

氏名	しゃか 謝佳
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第326号
学位授与の日付	平成15年7月25日
学位授与の要件	学位規程第3条第3項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学位論文題目	複合材料積層板の座屈荷重の予測に関する統一解法とその応用 (主査)
審査委員	教授 岩本 正治 教授 木村 照夫 教授 濱田 泰以 助教授 倪 慶清

### 論文内容の要旨

本研究では、Rayleigh-Ritz 法に高次の面外せん断変形を取り入れると共に、任意の境界条件に適合できる2変数の高次多項式変位関数を導入し、複合材料積層板の座屈問題に関する系統的かつ統一した半理論的解法を提案した。また、座屈特性を左右する諸因子の影響を系統的に調べることにより、複合材料積層板の最適設計に対する有意義な成果を得ることができた。本論文は、これらの研究成果をまとめ、10章から構成されたものである。

第1章では、複合材料積層板の座屈解析に関する研究の背景について述べ、さらに本研究の位置付けおよび論文の構成を示した。

第2章では、複合材料積層板の座屈解析に用いられた面外せん断変形を考慮しない古典積層理論、面外せん断変形を考慮した一次せん断変形理論および高次せん断変形理論について述べた。

第3章では、二軸圧縮荷重を受ける対称複合材料積層板を例に、最小ポテンシャルエネルギー原理に基づいて、高次せん断変形理論を取り入れ、Rayleigh-Ritz 法における肝心な変位関数に2変数の高次多項式変位関数を導入し、単純、固定、自由を組み合わせた任意の境界支持条件に対応できる半理論的な統一座屈解法を提案した。

第4章では、積層板が受ける荷形態の影響に注目し、第3章で提案した解析方法を用い、対称複合材料積層板の異なる荷条件下での座屈荷重の予測を行った。各種支持条件下において、等方性板の比較から、良い一致が得られ、本解析手法の有効性が確認された。また、一次せん断変形理論を用いた座屈荷重の予測結果は構造物にとって過大評価される危険性があることを判明した。また、座屈荷重はせん断負荷の方向によって大きく変化し、組合せ荷重を受ける場合、順せん断はプラス、逆せん断はマイナスの効果をもたらすことを明らかにした。さらに、各荷条件下で、積層板の座屈特性の材料異方性、繊維の配向、積層構造、境界支持条件などへの依存性を検討した。

第5章では、2変数高次多項式変位関数を拡張し、複合材料積層板の内部支持への適用を試み、二軸圧縮荷条件下で内部支持を有するアングルプライ複合材料積層板の座屈解析を行った。実用性の高い直線型、円形型および楕円型内部支持を有する積層板を取り上げ、板のアスペクト比、板厚、繊維の配向角などの影響を明らかにした。

第6章では、複合材料積層板の境界拘束はより現実に近い条件——弾性支持条件であることを取り上げ、弾性支持を撓みを拘束する並進バネおよび二つの変形角を拘束する回転バネを用いてモデル化した。バネ剛性の変化により固定支持と単純支持、単純支持と自由の間にある任意の境界支持条件に対応でき、本研究で導入した2変数高次多項式変位関数を用いることで、より一般的な境界条件を取り扱えることを示した。

第7章では、積層構造が非対称である複合材料積層板に対する座屈解析手法を確立した。非対称積層板の場合、中央面内と面外変形にカップリング効果が生じるため、座屈解析に中央面内の変形を考慮しなくてはならない。そのため、解析アプローチはより複雑になる。せん断負荷条件下での非対称積層板の座屈解析を行った結果、逆対称アングルプライ積層板では、順せん断と逆せん断負荷条件下において座屈荷重は変化しないのに対し、非対称積層板ではせん断負荷方向は座屈荷重に大きい影響を及ぼし、順、逆せん断が明確に現れたことを明らかにした。また、積層順序によって、順、逆せん断効果が大きく変化する積層構成が存在することも明らかにした。

第8章では、本研究で提案した座屈解法を検証するために、一方向強化材および対称積層材のせん断座屈実験を行い、各試験片の座屈荷重の実験値と座屈形状および提案した複合材料積層板の座屈荷重の予測に関する統一解法により得られた計算値と予測座屈モードとの比較を行った。その結果、両者は良い一致であることが確認され、本研究で提案した統一解法は有効であることが明らかとなった。

第9章では、上記第8章まで検証された座屈解析の統一解法を曲面板への展開を試みた。等方性曲面板に対する解析から、2変数高次多項式変位関数を曲面板の解析に展開可能であることを示唆した。また、積層曲面板に対する解析結果も収束性を示しており、ラミナ剛性および形状（曲率半径、中心角など）の変化が、積層曲面板の座屈応力に大きな影響を及ぼすことを示した。

第10章では、各章において得られた研究結果を総括し、結論を述べた。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、高次の面外せん断変形が取り入れられたと共に、任意の境界条件に適応できる2変数の高次多項式変位関数が導入され、複合材料積層板の座屈問題に関する系統的かつ統一した半理論的解法が提案された。また座屈特性を左右する諸因子の影響を系統的に調べることにより、複合材料積層板の座屈予測および最適設計に対し、同解析手法の有効性が示された。とりわけ、各負荷条件下での複合材料積層板に対し、高次せん断変形理論を取り入れた。その結果、予測された座屈荷重は従来の古典積層理論または一次せん断変形理論よりよい解析精度が得られた。Rayleigh-Ritz法における肝心な変位関数に2変数の高次多項式変位関数を導入することにより、提案された解析手法は単純、固定、自由およびそれらの組み合わせた任意の境界支持条件に対応できることを明らかにした。その上、より現実に近い境界拘束（弾性支持）を取り上げ、撓みを拘束する並進バネおよび二つの変形角を拘束する回転バネを用いてモデル化し、バネ剛性の変化により固定支持と単純支持、単純支持と自由の間にある任意の境界支持条件に対応でき、導入された2変数高次多項式変位関数はより一般的な境界条件を取り扱えることが示された。さらに、2変数高次多項式変位関数を拡張し、複合材料積層板の内部支持に適用し、二軸圧縮負荷条件下で実用性の高い直線型、円形型および楕円型内部支持を有する積層板に対して座屈荷重の予測を行い、板のアスペクト比、板厚、繊維の配向角などの影響を明らかにした。一方、一方向強化材および対称積層材のせん断座屈実験を行い、各試験片の座屈荷重の実験値と座屈形状を提案された統一解法により得られた計算値と予測座屈モードとの比較を行い、両者は良い一致であることが確認された。実験と解析の両面から、提案された座屈解法は有効であることが明らかとなった。

なお、本論文の内容は主に下記の6篇の論文を基礎に構成されたものである。そのうち3篇は申請者が筆頭著者となっている。

#### 【本学位論文の基礎となった学術論文】

1. 倪慶清, 謝佳, 前川善一郎, “高次せん断変形理論を用いた対称複合材料積層板の異なる負荷条件下での座屈解析”, 材料 (日本材料学会誌), Vol.52, No.6, pp.612-618, 2003.
2. 謝佳, 倪慶清, 岩本正治, “高次面外せん断変形を考慮した非対称アングル積層板のせん断座屈解析”, 材料 (日本材料学会誌), Vol.52, No.8, 2003. (印刷中).
3. Qing-Qing Ni, Jia Xie, and Zen'ichio Maekawa, “Buckling Analysis of Laminated Composite Plates Using Higher-order Shear Deformation Theory”, The 13<sup>th</sup> International Conference of Composite Material (ICCM-13), pp.1-8 (ID1333), 2001.
4. Jia Xie and Qing-Qing Ni and Masaharu Iwamoto, “Buckling Analysis of Laminated Composite Plates with Internal Supports”, Composite Structures, (submitted).
5. Qing-Qing Ni, Jia Xie and Masaharu Iwamoto, “Buckling of Laminated Composite Plates with Arbitrary Edge Supports”, Composite Structures, (submitted).
6. Qing-Qing Ni, Jia Xie and Masaharu Iwamoto, “Shear Buckling Analysis of Angle-ply Laminates with Higher-order Shear Deformation and  $pb-2$  Ritz Functions”, Science and Engineering of Composite Materials, (submitted).

#### 【参考論文】

1. Qing-Qing Ni, Jia Xie and Zen'ichiro Maekawa, “Buckling Analysis of Laminated Composite Plates under Shear and Compression with Higher-order Shear Deformation”, The 4<sup>th</sup> Japan-China Joint Conference on Composites, Tsukuba, pp. 42-47, 2000.
  2. Qing-Qing Ni, Jia Xie and Zen'ichiro Maekawa, “Buckling of Composite Structures with Higher-order Shear Deformation”, Proceedings of the Seventh Japan International SAMPE Symposium, pp.833-836, 2001.
  3. Jia Xie, Qing-Qing Ni, Zen'ichiro Maekawa and Masaharu Iwamoto, “Buckling of Laminated Composite Plates with Arbitrary Boundary Condition”, The 5<sup>th</sup> China-Japan-US Joint Conference on Composites, Kunming, China, pp. 96-104, 2002.
  4. Qing-Qing Ni and Jia Xie, “Buckling Analysis of Composite Laminated Plate under Ribs”, Design, Manufacturing and Applications of Composites (Proceedings of the 4<sup>th</sup> Joint Canada-Japan Workshop on Composites), CRC Press, Canada, Vancouver, pp. 395-402, 2002.
  5. 謝佳, 倪慶清, 前川善一郎, “高次せん断変形理論を用いた複合材料積層板の座屈解析”, 第31回FRPシンポジウム, pp.167-170, 2002.
  6. 謝佳, 倪慶清, 前川善一郎, “高次せん断変形理論を用いたリブ強化対称複合材料積層板の座屈解析”, 日本繊維機械学会第55回年次大会, pp.60-61, 2002,.
  7. 謝佳, 倪慶清, 前川善一郎, “高次せん断変形理論を用いた非対称複合材料積層板の座屈解析”, 日本機械学会第77期総会講演会, pp.1035-1036, 2002.
- 倪慶清, 謝佳, 倉鋪憲, 岩本正治, “リブ構造を有する複合材料積層板の座屈に関する研究”, 第27回複合材料シンポジウム講演要旨集/Proceedings of the Third Japan-Korea Joint Symposium on Composite Materials, pp.163-164, 2002.