ポリカーボネート板の疲労き裂進展の板厚依存性[†]

白石 哲郎* 荻山 博之** 佃 等***

Specimen Thickness Dependence of Fatigue Crack Propagation in Polycarbonate Plates

by

Tetsuro SHIRAISHI*, Hiroyuki OGIYAMA** and Hitoshi TSUKUDA***

The effect of the specimen thickness on the fatigue crack propagation in polycarbonate plates was investigated. Fatigue cracks were propagated under axial load conditions with constant amplitude loading, a single peak overload and two-step loading. The crack propagation rates both on the surface and in the interior of the specimen were measured. The crack closure behavior and the appearance of fracture surface were also examined. The fatigue crack propagation rate, da/dN , under constant amplitude loading increased with increasing specimen thickness at low ΔK levels. The crack closure behavior was not appreciably affected by the specimen thickness. The measurements of shear lip width on the fracture surface indicate that the thickness dependence of da/dN is closely related with the formation of shear lips. The crack extension during a single peak overload was larger in the thick specimen. The fatigue crack retardation after the peak overload was more marked in the thin specimen, which was similar to the case of stress decrease under two-step loading. These results can also be understood in terms of the contribution of shear lips to fatigue crack propagation.

Key words: Polycarbonate, Fatigue crack propagation, Specimen thickness, Shear lip, Single peak overload, Two-step loading

1 緒 言

エンジニアリングプラスチック（エンブラ）あるいはスーパーエンジニアリングプラスチック（スーパーエンブラ）と呼ばれる高性能高分子材料は、軽量構造部材としての積極的な活用が期待されるが、その際には耐疲労性を十分把握しておく必要がある。従来この種の材料の耐疲労性は主として一定荷重振幅下の疲労限度やき裂進展抵抗を測定して検討されてきた。¹⁾しかしながら、実用の各種機器が受ける負荷は複雑な変動荷重である場合が多いことを考えると、使用状況に応じたより合理的な評価を下すためには、種々の変動荷重下における挙動の把握も不可欠である。このような観点から、筆者らはこれまで、代表的なエンブラの一つであるポリカーボネート（以下、PC）の板状試験片を用いて、一定荷重振幅下のみならず単一過大荷重下や二段二重変動荷重下の疲労き裂進展挙動も調べ、いくつかの知見を得てきた。^{2)~5)}

ところで、一般に板状試験片の場合、試験片表面層には平面応力型のせん断縁（shear lip）が形成され、それはき裂進展に対する抵抗として働く。⁶⁾したがって、せん断縁の形成は試験片全体のき裂進展挙動を左右し、それによって板厚効果が現れる。せん断縁の発生は材料の種類により異なるが、PCの場合には、比較的容易にそれが形成されるため、例えば破壊じん性値の板厚依存性がかなり顕著に現れることが知られている。⁷⁾一方、疲労き裂

進展に対する板厚効果については、若干の検討例⁸⁾はあるもののなお十分とは言えず、とくに変動荷重下の場合に関する情報はほとんど得られていない。

そこで本研究では、数種の板厚のPC予き裂材を用い、一定荷重振幅下、単一過大荷重条件下および二段二重変動荷重下の疲労き裂進展挙動を調べることにし、これらの挙動に及ぼす試験片板厚の影響を検討した。

2 材料および実験方法

実験に用いた材料は、板厚3mm、5mmおよび8mmの市販のPC透明板（タキロン PC-1600）である。各材料の引張性質（負荷速度1mm/min）は、Table Iに示すようにほぼ同程度である。素材から幅50mm、長さ180mmの短冊状試験片を切り出し、片側中央部に糸のこおよび鋭利な刃で深さ約2.5mmの予き裂を設けた後、実験に供した。実験には島津サーボペット Lab-5型引張圧縮疲労試験機を用い、応力比 $R=0$ のもとで、一定荷重振幅試験、単一過大荷重試験および二段二重変動荷重試験を行った。繰返し速度は1Hz、雰囲気温度は約25℃である。Fig. 1に単一過大荷重試験および二段二重変動荷重試験の荷重負荷方法を示す。単一過大荷重試験における過大荷重比 $r (= \sigma_2/\sigma_1)$ は2.0および2.5とした。ここで、 σ_1 は基準繰返し応力、 σ_2 は過大応力である。過大応力の負荷は、き裂長さが約4mm、7mmおよび10mmとなった時点で手動（約0.1Hz）により行った。

[†] 原稿受理 平成11年6月3日 Received June 3, 1999

* 正会員 愛媛大学工学部機能材料工学科 〒790-8577 松山市文京町, Dept. of Mater. Sci. Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

** 正会員 愛媛大学工学部機械工学科 〒790-8577 松山市文京町, Dept. of Mech. Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

*** 愛媛大学工学部機械工学科 〒790-8577 松山市文京町, Dept. of Mech. Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

Table I. Tensile properties of materials.

Thickness (mm)	Young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Elongation (%)
3	2.4	62.7	68
5	2.3	62.7	90
8	2.3	62.5	70

(a) A single peak overload

(b) Two-step loading

Fig. 1. Load sequences for overload tests.

二段二重変動荷重試験では、高応力振幅から低応力振幅へ変動する、いわゆる応力下降試験を実施し、その場合の応力下降率は種々の値とした。き裂長さの測定には読み取り顕微鏡を用い、焦点位置を変化させることにより試験片表面および内部のき裂先端位置を同時に読み取った。応力拡大係数 K 値の計算には試験片つかみ部の拘束条件を考慮した片側き裂を有する帯板の一樣引張りの式⁹⁾を用いた。また、き裂開閉口挙動の測定には金属材料でよく用いられるひずみゲージによる方法¹⁰⁾を採用した。すなわち、き裂先端からわずか後方のき裂縁直下に貼り付けたひずみゲージ（ゲージ長さ 0.2mm）により検出されるひずみと荷重の線図を求め、その折れ曲がり点からき裂開口応力 σ_{op} を決定した。

3 実験結果および考察

3・1 一定荷重振幅下のき裂進展挙動

読み取り顕微鏡による疲労き裂進展挙動の観察によると、き裂はまず試験片内部で進展を開始し、ある程度進展した後にはじめて表面層でも進展を開始する。その後のき裂は常に内部で先行し、表面層でのき裂を引きづるようなかたちで進展を続ける。内部でのき裂の先行量は繰返し数の増加とともに増加するが、ある段階以降はほぼ一定となる。また、板厚の厚い試験片ほどその先行量

が大きい。このようなき裂進展挙動を考慮して、本研究では試験片表面と内部でのき裂長さの平均値を用いてき裂進展挙動を検討した。

Fig. 2 は、各板厚試験片について得られた一定荷重振幅下の疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を示したものである。 da/dN は、とくに低 ΔK 域において板厚の減少とともに低下する傾向が認められる。従来報告されている G. Pitman らの結果⁸⁾でも類似な板厚依存性が得られているが、彼らの結果に比べると本実験の場合には、高 ΔK 領域での板厚依存性が小さい。

一般に、金属材料における疲労き裂進展はき裂開閉口挙動¹¹⁾に強く支配されることが知られている。一方、高分子材料の場合にはこの種のき裂開口に関する情報が少なく必ずしも十分明確ではないが、筆者らのこれまでの測定によると少なくとも試験片表面ではき裂開口が生じ、この開口挙動と疲労き裂進展の応力比依存性がある範囲内ではよく対応することが認められている。^{12), 13)}ここでは、このようなき裂開閉口挙動と上述の板厚効果との関係を確認するため、き裂開口応力の測定を行った。Fig. 3 は、各板厚試験片のき裂開口応力の測定結果から求めたき裂開口比 $U (= (\sigma_{max} - \sigma_{op}) / \Delta \sigma)$ の値を比較したものである。ここで、 σ_{max} は繰返し最大応力、 σ_{op} はき裂開口応力、 $\Delta \sigma$ は応力幅を示す。図より、いずれの板厚の場合も U 値はほぼ一定の値（約 0.8）を示すことがわかる。このように、き裂開口比が板厚の影響をほとんど受けないことから、 da/dN の板厚依存性はき裂開閉口挙動によるものではないことが推察される。

緒言でも述べたように、破壊じん性値の板厚効果については、試験片表面層に形成される平面応力型のせん断縁の大きさが密接に関係していると言われており、その板厚効果は、板厚に対するせん断縁寸法の割合の観点から説明されている。⁶⁾ここでは、以上のような破壊じん性試験で得られている知見を参考として、せん断縁の観察を行った。Fig. 4 は、破面上に形成されたせん断縁の幅 S の板厚 t に占める割合 $2S/t$ の測定結果である。図より、

Fig. 2. Effect of specimen thickness on da/dN under constant amplitude loading.

Fig. 3. Effect of specimen thickness on fatigue crack closure.

Fig. 4. Effect of specimen thickness on shear lip formation.

$2S/t$ は板厚の減少とともに増大していることがわかる。平面応力型のせん断縁の部分は平面ひずみ型の試験片中央部に比べて破壊抵抗が大きい⁶⁾ことを考えると、疲労き裂進展抵抗についても、破壊じん性の場合と同様に、 $2S/t$ の大きさが重要な役割を果たしているものと思われる。前述のような da/dN の板厚依存性は、このようなせん断縁の形成挙動に起因しているものと理解される。

3・2 単一過大荷重によるき裂進展の加速および遅延挙動

高分子材料の疲労き裂進展に及ぼす過大荷重の影響に関する研究は、金属材料の場合に比べると数少ないが、従来からいくつか報告されている。^{14)~17)}筆者らもこれまで、いくつかの高分子材料を用いて、疲労き裂進展に及ぼす単一過大荷重の影響を調べ、過大荷重負荷時のき裂進展の著しい加速および負荷後の遅延に関する若干の知見を得てきた。^{2), 4), 5), 12)}Fig. 5は、それらの加速および遅延現象を模式的に示したものである。図中のO.L.は過大荷重の負荷、 $\Delta a_{O.L.}$ は過大荷重負荷時に生じるき裂進展

Fig. 5. Schematic illustration for crack acceleration and retardation due to a single peak overload for polymers.

量（この進展量は一定荷重振幅下のき裂進展速度に比べてきわめて大きいため、過大荷重による加速と呼ばれている）、 N_d は過大荷重負荷後のき裂進展の遅延が続く繰返し数（遅延繰返し数）である。ここでは、板厚3mmおよび8mmの試験片を用いて、このような加速および遅延挙動に及ぼす板厚の影響を検討した。なお、基準応力 σ_1 の値は、板厚3mmおよび8mmの試験片に対して、それぞれ11.8MPaおよび7.8MPaとした。

単一過大荷重負荷によるき裂進展の加速現象については、金属材料の場合にも認められているが、とくにPCのような非晶性高分子材料の場合には現象がきわめて顕著であるため、疲労破面の光学顕微鏡観察においてこの進展域を十分確認できる。²⁾Fig. 6は、破面上で測定した加速進展量 $\Delta a_{O.L.}$ の板厚依存性を示したものである。ここで、 $K_{O.L.}$ は過大応力に基づく応力拡大係数であり、加速進展量およびき裂長さとしては板厚中央部と表面との中間領域の数ヶ所で測定した平均値を用いた。図からわかるように、この加速進展量は、一定荷重振幅下のき裂進展速度の場合と同様に、板厚の薄い場合の方がより小さい値となった。このような結果に対してもせん断縁の形成挙動が関連しているものと思われる。すなわち、平面応力型の塑性域によって形成されるせん断縁がき裂進

Fig. 6. Effect of specimen thickness on the crack extension during a peak overload.

展抵抗となるため、せん断縁が板厚の大部分を占める薄板の方がより少ないき裂進展量となり、このような板厚依存性が生じたものと推察される。なお、筆者らは前報⁵⁾において、この種の加速進展量は、試験片内部ではほぼ一定であるが、表面のせん断縁近傍で著しく減少するという観察結果を報告した。この観察結果も、せん断縁がき裂の加速進展に対して大きな抵抗となっていることを示唆している。

Fig. 7 は、単一過大荷重負荷後に生じるき裂進展の遅延挙動に及ぼす板厚の影響を示したものである。この結果は、き裂長さが約 7mm の時点（両板厚試験片とも $da/dN \approx 8 \times 10^{-7}$ m/c のき裂進展速度領域）で過大荷重を負荷した場合のものであるが、図より、薄い試験片の方が遅延繰返し数はより大きく、また同一板厚の場合、試験片表面の遅延繰返し数は内部のそれより大きいことがわかる。この板厚依存性は、とくに $r = 2.5$ の場合に顕著である。これらの遅延挙動の板厚依存性や試験片表面と内部での挙動の違いに対しても、き裂進展抵抗の高いせん断縁の形成挙動が密接に関係しているように思われた。なお、金属材料の場合にも、本研究で得られた結果と同様な遅延挙動の板厚依存性が報告されている。^{10), 18)}

3・3 二段二重変動荷重下のき裂進展の遅延挙動

高分子材料の二段二重応力下降試験においても応力下降直後にき裂進展の遅延が生じることはすでに報告した通りである。³⁾ ここでは、この場合の遅延挙動に対する板厚効果を検討した。

Fig. 8 および Fig. 9 は、それぞれ、板厚 3mm および 8mm の試験片について、二段二重応力下降試験におけるき裂進展の遅延挙動を示したものである。図中の ΔN は高応力 (σ_1) から低応力 (σ_2) への荷重変動後の繰返し数、 Δa は荷重変動後のき裂進展量（いずれも表面での測定値）である。また、これらの図には比較のため低応力を一定振幅で繰返した場合のき裂進展挙動も示している。両図より、いずれの板厚の試験片においても応力下降直後からき裂進展の遅延が生じているが、厚板試験片のき裂はわずかながらも進展しているのに対し、薄板試験

片のき裂は完全に停止していることがわかる。このような遅延の程度は薄板試験片の方が顕著であることが認められたが、この傾向は前述の単一過大荷重の場合と一致する。Fig. 10 は、板厚 3mm の試験片について、Fig. 8 と同じ負荷条件下での試験片表面と内部における遅延挙動を比較したものである。試験片内部よりも表面の方がより顕著な遅延を生じていることがわかる。この傾向も単一過大荷重の場合と同様である。

4 結 言

板厚の異なるポリカーボネート板状試験片を用いて、一定荷重振幅試験、単一過大荷重試験および二段二重変動荷重試験を実施し、疲労き裂進展挙動に及ぼす板厚の影響を検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- 1) 一定荷重振幅下の疲労き裂進展速度は、低 ΔK 領域において板厚の減少とともに低下する。
- 2) 試験片表面でのひずみゲージ法により検出されるき裂開閉口挙動は試験片板厚の影響をほとんど受けない。
- 3) 試験片表面層に形成されるせん断縁の板厚に占め

Fig. 8. Crack retardation on the specimen surface under two-step loading in 3mm thick specimen.

Fig. 7. Effect of specimen thickness on the crack retardation after applying a single peak overload.

Fig. 9. Crack retardation on the specimen surface under two-step loading in 8mm thick specimen.

Fig. 10. Crack retardation both on the surface and in the interior of the specimen under two-step loading in 3mm thick specimen.

る割合は試験片板厚の減少とともに増大する。上記のような疲労き裂進展速度の板厚依存性はこのようなせん断縁の形成に起因しているものと理解される。

4) 単一過大荷重負荷時に生じるき裂進展量 (加速進展量) は板厚の薄い場合の方がより小さい。この結果もせん断縁の影響によるものと思われる。

5) 単一過大荷重負荷後あるいは二段二重の応力下降後に生じるき裂進展の遅延挙動に対しても板厚依存性が認められる。すなわち、薄い試験片の方が遅延の程度が大きく、また同一板厚の場合、試験片表面での遅延の方が内部でのそれより顕著である。

終わりに、本研究を行うにあたり、実験に協力された当時愛媛大学工学部学生 of 金集弘明君、水野寛人君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) R. Whitzberg, "DEFORMATION AND FRACTURE MECHANICS OF ENGINEERING MATERIALS", p.579 (1989) John Wiley & Sons.
- 2) 白石哲郎, 曾山義朗, 森慎之助, 材料, **34**, 406 (1985).
- 3) 白石哲郎, 曾山義朗, 森慎之助, 材料, **35**, 152 (1986).
- 4) T. SHIRASHI and Y. SOYAMA, "FATIGUE CRACK ACCELERATION AND RETARDATION IN GLASSY POLYMERS DUE TO A SINGLE PEAK OVERLOAD", Proc. KSME/JSME Joint Conf., FRACTURE AND STRENGTH '90, 370 (1990).
- 5) 白石哲郎, 森 慎之助, 曾山義朗, 材料, **39**, 933 (1990).
- 6) M. Parvin and J. G. Williams, Int. J. Frac., **11**, 963 (1975).
- 7) 成沢郁夫, "高分子材料強度学" (横堀武夫監修), p.189 (1982) オーム社.
- 8) G. Pitman and I. M. Ward, J. Mat. Sci., **15**, 635 (1980).
- 9) L. P. Pook, Int. J. Frac. Mech., **4**, 295 (1968).
- 10) 戸梶恵郎, 安藤善司, 森川邦彦, 材料, **29**, 808 (1980).
- 11) W. Elber, ASTM STP486, 230 (1971).
- 12) 白石哲郎, 黒島俊哉, 曾山義朗, 材料, **37**, 795 (1988).
- 13) 白石哲郎, 荻山博之, 佃 等, 材料, **46**, 1255 (1997).
- 14) F. J. Pitoniak, A. F. Grandt, L. T. Montulli and P. F. Packman, Engng. Fract. Mech., **6**, 663 (1974).
- 15) D. H. Banasiak, A. F. Grandt and L. T. Montulli, J. Appl. Polym. Sci., **21**, 1297 (1977).
- 16) Y. W. Mai, Int. J. Frac., **15**, R103 (1979).
- 17) Y. Imai, T. Takase and K. Nakano, J. Mater. Sci., **24**, 3289 (1989).
- 18) 戸梶恵郎, 安藤善司, 今井利雄, 森川邦彦, 材料, **31**, 51 (1982).