

学位論文題名

Optimal Design for Vibration Suppression of Laminated Composite Plates

(積層複合材料板の振動抑制に関する最適設計)

学位論文内容の要旨

The development of fiber-reinforced polymer composites has rapidly advanced as engineering structural materials, and the laminated composite structural components using such fibrous composites are extensively used in the aerospace, civil, automobile industries and other fields of engineering. In addition to their excellent specific stiffness and strength properties, they have high potentials in the vibration suppression by using the optimal design methods and passive/active control methods.

The present dissertation deals with vibration suppression problems of laminated composite flat rectangular plates and shallow cylindrical shells of rectangular planform. The structures in the study include laminated plates with interleaf viscoelastic layers and sandwich plates with soft sandwich cores. An optimal design using a layerwise optimization method and new control methods are applied.

The dissertation is composed of six chapters as follows. Chapter 1 states research background and introduction, and the motivation and outline of the present research are explained.

In Chapter 2, an analytical method is presented to study the active vibration control of plates treated with active constrained layer damping (ACLD). The analytical method is based on the conventional theory of structural dynamics, and Hamilton principle with the Ritz method is used to derive the equation of motion of the plate/ACLD system. By applying an appropriate external control voltage to activate the piezoelectric constraining layer, a negative velocity feedback control strategy is employed to obtain the active damping and effective vibration control. From the numerical results, it is seen that the damping performances of the plate can be significantly improved by the ACLD treatment. With the increase of the control gain, the active damping characteristics are also increased. By equally dividing a single ACLD patch into two and properly distributing them on the plate, one can obtain better results than for the plate with a single ACLD patch.

In Chapter 3, an active vibration control of laminated cylindrical panels with arbitrary edge condition is investigated using piezoelectric fiber reinforced composite (PFRC) material. The boundary conditions considered are free edge, simply supported edge and clamped edge. By adopting a velocity feedback control strategy, the transient response of cylindrical panels can

be suppressed efficiently and the relationship between the control gain and active damping ratio is investigated. The active damping ratio curves are numerically calculated, and from the simulation results, it is found that the piezoelectric fiber orientation of the PFRC patches plays an important role in the vibration suppression capability.

In Chapter 4, the analysis and optimal design for the damping loss factor of laminated plates under general edge conditions are considered. In the analysis based on the classical lamination theory, the loss factor is derived from the energy formulation for symmetrically laminated thin plates comprised of fiber reinforced layers and viscoelastic layers. The effects of location and thickness of viscoelastic layers are studied on the loss factor of the plates, and those of the fiber orientation angles are also clarified. In the optimal lay-up design problem, a layerwise optimization (LO) method is applied to the plates comprised of two different orthotropic materials, and the optimal fiber orientation angles are determined to obtain the maximum loss factor in the fundamental mode. The numerical simulations uncover that the present approach is quite useful in analyzing and designing the loss factor of the plates.

In Chapter 5, an optimal design is presented to maximize the fundamental damping loss factor of sandwich rectangle plates with general boundary conditions. With extensive development of the classical laminate theory and energy method, the loss factor of sandwich laminate with a thin viscoelastic core is derived. For sandwich-laminated plates, the effect of fiber orientation of the orthotropic layer on the loss factor is studied. In the numerical examples, the effects of aspect ratios of sandwich laminates on optimal fundamental loss factors are investigated. The maximum fundamental loss factor and optimal fiber orientation are obtained for different sandwich laminates with the aspect ratio as a variable.

In Chapter 6, a number of concluding remarks obtained throughout the research is summarized, and some comments are made for potentials in extending the research.

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	成 田 吉 弘
副 査	教 授	小 林 幸 徳
副 査	教 授	佐々木 克 彦
副 査	教 授	趙 希 禄 (埼玉工業大学)

学 位 論 文 題 名

Optimal Design for Vibration Suppression of Laminated Composite Plates

(積層複合材料板の振動抑制に関する最適設計)

繊維強化された高分子系の複合材料は、FRP 材料 (Fiber Reinforced Plastics) と称され、工業構造材料として急速に発展した。とくに、その薄層 (ラミナ) を重ねて一体成型した積層複合材料板は、航空、自動車、土木などの工業において幅広く使用されるようになっている。この材料は高い比剛性と比強度を優れた特長として持つが、加えて最適化手法やアクティブ/パッシブ制御法の適用により、構造振動現象を抑制することが可能となる。この特性は、航空機などの軽量構造において、振動が構造に有害な共振や繰り返し疲労の原因となることから工業的にきわめて重要である。

本論文では、積層複合材料から成る長方形平板とそれに僅かな曲率を加わった長方形パネル (偏平シェル) の振動現象の解析と、制御と最適化による振動抑制を取り扱う。とくに本論文で扱う積層板には、通常の長繊維一方向補強ラミナを積層した板構造以外に、内部に粘弾性材料を挟み込んだ積層減衰材料と低剛性のソフトコアを挟み込んだサンドイッチ積層材料を含める。各章では、それぞれの積層複合材構造の振動解析法を提案すると共に、それを制御や最適設計の計算ツールとして用いる。本論文前半の制御では速度フィードバック制御法、後半の最適化では層別最適化法を適用する。

本論文は全 6 章で構成されている。第 1 章では、本研究を遂行するに至った工学的な背景と、本論文の概要を説明した。

第 2 章では、アクティブ拘束減衰層 (ACLD: Active Constrained Layer Damping) を有する積層板のアクティブ振動制御について研究した。振動解析には、この振動系に古典理論によるエネルギー式を適用して、ハミルトン原理とリッツ法により積層板/ACLD 複合系の支配方程式を導いた。これに piezo 材料拘束層に適切な外部電圧を加え、速度フィードバック制御を適用して、アクティブ減衰の振動制御を実現した。数値結果から、ACLD 層の制御により、振動系全体の効果的な減衰効果が得られ、制御ゲインの増加から高い制御効果が得られた。さらに ACLD パッチを等面積のまま分割して貼ることにより、一枚の ACLD により得られる減衰より高い制御効果が得られた。

第 3 章では、小さい曲率を持つ曲板 (パネル) に、第 2 章と同様に piezo 素子パッチを張り付けた積層複合材料板の振動解析と制御を扱った。境界条件は自由辺、単純支持辺、固定辺の任意の組合せを考慮している。第 2 章の手法を拡張して、速度フィードバック手法により、曲板の過渡応答を抑え、とくにコントロールゲインと能動的減衰比の関係を明らかにした。数値例では、能動的減衰比曲線を計算して、その結果から、減衰層内の繊維配向角度が振動系全体の減衰特性に大きく影響を与えることを明らかにした。

第4章では、一般的な境界条件の下で、積層板の減衰損失係数 (damping loss factor) を扱った。解析では古典積層板理論に基づき、通常の長繊維ラミナと粘弾性層の両方から成る対称積層板に関してひずみエネルギーを導き、それから損失係数を得た。とくに層間に挟み込む減衰層の位置と厚さが損失係数に与える式を導いた。さらに積層構成最適化問題を考察して、層別最適化法の適用により2つの異なる直交異方性材料からなる積層板を考え、基本次数モードにおける板全体の損失係数を各層の繊維配向角度に関して最適化した。数値計算例から、提案した損失係数の解析法と最適化手法の組合せが、減衰積層板の特性の計算と振動減衰問題の最適化に有効であることが示された。

第5章では、一般的な境界条件の組合せ下で、ソフトコアを持つサンドイッチ板の基本次数モードでの損失係数の最大化の方法を示した。このため古典積層板理論とエネルギー法の活用により、粘弾性層を含むサンドイッチ板の損失係数を導いた。このサンドイッチ積層板に関する計算により、繊維配向角度の効果が導かれた。数値例では、最適設計により最大化した損失係数とそれに対応する繊維配向角度を、辺長比ごとに表にまとめ、減衰特性に関する傾向を包括的に評価した。

第6章では、全体の総括と結論を述べ、今後の展望について述べた。

これを要するに、著者は、先端複合材料である積層 CFRP 板に関して、振動制御用のパッチを表面に貼った場合の速度フィードバック型の制御手法を理論的に定式化するとともに、層間に粘弾性層やソフトコアなどの高減衰性材料を入れた場合の解析方法を提案し、層別最適化法の適用により積層板振動系の減衰特性を最適化できることを初めて定量的に示した。以上の成果は、学術と応用の両面から機械工学、とくに固体力学、最適設計工学、複合材料工学の分野の発展に貢献するところ大であり、よって、著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。