大応力下および小応力下における微小き裂伝ば挙動に 及ぼす応力比の影響*

(S45C 焼なまし材の引張り圧縮疲労)

西谷 弘 信**, 後藤 真 宏***

Effect of Stress Ratio on the Propagation of Small Crack of Plain Specimens under High and Low Stress Amplitudes (Fatigue under Axial Loading of Annealed 0.45% C Steel)

by Hironobu NISITANI and Masahiro GOTO

Fatigue tests under axial loading of plain steel specimens with a crack were carried out under various stress ratios R ($R=0\sim-1.5$).

When the crack is comparatively large and the stress amplitude σ_a is small, the crack growth rate is nearly proportional to ΔK^4 (ΔK : stress intensity factor range). When the crack is small and σ_a is large, the growth rate is nearly proportional to $\sigma_a^3 l$ (l : crack length). In both cases, the effect of stress ratio appears as the changes in the proportional constants.

Key Words: Fatigue, Tension-Compression, Stress Ratio, Crack Growth Law, Small Crack, Carbon Steel

1. 緒 言

巨視的疲労き裂の伝ば速度に関しては、すでに膨大な資料の蓄積があり、き裂伝ば速度の表示式も数多く提案されている⁽¹⁾。そして、その多くは応力拡大係数 ΔK による整理である。しかし、微小き裂に関しては比較的研究も少なく、まだ不明な点も多く残されている。

微小き裂がある程度大きい速度 (例えば 10^{-6} mm/c 以上) で伝ばするためには、そのき裂を含む領域の応力を大きくする必要がある。必然的に小規模降伏の条件は満たされなくなる。このため、微小き裂の伝ば速度を ΔK のみによって一義的に表すことはできない。一方、微小き裂の伝ば寿命は、全寿命のうちの大部分を占めているから、機械や構造物の寿命を推定する上で、微小き裂の伝ば速度をより確実に把握することはきわめて重要な意味をもつものと思われる。

著者の一人は、そのような微小き裂の伝ば則として $dl/dN \propto \sigma_a^3 l$ (σ_a : 応力振幅, l : き裂長さ) を提案し、伝ば則 $dl/dN \propto \Delta K^m$ との関連を指摘するとともにそ

の物理的背景についても検討してきた⁽²⁾⁽³⁾が、これまでの実験はすべて応力比 $R=-1$ のもとでのもの (回転曲げ⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾および引張り圧縮⁽⁷⁾) であった。

今回は、応力振幅 σ_a および応力比 R を種々変えて、平滑材の表面に生じたき裂の伝ば速度を測定し、 $dl/dN \propto \sigma_a^3 l$ が成り立つ範囲と $dl/dN \propto \Delta K^m$ が成り立つ範囲とを区別する条件を示すとともに、両者の関係に及ぼす R の影響について検討した。

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 (直径約 19 mm) であり、それを 845°C で 1h 焼なましした後試験片を製作した。本材料の化学成分を表 1 に、熱処理後の機械的性質を表 2 に示す。

図 1 に試験片形状を示す。試験片は被害を受ける範囲を局限するため浅い部分切欠きを有するが、その切欠き係数は小さく (約 1.1) 実質的には平滑材とみなせる。試験片製作後 600°C で 1h 真空焼なましを行い、さらに表面を約 20 μ m 程度電解研磨により取り除いた後実験を行った。微小穴材は、電解研磨後浅い部分切欠きの中央部表面に微小穴をあけたものである。穴形状を図 2 に示す。穴径 d は 0.1 mm でその深さは穴径と同じである。

* 昭和 58 年 11 月 30 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 25 日。

** 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*** 正員、九州大学大学院。

用いた試験機は電気油圧制御式引張り圧縮疲労試験機（島津サーボペット・Lab-5）であり、制御方式は荷重制御、繰返し速度は5～32 Hzにて実験を行った。引張り圧縮試験機では曲げ応力が発生しやすいので、試験片平行部（直径10 mmの部分）にひずみゲージをはり、定期的に動的ひずみを検出して曲げ応力なしに所定の応力振幅が得られていることを確認しながら実験を行った。

表面の疲労被害および微小き裂の観察は、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカに真空中で金を蒸着したものについて金属顕微鏡（×400）により行った。き裂長さ l としては表面に沿って測った円周方向の長さをとるものとする。

応力は部分切欠きの存在を無視した試験片最小断面（直径5 mmの部分）の公称応力をとっている。巨視的降伏が起こる（最大応力が降伏点を越える）場合は断面の減少が生じるので、実験途中で定期的に試験片を試験機から取りはずして断面減少を計測し、応力の補正を行った。

以下では $\sigma_{\max}$ で最大応力を、 $\Delta\sigma$ で応力幅を、 σ_a で応力振幅を、 σ_m で平均応力を表す[例えば、両振り（ $R=-1$ ）では $\Delta\sigma=2\sigma_{\max}=2\sigma_a$, $\sigma_m=0$ となる]。実験は応力比 $R=(\sigma_m-\sigma_a)/(\sigma_m+\sigma_a)$ 一定のもとで行った。 R の値は0, -0.5, -1.0, -1.5の4とおりに変えた。

表1 化学成分 (%)

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

表2 機械的性質 (MPa, %)

σ_{s1}	σ_B	σ_T	ψ
364	631	1156	45.8

σ_{s1} : 降伏点, σ_B : 引張強さ,
 σ_T : 真破断応力, ψ : 絞り

図1 試験片形状 (単位: mm)

3. 実験結果および考察

本研究では大応力下および小応力下^{*1}での微小き裂の伝ば挙動に及ぼす応力比 R の影響を調べるため、 R を種々変えて引張り圧縮試験を行ったものである。その際、大応力下の場合は主に平滑材（ $R=0, -0.5, -1.0, -1.5$ ）、小応力下の場合は微小穴材（ $R=-0.5, -1.0$ ）および予き裂材（ $R=0, -1.0$ ）の結果をもとに R の影響を検討した。

3.1 大応力下での微小き裂の挙動 ここでは平滑材に発生したき裂の挙動から大応力下におけるき裂伝ば則を検討する。このとき $R=-0.5, -1.0, -1.5$ の場合は巨視的降伏が起こらない範囲で実験できるが、 $R=0$ （片振り）の場合は破断する応力を繰返せば巨視的降伏が起こるので他の R の場合と多少事情が異なる。したがって $R=0$ の結果は区別して取扱う。以下に結果を示す。

図2 穴形状と寸法

図3 S-N 曲線

(a) $R=-0.5$ の場合(b) $R=-1.5$ の場合

図4 き裂伝ば曲線

^{*1} ここではき裂伝ば速度が ΔK により一義的に決まる範囲の応力を小応力と呼び、一義的に決まらない範囲の応力を大応力と呼ぶこととする。

3・1・1 $R = -0.5, -1.0, -1.5$ の結果 図3に縦軸を σ_a としたときの S-N 曲線を示す。

図4にき裂伝ば曲線を、図5にき裂長さの対数 log

図5 き裂長さとの対数 log

(a) $R = -0.5$ の場合

(b) $R = -1.5$ の場合

図6 $dl/dN-l$ の関係

l とき裂が 0.05 mm に達してから破断するまでの繰返し数 $N_f - N_{0.05}$ を基準とした相対繰返し数 $(N - N_{0.05}) / (N_f - N_{0.05})$ の関係を示す。いずれの R の場合もき裂合体の影響が多少は認められるが、両者の関係は応力幅 $\Delta\sigma$ に無関係にほぼ 1 本の曲線で表される。また、き裂が短い間は近似的に直線関係が成り立っている。すなわち、き裂が短い間はき裂伝ば速度 dl/dN はき裂長さ l に比例する。

図6は dl/dN の l 依存性を調べたものである。いずれの $\Delta\sigma$ の場合もき裂がある程度短ければ、 $dl/dN \propto l$ の関係がほぼ成り立っている。図7は dl/dN の応力依存性を調べたものである。横軸は応力振幅 $\sigma_a (= \Delta\sigma/2)$ を取っている。いずれの場合も l 一定のもとで両者の間に近似的に直線関係が認められ、直線の傾きは約 8 である。すなわち $dl/dN \propto \sigma_a^8$ となる。

結局図6と7から $R = -0.5, R = -1.5$ いずれの場合も $dl/dN \propto \sigma_a^8 l$ が成り立つことになる。 $R = -1.0$ の場合もき裂が短い間は $dl/dN \propto l, dl/dN \propto \sigma_a^8$ の関係⁽⁷⁾が得られていることから、 $-1.5 \leq R \leq -0.5$ の範囲では平滑材の微小き裂の伝ば挙動は $dl/dN \propto \sigma_a^8 l$ の関係によって表されることになる。

(a) $R = -0.5$ の場合 (b) $R = -1.5$ の場合

図7 $dl/dN-\sigma_a$ の関係

図8 $dl/dN-\sigma_a^8 l$ の関係

図8は $dl/dN-\sigma_a l$ の関係を両対数にて示したものである。いずれも R 一定のもとでは、 dl/dN と $\sigma_a l$ とは1対1に対応している。すなわち、き裂が小さいとき、き裂がある程度大きい速度($dl/dN \cong 10^{-6}$ mm/c)で伝ばしていれば、 R 一定のもとでの dl/dN は、 ΔK と1対1に対応しないときでも、 $\sigma_a l$ より一義的に決まり、本材料では R に無関係に $n \cong 8$ である。また、 $dl/dN \propto \sigma_a l$ が成り立つ l の下限は $50 \mu\text{m}$ 程度である。

図9 S-N 曲線 ($R=0$ の場合) 図10 き裂伝ば曲線 ($R=0$ の場合) 図11 き裂長さとの相対繰返し数の関係 ($R=0$ の場合)

図12 き裂長さとの相対繰返し数の関係の比較

図13 $dl/dN-l$ の関係 ($R=0$ の場合) 図14 $dl/dN-\sigma_a$ の関係 ($R=0$ の場合)

微小き裂の dl/dN と $\sigma_a l$ が1対1に対応する例⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾はこれまでも多くの材料について示されているが、それらはおもに回転曲げ($R=-1.0$)の結果である。

種々の R の値のもとで行った本実験結果から、 $R=-1.0$ 以外の場合でも高応力下における微小き裂の dl/dN を決定するパラメータとして $\sigma_a l$ が有効であり、 R の影響は $dl/dN \propto \sigma_a l$ の関係の比例定数の変化として現れることが分かる。

3.1.2 $R=0$ の結果 ここでは負荷形式が片振り($R=0$)の結果を示す。この場合、破断する応力を繰返せば、最大応力 σ_{max} が降伏点 σ_{sl} を越えるために、試験片は巨視的に降伏する。

図9にS-N曲線を示す(図中には比較のため他の応力比の結果を併せて示している)。

図10はき裂伝ば曲線である。図11は $\log l$ と相対繰返し数 $(N-N_{0.05})/(N_f-N_{0.05})$ の関係を示す。この場合も $\Delta\sigma$ に無関係に両者の関係は近似的に1本の曲線で整理でき、き裂が短い間は dl/dN は l に比例する。

図12は各種の R の場合の $\log l$ と $(N-N_{0.05})/(N_f-N_{0.05})$ の関係を同一図面上に示したものである。 R が大きくなるほど、長いき裂に対して直線性が成り立ちにくくなっている。

図13は dl/dN の l 依存性である。き裂が短ければ $R=0$ の場合も $dl/dN \propto l$ が成り立つ。図14に $dl/dN-\sigma_a$ の関係を示す。 l 一定では、いずれの場合も近似的には $dl/dN \propto \sigma_a^n$ の関係が認められる。 n の値は他の R (図7)のときとは異なり、 $n \cong 6.4$ となる。この n の値の相違はそのままS-N曲線の傾きの差として現れる(図9)。村上ら⁽⁹⁾によるS45C焼なまし材の低サイクル疲労(両振り引張り圧縮)では、 dl/dN

$\propto \sigma_a^{n-1} l$ の関係が得られており、 n の値は本実験とはほぼ一致している。

図13と14から巨視的降伏が生じる $R=0$ のもとの微小き裂の dl/dN は $\sigma_a^{n-1} l$ により決まることになる。図15に $dl/dN - \sigma_a^{n-1} l$ の関係を示す。

3・2 小応力下での微小き裂の挙動 3・1節では平滑材の結果に基づいて、高応力下のき裂伝ば則に及ぼす応力比の影響を検討したが、ここでは小応力下でのき裂伝ば挙動について述べる。小応力下では平滑材にき裂が発生しないので、小応力下におけるき裂伝ば速度を測定するためには、小穴材または予き裂材を用いる必要がある。以下に述べる結果で、 $R=0$ の場合⁽¹⁰⁾は予き裂材によるもの、 $R=-0.5$ の場合は穴径0.1 mmの小穴材(図2)、 $R=-1.0$ の場合⁽⁷⁾は予き裂材と穴径0.1 mmの小穴材(図2)によるものである。なお、小穴材や予き裂材を用いてもき裂がある程度成長した後では、当然のことながら平滑材にそれらと同じ長さのき裂をつくった場合とほとんど等しいき裂伝ば特性が得られる。

図16に $R=-0.5$ の場合のき裂伝ば曲線を示す。図17に dl/dN の l 依存性を示す。いずれの場合も $\Delta\sigma$ にほとんど無関係にき裂が短い範囲 ($l \leq 1.0$ mm) で、両者の間に近似的に直線関係が認められる。直線の傾きは両者とも $\Delta\sigma \geq 420$ MPa の範囲ではほぼ一定で約1であり、 $\Delta\sigma$ が小さくなるとともに大きくなっていく。

図15 $dl/dN - \sigma_a^{n-1} l$ の関係 ($R=0$ の場合)

図16 微小穴材のき裂伝ば曲線 ($R=-0.5$ の場合)

き、 $\Delta\sigma \leq 380$ MPa の範囲では約2である。このことは dl/dN の l 依存性が $\Delta\sigma$ により異なることを示している。すなわち、 $\Delta\sigma \geq 420$ MPa では $dl/dN \propto l$ 、 $\Delta\sigma \leq 380$ MPa では $dl/dN \propto l^2$ である。 $\Delta\sigma \geq 420$ MPa の範囲 ($dl/dN \propto l$ の成り立つ範囲) のき裂伝ば則は3・1節で示したので、ここでは $\Delta\sigma \leq 380$ MPa の範囲のき裂伝ば則について検討する。

図18に $dl/dN - \Delta K$ 関係を示す (応力拡大係数の計

(a) $R=-0.5$ の場合

(b) $R=-1.0$ の場合⁽⁷⁾

図17 $dl/dN - l$ の関係

(a) $R=-0.5$ の場合

(b) $R=-1.0$ の場合⁽⁷⁾

図18 $dl/dN - \Delta K$ の関係

図19 各種の R のもとでの dl/dN - ΔK 関係の比較

図20 各種の R のもとでの dl/dN - K_{max} 関係の比較

算は半無限体の表面き裂と仮定して近似的に求めた。その際、実験によりき裂面形状を求め計算に使用した。いずれの $\Delta\sigma$ の場合も両者の間に直線性は認められるが、 $\Delta\sigma$ が大きければ dl/dN と ΔK とは 1 対 1 に対応しない (同一 ΔK でも $\Delta\sigma$ が大きいほど dl/dN は大きくなる)。 $\Delta\sigma$ が小さくなれば ($\Delta\sigma \leq 380$ MPa), dl/dN と ΔK は 1 対 1 に対応する。すなわち、応力が小さく $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ の関係が認められなくなれば、 $dl/dN \propto \Delta K^m$ が成り立つようになる。このとき $m \cong 4$ であり、本材料でも Paris ら⁽¹¹⁾による四乗則が近似的に成り立っている。

以上のように $R = -0.5$ でも $R = -1.0$ でも $\Delta\sigma \cong 420$ MPa の範囲では $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ が、 $\Delta\sigma \leq 380$ MPa の範囲では $dl/dN \propto \Delta K^4$ が成り立っている (図 17)。

$380 \text{ MPa} < \Delta\sigma < 420 \text{ MPa}$ の範囲では、伝ば則を簡単なパラメータで表すことは困難であるが、この範囲はせまいので本材料のき裂伝ば則としては、上述した二つを採用すれば、広範囲の条件下における dl/dN を十分な精度で表せると思われる。また、 $R = -0.5$ と $R = -1.0$ とで伝ば則が $\Delta K^m \rightarrow \sigma_a^2 l$ に移行する場合の $\Delta\sigma$ の範囲がほぼ等しいことは、 R により dl/dN の値に差が生じている場合でも、き裂伝ば機構そのものには R がほとんど影響しないことを示唆している。

図 19 は 各種の R ($-1.0 \leq R \leq 0$) のもとで dl/dN - ΔK の関係を比較したものである。き裂伝ば挙動に及ぼす R の影響に関する研究⁽¹²⁾は、これまでも数多く行われており、一般に炭素鋼では R が 0 以上ならき裂伝ば挙動には R の影響はほとんど認められず、 R が 0 以下で R の影響が現れる⁽¹³⁾といわれている。本実験でも $-1.0 \leq R \leq 0$ の範囲では R の影響が認められ、その効果は、両対数で表した dl/dN - ΔK 関係を平行移動させる。

図 20 は dl/dN と最大応力拡大係数 K_{max} の関係で

ある。同一 K_{max} の場合でも dl/dN は $R = -1.0$ のほうが $R = 0$ より 2 倍程度大きくなっている。Crooker⁽¹⁴⁾ は高強度合金を用いて平板試験片の引張り圧縮試験を行い、同一 K_{max} の場合でも $R = -1.0$ のほうが $R = 0$ より dl/dN は約 1.5 倍大きくなることを示している。

4. 結 論

実質的には平滑材とみなせる試験片およびこれに微小穴を有する試験片を用いて、各種応力比 R のもとで引張り圧縮試験を行い、微小き裂の伝ば挙動に及ぼす応力比の影響を調べた結果、以下の結論を得た。

(1) 大応力下のき裂伝ば挙動に及ぼす R の影響

(i) き裂が短く応力が大きいとき、 R が一定でもき裂伝ば速度 dl/dN は応力拡大係数幅 ΔK のみでは決まらないが、いずれの R ($R = -0.5, -1.0, -1.5$) の場合も $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ (σ_a : 応力振幅) の関係が成り立つ。また、 R の影響はその比例定数の変化として現れる。

(ii) $R = 0$ の場合 (この場合は破断する応力を繰返せば、最大応力はいずれの場合も降伏点を越えるため試験片は巨視的に降伏する) も、微小き裂の伝ば則として $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ が得られるが、 n の値は (i) の場合と異なり、 $n \cong 6.4$ である。すなわち、 $dl/dN \propto \sigma_a^{6.4} l$ となる。

(2) 応力が小さく dl/dN が $\sigma_a^2 l$ により決まらなくなれば、 $dl/dN \propto \Delta K^m$ ($m \cong 4.0$) の関係が成り立つ。また、 $-1.0 \leq R \leq 0$ の範囲で R の影響が認められ、それは両対数で表した dl/dN - ΔK 関係の平行移動として現れる。

(3) 本材料ではいずれの R の場合も、き裂伝ば則として、大応力下で $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ 、小応力下で $dl/dN \propto \Delta K^m$ が成り立つ。 ΔK^m から $\sigma_a^2 l$ へは連続的に移行するので、この範囲の dl/dN を簡単なパラメータで表すのは難しいが、この範囲はせまいので、き裂伝ば則として上記の二つを採用すれば、本材料における広範囲の条件下のき裂伝ば則を精度よく表すことができる。

文 献

- (1) Kocanda, S., *Fatigue Failure of Metals*, (1978), 199, Sijthoff & Noordhoff Inter. Pub.
- (2) 西谷, 機講論, No. 790-13 (昭 54-10), 63.
- (3) Nisitani, H. (Mura, T., 編), *Mechanics of Fatigue-AMD*, 47 (1981), 151, ASME.
- (4) 西谷・森光, 機論, 42-354 (昭 51), 325.
- (5) 西谷・皮籠石, 機論, 49-440, A (昭 58), 431.
- (6) 西谷・後藤, 機論, 49-443, A (昭 58), 779.
- (7) 西谷・ほか 2 名, 機論, 50-449, A (昭 59), 23.

- (8) 広瀬・ほか3名, 機論, 45-400, A (昭54), 1496.
- (9) 村上・ほか4名, 機論, 49-447, A (昭58), 1411.
- (10) 西谷・後藤, 機講論, No. 820-12 (昭57-10), 269.
- (11) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASME, Ser. D*, 85-4 (1963), 528.
- (12) Maddox, S. J., *Int. J. Fract.*, 11-3 (1975), 389.
- (13) 長谷川・川田, 材料, 21-227 (昭47), 38.
- (14) Crooker, T. W., *Trans. ASME, Ser. B*, 93-4 (1971), 893.

討 論

〔質問〕 加藤 容三〔岐阜大学工学部〕

微小き裂の伝ば則に関する有益な提案に対して敬意を表する。

$dl/dN \propto \sigma_a^n l$ において, $R = -0.5, -1.0$ および -1.5 の場合とは $n=8$, 一方, 最大応力が降伏点を越える $R=0$ の場合には塑性疲労の場合も含めて $n=6.4$ となる。なぜ, n の値にこのような相違が生ずるのか。また, n の値の相違は $S-N$ 曲線の傾きの差として現れるとされているが, これは疲労寿命の大部分が微小き裂の進展に費やされることを前提とした議論か。

〔回答〕 $R=0$ の場合に, n の値が $R=-0.5,$

$-1.0, -1.5$ の場合と異なる原因としては, 巨視的降伏による材質の変化が考えられる。この $n=6.4$ は, 多くの焼なまし材で認められる $n=7\sim 8$ と焼入れ・焼もどし材の $n=3\sim 4$ の中間にある。また, n の差が $S-N$ 曲線の傾きの差として現れるのは, ご指摘のとおり, 寿命の大部分が微小き裂の伝ばに費やされていることに起因している。本材料では, 全寿命の $70\sim 90\%$ がき裂の伝ば寿命であり, その中の大部分は 1 mm までの微小き裂の伝ば寿命で占められている(付1)。

(付1) 西谷・後藤, 機講論, No. 830-10 (昭58-10), 101.