

室温硬化型樹脂による補修された炭素繊維強化複合材料積層板の 引張・疲労挙動に関する研究

金 炯秀 (ポスドクター)
 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、穴を有する構造部材が再利用される際や損傷を受け新しい部材に取り替えることの出来ない緊急時の場合、補修という方法を取らざるを得ない。補修というのは、「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」ということを言う。補修の方法は一般的に機械的な補修と接着による補修がある。機械的な補修の場合、ボルトやリベットなどの締結によるもので、部材に新たな穴の加工が不可欠であり、その穴の周辺での応力集中による破壊が懸念されている。また、接着による補修の場合は、接着剤そのものの挙動が補修能力を決定するので接着剤自体の性能が重要である。

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^{2),3)}も活発に行われてきている。

本研究では接着による補修能力が接着剤そのものの挙動に依存することに着目し室温硬化型樹脂だけで補修された炭素繊維強化エポキシ基複合材料積層板に対し、静的引張試験および疲労試験を行い、その挙動について明らかにする。

2 引張・疲労試験

2.1 試験片

本研究では補修効果に対し積層構成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 : 株式会社三菱レイヨン) 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、 $290\text{mm} \times 285\text{mm}$ 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 $253\text{mm} \times 25.4\text{mm}$ 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。Fig. 1 に円孔を有する試験片と常温硬化型接着剤で補修された試験片の概略と寸法を示す。

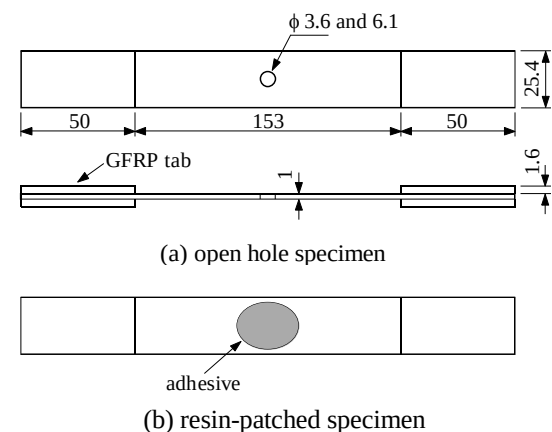


Fig. 1 Test specimen configuration.

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。また、円孔径 3.6mm に対してはメタクリレート系構造用接着材である MA310 (ITW Inc.) を追加で使用している。

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。疲労試験は Type B についてのみ行った。その際、使用した補修材は MA310 である。

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および疲労試験を行った。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。一方、疲労試験条件は、①繰り返し最大応力は最終破壊強度の 65%②応力比は 0.1、である。疲労試験は①繰り返し数 100 回のひずみの 2 倍のひずみになったら試験を停止し各繰り返し数を確認②繰り返し数が 72,000 回になったら試験を停止し超音波探傷装置による損傷観察、の手順で行った。

3 強度解析

既報⁴⁾では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) を行い、積層板の破壊に大きく寄与する σ_x が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を示した。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とも示した。本報では、既報の応力解析に続いて非線形有限要素ソルバー LS-DYNA(Mat_22)⁵⁾ 使用し、Type D ($[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ 、円孔径 3.6mm) 擬似等方性複合材料積層板対し、強度解析 (破壊基準は Chang and Chang モデル⁶⁾) を行った。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 150mm、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 1.5mm と 20mm である。解析モデルの要素分割の詳細を Fig. 2 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、以下になる。モデル左端の 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 (毎秒 60mm) を与えている。Table 1 に解析に用いた材料定数を示す。

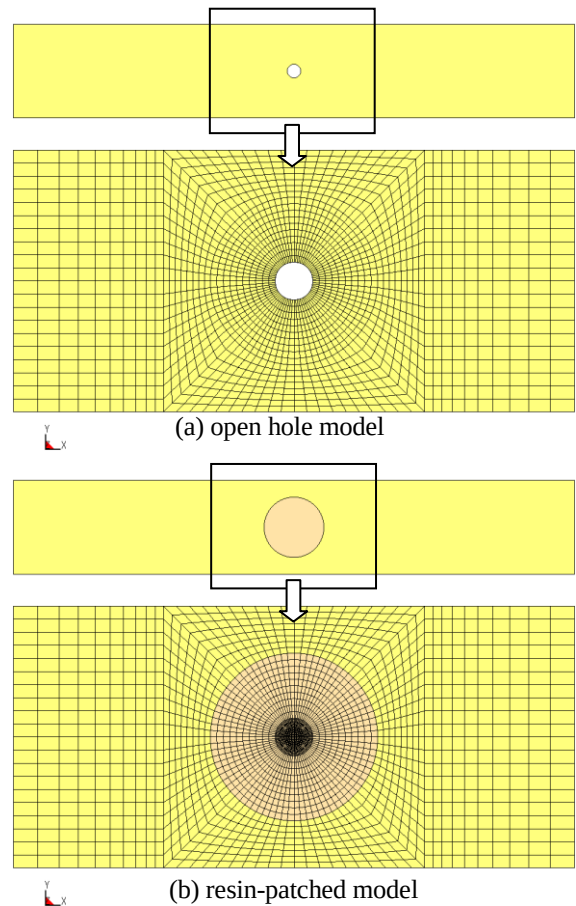


Fig. 2 FEM modeling of the upper half of the $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ quasi-isotropic composites.

Table 1 Mechanical properties of a carbon/epoxy unidirectional lamina and resin.

	CFRP	Resin
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	

4 結果および考察

4. 1 実験結果

有孔試験片およびエポキシ樹脂で補修された試験片の静的引張試験から得られた Type B 試験片の典型的な Stress-stroke 線図を Fig. 3 に示す。また、Fig. 4 は Type D 試験片の静的引張強度を示している。

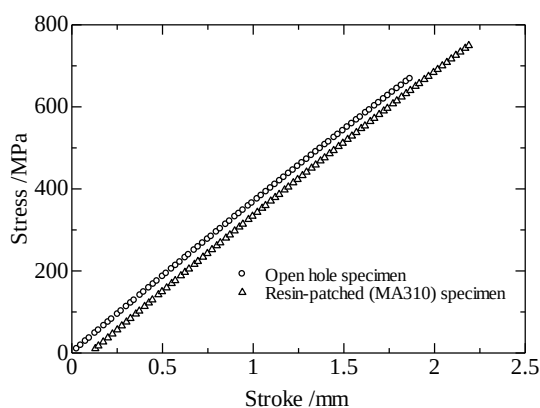


Fig. 3 Typical stress-stroke curves for Type B Specimen.

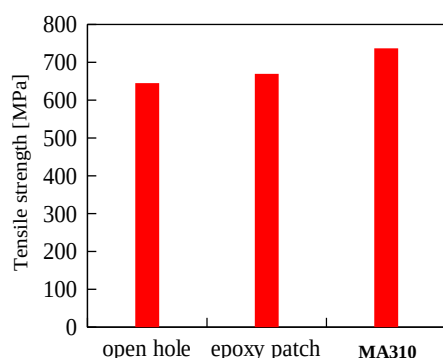
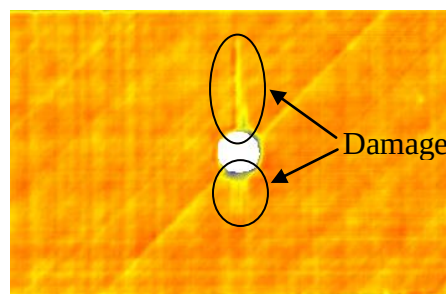
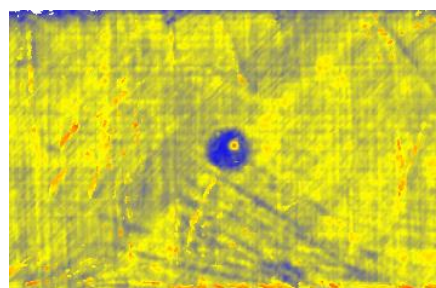


Fig. 4 Tensile strength of $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ quasi-isotropic laminates ($d=3.6\text{mm}$, Type D).

図 (Fig. 4 参照) より、樹脂で補修された試験片の静的引張強さ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。特に、構造用接着剤(MA310)によって補修された試験片の場合は補修されていない試験片の静的引張強さより 14.5~22.5%ほど高くなっている。その原因としては、補修された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が抑制されたためであると考えられる。Fig. 5 は構造用接着剤で補修された試験片 (Type D) の試験後 (破壊強度の 90%付近で試験停止) 観察し



(a) open hole specimen



(b) resin-patched specimen

Fig. 5 Photographs of ultrasonic detector for Type D specimen.

た超音波探傷写真である。

Fig. 5(a)は有孔試験片を Fig. 5(b)は構造用接着剤で補修された試験片を示している。有孔試験片には損傷が観察されたが構造用接着剤で補修された試験片には損傷が観察されなかった。これは補修による強度の回復が期待される。

補修効果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。

補修効果について、積層構成の影響 (Fig. 4 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。そういうことから、Type C と D 試験片の補修効果は期待されたが、Type A と Type B 試験片とさほど違いは見られなかった。

疲労試験の結果について以下に述べる。繰り返し数 100 回のひずみの 2 倍になった繰り返し数を比較すると、有孔試験片は 95,066 回、補修された試験片は 182,304 回であった。樹脂の補修により繰り返し数が約 2 倍になった。

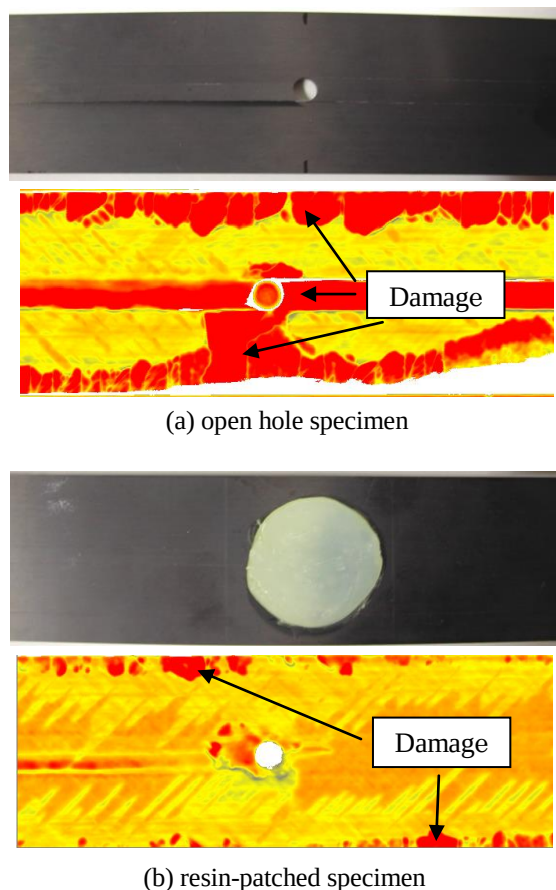


Fig. 6 Photographs of ultrasonic detector of fatigue tested specimens (Type B).

Fig. 6 は、繰り返し数が 72,000 回時に試験を停止し超音波探傷装置による損傷観察を行った写真である。写真の黒い部分が損傷を現しているが、補修された試験片のほうが著しく損傷領域が少ないことが分かる。

4. 2 強度解析結果

Table 2 に解析結果をまとめたものを示す。円孔を有するモデルの場合は、誤差 1%程度で実験と解析がよく合っている。しかし、樹脂で補修されたモデルの場合、補修していないモデルの結果と比べ、定性的な傾向は合っているものの定量的には誤差が 10%を超えている。この原因としては、実験でよく見かける樹脂の気泡を解析ではうまく表現できなかったと思われる。

また、解析に用いた樹脂の材料定数は推測値に近いもので、今後適切な材料定数の導入が必要である。また、解析において気泡の表現あるいは実験での樹脂に発生する気泡の抑制に改善が必要であると思われる。

Table 2 Comparisons between EXP and FEM

	EXP[MPa]	FEM[MPa]
Open hole model	644.90	652.86
Resin-Patched model	750.45	836.20

5 まとめ

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、常温硬化型樹脂の補修を行い、静的引張試験および疲労試験を実施し、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。特に、構造用接着剤によって補修された試験片の場合は補修されていない試験片の静的引張強さより 14.5~22.5%ほど高くなっている。また積層構成および円孔径の違いは補修効果（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。LS-DYNA による強度解析では樹脂で補修されていないモデルについては誤差 1%程度でよい結果が得られたが、補修されたモデルについてはまだ検討が必要である。また、疲労挙動にも常温硬化型樹脂による補修効果が認められた。今後、疲労挙動に対しても様々な環境での試験を行い、その挙動を明らかにしたい。

6 参考文献

- 1) F.Z. Hu, C. Soutis and E.C. Edge, Compos. Struct., 37, (1997), pp. 223~232
- 2) J.W. Choi, W. Hwang, H.C. Park and K.S. Han, Advanced Compos. Mater., 8, (1999), pp. 317~327
- 3) D.C. Seo and J.J. Lee, Compos. Struct., 57, (2002), pp. 323~330
- 4) 金 炯秀, 邊 吾一: 日本大学生産工学部ハイテクリサーチセンター平成 15 年度研究報告書, (2004), 1-13~1-16
- 5) LS-DYNA keyword user's manual. LSTC. Version 970, 2003.
- 6) F.K. Chang and K.Y. Chang, J Compos. Mater., 21, (1987), pp.834~855