

第4章 低サイクル疲労

この章では低サイクル疲労、即ち、塑性疲労での強度評価技法について概説する。

前述したように、低サイクル疲労でのサイクル数(繰返し数)は、概ね10の2乗から10の5乗を対象としている。

4-1 低サイクル疲労の強度評価法

■ 「応用は基礎の後にやるべき」は本当か？

習い事をする際、助言として与えられる常套句がある。「基本をしっかり身に着ける前に、応用に手を出すな」、である。

確かにその通りだと思う。基礎・基本がしっかり出来ていない建物は、崩れやすいからだ。

しかし、早合点してはいけない。「応用に手を出す」のではなく、「応用をイメージする」ことは大切な事だ。

応用とは、実際のな事項に当て嵌め、利用することである。実際のな事項とは、「使いみち・用いどころ」に該当しよう。従って、「応用」を言い換えれば、「正しい用途の活用」と言える。

つまり、「応用をイメージする」ということは、「用途を踏まえて活用し、達成イメージを持つ」ことに相当する。言わば、目標を掲げ、達成した姿を思い描くことになる。

これが有効なのは、それが学習欲・知識欲への動機づけとなるからである。知識獲得への推進力と成り得るからだ。

従って、修得している基本事項を何に使うのか、何に使えるのか、その用途を踏まえた活用での到達・達成イメージを持つ事が「基本」学習の為には重要と思う。

講釈が長くなってしまった。

この章では低サイクル疲労の基礎を示すが、実は、その手法の理解・修得はわりあい難儀と思われる。

この難儀な代物の修得に挫けない為に、応用のイメージ、即ち、「用途を踏まえ活用し、達成イメージを持つこと」を生かしたい。

その為、説明の順序としては変則的だが、基礎に先立って応用について簡単に触れておこう。

用途、達成イメージといっても、対象となるテーマは様々あり、個々に具体的に上げることはとてもできない。

その為、ここでは、それら具体的なテーマの基盤・核となっ

ている用途の根幹を、以下に示しておこう。

1. "塑性域まで含めた破損"での検討に意義がある箇所や状況。例えば、切欠き部のような高負荷、高ひずみ箇所、耐力(降伏点)や比例限度が低い鋼材など。
2. 様々な大きさの荷重の履歴を重要視したい場合。
3. 初期寿命(クラック1mm程度)での破損が関心事。

低サイクル疲労の基礎の修得には、応用への足掛かりになるこれらの用途の根幹をしっかり押さえて目的を外さないよう、そして、その達成イメージを持つことが大切である。

■ これが低サイクル疲労の評価判定式だ

ともあれ、まずは、低サイクル疲労の評価判定式を上げておこう。

既に述べた一般の疲労判定式から連想できるように、低サイクル疲労の評価判定式は次のようになる。

$$D = \sum(1/N_{f,i}) \geq 1 \quad (4.1.1)$$

ここで、

D：累積疲労損傷度(Cumulative Fatigue Damage)

$N_{f,i}$ ：そのひずみ幅での破断繰返し数(疲労寿命)

(Life to Failure)

を示す。

強度評価の判定には、やはり疲労寿命(破断繰返し数)が基準となり、「疲労寿命にどの程度達したか」を知ることには尽きる。言うまでもなく、「1」に達したら破断と解釈される。

因みに、 $1/N_{f,i}$ は「1サイクルあたりの損傷度」である。

この低サイクル疲労の評価判定式を、既に述べた高サイクル疲労の判定式(マイナー則)と比べてみよう。

基本的にはマイナー則と同様だが、マイナー則の n_i (その応力振幅が働いている頻度)が含まれていない式となっている。

これは、「同一のひずみ幅の集まりが極端に少ない」非定常な波形が主な対象である、ことを意味している。

■ 疲労寿命は「ひずみ-寿命線図」から得られる

さて、評価判定式(4.1.1)での破断繰返し数 $N_{f,i}$ を如何に求めるか？

これを求めるには、**図4.1**に示すような**ひずみ-寿命線図** (Strain-Life Curve)が使われる。

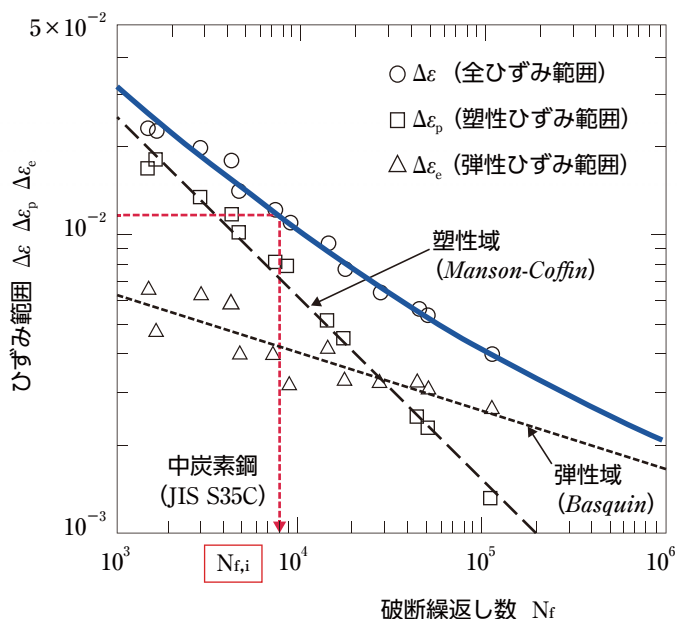


図4.1 ひずみ-寿命線図

この線図は高サイクル疲労でのヴェーラー線図に相当しよう。但し、ひずみ-寿命線図の横軸は**疲労寿命 (破断繰返し数)**、縦軸は応力振幅でなく**ひずみ範囲 (ひずみ幅、2×ひずみ振幅)**であり、両軸とも対数スケール (Log-Log) で表示される。

図4.1では、中炭素鋼(S35C)試験片に一定ひずみ幅で繰返し負荷を掛け、破断するまでの繰返し数の値がプロットされている。

太い青線が全ひずみ範囲でのカーブフィッティング結果である。

従って、対象の構造部材への負荷としてのひずみ範囲が得られれば、この曲線より疲労寿命(破断繰返し数) $N_{f,i}$ を求めることができる。

ここで、以下の点に留意されたい。

時刻歴の全ひずみ(全ひずみ範囲)は引張と圧縮の塑性域を含む**交番ひずみ**となり、即ち、これは、**図4.2**に示すような応力-ひずみのヒステリシスループとして形成される。

従って、強度評価の際、部材の対象箇所に働くヒステリシスループ(交番ひずみ)を見出す必要があり、それを見出すことができればこのヒステリシスループのひずみ幅に応じた疲労寿命 $N_{f,i}$ をひずみ-寿命線図から求めることができる。

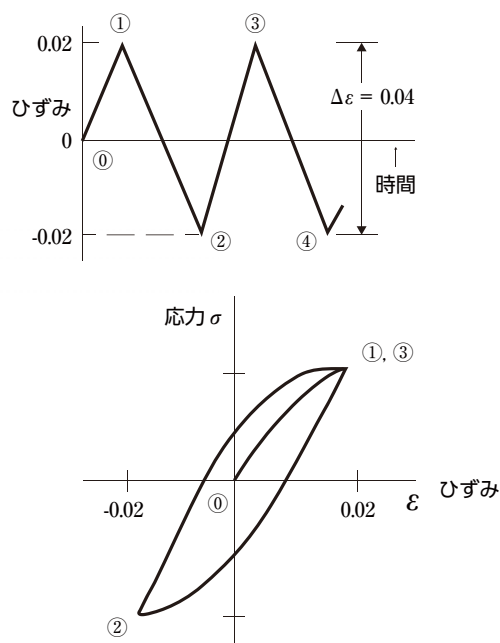


図4.2 ひずみ時刻歴と応力・ひずみ応答

話を**図4.1**に戻そう。

図では弾性ひずみ範囲と塑性ひずみ範囲の値もプロットされている。

多少のバラツキはあるが、それぞれ、実験式(回帰式)として「直線」(対数表示)でモデル化されており、これにより全ひずみ幅に対する数値処理が可能となる。

参考までに言えば、実験式のモデル化に関しては、弾性域についてはバスキーン (Basquin) が1910年に、そして、塑性域についてはマンソン (Manson) とコフィン (Coffin) が同時期(1950年代)にこれらを見出した。

この関係の数値処理については、「4-2」章で概説するつもりだ。

なお、前述したヒステリシスループについて、多少、付け加えておきたい。**(図4.3)**

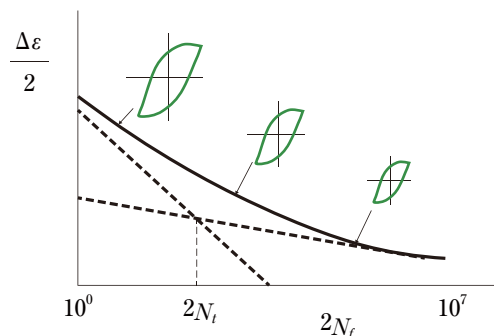


図4.3 ヒステリシスループとひずみ-寿命線図

図で、破断繰返し数が小さいところはループのひずみ幅が広く、大きいところはループのひずみ幅が狭い、という特徴がある。

このことは、それぞれ、塑性域の影響が大きいか、弾性域の影響が大きいかを示す。

その寄与する程度は、塑性域と弾性域のそれぞれの回帰直線に関するひずみ幅(ひずみ範囲)の程度で推し量ることができよう。

因みに、両ラインの交点(2Nt)は両者のひずみ幅が等しいことを意味している。

■ 寿命線図の縦軸はなぜ「ひずみ」なのか？

ところで、ひずみ-寿命線図の縦軸の物理量は、なぜ「ひずみ」なのか？ 応力では具合が悪いのか？

これについての理由は、次の点にあるようだ。

- (1) 疲労強度の対象となる構造部材の切欠き部(応力集中部)は、塑性域に進展しやすく、その塑性域の変形は廻りの弾性領域の制約(変形拘束)により両振りに近い「ひずみ制御」下に置かれている。
- (2) 応力制御(荷重制御)での疲労試験では、正確な結果データを得にくい。つまり、試験でのコントロールが難しい。
具体的には、応力制御(荷重制御)の試験では、引張側にひずみが累積し(繰返し変形、試験片の断面積が徐々に減少)、最終的に延性破壊してしまう。即ち、低サイクル疲労破壊とならない。

ここで、問題は(2)の試験でのコントロールが「なぜ」難しいのか、という点だ。

なぜだろう？

この点について試験を行った方々に説明を加えて欲しいところだが、筆者の知る限り、これに言及した文献等が無いのだ。理由が当たり前過ぎて言及する必要がないのか、それとも、本当の理由が分からないのか、いずれにしろ、まともそうな見解が見当たらない。

仕方ないので、無知を承知の上、自分自身で推し量ってみた。以下が私の見解だ。

応力-ひずみ曲線は、曲線と言う通り降伏点(耐力)を越えれば非線形となり、応力(荷重)の推定は、直接測ることはできない。結局は、応力 σ =縦弾性係数 E ×ひずみ ε の関係を利用して、ひずみから縦弾性係数を介して求めることになる。

つまり、非線形部の縦弾性係数を正確に得ることが出来なければ正確な応力(荷重)を推定できないワケだ。

試験中の交番荷重を掛けている際、その時のひずみ(変形)に応じた正確な縦弾性係数を得ることは、大層難しそうに思える。たとえ事前に測ったおいた応力-ひずみ曲線を利用したとしても、である。

ここに、応力制御(荷重制御)での試験の難しさがあるのではないだろうか。

ともあれ、疲労試験の際、塑性域(ひずみ幅)の感知・認識を高めるには、応力ではなく変位(ひずみ)を直接に観察・測定したほうがより良い、ということである。