

審査の結果の要旨

氏 名 安 部 聡

複合材料は、比強度・比剛性の高い材料であるために、軽量化に適した材料であるが、不均質・異方性の材料であるため、その損傷挙動は金属などの従来材料と比較して複雑であり、その破壊強度を正確に予測することは困難であった。今日まで複合材料構造の強度評価においては、最大応力破壊条件、最大ひずみ破壊条件、Tsai-Wu 則などの相互作用理論など応力を用いた破壊条件が強度基準として広く用いられてきた。しかしこれらの応力を用いた破壊条件では、層内樹脂割れや層間はく離が複合材料積層板の層厚さに依存するという、近年着目された破壊挙動を説明できない。さらに、航空機分野においては、複合材料の靱性が向上した結果、CAI(衝撃後圧縮)強度に対する疲労強度の相対的重要性が高まりつつある。複合材料においては、初期破損 (First Ply Failure) をもって設計限界とすることが一般的であったが、複合材料の繊維強度を最大限活用する視点からも、損傷許容性設計の適用に対する要求が高まりつつある。

初期損傷として代表的な層内樹脂割れを有する複合材料の強度問題については、既に多くの研究成果が報告されているが、その多くは、直交積層板をその対象としたものであり、実際の構造物で使用されるような多方向強化積層板に関する研究はそれほど多いとは言えない。また、比較的厚い層厚さを用いたモデル試験片の結果が多く、実際の複合材料構造で用いられるような、薄い層厚さの積層板に関する報告は少なかった。

本論文では、複合材料の不均質性と異方性を考慮した力学的に合理的な層内樹脂割れ解析手法を考案した。さらに、エネルギー破壊条件と応力破壊条件の両方を考慮し、層厚さ依存性を考慮できる、新しい設計基準を提案している。これらの手法の有用性を、積層構成と層厚さを数種類変えた炭素繊維強化プラスチック積層板を用いた静的引張り試験と引張り疲労試験を行い、層内樹脂割れの発生と損傷密度拡大特性について、解析結果と実験結果を比較しながら詳細

に検討している。

複合材料において、層内樹脂割れによる剛性の低下を的確に予測することにより、層内割れ損傷による構造物の安全性の影響を評価でき、構造安全性に影響のない範囲で層内割れ損傷を許容できるようになる。本論文では、層内割れ損傷による剛性の低下を予測するために、合力差分法により損傷を有する積層板の等価剛性を計算する手法を提案した。本解析は、静的に可容な応力分布を仮定しており、下界解、つまり損傷による剛性低下を正解よりも大きく見積もる安全側の解を与える。メッシュ分割数による解の収束性も良好であり、少ない要素数で誤差の少ない数値解を得ることができる。強度設計においては、安全側の解を用いることが求められるので、本論文提案した合力差分法による解析方法は極めて有用な方法といえる。

さらに、剛性低下手法の汎用性を高めるため、き裂密度の関数として等価剛性を表現する内挿式を提案している。この内挿式を用いることにより、解析解との差が1%以内で、任意のき裂密度に対する等価剛性を簡単に求めることができるようになった。

き裂密度と積層板の等価剛性の関係を明らかにできたので、エネルギー解放率に基づくエネルギー破壊条件とき裂による応力再配分を考慮した応力破壊条件を用いて、多方向強化複合材料積層板の層内樹脂割れの発生と拡大を予測する計算方法を提案した。

直交積層板および擬似等方性積層板の静的引張試験を行い、その損傷予測手法の有効性を検証した。直交積層板においては、層厚さが薄くなると、応力破壊条件が満たされても破壊せず、エネルギー破壊条件によって損傷発生が記述されるという予測結果が、実験からも確かめられた。但し、擬似等方性積層板では、層間はく離など、本論文での損傷予測手法では解析対象としていない損傷も生じたため、予測結果とは異なった実験結果が得られることもあった。

また、直交積層板について引張疲労試験を行い、繰り返し回数の増加に伴うき裂密度の増加傾向についての実験結果を得た。また、き裂の進展に伴って繰り返し最大エネルギー解放率は低下し、最終的には静的な破壊靱性値となるようなき裂密度に収束することを見いだした。この実験で得られた知見を基に、繰り返し回数が十分に大きい場合の、き裂密度の飽和状態に対する予測手法を考

案した。本方法により最終的な疲労損傷の程度が予測できるため、損傷許容性疲労設計に対して極めて有用な指針を与えると考える。

以上得られた成果をまとめて、エネルギー破壊条件に基づく損傷許容性設計手法を提案している。このような設計手法は従来には類を見ないものであり、複合材料構造設計の分野においては画期的な成果であると言える。

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。