

ぜい性材料の破壊じん性に及ぼす初期スリットの鋭さの影響†

原 田 昭 治* 野 田 尚 昭*
深 迫 泉** 遠 藤 達 雄*

Effects of Notch Sharpness and Plate Thickness on the Fracture
Toughness K_{Ic} of Acrylic Resin

by

Shoji HARADA*, Nao-Aki NODA*, Izumi FUKASAKO**
and Tatsuo ENDO*

In fracture toughness testing of ceramics, it is well known that notch sharpness gives a large effect on the fracture toughness. In this respect, the fracture toughness tests were carried out on acrylic resin. Plate specimens with different notch sharpness were prepared. The different artificial notches were introduced into the specimens by means of micro-grinding disk, fret saw, laser machining, razor and fatigue pre-cracking. It was found that the fracture toughness K_{Ic} decreased with increasing the notch sharpness. As a fracture criterion, it was found that the fracture occurred when the stress at a definite point ahead of the notch tip reached the critical value. In addition, it was also clarified that the specimen thickness (5~15 mm) hardly influenced the the value of K_{Ic} .

キー・ワード：アクリル樹脂，破壊じん性，切欠きの鋭さ，板厚効果

1 緒 言

周知のように，金属材料の破壊じん性試験においては初期スリット形状の影響を除くため，一般にスリットの先端にさらに疲労予き裂を導入して行う方法が採られ，その導入方法も規定されている¹⁾。一方，セラミック等のぜい性材料では疲労予き裂の導入が困難なため，通常種々の方法で導入した初期スリットを有する試験片を直接破壊試験して破壊じん性 K_{Ic} を決定する方法が採られる。その際，ビッカースやスnoop式の圧子を利用して鋭い自然き裂を導入する方法も採られるが，一般には導入方法によって異なる種々の鋭さの初期スリットを有する試験片が用いられている。それ故導入する初期スリットの鋭さによって K_{Ic} が変化することが考えられるが，現在までのところ導入するスリットの鋭さに関する規格はなく，またこの種の問題について検討した例は少ないようである。^{4)~6)}

Hashemi と Williams⁴⁾ は5種類の高分子材料を用いて K_{Ic} に及ぼす切欠き半径の鋭さの影響について検討を行っている。PMMA や PVC のような低じん性材では初期スリット先端の切欠き半径が広範囲 (12.5 μ m~1mm) に変化しても K_{Ic} はかなり近い値を示すのに対し，PA やナイロンおよび PP のような高じん性材では K_{Ic} 評価に切欠きの鈍化を考慮した塑性域補正が必要であること，などの点を明らかにし

た。若井ら⁵⁾も HPSN (ホットプレス窒化ケイ素) について初期スリット幅を約 45~330 μ m に変え， K_{Ic} に及ぼすスリットの鋭さの影響について検討を加えている。

有力な新素材の一つとして各種セラミックが注目を浴びている今日，それらぜい性材料の破壊じん性試験において K_{Ic} に及ぼす初期スリット先端の鋭さの影響を的確に把握・評価することは緊要である。

村上および著者らは，先にエポキシ樹脂およびアクリル樹脂等のぜい性プラスチック材料を用いてき裂部材の応力拡大係数 K を実験的に決定する手法を提案し，同手法の有効性を検証するとともに実際に二，三のき裂部材の K 値決定問題に適用した結果について報告した。本研究はそれらの研究の一環として，同手法を主題の問題に適用して検討することを目的とする。セラミック等のぜい性材料に対するアナロジーとしてぜい性プラスチック材料を用いた場合，材料による破壊機構の相違の影響が考えられる。しかし，破壊が塑性の影響が無視でき，かつき裂または初期スリット先端の幾何学的形状によって定まる弾性応力場の強さのみによって規定されるものとなれば，ぜい性プラスチック材料について得られた知見は，セラミック材料の巨視力学的破壊条件を論じるのに基本的には適用可能と考えられる。

† 原稿受理 昭和61年2月5日 Received Feb. 5, 1986

* 正 会 員 九州工業大学工学部 北九州市戸畑区仙水町, Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu

** (株)日立製作所戸塚工場 横浜市戸塚区戸塚町, Hitachi Company Ltd., Tozuka-cho, Tozuka-ku, Yokohama

本研究ではぜい性材料としてアクリル樹脂を用い、平板試験片に種々の鋭さのもつ初期スリットを導入し、 K_{Ic} に及ぼすスリットの鋭さの影響について検討した。スリットの導入はファインカッター、糸のこ、レーザ加工および剃刀を利用し、さらに疲労予き裂を導入した場合についても調べた。また、 K_{Ic} に及ぼす板厚の影響についても一部検討を行った。最後に K_{Ic} と初期スリットの鋭さの関係について切欠き応力集中の立場より考察した。

2 実験材料および方法

供試材は市販のアクリルシート (Sumipex, 住友化学工業 K.K. 製, 板厚 5~15 mm) である。素材を Fig. 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片側端に以下に示すような5種類の方法で鋭さの異なる初期スリットを導入した。

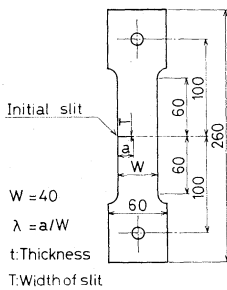


Fig. 1. Geometry of specimens tested.

- (1) ファインカッターによる加工：直径 150 mm, 厚さ 0.5 mm のマイクログラインドを用いて初期スリットを導入した。導入の際、試験片の両表面でスリットの長さが等しくなるように留意した。
- (2) 糸のこによる加工：市販の金工用糸のこ (厚さ 0.25 mm) を用いた。初期スリットを試験片端面に対して直角方向に精度よく導入するため、試験片の両表

面を補助板を介して万力で固定し、補助板の端面をスリット導入用のガイドに利用した。

(3) レーザ加工：レーザ加工機 (八幡電機精工 K.K. 自家製) を利用してスリットを導入した。加工後、残留応力除去のため、熱処理を行った。熱処理は乾燥器を用い、室温から 80℃まで 15℃/h で昇温後、7.5℃/h で室温まで徐冷した。

(4) 剃刀による加工：最初に糸のこを用いてほぼ所定の長さのスリットを導入し、つぎにスリット先端に市販の剃刀 (厚さ 0.1 mm) を用いて長さ約 0.5 mm 程度のき裂を入れた。

(5) 疲労予き裂：供試材がぜい性材料であるため、通常金属材料の破壊じん性試験で用いられる疲労予き裂導入方法の適用が困難なため、以下の方法を採用した。まず、Fig. 1 に示した試験片寸法より大きめに切り出した板の中央部の側端に糸のこを用いて短い切込みを入れ、さらに切込みにくさびを打ち込んで初期き裂を導入した。このようにして導入した初期き裂の長さは大きければつきを示したため、初期き裂長さが約 7 mm 程度となるように試験片全体を機械加工し、最後に疲労試験機 (島津引張圧縮疲労試験機 2 形, 最大容量 9.8 kN) を用いて片振荷重条件下 (平均応力 1.72 MPa, 応力振幅 0.59 MPa) で疲労き裂を所定の長さまで進展させた。

Fig. 1 に示した試験片の寸法は板厚を 5 mm とし、スリット長さ比 a/W (a : 初期スリット長さ, W : 板幅) を 0.2, 0.25, 0.30, 0.35, 0.4 の 5 種類に選び、それぞれの長さの試験片を 2 本ずつ計 10 本の試験片を上記(1)~(5)の各種スリットの場合について用意した。また、破壊じん性に及ぼす板厚の影響を調べるため、剃刀で導入したスリットの場合について、さらに板厚を 10 mm, 15 mm に変えて検討を行った。

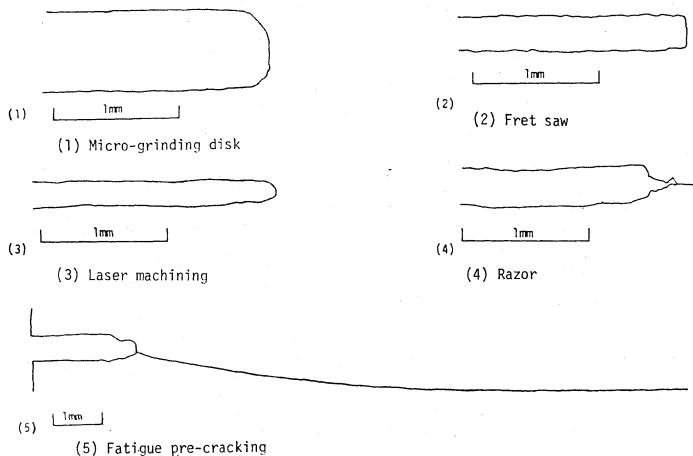


Fig. 2. Various shapes of the initial slits introduced by use of five different techniques.

Fig. 2 は上述(1)~(5)の方法によって導入した初期スリットの先端部の形状を万能投影機を用いて拡大してスケッチした例を示す。ファイナカッタ、糸のこおよびレーザ加工による導入の場合、スリット幅は平均でそれぞれ 0.59, 0.29, 0.24 mm 程度であるが、剃刀および疲労予き裂による導入の場合は、自然き裂とみなせる程度の鋭さである。

引張破壊試験はアムスラ型引張試験機を用いて実施

した。手動操作により、引張速度がほぼ一定となるように負荷して実験を行った。

3 実験結果および考察

3・1 初期スリットの導入法および鋭さの相違による破壊じん性 K_{Ic} の変化について

前節で述べた5種類のスリット導入法を用いて作製した片側スリット付平板試験片の引張破壊試験を行うことにより、 K_{Ic} がスリットの導入法および鋭さの違

Table I. Change of the values of K_{Ic} with a sharpness of the initial slit.

Notch	No.	T (mm)	t (mm)	W (mm)	λ ($=a/W$)	σ (MPa)	K_{Ic} ($N/mm^{3/2}$)
Micro-grinding disk	05101	0.553	5.125	40.029	0.201	8.23	57.0
	05102	0.569	5.210	39.965	0.263	6.78	60.1
	05103	0.631	5.199	40.043	0.302	5.32	54.8
	05104	0.622	5.139	40.024	0.357	5.34	67.7
	05105	0.596	5.096	40.037	0.405	4.04	61.6
	05106	0.570	4.620	40.140	0.211	8.09	58.4
	05107	0.789	4.740	40.406	0.257	7.89	68.7
	05108	0.617	4.780	40.398	0.314	6.25	67.7
	05109	0.622	4.715	40.407	0.350	4.84	60.0
	05110	0.603	4.820	40.352	0.411	3.33	52.1
Fret saw	05201	0.305	5.078	39.956	0.201	7.93	54.9
	05202	0.287	5.212	39.997	0.244	6.82	56.2
	05203	0.303	5.205	40.001	0.309	4.95	52.3
	05204	0.275	5.117	40.049	0.350	4.21	52.0
	05205	0.285	5.180	40.071	0.411	3.68	57.4
	05206	0.289	4.821	40.371	0.202	7.36	51.3
	05207	0.281	4.905	40.336	0.258	5.26	45.9
	05208	0.285	4.880	40.366	0.297	5.23	53.0
	05209	0.289	4.690	40.130	0.353	4.48	56.0
	05210	0.284	4.920	40.351	0.404	3.66	55.8
Laser machining	05301	0.241	4.880	40.108	0.220	6.01	45.0
	05302	0.224	4.730	40.106	0.246	5.58	46.4
	05303	0.230	4.880	40.065	0.299	5.42	55.2
	05304	0.263	4.685	40.091	0.349	3.87	47.6
	05305	0.246	4.640	40.101	0.394	3.42	50.0
	05306	0.233	4.895	40.111	0.217	6.44	47.7
	05307	0.228	4.659	40.100	0.249	5.46	45.9
	05308	0.242	4.808	40.115	0.298	4.98	50.5
	05309	0.234	4.875	40.107	0.357	3.76	47.7
	05310	0.247	4.643	40.056	0.393	3.32	48.3
Razor	05401	—	4.730	40.356	0.192	6.27	41.9
	05402	—	4.675	40.395	0.233	5.04	39.9
	05403	—	4.893	40.341	0.288	4.52	44.3
	05404	—	4.819	40.332	0.332	3.83	44.3
	05405	—	4.677	40.389	0.378	3.17	43.7
	05406	—	4.942	40.364	0.190	6.59	43.7
	05407	—	4.879	40.353	0.245	5.43	45.1
	05408	—	4.860	40.366	0.271	4.65	42.8
	05409	—	4.692	40.383	0.348	4.09	50.3
Fatigue pre-cracking	05501	—	4.881	39.955	0.226	4.83	36.9
	05502	—	4.933	39.977	0.256	3.63	31.3
	05503	—	5.035	39.902	0.262	3.76	33.2
	05504	—	4.850	39.981	0.292	3.08	30.5
	05505	—	4.831	39.954	0.364	2.54	33.0
	05506	—	4.964	39.970	0.231	3.86	30.2
	05507	—	4.795	39.937	0.255	4.36	37.4
	05508	—	4.789	39.913	0.279	3.80	35.8
	05509	—	4.859	39.959	0.308	2.93	30.8
	05510	—	4.923	39.963	0.324	2.79	31.2
	05512	—	4.945	39.950	0.205	5.86	41.2

いによってどのように変化するかを調べた。すなわち、あらかじめ測定した初期スリット長さ a と引張試験より求めた破断荷重 P を用い、 K_{Ic} を次式を用いて算出した。

$$K_{Ic} = F(\lambda) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} F(\lambda) &= (1.99 - 0.41\lambda + 18.7\lambda^2 \\ &\quad - 38.48\lambda^3 + 53.85\lambda^4) / \sqrt{\pi} \\ \lambda &= a/W, \quad \sigma = P/Wt \quad (t: \text{板厚}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

それぞれのスリット導入法に対する K_{Ic} の実測結果を Table I および Fig. 3 に示す。各系列それぞれ

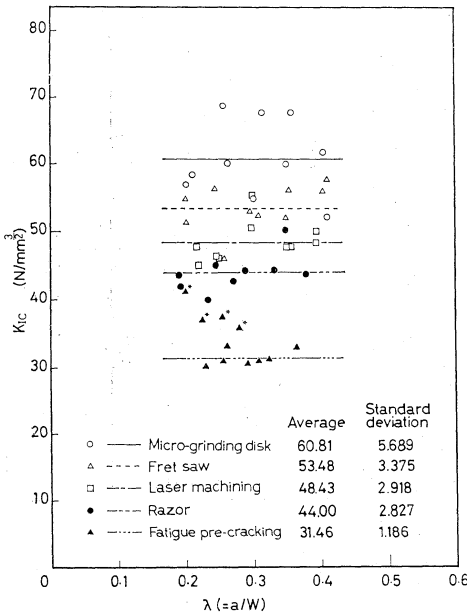


Fig. 3. Change of the values of K_{Ic} for specimens with a difference in sharpness of the initial slit.

10本の試験片について測定した K_{Ic} の平均値および標準偏差は以下のようである。

- (1) ファインカッター: 60.81 ± 5.69 (N/mm^{3/2})
- (2) 糸のこ: 53.48 ± 3.38 (N/mm^{3/2})
- (3) レーザ加工: 48.43 ± 2.92 (N/mm^{3/2})
- (4) 剃刀: 44.00 ± 2.83 (N/mm^{3/2})
- (5) 疲労予き裂: 31.46 ± 1.19 (N/mm^{3/2})

ただし、疲労予き裂導入の場合の結果は以下のようにして求めた。Fig. 3 に示した疲労予き裂の結果(▲)の中で他の結果に比べて比較的大きなばらつきとなっている*印付の4本の試験片の結果は、破面観察の結果、予き裂形状が不適当と判断した参考データで、上記の計算では除外した。Fig. 3 に示した結果より、初期スリットの形状が鋭いほど実測される見かけ上の K_{Ic} が小さくなるという傾向が認められる。以下ではこの点について切欠き応力集中の立場から検討を試みる。

る。

Fig. 4 に5種類の導入スリットに対し、 $a/W=0.3$ の場合について、引張破断時の初期スリット先端部近傍の弾性応力分布 σ_y を計算によって求めたものを示す。計算に際して、スリット先端の切欠き形状が Fig. 2 に示したように不規則である点を考慮し、(1)~(3)の導入スリットは切欠きと見なし、切欠き先端の曲率半径 ρ としてはスリット幅 T の半分を採った。また、(4)、(5)の方法による導入スリットはそれらをき裂 ($\rho=0$) と見なして整理した。なお、応力集中係数 K_t と応力分布 σ_y の算出には、次式で表されるだ円孔を有する無限板の引張問題の解を利用して近似した。

$$\left. \begin{aligned} K_t &= 1 + 2m, \quad m = \sqrt{\frac{a}{\rho}} \\ \xi &= \frac{a+x}{\sqrt{a\rho+2ax+x^2}} \sqrt{\frac{a}{\rho}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \sigma_\infty \frac{m^4 \xi^3 + m^2(m^2 - m - 3)\xi + m + 1}{(m-1)(m^2-1)} \quad (3)$$

ただし、 σ_∞ : 無限遠での引張応力

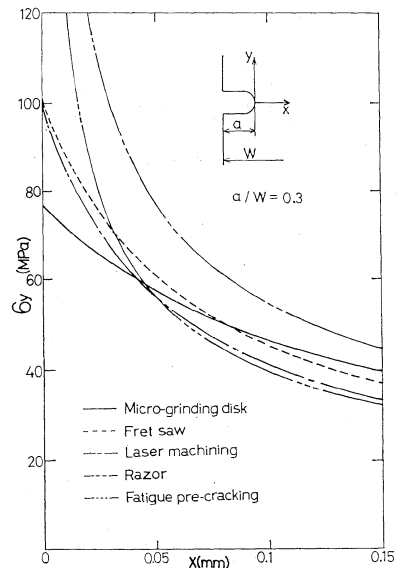


Fig. 4. Stress distributions near the tip of the initial slits with different sharpness.

Fig. 4 に示す結果より明らかなように、引張破断時の弾性応力分布は剃刀導入スリットの結果を除き、いずれも $x=0.03 \sim 0.08$ mm の範囲で交差する。すなわち、石橋が疲労における切欠き効果を論じる際に提案した切欠き底から ϵ_0 だけ内部に入った点の応力 $\sigma_y(\epsilon_0)$ に注目した次式で示される破壊条件が近似的に成立するようである。

$$\sigma_y(\epsilon_0) = \sigma_{yc} = \text{一定} \quad (4)$$

本材料の場合、 $\epsilon_0 \approx 0.05$ mm, $\sigma_{yc} \approx 59$ MPa 程度である。

上式の破壊条件は剃刀によるスリット導入の場合には成立しないようである。主な理由として、剃刀を用いてスリットを導入する際、剃刀を強く押しつけて加工を行う必要があり、その結果スリット先端近傍に圧縮の残留応力が形成されたためと考えられる。なお、残留応力の影響を除くため熱処理を行ったが、残留応力の解放に伴ってき裂先端が広がるように試験片全体が変形したため、有効な結果は得られなかった。

3・2 破壊じん性に及ぼす板厚の影響について

板厚の違いによる破壊じん性の変化を調べるため、試験片厚さを 5 mm, 10 mm, 15 mm の 3 種類に選び検討を行った。初期スリットは疲労予き裂に比べ導入が容易な剃刀による方法を用いた。なお、この方法は既述のように、導入時にスリット先端部近傍に発生する圧縮残留応力の問題を含むが、圧縮残留応力が各板厚の試験片の破壊じん性に対してはほぼ同じ影響を考えるものとして取り扱った。

実験結果を初期スリットの鋭さを変えた場合と同様な表示で Table II および Fig.5 に示す。実験結果に多少のばらつきが見られるものの、全体として K_{Ic} は板厚に無関係にほぼ一定であるものと判断される。試みに、図中の *、**印付のデータを除き(後述)、各板厚試験片の K_{Ic} の平均値と標準偏差を求めると、

Table II. Change of the values of K_{Ic} with a specimen thickness.

No.	t (mm)	w (mm)	λ (=a/W)	σ (MPa)	K_{Ic} (N/mm ^{3/2})
05401	4.730	40.356	0.192	6.27	41.9
05402	4.675	40.395	0.233	5.04	39.9
05403	4.893	40.341	0.288	4.52	44.3
05404	4.819	40.332	0.332	3.83	44.3
05405	4.677	40.389	0.378	3.17	43.7
05406	4.942	40.364	0.190	6.59	43.7
05407	4.879	40.353	0.245	5.43	45.1
05408	4.860	40.366	0.271	4.65	42.8
05409	4.692	40.383	0.348	4.09	50.3
10401	10.375	39.882	0.207	6.45	45.7
10402	9.745	39.906	0.260	5.45	47.7
10403	9.942	39.874	0.292	4.11	40.6
10404	9.869	39.889	0.358	3.06	38.8
10405	6.955	39.889	0.409	2.96	45.8
10406	9.632	39.891	0.204	5.61	39.2
10407	10.429	39.882	0.250	5.12	43.1
10408	9.665	39.893	0.303	3.43	35.4
10409	10.365	39.913	0.349	3.53	43.3
15401	15.373	40.079	0.205	6.45	45.3
15402	14.781	40.066	0.260	4.57	40.1
15403	15.122	39.998	0.304	3.75	38.9
15404	14.800	40.051	0.350	3.46	42.7
15405	14.600	40.042	0.416	2.85	45.3
15406	14.875	40.122	0.215	5.23	38.4
15407	14.646	40.004	0.246	4.84	40.2
15408	14.765	39.984	0.310	3.74	39.6
15409	14.595	40.039	0.358	4.14	52.6
15410	14.675	40.015	0.401	2.87	43.0

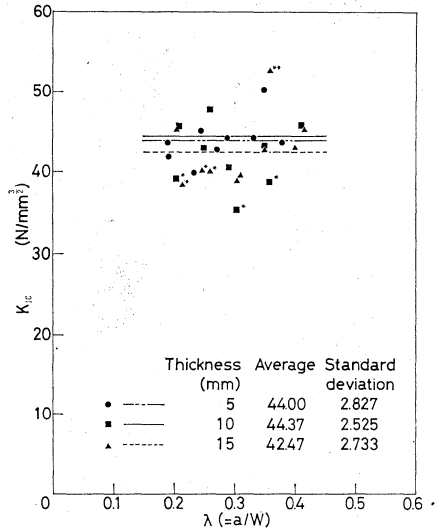


Fig. 5. Change of the values of K_{Ic} for specimens with a difference in specimen thickness.

以下のものである。

- (1) 板厚 5 mm : 44.00 ± 2.83 (N/mm^{3/2})
- (2) 板厚 10 mm : 44.37 ± 2.53 (N/mm^{3/2})
- (3) 板厚 15 mm : 42.47 ± 2.73 (N/mm^{3/2})

板厚 15 mm の場合の K_{Ic} が他の場合に比べてわずかに低いのが、この種の材料の K_{Ic} 試験結果に見られるばらつきの範囲内であり、板厚による有意差はないものと判断される。

同一スリット形状の試験片を用いても、破面形態が異なる場合があり、 K_{Ic} が変化して結果のばらつきの要因となることについてはすでにエポキシ樹脂およびアクリル樹脂に関する前報の結果で示したが、本研究の場合にもそのような結果が見られた。Fig.6 (a), (b), (c)に巨視的破面形態の例を示す。各破面例に見られるように、剃刀を用いて導入した初期スリットの前縁形状には次のような特徴が認められた。板厚の増加とともにき裂を断面内で均一に導入するのが困難となり、その結果き裂前縁形状は両表面で多少中心部よりき裂が長い湾曲型となっている。

さて、大部分の試験片は Fig.6 (a)のような破面パターンを示し、初期スリットと最終急速破断部の間に先行する破壊域(各図中の矢印参照)が観察された。この破壊域は金属材料の破壊じん性試験で経験されるポップインまたは安定き裂成長域に対応するものと考えられる。実際試験中、破断直前に荷重が多少変化するのが観察された。ただ、前報で述べたように、供試材をぜい性材料と見なして取り扱えることおよび破断荷重に対する既述の荷重変化の割合が、無視できる程度に小さかったことを考慮して、ここでは破断荷重の測定に主眼をおいた。以下では、先行破壊域を仮に擬

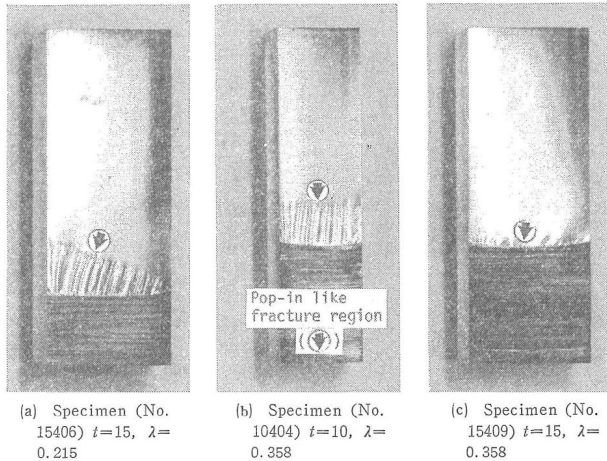


Fig. 6. Macrofractographs of the specimens showing different types of pop-in like fracture patterns.

ポップインと呼ぶことにする。多くの試験片では、この擬ポップイン破壊領域でのき裂長さは両表面で異なっていた。Fig. 6 (b)は Fig. 5 で低い K_{Ic} を示した*印付データに対応する試験片の破面の例で、この場合には擬ポップイン領域は Fig. 6 (a)の場合に比べて大きく、かつき裂長さは両表面ではほぼ等しかった。Fig. 5 で高い K_{Ic} を示した**印付データの試験片の破面を Fig. 6 (c)に示す。この場合には擬ポップイン状の破壊領域は Fig. 6 (a)の場合に比べて小さく、むしろ、初期スリット先端部から直接最終破壊が起っているようであった。導入した初期スリット先端の鋭さが不十分であったことが考えられる。

本研究では、既述のように破断時の荷重測定に主眼をおいたため、擬ポップイン状破壊および最終急速破壊開始時の荷重を区別していない。Fig. 5 および Table II において、 K_{Ic} はすべて導入した初期スリット長さを用いて算出した。試みにき裂長さを最終急速破壊開始時で評価 (Fig. 6 (a)のように両表面でき裂長さが異なる場合には、前報⁷⁾に従い長い方の値を採用)して K_{Ic} を算出し、Fig. 5 と同様にプロットしたところ、結果のばらつきが大きくなった。

Fig. 6 (a), (b), (c)に例示する破面形態の相違が生起する理由は必ずしも明らかではないが、剃刀を用いて導入した初期スリットの先端近傍での残留応力の分布の相違や湾曲型の初期スリット前縁形状始めとする、一定形状でかつ一様な鋭さのスリットの導入問題等が関与したものと考えられる。

4 結 言

セラミック等のぜい性材料の破壊じん性試験における、 K_{Ic} に及ぼす初期スリットの鋭さの影響について検討するため、アクリルシートに種々の方法で導入した異なる鋭さの初期スリット付平板試験片を用意し、

引張破断試験を行った。併せて K_{Ic} に及ぼす試験片厚さの影響についても一部検討を行った。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 初期スリットが鋭いほど K_{Ic} は低くなり、また結果のばらつきも小さくなる。

(2) 幅が 0.2 mm 程度以上の初期スリットを切欠きとみなし、切欠き応力集中の立場から破壊条件を規定すると、切欠き底から微小距離 ϵ_0 入った点の応力が限界値に達したとき破壊が起るというクライテリオンがほぼ成立するようである。

(3) K_{Ic} に及ぼす板厚の影響は認められなかった。

(4) 同一方法でスリットを導入しても破断形態が異なり、それにとまって K_{Ic} が大きく変化する例が観察された。

最後に有益なご討論を頂いた九州大学西谷弘信教授に深く感謝の意を表す。また実験の遂行と結果の整理に協力された本学学生佐藤浩幸君 (現日立湘南電子(株))、椿正昭君 (現九工大院) およびレーザ加工に便宜を計って頂いた八幡電機精工(株)菊竹倉平氏に謝意を表す。

(昭和60年6月27日 第3回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、弾塑性破壊靱性 J_{Ic} 試験方法 (JSME S001-1981), p. 10 (1981) 日本機械学会編。
- 2) J. J. Petrovic and M. G. Mendiratta, ASTM STP 678, 83 (1979).
- 3) M. Srinivasan and S. G. Sehadri, ASTM STP 745, 46 (1981).
- 4) S. Hashemi and J. G. Williams, J. Materi. Sci., **20**, 922 (1985).
- 5) 若井史博, 松野外男, 阪口修司, 第29回破壊力学部門委員会資料, FMR-143 (1984).
- 6) 小林俊郎, 鉄と鋼, **71**, 654 (1985).
- 7) 村上敬宜, 原田昭治, 遠藤達雄, 原田康彦, 八木良樹, 材料, **31**, 515 (1982).
- 8) 原田昭治, 村上敬宜, 遠藤達雄, 原田康彦, 深迫 泉, 材料, **33**, 1147 (1984).
- 9) S. Harada, T. Endo, Y. Harada and Y. Murakami, "Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures" (editors: G. C. Sih, E. Sommer, W. Dahl), p. 1095 (1984) Martinus Nijhoff Publishers.
- 10) W. F. Brown, Jr. and J. Strawley, ASTM STP 410, 11 (1966).
- 11) 西谷弘信, 日本機械学会論文集, **48**, 1353 (1983).
- 12) 石橋 正, "金属の疲労と破壊の防止", p. 56 (1977) 養賢堂。