領域被害モデルに基づく微小疲労き裂の強度評価に関する研究*

藤本 由紀夫^{*1}, 濱田 邦裕^{*1}Study on Strength Evaluation of Small Fatigue Cracks
Based on Inherent Damage Zone ModelYukio FUJIMOTO^{*2} and Kunihiro HAMADA^{*2} Hiroshima University, Dept. of Engineering Systems,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527 Japan

Inherent damage zone model assumes that σ_{r_0} , which is the stress at a small distance r_0 from the crack initiation position, governs the fatigue characteristics regardless of the geometric configuration of the specimen. The distance r_0 represents the size of effective damage zone and it is an inherent length of the material. A special feature of the model is using the exact solution of σ_{r_0} . Neuber's analytical solution for notched specimen and Westergaard's stress function for cracked specimen are employed for this purpose. In this paper, the strength of small fatigue crack is investigated based on the inherent damage zone model. A new crack propagation equation which is applicable to both small and large cracks is proposed and the crack propagation property at lower stress intensity factor range is evaluated. Mechanism of non-propagating crack is explained by the comparison of magnitude of σ_{r_0} between crack and notch with the same length. Occurrence condition of non-propagating crack is evaluated for elliptic notches and circular holes. Predicted strength properties of small cracks are in good agreement with the previous experimental data.

Key Words: Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Notch, Fatigue, Small Crack, Non-Propagating Crack

1. 緒 言

微小き裂伝ば特性を Paris 則で整理すると, 長いき裂よりも伝ば速度が速くなることや, 長いき裂の伝ば下限界値以下でもき裂が伝ばすることなどが従来の研究で明らかにされている⁽¹⁾. 長いき裂および微小き裂によらず, これらのき裂伝ば特性を統一的に説明するため, き裂先端の領域内の応力分布⁽²⁾, 弾塑性状態⁽³⁾⁽⁴⁾, き裂開閉口⁽⁵⁾⁽⁶⁾に基づくモデル, さらにき裂先端に潜在き裂を想定するモデル⁽⁷⁾などが提案されてきた.

従来の微小き裂の理論には, 一部で応力拡大係数に拠らない伝ば速度の評価式も提案されているが⁽⁸⁾⁽⁹⁾, 多くは, き裂先端の応力の特異性に基づく応力拡大係数を用いた検討が行われている. Haddad らの潜在き裂モデル⁽⁷⁾では, 平滑材においても潜在き裂を想定し, き裂発生とき裂伝ばの諸問題を応力拡大係数で一貫して説明することを試みている.

一方, これとは別の考え方に, き裂先端からある距離離れた位置の応力を用いて, き裂発生や伝ば特性を

解釈しようとする考えがある. 石橋⁽¹⁰⁾が提案した ε_0 のモデルは, 切欠きの応力集中係数と切欠係数の関係を, 切欠底から ε_0 離れた位置の応力で説明するモデルである. Neuber⁽¹¹⁾の提案した, 結晶粒寸法に關係する材料固有の被害領域(material block size)もこれに類似した考えである. 疲労被害にある領域が関与するとするこれらのモデルは, 厳しい応力こう配を有するき裂に対しても有効と考えられるが, ε_0 の決定方法や結晶組織との関係が必ずしも明らかでないためか, あまり研究が行われていない.

著者らは石橋のモデル⁽¹⁰⁾をき裂に適用し, その定式化を改善した領域被害モデル⁽¹²⁾を提案し, 微小き裂の伝ば特性を検討してきた. 領域被害モデルは, き裂先端から r_0 離れた位置の応力によって疲労強度を評価するもので, き裂先端に微小な被害領域を考える点で石橋のモデルと基本的に同じである.

しかしながら提案したモデルの特徴は, 応力分布の厳密解を用いる点にある. 従来, き裂先端の応力分布は, $1/\sqrt{r}$ の特異性(r はき裂先端からの距離)を考慮した近似解が多く用いられてきた. しかしこの近似解の精度は, き裂長さとき裂先端からの距離によって変化し, とくに微小き裂に対しては適用に注意が必要で

* 原稿受付 1999 年 5 月 13 日.

^{*1} 正員, 広島大学工学部(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1).

E-mail: fujimoto@naoe.hiroshima-u.ac.jp

ある。

本研究では、き裂の厳密応力分布を適用することにより、平滑材の疲労限と長いき裂の伝ば下限界値から r_0 を推定する方法を示す。次に、領域被害モデルに基づくき裂伝ば速度式を新しく提案する。そして、伝ば下限界付近の微小き裂の伝ば特性、平滑材の疲労限とき裂伝ば下限界の関係、切欠底における停留き裂現象を説明し、従来の実験結果と比較検討を行う。なお、本研究は弾性解に基づく検討を行うので、適用範囲は伝ば下限界付近に限られる。

2. 提案するモデル

2.1 領域被害モデル 提案する領域被害モデルは、石橋のモデル⁽¹⁰⁾ をき裂に適用し、応力分布の厳密解を用いて定式化を改善したものである。モデルの要約を以下に示す(図1)。

- (1) 切欠底から距離 r_0 内部に入った点の応力 $\Delta\sigma_{r_0}$ が平滑材の疲労限 $\Delta\sigma_{w0}$ と等しくなるとき、切欠材の疲労限の状態となる。
- (2) き裂材でも同様に、き裂先端から距離 r_0 内部に入った点の応力 $\Delta\sigma_{r_0}$ が $\Delta\sigma_{w0}$ と等しくなるとき、き裂伝ばの下限界の状態となる。
- (3) 疲労被害に有効な距離 r_0 は材料固有の長さである。

このモデルでは、被害領域の外縁での応力 $\Delta\sigma_{r_0}$ を、領域内部で損傷が活性化するための一種の駆動応力を考えていることになる。

2.2 切欠きおよびき裂先端近傍の応力分布 本研究では厳密解があるものとして、無限板中のだ円切欠きに対する Neuber⁽¹¹⁾ の解析解と、き裂に対する Westergaard⁽¹³⁾ の解析解を用いる。

だ円孔を有する無限板に、遠方で一様引張応力 σ_n が作用する場合、だ円長軸延長上の荷重方向の応力 σ_r は次式で与えられる⁽¹¹⁾。

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = Z(a, \rho, r)$$

$$Z(a, \rho, r) = 1 + [\cosh u_0 / (2 \sinh^2 u)]$$

$$\times [e^{u_0} \cdot (e^{2u_0} - 3)(1 + 0.5 \cdot \coth u) e^{-2u}$$

$$+ \cosh u_0 \cdot \coth u] \dots\dots\dots (1)$$

$$\coth u_0 = \sqrt{a/\rho}$$

$$u = \cosh^{-1}[(1 + r/a) \cosh u_0]$$

ここで、 a はだ円の長軸半長、 ρ は先端の局率半径、 r はだ円先端からの距離である。

だ円の形状が鋭くなるにつれて、先端近傍の応力分布は、 $\rho \ll a$, $0 \ll r \ll a$ の範囲で次式で近似できる⁽¹³⁾。

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{a}{2r+\rho}} \left(1 + \frac{\rho}{2r+\rho} \right) + \left(\frac{\rho}{2r+\rho} \right) \dots\dots (2)$$

一方、長さ $2a$ の貫通き裂を有する無限板に、遠方で一様引張応力 σ_n が作用する場合の、き裂延長線上の荷重方向の σ_r は次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \frac{a+r}{\sqrt{r(2a+r)}} \dots\dots\dots (3)$$

$r \ll a$ の条件下で上式を級数展開して第1項を取ると次式が得られる。

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{a}{2r}} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)の近似度が良いのは $r \ll a$ の場合に限られる。

なお、本研究ではとくに断らない限り、切欠材については式(1)、き裂材については式(3)の厳密解を用いる。

2.3 疲労被害に有効な距離 r_0 まず、固有被害領域の寸法 r_0 を推定してみる。式(4)での近似が可能な長いき裂材において、応力範囲(振幅の2倍) $\Delta\sigma_n$ と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は次式で表せる。

$$\Delta K = \Delta\sigma_n \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (5)$$

上式に式(4)を代入すると、

$$\Delta K = \Delta\sigma_r \sqrt{2\pi r} \dots\dots\dots (6)$$

2.1 節の仮定より、 $\Delta\sigma_{r_0}$ が平滑材の疲労限応力 $\Delta\sigma_{w0}$ と等しいとき、き裂伝ばの下限界 ΔK_{th} に一致すると考えられる。長いき裂材の場合、長いき裂の伝ば下限

Fig. 1 Effective stress σ_{r_0} at the edge of inherent damage zone

界 $\Delta K_{th, long}$ を用いると次式が成立する。

$$\Delta K_{th, long} = \Delta \sigma_{w0} \sqrt{2\pi r_0} \quad (7)$$

これを解くと、 r_0 が次のように得られる。

$$r_0 = (\Delta K_{th, long} / \Delta \sigma_{w0})^2 / 2\pi \quad (8)$$

表1は長いき裂材の伝ば試験(応力比 $R = -1$)で大田ら⁽¹⁴⁾、秋庭ら⁽¹⁵⁾が求めた $\Delta K_{th, long}$ と $\Delta \sigma_{w0}$ を式(8)に代入して r_0 を計算したものである。表1より r_0 は0.03から0.1 mm程度の値となり、石橋の示した ε_0 (0.2%C鋼で0.023 mm, 0.62%C鋼で0.056 mm)と比較的近い値となっている。また、強度の高い材料ほど r_0 は小さくなる傾向があり、結晶粒寸法との依存性が推察される。

3. 領域被害モデルによる疲労強度推定

3.1 き裂伝ば則 領域被害モデルによると、下限界付近のき裂伝ば速度は、き裂先端から r_0 の位置の応力 $\Delta \sigma_{r_0}$ によって決まると考えられる。そこで伝ば速度として次式および図2に示す関数を仮定する。

Table 1 Size of inherent damage zone of some materials

Material	σ_Y (MPa)	σ_B (MPa)	$R = -1$		
			$\Delta \sigma_{w0}$ (MPa)	$\Delta K_{th, long}$ (MPa $\cdot m^{1/2}$)	r_0 (mm)
HT80*	794	823	800	13.0	0.042
SM58Q*	588	666	630	12.7	0.065
A533*	721	769	750	10.5	0.031
SM41B(S)**	280	445	396	10.2	0.105
2024-T3**	322	483	300	6.44	0.073

*Ohta et al.⁽¹⁴⁾, **Akinawa et al.⁽¹⁵⁾

Table 2 Coefficients and exponents of Paris's equation

Material	C	m	R = -1
HT80	3.88×10^{-12}	2.54	
SM58Q	1.19×10^{-12}	2.80	
A533	1.26×10^{-12}	2.95

Fig. 2 Crack propagation rate as a function of $\Delta \sigma_{r_0}$

$$da/dN = A(\Delta \sigma_{r_0})^m \quad (9)$$

ここで係数 A と指数 m は材料定数である。

微小き裂では平滑材の疲労限を少し超える応力で実験が行われることが多いため、き裂先端は弾塑性状態にあるが、弾性応力が使用できると仮定し、式(3)を用いて式(9)を書き換えると次式が得られる。

$$da/dN = C(f)^m (\Delta K)^m \quad (10)$$

ここで、

$$C = A(1/\sqrt{2\pi r_0})^m \quad (11)$$

$$f = \frac{\sqrt{2}(a+r_0)}{\sqrt{a(2a+r_0)}} \quad (12)$$

式(10)が本研究で提案するき裂伝ば速度式である。伝ば速度は ΔK によって一義的に決まらず、き裂長さ a および r_0 にも影響を受けることになる。

き裂長さが十分長い場合には、式(12)で $r_0 \ll a$ とおくと $f = 1.0$ となる。すなわち長いき裂では式(10)は次の Paris 則と一致する。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (13)$$

大田ら⁽¹⁴⁾は表1の材料について、Paris 則の係数と指数を表2のように求めている。そこで表2の SM58Q 材について、微小き裂と長いき裂の伝ば速度を計算し図3に示す。

長いき裂の場合、式(13)に $C = 1.19 \times 10^{-12}$, $m = 2.8$ を代入して計算した。

微小き裂の場合は式(10)を用いて、一定応力範囲 $\Delta \sigma_n$ のもとで初期長さ $a = 0.01$ mm からき裂が成長したときの伝ば速度を示す。SM58Q の r_0 は0.065

Fig. 3 da/dN - ΔK relationship of small cracks predicted by inherent damage zone model

mmである。微小き裂では応力範囲によって伝ば曲線が変化するので、 $\Delta\sigma_n=600, 700$ および 800 MPa の三とおりを示している。なお、図3にはき裂長さが 0.01 mm, 0.1 mm および 1.0 mm の位置に●印を付けている。

図3より、微小き裂の伝ば速度はき裂長さが短くなるほどParis式から外れ、長いき裂の場合よりも速くなっている。き裂長さが 1 mm を超えると、ほぼ長いき裂の伝ば曲線に漸近している。また、 $\Delta K_{th, long}$ 以下においてもき裂が進展することがわかる。これらの関係は定性的に、従来の実験事実⁽¹⁾と良く対応している。また、 $\Delta\sigma_n$ が大きいほど伝ば速度は多少早くなっているが、これは戸根ら⁽¹⁶⁾の実験結果とよく一致している。

従来の実験によると、微小き裂の伝ば速度は式(14)のように a に比例するというものが多い⁽⁸⁾。

$$da/dN = C_1(\Delta\sigma_n)^{m_1} a \quad \dots\dots\dots (14)$$

上式を積分してき裂成長曲線を求めると、対数き裂長さ $\log(a)$ と繰返し数 N の間に直線関係が成り立つことになる。そこで、図3の微小き裂の伝ば速度を、 $a=0.05$ mm から 2 mm にわたって数値積分したき裂成長曲線を図4に示す。この付近のき裂長さは、従来の実験で $\log(a)-N$ 関係に直線関係が多く認められている⁽⁹⁾が、図より $\log(a)-N$ 関係はかなり直線に近いことがわかる。なお、図4には示していないが、Paris則の m が 4 の場合でも、 $0.05\sim 1$ mm の間では、 $\log(a)-N$ は直線に近い関係が得られる。

3.2 き裂伝ばの下限界 ΔK_{th} き裂伝ばの下限界は $\Delta\sigma_{r_0}$ が平滑材の疲労限 $\Delta\sigma_{w0}$ に一致するときである。

式(9)と式(10)を等置して、それぞれ $\Delta\sigma_{w0}$ と ΔK_{th} を代入すると次式になる。

$$A(\Delta\sigma_{w0})^m = C(f)^m (\Delta K_{th})^m \quad \dots\dots\dots (15)$$

これを ΔK_{th} について解くと、式(16)が得られる。

$$\Delta K_{th} = \frac{\sqrt{\pi a r_0 (2a + r_0)}}{(a + r_0)} \Delta\sigma_{w0} \quad \dots\dots\dots (16)$$

上式は、 ΔK_{th} が材料固有の値である $\Delta\sigma_{w0}$ と r_0 に依存するだけでなく、き裂長さ a にも依存することを示している。き裂長さが十分長い場合、式(16)に $r_0/a \equiv 0$ を代入すると式(17)になる。

$$\Delta K_{th, long} = \sqrt{2\pi r_0} \Delta\sigma_{w0} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式(16)、(17)より次の関係が成り立つ。

$$\Delta K_{th} / \Delta K_{th, long} = 1/f \quad \dots\dots\dots (18)$$

図5は縦軸に $\Delta K_{th} / \Delta K_{th, long}$ をとり、横軸にき裂半長 a をとって、式(18)の関係を示したものである。 r_0 は $0.03, 0.06$ および 0.09 mm の場合を示しているが、 r_0 が小さいほうが $\Delta K_{th} / \Delta K_{th, long}$ が小さくなる傾向にある。図中のプロットはLindleyの文献⁽¹⁷⁾から、 $R=-1$ の実験値(き裂深さに対する $\Delta K_{th} / \Delta K_{th, long}$)を写したものである。これらの材料の r_0 も 0.03 mm から 0.09 mm の範囲にあると考えられ、計算値は実験値の傾向とよく一致している。

3.3 下限界付近のき裂伝ば曲線 き裂伝ば下限界付近の伝ば特性をみるため、式(10)で応力範囲を徐々に減少させる方法で、下限界付近の伝ば速度を計算した。図6はSM58Qに対する計算結果である。表1によるとSM58Qの疲労限は 630 MPa であるので、応力範囲が疲労限に近い $\Delta\sigma_n=650$ MPa から徐々に応力を減少させた。応力減少を開始するき裂長さはそれぞれ、 $0.02, 0.05, 0.1, 0.2$ および 0.5 mm の五とおりとし、応力減少中のき裂進展はごく微小と仮定した。なお、図中のき裂長さの初期状態を結ぶ破線は、図3と同様の手法で描いてある。

図6より、応力減少の開始直後から伝ば下限界に達するまでの間は、伝ば速度のこう配は長いき裂の伝ば速度のこう配と等しい。これは応力減少中のき裂成長

Fig. 4 Estimated fatigue crack growth curve

Fig. 5 Relationship between crack growth threshold and crack length

が極めて小さいと仮定しているためである。下限界 ΔK_{th} はき裂長さによって変化し式(16)から決まる。短いき裂長さで応力減少させた場合のほうが ΔK_{th} はより小さくなる。

微小き裂の伝ば試験には浅い切欠きを加工した試験片を用いることが多いので、伝ば速度に初期切欠きの影響が現れる。また、微小き裂は結晶粒など組織に敏感で伝ば速度の変動が大きく生じやすい。このため、理論との比較には平均的伝ば速度を用いる必要があるが、図6は秋庭ら⁽¹⁵⁾、酒井ら⁽¹⁸⁾の文献に示された実験結果の特徴とよく対応している。

3.4 平滑材の疲労限 $\Delta\sigma_{w0}$ とき裂伝ば下限界応力 $\Delta\sigma_{th}$ との関係 $\Delta\sigma_{r0}$ が平滑材の疲労限 $\Delta\sigma_{w0}$ に一致するときの公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ を $\Delta\sigma_{th}$ と書くことにすると、式(3)より $\Delta\sigma_{th}$ と $\Delta\sigma_{w0}$ の間には次式が成り立つ。

$$\frac{\Delta\sigma_{th}}{\Delta\sigma_{w0}} = \frac{\sqrt{r_0(2a+r_0)}}{(a+r_0)} \quad (19)$$

図7は、縦軸に $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ を、横軸に $a/2r_0$ をとって式(19)の関係を示したものである。図中には、式(4)の線形破壊力学の近似に基づく同様の関係を直線で示してある。また、式(20)のHaddadら⁽⁷⁾による潜在き裂モデルの $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ も横軸に a/a_0 を取って描いてある。

$$\frac{\Delta\sigma_{th}}{\Delta\sigma_{w0}} = \frac{\sqrt{a_0}}{\sqrt{a+a_0}} \quad (20)$$

ここで a_0 は潜在き裂長さである。図7より、領域被害モデルと潜在き裂モデルの $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ は、 $2r_0=a_0$

と考えると極めて近い関係にあることがわかる。

ところで、潜在き裂モデルでは、 a_0 は次式で表される⁽¹⁾。

$$a_0 = (\Delta K_{th}/\Delta\sigma_{w0})^2/\pi \quad (21)$$

式(21)は $2r_0=a_0$ と置けば式(8)と全く同じである。Tanakaら⁽¹⁹⁾、北川ら⁽²⁰⁾によると、 $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ の実験結果の多くは潜在き裂モデルを支持している。このことは、多くの実験データが、式(19)の領域被害モデルをも支持するものであることを意味している。

なお、式(19)と式(20)で $2r_0=2a_0$ と置くと両式が極めて近い関係にあることは、微小き裂の伝ば速度や停留き裂に関するHaddadらの説明が、領域被害モデルを用いても説明可能であることを意味している。

3.5 停留き裂のメカニズム 切欠底半径 ρ が小さく、ある値以上の応力集中率を有する切欠材では、疲労限付近で停留き裂が生じることが知られている。停留き裂については種々の実験的検討が行われてきたが⁽²¹⁾、そのメカニズムは完全には解明されていない。本研究では、提案した領域被害モデルを用いて、その力学的説明を試みる。

図8は遠方で引張応力 σ_n を受けるだ円切欠きと、同一長さのき裂の先端近傍の応力分布を模式的に示す。図8において、き裂先端の応力が切欠底の応力よりも大きいのは当然である。しかし、先端から r_0 離れた位置の応力 σ_{r0} は、切欠きのほうが逆に大きい。切欠底のごく近傍での応力の逆転は、切欠底半径 ρ が小さい場合に限って生じる現象である。

図9は半長 a が1mmのだ円切欠きにおいて、 ρ を種々変化させて、切欠底から $r_0=0.065$ mmの位置で

Fig. 6 da/dN - ΔK relationship of small cracks around the threshold

Fig. 7 Normalized relation between threshold stress and crack length

の σ_{r_0} を公称応力 σ_n で除して無次元化表示したものである。横軸の $\rho=0$ の極限がき裂にあたる(図中に crack と表示)。

図 9 より、き裂では $\sigma_{r_0}/\sigma_n=2.91$ 付近にあるが、切欠きでは $\rho=0.1$ mm 付近で $\sigma_{r_0}/\sigma_n=3.32$ であり、き裂の場合よりもかなり大きい。このことは、同一長さの「き裂」と「鋭い切欠き」の疲労限を比較した場合、「鋭い切欠き」の疲労限が「き裂」の疲労限(き裂進展限界応力)よりも小さくなることを意味している。

このように、き裂発生以前の切欠きの σ_{r_0} に比べて、き裂発生後の σ_{r_0} がいったん小さくなる場合には、切欠底で発生したき裂が、停留する可能性が生じる。図 9 において $\rho \leq 0.5$ mm で停留き裂の可能性があり、それ以上の ρ では応力の逆転は生じない。この停留き裂が生じる可能性がある限界の切欠底半径を ρ_c とする。

停留き裂の説明では、切欠材のき裂発生に必要な公

Fig. 8 Stress distribution near sharp notch root and crack tip under the same nominal stress

Fig. 9 Effective stress, σ_{r_0} , of elliptic notches with different root radius

称応力範囲の下限値 $\Delta\sigma_{w1}$ と、き裂進展に必要な応力範囲の下限値 $\Delta\sigma_{w2}$ が用いられることが多い⁽²¹⁾。厳密解である式(1)、(3)を用いると、だ円切欠きの $\Delta\sigma_{w1}$ は式(22)で、またき裂の $\Delta\sigma_{w2}$ は式(23)で表せる。

$$\Delta\sigma_{w1} = \frac{\Delta\sigma_{w0}}{Z(a, \rho, r_0)} \dots \dots \dots (22)$$

$$\Delta\sigma_{w2} = \frac{\sqrt{r_0(2a+r_0)}}{a+r_0} \Delta\sigma_{w0} \dots \dots \dots (23)$$

図 10 は先端半径 ρ を種々変化させた、半長 a が 1 mm のだ円切欠きについて、 $\Delta\sigma_{w1}/\Delta\sigma_{w0}$ と応力集中係数 K_t の関係を示す。また、同じ半長を有するき裂の $\Delta\sigma_{w2}/\Delta\sigma_{w0}$ を一点鎖線で示している。 r_0 は 0.03, 0.06 および 0.09 mm の場合を計算した。式(22)の分母の $Z(a, \rho, r_0)$ は円孔より横長のだ円切欠き、すなわち $K_t \geq 3$ の場合にのみ適用できるので、 $K_t < 3$ の部分は点線で延長している。図 10 において、 $\Delta\sigma_{w2}/\Delta\sigma_{w0}$ が $\Delta\sigma_{w1}/\Delta\sigma_{w0}$ に比べて大きければ、だ円底からき裂は発生するが、伝ばできずに停留状態となる。すなわち図中の●印で示す分岐点を境目に、それより応力集中の高い場合に停留き裂が生じる可能性がある。図 10 は Frost⁽⁸⁾ を始めとする多くの実験結果とよい一致を示している。また西谷ら⁽²²⁾ の実験によると、高強度材料ほど分岐点が応力集中率の大きい側へ移動している。高強度材料ほど r_0 が小さいことを考慮すると、計算結果は西谷らの実験結果ともよく一致している。

$\Delta\sigma_{w1}$: stress range necessary for crack initiation

$\Delta\sigma_{w2}$: stress range necessary for crack propagation

Fig. 10 Normalized relation between fatigue limit and stress concentration factor

Fig. 11 Occurrence condition of non-propagating crack calculated for elliptic notches

図11は横軸に ρ を縦軸にだ円半長 a をとって、種々のだ円切欠きで停留き裂が生じる可能性がある領域を計算したものである。この領域は、 ρ が小さいほど停留き裂が生じやすいとする西谷⁽²³⁾の実験事実と一致している。図中の境界線が停留き裂の生じる分岐点となるが、領域被害モデルでは、分岐点は切欠底半径 ρ 、切欠長さ a および r_0 に依存して決まることになる。

3.6 円孔切欠きに生じる停留き裂 円孔を有する無限板が、遠方で一様引張圧縮応力を受ける場合について、停留き裂が生じる条件を計算した。まず、式(1)においてだ円の局率半径 ρ を a と等しく置き(実際には ρ と a をごく接近させる)、種々の直径 D の円孔材について $\Delta\sigma_{r_0}/\Delta\sigma_n$ を計算する。次に、円孔直径と同じ長さのき裂材について式(3)から $\Delta\sigma_{r_0}/\Delta\sigma_n$ を計算する。

図12は円孔材とき裂材の $\Delta\sigma_{r_0}/\Delta\sigma_n$ を比較して示す。図12より D が小さいうちは、円孔の $\Delta\sigma_{r_0}$ がき裂のそれよりも大きく、 D が大きくなるとある時点で、き裂の $\Delta\sigma_{r_0}$ が逆に大きくなっている。図中には逆転位置を●印で示すが、このときの $D/2$ がちょうど分岐点にあたる。●印の位置はいずれも $(D/2)/r_0$ が約10になっている。

西谷らが行った横穴を加工した丸棒の回転曲げ疲労試験⁽²⁴⁾によれば、多くの材料で分岐点が0.5 mm前後になるというデータが得られており、図12の計算結果は実験結果と比較的近いことがわかる。

以上述べたように、停留き裂は切欠底近傍とき裂先端近傍での σ_{r_0} の逆転現象によって生じると考えることによって、従来の実験結果をかなり説明できることがわかる。

Fig. 12 Occurrence condition of non-propagating crack calculated for circular holes

4. 結 言

本研究は、領域被害モデルに基づいて、微小き裂の伝ば下限界付近の特性について検討を行った。領域被害モデルは、き裂発生あるいは伝ば位置から r_0 離れた位置の応力 $\Delta\sigma_{r_0}$ を、疲労被害を活性化させる駆動応力と考えるもので、石橋が提案した ϵ_0 の理論と本質的に同じである。しかしながら、本研究ではき裂先端の応力分布の厳密解を用いている点に特徴がある。厳密応力分布の適用により、平滑材や切欠材の疲労限とき裂材の伝ば下限界強度との関連性を、単純なモデルで幅広く説明できる。本研究の要約と主な結果は次のようである。

- (1) き裂の厳密応力分布を適用した領域被害モデルに基づいて、き裂伝ば速度式と伝ば下限界強度の評価法を提案した。
- (2) 領域被害モデルを用いて停留き裂のメカニズムを説明し、切欠底に停留き裂が生じる条件を示した。
- (3) 提案手法を用いると、従来の実験で得られている微小き裂の伝ば特性や停留き裂に関する種々の現象を説明できた。

なお、本研究ではおもに完全両振り($R = -1$)の場合について検討を行ったが、き裂開閉口の問題やき裂先端の弾塑性挙動についてはふれていない。き裂伝ばにこれらの因子が関与していることは間違いなく⁽⁵⁾、今後モデルに組み込む必要がある。

文 献

- (1) 田中啓介, 微小疲労き裂の伝ば, 材料, **33**-371(1984), 961-972.
- (2) 西谷弘信, 炭素鋼の回転曲げ試験における分岐点ならびに疲れ限度の寸法効果, 機論, **34**-259, A(1968), 371-382.
- (3) 大内田久・宇佐美三郎・西岡章夫, 疲れき裂の発生ならびに進展, 機論, **40**-343, A(1975), 703-712.
- (4) 星出敏彦・藤村哲・山田敏郎, 平滑材塑性疲労における表面き裂の発生および成長挙動, 機論, **50**-451, A(1984), 320-329.
- (5) 大路清嗣・小倉敬二・大久保好二, 切欠き底に発生した疲労き裂の開閉挙動と進展・停留(解析的検討), 機論, **42**-355(1976), 643-648.
- (6) 小林英男, 疲労き裂進展特性とき裂開閉口, 機論, **49**-443, A(1983), 771-778.
- (7) Haddad, M. H. El, Topper, T. H. and Smith, K. N., Prediction of non propagating cracks, *Eng. Frac. Mech.*, **11**(1979), 573-584.
- (8) Frost, N. E., A relation between the critical alternating propagation stress and crack length for mild steel, *Proc. Instn. Mech. Engrs*, **173**-35(1959), 811-827.
- (9) 西谷弘信・皮籠石紀雄, 小さい疲労き裂の伝ば則とその疲労寿命評価への応用, 機論, **49**-440, A(1983), 431-440.
- (10) 石橋正, 金属の疲労と破壊の防止, (1967), 59, 養賢堂.
- (11) Neuber, H., *Kerbspannungslehre*, (1937), 50, 149, Verlag Von Julius Springer, Berlin.
- (12) 藤本由紀夫・金元範・新宅英司・黄飛, 領域被害モデルによる疲労強度評価, 日本造船学会論文集, **184**(1998), 311-319.
- (13) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, (1976), 15-19, 培風館.
- (14) 大田昭彦・佐々木悦男・小菅通雄, 疲労き裂伝ば速度に及ぼす平均応力の影響, 機論, **43**-373(1977), 3179-3191.
- (15) 秋庭義明・田中啓介・杵淵雅男, 切欠き底微小疲労き裂の伝ばおよび停留におよぼす微視組織の影響, 材料, **38**-434(1989), 1275-1281.
- (16) 戸梶恵郎・小川武史・原田行雄・安藤善司, 微小疲労き裂の成長に対する線形破壊力学の適用限界とその組織依存性, 材料, **34**-385(1985), 1160-1166.
- (17) Lindley, T., McIntyre, P. and Trant, P. J., Fatigue crack initiation at corrosion pits, *Metal Technol.*, **9**(1982), 135-142.
- (18) 酒井達雄・戸梶恵郎・長谷川典彦・中島正貴, 金属材料の静的強度および疲労強度特性値の適合分布形について, 材料, **41**-466(1992), 1014-1024.
- (19) Tanaka, K., Nakai, Y. and Yamashita, M., Fatigue growth threshold of small cracks, *Int. J. Fract.*, **17**-5(1981), 519-533.
- (20) 北川英夫・高橋進, 微小な疲労き裂の成長とその下限界条件に関する破壊力学的研究, 機論, **45**-399, A(1979), 1289-1303.
- (21) 日本材料学会編, 金属材料疲労設計便覧, (1978), 62, 養賢堂.
- (22) 西谷弘信・千代一郎, S50C焼きなまし材および焼き入れ材の切欠き感度と平滑試験片における微視的停留き裂, 機論, **40**-329(1974), 41-52.
- (23) 西谷弘信, き裂における応力拡大係数に相当する切欠きにおける応力場の尺度, 機論, **49**-447, A(1983), 1353-1359.
- (24) 西谷弘信・鹿毛正治, 電解研磨した横穴材の回転曲げ疲れ, 機論, **39**-323(1973), 2005-2012.