

# 切欠き材における疲労き裂の伝ばと停留

伊原 千秋\* 櫻田 尚之\*\*

Propagation and Non-propagation of Fatigue Cracks in Notched Components

Chiaki IHARA Naoyuki SAKURADA

## ABSTRACT

A fatigue crack nucleated in the vicinity of the root of a sharp notch first decelerates with increasing crack length, and then becomes non-propagating or begins to accelerate after reaching a minimum propagating rate depending on the applied stress. In this paper, a method to analyze the growth behavior of such a crack is proposed. The length of a non-propagating crack, and the fatigue limits for crack initiation and for fracture from a notch predicted by the method are compared with the fatigue experimental data for center-notched plates of low carbon steel SM41B and good agreement is obtained

キーワード：切欠きからの停留き裂，切欠きき裂成長の振舞い，切欠きからのき裂発生  
の疲労限，切欠きからの破壊の疲労限

Keywords：Non-propagating crack from a notch, Growth behavior of a notched crack, Fatigue limit  
for crack initiation from a notch, Fatigue limit for fracture from a notch

## 1. 緒言

機械構造物の疲労破壊の多くは、通常部材の切欠き部から起こることが知られているので、種々の切欠きをもつ部材の疲労強度を調べることは実用上重要な問題である。疲労き裂は切欠き底付近の応力集中部に発生し、部材が破断するまで、部材中を伝ばしつづける。鋭い切欠き材では、低い応力でもき裂は発生するが、切欠きが大変鋭く、応力が十分小さければ、発生したき裂は必ずしも部材の破断まで伝ばをつづけることなく、停留する。この場合切欠き材は破断しないが、切欠き底にき裂は発生する。かくして、鋭い切欠き材ではき裂発生限界応力 $\sigma_{w1}$ とき裂が伝ばし、部材が破断する限界応力 $\sigma_{w2}$ とは異なる。鈍い切欠き材では、2つの疲労限は同一になるが、鋭い切欠き材では同一で

ないため、停留き裂が発生する応力領域が現れることになる。

以上のことから、鋭い切欠き材の疲労限付近の応力では、切欠き底に発生したき裂は長くなるにつれて、伝ば速度が次第に低下し、やがて停留するか、または一旦極小値をとった後、再び増加をはじめめる。

切欠き材における停留き裂の振舞いに関しては、Miller<sup>(1)</sup>ら、Haddad<sup>(2)</sup>ら、田中<sup>(3)</sup>ら、によって解析されている。Millerらはき裂伝ば速度の初期の減少は、切欠き底の塑性歪が切欠き底から離れるにつれて、急速に減少することによっておこるとしている。Haddadらは同じくこの切欠きによる塑性歪の影響のほか、平滑材における微小き裂の伝ばの異常な振舞いが加わっておこると考えている。田中らは、切欠き底付近はき裂長さの増大による応力拡大係数の増大より、き裂

\* 機械工学科

\*\* 大学院機械工学専攻

開口比の低下のほうが著しいため、有効応力拡大係数が低下して、き裂速度の減少がおこるとしている。しかしいずれの解析も、技巧的な方法を採用しているため、現象の説明が不明確にならざるをえない。

本論文では次節でのべる簡明な方法を提案し、それを用いて中央に楕円形切欠きを持つ低炭素鋼 SM41B の平板に対する実験結果を解析する。

## 2. 解析方法

平滑材の表面に発生したき裂は応力が疲労限  $\sigma_{w0}$  より大きい場合は、長さが 2~3 結晶粒程度になるまでは、最大せん断応力方向に mode II 形の伝ばをし、以後応力に垂直方向に mode I 形の伝ばをつづける。<sup>(4)</sup> また応力が疲労限以下でもき裂先端での応力拡大係数範囲  $\Delta K$  がその下限界  $\Delta K_{th}$  をこえる場合は mode I 形で伝ばすることが知られている。この関係を伝ば開始応力-き裂長さ線図で模式的に表わしたのが、Fig.1 に実線で示す北川 diagram<sup>(5)</sup>である。図中の領域 I ではき裂は伝ばしないはずである。ところが種々の実験結果では伝ば開始点が領域 I 内に入り、必ずしも北川 diagram と一致しない。

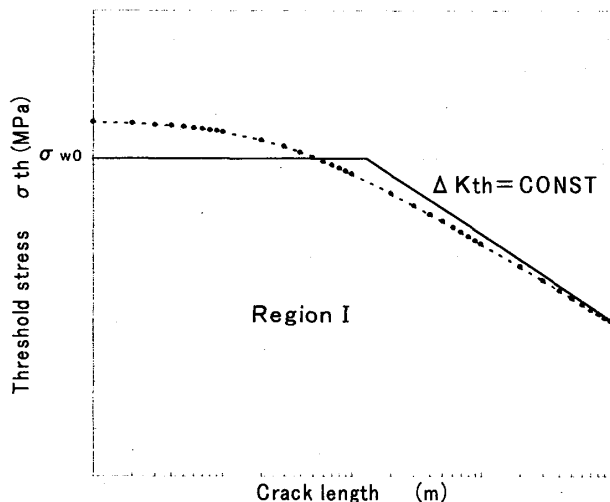


Fig.1 Relatin between threshold stress and crack length

著者の一人<sup>(6)</sup>は mode I 形き裂の伝ば開始条件を次のように定義した。すなわち、き裂先端での塑性域に着目し、その大きさ  $\omega_p$  が

$$\omega_p = \left\{ \sec \left[ \frac{\pi}{2} \frac{\Delta \sigma}{2 \sigma_Y} \right] - 1 \right\} \ell = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{2 \sigma_Y} \right)^2 \quad (1)$$

をこえた時、mode I 形の伝ばがはじまるとした。(ここで  $\sigma_Y$  は降伏応力である) この関係を Fig.1 にかくと、破線のようになり、実験をほぼ再現できる。

ところで、平滑材と切欠き材におけるき裂伝ばの違

いは、平滑材では応力が一様に作用するのに対して、切欠き材では切欠きによる応力集中の影響、すなわち応力分布が存在することであると考えられる。したがってこれを考慮すると、切欠き材でのき裂伝ばの振舞いは説明できる。

切欠きの存在による応力拡大係数  $K$  の補正係数を  $F(\ell)$  とすると、切欠き底からのき裂先端の塑性域は、

$$\omega_p = \left\{ \sec \left[ \frac{\pi}{2} \frac{F \cdot \Delta \sigma}{2 \sigma_Y} \right] - 1 \right\} \ell \quad (2)$$

とかけるので、これを用いると、切欠きのある場合、(1)式は、

$$\left\{ \sec \left[ \frac{\pi}{2} \frac{F \cdot \Delta \sigma}{2 \sigma_Y} \right] - 1 \right\} \ell = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{2 \sigma_Y} \right)^2 \quad (3)$$

となる。 $\Delta K_{th}$ 、 $\sigma_Y$ 、 $F(\ell)$  を与えると、実験から得られる停留き裂長さ、切欠き材でのき裂発生限界  $\sigma_{w1}$ 、および破断限界  $\sigma_{w2}$  が理論的に計算できる。

## 3. 実験との比較

実験<sup>(7)</sup>で用いられた材料は低炭素鋼 SM41B であり、その化学的性質および機械的性質をそれぞれ

Table I, Table II に示す。

Table I Chemical composition of SM41B (%)

C	Si	Mn	P	S
0.17	0.19	0.79	0.016	0.020

Table II Mechanical properties of SM41B

Yield strength $\sigma_Y$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Grain size $d_g$ ( $\mu m$ )
194	423	64

切欠き材は中央部に深さ  $2t = 6$  mm の切欠きを有する平板で、切欠き半径  $\rho = 0.16$  mm の時、切欠き底での弾性的応力集中係数は  $K_t = 8.48$ 、 $\rho = 0.86$  mm の時、 $K_t = 4.17$  である。平滑材の疲労限  $\sigma_{w0}$ 、 $\rho = 0.16$  mm の場合のき裂発生限界  $\sigma_{w1}$ 、破断限界  $\sigma_{w2}$ 、長いき裂伝ばの下限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  を Table III に示す。

Table III Fatigue limits and threshold stress intensity range

$\sigma_{w0}$ (MPa)	$\sigma_{w1}$ (MPa)	$\sigma_{w2}$ (MPa)	$\Delta K_{th}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
163	30 - 35	49.6 - 53	-12.22

次に田中<sup>(8)</sup>らにしたがって  $F(\ell)$  を求める。

切欠き底からのき裂に対する  $K$  はき裂長さが  $\ell \leq 1.5 \rho$  に対しては

$$K = 1.122 \sigma \sqrt{\pi \ell} \frac{Kt}{\sqrt{1 + 4.5 \left(\frac{\ell}{\rho}\right)}} \quad (4)$$

と表される。<sup>7)</sup>したがってこの場合の F を F<sub>1</sub> とすると、

$$F_1 = \frac{Kt}{\sqrt{1 + 4.5 \frac{\ell}{\rho}}} \quad (5)$$

となる。また  $\ell$  が大きい時には  $\ell + t$  をき裂長さと考えてよいから、その場合の F を F<sub>2</sub> とかくと、

$$\omega_p = \left\{ \sec \left( \frac{\pi}{2} \frac{\Delta \sigma}{2 \sigma_Y} \right) - 1 \right\} (\ell + t) \\ = \left\{ \sec \left( \frac{\pi}{2} \frac{F_2 \cdot \Delta \sigma}{2 \sigma_Y} \right) - 1 \right\} \ell \quad (6)$$

とにおいて F<sub>2</sub> を求める。F<sub>1</sub>( $\ell_0$ ) = F<sub>2</sub>( $\ell_0$ )となる  $\ell = \ell_0$  で F<sub>1</sub> と F<sub>2</sub> はつながる。

(3)式に(5)(6)式を代入して、 $\rho = 0.16$  mm および  $\rho = 0.86$  mm の場合の応力振幅と停留き裂長さの関係を示したのが Fig.2 である。図には(1)式を用いて、平滑材の場合のき裂開始曲線も示されている。

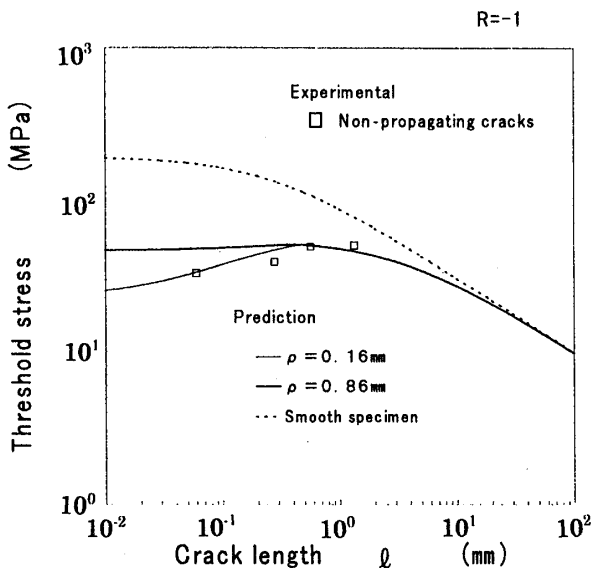


Fig.2 Notch root radius effect on the threshold stresses for elliptical notch in SM41B steel plates

4. 考察

Fig. 3 は Fig. 2 に示された  $\rho = 0.16$  mm の場合のき裂停留曲線を表したものである。

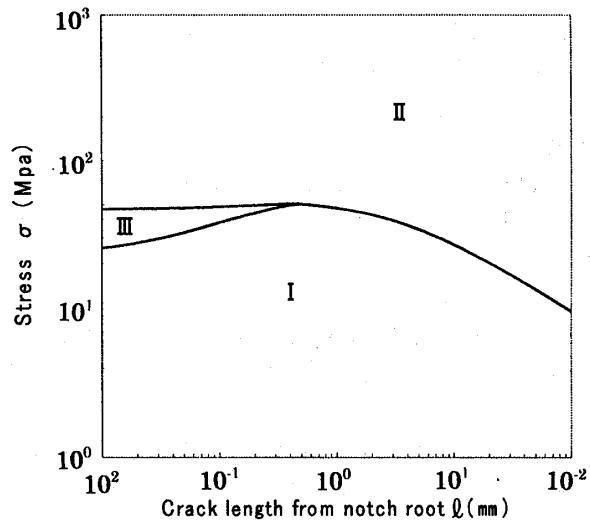


Fig.3 Non-propagating limit curve for  $\rho = 0.16$  mm

曲線上では mode I 型のき裂停留条件を満足しており、領域 I ではき裂は伝ばしない。即ち、この領域ではき裂先端の  $\Delta K$  はその下限値より小さい。領域 II、III ではき裂は伝ばする。II では応力振幅一定の場合、一旦発生したき裂はいくら長くなっても停留条件を満足せず、最終的には破断するが、III ではき裂が伝ばし、曲線上に達すると停留する。したがって、II と III の境界が破断限界  $\sigma_{w2}$  であり、また  $\ell = dg (= 0.064$  mm) の時、停留限界がき裂発生限界  $\sigma_{w1}$  である。したがって Fig.2 より、 $\rho = 0.16$  mm の場合、 $\sigma_{w1} = 34.2$  MPa、 $\sigma_{w2} = 51.1$  MPa が求まり、 $\rho = 0.86$  mm の場合  $\sigma_{w2} = 51.3$  MPa となり、Table III の実験結果とよい一致を示している。

5. 結論

切欠き材での疲労き裂伝ばを議論するため、平滑材での mode I 型き裂の伝ば開始条件をもとにし、切欠きの存在によって現れる応力集中の分布を考慮することにより、以下の結果を得た。

- 1) mode I 型でのき裂伝ば開始条件を(3)式のようにすることにより、切欠き底からのき裂伝ば、停留の実験値を再現することが出来た。
- 2) このことから切欠き材の停留き裂長さ、 $\sigma_{w1}$ 、および  $\sigma_{w2}$  が  $\Delta K_{th}$ 、 $\sigma_Y$ 、および  $\sigma_{wo}$  を与えることにより、得られることがわかった。

以上のことから切欠き材と平滑材はき裂伝ば則は同じであるが、平滑材では均一分布する応力をうけるのに対して、切欠き材では切欠き底で最大で、底から離

れるにつれて減少する分布応力を受けるために、異なった伝ばの振舞いをする事がわかった。

引用文献

- (1) R.A.Smith and K.J.Miller, Prediction of Fatigue Regimes in Notched Components, *Int.J.Mech.Sci.*20 (1978) 201.
- (2) M.H.El Haddad, T.H.Topper and K.N.Smith, Prediction of Non Propagating Cracks, *Eng.Frac.Mech.*11 (1979) 573.
- (3) K.Tanaka and Y.Nakai, Prediction of Fatigue Threshold of Notched Components, *ASME J.Eng.Mater.Tech.*106 (1984) 192.
- (4) P.J.E.Forsyth, Fatigue Damage and Crack Growth in Aluminium Alloys, *Acta Met.*11 (1963) 703
- (5) H.Kitagawa and S.Takahashi, Applicability of Fracture Mechanics to Very Small Cracks or the Cracks in the Early stage, *Proc. 2nd Int.Conf.of Mech.Beh.of Mater.* (1976) 627
- (6) 伊原千秋、微小な疲労き裂の伝ばに関する一つのモデル、*材料*、37(1988) 1071
- (7) P,Lukáš and M.Klesnil, Fatigue Limit of Notched bodies, *Mater.Sci.Eng.*34 (1978) 61.