

Q

疲労限度と疲労寿命に及ぼす応力集中(切欠き)の影響を教えてください。

参照 QNo.: FA-01, FA-14, FA-15

A

部材に切欠きがあると、切欠き底で応力が集中し、疲労限度と疲労寿命は低下する。応力集中が及ぼす影響は疲労限度と疲労寿命で異なるので、それぞれについて説明する。

[切欠き、応力集中と応力集中係数の定義]

・切欠き

部材の断面積が一樣でなく、急激に変化することを構造不連続という。構造不連続がもたらす具体例が、種々の形状の切欠き、孔、空孔、ピット、段、溝(材料欠陥とき裂を除く)の存在であり、これらを総称して切欠きという。

・応力集中

部材に切欠きがあると、切欠きを含む断面での応力は、切欠きから十分離れた位置での一樣な応力(基準応力または公称応力)から、切欠きに近づくにつれて大きくなり、切欠き底で最大値を示す。これを応力集中という。

・応力集中係数

弾性変形状態の応力集中係数 α は、次式で定義する。

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}$$

ここで、 σ_{\max} は切欠き底の最大応力、 σ_0 は基準応力である。基準応力は公称応力ともいう。基準応力は、切欠きのない断面での応力または切欠きのある断面での実断面応力 σ_{net} を使い分ける。

・応力集中係数の実例

楕円孔のある無限板の引張りの場合について、応力集中係数 α を次式に示す。

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} = 1 + 2 \frac{b}{a} = 1 + 2 \sqrt{\frac{b}{\rho}}$$

ここで、 a は楕円の長軸の半径、 b は短軸の半径、 $\rho = a^2/b$ は長軸端の曲率半径、引張りの方向は短軸の方向である。上式において、 $a = b$ が円孔の場合であり、 $\alpha = 3$ となる。

上式は近似的に、半楕円孔のある半無限板の引張りの場合に、適用できる。この結果から、片側切欠きのある帯板の引張りという一般的な場合に、応力集中係数 α の支配因子は、切欠きの深さ b と切欠き底の曲率半径 ρ であることがわかる。曲率半径の逆数 $1/\rho$ は、最大応力とその点での応力勾配の支配因子である。

[疲労限度に及ぼす応力集中の影響]

・切欠き効果

部材に切欠きがあると、応力集中の影響で疲労限度は低下する。これを切欠き効果という。

平滑材(平滑試験片)と切欠き材(切欠き試験片)を用いて疲労試験を行い、疲労限度の低下を切欠き効果として、定量的に表示する。部材の切欠き効果は試験片の切欠き効果に等しいとみなす。

・切欠き係数

切欠き係数 β は、次式で定義する。

$$\beta = \frac{\text{平滑材の疲労限度}}{\text{切欠き材の疲労限度}}$$

β と α の関係の一例を、図 1 に示す。 $\beta = \alpha$ の直線関係と比較すれば、 β は直線関係の下側に位置する($\beta < \alpha$)。

・切欠き感度係数

$\beta < \alpha$ となる程度は、材料によって異なる。切欠き感度係数 η を、次式で定義する。

$$\eta = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1}$$

$\eta = 1$ の場合が $\beta = \alpha$ で切欠き感度が最も高く、 $\eta = 0$ の場合が $\beta = 1$ で切欠き感度が最も低い。材料の引張強さの増大に伴い、 η の値は大きくなり、1 に漸近する。

・停留き裂

図 1 において、 β は $\alpha = 3$ 程度の値から α に関係なく、ほぼ一定値となる傾向を示す。一定値となるのは、破壊に対する疲労限度である。これ以下の応力振幅で、き裂は発生するが、停留する。すなわち、 $\alpha > 3$ の場合には、破壊に対する疲労限度 σ_{w2} とき裂発生に対する疲労限度 σ_{w1} という二種類の疲労限度がある。 α の増大に伴い、 σ_{w2} は一定値となるが、 σ_{w1} は常に $\beta = \alpha$ の直線関係の下側に位置する。

・応力勾配の影響

切欠き係数のより定量的な表示として、応力勾配の支配因子である $1/\rho$ を用いる。縦軸に α/β 、横軸に $1/\rho$ をとって、 σ_{w1} と σ_{w2} の結果を表示すれば、それぞれの結果が切欠き深さ b に関係なく、右上がりの二本の曲線として表示できる。もちろん、この曲線は、材料ごとに異なる。疲労限度に及ぼす応力勾配の影響は、疲労限度の寸法効果と本質的に同じ特性である。

[疲労寿命に及ぼす応力集中の影響]

・疲労強度減少係数

疲労限度の場合と同様に、応力集中の影響で疲労寿命は低下し、これを切欠き効果という。平滑材と切欠き材を用いて疲労試験を行い、疲労寿命の低下を切欠き効果として、定量的に表示する。

疲労寿命の場合には、疲労限度の切欠き係数に換えて、疲労強度減少係数の用語を用いる。疲労強度減少係数 K_f は、次式で定義する。

$$K_f = \frac{\text{平滑材の疲労強度}}{\text{切欠き材の疲労強度}}$$

ここで、疲労強度とは、同じ疲労寿命となる疲労強度であり、時間強度ともいう。すなわち、疲労寿命(具体的には 10^5 回、 10^6 回、 10^7 回)ごとに、 K_f は異なる。

疲労は、高サイクル疲労と低サイクル疲労に分類する。両者で疲労試験方法が異なる。高サイクル疲労は弾性疲労であり、疲労試験は荷重制御で行う。低サイクル疲労は塑性疲労であり、疲労試

験はひずみ制御で行う。荷重制御の高サイクル疲労の場合、 10^7 回の疲労寿命に対する K_f が、切欠き係数 β となる。したがって、疲労寿命ごとの K_f は、 β と同様に、部材の切欠き効果に適用できる。一方、ひずみ制御の低サイクル疲労の場合、 K_f は単純に、部材の切欠き効果に適用できない。

・応力集中係数とひずみ集中係数

一般に、部材の平滑部分の応力は、弾性変形状態に制限する。しかし、切欠きがある場合には、切欠き底で局所的な弾塑性変形状態を許容する。この場合、切欠き底の応力とひずみは比例関係にないから、応力集中とひずみ集中を区別する必要がある。

応力集中係数 K_σ とひずみ集中係数 K_ϵ を、それぞれ次式で定義する。

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}$$

$$K_\epsilon = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_0}$$

ここで、 σ_{\max} は切欠き底の最大応力、 ϵ_{\max} は切欠き底の最大ひずみ、 σ_0 は公称応力、 ϵ_0 は公称ひずみである。

前述した応力集中係数 α は弾性変形状態を仮定しており、上記の K_σ とは異なる。 α は理論的応力集中係数ともいい、以下では記号 K_T で表示する。 K_T 、 K_σ と K_ϵ の間には、次式の関係が成立し、これをノイバー(Neuber)則という。

$$K_T^2 = K_\sigma K_\epsilon$$

K_σ と K_ϵ は、切欠きの形状、応力-ひずみ関係、公称応力の大きさなどに依存する。したがって、これらの値を得るために、弾塑性有限要素法などの数値解析が必要である。

・切欠き底でのき裂発生寿命の予測

部材に切欠きがある場合、切欠き底の局所的な弾塑性変形状態は、周囲の弾性変形状態の拘束を受ける。したがって、部材に両振りまたは片振りの荷重制御の応力が繰返される場合に、切欠き底はひずみ制御となり、両振りのひずみが繰返される。上記の応力集中係数とひずみ集中係数を用いれば、応力とひずみの変動範囲(ヒステリシスループ)が解析できる。

一方、平滑材の両振りひずみ制御の低サイクル疲労試験の結果が、全ひずみ範囲と疲労寿命の関係の線図として、整備されている。この線図を用いて、切欠き底の全ひずみ範囲に対する疲労寿命が得られる。この場合には、切欠き底でのき裂発生寿命を、線図の疲労寿命とみなす。切欠き底から離れた弾性変形状態でのき裂進展寿命は、部材の疲労寿命には無視するか、または別途、破壊力学を用いるき裂進展解析で考慮する。

以上のように、部材の切欠き効果には、切欠き材のひずみ制御低サイクル疲労試験の結果(平滑材と切欠き材の比 K_f)を適用しないことは、注意する必要がある。

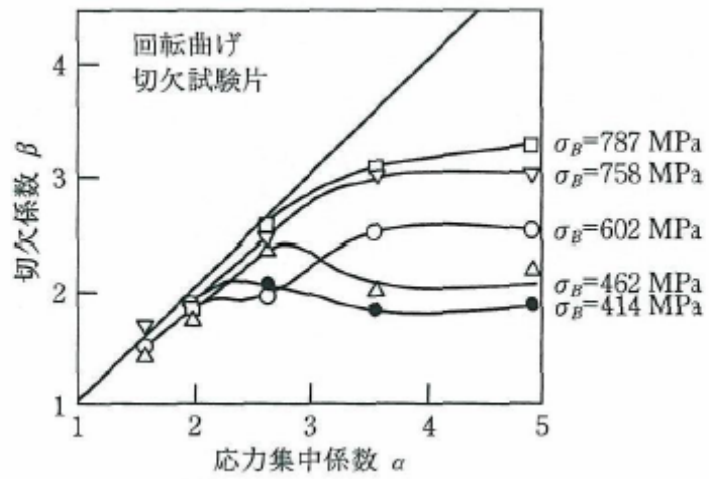


図1 応力集中係数 α と切欠き係数 β の関係の例⁽²⁾

[参考文献]

- (1) ‘機械工学便覧 基礎編 $\alpha 3$ 材料力学’, pp.76-77,124, 日本機械学会, (2005).
- (2) 石橋正, ‘金属の疲労と破壊の防止’, p. 54, 養賢堂, (1954).