

This is "Advance Publication Article".

Category: Paper

Received date: 9 May 2024

Accepted date: 27 August 2024

J-STAGE Advance publication date: 16 October 2024

Publication date: *****

Corresponding author: Kazuhiro ODA (E-mail address: oda-kazuhiro@oita-u.ac.jp)

DOI: 10.14953/jjsde.2024.3028

Copyright©2024 Japan Society for Design Engineering

付加切欠きによる干渉効果の重複作用による突合せ継手の 接着強度向上について

Adhesive Strength Improvement of Butt Joint due to Duplicated Interaction of Additional Notch

小田 和広*1, 竹尾 真理華*2, 井手 一希*2, 堤 紀子*3, 野田 尚昭*4
(Kazuhiro ODA) (Marika TAKEO) (Kazuki IDE) (Noriko TSUTSUMI) (Nao-Aki NODA)

Abstract

In this study, the strength improvement of adhesive joint is discussed for the steel/epoxy butt joints due to the duplicated interaction of additional notches. The experiment is conducted by varying the adhesive layer thickness h and the notch depth t in the range $h=0.1\sim 2.0\text{mm}$ and $t=0.4\sim 1.7\text{mm}$ when the specimen diameter $D=12.7\text{mm}$ and the interval between the notch and the interface $c=1.0\text{mm}$. The intensity of the singular stress field (ISSF) at the interface end is analyzed by the proportional method, as well as the interface stress distribution. The results show that the adhesive strength can be expressed as a constant ISSF independent of h and t except for too deep notch. The adhesive strength σ_c^{ISS} (h) of the butt joint measured by following JIS (Japan Industrial Standard) without notch increases with decreasing h due to the interaction of upper and lower adhesive bondlines. The adhesive strength for the case of additional notches increases with increasing t due to the duplicated interaction. The analytical and experimental results showed that the adhesive strength can be improved due to the duplicated interaction of suitable additional notch.

Key words

adhesive strength, intensity of singular stress field, butt joint, circumferential notch, interaction effect

* 1 正会員, 大分大学理工学部(〒870-1192 大分市旦野原700番地), oda-kazuhiro@oita-u.ac.jp

* 2 非会員, 大分大学大学院(同上)

* 3 非会員, 大分大学理工学部(同上), tsutsumi-noriko@oita-u.ac.jp

* 4 非会員, 九州工業大学工学研究院(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1), nao592noda@gmail.com

1 緒言

樹脂と金属との接着接合法は、工業分野のみならず様々な場面で使用されている。とくに近年では、軽量化や省資源化を目的として、接着接合技術の自動車や航空機などへの利用が拡大しており、接着接合部や接着継手に対する強度や信頼性の高度化への要求が高まっている。接着接合体は、接合界面端で特異応力場が生じ、接合界面端の応力が無限大となるため、界面端からはく離やき裂が生じ破壊に至る場合が多い。これまで、界面端部の特異応力場、界面き裂あるいは界面近傍のき裂の応力拡大係数などに関する研究が盛んにおこなわれてきた。久保-大路¹⁾や陳-西谷²⁾は、固有関数展開法によって界面端近傍の応力場の特異性を再検討している。野田ら³⁾は、有限要素法 (FEM) によって得られた界面端近傍の応力値の比を用いて界面端における特異応力場の強さ (ISSF) を評価する効率的な手法を報告している。さらに、野田ら⁴⁾、小田ら⁵⁾は仮想的な界面き裂を想定することで、その応力拡大係数 (SIF) に注目した接着接合材の強度評価法の有用性を示している。これらの研究によって、接着強度が ISSF 一定の条件 ($K_{\sigma c} = \text{const.}$) や、仮想的な界面き裂の SIF 一定の条件 ($K_{Ic} = \text{const.}$) として合理的に表現できることが明確にされてきた。したがって、何らかの手段、たとえば付加切欠きなどによって、その ISSF (または SIF) を緩和すれば、接着強度の向上が期待できる。干渉効果を利用して強度向上を目指した研究では、これまで、孔や切欠き^{6),7)}、き裂と介在物⁸⁾、界面とき裂⁹⁾などが対象とされてきた。また、接着面形状に注目した接着強度向上に関する検討は、スカーフ継手¹⁰⁾、段付き継手^{11),12)}や、波型突き合わせ接着継手¹³⁾に関して報告されている。しかしながら、接着継手に対して、干渉効果を用いて強度向上を目指した研究は著者らの知る限り見当たらない。

そこで本研究では、接着層近傍に設けた付加切欠きによる接着強度の向上について検討する。本研究で提案する方法は、切欠きによる応力集中の干渉効果という力学的原理に基づいており、従前の手法のように接着面形状そのものの変更は必要としない。すなわち、接着界面そのものではなく、界面近くの被着体のみを形状変更の対象として切欠きを付与するため、汎用的で実用的な手法として種々の応用も期待できる。接着強度は ISSF 一定の条件で表されることから、応力集中の緩和の程度も明確に評価できる。本研究では、まず、接着層近くに円周切欠きを付与し、その干渉効果により生じる ISSF の緩和の程度を明確にする。次に、その接着強度を実験的に求め、考察するとともに、付加切欠きの深さおよび接着層厚さを変化させ界面上の応力分布を解析し、接着面内部の引張応力の変化とその接着強度との関係についても議論する。最終的には、接着強度を向上させる理想的な付加切欠きの形状を明らかにすることを目的とする。切欠き形状は、深さと接着面からの距離が特異応力場に大きく影響するが、ここでは試験片加工の関係上、距離は固定して議論する。

2 付加切欠きによる界面端部特異場の強さ ISSF の低減効果

2.1 円周切欠き付き円柱突合せ継手試験片

図 1 に研究対象とする接着接合丸棒を示す。図 1(a), (b) の接着界面端部の ISSF の解析を行い、切欠きの無い突合せ継手 (切欠き深さ $t=0$ と称する) に切欠き付加することによる ISSF の減少をまず明らかにする。対象とする接着丸棒の直径は $D = 12.7\text{mm}$ であり、切欠き半径 $\rho = 0.4\text{mm}$ ならびに界面端部からの切欠き位置 $c = 1.0\text{mm}$ はともに固定し、基準応力 $\sigma_2^\infty = \sigma_0$ の下で ISSF を解析する。接着層厚さを $h = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0\text{mm}$ とし、切欠き深さ $t = 0, 0.4, 0.6, 0.85, 1.7\text{mm}$ とする。表 1 に本解析で用いた接着材および被着材の材料定数を示す。表 1 の α, β は Dundurs パラメータであり、 λ は界面端部特性指数である。

図 1(a) の点 A の特異応力場と、図 1(b) の特異応力場は、式(1)で表される。

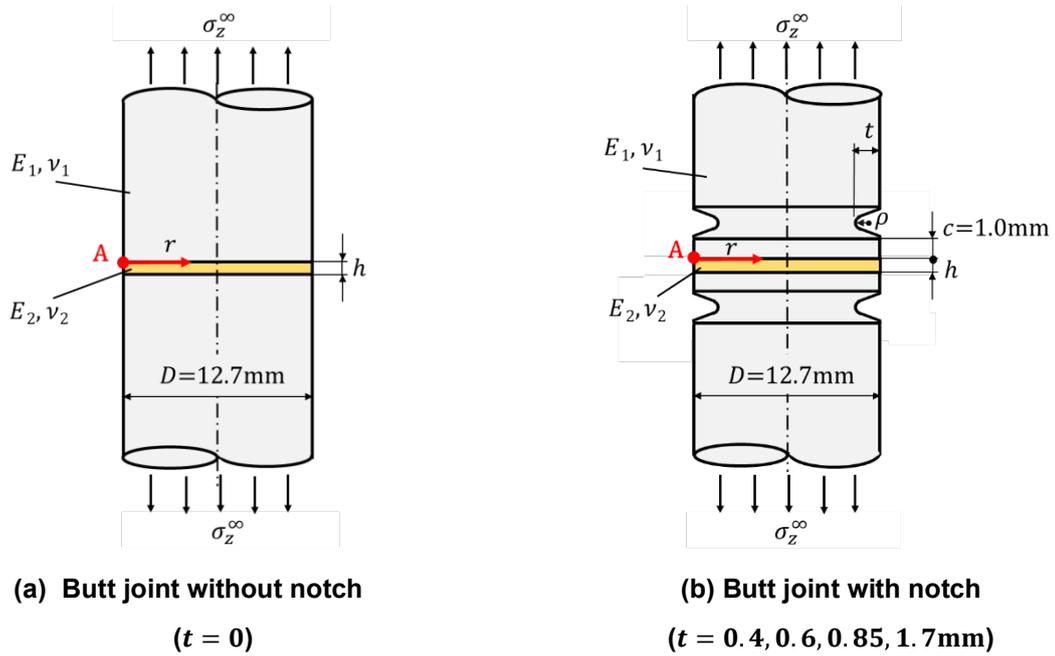


Fig. 1 Cylindrical butt joints with/without additional notch

$$\sigma_z(r) = \frac{K_\sigma}{r^{1-\lambda}} \quad (1)$$

図 1(a) の点 A の特異応力場の強さ ISSF (記号 K_σ で表す) は文献(14, 15)に与えられている. よって, 両者を同じ FEM メッシュで解析すれば, FEM 応力の誤差が同じとなることから, 厳密な ISSF の比が求まる. すなわち, 図 1(a) の結果を基準問題の解として用いることができる^{14)・16)}. 式(1)で, r は接着界面上の点 A から丸棒半径方向の距離である. 式(1)に示すように界面での応力 $\sigma_z(r)$ は, $\sigma_z(r) \propto 1/r^{1-\lambda}$ の特異性を有している. 点 A における特異性指数 λ は以下の特性方程式を解くことによって得ることができる. 式(2)は $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ のとき, 常にただ一つの実数根 $\lambda < 1$ をもつ. すなわち, 点 A の特異応力場は 1 つの ISSF K_σ で支配される.

$$\left[\sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - (\lambda)^2 \right]^2 \beta^2 + 2(\lambda)^2 \left[\sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - (\lambda)^2 \right] \alpha\beta + (\lambda)^2 [(\lambda)^2 - 1] \alpha^2 + \frac{\sin^2 \lambda\pi}{4} = 0 \quad (2)$$

ここで, α と β は Dundurs の複合パラメータであり, 被着材と接着剤の横弾性係数 G_j とポアソン比 ν_j から以下の式(3), (4)で定義される. ここで, 下添字 $j=1, 2$ は, 材料 1, 2 を表す.

$$\alpha = \frac{G_1(\kappa_2 + 1) - G_2(\kappa_1 + 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)}, \quad \beta = \frac{G_1(\kappa_2 - 1) - G_2(\kappa_1 - 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)} \quad (3)$$

$$\kappa_j = \begin{cases} \frac{3 - \nu_j}{1 + \nu_j} (\text{plane stress}) \\ 3 - 4\nu_j (\text{plane strain}) \end{cases}, \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

接合界面端部の特異応力場の強さ K_σ は式(5)で表される。

$$K_\sigma = \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma_z(r) \cdot r^{1-\lambda}] \quad (5)$$

また、点 A の無次元化された ISSF F_σ は式(6)で表現される。無次元値であるので相似形状では同じ値となり、電子機器を対象としたスケールまで適用できる。ここで σ_z^∞ は遠方引張応力、 h は接着層厚さである。

$$F_\sigma = \frac{K_\sigma}{\sigma_z^\infty h^{1-\lambda}} \quad (6)$$

Table 1 Material properties used in the present analyses

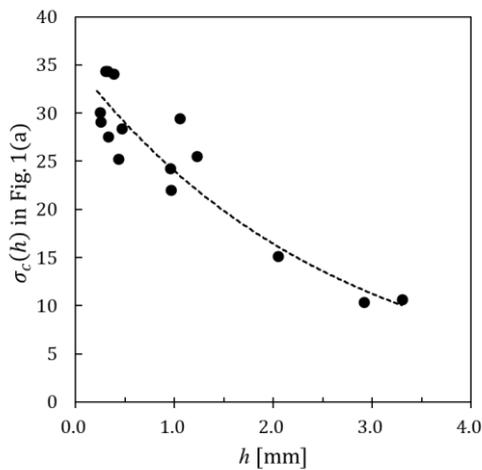
| Material combination | E [GPa] | ν | α | β | λ |
|----------------------|--------------|----------------|----------|---------|-----------|
| S35C | $E_1 = 206$ | $\nu_1 = 0.30$ | 0.973 | 0.174 | 0.6705 |
| Epoxy | $E_2 = 2.64$ | $\nu_2 = 0.39$ | | | |

2.2 JIS 規格に基づく円柱状突合せ継手の JIS 接着強度 σ_c^{JIS}

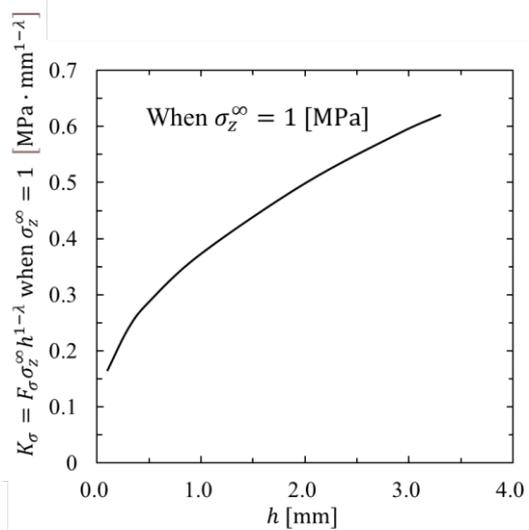
図 2(a)に、JIS 規格に基づいて求めた突合せ円柱状接着継手の JIS 接着強度 $\sigma_c^{JIS} = \sigma_c^{JIS}(h)$ を示す。突合せ継手の引張り強度試験は、JIS K6849¹⁷⁾に規定されており、接着面に垂直方向に荷重を負荷し、破壊時の最大荷重 P_c から接着面積 A を除することによって、その引張り接着強度を求める ($\sigma_c^{JIS}(h) = P_c/A$)。試験片形状としては、接着面が一辺 12.7mm の正方形である角柱と、直径が 12.7mm の円柱のどちらかをを用いることができる。なお、接着部に曲げがかからないよう、試験片取付ジグにはユニバーサルジョイントを組み込む。このように、JIS 規格には接着層厚さ h に関する規定はなされておらず、どのような記述もみあたらない。しかし、**図 2(a)**に示すように、接着強度 $\sigma_c(h)$ は接着層厚さ h の減少とともに顕著に増加する。このような JIS の接着強度 $\sigma_c^{JIS}(h)$ の h 依存性は、接着界面端部に生じる特異応力場の強さ ISSF から明確に説明できる^{14)・17)}。

図 2(b)に、基準応力 $\sigma_z^\infty = 1\text{MPa}$ を付加した際の、界面端部の ISSF $K_\sigma = F_\sigma \sigma_z^\infty h^{1-\lambda}$ を示す。ここで F_σ の値は、比例法などの解析法によって求められる ISSF の無次元値であり、後述する**表 2**にまとめて示す (**図 2(b)**の F_σ の値は、**表 2**の $t=0$ の場合に相当する)。接着層厚さ h の減少とともに基準応力 $\sigma_z^\infty = 1\text{MPa}$ での ISSF は減少するため、**図 2(a)**のように接着層厚さ h の減少とともに接着強度 σ_c は増加する。すなわち、接着界面端部の特異応力場の強さ ISSF に着目すれば、接着強度は、**図 2(c)**に示すように $K_\sigma = F_\sigma \sigma_z^\infty h^{1-\lambda} = 7.96 \pm 1.40 \text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.3295} = \text{一定}$ である。ここで、**図 2(c)**の $K_{\sigma c}^{\text{average}}$ は、平均値 ± 標準偏差である。

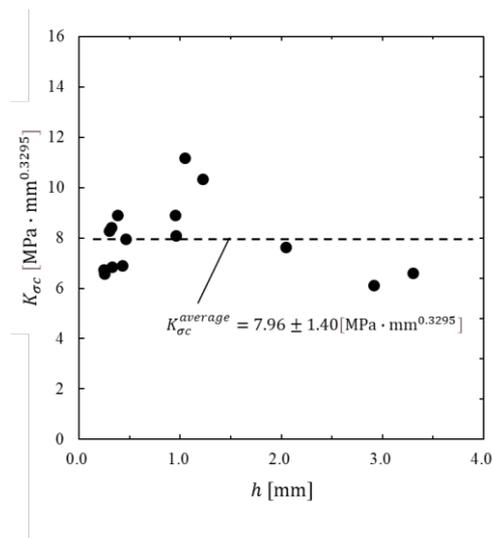
図 2(b)に示す ISSF $K_\sigma = F_\sigma \sigma_z^\infty h^{1-\lambda}$ ($\sigma_z^\infty = 1\text{MPa}$) が、接着層厚さ h の減少とともに減少する理由は、接着面上下端の特異点の干渉効果によるものと考えられる。特異点の距離が小さくなれば干渉によって ISSF は減少する。大きな JIS 接着強度 $\sigma_c^{JIS}(h)$ を得るには h を小さくすればよいが、極端に h を小さくすることは被着面の表面粗さの影響もあるので困難となる。**図 2(b)**と同様な干渉効果による ISSF の減少を、もし付加切欠き



(a) Critical adhesive strength $\sigma_c^{JIS}(h)$ experimentally obtained for Fig.1(a) varying depending on adhesive thickness h



(b) $K_\sigma = F_\sigma \sigma_z^\infty h^{1-\lambda}$ when $\sigma_z^\infty = 1\text{MPa}$ analytically obtained for Fig.1(a). The variation is due to the interaction of upper and lower bondlines



(c) Adhesive strength expressed as ISSF=const as $K_{\sigma_c} = F_\sigma \sigma_c h^{1-\lambda} = 7.96 \pm 1.40 \text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.3295}$

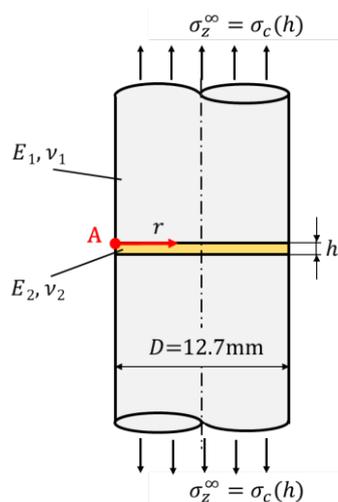


Fig. 2 Adhesive strength in Fig.1 (a) expressed as an average stress $\sigma_c^{JIS}(h)$ prescribed in JIS and adhesive strength as a constant ISSF $K_{\sigma_c} = F_\sigma \sigma_c h^{1-\lambda} = 7.96 \pm 1.40 \text{MPa} \cdot \text{mm}^{0.3295}$ ($K_{\sigma_c}^{average}$ denotes the average value of K_{σ_c} with a standard deviation)

によって実現できれば、接着層厚さ h を極端に減少させることなく、接着強度 $\sigma_c^{JIS}(h)$ を向上させることが期待できる。類似の研究として、界面端部の特異性を消失させる接着部の幾何学的形状の理論的検討がなされている¹⁾。本研究の切欠き付与による手法は、接着面形状は変更しなくてもよいという点に特徴があり、実用的で便利な新手法として、種々の接着接合構造の設計に応用可能である。接着強度はISSF一定の条件で表されることから、応力集中の緩和の程度も明確に評価できる。

2.3 ISSF に及ぼす付加切欠きによる干渉効果

図 1(b)の付加切欠きを有する突合せ丸棒接着試験片を対象として、付加切欠きの切欠き深さ t や接着層厚さ h を変化させて、接着端部の ISSF に及ぼす干渉効果の影響を明らかにする。表 2 に、図 1(b)の ISSF の無次元値 $F_\sigma = K_\sigma/(\sigma_z^\infty h^{1-\lambda})$ を比例法^{14),15)}で解析した結果を示す。ここでは、切欠き深さ $t=0, 0.4, 0.6, 0.85, 1.7$ mm と接着層厚さ $h=0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ mm に対して解析したものである。図 1(a)の ISSF は、表 2 の $t=0$ として与えられており、角柱状突合せ継手の ISSF (表 2 の()*の値¹⁴⁾)と一致することがわかる。

図 3 に、界面端部の ISSF $K_{\sigma c} = F_\sigma \sigma_c h^{1-\lambda}$ の解析結果を、基準応力 $\sigma_z^\infty = 1$ MPa を与えた場合に示す。図 3 に示す $t=0$ の結果は JIS 試験片 (図 1(a)) の結果であり、図 2(b)と同じものである。図 3 より、付加切欠き試験片においても JIS 接着強度と同様に、接着層厚さ h が小さいほど ISSF を低減できることがわかる。

Table 2 Normalized ISSF $F_\sigma(t, h) = K_\sigma/(\sigma_z^\infty h^{1-\lambda})$ in Fig.1(b). [In Table 2, the results $t = 0$ and $h = 0.1 \sim 2.0$ are F_σ in Fig.1(a). The results in ()* are F_σ of prismatic butt joint¹⁴⁾]

| | $F_\sigma(t, h) = K_\sigma/(\sigma_z^\infty h^{1-\lambda})$ | | | | |
|-------------------|---|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | $t = 0$ | $t = 0.4$ [mm] | $t = 0.6$ [mm] | $t = 0.85$ [mm] | $t = 1.7$ [mm] |
| $h = 0.1$ [mm] | 0.352 (0.353)* | 0.276 | 0.211 | 0.129 | -0.049 |
| $h = 0.3$ [mm] | 0.356 (0.357)* | 0.320 | 0.285 | 0.231 | 0.056 |
| $h = 0.5$ [mm] | 0.361 (0.362)* | 0.338 | 0.314 | 0.276 | 0.129 |
| $h = 1.0$ [mm] | 0.373 (0.374)* | 0.360 | 0.347 | 0.327 | 0.233 |
| $h = 2.0$ [mm] | 0.397 (0.397)* | 0.389 | 0.381 | 0.369 | 0.317 |

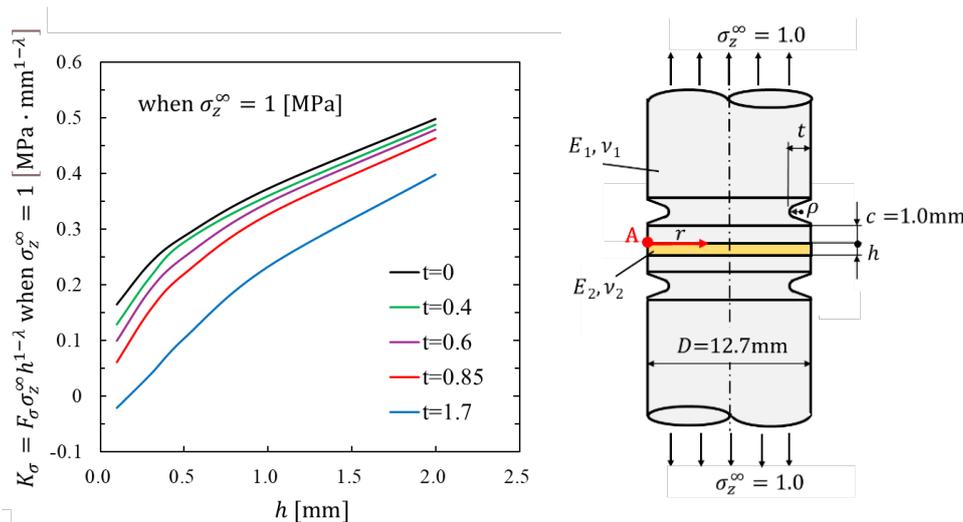


Fig. 3 ISSF $K_{\sigma c} = F_\sigma \sigma_z^\infty h^{1-\lambda}$ when $\sigma_z^\infty = 1.0$ MPa analytically obtained for Fig.1(b). The variation is due to the duplicated interaction of additional notches

付加切欠きの干渉効果は、付加切欠き深さ t の増加とともに増加しており、ISSFのより顕著な低下として生じる。特に、切欠き深さ $t=1.7\text{mm}$ においては $h<0.2\text{mm}$ の範囲では、 K_σ が負となっており、界面端部付近で圧縮応力が生じることが示された。これらの結果を基に、**図 1(a)**の突合せ継手の接着強度に対して、**図 1(b)**の付加切欠きを有する突合せ継手の接着強度が向上するか否かをISSFの観点から考察する。本研究で用いた有限要素法解析ソフトはMSC.MARC/MENTAT2019である。

3 付加切欠きを設けた円柱突合せ継手の引張破断試験

3.1 試験片製作および実験方法

図 1(a)のJIS円柱突合せ継手試験片と、**図 1(b)**の付加切欠きを設けた円柱突合せ継手を製作し、引張試験によって接着強さ $\sigma_z^\infty = \sigma_c$ を求めた。被着材には一般構造用炭素鋼(S35C)、接着剤にはエポキシ樹脂(EP-160熱硬化型樹脂)を使用した。被着材の接着面を60番の紙やすりで一方向に研磨した後、被着材をアセトンに浸して本田電子製の卓上型超音波洗浄機(W-113)で、10分間の洗浄を3回行い脱脂している。樹脂は城田電気炉製の電気炉(ピクチャー2S)で 60°C 30分加熱し粘度を下げた後、真空ポンプで40分間の脱泡を行った。次に、芯の出ている接着用V型治具に2本の被着材を固定し、注射器で樹脂を流し込み、電気炉で 150°C 2時間加熱し、1日炉冷した。接着層厚さは解析と同様に $h=0.1\sim 2.0\text{mm}$ で製作した。JISに基づく円柱突合せ継手($t=0$)、および切欠き材($t=0.4, 0.6, 0.85, 1.7\text{mm}$)の5種類の試験片を製作し、接着界面付近に付与した切欠きの有無が引張の破断強度に与える影響を調べた。引張試験には、島津製作所製の精密万能試験機(AG-250kNXplus)を用いた。取り付けにはムソー工業(株)製の二軸型引張試験治具を用い、接着試験片に曲げが作用しないようにしている。引張速度は定速で $1\text{mm}/\text{min}$ で行った。

3.2 引張試験結果

図 4に、実験で求めた接着強さ $\sigma_z^\infty = \sigma_c$ を示す。横軸は接着層厚さ h を示している。**図 4**中の破線は、実験

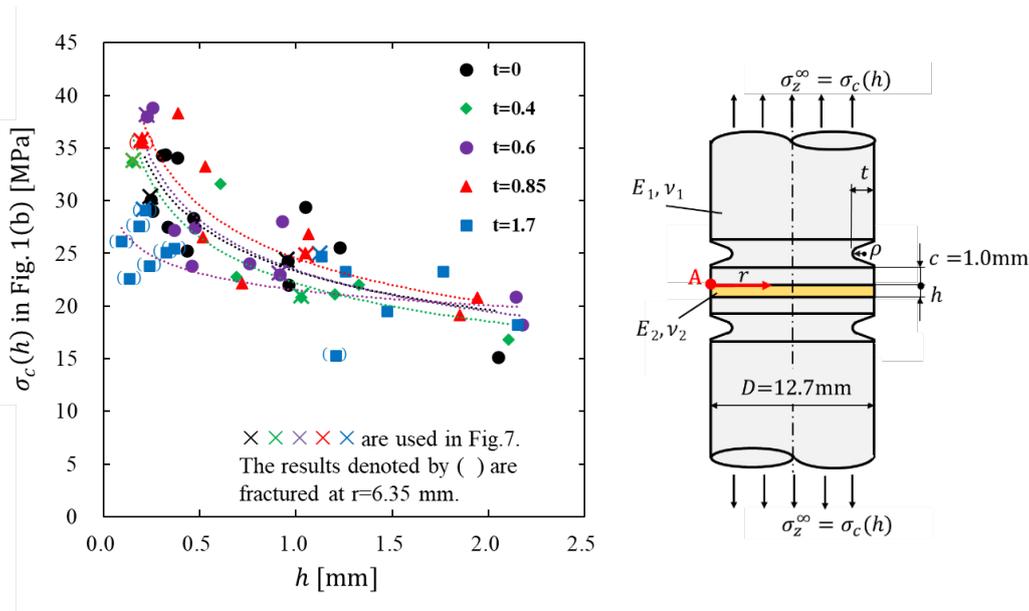


Fig. 4 Critical tensile strength $\sigma_c(h)$ in Fig. 1(b) experimentally obtained by varying additional notch depth t in comparison with critical adhesive strength $\sigma_c^{JIS}(h)$ prescribed in JIS for Fig.1(a)

値を累乗近似で表した曲線である。JISに基づく円柱突合せ継手 ($t=0$) と切欠き材を比較すると、接着層厚さ $h \leq 0.3\text{mm}$ では、切欠き深さが小さい試験片 $t=0.6, 0.85\text{mm}$ は、 $t=0$ と比べて多少の接着強度向上が見られる。これは上下の円周切欠きによって端部特異応力場の強さ ISSF が低減されるためであると考えられる。接着層厚さ $h \geq 0.3\text{mm}$ でも接着強度の多少の向上は見られるが、あまり顕著ではない。これは、上下の円周切欠きが離れるため、切欠き干渉効果の影響が小さくなるためであると考えられる。一方、 $t=1.7\text{mm}$ においては、接着層厚さに関わらず、接着強度は低下した。これは、切欠き深さが大きい場合には、接着面端部からの破壊ではなく、試験片中央部 (図 1 の $r=6.35\text{mm}$) 付近からの破壊が生じるためであると考えられる。このため、図 4 では、その実験値を (■), (▲) で表している。通常の突合せ継手 ($t=0$) では、接着界面端部の表面近傍の傷や欠陥が破壊起点となり、その場合には破壊起点付近にミラー、ミスト、ハックルと呼ばれる破面が観察されることが報告されており¹⁸⁾²⁰⁾、本試験片でもそのような破面が認められる。しかし、切欠きが深い突合せ継手 (■), (▲) では、界面端部の表面付近にこのような破面が観察されていないため、破壊が内部から生じていることが予想される。

4 付加切欠きを設けた円柱突合せ継手の接着強度の考察

4.1 ISSF によって表した円柱状突合せ継手の接着強度

図 5 は、図 4 の実験結果と図 3 の ISSF の解析結果を基に、図 1(a), (b) のすべての実験結果の破断時の ISSF $K_{\sigma c} = F_{\sigma} \sigma_c h^{1-\lambda}$ を示したものである。横軸は接着層厚さ h を示している。図 5 には、 $t=0$ の切欠きがない場合の破断時の ISSF の平均値 $K_{\sigma c}^{average}$ を破線で示している。図 1(a) の $t=0$ と図 1(b) の切欠き材で切欠きが浅い場合 $t=0.4, 0.6\text{mm}$ においては、 $K_{\sigma c}$ は接着層厚さに依存せず、ほぼ一定値を示している。これは、 $t=0$ と切欠きが浅い切欠き材 ($t=0.4, 0.6\text{mm}$) では、接着界面端部から破壊しているためと考えられる。一方、() を付けた実験結果、すなわち、 $t=0.85\text{mm}$ で $h \leq 0.2\text{mm}$ の場合と、 $t=1.7\text{mm}$ で $h \leq 1.2\text{mm}$ の場合においては、 $K_{\sigma c}$ が他の場合よりかなり低い値となっている。このことから、切欠きが深い場合 $t=1.7\text{mm}$

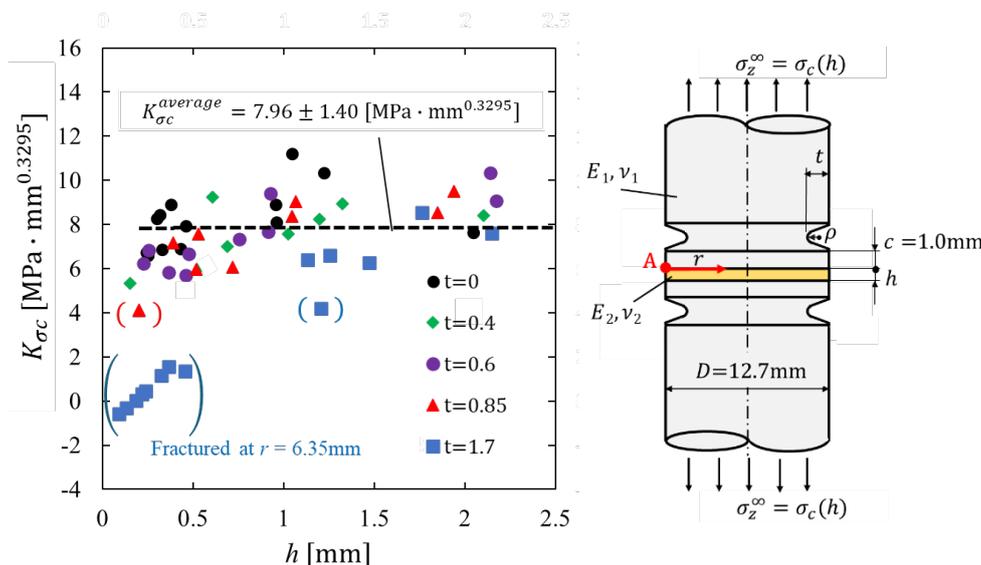


Fig. 5 Adhesive strength expressed as critical ISSF $K_{\sigma c}=\text{constant}$ in Fig.1 (b). The constant critical ISSF $K_{\sigma c} = F_{\sigma} \sigma_c h^{1-\lambda} = 7.96 \pm 1.40 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.3295}$ is obtained from Fig.1(a) corresponding to $t=0$ in Fig.1(b). ($K_{\sigma c}^{average}$ denotes the average value of $K_{\sigma c}$ with a standard deviation)

で $h \leq 1.2\text{mm}$ では、接着界面端部からではなく、試験片の中央部 ($r = 6.35\text{mm}$) から破壊が生じている可能性が考えられる。以下では界面の応力分布を調べて検討する。

4.2 円柱突合せ継手の破断時の界面上の応力分布

図6と図7に、円柱突合せ継手の接着界面上の丸棒半径方向 (r 方向) の応力分布を FEM 解析した結果を示す。図6は基準応力 $\sigma_z^\infty = 1.0\text{MPa}$ を与えたときの (a) 接着層厚さ $h = 0.2\text{mm}$ と、(b) 接着層厚さ $h = 1.0\text{mm}$ の場合の界面上の応力分布 $\sigma_z(r)$ を示したものである。図6の横軸は、界面端部から中心までの距離 r と相対距離 $2r/D$ を対数で示している。界面応力は $r \leq 0.02\text{mm}$ 付近で、破線で示す特異応力分布の漸近解 $\sigma_z(r) = K_\sigma/h^{1-\lambda}$ と一致する。

まず、図6(a), (b)の $t = 0$ (付加切欠きなし) の応力分布を比べると、接着層が小さい $h = 0.2\text{mm}$ の場合に接着上下面端部の干渉効果が大きいため、応力分布は小さくなる。次に、 $t = 0$ (付加切欠きなし) の応力分布を、 $t \neq 0$ (付加切欠きあり) の応力分布を比べると、図6(a)の $h = 0.2\text{mm}$ の場合には、切欠き深さ t が大

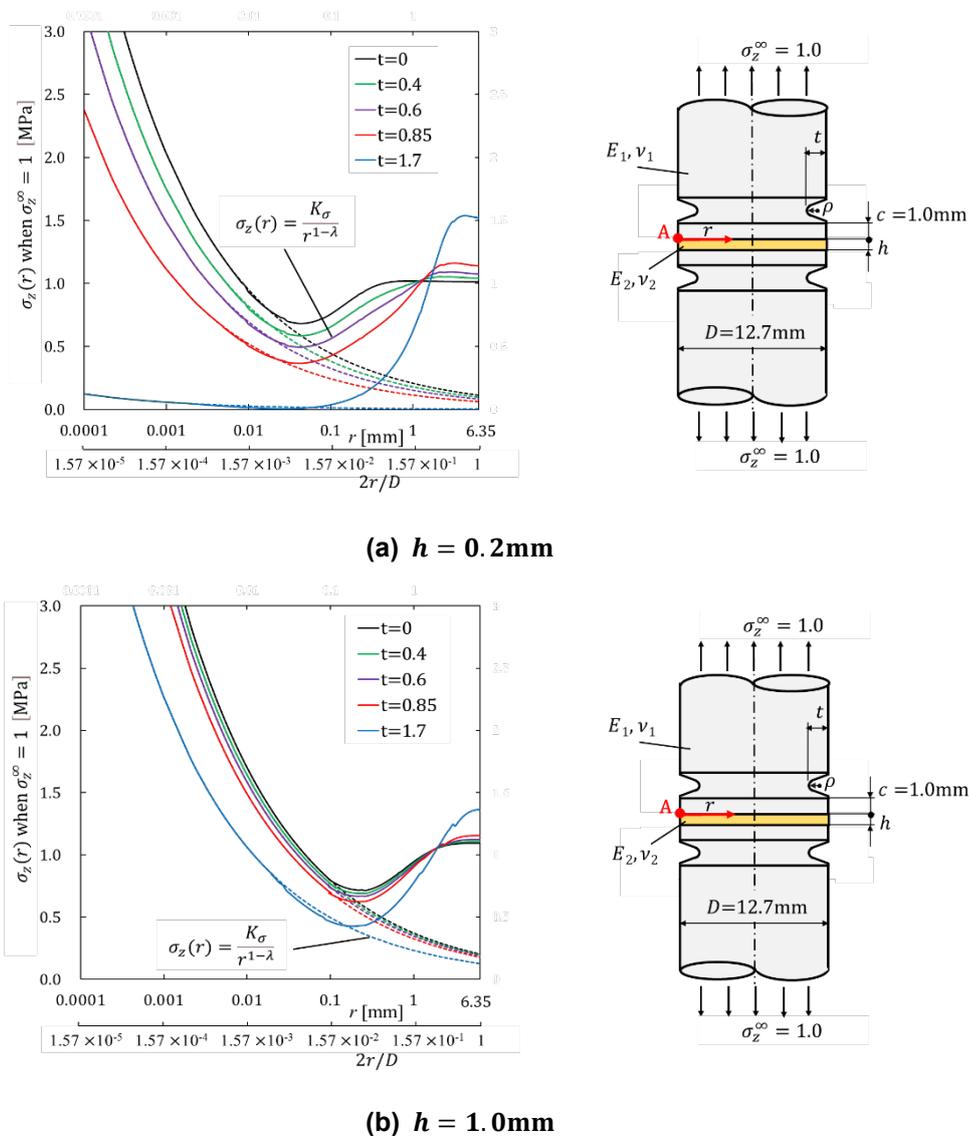


Fig. 6 Interface stress distribution $\sigma_z(r)$ when $\sigma_z^\infty = 1.0\text{MPa}$ and the asymptotic singular stress $\sigma_z(r) = K_\sigma/r^{1-\lambda}$ expressed as the dotted line

きくなるにつれて特異応力が顕著に小さくなることが確認できる．一方，**図 6(b)**の $h = 1.0\text{mm}$ では， $t = 0 \sim 0.85\text{mm}$ までは，ほぼ同じ応力分布になっており，切欠き深さ t の影響は比較的小さい．すなわち， $t = 0$ の結果と $t \neq 0$ の結果の違いとして表現される付加切欠きによる干渉効果は，接着層厚さが大きい $h = 1.0\text{mm}$ の場合より接着層が小さい $h = 0.2\text{mm}$ の場合に，より顕著に生じる．

付加切欠きによる干渉効果が顕著に生じると，外力として与える基準応力 $\sigma_z^\infty = 1.0\text{MPa}$ は一定であるので，界面端部近傍の特異応力の低下に伴い，力のつり合いから試験片内部，特に試験片中心 $r = 6.35\text{mm}$ の応力は大きくなる．例えば， $t = 1.7\text{mm}$ では，基準応力 $\sigma_z^\infty = 1.0\text{MPa}$ に対して，中心での応力は $\sigma_z(r = 6.35\text{mm}) = 1.5\text{MPa}$ 程度まで上昇する．

図 7 は，破断応力 $\sigma_z^\infty = \sigma_c(h)$ 負荷時の界面上の応力分布 $\sigma_{zc}(r)$ を示したものである．**図 7(a)**は接着層厚さ $h = 0.2\text{mm}$ の場合であり，**図 7(b)**は接着層厚さ $h = 1.0\text{mm}$ の場合である．ここで，各切欠き深さにおける破断応力 $\sigma_c(h)$ は，接着層厚さにばらつきがあるため，接着層厚さ $h = 0.2\text{mm}$ および $h = 1.0\text{mm}$ に最も近い実

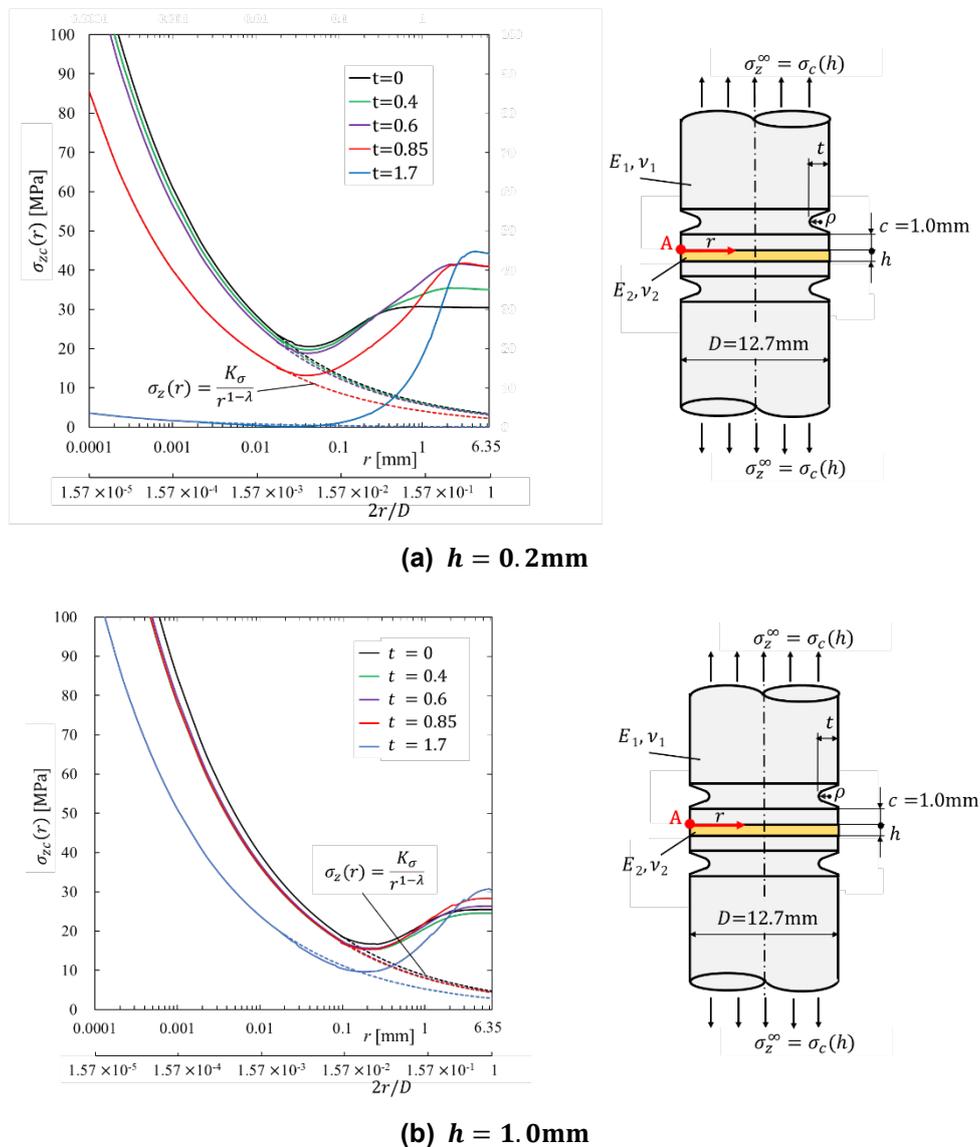


Fig. 7 Critical interface stress distribution $\sigma_{zc}(r)$ along the interface when $\sigma_z^\infty = \sigma_c(h)$ in comparison with the asymptotic critical singular stress $\sigma_{zc}(r) = K_\sigma/r^{1-\lambda}$ expressed as the dotted line

験値を用いた。使用した $\sigma_c(h)$ の値は、**図 4**中に×印で示している。**図 7(a), (b)**の横軸は界面端部から中心までの距離 r と相対距離 $2r/D$ を対数で示している。突合せ継手の破壊は、接着界面端部の表面近傍の傷や欠陥が破壊起点となることが報告されている¹⁶⁾。ここでは、試験片表面から $r = 0.001\text{mm}$ の特異応力と試験片中央 $r = 6.35\text{mm}$ の応力値を比較し、破壊が生じる位置について検討した。

図 7(a)より、 $t = 0$ と $t = 0.4, 0.6\text{mm}$ の切欠き材において、接着層厚さ $h = 0.2\text{mm}$ で破断時の応力分布 $\sigma_{zc}(r)$ が概ね一致していることがわかる。また、 $t = 0, t = 0.4, 0.6\text{mm}$ の場合は、界面端部近傍の応力 $\sigma_{zc}(r = 0.001)$ が試験片中心の応力 $\sigma_{zc}(r = 6.35)$ よりも大きくなっているため $[\sigma_{zc}(r = 0.001) > \sigma_{zc}(r = 6.35)]$ 、破壊は、界面端部から生じていると考えられる。

一方、**図 7(a)**の $t = 0.85, 1.7\text{mm}$ では、破断時の応力分布 $\sigma_{zc}(r)$ は、他の切欠き材の特異応力分布より小さくなっており、中心応力 $\sigma_{zc}(r = 6.35)$ が界面端部の応力 $\sigma_{zc}(r = 0.001)$ より大きくなっている $[\sigma_{zc}(r = 0.001) < \sigma_{zc}(r = 6.35)]$ 。これによって、 $h = 0.2\text{mm}$ の場合、 $t = 0.85, 1.7\text{mm}$ の切欠き材は、破断が丸棒中心 $r = 6.35\text{mm}$ から生じていることが予想される。

図 7(b)の接着層厚さ $h = 1.0\text{mm}$ の場合では、破断時の応力分布 $\sigma_{zc}(r)$ は、 $t = 1.7\text{mm}$ を除けば、概ね一致していることがわかる。表面近傍の応力分布 $\sigma_{zc}(r = 0.001)$ と試験片中心応力分布 $\sigma_{zc}(r = 6.35)$ を比較すると、切欠き深さに関係なく、 $\sigma_{zc}(r = 0.001) > \sigma_{zc}(r = 6.35)$ となっている。そのため、接着層厚さが大きい場合には、界面端部から破壊が生じているものと考えられる。

4.3 $K_{\sigma c}$ による破断強度の推定

図 8は、**図 5**で求めた $K_{\sigma c}$ を用いて予測した破断応力 $\sigma_c(t, h)$ を示している。**図 5**より、 $t = 0.4, 0.6, 0.85\text{mm}$ では界面端部から破壊が生じると考えられるので、 $K_{\sigma c}$ により σ_c の推定が可能である。 $t = 1.7\text{mm}$ では、 $h \leq 0.5\text{mm}$ で $K_{\sigma c}$ は低い値を取っており、 $K_{\sigma c}$ での推定は不可能であるが、 $h > 1.2\text{mm}$ では $K_{\sigma c} = \text{一定}$ なので推定可能である。**図 8**では、 $h < 1.2\text{mm}$ での $t = 1.7\text{mm}$ における $K_{\sigma c} = \text{一定}$ の推定値を破線で示し、中央の応力で破壊を実線で示している。実用的な接着層厚さは $h = 0.1 \sim 0.6\text{mm}$ であるので、切欠き深さ $t < 0.85\text{mm}$ の場合では、切欠き付与によって破断強度は上昇するものと考えられる。

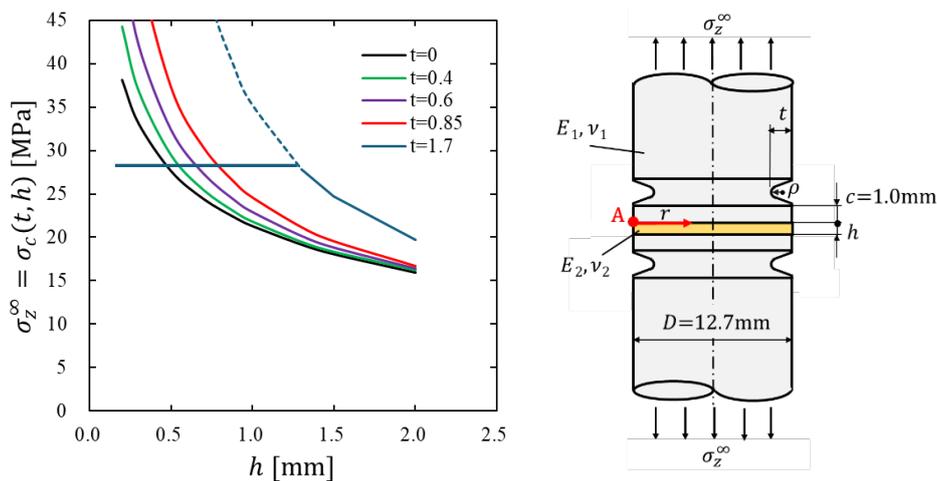


Fig. 8 Critical stress $\sigma_c(t, h)$ due to duplicated interaction of additional notch and from $K_{\sigma c} = 7.96 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0.3295}$

図 9に、**図 8**の $K_{\sigma c} = \text{一定}$ で得られた推定破断応力 $\sigma_c(t, h)$ を、切欠きのない $t = 0$ の破断応力 $\sigma_c(t = 0, h)$ との比を示す。このとき、実用的な接着層厚さ $h = 0.1 \sim 0.6\text{mm}$ の範囲において、 $t = 1.7\text{mm}$ の切欠き材では

K_{σ_c} =一定で評価できないため、除外している。図2に示したように、切欠きのない $t=0$ の場合は、接着端面同士の干渉効果によって、接着層厚さ h が小さくなるほど、荷重一定条件での ISSF は小さくなり、破断応力 $\sigma_c(t=0, h)$ は大きくなる。このように付加切欠きが無い場合にも接着上下面の干渉効果が存在するが、さらに切欠きを付与することにより、付加切欠きによって干渉効果が重複される。このような干渉効果の重複作用によって、接着端面の ISSF はさらに低減される (図3参照)。例えば、接着層厚さ h が施工法や接着面粗さ等によりあまり薄くすることができない場合でも、切欠き付与によって干渉効果を促進することで、破断強度 $\sigma_c(t, h)$ が向上できる可能性がある。このように、 K_{σ_c} =一定で接着強度が評価される範囲では、切欠きを付加することによる接着強度の向上が期待できる。

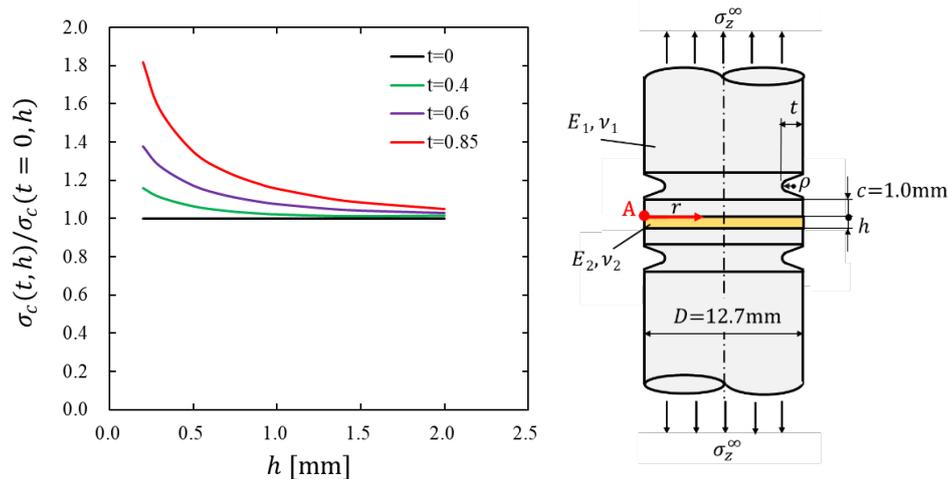


Fig. 9 Improvement of adhesive strength due to the interaction effect of additional notch $\sigma_c(t, h) / \sigma_c(t=0, h)$

5 結言

樹脂と金属との接着接合は、工業分野のみならず様々な場面で使用されているが、最近の研究によって、接着強度が ISSF =一定で表されることが明確になった。接着面形状に注目した接着強度向上に関する研究は、これまでも行われているが、本研究では、接着端面の応力集中の緩和の程度を ISSF に着目することによって、付加切欠きによる干渉効果の重複による接着強度の向上を明確にした。すなわち、付加切欠きが無い通常の継手でも接着上下面の干渉効果があるが、付加切欠きによる重複干渉によって強度向上を促進できることを示した。また、付加切欠きの深さおよび接着層厚さを変化させ界面上の応力分布を解析し、接着面内部の引張応力の変化を考慮した。得られた成果をまとめると以下ようになる。

(1) 付加切欠きを設けることで、界面端部の特異応力場の強さ ISSF を低減することができることを示した。切欠きの干渉効果により、接着層厚さ h が薄いほど、ISSF は小さくなることや、切欠き深さ t が大きくなると、ISSF の低下は大きくなることを明らかにした (図3参照)。

(2) 付加切欠きを有する突合せ継手試験片を作製し、引張破断試験を行った。その結果、切欠きがない場合の接着強度 σ_c に比べて、接着強度が向上すること示した (切欠き深さ $t=0.6, 0.85\text{mm}$, $h \leq 0.3\text{mm}$ のとき)。これは上下の円周切欠きの干渉効果によって端面特異応力場の強さ ISSF が低減されるためである。接着層厚さ $h \geq 0.3\text{mm}$ でも引張強度の多少の向上は見られるが、あまり顕著ではない。これは、上下の付加切欠きの距離が離れるためであると考えられる。

(3)界面端部特異応力場 ISSF で破断時の限界値 K_{sc} を整理したところ、切欠き付き試験片においても K_{sc} = 一定で破断することが示された (図 5 参照). なお、切欠きが深い場合 $t=1.7\text{mm}$ で $h\leq 1.2\text{mm}$ および $t=0.85\text{mm}$ で $h\leq 0.2\text{mm}$ では、 K_{sc} 値は、他の試験結果よりも低い値となった. これは、接着界面端部からではなく、試験片の中央部 ($r=6.35\text{mm}$) から破壊が生じているためと考えられる. 切欠きが深い場合 ($t=1.7\text{mm}$) で接着層厚さが薄い範囲 ($h\leq 0.5\text{mm}$) では、界面上の応力分布を検討したところ、特異場が低く、逆に界面中央部の応力が高くなるため、破壊起点が変わったものと考えられる.

(4) 接着界面近傍に切欠きを付与することにより、切欠き同士の干渉効果によって、接着端部の ISSF はさらに低減される (図 3 参照). すなわち、接着層厚さはあまり薄くすることができなくても、切欠き付与によって干渉効果を促進することで、破断強度が向上できる可能性があることが示唆された.

類似の研究として、界面端部の特異性を消失させる接着角部の幾何学的形状の理論的検討がなされている¹⁾. 本研究の切欠き付与による手法は、接着面形状は変更しなくてもよいという点に特徴があり、実用的で便利な新手法として、種々の接着接合構造の設計に応用可能である. 接着強度は ISSF 一定の条件で表されることから、応力集中の緩和の程度も明確に評価できる.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K0318 の助成を受けた. また、本研究の実験において、鈴木靖昭氏 (鈴木接着研究所)、宮崎達二郎教授 (琉球大学)、高木 怜助教 (日本文理大学) には貴重な助言を賜った. 試験片作成には、岡本直幸氏、川村茉由氏、西野恭輔氏 (大分大学大学院修了生) の協力を得た. 記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 久保司郎, 大路清嗣: 自由縁応力特異性を消失させるための異種材料接合部端の幾何学的条件, 日本機械学会論文 (A 編), 57, 535 (1991), 632.
- 2) 陳玳珩, 西谷弘信: 板状接合試験片における特異応力場の強さ, 日本機械学会論文集 (A 編), 59, 567 (1993), 2682.
- 3) 野田尚昭, 張玉, 高石謙太郎, 蘭欣, 小田和広: 単純重ね合わせ接着継手の特異応力場の強さ, 日本機械学会論文集 (A 編), 78, 789 (2012), 651.
- 4) 野田尚昭, 蘭欣, 道中健吾, 張玉, 小田和広: 任意の材料組み合わせを考慮した縁界面き裂を有する接合半無限板の応力拡大係数, 日本機械学会論文集 (A 編), 76, 770 (2010), 1270.
- 5) 小田和広, 高畑洋介, 野田尚昭, 堤紀子: 接着接合板の端部特異応力場の強さと微小界面縁き裂の応力拡大係数との関係, 日本機械学会論文集, 82, 839 (2016), 15-00557.
- 6) Noda, N.-A. and Matsuo, T.: Singular Integral Equation Method in Optimization of Stress-Relieving Hole: A New Approach Based on the Body Force Method, International Journal of Fracture, 70 (1994), 147.
- 7) Noda, N.-A. and Matsuo, T.: Numerical Solution of Singular Integral Equations in Stress Concentration Problems, International Journal of Solids and Structures, 34, 19 (1997), 2429.
- 8) Achour, T., Bouiadjra, B. B., Ouinas, D. and Kaddouri, K.: Analysis of the Effect of Notch-Inclusion Interaction in a Plate under Tensile Load, Computational Materials Science, 39 (2007), 495.
- 9) Ouinas, D., Hebbar, A., Bachir Bouiadjra, B., Benderdouche, N. and Serier, B.: Interaction Effect Crack-Interfacial Crack using Finite Element Method, Materials and Design, 31 (2010), 375.

- 10) 中野博子, 関口泰久, 沢俊行: 静的引張り荷重を受ける同種材料被着体によるスカーフ接着継手の三次元有限要素法応力解析と強度について, 日本接着学会誌, 49, 3 (2013), 82.
- 11) 答島一成, 関口泰久, 上田悠太, 小林隆志, 沢俊行: 引張り荷重を受ける中実円柱段付き重ね合わせ接着継手の応力解析と強度推定, 日本接着学会誌, 48, 9 (2012), 314.
- 12) 森きよみ, 杉森俊雄: 段付き重ね合わせ接着継手の段数が応力分布と最終破断強度に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 55, 519 (1989), 2211.
- 13) 志村穰, 秋山和徹, 黒崎茂: 波型突き合わせ接着継手の引張強度特性, 材料試験技術, 54, 3 (2009), 183.
- 14) 宮崎達二郎, 野田尚昭, 王 澤鋒, 佐野義一: 異種材料接合丸棒の特異応力場の強さの解析と異種材料接合板との比較について, 日本機械学会論文集, 81, 829 (2015), 15-00210.
- 15) Noda, N.-A., Ren, F., Takaki, R., Wang, Z., Oda, K., Miyazaki, T. and Sano, Y.: 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 and Adhesives, 85 (2018), 234.
- 16) Noda, N.-A., Miyazaki, T., Li, R., Uchikoba, T., Sano, Y. and Takase, Y.: Debonding Strength Evaluation in Terms of the Intensity of Singular Stress at the Interface Corner with and without Fictitious Crack, International Journal of Adhesion and Adhesives, 61 (2015), 46.
- 17) JIS K6849-1994: 接着剤の引張り接着強さ試験方法, 日本産業規格.
- 18) Takaki, R., Noda, N.-A., Suzuki, Y., Sano, Y., Hirata, K. and Ito, F.: Cohesive Failure Verification and Fracture Origin Identification when the Adhesive Strength is Expressed as a Constant ISSF, International Journal of Adhesion and Adhesives, 116 (2022) 103148.
- 19) 鈴木靖昭: 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), 日本機械学会論文集 (A 編), 50, 451 (1984), 526.
- 20) 鈴木靖昭: 鋼のスカーフおよびバット継手の引張接着強度 (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 (A 編), 53, 487 (1987), 514.