

接着接合板における接着層厚さが特異応力場の強さに与える影響* (面内曲げと引張りの比較)

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

Effect of Adhesive Thickness on the Intensity of Singular Strength for the Adhesive Joint (Comparison between Bending and Tension)

Yu ZHANG, Ken-Taro TAKAISHI, Nao-Aki NODA^{*3} and Xin LAN

^{*3} Department of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

In the previous paper, the authors have discussed the effect of the adhesive thickness and material combinations on the strength of adhesive joint under tension. On the basis of the FEM results, it has been explained explicitly that the strength of adhesive joint decreases with increasing of adhesive thickness under arbitrary material combinations. In this paper, an adhesive joint under bending is discussed using the FEM. Then, the effect of adhesive thickness on the strength of adhesive joint is discussed under bending. Comparing the results of tension and bending for the adhesive joint, it is found that the intensity of singular stress for the bending sometimes is larger than the intensity of singular stress for the tension. On the other hand, the intensity of singular stress for the bending is always smaller than the intensity of singular stress for the tension when the adhesive thickness is large enough.

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は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。接着構造物には様々な荷重、すなわち引張りや曲げが作用するが、接合界面では強度が低下する場合もあり、構造物の損傷に繋がる恐れがあるため、それぞれの荷重に対する強度評価が必要である。

接着層の強度評価のため、引張り、曲げ、せん断試験による実験的評価が多くなされてきた^{(1)~(5)}。例として、図 1 (a) に曲げ試験を示す⁽⁶⁾。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。しかし、図 1 (b) のような接着剤と被着材からなる接合試験片に曲げを負荷した場合の応力分布に関する研究は少ない。

接着層厚さが減少すると接合強度は増加することが、これまでに行われた引張り試験の場合に示されている⁽⁷⁾けれども、その理由は明確には説明されていなかった。著者らは先に、接着接合板が引張りを受ける場合の強度に関して、有限要素法を用いて特異応力場の強さの観点から考察を行なった⁽⁸⁾。その結果、接着層厚さが減少すると強度が増加することを、接着端部に生じる特異応力場の強さの立場から説明した。

本研究では、接着層が引張りを受ける場合と同じモデルを用いて、図 1 (b) のような面内曲げを受ける場合の界面端部における接着層厚さが特異応力場の強さに与える影響を解析し、引張りを受ける場合と比較し考察を行なった。

* 原稿受付 2011 年 5 月 6 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} 学生員, 九州工業大学大学院工学研究科

^{*3} 正員, 九州工業大学工学研究院

E-mail: zyzhangyu1225@yahoo.com



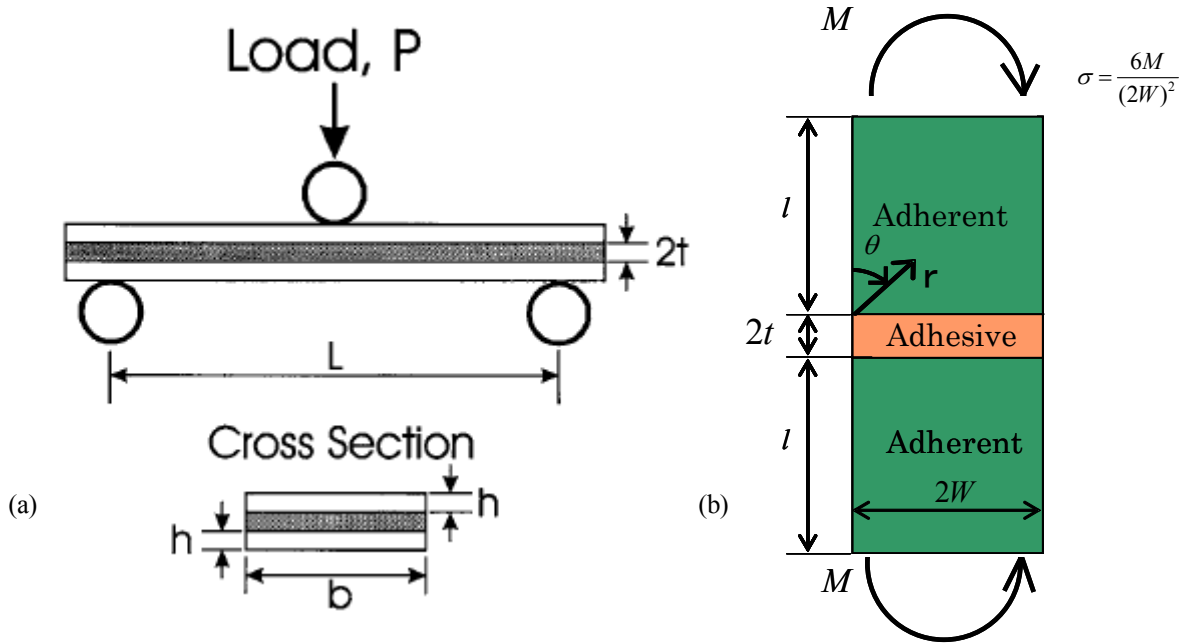


Fig.1 Adhesive joint (a) bending experiment , (b) model for the bending experiment

2. 解析方法

図1 (b) 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 $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ は接合端部で無限大となる. すなわち $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ のとき $(\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}) \propto 1/r^{1-\lambda}$ の特異性を示す. ここで, α, β は Dundurs' の複合材料パラメータでありポアソン比 ν と横弾性係数 G により表せる. また, 図1 (b) のような接合界面端部における特異指数 λ は式 (1) により求められる^{(9), (10)}. 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.

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

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

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

接着剤による接合端部の特異応力場の強さ K_σ は,

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

と表され, これを無次元化した特異応力場の強さを F_σ とし式 (5) に定義する (図1 (b)).

$$F_\sigma = \frac{K_\sigma}{\sigma(2W)^{1-\lambda}} = \frac{\lim_{r \rightarrow 0} [r^{1-\lambda} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}(r)]}{\sigma(2W)^{1-\lambda}}, \quad \sigma = \frac{6M}{(2W)^2} \tag{5}$$

ここで, M は接着接合板に作用する単位厚さ当りの曲げモーメントである.

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	0.8762	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	1.0000	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

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 1 (b) の 1/2 モデルを用いて解析を行う。被着材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, 0.1, 1, と変化させて解析を行う。

まず、曲げ問題における有限要素法を用いた特異応力場の強さの計算方法を検討する。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。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。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。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 、曲げモーメント M 、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、曲げモーメント M を負荷し同じ材料の組合せで特異応力場の強さを考察する。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、 $\lim_{r \rightarrow 0} [r^{1-\lambda_1} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2(r)] = K_\sigma^2 \neq 0$ であるので応力の比 $\lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1 / \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2)$ によってのみ決まる。

$$\frac{K_\sigma^1}{K_\sigma^2} = \frac{\sigma(2W)^{1-\lambda_1} F_\sigma^1}{\sigma(2W)^{1-\lambda_1} F_\sigma^2} = \frac{F_\sigma^1}{F_\sigma^2} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{r^{1-\lambda_1} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1(r)}{r^{1-\lambda_1} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2(r)} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^1(r)}{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^2(r)}, \quad \sigma = \frac{6M}{(2W)^2} \quad (6)$$

ここで、応力の比に注目するのは、応力分布そのものは $r \rightarrow 0$ で $\sigma_\theta \rightarrow \infty$ となるので有限要素法で求め難いが、応力の比は有限となるため比較的容易に求め得るためである。

以下は基準問題の特異応力場の強さ 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 の値から求めた F_σ について議論する。

3. 板状接合試験片の引張りと曲げの解—基準解について

図 2 の板状接合試験片の引張りに関しては、体積力法を用いて陳・西谷らにより解析がなされ⁽¹¹⁾、その後さらに正確な数値が表にまとめられている^{(8)・(12)}。一方、板状接合試験片の面内曲げに関しては、その F_σ が図にまとめられているものの、数値が与えられていないので基準問題として使用するの是不便である。そこで本研究

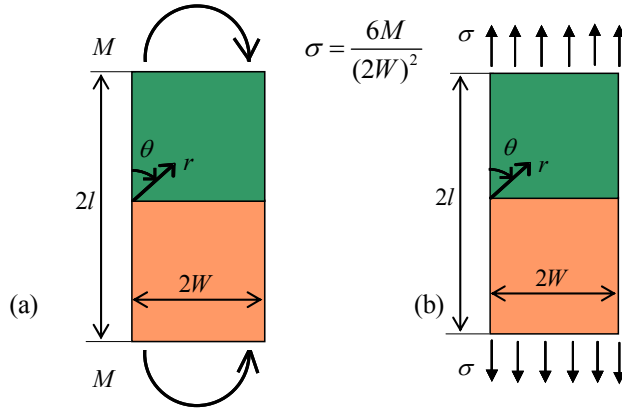


Fig.2 Bonded strip (a) bending (b) tension

ではまず図 2 (b) の基準問題を基にして図 2 (a) の F_σ の数値を有限要素法を用いて正確に求める。

以下で添え字の B, T は、板状接合試験片が曲げを受ける場合と、引張りを受ける場合を示すものとする。すなわち、式 (6) で板状接合試験片が引張りを受ける場合を基準解として図 2 (a) の解を求める。

表 2 に $w=1000$ とするとき最小メッシュサイズが $1/3^8 = 1/6561$ と $1/3^4 = 1/81$ の 2 種類のモデルを用いて、板状接合試験片が曲げを受ける場合の応力分布 σ_B^{FEM} と、引張りを受ける場合の応力分布 σ_T^{FEM} を示す。表 2 に示すようにメッシュサイズが異なると σ_B^{FEM} 、 σ_T^{FEM} とともに大きく値は変化する。すなわち、 $r \rightarrow 0$ の応力の値は特異性を有するため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。

この例からも明らかのように、 σ^{real} を界面端部における真の応力、 σ^{FEM} を有限要素法により求めた応力とすると、一般に $\sigma^{real} \neq \sigma^{FEM}$ である。

$$K_\sigma = \lim_{r \rightarrow 0} \left[r^{1-\lambda} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{real}(r) \right] \neq \lim_{r \rightarrow 0} \left[r^{1-\lambda} \sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{FEM}(r) \right] \quad (7)$$

一方、表 2 に示すように応力分布の比 $\sigma_B^{FEM} / \sigma_T^{FEM}$ はメッシュサイズに依存せず、また、端部からの距離 r にも依存せず、ほぼ 4 桁一致している。

このように、異なるメッシュの結果から得られる界面端部の応力の値は異なるものの、曲げと引張りの応力分布の比 $\frac{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{B,FEM}}{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{T,FEM}}$ の値は不変であり、式 (8) が成立し、式 (9) のように曲げの K_σ^B が求まることになる。

$$\frac{K_\sigma^B}{K_\sigma^T} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{B,real}}{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{T,real}} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{B,FEM}}{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{T,FEM}} \quad (8)$$

$$K_\sigma^B = K_\sigma^T \times \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{B,FEM}}{\sigma_{\theta|\theta=\pi/2}^{T,FEM}} \quad (9)$$

このような方法を用いて、板状接合試験片が曲げを受ける場合の特異応力場の強さをまとめて図 3 に示す。また、表 3 に先に求めた引張りの特異応力場の強さと、本研究により求めた曲げの特異応力場の強さを全ての材料組合せに対して示す。今後、図 3 と表 3 の板状接合試験片が面内曲げを受ける場合の解 F_σ を基準解として用いることで、式 (6) に基づいて、接着層厚さが異なる接合板 (図 1(b)) の問題を解析し、異なる接着層厚さについても特異応力場の強さを示す。図 4 に本解析に使用した材料組合せの α β 線図を示す。

図 3 の破線の範囲と表 3 の括弧内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の結果の近似式を求め、計算不可能な範囲の結果を外そうとした。

Table 2 Stress distribution for bonded strip under bending σ_B^{FEM} and tension σ_T^{FEM} in Fig. 2 obtained by FEM with varying mesh size ($W = 1000$).

(a) $\alpha = 0.3, \beta = 0$

Mesh size= $1/3^8$				Mesh size= $1/3^4$			
r/W	σ_B^{FEM}	σ_T^{FEM}	$\frac{\sigma_B^{FEM}}{\sigma_T^{FEM}}$	r/W	σ_B^{FEM}	σ_T^{FEM}	$\frac{\sigma_B^{FEM}}{\sigma_T^{FEM}}$
0/6561000	2.486	2.692	0.923	0/81000	1.889	2.045	0.924
1/6561000	2.071	2.242	0.924	1/81000	1.573	1.703	0.924
2/6561000	2.002	2.167	0.924	2/81000	1.521	1.647	0.923
3/6561000	1.950	2.111	0.924	3/81000	1.482	1.604	0.924
4/6561000	1.914	2.072	0.924	4/81000	1.454	1.574	0.924
5/6561000	1.885	2.041	0.924	5/81000	1.432	1.551	0.923
6/6561000	1.862	2.016	0.924	6/81000	1.415	1.532	0.924
7/6561000	1.843	1.995	0.924	7/81000	1.400	1.516	0.923
8/6561000	1.827	1.978	0.924	8/81000	1.388	1.502	0.924
9/6561000	1.812	1.962	0.924	9/81000	1.377	1.491	0.924

(b) $\alpha = 0.7, \beta = 0.2$

Mesh size= $1/3^8$				Mesh size= $1/3^4$			
r/W	σ_B^{FEM}	σ_T^{FEM}	$\frac{\sigma_B^{FEM}}{\sigma_T^{FEM}}$	r/W	σ_B^{FEM}	σ_T^{FEM}	$\frac{\sigma_B^{FEM}}{\sigma_T^{FEM}}$
0/6561000	8.397	10.117	0.830	0/81000	4.352	5.243	0.830
1/6561000	5.409	6.517	0.830	1/81000	2.803	3.377	0.830
2/6561000	5.052	6.087	0.830	2/81000	2.618	3.154	0.830
3/6561000	4.830	5.818	0.830	3/81000	2.503	3.015	0.830
4/6561000	4.696	5.658	0.830	4/81000	2.434	2.932	0.830
5/6561000	4.590	5.531	0.830	5/81000	2.379	2.866	0.830
6/6561000	4.500	5.422	0.830	6/81000	2.332	2.810	0.830
7/6561000	4.421	5.327	0.830	7/81000	2.291	2.760	0.830
8/6561000	4.351	5.242	0.830	8/81000	2.255	2.716	0.830
9/6561000	4.288	5.166	0.830	9/81000	2.222	2.677	0.830

4. 接着接合板が引張りと曲げを受ける場合の接着層厚さの影響

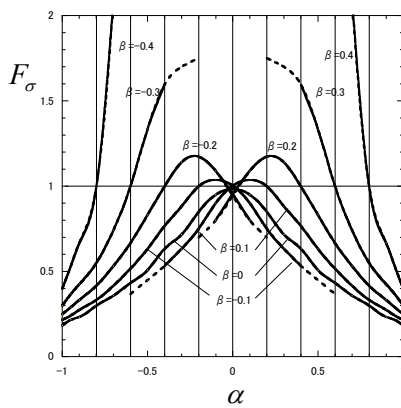
一般的な接着剤の条件 ($\alpha \geq 0$ かつ $\alpha - 2\beta \geq 0$) について曲げを受ける場合の $F_\sigma / F_{\sigma|t/W=1}$ を図5に示す。これらの結果を求める際にも、前節の表2と同様の検討を行い、最小メッシュサイズ $1/3^8$ 等により K_σ^B が正確に求められることを確認した。接着剤のヤング率 E_2 は被着材のヤング率 E_1 より小さく ($E_2 \leq E_1$)、接着剤のポアソン比 ν_2 は、被着材のポアソン比 ν_1 より大きい ($\nu_2 \geq \nu_1$)。この場合は $\alpha \geq 0$ 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。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5に示す。図5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。また、図5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。このように、接着層厚さが薄くなると特異応力場の強さが減少する。これは、特異応力が生じる界面上端部と界面下端部が近づくため、その干渉により生じると考えられる。よって界面強度向上のためには、接着層厚さが薄いほうが望ましい。また、先の研究により求めた引張りの場合⁽⁸⁾と比較すると、曲げを受ける場合の方が接着層厚さが薄くなるにつれて $F_\sigma / F_{\sigma|t/W=1}$ の下がり方が小さいことが明らかとなった。

Table 3 F_σ at interface edge point in bonded finite plate (Fig.2)

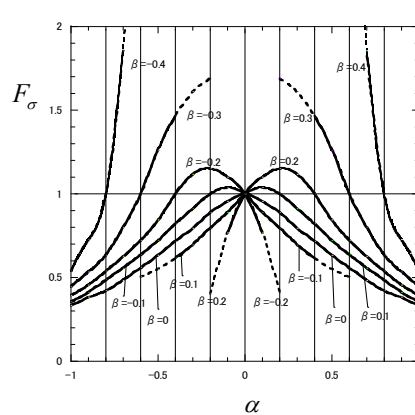
$K_\sigma = F_\sigma \sigma (2W)^{1-\lambda}$, T: Tension : $\sigma = P/2W$, B: Bending : $\sigma = 6M/(2W)^2$

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

α		$\beta=-0.4$	$\beta=-0.3$	$\beta=-0.2$	$\beta=-0.1$	$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	$\beta=0.3$	$\beta=0.4$
-1	T	0.540	0.446	0.395	0.357	0.332	--	--	--	--
	B	0.400	0.300	0.250	0.217	0.184	--	--	--	--
-0.9	T	0.726	0.534	0.456	0.412	0.381	--	--	--	--
	B	0.667	0.425	0.333	0.275	0.233	--	--	--	--
-0.8	T	1.000	0.636	0.538	0.487	0.450	--	--	--	--
	B	1.000	0.550	0.417	0.333	0.300	--	--	--	--
-0.7	T	(1.855)	0.800	0.626	0.558	0.486	--	--	--	--
	B	2.097	0.742	0.533	0.417	0.358	--	--	--	--
-0.6	T	(3.29)	1.000	0.724	0.638	0.559	(0.505)	--	--	--
	B	(3.96)	1.000	0.667	0.517	0.433	(0.373)	--	--	--
-0.5	T	--	1.264	0.842	0.722	0.635	(0.551)	--	--	--
	B	--	1.334	0.833	0.633	0.508	(0.449)	--	--	--
-0.4	T	--	1.467	1.000	0.822	0.718	0.615	--	--	--
	B	--	1.595	1.000	0.767	0.633	0.533	--	--	--
-0.3	T	--	(1.61)	1.118	0.913	0.796	0.697	--	--	--
	B	--	(1.70)	1.141	0.883	0.717	0.633	--	--	--
-0.2	T	--	(1.69)	1.153	1.000	0.889	0.797	(0.404)	--	--
	B	--	(1.75)	1.173	1.000	0.850	0.750	(0.702)	--	--
-0.1	T	--	--	1.103	1.037	0.955	0.89	0.767	--	--
	B	--	--	1.089	1.038	0.950	0.900	0.800	--	--
0	T	--	--	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	--	--
	B	--	--	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	--	--
0.1	T	--	--	0.767	0.890	0.955	1.037	1.103	--	--
	B	--	--	0.800	0.900	0.950	1.038	1.089	--	--
0.2	T	--	--	(0.404)	0.797	0.889	1.000	1.153	(1.69)	--
	B	--	--	(0.702)	0.750	0.850	1.000	1.173	(1.75)	--
0.3	T	--	--	--	0.697	0.796	0.913	1.118	(1.61)	--
	B	--	--	--	0.633	0.717	0.883	1.141	(1.70)	--
0.4	T	--	--	--	0.615	0.718	0.822	1.000	1.467	--
	B	--	--	--	0.533	0.633	0.767	1.000	1.595	--
0.5	T	--	--	--	(0.551)	0.635	0.722	0.842	1.264	--
	B	--	--	--	(0.449)	0.508	0.633	0.833	1.334	--
0.6	T	--	--	--	(0.505)	0.559	0.638	0.724	1.000	(3.29)
	B	--	--	--	(0.373)	0.433	0.517	0.667	1.000	(3.96)
0.7	T	--	--	--	--	0.486	0.558	0.626	0.8	1.855
	B	--	--	--	--	0.358	0.417	0.533	0.742	2.097
0.8	T	--	--	--	--	0.45	0.487	0.538	0.636	1.000
	B	--	--	--	--	0.300	0.333	0.417	0.550	1.000
0.9	T	--	--	--	--	0.381	0.412	0.456	0.534	0.726
	B	--	--	--	--	0.233	0.275	0.333	0.425	0.667
1	T	--	--	--	--	0.332	0.357	0.395	0.446	0.540
	B	--	--	--	--	0.184	0.217	0.250	0.300	0.400

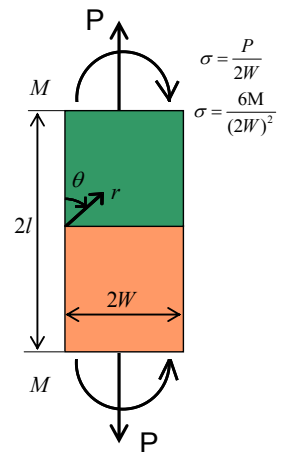


(a) Bending



(b) Tension

Fig. 3 F_σ for bonded strip in Fig. 2



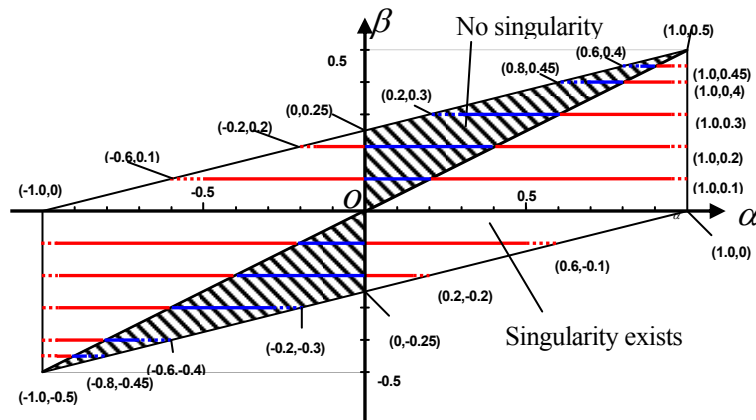


Fig.4 The map of α and β

式 (6) に示すように、界面端部の $\sigma_\theta / \sigma_{\theta|t/W=1}$ の比を計算することによって全ての材料組合せの F_σ を求めることができる。図 6, 図 7 にそれぞれ、 $t/W = 0.001$, $t/W = 0.1$ の場合の特異応力場の強さ F_σ の値を、 α と β を変化させて示す。また、表 4, 表 5 に引張りを受ける場合と比較して数値で示す。図 6 と図 7 より α が小さいとき、 α が増加すると F_σ は増加する。一方、 α が大きいときは α が増加すると F_σ は減少する。

図 8 に示すように板に引張り ($\sigma = P/2W$) と曲げ ($\sigma = 6M/(2W)^2$) が作用するとき、一般に引張りを受ける方が曲げを受ける場合より負荷が厳しいと考えられる。これは最大応力が同じでも、曲げの場合にはその最大応力が 1 点でのみ生じるためである。接合板 ($t/W = 1$) の場合でも、表 3 に示すように、特異性を示す範囲 ($\alpha \geq 0$ かつ $\alpha - 2\beta \geq 0$) では、一部例外を除き引張りの F_σ が曲げの F_σ より大きい。

一方、表 4 に示すように $t/W = 0.001$ の場合には、特異性を示す範囲であるか否かに関わらず、引張りが大きい場合と曲げが大きい場合の両者が混在することがわかった。これは曲げを受ける場合には界面上端部と界面下端部の干渉が引張りの場合より小さいためと考えられる。 $t/W = 0.1$ の場合には、 $t/W = 1$ と $t/W = 0.001$ の中間の傾向を示している。

従って、図 8 (c) の場合には、常に引張りの方が大きい特異応力場の強さを示すとは限らない。

5. 結 言

本研究では接着剤により接合された接着層端部での特異応力場の強さについて、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ようになる。

(1) 板状接着試験片 ($t/W = 1$) において、特異性を示す範囲においては曲げより引張りの方が大きい特異応力場の強さを示すことがわかった。一方、 $t/W = 0.001$ の場合は、特異性を示す範囲においても、引張りが大きい場合と曲げが大きい場合の両者が混在することがわかった。 $t/W = 0.1$ の場合には、 $t/W = 1$ と $t/W = 0.001$ の中間の傾向を示している。接着層厚さが薄い場合には、特異性を示す範囲の場合、特異応力が生じる界面上端部と界面下端部が近づくため、その干渉が生じると考えられる。

(2) 一般的な接着剤の条件である特異性を示す範囲 ($\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$ または $\lambda < 1$) においては、接着層厚さが薄いと特異応力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。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 F_σ は接着層が薄くなると減少するためである。また、特異応力場の強さ F_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 $F_\sigma / F_{\sigma|t/W=1} = 1$ となる。

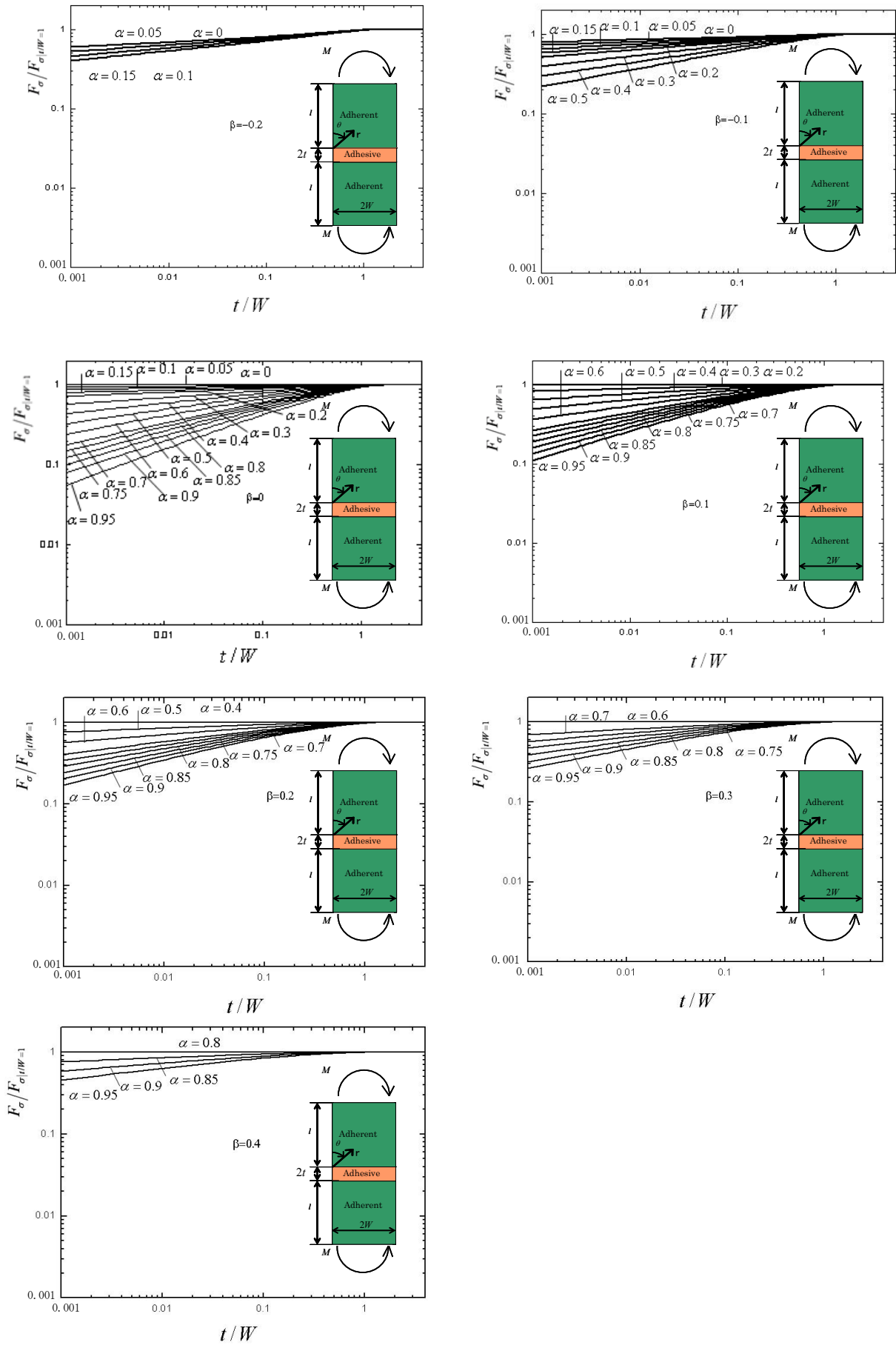


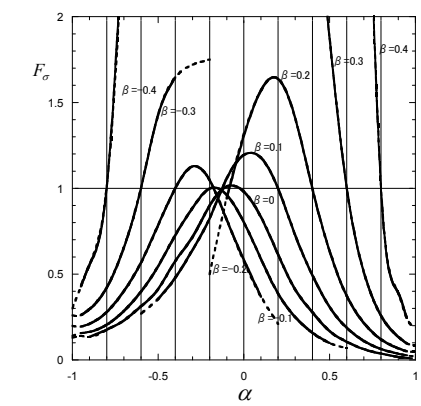
Fig.5 $F_\sigma / F_{\sigma|t/W=1}$ with t/W . (a) $\beta = -0.2$; (b) $\beta = -0.1$; (c) $\beta = 0$; (d) $\beta = 0.1$; (e) $\beta = 0.2$; (f) $\beta = 0.3$; (g) $\beta = 0.4$

Table 4 F_σ with varying α and β when $t/W = 0.001$ in Fig.1(b)

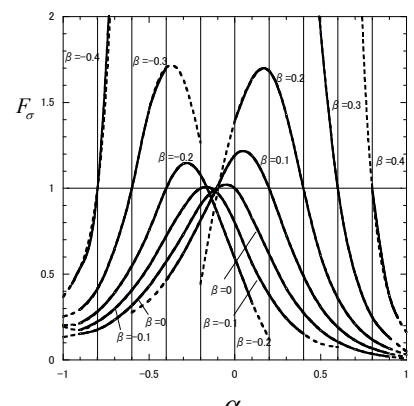
$K_\sigma = F_\sigma \sigma (2W)^{1-\lambda}$, T: Tension: $\sigma = P/2W$, B: Bending: $\sigma = 6M/(2W)^2$

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

α		$\beta=-0.4$	$\beta=-0.3$	$\beta=-0.2$	$\beta=-0.1$	$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	$\beta=0.3$	$\beta=0.4$
-1	T	(0.368)	(0.252)	(0.204)	(0.197)	(0.133)	--	--	--	--
	B	(0.302)	(0.255)	(0.197)	(0.145)	(0.130)	--	--	--	--
0.9	T	0.539	0.295	0.215	0.175	0.153	--	--	--	--
	B	0.555	0.296	0.211	0.164	0.135	--	--	--	--
-0.8	T	1.000	0.416	0.283	0.223	0.189	--	--	--	--
	B	1.000	0.421	0.279	0.205	0.176	--	--	--	--
-0.7	T	2.683	0.650	0.394	0.299	0.234	--	--	--	--
	B	2.602	0.654	0.401	0.285	0.230	--	--	--	--
-0.6	T	(6.82)	1.000	0.549	0.408	0.318	(0.278)	--	--	--
	B	(5.36)	1.000	0.567	0.398	0.312	(0.266)	--	--	--
-0.5	T	--	1.455	0.754	0.548	0.430	0.347	--	--	--
	B	--	1.428	0.786	0.546	0.413	0.355	--	--	--
-0.4	T	--	1.704	1.000	0.723	0.574	0.463	--	--	--
	B	--	1.646	1.000	0.727	0.576	0.478	--	--	--
-0.3	T	--	(1.64)	1.144	0.888	0.733	0.622	--	--	--
	B	--	(1.72)	1.127	0.885	0.716	0.639	--	--	--
-0.2	T	--	(1.27)	1.078	1.000	0.904	0.813	(0.444)	--	--
	B	--	(1.75)	1.048	1.000	0.899	0.824	(0.503)	--	--
-0.1	T	--	--	0.851	0.972	1.005	1.012	0.982	--	--
	B	--	--	0.817	0.962	1.011	1.057	0.941	--	--
0	T	--	--	0.591	0.799	1.000	1.193	1.393	--	--
	B	--	--	0.546	0.787	1.000	1.177	1.368	--	--
0.1	T	--	--	0.335	0.563	0.828	1.190	1.637	--	--
	B	--	--	0.369	0.588	0.832	1.178	1.571	--	--
0.2	T	--	--	(0.121)	0.380	0.607	1.000	1.684	(4.27)	--
	B	--	--	(0.211)	0.386	0.614	1.000	1.638	(5.25)	--
0.3	T	--	--	--	0.242	0.418	0.728	1.429	(3.93)	--
	B	--	--	--	0.249	0.409	0.726	1.408	(4.00)	--
0.4	T	--	--	--	0.152	0.275	0.490	1.000	2.980	--
	B	--	--	--	0.158	0.278	0.494	1.000	2.875	--
0.5	T	--	--	--	0.095	0.173	0.309	0.608	1.909	--
	B	--	--	--	0.098	0.168	0.309	0.635	1.872	--
0.6	T	--	--	--	(0.076)	0.106	0.191	0.361	1.000	(9.40)
	B	--	--	--	(0.069)	0.106	0.188	0.374	1.000	(10.9)
0.7	T	--	--	--	--	0.063	0.115	0.210	0.506	3.385
	B	--	--	--	--	0.063	0.111	0.216	0.510	3.893
0.8	T	--	--	--	--	0.038	0.068	0.120	0.251	1.000
	B	--	--	--	--	0.037	0.064	0.120	0.257	1.000
0.9	T	--	--	--	--	0.019	0.038	0.066	0.131	0.376
	B	--	--	--	--	0.018	0.037	0.068	0.135	0.392
1	T	--	--	--	--	(0.008)	(0.018)	(0.032)	(0.049)	(0.162)
	B	--	--	--	--	(0.010)	(0.020)	(0.045)	(0.088)	(0.190)



(a) Bending



(b) Tension

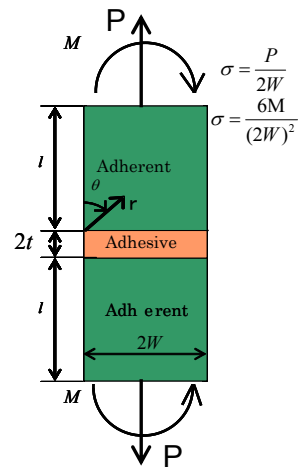


Fig.6 F_σ with varying material combination β when $t/W = 0.001$ in Fig. 1(b)

Table 5 F_σ with varying α and β when $t/W = 0.1$ in Fig. 1(b)

$K_\sigma = F_\sigma \sigma (2W)^{1-\lambda}$, T: Tension: $\sigma = P/2W$, B: Bending: $\sigma = 6M/(2W)^2$

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

α		$\beta=-0.4$	$\beta=-0.3$	$\beta=-0.2$	$\beta=-0.1$	$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$	$\beta=0.3$	$\beta=0.4$
-1	T	(0.540)	(0.446)	(0.395)	(0.357)	(0.355)	--	--	--	--
	B	(0.412)	(0.330)	(0.274)	(0.223)	(0.179)	--	--	--	--
-0.9	T	0.736	0.548	0.470	0.426	0.395	--	--	--	--
	B	0.675	0.437	0.347	0.280	0.225	--	--	--	--
-0.8	T	1.000	0.661	0.567	0.518	0.481	--	--	--	--
	B	1.000	0.567	0.476	0.351	0.301	--	--	--	--
-0.7	T	1.721	0.827	0.669	0.607	0.534	--	--	--	--
	B	1.998	0.762	0.561	0.445	0.369	--	--	--	--
-0.6	T	(2.51)	1.000	0.773	0.703	0.628	(0.581)	--	--	--
	B	(3.33)	1.000	0.700	0.556	0.458	(0.415)	--	--	--
-0.5	T	--	1.175	0.881	0.798	0.725	0.644	--	--	--
	B	--	1.270	0.858	0.677	0.549	0.505	--	--	--
-0.4	T	--	1.207	1.000	0.897	0.825	0.732	--	--	--
	B	--	1.404	1.000	0.871	0.687	0.601	--	--	--
-0.3	T	--	(1.12)	1.036	0.965	0.910	0.840	--	--	--
	B	--	(1.46)	1.087	0.914	0.777	0.704	--	--	--
-0.2	T	--	(0.933)	0.962	1.000	0.993	0.960	(0.467)	--	--
	B	--	(1.50)	1.057	1.000	0.900	0.843	(0.520)	--	--
-0.1	T	--	--	0.812	0.956	1.022	1.058	0.982	--	--
	B	--	--	0.909	0.989	0.988	0.994	0.809	--	--
0	T	--	--	0.643	0.832	1.000	1.150	1.286	--	--
	B	--	--	0.721	0.889	1.000	1.065	1.124	--	--
0.1	T	--	--	0.428	0.660	0.873	1.126	1.388	--	--
	B	--	--	0.633	0.769	0.906	1.083	1.244	--	--
0.2	T	--	--	(0.207)	0.522	0.732	1.000	1.383	(2.46)	--
	B	--	--	(0.501)	0.599	0.770	1.000	1.286	(2.40)	--
0.3	T	--	--	--	0.401	0.584	0.825	1.240	2.267	--
	B	--	--	--	0.480	0.615	0.840	1.203	(2.25)	--
0.4	T	--	--	--	0.308	0.466	0.663	1.000	1.902	--
	B	--	--	--	0.368	0.514	0.692	1.000	1.819	--
0.5	T	--	--	--	0.237	0.363	0.517	0.748	1.456	--
	B	--	--	--	0.283	0.388	0.539	0.789	1.424	--
0.6	T	--	--	--	(0.193)	0.279	0.403	0.567	1.000	(4.93)
	B	--	--	--	(0.212)	0.311	0.412	0.594	1.000	(4.21)
0.7	T	--	--	--	--	0.209	0.310	0.431	0.691	2.271
	B	--	--	--	--	0.240	0.312	0.447	0.694	2.302
0.8	T	--	--	--	--	0.163	0.236	0.325	0.475	1.000
	B	--	--	--	--	0.182	0.231	0.328	0.483	1.000
0.9	T	--	--	--	--	0.109	0.172	0.241	0.346	0.598
	B	--	--	--	--	0.124	0.187	0.241	0.347	0.614
1	T	--	--	--	--	(0.061)	(0.121)	(0.183)	(0.250)	(0.376)
	B	--	--	--	--	(0.081)	(0.128)	(0.170)	(0.245)	(0.335)

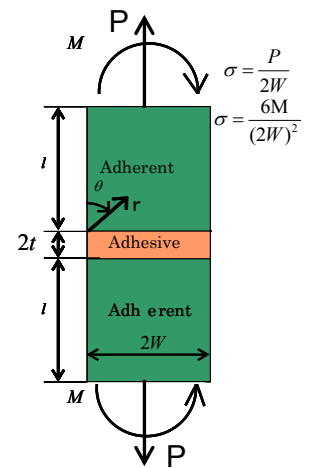
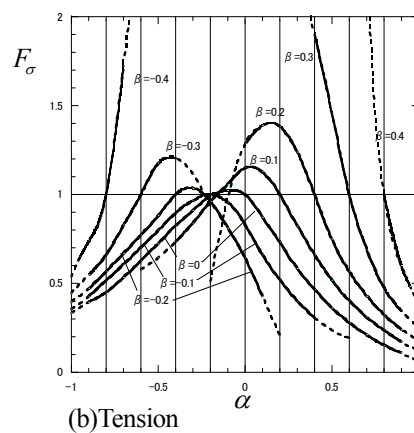
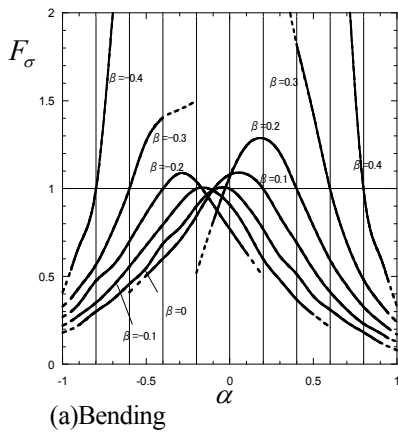


Fig.7 F_σ with varying material combination β when $t/W = 0.1$ in Fig. 1(b)

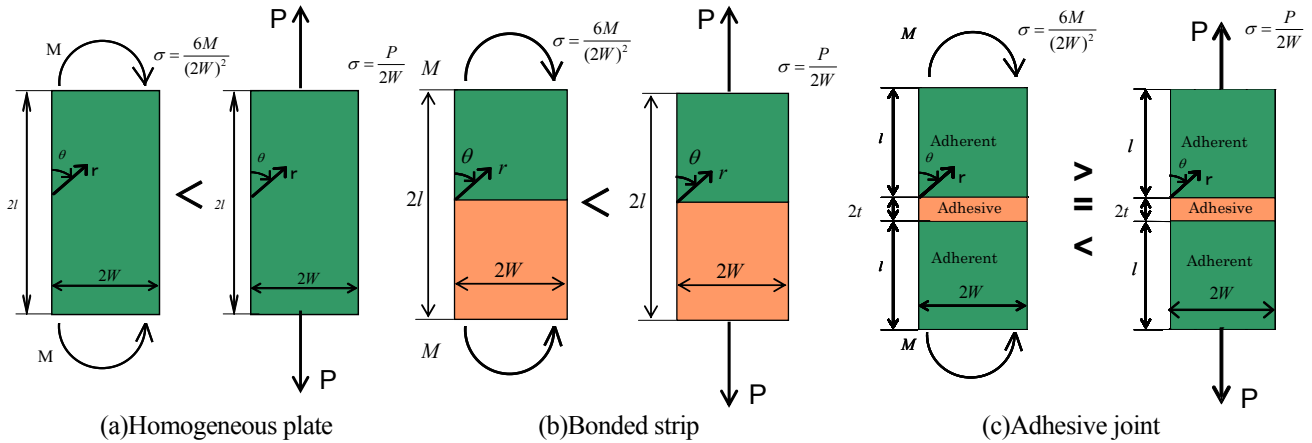


Fig.8 Severity for tension and bending.

参 考 文 献

- (1) Azari, S., Papini, M., and Spelt, J.K., “Effect of Adhesive Thickness on Fatigue and Fracture of Toughened Epoxy Joints- Part I: Experiments”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78 (2011), pp.153-162.
- (2) Kihara, K., Isono, H., etc., “A Study and Evaluation of the Shear Strength of Adhesive Layers Subjected to Impact Loads”, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 23 (2003), pp. 253-259.
- (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 Strengths 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 Structural Adhesive Joints Using Statistical Techniques based on Weibull Distribution”, *International Journal of Adhesion&Adhesives* (2009), pp.1-6.
- (6) Hunston, D.,Miyagi, Z.,etc., “The sandwich Bending Specimen for Characterizeing Adhesive Properties”, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 7(2003), pp.71-88.
- (7) Afendi, M, and Teramoto.T, “Fracture Toughness Test of Epoxy Adhesive Dissimilar Joint with Various Adhesive Thickness”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol., 4, No. 7 (2010), pp. 999-1010.
- (8) Yu Zhang, Nao-Aki Noda, Ken-Tarou Takaisi, and Xin Lan, “Effect of Adhesive Thickness on the Intensity of Singular Stress at the Adhesive Dissimilar Joint”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.4, No.10 (2010), pp.1467-1479.
- (9) Bogy, D.B., “Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35 (1968), pp. 460-466 .
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.