引張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*

天 摩 勝 洋*¹, 沢 俊 行*², 広 島 哲*³

A Two-Dimensional Stress Analysis of Butt Adhesive Joints Filled with Rigid Circular Fillers in an Adhesive Subjected to Tensile Loads

Katsuhiro TENMA, Toshiyuki SAWA and Tetsu HIROSHIMA

This paper deals with a two-dimensional stress analysis of butt adhesive joints with rigid fillers in an adhesive subjected to tensile loads. Assuming that adherends are rigid and replacing an adhesive with a finite strip including rigid fillers, the analysis was done using the two-dimensional theory of elasticity in order to examine the strength of joints. 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 calculation. For verification, photoelastic experiments were performed. The analytical result was in fairly good agreement with the experimental result. It was seen that by an amount of shift of location and size of fillers, the strength of joints was more improved than that of the joints without a filler. Discussion is also presented on the stress singularity at the edge of the interface.

Key Words: Elasticity, Stress Analysis, Butt Adhesive Joint, Tensile Load, Photoelasticity, Rigid Filler, Stress Singularity

1. 緒 言

新しい構造用接着剤が開発されるに伴い、機械構造物に接着継手が用いられるようになってきた。しかし、接着強度に関する明確な強度設計法が確立されていないため、接着継手は機械的接合の補助的なものとして用いられる場合が多い。これまでに各種形態の接着継手の強度に関する研究^{(1)~(5)}および層内に欠陥を有する接着継手に関する研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾などがなされている。また、粒子分散形複合材料⁽⁸⁾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⁽⁹⁾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明らかにした研究はまだ見当たらないようである。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⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾もいくつかなされている。

本研究は、層内に充てん物を有する突合せ接着継手に引張荷重が作用する場合の層内の応力分布を解析する方法を示し、充てん物が継手強度に及ぼす影響を推

定することにより、継手の強度向上をめざすことを目的としている。理論的には剛体とみなした被着体といくつかの剛体充てん物を有する接着層とを帯板にモデル化し、二次元弾性論を用いて接着層境界、および充てん物周縁の応力分布を数値的に明らかにする。この解析に基づいて、充てん物の大きさ、位置およびその数が層内の応力分布、接着層境界での特異応力に及ぼす影響について検討する。さらに光弾性実験を行い解析結果と実験結果との比較を行う。

2. 理 論 解 析

図1は層内に多数の半径 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、被着体の遠方で引張力 P が作用する場合を示す。接着層を高さ $2h$ 、幅 $2l$ の有限長帯板(I)に置き換え、その縦弾性係数を E 、ポアソン比を ν とする。同様に、被着体は幅 $2l$ の半無限長帯板(II)におき換え本研究では被着体は剛体とみなし、接着層について解析を行う。この場合、境界条件は接着層の各境界においては式(1)および(2)で与えられ、充てん物周縁においては式(3)となる。

$$x = \pm l : \sigma_x = 0, \tau_{xy} = 0 \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$y = \pm h : u_x = 0, \partial v_y / \partial x = 0 \cdots \cdots \cdots (2)$$

* 原稿受付 平成元年12月19日。

*¹ 正員、本更津工業高等専門学校（〒292 本更津市清見台東2-11-1）。

*² 正員、山梨大学工学部（〒400 甲府市武田4-3-11）。

*³ 学生員、山梨大学大学院。

図 1 円形充てん物を有する突合せ接着継手

$$r=a: u_r=0, v_\theta=0 \cdots \cdots (3)$$

なお, u_x は x 方向変位, v_y は y 方向変位, u_r は極座標における r 方向変位, v_θ は θ 方向変位を表し, P は $P = \int_{-l}^l \sigma_{y|y=\pm h} dx$ で与えられる.

これらの条件を満足する解を得るために次の手順で解析を行う. すなわち,

手順(1) 式(1)および(2)を境界条件とする充てん物のない有限長帯板が引張荷重 P を受ける場合の解を文献(6)の方法により求め, この結果から充てん物周縁の変位 u_r および v_θ を計算する.

手順(2) 手順(1)によって充てん物周縁($r=a$)に図2(a)に示す変位 u_r および v_θ が生じるがこの時, 極座標表示のエアリーの応力関数 ϕ を使い, $r=a$ の変位を境界条件とする有孔無限板を解析する. 応力関数 ϕ は一般に次のように与えられる.

$$\begin{aligned} \phi = & A_0 \theta + B_0 \log r + A_1 r \log r \cos \theta \\ & + B_1 r \theta \sin \theta + C_1 r \theta \cos \theta + D_1 r \log r \sin \theta \end{aligned}$$

(a)

(b)

図 2 解析方法の説明

$$+ \sum_{n=2}^{\infty} \{A_n r^{-n} + B_n r^{-n+2}\} \cos(n\theta)$$

$$+ \sum_{n=2}^{\infty} \{C_n r^{-n} + D_n r^{-n+2}\} \sin(n\theta) \cdots \cdots (4)$$

式(4)を用い各変位 u_r, v_θ を求める.

充てん物周縁($r=a$)の各点での u_r および v_θ の値をフーリエ級数展開し, 式(3)の境界条件を満足するように式(4)中の未定係数 $A_0, B_0, A_n, B_n, C_n, D_n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) を決定する. さらに, この応力関数 ϕ より接着層境界($y=\pm h$)に生ずる変位 $u_x, \partial v_y / \partial x$ および自由境界($x=\pm l$)において生ずる応力 σ_x および τ_{xy} を計算する. ただし, 一つの充てん物周縁の変位を打ち消したときに他の充てん物周縁への影響をも打ち消す必要がある.

手順(3) 式(1)および(2)の境界条件を満足するためには, 図2(b)に示す手順(2)で生じた接着層境界($y=\pm h$)の変位と自由境界($x=\pm l$)において生じた応力を打ち消すような逆向きの変位および応力を作用させる. このためには式(5)に示す直角座標表示のエアリーの応力関数 χ を用いる.

$$\begin{aligned} \chi = & \chi_0 + \chi_1 + \chi_2, \quad \chi_0 = \frac{\bar{A}_0}{2} x^2 + \frac{\bar{B}_0}{2} y^2 \\ \chi_1 = & \chi_1(\bar{A}_n, \bar{B}_n, l, h, a_n, \lambda_n, \bar{\Delta}_n, \bar{\Omega}_n, x, y) \\ = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{A}_n}{\bar{\Delta}_n a_n^2} \{ [\text{sh}(a_n l) + a_n l \text{ch}(a_n l)] \text{ch}(a_n x) - \text{sh}(a_n l) a_n x \text{sh}(a_n x) \} \cos(a_n y) \\ & + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{B}_s}{\bar{\Omega}_s \lambda_s^2} \{ [\text{sh}(\lambda_s h) + \lambda_s h \text{ch}(\lambda_s h)] \text{ch}(\lambda_s y) - \text{sh}(\lambda_s h) \lambda_s y \text{sh}(\lambda_s y) \} \cos(\lambda_s x) \\ \chi_2 = & \chi_2(\bar{A}_n, \bar{B}_n, l, h, a'_n, \lambda'_n, \bar{\Delta}_n, \bar{\Omega}_n, x, y) \\ = & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{A}_n}{\bar{\Delta}_n a_n'^2} \{ a'_n l \text{sh}(a'_n l) \text{ch}(a'_n x) - \text{ch}(a'_n l) a'_n x \text{sh}(a'_n x) \} \cos(a'_n y) \end{aligned} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$= - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{B}_s}{\bar{Q}_s \lambda_s^2} \{ \lambda_s h \operatorname{sh}(\lambda_s h) \operatorname{ch}(\lambda'_s y) - \operatorname{ch}(\lambda_s h) \lambda'_s y \operatorname{sh}(\lambda'_s y) \} \cos(\lambda'_s x) \quad \Bigg|$$

ただし

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{h}, \quad \alpha'_n = \frac{2n-1}{2h} \pi$$

$$\lambda_s = \frac{s\pi}{l}, \quad \lambda'_s = \frac{2s-1}{2l} \pi$$

$$\bar{A}_n = \alpha_n l + \operatorname{sh}(\alpha_n h) \operatorname{ch}(\alpha_n l)$$

$$\bar{A}'_n = \alpha'_n l + \operatorname{sh}(\alpha'_n h) \operatorname{ch}(\alpha'_n l)$$

$$\bar{Q}_s = \lambda_s h + \operatorname{sh}(\lambda_s h) \operatorname{ch}(\lambda_s l)$$

$$\bar{Q}'_s = \lambda'_s h + \operatorname{sh}(\lambda'_s h) \operatorname{ch}(\lambda'_s l)$$

sh : sinh, ch : cosh

$\bar{A}_0, \bar{B}_0, \bar{A}_n, \bar{B}_n, \bar{A}'_n, \bar{B}'_n (n, s=1, 2, 3, \dots)$ は未定係数で、これらは手順(2)と同様にして、境界面の応力お

よび変位をフーリエ級数展開し、境界条件と等置することによって決定される。

さらに、この応力関数 χ を用いて再び充てん物周縁 ($r=a$) に生ずる変位 u_r および v_θ を計算する。以下、境界条件の式(1), (2)および(3)を十分に満たすまで手順(2), (3)を繰返し計算することにより、最終的に接着層内部の応力および変位が決定される。

本研究においてはまず図3に示すように(1)2個の充てん物が x 軸上にしかも y 軸に対称にある場合、(2)原点 o から充てん物中心までの距離 $X_d=0$ の充てん物が1個の場合、および(3)図4に示すように x 軸上に充てん物が3個ある場合、さらに(4)2個の充てん物が y 軸上にしかも x 軸に対称にある場合の4通りのモデルを取扱う。

3. 実験方法

図5に光弾性実験に用いた試験片の寸法を示す。接着層に相当する有限長帯板の材質はエポキシ樹脂で、被着体および充てん物は構造用鋼 (S25C, JIS) を使用した。なお、鋼の縦弾性係数 (206 GPa) は今回使用したエポキシ樹脂の縦弾性係数 (3.43 GPa) の約60倍であり、著者らの研究⁽²⁾⁽⁶⁾により被着体を相対的にほぼ剛体とみなした。同様に充てん物も剛体と考えた。厚さはいずれも6.0 mm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硬化させ、また接着層(エポキシ樹脂)に図5に示すように直径10 mmの穴をあけた後、充てん物(S25C)を挿入しエポキシ系接着剤で接着した。この継手に圧縮力 (1176 N) を作用させて、光弾性実験を行った。充てん物の個数は2個とし、図中に示す位置に充てん物を配した。

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2個の場合

図3 層内に充てん物を2個有する接着継手

図4 層内に充てん物を3個有する接着継手

図5 光弾性実験用試験片の寸法

(1) 充てん物の直径の影響 数値計算にあたっては級数の項数を 50 項, 反復回数を 3 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みなした。図 6 は充てん物の直径と接着層厚さの比 $a/h=0.2, 0.5, 0.8$ の時の接着層境界 ($y=h$) 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。縦軸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平均垂直応力 $\sigma_m (=P/2l)$ 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 $X_d/l=0.4$ 一定とした。 $a/h=0.2, 0.5, 0.8$ 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。特別な場合である 1 充てん物 ($X_d=0$) と比較すると, $a/h=0.8$ で 1 充てん物の場合は充てん物直上の接着層境界 ($y=\pm h, x=X_d$) で最大主応力が高くなっているが, 2 充てん物の場合は充てん物直上の接着層境界の最大主応力は自由端近傍の最大主応力より低い。 $a/h=0.8$ の時, 充

図 6 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

図 7 応力特異場パラメータによる強度評価

てん物直上の接着層境界における最大主応力と, 自由端近傍 ($x/l=0.98$) の最大主応力がともに 1.41 となり, $a/h=0.8$ の場合が最も効率的と考えられる。

さらに, 応力特異場パラメータ⁽¹²⁾⁽¹³⁾を用いて接着層自由端近傍の強度評価を行った結果を図 7 に示す。ただし, $\sigma_1/\sigma_m = K/(r^\lambda)$, K : 応力特異場の強さ λ : 特異性の指数であり, r は自由端からの距離の無次元量 $(l-x)/l$ を表している。図 7 より K は $a/h=0.2$ の時最大となり, λ はすべて 0.25 一定となる。また, 平面ひずみ状態と仮定した場合の接着層境界での最大主応力分布を解析した結果, $\lambda=0.32$ となり応力特異場の強さは $a/h=0.2, 0.5, 0.8$ の時それぞれ $K=1.2, 1.17, 0.95$ となった。このことから平面応力状態よりも応力場の強さは約 20 % 高くなることがわかる。

(2) X_d の影響 図 8 より, $X_d/l=0.4, 0.48$ の場合は接着層自由端近傍 ($X/l=0.98, Y=\pm h$) の最大主応力が充てん物を入れないときよりも 15~17 % 低下している。また, 充てん物周縁の最大主応力と σ_m との比 σ_1/σ_m は 1.85 未満である。図 9 は充てん物周縁の

図 8 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

図 9 充てん物偏心量が充てん物周縁の最大主応力分布に及ぼす影響

無次元化した最大主応力分布を示す。用いた寸法は図8と同様である。 X_d/l の増加にともない充てん物周縁の最大主応力も増加する。接着層境界自由端近傍での応力特異場の強さ(平面応力) K は $X_d/l=0.4, 0.48, 0.64$ の時、それぞれ $K=0.96, 1.06$, および 1.67 であった。また、平面ひずみ状態での接着層境界自由端近傍の応力特異場の強さはそれぞれ、 $K=1.17, 1.25, 1.95$ となった。

(3) アスペクト比の影響 図10は $X_d=0$ の場合、すなわち1充てん物の場合にアスペクト比が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響を示している。アスペクト比 $h/l=0.2$ の場合の応力特異場の強さ(平面応力) K は $K=1.19$ となり、 $h/l=0.02$ の場合には $K=1.21$ となった。なお充てん物がない場合の K はそれぞれ $K=1.21(h/l=0.2)$, $K=1.21(h/l=0.02)$ となった。次に2充てん物の場合にもアスペクト比の影響を調べたが、アスペクト比(h/l)が小さくなると充てん物添加による接着層自由端近傍での最大主応力の低下は見られなくなる。 $h/l=0.2$ の場合、最大主応力が約4.6%低下しておりこの値は1充てん物の時の0.6%よりも高い値である。また、充てん物周縁の最大主応

図10 1充てん物の場合のアスペクト比が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

力も1充てん物の時より減少している。

4.1.2 充てん物が3個の場合

(1) 充てん物の直径の影響 図11は $a/h=0.4, 0.5, 0.6$ 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)を示す($X_d/l=0.48$ 一定)。 a/h の値が大きくなるほど接着層端部での最大主応力が低下し、応力特異場の強さ K は $a/h=0.4, 0.5, 0.6$ の時それぞれ $K=1.09, 0.9, 0.79$ となった。また、充てん物が大きいほうが充てん物周縁の最大主応力が高くなる。以上のことより継手強度にとって $a/h=0.5\sim 0.6$ が適切だと考えられる。また、平面ひずみ状態の時の応力特異場の強さはそれぞれ、 $K=1.44, 1.08$, および 0.91 となった。

(2) X_d の影響 図12は $X_d/l=0.4, 0.48, 0.64$ 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)を示す。2充てん物と同様に、 $X_d/l=0.4$,

図11 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

図12 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

0.48 の時に接着層自由近傍での最大主応力が充てん物を入れない時よりも低下している。応力特異場の強さ K は $X_d/l=0.4, 0.48, 0.64$ の時それぞれ $K=0.96, 0.90$, および 1.19 となり, 2 充てん物の時よりも 3 充てん物のほうが強度は若干高くなると推測される。さらに, 三つの充てん物のうち中央の充てん物の周縁での最大主応力が最も高くなることがわかった。また, 平面ひずみ状態の時の応力特異場の強さはそれぞれ, $K=1.17, 1.08$, および 1.38 となった。

(3) アスペクト比の影響 $h/l=0.02, 0.2$ の場合の充てん物がある場合とない場合の接着層境界 ($y=\pm h$) での主応力分布を解析した結果, 2 充てん物とほぼ同様の傾向があることがわかった。

4.1.3 充てん物の数の影響 アスペクト比が 0.02 の場合, 充てん物の数による接着層および充てん物周縁の最大主応力の変化は見られなかった。ところ

がアスペクト比が大きくなると充てん物 1 個よりも充てん物 2 個のほうが自由端近傍の最大主応力が低下し, 応力特異場の強さは平面応力状態で $K=1.19$ から $K=0.96$ に低下した ($a/h=0.5, h/l=0.4, X_d/l=0.4$)。充てん物周縁の最大主応力は充てん物が 2, 3 個のほうが充てん物 1 個よりも高い傾向にある。また, 充てん物 2 個と充てん物 3 個の差はあまり見られなかった。継手強化の主要因子は, X_d と充てん物の大きさであると考えられる。

4.1.4 充てん物を Y 軸方向に 2 個挿入した場合

図 13 は, 層内に剛体充てん物を Y 軸方向に 2 個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, 被着体の遠方で引張力 P が作用する場合を示す。応力関数および解析方法は 2 章の理論解析と同じである。

(1) 充てん物の直径の影響

図 14 は, $a/h=0.2, 0.4$ および充てん物がない場合の接着層境界での無次元化した最大主応力分布を示している。 $Y_d/h=0.5$ の位置に充てん物を挿入し, 直径と接着層厚さの比を変化させた。 $a/h=0.2, 0.4$ の場合とも最大主応力 (平面応力) は減少し, 応力特異場の強さ K はそれぞれ $K=1.14, 1.16$ となる。 $a/h=0.2, 0.4$ の場合の最大主応力の差は x 軸方向に 2 個挿入した時ほど見られなかった。ところが, $a/h=0.2$ の時充てん物周縁の無次元化した最大主応力が $\sigma_1/\sigma_m=2.0$ となり充てん物周縁からの破壊が予想される。また, $a/h=0.4$ の時は充てん物周縁の無次元化した最大主応力は $\sigma_1/\sigma_m=1.7$ となり, 図 14 と比較すると接着層境界から破壊が起こると予想される。平面ひずみ状態での応力特異場の強さ K は $a/h=0.2, 0.4$ に対しそれぞれ, $K=1.37, 1.39$ となった。

(2) Y_d の影響

図 15 に Y_d が無次元化した最

図 13 層内に充てん物を y 軸方向に 2 個有する接着継手

図 14 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

図 15 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

大主応力分布に及ぼす影響を示す。 $Y_d/h=0.2, 0.5, 0.8$ のすべての場合において接着層境界の最大主応力が充てん物のない場合よりも低下しており、応力特異場の強さ K はそれぞれ $K=1.24, 1.16, 1.27$ となる。ところが、 $Y_d/h=0.8$ の場合、充てん物周縁の無次元化した最大主応力が $\sigma_1/\sigma_m=2.3$ となり接着層を強化しているとはいえない。 $Y_d/h=0.2, 0.5$ の場合は、いずれも接着層境界の最大主応力よりも充てん物周縁の最大主応力のほうが小さい。図 15 より、 $Y_d/h=0.5$ が適切と予想される。また、平面ひずみ状態での応力特異場の強さはそれぞれ、 $K=1.41, 1.16, 1.51$ となった。

(3) アスペクト比の影響 X 軸方向に充てん物を挿入した場合と同様にアスペクト比 (h/l) が小さくなると、充てん物による接着層自由端近傍での最大主応力の低下はみられなくなる。また、 $h/l=0.02$ の場合は充てん物周縁の最大主応力が充てん物を入れない時の最大主応力よりも大きくなり、充てん物が有効でないとと言える。

4.1.5 充てん物添加による見かけの縦弾性係数 E とポアソン比 ν について 充てん物 3 個の場合と

充てん物のない場合の接着層の縦弾性係数 E とポアソン比 ν の変化を数値計算により求めた。計算において充てん物の直径 $2a$ 、接着層幅 $2l$ 、接着層厚さ $2h$ 、接着層のポアソン比 ν 、縦弾性係数 E 、充てん物の偏心量 X_d をそれぞれ 8 mm, 50 mm, 20 mm, 0.376, 3.43 GPa, 12 mm とした。また、級数の項数を 50 項とし、反復回数は 2 回で収束した。 $y=h$ での y 方向ひずみと、 $x=l$ での x 方向ひずみより E と ν を求めた結果、 $E=4.63$ GPa, $\nu=0.36$ となった。このことから、縦弾性係数は 25 % 高くなり、ポアソン比はほとんど変化しなかった。なお、接着層にしめる充てん物の面積分率は 15 % であった。

4.2 解析結果と実験結果の比較 解析結果の妥当性を確かめるために充てん物が 2 個の場合の光弾性実験を行った。図 17 は原点から X_d 離れた距離に充てん物を 2 個有する場合 ($X_d=15$ mm) の接着層境界 ($Y=\pm h$) の主応力の差 ($\sigma_1-\sigma_2$) の分布を示す。計算にあたっては接着層の縦弾性係数、ポアソン比を 3.43 GPa, 0.376 とし縦軸は最大主応力差を横軸は接着層中心からの距離 x を表す。実線は解析値を○印は実験値を示す。この結果から解析結果と実験結果はかなりよく一致していることがわかった。

5. 結 言

本研究では、接着層内に含まれる剛体充てん物の接着継手の強度に及ぼす影響について、接着層内に 1~3 個の剛体充てん物を有する突合せ接着継手に引張力が作用した場合の継手内の応力分布を被着体を剛体と仮定し、二次元弾性論を用いて解析および光弾性実験の両面より検討し、次の結果が得られた。

(1) 層内に剛体充てん物がある場合の接着層内の応力分布を二次元弾性論に基づき解析する方法を示した。

(2) 接着層界面の端部は応力の特異性を示し、応

図 16 アスペクト比が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

図 17 光弾性実験結果と解析結果の比較

力特異場パラメータを用いて特異応力を表示した。また、充てん物周縁にも応力集中が生じ、両者を比較検討した。

(3) 充てん物を添加することによって接着層境界の最大主応力が低下する場合と、逆に高くなる場合があることがわかった。充てん物が接着層の幅方向に偏心した時、 $X_d = l/2$ 近辺で端部の特異応力は最小になる。また、充てん物周縁の最大主応力は偏心量に比例して大きくなる。さらに、充てん物の直径が大きいほど接着層自由端近傍の特異応力の強さは低下するが、逆に充てん物周縁の最大主応力は増大する。接着層厚さに対する充てん物直径の比は $a/h = 0.5 \sim 0.6$ が適当と考えられる。さらに、充てん物が厚さ方向に偏心した場合 $Y_d/h = 0.5$, $a/h = 0.4 \sim 0.5$ の時、接着層自由端近傍の特異応力の強さは最小となり、また充てん物が欠陥となる場合のあることもわかった。

(4) 充てん物 1 個より、2, 3 個のほうが継手の強度が向上し、2 個と 3 個では強度に差がないことがわかった。また、アスペクト比が小さいほど充てん物の最大主応力分布に対する影響は小さくなる。

(5) (1) による解析結果を確かめるために光弾性実験を行い、両者はかなりよく一致することが示された。

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示す。

文 献

- (1) 鈴木, 機論, **50**-449, A(1984), 67.
- (2) 沢・ほか 2 名, 機論, **52**-476, A(1986), 919.
- (3) Wah, T., *Int. J. Mech. Sci.*, **18**(1976), 223.
- (4) 杉林・池上, 文献(1)の 17 ページ.
- (5) 能野・永弘, 機論, **52**-479, A(1986), 1698.
- (6) 仲野・ほか 2 名, 機論, **53**-496, A(1987), 2349.
- (7) 天摩・ほか 3 名, 機論, **55**-514, A(1989), 1347.
- (8) 山崎・千葉, 材料, **35**, 393 (1986), 629.
- (9) 今中・ほか 2 名, 日本接着協会誌, **16**-12 (1980), 501.
- (10) 山本・津村, 機論, **48**-432, A(1982), 1051.
- (11) 佐々木・ほか 2 名, 機論, **54**-497, A(1988), 126.
- (12) 服部・ほか 3 名, 機論, **54**-499, A(1988), 597.
- (13) 笠野・松本, 日本接着協会誌, **21**-9(1985), 373.
- (14) 中原, 応用弾性学, (1982), 38 ページ, 実教出版.