S20C 焼なまし材および予ひずみ材の二段二重重複 回転曲げにおける疲労き裂の挙動†

西谷 弘 信* 高 瀬 徹**

Behavior of Fatigue Cracks in Annealed or Pre-Strained 0.21% C Steel Specimens under Two-Step Loading

by

Hironobu NISITANI and Tooru TAKASE

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

Previous studies of fatigue under two-step loading have shown that the value of cumulative cycle ratio is usually smaller than unity when the first stress level is higher than the second, but in some cases it becomes larger than unity. This phenomenon may be related to the existence of work hardened layer in the specimen.

In the present study, rotating bending fatigue tests were performed by using the annealed or the pre-strained 0.21%C steel specimens under two-step loading. The behavior of fatigue cracks was observed successively by the replication method and the effect of the work hardened layer on the cumulative fatigue damage was examined. The main results obtained are as follows.

(1) The Miner's rule holds good in the crack initiation process under double repeated stress in two stress levels.

(2) On the annealed specimens:

(a) When $\sigma_1 < \sigma_2$, the value of the cumulative cycle ratio based on fracture, $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$, is nearly equal to unity in general.

(b) When $\sigma_1 > \sigma_2$, the value of $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ is nearly equal to unity excepting the case where the cycle ratio of the first stress level, n_1/N_{f1} , is small. In that case, the value of $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ is often larger than unity. This may be due to the work hardening under the first stress level.

(3) On the pre-strained specimens:

(a) When $\sigma_1 < \sigma_2$, the value of $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ is larger than unity.

(b) When $\sigma_1 > \sigma_2$, the value of $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ is smaller than unity including the case where n_1/N_{f1} is small. This may be due to the work softening under the first stress level.

(4) The results of the pre-strained specimens agreed with the previous results showing that $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2} > 1$ when $\sigma_1 < \sigma_2$ and $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2} < 1$ when $\sigma_1 > \sigma_2$. Therefore, the validity of the Miner's rule depends upon the existence of work hardened layer.

(Received Jan. 31, 1983)

キー・ワード：二段二重重複疲労，焼なまし材，予ひずみ材，マイナー則，疲労き裂挙動

1 緒 言

二段二重重複応力による疲労の問題は、一般の実働荷重による疲労を考える場合に基本的な意味をもっている¹⁾ので、これまでにも多くの研究があり、一般に $\sigma_1 < \sigma_2$ (σ_1, σ_2 : それぞれ一次および二次応力) なら累積繰返し数比は1より大きく、 $\sigma_1 > \sigma_2$ なら1より小さい^{2)~4)}と言われている。この現象はき裂発生までの過程

とき裂伝ば過程とで、疲労被害の尺度が異なることから理解されるが、加工層がない場合には $\sigma_1 > \sigma_2$ の場合でも累積繰返し数比が1より大きいこともある^{5)~7)}。したがって累積繰返し数比と加工層の有無との関連を、疲労き裂発生過程およびき裂伝ば過程の連続観察を通じて明確にしておくことは意義あることであると思われる。

そこで本研究では、S20Cの焼なまし材および予加工材について二段二重重複応力下の回転曲げ疲労試験を行い、破断の起点となるき裂の発生および伝ば挙動

† 原稿受理 昭和58年1月31日

* 正会員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎

** 学生会員 九州大学大学院 福岡市東区箱崎

をレプリカ法によって連続的に観察し、加工層の有無と疲労挙動の関連について検討した。

2 使用材料、試験片および実験方法

素材は市販の S20C 圧延丸棒（直径約 22 mm）であり、それをまず 890℃ で 1 時間焼なましした。

焼なましのままの試験片（以下、焼なまし材と呼ぶ）は、焼なまし後、Fig. 1 に示す形状に機械加工し、さらに 600℃ で 1 時間真空焼なましを行った。

Fig. 1. Dimensions of specimen and detail of a notched part.

10% 引張り予ひずみを与えた試験片（以下、予ひずみ材と呼ぶ）は、焼なまし後予ひずみを与え、100℃ で 1 時間の低温焼なましを行って Fig. 1 に示す形状に機械加工した。100℃ で 1 時間の低温焼なましは、常温で約 3 か月の時効に相当する。この時効処理は、加工後疲労試験を行うまでの時間の相違による時効硬化のばらつきを防ぐために行った。

両材は、いずれも試験前にその表面を約 30 μm 程度電解研摩により取り除いた。試験片は Fig. 1 に示すように、被害を受ける領域を局限するため、中央に浅い部分切欠きを有しているが、その切欠き係数は小さく実質上平滑材とみなせる。

素材の化学成分を Table I に、焼なまし材および予ひずみ材の機械的性質を Table II に示す。

Table I. Chemical composition (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn
0.21	0.21	0.47	0.014	0.017	0.09	0.06	0.21	0.016

Table II. Mechanical properties.

Pre-strain (%)	σ_{s1} (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	ϕ (%)
0	276	469	864	58.7
10	543	562	867	51.8

ϕ : Reduction of area. (%)

試験機は、小野式回転曲げ試験機（容量 14.7 N·m, 回転数 3 000 rpm）を用いた。

表面状態の観察は、所定の繰返し数で試験機を止めて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）で行った。き裂長さとしては表面において円周方向に沿って測った長さをとった。

3 実験結果および考察

3.1 焼なまし材および予ひずみ材の疲労強度

Fig. 2 に焼なまし材の S-N 曲線と 0.05 mm および 0.1 mm のき裂発生曲線を示す。Fig. 3 に予ひずみ材の S-N 曲線と 0.1 mm のき裂発生曲線を示す。

二段二重複応力の実験では、二段応力として疲労限度の応力 σ_w の 1.1 倍および 1.4 倍の応力をとった。すなわち、応力上昇の場合 $\sigma_1 = 1.1\sigma_w \rightarrow \sigma_2 = 1.4\sigma_w$ とし、応力下降の場合 $\sigma_1 = 1.4\sigma_w \rightarrow \sigma_2 = 1.1\sigma_w$ とした。 σ_1 , σ_2 の数値とその応力のもとでの寿命を Table III に示す。

Fig. 2. S-N and crack initiation curves of annealed specimens.

Fig. 3. S-N and crack initiation curves of pre-strained specimens.

Table III. Values of first and second stress σ_1 , σ_2 and fatigue lives N_f under these stresses (N_f : average of two specimens).

Materials	Annealed specimens ($\sigma_w = 205$ MPa)	Pre-strained specimens ($\sigma_w = 235$ MPa)
σ_1, σ_2		
1.1 σ_w	225 MPa ($N_f = 99 \times 10^4$)	259 MPa ($N_f = 82 \times 10^4$)
1.4 σ_w	287 MPa ($N_f = 17 \times 10^4$)	329 MPa ($N_f = 14 \times 10^4$)

3.2 一定応力下におけるき裂の発生と伝ば

二段二重複応力下の累積繰返し数比の特性を支配

するのは、一定応力下のき裂の発生および伝ば挙動である。したがって、ここではまず焼なまし材および予ひずみ材のき裂発生・伝ばの特徴を調べる。

(a) Annealed specimens. (b) Pre-strained specimens.

Fig. 4. Relation between crack length l and cycle ratio based on fracture n/N_f .

(a) Annealed specimens. (b) Pre-strained specimens.

Fig. 5. Relation between crack length l and cycle ratio based on 0.5mm crack initiation $n/N_{0.5}$.

Fig. 4, 5 で縦軸は、いずれもき裂長さ l である。横軸は相対繰返し数で、Fig. 4 のそれは破断寿命 N_f を基準とした相対繰返し数、Fig. 5 のそれはき裂が 0.5 mm に達するまでの寿命 $N_{0.5}$ を基準とした相対繰返し数である。ここでは $N_{0.5}$ としてき裂発生から破断までの全体的なき裂伝ば曲線より推定した値を採用した。また図中、破線はき裂の合体を、破線で示した記号はまだき裂になっていないすべり帯である。

(a) 焼なまし材の場合 Fig. 4 (a) では、 l と n/N_f との関係は、き裂 (0.05 mm, 0.1 mm) 発生曲線と $S-N$ 曲線がほぼ平行に近いことを反映して、全体的にみればあまり応力レベルに依存しない。このことは、応力レベルの切替えによる過渡的な現象が無視できれば、本材料では破断寿命を対象としてもマイナー則がほぼ成り立つことを示唆している。

Fig. 5 (a)を見ると、き裂が 0.5 mm に達するまでの寿命を対象としたマイナー則も本材料では成立する可能性があると思われる。

Fig. 6 (a)は、焼なまし材に疲労限度の応力 $\sigma_w (=205 \text{ MPa})$ を繰返した場合の表面状態の変化を示している。図からわかるように、ある有限の領域がほぼ同時に被害を受け、き裂となり、わずかながら伝ばした後に停留している。破断する応力を繰返すときも、き裂発生および初期き裂伝ば過程は Fig. 6 (a) の場合と同様である。⁸⁾

*1 き裂合体直後の見かけ上の加速を修正した伝ば曲線

Fig. 6. Behavior of fatigue cracks under constant loading ($\leftrightarrow$ axial direction).

(b) 予ひずみ材の場合 Fig. 4 (b)で $\sigma=305$ MPa のき裂伝ば曲線が大きくずれているが、これは発生したき裂が長かったこと、伝ばの初期において合体が多かったことによる。したがって、ある程度き裂が伝ばした後（例えば $l>0.5$ mm）は、他の応力下における傾向とほとんど差がなくなっている。この例を除けば、 l と n/N_f との関係は予ひずみ材でもあまり応力レベルに依存していない。ただし、予ひずみ材では焼なまし材より相対的に早い時期にき裂が発生する。例えば、0.5 mm き裂の発生時期は予ひずみ材では $n/N_f \cong 0.5 \sim 0.6$ であるのに対し、焼なまし材では $n/N_f \cong 0.6 \sim 0.7$ である。

Fig. 5 (b) を Fig. 5 (a) と比較すると、予ひずみ材ではばらつきが大きくなっている。これは、き裂の発生過程の差異 (Fig. 6) によるものと思われる。

Fig. 6 (b) は、予ひずみ材に疲労限度の応力 $\sigma_w (=235$ MPa) を繰返した場合の表面状態の変化であるが、この図からわかるように、予ひずみ材では加工軟化によってすべりが局所に集中する傾向が見られる。したがって、疲労限度の応力を 10^7 回繰返したときのすべり帯の密度は、焼なまし材に比べて小さい。このことは有限寿命域においても同様に認められる（例えば Fig. 12 と 16 の比較）。すべり帯の密度が小さいことは平均化の傾向が弱いことと対応しているので、予ひずみ材の方がばらつきが大きくなることは自然である。

3.3 二段二重重複応力下におけるマイナー則の検討

3.3.1 き裂発生を対象としたマイナー則の検討

(a) 焼なまし材の場合 Fig. 7 は、き裂 ((a) 0.1 mm, (b) 0.5 mm) 発生までの寿命を対象としたときのマイナー則の検討結果である。両図において、累積繰返し数比 $n_1/N_{c1} + n_2/N_{c2}$ (N_c : き裂発生寿命) は、 $\sigma_1 < \sigma_2$ のとき 1 より小さく、 $\sigma_1 > \sigma_2$ のとき 1 より大きくなる傾向にあるが、ほぼ 1 に近い。すなわち、微小き裂が生じるまでの寿命 N_c を基準にとれば、多少き裂伝ば過程が含まれることになるが、それでもマイ

Fig. 7. Cumulative cycle ratio based on crack initiation of annealed specimens (in this figure, numbers denote the values of the cumulative cycle ratio).

ナー則がほぼ成り立つ。

(b) 予ひずみ材の場合 Fig. 8 は、き裂 ((a) 0.1 mm, (b) 0.5 mm) 発生までの寿命を対象としたときのマイナー則の検討結果である。この場合はばらつきが大きいので、焼なまし材の場合ほど明確ではないが、やはりき裂発生を基準にとれば、マイナー則がほぼ成り立つと考えてよいであろう。

Fig. 8. Cumulative cycle ratio based on crack initiation of pre-strained specimens (in this figure, numbers denote the values of the cumulative cycle ratio).

3.3.2 破断を対象としたマイナー則の検討

(a) 焼なまし材の場合 Fig. 9 に破断寿命を対象としたときのマイナー則の検討結果を示す。Fig. 10, 11 にき裂伝ば曲線を示す。図中、実線は σ_1 のみを繰返すときのき裂伝ば曲線であり、細線は σ_2 のみを繰返すときのき裂伝ば曲線を、応力切替え点を通るように、平行移動させたものである。また破線はき裂の合体、破線で示した記号はまだき裂になっていないすべり帯である。

応力上昇の場合には、Fig. 9 (図中○印) に示すように累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は $n_1/N_{f1} = 0.75$ の場合 (このときは Fig. 10 からわかるように σ_1 の

Fig. 9. Cumulative damage based on fracture of annealed specimens (in this figure, numbers denote the values of the cumulative cycle ratio).

Fig. 10. Relation between crack length l and number of cycles N for annealed specimens (the case of $\sigma_1 < \sigma_2$).

もとのき裂伝ばが平均よりおそくなっている) 以外は 1 に近い。これは、き裂長さ と 破断寿命 を基準とした相対繰返し数との関係がほぼ 1 本の曲線で表される (Fig. 4 (a)) ことと、 σ_2 のもとのき裂伝ばが応力切替えの影響をほとんど受けない (Fig. 10) ことから理解できる。Fig. 10 からわかるように、 σ_2 のもとのき裂伝ば挙動が、 σ_1 の繰返し数比に無関係にき裂の寸法と σ_2 のみによってほぼ決まるのは、 $\sigma_1 < \sigma_2$ であるため、 σ_1 によるき裂先端の塑性域より σ_2 による塑性域の方が大きくなり、 σ_1 による塑性域が σ_2 に切替えた際のき裂伝ばにほとんど影響しないからだと思われる。

Fig. 11. Relation between crack length l and number of cycles N for annealed specimens (the case of $\sigma_1 > \sigma_2$).

つぎに応力下降の場合には、Fig. 9 (図中●印) に示すように、累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は σ_1 の繰返し数比 n_1/N_{f1} が小さいところを除き 1 に近い。 n_1/N_{f1} が小さければ σ_2 での寿命が処女材の寿命よりかなり増加している (n_1/N_{f1} が大きくなると $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ が 1 より小さくなる場合もある^{5)~7)})。これは n_1/N_{f1} が小さければ、 σ_1 による被害の影響より加工硬化の影響が大きいためだと思われる。実際に $\sigma_1 > \sigma_2$ のとき、試験前に比べ σ_1 を 5% 繰返した後ではフェライトの硬度 (荷重 25 g, 10 点の平均) は約 17% 程度硬くなっていた。

応力下降の場合 Fig. 9 に見られる傾向は、Fig. 11

Fig. 12. Behavior of fatigue cracks under two-step loading of annealed specimens ($\leftrightarrow$ axial direction).

に示すき裂伝ば曲線により説明できる。Fig. 11 からわかるように、応力切替え後のき裂伝ば挙動と最初から σ_2 を繰返す場合のき裂伝ば挙動との間にはかなりの差がある。特に n_1/N_{f1} が小さいときには、き裂伝ばがおそくなる傾向にある。この結果、 n_1/N_{f1} が小さいところでは $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ が 1 よりかなり大きくなる。

Fig. 12 は試験片表面状態の変化を σ_1 の繰返し数比が 12.5% のものについて示したものである。応力上昇の場合も下降の場合も、 σ_1 で生じたき裂が σ_2 のもとでもそのまま伝ばし破断にいたっている。

(b) 予ひずみ材の場合 Fig. 13 に破断寿命を対象としたときのマイナー則の検討結果を示す。Fig. 14, 15 にき裂伝ば曲線を示す。図中、実線および細線は Fig. 10, 11 におけると同様に、 σ_1 および σ_2 のみの場合のき裂伝ば曲線である。また破線はき裂の合体、破線で示した記号はまだき裂になっていないすべり帯を示す。

Fig. 13. Cumulative damage based on fracture of pre-strained specimens (in this figure, numbers denote the values of the cumulative cycle ratio).

Fig. 14. Relation between crack length l and number of cycles N for pre-strained specimens (the case of $\sigma_1 < \sigma_2$).

Fig. 15. Relation between crack length l and number of cycles N for pre-strained specimens (the case of $\sigma_1 > \sigma_2$).

応力上昇の場合には、Fig. 13 (図中○印) に示すように累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は 1 より大きい。また Fig. 14 からわかるように、予ひずみ材の場合も、 $\sigma_1 < \sigma_2$ ならば、焼なまし材の場合と同様に、応力切替え後のき裂伝ば挙動は、 σ_2 のみの場合のき裂伝ば挙動に近いが、多少伝ばがおそくなる傾向にある。

つぎに応力下降の場合には、Fig. 13 (図中●印) に示すように累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は 1 より小さくなっている。特に n_1/N_{f1} が小さいときには焼なまし材との違いが著しい。これは応力下降の場合、 σ_1 により焼なまし材では加工硬化するのに対し、予ひずみ材では加工軟化するためだと思われる。実際に $\sigma_1 > \sigma_2$ のとき、試験前に比べ σ_1 を 5% 繰返した後ではフェライトの硬度 (荷重 25 g, 10 点の平均) は約 12% 程度軟らかくなっていた。

Fig. 13 で示した結果は、従来の結果とよく一致している。

応力下降の場合 Fig. 13 に見られる傾向は、Fig. 15 に示すき裂伝ば曲線により説明できる。Fig. 15 からわかるように、予ひずみ材の場合には、応力切替え後のき裂伝ば速度は最初から σ_2 を繰返す場合のき裂伝ば速度より大きい傾向にある。この結果、焼なまし材の場合とは異なり、 n_1/N_{f1} の全範囲にわたって、累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ が 1 より小さくなる。

Fig. 16 は試験片表面状態の変化を σ_1 の繰返し数比が 12.5% のものについて示したものである。予ひずみ材の場合も、 σ_1 で生じたき裂が σ_2 でも伝ばし破断にいたっている。ただし、予ひずみ材の場合には、くしの歯状のすべり帯が認められ、このことから加工軟化が起っていることが推測される。

4 結 言

S20C 焼なまし材および予ひずみ材の二段二重重複疲労の結果を要約すると次のようになる。

(1) 二段二重重複疲労においてき裂発生過程 (所定

Fig. 16. Behavior of fatigue cracks under two-step loading of pre-strained specimens ($\leftrightarrow$ axial direction).

の寸法の微小き裂が生じるまでの過程)を対象とすればマイナー則がほぼ成り立つ。その背景として、微小き裂の長さや相対繰返し数との関係が応力レベルにあまり依存しないことが関係していると思われる。

(2) 焼なまし材について：

(a) 応力上昇の場合には、破断寿命を対象とする累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は全体として1に近い。これはき裂伝ば挙動から理解できる。

(b) 応力下降の場合には、破断寿命を対象とする累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は、一次応力の繰返し数比 n_1/N_{f1} が小さいところを除き1に近い。 n_1/N_{f1} が小さければ、 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は1よりかなり大きい場合がある。これは、一次応力による加工硬化の影響だと思われる。

(3) 予ひずみ材について：

(a) 応力上昇の場合には、破断寿命を対象とする累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は1より大きくなる。

(b) 応力下降の場合には、破断寿命を対象とする累積繰返し数比 $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}$ は、一次応力の繰返し数比 n_1/N_{f1} が小さいところも含めて1より小さくなる。これは、予ひずみ材の場合、一次応力により加工軟化するためだと思われる。

(4) 従来よく言われている $\sigma_1 < \sigma_2$ のとき $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2} > 1$, $\sigma_1 > \sigma_2$ のとき $n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2} < 1$ となる

結果は、予ひずみ材についてよく成り立つ現象である。したがって、マイナー則が成立するか否かは加工層の有無とも関連していると思われる。

最後に、実験に協力していただいた寺井大輔、福永剛両君に深く感謝します。

(昭和57年11月10日 第16回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 例えば、日本材料学会編，“金属の疲労”，p. 300 (1964) 丸善；中沢 一，本間寛臣，“金属の疲労強度”，p. 55 (1982) 養賢堂。
- 石橋 正，“金属の疲労と破壊の防止（増訂改版）”，p. 112 (1967) 養賢堂。
- 川田雄一，関戸義人，佐々木茂美，日本機械学会論文集，**25**，1147 (1959)。
- 青木逸郎，国尾 武，中村 宏，日本機械学会論文集，**32**，1762 (1966)。
- 西谷弘信，日本機械学会論文集，**34**，220 (1968)。
- 西谷弘信，吉川義久，日本機械学会論文集，**34**，1190 (1968)。
- 西谷弘信，後藤真宏，日本機械学会講演論文集，No. 828-2，65 (1982)。
- 西谷弘信，高尾健一，日本機械学会論文集，**40**，3254 (1974)。