

CFRP一面せん断接着継手の強度

中 村 俊一郎¹

¹第一工業大学客員教授 航空宇宙工学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)
E-mail: s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

Strength of CFRP Single-lap Joints

Shunichiro Nakamura¹

¹Guest Professor, Dept. of Aeronautics Eng., Daiichi Univ. Institute of Technology
(Kokubu-Chuo 1-10-2, Kirishima-shi, Kagoshima-ken 899-4395, Japan)
E-mail: s-nakamura@daiichi-koudai.ac.jp

The airplane made by composite materials, especially carbon fiber reinforced plastic (CFRP), are often damaged the structure during the operation of it. The damaged areas are repaired by several methods. One of them is adhesively bonded CFRP patch repair. In this paper, four pieces of adhesively bonded CFRP single lap joint are fabricated and tested. Handmade film type adhesive is used for bonding. Different failure modes are observed, which leads to scattered values of their strength. This test results are compared with the other reports. It is difficult to control the failure mode of the bonded joints with the handmade film type adhesives. Manufactured adhesive is recommended to the bonded joints.

Key Words: composite materials, adhesively bonded repairs, single lap joints, CFRP patches, failure modes

1. はじめに

航空機の複合材料構造が損傷を受けた場合、損傷部は切取られ、その部分に本来の強度を回復すべく、金属製パッチを当てファスナ結合するか、または損傷部と同じ複合材料製パッチを二次接着するかなどして修理される。二次接着で修理を行う場合は一面せん断継手が多用される。本報告ではこの一面せん断接着継手方式の強度について注目することにする。

一般に、継手の接着はコキュアリングと二次接着に大別される。コキュアリングはプリプレグ積層品どうしの間に接着剤を挟み加熱・硬化するものと、接着剤なしでプリプレグ積層品どうしを加熱・硬化するものの2つに分類される。二次接着は被接着積層板どうしを接着剤で

接着するもの、被接着積層板とプリプレグ積層品の間に接着剤を挟みプリプレグ積層品と接着剤を同時に加熱・硬化して接着するもの、および被接着積層板に接着剤なしでプリプレグ積層品を重ねて加熱・硬化しその樹脂で接着するものの3つに分類される。

参考文献 1) によると、コキュアリングによる継手は製作における接着強度に影響するパラメータは少ないが、二次接着による継手はパラメータが多いため継手強度の予測は依然難しい状況にある、と論じている。参考文献 2) では、コキュアリングで接着面に接着剤(FM300K)を使用するもの、またはしないもの、積層板どうしを接着剤で二次接着するもの、および積層板とプリプレグ積層品との間に接着剤を挟んで同時に加熱・硬化し二次接着するものの4種類について、接着面長さおよび被接着積

層板厚さをパラメータに 391 個の試験片を製作し引張試験を実施している。試験結果はどの接着方法の継手でも接着面長さが長くなるにつれて破断荷重は増加するものの、破断応力は低下していることを示している。接着方法の違いによる継手の破断強度については、接着面に接着剤を用いないコキュアリングが最も強く、次いで接着剤を用いたコキュアリング、接着剤を挟んだ被接着積層板どうしの二次接着、積層板とプリプレグ積層品の間に接着剤を挟んだ二次接着の順となっている。

いずれの参考文献でも接着剤は市販のフィルム接着剤を使用しているが、フィルム接着剤の入手は購入単位が大きく、かつ入手に長期間を有するといった難点がある。本報告ではこれに代わる方法として接着剤厚さを調整したフィルム状接着剤を手作りし、その有用性を確かめることとした。一面せん断継手試験片は被接着積層板どうしをこのフィルム状接着剤により二次接着して製作し、引張荷重を破断まで加え、破面の観察をおこなった。

2. 継手試験片の製作

(1) 被接着積層板の加工

製作した CFRP 疑似等方性積層板³⁾ (プリプレグ: 三菱レーヨン一方向材〈東レ T800/EP:#3633 相当品〉、積層構成 $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]_s$)を MC-453 コンポジットで試験片 4 体分の短冊状帯板(幅 25.4mm、長さ 137mm を 8 枚)に切断する。

(2) フィルム状接着剤の準備

a. マット状ポリプロピレン製キャリヤ(大創産業(株)の水切りフィルタ、厚さ 0.09mm)を長さ 21mm、幅 30mm 程度の接着面サイズに切断し、アセトンで脱脂後、トルエンで活性化させる。

b. 活性化したキャリヤを机上に置いたバッグフィルム上にのせ、これに常温硬化型接着剤 EP-34B(共和電業(株))をヘラで均等に塗り込み、フィルム状接着剤とする。接着剤は接着修理作業の利便性を考慮し常温硬化型を使用する。

(3) 一面せん断接着継手試験片組立の製作

a. 離型フィルムを敷いた定盤の上に試験片形状の被接着積層板を置く。この被接着積層板の接着部にピンセットでフィルム状接着剤を置き、さらにもう一枚の被接着積層板の接着部をフィルム状接着剤の上に重ねて試験片を組立てる。この際、両方の被接着積層板の接着面をサンドペーパーで軽くサンディングし、エタノールで表面の汚れを完全に拭きとって活性化しておく。また接着部に気泡が残らないよう注意して作業する。

b. 接着剤を挟む作業を終えた試験片組立に離型フィルムをかぶせ、重り(0.5kgf/cm² 相当)を乗せる。時間短縮のためオープンに入れ接着剤を加熱硬化(80℃、2h)⁴⁾させて一面せん断接着継手試験片の製作を完了する。

c. 一面せん断接着継手試験片の両端に EP-34B で GFRP タブ(1mm および 2mm 厚)を接着し、試験片組立の製作を完了する(図 1)。継手試験片組立は 4 体製作する。



図 1 一面せん断接着継手試験片組立

3. 引張試験

(1) 破断荷重

接着継手試験片組立を MTS 電気油圧サーボ万能試験機にセットし、変位制御により供試体が破断するまで引張荷重を加える。表 1 に引張試験結果を示す。破断荷重には大きなばらつきが見られる。

表 1 接着継手試験片—引張試験結果

試験片 No	破断荷重 N	幅 b mm	厚さ t mm	接着長さ mm
1	5257	25.7	0.85	21
2	5333	26.1	0.89	21
3	7382	25.7	0.92	21
4	10881	25.7	0.92	21

(2) 引張荷重とひずみ

試験片の被接着積層板接着部直近の表裏にひずみゲージを貼付(図 1)する。試験実施時のひずみ計測結果を図 2 及び図 3 に示す。

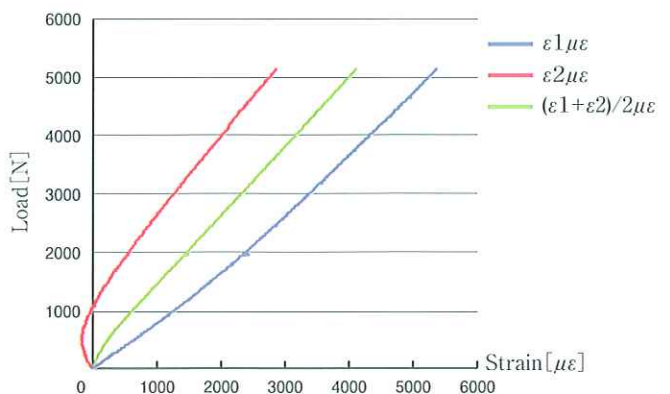


図 2 引張荷重—ひずみ線図 (試験片 No. 1)

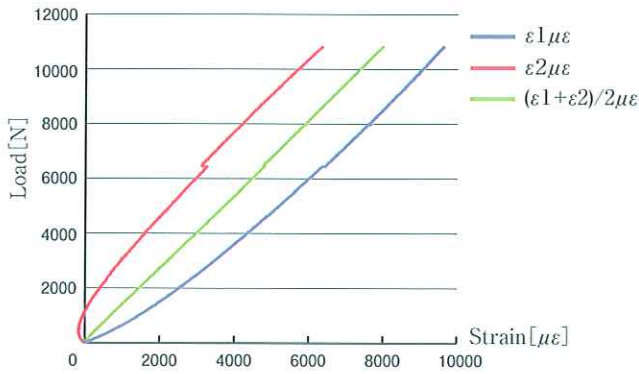


図3 引張荷重—ひずみ線図 (試験片 No. 4)

図2の試験片 No. 1 の計測結果より、表面のひずみ ε_1 と裏面のひずみ ε_2 は荷重負荷初期に差が生じ始め、曲げひずみが起きていることを示している。曲げひずみは荷重増大に従って一定の値に近づいき、引張ひずみ $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2$ が荷重増大に従って支配的となる。図3の試験片 No. 4 の計測結果も試験片 No. 1 と同様の傾向を示すが、破断荷重の 60% 付近で曲げひずみ増大が見られる。この現象はフィレットが外れる等が原因と想定される。

(3) 破面の観察

破断した接着面の詳細な観察を行なう。片側の破面をA面、もう一方の破面をB面と名付ける。破面には、被接着積層板とフィルム状接着剤との界面剥離(積層板/接着剤の界面剥離)、フィルム状接着剤の層内剥離、および被接着積層板内 $[-45^\circ/0^\circ]$ 層間剥離の3種類が見られる(図4～図7)。表2に各試験片毎のそれらの割合を示す。

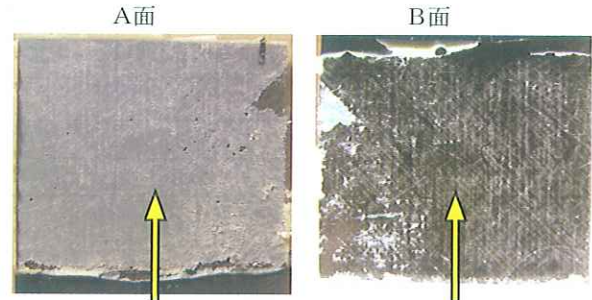
表3に接着強度および引張強度の2つの破断応力を示す。接着強度は表1の破断荷重を接着面積で除して求める。この値を接着剤の強度(メーカーが JIS K 6856 の引張 - せん断試験法に基づいて試験した値)と比較する。引張強度は表1の破断荷重を被接着積層板の断面積で除して求める。この値を被接着積層材の引張強度⁵⁾と比較する。

破面観察の結果、No. 1 試験片と No. 2 試験片の破面は被接着積層板接着面Aにほぼ全部のフィルム状接着剤が残る積層板/接着剤の界面剥離である(図4)。これら試験片の接着強度は接着剤メーカー試験値の 55% である(表3)。

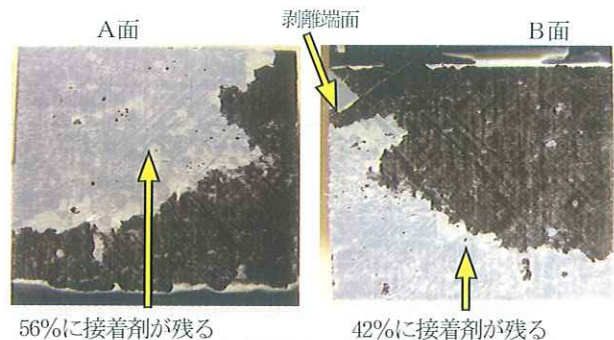
No. 3 試験片の破面は両方の被接着積層板(A面およびB面)にフィルム状接着剤がほぼ半分ずつ残る積層板/接着剤の界面剥離である(図5)。この試験片の接着強度は接着剤メーカー試験値のほぼ 78% である(表3)。

No. 4 試験片の破面は積層板/接着剤の界面剥離が

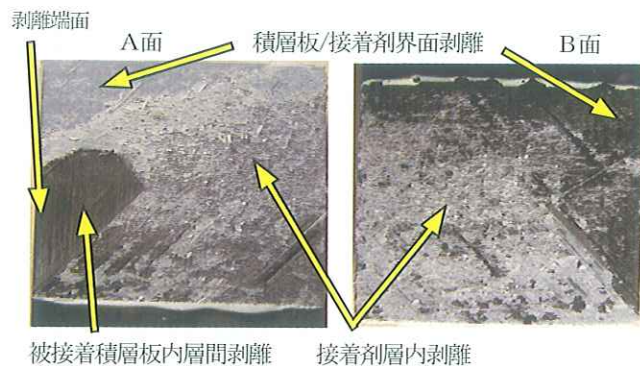
20%、フィルム状接着剤の層内剥離が 66%、積層板内 $[-45^\circ/0^\circ]$ 層間剥離が 14% である(図6)。この試験片の接着強度は接着剤メーカー試験値を上回る 115% である(表3)。



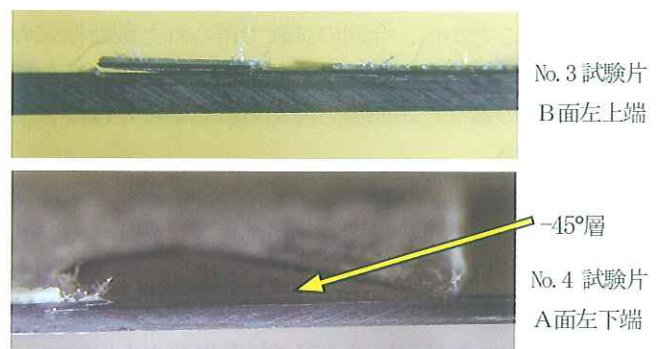
ほぼ全面に接着剤が残る 接着剤はほぼ残らず
図4 No. 2 試験片の破面—積層板/接着剤の界面剥離



56%に接着剤が残る 42%に接着剤が残る
図5 No. 3 試験片の破面—積層板/接着剤の界面剥離



被接着積層板内層間剥離 接着剤層内剥離
図6 No. 4 試験片の破面



被接着積層板 $-45^\circ/0^\circ$ 層間剥離端面
図7

表2 破面観察

試験片 No	破面観察(面積%)			
	フィルム状接着剤			被接着材
	A面 界面剥離	B面 界面剥離	層内剥離	積層板 層間剥離
1	92.7	7.3	0	0
2	98.2	1.4	0	0.4
3	55.8	42.2	0	2.0
4	17.6	2.2	66.4	13.8

表3 破断応力

試験片 No	破断応力			
	接着強度		引張強度	
	MPa	メーカ値%	MPa	積層板破断%
1	9.7	55	240	55
2	9.7	55	229	55
3	13.7	78	312	78
4	20.2	115	461	115

接着剤接着強度=17.6MPa、積層板引張強度=867MPa^⑤

4. 考察

引張試験の結果、一面せん断継手の接着強度をまとめると、No. 1、No. 2試験片に見られるフィルム状接着剤が片方の被接着積層板に残る積層板/接着剤界面剥離が一番弱く、No. 3試験片に見られる両方の被接着積層板にフィルム状接着剤が残る積層板/接着剤界面剥離は次に弱い。No. 4試験片に見られるフィルム状接着剤層内剥離の接着強度が一番強く、接着剤の持つ接着強度および被接着積層板層間剥離(-45°/0°層間)を生ずる強度レベルに達している。この破断様式で剥離することが一面せん断継手の目指す接着強度となる。次に試験片により異なる破断様式が生じた原因を考える。No. 1～No. 4試験片を製作する際の接着工程には手作業ではあるもののほとんど差がなく、また同じ工程で混合した2液性エポキシ接着剤を使用している。このことから、今回の試験で得られた破断様式の差異は、接着剤をキャリアに塗りこむ工程での接着剤の量などが原因と考えられるが特定はできていない。

参考文献 2) では一面せん断接着継手の破断様式と接着強度の関係を述べている。使用するプリプレグはCycom 方向材5276-1/G40-600-24K、積層構成は[45°/0°/-45°/90°]_{3s}、使用する場合の接着剤はFM300Kであり、接着工程で接着層厚さを0.092mmにコントロールしている。4種類の異なる接着工程

で一面せん断接着継手を製作し、引張試験を行っている。接着剤なしでプリプレグ積層品どうしをコキュアした接着強度は20.7MPaで最も高く、被接着積層板の[45°/0°]層間剥離がほぼ全面に見られる。接着剤を挟んでプリプレグ積層品どうしをコキュアした接着強度は17.5MPaとなり、積層板の[45°/0°]層間剥離と積層板/接着剤の界面剥離が混在している。接着剤による積層板/積層板二次接着継手の接着強度は18.3MPaとなり、積層板[45°/0°]層間剥離と積層板[45°]層内剥離が混在している。接着剤を挟んで硬化したプリプレグ積層品/積層板二次接着継手の接着強度は12.2MPaと最も低く、ほぼ全面に積層板/接着剤の界面剥離が見られる。これらの接着強度と破断様式の間関係を、本報告の引張試験結果(表2及び表3)と比較すると同じ傾向になり、本報告の試験結果は正しいと言える。しかし、同じ工程で製作した試験片にもかかわらず破断様式が異なり、かつ高い強度が得られる破断様式の試験片を安定して製作できないことから、手作りのフィルム状接着剤はこのままでは使用できない。

5. まとめ

航空機に一般的に使われる複合材料構造が何らかの原因で損傷を受けた場合のパッチ接着修理を想定して、手作りフィルム状接着剤による積層板/積層板の二次接着継手を製作し、引張試験を行った。その結果、接着部の破断様式により接着強度が大きく異なり、安定して高い強度の得られる接着工程を確立できていないことが分かった。

今後行う試験では接着剤の厚さがコントロールできる市販の航空機用フィルム接着剤を用いて、積層板/積層板の二次接着を行う事にしたい。

今回の研究を行うにあたりご指導頂いた九州大学応用力学研究所基礎力学部門複合連続体力学分野の高雄善裕教授、汪文学准教授および松原監壯係長に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Kwang-Soo Kim, Yeong-Moo Yi, Gwang-Rae Cho, Chun-Gon Kim: Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints; Composite Structure 82 (2008) 513-520
- 2) Min-Gyu Song, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Jai-Hyun Byun, Min-Hwan Song: Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints; Composite Structures(2009)
- 3) 中村俊一郎: CFRP 積層板の製作; 第21号(2009)pp.11-16
- 4) 中村俊一郎: CFRP 修理供試体の製作; 第22号(2010)pp.-
- 5) 中村俊一郎: CFRP 試験片の引張強度; 第21号(2009)pp.17-21 (2011.4.15 受付)