メタクリル樹脂の脆性破壊エネルギーの計測*

新川 和夫^{*1}, 馬田 俊雄^{*2}, 高橋 清^{*1}

Measurement of Brittle Fracture Energy in PMMA

Kazuo ARAKAWA^{*3}, Toshio MADA and Kiyoshi TAKAHASHI^{*3} Kyushu University, Research Institute for Applied Mechanics,
Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580 Japan

Dynamic fracture of PMMA was studied using a Cranz-Schardin high-speed camera. The single-edge-notched specimen was pin-loaded with special fixtures so that it could split and fly away after the fracture. The flying velocity was measured to estimate the elastic energy stored in the specimen. The nonelastic energy was also estimated from the visco-plastic deformation. The fracture energy was evaluated and correlated with the external work applied to the specimen.

Key Words: High Polymer Material, Brittle Fracture, Dynamic Crack Propagation, Fracture Energy, High-Speed Photography, Caustic Method, PMMA

1. 緒 言

材料の脆性的な破壊では、き裂は一般に加速や減速を伴いながら高速度で進展する。このような破壊挙動を理解するためには、材料の変形に伴う慣性力や運動エネルギーが無視できず、動的効果を考慮しなければならないことが指摘されている。また、き裂が進展する際に解放されるポテンシャルエネルギー、新しい破面を形成するために必要なエネルギーなどの関係を明らかにすることが重要である^{(1)~(3)}。しかし高速破壊におけるエネルギーを計測することは技術的に容易でなく、定量的なエネルギー評価はほとんどなされていないのが現状である。

本研究では、高速破壊におけるエネルギーを評価するための基礎的な実験を行った。試料としてメタクリル (PMMA) 樹脂、試料形状として片側ノッチ (SEN) 付き試験片を採用した。試験片には特殊な形状のジグを用いてピン負荷を加えた。このジグの特長は破断後に試験片の運動を拘束しないこと、そのため負荷方向への飛しょうが可能となることである。破壊の計測には、クランツ・シャルディン形の高速度カメラを使用した^{(4)~(6)}。このカメラは、試料面ピント像とコースティック像の同

時撮影、さらにき裂進展と飛しょうという時間変化が大きく異なる二つの現象を連続的に撮影することが可能である。本研究では、飛しょう速度を求め、試験片に蓄積された弾性エネルギー W_e を評価した。またピン負荷部で生じるコースティック像より試験片の残留変位を求め、非弾性的なエネルギー W_n を決定した。さらに破壊エネルギー E_f を評価し、試験片に作用した外力仕事 U_{ex} との対応関係を検討した。

2. 試験片および負荷方法

試料として板厚 5 mm の PMMA (Sumipex E) 樹脂板を用いた。図1(a)に試験片形状、寸法を示す。試験片の片側中央部に切欠きを導入し、その先端部をカミソリで鋭くした。ただし試験片の破断荷重を変化させるため、異なる長さの切欠きを導入した。また試験片には直径 10 mm の穴をあけ、ピン負荷を加えた。

図1(b)に負荷方法を示す。ここでは負荷ジグとして特殊な形状を用いた。このジグの特長は破断後に試験片の運動を拘束しないこと、そのため負荷方向への飛しょうが可能となることである。試験片にはインストロン形引張試験機を用いて引張り負荷を加えた。なお引張り速度は 1mm/min とし、室温下で実験を行った。

3. 高速度撮影

脆性破壊の撮影にはクランツ・シャルディン形の高速度カメラを使用した^{(4)~(6)}。このカメラは、焦点距

* 原稿受付 1999 年 10 月 4 日。

^{*1} 正員, 九州大学応用力学研究所 (☎ 816-8580 春日市春日公園 6-1)。^{*2} 九州大学応用力学研究所。

E-mail: k.arakaw@riam.kyushu-u.ac.jp

Fig. 1 Specimen geometry and loading method

離が異なる2像面を同時に撮影でき、また撮影速度を途中で変更できるという特徴を有している。そのため試料面ピント像とコースティック像、さらに破壊と試験片の飛しょうという時間変化が大きく異なる現象を連続的に撮影することが可能である。なおカメラの同期には2本の導電塗料線を使用した(図1(b)参照)。予き裂側の塗料線で破壊開始を、また端部側の塗料線で飛しょう開始を検出した。

高速度撮影の結果例を図2に示す。これらは30駒のなかから適当に抜粋したものである。図2(a)は試料面ピントで得られた像、図2(b)はイメージ面ピントで同時に得られたコースティック像に対応する。ここでは撮影速度として、き裂進展の計測には4 μ s/駒、飛しょう計測には200 μ s/駒を採用した。

図2に示すように、き裂は直線的に進展した。また破断後は試験片が上下に飛しょうした。この様子が破断面間の距離の増加として示されている。コースティック像は、応力やひずみが集中するき裂先端およびピン負荷部で発生した。またその大きさはき裂進展に伴い変化した。これは、応力やひずみが時間とともに変化することを意味している。さらに注目すべきことは、試験片が破断した後もピン負荷部にコースティック像が存在したことである。これは、粘性や塑性などによる残留変形が試験片で生じたことを示唆している。

4. 破壊エネルギーの定義

試験片が破断するまでの荷重 P と変位 δ を計測した。その結果例を図3に示す。ここでは破断時の荷重を P_c 、変位を δ_c で表示した。

Fig. 2 Example of dynamic fracture of a PMMA specimen, (a) specimen-focussed images (b) caustic patterns

外力が試験片になす仕事、すなわち外力仕事 U_{ex} は次式で与えられる(図3参照)。

$$U_{ex} = \int_0^{\delta_c} P d\delta \dots\dots\dots (1)$$

ただし本研究では P と δ の関係を直線で近似し、 U_{ex} を次式で評価した。

$$U_{ex} = P_c \cdot \delta_c / 2 \dots\dots\dots (2)$$

また U_{ex} は図3に示すように以下の3つエネルギー成分に分離できるものと仮定した。

$$U_{ex} = E_f + W_e + W_n \dots\dots\dots (3)$$

ここで E_f は破壊エネルギーを表す。すなわち E_f は、破面形成に必要な表面エネルギー、き裂から放出される音響エネルギー、き裂周辺の温度上昇に寄与する熱エネルギーなど非可逆的な総エネルギーに対応する。また W_e は試験片に蓄積された弾性的なひずみエネルギー、 W_n は粘性や塑性ひずみなど破断後も試験片に残留する非弾性的なエネルギーに相当する。

本研究では、 W_e 、 W_n を評価するために以下の仮定を行った。(1) W_e は試験片が破断すると全て飛しょうエネルギーに変換する。(2) 動的破壊で生じる除荷過程では粘性効果が無視できる。すなわち P_c から残留変位 δ_n への変化が弾性的である(図3参照)。その結果、 $W_n / U_{ex} = \delta_n / \delta_c$ の関係が成立する。

Fig. 3 P - δ diagram under a displacement controlled condition Fig. 5 Relationships between flying velocity V_i and fracture load P_c Fig. 4 Flying distance L after fracture as a function of time t Fig. 6 Relationship between elastic energy W_e and external work U_{ex}

5. 破壊エネルギーの評価法

5.1 飛しょう速度 V_i 試験片の初期飛しょう速度 V_i の評価法を図4に示す。まず上下に飛しょうする試験片の破断面間の移動距離 L を時間 t の関数として計測した。ここで計測点として破断面中央を採用した。これは、試験片が回転する影響を小さくするためである。図4で注目すべきことは、 L と t の関係が直線的になることである。すなわちこの結果は、 L を計測することにより、重力加速度の影響が無視できることを意味している。なお $2V_i$ は L - t の勾配より決定した。

V_i と破断荷重 P_c の関係を図5に示す。 P_c が大きくなると V_i は増加した。これは、破断荷重が大きくなると試験片に蓄積される弾性エネルギー W_e が増加すること、それに伴い破断後の飛しょう速度が大きくなることを意味している。

5.2 弾性エネルギー W_e 試験片とピンの質量を求め、飛しょうエネルギーを決定した。図6に飛しょうエネルギーより評価した W_e 値を示す。ここでは W_e と外力仕事 U_{ex} の関係、さらに両者の比を表示した。 W_e は U_{ex} とともに増加した。また両者の比も変化した。例

えば U_{ex} が小さいところでは W_e/U_{ex} 値として約8%、また比較的に大きなところでは約17%が得られている。この結果は、 W_e/U_{ex} の割合が一定ではなく、低 U_{ex} 域では小さく、その後は徐々に増加することを示している。

5.3 残留変位 δ_n 非弾性エネルギー W_n を決定するためには破断直後の試験片の残留変位 δ_n を計測することが必要である。高速度写真の試料面ピント像を用いて δ_n の測定を試みた(図2参照)。しかし δ_n は1mm以下と小さく、測定値には読取り誤差が発生した。本研究では δ_n を評価するために、破断直後の荷重点コースティック像寸法 ω を計測した。ここで ω は負荷軸に対し垂直方向の最大寸法を表わす(図2参照)。以下ではまず静的な条件下で P, δ, ω を計測し、その対応関係を検討した。

図7～9に P, δ, ω の関係を示す。ここでは負荷、除荷速度として1mm/minの結果を表示した。図7の P - δ 関係で明らかなことは、負荷、除荷過程において履歴が生じ、それに伴い残留変位 δ_n が発生したことである。これは、準静的な負荷条件下でも、非弾性的な変

Fig. 7 P - δ relationship under static condition Fig. 9 δ - ω relationship under static condition Fig. 8 P - ω relationship under static condition Fig. 10 P - δ diagrams for pin and uniform loadings

形が生じたことを意味している。図8の P - ω 関係にも同様な履歴が発生した。これは、粘弾性的な材料では、コースティック像寸法と荷重すなわち応力が直接的な依存関係にはないことを示唆している。同様な関係が他の高分子材料でも得られている⁽⁷⁾。一方、図9の測定値には若干のばらつきが発生した。しかしここで注目すべきことは、 δ - ω 関係が負荷、除荷過程においてほぼ一致したことである。この結果は、コースティック像が、変位すなわちひずみに依存して変化することを示唆している。さらに負荷、除荷速度の影響を調べるために、同様な計測を100 mm/minで行った。その結果は、図9の δ - ω 関係と良く一致した。これは、図9を用いて δ_n が評価できる可能性を示している。その評価例を図3に示す。ここでは δ_n 値として0.34 mmが得られている。

しかし動的な破壊では試験片の除荷速度が著しく大きくなる。そのため図9の適応性、また評価した δ_n 値の妥当性は明確でない。本研究では、その妥当性を以下のように検討した。(1) ピン負荷および平板ジグによる一様引張り条件下で破壊実験を行い、 P - δ 関係を比較した(図10参照)。ここでは破断荷重がほぼ等しい

結果を表示した。(2) 試験片にはひずみゲージを貼付け、破断直後の残留ひずみを計測した。(3) $\delta_n = \delta_n' + \delta_n''$ を仮定した(図10参照)。ここで δ_n' は一様引張り部、 δ_n'' はピン負荷部からの寄与分である。そして δ_n' は残留ひずみから、また δ_n'' は δ_c と δ_c' の差から決定した。

図10の手法で δ_n を求め、図9で得られた値と比較した。もし δ - ω 関係が除荷速度に依存するならば、両者に大きな差が生じるはずである。しかしその差は約3%と小さく、両者はほぼ一致した。これは、図9の関係が室温下では除荷速度に大きく依存しないこと、そのため高速破壊にも適応できることを示唆している。

図11に δ_n の評価値を示す。ここでは破断荷重 P_c の関数として表示した。 P_c とともに δ_n が増加した。この結果は、破断荷重が大きくなると残留変位、すなわち非弾性エネルギー W_n が増加することを意味している。

5.4 非弾性エネルギー W_n $W_n/U_{ex} = \delta_n/\delta_c$ の関係をj用いて、 W_n を評価した。その結果を図12に示す。ここでは W_n と U_{ex} の関係、さらに両者の割合を表示した。

Fig. 11 Relationships between displacement δ_n and fracture load P_c

Fig. 13 Relationship between fracture energy E_f and external work U_{ex}

Fig. 12 Relationship between nonelastic energy W_n and external work U_{ex}

Fig. 14 Relationships between W_e , W_n , E_f and external work U_{ex}

W_n は U_{ex} とともに増加した。しかし W_n/U_{ex} の比は小さくなる傾向を示した。例えば W_n/U_{ex} の値として、 U_{ex} が小さいところでは約 43%，また比較的大きいところでは約 37% が得られている。この結果は、 W_n/U_{ex} の割合が一定ではないこと、低 U_{ex} 域で大きく、その後は徐々に減少することを示している。

5.5 破壊エネルギー E_f 式 (3) の関係を用いて、 E_f を評価した。その結果を図 13 に示す。 E_f は U_{ex} が大きくなるとほぼ直線的に増加した。一方、両者の割合は若干減少する傾向を示した。しかしその減少量は小さく、 E_f/U_{ex} の値として約 46% のほぼ一定値が得られている。この結果は、破断荷重や外力仕事などの破壊条件が大きく変化しても E_f/U_{ex} の割合がほとんど影響を受けない可能性を示唆している。

6. 結 言

高速度カメラを用いて PMMA 樹脂の脆性破壊を計測した。試験片の破断後の飛しょう速度を求め、弾性エネルギー W_e を評価した。また破断後の残留変位より非弾性エネルギー W_n を決定した。さらに破壊エネルギー

E_f を評価し、試験片に作用した外力仕事 U_{ex} との対応関係を検討した。そして以下の結果を得た。

- (1) W_e , W_n , E_f は、 U_{ex} とともに増加した (図 6, 12, 13 参照)。
- (2) 同一の U_{ex} に対して $E_f > W_n > W_e$ の関係が得られた (図 14 参照)。
- (3) E_f/U_{ex} 値として約 46%，すなわち外力仕事の半分近くが破壊エネルギーとなることを示した。

文 献

- (1) Dally, J.W. and Shukla, A., *Eng. Frac. Mech.*, **13** (1980), 807-817.
- (2) Shukla, A., *Eng. Frac. Mech.*, **18** (1983), 725-730.
- (3) Shukla, A. and Fournery, W. L., *Eng. Frac. Mech.*, **19** (1984), 251-259.
- (4) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 245-259.
- (5) Takahashi, K. and Mada, T., *High-Speed Photography and Photonics*, SPIE 1802 (1993) 901-909.
- (6) Takahashi, K. Kido, M. and Arakawa, K., *Int. J. Fract.*, **90** (1998), 119-131.
- (7) 新川和夫・名合大輔・高橋清, 機論, **64**-625, A (1998), 2294-2299.