

切欠き底に発生した微小き裂の 進展下限界条件に関する研究

九州大学[院] ○ 瀬尾明光

九州大学・エアリキード・I2CNER・産業技術総合研究所 久保田祐信

九州大学・I2CNER・産業技術総合研究所 近藤良之

Fatigue Crack Propagation Threshold for the Short Crack at Notch Root Akimitsu Seo, Masanobu Kubota and Yoshiyuki Kondo

1 緒 言

微小欠陥の存在は様々な機械部材で考慮に入れるべき事象であり、多くの研究がなされてきた^{1)~3)}。しかし、深い切欠きのように大きな応力集中が生じる場所に微小なき裂が存在する場合、その進展挙動は十分に明らかではない。そこで、本研究では深い切欠きの底に微小予き裂を導入した試験片を用いてき裂進展試験を行い、微小き裂の進展下限界条件 ΔK_{th} に及ぼす切欠き半径 ρ および応力比 R の影響を検討した。

2 実験方法

2.1 供試材 供試材としてS25C焼きならし材を用いた。本研究では予き裂導入後に、応力除去焼鈍を行った。焼鈍後の降伏応力は $\sigma_Y = 300$ MPaであり、ビッカース硬さはHV = 140であった。

2.2 試験片 図1に示すように、試験片は深さ2 mm、先端半径 $\rho = 0.015 \sim 15$ mmで、深さ0.15 mmの微小疲労予き裂を有する切欠き材である。初めに、切欠き半径 $\rho = 0.015$ mm、深さ2 mmの切欠きを加工し、その底から疲労試験によって長さ0.15 mmの微小予き裂を導入した。その後、 $\rho = 0.015$ mmの場合はそのまま実験に使い、他の ρ については予き裂を残して、切欠き半径を研削により加工した。最後に、予き裂導入時および機械加工時の残留応力を除くため、応力除去焼鈍を真空中で、温度を873 Kとして1 h施した。

2.3 疲労試験 疲労試験は動電型加振器を利用した曲げ疲労試験機を用いて行い、試験周波数は25 Hzである。応力比は $R = -1, 0, \text{High } R$ (平均応力を200 MPaとする高応力比 $R = 0.62 \sim 0.72$)の3種類を用いた。試験中は背面ゲージを用いた除荷弾性コンプライアンス法⁴⁾によ

って、き裂長さおよびき裂開閉口挙動を連続的に測定した。ただし、切欠き半径15 mmの条件では感度不足の為、背面ゲージによる測定を行わなかった。

3 実験結果および考察

3.1 疲労き裂進展下限界条件 ΔK_{th} に及ぼす切欠き半径および応力比の影響 それぞれの切欠き半径と応力比に対して $S-N$ 曲線の取得を行い、得られた疲労限度と試験終了後に開放した破面において測定した停留き裂長さ a から ΔK_{th} を算出した。 K 値の算出には、 $a \geq \rho$ の場合は a と切欠き深さを合わせたものをき裂長さとして取り扱い、Gross & Srawleyの式⁵⁾を用い、 $a < \rho$ の場合はき裂長さとして a を用いてLukas & Klesnilの式⁶⁾を適用した。すべての試験条件の ΔK_{th} を図2に中実のプロットで示す。 $R = -1$ では、比較的鈍い切欠きの ΔK_{th} は、比較的鋭い切欠きに比べ、低下した。一方、 $R = 0$ および高応力比では ΔK_{th} の低下は見られなかった。

3.2 有効応力拡大係数の下限界値 $(\Delta K_{eff})_{th}$ に及ぼす切欠き半径および応力比の影響 3種類の応力比のうち、 $R = -1, R = 0$ ではき裂閉口が生じ、高応力比の場合は、き裂閉口は生じなかった。図2に示した中空のプロットは有効応力拡大係数の下限界値 $(\Delta K_{eff})_{th}$ を示す。高応力比の場合には、 $\Delta K_{th} = (\Delta K_{eff})_{th}$ であるので、中空の点はプロットしていない。 $R = -1$ において、 ΔK_{th} は ρ に依存して変化した。また、3つの応力比間には ΔK_{th} に顕著な差がみられたが、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ で整理した結果では、 $R = -1, R = 0$ の結果が、き裂閉口が生じなかった高応力比の結果に一致した。したがって、応力比による ΔK_{th} の差違と $R = -1$ で生じた ρ の変化に伴う ΔK_{th} の変化は、き裂開閉口挙動を原因として生じたことが明らかであり、以下では ρ と R の違いによるき裂閉口の発達の違いの観点から ΔK_{th} の変化について検討を行った。

3.3 き裂停留条件の評価モデル き裂閉口の起こった試験では疲労限度で非破断であった試験片でも予き裂は進展し、それから停留した。そこで、き裂進展に伴い発達するき裂閉口を考慮した停留き裂生成の評価モデルを図3に示す。応力振幅一定の本実験では、き裂進展に伴い K_{max} は増大するが、き裂閉口によりき裂開口応力拡大係数 K_{op} も増加し、結果として $\Delta K_{eff} (= K_{max} - K_{op})$ は減少する。最終的に K_{op} が $(\Delta K_{eff})_{th}$ のバンドに入り、 ΔK_{eff} が $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下となる場合は、き裂は停留する。一方、

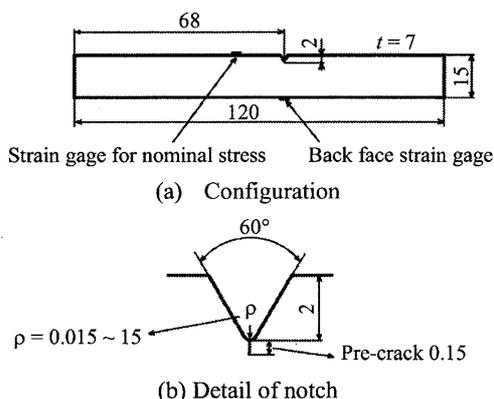


Fig.1 Test specimen (Dimensions are in mm.).

K_{op} が $(\Delta K_{eff})_{th}$ のバンドに入らない場合、き裂は停留することなく進展し、破断に至る。したがって、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ が一定の条件では、 K_{op} の増加が少ないものほど停留条件を達成するための応力振幅が低下し、疲労限度およびその時の ΔK である ΔK_{th} が低下する。

3.4 き裂開口応力拡大係数 K_{op} の変化に及ぼす切欠き半径および応力比の影響 ここでは、比較的鋭い切欠きとして $\rho = 0.015 \text{ mm}$, 0.5 mm を、比較的鈍い切欠きとしては $\rho = 1 \text{ mm}$, 5 mm を取り上げて、疲労限度の試験片でき裂開口が生じた応力比 $R = -1$, $R = 0$ について、き裂開口応力拡大係数 K_{op} の変化について考察する。図4にき裂進展に伴う K_{op} の変化を示す。

$R = -1$ では、初期には K_{op} は負の値であり、圧縮側でもき裂が開いている。鈍い切欠きでは、鋭い切欠きに比べて K_{op} の増加が比較的少なく、矢印で示したき裂停留時のき裂開口応力拡大係数 $(K_{op})_{th}$ は鈍い切欠きの方が低い。このことが ΔK_{th} の低下に繋がり、これは図2に示した切欠き半径に応じた ΔK_{th} の変化に対応している。

一方、 $R = 0$ では切欠き半径によって K_{op} の増加に大きな差は見られず、 $(K_{op})_{th}$ もほぼ同程度の値であった。したがって、図3のモデルによると疲労限度に ρ の影響は見られないはずであり、図2の実験結果と一致する。

そこで、 $R = -1$, $R = 0$ について、すべての切欠き半径の $(K_{op})_{th}$ を図5に示す。それぞれの $(K_{op})_{th}$ の ρ による変化の傾向は図2に示した ΔK_{th} の変化とよく一致した。 $R = -1$

では比較的鈍い切欠きほど $(K_{op})_{th}$ が低く、 $R = -1$ の ρ に依存した ΔK_{th} の低下を説明するモデルの検証がなされた。

4 結 言

S25C 焼きならし材について、深い切欠きの底の微小き裂の進展下限界条件 ΔK_{th} に対する切欠き半径および応力比の影響を検討した。

- (1) 応力比 $R = -1$ では、比較的鈍い切欠きの ΔK_{th} は鋭い切欠きに比べて、低下した。鈍い切欠きの方が K_{op} の増加が抑えられたことが原因である。
- (2) 応力比 $R = 0$, 高応力比ではいずれの切欠き半径においても ΔK_{th} はほぼ一定となった。
- (3) すべての切欠き半径および応力比で $(\Delta K_{eff})_{th}$ は一定となった。 $R = -1$ で見られた ρ の変化に伴う ΔK_{th} の変化は K_{op} の発達の差違によるものであり、切欠き底の微小き裂のき裂進展下限界条件 ΔK_{th} に及ぼす ρ , R の影響はき裂開口が支配因子である。

参考文献

- 1) H. Kitagawa, S. Takahashi, *Trans. JSME, Ser. A*, Vol.45, No.399, (1979), pp.1289-1303.
- 2) Y. Akiwaka, et al., *Trans. JSME, Ser. A*, Vol. 53, No. 487, (1987), pp.393-400.
- 3) Y. Kondo, et al., *ASTM STP* 1461, (2005), pp.415-432.
- 4) M. Kikukawa, et al., *J.JSMS*, (1976), vol. 25, pp.899-903.
- 5) B. Gross and J.E. Srawley, *NASA TN D-2603* (1965).
- 6) P. Lucas et al., *Mat. Sci. Eng.*, 34-1 (1978), pp.61-66.

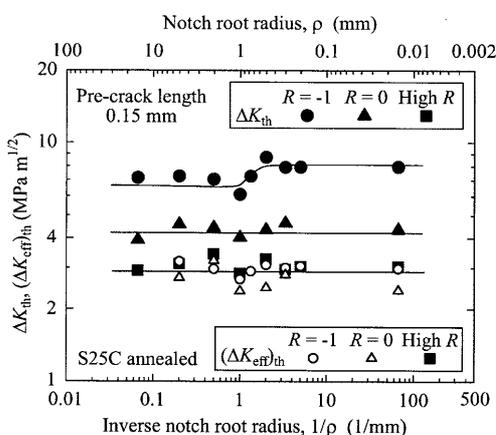


Fig.2 Effects of notch root radius ρ and stress ratio R on ΔK_{th} and $(\Delta K_{eff})_{th}$ for short crack at notch root.

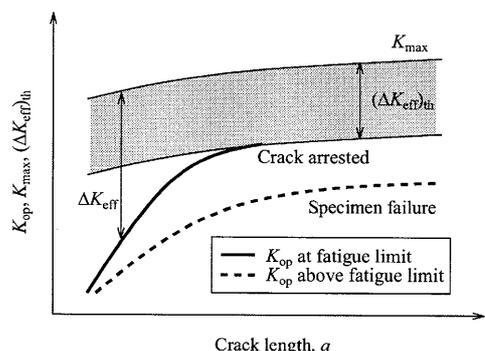


Fig.3 Concept for achieving crack arrest.

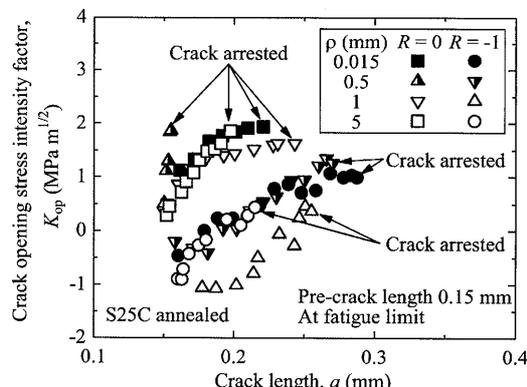


Fig.4 Development of crack closure in $R = -1$ and $R = 0$ at fatigue limit.

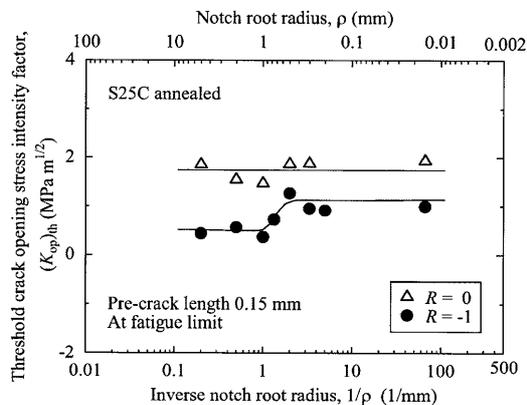


Fig.5 Change in threshold crack opening stress intensity factor $(K_{op})_{th}$ with change in notch root radius ρ and stress ratio R .