

金属疲労は18世紀にイギリスで起きた産業革命以降、その重要性が認識され、金属が突然破壊する事故は深刻な社会問題となった。金属疲労を世界で大きく認識させるきっかけとなった事故としてジェット旅客機であるコメット機の空中分解事故はよく知られている。この事故以降、航空機の疲労強度設計と耐久性を評価する確認試験は抜本的に見直されることになり、より重要性が高まった。

疲労強度設計の基本は、材料の基準強さを安全率で除して許容応力を求め、設計応力が許容応力以下になるようにすることである。しかし機械・構造物には、機能上の観点からある程度の応力集中部が存在し、材料に潜在的な欠陥が存在する可能性もある。

今回の特集号ではこれらを前提とした上で作用応力や使用環境などを考慮した疲労試験技術や疲労寿命を予測する解析技術について紹介する。



技術本部
機械・構造センター
構造技術部

みなみ たけとし
南 武俊

A-1 疲労の基礎

1.1 疲労現象

疲労とは弾性範囲内の負荷であっても数万回から数百万回の繰り返し負荷により突然破壊する現象であり、機械・構造物の破壊原因の7割程度が金属疲労と言われている。繰り返し負荷を受けた金属の表面には転位によるすべり帯が観察され、すべり帯に沿って外部に飛び出した突出しと内部に陥没した入込みが生成される。入込みでは応力集中が起こり、微視的な疲労き裂の発生となる。

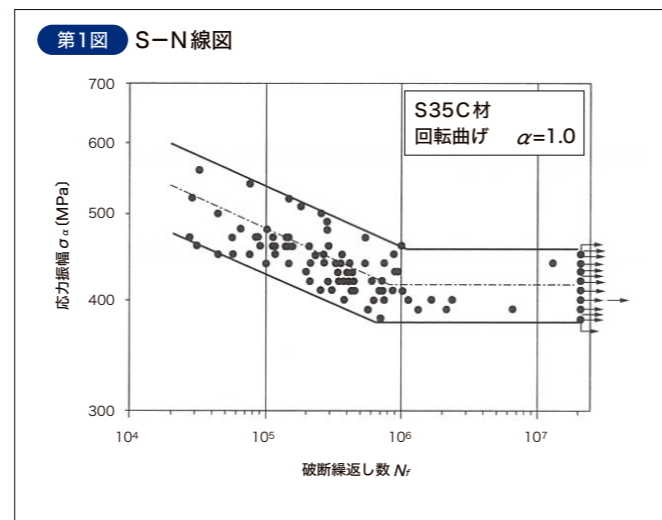
疲労き裂の進展は3段階で構成されると言われている。第1段階は微視的き裂が発生した後、せん断応力の影響を受けてき裂が材料内部に入り込む段階であり、第2段階では、き裂先端の塑性変形によりストライエーションと呼ばれる筋状の模様が生じてき裂が繰り返し応力の直角方向へ進展、その後破断に至る段階が第3段階である。

1.2 疲労試験

材料の基本的な疲労強度を知るには小型の疲労試験片をもちいて疲労試験を行うことが一般的であり、機械・構造物を構成する要素部品をもちいて疲労試験を行うこともある。疲労試験にもちいる負荷の種類は軸荷重や曲げ荷重、ねじり荷重やこれらの複合的な荷重である。複合的な荷重を付与するには複数の油圧式疲労試験機を配置し、同期制御を行う手法があり、特に要素部品を対象とする場合には実体での評価が必要となることから、複合的な荷重を付与する多軸疲労試験が不可欠となる。また後述する疲労強度への影響因子として試験環境があることから、高温環境や腐食環境など実態に応じた環境を作り出し、疲労試験を行う必要がある。これらの疲労試験方法に関しては次稿以降で詳しく紹介する。

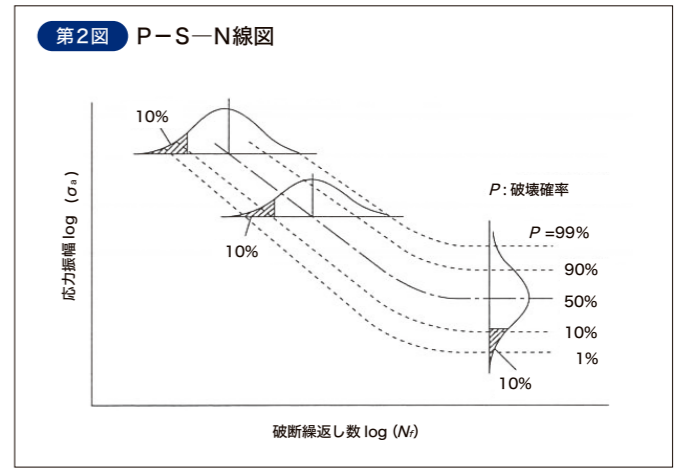
1.3 S-N線図

疲労試験は一般的に一定の応力振幅を負荷し、疲労き裂が発生した繰り返し数や破断までの繰り返し数を求める。応力振幅と繰り返し数の関係を示した線図をS-N線図と称する。S-N線図は第1図に示すように通常縦軸に応力(応力振幅または最大応力)、横軸に破断までの繰り返し数をとる。縦軸は、真数目盛または対数目盛とし、横軸は対数目盛とする。鉄鋼材料の場合には応力振幅がある値以下になると、いくら繰り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、その繰り返し数は通常 $10^6 \sim 10^7$ 回となる。この水平となる応力を疲労限度または耐久限度と称する。一方、アルミニウムや銅などの非鉄材料や複合材料は明確な疲労限度を持たないと言われている。



【出典】中村宏ほか：金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用、(2008)、p.34、コロナ社

疲労強度設計では疲労限度が許容応力を決定する指標となるが、多数の試験片をもちいて疲労試験を実施すると同一の応力振幅でも破断までの繰り返し数にはばらつきがある。このばらつきは介在物の存在など材料固有の影響や試験機の差などにより生じるものである。少数の試験片(7~10本程度)で取得したデータから最小二乗法を使って式を求めると、破壊確率50%のS-N線図となる。この破壊確率をパラメータとするS-N線図は第2図に示すようにP-S-N線図と称する。例えば破壊確率1%であれば、100本の試験片に対して疲労試験を実施すると1本が疲労破壊するS-N線図である。設計期間を考慮すると多くの疲労試験を行う余裕がない場合が多く、破壊確率50%のS-N線図に安全率を考慮する。安全率は一般的に3程度に設定することが多いと言われているが、どの値を設定するかは設計者の経験や条件による。



【出典】中村宏ほか：金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用、(2008)、p.37、コロナ社

A-2 疲労強度に影響を及ぼす因子

2.1 切欠き効果

機械・構造物は、ほとんどの場合一様断面ではなく、穴や段差など断面の形状が急変し、切欠き部を形成することが多い。切欠き部では応力集中が起こり、この影響により疲労強度が低下する。この疲労強度の低下を表すために次式で示す切欠き係数 β がもちいられる。

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

また切欠部の最大応力を公称応力で除した値を応力集中係数 α と称する。

$$\alpha = \frac{\text{切欠部の最大応力}}{\text{切欠部の公称応力}}$$

α と β の関係を示す資料は多くあるが、 α を求めることにより疲労強度設計が可能となる¹⁾。

2.2 表面粗さ効果

多くの疲労破壊は部材の表面から発生しているため、表面仕上げが粗い場合には疲労強度が低下する。これは部材を機械加工した際に工具を使用した切削などの工程で微小な傷が生じること、残留応力が発生することがあり、これらが影響を及ぼすことになる。対策としていくつかの表面処理法があり、表面に窒化や浸炭、高周波焼入れやショットピーニングなどの処理を施すと表面に圧縮残留応力が生じ、かつ表面硬さが増加することから疲労強度が上がる。

また、構造物は大型化すると溶接構造や締結構造の割合が増

加する。特に溶接継手の疲労強度は継手形状と表面状況の影響を受けやすく、通常は余盛止端部の応力集中部から疲労き裂が発生する。この余盛をグラインダなどで研削仕上げする、もしくは余盛形状に丸みを付けるなどの処理を施せば応力集中が緩和され、疲労強度の改善につながる²⁾。

2.3 寸法効果

材料の形状寸法が大きくなると疲労強度が低下することが実験的に知られており、これを寸法効果と称する。このような寸法効果の要因としては、素材の製造過程の違いによって生じる強度の低下と、純粋に幾何学的な形状寸法の影響とがある。前者については、材質や微小欠陥の発生状況、表面の硬度や残留応力など複数の因子が影響している。後者については高応力にさらされる領域が大きいほど、強度が低くて疲労破壊の起点となる箇所が多くなり破壊しやすいことになる³⁾。平滑材の引張圧縮疲労試験では、表面と内部との応力差である応力勾配が存在しないことから寸法効果の影響は低いと言えるが、応力勾配が生じる曲げやねじり試験は寸法効果が現れやすい。

2.4 平均応力

繰り返し応力の最大値を最大応力 σ_{max} 、最小値を最小応力 σ_{min} と称し、最大応力と最小応力の平均を平均応力 σ_m と称する。疲労強度は平均応力の影響を受ける。一般的に引張圧縮負荷ではその影響が顕著であり、高強度材料も平均応力の影響が大きいと言われている。

第3図のように疲労限度と平均応力の関係を示す図を疲労限度線図と称し、平均応力作用下での材料の疲労限度の推定にもちいられる。疲労限度線図の横軸には平均応力をとり、縦軸には疲労限度における最大応力と最小応力をとるものと、応力振幅をとるものなどがある。縦軸上には完全両振(応力比 $R=-1$)の疲労限度を表し、原点から右上がり45°の線上には完全片振引張(応

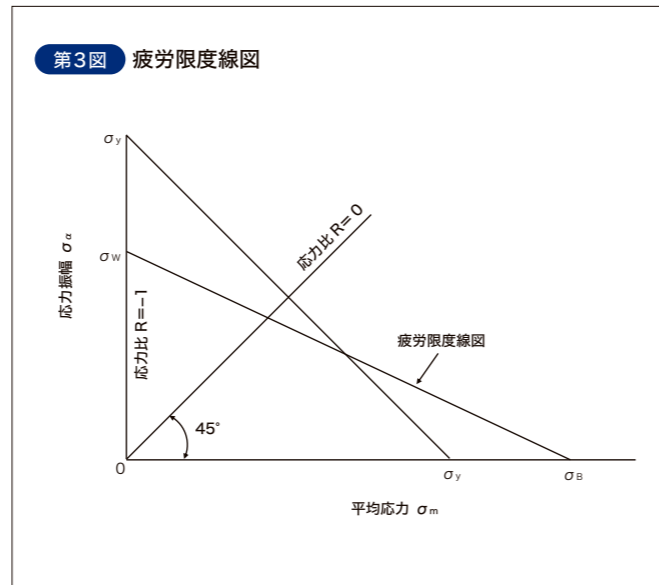
力比R=0)の疲労限度が表される。平均応力軸上に引張強さ σ_B の値をとった点と、縦軸上の点 σ_w を直線で結ぶ修正グッドマン線図をもちいて、任意の平均応力が作用する場合の疲労限度における応力振幅を決めることが多い。

疲労強度設計では最大応力が降伏応力を越えないようにすることが重要である。第4図に示す疲労限度線図の横軸は平均応力、縦軸は応力振幅である。点Aは両振り疲労限度 σ_{w0} であり、点Bは引張強さ σ_B である。点CおよびDは降伏応力 σ_y を表す。図中に領域Iと領域IIがあるが、領域Iは最大応力が降伏応力以下であるが、疲労破壊する領域であることを示す。領域IIは疲労破壊しないが最大応力が降伏応力を越える領域である。疲労強度設計に使用できる耐久限度領域はこの二本の直線より下の領域である⁴⁾。

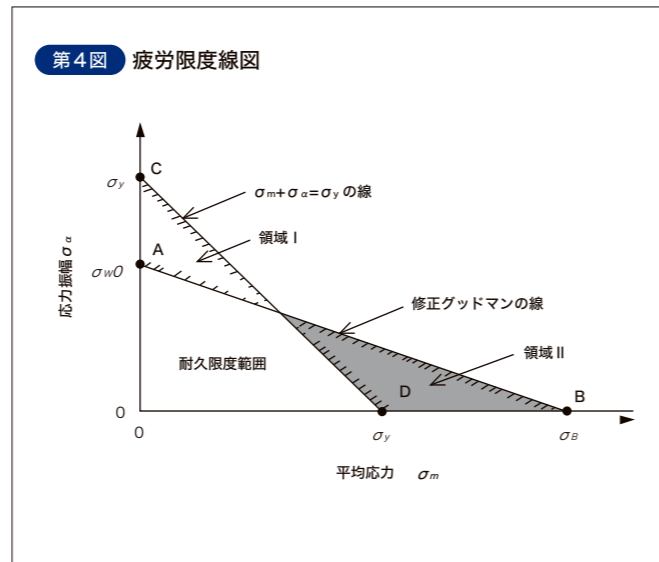
2.5 腐食環境

金属材料の疲労強度は環境による影響が大きく、海中や酸溶液などの環境下では腐食ピットの発生やその他要因から疲労き裂発生へとつながることが知られている。疲労によって発生するき裂と、その先端が腐食影響で溶解することが相互作用することにより、き裂の進展過程を助長するため、疲労強度の低下につながる。腐食環境下では金属材料の疲労限度は存在せず、時間強度が大気中に比べて低い。また繰り返し速度に大きく影響されるなどの特性を持つ。

腐食による疲労破壊を完全に防止するのは困難なため、要素部品が腐食環境と接触しない状況を作り出すような防食が必要となる。めっきなどの被膜形成、腐食に強い合金鋼の使用などいくつかの手法があるが、いずれも完全に防止することはできないため、形状変更などと合わせ防食を取り入れる必要がある。



第3図 疲労限度線図



第4図 疲労限度線図

【出典】中村宏ほか：金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用、(2008)、p.57、コロナ社

A-3 疲労寿命

3.1 疲労寿命予測

機械・構造物は疲労強度設計において安全性を確保すべく疲労破壊を生じないよう許容応力を設定するが、想定外の負荷や疲労強度影響因子の見誤りなどにより疲労破壊に至ることがある。疲労寿命予測の基準となる考え方は線形累積損傷則であり、前述したS-N線図をもちいる。線形累積損傷則はある応力振幅での繰り返し数と破断繰り返し数との比を全応力波形で積算し、破断繰り返し数の和が1を越えなければ疲労破壊しないというものである。なお疲労限度を下回る応力は疲労破壊には寄与しないとする場合に時間強度の傾斜部を直線で延長し、寿命を考慮する修正マイナー則がある。

き裂進展特性はき裂先端の応力拡大係数範囲 ΔK と進展速度 da/dN で表すことができる。この式はParis則と呼ばれている。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

ここに、
 a ：き裂寸法
 N ：繰り返し数
 ΔK ：応力拡大係数範囲
 C, m ：材料定数

き裂進展を開始する応力拡大係数範囲をき裂進展の下限界値と呼び、 ΔK_{th} と表される。下限界値 ΔK_{th} 以下であれば疲労き裂

は進展せず、疲労破壊には至らない。これはS-N線図における疲労限度と同等の意味合いとなる。第5図に疲労き裂進展速度と応力拡大係数の模式図を示す。

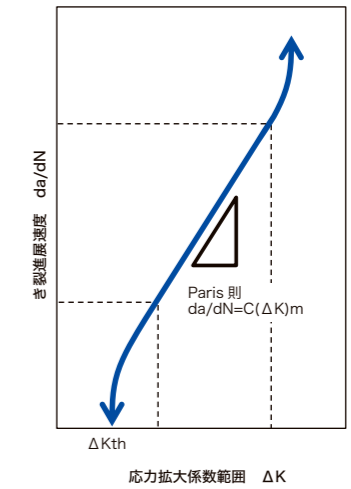
S-N線図は一定応力振幅での疲労特性であることから、変動応力に対応するものではない。変動応力の疲労特性を把握するには応力頻度計数法をもちいる。実働応力波形から応力振幅と頻度を求めて応力頻度分布を作り予測寿命を求める。応力頻度計数法にはピーク法やレンジ・ミーン法などが知られているが、今日ではレインフロー法が広く使われており、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針」で推奨されている。

3.2 非破壊検査

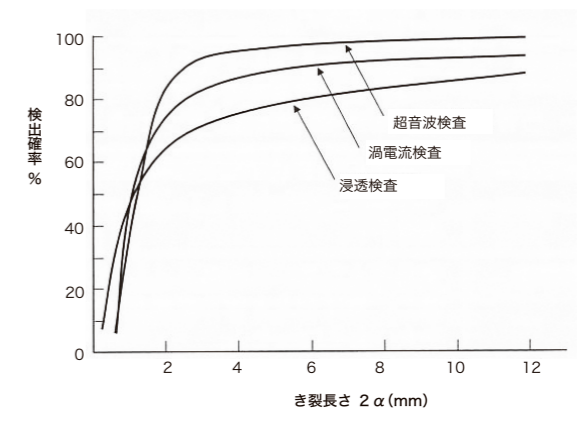
非破壊検査とは部材・部品を破壊させることなく、表面や内部に欠陥やき裂が存在するかを検査するものである。非破壊検査には浸透探傷試験、磁粉探傷試験、超音波探傷試験、渦流探傷試験など用途に応じて数種の試験がJISなどで規格化されている。これらの非破壊検査で疲労き裂が発見できる確率は第6図から明らかのように、2 mm以上で70～90%であり、1 mm程度の疲労き裂が発見できる最小単位と言える⁵⁾。

き裂が発見されたからといって、その要素部品が使用できないと判断することはない。使用条件によりき裂は進展しない場合もあり、疲労破壊に至らないき裂もある。重要なことはそのき裂がどのように進展していくかを予測することである。

第5図 疲労き裂進展速度と応力拡大係数の関係



第6図 疲労き裂が非破壊検査で発見できる確率



【出典】機械・構造系技術者のための実用信頼性工学：日本材料学会編(1987)、p.237、養賢堂

疲労という現象はある意味で避けられない問題であり、事前に疲労強度設計を入念に行うことが重要となる。疲労強度設計にもちいる各種データは、実験や経験則から得られるものであり、当社では多種多様な疲労試験機を保有することにより、お客さまのご要望に幅広く応えている。機械・構造物に作用する負荷や使用環境が刻一刻と変化中、実稼働状態を再現した実験技術や解析技術を駆使して疲労強度設計の一翼を担い続ける所存である。

- 参考文献
- *1) 柳井博ほか：こへるにくす、Vol.3(1994)、p.4、コベルコ科研
 - *2) 社団法人溶接学会：溶接・接合技術入門、溶接学会編(1998)、p.139、産報出版
 - *3) 社団法人日本機械学会：金属材料疲労強度の設計資料I、改訂第2版(1982)、p.3
 - *4) 中村宏ほか：金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用、(2008)、p.57、コロナ社
 - *5) 西島敏：金属疲労のおはなし、(2007)、p.159、一般財団法人日本規格協会