NiCr MoV 鋼における表面疲労き裂の発生・伝ば寿命のばらつき特性*

佐々木 茂美^{*1}, 越 智 保 雄^{*1}, 石 井 明^{*1}

Some Investigations on Statistical Scatter in the Initiation and Growth Lives of Surface Fatigue Cracks in NiCrMoV Steel

Shigemi K. SASAKI, Yasuo OCHI, and Akira ISHII

Rotating bending fatigue tests were carried out for smooth and small notched specimens of NiCrMoV steel, using the large-size turbine rotor shaft of the nuclear generator, in order to statistically investigate distributions of surface crack initiation and growth lives. Most of surface cracks of the smooth specimens initiated at inclusions on the surface. The distributions of the initiation life N_i , the growth life N_p and the failure life N_f determined in this study were expressed as a two-or three-parameter Weibull distributions for the smooth and the small notched specimens. The statistical scatter of the N_i , N_p and N_f distributions increased with decreases in stress amplitude σ_a for the smooth specimens, and the scatter of each life of the notched specimens was smaller than that of the smooth ones. The correlation coefficient of order between N_i , N_p and N_f increased with increases in cycles, but decreased with increases in σ_a for the smooth specimens, and that of the notched specimens was smaller than that of the smooth ones during the early stage of crack growth to less than 1 mm in length.

Key Words: Fatigue, NiCrMoV Steel, Smooth Specimen, Small Notched Specimen, Surface Crack, Initiation Life, Growth Life, Weibull Distribution

1. 緒 言

疲労破壊過程の大部分はき裂の発生と伝ば過程で占められている⁽¹⁾ので、破断寿命のばらつき特性を推定するためには、き裂の発生寿命と伝ば寿命のばらつき特性を知ることが重要な課題となる。従来より、疲労過程における表面き裂や微小き裂の統計的諸性質についての検討が種々行われてきた^{(2)~(7)}。しかしながら、表面き裂の発生、伝ば寿命分布の物理的特性についての検討は比較的少なく、疲労寿命評価やばらつき特性の原因に関してはさらに多くのデータや知識の積み重ねが必要となる。著者らもこれまでに、各種材料の平滑材および微小欠陥材を用いて表面疲労き裂の発生、初期成長挙動およびそれらの寿命のばらつき特性に及ぼす材料特性や結晶粒径の影響などについて統計的な考察を行ってきた^{(8)~(11)}。

本研究では、大形ロータ軸材 NiCrMoV 鋼の平滑材および微小欠陥材を用いて、高サイクル疲労試験を行い、表面疲労き裂の発生・伝ば寿命のばらつき特性を、応力振幅依存性や微小欠陥の影響の観点から実験的な

らびに統計的手法により考察した。

2. 実験方法

2.1 試験片および疲労試験 供試材は原子力発電機の大形タービンロータ軸に使用されており、実際に表面微小き裂が問題となっている NiCrMoV 鋼鍛造品である。その化学成分を表 1 に示す。素材は鍛造後、表 2 に示す熱処理を施したものを直径 2464 mm のロータ軸に機械加工したものである。熱処理後の組織はペーナイト組織で、平均結晶粒径は 23 μm 、また硫化物系の介在物の平均直径は 20 μm であった。表 3 に熱処理後の機械的性質を示した。試験片軸方向はロータ軸の半径方向に一致させ取り、図 1 に示す形状、寸法に機械加工した。図 (a) は平行部表面に R 20 の環状切込みを付したもので応力集中率が低くほぼ平滑材とみなせる。また、図 (b) は環状切込み深部に図に示すように 4 個所の微小穴(直径 200 μm 、深さ 200 μm)を開けた微小欠陥材($K_t \approx 3.0$)を示している。表面はエメリー紙(#400~#1500)研磨の後アルミナ水溶液によるバフ研磨仕上を施してから、軽くエッチング処理を行った。使用した試験機は 3000cpm の小野式回転曲げ疲労試験機で、室温・大気中で疲労試験を行った。表面き裂長さの測定はレプリカ法によって、

* 昭和 63 年 10 月 18 日 第 66 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 2 月 19 日。

*¹ 正員、電気通信大学(〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。

金属顕微鏡 ($\times 100 \sim \times 400$) を用いて試験片円周方向への投影長さ $l (=2c)$ を求めた。図 2 に得られた平滑材および微小欠陥材の S-N 曲線を示す。実験は平滑材については 3 種類の応力振幅 ($\sigma_a = 430, 470, 530$ MPa) で、微小欠陥材では $\sigma_a = 470$ MPa (平滑材 $\sigma_a = 530$ MPa と平均寿命がほぼ等しくなる) で行った。

2.2 各寿命の定義および分布の整理方法 平滑材および微小欠陥材のき裂発生寿命 N_i 、伝ば寿命 N_p 、ならびに破断寿命 N_f は以下のように定義した⁽⁹⁾。

(1) き裂発生寿命 N_i ; 後述の図 4 などからわかるように、平滑材表面からのき裂発生は、そのほとんどが表面に存在する介在物から生じ、また、微小欠陥材では微小欠陥の両端を起点としていた。そこで、図 3 に模式的に示すように、深さ方向に 1 結晶粒分 (D) 成長するときの表面き裂長さ (D/λ) を平均介在物直径 ($d_{inc1} = 20 \mu\text{m}$) または微小欠陥の直径 ($d_{hole} = 200 \mu\text{m}$) に加えた長さ l_i として、その時の繰返し数を N_i として定義した。すなわち、 l_i は以下ようになる。

平滑材に対して: $l_i = d_{inc1} + (D/\lambda) = 80 \mu\text{m}$ … (1)

微小欠陥材に対して: $l_i = d_{hole} + (D/\lambda) = 260 \mu\text{m}$ (2)

ここで、 λ の値は表面長さ l に対する深さ a の比で、

き裂破面の SEM 観察より平均値として $\lambda = 0.38$, D は平均結晶粒径で $D = 23 \mu\text{m}$ を用いた。

(2) 伝ば寿命 N_p ; き裂成長過程のばらつき特性を検討するために、伝ば途中でのき裂長さを $l_{p,500}$ および $l_{p,1500}$ と表して (それぞれ、 $l_p = 500 \mu\text{m}$, $l_p = 1500 \mu\text{m}$)、その時の繰返し数をき裂伝ば途中の寿命という意味でき裂伝ば寿命 $N_{p,500}$, $N_{p,1500}$ と定義した。

(3) 破断寿命 N_f ; き裂長さ l が $3000 \mu\text{m}$ 以上になると他のき裂との連結が生じ急速に破断に至ることから、本報では l が $l_f = 3000 \mu\text{m}$ の時の繰返し数 N_f を破断寿命と定義した。

以上のように定義した N_i, N_p および N_f をデータの整理の都合上と分布の推定の容易さにより、ワイブル分布に従うとして検討することにした⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。すなわち、分布関数 $F(N)$ は、

$$F(N) = 1 - \exp[-\{(N - \gamma)/\beta\}^\alpha] \dots\dots\dots (3)$$

である。ただし、 α は形状母数、 β は尺度母数そして γ は位置母数である。なお、データの確率紙へのプロットはミーンランク法を用いた。また、ワイブル母数の評価に対しては酒井らの相関係数法⁽¹²⁾を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 表面き裂の発生状況ならびに成長曲線 図 4 は平滑材および微小欠陥材表面のき裂発生状況を示した一例である。図よりわかるように、平滑材では各応力振幅において、ほとんどのき裂が表面に存在する

表 1 化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.024	0.06	0.30	0.005	0.008	3.12	1.51	0.39	0.12

表 2 熱処理条件

840°C, 91 hr., Water quenching
620°C, 81 hr., Tempering
590°C, 39 hr., Stress relieving

表 3 機械的性質

Yield strength $\sigma_{Q,2}$, MPa	Tensile strength σ_B , MPa	Elongation %, Z	Reduction of area %, Z	Grain size μm
652	770	24.5	64	23

図 1 試験片形状

図 2 S-N 曲線

図 3 き裂発生寿命 N_i の定義の模式図

介在物から発生しており（80%以上であることを確認）、一方、微小欠陥材ではすべてが微小穴の両端から発生していた。また、図5は $\sigma_a=530$ MPaの平滑材において、表面に発生したすべてのき裂の長さ、個数とその発生場所となった介在物寸法の関係を示したものである。図より直径20 μm 前後の介在物から発生したき裂が比較的多く、また長く成長するものも多いことがわかる。

次に、平滑材および微小欠陥材表面から発生したき裂の成長曲線の一例を図6に示す。なお、各き裂に対する成長曲線は破断寿命によって異なるが、約20点前後のき裂長さデータを滑らかな曲線で表したものである。図(a)、(b)の平滑材において、応力振幅が高くなると、き裂成長のばらつき程度が小となっていることが分かる。また、図(b)と(c)の平均寿命がほぼ等しい場合の平滑材と微小欠陥材を比較すると、平滑材ではき裂の発生の繰返し数が大であり、そのばらつきも大きい。ある程度まで成長したき裂は応力振幅が高いこともありその後の進展は速く、急速に破壊に至るものもあり、成長曲線のばらつきは大となっていることがわかる。

3.2 各寿命の分布特性 図6などのき裂成長曲線の結果を用いて、前述の定義による $N_i, N_{p,1/500}$ および N_f の各寿命分布をワイブル確率紙にプロットした結果を図7に示した。図(a)、(b)、(c)は平滑材、図

(b)は微小欠陥材である。また、図より得られたワイブル母数ならびにその他の統計値を表4に示した。表において、 μ は平均値、 η は変動係数($\eta=s/\mu$: s は標準偏差)、 r は回帰直線との相関係数を示す。図7および表4の平滑材の場合を見ると、 N_i 分布は直線で近似的に、位置母数 γ の値はいずれの σ_a においても μ に比べて無視できるほど小さいことから、2母数ワイブル分布で表示できると考えてよい。また、回帰直線の傾きを示す形状母数 α の値は σ_a が小さいほど小さくなり1に近づく。2母数ワイブル分布で $\alpha=1$ の場合は指数分布となることと、また前述したように、き裂の発生はそのほとんどがサイズと空間の分布がランダムである介在物を起点としていることから考えて、 σ_a

図5 表面き裂発生における介在物寸法、個数および長さの関係

(a) 平滑材

(b) 微小欠陥材

図4 表面き裂の発生状況

(a) 平滑材

(b) 平滑材

(c) 微小欠陥材

図6 表面き裂伝ば曲線

が小さくなるにつれて平滑材のき裂の発生は偶発的になり、結果的には N_i 分布は指数分布に近づいたものと考えられる。また、伝ば寿命 $N_{p,1500}$ と破断寿命 N_f の分布はいずれも 3 母数ワイブル分布で表示することができた。さらに、微小欠陥材の場合を見ると、 N_i, N_p および N_f の分布はいずれも 3 母数ワイブル分布で表示された。図 8 に平滑材および欠陥材の N_i ならびに N_f におけるばらつきの応力振幅依存性を明らかにするため、表 4 などより得られるそれぞれの分布の変動係数 η の σ_a による変化を示した。図より、平滑材においては σ_a が大となると η が小となり、ばらつきの程

度は小さくなることが明らかである。さらに、平均寿命のほぼ等しい平滑材 ($\sigma_a=530$ MPa) の場合とばらつき程度を η で比較すると、いずれの分布でも微小欠陥材のほうが小さい値となっていることがわかる。これは微小欠陥材のほうが、き裂の発生起点としてその個数と場所をより限定されているためであり、また、 N_p と N_f の分布も N_i の分布に影響されるためであると考えられる。

図 7 の平滑材の寿命分布曲線において、 N_i 分布の破線はプロット点の回帰直線を示しているが、 $N_{p,1500}$ および N_f 分布における曲線は N_i 分布の回帰直線に対してそれぞれの寿命分布における位置母数の値 γ だけ移動させたときの曲線、つまり、 $F(N_i + \gamma)$ の曲線を示している。応力振幅が最も低い $\sigma_a=430$ MPa においては、実験点の N_p, N_f 分布と曲線とがよく一致しているが、より高い $\sigma_a=470, 530$ MPa の場合には $F(N)$ の値が大きな長寿命の部分で曲線と実験点がずれる傾向がある。しかしながら、いずれの場合にも

(a)(b)(c) 平滑材 (d) 微小欠陥材
図 7 N_i, N_p および N_f 分布のワイブルプロット

表 4 N_i, N_p および N_f のワイブル母数ならびに他の統計的諸量

	σ_a , MPa	Smooth			Notched
		430	480	530	470
N_i	α	1.200	1.235	1.917	1.628
	$\beta, 10^4$	10.83	5.144	3.435	0.319
	$\gamma, 10^4$	0.004	0.000	0.033	0.521
	$\mu, 10^4$	10.19	4.805	3.080	0.807
	η	0.836	0.814	0.537	0.223
	τ	0.985	0.989	0.980	0.983
$N_{p,1500}$	α	1.359	1.878	2.312	16.73
	$\beta, 10^4$	11.76	4.290	2.741	4.904
	$\gamma, 10^4$	13.37	6.375	5.269	0.463
	$\mu, 10^4$	24.14	10.18	7.698	5.214
	η	0.332	0.207	0.145	0.067
	τ	0.986	0.967	0.954	0.979
N_f	α	0.975	1.191	1.685	22.45
	$\beta, 10^4$	10.65	2.501	1.962	6.880
	$\gamma, 10^4$	16.72	8.534	6.448	0.316
	$\mu, 10^4$	27.49	10.89	8.200	7.032
	η	0.403	0.182	0.130	0.053
	τ	0.980	0.985	0.980	0.994

図 8 N_i および N_f 分布の変動係数 η の応力振幅依存性

$F(N)$ が低い領域、すなわち実用上問題となる寿命の短い、左裾野の領域での分布はよく一致していることは注目に値する。このことは、き裂の発生寿命の分布から、伝ば途中の寿命分布や破断寿命分布の $F(N)$ の小さい領域が推定可能であることを示している。より高い応力振幅で、長寿命側において推定曲線と実験点がずれる原因の一つとして、試験片ごとのき裂の発生個数が多く、発生したき裂と破断に至るき裂の相関が小さいためと考えられる。一方、低い応力振幅では、発生したき裂と破断に至るき裂との相関が大きく、特に寿命の長い場合にはき裂の発生時期が直接破断寿命に影響し、 N_i と N_p, N_f の相関性は高くなる。また、さうには図9に示すように、低応力振幅では個々のき裂がそれぞれ独立に成長するのに対して、高応力振幅では疲労過程の後半にはき裂同志の合体が多く見られ、それらの影響により破断寿命が短くなり推定曲線とプロット点がずれるものと考えられる。

3・3 破断寿命とき裂発生ならびに伝ば寿命との関係 前節において述べたように、応力振幅の低い場合には、き裂の発生個数は少なく、発生したき裂が個々に成長して破断に至る場合が多く、 N_i と N_f との間の相関は高いことが定性的に考えられた。そこで、次に N_i 、 N_p および N_f の各寿命間の相関関係を定量的に比較検討することにした。破断寿命 N_f に至る主き裂について、その発生から各伝ば段階のき裂長さ l_p

に達するまでの繰返し数の順位相関係数 Z の l_p に対する変化を求めたところ図10が得られた。き裂の成長に伴い、各条件における Z は増加していること、平滑材の同じき裂長さでは、 σ_a の低いものほど Z が高くなる傾向がある。これは σ_a が高くなるとき裂発生の際のばらつきが小となり、早く発生したものが必ずしも早く成長し破断に至るとは限らず、途中で伝ば曲線の交錯が多く生じるため、 N_i と N_f や途中の N_p と N_f の相関が低くなるものと考えられる。また平均寿命のほぼ等しい平滑材 ($\sigma_a=530$ MPa) と微小欠陥材 ($\sigma_a=470$ MPa) を比較すると、その差は明確ではなく、ほぼ同程度の相関があると見られるが、き裂の発生と初期成長段階では微小欠陥材のほうが Z が小さくなっている。これは欠陥材はき裂の発生場所が限定されているため N_i のばらつきが小さいので、前述の高応力振幅の場合と同じく、 N_i と N_f や初期進展段階の N_p と N_f との相関が小となったものと考えられる。しかしながら、ある程度き裂が成長 ($l_p=1000\ \mu\text{m}$ 以上) すると、その差はほとんどなくなる。

表5は N_i および $N_{p,500}$ の寿命分布の平均値を N_f の分布の平均値で除したもので、それぞれの寿命の破断寿命に対する平均寿命比を示している。表において、上段の値は図10と同様に $l_p=3000\ \mu\text{m}$ 以上成長した主き裂のみを対象とした場合、下段の () 内の値は $l_p=1000\ \mu\text{m}$ 以上成長したものを対象とした場合を示している。表を見ると、平滑材の各寿命比の応力振幅

(a) 単独で成長する場合

(b) 連結のある場合

図9 表面き裂の伝ば挙動

表5 $N_i, N_{p,500}$ の N_f に対する平均寿命比

Specimens	Smooth			Notched
σ_a , MPa	430	480	530	470
N_i/N_f	0.200 (0.205)	0.116 (0.178)	0.258 (0.290)	0.111 (0.113)
$N_{p,500}/N_f$	0.700 (0.705)	0.607 (0.731)	0.679 (0.756)	0.291 (0.292)

図10 N_i, N_p と N_f 間の順位相関係数 Z の応力振幅およびき裂長さ依存性

依存性は明確ではなく、発生寿命比で 20%前後、500 μm 伝ば寿命比で 70%前後となっている。一方微小欠陥の影響を見ると、欠陥材では発生寿命比は 10%程度、500 μm 伝ば寿命比は 30%程度となっており、明らかに平滑材よりも早くなっている。

4. 結 言

NiCr MoV 鋼の表面疲労き裂の発生、伝ばおよび破断寿命のばらつき特性に及ぼす、応力振幅 σ_a ならびに微小欠陥の影響を実験的、統計的に検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 平滑材においては、き裂のほとんどは応力集中源としての介在物から発生した。また、き裂発生寿命 N_i 分布は 2 母数ワイブル分布、伝ば寿命 N_p および破断寿命 N_f は 3 母数ワイブル分布で表示でき、そのばらつき程度を変動係数 η で比較すると、いずれも σ_a が小さくなるとばらつきが大となった。なお、 N_i 分布は低応力振幅では形状母数 α は 1.0 に近くなり指数分布に近似できた。さらに、平滑材の N_f 分布の破壊確率 $F(N)$ の小さい左裾野の分布は N_i の値に N_f 分布の位置母数 γ を加算した分布曲線とほぼ一致することがわかった。

(2) き裂の発生場所を限定した微小欠陥材($\sigma_a = 470 \text{ MPa}$)の各寿命分布は、いずれも 3 母数ワイブル分布で表示できた。平均寿命のほぼ等しい平滑材($\sigma_a = 530 \text{ MPa}$)の場合とばらつき程度を変動係数 η で比較すると、いずれの分布においても欠陥材のほうが小さい値となった。

(3) 破断寿命 N_f と発生寿命 N_i およびき裂長さがある値に達したときの寿命(伝ば寿命) N_p との順位相関関数 Z は、平滑材においては応力振幅が低くなるほど高くなり、平滑材と微小欠陥材を比較すると初期成長段階では平滑材のほうが高くなったが、き裂が 1 mm 以上成長するとその差はほとんどなくなった。

なお、本研究は日本学術振興会第 129 委員会(委員長横堀武夫東北大学名誉教授)、統計処理試験法処理小委員会の共同研究の一部として行われた。ご指導いただいた横堀武夫名誉教授、ならびに材料を提供いただいた(株)日本製鋼所に深く感謝する。また、本研究の実験の遂行に協力された当時電気通信大学学生、半田智治、川辺均ならびに松田洋の諸君に謝意を表す。

文 献

- (1) 小林・中澤, 機械の研究, 25-11 (昭 48), 71.
- (2) 山田・曾我美, 川村, 材料, 28-304 (昭 54), 20.
- (3) Zureck., AK James, M. R., Morris, W. L., *Met. Trans.*, 14-8 (1983), 1697.
- (4) Kitagawa, H., Nakasome, Y., Miyashita, S., *ASTM STP*, 811 (1983), 233.
- (5) 戸嵜・小川・原田・安藤, 材料, 34-385 (昭 60), 1160.
- (6) 桜井・宇佐美・梅沢・宮田, 材料, 35-389 (昭 61), 170.
- (7) 西谷・皮龍石・大津・末永・若原, 機論, 53-495, A (昭 62), 1988.
- (8) 越智・石井・山本・佐々木, 材料, 32-363 (昭 58), 1363.
- (9) Ochi, Y., Ishii, A., Sasaki, S. K., *Fatigu Fract. Eng. Mater. Struct.*, 8-4 (1985), 327.
- (10) Sasaki, S. K., Ochi, Y., Ishii, A., *Eng. Fract. Mech.*, 28-5/6 (1987), 761.
- (11) 佐々木・越智・石井・安部, 機論, 54-499, A (昭 63), 426.
- (12) 酒井・田中, 材料, 29-316 (昭 55), 17.