中空軸突合せ接着継手の熱応力解析*

中川 文人^{*1}, 仲野 雄一^{*2}, 沢 俊行^{*3}Thermal Stress in Adhesive Butt Joints of Hollow Shafts
in Steady Temperature Field

Fumito NAKAGAWA, Yuichi NAKANO and Toshiyuki SAWA

This study deals with the thermal stress and strain distributions in an adhesive butt joint which is composed of two hollow shafts. The butt joints are joined by an epoxide-type adhesive and kept at a constant temperature. In the analysis, when the shafts and an adhesive are replaced with finite hollow cylinders respectively, the temperature distribution in a joint is calculated based on the thermal conditions of the joint. Then, thermal stresses are analyzed as a three-body contact problem by the axisymmetric theory of elasticity. The effects of the ratios of Young's modulus, the coefficient of thermal expansion and the thickness of the adhesive on the thermal stress distribution at the interface between the adherend and adhesive are studied as general cases. Moreover, thermal stress in the joints of hollow and solid shafts under uniform temperature change is examined by numerical calculations as special cases of the joints. In the experiments, an adhesive is modeled by an epoxide disc-shape plate and the thermal strains are measured by strain gages which are mounted on the outer surface of the shaft close to the interface between the shaft and the epoxide plate. The analytical results of the thermal strain distribution are compared with the experimental ones measured by the strain gages and it is shown that they are in fairly good agreement.

Key Words: Elasticity, Thermal Stress, Adhesion, Butt Joint, Hollow Shaft, Thermoelastic Potential, Peel Strength, Stress Singularity

1. 結 言

航空機, 自動車, 車両, 電気, 電子デバイス等の組立工程では, 従来からボルト, リベット, 溶接, 半田等の接合方法が多く使用されている。さらに上記の分野における組立工程においては, 特に板材等接合面積が広い場合は, 最近接着剤がその信頼性の向上とともに使用されるようになってきている。一般的に, 構造用接着継手においては, 被着体と接着剤の材料定数が大きく異なっているので, 他の接合方法に比べ接着時の残留応力の発生等の問題が生じる欠点がある。このため従来より接着界面の力学的強度評価に関する多数の研究がなされている^{(1)~(6)}。一方, 自動車部品, 電気部品, 配管系統等では中空軸または中実軸形状部品どうしの接合にもボルト等と併用されてまた単独に接着剤が使用されている^{(7)~(9)}。このような接着軸継手が温度変動下で使用される場合, 継手に外力が作用しない場合でも周囲の温度変動で, 破損・変形が予想されるので, 熱的強度評価に関する研究も実用上重要な問題と考えら

れる。従来より突合せ接着継手の熱応力の問題に関しては, 著者らの二次元解析⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾がなされているが軸対称三次元問題を扱った例はいくつかの例^{(12)~(14)}を除いてかなり少ないようである。一般に突合せ軸継手においては, 突合せ面をはめ合う構造とすることが多く, 温度変動を受ける場合には, 接着面に作用するはく離応力に対する強度の検討が必要と考えられる。

本研究では中空軸突合せ接着継手の熱応力と熱ひずみを三次元軸対称問題として弾性論による解析方法を示し, 解析に基づいて数値計算を行い, 被着体中空軸と接着剤の材料定数および熱的定数の比の違い, 接着層の厚さ, 継手形状等が接着層と被着体との界面における熱応力の分布に及ぼす影響を明らかにする。さらに解析結果を確かめるためにある定常温度場に置かれている中空軸および中実軸の突合せ接着継手の熱ひずみを測定し解析結果と比較検討する。

2. 理 論 解 析

図1は同一寸法・材質の二つの中空軸 I (外径 $2b$, 内径 $2a$, 高さ $2h_1$) が厚さ $2h_2$ の接着層 II により突合せ接着されている継手を示す。継手は上下両端 ($z_1 = h_1$, $z_3 = -h_1$) が一定温度 T_0 に保持され, 中空軸内周面 ($r = a$) では温度 0°C の流体との間で熱伝達があり,

* 原稿受付 平成5年8月25日。

^{*1} 正員, 東京都立航空工業高等専門学校 (〒116 東京都荒川区南千住 8-52-1)。^{*2} 正員, 湘南工科大学 (〒251 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25)。^{*3} 正員, 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田 4-3-11)。

外周側面($r=b$)は断熱されているものとする。すなわち半径方向および軸方向に温度こう配がある一般的な場合を想定している。解析においては各中空軸と接着層を有限中空軸ⅠおよびⅡに置き換え、縦弾性係数、線膨張係数、ポアソン比および熱伝導率を各々、 E, β, ν および K とし、添字1,2を用いて各軸ⅠおよびⅡを表す。また、中空軸の内周面と流体間の熱伝達率を α とし、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、対称性から継手の上半分について解析を行う。

2.1 温度分布 図1の中空軸接着継手の熱応力解析を行うため、初めに定常状態における継手の温度分布を求める。有限中空軸Ⅰの温度分布を $T^I(r, z_1)$ 、Ⅱの温度分布を $T^{II}(r, z_2)$ とすると、継手の熱的境界条件は式(1)により表される。

$$\left. \begin{aligned} -K_1 \frac{\partial T^I(a, z_1)}{\partial r} &= -\alpha T^I(a, z_1) \\ -K_2 \frac{\partial T^{II}(a, z_2)}{\partial r} &= -\alpha T^{II}(a, z_2) \\ \frac{\partial T^I(b, z_1)}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial T^{II}(b, z_2)}{\partial r} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (a)$$

$$\left. \begin{aligned} T^I(r, h_1) &= T_0, \quad T^I(r, -h_1) = T^{II}(r, h_2) \\ -K_1 \frac{\partial T^I(r, -h_1)}{\partial z_1} &= -K_2 \frac{\partial T^{II}(r, h_2)}{\partial z_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (b)$$

$$\dots\dots\dots (1)$$

ここで、境界条件式(1)-(a)を考慮し温度分布 $T^I(r, z_1)$ および $T^{II}(r, z_2)$ を式(2)のようにおく⁽¹⁵⁾。

図1 中空軸接着継手の熱応力解析モデル

$$\left. \begin{aligned} T^I(r, z_1) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ A_{n1} \frac{\cosh(\alpha_n z_1)}{\cosh(\alpha_n h_1)} \right. \\ &\quad \left. + B_{n1} \frac{\sinh(\alpha_n z_1)}{\sinh(\alpha_n h_1)} \right\} C_0(\alpha_n r) \\ T^{II}(r, z_2) &= \sum_{n=1}^{\infty} A_{n2} \frac{\cosh(\delta_n z_2)}{\cosh(\delta_n h_2)} C_0(\delta_n r) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで、 $C_m(\alpha_n, r)$ および $C_m(\delta_n r)$ は以下の式を表し、

$$C_m(\alpha_n r) = J_m(\alpha_n r) - J_1(\alpha_n b) Y_m(\alpha_n r) / Y_1(\alpha_n b) \quad (m=0, 1)$$

$$C_m(\delta_n r) = J_m(\delta_n r) - J_1(\delta_n b) Y_m(\delta_n r) / Y_1(\delta_n b) \quad (m=0, 1)$$

$J_m(\alpha_n r)$, $Y_m(\alpha_n r)$ 等は各々 m 次の第一種および第二種ベッセル関数である。 α_n, δ_n は、各々

$$\alpha_n C_1(\alpha_n a) + H_1 C_0(\alpha_n a) = 0 \quad (H_1 = \alpha/K_1)$$

$$\delta_n C_1(\delta_n a) + H_2 C_0(\delta_n a) = 0 \quad (H_2 = \alpha/K_2)$$

を満たす第 n 番目($n=1, 2, 3, \dots$)の正根である。

式(2)中の未定係数 A_{n1}, B_{n1} および A_{n2} は式(1)-(b)の三つの条件から決定され、継手内の温度分布を求めることができる。

2.2 熱応力 熱応力解析を行うため熱弾性ポテンシャル $\Omega(r, z)$ を用いると中空軸ⅠおよびⅡの熱弾性ポテンシャル $\Omega^I(r, z_1)$ および $\Omega^{II}(r, z_2)$ は式(2)の温度分布 $T^I(r, z_1)$ および $T^{II}(r, z_2)$ から次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Omega^I(r, z_1) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r}{2\alpha_n} \left\{ A_{n1} \frac{\cosh(\alpha_n z_1)}{\cosh(\alpha_n h_1)} \right. \\ &\quad \left. + B_{n1} \frac{\sinh(\alpha_n z_1)}{\sinh(\alpha_n h_1)} \right\} C_1(\alpha_n r) \\ \Omega^{II}(r, z_2) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r}{2\delta_n} \left\{ A_{n2} \frac{\cosh(\delta_n z_2)}{\cosh(\delta_n h_2)} \right\} C_1(\delta_n r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

これらの熱弾性ポテンシャル $\Omega^I(r, z_1)$ および $\Omega^{II}(r, z_2)$ から求まる各熱応力 $\sigma_{r0}, \sigma_{\theta 0}, \sigma_{z0}$ および τ_{rz0} と半径および軸方向変位 u_{r0} および w_{z0} は次式(4)により計算することができる⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r0} &= -\frac{E\beta}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} \right\} \\ \sigma_{\theta 0} &= -\frac{E\beta}{1-\nu} \left\{ \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} \right\} \\ \sigma_{z0} &= -\frac{E\beta}{1-\nu} \left\{ \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right\} \\ \tau_{rz0} &= \frac{E\beta}{1-\nu} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r \partial z} \\ u_{r0} &= \frac{1+\nu}{1-\nu} \beta \frac{\partial \Omega}{\partial r}, \quad w_{z0} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \beta \frac{\partial \Omega}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

しかし一般にこれだけで継手の応力および変位に関する次式(5)の境界条件を満足することはできない。

$$\left. \begin{aligned} z_1 = h_1; \sigma_z^I = \tau_{rz}^I = 0 \\ r = a, r = b; \sigma_r^I = \sigma_r^{II} = \tau_{rz}^I = \tau_{rz}^{II} = 0 \\ z_1 = -h_1, z_2 = h_2; \sigma_z^I = \sigma_z^{II}, \tau_{rz}^I = \tau_{rz}^{II} \\ u_r^I = u_r^{II}, \partial w_z^I / \partial r = \partial w_z^{II} / \partial r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

そこで式(5)の境界条件を満足するため、次の応力関数を用いる。初めに境界条件式(5)のうち、 $z = \pm h_1$ における応力 σ_z の条件を考慮し、式(6)に示す応力関数 $\phi_0(r, z)$ を用いる⁽¹⁸⁾。

$$\phi_0 = k_1 z^4 + k_2 r^2 z^2 + k_3 r^4 + k_4 r^2 (\log r - 1) \dots\dots\dots (6)$$

さらに、これと文献(3)に示すミッチェルの応力関数 $\phi_1(r, z)$ を組合せ ($\phi = \phi_0 + \phi_1$) て用いると、これらによる各応力・変位 $\sigma_{r1}, \sigma_{\theta 1}, \sigma_{z1}, \tau_{rz1}, u_{r1}$ および w_{z1} は次式によって求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right\} \\ \sigma_{\theta 1} &= \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu \nabla^2 \phi - \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right\} \\ \sigma_{z1} &= \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (2 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right\} \\ \tau_{rz1} &= \frac{\partial}{\partial r} \left\{ (1 - \nu) \nabla^2 \phi - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right\} \\ u_{r1} &= -\frac{1 + \nu}{E} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} \\ w_{z1} &= -\frac{1 + \nu}{E} \left\{ (1 - 2\nu) \nabla^2 \phi + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi = 0, \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

以上の式と先に求めた熱弾性ポテンシャルによる解、式(4)とを重ね合わせて境界条件式(5)を満足するように応力関数 $\phi_0(r, z)$ および $\phi_1(r, z)$ に含まれる未定係数を決定する。決定された係数を用いること

により、継手内の任意の位置における各熱応力および変位を求めることができる。

3. 実験方法

図2に中空軸の接着継手の熱ひずみに関する実験に用いた試験片の形状と寸法を示す。実際の接着継手では接着層の厚さは極めて薄い。このため熱ひずみを直接測定することは困難であるので本実験では、接着層は厚さ6mmの中空円盤状のエポキシ板でモデル化した。中空軸継手の被着体には構造用炭素鋼(JIS, S45C)を使用し、接着表面は研削加工で仕上げた。継手の被着体の縦弾性係数、ポアソン比および線膨張係数は各々206 GPa, 0.3および $11.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とする。同様にエポキシ板は各々実測結果から⁽¹¹⁾ 3.6 GPa, 0.36および $57.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とする。

熱ひずみの測定には高温用ひずみゲージ(共和電業, KFH-2-C1-11)を使用し、接着界面から2mmと10mmの各々対称の位置(2箇所)に貼り付けた。被着体とエポキシ板はエポキシ板とほぼ同じ材料定数をもつエポキシ樹脂系接着剤(Sumitomo 3M, XA7416)により接着し、接着後継手全体を恒温装置(ヤマト科学 IE21)内で一様に加熱し、一定温度に保持して、熱ひずみを測定した。

なお、この測定値には熱膨張に伴うひずみも含まれているため、継手作成前に同じひずみゲージを貼った被着体中空軸を単独で恒温装置内で加熱し各温度における見掛けのひずみをあらかじめ測定しておき、接着継手の熱ひずみの測定値からこの見掛けのひずみの測定値を差し引き、熱応力によるひずみとした。

被着体が中実軸の継手の場合も中空軸接着継手と同様に一様温度変化を与え熱ひずみの測定を行った。

4. 結果と考察

数値計算においては式(2)、(3)およびミッチェルの応力関数 $\phi_1(r, z)$ の級数の項数を50として行った。なお級数の項数を60とした場合に比べ応力、変位の計算結果の差は約1%以下であり、項数50項で実用上十分な精度の解が得られることを確認している。

2章の解析方法で示した継手の熱的境界条件の特別な場合として、継手全体が一様な温度変化を受ける場合、すなわち熱硬化形接着剤を用い、加熱硬化後冷却されるような場合、さらに特別な場合として中空軸内径(2a)が零の場合、すなわち中実軸継手が一様な温度変化を受ける場合についても数値計算を行う。

4・1 中空軸継手で温度こう配がある場合(上下面; T_0 , 内周面; 0°C の流体に放熱, 外周面; 断熱) 図

図2 中空軸接着継手の熱ひずみ測定実験装置の概要

3は接着界面 ($z_1 = -h_1, z_2 = h_2$) における各熱応力成分の分布を $E_1\beta_1 T_0$ で除し無次元化して示す。無次元化した軸方向垂直応力 σ_z は継手の内周側 ($r=a$) の接着界面で引張り、外周側 ($r=b$) で圧縮応力になる。また σ_r と σ_θ は圧縮、せん断応力 τ_{rz} は内外周端部付近を除きほぼ零になる。

熱応力の分布については接着層界面の軸方向の応力 σ_z が接着界面におけるはく離接着強さに相対的に強い影響を及ぼすと考えて以下の解析結果では σ_z の分布を示す。

図4は被着体と接着剤の線膨張係数比 β_1/β_2 が接着界面における無次元化した熱応力分布 $\sigma_z/E_1\beta_1 T_0$ に及ぼす影響を示す。この結果から、接着界面内周側では引張応力、外周側では圧縮応力になるが、外周端では引張側に応力が增加することがわかる。また β_1/β_2 が小さくなるにつれ接着界面の応力こう配はわずかに大

図3 接着界面上 ($z = \pm h_2$) の各熱応力成分 ($T_0 = 100^\circ\text{C}$, $a/b = 0.4$, $b/h_1 = 1$, $E_1/E_2 = 40$, $h_1/h_2 = 50$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$, $\alpha = 250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $\beta_1/\beta_2 = 0.2$)

図4 線膨張係数比が接着界面 ($z = \pm h_2$) の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響 ($T_0 = 100^\circ\text{C}$, $a/b = 0.4$, $b/h_1 = 1$, $E_1/E_2 = 40$, $h_1/h_2 = 50$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$, $\alpha = 250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)

きくなるが図中に示す計算条件の範囲ではその差は小さい。

図5は被着体高さ と接着層厚さの比 h_1/h_2 が接着界面における無次元化した熱応力分布 $\sigma_z/E_1\beta_1 T_0$ に及ぼす影響を示す。 h_1/h_2 が大きくなるにつれ、すなわち相対的に接着層が小さくなるにつれ、内周側 ($r=a$) の引張応力や半径方向の応力こう配は大きくなる。

図6は中空軸の内径 ($2a$) を変えた場合で、肉厚の変化が接着界面の熱応力分布に及ぼす影響を示す。図中、破線で示す薄肉の中空軸の場合は、内周面の引張応力、外周面の圧縮応力ともに厚肉の場合よりかなり大きくなる。

以上より外周側より内周側の温度が低い場合内周側の引張りのはく離応力が大きいことがわかる。

4.2 中空軸接着継手が一樣な温度変化を受ける場合
特別な場合として図1の中空軸接着継手が継手作成後一樣な温度変化 ($\Delta T = -100^\circ\text{C}$) を受ける場合

図5 厚さの比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響 ($T_0 = 100^\circ\text{C}$, $a/b = 0.4$, $b/h_1 = 1$, $E_1/E_2 = 40$, $h_1/h_2 = 50$, $\beta_1/\beta_2 = 0.2$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$, $\alpha = 250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)

図6 内外径の比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響 ($T_0 = 100^\circ\text{C}$, $b/h_1 = 1$, $E_1/E_2 = 40$, $h_1/h_2 = 20$, $\beta_1/\beta_2 = 0.2$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$, $\alpha = 250 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)

の熱応力分布について数値計算を行った(図1の解析モデルで中空軸内周面と流体間の熱伝達率 α が零の場合に相当する)。

図7は線膨張係数比 β_1/β_2 が接着界面における無次元化した熱応力分布 $\sigma_z/E_1\beta_1\Delta T$ に及ぼす影響を示す。

図7 線膨張係数比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響(一様な温度変化を受ける中空軸継手)($\Delta T = -100^\circ\text{C}$, $a/b=0.25$, $b/h_1=0.8$, $E_1/E_2=20$, $h_1/h_2=20$, $\nu_1=\nu_2=0.3$)

図8 被着体と接着層の厚さの比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響(一様な温度変化を受ける中空軸継手)($\Delta T = -100^\circ\text{C}$, $a/b=0.25$, $b/h_1=0.8$, $E_1/E_2=20$, $\nu_1=\nu_2=0.3$, $\beta_1/\beta_2=0.2$)

図9 線膨張係数比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響(一様な温度変化を受ける中実軸継手)($\Delta T = -100^\circ\text{C}$, $b/h_1=1$, $E_1/E_2=20$, $h_1/h_2=20$, $\nu_1=\nu_2=0.3$)

この結果から、無次元化した熱応力は中空軸内周付近と外周付近でいったん圧縮応力になるが、内外の両端部では引張応力の急激な増加を示し特異性を示す。 β_1/β_2 が大きく1に近づくにつれ、すなわち、被着体と接着剤の線膨張係数の差が小さくなるにつれ、接着界面の熱応力は小さくなる。

図8は被着体と接着層の厚さの比 h_1/h_2 が接着界面における無次元化した熱応力分布 $\sigma_z/E_1\beta_1\Delta T$ に及ぼす影響を示す。 h_1/h_2 が大きくなるにつれ、肉厚方向の中央部分では応力分布が小さく平坦になるが内周および外周側面では圧縮応力から引張応力へ急激に変わり特異性を示す。

4.3 中実軸接着継手が一様な温度変化を受ける場合 図9は中実軸接着継手が継手作成後、一様な温度変化 $\Delta T(-100^\circ\text{C})$ を受ける場合に、被着体と接着剤の線膨張係数比 β_1/β_2 が接着界面における無次元化した熱応力分布 $\sigma_z/E_1\beta_1\Delta T$ に及ぼす影響を示す。この結果から、 β_1/β_2 が小さくなるにつれて、継手内部の接

図10 被着体と接着層の厚さの比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響(一様な温度変化を受ける中実軸継手)($\Delta T = -100^\circ\text{C}$, $b/h_1=1$, $E_1/E_2=20$, $\nu_1=\nu_2=0.3$, $\beta_1/\beta_2=0.2$)

図11 縦弾性係数の比が接着界面の熱応力分布 σ_z に及ぼす影響(一様な温度変化を受ける中実軸継手)($\Delta T = -100^\circ\text{C}$, $b/h_1=1$, $E_1/E_2=40$, $E_3/E_2=4$, $\nu_1=\nu_2=0.3$, $\beta_1/\beta_2=\beta_3/\beta_2=0.2$)

(a) 中空軸接着継手の熱ひずみ

(b) 中空軸接着継手の熱ひずみ ($\Delta T = 50^\circ\text{C}$)

図 12 一様温度変化を受ける接着継手の熱ひずみ

着界面では引張応力が増加し、外周付近では圧縮応力が増加する。外周端部では応力は引張応力側に転じ特異性を示すこともわかる。

図 10 は被着体と接着層の厚さの比 h_1/h_2 が接着界面における無次元化した熱応力分布 $\sigma_z/E_1\beta_1\Delta T$ に及ぼす影響を示す。 h_1/h_2 が小さくなるにつれ、すなわち相対的に接着層が大きくなるにつれ、継手内部の接着界面では引張応力が増加し、外周付近では圧縮応力が増加するが、外周端部では圧縮応力は引張応力側に変化する。なおこれらの β_1/β_2 および h_1/h_2 の影響は中空軸が一様温度変化を受ける場合の応力分布への影響 (図 7 および図 8) と各々同様の傾向を示していることがわかる。

以上の数値計算においては上下被着体は同一形状、同一材質として計算を行っている。図 11 は中空軸継手の場合についてより一般的な場合として、上下の被着体の縦弾性係数が異なる場合の両接着界面 ($z = \pm h_2$) の熱応力分布を示す。縦軸は接着界面の熱応力 σ_z を示し、横軸は無次元化した半径方向の位置を示す。図中の破線は被着体と接着層の縦弾性係数比が小さい接着

界面 ($E_3/E_2=4$) および実線は縦弾性係数の比が大きい接着界面 ($E_1/E_2=40$) の応力分布を示す。接着界面端部 ($r/b=1.0$) 近傍では縦弾性係数の比が大きいほう (実線) が σ_z はやや大きくなる傾向が認められる。

4.4 実験結果 図 12(a) に中空軸接着継手が継手作成後一様温度変化を受ける場合の接着界面から 2 mm 離れた位置の熱ひずみの測定値と解析結果を示す。横軸は継手の温度を表し 0°C (初期状態) から $+50^\circ\text{C}$ まで継手全体を一様に加熱を、○印は各温度における熱ひずみの測定結果を、実線は解析結果を表す。

図 12(b) は同様に中空軸接着継手が継手作成後一様温度変化 ($+50^\circ\text{C}$) を受ける場合で、軸外周面で接着界面から 2 mm 離れた位置の熱ひずみの測定結果を○印で、また同じ位置の半径方向の熱ひずみ分布の解析結果を実線で示す。いずれの場合も実験結果は計算結果とよく一致していることがわかる。

5. 結 言

本研究では、中空軸の突合せ接着継手が非一様の温度分布下にある場合の、継手内部の熱応力分布および熱ひずみについて軸対称三次元弾性論に基づいて解析した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 中空軸接着継手の被着体と接着層を有限中空軸でモデル化し、継手に温度こう配がある場合について軸対称三次元弾性論を用いて継手内の熱応力を解析する方法を示した。さらに特別な場合として中空軸および中空軸の接着継手が一様温度変化を受ける場合についても解析を行った。

(2) (1) の解析法に基づき数値計算を行い、接着層厚さおよび被着体と接着層の線膨張係数の比が変化した場合の中空軸接着継手の接着界面において、はく離強さに影響をもつと推測される σ_z の熱応力分布を明らかにした。この結果内周側で放熱、外周側で断熱、上下端面で高温に保持した中空軸の場合接着界面端部で特異性が生じるが、特に内周側の σ_z が大きくなることがわかった。被着体と接着層の線膨張係数比 β_1/β_2 が小さくなるにつれ、被着体高さおよび接着層厚さの比 h_1/h_2 が大きくなるにつれ、また中空軸の肉厚が小さくなるにつれ、内周側では引張応力が大きくなる。同様に中空軸、中空軸継手が一様温度変化を受ける場合についても接着界面の応力 σ_z の分布に与えるこれらの影響を明らかにした。

(3) 中空軸どうしおよび中空軸どうしの接着継手で接着層をエポキシ板でモデル化した継手を作成し、継手が一様に温度変化する場合の被着体の接着界面付近の熱ひずみをひずみゲージにより測定した。測定結

果は解析結果と良好な一致が得られた。

文 献

- (1) 沢・ほか3名, 機論, 53-485, A(1987), 91.
- (2) 沢・ほか3名, 機論, 55-509, A(1989), 73.
- (3) 沢・ほか2名, 機論, 53-492, A(1987), 1685.
- (4) Adams, R. D., Coppendale, J. and Peppiatt, N. A., *J. Strain Analysis*, 13-1(1978), 1.
- (5) 永弘・ほか2名, 日本接着協会誌, 20-5(1984), 195.
- (6) 網島・ほか4名, 日本接着協会誌, 27-10(1991), 416.
- (7) 沢・ほか2名, 機論, 57-534, A(1991), 417.
- (8) 沢・ほか3名, 機論, 58-546, A(1992), 242.
- (9) 今中・ほか2名, 機論, 59-563, A(1993), 1771.
- (10) 仲野・ほか2名, 機論, 57-537, A(1991), 164.
- (11) 仲野・ほか2名, 機論, 58-546, A(1992), 98.
- (12) 五嶋・宮尾, 機論, 56-525, A(1990), 1204.
- (13) 木村・川島, 粉体および粉体冶金, 34-8(1987), 325.
- (14) 瀬尾・ほか5名, 機論, 55-510, A(1989), 312.
- (15) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., *Conduction of Heat in Solids*, (1959), 217, Oxford Press.
- (16) 中原, 応用弾性学, (1977), 172, 実教出版.
- (17) 竹内, 熱応力, (1981), 42, 日新出版.
- (18) 沢・丸山, 機論, 41-346(1975), 1917.