応力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評価*

服 部 敏 雄^{*1}A Stress-Singularity-Parameter Approach for Evaluating
Adhesive Strength of Single-Lap Joints

Toshio HATTORI

In a previous paper, we presented a new adhesive-strength evaluation method, which uses two stress-singularity parameters. In this paper, this new adhesive-strength evaluation method is applied to single-lap joints which are generally used as adhesive-strength test specimens. By this strength evaluation method the relationships between adhesive-strength and lap length, thickness of adhesive layer, thickness of adherend, and adhesive edge angle are analyzed. These analytical results coincide well with the results based on maximum stresses in adhesive layers.

Key Words: Adhesive Joints, Delamination, Fracture Criterion, Stress Singularity, Single-Lap Joints

1. 緒 言

最近の接着剤の利用は目覚ましく、例えば軽量化設計が要望されている航空機や自動車においては、構造用接着剤による強度部材の結合が各部で採用されるようになってきている。また、電子、光機器の組立、電子部品の封止などの分野でも、精密固定、無応力締結あるいは工程上の容易さなどの利点から接着剤利用の拡大は著しい。しかしこのような現状にもかかわらず、接着結合部の強度が十分な精度で評価されているとは言い難い。その原因は接着部のはく離の発生の起点となる接着端では材料および形状の不連続のため応力の特異場^{(1)~(7)}となっており、応力値のみでは高精度な評価ができないことである。前報⁽⁷⁾ではこの応力特異場を近似的に表現する二つの応力特異場パラメータを用いて接着界面の強度評価をする方法を提案し、レジンモールドされたモデルの界面はく離の評価に適用してきた。本報ではこの評価法を、単純重ね継手に適用し、特にそのラップ長さ、接着層厚さ、被着体厚さ、接着端角度の影響について明確にした。

2. 応力特異場パラメータを用いた
接着強度評価法の概要

従来、接着剤の接着強度の実測は、ほとんどが図 1 に示すような単純重ね継手の引張せん断試験によってなされてきた。この場合最も単純な強度評価法としては破断時の平均せん断応力 τ_{nom} を用いる方法があるが、接着端での応力集中のため、他の接着構造体の強度評価には直接利用できない。そこで種々の仮定のもとに、近似的に求められる最大せん断応力 τ_{max} を用いた強度評価に関する研究が多く行われてきた^{(8)~(14)}。しかしこれら継手のはく離の起点となる接着端では、厳密には応力が無限大となる特異場となっており^{(1)~(7)}、単なる有限要素法応力解析のみでは汎用的な評価ができない。そこで著者は先にこの応力特異場の応力分布が近似的に

$$\tau(r) = K/r^\lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

$\tau(r)$: 応力 MPa

r : 特異点からの距離 mm

K : 応力特異場の強さ

λ : 特異性の指数

で示されることに着目し、この K と λ によって接着構造の強度を評価する方法を提案し、レジンモールド

* 平成元年 11 月 10 日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成元年 4 月 17 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町 502)。

されたモデル内の接着界面の強度評価に適用し、この評価法の有効性を確認した⁽⁷⁾。本報では、この評価法を接着強度の試験として最も簡便であり、データベースも充実している単純重ね継手に適用し、従来種々の形状、寸法で行われてきたそれぞれの接着強度が统一的に表されることを示す。

3. 接着継手強度に及ぼすラップ長、被着体厚さ、接着層厚さの影響

接着継手の応力解析結果をもとにした単純重ね継手の強度評価の研究は多くなされており^{(8)~(14)}、例えば Goland ら⁽⁹⁾は、図2に示す接着端部の応力集中率として次式を誘導している。

$$\frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{nom}}} = \frac{1+3K}{4} (2\Delta)^{1/2} \coth(2\Delta)^{1/2} + \frac{3}{4}(1-K) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta = \frac{G_a l^2}{E_s S t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$K = 1 + 2\sqrt{2} \tanh \left\{ \left[\frac{3}{2}(1-\nu_s) \right]^{1/2} \frac{l}{2d} \left(\frac{\sigma_s}{E_s} \right)^{1/2} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\tau_{\max}$: 接着端部最大応力 MPa

τ_{nom} : 接着面の平均応力 ($F/\text{接着面積}$) MPa

G_a : 接着層の剛性率 MPa

E_s : 被着体の弾性率 MPa

ν_s : 被着体のポアソン比

l : ラップ長さ mm

t : 接着層の厚さ mm

S : 被着体の厚さ mm

σ_s : 被着材の平均応力 MPa

この最大応力 $\tau_{\max}$ を用いて、接着継手の強度を予測した結果は、実測した継手強度のラップ長さ、接着層厚さ、被着体厚さの影響などを比較的よく表している。

図1 単純重ね継手試験片の応力分布

図2 単純重ね継手の概略形状と寸法記号

しかし、前述のごとくこの接着端は応力の特異場となっており、厳密にはこの最大応力は存在せず、したがって他の接着構造体の強度評価にこのままで適用できない。

ここでは応力特異場パラメータを用いて、この接着強度のラップ長さ、接着層厚さおよび被着体厚さ依存性を把握し、Goland ら⁽⁹⁾の予測式との比較も行う。図3にラップ長さ l がそれぞれ 5 mm, 15 mm, 30 mm の場合の要素分割およびせん断応力分布の図を示す。荷重はいずれも平均せん断応力換算で 50 MPa とした。被着体および接着層の厚さはそれぞれ 5 mm, 0.1 mm であり、それぞれの材料定数を表1に示す。図4に有限要素法による接着端近傍のせん断応力分布を示す。それぞれの接着端の応力特異場の強さ K は、式(1)をこれらのせん断応力分布にベストフィットさせることによって得られる。これらの荷重(平均せん断応力換算で 50 MPa)のもとでの応力特異場パラメータの算出結果 K ($l=5$ mm で $K=31$, $l=15$ mm で $K=8.5$) を、前報⁽⁷⁾で求めたはく離限界値(図5参照, $\lambda=0.284$ で $K_{\text{crit}}=8.5$) と比較することによって、種々のラップ長さの単純重ね継手試験片の破断荷重(F_B)を予測すると、図6のごとくなる。これらの図には接着せん断強度(τ_B)も示してあるが、これは次式で求め

表1 接着継手構成材の材料定数

Material	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Adhesive	14.7	0.25
Substrate	148.0	0.3

図3 単純重ね継手の要素分割およびせん断応力分布 ($S=5$ mm, $t=0.1$ mm)

ている。

$$\tau_B = F_B / \text{接着面積} \quad \cdots \cdots (5)$$

図7, 図8はそれぞれ被着体の厚さ2 mm, 接着層の厚さ0.1 mmの場合, および被着体の厚さ5 mm, 接着層の厚さ0.2 mmの場合の同様な強度予測結果である。これらの予測結果はいずれも図中に示す, 式(2)の最大応力 $\tau_{\max}$ が50 MPaに達すると破断すると仮定した場合の予測結果と比較的よく一致している。被着体の厚さ, および接着層厚さが増大するほど接着強度は上昇し, かつラップ長さが被着体の厚さ以上になるとその破断荷重がさほど向上しなくなる傾向を示す。これらの予測結果は他の実測結果を良く説明している⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

図4 接着端近傍のせん断応力分布
($S=5$ mm, $t=0.1$ mm)

図5 はく離限界曲線

図6 接着せん断強度および破断荷重とラップ長の関係
($S=5$ mm, $t=0.1$ mm)

図7 接着せん断強度および破断荷重とラップ長の関係
($S=5$ mm, $t=0.2$ mm)

4. 接着継手強度に及ぼす 接着端角度の影響

本章では前章と同様応力特異場パラメータを用いて、接着端にテーパのついた接着継手の接着強度を予測する。図9にラップ長さ $l=30$ mm でかつ、接着端角度 θ がそれぞれ $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ の場合の要素分割およびせん断応力分布の図を示す。負荷はいずれも平均せん断応力換算で 50 MPa とした。まず特異性の指数 λ については前報⁽⁷⁾で示したごとく、接着剤と被着体の弾性係数とポアソン比、および接着端角度より求める。図10にその計算結果を示す。当然のことながら特異性の指数 λ は、図10に示す下部接着端 A 部と上部接着端 B 部とで異なり、接着端角度により各々の大小関係は異なる。これらの特異性の指数 λ を式(1)に代入し、接着端近傍の応力分布の解析結果にベストフィットさせて求めた直線と、その場合の特異場の強さ K の値を図11に示す。これらの特異場パラメータの算出結果を、図5に示すはく離限界曲線と比較することによって、種々の接着端角度の接着継手の接着せん断強度 (τ_B) を予測すると図12のごとくなる。この図12は、下部接着端 A 部および上部接着端 B 部それぞれのせん断強度を示すが、接着端角度 θ が $\pi/3$ 以下では上部接着端 B 部から破断し、 $\pi/3$ 以上では下部接

図8 接着せん断強度および破断荷重とラップ長の関係 ($S=2$ mm, $t=0.1$ mm)

着端 A 部から破断することがわかる。また接着端角度を $\pi/6$ 以下にすることによって接着強度が大きく向上することが予測されるが、この予測傾向は、図13に示す Horton らの実測結果⁽¹⁶⁾と比較的に一致を示した⁽¹⁶⁾。

5. 結 言

先に開発した接着端の応力特異場パラメータを用いた接着強度評価を、単純重ね継手に適用し、以下の結論を得た。

(1) 単純重ね継手の接着強度のラップ長さ依存性を明らかにした。これによるとラップ長さが被着体の

図9 テーパ付き重ね継手の要素分割およびせん断応力分布 ($S=5$ mm, $t=0.1$ mm, $l=30$ mm)

図10 接着端角度 θ と応力特異性の指数 λ の関係

図 11 接着端近傍のせん断応力分布
($S=5$ mm, $t=0.1$ mm, $l=30$ mm)

厚さ相当以上になると接着強度 (τ_b) がかなり低下し、破断荷重 (F_b) はそれほど上昇しないことがわかった。

(2) 単純重ね継手の接着強度の接着層厚さ、被着体厚さの依存性を明らかにした。これらの予測結果は、

図 12 接着端角度と接着せん断強度の関係
($S=5$ mm, $t=0.1$ mm, $l=30$ mm)

図 13 接着端角度と接着せん断強度の関係
(実測結果, Horton ら⁽¹⁶⁾)

Goland らの最大応力基準の予測結果と比較的よい一致を示した。

(3) 単純重ね継手の接着強度の接着端角度依存性を評価した結果、接着端角度が $\pi/3$ 以下では上部接着端で、 $\pi/3$ 以上では下部接着端でなく離が発生することを明らかにできた。また、接着強度は接着端角度を $\pi/6$ 以下にすることによって大きく向上することが予測できた。この予測傾向は Horton らの実験結果とも比較的よく一致した。

文 献

- (1) Bogy, D. B., *J. Appl. Mech.*, **38** (1971), 377.
- (2) Hein, V. L. and Erdogan, F., *Int. J. Fract. Mech.*, **7-3** (1971), 317.
- (3) Theocaris, P. S., *Int. J. Eng. Sci.*, **12** (1974), 107.
- (4) Carpenter, W. C. and Byers, C., *Int. J. Fracture*, **35** (1987), 245.
- (5) 笠野・松本, 日本接着協会誌, **21-9, A** (1985), 373.
- (6) Groth, H. L., *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **5-1** (1985), 19.
- (7) 服部・ほか3名, 機論, **54-499, A** (1988), 597.
- (8) Volkelsen, O., *Luftfahrtforsch.*, **15** (1938), 41.

- (9) Goland, M. and Reissner, E., *J. Appl. Mech.*, **2** (1944), A-17.
 - (10) Findlater, D., *Int. J. Adhesion and Adhesives*, **7-3** (1987), 129.
 - (11) 能野・永弘, 日本接着協会誌, **22-4** (1986), 205.
 - (12) 杉林・池上, 機論, **50-499, C** (1984), 17.
 - (13) 網島・ほか3名, 日本接着協会誌, **19-7** (1983), 265.
 - (14) 網島・ほか3名, 日本接着協会誌, **21-8** (1985), 319.
 - (15) Lee, Y., Wang, S. and Chin, W., *J. Appl. Poly. Sci.*, **32** (1986), 6329.
 - (16) Horton, W. H. and Rogers, C. C., *USAVLABS Tech. Report*, 70-23 (AD875736), (1970).
-