曲げモーメントを受ける異種材料突き合せバンド接着 継手の二次元応力解析と強度について*

天 摩 勝 洋*¹, 沢 俊 行*²
西 ケ 谷 達*³, 内 田 洋 彰*⁴

A Two-Dimensional Stress Analysis and Strength of Band Adhesive Butt Joints of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moments

Katsuhiro TENMA, Toshiyuki SAWA,
Tohru NISHIGAYA and Hiroaki UCHIDA

The stresses of band adhesive butt joints, in which the interfaces were partially bonded, were analyzed using a two-dimensional theory of elasticity in order to establish the fracture criteria when the joints of dissimilar adherends were subjected to external bending moments. In the analysis, the dissimilar adherends and the adhesive were replaced with finite strips when the interfaces were bonded by an adhesive at two regions. In the numerical calculations, the effects of the ratios of Young's modulus among adherends and an adhesive, the thickness of the adhesive, the bonding area and the position on the stress distributions at the interfaces were demonstrated. As a result, it was seen that band adhesive joints were available when the bonding area and positions were determined taking into account the external load distributions. Experiments were performed on the strains of adherends and the joint strengths. Analytical results were consistent with the experimental ones.

Key Words: Elasticity, Stress Analysis, Strength, Band Adhesive Joints, Dissimilar Adherends, Bending Moments

1. 結 言

接着継手構造の利用の拡大に伴い、接着継手内の応力分布を知ることおよび継手強度の推定法の確立が望まれ⁽¹⁾、これまで接着継手の応力分布に関して数多くの研究^{(2)~(8)}がなされるようになってきた。しかし、接着面の全域にわたって接着する従来の方法に対して、部分的に接着することによって、荷重に対して効率的に抵抗しようとするバンド接着継手に関してはいくつかの研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾および著者ら⁽¹¹⁾の同種材料のバンド接着継手に関する研究以外見あたらないようである。さらに、同種材料どうしの全面接着継手に関する研究⁽⁶⁾⁽⁸⁾に比べて異種材料どうしの継手の研究⁽¹²⁾は従来よりあまりなされていないようである。今後さらに接着作業時に生じる収縮応力⁽¹³⁾の低減の観点からバンド接着継手の必要性も増すことが考えられ、異種材料どうしのバンド接着継手の強度特性を明らかにする必要がある。

本研究では、有限長帯板の異種材料どうしの突き合せバンド接着継手に基本荷重形態である曲げモーメントが作用する場合に継手の応力および継手強度などバンド接着継手の特性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(平面ひずみ)により弾性接触問題として解析を行う。さらに数値計算により、被着体と接着層の縦弾性係数の比、接着層の厚さ、接着領域などの因子が接着層境界の応力分布に及ぼす影響について数値的に明らかにし、継手強度も検討する。また実験も行い、解析結果と実験結果の比較・検討を行う。

2. 理 論 解 析

図1は異種材質の二つの被着体をその接着面の $c - l_2 \leq |x_1| \leq c + l_2$ の2領域で部分的に接着した突き合せバンド接着継手に曲げモーメントが作用する場合を示す。このような接着継手の接着層境界の応力分布を解析するために、被着体および接着層を有限長帯板 [I], [II] および [III] に置き換え、各座標の原点を O_1, O_2 および O_3 とする。帯板 [I] の寸法は、長さ $2l_1$ 、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] および [III] についてもそれぞれ $2l_2, 2h_2, E_2, G_2, \nu_2, 2l_3, 2h_3, E_3, G_3,$

* 平成3年3月29日 第68期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成4年3月27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。

*⁴ 准員、木更津工業高等専門学校。

メントの釣合条件 $(M=2\int_{-l_2}^{l_2}(x_2+c)\sigma_y^{\text{II}}dx_2)$ を加える。

級数の項数を N とするとき、 $32N+1$ 元の連立一次方程式を解くことにより、 $A_0^{\text{II}}, \bar{A}_n^{\text{II}}, \bar{B}_s^{\text{II}}, \dots, \tilde{A}_n^{\text{III}}, \tilde{B}_s^{\text{III}}$ ($n, s=1, 2, 3, \dots$) などの未定係数が決定される。係数が決定された応力関数を用いることにより各応力および変位が得られる。

$$\begin{aligned} \chi_1^{\text{II}} = & \chi_1(A_0^{\text{II}}, \bar{A}_n^{\text{II}}, \bar{B}_s^{\text{II}}, l_2, h_2, a_n^{\text{II}}, \lambda_s^{\text{II}}, \bar{D}_n^{\text{II}}, \bar{Q}_s^{\text{II}}, x_2, y_2) = \frac{A_0^{\text{II}}}{2} x_2^2 \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{A}_n^{\text{II}}}{\bar{D}_n^{\text{II}} a_n^{\text{II}2}} [(a_n^{\text{II}} l_2 \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}} l_2) + \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}} l_2)) \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}} x_2) - a_n^{\text{II}} x_2 \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}} l_2) \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}} x_2)] \cos(a_n^{\text{II}} y_2) \\ & + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{B}_s^{\text{II}}}{\bar{Q}_s^{\text{II}} \lambda_s^{\text{II}2}} [\{\lambda_s^{\text{II}} h_2 \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) + \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} h_2)\} \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} y_2) - \lambda_s^{\text{II}} y_2 \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} y_2)] \cos(\lambda_s^{\text{II}} x_2) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_2^{\text{II}} = & \chi_2(\bar{A}_n^{\text{II}}, \bar{B}_s^{\text{II}}, l_2, h_2, a_n^{\text{II}}, \lambda_s^{\text{II}}, \bar{D}_n^{\text{II}}, \bar{Q}_s^{\text{II}}, x_2, h_2) \\ = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{A}_n^{\text{II}}}{\bar{D}_n^{\text{II}} a_n^{\text{II}2}} [(a_n^{\text{II}'} l_2 \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}'} l_2) + \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}'} l_2)) \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}'} x_2) - a_n^{\text{II}'} x_2 \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}'} l_2) \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}'} x_2)] \sin(a_n^{\text{II}'} y_2) \\ & + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\bar{B}_s^{\text{II}}}{\bar{Q}_s^{\text{II}} \lambda_s^{\text{II}2}} [\{\lambda_s^{\text{II}} h_2 \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) + \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} h_2)\} \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} y_2) - \lambda_s^{\text{II}} y_2 \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} y_2)] \cos(\lambda_s^{\text{II}} x_2) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_3^{\text{II}} = & \chi_3(\tilde{A}_n^{\text{II}}, \tilde{B}_s^{\text{II}}, l_2, h_2, a_n^{\text{II}'}, \lambda_s^{\text{II}'}, \tilde{D}_n^{\text{II}}, \tilde{Q}_s^{\text{II}}, x_2, y_2) \\ = & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tilde{A}_n^{\text{II}}}{\tilde{D}_n^{\text{II}} a_n^{\text{II}'2}} [a_n^{\text{II}'} l_2 \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}'} l_2) \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}'} x_2) - a_n^{\text{II}'} x_2 \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}'} l_2) \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}'} x_2)] \cos(a_n^{\text{II}'} y_2) \\ & - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\tilde{B}_s^{\text{II}}}{\tilde{Q}_s^{\text{II}} \lambda_s^{\text{II}'2}} [\lambda_s^{\text{II}'} h_2 \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}'} h_2) \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}'} y_2) - \lambda_s^{\text{II}'} y_2 \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}'} h_2) \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}'} y_2)] \cos(\lambda_s^{\text{II}'} x_2) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \chi_4^{\text{II}} = & \chi_4(\tilde{A}_n^{\text{II}}, \tilde{B}_s^{\text{II}}, l_2, h_2, a_n^{\text{II}'}, \lambda_s^{\text{II}'}, \tilde{D}_n^{\text{II}}, \tilde{Q}_s^{\text{II}}, x_2, y_2) \\ = & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\tilde{A}_n^{\text{II}}}{\tilde{D}_n^{\text{II}} a_n^{\text{II}'2}} [a_n^{\text{II}} l_2 \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}} l_2) \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}} x_2) - a_n^{\text{II}} x_2 \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}} l_2) \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}} x_2)] \sin(a_n^{\text{II}} y_2) \\ & - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\tilde{B}_s^{\text{II}}}{\tilde{Q}_s^{\text{II}} \lambda_s^{\text{II}'2}} [\lambda_s^{\text{II}'} h_2 \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}'} h_2) \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}'} y_2) - \lambda_s^{\text{II}'} y_2 \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}'} h_2) \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}'} y_2)] \cos(\lambda_s^{\text{II}'} x_2) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} a_n^{\text{II}} = & a_n(h_2) = \frac{n\pi}{h}, \quad a_n^{\text{II}'} = a_n'(h_2) = \frac{(2n-1)\pi}{2h_2}, \quad \lambda_s^{\text{II}} = \frac{s\pi}{l_2}, \quad \lambda_s^{\text{II}'} = \frac{(2s-1)\pi}{2l_2} \\ \bar{D}_n^{\text{II}} = & \bar{D}_n(a_n^{\text{II}} l_2) = \operatorname{sh}(a_n^{\text{II}} l_2) \operatorname{ch}(a_n^{\text{II}} l_2) + a_n^{\text{II}} l_2, \quad \bar{D}_n^{\text{II}'} = \bar{D}_n(a_n^{\text{II}'} l_2), \quad \tilde{D}_n^{\text{II}} = \bar{D}_n^{\text{II}}, \\ \bar{Q}_s^{\text{II}} = & \bar{Q}_s(\lambda_s^{\text{II}} h_2) = \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) + \lambda_s^{\text{II}} h_2, \quad \bar{Q}_s^{\text{II}'} = \bar{Q}_s'(\lambda_s^{\text{II}'} h_2) = \operatorname{sh}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) \operatorname{ch}(\lambda_s^{\text{II}} h_2) - \lambda_s^{\text{II}} h_2 \\ \tilde{Q}_s^{\text{II}} = & \tilde{Q}_s(\lambda_s^{\text{II}'} h_2), \quad \tilde{Q}_s^{\text{II}'} = \tilde{Q}_s'(\lambda_s^{\text{II}'} h_2), \quad \operatorname{sh} : \sinh, \operatorname{ch} : \cosh \end{aligned}$$

3. 実験方法

図2および図3に4点曲げ実験に用いた試験片の寸法を示す。図2は解析結果を確かめるためのひずみに関する実験に用いた試験片を示し、試験片には未接着部分をつくるために1mmの段差をつけ、接着領域(斜線部分)を図2に示す2領域とした。なお被着体の材質は鋼(S45C)、アルミニウム(A1080P)を使用

し、被着体の接着層境界から3mm離れた位置にひずみゲージがy軸方向にはられている。2種類の試験片を異種材料どうし組合せ、常温硬化型エポキシ接着剤[住友スリーエム(株), Scotch-Weld 1838]で接着し、65°Cで2時間硬化させた。その後継手に14.89 N・mの曲げモーメントを作用させ、このときのひずみを測定する。図3は継手強度に関する実験に用いたバンド接着用試験片(斜線部分が接着領域)を示す。接着面

図2 ひずみに関する実験に用いた試験片

図3 継手強度に関する実験に用いた試験片

に段差のない同一寸法の全面接着用試験片も用意した。材質は鋼 (S 45 C), アルミニウム (A 2017 P) を使用し, 鋼と鋼 (St-St), アルミニウムとアルミニウム (Al-Al), 鋼とアルミニウム (St-Al) の 3 種類の継手を作成し, 継手の破壊荷重を測定する。試験片の寸法は $2h_1=2h_3=55.0\text{ mm}$ で, 厚さはいずれも $t=6\text{ mm}$ である。

(a) $y_2 = h_2$ における各応力

(b) $y_2 = -h_2$ における各応力

4. 解析結果および実験結果との比較

4.1 解析結果 接着層境界 ($y_2 = \pm h_2$) の端部 ($|x_1| = c + l_2$ および $|x_1| = c - l_2$) では応力の特異性を示すので, ここでの応力の収束性を考慮して級数の項数を 50 とした。図 4 は被着体と接着層の縦弾性係数比 E_1/E_2 が接着層境界 ($y_2 = \pm h_2$) の各応力 σ_x , σ_y , τ_{xy} および最大主応力 σ_1 (平面ひずみ状態) 分布に及ぼす影響を示している。 E_1/E_2 を 5, 10 および 60 とし, 被着体の上下端面 ($y_1 = +h_1$, $y_3 = -h_3$) には線形分布荷重 [$|x_1| = |x_3| \leq l_1$ で $F(x_1) = G(x_3) = Px_1/l_1$] が作用し, 接着領域は $l_2 = 0.2l_1$ とした。縦軸は各応力と上下端面に作用する荷重分布 $F(x_1)$ および $G(x_3)$ の応力の最大値 $P(x_1 = l_1)$ との比を, 横軸は被着体半分の長さ l_1 に対する被着体の中心からの距離 x_1 の比を表す。以下の計算結果において応力分布は接着層端部から長さ $2l_2$ の 0.4% 内側の点までとっている。 E_1/E_2 が小さくなるほど未接着部近傍 ($x_1/l_1 = 0.6$) での応力が高くなる特異性を示し, また E_1/E_2 が大きくなるほど応力分布

(c) $y_2 = h_2$ における最大主応力 σ_1

(d) $y_2 = -h_2$ における最大主応力 σ_1

$$\left| h_1/h_3=1, h_1/h_2=25, h_1/l_1=1, \nu_1/\nu_2=\nu_3/\nu_2=1, E_1/E_3=3, l_2=0.2l_1, l_1=c+l_2, |x_1|=|x_3|\leq l_1 \text{ で } F(x_1)=G(x_3)=Px_1/l_1 \right|$$

図 4 被着体と接着層の縦弾性係数の比が接着層境界の各応力および最大主応力分布に及ぼす影響

は荷重分布 $F(x_1)$ および $G(x_3)$ に近づく傾向にある。

図5は被着体どうしの縦弾性係数比 E_1/E_3 が接着層境界の無次元化した最大主応力分布 σ_1/P に及ぼす影響を示している。 E_1/E_3 が大きくなるほど応力の変化は大きくなり、自由端近傍 ($x_1/l_1=1.0$) では被着体 [I] 側での応力が高くなる。すなわち縦弾性係数の大きい被着体側の接着層境界からの破壊が起こり、被着体が異種材料どうしの場合と同種材料どうしの場合⁽¹¹⁾ に比べ強度が低下すると推測される。図6は接着層厚さの影響を示している。被着体と接着層厚さの比 h_1/h_2 を 50, 100 および 200 とした、 h_1/h_2 が大きくなるほど接着層端部 ($x_1/l_1=0.6$ および 1.0) での応力の特異性が大きくなっている。

図7は $h_1/l_1=0.2$ で荷重分布 $F(x_1)=G(x_3)$ が $|x_1|=|x_3|\leq 0.5l_1$ の範囲で線形的に作用した場合に、接着位置 c/l_1 ($l_2=0.2l_1$ は一定) が接着層境界 ($y_2=\pm h_2$) の $0.2\leq |x_1/l_1|\leq 0.6$, $0.4\leq |x_1/l_1|\leq 0.8$ および $0.6\leq |x_1/l_1|\leq$

1.0 での応力分布に及ぼす影響を示している。この解析結果に基づき、図8は継手破壊が生じると推測される応力の一番高い位置、すなわち接着層 [II] の界面 ($y_2=\pm h_2$) における接着端部 ($|x_1|=c+l_2$ および $|x_1|=c-l_2$ から 0.4% 内側の点) の点④、⑥、⑦および⑧ (図8) での最大主応力値の変化を示している。 c/l_1 が約 0.56 のとき点④と点⑦での最大主応力値が一致し、接着層境界の最大主応力分布がより均一化されている。図8(b)は図8(a)の場合の未接着部近傍での特異応力の変化を応力特異場パラメータ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ で表したものである。すなわち未接着部近傍の応力を次式で表し、 K の値の大小で強度を評価する。

$$\sigma_1/P = K/(r^\lambda) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 K は応力特異場の強さ、 λ は特異性の指数である。 λ は文献⁽¹⁶⁾ により求められる。 c/l_1 が約 0.57 で点④と点⑦の特異場強さ K の値が一致する。以上図8(a)と(b)の考察より、この継手は c/l_1 が 0.56 ~

(a) $y_2 = h_2$ における最大主応力 σ_1

(a) $y_2 = h_2$ における最大主応力 σ_1

(b) $y_2 = -h_2$ における最大主応力 σ_1

(b) $y_2 = -h_2$ における最大主応力 σ_1

$h_1/h_3=1$, $h_1/h_2=25$, $h_1/l_1=1$, $E_1/E_2=60$, $\nu_1/\nu_2=\nu_3/\nu_2=1$, $l_2=0.2l_1$, $l_1=c+l_2$, $|x_1|=|x_3|\leq l_1$ で $F(x_1)=G(x_3)=Px_1/l_1$

図5 被着体どうしの縦弾性係数の比が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

$h_1/h_3=1$, $E_1/E_3=3$, $E_1/E_2=60$, $h_1/l_1=1$, $\nu_1/\nu_2=\nu_3/\nu_2=1$, $l_2=0.2l_1$, $l_1=c+l_2$, $|x_1|=|x_3|\leq l_1$ で $F(x_1)=G(x_3)=Px_1/l_1$

図6 被着体と接着層厚さの比が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

0.57 で強度が最大になると推測される。

図9は接着領域が接着層境界 ($y_2 = \pm h_2$) の無次元化した最大主応力分布 σ_1/P に及ぼす影響を示している。なお $F(x_1) = G(x_3) = Px_1/l_1 [|x_1| \leq l_1, |x_3| \leq l_1]$ である。 $2l_2/l_1$ の比を 1.0 (全面接着)、0.6 および 0.4 とした。これより応力値の小さい被着体中心部が未接着であっても、被着体の両端では未接着による応力の増加は少ないと考えられる。すなわち、部分的に接着したバンド接着の場合でも接着領域を適切に選択することにより荷重に対して効率的に抵抗できる可能性を示している。

4.2 解析結果と実験結果との比較 図10は図2に示す鋼 (S 45 C) とアルミニウム (A 1080 P) による継手の接着層境界から 3 mm ($y_1 = -4.5$ mm, $y_3 = 4.5$ mm) 離れた位置における y_1 および y_3 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_1

および y_3 方向のひずみを、横軸は被着体の中心からの距離 x_1 を表し、また実線は計算値を○印は実験値を表す。数値計算においては、鋼およびアルミニウムの縦弾性係数をそれぞれ 206 および 68.6 GPa とし、ポアソン比を 0.3, $2h_1 = 2h_3 = 15.0$ mm とした。接着層のそれらは 3.60 GPa, 0.38 とし、その厚さは実測値より 0.055 mm とした。解析結果と実験結果はかなりよく一致していることを示している。

4.3 継手強度について 表1に全面接着継手とバンド接着継手の破壊強度の比較を示す。図3の試験片を使用し、同種材料どうしと異種どうしの接着継手および全面接着とバンド接着継手を含め6種類の各継手についてそれぞれ30回の曲げ実験を行った。結果を統計処理し、95%以上非破壊確率値を継手強度とみなした。なお本実験の異種材料のバンド接着継手の場合平均値 $\mu = 90.2$ Nm および標準偏差 $\sigma = 25.5$ Nm とな

(a) $y_2 = h_2$ における最大主応力 σ_1

(b) $y_2 = -h_2$ における最大主応力 σ_1

$$\left| \begin{array}{l} h_1/h_3=1, h_1/h_2=5, h_1/l_1=0.2, E_1/E_2=60, E_1/E_3=3, \nu_1/\nu_2 \\ =\nu_3/\nu_2=1, l_2=0.2l_1, |x_1|=|x_3|\leq 0.5l_1 \text{ で } F(x_1)=G(x_3)=Px_1/l_1 \end{array} \right|$$

図7 接着位置が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

(a) 未接着部近傍の最大主応力 σ_1

(b) 未接着部近傍の応力特異場強さの値 K

$$\left| \begin{array}{l} h_1/h_3=1, h_1/h_2=5, h_1/l_1=0.2, E_1/E_2=60, E_1/E_3=3, \nu_1/\nu_2 \\ =\nu_3/\nu_2=1, l_2=0.2l_1, |x_1|=|x_3|\leq 0.5l_1 \text{ で } F(x_1)=G(x_3)=Px_1/l_1 \end{array} \right|$$

図8 接着位置が未接着部近傍の最大主応力に及ぼす影響

った。継手強度を推定するにあたり、本実験に用いたエポキシ系接着剤の破壊応力 σ_a を文献⁽¹⁷⁾ の円筒試験片を用いてあらかじめ求めた。鋼どうしの継手では $\sigma_a = 47.4$ MPa、アルミニウムどうしでは $\sigma_a = 43.9$ MPa、鋼とアルミニウムでは $\sigma_a = 41.2$ MPa が得られた。図 11 は異種材料どうしの継手の強度実験に用いた図 3 の試験片寸法に対する界面 ($y_2 = h_2$) での応力分布を示す。本研究では継手強度を推定するための一方法として、以下の方法により継手強度を求めた。すなわち接着端部 $x_1/l_1 = 0.996$ の位置で、最大主応力 σ_1 の値が接着層の破壊応力に等しくなったときに継手が破壊すると仮定した。評価法は最大主応力説およびミーゼスの降伏条件 (表中の括弧内の値) により行った。最大主応力説に基づく推定値は実験値より小さめの値を示しているが、両者はかなりよく一致している。一方ミーゼスの条件による値は本研究の場合には推定値は実験値よりかなり大きくなっている。また、いずれの場

合もバンド接着は全面接着と同程度の強度を有することがわかる。さらに、被着体が異種材料どうしの継手の場合 (St-Al) には、鋼と鋼 (St-St) およびアルミニウムとアルミニウム (Al-Al) による同種材料どうしの継手の場合に比べて継手強度が半分程度になることがわかる。

5. 結 言

本研究では異種材料帯板どうしの突き合せバンド接着継手に曲げモーメントが作用する場合の継手の応力と強度に関して検討し、次の結果が得られた。

(1) 突き合せ接着継手の接着層境界の応力分布

表 1 継手の強度に関する比較

		(Nm)		
Adherends		St-St	Al-Al	St-Al
completed adhesion ($2l_2/l_1=1.0$)	EXP	123	110	50
	NUM	118 (329)	107 (297)	48 (134)
Band Adhesion ($2l_2/l_1=0.6$)	EXP	120	108	47
	NUM	116 (299)	104 (269)	44 (119)

(a) $y_2 = h_2$ における最大主応力 σ_1

(b) $y_2 = -h_2$ における最大主応力 σ_1

$$\left| \begin{array}{l} h_1/h_2=1, h_1/h_2=25, h_1/l_1=1, E_1/E_2=60, E_1/E_3=3, \nu_1/\nu_2 \\ =\nu_3/\nu_2=1, l_1=c+l_2, |l_1|=|x_3| \leq l_1 \text{ で } F(x_1)=G(x_3)=Px_1/l_1 \end{array} \right|$$

図 9 接着領域が接着層境界の最大主応力分布に及ぼす影響

(a) 鋼におけるひずみ ($y_1 = -4.5$ mm)

(b) アルミニウムにおけるひずみ ($y_3 = 4.5$ mm)

図 10 解析結果と実験結果との比較

$$\left\{ \begin{array}{l} h_1 = h_3 = 27.5 \text{ mm}, h_2 = 0.0275 \text{ mm}, l_1 = 25.0 \text{ mm}, \nu_1 = \nu_3 = 0.3, \\ \nu_2 = 0.38, E_1 = 206 \text{ GPa}, E_3 = 68.6 \text{ GPa}, E_2 = 3.6 \text{ GPa}, |x_1| = |x_3| \\ \leq l_1 \text{ で } F(x_1) = G(x_3) = Px_1/l_1 \end{array} \right.$$

図 11 接着層境界 ($y_2 = h_2$) における最大主応力分布

を、被着体と接着層を有限長帯板にモデル化し、弾性三体問題として二次元弾性論により厳密に解析する方法を示した。

(2) (1)の方法に基づいて被着体と接着層の縦弾性係数比、被着体どうしの縦弾性係数比、接着層の厚さ、接着領域および接着位置が接着層境界の応力分布に及ぼす影響を数値的に明らかにした。その結果、被着体と接着層の縦弾性係数の比が大きくなるほど未接着部近傍での応力が低くなった。

(3) 未接着部近傍での最大主応力値および応力特異場の強さ K が均一化されるバンド接着位置が存在することが示された。

(4) 荷重分布に対応して、最適なバンド接着位置および領域が存在することがわかった。

(5) 被着体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が示された。さらに、継手の強度実験を行い、部分的に接着したバンド接着の場合でも全面接着した場合と同程度の強度が得られることを示した。

(6) 解析および実験より異種材料どうしの接着継手の強度は同種材料どうしの接着継手の強度に比べて低いことが示された。

終わりに本研究を行うにあたって有益なご教示を賜わっ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) 池上, 機論, 50-457, A(1984), 1557.
- (2) 杉林・池上, 機論, 50-449, A(1984), 17.
- (3) 京極・ほか2名, 機論, 53-487, A(1987), 449.
- (4) 辻・島田, 機論, 30-218(1964), 1192.
- (5) Erdogan, F. and Ratwani, M., *J. Compos. Mater.*, 5 (1971), 378.
- (6) 沢・ほか2名, 機論, 52-476, A(1986), 919.
- (7) Wah, T., *Int J. Mech. Sci.*, 18(1976), 223.
- (8) 沢・ほか3名, 機論, 53-487, A(1987), 523.
- (9) 杉林・池上, 機論, 50-451, A(1984), 373.
- (10) Pirvics, J. *Adhes.*, 6(1974), 207.
- (11) 天摩・ほか3名, 機論, 56-525, A(1990), 1189.
- (12) 沢・ほか3名, 機論, 54-499, A(1988), 449.
- (13) 鈴木・機論, 50-455, A(1984), 1341.
- (14) 天摩・ほか3名, 機論, 56-531, A(1990), 2317.
- (15) 服部・ほか3名, 機論, 54-499, A(1988), 597.
- (16) Bogy, D. B., *J. Appl. Mech.*, 38(1971), 377.
- (17) 沢・小林, 機論, 53-495, A(1987), 2143.