炭素鋼の回転曲げ疲労およびねじり疲労における 微視的停留き裂の開閉挙動*

高尾 健一** 西谷 弘信***

Opening and Closing Behavior of Non-Propagating Micro-Cracks in Rotating Bending and Torsional Fatigue Tests of Carbon Steels

by

Ken-ichi TAKAO

(Faculty of Science and Engineering, Saga University, Saga)

and Hironobu NISITANI

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

Non-propagating microcracks are observed on the surfaces of smooth unbroken specimens loaded more than 10^7 cycles at or slightly below their fatigue limits under rotating bending fatigue tests of a prestrained 0.17%C steel and under torsional fatigue tests of an annealed 0.54%C steel. In this study, the crack opening displacement at various distances from the tip of a fatigue microcrack was measured accurately on the specimen surface by using electron microscopy, and the opening-and closing-behaviors of the non-propagating microcracks were compared with those of propagating microcracks, in order to investigate the mechanism of non-propagation of fatigue microcracks.

The main results obtained are as follows;

- (1) The opening-and closing-behaviors of non-propagating microcracks observed under rotating bending fatigue is almost the same as the one observed under torsional fatigue.
- (2) The shape of the rim near the tip of the non-propagating microcrack on the surface of the specimen is very different from that of the propagating microcrack, at the maximum stress in one cycle of the reversed stress under which the respective cracks are formed. The shape of the non-propagating microcrack shows the "cusp" type, while that of the propagating microcrack shows the "blunt" type near the crack tip. The crack opening displacement near the tip of the non-propagating microcracks is much smaller than that of the propagating microcracks formed under the reversed stress whose amplitude is slightly higher than that of fatigue limit. Moreover, the non-propagating microcracks open rarely at or near their tips even under the maximum stress in one cycle of the reversed stress under which the cracks are formed.

(Received Jan. 22, 1979)

キー・ワード：炭素鋼，疲労限度，微視的停留き裂，き裂開閉挙動

1 緒 言

鋭い切欠きを有する試験片に発生する停留き裂や平滑試験片に発生する微視的停留き裂の生成機構を考える場合、あるいはき裂伝ばにおける下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th} の存在を考える場合、き裂閉口現象が重要な意味をもってくる^{1)~5)}。したがって著者らは以前に横穴材や平滑材に停留き裂が生ずる場合について、主として金属顕微鏡によりき裂の開閉挙動を観察しながら疲労試験を行い、き裂停留現象とき裂開閉挙動との関連

について検討してきた²⁾⁶⁾。また最近著者の一人はき裂開口量の測定の精度を上げるために、疲労き裂が成長して行く部分にあらかじめ密で微細な平行線をき裂の伝ば方向と45°をなす方向に引いておき、その線のずれからき裂先端部の開閉挙動を電子顕微鏡写真($\times 10\,000$)上で精密に測定することにより、停留き裂先端部の開閉挙動の特徴を伝ばしている疲労き裂の先端部の開閉挙動の特徴と比較しながら明らかにし、鋭い切欠きを有する試験片の停留き裂の生成機構とコーキング効果の物理的意味を検討してきた。上記の方法によれば各試験片のき裂先端から $10\,\mu\text{m}$ 以内の表面における開閉挙動を $\pm 0.01\,\mu\text{m}$ 程度の精度で定量的に比較する

* 原稿受理 昭和54年1月22日

** 正会員 佐賀大学理工学部 佐賀市本庄町

*** 正会員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎町

ことができる。

本研究では炭素鋼の耐久限度に関して重要な意味をもつ平滑試験片の表面に発生する微視的停留き裂の生成機構の一端を明らかにする目的で、引張りひずみを与えた S15C 平滑試験片の回転曲げ疲労試験と焼なましした S50C 平滑試験片のねじり疲労試験を行い、主として上記と同一手法を用いて微視的停留き裂および伝ばしているき裂の先端部の開閉挙動を比較検討した。なお、曲げ疲労に S50C を用いなかったのは平滑試験片の微視的停留き裂が一般に、曲げ疲労における方がねじり疲労における方より小さい⁸⁾ので、測定が困難となるためである。本研究の場合には両者の微視的停留き裂の寸法はよく似ている。

2 材料、試験片および実験方法

素材は市販の S15C 圧延丸棒（直径 25 mm，長さ 5 m）および S50C 圧延丸棒（直径 22 mm，長さ 5 m）である。試験片作製手順を Fig. 1 に示す。試験片形状を Fig. 2 に示す。Fig. 1 の最終過程で最大主応力

と 45° をなす方向に酸化クロム粉を用いて密で微細な平行線を切欠き底に引いた。浅い切欠きを付けたのは疲労被害を受ける領域を局限するためである。この切欠きによる切欠き係数は小さい（Fig. 2 (a) と同一形状の S10C 焼なまし試験片の回転曲げ疲労における切欠き係数は約 1.06 である⁹⁾）ので、本試験片は実質的には平滑試験片とみなし得る。試験片に加える応力はすべて切欠きの存在を考えない公称応力で与えた。ねじり疲労における繰返し応力はすべて両振りで与えた。

素材の化学成分と焼なましの機械的性質を Table I に示す。S15C に 6% の引張りひずみを与えることによって硬度 H_v は約 180 となり、焼なまし材のそれに比べて約 50% 上昇した。

用いた試験機は小野式回転曲げ疲労試験機（容量 10 kgm, 3 000 rpm）と繰返し曲げねじり疲労試験機（定荷重型，容量 10 kgm, 2 000 rpm）である。

疲労過程における表面状態の変化の観察は、所定の繰返し数ごとに採取した浅い切欠き部のレプリカにつ

(*) This operation was performed only on the surface of the notch.

Fig. 1. Procedure in preparation of specimens.

Fig. 2. Dimensions of specimens and details of notched parts.

Table I. Chemical composition and mechanical properties of materials.

Materials	Chemical composition						Mechanical properties				
	(%)						Yield strength	Tensile strength	True fracture strength	Reduction of area	Hardness
	C	Si	Mn	P	S	Cu	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(%)	H_v
0.17%C steel	0.17	0.25	0.44	0.011	0.02	0.02	20 7	38 7	79.1	64.3	118
0.54%C steel	0.54	0.28	0.77	0.017	0.016	0.06	35 4	68.7	105 2	42.3	—

Fig. 4. Surface of a specimen at different stages of a rotating bending fatigue test (prestrained 0.17%C steel).

Fig. 3. Method of measurements of crack opening displacements.

いて金属顕微鏡を用いて行った。回転曲げ疲労における疲労破面の観察は微視的停留き裂を有する試験片を液体窒素中でぜい性破壊させたのち、走査型電子顕微鏡を用いて行った。

き裂開閉挙動の観察は所定の繰返し数で試験機を止め、最大応力および最小応力を負荷した状態で切欠き底のレプリカを採取し、そのレプリカについて電子顕

微鏡を用いて行った。き裂開口量は Fig. 3 の方法に従って電子顕微鏡写真上 ($\times 10\,000$) で、切欠き底に引いた細線のずれを求めることによって得た。

3 実験結果および考察

3・1 微視的停留き裂の生成過程と破面(回転曲げ)

Fig. 4 に電解研磨したままの回転曲げ疲労試験片に疲労限度の応力 σ_{w0} (19.0 kg/mm^2) を繰返すときの表面状態の変化を示す。この場合、き裂発生過程は焼なまし材におけるそれとよく似ており (ただしき裂発生の起点は異なる。すなわち焼なまし材では結晶粒界であるのに対し、予ひずみ材では粒内のすべり帯である)、将来 1 結晶粒程度のき裂となるべき部分 (すべり帯) はその寸法をほとんど増さず、そこにすべりが繰返されて徐々に自由表面に近づく^{*1} 1 結晶粒程度のき裂となるようである ($N=10^5$ および 4×10^5)。すべり帯の発生状態は両者で多少異なる。すなわち、焼なまし材においてはすべり帯は結晶粒をぬりつぶすように密に発生するが、予ひずみ材ではすべりは比較的少数のすべり帯中に集中的に起り、疲労き裂は多くの場合そのようなすべり帯中に発生する。疲労限度の応力では発生した 1 結晶粒程度のき裂が隣りの結晶粒中へ伝ばし始め ($N=10^6$)、 10^7 回の応力繰返しの後には表面において平均結晶粒径 (約 $50\text{ }\mu\text{m}$) の 4~5 倍の大きさに成長して微視的停留き裂となっている。

Fig. 5 に Fig. 4 の微視的停留き裂の破面の写真を示す。Fig. 5 から試験片内部におけるき裂面の形状はほぼ半円状を呈しており、このときのき裂深さは表面における長さの 30~40% である。以上のことから本材料における疲労限度も焼なまし材におけると同様に、き裂が発生しない限界の応力ではなく、発生した 1 結

*1 すべりの繰返しによって将来き裂となるべき部分は、小さい外力でもその部分全体にわたって開口するようになることを意味する。

Fig. 5. Fractographs of a non-propagating microcrack formed under a rotating bending fatigue test (the identical crack at $N=10^7$ in Fig. 4. The region designated by arrows A and enclosed by a circle means the starting point of fatigue cracking and the arrows B mean a non-propagating microcrack on the surface of a specimen).

晶粒程度のき裂が表面に沿うと同時に内部に向っても多少伝ばして微視的停留き裂となる限界の応力であるといえる。Fig. 5 (b), (c)から表面付近の比較的黒く見える滑らかな部分 (○で囲んだ部分) がき裂発生起点であると思われるが、このことの詳細については今後さらに検討する予定である。

3・2 伝ば中のき裂の先端部の挙動

伝ば中のき裂を Fig. 6 (a) (回転曲げ) および Fig. 7 (ねじり疲労) に示す。ねじり疲労におけるき裂の発生、伝ば過程はまず最大せん断応力の作用する方向に生じた疲労き裂が同じ方向に多少伝ばし、その後主応力の作用面内に枝分れして伝ばし続ける。この傾向は S50C 焼入れ焼もどし材においても認められた。Fig. 8 は Fig. 7 (b) の A で示したき裂先端部の、最大、最小応力下における電顕写真である。Fig. 9 および Fig. 10 はそれぞれ Fig. 7 および Fig. 6 に示すき裂の開口変位の測定結果である。回転曲げ疲労およびねじり疲労において、主応力方向とほぼ直交する方向に伝ばしているき裂に対しては、き裂先端付近でも明らかに開口しているのが認められる。開口量はき裂先端からの距離とともに増加しているが、その増加の仕方はき裂先端から 5 μm 程度までの範囲で著しい。この傾向は焼なましした低炭素鋼の横穴材におけるそれとほぼ一致している。このことはき裂が伝ばする際には、応力サイクルごとに先端付近において明らかに開閉を繰返しながら、き裂を伝ばさせる要因の蓄積を受けることを示唆している。

3・3 微視的停留き裂先端部の挙動

Fig. 6 (b), Fig. 11 に微視的停留き裂を示す。ねじ

Fig. 6. Optical micrographs of (a) a propagating microcrack and (b) a non-propagating microcrack under rotating bending fatigue tests.

り疲労 (疲労限度 $\tau_{w0}=15.0 \text{ kg/mm}^2$) における微視的停留き裂は、最大せん断応力方向に発生したき裂がほぼ同一方向に多少伝ばしたのち主応力方向と直交する方向に伝ばして微視的停留き裂となったもので、このような過程は S50C 焼入れ焼もどし材においても観察されている。本材料の場合もねじり疲労において試験片が破断するか否かの限界は、き裂が主応力方向と直交する方向に伝ば方向を変えて多少伝ばしたのち、さらに伝ばするか否かで決っていることがわかる。

Fig. 10 および Fig. 12 にそれぞれ Fig. 6 (b) および Fig. 11 の微視的停留き裂先端部のき裂開口変位の測

Fig. 7. Optical micrographs of a propagating crack at different stages of torsional fatigue test ($\tau_a = 17.0 \text{ kg/mm}^2$, fatigue life $N_f = 7.0 \times 10^5$).

Fig. 8. Electron micrographs near the same tip of a propagating crack as the one designated by an arrow A in Fig. 7 (b), under the minimum- and maximum-stresses in one stress cycle.

定結果を示す。回転曲げ疲労およびねじり疲労における微視的停留き裂は最大応力においてき裂先端から10

μm 離れた箇所では明らかに開口しているが、き裂先端付近ではほとんど開口しない。このき裂の開口状態を伝ば中のき裂のそれと比較すれば、疲労限度より10～15%高い応力のもとで伝ばしている場合のき裂先端の開口変位は前者に比べて著しく大きく(き裂先端から10 μm の点で比べると、前者は回転曲げ疲労で約0.1 μm 、ねじり疲労で約0.03 μm であり、後者は回転曲げ疲労で約0.4 μm 、ねじり疲労で約0.25 μm である)、かつき裂開口変位とき裂先端からの距離との関係も大きく異っている。すなわち伝ば中のき裂は最大応力において先端が鈍化しているように見えるが、微視的停留き裂は先端での開き角が0となるような、とがった状態を呈している。この傾向は焼なましした低炭素鋼の横穴材の回転曲げ疲労における停留き裂の開口状態のそれと非常によく似ている。

このようにき裂の先端部が最大応力においてもほとんど開口しなければ、き裂先端部の材料は応力およびひずみの集中をほとんど受けず、したがってき裂はそれ以上伝ばしないものと考えられる。以上のようなき裂の停留現象は、き裂がそこまで伝ばしてくる間にき

Fig. 9. Crack opening displacements at different distances from the tip of propagating cracks formed under torsional fatigue tests.

Fig. 10. Crack opening displacements at different distances from the tip of the propagating and the non-propagating microcracks formed under rotating bending fatigue tests.

Fig. 11. A non-propagating microcrack under torsional fatigue test, (a) an optical micrograph, (b) an electron micrograph, framed area in (a), ($\tau_a = \tau_{w0} = 15.0 \text{ kg/mm}^2$, $N = 10^7$).

Fig. 12. Crack opening displacements at different distances from the tip of a non-propagating microcrack formed under the torsional fatigue test.

裂面に引張塑性変形が残される現象、すなわちき裂閉口現象と密接な関係があるものと思われる。

以上、主として表面観察から微視的停留き裂の挙動を調べてきたが、次に表面と内部におけるき裂の挙動の関連について検討してみる。

回転曲げ疲労における平滑材の微視的停留き裂の破面形状、あるいは横穴材（直径 0.3 mm、深さ 0.3 mm）のき裂面の形状から類推すれば、平滑材に発生した十分の数ミリメートル位のき裂面の形状も応力レベルに無関係にはほぼ半円状を呈しながら伝播するが、

表面と内部でき裂開閉挙動は一般に異っているものと思われる。しかしながらき裂の寸法が一定の場合、表面における有効応力幅 $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ を用いれば、き裂伝ば速度が一義的に決ることから推定すれば、表面のき裂開閉挙動は内部のそれと一対一に対応している（すなわち、表面と内部でき裂先端に注目したときの $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ の値は異っていても、表面の $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ が決れば内部の $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ もそれに応じて決る）ものと思われる。したがって表面でき裂の伝ば・停留を観察し、かつき裂開口変位を測定することは内部におけるそれを推定する際にも重要な意味をもつものと思われる。

4 結 論

焼なましした S10C 平滑試験片の回転曲げ疲労において発生する微視的停留き裂の生成過程と開閉挙動に関して、先に定性的に明らかにし、報告してきた。

本研究では、予ひずみを与えた S15C 平滑試験片の回転曲げ疲労および焼なましした S50C 平滑試験片のねじり疲労において発生する微視的停留き裂の生成過程を再検討するとともに、特にき裂先端部の電子顕微鏡観察を通じて微視的停留き裂の開閉口状態の定量的な把握を試み、以下の結論を得た。

(1) 回転曲げ疲労における微視的停留き裂は、1 結晶粒程度のき裂がすべり帯に沿って発生したのち、表面に沿うだけでなく内部に向っても多少伝ばして停留したものであり、またねじり疲労におけるそれは最大せん断応力の作用方向に発生したき裂がその方向に多少伝ばしたのち、伝ば方向を主応力と直交する方向に変えてさらに伝ばして停留したものである。

(2) 微視的停留き裂の開閉挙動は回転曲げ疲労とねじり疲労で互によく似ている。

(3) 微視的停留き裂と伝ば中のき裂とでは、それらを発生させた応力サイクル中の最大応力におけるき裂開口状態は非常に異っている。すなわち、微視的停留き裂では先端での開き角が 0 となるような、とがった状態を示すのに対して伝ば中のき裂では先端が鈍化しているような開口状態を示す。微視的停留き裂の、先端から $10\mu\text{m}$ の点での開口変位は $0.03\sim 0.1\mu\text{m}$ であ

るのに対し、伝ば中のき裂のそれは前者のそれに比べてかなり大きい。さらに微視的停留き裂の先端は最大応力においてもほとんど開口しない。

終りに本研究の遂行に当り協力された佐賀大学理工学部技官、伊藤勝美氏、卒研学生、新原薫、坂本泰弘、山根真の諸君に感謝します。また本研究の一部に昭和 53 年度科学研究費補助金（一般研究 D）を得た。併せて記し謝意を表す。

（昭和 51 年 11 月 18 日 第 10 回；昭和 52 年 11 月 21 日 第 11 回疲労シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) Elber, W., Engng. Fracture Mech., **2**, 37 (1970).
- 2) 西谷弘信, 高尾健一, 材料, **23**, 69 (1974).
- 3) 菊川 真, 城野政弘, 参輪 隆, 高谷 勝, 日本機械学会講演論文集, No 750-1, 23 (1975).
- 4) Ohji, K., K. Ogura, and K. Ohkubo, Engng. Fracture Mech., **7**, 457 (1975).
- 5) Ohta, A., and E. Sasaki, Int. J. Fracture, **11**, 1049 (1975).
- 6) 西谷弘信, 高尾健一, 日本機械学会論文集, **40**, 2725 (1974).
- 7) 西谷弘信, 鹿毛正治, 中江 洋, 日本機械学会講演論文集, No. 760-9, 87 (1976).
- 8) 西谷弘信, 村上敬宜, 日本機械学会論文集, **35**, 1389 (1969).
- 9) 西谷弘信, 高尾健一, 日本機械学会論文集, **40**, 3254 (1974).
- 10) 西谷弘信, 西田新一, 日本材料強度学会誌, **5**, 84 (1970).
- 11) 西谷弘信, 古賀 潔, 日本材料強度学会講演論文集, 29 (1976).
- 12) 高尾健一, 西谷弘信, 材料, **25**, 830 (1976).
- 13) 西谷弘信, 森光武則, 日本機械学会論文集, **42**, 325 (1976).
- 14) 西谷弘信, 高尾健一, 日本機械学会論文集, **42**, 1964 (1976).
- 15) Koterazawa, R., Proc. ICM, **2**, 209 (1972).
- 16) Lindley, T. C., and C. E. Richards, Mat. Sci. Engng., **14**, 281 (1974).