

1 有限要素法による熱可塑性 CFRP 単純重ね合わせ溶着継手の強度予測

河野洋輔, 松葉 朗*, 藤井敏男, 山下弘之, 荻原慎二**, 永田 優**, 小柳興瑤**

Prediction of strength for welded lap joint with thermoplastic CFRP laminates using Finite Element Analysis.

KOUNO Yousuke, MATSUBA Akira*, FUJII Toshio, YAMASHITA Hiroyuki,
OGIHARA Shinji**, NAGATA Yu** and KOYANAGI Koyo**

A prediction method for tensile shear strength of single lap joint welded with high fracture toughness CF/PA6 laminates was examined using FEM analysis with cohesive zone model(CZM), in comparison with the single lap joint of conventional CF/Epoxy laminates. In the analytical results using the interface cohesive element with traction separation laws determined by experimental testing results such as fracture toughness(DCB and ENF) and several static tests, the predicted strength for the CF/PA6 welded joint was higher than the strength experimentally obtained by tensile testing, although the analytical strength for the CF/Epoxy laminates was in good agreement with the experimental one especially for the relatively long lap length.

キーワード：複合材料, シミュレーション, 結合力要素

1 結 言

自動車の燃費向上を目的とした軽量化のため, 比重の小さい CFRP を車体構造部材へ適用する傾向が高まっている。自動車部品の構造設計では, 締結部強度を適切に確保することが重要となるが, ボルトやリベットなどの機械的締結は重量が増加しやすく, 接着や溶着による締結が軽量化の点で有利である。そこで, これらの接合強度を簡易かつ精度良く予測し, 設計に反映できる技術が求められている。

近年, CFRP の層間や接着界面に対して結合力要素を用いたき裂進展解析が行われており, 従来のエポキシ系 CFRP 接着継手にも適用され, その有効性が報告されている。本研究では, 自動車への適用が期待される熱可塑性 CFRP の溶着継手について, 結合力要素法による溶着強度の予測について検討した。まず, 結合力要素解析の妥当性を検証するため, CF/PA6 および従来の CF/エポキシ積層板による DCB および ENF 試験片について, 結合力要素を挿入した FEM モデルにより層間き裂進展解析を行い, 実験結果と比較した。つぎに, 単純重ね合わせ溶着継手の接合面に結合力要素を適用したモデルで同様に解析を行い, 溶着強度の予測を行った。

2 層間破壊じん性試験を模擬したき裂進展解析

2.1 解析方法

図 1 は今回用いた FEM モデルであり, CFRP 積層板の層間破壊じん性試験を模擬している。解析は四角形一次要素を用い, 幾何学的非線形を考慮した平面ひずみ状態で行った。き裂が進展する上下梁の間に厚さ 0 の結合力要素を挿入し, メッシュサイズは 0.1mm とした。また, 上下梁の接触時における摩擦係数は 0 とした。荷重条件として, DCB モデルでは上下梁端部付近に外力を与え, ENF では支点と圧子を剛体でモデル化し, 圧子に荷重を負荷した。

CF/PA6 および CF/エポキシ積層板の機械的特性は, JIS K 7165 に準拠した静的引張試験より得られた表 1 の値を用いた。結合力要素のパラメータとして, 臨界エネルギー解放率 G_{IC} および G_{IIC} は JIS K 7086 に準拠した層間破壊じん性試験より取得し, 最大結合力 t_n 及び t_s はそれぞれ静的引張試験から取得した 90° 方向引張強さと, JIS K 7078 に準拠のショートビーム試験から取得した層間せん断強度よりそれぞれ求めた。結合力要素の結合力と相対変位の関係は式 (1) 及び (2) で与えた¹⁾。ここで, 式 (2) 中の e は自然対数の底である。なお, FEM 解析には MSC/Marc2010 を使用した。

*広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター

**東京理科大学 理工学部

表 1 CF/PA6 および CF/エポキシ
積層板の機械的特性

	Young's modulus (GPa)			Poisson's ratio			Shear modulus (GPa)		
	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃	v ₁₂	v ₂₃	v ₃₁	G ₁₂	G ₂₃	G ₃₁
CF/PA6	125	7.2	7.2	0.35	0.5	0.02	3.2	2.4	3.2
CF/Epoxy	128	9.2	9.2	0.32	0.5	0.02	4.4	3.1	4.4

表 2 結合力要素の特性

	Critical energy release rate (N/mm)		Maximum traction (MPa)	
	G _{IC}	G _{IIc}	t _n	t _s
CF/PA6	2.438	2.067	30	56
CF/Epoxy	0.331	1.119	62	82

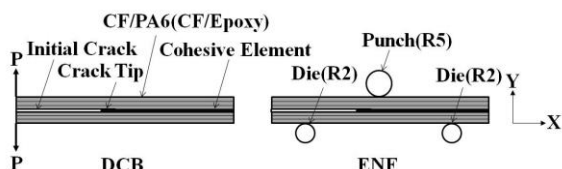


図 1 DCB および ENF の模式図

$$T_i = G_{IC} \frac{\delta_i}{\delta_{iC}^2} \exp(-\delta_i / \delta_{iC}) \quad (1)$$

$$\delta_{iC} = \frac{G_{IC}}{et_j} \quad (2)$$

(i = I, II j = n, s)

2.2 実験方法

CF/PA6 積層板は、50℃で 8 時間乾燥させたミツヤ製 CF/PA6 プリプレグを積層し、ホットプレスにより 270℃、圧力 6.4MPa・5min 保持の条件で圧縮成形し、厚さ約 3mm の一方向積層板を作製した。一方、CF/エポキシ積層板は、東レ製 T700SC/2592 プリプレグを用い、135℃、0.2MPa・1h 保持の条件でオートクレーブにより成形した。

DCB および ENF 試験片は JIS K 7086 に基づき、両積層板から所定の寸法で試験片を作製し、試験に供した。

2.3 層間き裂進展挙動における解析と実験結果の比較

DCB 試験における荷重-変位(COD)関係を図 2 に示す。実験結果では、CF/エポキシに比べ CF/PA6 は、き裂発生および初期のき裂進展に要する荷重(最大荷重)が高く、モード I き裂進展に対して高いじん性を有していることがわかる。また、解析結果

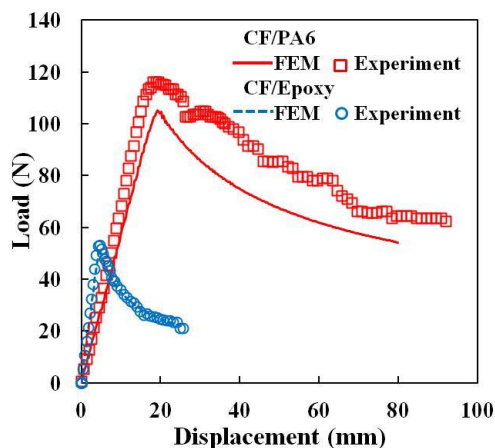


図 2 DCB 試験と解析の荷重変位曲線

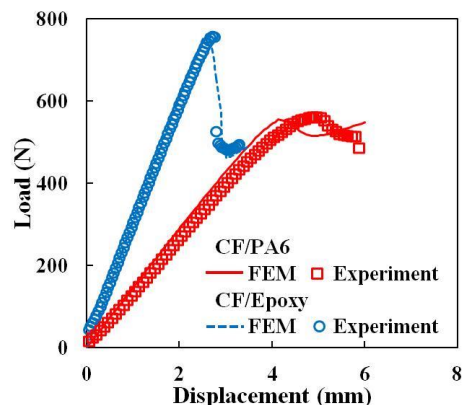


図 3 ENF 試験と解析の荷重変位曲線

と実験結果を比較すると、き裂進展初期の G_{IC} 値を用いた今回の解析では、CF/PA6 において最大荷重およびその後のき裂進展過程での荷重-変位関係がやや低い傾向にあるものの、両試験片のき裂発生及び進展挙動を概ね解析で表現できていることがわかる。さらに、図 3 に示した ENF 試験においても、解析および実験の結果は比較的よく一致している。以上のことから、モード I およびモード II 単体条件下でのき裂進展挙動における実験結果との比較により、今回の結合力要素による有限要素解析の妥当性が確認できた。

3 単純重ね合わせ溶着継手の強度予測

3.1 解析方法

解析モデルとして、図 4 に示すような単純重ね合わせ溶着継手を用い、ラップ長さ L は 12.5, 25, 37.5mm の 3 種類とした。図 1 同様に被着体間の接

合面に結合力要素を挿入し、その厚さは 0 とした。解析は四角形一次要素を使用し、幾何学的非線形を考慮した平面ひずみ状態で実施した。

また、被着体同士の接触を考慮し、摩擦係数は 0 とした。境界条件として、被着体端部の X および Y 方向変位を拘束し、他方の被着体端部に X 方向の外力を負荷した。被着体の機械的特性は、前節同様に表 1 及び表 2 の値を使用し、結合力要素の結合力と相対変位の関係は式 (1) および (2) で与えた。ただし、今回のき裂進展挙動は DCB や ENF と異なり、混合モード条件下となることが予想されるため、結合力要素の損傷発生条件と破壊基準は混合モードを考慮し、損傷発生条件は式 (3) の楕円則を、破壊基準は式 (4) のべき乗則とし、指数 α は 1 とした。

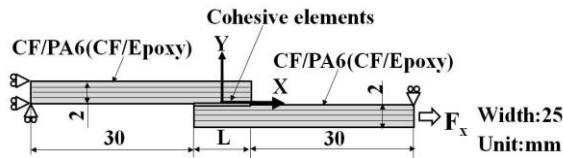


図 4 単純重ね合わせ継手の模式図

$$\left\{ \frac{\langle \tau_3 \rangle}{t_n} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_1}{t_s} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

$$\left\{ \frac{G_I}{G_{IC}} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_{II}}{G_{IIC}} \right\}^\alpha = 1 \quad (4)$$

3.2 実験方法

CF/PA6 製溶着板の作製方法は、まず、2.2 項と同様の手法で板厚約 2mm の一方向積層板をプレス成形で作製し、これを被着体として解析モデルと同様の 3 種類のラップ長さとなるよう重ね、オートクレーブにより再度加熱溶融させ、単純重ね合わせ状の溶着板を作製した。

一方、CF/エポキシについては、所定のラップ長さとなるよう図 4 のようにプリプレグを積層し、一回のオートクレーブ成形で CF/PA6 と同一形状の積層板を作製した。これらを繊維方向が試験片長手方向になるよう切出し、その両端部に厚さ 2mm のアルミ製タブを接着剤で貼り付けて試験片とした。試験方法は JIS K 6850 を参照し、50℃ で 8 時間試験片を乾燥後、試験速度 1mm/min の条件で静的引張せん断試験を実施した。

3.3 単純重ね合わせ継手における解析と実験結果の比較

まず、ラップ長さ $L=25\text{mm}$ の CF/PA6 試験片において、ラップ領域中央部の試験片表面の長手方向ひずみを実測し、解析結果と比較して図 5 に示す。その結果、最大荷重値に違いはあるものの、荷重とひずみの関係は解析と実験でほぼ一致しており、接合面に結合力要素を挿入した今回の解析モデルにおいて、単純重ね合わせ継手の変形挙動をうまく表現できていることがわかる。

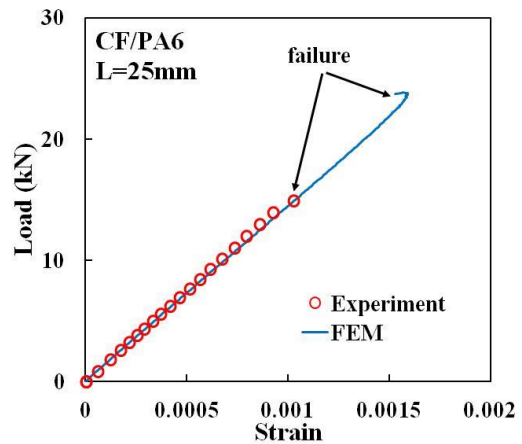


図 5 引張りせん断試験の荷重ひずみ曲線

つぎに、引張せん断試験および FEM 解析で得られた最大荷重値を接合面積で除して得られる平均応力を見掛けのせん断強さとし、実験と解析の結果を比較した。CF/PA6 の結果を図 6 に、CF/エポキシの結果を図 7 にそれぞれ示す。まず、図 6 の CF/PA6 に注目すると、ラップ長さの増加に伴ってせん断強度は低下しており、実験および解析ともにその傾向は一致している。ただし、解析によるせん断強度の予測値は、実験結果を上回っており、ラップ長さの増加に伴い両者の差が拡大する結果となった。一方、図 7 に示した CF/エポキシでは、ラップ長さが比較的長い $L=25, 37.5\text{mm}$ では、解析値は実験値とほぼ一致しており、結合力要素を用いた今回の解析で、接合継手の強度（最大荷重あるいは応力）を予測できる可能性を示唆している。ただし、ラップ長さが短い $L=12.5\text{mm}$ の結果では実験と解析で差が生じており、解析の方が低い強度値を示し、図 6 の CF/PA6 とは逆の傾向となった。

以上のことから、今回の解析手法では、精度の良い継手強度の予測は特定の材質や試験片形状に限られている。材料や各種境界条件に依存しない形で統一的に適用するためには、結合力要素のパラメータや混合モード破壊条件の適正化など、今後さらなる検討が必要と考えられる。

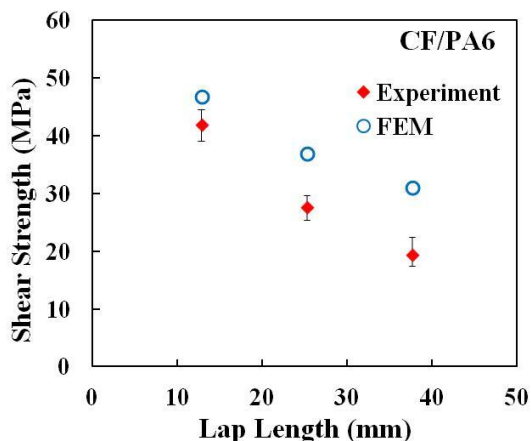


図6 CF/PA6のせん断強さとラップ長さの関係

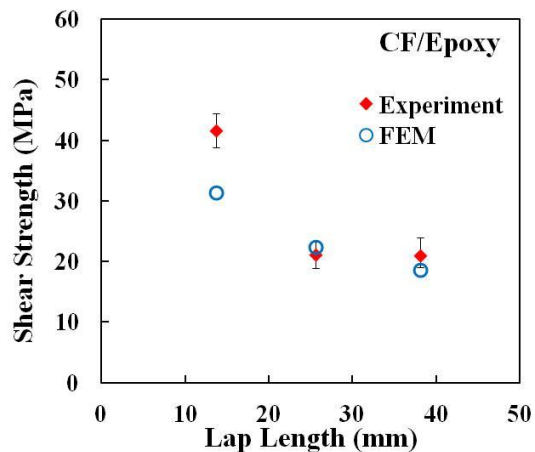


図7 CF/エポキシのせん断強さとラップ長さの関係

4 結 言

結合力要素を用いた FEM き裂進展解析により、熱可塑性 CFRP の単純重ね合わせ継手の強度予測について検討した。DCB および ENF の破壊じん性試験や静的試験から導出した結合力要素条件を用いてせん断強度の予測を行った結果、比較的ラップ長さの長い従来の CF/エポキシ継手の強度については精度よく予測ができたものの、高じん性の CF/PA6 溶着継手では、実験値よりも高強度側での予測となることがわかった。

文 献

- 1) Marc 2010 Product documentation, Volume A, "Theory and user information", pp.531-535(2010).