

板厚方向縫合がCFRP積層板の面外衝撃損傷に与える影響の評価

56213 仲尾知晃

(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : CFRP、損傷評価、三次元複合材、低速面外衝撃、有限要素法

1. はじめに

板厚方向に縫合を施した縫合CFRP積層板は比強度、比剛性、衝撃後圧縮強度(CAI強度)に優れ、航空宇宙分野への適用が期待されている。また、縫合糸の径や縫合密度を用途に応じて設計できる。既存研究から、縫合無しのCFRP積層板に生じる面外衝撃損傷の面積や形状は、CAI強度と強い相関関係を持っていることが知られている。したがって、縫合CFRP積層板においても、面外衝撃損傷の詳細な理解は重要である。しかしながら、縫合が衝撃損傷に与える影響はこれまで明らかにされていなかった。そこで、本研究では、縫合CFRP積層板に生じる衝撃損傷を実験・解析によって調べ、縫合が衝撃損傷に与える影響を明らかにした。また、これに基づき、衝撃損傷抑制のための効果的な縫合方式の決定指針を示した。

2. 縫合CFRP積層板の衝撃試験及び損傷観察

縫合積層板、非縫合積層板に対し、衝撃試験を実施した。試験片の仕様は、面内糸:T800-12kf, 母材樹脂:AralditeLY5052/Aradur5052, 寸法:102mm×76mm×4.5mm, 積層構成:[-45/0/45/90]_{3s}, 縫合糸:TR40-2kfである。Fig.1に縫合方式を示す。縫合糸間隔とピッチの組み合わせは3mm×3mmとした。単位厚さあたりの衝撃エネルギーは0.838J/mm, 1.675J/mm, 3.350J/mmとした。衝撃試験後、軟X線装置を用いて損傷の透視画像を、マイクロフォーカスX線CTによって試験片断面画像をそれぞれ撮影した。

Fig.2に損傷の透視画像から算出した投影損傷面積と衝撃エネルギーの関係を示す。全ての衝撃エネルギーにおいて、縫合積層板は非縫合積層板よりも損傷面積が小さいことがわかった。また、エネルギーが小さいときには損傷面積の差が小さいのに対し、エネルギーの増加に伴い差が拡大していることがわかった。

Fig.3に衝撃点直下の試験片断面写真を示す。非縫

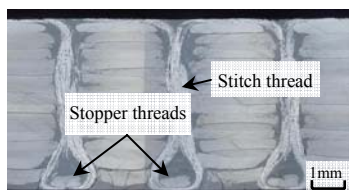


Fig.1 Cross section of the laminate along a stitch thread.

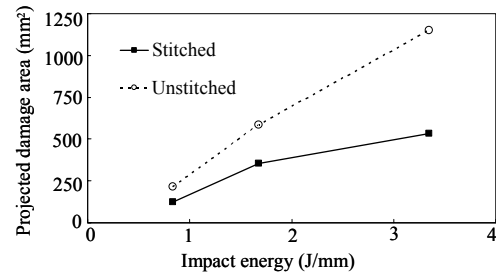


Fig.2 Projected area of measured impact damage as function of impact energy.

合の場合、層間はく離は衝撃面側から逆側に向かって大きくなっている。一方、縫合を施した場合、層間はく離は試験片中央部で最も広く、表面および裏面に近づくにつれ狭くなっていることが分かった。

3. 押込み荷重下の円形はく離先端のエネルギー解放率

縫合が損傷に与える影響の原因を調べるため、青木ら[1]の手法に従い、有限要素法に基づく数値解析を行った。解析では、はく離面積拡大に伴うエネルギー解放率変化を調べるため、はく離面積の異なる5つのモデル(はく離直径:4mm, 4.6mm, 11mm, 16.5mm, 22mm)を用意した。Fig.4に、はく離直径22mmのモデルを代表例として示す。モデルサイズは実験の固定境界条件に合わせて80mm×60mm×4.5mmとし、積層構成は実験における試験片と同じとした。モデル中央部の全層間には大きさの等しいはく離を、各層にははく離直径と等しい長さの層内き裂をそれぞれ導入した。縫合モデルにおいては、はく離部上下面間に線形バネ要素を3mm×3mm間隔で導入し、縫合糸のはく離架橋効果を表現した。モデルは周縁部完全固定とした。以上の条件の下、モデル中央部に押込み荷重(4.0kN)を加え、仮想き裂閉口法によってはく離先端のエネルギー解放率を計算した。

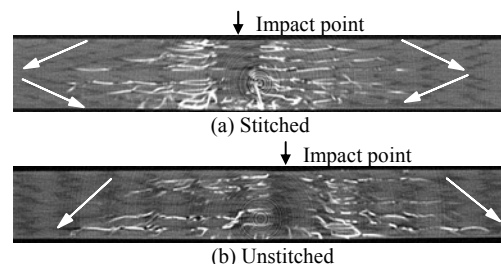


Fig.3 X-ray images of the stitched and unstitched specimens.

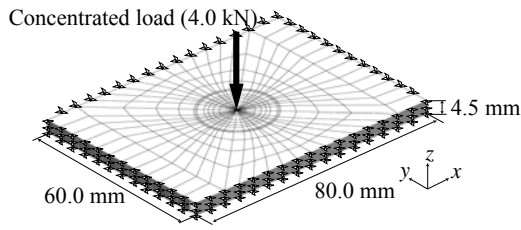


Fig.4 Overview of the model ($d=22\text{mm}$).

図5に、直径22mmのはく離を有するモデルの、各層間の最大エネルギー解放率厚さ方向分布を示す。押し込み面は $z=4.5\text{mm}$ の面である。全層間に渡って縫合モデルは非縫合モデルよりもエネルギー解放率が減少している。また、縫合モデルでは、エネルギー解放率は厚さ方向中央部付近及び底面付近で小さなピークを成している。一方、非縫合モデルでは、衝撃面から離れるに従い縫合積層板よりも急激に増加し、底面付近で大きなピークを成している。よって、本解析は実験結果(Fig.3)と良く合っていると云える。

縫合、非縫合で厚さ方向エネルギー解放率の分布が異なる理由を調べるため、エネルギー解放率をモードI(はく離開口方向)、モードII(せん断方向)に分割してFig.6に示す。ここで、非縫合モデルのモードI方向のエネルギー解放率は、底面付近で縫合モデルより顕著に大きい。これは、縫合モデルでは底面層のめくれ上がりによるモードI変形を縫合が抑制するためである。また、モードIIエネルギー解放率は、縫合積層板の方が、非縫合積層板よりも小さい。以上から、エネルギー解放率の厚さ方向分布の異なる原因は、縫合がモードII変形に加えて、底面付近でのモードI方向変形を強く抑制することであるとわかった。

はく離面積変化に伴うエネルギー解放率変化を調べるため、はく離面積の異なる5つのモデルの、全層間に渡るエネルギー解放率の最大値とはく離直径の関係をFig.7に示す。非縫合モデルでは、はく離面積が増加してもエネルギー解放率の最大値がほぼ一定の値をとるのに対して、縫合モデルにおいてはその値は減少している。これは、はく離進展に伴う縫合の架橋領域の増加によって、き裂開口荷重が抑制されることが原因である。Fig.2において、衝撃エネルギーの増大にともない、投影はく離面積の差が増大した現象は、以上のような、はく離面積拡大に伴うエネルギー解放率の減少によって説明が可能である。

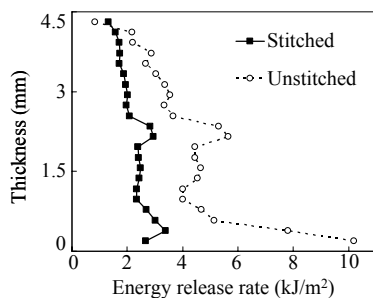


Fig.5 Energy release rate distribution through the thickness.

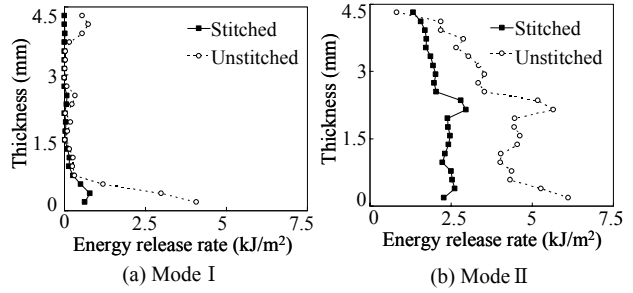


Fig. 6 Energy release rate distribution of each deformation mode through the thickness.

4. はく離抑制効果の高い効果的な縫合方式

縫合方式の決定指針を示すため、第3節で用いたモデルの縫合糸剛性及び縫合密度を変化させて解析した。その結果、縫合糸剛性及び縫合密度は、どちらも高ければ高いほど損傷抑制効果は大きいということがわかった。そこで、同種類、同体積の縫合糸を用いて損傷抑制効果の高い縫合を施すためには、縫合糸の径と縫合密度のどちらを優先すべきかを検討した。Fig.4のモデルの縫合糸の径だけを半分(剛性を1/4倍)に変えた場合の結果(High-density)と、縫合糸の径はそのまま、縫合密度だけを $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ に変えた場合の結果(Thick-thread)とのエネルギー解放率の比較を行った。エネルギー解放率の板厚方向分布をFig.8に示す。押し込み面の逆側に近いほどHigh-densityのエネルギー解放率は、Thick-threadより減少している。これにより、同種類、同体積の縫合糸を用いて損傷抑制効果の高い縫合を施すには、縫合糸の径よりも縫合密度を優先すべきであるという縫合方式の決定指針が示された。

5. まとめ

本研究では、縫合積層板に生じる面外衝撃損傷に関して、縫合が面外衝撃損傷に与える影響を明らかにした。また、数値解析により、より効果的な損傷抑制が可能な縫合方式の決定指針を示した。

参考文献

- [1] 青木雄一郎, 繊維強化複合材料積層板の衝撃損傷問題に関する研究, 上智大学博士学位論文(2002).

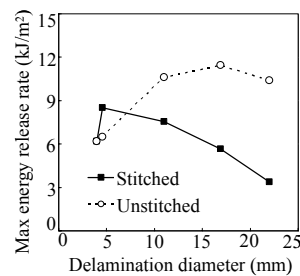


Fig.7 Energy release rate as a function of the crack diameter.

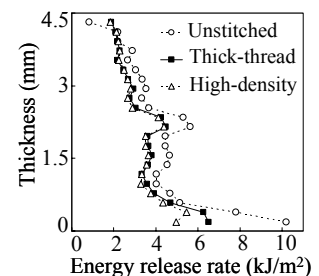


Fig.8 Energy release rate distribution through the thickness.