専攻主任
丸山

学位論文審査結果の要旨

博士(工学)申請者　　趙 希禄

審査委員
主査　教授　　成田　吉弘
副査　教授　　丸山　晃市
副査　教授　　大滝　誠一
副査　助教授　太田　佳樹

複合材料から成る積層平板と偏平シェルの最適設計に関する研究

CFRP 等のプラスチック系複合材料からなる平板やシェル構造は、高い比剛性・比強度を生かして航空宇宙構造からゴルフシャフトなどのスポーツ分野まで幅広く利用されている。また FRP 材料はテーラードマテリアルとも呼ばれ、積層構造において各層の繊維配向角度や厚さを適切に選択することで、静変形や振動などの力学特性を最適化できることが知られている。

本論文においては，ＦＲＰラミナから構成される積層平板と偏平シェルの最適設計問題についての研究をまとめている。各章は以下のように要約される。

第１章は緒論であり，本研究の意義と目的及び各章の概要を述べた。

第２章では，本研究で扱う種々の積層板の設計問題に対して，それぞれの目的関数，設計変数および制約条件について詳細に説明したうえで，積層板の基本振動数の最大化、座屈荷重の最大化、静変形剛性の最大化及び基本振動数制約条件付き重量最小化の設計モデルを数理的に定義した。また，これらの最適化問題の解を求めるために，Kuhn-Tucker 条件式とコンプレックス法について詳細な検討を行った。

第３章では，　任意の境界条件をもつＦＲＰ積層板の力学問題にリッツ法を適用するため，積層板の構成方程式，運動方程式，種々の剛性係数および各エネルギーの表現式の検討を行った。

第４章では，任意の境界条件を持つ積層長方形板の基本振動数の最大化設計にコンプレックス法を適用した。設計変数には，各層ラミナの繊維配向角を用いた。目的関数である基本振動数の計算には,任意の境界条件の組合せを計算できるよう変位関数を工夫したリッツ法を適用した。計算例では，異方性がかなり強い Graphite/epoxy 材料と比較的弱い E-Glass/epoxy 材料の８層正方形板を扱い，それぞれ２１種類の境界条件の組合せに対して最適繊維配向角を計算した。その結果，最適な繊維配向角の分布は境界条件の組合せによりかなり影響を受けるが，全体の傾向として２つのパターンに分類されることが明らかとなった。

第５章では，積層長方形板の一般的な積層構成と境界条件の自由な組合せを考慮し，とくに力学的性質の異なる設計変数である繊維配向角と支持点位置を組合せた基本振動数の最大化問題に対する改良したコンプレックス方法を提案した。数値例では，３層の長方形積層板の２１通りの境界条件について，１つと２つの支持点により拘束する場合を取り上げ，数値結果の妥当性を検証した。

第６章では，任意の境界条件の組合せをもつ積層長方形板の座屈荷重の最大化問題にコンプレックス法を適用した。設計変数には，各積層ラミナにおける繊維配向角を用いた。計算例として，異方性の程度の異なる２種類の繊維強化複合材料の８層板を扱い，１１種類の境界条件の組

合せに対して最適な繊維配向角の計算をした。その結果，最適な配向角は境界条件によりかなり影響を受けるが，荷重と向かい合う辺の境界条件の影響は側面部の境界条件に比べて少ないことが明らかにした。

第７章では，任意の境界条件の組合せをもつ積層長方形板の静変形剛性の最大化問題にコンプレックス法を適用した。設計変数には，各積層ラミナにおける繊維配向角を用いた。計算例として，異方性の程度の異なる２種類の繊維強化複合材料の８層正方形板を扱い，１７種類の境界条件の組合せに対して最適な繊維配向角の計算をした。その結果，最適な配向角は材料の異方性によりかなり影響を受けるが，傾向として異方性が強い積層板のほうが積層ラミナの繊維配向角を調節することによる最適化のメリットが得られた。また，１組の対辺が拘束され剛性の強化すべき方向が明白で，境界条件に対称軸がある場合，最適な積層構成は完全な対称積層となり，他の境界条件でも対称積層に近い構成になった。

第８章では，積層板の振動解析法と２レベルの最適化法を用い，基本振動数の制約条件下で，各層ラミナの繊維配向角を調節することにより最小重量の積層板を求める最適設計法を提案した。具体的には，連成効果が低い２種類の設計変数を分離し，２段階に分けて最適解を求める。第１レベルの最適化において，基本振動数の最大化を目的関数とし，繊維配向角度の最適化のみを行なう。次に，第２レベルの最適化において，１レベルの最適化で求めた最適な繊維配向角を一定値のまま，指定された積層板の基本振動数の制約条件を付けた上で，板厚の最適化を行なう。計算例として，異方性の程度の異なる２種類の８層正方形板を扱い，２１種類の境界条件の組合せに対して，それぞれ最小重量に当たる積層板の最適な繊維配向角を計算した。

第９章では，対称にアングルプライ積層された偏平シェルの自由振動特性に関する最適化法を提案した。積層偏平シェルについて，全周単純支持の仮定の下に固有振動数の厳密解を与えた。次に各層ラミナの繊維配向角を設計変数として，基本振動数を目的関数とおく。この場合にKuhn-Tucker の最適性条件が満足されることを利用して，最適繊維配向角の計算式を導いた。また偏平シェルの自由振動では，積層角度の変化に対応して種々の半波数をもつモードが入替って基本振動数を与える。こうした基本振動モードの自明でない問題に対して，最適解の存在するすべてのパターンを検討して二つに分類した。これにより大域的な最適解を求める計算方法を提案した。円筒形，球形，鞍型形の３種類の形状をもつ対称積層偏平シェルについて，種々の寸法比と曲率をもつ場合の最適解を求めた。これらの計算例から，本方法が適用性にすぐれ，数値計算上の問題もないことが明らかになった。円筒形と球形シェルでは「積層角度－固有振動数曲線」における二つのモードの交点に最適解が存在するが，鞍型形ではほとんど単一モードの極値に最適解があることが示された。また正方形状の円筒形と鞍型形シェルでは対角線に関する対称性から最適積層角度が45°になることなど，過去の積層平板の研究では求められなかった，構造のもつ曲率が最適繊維配向角へ与える影響が明らかになった。

第１０章は本論文の結論であり，各章で得られた成果を要約している。

以上の研究をまとめると、任意の境界条件をもつ一般的な積層平板に対して，振動、座屈や静変形など力学特性に関連する最適設計モデルを設定し,直接探索法のコンプレックス法を用い,それぞれの力学特性に関して最適な積層構成を求めた。次に，全周単純支持の境界条件をもつ積層偏平シェルの振動問題に対して，シェルの運動方程式と境界条件を厳密的に満足する固有振動数の理論解を求めたうえで，Kuhn-Tucker 最適性条件を利用し，積層シェルの基本振動数を最大化する繊維配向角の公式を解析的に導いた。数値計算例によって，積層平板と偏平シェルの最適な積層構成を明らかにし，拘束条件と寸法比などの影響について詳細な検討を行った。

著者はこのように、積層構造を持つ平板やシェルの力学特性の最適設計問題に関して、独創性に富み学問的な厳密さを満足した成果を得ており、学術的に貢献度の高い博士論文を著している。この成果は、今後も本分野における工学的研究の１つの基準となり、また複合材料の構造設計に十分に寄与すると思われる。よって著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。