

報 文

軽量板振動のダンピング同定と計測法について

富山職業訓練短期大学校 機械系 松岡 昇・小田 英明

西村 勝

Damping Identification in Light Structures Based on  
Transfer Frequency Response Measurement

Noboru Matuoka, Hideaki Oda, Masaru Nishimura

**要 約** 近年、機械は高性能、高速化のために低振動を計らなければならない、そのため構造体に減衰性の高い軽量新素材が採用されるようになってきた。しかし、軽量化することにより振動の発生が問題となっている。軽量構造体のダンピングに関しては検討がほとんどなされていない。

本研究では、軽量で減衰が高いとされているプラスチック系、繊維強化プラスチック系 (FRP)、コンクリート系のダンピングを検討する。最近、構造体の動特性を解析する手法として、実験モーダル解析法が急速に普及して広く利用されている。しかし、このような軽量構造体の実験モーダル解析法から求めるモード減衰比は試験体の支持方法によって大きく異なるにもかかわらず、その測定方法の確立についてはほとんど検討されていない。本実験では単純構造体すなわち長方形平板を試作し、自由支持法として各種の吊るし法および浮かし法を採用してモード減衰比の測定法を検討する。

その結果、最適な支持法は綿糸かナイロン糸またはゴム糸の吊るし支持法を用い、支持糸を振動モードの節部の位置に設置するようにすれば、ダンピングの同定には1つの代表伝達関数を採用するだけで十分で、カーブフィット法によるモード減衰比の同定に有効であることがわかった。

I はじめに

近年、構造体の軽量化が要求されるようになった。軽量化することにより振動の発生が問題となっている。しかし、軽量構造体のダンピングに関しては検討がほとんどなされていない。

そこで本研究では、軽量で減衰が高いとされるプラスチック系、繊維強化プラスチック系、コンクリート系の素材<sup>(1)(2)</sup>のダンピングを検討する。

最近、構造体の動特性を解析する手法として、実験モーダル解析法<sup>(3)-(11)</sup>が急速に普及して広く利用されている。しかし、このような軽量構造体の実験モーダル解析法から求めるモード減衰比は試験体の支持方法によって大きく異なるにもかかわらず、その測定方法の確立についてはほとんど検討されていない。

本実験では単純構造体すなわち長方形平板を試作し、

自由支持法として各種の吊るし法および浮かし法を採用して、モード減衰比の測定法を検討する。

試験体のモード減衰比が支持方法の違いによってどのように影響を受けるか明らかにするとともに最適な支持方法を検討し、実験モーダル解析法から長方形平板のモード減衰比を決定する。

II 自由支持法

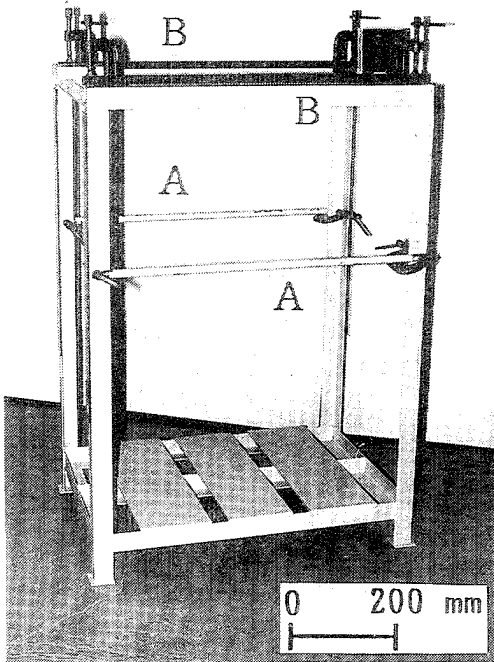
完全な自由支持の条件は現実には実現できず、何らかの手段で支持をしなければならない。

軽量構造体の支持は、構造体の内部に吸収されるエネルギーが外部に消散するエネルギーより大きくなるようではなければならない。すなわち軽量構造体に適応する支持方法は支持部から逃げるエネルギーを出来るだけ小さくする必要がある。具体的には各振動モードに対して節部で支持するようにするのが最も効果的であろう。

本実験では吊るし支持法と浮かしの2つの支持法について検討を行うが、吊るし支持法による測定方法は吊る

しの長さの調整が簡単に操作でき、しかも各振動モードの節部への移動が容易に行えるように工夫した。

そのためには図1に示すような簡易形支持装置を用いた。すなわち支持装置の主要部は、吊るしの長さを調整出来るようにした1対の丸棒と試験体の幅に対応できるようにした2本の丸棒から構成されている。丸棒を用いた理由は支持系の各振動モードの節部への移動が容易に操作するためである。これらは、長さとの調整が簡単にできるようにシャコ万力で固定してある。



A 吊るし長さ調整棒  
B 幅調整棒

図1 簡易形支持装置

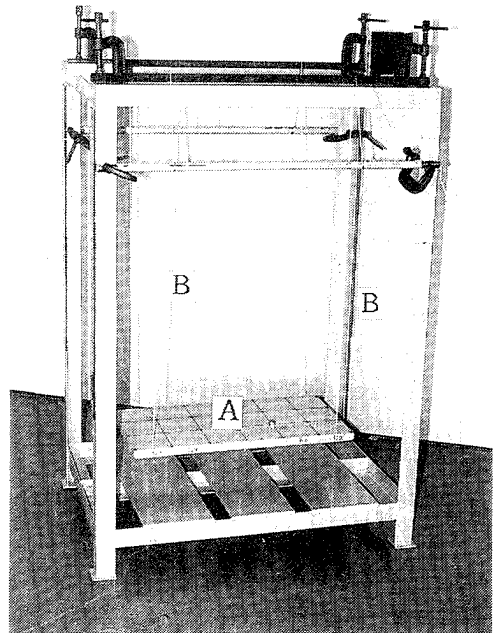
表1に吊るし法および浮かし法の支持条件を示す。表に見られるように、吊るし支持材は綿糸、ナイロン糸、ゴム糸、バネの4種類である。糸吊るしの場合は2本で、バネ吊るしでは4本で保持する。糸吊るしの長さは、図1に示されている幅調整棒から試験体の支持点までとした。本実験では400~800mmの範囲で長さを変化させたところ、モード減衰比の変動は3~7%となり、この範囲内における長さの違いが、モード減衰比にはほとんど影響しないと言える。図2には糸吊るしとバネ吊るしの支持状態をそれぞれ示す。

浮かし支持は図3に示すように空気入りチューブと部分的クッションおよび全面クッションの3種類を用いる。

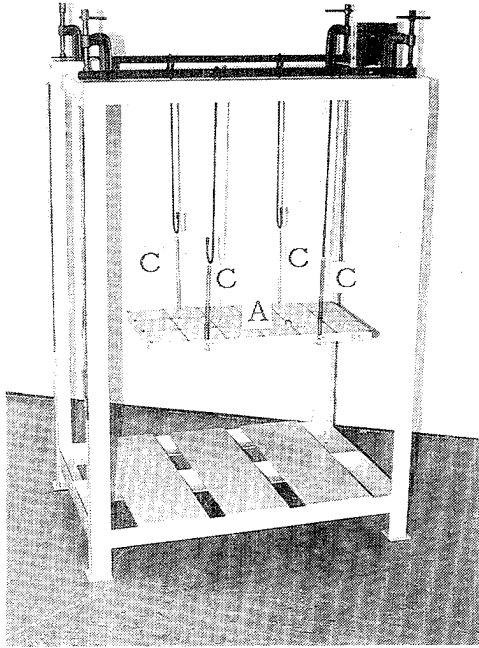
浮かし条件は、いずれの場合も試験体を乗せたとき、2~5%縮む程度にした。

表1 吊るし法および浮かし法の支持条件

支持条件		寸法	
吊るし法	綿糸	長さ (mm)	800
		直径 (mm)	1
	ナイロン糸	長さ (mm)	800
		直径 (mm)	0.330
	ゴム糸	長さ (mm)	800
		断面 (mm)	幅 3×厚さ 1
バネ	バネ定数 (N/mm) 線径 (mm) / 巻数 (カタログデータ)	0.0657 0.9 / 64	
浮かし法	空気入りチューブ	大きさ (mm)	80 (幅) 300 (直径)
	部分的クッション	硬度 (N/cm <sup>2</sup> ) (カタログデータ)	19.6 ± 14.7
	全面クッション		58.8 ± 19.6

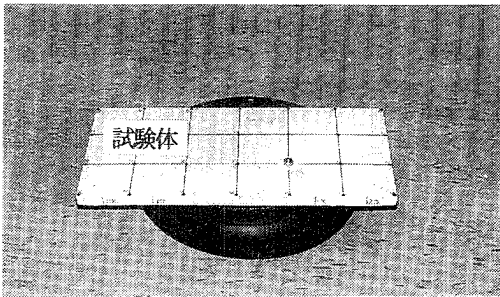


(a) 糸吊るし [綿糸、ナイロン糸、ゴム糸]

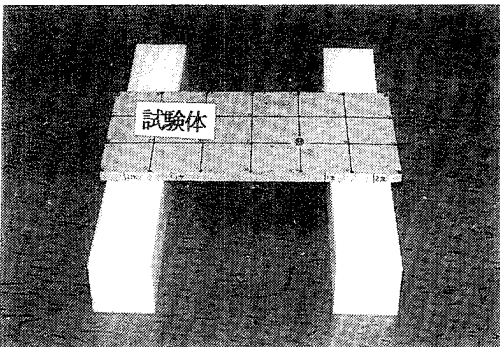


(b) バネ吊りし  
A 試験体  
B 糸  
C バネ

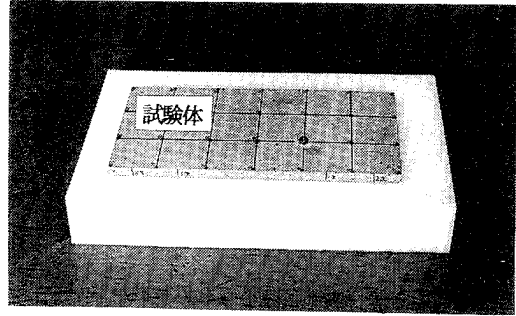
図2 吊りし支持法



(a) 空気入りチューブ



(b) 部分的クッション



(c) 全面クッション

図3 浮かし支持法

### III 試験体

本実験では、軽量でダンピング材として可能性のある材料として、プラスチック系、繊維強化プラスチック系 (FRP)、コンクリート系の3種類を対象にする。プラスチック系の素材はナイロン6とポリアセタールの2種類、繊維強化プラスチック系ではトレカ [積層角度:  $0^\circ$  (たて糸) /  $90^\circ$  (よこ糸), 積層段数: 平織り45枚] とグラファイト [G5電極] の2種類、コンクリート系はレジンモルタルである。表2に素材名と密度と板状試験体の寸法を示す。

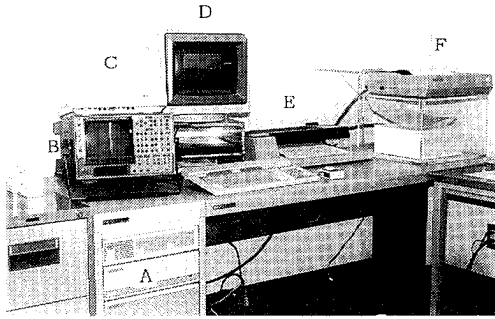
表2 ダンピング材として可能性ある軽量材料

軽量材料		密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	板状試験体の大きさ [mm]
プラスチック系	ナイロン6	1.13	H20×W250 ×L500
	ポリアセタール	1.43	
繊維強化プラスチック系 (FRP)	トレカ	1.74	H10×W250 ×L500
	グラファイト	1.80	H20×W250 ×L500
コンクリート系	レジンモルタル	2.10	

### IV 実験モーダル解析

本実験におけるモーダル解析は、まず最初にコンピュータ上で試験体の幾何学的モデルを作成してから伝達関数の計測に入る。その測定方法はインパルスハンマと圧電型加速度ピックアップ、および2チャンネルFFTアナライザを用いて行い、測定された伝達関数はコンピュータ (HP9000シリーズ310) に転送してモーダル解析ソフトウェア (SMS社製のMODAL3.0SE) 上に引き渡す。

このソフトウェアでは伝達関数から固有振動数を検出し、カーブフィットと呼ばれる曲線当てはめ処理を行って、試験体の動特性すなわちモーダルパラメータ (固有振動数、減衰比、振動モード) を推定する。図4はモーダル解析システム装置を示す。



- A ハードディスク (40MB)
- B 2チャンネルFFTアナライザ
- C ハードコピー
- D カラーディスプレイ
- E プロッタ
- F プリンタ

図4 モーダル解析システム装置

加振実験は図5に示すようにインパルスハンマで板状試料の各部を加振し、応答を圧電型加速度ピックアップで検出する。検出器は試験体上面に瞬間接着剤(アロンアルファ)で固定する。ピックアップは電荷感度が90cP/G、質量が30gで、その振動振幅特性は20kHzまで一定である。

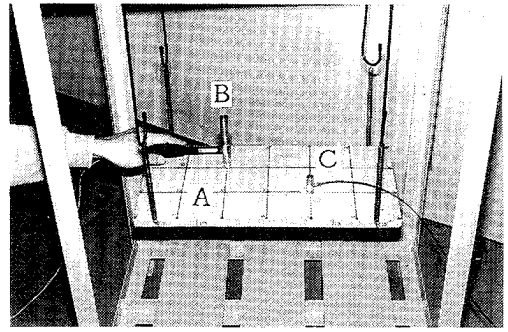
一般に試験体と検出器の質量の関係は、国際規格で1/50倍以下となっている。本実験では試験体の質量が2000~4800gであるから約1/65~1/160倍となり、試験体の固有振動数が検出器の質量によって影響を受けないと言える。

加振点と応答点間の伝達関数は、インパルス応答波形の振幅値を高速フーリエ変換して求める。その応答波形の取込時間は0.2secで行い、その波形の最低周波数は計測しようとする周波数範囲より高くなるようにする必要がある、そのためにはハンマのチップ材質を選択しなければならない。本実験では2000Hzの周波数領域で計測するが、硬質プラスチックでの最低周波数はほぼ3500Hzになっていたため、チップの材質は適当であると言える。

信号取込時のウィンド処理は時間窓の中で完全に周期化し、減衰する波形なのでレクタングラ(矩形波)を採用する。

加振と応答の間の伝達関数(ゲイン)の計測には応答点は試験体上面に固定し、加振点を変化させて16回の繰り返し加振の加算平均法で求める。

モーダル解析に当たり試験体を図6のように分割し、その節点に28個の加振点を設ける。



- A 試験体
- B インパクトハンマ
- C 加速度ピックアップ

図5 加振実験

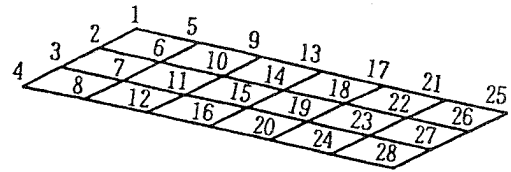


図6 試験体の形状定義

## V ダンピング同定の手順

応答計測を時間領域で行う場合は、すべてのモードに対してモードの節部を支持することは不可能である。ここでは長手方向の曲げ振動モード(以下縦曲げ振動モードと呼ぶ)のみに注目し、吊りし支持法における試験体の支持場所は縦曲げ振動モードの節部で保持するようにした。

図7には縦曲げ振動におけるモード減衰比のダンピング同定の手順を示す。図に見られるように、吊りし支持法では試験体を縦曲げ振動モードの1次と2次および3次の節部にそれぞれ保持する。各振動モードの節部はモードアニメーションから決定した。図8には縦曲げ振動モードの支持場所を示す。インパクト加振は曲げ振動モードが励起されやすいように試験体を垂直方向に打撃する。測定された伝達関数はコヒーレンス関数で評価する。吊りしおよび浮かしのどちらの支持法もコヒーレンス関数が各固有振動数近傍でほぼ1に近い値を示すことを確認している。

モード減衰比は試験体で実測される28個の伝達関数すべてに対してそれぞれカーブフィット法により求めた。その結果、全点から得られたモード減衰比は加振位置に関係なくほぼ同一で、その標準偏差は0.008~0.018となった。ただし、1~2箇所の加振位置でモード減衰比が

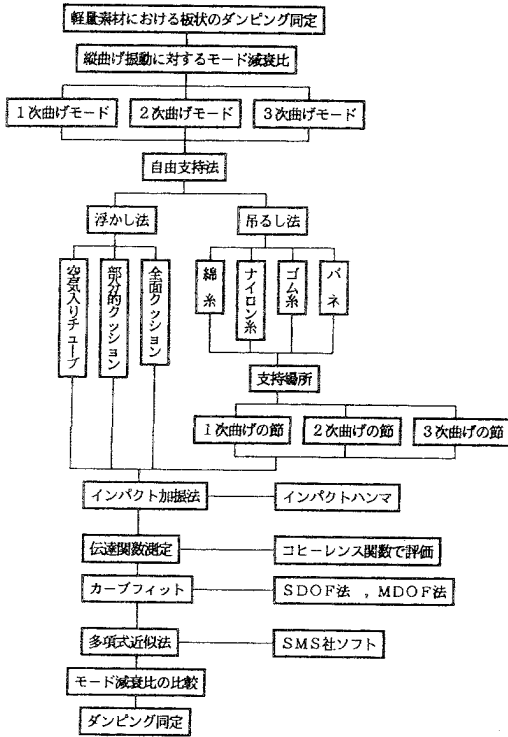


図7 ダンピング同定の手順

比較的大きくあるいは小さく求められたがそれは除外した。

ここでのカーブフィット手法は試験体の減衰を比例粘性減衰としたときの伝達関数(外力と変位関係式)を想定し、この式中の固有振動数、減衰比、振動モードなどのモーダルパラメータを適当な値にすることにより、実測された伝達関数と仮定した伝達関数をできるだけ近似させるようにするものである。

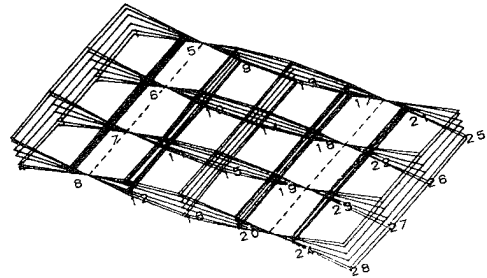
そして、各振動モードのピーク(共振峰)が離れている場合は1自由度系カーブフィット(SDOF)法で行い、複数のピークが近接してお互いに影響し合っている場合は、多自由度系カーブフィット(MDOF)法を用いる。

実際にカーブフィットするときは、共振ピーク付近に使用するデータの範囲を決定し、この指定範囲のデータからモーダルパラメータを推定する。カーブフィットのアルゴリズムは多項式近似法を採用している。このようなカーブフィットによって作られた伝達関数は、図9に見られるように実測と良好な一致を示した。

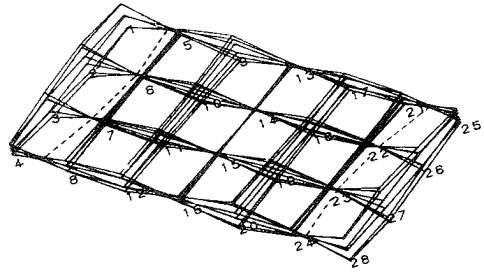
### VI 各種の自由支持法による減衰比の変化

図10に5種類の試験体に対するモード減衰比の分布を示す。固有振動数はその支持条件によって、ほとんど変化

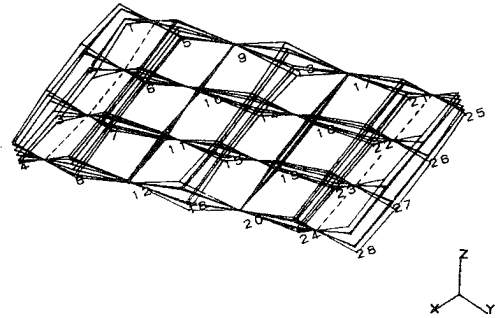
をしなかった。しかしモード減衰比は図10に見られるよ



(a) 1次曲げモード



(b) 2次曲げモード



(c) 3次曲げモード

図8 縦曲げ振動モードにおける保持位置(破線の節部)

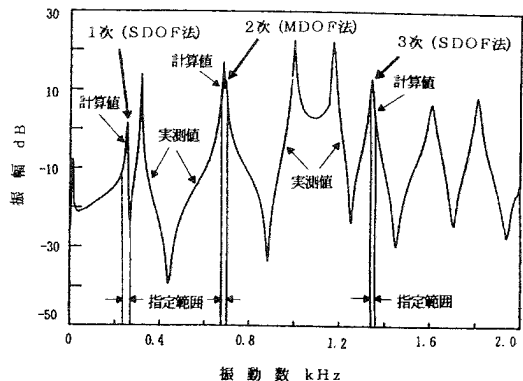


図9 カーブフィット結果

うに、吊るし支持法から求められた値は全般に浮かし支持法によって得られた値より小さくなっている。吊るし支持条件ではモード減衰比の値がほぼ同一であり、支持の影響をほとんど受けていないと言える。

これに対して浮かし支持法から求めたモード減衰比は、その支持条件によって大きく違っている。特に全面クッション浮かしのモード減衰比が大きくなっている。これはクッションの接触面積が広く減衰要素として試験体に作用しているものと考えられる。

このようにモード減衰比は支持条件によって、相当の影響を受けることが明らかになった。たとえばレジンモルタルの場合、綿糸吊るしと全面クッション浮かし（硬度： $19.6 \pm 14.7 \text{ N/cm}^2$ ）では、縦 1 次曲げモードで比較すると約 4 倍クッション浮かしの方が高くなっている。

5 種類すべての試験体でモード減衰比に振動数依存性が認められる。

### VII ダンピングの同定

モード減衰比は支持からの減衰が試験体にどの程度作用するかによって異なる。各種の支持法の中でモード減衰比が小さくなっているほど支持部による減衰の影響を受けていないものと見なすことができる。

吊るし支持法から求められたモード減衰比は値がほぼ同一であったばかりでなく、浮かし支持法に比較して全般に小さくなっているため、試験体のダンピングを同定するための支持法として適当であると考えられる。

表 3 には 5 種類の試験体について同定された固有振動数とモード減衰比の値が示されている。モード減衰比は綿糸とナイロン糸およびゴム糸の 3 種類の支持条件に対して求めたものである。

表 3 に示されているダンピングの範囲は 3 種類の吊るし支持法について求められたモード減衰比の変動に対応

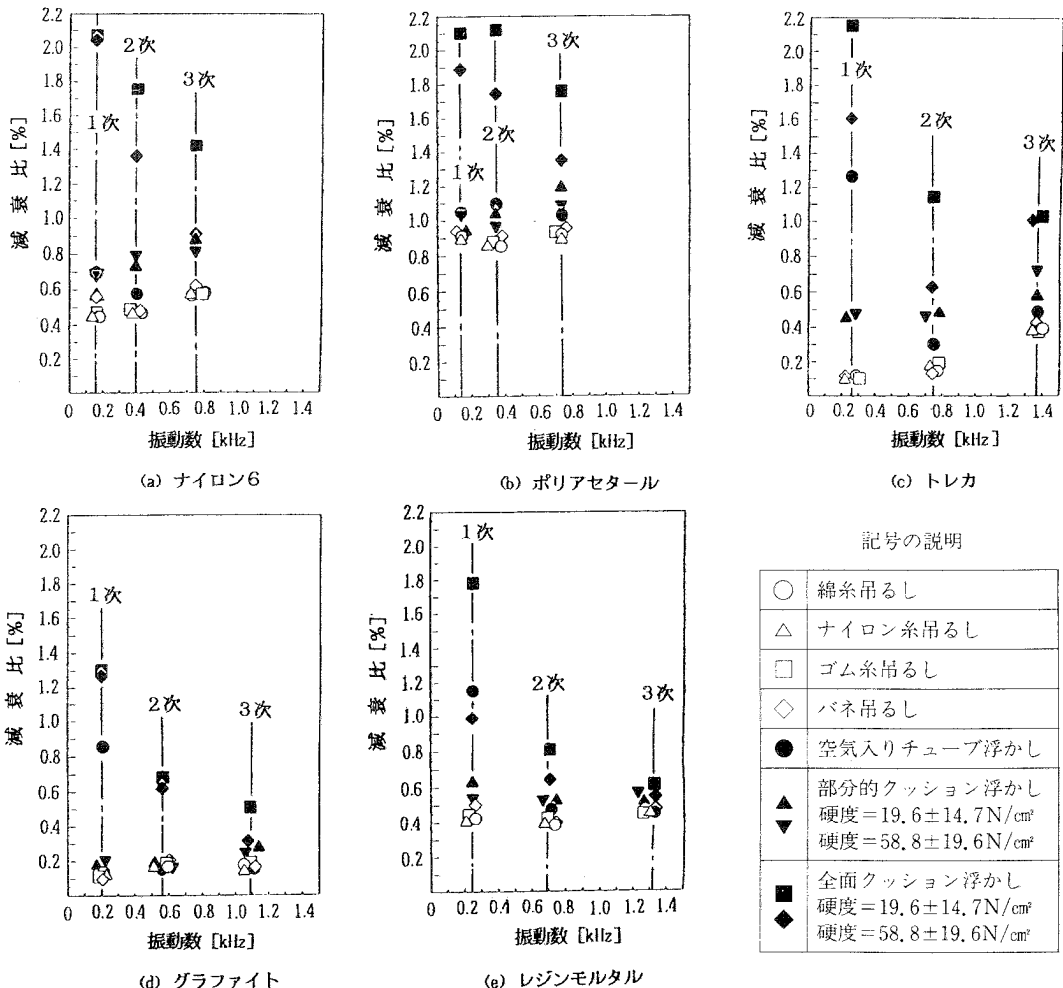


図10 各種支持条件のモード減衰比への影響

表3 各種軽量材料における固有振動数およびモード減衰比の値

軽量材料	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	縦1次曲げモード		縦2次曲げモード		縦3次曲げモード		
		固有振動数 [Hz]	減衰比 [%]	固有振動数 [Hz]	減衰比 [%]	固有振動数 [Hz]	減衰比 [%]	
プラスチック系	ナイロン6	1.13	144	0.45~0.47	393	0.48~0.49	777	0.57~0.58
	ポリアセタール	1.43	134	0.86~0.91	367	0.86~0.88	727	0.91~0.93
繊維強化プラスチック系 (FRP)	トレカ	1.74	273	1.10~0.11	732	0.15~0.19	1385	0.38~0.39
	グラファイト	1.80	206	0.11~1.13	560	0.17~0.18	1094	0.15~0.18
コンクリート系	レジンモルタル	2.10	253	0.14~0.44	690	0.38~0.41	1347	0.45~0.47

している。

表において、トレカの第3次曲げモードにおけるモード減衰比が第1次、第2次のそれに比べて大きな差が生じている。これはトレカのモード減衰比が、高次モードになるにつれて大きくなる特性のためである。

5種類の試験体では縦曲げ振動モードの1次~3次にわたって、モード減衰比はグラファイト、トレカ、レジンモルタル、ナイロン6、ポリアセタールの順に大きくなっている。

### VIII あとがき

軽量の素材の支持法とダンピング同定について検討した。支持法として綿糸かナイロン糸またはゴム糸の吊るし支持法を用い、支持糸を振動モードの節部の位置に設置するようにすれば、ダンピング同定には1つの代表伝達関数を採用するだけで十分で、カーブフィット法によるモード減衰比の同定に有効であることがわかった。

しかし、振動モードによっては節で吊るすことが困難である場合があり、これらは今後の課題である。減衰の小さい素材に対しては音響放射によるダンピングも考慮する必要があるかも知れない。本実験ではその効果は無視した。

### IX 謝辞

加川幸雄教授(富山大学工学部)には、日頃ご指導ご鞭撻をいただいている。ここに感謝の意を表す。

### X 文献

- (1) 宮入, プラスチック系複合材料のハイブリット化, 日刊工業, 35-13 (1987-9), 26.
- (2) 上野, 工作機械構造物における新素材の応用, 機械と工具 (昭57-6), 64.
- (3) 加川・石川, モーダル解析入門 (1987), 159, オーム社.
- (4) 谷川, 振動工学ハンドブック (昭60), 275, 養賢堂.

- (5) 時田・森村, 精密防止ハンドブック (昭62), 143, フジテクノシステム.
- (6) 長松, モード解析 (昭60), 99, 培風館.
- (7) 大久保, 機械のモーダルアナリシス (昭61), 中央大学出版部.
- (8) 重田, モーダル解析での高次モード消除の補正方法, 日本機械学会論文集 (C編), 50巻49号 (1984), 11.
- (9) 大熊・長松, 特性行列の実験的決定による系の同定 (第1報 方法と提案の基礎的検討), 日本機械学会論文集 (C編), 51巻464号 (1985), 719.
- (10) 長池・長松, モード解析に関する研究 (第3報1自由度系に対する基礎検討), 日本機械学会論文集 (C編), 50巻464号 (1985), 710.
- (11) 長松・大熊, 区分モード合成法による振動解析 (第1報 固有振動数と固有モード), 日本機械学会論文集 (C編), 46巻412号 (1980), 1463.