

PC 切欠き材の片持ち回転曲げによる疲労挙動

内田 武*・大和 政弘**

Cantilever-type Rotating Bending Fatigue Behavior of PC Notched Specimen

Takeshi UCHIDA* and Masahiro YAMATO**

In the research, it doesn't influence the fatigue limit in PC that is the testing material too much, the acting minute and drill hole processing is given as a crack generation starting point, and the crack progress behavior is observed continuously with cantilever-type rotating bending fatigue tester. As a result, it reports on research results of the progress behavior of the obtained fatigue crack. First of all, the diameter and the depth of notch materials were investigated. The diameter and depth became, the fatigue limit of notch materials when both were 0.1mm became 11MPa, and the fatigue limit of the smooth specimen was 14MPa. At this time, the notch coefficient β was 1.27. It was confirmed that the surface length that the influence of the drilled hole is lost. It was between 0.36~0.55 when the aspect ratio in the fracture cross section in the smooth specimen was investigated. It was 0.21mm that the surface length that the influence of the drilled hole is lost in consideration of 0.1mm of the drilled hole in depth. The result of the progress behavior of the crack is shown. The crack has progressed greatly as it approaches breaking regardless of the stress. Especially, the crack has progressed rapidly in the vicinity of breaking. Next, when the stress grows, the crack growth rate grows, too. Therefore, it is thought that there is a stress dependency at the crack growth rate. It is possible to approximate by the straight line in each stress when the crack growth rate and the width of the stress intensity factor change are taken in the graph by the double logarithm, and it exists in the proportion. When the straight line recurred by one regardless of the stress, validity is admitted, and it is thought that the progress behavior of the fatigue crack by cantilever-type rotating bending of PC can be arranged by ΔK though there are a few differences.

Key Word : Plastics, PC, Cantilever-type rotating bending fatigue, Notched specimen, Fatigue life, Macrofractography

1. 緒 言

プラスチック材料は第二次世界大戦後から本格的に使用され始め、産業の高度成長期に伴う有機合成化学の発展、既存材料のアロイ化や複合化技術の貢献により現在の地位を確立した。最近では、従来の汎用プラスチックよりも機械的性質を改善させたエンジニアリングプラスチック（エンブラ）が次々と登場している。これらは、軽量化による燃費改善での環境負荷低減、高性能化、一体成形などによる加工工程削減、その他に防錆性・無潤滑・低騒音、高い比強度を持つことから構造材料、機械部品材料など過酷な環境下でも積極的に使用されるようになった。今後さらに、より強力な複合材としてだけでなく、リサイクル性や加工性などの面からもプラスチック単体の需要が高まるものと見られ⁽¹⁾、その性質の向上が要求されるのは必至である。

プラスチック材料が、今日あらゆる分野で使用・開発されているのは、軽量であり、成形性、着色性がよい等という特徴を持っており、また、複合化・新機能付加が他の材料に比べて比較的容易であるためである。要求が多くなっ

ている現在、この材料が持つ可能性と期待は大きいと思われる。プラスチック材料そのものは、新材料と言えなくなっているが、単体材料の改質・新機能付加・複合化ならびに、新しい分子構造を持つプラスチックなどの研究は、多くの研究者が関わっている。

今回試験片として使用するプラスチックの一種であるポリカーボネート樹脂（以後 PC）は、1958 年の商業生産開始以来、その優れた特性、透明性、耐衝撃性、耐熱性、寸法安定性、自己消火性とそれらのバランスの良さにより、フィルム、シート、自動車用途、コンピュータハウジング、DVD 等の光ディスク、自動車窓ガラス等、次々に革新的な用途に採用⁽²⁾ され、需要を拡大してきた。

実際、機械・構造物の破損例の約 80%が、直接的あるいは間接的に疲労現象が原因とされている。疲労破壊は、一回の負荷では破断しない応力でも、繰返し負荷がかかることで破断してしまう破壊のことである。金属材料は疲労に関する多くの研究が行われ、今日もなお継続的な研究が行われている。しかし、プラスチック材料を金属や合金などの代替材料としての工業用途あるいは構造用途に利用する際には、強度や耐久性について調査する必要がある。そのため、プラスチック材料の強度的特性の評価、特に疲労挙動に関しては検討の余地が多分に残されている。

機械や構造物などが受ける外力や変形は複雑に変動するが通常である。しかし、疲労試験では材料の力学的応答や

* 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

** 専攻科、生産工学専攻 2 年

(Advanced Production Engineering Course, 2nd grade)

基本的な疲労強度特性をあきらかにするために、単純な応力や変形の連続負荷が用いられている。ここでの代表的な疲労試験機には、回転曲げ疲労試験機、平面曲げ疲労試験機および引張・圧縮疲労試験機など^{(3)~(5)}がある。

本研究では、透明性に優れている PC を試験材料とし、平滑試験片の疲労限度にそれほどの影響を与えず、き裂発生起点として作用する微小ドリル穴加工を施し、試験機は片持ち回転曲げ疲労試験機を用いて、片持ち回転曲げによるき裂進展挙動を連続観察するものである。

2. 試験片および試験方法

2.1 試験片

材料は非晶性で熱可塑性樹脂である PC (原料：帝人化成(株)，加工：テイヨー(株)) で、表 1 に機械的性質^{(6)~(8)}、図 1 に片持ち回転曲げ疲労試験片の形状・寸法を示している。試験片は直径 10mm の市場供給の透明丸棒から旋削加工された砂時計型である。今回この材料を採用したのは、透明であるため、き裂の進展挙動が確認しやすいためである。

試験片は、旋削加工後、試験片湾曲部を中心に #360~2000 のスポンジ研磨材および耐水ペーパーで注意深く研磨し、最終研磨に 0.5 μ m のアルミナ水溶液で完全な透明に仕上げた。仕上げ後、今回、試験片は小穴材を使用するため、ミニボール盤を用いて、試験片の湾曲部中心に微小ドリル穴加工を施した。その後、旋削加工および研磨作業によって生じた残留応力が試験結果に与える影響を考え、焼きなまし処理を行い、残留応力を取り除いた。焼きなまし処理温度は PC の粘弾性測定⁽⁸⁾、⁽⁹⁾ で出たガラス転移温度約 141 $^{\circ}$ C (414K) と試料の熱変形温度の 132 $^{\circ}$ C を考慮して、132 $^{\circ}$ C とした。熱処理工程は図 2 に示したように、まず

100 $^{\circ}$ C/hr の昇温速度で 132 $^{\circ}$ C (405K) まで加熱し、132 $^{\circ}$ C で 10 時間保持した。その後、-10 $^{\circ}$ C/hr の降温速度で室温まで炉内で徐冷し、実験までその状態を保持した。

2.2 試験方法

疲労試験は、図 3 に示しているインバータにより繰返し速度が変更できる 4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機 (ホーコス(株)) を用いて、温度 23 $^{\circ}$ C・繰返し速度 20Hz で実施した。図 4 は、試験片取付け部の写真である。

今回、き裂の進展挙動を連続観察するために、メチルセルロース水溶液 (3wt%) にエタノールを加えたものを用いて、き裂のレプリカを取ることで連続観察を実施した。き裂長さは、円周に沿った長さのレプリカを写し取った。き裂長さ測定には顕微鏡を使用した。エタノールを加える割合やレプリカ法の検定は、後述の試験結果で述べる。

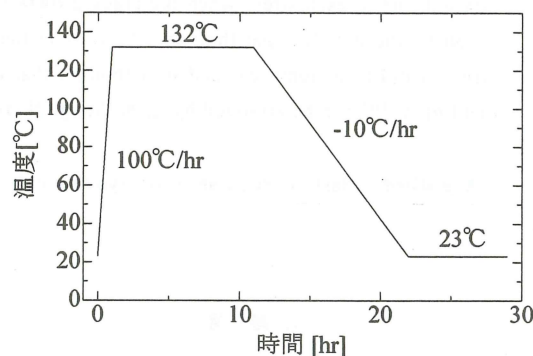


図 2 PC 疲労試験片の熱処理工程

表 1 PC の機械的性質

ヤング率 [GPa]	引張強さ [MPa]	耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	曲げ強さ [MPa]	伸び [%]	比重
1.5	54.9	65.1	95	87.9	1.2

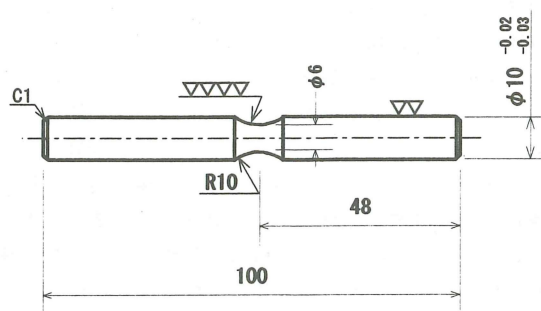


図 1 片持ち回転曲げ疲労試験片の形状・寸法



図 3 4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機

3. 試験結果および考察

3. 1 切欠き材の直径・深さおよび切欠き係数

図5は切欠き材の応力と繰返し数の関係 (S-N 曲線) を示している。図5の矢印を付けた試験片は繰返し数が 10^7 回を超えても破断しないため、試験を中止したものである。平滑材の曲線は、以前試験された繰返し速度 20Hz のデータ^{(10), (11)} について曲線回帰したものである。

き裂進展の連続観察は平滑材で行うのが最も良いが、き裂発生を観察することが困難なため、切欠き材を使用する。図5より、平滑材の曲線に比べて、切欠き材の疲労寿命は短いことがわかり、切欠き効果があることがわかる。平滑材の疲労限度は約 14MPa で、切欠き材の疲労限度は約 11MPa であった。このとき、き裂が切欠きから発生し、疲労限度にそれほど影響を与えないドリル穴の調査を行ったところ、切欠き材の直径と深さは、ともに 0.1mm であった。図5に示した切欠き材の試験結果は、直径と深さが全て約 0.1mm のデータである。

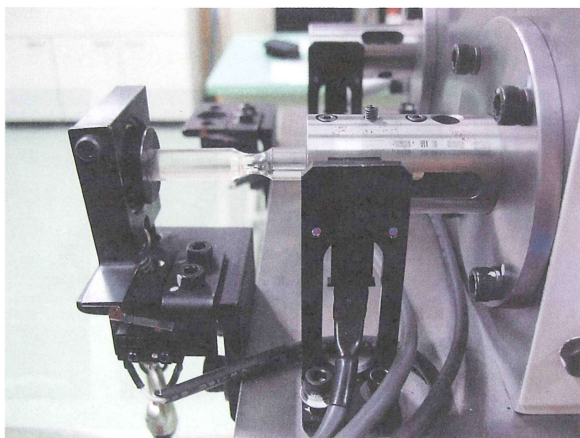


図4 片持ち回転曲げ疲労試験片の取付け部

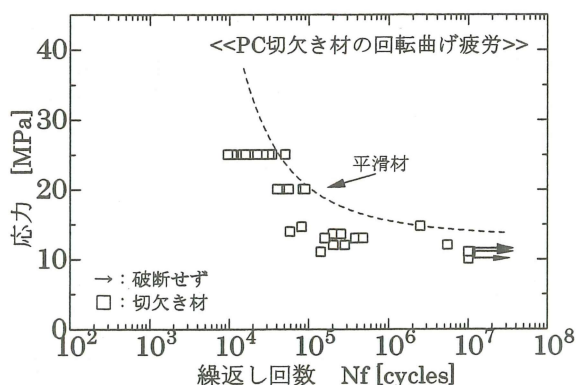


図5 PC 切欠き材の S-N 曲線

ここで切欠き係数とは、平滑材の疲労限度を切欠き材の疲労限度で割った値なので、切欠き係数 β は

$$\beta = \frac{14}{11} = 1.27$$

となる。

3. 2 レプリカ法の検定

き裂の連続観察を行う上で、き裂の確認をする必要がある。そこで、図6にメチルセルロース水溶液にエタノールを混ぜたものが、き裂を写し取ることができるかの確認を行った写真を示している。ここで、メチルセルロース水溶液の乾燥を早めるためにエタノールを加えることにした。試験片に影響を与えず乾燥を早めるエタノールの割合を調査したところ、エタノールの割合は全体の約 25% であった。

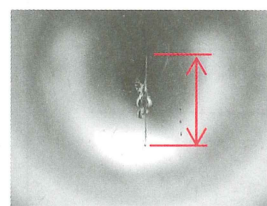
図6より、実際のき裂長さとしてレプリカのき裂長さを測定したところ、5.52mm と 5.46mm であった。レプリカ法で実際のき裂の約 99% 写し取ることができているので、今回はこの方法でき裂の連続観察を実施することにした。

3. 3 アスペクト比

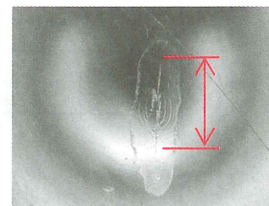
アスペクト比とは、破断面における鏡面領域の深さ h と鏡面領域の表面長さ S との比である。図7に実際の破断面における鏡面領域の深さ h と表面長さ S を示している。

図8は、アスペクト比と振幅応力の関係を示している。アスペクト比は以前の平滑材の破断面から確認したものである。アスペクト比は、低い応力では、ほぼ同程度であるが、高い応力では少しばらつきが見られるが、ほぼ 0.36~0.55 の間にあることがわかる。アスペクト比の平均を求めたところ、0.469 であった。これにより、応力が変化すると鏡面領域の割合は変化するが、アスペクト比は大きく変化しないことがわかった。

今回実施するき裂の連続観察では、ドリル穴はき裂発生起点としての役割であるが、き裂成長の初期段階では、ドリル穴による応力集中の影響が考えられる。したがって、ドリル穴の影響を考慮しなくてすむき裂長さの進展挙動を観察対象とするため、アスペクト比を確認することでドリル穴の影響のないき裂の表面長さ S を見積もることができる。ドリル穴の深さが 0.1mm、アスペクト比の平均が 0.469



(a) 実際のき裂



(b) レプリカ採取したき裂

図6 き裂のレプリカ採取の検定

から判断すると、ドリル穴の影響がなくなる表面長さ S は

$$S = \frac{0.1}{0.469} = 0.21\text{mm}$$

となり、これ以上となったものが、き裂の進展挙動の調査対象となる。

3. 4 小穴材のき裂進展挙動

き裂進展調査は 3 つの応力レベルで設定し、疲労限度付近の 13MPa, 繰返し数が 10^4 回を超える 25MPa, それらの中間として 20MPa とした。

図 9 は、振幅応力 20MPa 時に採取したレプリカであり、き裂成長の例を示している。破断寿命 N_f は 91770 回で、それを 1 としたとき、レプリカ採取時の相対繰返し数比は、(a) が 0.52, (b) が 0.65, (c) が 0.72, (d) が 0.82, (e) が 0.89 であった。相対繰返し数比が大きくなるにつれて、き裂長さが成長しており、き裂は微小ドリル穴の両端から成長していることがわかる。

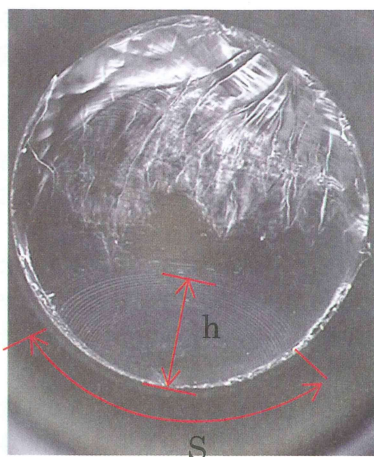


図 7 破断面上の各部寸法 (PC 平滑材)

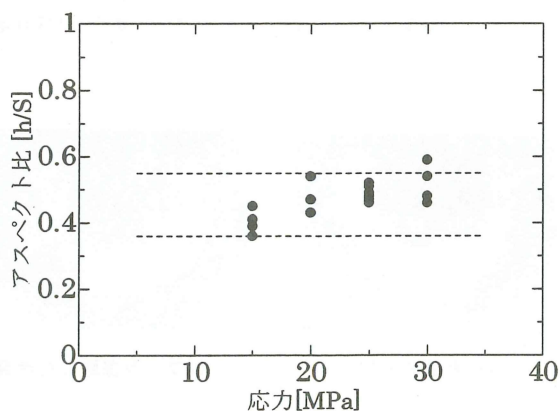


図 8 アスペクト比と振幅応力の関係 (PC 平滑材)

図 10 は、き裂長さと繰返し数との関係で、13MPa (図中●印), 20MPa (図中▲印), 25MPa (図中□印) のデータを示している。これにより、応力の高いところでは、巨視的き裂が成長するまでの繰返し数はほぼ同程度であるが、応力の低いところでは、き裂が成長するまでの繰返し数にばらつきがあることがわかる。

図 11 は、き裂長さと相対繰返し数比との関係で、13MPa (図中●印), 20MPa (図中▲印), 25MPa (図中□印) のデータを示している。横軸は破断した繰返し数を 1 とする相対繰返し数にすると、応力での違いが見えるようになる。高い応力では、相対繰返し数比の約 0.5~0.7 ぐらいから、巨視的き裂が成長していることがわかる。これは、延性的なプラスチックのひずみ軟化は、疲労破壊までの負荷の全繰返し回数のなかで、比較的初期段階において急激に生じることが多い⁽⁴⁾ ことによるもので、その後は、ゆるやかに進行するものと考えられる。

13MPa ではき裂成長初期段階の観察データはないが、応力が小さい方が疲労寿命後半に一気に破断までき裂が進展していることがわかる。このことより、低い応力の方が、発生き裂に対して敏感だと考えられる。

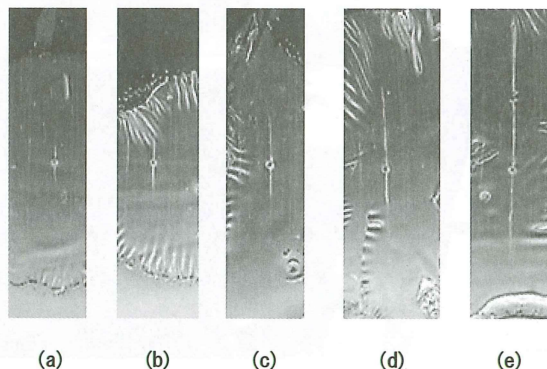


図 9 PC 切欠き材のき裂成長例 (20MPa, レプリカ)

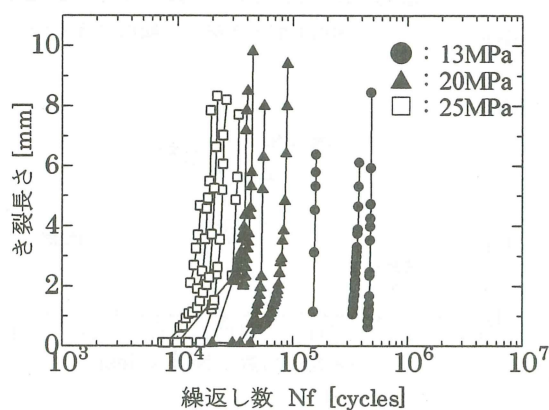


図 10 PC 切欠き材のき裂長さと繰返し数の関係

図12にき裂進展速度と相対繰返し数比との関係として、13MPa (図中●印)、20MPa (図中▲印)、25MPa (図中□印) のデータを示している。図中の黒線は13MPa、青線は20MPa、赤線は25MPaの回帰曲線である。

低い応力ではデータにまとまりがあるが、25MPaを見ると、相対繰返し数比が大きくなるにつれて、データに大きなばらつきが見られる。3つの応力とも、相対繰返し数比が1、すなわち破断に近づくにつれて、き裂進展速度は大きくなっていることがわかる。また、高い応力では相対繰返し数比の早い段階からき裂進展速度が大きいのにに対し、低い応力では相対繰返し数比の後半からき裂進展速度が大きくなっていることがわかる。さらに、応力が高いほど、相対繰返し数比が大きくなるにつれて、き裂進展速度の差も大きくなっている。このことから勘案すると、き裂進展速度には応力依存性があるものと考えられる。

図13はき裂進展速度と ΔK (応力拡大係数変化幅) との関係で、13MPa (図中●印)、20MPa (図中▲印)、25MPa (図中□印) のデータを両対数で示している。

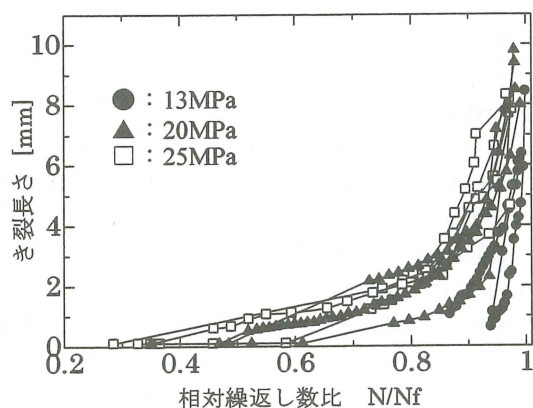


図11 PC切欠き材のき裂長さと相対繰返し数比の関係

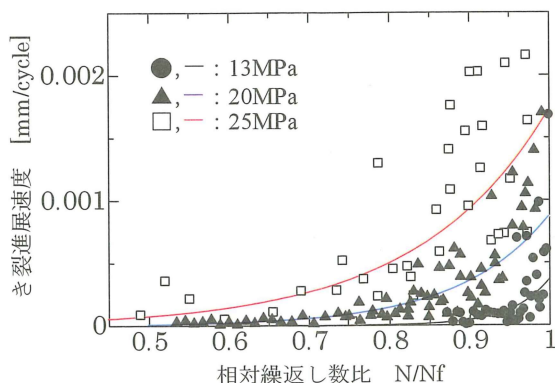


図12 PC切欠き材のき裂進展速度と相対繰返し数比の関係

今回の応力拡大係数 K は便宜的に

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$$

を利用する。ここで、 σ は応力、 a はき裂半長である。

図13より、き裂進展速度が大きくなるにつれて、 ΔK も大きくなっていることがわかる。

多くの金属・非鉄金属材料においてき裂進展速度 (da/dN) と応力拡大係数変化幅 (ΔK) の間には次の関係がある。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

ここで、 C 、 m は材料、環境などにより決まる定数である。上式はパリス則と呼ばれるもので、パリス則が成立するのは、安定き裂成長段階のき裂であり、今回もパリス則に従うものとして直線回帰を行った。ここで、図13の回帰直線の黒線は13MPa、青線は20MPa、赤線は25MPaの場合を

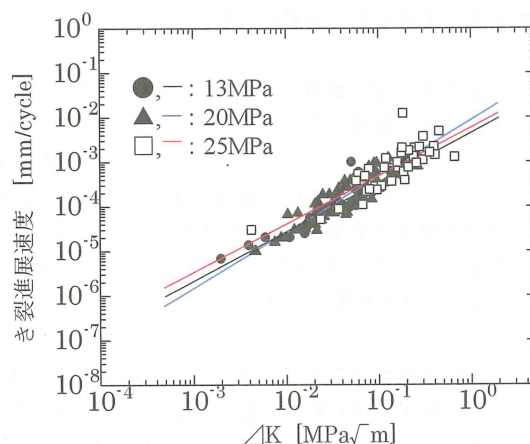


図13 PC切欠き材のき裂進展速度と ΔK の関係 (個別回帰)

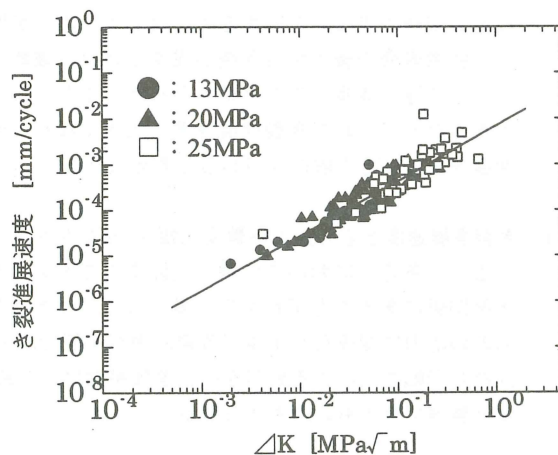


図14 PC切欠き材のき裂進展速度と ΔK の関係 (総合回帰)

示している。13MPa の直線の傾きは 1.11, 20MPa の傾きは 1.26, 25MPa の傾きは 1.08 であることがわかった。各直線の傾きに多少の違いはあるが、全てのデータを 1 本の回帰直線で表示することにする。

次に、全てのデータを 1 本の回帰直線で表示したものが図 14 で、回帰直線の傾きは約 1.20 (相関係数 0.916) となった。データのばらつきは、試験片の個体差によるものと考えられる。多少のばらつきはあるものの、応力に関係なく 1 本での直線回帰には妥当性が認められる。すなわち、PC の片持ち回転曲げによる疲労き裂の進展挙動は、 $\angle K$ により整理されるものと考えられる。

4. 結 言

今回、非晶性で透明性に優れている PC を試験材料とし、疲労限度にそれほどの影響を与えず、き裂の発生起点として有効な微小ドリル穴加工を施した切欠き材を用いて、片持ち回転曲げ疲労試験を実施した。これにより得られた、疲労き裂の進展挙動の調査結果を以下に示す。

1. き裂進展の連続観察は平滑材で行うのが最も良いが、き裂発生を観察することが困難なため、切欠き材を使用する。微小ドリル穴の直径と深さは、共に 0.1mm であったときの切欠き材の疲労限度は 11MPa となり、平滑材の疲労限度は 14MPa であった。このとき、切欠き係数 β は 1.27 であった。このことから、切欠きが疲労寿命に与える影響は小さいといえる。
2. 平滑材破断面でのアスペクト比は、応力に変化することで、鏡面領域の割合は変化するが、0.36~0.55 の間にあることがわかった。アスペクト比の平均は 0.469 で、ドリル穴の深さ 0.1mm を考慮すると、ドリル穴の影響がなくなる表面長さは 0.21mm であった。
3. き裂の進展挙動は、応力の高い方は、巨視的き裂成長は疲労寿命の半ばから始まるのに対して、応力が低い方が疲労寿命の後半からき裂が成長し始め、破断に近づくと急速に成長することがわかった。また、応力が大きくなるにつれてき裂進展速度も大きくなり、き裂進展速度には応力依存性があると考えられる。
4. き裂進展速度と応力拡大係数変化幅 ($\angle K$) をグラフ化すると、各応力において直線で近似することができ、比例関係にあることがわかる。多少のばらつきはあるものの応力に関係なく 1 本で直線回帰が可能で、PC の片持ち回転曲げによる疲労き裂の進展挙動は、 $\angle K$ により整理できるものと考えられる。

参考文献

- (1) 例えば 高野 菊雄；プラスチック, 4月号, (1997), pp.10~15, 工業調査会.
- (2) 福井 博之；プラスチック, 1月号, (2009), p69, 工業調査会.
- (3) 小川 俊夫；工業技術者の高分子材料入門, (1993), 共立出版.
- (4) 成澤 郁夫；プラスチックの機械的性質, (1994), シグマ出版.
- (5) 村上 理一, 金 允海, 楠川 量啓；材料の強度と破壊の基礎, (2005), pp74~77・83・84, ふくろう出版.
- (6) 内田 武・江藤 友昭；ポリメチルメタクリレート (PMMA) の破壊強度に及ぼす負荷速度の影響, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.31, (1998), pp.15-22.
- (7) 内田 武・池田 哲朗；PMMA の破壊じん性値およびき裂進展挙動に及ぼす変位速度の影響, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.33, (2000), pp.17-27.
- (8) 内田 武・呉 奉春；PMMA ならびに PC の破壊じん性値および破壊エネルギーに及ぼす変位速度の影響, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.35, (2002), pp.9-18.
- (9) 内田 武・山内 康平；PMMA の引張・圧縮疲労挙動に関する研究 (第 2 報：切欠き材の疲労寿命およびき裂進展挙動), 北九州工業高等専門学校研究報告, No.35, (2002), pp.19-25.
- (10) 内田 武・小西 雄一郎；PMMA の片持ち回転曲げによる疲労挙動に関する研究 (第 1 報：平滑材の疲労寿命・表面温度・破断面形態), 北九州工業高等専門学校研究報告, No.37, (2004), pp.13-20.
- (11) 内田 武・坂本 洋；PMMA および PC 平滑材の片持ち回転曲げ疲労挙動, 北九州工業高等専門学校研究報告, No.40, (2007), pp.7-14.

(2009年10月9日 受理)