定常および過大過小応力下の表面疲労き裂伝ばに 及ぼす平均応力の影響†

藤 田 和 孝* 小寺沢 良 一** 谷 本 晃*

Effect of Mean Stress on Surface Fatigue Crack Propagation under Constant Amplitude Stressing and Periodic Overstressing

by

Kazutaka FUJITA*, Ryoichi KOTERAZAWA** and Noboru TANIMOTO*

The effect of mean stress on growing surface fatigue cracks in bending plates of annealed 0.20% C steel was studied under constant amplitude stressing and periodic overstressing. In constant amplitude stressing tests, the crack was semi-elliptic and had a smaller aspect ratio under compressive mean stress than under tensile mean stress. The crack propagation rate in depth direction was almost equal to that in surface direction for the same ΔK value when mean stress was tensile ($R=0$). When mean stress was compressive ($R=-2$), the former was lower than the latter. In periodic overstressing tests, the crack propagation rate became remarkably accelerated (several hundred times) as mean stress changing from tension to compression. Large acceleration (more than one hundred times) also occurred even in the case of tensile mean stress of overstress provided that it was large enough ($R=0$). The fracture surface morphology in most cases except small acceleration showed that the crack propagated in zigzag manner in the same way as the cases with large acceleration in through-thickness cracks reported previously.

Key words : Fatigue, Crack propagation, Fractography, Fracture mechanics, Variable stress, Mean stress, Surface crack, Acceleration of crack propagation

1 緒 言

実機で見られる疲労破壊の多くは、表面欠陥や応力集中部等を起点として発生した表面き裂の伝ばによる。このため表面き裂の伝ばについては従来から多くの研究^{1)~3)}が行われて来ている。しかし、平均応力が圧縮の場合も含み表面および内部の伝ばを詳細に調べた例は少ないようである。また実機に加わる変動荷重を模擬した過大過小応力下のき裂伝ばについて、巨視貫通き裂^{3),4)}や微視き裂⁵⁾と同様、表面き裂においても顕著な加速が筆者の一人らにより観察されているが、平均応力が加速挙動におよぼす影響はまだ調べられていない。そこで本研究においては種々の平均応力を用いて、定常および過大過小応力下の表面疲労き裂伝ば試験を実施し、平均応力がき裂伝ば挙動に及ぼす影響について検討した。

2 試 験 方 法

供試材は S20C 焼ならし材 (機械的性質: 降伏応力 271 MPa, 引張強さ 456 MPa, 伸び 30.8%) である。試験片は平行部板幅 25 mm 板厚 4 mm であり、表面中央に直径 0.3 mm 深さ 0.2 mm のドリル穴を加工し、

き裂発生箇所とした。試験には、シェンク式平面曲げ疲労試験機 (40 Nm, 3600 cpm) を用いた。応力拡大係数 K の算出には Newman-Raju の式⁶⁾を用いた。定常応力下のき裂伝ば挙動は応力比 R を 0, -1, -2 (それぞれ片振り, 両振り, 圧縮の平均応力を有する両振り) とし荷重一定試験により、また ΔK_{th} は荷重漸減試験 (ASTM の方法⁷⁾に準じ荷重減少率 1 割以内、片側き裂伝ば増分約 0.5 mm) により求めた。過大過小応力下のき裂伝ば挙動は、 ΔK_{th} 以下の過小応力拡大係数幅 ΔK_1 を 2.2×10^5 回負荷後、過大応力拡大係数幅 ΔK_2 を手動 (約 0.5 Hz) により 2 回負荷して 1 ブロックとし、これを繰返す二段多重試験により求めた。試験には、 ΔK_1 と ΔK_2 の平均応力 (それぞれ K_{1m} , K_{2m}) はおのおの一定とし、両者を等しくおいた Table I に示す負荷プログラム I, II, III (それぞれ平均応力が圧縮, ゼロ, 引張り), および過小応力はすべて片振り⁸⁾で K_{2m} を変えた同 V, III, IV (それぞれ K_{2m} が圧縮, 引張り, 片振りのさらに大きな引張り) を用いた。各負荷プログラムとも ΔK_1 は $0.9 \times \Delta K_{th}$, ΔK_2 は表面方向のき裂伝ば速度が 1×10^{-5}

† 原稿受理 平成 2 年 8 月 21 日 Received Aug. 21, 1990

* 正 会 員 宇部工業高等専門学校 宇部市常盤台, Ube Technical College, Tokiwadai, Ube

** 正 会 員 筑波大学構造工学系 つくば市天王台, Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, Tennoudai, Tsukuba

mm/c となる値とした。なお負荷プログラム I, III の ΔK_2 の応力比 ($R_2 = -1.35, -0.5$) におけるき裂伝ば速度と ΔK の関係は、定常応力下のき裂伝ば試験結果 ($R=0, -1, -2$) を用いて内挿により推定した。き裂長さの測定は、表面方向はき裂伝ば量の多い荷重一定試験では読取り顕微鏡 (100 倍, 分解能約 $10 \mu\text{m}$)、き裂伝ば量の少ない荷重漸減試験や 2 段多重試験ではレプリカを採取し、それを金属顕微鏡 (500 倍, 分解能約 $1 \mu\text{m}$) により行った。また深さ方向は破面を実体顕微鏡を用いて撮影し、写真 (総合倍率約 40 倍) 上でピーチマーク^{*1}を基に行った。き裂開口挙動の測定はひずみゲージを用いたコンプライアンス法⁸⁾により行った。き裂最深点付近の開閉口は試験片背面中央に、表面付近のそれは表面のき裂先端前方にそれぞれ貼付したゲージ出力から求めた。

3 試験結果と検討

3.1 定常応力下のき裂伝ば

実体顕微鏡によるマクロ破面写真例を Fig. 1 に、このような破面写真上で求めたき裂前縁のアスペクト比 a/b と表面方向のき裂長さ $2b$ の関係を Fig. 2 に示す。同図の実線はそれぞれ $R=0, -1, -2$ のデータの平均値である。データにバラツキは見られるものの、 a/b は R が $0, -1, -2$ と平均応力が引張りからゼロ、圧縮となるにつれ小さくなっている。マクロ破面写真例 (Fig. 1) を少し注意して見ると、 $R=0$ では内部が表面付近と比べ少し黒ずんでおり、 $R=-1$ でも同様であるがその差は $R=0$ よりも幾分大きく、また $R=-2$ では全体が黒ずんでいる。き裂伝ば速度がほぼ等しい (約 $2 \times 10^{-6} \text{ mm/c}$) 領域の SEM によるミクロ破面写真例を Fig. 3 に示す。 $R=0$ と -2 およびそれぞれの表面と内部の破面様相は、いずれもこの

Fig. 1. Macrofractographs of specimens tested under constant amplitude stressing.

Fig. 2. Aspect ratio of surface cracks under constant amplitude stressing.

ような低伝ば速度域の特徴であるき裂伝ば方向に平行な幅の狭い多数のプラトーとプラトー上のストライエーション状模様からなり、微視的破壊機構に明りような差異は見られなかった。 R が 0 から $-1, -2$ へ、すなわち平均応力が引張りからゼロ、圧縮に変わると a/b は小さくなったが、これは、平均応力が引張りよりもゼロの場合の方が表面に対する内部の黒ずみ具合が大きく、また破面全体の黒ずみ具合は平均応力が引張りからゼロ、圧縮となるにつれて大きいというマクロ破面写真の観察結果から、酸化物誘起き裂開口が関係しているのではないと思われる。

表面方向および深さ方向のき裂伝ば速度 (それぞれ $db/dn, da/dn$) と ΔK の関係を Fig. 4(a) に示す。図中白抜き印は $R=0$ 、半黒塗印は -1 、黒塗印は -2 を、また横棒なしの印は db/dn 、横棒付きの印は da/dn を示す。従来から報告されているように R 依存性が見られ、 R が $0, -1, -2$ の順にき裂伝ば速度は小さくなっている。 db/dn と da/dn を比べると、後者のデータ点は少数でかつ低速度域に限られているが、 $R=0$ の引張りの平均応力下では両者はほぼ等しく、 $-1, -2$ とゼロから圧縮の平均応力になるとともに db/dn に比べ da/dn が小さくなっており、アスペクト比で見られた結果と対応している。

コンプライアンス法によりき裂開口比 U (き裂先端開口応力範囲/全応力範囲) を求め、これを用いて得た $\Delta K_{\text{eff}} (=U \times \Delta K)$ によってき裂伝ば速度を再整理した結果を Fig. 4(b) に示す、全速度範囲において明りような R 依存性は見られず、低伝ば速度域では実験点の帯域が下方に折れ曲がり、 $(\Delta K_{\text{eff}})_{\text{th}}$ ²⁾ が存在しており (概略 $3.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)、筆者の一人らや菊川らの報告と同傾向を示している。また ΔK 線図におい

*1 荷重一定試験では平均応力は変えず応力振幅を下げて入れ、二段多重試験では試験開始時は試験条件が予き裂条件 (表面方向のき裂伝ば速度が約 $1 \times 10^{-6} \text{ mm/c}$) と異なるため入り、試験終了時は液体窒素を用いて低温ぜい性破断させ入れている。

Fig. 3. Microfractographs of specimens tested under constant amplitude stressing.

て $R = -1, -2$ と平均応力がゼロから圧縮になるとともに db/dn に比べ da/dn が小さくなったが、 $R = -2$ においても、試験片表面のき裂先端前方ゲージ出力から得た U 値と、背面中央のゲージ出力から得た U 値に差異は見られず ($R = 0, -1$ においても同様)、 ΔK_{eff} 線図においても db/dn と da/dn 間の差異は残っている (▲と●印や●と●印)。前述のようにマクロ破面観察結果は、この差異がき裂開口現象の違いにより生じた可能性を示唆しており、また本コンプライアンス法では背面ゲージの出力はき裂の最深点も含めた前縁のかなり大きな範囲の平均的な U 値を示し、そのため表面と背面のゲージ出力から得た U 値間に差異が見られなかったことも考えられる。今後局所的な U 値の測定が可能な超音波法を用いた検討を行う予定である。

3・2 過大過小応力下のき裂伝ば

過大過小応力下のき裂伝ば試験結果を Table I に示す。同表中の R_{ac} は加速率を、 $\overline{R_{ac}}$ は各負荷プログラムごとの R_{ac} の平均値を示している。種々の平均応

力を用いた本表面き裂伝ば試験においても、従来から報告している巨視貫通き裂および表面き裂や微視き裂と同様、条件によっては数百倍という極めて高い加速を生じている。

Table I において、過大、過小の各平均応力 K_{2m} 、 K_{1m} を等しくおき、それを変えた負荷プログラム I、II、III を見ると、平均応力が引張り (III)、ゼロ (II)、圧縮 (I) の順に表面 (0° 方向) および内部 (60° 方向) とも加速率 R_{ac} 、 $\overline{R_{ac}}$ は大きくなっている。また表面と内部を比べると I、II の場合表面の加速の方が大きく、加速があまり大きくない III の場合にはほぼ等しい。ここで内部は 60° 方向で評価したが、これはき裂伝ば量の少ない場合に 90° 方向では伝ば量を測定できなかったためである。平均応力が引張り、ゼロ、圧縮の順に加速が大きくなるのは、圧縮応力負荷による圧縮残留応力の解放が影響しているものと考えられる。

*2 過大過小応力試験中の実際のき裂伝ば量を、過大過小の各応力段階ではそれらを定常的に負荷した場合の伝ば速度に等しいとして求めた伝ば量で除した値であり、疲労寿命を評価する際に用いられるマイナー則の逆数に相当する。

Fig. 4. Crack propagation rates as a function of ΔK or ΔK_{eff} .

Fig. 5. Microfractographs of specimens tested under periodic overstressing.

Table I. Crack propagation data under periodic overstressing.

No.	Loading program	Rac		Rac	
		0°	60°	0°	60°
70	I $K_{1m}=K_{2m}$ $R_1=-2$ $R_2=-1.35$	940	212	920	197
72		900	181		
64	II $K_{1m}=K_{2m}=0$ $R_1=R_2=-1$	236	150	177	126
74		147			
108		148	102		
69	III $K_{1m}=K_{2m}$ $R_1=0$ $R_2=-0.5$	13	6	28	33
73		49	54		
110		23	40		
65	IV K_{2m} K_{1m} $R_1=0$ $R_2=0$	183	208	153	216
104		145	258		
113		130	183		
106	V K_{1m} K_{2m} $R_1=0$ $R_2=-2$	455	691	381	586
107		308	481		

K_{1m} : mean stress of understress
 K_{2m} : mean stress of overstress
 R_1 : stress ratio of understress
 R_2 : stress ratio of overstress

つぎに過小応力はすべて片振りで過大の平均応力 K_{2m} のみを変えた負荷プログラムⅢ、Ⅳ、Ⅴを見ると、この場合も上記と同様、 K_{2m} が圧縮のプログラムⅤが最も大きい加速を示した。ただし、次は中間の K_{2m} のⅢ（引張りの平均応力を有する両振り）ではなく、大きい引張りの K_{2m} のⅣ（片振り）となった。表面と内部を比べると、上記とは逆に内部の加速の方が大きい。

過大過小応力下のき裂伝ば部の破面写真例を、立体マッピング観察して描いた断面模型図とともに Fig. 5 に示す。加速の小さいⅢを除いたすべての負荷プログラムにおいて、過大および過小応力に対応するしま模様が見れている。過大応力部分は高伝ば速度域のストライエーション間に見られるすべり線状模様、過小応力部分は低伝ば速度域の破面の特徴であるき裂伝ば方向に平行な幅の狭いプラトーとその上のストライエーション状模様からなっている。き裂進展機構は断面模型図に見られるように山と谷、谷と山が対応するジグザグ進展を示した。以上は筆者の一人らが巨視貫通き裂の高加速域で観察している結果と同様であり、表面き裂においても、過大過小応力下の顕著な加速現象は、過小応力の多数回の繰返しによる組織回復と過大応力負荷によりき裂先端部に生じた放射状組織に沿うき裂のジグザグ進展が関係しているものと考えられる。過小応力はいずれも片振りで、過大応力の平均応力を引張りとしたプログラムⅢと、さらに大きい片振り引張りとした同Ⅳについて、上記のようにⅢではなくⅣが大きな加速を生じ、ジグザグ進展を示した。この原因は明らかでないが、過大の平均応力が引張りの大きな値になると過大応力の最大応力も大きくなり、これに伴ってき裂先端での塑性変形が大きくなり、その結果、き裂先端近傍の局所的な塑性変形に関係するとみられる上述した放射状組織が形成されたためではないかと考えられる。この放射状組織は転位密度が高く比較的不安定とみられ、引続き繰返し負荷される過小応力下ではこの放射状組織に沿う組織回復と、回復に関連したき裂進展が生じ、さらにこの回復が次の過大応力下のき裂進展の加速と放射状組織の形成を促進してジグザグ進展を示し、大きな加速を生じたものと推測される。

4 結 言

S20C 焼ならし材を用いて、定常および過大過小応力下の表面疲労き裂伝ば試験を種々の平均応力を用い

*3 一回目の過大応力の最大応力負荷時のき裂先端の塑性変形と関連する CTOD は、繰返し有効過小応力による CTOD と過小応力の最大応力以上過大応力の最大値までの一方向負荷による CTOD を加えた値¹¹⁾となり、Ⅳの方がⅢよりも約 1.5 倍大きい。

た曲げ応力下で行い, き裂伝ば挙動に及ぼす平均応力の影響について検討した. 得られた結果は以下の通りである.

4・1 定常応力下のき裂伝ば試験

(1) き裂前縁形状は平均応力が引張り ($R=0$) からゼロ ($R=-1$), 圧縮 ($R=-2$) となるにつれて, 表面方向により長い半だ円形状を示した.

(2) ΔK に対する試験片表面方向と深さ方向の伝ば速度の大きさは, 平均応力が引張り ($R=0$) のときほぼ等しく, ゼロ ($R=-1$), 圧縮 ($R=-2$) となるにつれて深さ方向の伝ば速度がより小さくなり, き裂前縁形状の結果と対応した. マクロ破面観察結果は, 平均応力の違いによるき裂伝ば速度のこの差異が酸化物誘起き裂開口に関係していることを示唆したが, ひずみゲージを用いたコンプライアンス法によるき裂開口の測定では, 試験片表面のき裂先端前方と背面中央のゲージ出力から得たき裂開口レベルに明瞭な差異は見られなかった.

4・2 過大過小応力下のき裂伝ば試験

(1) 過大過小応力下のき裂伝ば速度は, 過大と過小の平均応力が等しいとき, 平均応力が引張りから, ゼロ, 圧縮となるにつれ大きい加速を生じた.

(2) 過小応力はすべて片振りとし, 過大応力の平均応力を高い引張り, 低い引張り, 圧縮と変えたときも, (1)と同様, 圧縮の平均応力で最も大きな加速を生じた. しかし, 次に加速が大きいのは中間の低い引張りの平均応力の場合ではなく, 高い引張りの平均応力(片振り)の場合であった.

(3) 加速が小さな場合を除いて, 巨視貫通き裂の高加速域で観察されたのと同様なジグザグ進展が観察され, 表面き裂においても, 巨視貫通き裂と同様, 過小応力の多数回の繰返しによる組織回復と過大応力負荷による放射状組織に沿うジグザグ進展機構が顕著な加速現象と関係しているものと考えられる.

(平成2年6月22日 第7回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば, 金沢 武, 町田 進, 糸賀興右, 日本造船学会論文集, No. 132, 395 (1972); 川原正言, 栗原正好, 日本造船学会論文集, No. 137, 297 (1975); J. B. Chang, ed., ASTM STP 687 (1979).
- 2) 小寺沢良一, 大橋喜法, 渡辺 寛, 材料, **27**, 363 (1978).
- 3) 小寺沢良一, 材料, **27**, 871 (1978).
- 4) 小寺沢良一, 志茂大治郎, 材料, **25**, 875 (1976).
- 5) 藤田和孝, 小寺沢良一, 材料, **34**, 687 (1985).
- 6) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju, Eng. Fract. Mech., **15**, 185 (1981).
- 7) ASTM Committee E-24, ASTM STP 738, 340 (1981).
- 8) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, **25**, 899 (1976).
- 9) 平野一美, 小林英男, 中沢 一, 林 昭夫, 日本機械学会論文集, A-52, 2480 (1986).
- 10) K. Katagiri, R. Koterazawa, T. Yamada and T. Tsuboi, Metal Science, **17**, 556 (1983).
- 11) 小寺沢良一, 本上 勉, 材料, **23**, 730 (1974).