PMMA 樹脂の動的破壊挙動に及ぼす負荷作用点の影響*

新川 和夫^{*1}, 馬田 俊雄^{*2}, 高橋 清^{*1}

Influence of Loading Positions on Dynamic Fracture Behavior of 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 behavior of PMMA was studied using the method of caustics in combination with a Cranz-Schardin high-speed camera. Single-edge-cracked tensile specimens were fractured under pin-loading conditions so that cracks could undergo acceleration and deceleration stages in one fracture event. To study the effect of the loading positions, dynamic stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and load P applied to the specimens were determined in the course of crack propagation. Unloading rate $\dot{P}$, time derivative of P , was also evaluated to correlate with the time histories of K_{ID} and $\dot{a}$.

Key Words: High Polymer Material, Dynamic Fracture, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Crack Velocity, Unloading Rate, Caustic Method, High-Speed Photography, PMMA

1. 緒 言

脆性的な破壊が生じると、材料中をき裂が高速度で進展する。またき裂の速度 $\dot{a}$ は、進展するに伴い変化する。例えば、一様引張り負荷を受ける SEN 試験片では、 $\dot{a}$ は破壊の開始直後で増加し、その後は一定値へと漸近する^{(1)~(4)}。一方、ピン負荷を受ける DCB 試験片では、破壊の開始直後で $\dot{a}$ は最大となり、その後は減少する^{(5)~(7)}。また動的な応力拡大係数 K_{ID} が種々の手法を用いて計測されており、き裂の進展に伴い K_{ID} が変化することが報告されている。これは、 $\dot{a}$ や K_{ID} の挙動が試料形状や負荷方法、すなわち試料内部の応力分布に依存するものと解釈されている。しかし高速度で進展するき裂先端周辺の応力分布は静的な場合とは異なること、また材料の破壊変形による慣性力が無視できず動的効果を考慮しなければならないことなどが指摘されている。そのため、動的破壊のき裂進展メカニズムを解明するためには多くの問題点が残されている。

本研究では、コースティック法を用いてメタクリル樹脂 (PMMA) の動的破壊を計測し、き裂進展のメカ

ニズムを調べることを目的とした。ここでは1回のき裂進展において明確な加速、減速を生じるような試料形状、負荷方法を採用した。そして試料に作用する負荷点の距離 H_1 を変化させ、 K_{ID} , $\dot{a}$ の挙動を調べた。また試料の負荷作用点で生じるコースティック像を計測し、動的荷重 P を評価した。さらに P の時間変化率、すなわち除荷速度 $\dot{P}$ を求め、 K_{ID} , $\dot{a}$ との時間依存関係を考察した。

2. 実験方法

試料として厚さ 5 mm の PMMA (アクリライト S-001) 樹脂板を用いた。試料形状、寸法を図 1 に示す。試料の片側中央部に長さ約 6 mm の鋭い初期き裂をインパクト法⁽⁸⁾により導入した。また試料には負荷を加えるための 2 つの円孔を作成した。この試料形状を用いると、破断するまでの 1 回のき裂進展過程において応力拡大係数 K_{ID} とき裂速度 $\dot{a}$ のピーク値を得ることが可能となる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ただしき裂線上から円孔中心まで距離を H_1 とし、 $H_1=30\text{mm}$, 40mm , 50mm を採用した。これは、 K_{ID} , $\dot{a}$ に及ぼす H_1 の影響を調べるためである。

試料にはインストロン形万能試験機を用いて引張負荷を加えた。負荷ジグとして、図 1 に示すようなステンレス鋼製の丸棒 U 字形ピン金具を使用した。これは、負荷部円孔で生じるコースティック像を計測し、

* 原稿受付 1998 年 12 月 24 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: karakaw@riam.kyushu-u.ac.jp

荷重を評価するためである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。試料の負荷速度は 1 mm/min とし、室温下で実験を行った。なおき裂が進展を開始までの荷重は試験機のロードセルにより検出した。

破壊の高速撮影には改良形のクランツ・シャルディンカメラを使用した。このカメラの特徴は、焦点距離が異なる 2 像面を各々 30 こま同時に撮影できることである^{(13)~(15)}。撮影の結果例を図 2 に示す。これらは 30 こまのなかから抜粋したものである。ただし最終こまの撮影は試料が完全に破断した直後になされている。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。

き裂長さ a は、試料面ピントで得られた像よりき裂先端の移動距離を測定することにより求めた。また応力拡大係数 K_{ID} は次式で評価した⁽¹⁶⁾。

$$K_{ID} = (2\sqrt{2\pi}/3z_0dc^*\eta^{3/2})(\phi/3.17)^{5/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで d は試料厚さ、 c^* は応力光定数、 z_0 は試料面

からイメージ面までの距離を表わす。また η は光学系の配置に関する係数⁽¹⁷⁾、 ϕ はき裂先端コースティック像の縦最大直径である。PMMA 樹脂に対する c^* 値として、 $4.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ を採用した⁽¹⁶⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 応力拡大係数 K_{ID} と荷重作用点距離 H_1 の関係

図 3~5 に応力拡大係数 K_{ID} 、き裂長さ a の測定値を時間 t の関数として示す。また図中には荷重作用点距離 H_1 を表示した。いま K_{ID} と H_1 の関係に着目し、 H_1 の増加に伴う K_{ID} の変化を考察する。まず H_1 が比較的小さい図 3 の結果を検討する。図 3 では、き裂進展の初期過程で K_{ID} が増加し、後半で急激に減少した。そのため明確なピーク値が存在した。一方、 H_1 が 40 mm と増加した図 4 の結果でも、き裂進展の初期過程で K_{ID} は増加した。しかし後半での K_{ID} の減少勾配がゆるやかになっている。この傾向は図 5、すなわち H_1 がさらに大きくなった結果で顕著に現われている。

Fig. 1 Specimen geometry and loading method

Fig. 3 Stress intensity factor K_{ID} and crack length a as a function of time t ($H_1=30\text{mm}$)

Fig. 2 Example of dynamic crack propagation in a PMMA specimen
(a) Specimen-focussed images, (b) Caustic patterns

Fig. 4 Stress intensity factor K_{ID} and crack length a as a function of time t ($H_1=40\text{mm}$)

Fig. 6 Stress intensity factor K_{ID} and crack velocity $\dot{a}$ as a function of time t ($H_1=30\text{mm}$)

Fig. 5 Stress intensity factor K_{ID} and crack length a as a function of time t ($H_1=50\text{mm}$)

Fig. 7 Stress intensity factor K_{ID} and crack velocity $\dot{a}$ as a function of time t ($H_1=40\text{mm}$)

図5では、 K_{ID} がほぼ一定となるような領域が存在した。これは、 H_1 が増加すると、 K_{ID} の減少挙動が大きな影響を受けることを示している。

3.2 き裂速度 $\dot{a}$ と H_1 の関係 本研究では測定値のばらつきを小さくするために、 K_{ID} と a 値を最小二乗法を用いた数値計算により時間 t に関する多項式で近似した。図3～5に近似曲線 $K_{ID}(t)$ 、 $a(t)$ を表示した。測定値と各近似曲線がよく一致することが示されている。き裂速度 $\dot{a}$ は、 $a(t)$ 曲線を t に関し微分することにより評価した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

図6～8に K_{ID} 、 $\dot{a}$ を t の関数として示す。 H_1 が小さい図6の結果では、明確なき裂の加速、減速過程が存在した。しかし H_1 が増加するに伴い、き裂の減速挙動に変化が発生した(図7, 8参照)。とくに $H_1=50\text{mm}$ となった図8の結果では、減速過程における速度変化がゆるやかになっている。この結果は、 H_1 がさらに大きくなると、 $\dot{a}$ は明確なピーク点を持たずある一定値に徐々に漸近していくことを示唆している。すなわち一様引張り負荷を受ける SEN 試験片と同様に減速過程が消滅する可能性が示されている。

Fig. 8 Stress intensity factor K_{ID} and crack velocity $\dot{a}$ as a function of time t ($H_1=50\text{mm}$)

3.3 K_{ID} と $\dot{a}$ の関係 図6～8で明らかなように、各試験片における $\dot{a}$ と K_{ID} がよく似た変化挙動を呈している。しかし両者のピーク値を与える時間 t が異なること、 $\dot{a}$ のピークが K_{ID} より先行することが示されている。図6の結果では、 $\dot{a}$ と K_{ID} のピーク値が約 $80\mu\text{s}$ と $115\mu\text{s}$ で得られており、両者に $35\mu\text{s}$ 程度の時間差 Δt が生じている。一方、図7では $42\mu\text{s}$ 、図

Fig. 9 Loading point caustic size ω and load P as a function of time t ($H_1=30\text{mm}$)

Fig. 11 Loading point caustic size ω and load P as a function of time t ($H_1=50\text{mm}$)

Fig. 10 Loading point caustic size ω and load P as a function of time t ($H_1=40\text{mm}$)

Fig. 12 P - ω relationships for a PMMA specimen under static and dynamic conditions

8では48 μs 程度の Δt が発生した。ここで注目すべきことは、 H_1 が増加すると、 Δt が大きくなる傾向を示していることである。このような Δt と H_1 の関係を考察するために、以下では試験片の除荷挙動を調べた。

3.4 荷重点コースティック像寸法 ω 本研究では負荷部円孔で生じるコースティック像を撮影し、その横方向最大寸法 ω を計測した(図2参照)。その結果を図9~11に示す。各試験片の ω 値は、時間 t の経過、すなわちき裂進展に伴い減少した。しかしその減少挙動は、 H_1 により変化した。 H_1 が小さいとき、 ω 値の減少は破壊の初期過程で急激に生じ、後半でゆるやかになっている(図9参照)。しかし H_1 が増加すると、 ω の減少勾配が後半でほぼ一様となる傾向が存在した(図10, 11参照)。以下では荷重 P を評価するために、 ω との対応関係を調べた。

3.5 荷重 P と ω の関係 図12にPMMAの P - ω 関係を示す。ここで実線で表示した負荷経路は、静的条件下で得られたものである。また ω_0 (●印)は、 $P=0$ で計測されたイメージ面上の負荷部円孔像に相当する。図には3つの試験片で得られた破断荷重点 P_f (□印)を表示した。一方、 ω_{d0} (○印)は、試験片が完全に

破断した直後の荷重点コースティック像の寸法を表わしている(図2参照)。 ω_{d0} は ω_0 より大きな値を示した。また P_f が大きくなると、対応する ω_{d0} 値が増加した。この結果は、PMMAの変形が室温下では除荷速度に依存すること、すなわち材料の粘性が動的 P - ω 関係に影響を及ぼすことを意味している⁽¹²⁾。

3.6 動的 P と除荷速度 $\dot{P}$ の評価 本研究では、前報⁽¹²⁾と同様PMMA試料に対し、以下の仮定を行った。(1)破断荷重点 P_f までは静的な P - ω 関係が成立する。(2)動的な除荷過程では粘性効果が無視できる。(3) $\omega=\omega_{d0}$ で $P=0$ となる。すなわち点 P_f から ω_{d0} への変化が弾性的であるものと仮定した。そして動的 P - ω 関係として次式を採用した。

$$P = k(\omega/\omega_{d0} - 1)^n \quad (2)$$

ここで、 k と n は係数である。前報⁽¹²⁾と同様に $n=1.04$ を採用し、 k 値は P_f と ω_{d0} を用いて決定した。各試験片に対する除荷経路を図12に破線で表示した。ここで注目すべきことは、 P_f が異なると、除荷経路が移動することである。

図9~11に、式(2)で評価した動的 P 値を表示した。 P は ω とほぼ同様な挙動で変化した。このような

P の変化挙動は、き裂進展により解放されるエネルギー変化と関連する。そのため P と $\dot{a}$ や K_{ID} との間にはある依存関係が存在するはずである。本研究では、 P の時間変化率、すなわち除荷速度 $\dot{P}$ を求め、 K_{ID} 、 $\dot{a}$ との対応関係を検討した。ここでは近似曲線 $P(t)$ を微分することにより $\dot{P}$ を評価した。

3.7 $\dot{P}$ 、 K_{ID} 、 $\dot{a}$ と H_1 の関係 図13～15に K_{ID} 、 $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ を時間 t の関数として示す。 $K_{ID}(t)$ は実線、 $\dot{a}(t)$ は一点鎖線、 $\dot{P}(t)$ は破線（ただし負の値を上向き）で表示した。 $\dot{P}$ が K_{ID} や $\dot{a}$ とほぼ同様な変化挙動を示している。しかし各ピーク値の到達時間には差が発生した。その順序は $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ 、 K_{ID} となっており、 $\dot{P}$ がほぼ中間に位置している。これと同様な関係が他の高分子材料であるエポキシ、ホマライト 100 においても得られている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

前述のような $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ 、 K_{ID} の時間差の原因を調べるため

に、以下のような検討を行った。まず $\dot{a}$ 、 K_{ID} がピーク値を生じたき裂の先端位置を計測した。そして各位置から荷重点までの距離を求め、縦波が伝ばする時間 Δt_1 、 Δt_2 を評価した。ただし縦波速度として $c_L=2540$ m/s を採用した⁽¹⁸⁾。その結果、図13では $\Delta t_1=15.6\mu\text{s}$ 、 $\Delta t_2=17.6\mu\text{s}$ 、図14では $\Delta t_1=18.8\mu\text{s}$ 、 $\Delta t_2=21.2\mu\text{s}$ 、図15では $\Delta t_1=22.4\mu\text{s}$ 、 $\Delta t_2=24.4\mu\text{s}$ が得られている。ここで注目すべきことは、これらの値が各試験片での $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ 、 K_{ID} のピーク点の到達時間差とほぼ一致したこと、また H_1 が増加するに伴い Δt_1 、 Δt_2 が大きくなっていることである。この結果は、 $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ 、 K_{ID} で生じるピーク値の時間差が H_1 に依存することを示唆している。

き裂が準静的に進展する場合 ($\dot{a} \ll c_L$) には、 Δt_1 、 Δt_2 は $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ 、 K_{ID} の時間変化に比較して十分に小さく無視することが可能である。そのため $\dot{a}$ 、 $\dot{P}$ 、 K_{ID} の変化は時間的にほぼ対応する。しかしき裂が高速で進展する場合

Fig. 13 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ as a function of time t ($H_1=30\text{mm}$)

Fig. 14 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ as a function of time t ($H_1=40\text{mm}$)

Fig. 15 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ as a function of time t ($H_1=50\text{mm}$)

には Δt_1 , Δt_2 は無視できず, $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} の時間差となって発生する. このような解釈を行えば時間差の原因を説明することが可能である. しかし $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} 値の定量的な時間変化を議論するためには, さらに破面を形成するために消費されたエネルギー, 試験片の運動エネルギーなどを含む系全体のエネルギーバランスを検討することが必要となる.

4. 結 言

き裂の加速, 減速を生じるような PMMA 試料を用いて高速破壊実験を行った. 荷重作用点の距離 H_1 を変え, 応力拡大係数 K_{ID} , き裂速度 $\dot{a}$ を計測した. また負荷部で生じるコースティック像より動的荷重 P を評価した. さらにその時間変化率 $\dot{P}$ を求め, K_{ID} と $\dot{a}$ との対応関係を調べた. そして以下の結果を得た.

- (1) H_1 により K_{ID} , $\dot{a}$, P の挙動が変化した.
- (2) $\dot{a}$, K_{ID} のピーク値に時間差 Δt が発生した.
- (3) Δt は, H_1 が増加すると大きくなる傾向を示した.
- (4) $\dot{P}$ は $\dot{a}$, K_{ID} と定性的に同様な変化挙動を呈した.
- (5) $\dot{P}$ のピーク値は $\dot{a}$, K_{ID} のほぼ中間に存在した.

文 献

- (1) Schardin, H., (Averbach, B. L. 編), *Fracture*, (1959), 297-330, Wiley, J., New York.
- (2) Anthony, S. R., Chubb, J. P. and Congleton, J., *Philos. Mag.*, **22** (1970) 1201-1216.
- (3) Paxson, T. L. and Lucas, R. A., (Sih, G. C. 編), *Dynamic Crack Propagation*, (1973), 415-426, Noordhoff International Publishing.
- (4) Katsamanis, F., Raftopoulos, D. and Theocaris, P. S., *Exp. Mech.* **17** (1977), 128-132.
- (5) Beinert, J. and Kalthoff, J. F. (Sih, G. C. 編), *Mechanics of Fracture*, (1981), 281-330, Martinus Nijhoff Publishers.
- (6) Rosakis, A. J., Duffy, J. and Freund, L. B., *J. Mech. Phys. Solids* **32** (1984), 443-460.
- (7) Nishioka, T., Murakami, T., Uchiyama, H., Sakakura, K. and Kittaka, H., *Engng. Frac. Mech.*, **39** (1991), 757-767.
- (8) 高橋清・桜田泰弘・小松治男, 九州大学応用力学研究所所報, No.48 (1978), 69-75.
- (9) 新川和夫・高橋清, 機論, **53**-485, A (1987), 128-134.
- (10) Takahashi, K. and Arakawa, K., *Exp. Mech.* **27** (1987), 195-200.
- (11) 新川和夫・名合大輔・高橋清, 機論, **64**-619, A (1998), 579-583.
- (12) 新川和夫・名合大輔・高橋清, 機論, **64**-625, A (1998), 2294-2299.
- (13) 新川和夫・高橋清, 機論, **54**-500, A (1988), 718-722.
- (14) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 245-254.
- (15) Takahashi, K. and Mada, T., *High-Speed Photography and Photonics*, SPIE 1802 (1993) 901-909.
- (16) Manogg, P., *Glastechnische Berichte* **39** (1966) 323-329.
- (17) 高橋清, 非破壊検査, **27**-10 (1978), 672-678.
- (18) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 103-114.