GFRP と金属材料の接着スカーフ継手における引張強度[†]

竹下 達郎* 松尾 圭造**

杉林 俊雄*** 池上 皓三****

Tensile Strength of Adhesive Scarf Joint between GFRP and Metals

by

Tatsuro TAKESHITA*, Keizo MATSUO**,

Toshio SUGIBAYASHI*** and Kozo Ikegami****

The strength evaluation of adhesive scarf joints under tensile load was investigated both analytically and experimentally. The scarf joints were constructed by two adherends of glass cloth laminated plastic (GFRP) and metal (carbon steel, brass, copper, or aluminium alloy). The adhesive was epoxy resin. The strain and stress distributions in the joints were analyzed by applying the elastic finite element method. The analytical strain distributions were in good agreement with the experimental ones.

The strength of the joints was predicted by applying the strength laws to the adherends, adhesive layer and their interfaces. The joint strength depended on the adhesive strength or interfacial strength for short overlaps, and depended on the strength of metal adherend for long overlaps. The overlap length have little effect on the initial failure stress of the joints for the case of the adherends of copper, brass and aluminium alloy.

Key words : Strength, Adhesive scarf joint, Finite element method, GFRP

1 緒 言

近年、繊維強化プラスチック（以下 FRP と呼ぶ）は軽量で強度の高い材料として注目され、航空宇宙機器、船舶、建築物等に広く用いられている材料である。FRP 製の機械要素を他の金属と結合して使用する場合に接着結合法を用いれば、機械的締結法を用いた場合と比較して、FRP の強度低下がなく、かつ付加重量が少ないという大きな利点が生じ、FRP の材料特性を十分に生かすことが可能となる。しかし、FRP を用いた接着継手に対する系統的な強度設計法は、まだ確立されているとは言えない。FRP と金属との接着構造に関する研究については、Barker らのボロン強化エポキシ樹脂とアルミニウムのスカーフ継手における応力解析や、Smith らの疲労に関する研究の他にはあまり見あたらない。そこで本報では、FRP と金属からなるスカーフ継手を取り上げ、FRP 材料にガラス繊維強化プラスチック（以下 GFRP と呼ぶ）を用い、金属材料に実用上よく利用される炭素鋼、黄銅、銅、アルミニウム合金の 4 種類の材料を用いて、スカーフ継手に、引張せん断負荷を加えたときの継手の応力分布を計算した。さらに強度則と組み合わせて行った継手の強度予測について、実験と解析の両面から検

討した。また、左右被着体の力学的性質の相違が継手強度に及ぼす影響についても検討した。

2 継手の応力解析および実験結果

2・1 解析方法および実験方法

Fig. 1 に解析に用いた継手の座標および各部の寸法を示す。継手の座標は継手の長手方向を x 軸、厚さ方向を z 軸、また接着層に平行な方向を s 軸、それに垂直な方向を n 軸とする。継手各部の寸法は、継手全長を l 、被着体長さを l_1 、重ね合わせ長さを l_2 、接着長さを l_3 とする。また、両被着体（左右被着体）の厚さ t_1 と接着層厚さ t_2 を一定とし、被着体の鋭角側の角度をスカーフ角 θ とする。なお、スカーフ形

Fig. 1. Coordinates and dimensions of the joints.

† 原稿受理 昭和62年11月16日 Received Nov. 16, 1987

* 東京工業大学大学院 横浜市緑区長津田町, Graduate student, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama

** 日本光学株式会社 東京都品川区西大井, Nippon Kogaku K. K., Nishiooi, Shinagawa-ku, Tokyo

*** 拓殖大学工学部 八王子市館町, Department of Technology, Takushoku University, Tate-machi, Hachiooji, Tokyo

**** 正会員 東京工業大学精密工学研究所 横浜市緑区長津田町, Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama

Table I. Material constants for the joints.

		GFRP	Steel	Copper	Brass	Aluminum alloy	Adhesive	Matrix
Young's modulus (GPa)	E_x	9.98	206	130	100	71.5	3.33	3.50
	E_z	7.56						
Shear modulus (GPa)	G_{xz}	1.60	77.4	48.5	37.0	26.7	1.24	1.29
	G_{xy}	3.22						
Poisson's ratio	ν_{xz}	0.14	0.33	0.34	0.35	0.34	0.34	0.35
	ν_{xy}	0.11						

状を表すパラメータとして、無次元化した $\bar{L}=l_2/l_1(=\cot\theta)$ を用いる。また、 s 方向の位置を無次元化して $\bar{S}=s/l_3$ で表す。ここで、 $\bar{S}=-0.5, 0, 0.5$ はそれぞれ継手の上面, 中央部, 下面を意味する。継手の材料には、左被着体に GFRP 積層板, 右被着体を実用上よく用いられる材料として炭素鋼, 黄銅, 銅, アルミニウム合金を用いた。GFRP を構成する繊維は平織ガラスクロス (日東紡 WF300-7N), 樹脂はビニルエステル樹脂 (昭和高分子リポキシ R-802) とした。また、接着剤としてエポキシ樹脂 (住友 3M 社製スコッチ・ウェルド 1838-A) を用いた。これらの材料定数を Table I に示す。試験片はハンドレイアップ法によって成形し、24 時間室温で硬化させた後、80°C で 5 時間キュアリングを行った。また試験片の繊維含有率は、体積含有率で 0.3 であった。

応力解析は有限要素法により三角形要素を用いて平面ひずみ状態を仮定して弾性解析で行った。Fig. 2 に要素分割および境界条件を示す。要素は、 x 方向で接着層を 4 等分割、被着体を 12 分割、 z 方向で 50 等分割した。なお、Fig. 2 では、図の複雑化を避けるため z 方向で 8 分割となっている。境界条件は、被着体左端部の各節点のうち中央だけを x, z 両方向固定とし、残りの節点は x 方向固定、 z 方向自由とした。荷重条件は、被着体の右端部の各節点のうち、上下両端の節点には外力 f を z 方向の分割数 (N) で割った値の $1/2$, すなわち $f/2N$ を、残りの節点には f/N を負荷した。

継手のひずみ測定は継手に 200 kgf を引張試験機により負荷して静ひずみ計を用いて行った。また、初期

Fig. 2. Finite element configurations and boundary conditions.

破損荷重および最終破断荷重は、引張試験機により負荷し、動ひずみ計とレコーダを用いて測定した。

2・2 ひずみ分布の解析結果と実験結果

継手の応力解析は継手全長を $l_1=160$ mm, 継手幅を 25 mm, 接着層厚さ $l_2=0.05$ mm として、被着体厚さ $l_1=8$ mm の場合について重ね合わせ長さ l_2 を変化させて行った。以下に例として GFRP とアルミニウム合金の継手について示す。

Fig. 3, 4 に $l_1=8$ mm, $l_2=0.05$ mm, $\bar{L}=5.0$ の継手に、引張荷重を継手断面積で割った平均応力 $\sigma_m=10$ MPa の負荷を加えたときの被着体の接着層近傍における s 方向のひずみ $\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz}$ の分布を示す。なお、以下引張負荷は、平均応力 σ_m で表すものとする。アルミニウム合金の方が GFRP より弾性係数が高いため、Fig. 4 では Fig. 3 に比べて、 $\bar{S}$ のすべての範囲についてひずみの絶対値は小さな値となっている。また $\bar{S}=-0.5, 0.5$ に近づくほど、すなわち被着体の上下面に近づくほどひずみは急激に変化している。この変化の程度は、 $\bar{S}=-0.5$, すなわち GFRP のスカーフ角が大きい方で著しい。また金属被着体の場合は、アルミニウム合金の場合と比べるとひずみの絶対値が小さく、継手端部におけるひずみの増加のこう配が急であったが、その傾向は二つの継手とも類似していた。

Fig. 3. Distribution of strains in GFRP adherend.

Fig. 4. Distribution of strains in aluminum adherend.

このように、被着体が GFRP と金属材料の場合には弾性係数が著しく異なるため、被着体のひずみ分布の変化が大きい。これは、ひずみ分布が平滑だった同種金属材料の場合や、その変化が小さかった異種金属材料の場合と大きく異なる点である。

Fig. 3, 4 に GFRP とアルミニウム合金の継手に平均応力 $\sigma_m = 10 \text{ MPa}$ を負荷した場合のひずみ分布の測定結果も示す。使用したひずみゲージはゲージ長 1 mm のもので、接着界面に沿って金属接着体および GFRP 被着体に貼付した。スカーフ継手の場合被着体の鋭角部のひずみ測定は困難であるため、GFRP 被着体では $-0.50 < \bar{S} < 0.25$ 、金属被着体では $-0.25 < \bar{S} < 0.50$ の範囲の測定にとどまっている。これらの図からもわかるように、測定結果は解析結果とはほぼ一致しており、解析に用いた境界条件は妥当と考えられる。

2・3 接着層における応力分布の解析結果

Fig. 5 ~ Fig. 7 に $t_1 = 8 \text{ mm}$ 、 $t_2 = 0.05 \text{ mm}$ 、 $\bar{L} = 0, 2.0, 5.0, 10.0$ の継手に、 $\sigma_m = 10 \text{ MPa}$ の負荷を加えたときの接着層のアルミニウム合金被着体近傍における応力 σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz} の分布を示す。 $\bar{L} = 0$ の継手では、応力は $\bar{S} = 0$ すなわち継手の中央面について対称となっている。また、いずれの形状の継手も $\bar{S} = -0.5, 0.5$ 付近で応力が急激に変化しており、特に $\bar{S} = -0.5$ で応力が集中していることがわかる。これは Fig. 3, 4 のひずみ分布の結果と一致している。

つぎにスカーフ形状が応力分布に及ぼす影響をみると、 σ_x 、 σ_z については $\bar{L} = 0$ でほぼ平滑な分布となっているが、その応力の絶対値は高くなっている。また、 $\bar{L} = 2.0$ では他と比べて応力分布の変化が著しく、 $\bar{S} = -0.5, 0.5$ における応力の絶対値も大きい値を示している。 $\bar{L}$ の値が大きくなるにつれて応力は平滑に

Fig. 5. Distribution of stress σ_x in adhesive layer.

Fig. 6. Distribution of stress σ_z in adhesive layer.

Fig. 7. Distribution of stress τ_{xz} in adhesive layer.

分布し、継手全体の応力値も小さくなる傾向がみられる。一方 τ_{xz} についてみると、スカーフ形状の応力分布に及ぼす影響は σ_x 、 σ_z に比べて小さいが、Fig. 5, 6 と同様 $\bar{L}$ の値が大きくなるにつれて応力が平滑に

分布する傾向がみられる。

3 継手の強度予測および実験結果

3・1 強度則

継手の強度予測は、継手を GFRP 被着体、金属被着体、被着層、接着界面の四つの部分に分けて各々の強度則と応力解析結果を組み合わせて行った。^{5), 6)}

被着体および接着層に対しては、ホフマン則⁷⁾、金属被着体と接着層との界面に対しては接着強度則⁸⁾を用いた。また、GFRP に用いる樹脂と接着剤の弾性係数等の力学的性質がほぼ等しいため、GFRP の樹脂と接着剤を区別せず、GFRP が金属被着体に直接接着しているものとした。すなわち、両被着体および接着層に対して用いる強度則は、

$$Fa = \frac{\sigma_x^2}{F_{tx}F_{cx}} + \frac{\sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_z}{F_{tz}F_{cz}} + \frac{F_{cx} - F_{tx}}{F_{tx}F_{cx}}\sigma_x + \frac{F_{cz} - F_{tz}}{F_{tz}F_{cz}}\sigma_z + \frac{\tau_{xz}^2}{F_{sxz}^2} = 1 \quad (1)$$

また、接着界面に対して用いる強度則は薄肉円筒試験片により、引張りとねじり負荷の組合せ応力下で求めた実験式で、

$$Fi = \left| \frac{\sigma_n}{F_n} \right|^m + \left| \frac{\tau_s}{F_s} \right|^m = 1 \quad (2)$$

である。ここで、式(1)の定数 F_{tx} 、 F_{tz} は x 、 z 方向の引張強度、 F_{cx} 、 F_{cz} は x 、 z 方向の圧縮強度、 F_{sxz} は xz 面内のせん断強度、式(2)の F_n 、 F_s は n 、

Fig. 8. Strength distribution in the joint.

s 方向の接着強度であり、これらの値を Table II に示す。⁸⁾ また、 σ_n および τ_s はそれぞれ接着界面に働く垂直応力およびせん断応力である。以上の式を満足するような外力を与えたときに継手が初期破損をおこすと考え、そのときの外力を継手強度として評価した。

3・2 強度予測結果

継手の強度予測は継手内の各部の応力分布を強度則(1)、(2)に適用して行った。Fig. 8 に代表例として、被着体が GFRP とアルミニウム合金の継手で、 $t_1=8$ mm、 $\bar{L}=5.0$ の継手の強度分布を模式的に示す。図中の σ_c は、継手各部の応力 σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz} が式(1)、(2)の強度則を満足するときの平均応力を意味する。これより GFRP 被着体、金属被着体、接着層、接着界面とも金属被着体の鋭角側、すなわち図面では上側の接着層近傍の値が小さいのがわかり、この近傍から破損することを示唆している。また、継手全体でみた場合、 σ_c の値はアルミニウム合金の鋭角部分が最小であり、この継手はアルミニウム被着体のこの部分から破損することを示している。これは、Fig. 5, 6, 7 でわかるように $\bar{S}=-0.5$ の部分、すなわち継手の上部に応力が集中しているためである。

Fig. 9 ~ 12 にスカーフ形状と継手各部の強度の関係を、被着体厚さ $t_1=8$ mm で、被着体の金属材料がアルミニウム合金、銅、黄銅、炭素鋼の4種類の継手について示す。縦軸に、継手に負荷を加えることにより継手が破断するときの荷重を継手断面積で割った平均破断応力 σ_c を示す。横軸に重ね合せ長さ l_2 を被着体厚さ t_1 で割って無次元化した $\bar{L}$ を示す。また図中には、継手の破損する部分もあわせて示す。これらを見ると、金属被着体は $\bar{L}=2.0$ の付近で強度が急激に減少しており、また $\bar{L}$ の増加にともなって強度が減少している。その強度の値は、炭素鋼、黄銅、銅、アルミニウム合金の順に高く、材料の持つ強度に依存していることがわかる。GFRP 被着体では、 $\bar{L}=3.0$ 付近を軸に、破損箇所が下面から上面に、すなわち鋭角

Table II. Constants of strength laws.

		GFRP	Steel	Copper	Brass	Aluminum alloy	Adhesive
Tensile strength (MPa)	F_{tx}	215	343	78.0	118	69.0	64.0
	F_{tz}	25.0					
Compressive strength (MPa)	F_{cx}	243	200	45.0	68.0	40.0	37.0
	F_{cz}	497					
Shear strength (MPa)	F_{sxy}	39.7	31.5	47.1	50.8	41.2	—
	F_{syz}	98.0					
Interfacial strength (MPa)	F_n	—	30.8	44.2	48.1	41.2	—
	F_s	—	8.66	1.26	1.05	2.00	—
	m	—	—	—	—	—	—

Fig. 9. Variation of joint strength against adhesive length (aluminum alloy).

Fig. 11. Variation of joint strength against adhesive length (brass).

Fig. 10. Variation of joint strength against adhesive length (copper).

Fig. 12. Variation of joint strength against adhesive length (carbon steel).

側から鈍角側に変わっている。また $\bar{L}$ の増加とともに強度も増加する傾向があるが、 $\bar{L}=1.5$ 付近で最小となっている。接着剤および接着界面でも、GFRP 被着体と同様、 $\bar{L}$ の増加とともに強度も増加する傾向がみられ、また、 $\bar{L}=1.5 \sim 2.5$ 付近で最小となっている。任意のスカーフ形状 $\bar{L}$ の継手全体の強度を評価するには Fig. 9 ~ Fig. 12 中の $\bar{L}$ の値におけるもっとも弱い部分の破損応力 σ_c を求めればよい。これは継手が最初に破損するときの応力、すなわち初期破損のおこる強度を意味する。

3.3 強度予測結果と実験結果の比較

Fig. 13 に継手の強度評価実験において、継手が破断するまでの引張荷重を継手断面積で割った平均応力 σ_m と、ひずみ ϵ_x の関係の代表的な例を示す。 ϵ_x は GFRP 被着体の鈍角側の接着層近傍における x 方向

のひずみである。これをみると、金属被着体が黄銅で $\bar{L}=5.0$ の継手では、38MPa 付近でひずみが急激に増加しており、初期破損がおこったことがわかる。さらに、85MPa 付近でひずみが急激に増加した後、116MPa で継手が破断している。また、同様に金属被着体が炭素鋼で $\bar{L}=10.0$ の継手では、87MPa 付近で初期破損がおこり、110MPa で破断している。100MPa 付近から最終破断までひずみが減少しているのは、ひずみを測定した部分が完全にはく離して、応力集中が解放されたためと考えられる。一方、アルミニウム合金 $\bar{L}=7.5$ の継手は、前述した二つの継手とは異なり、30MPa 付近で曲線がゆるやかに変化している。これは金属被着体が塑性変形したためで、やはり初期破損したと考えられる。

Fig. 9 ~ Fig. 12 に各々の継手に対する強度評価実

Fig. 13. Variation of strain ϵ_x in GFRP adherends.

験の結果を示す。○は初期破損のおこる応力値を、●は最終破断のおこる応力値を表しており、初期破損と最終破断が同時におこった場合は、その応力値を初期破損○で表した。これらの図をみると、いずれの継手の場合にも初期破損について実験結果と解析結果はよく一致している。また、重ね合せ長さの短い継手では、初期破損と最終破断が同時におこっていることがわかる。これは、 $\bar{L}$ の値の小さな継手では破損は接着界面から起こるため、界面に生じたき裂が瞬時に進行して継手が破断に及ぶためだと考えられる。最終破断応力が初期破損応力に比べて実験結果にばらつきがあるのは、接着面全体の接着状態が最終破断に影響するためと考えられる。

3・4 弾性係数の継手強度に及ぼす影響

被着体が異種材料の場合には、上述したように継手の応力状態が複雑になり、被着体の機械的性質の相違が継手強度に影響を及ぼすものと考えられる。そこで被着体の弾性係数の相違が継手強度に及ぼす影響について検討する。Fig. 14 に被着体の弾性係数の変化に対する継手強度の変化の解析結果を、代表的な5種類の重ね合せ長さの継手について示す。なお、金属被着体は塑性変形をもって破損とするため、金属被着体を除いたもののうち、最も強度の低い継手部分の破断応力、すなわち最終破断の平均応力 σ_c を縦軸に、横軸には金属被着体の弾性係数 E_m と GFRP 被着体の x 方向の弾性係数 E_g の比、 E_m/E_g を示す。

これをみると、いずれの継手においても、弾性係数の比の変化は継手の強度に大きな変化を与えないが、両被着体の弾性係数が近い継手ほど強度が高いことがわかる。また、その変化も重ね合せ長さの長い継手ほど

Fig. 14. Variation of joint strength against Young's moduli of adherends.

ど大きい。つぎに、重ね合せ長さで継手強度の関係についてみると、 $\bar{L}=2.0$ の継手が一番強度が低いものの、一般に重ね合せ長さの長いほど継手の強度が高いことがわかる。さらに、 $\bar{L}=0 \sim 5.0$ の重ね合せ長さが短い継手では、重ね合せの長さの変化は継手強度に大きな影響を与えないが、 $\bar{L}$ の値が大きくなると、重ね合せ長さの変化が継手強度に大きく影響していることがわかる。

Fig. 15 に被着体の弾性係数の変化に対する接着層中央部 ($\bar{S}=0$) および接着層端部 ($\bar{S}=0.49$) における応力の変化を示す。これを見ると $\bar{S}=0$ では、被着体の材質にかかわらず応力の変化は平滑で、その値は小さい。しかし $\bar{S}=0.49$ では被着体の弾性係数の比が大きい継手ほど各応力の絶対値が大きくなっており、継手強度が小さいことを示している。

4 結 言

本報では、被着体が GFRP と金属材料のスカーフ

Fig. 15. Variation of stress in adhesive layer against Young's moduli of adherends.

継手（突合せ継手も含む）に引張せん断負荷を加えたときの、継手の変形と強度について解析と実験の両面から検討した。金属被着体には、炭素鋼、黄銅、銅、アルミニウム合金を用いた。まず、継手に一定の引張せん断負荷を加えたときの継手内のひずみ分布、応力分布を有限要素法により解析した。つぎに、継手内に生じる各応力の値と強度則を組み合わせて継手の強度について予測し、その結果の妥当性を実験により確かめた。また、被着体の弾性係数の相違による継手強度の変化についても検討した。以上の結果をもとに、次のような結論を得た。

(1) 被着体がGFRPと金属材料の場合は、被着体が同種金属材料あるいは異種金属材料の場合と比較して、被着体のひずみ分布、および応力分布の変化は著しく大きい。

(2) 接着層に生じる応力は、継手の上面と下面で急激に増加しており、応力の絶対値はGFRP被着体の鈍角側のほうが大きい。また重ね合せ長さが長い継手ほど、応力分布は平滑で、かつ応力の絶対値も小さい。

(3) 継手強度の初期破損値を継手材料の各強度則から予測した。その解析結果は、実験結果とよく一致していた。

(4) 金属被着体が、アルミニウム合金、黄銅、銅の継手の初期破損応力は、重ね合せ長さの変化に対して

あまり影響を受けない。

(5) 重ね合せ長さの長い継手では、初期破損応力と最終破断応力の間に相違がみられる。

(6) 継手の左右被着体の弾性係数の差が小さい方が、継手強度（最終破断応力）が高い。

(7) 重ね合せ長さが短い継手では、重ね合せ長さの変化は継手強度（最終破断応力）に大きな影響を与えないが、重ね合せ長さが長い継手では、重ね合せ長さの変化が継手強度に大きく影響する。

参 考 文 献

- 1) R. M. Barker and F. Hatt, AIAA Journal, 11-2, 1650 (1957).
- 2) M. A. Smith and R. Hardy, Composites, 8, 255 (1977).
- 3) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-53, 499 (1987).
- 4) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-53, 506 (1987).
- 5) 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-50, 1557 (1984).
- 6) 松尾圭造, 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-52, 2031 (1986).
- 7) 林 毅, “複合材料工学”, p. 593 (1971) 日科技連.
- 8) 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, C-50, 17 (1984).