S 45 C 調質平滑材の二段二重重複応力下における疲労被害*

後藤 真 宏^{*1}, 西谷 弘 信^{*2}
柳 川 恭 廣^{*3}, 宮 川 浩 臣^{*1}Fatigue Damage of Heat-Treated 0.45 % C Steel Plain Specimens
Under Two-Step LoadingMasahiro GOTO, Hironobu NISITANI,
Yasuhiro YANAGAWA, and Hiroomi MIYAGAWA

In order to clarify the fatigue damage of plain specimens under complex loadings, it is important to investigate the effect of stress change through the behavior of a small crack because the fatigue life of the specimens is occupied mainly by the propagation life of a small crack. However, these kinds of studies made in heat-treated carbon steels are few. In this study, the fatigue tests of heat-treated carbon steel plain specimens under two-step loading were carried out and the effect of stress change on the behavior of a small crack is investigated. Results show that the value of cumulative cycle ratio $\Sigma(n/N)$ is smaller than unity when the first stress level σ_1 is higher than the second one σ_2 , however $\Sigma(n/N)$ is about unity when σ_1 is lower than σ_2 . This difference in the value of cumulative cycle ratio is explained by the behavior of a small crack after the stress change.

Key Words: Fatigue, Fatigue Damage, Two-Step Loading, Heat-Treated Steel, Cumulative Cycle Ratio, Small Crack, Rotating Bending

1. 緒 言

一般に、機械要素は変動応力下で使用されるため、平滑材の変動応力の影響を調べた研究は数多く報告されている。その中でも基本的な二段二重重複応力の影響を調べたものは特に多く⁽¹⁾、その一般的な傾向として応力上昇の場合は累積繰返し数比 $\Sigma(n/N)$ が 1 より大きく、応力下降の場合は 1 より小さくなることが示されている。

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、調質材の実働荷重下の被害を検討することは実用上重要と考えられる。また、多くの場合寿命の大部分は微小き裂の伝ば寿命によって占められるので、変動応力の被害の物理的背景を把握するためには、このような微小き裂の伝ば挙動を最終破断の起点に注目して調べる必要がある。しかしながら、調質材の変動応力下の被害を微小き裂の挙動との関係で明らかにしたものはほとんど見当たらない。

以上のことを考慮して、本研究では、実質的に平滑

材とみなせる調質鋼試験片を用いて、回転曲げによる二段二重重複応力下の実験を行った。そして、破断の起点となる微視的き裂の発生および伝ば挙動を、レプリカ法により連続観察し、調質材における変動応力下の疲労被害の物理的意味を検討した。

2. 使用材料、試験片および実験方法

素材は市販の S 45 C 圧延丸棒 (直径約 19 mm) であり、それを 845 °C で焼ならし、845 °C で焼入れ、600 °C で焼戻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および組織写真を表 2、図 1 にそれぞれ示す。

図 2 に試験片の形状・寸法を示す。試験片は被害を受ける範囲を局限するための浅い部分切欠を有するが、その切欠係数は 1 に近く実質的には平滑材とみなせるので、以下ではこれを平滑材と呼ぶ。試験片は試験片製作時の加工層を取り除き、かつ表面の観察を容易にするため、直径で約 30 μm 程度電解研磨によって表面を取り除いてから実験に供した。

使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機 (容量: 14.7 N·m, 3 000 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、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカに、真空中で金

* 昭和 63 年 10 月 19 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 3 月 28 日。

^{*1} 正員、大分大学工学部 (〒870-11 大分市旦野原 700)。

^{*2} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*3} 学生員、大分大学大学院。

を蒸着したものについて金属顕微鏡($\times 400$)により行った。き裂長さ l としては試験片表面に沿って測った円周方向長さをとり、応力は部分切欠の存在を無視した試験片最小断面部の公称応力で表した。応力の負荷形式は、最初に一次応力 σ_1 を決められた回数繰返した後に、荷重を切換え二次応力 σ_2 のもとで破断させるもので、応力上昇 ($\sigma_1 < \sigma_2$) と応力下降 ($\sigma_1 > \sigma_2$) のそれぞれについて行った。このとき、荷重の切換えは試験機を止め手動で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 S - N 曲線とき裂発生曲線 図3に一定応力下での破断寿命を○印で、微視的なき裂 ($l=10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度のき裂)の発生曲線を●印で示す。 S - N 曲線と

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

表 2 機械的性質

MPa			%	Hv*
σ_{51}	σ_B	σ_T	ψ	
750	833	1510	61.6	277

*Vickers hardness (Load: 9.8N)

図 1 組織写真

図 2 試験片の形状および寸法

き裂発生曲線はほぼ平行であることがわかる。また、疲労限度 σ_w は 395 MPa であり、 σ_w を 10^7 回繰返した後の表面には $10\ \mu\text{m}$ 程度の長さの微視的停留き裂が認められた (図4)。

本研究では、調質材の疲労限度以上の応力レベルにおける応力切換えによる被害を調べるため、一次応力 σ_1 を繰返した後、二次応力 σ_2 で破断させた。それらの応力として σ_w の約 8% 増しの応力 (425 MPa) と約 46

図 3 一定応力下の S - N 曲線およびき裂発生曲線

図 4 疲労限度の応力を繰返す場合の表面状態の変化

図 5 425 MPa および 575 MPa の場合の $\ln l - n/N_f$ 関係

%増しの応力 (575 MPa) を用いた (図 3)。425 MPa での破断寿命 N_f は 3.87×10^5 回 (4 本の平均) であり, 575 MPa での破断寿命は 4.07×10^4 回 (3 本の平均) である。

図 5 にこれら二つの応力レベルにおけるき裂長さの対数 $\ln l$ と破断寿命 N_f を基準とした相対繰返し数 n/N_f の関係を示す。S-N 曲線とき裂発生曲線がほぼ平行になることを反映して, 両者の関係は応力レベルにほとんど影響されず近似的に 1 本の直線で表される。 $\ln l - n/N_f$ 関係の直線性は, き裂伝ば速度 dl/dN がき裂長さ l に比例することを意味している。また, 全寿命の 30 % 程度でき裂が発生することがわかる。以下に, 応力上昇および応力下降それぞれの実験から得られた結果を示す。

3.2 応力上昇の結果 これは一次応力 ($\sigma_1=425$ MPa) の繰返し数を種々変えて, 二次応力 ($\sigma_2=575$ MPa) にて破断させる実験である。

図 6 に, 破断寿命を基準としたときの, σ_1 の繰返し数比と σ_2 の繰返し数比の関係を○印で, き裂発生までの寿命を基準としたときの同様な関係を●印で示す。図において N_{f1} , N_{f2} は σ_1 , σ_2 のもとでの破断寿命を, N_{i1} , N_{i2} は σ_1 , σ_2 のもとでのき裂発生寿命を示す。また, 図中の数字は $\Sigma(n/N_f)$ または $\Sigma(n/N_i)$ の値を意味している。多少のばらつきはあるが, これらの値はいずれも 1 に近い。すなわち, 破断寿命・き裂発生寿命のどちらを基準にしてもマイナー則がほぼ成り立っている。

図 7 に応力上昇の場合のき裂伝ば曲線を示す。矢印で応力切換えの繰返し数を示す。応力切換え後の σ_2 のもとでのき裂伝ば挙動は, 最初から σ_2 のみを繰返ししたときの伝ば挙動 (一点鎖線) とほぼ一致している。

以上のことからわかるように, $\sigma_1 < \sigma_2$ のときマイナー則がほぼ成り立つ理由は, き裂長さと破断寿命を基

図 6 破断寿命およびき裂発生寿命を基準としたときのマイナー則による評価 (応力上昇の場合)

図 7 応力上昇の場合のき裂伝ば曲線

図 8 応力上昇の場合 ($n_1/N_{f1}=0.65$) の表面状態の変化 ($n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2}=1.28$)

準にした相対繰返し数の関係が応力レベルに無関係にほぼ1本の曲線で表され(図5), かつ σ_2 のもとでのき裂伝ば挙動が応力切換えの影響をほとんど受けずにき裂長さと σ_2 のみによって決まるためである。

図8に応力上昇の場合の表面状態の変化の一例($n_1/N_{f1}=0.65$)を示す。他の n_1/N_{f1} の場合も含めていずれの場合も σ_1 の繰返しにより発生したき裂(またはすべり帯)が, σ_2 のもとでの破断の起点となった。

3.3 応力下降の結果 これは一次応力($\sigma_1=575$ MPa)の繰返し数を種々変えて, 二次応力($\sigma_2=425$ MPa)にて破断させる実験である。

図9に破断寿命を基準としたときの, σ_1 の繰返し数比と σ_2 の繰返し数比との関係を○印で, き裂発生までの寿命を基準としたときの, 同様な関係を●印で示す。き裂発生までの寿命を基準とすれば, この場合もマイナー則がほぼ成り立つ。一方, 破断寿命を基準とした場合は $\sum(n/N_f)$ はいずれも1より小さくなる。

図10はき裂伝ば曲線である。 σ_1 を繰返した後の σ_2 のもとでのき裂伝ば速度は, 最初から σ_2 のみを繰返した場合(一点鎖線)より大きく, とくに1 mm以下の微小き裂に対してその影響が大きいことがわかる。この主な理由として, $\sigma_1(>\sigma_2)$ の繰返しによる加工軟化が考えられる。実際に, 575 MPaの応力を寿命の10%繰返したときの試験片表面におけるビッカース硬さ H_v (荷重:4.9 N)は, 処女材($H_v=277$)に比べて9%程度低下し, 材質が軟化することが確認された。

図11は応力下降の場合の表面状態の変化の一例($n_1/N_{f1}=0.34$)である。この場合も一次応力の繰返しにより発生したき裂(またはすべり帯)が, 二次応力の繰返しのもとでの破断の起点となった。

3.4 調質材のマイナー則 以上述べたように, 調質材ではき裂発生寿命を基準としたときは, 他の材料同様応力上昇・応力下降いずれの場合もマイナー則

図9 破断寿命およびき裂発生寿命を基準としたときのマイナー則による評価(応力下降の場合)

図10 応力下降の場合のき裂伝ば曲線

図11 応力下降の場合($n_1/N_{f1}=0.34$)の表面状態の変化($n_1/N_{f1}+n_2/N_{f2}=0.60$)

がほぼ成り立つ。一方、破断寿命を基準とすれば応力上昇と応力下降とで、傾向的に $\Sigma(n/N_f)$ の値は異なるが、これは焼なまし材^{(2)~(4)}や予ひずみ材⁽⁴⁾で得られる傾向とも異なる。ここでは、調質材における破断寿命を基準としたときのマイナー則を他の材料との比較を通して検討する。

図 12, 13 に、本実験結果と 3 種類の材料 (S 20 C 焼なまし材⁽⁴⁾, S 20 C 予ひずみ材⁽⁴⁾および S 45 C 焼なまし材⁽³⁾) で行われた結果とを応力上昇・応力下降それぞれについて比較したものを示す。

まず、応力上昇 (図 12) の場合は、調質材以外の材料では $\Sigma(n/N_f)$ はいずれも 1 より大きくなる傾向がある。調質材との差は、調質材では S-N 曲線とき裂発生曲線がほぼ平行 (図 3) であるのに対し、焼なまし材や予ひずみ材ではこれらの曲線が高応力側で離れる傾向にある⁽³⁾⁽⁴⁾ ことに起因していると思われる。すなわち、後者では同じ長さのき裂を発生するのに要する繰返し数比が応力が小さいほうが大きくなるため、応力を高応力に切替えたときの残りの繰返し数比が、低応力下でそのまま繰返す場合より大きくなり、けっきょく $\Sigma(n/N_f)$ は 1 より大きくなる。

次に、応力下降 (図 13) の場合について考える。焼なまし材では、一次応力の繰返し数比が小さい範囲では $\Sigma(n/N_f)$ の値は 1 より大きくなるが、 n_1/N_{f1} が増加するにつれ、 $\Sigma(n/N_f)$ の値は 1 に近づく傾向にある。これに対し、調質材と予ひずみ材では $\Sigma(n/N_f)$ の値はいずれの材料でも 1 より小さくなる。この理由としては、一次応力の繰返しによる加工軟化が考えられる (これらの材料では、 $1.4\sigma_w$ 程度の応力を寿命の 5~10% 程度繰返せば、ビッカース硬さは処女材に比

べ約 10% 低下する)。

表 3 に、図 6, 9 の結果を整理したものを示す。 $\Sigma(n/N_f)$ の値はいずれも $0.6 < \Sigma(n/N_f) < 1.28$ の範囲にあり、これは實際上マイナー則の成立を大きく否定するものではないが、調質材では上述したように応力上昇と応力下降とで $\Sigma(n/N_f)$ の値に他の材料とは異なる傾向が認められる。このことは、調質材の実働応力下の疲労被害を検討する際に重要な意味をもつと思われる。

表 3 応力上昇・応力下降それぞれにおける繰返し繰返し数比の値 (S 45 C 調質材)

	n_1	n_1/N_{f1}	n_2	n_2/N_{f2}	$\Sigma(n/N_f)$
a	33500	0.09	30600	0.74	0.83
	90100	0.23	36100	0.89	1.12
	96700	0.25	31200	0.77	1.02
	140000	0.36	17400	0.43	0.79
	193400	0.50	28600	0.70	1.20
	251400	0.65	25300	0.63	1.28
	290000	0.75	6600	0.15	0.90
	40	0.001	326500	0.85	0.85
b	2000	0.05	292600	0.76	0.81
	11000	0.27	130200	0.34	0.61
	14000	0.34	98000	0.26	0.60
	22000	0.55	56200	0.15	0.70
	30000	0.74	43300	0.11	0.85

a: $\sigma_1=425\text{MPa} \rightarrow \sigma_2=575\text{MPa}$

b: $\sigma_1=575\text{MPa} \rightarrow \sigma_2=425\text{MPa}$

$\sigma=425\text{MPa}$ ($N_f=38.65 \times 10^4$)

$\sigma=575\text{MPa}$ ($N_f=4.07 \times 10^4$)

図 12 調質材と焼なまし材、予ひずみ材のマイナー則による評価 (応力上昇の場合)

図 13 調質材と焼なまし材、予ひずみ材のマイナー則による評価 (応力下降の場合)

4. 結 論

実質的には平滑材とみなせる S 45 C 調質材について、一次応力を決められた回数繰返した後、二次応力にて破断させる回転曲げ疲労試験を行った（応力としては疲労限度の約 8 % 増の応力と約 46 % 増の応力を用いた）。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) き裂発生寿命を基準とすれば、応力上昇・応力下降のいずれの場合でもマイナー則がほぼ成り立つ。

(2) 破断寿命を基準とするとき、応力上昇の場合は累積繰返し数比 $\Sigma(n/N_f)$ の値はほぼ 1 となり、マイナー則が近似的に成り立つが、応力下降の場合は $\Sigma(n/N_f)$ の値はいずれも 1 より小さくなる。また応力上昇・応力下降ともに、一次応力で被害の集中した部分が、二次応力のもとでも被害を受け最終破断の起点となる。

(3) 本材料と他の材料（焼なまし材、予ひずみ材）の二段二重重複応力下の被害を比較すると、

(a) 応力上昇の場合：一般に、焼なまし材および予ひずみ材では $\Sigma(n/N_f)$ は 1 より大きくなるのに対し、調質材では $\Sigma(n/N_f) \cong 1$ となる。これは、調質材では S-N 曲線とき裂発生曲線がほぼ平行になるのに対

し、焼なまし材および予ひずみ材では高応力側になるほどこれら二つの曲線が離れるためと考えられる。

(b) 応力下降の場合：焼なまし材では一次応力の繰返し数比 n_1/N_{f1} が小さいうちは $\Sigma(n/N_f)$ の値は 1 より大きい、 n_1/N_{f1} が大きくなるにつれて $\Sigma(n/N_f)$ は 1 に近づく傾向にある。一方、調質材と予ひずみ材では、 n_1/N_{f1} の値に無関係に $\Sigma(n/N_f) < 1$ となる。調質材と予ひずみ材の $\Sigma(n/N_f)$ が 1 より小さくなる主な理由として、一次応力の繰返しにより材質が軟化することが考えられる。

終わりに実験にご協力いただいた大分大学技官・三浦篤義氏、研究当時卒研生であった渡辺悦生君〔現：本田技研工業(株)〕に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 例えば、日本材料学会編、金属の疲労、(昭 39)、300、丸善；日本金属学会編、金属材料の強度と破壊、(昭 39)、408、丸善；石橋、金属の疲労と破壊の防止（増訂改版）、(昭 42)、112、養賢堂；中沢・本間、金属の疲労強度、(昭 57)、55、養賢堂；青木・ほか 2 名、機論、32-244 (昭 41)、1962；西谷、機論、34-258 (昭 43)、220。
- (2) 西谷・吉川、機論、34-263 (昭 43)、1190。
- (3) 西谷・後藤、機論、49-443, A (昭 58)、779。
- (4) 西谷・高瀬、材料、33-369 (昭 59)、666。

討 論

〔質問〕 萩原 芳彦（武蔵工業大学）

図 9 におけるき裂発生寿命を基準にした整理結果で n_1/N_{f1} が 0 や 1 近傍のデータはあるが、0.5 前後の値が示されていない。これら結果から結論(1)のように、応力下降の場合もマイナー則が成立すると断言してよいか。ほかに説明されていない内容が含まれているのか。

〔回答〕 ご指摘に感謝する。確かに、図 9 のデータから応力下降の場合もき裂発生寿命を基準としたときにマイナー則が成り立つと断言するには無理があったと思う。

付図 1 に応力下降で $n_1/N_{f1} \cong 0.62$ の場合の表面状態の変化を示す。 σ_1 により被害を受けた部分は $\sigma_2 (< \sigma_1)$ のもとでも被害が蓄積され、 $n_2/N_{f2} \cong 0.33$ でき裂が発生している。 $n_1/N_{f1} \cong 0.38$ の場合の実験も行い、図 9 にこれらの結果を加えたものを付図 2 に示す。き裂発生を基準とすれば、応力下降の場合もマイナー則がほぼ成り立つ。

〔質問〕 鳥居 太始之（岡山大学工学部）

き裂発生および微小き裂伝ばの観点から疲労被害を検討されたことに敬意を表す。以下に質問させていただく。

(1) 図 10 において、応力下降直後疲労き裂伝ばを生じない期間が見受けられるが、これはどのような理由によるのか。また、それがマイナー則に影響することはないのか。

(2) き裂発生寿命を基準とするマイナー則は、材料および応力変動のタイプによらず多くの場合に成立するようであるが、かなり普遍的な現象として理解したらよいのか。ご見解を伺えれば幸いである。

〔回答〕 検討していただき感謝する。以下のとおり回答する。

(1) 図 10 の○印と▽印の場合は、き裂発生以前（すべり帯の段階）に応力レベルを切り換えている。その後、 σ_2 の繰返しのもとでき裂が発生し伝ばした（応力切り換えによるき裂の停留は認められない）。

(2) き裂発生を基準としたマイナー則が成立する

付図 1 応力下降の場合 ($n_1/N_{f1} = 0.20$, $n_1/N_{i1} = 0.62$) の表面状態の変化
($n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2} = 0.61$, $n_1/N_{i1} + n_2/N_{i2} = 0.95$)

か否かは、き裂発生形態に関係するものと考えている。例えば、炭素鋼にみられるように繰返しの初期から有限寸法の領域が同時に被害を受けて、繰返しとともに全体としてき裂になる場合は、発生を基準としたマイナー則が比較的良く成り立つ^{(2)~(4)}が、時効硬化 Al 合金のようにき裂が点発生的な場合は成り立たない(付1)。

(付1) 西谷・ほか2名, 材料, 33-369(1984), 673.

付図 2 破断寿命およびき裂発生寿命を基準としたときのマイナー則による評価 (応力下降の場合)