

京都大学工学部 学生員 ○塩見謙介 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐晃
 東海ゴム工業(株) 正会員 山田 博 可知孝啓 近藤光由 高田友和

1. はじめに

パネル材の打撃振動に起因する騒音の低減対策として、アクティブ振動制御が有効な可能性のある一つの方策として考えられる。計測された振動を固有振動モードに分解する手法であるモーダルフィルタリングのアクティブ振動制御への導入は、意図する周波数帯域の振動の低減に制御系の能力を重点的に活用できる上、アクチュエータ・制御系における位相補償を合理的に実現できる等の利点がある。モーダルフィルタリングは制御対象構造物の固有振動モード形が実モードである事を前提とした手法であるが、現実の設置条件での床パネル材等に生じる、モード形に虚数部を含むような複素モードを持つ平板に対してはモード分解が有効に機能しないという問題がある。この問題をセンサ配置の調整により回避することを目的として、センサ配置がモーダルフィルタリングのモード分解性能に与える影響を検討した。

2. モーダルフィルタリングの原理

平板の面外振動を非減衰線形弾性 N 自由度振動系の自由振動と見なせる場合、その自由振動による応答変位 $\mathbf{u}(t)$ は、次式のように固有振動モードの重ね合わせで表現される。

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N A_n \phi_n \sin(\omega_n t - \gamma_n) \quad (1)$$

ここに A_n は n 次モードの振幅、 ϕ_n は振動モード形ベクトル、 ω_n は固有振動数、 γ_n は位相角である。よく知られている振動モードの直交性を前提として、例えば 1 次モード形ベクトル ϕ_1 に直交せず、2 次以上の振動モード形ベクトルに全て直交するようなベクトル ϕ_1 が存在すれば、 ϕ_1 と $\mathbf{u}(t)$ の内積を計算する事で、1 次モードの調和振動のみが抽出できる。このような手法を(1 次)モーダルフィルタリングと呼ぶ。 ϕ_1 は、 $N \times (N-1)$ 次元行列 Φ' を

$$\Phi' = [\phi_2 | \phi_3 | \dots | \phi_N] \quad (2)$$

で定義し、 Φ' の転置行列の零空間 (null space) の基底ベクトルを算出することで得られる。平板振動の制御においては、平板上に N 個のセンサを配置して振動を計測しこれらを N 自由度の応答と見なし、モーダルフィルタリングを適用して各振動モードの応答を分離すれば、個々の調和振動に対し制御を行う単純化された問題に帰着できる。

これは、比例減衰を有する場合でも同様に成立するが、現実の設置条件での床パネル材では非比例減衰となる例が多く見出され、この時振動モード形ベクトルは複素数(複素モード)となる。複素モードでは平板上の各計測点の振動の位相角が異なっており、モード形に位相差がない事を前提としたモーダルフィルタリングは、そのままでは適用できない。

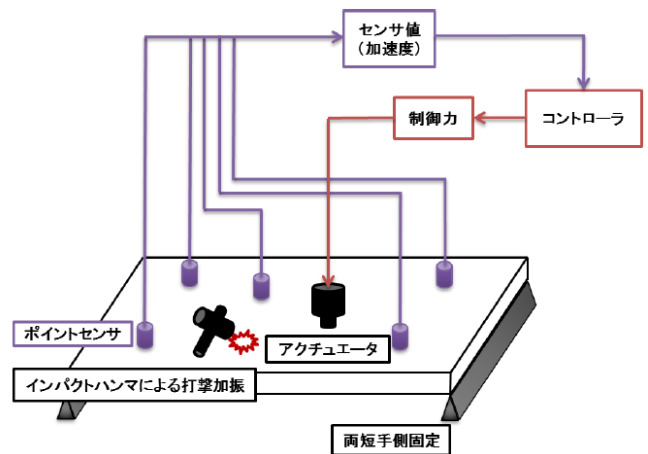


図-1 平板打撃振動のアクティブ制御概念図

3. センサ配置による影響

抽出対象の複素固有モードに対応するモード形ベクトルは、センサ配置に応じて変化する。考慮すべきセンサ配置による影響として以下が挙げられる。

- (1) **モード形ベクトル成分の位相差** : モード形ベクトル成分間の位相差が大きいほどモーダルフィルタリングの適用性が低下する。
- (2) **モード形ベクトル間の相関性** : 異なるモードに対応するモード形ベクトル同士の成分比が接近し一次従属に近い場合モーダルフィルタリングの適用性

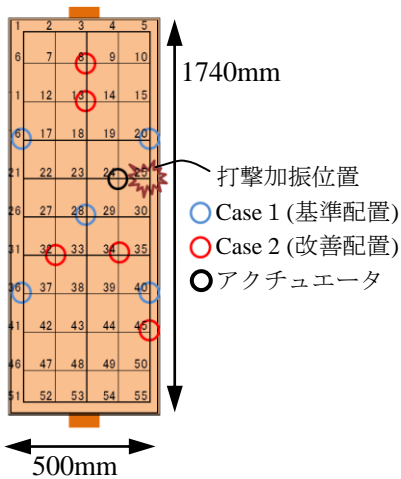


図-2 実験でのセンサ配置

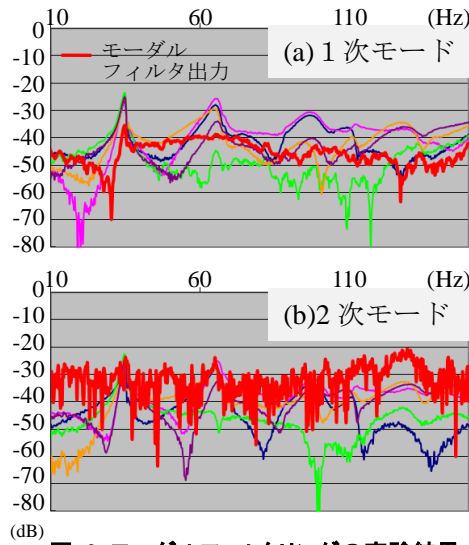


図-3 モーダルフィルタリングの実験結果
(Case 1:基準配置)

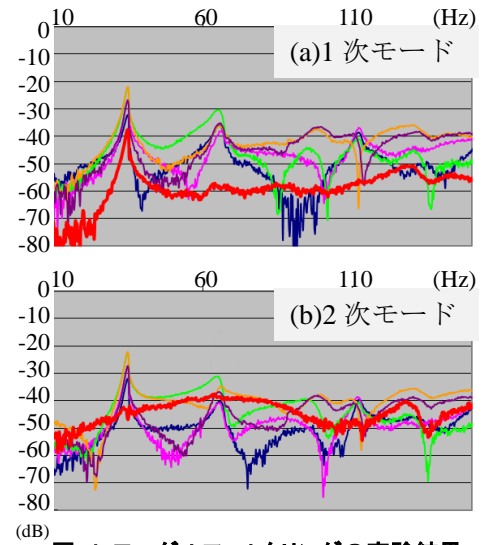


図-4 モーダルフィルタリングの実験結果
(Case 2: 改善配置)

が低下する。

(3) モードの腹・節の影響：センサ計測信号に混入するノイズの影響のため、センサ位置が対象モード形の節よりも腹に近い位置であればモーダルフィルタリングの適用性が向上する。

4. 実験による検証結果

床パネル材として用いられる軽量気泡コンクリート(ALC)にパーティクルボードを貼り合わせた500mm×1740mm×115mmの平板を実験対象とし、短辺側固定、長辺側自由の条件で支持した。同定された1次モードの固有振動数は34.0Hz、2次モードは66.5Hzである。この平板に圧電型ポイントセンサ5個と動電型アクチュエータ1個を設置し、振動制御のアクティブ制御を行う。その際、センサを平板上に対称的に配置した「基準配置」(Case1)と、前節の影響を考慮した位置にセンサを配置した「改善配置」(Case2)の1ケースの比較を行った。

(1) モーダルフィルタリングによるモード分離：対象平板への打撃加振により自由振動を生じさせ、両センサ配置についてモーダルフィルタリングによる1, 2次モードの分離性能を比較した結果を図3および図4に示す。赤線はモーダルフィルタリング結果を周波数領域でのフーリエ振幅をdBで表示したものであり、それ以外の線は個別のセンサ出力である。図-3(a)と図-4(a)の比較により、Case2がCase1に比べて1次モードをより明確に分離抽出している事が

わかる。2次モードに関しては、図-3(b)に示すCase1はノイズの影響が大きいのに対して、図-4(b)のCase2はノイズの影響が小さくなった。

(2) アクティブ制御による振動低減効果：センサ配置をCase2とし、図-2の黒色シンボルで示された位置にアクチュエータを設置してアクティブ制御を行う実験を行った。制御則には、1次、2次モードを対象としたDVF制御¹⁾を採用した。インパクトハンマによる加振を行い、無制御と制御を行った場合の伝達関数を比較した結果を図5に示す。本制御においては、1次モード固有振動数において10dBの振動低減を目標としたが、この目標に相当する制御効果が実現されることを確認した。

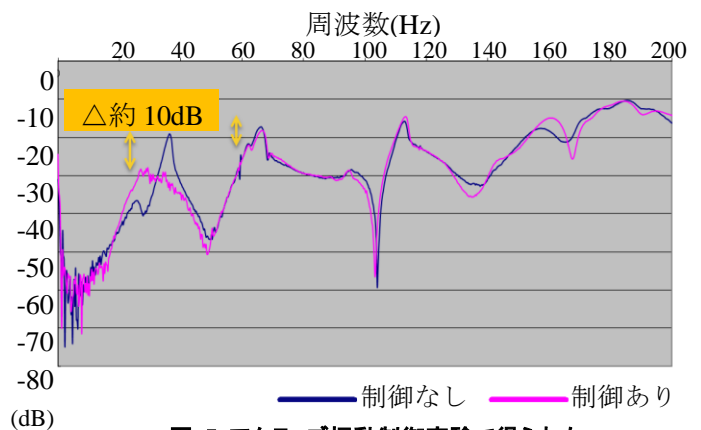


図-5 アクティブ振動制御実験で得られた
伝達関数(縦軸)の比較

参考文献 1) A. Preumont, K. Seto (2008) Active Control of Structures, Wiley.