

S35C

S5400

27-7 J & 377° J

7e707 EA9430

山梨地方講演会

講演論文集

開催日：1992年10月31日（土）

会場：山梨大学工学部（甲府市）

共

催

社団法人 日本機械学会
(郵便番号151)

東京都渋谷区代々木二丁目4番9号
新宿三信ビル5階

電話 東京 (03) 3379-6781

社団法人 精密工学会
(郵便番号160)

東京都新宿区百人町二丁目22番17号
セラミックビル内

電話 東京 (03) 3362-4030

408. スカーフ接着継手および重ね合せ接着継手の応力解析および破壊条件について

On Stress Analyses and Fracture Conditions of Adhesive Scarf and Lap Joints.

正 鈴木靖昭 石塚孝志 水谷裕二 (日本車輛)

Yasuaki Suzuki, Takashi Ishizuka, Yuji Mizutani (Nippon Sharyo, Ltd.)

Key Words: Strength, Fracture condition, Adhesive joint, Scarf joint, Butt joint, Lap joint, Yield stress, Two-dimensional, FEM.

1. 緒 言

接着継手はボルト、リベットなどの機械的結合とは異なり、広い面で荷重を負担するため疲労特性に優れているなどの利点が認められ、最近では航空機だけでなく各分野への適用が拡大しつつあるが、設計の基礎となる継手の破壊条件についてはまだ十分確立されているとはいえない。本研究では、主な接着接合形式であるスカーフ、バット、および重ね合せの各接着継手の接着強度を測定するとともに継手の有限要素解析を行って、既報⁽¹⁾と同じく、接着層自由端に境界層を考慮した継手の破壊条件を考察した。

2. 実 験

図1の形状のスカーフ継手・バット継手〔被着材 S 35 C, スカーフ角 $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 〕および図2の重ね合せ継手〔被着材 (S S 41) 厚さ $t = 0.75, 1.1, 1.6, 5.0$ mm〕を製作した。接着面の寸法は 12.7 mm \times

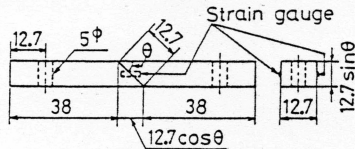


Fig. 1 Adhesive scarf joint specimens.

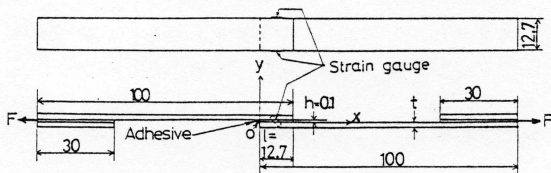


Fig. 2 Adhesive lap joint specimens.

Table 1 Material constants.

	Young's modulus GPa	Poisson's ratio	Yield stress MPa
Adherend	206	0.30	300
Adhesive	1.77	0.37	30.4

12.7 mm (一定) とした。被着材および接着剤の機械的特性を表1に示す。被着材表面を W A I - 6 0 のと石を用いて研削し、MEKによる5分間、3回の超音波洗浄後、エポキシ系接着剤ナビロック EA 9 4 3 0 (豊田合成) により接着層厚さを 0.1 mm として接着した。硬化条件は $30^\circ\text{C} / 24\text{H} + 80^\circ\text{C} / 10\text{H}$ である。スカーフ継手の場合は図1のように、重ね合せ継手の場合は図2の接着端面の中心に荷重方

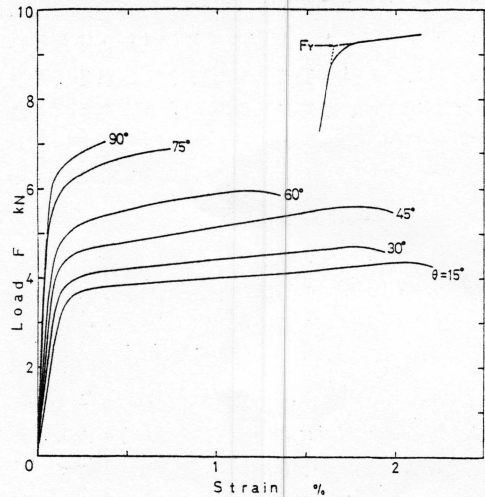


Fig. 3 Load-strain curves for scarf joints.

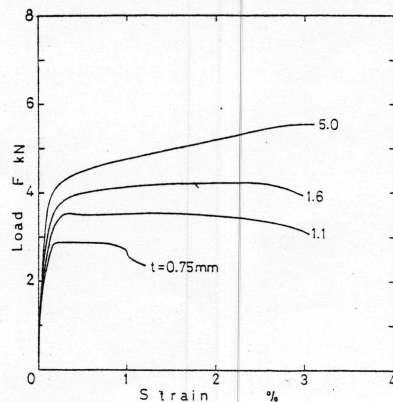


Fig. 4 Load-strain curves for lap joints.

3.1.3. スカーフ継手 $\sigma = 0.4 \text{ mm/min}$
 ラップ継手 $1 \sim 5 \text{ mm/min}$
 $1.6t, 5.0t \dots 1 \text{ mm/min}$

向に 45° の角度をなすように、ゲージ長がそれぞれ 5 および 2 mm の大ひずみゲージをはりつけて、ひずみの測定を行った。荷重-ひずみ線図の代表的な例を図 3 および図 4 に示す。これらの曲線を折れ線で近似し、降伏荷重 F_y を求めた。図 5 にはスカーフ継手・パット継手の引張接着強度 $\sigma_v (= F_y / \text{荷重方向に垂直な断面積})$ 、図 6 には重ね合せ継手の引張せん断接着強度 $\tau_v (= F_y / \text{接着面積})$ の実験結果を示す。

3. 有限要素解析

スカーフ継手・パット継手の応力解析および重ね合せ継手の応力解析を、それぞれ既報⁽²⁾⁽³⁾と同一の 2 次元弾性有限要素法により行った。前者の解析結果は既報⁽²⁾と全く同一のため省略し、重ね合せ継手の σ_1 および σ_2 の解析結果を図 7 および図 8 に示す。

4. 検討

切欠きなどにより応力こう配のある材料の降伏あるいは破壊が最大応力により決まるのではなく、最大応力を含む有限容積についての応力の平均値により決まることが Neuber⁽⁴⁾により示された。また、同様の事実が材料の表面に境界層を考慮することにより説明できることが中西⁽⁵⁾により示され、著者らもスカーフ継手の強度に対し、その理論が適用できることを示した⁽¹⁾⁽⁶⁾が、ここではさらに重ね合せ継手への適用を試みる。図 9 において接着層境界の自由端近傍における応力は破線のようになるが、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_2 を示し、そ

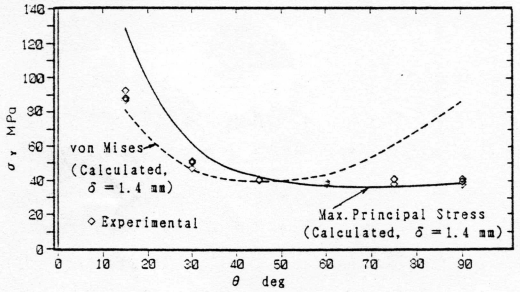


Fig. 5 Adhesive tensile strengths of scarf joints.

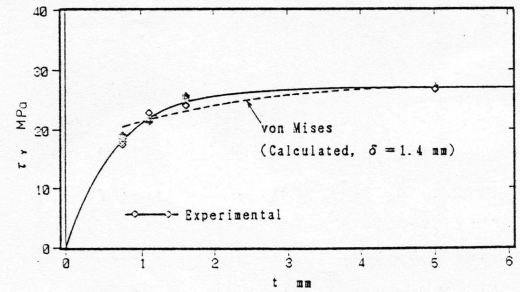


Fig. 6 Adhesive tensile shear strengths of lap j.

の値は $x = \delta$ における弾性応力に等しいものとし、次式を破壊条件とする。

$$\sigma_2 = A \sigma_0 \quad (1)$$

ここで、 A は定数である。また、 σ_0 は接着剤自体の引張強度であるが、接着剤のバルク試験片により得た引張強度の値は接着層の引張強度よりかなり小さい⁽¹⁾ため、式(1)から直接接着強度を求めるのではなく、スカーフ継手においては基準のスカーフ角 θ_0 、重ね合せ

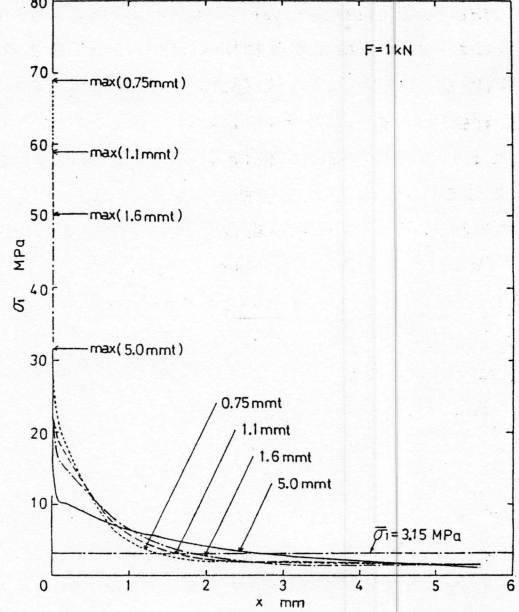


Fig. 7 Maximum principal stress distributions at the interface of adhesive layer.

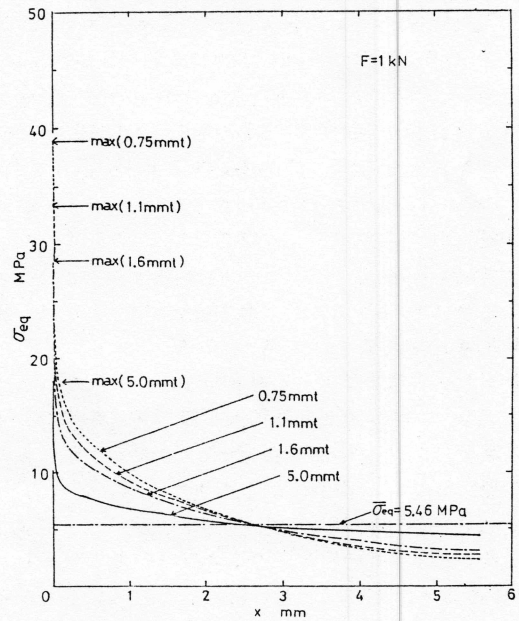


Fig. 8 Von Mises equivalent stress distributions at the interface of adhesive layer.

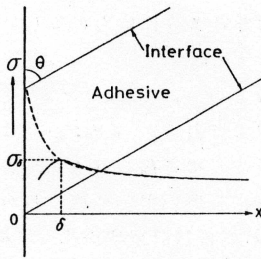


Fig. 9 Stress distributions in the vicinity of the free end based on the boundary layer theory.

継手においては基準の被着材厚さ t における接着強度 σ_v 、あるいは τ_v に対する任意の θ あるいは t の継手の接着強度 σ_v あるいは τ_v の比の計算値を、 θ 、または t における接着強度実験値 $(\sigma_{v_s})_{exp}$ または $(\tau_{v_s})_{exp}$ に乗じることにより、接着強度計算値を得た。

すなわちスカーフ継手の場合、

$$\begin{aligned} (\sigma_{v_s})_{cal} &= (\sigma_{v_s})_{exp} \cdot (\sigma_v / \sigma_{v_s})_{cal} \\ &= (\sigma_{v_s})_{exp} \cdot \left(\frac{\sigma_{\delta s}}{\sigma_s} \right) / \left(\frac{\sigma_{\delta}}{\sigma_s} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

重ね合せ継手の場合、

$$\begin{aligned} (\tau_{v_s})_{cal} &= (\tau_{v_s})_{exp} \cdot (\tau_v / \tau_{v_s})_{cal} \\ &= (\tau_{v_s})_{exp} \cdot \left(\frac{\sigma_{\delta s}}{F} \right) / \left(\frac{\sigma_{\delta}}{F} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

ここで σ_s はスカーフ継手においてみかけの垂直応力 (荷重 F / 荷重方向に垂直な断面積)、添字 s は θ 、または t における値、添字 δ は $x = \delta$ における値であることをそれぞれ示す。 $\delta = 1.4 \text{ mm}$ 、 $\theta_s = 45^\circ$ 、 $\sigma_{\delta} = \sigma_{s_0}$ の場合および $\delta = 1.4 \text{ mm}$ 、 $\theta_s = 90^\circ$ 、 $\sigma_{\delta} = \sigma_{s_1}$ の場合のスカーフ継手の接着強度 σ_v の計算値を図5に併記した。また $\delta = 1.4 \text{ mm}$ における σ_s および σ_{s_0} の応力解析結果と図5の接着強度実験値とから σ_{s_0} および σ_{s_1} の値を求めて図10および図11に示した。さらに、 $\delta = 1.4 \text{ mm}$ 、 $t = 5.0 \text{ mm}$ 、 $\sigma_{\delta} = \sigma_{s_0}$ の場合の重ね合せ継手の接着強度 τ_v の計算値を図6に併記した。

図5において、 $\theta \leq 55^\circ$ ではMisesの応力を基準とする計算値が、 $\theta \geq 55^\circ$ では σ_{s_1} を基準とする計算値がそれぞれ実験値にほぼ一致している。 $\theta \geq 55^\circ$ では三軸応力状態によるぜい性破壊が起こったものと考えられる。以上の結果にともなって、 $\theta \leq 55^\circ$ では図10の σ_{s_0} が、 $\theta \geq 55^\circ$ では図11の σ_{s_1} がそれぞれほぼ一定値を示している。 $\theta \leq 55^\circ$ における図10の σ_{s_0} は、完全には一定でなく、 θ の減少により少し増加傾向を示しておりこの接着剤の降伏が完全に von Misesの条件に従うのではなく、静水圧の影響を受けていることが推定される。図10の θ を 0° まで外挿したとき $\sigma_{s_0} = 41 \text{ MPa}$ が得られる。

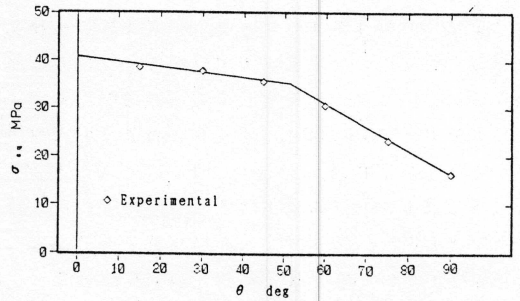


Fig. 10 σ_{s_0} values in adhesive layers.

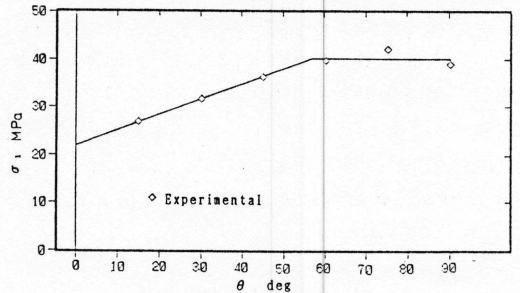


Fig. 11 σ_{s_1} values in adhesive layers.

一方、図6の重ね合せ継手の τ_v の計算値も実験値にほぼ一致している。図6の $t = 5.0 \text{ mm}$ における τ_v の値を用いて、次式

$$\sigma_{s_0} = \sqrt{3} \tau_{v_s} \quad (4)$$

により σ_{s_0} を求めると 46 MPa が得られ、図10から得られた 41 MPa とほぼ等しいが、表1のバルク接着剤の引張降伏応力 30.4 MPa よりかなり大きい。これは接着剤の体積の差 (数十倍) に起因する寸法効果によるものと考えられる。

5. 結 言

スカーフ継手・バット継手および重ね合せ継手の接着強度を測定するとともに、両継手の2次元有限要素解析を行い、接着層に境界層理論を適用して接着強度計算値を求め、実験値との比較を行ったところ、 1.4 mm の厚さの境界層を考慮することにより、スカーフ継手のスカーフ角と接着強度および重ね合せ継手の被着材厚さと接着強度との関係をほぼ定量的に説明することができた。

文 献

- (1) 鈴木, 機論, 51-463, A (1985), 926.
- (2) 鈴木・ほか2名, 日本接着協会誌, 18 (1982), 7.
- (3) 鈴木, 機論 No.900-86, (1991-11), 395.
- (4) Neuber, H., Kerbspannungslehre, (1937), Springer-Verlag, Berlin.
- (5) 中西・ほか4名, 機論, 19-87 (1953), 14.
- (6) 鈴木, 機論, 53-487, A (1987), 514.