層内に円孔欠陥と剛体充てん物を有する 突合せ接着継手の二次元熱応力*

勝 尾 正 秀^{*1}, 仲 野 雄 一^{*1}
川 脇 賢 剛^{*2}, 沢 俊 行^{*3}

Two-Dimensional Thermal Stress Analysis in Butt Adhesive Joints Containing Hole Defects and Rigid Fillers in Adhesive

Masahide KATSUO, Yuichi NAKANO,
Masataka KAWAWAKI and Toshiyuki SAWA

This study is concerned with the thermal stress analysis of a butt adhesive joint which contains circular holes and fillers in the adhesive and is under non uniform temperature field. In the analysis, the adherends and fillers are assumed to be rigid and the adhesive is replaced with a finite strip containing holes and rigid fillers and the thermal stress distribution in the adhesive is analyzed using a two-dimensional theory of elasticity. The effects of size and location of circular holes and rigid fillers on the stress distributions at the interface and at the filler and hole peripheries are clarified by numerical calculations. For verification, photoelastic experiments were performed using an epoxide resin plate containing small holes and fillers, to model an adhesive in the joint. The analytical results were fairly consistent with the experimental ones.

Key Words: Elasticity, Thermal Stress Analysis, Butt Adhesive Joint, Photoelasticity, Thermoelastic Potential, Hole Defect, Rigid Filler

1. 緒 言

構造物の軽量化や異種材料間の接合が比較的容易であるほか半導体の例のように部品の超小形化に応用しやすいなどの利点から接着継手が多く分野で用いられている。最近、接着構造の強度に関する多くの研究がなされ^{(1)~(6)}、特に静的荷重が作用する場合は継手強度の予測が可能となりつつある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また、接着剤にゴムやアルミナ等の充てん物を添加し継手の静的・動的あるいは電気的・熱的特性を改善することも広く試みられている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。一方、接着継手の温度環境の変化により容易に熱応力が発生することも知られているが継手の熱的強度に関する研究はこれまで比較的少なく^{(11)~(13)}、特に添加した充てん物や接着時に混入した気泡や不純物等が継手の熱的強度に与える影響については、被着体温度場が同一の突合せ接着継手で円孔欠陥または充てん物をそれぞれ単独に有する場合の著者らの研究⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾のほかにはあまり見当たらない。

そこで本研究は、より実際の継手とその使用環境を考慮し、接着層内に気泡に相当する円孔欠陥と充て

ん物を同時に有する突合せ接着継手で、被着体がそれぞれ異なる温度に保たれた場合の継手の熱的強度を検討する。継手は定常温度場とし、二次元弾性論(平面応力)を用いて熱応力解析を行い、また、解析に基づく数値計算より円孔欠陥および充てん物の大きさや位置等が接着界面や円孔および充てん物周縁の熱応力分布に及ぼす影響を明らかにする。併せて、接着層をエポキシ樹脂板でモデル化した継手を用いて接着層内部の熱応力分布を光弾性実験により求め、解析結果と比較検討する。

2. 理 論 解 析

図1に、同一寸法、材質の被着体が接着剤により突合せ接着され、さらに接着層中心を原点とする x 軸上でその中心($x=0$)に半径 a の充てん物、中心から $x=\pm O_x$ の位置に半径 a の円孔を有する継手の解析モデルを示す。被着体はそれぞれ温度、 T_1 , T_2 に保持され、接着層側面において周囲の 0°C の流体と熱伝達率 α で熱移動があるものとする。また、接着層を高さ $2h$ 、幅 $2l$ の有限長帯板に置き換え、その縦弾性係数を E 、ポアソン比を ν 、線膨張係数を β および熱伝導率を K とする。なお、本研究ではこれらの定数の温度依存性を考慮せず一定とした。また、紙面に垂直な方向の温

* 原稿受付 1995年6月28日。

^{*1} 正員、湘南工科大学 (〒252 藤沢市辻堂西海岸1-25)。

^{*2} 学生員、湘南工科大学大学院。

^{*3} 正員、山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

度分布がない二次元問題とし、さらに、被着体および充てん物を剛体とみなし接着層について解析を行う。

2.1 温度分布 熱応力を解析するに当たり、最初に接着層の温度分布の解析を行う。なお、この温度分布の解析においては簡単化のため円孔や充てん物がない二次元有限長帯板として行う。接着層の温度分布を $T(x, y)$ とおくと、定常状態における二次元熱伝導問題の基礎式は式(1)のように表される。

$$\nabla^2 T(x, y) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、境界条件は接着層界面における温度および接着層側面の流入エネルギー一定の関係から式(2)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} T(x, +h) &= T_1, \quad T(x, -h) = T_2 \\ -K \frac{\partial T(\pm l, y)}{\partial x} &= \pm \alpha T(\pm l, y) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)の境界条件を考慮し、基礎式(1)の変数分離解から $T(x, y)$ は式(3)のように表される。

$$\begin{aligned} T(x, y) = & \sum_{s=1}^{\infty} \left\{ A_s \frac{\cosh(\lambda'_s y)}{\cosh(\lambda'_s h)} \right. \\ & + B_s \frac{\sinh(\lambda'_s y)}{\sinh(\lambda'_s h)} \left. \right\} \cos(\lambda'_s x) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cosh(\alpha'_n x)}{\cosh(\alpha'_n l)} \{ C_n \cos(\alpha'_n y) + D_n \sin(\alpha'_n y) \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$$\alpha'_n = \frac{2n-1}{2h} \pi, \quad \lambda'_s = \frac{2s-1}{2l} \pi \quad (n, s = 1, 2, 3, \dots)$$

であり、また、式中の A_s, B_s, C_n, D_n は式(2)の境界条件と等値することから求められる未定係数である。

2.2 熱応力 図1に示した解析モデルにおいて熱応力のほかに外力が作用せず、上下被着体と接着層内の充てん物が剛体であるとした場合、接着層境界、円孔および充てん物周縁における応力と変位に関する境界条件は次のように表される。

Fig.1 Model for analysis of butt adhesive joint containing circular holes and rigid filler in adhesive

接着層境界において、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x = \tau_{xy} &= 0 \quad (x = \pm l) \\ u_x = \frac{\partial v_y}{\partial x} &= 0 \quad (y = \pm h) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4 \cdot a)$$

円孔周縁において、

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0 \quad (r = a) \quad \dots\dots\dots (4 \cdot b)$$

剛体充てん物周縁において、

$$u_r = v_\theta = 0 \quad (r = a) \quad \dots\dots\dots (4 \cdot c)$$

$\dots\dots\dots (4)$

ここで、 u_x, v_y は x, y 方向、 u_r, v_θ は r, θ 方向の熱変位を表す。

接着層の熱応力を解析するために熱弾性ポテンシャル $\Omega(x, y)$ を用いると、 $\Omega(x, y)$ と温度分布 $T(x, y)$ との関係は一般に式(5)で表され、これと式(3)から接着層の熱弾性ポテンシャル $\Omega(x, y)$ は式(6)のように表される。

$$\nabla^2 \Omega(x, y) = T(x, y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \Omega(x, y) = & \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{2\lambda'_s} \left\{ A_s y \frac{\sinh(\lambda'_s y)}{\cosh(\lambda'_s h)} \right. \\ & + B_s y \frac{\cosh(\lambda'_s y)}{\sinh(\lambda'_s h)} \left. \right\} \cos(\lambda'_s x) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x \sinh(\alpha'_n x)}{2\alpha'_n \cosh(\alpha'_n l)} \{ C_n \cos(\alpha'_n y) \\ & + D_n \sin(\alpha'_n y) \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、 $\Omega(x, y)$ による熱応力 $(\sigma_{xo}, \sigma_{yo}, \tau_{xyo})$ と熱変位 (u_{xo}, v_{yo}) はそれぞれ式(7)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xo} &= -E\beta \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2}, \quad \sigma_{yo} = -E\beta \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} \\ \tau_{xyo} &= E\beta \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y} \\ 2Gu_{xo} &= E\beta \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \quad 2Gv_{yo} = E\beta \frac{\partial \Omega}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで G は接着剤の横弾性係数である。

しかし、一般に式(6)および式(7)による解だけでは式(4)で示した接着層の境界条件を満足しない。そこで、これらの境界条件を満足する解を得るため次の手順で解析を行う⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。すなわち、

手順1：円孔欠陥および剛体充てん物を含まない有限長帯板の解析

境界条件式(4・a)を満足させるため $\Omega(x, y)$ により接着層各境界 $(x = \pm l, y = \pm h)$ に生じる応力 σ_{xo}, τ_{xyo} と変位 $u_{xo}, \partial v_{yo} / \partial x$ を零とするような新たな境界条件を用いた円孔および充てん物を含まない幅 $2l$ 、高さ $2h$ の有限長帯板の解析を行う [図2(a)]。このとき、文献(16)に示した直角座標表示のエアリの応力関数 χ を用いる。

手順2：有限長帯板内の円孔欠陥および剛体充てん物周縁の応力と変位の解析

応力関数 χ を用いた手順 1 の解より有限長帯板内の円孔欠陥周縁および剛体充てん物周縁 ($r=a$) に相当するそれぞれの位置での応力 $\sigma_r, \tau_{r\theta}$ と変位 u_r, v_θ を求める。

手順 3：円孔欠陥または剛体充てん物を有する無限板の解析

境界条件式(4・b)を満足させるため、手順 2 で生じた円孔欠陥周縁 ($r=a$) の応力 $\sigma_r, \tau_{r\theta}$ を零とする新たな境界条件を用いて円孔を有する無限板の解析を行う[図 2 (b)]。このとき、極座標表示のエアリの応力関数 Ψ_1 を用いると、一般に Ψ_1 は式(8)のように与えられる⁽¹⁷⁾。

$$\begin{aligned} \Psi_1(r, \theta) = & A_0\theta + B_0 \log r + A_1 r \log r \cos \theta \\ & + B_1 r \theta \sin \theta + C_1 r \theta \cos \theta \\ & + D_1 r \log r \sin \theta \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n r^{-n} + B_n r^{-n+2}) \cos(n\theta) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n r^{-n} + D_n r^{-n+2}) \sin(n\theta) \quad \cdots \cdots (8) \end{aligned}$$

式中の $A_0, B_0, A_n, B_n, C_n, D_n (n=1, 2, 3, \dots)$ は未定係数であり、これらは手順 2 で生じた円孔欠陥周縁の応力 $\sigma_r, \tau_{r\theta}$ をフーリエ級数展開し、各係数を比較することにより決定される。同様に、式(4・c)を満足させるため、充てん物周縁 ($r=a$) の変位 u_r, v_θ を零とする新たな境界条件を用いて、剛体充てん物を有する無限板の解析を式(8)と同様な応力関数 Ψ_2 を用いて行う。

手順 4：無限板内の接着層境界に相当する位置の応力と変位の解析

手順 3 で得られた円孔と充てん物を有する無限板の

各応力関数 Ψ_1, Ψ_2 による接着層境界 ($x=\pm l, y=\pm h$) に相当する位置での応力 σ_x, τ_{xy} と変位 $u_x, \partial v_y / \partial x$ を計算し、これらを打ち消すため再び手順 1 に戻り解析する。

以上のようにして、境界条件式(4)を十分に満足するまで手順 1～手順 4 を繰返し行うことにより、最終的に接着層内部の応力と変位分布が得られる。また、多数の円孔や充てん物を有する場合についても同様の手順で行える。

3. 実験方法

図 3 は光弾性実験に用いた接着継手の寸法・形状を示す。接着層は厚さ 6 mm のエポキシ樹脂板でモデル化し、あらかじめ三つの円孔(直径 5 mm)をそれぞれ中心および中心から ± 20 mm の位置にあけた。被着体とエポキシ樹脂板、充てん物とエポキシ樹脂板の穴との接着にはエポキシ系接着剤(住友 3 M, 1838 B/A)を用い、50°C 一定に保持した電気炉内で硬化させた。なお、被着体および充てん物は構造用炭素鋼 S 45 C とし、その縦弾性係数(206 GPa)とエポキシ樹脂板の縦弾性係数(3.43 GPa)との比はおおよそ 60 であり、このことから相対的にこれらは剛体とみなした。また、エポキシ樹脂板の線膨張係数、ポアソン比、熱伝導率をそれぞれ $\beta = 70 \times 10^{-6} 1/K$, $\nu = 0.38$, $K = 0.32 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ とした。

実験にあたって、継手モデルの上部被着体は 2 枚の厚さ 1 mm の薄ヒータ(50 W/100 V)を両面に密着し電圧を制御することにより一定温度に加熱保持し、下部被着体は一定温度の水槽内にいれ一様温度に保った。被着体の温度分布を熱電対(線径 0.1 mm)により計測し、定常温度状態に達したことを確認した後にエ

(a) Stresses and displacements at boundaries of adhesive

(b) Stresses at hole periphery and displacements at filler periphery

Fig. 2 Illustration of analytical method

Fig. 3 Dimensions of butt adhesive joint used in photoelastic experiment

ポキシ樹脂板内の等色線しまの撮影を行った。

4. 結果と考察

接着層内に円孔欠陥および剛体充てん物を有する接着継手の熱的強度を予測するため、接着層中心に充てん物、 $x=\pm O_x$ の位置に円孔を有する継手(1)と、逆に、中心に円孔、 $x=\pm O_x$ の位置に充てん物を有する継手(2)の2種類の継手に対して接着界面、円孔および充てん物周縁の最大主応力分布を数値計算により求めた。なお、それぞれ接着層側面において 0°C の流体と熱伝達率 $\alpha=200\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ で熱移動があるものとした。以下の数値計算においては、2章の理論解析においてエアリの応力関数 χ および Ψ_1, Ψ_2 を決定する際に得られる無限連立一次方程式の級数の項数 N を 80

とした。また、手順1～手順4の繰返し回数は5回とし、6回との各応力値の差が1%以下になり、実用上十分収束したものとみなした。

4.1 円孔・充てん物径が熱応力分布に与える影響

実際の接着層には大小さまざまな気泡や充てん物が混在しているものと考えられる。そこで、4.1節では、接着層厚さに対する円孔・充てん物径を相対的に変えた場合の接着界面、円孔および充てん物周縁の熱応力分布を継手(1)および(2)について求めた。なお、円孔と充てん物は同一直径とし、また、上下被着体は接着後、周囲流体温度より低い同一温度に保たれるとした。

4.1.1 継手(1) [1充てん物-2円孔]

図4に継手(1)の場合の円孔・充てん物径と接着層厚さの比 $a/h=0.2, 0.5$, および 0.8 における熱応力を最大主応力 σ_1 で表し、さらに以下の図においては $(E\beta T_0)$ で除し無次元化して示した (T_0 は継手側面の流体と被着体の温度差)。図4(a)は接着界面 ($y=\pm h$) の最大主応力分布で、界面の位置を示す横軸も被着体の半幅 l で除し無次元化表示している。なお、この場合、応力分布の対称性から継手右半分の界面について示す。図4(b)は接着層中心の充てん物周縁 ($r=a$) の無次元化した最大主応力分布で、同様に対称性から $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$ の周縁について示す。図4(c)は中心から $x=0.5l$ の位置にある円孔周縁の無次元化した最大主応力分布で、図4(b)と同様に $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$ の周縁について示す。この結果、図4(a)より、接着界面の無次元化した最大主応力は引張応力となり、界面端部 ($x/l=1.0$) では応力の特異性を示す。また、 a/h が大きくなるに従い充てん物上部 ($x=0$) の界面においては最大主応力が減少し、円孔上部の界面 ($x=0.5l$) では増加する傾向を示す。図4(b)より、剛体充てん物周縁の最大主応力分布は $\theta=\pm 45^\circ$ および $\pm 135^\circ$ 近傍で最大値を示し、また、相対的に充てん物径が大きくなるに従い、その値が大きくなる傾向を示す。一方、図4(c)より、円孔周縁では $\theta=\pm 90^\circ$ で最大主応力が最大となり、円孔径が相対的に小さくなるに従いその値は大きくなる傾向を示す。さらに図4(b), (c)の比較から充てん物周縁に比べ円孔周縁の最大主応力が大きいことがわかる。

4.1.2 継手(2) [1円孔-2充てん物]

図5に継手(2)の場合の円孔・充てん物径と接着層厚さの比 $a/h=0.2, 0.6$ および 0.8 における、図5(a)接着界面 ($y=\pm h$)、図5(b)接着層中心の円孔周縁、図5(c)中心から $x=0.5l$ の充てん物周縁のそれぞれ無次元化した最大主応力分布を示す。図5(a)より、

Fig. 4 Effect of ratio a/h on maximum principal thermal stress distribution: joint (1) ($h/l=0.2, O_x/l=0.5, T_1=T_2=-100^\circ\text{C}$)

接着界面の最大主応力分布は継手(1)と同様に剛体充てん物上部の界面($x=0.5l$)において減少し、充てん物径が相対的に大きくなるに従い最大主応力の低下が顕著になる傾向を示す。また、円孔上部の界面中央部においては円孔径が大きくなるにつれ($a/h=0.8$)急減に減少する。図5(b)の円孔周縁の最大主応力は、継手(1)と同様に $\theta=\pm 90^\circ$ で最大値となり円孔径が相対的に小さくなるに従い増大する。また、図5(c)の充てん物周縁においては $\theta=\pm 45^\circ$ および $\pm 135^\circ$ 近傍で最大主応力が大きく、特に充てん物径が大きい $a/h=0.8$ では自由端側($\theta=\pm 45^\circ$)で最大となる。また、この継手(2)の場合も充てん物周縁より円孔欠陥周縁の最大主応力が大きいことがわかる。

以上の結果より、いずれの継手においても接着界面

(a) At interface ($y=\pm h$)

(b) At circular hole periphery ($O_x=0$)

(c) At rigid filler periphery ($O_x=0.5l$)

Fig. 5 Effect of ratio a/h on maximum principal thermal stress distribution: joint (2) ($h/l=0.2$, $O_x/l=0.5$, $T_1=T_2=-100^\circ\text{C}$)

端部で熱応力は特異性を示している。これに対し Boggy⁽¹⁸⁾ や服部ら⁽¹¹⁾ は応力特異場の強さ K と特異性の指数 λ の二つのパラメータを用いて $Kr^{-\lambda}$ の形で特異応力場を表している。ここで r は界面端部からの距離を示す。一方、結城ら⁽¹⁹⁾ は熱応力の場合には上記の形の特異性のほかにさらに $\log r$ 形の特異性が生じることを示している。これらの応力特異性は継手の熱的強度に大きく影響することが予想される。本計算条件に

Fig. 6 Effect of rigid filler position on maximum principal thermal stress distribution at interface: joint (2) ($h/l=0.2$, $a/h=0.2$, $T_1=T_2=-100^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Effect of circular hole position on maximum principal thermal stress distribution at hole periphery: joint (1) ($h/l=0.2$, $a/h=0.2$, $T_1=T_2=-100^\circ\text{C}$)

Fig. 8 Effect of circular hole and rigid filler positions on maximum principal stress values at each periphery: joint (1), (2) ($h/l=0.2$, $a/h=0.2$, $T_1=T_2=-100^\circ\text{C}$)

においても端部近傍の応力値は円孔および充てん物周縁の応力値に比べ大きな値を示し、熱応力による破壊の開始点となることが予測されるが、実際の継手の熱的強度と界面端部の応力特異性の関係を明らかにすることは極めて重要であり、今後実験的確認も含めさらに

詳細な検討を行う必要がある。

なお、接着層内部で破壊が進行する場合は円孔欠陥および充てん物周縁の応力分布の比較から円孔欠陥のほうが、特に円孔径が小さくなるほど応力集中が大きくなり、破壊の起点となることが予想される。

(a) At interface ($y = \pm h$)

(b) At circular hole and rigid filler periphery

Fig.9 Effect of adherend temperature on maximum principal thermal stress distribution: joint (1)
($h/l=0.2$, $a/h=0.2$, $O_x/l=0.5$, $T_1=-100^\circ\text{C}$, $T_2=0^\circ\text{C}$)

(a) Isochromatic pattern by photoelasticity ($T_1 = T_2 = -20^\circ\text{C}$)

Numerically obtained isochromatic pattern

(b) Isochromatic pattern by photoelasticity ($T_1 = -15^\circ\text{C}$, $T_2 = -20^\circ\text{C}$)

Numerically obtained isochromatic pattern

Fig.10 Photoelastic experimental results and comparison with numerical results: joint (1)

(a) Isochromatic pattern by photoelasticity ($T_1 = T_2 = -20^\circ\text{C}$)

Numerically obtained isochromatic pattern

(b) Isochromatic pattern by photoelasticity ($T_1 = -15^\circ\text{C}$, $T_2 = -20^\circ\text{C}$)

Numerically obtained isochromatic pattern

Fig.11 Photoelastic experimental results and comparison with numerical results: joint (2)

4・2 円孔欠陥および剛体充てん物の位置が熱応力分布に与える影響

4・2・1 接着界面の応力分布 図6は継手(2)において、 $a/h=0.2$ の剛体充てん物が接着層自由端近傍($O_x/l=\pm 0.7, \pm 0.8$ および ± 0.9)にある場合の接着界面の最大主応力分布を示す。なお、図中の実線は比較のため円孔および充てん物を含まない場合の応力分布を示したものである。この結果、層内に充てん物を含む場合、接着界面の応力分布は自由端近傍で低下する傾向を示し、充てん物の位置が自由端に近いほど顕著になる。一方、継手(1)で円孔欠陥の位置を変えた場合の接着界面の最大主応力分布の変化は今回の計算条件において極めて小さくその影響は認められない。

4・2・2 円孔欠陥と剛体充てん物周縁の応力分布

図7は継手(1)において $O_x/l=\pm 0.1, \pm 0.5$ および ± 0.9 にある $a/h=0.2$ の円孔欠陥周縁($r=a$)の最大主応力分布を示す。同図より円孔位置が接着層中心に近いほど無次元化した最大主応力が大きくなり、いずれの場合も $\theta=0^\circ$ と 180° の周縁では応力が減少する。最大主応力の最大値は円孔欠陥位置が $O_x/l=0.7$ より小さく接着層中心側にある場合は $\theta=\pm 90^\circ$ 近傍で最大主応力値となるが、接着層自由端側に近づく $O_x/l=0.9$ の場合は $\theta=\pm 50\sim 55^\circ$ で最大値となる。

図8は継手(1)と継手(2)においてそれぞれ円孔欠陥および充てん物位置が変化した場合の各周縁の最大主応力の最大値を示す。この結果、円孔欠陥周縁の最大主応力値は自由端近傍を除き剛体充てん物周縁の値より大きい。また、円孔欠陥の最大主応力値は円孔が自由端に近づくほど単調に減少するが、充てん物周縁の最大主応力値は充てん物が接着層中心または自由端に近づくほど増加する傾向にある。

4・3 被着体が異なる温度に保たれた場合 図9は継手(1)において上下被着体温度をそれぞれ $T_1=-100^\circ\text{C}$ 、 $T_2=0^\circ\text{C}$ とした場合の最大主応力分布を示す。図9(a)は上下接着界面の応力分布を示し、図中の実線は被着体温度が -100°C 側、破線は 0°C 側の接着界面を表す。この結果、最大主応力は接着層側面の流体との温度差が大きい -100°C 側の接着界面でより大きいことがわかる。図9(b)はこの場合の剛体充てん物(実線)および円孔欠陥周縁(破線)の最大主応力分布を示す。充てん物周縁では上下被着体の温度差による変化は極めて小さいが、円孔周縁においては温度差により最大応力となる点が被着体温度が同一の図4(c)の場合($\theta=\pm 90^\circ$)に比べ偏心する。

4・4 実験結果 図10に継手(1)(充てん物位置 $x=0$ 、円孔位置 $x=\pm 20\text{ mm}$)の光弾性実験結果を示

す。図10(a)は継手の上下被着体が同一温度に保たれた場合(接着時との温度差 $T_1=T_2=-20^\circ\text{C}$)の接着層をモデル化したエポキシ樹脂板内に生じた等色線しまを表す。また、図10の右側に光弾性実験と同じ温度条件で数値計算により求めた等色線しま(図中の数字は等色線しまの次数)を示す。なお、対称性から継手の右半分だけについて示している。図10(b)は継手の上部と下部の被着体温度が異なる場合($T_1=-15^\circ\text{C}$ 、 $T_2=-20^\circ\text{C}$)の光弾性実験と数値計算による結果を示す。

図11は継手(2)(円孔位置 $x=0$ 、充てん物位置 $x=\pm 20\text{ mm}$)の光弾性実験結果と数値計算結果を示す。図10と同様に図11(a)は被着体温度が同一、図11(b)は被着体温度が異なる場合である。

図10, 11の結果から、いずれの継手の場合も光弾性実験結果と数値計算結果はよく一致することがわかる。

5. 結 言

本研究では、層内に円孔欠陥および剛体充てん物を有し、上下被着体が接合時と各々異なる一様温度に保たれ、接着層側面で周囲の流体と熱移動がある突合せ接着継手の熱応力解析を行った。解析に基づいて数値計算を行い、円孔欠陥と充てん物の大きさや位置が接着界面や円孔欠陥、充てん物周縁の熱応力分布に及ぼす影響を検討した。併せて継手モデルによる光弾性実験を行い解析結果と比較検討し、次の結果を得た。

(1) 接着層内に円孔欠陥と剛体充てん物を有する突合せ接着継手において、剛体とみなした被着体が接合時と異なる温度環境にある場合の接着層の定常熱応力分布を二次元弾性論により解析する方法を示した。

(2) 被着体が接着時より低い温度環境にある場合、接着界面では引張りの最大主応力が生じる。

(3) 接着界面の最大主応力分布は端部で応力の特異性を示す。また、剛体充てん物が接着層の自由端側にある場合、接着界面端部近傍の最大主応力が緩和される。

(4) 充てん物が自由端近傍にある場合を除き、円孔欠陥周縁の応力集中は充てん物周縁の応力集中より大きい。また、円孔欠陥が小さいほど応力集中は増大する。

(5) 二つの被着体温度が異なる場合、最大主応力は周囲流体との温度差の大きい被着体との接着界面側のほうが大きい。

文 献

- (1) Erdogan, F. and Ratwani, M., *J. Composite Mater.*, 5

- (1971), 378-393.
- (2) 池上皓三・ほか2名, 機論, **50**-457, A (1984), 1557-1564.
- (3) 沢俊行・ほか2名, 機論, **52**-476, A (1986), 919-925.
- (4) Bigwood, D. A. and Crocombe, A. D., *Int. J. Adhesion and Adhesive*, **9**-4 (1989), 229-242.
- (5) 森きよみ・杉林俊雄, 機論, **55**-519, A (1989), 2211-2217.
- (6) Schmueser, D. W. and Johnson, N. I., *J. Adhesion*, **32** (1990), 171-191.
- (7) 能野謙介・永弘太郎, 機論, **52**-479, A (1986), 1698-1707.
- (8) Adams, R. D., *J. Adhesion*, **30** (1989), 219-242.
- (9) Sohn, J. E., *J. Adhesion*, **19** (1985), 15-27.
- (10) Jakusik, R., ほか2名, *J. Adhesion*, **32** (1990), 245-254.
- (11) 服部敏雄・ほか3名, 機論, **54**-499, A (1988), 597-603.
- (12) 尾田十八・ほか3名, 機論, **57**-541, A (1991), 2050-2056.
- (13) Kokini, K. and Smith, C. C., *Exp. Mech.*, **29**-3 (1989), 312-317.
- (14) 仲野雄一・ほか2名, 機論, **58**-546, A (1992), 250-256.
- (15) 中川文人・ほか2名, 機論, **58**-554, A (1992), 1921-1927.
- (16) 仲野雄一・ほか2名, 機論, **53**-496, A (1987), 2439-2355.
- (17) 中原一郎, 応用弾性学, (1977), 166, 実教出版.
- (18) Bogy, D. B., *J. Appl. Mech.*, **38** (1971), 377-386.
- (19) 結城良治・許金泉, 機論, **58**-556, A (1992), 2394-2400.
-