高分子固体と金属材料の疲労破壊の共通性と相違性*

横 堀 武 夫**

The Similarities and Dissimilarities of Fatigue Fracture between Polymers and Metallic Materials

by

Takeo YOKOBORI

(Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)

1 緒 言

著者の研究室では固体破壊と強度の問題について

(1) 異なる学問的アプローチをシステムエンジニアリング的に総合して、ミクロとマクロの両面からの統一的研究

(2) あらゆる固体の破壊と強度に共通した原理とその相違性、すなわち材料を統一しての研究

(3) 疲労・クリープ・ぜい性破壊・おくれ破壊・降伏など各種破壊の共通性と相違性、すなわち破壊と強度のふるまいの統一的研究¹⁾²⁾

といった三つの特徴的立場からの研究を進めている。これを材料強度学と名づけている¹⁾²⁾。この材料強度学としての内容にふくまれる各領域を具体的に Table I に示しておく。

Table I.

Interdisciplinary approach to strength of solids	1.	Stochastic approach
	2.	Thermodynamical approach
	3.	Atomistic approach
	4.	Microstructural approach
	5.	Continuum mechanical approach
	6.	Environmental effect
	7.	Materials testing
	8.	Design aspect

ここでは高分子固体と金属材料の疲労破壊の共通性と相違性についての研究の一部を述べたい。

2 高分子固体と金属材料の疲労破壊の動的特性の共通性

高分子固体と金属材料の疲労破壊の動的特性の共通性として著しいことは、両者の疲労破壊が核生成 (Nucleation process) として説明されるという点であ

— Values calculated by the author's theory¹⁾ (1955) (Steel)
 - - - Values calculated by Prevorsek *et al* (1964) using essentially the same theory as the author's (Polymer fibre)

Fig. 1. Comparison of S-N curves of metallic materials and high polymers.

る^{3)~5)} (たとえば Fig. 1). さらに筆者は、この考え方を発展させて、疲労き裂伝ばの動的理論として疲労き裂伝ばの核生成論を導いた⁶⁾。この理論は^{*1}、金属に対しても高分子固体に対しても、応力振幅-破壊繰返し数 (S-N) 関係曲線だけでなく、疲労き裂伝ば速度特性などをも、きわめてよく説明することができる。高分子固体については^{3~6} および文献⁶⁾の Fig. 23.4 などに示してあり、金属材料については、たとえば文献⁶⁾の Fig. 23.3 に示してあるように、き裂伝ば特性が全く同様な特性をもっている。さらに、き裂が弾塑性である場合について本理論が拡張されている。次の問題としては、発生とその微視機構の相違の究明である。金属材料の疲労き裂発生と伝ばの微視機構の形態学的研究はかなり多いので、本文では、高分子固体の疲労き裂発生と伝ばの微視機構に関して形態学的に調べた結果を述べ、両材料についてこれを比較しながら、さらに動的理論との関連について論じたい。

* 原稿受理 昭和46年2月8日

** 正 会 員 東北大学工学部 仙台市荒巻字青葉

*1 この理論については頁数の関係で説明できないので、文献⁶⁾~⁸⁾を参照されたい。

3 高分子固体の疲労き裂発生と伝ばについての実験

ポリエチレンやアセチルセルロースの疲労き裂伝ばについては金属材料のそれと共通的な特徴を示すことが知られている⁹⁾。そこで、ここでは、ポリカーボネートの疲労き裂発生と伝ばについて、き裂先端近傍のすべり模様、ストリェーションと繰返し数の対応性、クレージングなどに関する fractographic な観察や、疲労き裂伝ば法則やき裂先端近傍の塑性領域などの実験¹⁰⁾およびその考察を行なった。

供試材はポリカーボネート（厚さ 1 mm）の板材であり、試片に加工後、電気炉内で焼なましを行なった。焼なまし後に偏光フィルター（複屈折測定装置）により検査し、加工による残留応力をほとんど除去されたことを確かめた。

3・1 き裂先端のすべり模様の走査電子顕微鏡による観察

Fig. 2(a), (b)に板厚中央部における疲労き裂が 8 mm にまで伝ばしたときの表面でのき裂先端のすべり模様の走査型電子顕微鏡による観察結果を示す。すべり帯の交差模様があらわれている。この点、金属材料と類似しているといつてよいであろう。さらに板厚中央におけるき裂先端近傍についての観察の結果をFig. 3 に示す。これらの結果から、疲労にともなって生じている巨視的塑性変形は、Fig. 4 および Fig. 5 のようになっているものと考えられる。この点も、金属材料のそれと類似している。

Fig. 2. A typical example of the observation by a scanning electron microscope on the slip pattern near the tip of fatigue crack of polycarbonate¹⁰⁾ (At the surface of the specimen).

Fig. 6. A Schematic illustration of the three stages of the fatigue crack propagation of polycarbonate¹⁰⁾.

Fig. 3. A typical example of observation by a scanning electron microscope on the slip pattern near the tip of fatigue crack of polycarbonate¹⁰⁾ (At the mid portion of the specimen thickness).

Fig. 4. Schematic illustration of macroscopic plastic deformation of polycarbonate. (The Numbers show the level of the height qualitatively).

Fig. 5. Macroscopic plastic deformation of polycarbonate.

3・2 疲労き裂伝ばの第Ⅰ～Ⅲ段階

疲労き裂伝ばは、高分子固体の場合にもFig. 6のD、EおよびFに示すように、三つの段階に分類される。このうち期間の長い第Ⅱ段階は本実験結果からFig. 7のようにあらわされる。

D領域すなわち第Ⅰ段階においては river

Fig. 7. A Schematic illustration of the II stage of crack propagation¹⁰⁾.

Fig. 8. A typical example of river pattern observed by a scanning electron microscope of the area of the II stage¹⁰⁾ of fatigue crack propagation in polycarbonate.

Fig. 9. An enlarged photo by scanning electron microscope of Fig. 8¹⁰⁾.

Fig. 10. A typical example of voids observed by a scanning electron microscope on the area of II stage crack propagation of polycarbonate¹⁰⁾.

pattern が観察され (Fig. 8), これを高倍率で観察すると Fig. 9 のようにはげしい起伏がみられる。この領域は、微視構造としては金属材料の場合と異なっている。E 領域すなわち第 II 段階領域は Fig. 7 のように板面に垂直な破面と、これと傾いた shear lip といわれる傾斜部からできている。垂直中央部には、しばしば Fig. 10 のような空孔が観察される。

3・3 繰返し数とストリーエーションとの対応性

二段重複荷重による疲労試験により、高応力側ではこの両者の間に 1 対 1 の対応があることがわかった。(Fig. 11). このことも金属材料の場合と類似している。

Fig. 11. A typical example of striations observed in two stage loading fatigue testing¹⁰⁾ of polycarbonate.

3・4 光弾性実験による疲労試験中のき裂先端の応力集中の変化の経過

実験の結果、応力の繰返しにつれて、き裂先端の応力集中は板厚内部から板の表面に移動する。すなわち均等化される傾向をとる。¹⁰⁾

3・5 クレージングについて

Fig. 12 および Fig. 13 に示すように、疲労試験を途

Fig. 12. A typical example of crazing observed in polycarbonate subjected to cyclic stressing¹⁰⁾. Arrows show the direction of applied stress.

Fig. 13. Another typical example of crazing observed in polycarbonate subjected to cyclic stressing¹⁰⁾. Arrows show the direction of applied stress.

中まで行なった試片について、くぼんだクレース matter を観察することができ、その中に void が存在する。

3・6 疲労き裂伝ば曲線

疲労き裂伝ば速度 dc/dN と応力拡大係数 (Stress intensity factor) を両対数で表わしてプロットすると Fig. 14 のようになる。ここで ΔK = 応力振幅に対する応力拡大係数、 $K_{\max}$ = サイクル中の最大応力に対する応力拡大係数。Fig. 14 からわかるように、 $\log dc/dN$ と $\log \Delta K$ または $\log K_{\max}$ との関係は、

Fig. 14. The relation between fatigue crack propagation rate, dc/dN and stress intensity factor (ΔK and $K_{\max}$ respectively) for polycarbonate¹⁰⁾. The symbols are common in Fig. 17.

$$\frac{dc}{dN} = \alpha (\Delta K)^\delta$$

または

$$\frac{dc}{dN} = \alpha (K_{\max})^{\delta m}$$

で表わされる。この式は疲労き裂の核生成理論から導かれる式と一致する。

なお、応力拡大係数の大きい領域においては $\log dc/dN$ と $\log \Delta K$ (または $\log K_{\max}$) との関係は別の直線関係となる。この特性も、全く金属材料の場合と同様である。¹¹⁾¹²⁾ なお、応力拡大係数の小さい方の領域では $K_{\max}$ によるプロットの方がバラツキが少なく、応力拡大係数の大きい方の領域では ΔK によるプロットの

Table II.

Material	The value of δ	The value of δm
Low carbon steel	4.0	
High strength steel	2.5~4	
Polyethylene	5.0	8.0
Acetylcellulose	6.0	7.0
Polycarbonate	5.4 (Low stress intensity factor) 1.7 (High stress intensity factor)*2	7.0 (Low stress intensity factor) 1.8 (High stress intensity factor)

*2 第18回レオロジー討論会に本原稿提出後に、永田、鈴木がポリカーボネートについて実験し、 $\delta=2.2$ を得ていることを知った。しかし、この値は、高応力拡大係数の領域での値であると考えられる。

方がバラツキが少ないようであるが、 ΔK と $K_{\max}$ のいずれであらわすべきかは今後の問題である。

なお、種々の材料についての δ の実験値を Table II に示す。

3・7 疲労き裂先端近傍の塑性領域

この高分子固体の塑性領域 (Fig. 15) は金属材料の場合と同様に、連続体としての破壊力学的計算結果とよく一致する。(たとえば Fig. 16 に示した実線は理論直線である)。

Fig. 15. Elastic-plastic crack model.

Fig. 16. The relation between the length of crack and the length of plastic zone in fatigue crack propagation of polycarbonate¹⁰⁾.

3・8 塑性領域大きさとき裂伝ば

Fig. 17 に示すように、疲労き裂伝ばのためには、この塑性領域大きさには限界値が必要であり、ポリカーボネートの場合 0.2~0.27 mm であることがわかる。

4 結 語

以上のように、疲労破壊という例をとってみても、高分子固体と金属材料という異種材料についても、共通性をもつことがわかる。この意味からも、この種の研究が材料強度学のフレームワークを形成しているといつてよいであろう。また、高分子固体と金属材料といったような材料によるマイクロ (微視) 組織の相連性が疲労挙動という巨視破壊挙動を記述する表式の中にどのような形で入りこんでいるかということも明確にされたであろう。

Fig. 17. The relation between the fatigue crack propagation rate dc/dN and the length of plastic zone of polycarbonate¹⁰⁾.

(昭和45年10月8日 第18回レオロジー討論会にて講演)

参考文献

- 1) 横堀武夫, 材料強度学 (1955) 技報堂; English Edition, Strength, Fracture and Fatigue of Materials, Nordhoff Pub., Groningen, The Netherlands (1965).
- 2) 横堀武夫, 材料強度学(1964)岩波全書; English Edition, An Interdisciplinary Approach to Strength and Frac-

ture of Solids, Walters-Nordhoff Pub., Groningen, The Netherlands (1968).

- 3) Yokobori, T., J. Phys. Soc. Japan, **10**, No. 5, p. 368 (1955).
- 4) 横堀武夫, 笹平誠一, 日本材料強度学会誌, **2**, No. 4, p. 40 (1967).
- 5) 横堀武夫, 日本機械学会誌, **70**, No. 584, p. 1258 (1967).
- 6) Yokobori, T., The Orowan Anniversary Volume, "Physics of Strength and Plasticity," A. S. Argon Ed. MIT Press, p. 327 (1969); 一部は日本材料強度学会誌, **3**, No. 1, p. 1 (1968).
- 7) Yokobori, T., and M. Ichikawa, Rep. Res. Inst. Strength and Fracture of Materials, Tohoku Univ., **4**, No. 2, p. 45 (1968); 横堀武夫, 市川昌弘, 日本材料強度学会誌, **4** No. 1—2, p. 1 (1969).
- 8) Yokobori, T., Rep. Res. Inst. Str. Frac. Mat'ls Tohoku Univ., **5**, No. 1, p. 19 (1969).
- 9) 横堀武夫, 笹平誠一, 日本機械学会講演論文集, No. 187, p. 125 (1968).
- 10) 一部は横堀武夫, 佐藤好一, 日本機械学会仙台地方講演会前刷 (1970)
- 11) 横堀武夫, 日本機械学会誌, **74**, No. 624, p. 4 (1971).
- 12) Yokobori, T., *et al.*, Rep. Res. Inst. Str. Frac. Mat'ls Tohoku Univ., **3**, No. 2, p. 39 (1967).
- 13) 永田雅一, 鈴木 恵, 材料, **19**, 455 (1970).