

突合せおよび重ね合せ接着継手の強度分布特性[†]

今 中 誠* 原 賀 康 介** 西 川 哲 也***

Strength Distributions of Adhesive Bonded Butt and Lap Joints

by

Makoto IMANAKA*, Kosuke HARAGA** and Tetsuya NISHIKAWA***

Since adhesive bonded joints generally possess a considerable scatter in their strength, elucidation of the strength distribution properties of these joints is important for better utilization of these joints.

In this study, to investigate the change in strength distribution of adhesive joints due to the size effect, tensile and tensile shear strengths of adhesive bonded butt and lap joints were statistically evaluated. The probability of failure was calculated for butt joints with a different diameter and for lap joints with a different lap length. Each data set was then plotted using normal, Weibull and doubly exponential functions. Furthermore, the effect of adhesive area on the mean and coefficient of variation of the joint strength was investigated. First, the strength distributions of butt and lap joints were simulated by the weakest link model based on the strength distribution of the butt joint having the smallest diameter and stress distribution of the adhesive layer obtained by FEM analysis. Then, the mean and coefficient of variation of these joints were compared with the simulation results. The main results obtained are summarized as follows;

(1) The strength distribution of adhesive bonded butt joint was nearly approximated by a normal distribution. However, for lap joint the strength distribution was fitted for an extreme distribution rather than a normal distribution.

(2) The relationship between the mean strength and adhesive area plotted on a logarithmic graph paper showed experimental curves of butt and lap joints with a convex shape. However, the mean strength of the butt joint simulated by the weakest link model decreased linearly with increasing adhesive area, while the shape of the simulated curve of the lap joint was concave.

(3) The coefficient of variation of the butt joint was independent of the adhesive area, as predicted from the model, whereas the coefficient of variation of the lap joint decreased with increasing adhesive area contrary to the prediction of the model. This discrepancy may have been caused by a variation in shear strength due to a measurement error in the lap length.

Key words: Adhesive joint, Butt joint, Lap joint, Normal distribution, Weibull distribution, Doubly exponential distribution, Size effect

1 緒 言

軽量化や異種材料等の接合を可能にすることから、航空機、自動車、電機産業等において接着接合法の適用範囲が拡大している。そのため、継手強度についての関心が高まり、接着継手の強度特性や応力解析に関する研究報告が増加している^{1),2)}。しかし、継手の信頼性を明確化する上で必要な強度分布に関する統計的な研究はごく僅かである³⁾⁻⁶⁾。さらに、接着継手強度のばらつきは溶接継手やリベット継手等と比較すると大きく、このことが、機械構造物の設計者が接着接合をためらう大きな原因の一つになっている。したがって、接着継手の強度分布特性の明確化は接着継手の設計基準を

決定する上で極めて重要な課題である。

本研究では接着継手のスケールアップを行う際に必要となる継手寸法と強度分布の関係を調べるため、直径ならびに重ね合せ長さの異なる突合せおよび重ね合せ接着継手の静的強度試験を行い、強度分布を求め、正規分布、ワイブル分布および二重指数分布への適応度を調べた。さらに、最小リンクモデルに基づいて、接着面積の増加に伴う平均強度ならびに変動係数の推定および実験値との比較検討を行った。

2 接着継手試験片および実験方法

Fig. 1(a), (b), (c)は、静的引張試験に使用した突合せと重ね合せ接着継手試験片ならびにねじりせん断強

† 原稿受理 平成5年2月10日 Received Feb. 10, 1993

* 正 会 員 大阪教育大学教育学部技術学科 〒582 柏原市旭ヶ丘, Dept. of Tech., Osaka Kyoiku Univ., Asahigaoka, Kashiwara, 582

** 三菱電機(株)材料デバイス研究所 〒661 尼崎市塚口本町, Mat. & Elect. Devices Lab., Mitsubishi Electric Co., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661

*** 三菱電機(株)生産技術研究所 〒661 尼崎市塚口本町, Manufacturing Development, Lab., Mitsubishi Electric Co., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661

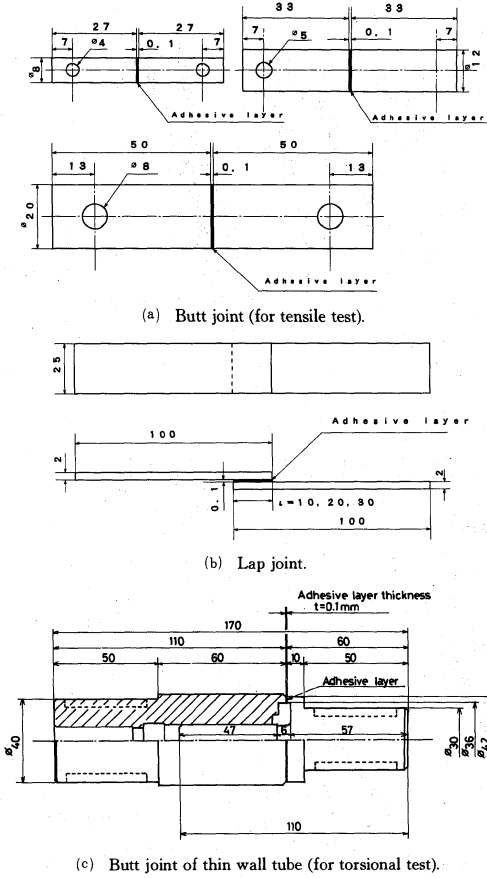


Fig. 1. Shape and sizes of the adhesive bonded lap and butt joints.

度を求めるために使用した薄肉円筒突合せ接着継手の形状・寸法を示している。接着剤にはエポキシ系接着剤である DP-190 グレー（住友スリーエム(株)製）を使用し、被着体としては、突合せ接着継手については

機械構造用炭素鋼 (JIS S45C) を、重ね合せ接着継手については板厚 2 mm のステンレス鋼板 (SUS304) を使用した。

これら接着継手試験の作製条件を以下に示す。被着体表面をアセトンにより脱脂した後、主剤と硬化剤を体積比 1:1 に混合した接着剤により接着を行い、室温で 24 時間保った後、70°C で 24 時間アフターキュアを行った。なお、接着層厚さは接着剤中に直径 100 μm のガラスビーズを少量添加することにより調節した。

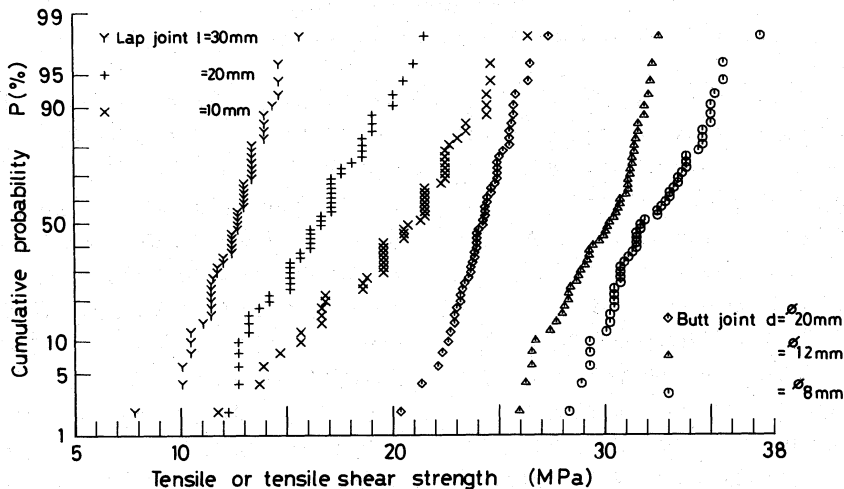
突合せおよび重ね合せ接着継手の静的引張試験はオートグラフ DCS-5000 (株島津製作所製) により、それぞれ引張速度 0.5 mm/min ならびに 1.0 mm/min の条件で行った。なお、強度分布を求めるに際しての試験本数はそれぞれ 50 本とした。また、薄肉円筒突合せ接着継手のねじりせん断試験は容量 400 N・m のねじり試験機を用いて荷重速度 100 N・m/min の条件で測定した。

3 実験結果ならびに考察

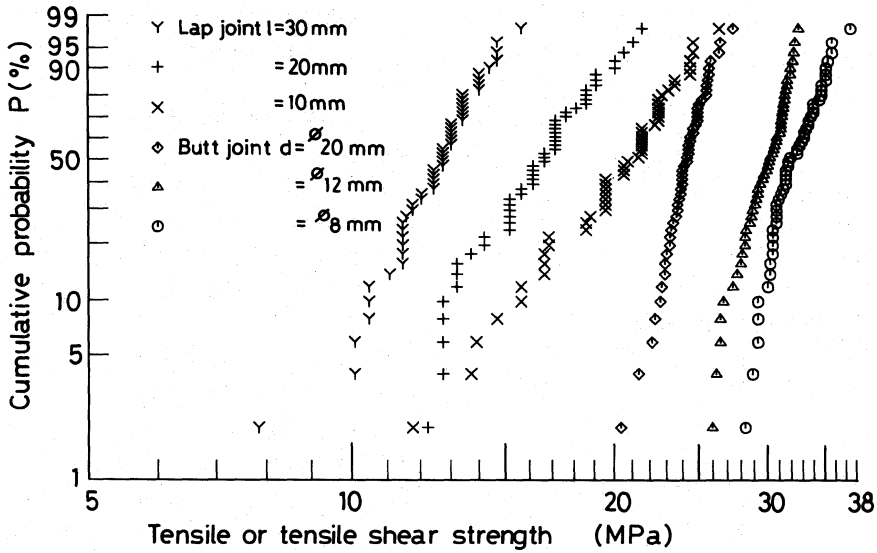
3.1 強度分布特性

Fig. 2 (a), (b) は突合せならびに重ね合せ接着継手の引張および引張せん断強度を正規確率紙、ワイブル確率紙にプロットしたものである。また、Fig. 2 (c) は二重指数分布に対する適応性を調べるため、ワイブル分布確率紙の横軸を普通目盛りに修正したプロットを示している。いずれの図とも横軸は単位接着面積あたりの見かけの引張もしくはせん断強度を、縦軸は累積破断確率を示している。

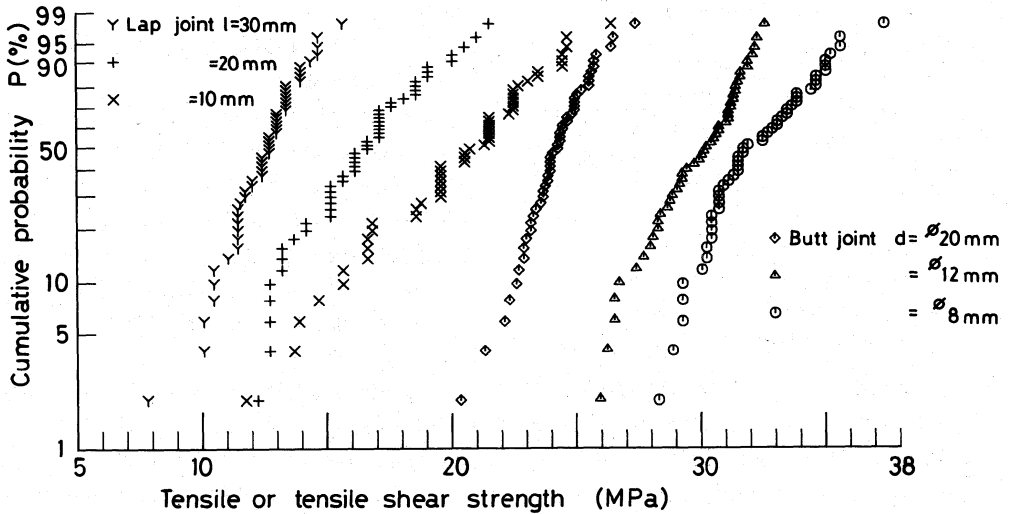
まず、突合せ接着継手の各分布に対する適応性について検討を行う。正規分布については、Fig. 2 (a) より直径 12 mm の継手では高強度側でやや左上がりの傾向が認められるが、他の継手はほぼ良好な直線関係が



(a) Normal distribution.



(b) Weibull distribution.



(c) Doubly exponential distribution.

Fig. 2. Tensile and tensile shear strength distributions of the butt and lap joints.

得られている。ワイブル分布については、Fig. 2(b)に示すように直径 8 mm, 12 mm の継手では分布曲線の折れ曲がり傾向が認められる。二重指数分布については、直径 20 mm の継手ではほぼ直線関係が維持されているが、直径 8 mm, 12 mm の継手では明確な分布曲線の折れ曲がり傾向が認められる。

一方、重ね合せ接着継手については、ラップ長さ 20 mm の継手においていずれの分布に対しても左下がり傾向が認められるものの他の継手についてはいずれの分布に対してもほぼ直線関係が保たれている。

Fig. 2 の結果より、突合せおよび重ね合せ接着継手についていずれの分布に適応するか明確な傾向は認められない。そこで、前報と同様に各分布の母数を最尤

法により推定し、推定値を Table I に示すとともに、コロモゴルフスミルノフの適応度検定によりこれらの分布のワイブル分布、二重指数分布ならびに正規分布に対する分布の適応度を調べた。実測した累積標本分布と推定値を母数とする累積分布関数に対して両者の確率紙上の垂直距離の最大値 D_{max} を Fig. 3 に示す。図より、突合せならびに重ね合せ接着継手に共通して極値分布であるワイブル分布と二重指数分布の D_{max} がほぼ一致することが認められる。突合せ接着継手については、直径 8 mm と 20 mm の場合、正規分布に対する適応度が他の分布と比較して最も高いが、直径 12 mm の突合せ接着継手では、やや二重指数分布に対する適応度が高くなっている。重ね合せ接着継手で

Table I. Statistic properites of tensile and tensile shear strength.

Kind of joint		Butt joint			Lap joint		
Diameter or lap length (mm)		*8	*12	*20	10	20	30
Normal distribution	Mean value (MPa)	32.34	29.90	24.24	20.2	16.4	12.6
	Standard dev. (MPa)	2.097	1.754	1.313	3.33	2.35	1.27
	Coeff. of var. (%)	6.5	5.9	5.4	16.5	14.3	10.2
Weibull distribution	Shape parameter m (-)	16.21	21.43	19.86	7.78	7.71	10.79
	Scale parameter a (MPa)	33.32	30.70	24.85	21.66	17.50	13.20
Doubly exponential distribution	Location parameter u (-)	33.39	30.73	24.89	21.87	17.66	13.25
	Scale parameter b (MPa)	0.210	0.143	0.128	0.272	0.230	0.125

はラップ長さ 30 mm の継手では正規分布に対する適応度が高くなっているもののラップ長さ 10 mm と 20 mm の継手については、二重指数分布に対する適応度が他の分布と比較して最も高いことが認められる。前報⁶⁾においても、本実験と同一被着体を用いて 2 種類の接着剤により接合された重ね合せ長さ 25 mm の重ね合せ接着継手についても正規分布よりもむしろ極値分布に対する適応度が高いことが確認されている。Kurzmann³⁾らは突合せならびに重ね合せ接着継手の強度分布は、正規分布よりもむしろ二重指数分布に適応するとしている。本実験結果では、全体として、重ね合せ接着継手については正規分布よりも極値分布であるワイブルおよび二重指数分布に対する適応度がやや高くなっているが、突合せ接着継手については極値分布よりも正規分布に対する適応度がやや高くなっている。また、野中らは接着層の応力分布が不均一化するにしたがって、極値分布に対する適応度が低下し、正規分布に対する適応度が高くなるとしているが、本実験結果では応力分布の不均一な重ね合せ接着継手の方が突合せ接着継手よりも極値分布に対する適応性が高

くなっている。このように、接着継手の強度分布の適応度の傾向を統一的に示すことは困難であると考えられる。

3・2 平均強度ならびに変動係数と接着面積の関係
 一般に強度分布の寸法効果については、最小リンクモデルに基づき考察される場合が多い⁸⁾。そこで、これら接着継手の平均強度ならびに変動係数と接着面積の関係を最小リンクモデルに基づいて検討する。

3・2・1 突合せ接着継手 最小リンクモデルを仮定すると応力分布が均一な場合には強度分布の寸法効果を求めることができる。ここでは、本モデルに従って比較的均一な接着層の応力分布が得られる突合せ接着継手の強度分布と接着面積の関係について検討する。

最小単位の 1 つのリンクの破壊確率を引張応力を基準として形状パラメータ ϵ_0 、尺度パラメータ ξ_0 の 2 母数ワイブル分布として次式に示す。

$$F_0(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\xi_0}\right)^{\epsilon_0}\right] \quad (1)$$

単位接着面積当たりの欠陥の数を α とすると接着面積 S の突合せ継手に含まれる欠陥の数は $n = \alpha S$ となるので、接着面積 S の強度分布関数は次式で示される。

$$F(\sigma) = 1 - [1 - F_0(\sigma)]^n = 1 - \exp\left[-\alpha S \left(\frac{\sigma}{\xi_0}\right)^{\epsilon_0}\right] \quad (2)$$

これより接着面積が変化した後にも尺度パラメータが $\xi' = \xi_0(\alpha S)^{-1/\alpha}$ と変化するのみであり、形状係数は変わらず⁸⁾、平均強度ならびに変動係数は次式で与えられる。

$$E = \xi_0'(\alpha S)^{-1/\alpha} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\epsilon_0}\right) \quad (3)$$

$$CV = \frac{\left[\Gamma\left(2 + \frac{1}{\epsilon_0}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\epsilon_0}\right)\right]^{1/2}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\epsilon_0}\right)} \quad (4)$$

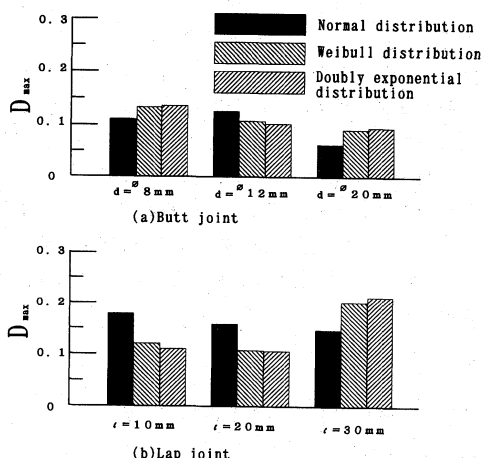


Fig. 3. The fitness of the theoretical distributions.

Fig. 4 には突合せならびに重ね合せ接着継手の接着面積と平均強度の関係ならびにそれぞれの継手の平均

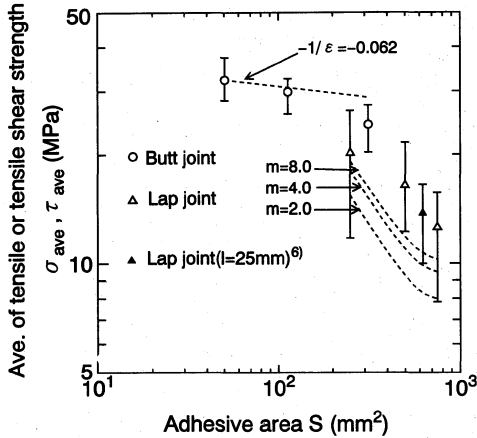


Fig. 4. Effect of adhesive area on the average tensile or tensile shear strength of the butt and lap joints.

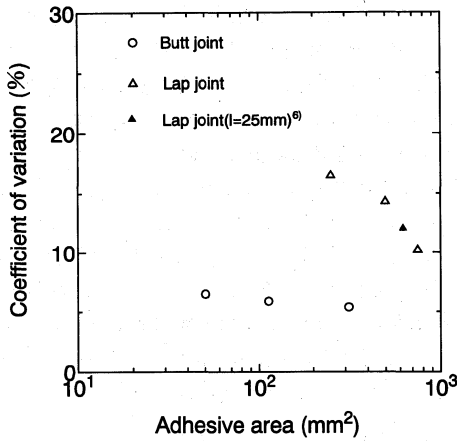


Fig. 5. Effect of adhesive area on the coefficient of variation of tensile or tensile shear strength of the butt and lap joints.

値の推定値が示されている。図中の突合せ接着継手の平均強度の推定値は直径 8 mm の突合せ接着継手の強度分布に基づき式 (3) に従って求めたものである。図より接着面積の増加により実験値が推定値よりやや低下する傾向が認められる。この結果は、小径の突合せ接着継手の強度分布に基づき大径の突合せ接着継手の平均強度を推定すると危険側の推定値を与えることを示している。なお、同様の傾向がセラミック材料の試験片体積と平均強度の関係においても確認されている。⁹⁾

変動係数については式 (4) より形状パラメータのみに依存しており、接着面積に依存せず一定値をとることが予想される。Fig. 5 は突合せおよび重ね合せ接着継手について接着面積と変動係数の関係を示している。図より、式 (4) の傾向と一致して突合せ接着継手の変動係数は接着面積の増加に依らずほぼ一定値をとるこ

とが認められる。

3・2・2 重ね合せ接着継手 試験片の応力分布が不均一な場合についても最小リンクモデルを適用すると均一な応力状態における強度分布を基準として強度分布関数を導くことが可能である。⁸⁾ ここでは、池上らにより提案されている接着部の強度則を用いることにより、直径 8 mm の突合せ接着継手の強度分布ならびに重ね合せ接着継手の接着部の応力分布を基準として重ね合せ接着継手の強度分布の導出を試みるとともに実験値との比較を行う。

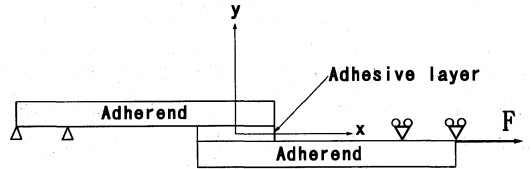


Fig. 6. Boundary conditions of the lap joint.

Fig. 6 に示す境界条件ならびに荷重条件下で有限要素法により、重ね合せ接着継手の応力分布の解析を行った。なお、本解析に用いた接着層のヤング率とポアソン比は 1098 MPa および 0.33、被着体鋼板のヤング率とポアソン比は 205.0 GPa および 0.33 である。Fig. 7 (a), (b) は本解析より得られた接着層方向に平均化した y 方向の引張ならびに yx 方向のせん断応力分布を示している。同図の横軸の値はラップ長さにより、縦軸の値は平均せん断応力により正規化されている。Fig. 7 より、引張およびせん断応力ともにラップ端部で応力集中が生じており、その値はラップ長さの増加に伴い増大しており、一般的な重ね合せ接着継手の応力分布の傾向と一致している。^{1), 2)}

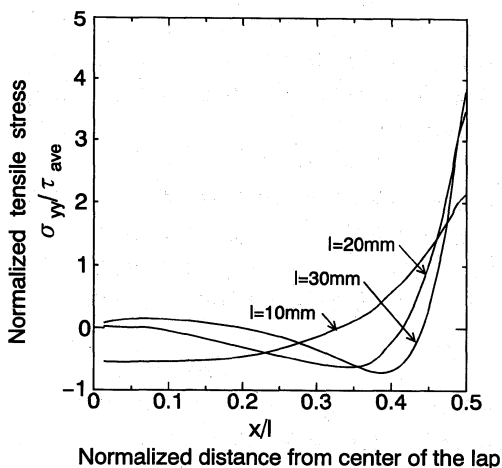
接着部の強度則としては式 (5) を用いる。

$$\left| \frac{\sigma_y}{\sigma_0} \right|^m + \left| \frac{\tau_{yx}}{\tau_0} \right|^m = 1 \quad (5)$$

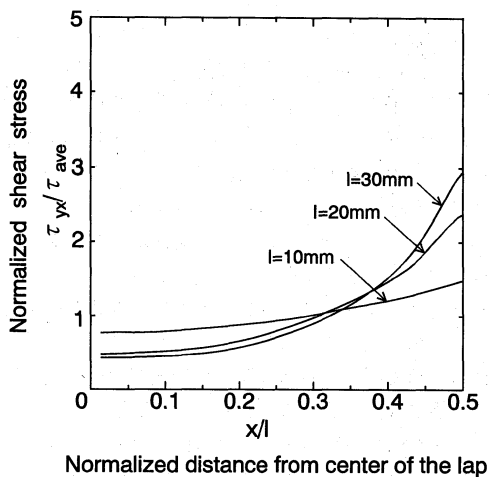
式 (5) において、 σ_y , τ_{yx} は接着部の引張およびせん断応力、 σ_0 , τ_0 は欠陥のない接着部の極限強度、 m は常数である。なお、数値計算に際しては、 σ_0 としては直径 8 mm の突合せ接着継手の最大値 37.4 MPa を、 τ_0 は Fig. 1 に示した比較的均一な接着層の応力分布が得られる薄肉円筒突合せ接着継手のねじり試験より得られたせん断強度の最大値 30.2 MPa を用いた。式 (5) の強度則を仮定すると相当応力は次式により示される。

$$\sigma_{eq} = \left\{ \left| \frac{\sigma_y}{\sigma_0} \right|^m + \left| \frac{\tau_{yx}}{\tau_0} \right|^m \right\}^{1/m} \quad (6)$$

強度分布推定の基準となる単軸引張の場合、相当応力は $\sigma_{eq} = \sigma_y / \sigma_0$ となるので、式 (1) により示される 1 つのリンクの破断確率は式 (6) の相当応力を用いて示すと式 (7) のようになる。



(a) Normal stress.



(b) Shear stress.

Fig. 7. Normal and shear stress distributions of the lap joint.

$$F_0(\sigma_{eq}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{eq}}{\xi_0}\right)^{\epsilon_0}\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{eq}}{\xi'}\right)^{\epsilon_0}\right] \quad (7)$$

ただし $\xi' = \xi_0 / \sigma_0$

さて、重ね合せ接着継手の接着層を m 個の微小要素に分割し、 i 番目の部分で破壊しない確率を R_i とすると最小リンクモデルに基づく接着部の非破壊確率は次式で示される。

$$R = \prod_{i=1}^m R_i \quad (8)$$

i 番目の部分の相当応力を σ_{ei} 、接着面積を S_i とすると式 (8) の両辺に対数をとると

$$\begin{aligned} \ln R &= \sum_{i=1}^m \ln R_i = \sum_{i=1}^m \ln[1 - F_0(\sigma_{ei})]^{n_i} \\ &= \sum_{i=1}^m \alpha S_i \ln[1 - F_0(\sigma_{ei})] \end{aligned} \quad (9)$$

$S_i \rightarrow 0$ とすると

$$\ln R = \int_s \alpha \ln[1 - F_0(\sigma_{eq})] ds \quad (10)$$

ラップ幅を W とすると $ds = W dx$ となるので

$$\ln R = -\alpha W f_e \left(\frac{\tau_\alpha}{\xi'}\right)^{\epsilon_0}$$

$$f_e = \int_{-c}^c \left\{ \left| \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_0} \right|^m + \left| \frac{\tau_{yx}}{\tau_0} \right|^m \right\}^{1/m} dx \quad (11)$$

ただし τ_α は平均せん断応力、なお、 f_e は Fig. 7 に示した引張ならびにせん断応力分布を用いて数値積分を行うことにより算出した。

式 (11) より、破壊確率は式 (12) で示すことができる。

$$F(\tau_\alpha) = 1 - \exp\left[-\alpha W f_e \left(\frac{\tau_\alpha}{\xi'}\right)^{\epsilon_0}\right] \quad (12)$$

式 (12) に示されるように突合せ接着継手の強度分布を基準として導いた重ね合せ接着継手の強度分布も 2 母数ワイブル分布である。式 (12) よりラップ長さが変化した場合も尺度パラメータが $\xi'(\alpha W f_e)^{-1/\epsilon_0}$ と変化するのみであり、形状係数のみの変数である変動係数は変化しない。また、平均強度は式 (13) で与えられる。

$$E = \xi'(\alpha W f_e)^{1/\epsilon_0} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\epsilon_0}\right) \quad (13)$$

Fig. 4 には重ね合せ接着継手の接着面積と平均せん断強度の関係ならびに式 (13) に基づく式 (5) の m をパラメータとした平均せん断強度の推定値も示されている。なお、Fig. 4, 5 の図中には前報において測定した同一接着剤により接合されたラップ長さ 25 mm の重ね合せ接着継手の平均強度ならびに変動係数もあわせて示している。同図より、 $m=8$ の場合に実験値と最も近い値を示すことが認められるが、ラップ長さの増加に伴い平均強度は推定値よりも実験値の方がやや高い値を示すことが認められる。しかし、実験値と推定値の接着面積の増加に伴う低下傾向を比較すると、平均強度の実験値のプロットを結びと上に凸の曲線となるが、推定値のプロットは下に凸の曲線となっている。このことは、突合せ接着継手と同様に、実験値は接着面積の増加に伴って低下率が増加し、推定値は接着面積の増加に伴って低下率が減少することを示している。

一方、変動係数は Fig. 5 に示されているように式 (12) より予想される傾向と異なりラップ長さの増加に伴い低下することが認められる。この原因は、突合せと重ね合せ接着継手の作製方法の違いによるものと推察される。すなわち、突合せ接着継手において、接着面積は被着体の直径によってほぼ決定されるが、重ね合せ接着継手では接着時に重ね合せ長さの調節を行うため、接着面積の誤差は突合せ継手と比較して増加するものと考えられる。同図においても重ね合せ接着継手の変動係数は突合せ接着継手の変動係数と比較して

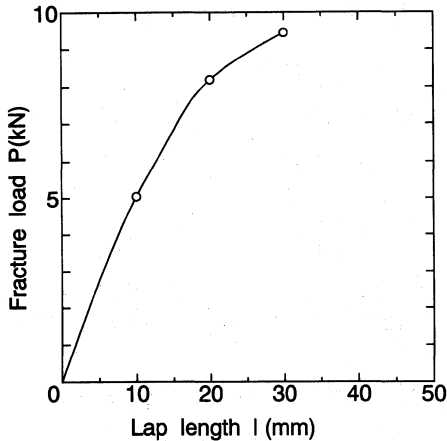


Fig. 8. Fracture load vs. lap length.

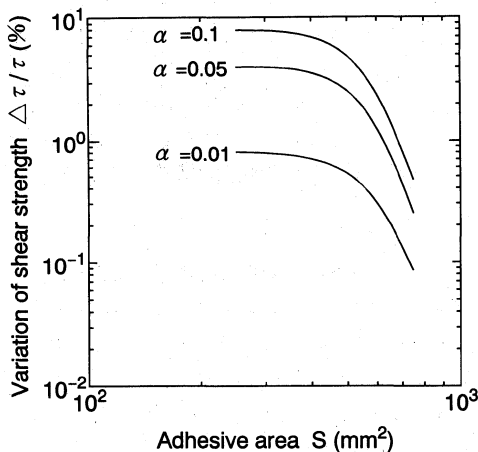


Fig. 9. Variation of average shear strength due to measuring error in the lap length.

約2倍以上の値を示すことが認められている。以下、変動係数に及ぼすラップ寸法の誤差の影響について検討を行う。

Fig. 8はラップ長さと破断荷重の関係を示している。ラップ長さと破断荷重の関係を2次式で近似すると式(14)で示される。

$$P(l) = 600l - 9.5l^2 \quad (14)$$

さて、ラップ長さ l の重ね合せ接着継手作製時の所定のラップ長さとの誤差 Δl について、 α を常数として $\Delta l = \alpha l$ と仮定すると寸法誤差による破断荷重の変動は式(15)で示される。

$$\Delta P = P(l + \alpha l) - P(l) = 600\alpha l - 19\alpha^2 l^2 - 9.5\alpha^2 l^2 \quad (15)$$

したがって、ラップ長さの誤差によるせん断強度の変動 $\Delta\tau/\tau$ は式(16)で示される。

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{600\alpha l - 19\alpha^2 l^2 - 9.5\alpha^2 l^2}{600l - 9.5l^2} \quad (16)$$

Fig. 9は式(16)に基づいて計算した重ね合せ接着継手の接着面積とせん断強度の変動 $\Delta\tau/\tau$ の関係を α を

パラメータとして示したものである。同図より α によらず接着面積の増加に伴って減少し、Fig. 5に示した重ね合せ接着継手における接着面積の増加に伴う変動係数の低下傾向と一致する。

4 結 言

接着面積の異なる突合せならびに重ね合せ接着継手の強度分布の正規、ワイブルならびに二重指数分布に対する適応性を調べるとともに、平均強度ならびに変動係数に及ぼす接着面積の影響について検討した。主な結果は以下のとおりである。

(1) コロモゴルフスミルノフの検定結果より、突合せ接着継手については正規分布に対する適応度がやや高く、重ね合せ接着継手についてはワイブルもしくは二重指数分布に対する適応度がやや高いことが認められた。

(2) 突合せ接着継手について最小リンクモデルに従って、直径8mmの突合せ接着継手の強度分布を基準として、平均強度の推定を行ったところ接着面積の増加につれて、平均強度を過小に評価する傾向が確認された。一方、変動係数は最小リンクモデルの予想どおり接着面積に依存せずほぼ一定値を示した。

(3) 重ね合せ接着継手についても、最小リンクモデルならびに接着層の組合せ応力下における強度則を適用することにより、ラップ長さの増加に伴う平均強度および変動係数を推定したところ、突合せ接着継手と同様に、接着面積の増加に伴う平均強度の低下率を過小に評価する傾向が認められた。変動係数については、最小リンクモデルより予想される傾向と大きく異なり、ラップ長さの増加に伴う顕著な低下傾向が確認された。この原因と予想される継手強度の変動に及ぼすラップ寸法の誤差の影響を調べたところ実験結果の傾向とよく一致した。

終わりに本研究の実施に際して当時、大阪教育大学学生であった上江後剛氏、久和人氏ならびに鎌田寿郎氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、A. J. Kinloch, *J. Mater. Sci.*, **17**, 67 (1982).
- 2) 池上皓三, 日本機械学会論文集, A-50, 1557 (1984).
- 3) P. Kurzmam and D. A. Klemme, *J. of Adhesion*, **7**, 203 (1978).
- 4) 小沢正幸, 蟹江 壽, 野中保雄, 日本接着協会誌, **17**, 358 (1981).
- 5) 野中保雄, 接着応用技術, 宮入裕夫, 池上皓三, 中島常雄, 永田宏二, 柳沢誠一編, 507 (1991) 日経技術図書
- 6) 今中 誠, 原賀康介, 西川哲也, 材料, **41**, 1662 (1992).
- 7) P. G. Hoel, "Introduction to Mathematical Statistics" (1977) John Wiley & Sons Inc., 浅井 晃, 村上正康, 邦訳 "入門数理統計学", 318 (1990) 培風館
- 8) 岡村弘之, 坂垣 弘, "強度の統計的取扱" (1979) 培風館
- 9) 松末勝利, 高原北雄, 稲本良作, 窯業協会誌, **90**, 168 (1982).
- 10) 杉林俊雄, 池上皓三, 日本機械学会論文集, C-50, 449 (1984).