

## 論文の内容の要旨

論文題目 層厚効果を考慮した複合材積層板の静的・疲労損傷進展  
評価

氏 名 青木 涼馬

燃費向上が要求される航空機や自動車のような輸送機における構造軽量化には、優れた機械特性を有する炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が必要不可欠であり、構造部材への適用が拡大している。近年、さらなる革新的な構造軽量化に向けて、開繊技術によるCFRPの薄層化技術が注目を集めている。薄層化技術を用いて、CFRP積層板の1層の厚さを薄くすることにより、き裂や層間剥離といった内部損傷の発生と進展を抑制することができ、その結果、薄層CFRP積層板は従来の積層板と比して、高い静的強度や優れた疲労特性を有することが知られている。また、複合材構造設計の観点では、従来のCFRPより板厚当たりの積層数が増加するため、積層板の層厚や繊維配向角を新たに設計変数とする高自由度な構造設計が可能になる。しかし、設計自由度が増加するため、実験のみによる評価では、設計コストが膨大になるため、数値解析による設計評価が必須となる。CFRP積層板の内部損傷や強度・破壊モードは、その層厚や積層構成によって大きく変化するため、あらゆる層厚や積層構成に対して、積層板の静的・疲労荷重下における損傷進展を数値解析上で評価し、強度・破壊モードの予測が可能な解析手法の確立が求められる。本論文では、薄層CFRPを活用した高自由度複合材構造設計の実現に向けて、層厚効果を考慮した静的・疲労損傷解析手法の確立に取り組んだ。

最初に、層厚効果を考慮したCFRP積層板の静的損傷解析手法の構築に取り組んだ。静的荷重下の損傷進展に対する層厚の影響を実験的に評価し、拡散・離散損傷を考慮した損傷力学モデルを提案した。静的損傷解析モデルの構築に向けて、異なる3種類の層厚を有する積層板を対象に負荷・除荷試験を行い、連続体損傷力学に基づく損傷進展の定量的評価を行った。負荷・除荷試験での損傷観察及び応力ひずみ線図から得られた損傷進展曲線から、き裂や層間剥離のような離散損傷は層厚依存性があり、樹脂の微小き裂や繊維/樹脂間の界面剥離を含む拡散損傷は層厚依存性がないことを実験的に示した。得られた実験結果を基に定式化した損傷進展モデルについて、有限要素法と組み合わせた損傷進展解析を実施し、妥当性検証を行った。層厚の異なる積層板において応力ひず

み挙動・強度予測が可能であり、層厚による損傷進展の差異を予測できることを示した。

続いて、円孔を有するCFRP積層板の静的強度・破壊モード・損傷進展に層厚・0度層比率が与える影響について実験的に評価した。層厚・0度比率の異なる6種類のCFRP積層板を用いて有孔引張破壊試験を実施し、軟X線透過探傷により破壊までの内部損傷進展の観察を行った。強度試験と内部損傷観察から、薄層による円孔でのき裂・層間剥離抑制効果が円孔の応力集中緩和に繋がらず、層厚を薄くした場合には強度が低下することを確認した。また0度層比率を高くした場合、強度は高くなるが損傷・破壊モードは0度層スプリッティングが支配的になっていき、破壊モードが大きく変化することを明らかにした。さらに、有孔試験片はボルト等のファスナーを施した状態で構造体に使用されることを想定し、ファスナー拘束を適用した有孔試験片についても同様に、層厚・0度層比率の影響について調査した。内部損傷観察での有孔試験片との比較や応力解析の結果から、ファスナー拘束には損傷抑制効果や破壊遅延による強度向上効果があることを示した。

提案した静的損傷進展モデルを用いて、実験を行った6種類の有孔CFRP積層板の損傷進展解析を実施した。まず、本論文で示す静的損傷モデルが、応力集中の発生する有孔CFRP積層板に対しても、層厚による損傷進展への影響を考慮した上で、静的破壊強度や内部損傷進展が数値解析的に評価可能か検証を行った。検証解析の結果から、層厚の異なる2種類の擬似等方性積層板では、高精度な静的強度予測が可能で、層厚による破壊モードも違いも再現できることを示した。他の種類の積層板についても損傷解析を行い、静的強度・損傷進展予測を試みた。解析結果から、高0度層比率の積層板では、0度層スプリッティング進展が過小評価されたことで、静的強度も実験と比して大幅に過小評価となったが、その他の積層板では、静的強度・損傷進展を高精度に予測することができ、本損傷進展モデルの有用性を示した。また、ファスナー拘束の有無による比較から、試験片とボルトの接触及びワッシャの摩擦により、最終破壊の起点となる0度層の繊維破断が抑制されることで、ファスナー拘束を用いた場合に静的強度が上昇することを明らかにした。

次に、層厚の異なる2種類の有孔CFRP積層板を対象に疲労試験を行い、円孔部から発生する疲労損傷進展に対する層厚の影響について実験的に評価した。複数の応力レベルでの疲労試験により、剛性低下量の評価と内部損傷観察を行い、疲労き裂・層間剥離進展を比較した。薄層の場合は、どの応力レベルでも疲労サイクルの初期に内部でき裂と層間剥離が発生・進展しており、それらの損傷による剛性低下が確認された。応力レベルが上がることで疲労損傷進展の程度は増加したが、剛性低下に大きく寄与するものではなかった。厚層の場合は、ある応力レベル以上では、試験片全体に渡るき裂・層間剥離が発生・進展した。特に0度層スプリッティングは試験片タブ部まで到達し、それに伴う大幅な剛性低下が確認された。さらに、疲労試験で破断しなかった試験片を対象に、疲労後の残留強度を評価した。薄層の場合は、疲労後残留強度は静的強度と同程度

で破壊モードも変わることはなく、円孔に発生した疲労損傷が応力集中の緩和にほとんど寄与しなかった。厚層では、疲労後にき裂・剥離が円孔周辺で留まっていたものは、疲労後残留強度は上昇し、円孔の疲労損傷が応力緩和に寄与したことが明らかになった。一方で、疲労後に損傷が試験片全体に損傷が渡っていたものは、0度層にも多数の縦き裂が発生しており、残留強度が低下した。有孔試験片の疲労試験と残留強度評価試験から、薄層では、高応力レベルで高サイクル疲労後においても残留強度が保たれ、疲労損傷進特性と残留強度特性における薄層材の優位性が示唆された。

最後に、提案する静的損傷進展モデルに基づいて、層厚による疲労損傷進展への影響を考慮した疲労損傷進展モデルを提案した。横方向損傷とせん断方向損傷に対して、き裂密度の増加率を定式化することで疲労損傷進展をモデル化した。提案手法により、有孔試験片の疲労解析を実施し、円孔周辺に発生する疲労損傷進展を数値解析的に評価した。実験で確認された試験片全体に及ぶ損傷進展は再現することができず、連続体損傷力学に基づく本モデルでは、き裂先端の応力集中が捉えることが難しく、疲労き裂進展長さの予測精度に課題が見つかった。一方で、低応力レベル条件では、層厚による疲労損傷進展の差異を捉えられ、疲労荷重による剛性低下も良い精度で予測することができ、本疲労解析モデルの有用性を示した。最後に、疲労解析で得られた最大サイクルでの損傷分布を入力とした静的損傷解析を実施し、実験的に評価した疲労後残留強度の予測を試みた。疲労解析において、損傷分布を精度よく予測できていたものについては、残留強度評価解析でも実験結果と良い一致を示し、本解析モデルで疲労後残留強度予測も可能であることを示した。