曲げモーメント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 External Bending Moments

Katsuhiro TEMMA, 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 external bending moments. Assuming that adherends are rigid, and replacing an adhesive with a finite strip including rigid fillers, the analysis was performed 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 calculations. For verification, photoelastic experiments were performed. The analytical result was in fairly good agreement with the experimental result. It was seen that due to the amount of shift of location and size of fillers, the strength of joint was more improved than that of the joints without a filler. The stress singularity at the edge of the interface was discussed.

Key Words: Elasticity, Stress Analysis, Butt Adhesive Joint, External Bending Moment, Rigid Filler, Stress Singularity, Photoelasticity

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)~(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扱った研究は著者らの引張荷重を受ける円形剛体充てん物を有する接着継手に関する研究⁽¹⁰⁾ 以外に見当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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 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

に曲げモーメント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有限長帯板にモデル化し, 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, 被着体の遠方で曲げモーメント M 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)に置き換え, 被着体を剛体とみなし, 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。

* 原稿受付 平成2年12月26日。

*¹ 正員, 木更津工業高等専門学校 (〒292 木更津市清見台東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 曲げモーメントを受ける円形充てん物を有する突合せ接着継手

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

$$y = \pm h : \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$$

$$v_y = \sum_{s=1}^{\infty} b_s \sin\{(2s-1)\pi x/2l\} \dots \dots \dots (2)$$

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

なお、 u_x は x 方向変位、 v_y は y 方向変位を、 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、継手に作用する曲げモーメントは接着層境界 ($y = \pm h$) に変位分布 $F(x) = \varepsilon_0/l \cdot x$ を作用させることに

図 2 解析方法の説明

より与える。式(2)の $b_s (s=1, 2, 3, \dots)$ は

$$b_s = \frac{1}{l} \int_{-l}^l F(x) \cdot \sin\{(2s-1)\pi x/2l\} dx$$

である。これらの条件を満足する解を得るために次の手順⁽¹⁰⁾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曲げモーメント M を受ける場合の解を文献(7)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 ψ を用い、 $r = a$ 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 ψ は一般に次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \psi = & A_0 \theta + B_0 \log r + A_1 r \log r \cos \theta + B_1 r \theta \sin \theta + C_1 r \theta \cos \theta + D_1 r \log r \sin \theta \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} \{A_n r^{-n} + B_n r^{-n+2}\} \cos(n\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} \{C_n r^{-n} + D_n r^{-n+2}\} \sin(n\theta) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

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 ψ より接着層境界 ($y = \pm h$) に生ずる変位 $\partial u_x / \partial x, v_y$ 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。

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。

$$\begin{aligned} \chi = & \chi_0 + \chi_1 + \chi_2, \chi_0 = \frac{A_0}{2} xy^2 \\ \chi_1 = & \chi_1(\overline{A_n}, \overline{B_n}, l, h, a_n, \lambda_n, \overline{D_n}, \overline{C_n}, x, y) \\ = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\overline{A_n}}{\alpha_n^2 \overline{D_n}} [\{\alpha_n l \operatorname{sh}(\alpha_n l) + \operatorname{ch}(\alpha_n l)\} \operatorname{sh}(\alpha_n x) - \alpha_n x \operatorname{ch}(\alpha_n l) \operatorname{ch}(\alpha_n x)] \cos(\alpha_n y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{B}_s}{\lambda_s^2 \bar{\Omega}_s} [(\lambda'_s h \operatorname{ch}(\lambda'_s h) + \operatorname{sh}(\lambda'_s h)) \operatorname{ch}(\lambda'_s y) - \lambda'_s y \operatorname{sh}(\lambda'_s h) \operatorname{sh}(\lambda'_s y)] \sin(\lambda'_s x) \\
\chi_2 = & \chi_2(\bar{A}_n, \bar{B}_s, l, h, \alpha'_n, \lambda_s, \bar{\Delta}_n, \bar{\Omega}_s, x, y) \\
= & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{A}_n}{\alpha_n^2 \bar{\Delta}_n} [\alpha'_n l \operatorname{ch}(\alpha'_n l) \operatorname{sh}(\alpha'_n x) - \alpha'_n x \operatorname{sh}(\alpha'_n l) \operatorname{ch}(\alpha'_n x)] \cos(\alpha'_n y) \\
& - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{B}_s}{\lambda_s^2 \bar{\Omega}_s} [\lambda_s h \operatorname{sh}(\lambda_s h) \operatorname{ch}(\lambda_s y) - \lambda_s y \operatorname{ch}(\lambda_s h) \operatorname{sh}(\lambda_s y)] \sin(\lambda_s x)
\end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}
\alpha_n = \frac{n\pi}{h}, \alpha'_n = \frac{2n-1}{2h} \pi, \lambda_s = \frac{s\pi}{l}, \lambda'_s = \frac{2s-1}{2l} \pi, \bar{\Delta}_n = \alpha_n l + \operatorname{sh}(\alpha_n l) \operatorname{ch}(\alpha_n l), \bar{\Delta}_n = \alpha'_n l + \operatorname{sh}(\alpha'_n l) \operatorname{ch}(\alpha'_n l) \\
\bar{\Omega}_s = \lambda_s h + \operatorname{sh}(\lambda_s h) \operatorname{ch}(\lambda_s h), \bar{\Omega}_s = \lambda'_s h + \operatorname{sh}(\lambda'_s h) \operatorname{ch}(\lambda'_s h), \operatorname{sh} : \sinh, \operatorname{ch} : \cosh
\end{aligned}$$

……………(5)

$\bar{A}_0, \bar{A}_n, \bar{B}_s, \bar{A}_n, \bar{B}_s (n, s=1, 2, 3, \dots)$ 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、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 $X_d=0$ である充てん物が1個の場合、および図4に示すように(3) 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通りのモデルについて検討する。

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

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

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、接着層とほぼ同じ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）を挿入し同様の接着剤を用いて接着層に接着した。この継手に純曲げモーメント 8.9 N・m を作用させて光弾性実験を行った。

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

(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 回としたところ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なした。また、接着層境界

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 ($h/l=0.4$, $X_d/l=0.4$)

図 7 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の大きさの関係

自由端 ($x/l=1.0$) 近傍では応力は特異性を示す。充てん物周縁の最大主応力との比較のためおよび数値計算上の精度の観点から本研究では $x/l=0.98$ の点の応力を用いる。図 6 は充てん物の直径と接着層厚さの比 $a/h=0.3, 0.5$ および 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 と充てん物がなく、応力の特異性を考慮せず線形に応力が変化すると仮定した場合の接着層境界自由端 ($y=h, x=l$) での垂直応力 σ_m 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。 $a/h=0.3, 0.5$ 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。特別な場合である 1 充てん物 ($x_d=0$) の場合と比較すると、 $a/h=0.8$ の時 2 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。また、図 7 に接着層境界および充てん物周縁の最大主応力 σ_1/σ_m と a/h の関係を示す。この図より $a/h=0.5$ の時、充てん物周縁の最大主応力と、接着層自由端近傍 ($x/l=0.98$) の最大主応力がともに 1.5 となり、 $a/h=0.5$ の場合が最も効率的に特異応力が減少すると推測される。

接着層境界自由端近傍では特異応力を生じ、この応力特異性を評価するために応力特異場パラメータ⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を用いる。図 8 は応力特異性評価を行った結果を示す。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 8 より K の値は $a/h=0.8$ の時最大となり、 λ の値はいずれの場合も

図 8 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

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、無次元化した充てん物の直径 $a/h=0.3, 0.5$ および 0.8 の時応力特異場の強さ K はそれぞれ $K=0.3, 0.42$ および 0.47 となった。このことから平面応力状態の応力特異場の強さと同様な傾向を示すことがわかる。

(2) 充てん物偏心量 X_d の影響 図 9 より、 $X_d/l=0.2, 0.4$ および 0.6 のすべての場合において接着層自由端近傍 ($X/l=0.98, Y=\pm h$) の最大主応力が充てん物を入れないときよりも低下しており、 X_d/l の値が大きいくほどその低下率も大きくなる。また、充てん物周縁の最大主応力と σ_m との比 σ_1/σ_m の値は X_d/l の増加に伴い大きくなるが 2.0 以下である。図 10 は接着層境界および充てん物周縁の無次元化した最大主応力 σ_1/σ_m と X_d/l との関係を示している。この図より $X_d/l=0.51$ の場合、接着層境界と充てん物周縁の最大主応力がともに 1.4 となり、最も効果的に最

大主応力が減少する。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 $X_d/l=0.2, 0.4$ および 0.6 の時、それぞれ $K=0.46, 0.45$, および 0.44 であり、各 X_d/l に対しての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、 $K=0.46, 0.42$ および 0.4 となった。

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 は無次元化した充てん物の直径 $a/h=0.3, 0.5$ 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) を示す ($X_d/l=0.64$ 一定)。接着層境界と3個の充てん物周縁の最大主応力を比較すると、両端にある充てん物周縁の最大主応力が最も大きい。このため、左右の充てん物周縁からの破壊が予想される。また、図 12 より $a/h=0.5$ の時最も継手の最大主応力が小さくなる。平面応力状態での応力特異場の強さ K は $a/h=0.3, 0.5$ および 0.8 の時それぞれ $K=0.41, 0.38$ および 0.62

図 9 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 ($h/l=0.4, a/h=0.4$)

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 ($h/l=0.4, X_d/l=0.64$)

図 10 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

図 12 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の大きさの関係

となった。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、 $K=0.45, 0.37$ および 0.55 となった。

(2) 充てん物偏心量 X_d の影響 図 13 は $X_d/l = 0.24, 0.4$ 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）を示す。2 充てん物と同様に、充てん物が自由端方向へ偏心するほど接着層自由端近傍での最大主応力が低下している。また、図 14 に接着層境界および中央と両端の充てん物周縁の最大主応力と X_d/l の関係を示す。これより、 $X_d/l = 0.45$ の場合が最も継手が強化される。また、中心の充てん物周縁の主応力は両端にある充てん物の最大主応力よりも小さい。応力特異場の強さ K は $X_d/l = 0.24, 0.4$ および 0.8 の時それぞれ $K=0.52, 0.44$, および 0.38 となる。

4.1.3 充てん物の数の影響 継手に引張荷重が作用する場合⁽¹⁰⁾と同様に充てん物 1 個よりも充てん物が 2, 3 個のほうが自由端近傍の最大主応力が低下

図 13 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 ($h/l = 0.4, a/h = 0.5$)

図 14 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

し、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。充てん物が 3 個の時には両端の充てん物から破壊する場合が多いと予想される。2 個と 3 個では主応力の低下にあまり差がなかった。以上より曲げモーメントが作用する場合の継手強化の主要因子は、充てん物偏心量 X_d と充てん物の大きさであると推測される。

4.1.4 充てん物を Y 軸方向に 2 個挿入した場合

図 15 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、被着体の遠方で曲げモーメント M が作用する場合を示す。使用する応力関数および解析方法は 2 章の理論解析の場合と同様である。

(1) 充てん物の直径の影響 図 16 は、 $a/h = 0.2, 0.33$ および 0.47 の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。 $Y_d/h = 0.47$ 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。無次元化した充てん物の直径 $a/h = 0.2, 0.33$ および 0.47 のすべての場合で最大主応力（平面応力）は減少し、応力特異場の強さ K はそれぞれ $K=0.45, 0.45$ および 0.52 となる。また、図 17 より無次元化した充てん物の直径が $a/h = 0.15$ の時、充てん物周縁の最大主応力と接着層境界自由端近傍の最大主応力がともに $\sigma_1/\sigma_m = 1.5$ となり最も効果的に継手の最大主応力が減少する。

(2) Y_d の影響 図 18 に Y_d が無次元化した最大主応力分布に及ぼす影響を示す。 $Y_d/h = 0.27, 0.47$ および 0.67 のすべての場合において接着層境界の最大

図 15 層内に充てん物を Y 軸方向に 2 個有する接着継手

主応力が充てん物のない場合よりも低下している。また、充てん物周縁の最大主応力は接着層境界の最大主応力よりも常に小さいので、接着層界面からの破壊が予想される。また、充てん物が Y 軸上を原点方向に偏心した時若干接着層境界の最大主応力が減少するが、

図 16 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 ($h/l=0.4$, $Y_d/h=0.47$)

図 17 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の大きさの関係

図 18 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 ($h/l=0.4$, $a/h=0.2$)

X 方向に偏心した時ほどの減少は生じなかった。図 19 は Y_d/h と σ_1/σ_m との関係を示す。 $Y_d/h=0.3\sim0.5$ が継手強度に対し適切と予想される。 $Y_d/h=0.27, 0.47$ および 0.67 の時、応力特異場の強さ K (平面応力) はそれぞれ $K=0.36, 0.48$ および 0.54 となる。

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 20 は X 軸上に充てん物を 2 個有する場合の充てん物中心を通る接着層 ($y=0$) の主応力差 ($\sigma_1-\sigma_2$) 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○, △印はそれぞれ引張側及び圧縮側の実験値を示す。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。

6. 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曲げモーメントが作用した場合の継手内の応力分布を被着

図 19 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

図 20 実験結果と解析結果の比較

体を剛体と仮定し、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) 曲げモーメントが作用する層内に剛体充てん物を有す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、接着層境界端部の特異応力は減少する。また、逆に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。偏心量は $X_d/l = 0.5 \sim 0.6$ が継手強度に対して適切と考えられる。さらに、充てん物の直径が小さ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 $a/h = 0.3 \sim 0.4$ が適切と考えられる。さらに、充てん物が接着層の厚さ方向に偏心した場合、常に接着層境界最大主応力が充てん物周縁の最大主応力よりも大きいので、接着層境界自由端近傍からの破壊が予想される。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、3 個の場合は左右の充てん物周縁からの破壊が予想される。

(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表す。

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) 岸本・ほか 2 名, 接着, 16-12(1980), 501.
- (10) 天摩・ほか 2 名, 機論, 56-531, A, (1990), 2325.
- (11) 山本・津村, 機論, 48-432, A, (1982), 1051.
- (12) 佐々木・ほか 2 名, 機論, 54-497, A, (1988), 126.
- (13) 服部・ほか 3 名, 機論, 54-499, A, (1988), 597.
- (14) 笠野・松本, 接着, 21-9(1985), 373.
- (15) 中原, 応用弾性学, (1982), 38, 実教出版.