PMMA 樹脂の引張破壊挙動に及ぼす動的効果[†]

新 川 和 夫* 加 藤 大**
馬 田 俊 雄*** 東 藤 貢*

Dynamic Effect on Impact Tensile Fracture Behavior of PMMA Resin

by

Kazuo ARAKAWA*, Masaru KATO**, Toshio MADA*** and Mitsugu TODO*

The fracture behavior of a brittle polymer, polymethyl methacrylate (PMMA) resin, under static and impact tensile loadings was studied using single-edge-cracked specimens. The impact load and displacement were measured with a Piezo sensor and a high-speed extensometer, respectively. The load and displacement diagram, i.e., the external work U_{ex} applied to the specimen was used to determine the elastic energy E_e and non-elastic energy E_n due to viscoelastic and plastic deformation, and the fracture energy E_f for creating new fracture surface A_s . The energy-release rate was then estimated using $G_f = E_f/A_s$. The values of E_e , E_n , E_f and G_f were correlated with the fracture loads, and the two results determined for the static and impact loadings were compared to study the effect of loading conditions.

Key words : Polymer, PMMA resin, Static and impact loadings, Tensile fracture, Fracture energy, Elastic energy, Fracture load, External work, Energy release rate, High-speed extensometer

1 緒 言

近年、軽量化が要求される部材として、比重が小さい高分子材料が多く使用されるようになってきている。しかしながら材料の機械的特性、とくに耐衝撃性がまだ十分ではなく、その改善が重要な課題となっている。そのため種々の条件下で破壊挙動が調べられ、材料の力学的な信頼性が評価されている。¹⁾例えば静的な条件下では、試験片に作用する荷重と変位が計測され、き裂寸法などの条件から破壊じん性値などが得られている。²⁾また衝撃条件下でも破壊じん性値が計測され、静的条件下との比較検討がなされている。一般に、多くの高分子材料は粘弾性挙動を呈し、その結果、負荷速度依存性が発生する。さらに、き裂が高速度で進展するぜい性破壊では、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。^{3)~7)}この動的効果の計測法として、光弾性法^{3), 4)}やコースティック法^{5)~7)}が応用され、き裂周辺の動的応力場が評価されている。そして動的破壊じん性値が導かれ、き裂速度との対応関係などが調べられている。ところが粘性や動的効果を定量的に評価することは技術的に容易でなく、破壊挙動に及ぼすこれらの効果はほとんど考察されていないのが現状である。

本研究では、汎用的な高分子材料であるメタクリル (PMMA) 樹脂を用いて、ぜい性破壊挙動に及ぼす粘性や動的効果を定量的に評価することを試みた。その計測法として、筆者らが開発した静的および衝撃引張装置を応用した。^{8)~10)}この静的引張装置の特徴は、破断後の試

験片の運動を拘束しないため負荷方向への飛しょうが可能となること、これにより試験片に蓄積された弾性エネルギーを評価することが可能となる。また、光ファイバを用いた変位計により、き裂近傍の静的および動的変位が精度良く計測できることである。^{8), 9)}一方、衝撃引張装置の特徴は、ピエゾセンサによる衝撃荷重計測¹⁰⁾光ファイバによるき裂近傍の高速度変位が計測できることである。本研究では、上述の静的および衝撃引張装置を用いて、荷重と変位を計測した。荷重と変位より外力仕事 U_{ex} 、破断直後の残留変位より非弾性エネルギー E_n を求めた。静的負荷実験では試験片の破断後の飛しょう高さより、衝撃負荷実験では試験片の破断直後の振幅より弾性エネルギー E_e を決定した。 U_{ex} , E_n , E_e より破壊エネルギー E_f を求め、エネルギー比 E_e/U_{ex} , E_n/U_{ex} , E_f/U_{ex} を評価した。さらに破面の面積 A_s を用いて、エネルギー解放率を $G_f = E_f/A_s$ で求め、破断荷重 P_c との対応関係を検討した。そして、PMMA 樹脂のぜい性破壊挙動に及ぼす粘性や動的効果を考察した。

2 実験方法

2・1 試験片

試験片として板厚 3mm の PMMA (Sumipex E) 樹脂板を用いた。Fig. 1 に形状、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 P_c および外力仕事 U_{ex} を変化させるため、異なる長さ 1.5 ~ 5mm の切欠きを導入した。さらに試験片の両端には直径 6mm の穴をあけ、ピン負荷用とした。

[†] 原稿受理 平成 19 年 8 月 17 日 Received Aug. 17, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 九州大学応用力学研究所 〒816-8580 春日市春日公園, Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Kasuga-koen, Kasuga, 816-8580

** 九州大学大学院 〒816-8580 春日市春日公園, Graduate Student, Kyushu Univ., Kasuga-koen, Kasuga, 816-8580

*** 九州大学応用力学研究所 〒816-8580 春日市春日公園, Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Kasuga-koen, Kasuga, 816-8580

2・2 静的引張試験

Fig. 2 に静的引張試験法の概略を示す。試験片の下部は固定し、上部を鋼製のグリップとピンを用いることにより引張負荷を加えた。引張速度は 1mm/min とし、室温下で実験を行った。なお負荷装置として、インストロン形引張試験機を用いた。試験片上端部の負荷ジグは、鋼製の丸棒 4 本で構成されている。このジグの特徴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。^{8), 9)} さらに PMMA 試験片に比べて剛性が十分高いため、ジグに蓄積されるエネルギーが無視できることである。試験片の飛しょう高さは、丸棒ジグ間に挿入した薄い紙パイプ (約 0.3g) を用いて計測した。この紙パイプは破断した試験片部 (約 30g) とともに飛しょうし、最大高さで停止するように設定されている。最大高さを計測することにより、試験片に蓄積された弾性エネルギーを求めた。ただし紙パイプの質量とジグ間との摩擦は無視できる程度の小さいものと仮定した。

変位計測法の概略を同図に示す。ピン負荷部の変位は、試験機のクロスヘッドの移動量より求めた。一方、き裂近傍の変位 δ の計測には高速度変位計を利用した。^{8), 9)} この変位計では、光ファイバを試験片に貼り付け、その移動量を PSD (Position Sensing Detector) センサで計測する。センサからの出力波形はアンプで増幅した後、デジタルメモリで記録した。このセンサは約 100kHz の応答速度を有しており、静的および動的変位計測に使用可能である。^{8), 9)} なお高速き裂進展による影響を避けるため、光ファイバを切欠きから 3mm 離れた下部に貼り付けた。ただしこれによる変位の計測誤差は数 % 以下であり、実験解析では無視することとした。

2・3 衝撃引張試験

Fig. 3 に衝撃引張試験法の概略を示す。本研究では、重錘の自由落下を利用した衝撃引張装置¹⁰⁾を使用した。この装置は、(1) 重錘を任意の高さ位置で固定する電磁石、(2) 試験片を固定する軸、(3) 圧縮を引張りに変換

する金属棒、(4) 衝撃荷重を計測するためのピエゾセンサから構成されている。

本研究では、重錘として質量 10kg 、金属棒の上端から重錘までの高さを 300mm とした。このとき衝撃時の重錘の速度は約 2.4m/s となる。また金属棒の上端に厚さ 3mm のゴムシートを貼付けた。これにより衝撃時に発生する高周波振動を軽減することができる。このピエゾセンサは 45kHz の周波数特性を有しており、動的計測が可能である。¹⁰⁾ なお変位計測は、切欠きから 3mm 離れた上部に光ファイバを貼り付けることにより行なった。

3 実験結果および考察

3・1 静的 P - δ 関係

Fig. 4 に静的引張試験で得られた荷重 P と変位 δ の計測例を示す。ここでは破断時の荷重を P_c 、変位を δ_c で表示した。 P と δ は荷重時間 t とともに増加し、試験片が破断すると P_c 、 δ_c から急激に低下した。ここで注目すべきことは、 P と δ の勾配が t と共に変化すること、また破断後に残留変位 δ_n が生じたことである。これは静的引張試験では、PMMA 樹脂の粘性による非弾性効果が無視できないことを示唆している。

本研究では、上述の非弾性効果を詳細に調べるため、破断直後の試験片の残留変位 δ_n を計測した。このため PSD センサからの出力波形をサンプリングタイム 10ms と $1\mu\text{s}$ 間隔の 2 種類で記録した (Figs. 4, 5 参照)。Fig. 5 の結果で明らかなのは、 δ_c で急激に低下し、その後は減衰を伴いながら振動したことである。

荷重 P と変位 δ の計測値 (Fig. 4 参照) から静的 P - δ 関係を求めた。その結果例を Fig. 6 に示す。ここで注目すべきことは、非弾性効果が見かけ上顕著ではなく、 P - δ 関係が線形的に表示されていることである。

3・2 動的 P '- δ ' 曲線

Fig. 3 の衝撃引張試験機を用いると、試験片には静的な初期荷重 P_0 ($= 0.13\text{kN}$) が作用し、そのあと衝撃荷重 P' が作用する。変位 δ も同様に、初期変位 δ_0 と動的変位

Fig. 1 Specimen geometry.

Fig. 2 Static loading method and displacement measurement by PSD.

Fig. 3 Impact loading method.

Fig. 4 Load P and displacement δ as a function of time t under static loading. (sampling time $\Delta t = 10\text{ms}$)

Fig. 6 Load P versus displacement δ diagram under static loading.

Fig. 5 Displacement δ versus time t under static loading. (sampling time $\Delta t = 1\mu\text{s}$)

Fig. 7 Dynamic load P' versus time t under impact loading. (sampling time $\Delta t = 1\mu\text{s}$)

δ' に分けられる. Fig. 7に P' と時間 t の関係を示す. P' は t とともに増加し, 試験片が破断すると P'_c から急激に低下した. この $P'-t$ 波形から明らかなことは, 金属棒の上端に貼付けたゴムシートにより, 衝撃時に発生する高周波振動が軽減できたことである.

Fig. 8に高速度変位計で測定した動の変位 δ' と時間 t の関係を示す. δ' は t とともに増加し, δ'_c で急激に低下した. そして, δ' はその後, 減衰を伴いながら振動した. もし大きな非弾性変形が存在するならば, 振動中心はFig. 5の δ_n のように上側へシフトするはずである. しかし明確なシフトはみられない. すなわちこの結果は, 衝撃負荷の場合には, 非弾性変形が小さな値となることを示唆している. 同様な結果が他の試験片でも得られている.

Fig. 9に衝撃引張条件下での $P'-\delta'$ 関係を示す. この結果で示唆されていることは, ほぼ同じ初期裂長さの静的条件と比較して破断荷重が増加したことである (Fig. 6参照).

4 破壊エネルギーの定義

Fig. 10に静的な初期荷重 P_0 が作用し, そのあと衝撃負荷が作用する場合の荷重 P と変位 δ の関係を示す. ただし δ は試験片中央点の変位を示す. 一般に, $P-\delta$ の勾配は静的と動的負荷では異なっている. しかし本研究では, 解析を容易にするため, さらに P_0 が P_c より十分小

さい場合には大きな誤差が生じないものと仮定し, 両者の勾配を同一とした. このとき, 外力が試験片の半分になす仕事, すなわち外力仕事 U_{ex} は次式で与えられる.

$$U_{ex} = \frac{P_c \delta_c}{2} = \frac{\delta'_c (P_0 + P'_c)^2}{2P'_c} \quad (1)$$

ここで, $P_c = P_0 + P'_c$, $\delta_c = \delta'_c P_c / P'_c$ である. なお静的負荷の場合には, U_{ex} は P_c と δ_c から決定した.

本研究では, 破壊変形のプロセスが, き裂の進展, 試験片の破断, それに伴う弾性変形, 最後に非弾性変形の残留という順序で生じるものと考え, そして, U_{ex} がFig. 10に示されるように以下の3つのエネルギー成分に分離できるものと仮定した.^{8)~10)}

$$U_{ex} = E_f + E_e + E_n \quad (2)$$

ここで E_f は全破壊エネルギーの半分を表わす. すなわち E_f は, 破面(2 A_s)の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の半分に対応する. 一方, E_e は試験片に蓄積される弾性的なひずみエネルギー, E_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, 弾性エネルギー E_e , 非弾性エネルギー E_n を評価するため, 以下のことを仮定した. (1) E_e は試験片が破断すると全て運動エネルギーに変換する. (2) 動的破壊で生

Fig. 12 Flying height H_e versus fracture load P_c under static loading.

Fig. 13 Energy ratios E_e/U_{ex} , E_n/U_{ex} and E_f/U_{ex} as a function of fracture load P_c under static loading.

周期目と2周期目の振幅を求める。(2) 1, 2周期目の振幅から減衰を考慮した直線(破線で表示)を決定する。ただしこの減衰は、負荷軸への応力波の伝ばによるものとする。振幅を結ぶ直線と変位曲線 δ' との交点 δ'_e を求める。(4) そして、 δ_e は次式で求めた (Fig. 10 参照)。

$$\delta_e = \frac{\delta'_e(P_0 + P'_c)}{P'_c} \quad (5)$$

さらに E_e 値は、得られた δ_e を式 (3) に代入して求めた。

静的負荷の場合でも破断直後の振幅から E_e 値を近似的に評価することが可能である。ただし同一荷重値に対して動の変位は静的変位の2倍となることが理論的に示されている。そのため静的破断変位との比をとる場合には、Fig. 5 に示すように振幅、すなわち動の変位の半分値を用いることが必要となる。Fig. 5 の δ_e 値から弾性エネルギーと外力仕事の比 E_e/U_{ex} を求めると約 18% となり、飛しょう高さ H_e から得られた約 15% とほぼ同じ値となる。

4・3 破壊エネルギー E_f

得られた外力仕事 U_{ex} 、弾性エネルギー E_e 、非弾性エネルギー E_n を式 (2) に代入することにより E_f 値を求めた。静的負荷での結果を Fig. 13 に、衝撃負荷での結果を Fig. 14 に示す。ただしここでは、各エネルギー値と外力仕事の比、すなわち、 E_e/U_{ex} , E_n/U_{ex} , E_f/U_{ex} を破断荷重 P_c の関

Fig. 14 Energy ratios E_e/U_{ex} and E_f/U_{ex} as a function of fracture load P_c under impact loading.

Fig. 15 Energy release rate G_f versus fracture load P_c under static and impact loadings.

数として表示した。得られた結果を以下に示す。

静的負荷 (Fig. 13 参照) では、(1) E_n/U_{ex} は約 40% の一定値、(2) E_e/U_{ex} は、 P_c が小さいところでは約 15%、また比較的に大きなところでは約 13%、(3) E_f/U_{ex} は若干変化するものの、約 45% の一定値となった。

一方、衝撃負荷 (Fig. 14 参照) では、(1) E_n/U_{ex} はほぼ零、(2) E_e/U_{ex} は、約 73%、(3) E_f/U_{ex} は、約 27% となった。すなわち静的と衝撃負荷では、エネルギー比が大きく異なることが示されている。

4・4 エネルギー解放率 G_f

エネルギー解放率 G_f を次式で評価した。

$$G_f = \frac{E_f}{A_s} \quad (6)$$

ここで A_s は破面の面積を表す。式 (6) から導かれた G_f 値を Fig. 15 に示す。静的および衝撃負荷条件下において、 G_f は一定値でなく、 P_c とともに増加した。これは P_c の増加に伴い、 E_f 値が大きくなることを意味している。また衝撃時の G_f 値が静的値より小さくなっている。この結果は、衝撃条件下では運動エネルギー、すなわち弾性エネルギー E_e が大きくなり、これに伴い対応する E_f が小さくなることを示唆している。

5 結 言

静的および衝撃引張試験装置を用いて PMMA 樹脂のぜい性破壊実験を行なった。試験片に作用する荷重と変位より外力仕事 U_{ex} 、破断直後の残留変位より非弾性エネルギー E_n を求めた。一方、弾性エネルギー E_e は、静的負荷では試験片の破断後の飛しょう高さより、衝撃負荷では試験片破断直後の振幅より決定した。破壊エネルギー E_f は、 U_{ex} 、 E_n 、 E_e より求め、エネルギー比 E_e/U_{ex} 、 E_n/U_{ex} 、 E_f/U_{ex} を評価した。さらに破面の面積 A_s を用いて、エネルギー解放率を $G_f = E_f/A_s$ で求め、破断荷重 P_c との対応関係を検討した。そして以下の結果を得た。

- (1) E_e/U_{ex} 、 E_n/U_{ex} 、 E_f/U_{ex} 値は、負荷方法により大きく異なった。
- (2) E_n/U_{ex} 値は、静的負荷で約 40%、衝撃負荷ではほぼ零となった。
- (3) E_e/U_{ex} は、静的より衝撃負荷で大きな値を示した。
- (4) E_f/U_{ex} 値は、静的負荷で約 45%、衝撃負荷では約 27% となった。
- (5) P_c が大きくなると G_f 値は増加した。
- (6) G_f は静的より衝撃負荷で小さな値を示した。

参 考 文 献

- 1) J. G. Williams, "Fracture Mechanics of Polymers" (1984) Ellis Horwood Limited.
- 2) A. S. Kobayash, "Handbook on Experimental Mechanics", pp.430-500 (1987) Prentice-Hall.
- 3) J. W. Dally and A. Shukla, "Energy Loss in Homalite 100 during Crack Propagation an Arrest", Engineering Fracture Mechanics, Vol.13, pp.807-817 (1980).
- 4) A. Shukla and H. Nigam, "Note on the Stress Intensity Factor and Crack Velocity Relationship for Homalite 100", Engineering Fracture Mechanics, Vol.25, pp.91-102 (1986).
- 5) S. Suzuki, H. Homma and R. Kusaka, "Pulsed Holographic Microscopy as a Measurement Method of Dynamic Fracture Toughness for Fast Propagating Cracks", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.36-6, pp.631-653 (1988).
- 6) K. Arakawa, D. Nagoh and K. Takahashi, "Dynamic Crack Propagation and Unloading Behavior of Brittle Polymers", International Journal of Fracture, Vol.96, pp.347-360 (1999).
- 7) K. Arakawa, T. Mada and K. Takahashi, "Correlations among Dynamic Stress Intensity Factor, Crack Velocity and Acceleration in Brittle Fracture", International Journal of Fracture, Vol.105, pp.311-320 (2000).
- 8) K. Arakawa and T. Mada, "Measurement of Brittle Fracture Energy in PMMA (2nd Report, Application of High-Speed Extensometer)", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.70, No.695, pp.936-940 (2004).
- 9) K. Arakawa and T. Mada, "Measuring Fracture Energy in a Brittle Polymeric Material", Experimental Mechanics, Vol.46, pp.347-353 (2006).
- 10) K. Arakawa, T. Mada, J. Takahashi, M. Todo and S. Ooka, "Effect of Rubber Particle Size on Impact Tensile Fracture Behavior of MBS Resin", Journal of the Society of of Material Science, Japan, Vol.56, No.4, pp.371-376 (2007).