

切欠き部の塑性変形領域と最大塑性ひずみ範囲に及ぼす降伏応力、切欠き形状および応力状態の影響について

近畿大学 ○時政勝行 島津エンジニアリング(株) 佐竹好史

1 緒 言

切欠き部のき裂発生寿命およびき裂進展寿命を正確に予測するためには、切欠き底の最大塑性ひずみ範囲だけでなく塑性変形領域の大きさやひずみ範囲の深さ方向分布も考慮した評価を行うことが必要であると考えられる。本研究は、このような点をクリープ疲労負荷を受ける切欠き部の寿命評価の場合に考慮することを目的として開始したものである。本報では、その第1段階として、クリープを伴わない疲労負荷の場合について、切欠き底における塑性変形領域、最大塑性ひずみ範囲および塑性ひずみの分布が、切欠き形状、材料特性および負荷応力とどのような関係があるかを、汎用弾塑性有限要素解析プログラムを用いた解析により調べた。

2 解析方法および内容

2.1 切欠き形状と負荷条件 本報では、(1) 静的負荷を受ける軸対称切欠き部、(2) 静的負荷を受ける平板円孔切欠き部、(3) 静的負荷を受ける平板楕円孔切欠き部、および(4) 繰返し負荷を受ける軸対称切欠き部の4つのケースを解析した。軸対称切欠きとしては直径12mmの丸棒にU型およびV型環状切欠きを付与した形状とし、切欠き半径および切欠き底直径を、応力集中係数 k_t が1.5~5.0の範囲に収まるように変化させた。平板円孔および楕円孔切欠きとしては板幅12mmの中央に貫通円孔切欠きと貫通楕円孔切欠きを付与した形状とし、円孔半径および楕円孔曲率半径を変化させて応力集中係数 k_t を変化させた。平板の場合、板厚を変化させた3次元解析は実施せず、平面応力状態と平面ひずみ状態での2次元解析を実施した。負荷条件については、静的負荷の場合、公称作用応力 S は、材料の降伏応力 σ_y として、 $k_t S/\sigma_y > 1$ となるように変化させ、また、繰返し負荷の場合の繰返し公称応力範囲 ΔS は、 $k_t \Delta S/\sigma_y > 2$ となるように変化させ、移動硬化則に従う材料において切欠き部に塑性変形が生じるよう配慮した。¹⁾

2.2 材料の変形特性 材料の静的変形特性は、ヤング率 E と加工硬化係数 H 、および降伏応力 σ_y で表示できるとし、 $E=206$ GPa、 $H=20.6$ GPaとして、 σ_y を種々変化させて解析した。また、繰返し変形特性は、移動硬化則に従うものと仮定した。

2.3 塑性変形領域の決定方法 切欠き底近傍におけるMisesの相当応力分布を描き、相当応力が材料の降伏応力を超える領域を求め、これを塑性変形領域 R_p とした。また、繰返し塑性変形領域 R_{pf} は、塑性ひずみ範囲がゼロとならない領域の大きさとした。

2.4 有限要素報プログラム 汎用有限要素報プログラムCAFEMを使用した。

3 解析結果および考察

3.1 静的負荷を受ける切欠き部に生じる塑性変形領域 R_p の大きさおよび最大塑性ひずみ ϵ_{pmax} に及ぼす降伏応力、切欠き形状と応力状態の影響について Fig.1は、求めた R_p を切欠

き先端の半径もしくは曲率半径 r で除して、 $(k_t S - \sigma_y)/\sigma_y$ との関係を調べたものである。円孔切欠き部の場合の結果は、楕円孔切欠き部の場合の結果の一部と一致したので、Fig.1中にはプロットしていない。Fig.1の結果より、軸対称切欠き部の場合と平板切欠き部の平面ひずみ状態の場合の解析結果はほぼ一致するのに対し、平板切欠き部平面応力状態の場合、 R_p は $(k_t S - \sigma_y)/\sigma_y$ の値が1より大きくなると軸対称切欠き部の場合よりも大きくなり、応力状態の影響が大きくなることがわかる。最大塑性ひずみ ϵ_{pmax} についても同様の傾向が認められた。これらの結果を定量的に表示する式として、次式が得られた。

軸対称切欠き部：

$$\frac{R_p}{r} = 0.41 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_{pmax}}{\sigma_y/E} = 1.58 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right) \quad (2)$$

平面応力状態の平板楕円孔切欠き部：

$$\frac{R_p}{r} = 0.44 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right) + 0.18 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_{pmax}}{\sigma_y/E} = 0.0021 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right) + 0.00017 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right)^2 \quad (4)$$

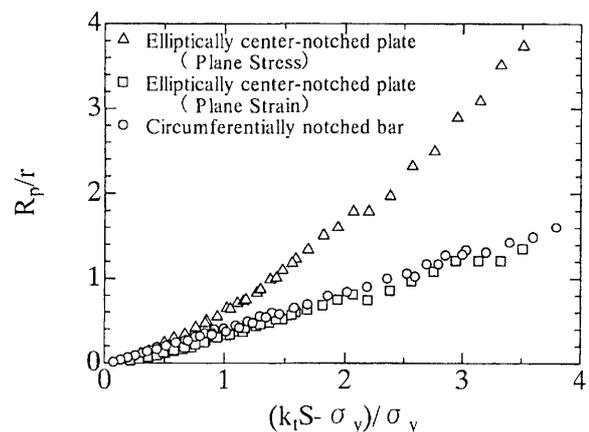


Fig.1 Effect of yield strength, notch geometry, nominal stress and stress state on the plastically deformed region size.

3.2 応力状態の影響の定量的表示について 本報では、Fig.1のような平面応力状態と平面ひずみ状態の差を定量的に表示する方法として、3軸性指数 TF を考慮した R_p と ϵ_{pmax} の表示式を検討し、次式に示すような修正係数 $MF_{1.5}$ を含む定量的表示式を導くことが出来た。

$$\frac{R_p/r}{MF_{1.5}} = 0.59 \left(\frac{k_t S - \sigma_y / MF_{1.5}}{\sigma_y / MF_{1.5}} \right) + 0.19 \left(\frac{k_t S - \sigma_y / MF_{1.5}}{\sigma_y / MF_{1.5}} \right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{\epsilon_{pmax}(\sigma_y/E)}{MF_{1.5}} = 1.55 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right) + 0.22 \left(\frac{k_t S - \sigma_y}{\sigma_y} \right)^2 \quad (6)$$

$$MF_{1.5} = 1.5^{1-TF}, \text{ where } TF = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} \quad (7)$$

ここで、 σ_1 , σ_2 , σ_3 および σ_e は、それぞれ、切欠き底における主応力および相当応力である。Fig. 2に、式(5)と計算結果との対応状況を示す。

3.3 繰返し負荷を受ける軸対称切欠き部に生じる塑性変形領域 R_{pf} の大きさおよび最大塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{pmax}$ にの解析結果とその定量的評価式について 式(1), (2), (5)および(6) 対応する式として、式(8)~(11)が得られた。

$$\frac{R_{pf}}{r} = 0.44 \left(\frac{k_t \Delta S - 2\sigma_y}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\epsilon_{pmax}}{(2\sigma_y/E)} = 1.25 \left(\frac{k_t \Delta S - 2\sigma_y}{2\sigma_y} \right) \quad (9)$$

$$\frac{R_{pf}/r}{MF_{1.5}} = 0.65 \left(\frac{k_t \Delta S - 2\sigma_y / MF_{1.5}}{2\sigma_y / MF_{1.5}} \right) + 0.027 \left(\frac{k_t \Delta S - 2\sigma_y / MF_{1.5}}{2\sigma_y / MF_{1.5}} \right)^2 \quad (10)$$

$$\frac{\epsilon_{pmax}(\sigma_y/E)}{MF_{1.5}} = 1.78 \left(\frac{k_t \Delta S - 2\sigma_y}{2\sigma_y} \right) + 0.0028 \left(\frac{k_t \Delta S - 2\sigma_y}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (11)$$

Fig.3に、式(10)と計算結果との対応状況を示す。

3.4 切欠き底近傍における $\Delta\epsilon_p$ の分布について Fig.4は、繰返し負荷 ($\Delta S = S_{max} - S_{min}$, $R = S_{min} / S_{max}$) 時の $\Delta\epsilon_p$ の分布に及ぼす k_t および R 比の影響を示したものである。

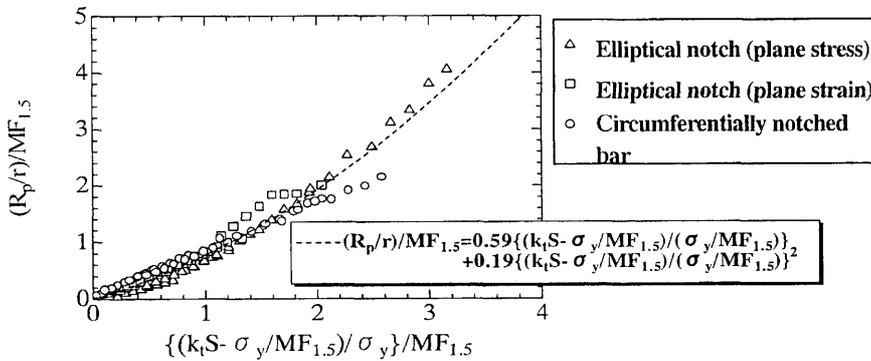


Fig.2 Comparison between Eq.(5) and the calculated results on R_p .

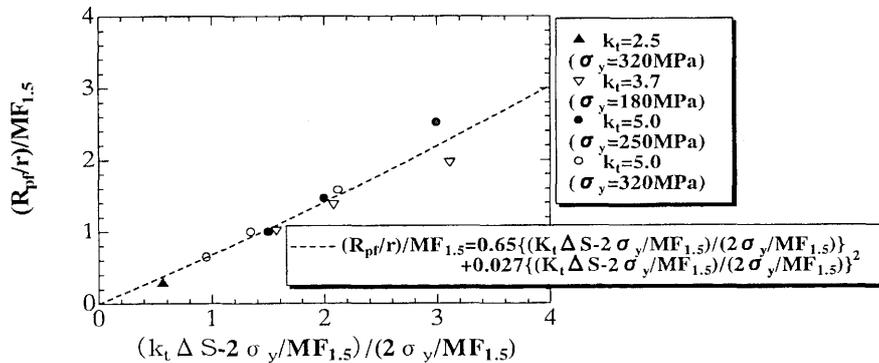


Fig.3 Comparison between Eq.(8) and the calculated results on R_{pf} .

3.5 R_p と ϵ_{pmax} の関係, および R_{pf} と $\Delta\epsilon_{pmax}$ の関係について

Fig.4の結果から、 R_p と ϵ_{pmax} の間および R_{pf} と $\Delta\epsilon_{pmax}$ の間にはほぼ比例関係が成立することが容易に推察される。そこで、軸対称切欠きについて得られた式(1)と(2), および式(8)と(9)から、それぞれの比を求めてみると、次式が得られる。

$$\frac{R_p}{\epsilon_{pmax}} = 0.26 \frac{r}{(\sigma_y/E)} \quad (12)$$

$$\frac{R_{pf}}{\Delta\epsilon_{pmax}} = 0.35 \frac{r}{(2\sigma_y/E)} \quad (13)$$

このような結果は、切欠き底における応力とひずみの関係を知ることによって、簡便に塑性変形領域、あるいは繰返し変形領域の大きさ知り得ることを示唆するものである。

4 結言

切欠き部の疲労寿命評価精度向上を最終的な目標として、切欠き部き裂発生寿命評価に必要な塑性変形領域の大きさと最大塑性ひずみ範囲の大きさを、汎用有限要素解析プログラムを用いて評価した。その結果、切欠き形状、降伏応力、公称応力、応力状態を考慮した簡便評価式を導くことが出来た。今後、溶接止端部や異材溶接部などの形状についても検討を進めるとともに、クリープ現象を考慮した検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 例えば、N.E.Dowling, Mechanical Behavior of Materials, p.421 (1998) Prentice Hall.

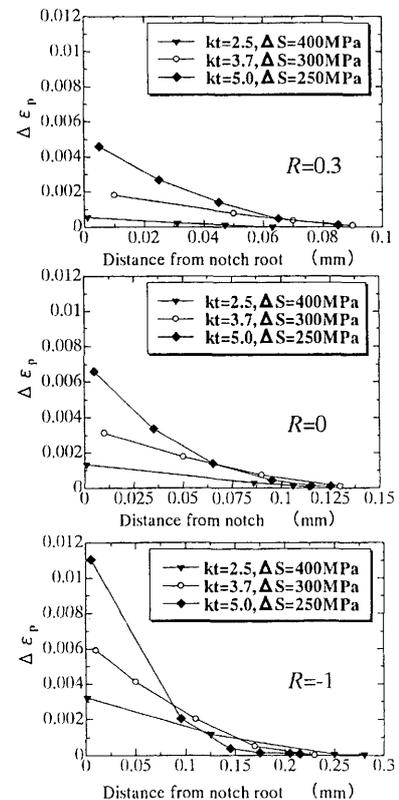


Fig.4 The $\Delta\epsilon_p$ distribution near the notch root