

接着接合板における接着層厚さが特異応力の強さに与える影響*

張 玉^{*1}, 野田尚昭^{*2}, 高石謙太郎^{*3}, 蘭 欣^{*4}

Effect of Adhesive Thickness on the Interface of Singular Stress at the Adhesive Dissimilar Joint

Yu ZHANG, Nao-Aki NODA ^{*2}, Ken-Taro TAKAISHI and Xin LAN^{*2} Department of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

This paper deals with the singular stress field at the adhesive dissimilar joint, and discusses the effect of material combination and adhesive thickness on the intensity of the singular stress when bonded strip is subjected to tension. A useful method to calculate the intensity of singular stress at the adhesive dissimilar joint is presented with focusing on the stresses at the edge calculated by finite element method. The intensities of singular stress are indicated in charts with varying adhesive thickness t under arbitrary material combinations for adhesive and adherents, and it is found that the intensity of singular stress increases with increasing the adhesive thickness t until $t=W$, when W is the width of adhesive. The intensity of singular stresses are also charted under arbitrary material combinations which are presented by Dundurs' parameters α, β when $t/W=0.001$ and $t/W=0.1$, and it is found that for a fixed value β the intensity of singular stress increases with increasing α when α is small while it decreases with increasing α when α is large.

Key Words : Elasticity, Fracture Mechanics, Finite Element Method, Intensity of Singular Stress, Adhesive

1. 緒 言

工業の多くの分野で接着剤による接合が頻繁に使用されている。その応用範囲は広く、自動車産業や造船業や航空業など様々な産業で使用されている。また、接着剤による接合は、今日では複合材料を用いた歯の治療にもよく利用されている^{(1), (2)}。そのような歯の治療における、複合材料の接着剤による接合の有効性を評価するため、図1のような微小試験片に引張りを与える実験が行われている⁽³⁾。この試験はつき合わせ接合強度試験の小型化版とみなすことができ、その試験片の縦断面は図2のような長方形断面である。

しかしながら、ある種の材料組合せにおいては、異種材料界面の接合端部で特異応力が発生することがあり、それは構造物の接合部の損傷へとつながる。この損傷を生じる厳しさの評価は特異応力場の強さによって表現される。今まで、様々な実験によって接着部の強度は評価されてきたが^{(4), (5)}、図1のような接着剤と被接着剤からなる微小接合試験片に引張りを負荷した場合の応力分布に関する研究は少ない。また、特に、そのような微小試験片⁽⁶⁾の接着剤の接合端部での特異応力場の強さに注目し、その強さを議論した研究は見当たらない。従って、これまでに行われた実験結果より、接着層厚さが大きくなると接合強度は下がることがわかっている⁽⁷⁾けれども、その理由をはっきりとは説明されていない。

* 原稿受付 2010年11月12日, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.10(2010), pp.1467-1479
(原稿受付 2010年4月22日)

^{*1} 正員, 九州工業大学大学院工学研究科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

^{*2} 正員, 九州工業大学工学研究院

^{*3} 九州工業大学大学院工学研究科

^{*4} 学生員, 九州工業大学大学院工学研究科
E-mail: noda@mech.kyutech.ac.jp



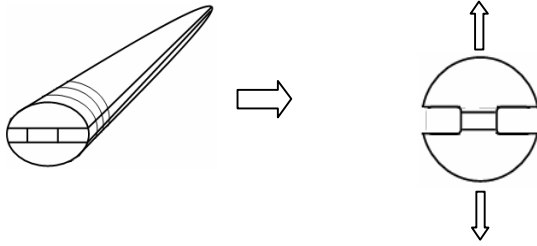


Fig.1 Micro-tensile bond test

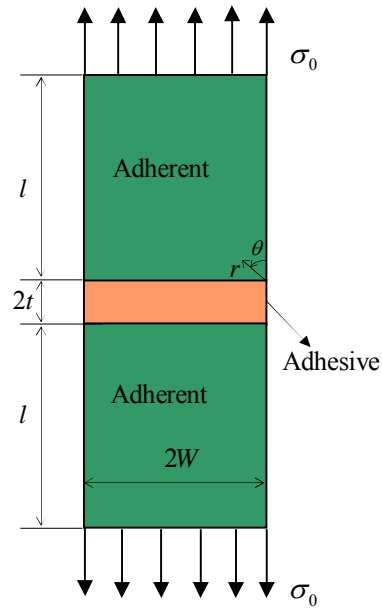


Fig.2 Adhesive joint

2. 解析方法

図2に示すような接着剤により接合された接合板の問題を考える．この界面の応力 σ_{ij} ($ij = rr, \theta\theta, r\theta$) は接合端部で無限大となる．すなわち $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ のとき $\sigma_{ij} \propto 1/r^{1-\lambda}$ の特異性を示す．ここで， α ， β は Dundurs' の複合材料パラメーターでありポアソン比 ν と横弾性係数 G により表せる．また， $\theta = \pi/2$ のとき接合界面における特異応力 λ は式(1)により求められる^{(8), (9)}．表1に式(1)により得られる λ の値を示す．表より $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ のとき $\lambda < 1$ となり， $\alpha(\alpha - 2\beta) = 0$ のとき $\lambda = 1$ となり， $\alpha(\alpha - 2\beta) < 0$ のとき $\lambda > 1$ となることがわかる．

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

$$\alpha = \frac{G_1(\kappa_2 + 1) - G_2(\kappa_1 + 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)} \quad \beta = \frac{G_1(\kappa_2 - 1) - G_2(\kappa_1 - 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)} \quad (2)$$

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

接着剤による接合端部の特異応力場の強さ K_σ は，

$$K_\sigma = \lim_{r \rightarrow 0} \left[r^{1-\lambda} \times \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}(r) \right] \quad (4)$$

と表され，これを無次元化特異応力場の強さ F_σ とし次式により定義する．

$$F_\sigma = \frac{K_\sigma}{\sigma_0(2W)^{1-\lambda}} = \frac{\lim_{r \rightarrow 0} [r^{1-\lambda} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}(r)]}{\sigma_0(2W)^{1-\lambda}} \quad (5)$$

ここで σ_0 は遠方における y 方向応力である．

Table 1 Values of singular index λ
 [Red figures indicate $\lambda < 1$, blue figures indicate $\lambda > 1$, black figures indicate $\lambda = 1$]

α	$\beta=-0.45$	$\beta=-0.4$	$\beta=-0.3$	$\beta=-0.2$	$\beta=-0.1$	$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	$\beta=0.3$	$\beta=0.4$	$\beta=0.45$
-1.00	0.87624	0.8073	0.7205	0.6646	0.6247	0.5946					
-0.95	0.9349	0.8536	0.7576	0.6975	0.6550	0.6232					
-0.90	1.00000	0.9008	0.7941	0.7295	0.6845	0.6511					
-0.80		1.0000	0.8655	0.7916	0.7415	0.7048					
-0.70		1.1174	0.9348	0.8510	0.7961	0.7564					
-0.60			1.0000	0.9071	0.8480	0.8060	0.7746				
-0.50			1.0558	0.9580	0.8966	0.8532	0.8210				
-0.40			1.0913	1.0000	0.9403	0.8974	0.8655				
-0.30			1.0964	1.0276	0.9761	0.9371	0.9075				
-0.20			1.0756	1.0360	1.0000	0.9699	0.9457	0.9269			
-0.10				1.0251	1.0083	0.9921	0.9777	0.9659			
0.00				1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000			
0.10				0.9659	0.9777	0.9921	1.0083	1.0251			
0.20				0.9269	0.9457	0.9699	1.0000	1.0360	1.0756		
0.30					0.9075	0.9371	0.9761	1.0276	1.0964		
0.40					0.8655	0.8974	0.9403	1.0000	1.0913		
0.50					0.8210	0.8532	0.8966	0.9580	1.0558		
0.60					0.7746	0.8060	0.8480	0.9071	1.0000		
0.70						0.7564	0.7961	0.8510	0.9348	1.1174	
0.80						0.7048	0.7415	0.7916	0.8655	1.0000	
0.90						0.6511	0.6845	0.7295	0.7941	0.9008	1.0000
0.95						0.6232	0.6550	0.6975	0.7576	0.8536	0.9349
1.00						0.5946	0.6247	0.6646	0.7205	0.8073	0.8762

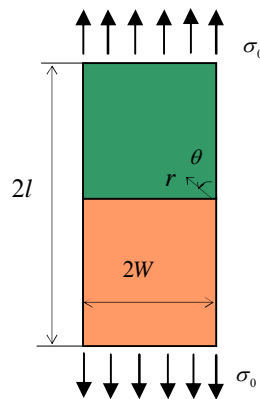


Fig.3 Bonded strip

本論文では有限要素法を用いて接合界面の応力を求める．対称性を考慮して図2の1/4モデルを用いて解析を行う．被接着剤のヤング率とポアソン比を E_1, ν_1 とし，接着剤のヤング率とポアソン比を E_2, ν_2 とする．モデルの幅を $2W=2000\text{mm}$ とし， $l \geq 2W$ の場合は界面において同じ応力を示すことが確認されたので， $l = 2W$ とする．この条件下で接着層厚さ t/W を 0.001, 0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 4 と変化させて解析を行う．

まず，有限要素法を用いた特異応力場の強さの計算方法を提案する．ここでは特異応力場の強さの比 K_σ^1 / K_σ^2 に注目する．ここで，比 K_σ^1 / K_σ^2 に注目する理由は，後述するように，この比を求める方が K_σ を直接求めるより解析が容易となるからである．また，添え字の 1, 2 は異なる t/W の結果であることを意味している．式(5)に示すように無次元化した特異応力場の強さ F_σ は，距離 r ，特異指数 λ ，応力 σ_0 ，幅 W ， $\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}$ の極限に関連する．異なる接着層厚さ t_1, t_2 の問題を，それぞれ問題1，問題2とし，両者に無限遠で同じ大きさの応力 $\sigma_y = \sigma_0$ を負荷し同じ材料組合せで考察する．従って，問題1と問題2で， $\lambda_1 = \lambda_2$ である．よって，式(6)に示すように特異応力場の強さの比 K_σ^1 / K_σ^2 は，応力の比 $\lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1 / \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2)$ によってのみ決まる．

$$\frac{K_{\sigma}^1}{K_{\sigma}^2} = \frac{\sigma_0^1 (2W)^{1-\lambda_1} F_{\sigma}^1}{\sigma_0^2 (2W)^{1-\lambda_2} F_{\sigma}^2} = \frac{F_{\sigma}^1}{F_{\sigma}^2} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\left[r^{1-\lambda_1} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1(r) \right]}{\left[r^{1-\lambda_2} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2(r) \right]} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1(r)}{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2(r)} \quad (6)$$

本解析では主に特異応力の強さの比を考慮し解析する．そして，応力の比から特異応力の強さを得るために，図3の解を基準問題として使用する．

3. 有限要素法により得られる界面の応力分布とその比

まず図4に $t/W = 1$ のときの $\alpha = 0.8, \beta = 0.1$, $\alpha = 0.9, \beta = 0.3$, $\alpha = 0.3, \beta = 0$, $\alpha = 0.2, \beta = 0.1$, $\alpha = 0.2, \beta = 0.2$ の場合の接着剤と被接着剤の間の界面における応力分布を示す． $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ のときは界面での応力は α, β の値によらず無限大になり， $\alpha(\alpha - 2\beta) = 0$ のときは一定となり， $\alpha(\alpha - 2\beta) < 0$ のときは0となることがわかる．有限要素法では，通常接着剤と被接着剤の界面の応力は一致しないので，本解析では接着剤と被接着剤の結果から外挿し，その平均値を用いることによって界面に沿っての応力分布を求める．

接着層厚さが特異応力場の強さに与える影響を理解するため，接着層厚さを変化させた場合の応力分布を考察する．図5(a)に $\alpha = 0.3, \beta = 0$ の場合における接着層厚さ t/W を 0.001, 0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 4 と変化させて界面の応力分布を示す．また，その詳細を図5(b)に界面の端部における特異応力分布を拡大して示す．接着層厚さが増加すると特異応力を示す領域がかなり増加することがわかる．また $t/W = 1, 2, 4$ の場合，ほとんど同じ応力分布を示す．界面端部における応力分布を詳しく理解するため，接着層厚さを変化させたときの応力の比を図5(c)に示す．図5(c)より応力は急激に増加することがわかる．ただし，真の応力は $r \rightarrow 0$ で無限大となるが，有限要素法では特異応力を正確に表すことができない．しかしここで注目すべきことは，異なる t/W の応力分布の線が r/W に沿ってほぼ平行となっていることである．

図6に示すように， $W = 1000mm$ の場合，最小メッシュサイズとして $1/3^8 = 1/6561$ を用いると，接着剤接合端部付近の応力分布の比 $\sigma_y / \sigma_{y|_{r/W=1}}$ は一定となることがわかる．有限要素法により端部の特異性を正確に示すのは困難であるけれども，図6のように特異性を示す領域においても $\sigma_y / \sigma_{y|_{r/W=1}}$ の比については正確に求めることができる．

より詳しく検討するため，最小メッシュサイズ $1/3^8 = 1/6561$ で有限要素法を用いて得られた結果の比と応力分布を表2(a)で比較する．表2(a)より応力の比は r に依存せず4桁一致していることがわかる．表2(b)は最小メッシュサイズ $1/3^4 = 1/81mm$ での結果である．この場合， r に依存せず3桁一致していることがわかる．また，表2(a),(b)の比は，互いに3桁まで一致している．応力の値はメッシュサイズに大きく依存するので，有限要素法を用いて特異応力を表現することは容易ではないが，表2より応力の比は正確に求められることがわかる．言い換えると，界面の応力の比はメッシュサイズに依存しないことがわかる．

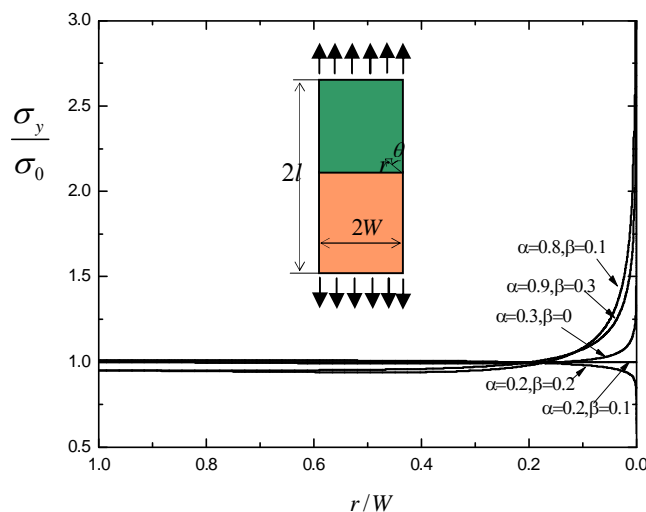


Fig.4 The stress distribution on the interface with different material combination.

2章より, r に沿って K_σ^1/K_σ^2 の比と σ_y^1/σ_y^2 の比は一致し, 表2に示す σ_y^1/σ_y^2 の値は r に依存しないため異種材料接合端部における応力のみを考慮する.

以下は基準問題の特異応力の強さ K_σ^2 , 未知問題の特異応力の強さ K_σ^1 として, K_σ^1/K_σ^2 の値について議論する.

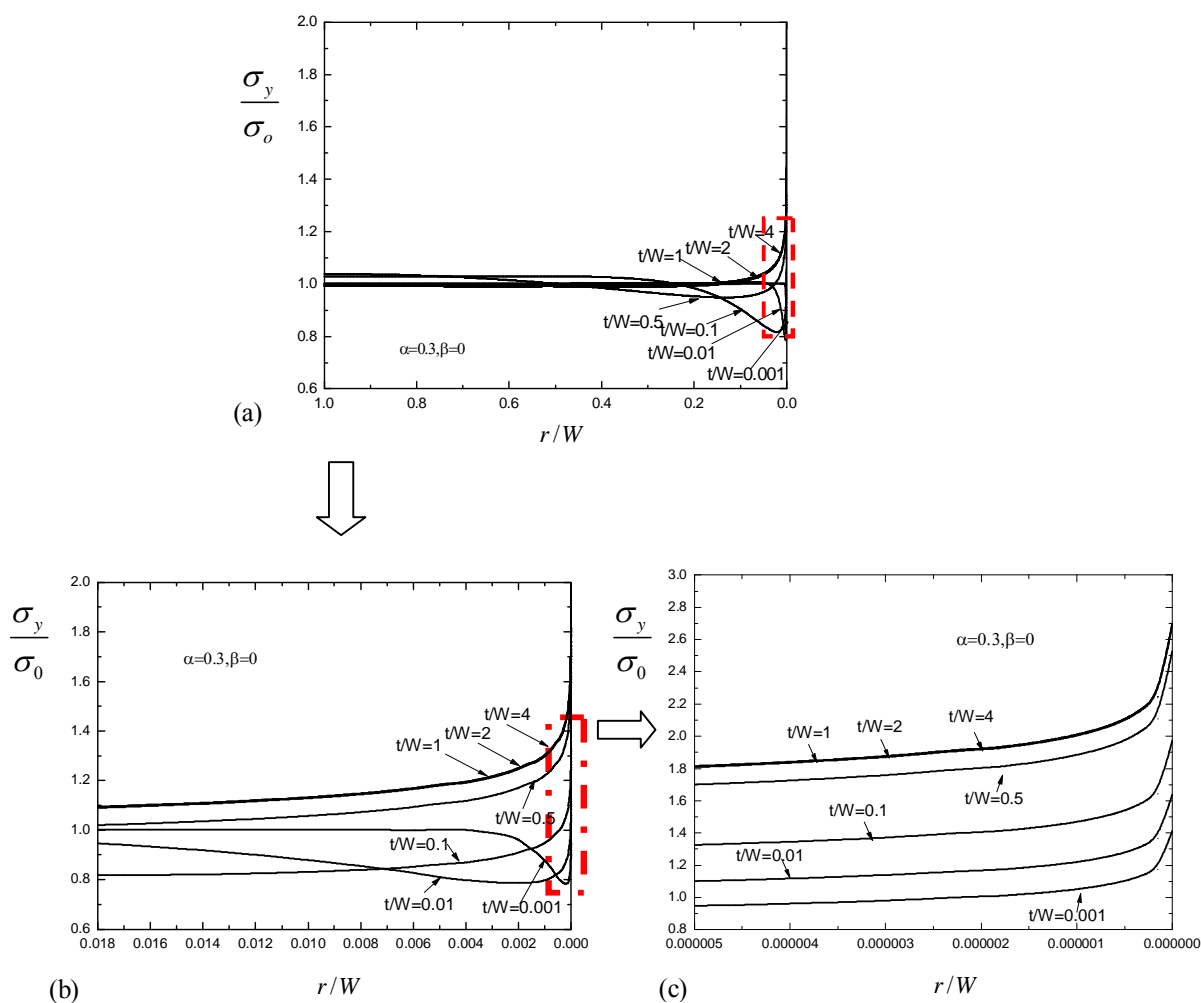


Fig.5 Stress distribution σ_y on the interface with different adhesive thickness.

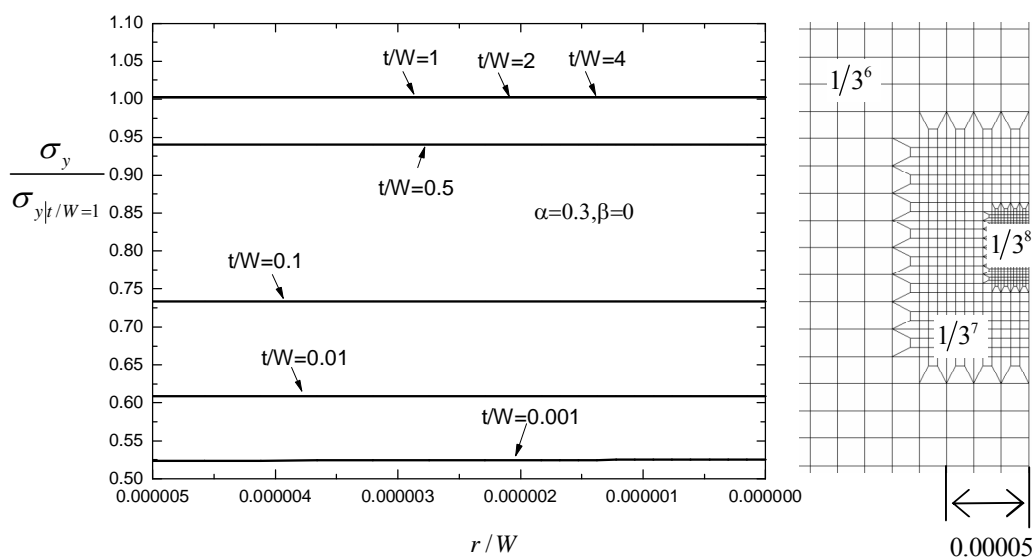


Fig. 6 Ratio of $\sigma_y^1/\sigma_y^1|_{t/W=1}$ near the edge of adhesive joint.

Table 2 Stress distribution σ_y along the interface when $\alpha = 0.3, \beta = 0$. The ratio of stress distributions $\sigma_y / \sigma_{y/t/W=1}$ are indicated in parentheses.

(a) σ_y and $(\sigma_y / \sigma_{y/t/W=1})$ obtained with the smallest mesh size $1/3^8 = 1/6561mm$ and $W = 1000mm$

t/W \ r/W	0.001	0.01	0.1	0.5	1	2	4
$\rightarrow 0$	1.414(0.525)	1.640(0.609)	1.973(0.733)	2.530(0.940)	2.692(1.000)	2.700(1.003)	2.670(1.003)
1/6561000	1.177(0.525)	1.365(0.609)	1.644(0.733)	2.108(0.940)	2.242(1.000)	2.249(1.003)	2.249(1.003)
2/6561000	1.138(0.525)	1.320(0.609)	1.589(0.733)	2.038(0.940)	2.167(1.000)	2.174(1.003)	2.174(1.003)
3/6561000	1.109(0.525)	1.286(0.609)	1.548(0.733)	1.985(0.940)	2.111(1.000)	2.118(1.003)	2.117(1.003)
4/6561000	1.088(0.525)	1.262(0.609)	1.519(0.733)	1.948(0.940)	2.072(1.000)	2.078(1.003)	2.078(1.003)
5/6561000	1.071(0.525)	1.243(0.609)	1.497(0.733)	1.919(0.940)	2.041(1.000)	2.047(1.003)	2.047(1.003)
6/6561000	1.058(0.525)	1.228(0.609)	1.478(0.733)	1.896(0.940)	2.016(1.000)	2.022(1.003)	2.022(1.003)
7/6561000	1.047(0.525)	1.215(0.609)	1.463(0.733)	1.876(0.940)	1.995(1.000)	2.002(1.003)	2.001(1.003)
8/6561000	1.038(0.525)	1.205(0.609)	1.450(0.733)	1.859(0.940)	1.978(1.000)	1.984(1.003)	1.984(1.003)
9/6561000	1.030(0.525)	1.195(0.609)	1.439(0.733)	1.845(0.940)	1.962(1.000)	1.968(1.003)	1.968(1.003)

(b) σ_y and $(\sigma_y / \sigma_{y/t/W=1})$ obtained with the smallest mesh size $1/3^4 = 1/81mm$ and $W = 1000mm$

t/W \ r/W	0.001	0.01	0.1	0.5	1	2	4
$\rightarrow 0$	1.072(0.524)	1.246(0.609)	1.499(0.733)	1.923(0.940)	2.045(1.000)	2.051(1.003)	2.051(1.003)
1/81000	0.889(0.522)	1.036(0.609)	1.249(0.733)	1.601(0.940)	1.703(1.000)	1.708(1.003)	1.708(1.003)
2/81000	0.859(0.522)	1.001(0.608)	1.207(0.733)	1.548(0.940)	1.647(1.000)	1.652(1.003)	1.652(1.003)
3/81000	0.838(0.522)	0.975(0.608)	1.176(0.733)	1.508(0.940)	1.604(1.000)	1.609(1.003)	1.608(1.003)
4/81000	0.824(0.523)	0.956(0.608)	1.154(0.733)	1.480(0.940)	1.574(1.000)	1.579(1.003)	1.579(1.003)
5/81000	0.813(0.525)	0.942(0.607)	1.137(0.733)	1.458(0.940)	1.551(1.000)	1.555(1.003)	1.555(1.003)
6/81000	0.806(0.526)	0.930(0.607)	1.123(0.733)	1.440(0.940)	1.532(1.000)	1.536(1.003)	1.536(1.003)
7/81000	0.800(0.528)	0.920(0.607)	1.111(0.733)	1.425(0.940)	1.516(1.000)	1.521(1.003)	1.520(1.003)
8/81000	0.795(0.529)	0.912(0.607)	1.092(0.733)	1.403(0.940)	1.502(1.000)	1.507(1.003)	1.507(1.003)
9/81000	0.792(0.531)	0.904(0.607)	1.084(0.733)	1.401(0.940)	1.491(1.000)	1.495(1.003)	1.495(1.003)

4. 板状接合試験片の特異応力の強さの解 [基準解]

第3章より、有限要素法を用いて界面における応力分布の比が精度よく求められることがわかった。しかし特異応力の強さを得るためには、基準となる解が必要である。陳・西谷⁽¹⁰⁾や野田⁽¹¹⁾らは図3のような板状接合試験片の特異応力の強さについて、体積力法を用いて精度よく解析した。表3と図7は、 $t/W \geq 1$ の場合と同じ板状接合試験片の結果である。過去の研究^{(10), (11)}では、 $\lambda < 1$ の範囲だけが解析され特異応力が求められた⁽¹¹⁾が、本研究では全ての材料組合せについて新たに解析し、表3と図7に示す。従って、図7には特異指数 $\lambda > 1$ の特異応力がない $F_\sigma > 1$ となる範囲もあわせて示した。新たに解析した範囲は、特異性がないため有限要素法により容易に解析できる。しかしながら、図7の破線の範囲の材料組合せに対して、現在使用している有限要素法コードで計算を実行することができない。このため、破線の範囲は計算可能な範囲から外そうして求めた。表3と図7の基準解を用いれば接着層厚さが異なる接合板の問題の特異応力の強さは $F_\sigma / F_{\sigma/t/W=1}$ の比より求められる。

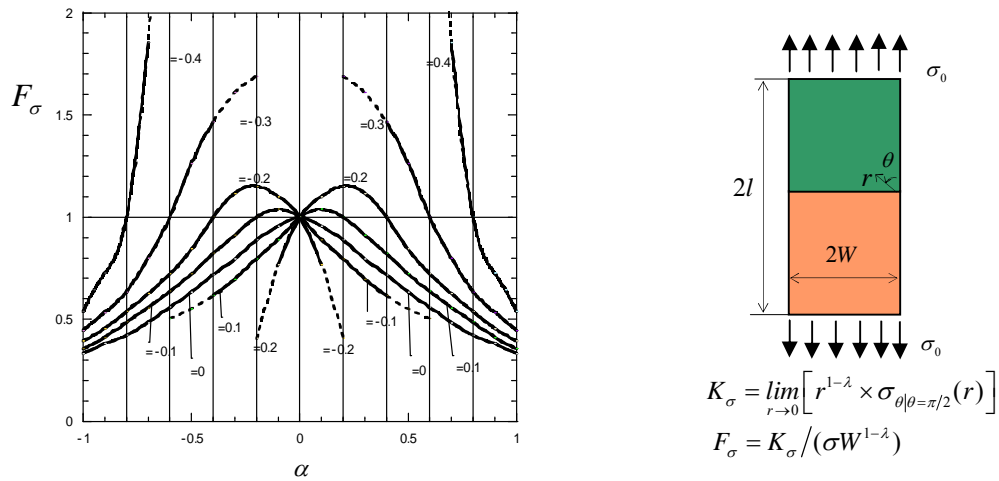


Fig.7 F_σ for a bonded strip in Fig.3 (Note that $F_\sigma = 1$ when $\alpha(\alpha - 2\beta) = 0$)

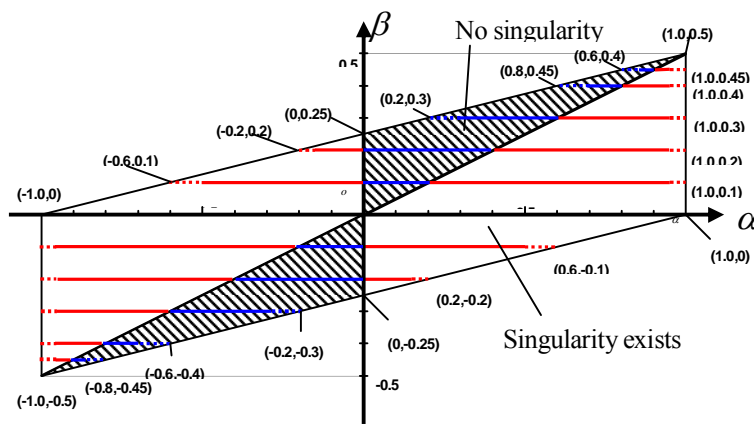


Fig.8 The map of α and β

Table 3 F_σ at interface edge point in bonded finite plate

[(): Extrapolated or interpolated results. Red figures indicate $\lambda < 1$, blue figures indicate $\lambda > 1$, black figures indicate $\lambda = 1$]

	=-0.4	=-0.3	=-0.2	=-0.1	=0	=0.1	=0.2	=0.3	=0.4
-1.00	0.540	0.446	0.395	0.357	0.332	--	--	--	--
-0.95	0.643	(0.349)	(0.381)	(0.422)	(0.491)	--	--	--	--
-0.90	0.726	0.534	0.456	0.412	0.381	--	--	--	--
-0.80	1.000	0.636	0.538	0.487	0.45	--	--	--	--
-0.70	(1.855)	0.800	0.626	0.558	0.486	--	--	--	--
-0.60	(3.291)	1.000	0.724	0.638	0.559	(0.505)	--	--	--
-0.50	--	1.264	0.842	0.722	0.635	(0.551)	--	--	--
-0.40	--	1.467	1.000	0.822	0.718	0.615	--	--	--
-0.30	--	(1.609)	1.118	0.913	0.796	0.697	--	--	--
-0.20	--	(1.690)	1.153	1.000	0.889	0.797	(0.404)	--	--
-0.10	--	--	1.103	1.037	0.955	0.890	0.767	--	--
0.00	--	--	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	--	--
0.10	--	--	0.767	0.890	0.955	1.037	1.103	--	--
0.20	--	--	(0.404)	0.797	0.889	1.000	1.153	(1.690)	--
0.30	--	--	--	0.697	0.796	0.913	1.118	(1.609)	--
0.40	--	--	--	0.615	0.718	0.822	1.000	1.467	--
0.50	--	--	--	(0.551)	0.635	0.722	0.842	1.264	--
0.60	--	--	--	(0.505)	0.559	0.638	0.724	1.000	(3.291)
0.70	--	--	--	--	0.486	0.558	0.626	0.800	1.855
0.80	--	--	--	--	0.450	0.487	0.538	0.636	1.000
0.90	--	--	--	--	0.381	0.412	0.456	0.534	0.726
0.95	--	--	--	--	(0.491)	(0.422)	(0.381)	(0.349)	0.643
1.00	--	--	--	--	0.332	0.357	0.395	0.446	0.540

5. 解析結果および考察

5.1 材料組合せが一般化応力拡大係数に与える影響

式(6)に示すように、 F_σ^1/F_σ^2 の比と σ_y^1/σ_y^2 の比は等しいことが示された。界面に沿って σ_y^1/σ_y^2 は一定であるので、界面端部付近の $\sigma_y/\sigma_{y|t/W=1}$ の比を計算することによって全ての材料組合せの $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の比を求めることができる。図8に本解析で使用した材料組合せの α β 線図を示す。

図9に(a) $t/W = 0.001$ と(b) $t/W = 0.1$ の場合の $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の値を、 α と β を変化させて示す。また、表4に数値を示す。図より α が小さいとき、 α が増加すると $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の比は増加する。一方、 α が大きいときは α が増加すると $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の比は減少する。(a) $t/W = 0.001$ と(b) $t/W = 0.1$ の結果を比較すると、 $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の存在範囲が異なることがわかる。すなわち、 $t/W = 0.001$ のときの $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の値は0.025~2.857と、広い範囲に分布し、 $t/W = 0.1$ のときは0.185~1.498と、狭い範囲に分布していることがわかる。

表4の $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の比と表3の $F_{\sigma|t/W=1}$ の結果を利用して、図10に示すように $t/W = 0.001$ と $t/W = 0.1$ の F_σ の値が得られる。

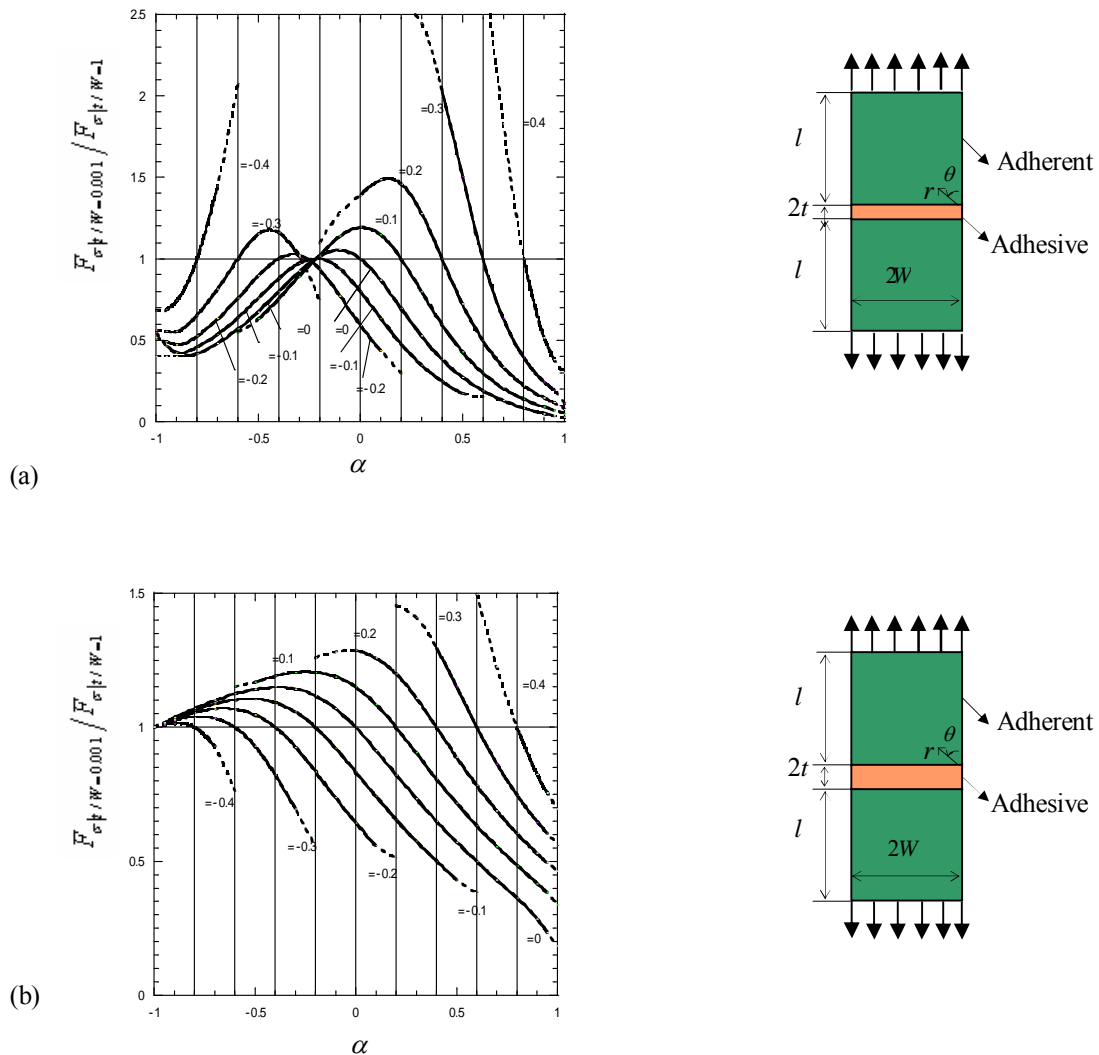


Fig.9 $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ with varying α and β when (a) $t/W = 0.001$; (b) $t/W = 0.1$

Table 4 $F_{\sigma}/F_{\sigma|t/W=1}$ with varying α and β when (a) $t/W = 0.001$; (b) $t/W = 0.1$

(a) $t/W = 0.001$ (Note that $F_{\sigma}/F_{\sigma|t/W=1} = 1$ when $\alpha = 2\beta$)

[(): Extrapolated or interpolated results. Red figures indicate $\lambda < 1$, blue figures indicate $\lambda > 1$, black figures indicate $\lambda = 1$]

	=-0.4	=-0.3	=-0.2	=-0.1	=0	=0.1	=0.2	=0.3	=0.4
-1.0	(0.682)	(0.566)	(0.517)	(0.552)	(0.400)	--	--	--	--
-0.95	0.6864	0.5554	0.4957	0.4629	(0.400)	--	--	--	--
-0.9	0.7420	0.5533	0.4722	0.4252	0.4004	--	--	--	--
-0.8	1.0000	0.6535	0.5254	0.4587	0.4190	--	--	--	--
-0.7	1.4465	0.8130	0.6289	0.5356	0.4812	--	--	--	--
-0.6	(2.073)	1.0000	0.7579	0.6390	0.5690	(0.550)	--	--	--
-0.5	--	1.1509	0.8952	0.7587	0.6769	0.6297	--	--	--
-0.4	--	1.1613	1.0000	0.8794	0.7988	0.7530	--	--	--
-0.3	--	1.0165	1.0232	0.9725	0.9205	0.8924	--	--	--
-0.2	--	(0.750)	0.9346	1.0000	1.0169	1.0203	(1.100)	--	--
-0.1	--	--	0.7716	0.9372	1.0526	1.1374	(1.280)	--	--
0	--	--	0.5912	0.7994	1.0000	1.1925	1.3925	--	--
0.1	--	--	0.4363	0.6331	0.8665	1.1473	1.4837	--	--
0.2	--	--	(0.300)	0.4768	0.6938	1.0000	1.4608	(2.524)	--
0.3	--	--	--	0.3477	0.5253	0.7974	1.2786	(2.443)	--
0.4	--	--	--	0.2478	0.3834	0.5962	1.0000	2.0311	--
0.5	--	--	--	0.1728	0.2729	0.4281	0.7223	1.5100	--
0.6	--	--	--	(0.150)	0.1904	0.2996	0.4984	1.0000	(2.857)
0.7	--	--	--	--	0.1297	0.2058	0.3355	0.6323	(1.825)
0.8	--	--	--	--	0.0852	0.1388	0.2224	0.3942	1.0000
0.9	--	--	--	--	0.0511	0.0913	0.1456	0.2448	0.5173
0.95	--	--	--	--	0.0348	0.0725	0.1172	0.1930	0.3806
1.0	--	--	--	--	(0.025)	(0.050)	(0.080)	(0.110)	(0.300)

(b) $t/W = 0.1$ (Note that $F_{\sigma}/F_{\sigma|t/W=1} = 1$ when $\alpha = 2\beta$)

[(): Extrapolated or interpolated results. Red figures indicate $\lambda < 1$, blue figures indicate $\lambda > 1$, black figures indicate $\lambda = 1$]

	=-0.4	=-0.3	=-0.2	=-0.1	=0	=0.1	=0.2	=0.3	=0.4
-1.0	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)	(1.000)	--	--	--	--
-0.95	1.0099	1.0143	1.0164	1.0177	(1.018)	--	--	--	--
-0.9	1.0144	1.0260	1.0312	1.0342	1.0365	--	--	--	--
-0.8	1.0000	1.0390	1.0548	1.0637	1.0698	--	--	--	--
-0.7	0.9275	1.0333	1.0681	1.0870	1.0993	--	--	--	--
-0.6	(0.764)	1.0000	1.0671	1.1018	1.1239	(1.150)	--	--	--
-0.5	--	0.9298	1.0462	1.1048	1.1415	1.1686	--	--	--
-0.4	--	0.8228	1.0000	1.0916	1.1491	1.1910	--	--	--
-0.3	--	0.6943	0.9269	1.0575	1.1426	1.2051	--	--	--
-0.2	--	(0.552)	0.8345	1.0000	1.1175	1.2051	(1.260)	--	--
-0.1	--	--	0.7361	0.9219	1.0698	1.1890	(1.280)	--	--
0	--	--	0.6433	0.8324	1.0000	1.1501	1.2864	--	--
0.1	--	--	0.5579	0.7413	0.9144	1.0856	1.2580	--	--
0.2	--	--	(0.513)	0.6548	0.8229	1.0000	1.1994	(1.453)	--
0.3	--	--	--	0.5748	0.7332	0.9037	1.1092	(1.409)	--
0.4	--	--	--	0.5007	0.6492	0.8071	1.0000	1.2962	--
0.5	--	--	--	0.4307	0.5715	0.7160	0.8879	1.1518	--
0.6	--	--	--	(0.382)	0.4994	0.6324	0.7828	1.0000	(1.498)
0.7	--	--	--	--	0.4309	0.5561	0.6882	0.8635	(1.224)
0.8	--	--	--	--	0.3625	0.4855	0.6040	0.7467	1.0000
0.9	--	--	--	--	0.2851	0.4180	0.5291	0.6479	0.8241
0.95	--	--	--	--	0.2329	0.3836	0.4947	0.6046	0.7544
1.0	--	--	--	--	(0.185)	(0.339)	(0.463)	(0.560)	(0.697)

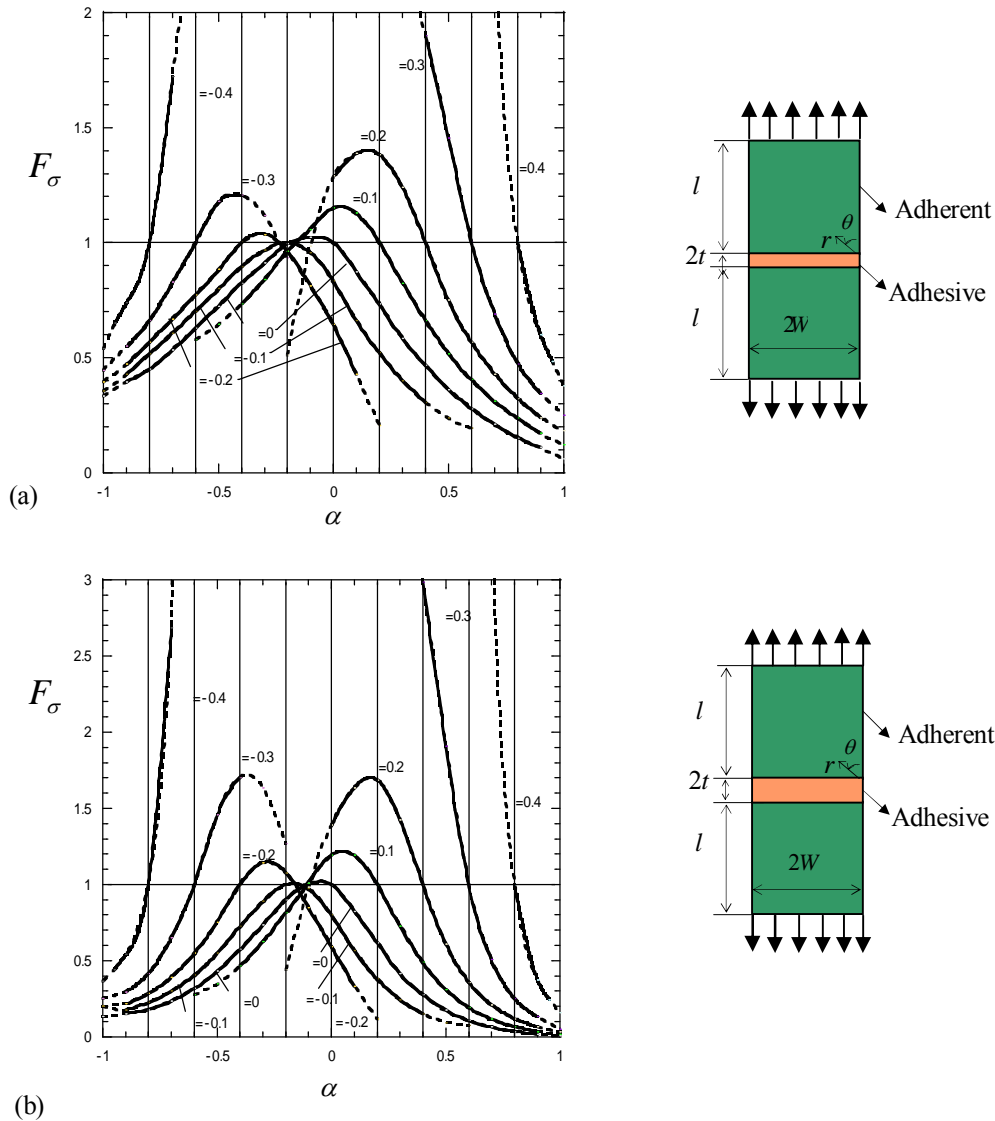


Fig.10 F_σ with varying material combination β when (a) $t/W = 0.001$; (b) $t/W = 0.1$

5・2 接着層厚さが特異応力場の強さに与える影響

接着層厚さが特異応力の強さに与える影響を調べるために、まず被接着剤としてステンレス SUS304 とアルミニウム合金 A7075 とシリコンと IC 基板の FR-4.5⁽¹²⁾ を考える。また、接着剤は樹脂とする。表 5 に接着剤と被接着剤の物性値を示す。表 6 に $t/W = 0.001, 0.01, 0.1, 0.5, 2, 4$ における界面の $K_\sigma/K_{\sigma|t/W=1}$ の比を示す。表 6 をグラフにしたのが図 11 である。 $t/W < 1$ の範囲では t/W が増加すると $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の値も増加し、 $t/W > 1$ の範囲ではどの材料組合せでも $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の値は 1.0 となる。

一般的に接着剤のヤング率 E_2 は被接着剤のヤング率 E_1 より小さく ($E_2 \leq E_1$)、接着剤のポアソン比 ν_2 は、被接着剤のポアソン比 ν_1 より大きい ($\nu_2 \geq \nu_1$)。この場合は $\alpha \geq 0$ かつ $\alpha - 2\beta \geq 0$ であるので、界面端部付近において特異応力が発生する。表 4 の値から様々な t/W に対して $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ を両対数グラフに整理し、 $\beta = -0.2$ から $\beta = 0.4$ まで β を一定として α を変化させて図 12 に示す。図 12 より $\alpha \geq 0$ かつ $\alpha - 2\beta \geq 0$ のときは、全ての組合せにおいて t/W が増加するにつれて $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ の値も増加する。なお $t/W \geq 1$ では $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ が、ほぼ一定となる。界面強度を改善させるためには、接着層厚さは薄いほうが望ましい。すなわち、接着層厚さが薄いと特異応力場の強さが減少することが特異応力場の強さの観点から明らかとなった。

また 図 12 より $\alpha - 2\beta = 0$ のとき t/W によらず $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1} = 1$ であることがわかる。一方、 $\alpha \geq 0$ かつ $\alpha - 2\beta > 0$ のときには、 t/W が減少すると $F_\sigma/F_{\sigma|t/W=1}$ は常に減少することがわかる。

Table 5 Material properties

	Material	Elastic Modulus/Gpa	Poissons ratio
Adherent	SUS304 (stainless steel)	206	0.3
	A7075 (aluminum alloys)	71	0.33
	Silicon	166	0.26
	FR-4.5 (IC substrate)	15.34	0.15
Adhesive	Resin	2.74	0.38

Table 6 $F_\sigma / F_{\sigma|t/W=1}$ with varying adhesive thickness t/W

t/W	SUS304	A7075	Silicon	FR-4.5
0.001	0.100	0.118	0.102	0.229
0.01	0.212	0.236	0.215	0.355
0.1	0.466	0.4884	0.468	0.573
0.5	0.898	0.903	0.898	0.916
1	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.002	1.002	1.002	1.003
4	1.002	1.002	1.002	1.003

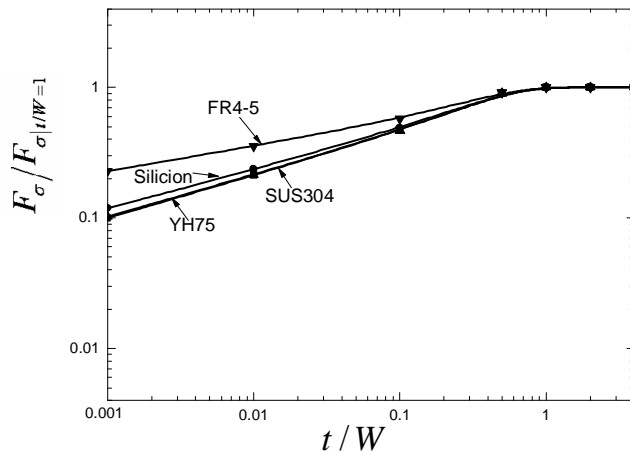


Fig.11 $F_\sigma / F_{\sigma|t/W=1}$ with varying adhesive thickness t/W

6. 結 言

本研究では接着材で接合された接合板の接着層端部での特異応力の強さについて、接着層厚さと材料組合せを変化させて議論した。本論文の結論をまとめると以下のようになる。

(1) 接着接合板の特異応力場の強さを有限要素法を用いて精度よく計算する方法を提案した。接着層厚さの異なる2つの接合板の問題を問題1, 問題2とすると、特異応力場の強さの比 K_σ^1 / K_σ^2 は、接合界面上の応力の比 $\lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1 / \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2)$ より求められることを示した。また、適当なメッシュを用いて有限要素法解析を行えば、 $K_\sigma / K_{\sigma|t/W=1}$ の比が、メッシュサイズに依存しないことが明らかとなった。しかも、界面においては応力の比は一定である。したがって、 $K_\sigma / K_{\sigma|t/W=1}$ の比を計算するとき最初の節点の応力値のみ考慮すればよいことを明らかにした。

(2) 材料組合せの特異応力場の強さ K_σ への影響を考察した。図7および図10に示すように Dundersパラメータの β の値を固定すると、 α が小さいときには α が増加すると K_σ も増加することがわかった。一方、 α が大

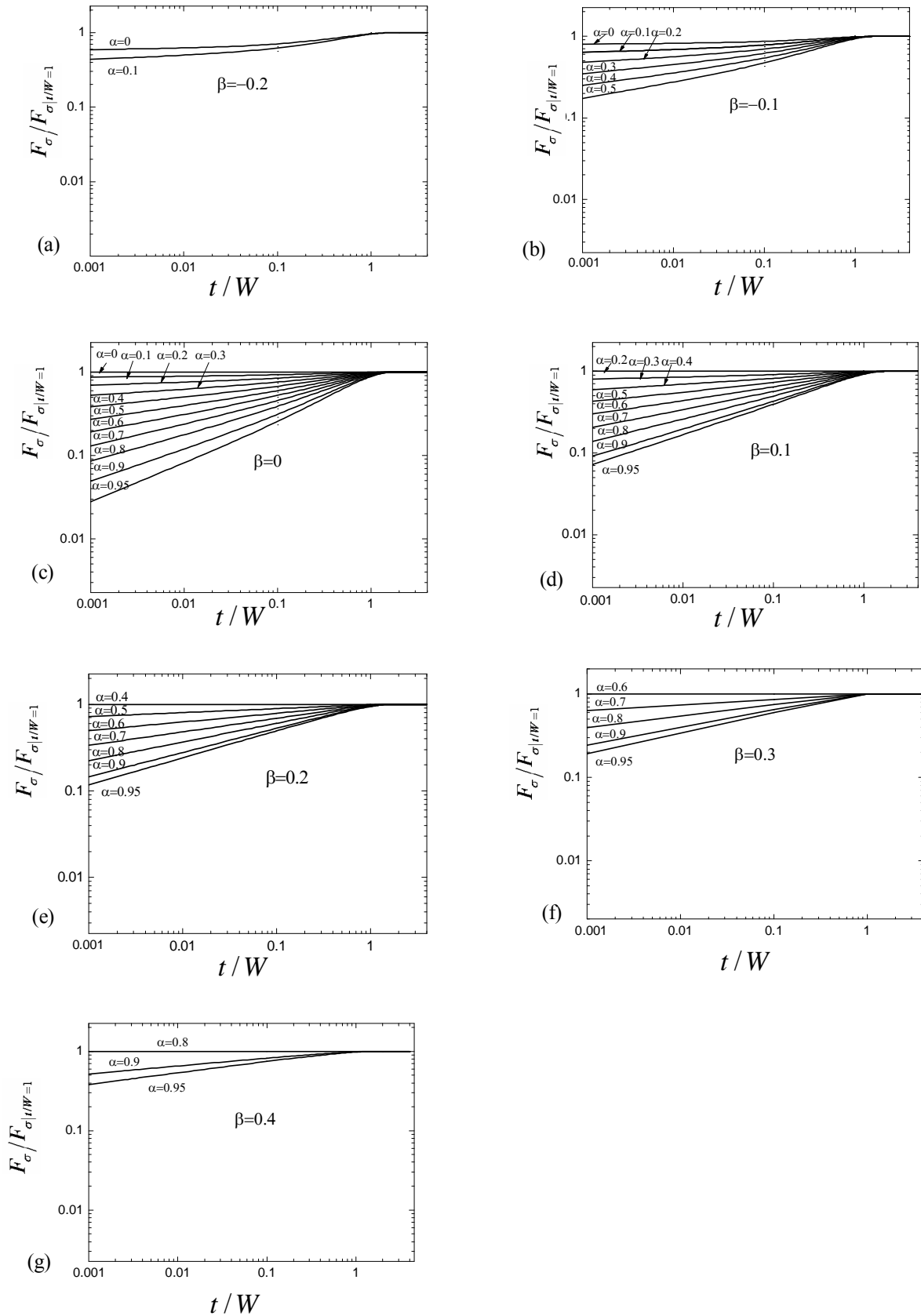


Fig.12 $F_{\sigma}/F_{\sigma|t/W=1}$ with t/W . (a) $\beta = -0.2$; (b) $\beta = -0.1$; (c) $\beta = 0$; (d) $\beta = 0.1$; (e) $\beta = 0.2$; (f) $\beta = 0.3$; (g) $\beta = 0.4$

きいときは α が増加すると K_{σ} は減少することがわかった。特異応力場の強さ K_{σ} の存在範囲は接着層厚さである t/W に応じて変化することを示した。

(3) 界面強度を強化するためには薄い接着層のほうが望ましい。なぜなら特異応力場の強さ K_{σ} は接着層が薄くなると減少するためである。また K_{σ} の変化の程度は材料組合せによって異なる。どの材料組合せにおいても $t/W \geq 1$ の場合には、比 $K_{\sigma}/K_{\sigma|t/W=1} = 1$ となる。

文 献

- (1) Kanno, T., Ogata, M., and Foxton, R.M., etc, "Microtensile Bond Strength of Dual-cure Resin Cement to Root Canal Dentin with Different Curing Strategies", *Dental Material*, Vol. 23, No. 4 (2004), pp. 550-556.
- (2) Kitasako, Y., Burrow, M.F., and Nikaido, T., etc, "Shear and Tensile Bond Testing for Resin Cemented with SixLluting Agents", *The Journal of Prosthetic Density*, Vol. 80 (1995), pp.423-428.
- (3) Van Meerbeek, B., De Munck, J., and Yoshida, Y., etc, "Buonocore Memorial Lecture-Adhesion to Enamel and Dentin: Current Status and Future Challenges", *Operative Dentistry*, Vol. 28 (2003), 215-235.
- (4) Park, J.H., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Evaluating the Strenghts of Thick Aluminum-to-Aluminum Joint with Different Adhesive Lengths and Thicknesses", *Composite Structures* (2009), pp. 1-10.
- (5) Arenas, J., Narbon, J.J., and Alia, C., "Optimum Adhesive Thickness in Strutural Adhesive Joints Using Statistical Techniques based on Weibull Distribution", *Internaltional Journal of Ahesion&Adhesives* (2009), pp. 1-6.
- (6) Neves, A.A., Courinho, E., and Poitevin, A., "Influence of Joint Component Mechanical Properties and Adhesive Layer Thickness on Stress Distribution in Micro-tensile Bond Strength Specimens", *Dental Materials*, Vol.25 (2009), pp. 4-12.
- (7) Afendi, M., and Teramoto.T., "Fracture Toughness Test of Epoxy Adhesive Dissimilar Joint with Various Adhesive Thickness", *Proceedings of Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics* (2009), a55.
- (8) Bogy, D.B., "Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, (1968), pp. 460-466.
- (9) Bogy, D.B., "Two Edge-Bonded Elastic Wedges of Different and Wedge Angles under Surface Traction", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 38, (1971), pp. 377-386.
- (10) 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, Vol. 59, No. 567 (1993), pp. 2682-2686.
- (11) 野田尚昭, 白尾亮司, 李俊, 杉本淳典, "強化繊維の引抜きにおける繊維端部の特異応力場の強さ", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 72, No. 721 (2006), pp. 1397-1404.
- (12) Nakajima, M., Koguchi, H., "Influence of Interlayer Thickness on the Intensity of Singular Stress Field in 3D Three-layered Joints Under an External Load", *Proceedings of Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics*, (2009),a112.