ぜい性プラスチック破面模様の前・後近接度
による影響*瀧本 昭夫*¹,小田 直樹*²Analysis of the Proximity-Effect of a Before Mark on the Behind One
on the Fracture Surface of a Brittle Plastic Sheet

Akio TAKIMOTO and Naoki ODA

A fracture surface mark is known to be formed by an interference between a primary crack front and a secondary crack front. We have shown so far that many such marks have been observed on a fracture surface of a brittle plastic specimen. The primary crack front passing through a before mark produces the succeeding behind mark as it propagates in the material, and the effect of the before mark often appears in the behind one. The cusp of the latter usually extends further as the two marks are closer together in front and in the rear on a fracture surface. For example, the experimentally measured chordal length at the nucleus of the behind mark increases as they close. Here, we define the proximity p^* to express the linear distance between the nuclei of the two marks in front and in the rear, and we modify the previously reported equation of fracture surface marks to express those changes as a function of the proximity of the two. This expression, of course, gives better parabola-like configuration of the observed behind mark than the previous one.

Key Words: Fracture, Nonmetallic Material, Fracture Marks, Curved Primary Crack, Before and Behind Marks, Expression of Behind Marks, Proximity-Effect

1. 緒言

PMMAなどの破面に観察される小円状、だ円状、放物線状および双曲線状破面模様は直線状⁽¹⁾(以後、直線伝ばモデルと呼ぶ)あるいは曲線状⁽²⁾(以後、曲線伝ばモデルと呼ぶ)に走る一次き裂先端と同心円状に広がる二次き裂先端の干渉により生じ、各々の速度によって上述の形状ができることは古くから知られている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。筆者らはこれまで一次き裂が直線状、二次き裂が同心円状に伝ばするモデルにおいて、それぞれの速度が加速度を伴って伝ばする場合の干渉模様を定量的表現し、不飽和ポリエステル樹脂⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾およびPMMA⁽¹¹⁾の種々の破壊試験における破面模様並びにそれらのき裂伝ばによる変化を検討してきた。

一次き裂伝ば速度が小さく、その先端における動的応力の場が小さい場合は、近似だ円状などの両端閉そ

く模様(Both ends closed mark, BECM)や、放物線状などの一端開放模様(One end opened mark, OEM)が散在するため直線伝ばモデルによる定量的式による近似でよいが、一次き裂伝ば速度が大きくなりその先端の動的応力の場が強くなるなどによってOEM密度が高くなると、前・後、左・右に近接したものが多く現れる。前・後模様が近接してくると、前の模様による一次き裂先端の曲率がすぐあとに生じる模様形状に影響を及ぼす、これを定量的するため、前・後模様の核間距離やそれによる一次き裂先端の曲率等の因子を考え、破面模様の近接度の影響を解析した。理論解は前報⁽⁵⁾⁽⁸⁾同様、定速度解からはじめ加速度解を紹介し、PMMA中央き裂付大型引張試片の破面上、明らかに近接による影響があるとみられる模様例の近似定量的などによりその意義を検討した。

記号

$a/C_{0.22}$: 前・後近接模様におけるうしろの両端閉そく模様の相対長軸長さ

$b/C_{0.22}$: 前・後近接模様におけるうしろの両端閉そく模様の相対短軸長さ

* 昭和61年3月14日 中国四国支部第24期総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年2月26日。

¹ 正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台2557)。

² 正員、新日本製鉄(株)。

- C_2 : 模様核位置 (O_1 または O_2) からの二次き裂伝ば距離
- C_{022} : 前・後近接模様におけるうしろ模様の二次き裂核半長
- $C_{022,op}$: 前・後近接模様におけるうしろ模様の見かけ上の二次き裂核半長
- C_2/C_{022} : 曲線伝ばモデル, 加速度解における相対二次き裂伝ば距離
- $$= \alpha_{2,c}$$
- d/C_{022} : 前・後近接模様におけるうしろ模様の相対臨界距離
- e/C_{022} : 前・後近接模様におけるうしろ模様の相対干涉開始距離
- p^* : 前・後近接模様核 (O_1, O_2) 間距離
- p^*/C_{022} : 前・後近接模様におけるうしろ模様の相対近接度
- x : 模様核位置 (O_1 または O_2) からの x 軸方向距離
- y : 模様核位置 (O_1 または O_2) からの y 軸方向距離
- β_c : 曲線伝ばモデル, 定速度解における一次, 二次き裂速度比
- $$= V_2/V_1$$
- β_a : 曲線伝ばモデル, 加速度解における一次, 二次き裂速度比
- $$= V_{2max}/V_1$$
- β_L : 直線伝ばモデル, 加速度解における一次, 二次き裂速度比
- $$= V_{2max}/V_1$$
- $\delta C_{1,c}$: 曲線伝ばモデルで p^* を半径とする円弧上から一次, 二次き裂の交点まで同心円上垂直にとった一次き裂伝ば距離の増分量
- $$= \sqrt{(p^*+x)^2+y^2}-p^*$$
- 上記以外の記号は文献(5),(6)に詳しく報告した。

2. 理論解

2・1 近接度の影響を考慮した干涉模様生成モデル

これまでの破面模様の式⁽⁵⁾では, 一次き裂先端が直線状で伝ばし, そのき裂先端の動的応力の場の大きさにより一次き裂先端 d なる距離 (臨界距離⁽⁵⁾⁽⁶⁾) のところの二次き裂核が活性化され, その核より加速度をともなった二次き裂が同心円状に伝ばし, 一次および二次き裂の間隔が e なる距離 (干涉開始距離⁽⁵⁾⁽⁶⁾) で両方が干涉しはじめるとした。この場合一模様を生じるき裂伝ば距離内における一次き裂速度を V_1 (模様を描く短い距離の間, その変化は非常に小さい⁽⁵⁾⁽⁶⁾) と

仮定) と二次き裂伝ば速度 V_2 (模様を描く短い距離の間で零から大きな値まで変化) の限界速度 V_{2max} の比を β_L ⁽⁵⁾⁽⁶⁾ とした (ここで L は Linear の意)。この干涉モデルを図 1 に再現する。この場合一次, 二次き裂による干涉模様の定式は

$$\frac{\sqrt{\alpha_2-1} \sqrt{\alpha_2-(n_2-1)} + n_2 \ln[\sqrt{\alpha_2-1} + \sqrt{\alpha_2-(n_2-1)}] - \frac{n_2}{2} \ln(2-n_2)}{2} = \beta_L \left(\frac{d+x}{C_{022}} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

で近似的定式できる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

一次き裂が伝ばし, V_1 が大きくなり核密度も高いと模様密度が高くなり, 前・後, 左・右に模様が近接してくる。図 2 に PMMA 破面の一例 (き裂が左から右に進む) を示した。今, 前・後模様の核位置 (白く見える部分の中心) 間距離を模様近接度 p^* とすると, この値および核の大きさ等はうしろの放物線形状に影響を及ぼす。また, 左・右模様の近接度合いも模様形状を干涉しあうが, それはむしろ各放物線模様頭部以降で起こるものが多く観察され, 模様の頭部 (先端から核位置まで) 形状は前・後近接度の影響に主として支配されている。もっとも, 多くの模様の中にはこの例に現われていないような 2 つの核位置が非常に近接した 2 核頭模様に近いものも少数あるが, ここでは前・後に並んだものの相互干涉の定式を主とした。

前・後模様が近接する場合, 前の模様を通過して行く一次き裂先端は図 3 (または図 1) のごとくある曲率をもって伝ばする。今, 前・後近接模様で先行する模様の核位置 O_1 (原点とする) から p^* なる距離に次の模様の核位置 O_2 があり, 曲線状の一次き裂先端が V_1 なる速度で右方向に伝ばし, O_2 直前 d (臨界距離) に達したところで次の二次き裂核が活性化されて同心円状に伝ばしはじめ, 両者の干涉により放物線模様が生成されるモデル (曲線伝ばモデル) を図 3 に表した。曲線状に修正された一次き裂が $d + \delta C_{1,c}$ なる距離を進む間に, 二次き裂が O_2 から C_2 だけ伝ばして P 点で干涉し, この点の軌跡が干涉模様を形成する。前報⁽⁵⁾と同様に干涉模様頭部, 模様先端から二次き裂核位置 O_2 までを両き裂先端が干涉し始める距離, すなわち干涉開始距離 e とし, この二次き裂核上の模様最小弦長を l とした。なお図中, 実線で示したものは近接度の影響を考慮した曲線伝ばモデルによる干涉模様例であり, 点線のものはそれを考えない, いわゆる直線伝ばモデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾による例である。前者の方が明らかに模様の開きが大きくなる。

2・2 定速度解および加速度解 前報の直線伝

ばモデル⁽⁵⁾と比較するため一次、二次き裂ともに定速度で伝ばする単純化したモデル解を先に検討する。一次および二次き裂ともに定速度で伝ばするとしたモデル解では、両者の干渉模様は

$$\sqrt{x^2+y^2} = \beta_c (\sqrt{(p^*+x)^2+y^2} - p^*+d) \quad \dots\dots(2)$$

で与えられることになる。これを曲線伝ばモデルの定

図1 直前模様による一次き裂先端の曲率

図2 PMMA一端開放模様の前・後近接例

図3 曲線状一次き裂による直後模様の形成

速度解と呼ぶ。

式(2)で、例えば $p^* = 100 \mu\text{m}$ として、 d および β_c による干渉模様を描くと図4のようになる。一次および二次き裂伝ば速度の比 β_c が大きくなると共に、小円状、近似だ円状などのBECMから放物線状、双曲線状などのOECMを描くことができる。これら模様は直線伝ばモデル⁽⁵⁾によるものに比べて、BECMでは模様の幅 b が大きくなる。BECMが生じるような一次き裂速度の小さい域では近接度の影響はあま

図4 定速度解による直後模様の変化

図5 定速度解による直後両端閉そく模様の長軸と短軸の関係 (p^* の影響)

図6 定速度解による直後模様の l/e と干渉開始距離 e の関係 (p^* の影響)

りみられないが、参考までに模様の長さ：長軸（ a ）とその幅：短軸（ b ）の関係を近接度 p^* をパラメータとして（ $\beta_c = 0.97$ の場合）図 5 に示した。 p^* が小さくなるほど、すなわち前・後の模様が近づくほど、うしろの模様の幅 b が大きくなり、 p^* が非常に大きくなると a と b の関係は直線伝ばモデルに近づく。また、ここには図示していないが $\beta_c = V_2/V_1$ が小さくなるに従って、二次き裂伝ば速度が小さくなるため BECM の長さ（ a ）がだんだんと小さくなる。次に BECM および OEM 頭部の開きの大きさ、すなわち二次き裂核上最小弦長 l と干渉開始距離 e の比 l/e が e と共に変わる様子を図 6 に示した（ $\beta_c = 0.97$ の例）。 p^* が小さくなるほど、すなわち前後模様が近づくほど、 l/e は大きくなりうしろの模様の頭部の開きが大きくなることを示している。ここでは $\beta_c = 0.97$ の解を例示したが、図 4 から分かるごとく同一 p^* で β_c が 0.5 から 1.0 へと増加するにつれ l/e は大きくなる。

上述の定速度解はあまりにも単純化したものである。したがって前報⁽⁶⁾にも述べたごとく BECM および OEM の形状やその変化を予想することができ、実際の破面模様のうち、放物線模様は近似できてもだ円模様の近似が困難であるなど実用的なモデルとは言えない。そこで一次き裂が加速度を伴って伝ばし、その先端のき裂伝ば面およびその少し上・下面の核が活性化され二次き裂が初期速度 $V_2 = 0$ から加速度を伴って伝ばし、両き裂速度の干渉により模様を生じる加速度解を次に示す。

図 3 は O_1 核上に生じる模様の生成を表したもので、 O_1 核による直前模様により、ある曲率に修正され伝ばする一次き裂および次の核位置 O_2 から伝ばし始める二次き裂（各々の限界速度は V_{1max} 、 V_{2max} ）がともに加速度を伴って伝ばし、干渉模様を生じる例である。この場合、一次き裂半長（例えば $C_{01} = 10\text{mm}$ ）に比べ干渉模様長さ（例えば $200\mu\text{m}$ ）が非常に小さいことを考えると、この短い干渉距離内（ $C_1/C_{01} = \alpha_1 = 200\mu\text{m}/1 \times 10^4\mu\text{m} = 2 \times 10^{-2}$ ）では一次き裂速度変化は非常に小さく、ほとんど定速と仮定することができる⁽⁶⁾。一方、同一干渉距離（二次き裂伝ば距離 C_2 に相当）内を二次き裂は O_2 点から長い相対距離（二次き裂核半長 C_{02} を $1\mu\text{m}$ としても、 $C_2/C_{02} = \alpha_{2,c} = 200\mu\text{m}/1\mu\text{m} = 200$ ）まで加速度を伴って伝ばすることになる⁽⁶⁾。一次き裂先端は前の模様によりある曲率〔 O_1 からの距離（ $p^* - e$ ）なる動径〕に修正され、二次き裂核 C_{02} より伝ばし始めたものと $x = -e$ なる距離で干渉を始める。今、 C_{02}

より伝ばする二次き裂速度 V_2 はき裂伝ば距離と共に加速度を伴って前報⁽⁶⁾のように変化する⁽²⁾とし、 C_{02} を核とする模様を描く短い距離（ C_2 ）の間、一次き裂は前述のごとく定速度 V_1 で伝ばするとすれば、両者による干渉模様の近似式は近接度 p^* により、次式で与えられる。

$$\frac{\sqrt{\alpha_{2,c}-1}\sqrt{\alpha_{2,c}-(n_2-1)}+n_2/n[\sqrt{\alpha_{2,c}-1}+\sqrt{\alpha_{2,c}-(n_2-1)}]-\frac{n_2}{2}\ln(2-n_2)}{\beta_c' \frac{\sqrt{(p^*+x)^2+y^2}-p^*+d}{C_{02}}} \quad \dots\dots(3)$$

ここで

n_2 ：二次き裂伝ば速度の定数（1.0～2.0）

式（3）で相対近接度 $p^*/C_{022} = 100$ 、 $\beta_c' = 1.0$ 、 $n_2 = 1.2$ として、相対臨界距離⁽¹⁾ d/C_{022} を変えて種々の干渉模様を描いたのが図 7 である。直線伝ばモデルによるもの⁽³⁾と類似の模様変化を示している。やはり近接度による影響が模様の開きに現れている。 p^*/C_{022} が小さくなるほど、模様の開きが大きくなり、逆に $p^*/C_{022} = 5000$ ぐらいで、直線伝ばモデルに近づく（後述図 9 および 11 参照）。式（3）で、 p^*/C_{022} 、 β_c' 、 d/C_{022} 各値を固定し、二次き裂伝ば速度の定数 n_2 を変化させたものを図 8 に表した。やはり二次き裂伝ば速度が速くなると（すなわち、 n_2 が小さくなること）、BECM から OEM へと変化することを表している。

次に BECM の長・短軸の相対長さ、 a/C_{022} 、 b/C_{022} と p^*/C_{022} の関係を $\beta_c' = 1.0$ 、 $n_2 = 1.2$ の場合について図 9 に示した。 p^*/C_{022} 値が小さくなるにしたがって、BECM の長軸に対する短軸（すなわち模様の開き）が大きくなる。この図で $p^*/C_{022} = 5000$ 、（前・後模様が非常に遠く離れている場合）の結果、は直線伝ばモデル⁽³⁾と類似のものを示している。

次に、 $p^*/C_{022} = 100$ として、 β_c' を変化させた例を、図 10（ $n_2 = 1.2$ ）に示した。前報⁽⁶⁾の直線伝ばモデルのごとく β_c' の減少、すなわち一次き裂速度が大きくなるにつれ a/C_{022} が小さくなる。なお、前にも少しふれたように BECM が実際に観察されるのはき裂伝ば速度の比較的小さい域であり、以上のような干渉を考える必要が生じるのは前方に OEM が

†1 曲線状で伝ばする一次き裂先端が二次き裂核を活性化する臨界距離 d を二次き裂核の大きさ C_{02} で除したものである。

生じ、そのあとにBECMが生じるような場合、すなわち一次き裂速度が減速過程⁽⁵⁾で伝ばする域での現象であろう。

次にBECMおよびOEO頭部の開きの大きさ l と e と e/C_{022} との関係を図11に検討した。曲線は $\beta_c = 1.0, n_2 = 1.2$ の結果であり、やはり $p^*/C_{022} = 5000$ のように両模様は遠く離れている場合(曲線L)は $l/e = 4$ に漸近し、直線伝ばモデル⁽⁵⁾とほとんど等しくなる。また、 p^*/C_{022} が小さくなり近接度が増すと共に模様頭部の開きが急激に大きくなること

図7 加速度解における直後模様の d/C_{022} による変化

図8 加速度解における直後模様の n_2 による変化

図9 加速度解による直後両端閉そく模様の a/C_{022} と b/C_{022} の関係(p^*/C_{022} の影響)

を示している。 $p^*/C_{022} = 100, n_2 = 1.2$ として、同関係の β_c 値による変化を図12に示した。 β_c が小さい間($\beta_c \leq 0.8$)は直線伝ばモデル⁽⁵⁾のごとく右折の曲線を示すが、 β_c が大きくなるにつれ e/C_{022} の増加とともに l/e は急に上昇しはじめている。

以上のごとく一次き裂先端が加速度を伴って(凸型の)曲線状を描いて伝ばし、その直前の核から同心円状に伝ばする二次き裂と干渉して生成する模様は、前者が直線状で伝ばする場合⁽⁶⁾の模様と比べて、模様の開きが大きくなる。模様の諸定数関係(たとえば、図

図10 加速度解による直後両端閉そく模様の a/C_{022} と b/C_{022} の関係(β_c の影響)

図11 加速度解による直後模様の l/e と e/C_{022} の関係(p^*/C_{022} の影響)

図12 加速度解による直後模様の l/e と e/C_{022} の関係(β_c の影響)

9および11)で、相対近接度 p^*/C_{022} の小さいところではその影響が顕著であるが、 p^*/C_{022} が大きくなるとそれがだんだん小さくなり、 a/C_{022} と b/C_{022} や l/e と e/C_{022} の関係は直線伝ばモデルによる加速度解⁽¹⁾に近付き、これまで報告してきた傾向と一致してくる。このモデル解は、一次き裂伝ば速度が大きく、き裂先端の動的応力拡大係数 K_D や動的ひずみエネルギー解放率 β_0 の大きい場合の破面など模様密度の比較的高い部分(模様密度が余り高くなると破面が粗くなり、模様定量測定は困難となる)に現れるO E O Mの定量に適していると考えられる。

3. 実例による理論解の検討

次に、上述の理論解をPMMA破面模様で検討してみた。中央、一次き裂半長 $C_{01} = 11.4\text{mm}$ を有する大型引張試片[全長500mm, ゲージ部寸法260mm(長)×240mm(幅)×4mm(厚)]を均等負荷の下で試験機のカrossヘッド速度500mm/min, 試験温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ で破壊させ、その破面上に観察された前・後近接2放物線模様例を図13(a)に示した。この試片は破壊強度も割合強く($\sigma_f \approx 3.69\text{MPa}$)、ぜい性破面はほとんどO E O Mで占有されている。この模様は $C_1/C_{01} \approx 2.54$ で観察されたもので、破面模様密度の比較的低い(この試片では模様密度は $C_1/C_{01} = 1$ で零、 $C_1/C_{01} = 1.24$ で約10個/mm²から破断近傍で約70個/mm²まで変化する⁽¹⁾)ところのものであり、そのためか他の模様が左・右に近接していない。したがって、前・後近接度の影響を定量するには適切な一例である。PMMAでは二次き裂核の真の大きさは測定しがたく、SEM写真で13,500倍に拡大しても中心部に小さな窪が観察される程度⁽¹⁾である。そこで前報⁽¹⁾にも述べたようにうしろ模様の核周辺の平坦部の大きさから $C_{022,ap}$ を $9.6\mu\text{m}$ とし、干渉開始距離 $e \approx 18.3\mu\text{m}$ 、二次き裂核上最小弦長 $l = 76.2\mu\text{m}$ 、前・後模様核間距離 $p^* = 143.3\mu\text{m}$ などの測定値より、 $n_2 = 1.2$ および $\beta_0 = 1.20 \sim 1.03$ (一模様内で β_0 が変化する⁽²⁾)として、うしろのO E O Mを式(3)で近似したのが図13(b)である。二次き裂核上の開き l/e や模様形状は非常によく近似されている。一方、同模様を諸測定値より前者と同じ β_0 値変化を考えて直線伝ばモデルの式⁽¹⁾で近似すると図13(c)のごとくなる。明らかに模様の開きが小さくなる。したがって直線伝ばモデルでこのO E O Mを近似するより、曲線伝ばモデルの方が適切であることが分かる。このように近接度 p^* が小さく、明らかに先行する模様に干渉されていると考えられるO E O Mは近接度の影響を考慮した式(3)で

近似するのがよい。次に直前の大きな模様内に生じた小さな模様例を図14(a)に示した。この模様は $C_1/C_{01} = 2.97$ のものであり、先行する大きな核($C_{022,ap} \approx 10\mu\text{m}$)より生じたO E O Mの中に小さな核を有する模様が2個生じている。下側のものは近接度 $p^* \approx 105.8\mu\text{m}$, $C_{022,ap} \approx 1.52\mu\text{m}$ であり、右上の模様は $p^* \approx 167.8\mu\text{m}$, $C_{022,ap} \approx 2.43\mu\text{m}$ である。大きな模様の中を走るき裂先端形状はその核を中心として同心円状に修正されるとして[図1参照], $e = 3.65\mu\text{m}$, $l = 14.6\mu\text{m}$ をもつ下側の模様を上記の p^* , $C_{022,ap}$ の測定値および $n_2 = 1.2$ を仮定して曲線伝ばモデルによる破面模様の式(3)で近似してみると図14(b)となる。また、同様に右上の模様を同式で上記 p^* , $C_{022,ap}$, $e = 5.47\mu\text{m}$, $l = 24.3\mu\text{m}$ の測定値および $n_2 = 1.2$ で近似したものが図14(c)である。前者は後者より近い位置(小さな p^*)にあるが見かけ上の核が小さいためO E O Mの開きが小さい。逆に、後者はより遠い位置にあるが見かけ上の核が大きいため模様の開きも大きい。そのうえ、直

(a) The observed fracture surface marks (PMMA) at $C_1/C_{01} = 2.54$ and measured dimensions (in μm) of the succeeding parabolic mark

図13(a) PMMA引張試片の前・後近接模様例と直後模様の諸測定値

(b) The predicted interference mark for a curved primary crack

(c) The predicted interference mark for a linear primary crack

図13(b, c) 曲線および直線⁽¹⁾き裂伝ばモデルによる加速度解での直後模様の近似定量比較

† 2 前項では一定の β_0 で描ける基本模様解を検討したが、実例の中には β_0 を変化させて、同様に表現できる例もあることはこれまでも報告⁽¹⁾している。

(a) The observed fracture surface marks (PMMA)
at $C_1/C_{02} = 2.97$

 Measured dimensions (in μm) of the
succeeding parabolic marks

Lower one	Upper one
$e = 3.65$	$e = 5.47$
$l = 14.6$	$l = 24.3$
$C_{02,00} = 1.52$	$C_{02,00} = 2.43$
$p^* = 105.8$	$p^* = 167.8$
$l/e = 4.00$	$l/e = 4.44$

 図14 (a) PMMA引張試片における直前模様内の
直後2模様例と後者の諸測定値

 The predicted interface marks for a
curved primary crack

 図14 (b, c) 前図, 直後2模様の曲線き裂伝
ばモデル, 加速度解による近似定値

前模様の核と右上模様の核を結んだ直線延長上 O_1O_2 の上・下で非対称に現れており、模様下側(実線A)の方が上側(実線B)より大きくなるのは直前の大きい模様の中心の方が水平速度成分が強いためであろう(参考 A' 曲線はA曲線の中心線対称のものであり、B曲線は近似模様の輪かくの上側部分)。このように直前模様内に生じる模様も式(3)でよく近似することができる。ここでは前・後近接模様の2実例をあげ、式(3)の関係を検討したが、他にもいくつかの類似の例で検討し同様な結果を得ている。

短い中央き裂を有する引張試片では一次き裂伝ば距離が大きくなるとともに、その伝ば速度も増加し、動的応力拡大係数 K や動的ひずみエネルギー解放率 η_d も大きくなり模様密度が大きくなる⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。したがってこれらの域では、前・後のみならず、左・右にも模様が近接し、破面も非常に粗れてくる。このような破面に現れるのは一般に放物線状または双曲線状の模様であるが、同一平面上で近接する例が観察され難い(個々の模様が複雑に傾斜したり、ねじれている)。した

がってその近似定値はできないが、これら模様も当然上述のような前・後近接度の影響が現れるものと考えられる。

以上、破面模様の近接度の影響を理論的に検討し、PMMAの実際の破面模様例を近似してきた。また、よりぜい性を呈する不飽和ポリエステル樹脂破面(この破面のほうが粗れかたがひどく、分岐破壊も起こりやすい)でも模様密度により同様な干渉模様が観察されている。これまで述べてきた結果から、一般に、一次き裂が特定の曲率をもって伝ばする場合も、それが直線状で伝ばする場合に比べ模様の開きが大きくなることが予測される。

4. 結 言

一次き裂先端が曲線状をなして伝ばしすぐあとに続く二次き裂核に近づき、後者を活性化し二次き裂を伝ばさせ、両者の干渉により模様が生じるモデルの模様近似式を導いた。このモデルにおいて前・後模様の核間距離を近接度 p^* とし、この大きさが後者の模様形状に及ぼす影響を定速度解および加速度解により検討した。また、実際のPMMA破面に観察されたそのような一端開放模様例を曲線伝ばモデルの加速度解により検討し次の結言を得た。

- (1) 一次き裂先端が曲線状をなして伝ばするモデルの近接度 p^* を含む定速度解および加速度解は一次き裂が直線状をなして伝ばするモデル解に比べ総合的にうしろ模様の開きが大きくなることを表現している。
- (2) 上記、加速度解はうしろに生じる干渉模様の諸寸法関係を与え、これらの関係は前・後模様の近接度の影響を定量的に予測することができる。
- (3) これらの関係で相対近接度 p^*/C_{02} が小さくなるほど、すなわち、前・後模様が近接するほど、それがうしろ模様に与える影響は大きく、 p^*/C_{02} が大きくなるに従ってその影響は小さくなる。 p^*/C_{02} が5000近くに大きくなるとその影響は非常に小さくなり、これまでの直線伝ばモデルの加速度解に近づく。
- (4) 曲線伝ばモデル、加速度解は実際のPMMA破面上に観察された前・後近接模様のうしろの放物線状模様や前模様内に現れる小さなうしろ模様などの測定した形状や寸法を理論的によく近似定値しうることが確認された。
- (5) 一般に、一次き裂が凸状の曲率をもって伝ばする場合の破面模様は、それが直線状で伝ばする場合に比べて模様形状の開きが大きくなることが予測される。

参考文献

- (1) Feltner, C.E., Univ. Illinois, Theoretical and Applied Mechanics Report, 224, (August, 1962)
- (2) Berry, J.P., Fracture Processes in Polymeric Solid, Interscience Publishers, (1964), 195.
- (3) J.A. Kies, A.M. Sullivan, G.R. Irwin, J. Appl. Phys. 21 (1950), 176.
- (4) G.R. Irwin, J.A. Kies, Welding J.(Res. Suppl.), (1952), 955.
- (5) 蔵本・ほか3名, 機論, 49 443, A編 (W58), 803.
- (6) 蔵本・吉村, 機論, 52 476, A編 (W61), 818.
- (7) 蔵本・ほか2名, 機論, 52 476, A編 (W61), 809.
- (8) 蔵本・増田, 機論, 53 487, A編 (W62), 490.
- (9) 蔵本・吉村, 機論, 52 476, A編 (W61), 801.
- (10) 蔵本・ほか2名, 機論, 53 491, A編 (W62), 1332.
- (11) 蔵本・吉村, 機論, 53 493, A編 (W62), 1754.
- (12) Berry, J.P., J. Mech. Phys. Solid, 8 (1960), 194.
- (13) 蔵本・ほか3名, 機論, No.865-1 (W61 3), 19.

討 論

〔質問〕 鈴木 恵

(京都工芸繊維大学工学部)

前・後近接する破面模様を定速度解, 加速度解などの解析と実験 (PMMA および不飽和ポリエステル) から立証し, Berry 以来のこの分野の研究に大いに貢献したものと思いき高く評価している。一連の研究はぜい性材料の破面模様について述べているが, ぜい性破壊の本質はき裂核の初生, それに続くき裂伝ばであり, 破面模様はその破壊形態を知る道具と考えている。したがって, 個々の破面模様およびき裂の速度, 加速度から, 破面の場所ごとのき裂進展方向はわかるが, き裂先端の応力状態はわかるものなのか。この場合, 材料の結合エネルギーは破面模様, さらに応力状態に関係しないのか。

〔回答〕 破面模様は二次き裂核 (C_{02} および C_{022}) の生成とそれから伝ばする二次き裂速度にも依存している。一次き裂先端でき裂核が活性化され, 二次き裂が伝ばする現象は一次き裂先端の動的応力の場の大きさに左右されている。一次き裂伝ば速度 V_1 が高速になると共に動的応力拡大係数 K_D が急速に大きくなる。例えば Homalite-100 ではその関係は Γ 字曲線で変化する(付1)。また, 速度と K_D が与えられれば Freund の式(付2)より動的ひずみエネルギー解放率 $\mathcal{D}_0$ が求まる。すなわち, V_1 が大きいほど, より多くのき裂核を活性化させ, そのうちあるものは高速で, またあるものは低速で伝ばし各々一次き裂と干渉し結果として種々の模様形状を生じる。き裂核の多少や大小は当然, V_1 による動的応力の場の大きさや材料の清

浄度などに依存している。従って, 相対一次き裂伝ば距離 C_1/C_{01} における V_1 が分かれば, Γ 字型関係よりその位置の K_D/K_C たは $\mathcal{D}_D/\mathcal{D}_C$ (K_C , $\mathcal{D}_C$ は静的な値) の変化・変動が予測できる。これまでの筆者らの報告では C_1/C_{01} による破面模様やその形状変化は K_D , $\mathcal{D}_D$ (または K_D/K_C , $\mathcal{D}_D/\mathcal{D}_C$) の変化・変動とよく対応しており, き裂先端の応力状態を忠実に反映している。なお, 各 C_1/C_{01} における個々の模様の K_D , $\mathcal{D}_D$ の正確な絶対値を予測し難いことは言うまでもない。

材料の結合エネルギーは破壊強度に直接関与し, 後者の大小は当然破面模様に影響し, また応力状態にも関与すると考えられる。例えばもろくて弱い不飽和ポリエステル (UP) 試片の低強度破壊または低速き裂伝ば域では BECM が, 逆に高強度破壊や高速き裂伝ば域では OEOM が各々主たる模様を占める。これら両模様の競合は強度および速度(結果として K_D , $\mathcal{D}_D$) に依存している。また, 強くて靱性がある PMMA の試片では低速伝ば域や面応力域(材料表面近く)で BECM も少数観察され, 高速伝ば域や板厚内部(面ひずみ成分がより強い)では全て放物線状または双曲線状の OEOM となる。模様形状, 両模様の競合, 模様数や密度等の一次き裂伝ば距離による変化は結合エネルギー(強度)により変わるが, むしろ一次き裂伝ば速度(即ち K_D , $\mathcal{D}_D$) により支配されていると言える。

(付1) Kobayashi, A. S. *Prog. Exp. Mech., Durelli Anniversary Volume*, (1975), 83.

(付2) Freund, I. B., *J. Mech. Phys. Solids*, 20 (1972), 129.