



入門講座

材料試験法編 機械的性質-4

疲労

新家光雄
Mitsuo Ninomi

豊橋技術科学大学
生産システム工学系 教授

Fatigue

1 はじめに

構造部材の破壊は、それらのほとんどが繰返し荷重を受けて破壊する、疲労破壊が大部分であると言われている。したがって、疲労特性の評価も材料の信頼性評価に重要である。

本稿では、代表的な疲労特性につきその評価法を中心に概説することとする。

2 疲労

一回の負荷で破壊しないような荷重の繰返し負荷により構造部材が破壊する場合を疲労と呼ぶ。疲労破壊は、平滑な部材に繰返し荷重が作用すると、部材中の欠陥や極限られた部分での塑性変形の繰返しによりき裂が発生し、そのき裂が進展する過程を経て生じる。このことから、疲労破壊過程は、平滑部材を考えた場合、荷重繰返し負荷による(1)き裂の発生、(2)発生き裂の進展および(3)最終破断の各過程よりなっている。この中のき裂の進展過程は、き裂進展初期の小さな寸法のき裂が伝播する過程とその後の比較的大きな寸法のき裂が進展する過程とに分けて考えるようになってきている。

これらの疲労破壊過程から、平滑バージン部材の疲労寿命は、疲労き裂が発生するまでの寿命、小さなき裂(微小き裂あるいは短いき裂)が進展する寿命、大きな寸法になったき裂(長いき裂)が進展する寿命、最終破断する寿命の総和からなっていると考えることができる。比較的負荷荷重(負荷応力)が高く破断までの負荷繰返し数が小さい場合にはき裂発生過程から微小き裂の伝播過程が全寿命の大半を占める傾向にあり、負荷荷重が低く破断までの負荷繰返し数が大きい場合にはき裂発生過程が全寿命の大半を占める傾向にある。しかし、こういった傾向も材料によって異なる。

り、各疲労過程の評価が疲労寿命の評価には重要となる。

以下には、上記各疲労過程に関係する疲労試験法を中心として疲労について述べていく。

2.1 疲労強度

2.1.1 平滑材の疲労強度

平滑材の疲労強度は、基本的には試験片に一定の応力(一定荷重)を繰返し負荷したときに、試験片が破断するまでの応力の繰返し数を求めることから決定される。一般に、繰返し最大応力($\sigma_{\max}$)あるいは応力振幅(σ_a)および試験片破断までのこれらの応力の繰返し数の関係で表わされる。すなわち、この関係を模式的に示すと図1のようになる。この曲線は、上記応力をS(Stress)、破断までの繰返し数をN(Number of cycles to failure)として、S-N曲線と呼ばれる。また、疲労の先駆的研究者の名を取って、ウェーラー曲線(Wöhler curve)と呼ばれることもある。

よって疲労強度試験は、疲労き裂の発生から、伝播、さらには最終破断過程と全疲労過程を含んだ試験に相当し、材料の全疲労寿命を評価することになる。一定繰返し応力で、材料が何回の繰返し数まで壊れずにもつか、あるいは材料を必要応力繰返し数まで壊さずにもたせるにはどの大

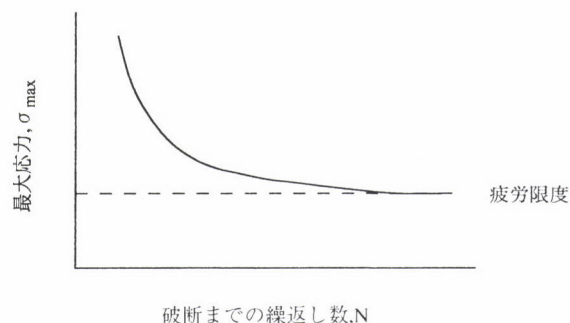


図1 S-N曲線の模式図

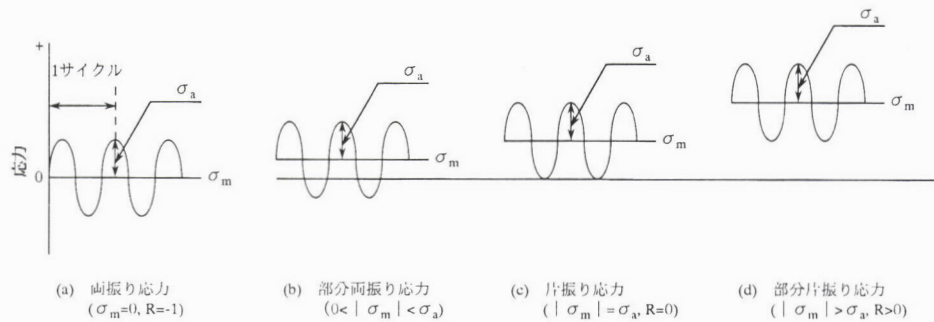


図2 正弦波状繰返し応力の分類

きさの繰返し応力なら良いか等を判断できる。

疲労強度試験は、一般に疲労試験と呼ばれ、引張り、圧縮、引張り－圧縮、回転曲げ、平面曲げ、ねじり等種々の応力条件での試験がある。疲労試験規格としては、ASTM E466¹⁾やJIS Z2273²⁾が代表的である。いずれにせよ、図2のように正弦波状の繰返し応力が各々負荷される場合に最大応力が $\sigma_{\max}$ 、最小応力が $\sigma_{\min}$ であるとする、応力比 R 、応力振幅 σ_a および平均応力 σ_m が次式のように定義される。

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_a = 1/2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_m = 1/2(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

疲労試験の応力状態としては、図2に正弦波状繰返し応力の場合で示したように(a)両振り応力、(b)部分両振り応力、(c)片振り応力および(d)部分片振り応力などが代表的である。無限回数の繰返しに耐える応力の上限値を疲れ限度、疲労限度あるいは耐久限度と呼び、上記S-N曲線が水平に漸近する領域の応力を持ってこれに充てる。高強度銅、アルミニウム合金や銅合金などでは、S-N曲線に水平部分が現れないので、そのような場合にはS-N曲線の $N = 1 \times 10^7 - 1 \times 10^8$ のある N に対する応力値をもって疲れ限度とするのが一般的である。一般に、疲労限度以下の繰返し応力では、疲労破壊に至ることはない。S-N曲線による疲労強度の評価は、一般に破断までの繰返し数 N が 10^4 回以上になる領域で行われる。この領域の疲労を高サイクル疲労と呼ぶ。試験片には、平滑な丸棒や板状試験片、平滑な砂時計型(曲率をもった)、丸棒試験片、平滑な曲率をもった板状試験片あるいは切欠き付き丸棒や板状試験片を用いる。

破断までの繰返し数 N が 10^4 よりも小さな領域を低サイクル疲労領域と言うが、この領域では、塑性歪が大きく、これが疲労の支配因子となるので、一般にはASTM E606³⁾規格にあるような歪制御の疲労試験により疲労寿命を評価する。平滑丸棒や砂時計型試験片を用いて、変位計等により試験片変位を検出し、一定歪を繰返し負荷し、試験片破断までの繰返し数を求める。したがって、この場合には最

大塑性歪 $\epsilon_{p\max}$ や塑性歪振幅 ϵ_p と試験片の破断するまでの繰返し数 N との関係を求める。この場合、繰返し最大歪 $\epsilon_{\max}$ 、繰返し最小歪 $\epsilon_{\min}$ 、繰返し歪比 R_ϵ 、歪振幅 ϵ_a および平均歪 ϵ_m との関係は次式で表わされる。

$$R_\epsilon = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\epsilon_a = 1/2(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\epsilon_m = 1/2(\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

全歪範囲 $\Delta\epsilon_t$ 、弾性歪振幅 $\Delta\epsilon_e$ および塑性歪振幅 $\Delta\epsilon_p$ 間の関係は、ヤング率 E および応力範囲 $\Delta\sigma$ を用いて次式で表わされる。

$$\Delta\epsilon_t/2 = \Delta\epsilon_e/2 + \Delta\epsilon_p/2 = \Delta\sigma/2E + \Delta\epsilon_p/2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、破断までの繰返し数 N_f を用いると、

$$\Delta\sigma/2 = \Delta\epsilon_e E/2 = \sigma'_f (2N_f)^b \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta\epsilon_p = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 σ'_f は疲労強度係数、 ϵ'_f は疲労延性係数、 b は疲労強度指数、 c は疲労延性指数である。

したがって、(7)式は、次のように表わされる。

$$\Delta\epsilon_t/2 = (\sigma'_f/E) (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad \dots\dots\dots (10)$$

(7)式の各項の関係を模式的に示すと図3のようになる。

なお、(8)式はBasquin則^{4,5)}、(9)式はCoffin-Manson則と呼ばれる^{5,6)}。

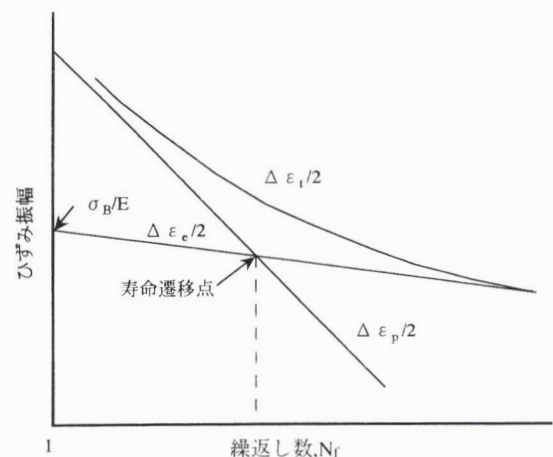


図3 低サイクル疲労曲線の模式図

2.1.2 疲労限度線図

両振り疲労 ($R=-1$) 以外の疲労では平均応力が作用し、両振り疲労限度に比べ疲労限度が異なる。引張り平均応力は疲労限度を低下させ、圧縮平均応力は疲労限度を上昇させる。このため、任意の平均応力での疲労限度を知るために、平均応力を横軸とし、応力振幅を縦軸とする疲労限度線図が作成され用いられている。図4に疲労限度線図の作製例を模式的に示す。図中の縦軸上では、平均応力は0で両振り応力であり、そのときの疲労限度をB点で示す。原点から45°に引いた直線上は片振り応力の場合に相当するから、この直線上に片振り疲労限度をD点で示す。任意の平均応力での疲労限度の側定点 (E、G、F、C点) は、BおよびD点を結ぶ直線上に乗る。直線ACが疲労限度線に相当する。引張り降伏応力 σ_y および圧縮降伏応力 σ_y' をそれぞれ縦軸および横軸にとると、縦軸および横軸の σ_y あるいは σ_y' を結ぶ直線は、上限応力あるいは下限応力が引張りあるいは圧縮降伏点に等しくなる限界を与える。よって、横軸の σ_y' G B D F 横軸の σ_y の内部が疲労と降伏変形の両者に対して安全な範囲となる。

上述の疲労限度線は、両振り疲労限度 (B点) と横軸にとった真破断応力 σ_T を結ぶ直線と一致するとされる。しかし、真破断応力を測定する場合は少ないため、横軸に取った引張り強さ σ_B と両振り疲労限度 (B点) を結ぶ直線あるいは曲線で疲労限度線を表わすことがある。直線を修正グッドマン線 (modified Goodman's line)^{7,8)}、曲線をゲルバー曲線 (Gerber's curve)^{7,9)} であり、次ぎの各式で与えられている。なお、修正グッドマン線およびゲルバー曲線を式番号で明示し、図4中にも示す。

$$\sigma_a = \sigma_w \{1 - (\sigma_m / \sigma_B)\} : \text{修正グッドマン線} \cdots \cdots (11)$$

$$\sigma_a = \sigma_w \{1 - (\sigma_m / \sigma_B)^2\} : \text{ゲルバー曲線} \cdots \cdots (12)$$

2.1.3 切欠き材の疲労強度

構造部材では、みぞ、穴あるいはコーナーなど応力が集

中しやすい箇所があり、疲労強度の低下が生じる。このような応力集中箇所のある場合の疲労強度評価のために、切欠きを付けた試験片を用いて上述の疲労強度試験を行う。部材に想定される応力集中部の形状に応じて、切欠きの形状、すなわち切欠き先端の曲率、深さ、円穴などを選択する。

切欠き先端の応力集中部の最大応力を $\sigma_{\max}$ とし、応力集中を無視した切欠き部の公称応力を σ_n とし、応力集中の程度を示す応力集中係数 α を次式で定義する。 α は、形状によって変化する係数である。

$$\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_n \cdots \cdots (13)$$

また、切欠き試験片の疲労限を σ_{nf} 、平滑試験片の疲労限度を σ_n とし、これらの比をとって、切欠き試験片の疲労限度の低下の程度の指標となる切欠き係数 β を次式で定義する。 β は、形状および材質によって変化する係数である。

$$\beta = \sigma_{nf} / \sigma_n \cdots \cdots (14)$$

よって、応力集中係数より切欠き部の応力の程度を知ることができ、さらに切欠き係数よりその応力での疲労限度の低下を算定することができる。

2.2 疲労き裂進展速度

平滑試験片の疲労では、試験片表面近傍でのすべり面に沿ったせん断型き裂の発生が先ず生じる。この段階のき裂進展を第I段階のき裂進展と呼ぶ。この段階では、き裂先端に形成される塑性域は多結晶材料では、結晶粒寸法よりも小さい。さらに、応力が高まり、この塑性域寸法が結晶粒寸法よりも大きくなると、き裂は荷重軸に対して垂直に進展するようになる。この段階のき裂進展を第II段階 (後に示すように、 ΔK の低い方からさらにIIa、IIb、IIc段階に分けられる) のき裂進展と呼ぶ。疲労き裂長さの定義については、種々あるが、およそ第I段階から第IIa段階の極めて初期のき裂を短いき裂、それ以降の第II段階のき裂を長いき裂と区別して差し支えないと考える。そこで、疲労による長いき裂および短い (微小) き裂の進展速度について述べる。

2.2.1 長いき裂の進展速度

長いき裂の進展速度の評価は、破壊力学に基づく試験法により評価されるのが一般的になっている。疲労き裂進展試験法としては、ASTM E647¹⁰⁾ が代表的である。その場合、切欠き付きCT (Compact Tension) 試験片あるいは中央切欠き付き平板試験片に、一定荷重振幅条件で試験を行い、き裂長さを試験片表面にて光学的に測定するか、あるいはそれと同等手法で測定し、き裂進展曲線を求める。

試験における、荷重範囲を ΔP 、最大荷重を $P_{\max}$ および最小荷重を $P_{\min}$ とすると、これらの間には次式が成立する。

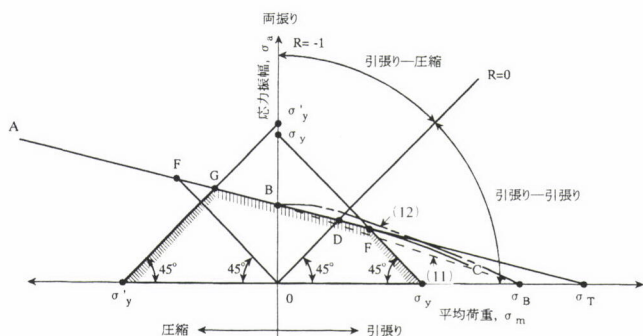


図4 疲労限度線図

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad \dots\dots\dots (15)$$

これらを、応力拡大係数 K を用いて表わすと、

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 ΔK は応力拡大係数範囲、 $K_{\max}$ および $K_{\min}$ は $P_{\max}$ および $P_{\min}$ に対する応力拡大係数である。

応力比 R は、

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。

試験では、応力拡大係数範囲 ΔK を変化させて、き裂長さを測定し、き裂進展速度 da/dN (a : き裂長さ、 N : 繰返し数)を求め、両者の関係を求める。この関係は、模式的に図5のように表わされる。 da/dN が 10^{-8} m/cycle以上の領域では ΔK を一定して試験を行う。それ以下では漸減して試験を行い ΔK_{th} を求める。 ΔK_{th} はそれ以下の ΔK ではき裂が進展しない ΔK の敷居値で下限界応力拡大係数範囲と呼ばれる。試験では、 da/dN が 10^{-10} m/cycleに対応する ΔK をもって ΔK_{th} とする。

da/dN vs ΔK 曲線のIIb段階では、次式で示されるParis則が成立する¹¹⁾。

$$da/dN = C \Delta K^m \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 C および m は、定数である。

一般に、き裂先端に有効に作用する応力拡大係数範囲は、全体の応力拡大係数範囲よりも小さい。これは、き裂面の凹凸や塑性変形によって最小荷重 $P_{\min}$ に至る以前にき裂が閉じてしまうためである。このような場合、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を定義する。すなわち、き裂が開き始める時の荷重である開口荷重 P_{op} での応力拡大係数を K_{op} とすると、

$$\Delta K_{eff} = K_{\max} - K_{op} \quad \dots\dots\dots (19)$$

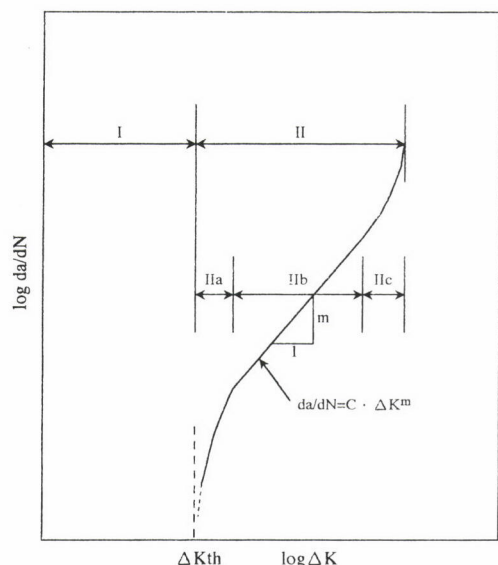


図5 疲労き裂進展曲線の模式図

き裂開口荷重は、破壊靱性試験で述べた電位差法、試験片の背面の歪を検出することによる背面歪法や開口変位からのコンプライアンスを測定するコンプライアンス法等によって評価する。き裂開口がある場合には、 ΔK_{eff} vs da/dN 曲線は、 ΔK vs da/dN 曲線に対して、より低 ΔK 側へ移行する。き裂開口挙動の程度は、次式で定義されるき裂開口比 U で評価できる。

$$U = (K_{\max} - K_{op}) / (K_{\max} - K_{\min}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

すなわち、き裂開口の程度がより大きければ、 U はより小さな値となる。

長いき裂の進展速度データは、内在き裂が繰返し負荷によりき裂進展速度曲線の繰返し応力拡大係数の下限界値以上になった場合からの材料の寿命の評価に有効となる。このデータの設計への使い方については、補遺のQ&Aコーナーの例をご覧ください。

2.2.2 短いき裂(微小き裂)の進展速度

短いき裂の進展速度に関しては、規格化された試験法は現在の所ない。主に第I段階から第IIa段階初期程度までのき裂の進展量を測定する必要があるため、試験片表面のレプリカを取りその後カーボン蒸着などの処理を施した後、光学顕微鏡や走査型顕微鏡等で観察しき裂長さを測定¹²⁾したり、レーザーを利用しての変位測定からき裂長さを測定¹³⁾したりする。このような短いき裂の進展に対して破壊力学パラメーター ΔK を適用することは適切でないことから、き裂長さ a と繰返し数との関係で表わすのが一般的である。微小き裂の進展速度 da/dN をあえて ΔK で整理し、同じ ΔK での長いき裂の進展速度との比較を模式的に示すと図6のようになる。微小き裂の進展速度は、長いき裂の進展速度に比べ大きい。さらに、微小き裂は、長いき裂の ΔK_{th} 以下の ΔK でも成長する。

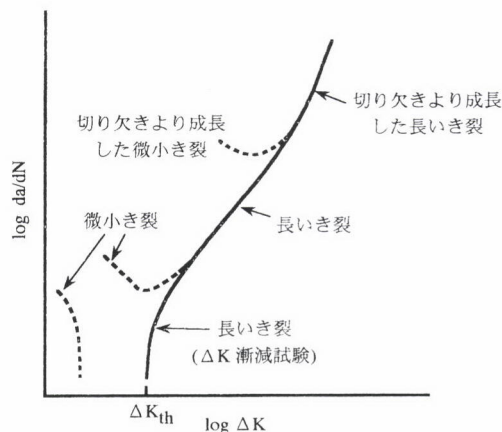


図6 長い疲労き裂と短い疲労き裂の成長挙動の模式図

材料による微小疲労き裂の進展段階が全疲労寿命の大部分を占める場合が多く見受けられるようである。

2.3 フレッシング疲労

摩擦摩耗と繰返し応力が同時に材料に作用するような場合の試験であり、試験法の規格化はなされていない。疲労試験片に摩擦摩耗パッド(フレッシングパッド)を押し付けて、疲労試験を行う。本疲労試験のフレッシング機構を模式的に図7に示す。フレッシングパッドは、図示したようなブリッジタイプが一般的である¹⁴⁾。最近では、図8に模式的に示すように、試験片取付け部にパッドを設定

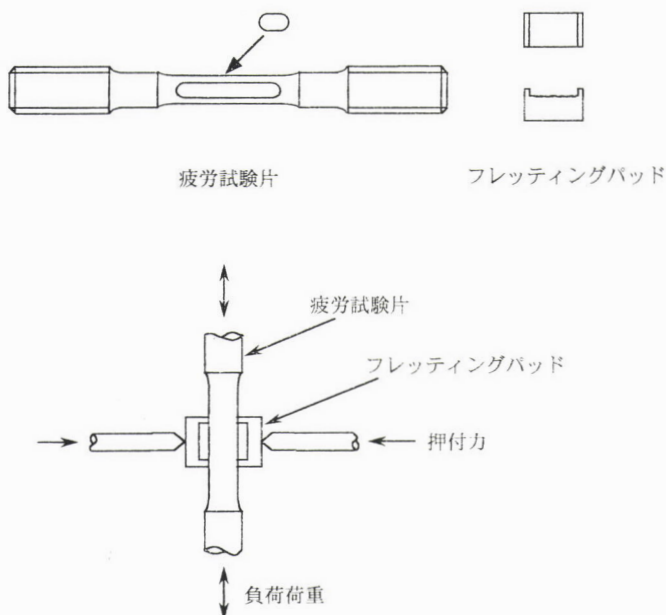


図7 一般的なフレッシング疲労試験法の模式図

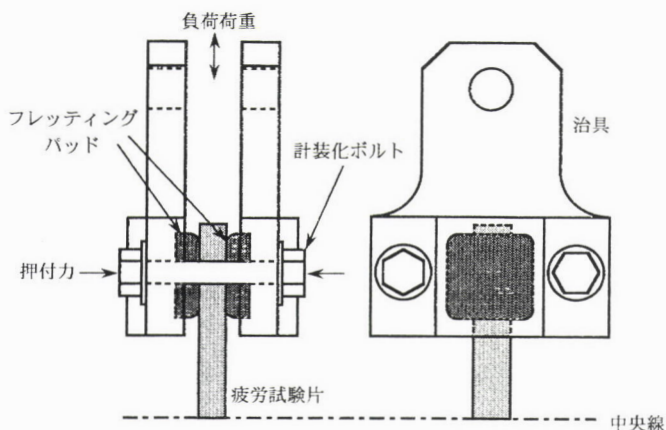


図8 平坦パッドと平板試験片との組合せによるフレッシング疲労試験法

し、その部分でフレッシング疲労破壊が生じるようにしたユニークな試験方法が見られる¹⁵⁾。これは、通常の疲労試験で、試験片取付け部で試験片が破壊してしまう場合があることに注目して考案された試験方法と言われている。

一般には、通常疲労寿命に比べて、フレッシング疲労寿命は短い、試験片とパッド間の摩擦係数、接触面の粗さ等が複雑に作用するので、通常疲労寿命に対して複雑な挙動を取る場合もある。

2.4 衝撃疲労

衝撃疲労は、衝撃荷重が繰返し部材に作用する場合に生じる。衝撃疲労条件は、通常疲労条件に比べて、より過酷な条件と言える。衝撃疲労特性を評価するための統一された試験方法や規格は現在の所ないが、重要である。例えば、模式的に図9に示すような機構で、繰返し衝撃荷重を試験片に負荷し、試験を行う¹⁶⁾。このような機械的試験機構では、応力の繰返し速度(周波数)を高くすることが困難で、通常10Hz程度までの試験が可能である。油圧を利用することで、周波数が20Hz程度までの試験が可能であるとされている。衝撃疲労特性試験でも上述した通常疲労特性試験の場合と同様に、衝撃疲労強度(S-N曲線)および衝撃疲労き裂伝播特性を評価する。

衝撃疲労では、衝撃繰返し応力 σ_t と試験片破断までの繰返し数 N_t との間には、1サイクル当りの荷重負荷時間を T_e とした時、累積負荷時間($N_t \cdot T_e$)を考慮して、次式の関係が成り立つとされている¹⁷⁾。

$$\sigma_t (N_t \cdot T_e)^m = D \dots \dots \dots (21)$$

ここで、 m および D は定数である。

衝撃疲労条件は、通常疲労条件に比べ、より厳しい条件であるので、衝撃疲労寿命が通常疲労寿命よりも低下するのが一般的である。

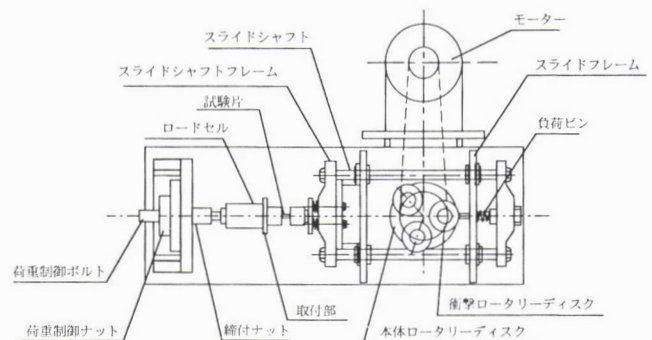


図9 回転円盤式衝撃疲労試験機の模式図

3 おわりに

本稿では、特に重要と思われる基本的な疲労特性をそれらの評価法を中心について簡単に述べたつもりであるが、どちらかと言うとメーカー側の立場での記述が多くなっている点ご容赦願いたい。この点を補うためにQ&Aコーナーを参考にして頂ければ幸いである。

文献

- 1) Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM Designation E 466-96, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 2) 金属材料の疲れ試験方法通則, JIS Z2273-1978, 日本工業規格標準調査会, (1978)
- 3) Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM Designation E 606-92, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 4) O. H. Basquin : Proc. ASTM, 10 (1910), 625.
- 5) 竹内勝治 : アルミニウム合金の疲労強度, (1991), 195.
- 6) L. F. Coffin, Jr. and T. F. Travenelli : Trans. Metall. Soc. AIME, 215 (1959), 794.
- 7) 竹内勝治 : アルミニウム合金の疲労強度, (社)軽金属溶接構造協会, (1990), 62.
- 8) H. F. Moore, J. B. Kommers and T. M. Jasper : Proc. ASYTM, 22 (1922), II, 226.
- 9) H. Gerver : Z. Bayerischen Architekten Ingen.-Vereins, 6 (1874), 101.
- 10) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM Designation E 647-95a, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 11) P. C. Paris and F. Erdogan : Trans. ASME, Ser. D, 85 (1963), 528.
- 12) M. H. Swain : ASTM STP 1149, (1992), 34.
- 13) W. N. Sharpe, Jr., J. R. Jira and J. M. Larsen : ASTM STP 1149, (1992), 92.
- 14) 山本玲子, 小林 剛, 丸山典夫, 中沢興三, 角田方衛 : 日本金属学会誌, 59 (1995), 463.
- 15) A. L. Hutson, T. Nicholas and R. Goodman : Int. J. Fatigue, 21 (1999), 663.
- 16) M. Niinomi, K. Uwai, T. Kobayashi and A. Okahara : Eng. Fracture Mech., 38 (1991), 439.
- 17) 田中道七, 中山英明 : 材料, 23 (1974), 678.

補遺 ユーザーのためのQ&Aコーナー

疲労について疑問に思われるかもしれない次の項目について簡単な説明を加える。

Q1 : 「疲労のデータを材料の選定や形状、大きさの決定などに対してどのように使うのか」

疲労強度に関しては、S-N曲線を用いて、繰返し応力から部材が耐え得る繰返し数を知ることが可能であるから、その繰返し応力で必要繰返し数を満足するS-N曲線を持つ材料を選択すれば良い。あるいは、目標繰返し数を満足する繰返し応力になるように部材寸法を大きくすることで対応できる。形状に関しては、その形状に相当する応力集中係数を求め、その応力集中をもたらしうな切欠き形状の試験片のS-N曲線から、所定の繰返し応力や繰返し数を満足する材料を選択することで対応可能となる。

疲労き裂進展データからの材料およびその大きさの選択に関しては、本稿Q 4 および前報(新家光雄、ふえらむVol. 5 No. 1 「破壊靱性」)のQ 2 を参考にして頂きたい。

Q2 : 「疲労のデータを使う場合に注意すべき点は(例えばねじり疲労が予想されるところに使う材料で引張り疲労のデータしか示されていないときはどのように活用したらよいか、換算できるのか)」

種々の疲労条件があり、最も単純な引張り-引張りの疲労データだけからは、判断できない場合は多い。異なった疲労条件間に換算式等はない。厳密には同疲労条件でのデータの比較で判断すべきである。しかし、例えば材料を選択する場合、ある同一材料についての引張り疲労およびねじり疲労のデータがあれば、それらのデータ間のばらつきを算定し、選択対象材料につき例えば引張り疲労データへそのばらつきを補正することで対応可能であろう。さらには、引張り疲労データとねじり疲労データ間の比を求め、ねじり疲労強度を推定する方向へもっていける。

例えば、回転曲げ疲労強度と両振ねじり疲労強度間では、純粋せん断で破壊するときのせん断応力 τ と引張りで破壊するときの引張り応力 σ との関係は最大せん断応力説では $\tau/\sigma=0.5$ 、せん断歪エネルギー説では $\tau/\sigma=0.577$ となるので、引張り疲労の応力 $(\sigma$ に相当)をこれらの関係に代入してやれば両振ねじり疲労応力 $(\tau$ に相当)が推定できることが示されている。アルミニウム合金では、最大せん断応力説の場合の τ と σ との関係が良く合うようである。

炭素鋼では、回転曲げ疲労においては、疲労限度と静的引張強さや硬さとの間に相関関係式が提案されている場合があるので、静的引張強さや硬さから疲労限度を推定することもある程度可能である。

疲労限度は、回転曲げ疲労、平面曲げ疲労および引張圧縮疲労の順に小さくなるなど、疲労条件により疲労強度の

大きさの傾向があるので、これから疲労強度の大小を類推することもできる。

Q3:「実際の部材には疲労試験のような一定の応力や歪が繰返しにかかるのではなく大きさのまちまちな応力や歪が不定期にかかる。疲労試験のデータをどのように修正すれば現実に近くなるか」

バージン材料の疲労限より高い応力(過大応力)が加わると疲労限は高まり、逆に低い応力(過小応力)が加われば疲労限は低下する傾向にある。変動応力の影響を一定応力の場合の疲労データから推定する方法としては、例えば累積被害の考えがある。振幅応力 σ_1 は振幅応力 σ_2 より大きいとし、ある材料では、 σ_1 の振幅応力では破断までの繰返し数が N_1 で、 σ_2 の振幅応力では破断までの繰返し数が N_2 であるとする。そのような材料に、 σ_1 の振幅応力を n_1 回、次いで σ_2 の振幅応力を n_2 回繰返し負荷した場合には、破断までの繰返し数 N は N_1 より大きくなるが、 N_2 より小さくなり、そのときにおおよそ次の関係が成立する。

$$(n_1/N_1) + (n_2/N_2) = 1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

これは、マイナー則と呼ばれている。さらに、応力振幅 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$ がそれぞれ $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ 回繰返されて破断し、それぞれの応力振幅での疲労試験での破断までの繰返し数を $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ とし一般表示すると次のように表わされる。

$$\sum_{i=1}^n (n_i/N_i) = 1 \quad \dots\dots\dots (23)$$

マイナー則が成立するためには、(1)疲労被害は繰返し数ともに直線的に進行する、(2)応力の負荷順序が変わっても疲労被害の累積値は変わらない、(3)加工硬化しない、(4)疲労限以下の繰返し応力では疲労被害を生じない等の仮定がなされている。なお、さらに多段多重応力での累積疲労被害関係が検討されている。

Q4:「疲労試験での試験片の形状や大きさの影響はないか」

疲労試験片の形状や大きさの影響は存在する。例えば、疲労限は、切欠きがある場合(形状の違い)の方がより小さく、また寸法の大きな試験片の方が、小さな試験片に比べてより小さな値となる。前者は切欠き効果、後者は寸法効果といわれる。本稿で既に述べたが平滑試験片の疲労強度に対する切欠き試験片の疲労強度を切欠き係数 β と呼ぶ。また、任意直径の平滑試験片の疲労強度に対する標準平滑試験片(直径10mm)の疲労強度の比 β を寸法効果係数と呼ぶ。

Q5:「き裂進展速度を機械設計などではどのように使うのか」

脆性破壊を起す限界欠陥寸法 a_c の評価の例をとって説明する。材料の K_{IC} がわかっているれば、前報(新家光雄:ふえらむVol.5 No.1「破壊靱性」)で述べたように a_c は計算可能である。また、材料中の初期欠陥寸法を a_0 とする。疲労き裂伝播速度は、本文(18)式のパリズ則で与えられる。したがって、初期欠陥寸法が脆性破壊の臨界欠陥寸法に達するまでの繰返し数は、

$$N = \int_{a_0}^{a_c} 1/C\Delta K^m da \quad \dots\dots\dots (24)$$

から計算でき、 a_0 から a_c までき裂が成長するまでの全寿命(N :全繰返し数)が求まる。これを、必要寿命(繰返し数)と比較し、 N が必要寿命より大きければ設計変更をする必要はないが、必要寿命より小さければ設計変更が必要となる。設計変更は、(1) K_{IC} のより大きな材料に変更すること: a_c の増大になる、(2)設計応力を低くする: a_c の増大になる、(3)応力幅 $\Delta\sigma$ (ΔK に対応する)を小さくしてき裂伝播速度 da/dN を小さくすることにより a_c までき裂が成長するに必要な繰返し数を増大させる、(4)初期欠陥寸法 a_0 を小さくする等である。

(1999年5月28日受付)