き裂状欠陥材の疲労限度に及ぼす応力比の影響*

張 洛 明^{*1}, 秋 庭 義 明^{*2}, 田 中 啓 介^{*2}

Effect of Stress Ratio on Fatigue Threshold of Cracked Components

Luoming ZHANG, Yoshiaki AKINIWA and Keisuke TANAKA

The propagation behavior of fatigue cracks was investigated under various stress ratios using structural carbon steel (JIS-S45C) specimens with small surface pre-cracks. The threshold condition of crack extension from pre-cracks was given by a constant value of the effective stress intensity range which was equal to the threshold value for long cracks irrespective of the stress ratio. Cracks initiated from precracks were arrested under lower stress amplitudes because of the development of crack closure with crack growth. The cyclic resistance-curve-method was used to predict the fatigue thresholds of the precracked components. The predicted values of the fatigue limit for crack extension, the fatigue limit for fracture, and the length of non-propagating cracks agreed very well with the experimental results. The effect of the mean stress on the fatigue limit of smooth specimen was successfully predicted by the cyclic resistance-curve-method.

Key Words: Fatigue, Pre-Crack, Crack Closure, Stress Ratio, Mean Stress, R-Curve Method, Stress Intensity Factor, Fatigue Limit

1. 緒 言

実働荷重下にある機械構造部材では、平均応力作用下での疲労がしばしば問題となる。従来、平均応力下における疲労限度は、経験的な実験式として修正グッドマン線図やゲルバー曲線等の疲労限度線図(Haigh diagram)をもとに議論されてきた⁽¹⁾。これらは、工学的に極めて有用ではあるが、その物理的な意味は必ずしも明確でない。一方、これをき裂伝ばの観点から見ると、平滑材の疲労限度は微小き裂の発生および伝ばの下限界条件として捉えることができる。従来、長い疲労き裂に関しては、伝ば速度および下限界値が応力比 R の関数として種々の実験式が提案されており^{(2)~(4)}、き裂閉口現象を考慮することによってその物理的意味も明らかになってきた。しかしながら、微小き裂の発生および伝ばに関しては不明な点も多く、必ずしも明らかではない。

村上ら⁽⁵⁾は、多くの実験結果をもとに平均応力下における微小欠陥材の疲労限度の予測式を提案してい

る。比較的容易に予測が可能であり実用性に優れるが、やはりその物理的意味は明確ではない。

著者らは、疲労き裂の伝ば下限界予測法として、き裂閉口現象に基づくき裂伝ば抵抗曲線法を提案し⁽⁶⁾、切欠きを有する各種金属材料の疲労限度⁽⁷⁾⁽⁸⁾や、平均応力下での疲労限度予測⁽⁹⁾に有効であることを示してきた。さらに、予き裂を有する平滑材の疲労限度予測法へと拡張し⁽¹⁰⁾、微小欠陥材の疲労限度予測に有効であることを示したが、予き裂材の平均応力下での疲労限度評価については検討していない。

そこで本研究では、種々の応力比に対して、表面予き裂からの疲労き裂進展開始および伝ば挙動をき裂閉口挙動とともに詳細に観察するとともに、任意の応力比での疲労限度予測に対するき裂伝ば抵抗曲線法の有効性について検討した。

2. 実 験 方 法

2・1 材料および試験片 供試材は前報⁽¹⁰⁾と同一の機械構造用炭素鋼(JIS-S 45 C)であり、熱処理後の機械的性質はそれぞれ降伏応力 $\sigma_y=316$ MPa, 引張強さ $\sigma_B=570$ MPa, 真破断応力 $\sigma_T=985$ MPa, 硬さ $H_V=124$ である。

試験片には両表面に鈍い切欠きを設けた平滑板を用

* 原稿受付 1997 年 7 月 28 日。

*¹ 正員, 名古屋大学大学院(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。*² 正員, 名古屋大学工学部。

いた⁽¹⁰⁾。切欠きによる応力集中係数は1.03である。試験片の中央部には直径50 μm のドリルを用いて、深さ25 μm のスタートノッチをもうけ、応力比 $R=-1$ 、応力振幅 $\sigma_a=220\text{ MPa}$ から240 MPaで表面半長約0.5 mmの疲労予き裂を導入した。疲労試験前には予き裂導入時の残留応力を除去するため、650°Cで1 hのひずみ取り焼なましを行った。

また、材料特性を系統的に明らかにするため、上述と同じ試験片形状でドリル穴のない試験片を用いて、平滑材の疲労限度を測定した。さらに、片側切欠平板⁽¹⁰⁾を用いて長いき裂伝ば挙動も測定した。

2・2 疲労試験 疲労試験はすべて電気油圧サーボ式疲労試験を用いて、室温大気中、軸荷重制御で行った。応力比は平滑材では $R=-1.5, -0.5, 0$ の3種類、予き裂材では $R=-2.0, -0.5, 0$ の3種類について行った。繰返し速度は平滑材では25 Hz、予き裂材では15 Hzとした。き裂伝ば速度が 10^{-11} m/cycle 以下となった場合には停留とみなした。その後、再び650°Cで1 hのひずみ取り焼なましを行い、応力振幅を増加させて疲労試験を行った。同様の手順をき裂が連続的に伝ばするまで繰返し、き裂が停留する最大の応力振幅と、連続的に伝ばする応力振幅の平均値を予き裂材の疲労強度とした。負荷応力は実験開始時の初期き裂長さに対応する初期最大応力拡大係数と長いき裂の下限界値との比較から適宜決定した。応力拡大係数 K はNewmanら⁽¹¹⁾の解析結果をもとに計算した。アスペクト比は実験終了後の破面観察結果から測定した値を用いた(いずれの R でも約0.85)。また、応力拡大係数範囲は全範囲($\Delta K=K_{\max}-K_{\min}$)をとった。

き裂長さの測定には移動式顕微鏡を用いて試験片表面のき裂長さを測定した。き裂開口挙動はレーザ干渉変位計を用いて、疲労試験と同一の周波数でき裂中

央開口変位-荷重関係を測定した。き裂開口応力は除荷弾性コンプライアンス法によって決定した。

長いき裂の疲労試験は繰返し速度20 Hz、応力比 $R=-2, -0.5, 0$ で行った。き裂が切欠底より十分長く(2 mm以上)なった後に荷重漸減試験を行った。き裂長さの測定には移動式顕微鏡を用いて試験片両面のき裂長さを測定し、その平均値を採用した。 K 値は前報⁽¹⁰⁾と同じ片側き裂板の式を用いた。き裂開口応力の測定は試験片切欠部に張り付けたひずみゲージの出力を用い、除荷弾性コンプライアンス法によって決定した。

3. 実験結果および考察

3・1 平滑材の疲労試験 図1に平滑材により得られた $S-N$ 線図を示す。図中の矢印付データは 10^7 回繰返しても破断しなかったことを意味している。また、応力比 $R=-1$ の結果は前報⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾で得られたものである。図1より、応力比の増加につれ疲労限度は低下することがわかる。

3・2 長いき裂の荷重漸減試験 図2にそれぞれの応力比におけるき裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK との関係を示す。ただし▼印は金属材料疲労き裂進展抵抗データ集⁽¹²⁾の $R=0$ のデータで、参考のために載せたが、本研究の結果とよく一致している。また○印は前報⁽⁸⁾で報告した $R=-1$ の結果で、 $R=-0.5$ については、下限界近傍のみ測定した。図2より同一の ΔK で比較すると R の大きいほうが伝ば速度は速く、また下限界値 ΔK_{th} は R の増加とともに低下する。

Fig. 1 $S-N$ curve

Fig. 2 Relation between crack propagation rate and stress intensity range

図3はき裂伝ば速度を有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で整理したものである。 da/dN と ΔK_{eff} の関係は R に依存せずほぼ一価関係が得られ、下限界値 $\Delta K_{\text{effth}\infty}$ は平均で $2.92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ となった。

Schmidt ら⁽³⁾ や中井ら⁽⁴⁾ は応力比 R と下限界値 $\Delta K_{\text{th}\infty}$ の関係が次式で表せることを報告している。

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{th}\infty} &= \Delta K_{\text{th0}\infty}(1 - \kappa R), \quad R \leq R_c \\ &= \Delta K_{\text{effth}\infty}, \quad R > R_c \end{aligned} \quad (1)$$

ここで κ は材料定数、 $\Delta K_{\text{th0}\infty}$ は $R=0$ における $\Delta K_{\text{th}\infty}$ の値である。本研究で得られた結果を図4に示す。前述のごとく $\Delta K_{\text{effth}\infty}$ は応力比によらずほぼ一定値(平均で $2.92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)を取るのに対し、 $\Delta K_{\text{th}\infty}$ は R の増加とともに直線的に低下し、 $R=1$ 、 $\Delta K_{\text{th}\infty}=0$ の点

Fig. 3 Relation between crack propagation rate and effective stress intensity range

Fig. 4 Relation between threshold stress intensity range and stress ratio for long cracks

を通る直線での近似が可能である。近似直線より改めて $\Delta K_{\text{th0}\infty} = 5.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ が得られた。また、破線と実線の交点で与えられる応力比 R_c は 0.425 となる。

さて、 K_{max} は R と ΔK を用いて次式で表される。

$$K_{\text{max}} = \Delta K / (1 - R) \quad (2)$$

これに式(1)を代入すると、下限界最大応力拡大係数 $K_{\text{maxth}\infty}$ は次式となる。

$$\begin{aligned} K_{\text{maxth}\infty} &= 5.08, \quad R \leq R_c \\ &= 2.92 / (1 - R), \quad R > R_c \end{aligned} \quad (3)$$

また、下限界き裂開口応力拡大係数 $K_{\text{opth}\infty}$ は次式で与えられる。

$$K_{\text{opth}\infty} = K_{\text{maxth}\infty} - \Delta K_{\text{effth}\infty} \quad (4)$$

図5に $K_{\text{maxth}\infty}$ および $K_{\text{opth}\infty}$ と R との関係を示す。図中○印および△印は実線結果で、破線および実線はそれぞれ式(3)および式(4)である。両者とも、 $R \leq R_c$ ではほぼ一定値(平均で $5.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ および $2.16 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)となる。表1に長いき裂の下限界値および平滑材の疲労限度をまとめる。

3・3 表面予き裂材の疲労試験

一例として、図6に $R=0$ における da/dN と ΔK との関係を示す。図中実線は荷重漸減試験で得られた長いき裂の関係である。き裂の進展開始限界は、 $\sigma_{\text{max}} = 105 \text{ MPa}$ と 115

Table 1 Threshold values for long cracks and fatigue limit of smooth specimen

Stress ratio R	$\Delta K_{\text{th}\infty}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	$K_{\text{maxth}\infty}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	$\Delta K_{\text{effth}\infty}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	σ_w (MPa)
0	5.06	5.06	2.98	188
-0.5	7.55	5.03	3.00	205
-1	10.52	5.26	2.94	223
-1.5	-	-	-	224
-2	14.98	4.99	2.77	-

Fig. 5 Relation between threshold stress intensity factor and stress ratio for long cracks

MPa の間で、応力拡大係数でみると $K_{\max}=2.85 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と $3.12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ との間であることから、 $K_{\max} \geq \Delta K_{\text{effth}\infty}$ がき裂進展開始条件であることがわかる。低負荷応力振幅では長いき裂の下限界値 $\Delta K_{\text{th}\infty}$ 以下でも疲労き裂は伝ばし、長いき裂の da/dN - ΔK 関係より高速側で伝ばする。しかも伝ば速度はき裂伝ばに伴い低下し、最終的に停留する。また負荷応力が大きくなるほど停留き裂長さは長くなり、疲労き裂の

下限界値 ΔK_{th} は、負荷応力の増加とともに長いき裂の下限界値 $\Delta K_{\text{th}\infty}$ に近づく。特に負荷応力 178 MPa の場合には疲労き裂の伝ば速度が、極小値を取った後に加速して、長いき裂の関係に漸近する。これらの挙動は他の R でも同様であり、また前報⁽¹⁰⁾ の $R=-1$ の結果と同じである。

図7には $R=-2$ と $R=0$ に対するき裂伝ばに伴う開口応力拡大係数 K_{op} の変化を示す。図中破線は長いき裂の下限界値であり、また図中の矢印はき裂の停留点を示す。いずれの応力においてもき裂伝ばとともにき裂開口が形成され K_{op} が増加する。また負荷応力の増加につれ停留時の下限界開口応力拡大係数 K_{opth} は大きくなる。

$R=0$ における da/dN を ΔK_{eff} で整理した結果を図8に示す。図中実線は長いき裂の関係である。表面予き裂より伝ばしたき裂の伝ば速度は負荷レベルによらず実線とほぼ一致することがわかる。

以上の傾向は他の応力比においても全く同様であった。このことから、予き裂から進展開始、伝ばした疲労き裂の伝ば挙動は応力比に依存せず ΔK_{eff} によって支配されることがわかる。

前述のごとく表面予き裂からのき裂進展開始条件は、 $K_{\max}$ が長いき裂の $\Delta K_{\text{effth}\infty}$ より大きくなる条件によって与えられた。しかしながら、図7に示したように $R=-2$ においてはき裂進展開始時のき裂開口応力拡大係数は常に零より小さく、圧縮側でき裂が開口し、 $K_{\max}$ が $\Delta K_{\text{effth}\infty}$ より小さい場合にもき裂が進展開始した。 da/dN は ΔK_{eff} で整理されることから、厳密にはき裂の伝ば開始条件は $\Delta K_{\text{eff}} \geq \Delta K_{\text{effth}\infty}$ で与

Fig. 6 Relation between crack propagation rate and stress intensity range for small cracks

Fig. 7 Change of crack opening stress intensity factor with crack length for small cracks

Fig. 8 Relation between crack propagation rate and effective stress intensity range for small crack

えられることがわかる。

4. 表面き裂材の疲労限度

4・1 き裂伝ば抵抗曲線 前報⁽¹⁰⁾ではき裂閉口をき裂伝ばの抵抗の形成として捉え、種々の長さを有する表面予き裂材の疲労限度を予測する方法を提案した。その結果、 $R=-1$ に対して下限界開口応力拡大係数 $K_{\text{Oph}}[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$ と予き裂からの疲労き裂の伝ば増分量 $\Delta c_{np}[\text{m}]$ は、予き裂長さによらず次式で近似できることを示した。

$$K_{\text{Oph}} = \alpha \left(\frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_Y} \right)^{-1} \sqrt{\Delta c_{np}}, \quad K_{\text{Oph}} \leq K_{\text{Oph}\infty} \cdots (5)$$

ここで、 σ_Y は材料の降伏応力である。前述のごとく平均応力が圧縮に大きい場合には、き裂進展開始時のき裂開口応力は負となる。そこで本研究では K_{Oph} と

Δc_{np} の関係を次式で仮定した。

$$K_{\text{Oph}} = \alpha \left(\frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_Y} \right)^{-1} \sqrt{\Delta c_{np}} + \gamma \cdots (6)$$

本実験で得られた結果をもとに Gauss-Newton 法により求めた α および γ と R の関係を図9および表2に示す。 α は R の増加とともに増大するのに対し、 γ は $R=-2$ を除いてほぼ零に近い。これより α は R の関数として次式で表すことが可能である。

$$\alpha = 116 \times (1-R)^{-4.2} + 33 \cdots (7)$$

また γ は

$$\gamma = 0, \quad R \geq -1$$

$$\gamma = 0.59(1+R), \quad R < -1 \cdots (8)$$

ただし、 γ に関しては $R=-1$ から -2 の間にデータがないためその間を直線で近似した。なお、 $R>0$ に関してはさらにデータの蓄積が必要である。

図10に各応力比での下限界開口応力拡大係数 K_{Oph} と予き裂からの疲労き裂の伝ば増分量 Δc_{np} の関係を示す。図中のデータ点は実験値、実線は式(6)による近似曲線であり、よく近似されていることがわかる。ただし、 $R=-1$ に対しては、初期き裂長さ 0.5 mm の実験を行っていないため、近似曲線のみを示した。なお、 $R=-1$ に関しては予き裂長さ 0.16 mm から 4.33 mm の種々の予き裂長さに対して式(5)を得ており⁽¹⁰⁾、 0.5 mm に対する内挿は問題ないであろう。同一の Δc_{np} で比較すると、 R が大きくなるほど K_{Oph} の値は大きくなる。

Table 2 Coefficients of resistance curve

R	α (MPa)	γ (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
0	146.5	-0.025
-0.5	57.9	-0.045
-1	36.8	0.040
-2	35.4	-0.533

Fig. 9 Change of coefficients of resistance curve with stress ratio

Fig. 10 Change of threshold crack opening stress intensity factor with crack length from pre-crack

Fig. 11 Limiting curves of pre-cracked specimens

以上のように K_{opt} と Δc_{np} の関係が得られると、前報と同様にして疲労限度の予測が可能となる。

4・2 予き裂材の疲労限度予測 各応力比に対する実験結果とき裂伝ば抵抗曲線法による予測結果を図11に示す。左軸上の印は疲労き裂が進展しないことを、右軸上の矢印は疲労き裂が停留せず、伝ばを続けたときの負荷応力振幅を表している。き裂進展開始限界、破断限界、停留き裂長さとの関係は、いずれの R においても予測値とよく一致する。表3および表4に各条件下における疲労き裂進展開始限度と破断限度の実験結果と予測値を示す。ただし、破断限度は最終的に破断に至ったときの予き裂長さで計算した。いずれの場合においても予測値と実験結果は極めてよく一致することがわかる。また表4には村上らの手法⁽⁵⁾を用い、欠陥寸法と硬さから予測される値も示したが、 $R=0$ と -0.5 では近い予測であるが、 $R=-2$ においては小さめとなる。

前報⁽¹⁰⁾では、任意の予き裂長さに対して式(5)が成立することを示した。そこで、式(6)がき裂長さによらずに成立するものとして、それぞれの応力比に対する破断限界応力振幅と予き裂長さの関係を予測した結果を図12に示す。ただし、初期欠陥は表面半円き裂とし、等価き裂長さ l を横軸に取った。図中白抜き印はき裂伝ばせず、半白抜き印は伝ば後に停留、黒印は停留せずに破断に至ることを意味している。点線は平滑材の疲労限度である。ただし、 $R=-2$ の疲労限度は実験結果が得られていないため、後述の疲労限度線図における σ_a - σ_r 直線関係より予測される値 241 MPa を採用した。前述のように、図中一点鎖線で示

すき裂進展開始限度は $K_{\text{maxth}} = \Delta K_{\text{effth}} + \gamma$ で与えられ、破断限度は図中実線の予測曲線で与えられる。十分長い予き裂に対しては長いき裂の下限界値 $K_{\text{maxth}\infty}$ である二点鎖線と実線の予測曲線がほぼ一致する。また、図中破線は村上らの手法による予測値であるが、前述のごとく $R=-2$ でやや小さめの予測となる。

図13には各応力比に対して予測される破断限界曲

Fig. 12 Relation between stress amplitude and crack length

Fig. 13 Change of fatigue fracture limit curve with crack length for different stress ratio

Table 3 Fatigue limit for crack extension

Stress ratio R	Pre-crack length c_i (mm)	Fatigue limit for crack extension, σ_{w1} (MPa)	
		Experiment	R-curve method
0	0.50	52.5~57.5	52.7
-0.5	0.50	71.3~78.8	77.1
-2	0.52	120.0~127.5	122.5

Table 4 Fatigue limit for fracture

Stress ratio R	Pre-crack length c_i (mm)	Fatigue limit for fracture σ_{w2} (MPa)		
		Experiment	R-curve method	Murakami's method
0	0.64	85.0~89.0	81.4	98.4
-0.5	0.61	101.3~108.8	98.7	109.2
-2	0.64	150.0~165.0	157.7	127.7

線をまとめて示す。同一の初期欠陥寸法で比較すると、応力比が大きいほど破断限界応力振幅は小さくなる。図13は初期欠陥寸法を関数として、平滑材の疲労限度、微小き裂の破断限度、長いき裂の破断限度の三つの領域に分けることができるが、それらに遷移する欠陥寸法は応力比が小さくなるほど大きくなることわかる。特に、平滑材の疲労限度と微小き裂の破断限度の遷移欠陥寸法(図中点線と実線との交点、最大非損傷欠陥寸法に対応する)は、各応力比に対して図中一点鎖線で近似可能である。ただし $R=-2$ については、 $\sigma_a-\sigma_r$ 関係より予測される値であり、実験値ではない。特に興味深い点は、この一点鎖線が $R=-1$ における平滑材で得られた負荷応力振幅と最大停留き裂長さの関係⁽¹⁰⁾ であることである。さらに、この関係は $R=0$ および -1.5 の平滑材で得られた応力振幅と最大停留き裂長さの関係(図中の□印および○印)とも一致し、応力比には依存しない。本材料の場合、一点鎖線は次式で与えられる。

$$\sigma_a = 1128 l^{0.165} \dots\dots\dots (9)$$

ここで単位は σ_a [MPa], l [m] である。西谷ら⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ は、平滑材のき裂の発生過程は平均応力に依存せず、応力振幅のみで決定されることを報告しており、本結果によく対応している。

平滑材の疲労限度は、表面に発生したせん断形のステージⅠき裂の伝ば条件で決定される。ステージⅠき裂にき裂閉口がないとすると、き裂の発生および初期伝ばは平均応力によらず、応力振幅のみで決定される。ステージⅠき裂はステージⅡに移行してき裂閉口が形成されるが、その過程は本実験の予き裂からのステージⅡき裂の伝ばに対応する。したがって、平滑材の疲労限度は、負荷応力振幅と最大停留き裂長さの関係式(9)と、き裂伝ば抵抗曲線法によって予測される破断限度曲線との交点で与えられることになる。すな

わち、長いき裂の下限界値に関する式(1)[もしくは式(3)], 式(6)および(9)が得られると、任意の応力比(あるいは平均応力)に対する疲労限度が予測可能となる。なお、本手法で $R=-2$ の平滑材の疲労限度を予測すると 237 MPa となる。 $R=-1.5$ の実験結果をも考慮すると $\sigma_a-\sigma_r$ 関係は $R<-1$ に対して大きめの疲労限度を与えるようである。

平滑材の疲労限度に及ぼす応力比の影響については、従来より多くの研究が行われており、疲労限度線図として $\sigma_a-\sigma_r$ 線、修正グッドマン線やゲルバー曲線等が実用されている⁽¹⁾。図14に本手法による破断予測曲線の実験結果を示す。ただし、欠陥形状は半円き裂として計算した。実験結果は予測結果とよく一致し、修正グッドマン線とゲルバー曲線の間にある。より詳細には従来の多くの報告にあるように $\sigma_a-\sigma_r$ 関係に近い疲労限度線図が予測される。すなわち、従来物理的意味付けが不十分であった疲労限度線図は、ステージⅠき裂の発生およびき裂閉口現象に基づく微小き裂の伝ば下限界条件によって与えられることがわかる。

図15には等価き裂長さ l の半円状初期欠陥がある場合の疲労限度線図を示す。図中の実線は図14の欠陥がない場合の予測線である。例えば欠陥寸法 $l=0.053$ mm では、平均応力が圧縮の場合には非損傷欠陥寸法の方が大きくなるため、疲労限度は実線で与えられる。一方、平均応力が正になると l の初期欠陥からき裂が伝ばし、疲労限度は一点鎖線のように実線より小さくなるのが本手法を用いて予測される。

これまで報告した切欠材の結果⁽⁷⁾⁽⁸⁾ より、通常の鉄鋼材料に関しては、式(6)が適用可能と考えられるが、ステージⅠき裂長さと負荷応力の関係、および長いき裂の下限界値はそれぞれの材料に対して決定する必要がある。今後、さらに簡便な評価手法を開発すると

Fig. 14 Haigh diagram of smooth specimen

Fig. 15 Haigh diagram of cracked specimen

もに、強度レベルの異なる材料での検討や、 $R > 0$ の場合への発展が望まれる。

5. 結 言

(1) 長いき裂に対して応力比 $R \leq R_c$ では、下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th\infty}$ は応力比の増加とともに直線的に減少する。下限界最大応力拡大係数 $K_{maxth\infty}$ および下限界き裂開口応力拡大係数 $K_{opth\infty}$ は応力比に依存せず、一定となる。一方、 $R > R_c$ では $\Delta K_{th\infty}$ はほぼ一定値を取り、その値は有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{effth\infty}$ に一致する。 R_c は 0.425 であった。

(2) き裂伝ば速度は応力比やき裂長さによらず、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} によって一価的に整理できた。また、その下限界値 $\Delta K_{effth\infty}$ は材料固有の伝ば抵抗である。

(3) 応力比が -1 より大きい場合には、き裂進展開始時のき裂開口応力はほぼ零であるのに対し、平均応力が圧縮に大きい $R = -2$ では圧縮側でき裂が開いた。

(4) き裂伝ば抵抗曲線法は、任意の応力比に対する疲労限度予測に有効であり、予測値は実験結果とよく一致した。

(5) 非損傷欠陥寸法は応力比が小さくなるほど大きくなり、疲労限度と非損傷欠陥寸法の関係は、平滑材の負荷応力振幅と最大停留き裂長さの関係に一致し

た。また、この関係は応力比に依存しない。

(6) き裂伝ば抵抗曲線法によって予測される疲労限度線図は、 $\sigma_a - \sigma_T$ 直線関係に近い。

文 献

- (1) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, (1990), 5-8, Prentice Hall.
- (2) Klesnil, L. and Lukas, P., *Mater. Sci. Eng.*, **9** (1972), 231-240.
- (3) Schmidt, R. A. and Paris, P. C., *ASTM STP*, 576 (1973), 79-94.
- (4) 中井善一・田中啓介・川島理生司, 材料, **33**-371 (1984), 1045-1051.
- (5) 村上敬宜・上村裕二郎・夏目喜孝・宮川進, 機論, **56**-525, A (1990), 1074-1081.
- (6) Tanaka, K. and Akiniwa, Y., *Eng. Fract. Mech.*, **30**-6 (1988), 863-876.
- (7) 秋庭義明・田中啓介・杵渕雅男, 材料, **38**-434 (1989), 1275-1281.
- (8) 秋庭義明・田中啓介・張洛明, 機論, **62**-594, A (1996), 356-362.
- (9) 秋庭義明・田中啓介・谷口尚正, 機論, **55**-511, A (1989), 435-442.
- (10) 秋庭義明・田中啓介・張洛明, 機論, **63**-606, A (1997), 233-239.
- (11) 材料の疲労き裂進展抵抗に関する資料調査分科会編, 金属材料疲労き裂進展抵抗データ集, **1** (1983), 257.
- (12) Newman, J. C. Jr. and Raju, I. S., *ASTM STP*, 791 (1983), 238-265.
- (13) 西谷弘信・山下尚義, 機論(第1部), **32**-242 (1966), 1456-1461.
- (14) 西谷弘信・蓮尾康博, 機論(第1部), **44**-377 (1978), 1-7.