動的き裂進展を伴う高分子材料の除荷挙動*
(第 1 報, エポキシ樹脂の場合)新川 和夫*¹, 名合 大輔*², 高橋 清*¹Unloading Behavior of Polymers due to Dynamic Crack Propagation
(1st Report, Case of Epoxy Resin)

Kazuo ARAKAWA, Daisuke NAGOH and Kiyoshi TAKAHASHI

The method of caustics in combination with a Cranz Schardin high-speed camera was utilized to study dynamic crack propagation in epoxy specimens. Single-edge-cracked tensile specimens were fractured under pin-loading conditions so that cracks could undergo acceleration and deceleration stages in one fracture process. Dynamic stress intensity factor K_{ID} and crack velocity $\dot{a}$ were evaluated in the course of crack propagation. Caustic patterns at the loading points were also recorded to estimate the dynamic load P applied to the specimen. Unloading rate $\dot{P}$, i. e. the time derivative of P , was determined as a function of time t , and its correlations with K_{ID} and $\dot{a}$ were examined.

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

1. 緒 言

材料や構造物で脆性的な破壊が生じると、き裂が高速で進展を開始する。Griffith は、このような破壊挙動をエネルギーに関する不安定現象として扱うことにより、破壊が開始するための必要条件を提唱した⁽¹⁾。この条件は、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新しい破面を形成するために必要な表面エネルギーに関係し、前者のエネルギーが後者を越えたときに破壊が開始するというものである。一方、これらのエネルギー関係は、高速破壊におけるき裂の加速、減速、さらにそれに伴うき裂の分岐、停止する条件などを理解するうえで重要なものである。しかし高速で進展するき裂を計測し、さらに時々刻々と変化するエネルギーを精度よく評価することは技術的に容易でない。この原因として、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、また破面形成の条件が十分に解明されていないことなどが挙げられる。き裂周辺の動的応力場の計測がこれまでに種々の手法、とくに光弾性法^{(2)~(6)}、コース

ティック法^{(7)~(14)}を用いてなされている。また試験片に作用する動的負荷の評価が試みられている⁽³⁾⁽⁷⁾。しかしエネルギー関係を定量的に評価するためには多くの問題点が残されている。

本研究では、高速き裂進展に伴うエネルギー変化を調べるための基礎実験として、試験片に作用する動的負荷を測定した。その手法としてコースティック法を採用した。ここでは 1 回のき裂進展中に明確な加速、減速を生じるような試料形状を用いて、負荷部で生じるコースティック像の時間変化を計測した。そして動的荷重 P を求め、その時間変化率、すなわち除荷速度 $\dot{P}$ を評価した。さらに応力拡大係数 K_{ID} 、き裂速度 $\dot{a}$ を求め、 $\dot{P}$ との対応関係を検討した。

2. 試験片および実験方法

試料として厚さ 5 mm のエポキシ樹脂 (アラルダイト B) 板を用いた。この樹脂は脆性的な材料で、さらに負荷速度の影響も小さいとされているために動的な破壊実験の試料としてよく用いられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。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 の鋭い初期き裂を作成した。その作成法としてインパクト法⁽¹⁵⁾を採用した。また試料には負荷を加えるための二つの円孔を作成した。この試料形状の特徴

* 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)。

は、破断するまでの1回のき裂進展過程において明確なき裂速度と応力拡大係数のピーク値が得られることである。また初期き裂と負荷軸線までの距離 b を変えることにより試料の破断荷重をある程度制御することが可能である。

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、動的荷重を評価するためである。試料の負荷速度は 1 mm/min とし、室温下で実験を行った。なおき裂進展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像面を同時に撮影できることである^{(16)~(18)}。

3. 実験結果および考察

3.1 撮影結果 高速撮影の結果例を図2に示す。これらは30コマのなかから抜粋したものである。ただ

Fig. 1 Specimen geometry and loading method

し最終コマの撮影は、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。き裂は直線的に進展した。またき裂先端で生じるコースティック像の直径は時間とともに変化した。その直径は、き裂進展の初期では増加し、後半では減少した。一方、負荷部円孔でも明確なコースティック像が撮影されている。その像はき裂の進展に伴い若干傾斜した。しかしその大きさはき裂進展により減少し、試料が完全に破断するとほぼ消滅した。これは、負荷部でのコースティック像を計測することにより動的荷重が評価できる可能性を示している。

3.2 応力拡大係数 K_{ID} とき裂長さ a の評価 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⁽¹⁹⁾。

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

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⁽²⁰⁾、 ϕ はイメージ面上で計測されるコースティック像の縦最大直径である。エポキシ樹脂 (アラルダイト B) に対する c^* 値として、 $0.97 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ を採用した⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

図3に応力拡大係数 K_{ID} 、き裂長さ a の測定値を時間 t の関数として示す。また図中には初期き裂と負荷軸線までの距離 b を表示した。 K_{ID} は、き裂進展の初期過程では増加し、約 $135 \mu\text{s}$ で最大値に達したのちに減少した。一方 a は比較的単調に増加した。しかしこのよう配は一定ではなく、 t とともに変化した。図3の結果ではこの配の増加が約 $40 \mu\text{s}$ 前後に、またこの

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

Fig. 3 Stress intensity factor K_{ID} and crack length a as a function of time t (Specimen No.1)

Fig. 4 Stress intensity factor K_{ID} and crack velocity $\dot{a}$ as a function of time t (Specimen No.1)

配の減少が約 160 μ s 前後に存在した。これは破壊の初期ではき裂の加速が、また後半では減速が生じたことを示唆している。しかし高速度撮影の結果から直接得られた K_{ID} と a 値には、読取り誤差などによるある程度のばらつきを含むことが避けられない。このような測定値を用いてき裂速度 $\dot{a}$ を直接求めた場合には、精度よく $\dot{a}$ を求めることは困難となる。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 の測定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 9 次の多項式で近似した。図 3 に多項式近似で得られた $K_{ID}(t)$ と $a(t)$ 曲線が表示されており、それらが測定値とよく合ってい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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

3.3 K_{ID} と $\dot{a}$ の関係 図 4 に K_{ID} 、 $\dot{a}$ を t の関数として表示した。 K_{ID} と $\dot{a}$ がよく似た挙動を呈している。しかし K_{ID} と $\dot{a}$ 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 100 μ s と 135 μ s で得られており、両者に 35 μ s 程度の時間差が生じている。これと同様な結果が他の高

Fig. 5 Loading point caustic size ω and load P as a function of time t (Specimen No.1)

Fig. 6 Relation between loading point caustic size ω and load P under static condition

分子材料でも得られている。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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

3.4 荷重点コースティック像寸法 ω 図 5 に荷重点で生じたコースティック像の時間変化を表示した。図 2(b) で明らかなように、荷重点とき裂先端で形成されるコースティック像の形状は異なっている。本研究では荷重点コースティック像の変化を精度良く評価するために、横方向の最大寸法 ω を計測した。図 5 で明らかなように 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。

3.5 荷重 P と ω の関係 荷重 P を定量的に評価するためには ω との対応関係を調べる必要がある。ここでは両者の関係をまず静的条件で求め、さらに動的条件下での適応性を検討した。

図 6 に静的条件下で得られた P と ω の関係を示す。ただし試料はき裂なし、負荷、除荷速度は 1 mm/min とした。また ω_0 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 6 で示すように、 P とともに ω は増加した。しかし注目すべきことは、除荷

Fig. 7 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ as a function of time t (Specimen No.1)

により ω が減少すること、またその経路が負荷過程とほぼ一致したことである。これは、塑性や粘性などによる残留変形が負荷部でほとんど発生していないこと、 ω の増加分すなわち $\omega - \omega_0$ が弾性的に生じたことを示唆している。

一方、高速破壊では試料の除荷速度が著しく大きくなる。そのため動的条件下での図6の適応性は明らかでない。ここでは P - ω 関係に及ぼす動的効果を以下の方法で検討した。まずき裂が高速で進展し、試料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} を測定した(図2参照)。そして得られた ω_{d0} と ω_0 を比較した。もし P - ω 関係が除荷速度に大きく依存するならば、 ω の減少経路は動の場合と静的場合では異なるはずである。その結果、 ω_{d0} と ω_0 値には差が生じるはずである。しかし得られた結果では両者がほぼ一致した。これは、使用したエポキシ樹脂が室温下では除荷速度に大きく依存しないこと、高速破壊でも弾性的に応答することを示唆するものである。これと同様な結果がコースティック法による衝撃三点曲げ破壊実験でも報告されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本研究では図6の関係が動的条件下でも成立するものとの仮定し、荷重 P を評価した。ここでは P を ω の関数として次式で表示した。

$$P = k (\omega / \omega_0 - 1)^n \quad (2)$$

ここで k と n は係数であり、使用したエポキシ試料に対して $k=1990$, $n=1.04$ を採用した。その結果を図6に示す。式(2)が P - ω 関係を良く表現することが示されている。

式(2)で評価した動的 P 値を図5に示す。ここで明らかに、 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に関連する。また荷重点変位が十分小さく無視できるならば、 P は試料のひずみエネルギー変化と関係する。そのため P と K_{ID} や $\dot{a}$ との間にはある相関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 P を t に関する多項式で近似し、微分することにより $\dot{P}$ を評価した(図5参照)。

3.6 K_{ID} , $\dot{a}$ と $\dot{P}$ の関係 図7に $\dot{P}$ を K_{ID} , $\dot{a}$ とともに時間 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。ここで明らかなことは、 $\dot{P}$ が K_{ID} や $\dot{a}$ と良く似た変化挙動を示していることである。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。他の試験片 ($b=27\text{mm}$) での結果が図8に示されており、ピーク値は $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} の到達順序となっている。もし $\dot{a}$ の変化によりき裂周辺の応力場が直接影響を受けるならば、 K_{ID} のピーク値は $\dot{P}$ より先行すべきはずである。しかし実験結果では逆の順序となっている。以下ではこの原因を考察した。

まず、(1) $\dot{a}$, K_{ID} がピーク値を生じるき裂の先端位置を求めた。(2) 各先端位置から荷重点までの距離を計測した。(3) 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。ただしエポキシ樹脂(アラライトB)中の縦波速度として $c_L=2500\text{ m/s}$ を採用した⁽⁸⁾。その結果、図7の試料では $\Delta t_1=17\text{ }\mu\text{s}$, $\Delta t_2=19\text{ }\mu\text{s}$ 、また図8の試料では $\Delta t_1=16\text{ }\mu\text{s}$, $\Delta t_2=19\text{ }\mu\text{s}$ が得られている。これらの値で注目すべきことは、図7, 8での $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} ピーク値の到達時間差とほぼ一致したことである。この結果は、 K_{ID} と $\dot{a}$ の依存関係に、 $\dot{P}$

Fig. 8 Relationships between stress intensity factor K_{ID} , crack velocity $\dot{a}$ and unloading rate $\dot{P}$ as a function of time t (Specimen No.2)

の変化が影響を及ぼすことを示唆している。しかしこの妥当性を明確にするためには、動的除荷挙動に及ぼす材料物性の影響を調べることで、すなわち異なる材料に対して同様な実験解析を行うことが必要である。

4. 結 言

エポキシ樹脂中における動的き裂進展挙動をコースティック法を用いて計測した。き裂の加速、減速域における応力拡大係数 K_{ID} 、き裂速度 $\dot{a}$ を求めた。また負荷部で生じるコースティック像より荷重 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} 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 値はき裂進展により急激に低下した。
- (2) $\dot{P}$ は $\dot{a}$, K_{ID} の変化挙動と定性的に一致した。
- (3) しかし $\dot{P}$, $\dot{a}$, K_{ID} のピーク値の到達時間に差が発生した。
- (4) その到達順序は、 $\dot{a}$, $\dot{P}$, K_{ID} となった。

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。

文 献

- (1) Griffith, A. A., *Philos. Trans. Royal Soc.*, **A221** (1920), 163-198.
- (2) Kobayashi, T. and Dally, J. W., *ASTM STP* 627 (1977), 257-273.
- (3) Dally, J.W. and Shukla, A., *Eng. Frac. Mech.*, **13** (1980), 807-817.
- (4) Kobayashi, A.S. ほか4名, *Int. J. Fract.*, **30** (1986), 275-285.
- (5) Shukla, A. and Nigam, H. *Eng. Frac. Mech.*, **25** (1986), 91-102.
- (6) Dally, J. W. ほか2名, *Exp. Mech.* **30** (1990), 177-183.
- (7) Theocaris, P. S., *Int. J. Solids Structures*, **14** (1978), 639-653.
- (8) Beinert, J. and Kalthoff, J. F. (Sih, G. C. 編), *Mechanics of Fracture*, (1981), 281-330, Martinus Nijhoff Publishers.
- (9) Kalthoff, J. F. (Kobayashi, A. S. 編), *Handbook on Experimental Mechanics* (1987), 430-500, Prentice-Hall.
- (10) Knauss, W.G. and Ravi-Chandar, K., *Int. J. Fract.*, **27** (1985), 127-143.
- (11) Takahashi, K. and Arakawa, K., *Exp. Mech.*, **27** (1987), 195-200.
- (12) 新川和夫・高橋清, 機論, **53**-485, A(1987), 128-134.
- (13) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 103-114.
- (14) Nishioka, T. ほか3名, *Eng. Frac. Mech.*, **39** (1991), 757-767.
- (15) 高橋清・ほか2名, 九州大学応用力学研究所所報, No.48 (1978), 69-75.
- (16) 新川和夫・高橋清, 機論, **54**-500, A(1988), 718-722.
- (17) Arakawa, K. and Takahashi, K., *Int. J. Fract.*, **48** (1991), 245-259.
- (18) Takahashi, K. and Mada, T., *High-Speed Photography and Photonics*, SPIE 1802 (1993) 901-909.
- (19) Manogg, P., *Glastechnische Berichte* **39** (1966) 323-329.
- (20) 高橋清, 非破壊検査, **27**-10 (1978), 672-678.