プラスチック引張試験片のき裂先端半径と 伝ば速度および破面模様*

(UPおよびPMMA樹脂板材の結果)

瀧本 昭夫*¹

平山 健治*²

松井 良和*³

中道 義弘*⁴

Relationships among Crack Sharpness, Crack Velocity
and Fracture Surface Marks in Plastic Sheet Specimens under Tension
(Results in UP and PMMA Resins)

Akio TAKIMOTO, Kenji HIRAYAMA, Yoshikazu MATSUI and Yoshihiro NAKAMICHI

The crack velocities of compact-tension type sheet specimens having various crack-tip radii are experimentally investigated under tension using UP and PMMA plastics. The crack velocity increases rapidly to the maximum value and decreases slowly as the crack propagates in a specimen. This velocity change is approximated by the existing velocity equation for the double-cantilever-beam-type specimen. The mean velocity decreases as the crack-tip radius sharpens. The density of the fracture surface marks which appeared in the fracture surface changes with respect to the relative crack length C_1/C_0 , in a manner similar to the way the crack velocity changes in each specimen. Fracture strength and the fracture surface marks also decrease as the crack-tip radius sharpens, showing that the velocity and the number of marks tend to be smaller the lower the fracture strength. The relationships among fracture strength, the number of fracture surface marks and the mean velocity are discussed.

Key Words : Crack Propagation, Material Testing, High Polymer Materials, Crack-Tip Radius, Compact-Tension Type Specimen, Fracture Surface Marks

1. 緒 言

鋭いき裂を持つ片側き裂付きプラスチック引張試験片のぜい性き裂伝ば速度は引張負荷作用点位置により変化し、これまで多くの研究が報告されている[例えば文献(1),(2)]が、一次き裂先端半径とき裂伝ば速度を詳しく調べた報告例は少ない。ここでは試験片作成やき裂伝ば速度測定が比較的容易な片側き裂試験片としてCompact-tension型の薄板材を用いた。ぜい性の極めて高い不飽和ポリエステル(Unsaturated Polyester, UPと略す)樹脂と市販のPMMA樹脂に先端半径 $r \approx 0$ の鋭いものから約1.2mmの鈍い一次き裂まで導入し、それらの伝ば速度変化と破面模様変化を調べた。予想通り両プラスチック試験片ともき裂伝ば速度はその先端半径と無関係に加速・減速過程を伴って変化し、き裂先端が鋭くなるほどその平均速度

が減少することが分かった。いずれの速度変化とも既存の二重片持梁の理論解⁽³⁾で近似表現しうることを示した。UP各試験片におけるだ円状などの両端閉そく模様(Both ends closed mark, BECMと略す)と放物線状などの一端開放模様(One end opened mark, OEMと略す)密度の競合状態はき裂先端の鋭さにより変わると共に前報⁽⁴⁾にも報告したように相対き裂伝ば距離 C_1/C_0 により変化することを示した。UPおよびPMMA共に各試験片の C_1/C_0 による模様密度変化は各々の速度変化とよく対応している。き裂先端半径による破壊強度、破面模様および平均速度等の変化を検討すると共にそれらの相互関係を詳しく検討した。

2. 実験方法

片側き裂付き引張試験(Single edge notched tension, SENTと略す)は試験片作成および破壊試験などが容易なため種々の形状のものが用いられている。これらSENT試験片はその試験片長さ(H)、全幅(L)、正味幅(W)、厚さ(t)、負荷作用点位置、一次き裂長さ(C_0)およびき裂先端半径などの設計因子により破壊強度やき裂伝ば速度が変わる。ここでは表面き裂伝ば

* 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 東洋キャリア工業(株)。

*³ 九州松下電器(株)。

*⁴ 学生員, 山口大学大学院。

速度(板が厚くなると表面と板厚中心のき裂伝ば速度が異なると考えられる)と破面模様変化を測定する目的で試験片板厚を4mmとした以外はCompact-tension型試験片設計を採用した。その寸法を図1に示した。この試験片でき裂先端半径 $r \approx 0$ から1.2mm まで6~7段階に変えたものを上下各1本のピン負荷により引張破壊した。試験機のカrossヘッド速度は0.5mm/min*1と遅くし、試験温度は20℃±2℃とした。UP試験片はこれまでの報告^{(4)~(6)}のとおり液材を用いて注塑後加工し、後硬化処理を施したもので、PMMAも前報⁽⁷⁾どおり市販のキャスト板より機械加工、熱処理したものである。き裂先端半径 $r \approx 0$ のものはsaw-cutでき裂を導入した後、その先端にカッターの刃で自然き裂を導入したものである。 $r \neq 0$ の先端半径は所望のキリ穴によるもので、これら r 値は試験直前に顕微鏡下で測定したものである。伝ば速度はき裂先端表面に引張軸と平行に等間隔につけた銀ペイント細線(0.3mm幅)をき裂が横切る時間をデジタル・ストレージ・オシロ(DSOと略す、100MHz)で測定し、算出した。なお、これまでの種々の試験結果^{(4)~(7)}から試験片表面に塗布した銀ペイント線は破面模様にはほとんど影響を及ぼさないことを確認している。速度測定および破面模様測定は同一試験片で行った。近似だ円状などの両端閉そく模様および放物線状などの一端開放模様の測定は光学顕微鏡またはSEMの観察によった。なお、これら破面模様例はこれまで報告したもの[たとえばUPには文献(5)、PMMAには文献(9)]と同様である。

図1 片側き裂付き引張試験片形状
(Compact tension type, 薄板試験片)

*1 UP試験片は強いぜい性を示すが0.5 mm/minではとんどき裂分岐を伴わない高速破壊現象を示した。PMMA試験片は0.5mm/minおよび500mm/min共に試験をしているが、どちらも分岐を伴わないで破壊している。ここではクロスヘッド速度を一定にし、き裂先端半径の影響を比較するため0.5 mm/minの結果を検討した。

3. 実験結果および解析

3.1 き裂先端半径とき裂伝ば速度 UPおよびPMMA試験片共に引張試験速度(クロスヘッド速度)0.5 mm/minでは一次き裂速度は相対き裂伝ば距離 C_1/C_{01} と共に加速・減速変化を呈する。図2のデータ点はUP、き裂先端半径 $r = 1.01\text{mm}$ 試験片の速度測定結果である。ここではすべての試験片共、正味幅は38mm、一次き裂長さ C_{01} は約16mmであるため、 $C_1/C_{01} = 1 + 38/16 \approx 3.38$ で破断する。測定値は急加速後、弱い減速を伴いながら伝ばし、 $C_1/C_{01} = 2.5$ 近傍で反射波の影響とみられる上昇点を含み破断に至っている。図中、実線で示したのは前報同様Sihの二重片持梁(Double Cantilever Beam)の解⁽⁸⁾、

$$V_{1(\text{dcb})} = V_{1\text{max}(\text{dcb})} (\alpha_1)^{-\frac{1+\eta}{2\eta}} \left\{ 1 - (1/\alpha_1)^{\frac{2\eta+1}{\eta}} - n_0(1-1/\alpha_1)(1/\alpha_1)^{\frac{\eta+1}{\eta}} \right\}^{1/2} \dots (1)$$

ここで

$V_{1\text{max}(\text{dcb})}$: 一次き裂の限界速度

$\alpha_1 = C_1/C_{01}$, $n_0 \leq 3.0$, $\eta \leq 1.0$

により近似表現したものである。ここで式(1)に $V_{1\text{max}(\text{dcb})} = 1100 \text{ m/s}$, $n_0 = 2.5$, $\eta = 0.8$ を仮定したのが中央の曲線である。上下2本の曲線は±25%の速度振動幅を仮定して描いたもので、実験値はこれら上、下線によく近似されている。き裂先端半径が約0.22mmと鋭くなると図3のごとく、急加速後の減速過程も強く現れている。最初のデータ点は高い値を示しているが、その後のデータ点は急勾配ながらなめらかな減速過程を呈している。式(1)で、 $V_{1\text{max}(\text{dcb})} = 1000 \text{ m/s}$, $n_0 = 2.0$ および $\eta = 0.4$ を仮定して近似したのが中央の実線である。前図同様、±25%の速度振動幅を考えて描いたのが上下の曲線である。実験値はこれら実線よく近似されている。次にき裂先端半径 $r \approx 0$ の場合の結果を図4に示した。先端半径が非常に鋭くなると加速過程による到達速度も低くなり、また減速過程による速度変化も試験片幅の中程で零に近付いている。中央の実線は式(1)で、 $V_{1\text{max}(\text{dcb})} = 700 \text{ m/s}$, $n_0 = 1.5$, $\eta = 0.13$ として近似したものであり、実験値より少し左側に最大値を持つ曲線となっている。もちろん、これら各図の最初の測定点より左側では、き裂伝ば開始時にDSOにトリガーをかけるための銀線により、これ以上き裂先端に近い測定は実験上得難いのでその域の変化は言及し難い。なお、 $r \approx 0$ の試験片はASTM平面ひずみ破壊靱性試験用厚板試験片⁽¹⁰⁾を単に薄く(平面応力状態に)したもののき裂伝ば速度である。

その他多くのこの様な試験片のき裂伝ば速度を測定

しているが、上記UP試験片のき裂伝ば速度にみると、き裂先端が鋭くなる程、伝ば速度が減少し、減速過程が顕著に現れる。また、Sihの解で近似したものは、データ点の変化をよく表現しているものと考えられる。式中、限界速度 $V_{\max}(deb)$ は r 値と共に減少し、定数 n_0 も r 値が小さくなる程、小さい値でよく近似されている。また、材料の応力・ひずみ関係の非線形特性の大きさを表す値 η (η が小さい程上に凸

図2 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度変化 (UP, $r = 1.01\text{mm}$)

図3 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度変化 (UP, $r = 0.22\text{mm}$)

図4 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度変化 (UP, $r = 0\text{mm}$)

の曲線となる)も、 r と共に小さくなっている*2。

次にPMMA試験片、 0.5mm/min の結果を図5から図7に示した。図5は $r = 0.995\text{mm}$ 試験片の C_1/C_0 によるき裂伝ば速度の変化である。データ点はやはり急加速後、ゆるやかな減少過程を呈している。式(1)

図5 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度変化 (PMMA, $r = 0.995\text{mm}$)

図6 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度変化 (PMMA, $r = 0.503\text{mm}$)

図7 相対一次き裂伝ば距離によるき裂伝ば速度変化 (PMMA, $r = 0\text{mm}$)

*2 UPおよびSENT試験片の 0.5mm/min 引張り変形では、 r 値が小さい程(すなわち弾性応力集中が大きい程)き裂先端部で粘性流動が生じやすいと考えられる。一方、粘性材料で応力の時間依存性が大きい程応力・ひずみ曲線が上に凸になることが知られている。

で $V_{imax}(dcb) = 900 \text{ m/s}$, $n_0 = 3.0$, $\eta = 0.6$ として求めた速度曲線(中央のもの)はその変化をよく近似している。上下の曲線は $\pm 25\%$ の速度振動幅を仮定したものである。 $r = 0.530 \text{ mm}$ の速度変化を図6に示した。前述のUP同様急加速後、減速過程がより早くなっていることが分かる。なお、このデータ全10点のうち終わりに近い3点は反射波の影響が強く現れているものと考えられる。データ点全体としてはこれまで同様、加速・減速過程で変化している。式(1)に $V_{imax}(dcb) = 720 \text{ m/s}$, $n_0 = 3.0$, $\eta = 0.35$ を入れて表現したのが中央の曲線でデータ点の傾向をよく近似している。上下の実線はこれまで同様 $\pm 25\%$ の振動幅を考慮したものである。PMMAでは切欠先端半径が非常に鋭く ($r \approx 0$) になるとき裂伝ば速度が極端に遅くなり、これまでの縦軸では適切に表現できない。図7は縦軸の単位を $1/1000$, すなわち mm/s にしたもので丸印はデータ点である。この様に非常に遅い伝ば速度でも C_1/C_{01} と共に急加速・減速過程で変化していることが分かる。式(1)に $V_{imax}(dcb) = 2.3 \text{ mm/s}$, $n_0 = 2.5$, $\eta = 0.3$ を入れて求めたのが中央の曲線である。1~2のデータ点がより大きな振動を示しているが、これまで同様曲線は速度変化をよく近似している。上下の曲線は $\pm 25\%$ の速度振動幅を考慮して描いたものである。以上のごとくPMMA, Compact-tension型薄板試験片でも、 C_1/C_{01} と共にき裂伝ば速度は加速・減速過程を呈し、速度変化は式(1)でよく近似することができる。なお、式(1)による近似曲線に用いた3つの定数はPMMAでもき裂先端半径が小さくなる程 $V_{imax}(dcb)$ が小さくなり、非線形特性を表すパラメータ η も小さくなっている(脚注*2に述べた様に、PMMAの遅い引張速度 0.5 mm/min でも r が鋭くなると、その先端での粘性流動が生じやすくなるのであろう)。

これら個々の試験片の最大到達速度 $V_{imax}(sent)$ [データの最大値]と平均速度 $V_{im}(sent)$ (全データ点の平均値)の関係を図8に示した。速度が大きくなる

図8 平均き裂伝ば速度と最大き裂伝ば速度の関係 (UP, PMMA)

程 $V_{im}(sent)$ のばらつきは大きくなるものの両者は直線関係をなしている。

3・2 相対き裂伝ば距離 C_1/C_{01} と破面模様変化

UP試験片の高速き裂伝ば破面には近似円状模様などの両端閉そく模様(BECM)と放物線状模様などの一端開放模様(OEOM)が現れ^{(4) (5) (6) (10)}, 両者の比率はき裂伝ば速度の大きさによって変わる^{(5) (6)}。今, UP, $r = 1.01 \text{ mm}$ 試験片 [き裂伝ば速度が図2のごとく変化する場合] の両破面模様密度^{*3}の C_1/C_{01} による変化を図9に表した。 C_1/C_{01} が小さく、き裂伝ば速度が速い域ではOEOM密度がBECM密度に比べてかなり多くなり、逆に伝ば速度が小さくなるにつれ後者の方が多くなる傾向がみられる。なお、ここでは前報⁽⁴⁾のごとく模様形状の詳細な解析は含めていないが、この変化は模様頭部の干渉開始距離 e 値^{(5) (6)} や二次き裂核上最小弦長 l 値^{(5) (6)} の大きいものが高速域で多く生成され、それらの小さなものは低速域でより多く生成されていることを裏付けている。UP, r

図9 BECM密度とOEOM密度の相対一次き裂伝ば距離による競合 (UP, $r = 1.01 \text{ mm}$)

図10 BECM密度とOEOM密度の相対一次き裂伝ば距離による競合 (UP, $r = 0.22 \text{ mm}$)

*3 UPおよびPMMAに観察される模様の大さは長さ数 μm から $150 \mu\text{m}$ 前後のものが大半です。き裂伝ば距離(ここでは $C_1 = 1 \text{ mm}$ ごと) $\times$ 試験片厚さ ($t = 4 \text{ mm}$) の破面面積 (4 mm^2) 内に観察された模様数から単位面積 (mm^2) 当たりの模様密度を求めた。

$=0.22\text{mm}$ [き裂伝ば速度変化が図3のごとく変化する試験片]の模様密度変化を図10に示した。き裂先端が鋭くなり伝ば速度が減少するため図9に比べて全体的に模様密度は非常に小さくなっている。また、 $C_1/C_{0.1}$ の全域にわたってBECM密度の方がOEO M密度より多くなり、BECMの最高値は $C_1/C_{0.1}=1.3$ 近傍に現れ、速度近似曲線のピーク値とよく似ている。OEO M密度はスタート点で少し高く、 $C_1/C_{0.1}$ と共に減少しておりこの模様は速いき裂伝ば速度域で生成される事を裏付けている。次にUP、 $r=0$ の鋭いき裂先端をもつ場合の結果を図11に示した。この試験片のき裂速度変化は図4で述べたごとく、加速・減速過程を伴って変化するものの、 $C_1/C_{0.1}=1.8$ 近傍からその速度がほとんど零になっている。実際には、非常に小さい速度でき裂が不連続的に伝ばし破断に至っているものと考えられる。このような場合、き裂停止線(Arrest line)が現れることがよく知られている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この試験片の停止線数を $C_1/C_{0.1}$ により表したのが図11である。 $C_1/C_{0.1}=1.8$ 近傍から停止線が現れ、最終破断点($C_1/C_{0.1}$) $r=3.38$ に近付くにつれその数は急速に増加しており、低速伝ば現象が何度も繰り返され

図11 き裂伝ば停止線数の相対一次き裂伝ば距離による変化

図12 PMMA、OEO M密度の相対一次き裂伝ば距離による変化(き裂先端半径による比較)

て破断に至っていると考えられる。次にPMMA、 $r=0.995\text{mm}$, 0.530mm , 0.242mm 各試験片の $C_1/C_{0.1}$ によるOEO M密度変化を図12にまとめて表した。PMMAに現れる模様のほとんどはOEO Mであるので⁽¹³⁾この図は各試験片の模様密度変化をよく表していることになる。図中、白棒グラフは $r=0.995\text{mm}$ 試験片のもので、その鈍い先端半径による大きいき裂伝ば速度(図5参照)のため多くのOEO Mを生成し、その密度は $C_1/C_{0.1}=1.4$ 近傍で最大に達した後ゆるやかに減少している。き裂伝ば速度もほとんど同じ $C_1/C_{0.1}$ で最高値に達した後減速している。 $r=0.503\text{mm}$ 試験片のデータは斜線を入れた棒グラフである。当然、前者より各 $C_1/C_{0.1}$ での模様密度が小さくなり、また、より小さな $C_1/C_{0.1}$ で模様が消滅している。模様密度は $C_1/C_{0.1}=1.2\sim 1.4$ 近傍に最大値が現れており、この試験片のき裂伝ば速度変化(図6)とよく対応している。PMMAの $r=0$ の試験片は図7の速度変化からも予測されるごとく、OEO Mは生成されず、局部的な停止線状のもの*4が多く現れている。従って、ここではそれより少し鈍いき裂先端半径 $r=0.242\text{mm}$ 試験片のOEO M密度変化を示した(黒棒グラフ)。rが鋭くなるにつれ、き裂伝ば速度も小さくなり、OEO M密度も一段と小さくなるのが分かる。

以上のごとくUPおよびPMMA試験片共にき裂先端半径が鈍い($r>0$)試験片では、相対き裂伝ば距離 $C_1/C_{0.1}$ による模様密度変化はき裂伝ば速度と非常によく似た変化をしている。き裂先端の鈍いものではこれまでの Sharp notch fracture mechanics によるき裂伝ば速度と $K_{0.1}/K_{0.2}$ の Γ 関係など^{(15)~(17)}よりき裂伝ば速度による $K_{0.1}/K_{0.2}$ や $\sigma_{0.1}/\sigma_{0.2}$ 変化を求めることができないが、き裂伝ば速度が大きくなる程き裂先端の動的応力場(Dynamic Stress Field)が大きくなり、その大きさに模様生成機構が支配されているものと考えられる。

3・3 き裂先端半径と諸測定値 3・1項で述べたようにき裂先端半径が鋭くなると Compact-tension 型試験片ではき裂伝ば速度が減少する。各試験片の速度測定値を平均して求めた平均き裂伝ば速度 $V_{1m}(\text{sent})$ のrによる変化を図13に表した。UPおよびPMMA共にrの減少に従って $V_{1m}(\text{sent})$ は放物線を描いて減少している。0.5 mm/minの試験速度ではUPの方がPMMAより平均速度が速く、両者ともき裂先端半径依存性が大きい。なお、ここには含めていないが

*4 き裂伝ば方向にほとんど垂直に試験片の表面から裏面まで走っている停止線は観察されず、局部的な試験片厚さにわたって走っている同様な垂直線。

500mm/minの高速引張りでは、PMMAの $V_{im(sent)}$ はき裂先端半径依存性が非常に鈍くなることを確かめている。

破面模様数はき裂伝ば速度や破壊強度に関与しているので、当然き裂先端半径にも依存している。UP試験片のBECM数およびOEOM数の r による変化を図14に示した。先端半径が鈍くなる程両模様数とも多くなるが、 r の小さいところではBECM数が多く現れ r が大きくなると逆にOEOM数が多くなり両模様数の競合はき裂伝ば速度に依存している。PMMAのOEOM数はUPの両模様数に比べて非常に少ないが r の増加と共にやはり増加している。

これら試験片の破壊強度 σ_{fn} (正味断面積による値) とき裂先端半径の関係を図15に表した。当然のことながら r の増加と共に σ_{fn} は大きくなっている。また、この試験速度ではUPの方がよりぜい性破壊に近い $\ln \sigma_{fn}$ と $\ln r$ 関係^{*5}を示した。

次に平均き裂伝ば速度、破面模様数および破壊強度の相関関係を検討する。まず破壊強度と平均き裂伝ば速度の関係を図16に示した。UPおよびPMMA共

図13 き裂先端半径による平均き裂伝ば速度の変化

図14 BECM総数およびOEOM総数のき裂先端半径による変化 (UP, PMMA)

に σ_{fn} の増加と共に $V_{im(sent)}$ は急上昇して後、一定値に近付くかのごとくゆるやかに上昇を続け Γ 字形曲線の変化をする。破壊強度が大きくなることはき裂先端半径が大きくなることである。典型的なぜい性破壊を生じるセラミックにおける速度と破壊靱性の関係⁽¹⁰⁾のように速度と強度の関係が

$$V_{im(sent)} = Q(\sigma_{fn} - S)^R \quad \dots (2)$$

で近似できるものとして Q , R , S の各値を求めてみると、UPでは $Q = 288$, $R = 0.209$, $S = 0.71$ となり PMMAでは $Q = 142$, $R = 0.386$, $S = 1.05$ となる。UPでは $\sigma_{fn} \approx 0.7$ MPa 以下では $V_{im(sent)}$ は非常に小さくなり、PMMAでは $\sigma_{fn} \approx 1.2$ MPa 以下では $V_{im(sent)}$ はほとんど零に近づく。次に破壊強度と破面模様数の関係を図17に示した。UP試験片は破壊強度が低くても破面模様数が多くなり低強度域ではBECM数が生じ、強度が高くなるにつれOEOM数

図15 き裂先端半径と破壊強度 (正味) の関係 (UP, PMMA)

図16 破壊強度 (正味) と平均き裂伝ば速度の関係 (UP, PMMA)

*5 ぜい性破壊強度はき裂長さ C_0 およびき裂先端半径 r により $\sigma_f \approx \Lambda / (2\sqrt{C_0/r})$ (Λ, C_0 ; 定数) で近似しうるとすれば $\ln \sigma_f \propto (1/2) \ln r$ となる。実際、UPの破壊強度は $r \approx 0.1$ mm 近くまで上記 (1/2の勾配) の式で近似的に表現でき、PMMAの同関係は $r \approx 0.2$ mm 近くまで1/2より大きい勾配 ($\approx 3/4$) の直線関係で近似しうる。

が多く生じることが分かる。この傾向はこれまでも他の試験片形状の結果を報告^{(4) (5) (7) (9) (10)}している。一方、PMMAはUPほど多くの模様を生成していないが、やはり破壊強度が大きくなるにつれ模様数は増加している。PMMA試験片の模様数が少ないのはき裂伝ば速度が大きな値に達し難いことが一つの要因であろう。同一 σ_{fn} 値でUPおよびPMMAの平均き裂伝ば速度の大きさを比較した前図にはそのことが明白に示されている。この例のごとく強度の大きく異なる場合破面模様数を破壊強度の関数として図示すると、非常に大きな開きが生じる。そこで平均き裂伝ば速度と破面模様数の関係を図18に表した。UP試験片に多くあらわれるBECMは低い $V_{im(sent)}$ 値から生成しはじめ、横軸の増加と共に比較的ゆるやかに増加する。UPおよびPMMA, SENT試験片に現れるOEOМ数は $V_{im(sent)} \approx 200$ m/s 近傍から増加しはじめ急激に増加する様子をみせている。この図では $V_{im(sent)}$ によるOEOМの増加傾向は両者とも割合によく似た

図17 BECM総数およびOEOМ総数と破壊強度(正味)の関係(UP, PMMA)

図18 BECM総数およびOEOМ総数と平均き裂伝ば速度の関係(UP, PMMA)

*6 なお、この試験片形状ではPMMAの $V_{im(sent)}$ は270 m/s 近傍までしか上昇しない(たとえ 500mm/minの試験速度でもそれ以上入きくならない)ため、これより右のデータは現れない。

曲線を示している*6。UPおよびPMMAの破面模様数は $V_{im(sent)}$ の関数として表示するほうが適切であると考えられる。

UPおよびPMMAのCompact-tension 型試験片は遅い(0.5mm/min)引張り速度による破壊試験では両プラスチック共ほとんど分岐を伴わない擬ぜい性破壊を示し、比較対照しうるデータを得ることができた。一方、同じ試験片形状の速い(500 mm/min)試験速度ではPMMA試験片は分岐することなく破壊したが、UP試験片は多くの破片数に分岐破壊をし比較検討しうるデータがとれなかったのここには含めなかった。

4. 系 言

UPおよびPMMAのCompact-tension 型板材試験片の試験速度0.5mm/min による室温破壊試験で、き裂先端半径を自然き裂状の鋭いもの($r \approx 0$)から約1.2mmの鈍いものまで様々に変化させ、き裂伝ば速度および破面模様の相対き裂伝ば距離 C_1/C_0 による変化を調べると共に既存の速度解による近似定量をした。また、上記値と破壊強度の関係を検討し次の結言を得た。

- (1) Compact-tension 型板材でき裂先端半径 $r \approx 0$ から1.2mmまでの引張り試験片のき裂伝ば速度は加速・減速過程を呈して変化する。
- (2) き裂先端半径が鋭くなる程、加速過程における最大到達速度が減少すると共にそのあとに続く減速過程も急になる。
- (3) これら試験片のき裂速度変化は非線形弾性を表すパラメータ η を含む速度式でよく近似できる。
- (4) UP試験片では相対き裂伝ば距離により一端開放模様密度と両端閉そく模様密度が競合し、き裂先端が鈍いものでは前者が後者より高く、き裂先端が鋭くなるとこの関係が逆転する。PMMA試験片の一端開放模様密度はき裂先端半径が鋭くなる程小さくなる。模様密度変化はき裂伝ば速度変化とよく対応している。
- (5) き裂が鋭くなるほど破壊強度、平均き裂伝ば速度および全破面模様数が減少する。
- (6) 破壊強度の増加と共に平均き裂伝ば速度が急上昇してのち非常にゆるい増加を示し、一定値に漸近するかのごとく、いわゆるΓ字型曲線の変化を示す。
- (7) UP試験片の両端閉そく模様数は小さな平均き裂伝ば速度から、速度上昇と共に曲線的に増加する。一方、UPおよびPMMAの一端開放模様は大きい速度域で生成し、その数は速度と共に急速に増加する。

参考文献

- (1) Bradley, W.B., and Kobayashi, A.S., Exp. Mech., 10-3(1970), 106.
- (2) Bradley, W.B., and Kobayashi, A.S., Eng. Fract. Mech., 3(1971), 317.
- (3) Sih, G.C., Proceedings of an international conference on Dynamic Crack Propagation, (1972), 227., NOORDHOFF INTERNATIONAL.
- (4) 龍本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 801.
- (5) 龍本・ほか3名, 機論, 49-443, A (1983), 803.
- (6) 龍本・吉村, 機論, 52-476, A (1986), 818.
- (7) 龍本・ほか2名, 機論, 52-476, A (1986), 809.
- (8) 龍本・増田, 機論, 53-487, A (1987), 490.
- (9) 龍本・吉村, 機論, 53-493, A (1987), 1754.
- (10) 龍本・ほか2名, 機論, 53-491, A (1987), 1332.
- (11) 龍本・ほか2名, 機論, No. 875-1(1987-3), 31, 投稿中, 論文No. 88-0014.
- (12) 龍本・ほか3名, 機論, No. 865-1(1986-3), 19, 投稿中, 論文No. 88-0200.
- (13) 岡村, 線形破壊力学入門, (1976), 219, 培風館.
- (14) Cedric, W.R., Engineering Materials Science, (1961), Wadsworth Publishing Company, Inc.
- (15) Kobayashi, T., and Dally, J.W., ASTM Spec. Tech. Publ., 627(1977), 257.
- (16) Kobayashi, A.S., and Mall, S., Exp. Mech., 18(1978), 11.
- (17) Kobayashi, A.S., Prog. Exp. Mech., Durrelli Anniversary Volume, (1975), 83.
- (18) 西田・安田, セラミックスの力学特性評価, (1986), 67, 日刊工業新聞社

討 論

〔質問〕 小 川 和 雄〔青山学院大学理工学部〕

質問者らも異なる材料で高分子材料の破壊実験を行っているがこの種の材料における力学挙動並びに破壊挙動は温度-時間依存性を示し、特にガラス転移温度 T_g 近傍では顕著な依存性を示すことを経験している。本実験で用いた UP, PMMA 両材料の T_g は何度くらいか。

もし、異なるとすれば同一温度条件としたことによるき裂速度や、破壊強度に与える影響はないのか。また、温度はどのようにして制御しているのか。

き裂先端半径 $r=0$ を導入するのにカッタの刃を用いているが、具体的にどのように導入するのか。

破壊面上には、OEOM, BECM 模様以外、特にき裂進展開始直後にティアライン等の模様は観察されないのかどうか。

〔回答〕 本実験で用いた UP および PMMA の T_g 温度は正確に測定していないが前者で約 90°C 、後者で約 108°C である。 T_g 温度に近くなれば力学挙動や破壊挙動は温度-時間により大きな依存性を示すが、ここでは $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ で破壊した結果を報告した。したがって、UP では T_g 温度より約 70°C 低く、PMMA では約 88°C 低いもので、いずれの材料とも擬脆性破壊を示している。プラスチックであるため当然、き裂先端部などに多少の塑性（または粘性）変形を伴っていると考えられる。UP および PMMA の破壊強度 σ_m とき裂先端半径 r の $\ln \sigma_m \cdot \ln r$ 関係を取り、そのこの配 $d(\ln \sigma_m)/d(\ln r)$ を求めると UP は約 0.5、

PMMA は約 0.7 を示し後者は切欠脆性理論(0.5 のこの配)から、よりずれている。この違いは T_g 温度と試験温度の差よりむしろプラスチックの性質の違いにより、き裂先端の変形挙動が影響されるためであろう。図 15 の σ_m と r の関係でも PMMA のほうが強く現れており、き裂先端の塑性（または粘性）変形がより大きいことこのような結果になることが考えられる。平均き裂伝ば速度にも影響が現れ、UP の平均速度のほうが PMMA のそれより大きくなっているが（図 13, 16）、相対き裂伝ば距離による速度変化の比較〔UP（図 2～4）と PMMA（図 5～7）〕では定量的な差を検出し得るまでには至っていない。なお、 T_g 以下の適切な温度まで試験温度を別々に下げ両材料の脆性度合を一致させることが可能か否かは試験をしていないのでわからない。ここでは大形試験機を使用しているため室温を $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ になるよう空調器でコントロールし、破壊試験をした。

Jig saw で約 0.5 mm の溝を切りその先端にカッタの刃を入れ、小形ハンマにより小さな衝撃を加え $r=0$ のき裂先端を導入した。

材料の種類、設計形状、負荷様式、負荷速度、破壊強度およびき裂伝ば速度などにより、OEOM, BECM 以外に線状模様（ティアラインも含む）や進行方向に直角な線状模様（アレスト・ライン）および後流模様⁽⁷⁾、槍形模様⁽⁸⁾なども現れるが、ここでは一次・二次き裂の干渉により生成するもので、破面模様の式で近似しうる模様の変化を主に報告した。