

金属の疲労—疲労強度設計—



機械・構造物の設計にあたって、各部材の強度は最も重要な検討事項である。

機械・構造物の機能を付与するためのみならず、安全性、経済性を確保することが設計の基本となるが、そのためには適正な部材の強度性能を明らかにする必要がある。そして、その強度問題の大部分が疲労に関するものである場合が多く、疲労強度の設計に占める重要性はまことに大であるといえる。

ここでは、機械・構造物の設計の立場から疲労強度について紹介する。

疲労強度設計の概要

一般に機械・構造物の受ける荷重は一定の静荷重の場合よりも、周期的に変化する荷重すなわち繰返し荷重あるいは変動荷重であることが多い。したがって、許容応力は繰返し荷重を受ける部材については、疲労限度を基準として決めるのが適切であり、この疲労限度に安全率を考慮して許容応力を決めることになる。

すなわち、疲労強度設計を行う場合、機能上からある程度の応力集中部と許容限度以下の材料欠

陥の存在を前提とし、その条件下で機械・構造物の作用応力および耐用年数（繰返し荷重を受ける期間、回数）を考慮して、最も軽量かつ経済的に設計することが要求される。

しかしながら、疲労寿命を考慮して部品や構造物を設計する際には、以下に述べるような多くの課題の検討を必要とする。なお、疲労寿命については、微細き裂の発生をもって寿命とするのが一般的である。

S-N線図と疲労限度線図

S-N線図

材料に繰返し一定応力が負荷される場合、上限応力を σ_{max} 、下限応力を σ_{min} とすれば、平均応力は $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$ 、応力振幅は $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ となる。

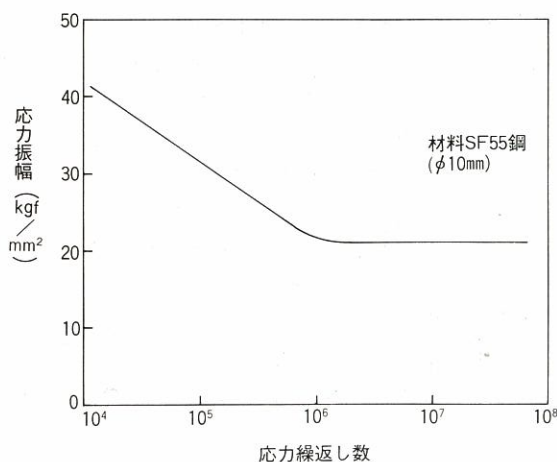
第1図に示すように、疲労試験の結果を縦軸に応力（応力振幅または最大応力）、横軸に材料が破断するまでの応力繰返し数の対数をとって示した図をS-N線図という。

S-N線図からわかるように、応力振幅が小さいほど破壊までの繰返し数が増加する。鋼材の場合、応力振幅がある値以下になると、いくら繰返しても破壊を生じず、曲線が水平になるのが一般的であり、その繰返し数は通常 $10^6 \sim 10^7$ 回となる。非鉄金属や複合材料では 5×10^8 回以上でも水平にならないものが多い。なお、S-N線図は傾斜部分を直線で近似して表示することが多い。この傾斜部の応力をその回数における時間強度という。

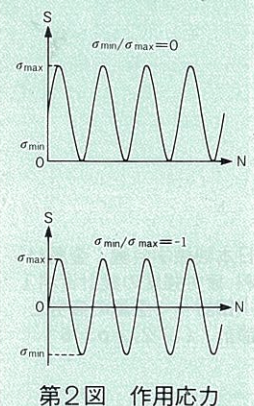
S-N線図が水平になる限界の応力を疲労限度または耐久限度という。

許容応力は、この疲労限度あるいは時間強度を安全率で除した値である。

構造物に作用する応力は、第2図に示すように σ_{min} と σ_{max} の比が異なるケースがある。 $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ をRで表し、応力比と呼ぶ。応力比が異なると、S-N線図も当然異なる。そのため応力比によって許容応力も左右される。したがって、応力比と疲労強度との関係を知る必要がある。その簡便な方法が、次に示す疲労限度線図による方法である。



第1図 S-N線図(完全両振り)



第2図 作用応力

A - 1

A - 2

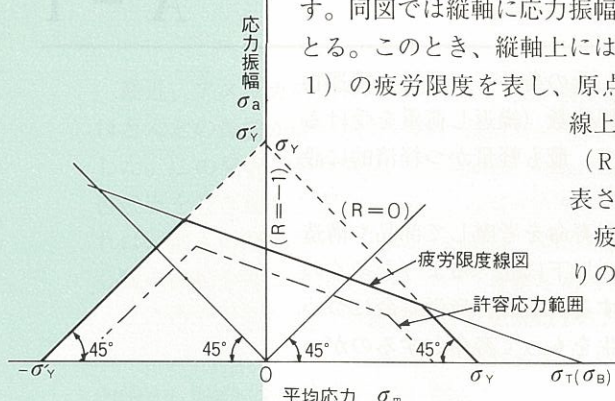
疲労限度線図

いろいろの平均応力（応力比）によって、疲労限度がどのようになるかを示したものが疲労限度線図（または耐久限度線図）である。

疲労限度の表し方にはいくつかの方法があり、平均応力と疲労限度における上・下限応力により表したもののや、平均応力と応力振幅により表したもののなどがあるが、ここでは一例として応力振幅を用いたグッドマン線図を取り上げ、第3図に示す。同図では縦軸に応力振幅、横軸に平均応力をとる。このとき、縦軸上には完全両振り（ $R = -1$ ）の疲労限度を表し、原点から右上がり45°の

線には完全片振り（ $R = 0$ ）の疲労限度が表される。

疲労限度線図は右下がりの直線で表され、横軸との交点は真破断力（ σ_T ）によく合うといわれているが、真破断力を求めるこ



第3図 疲労限度線図(グッドマン線図)

とが困難な場合もあり、このようなときには引張強さ（ σ_B ）を便宜的に用いることもある（修正グッドマン線図）。図中の σ_Y 、 σ_T はそれぞれ引張、圧縮の降伏強さである。この線図は疲労設計をする上で非常に重要なものであるが、これを正確に求めるためには、いろいろの平均応力（応力比）の下で疲労試験を行う必要があり、多大な労力を要する。しかし、簡略的にはある一つの応力比の疲労限度と真破断力（または引張強さ）がわかっているならば、線図を推定することは可能である。

この疲労限度線図を安全率で除した値が許容応力線図であり、これを第3図に一点鎖線で示す。安全率は、設計しようとする構造物の社会的重要性、製作の難易度、疲労強度データの量および作用応力の評価の正確さなどで異なり、不確定要素の多いもの、社会的重要性が大きいものほど高くとるのが一般的であり、通常1.2～2.0の範囲である。さて、この疲労限度線図を求めることは、疲労設計上重要な要素となるが、この線図は試験片の形状や、表面状態などの諸因子によって左右される。

次に、疲労強度に影響をおよぼすこれら因子について述べる。

A - 3

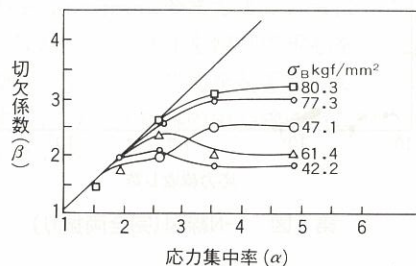
疲労強度に影響をおよぼす因子

切欠効果

機械部品や構造物の部品は、ほとんどの場合一樣断面でなく断面が急変し、切欠部を形成することが多い。この切欠部では応力が局部的に大きくなり、応力集中を生ずる。応力集中の大きさを表すものが応力集中度 α （形状係数ともいう）である。この応力集中の影響により疲労強度が大きく低下する。

この疲労強度の低下を表す式として次式で示す切欠係数 β が用いられる。

$$\beta = \frac{\text{切欠きのない場合の疲労強度}}{\text{切欠きのある場合の疲労強度}} \dots\dots(1)$$



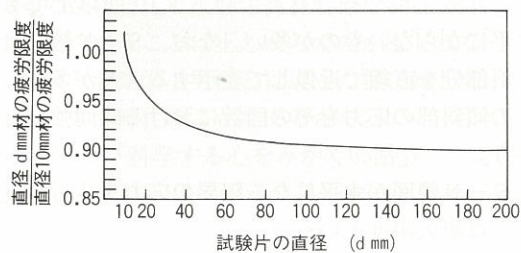
第4図 応力集中度と切欠係数の関係¹⁾

第4図は、 α と β の関係を示した一例であるが、この関係が知られていれば、 α を求めることによって疲労強度設計が可能となる。

寸法効果

小型試験片での疲労試験結果から求めた疲労強度を用いて疲労設計を行う場合、部材の寸法が大きくなると、疲労強度が低下するという寸法効果を考慮する必要がある。寸法効果のための疲労強度の低下は、設計上無視できない程度のものであり、次に述べるような因子により影響を受ける。

形状が相似であっても、表面層の面積の相違、材質の相違、熱処理による残留応力分布の違い、



第5図 回転曲げ疲労限度と丸棒の直径との関係²⁾

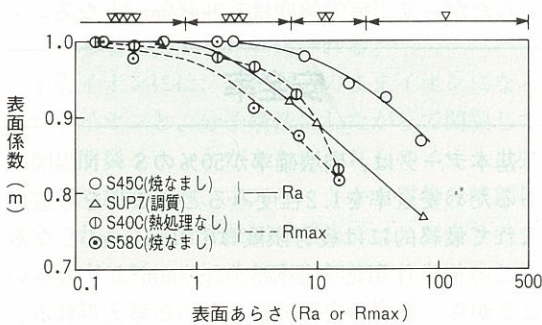
1) 日本機械学会編：金属材料 疲労強度の設計資料 I
2) 川田雄一：金属の疲労と設計，(1972)，p.116

形状や荷重の種類によって生じる応力勾配などによって疲労強度が変化する。

材料の全断面に、引張りまたは圧縮力が均一に作用する場合は、試験片の寸法によりそれほどの相違はないが、第5図に示すように、回転曲げ疲労試験の場合、疲労限度は明らかに低下する。構造物の場合、応力勾配のある場合が多いので、実物での試験データを求めることが完全な疲労設計に結びつくことになる。

仕上効果 (表面状況)

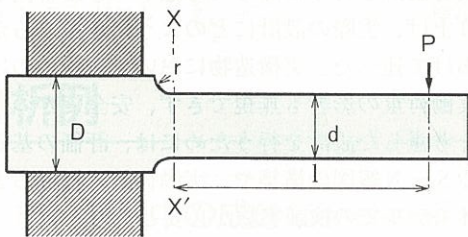
表面仕上げのあらさは疲労強度に対して、切欠きによる応力集中と同様に作用し、表面があらいほど疲労限度は下がる。その下がり方は引張強さの高い材料ほど大きく、鋼材では研削仕上げまたは切削仕上げの場合の疲労限度は、鏡面仕上げの場合より0~30%程度低下する。鏡面仕上げの疲労強度を1.0としたとき、それに対する疲労強度の低下率を表したものが表面係数であり、一例を第6図に示す。ここで R_a および R_{max} はそれぞれ



第6図 表面あらさと表面係数³⁾(鋼、回転曲げ)

疲労設計の例

疲労設計の一例として、第7図に示すような、一端が固定され他端に片振りの繰返し荷重が加わるような段付の軸材を取り上げる。



第7図 片持ち軸の負荷説明図

作用応力の算出

各部の寸法および荷重の大きさを次のようにす

中心線平均あらさ、最大高さを表す。

その他の因子

圧縮の平均応力は疲労強度を向上させ、引張りの平均応力は疲労強度を低下させる。また、熱処理や加工(溶接を含む)により部材に残留応力が存在する場合も、平均応力と等価な影響がある。しかし、残留応力は応力の繰返しによって緩和されることが多く、疲労強度は短時間寿命域の高応力が作用する場合には、ほとんど残留応力の影響を受けない。熱処理により静的強度レベルを向上させると、疲労強度も上昇するが、ある一定レベルを超えると疲労強度の向上はあまり顕著でなくなり、むしろ低下する傾向が現れるため、高い疲労強度を達成するためには、延性を失うことなく高い強度レベルを維持する必要がある。圧延鋼板などでは、材料の異方性により疲労強度が影響を受けることがある。また、使用環境、温度により疲労強度は変化する。一般に高温になるにつれて疲労強度は低下し、低温になると上昇する。特に、腐食環境下で疲労強度は大きな影響を受けるため、実際に使用される条件下で疲労強度を求めることが安全な設計に結びつく。疲労設計に際しては、以上のような因子による疲労強度への影響を考慮し、さらに安全率を考慮して許容応力を決める。また、一方では作用応力を求め、作用応力が許容応力を上回らないように設計する。この作用応力は有限要素法によって計算されるのが一般的である。次に、この許容応力、作用応力が異なる構造物の疲労設計について紹介する。

3)日本機械学会編：金属材料 疲労強度の設計資料II

る。

$$D = 100\text{mm}, d = 80\text{mm}, r = 5\text{mm}$$

$$P_{max} = 2,000\text{kgf}, P_{min} = 0\text{kgf}, l = 250\text{mm}$$

この場合の危険断面はX-X'で示すrどまりである。この部分に作用する応力 σ は次式で求められる。

$$\sigma = \frac{M}{Z} \dots \dots (1)$$

ここで

$$M : \text{曲げモーメント} (M = P \cdot l)$$

$$Z : \text{断面係数} (Z = \frac{\pi d^3}{32})$$

したがって(1)式は次のようになる。

$$\sigma = \frac{32Pl}{\pi d^3} \dots \dots (2)$$

これにより応力の範囲は9.9kgf/mm²となる。
したがって、応力振幅は5.0kgf/mm²となる。

材料の疲労限度の算定

軸の材料をSF55鋼とすると、両振り (R = -1) の疲労限度 (σ_{wb}) は第1図より21kgf/mm²である。片振り (R = 0) の疲労強度を知るためには、疲労限度線図を用いて推定する。両振りの疲労限度 σ_{wb} と真破断力 σ_T を用いて、疲労限度線図は次のように表される。

$$\sigma_a = -\frac{\sigma_{wb}}{\sigma_T} \cdot \sigma_m + \sigma_{wb} \dots \dots (3)$$

一方、片振りの疲労強度は原点を通る右上がり45°の線であるから次式で表される。

$$\sigma_a = \sigma_m \dots \dots (4)$$

(3)式と(4)式から σ_a を求めると、

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{wb} \cdot \sigma_T}{\sigma_{wb} + \sigma_T} \dots \dots (5)$$

となる。 σ_T の代わりに $\sigma_B = 60\text{kgf/mm}^2$ を用いると

$$\sigma_a = 15.6\text{kgf/mm}^2 \text{ となる。}$$

複雑な形状の場合は、有限要素法を用いて応力集中率 α を計算するが、この例のように比較的単純な形状の場合には、光弾性法により求められた図表⁴⁾がある。これを用いると、 $\alpha = 1.85$ となる。このときの切欠係数 β は第4図より1.8となる。

したがって、求める疲労限度は、8.7kgf/mm²となる。

寸法効果

ここまで考えてきた疲労限度は、 $\phi 10\text{mm}$ の試験片で得られた結果であり、 $\phi 80\text{mm}$ の軸材に適用する場合は第5図に示す0.93の係数を乗ずる必要がある。したがって、疲労限度はさらに下がり8.1kgf/mm²となる。

表面効果

ここまでは、鏡面仕上げのデータにもとづくものであるが、一般には第6図よりさらに0.95の係数を乗じる必要がある。

したがって、疲労強度は7.7kgf/mm²となる。

安全率

基本データは、破壊確率が50%のS-N線図であるため安全率を1.2程度みると、これを考慮に入れて最終的には疲労限度は6.4kgf/mm²となる。

この値は作用応力振幅5.0kgf/mm²より大きいことから、まずは疲労破壊しないと考えられる。

A - 5

疲労設計上の注意点

疲労設計を行うとき、作用応力が大きい場合、高強度材料を使おうとする傾向がある。しかし、第4図に示したように、切欠係数は高強度鋼ほど大きくなる傾向にあり、このことは応力集中がある場合、高強度鋼を用いても疲労強度の向上はあまり望めないことを意味する。材料強度を上げることより、応力集中の低減あるいは作用応力振幅の低減を計ることが得策である。高強度鋼を使う場合のメリットは、低サイクル領域、応力集中がない場合、平均応力が高い場合に出てくる。また、溶接構造物ではいろいろの溶接継手が用いられるが、この場合の疲労設計を行うためには実構造物と同じ材料で同じ溶接をした試験片を用いてS-N曲線を求める必要がある。

特に、溶接止端部の形状が疲労強度に大きく影響することから、試験片の製作においても注意が必要である。実構造物と同じ条件の試験片で得ら

れたS-N線図を用いれば、前項のような諸因子を考慮しなくてよく、安全率のみ考えればよい。

疲労設計を行うに際して考慮すべき影響因子を取り上げ、実際の設計にどのように適用するか例をあげて述べた。実構造物においては、このほかに実働荷重の影響も無視できず、安全でかつ経済性を考慮した設計を行うためには、評価の基礎となるS-N線図の構築や、実働荷重の把握および実体モデルでの検証実験が必要となる。

また、疲労強度は腐食雰囲気および高温環境下で大きな影響を受けるが、この問題については紙面の都合上、今回は触れることができなかった。

[尼崎事業所 強度技術室 柳井 博・八木和茂]