引裂荷重を受ける層内に円形剛体充てん物を
有する接着継手の二次元応力解析*沢 俊 行^{*1}, 天 摩 勝 洋^{*2}
広 島 哲^{*3}, 浦 江 潔^{*4}A Two-Dimensional Stress Analysis of a Butt Adhesive Joint Filled with
Rigid Circular Fillers in the Adhesive Subjected to a Cleavage LoadToshiyuki SAWA, Katsuhiro TEMMA,
Tetsu HIROSHIMA and Kiyoshi URAE

This paper deals with a two-dimensional stress analysis of a butt adhesive joint with rigid fillers in the adhesive subjected to a cleavage load. Similar adherends were replaced with finite strips, and an adhesive was replaced with a finite strip including rigid fillers. The analysis was done using the two-dimensional theory of elasticity in order to evaluate the joint strength. The effects of the location and size of rigid fillers on the stress distributions around the fillers and at the interface were shown by numerical calculations. An experiment concerning the strains of adhesive was performed. The analytical result was consistent with the experimental result. It was seen that with an increase of the shift of location and size of fillers, the joint strength increased more than that of the joint without a filler. The stress singularity at the edge of the interface was discussed.

Key Words: Elasticity, Stress Analysis, Butt Joint, Adhesion Cleavage Loads, Rigid Filler, Stress Singularity

1. 結 言

最近, 機械構造物にも接着継手が用いられるようになり, 接着継手内の応力分布や継手強度に関するデータの整備およびその設計法の確立が望まれるようになってきた。これまでに各種形態の接着継手の強度に関する研究^{(1)~(7)}および層内に欠陥を有する接着継手に関する研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾などがなされている。また, 粒子分散形複合材料⁽¹⁰⁾と並んで最近, 接着層内への充てん物(液状合成ゴムあるいは石綿など)添加による継手の強度向上を試みた研究⁽¹¹⁾も現れるようになってきた。しかし, 充てん物を有する接着継手の力学的特性を解析的に扱った研究は著者らの引張荷重および曲げモーメントを受ける円形剛体充てん物を有する被着体を剛体とした接着継手に関する研究⁽¹²⁾⁽¹³⁾以外みあたらないようであり, 種々の荷重形態に対してその特性を明らかにする必要があると考えられる。なお, 円形充てん物を含む無限板の応力に関する解析的研究⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾もい

くつかはなされている。

そこで本研究は, 層内に充てん物を有する突合せ接着継手に基本的荷重形態である引張荷重が作用する場合の層内の応力分布を解析し, 充てん物が継手強度に及ぼす影響を調べることを目的としている。理論的には被着体および接着層を有限長帯板にモデル化し, 二次元弾性論を用いて特に被着体の弾性を考慮に入れて層内の応力解析を行う。数値計算により, 被着体と接着層の縦弾性係数の比, 充てん物の大きさ, 位置および数が接着層境界, 充てん物周縁の応力分布および特異応力に及ぼす影響について数値的に明らかにする。また, 接着層内のひずみに関する実験を行い, 解析結果と実験結果の比較を行っている。なお, 充てん物のない継手に関する研究⁽⁴⁾はすでに著者らによりなされている。

2. 理 論 解 析

図1に層内に多数の半径 a の円形剛体充てん物を有する接着層によって寸法および形状の等しい二つの被着体を突合せ接着した接着継手に引裂荷重が作用する場合を示す。なお継手の上下端面に作用する引裂荷重の分布は同一とする。このような接着継手の応力分布を解析するために, X 軸に関する継手の対称性を

* 原稿受付 平成3年9月9日。

^{*1} 正員, 山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。^{*2} 正員, 木更津工業高等専門学校 (〒292 木更津清見台東2-11-1)。^{*3} 准員, (株)キトー (〒409-38 山梨県中巨摩郡昭和町築地新居2000)。^{*4} 学生員, 山梨大学大学院。

考慮して、被着体および接着層をそれぞれ有限長帯板 [I] および [II] に置き換えて、各帯板の座標原点を O_1 および O_2 とする。帯板 [I] の寸法は、長さ $2l$ 、高さ $2h_1$ とし、縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比をそれぞれ E_1, G_1, ν_1 とする。帯板 [II] についてもそれぞれ $2l, 2h_2, E_2, G_2, \nu_2$ とする。円形剛体充てん物は一般的に層内に N 個充てんされ、 i 番めの充てん物の中心は、図 1 に示すように原点 O_2 から $X = X_{di}, Y = Y_{di}$ ($i=1, 2, 3, \dots, N$) にあるものとする。また帯板 [I] の上下端面には図 1 に示すように任意の応力分布 $F(x)$ が、 $e_1 \leq x \leq e_2$ ($e_1 < e_2 \leq l$) の範囲に作用すると仮定する。

有限長帯板 [I] の上下端面に作用する引裂荷重の応力分布 $F(x)$ をフーリエ級数に展開すると境界条件は式 (1)～(3) となる。なお u_x は x 方向変位、 v_y は y 方向変位、 u_r は半径方向変位および v_θ は円周方向変位を表し、以下右肩の添字 I, II はそれぞれ帯板 [I], [II] に関するものを表す。

また、 N 個の各充てん物の中心を原点とする各座標系において、各充てん物周縁の境界条件は式 (4) となる。しかし荷重作用に対して上記各座標系は移動および回転可能とする。すなわち原点 O_2 対し剛体充てん物の剛体変位および回転は許容するものとする。

(1) 有限長帯板 [I] (被着体) において

$$\begin{aligned} x = \pm l : \sigma_x^I = \tau_{xy}^I = 0 \\ y_1 = h_1 : \sigma_y^I = a_0 + \sum_{s=1}^{\infty} \left\{ a_s \cos\left(\frac{s\pi}{l}x\right) + b_s \sin\left(\frac{s\pi}{l}x\right) \right\} \dots\dots\dots (1) \\ \tau_{xy}^I = 0 \end{aligned}$$

図 1 引裂荷重を受ける円形剛体充てん物を有する突合せ接着継手

(2) 有限長帯板 [II] (接着層) において

$$x = \pm l : \sigma_x^{II} = \tau_{xy}^{II} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

(3) 有限長帯板 [I] と [II] の境界において

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_y^I)_{y1=-h1} &= (\sigma_y^{II})_{y2=h2} \\ (\tau_{xy}^I)_{y1=-h1} &= (\tau_{xy}^{II})_{y2=h2} \\ (\partial u^I / \partial x)_{y1=-h1} &= (\partial u^{II} / \partial x)_{y2=h2} \\ (\partial v^I / \partial x)_{y1=-h1} &= (\partial v^{II} / \partial x)_{y2=h2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし X 軸および Y 軸方向の力の釣合いが成り立ち、

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2l} \int_{e_1}^{e_2} F(x) dx \\ a_s &= \frac{1}{l} \int_{e_1}^{e_2} F(x) \cos\left(\frac{s\pi}{l}x\right) dx \\ b_s &= \frac{1}{l} \int_{e_1}^{e_2} F(x) \sin\left(\frac{s\pi}{l}x\right) dx \quad (s=1, 2, 3, \dots) \end{aligned}$$

(4) 各充てん物周縁において

$$r = a : u_r = 0, v_\theta = 0 \dots\dots\dots (4)$$

これらの境界条件を満足する解を得るために、次の手順で解析を行う。

(手順 1) 図 1 において充てん物がないと仮定した継手が引裂荷重を受ける時の解を文献 (4) の方法にしたがい求め、この結果から接着層内の各充てん物周縁 ($r=a$) における変位 u_r および v_θ を計算する。

(手順 2) 次に、境界各件式 (4) を満足するために手順 1 で得られた各充てん物周縁の変位と符号が逆向きの変位を周縁の境界条件とする図 2 (a) に示す有孔無限板を解析する。この時、極座標表示のエアリーの応力関数 ψ を用い、接着層境界 ($y = \pm h_2$) と自由端

図 2 解析方法の説明

($x = \pm l$) に相当する位置および各充てん物周縁の応力および変位を求める。 ϕ は次式(5)で与えられ、 $A_0, B_0, A_n, B_n, C_n, D_n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) は境界条件より決定される未定係数である。

$$\begin{aligned} \phi = & A_0 \theta + B_0 \log r + A_1 r \log r \cos \theta \\ & + B_1 r \theta \sin \theta + C_1 r \theta \cos \theta + D_1 r \log r \sin \theta \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} \{A_n r^{-n} - B_n r^{-n+2}\} \cos(n\theta) \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} \{C_n r^{-n} + D_n r^{-n+2}\} \sin(n\theta) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

(手順3) 手順2によって図2(a)に示すように無限板の接着層境界($y_2 = h_2$)相当部分に生じた応力 σ_y^I, τ_{xy}^I の分布に、 X 軸および Y 軸方向の力の釣合いを考慮して、図2(b)に示すように被着体[I]の境界条件の応力 σ_y^I, τ_{xy}^I ($y_1 = -h_1$) とし、境界条件式(6)の下で有限長帯板[I]を解析する

$$\left. \begin{aligned} x = \pm l : \sigma_x^I = \tau_{xy}^I = 0 \\ y_1 = h_1 : \sigma_y^I = F(X), \tau_{xy}^I = 0 \\ y_1 = -h_1 : \sigma_y^I = \sigma_y^I, \tau_{xy}^I = \tau_{xy}^I \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、被着体[I]の応力、変位を解析するために直角座標系のエアリーの応力関数 χ を文献(2)および(3)を参考にして、決定する。この解析結果より $\partial u^I / \partial x, \partial v^I / \partial x$ ($y_1 = -h_1$) が求められる。

(手順4) 手順3より得られた帯板[I]の $y = -h_1$ での $\partial u^I / \partial x, \partial v^I / \partial x$ が帯板[II]の $y = h_2$ で等しくなるように、境界($y = \pm h_2$)での $\partial u^{II} / \partial x, \partial v^{II} / \partial x$ の値および $x = \pm l$ での値を境界条件式(7)とし、図2(c)に示す帯板[II]を解析し、再び各充てん物周縁の変位 u_r, v_θ を求める。

$$\left. \begin{aligned} x = \pm l : \sigma_x^{II} = \tau_{xy}^{II} = 0 \\ y = \pm h_2 : \partial u^{II} / \partial x = -\partial u^I / \partial x \\ \partial v^{II} / \partial x = -\partial v^I / \partial x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

さらに、おのおのの充てん物周縁および接着層境界での各応力を求める。以下境界条件の式(1)~(4)を十分に満たすまで X 軸および Y 軸方向の力の釣合いを考慮して、図2に示すように手順2から手順4を繰返し計算することにより最終的に継手内の応力、変位が決定される。

本研究においては、図3(a)に示すように(1) X 軸上($X = \pm Xd$)に2個の充てん物がある場合、(2) 原点に1個の充てん物がある場合($Xd = 0$)、および(3) X 軸上、 $X = \pm Xd$ および $X = 0$ に充てん物が3個ある場合、さらに図3(b)に示すように(4) Y 軸上($Y = \pm Yd$)に充てん物が2個ある場合の4とおりのモデルを取り扱う。

(a) X 軸上($X = \pm Xd$)に充てん物が2個ある場合

(b) Y 軸上($Y = \pm Yd$)に充てん物が2個ある場合

図3 解析モデル

図4 実験用試験片の寸法

3. 実験方法

図4に被着体のひずみに関する実験に用いた試験片の寸法を示す。接着層をエポキシ樹脂製の有限長帯板にモデル化し、被着体および充てん物は構造用鋼(S25C, JIS)を使用した。厚さはいずれも6mmで被着体と接着層(エポキシ樹脂)との接着面は研削仕上げ後、接着層とはほぼ同一材料であるエポキシ系接着剤を用いて接着硬化させ、また図4に示すように直径7mmの穴を開けた接着層(エポキシ樹脂)に充てん物(S25C)を挿入し、同様の接着剤を用いて接着した。なお、接着層には図4に示す位置にプラスチック用ひずみゲージ(共和電業製, KFP-2-C1-65)がはられており、継手に21Nの引裂荷重を作用させ、このときのひずみを測定した。

4. 解析結果および実験結果との比較検討

4.1 解析結果

4.1.1 充てん物が $X = \pm X_d$ に2個の場合

(1) 充てん物の直径の影響 数値解析にあたっては級数の項数を30項、反復回数を2回で前回の各応力値に対する誤差が5%以下になり実用上十分収束したものと見なした。なお荷重分布 $F(x)$ は $F(x) = P(e_1 \leq x \leq e_2)$ 、一定とした。図5は充てん物の直径が充てん物周縁($r=a$)および接着層境界($y_2 = \pm h_2$)での最大主応力に及ぼす影響を示す。図5(a)は充てん物の直径と接着層厚さの比 $a/h_2 = 0.3, 0.5$ および 0.8 の時の接着層境界での無次元化した最大主応力分布(平面応力)を示している。縦横は接着層境界の最大主応力 σ_1 と充てん物がないとした場合の接着層境界での平均垂直応力 $\sigma_m [= P(e_2 - e_1)/2l]$ との比を、横軸は原点からの距離と接着層幅の半分の比 x/l を表している。なお、原点から充てん物中心までの距離 X_d と接着層幅の半分 l の比は $X_d/l = 0.48$ 一定とした。 $a/h_2 = 0.3, 0.5$ および 0.8 のどの場合でも自由端近傍($x/l = 0.98$)の最大主応力は減少している。接着層境界自由端($x/l = 1.0$)近傍では応力は特異性を示すので、数値計算上の級数の項数と精度の観点から本研究では $x/l = 0.98$ の点の応力を用いた。

図5(b)は接着層境界($y = \pm h_2, x/l = 0.98$)および充てん物周縁の最大主応力に及ぼす充てん物の直径の影響を示す。接着層境界自由端近傍での特異応力と充てん物周縁の応力集中の大きさを直接比較できないが、どこから破壊が生じるかの予測のための目安として、本研究では接着層境界の98%の点の応力を用いて比較を行う。この結果より無次元化した充てん物の

(a) 接着層境界での最大主応力分布

(b) 接着層境界および充てん物周縁の最大主応力に及ぼす直径の影響

(c) 応力特異場パラメータによる接着層自由端近傍での応力特異性の評価

($h_1/l = 1.2, h_2/l = 0.4, \nu_1/\nu_2 = 1, E_1/E_2 = 10, X_d/l = 0.48, F(x) = \text{const} (e_1 \leq x \leq e_2), e_1/l = 0.8, e_2/l = 1$)

図5 充てん物の直径が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

直径が $0.3 < (a/h_2) < 0.55$ において充てん物周縁の無次元化した最大主応力が接着層境界のそれよりも大きくなり、 $X = X_d$ の位置にある充てん物 (right filler) 周縁からの破壊が予想される。このことから、無次元化した充てん物直径 a/h が $a/h = 0.5$ 程度の場合が最も効率的と推測される。

図5(c)に応力特異場パラメータ K および $\lambda^{(17)(18)}$ を用いて、接着層自由端近傍の特異応力を $\sigma_1/\sigma_m = K/r^\lambda$ と表した結果を示す。なお r は自由端からの無次元化した距離 $r = (l-x)/l$ である。これら3例の結果より、 K は $a/h = 0.8$ のとき最大となり、 λ はすべて $0.18 (E_1/E_2 = 10)$ 一定となる。図6は図5の寸法に対応する場合の充てん物 ($x = x_d$) 周縁の無次元化した最大主応力分布を示す。充てん物直径が小さいほど最大主応力は大きくなることを示している。

(2) X_d の影響 図7は X 軸上の充てん物を Y 軸に対称に移動させたときの接着層境界での無次元化した最大主応力分布を示す。 $x_d/l = 0.2, 0.48$ および 0.72 とした。充てん物を挿入することにより自由端近傍 ($x/l = 0.98$) の最大主応力が充てん物のない場合よりも約40%減少した。図8は X_d が接着層境界および充てん物周縁の最大主応力に及ぼす影響を示す。充てん物 X_d が大きくなる程、すなわち自由端方向 ($x = \pm l$) へ偏心するほど、接着層境界自由端近傍と $X = X_d$ にある充てん物周縁の最大主応力は大きくなり、逆に $X = -X_d$ にある充てん物周縁の最大主応力は小さくなる。図8より $0.3 < (X_d/l) < 0.6$ の場合が最も効率的に最大主応力が減少する。また、このときの接着層境界自由端での応力特異場の強さ K は $X_d/l = 0.2, 0.48$ および 0.72 のときそれぞれ $K = 1.50, 1.53$ および 1.60 、特異性の指数 λ は 0.18 一定である。

(3) 縦弾性係数比 E_1/E_2 の影響 図9は層内に2個充てん物を有する突合せ接着継手の被着体と接着層の縦弾性係数比 ($E_1/E_2 = 3, 10, 60$) が接着層境界の無次元化した最大主応力分布に及ぼす影響を示す。この結果縦弾性係数比が変化しても充てん物添加による接着層境界自由端近傍での最大主応力の低下する割合はほとんど変化しない。また、充てん物周縁の最大主応力はわずかに増加する傾向がみられたが、充てん物の位置や大きさが接着層境界および充てん物周縁に及ぼす影響に比べるとかなり小さい。

4.1.2 充てん物の数の影響 図10は充てん物が X 軸上に1~3個ある場合の接着層境界における最大主応力分布の比較を示す。充てん物の位置は1個の場合原点 ($X = 0$) に、2個の場合は $X = \pm X_d (X_d/l = 0.48)$ の位置に、3個の場合は原点と $X = \pm X_d (X_d/l$

図6 充てん物の直径が荷重作用側 ($X = X_d$) にある充てん物周縁の最大主応力分布に及ぼす影響 (継手寸法は図5と同じ)

($h_1/l = 1.2$, $h_2/l = 0.4$, $\nu_1/\nu_2 = 1$, $E_1/E_2 = 10$, $c_1/l = 0.8$, $c_2/l = 1$, $a/h_2 = 0.5$)

図7 充てん物偏心量 X_d が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

図8 接着層境界および充てん物周縁の最大主応力と充てん物偏心量 X_d の関係 (継手寸法は図7の場合と同じ)

(a) $E_1/E_2=3$ の場合 (b) $E_1/E_2=10$ の場合 (c) $E_1/E_2=60$ の場合
($h_1/l=0.4$, $h_2/l=0.4$, $\nu_1/\nu_2=1$, $e_1/l=0.8$, $e_2/l=1$,
 $a/h_2=0.5$, $Xd/l=0.48$)図 9 被着体と接着層の縦弾性係数比 E_1/E_2 が接着層境界の主応力分布に及ぼす影響

$=0.48$) の位置に充てん物を配した。この結果充てん物の数が増加するにつれて接着層境界自由端近傍の最大主応力が減少することがわかる。また、充てん物周縁の最大主応力は充てん物が 1~3 個のとき、それぞれ $\sigma_1/\sigma_m=2.0, 3.19$ および 3.06 となり 1 個の場合よりも 2 個および 3 個の場合のほうが高く、2 個と 3 個の場合を比較すると 3 個の場合のほうが原点にある充てん物の影響のため最大主応力が低下している。引裂荷重を受ける場合にも継手強化の主要因子は、 Xd と充てん物の大きさ a/h であると推測される。

4.1.3 充てん物を Y 軸上に 2 個挿入した場合

(1) 充てん物の直径の影響 図 11 は充てん物の直径と接着層厚さの比 $a/h_2=0.25, 0.33, 0.42$ のときの接着層境界 ($y_2=h_2$) での無次元化した最大主応力分布 (平面応力) を示している。

原点から充てん物中心までの距離 Yd と接着層高

($h_1/l=3$, $h_2/l=0.4$, $\nu_1/\nu_2=1$, $E_1/E_2=10$, $e_1/l=0.8$,
 $e_2/l=1$, $a/h_2=0.5$, $Xd/l=0.48$)

図 10 X 軸上にある充てん物の数が接着層境界の主応力分布に及ぼす影響

($h_1/l=1.2$, $h_2/l=0.48$, $\nu_1/\nu_2=1$, $E_1/E_2=10$, $e_1/l=0.8$,
 $e_2/l=1$, $Yd/h=0.5$)

図 11 Y 軸上にある充てん物の直径が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

きの半分 h_2 の比は $Y_d/h_2=0.5$ 一定 ($X_d/l=0.0$) とした。 $a/h_2=0.25, 0.33, 0.42$ のどの場合でも自由端近傍 ($x/l=0.98$) の最大主応力は充てん物がない継手の場合に比べて減少している。ところが、 $a/h_2=0.25$ のとき充てん物周縁の最大主応力が充てん物のない場合の接着層境界での無次元化した最大主応力 ($\sigma_1/\sigma_m=5.7$) よりも大きくなり、充てん物周縁からの破壊により継手強度が低下すると考えられる。 $a/h_2=0.29$ が充てん物周縁と接着層境界の最大主応力がともに 5.0 となり最も最大主応力が低下する。また、応力特異場の強さは $a/h_2=0.5, 0.33$, および 0.42 のとき、それぞれ $K=2.47, 2.57$, および 2.64 である。なお、特異性の指数 $\lambda=0.18$ 一定である。また、図 12 は図 11 の寸法の部分に対応する充てん物 ($Y=Y_d$) 周縁の無次元化した最大応力分布を示す。この場合にも直径が小さくなるにつれて最大主応力は大きくなることを示している。

(2) Y_d の影響 図 13(a) は Y 軸上の充てん物を X 軸に対称に移動したときの接着層境界での無次元化した最大主応力分布を示す。充てん物を挿入することにより自由端近傍の特異応力が充てん物のない場合よりも約 14% 減少した。図 13(b) は Y_d の影響を示す。充てん物が接着層境界方向へ偏心するほど充てん物周縁および接着層境界の最大主応力が増加する。充てん物の位置は原点に近いほど強度に対して好ましいと言える。接着層境界自由端での応力特異場の強さ K は $Y_d/h_2=0.3, 0.5, 0.7$ のとき、それぞれ $K=2.41, 2.47$ および 2.70 であった。また、特異性の指数は $\lambda=0.18$ であった。なお本研究で扱った数値計算例においては剛体移動と回転を許容したが、剛体移動と回転を拘束した場合での接着層境界および充てん物周縁での応力分布は剛体移動と回転を許容した場合の応力分布と比べてその差は極めて小さいことがわかった。

図 12 充てん物の直径が $Y=Y_d$ にある充てん物周縁の最大主応力分布に及ぼす影響 (継手寸法は図 11 と同じ)

(a) 充てん物偏心量が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

(b) Y_d が充てん物周縁と接着層境界の最大主応力に及ぼす影響

($h_1/l=12$, $h_2/l=0.48$, $\nu_1/\nu_2=1$, $E_1/E_2=10$, $c_1/l=0.8$, $c_2/l=1$, $a/h=0.25$)

図 13 接着層境界および充てん物周縁の最大主応力と充てん物偏心量の関係

($h_1/l=3$, $h_2/l=0.4$, $\nu_1/\nu_2=1$, $E_1/E_2=10$, $c_1/l=0.8$, $c_2/l=1$, $a/h=0.5$)

図 14 平面ひずみ状態と平面応力状態における最大主応力分布の比較

図 15 ひずみに関する実験結果と解析結果の比較

4・1・4 平面応力状態と平面ひずみ状態における応力分布の比較 図 14 に充てん物が X 軸上に 3 個の場合の平面応力状態と平面ひずみ状態での無次元化した最大応力分布を示す。平面ひずみ状態の場合最大主応力値は平面応力状態の応力値に対して接着層境界自由端近傍 ($x/l = 0.98$) において 1.01 倍、充てん物周縁 ($X = Xd$) において 1.15 倍大きくなる。このことより平面ひずみ状態で解析を行うほうが強度設計に際して安全であると考えられる。

5. 解析結果と実験結果の比較

図 15 は接着層 (エポキシ樹脂) の図 4 に示す位置における Y 方向のひずみに関する解析結果と実験結果の比較を示す。縦軸は Y 方向のひずみを、横軸は接着層の中心からの距離 X を表す。実線は計算値を、○印は実験値を表す。計算においては、被着体と接着層の縦弾性係数、ポアソン比をそれぞれ 206 GPa, 0.376 および 3.6 GPa, 0.376 とした。被着体のひずみに関しては解析結果と実験結果がかなりよく一致している。

6. 結 言

本研究では層内に円形剛体充てん物を有する突合せ接着継手に基本的荷重形態である引裂荷重が作用する場合の継手の応力分布に関して検討し、次の結果が得られた。

(1) 突合せ接着継手の接着層内の応力分布を、被

着体と接着層を有限長帯板にモデル化し、二次元弾性論により特に被着体の弾性を考慮に入れて解析する方法を示した。

(2) (1)の方法を用いて接着層境界および充てん物周縁の応力分布を解析し、被着体と接着層の縦弾性係数の比、充てん物の大きさ、位置および数が応力分布に及ぼす影響を数値的に明らかにし、充てん物の直径が接着層厚さに対して小さくなるほど接着層境界自由端近傍の最大主応力は低下するが、逆に充てん物周縁の最大主応力は増加することがわかった。また、充てん物の数が増加するにつれて自由端近傍の最大主応力は減少し、縦弾性係数比による影響は充てん物の位置や大きさが及ぼす影響に比べるとかなり小さいことがわかった。

(3) X 軸上に充てん物が 2 個および 3 個ある場合には充てん物の位置 (Xd) は接着層長さ ($2l$) に対し $Xd/l = 0.3 \sim 0.6$ が適切であり、充てん物直径 ($2a$) の厚さに対する比は $a/h = 0.5$ 程度が適切であることがわかった。

(4) 平面ひずみ状態と平面応力状態での応力分布を比較したところ平面ひずみ状態での応力値が平面応力状態での応力値よりもやや高くなることを示した。

(5) 接着層のひずみに関する実験を行い、解析結果と実験結果はかなりよく一致することを示した。

終わりに本研究を遂行する上で貴重なご教示をいただいた東京工業大学精密工学研究所の池上皓三教授に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 鈴木・機論, 50-499, A(1984), 67.
- (2) 沢・ほか 2 名, 機論, 52-476, A(1986), 919.
- (3) 沢・ほか 2 名, 機論, 52-483, A(1986), 2506.
- (4) 沢・ほか 3 名, 機論, 53-487, A(1987), 523.
- (5) Wah, T., *Int. J. Mech. Sci.*, 18(1976).
- (6) 杉林・池上, 機論, 50-449, A(1984), 17.
- (7) 能野・永弘, 機論, 52-479, A(1986), 1698.
- (8) 佐野・ほか 2 名, 機論, 53-496, A(1987), 2349.
- (9) 大塚・ほか 3 名, 機論, 55-514, A(1989), 1347.
- (10) 山崎・千葉, 材料, 35(1986), 629.
- (11) 岸本・ほか 2 名, 接着, 16(1980), 501.
- (12) 大塚・ほか 2 名, 機論, 56-531, A(1990), 2325.
- (13) 大塚・ほか 2 名, 機論, 57-540, A(1991), 1782.
- (14) 山本・津村, 機論, 48-432, A(1982), 1051.
- (15) 佐々木・ほか 2 名, 機論, 54-497, A(1988), 126.
- (16) Timoshenko, S. P., *Theory of Elasticity*, 3rd ed., (1985), 35, McGraw-Hill.
- (17) 服部・ほか 3 名, 機論, 54-499, A(1988), 597.
- (18) Bogy, D. B., *J. Appl. Mech.*, 38(1971), 377.