

(第6号様式)

学位論文審査の結果の要旨

氏名	Rozaini Bin Othman
審査委員	主査 黄木 景二 副査 高橋 学 副査 柳原 大輔

論文名 CHARACTERIZATION OF MICROSCOPIC IMPACT DAMAGE IN
CFRP LAMINATES WITH TOUGHENED INTERLAYERS

審査結果の要旨

炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber reinforced plastics; CFRP) は軽量高強度材料として航空機の構造部材として使用されている。CFRP 積層板は運用中あるいはメンテナンス過程において異物衝突を受けることがある。そこで異物衝突による損傷の進展を抑制するために、層間をじん性の高い熱可塑性樹脂粒子で強化した層間強化型 CFRP が航空機用途には使用されている。本論文は層間強化型 CFRP の低速衝撃および高速衝撃による損傷挙動を実験及び数値解析によって解明することを目的としている。

第1章は序論であり、研究の背景、目的、概要について述べている。

第2章では実験方法が説明されている。層間強化型 CFRP クロスプライ積層板試験片について、落錘衝撃試験装置による低速衝撃試験、および、飛翔体衝突試験装置を用いた高速衝撃試験の方法が述べられている。次に、光学顕微鏡および軟X線撮影装置を用いた衝撃後試験片の表面・裏面および内部の微視的損傷の観察方法が説明されている。

第3章は数値解析手法について述べており、有限要素法を用いて、衝撃荷重を受ける試験片の損傷過程を再現する手法を説明している。炭素繊維と樹脂からなる基材層と層間樹脂層に固体要素を適用し、繊維破断、樹脂き裂を再現している。一方、層内および層間のはく離を模擬するために、基材の中央層および基材と層間樹脂層の層間に結合要素が導入されている。損傷の発生・進展のクライテリオンとして、前者では応力クライテリオン、後者ではエネルギークライテリオンが適用されている。

第4章は低速衝撃及び高速衝撃による微視的損傷のキャラクター化が行われており、以下の実験的知見が得られている。低速、高速衝撃後の表面にはそれぞれデント(へこみ)、クレーターが発生する。低速衝撃においては高速衝撃と比べて衝撃時の変形がグローバルであるために、デント周辺部に座屈による繊維破断が見られる。一方、高速衝撃では局所変形であり、クレーター近傍に多重の樹脂割れが発生する。

裏面は低速衝撃・高速衝撃ともに曲げによる樹脂割れと繊維のピールオフ（剥がれ）が発生する。内部にはコーンクラックと呼ばれる樹脂割れと層間はく離が見られるが、層間強化型 CFRP 積層板では層間のじん性が高いために、通常の CFRP 積層板では見られない層内はく離も発生する。低速衝撃・高速衝撃ともに、層間樹脂層は基材層からの割れの進展を停留し、層間はく離の進展を抑制する役割を果たしている。

第5章では、低速衝撃試験について、第3章で述べた手法で損傷進展解析を行った結果を第4章で示された微視的損傷観察結果と比較検討している。表面のデントと繊維破断および裏面の樹脂割れと繊維剥がれが実験と同様の形態と寸法で再現されている。また内部損傷として、層間はく離だけでなく、層内はく離の発生も再現されている。さらに、層内はく離を考慮しない解析結果と比較して、層内はく離を考慮した解析結果のほうが衝撃時の荷重－変位線図の傾きがよりよく実験結果と一致している。以上より、本解析手法の妥当性が示されている。

第6章は結論であり、全体を総括して以下の知見が得られている。1) 層間強化型 CFRP における低速衝撃と高速衝撃による損傷モードは類似しているが、損傷規模は高速衝撃のほうが大きい。低速衝撃ではグローバル変形によりエネルギー吸収されるため、損傷は緩和される。2) 層間樹脂層は低速衝撃・高速衝撃ともにき裂を停留し、層間はく離を抑制する。3) 本数値解析手法は低速衝撃による損傷のモードとサイズを再現している。4) 層間強化型 CFRP では層間樹脂層が高じん性であるために、層内はく離が発生するという特徴を有する。この損傷は数値解析において再現できる。

以上のように本論文は層間強化型 CFRP 積層板の衝撃損傷過程を実験的かつ数値的に明らかにしたものであり、航空機構造の安全性確保に貢献するだけでなく、新規 CFRP 材料の開発に役立つ有益な知見を与えている。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認められる。