10405 引張疲労負荷における Stitched Laminate Composite の内部損傷進展

Internal Damage Behavior of the stitched CFRP Laminates Under Tensile Fatigue Loading

○ 荒尾与史彦(早大・院) 細井厚志(早大・院) 川田宏之(早大)

Yoshihiko ARAO, Graduate school of Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo

Atushi HOSOI, Graduate school of Waseda University

Hiroyuki KAWADA, Waseda University

This paper studies the effects of edge stitching on tensile fatigue properties of CFRP laminates. Fatigue damage development was investigated through experimental observation. From experimental observation results, it was shown that introduction of the stitch threads suppressed the initiation and propagation of the delamination. But the stitch thread broke in earlier stage under the high stress level cyclic loading. As a result, fatigue lives of the stitched laminates were shorter than that of the unstitched laminates. On the other hand, it was remarkable that the fatigue lives between the both laminates were almost equal due to the difference of internal damage propagation.

Key Words : Fatigue, Delamination, Stitching

1 序論

CFRP 積層板は面内特性が良好なものの、面外荷重に弱くそれによって伴う層間剥離が問題となっている。弱点克服のために高じん性の樹脂を用いるなど様々な試みがなされており、スティッチ技術はその一つである。スティッチは他の 3 次元強化複合材料と比較して面内特性の低下が小さいため、外部からの衝撃を受ける構造部材等への適用が期待されている

一般的に破壊のほとんどは疲労によるものであり構造部材の適用を考える上で、縫合された CFRP 積層板の疲労特性を細かく調査し、長期信頼性を確立することは必要不可欠である。本研究ではアラミドスティッチ CFRP 積層板について S-N 線図を取得し、内部損傷観察を行うことで、疲労損傷進展特性の検討を行った。

2 実験

2.1 試験片

今回使用した基材には、炭素繊維 IM600(東邦テナックス)と熱硬化型 Epoxy 樹脂(ビスフェノール A 型, 180℃ 硬化)のプリプレグを用い積層構成は $[45/0/-45/90]_s$ の擬似等方性積層板とした。成形は RTM によって行った。

また端部から 1mm のところにスティッチを施した。縫合糸には KEVLAR29/220dtex を 2 本撚ったものを、それぞれ 3mm, 6mm のピッチで縫合した。その詳細を Fig.1 に示す。

2.2 疲労試験

応力比 $R=0.1$ の引張-引張負荷形態の疲労として、繰り返し速度は 5Hz, 荷重波形は正弦波とした。負荷応力レベル $\sigma_{\max}/\sigma_b=0.3\sim0.8$ に設定して疲労試験を行った。

Fig.1 Specimen geometry and dimension

3 実験結果

3.1 S-N 線図

Fig.2 に縫合 CFRP 積層板と縫合なしの CFRP 積層板の S-N 線図を比較したグラフを示す。全体的にみるとスティッチにより疲労寿命が小さくなっている。ここで、繰り返し数 10^6 未満で破壊する応力を高応力域、 10^6 以上で破断する場合を低応力域と定義する。高応力側ではスティッチにより疲労寿命が短くなっている。高応力側ではトランスバースクラック、層間はく離が最初の負荷で

Fig.2 S-N diagram

発生し、大きく進展するため静的引張破断に近い形態で破断する。そのため層間はく離を抑える効果よりもスティッチにより生じる、レジニリッチ等の不均質領域が及ぼす影響が強いため、縫合することで疲労強度が低下したと考えられる。逆に低応力レベルでは同負荷応力レベルにおいて多少の疲労寿命の改善が見られた。これは疲労により進展する層間はく離に対し、スティッチが層間はく離進展を効果的に遅らせたためと考えられる。

3.2 内部損傷観察

層間はく離抑制効果を観察するために、内部損傷観察を行った。尚、層間はく離のほとんどは[-45/90]の層間に発生・進展していることが光学顕微鏡による端面観察から観察された。Fig.3 に負荷応力レベル 50%で、10,000 回の負荷を与えた時の試験片の内部損傷進展状態を示す。Fig.3 より層間はく離がスティッチにより抑えられている様子が分かる。またピッチ間隔により層間はく離の進展に違いがあらわれている。6mm ピッチではき裂がスティッチ系に対し迂回するように進展する Bowing 挙動を示しており、部分的に破断したスティッチ系の箇所から層間はく離が大きく進展している。3mm ピッチでは層間はく離の進展が遅く、片方では発生していない。スティッチが端部近くにあることで面外応力の影響を緩和しており、3mm ピッチではその影響が 6mm ピッチより大きくでたため層間はく離の発生が遅れたものと考えられる。

Fig.4 に繰り返し数に対する層間剥離進展率を調査した結果を示す。Fig.4(a)は負荷応力 70%における高応力域での層間はく離進展であり、Fig.4(b)は負荷応力 50%の低応力域における層間剥離進展の結果である。応力レベル 70%ではスティッチを施さない場合は繰り返し数 10000 回でほぼ層間はく離は幅方向に貫通する。これは疲労寿命比に換算すると 10%程度であるため、残り 90%の寿命

Fig.3 Different damage propagation ($\sigma_{\max}/\sigma_b=0.5, N=10000$)

は層間はく離が貫通した状態で負荷をかけられていることになる。縫合 CFRP 積層板の場合、6mm ピッチにおいては早期にスティッチが破断して、層間剥離進展を抑えられていない。また 3mm ピッチにおいても繰り返し数 10000 回において、部分的なスティッチの破断により層間はく離が進展した。応力レベル 50%では、初期の層間剥離進展の発生がスティッチの有無により異なることがわかる。またスティッチが破断せずにもつため、層間はく離進展が 6mm ピッチにおいても遅れていることが分かる。応力レベルによりスティッチの効果が違うことで、スティッチが最終強度に及ぼす影響も異なることが明らかとなった。

4. 結論

本研究では縫合 CFRP 積層板の引張り疲労における損傷進展について詳細な損傷観察から検討を行った。高い負荷における疲労ではスティッチが早期に破断し、疲労寿命は低下することが明らかとなった。実構造物で受けるような低い疲労負荷環境下ではスティッチは層間剥離に対し効果的に働き、疲労寿命が延びる可能性が示唆された。

Fig.4 Delamination ratio in stitched and unstitched laminates as a function of stress cycles

参考文献

- (1)Faymerich, P.Priolo, C.T.Sun Composites Science and Technology,63(6),907-917,(2003).
- (2)A.P.Mouritz,,B.N.Cox,,Composites,PartA,31, 1-27,(2000)