PMMA 中央き裂引張試験片のき裂長さと 伝ば速度および破面模様の関係*

瀧 本 昭 夫*¹,
難 波 政 浩*³,

高 橋 達 朗*²
藤 井 敏 男*⁴

Relationships among Central Crack Length, Crack Velocity
and Fracture Surface Marks in a Center-Cracked Specimen of PMMA under Tension

Akio TAKIMOTO, Tatsurou TAKAHASHI, Masahiro NANBA and Toshio FUJII

We previously reported that the experimental crack velocity in a center-cracked specimen of unsaturated polyester resin is well expressed by one of the three different velocity equations of a constant stress, a mixed condition and a constant strain due to the central crack length C_0 , under tension. Here, we show that the three different velocity equations are well fitted to express the velocity of fast fracture in PMMA sheet specimens having different crack lengths. The experimental crack velocity generally decreases as the crack length increases, and its change with the relative crack length C_1/C_0 is expressed by one of these equations. Fracture strength and the number of fracture surface marks decrease with an increase in the crack length. The number of marks changes as a function of C_1/C_0 . The velocity expressions, combined with the existing relation between crack velocity and a dynamic stress-intensity factor, give the variations of the dynamic stress-intensity factor and a dynamic strain-energy release rate with C_1/C_0 for the specimens, both of which are in qualitative agreement with the experimental variations of the number of fracture surface marks and their density in the specimens.

Key Words: Crack Propagation, Material Testing, Fracture Mechanics, PMMA, Experimental Crack Velocity, Theoretical Crack Velocity, Fracture Surface Marks, Dynamics

1. 緒 言

筆者らは先にもろいプラスチック、不飽和ポリエステル樹脂(UPと略す)中央き裂板材引張試験片の相対一次き裂長さ C_0/W ($2C_0$: 一次き裂長さ, $2W$: 試験片幅)とき裂伝ば速度の関係を報告⁽¹⁾した。き裂伝ば速度は C_0/W が大きくなると共に定応力条件⁽²⁾、混合条件および定ひずみ条件⁽³⁾に移行するとみえ、それぞれの速度解^{(4)~(6)}でよく近似しうることを示した。ここではUPに比べてより靱性のあるPMMA板材に種々の長さの鋭い中央き裂を導入し、き裂長さと伝ば速度の変化を調べた。前報⁽¹⁾同様、 C_0/W の増加と共にき裂伝ば速度は定応力解、混合条件解および定ひずみ解でよく近似しうることを確認した。また、各 C_0/W をもつ試験片の放物線状など一端開放模様(One end opened mark, OEMと略す)数の相対き裂伝ば距離

C_1/C_0 による増加・減少傾向を測定し、速度と動的応力拡大係数 K 、や動的ひずみエネルギー解放率 $\dot{G}$ の Γ 関係により求めたこれら試験片の C_1/C_0 による変化とよく対応していることを検討した。

C_0/W が大きくなるほど破壊強度は当然、小さくなる。また、破壊強度が小さくなると各試験片の平均伝ば速度や破面模様密度が小さくなる。破壊強度より C_0/W の異なる試験片の平面応力破壊靱性値を求めた。PMMAにおけるこれら破壊強度、平面応力破壊靱性値、平均伝ば速度、および破面模様数などの相関関係を検討した。

2. 実験方法

PMMA板状試験片におけるき裂伝ば速度と破面模様数などの関係を調べるため、市販の板材より二種類の大きさの試験片を用意した。全長 500mm、ゲージ部寸法 260mm(長)×240mm(幅)×4mm(厚)の大型試験片と、異なる寸法での実験データを求めるため中型試験片寸法として全長 240mm、ゲージ部寸法 100mm(長)×130mm(幅)×4mm(厚)を用いた。各試験片は成型してから 75℃、約 2 時間加熱してのち徐冷し、実験に供した。これら板材試

* 平成元年 7 月 13 日 九州支部北九州地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 9 月 27 日。

*¹ 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台 2557)。

*² マツダ(株) (〒735 広島市安芸郡府中町新地 3-1)。

*³ 新明和工業(株) (〒665 宝塚市新明和町 1-1)。

*⁴ 学生員、山口大学大学院。

試験片は上下グリップ部分を鋼板の治具で保持し、49kN容量の試験機で一ピン負荷様式により室温にて引張破壊した。引張試験速度は前者をクロスヘッド速度 500 mm/min (この試験機の最大速度)、後者を 500 mm/min および 300 mm/min とした。したがってゲージ部長さで求めた各ひずみ速度は大型試験片で $\dot{\epsilon} = 0.032 \text{ sec}^{-1}$ 、中型試験片で 0.083 sec^{-1} および 0.05 sec^{-1} となる。一次き裂半長 C_{01} [所望の長さ近くまで薄刃 (0.39 mm 厚) Jig saw で切り込み、カッターの刃を入れ弱い衝撃を加えて鋭くしたもの] は大型試験片で約 3 mm から 100 mm、中型試験片で約 5 mm から 45 mm まで種々変化させた。したがって、これらの C_{01}/W 比は大型で 0.025 から 0.833、中型で 0.077 から 0.692 までとなる。き裂先端近傍の写真を図 1 (a, b) に示した。図 1 (a) は約 80 倍のもので、Jig saw による切り込みとその先端に導入した鋭いき裂を示し、図 1 (b) は後者を約 640 倍に拡大したものです。

き裂伝ば速度は試験片面に塗布した銀ペイント細線 ($\approx 0.3 \text{ mm}$) 間をき裂が横切る速さをデジタル・ストレージ・オシロ (DSO, 100 MHz) で測定した。中央き裂が左右に伝ばするので各々をチャンネル 1 および 2 (Ch.1, Ch.2) と表示した。各試験片の相対き裂伝ば距離による速度変化 (データ点) を平均したものを平均伝ば速度 $V_{m(\sigma, \text{mix}, \epsilon)}$ で表した。同一条件での破壊試験は基本的には三回行うようにした。個々の試験片

(a)

(b)

図 1 Jig saw による切り込みとその先端に導入した鋭いき裂

の破面模様数は主として光学顕微鏡により測定し、単位面積当たりの模様密度を求めた。

3. 実験結果および検討

3.1 相対き裂長さと伝ば速度 大型試験片の一次き裂半長 3.50 mm から 99.85 mm までおよび中型試験片の一次き裂半長 5.30 mm から 44.07 mm までの試験結果のうち一次き裂半長の短いものから長いものへと順次報告し検討する。

試験片幅に対して一次き裂半長が短い場合、き裂伝ば速度は定応力解、式 (1) で与えられることは Berry⁽²⁾ によって導かれており、

$$\frac{V_{l(\sigma)}}{V_{l \max(\sigma)}} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n_1}\right) \left[1 - (n_1 - 1) \frac{1}{n_1}\right]} \quad \dots (1)$$

$$V_{l \max(\sigma)} = \sqrt{\frac{2\pi}{\kappa}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで n_1 : 材料定数 (1.0 ~ 2.0)

筆者らもこれまで UP⁽¹⁾⁽⁴⁾ および PMMA⁽⁵⁾ 板状大型試験片で上記解がこれらの速度をよく近似しうることを報告した。ここでは一次き裂半長によるき裂伝ば速度を系統的に求め検討した。まず前報⁽⁵⁾の PMMA, $C_{01} = 10.69 \text{ mm}$, $C_{01}/W \approx 8.91 \times 10^{-2}$ の結果を図 2 に引用した。図は大型試験片、引張試験速度 (クロスヘッド速度) 500 mm/min (ゲージ部長さで求めた $\dot{\epsilon} = 0.032 \text{ sec}^{-1}$) のものである。図中、うしろの二、三のデータ点は反射波による影響と考えている。中央の実線は式 (1), $n_1 = 1.2^{*1}$, $V_{l \max(\sigma)} = 300 \text{ m/s}$ の解で $\pm 25\%$ の速度振動を考えたものが上下の実線である。理論解は実測値の変化をよく表現している。

図 3 は $C_{01} = 40.28 \text{ mm}$, $C_{01}/W = 3.36 \times 10^{-1}$ のデータである。Ch.1 および Ch.2 とも伝ば初期に多少のばらつきは見られるが、その後、緩やかな増加・減少過程をたどっている。ここでもうしろのデータ点はやはり反射波の影響により少し上昇している。UP 試験片に関する前報⁽¹⁾⁽⁴⁾でも検討したように、 C_{01} が 10 mm 近傍以上このき裂長さ近傍までの速度変化は定応力解⁽²⁾で表現しにくく、また定ひずみ解⁽³⁾でも近似できない。したがって、定応力条件から定ひずみ条件へ漸次移行する現象を考え導出した混合条件解⁽⁶⁾、式 (2)

*1 前報⁽⁵⁾では $n_1 = 1.0$ の近似解を示したが、ここでは参考までに $n_1 = 1.2$ の解で近似した。式 (1) の定数 n_1 は 1.0 ~ 2.0 の値をとり得るもので n_1 が小さくなるほど、曲線の立ち上がり が左側に移行する。データ点のうち最初のいくつかはしばしば、ばらつくことから n_1 値の仮定にはこの程度の自由度が許容されると考えられる。

$$\frac{V_{I(mix)}}{V_{I \max(mix)}} = \begin{cases} \frac{V_{I(\sigma)}}{V_{I \max(\sigma)}} & (1 \leq \alpha_i \leq x_m^*) \\ (1 - y_\varepsilon) \frac{V_{I(\sigma)}}{V_{I \max(\sigma)}} \\ + y_\varepsilon \frac{V_{I(\varepsilon)}}{V_{I \max(\varepsilon)}} & (x_m^* < \alpha_i \leq \alpha_{1f}) \end{cases} \quad \dots(2)$$

$$V_{I \max(mix)} = \sqrt{\frac{2\pi}{x''}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで $C_{01}^* = C_{01} + \delta C_{01}$

$$m^* = A / (\pi (C_{01}^*)^2)$$

$$x_m^* = C_{01}^* / C_{01}$$

$$y_\varepsilon = \left(\frac{\alpha_i - x_m^*}{\alpha_{1f} - x_m^*} \right)^p$$

で近似するのがよい。中央の実線は上式に $n_1 = 1.45$, $p = 1.5$, $m^* = 6$, $V_{I \max(mix)} = 350 \text{ m/s}$ を代入して描いたものであり、上下の実線は $\pm 25\%$ の速度振幅を仮定したものである。最初のデータ点のばらつき(図10, C_1/C_{01} によるこの試験片の破面模様数変化からも、頭部のデータ点はばらつきであることがわかる)およびうしろの反射波による影響はあるものの、曲線は速度変化をよく近似している。PMMAはUPより靱性があるためか、混合条件域から定ひずみ域への変化はいっそう明確には表れにくい、やはり $C_{01} = 40 \text{ mm}$ ($C_{01}/W = 3.33 \times 10^{-1}$) 近傍で移行するものと考えられる。

一次き裂半長が更に長くなり $C_{01} = 99.85 \text{ mm}$, $C_{01}/W = 8.32 \times 10^{-1}$ となるとき裂伝ば速度は加速・減速過程を経て試験片幅内(またはその近傍)で零に近づく。図4はCh.1の結果である(このように C_{01} が長くなると中央き裂が左右ほとんど同時に伝ばせず、両者の伝ば開始時間の遅れが目立つのでCh.1のデータを示した)。試験片幅に対してき裂が長くなるとその伝ば速度は定ひずみ解の式(3)で与えられることがBerry⁽³⁾ により報告されている。

$$\frac{V_{I(\varepsilon)}}{V_{I \max(\varepsilon)}} = \sqrt{\frac{(m+2)\alpha_i^2}{\alpha_i^2(m+2)}} \times \sqrt{\frac{(m+2)(\alpha_i^2-1)}{(m+2)\alpha_i^2} - n_1(\alpha_i-1)} \quad \dots(3)$$

$$V_{I \max(\varepsilon)} = \sqrt{\frac{2\pi}{x'}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

ここで n_1 : 材料定数 (1.0~2.0)

筆者らもUPの速度測定結果 ($C_{01} = 55.24 \text{ mm}$, $C_{01}/W = 4.60 \times 10^{-1}$)⁽⁴⁾ で上記の事実を証明している。図4の中央の実線は式(3)で $n_1 = 1.98$, $m = 6$ [m の下限値は 6.0 ⁽³⁾], $V_{I \max(\varepsilon)} = 5500 \text{ m/s}$ として求めたものであり、上下の実線は $\pm 25\%$ の速度振幅を考慮して描

いたものである。一次き裂の長いPMMA試験片の速度は定ひずみ解でよく近似できることが分かる。以上は大型試験片、引張試験速度 500 mm/min による結果である。中央き裂の長さにより各々定応力解、混合条件解および定ひずみ解で、き裂伝ば速度変化がよく近似できることを示した。

次に同一材料の中型試験片による一次き裂長さや伝ば速度の関係を検討した。図5は $C_{01} = 5.55 \text{ mm}$, C_{01}/W

図2 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度の変化(大型, $C_{01} = 10.69 \text{ mm}$, $C_{01}/W = 0.089$)

図3 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度の変化(大型, $C_{01} = 40.28 \text{ mm}$, $C_{01}/W = 0.336$)

図4 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度の変化(大型, $C_{01} = 99.85 \text{ mm}$, $C_{01}/W = 0.832$)

$=8.54 \times 10^{-2}$, 試験速度 300mm/min (ゲージ部長さで求めた $\dot{\epsilon} \approx 0.05 \text{sec}^{-1}$) の速度変化である。中央の実線は式 (1) $n_1=1.2$, $V_{1\max}(\sigma)=280 \text{m/s}$ によるもので上下の実線は $\pm 25\%$ の振幅を考慮している。試験片 (ゲージ部体積) が小さくなり (大型試験片の $1/4.8$ 倍), ひずみ速度が少し速く (1.56 倍) ながらも, 大型試験片 $C_{01}/W=8.91 \times 10^{-2}$ の結果に比べ速度が全般的に少し小さくなる程度でやはりこの試験片のき裂伝ば速

図5 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度の変化 (中型, $C_{01}=5.55 \text{mm}$, $C_{01}/W=0.085$)

図6 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度の変化 (中型, $C_{01}=21.26 \text{mm}$, $C_{01}/W=0.327$)

図7 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度の変化 (中型, $C_{01}=43.29 \text{mm}$, $C_{01}/W=0.666$)

度は定応力解でよく近似できている。図6は中型試験片, $C_{01}=21.26 \text{mm}$, $C_{01}/W=3.27 \times 10^{-1}$, 引張試験速度 300mm/minの結果である。 C_{01}/W が大きくなり (大型試験片相当 $C_{01}=39.25 \text{mm}$) 定ひずみ条件が混入するとみえて, データ点はゆるやかな加速・減速過程を経ている。このデータ点は明らかに定応力解では適切に表現できず, したがって式 (2) の混合条件解で近似するのがよい。同式で $n_1=1.4$, $p=1.2$, $m^*=6$, $V_{1\max}(\text{mix})=390 \text{m/s}$ で表現したのが図の中央の実線である。上下の曲線は速度振幅 $\pm 25\%$ を仮定したものである。これらの曲線はデータ点をよく近似している。最後のデータ点にはやはり反射波の影響が現れている。中型試験片の $C_{01}=43.29 \text{mm}$, $C_{01}/W=6.66 \times 10^{-1}$, 引張試験速度 300mm/minの結果を図7に示した。データ点は明らかに破断点 $W/C_{01} \approx 1.50$ に達するまでに零に近付くと考えられる。試験片幅内でき裂速度が加速・減速過程を経て零に近付くのは定ひずみ条件による破断であり, 式 (3) による解で $n_1=1.94$, $m=6$, $V_{1\max}(\epsilon)=2200 \text{m/s}$ として描いたのが図の中央の曲線である。上下の曲線は $\pm 25\%$ の振幅を考えたものでデータ点の傾向がよく近似されている。なお, この C_{01}/W の大型試験片相当 C_{01} は 79.92mm となる。ここでも最後のデータ点は大きく反射波の影響が顕著に現れている。試験片ゲージ部体積が大型試験片に比べ約 $1/4.8$ となっているうえに平均速度が小さいものではその影響が現れやすいのであろう。以上, 中型試験片でも同様にき裂伝ば速度はき裂相対長さ C_{01}/W により三つの条件解すなわち定応力解, 混合条件解および定ひずみ解でよく近似されることを示した。

次に大型試験片の引張試験速度 500mm/min および中型試験片の 500mm/min および 300mm/min の速度測定結果について, 個々の試験片の平均速度 (一試験片の全データ点の平均) $V_m(\sigma, \text{mix}, \epsilon)$ を求め, C_{01}/W に対する変化を図8に示した。平均速度は個々の試験片によりばらついているが大型 (○印), 中型 500mm/min (□印) および中型 300mm/min (△印) いずれの試験も, 相対き裂長さが大きくなると共に平均速度が小さくなっている。曲線はこれらすべてのデータより回帰した減少曲線である。個々の試験について求めた減少曲線のほうがもちろん, 各試験データの傾向をよく表現することはいうまでもないが, ひずみ速度が大型 ($\dot{\epsilon}=0.032 \text{sec}^{-1}$), 中型 500mm/min ($\dot{\epsilon}=0.083 \text{sec}^{-1}$), 中型 300mm/min ($\dot{\epsilon}=0.05 \text{sec}^{-1}$) の三試験の減少傾向がよく似ているのでここでは一本の曲線で表現した。平均速度は定応力条件から混合条件, さらに定ひずみ条件へと移行するほど小さくなっている。

図8 相対一次き裂長さによる平均き裂伝ば速度の変化(大型, 中型)

図9 相対一次き裂長さや三つの破壊条件モデルおよび破壊に至る相対一次き裂伝ば距離の関係

以上, 一次き裂相対長さ C_{01}/W とき裂伝ば速度の関係を検討した。これらのPMMA試験で得られた結果は, 先のUP大型試験, 引張試験速度0.5mm/minの結果⁽¹⁾同様, C_{01}/W 比により定応力条件域, 混合条件域および定ひずみ条件域の三つに分けることができる。当然, 各条件域への変化は徐々に変化するためその境界は明確に表現できるものではないが, UPについて示したように, PMMAでもこれら三域の範囲をいくらか幅を持った垂直のバンドで図9に示した。図中には, 各 C_{01} をもつ試験片の破断に至る相対伝ば距離 $\alpha_{1f} = W/C_{01}$ の関係も曲線で示した。PMMA中央き裂試験片でも大型, 中型をとわずこの略図の関係が成立し, これはUPで報告したものと同様である。

3・2 き裂伝ば速度と破面模様数 破面模様は高速で伝ばする一次き裂とその先端 d なる臨界距離⁽⁶⁾⁽⁷⁾にある二次き裂核が活性化され, そこから伝ばする二次き裂の干渉により生じることが報告されている⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾。したがって一次き裂速度が大きくなればなるほど, そ

の動的応力の場が強くなりより多くの二次き裂核が活性化されたり, より遠くの臨界距離の核まで活性化されることになる。このことは一次き裂速度が大または小であれば, それに応じて模様数が多かつ大きいものまで生成されるかまたは模様数が少かつ小さいものが主となることになる。UP破面模様数に関するこれまでの報告⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾やPMMAに関する前報⁽⁵⁾でこれらのことを実証している。

ここでは各 C_{01} を有するPMMA試験片の速度が求められているので, 定応力域, 混合条件域および定ひずみ域の三試験片の破面模様密度^(*)変化を比較し^(*), それらと一次き裂速度との対比をした。なお, 三条件の結果を直接対比するため図の横軸は $C_1/C_{01} = \alpha_1$ と $W/C_{01} = (C_1/C_{01})_f = \alpha_{1f}$ の比による表示とした。図10は大型試験片, $C_{01} = 10.69\text{mm}, 40.28\text{mm}, 99.85\text{mm}$ のデータである。10.69mmの試験片は図2に示したようにき裂伝ば速度が定応力型のものであり, 模様密度も C_1/C_{01} と共に増加し, 速度曲線と同様な傾向を示している。破断点近傍の高い密度は速度図でも検討したように反射波の影響であろう。次にその速度を図3に検討した混合条件型で近似される40.28mmの模様密度を斜線付き棒グラフで示した。一次き裂長さが前者より大きいため α_1/α_{1f} 約0.336 からき裂の伝ばがはじまり棒グラフが右に移行した型になっている。 $\alpha_1/\alpha_{1f} = 0.75$ ($C_1/C_{01} = 2.234$) 近傍で密度がやや高くなり, その後, 減少している。図3の速度曲線(実線)もその近傍で最大速度を示して減速過程にはいっている。破断点近傍の密度上昇は速度図でも現れている反射波の影響と考えられる。 $C_{01} = 99.85\text{mm}$ の結果は $\alpha_1/\alpha_{1f} = 0.85$ ($C_1/C_{01} = 1.02$) 近傍から黒棒グラフがはじまり $\alpha_1/\alpha_{1f} = 0.95$ ($C_1/C_{01} = 1.14$) 近傍で密度が少し大きくなっている。また, 最後の密度上昇は反射波によるものであり, この影響はき裂伝ば速度が遅いものには顕著に現れている。模様密度図は横軸 α_1/α_{1f} で表示しているのでデータが右におしやられているが, 速度図によく対応している。以上, 大型試験片三条件の各試験片の模様密度図は同試験片の速度変化をよく裏付けている。次に中型試験片の上記三条件の模様密度を図11に示した。 $C_{01} = 5.55\text{mm}$ のものは α_1/α_{1f} とともに上昇することを示し, 図5の速度変化のように定応力型である。 $C_{01} = 21.26\text{mm}$ のものは振動を伴いながらも速度変化に類似した傾向で変化している。終

^(*) PMMAにもごく少数の変形だ円状の両端閉そく模様も現れるが, そのほとんどが放物線状などの一端開放模様であるため, ここではこの模様密度を比較している。

^(*) もっとも, 同じPMMAでもlotによって生成模様数の多少はみられるが, ここでは同一のlotのもので比較している。

わり近くの棒グラフが高く出ているのは速度図からわかるように反射波の影響であろう。 $C_{01}=43.29\text{mm}$ のデータは α_1/α_{1f} で表示しているため、グラフが一段と右に移行しているが、き裂開始点近傍 $\alpha_1/\alpha_{1f}\approx 0.725$ ($C_1/C_{01}=1.15$) から模様が見れ、 $\alpha_1/\alpha_{1f}=0.80$ ($C_1/C_{01}=1.20$) 近傍で模様密度が高くなり $\alpha_1/\alpha_{1f}=0.9$ ($C_1/C_{01}=1.35$) 近くで一度低くなり、その後上

図10 相対一次き裂伝ば長さによるOEOM密度の変化(大型, き裂半長による比較)

図11 相対一次き裂伝ば長さによるOEOM密度の変化(中型, き裂半長による比較)

図12 相対一次き裂長さによる平均OEOM密度の変化(大型, 中型)

昇している。あとの上昇は反射波のためであろう。この変化は図7の速度変化とよく対応している。中型試験片でも、個々の模様密度変化はその速度が定応力型、混合条件型および定ひずみ型であることをよく裏付けている。模様密度を各試験片ごとに平均した値、平均模様密度を求め大型引張試験片500mm/min, 中型500mm/min, 中型300mm/minの三条件の結果を図12に示した。各試験条件ごとの曲線を求めれば当然ばらつきの少ない関係を得るが、図のように三条件まとめて表示しても平均模様密度は C_{01}/W と共に減少曲線のようになり、図8の平均き裂伝ば速度の減少曲線とよく似た傾向を示している。

き裂伝ば速度が図2から図7のように近似できると、動的応力の場の大きさを予測することができる。Kobayashi^{(11)~(13)}らはHomalite 100について速度と動的応力拡大係数 K_D/K_C (K_D :動的応力拡大係数, K_C :静的応力拡大係数)の Γ 関係を報告している。PMM Aでも同様な関係が成立するとして(参考: 図18の平均伝ば速度と K_C との関係も類似の Γ 字型関係である)大型試験片のき裂伝ば速度から K_D/K_C とき裂伝ば距離の関係を求めたのが図13である。ここでは、 C_{01} の

図13 相対一次き裂伝ば長さによる K_D/K_C の変化(大型, き裂半長による比較)

図14 相対一次き裂伝ば長さによる G_D/G_C の変化(大型, き裂半長による比較)

異なる試験片の全き裂伝ば過程を同じ大きさで表現して直接比較するため図の横軸は $(\alpha_i - 1)/(\alpha_{if} - 1)$ で表した。 $C_{0i} = 10.69\text{mm}$, 40.28mm , 99.85mm と一次き裂が長くなるほど K_{0i}/K_c は小さくなり、 10.69mm の曲線は他の二者に比べていちだんと大きな値を示している。 K_{0i} 値は後述(図18)の各試験片の K_c 値を用いれば求まるがここではその絶対値の大きさよりむしろ K_{0i}/K_c のき裂伝ば距離による変化傾向が破面模様数の変化傾向と対応していることを示した。 K_{0i}/K_c 値から Freund¹⁴⁾ の関係を用いて a_0/a_c (各試験片の

図15 相対一次き裂長さと破壊強度(gross)の関係 (大型, 中型)

(a) 大型, 500mm/min

(b) 中型, 500mm/min および 300mm/min

図16 相対一次き裂長さと平面応力破壊靱性値の関係

a_0 も図18の K_c より求まる) を求め、き裂伝ば距離による三試験片の変化を直接比較したのが図14である。 K_{0i}/K_c および a_0/a_c のき裂伝ば距離による変化も定応力型、混合条件型および定ひずみ型の順に小さくなり、これらの変化はこれまでも報告^{6)~11)} したように破面模様数やその形状変化(頭部の開きの大きさや放物線形、双曲線形など)を支配しているものと考えている。中型試験片のこれらの曲線は示していないが、これと同様な傾向であることは言うまでもない。

3.3 破壊強度、平面応力破壊靱性と平均き裂伝ば速度 一次き裂が長くなると当然、破壊強度が減少する。大型試験、中型試験二種類の破壊強度 σ_f (gross) の相対き裂長さによる変化を図15に表した。いずれの試験結果も C_{0i}/W の増加とともに減少し、よく似た傾向を示しているので三条件の結果をまとめて一曲線に表示した。多少のばらつきはみられるもののデータ点は曲線でよく表示されている。個々の試験片の破壊強度より次式

$$K_c = \sigma_f \cdot \sqrt{\pi C_{0i}} \cdot F(C_{0i}/W)$$

$$F(C_{0i}/W) = (1 - 0.025(C_{0i}/W)^2 + 0.06(C_{0i}/W)^4) \cdot \sqrt{\sec(\pi C_{0i}/2W)}$$

... (4)

図17 平均き裂伝ば速度と破壊強度(gross)の関係 (大型, 中型)

図18 平均き裂伝ば速度と平面応力破壊靱性値の関係 (大型, 中型)

により静的平面応力破壊靱性値 K_{IC} を求め各試験における K_{IC} と $C_{0.1}/W$ の関係を図16に記した。図16(a)は大型試験片、引張試験速度 500mm/min のものである。PMMA はある程度の靱性を有するためか、鋭いき裂を有する中央き裂試験片の引張破壊でも $\ln \sigma_f$ (gross) と $\ln C_{0.1}$ の関係は約 -0.98 の勾配を示した^{*4}。ひずみ速度が小さいことや材料の靱性のためか図のように K_{IC} は $C_{0.1}/W$ により一定値にはならず、 $C_{0.1}/W$ が小さいほうが急上昇し、また、 $C_{0.1}/W$ が大きくても少し増加している。中型試験片、500mm/min の K_{IC} と $C_{0.1}/W$ の関係を図16(b)に□印で示した。この試験でも $C_{0.1}/W$ が小さくなると K_{IC} は上昇する傾向がみられる。この試験はひずみ速度が前者 ($\dot{\epsilon} = 0.032 \text{sec}^{-1}$) に比べ約 2.6倍早い ($\dot{\epsilon} = 0.083 \text{sec}^{-1}$) ためか $\ln \sigma_f$ と $\ln C_{0.1}$ の勾配が -0.67 となり、 $C_{0.1}/W$ の減少による変化も小さい。次に中型試験片 300mm/min の結果を図16(b)に△印で示した。この試験は $\dot{\epsilon} = 0.050 \text{sec}^{-1}$ と前者より少し遅いためか少し強くなり K_{IC} 値も少し大きくなっている。また、この試験の $\ln \sigma_f$ と $\ln C_{0.1}$ の勾配は -0.89 となり、 K_{IC} は前者に比べ $C_{0.1}/W$ の減少とともにより上昇する傾向が現れている。

次にこれら破壊強度と各試験片の平均き裂伝ば速度測定値の関係を図17に示した。き裂伝ば速度は各試験片内で相対き裂伝ば距離 $C_1/C_{0.1}$ により変わるが、図は各試験片の平均値 $V_m(\sigma, \text{mix}, \dot{\epsilon})$ を求めたものと破壊強度の関係である。やはり、三試験条件の結果がよく似ているのでまとめて表示した。データにばらつきはあるものの破壊強度が大きくなるとともに平均速度が急上昇した後、特定の値に漸近するようなΓ字型曲線で表現しうる。個々の試験条件につき曲線を求めても非常によく似たものとなるのでまとめて表した。

図18は K_{IC} と $V_m(\sigma, \text{mix}, \dot{\epsilon})$ の関係を表している。データには当然ばらつきはみられるものの前図同様平均速度は K_{IC} とともに急上昇して後、一定値に向かって漸近するようなΓ字型曲線を示す。 K_{IC} および $V_m(\sigma, \text{mix}, \dot{\epsilon})$ の小さなところのデータ点はないので $K_{IC} = 0$ で $V_m(\sigma, \text{mix}, \dot{\epsilon}) = 0$ となる点を仮定して描いたのが一点鎖線であるが、実際、 K_{IC} 値は特定の小さな値以下にはなり得ないとするとたとえば点線のようになり、よりΓ字型曲線となる。

*4 これに比べ、UP大型試験片の中央き裂試験片では $\ln \sigma_f$ (gross) と $\ln C_{0.1}$ 関係の勾配は約 -0.5 を示し、ぜい性破壊することは以前報告⁽¹⁾した。

4. 結 言

PMMA 中央き裂大型および中型引張試験片の速い破壊試験をし、き裂長さとき裂伝ば速度の関係を求め、これまでの定応力解、混合条件解および定ひずみ解で近似定量化した。また破面模様、平均き裂伝ば速度、破壊強度および平面応力破壊靱性値などを求め、それらの相関関係を検討し、次の結言を得た。

1. 大型試験片および中型試験片とも相対き裂長さ $C_{0.1}/W$ が大きくなるほど、き裂伝ば速度が小さくなる。
2. これら試験片のき裂伝ば速度測定値は $C_{0.1}/W$ の大きさによって定応力解、混合条件解および定ひずみ解の三条件でよく近似される。
3. 各試験片の平均き裂伝ば速度は $C_{0.1}/W$ の増加とともに双曲線的に減少する。
4. 大型、中型試験片の破面模様密度の $C_1/C_{0.1}$ による変化はき裂伝ば速度変化とよく対応している。
5. き裂伝ば速度変化より求めた動的応力拡大係数や動的ひずみエネルギー解放率の $C_1/C_{0.1}$ による変化は上記破面模様密度やその形状変化を支配しているものと考えられる。
6. 破壊強度は $C_{0.1}/W$ の増加とともに双曲線的に減少し、平面応力破壊靱性値 K_{IC} もこの試験条件では $C_{0.1}/W$ とともに変化する。
7. 平均き裂伝ば速度は破壊強度および平面応力破壊靱性値の増加とともに急上昇後、一定値に向かって漸近するようなΓ字型曲線を描いて大きくなる。

参考文献

- (1) 龍本・ほか2名, 機論, 54-507, A (1988), 2039.
- (2) Berry, J.P., J. Mech. Phys. Solid, 8 (1960), 194.
- (3) Berry, J.P., J. Mech. Phys. Solid, 8 (1960), 207.
- (4) 龍本・ほか2名, 機論, 53-491, A (1987), 1332.
- (5) 龍本・吉村, 機論, 53-493, A (1987), 1754.
- (6) 龍本・ほか3名, 機論, 49-443, A (1983), 803.
- (7) 龍本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 818.
- (8) 龍本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 801.
- (9) 龍本・ほか2名, 機論, 52-476, A (1986), 809.
- (10) 龍本・増田, 機論, 53-487, A (1987), 490.
- (11) Kobayashi, T., and Dally, J. W., ASTM Spec. Tech. Publ., 627 (1977), 257.
- (12) Kobayashi, A. S., Prog. Exp. Mech., Durelli Anniversary Volume, (1975), 83.
- (13) Kobayashi, A. S., and Mali, S., Exp. Mech., 18 (1978), 11.
- (14) Freund, L. B., J. Mech. Phys. Solids, 20 (1972), 129.