

プロジェクト1

エポキシ樹脂で補修されたCFRP 複合材料積層板の引張挙動

金 炯秀 (ホストカー)

邊 吾一 (機械工学科)

1. 緒言

CFRP は軽量でありながら、高強度、高弾性率など優れた機械的特性を有することから、これまで航空機、宇宙機器などの軽量化が生命である航空宇宙分野で積極的に適用されてきた。一般的に、先進複合材料が構造部材に応用される際は穴の存在が不可欠である。また、損傷を受けた部分を取り除いて健全な材料で補えば完全に新しいものに取り替えなくてもその役割を果たすことは十分考えられる。多くの研究者たちは円孔を有する積層板に対してあらゆる角度（実験および解析）で研究してきた¹⁾。また、損傷を受けた複合材料積層板の補修に関する研究も活発に行われてきている²⁾。

本研究では炭素繊維強化エポキシ複合材料積層板に対して、常温硬化型エポキシ樹脂の補修による強度の回復について検討する。2種類の積層構成および円孔径を有する擬似等方性複合材料積層板にエポキシ樹脂で補修し、静的引張試験を行う。補修程度（引張強さの回復）の積層構成および円孔径の影響について調べる。また、3次元有限要素解析を行い、エポキシ樹脂の補修による円孔近傍での応力緩和についても言及する。

2. 静的引張試験

2. 1 試験片

本研究では補修程度に対して積層構成の影響、また円孔径の影響を調べるために4種類の試験片を用意した。その詳細について以下に述べる。試験片は炭素繊維を強化材、熱硬化性エポキシ樹脂を母材とした一方向プリプレグ（TR350E-150S：(株)三菱レイヨン）を用いており、積層構成が $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 、 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ となるようにハンドレイアップ法で積層した。このように積層したプリプレ

グをホットプレスにより加熱加圧成形し、290mm×285mmの板を作製した。最終的に、この板（擬似等方性複合材料積層板）は精密切断機により253mm×25.4mmの短冊形状に加工される。その後、直径3.5mmと6mmの円筒型砥石で円孔を設けているが、最終的な円孔径は約3.6mmと6.1mmとなる。これらの試験片は水没式超音波探傷装置を用いて初期欠陥がなく、試験片として適切であることが確認された。試験片の両端にはGFRPタブが接着された。

2. 2 補修材

試験片円孔部の補修にはその大半は常温硬化型エポキシ系接着剤であるAraldite[®]が使用されたが、積層構成 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 、円孔径6.1mmの試験片に対してはEP34B（(株)共和）が用いられた。Fig.1に円孔を有する試験片と常温硬化型エポキシ接着剤で補修された試験片の概略と寸法を示す。

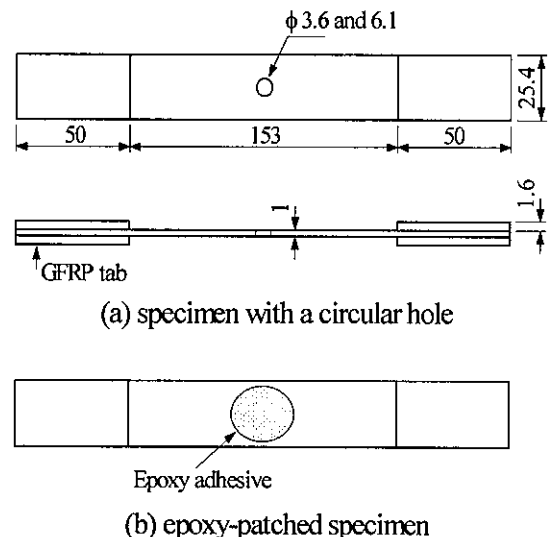


Fig.1 Test specimen configuration.

また、本研究では積層構成 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 、円孔径 6.1mm を Type A、円孔径 3.6mm を Type B、積層構成 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 、円孔径 6.1mm を Type C、円孔径 3.6mm を Type D と称することにする。

2. 3 試験条件

本実験では油圧式疲労試験機（48000 型サーボパルサー疲労試験機：島津製作所）を使用して静的引張試験を行った。静的引張試験は 0.5mm/min の負荷速度、また、室温環境下で行われた。

3. 応力解析

実験で得られた結果を検証するために、Type B ($[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 、円孔径 3.6mm) 擬似等方性複合材料積層板対し、3次元有限要素解析（線形解析）を行った。解析には、有限要素法構造解析汎用ソルバー ANSYS 5.6 を使用した。対称性を考慮し板厚半分をモデル化した。解析モデルの寸法は、長さ 100mm、幅 25mm、厚さ 0.54mm（板厚半分）、一層の板厚 0.135mm であり、また、補修層（樹脂層）の厚さおよび直径はそれぞれ 2mm と 20mm である。解析モデルの要素分割の詳細を****に示す。板厚方向に 1層を 3つの要素で分割している。通常、自由縁近傍では応力集中を考慮して要素分割を細かくするが、本研究ではほぼ均等にした。また、要素は 8 節点ソリッド要素を用いた。拘束条件は、以下ようになる。モデルの左端の x 方向変位のゼロ固定、 $z=0$ の節点に対称境界条件、節点 $(-50,0,0)$ （左端）と $(50,0,0)$ （右端）の y, z 方向変位のゼロ固定、また、右端に一樣伸びひずみ ($\epsilon_0=1\%$) を与えている。応力分布図には解析モデルの $x=0$ （長手方向に対して真ん中）の Y 軸方向に沿う値を示す。Table 1 に応力解析に用いた材料定数を示す。

4. 結果および考察

4. 1 実験結果

静的引張試験から得られた Type A 試験片の典型的な Stress-stroke 線図を Fig.3 に、Type B 試験片の静的引張強度を Fig.4 に、また Type D 試験片の静的引張強度を Fig.5 に示す。Fig.3 において一点鎖線は円孔を有する試験片を、実線は常温硬化型エポキシ樹脂で補修された試験片を

それぞれ示している。図 (Fig.4,5 参照) より、エポキシ樹脂で補修された試験片の静的引張強度が補修されていない試験片より若干高い値を示していることが分かる。その原因としては、補修されたエポキシ樹脂によりトランスバースクラックや層間剥離といった損傷を抑制する効果があると考えられる。その詳細については今後の課題にしたい。

補修程度に対して円孔径の影響を調べるために Type B 試験片を用いて静的引張試験を行った。図示していないが、Stress-stroke 線図については Type A 試験片とほぼ同じ傾向を示した。その原因についても Type A 試験片と同様な説明ができる。

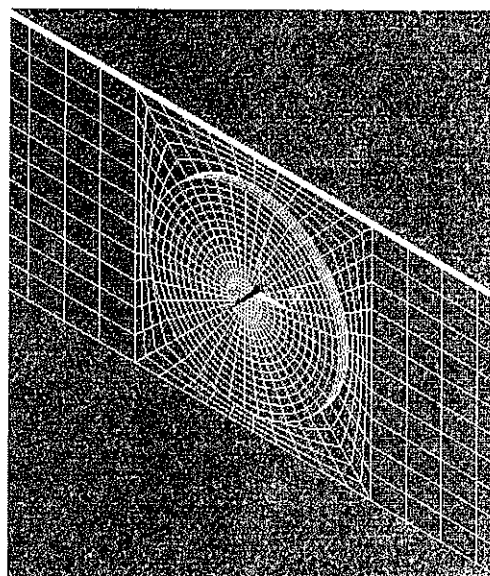


Fig.2 FEM modeling of the upper half of the $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ for epoxy-patched model

Table 1 Mechanical properties of a carbon/epoxy unidirectional lamina

	CFRP	Epoxy
E_L (GPa)	144.8	3.43
E_T (GPa)	8.05	
ν_{LT}	0.3	0.36
ν_{TT}	0.45	
G_{LT} (GPa)	4.7	
G_{TT} (GPa)	2.8	

補修程度について、積層構成の影響 (Fig.4,5 参照) を調べるために Type C、円孔径の影響を調べるために Type D 試験片を用いて静的引張試験を行った。静的引張強さの回復については Type A、B 試験片とさほど変化は見られなかった。無孔積層板の積層構成 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ と $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ の損傷挙動が異なるということはよく知られている。積層構成 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ の場合は応力-ひずみ線図においてほぼ線形的な挙動を示すことに対し、積

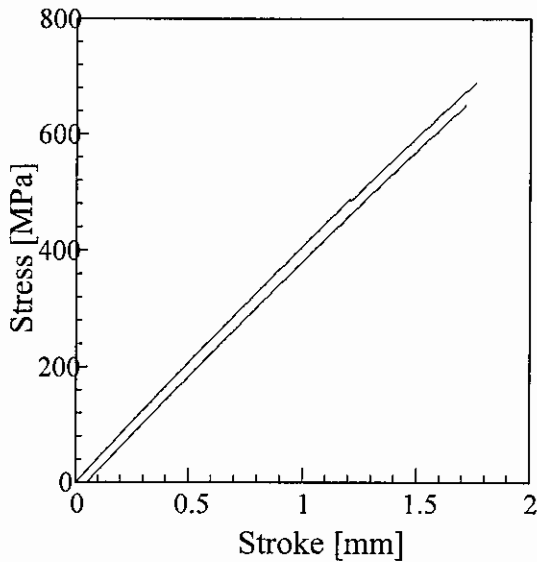


Fig.3 Typical stress-stroke curves for Type A specimen.

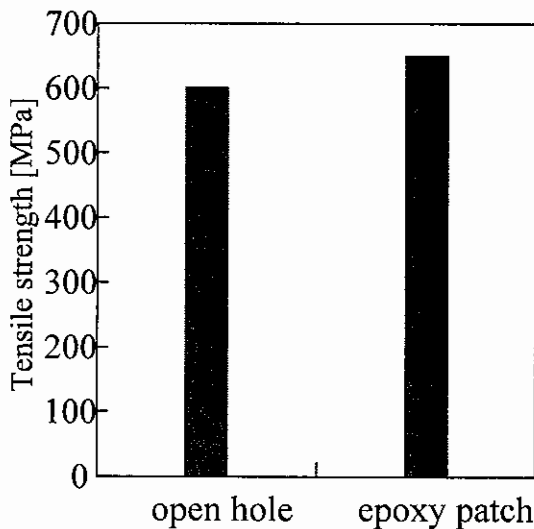


Fig.4 Tensile strength of $[0/45/90/-45]_s$ quasi-isotropic laminates ($d=3.6\text{mm}$, Type B)

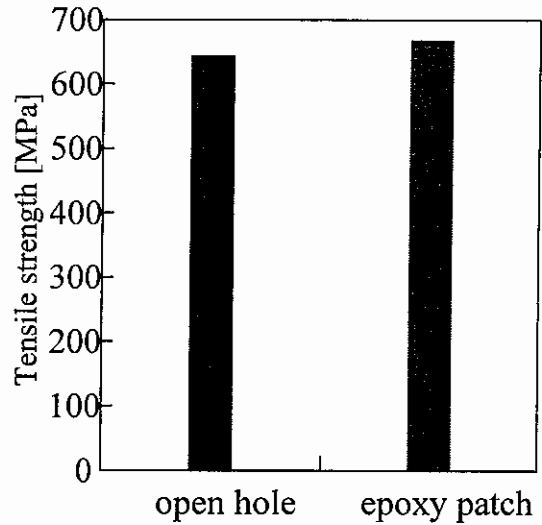


Fig.5 Tensile strength of $[0/45/-45/90]_s$ quasi-isotropic laminates ($d=3.6\text{mm}$, Type D)

層構成 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ の場合は大規模な層間剥離に起因する非線形的な挙動を示す。そういことから、Type Cと Type D 試験片の補修程度は期待されたが、Type Aと Type B 試験片とさほど違いは見られなかった。その詳細についても今後の課題にしたい。

4. 2 応力解析結果

Fig.6 実験で得られた結果を検証するために、Type B ($[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$, 円孔径 3.6mm) 擬似等方性複合材料積層板に対して行った解析結果である。本報では、表面層すなわち 0° 層の応力成分 σ_x に着目して示すことにする。図よりわかるように、エポキシ樹脂で補修されたモデルと補修されていないモデルともに円孔近傍で極端に応力の値が高いことが分かる。また、エポキシ樹脂で補修されたモデルの円孔近傍での応力の値は補修されていないモデルの応力より約25%ほど応力緩和が見られた。これは、実験結果とよい傾向を示している。図示していないが、ほかの応力成分すべてもエポキシ樹脂で補修されたモデルのほう補修されていないモデルの応力の値より低い値を示した。しかし、解析は線形解析であり、今後非線形解析に拡張したモデルを提案すべきであると思われる。

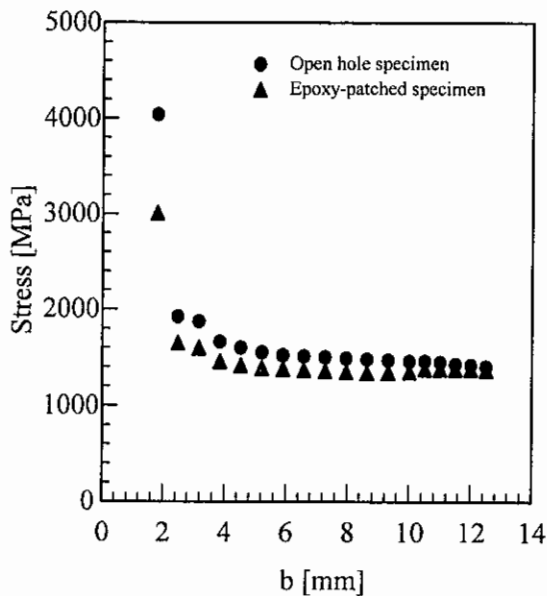


Fig.6 The distribution of stress σ_x for 0° ply

5. 結言

本研究では2種類の積層構成および円孔径を有する擬似等方性複合材料積層板に対し、常温硬化型エポキシ樹脂の補修を行い、静的引張試験を実施し、補修程度（引張強さの回復）の積層構成および円孔径の影響について以下の知見を得た。

4種類の試験片において引張強さの回復は認められる。また積層構成および円孔径の違いは補修程度（引張強さの回復）にはあまり影響を及ぼさないことが分かった。今後、エポキシ樹脂の補修による破壊パターンの変化について検討したい。

実験で得られた結果を検証するために行った解析ではエポキシ樹脂で補修されたモデルの円孔近傍での応力の値は補修されていないモデルの応力より約25%ほど応力緩和が認められ、定性的には実験結果を裏付けている。定量的に検討するためには、今後、非線形性を考慮した解析手法を採る必要があると思われる。

6. 参考文献

- 1) Hu, F. Z., C. Soutis and E. C. Edge, Interlaminar stresses in composite laminates with a circular hole, *Compos Struct*, 37, 223-232, 1997
- 2) Seo, D. C. and J. J. Lee, Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch, *Compos Struct*, 57, 323-330, 2002