2 段多重繰返し試験における微小き裂の挙動と 累積疲労損傷値の変動[†]

村 上 敬 宜* 松 田 健 次**

Correlation between Behavior of Small Cracks and Variation of Cumulative Fatigue Damage under the Multiple Repeated Two-Step Stress Loading

by

Yukitaka MURAKAMI* and Kenji MATSUDA**

The Correlation between behavior of small fatigue cracks and variation of cumulative fatigue damage under the multiple repeated two-step stress loading was investigated by using specimens with an initial small crack. Various combinations of the overstress σ_H and the understress σ_L cause various values of cumulative fatigue damage. The critical stress σ_{wi} for fatigue crack initiation from a small crack is the important measure to evaluate the contribution of σ_L on fatigue damage.

The values of cumulative fatigue damage D based on the Modified Miner Rule became much smaller than 1.0 for a certain combination of σ_H and σ_L . The minimum value of D obtained in the present study was $D \cong 0.18$. Although a wide scatter of D has been reported by many studies, it is not caused by statistical scatters of a material but caused by various combinations and sequence of σ_H and σ_L in relation to crack size at every moment. The possible minimum value of D (D_{min}) for a definite cycle ratio of σ_H and σ_L under various combinations of sequence of loadings can be predicted by the method proposed in the present study and D_{min} will be useful for the design under variable amplitude loadings.

Key words : Fatigue, Variable amplitude loading, Cumulative fatigue damage, Small cracks, Critical crack initiation stress from crack, Crack propagation

1 緒 言

変動応力下における疲労損傷則にはこれまで多くのものが報告されている。そのうち多くは塑性ひずみ幅を用いたものであるが、これは実機のひずみ測定の結果を基にして寿命予測を行うことを前提としたものであると思われる。応力に基づいた寿命推定方法には、いわゆるマイナー則、修正マイナー則、Corten-Dolan 則、等価応力法などがあり、これらは、ある限られた条件下では比較的良く成立すると言われている。しかし共通の欠点は、応力頻度分布が同一の形で、各応力の作用する順序が異なると寿命が異なる⁴⁾ことを説明できないことである。この現象には変動応力のもとでの微小き裂の挙動が密接に関係していると考えられる。

この現象の基本的機構を明らかにするための基礎実験の一部として、著者らは先に、焼なました微小疲労き裂材を用いて試験を行い、繰返し負荷しても初期き裂先端からき裂が発生しないような有限な応力 σ_{wi} が存在することを示した。したがって、負荷される応力

が σ_{wi} より大きい小さいかは、それが損傷に寄与するかどうか重要な意味をもっている。 σ_{wi} 以下の応力の繰返しによってはき裂は伝ばしないので、そのような応力の繰返しは疲労被害として寄与しないと考えられる。しかし、応力が σ_{wi} 以上であれば、たとえ疲労限度以下であってもき裂は若干伝ばするので、その後に繰返される過大応力との間に干渉効果が生じ疲労被害に大きく寄与する可能性がある。

したがって、過小応力を含む 2 段繰返し試験を行った場合、Fig. 1 (a) に示すように過小応力 σ_L が初期き裂寸法 l_i に対応する σ_{wi} より小さい場合と、(b) の σ_{wi} より大きい場合とでは、たとえ過大応力が同じであってもき裂伝ば挙動に大きな差が生じることが予測される。前報⁶⁾では、2 段 2 重繰返し疲労試験でそのような現象が生じることを示したが、本研究では、このような 2 種類の 2 段多重繰返し疲労試験でのき裂伝ば挙動を比較し、累積疲労損傷値の変動と微小き裂の挙動との関連を明確にすることを目的とする。

なお、き裂伝ば挙動に対してき裂閉口現象が重大な

[†] 原稿受理 昭和63年12月26日 Received Dec. 26, 1988

* 正 会 員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎, Faculty of Engineering, Kyushu University, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka

** 九州大学大学院 福岡市東区箱崎, Graduate Student, Kyushu University, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka

In the case of (a),
 $\sigma = \sigma_L, l = l_i < l_{wi}$ no crack initiation from crack.
 $\sigma = \sigma_L, l = l_{wi}$ crack initiation limit.
 $\sigma = \sigma_L, l > l_{wi}$ crack initiation from crack.
 In the case of (b),
 $\sigma = \sigma_L, l = l_{wi}$ crack initiation limit.
 $\sigma = \sigma_L, l = l_i > l_{wi}$ crack initiation.
 $\sigma = \sigma_L, l_{wi} < l < l_w$ the crack initiates and stops propagation.

Fig. 1. Relationship between $\sigma_w, \sigma_{wi}, \sigma_H, \sigma_L$ and crack length.

影響を与えることはよく知られている。しかしながら、実機において、き裂開口挙動を常に把握しながらき裂伝ば速度を予測することは非常に困難であると思われるので本論文では、き裂開口挙動が不明でも過大応力と過小応力が最も効果的に疲労損傷をもたらす場合を想定して、累積疲労損傷値の下限値を予測する方法を提案する。このようにして予測された下限界値に基づいた設計は累積疲労損傷値のばらつきを考慮して不確かな安全率を採用する設計に比べて合理的に安全側の設計になるであろう。

2 使用材料および実験方法

使用材料は、市販の S45C 圧延丸棒（直径約 26 mm）で、Table I に素材の化学成分を示す。素材は 844°C で 1 時間焼なましした後、機械加工した。Table II に焼なまし材の機械的性質を示す。

Fig. 2 に試験片の形状を示す。試験片は機械加工後、電解研磨によって表面層を直径当り 50 μm 程度除去した。電解研磨後、試験片の最小断面部にドリルで、Fig. 2(b) に示すような微小穴をあけた。穴径 d は 40 μm で、穴の深さは穴径と同じにした。穴あけ後、真空中で 600°C、1 時間の焼なましを行い、応力 235.2 MPa で引張圧縮疲労試験機にかけ、微小穴より所定の長さのき裂を発生させた。その後、疲労前歴を取り除き、初期き裂を理想き裂の状態にすることを目的として、再び真空中で 600°C、1 時間の焼なましを行い実験に供した。

Table I. Chemical composition (%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.46	0.22	0.74	0.024	0.026	0.01	0.02	0.15

Table II. Mechanical properties.

σ_{st} (MPa)	σ_b (MPa)	σ_t (MPa)	H_v	ϕ (%)
356	663	1043	170	43.9

(b) Shape and dimension of drilled hole.

Fig. 2. Specimen containing an artificial small hole.

Fig. 3. Stress pattern in one block.

使用した試験機は、油圧サーボ式引張圧縮試験機（容量 9.8×10^4 N）であり、荷重制御方式、繰返し速度 20 Hz、応力比 $R = -1$ （両振り）で実験を行った。

Fig. 3 に、繰返しの 1 ブロック間の応力の変動パターンを示す。過大応力 σ_H と過小応力 σ_L の設定は、各き裂材の疲労限度 σ_w とき裂からのき裂発生限界応力 σ_{wi} を考慮して次の 2 種にした。

- (I) $\sigma_H > \sigma_w, \sigma_L < \sigma_{wi}$
 (II) $\sigma_H > \sigma_w, \sigma_{wi} < \sigma_L < \sigma_w$

1 ブロック当りの σ_H の繰返し数 n_H と σ_L の繰返し数 n_L は、 $n_H = 1, n_L = 40$ とした。その理由は菊川ら⁷⁾が S25C と S35C を用いた試験で、この繰返しの組合せの場合が σ_H と σ_L が最も効果的にき裂伝ばに寄与すると報告しているからである。

表面き裂の観察は、荷重切換え時に除荷状態で、レプリカ法と光学顕微鏡 ($\times 100 \sim \times 400$) を用いて行なった。なお、き裂寸法は穴も含めたき裂を軸方向に垂直な面に投影した投影長さを測定した。

3 実験結果と考察

本論文では、初期き裂寸法が異なる場合の影響を調べるために、予き裂長さ $l_i \cong 100, 200, 500, 1000 \mu\text{m}$ の 4 種類のき裂材について実験を行った。

Fig. 4 に、各き裂材の S-N 線図を示す。また同図には下記の式(2)による疲労限度 σ_w の予測値も示す。図中の破線は S-N 曲線を σ_w 以下に延長し、修正マイナー則適用のための仮定の破断繰返し数である。本論文では、この線図に基づいて累積疲労損傷値の計算

Fig. 4. S - N diagram of specimens containing an initial fatigue crack.

Fig. 5. Combinations of σ_H and σ_L adopted in the experiments of two step tests.

を行った。

Fig. 5 に、各き裂材の疲労限度および 2 段多重試験で選択した σ_H と σ_L の値を示す。図中、実線および破線はそれぞれ σ_w と σ_{wi} の予測値であり、次式より求めた。

$$\Delta K_{th} \cong 3.3 \times 10^{-3} (H_v + 120) (\sqrt{area})^{1/3} \quad (1)$$

$$\sigma_w \cong 1.43 (H_v + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \quad (2)$$

$$\Delta K_{eff,th} \cong 3.4 \sim 3.6 \quad (3)$$

(S45C 焼なまし材)

$$\sigma_{wi} \cong 1.48 \times 10^3 / (\sqrt{area})^{1/2} \quad (4)$$

($\sqrt{area} < 1000 \mu m$)

ここで、各量の定義と単位は次の通りである。

$area$: 微小き裂または欠陥を最大主応力方向に投影した投影面積 μm^2

H_v : ビッカース硬さ kgf/mm^2

ΔK_{th} , $\Delta K_{eff,th}$: $MPa \cdot m^{1/2}$, σ_w , σ_{wi} : MPa

なお、式(3)より σ_{wi} を求める際には、き裂は理想き裂と仮定し、前報の考察によって $\Delta K_{eff,th} = 2K_{max,th}$ とした。また $\sqrt{area} < 1000 \mu m$ の場合の K_{max} の計算には次式を用いた。

$$K_{I,max} \cong 0.650 \sigma_0 \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (5)$$

ここで、 $K_{I,max}$ はき裂前縁の K_I の最大値、 σ_0 は応力

$$\sigma_H = 215.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_L = 98.0 \text{ MPa}$$

$$n_{H1} = 200$$

$$n_{L1} = 40000$$

(a) Fracture surface of a specimen.

(b) Relationship between aspect ratio and surface crack length.

Fig. 6. Crack shape in a specimen.

振幅 ($R = -1$) である。 $\sqrt{area} < 1000 \mu m$ では、き裂形状を半円と仮定して、 $area$ を見積った。

$\sqrt{area} > 1000 \mu m$ の場合の K_I は西谷らの結果¹⁰⁾を用いて計算した。その際 Fig. 6 (a) に示す、 $\sigma_H = 215.6 \text{ MPa}$, $\sigma_L = 98.0 \text{ MPa}$, $n_{H1} = 200$, $n_{L1} = 40000$ で行った 2 段繰返し試験の疲労破面より、き裂の表面長さ l と、き裂面を半円の一部と見なしたときの円径の長径と短径の比 (アスペクト比 b/a) の関係を求め、これを Fig. 6 (b) に示す直線で近似したものからき裂形状を決めた。

Fig. 7 は、各き裂材で σ_H (σ_w より高い値) を単独に繰返した場合のき裂進展を比較したものである。(a)

*1 実際にはき裂形状はほぼ半円に近い半円状であるが、前報⁵⁾で σ_{wi} より $\Delta K_{eff,th}$ を求める際、き裂形状を半円と仮定して計算している。

Fig. 7. Crack propagation curves under constant amplitude tests $\sigma = \sigma_H$. Fig. 8. Crack propagation curves under repeated two step tests
[abscissa: $\Sigma(n_H/N_H)$].

は $\sigma = 235.2$ MPa, $\ell_i \approx 100, 200 \mu\text{m}$ および微小穴 ($d = h = 40 \mu\text{m}$) からのき裂進展であり, (b) は $\sigma = 196.0$ MPa, $\ell_i \approx 500 \mu\text{m}$ と $1000 \mu\text{m}$ である。き裂材は焼なましにより応力履歴が除かれるため, ℓ_i の大きい方が特に初期において進展が速い傾向にあるが, き裂が進展するに従って ℓ_i の違いによる影響は減少するようである。

3・1 $\sigma_L < \sigma_{wi}$ と $\sigma_L > \sigma_{wi}$ の場合のき裂進展挙動の比較

Fig. 8 に, 各き裂材の2段繰返しのき裂伝ばを示す。図の横軸は, 過大応力 σ_H のみの累積繰返し数比 $\Sigma(n_H/N_H)$ をとって整理してある。また, 図中一点鎖線は, $\sigma_L < \sigma_{wi}$ の場合の σ_L を単独に繰返したとき, それがき裂発生限界応力になるようなき裂長さ ℓ_{wi} の予測値 (式(3)) を示している (σ_L と ℓ_{wi} の関係については Fig. 1 参照)。

$\sigma_L > \sigma_{wi}$ の場合の σ_L の値は Fig. 5 に示すように, 初期き裂長さ ℓ_i に対応する σ_{wi} の予測値の直上 ($100 \mu\text{m}$ のみ直下) の値を与えている。 σ_H の一定振幅試験と比べると初期からき裂進展が速く, 最初から σ_L が大きく寄与していることがわかる。これに対し $\sigma_L < \sigma_{wi}$ の場合は, σ_L を過大応力の40倍繰返しているにもかかわらず, σ_H 一定振幅試験とほとんど変わらないき裂進展を示し, き裂長さが ℓ_{wi} に達する少し前から次第に進展が速くなっている。このように, σ_L の選び方によりき裂進展挙動に大きな違いが生じるが, この現象は微小き裂の存在と密接に関係していることがわかる。

なお, 本研究ではき裂進展挙動の違いを明確にするため, $\sigma_L < \sigma_{wi}$ の場合の σ_L は σ_{wi} よりかなり小さい値を選んだ。この場合の σ_L の選び方が変化すると, σ_L がき裂進展に寄与し始める時期が異なってくるために, $\sigma_L > \sigma_{wi}$ の場合とのき裂進展挙動の違いの程度は異なってくると考えられる。したがって, 累積疲労損傷値も σ_L の変化に対応して変化すると思われるが, この詳細については次節で示す。

さて, Fig. 5 に示すように $\sqrt{\text{area}} < 1000 \mu\text{m}$ の範囲では, き裂寸法に対し疲労限度 σ_w は $-1/6$ の傾きで, また, き裂発生限界応力 σ_{wi} は $-1/2$ の傾きで変化するため, き裂寸法が大きくなるほど σ_w と σ_{wi} の差が開いてくる。例えば, 本材料の場合は $\sigma_{wi} / \sigma_w \approx 1/3$ 程度までになる。したがって, 初期の切欠きやき裂が大きい部材では, σ_L が一定振幅下の疲労限度 σ_w に比べてかなり小さい値であっても σ_{wi} を越える可能性が高く, 変動応力下では疲労被害に大きく寄与することになる。

3・2 過小応力と累積疲労損傷値 D の関係についての考察

議論の便宜のために必要な累積疲労損傷値を Table III のように定義する。先に著者らは, σ_H と σ_L の大きさの組合せ次第で変化する D の下限値 $D_{\min}$ は, σ_L が疲労被害として寄与する限界き裂長さ $\ell = \ell_{wi}$ にき裂が成長するまでの D_H (以下 $D_{H, \ell = \ell_{wi}}$ と書く) ⁶⁾ まで低下する可能性があることを示した。これは, σ_L が σ_{wi} に比べて小さい値のとき起こりうる。なぜなら $\ell \approx \ell_{wi}$ に達するまでは σ_L を負荷しても疲労被害として寄与せず, その後は σ_L が寄与するため, σ_H と σ_L の組合せ方によってごくわずかの σ_H でも破断に至ることが考えられる。このとき, 修正マイナー則に基づく寿命 N_L は非常に大きいので n_L / N_L の値は小さく, D は D_H とほとんど変わらない値となるからである。

Table III. Definition of cumulative fatigue damages.

$D = D_L + D_H = \Sigma(n_L/N_L) + \Sigma(n_H/N_H)$
$D_L = \Sigma(n_L/N_L)$
$D_H = \Sigma(n_H/N_H)$
$D_{H, \ell = \ell_{wi}}$: The value of D_H when the crack grows to $\ell = \ell_{wi}$
$D_{\min}$: The minimum value of D

ここで, Fig. 8 を利用して本実験条件から σ_L と $D_{H, \ell = \ell_{wi}}$ の関係を求めると Fig. 9 の実線のようになる。^{*2} また Fig. 10 の曲線 $C'_1 \sim C'_4$ は $D = D_{H, \ell = \ell_{wi}}$ とみなして2段繰返し試験での破断寿命と σ_L の関係を求めたものである。 $\sigma_L < \sigma_{wi}$ の場合 (図中白印) の実験結果の寿命はほぼこれらの曲線上にのっていることがわかる。また, C'_i は現象の下限を意味するから, $\sigma_L > \sigma_{wi}$ の場合の寿命と σ_L の関係は必ず一定応力振幅の $S-N$ 曲線 C_i と曲線 C'_i の間に存在する。したがって, 実験点は C_i 上の点 (σ_H, N_H) から C'_i に引いた接線 (一点鎖線) の近傍に位置するものと思われる。実際の実

Fig. 9. Variation of cumulative fatigue damage D due to different values of σ_L .

*2 例えば $100 \mu\text{m}$ のき裂材において $\sigma_H = 235.2$ MPa, $\sigma_L = 68.6$ MPa の組合せでの $D_{\min}$ の値を求めてみる。Fig. 5 より $\sigma = 68.6$ MPa に対する ℓ_{wi} の予測値は $\ell_{wi} \approx 738 \mu\text{m}$ であるから, Fig. 8(a) の $\sigma = 235.2$ MPa の一定振幅試験のき裂伝ば曲線より $\ell \approx 738 \mu\text{m}$ となるときの $\Sigma(n_H/N_H)$ の値を求めるとこれが $D_H \approx 0.74$ となる。

Fig. 10. Effects of understress on fatigue life.

験点（図中黒印）はこの予想に一致している。^{*3}

Fig. 10 を利用して、1 つの σ_H の値に対して種々の σ_L の値についての D を計算して D の変化を調べると Fig. 9 の破線ようになる。Fig. 9 からわかるように、 σ_H が決まると D を最小にするような σ_L が存在し、このとき $D_{\min}$ は 1.0 よりかなり小さい値であることがわかる。

Table IV. Predicted values of $D_{\min}$.(a) Effect of overstress σ_H [$(n_H, n_{L1}) = (1, 40)$].

l_i μm	$D_{\min} (\sigma_L^* \text{ MPa})$		
	$\sigma_H = 196.0 \text{ MPa}$	$\sigma_H = 235.2 \text{ MPa}$	$\sigma_H = 294.0 \text{ MPa}$
100		0.19 (170)	0.11 (220)
200	0.27 (130)	0.16 (160)	0.11 (210)
500	0.26 (120)	0.18 (150)	0.12 (200)
1000	0.32 (110)	0.23 (140)	0.15 (190)

(b) Effect of combinations of stress cycles [$\sigma_H = 235.2 \text{ MPa}$].

l_i μm	$D_{\min} (\sigma_L^* \text{ MPa})$		
	$(n_H, n_{L1}) = (1, 4)$	$(n_H, n_{L1}) = (1, 40)$	$(n_H, n_{L1}) = (1, 400)$
100	0.35 (180)	0.19 (170)	0.46 (160)
200	0.36 (180)	0.16 (160)	0.20 (140)
500	0.38 (170)	0.18 (150)	0.18 (120)
1000	0.41 (160)	0.23 (140)	0.28 (110)

*3 なお、同じ応力頻度であっても、1 ブロック当りの過小応力の繰返し数が増加すると、き裂が停留挙動を示すようになるため、寿命は長寿命側にずれると考えられる。例えば、菊川ら¹¹⁾は、S35C 材の片振り試験を行い、 n_{L1} が 10^4 を越えて増加すると K_{op} が上昇して進展速度が低下すると報告している。

Table IV は、このようにして種々の (σ_H, σ_L) の組に対して求めた $D_{\min}$ の値を示したものである。(a) は σ_H を変えた場合であり、 σ_H が上昇するほど $D_{\min}$ は減少する傾向にあるが、このとき $D_{\min}$ を与える σ_L の値 ($=\sigma_L^*$) は増加していき疲労限度以上となっている。また (b) は、 $\sigma_H = 235.2 \text{ MPa}$ で、応力頻度 (n_H, n_{L1}) を変えた場合であるが、各き裂材とも (1, 40) のときが最も小さくなっている。菊川らが指摘しているように応力頻度 (n_H, n_{L1}) = (1, 40) の近傍で $D_{\min}$ を最小にする組合せがあるようである。

このように、修正マイナー則に基づく累積疲労損傷値が 1.0 よりかなり小さい値をとるのは材質の統計的ばらつきのためではなく、応力の変動と時々刻々の微小き裂の寸法の変化の相互関係によるものである。

4 結 言

すでに存在するき裂からのき裂発生限界応力に注目して、過大応力と過小応力を頻繁に繰り返す 2 段多重疲労試験を行い、累積疲労損傷値 D の変動の範囲とその変動理由を明らかにした。

修正マイナー則に基づく D は σ_H と σ_L の組合せ次第で $D = 1.0$ とはならず大きく変動する。しかし、実際問題として重要なのは D が 1.0 よりかなり小さい値をとる場合である。例えば、本実験で得られた D の最小値は 0.18 である。本研究では、 σ_H と σ_L の組合せが与えられたとき D の最小値を予測する 1 つの方法を示した。 D がこのような広い範囲で変動するのは材質の統計的ばらつきのためでなく、応力の変動と時々刻々の微小き裂の寸法の変化の相互関係によるものである。変動応力下において応力順序が変化すると寿命が異なる原因もこの点から理解できる。

なお、本研究は昭和 61 年度文部省科学研究費（一般研究 C）によるものであることを付記し謝意を表す。

（昭和 63 年 11 月 8 日 第 19 回疲労シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) 菊川 真, 大路清嗣, 鎌田敬雄, 城野政弘, 日本機械学会誌, **70**, 1495 (1967).
- 2) H. T. Corten, T. J. Dolan, Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, 235 (1956).
- 3) 中村 宏, 堀川 武, 鎌田敬雄, 山地成一, 日本機械学会論文集, **39**, 472 (1973).
- 4) 中村 宏, 日本機械学会論文集, A-49, 1 (1983).
- 5) 村上敬宜, 松田健次, 日本機械学会論文集, A-53, 871 (1987).
- 6) 村上敬宜, 松田健次, 材料, **36**, 1065 (1987).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 宋 智浩, 材料, **23**, 743 (1974).
- 8) 村上敬宜, 遠藤正浩, 材料, **35**, 911 (1986).
- 9) Y. Murakami, Engng. Frac. Mech., **22**, 101 (1985).
- 10) 西谷弘信, 陳 玳珩, 日本機械学会論文集, A-50, 1077 (1984).
- 11) 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 日本機械学会論文集, A-47, 468 (1981).