熱可塑性プラスチックの平滑材と切欠材の疲労強度* (PEEKの場合)

西谷 弘 信*¹, 野口 博 司*¹
山口 照 敬*², 金 允 海*²

Fatigue Strength of Plain and Notched Specimens of Thermoplastics (In the Case of Polyetheretherketone)

Hironobu NISITANI, Hiroshi NOGUCHI,
Terutaka YAMAGUCHI and Yun-Hae KIM

In this paper, rotating-bending fatigue tests for polyetheretherketone (PEEK) were carried out to investigate the fatigue characteristics of plain and notched specimens at room temperature. The results were discussed using linear notch mechanics. In the case of the plain specimen, fracture always occurs from defects and the crack growth rate is very high. The fatigue crack initiation of this material is of the point-initiation type and the fatigue strength is very sensitive to a notch. The fatigue strength of an arbitrarily notched specimen of this material will be estimated from the present results rearranged based on linear notch mechanics.

Key Words: Fatigue, Thermoplastics, Notch, Linear Notch Mechanics

1. 緒 言

最近では、機械・構造物に使用される構造材料として、金属ばかりでなくプラスチックや複合材料なども多用される傾向にある。そのため熱可塑性プラスチックの開発は盛んであり、耐熱性、耐薬品性、耐衝撃性があり、高強度であるスーパーエンジニアリングプラスチックが次々に開発されている。その中でも、結晶性の熱可塑性樹脂であるポリエーテルエーテルケトン(PEEK)は、特に耐疲労性に優れた材料として注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。本論文では、PEEKについて、平滑材と切欠材の回転曲げ疲労試験を行い、その疲労特性を明らかにした。平滑材ではドリル穴を試験片に設けて、き裂の発生および伝ばの挙動を検討し、切欠材では、種々の切欠半径、切欠深さを有する60°V形切欠きを設けて、実験を行った。そして著者の一人が提唱している線形切欠力学の概念を用いてその結果を整理した。高分子材料およびFRPに対して、線形切欠力学の考え方を適用したものは、静的強度特性についてはいくつがあるか^{(3)~(14)}、疲労強度特性について適用した

ものはほとんどない。

2. 材料、試験片および実験方法

使用した素材は、直径10mmの押出し棒の熱可塑性樹脂であるポリエーテルエーテルケトン(PEEK)である。素材を200°Cで2時間焼なましした後、試験片を製作し実験に供した(ガラス転移温度143°C、融点334°C⁽¹¹⁾)。素材焼なまし後の引張試験における応力-ひずみ線図を図1に示す。また表1はその結果をまとめたものである。

試験片は、図2に示す平滑材($\rho=20$ mm:これを平滑材とみなす)と切欠材を用いた。切欠材は最小断面の直径($d=5$ mm)を一定にして、切欠深さ(t)を0.2, 0.5, 2mmと変え、それぞれについて切欠半径(ρ)を0.1, 0.3, 1.0mmとして実験を行った。また、 $t=0.5$ mmの切欠材については $\rho=0.05$ mmの試験片も用いた。それらの切欠底における応力集中係数を表2に示す。なお K_t の計算には体積力法によって得られた高精度な値を用いた⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。平滑材においては一部、き裂の発生・伝ば挙動を見るために表面にドリル穴を設けた試験片についても実験を行った。

平滑・切欠試験片は旋削の後、表面きずを極力なくするために、ペーパー仕上げとアルミナおよびダイヤモンド

* 平成2年4月1日 第67期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成2年12月20日。

*¹ 正員、九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

*² 正員、九州大学大学院。

ドペーストによるバフ研磨を行った。さらに試験片製作時における加工の影響を除去するため、200°Cで2時間の焼なましを行った。

疲労試験には小野式回転曲げ試験機（容量15 N・m、回転数2500 rpm）を用いた。応力としては、最小断面における公称曲げ応力を用いた。

平滑材の試験片表面状態の変化の観察には、レプリカ法を用いた。

3. 実験結果および考察

図3に平滑材のS-N曲線を示す。プラスチックは高応力、高回転数の疲労では発熱する場合⁽²⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾があるので、 $\sigma=83$ MPaの疲労試験下において、連続運転中、赤外線顕微鏡で温度測定を行ったが、この場合

図1 応力-ひずみ線図

(a) 平滑材

(b) 切欠材 (D, ρ は表2に示す)

図2 試験片形状

全く温度上昇はみられなかった。また、本材料には折れ点がないとされている⁽¹⁾⁽²⁾ので、 10^7 回の破断応力は外挿によって求めた。

図4に切欠試験片のS-N曲線を示す。その結果をまとめたのが表3である。ここで 10^7 回の繰返しにおいても未破断であった試験片の切欠底を光学顕微鏡で観察した結果、いずれの切欠深さ t においても、 $\rho=$

表1 機械的性質

Ultimate tensile strength	102 MPa
0.2% proof stress	77.4 MPa
Elastic modulus	3500 MPa
Contraction in area	58.2 %
Elongation	27.5%

表2 切欠材における D, T, ρ, K_t の値

D	t	ρ	K_t
5.4	0.2	1.0	1.49
		0.3	2.13
		0.1	3.20
6	0.5	1.0	1.60
		0.3	2.48
		0.1	3.95
		0.05	4.48
9	2.0	1.0	1.63
		0.3	2.62
		0.1	4.20

t : Notch depth (mm)

ρ : Notch root radius (mm)

K_t : Stress concentration factor

図3 平滑材のS-N曲線

1.0 mm, 0.3 mm の試験片には、切欠底にき裂らしきものは認められなかったが、 $\rho=0.1$ mm, および $\rho=0.05$ mm ($t=0.5$ mm) の試験片にはき裂が観察されるものがあつた。図 5 にき裂が認められた試験片 ($\rho=0.1$ mm) の切欠底の一部を示す。

本材料では、明確な疲労限度は認められないので、 10^7 回に対する時間強度を疲労限度に対応するものとみなして σ_w で表し、炭素鋼と同様に、き裂発生に対する疲労限度 σ_{w1} と停留き裂の伝ば限界に対する疲労限度 σ_{w2} を定義して⁽¹⁹⁾ 結果を整理する。

図 3 および図 4 と切欠底の観察結果から σ_{w1} と σ_{w2} を決定し、それらを $1/\rho$ に対してプロットすれば図 6 のようになる。 $t=0.5$ mm, $\rho=0.1$ mm, 0.05 mm での結果からわかるように、 t = 一定のもとにおける σ_{w2} は $1/\rho$ にかかわらずほぼ一定となるので、 $t=0.2, 2$

mm に対しても σ_{w2} は一定であると仮定すると、分岐点は切欠深さ t にかかわらず約 0.15 mm になる。この値は、炭素鋼焼なまし材に比べてかなり小さい⁽¹⁹⁾。また、平滑材 ($\rho=20$ mm) の疲労限度が切欠材の σ_{w1} から推定される平滑材の σ_{w1} の値に比べ低くなっているのは、切欠半径 ρ が大きくなるに従って危険にさらされる表面積が広くなり、疲労限度が材質のばらつきに起因する影響を強く受けるためであると考えられる⁽²⁰⁾。図 7 に平滑材の破面の一例を示す。破断の起点近傍の写真からわかるように、この場合欠陥の影響が大きい。図 7 (a) のような内部を破壊の起点とする破

表 3 試験片の主要寸法と回転曲げ疲労限度

t	ρ	Symbols	K_t	σ_{w1}	σ_{w2}	$K_t\sigma_{w1}$	$K_t\sigma_{w2}$
0.25	20	○	1.04	66.0	—	68.6	—
0.2	1.0	■	1.49	56.8	—	84.6	—
	0.3	▲	2.13	40.7	—	86.7	—
	0.1	▼	3.20	29.4	34.3	94.1	109.8
0.5	1.0	□	1.60	54.9	—	87.8	—
	0.3	△	2.48	35.3	—	87.5	—
	0.1	▽	3.95	24.5	26.9	96.8	106.3
	0.05	◇	4.48	22.1	26.5	99.0	118.8
2.0	1.0	■	1.63	52.4	—	85.4	—
	0.3	▲	2.62	33.3	—	87.2	—
	0.1	▼	4.20	22.1	24.5	92.8	102.9

t : Notch depth (mm)

ρ : Notch root radius (mm)

K_t : Stress concentration factor

σ_{w1} : Limiting stress for crack initiation (MPa)

σ_{w2} : Limiting stress for fracture in the range of non-propagating crack existing (MPa)

図 4 切欠材の S-N 曲線

図 5 未破断試験片の表面状態

面は、 $\rho=1.0$ mm の切欠材の一部においてもみられたが、 $\rho=0.3, 0.1, 0.05$ mm の切欠材では全くみられなかった。このことを考慮して欠陥のない健全な平滑材の疲労限度の推定値(約 85 MPa)を基準にすれば、 σ_{w1} の値は、 $K_t=K_f$ の線にかなり近くなる(K_t : 応力集中係数, K_f : 切欠係数)。図 6 には $t=2$ mm の $K_t=K_f$ の線だけ示した。以上のことから、本材料は切欠きに敏感であるといえる。

以上のデータを線形切欠力学の考え方に従って整理

図 6 σ_{w1}, σ_{w2} と ρ との関係

(a) 破断起点近傍

(b) 最終破断近傍

図 7 平滑材の破断 ($\sigma_a=73.5$ MPa, $N_f=2 \times 10^6$)

すれば図 8 のようになる。図 7 の $\sigma_{w1}-1/\rho$ の関係では切欠深さの影響が現れるが、図 8 では $K_t\sigma_{w1}$ および $K_t\sigma_{w2}$ と $1/\rho$ の関係が切欠深さと無関係に材料に固有な 1 本の曲線で表される。すなわち、切欠きをもつ PEEK において、き裂発生限界およびき裂伝ば限界で切欠底に繰返される最大弾性応力 $K_t\sigma_{w1}, K_t\sigma_{w2}$ は、試験片の切欠深さによらず一定となる。この図から PEEK の任意の切欠試験片の疲労強度が推定できる。

図 9 は、平滑材に直径 0.1 mm, 深さ 0.1 mm のドリル穴を設けた試験片の疲労き裂伝ば曲線である。この図からわかるように、き裂伝ば速度はかなり大きい。つまり、破断までの全寿命に対するき裂伝ば寿命の割合が小さく、全寿命はほとんどき裂が発生するまでの寿命で決まる。

ここではドリル穴のない平滑材でき裂の発生過程を見ようとしたが、図 8 に示すようにき裂伝ば寿命が全寿命に比べて十分小さいため不可能であった。そこで、

図 8 本材料の線形切欠力学による整理

図 9 疲労き裂伝ば曲線
($\sigma_a=69$ MPa, $N_f=2.12 \times 10^5$)

図 10 き裂の発生および初期成長
($\sigma_a = 73.5 \text{ MPa}$, $N_f = 3.7 \times 10^4$)

試験片表面で応力集中係数が最大となるように直径 0.2 mm、深さ 0.1 mm、先端角 $2\pi/3$ のドリル穴を設け⁽²¹⁾ 連続観察を行った。図 10 はその結果を示したものである。この図から、PEEK の疲労き裂発生過程は点発生的であることがわかる。このことは、図 8 にお

いて、 $K_t \sigma_{w1} \cong \sigma_{w0}$ (ただし、 σ_{w0} は欠陥のない健全材での平滑材の疲労強度) となり、PEEK が切欠きに対して敏感であることと対応している。

4. 結 言

他の熱可塑性樹脂に比べて疲労特性が優れている結晶性熱可塑性プラスチック、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) の平滑材および切欠材について、切欠深さおよび切欠半径を種々変えて回転曲げ疲労試験を行い、線形切欠力学の概念を用いて検討した結果、次の結論を得た。

(1) PEEK は、平滑材では欠陥から破断し、寿命にばらつきが大きく、その疲労強度 (10^7 回に対する時間強度) は切欠材の σ_{w1} から推定される健全な平滑材の疲労強度よりも低い。

(2) その健全な平滑材の疲労強度の推定値 σ_{w0} を基準にすれば、切欠材では $K_t \sigma_{w1} \cong \sigma_{w0}$ となる。また分岐点での切欠半径 ρ_0 の値は約 0.15 mm であり、かなり小さい。つまり、PEEK は切欠きに対してかなり敏感であるといえる。

(3) 全寿命に対するき裂伝ば寿命の割合が非常に小さく、き裂発生までの寿命が、全寿命の大半を占める。

(4) 線形切欠力学の概念によって導かれる評価基準によって本材料の任意の切欠試験片の疲労強度が推定可能となる。

文 献

- (1) 後藤, 工業材料, 33-1(1985), 80.
- (2) 平野・古江, 機論, 55-509, A(1989), 17.
- (3) 西谷・百武, 機論, 49-445, A(1983), 1071.
- (4) 百武・西谷, 機論, 50-453, A(1984), 888.
- (5) 百武・西谷, 機論, 51-462, A(1985), 478.
- (6) 百武・西谷, 機論, 51-465, A(1985), 1494.
- (7) 百武・西谷, 機論, 53-494, A(1987), 1893.
- (8) 百武・萩尾・西谷, 文献(2)の112ページ.
- (9) 百武・西谷・萩尾, 機論, 54-498, A(1988), 326.
- (10) 百武・西谷, 機論, 52-479, A(1986), 1683.
- (11) 金・村上・西谷, 機論, 56-523, A(1990), 582.
- (12) 金・村上・野々村・西谷・岡田, 機論, 56-531, A(1990), 2248.
- (13) KIM, Y-H, NISITANI, H., ほか 3 名, *Proc. KSME/JSME Joint Conf. (Fract. and Strength '90)*, (1990), 170.
- (14) 西谷・金・山口・野口, 機論, 57-539, A(1990), 1643.
- (15) 村上・野田・西谷, 機論, 48-430, A(1982), 800.
- (16) 西谷・野田, 機論, 51-463, A(1985), 775.
- (17) Nielsen, L. E., *Mechanical Properties of polymers and composites*, (1975), 294, Marcel Dekken.
- (18) 朝原・安藤・庄司, 材料, 23-245(1974), 122.
- (19) 西谷編, 疲労強度学, (1985), 13, オーム社.
- (20) 西谷・都野, 機論, 52-477, A(1986), 1200.
- (21) 野口・西谷・後藤, 機論, 54-501, A(1988), 977.