

繊維強化樹脂/金属積層板のピン継手の界面応力に及ぼす材料定数と塑性の効果

高祖, 京介
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

高雄, 善裕
九州大学応用力学研究所新エネルギー力学分野

<https://doi.org/10.15017/27106>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 140, pp.17-24, 2011-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



繊維強化樹脂/金属積層板のピン継手の界面応力に及ぼす材料定数と塑性の効果

高祖 京介^{*1}、高雄 善裕^{*2}

(2011年1月31日受理)

Effects of material properties and plasticity on the interface stresses of a pin joint in fiber reinforced metal laminates

Kyosuke KOSO^{*1} and Yoshihiro TAKAO^{*2}

E-mail of corresponding author: k-kouso@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

Fiber metal laminates (FML) are composites laminated by fiber reinforced plastics (FRP) and aluminum alloy. GLARE, one of the FML laminated by Glass Fiber Reinforced Plastics 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 several papers applied the three dimensional (3D) finite element method (FEM) to GLARE for delamination failure analysis. This paper applies 3D-FEM to a GLARE pin joint and obtains the characteristic stresses near the contact region. Effects of material properties and plasticity on the distribution and magnitude of stresses are discussed together with previous results of Carbon FML obtained by the present authors. It was found that within the practical range of material properties and loading stroke, their effects on the stress distribution are small and that the magnitude depends on them. A model that relates the out of plane normal stress σ_{ZZ} with the longitudinal stiffness of FRP is presented, which explains well the several numerical results.

Key words: FML, pin joint, Finite Element Methods (FEM), material properties, plasticity

1. 緒言

繊維強化樹脂(Fiber Reinforced Plastics; FRPs)は、比強度と比剛性が大きく、更に疲労強度特性も優れている。しかし、界面強度が低く面外の低速衝撃に弱い。また、アルミニウム(AL)合金は軽量高強度材であるが疲労特性に問題がある。しかし金属は衝撃に強い。そこでFig.1に示すように表面に軽金属、内層にFRPを配した低速衝撃にも疲労にも高い耐力を示す軽量高強度のハイブリッド繊維強化金属積層板(Fiber Metal Laminates; FMLs)^{1)~3)}が開発されてきた。FMLの1つに、ガラス繊維強化樹脂(Glass Fiber Reinforced Plastics; GFRPs)とAL合金のGFML商品名GLAREがあり、エアバス社A380の胴体で使用されている⁴⁾。

CaprinoらはGLAREのピンおよびボルト機械継手の実験から、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GLAREピン継手のベアリング損

傷観察を行い、内部に生じる剥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⁾。これらの結果は、FMLにおける応力分布そして金属層の挙動の正確な把握が重要であることを示すものである。前述のGLARE機械継手に関する研究はいずれも実験によるものであり、これから応力構造を一般的に議論するのは難しい。既存の幾

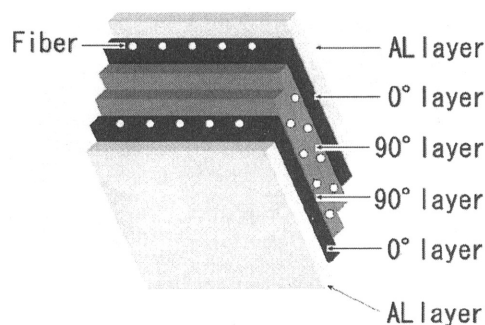


Fig.1 A FML [AL/0°/90°]_s

*1 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

*2 九州大学応用力学研究所新エネルギー力学分野

つかの実験と GFRP、GLARE、CFRP、CFML 等の積層板の網羅的な数値解析から諸パラメータの効果を議論するのが妥当と思われる。

著者は数値応力解析研究例が乏しかった炭素繊維強化金属積層板 (Carbon Fiber Metal Laminates; CFMLs) のピン継手に関して、有限要素法 (Finite Element Method; FEM) による 3 次元 (3D) 非均質異方性弾塑性接触解析を実施し、解の収束性を検討し、このピン継手における応力構造の特徴を示した⁷⁾。そこで、本研究では、GLARE のピン継手の 3D-FEM 応力解析を実施し、材料定数および塑性が応力分布にどのような影響を与えるのかを CFML 研究結果⁷⁾も含めて検討する。前にも述べたように GLARE 機械継手の研究には実験解析が多く、解析的研究は少ない。また、破壊を対象にした数値解析は見かけるものの、応力構造に関する詳細な報告は見かけない。

本論文においては、単層と FML の構成層を必要に応じて区別する。0°層について言うなら、0°や 0°層の他に、単層の場合は、0°単層、FML の 0°層の場合は、FML の種類を GL (GLARE) あるいは CM (CFML) と明示した 0°-GL や 0°-CM も使用する。層境界については、例えば AL//0° (AL と 0°との界面部分、以下同様) について言うと、AL//0°、FML の種類を明示する必要がある時は AL//0°-GL として

AL//0°-CM も使用する。

2. 応力解析方法

2.1 FEM 解析対象およびモデル

FEM 解析モデルと寸法を Fig.2 に、同解析モデルの円孔周りと座標系を Fig.3 に、それぞれ示す。Z=0~0.2mm が 0°層、Z=0.2~0.4mm が 90°層、Z=0.4~0.9mm が AL 合金層になる。構成モデルの対称性等の詳細に関しては、前回の研究報告⁷⁾に述べているので省略する。FEM 解析には市販の有限要素解析コード Marc & Mentat を使用している。

2.2 材料特性

FEM 解析に使用した 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⁾(相当塑性ひずみ ϵ_p) を Table 2 に示す。AL 合金は等方性と扱われるので、2個の材料定数だけを Table 1 に示している。

3. 応力解析結果

3.1 接触領域の広がり

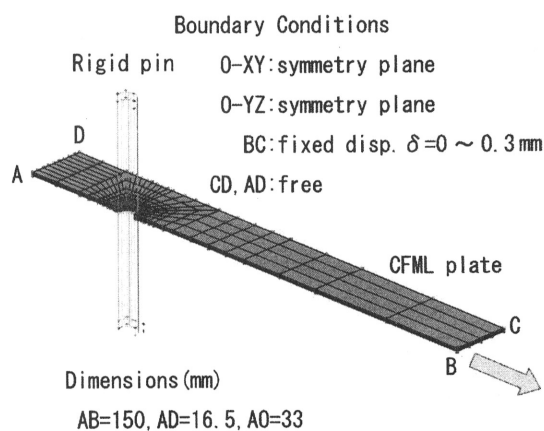


Fig.2 A FEM model with boundary conditions and dimensions

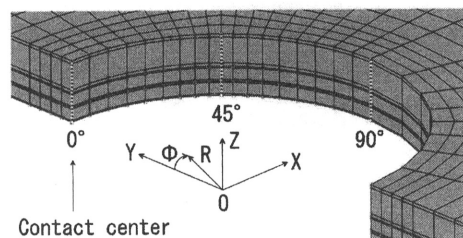


Fig.3 A FEM model around the hole with two coordinate systems

Table 1 Elastic mechanical properties of GFRP, CFRP and AL-alloy

Mechanical properties	GFRP (0° layer)	CFRP (0° layer)	AL-alloy
E_{xx} , GPa	10.20	9.5	70.0
E_{yy} , GPa	31.85	150.0	
E_{zz} , GPa	7.14	9.5	
G , GPa	2.14	3.5	
ν_{xy}	0.105	0.0167	0.300
ν_{yz}	0.139	0.263	
ν_{zx}	0.02	0.263	

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

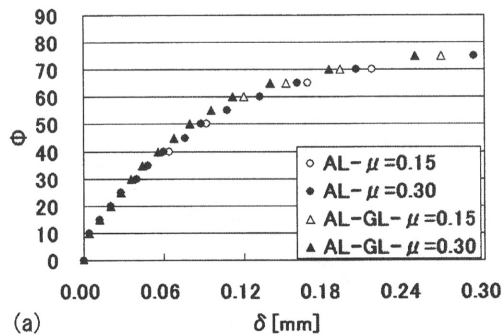
ϵ_p	σ_e (MPa)
0	344
0.002534	391
0.003509	394
0.005458	398
0.007441	399
0.009423	400

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

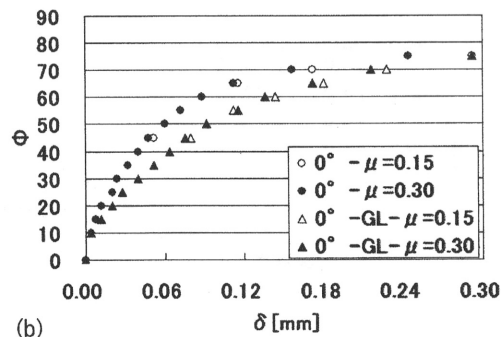
接触領域の先端位置を Φ で表し、各単層材(AL、 0° 、 90°)とGLARE各層(AL-GL、 0° -GL、 90° -GL)の結果を摩擦係数 μ をパラメータに取り負荷ストローク δ の関数としてFig.4に示す。単層材については対称性を利用して厚さ0.2mmの半分を同じ境界条件で解析し、 $Z=0.1\text{mm}$ の値を表示している。AL-GL、 0° -GL、 90° -GLでは $Z=0.9$ 、 0.4 、 0.2mm のデータを表示している(以下同様)。

いずれにおいても、 μ が大きいと Φ が大きい傾向が現れている。また、 0° の Φ はALや 90° に比べて大きい。FMLでは、 0° -GLは減速され、AL-GLと 90° -GLは加速される傾向が得られる。

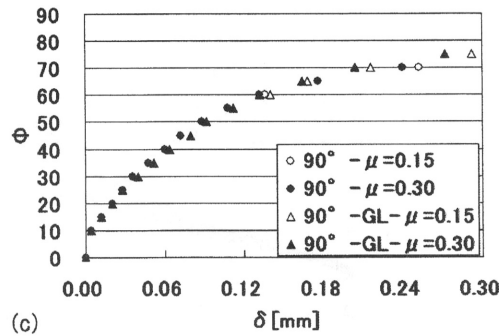
3.2 塑性領域の広がり



(a)



(b)



(c)

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

$\delta=0.16\text{mm}$ 、 $\mu=0.3$ でのGLARE、CFMLの ϵ_p の分布をFig.5に示す。 ϵ_p の最大位置は、GLARE、CFMLともに 60° 位置近傍で、最大値もGLAREでは $\epsilon_p=0.007$ 、CFMLは $\epsilon_p=0.012$ に近い。また、円孔面近傍で ϵ_p が生じている($\epsilon_p \geq 0.0007 \sim 0.0001$ とする)領域は、GLARE、CFMLともに 90° 位置近傍までである。

Fig.6に 0° 位置での ϵ_p を δ の関数として μ をパラメータに取って示す。 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。 $\delta=0.12\text{mm}$ 付近で ϵ_p が発生する。AL-GL、AL-CMともに、 μ が大きいと ϵ_p は小さくなる。また、 $\delta=0.16\text{mm}$ 頃まではAL-GLとAL-CMで大きな違いはないが、その後AL-GLの傾きが大きくなり、 $\delta=0.3\text{mm}$ で ϵ_p はAL-CMに比べて5割程大きくなる。

3.3 相当応力 σ_e ならびに σ_{yy} の分布

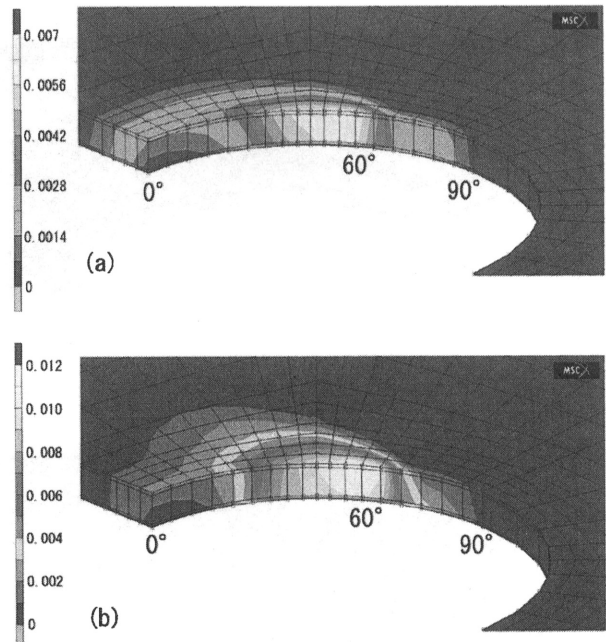


Fig.5 Equivalent plastic strain ϵ_p for $\delta=0.16\text{mm}$, $\mu=0.3$: (a) GLARE and (b) CFML

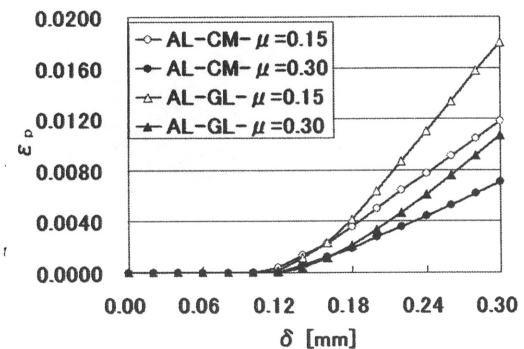


Fig.6 Equivalent plastic strain ϵ_p vs δ at $\Phi=0^\circ$ of AL-CM and AL-GL

GLARE の σ_e の分布を Fig.7 に示す。 σ_e は、 $\delta=0.088$ mm では AL 層で最も大きいのにに対して、塑性変形が進んだ $\delta=0.3$ mm では強化繊維層の 0° 層で最も大きい。最大値は、 $\delta=0.088$ mm では 360 MPa であるのにに対して、 $\delta=0.3$ mm では 720 MPa である。

0° 層の σ_{YY} の分布を Fig.8 に示す。 $\delta=0.3$ mm、 $\mu=0.30$ で

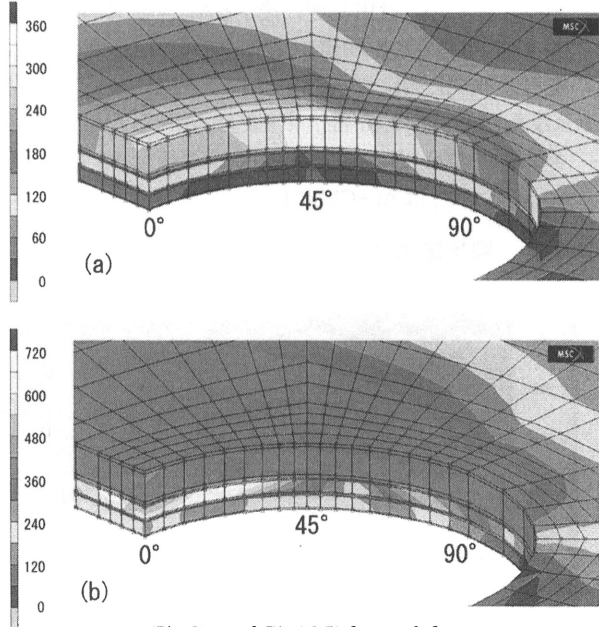


Fig.7 σ_e of GLARE for $\mu=0.3$:
(a) $\delta=0.088$ mm and (b) $\delta=0.3$ mm

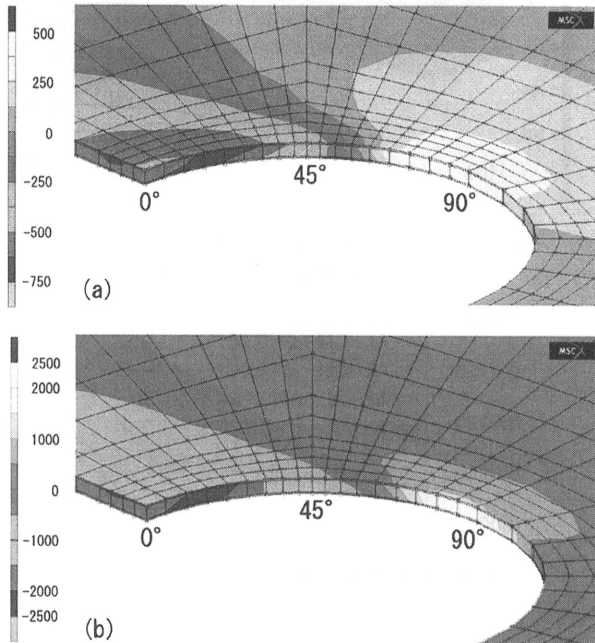


Fig.8 σ_{YY} for $\delta=0.3$ mm, $\mu=0.3$:
(a) 0° -GL and (b) 0° -CM

ある。 σ_{YY} は、 0° 位置近傍と 90° 位置近傍で大きい。 σ_{YY} の最大絶対値は、 0° -GL が 750 MPa 程度であるのにに対して、 0° -CM は 2500 MPa であり、繊維方向の弾性率 E_{YY} の違いが現れている。

0° 位置での σ_{YY} を 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 でも摩擦の影響が認められるのにに対して、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 前後で曲線の勾配が増加し始める。また、AL-GL は、単層 AL に比べて小さいのにに対して、 0° -GL と 90° -GL は、それぞれ単層 0 と単層 90° に比べて大きい。特に、 0° -GL は単層の 2 倍以上になる。

3.4 面外応力の分布

塑性変形がほとんど発生していない $\delta=0.088$ mm での層

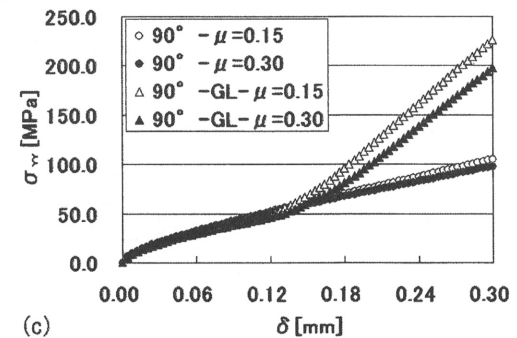
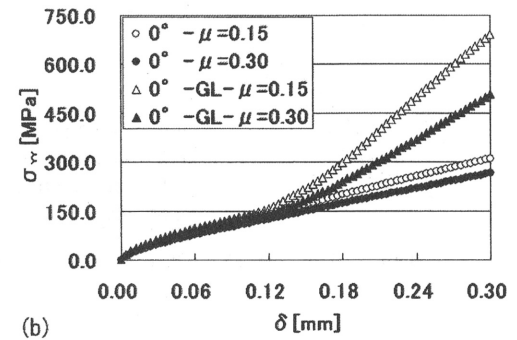
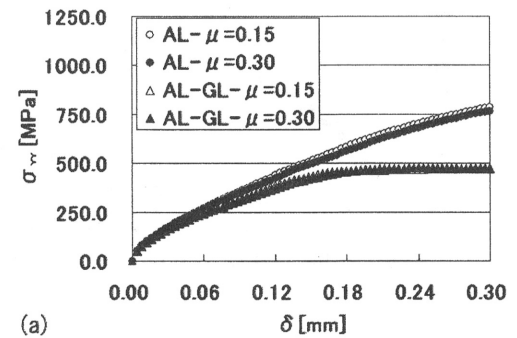


Fig.9 σ_{YY} - δ curve at $\Phi=0^\circ$ of (a) AL & AL-GL
(b) 0° & 0° -GL and (c) 90° & 90° -GL

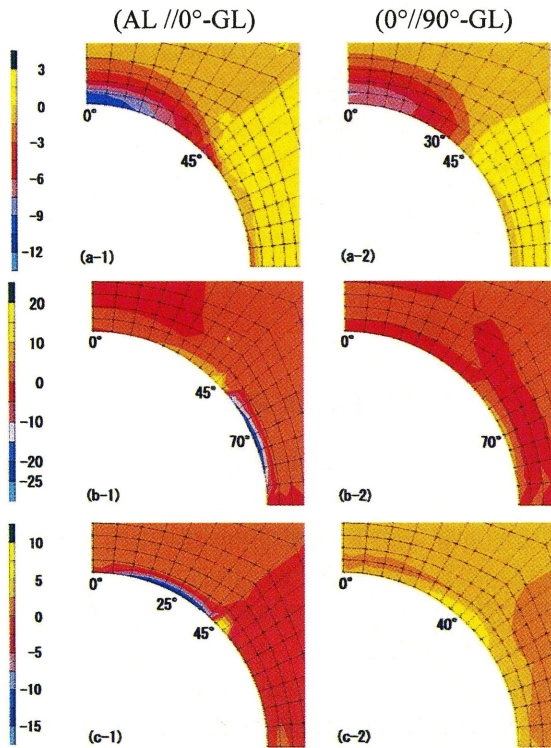


Fig.10 (a) σ_{zz} (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} in GLARE
for $\delta=0.088$ mm & $\mu=0.3$

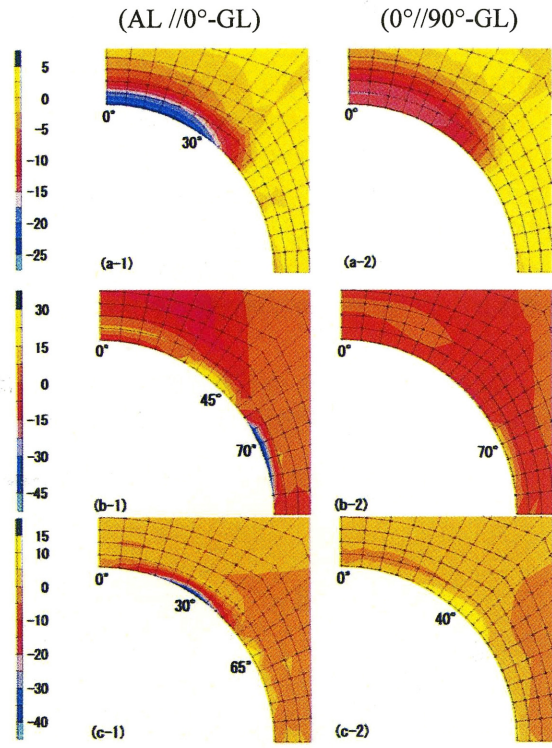


Fig.12 (a) σ_{zz} (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} in GLARE
for $\delta=0.16$ mm & $\mu=0.3$

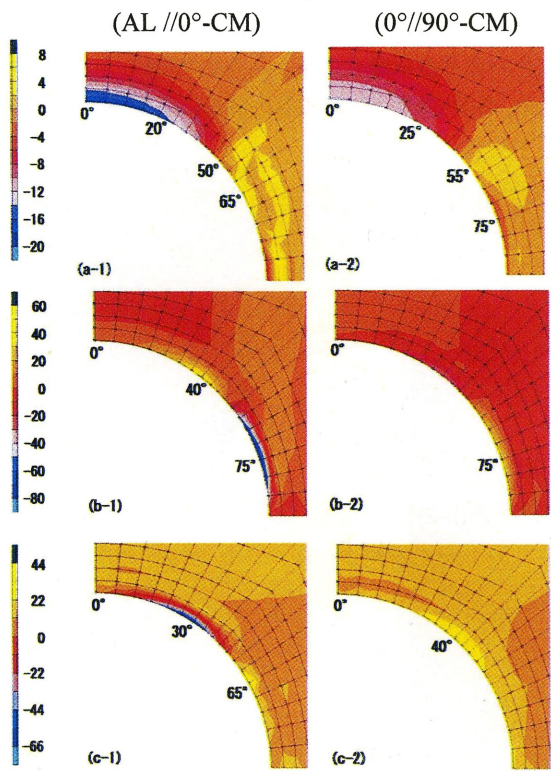


Fig.11 (a) σ_{zz} (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} in CFML
for $\delta=0.088$ mm & $\mu=0.3$

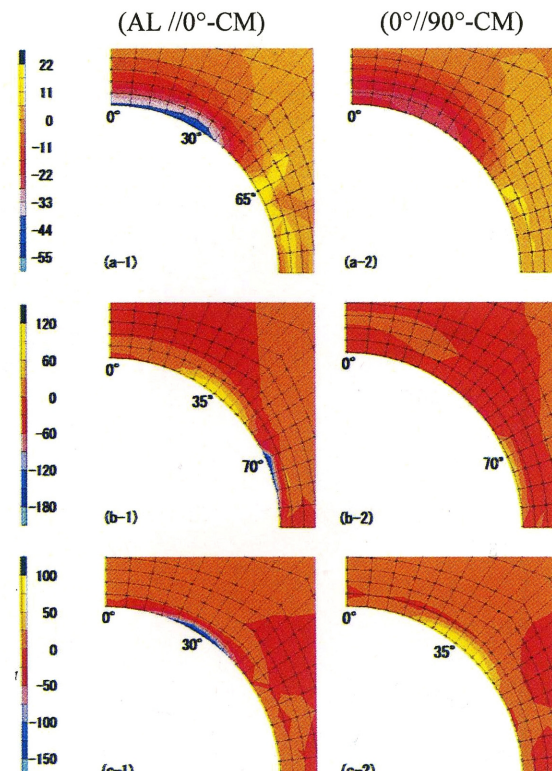


Fig.13 (a) σ_{zz} (b) τ_{yz} and (c) τ_{zx} in CFML
for $\delta=0.16$ mm & $\mu=0.3$

境界面の面外応力(σ_{zz} , τ_{yz} , τ_{zx})分布を GLARE とCFML についてそれぞれ Fig.10 と Fig.11 に示す。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°位置近傍から先は引張領域である。しかし、引張領域は円孔面までは到達していない。0°//90°の圧縮応力は AL//0°に比べ小さい。AL//0°の場合とは異なり、引張領域は円孔面まで到達している。

τ_{yz} は、AL//0°では 45°と 70°位置近傍で大きい(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°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)。全ての面外応力の最大値(絶対値)が 0°//90°より AL//0°で大きい。

Fig.11 の CFML でもおおむね同じ応力分布が得られている。応力の値は約 2~3 倍程度になっている。

AL 合金の塑性の影響が出る $\delta=0.16\text{mm}$ での面外応力の分布を、Fig.12 と Fig.13 に示す。GLARE の Fig.12 と CFML の Fig.13 はそれぞれ Fig. 10 と Fig. 11 の応力値が約 2 倍の同じ様な分布になっている。

4. 考 察

4.1 AL 層の塑性変形の影響

Fig.14 に、0°位置およびその近傍での変形を示す。変位を 50 倍に拡大している。上から 3 要素が AL 層、その下 3 要素分が 0°層、その下 3 要素分が 90°層になる。 $\delta=0.16\text{mm}$ 及び $\mu=0.3$ でのデータである。Fig.6 からは 0°位置の ε_p は 0.13% 程度になり、弾性相当ひずみみはおよそ初期降伏力に対応する $344\text{MPa}/70\text{GPa}=0.5\%$ になる。弾性ひずみと塑性ひずみのポアソン比はそれぞれ 0.3 と 0.5 であるので、厚さ方向への両者に効き具合はおよそ $0.5 \times 0.3 : 0.13 \times 0.5 = 9:4$ の比率で弾性の効果がまだ大きい状態になる。

0°位置の A 点とここから 1 要素分離れた B 点の間が大きく変形している。Fig.15 に 0°//90°、AL//0°、自由表面の 3 つの位置での $\delta=0.16\text{mm}$ における Z 方向変位を示している。黄色の部分が試験片表面から見てせり出した凸部の最大部分、青がくぼんだ凹部の最大部分になる。スケールバー

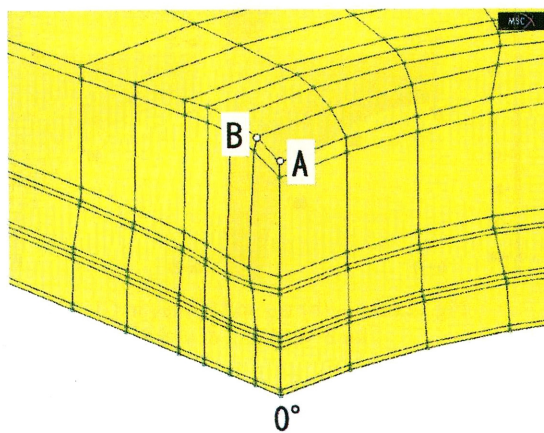


Fig.14 Deformation (magnified to 50 times) of FML near $\Phi=0^\circ$

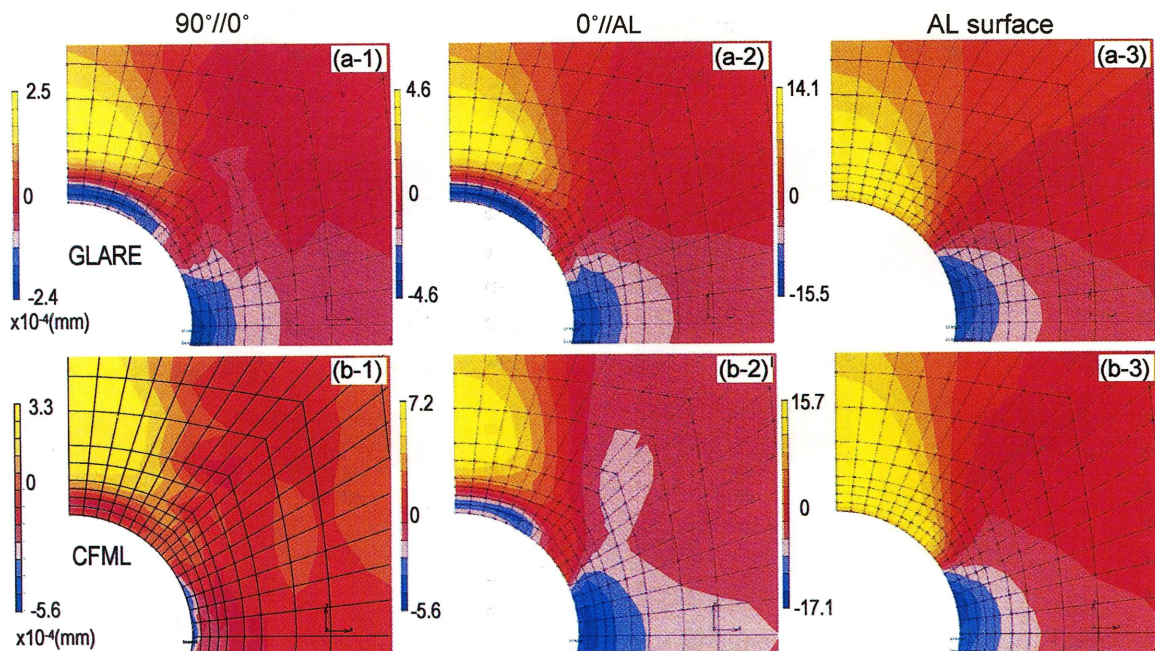


Fig.15 Displacement of the boundary and surface of FML at $\delta=0.16\text{mm}$ & $\mu=0.3$: (a) GLARE and (b) CFML

に記載した最大および最小値は解析対象の最大および最小になっており、必ずしも掲載図面の中に最大と最小の値があるわけではない。また、スケールバーの0位置(Z変位がゼロ)はおおむねその中心にあり、朱色に対応している。

引張りを受けるネットテンション位置では図示した全ての面でくぼみ、圧縮を受けるベアリング位置では試験片表面と両境界面では異なる挙動を示す。試験片表面は単に圧縮負荷によるポアソン効果で膨らんでいるだけであるが、両境界面では、見難いが(b-1)の場合も含み、接触面近傍でくぼみ、少し離れた位置で膨らんでいる。この様子は Fig.14 の左側面にも表れている。

ここには記載していないが、試験片の殆どの領域で弾性挙動を示し、0度位置では弾性挙動だけとなる $\delta=0.088\text{mm}$ のAL//0°では

(1) 圧縮側の最大くぼみはスケールバーの下から3段目
(2) 引張側の最大くぼみはスケールバーの下から1段目であるのに対して、Fig.15 ではこれらが全て下から1段目になっている。これは、 δ で無次元化した圧縮側のくぼみ量がFig.15で増加していることを示している。

弾性での境界面AL//0°のくぼみは、AL合金と0°層のポアソン比 ν_{yx} の差 $0.3-0.139=0.161$ に起因している。その前提として圧縮が局所化していることが必要である。塑性になるとこれに塑性の分が加わるため、くぼみ量の相対量が増加することになる。

では、何故、AL//0°のくぼみは表面の膨らみ領域と同じ様に広くないのか？これには、0°層の異方性が作用していると考えている。等方性ではせん断剛性は縦剛性の2.5から3分の1であるが、GFRPでは15分の1と小さい。このため応力があまり分散しない。同じ応力状態が繊維方向に続く傾向がある。AL合金では接触による圧縮が円孔周辺に留まるのに対し、0°材では0°方向に圧縮ひずみがそのまま伝わる割合が高い。このため、AL//0°においては0°層の圧縮に対する横方向の膨らみは広い範囲におきる。この結果、AL合金の局所的膨らみの影響が円孔面周辺で卓越し、円孔面から離れると0°層の膨らみが顕在化してくる。なお、ピンとの接触面では面外方向の変位は摩擦によって抑えられる。

この傾向はFig.15(b)に示すCFRPでも同様に見られる。しかし、以下の様な違いがある。

(1) GLAREの $\delta=0.088\text{mm}$ と同様なことがCFML($\delta=0.16\text{mm}$)でおきている。つまり、CFMLでは相対的くぼみ量が小さめになっている。
(2) 圧縮側の応力contourがGLAREに比べるとよりY軸方向に沿っている。GLAREではより扁平形状になる。
これらは次の材料定数の影響で考察する。

4.2 材料定数が面外応力 σ_{zz} に与える影響

Fig. 6から $\delta=0.16\text{mm}$ ではGLAREとCFMLの塑性ひず

みの差は小さく、Fig.15 からくぼみ量自体の差もあまりないことがわかる。しかしながら、Figs.10~13に示すように、層境界の面外応力はCFMLの方がGLAREより2~3倍程になる。ここではその内の1つ、1.5~2.2倍大きくなる垂直応力 σ_{zz} について考える。

σ_{zz} には横方向(厚さ方向)の剛性が主に影響を与えると考えられる。しかし、この考えでは、厚さ方向剛性がGFRPとCFRPそれぞれ7GPaと9GPaであり、その差が小さいため、1.5~2.2倍の違いを説明できない。

σ_{zz} 発生の主な原因はAL合金の局所的膨張にある。膨張したAL合金はFRP0°層を押し込み、押し込みに対する0°層の抵抗が σ_{zz} を導いている。また、CFML0°層の膨らみはGLARE0°層の膨らみに比べより繊維方向に広がっている。両者の違いは、局所的なものではなく、広範囲に発生する変形と言える。これは、AL合金の膨張に対する抵抗がFRP0°層の曲げから来ていることを示唆している。曲げ変形には縦剛性が関わっている。

曲げ変形と縦剛性を導いた今、改めて横方向剛性の役割について考える。ポアソン効果あるいは塑性変形によるAL合金の横方向への膨らみは0°層を押す。この局所的釣り合いは、横剛性に比例した力で理解できる。同時に膨らみの分布により、0°層は曲がってきた。これは縦剛性に比例する力となる。界面の変形は両者の和になる。つまり、AL合金の横方向への膨らみによる0°層の変形量は縦剛性に比例するものと横剛性に比例するものの和となる。横剛性の占める割合が大きい時には σ_{zz} の差は小さく、縦剛性の割合が大きい差は大きくなり、1と5の間に入ると考えられる。

ネットテンション部に発生する面外引張応力については同じ議論が成り立つ。しかし、せん断の応力集中は接触面に近いかなり狭い領域に集中している。界面の特異応力場の影響も考えられ、今後の課題としたい。

4.3 FRP層がAL合金塑性変形量に与える影響

塑性変形が端面に限定されている場合には、積層板のFRP層による面内拘束が小さい。このために δ が小さい範囲ではGLAREとCFMLの相当塑性ひずみに差はない。 δ が大きくなると塑性変形量は弾性FRP層と塑性状態になったAL合金の積層理論に従った動きをする。このため、違った挙動を示すようになる。0°位置のFig. 6から $\delta=0.12\text{mm}$ で塑性が始まり、 $\delta=0.16\text{mm}$ 辺りからFRPの影響が顕在化し始め、 $\delta=0.18\text{mm}$ 辺りからは積層理論に従った塑性変形増加がおきてくると考えられる。

4.4 初期損傷に関する検討

接触中心で発生するベアリング損傷になるよう機械継手設計が行われることが多い。しかし、疲労負荷ではFRPの耐力が高く、ネットテンション面で金属層に疲労亀裂が発生

する。ネットテンション面での σ_{zz} は引張であり、疲労時のモード I 剥離発生を導く、あるいはせん断応力 (τ_{yz} 、 τ_{zx}) によるモード II 剥離発生を助ける可能性がある。FRP による疲労亀裂抑制が実現するには、まず剥離を抑える必要がある。これには clamp up が肝要である。特に CFML では GLARE の3倍の引張になるので十分な注意が必要である。

準静的な破壊はベアリング面で発生する。この σ_{zz} は圧縮であり、剥離に対して高い抵抗を示すことが期待できる。

5. ま と め

FML としての実用化が進んでいる GLARE の機械継手の研究には実験解析が多く、解析的研究は少ない。また、破壊を対象にした数値解析は見かけられるものの、応力構造に関する詳細な報告は見かけない。そこで、CFML の数値応力解析に続き、今回 GLARE のピン・ジョイントについて、FEM 数値応力解析を実施した。金属の塑性変形、FRP と金属の接触と摩擦を取り入れた非線形解析になる。得られた解析結果を CFML ピン継手に関する FEM 応力解析結果⁹⁾と比較し、以下の結果を得た。

1. FML の初期損傷と関わりが深い面外応力 (σ_{zz} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx}) 分布には、ストロークおよび FRP 層材料定数を変えても有意な違いは認められない。
2. 面外応力値はほぼストロークに比例して増大する。
3. CFML の面外応力は GLARE のほぼ3倍の値を示す。 σ_{zz} について、その発生モデル、そして3倍となる機構を提案した。
4. ベアリング面での σ_{zz} は圧縮であり、ここでの界面剥離に関して CFML は安全側に位置する。しかし、ネットテンション面での σ_{zz} は引張であり界面の剥離発生を助長し、金属に発生する疲労亀裂抑制の点から CFML は危険側にある。

参考文献

- 1) A.Asundi and A.Y.N.Choi, J. Mater. Proc. Tech., **63**, (1997) 384-394
- 2) L.B.Vogelgesang and A.Vlot, Mater. Proc. Tech., **103**, (2000) 1-5
- 3) A.Vlot and J.W.Gunnink, "Fiber metal laminates an introduction," Kluwer Academic Publishers, (2001) 14-21
- 4) G.Marsh, Reinforced Plastics, **48**, (2004) 22-27
- 5) G.Caprino, A.Squillace, G.Giorleo, L.Nele and L.Rossi, Compo. A, **36**, (2005) 1307-1315
- 6) R.M.Frizzell, C.T.McCarthy and M.A.McCarthy, Compo. Sci. Tech., **68**, (2008) 3314-3321
- 7) 高祖京介、高雄善裕、九州大学応用力学研究所所報、**139**, (2010) 159-166
- 8) W.H.Chen, S.S.Lee and J.T.Yeh, Compo. Struc., **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 and W.X.Wang, Proc. ACCM6, o-077, (2008) 1-4