

CFRP修理供試体の製作

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

Manufacture of Repaired CFRP Panels

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

Composite materials, especially carbon fiber reinforced plastic (CFRP), has been widely used in the airplane structures. During the airplane operation on the ground, the structures made by CFRP are damaged in the ramp accidents or incidents. If the damage is limited to the repairable area, a repair should be considered. Several types of repair will be intended. In this paper, repair of damaged fuselage panel made by CFRP laminate is considered. Four repair methods are selected. In order to compare these methods, test panels are manufactured. These are 108mm wide CFRP laminates which are cut out to have a square hole, then repaired using bonded small CFRP patch, bonded large CFRP patch, fastened aluminum patch or fastened titanium patch. In this paper, the manufacturing times of repair methods are counted and each comparative merits and demerits are discussed.

Key Words: CFRP laminates, repair method, bonded CFRP patch, fastened aluminum patch, fastened titanium patch, manufacturing times

1. はじめに

航空機に一般的に使われるようになった複合材料は、金属材料に比し比強度・比剛性が大きく軽量化が期待され、また耐腐食性もすぐれており、使用範囲が飛躍的に拡大されてきた。使用範囲が拡大されるにつれ、運用中に損傷を受ける部位も増え、その修理も重要な課題となってきた。民間航空機にあっては修理等により航空機が運航出来ない日数・時間を極力減らすことが重要であり、損傷の程度に応じ、何時・如何に修理するかが検討され実施されてきた。万一、損傷を受けた場合は、当面、簡易的修理を短期間で行って飛行機が運航できない日数を

運航に支障のないレベルにとどめ、恒久的修理は長い修理日数を費やすことができる定期修理で行う事が望まれる。どのような簡易的修理を行えばこの要求にそえるのか多くの研究がなされているものの、修理の課題は依然として残っている。そこで著者は簡易的修理としてファスナ修理と接着修理に注目し研究を実施している。

複合材積層板で作られた胴体外板が空港内でのアクシデントまたはインシデントにより損傷を受けたと想定し、この損傷部は切取られ、パッチ当て修理を行うものとする。本報告では、この修理を考えた4種類の試験供試体を製作し、修理作業に要する時間の測定を行い、これらを比較しその優位性を検証する。

2. 修理対象および修理法

中型民間旅客機胴体構造一般部の代表として炭素繊維強化複合材 (CFRP) 積層板の外板を取り上げる。この外板が損傷を受けたと想定し、これを修理対象とする。この損傷は切欠き孔をあけて切り取られ、小型 CFRP 積層板パッチ (小型 CFRP パッチ) の接着、恒久 CFRP 積層板パッチ (恒久 CFRP パッチ) の接着、アルミニウム板パッチ (アルミパッチ) のファスナ結合、またはチタン板パッチ (チタンパッチ) のファスナ結合の4つの方法のいずれかで修理される。

3. 修理供試体

供試体は、製作した厚さ0.89mmのCFRP積層板¹⁾を被修理板とする。積層板は一方方向性プリプレグを擬似等方性 $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ に積層し加熱・硬化させたものである。被修理CFRP積層板の大きさはファスナによるパッチ修理を想定し幅108mm、長さ270mmとする。損傷除去を模擬した切欠き孔は42mmx68mmとする。接着修理に用いるCFRPパッチは擬似等方性積層板、厚さ0.89mm¹⁾、幅108mmとする。小型CFRPパッチは長さ62mm (切欠き孔上下の接着長さは10mm)、恒久CFRPパッチは長さ84mm (切欠き孔上下の接着長さは21mm)である。接着はエポキシ接着剤EP-34B (共和電業製)で行い、重り加圧・オープン加熱で硬化させる。ファスナ修理に用いるパッチの大きさは幅108mm、長さ114mm (切欠き孔上下の接合長さは36mm)、厚さはアルミパッチが1.6mm (0.063in.)、チタンパッチが0.64mm (0.025in.)とする。ファスナ結合は4.8mm (3/16in.)径のチタンファスナ/アルミカラーを用いる。

3. 使用設備等¹⁾

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が所有する下記設備を使用した。

- (1) コンポジットカッター MC-453 切断機
CFRP 積層板¹⁾を被修理板の大きさに切断する。
- (2) シアリング
切断加工を行う。
- (3) ボール盤
ドリル孔加工を行う。
- (4) フライス盤
切り欠き孔加工を行う。
- (5) 複合材料積層板作製装置
CFRP パッチは下記の器材を用いて製作する。
 - a. オートクレーブ (加熱・加圧用の圧力容器)
 - b. オートクレーブ制御盤

- c. 真空ポンプ
- d. コンプレッサー
- e. 冷却設備
- (6) オープン
CFRP パッチと被修理板を加熱硬化し接着する。
- (7) マシンバイス
フライス盤又はボール盤での被加工品を固定する。
- (8) 作業台、作業補助具、副資材

4. 製作手順および作業時間実績

- (1) 被修理 CFRP 積層板の損傷除去を模擬した切欠き孔の加工
: 335 分; 孔加工の準備 285 分 (アルミ板およびアクリル板) + 孔加工 50 分 (CFRP 積層板 10 枚を同時加工)
 - a. 被修理 CFRP 積層板の両側面を、マシンバイスで固定できる様、コンポジットカッターで真直ぐに切断する。
 - b. 被修理 CFRP 積層板と同寸 (幅および長さ) のアルミ板 (厚さ 3mm) を切出し、この板に切欠き孔の位置を卦書く。
 - c. 被修理 CFRP 積層板と同寸のアクリル板 (厚さ 15mm) を切り出す。
 - d. アルミ板、被修理 CFRP 積層板 (10 枚)、アクリル板の順で計 12 枚の板を重ねて組合せ、マシンバイスに固定する。
 - e. マシンバイスをボール盤にセットし、板組合せの4箇所²⁾にφ5mm孔を超硬ドリルであけ、ボルト・ナットで共締めする。



図1 損傷除去模擬切欠き孔の加工

- f. マシンバイスに固定した板組合せをフライス盤にセットし、切欠き孔位置の4隅にφ10mm下穴を超硬ドリル (OSG製D-GDN) であける。下穴はCFRP

積層板を突き抜ける深さとする。続いて4隅の下穴を結ぶ直線加工を $\phi 10\text{mm}$ エンドミル(OSG製ヘリボーンカッターD-HBC)で行い、損傷除去を模擬した矩形の切欠き孔をあける。

(図1、図2、図3)

- g. 矩形の切欠き孔をあけた被修理CFRP積層板の4辺をコンジットカッターで修理供試体の正寸(幅108mm、長さ270mm)に切斷する。

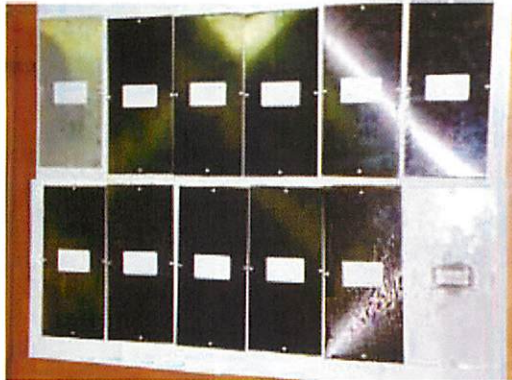


図2 修理孔加工後の被修理CFRP積層板

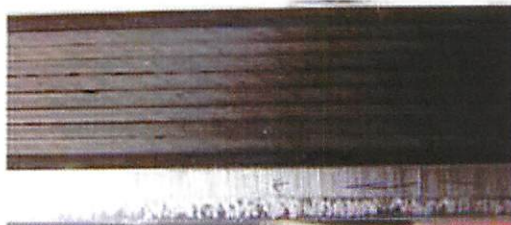


図3 修理孔加工面

(2) アルミパッチおよびチタンパッチの加工

: 160分/(4枚同時)

- アルミパッチ(2024-T3Sheet 厚1.6mm) 2枚、およびチタンパッチ(ASTM-T-9046A Sheet 厚さ0.64mm) 2枚をシアリングで正寸(幅108mm、長さ114mm)に切斷する。サンドペーパーで端面のバリ取りを行う。
- アルミパッチ1枚にファスナ修理用孔位置を卦書く。このパッチの下にアルミパッチ1枚およびチタンパッチ2枚を重ね、マシンバイスに固定する。
- マシンバイスをフライス盤にセットし、24か所のファスナ用 $\phi 3.95\text{mm}$ 下孔を超硬ドリル(OSG製VPH-GDN)であける。

(3) アルミパッチ修理供試体およびチタンパッチ修理供試体 : 212分/1体(下記a. b. c.の合計)

- 被修理CFRP積層板のファスナ用下孔加工 : 127分/(4枚同時)

イ) 塩化ビニール板(厚さ1mm)の上に、ファスナ修理を行うCFRP積層板4枚を重ね、その上にアルミパッチ1枚を修理位置(切欠孔上下の重なり部が36mmになる位置)に置き、マシンバイスに固定しする。

ロ) マシンバイスをフライス盤にセットし、アルミパッチのファスナ用下穴をガイドにして、CFRP積層板4枚にドリル(OSG製TDR)で24箇所の $\phi 3.95\text{mm}$ 下孔をあける。

b. CFRP積層板の修理ファスナ用本孔加工

: 43分/1体

イ) 下孔をあけたCFRP積層板の修理位置に、同じく下孔をあけたアルミパッチを重ね、剥離防止用塩化ビニール板の上に置き、マシンバイスに固定する。

ロ) マシンバイスをボール盤にセットし、修理用ファスナの本孔24箇所をリーマ孔(OSG製CRM)加工する。(図4、図5、図6)



図4 ファスナ孔の加工

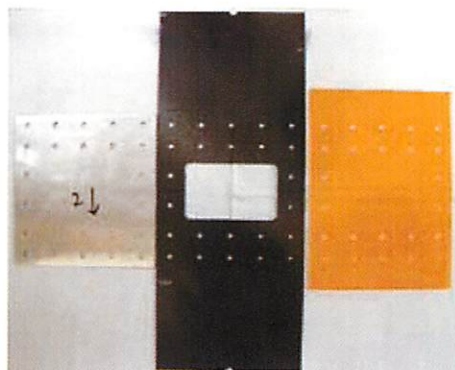


図5 ファスナ孔加工後の被修理CFRP積層板



図6 ファスナ孔加工面

c. 修理供試体組立
: 42分/1体

- イ) 被修理 CFRP 積層板側からファスナを挿入し、アルミパッチ側からワッシャおよびアルミカラーを取付ける。六角レンチ HLD2509B でファスナ頭を保持し、スパナ S2-5/15x3/8 にてカラーのナット部を切断するまで回してファスナを装着する。(図7、図8)
- ロ) ファスナ24本が回転することなく装着されていることを確認し、アルミパッチファスナ修理供試体製作を完了する。

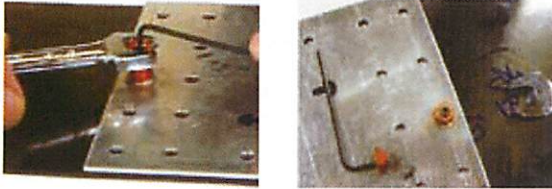


図7 ファスナ装着作業

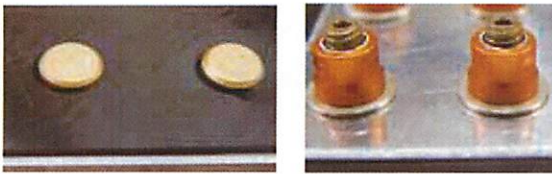


図8 ファスナ装着詳細

- d. 同様の作業手順でアルミパッチファスナ修理供試体をもう一体、チタンパッチファスナ修理供試体を2体製作する。(図9、図10)

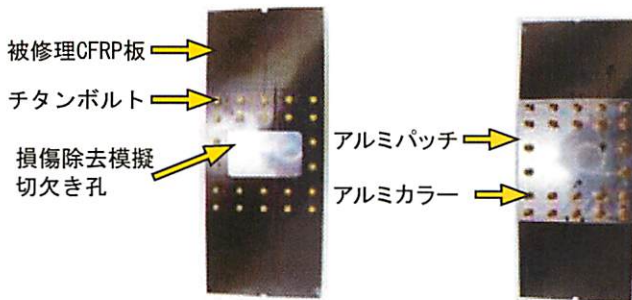


図9 アルミパッチファスナ修理供試体

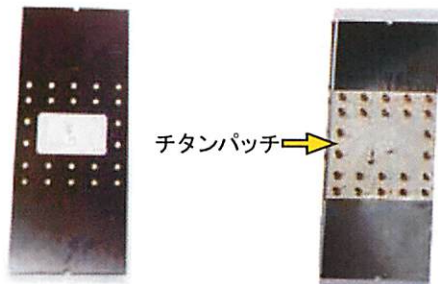


図10 チタンパッチファスナ修理供試体

(4) CFRP パッチの加工(その1)

: 663分/1枚 (硬化サイクル時間を含む)

被修理 CFRP 積層板を治具にして、小型 CFRP パッチ(幅 108mm x 長さ 62mm)および恒久 CFRP パッチ(幅 108mm x 84mm)を製作する。

a. CFRP プリプレグ積層品

被修理 CFRP 積層板に使用したのと同じ一方向材プリプレグを $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]$ の順で積層する。(図11)

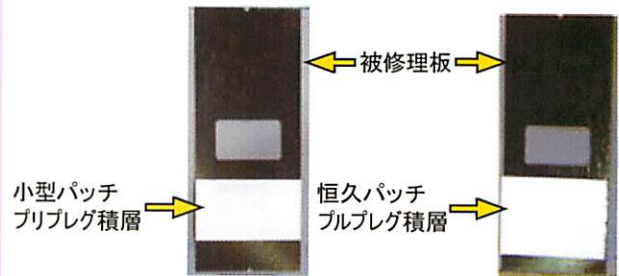


図11 プリプレグ積層品

b. CFRP パッチの加熱・加圧硬化

被修理積層板と同じ板厚の CFRP 埋め板を切出し、すみR加工をする。: 55分/1枚

被修理 CFRP 積層板の切欠き孔に CFRP 埋め板をはめ込み、プリプレグ積層品を修理位置(小型 CFRP パッチは切欠き孔上下の接着長さは 10mm の位置、恒久 CFRP パッチは切欠き孔上下の接着長さは 21mm の位置)に置き、当て板およびダムで位置を固め、真空引きで固定し、オートクレーブで加熱・加圧し硬化する。(図12)

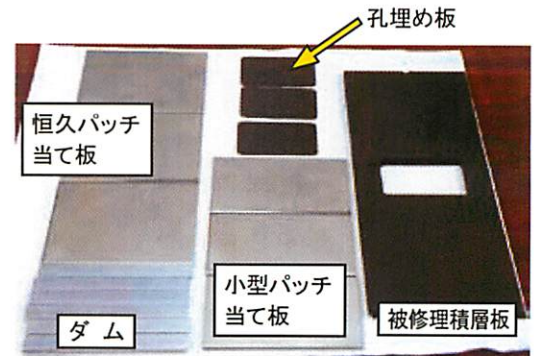


図12 パッチの成型具

c. CFRP パッチ(1)

当初はパッチを加熱・硬化する際のプリプレグ樹脂で被修理積層板に接着して修理する、接着剤の無いコキュアパッチ修理を目指した。しかしこの方法は CFRP パッチと被修理 CFRP 積層板との接着が不十分であることが判った。

そこで、加熱・硬化したコキュアパッチを被修理 CFRP 積層板より剥がし、これを CFRP パッチ(1)とする。

- (5) CFRP パッチの加工(その 2)
 - : 501 分/1 枚 (硬化サイクル時間を含む)
 - 加工した CFRP 積層板¹⁾から小型 CFRP パッチ(幅 108mm x 長さ 62mm)および恒久 CFRP パッチ(幅 108mm x 84mm)を製作する。
 - a. 被修理 CFRP 積層板の製作と同一行程でパッチ用の積層板を製作する。: 446 分¹⁾
 - b. 積層板をパッチサイズへ切出し、CFRP パッチ(2)として製作する。: 55 分(4 (4) b 項)

- (6) CFRP パッチ接着修理供試体の製作
 - (その 1) : 被修理積層板を治具にして製作した CFRP パッチ(1)を接着剤で二次接着するもの。
 - (その 2) : 積層板から切出して製作した CFRP パッチ(2)を接着剤で二次接着するもの。
 - : 243 分/1 体 (オープンキュア時間を含む)
 - a. 被修理積層板とパッチの接着面を軽くサンディングし活性化させ、接着面にエポキシ接着剤EP-34B ((株)共和電業製)を塗布し、パッチを修理位置に重ね合わせる。(図 1 3)
 - b. 接着剤の硬化は接着部の重石加圧(約30 k Pa)と、オープン加熱(80℃・2時間)で行う。(図 1 4)

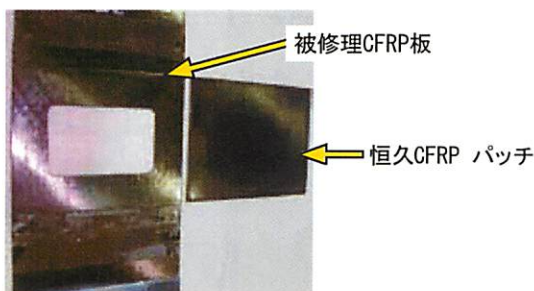


図 1 3 被修理板とパッチの接着

5. 製作時間

表 1 に修理供試体の製作時間実績を示す。時間は初めて製作した筆者が、作業指導を受け、要し

表 1-1 ファスナ修理供試体製作時間実績 (単位: 分)

ファスナ修理供試体	損傷部の除去	修理パッチ	ファスナ修理	合計 (1体当り)
	除去孔加工用治具の製作 損傷除去孔の加工	パッチの製作 ファスナ用下孔あけ	ファスナ用下孔あけ ファスナ用本孔あけ ファスナ装着	
アルミパッチファスナ修理	335	160	212	707
チタンパッチファスナ修理				

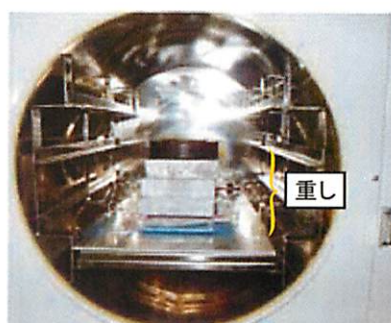


図 1 4 オープン加熱による接着剤の硬化

CFRP パッチ修理供試体(その 1)を図 1 5 および図 1 6 に示す。

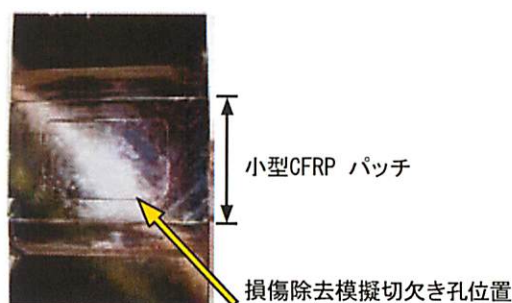


図 1 5 CFRPパッチ修理供試体(その 1)
-小型CFRPパッチ

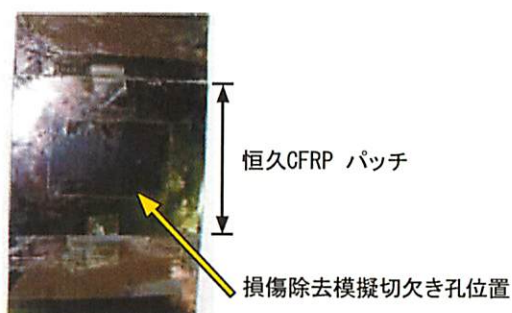


図 1 6 CFRPパッチ修理供試体(その 1)
-恒久CFRPパッチ

た時間である。また、作業にあたっての必要な準備が整った状態での作業である。

表1-2 接着修理供試体製作時間実績 (単位:分)

接着修理供試体	損傷部の除去	修理パッチ	接着修理	合計 (1体当り)
	除去孔加工用治具の製作 損傷除去孔の加工	CFRPパッチ(1)の加工 または CFRPパッチ(2)の加工	接着前処理 加熱加圧硬化	
CFRPパッチ接着修理供試体(その1)	335	663 ^{a)} (423)	243 ^{b)} (93)	1241 ^{c)} (851)
CFRPパッチ接着修理供試体(その2)		501 ^{a)} (261)	243 ^{b)} (93)	1079 ^{c)} (689)

a): 硬化サイクル非拘束
240分を含む

b): オープンキュ
ア非拘束 150分
を含む

c): 非拘束時間
を含む

6. 成果

- CFRP 積層板のファスナ修理供試体および接着修理供試体を製作し、修理作業を習得できた。
- 損傷除去からパッチ修理までに要する時間はアルミパッチもしくはチタンパッチによるファスナ修理が707分(11.8時間)、CFRPパッチ(1)による二次接着修理が851分(14.2時間)であった。
- CFRPパッチ(1)の加工は、損傷部切欠孔のある被修理積層板を治具にして行ったため423分を要した。これを金属パッチと同じく被修理積層板を治具にせず積層板からCFRPパッチ(2)を加工する場合に置き換えると、パッチの加工時間は261分となる。従ってCFRPパッチ(2)による二次接着修理の時間は689分(11.5時間)となる。このように、被修理面が複雑でなく、CFRPパッチの製作には被修理面を治具にしなくて良い場合には、CFRPパッチ二次接着修理のほうが金属パッチファスナ修理より少ない時間で行えることになる。なお、接着修理はこの外に作業者の非拘束時間としてCFRPパッチの加圧・加熱硬化に240分(4.8時間)、接着剤の硬化に150分(2.5時間)を要する。
- 接着修理方式²⁾としては接着剤を挟んだコキユアパッチ修理、接着剤がないコキユアパッチ修理、接着剤を用いた二次接着修理がある。今回は当初、接着剤がないコキユア修理を目指したが、被修理積層板とCFRPコキユアパッチとの接着が不十分である³⁾ことが判明した。

7. まとめ

航空機に使われる複合材料構造が空港内での事故またはインシデントにより損傷を受け、この損傷を除去して修理する場合を想定した修理法を考えた。本報告では2種類のファスナ修理と2種類

の接着修理を行った修理供試体を製作し、その作業手順の取得と作業時間を得ることを主とした。修理を行うには1) 損傷部分を特定する検査、2) 修理設計、3) 修理作業、4) 修理が正しく行われていることを確認する検査の4過程からなる。

今回は3)の修理作業に関する部分について作業時間を得た。作業者の拘束時間はファスナ修理が12時間、接着修理が14時間と大差がなかったものの修理作業全体を考えると、この差は少ないものと考えられる。また、CFRPパッチの加工が被修理積層板を治具にして製作しなくて良い場合はファスナ修理と接着修理の作業時間は差がほとんどないことも判った。

なお、得られた作業時間は作業準備が整った状態で、新人作業者が作業手順の説明を受けた後、一人で製作したとの条件で得られたものである。従って慣熟度や協同作業による時間短縮は考慮されていない。

修理供試体を製作するにあたりご指導を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。

複合材料の加工に関し御指導をいただいた川崎重工業(株)航空宇宙カンパニーの指熊裕史様および、使用するドリルおよびルータでご指導を頂いたオーエスジー(株)の滝川義寛様に深く感謝いたします。

参考文献

- 中村俊一郎: CFRP 積層板の製作, 第21号(2009)pp.11-16
- 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
- 中村俊一郎,高雄善裕,汪文学,松原監壯: 航空機複合材料構造の修理法; 九州大学研究集会報告 21ME-S8, Jan.2010 (2010.4.15 受付)