動的き裂進展を伴う高分子材料の除荷挙動*
(第2報, PMMA とホマライト 100 の場合)新川 和夫^{*1}, 名合 大輔^{*2}, 高橋 清^{*1}Unloading Behavior of Polymers due to Dynamic Crack Propagation
(2nd Report, Case of PMMA and Homalite-100)

Kazuo ARAKAWA, Daisuke NAGOH and Kiyoshi TAKAHASHI

Dynamic stress intensity factor K_{ID} and crack velocity $\dot{a}$ were determined using single-edge-cracked tensile specimens of PMMA and Homalite-100. To study unloading behavior of the material, load P applied to the specimen was also evaluated as a function of time t . Unloading rate $\dot{P}$, the time derivative of P , was determined to correlate with K_{ID} and $\dot{a}$. The findings showed that the change in $\dot{P}$ was qualitatively in accord with the change in K_{ID} or $\dot{a}$. However, there existed slight differences among the values of t giving peak values of $\dot{P}$, K_{ID} and $\dot{a}$, so that their order was $\dot{a}$, $\dot{P}$ and K_{ID} .

Key Words: High Polymer Material, Brittle Fracture, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Crack Velocity, Unloading Rate, Caustic Method, High-Speed Photography, PMMA, Homalite-100

1. 緒 言

物体に外力すなわち負荷が作用するとひずみを生じ、その結果、形状が変化する。さらに負荷が増加すると最終的には破壊が発生する。とくに脆性的な材料で破壊が生じると、き裂が高速度で進展する。そのため物体に作用する負荷は急激に低下し、動的な除荷が発生する^{(1)~(3)}。このような除荷挙動は、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と関連し、破壊の動的メカニズムを解明するうえで重要なものである。

筆者らは前報⁽⁴⁾において、コースティック法と高速カメラを応用してエポキシ樹脂の動的破壊実験を行った。そして1回のき裂進展中に明確な加速、減速を生じるような試験片形状を用いて、応力拡大係数 K_{ID} 、き裂速度 $\dot{a}$ を評価した。また負荷部で生じるコースティック像を計測し、試験片に作用する動的荷重 P を評価した。さらにその時間変化率、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。そして $\dot{P}$ の変化挙動が K_{ID} や $\dot{a}$ と定性的に一致すること、しかし各変化挙動には時間差が生じることを報告した⁽⁴⁾。

本研究では、このような動的除荷挙動に及ぼす材料物性、とくに粘性の影響を調べることを目的とした。そのため試料として、粘性に明確な差が生じるように熱可塑性のメタクリル樹脂 (PMMA) と熱硬化性のポリエステル樹脂 (ホマライト100) の2種類を採用した。ここでは材料の粘性が負荷部コースティック像に及ぼす効果を調べ、動的荷重 P を評価した。そして除荷速度 $\dot{P}$ を求め、応力拡大係数 K_{ID} 、き裂速度 $\dot{a}$ との比較検討を行った。さらに $\dot{P}$ と K_{ID} 、 $\dot{a}$ の各変化挙動で生じる時間差の要因について考察した。

2. 試験片および実験方法

試料として PMMA (アクリライト S-001)、ポリエステル樹脂 (ホマライト100) の高分子材料を用いた。各材料の物性値を表1に示す⁽⁵⁾。試料厚さは PMMA が 5 mm、ホマライト100 が 6.4 mm である。試験片形状、寸法を図1に示す。長さ約 6 mm の鋭い初期き裂を試験片の片側中央部に作成した⁽⁶⁾。また試験片には負荷を加えるための2つの円孔を作成した。この試験片形状の特徴は、破断するまでの1回のき裂進展過程においてき裂速度 $\dot{a}$ と応力拡大係数 K_{ID} のピーク値が得られることである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

試験片にはインストロン形万能試験機を用いて引張

* 原稿受付 1997年8月11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} (株)シマノ (☎ 590-0824 堺市老松町3-77)。

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、荷重を評価するためである。試験片の負荷速度は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するまでの荷重は試験機のロードセルにより検出した。破壊の高速度撮影にはクランツ・シャルディンカメラを使用した^{(9)~(11)}。

Table 1 Material Properties

	PMMA	Homalite-100
c_L (m/s)	2540	2598
c_s (m/s)	1415	1240
E_d (GPa)	5.97	5.11
ρ (Kg/m ³)	1187	1230
c^* (m ² /N)	4.90×10^{-11}	7.67×10^{-11}

c_L : 縦波速度, c_s : 横波速度, E_d : 動的縦弾性係数, ρ : 密度, c^* : 応力光定数

Fig. 1 Specimen geometry and loading method

3. 動的き裂進展挙動の評価法

3.1 応力拡大係数 K_{ID} とき裂長さ a の評価 PMMA試験片で得られた高速度写真を図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験片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。応力拡大係数 K_{ID} は次式で評価した⁽¹²⁾。

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

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⁽¹³⁾, ϕ はき裂先端コースティック像の縦最大直径である。

3.2 き裂速度 $\dot{a}$ の評価 図3に応力拡大係数 K_{ID} , き裂長さ a の測定値を時間 t の関数として表示した。

Fig. 3 Stress intensity factor K_{ID} and crack length a for a PMMA specimen as a function of time t

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 velocity $\dot{a}$ for a PMMA specimen as a function of time t

Fig. 5 Loading point caustic size ω and load P for a PMMA specimen as a function of time t

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 t に関する 9 次の多項式で近似した。図 3 に近似曲線 $K_{ID}(t)$, $a(t)$ を表示した。各曲線が測定値と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⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

図 4 に K_{ID} , $\dot{a}$ を t の関数として表示した。 $\dot{a}$ と K_{ID} がよく似た挙動を呈している。しかし $\dot{a}$ と K_{ID} のピーク値を与える t が異なること、また $\dot{a}$ のピークが K_{ID} より先行することが示されている。図 4 の結果では、 $\dot{a}$ と K_{ID} のピーク値がそれぞれ約 110 μs と 150 μs で得られており、両者に 40 μs 程度の時間差が生じている。これは、 K_{ID} と $\dot{a}$ の関係が一意的に対応しないことを意味するものである。これと同様なき裂進展挙動が他の高分子材料でも得られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

4. PMMA の除荷挙動

4.1 動的荷重 P の評価法 図 2(b) で明らかなようにに荷重点円孔でも明確なコースティック像が撮影されている。本研究では荷重点コースティック像の変化を

Fig. 6 P - ω relationship for a PMMA specimen under static condition

Fig. 7 P - ω relationships for a PMMA specimen under static and dynamic conditions

精度よく評価するために、荷重軸線に対して垂直方向の最大寸法 ω を計測した。その結果を図 5 に示す。 ω は時間とともに急激に減少した。これは、き裂進展に伴い除荷が生じたことを示すものである。以下ではまず静的条件下での ω と荷重 P の関係を検討した。

図 6 に静的な P - ω 関係を示す。ただし試験片はき裂なし、荷重、除荷速度は 1 mm/min とした。 ω は P とともに増加した。しかし除荷により ω は減少するものの、その除荷経路は荷重過程とは異なっている。また同一の P 値に対し、除荷過程での ω 値が大きくなっている。これは、塑性や粘性などによる残留変形が荷重点で生じたことを示している。

本研究では、動的な除荷で生じる荷重点の残留変形を評価した。そのため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を測定した(図 2 参照)。その寸法 ω_{d0} を図 7 に示す。また静的な P - ω 荷重曲線と破断荷重点 P_f を表示した。 ω_{d0} が ω_0 よりかなり大きくなっている。これは、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 関係に大きく影響することを示唆している。

Fig. 8 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ for a PMMA specimen as a function of time t

筆者らは前報⁽⁴⁾において、同様な計測をエポキシ樹脂で行った。そして静的な P - ω 関係が負荷、除荷過程で変化しないこと、また ω_{d0} と ω_0 がほぼ一致することを報告した。これは、使用したエポキシ樹脂の粘性が室温下では無視できること、すなわち負荷部の変形が弾性的に応答する可能性を指摘した。さらにエポキシ樹脂の P - ω 関係が、

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

の関数形で表示できること、その係数が $k = 1990$, $n = 1.04$ で与えられることを報告した⁽⁴⁾。

本研究では PMMA 樹脂に対し、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(図7参照)。(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。そしてエポキシ樹脂で得られた係数 $n = 1.04$ を採用した⁽⁴⁾。一方 k 値は P_f と ω_{d0} に依存する係数である。ここでは $\omega = \omega(P_f)$ を静的 P - ω 関係より求め、さらに $P = P_f$, ω_{d0} を式(2)に代入することにより k 値を決定した。なお本試験片では $k = 13740$ が得られており、対応する動的 P - ω 曲線を図7に破線で表示した。以下では式(2)を用いて、動的 P を評価した。

図5に動的 P 値を示す。ここで明らかなように、 P は時間 t の経過、すなわちき裂進展に伴い急激に低下した。このような P の挙動は、き裂進展により解放されるポテンシャル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。

4.2 $\dot{P}$ と K_{ID} , $\dot{a}$ の関係 図8に K_{ID} , $\dot{a}$ とともに $\dot{P}$

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。ここで明らかなように、 $\dot{P}$ が K_{ID} や $\dot{a}$ と良く似た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。この関係は、エポキシ樹脂の結果と定性的に一致した⁽⁴⁾。以下ではこの原因を考察するために、 $\dot{a}$, K_{ID} がピーク値を生じるき裂の先端位置から荷重点までの距離を計測した。そして各距離を縦波が伝ばする時間 Δt_1 , Δt_2 を評価した。その結果 $\Delta t_1 = 17 \mu s$, $\Delta t_2 = 21 \mu s$ が得られている。これらの値は、 $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} のピーク値の到達時間差とほぼ一致した(図8参照)。もしき裂先端近傍の応力場が $\dot{a}$ 変化に直接依存するならば、き裂先端から離れた位置での $\dot{P}$ より K_{ID} の変化が時間的に先行すべきはずである。しかし得られた結果は逆の順序となっている。すなわちこの結果は、 K_{ID} と $\dot{a}$ の依存関係が直接的ではなく、 $\dot{P}$ の影響を受けることを示唆している⁽⁴⁾。

5. ホマライト100のき裂進展と除荷挙動

5.1 K_{ID} , $\dot{a}$, ω の評価 ホマライト100試験片で得られた高速度写真を図9に示す。また実験結果を図10, 11に示す。図10では応力拡大係数 K_{ID} , き裂長さ a , また図11に荷重点コースティック像の横最大寸法 ω の時間変化を表示した。 K_{ID} , $\dot{a}$, ω の変化挙動は、PMMA試験片と定性的には一致した。以下では P - ω 関係を求め、動的荷重 P を評価した。

5.2 P - ω 関係 静的条件下で得られた P - ω 関係を図12に示す。 ω 値は負荷により増加し、除荷により減少した。しかし同一の P 値に対しては、除荷過程での ω 値が若干大きくなっている。これは、PMMA ほど

Fig. 9 Example of dynamic crack propagation in a Homalite-100 specimen
(a) Specimen-focussed images, (b) Caustic patterns

Fig. 10 Stress intensity factor K_{ID} and crack length a for a Homalite-100 specimen as a function of time t

Fig. 12 P - ω relationship for a Homalite-100 specimen under static condition

Fig. 11 Loading point caustic size ω and load P for a Homalite-100 specimen as a function of time t

Fig. 13 P - ω relationships for a Homalite-100 specimen under static and dynamic loading conditions

顕著ではないものの、ホマライト 100 でも負荷部で残留変形が生じることを示している。

図13 に負荷過程での P - ω 曲線、破断荷重点 P_f 、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寸法 ω_{d0} を表示した。 $\omega_{d0} > \omega_0$ となっており、 P - ω 関

係の除荷速度依存性が示されている。ここでも P_f から ω_{d0} への変化が弾性的であるものと仮定し、ホマライト 100 に対して $n=1.04$ を採用した。また本試験片に対する k 値として 3508 が得られている。その結果を図13 に破線で表示した。また動的 P 値を図11 に示す。

Fig. 14 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ for a Homalite-100 specimen as a function of time t

PMMA と同様に、 P はき裂進展に伴い急激に低下した。以下では除荷速度 $\dot{P}$ を求め、 K_{ID} , $\dot{a}$ との相関関係を考察した。

5.3 K_{ID} , $\dot{a}$, $\dot{P}$ の関係 図14に K_{ID} , $\dot{a}$, $\dot{P}$ の時間変化を表示した。ここで明かなように、 $\dot{P}$ が K_{ID} , $\dot{a}$ と良く似た変化挙動を示している。しかし PMMA 試験片と同様に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。 $\dot{a}$, K_{ID} がピーク値を生じるき裂先端位置から荷重点までの距離を計測し、縦波が伝ばする時間 Δt_1 , Δt_2 を評価した。その結果、 $\Delta t_1 = 16 \mu s$, $\Delta t_2 = 19 \mu s$ が得られている。ここで注目すべきことは、図14での $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} ピーク値の到達時間差とほぼ対応したことである。このような破壊挙動は、粘弾性挙動がより顕著な PMMA さらに前報⁽⁹⁾で示した弾性的なエポキシ樹脂の結果と一致した。すなわち得られた実験結果は、高分子材料中における $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} の依存関係が材料物性、とくに粘性の影響を受けない可能性を示している。

6. 結 言

PMMA とホマライト100 の脆性破壊実験をコースティック法を用いて行った。そしてき裂速度 $\dot{a}$ 、応力拡大係数 K_{ID} 、および負荷部で生じるコースティック像寸法 ω を計測した。また材料の粘性が ω に及ぼす効果を調べ、荷重 P を評価した。さらに時間変化率 $\dot{P}$ 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) P - ω 関係は除荷速度により変化、すなわち両材料とも粘弾性的な挙動を呈した。

(2) $\dot{P}$ の変化挙動は $\dot{a}$, K_{ID} と定性的に一致した。しかし各変化挙動には時間差が発生した。

(3) 各ピーク値の到達順序は $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} となった。

(4) この順序は、弾性的な破壊挙動を呈したエポキシ樹脂の結果⁽⁹⁾と一致した。すなわち(3)の関係が材料の粘性の影響を受けない可能性を示している。

高速度撮影を行うにあたり九州大学応用力学研究所の馬田俊雄氏の助力を得た。記して謝意を表する。

文 献

- (1) Katsamanis, F. ほか2名, *Exp. Mech.* **17** (1977), 128-132.
- (2) Dally, J. W. and Shukla, A., *Eng. Frac. Mech.*, **13** (1980), 807-817.
- (3) Beinert, J. and Kalthoff, J. F. (Sih, G. C. 編), *Mechanics of Fracture*, (1981), 281-330, Martinus Nijhoff Publishers.
- (4) 新川和夫 ほか2名, 機論, **64**-619, A(1998), 579-583.
- (5) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 103-114.
- (6) 高橋清・ほか2名, 九州大学応用力学研究所報, No.48 (1978), 69-75.
- (7) 新川和夫・高橋清, 機論, **53**-485, A(1987), 128-134.
- (8) Takahashi, K. and Arakawa, K., *Exp. Mech.* **27** (1987), 195-200.
- (9) 新川和夫・高橋清, 機論, **54**-500, A(1988), 718-722.
- (10) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 245-259.
- (11) Takahashi, K. and Mada, T., *High-Speed Photography and Photonics*, SPIE 1802 (1993) 901-909.
- (12) Manogg, P., *Glastechnische Berichte* **39** (1966) 323-329.
- (13) 高橋清, 非破壊検査, **27**-10 (1978), 672-678.