

引張接着強さの接着部の幾何形状寸法依存性について (特異応力場の強さ ISSF に基づく考察)*

野田 尚昭¹⁾ 高木 怜²⁾ 小田 和広³⁾ 鈴木 靖昭⁴⁾

Variation of Tensile Adhesive Strength Prescribed by JIS Depending on the Adhesive Geometries

Nao-Aki Noda Rei Takaki Kazuhiro Oda Yasuaki Suzuki

The Japanese Industrial Standards (JIS) specify the adhesive strength $\sigma_c^{JIS}(h)$ as an average ultimate tensile stress by using a small specimen without considering the adhesive thickness h . In this paper, the validity of $\sigma_c^{JIS}(h)$ is investigated when $\sigma_c^{JIS}(h)$ is used to evaluate the strength for larger adhesive area $\sigma_c^W(h)$ from the ISSF (Intensity of the Singular Stress Field). Then, it is found that when h in the JIS test specimen is equal to h in actual products, $\sigma_c^{JIS}(h)$ can be used since $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$. This is because the ISSF of actual product is controlled by the adhesive thickness h independent of the adhesive area.

KEY WORDS: Materials, Adhesive, Debonding strength, Size effect, Intensity of Singular Stress Field (ISSF), Elastic modulus (D3)

1. 緒言

構造用接着剤による接着構造は、部品表面の平滑化、異種材料同士の接合、重量の軽減、密封性、設備費低減・工数削減といった生産経済性など多くの優れた点を有する。自動車の安全性と軽量化のキーとなるマルチマテリアル化において、接着接合技術は益々重要となっている^{(1),(2)}。接着強さの評価方法は日本産業規格 JIS によって種々の試験法が規定されており、引張接着強さは $\sigma_c^{JIS} = P/A$ と定義され、 P = 最大荷重、 A = 接着面積 ($A = W^2 = (12.7\text{mm})^2$) である。このように定義される接着強度 σ_c^{JIS} は接着層厚さ h に依存して大きく変わる。しかし、JIS 規格では接着層厚さ h に関しては、どのような記述も見あたらず、その考慮がなされていない⁽³⁾。このような、平均応力で表す強度は、試験片の引張強度や降伏応力を求めるのに有用であるが、その際、試験片に均一な応力が生じることを前提としている(図 1 参照)。すなわち、接着強度を求める突き合わせ継手では、接着部に不均一な応力集中が生じるけれども、それに対する配慮がない。そのことが、引張接着強さ σ_c^{JIS} が接着厚さ h に依存して変化する理由である。一方、最近、著者らが指摘しているように、接着部の応力集中を考慮した接着端部の特異応力場の強さ Intensity of Singular Stress Field

(以下 ISSF と略記) を用いれば、接着強さは、 h に依存せず ISSF = 一定で表される⁽⁴⁾。その説明は 3 節で行う。

このように平均応力で表す接着強さ σ_c^{JIS} には、接着部の寸法に依存して変化する問題点がある。しかし、ISSF に比べて、この接着強さ σ_c^{JIS} は直観的には理解し易く、接着強度の指標として広く認識されている。そこで本論文では、JIS の接着面積より接着面積が大きい ($A = W^2 > (12.7\text{mm})^2$) 場合など、接着部の幾何形状寸法を変化させた場合の接着強さ $\sigma_c^W(h)$ を、JIS で規定される σ_c^{JIS} から求める場合の妥当性を考察する。その際、一般的に使用される延性接着剤を用いた場合でも、接着層が弾性的挙動を示すことを説明する。また、最大荷重負荷時にも、接着層に生じる塑性域の大きさが小規模降伏条件満足することを、接着層形状を変えて明らかにする。

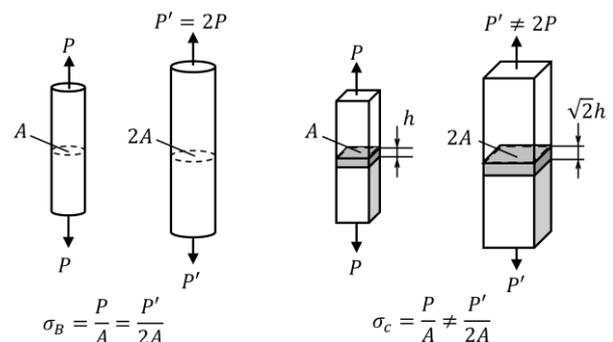


Fig. 1 Illustration of tensile strength σ_B and tensile adhesive strength σ_c for the similarity ratio $\sqrt{2}$

*2023 年 10 月 30 日受理。

1) 九州工業大学 (804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

2) 日本文理大学 (870-0397 大分県大分市一木 1727)

3) 大分大学 (870-1192 大分県大分市旦野原 700 番地)

4) 鈴木接着技術研究所 (491-0806 愛知県一宮市千秋町浮野 字屋敷 131)

2. JIS 規格に基づく接着強さ評価法とその問題点

図 2 に、接着剤/被着材の組み合わせとして、① Resin A / S35C, ② Resin B / S35C, ③ Araldite / Al, ④ Solder / Brass の 4 種類の組み合わせにおける突合せ継手の接着強さの実験値^{(4),(5)}を黒丸 (実験結果の平均値) で示す. 表 1 にそれぞれの材料の機械的性質を示す. 図 2 に示すように、 σ_c^{JIS} は h に依存して変化することは古くからよく知られており、例えば市販の接着剤の特性を代表する Resin B で S35C を接着した場合 $\sigma_c^{JIS} = 76.8 \sim 13.6 \text{MPa}$ である. よって σ_c^{JIS} は、少なくとも h の関数 $\sigma_c^{JIS} = \sigma_c^{JIS}(h)$ として表示する必要がある. しかし、JIS 規格では接着層厚さ h に関しては、どのような記述も見あらず、考慮がされていない⁽⁹⁾. また、ASTM や ISO など他の規格や、接着技術教本においても、接着層厚さと接着強度との関係について言及した記述は見当たらない⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾.

なお、重ね合わせ継手や他の JIS の試験法でも、接着強さは最大荷重/接着面積で定義されている⁽⁹⁾. 重ね合わせ継手の接着強さは $\tau_c^{JIS} = N/A$ と定義され、 N = 最大荷重、 A = 接着面積 ($A = 12.5 \times 25 \text{mm}^2$) である. 図 3 に接着面積 $A = l_b \times 25 \text{mm}$ を変化させた場合の接着強さ τ_c の例を示す⁽¹¹⁾.

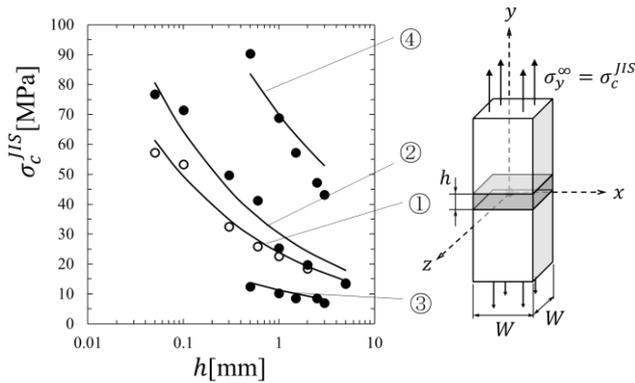


Fig. 2 Butt joint adhesive strength expressed as $\sigma_c^{JIS} = P/A$, P = ultimate tensile load, $A = W^2$ = fixed adhesive area with $W = 12.7 \text{mm}$ (JIS)^{(4),(5)}

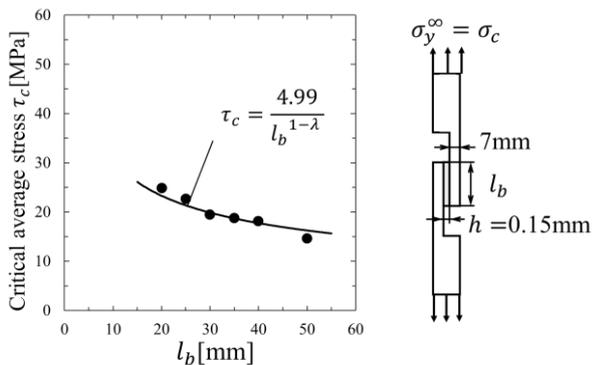


Fig. 3 Lap joint adhesive strength expressed as $\tau_c = P/A$, P = ultimate tensile load, A = adhesive area under fixed $A = l_b \times 25 \text{mm}$ when Aluminium is bonded by brittle epoxy resin⁽¹¹⁾. ($\tau_c = 24.8 \sim 14.6 \text{MPa}$)

Table 1 Material properties for Adhesive/Adherend

Material	Young's modulus	Poisson's ratio	Bulk strength	Dundurs parameter	
	E_y^{Resin} [GPa]			α	β
	E_y^{Steel} [GPa]	ν	σ_b [MPa]	Singularity index λ	
① Resin A / S35C	3.14	0.37	65.5	0.969	0.199
	205.9	0.30	570	$\lambda = 0.685$	
② Resin B / S35C	2.16	0.38	46.8	0.978	0.188
	205.9	0.30	570	$\lambda = 0.674$	
③ Araldite / Al	2.1	0.36	14.8	0.941	0.205
	70	0.35	260	$\lambda = 0.714$	
④ Solder / Brass	6.4	0.39	60	0.862	0.151
	90	0.34	205	$\lambda = 0.745$	

図 3 では接着強さ τ_c は接着長さ l_b に依存して変化している. このように、もし接着強さを最大荷重/接着面積、すなわち平均応力として表示する場合には、接着層の形状によって $\sigma_c^{JIS} = P/A$ や、 $\tau_c^{JIS} = N/A$ が変化することに注意が必要となる.

JIS で規定される $\sigma_c^{JIS}(h)$ のもう一つの問題点として、接着面積 $A = W^2$ の影響が考慮されていないことが挙げられる. すなわち、実用上は JIS の規定 $W^2 = (12.7 \text{mm})^2$ より、通常広い面積が接着される $A = W^2 > (12.7)^2 \text{mm}^2$. しかし、その接着強さ $\sigma_c^W(h)$ に、JIS で求めた平均応力 $\sigma_c^{JIS}(h)$ がそのまま適用可能で $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$ であるのか、それとも低下して $\sigma_c^W(h) < \sigma_c^{JIS}(h)$ であるのかは明らかではない.

3. 特異応力場の強さ ISSF で表される接着強さ

界面端部の特異応力場に注目し、特異性指数や特異応力場について、多くの有用な解析がなされており⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾、合理的な評価がなされるようになってきた⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾. 著者らは特異応力場の強さを端的に理解できるように ISSF(Intensity of Singular Stress Field) と定義し、JIS で定義される突合せ継手や重ね合わせ継手の強度が、ISSF = 一定で表されることを、種々の接着剤と被着材の組み合わせについて実証した(図 5 参照)⁽¹⁹⁾⁻⁽²³⁾.

図 2 に示すような角柱突合せ継手の接着剤と被着材の界面端部、 $x = \pm W/2, y = \pm h/2, z = \pm W/2$ には式(1)で示されるような特異応力場が生じる. ここで、 K_σ は特異応力場の強さ ISSF を表す記号であり、 r は接着界面端部からの距離、 λ は特異性指数である.

$$\sigma_y^{Side}(x, z) \rightarrow \frac{K_\sigma}{r^{1-\lambda}} \quad (r \rightarrow 0) \quad (1)$$

図 2 の角柱状突合せ継手を直接解析する 3 次元 FEM 解析と比較して、2 次元 FEM 解析、すなわち突合せ継手を板状平面ひずみ試験片として解析するのは、はるかに容易である. 図 4 に表 1 の ② Resin B/S35C について、2 次元解析結果 $K_{\sigma_c}^{2D} = 1.204 \pm 0.172 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}]$ と 3 次元解析結果 $K_{\sigma_c}^{Side}(0) = 1.227 \pm 0.164 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}]$ を比較して示す⁽²⁴⁾. 図 2 の図中に示す $\sigma_c^{JIS}(h) = 3.18/h^{1-\lambda}$ は $K_{\sigma_c}^{2D} = 1.204 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}]$ より求めた結果である. 図 4 の Resin B/S35C では、2 次元解析結果と、3 次元解析結果はほとんど一致する. 図

4には、角柱状継手角部の特異応力場の強さの一定値も示している。接着継手の強度はこれら 3 つのうちの 1 つで表現できており、簡便な 2 次元解析の有用性が確認される。なお、角部には他の界面縁よりも特異性指数の観点から強い特異場が存在しているが、その範囲は限定されており、また、通常角部には面取りも施されるので、破壊起点は角部以外の界面縁から生じる。よって以下では、簡便に利用できて、理解が容易な 2 次元 FEM 解析を中心に平均応力で表される接着強さの寸法効果を議論する。

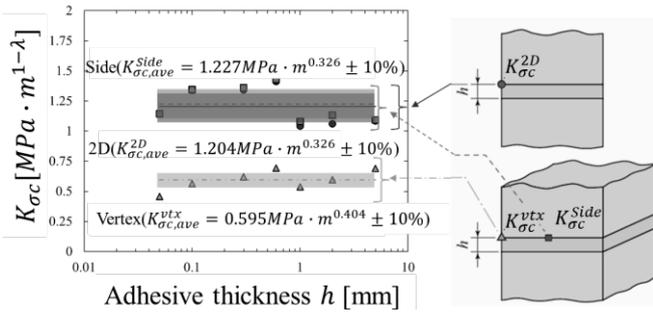


Fig. 4 Prismatic butt joint strength for ② in Table 1 can be expresses as a ISSF=const. obtained by the two-dimensional FEM analysis

図 5 に例として① Resin A / S35C, ② Resin B / S35C, ③ Araldite / Al, ④ Solder / Brass の 4 種類の組み合わせにおける突合せ継手の破断時の ISSF を示す。図 5 の一定値を利用すると、図 2 に示す、曲線① $\sigma_c = 2.70/h^{1-\lambda}$ (Resin A / S35C), ② $\sigma_c = 3.18/h^{1-\lambda}$ (Resin B / S35C), ③ $\sigma_c = 1.57/h^{1-\lambda}$ (Araldite / Aluminum), ④ $\sigma_c = 12.0/h^{1-\lambda}$ (Solder / Brass) の曲線が得られる。図 2 に示す重ね合わせ継手の $\tau_c = 4.99/l_b^{1-\lambda}$ の曲線も ISSF=一定から得られる。

接着強度が JIS で規定される平均応力ではなく、特異応力場の強さ ISSF=一定で表されることは、突き合わせ継手が一見すると応力集中の無い平滑試験片のように見えるので、理解が難しいかもしれない。しかし、同様のことは、過去の破壊力学分野の研究でも経験してきている。すなわち、き裂材の脆性破壊強度が応力拡大係数 K (き裂の ISSF に相当) で表現できることは、今日ではよく知られている。図 6 に片側き裂を有する平板の破断応力 σ_c および破断時の応力拡大係数 K_{Ic} と相対き裂長さ a/W の関係を示す⁽²⁵⁾。板幅 W に対してき裂長さ a が大きくなると破断応力 σ_c は低下するのに対して、応力拡大係数 K_{Ic} は a/W に依存せず一定である。図 5 の突き合わせ継手における接着層厚さ h と ISSF の関係は、図 6 のき裂材におけるき裂長さ a と応力拡大係数 K の関係とよく似ている。特異応力が生じる問題では、破壊条件を表現するために、平均応力ではなく、応力拡大係数を用いるのが有用である。しかし、応力拡大係数 K が知られていな

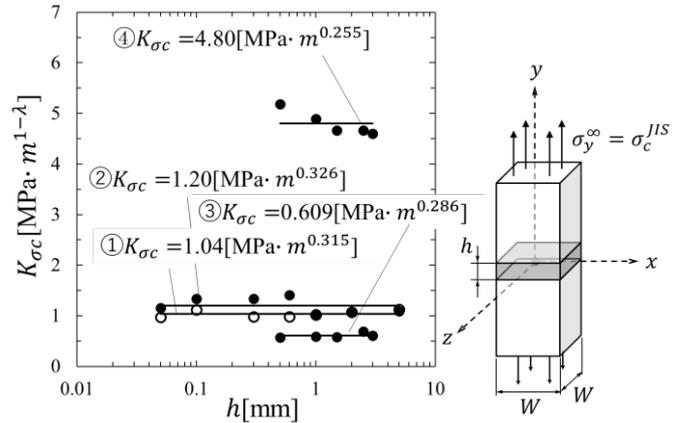


Fig. 5 Butt joint strength in Fig. 2 can be expresses as constant ISSF for ①~④ in Fig. 2.

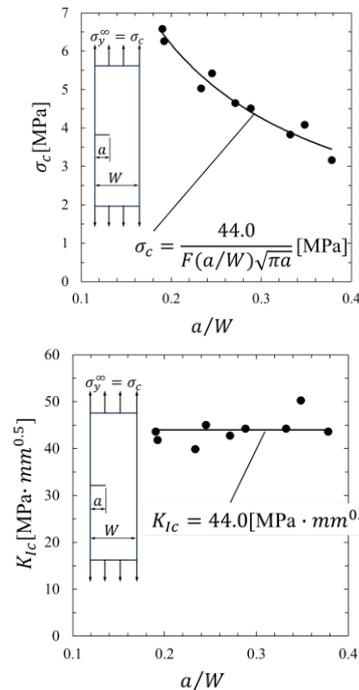


Fig. 6 Fracture strength of an edge cracked acrylic resin plate can be expresses as a constant stress intensity factor⁽²⁵⁾

い時代では平均応力 σ_c を使用せざるを得なかった。接着強度の問題も同じように考えることができる。

突き合わせ継手の場合、接着層厚さ h がき裂長さ a に相当するが両者には若干の違いがある。すなわち、図 6 のき裂材の特異場はき裂先端の 1 箇所であるのに対して、突き合わせ継手では特異場が上下の接着端の 2 箇所ある。よって、 h が小さいとその干渉によって、ISSF が減少するので、図 6 のき裂材におけるき裂長さ a と、図 5 の突き合わせ継手における h がき裂長さ a と類似の挙動を示す。このように、接着層厚さ h は、き裂長さ a とは異なり、接着端部上下 2 箇所の特異場の干渉効果に関係する量であるため、 $h/W \geq 1$ では干渉が無くなるので ISSF は一定になる。つまり、ISSF に対する接着層厚

さ h の影響(干渉効果)は、図6のき裂材に同じ長さで距離が h の平行な2つのき裂が存在する場合に、その応力拡大係数 K が距離 h によって変化する影響と似ている。

突き合わせ継手の接着強度を平均応力 $\sigma_c^{ISS} = P/A$ で評価する場合、もし、接着層厚さ h が十分大きい($h/W \geq 1$)ならば、特異点の干渉が無くなるのでISSFは h に依存せず一定となり σ_c^{ISS} で評価可能である(後述する図8参照)。しかし、現実には $h = 0.05 \sim 1.0 \text{mm}$ が実用上の接着層厚さの範囲であるのでISSFによる評価が必要である。また、 $h/W \geq 1$ を満足しても接着面積($A = W^2$)が変化すると後述する図8に示すようにISSFは変化するので $\sigma_c^{ISS} = P/A$ は変化する。

4. 接着層の弾性的挙動と塑性域の大きさ

図7にASTM D638に基づいて測定したバルク接着剤 Resin B の応力ひずみ関係を、 $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Bulk}$ として示す⁽¹⁸⁾。弾完全塑性体として、弾塑性解析を行う際の応力ひずみ関係 $\sigma_{yield}^{Bulk} = \sigma_B^{Bulk} = 46.8 \text{MPa}$ も破線で示す。エポキシ樹脂 Resin B の応力ひずみ線図には、明確な降伏点があり、破断ひずみは $\varepsilon_f \approx 8\%$ であり、延性接着剤に分類される。Resin B は、添加物を用いず、ぜい性樹脂と延性樹脂の混合比率を変えることで延性的性質を得ている。一方、市販の接着剤は、エポキシ樹脂にゴムの微粒子などの添加物を加えること、可とう性硬化剤を使用すること、あるいは可塑剤を添加することで延性を増加させることが多いが、エポキシ樹脂 Resin B の応力ひずみ関係は、多くの市販の接着剤と近く、本論文の議論は実用上用いられる接着剤に適用できるものと考えられる。よって、以下の議論では表1の Resin B/S35Cに着目する。

図7に、突き合わせ継手の接着層の応力ひずみ関係を $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Resin}$ として、接着層厚さ h を変えて示す⁽²⁶⁾。図5の $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Resin}$ 関係は、図7の挿絵に示すように試験片の接着層をまたいで貼付されたゲージ長さ $l = 5 \text{mm}$ のひずみゲージによるひずみ ε_y^{Joint} から求めた。この ε_y^{Joint} には、被着材のひずみ $\varepsilon_y^{Steel} = \sigma_y^\infty / E_{Steel}$ が含まれているので、式(2)に示すように ε_y^{Joint} から ε_y^{Steel} を除くことによって、接着層自体の平均的ひずみ ε_y^{Resin} が得られる。式(2)で、 $l_{Steel} (= l - h)$ はひずみゲージの被着材に貼り付けられた部分の長さ、 E_{Steel} は被着材のヤング率である。

$$\begin{aligned} \varepsilon_y^{Resin} &= \frac{l}{h} \left(\varepsilon_y^{Joint} - \varepsilon_y^{Steel} \frac{l_{Steel}}{l} \right) \\ &= \frac{l}{h} \left(\varepsilon_y^{Joint} - \frac{\sigma_y^\infty}{E_{Steel}} \frac{l_{Steel}}{l} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

図7より、 $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Resin}$ と $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Bulk}$ とは大きく異なることがわかる。これは、接着層は被着材によって x - z 方向の変形が強く拘束されるためと考えられる。荷重軸方向の応力 σ_y^∞ と同時に、 $\varepsilon_x = \varepsilon_z = 0$ を満足するように、荷重軸直交方向の応力 $\sigma_x = \sigma_z = \nu / (1 - \nu) \sigma_y^\infty$ を作用させた場合の見

かけのヤング率 E_y^{*Resin} は、式(3)で表される。このとき、表

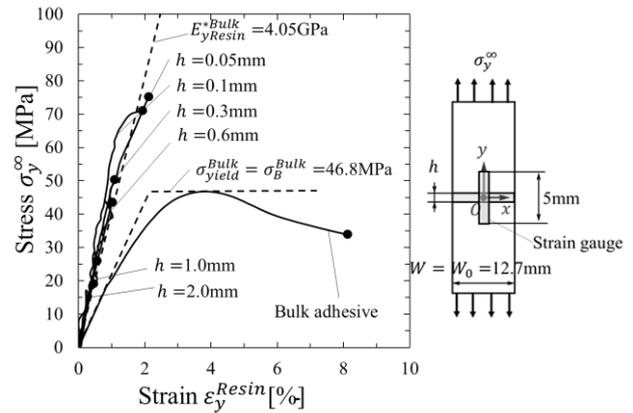


Fig. 7 $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Resin}$ relation of adhesive layer in butt joint for Resin B/S35C in Table 1 in comparison with $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Bulk}$ relation of bulk adhesive

1の E_y^{Resin} とは異なり、 $E_y^{*Resin} = 1.87 E_y^{Resin} = 4.05 \text{GPa}$ となり、これを図7に破線($E_y^{*Resin} = 4.05 \text{GPa}$)で示す。

$$E_y^{*Resin} = \frac{1 - \nu}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} E_y^{Resin} = 4.05 \text{GPa} \quad (3)$$

図7に示すように、接着層の $\sigma_{y0} - \varepsilon_y^{Resin}$ 関係⁽⁴⁾(実験結果)は、ほぼ直線的で弾性的挙動を示しており、その傾きは、式(3)で示された破線($E_y^{*Resin} = 4.05 \text{GPa}$)の傾きとおおよそ一致する。より正確に、接着層の平均的ヤング率を求めるため、FEMによる弾塑性解析も行った。その結果、最大荷重 $\sigma_y^\infty = \sigma_c^{ISS}$ 負荷時における、接着層の平均的ヤング率は、接着層厚さ h が極端に厚い $h = 5 \text{mm}$ の場合を除いて、数%以内で式(3)と一致することが確認された。

図7の接着層の応力ひずみ関係 $\sigma_{y0} - \varepsilon_y^{Resin}$ と、バルク接着剤の $\sigma_y^\infty - \varepsilon_y^{Bulk}$ 関係とを比べると、継手強度 $\sigma_y^\infty = \sigma_c$ は、 $h \leq 0.3 \text{mm}$ ではバルク接着剤の強度 $\sigma_B^{Bulk} = 46.8 \text{MPa}$ を上回り $\sigma_c > \sigma_B^{Bulk}$ である。しかし、その場合も含めて、接着層の応力ひずみ関係 $\sigma_{y0} - \varepsilon_y^{Resin}$ は、破断までほぼ直線的で、明確な降伏点はない。バルク接着剤の破断ひずみは $\varepsilon_f \approx 8\%$ に対して、接着層の破断ひずみ ε_f は、 $\varepsilon_f = 0.5 \sim 2\%$ まで減少し、最も ε_f が大きい $h = 0.05 \text{mm}$ の場合でも破断ひずみ $\varepsilon_f \approx 2\%$ まで、ほぼ弾性的な挙動を示す。

本論文の6節で議論する接着強さ σ_c^W は、ISSF、すなわち弾性解析に基づくものである。すでに接着層の弾性的挙動が明らかとなったが、以下では、接着層の塑性域の大きさを求め、弾性解析の妥当性を示す。過去の研究に倣って⁽²⁴⁾、⁽²⁷⁾、本解析でも、図7の破線($\sigma_{yield}^{Bulk} = \sigma_B^{Bulk} = 46.8 \text{MPa}$)に示すように、接着剤は弾完全塑性体とした。被着材のS35Cの降伏応力は接着剤と比べて十分大きいため、弾性体として扱った。有限要素解析にはMarc Mentat 2019を用いた。

図8に最大荷重 $\sigma_y^\infty = \sigma_c$ 負荷時の弾塑性解析によって得られた、突き合わせ継手の塑性域の大きさ r_p^{FEM} を示す。図8には、

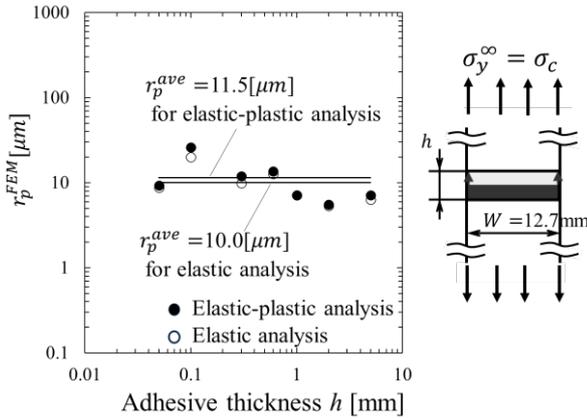


Fig. 8 Plastic zone size r_p obtained by FEM analysis

簡便な弾性解析によって、ミーゼス応力が降伏応力以上となる範囲を塑性域として求めた結果も示す。両者は 20%程度で一致しており、塑性域の大きさは接着層厚さ h に依存しない。継手強さがバルク試験片の強度を上回る $\sigma_c > \sigma_B^{Bulk}$ の場合でも、破断直前までに接着層に生じる塑性域の大きさ r_p^{FEM} は試験片幅 W と比べて十分小さく、小規模降伏条件を満足している。Resin B のように、バルク接着剤が延性的な場合でも、弾性解析に基づいて求めた ISSF による接着強さ評価法は、突合せ継手において有用であり、ISSF に基づいて、接着層の形状を変えた場合の継手強さが議論できるものと考えられる。

5. 突合せ継手の ISSF とそれを表示する F_σ, F_σ^* について

突合せ継手の ISSF が接着層の形状によってどのように変化するかを示すため、著者らは、以下に示す 2 種類の無次元化表示を提案している^{(28),(29)}。まず 1 つ目は、式(4)のように ISSF K_σ を平均引張応力 $\sigma_y^\infty = \sigma$ と試験片幅 W で無次元化した F_σ である。もう 1 つは式(5)のように ISSF K_σ を平均引張応力 $\sigma_y^\infty = \sigma$ と接着層厚さ h で無次元化した F_σ^* である。

$$F_\sigma(h/W) = \frac{K_\sigma}{\sigma W^{1-\lambda}} \quad (4)$$

$$F_\sigma^*(h/W) = \frac{K_\sigma}{\sigma h^{1-\lambda}} \quad (5)$$

図 9(a) に式(4)の $F_\sigma(h/W)$ を解析した結果^{(21), (22)} を示す。図 9(a) のグレーの範囲は実用上の接着剤厚さ h の範囲 ($h = 0.05 \sim 1.0 \text{ mm}$) を示している。これは後述の図 9(b) 及び図 11 でも同様である。式(4)の F_σ は無次元値であり h/W が同じなら同じ値となる。図示するように、接着層厚さ h を減少させると、 $F_\sigma(h/W)$ は接着層端部上下の特異点の干渉により減少する。これが図 2 に示すように、 h を減少させると、 σ_c^{JIS} が増加する理由であり、接着強さは ISSF = 一定で表される。式(4)の F_σ は $h/W \geq 1$ では一定となる。これはサンプナンの原理から説明できる。

逆に、図 9(b) に示すように、式(5)で定義される $F_\sigma^*(h/W)$ の表示は、 $h/W \leq 0.1$ では一定となる。このことは、接着

継手の強度評価に極めて有用である。なぜなら、実用上の接着剤厚さは $h = 0.05 \sim 1.0 \text{ mm}$ 程度であり、これと JIS 試験片の $W = 12.7 \text{ mm}$ より、 $h/W \leq 0.0787$ が実用上の接着層厚さの範囲であると考えられ、 $F_\sigma^*(h/W)$ の表示は、この範囲

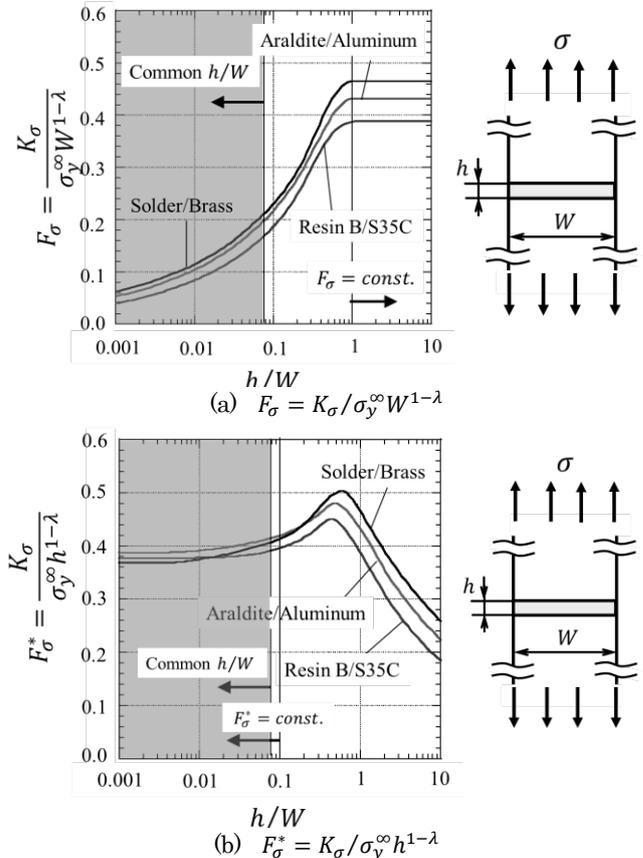


Fig. 9 Dimensionless ISSF defined as (a) $K_\sigma = F_\sigma(h/W)\sigma_y^\infty W^{1-\lambda}$ and (b) $K_\sigma = F_\sigma^*(h/W)\sigma_y^\infty h^{1-\lambda}$, $\sigma_y(r) \rightarrow K_\sigma/r^{1-\lambda}$ ($r \rightarrow 0$) for butt joints whose material combination are Resin B/S35C, Araldite/Aluminum and Solder/Brass

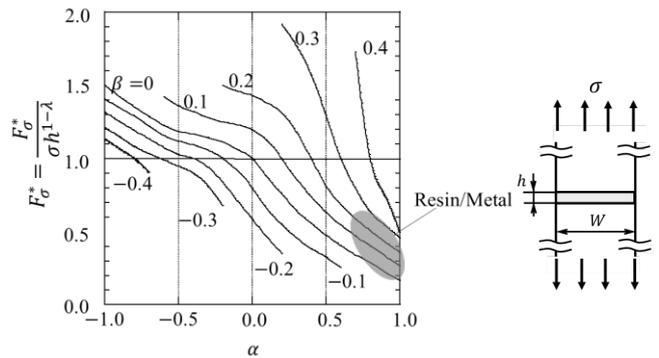


Fig. 10 Normalized ISSF F_σ^* of butt joint in Fig. 1(b) which is useful for $h/W \leq 0.1$.

$$\alpha = \frac{G_1(\kappa_2 + 1) - G_2(\kappa_1 + 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)}, \beta = \frac{G_1(\kappa_2 - 1) - G_2(\kappa_1 - 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)}$$

G_j : Shear modulus,
 $\kappa_j = 3 - 4\nu_j$ ($j = 1(\text{adherend}), 2(\text{adhesive})$)

では図 9(b) に示すように一定値を与えるためである。Resin B/S35C の組み合わせでは $F_\sigma^*(0.1/12.7) \approx \text{一定} \approx 0.377$ である。他の材料組み合わせにおいても、 $F_\sigma^*(h/W) \approx \text{一定}$ と

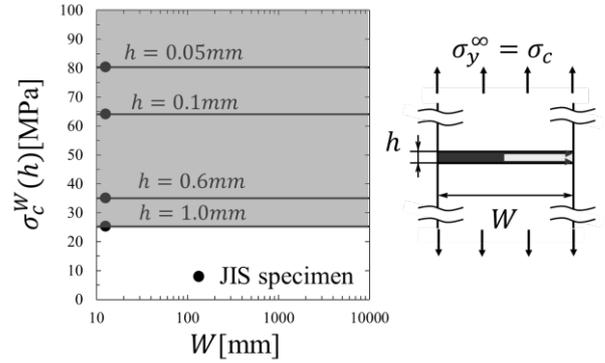
ることは、同様である。

図 10 に、 $h/W \leq 0.1$ における任意の材料組み合わせにおける F_{σ}^* の値を、任意の材料組み合わせに対して、Dundursの複合パラメータの全範囲に対して示す。図 10 より、実用上の接着継手における F_{σ}^* が得られる。金属を樹脂で接着する場合を例とすれば、図 10 のグレーで示された範囲にあり、 $F_{\sigma}^* = 0.3 \sim 0.6$ の範囲にあるので、これを利用して実用上の接着強さを評価できる。

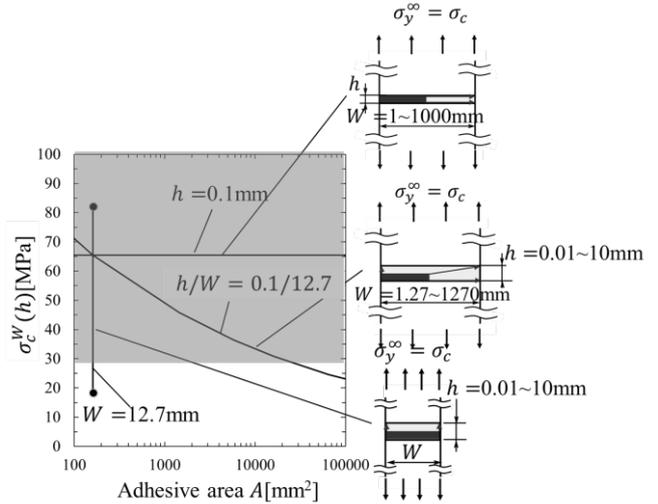
6. 最大荷重/接着面積で表した引張接着強さの寸法効果

突合せ継手の場合、接着層の形状を変化させるモデルとして、①接着層全体の形状が一定のまま相似的に大きさが変わる場合、②接着層厚さ h のみが変わる場合、③試験片幅 W のみが変わる場合などが考えられる。このうち、実験が行われているのは、②のパターンであり、①、③についての実験的研究は見当たらない。そこで、本研究では ISSF=一定の条件を用いて、これらの接着強さを数値実験によって考察する。

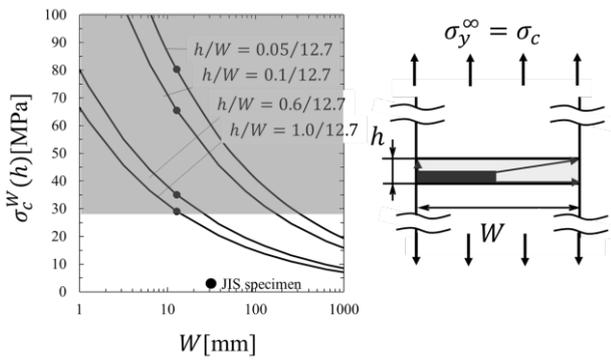
図 11(a)は、角柱状突合せ継手の接着層の形状比 h/W を固定して、接着層全体の寸法を変化させたときの引張接着強さを図示したものである。図 11(a)の場合、接着層は相似なので、式(5)の $F_{\sigma}^*(h/W)$ は一定である。試験片の幅 W と接着層厚さ h が比例的に変化するときの試験片の接着強さ σ_c は式(6)によって表される。式(6)を図示すると図 11(a)となる。



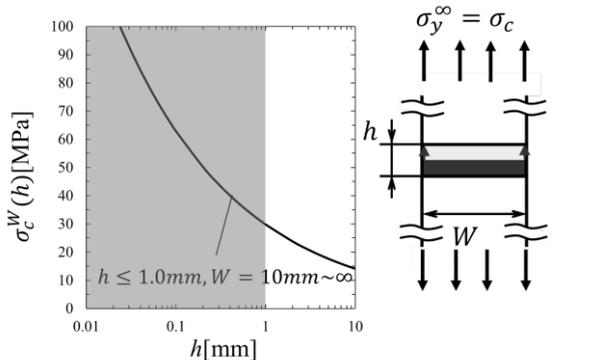
(c) σ_c^W vs. W under fixed h
 $h \leq 1.0\text{mm}, W = 10\text{mm} \sim \infty, h/W \leq 0.0787$



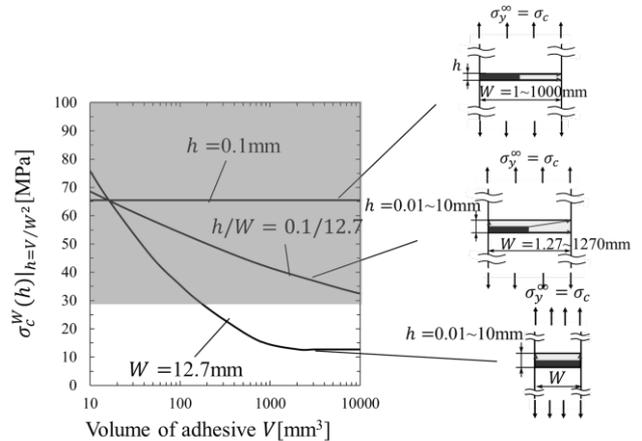
(d) σ_c vs. adhesive area $A = W^2$



(a) σ_c^W vs. W under fixed h/W



(b) σ_c^W vs. h for $h \leq 1.0\text{mm}$ independent of $W = 10\text{mm} \sim \infty$



(e) σ_c vs. volume of adhesive V

Fig. 11 Adhesive strength σ_c defined as an average stress $\sigma_c = P/A$ estimated from ISSF=const. in three models for Resin B/S35C

For Resin B/S35C

$$\sigma_c = \frac{K_{\sigma c}}{[F_{\sigma}^*(h/W)h^{1-\lambda}]} = \frac{3.18}{h^{1-\lambda}} [\text{MPa}] \quad (6)$$

when $h/W = 0.1/12.7 \sim 1.0/12.7, F_{\sigma}^*(h/W) = 0.377,$
 $K_{\sigma c} = 1.20\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.326}$

次に、図 11(b)は、試験片幅 W 一定として、接着層厚さ h のみを変化させた場合の接着強さを示す。このとき、その

一定値の値は影響しない。すなわち、接着面積が JIS と異なっても、 $W = 6\text{mm} \sim \infty$ であっても、 $F_{\sigma}^*(h/W)$ の解析結果より、接着強さ $\sigma_c^W(h)$ は JIS 試験片の強度 $\sigma_c^{JIS}(h)$ に等しく、 $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$ となる。図 11(b) に示すように、接着層厚さ h が大きくなるにつれて接着強さが小さくなる。この結果は、 $h/W = 0.007874$ の場合の図 11(a)と同じ曲線である。

図 11(c)は、接着層厚さ h ＝一定で、試験片幅 W のみを変化させた場合の接着強さを示す。これまでの研究で示してきたように(19), (28), (29), 接着強さは ISSF (記号 $K_{\sigma c}$)、すなわち $K_{\sigma c} = F_{\sigma}^*(h/W)\sigma_c h^{1-\lambda}$ で支配されるので、試験片幅がいくら大きくなって、図 11(c)に示すように σ_c は一定となる。よって、接着層厚さ h が JIS 試験片と実物の接着で同じにすれば、試験片幅 W に依らず同じ接着強さ σ_c が得られる。実物の接着で接着層厚さ h を同じにするためには、接着面積あたりに塗布する接着剤の重量をコントロールすることで比較的容易に実現できる。

図 11(d)は、図 11(a)~(c)のモデルにおける接着強さ σ_c と接着面積 A の関係を示したものである。また、図 11(e)は、図 11(a)~(c)のモデルにおける接着強さ σ_c と接着層全体の体積 V の関係を示したものである。上述のように、接着層厚さ h が増加すると接着強さは減少するが、試験片幅 W が増加しても接着強さ σ_c は変化しない。従って、図 11(d), (e)に示すように、接着強さ σ_c と接着面積の関係、および、接着強さ σ_c と接着層体積の関係は、図 11 の 3 つのモデルで一致しない。つまり接着面積 A や接着層体積 V は接着強さ σ_c に直接は影響せず、接着層厚さ h が接着強さ σ_c に大きな影響を及ぼすと考えられる。

図 11 の結果は力学的な条件 (ISSF の一定条件) から求められたもので、接着層に含まれる欠陥などの統計的因子は考慮していない。接着面積や接着層の体積を増加させて、接着層厚さ h は変化させない場合に、もし接着強さ σ_c が減少した場合、すなわち、ISSF は一定であるのに接着強さ σ_c が減少した場合、その原因は接着層内に含まれる欠陥の増加が影響することによるものと考えられる。

7. 結 言

接着継手の強度が、接着層の形状・寸法によってどのように変わるか、特異応力場の強さ ISSF の観点から考察した。また、その妥当性を、接着層の弾性的性質や接着層に生じる塑性域の大きさから確認した。以下に結論をまとめる。

- (1) 接着面積が JIS 試験片より、はるかに大きい場合でも、JIS 試験片の接着層厚さ h と実製品で用いる接着層厚さ h を揃えることで、JIS 試験片によって得られた引張接着強さ $\sigma_c^{JIS}(h) = P/A$ を実製品の強度に $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$ として適用可能である (図 11(c))。
- (2) 接着強さ $\sigma_c^{JIS}(h) = P/A$ が実製品の評価に $\sigma_c^W(h) = \sigma_c^{JIS}(h)$ として適用可能となる理由は、 $h/W \leq 0.1$ の範

囲で、接着面積が異なっても、無次元化された ISSF $F_{\sigma}^* = K_{\sigma}/\sigma h^{1-\lambda} = \text{一定}$ が成り立つためである。すなわち、ISSF は試験片幅 W に依存せず、接着層厚さ h のみに依存するためである (図 9(b))。

- (3) 接着面積の増加とともに、接着層厚さ h も増加させた場合、すなわち JIS 試験片の接着層と相似な形状では、 $\sigma_c^W(h')$ は低下する、すなわち、 $\sigma_c^W(h') < \sigma_c^{JIS}(h), h' > h$ 。すなわち、接着面積当たりの最大荷重 σ_c を接着層厚さ h が異なる場合に適用するときは、十分な注意が必要である (図 11(a),(b))。
- (4) バルク試験片での応力ひずみ関係は延性的な挙動を示す延性接着剤においても、接着継手の応力ひずみ線図は多くの場合直線的であり、弾性的挙動を示す(図 6)。また、接着層の塑性域の大きさは破断時においても試験片幅と比して十分小さく、小規模降伏条件を満たしている(図 8)。

参 考 文 献

- (1) 自動車技術, Vol.77, No. 7, 「特集 異材接合と適材適所によるモビリティのマルチマテリアル化」, (2023)
- (2) 野田尚昭: 金属と樹脂の界面力学と特異応力場の強さに基づく新しい接着強度評価法, 自動車技術, Vol. 77, No. 7, pp. 2-11, (2023)
- (3) 日本産業規格, JISK6848 接着剤-接着強さ試験方法 (1999)
- (4) 鈴木靖昭: 鋼のスカーフおよびバット継手の引張り接着強度(第 3 報, 接着層の厚さと接着強度との関係)”, 日本機械学会論文集, Vol. 54, No. 487, pp.514-522, (1987)
- (5) A. R. Akisanya, C. S. Meng: Initiation of fracture at the interface corner of bi-material joints. Journal of Mechanical Physics and Solids, Vol. 51, No. 1, pp.27-46, (2003)
- (6) ASTM D5656 Standard test method for thick-adherend metal lap-shear joints for determination of the stress-strain behavior of adhesives in shear by tension loading. (2005)
- (7) ISO 11003-1:1993, 接着剤—構造接着のせん断虚構の測定—第 1 部: 突合せ接合中空円筒ねじり試験方法, (1993)
- (8) 日本接着学会, 接着ハンドブック第 4 版, 日刊工業新聞社, (2007)
- (9) 日本接着学会, プロを目指す人のための接着技術教本, 日刊工業新聞社, (2009)

- (10) 小野昌孝, JIS 使い方シリーズ 新版接着と接着剤—その選び方・使い方—, 日本規格協会, (1989)
- (11) J. H. Park, J. H. Choi, J. H. Kweon : Evaluating the strengths of thick aluminum-to-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 2226-2235, (2010)
- (12) D. B. Bogy : Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading, *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, No. 3, pp. 460-466, (1968)
- (13) D. B. Bogy : Two edge-bonded elastic wedges of different materials and wedge angles under surface tractions, *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 38, No.2, pp. 377-386, (1971)
- (14) V. L. Hein, F. Erdogan : Stress singularities in a two-material wedge, *International Journal of Fracture*, Vol. 7, pp. 317-330. (1971)
- (15) D. H. Chen, H. Nisitani : Singular stress field near the corner of jointed dissimilar materials, *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 60, No. 3, pp.607-613, (1993)
- (16) 渋谷忠弘 : 異種材料接合端部のはく離発生強度の破壊力学的評価と電子デバイスへの適用”, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 7, No. 7, pp. 639 - 644, (2004)
- (17) 白鳥正樹 : 電子デバイス実装における接合の諸問題, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 60, No. 577, pp. 1905 - 1912, (1994)
- (18) 服部敏雄, 坂田荘司, 初田俊雄, 村上元 : 応力特異場パラメータを用いた接着界面強度評価, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 54, No. 499, pp. 597-603, (1988)
- (19) 野田尚昭, 宮崎達二郎, 内木場卓巳, 李戎, 佐野義一, 高瀬康 : 接着接合板における特異応力の強さをを用いた接着強度の簡便な評価法について, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 17, No. 2, pp. 132 - 142, (2014)
- (20) 野田尚昭, 高木怜, 王彪, 王思瑞, 石田大貴, 佐野義一, 宮崎達二郎 : スカーフ継手における特異応力の強さをを用いた接着強度の簡便な評価法, *自動車技術会論文集*, Vol. 52, No. 4, pp.905-910, (2021)
- (21) 野田尚昭, 李戎, 佐野義一, 高瀬康, 高木怜, 宮崎達二郎 : 単純重ね合わせ継手を用いて二重重ね合わせ継手と同一強度を得る方法について, *設計工学*, Vol. 52(10), pp. 621-628, (2017)
- (22) 高木怜, 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 鈴木靖昭, 趙振綱, 張季婷 : 角柱突き合わせ継手の破壊起点の位置と特異応力場の強さとの関係について, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 23, No. 6, pp.507-515, (2020)
- (23) 宮崎達二郎, 井上卓真, 野田尚昭, 佐野義一, 3次元異材接合体の界面端角部に生じる特異応力場の簡便で効率的な評価法について, *日本機械学会論文集*, Vol. 84, No. 864, p.18-00013
- (24) 古口日出男, ヴィセシント アッタポーン : 有限要素法による接合体の界面自由端近傍における弾塑性特異応力場の解析, *日本材料学会 学術講演会講演論文集*, Vol.55, pp. 259-260, (2006)
- (25) 原田昭治, 野田尚昭, 深迫泉, 遠藤達雄, ぜい性材料の破壊じん性に及ぼす初期スリットの鋭さの影響, *材料*, Vol. 35, No. 397, pp. 1157-1162, (1986)
- (26) 鈴木靖昭 : 鋼のスカーフおよびバット継手の引張り接着強度 (第 2 報, 接着層の力学的性質と継手の破壊条件との関係), *日本機械学会論文集 (A 編)*, Vol. 51, No. 463, pp.926-934, (1985)
- (27) 鈴木靖昭 : 重ね合せ接着継手の応力解析および強度, *日本機械学会 材料力学講演会講演論文集*, No.900-86, pp.395-397,(1990)
- (28) N. A. Noda., T. Miyazaki, R. Li., T. Uchikoba., Y. Sano., Y. Takase : Debonding strength evaluation in terms of the intensity of singular stress at the interface corner with and without fictitious crack, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 61, pp. 46-64, (2015)
- (29) N. A. Noda., F. Ren., R. Takaki., Z. Wang., K. Oda., T. Miyazaki., Yoshikazu Sano : Intensity of singular stress field over the entire bond line thickness range useful for evaluating the adhesive strength for plate and cylinder butt joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 85, pp. 234-250, (2018)