

博士(工学) 本田 真也

学位論文題名

局所異方性を有する纖維強化複合材板の
振動最適化に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究の目的は異方性を能動的に活用するために、曲線状纖維によって強化された材料を用いて局所的な異方性を有する構造要素を実現し、その性能を検証することである。第1章では、異方性的能動的な活用に至る動機と複合材積層板の積層構成最適化に関するこれまでの研究動向について述べた。

第2章では、平行纖維を有し、均一な異方性を有する板の最適設計法について述べた。最適な積層パラメータに対して、効率的に積層構成を算出した。その結果、層別最適化(LO)法と同等の精度を与えた。また、外側の領域から順次積層構成を決定していくことで、多層積層板に対しても効率的に板の積層構成を算出した。

第3章では、最適化計算の結果を実験的に検証するために、ハンドレイアップ成形法により、代表的な積層構成を有する板と、最適な積層構成を有する板を成形し、高速度デジタルカメラおよびレーザー変位計により固有振動数を測定した結果についてまとめた。最適積層構成の算出には有限要素法(FEM)解析とLO法を用いた。実験の結果、最適な積層構成を持つ板は、他の代表的な積層構成を持つ板よりも高い固有振動数を与えた。また、積層構成による振動数の違いも、FEMによる解析と同様の傾向を与えていた。これにより、LO法や第2章での最適解の妥当性が確認できた。

第4章では、局所的な異方性を有する板の性能を確認するために、短纖維を最適に分布した仮想的な材料の設計を行った。短纖維の最適な分布は、FEMの各要素において最適な積層構成を決定することで実現した。はじめに、数理計画法により積層パラメータの最適分布を算出し、第2章で述べた手法を拡張することで、短纖維分布を求める手法を提案した。その結果、局所異方性板が均一な異方性板よりも優れた静剛性を持ち、短纖維の分布にはある程度傾向があることを示した。しかしながら、数理計画法は固有振動数を扱う問題に対しては不安定な精度を示した。そのため、LO法と遺伝的アルゴリズム(GA)を組合せた手法を提案した。LO法の概念を応用し、GAを最外層から順に適用していくことで、多層最適化問題を単層の最適化問題の繰り返しに帰着させ、効率よく短纖維の分布を算出した。「LO+GA」により算出された短纖維分布は、積層パラメータを用いた手法よりも高い静剛性を示し、より明確な短纖維の傾向を示した。また、本手法は固有振動数を扱う問題にも有効であり、局所異方性板は平行纖維により強化された板よりも高い基本振動数を与えた。さらに短纖維の分布にも静剛性最適化問題と同様に、ある傾向が見られた。これにより、曲線状の強化纖維は、平行纖維よりも効果的に複合材を強化できる可能性を示した。

第5章では、曲線状纖維によって強化した複合材積層板の振動解析手法と最適化手法を提案した。スプライン関数を用いて任意の曲線形状を表現し、リツツ法により振動数方程式を導いた。曲線状の

強化繊維を有する板は、従来の均一な異方性板や等方性板とは異なり、曲線形状をよく反映した振動の腹や節を示した。これらの結果は、FEM の各要素に異なる繊維配向角度を与えて近似的に実現した曲線状強化繊維板の結果とよく一致した。また、他の境界条件や辺長比を持つ板に対しても適切な結果を与えており、本手法の妥当性が確認できた。以上の解析手法を用いて、曲線状繊維の形状を最適に設計することにより、板の基本振動数を最大化する最適化問題に取り組んだ。最適解の探索には GA を用い、設計変数はスプラインの形状を定義する入力データ点の垂直方向増分値、制約条件はデータ点間の限界の変化角度とした。最適化の結果は 21 種の境界条件に対して与えた。その結果より、本研究の問題設定上の制約および最適化問題の制約条件の下では、曲線状の強化繊維が有利な境界条件と、平行繊維が有利な境界条件が存在することがわかった。振動数の改善量は繊維の分布に制約がなかった第 4 章よりも小さな値であったが、改善が見られた境界条件の端付近では繊維の形状に共通した傾向が発見された。

最後に第 6 章において、総括と今後の展望について述べた。

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 福永 久雄（東北大学工学研究科）

学位論文題名

局所異方性を有する纖維強化複合材板の 振動最適化に関する研究

近年、構造軽量化により省資源と高効率化を目指す革新技術が、構造材料に求められている。従来からの金属材料を主とするマクロ的に均質な材料だけでは、この要求を満足することは困難である。一方、自然界に見られる構造は、しばしば不均質性を最適に配置して、均質材料よりも優れた性能を示している。機械構造物においても、こうした材料内部の不均質さを積極的に活用した機能性構造材料の出現が期待される。

本論文は、以上のことから材料中の不均質性を積極的に活用し、構造内に異方性を最適に分布させることで、従来より優れた不均質複合材料を実現することを目的とする。このために、曲線状纖維によって強化された局所異方性を有する材料を提案して、その特性解明のための構造材料の解析法および設計手法を確立する。

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動機と、纖維強化複合材料の特徴について述べた。また、纖維強化複合材料の積層構成を最適に設計する手法に関する過去の研究動向を概説し、近年注目を集めている曲線状強化纖維に関する最近の研究動向について述べた。

第2章では、平行纖維を有し、均質な異方性を有する纖維強化複合材料板の最適設計法について述べた。最適な積層パラメータに対して、層別最適化(LO)法の概念を適用し、外側の領域から順次積層構成を決定していくことで、多層積層板に対して効率的に板の積層構成を算出した。

第3章では、第2章における最適化の結果を実験的に検証するために、ハンドレイアップ成形法により、代表的な積層構成を有する板と、最適な積層構成を有する板を成形し、高速度デジタルカメラおよびレーザー変位計により固有振動数を測定した。実験の結果、最適な積層構成を持つ板は、他の代表的な積層構成を持つ板よりも高い固有振動数を与えた。また、積層構成による振動数の違いも、有限要素法(FEM)による解析と同様の傾向を与え、第2章で得られた最適解の妥当性を確認した。

第4章では、局所的な異方性を有する板の特性を確認するために、FEMの要素ごとに最適な短纖維の配向角度を算出し、短纖維を最適に分布した仮想的材料の設計を行った。はじめに、数理計画法

により積層パラメータの最適分布を算出し、第2章で述べた手法を拡張することで短纖維分布を求める手法を提案した。その結果、局所異方性板が均質な異方性板よりも優れた静剛性を持ち、短纖維の分布には特定の傾向があることを示した。しかし、数理計画法は固有振動数を扱う問題に対して不安定な精度を示した。このためLO法と遺伝的アルゴリズム(GA)を組合せた手法を新たに提案した。すなわちLO法の概念を適用し、GAを最外層から逐次的に適用していくことで、多層最適化問題を単層の最適化問題の反復に帰着して短纖維の分布を算出した。「LO法+GA」により算出された短纖維分布は、積層パラメータを用いた手法よりも高い静剛性を示し、短纖維の明確な分布傾向を示した。また後者の手法は固有振動数を扱う問題にも有効であり、局所異方性板は平行纖維により強化された板よりも高い基本振動数を与えた。以上より曲線状の強化纖維は、平行纖維より効果的に複合材を強化できることを示した。

第5章では、連続な曲線状纖維によって強化した複合材積層板の振動解析法と最適化手法を提案した。スプライン関数を用いて任意の曲線形状を表現し、リツツ法により振動数方程式を導いた。曲線状強化纖維を有する板は、従来の均質な異方性板や等方性板とは異なり、振動モードにおいて曲線形状をよく反映した腹や節を示した。この結果は、FEMの各要素に異なる纖維配向角度を与えて近似的に実現した曲線状強化纖維板の結果とよく一致した。また、他の境界条件や辺長比を持つ板に対しても適切な結果を与えて、本手法の妥当性を確認した。次に、以上の解析手法を用いて曲線状纖維の形状を最適化することにより、板の基本振動数を最大化する最適化問題を取り組んだ。その結果、本研究の制約条件の下では、曲線状の強化纖維が最適化に有利な境界条件と、平行纖維が有利な境界条件に分類できることがわかった。

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、複合材料の新しい概念を提案し、曲線状の纖維強化により局所異方性を活用した複合材料板を実現する方法を提案した。研究の結果、この局所異方性複合材料は従来の均質な複合材料より高い動剛性を持つことが明らかになった。以上の成果は、学術と応用の両面から固体力学、とくに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。