文

論

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_{Ie} 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_{Ie} . $\neq -\cdot \nabla - k : \nabla - \nu \mu$ mblin, we clark of $\chi_{Ie} \otimes 0$

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. つ方、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_{Ie} を決定す る方法が採られる.その際、ビッカースやヌープ式の 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_{Ie} 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.

Hashemi と Williams は5 種類の高分子材料 を 用 いて K_{Ie} 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_{Ie} 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_{Ie} 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 $45\sim330\mu m$ に変え, K_{Ie} 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.

7)~9)
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値決定問題に応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すれば、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 Campany 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_Ie 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_Ie 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_Ie 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ダを用いて初期スリ 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,以下の方法を採った. 先ず,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 大きなばらつきを示したため,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.

(64)

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.ファインカッタ,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_{Ie} 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_{Ie} がスリットの導入法および鋭さの違

Noth No. T_{mn}^{A} t_{mn}^{A} W_{mn}^{P} λ_{mn}^{A} m_{mn}^{A} <th< th=""><th></th><th></th><th>_</th><th></th><th>1</th><th></th><th></th><th></th></th<>			_		1			
Bill 0.553 5.125 40,029 0.011 8.23 67.0 Bill 0.631 5.190 40,029 0.632 5.32 66.1 Micro-grinding 05105 0.536 5.32 64.8 67.7 04104 0.622 5.139 40.027 0.405 0.357 5.84 67.7 05105 0.506 5.066 40.027 0.406 0.237 7.89 68.7 05105 0.570 4.420 40.040 0.211 8.09 84.7 05109 0.637 4.773 40.382 0.411 3.33 52.1 05110 0.603 5.774 39.966 0.211 7.98 54.9 05202 0.227 5.127 39.970 0.244 6.82 56.3 05203 0.226 5.130 40.071 0.411 3.68 57.4 05203 0.228 4.860 40.336 0.233 5.28 55.0 05207 0.2	Notch	No.	T (mm)	(mm)	W (mm)	(=a/W)	。 (MPa)	K_{Ic} (N/mm ^{3/} 2)
Micro-grinding 05102 0.269 5.210 39.665 0.233 6.73 60.1 Micro-grinding 05106 0.622 5.139 40.024 0.337 5.34 67.7 disk 05106 0.556 5.666 40.037 0.405 4.014 61.6 05106 0.570 4.620 40.040 0.217 7.89 68.7 05108 0.617 4.740 40.406 0.227 7.89 68.7 05109 0.622 4.715 40.407 0.350 4.84 60.0 05101 0.635 5.073 38.566 0.211 7.93 54.9 05202 0.287 5.112 40.497 0.350 4.82 55.2 05205 0.285 5.113 40.499 0.350 4.21 55.0 05205 0.286 4.850 40.361 0.214 4.86 55.2 05206 0.289 4.621 40.371 0.214 4.86 55.2 <td></td> <td>05101</td> <td>0.553</td> <td>5.125</td> <td>40.029</td> <td>0.201</td> <td>8.23</td> <td>57.0</td>		05101	0.553	5.125	40.029	0.201	8.23	57.0
Micro-grinzing disk 06103 06105 0.631 0.5805 5.190 5.065 40.037 4.003 0.302 0.405 5.122 5.34 07.7 disk 06105 0.5805 5.065 40.037 0.405 4.040 0.211 8.09 8.8.4 06106 0.617 4.780 40.030 0.314 9.038 6.25 67.7 06109 0.622 4.715 40.407 0.303 9.936 0.314 9.333 6.25 67.7 06102 0.637 5.072 39.936 0.201 9.333 7.83 9.49 54.2 9.233 52.1 06302 0.267 5.12 9.997 0.244 9.49 6.82 9.23 52.3 06302 0.267 5.117 40.009 0.530 9.25 5.18 9.028 0.281 9.23 7.38 9.52 51.3 Fret saw 06350 0.285 5.180 9.028 48.00 40.011 0.411 9.038 3.66 55.8 02308 0.281 4.905 40.366 0.287 9.23 5.23 55.0 0550 0.289 4.660 <		05102	0.569	5.210	39.965	0.263	6.78	60.1
Micro-grinaling disk 05104 05105 0.622 0.570 5.139 4.600 94.0.024 4.600 0.377 0.211 5.134 8.09 67.7 6.61.6 disk 05106 0.570 4.620 40.140 0.211 8.09 88.4 05107 0.789 4.740 40.368 0.317 7.89 68.7 05109 0.622 4.715 40.407 0.610 4.84 60.0 05010 0.633 5.075 59.966 0.211 7.93 64.9 05021 0.335 5.265 40.019 0.244 6.82 65.2 05032 0.353 5.265 40.019 0.244 6.82 65.2 05034 0.275 5.117 40.049 0.300 4.21 65.0 05035 0.285 5.140 40.071 0.214 3.68 55.28 05037 0.284 4.800 40.361 0.232 7.36 13.3 05030 0.285 4.860 40.065 0.237 5.23		05103	0.631	5.199	40.043	0.302	5.32	54.8
Micro-grinding disk 05106 0.566 5.066 40.037 0.465 4.04 6.1.6 disk 05107 0.789 4.740 40.406 0.257 7.89 68.7 05108 0.617 4.780 40.407 0.380 4.84 60.0 05108 0.622 4.715 40.407 0.380 4.84 60.0 05109 0.622 4.715 40.407 0.380 4.84 60.0 05202 0.287 5.212 39.997 0.244 6.82 65.2 05203 0.285 5.180 40.011 0.411 8.86 57.4 05205 0.285 5.180 40.071 0.411 8.68 57.4 05205 0.289 4.801 40.366 0.287 5.23 45.0 05207 0.281 4.800 40.130 0.461 5.86 45.0 05200 0.289 4.800 40.165 0.297 5.23 65.0		05104	0.622	5.139	40.024	0.357	5.34	67.7
diak 05106 0.570 4.620 40.140 0.211 8.09 58.4 05108 0.617 4.780 40.406 0.257 7.69 68.7 05108 0.617 4.780 40.388 0.814 6.25 67.7 05109 0.622 4.715 40.407 0.360 4.84 60.0 05100 0.603 4.800 40.382 0.411 3.33 52.1 05201 0.305 5.122 39.997 0.244 6.82 56.2 05204 0.275 5.117 40.049 0.300 4.51 52.3 05204 0.285 5.180 40.071 0.411 3.68 57.4 05206 0.289 4.821 40.371 0.212 7.63 51.3 05200 0.289 4.860 40.366 0.297 5.23 53.0 05200 0.289 4.860 40.366 0.297 5.23 53.0 05303 0.220 <td>Micro-grinding</td> <td>05105</td> <td>0.596</td> <td>5.096</td> <td>40.037</td> <td>0.405</td> <td>4.04</td> <td>61.6</td>	Micro-grinding	05105	0.596	5.096	40.037	0.405	4.04	61.6
bill 0.789 4.740 40.66 0.257 7.89 68.7 05109 0.622 4.715 40.470 0.300 4.84 60.0 05109 0.632 4.715 40.477 0.300 4.84 60.0 05002 0.287 5.212 39.997 0.244 6.82 56.2 05203 0.287 5.212 39.997 0.244 6.82 56.2 05204 0.275 5.117 40.049 0.350 4.21 52.3 05205 0.289 4.821 40.371 0.222 7.6 51.3 05206 0.289 4.861 40.366 0.287 5.23 53.0 05207 0.281 4.905 40.366 0.287 5.23 53.0 05209 0.289 4.880 40.366 0.288 5.26 45.9 05209 0.284 4.880 40.065 0.298 5.23 53.0 05304 0.241 4.880	disk	05106	0.570	4.620	40.140	0.211	8.09	58.4
05108 0.617 4.780 40.388 0.314 6.25 5.77 05110 0.603 4.820 40.352 0.411 3.35 52.1 05201 0.305 5.078 39.956 0.201 7.93 54.9 05202 0.227 5.122 39.97 0.244 6.62 56.2 05203 0.203 5.055 40.001 0.309 4.51 52.3 05205 0.228 5.100 40.017 0.411 3.88 57.4 05206 0.229 4.821 40.371 0.202 7.85 51.3 05206 0.229 4.800 40.366 0.238 5.36 45.9 05208 0.229 4.800 40.361 0.404 3.66 55.8 05209 0.224 4.920 40.351 0.404 3.65 5.5 05203 0.224 4.920 40.055 0.239 5.42 55.2 05203 0.224 4.805		05107	0.789	4.740	40.406	0.257	7.89	68.7
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		05108	0.617	4.780	40.398	0.314	6.25	67.7
05110 0.603 4.820 40.352 0.411 3.33 52.1 05201 0.305 5.078 39.956 0.211 7.93 64.9 05202 0.227 5.112 39.997 0.244 6.82 65.2 05204 0.225 5.117 40.041 0.303 4.21 52.0 05205 0.285 5.180 40.071 0.225 5.23 53.0 05206 0.289 4.821 40.371 0.222 7.36 51.3 05208 0.285 4.880 40.366 0.237 5.23 53.0 05209 0.289 4.880 40.130 0.633 4.48 56.0 06209 0.289 4.880 40.106 0.246 45.5 45.2 06300 0.224 4.730 40.106 0.246 45.5 45.2 06304 0.233 4.885 40.011 0.344 3.42 50.0 05304 0.233 4.885 <td></td> <td>05109</td> <td>0.622</td> <td>4.715</td> <td>40.407</td> <td>0.350</td> <td>4.84</td> <td>60.0</td>		05109	0.622	4.715	40.407	0.350	4.84	60.0
05201 0.305 5.078 39.966 0.211 7.93 64.9 05202 0.227 5.112 39.997 0.244 6.82 65.23 05203 0.303 5.205 40.001 0.309 4.95 52.33 05204 0.275 5.117 40.049 0.301 4.68 57.4 05205 0.285 5.180 40.071 0.202 7.36 51.3 05206 0.285 4.880 40.356 0.237 5.23 45.9 05209 0.284 4.802 40.351 0.49 3.66 55.8 05301 0.241 4.880 40.196 0.220 6.01 45.0 05302 0.224 4.730 40.065 0.289 5.42 55.2 05304 0.223 4.685 40.091 0.349 3.87 47.6 05305 0.246 4.640 40.101 0.349 3.87 47.6 05306 0.242 4.885 </td <td></td> <td>05110</td> <td>0.603</td> <td>4.820</td> <td>40.352</td> <td>0.411</td> <td>3. 33</td> <td>52.1</td>		05110	0.603	4.820	40.352	0.411	3. 33	52.1
b5202 0.287 5.212 39.97 0.244 6.62 66.2 b5203 0.303 5.205 40.001 0.309 4.95 52.3 b5204 0.275 5.117 40.49 0.300 4.21 52.0 b5205 0.285 5.180 40.071 0.411 3.68 57.4 b5206 0.289 4.821 40.370 0.222 7.38 51.3 b5207 0.281 4.905 40.336 0.238 5.26 45.9 b5209 0.289 4.680 40.130 0.333 4.48 56.0 b5210 0.284 4.920 40.351 0.404 3.66 55.8 b5301 0.241 4.880 40.085 0.299 5.42 55.2 b5303 0.220 4.880 40.085 0.299 5.42 55.2 b5303 0.224 4.630 40.085 0.299 5.42 55.2 b5303 0.244 4.630		05201	0.305	5.078	39.956	0.201	7.93	54.9
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05202	0.287	5.212	39.997	0.244	6.82	56.2
Fret saw 05204 05205 0.285 0.285 5.117 5.180 40.049 40.071 0.301 0.301 4.21 3.68 57.4 57.4 05206 0.289 4.821 40.071 0.411 3.68 57.4 0.222 05207 0.281 4.905 40.336 0.222 7.36 51.3 0.520 05209 0.289 4.690 40.366 0.233 4.46 66.0 05209 0.289 4.690 40.130 0.333 4.46 66.0 05210 0.284 4.920 40.861 0.404 3.66 55.8 05301 0.241 4.880 40.106 0.220 6.01 45.0 05303 0.230 4.480 40.065 0.299 5.42 45.2 05304 0.263 4.680 40.011 0.394 3.42 50.0 05306 0.242 4.680 40.107 0.377 3.76 47.7 05309 0.247 4.643 40.107 0.337 3.22 48.3 </td <td></td> <td>05203</td> <td>0.303</td> <td>5.205</td> <td>40.001</td> <td>0.309</td> <td>4.95</td> <td>52.3</td>		05203	0.303	5.205	40.001	0.309	4.95	52.3
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05204	0.275	5.117	40.049	0.350	4.21	52.0
Base 05206 0.280 4.821 40.371 0.202 7.36 51.3 05207 0.281 4.905 40.336 0.235 5.25 45.9 05208 0.285 4.690 40.130 0.333 4.48 56.0 05209 0.289 4.690 40.351 0.404 3.66 55.8 05301 0.241 4.880 40.088 0.220 6.01 45.0 05302 0.224 4.730 40.108 0.220 6.01 45.0 05303 0.220 4.880 40.065 0.299 5.42 55.2 05304 0.283 4.685 40.010 0.349 3.87 47.6 05305 0.246 4.680 40.101 0.349 3.42 50.0 05306 0.224 4.699 40.100 0.349 3.42 50.5 05308 0.242 4.693 40.107 0.357 3.76 47.7 05308 0.244 <td>Fret saw</td> <td>05205</td> <td>0.285</td> <td>5.180</td> <td>40.071</td> <td>0.411</td> <td>3.68</td> <td>57.4</td>	Fret saw	05205	0.285	5.180	40.071	0.411	3.68	57.4
d65207 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 0.284 4.920 40.351 0.404 3.66 55.8 05210 0.284 4.920 40.351 0.404 3.66 55.8 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 0.233 4.685 40.011 0.349 3.87 47.6 05305 0.242 4.685 40.111 0.217 6.44 47.7 05306 0.223 4.659 40.107 0.357 3.76 47.7 05309 0.224 4.803 40.395 0.233 5.04 39.9 05401 - 4.677		05206	0.289	4.821	40.371	0.202	7.36	51.3
65208 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 05501 0.224 4.730 40.106 0.220 6.01 45.0 05502 0.224 4.730 40.106 0.246 5.58 46.4 05503 0.230 4.880 40.065 0.299 5.42 55.2 05504 0.233 4.685 40.001 0.349 3.87 47.6 05505 0.246 4.640 40.101 0.334 3.42 50.0 05506 0.246 4.640 40.111 0.276 6.44 47.7 05507 0.233 4.659 40.100 0.249 5.46 45.9 05509 0.244 4.808 40.115 0.238 4.98 50.5 05309 0.247 4.637 <td></td> <td>05207</td> <td>0.281</td> <td>4.905</td> <td>40.336</td> <td>0.258</td> <td>5,26</td> <td>45.9</td>		05207	0.281	4.905	40.336	0.258	5,26	45.9
d6209 05210 0.289 0.284 4.660 4.920 40.130 40.381 0.404 3.66 55.8 a 05301 0.241 4.860 40.1381 0.404 3.66 55.8 a 05301 0.241 4.860 40.108 0.220 6.01 45.0 a 05302 0.224 4.730 40.106 0.246 5.58 46.4 05303 0.230 4.860 40.065 0.299 5.42 55.2 55.2 05305 0.246 4.640 40.101 0.349 3.42 50.0 05306 0.233 4.895 40.111 0.217 6.44 47.7 05306 0.224 4.669 40.107 0.357 3.76 47.7 05309 0.234 4.875 40.107 0.357 3.76 47.7 05401 - 4.730 40.356 0.192 6.27 41.9 05403 - 4.643 40.056 0.333 3.32 <t< td=""><td></td><td>05208</td><td>0.285</td><td>4.880</td><td>40.366</td><td>0.297</td><td>5.23</td><td>53.0</td></t<>		05208	0.285	4.880	40.366	0.297	5.23	53.0
05210 0.284 4.920 40.351 0.404 3.66 55.8 Image: anomal system of the system of		05209	0.289	4.690	40.130	0.353	4.48	56.0
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05210	0.284	4.920	40.351	0.404	3.66	55.8
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05301	0.241	4.880	40.108	0.220	6.01	45.0
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05302	0.224	4.730	40.106	0.246	5.58	46.4
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05303	0.230	4.880	40.065	0.299	5,42	55.2
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05304	0.263	4.685	40.091	0.349	3.87	47.6
Bits meaning 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 4.99 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 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 3.17 43.7 05405 - 4.677 40.395 0.245 5.43 45.1 05406 - 4.879 40.353 0.245 5.43 45.1 05407 - 4.879 40.353 0.245 5.43 45.1 05409 - 4.860<	Laser machining	05305	0.246	4.640	40.101	0.394	3.42	50.0
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Babbi mataning	05306	0.233	4.895	40.111	0.217	6.44	47.7
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05307	0.228	4.659	40.100	0.249	5.46	45.9
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 05401 - 4.643 40.056 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 - 4.879 40.353 0.245 5.43 45.1 05406 - 4.860 40.366 0.271 4.65 42.8 05407 - 4.860 40.366 0.226 4.83 36.9 05502 - 4.881 39.955 0.226 4.83 36.9 05504 - 4.831 39.954 0		05308	0.242	4.808	40.115	0.298	4.98	50.5
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05309	0.234	4.875	40.107	0.357	3.76	47 7
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05310	0. 247	4.643	40.056	0.393	3. 32	48.3
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05401		4.730	40.356	0.192	6.27	41.9
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05402	-	4.675	40.395	0.233	5.04	39.9
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05403		4.893	40.341	0.288	4.52	44.3
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05404	·	4.819	40.332	0.332	3.83	44.3
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Razor	05405		4.677	40.389	0.378	3.17	43.7
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05406		4.942	40.364	0.190	6.59	43.7
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		05407		4.879	40.353	0.245	5.43	45.1
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$		05408		4.860	40.366	0.271	4.65	42.8
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	- <u></u>	05409		4.692	40.383	0.348	4.09	50.3
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05501		4.881	39.955	0.226	4.83	36.9
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05502	_	4.933	39.977	0.256	3.63	31.3
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		05503	·	5.035	39.902	0.262	3.76	33.2
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		05504	-	4.850	39.981	0.292	3.08	30.5
$ \begin{array}{c ccccc} 05506 & - & 4.964 & 39.970 & 0.231 & 3.86 & 30.2 \\ \hline pre-cracking & 05507 & - & 4.795 & 39.937 & 0.255 & 4.36 & 37.4 \\ \hline 05508 & - & 4.789 & 39.913 & 0.279 & 3.80 & 35.8 \\ \hline 05509 & - & 4.859 & 39.959 & 0.308 & 2.93 & 30.8 \\ \hline 05510 & - & 4.923 & 39.963 & 0.324 & 2.79 & 31.2 \\ \hline 05512 & - & 4.945 & 39.950 & 0.205 & 5.86 & 41.2 \\ \end{array} $	Fatigue	05505		4.831	39.954	0.364	2.54	33.0
$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	nre-cracking	05506	-	4.964	39.970	0.231	3.86	30.2
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	pro crucking	05507	_	4.795	39.937	0.255	4.36	37.4
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		05508	l –	4.789	39.913	0.279	3.80	35.8
05510 4.923 39.963 0.324 2.79 31.2 05512 4.945 39.950 0.205 5.86 41.2		05509		4.859	39.959	0.308	2.93	30.8
05512 — 4.945 39.950 0.205 5.86 41.2		05510	· · · ·	4.923	39.963	0.324	2.79	31.2
		05512		4.945	39.950	0.205	5.86	41.2

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

(1)

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_I を次式を用いて算出 した.

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

ただし,

$$F(\lambda) = (1, 99 - 0, 41\lambda + 18, 7\lambda^{2} - 38, 48\lambda^{3} + 53, 85\lambda^{4})/\sqrt{\pi}$$

$$\lambda = a/W, \ \sigma = P/Wt \ (t : \overline{k} \overline{\mu})$$
(2)

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





10本の試験片について測定した K_I 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: $60.81 \pm 5.69 (\text{N/mm}^{3/2})$

 (2) 糸 の こ: $53.48 \pm 3.38 (\text{N/mm}^{3/2})$

 (3) レ ー ザ 加 工: $48.43 \pm 2.92 (\text{N/mm}^{3/2})$

 (4) 剃 刀: $44.00 \pm 2.83 (\text{N/mm}^{3/2})$
- (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(\blacktriangle) 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_{Ie} 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.

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 ,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_{ℓ} と応力 分布 σ ,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.

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

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

$$\sigma_{v}(\varepsilon_{0}) = \sigma_{vc} = -\Xi \tag{4}$$

本材料の場合, $\varepsilon_0 \simeq 0.05 \text{ mm}$, $\sigma_{yc} \simeq 59 \text{ MPa}$ 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_{Ie} 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_{Ie} 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.

N.	t	w	λ	σ	KIC	
10.	(mm)	(mm)	(=a/W)	(MPa)	(IN/ 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.

以下のようである.

(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_{Ie} が他の場合に 比 べてわず かに低いが,この種の材料の K_{Ie} 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_{Ie} 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

昭和61年10月

15409) $t=15, \lambda=$

0.358



(a) Specimen (No.
 15406) t=15, λ=
 0.215

10404) t=10, λ= 0.358

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_{Ie} 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ぼ等しかった.Fig. 5 で高い K_{Ie} 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_{Ie} 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、前報に従い長い方の値を採用)し て K_{Ie} を算出し、Fig.5 と同様にして 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_I 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_{Ie} 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 ε0 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_{Ie} 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、それにともなって K_{Ie} 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年27日 第3回破壊力学シンポジウムにて講演)

参考文献

- 例えば, 弾塑性破壊靱性 J_Ie 試験方法 (JSME S001-1981), p.10 (1981) 日本機械学会編.
- J. J. Petrovic and M. G. Mendiratta, ASTM STP 678, 83 (1979).
- M. Srinivasan and S.G. Sehadri, ASTM STP 745, 46 (1981).
- 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回破壞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,遠藤達維,原田康彦,八木良樹, 材料,31,515 (1982).
- 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.
- 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.