

# CFRPパッチで接着修理したCFRP積層板の破損モード

中 村 俊一郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

## Failure modes of CFRP panels repaired by CFRP patch bonding

Shunichiro Nakamura

<sup>1</sup>Guest 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

**Abstract:** Recently composite materials, especially carbon fiber reinforced plastics (CFRP), are widely used in the airplane structures. The accidents or serious incidents may damage the CFRP structures. The damaged area should be repaired by removing it and bonding a CFRP patch. There, the strength will be recovered to the required levels. In this experimental study, CFRP panels with a squared hole were repaired by secondary bonding with a small or a large CFRP patch and their tensile strength tests were conducted. The results show that cohesive failure occurred and the reinforcement effects by the CFRP patch are achieved to the required strength levels. The failure modes of the tested panels are investigated in detail and specified.

**Keywords:** CFRP panels, CFRP patch, repaired, secondary bonding, cohesive failure, failure modes

### 1. はじめに

炭素繊維強化エポキシ樹脂複合材料(CFRP)は民間旅客機の主翼、胴体などの主要構造に大幅に使われるようになった。一方、民間旅客機は運航中に事故や重大インシデントによりさまざまな損傷を受ける。損傷部を修理する場合、損傷部分を切り取り、パッチを当て、初期の構造に要求される強度レベルに回復させる。パッチはファスナまたは接着で接合される。シングルラップあるいはダブルラップのような試験片レベルについては多くの研究がなされ<sup>1)2)</sup>、ファスナと接着の両方の継手に関し損傷モードが明らかにされている。そこで、本研究では実構造に近い接着修理構造の実験を行った。接着修理供試体はCFRP積層板に損傷部除去を模擬した長方形切欠孔をあけ、この部分にCFRP積層板製のパッチを二次接着したものとした。二次接着はフィルム接着剤を用いて行った。これに引張荷重を加え、破断時の強さを求めた。本報告では破断した供試体の破損部を詳しく観察した結果を示す。破損モードと破断に至るメカニズムは参考文献3)を参照されたい。

### 2. 供試体<sup>3)</sup>

被修理 CFRP 積層板(母材)は損傷を受けた中型旅客機胴体外板を想定したものとする。積層構成は擬似等方性  $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]_s$  である。プリプレグ 8 層を順に積層し、オートクレーブに入れ、6 気圧加えたまま  $180^\circ\text{C}$  で 2 時間加熱して硬化させる。硬化後の平均板厚は 0.89mm である。サイズは幅 108mm、長さ 270mm とする。プリプレグは三菱レイヨン製(東レ T800/EP:#3633 相当品)を用いる。

母材の中央にあけた切欠孔はすみ R 付き長方形とする。大きさは長さ 44.5mm、幅 68mm、すみ R は 5mm である。

パッチは母材と同じ積層構成の CFRP 積層板から切出したものである。小型と大型の 2 種類のパッチを製作する。小型パッチは長さ 64.5mm x 幅 108mm である。このパッチは切欠孔上下の接着長さが 10mm となる大きさであり、母材に働く胴体外板の与圧制限荷重を伝達する。大型パッチは長さ 86.5mm x 幅 108mm である。このパッチは切欠孔上下の接着長さが 21mm となり、母材に働く終局荷重(制限荷重の 1.5

倍)を伝達する。

接着修理は次の工程で行った。まず母材とパッチの被接着面を十分にサンディングし、溶剤で洗浄する。このことにより表面の脱脂と活性化および接着面積の増加が行われる。次に厚さ0.13mmのCytec製FM300Mフィルム接着剤(接着剤)を接着面の大きさに切断し、母材とパッチの間に挟む。これをオートクレーブに入れ、2気圧加えたまま175°Cで1時間加熱して接着剤を硬化させる。加圧・加熱工程でパッチ接着面の端には、接着剤の樹脂がはみ出すことにより三角形のフィレットが形成される。その形状は機体メーカーで行っている作業工程から得られるままとする。

以上の工程で、損傷を受けた母材を小型パッチで接着修理したパネル(Small-PP)と大型パッチで接着修理したパネル(Large-PP)の2種類を製作した。各パネルとも3体ずつ製作し、試験の供試体とした。Fig.1に供試体の形状、母材とパッチの積層方向および引張荷重の負荷方向を示す。Small-PPとLarge-PPとの両端チャック部は両面をGFRP板およびアルミ板のタブで補強した。

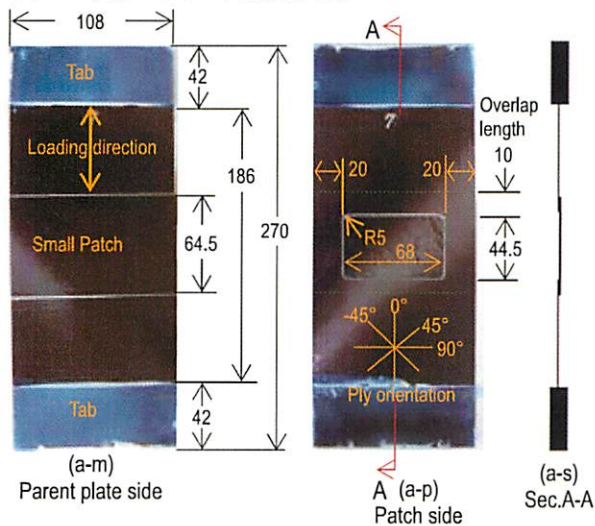


Fig.1(a). Bonding repair with small patch (Small-PP)

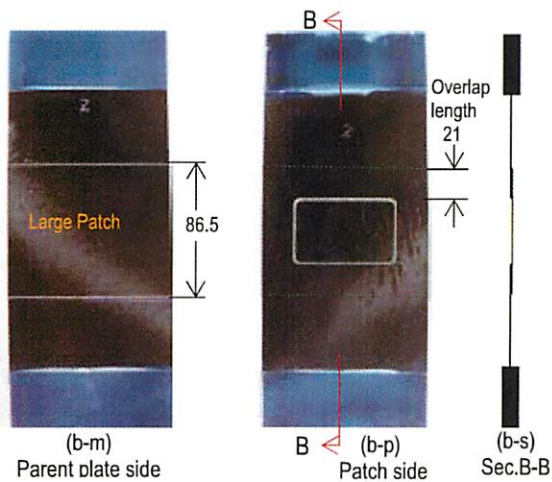


Fig.1(b). Bonding repair with large patch (Large-PP)

### 3. 引張荷重試験

供試体を MTS 電気油圧式サーボ万能試験機にセットし、変位制御 0.5mm/min. により引張荷重をパネルが破断するまで負荷した。破断荷重を Table 1 に示す。Small-PP(1)と(2)および Large-PP(1)と(2)の破断荷重は少しばらついているが、Small-PP は制限荷重の要求を満足し、Large-PP は終極荷重の要求を満足しており、修理の目的は達成される。

供試体が破断するメカニズムは次の様に得られた。負荷荷重が増加するとパッチと母材の接着面内に剥離が発生し、これが進展しパッチの補強効果が減少する。これに伴い母材の分担荷重が増し、切欠孔のすみR部を含む断面に加わる荷重が破断強度に達すると供試体は破断する<sup>3)</sup>。

Table 1 Tensile strength test results

修理法	接着修理供試体	
	Small-PP	Large-PP
CFRP パッチ	小型パッチ	大型パッチ
破断荷重 (KN)* (平均破断荷重x2/3***)	(1) 51.3**	(1) 61.6
	(2) 50.7	(2) 65.5
強度要求値 (KN)	制限荷重 27.20	終極荷重 40.80

\* 3体ずつ試験を実施した。Small-PPの1体はパッチの接着工程でパネルが振れた。Large-PPの1体は試験時にチャックが滑った。そのため、いずれも破断荷重が小さくなった。従って、データとして使える試験結果は各パネルとも2体ずつとなった。

\*\* Small-PP(1)の母材およびパッチに貼付したひずみゲージにより荷重-ひずみ関係を計測した。破断したSmall-PP(2)も同じ位置にひずみゲージを貼付し、荷重-ひずみ関係を計測した。両供試体の同じ位置でのひずみの変化はほぼ同じである。従って Small-PP(1)は破断に近い荷重まで負荷されたとみなした。

\*\*\* SAAB社が破断荷重のばらつきを考慮して定めた接着強度の軽減係数である<sup>4)</sup>。

Fig.2に Small-PP(2)および Large-PP(2)の破断状況を示す。図(a)の破断部AおよびBには、接着剤が母材とパッチの両方に残るような接着層内剥離、および母材の破断が見られる。図(a-p)に母材の破断方向を一点鎖線で示す。すみRから斜め上方へ約20度傾いて、母材の側端と結んでいる。図(b)に Large-PP(2)の破断状況を示す。破断部CおよびDには Small-PP(2)の破断部と同じ接着層内剥離および母材破断が見られる。Small-PP(2)と特に異なるのは、図(b-m)のC1部および図(b-p)のD1部に示す、剥ぎ取られるように生じた45°層内または45°/0°層間の剥離が母材に見られることである。これは、この部分ではパッチと母材との接着力が母材の層内または層間の接着力より強いことを示している。図(b-p)に母材の破断方向を一点鎖線で示す。すみ

R部から斜め上方へ約45度傾いて、母材の側端と結んでいる。

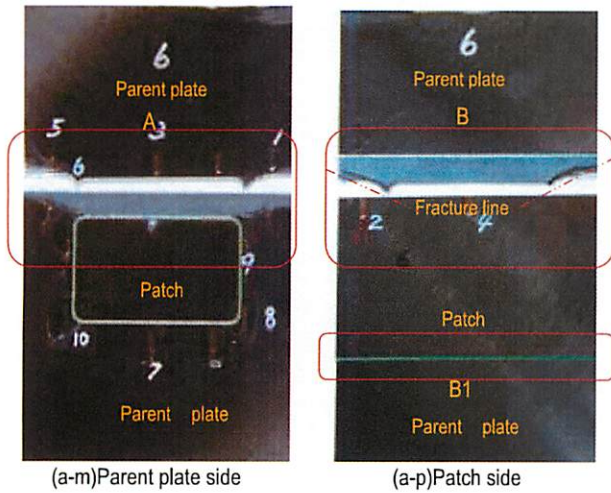


Fig.2(a). Overview of fracture area in Small-PP(2)

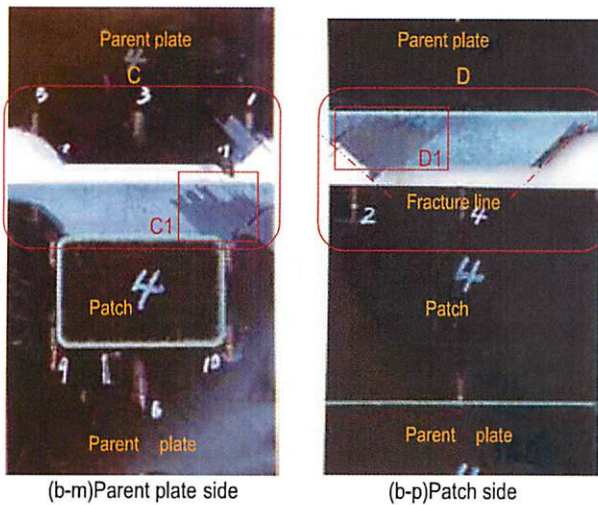


Fig.2(b). Overview of fracture area in Large-PP(2)

### 5. 破損部の内部損傷

破断した供試体を拡大鏡により観察し、内在する損傷の有無を調べた。

Fig. 3に Small-PP(1)の損傷を示す。図(a)のパッチ下方縁E部にフィレット内部損傷の可能性があると観察された。損傷を詳細に調べるため、E部から幅約3mm、長さ24mmの切片を切出し、樹脂に埋め込んで固定した上で、切断面を研磨した。図(a)に中央断面E1を示す。図(b)にこの研磨した面の30倍に拡大した顕微鏡写真を示す。右半分が母材であり、左上の矩形部分がパッチである。左下の台形部分はフィルム接着剤の樹脂がはみ出して出来たフィレットの一部である。また、左下の三角部分は切片の埋め込みに使用した樹脂である。パッチの下部右側面は45°層がサンディングにより削られており、挟まれた接着剤は楔状になっている。図(b)にE2部分を

示す。この部分を200倍に拡大して図(c)に示す。パッチの右側面下部の近傍に200μm程の接着剤樹脂亀裂が観察される。この樹脂亀裂は図(a)のE部全幅に渡り観測されるが、E1に代表される中央部分の樹脂亀裂が長く、中央部分から離れるに従い100μm以下になる。同様の樹脂亀裂は Fig. 2(a)に示す Small-PP(2)のB1部にも観察されており、長さは100μm以下である。

この樹脂亀裂の発生状況は、Fig. 2(a)に示す Small-PP(2)の破断部分Bでも同様と考えられ、損傷は母材とパッチの接着中央部分から発生し破断に至ったことが判る。

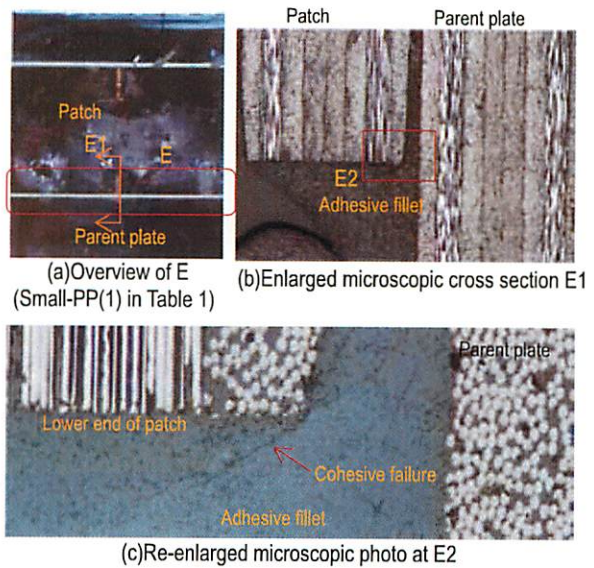


Fig.3.Microscopic failure mode of Small-PP(1)

Fig. 4に Large-PP(2)の損傷を示す。図(a)に拡大鏡によりフィレット割れが観察されたF-p部およびG-p部を示す。また内部損傷を観察した断面F1、F2、G1、G2およびフィレットの割れを観察した部位F3を示す。図(b)は部位F3を30倍に拡大した写真である。上部の白色部分はパッチを示し、下部の緑色部分はフィレットを示す。パッチ端から280μm離れた位置に割れが有る。同様のフィレット割れは Large-PP(1)でも見られた。内部損傷の観察は Small-PP(1)の場合と同様の手順で行った。図(b)~(e)に観察した断面F1、F2、G1、G2のフィレットを含む部分を30倍に拡大した顕微鏡写真を示す。各写真とも右半分は母材、左上半分はパッチである。左下の三角部分は Fig. 3(b)と同じく切片の埋め込みに使用した樹脂である。図(a)のパネル側端に近い断面G1、F1では、パッチと母材との接着面内の樹脂亀裂がパッチ右側面下部の近傍を通過してフィレット割れに繋がっている。図(a)のパネル側端から離れた断面G2、F2では、パッチ右側面下部の近傍に300μm程の接着剤樹脂亀裂が観察される。この樹脂亀裂はパネル側端から離れるほど小さくなり、図(a)の中央部Hになると100μm以下となる。

図(a)の断面G 1とG 2およびF 1とF 2の位置は接着されたパッチの母材の長方形切欠孔から外れた部分にあたり、この部分の損傷が中央部より大きいことを示している。この樹脂亀裂の発生状況は、Fig. 2(b)に示す Large-PP (2)の破断部分Dも同様と考えられ、損傷は母材とパッチの長方形切欠孔を外れた接着部分から発生し、破断に至ったことが判る。

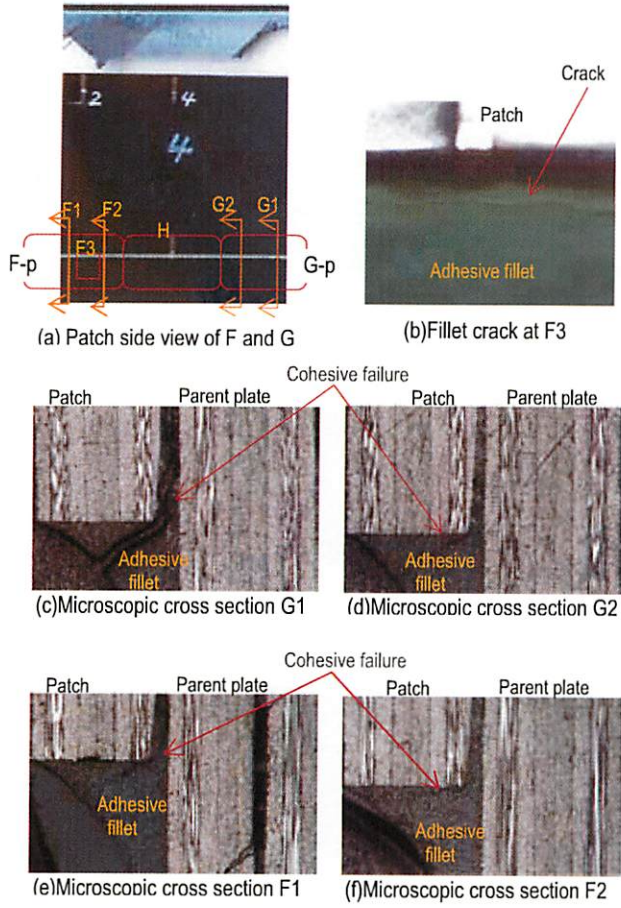
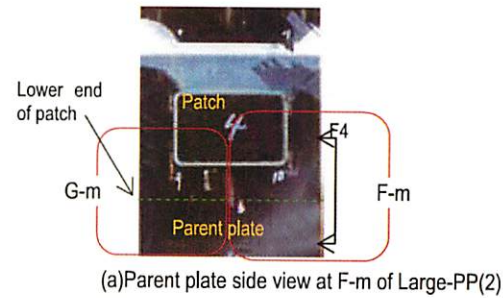


Fig.4. Microscopic failure mode at F-p and G-p of Large-PP(2)

Fig. 5にFig. 4と同じLarge-PP (2)を母材側から見た写真を示す。図(a)のF-m部を矢視F 4から観察すると、図(b)に示すように母材の割れが見られた。観察は図(b)に示すF 3 a～F 3 eの位置に相当し、側端から3mm内側の断面で行った。30倍に拡大した顕微鏡写真を図(c)～(g)に示す。なお、図(e)はFig. 4(e)を左右反転して示したものである。観察された母材の内部損傷は、図(c)、(d)に示す①破断部分から続く母材接着層側の0°層内亀裂、図(d)に示す②供試体の自由縁につながる接着層より遠い側の0°層内亀裂、図(g)に示す③0°/45°層間剥離、図(e)、(f)に示す④45°/90°層間剥離および図(g)に示す⑤45°層内亀裂である。②～⑤の損傷は一つに繋がるモードであり、破断部に近いところから②→④→⑤→③と移動する損傷である。更に、図(e)に示す⑥接着層内の樹脂亀裂がフィレット表面に達する割れが観察される。①、②～⑤および⑥の3つの損傷モードはそれぞれが独立しており繋がっていない。



(a)Parent plate side view at F-m of Large-PP(2)

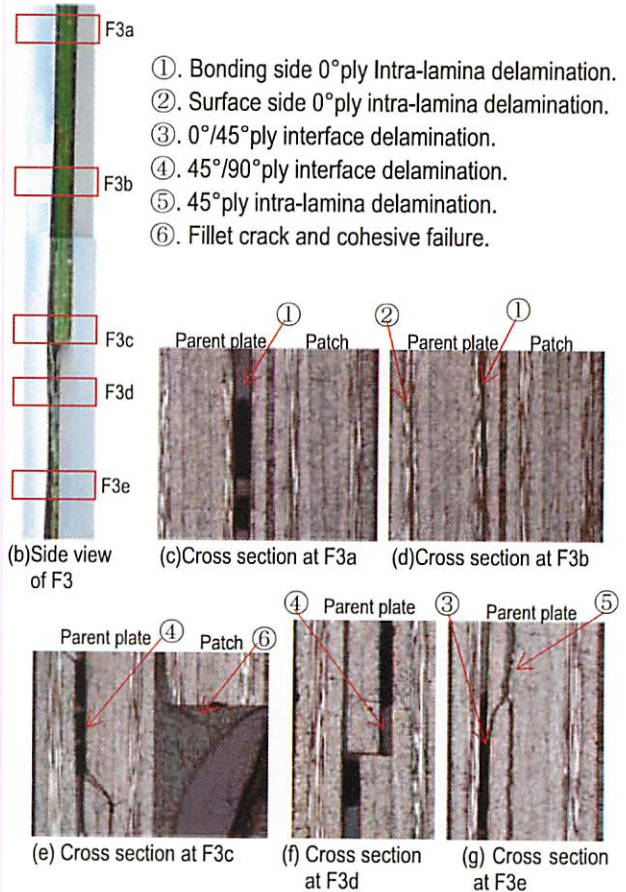


Fig.5. Microscopic failure modes at F-m and G-m of Large-PP(2)

Fig. 4とFig. 5に示す内部損傷の観察をFig. 5(a)に示すF-m部およびG-m部の全面について行った。Fig. 6に観察された内部損傷の全容を示す。Fig. 5(a)のF-m部では損傷①が母材の側端にあたる自由端から長方形切欠孔の縁まで達している。損傷②～⑤は接着されたパッチの下方縁上下の自由端から下方縁中央方向に14mmの位置まで広がっている。また、損傷⑥は接着層内の樹脂亀裂が自由端からパッチ下方縁に沿って中央に伸びているものの、亀裂の大きさは急速に減少し、同時にフィレット表面に到達しなくなる。自由端から7mm中央に入った位置ではFig. 4(f)に示すパッチ右側面下部近傍に沿う接着剤樹脂亀裂が有るのみになる。この樹脂亀裂の長さは100μm以下と短くなるがパッチ下方縁の中央部まで続いている。Fig. 5(a)のG-m部では損傷⑥が自由端から14mm中央に入った位置まで観察され、これに続くFig. 4(d)の樹脂亀裂はパッチ下方

縁の中央部まで続いている。しかし損傷①と損傷②～⑤は観察されない。

損傷①および②～⑤がF-m部のみにあることは、その上部にある Fig. 2(b)のC1部およびD1部の損傷で説明したように剥ぎ取られるようにして生じた母材の破断が影響したものと考えられる。損傷⑥のパッチと積層板の接着層内の損傷は自由端から離れるに従い大きく減少し、フィレットの割れのみが自由端から遠くなくても生じている。このことはCFRP積層板の引張試験片で見られる自由端剥離と類似の現象とも考えられる。

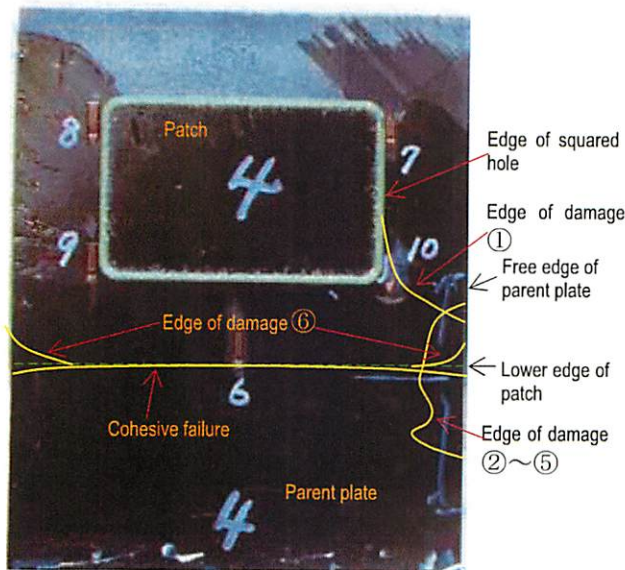


Fig.6. Failure modes of Large-PP(2)

## 8. 結言

長方形孔をもつ被修理CFRP積層板(母材)に、同じ層構成のCFRPパッチ(パッチ)をあて接着修理したCFRPパネルに破断が生じるまで引張荷重を加えた。この試験結果から、小型パッチと大型パッチによる接着修理の目的は達成できた。また破断部分の観察を行い、破断のメカニズムを解明した。これらの結果は参考文献3)に示す。

本報告では大型パッチ接着修理供試体(Large-PP)を詳細に観察し、破損部の内部損傷範囲がどこまで及んでいるかを明らかにした。損傷は母材および接着層に見られた。母材の損傷は長方形切欠孔の片側で母材が剥ぎ取られる様に破断した側にも観察されることから、母材が破断した影響と考えられる。接着層の損傷はパッチと母材の接着端に生じている。この位置はシングルラップ継手のせん断およびピール方向の応力集中部と一致している。また、自由端の近くでは接着層内の樹脂亀裂がフィレット表面まで達する損傷が観察される。しかし自由端から離れるに従い、母材に接着されたパッチの接着面角近傍のみに接着剤樹脂亀裂が観察されるようになる。この樹脂亀裂の長さは母材の長方形切欠孔から外れた

位置か切欠孔のある位置かにより異なり、また小型パッチ接着修理か大型パッチ接着修理かによっても異なる。これらの損傷の解明には接着層のせん断応力やピール応力の解析が必要となる。

## 9. あとがき

本研究を実施するに当たりご指導いただいた九州大学応用力学研究所新エネルギー力学部門の高雄善裕教授、汪文学准教授、松原監壯係長に深く感謝致します。またパッチの接着を行った川重岐阜エンジニアリング(株)の原田信説様、田島 学様に深く感謝致します。

### 参考文献

- 1)Min-Gue Song, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Jai-Hyun Byun, Min-Hwan Song, Sang-Joon Shin, Tae-Joo-Lee. Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints、Composite Structures 92(9)(2010)2194-202
- 2) W.S.Arnold, I.H.Marshall & J.Wood. Optimum Design Considerations for Mechanically Fastened Composite Joints、Composite Structures 16(1990)85-101
- 3)ShunichiroNakamura, Terutake Matsubara, YoshiroTakao, Wen-Xue Wang. Fracture of CFRP panels repaired by bonding CFRP patch. 投稿中
- 4)航空宇宙工学便覧 第3版 pp477