第3章 高サイクル疲労

3-2 実際データでの寿命予測は如何に行うか?

■ マイナー則を用いて疲労損傷度を推測する

ここで、異なる応力振幅のものが幾つか重なって負荷されている場合を考え、その累積疲労損傷度Dを求める方法を概説しよう。

既に述べたように、累積疲労損傷度Dはマイナー則より

$$D = \Sigma D_i$$
$$= \Sigma(n_i/N_i)$$

である。

例として、今、図3.2のように、平均応力がゼロで、応力振幅がS_1とS_2、回数がn_1サイクルとn_2サイクルの２種の負荷が働いている部材を想定し、S−N線図に適用して推測してみよう。

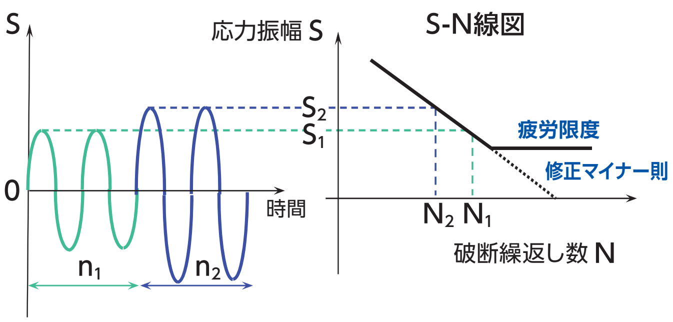

図3.2 S−N線図を用いたマイナー則

S−N線図より、S_1での破断繰返し数はN_1で、S_2での破断繰返し数はN_2として得ることができる。

それぞれの分別損傷度Diは以下のようになり、

$$D_1 = n_1/N_1$$
$$D_2 = n_2/N_2$$

従って、累積疲労損傷度Dは次のようにして求めることができる。

$$D = D_1 + D_2$$

なお、通常のマイナー則では、応力振幅が疲労限度以下の場合、損傷にカウントされない。それは、疲労限度以下の場合には寿命が無限と考えられているからだ。

しかし、実際の疲労現象では疲労限度以下の応力振幅も損傷に影響する場合も在り得るので、この範囲でもカウントする方法を採るかも知れない。

そのような場合、疲労限度以下の応力振幅についても損傷としてカウントできるように修正を加える必要がある。その修正手法の1つが、**修正マイナー則**と言われるものだ。

修正マイナー則は、図3.2に示したようにS−N曲線の傾きを便宜的に疲労限度以下まで直線で延長させている。これによって、疲労限度以下の応力振幅についても破断繰返し数を求めることが可能となる。

以上が基本的な計算手順である。

但し、前述したようにヴェーラー線図は両振りのデータであり、即ち、「平均応力＝０」であり、上記の計算も負荷応力の平均応力はゼロであることを前提としている。

一方、実際に扱われるデータは平均応力が非ゼロの場合もあり得る。それでは、このような一般的な実データはどのように処理すべきか?

それについては、次節で取り上げよう。

■ 平均応力がゼロでない場合の処理は如何に行うか

非ゼロの平均応力と応力振幅の値が与えられた場合を想定しよう。この条件下で該当する破断繰返し数を如何に求めるか?

実は、求めるに当たって大きく次の2つのステップが採られる。

(１)等価な破断繰返し数を有する「平均応力ゼロの応力振幅」を求出する。

(２)ヴェーラー線図を使って、その応力振幅(平均応力ゼロ)での破断繰返し数を求める。

ここで、ステップ(２)に関しては前述した。問題はステップ(１)である。

この処理でのキーワードは、「等価」である。等価、即ち、価値が等しいこと。非ゼロの平均応力を処理する上での基本的なアイデアはここに在る。

日常、我々はこの言葉を直接的表現として使う機会はあまり無いと思うが、実は、暗黙にこれを活用している。例えば、経済活動。お金と金(gold)、株の売り買い、土地の購入など、その時点で「同じ価値」のものと交換しているはずだ。

ここで扱う応力振幅の変換処理もその等価の関係性を利用している。具体的には「破断繰返し数が等価な応力振幅群」の関係だ。破断繰返し数が同じならば、「平均応力ゼロでの応力振幅」と「平均応力非ゼロでの応力振幅」は同じ価値、同じ負荷荷重と見なしていることになる。

ところで、そんな旨みのある"関係"が実際に存在するのだろうか。

実は、Haighという人が膨大な実験データからこの関係を見出した。

平均応力と**交番応力**（応力振幅）の対となる疲労寿命（破断繰返し数）の実験データ群をプロットすると、図3.3に示すように疲労寿命が一定となるラインが在るというわけだ。

勿論、多少のバラツキはあるだろうが、その関係は保持されているとの事。誠に具合の良い関係を見出してくれたものだ。

因みに、この図表は**Haigh線図**(Haigh Diagram)と言われている。

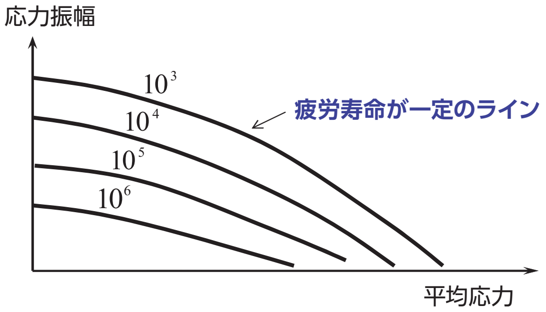

図3.3 Haigh線図

この図表を基にして、直接、非ゼロ平均応力での疲労寿命を求める手もあると思うが、なぜかそうはしていない。

一つには、与えられた材料をその都度それなりに信頼できるデータを得るには、手間も費用も掛かる実験を強いられるからであろう。更に言えば、実験にて代表的な破断繰返し数のラインを何本か得たとしても、所望の破断繰返し数に対し補間処理が必要となってくる。

その為、「任意の破断繰返し数に対してこの一定値ラインが存在している」という事実を流用して、経験実証的で簡便な数式モデルが幾つか考え出された。

その代表的な一つが、**グッドマン線図**（Goodman Diagram）である。

これを図3.4に示す。

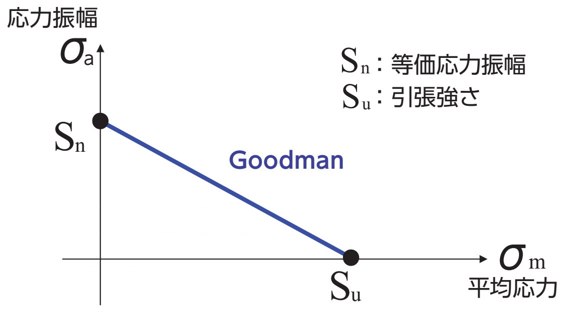

図3.4 グッドマン線図

このラインと縦軸の交点が「平均応力ゼロでの応力振幅」即ち、両振りでの等価応力振幅S_nということになる。

グッドマン線図の特徴は、この等価応力振幅S_nと引張強さ（極限強さ）S_uとを直線で結び、簡略なモデルにした点である。

これを式で表すと、以下のように1次式となり、

$$\frac{\sigma_a}{S_n}+\frac{\sigma_m}{S_u}=1$$

従って、非ゼロでの平均応力σ_mとその応力振幅σ_aにおいて、所望のS_n（等価応力振幅）をこの次より求めることができる。

以上のように、前述のステップ（1）での「平均応力ゼロの応力振幅」求出に関して、一般的にはこのグッドマン線図が広くに使われている。

■ 等価変換モデルは他にもある

前節で説明した等価応力振幅への変換モデル（**疲労寿命等価モデル**）は、グッドマン線図以外にも幾つか提案されている。

参考までに、これについて述べておこう。

代表的なモデルは以下のものだ。

（A）Gerber（Germany, 1874）

$$\frac{\sigma_a}{S_n}+\left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2=1$$

（B）Goodman（England, 1899）

$$\frac{\sigma_a}{S_n}+\frac{\sigma_m}{S_u}=1$$

(C) Soderberg (USA, 1930)

$$\frac{\sigma_a}{S_n}+\frac{\sigma_m}{S_y}=1$$

(D) Morrow (USA, 1960s)

$$\frac{\sigma_a}{S_n}+\frac{\sigma_m}{S_f}=1$$

各モデルを視覚化すると、図3.5のようになる。

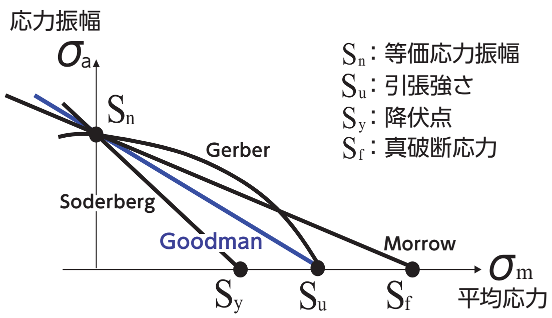

図3.5 疲労寿命等価モデル

それぞれの特徴としては、Gerberが2次式、それ以外のモデルは1次式で成り立っている。

又、X軸交点が引張強さS_u、降伏点S_y、真破断応力S_fである点が大きな違いである。

更に、平均応力が引張の負荷を受けているような場合、以下に示すような特徴がある事も見逃せない。

1. 実際のテストデータではGoodmanラインとGerberラインの間に落ち着く傾向がある。

2. 引張強さS_uと真破断応力S_fが接近している固い材料の場合、MorrowとGoodmanラインは本質的に同じである。

3. 疲労設計する上で最も状況が多い応力比R<1の場合(応力振幅に対して平均応力が小さい場合)、これらのモデルの違いはあまり無い。

各モデルを使い分ける際には、これらの点も留意されたい。

■「応力ー寿命(S-N)」法の特徴とは？

この章ではここまで終始一貫、S－N線図を使った手法を概説してきた。因みに、この手法は「応力・寿命」法(Stress-Life method)、又は**「S－N」法**(S-N method)と言われている。

ここでは、その**「応力・寿命」法**についてまとめておこう。

この手法の強みとしては、次の点が挙げられようか。

1. 計算手法が簡便である。それに関連する必要な材料定数の推定も簡単である。

2. 一定の応力振幅の負荷履歴で長寿命の破損に対し、その予測は結果と良く合致している。

3. 本報ではほとんど取り上げなかったが、材料の表面処理、荷重形態(曲げ、捩りなど)、環境腐食など様々なバリエションに対し、活用できるデータが揃っている。

一方、弱みは以下の点であろう。

1. 実証的経験則に基づいた方法で、疲労メカニズムに対する物理的解釈が殆んど無い。材料や実験方法などで実績データに関して適用範囲外の場合には、活用する際、注意する必要がある。

2. 一定ではない応力振幅の組み合わせを持つ負荷に対し、荷重履歴が異なると、実験結果では破断繰返し数にバラツキが見られる。しかし、この手法ではその点は考慮されていない。

更に、「破損」の定義に関連して、次の点も指摘しておきたい。

3. 疲労現象での過程として、一般的に「小クラックの発生・成長(概ね2mm程度まで)と「破壊までのクラックの成長」と分けて扱われている。この「S－N」法ではこの両者を特に区別していない。従って、「破損」の定義として多少曖昧な点がある。

何れにしろ、諸々の不確かさを考慮して、疲労損傷度の検討・予測には「安全係数」の概念をも含める配慮が必要となろう。