研究論文

FRP/金属ハイブリッド積層板のピン機械継手近傍の応力に
及ぼす材料定数と塑性の影響高祖 京介^{*1}, 高雄 善裕^{*2}

(2011 年 12 月 6 日受付)

Influences of Material Properties and Plasticity on the Stresses around a
Pin Joint in Fiber Reinforced Plastics/Metal Hybrid LaminatesKiyosuke KOSO^{*1} and Yoshihiro TAKAO^{*2}

(Received December 6, 2011)

Abstract: Fiber reinforced plastics/metal hybrid laminates are composites laminated by fiber reinforced plastics (FRP) and light metals such as aluminum alloy. GLARE, one of the fiber reinforced plastics/metal hybrid laminates laminated by glass fiber reinforced plastics (GFRP) and aluminum alloy, has been applied to an upper fuselage panel in an Airbus A380. The precise stress distribution of the out of plane components has not been discussed around the contact hole boundary, though most of papers on the mechanical joint of GLARE deal with strength and damages. This paper deals a complicated non-linear analysis including elastic-plastic mechanical response, anisotropic material properties, lamination, contact and friction. Compared with the previous results about CARALL by the same author, it was obtained that some parameters, such as contact and friction between pin and the hole of laminates, affect the distribution and magnitude of stresses. Particularly, it is important that bend in thickness direction caused by plasticity of aluminum layer and resistance to bend by longitudinal stiffnesses of FRP layer affects the out of plane normal stresses of the interface between AL layer and FRP layer or between FRP layers. On the basis of these results, we discussed the initial failure of a pin joint occurred at the part of net-tension of the joint.

Key words: GLARE, Pin joint, Finite element methods (FEM), Material properties, Plasticity

1. 緒 言

繊維強化樹脂 (fiber reinforced plastics; FRP) は、比強度と比剛性、さらに疲労強度特性に優れている。FRP の主なものには、炭素繊維強化樹脂 (carbon fiber reinforced plastics; CFRP) やガラス繊維強化樹脂 (glass fiber reinforced plastics; GFRP) がある。しかし、界面強度が低く面外方向の低速衝撃に弱いという欠点を有する。そこで、高強度で低速衝撃に強いアルミニウム (AL) 合金などの軽金属と FRP とを積層させた FRP/金属ハイブリッド積層板¹⁻³⁾が開発された。

FRP/金属ハイブリッド積層板は、Fig. 1 に示すように、表面に AL を置いて衝撃に耐え、内側に FRP を配して AL 合金と強い接着を保ち、AL 合金の疲労亀裂進展を抑えている。FML は、厚いものでは表面のほか内側にも AL 合金を配している。

FRP/金属ハイブリッド積層板の一つに、GFRP と AL 合金との積層複合材料である GFRP/金属ハイブリッド積層板 (商品名 GLARE) を挙げることができる。GLARE はエアバス社 A380 の胴体部分に使用されている⁴⁾。

複数の部品を使用して構造物を製作するには、各部材を接合する継手 (joint) は不可欠である。継手には、樹脂で接合する接着継手とボルトなどの機械継手がある。機械継手は、円孔を開けることで材料の剝離や円孔面への応力集中が生じるが、輸送機器や建築構造物での実用

^{*1} 現・名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

^{*2} 元・九州大学教授
former Professor, Kyushu University

Fig. 1 FRP/metal hybrid laminates $[AL/0^\circ/90^\circ]_s$.

も多く、機械継手の技術を確認することは重要である。

GLARE の機械継手に関して複数の研究例^{5,6)}がある。Caprino らは、ピン継手・ボルト継手に関する実験から、AL 合金層が継手の破壊に重要な影響を及ぼすことを示した⁵⁾。また、Frizzell らは、ピン継手のベアリング損傷観察から、内部に生じる剝離のうち初期のものは座屈ではなく層内応力によって発生するとした⁶⁾。一連の結果から、FRP/金属ハイブリッド積層板の機械継手の応力分布と金属層の挙動を正確に把握することの重要性が示されたが、いずれも実験手法によるものであり、同研究を基に応力構造を一般的に議論するのは難しい。著者は、従来応力解析の研究例が乏しかった CFRP/金属ハイブリッド積層板 (CARALL) のピン継手に関して有限要素法 (finite element method; FEM) を使用した 3 次元 (3D) 応力解析を実施して、解の収束性を確認したほか、同ピン継手の応力構造の特徴 (接触条件が応力に及ぼす影響、円孔周辺部分の応力集中など) を示した⁷⁾。

AL 層は、負荷荷重 (本稿ではストローク δ の形で表記) に起因する応力が降伏応力に達すると、塑性変形を開始するが、この塑性変形に対して FRP 層が曲げによる抵抗を行う。本論文では、AL 層の塑性変形と FRP 層の曲げ抵抗が積層板内部の応力構造にどのような影響を及ぼすのかを考究する。特に、AL 層と FRP 層 (0° 層) もしくは FRP 0° 層と同 90° 層との間の面外方向の応力 (面外応力) は、ピン機械継手の損傷ないし破壊に影響するため、両者の影響を考察することは非常に重要である。

2. 応力解析方法

2.1 FEM 解析対象およびモデル

本研究では、既述の CARALL ピン機械継手に関する FEM 応力構造解析研究⁷⁾を基に、GLARE ピン機械継手 (積層構成は $[AL/0^\circ/90^\circ]_s$) に関する FEM 応力構造解析を実施した。FEM 解析モデルと幾何形状、および境界条件を Fig. 2 に、同解析モデルの円孔周りと座標系を Fig.

Fig. 2 FEM model with boundary conditions and dimensions.

Fig. 3 FEM model around the contact hole boundary with two coordinate systems.

3 に、それぞれ示す。Fig. 2 の境界条件には、引張の負荷荷重に相当する辺 BC での強制変位 δ ($dY=0.2 \text{ mm/min}$, $\delta=0.3 \text{ mm}$ となる 1.5 min まで与え続けた) を含む。面外方向では、 $Z=0 \sim 0.2 \text{ mm}$ が 90° 層に、 $Z=0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ が 0° 層に、 $Z=0.4 \sim 0.9 \text{ mm}$ が AL 層に、それぞれ相当する。

摺んだ部分 (33 mm) を含めて 150 mm、幅は 33 mm、厚さは 1.8 mm、試験片端部とピン穴中心の距離は 33 mm である。また、円孔の直径は 6 mm、ピンの直径は 5.95 mm であり、負荷開始の時点 ($\delta=0 \text{ mm}$) では、円孔とピンの間にはクリアランス (隙試験片の寸法は、長さは引張試験機のチャックで間、円孔の断面積に占める割合は 1.5%) が生じている。直交座標系の X, Y, Z 方向をそれぞれ幅、長手、厚さ方向に取り、厚さ方向に対する対称面の円孔の中心に座標原点 O を定める。また、 OY (原点 O は前記の座標表示と同じ) からの角度 ϕ を定義した 2 次元極座標表示を使用する。接触の中心は $\phi=0^\circ$ であり、Fig. 2 の解析モデルにおける辺 BC の強制変位 δ が増すにつれて、Fig. 3 で定義した角度 ϕ が $\phi=0^\circ$ から $\phi=90^\circ$ の方向に徐々に大きくなる形で接触が進展し、前記のクリアランスが徐々に小さくなる。O-

Table 1 Elastic mechanical properties of GFRP, CFRP and AL.

Mechanical properties	GFRP (0° layer)	CFRP (0° layer)	AL
E_{xx} , GPa	31.85	150.0	70.0
E_{yy} , GPa	10.20	9.5	
E_{zz} , GPa	7.14	9.5	
G , GPa	2.14	3.5	
ν_{xy}	0.328	0.263	0.300
ν_{yz}	0.199	0.263	
ν_{zx}	0.045	0.0167	

E : Young's modulus, G : shear modulus, ν : Poisson's ratio.

Table 2 Work hardening relationship of AL-alloy: σ_e as a function of ϵ_p .

ϵ_p	σ_e (MPa)
0	344
0.002534	391
0.003509	394.3
0.005458	397.6
0.007441	399.3
0.009423	399.9

ϵ_p : equivalent plastic strain, σ_e : equivalent stress at ϵ_p .

XY 面と O- YZ 面に関して対称であるため、解析モデルは試験片全体の 4 分の 1 となる。Fig. 3 の解析モデルにおける層方向の 9 つの分割のうち、上表面からの 3 分割が AL、その下 3 分割が 0° 層、さらにその下の 3 分割が 90° 層である。AL 層、0° 層、90° 層の厚さは、それぞれ 0.5 mm, 0.2 mm, 0.2 mm である。予備計算の結果、3 つずつ分割した各層のうち、中心の分割は厚く、両側の分割は他の層との界面部分と考えて薄くした。ピンと円孔との間の接触摩擦係数 μ は、0.15 と 0.30 の 2 種類を設定した。

FEM 解析には、市販の有限要素解析コード Marc & Mentat を使用した。

2.2 材料特性

GFRP の 0° 材⁸⁾, CFRP の 0° 材⁹⁾, AL 合金¹⁰⁾ の材料定数を Table 1 に、AL 合金の加工硬化データ¹⁰⁾ (相当応力 σ_e と相当塑性ひずみ ϵ_p の関係) を Table 2 に、それぞれ示す。AL 合金は等方性材料として扱うため、Table 1 に示した材料定数は 2 つのみである。

2.3 各層の表記

本論文では、単層材料と FRP/金属ハイブリッド積層

板の構成層とを必要に応じて区別する。例えば、0° 層に関して述べる場合には 0° または 0° 層などの表記を用いるほか、単層材料に関しては 0° 単層と表記し、FML の構成層 (0° 層) に関しては 0° の後に FML の種類を明示した 0°-GL や 0°-CA (前者は GLARE を GL, 後者は CARALL を CA と、それぞれ省略して記載) と表記する。また、構成層の境界面 (界面) に関しては、例えば、AL 層と 0° 層との界面については、AL//0°, AL//0°-GL, AL//0°-CA などと表記する。

3. 応力解析結果

3.1 接触の進展

$\Phi=0^\circ$ から $\Phi=90^\circ$ の方向に角度 Φ (Fig. 3 で定義) が徐々に大きくなる形で接触が進展する件については 2.1 節の第 2 段落で述べたが、円孔とピンが接触している領域のうち、円孔の側の最も先端の位置を角度 Φ で表し、各単層材料 (AL, 0°, 90°) と GLARE 各層 (AL-GL, 0°-GL, 90°-GL) の結果を、摩擦係数 μ をパラメータに取った無次元量 δ^* ($=\delta/L$, δ : 負荷ストローク [mm], L : Fig. 2 の負荷端 BC から円孔中心 O までの距離 117 mm) の関数として Fig. 4 に示す。

単層材料は、対称性を利用して厚さ 0.2 mm の半分を同じ境界条件で解析しており、 Φ は厚さ $Z=0.1$ mm でデータである。AL-GL, 0°-GL, 90°-GL は、それぞれ $Z=0.9$ mm, 0.4 mm, 0.1 mm での Φ である (以下同様)。

各データを見ると、0°, AL, 90° の順に Φ は大きく、いずれも摩擦係数 μ が大きくなると Φ も大きくなる。積層構造では、▲ (△) と ● (○) の上下関係から、0°-GL の Φ は単層時より小さい、すなわち他層との積層によって接触の進展が助長され、90°-GL と AL-GL ではその逆の傾向がある。

3.2 塑性領域の進展

$\delta=0.16$ mm, $\mu=0.30$ での GLARE, CARALL の ϵ_p の分布を Fig. 5 に示す。 ϵ_p の最大位置は、GLARE, CARALL とともに 60° 位置近傍で、 ϵ_p の最大値は、GLARE では $\epsilon_p=0.07$, CARALL では $\epsilon_p=0.012$ である。また、円孔面近傍で ϵ_p が生じている ($\epsilon_p \geq 0.0007 \sim 0.0001$ である) 領域は、GLARE, CARALL とともに 90° 位置近傍までである。

接触中心である Fig. 3 の座標系の $\phi=0^\circ$ の位置 (以下 0° 位置) での ϵ_p を無次元量 δ^* の関数として μ をパラメータに取って Fig. 6 に示す。 ϵ_p は円孔面に接する AL 合金 3 要素の中央の要素値 (積分点の平均値) である。 $\delta=0.12$ mm 付近で ϵ_p が発生する。AL-GL, AL-CA とともに、

Fig. 4 Contact front: (a) AL & AL-GL, (b) 0° & 0°-GL and (c) 90° & 90°-GL.

μ が大きいと ϵ_p は小さくなる。また、 $\delta=0.16$ mm ごろまでは AL-GL と AL-CA との間に大きな違いはないものの、その後は AL-GL の傾きが増大し、 $\delta=0.30$ mm では AL-GL の ϵ_p は AL-CA に比べて 5 割程度大きくなっている。

3.3 相当応力 σ_e ならびに σ_{YY} の分布

GLARE の σ_e の分布を Fig. 7 に示す(スケールバーの単位はすべて MPa とする。以下の応力分布でも同様)。 σ_e は、 $\delta=0.088$ mm では AL-GL 層で最も大きいものに対して、塑性変形が進んだ $\delta=0.30$ mm では FRP 層の 0°-GL 層で最も大きい。最大値は、 $\delta=0.088$ mm では

Fig. 5 Equivalent plastic strain ϵ_p for $\delta=0.16$ mm, $\mu=0.30$: (a) GLARE and (b) CAR-ALL.

Fig. 6 Equivalent plastic strain ϵ_p vs δ^* at $\phi=0^\circ$ of AL-CA and AL-GL.

360 MPa であるのに対して、 $\delta=0.30$ mm では 720 MPa である。

0° 層での σ_{YY} の分布を Fig. 8 に示す。0° 位置近傍および Fig. 3 の座標系の 90° 位置近傍で大きい。 σ_{YY} の最大絶対値は、0°-GL が 750 MPa 程度であるのに対して 0°-CA は 2,500 MPa であり、FRP 層 (0° 層) の材料定数、すなわち (Table 1 で示した) 繊維方向の弾性率 E_{YY} の違いによる影響が現れている。

0° 位置での σ_{YY} を無次元量 δ^* の関数として Fig. 9 に示す。0°-GL では摩擦の影響が大きく、0° 単層、90°-GL

Fig. 7 σ_e of GLARE for $\mu=0.30$: (a) $\delta=0.088$ mm and (b) $\delta=0.30$ mm.

Fig. 8 σ_{yy} for $\delta=0.30$ mm, $\mu=0.30$: (a) 0°-GL and (b) 0°-CA.

でも同影響が認められるのに対して、AL 単層、AL-GL、90° 単層では摩擦の影響が小さい。なお、0°-GL、90°-GL では $\delta=0.12$ mm 前後で同曲線の勾配が増加し始める。ま

(a)

(b)

(c)

Fig. 9 σ_{yy} - δ^* curve at $\Phi=0^\circ$ of (a) AL & AL-GL, (b) 0° & 0°-GL and (c) 90° & 90°-GL.

た、AL-GL は、AL 単層に比べて小さいのに対して、0°-GL、90°-GL は、それぞれ 0° 単層、90° 単層に比べて大きい。特に、0°-GL は単層 0°-GP の 2 倍以上である。

3.4 面外応力の分布

AL 合金層の塑性変形が発生していない $\delta=0.088$ mm の層境界面の面外応力 (σ_{zz} , τ_{yz} , τ_{zx}) の分布を、GLARE を Fig. 10 に、CARALL を Fig. 11 に、それぞれ示す。左側は AL//0°, 右側は 0°//90° の分布である。

GLARE の σ_{zz} は、AL//0° の 0° 位置近傍で大きい圧縮、45° 位置近傍からは引張領域であるが、引張領域は円孔面にまでは到達していない。0°//90° の圧縮応力は AL//0° に比べて小さい。AL//0° の場合とは異なり、

Fig. 10 (a) σ_{zz} , (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} at (-1) AL-GF//0°-GF and (-2) 0°-GF//90°-GF for $\delta=0.088$ mm & $\mu=0.30$.

Fig. 12 (a) σ_{zz} , (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} at (-1) AL-GF//0°-GF and (-2) 0°-GF//90°-GF for $\delta=0.16$ mm & $\mu=0.30$.

Fig. 11 (a) σ_{zz} , (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} at (-1) AL-CM//0°-CM and (-2) 0°-CM//90°-CM for $\delta=0.088$ mm & $\mu=0.30$.

Fig. 13 (a) σ_{zz} , (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} at (-1) AL-CM//0°-CM and (-2) 0°-CM//90°-CM for $\delta=0.16$ mm & $\mu=0.30$.

引張領域は円孔面にまで到達している。

τ_{yz} は, AL// 0° では 45° 位置近傍と 70° 位置近傍で大きい(符号は, 前者は正, 後者は負). 0° // 90° では 70° 位置近傍でやや大きい (符号は正).

τ_{zx} は, AL// 0° では 25° 位置近傍と 45° 位置近傍で大きい(符号は, 前者は負, 後者は正). 0° // 90° では 40° 位置近傍でやや大きい (符号は正).

面外応力の最大値 (絶対値) は, いずれも 0° // 90° が AL// 0° に比べて小さい.

Fig. 11 の CARALL でも, Fig. 10 の GLARE とほぼ同様の応力分布の傾向が得られた. 応力値は GLARE の約 2~3 倍である.

次に, AL 合金層の塑性変形の影響がみられる $\delta=0.16$ mm での面外応力の分布を, Fig. 12, Fig. 13 に示す.

Fig. 12 の GLARE と Fig. 13 の CARALL では, いずれも Fig. 10, Fig. 11 と同じような応力値と応力分布が得られた.

4. 考 察

4.1 AL 層の塑性変形が及ぼす影響

Fig. 14 は, CARALL の $\delta=0.16$ mm, $\mu=0.30$ での 0° 位置ならびに同位置近傍での (座標はそのまま) 変形の 50 倍に拡大した模式図である (上から 3 要素分が AL

層, その下 3 要素分が 0° 層, さらにその下 3 要素分が 90° 層). 0° 位置の A 点と (A 点から 1 要素分離れた) B 点の間が大きく変形している様子がわかる. $\delta=0.16$ mm では, ϵ_p は (Fig. 6 の 4 種類の ϵ_p のデータを平均して) 0.0012, すなわち 0.12% であるのに対して, 弾性ひずみ ϵ_e は, 初期降伏応力に対応する 344 MPa を AL の弾性率 (Table 1 に記載) で割った $344 \text{ MPa}/70 \text{ GPa}=0.5\%$ となる.

弾性ひずみのポアソン比 (以下, 弾性ポアソン比) は 0.3, 塑性ひずみのポアソン比 (以下, 塑性ポアソン比)

Fig. 14 Deformation of fiber reinforced plastics/metal hybrid laminates near at $\Phi=0^\circ$ for $\mu=0.30$ and $\delta=0.16$ mm; displacements are magnified by 50 times.

Fig. 15 Displacement in Z direction of the boundary and surface at (-1) 0° // 90° (-2) AL// 0° and (-3) free surface for $\delta=0.16$ mm & $\mu=0.30$: (a) GLARE and (b) CARALL.

Fig. 16 Displacement in Z direction of the boundary and surface at (-1) $0^\circ//90^\circ$ (-2) $AL//0^\circ$ and (-3) free surface for $\delta=0.088$ mm & $\mu=0.30$: (a) GLARE and (b) CARALL.

は0.5であることから、弾性ひずみと弾性ポアソン比が厚さ方向に対して及ぼす量と、塑性ひずみと塑性ポアソン比が及ぼす量との比率は、弾性：塑性 $=0.3 \times 0.5 : 0.5 \times 0.12 = 5 : 2$ であるため、 ϵ_p が小さい $\delta=0.16$ mmの時点では弾性の及ぼす効果が塑性の効果に比べて依然として大きいと考えられる。しかし、同 δ 以降は、Fig. 6のデータからも ϵ_p が急増し始めることが明らかであり、塑性の及ぼす量の比率が徐々に大きくなると考えられる。

次に、 $0^\circ//90^\circ$ 、 $AL//0^\circ$ 、 AL 自由表面の3つの位置の $\delta=0.16$ mmでのZ方向の変位をFig. 15に示す（スケールバーの単位はmm）。Fig. 15には、絶対値が比較的大きい、スケールバーでは上から1番目の部分（符号は正）とスケールバーでは下から1番目の部分（符号は負）がある。このうち、スケールバーでは上から1番目の部分は自由表面側から見て膨らんだ凸の状態、スケールバーでは下から1番目の部分は窪んだ凹の状態である。また、凹凸の中間、すなわちZ方向変位0の部分はFig. 15のスケールバーでは上から6番目ないし7番目の部分にほぼ相当する。引張荷重を受けるネットテンション位置では、自由表面、 $AL//0^\circ$ 、 $0^\circ//90^\circ$ の3つの面がすべて窪む。一方、圧縮負荷を受けるベアリング位置では、自由表面が圧縮にともなうポアソン効果で膨らんで

いるのに対して、 $AL//0^\circ$ 、 $0^\circ//90^\circ$ に関しては 0° 位置を含む接触面では凹、 0° 位置から少し離れた部分では凸というように、自由表面の他の2面では変形の状態が異なっている（なお、 $0^\circ//90^\circ$ の 0° 位置から少し離れた部分の凸状態は、Fig. 14のB点を含む左側面にも現れている）。

さらに、 $\delta=0.088$ mmでのZ方向変位をFig. 16に示す。Fig. 16をFig. 15と比較すると、 $\delta=0.16$ mmでは 0° 位置の圧縮側の窪みの量が増加していることがわかる。弾性変形時の $AL//0^\circ$ の窪みはAL層のポアソン比 ν_{yz} と 0° 層のポアソン比 ν_{yz} との差 $(0.3 - 0.139 = 0.161)$ に起因するが、その前提として圧縮の部分が局在化していることが必要である。 $\delta=0.16$ mmでは、AL層の塑性変形量に加わり、窪みの相対量が増大する。

0° 位置近傍でのGLAREの変形に関して、前述のように、自由表面では凸が広くみられるのに対して $AL//0^\circ$ の 0° 位置近傍では凹の状態であるが、これには 0° 層のせん断弾性率 G が小さいことが影響を及ぼしていると考えられる。 AL 合金などの等方性材料では G は縦弾性率 E の2.5～3分の1の大きさであるのに対して、 0° -GP層では約15分の1と小さく、負荷された応力が分散しにくい。そのため、同じ応力状態が繊維方向に続く傾向に

Fig. 17 Bend in Z direction caused by plasticity of aluminum layer and resistance to bend by longitudinal stiffness of FRP layer.

ある。

すなわち、AL層では接触による応力が円孔面とその周辺に留まり圧縮ひずみが引張荷重方向にあまり進展しないのに対して、 0° -GP層では引張荷重方向にそのまま進展しやすい傾向にある。このため、AL// 0° の 0° 位置近傍の窪みは円孔面に沿って進展し、円孔面から数要素分離れると 0° 層の膨らみが現れるようになる。特に、AL層の塑性変形開始後にはこの傾向が顕著であるものの、GLAREとCARALLとでは窪みの量や膨らみの形状が異なる。この違いに関して、FRP層の材料定数の違いが影響を及ぼしていると考えられる。

4.2 FRP層の材料定数が面外応力 σ_{zz} に及ぼす効果

GLAREピン継手とCARALLピン継手とでは、AL// 0° の 0° 位置近傍の窪みの量や膨らみに以下の違いがある。

1. CARALLでは相対的に窪みの量が小さい。
2. GLAREでの膨らみの展開する形状が扁平形状であるのに対して、CARALLでの膨らみの展開形状はFRP 0° 層の繊維方向である。

Fig. 6から、 $\delta=0.16$ mmでの ε_p はAL-GL、AL-CAともに小さい。しかし、AL// 0° での σ_{zz} はCARALLのほうがGLAREに比べて大きい。例えば、Fig. 12の(a-1)からGLAREの 30° 位置近傍の σ_{zz} は20 MPaであるのに対してFig. 13の(a-1)からCARALLの σ_{zz} は30 MPaであり、約1.5倍の大きさである。

σ_{zz} が増大する主な原因の一つは、AL層の局所的膨張であると考えられる。すなわち、Fig. 17に示すように、膨張したAL層は 0° 層を押し込むが、AL層の押し込みに対して 0° 層が曲げによって抵抗し、 σ_{zz} が増大する。より具体的に述べると、Fig. 17では、上側のAL層が塑性

Fig. 18 Magnification of the out of plane normal stresses of the interface between AL layer and FRP layer or between FRP layers and the mechanism of delamination when: (a) $\sigma_{zz} > 0$ and (b) $\sigma_{zz} < 0$.

変形して膨張し、厚さ方向に下側のFRP 0° 層を押し込むが、これに対して同 0° 層が曲げによる抵抗を行う。その際に、同 0° 層の繊維方向の材料定数が大きいほど曲げ抵抗は大きくなる。本研究の場合においては、Table 1から、GFRPの繊維方向の弾性率が31.85 GPaに過ぎないのに対して、CFRPの繊維方向の弾性率は150 GPaであり、約5倍に相当する。したがって、AL層とFRP 0° 層との界面AL// 0° における σ_{zz} も、CARALLのほうがGLAREに比べて大きくなる。

また、 0° -CA層の膨らみは 0° -GL層の膨らみに比べて繊維方向に展開する件については本稿で既述したが、この違いは、局所的なものに留まらず、広範囲に発生している変形である。これは、AL合金層の膨張に対してFRP 0° 層が抵抗し、かつ繊維方向の縦弾性率 E が同 0° 層の曲げの変形に影響を及ぼしているためである。

4.3 せん断面外応力(τ_{yz} , τ_{zx})への影響

3種類の面外応力のうち σ_{zz} について前項で述べたが、本項で他の2種類の応力(τ_{yz} , τ_{zx})について述べる。

このうち、 τ_{yz} については、 70° 位置での τ_{yz} はAL// 0° 、 0° // 90° ともに絶対値が大きい、符号は前者が負、

後者が正である。Fig. 16 をみると、AL 層の最上部の層が大きく変形している様子がわかる。これは、ピンとの接触を受けて AL 層の円孔周辺部分の節点が移動するが、AL 層の節点のうち円孔周辺から離れた部分に存在する節点も円孔周辺の節点によって押し出されるように徐々に移動する。

この AL 層の節点の動きが、AL//0° での τ_{yz} の絶対値を増大させる原因の一つであると推測される。しかし、 τ_{yz} の増大については、全般的にその発生機構が非常に複雑であるため (τ_{zx} の増大についても同様)、今後の研究課題としたい。

4.4 ピン機械継手の初期破壊に対する検討

FRP/金属ハイブリッド積層板の機械継手の設計は、接触中心での損傷がベアリング損傷になるように設計される。しかし、FRP 層は面外方向の低速衝撃に弱く、金属面の疲労亀裂はネットテンション部分で発生する。

このネットテンション部分での σ_{zz} は引張であるため、疲労亀裂が発生した場合には Fig. 18 の (a) で図示したようなモード I の開口型剥離が生じる可能性があるほか、AL 層の塑性変形に伴うモード II の面内せん断型剥離、モード III の面外せん断型剥離の危険性もある。FRP 層が疲労亀裂の進展を抑制するには、締め付け圧を制御して剥離の発生を抑える必要がある。但し、Fig. 10 の (a-1) と Fig. 11 の (a-2) から、CARALL での引張は GLARE の約 2 倍であるため、固定部分を一気に締めて衝撃荷重を与え、試験片が引張試験機から外れないようにする必要がある。

なお、疲労破壊とは異なる準静的な破壊はベアリング部分で発生する。同部分での σ_{zz} は圧縮であるため、Fig. 18 の (b) のようにネットテンション部分のような引張の σ_{zz} に基づく剥離は生じにくく、剥離に対して高い抵抗が期待される。

5. 結 言

GLARE の機械継手に関する研究は実験手法によるものが多く、数値解析の研究例は少ない。また、破壊を対象とした数値解析の研究例は存在するが、応力構造に関する研究は報告されていない。

そこで、本研究では CARALL のピン機械継手に関する応力構造解析方法⁷⁾を基に、GLARE ピン継手に関し

て 3D-FEM 応力解析を実施した。AL 層の弾性・塑性が及ぼす影響や FRP 層の異方性材料定数が及ぼす影響、積層効果、および全ての層の接触・摩擦が及ぼす影響を取り入れた非線形解析により、GLARE ピン継手における接触や塑性変形の進展、円孔近傍の面内応力分布などの特徴的挙動を得た。また、CARALL ピン継手に関する応力構造の特徴と比較し、以下に列举する傾向を得た。

1. FRP/金属ハイブリッド積層板ピン継手の初期損傷に大きく影響を及ぼす面外応力 σ_{zz} は、CARALL ピン継手と GLARE ピン継手のいずれにおいても、負荷ストローク δ にほぼ比例する形で増大する。
2. 弾性変形時の CARALL の σ_{zz} の大きさは GLARE の約 2~3 倍である。この σ_{zz} の増大する理由と符号の異なる機構、AL 層の塑性変形が及ぼす影響、FRP 層の材料定数が及ぼす影響について説明した。
3. ネットテンション部分での σ_{zz} は引張であるため、疲労亀裂が生じた場合には界面での剥離発生を助長する危険性がある。一方、準静的な破壊が生じるベアリング部分での σ_{zz} は圧縮であるため、剥離に対して高い抵抗が期待される。

参 考 文 献

- 1) Asundi & A.Y.N. Choi : *Journal of Materials Proceeding Technology*, **63** (1997), 384-394.
- 2) L.B. Vogelesang & A. Vlot : *Journal of Materials Proceeding Technology*, **103** (2000), 1-5.
- 3) A. Vlot & J.W. Gunnink : *Fiber Metal Laminates an Introduction*, Kluwer Academic Pubrisers (2001), pp. 14-21.
- 4) G. Marsh : *Reinforced Plastics*, **48** (2004), 22-27.
- 5) G. Caprino, A. Squillace, G. Giorleo, L. Nele & L. Rossi : *Composites: Part A*, **36** (2005), 1307-1315.
- 6) R.M. Frizzell, C.T. McCarthy & M.A. McCarthy : *Compos. Sci. Technol.*, **68** (2008), 3314-3321.
- 7) 高祖京介, 高雄善裕 : 九州大学応用力学研究所, **139** (2010), 159-166.
- 8) W.H. Chen, S.S. Lee & J.T. Yeh : *Compos. Struct.*, **30** (1995), 287-297.
- 9) 肖 毅, 汪 文学, 高雄善裕 : 九州大学応用力学研究所, **81** (1997), 1-13.
- 10) T. Matsubara, Y. Takao & W.X. Wang : *Proceedings of ACCM6*, o-077 (2008), pp. 1-4.