九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

CFML機械継ぎ手の最大荷重領域における損傷進展

松原, 監壮
九州大学応用力学研究所技術室

https://hdl.handle.net/2324/17838

出版情報：九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 11, pp.49-54, 2010-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

CFML機械継ぎ手の最大荷重領域における損傷進展

九州大学応用力学研究所技術室　松原監壮

１．はじめに

繊維強化樹脂(FRP)と金属を交互に重ねたハイブリッド積層板をFMLs(Fiber Metal Laminates) と称し、1970年代後半にオランダのDelft大学で研究がスタートした。

図1にそのFMLsを図示する。アラミド繊維強化樹脂とアルミニウム合金を交互に積層したARALL®が軍用大型長距離輸送機C17の貨物扉に、そしてガラス繊維強化樹脂とアルミニウム合金を交互に積層したGLARE®がエアバス社の旅客機A380の上部胴体パネルに使用されている。図２と図３はそれらの飛行機の写真である。

このARALL® やGLARE®に比べると炭素繊維強化樹脂とアルミニウム合金を交互に積層したCFMLs (Carbon Fiber Metal Laminates)の方が剛性と強度に優れているのは明らかなのだが、残念ながら未だ実用されないでいる。それはガルバニック腐食や熱残留応力の問題が未解決のまま残されているためである。

最近、九州大学応用力学研究所は耐ガルバニック機能を備えたCFMLsのオートクレーブ成形に成功した[1)]。使用するアルミニウム合金A2024には陽極酸化皮膜とSiO_2ゾルゲルコート[2)]の耐ガルバニックコートが二層に施されている。

現在、本積層システムの電気化学特性[3)]や強度特性[4)]などが調べられている。ピンジョイントの引張り試験により初期-最大-最終の各領域の損傷挙動が得られたがそれは既に前回の技術レポートで報告した。今回はそれら領域の間を補完する連続的な損傷挙動について報告する。

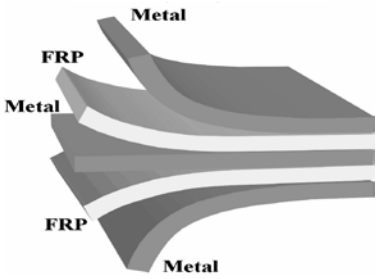

図1.繊維強化樹脂/金属ハイブリッド積層板(FMLs)

図2.軍用大型長距離輸送機C17

図3.旅客機エアバス380

2. 実験方法

2.1 試験片の作成

３μｍの陽極酸化膜と25μｍのゾル-ゲル膜[1)]を施したA2024 -T3の板に東レT300/#2580プリプレグシートを挟んだCFMLをオートクレーブで焼成した。

2.2　ピンジョイントによる引張り破壊試験

CFMLピンジョイントの引張り試験の様子を図4に示す。MTS負荷試験機は0.5mm/minの負荷速度で使用した。試験片が破壊すると荷重の低下が生じる。その値が50Nから100N低下した時点で負荷を停止し除荷するようプログラミングした。これにより初期-最大-最終の各々の破壊データと試験片が自動的に採取できた。それらの間を補間する破壊データと試験片は荷重-ストローク曲線のモニターを見ながら手動で採取した。

引張りの方向はAl圧延方向に直角である。試験片はCFRPの最終破壊モードがベアリング破壊となる幾何学的条件[2]、$W / D \geqq 4$ and $E / D \geqq 4$ ----- (1)を満足している。

ベアリング応力σ_bは、$\sigma_b = P / D \cdot t$ ----- (2) で算出した。　但しP: 最大引張力、D: ピン径、t：試験片厚さである。

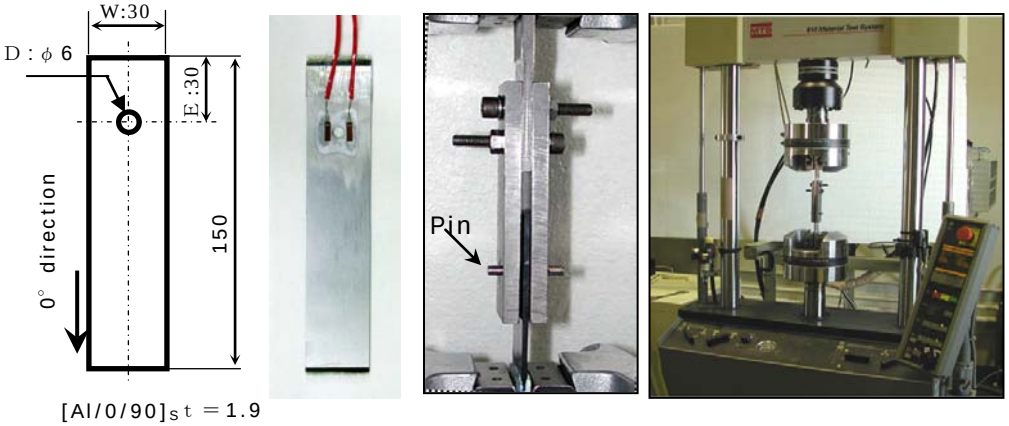

図4.CFMLピンジョイントの引張り試験

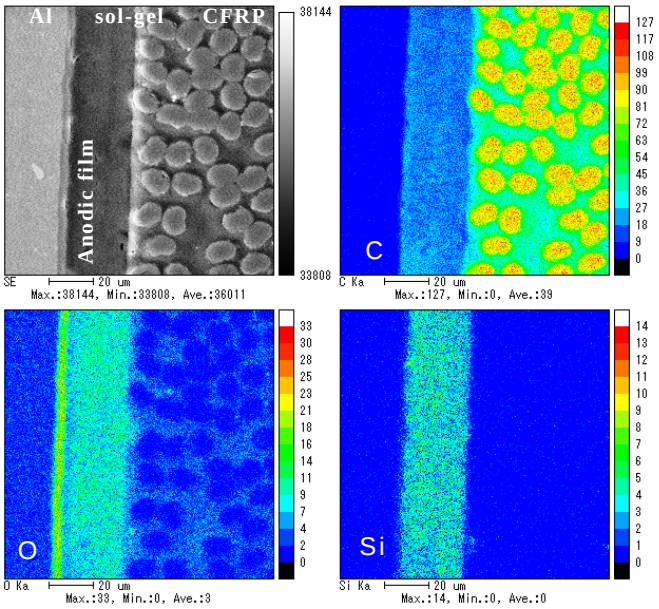

図5.ＣＦＭＬ界面のＥＰＭＡ分析例

2.3　損傷観察

引張り試験を終えた後、ピン穴周りの超音波探傷検査、ＥＰＭＡ分析そして光学顕微鏡観察を行った。

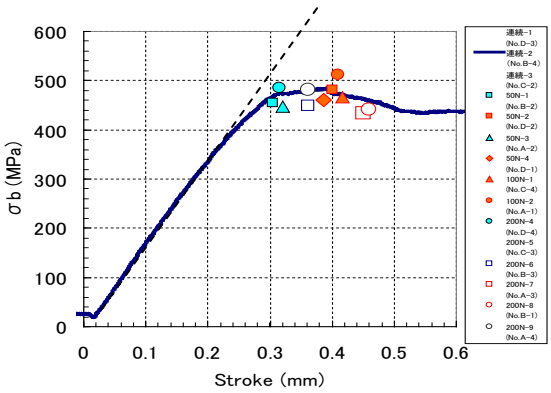

図6.ＣＦＭＬ[Al/0/90]$_S$ のベアリング応力-ストローク曲線

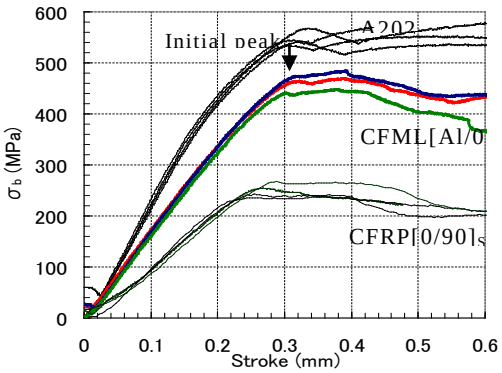

図7. A2024とCFMLそしてCFRPのベアリング応力-ストローク曲線

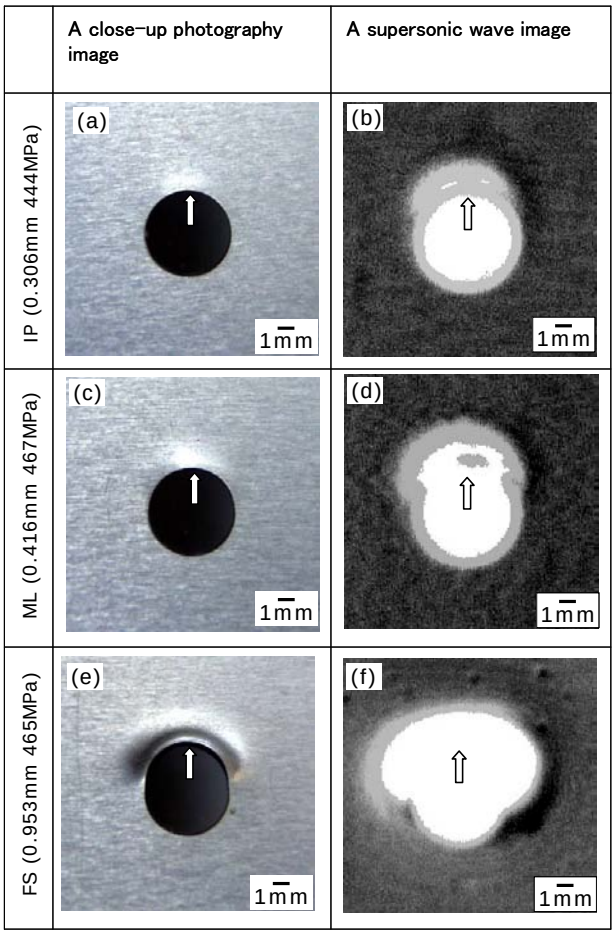

図8.ピン穴の損傷進展
光学像(a)(c)(e)と超音波探傷像(b)(d)(f)

3. 実験結果および考察

3.1 Al/CFRP の界面

オートクレー部で成形した CFML の界面の EPMA 分析例を図 5 に示す。Al/陽極酸化皮膜/ゾルゲル膜/CFRP の夫々の界面に空孔や剥離そして不純物の混入などは見られない。密着性が良好なのが判る。陽極酸化皮膜/ゾルゲル膜の二層コーティングが耐ガルバニックに優れているのは電気化学試験で既に確かめている[3) 4) 5)]。

3.2 ベアリング応力-ストローク曲線

図6がCMFL[Al/0/90]$_S$のベアリング応力-ストローク曲線である。ストロークはクロスヘッドの移動量である。

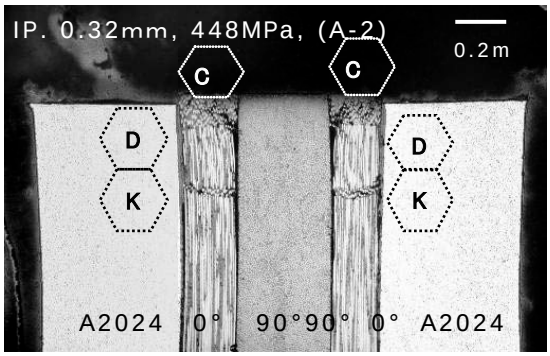

図9. 初期破壊の損傷

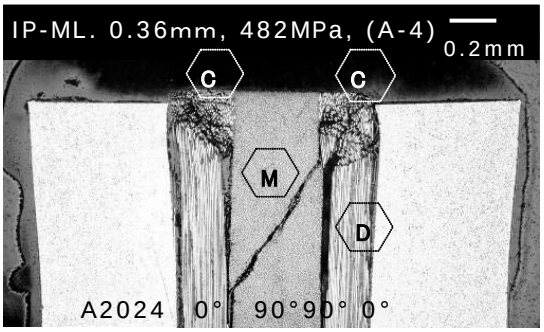

図10.初期破壊を経て最大荷重へ至る途中の損傷

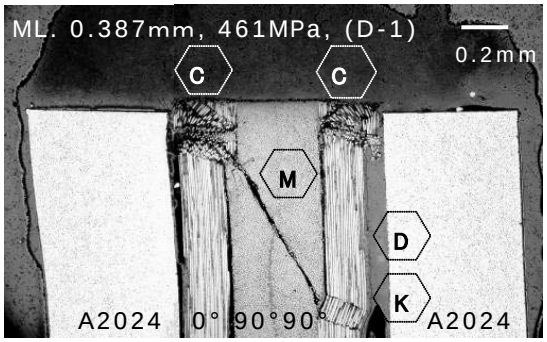

図11.最大荷重の損傷

CFMLの曲線はストロークが0.2 mm付近で線形部分から非線形部分へ移行し、0.31 mm付近に初期破壊の荷重低下を示すInitial Peakeが現れる。最大荷重のストロークの平均は0.42 mmで、その後は急速な荷重の低下も無く比較的穏やかに最終破壊の領域（FS）へ移行した。このInitial Peakeと穏やかな荷重の低下はCFMLに特有なもので、以前に清家らが行った擬似等方性CFRPのピンジョイント実験解析[6]には存在しなかった現象である。

図7はA2024とCMFL$[Al/0/90]_S$そしてCFRP$[0/90]_S$のベアリング応力-ストローク曲線である。今回の研究はAlの圧延方向に対して垂直に引張っている。そのCFMLに約15%程のハイブリッド効果が現れた。これは以前の研究で明らかにしたAl圧延方向に対して平行に引張る場合の結果[7]と略同じであった。

3.3 超音波探傷

図8はピン穴の接写像と超音波探傷の像である。
矢印がピン接触部位で、探傷した場所はAl/CFRPの界面である。表面のAlの塑性変形面積に比べその直下の界面の剥離の面積が大きいのが分かる。

3.4 断面の損傷の観察

3.4.1 初期破壊の損傷

初期破壊(Initial Peake)の損傷を図9に示す。写真からは最初にピン接触面の0°層に圧壊collapse(C)が生じ、それがAl合金との界面に剥離(D)を生じさせ、更に0°層下部の繊維座屈Kink（K）様の発生へと繋がっているのが判る。このKink（K）様がInitial Peakeの原因と思われる。Al合金との界面に剥離が生じると焼成時の熱残留応力が開放されてAlは縮み、CFRPが伸びてピン接触面に凸型の段差が生じる。

3.4.2 初期破壊から最大荷重の破壊への移行

図10が初期破壊から最大荷重へ移行する途中の領域の損傷である。この領域は0°

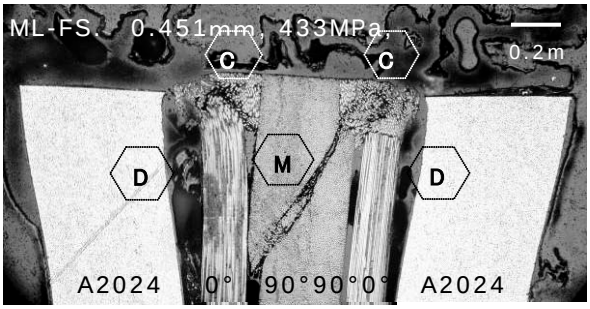

図12.最大荷重を経て最終破壊に至る途中の損傷

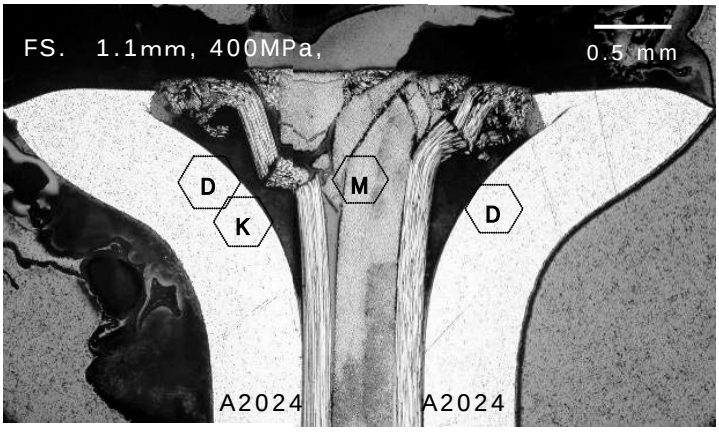

図13. 最終破壊の損傷

層の圧壊collapse (C)が大きくなって、それが0°層/90°層の層間に剥離 (D) を生じさせ、更に90°層のマトリックスクラック (M) の発生へと繋がっているのが写真から判る。

3.4.3 最大荷重の損傷

最大荷重の損傷を図11に示す。Kink (K) の発生が顕著である。マトリックスクラック (M) が有るにもかかわらず最大値が513MPaを超える試験片もあった。ストロークが0.42ｍｍ付近までは予想を超える荷重を分担してくれるのが分かる。

3.4.4 最大荷重の破壊から最終破壊への移行

図12は最大荷重から最終破壊へ移行する途中の領域の損傷である。この領域はAl界面の剥離(D)が更に大きくなっている。0°層の圧壊 (C) が横へ広がり0°層/90°層の層間が剥離して横からの拘束が無くなり、90°層のマトリックスクラック (M) がより激しくなっている。

3.4.5 最終破壊の損傷

図13に最終破壊の損傷を示す。写真のCFMLのピン接触面が大きく開口している。この様な状態でも1mmつまりピン半径の1/3程度までの変形ならば最大荷重の約80%の荷重が保持される。

4. 結論

1) 前回は初期破壊-最大荷重-最終破壊の夫々の損傷挙動を段階的に調べたが、今回はそれらの間を補完する連続的な損傷解析を行った。
2) ベアリング応力-ストローク曲線はストロークが0.2 mm付近で線形部分から非線形部分へ移行し、同0.31 mm付近で初期破壊の荷重低下によるInitial Peakeが現れる。その際にCFRP/Alの界面に剥離が生じる。これにはCFRPの0°層・ピン接触面に生じた圧壊が効いていると思われる。
3) 今回作成したCFML$[Al/0/90]_S$の最大ベアリング応力は約480MPaである。その約95%の450MPaで初期破壊が生じる。1mmの変形で最終破壊に至りピン接触面が開口するが、それでも最大ベアリング応力の約80%は保持するのが判った。

謝辞

本技術報告は九州大学応用力学研究所複合連続体力学分野のプロジェクト研究の一環をなすものである。研究の遂行に際し高雄善裕教授そして汪文学准教授には適切なアドバイスならびに心温まるご指導を受けた。ここにあらためて謝意を述べます。また、日産科学工業(株)とDIC(株)からゾル-ゲルコーティング用の溶剤の無償提供を受けたことに感謝します。

参考文献

1) H.Schmidt, S.Langenfeld, R.NaB: Materials ＆Design, 18, pp309-313, (1997) .
2) A.Aktas, M.H.Dirikolu: Composite Science and Technology, 64, 10-11. (2004) 1605-1611.
3) W.X.Wang et al., J SMSJ, 56, 420-425, 2007.
4) W.X.Wang et al., AIAA 2007-2268, 1-11, 2007.
5) Y.Harita et al., Proc. 6th K-J JS on CM, 42-43, 2007.
6) S.Seike, Y.Takao, W.Wang, T.Matsubara: Proceedings of 48th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (2007) AIAA 2007-2409, 1-10.
7) T.Matsubara, Y.Takao, W.Wang;Proceedings of ACCM-6, 188-191,2008.