409 切欠疲労問題に対する新しいアプローチ (その2)

疲労強度の実用クライテリオンと切欠感受性に対する解釈

A New Approach to Notch Fatigue Problems (Part 2)

A Practical Criterion on Fatigue Strength and Interpretation of Notch Sensitivity

○正 松野 博 (崇城大) 向井 喜彦 (大阪産大)

Hiroshi MATSUNO, Sojo University, Ikeda 4-22-1, Kumamoto
Yoshihiko MUKAI, Osaka Sangyo University, Nakagaito 3-1-1, Daito, Osaka

Key Words : Correspondence Between Notched and Unnotched Fatigue Data, Equivalent Stress Ratio, Uniaxial/Multiaxial Fatigue, Equivalent Stress Ratio-Fatigue Strength Diagrams, Material-Dependency of Notch Effect

1. 緒言

本報では、平滑材の疲労データに対する切欠材の相関パラメータとして応力集中係数 K_t および前報¹⁾で誘導した『等価応力比 R_{eq} 』を採用し疲労線図を表すと、切欠材と平滑材の疲労線図は一致するばかりでなく、比例多軸応力疲労の場合をも含めて成立する材料固有の線図であることが示される。この結果より従来の定義による疲労強度減少係数 K_f は、応力集中係数 K_t および平滑材疲労強度の平均応力依存性の両者の関数であることが明らかにされる。このことは、切欠効果の材料依存性すなわち材料の切欠感受性は平滑材の疲労強度におよぼす平均応力の影響を知ることにより推定できることを意味する。この点で従来からの見解と大きく異なる。

2. 等価応力比にもとづく疲労線図と実用クライテリオン

2.1 等価応力比の算定式 疲労中の材料表面層では大量の原子空孔が発生しその体積膨張によるくさび効果のため表面層における繰返し応力の平均値が低下する。切欠底では応力集中によってこうした傾向はさらに強められる。そこで切欠底での平均応力の低下を応力比の低下として評価しこれに等価な平滑材の応力比を求めるというのが等価応力比の考え方である。したがって、等価応力比は平滑材と切欠材の繰返し応力条件の相関を表すものであり、それ自身、疲労強度の相関を直接表すものでないことを知っておく必要がある。Table1にこれまでに得られた等価応力比 R_{eq} の算定式を一覧に示しておく。表中、 R_N は通常の公称応力比を表す。 R_N^* は比例多軸応力条件下において繰返し公称応力に対する主応力波形の最小値どうしの総和を最大値どうしの総和で割った値を表し本

研究では R_N の代りに用いる。また、 K_t 、 K_{ts} および K_{eq} はそれぞれ軸応力、せん断応力および Mises の相当応力分布に着目したときの弾性応力集中係数を表し、 p は引張りを受ける円周切欠試験片の公称応力に対する相当応力分布の断面平均値の比を表す。なお、Table1の算定式は $K_t=1$ 、 $K_{ts}=1$ および $p=1$ とおくことにより平滑材にもそのまま適用可能である。

2.2 切欠底の弾性応力範囲の算定式 切欠底における繰返し応力状態が単軸あるいはそれに近似できる場合、その応力範囲は公称応力範囲に応力集中係数を乗じた値でもって示される。しかしながら、振りあるいは曲げ振り組み合わせ荷重のようにせん断応力を含む多軸応力状態に対しては、単軸応力状態に換算するいわゆる相当応力の考え方が必要となる。これについては古くより最大主応力説、最大せん断応力説および Mises の相当応力説が知られている。しかしながら、疲労の場合、これらのいずれかひとつによってその破壊現象を統一的に説明できるとは限らない。本研究では、せん断応力を含む多軸応力のケースに対し、河本²⁾の提案による相当応力を用いて切欠底の応力範囲を表現した。記号は $\Delta \sigma_{eq \phi NR}$ により表す。すなわち、平滑材の曲げおよび振りの疲労強度(いずれも両振り)をそれぞれ σ_{wo} および τ_{wo} とすると、 $\phi (= \tau_{wo} / \sigma_{wo})$ の値にもとづき $\Delta \sigma_{eq \phi NR}$ は以下の式により計算される；

$\phi \leq 1/\sqrt{3}$ に対し、

$$\Delta \sigma_{eq \phi NR} = [(K_t \Delta \sigma_{bN})^2 + (K_{ts} \Delta \tau_N / \phi)^2]^{1/2} \quad (1)$$

また、 $\phi > 1/\sqrt{3}$ に対しては、

$$\Delta \sigma_{eq \phi NR} = [(3\phi^2 - 1) K_t \Delta \sigma_{bN} + \{(\phi^2 + 1)^2 (K_t \Delta \sigma_{bN})^2 + (4\phi)^2 (K_{ts} \Delta \tau_N)^2\} / (2\phi)^2]^{1/2} \quad (2)$$

(1)式における $\Delta \sigma_{eq \phi NR}$ は、 $\phi = 1/\sqrt{3} = 0.577$ ならばMisesの相当応力説による切欠底の応力範囲を、また $\phi = 0.5$ ならば最大せん断応力説による応力範囲を表す。また(2)式の $\Delta \sigma_{eq \phi NR}$ は $\phi = 1$ のとき最大主応力説による切欠底の応力範囲を表す。 ϕ の値は平滑材の疲労試験から直接求めざるを得ない。なお、平滑材の応力範囲 $\Delta \sigma_{eq}$ については、(1)および(2)式において $K_t=1$ および $K_{ts}=1$ を代入することにより求まる。

2.3 R_{eq} -疲労線図とクライテリオン 通常の疲労線図は横軸に平均応力、縦軸に応力振幅をとることによって表される。これに対し筆者らは、平滑材および切欠材の疲労強度を統一的に表す方法として、横軸の平均応力の代りに等価応力比を、また縦軸の応力振幅(範囲)の代りに切欠底での弾性応力振幅(範囲)を採用する方法を提案した。Figs.1-3に整理結果の例を示す。図はそれぞれ高張力鋼HT100³⁾、18Cr-9Niステンレス鋼⁴⁾および鋳鉄FC200の場合^{2,3)}を示す。これら図より疲

Table 1 Summary of the equations on the equivalent stress ratio R_{eq}

Notched plate specimen	
Tension-compression	$R_{eq}=R_N - (K_t - 1)(1 - R_N)$
Bending	
Notched round-bar specimen	
Tension-compression	$R_{eq}=R_N^* - (K_t/p - 1)(1 - R_N^*)$ (R_N^* is equal to R_N)
Bending	$R_{eq}=R_N - (K_t - 1)(1 - R_N)$
Torsion	$R_{eq}=R_N^* - (K_{ts} - 1)(1 - R_N^*)$ (R_N^* is a fixed value of -1)
Combined bending / torsion	$R_{eq}=R_N^* - (K_{t_{eq}} - 1)(1 - R_N^*)$

劣限度に対する切欠底の弾性応力範囲と等価応力比の関係は平滑材における疲労強度と応力比の関係に一致し、かつ応力集中係数や荷重様式の相違に依らない材料固有の一義的な関係であることが明らかである。すなわち(3)式の成立をみる；

$$K_t(\sigma_{w1})_{RN} = (\sigma_{w0})_{REQ} \quad (3)$$

(3)式の左辺は疲労強度に対する切欠底の弾性応力範囲を表し、多軸応力状態に対しては疲労強度における(1)および(2)式の $\Delta\sigma_{eq}$ が該当する。筆者らはこれらの線図を通常の平均応力対応力振幅の疲労線図と区別するため R_{eq} -疲労線図と名付け、さらに多くの材料に対し整理を試みた。その結果、 R_{eq} -疲労線図は(4)式のように定式化できることがわかった；

$$K_t(\sigma_{w1})_{RN} = C(1 - R_{eq})^{1/m} \quad (4)$$

ここで、Cおよびmは材料定数である。材料定数mの値は疲労線図のカーブ形状に関係し、次に述べるようにその大小は材料の切欠感受性を比較する上に重要な目安と与える。

3. 切欠感受性に対する解釈

切欠による応力集中は、切欠底の応力振幅(範囲)を高めるとともに、切欠底の局所的な塑性伸びによる平均応力の低下(塑性順応)を増大する。このことを通常の疲労線図に反映したものがFig.1である。ここでいう疲労強度は疲労限度および時間強度の両者を指す。以下、簡単のため単軸応力状態の場合を例として議論を進める。Fig.4は、縦・横軸にそれぞれ応力振幅 σ_a と平均応力 σ_m をとり、平滑および切欠材の疲労線図を表す。図において、平均応力 σ_m (公称応力比 R_N)における切欠材の疲労強度(A点)を $(\sigma_{w1})_{RN}$ とし、それに弾性応力集中係数 K_t を乗じたB点の縦軸の値 $K_t(\sigma_{w1})_{RN}$ は通常同じ平均応力 σ_m に対する平滑材のP点での疲労強度 $(\sigma_{w0})_{REQ}$ よりも高い値となる。一方、Table1から切欠材の等価応力比 R_{eq} を計算し、この応力比に対する平滑材の疲労強度(C点)を $(\sigma_{w0})_{REQ}$ とする。このとき、B点とC点の応力振幅値は等しいというのが本研究の考え方であり、これについてはFigs.1-3の整理結果からも確認することができる。さて、従来より切欠材の疲労強度を平滑材のそれと比較するためのパラメータとして疲労強度減少係数 K_f が用いられる。この係数をFig.4の記号にもとづいて定義すると、(5)式のように示される；

$$K_f = (\sigma_{w0})_{REQ} / (\sigma_{w1})_{RN} \quad (5)$$

ここで、(5)式の分母 $(\sigma_{w1})_{RN}$ を(3)式によって書き直すと、次式が得られる；

$$K_f = \{(\sigma_{w0})_{REQ} / (\sigma_{w0})_{REQ}\} K_t \quad (6)$$

(6)式より疲労強度減少係数 K_f は、弾性応力集中係数 K_t に依存するほか、 $(\sigma_{w0})_{REQ}$ と $(\sigma_{w1})_{RN}$ の値の違いすなわちFig.4におけるP点とC点の間の応力値の違いに依存することがわかる。したがって、Fig.1の高張力鋼HT100の場合にみるように平滑材の疲労線図のカーブの傾斜が小さければ、 $(\sigma_{w0})_{REQ}$ と $(\sigma_{w1})_{RN}$ の比は1に近く K_f は K_t に近い値をとる(切欠感受性が大)。一方、Fig.3の鋳鉄FC200の場合にみるように平滑材の疲労線図のカーブの傾斜が急であれば、 $(\sigma_{w0})_{REQ}$ と $(\sigma_{w1})_{RN}$ の比は1よりも小さい値となり、 K_f は K_t よりも小さい値をとることになる(切欠感受性が小)。したがって、材料の切欠感受性は平滑材の疲労強度におよぼす平均応力の影響を明らかにすることによりその特性を知ることができる。切欠効果の材料依存性に関する以上の見解は、現在主流をなす『領域被害』の考え方と大きく異なる。(結論および参考文献；省略)

Fig. 4 Illustration of notch effect based on the equivalent stress ratio R_{eq}

Fig. 1 R_{eq} -fatigue diagram on high strength steel HT100

Fig. 2 R_{eq} -fatigue diagram on 18Cr-9Ni stainless steel

Fig. 3 R_{eq} -fatigue diagram on cast iron FC200