

混合モード破壊における角部の応力拡大係数を用いた強度評価法*

野田 尚昭*¹, 陳 玳 珩*²
高瀬 康*³, 諸 富 貴 光*⁴Evaluation of Static Strength by the Application of Mixed Mode
Stress Intensity of Angular CornerNao-Aki NODA, Dai-heng CHEN,
Yasushi TAKASE and Takamitsu MORODOMI

In this paper, a method of evaluation of static strength by the application of mixed mode stress intensity factors of angular corner is considered. Recently, it has been found that the stress field near a corner of jointed dissimilar materials is expressed as a sum of the symmetric state with a singularity of $1/r^{1-\lambda_1}$ and the skew symmetric state with a stress singularity of $1/r^{1-\lambda_2}$. In this respect, the fracture tests are carried out on the plane specimens of acrylic resin having a single sharp notch. Different artificial notches are introduced into the specimens with varying the opening and inclination angles. The fracture criterion for different shaped notch is discussed on the basis of the stress distribution near the notch. The usefulness of K_{I,λ_1} and K_{II,λ_2} for the evaluation of static strength under mixed mode fracture is confirmed through the experiment.

Key Words: Fracture Mechanics, Stress Intensity Factor, Stress Concentration, Notch, Fracture Criterion, Fracture Toughness, Angular Corner, Mixed Mode Fracture

1. 緒 言

複合材料の強度評価を行う際には、強化材と母材の異材境界角部において集中応力が発生し、これが原因となってき裂の発生を招き、全体的な破壊へと至ることが多いため、異材境界角部の応力分布を知る必要がある⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。最近、著者らは⁽¹⁾鋭いV型切欠きをもつアクリルシートの帯板で切欠きの開き角と切欠き深さ、および引張りの位置を変化させて実験を行い、モードIのみの単独モード状態において角部の応力拡大係数を用いた強度評価法がV型切欠き材の脆性破壊の問題に有効であることを確認した。しかし、一般にはモードIおよびモードIIがともに存在する混合モード状態で破壊が生じることが多いので、混合モードにおける K_{I,λ_1} 、 K_{II,λ_2} を用いた強度評価法を検証する必要がある。

また、V型切欠きでは、切欠きの開き角によって応力特異性の指数が異なるため、服部ら⁽²⁾が提案した特異性の指数と特異場の強さとの二つのパラメータを用いて接着界面の強度評価をする方法と同様に、異なる開き角の切欠きに対して、それぞれの破断限界応力拡大

係数を求める必要がある。従って、より少ないデータに基づく強度評価法を確立するには、例えば、一つの開き角の切欠きだけについて実験を行うことによって、他の切欠きの結果を予測できるかどうかは重要である。

異材境界角部の強度評価をその角部近傍の特異応力場に基づいて行うためには、通常なき裂に対して破壊力学を適用する場合とは異なり、以下の2点に注意する必要がある。

- (1) 異材境界角部近傍の特異応力場が、特異性指数の異なる応力拡大係数の組み合わせ(平面問題の場合はモードIとモードII)によって表現されること、
- (2) 破壊は通常異材接合境界上(またはその極く近傍)に生じるため、材料単体の強度のみならず、特に異材界面の接合強度、ならびに、き裂発生状況の把握が問題となること。

そこで本研究では、まず項目(1)に注目し、最も単純な異材境界角部の問題とみなしうる鋭いV型切欠き(異材のヤング率が0に相当)をアクリルシートの帯板に導入し、切欠きの開き角だけでなく、切欠きの傾き角も変化させて、引張試験を行った。すなわち、この場合には異材界面が存在しないため母材の強度のみ考えればよく、き裂発生状況の把握も比較的容易である。そして、モードIとモードIIの異なる特異性指数に対応する応力拡大係数の組み合わせが種々変化し

* 原稿受付 1997年5月23日。

¹ 正員,九州工業大学工学部 (☎ 804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。² 正員,東京理科大学工学部 (☎ 162-0825 東京都新宿区神楽坂1-3)。³ 准員,九州工業大学工学部。⁴ 学生員,九州工業大学大学院。

た場合の強度評価法を、切欠き先端における特異応力場の解析結果⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾を利用して考察した。

2. 実験材料及び方法

供試材は市販のメタクリル樹脂材(株式会社クラレ製, 商品名コモガラス, 板厚5mm)である。その機械的性質を表1に示す。素材を図1に示す形状の平板試験片に機械加工し、さらに試験片中央部に自作の先端の尖ったバイトを形削り盤に取り付けて切欠きを導入した。引張り試験には、コンピュータ計測制御式精密万能試験機(島津製作所 AUTOGRAPH AG10-TC)を使用した。クロスヘッドスピードは1 (mm/min)とし

Table 1 Mechanical properties of material (MPa)

Tensile Strength	72.5
Young modulus	3230
Bending Strength	113

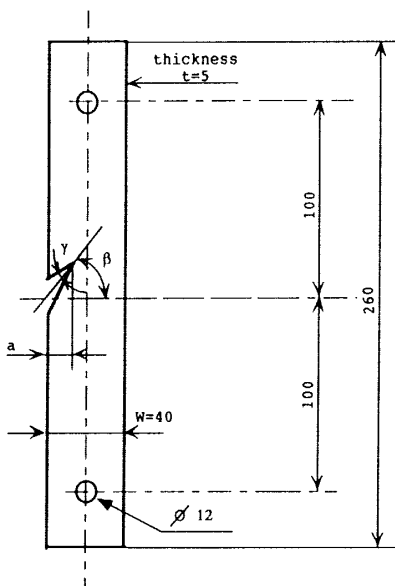


Fig.1 Geometry of specimens tested

Table 2 Dimensionless SIF

$$F_{I,\lambda_1} = \frac{K_{I,\lambda_1}}{\sigma_T \sqrt{\pi a}^{1-\lambda_1}}, F_{II,\lambda_2} = \frac{K_{II,\lambda_2}}{\sigma_T \sqrt{\pi a}^{1-\lambda_2}}$$

Tension: $\sigma_T^\infty = P/tW$, P: External Load

	a/W	F_{I,λ_1}				F_{II,λ_2}			
		0°	5°	15°	30°	0°	5°	15°	30°
$\gamma = 30^\circ$ $\lambda_1 = 0.501$ $\lambda_2 = 0.598$	0.0	1.148	1.140	1.107	1.000	0.000	0.075	0.218	0.397
	0.1	1.217	1.208	1.178	1.064	0.000	0.080	0.231	0.421
	0.2	1.399	1.390	1.354	1.226	0.000	0.090	0.262	0.478
	0.3	1.698	1.687	1.645	1.495	0.000	0.107	0.309	0.567
	0.4	2.517	2.144	2.094	1.914	0.000	0.130	0.378	0.698
$\gamma = 60^\circ$ $\lambda_1 = 0.512$ $\lambda_2 = 0.731$	0.0	1.225	1.218	1.176	1.040	0.000	0.113	0.326	0.577
	0.1	1.298	1.291	1.249	1.107	0.000	0.120	0.345	0.611
	0.2	1.492	1.485	1.437	1.282	0.000	0.136	0.391	0.697
	0.3	1.908	1.797	1.746	1.572	0.000	0.160	0.462	0.834
	0.4	2.295	2.282	2.224	2.023	0.000	0.197	0.570	1.046
$\gamma = 90^\circ$ $\lambda_1 = 0.544$ $\lambda_2 = 0.909$	0.0	1.336	1.327	1.266	1.065	0.000	0.331	0.946	1.576
	0.1	1.417	1.407	1.347	1.146	0.000	0.351	1.001	1.687
	0.2	1.630	1.618	1.557	1.356	0.000	0.397	1.140	1.975
	0.3	1.980	1.958	1.903	1.695	0.000	0.476	1.372	2.465
	0.4	2.523	2.486	2.441	2.211	0.000	0.609	1.760	3.254

た。実験は、図1に示す形状の片側切欠き試験片で、切欠き深さの相対値 a/W (a:切欠きの長さ, W:板幅)を 0.1と固定して開き角 $\gamma = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ における傾き角 $\beta = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ の実験を行った。

表2⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾は、片側切欠きの引張りにおける応力拡大係数の無次元値の解析結果を表にしたものである。

Table 3 Results of experiment ($\gamma = 30^\circ$)

Specimen No	W (mm)	a/w	t (mm)	γ (°)	β (°)	σ (MPa)	K_{I,λ_1} [$N \cdot mm^{-(1-\lambda_1)}$]	K_{II,λ_2} [$N \cdot mm^{-(1-\lambda_2)}$]
Inclination angle $\beta = 5^\circ$								
3101	40.0	0.10	5.0	30.3	4.67	8.36	36.3	2.09
3102	40.0	0.11	5.0	30.1	4.63	8.25	36.6	2.09
3103	40.0	0.11	5.0	30.8	4.52	8.37	37.0	2.11
Inclination angle $\beta = 15^\circ$								
3104	40.1	0.10	4.9	30.2	15.1	8.63	36.4	6.23
3209	39.9	0.10	4.9	30.2	15.0	8.95	37.4	6.41
3213	40.0	0.10	4.9	30.0	15.0	8.99	37.8	6.47
Inclination angle $\beta = 30^\circ$								
3107	40.2	0.11	4.9	30.7	29.5	9.11	35.3	12.1
3108	40.2	0.10	4.9	30.8	30.1	9.22	35.2	12.2
3109	39.8	0.10	4.9	30.9	29.6	9.00	33.4	11.6
3214	40.1	0.10	5.0	30.1	30.0	9.30	35.0	12.1
3215	40.1	0.10	4.9	30.3	30.0	9.57	35.8	12.4
3216	40.1	0.10	4.9	30.1	30.1	9.40	35.6	12.3

Table 4 Results of experiment ($\gamma = 60^\circ$)

Specimen No	W (mm)	a/w	t (mm)	γ (°)	β (°)	σ (MPa)	K_{I,λ_1} [$N \cdot mm^{-(1-\lambda_1)}$]	K_{II,λ_2} [$N \cdot mm^{-(1-\lambda_2)}$]
Inclination angle $\beta = 5^\circ$								
6201	39.9	0.10	5.0	60.1	4.90	9.31	41.9	2.87
6202	39.9	0.10	4.9	59.9	5.13	8.98	40.4	2.77
6203	40.0	0.10	4.9	60.0	5.07	8.99	40.8	2.79
Inclination angle $\beta = 15^\circ$								
6204	39.9	0.10	5.0	59.9	15.0	9.31	40.6	8.27
6205	39.8	0.10	4.9	60.0	15.0	9.08	39.4	8.05
6206	39.9	0.10	5.0	60.1	15.1	8.88	38.7	7.89
Inclination angle $\beta = 30^\circ$								
6207	39.9	0.10	4.9	60.0	30.2	10.6	40.6	16.6
6208	39.8	0.10	4.9	60.2	30.0	9.32	35.6	14.6
6209	40.0	0.10	4.9	59.9	30.0	9.49	36.8	15.0

Table 5 Results of experiment ($\gamma = 90^\circ$)

Specimen No	W (mm)	a/w	t (mm)	γ (°)	β (°)	σ (MPa)	K_{I,λ_1} [$N \cdot mm^{-(1-\lambda_1)}$]	K_{II,λ_2} [$N \cdot mm^{-(1-\lambda_2)}$]
Inclination angle $\beta = 5^\circ$								
9001	37.0	0.10	5.0	93.3	4.83	9.29	42.9	6.68
9002	40.0	0.10	5.0	92.5	4.75	9.32	43.8	6.73
Inclination angle $\beta = 15^\circ$								
9004	40.1	0.10	4.9	95.4	15.7	8.62	39.6	17.4
9005	39.9	0.10	4.9	93.8	15.2	9.19	41.5	18.5
9006	40.0	0.10	5.0	93.3	14.8	9.37	42.1	18.9
Inclination angle $\beta = 30^\circ$								
9007	40.0	0.10	4.9	92.9	29.2	10.8	40.4	36.5
9008	40.1	0.10	4.9	93.0	29.4	10.9	41.5	37.0
9009	40.1	0.10	5.0	92.8	29.1	10.5	40.5	35.7

Table 6 Experimental results of $K_{IC,\lambda 1}$, $K_{IIC,\lambda 2}$
(Average Standard deviation)

	$\beta (^{\circ})$	$K_{IC,\lambda 1} [N \cdot m^{-3/2(\lambda_1+1)}]$	$K_{IIC,\lambda 2} [N \cdot m^{-3/2(\lambda_2+1)}]$	σ_T° (MPa)
$\gamma = 30^{\circ}$ $\lambda_1 = 0.501$ $\lambda_2 = 0.598$	0	38.0 ± 1.2	0.0	8.19 ± 0.47
	5	36.6 ± 0.4	2.1 ± 0.0	8.33 ± 0.27
	15	37.2 ± 0.7	6.4 ± 0.1	8.86 ± 0.83
	30	35.0 ± 0.9	12.1 ± 0.3	9.27 ± 1.40
$\gamma = 60^{\circ}$ $\lambda_1 = 0.512$ $\lambda_2 = 0.731$	0	40.2 ± 2.4	0.0	8.29 ± 0.12
	5	41.0 ± 0.8	2.8 ± 0.1	9.09 ± 0.81
	15	39.6 ± 1.0	8.1 ± 0.2	9.09 ± 0.92
	30	37.7 ± 2.6	15.4 ± 1.1	9.80 ± 3.14
$\gamma = 90^{\circ}$ $\lambda_1 = 0.544$ $\lambda_2 = 0.909$	0	43.0 ± 0.6	0.0	8.98 ± 0.40
	5	43.3 ± 0.6	6.7 ± 0.0	9.31 ± 0.02
	15	41.1 ± 1.2	18.3 ± 0.4	9.06 ± 1.65
	30	40.8 ± 0.3	36.4 ± 0.3	10.74 ± 0.98

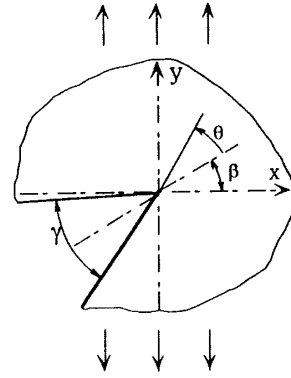


Fig.2 Model of angular corner

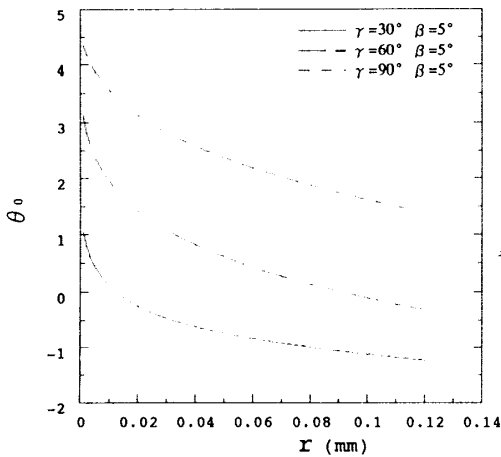


Fig.3 Direction of $\sigma_{\theta \max}$ ($\beta = 5^{\circ}$)

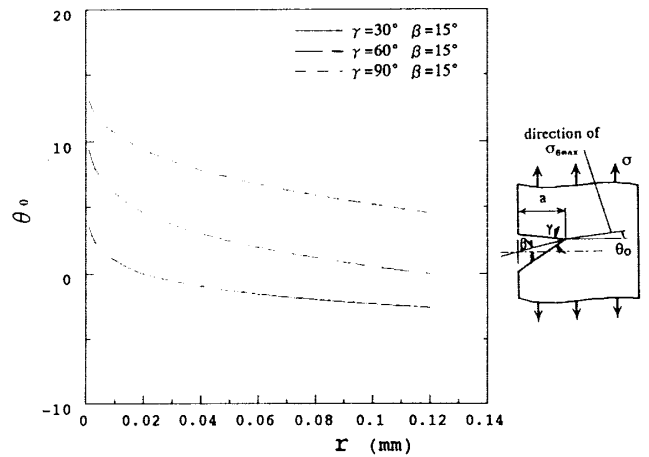


Fig.4 Direction of $\sigma_{\theta \max}$ ($\beta = 15^{\circ}$)

3. 実験結果および考察

前節で述べた導入法を用いて製作したV型切欠き付き平板試験片の引張破断試験を行った。あらかじめ測定した試験片の各寸法と破断荷重Pを用いて破断時の $K_{IC,\lambda 1}$, $K_{IIC,\lambda 2}$ を次式を用いて算出した。

$$K_{IC,\lambda 1} = F_{I,\lambda 1} \sigma_T^{\circ} \sqrt{\pi a}^{1-\lambda_1}, K_{IIC,\lambda 2} = F_{II,\lambda 2} \sigma_T^{\circ} \sqrt{\pi a}^{1-\lambda_2}, \sigma_T^{\circ} = P/tW \dots \dots \dots (1)$$

式(1)の $F_{I,\lambda 1}$, $F_{II,\lambda 2}$ は表2に与えられる。表3, 表4, 表5にそれぞれ開き角 $\gamma = 30^{\circ}$, 60° , 90° の実験結果を示す*1。ただし、傾き角 $\beta = 0^{\circ}$ の実験結果は前報⁽¹⁾で報告しているので省略した。Wとtはそれぞれ試験片幅と厚さを示している。表6は、片側切欠きの開き角 γ と傾き角 β を種々に変化させて実験を行って得られた σ_T° , $K_{IC,\lambda 1}$, $K_{IIC,\lambda 2}$ の平均値と標準偏差をまとめたものである*2。同じ γ で傾き角 β を増加させると $K_{IIC,\lambda 2}$ が増加するに伴い $K_{IC,\lambda 1}$ はばらつきが有りながら減少する。しかし一般にその変化はあまり大きくないようである。

図2のように極座標をとるときの角部近傍の応力の式は式(2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r = & -\frac{\lambda_1}{\sqrt{2\pi}} \left[(\lambda_1 - 3) \sin\{\lambda_1(\alpha - \pi)\} \cos(\lambda_1 - 1)\theta + [\lambda_1 \sin\{\alpha - \lambda_1(\alpha - \pi)\} + \sin(\lambda_1\pi)] \cos(\lambda_1 + 1)\theta \right] \frac{K_{I,\lambda_1}}{r^{1-\lambda_1}} \\ & -\frac{\lambda_2}{\sqrt{2\pi}} \left[(\lambda_2 - 3) \sin\{\lambda_2(\alpha - \pi)\} \sin(\lambda_2 - 1)\theta - [\lambda_2 \sin\{\alpha - \lambda_2(\alpha - \pi)\} - \sin(\lambda_2\pi)] \sin(\lambda_2 + 1)\theta \right] \frac{K_{II,\lambda_2}}{r^{1-\lambda_2}} \\ \sigma_{\theta} = & \frac{\lambda_1}{\sqrt{2\pi}} \left[(\lambda_1 + 1) \sin\{\lambda_1(\alpha - \pi)\} \cos(\lambda_1 - 1)\theta + [\lambda_1 \sin\{\alpha - \lambda_1(\alpha - \pi)\} + \sin(\lambda_1\pi)] \cos(\lambda_1 + 1)\theta \right] \frac{K_{I,\lambda_1}}{r^{1-\lambda_1}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

*1 表3~5に示すように、厳密には $a/w \geq 0.1$, $\beta = 5^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$ であるが、表6の結果を求める際には $a/w = 0.1$, $\beta = 5^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$ として表2の結果を用いた。

*2 表6で $K_{I,\lambda 1}$ の $\beta = 0^{\circ}$ の結果は前報⁽¹⁾の切欠き深さの相対値を変えた結果も含む平均値と標準偏差である。

$$\tau_{i\theta} = \frac{\lambda_2}{\sqrt{2\pi}} \left[(\lambda_2 + 1) \sin\{\lambda_2(\alpha - \pi)\} \sin(\lambda_2 - 1)\theta + [\lambda_2 \sin\{\alpha - \lambda_2(\alpha - \pi)\} - \sin(\lambda_2\pi)] \sin(\lambda_2 + 1)\theta \right] \frac{K_{II, \lambda_2}}{r^{1-\lambda_2}}$$

$$+ \frac{\lambda_1}{\sqrt{2\pi}} \left[(\lambda_1 - 1) \sin\{\lambda_1(\alpha - \pi)\} \sin(\lambda_1 - 1)\theta + [\lambda_1 \sin\{\alpha - \lambda_1(\alpha - \pi)\} + \sin(\lambda_1\pi)] \sin(\lambda_1 + 1)\theta \right] \frac{K_{I, \lambda_1}}{r^{1-\lambda_1}}$$

$$- \frac{\lambda_2}{\sqrt{2\pi}} \left[(\lambda_2 - 1) \sin\{\lambda_2(\alpha - \pi)\} \cos(\lambda_2 - 1)\theta + [\lambda_2 \sin\{\alpha - \lambda_2(\alpha - \pi)\} - \sin(\lambda_2\pi)] \cos(\lambda_2 + 1)\theta \right] \frac{K_{II, \lambda_2}}{r^{1-\lambda_2}}$$

式(2)に示されるように角部近傍の応力場はき裂問題と同様に角部に関して定義された応力拡大係数 K_{I, λ_1} , K_{II, λ_2} によって一義的に記述できる。しかし、き裂問題と異なり σ_θ が最大となる方向は距離 r の増加とともに変化する。これは、角部の特異応力場が特異性の異なる二つの応力場の和として表現されるためである。

図3~5は、開き角 γ が一定の場合に傾き角 β を変化させたときの σ_θ が最大となる方向の θ_0 を求めた結果である。図3~5より β が一定ならば γ が増加すると θ_0 は増加していくことがわかる。これは γ が大きくなると特異性の指数がモードIとモードIIで大きく異なる ($1 - \lambda_1 > 1 - \lambda_2$) ようになるため、モードIの応力場が支配的となり切欠きの角の二等分線上にき裂が進む傾向があるためと思われる。図6は、 $\beta = 30^\circ$ の場合の $\gamma = 30^\circ$ と 90° の実験後の試験片のスケッチである。図に示すように、切欠き先端でのき裂進展角度 θ_i は $\gamma = 90^\circ$ の場合で大きくなっている。また、図7は、破断後の切欠き先端でのき裂進展角度 θ_i を測定し、プロットしたものであり、図3~6に示す結果と同様に傾き角 β および開き角 γ が大となるに従って θ_i が大となる傾向が認められる。

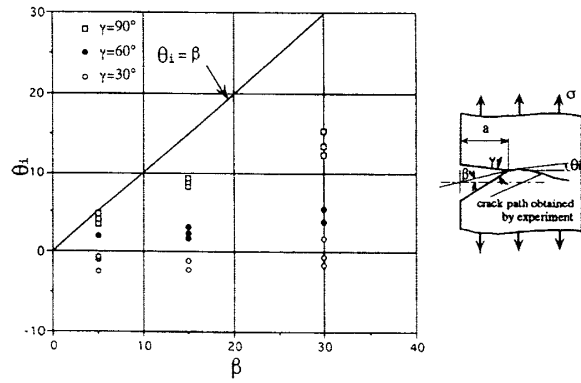


Fig.7 Crack initiation angle θ_i vs β

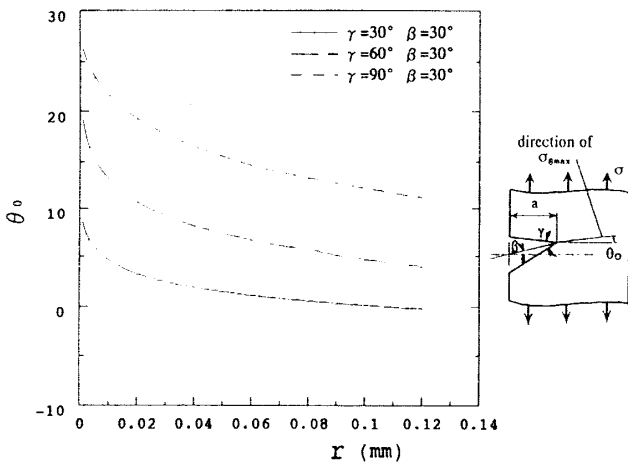
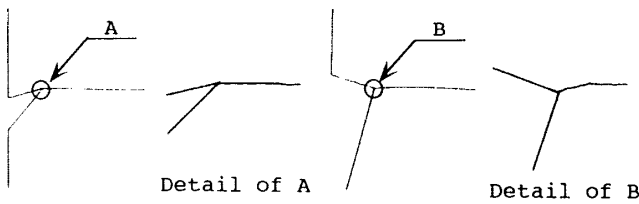


Fig.5 Direction of $\sigma_{\theta \max}$ ($\beta = 30^\circ$)



(a) $\gamma = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$ (b) $\gamma = 90^\circ$, $\beta = 30^\circ$

Fig.6 Examples of fracture surface

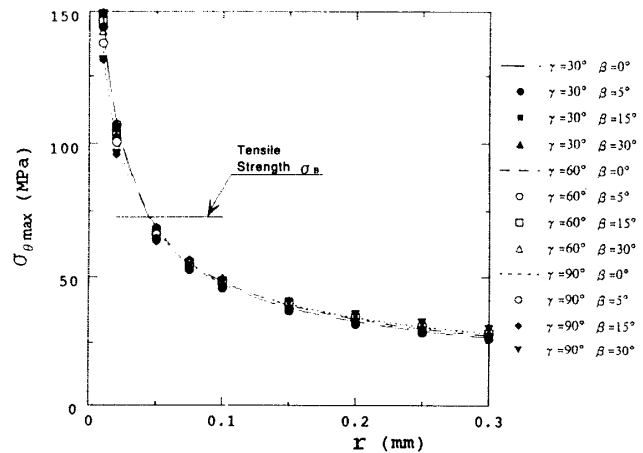


Fig.8 $\sigma_{\theta \max}$ vs r relation

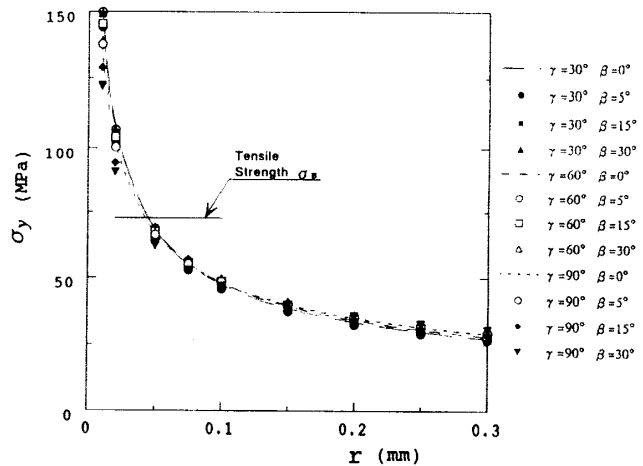


Fig.9 σ_y vs r relation

図8の3本の曲線は開き角 $\gamma = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ で傾き角 $\beta = 0^\circ$ の破壊時の応力分布を示した図である。また、図中の記号は傾き角 $\beta \neq 0^\circ$ の破壊時の σ_θ が最大となる角度 (r によって異なる) における $\sigma_{\theta \max}$ の応力分布を示している。図8に示すように傾き角 β が異なっても破断時の応力分布はほぼ等しくなっていることがわかる。

図9は図8と同様に、試験片の最小断面部となる荷重軸に垂直な面での応力分布 σ_y を示した図である。また、図10は図9を両対数グラフで整理した結果である。図8と比べて $\beta \neq 0^\circ$ の結果のバラツキがいくぶん大きくなるものの、 σ_y を用いて整理した場合にも応力分布はほぼ一定となっていることがわかる。図8では σ_θ が最大となる方向が r によって変化するため図8のように実験結果を整理することは応力分布 $\sigma_{\theta \max}$ を考える面がわかりにくいという欠点がある。一方、図9では荷重軸に垂直な水平面での応力分布を示しているため考察が容易である。よって、本研究では図9の結果をもとに混合モード破壊における破壊条件を検討するものとする。今ここで最も簡単な破壊のクライテリオンとして式(3)を考える。

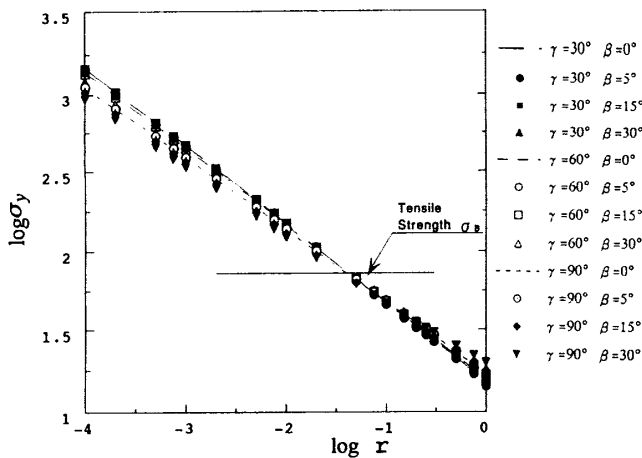


Fig.10 $\log \sigma_y$ vs $\log r$ relation

Table 7 Results of $K_{IC,\lambda_1}, K_{IIC,\lambda_2}$ based on eqn(3) [(): Experimental results]

	$\beta (^{\circ})$	$K_{IC,\lambda_1} [N \cdot m^{-3/2(\lambda_1+1)}]$	$K_{IIC,\lambda_2} [N \cdot m^{-3/2(\lambda_2+1)}]$	σ_T° (MPa)
$\gamma = 30^\circ$ $\lambda_1 = 0.501$ $\lambda_2 = 0.598$	0	38.0 (38.0)	0.0 (0.0)	8.19 (8.19)
	5	37.8 (36.6)	2.2 (2.1)	8.61 (8.33)
	15	36.8 (37.2)	6.3 (6.4)	8.76 (8.86)
	30	34.0 (35.0)	11.7 (12.1)	8.99 (9.27)
$\gamma = 60^\circ$ $\lambda_1 = 0.512$ $\lambda_2 = 0.731$	0	40.1 (40.2)	0.0 (0.0)	8.81 (8.29)
	5	40.0 (41.0)	2.7 (2.8)	8.86 (9.09)
	15	39.3 (39.6)	8.0 (8.1)	9.03 (9.09)
	30	37.6 (37.7)	15.4 (15.4)	9.80 (9.80)
$\gamma = 90^\circ$ $\lambda_1 = 0.544$ $\lambda_2 = 0.909$	0	43.9 (43.0)	0.0 (0.0)	8.17 (8.98)
	5	43.9 (43.3)	6.6 (6.7)	9.43 (9.31)
	15	43.9 (41.1)	19.5 (18.3)	9.69 (9.06)
	30	44.5 (40.8)	39.7 (36.4)	11.71 (10.74)

$$\sigma_y(\epsilon) = \sigma_B \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

σ_B : 実験材料の引張強さ(72.5MPa)

ϵ : 引張強さ σ_B と荷重軸垂直方向応力 σ_y の交点

開き角 $\gamma = 30^\circ$, 傾き角 $\beta = 0^\circ$ の場合の結果から式(3)で $\epsilon = 0.042\text{mm}$ を得る。そして $\sigma_y(0.042\text{mm}) = 72.5\text{MPa}$ という条件より $\gamma = 30^\circ$, $\gamma = 60^\circ$ と $\gamma = 90^\circ$ の $K_{IC,\lambda_1}, K_{IIC,\lambda_2}$ を求めると表7ようになる。

表7より、誤差は多くの場合数%以内(最大でも9%程度)で実験結果と一致する。すなわち、 $\gamma = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$ の結果から他の γ および β の結果を予想することが可能である。

4. 結 言

異材接合角部近傍の特異応力場は拡張された応力拡大係数 $K_{I,\lambda_1}, K_{II,\lambda_2}$ によって表わされる。しかし、これらを用いた異材接合角部の強度評価法はいまだ確立されていない。そこで本研究では、その最も単純な場合であるV型切欠きを持つメタクリル樹脂板の混合モード破壊における強度評価法を考察した。試験片として片側に鋭いV型切欠きを持つ帯板試験片を用意し、開き角 γ および傾き角 β を変化させて引張破断試験を行った ($\gamma \leq 90^\circ, \beta \leq 30^\circ$)。切欠き先端から一旦短いクラックが生じた後(または、切欠き先端に短いクラックが存在したと仮定した場合)には、従来の破壊力学の強度評価法が適用可能であると考えられる。しかし、切欠き先端からの初期き裂がどのような条件でどのように生じるかという点に関しては本論文で用いたような $K_{I,\lambda_1}, K_{II,\lambda_2}$ に基づく議論が不可欠である。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 同じ開き角 γ をもつ切欠きの傾き角 β を増加させたとき、試験片破断時の K_{IIC,λ_2} が増加するに伴って K_{IC,λ_1} はばらつきがありながら減少する。しかし、一般に K_{IC,λ_1} の変化は小さいようである (表6)。

(2) き裂の進展方向は傾き角 β および開き角 γ が増加するに従い、角の二等分線上に近い方向に進む傾向にある。これは開き角 γ が大きくなると特異性の指数がモードIとモードIIで大きく異なり ($1 - \lambda_1 > 1 - \lambda_2$)、モードIの応力場が支配的となるためであると思われる。

(3) 開き角 γ および傾き角 β を広範囲に変化させた試験片の破壊条件を検討した。その結果、破断時における荷重軸垂直方向の σ_y の応力分布はほぼ一定になった。従って、適当なクライテリオン (式(3)等) を用いれば、一つの開き角 γ 、一つの傾き角 β で実験を行うことにより、他の γ および β の結果を予想することが可能で

ある。

なお本研究の一部を手伝っていただいた卒論学生の
日力義則氏, 尾里直繁氏, 椿 浩忠氏に深謝する。

文 献

- (1) 陳 耽疇・野田尚昭・高瀬 康・諸富貴光, 角部の応力拡大係数を用いた強度評価法, 機論, 62-598, A(1996), 1445-1449.
- (2) 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境界面強度評価, 機論, 54-499, A(1988), 597-603.

- (3) 木原茂文・吉井明彦, 等価応力拡大係数の概念による鋭敏な切欠構造の強度評価, 機論, 56-524, A(1990), 903-910.
- (4) 河野好秀・石川晴雄, 正方形の剛体介在物と孔の角部における特異性解析について, 機論, 56-527, A(1990), 1641-1647.
- (5) 陳 耽疇・西谷弘信, 引張りまたは面内曲げを受ける片側V形切欠き入り帯板の応力拡大係数 $K_{I,\lambda 1}$ と $K_{II,\lambda 2}$, 機論, 59-560, A(1993), 1069-1074.
- (6) Chen, D. H., Stress intensity factors for V-notched strip under tension and in-plane bending, Int. J. Fract., 70, (1995), 81-97.
- (7) 陳 耽疇・西谷弘信, 半無限板のV形切欠き先端における特異応力場, 機論, 57-538, A(1991), 1406-1411.