過大過小応力下の微視的疲労き裂伝ば[†] (加速を生ずる過大過小応力値の検討)

藤 田 和 孝* 小寺沢 良 一**

Propagation of Microscopic Fatigue Crack under Periodic Overstressing

(Overstress and Understress Values and Acceleration of Crack Propagation)

by

Kazutaka FUJITA* and Ryoichi KOTERAZAWA**

Propagation of microscopic fatigue cracks by periodic overstressing was studied under different overstress and understress conditions using a low carbon steel. When the overstress value was large, a significant acceleration of crack propagation (more than one hundred times) occurred even if the understress value was lower than the threshold stress, similarly as in the case of macroscopic cracks. The lower limit of the understress that caused such a significant acceleration was reduced as the overstress was increased, but it was independent of the crack length as far as the crack was microscopic (less than $50\mu\text{m}$). For longer cracks, the lower limit was considerably reduced by increasing the crack length. When the overstress value was low, a significant acceleration in short cracks occurred only when the understress value was nearly equal to the threshold stress, but in longer cracks it took place even the understress value was lower than the threshold stress. The microscopic fracture surface consisted of small facets, which was supposed to be related to crystal structures. Observation of the specimen surface showed that cracks propagated intermittently, hesitating at the boundary of microstructure. These observations indicate that microstructure has a significant effect upon microscopic crack propagation under intermittent overstressing.

キー・ワード：変動応力，微視的き裂，疲労き裂，フラクトグラフィ，破壊力学

1 緒 言

過大過小応力下の疲労き裂伝ばについて，筆者の一人らは鋭い切欠き試験片を用い K_{th} 以下の過小応力の多数回 (10^5 回以上) の繰返しに過大応力の少数回 (2 回) の繰返しを交互に加えた場合，過小応力がき裂伝ばに大きい影響を及ぼし，き裂伝ば速度が定常負荷の場合に比して 100 倍程度以上の極めて大きい値になる場合があること，およびその場合のき裂伝ば機構が定常負荷の場合と異なることを明らかにしてきている^{1)~5)}。微視的き裂についても，疲労限度の応力を繰返す際の過大応力の影響について調べた西谷らの研究や，疲労き裂伝ば下限界応力 σ_{th} 以下の応力が加わった場合も含む筆者の一人らの研究があり，いずれも巨視的き裂と同様の顕著な加速を生ずることが示されてきている。しかしながら， σ_{th} が疲労限度の応力とほぼ一致するような微視き裂に σ_{th} より低い過小応力が加わる実用上より重要と考えられる条件下において，加速

は観察されていない。ここでは，この点をさらに調べるため過小応力ばかりでなく，過大応力の大きさも変えて，微視的き裂の加速効果に及ぼす応力値の影響を検討した。

2 試験方法

供試材は低炭素鋼 S15CK 焼ならし材で，その化学成分と熱処理条件および機械的性質を Table I, II に示す。試験は小野式回転曲げ疲労試験機 (98N-m, 3 600 cpm) により行った。試験片は，Fig. 1 の形状に機械加工後 600℃，1 時間保持の真空焼なましを行い，最後に表面を約 $25\mu\text{m}$ 電解研磨して鏡面に仕上げた。これに疲労限 $\sigma_w = 183\text{ MPa}$ より少し高い 190

Table I. Chemical composition of test material.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.15	0.30	0.45	0.007	0.08	0.03	0.07

† 原稿受理 昭和59年8月20日 Received Aug. 20, 1984

* 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 茨城県新治郡桜村, Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki

Table II. Condition of heat treatment and mechanical properties of test material.

Condition of heat treatment	Mechanical properties		
	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
920°C, 1 hr, A.C.	312	441	40.0

Fig. 1. Test specimen.

MPa を約 1×10^6 回繰返し負荷してき裂を発生させ、すべり線と区別するため、電解研磨により表面をさらに $3 \mu\text{m}$ 除去して予き裂試験片とした。負荷応力の過大過小を決める基準となる定常応力下のき裂伝ば下限界応力 σ_{th} は、 5×10^6 回繰返し負荷して平均き裂伝ば速度が $2 \times 10^{-6} \mu\text{m/c}$ となる応力をそのき裂長さに対する σ_{th} とした。 σ_{th} 確認後引続き実施した過大過小応力試験は、過大応力 σ_2 を 2 回、過小応力 σ_1 を 2.2

Table III. Results of crack propagation tests under periodic overstressing.

Specimen No.	Crack No.	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_1/σ_{th}	$2b_i$ (μm)	Δb (μm)	n_b	R_{ac}
24	1	288	150	0.88	140	5	5	74
25	1		160	0.87	19	22.5	26	270
28	1		164	0.90	54	8.5	20	101
30	2		180	0.98	35	11.5	10	387
32	1		175	0.96	36	5	20	89
34	1		140	0.79	99	31	29	95
40	7		120	0.68	91	4.5	26	25
74	3		145	0.81	78	3.5	20	31
43	10	256	170	0.93	30	1.5	12	391
43	12		170	0.94	66	9	12	446
43	16		170	0.94	68	9	12	431
43	17		170	0.95	74	3	12	144
44	7		160	0.87	58	1	20	47
51	2		130	0.74	108	6.5	20	96
115	1		120	0.74	166	6	16	63
58	3	225	175	0.96	46	1.5	20	520
58	4		175	0.96	38	2	20	961
106	1		175	0.99	93	5	10	806
109	1		160	0.93	142	11.5	20	339
107	1		135	0.94	213	9.5	5	528
103	2		135	0.85	175	5.5	30	76

Δb : crack extension under periodic overstressing.

n_b : number of program cycles.

R_{ac} : ratio of acceleration of crack propagation.

$$\frac{\Delta b}{n_2 \cdot n_b} \bigg/ \left(\frac{\Delta b}{dn} \right) \sigma_2$$

$\times 10^5$ 回交互に負荷する 2 段多重繰返しで、 σ_2 は 288 MPa, 256, 225 の 3 種類とし、 σ_1 は σ_{th} 以下とした。き裂長さの測定は、レプリカを用いて 100 倍と 400 倍の金属顕微鏡で行った。また破面観察は、試験片を液体窒素を用いて低温ぜい性破断し走査電顕で行った。

3 試験結果と検討

疲労き裂伝ば下限界応力 σ_{th} とき裂長さ $2b_i$ の関係を Fig. 2 に σ_{th} 曲線として示す。▼はその応力で破断したことを、▽はき裂伝ば速度が $2 \times 10^{-6} \mu\text{m/c}$ 以上、○および●は以下であることを示しており、 σ_{th} 曲線は▽と○および●の境界として求めている。 σ_{th} は、 $2b_i \leq 50 \mu\text{m}$ では疲労限界 $\sigma_w = 183 \text{ MPa}$ と一致し、 $2b_i > 50 \mu\text{m}$ では $2b_i$ の増加とともに減少してきており、既報の結果と同様な傾向を示している。

3・1 加速に及ぼす過大過小応力値の影響

σ_{th} が σ_w とほぼ一致する微視的なき裂 ($\sim 200 \mu\text{m}$)

(a) $\sigma_2 = 288 \text{ MPa}$

(b) $\sigma_2 = 256 \text{ MPa}$

(c) $\sigma_2 = 225 \text{ MPa}$

Fig. 2. σ_{th} and acceleration ratio (R_{ac}) as a function of crack length ($2b_i$).

を対象に、 σ_{th} 以下の過小応力 σ_1 と過大応力 σ_2 も 288 MPa, 256, 225 と変えて、加速を生ずる過大過小応力値の検討を行った。得られたき裂伝ば速度の加速率 R_{ac}^{*1} と σ_2 , σ_1 および $2b_i$ の関係を Fig. 2 に示す。●は伝ばが認められなかったき裂であり、○は伝ばしたき裂でその R_{ac} 値を付記している。微視き裂について、 σ_1 が σ_{th} より低い場合においても、既報の σ_{th} が K_{th} 一定の線に漸近した微小き裂や大きいき裂の結果と同様、き裂によっては 100 倍程度以上の顕著な加速を生じている。伝ばしたき裂の結果は Table III にまとめて示した。Fig. 2 (a) の $\sigma_2=288$ MPa の伝ばしたき裂 (○) に注目すると、 $50\mu\text{m}$ 以下のき裂では、 σ_1 の σ_{th} に対する低下割合は $2b_i$ によらずほぼ一定 ($\sigma_1/\sigma_{th} \div 0.90$) である。き裂が $50\mu\text{m}$ 以上になり σ_{th} が σ_w より小さくなり始めると、 σ_1 の σ_{th} に対する低下割合は、 σ_{th} の σ_w に対するそれと比べ $2b_i$ の増加とともに急激に大きくなっている。つぎに (b) の $\sigma_2=256$ MPa の場合をみると、 $\sigma_2=288$ MPa の結果と比べ同様な傾向は示しているが、伝ばを示したき裂の σ_1 の低下割合は若干小さくなっている。過大応力がさらに低い $\sigma_2=225$ MPa の (c) の場合には、約 $150\mu\text{m}$ 以下のき裂では σ_1 が σ_{th} に近い場合にのみ伝ばがみられ、それ以上のき裂では σ_{th} より低い σ_1 下においても伝ばしている。これは、き裂が短い場合は $\sigma_1 \div \sigma_{th}$ のときのみ伝ばし、き裂が長くなって始めて $\sigma_1 < \sigma_{th}$ においても伝ばするとする既報の結果 ($\sigma_2=245$ MPa) と同じである。

以上より、加速を生じ得る σ_1 の σ_{th} に対する低下割合は、 σ_2 が高い場合、 σ_{th} が σ_w と一致するき裂 ($50\mu\text{m}$ 以下) では σ_2 が高いほど大きく、 σ_{th} と同様き裂長さ $2b_i$ には依存しないようであり、 σ_{th} が σ_w より低下し始めるき裂 ($50\mu\text{m}$ 以上) では、 $2b_i$ とともに急増する。 σ_2 が低い場合には、 σ_{th} が σ_w より低下したより長いき裂 (約 $150\mu\text{m}$ 以上) において始めて σ_1 の σ_{th} に対する低下が生じ得る。

なお、 R_{ac} の大きさは、いずれの過大応力値の場合にも、過小応力が高い方が大きい値を示す傾向がみられる。

3・2 き裂の伝ば挙動

既報では短いき裂の伝ばは、き裂長さの影響は 2 次的であり、結晶粒界等の微視組織の影響が支配的とみられた。 σ_1 が σ_{th} より低い本試験結果においても Fig. 2 から明らかなように、 $2b_i$ とき裂伝ばの有無および R_{ac} の大小は対応していない。また、 σ_{th} が σ_w

と一致する $50\mu\text{m}$ 以下では、 σ_{th} と同様き裂の伝ばし得る下限の σ_1 値も $2b_i$ の影響を受けないようである。 $50\mu\text{m}$ 以下の伝ばしたき裂のうち σ_1/σ_{th} 値が最も小さい場合の表面写真例を Fig. 3 に示す。 σ_{th} 確認後の (b) をみると、予き裂を含む結晶粒およびその上側隣接結晶粒内で最大引張応力方向 (図中水平方向) にほぼ垂直な多数のすべり帯が生じているが、下側では生じていない。 σ_1 の繰返しとそれに続く σ_2 の繰返しで 1 ブロックとし、26 ブロック負荷した (h) をみ

Fig. 3. Crack propagation under periodic overstressing ($\sigma_2=288$ MPa, $\sigma_1/\sigma_{th}=0.87$).

ると、き裂上側はこのすべり帯に沿って隣接結晶粒へと伝ばしており、下側は粒界で停止している。 σ_1/σ_{th} 値が同じでさらに長い他のき裂よりも短いこのき裂が伝ばし得たのは、き裂の存在した結晶粒および隣接結晶粒がすべりやすい方位にあったことが考えられ、既報と同様 σ_1 が σ_{th} より低い場合の微視き裂の伝ばも、き裂長さよりは結晶方位等の微視組織の影響をより強く受けていることが伺われる。 $50\mu\text{m}$ 以上の伝ばしたき裂で σ_1/σ_{th} 値が小さい場合の表面写真例を Fig. 4 に示す。き裂下側は、(c) の 10 ブロック負荷後までは伝ばし、それ以後 (e) の 20 ブロック負荷後まで粒界付近で停止している。Fig. 5 に伝ば曲線例を示す。既報の微視き裂と同様な伝ば曲線の急激な立上りを示す例が過大過小応力値によらずみられる。この立上りを示す付近のき裂長さは、Fig. 5 に矢印で示した σ_1 が σ_{th} と等しくなるき裂長さ $2b_{th}$ とほぼ一致している。また、最終き裂長さが $2b_{th}$ 以下である他のき裂の伝ばは、大きいき裂の定常的な伝ばとは異なり間欠的である。これは、き裂伝ばの有無に限らず、Fig. 4 においてみられたとおり σ_1 が σ_{th} より低い場合は伝ば途中においても微視組織の影響が強いことを示唆している。

3・3 破面の観察

Fig. 6, 7 に過大過小応力下の破面写真例を、Fig. 8 に比較のため定常応力下の破面写真例を示す。Fig. 6

*1 過大過小応力下の実際のき裂伝ば量を、過大過小応力の各段階においては定常応力下と同じ伝ば速度をもつとして算出したき裂伝ば量で割ったもの。疲労寿命試験におけるマイナー則による累積繰返し数比 (破断時) の逆数に相当する。

Fig. 5. Crack propagation curves.

Fig. 4. Crack propagation under periodic overstressing ($\sigma_2=256 \text{ MPa}$, $\sigma_1/\sigma_{th}=0.74$). Fig. 6. Fracture surface of a specimen tested under periodic overstressing ($\sigma_2=256 \text{ MPa}$, $\sigma_1/\sigma_{th}=0.94$).

の $\sigma_1/\sigma_{th}=0.94$ の場合の破面様相は、過大過小応力試験開始時のき裂長さ $2b_i (=66 \mu\text{m})$ 直後の(b)および

σ_1 が σ_{th} に達するき裂長さ $2b_{th} (=150 \mu\text{m})$ 近傍の(c)では結晶方位の影響のみられる小さなファセット状であり、 $2b_{th}$ より長い(a)に破線で示した17ブロック負荷後のき裂前縁付近 ($2b=194 \mu\text{m}$) 以上では(d)にみられるようにファセットは大きく平坦になりストライエーション状模様も明りょうになってきている。Fig. 7 は、 σ_1 が、 $\sigma_1/\sigma_{th}=0.79$ と低く、29ブロック負荷後のき裂長さにおいても σ_{th} を越えていない例である。29ブロック負荷後のき裂前縁付近を含む(b)においても、Fig. 6 の $2b_{th}$ 以下の短いき裂領域を示した(b)、(c)と同様結晶方位の影響のみられる小さなファセット状になっている。Fig. 8 の $\sigma_w=183 \text{ MPa}$ より若干高い定常応力 ($\sigma=190 \text{ MPa}$) 下の破面様相は、(b)の発起点近傍では結晶方位の影響のみられる小さなファセット状であり、き裂の伝ばとともに(c)のように大きなファセット状を示している。

以上より、 σ_1 が σ_{th} 以下の過大過小応力の下におけるき裂伝ば領域の破面様相は、微視組織の影響の大きいことがよく知られている定常応力下のき裂発起点近傍の微視き裂領域と同じく、結晶方位の影響のみられる小さなファセット状であり、前節の表面観察結果と同様内部においてもき裂伝ばに微視組織の影響の大きいことを示唆している。

なお、Fig. 6 (a)に破線で示した17ブロック負荷後のき裂前縁付近は、伝ば量が急増したき裂長さ領域とはほぼ対応している (Fig. 5 (b)の□印)。上述したとおりこの付近では破面上ファセットは大きくストライエーション状模様も明りょうになってきており、微視き裂においてみられた伝ば量の急増はき裂長さの増加にともない応力が上昇したためと推測される。

4 結 言

低炭素鋼 (S15CK 焼ならし材) につき、疲労限 σ_w と疲労き裂伝ば下限界応力 σ_{th} がほぼ一致する微視き裂を対象に、過大過小応力 (1 ブロック

Fig. 7. Fracture surface of a specimen tested under periodic overstress ($\sigma_2=288$ MPa, $\sigma_1/\sigma_{th}=0.79$).

中の過大応力繰返し数2, 過小応力繰返し数 2.2×10^5 の下におけるき裂伝ば試験を過大 および 過小応力を変えて実施し, 以下の結論を得た.

(1) 過大応力が高い場合, σ_{th} より低い過小応力においても顕著な加速を生ずる. 加速を生ずる過小応力の σ_{th} に対する低下率は, σ_{th} が σ_w と一致する短いき裂 ($50\mu\text{m}$ 以下) では過大応力が高いほど増加し, σ_{th} と同様き裂長さには依存しないようであり, σ_{th} が σ_w より低下し始めるき裂 ($50\mu\text{m}$ 以上) では過大応力が高い場合き裂長さとともに急増する. また過大応力が低い場合, 短いき裂では過小応力が σ_{th} にほぼ等しいときのみ加速を生じ, σ_w よりも低い σ_{th} を示すより長いき裂で始めて σ_{th} より低い過小応力においても加速を生ずる.

(2) σ_{th} 以下の過小応力下における微視き裂の伝ばは, 大きいき裂の定常的な伝ばとは異なり間欠的で, 破面様相も結晶方位の影響のみられる小さなファセッ

Fig. 8. Fracture surface of a specimen tested under steady stress ($\sigma=190$ MPa).

ト状を呈しており, 微視組織の影響を強く受ける.

(昭和59年6月29日 第4回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 小寺沢良一, 志茂大治郎, 材料, **25**, 875 (1976).
- 2) 小寺沢良一, 志茂大治郎, 近藤潤一, 材料, **27**, 54 (1978).
- 3) 小寺沢良一, 材料, **27**, 871 (1978).
- 4) 小寺沢良一, 渡辺 寛, 高良泰敏, 材料, **28**, 868(1979).
- 5) 小寺沢良一, 森崎郁志, 山田敏晴, 材料, **31**, 685(1982).
- 6) 小寺沢良一, 坪井俊郎, 材料, **32**, 1370 (1983).
- 7) 高尾健一, 西谷弘信, 坂口英信, 日本機械学会論文集, A-48, 1391 (1982).
- 8) 西谷弘信, 中村久千, 日本機械学会論文集, A-48, 990 (1982).
- 9) 西谷弘信, 後藤真宏, 日本機械学会論文集, A-49, 424 (1983).