実物試験片による光ファイバの破壊靱性の評価*

村岡 幹夫^{*1}, 阿部 博之^{*1}Evaluation of the Fracture Toughness of Optical Glass Fibers
using Real Fiber Specimens

Mikio MURAOKA and Hiroyuki ABÉ

The fracture toughness of optical glass fibers, the dimension of which is very small in diameter, has been evaluated directly. The method and results are summarized as follows. A silica glass fiber 125 μm in diameter without a silicone resin coating was indented with a Vickers diamond pyramid. A pre-crack was then introduced by pulling the indented fiber specimen in a longitudinal direction. Each pre-cracked fiber specimen was tested under constant tensile loads in atmospheric air. After the delayed fracture of the fiber specimen occurred, the fracture surface was observed in order to see the crack shape at the onset of the final unstable fracture. Next, based on the observed crack front, the stress intensity factor K_I at the onset of the final unstable fracture, i.e., fracture toughness K_{IC} was evaluated by the 3-D boundary element method. The fracture toughness K_{IC} of optical glass fibers was 0.77 MPa $\sqrt{\text{m}}$, which was slightly smaller than that obtained from the indirect evaluation using a WOL-type CT specimen.

Key Words: Fracture, Optical Glass Fiber, Delayed Fracture, Fracture Toughness, Vickers Hardness Indenter, 3-D Boundary Element Method

1. 緒 言

光ファイバは、光通信の伝送路として脚光を浴び、盛んに導入されているが、長時間にわたる使用期間中にケーブル内で負荷を受け遅れ破壊を引き起こす可能性がある。光ファイバの破断は、光通信システムの信頼性に対して致命的な障害となる。そのため正しい予測手法のもとに、その寿命を保障しなければならない。光ファイバの遅れ破壊に至る過程は、初期き裂の安定成長および安定-不安定遷移よりなる。前者は、光ファイバの成分である SiO_2 と大気中の H_2O との腐食反応による応力腐食割れが原因である。また後者は、成長したき裂の応力拡大係数が破壊靱性値に達した時点で起こる。したがって光ファイバの応力腐食割れ挙動および破壊靱性値を把握しておくことは、正しい破断寿命予測のために、有用であると考えられる。

ところで、光ファイバの破壊靱性評価に関して、Sakaguchi ら⁽¹⁾は、天然石英ガラス板よりなる大形の WOL 形 CT 試験片を用い、破壊靱性評価を行っている。しかしながら、直径がわずかに約 125 μm である実物

の光ファイバの破壊靱性は、未だ評価されていない。本研究では、新たに考案する手法により実物の光ファイバを用いて、破壊靱性の直接評価を行う。まず光ファイバに予き裂を導入し、光ファイバ試験片を作製する。これを用いて静疲労試験つまり一定荷重下の遅れ破壊試験を行い、破断後、破断面の観察により不安定破壊開始時のき裂形状・寸法を測定する。次に測定したき裂形状・寸法をもとに、三次元境界要素解析を行い、光ファイバの破壊靱性値を評価する。

2. 光ファイバの静疲労試験

2.1 光ファイバ試験片の作製 供試材として図 1 に示す断面形状を有するシリコン樹脂被覆石英系光ファイバ(シングルモード)を用いる。試験片の作製には、まず光ファイバを 50 mm に切断し、シリコン樹脂被覆を取り除く。その際石英ガラス表面をエチルアルコールでよく拭き、シリコン樹脂を取り除く。次に図 2 に示すように、裸の光ファイバの両端にプラスチック板を接着する。その後蒸留水により試験片を洗い、さらに熱風により乾燥させる。次に予き裂の導入を行う。まずマイクロビッカース硬度計(明石製作所製)を用い、試験片にビッカース圧子を押し込む。具体的には、まず試験片の一方の端を図 3 に示す顕微鏡取付け

* 昭和 63 年 11 月 17 日 第 954 回講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 5 月 16 日。

^{*1} 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

治具に接着し、次に試験片の下に図3の破線で示した台を挿入して試験片を固定させ、圧子を押し込む。この際、圧痕の二つの対角線が光ファイバの軸方向に平行および垂直になるように、また圧痕の中心が、光ファイバの中心に位置するように圧子を押し込む。押し込み荷重、押し込み時間は、それぞれ0.49 N、15 sとする。この時点では、予き裂〔図5(a)参照〕は、まだ発生しない。

圧子押し込み後、顕微鏡取付け治具を図4(a)のように光学顕微鏡に取付ける。このとき図4(b)に示すように、重りを試験片上端よりナイロンの糸でつるし、さらに試験片下端とナイロンの糸を接着する。そして試験片上下端の間でナイロンの糸を切断することにより、試験片に荷重を与える。予き裂は荷重開始後、数十分から数時間経過した後、瞬時に、圧痕からファイバの軸方向に対して垂直に発生する〔図5(a)〕。図5(b)に、圧痕および予き裂の顕微鏡写真を示す。なお荷重に用いる重りは、図4(b)に示すように高粘度の油中に沈めてある。これは試験中の試験片の振動を避けるためである。また試験片に作用する一定引張力す

なわち、重りの重量から浮力を差し引いた値は0.41 Nである。

2・2 静疲労試験 予き裂発生後、荷重を除荷し、次に所定の荷重を与え静疲労試験を行う。試験片に与える一定引張力は、0.75, 0.81, 0.84, 0.86, 0.89, 0.96 Nの6種類である。なお試験は、すべて大気中で行い、温度、相対湿度はそれぞれ $24 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $58 \pm 3\%$ r.h.である。なお荷重の方法は2・1節と同様に行う。表1に、一定引張力が異なる六つの試験片の荷重開始から破断に至るまでの時間を示す。表1からわかるように一定引張力の値が減少するに従い、荷重開始から破断に至るまでの時間が増加している。

図1 シリコン樹脂被覆石英系光ファイバ

図2 試験片

図3 圧痕の導入および予き裂導入、静疲労試験に用いた顕微鏡取付け治具

図4 顕微鏡および荷重装置

(a) 説明図

(b) 予き裂発生後の顕微鏡写真

図5 圧痕および予き裂

2.3 破断面の観察 試験片が破断した後、各試験片の破断面を微分干渉顕微鏡を用いて観察し、不安定破壊開始時のき裂形状・寸法を測定する。図6に顕微鏡写真の例(表1の試験片1)を示す。また図7に各試験片における不安定破壊開始時のき裂前縁形状を示す。図7より不安定破壊開始時のき裂寸法は、一定引張力の値が小さくなるに従い、大きくなっていくことがわかる。

3. 三次元境界要素解析

まず、2章で得られた不安定破壊開始時のき裂形

表1 負荷開始から破断に至るまでの時間

Speci. No.	Constant tensile load (N)	Time-to-failure
1	0.75	18 h 27 min 13 sec
2	0.81	8 h 20 min 10 sec
3	0.84	30 min 12 sec
4	0.86	27 min 31 sec
5	0.89	22 min 57 sec
6	0.96	10 min 20 sec

図6 破断面の顕微鏡写真(試験片1)

図7 破断面上における不安定破壊開始時のき裂前縁

状・寸法および一定引張力の値を用いて、三次元境界要素解析を行い、各試験片の不安定破壊開始時におけるき裂前縁に沿う応力拡大係数 K_I の分布を求める。

本解析における要素分割の例を図8に示す。要素分割は、き裂を含む試験片の中央部を対象とし、問題の対称性を考慮して、その1/4について行う。また図8の端面Cに、一様な引張応力を境界条件として与える。ポアソン比としては、0.23⁽²⁾⁽³⁾を用いる。境界要素解析プログラムは、林ら⁽⁴⁾が開発したものをを用いる。 K_I の決定法としては、接続外挿法⁽⁵⁾を用いる。なお図8に示した要素分割と同程度の要素分割を用い、周方向に円表面き裂を有する円柱がその端面に引張応力を受ける問題を対象とした西谷ら⁽⁶⁾の解析におけるモデルと同一のモデルについて、 K_I を計算した際に、本境界要素解析の結果は、西谷らの結果と良好に一致すること(両者の結果の差が1%以下)を確認している。また本解析において、軸方向の長さ L (図8参照)として、 $3R$ (R : 試験片半径)を採用している。これは、き裂寸法が最も大きい場合(一定引張力が0.75Nの場合、図7参照)について、 L/R の値を2.0、3.0、6.0と変化させて K_I の計算を行った際に、 $L/R=3.0$ と $L/R=6.0$ の結果の差が3%以下におさまっていることより、 $L/R=3.0$ のモデルは、端面Cの影響が無視でき

図8 要素分割の例

図 9 不安定破壊開始時におけるき裂前縁に沿う K_I の分布(一定引張力 0.81 N)

る十分な軸方向の長さを有していると判断したからである。

図 9 に本解析により得られた不安定破壊開始時におけるき裂前縁に沿う K_I の分布の例を示す。図 9 は、一定引張力 0.81 N の場合のき裂形状に基づいて計算した結果である。なお図 9 中の x は、き裂前縁の位置を表すパラメータである。図 9 からわかるように、 K_I の値は、き裂最深部($x/R=0$)で最大となっているが、き裂前縁に沿う K_I の変化量はわずかである。なお他の試験片についても、同様の傾向が得られている。

さて、 K_I のき裂前縁に沿う変化量がわずかであることを考慮すれば、 $x/R=0$ における K_I の値を破壊靱性 K_{IC} とみなしてもよいであろう。そこで各試験片に対する解析結果から、 K_{IC} と一定引張力との関係を整理すると図 10 のようになる。図中の番号は、表 1 の試験片番号を表す。なお図 10 には、不安定破壊開始時におけるリガメント部の公称応力 σ_b と外部応力 σ の比 σ_b/σ および不安定破壊開始時における $x/R=0$ でのき裂長さ a_{max} の値を併記している。図 10 より、 K_{IC} の値は一定引張力の値によらず、ほぼ一定となっており、平均値として $0.77 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であることがわかる。この値は、大気中(室温, 40~60% r.h.)において天然石英ガラス板よりなる大形の WOL 形 CT 試験片を用い

図 10 K_{IC} と一定引張力の関係

静疲労試験を行って得られた値($0.87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)⁽¹⁾より若干小さい。

4. 結 言

新たに考案した手法により、実物試験片を用いた光ファイバの破壊靱性評価を行った。本評価により得られた光ファイバの破壊靱性値は、 $0.77 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。この値は、天然石英ガラス板よりなる大形の WOL 形 CT 試験片により得られた値より若干小さい。

終わりに、日立電線(株)電線研究所のご好意により、光ファイバおよび多大なご助言をいただいたことを記し、深く感謝の意を表する。また数値計算において協力を得た東北大学学生・西井俊明君に感謝の意を表する。本研究の一部は文部省科学研究補助金[昭和 62 年度奨励研究(A)62750068]によるものであり、数値計算は東北大学大型計算機センター ACOS シリーズ 77, NEAC システム 2000 によったことを付記する。

文 献

- (1) Sakaguchi, S., ほか 3 名, *J. Mater. Sci.*, 17-10 (1982), 2878.
- (2) 石原・内田, 電子通信学会論文誌, J 64 B-4 (昭 56), 271.
- (3) 島田・村田, 光ファイバケーブル, (昭 62), 17, オーム社.
- (4) 林・ほか 2 名, 機論, 54-504, A (昭 63), 1541.
- (5) 北川・ほか 3 名, 機論, 50-450, A (昭 59), 129.
- (6) 西谷・陳, 機論, 50-453, A (昭 59), 1077.

討 論

〔質問〕 菅 野 智

〔(株)日立製作所機械研究所〕

大形試験片の結果より、本試験結果で得られた K_{Ic} の値は小さくなったと述べられたが、寸法効果が現れたものか。

〔回答〕 本論文では、従来の破壊靱性試験に供されている試験片に比べ、寸法が非常に小さいという特徴を有する実物の光ファイバを用いて、破壊靱性 K_{Ic} を求める手法を提案し、これにより破壊靱性を求めることを目的としている。

光ファイバから得られた K_{Ic} の値が、文献(1)に報告されている大形の試験片の値⁽¹⁾より若干小さい値を示した理由については、ご指摘の寸法効果あるいは不純物含有量のわずかな違いなど、種々の要因が考えられると思うが、その詳細については、今後さらに検討したいと考えている。

〔質問〕 鈴木 秀 人

〔小山高等専門学校機械工学科〕

興味深い研究であるが以下についてご教示願いたい。

(1) 坂口らの測定値の違いは予き裂導入法の相異と考えられないか。本研究による予き裂導入法による予き裂は実際に光ファイバに存在する欠陥に近いものか。

(2) 破面に認められる相異、すなわち不安定破壊開始とされている領域は、負荷時の曲げが生じるところと一致するのではないか。

〔回答〕 (1) Sakaguchi ら⁽¹⁾は大形試験片(WOL形CT試験片)においてスリットの先端近傍に引張応力を作用させることにより予き裂を導入しているのに対し、実物の光ファイバを扱った本論文ではビッカース圧子による圧痕近傍の残留引張応力にさらにおもりによる引張応力を加えることにより予き裂を導入しており、ご指摘のように両者には予き裂導入法の相違がある。しかしながら、本論文の破壊靱性の評価は、予き裂近傍の残留応力場の大きさに比べ、き裂が十分大きく成長した後の不安定破壊開始時のき裂に対して行っている。そのため本論文の測定値に対しての残留応力の影響は小さいと考えられる。なお残留ひず

み場の大きさは偏光顕微鏡を用いて予き裂寸法と同程度(不安定破壊開始時のき裂寸法の約1/3)であることを確認している。以上より Sakaguchi ら⁽¹⁾と本論文における測定値の相違は、予き裂導入法の相違によるものではないと考えることができる。

また後半のご質問に対しては、以下のとおりである。光ファイバに存在する実際の欠陥のうち、特に重要である低強度欠陥(寸法が1 μm 程度)は主に次のような原因で発生する。製造過程において、線引き炉内のヒータ、保温材等から放出される粒子がファイバの表面に付着する、あるいはシリコン樹脂被覆材中の不純物粒子がファイバの表面を押しつける。本論文による予き裂は、後者つまり被覆材中の不純物粒子がファイバ表面を押しつけることによって生じる欠陥に近いと考えることができる。しかしながら実際の初期欠陥の寸法は、本論文における初期き裂寸法に比べ小さく、また実使用状態で予想される不安定破壊開始時のき裂寸法も、本論文におけるものよりも小さくなっている。これらの相違が破壊靱性値に与える影響については、本評価手法をもとに、今後さらに検討したいと考えている。

(2) 光ファイバ試験片に作用させる引張外荷重を P とし、そのときのリガメントに生じる垂直応力によるリガメント図心まわりの曲げモーメントを M とします。一定引張荷重下でき裂が進展するとき、 M の値は、き裂最深部のき裂長さ a の増加とともに、徐々に大きくなると考えられる。そこでご質問にある“不安定破壊開始……曲げが生じるところと一致する”を、仮りに M/P の急増点が存在し、そこで不安定破壊開始が起こると解釈すると、次のように考えることができる。 a の値が決まれば P の大小によらず応力分布は定まる。したがって M/P の急増点は、幾何学的形状のみで決まることになる。しかしながら本実験結果によれば、不安定破壊開始時の a の値 $a_{\max}$ は P が小さいと大きくなっている(図7参照)。さらに P の値を広範囲に変化させれば、 $a_{\max}$ の値はさらに変化するものと予想される。したがって曲げが急増するところと不安定破壊開始が一致するのではないと考えられる。