

氏 名	さとうまさき 佐藤正喜
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械工学専攻
学位論文題目	複合材構造の剛性特性最適化に関する研究
指導教官	東北大学教授 関根 英樹
論文審査委員	主査 東北大学教授 関根 英樹 東北大学教授 福永 久雄 東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 井上 克己

論文内容要旨

第1章 序 論

技術者はこれまで材料に関して単なる“選択者”にすぎなかった。しかし、複合材料を構造材料として適用する場合、技術者は材料を選択するだけでなく“設計者”たることが余儀なく要求される。炭素繊維強化プラスチック(CFRP)等に代表される先進複合材料は高比強度・高比剛性の点において従来の構造材料を凌駕しているため軽量化が要求される航空宇宙機等の構造材料として注目を浴びているが、それ以上に設計可能であることを見逃してはならない。CFRP等の先進複合材料では特性を最大限に生かすために、一方向強化材であるプリプレグを幾層にも重ね合わせ積層板として用いられることが多く、従来の材料では見られなかった異方性という特質を持つ。この異方性の存在のために複合材積層板の強度特性・剛性特性は各層の層厚だけでなく繊維配向角によっても著しく変化する。従って、特定の荷重条件や振動条件に対しては、異方性を積極的に利用して各層の層厚や繊維配向角を適切に設定することにより設計条件を満たしながら更なる軽量化を行える可能性がある。

積層板においては各層の繊維配向角や層厚が直接的な設計変数となり、その設計自由度が非常に膨大になる。そのため、特性把握や最適化においては、層数を一定にするなどして積層構成に制限を加えた研究が多く、パラメトリックな研究にとどまっている。また、繊維角や層厚を直接に設計変数に用いた場合、剛性特性に対する非線形性が強いため、初期値依存性の強い局所的最適解に陥りやすい最適化問題になる。従って、あらゆる積層構成を対象にした効率的最適化問題のモデリングが必要となる。一方、各分野での最適化研究においては、繊維角最適化や層厚最適化等により設計変数の設定や設計変数の数に相違が見られる。また、設計変数に対する目的関数の感度も最適化においては重要な要因であり、これらの特性をふまえ、最適化手法も各々の場合に適合した様々な最適化手法が採用されている。つまり、複合材構造の種々

の剛性特性に対して統一的に扱える有効な最適設計法は確立されていないのが現状である。

本研究では、複合材構造における剛性特性の最適化を目的とし、基本的構造要素である矩形対称積層板を対象に、あらゆる積層構成を考慮した積層構成最適化のモデリングを行い、種々の問題に対して統一的取り扱いの可能な効率的数値最適設計法の確立を目指した。まず、積層パラメータの概念を導入するために積層パラメータ自体の特性及び物理的意味とを詳細に把握・検討した上で、積層パラメータによる剛性特性の把握及び積層パラメータによる積層構成最適化のための基礎理論の構築を行った。その後、積層板の静的釣り合い問題、動的問題、弾性不安定問題及び空力弾性問題に対して、本研究で提案した基礎理論を適用して積層パラメータによる剛性特性把握及び積層パラメータによる効率的最適化を実行し、複合材構造のあらゆる剛性特性最適化に対する本手法の有効性を検証した。

第2章 積層パラメータに基づく剛性特性表示と最適化法の基礎理論

第2章では、積層パラメータによる複合材構造の剛性特性最適化モデルを構築し、複合材構造の剛性特性の把握及び最適化のための基礎理論の確立を行った。複合材構造における基本的構造要素である対称積層板の材料設計において積層パラメータを導入することにより、積層構成に制限を加えることなくあらゆる積層構成を容易に設計対象にでき、膨大な設計変数をわずか4個の積層パラメータで制御できること、そして、繊維角及び層厚に関する非線形性を緩和できることを理論的に明らかにした。この積層パラメータの特性をふまえ、積層パラメータを中間的設計変数に用いた最適化法を提案し、数理計画法に基づいて種々の剛性特性に対しての最適積層構成を求める最適化問題の定式化を行った。また、剛性特性評価を得るための方法として、積層パラメータ座標上で剛性特性値を等高線として表示する剛性特性評価法を合わせて提案し、複合材構造の剛性特性に関する設計データベースとしての有用性を示した。

第3章 静的荷重あるいは熱荷重を受ける積層板の曲げ変形特性と最適化

第3章では、積層板の剛性特性のうち静的釣り合い状態における剛性特性について考え、静的荷重あるいは熱荷重を受ける積層板の曲げ変形特性を検討した。ここでは、積層板の最大たわみ及び歪みエネルギーの最小化問題を考え、多数の数値計算例を通して曲げ変形特性の一般的把握及び積層構成最適化を行った。

まず、積層パラメータを用いた剛性特性表示法に従い、最大たわみあるいは歪みエネルギーを積層パラメータ座標上に等高線表示した結果、曲げ変形特性に及ぼす積層構成の影響及び曲げ・ねじりカップリングの影響の一般的把握が容易に可能となり、直交異方性板の場合には、最大たわみあるいは歪みエネルギーを最小とする積層構成はアングルプライ積層あるいはクロスプライ積層であることが明らかになった。また、曲げ・ねじりカップリングの存在は、周辺単純支持のとき最大たわみ及び歪みエネルギーが常に増加するが、周辺固定支持のとき最大たわみを増加・減少させ、歪みエネルギーを常に増加させることが明らかになった。

次に、積層パラメータを中間的設計変数に用いた最適化法に従い、最大たわみあるいは歪みエネルギーを最小にすることを目的とした曲げ変形特性に関する積層構成最適化を行った結果、初期値依存性の少ない安定した解が得られた。いずれの荷重条件においても最適積層パラメータはその許容領域境界上に存在し、最適積層構成は多くとも2種類の繊維角を用いることによって構成でき、曲げ・ねじりカップリングのな

い直交異方性板のアングルプライ積層あるいはクロスプライ積層が最適積層構成となった。

ここでは、曲げ変形特性に関する有用な設計資料を提供するとともに、本研究での積層パラメータによる剛性特性評価法及び最適化法が積層板の静的な曲げ変形問題に対して有効な方法であることを実証した。

第4章 積層板の振動・座屈特性と最適化

第4章では、積層板の剛性特性のうち動的問題及び弾性不安定問題について考え、積層板における振動特性及び座屈特性を検討した。ここでは、積層板の固有振動数及び圧縮座屈荷重の最大化問題を考え、多数の数値計算例を通して振動・座屈特性の一般的把握及び積層構成最適化を行った。また、曲げ・ねじりカップリング効果の影響を簡易に評価する方法として摂動法による簡易評価法を合わせて提案した。

まず、積層パラメータを用いた剛性特性表示法に従い、固有値解析によって得られた振動数及び座屈荷重を積層パラメータ座標上に等高線表示した結果、振動・座屈特性に及ぼす積層構成の影響及び曲げ・ねじりカップリングの影響に関する一般的把握が容易に可能となり、直交異方性積層板の場合には、アングルプライ積層あるいはクロスプライ積層が振動数及び座屈荷重を最大にすることが明らかになった。また、曲げ・ねじりカップリングの存在により振動数及び座屈荷重が直交異方性板に比べて低下することが明らかになった。摂動法を用いた簡易評価法では、計算過程を簡略化するとともにあらゆる積層構成に対しての曲げ・ねじりカップリング効果を積層パラメータ座標上で近似的に一括評価して、わずかな設計資料で容易に精度良く評価可能にした。

次に、積層パラメータを中間的変数に用いた最適化法に従い、振動数あるいは荷重を最大にすることを目的とした振動・座屈特性に関する積層構成最適化を行った結果、初期値依存性の少ない安定した解が得られた。最適積層パラメータはその許容領域境界上に存在し、最適積層構成は多くとも2種類の繊維角を用いることによって構成でき、曲げ・ねじりカップリングのない直交異方性板のアングルプライ積層あるいはクロスプライ積層が最適積層構成となった。

ここでは、振動・座屈特性に関する有用な設計資料を提供するとともに、本研究での積層パラメータによる剛性特性評価法及び最適化法が積層板の動的問題及び弾性不安定問題に対して有効な方法であることを実証した。

第5章 空力荷重による積層板のパネルフラッタ特性と最適化

第5章では、積層板の剛性特性のうち空力弾性特性について考え、空力荷重を受ける積層板の超音速パネルフラッタ特性を検討した。ここでは、積層板がパネルフラッタを生じ始める限界フラッタ動圧パラメータの最大化問題を考え、多数の数値計算例を通してフラッタ特性の一般的把握及び最適化を行った。

まず、積層パラメータを用いた剛性特性表示に従い、限界フラッタ動圧パラメータを積層パラメータ座標上に等高線表示した結果、フラッタ特性に及ぼす積層構成の影響及び曲げ・ねじりカップリングの影響の一般的把握が容易に可能となり、直交異方性積層板の場合には、限界フラッタ動圧パラメータを最大にする積層パラメータはその許容領域境界上に現れるが、場合によっては最大点以外に別の極大点が存在し、局所的最適解が存在する可能性があることが明らかになった。また、曲げ・ねじりカップリングの存在に

より限界フラッタ動圧パラメータは常に減少する場合と増加・減少する場合があり、局所的最適解が存在する可能性があることが明らかになった。さらに、空気流が積層板に対して入射角を持つ場合には、曲げ・ねじりカップリングの積極的利用により、フラッタ特性を向上させることができることを示した。

次に、積層パラメータを中間的設計変数に用いた最適化法に従い、限界フラッタ動圧パラメータを最大にすることを目的としたパネルフラッタに関する積層構成最適化を行った結果、局所的最適点が多数存在し、初期値依存性の高い最適化問題となることが分かった。局所最適値に陥る危険性をできる限り避けるために、多数の初期値を用いて積層構成最適化を行った結果、空気流が入射角を持たない場合には曲げ・ねじりカップリングのない直交異方性板が最適積層構成となり、空気流が入射角を持つ場合には曲げ・ねじりカップリングを積極的に利用した積層構成が最適積層構成となることが分かった。また、限界フラッタ動圧パラメータを最大とする積層パラメータはその許容領域境界上に存在し、最適積層構成は多くとも2種類の繊維角を用いることによって構成できることが分かった。

ここでは、フラッタ特性に関する有用な設計資料を提供するとともに、本研究での積層パラメータによる剛性特性評価法及び最適化法が積層板の空力弾性問題に対して適用可能であることを示した。

第6章 結 論

第6章は本論文の結論であり、本研究で得られた成果及び意義を総括的にまとめ、積層パラメータの概念に基づく剛性特性評価法及び効率的最適化法が複合材構造の種々の剛性問題について有効であること、種々の剛性問題に関する特性及び最適化結果が複合材積層板の総合的な特性把握及び材料設計の際の有用な設計データベースとなることを述べた。また、本研究では個々の特性についての最適化を行ったため、他の特性との整合性は考慮していないが、各特性を同時に考え合わせた最適化へも容易に拡張できる。この分野の研究に関して今後要求される問題としては、弾性不安定問題及びパネルフラッタ問題の非線形特性を考慮した最適化問題、板厚分布を含めた積層構成最適化問題等が挙げられる。

審査結果の要旨

複合材積層板は層厚及び繊維配向角に関するテーラリングによって優れた剛性特性を発揮する可能性があることが指摘されている。本論文は、複合材構造における剛性特性最適化問題を対象に、あらゆる積層構成を考慮した積層構成最適化のモデリングを行い、種々の問題に対して統一的取り扱いが可能な効率的最適化手法を確立し、その有効性を実証した研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、積層パラメータの剛性特性への導入の仕方を示すとともに積層パラメータ間の関係、積層パラメータと積層構成の対応関係及び積層パラメータから積層構成を決定する方法を検討し、積層パラメータによる剛性特性表示ならびに積層パラメータによる最適化法の基礎理論を明らかにしている。これは重要な成果である。

第3章では、静的荷重あるいは熱荷重を受ける複合材積層板の曲げ変形特性について検討し、種々の境界条件、アスペクト比についての数値計算結果に基づいて曲げ特性に対する一般的な議論を展開している。最後に、数理計画法に基づき積層パラメータによる最適化法を適用し、曲げ特性が最適となる積層構成を求めている。これは優れた成果である。

第4章では、複合材積層板の固有振動特性及び座屈特性を取り上げ、摂動法を用いた簡易解析法を確立して、積層パラメータによる剛性特性表示に基づいた振動・座屈特性に対する一般的評価と最適化を行っている。簡易解析によって曲げ・ねじりカップリングの簡易評価を可能にした点は極めて有用な成果である。

第5章では、複合材積層板の超音速パネルフラッタ特性を取り上げ、積層パラメータによる剛性特性表示に基づいて、フラッタ特性の把握及び一般的評価を行い、その後、本最適化法を適用してフラッタ特性を最適にする積層構成を求めている。これは重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、複合材積層板における各種の剛性特性最適化問題を対象に、あらゆる積層構成を考慮した積層構成最適化のモデリングを行い、統一的取り扱いが可能な効率的最適化手法を確立したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。