非対称形状の単純重ね合せ継手の強度評価*

(第 1 報, 被着体の厚さが異なる場合)

京 極 秀 樹**, 杉 林 俊 雄***, 池 上 皓 三***

Strength Evaluation of Asymmetric Single Lap Joints
(1st Report, Effects of the Difference of the Adherend Thickness)

by Hideki KYOGOKU, Toshio SUGIBAYASHI, and Kozo IKEGAMI

The deformation and strength of single lap joints having different thickness of adherends were investigated analytically and experimentally. The strain distributions of the joints of carbon steel bonded with epoxy resin under tensile shear loads were analyzed by the finite element method. The strength of the joints was predicted by applying the strength laws of adherend, adhesive layer and their interfaces to the calculated stress distributions. The calculated results of the strain distributions in the joints were in good agreement with experimental results. The predicted strength values of the joints coincided approximately with the measured values by experiments. On the basis of the obtained results, the effect of the adherend thickness on the joint strength are discussed.

Key Words: Elasticity, Fracture, Single Lap Joint, Stress Distribution, Strain Distribution, Strength Estimation, Finite Element Method

1. 緒 言

最近の構造用接着剤の進歩により, 接着接合が構造物や機械要素の接合に多く用いられてきている。特に, 異種材料を接合する場合には, 電気化学的腐食が起こりにくいという特徴があるため, 今後ますます異種材料の接着接合の必要性が高まってくると考えられる。このような異種材料からなる接着接合部分の変形や強度には, 被着体の形状や力学的性質の相違が複雑に関連してくる。また, 異種材料に関する報告は Hart-Smith による単純重ね合せ継手の解析結果の報告⁽¹⁾のみである。そこで, 本報ではこれらの因子のうち, 形状の異なる継手の変形と強度について検討し, 被着体厚さの相違が継手の変形と強度におよぼす影響を明らかにした。

2. 引張せん断負荷に対する継手の応力解析

2.1 解析方法 図 1 に解析に用いた継手の座標, 各部の寸法および境界条件を示す。継手の各部の寸法

は継手全長を l , 上下被着体長さを l_1 , 接着長さを l_2 とする。また, 上部および下部被着体の厚さをそれぞれ t_1 および t_3 , 接着厚さを t_2 とする。さらに, x 方向の位置を $\bar{X}$ ($\bar{X} = x/l_2$), 継手全長に対する接着長さを $\bar{L}_0$ ($\bar{L}_0 = l_2/l$) として無次元化して表す。境界条件は上部被着体の左端部を x, z 両方向固定, 下部被着体の右端部の上部を x 方向自由, z 方向固定とし, 単位幅当たり外力 f を継手に負荷した。

応力分布の計算は継手の x 方向で 89 等分割, z 方向で 12 等分割 (上下被着体で 8 等分割, 接着層で 4 等分割) の三角形要素を用いて有限要素法により平面ひずみ状態を仮定して, 弾性解析で行った。解析に用いた被着体 (炭素鋼 S 45 C) と接着剤 (エポキシ樹脂)

図 1 継手の座標, 寸法および境界条件

* 昭和 60 年 3 年 31 日 第 62 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 59 年 10 月 31 日.

** 正員, 広島県立西部工業技術センター福山支所 (〒720 福山市山手町 198-2).

*** 正員, 東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259).

の材料定数を表1に示す。

2・2 解析結果 継手に負荷を加えたときの継手内の応力解析は継手全長を $l=178\text{ mm}$ 、継手幅を 25 mm 、接着層厚さを $t_2=0.05\text{ mm}$ として、上部および下部被着体厚さ (t_1 および t_3) を変化させて、(1) $t_1=10\text{ mm}$, $t_3=5\text{ mm}$, (2) $t_1=10\text{ mm}$, $t_3=2.5\text{ mm}$, (3) $t_1=5\text{ mm}$, $t_3=2.5\text{ mm}$ の3種類について行った。以下に示す例は、 $l_1=114\text{ mm}$, $l_2=50\text{ mm}$, $t_1=10\text{ mm}$, $t_2=0.05\text{ mm}$, $t_3=5\text{ mm}$, $\bar{L}_0=0.281$ の場合である。

図2に継手の単位幅当たり $f=100\text{ N/mm}$ の負荷を加えたときの継手全体の変形状態を節点変位で示す。変位ベクトルの大きさは図2中に示すとおりで、細線が変形前、実線が変形後の状態である。上部被着体は先端に近いほど大きく変形するのに対し、下部被着体は中央部で最も大きく変形し、わん曲する。接着層はせん断変形を受けている。

図2に対応する継手について上下被着体の x 方向の ε_x , ε_z , γ_{xz} の分布を上部被着体に対しては $z=t_1/8+t_2/2$ の面 ($z=1.275\text{ mm}$)、下部被着体に対しては $z=-t_3/4-t_2/2$ の面 ($z=-1.275\text{ mm}$) についてそれぞれ図3~5に示す。図3~5中で $\bar{X}=0$ から $\bar{X}=1.0$ の間が接着部である。各ひずみ成分 ε_x , ε_z , γ_{xz} は $\bar{X}=0$ および 1.0 近傍、すなわち接着部の両端で大きく変化し、逆に $\bar{X}=0.4$ 近傍から $\bar{X}=0.7$ 近傍の間ではほぼ一定の値となる。また、被着体厚さが薄い下部

被着体のほうがひずみが大きい。すでに報告した⁽²⁾被着体厚さが同じ対称形状の単純重ね合せ継手のひずみ分布と比較すると、非対称形状の場合には、接着部でひずみが一定となる範囲が広く、かつ継手内でのひずみの最大値も大きい。これは被着体厚さが異なるため、図2のように特に薄い下部被着体が大きくひずむためである。

図6~8に図2に対応する継手の上下被着体および接着層の x 方向に対する各応力成分 σ_x , σ_z , τ_{xz} の分布を示す。図6~8中では上部被着体に対しては $z=t_1/8+t_2/2$ の面 ($z=1.275\text{ mm}$)、下部被着体に対しては $z=-t_3/4-t_2/2$ の面 ($z=-1.275\text{ mm}$)、接着層に対しては $z=-(3/8)t_2$ の面 ($z=-0.019\text{ mm}$) の値をそれぞれ実線、一点鎖線、破線で示す。図6より上下被着体の σ_x は接着部両端近傍で急激に増加している。接着層の σ_x は接着部両端近傍でわずかに増加しており、接着部のほとんどの範囲で零または負(圧縮)の値である。図7および図8より上下被着体および接着層の σ_z および τ_{xz} も接着部両端付近で変化しているが、ほとんどの範囲で零または負の値をとっている。

図2 継手の変形図

表1 材料定数		
	Adherend (Carbon steel)	Adhesive (Epoxy resin)
Young's modulus GPa	206	3.33
Poisson's ratio	0.33	0.34

図3 上下被着体の x 方向の ε_x の分布

図4 上下被着体の x 方向の ε_z の分布

すでに報告⁽²⁾したように、被着体厚さが同じ継手の場合には被着体のひずみが小さいため、接着層に大きな負荷がかかる。これに対して、被着体厚さが異なる継手の場合には、上下被着体のひずみ分布ならびに上下被着体および接着層の応力分布から、薄い被着体が大きくひずむために、被着体、接着層および界面にかかる負荷が平均化されるので、接着層にかかる負荷が小さい。すなわち、これは継手強度が向上することを示唆している。

2.3 引張せん断負荷に対する実験結果 引張せん断負荷に対する継手のひずみの測定は球面座を用いたジグ⁽³⁾と引張試験機により行った。ここでは、図3~5の解析に用いた継手に単位幅当たり $f=100 \text{ N/mm}$ 負荷してひずみ分布を測定した。測定結果も図3~5に示してある。これらの図からわかるように、測定結果は解析結果とほぼ一致しており、解析結果が非対称形状の単純重ね合せ継手の変形状態をよく表わしている。

図3~5の解析に用いた継手に引張荷重を増加させて、破損するまでの継手各部のひずみの変化を測定した。図9および図10にそれぞれ ε_x および ε_z の引張荷重の増加に対する変化を示す。図9、10中の縦軸には加えた引張外力を全接着面積で割った平均応力 σ_a を示す。なお、1および2の位置、7および8の位置はそれぞれほぼ同様の变化を示すので、図中には2の位置と7の位置の値のみを示した。図9および図10より $\sigma_a=7.5 \text{ MPa}$ 近傍で4の位置の ε_x の値が急に減少し、ひずみがほぼ零になっている。これは4の位置

図5 上下被着体の x 方向の γ_{xz} の分布

図6 上下被着体および接着層の x 方向の σ_x の分布

図7 上下被着体および接着層の x 方向の σ_z の分布

図8 上下被着体および接着層の x 方向の τ_{xz} の分布

すなわち上部被着体の先端にき裂が入ったと考えられる。これに伴って、3および6の位置の ε_x , ε_z も大きく変化している。これは継手に入ったき裂が進行していることを示唆している。

3. 継手の強度予測および実験結果

3.1 強度則 継手の強度予測は著者らがすでに報告した方法⁽⁴⁾で引張せん断負荷に対して行った。これは被着体、接着層、界面から継手の強度をそれぞれの強度則を用いて予測する方法である。それぞれの強度則を被着体に対して F_1 、接着層に対して F_2 、界面

に対して F_3 とすると、本報で用いた材料については次式のように書き表せる。ここで、 F_1 , F_2 はミーゼスの条件式、 F_3 は接着強度則に対応するものである。

$$F_1 = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2)^{1/2} / 343 = 1 \quad \dots\dots (1)$$

$$F_2 = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2)^{1/2} / 64 = 1 \quad \dots\dots (2)$$

$$F_3 = \left| \frac{\sigma_z}{31.5} \right|^{8.66} + \left| \frac{\tau_{xz}}{30.8} \right|^{8.66} = 1 \quad \dots\dots (3)$$

3.2 引張せん断負荷に対する強度予測 継手の強度予測は、式(1)~(3)の強度則を継手内のそれぞれの応力分布に適用して行った。強度予測を行った継手は全長 $l=178$ mm, 継手幅25 mm, 接着層厚さ $t_2=0.05$ mmを一定とし、接着層長さ l_2 と被着体厚さ(t_1 および t_3)をそれぞれ変化させた。図11にひずみ分布の解析結果を示した継手($t_1=10$ mm, $t_3=5$ mm, $l_2=50$ mm)の被着体、接着層および界面の強度分布を示す。強度 f^* は接着層の両端および被着体の先端側の界面で小さいことがわかる。これは継手がこれらの部分から破損しやすいことを示唆している。この強度予測結果は、2.3節で述べたように図9および図10に示した4の位置すなわち上部被着体の先端からき裂が入った実験事実と一致する。

図12に被着体厚さと接着長さの両者を変化させた場合の継手の強度予測結果を示す。図12中の一点鎖線、破線、実線はそれぞれ強度則 F_1 , F_2 , F_3 より求めた被着体、接着層、界面の強度予測結果を示す。図12の縦軸は継手に負荷を加えることにより継手内の接着層、界面が破損する時の外力 f を接着長さで割った平均破損応力 σ_b を示している。図12(a)に被着体厚さ $t_1=10$ mm, $t_3=5$ mmの場合の強度変化を示す。平均破損応力 σ_b は接着層強度が界面よりわずかに大きく、両者とも $\bar{L}_0=0.5$ 近傍まで急激に減少して、その後ほぼ一定となる。被着体強度はこれらよりかなり大きな値をとる。図12(b)および図12(c)にそれぞれ被着体厚さ $t_1=10$ mm, $t_3=2.5$ mmおよび $t_1=5$ mm, $t_3=2.5$ mmの場合の強度変化を示す。いずれの場合にも、

図9 破損に至るまでの継手各部のひずみ(ε_x)の変化

図10 破損に至るまでの継手各部のひずみ(ε_z)の変化

図11 継手全体の強度分布

*1 ここでの強度 f は各部の応力が式(1)~(3)の強度則 $F_i=1$ ($i=1, 2, 3$)を満足する時の外力を示す。

界面および接着層の強度は $t_1=10$ mm, $t_3=5$ mm の場合と同様の变化を示す。しかし、被着体強度は $t_1=10$ mm, $t_3=2.5$ mm の場合にはほぼ $\bar{L}_0=0.5$ 以上で他の強度に一致する。また、 $t_1=5$ mm, $t_3=2.5$ mm の場合には $\bar{L}_0=0.1$ 以上では界面強度とほぼ一致する。このような σ_b の変化は、接着長さが強度に影響し、接着長さがほぼ $\bar{L}_0=0.5$ 以上では強度があまり増加しないことを意味している。それぞれの場合の強度を比較すると (1) $t_1=10$ mm, $t_3=2.5$ mm, (2) $t_1=10$ mm, $t_3=5$ mm, (3) $t_1=5$ mm, $t_3=2.5$ mm の順で小さくなっている。2・2節で述べたように薄い被着体が負荷を受けもつために、最も厚い 10 mm の被着体と最も薄い 2.5 mm の被着体の組合せが最も強くなると考えられる。また、 $t_1=5$ mm, $t_3=2.5$ mm の組合せでは、図 12(c) に示すように被着体自体の強度が低いため、逆に被着体のひずみが大きすぎて、強度が低くなると考えられる。

3・3 強度予測結果と実験結果の比較 それぞれの継手に対する強度の実験値も図 12 に示してある。図 12(a) の $t_1=10$ mm, $t_3=5$ mm の場合には解析結果と実験結果はほぼ一致しているが、 $\bar{L}_0$ が大きい領域でわずかに実験結果が大きくなっている。図 12(b) の $t_1=10$ mm, $t_3=2.5$ mm の場合には $\bar{L}_0$ が小さい領域では実験結果は解析結果とほぼ一致しているが、 $\bar{L}_0$ が大きい領域では実験結果が大きくなっている。図 12(c) の $t_1=5$ mm, $t_3=2.5$ mm の場合、 $\bar{L}_0$ が小さい領域で実験結果がわずかに小さく、逆に $\bar{L}_0$ が大きい領域では大きくなっている。これは、2・3節で述べ

たように、継手にき裂が入ってもすぐには破損しないでき裂が伝ばしていき、最終的な破損が起こるため、接着長さが長いほうが強度が大きくなるためと考えられる。図 13 に継手 ($\bar{L}_0=0.281$) の代表的な破損面を示す。この図 13 で上側および下側がそれぞれ上部および下部被着体である。図 13(a)～(c) いずれの場合にも界面破壊と凝集破壊が混在しており、上述したようにき裂の伝ばが複雑であることを示している。図 14 に $t_1=10$ mm, $t_3=5$ mm の継手の接着長さを変化させた場合の代表的な破損面を示す。図 14(a)～(c) い

図 12 接着長さによる継手強度の変化

(a) $t_1=10$ mm, $t_3=5$ mm, $f=590$ N/mm, $\sigma_b=11.8$ MPa (b) $t_1=10$ mm, $t_3=2.5$ mm, $f=659$ N/mm, $\sigma_b=13.2$ MPa (c) $t_1=5$ mm, $t_3=2.5$ mm, $f=566$ N/mm, $\sigma_b=11.3$ MPa図 13 継手 ($\bar{L}_0=0.281$) の破損面

れの場合にも、界面破壊と凝集破壊が混在しており、接着長さによる明確な差はみられない。

以上のように、強度予測結果はほぼ $\bar{L}_0=0.5$ 以下では実験結果と一致する。また、ほぼ $\bar{L}_0=0.5$ 以上では実験結果はいずれも予測結果よりやや大きくなっているが、予測値は安全側にてている。

4. 結 言

本報は被着体厚さの異なる非対称形状の単純重ね合せ継手に引張せん断負荷を加えたときの継手の変形と強度について解析と実験の両面から研究を行ったものである。被着体には炭素鋼 (S 45 C)、接着剤にはエポキシ樹脂を用いた。まず、継手に引張せん断負荷を加

(a) 接着長さ $\bar{L}_0=0.112$, $f=466$ N/mm, $\sigma_b=23.3$ MPa (b) 接着長さ $\bar{L}_0=0.281$, $f=590$ N/mm, $\sigma_b=11.8$ MPa (c) 接着長さ $\bar{L}_0=0.421$, $f=629$ N/mm, $\sigma_b=8.4$ MPa図 14 継手 ($t_1=10$ mm, $t_2=0.05$ mm, $t_3=5$ mm) の破損面

えたときの継手内のひずみ分布を有限要素法により解析した。次に、継手内に生じる各応力の値と強度則を組合せて、被着体厚さの異なる継手の強度について予測し、その結果の妥当性を実験によって確かめた。これらの結果をもとに、非対称形状の単純重ね合せ継手の形状と強度の関係を明らかにした。

文 献

- (1) Hart-Smith, L. J., NASA CR, 2218 (1974).
- (2) 杉林・池上, 機論, 50-449, C (昭 59), 17.
- (3) 杉林・池上, 日本接着協会誌, 18-11 (昭 57), 484.
- (4) 杉林・池上, 日本接着協会誌, 18-3 (昭 57), 102.