鋼のスカーフおよびバット継手の引張接着強度*

(第 1 報, ぜい性接着剤の場合)

鈴木 靖 昭**

Adhesive Tensile Strength of Scarf and Butt Joints of Steel Plates (1st Report, A Case of Brittle Adhesive)

by Yasuaki SUZUKI

Adhesive tensile strength of scarf joints with various scarf angles and butt joints with various adhesive layer thicknesses have been measured to study fracture criterion of joints of steel plates bonded by brittle epoxy adhesive. For those joints, three-dimensional elastic stress analysis was performed by FEM. Fracture of both joints were explained quantitatively by introducing the boundary layer depth of 0.035 mm at free surfaces of adhesive layers and obeyed maximum principal stress criterion. In adhesive layers of scarf joints with 0.1 mm layer thicknesses, the boundary layer depth of 0.035 mm included most of stress concentrated area at free surfaces. Locations of fracture initiation and fracture modes of adhesive layers observed with a optical microscope and a scanning electron microscope were agreed with those expected from stress distributions and boundary layer conception.

Key Words: Strength, Elasticity, Fracture Criterion, Adhesive Joint, Scarf Joint, Butt Joint, Non-Uniform Stress Distribution, Brittle Fracture, Three-Dimension, FEM

1. 緒 言

安全で効率的な接着継手の設計のためには、継手の破壊条件を明確にする必要がある。接着継手の応力解析に関する研究は従来から多く行われているが、破壊条件に関する研究は多くを見ない。スカーフ継手については、Lubkin⁽¹⁾により破壊条件の検討、山口ら⁽²⁾により接着強度の実験的検討がそれぞれなされている。またバット継手については、増岡ら⁽³⁾により接着層の塑性変形が十分進んだ場合の破壊条件の検討、杉林・池上ら⁽⁴⁾により組み合わせ応力下の円筒継手の接着強度の定式化などが行われている。

スカーフ継手の接着層内においては、垂直応力とせん断応力の組合せ応力状態となり、スカーフ角を変えることでその比率が変わるため、継手の破壊条件を調べる上で有用である。そこで著者らは既報⁽⁵⁾においてエポキシ系接着剤を用いた鋼のスカーフ継手の接着強度を実測し、その破壊条件の検討を行ったが、継手の応力解析が二次元の近似的なものであったため、実験結果の説明が必ずしも十分でなかった。

一方、先の Lubkin の報告では、接着層内の応力分布が均一で平面応力状態であるとして破壊条件の検討が行われているが、著者ら⁽⁶⁾の三次元有限要素解析によれば、接着層自由端近傍ではかなりの応力集中がみられ、その部分を除く接着層の大部分では平面ひずみ状態であることが明らかになった。

そこで本報においては、スカーフおよびバット継手の破壊条件の検討をより詳細に行うため、まず既報⁽⁵⁾のスカーフ継手の実験結果に加えて、既報と同一接着剤を用い接着層厚さを数種類に変えたバット継手の接着強度の測定を行った。次にそれらの継手の三次元有限要素解析を、接着層自由端近傍に関し前報⁽⁶⁾より詳しく行い、その結果を用いて、接着層表面の境界層⁽⁷⁾を考慮してスカーフ角度および接着層厚さと接着強度との理論的關係を導き、実験結果と比較して不均一応力分布が接着強度におよぼす影響を調べた。

2. 実験方法

2・1 接着剤 接着剤としてはエピコート 828 (シエル化学) 100 部に対し、硬化剤としてジエチレントリアミンを当量の 11 部添加したものを用いた。接着剤注型材の応力-ひずみ線図およびポアソン比の測定は既報⁽⁵⁾と同一方法により行った。

* 昭和 58 年 11 月 29 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 25 日。

** 正員、日本車輛製造(株) (〒456 名古屋市熱田区三本松町 1-1)。

2.2 接着継手 引張接着強度の測定に用いたスカーフおよびバット継手試験片の形状および寸法を図1に示す。被着材には低炭素鋼 (SS 41) を用いた。スカーフ角 θ は、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、および 90° (バット継手) の6種類で、接着面はいずれも $12.7 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ の正方形である。接着層厚さ h は、スカーフ継手については 0.1 mm 、バット継手については 0.1 mm のほか 0.3 、 0.6 、 1.0 、および 5.0 mm とした。接着方法は接着剤の真空注入法⁽⁵⁾によった。試験片中央には図1のようにゲージ長さ 5 mm の大ひずみ用ストレインゲージを2枚はりつけて、被着材の伸びを含む接着層の伸びを測定した。バット継手試験片についてのその他の製作方法および引張試験方法はすべて既報⁽⁵⁾と同一である。

3. 実験結果

3.1 接着剤 図2に接着剤の応力-ひずみ線図の例を示したが、破断に至るまでほぼ直線を示しており、ぜい性材料とみなされる。また表1には縦弾性係数およびポアソン比の実験値を示す。これらの値はそれぞれ試験片5個の平均値である。

3.2 スカーフ継手の引張接着強度 図3には各 θ における破断荷重を長手方向に垂直な継手の断面積で割り、引張接着強度 σ_r として○印で示した。各値は試験片10個の平均値である。 σ_r は $\theta=60^\circ$ において最小値を示し、 $\theta=90^\circ$ までほぼ同じ値を示しているが、 $\theta < 60^\circ$ においては θ の減少とともに急激に増加している。それらの関係については後に検討する。また図4には継手の荷重-ひずみ線図の例を示した。こ

図1 接着継手試験片 ($\theta=15^\circ \sim 90^\circ$)

図2 接着剤の応力-ひずみ線図

の実測ひずみ値のうち接着層の伸びの占める割合は、被着材と接着層の縦弾性係数の比およびストレインゲージ内の長さの比から数十%と推定されるが、線図はほとんど直線を示している。

3.3 バット継手の引張接着強度 図5には各接着層厚さ h における σ_r の実験値を、試験片10個の平均値として○印で示した。Griffithの理論にもとづく破壊の確率論から、Weibullは試験片内のクラックの総数 n と試験片の強度 S_m の関係として次式を導いている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

$$S_m = \frac{(1-1/m)^{1/m}}{(an)^{1/m}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

表1 接着剤の力学的性質

Young's modulus	Poisson's ratio
3.14 GPa {320 kgf/mm ² }	0.37

図3 スカーフ継手の接着強度とスカーフ角との関係

図4 スカーフ継手の荷重-ひずみ線図

ここで、 α および m は材料による定数である。 n は試験片の容積 V に比例するから、式(1)を簡単に表せば次式のようになる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

$$S_m \propto V^{-1/m} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図5 パット継手の接着強度と接着層厚さとの関係

図6 パット継手の荷重-ひずみ線図

したがって $\log S_m$ と $\log V$ とは直線関係になる。接着層容積 V は h に比例するため、図5においては σ_y と h の両者とも対数目盛にプロットした。その結果両者の関係は $h=0.6\text{mm}$ において折れ曲がる直線を示した。 σ_y と h との関係については後に検討を加える。

また図6には継手の荷重-ひずみ線図を示したが、いずれも破断に至るまでほとんど直線を示している。

4. 応力解析

4・1 解析方法 解析モデルおよび解析方法は前報⁽⁶⁾と同一である。図7(a)の $\theta=15\sim75^\circ$ のモデルの1/2の部分および(b)の $\theta=90^\circ$ のモデルの1/8の部分を実八節点六面体のアイソパラメトリック要素を用いて約1100節点、約800要素に分割し、三次元弾性解析を行った。座標の拡大・縮小(図7の k の値の変化)により、接着層の長さ l 対厚さ h の比を約10~127に変えた。 $l/h=127$ は $h=0.1\text{mm}$ の試験片に対応している。また図7(a)に示したように、 θ によりモデルの厚さ t (x 座標)を変化させた。 x, y , および z 方向の分割数は(a), (b)両モデルとも前報と同一であるが、接着層の自由端角[図7(c)の点A]近傍がより細分割されるように座標を前報とは変え、さらに、 xz 面において対角線 $\bar{AL}$ 上の要素の図心が $\bar{AL}$ に一致するように考慮した。

なお平面ひずみ状態下における継手の有限要素解析の結果⁽¹⁰⁾、継手全体に全くの均一応力分布を与えた $\theta=52.47^\circ$ についても解析を行った。

図7 三次元有限要素解析モデル

4.2 応力解析結果 図8には、 $\theta=15\sim 90^\circ$ の下側接着層境界において最大応力を示す側の自由端近傍の応力を、最大主応力 σ_1 およびMisesの相当応力 σ_{eq} について σ_a により無次元化して示した。 $\theta=15\sim 52.47^\circ$ においては図7(c)のBB'において、 $\theta=60\sim 90^\circ$ においてはA-A'において最大応力が生じた。接着層自由端から x 方向または z 方向に一定深さだけ内部へ入った点の応力の最大値は、対角線AQL上、BRL上、あるいは幅 b の中心線AQLRB上において生じるため、図8にはそのうちいずれか大きいほうの値を示した。横軸は自由端からの x 方向の距離を h により無次元化した。各応力はいずれも l/h によらずそれぞれほぼ一つの曲線上にのっており相似性がみられる。

(a) $\theta=15^\circ$ (b) $\theta=30^\circ$

また図8には、図7(c)の接着層の s, n および z 方向の中心点の要素(一定応力域)における応力を σ_{ic} および σ_{eqc} とし、それらの σ_a による無次元化値を $l/h=127$ の場合について直線で示した。自由端における σ_1, σ_{eq} の最大値の $\sigma_{ic}, \sigma_{eqc}$ に対する比は一種の応力集中係数であるが、その値は $\theta=52.47\sim 60^\circ$ において最小で、 θ がその角度からずれるほど増加しており、特に $\theta=15^\circ$ および 30° においては、両応力の場合とも3以上である。しかし自由端から内部へ $0.8h$ の

(c) $\theta=45^\circ$ (d) $\theta=52.47^\circ$ (e) $\theta=60^\circ$

図8 最大応力を示す接着層自由端近傍における応力分布 (その1)

深さだけ入れれば両応力はそれぞれ σ_{ic} あるいは σ_{eqc} にほぼ等しくなっている。

図9には $\theta=90^\circ$ における σ_i/σ_a と x との関係を示した。 l/h の値はそれぞれバット継手試験片の各 h の場合に対応している。 $l/h=2.54$ の場合を除き、自由端のごく近傍では対角線 AQ_L 上における応力のほうが幅 b の中心線 AQ_L 上の応力より大きいが、それより内部では両者の値が逆転している。

5. 実験結果の検討

5.1 接着層に対する境界層理論の適用 材料の表面に境界層⁽⁷⁾を考慮することにより、延性材料のみでなく大理石、ガラスセラミックスなどのぜい性材料および鋳鉄などについても不均一応力下の破壊がよく説明できることが、佐藤ら⁽¹¹⁾⁽¹²⁾および野口⁽¹³⁾により

報告されている。そこで本研究の接着層にもその考えの適用を試みた。

図10において、接着層境界の自由端近傍における応力は図8の解析結果では破線のようになるが、中西ら⁽⁷⁾の説に従って、厚さ δ の境界層の存在により実線のように $x=\delta$ で最大値 σ_δ を示し、この値は $x=\delta$ における弾性解析応力に等しいものとする。そこで次式を接着層の破壊条件とする。

$$\sigma_\delta = A\sigma_0 \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで σ_0 は接着剤自体の引張強度であり、 A の値は佐藤ら⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の報告では1.5、野口⁽¹³⁾の報告では1.0とされている。ところで2・1節で用いた接着剤の引張試験片に対し、接着層の容積は数百分の一であるため、式(1)によれば接着層のほうが σ_0 が大きくなると考えられる。しかし接着層の容積がわずかなため、被着材表面に吸着されている水分、ガスなどが混入することにより、含水率および単位容積当たりの欠陥数などが前記引張試験片に比して多くなりやすく、それらは接着層の σ_0 を減少させる方向に作用する。したがって今回の接着剤のような欠陥に敏感なぜい性接着剤

(f) $\theta=75^\circ$

(g) $\theta=90^\circ$

図8 最大応力を示す接着層自由端近傍における応力分布 (その2)

図9 バット継手の接着層境界における応力分布

図10 境界層を考慮した自由端近傍の応力分布

の場合には、前記引張試験片により得た引張強度を式(3)の σ_0 として用いることは、厳密に考えれば適当でないと考えられる。

そこで式(3)を直接適用して接着強度の計算値 $(\sigma_r)_{cal}$ を求めるのではなく、スカーフ継手においては基準の角度、パット継手においては基準の厚さを決め、そこにおける接着強度 σ_{ys} に対する任意の θ あるいは h における接着強度 σ_r の比の計算値 $(\sigma_r/\sigma_{ys})_{cal}$ を、各々における σ_s/σ_a の値の比として次式、

$$\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{ys}}\right)_{cal} = \left(\frac{\sigma_{ss}}{\sigma_a}\right) / \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_a}\right) \dots\dots\dots (4)$$

により求めた。ただし、 σ_{ss} は基準の θ あるいは h における σ_s である。 $(\sigma_r)_{cal}$ の値は、次式のように式(4)に σ_{ys} の実験値 $(\sigma_{ys})_{exp}$ を乗じて得た。

$$(\sigma_r)_{cal} = \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{ys}}\right)_{cal} (\sigma_{ys})_{exp} \dots\dots\dots (5)$$

5.2 スカーフ継手の接着強度 図8の解析結果から δ の値が0.001 mm (最大応力点近傍)、0.035 mm、および約 $l/2$ (一定応力域) の三つの場合における σ_s の値を σ_1 および σ_{eq} について求め、基準角度を 52.47° として式(4)および(5)により $(\sigma_r)_{cal}$ を計算して図3に示した。 $\delta \approx l/2$ における σ_s としては図8に示した σ_{1c} および σ_{eqc} の値を用い、 $\theta=90^\circ$ の $\delta=0.035$ mmにおける σ_1 の値は σ_{1c} より小さいため σ_s として σ_{1c} の値を用いた。また、 $\theta=52.47^\circ$ の $(\sigma_{ys})_{exp}$

としては 45° と 60° の実験値の平均値を使用した。

図3によれば、最大主応力 σ_1 を基準とした $\delta=0.035$ mmの場合の計算値が実験値にほぼ一致している。図8の $\delta=0.035$ mmと $\delta \approx l/2$ とにおける σ_1 の値は、 θ が 15° と 30° において少し差がみられるのみで、他の θ においてはほぼ等しいため、 σ_r の計算値も同じ傾向を示している。すなわち厚さ0.035 mmの境界層の中に応力の大きな部分はほとんど包含されていると言える。したがって、 $\delta=0.001$ mmとした場合の σ_r の計算値は実験値に全く一致していない。

一方、比較のために示したMisesの相当応力 σ_{eq} を基準とする σ_r の計算値も、いずれも実験値に全く一致がみられない。

5.3 パット継手の接着強度 図9の応力分布において、対角線 $\bar{A}QL$ 上と幅 b の中心線 AQL 上の応力のうちいずれか大きいほうの値を用いて、境界層を考慮して σ_r の計算値を求めた。図9によれば不均一応力分布の影響は h が厚いほうが大きいと考えられる。そこで $h=0.6, 1.0$, および 5.0 mmの場合の接着強度実験値に対し計算値が最もよく一致するように、 $h=1.0$ mmを基準として δ を求めたところ、スカーフ継手の場合に等しい $\delta=0.035$ mmが得られた。その時の σ_r の計算値を図5に示す。同図において破線で示したのは、 $h=0.1$ および 0.3 mmの場合は $\delta=0.035$ mmにおける応力のほうが σ_{1c} より小さくなる

図11 スカーフ継手接着層の破面 (12.7 mm×12.7 mm, $h=0.1$ mm)

ため、 σ_{ic} の値を用いて求めた σ_r の計算値である。計算値に比して実験値の直線のほうがこう配が少し大きい、これは実験値には式(1)により表される接着層中のクラックに起因する強度減少が加わっているためと考えられる。

$\delta = 0.035$ mm の境界層厚さは、軟鋼の 0.30 mm⁽⁷⁾、大理石の 0.27 mm⁽¹¹⁾、ガラスセラミックスの 0.11 mm⁽¹²⁾、および鉄の $2 \sim 4$ mm⁽¹³⁾ に比して小さいが、これはエポキシ樹脂がそれらの材料とは異なり、三次元の網状の分子構造をもつ非晶質体であるためであろう。エポキシ樹脂については、 δ の値は内在する欠陥の大きさ、先端が他と結合していない枝分かれ分子鎖の長さなどにより決まるのではないかと考えられる。

5.4 接着層の破面の観察 図11にはスカーフ継手の接着層破面の代表的な例を示した。 $\theta = 15^\circ \sim 75^\circ$ においては、特徴的な羽毛状の破面がみられる。この生成原因は既報⁽¹⁰⁾で報告したようにマイクロクラック⁽¹⁴⁾によるものと考えられる。荷重方向(図11では水平方向)に直角に接着面を横切るように生じるクラック

図12 接着層破面 ($\theta = 90^\circ$, 12.7 mm $\times$ 12.7 mm, $h = 0.1$ mm)

ク(以後メインクラックと呼ぶ)は破壊の開始箇所と考えられるが、それは図11のように $\theta = 15^\circ$ および 30° においてはほとんどの試験片が自由端(図7(c)のBB)近傍で生じたが、 $\theta = 45^\circ \sim 75^\circ$ においては大部分の試験片が両自由端の間において発生していた。これは図8からわかるように、 $\theta = 15^\circ$ および 30° の継手においては $\theta = 45^\circ \sim 75^\circ$ の継手に比して自由端における応力集中($\sigma_{imax}/\sigma_{ic}$)が大きく、しかも継手の厚さ t の中で応力が σ_{ic} より大きい部分の占める割合が大きいことが原因と考えられる。図8において、 $\theta = 45^\circ \sim 90^\circ$ の継手の場合、自由端から $\delta = 0.035$ mm 入った点の σ_i の値は σ_{ic} にほとんど一致している。 $\theta = 45^\circ \sim 75^\circ$ の破面には部分的にパラボラ模様⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾状の箇所がみられる。

$\theta = 90^\circ$ の試験片の多くは、図11(f)のように自由端角(左下)の界面付近に破壊が開始したミラー領域⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾がみられ、それに放射状にイレギュラライン^{(15)~(17)}が続き、その先はさらにあらい面になっている。しかし小さな円形の破壊の核⁽¹⁸⁾が自由端のみでなく内部にも多数個みられる。中には、図12のように主な破壊開始点である核⁽¹⁸⁾が接着面の中心付近に生じた試験片もみられた。

図13にはスカーフ継手破面の走査形電子顕微鏡による観察結果を示す。 15° の①および②は図11(a)の羽毛状部分であり、マイクロクラックにより生じた接着剤の細片が鋼の表面に残っている。 45° の①は図11(c)のメインクラックの近傍で、黒いのが接着層であり、その厚さ方向の断面がみられ、そこから破断により生じた島状および細片状の接着層が広がっている

図13 スカーフ継手の接着層破面の走査形電子顕微鏡写真

図14 バット継手接着層破面(12.7mm×12.7mm)

る。45°の②は図11(c)右下の白くかすんだ状態の部分で、鋼の研磨条こんの中へ接着剤が入り込み、その表面に微粒子状の接着剤が付着しているのがわかる。90°の①には接着層が黒く島状にみられ、中央付近に円形の破壊の核が生じているほか周辺にも小さな円形の核が多数点在している。90°の②は90°の①の右端付近をさらに拡大したものであるが、鋼の研磨条こんの中には接着剤が十分入り込んで残っていることがわかる。

図14には $h=0.3\sim 5.0$ mmのバット継手の破面を示した。破壊はいずれも自由端の角付近の界面に近い部分において開始し、ミラー領域に続いてイレギュララインがみられることは図11(f)の $h=0.1$ mmの場合と同様である。しかし破壊の開始点はいずれも自由端角近傍においてのみ生じた。

以上述べたように接着層の破壊の箇所および形態は、応力解析結果に境界層理論を適用することによって予想される結果にほぼ一致することが明らかになった。

6. 結 言

ぜい性接着剤を用いた接着継手の破壊条件を調べるため、スカーフ角度を変えた場合のスカーフ継手および接着層厚さを変えた場合のバット継手の引張接着強度の測定を行った。さらにそれらの継手について三次元有限要素解析を行い、境界層の理論を適用して接着強度の計算値を求め、実験値との比較検討を行ったところ以下の結論が得られた。

(1) スカーフ継手およびバット継手とも、接着層自由端に0.035 mmの境界層厚さ δ を考慮することにより、実験結果をほぼ定量的に説明することができた。

(2) 両継手の接着層の破壊は最大主応力条件に従って起こる。

(3) スカーフ接着継手(接着層厚さ0.1 mm)においては、接着層自由端近傍の応力集中部分のほとんどが $\delta=0.035$ mmの境界層中に包含される。

(4) 光学顕微鏡および走査形電子顕微鏡により観察した接着層の破壊の箇所および形態は、応力解析結果と境界層理論とから予想される結果にほぼ一致した。

終わりに本研究を行うにあたりご激励をいただいた名古屋大学工学部 清家政一郎教授に対し深く感謝の意を表します。また本研究に対しご支援ご指導をいただいた日本車輛製造(株) 岩瀬郁雄技術研究開発部長、谷口肇彦部長、小幡 鍊部長、電子顕微鏡による破面の撮影にご協力いただいた松本 力係長ならびにACOS 77 モデル 550 による計算にご協力いただいた同社計算センターの方々に対し厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) Lubkin, J. L., *J. Appl. Mech.*, 24 (1957), 255.
- (2) 山口・ほか2名, 工学院大学研究報告, 30 (昭46), 66.
- (3) 増岡・中尾, 日本接着協会誌, 14-4 (昭53), 125.
- (4) 杉林・ほか2名, 日本接着協会誌, 14-5 (昭53), 167.
- (5) 松本・ほか2名, 日本接着協会誌, 14-8 (昭53), 288.
- (6) 鈴木, 機論, 50-449, A (昭59), 67.
- (7) 中西・ほか4名, 機論, 19-87 (昭28), 14.
- (8) Weibull, W., *Ing. Vetenskaps Akad. Handl.*, No. 151 (1939); No. 153 (1939).
- (9) 横堀, 材料強度学, (昭41), 86, 技報堂.
- (10) 鈴木・ほか2名, 日本接着協会誌, 18-1 (昭57), 7.
- (11) 佐藤・桜井, 機論, 43-374 (昭52), 3702.
- (12) 佐々木・ほか3名, 機論, 44-388 (昭53), 4024.
- (13) 野口, 材料, 28-307 (昭54), 306.
- (14) Bascom, W. D., ほか2名, *J. Mater. Sci.*, 10 (1975), 1037.
- (15) Wolock, I. and Newman, S. B. (Rosen, B. 編), *Fracture Processes in Polymeric Solids*, (1964), 237, John-Wiley & Sons.
- (16) 上田・ほか2名, 機論, 44-378 (昭53), 433.
- (17) 成沢・小川, 機講論, No. 801-1 (昭55-6), 62.
- (18) 成沢・ほか3名, 高分子論文集, 36-8 (昭54), 543.