

種々の曲面を持つ積層偏平シェルの解析と 最適設計に関する研究

学位論文内容の要旨

近年, 世界的に環境と省資源化に対する関心が高まっている. その中で, 自動車や航空機などの燃料消費量の低減は重要課題であり, その対策として内燃機関の改良, ハイブリッド機関や燃料電池の開発とともに, 車体や機体の構造軽量化はきわめて重要である. 一般にこれらの構造には, シェルと呼ばれる薄い肉厚の曲面構造が多く用いられ, たとえば自動車のボンネット, フェンダ, ルーフ等の外装パネルや, 航空機の胴体や翼の構造要素に多く見られる. これらの材料には, 従来の等方性材料の金属だけでなく, 最近では高い比剛性と比強度を持つ繊維強化複合材料 (FRP) が多用されている. とくに CFRP は, カーボンの繊維により補強した高分子系の異方性複合材料であり, 自動車や航空機材料として着目されている.

本研究の目的は, 以下の通りである. はじめに, 偏平シェルの構造要素において, 振動を中心とする機械的挙動を解析する高精度の解析方法を提案して, 数値計算例を通して曲率の機械的挙動への影響を考察する. それと共に, 従来ほとんど研究が進んでいなかった非一様な曲率を持つ偏平シェルの振動解析に, 提案した方法を拡張する. このように曲率が位置により変化する曲面は, 最近の曲面を多用するデザイン重視の工業製品の開発に大きく関連する. さらに, 積層 FRP 材料からなる偏平シェルの解析を行ない, 曲率と材料異方性の機械特性への影響を調べると共に, 各層の繊維配向角度を設計変数, 固有振動数を目的関数とする最適化問題を取上げて, 基本振動数を最大化する最適積層角度を求める最適化方法を提案する.

本論文は 5 章で構成されている. 以下にそれぞれの章の概要を述べる.

第 1 章では, 本研究を進めるに至った社会的と技術的な背景を説明する. それから偏平シェルの振動についての過去 30 年余りの研究の進展を概観する. その後に, 本研究の目的を明確にする. とくにこの文献レビューによれば, 過去の研究の全てが実質的に一様な曲率を持つ偏平シェルの扱ってきており, 本研究により初めて, 位置により曲率の異なる曲面を持つ偏平シェルの問題が解析的に解決されたことを明らかにする.

第 2 章では, 積層複合材料からなる偏平シェルの基礎理論を展開する. 一枚の層 (ラミナ) の構成式から始まり, 積層された偏平シェルの全肉厚に対する剛性を導く. つぎに, 偏平シェル全体のひずみエネルギーと慣性エネルギーを求めて, エネルギー法の一つであるリッツ法を適用する. すなわち両エネルギーから与えられる汎関数を, 変位関数の未定係数により極小化する. この変位関数には, 任意の境界条件の組合せに対応できる特長を持たせる. 以上の手順から固有値問題として振動数方

程式を与えると共に、外圧による座屈問題の固有値方程式も導く。そして数値計算において、各層の繊維配向角度が固有振動数と固有振動モードに与える影響を定量的に評価し、外圧座屈問題についても、同様の考察を行う。また厳密解の存在する特別な場合について、汎用有限要素法により求めた結果と比較して、本解析方法の解の精度に関する優位性を明らかにする。

第3章では、本論文で新しく解析方法が提案される、曲率が位置の関数となる積層偏平シェルの基礎理論を説明する。このため三次べき関数による曲面表現を導入して、微分幾何による曲率の定式化を行う。とくに実際の偏平シェルモデルの挙動を解析するため、領域内で曲率が変化する実用モデルを与えて、任意の境界条件を考慮する汎用性のある解析方法を提案する。このために実形状を表す代表点を用いて、領域内を内挿することでシェル形状を表す。つぎにリッツ法による解析を、この非一様な曲率を持つ偏平シェルのエネルギーの評価により、振動数方程式を導いて行う。数値計算では、曲面の影響を明らかにするため、等方性材料の偏平シェルの数値結果を与える。すなわち初めに数値計算例に用いる代表的形状(NUC)モデルを設定して、このNUCモデルの固有振動数と振動モードを与える。つぎに曲面を表す三次べき関数の係数と振動特性の関係を等方性偏平シェルについて調べ、さらに積層偏平シェルの数値結果を与えて、固有振動数と振動モードから三次べき関数の係数と振動特性の関係を明らかにする。

第4章では、積層偏平シェルの最適化問題を扱う。初めに偏平シェルの最適化問題の概要を説明して、とくに積層構成の最適化問題の位置づけを明確にする。つぎに積層構造の最適化問題に有効な手法である層別最適化(LO)法の概要とそのアルゴリズムを説明する。数値計算例では、目的関数を基本振動数として、その値を最大化するような全層の繊維配向角度の最適値から成る設計変数ベクトルを求め、その結果について、物理的な考察を含めて議論を行った。

第5章は、全体の総括を述べた後、各章で与えた解析法とそれに基づく計算結果から得られた結論を示す。

以上のように、本論文では一様な曲率を持つ偏平シェルの振動と座屈特性について、幅広い知見を得ると共に、最近の工業製品への曲面デザインの多様化に対応するため、位置によって変化する非一様な曲率を持つ偏平シェルの実用的な解析方法を提案する。その精度の高さを、汎用有限要素法の結果との比較により明らかにし、また同時にこうした種々の曲面を持つ積層偏平シェルについて、積層構成を最適化する方法を提案する。

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 林 川 俊 郎
副 査 准教授 佐々木 克 彦

学 位 論 文 題 名

種々の曲面を持つ積層偏平シェルの解析と 最適設計に関する研究

近年,世界的に環境と省資源化に対する関心が高まっている.その中で,自動車や航空機などの燃料消費量の低減は重要課題であり,その対策として内燃機関の改良,ハイブリッド機関や燃料電池の開発とともに,車体や機体の構造軽量化はきわめて重要である.一般にこれらの構造には,シェルと呼ばれる薄い肉厚の曲面構造が多く用いられ,たとえば自動車のボンネット,フェンダ,ルーフ等の外装パネルや,航空機の胴体や翼の構造要素に多く見られる.これらの材料には,従来の等方性材料の金属だけでなく,最近では高い比剛性と比強度を持つ繊維強化複合材料 (FRP) が多用されている.とくに CFRP は,カーボンの繊維により補強した高分子系の異方性複合材料であり,自動車や航空機材料として着目されている.

本論文は,以上のことから,偏平シェルの構造要素において振動を中心とする機械的挙動を解析する高精度の解析方法を提案して,数値計算例を通して曲率の機械的挙動への影響を考察した.それと共に,従来ほとんど研究が進んでいなかった非一様な曲率を持つ偏平シェルの振動解析に,この方法を拡張した.このように曲率が位置により変化する曲面は,最近の曲面を多用するデザイン重視の工業製品の開発に大きく関連する.さらに,積層 FRP 材料からなる偏平シェルの解析を行ない,曲率と材料異方性の機械特性への影響を調べると共に,各層の繊維配向角度を設計変数,固有振動数を目的関数とする最適化問題を取上げて,基本振動数を最大化する最適積層角度を求める最適化方法を提案した.

本論文は 5 章で構成されている.以下にそれぞれの章の概要を述べる.

第 1 章では,本研究を進めるに至った社会的と技術的背景を説明した.それから偏平シェルの振動についての過去 30 年余りの研究の進展を概観する.その後に,本研究の目的を明確にする.とくに従来の研究では,実質的に過去の文献の全てが一様な曲率を持つ偏平シェルの扱ってきており,本研究により初めて,位置により曲率の異なる曲面を持つ偏平シェルの問題が解析的に解決されたことを明らかにした.

第 2 章では,積層複合材料からなる偏平シェルの基礎理論を展開した.一枚の層 (ラミナ) の構成式から始まり,積層された偏平シェルの全肉厚に対する剛性を導く.つぎに,偏

平シェル全体のひずみエネルギーと慣性エネルギーを求めて、エネルギー法の一つであるリッツ法を適用する。すなわち両エネルギーから与えられる汎関数を、変位関数の未定係数により極小化する。この変位関数には、任意の境界条件の組合せに対応できる特長を持たせる。以上の手順から固有値問題として振動数方程式を与えると共に、外圧による座屈問題の固有値方程式も導く。そして数値計算において、各層の繊維配向角度が固有振動数と固有振動モードに与える影響を定量的に評価し、外圧座屈問題についても、同様の考察を行う。また厳密解の存在する特別な場合について、汎用有限要素法により求めた結果と比較して、本解析方法の解の精度に関する優位性を明らかにした。

第3章では、本論文で新しく解析方法が提案される、曲率が位置の関数となる積層偏平シェルの理論を説明した。このため三次べき関数による曲面表現を導入して、微分幾何による曲率の定式化を行う。とくに実用的な偏平シェルモデルの挙動を解析するため、領域内で曲率が一様でないモデルを与えて、任意の境界条件を考慮する汎用性のある解析方法を提案する。このために実形状を表す代表点を用いて、領域内を内挿することでシェル形状を表す。つぎに不均一な曲率を持つ偏平シェルのエネルギーを評価して、リッツ法により振動数方程式を求めた。数値計算では、曲面の影響を明らかにするため、等方性材料の偏平シェルの数値結果を与える。すなわち初めに数値計算例に用いる自動車のフェンダを模した代表的形状(NUC)モデルを設定して、このNUCモデルの固有振動数と振動モードを与える。つぎに曲面を表す三次べき関数の係数と振動特性の関係を等方性偏平シェルについて調べ、さらに積層偏平シェルの数値結果を与えて、NUCモデルの固有振動数と振動モードから、三次べき関数の係数と振動特性の関係を明らかにした。

第4章では、積層偏平シェルの最適化問題を扱った。初めに偏平シェルの最適化問題の概要を説明して、とくに積層構成の最適化問題の位置づけを明確にする。つぎに積層構造の最適化問題に有効な手法である層別最適化(LO)法の概要とそのアルゴリズムを説明した。数値計算例では、目的関数を基本振動数として、その値の最大化を設計変数の全層の繊維配向角度の最適値から成るベクトルを求め、その結果について、物理的な考察を含めて議論を行った。

第5章は、全体の総括を述べた後、各章で与えた解析法とそれに基づく計算結果から得られた結論を示した。

これを要するに、著者は、一様な曲率を持つ偏平シェルの振動と座屈特性について幅広い知見を得ると共に、最近の工業製品への曲面デザインの多様化に対応するため、位置によって変化する非一様な曲率を持つ偏平シェルの実用的な解析方法を提案した。その精度の高さを明らかにし、こうした種々の曲面を持つ積層偏平シェルに対して、積層構成を最適化する方法を提案したものであり、固体力学、複合材料工学の分野と自動車工学への応用に貢献するところ大である。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。