脆性および延性高分子材料のき裂先端近傍における変位場計測*

楠元 淳一^{*1}, 新川 和夫^{*2}, 高橋 清^{*2}Measurement of Displacement Fields around Crack Tip
in Brittle and Ductile Polymers

Junichi KUSUMOTO, Kazuo ARAKAWA and Kiyoshi TAKAHASHI

Moiré interferometry was utilized to study fracture behavior of polymer specimens under mode I loading. Displacement fields around a crack tip were experimentally determined for two kind specimens of brittle and ductile polymers. The results were compared with the displacements given by linear fracture mechanics or HRR fields to study their applicability to the polymers. Examinations were also made on the effect of material properties and the influence of load applied to the specimens.

Key Words: Polymer, Fracture, Displacement Fields, Linear Fracture Mechanics, HRR Fields, Moiré Interferometry, PMMA, Polymer Alloy

1. 序 論

高分子材料は、一般に複雑な変形・破壊挙動を呈することで知られている。これは、微視的変形が高分子鎖の熱運動と関連し、準微視的にはボイド、クレイズ、シアーバンディングなどの発生を伴うことに起因する⁽¹⁾。このような変形挙動は、巨視的には粘弾性効果、すなわち材料の負荷速度および時間依存性として出現する。またある種の材料では大規模な塑性変形を生じることもある。したがって高分子材料の破壊を扱う場合、完全弾性体を仮定する線形破壊力学⁽²⁾についてはその適用性を検討することが必要である。一方、弾塑性変形を考慮した解析方法として、金属材料に対しHRR特異場理論⁽³⁾⁽⁴⁾が提案されている。しかし高分子材料への適応性についての証明はなされていないのが現状である。

本研究の目的は、脆性的な高分子材料であるメタクリル樹脂(PMMA)、および延性的なポリマアロイ(PA6/PPE/SBS)を試料とし、き裂先端近傍で生じる変位場を定量的に評価することである。その評価法

として、モアレ干渉法⁽⁵⁾を応用した。この手法では、光回折格子を試料表面に転写し、レーザ光の干渉によりモアレ縞を生じさせている。そのため微視的変位を二次元的に高精度で測定できる利点がある。本研究では、き裂に対し垂直方向の変位場を計測した。その変位場をき裂先端からの距離 r 、角度 θ の関数として表示し、変位こう配を定量的に評価した。またこう配に及ぼす r 、 θ の影響を調べ、線形破壊理論およびHRR特異場理論との対応関係を検討した。

2. 実 験

2・1 試験片 脆性的な高分子材料として熱可塑性樹脂のPMMA(アクリライトS-001)を用いた。また延性的な材料として、ポリマアロイの一種であるPA6/PPE/SBS樹脂を用いた。この樹脂は、48.6 wt.%のPA6(Polyamide-6)、39.8 wt.%のPPE(Polyphenylene ether)、11.0 wt.%のSBS(styrene butadiene styrene)、0.6 wt.%の相容剤の組成比から成り立っている。試料厚さはPMMAが5 mm、アロイ材が3 mmである。PMMAのヤング率は2.94 GPa、アロイ材は0.62 GPaである。

本実験で使用した試験片形状および寸法を図1に示す。試験片の片側中央に長さ約6 mmの初期き裂をイ

* 原稿受付 1995年7月21日。

^{*1} 九州電力(株)総合研究所 (〒815 福岡市南区塩原2-1-47)。^{*2} 正員、九州大学応用力学研究所 (〒816 春日市春日公園6-1)。

ンパクト法⁽⁶⁾により導入した。この手法では、あらかじめ作製した切欠部にくさびを打込むことによりき裂を生じさせている。そのためき裂先端部の曲率半径が零、すなわち自然き裂に近い鋭い人工き裂を作製することができる。またくさびに加える衝撃力を変えることによりき裂長さを制御することが可能である。PMMA 材の初期き裂の作製は室温で、アロイ材は低温下で行った。PMMA 試料への引張負荷はピンジグにより、またアロイ材へは平板つかみジグにより加えた。なお実験条件は、室温 22°C、湿度約 45%、負荷速度 1 mm/min とした。き裂材に対して得られた荷重変位曲線を図 2 に示す。PMMA が弾性的に変形したこと、また脆性的に破壊したことが示されている。一方、使用したアロイ材は室温下では引張強度が高く、かつ著しく延性的であることが示されている。

2.2 モアレ干渉法 き裂先端近傍の変位場計測にはモアレ干渉法を応用した。その光源として、アルゴン・レーザ(Spectra Physics 製, Model No. 2020-5, 波長 $\lambda=514.5$ nm)を使用した。本実験では、線密度 200 本/mm と 600 本/mm からなる 2 種類の回折格子を作製した。破断変形の小さい PMMA には密度が高い 600 本/mm の回折格子を使用した。一方、変形が大きいアロイ材には、密度が低い 200 本/mm の回折格子を使用した。回折格子の表面に厚さ約 0.1 μm のアルミニウムを蒸着し、それをエポキシ系の接着剤を用いて試験片に転写した(図 1 参照)。干渉じまは、転写した試料格子に平行光を 2 方向より入射し、一次の回折光により生じさせた⁽⁷⁾。なお干渉じまの撮影時には、引張試験機を 10 秒ほど停止した。

Fig. 1 Specimen geometries for PMMA and PA6/PPE/SBS

3. 実験結果および考察

3.1 モアレ干渉じま 図 3 と図 4 に得られたモアレ干渉じまを示す。これらはいずれもき裂と垂直方向、すなわち v 変位場を表している。図 3 の結果は、き裂長さが約 6.5 mm の PMMA で得られたものである。負荷レベルは、図 3(a) が 470 N、(b) が 781 N であり、各々破断荷重の約 50% と 80% に相当する(図 2 参照)。得られた干渉じまは等変位分布を表し、その間隔は 0.83 μm の変位差に対応する。

一方、図 4 はき裂長さが 5.7 mm のアロイ材で得られたものである。負荷レベルは、図 4(a) が 456 N、(b) が 1315 N であり、最大荷重値の約 18% と 50% に対応する(図 2 参照)。なお得られた干渉じまの間隔は 2.5 μm の変位差に相当する。図 4(b) で明らかなように、き裂先端部で干渉じまの計測ができない黒い領域が発生した。このような領域は、脆性的な PMMA ではほとんど観察されていない。これはアロイ材のき裂先端部で大きな塑性変形が生じたことを示すものである。

3.2 き裂先端近傍の変位分布 図 5 と図 6 にモアレじまから評価した変位分布を示す。ただしここでは変位量をき裂先端からの距離 r およびき裂線上からの角度 θ の関数とし、両対数で表示した。角度 θ として、45°, 90°, 135°, 180° を採用した。なお 0.5 のこの配で示す実線は、線形破壊理論の近似式($v \propto \sqrt{r}$)から導かれた値である。以下ではまず変位分布の定性的な考察を行う。

図 5(a) は負荷 470 N の PMMA 試料で得られたものである。全体的な傾向としては、一定の θ 値に対す

Fig. 2 Load displacement relations for single edge cracked specimens of PMMA and PA6/PPE/SBS

る $\log v - \log r$ 曲線のこう配(以下、「変位こう配」)が
 ほぼ 0.5 の値を示している。しかし厳密には変位こう
 配は一定ではなく、 r と θ により変化した。例えば θ
 $= 45^\circ$ の結果では r が大きくなるとこう配も増加し
 た。しかし θ の増加によりそのような傾向は徐々に変

(a) Applied load (170 N)

(b) Applied load (781 N)

Fig. 3 Moiré fringe patterns for a PMMA specimen

(a) Applied load (456 N)

(b) Applied load (1315 N)

Fig. 4 Moiré fringe patterns for a PA6/PPE/SBS specimen

Fig. 5 r displacement fields around a crack tip in a PMMA specimen

Fig. 6 r displacement fields around a crack tip in a PA6/PPE/SBS specimen

化した。特に $\theta \geq 135^\circ$ では、こう配は r の増加に伴い逆に減少した。同様な結果は、負荷が増加した図5(b)でも示されている。しかしここで注目すべきことは、負荷の増加により $\theta = 45^\circ$ のこう配が増加したことである。 $v \propto \sqrt{r}$ の関係が成立するならば、各 θ における変位こう配に0.5の一定値を示す領域が存在するはずである⁽²⁾。しかし得られた結果はこのこととは差が生じている。

図6に延性的なアロイ材から得られた結果を示す。図6(a)の変位こう配はPMMAと同様に一定ではなく r と θ により大きく変化した。例えば $\theta = 45^\circ$ のこう配は0.5より大きいこと、一方 $\theta = 90^\circ$ のこう配はき裂先端から約2 mmの近傍で大きく変化した。しかし角度が大きくなった $\theta \geq 135^\circ$ では、こう配は0.5に近い値を与えている。変位こう配が θ に依存するこのような傾向は、負荷が増加した図6(b)の結果でも示されている。

図5, 6の結果は、物性値が大きく異なる材料を用いて得られたものである。それにもかかわらず変位こう配の r, θ 依存性が示されている。すなわちこの結果

は、こう配変化の原因が物性値またはき裂先端の塑性域の影響ではなく、他の別の効果が作用していることを示唆するものである。

3.3 変位こう配の定量的評価 以下では変位こう配を定量的に評価し、その変化挙動を調べた。ここでは図5と図6の測定結果を多項式近似法で表示し、それを微分することにより変位こう配を評価した。その手法を以下に示す。

いま v 変位場が次式で表示できるものと仮定する。

$$v(r, \theta) \propto r^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし指数 n は r と θ の関数とする。式(1)の対数をとリ、さらに $\log r$ で微分すると、 n は次式で表示される。

$$n = \frac{d(\log v)}{d(\log r)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

すなわち n は対数で表示した変位曲線の任意点でのこう配に相当する。

本研究では指数 n を以下の手法で決定した。まず図5, 6の各 $v(r, \theta = \text{const})$ 曲線を次のように6次の多項式

Fig. 7 Slope n for a PMMA specimen as functions of r and θ

Fig. 8 Slope n for PA6/PPE/SBS specimen as functions of r and θ

$$\log v = \sum_{i=0}^6 c_i (\log r)^i \dots\dots\dots (3)$$

で表し、係数 c_i を数値計算による最小二乗法で求めた。さらに n は式(3)を $\log r$ で微分することにより評価した。その結果を図7, 8に示す。

図7, 8では指数 n を r および θ の関数として表示した。ここではまず低負荷で得られた図7(a)のPMMA材の結果に着目し、 v 変位場における n 値の変化挙動を考察する。図7(a)で明らかなことは、 n が一定値ではなく r と θ により変化したことである。例えば $\theta=45^\circ$ で得られた n 値は、き裂先端の近傍では0.5に近い値を示している。しかし r の増加に従い n 値は徐々に増加した。また $\theta=90^\circ$ の n 値も同様にき裂先端の近傍で約0.5を示し、 r の増加とともに増加した。それに対し $\theta=135^\circ$ の n 値は r の増加により0.5以下に減少する傾向が存在した。一方 $\theta=180^\circ$ の n 値は0.5のまわりで変動した。負荷が増加した図7(b)の結果でもほぼ同様な傾向が示されている。図7(a)と異なる点は、き裂先端の近傍における $\theta=45^\circ$ の n 値が0.5よりかなり大きくなったことである。

次にアロイ材で得られた図8(a)の結果に着目し、低負荷での n 値と r, θ との対応関係を検討する。ここで明らかなことは、 θ により n 値が大きく異なること、また θ の増加により n 値が減少したことである。 n 値は $\theta \leq 90^\circ$ では0.5より大きく、一方 $\theta \geq 135^\circ$ では0.5より小さくなっている。負荷が増加した図8(b)の結果でもほぼ同様な傾向が示されている。しかしここで注目すべきことは、負荷が増加すると $\theta \geq 135^\circ$ の n 値が0.5より小さくなる傾向がみられたことである。

図7, 8で明かなように n 値は r と θ および負荷の増加により変化した。 $v \propto \sqrt{r}$ の関係が成立するならば、 n 値はき裂先端近傍で0.5の一定値を与えるはずである⁽²⁾。一方 HRR 特異場理論に従うならば n 値は0.5よりも小さなある一定値をとるはずである⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし得られた測定結果は複雑な挙動を呈しており、これらの理論とは大きく異なっている。その原因は現在のところ明らかでない。 n 値が変化する原因として、き裂先端で生じる三次元応力場または塑性

域など非線形領域の発生があげられる。また材料の粘性、変位場に及ぼす高次項の影響および試験片の寸法効果を考慮することが必要である。本研究と同様に r と θ により変位こう配が変化するという計測例が金属材料で報告されている⁽⁸⁾。しかしその原因について明確な説明はなされていない。すなわちき裂先端の変位場と理論値との比較検討を詳細に行うためには、さらに種々の材料、試料形状、負荷条件下での系統的な実験研究と解析が必要である。

4. 結 論

モアレ干渉法を応用し脆性的な高分子材料であるPMMA および延性的なアロイ樹脂を用いて、き裂先端近傍の変位分布を計測した。き裂に対し垂直方向の変位量 v をき裂先端からの距離 r 、き裂の線上からの角度 θ の関数として表示した。そして変位場におけるこう配 n を定量的に評価した。また線形破壊理論の近似式($v \propto \sqrt{r}$)から導かれるこう配値0.5との比較を行い、以下の結論を得た。

- (1) 変位こう配 n は一定値0.5ではなく、 r と θ により大きく変化した。
- (2) 負荷レベルの増加により n 値の分布状態に変化が発生した。
- (3) θ が増加するに伴い n 値に減少する傾向がみられた。

文 献

- (1) 例えば、成沢郁夫、高分子材料強度学、(1982)、157、オーム社。
- (2) 例えば、岡村弘之、線形破壊力学入門、(1976)、22、培風館。
- (3) Hutchinson, J. W., *J. Mech. Phys. Solids*, **16**(1968), 13-31.
- (4) Rice, J. R. and Rosengren, G. F., *J. Mech. Phys. Solids*, **16**(1968) 1-12.
- (5) Post, D. (Kobayashi, A. S. 編), *Handbook on Experimental Mechanics*, (1987), 314-387, Society for Experimental Mechanics, Inc.
- (6) 高橋清・桜田泰弘・小松治男、九州大学応用力学研究所報, No. 48(1978), 69-75.
- (7) 新川和夫, Drinnon, R. H. Jr., Wang, F. X. and Kobayashi, A. S., 機論, **58**-545, A(1992)59-63.
- (8) Dadkhah, M. S. and Kobayashi, A. S., *Eng. Fract. Mech.*, **34**(1989), 253-262.