微視的き裂の発生と伝ばに関する統計的性質* (S45C 調質平滑材の回転曲げ疲労)

後藤 真 宏^{*1}, 柳 川 恭 廣^{*2}, 西 谷 弘 信^{*3}

Statistical Property on the Initiation and Propagation of Microcracks (Rotating Bending Fatigue of Heat-Treated 0.45 % C Steel Plain Specimens)

Masahiro GOTO, Yasuhiro YANAGAWA, and Hironobu NISITANI

The statistical property of the fatigue behavior was investigated for the heat-treated 0.45 % C steel plain specimens. The emphasis is to investigate separately the statistical properties of the initiation and propagation of microcracks through the successive observations on the specimen surface due to the plastic replica method. Results show that the Weibull distribution of the mixed type is well fitted to the crack initiation life distribution. On the other hand, the microcrack propagation life distribution and the crack length distribution are expressed as two-and three-parameter Weibull distribution, respectively.

Key Words: Fatigue, Carbon Steel, Heat-treatment, Microcrack, Surface Defect, Crack Initiation, Crack Propagation, Weibull Distribution

1. 緒 言

機械・構造物の信頼度を評価するうえで、疲労被害における統計的性質を把握することが重要である。このような理由から、平滑材の疲労試験を行いその結果を統計的に整理した研究は数多い^{(1)~(12)}。平滑材の寿命の大部分は、き裂の発生および微小き裂の伝ば寿命で占められる⁽¹³⁾ため、疲労被害の統計的検討を行う際に、き裂発生および微小き裂伝ばのそれぞれに対する統計的性質を調べることが必要と考えられる。

一方、使用条件が過酷な機械や構造物には調質材が多く使われているので、調質材の疲労特性を明らかにすることは実用上重要である。一般に、疲労強度は高強度材料ほど欠陥に対して敏感となるので、調質材の統計的性質を検討しておく意味は大きいと思われる。

微視的き裂の発生・伝ば特性の詳細な検討を行うには、同一領域内のき裂をその発生から伝ばまで連続的に追跡する必要がある。しかしながら、この種の研究は少なくデータの集積およびそれらに関する知識は十

分とは言えない。

本研究では、以上のことを考慮して、S45C 調質平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。そして、任意に選んだ試験片表面の複数の領域をレプリカ法により連続的に観察し、特に微視的き裂の発生および伝ばに注目して疲労被害の統計的性質を検討した。

2. 使用材料、試験片および実験方法

素材は市販の S45C 圧延丸棒(直径は約 19 mm)であり、それを 845°C (30 min 保持) で焼ならし、845°C (30 min 保持) で焼入れ、600°C (60 min 保持) で焼き戻した後試験片を製作した。表 1 に素材の化学成分を、表 2 に熱処理後の機械的性質を示す。図 1 は組織写真である。

図 2 に試験片の形状・寸法を示す。試験片製作後、試験片平行部の全面を 600 番シリコンカーバイドペーパーを用いて軸方向に研磨した。さらに、すべり帯の観察を容易にする目的で、電解研磨により表面を数 μm 程度取り除いた後実験を行った。

使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容量: 100 N·m, 3 600 rpm)である。

表面の疲労被害の観察およびき裂長さの測定はレプリカ法により行った。その際、試験片中央部の円周上

* 平成元年 4 月 3 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 10 月 3 日。

*¹ 正員、大分大学工学部 (〒870-11 大分市旦野原 700)。

*² 学生員、大分大学大学院。

*³ 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

からほぼ等間隔になるように $1.3\text{ mm} \times 1.3\text{ mm}$ (面積: 約 1.7 mm^2) の正方形領域を 12~18 領域選び、その領域を 200 倍の写真に撮影し、領域内のすべてのき裂について繰返しによる変化を写真上で直接追跡することで、き裂発生・伝ば挙動を観察した。また、必要に応じて金属顕微鏡 ($\times 400$) による観察も併用した。き裂長さとしては、試験片表面の円周方向の長さを取っている。

3. 実験結果および考察

図 3 に S-N 曲線を示す。本研究では、疲労限度 σ_w 近傍を除く有限寿命域におけるき裂発生・伝ば挙動の統計的性質を明らかにするため、 $\sigma_a = 550 \sim 700\text{ MPa}$ ($1.2\sigma_w \sim 1.6\sigma_w$) の範囲から四つの応力レベル (550, 600, 650 MPa および 700 MPa) を選び、疲労被害の観察を行った。このとき、個々の試験片の材質のばらつきの影響を小さくするため、その第 1 近似として硬さのばらつきの小さい試験片について統計的整理を行った。

図 4 に本実験で使用した試験片のビッカース硬さ H_v を正規確率紙に図示したものを示す。本材料も他の材料⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾同様、硬さ分布はほぼ正規分布をなすことがわかる。また、その中央値は約 270 である。四つ応力レベルの試験片としては、統計的整理を行った硬さが、この中央値に近いものを用いている ($H_v = 270$,

269, 271, 267)。以下に、実験結果をき裂発生と伝ばそれぞれについて示す。

3.1 き裂発生に関する統計的性質 図 5 に、繰返しに伴うき裂密度 δ (1 mm^2 当たりのき裂の個数) の変化を示す。繰返しとともに δ は増加し、その増加量は応力が大きいほど大きい。

緒言でも述べたように、強度の比較的高い調質材の疲労強度は欠陥に対して敏感となる。図 6 に、き裂発生場所付近の繰返しによる表面状態の変化を示す。き裂発生は、すべり帯を起点とする場合と介在物などの微小表面欠陥を起点とする場合とがある。

図 7 に、欠陥・すべり帯それぞれを起点として発生したき裂数の割合を各応力ごとに示す。応力が小さいほど欠陥を起点としたき裂の占める割合は大きく、繰返しとともにすべり帯からのき裂が相対的に増加している。

ところで、疲労寿命分布やき裂長さ分布がワイブル

表 2 機械的性質

MPa			%	H_v^*
σ_{SI}	σ_B	σ_T	ψ	
750	833	1510	61.6	270

*Vickers hardness (Load: 9.8 N)

図 3 S-N 曲線

表 1 化学成分 (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.45	0.25	0.79	0.01	0.01	0.09	0.03	0.18

図 1 組織写真

図 2 試験の形状および寸法

図 4 硬さの分布状態 (正規確率紙による整理)

分布⁽¹⁶⁾で良く整理されることを示した報告は多い⁽²⁾⁻⁽¹²⁾。ここで、3母数ワイブル分布の分布関数 $F(x)$ は次式で示される。

$$F(x)=1-\exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^m\right\}\dots\dots\dots(1)$$

上式中、 m 、 η および γ はそれぞれ形状母数、尺度母数および位置母数である。以下では、ワイブル分布関数による整理を行い、統計的性質を検討する。

図8(a)は、 $0.9N_f$ までに発生したき裂の発生寿命 N_i をワイブル確率紙上にプロットしたものである。本材料では、き裂発生時のき裂長さが最大でも25

μm 以下である点を考慮して、便宜上25 μm に達したときの繰返し数を伝ば曲線から求め N_i とした。プロット点は下に凸のゆるやかな曲線で表される。図8(a)の N_i を起点が欠陥のものとするべき帯のものに分け、ワイブル確率紙上にそれぞれプロットしたものを図8(b)に示す。発生を起点を区別すれば、いずれの N_i もその分布は2母数のワイブル分布で整理できる。プロット点を通る直線は、最小二乗法により各母数を決めたときの分布関数である。

図8(b)の結果から、図8(a)の N_i は混合ワイブル分布で整理できると思われる。すなわち、

$$F(N_i)=pF_D(N_i)+qF_S(N_i)\dots\dots\dots(2)$$

$$p+q=1\dots\dots\dots(3)$$

$$F_D(N_i)=1-\exp\left\{-\left(\frac{N_i}{\eta_D}\right)^{m_D}\right\}\dots\dots\dots(4)$$

$$F_S(N_i)=1-\exp\left\{-\left(\frac{N_i}{\eta_S}\right)^{m_S}\right\}\dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $F_D(N_i)$ 、 $F_S(N_i)$ はそれぞれ起点を欠陥および

図5 き裂密度と繰返し数比の関係

(a) すべり帯を起点として発生したき裂

(b) 欠陥を起点として発生したき裂

図6 き裂発生場所付近の表面状態の変化
($\sigma_a=650\text{ MPa}$, $\leftrightarrow$ 軸方向, $N_f=1.35 \times 10^4$)

図7 各繰返し数比における全き裂数に対する欠陥を起点としたき裂の占める割合

(a) $F(N_i)$ の分布

(b) $F_D(N_i)$ 、 $F_S(N_i)$ の分布

図8 き裂発生寿命 N_i のワイブル確率紙による整理

すべり帯としたときの2母数ワイブル分布関数である。また、 p, q はそれぞれの生起確率である。

図8(a)のプロット点を通る曲線は、式(2)により求めた分布関数であり、実験点と $F(N_i)$ は全領域にわたって良く一致している。表3に、各応力レベルにおける $F_D(N_i)$ と $F_S(N_i)$ の各母数と生起確率を示す。図7を反映して欠陥からのき裂発生が生起確率 p は応力が大きいほど相対的に小さくなる。

3.2 き裂伝ばに関する統計的性質 図9は、 $\sigma_a = 600$ MPa の場合の破断直前の観察でき裂長さが $200\ \mu\text{m}$ を超えたき裂について、き裂伝ば曲線を示したものである($200\ \mu\text{m}$ を超えた23個のき裂のうち、ここでは代表的な13個を示す)。 $\bullet$ 印は起点が欠陥の場合、 $\circ$ 印はすべり帯の場合であるが、き裂発生後の伝ば挙動に起点の違いによる差は認められない。

一般に、き裂伝ばのばらつきの中でも、比較的寸法の小さいき裂のばらつきが、全体のばらつきに与える影響が大きいと思われる。ここでは、き裂発生($l=25\ \mu\text{m}$)から $100\ \mu\text{m}$ に達するまでの微視的き裂の伝ばに注目して、その統計的性質を検討する。

図10は、き裂発生後 $100\ \mu\text{m}$ に達するまでの寿命 N_{100} をワイブル確率紙に整理したものである。いずれの応力レベルの結果をほぼ直線で表され、 N_{100} の分布は2母数ワイブル分布で整理される。図11, 12に、こ

の場合の応力レベルと形状母数 m および尺度母数 η の関係をそれぞれ示す。

3.3 き裂長さ分布に関する統計的性質 図13に、各繰返し数比ごとにき裂長さ l をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。図13中の各曲線は、直線回帰における相関係数が最大となるように3母数を求めたときの分布関数である。いずれの繰返し数比の場合も分布関数は実験結果に良く適合しており、き裂長さの分布は本材料でも3母数ワイブル分布で表示でき

図10 き裂が発生してから $100\ \mu\text{m}$ に達するまでの寿命 N_{100} のワイブル分布

表3 $F_D(N_i)$, $F_S(N_i)$ の各応力における母数と生起確率

MPa	$F_D(N_i)$			$F_S(N_i)$		
	m_D	$m_D(\times 10^4)$	p	m_S	$m_S(\times 10^4)$	q
550	4.5	6.2	0.24	7.2	7.3	0.76
600	6.6	2.5	0.18	12.5	3.1	0.82
650	5.3	0.9	0.12	13.2	1.1	0.88
700	8.1	0.5	0.09	10.7	0.6	0.91

図9 $200\ \mu\text{m}$ を超えたき裂の伝ば曲線 ($\sigma_a = 600$ MPa, $N_f = 3.64 \times 10^4$)

図11 形状母数 m の応力依存性

図12 尺度母数 η の応力依存性

る。

図14は、き裂長さ分布における形状母数 m と繰返し数比 N/N_f の関係を、各応力レベルについて示したものである。 m の値は、応力が一定であれば N/N_f にあまり影響されずほぼ一定値をとる。各応力のもとでの m の値をみれば、応力が大きいほど m は大きくなる傾向にあるが、 $\sigma_a=600\sim 700$ MPa の範囲では $m\cong 0.9\sim 1.1$ となりほぼ1に近い値をとるのに対し、 $\sigma_a=550$ MPa の場合は $m\cong 0.6$ となる。

図15は、尺度母数 η と繰返し数比 N/N_f の関係を各応力レベルについて調べたものである。この場合も、 $\sigma_a=600\sim 700$ MPa の範囲では応力レベルによる明確な依存性は認められず、ほぼ1本の直線で近似できる。一方、 $\sigma_a=550$ MPa の場合は両者の関係は1本の直線で表されるが、 $\sigma_a=600\sim 700$ MPa の場合とその関係は異なる。

以上のように、 $\sigma_a=600\sim 700$ MPa では、 m の値に多少応力依存性が認められるものの、 m, η ともそれぞれほぼ近い値を取るのに対し、 $\sigma_a=550$ MPa の場

合は m, η ともこれと異なる。

図16に、き裂長さとき裂数の関係を調べたものを示す。図16中、黒ぬりの部分は欠陥を起点としたき裂であり、白ぬりの部分はすべり帯を起点として発生したき裂である。図16(a)は、 $\sigma_a=650$ MPa の場合、図16(b)は $\sigma_a=550$ MPa の場合である。いずれも、初期に発生するき裂は、相対的に欠陥を起点とするものが多いことがわかる。また、図16(a)と図16(b)の分布状態を比較すれば、その分布が両者で異なることがわかる。すなわち、図16(a)では繰返しとともに初期に発生したき裂はその長さを増加し、同時に他のき裂が多数発生しそれらも伝ばするため、き裂数と長さはある程度対応しながら増加している ($\sigma_a=600, 700$ MPa の場合の分布状態もこれとほぼ同じである)。一方、 $\sigma_a=550$ MPa の場合は、繰返しの初期ではき裂はすべり帯からよりも欠陥から発生しやすいため、欠陥を起点として発生したき裂が見掛け上優先的に成長することになり、それがき裂長さの分布に大きく影響している。

さて、寿命分布では $m>1$ が摩耗故障を、 $m=1$ は偶発的故障を、 $m<1$ は初期故障を表すとされている⁽¹⁷⁾。本実験の $\sigma_a=600\sim 700$ MPa の場合は $m\cong 1$ となり、これは偶発的故障に対応し、一方 $\sigma_a=550$ MPa の場合は $m\cong 0.6(<1)$ であり、初期故障に対応する。図16(b)でも示したように、この場合は繰返しの初期に発生したき裂が見掛け上優先的に成長するため、き裂長さ分布にその影響が強く現れ、 $m<1$ となったものと思われる。また、図16のもう一つの傾向として、欠陥から発生するき裂の数は繰返しにつれ飽和

図13 $\sigma_a=600$ MPa の場合の各繰返し数比におけるき裂長さのワイブル分布

図14 各応力レベルにおける形状母数の繰返し数比依存性

図15 各応力レベルにおける尺度母数の繰返し数比依存性

図 16 繰返しによるき裂長さ分布の変化

するが、すべり帯からの数は繰返しとともに増加する。

4. 結 論

S 45 C 調質材について平滑材の回転曲げ疲労試験を行い、レプリカ法により試験片表面の複数の領域を連続観察した。得られた結果を統計的に整理し、疲労限度付近を除く有限寿命域 ($\sigma_a = 1.2\sigma_w \sim 1.6\sigma_w$) における微視的き裂の発生および伝ば挙動に関して、次に示すような統計的性質が得られた。

(1) 本材料では、微小表面欠陥を起点としてき裂が発生する場合と、すべり帯を起点として発生する場合があるが、いずれもき裂発生寿命の分布は 2 母数ワイブル分布で整理される。また、き裂の発生場所を区別しないときの発生寿命分布は、両者の混合ワイブル分布で表せる。このとき、欠陥を起点とするき裂の生起確率は、応力が大きいほど相対的に小さくなる。

(2) 微視的き裂の伝ば寿命分布 (き裂が発生してから 100 μm に達するまでの寿命分布) は、2 母数ワイブル分布で表せる。

(3) き裂長さ分布は、3 母数ワイブル分布で整理される。このとき、応力が比較的大きければ形状母数 m は、多少の応力依存性は認められるがほぼ 1 となり、尺度母数 η は応力の影響はほとんど受けず近似的

に繰返し数比 N/N_f のみの関数となる。一方、応力が小さい場合 (本実験では $\sigma_a \cong 1.2\sigma_w$ の場合) は、 m は 1 より小さく ($m \cong 0.6$)、 $\eta - N/N_f$ の関係も他の応力の場合と異なる。

本研究において、その一部に協力いただいた大分大学工学部 三浦篤義氏および大学院学生 古手川保君 [現：本田技研工業(株)] に感謝する。

文 献

- (1) 西島・増田, 材料, 22-243(1973), 1097.
- (2) 田中・藤井, 材料, 25-276(1976), 909.
- (3) 戸髭・ほか 3 名, 材料, 30-328(1981), 15.
- (4) 田中・ほか 2 名, 材料, 30-332(1981), 483.
- (5) 越智・ほか 2 名, 材料, 31-345(1982), 559.
- (6) 戸髭・ほか 2 名, 材料, 31-351(1982), 1204.
- (7) Suh, C. M., ほか 2 名, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 8-2(1985), 193.
- (8) Ochi, Y., ほか 2 名, *Eng. Fract. Mech.*, 18-4(1985), 327.
- (9) 北川・ほか 2 名, 機論, 51-461, A(1985), 179.
- (10) 西谷・ほか 4 名, 機論, 53-495, A(1987), 1988.
- (11) 酒井・ほか 2 名, 材料, 36-408(1987), 915.
- (12) 佐々木・ほか 3 名, 機論, 54-499, A(1988), 426.
- (13) 西谷・後藤, 機論, 50-460, A(1984), 1926.
- (14) 西島・阿部, 材料, 26-280(1977), 50.
- (15) 酒井・鈴木, 機論, 54-506, A(1988), 1925.
- (16) Weibull, W. J., *J. Appl. Mech.*, 18-3(1951), 293.
- (17) 例えば, 真壁, ワイブル確率紙の使い方, (1966), 22, 日本規格協会, 塩見, 信頼性工学入門(改訂 2 版), (1972), 57, 丸善.