＜論 文＞

(受理：平成11年7月2日)

一様温度変化を受けるスカーフ接着継手の熱応力

中川 文人*・沢 俊行**・仲野 雄一***・勝尾 正秀***

要 旨

本研究では一様温度変化を受けるスカーフ接着継手内部の熱応力を光弾性法と有限要素法を用いて検討した。被着体はアルミ板、接着層はエポキシ樹脂板でモデル化して製作した。被着体とエポキシ樹脂板を熱硬化性エポキシ樹脂系接着剤を用いて、高温で熱硬化させ室温まで冷却した。エポキシ樹脂板内部の熱応力は光弾性実験により測定した。その後スカーフ接着継手を冷却し、界面端部から生じるはく離を観察した。界面端部からはく離は、接着層側の鋭角側から起こり鈍角側からは起こらないことを確認し、さらにスカーフ角が90度の時が最もはく離に対し強度が小さいことがわかった。接着界面端部付近の応力分布を用いて応力特異性について検討し、静的荷重と熱的荷重が作用する場合の応力特異性がそれぞれ異なることを明らかにした。

1. 緒 言

熱硬化性接着剤は耐熱性にすぐれ、さらに引張りおよびせん断接着強さも他の接着剤に比べ優れており、機械構造用に多く使用されている。一方、接着剤は被着体と線膨張係数が異なることが一般的である。熱硬化性接着剤の場合、接着剤が高温で熱硬化した後に室温まで冷却されるため、室温で接着接合部に熱応力が発生する。このような熱応力の存在は接着継手の強度に大きな影響を及ぼすことも予想される。溶接や接着等による異種材料どうしの接合部に関して、接合端部の応力特異性が解析的に研究されている¹⁾。異材接合端部の熱応力の特性²⁾についても詳細に検討されている。しかし、接着継手の場合には接着層が非常に薄く材質の異なる被着体に挟まっているため、接着層内部の界面端部における熱応力の分布は、異種材料接合端部における熱応力分布とはかなり異なることも予想される。単純重ね合せ継手または突合せ継手では、接着界面端部の被着体側テーパ部の角度は90度または180度である。スカーフ接着継手においては接着層側界面端部のテーパ部角度が鈍角と鋭角の組合せになっており、接着層内部の界面端部の応力集中が軽減

されることが推測される。静的荷重を受けるスカーフ継手に関してはLubkinらによる応力解析を始めとして、多数の研究報告³⁻¹⁹⁾があるが、熱的荷重を受けるスカーフ接着継手に関する研究はあまりなされていないようである。

実際の接着層厚さは数十 μm から数百 μm と非常に薄い、接着層厚さが異なっても、接着層内部の応力分布には相似関係があると考えられる。そこで本研究では接着層をエポキシ樹脂板でモデル化し、熱硬化性接着剤を用いてスカーフ接着継手を製作した。エポキシ樹脂板内部の熱応力を光弾性実験により測定し、さらに界面端部から生じるはく離についても観察した。一様温度変化を受けるスカーフ接着継手のエポキシ樹脂板または接着層内部の熱応力は二次元有限要素法により解析し、スカーフ角やエポキシ樹脂板または接着層厚さが界面端部の熱応力分布に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験方法と実験結果

実際の接着層内部の熱応力分布を直接測定することはかなり困難である。本研究では、接着層をエポキシ樹脂板でモデル化したスカーフ接着継手を製作し光弾性実験によりエポキシ樹脂板内部の熱応力を測定した。Fig. 1は一様温度変化を受けるスカーフ角が θ 'のスカーフ接着継手形状寸法を示す。上下の被着体ⅠとⅢの材料はアルミ板とし、接着層Ⅱの材料は光弾性実験用エポキシ樹脂板とした。エポキシ樹脂板はウオータジェット加工機により切断した。接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板

* 東京都立航空工業高等専門学校 機械工学科
東京都荒川区南千住 8-52-1 〒116-0003

** 山梨大学工学部 機械システム工学科
山梨県甲府市武田 4-3-11 〒400-0016

*** 湘南工科大学 機械工学科
藤沢市辻堂西海岸 1-1-25 〒251-0046
(原稿受付日：平成11年4月22日)

Fig. 1 Scarf joint bonded with epoxide resin adhesive under uniform temperature change
 $(2h=20\text{mm } (\theta'=90^\circ, 60^\circ, 52^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 2h'=50\text{mm}),$
 $2h=5\text{mm}, 10\text{mm } (\theta'=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 52^\circ, 40^\circ, 30^\circ,$
 $2h'=43\text{mm}), l_1+l_2+l_3=160\text{mm } (2h=20\text{mm}), l_1+l_2+l_3=$
 $150\text{mm } (2h=10\text{mm}), t=60\text{mm}, \Delta T=-50^\circ\text{C},$
 $E_1=69.6\text{GPa}, \nu_1=0.33, \beta_1=23.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C},$
 $E_2=3.43\text{GPa}, \nu_2=0.38, \beta_2=60 \times 10^{-6}/^\circ\text{C})$

の高さ $2h$ は 20mm , 10mm 及び 5mm とした。 $2h$ が 20mm の時, スカーフ接着継手幅 $2h'$ は 50mm とし, スカーフ角 θ は 30° , 45° , 52° , 60° および 90° の 5 種類 2 個づつ製作した。 $2h$ が 5mm と 10mm の継手は $2h'$ は 43mm とし, スカーフ角 θ は 30° , 40° , 52° , 60° , 75° および 90° の 6 種類 2 個づつ製作した。Fig. 1 で $2h=10\text{mm}$ ($2h'=43\text{mm}$) の継手では $l_2+l_3=160\text{mm}$, $2h=20\text{mm}$ ($2h'=50\text{mm}$) では $l_1+l_2+l_3=150\text{mm}$ とした。被着体とエポキシ樹脂板を一液の熱硬化性エポキシ樹脂系接着剤 (EP128, CEMEDINE) を用いて約 85°C で熱硬化させ, その後徐々に冷却し, 室温で光弾性実験を行った。さらに継手を段階的 (-5°C , 3 段階/日) に -70°C まで冷却し, はく離開始位置を観

察した。その後室温にもどして再び光弾性実験を行った。

Fig. 2 は光弾性実験結果により得られた等色線しま模様を示す。接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板の高さ $2h$ を 20mm とし, スカーフ角 θ が 30° と 52° の継手を示す。界面端部近傍では等色線の間隔がせまくなり応力が集中していることがわかる。スカーフ角 θ が 45° , 60° 及び 90° の継手の場合でも界面端部では, 同様な応力集中が生じていることが認められた。

Fig. 3 ははく離実験後の光弾性実験により得られた等色線しま模様を示す。Fig. 3 からエポキシ板内側の接合角度が鋭角側 (30° と 52°) で部分的にはく離が生じ, 鈍角側 (150° と 128°) でははく離は生じていないことがわかる。また, スカーフ角 θ が 45° と 60° の継手の場合でも, 同様に界面端部の接合角度が鋭角側 (45° と 60°) で部分的にはく離が生じており鈍角側 (135° と 120°) でははく離が生じていないことがわかった。スカーフ角 θ が 90° の場合は全面にはく離が生じ, はく離に対する強度が最も小さいことがわかった。

Fig. 4 は, 接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板高さ $2h$ が 10mm の継手の光弾性実験結果を, また Fig. 5 は, エポキシ樹脂板高さ $2h$ が 5mm の継手の光弾性実験結果を示す。両者の比較より, 接着層内部の等色線しま模様は相似形であることが認められる。光弾性実験の後, $2h=10\text{mm}$ と $2h=5\text{mm}$ のスカーフ継手についてもはく離実験を行った。 $2h=20\text{mm}$ のスカーフ接着継手と同様に, はく離は界面端部の鋭角側から開始し, 鈍角側からは開始しないことがわかった。

3. 解析方法

一様温度変化を受けるスカーフ接着継手の二次元有限要素法熱応力解析は Fig. 1 に示す継手形状で行った。

(a) $\theta' = 52^\circ$

(b) $\theta' = 30^\circ$

Fig. 2 Isochromatic fringe patterns from photoelastic measurements ($2h=20\text{mm}$, $2h'=50\text{mm}$)

(a) $\theta' = 52^\circ$

(b) $\theta' = 30^\circ$

Fig. 3 Isochromatic fringe patterns from photoelastic measurements after delamination growth occurred ($2h=20\text{mm}$, $2h'=50\text{mm}$)

Fig. 4 Isochromatic fringe patterns from photoelastic measurements ($2h=10\text{mm}$, $2h'=43\text{mm}$) Fig. 5 Isochromatic fringe patterns from photoelastic measurements ($2h=5\text{mm}$, $2h'=43\text{mm}$)

スカーフ角 θ' が 90 度の場合は $1/4$ モデルとし、その他のスカーフ継手では継手全体を Fig. 1 に示す形状にモデル化した。接着層側の界面端部の接合角度は鋭角側と鈍角側と同じ記号 θ で表すことにする。接着界面端部の接着層の鋭角側角度 θ はスカーフ角 θ' と同じになり、鈍角側角度 θ は $(180^\circ - \theta')$ となる。エポキシ樹脂板を使わず被着体どうしを直接接着したスカーフ接着継手では、接着層厚さ $2h$ を 0.05mm とした。

被着体の縦弾性係数、ポアソン比及び線膨張係数をそれぞれ E_1 , ν_1 及び β_1 とする。エポキシ樹脂板及びエポキシ樹脂系接着剤の被着体の縦弾性係数、ポアソン比及び線膨張係数はそれぞれ E_2 , ν_2 及び β_2 とする。接着層としてエポキシ樹脂板を用いるスカーフ接着継手の場合被着体、接着層及びエポキシ樹脂からなる 5 層の接合体であるが、本研究では接着層材料とエポキシ樹脂板は同一材料であるので一体とみなして応力解析を行った。

有限要素法 (FEM) による解析には MARC または FINAS を使用し、プリ・ポストプロセッサには MENTAT または CADAS/W を使用した。解析は、

弾性域で行い、接着層としてエポキシ樹脂板を使用するスカーフ接着継手 ($2h=10\text{mm}$, 20mm) の熱応力解析では 4 節点平面応力要素を使用した。要素数は 2592 ~ 3024 (全体モデル) とした。接着層がほぼ実際の厚さ ($2h=0.05\text{mm}$) の継手では、8 節点平面ひずみ要素を使用し、要素数は 960 (全体モデル) とした。

4. 解析結果

上下の被着体 I と III の材料はアルミ板とし、接着層 II の材料は熱硬化型エポキシ樹脂系接着剤とした。材料定数は Fig. 1 中に示す。接着剤の熱硬化温度と常温との差を $\Delta T = -50^\circ\text{C}$ とし一様温度変化とみなした。

Fig. 6 は接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板の高さ $2h$ が 20mm とした場合で、接着界面上の最大主応力 σ_1 の分布を示す。縦軸は最大主応力 σ_1 を $E_2\alpha_2|\Delta T|$ で除し無次元化し、横軸は界面端部 o' および o'' からの位置 x' および x'' をエポキシ樹脂板高さ $2h$ で除し無次元して示す。接合角度 θ は 30, 45, 52, 60, 90, 120, 128, 135 および 150 度とした。図から接合角度 θ が 30

Fig. 6 Effects of corner angle on maximum principal stress at the interface ($2h=20\text{mm}$)

Fig. 7 Effects of corner angle on normal stress at the interface ($2h=20\text{mm}$)

Fig. 8 Effects of corner angle on shear stress at the interface ($2h=20\text{mm}$)

度では応力特異性を示さないが接合角度 θ が 40 度以上では全て応力特異性を示した。界面端部近傍で応力が急激に増加する領域は界面端部から数 mm ありこの場合は応力特異性が継手強度に及ぼす影響は大きいことが推測される。最大主応力 σ_1 は、非常に狭い範囲では、 θ が鋭角側の方が鈍角側よりも大きい。

Fig. 7 は接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板高さ $2h$ が 20mm で、接着界面上の垂直応力 σ_y の分布を示す。接合角度 θ が 30 度から 90 度増加するにつれ、また 150 度から 90 度に減少するにつれ、垂直応力 σ_y は増加することがわかる。垂直応力 σ_y は鋭角側では引張り応力を示した。鈍角側では、界面端部に近づくにつれ、一旦圧縮応力（マイナス）になり、次に 150 度を除き、プラス側に増加し引張り応力を示した。Fig. 7 から、界面端部近傍では、 σ_y は鈍角側よりも鋭角側の方が大きいことが認められる。本研究で取り扱う接着剤のような脆性材料の場合、き裂は応力特異点周囲の円周上で最大応力が作用する方向の直角方向（半径方向）に進行すると考えられる。この考え方（ $\sigma_{\theta_{\max}}$ クライテリオン）²⁰⁻²¹⁾ から、はく離は接着層界面端部のテーパ部において、鈍角側ではなく鋭角側から開始することが予想される。Fig. 7 からのはく離に対する強度はスカフ角が 90 度の時（突合せ継手の時）最小であることが予測される。

Fig. 8 は接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板高さ $2h$ が 20mm で接着界面上のせん断応力 τ_{xy} の分布を示す。縦軸はせん断応力を $E_2\alpha_2|\Delta T|$ で除し無次元化し、横軸は界面端部 o' および o'' からの位置 x' および x'' を接着層厚さ $2h$ で除し無次元して示す。Fig. 8 からせん断応力 τ_{xy} は、鋭角側よりも鈍角側の方が大きいことがわかる。Fig. 7 と Fig. 8 より、鋭角側では、垂直応力 σ_y が、鈍角側では、せん断応力が支配的であることがわかる。

引張り荷重が作用するスカフ継手では、接着界面端部において応力特異性が消失する最適なスカフ角度が存在することが知られている³⁾。被着体がアルミ板、接着層がエポキシ樹脂の時の最適スカフ角は 51.8° （ $\approx 52^\circ$ ）²²⁾ であった。

Fig. 1 に示すスカフ継手と同じ形状で静的な引張り荷重のみ作用する場合について FEM により計算し、界面端部テーパ部の鋭角側が 52° 、鈍角側が 128° の時、応力特異性が消失し応力分布が平坦になることを確認した。また、応力特異性の指数 λ を Fig. 6 に示す最大主応力 σ_1 の界面端部近傍の応力分布から求めた。

Fig. 9 は応力特異性の指数 λ と界面端部接着層側の接合角度との関係を示す。横軸は界面端部接着層側の

合角度 θ (鋭角側と鈍角側) を、縦軸は応力特異性指数 λ を示す。点線と実線はそれぞれ、平面応力状態と平面ひずみ状態の理論的解析結果を示す。▼印 (FEM (MARC)) および △印 (FEM (FINAS)) は静的荷重を受けるスカーフ接着継手界面端部の応力分布から得られた特異性指数 λ を示す。◆印 (FEM) は熱的荷重を受けるスカーフ接着継手の応力分布から得られた特異性指数 λ を示す。

Fig. 9 からスカーフ角 30 度で鋭角側 30 度 (この場合鈍角側 150 度) の時は特異性指数 λ は零に近いがその他の角度ではすべてプラスの値を示した。したがって、熱的荷重が作用するスカーフ接着継手では最適なスカーフ

フ角は存在しないことがわかる。

Fig. 10 は接着層厚さ $2h$ が 0.05mm の場合で、接合角度が接着界面上の最大主応力 σ_1 の分布に及ぼす影響を示す。スカーフ角が 30 度、52 度および 90 度の場合を示し、他の角度については省略した。横軸は界面端部からの位置 x' と x'' を接着層厚さ $2h$ で除し無次元化して示す。Fig. 10 から接着層厚さの約 3 倍より内部では、すべての接合角度 θ について、無次元化された最大主応力 σ_1 はほぼ一定値 (約 1.4) を示していることがわかる。界面端部近傍では接合角度 θ が 30 度から 90 度までは接着層内部の応力が一旦減少し界面端部に近づくにつれまた急激に増加する傾向がある。しかし応力が急激

Fig. 9 Effects of corner angle of epoxide resin plate on the order of stress singularity λ ($2h=20\text{mm}$)

Fig. 11 Effects of corner angle on normal stress at the interface ($2h=0.05\text{mm}$)

Fig. 10 Effects of corner angle on principal stress at the interface ($2h=0.05\text{mm}$)

Fig. 12 Effects of corner angle on shear stress at the interface ($2h=0.05\text{mm}$)

に増加する領域は数 μm 程度であり、接着長さと比較すると非常に小さく継手強度に及ぼす影響は小さいことが推測される。

Fig. 11 は接着層厚さ $2h$ が 0.05mm で接合角度 θ が、垂直応力 σ_y の分布に及ぼす影響を示す。垂直応力 σ_y は界面端部近傍で圧縮応力になることがわかる。また応力特異性を示す範囲は数 μm であることがわかる。

Fig. 12 は接着層厚さ $2h$ が 0.05mm で接合角度 θ が、せん断応力 τ_{xy} の分布に及ぼす影響を示す。

Fig. 6-Fig. 8 と Fig. 10-Fig. 12 のグラフ横軸に関して、界面上の位置を接着層厚さで除し無次元化して表示している。この時、Fig. 10-Fig. 12 に示す各応力成分 (σ_1 , σ_y , τ_{xy} , $2h=20\text{mm}$) の分布は Fig. 6-Fig. 8 に示す各応力成分 (σ_1 , σ_y , τ_{xy} , $2h=0.05\text{mm}$) の分布に相似関係にあることが認められる。

5. 結 言

得られた結果は次のとおりである。

(1) 一様温度変化を受けるスカーフ接着継手の界面端部接合角度が鋭角側と鈍角側について熱応力を比較検討した。鈍角側では垂直応力は界面端部の非常に小さな範囲で急激に増加するが、界面端部近傍では圧縮応力を示した。鋭角側では、垂直応力が支配的であり、はく離は鋭角側の界面端部から開始することが予測された。さらにこの予測は実験結果と良く一致することを示した。

(2) 接着層をエポキシ樹脂板でモデル化したスカーフ継手を熱硬化性接着剤を用いて製作した。高温で熱硬化したスカーフ継手が常温まで冷却された後接着層に相当するエポキシ樹脂板内部に生じた熱応力を光弾性実験により測定した。接着層厚さに相当するエポキシ樹脂板の高さ ($2h=5\text{mm}$, 10mm , 20mm) を変化させたところ、エポキシ樹脂板内部に発生する熱応力分布は相似関係にあることがわかった。

(3) 光弾性実験に用いたスカーフ継手を室温から段階的に -70°C まで冷却しはく離進展を測定した。その結果、はく離は全てエポキシ樹脂板の鋭角側界面端部から開始することを確かめた。また接合角度が 90° の突合せ継手が最もはく離に対する強度が小さいことがわかった。

(4) 静的荷重が作用するスカーフ接着継手では、接着界面端部の応力特異性が消失し、鋭角側と鈍角側が同時に応力分布が平坦になるスカーフ角度が存在することが確かめられた。しかし、熱的荷重が作用する場合は、鋭

角側と鈍角側が同時に応力分布が平坦になるスカーフ角度が存在しないことを確かめた。

(5) FEM による解析結果から、接着層界面端部では接着層厚さが 0.05mm の場合とエポキシ樹脂板でモデル化した場合 ($2h=5\text{mm}$, 10mm , 20mm) では応力分布は相似関係にあることがわかった。接着層厚さが 10mm の場合は界面端部において応力が急激に増加する範囲が比較的大きく、応力特異性が継手強度に及ぼす影響は大きい。しかし接着層厚さが 0.05mm の場合、界面端部の応力が急激に増加する範囲の大きさが数 μm と非常に小さく、応力特異性が継手の強度に及ぼす影響は小さいことが推測された。

(6) 接着層厚さが 0.05mm の継手では、界面端部で応力特異性を示しているが、界面端部からやや内側で界面に対する垂直応力が圧縮応力になっている。そのため、接着継手を冷却した場合に残留熱応力のみでは界面端部からのはく離進展は生じないことが予測された。

参 考 文 献

- 1) D. B. Bogy, J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME, 38, 377 (1971-6)
- 2) 井上忠信, 古口日出男, 日本機械学会論文集, 61-591, A, 2461 (1995-11)
- 3) J. L. Lubkin, J. Appl. Mech., 24-255, 255 (1957)
- 4) Thein Wah, Int. J. Mech. Sci., 18, 223 (1976)
- 5) Thein Wah, Int. J. Solids Structures, 12, 491 (1976)
- 6) 松本 淳, 小幡 鍊, 鈴木靖昭, 日本接着学会誌, 14-8, 288 (1978)
- 7) 松田 弘, 山口小三郎, 日本接着学会誌, 15-8, 305 (1979)
- 8) 永弘太郎, 能野謙介, 上田 宏, 日本接着学会誌, 17-12, 499 (1981)
- 9) 鈴木靖昭, 松本 淳, 小幡 鍊, 日本接着学会誌, 18-1, 7 (1982)
- 10) 鈴木靖昭, 日本機械学会論文集, 50-449, A, 67 (1984-1)
- 11) 鈴木靖昭, 日本機械学会論文集, 50-451, A, 526 (1984-3)
- 12) 鈴木靖昭, 日本機械学会論文集, 50-455, A, 1341 (1984-7)
- 13) 鈴木靖昭, 日本機械学会論文集, 51-463, A, 926 (1985-3)
- 14) 鈴木靖昭, 日本機械学会論文集, 53-487, A, 514 (1987-3)
- 15) D. W. Adkins and R. B. Pipes, Composites Science and Technology, 22, 209 (1985)
- 16) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, 53-487, A, 499 (1987-3)
- 17) 京極秀樹, 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, 53-487, A, 506 (1987-3)
- 18) M. Imanaka, J. Adhesion, 59, 111 (1996)
- 19) 川脇賢剛, 仲野雄一, 日本接着学会誌, 35-3, 105 (1999)
- 20) F. Erdogan, G. C. Sih, Journal of Basic Engineering, Trans. of the ASME, Ser. D, 85-12, 519 (1963)
- 21) 結城良治, 許 金泉, Siegfried Schmauder, 日本機械学会論文集, 57-536, A, 864 (1991-4)
- 22) 結城良治, 界面の力学, 培風館, 263 (1993)

<Original>

Thermal Stress of Scarf Adhesive Joint Under Uniform Temperature Changes

Fumito NAKAGAWA*, Toshiyuki SAWA**, Yuichi NAKANO**
and Masahide KATSUO****

*Tokyo Metropolitan College of Aeronautical Engineering
8-52-1 Minamisenju Arakawa-ku, Tokyo, 116-0003 Japan

**Department of Mechanical Engineering, Yamanashi University
4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi, 400-0016 Japan

***Department of Mechanical Engineering, Shonan Institute of Technology
1-1-25 Tsujido Nishikaigan Fujisawa, 251-0046 Japan
(Accepted for publication : July 2, 1999)

Abstract

This study dealt with thermal stresses and delamination growth in scarf joints under uniform temperature change by photoelastic measurement and a two-dimensional finite element analysis. The adherends were aluminum plates and an adhesive layer was modeled and manufactured from an epoxide resin plate. Adherends and epoxide resin plate were bonded using a heat setting and one component type adhesive. The adhesive was cured at high temperature and cooled to room temperature. The thermal stress was then generated in the scarf joint during temperature change and measured by the photoelastic experiments. After that the scarf joints were cooled stepwise, delamination growth from the edge of the interface was measured. It was confirmed that the delamination initiated from the edge of the interface was not the obtuse angle side, but the acute angle side. When the scarf angle was 90 degree, i.e., in adhesive butt joints, the resistance against the delamination was minimum. The thermal stresses in the scarf joints with thin adhesive layer were also analyzed. It was expected that the thermal strength increased with a decrease of an adhesive layer thickness. The stress singularity near the edge of the interface was calculated from the stress distributions in the joints with different scarf angles. As a result, the stress singularity in the scarf joints under thermal loads was quite different with that under mechanical tensile loads.

(Received : April 22, 1999)