpha_t = - \frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (2)$$

α_t : 換算係数 T : 測定温度 (°C)

C_1 , C_2 : 定数 T_0 : 基準温度 (°C)

換算周波数 $f_r = \alpha_t \times f_c$

f_c : 試験片の共振周波数 (Hz)

図6、図7に示したとおり、高分子系材料の粘弾性特性は、温度依存性や周波数依存性を示すが、最も有効に制振機能を発現するのは、損失係数が最大となるガラス転移点付近である。ガラス転移点では、主鎖のミクロブラウン運動が活発になり始める領域であり、炭素数で10～50程度の共有結合の分子鎖が制振効果にもっとも深く関与していると考えられている⁴⁾。騒音・振動制御技術者は制振機能を発現すべき温度や周波数領域を把握した上で、適切な制振材料を選定する必要がある。

近年では、換算周波数ノモグラム³⁾による制振特性の表現方法が認知されている。温度-周波数換算則が成立する

図8 EVAの換算周波数ノモグラム

制振材料に関して、使用条件などの適合を予測的に検討が可能となった。図8は、図6を基に作成したEVAの換算周波数ノモグラムである。横軸は換算周波数、左縦軸は各物性値、右縦軸は使用環境の周波数である。例えば、図中の100 Hzで0℃の材料の貯蔵弾性率は、点A⇒C⇒Eをたどって、損失係数は点A⇒B⇒Dをたどって、それぞれ求めることができ、振動予測シミュレーションに活用されている。

制振材料を設計する観点から、極力広い温度領域、周波数領域で高い損失係数を有する材料設計が検討されている。天然ゴム、合成ゴム（スチレンブタジエンゴム、ブタジエンゴム、イソプレングム、ブチルゴム、ニトリルゴム、水添ニトリルゴム、EPDM、クロロプレングム、熱硬化ポリウレタン、アクリルゴム、シリコーンゴム、フッ素ゴム）、熱可塑性エラストマー（オレフィン系、EVA、スチレン系、ポリ塩化ビニル系、熱可塑性ポリウレタン系、ポリエステル系）がその代表例として挙げられる⁵⁾。

制振材料としての機能を向上させるため、高分子系材料そのものの分子構造の設計に加え、架橋状態、可塑剤・軟化剤、伸展剤、補強剤、充填剤、高分子系アロイ等々、さまざまな設計因子が検討されている。近年では、圧電材料、低分子有機極性物質を高分子材料中に配合し、外力による変位を電力へ変換し、電流のジュール熱によって振動エネルギーを減衰する制振材料も報告されている⁵⁾。

4. 配合技術によるEPDMの粘弾性特性制御

配合技術による粘弾性特性の制御技術に関して、EPDMの配合例を紹介する。代表的な補強剤であるカーボンブラックをEPDMに添加すると、カーボンブラック同士の凝集力ならびにカーボンブラックと高分子鎖間の凝集力により、材料の硬度が上昇する。同時に外部からの振動・変形により、カーボンブラック同士あるいはカーボンブラックと高分子鎖間にずれや滑りが生じる。このずれや滑りが応力緩和性や振動減衰性として作用し、振動エネルギーを熱エネルギーとして吸収することが可能となり、制振性能が

発現する。

表1に、EPDMに対し、カーボンブラックとパラフィンオイルを配合し、総充填部数を200部、300部、400部、500部と変更した際の配合と代表物性を示す。この検討においては、ショアA硬度（直後値）が70付近となるよう、カーボンブラックとパラフィンオイルの配合量を調整した。総充填部数が高くなるにつれて、反発弾性率が低下する。これらの架橋シートの粘弾性特性について図9に貯蔵弾性率（ G' ）、図10に損失弾性率（ G'' ）、図11に損失係数（ $\tan\delta = G''/G'$ ）を示す。総充填部数が高くなるほど、損失弾性率が増大し、その結果、損失係数も増大する。これは、カーボンブラック配合量の増大はカーボンブラック同士あるいはEPDM高分子鎖とカーボンブラックの相互作用部分の増大につながる。外部からのひずみによりその相

表1 EPDMの配合事例

		200部	300部	400部	500部
配合					
三井EPT ^{TM} 3110M ^{*1)}		100	100	100	100
活性亜鉛		5	5	5	5
カーボンブラック (FEF)		47	104	158	215
パラフィンオイル		13	56	102	145
軽質炭酸カルシウム		28	28	28	28
その他加工助剤等		7	7	7	7
加硫系					
CBS		2	2	2	2
ZnBDC		1.0	1.0	1.0	1.0
TMTD		0.5	0.5	0.5	0.5
DPTT		0.5	0.5	0.5	0.5
イオウ		0.8	0.8	0.8	0.8
加硫ゴム物性 ^{*2)}					
比重		1.15	1.17	1.18	1.19
ショアA硬度	直後	71	71	70	70
	15秒後	68	67	65	66
機械物性 (JIS K6251)					
引張強度	MPa	14.3	14.7	12.0	9.4
破断伸び	%	400	460	457	312
反発弾性率 ^{*3)}	%	65	48	38	31
(JISK K6255 リュブケ式)					

*1) ML (1+4) 125℃ = 78, エチレン含量 = 56 wt%, ジエン含量 = 5 wt%

*2) 2 mm 架橋シート : 160℃ × 10 min

*3) CSブロック : 160℃ × 13 min

図9 EPDM配合の固体粘弾性（貯蔵弾性率）

図10 EPDM配合の固体粘弾性（損失弾性率）

図11 EPDM配合の固体粘弾性（損失係数）

相互作用部分のずれや滑りがより多く発生するため、結果として損失係数が増大すると考えられる。

ここで紹介した配合による粘弾性特性の制御技術は、同一のEPDM素材を使っているにもかかわらず、カーボン

ブラックの配合により損失係数をコントロール可能である点が興味深い。筆者も含め、制振材料の開発技術者は高分子素材そのものの設計や選定ならび配合技術による高機能化を検討しているのが現状である。

5. お わ り に

近年、クオリティ・オブ・ライフという言葉が社会に浸透し始め、より快適な空間を創出するための音響・振動制御技術が見直されている。本稿では、制振を取り上げたが、遮音、吸音、防振技術とともに複合化した空間設計が重要だと考える。そのためには、空間や構造を設計する立場の技術者と制振や防振材料を設計する立場の技術者が設計の初期段階から要求特性を協議しあうものづくりの体制が重要と思われる。

References

- 1) Seishin Kogaku Handbook Henshuiinkai Ed, "Seishin Kogaku Handbook", Corona Publishing, Tokyo (2008)
- 2) Nihon Kenchiku Gakkai Ed, "Jitsumuteki Souon Taisaku Shishin (2nd Edition)", Gihodo Shuppan, Tokyo, p.71 (1994)
- 3) Japanese Industrial Standards: JIS K 7391:2008
- 4) Sperling, L. H.: Sound and Vibration Damping With Polymer, 5, ACS Symp 424 (1990)
- 5) Nisizawa, H. Ed, "Kobunshi Seisinzairyou · Ouyouseihin no Saisinndoukou II", CMC Publishing, Tokyo (2009)

日本語表記参考文献

- 1) 制振工学ハンドブック編集委員会：「制振工学ハンドブック」、コロナ社、東京（2008）
- 2) 日本建築学会編：「実務的騒音対策指針（第二版）」、技報堂出版、東京、p.71（1994）
- 3) 日本工業規格：JIS K7391:2008
- 5) 西沢仁監修：「高分子制振材料・応用製品の最新動向Ⅱ」、シーエムシー出版、東京（2009）

*

*

*

*

*