

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 横関 智弘

修士（工学）横関智弘提出の論文は、「複合材料積層板の多層層内損傷挙動」と題し、本文7章及び付録6項から成っている。

炭素繊維などの補強材で強化された複合材料は、優れた比強度・比剛性を有し、航空宇宙分野をはじめとして様々な構造物へ適用されている。この複合材料は通常複数の層を積層した積層板として使われるが、その構成の複雑さから、特有の損傷プロセスを示す。その特徴的な損傷の一つは、荷重方向以外に繊維が配向している層の母材内或いは母材と強化繊維の間の損傷である。この層内損傷（トランスバースクラック）は、概ね最初の損傷モードであり、積層板の力学的特性を低下させることが多く、複合材の構造信頼性向上を目指す上で考慮の不可避な損傷モードである。本論文では、複合材料積層板の実構造物への適用に際して問題となる、複雑な荷重下での層内損傷進展挙動や、多層にわたり層内損傷が広がり累積していく挙動の把握を試みている。特に、多層にクラックが存在する場合に、従来直接扱うことがなかった斜交するクラックに関する解析手法を提案し、多層層内損傷挙動の詳細な考察と、実験的な挙動の把握を行っている。

第1章では、積層板の層内損傷に関する工学的問題点や、従来の解析的及び実験的な研究成果を詳細にまとめ、本論文の研究目的を述べている。

第2章では、まず複合材料積層板の1つの層にのみ層内損傷が累積する場合に対応した解析手法をまとめ、任意の面内荷重を受ける対称積層板について、シアラグモデルを適用した応力解析法を示している。また、歪み一定条件下で層内損傷が発生する際のエネルギー解放率について、熱残留応力の影響を含めてクラック閉口法によりモード別に求める手法を示している。

第3章では、斜交座標系成分に基づいた解析法を詳述している。これによって、積層板において異なる2層に斜交するトランスバースクラックが存在する場合に、斜交角をパラメータとして扱う解析手法を提案している。即ち、任意の斜交角を有する斜交形状問題は、直交形状問題に変換可能であり、直交座標系における問題とみなして解析が行えることを述べている。さらに、この手法を汎用的な有限要素法へ適用し、1つの直交形状の要素分割モデルを用いて、境界条件や剛性成分を変化させるだけで、任意の斜交角を有する形状のパラメトリック有限要素解析が行えることを示している。

第4章では、第3章で示した斜交座標系を用いた解析手法を、各層を貫通する斜交トランスバースクラックを有する積層板の問題に適用し、直交クラック問題とみなして2次元シアラグモデルを用いて解析解を求めている。この結果を、斜交クラックを直接モデル化した有限要素解析と比較することにより、本手法の有効性を確認している。続いて、第3章で定式化した有限要素法により、 90° 層に貫通トランスバースクラックが存在し、それに斜交する貫通していない θ° 層クラックを有する $[S/\theta_m/90]_s$ 積層板につい

て、代表体積を定めてその詳細な解析を θ° 行っている。 θ° 層クラックの進展に伴うエネルギー解放率と、混合モードを考慮した破壊規準とを組み合わせたクラックの進展しやすさの考察により、 θ° 層に生じるクラック形態の差を見出し、 θ が大きい、つまり 90° 層とのなす角度が小さいほど、微小クラックが累積し、逆に θ が小さい、つまり 90° 層とのなす角度が大きいほど、クラックが発生と同時に進展する傾向があることを示している。また、同時に θ° 層厚みもこの損傷形態の違いに大きく影響することを述べている。

第5章以下では実験について述べている。まず第5章では、トランスバースクラックの最初の層での発生とその層内累積について、実験的な挙動把握を詳述している。 90° 層を有する平板試験片と円筒試験片における 90° 層クラック累積挙動の比較により、平板試験片では自由端の影響でクラックが発生しやすく、自由端のない場合と異なる挙動を示すことを示している。また、 90° 層または θ° 層を有する平板試験片について、混合モード状態を含めたトランスバースクラック累積挙動を把握し、これがエネルギー解放率による予測法で説明可能であることを示している。平板試験片において繊維方向へ進展したクラックに着目し、自由端の影響が小さい実構造部での評価に適合することを述べている。

第6章では、複数の層に層内損傷が累積する場合について、 $[0/\theta_2/90]_s$ 平板試験片を対象として、実験的な損傷挙動の把握を試みている。 θ が大きい場合、 90° 層クラック発生と同時に θ° 層にも短い多数の網目状の微小クラックが観察されるが殆ど進展せず、逆に θ が小さい場合は、 90° 層クラックが累積しても θ° 層クラックはしばらく観察されず、負荷の増大に従い繊維方向に進展した θ° 層クラックが観察されていることを示している。また、 0° 層へのクラック誘発に関しても、 θ° 層に微小クラックが発生すると、その繊維方向進展の有無に関わらず、 0° 層にもクラックを誘発しうる実験結果を得ており、多層層内損傷累積に関する解析結果との一致を示している。さらに、進展形態のクラックに関しては解析的な予測が可能であることを述べている。

第7章は結論であり、本論文の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、複合材料積層板における層内損傷の多層累積に関する解析手法を提案し、詳細な損傷累積挙動に関して実験的・解析的に明らかにしたものであり、航空宇宙工学及び複合材料工学に貢献する所が大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。

「審査の結果の要旨」の概要

- | | |
|----------------|---|
| 1. 課程・論文博士の別 | 課程博士 |
| 2. 申請者氏名（ふりがな） | 横関智弘（よこぜき ともひろ） |
| 3. 学位の種類 | 博士（工学） |
| 4. 学位記番号 | 博工 第 号 |
| 5. 学位授与年月日 | 平成 年 月 日 |
| 6. 論文題目 | 複合材料積層板の多層層内損傷挙動 |
| 7. 審査委員会委員 | (主査) 東京大学 教授 青木隆平
教授 小野田淳次郎
教授 武田展雄
教授 藤本浩司
教授 影山和郎 |
| 8. 提出ファイルの仕様等 | 提出ファイル名 仕様アプリケーション OS |
| 使用文書ファイル | 横関智弘.doc word2002 Windows xp |
| テキストファイル | 横関智弘.doc |