

構造物における疲労

東京大学生産技術研究所* 高橋幸伯**

1. は し が き

構造部材や機械要素が周期的に変動する荷重によって繰返応力を受けるとき、繰返数がきわめて多くなると疲労の現象を起し、一般に (1) 静的破壊または降伏応力よりもはるかに低い応力の繰返しのみでも破壊に至ること、(2) 疲労被害はふつう疲労クラックの伝播という形で進行し延性材料でも巨視的な塑性変形を起すことなく破壊すること、という特異の性質を示すことはよく知られていることである。

材料や構造要素の疲労強度および疲労破壊の機構を調べるには、各種の疲労試験が行われている。疲労試験は一般に簡単な形状の試験片に回転曲げ、平面曲げ、引張圧縮、片振り引張りまたは繰返しねじりなどの繰返荷重を加えるもので、いずれの場合も荷重振幅一定で試験される場合が多い。すなわち、平均応力 σ_m と応力振幅 σ_a がともに一定の試験が大部分である（ここに応力は公称応力をとる）。

この疲労試験結果は、応力 S （ふつう応力振幅 σ_a をとる）と破壊までの繰返数 N との関係を示す $S-N$ 線図として表わされる。試験片形状、荷重形式および材料などによってそれぞれ異なるが、 $S-N$ 線図は両対数目盛で表わすと大体において図1のように2本または3本の直

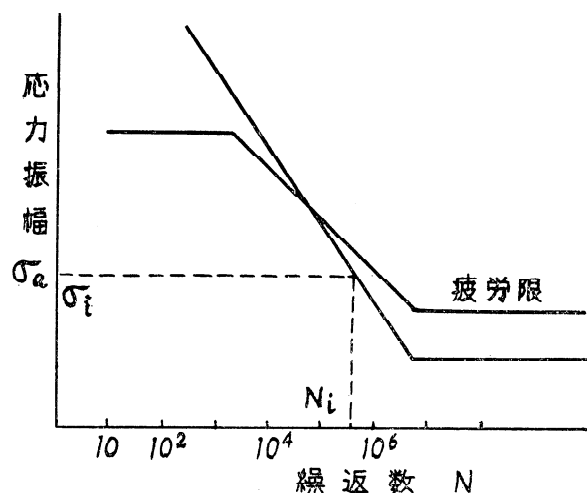


図1 $S-N$ 曲線

* 東京都港区麻布新龍土町10

** 助教授

線からなる折線で近似できるのがふつうである。

回転機械部品のようなものの疲労強度は、このような荷重振幅一定の疲労試験結果に基づいて比較的容易に検討することができる。しかし、車両、航空機、船舶、クレーンまたは橋などのような一般構造物では、単純な応力が定常的に繰返されることはほとんどなく、きわめて不規則な変動荷重の繰返しを受けるのがふつうである。したがって、これらの構造物の疲労強度を解明するには、実物またはこれに近い構造要素の模型について、その実働状態における変動荷重と同様のプログラム荷重を加える疲労試験を行うことが望ましい。このプログラム荷重による疲労試験は、最近各方面、特に航空機部門などで盛んに行われるようになってきたが、これは莫大な時間、労力および経費を必要とする。そこで、やや便宜的な方法として、単一材の定荷重振幅の疲労試験結果（ $S-N$ 線図）と、構造物の実働状態における荷重頻度とを用いて、簡単な累積被害の仮説によって、構造物の寿命の推定または所要の耐用年数を得るための安全な部材寸法の決定を行うという手段が比較的多くとられている。

プログラム荷重試験を行う場合でも、累積被害説を用いる場合でも、構造物の実働状態における荷重の頻度分布を知ることが先決で、荷重頻度の計測方法、計測装置および計測結果の処理方法などについても、最近盛んに研究が行われているようである。

以下に、これらの諸状況の簡単な概観および疲労を考慮した構造物の設計を行う場合に注意すべき事項などについて述べるが、直接構造物の設計製作に当たっている方々の参考になれば幸である。

2. $p-S-N$ 線図

応力振幅一定の疲労試験をまったく同じ条件下で行なっても、破壊を起すまでの繰返数 N に著しいばらつきのあることは周知のとおりである。これは疲労に限らず、材料の破壊現象には一般に同様の現象が認められ、材料の組織敏感性に基づくもので、いかに注意して試験条件を同じにしても免れないものである。すなわち、これらは確率過程の問題として統計的に処理しなければならない問題である。

いま、疲労試験である試験片が応力振幅 S で繰返数 N

回で破壊する確率を p とする。 p は S および N の関数であるが、 S を一定破壊確率として多数個の実験を行い、統計計算をすれば $p \sim N$ の関係を求めることができる²⁻⁶⁾。さきに述べた $S-N$ 線図に p をパラメタとした線図を入れたものを $p-S-N$ 線図と称するが、著者が行なった切欠丸棒の回転曲げ試験⁷⁾による $p-S-N$ 線図の一例を図 2 に示す。

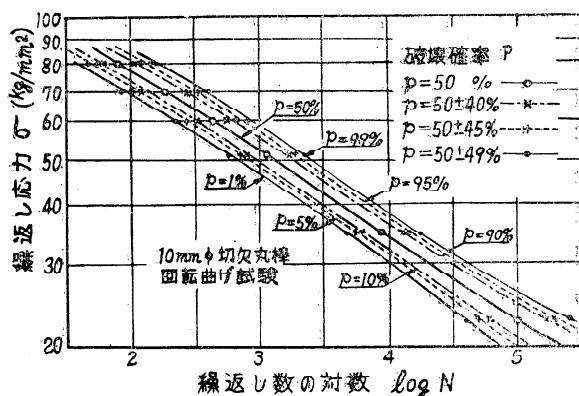


図 2 $p-S-N$ 線図⁷⁾

ふつうに $S-N$ 線図と称する線上の点は $p=0.50$ に対応するもので、応力 S_i では N_i 回の繰返しに耐えることを保証するものではなく、応力 S_i で N_i 回繰返せば 100 個中 50 個は破壊することを示していることに注意しなければならない。 $p=0.01$ の $p-S-N$ 線図を基準とすれば、100 個中 99 個の安全性が保証されるわけで、より定量的な安全度を推定することが可能である。

実際問題としては、 $p-S-N$ 線図を正確に求めるにはきわめて多数の試験を必要とするが、概略的には、 $p=0.01$ および $p=0.99$ に対応する N は、 $p=0.50$ に対応する N の平均値の約 $1/2$ および 2 倍程度と考えてよいようである。他の二三の実験結果⁶⁾ も大体同程度の数値を示しているようである。

応力が低くなって $S-N$ 線図が水平となる疲労限の部分でも、同様に p をパラメタとする多数の水平直線が引けるわけであるが、大体において試験片全個数の 95% は疲労限の平均値の上下 $\pm 10 \sim 20\%$ の範囲内に含まれているようである⁸⁻⁹⁾。

3. 荷重頻度

実際の構造物では、静的な荷重のほかにきわめて複雑な不規則波形の変動荷重が加わるのがふつうである。荷重波形の各種の形式を図 3 に例示するが、¹⁰⁾ (a)~(g) のような簡単な形となることはまれで、一般にはこれらが不規則に組合わさった (r) または (s) のような形のことが多い。

これらの荷重と構造物の疲労とを関連づけるには、実

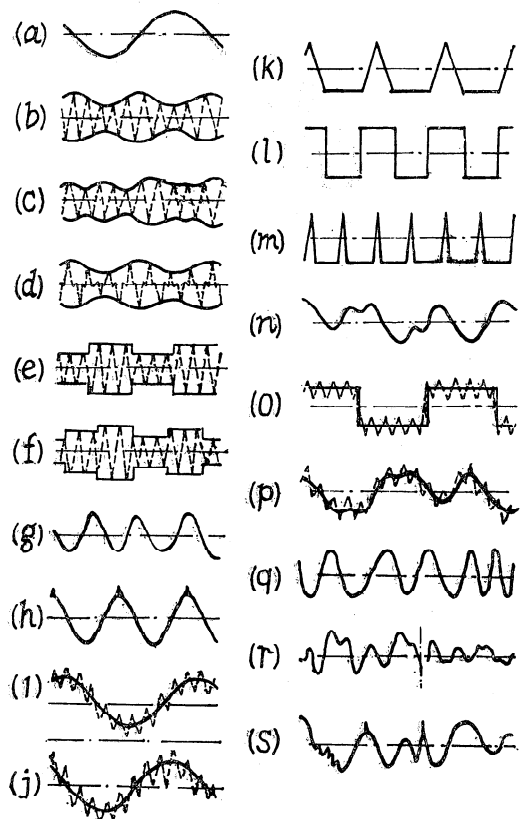


図 3 荷重波形

物について実働荷重による疲労試験ができないとすれば、この荷重波形を何らかの方法で平均応力 σ_m 、応力振幅 σ_a および繰返数 n で簡単に表示できる数多くの波に分解して、これから当面の構造部材の応力頻度分布を求め、これによってプログラム荷重試験を行うか、累積被害の略算を行うかしなければならない。

3.1 頻度計測方法

現在実用されている荷重頻度計または応力頻度計には各種の形式のものがあ、またその開発研究は現在も各方面で盛に行われている。^{11,12)} 計数方式を大別すると、(1)帯域経過頻度、(2)極大値頻度、(3)振幅頻度および(4)経過時間率の各量を計数するものに分類することができる。いずれの場合でも、時間尺度は問題とせず、すなわち、繰返速度とか荷重順序などは無視して、ただ頻度分布だけを求めるのがふつうである。

(1)の経過頻度計数方式のものは、その結果から計算によって極大値頻度を求めるようにしているものが多い。(2)極大値頻度計にも図示のように極大値を全部計数するもののほかに、零レベルを通過するごとに正負の極大値を交互に計数する方式のものもある。(3)の振幅頻度計にも、振幅と同時に平均応力も計数する 2 元的のものもある。前述のように、疲労強度と関連づけるにはこの σ_m と σ_a とを同時に測るこの方式が最も望ましいものであ

る。しかし、これは装置がきわめて複雑になること、プログラム荷重試験がそういう荷重を再現することも困難であり、累積被害の計算も厄介になることなどの理由から、あまり実用はされていないようである。(4)の経過時間率の計測もあまり一般には行なわれていないが、後述する低サイクル疲労強度の検討などには重要な資料を提供するものと考えられる。

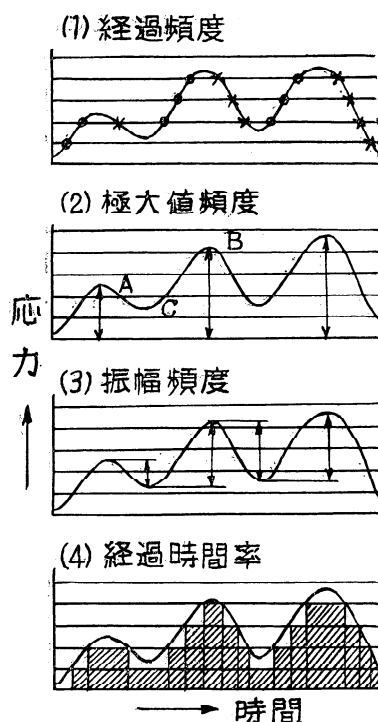


図4 応力の頻度計測方式

いずれにしても、上記のように時間尺度は無視していること、また、装置の性質上図3の(i)(j)(o)および(p)のように大波に重畳している小波や、(r)および(s)中にある小振幅の変動などで、ある程度以下の振幅のものは無視せざるをえないことなどのために、頻度計の計数結果から正確な応力-時間曲線を再現することは不可能である。この小振幅の変動（リップル波）の処置をどうするかについては、まだ統一の見解が得られていないのが現状で、同じ構造物の頻度計測でも、使用する頻度計によって計測結果は相当異なったものとなる可能性がある。

振幅頻度計と極大値頻度計とを比較してみよう。振幅頻度計では一般に平均値の変動は無視しており、どのサイクルもすべて平均値零の上下に変動しているものとして計数するので、実際の荷重-時間曲線よりも低い値の頻度を強調する結果となりやすい。これに反して、極大値頻度計では、図4(2)にみるとおり極大値AおよびBの間に正の谷(C)があっても、Aから零まで下降して再びBに上ってきたものとして計数するわけで、実際の荷重よりも高い荷重値が強調された結果が出てくる。リップル波の多い場合は特にこの傾向が顕著となる。

どの計数方法を選ぶかは、計測しようとする荷重が一般的にどのような波形のものであるかを知ったうえで、それに適したものを決めるべきであろう。

頻度計測装置としては、長期間の安定した動作が強く要求されるので、最近までは主として機械的のピックアップを使用して電磁カウンタで計数するという簡単な方

式のものが多かった。最近では電子管測定機器の急速の進歩に伴って、現象を磁気テープまたは穿孔テープに記録しておいて、実験室において任意の方式の頻度計数を任意に行なうというような方向に進んでいるようである。

3.2 頻度計測例

さきに述べたように、いずれの頻度計数方式によっても、実際の荷重または応力の変動状況を正確に表わすことは不可能であるが、現段階においては各方面で行なわれている頻度計測の概況を紹介しておく。

航空機分野では、構造の軽量化に重点をおくため合理的設計に対する要求がきびしく、また疲労による損傷が致命的な重大事故を起すおそれがあり、またその事例もあるので、この方面の研究は最も活潑に行なわれているようである^{13,14}。図5は機体の応力集中部の1回の飛行中の応力変動を示すもので、航路および飛行回数などが大体決まっておれば、ある期間中の応力頻度は大体推定することができる。

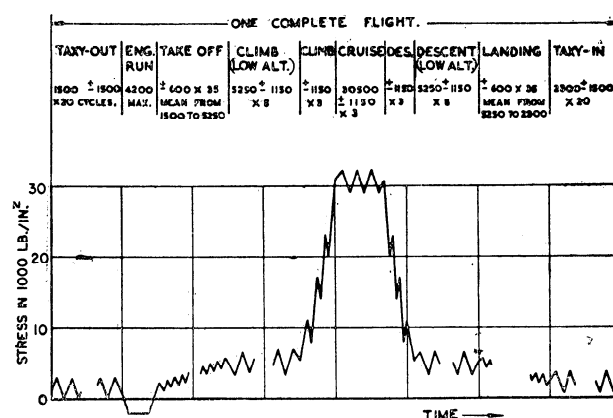


図5 航空機の扉開口隅部の応力変動¹³⁾

自動車構造における応力変動も、わが国のように特に道路事情の悪いところでは相当複雑な問題があるようで、各方面で盛んに計測が行なわれているようであるが、公開されているものは少ない。

鉄道車両構造の応力頻度計測も盛んに行われている。図6は車軸の車輪圧入部の応力頻度の一例である。車両種類、線路状況、速度および荷重などに大きい変化がな

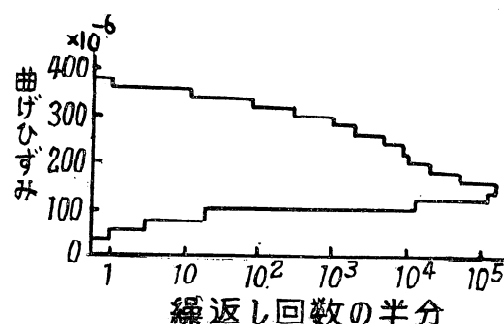


図6 鉄道車両：車軸曲げ応力頻度
(東海道線東京-大阪間)¹⁰⁾

ければ、頻度分布曲線の形はほぼ一定となっている。

橋梁部材の応力頻度計測例を図7に示す。橋梁のように死荷重の相当大きいものでは、疲労の検討をする場合にも σ_m の影響を無視することはできないであろう。(1)と(2)を比較すると、(1)では最小応力がほぼ一定で応力振幅 σ_a が変動し、(2)では平均応力 σ_m がほぼ一定で σ_a が変動しているような傾向が見られる。

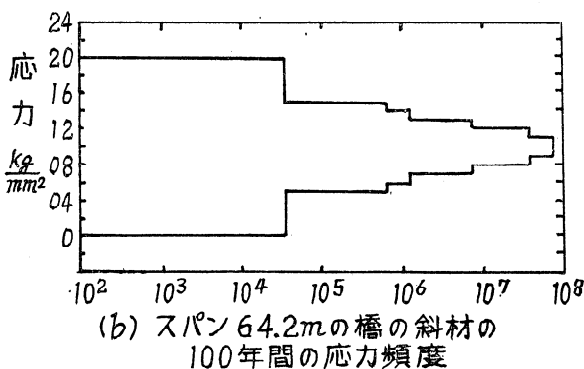
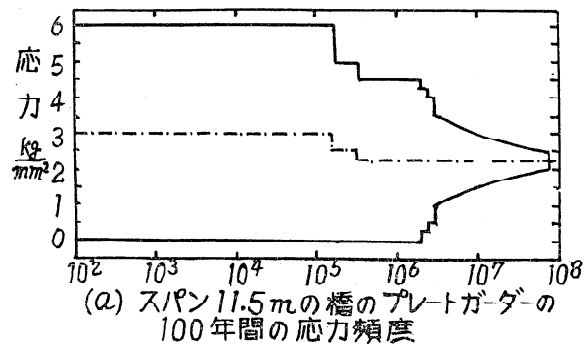


図7 橋りょうの応力頻度計測例¹²⁾

船舶においては、気象海象という不規則変動をする外界条件の影響が大きいので事情は一層複雑である。ある船のある載荷状態については、船速、波高、波長、風力および波や風と船との相対角度などの外界条件がほぼ一定と考えられる短時間(15~30分間程度)では、船体構造部材の応力頻度は、いずれの場合でも図8に示すよう

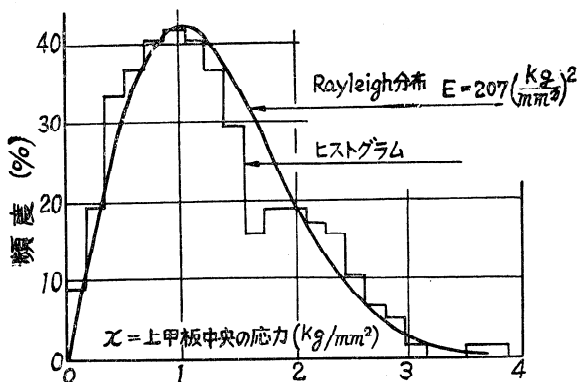


図8 船体応力短期分布例¹⁵⁾
航空母艦、有義波高5m。
向い波、船速6ノット、30分間

な Rayleigh 分布に適合することが確かめられている¹⁵⁾。

この分布形(図中の連続曲線の形)は変動量(この場合は応力) x の自乗平均である E の値によって一義的に定まるもので、精密なヒストグラムを描かなくても、 E の値を求めれば、同じ条件下における応力頻度分布および出現が期待される最大応力値などを推定することができる。そこで最近では、選去15分間程度の間の E の値を刻々自動表示させて操船のモニター用計器として使用している例もある¹⁶⁾。

船体応力の1日間、1航海または1年間というような長期間の応力頻度分布は、ほぼ対数正規分布に適合することも多くの実験から確かめられている^{17~19)}。図9にこ

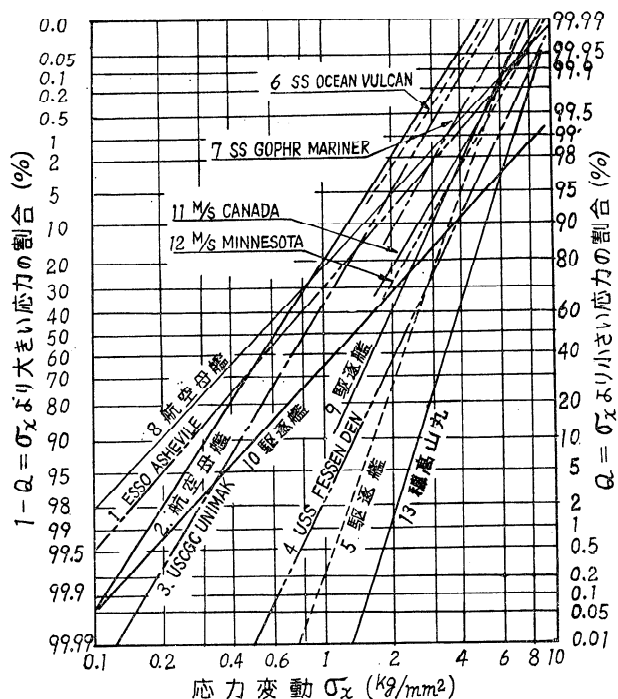


図9 船体応力の長期頻度分布^{17~19)}

れまで各国で各種の船舶についてそれぞれ数年間行なわれた計測結果の若干を示す。横軸に示す応力は、いずれも船体中央部の強力甲板または船底の縦方向の船体曲げ応力(引張り圧縮と交互に変動するが片振幅をとっている)を示す。これは船体応力の基準となるもので、その他の構造細部の応力は、計算または実測によって大体分っている応力集中係数を乗ずることによって推定することができる。たとえば船倉の開口隅部などの不連続部分では基準応力値の約3倍程度の応力を生じている。図9の縦軸 Q は累積確率密度で、全繰返回数のうち σ_x より大きい応力が表われる回数の割合(%)を示すものである。対数正規分布に適合する場合はこのように直線表示することができる。

海象気象なども季節だけでなく年度によっても変動が

あるものであるが、相当多年度にわたる計測結果を集積すれば、その船の生涯を通じての応力頻度と類推することができ、また類似船型の船を設計する場合、所期の耐用年数の間の応力スペクトルを推定することも可能であるので、現在でも世界各国で各種の船舶について応力頻度計測が実施されている。

一方、外界条件および操船条件がわかれば、これに対する応答として応力頻度の短期分布を求めることは、計算でも近似的には可能であるし、実測にもあまり労力を必要としないので、外界条件の頻度分布を求めようという要望が強くなり、その一端として、現在世界の全海面をいくつかに分けて各国が分担して、統一した方法によって海象の頻度解析も行なわれている²⁶⁾。

4. 疲労被害の累積

繰返応力を受ける金属材料の疲労破壊の過程は、巨視的な模型図で示すと一般に図10のようになり、疲労被害

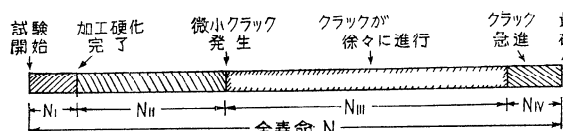


図10 疲労破壊の進行段階

の度合は疲労クラックの進行度で表わすのが最も適しているかも知れない。しかし、試験途中においてクラックの長さを正確に測ることは相当に困難であり、またクラックが検出できない場合でも、X線の組織変化、転位または硬度の変化のような物理的機械的性質の変化を生じていることは確かで、明らかに疲労被害を受けていると考えなければならないこともある。

このように、途中の段階において疲労被害を論ずることはかなり複雑かつ困難であるが、われわれの今の立場では、最終破壊点のみに注目することにする。すなわち、複雑な変動荷重を受ける場合、破壊までの繰返数が実験とよく合うような累積被害の法則が求められればよいとする。設計を目的として提案されている累積被害の法則は数多くあるが、直線被害法則が最も簡単で便利なものではないかと思われる。

直線被害法則はいわゆる Miner の法則²¹⁾と呼ばれているもので、ある試験片の繰返数 N_i に対する時間強度を σ_i (応力 σ_i の繰返しの場合の寿命を N_i) とするとき、応力 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots$ の繰返しを順次 $n_1, \dots, n_2, \dots, n_i, \dots$ 回ずつ受けた試験片 (図3(e)(f)参照) は、それぞれ $n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_i/N_i, \dots$ ずつの疲労被害を受け、

$$D = \sum_i (n_i/N_i) = 1$$

に達すると疲労破壊を生ずるという仮説である。

このような応力の組合せは無数に考えられるが、簡単な2～3段の重複応力による試験は各方面で行なわれている^{22～25)}。これらによると、各応力の値、加えられる順序、繰返数比などによって D の値は必ずしも1とはならず、場合によっては $1/3 \sim 3$ 倍程度のばらつきはあるが、ごく概略的には上式が成立するものと考えて大差なく、不規則変動荷重を受ける構造部材の寿命にある程度の見当をつけるのに有用であるのでよく用いられている。

Miner の法則では、疲労限以下の応力に対しては N_i が無限大であるため被害度は零であると考えているわけであるが、Corten²⁶⁾ らは、疲労限を超える繰返応力によって生じた被害はその後の疲労限以下の繰返応力によって進行するという訂正説を立てている。疲労限以下の応力でも被害に若干の影響のあることは確かめられているが、この仮説はいくらか安全例に選ばれるようにも思われる。

いま、ある部材の1年間の応力スペクトルが図11の①

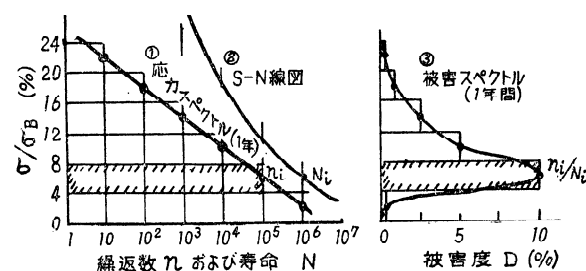


図11 疲労被害計算例¹⁵⁾

のようになり (図では応力振幅 σ と引張り強さ σ_B との比をとった)、またこの部材のS-N線図が②のように得られたとする。直線被害法則が成立するものとすれば、細分した各応力範囲における疲労被害 n_i/N_i は③のようになって被害スペクトルが得られるわけである。図の場合、年間の被害度は $D = \sum (n_i/N_i) = 18.6\%$ となり、 $D=100\%$ で破壊するとすれば、この部材の寿命は5.4年と推定することができる。したがって、応力を小さくするように部材の寸法や形状を変えるか、さらに疲労強度の強い材料を選ぶかする必要があるということになる。

さきに述べたように、②の代りに p -S-N 線図が得られているとすれば、適当に小さい p の値を抑えて、将来の危険性を一層定量的に考慮した設計を行なうことも可能である。また、いま考えている構造部材が構造不連続部に当たって大きい応力集中のある場合、または切欠や溶接欠陥などの存在が予想される場合には、②の代りにそれに相当するS-N線図を用いるか、または①の代りに適当な係数を乗じた応力スペクトルを用いる必要があるのはいうまでもない。

5. 低サイクル疲労

ここで最近よく問題になっている低サイクル疲労について簡単に触れておこう。低サイクルとは、繰返しの周波数が低いということではなく、破壊までの繰返し数が少ないという意味に用いられている。一般にS—N線図のNの小さい方、大体 10^4 回以下程度の範囲を低サイクル疲労と呼んでいるようである。すなわち、高応力疲労とか塑性疲労とかいわれているものがこれである。

構造物では、不連続部分で相当高い応力集中の生ずる場所を絶無とすることはできないのがふつうであるが、荷重がほぼ定常的に変化して、しかも耐用期間中の繰返し数があまり極端に多くなければ、そのような部分の応力まで疲労限以下に抑えて $10^6 \sim 10^7$ 回の繰返しにも安全なように設計することは、経済的にも機能的にも好ましくない。この場合は、その回数に相当する時間強度を基準にする方がより合理的である。また、不規則な変動荷重を受ける場合、構造物によっては図11③に示した被害スペクトルが、もっと高応力域でピークを示すこともある。

実際問題としては、航空機の離着陸時の荷重や突風荷重、超高層飛行時の気圧の差による荷重、熱機関部品などの大きい熱応力に重畳した荷重、船舶の波浪による荷重および圧力容器の圧力荷重等々がこの低サイクル疲労の対象となりうるもので、最近各方面で盛んに研究が行なわれている。

図11で演算したような直線被害法則が成立するとしても、①の応力スペクトルを求めるにも頻度計測方式の項で述べたようにまだ多くの問題があり、②のS—N線図も極めて高応力域のものはまだ十分資料が得られているとはいえない。さらに、低応力域の重複荷重試験に基づいて立てた直線被害法則が、高応力域でも通用するかどうかということもまだ明らかにはされていない。

また、さわめて高応力域では、疲労のほかに動クリープの現象も表われるようになり、荷重の繰返し速度や荷重波形も重要な因子となってくるようである。たとえば、荷重の平均値と振幅が同じでも、図3の(k)と(l)とでは明らかに異なった結果を示す。この荷重の差は現用の頻度計では検出することができず、図4(4)のような経過時間率の計測が望まれるわけである。

6. プログラム荷重試験

これも主として低サイクル疲労に関連して行なわれるものである。高応力域の疲労機構や累積被害については、上記のように未解決の問題が多いため、できるだけ実物に近い構造物について、実働荷重に近い変

動荷重をプログラムによって、加えて疲労を起させようという試験である。相当大規模な実験であるが、最近航空機部門などでは盛んに行なわれている。現段階では、プログラムといっても、荷重は数段階程度で図3(f)のような定振幅荷重を順次重複して加える方法がとられており、荷重順序の影響などは考えられていないのがふつうである。

しかし、今後の荷重頻度計測装置およびプログラム制御装置などのめざましい進歩によって、この種の試験は一層普及し、大きい成果を挙げるものと期待される。

7. 疲労設計

構造物の設計に当って、(1)その耐用期間中の荷重頻度、(2)荷重が与えられたときの各部の応力分布、(3)部材の疲労強度(S—N線図)などが明らかにされているとすれば、これまで述べてきたように、累積被害法則を用るか、あるいはプログラム荷重試験を行なうかして、疲労を考慮した、ある程度合理的な設計を行なうことができる。

実際問題としては、荷重または応力の値や頻度が設計段階において正確に求められているということは少なく概略値が推定できるに過ぎないことが多い。また、荷重が判明したとしても、形状の複雑な構造物では応力計算も近似的にしかできない場合が多く、実物または模型で計測するにしてもある程度の誤差はまぬがれない。さらに、製品寸法の不整、加工のミス、熱応力または残留応力の存在などによっても応力推定値の誤差は増大する。またS—N線図の方も、実物またはこれに近い構造模型での疲労試験を一々行なうのは容易でないので、素材試験片または簡単な構造要素の試験結果から類推しなければならぬことが多い。累積被害法則やプログラム荷重試験についても問題点のあるのは前述の通りで、なお今後の研究が期待されている。

さらに一步後退して、荷重または応力の頻度分析が明らかでない場合は、従来もよく用いられていたいわゆる耐久線図で大体の見当をつける程度のことしかできない。図12は耐久線図の1例で、縦軸に応力振幅 σ_a 、横軸に平均応力 σ_m をとったものである。ここで、 $\overline{OB}$ は

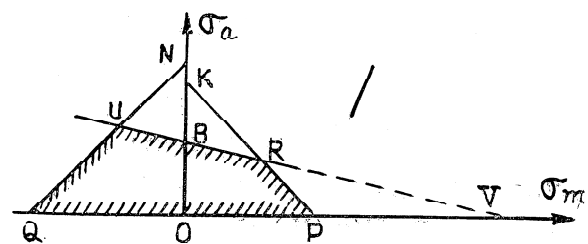


図12 耐久線図

両振りの引張圧縮疲労限, $\overline{OV}$ は引張り真破断応力, $\overline{OP}$ および $\overline{OK}$ は引張降伏応力, $\overline{OQ}$ および $\overline{ON}$ は圧縮降伏応力とすると, 斜線部が静的降伏および疲労の両方に対して安全な範囲を示すことになる. 耐用期間中に予想される最大応力がこの範囲内にあるようにすれば安全というわけであるが, 荷重変動の多い構造物では, 疲労に対してあまりに安全すぎる設計となってしまうおそれがある. 荷重頻度についていくらかでも情報が得られれば, より合理的な設計を行なうことができる. これに関連して, 図12の $\sigma_a - \sigma_m$ 軸のほかさらに繰返回数軸を加えた3次元表示の耐久線図(屋根形の曲面)²⁷⁾を求めようという動きも, 低サイクル疲労研究の一環としてあるようである.

これまで述べてきたことはすべて単純な応力状態の場合であったが, 実際の構造物では多軸の組合せ応力の場合が多く問題はさらに複雑となってくる. 定常的な繰返しの場合は, いろいろ提唱されている組合せ応力における各種の破壊条件式のうち適当なものを選べばよい. 不規則変動荷重を受ける一般の構造物では, それほどの手数をかけるに十分なほどの情報が得られない場合が多く, 単純応力として大体的見当をつけるのがせい一杯というのが現状のようである.

構造要素のなかには, 構造の主要強度部材であって, その振幅が構造全体の致命的欠陥となるものと, 構造の強度にあまり関係のない副次的な要素とがある. 後者のような部材は, 多少疲労被害を受けてクラックを生じたとしても, 構造物の機能にはなんら影響を与えないものもあるわけで, これらは放置しておいてもよく, また適当な期間ごとに検査して重大な欠陥にまで進行する前に適宜修理とか取替えとかの処置をすればよいという考え方も可能である. 静的荷重に対して部材の一部が降伏しても構造物が崩壊しなければよいとする塑性設計の考え方に相応する方法を, 疲労の場合にとってもよいと思われるものが相当ある.

最近の構造物における疲労の研究は, このような fail safe の考え方でできるだけ経済的に能率よく部材配置をして機能の向上をはかることを目的として出発したものと, 現実に既存の構造物に生じた疲労被害と考えざるをえないような損傷例から, その被害発生過程を明らかにして対策を講じようという立場から出発したものとがあるようである. いずれの場合にも, ほぼ定常的な繰返応力を受ける機械部品などとは異なり, 一般の構造物では, 実働荷重のスペクトルを求めること, および低サイクル疲労の機構を明らかにすることが先決問題である.

構造物設計に当っては繰返応力に対して十分の疲労強

度を有するとともに, 予想される最大応力に対して静的計算でも十分安全である必要があるのはもちろんである. この最大応力は前述の通り定め難いものであるが, 最近疲労に関連して盛んに行なわれている荷重頻度の計測資料から統計的に比較的信頼度の高いものを得ることは可能である. この場合, さきに述べた頻度分布曲線から外挿して求めるよりも, 最大値分布理論によって推定する方法²⁸⁾の方がより信頼度の高いものが得られるようである.

構造物では, 応力伝達が一連続になって高い応力集中の避けられない部分を皆無とすることはできないのがふつうで, 疲労クラックなども人部分はこのような応力集中部に生じている. こういう部分の形状や寸法を改良して応力集中率を低下させること, 溶接, 機械, 加工などの工作を入念にして欠陥を作らないようにすること, 必要があればその部分に疲労強度の高い材料を用いることなども十分考慮しなければならぬ点である.

このほか, 高張力鋼その他の新しい構造用鋼材の疲労強度, 溶接継手の疲労強度, および塑性疲労強度なども, 構造物の疲労を論ずる場合きわめて重要な問題であるが, まだ研究の初期段階にあるものが多く, 今後の強力な推進が期待されている.

文 献

- 1) 平田森三; 機械の研究, 1—5, 1949.
- 2) W. Weibull; Trans. Royal Inst. Tech. Stockholm. No. 27, 1949.
- 3) A. M. Freudenthal & E. J. Gumbell; Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 216, 1953.
- 4) W. Weibull; Fatigue in Aircraft Structures, Academic Press, 1956.
- 5) 河本実他; 材料試験, 9—87, 1960
- 6) 横堀武夫; 材料強弱学, 技報堂, 1955.
- 7) 高橋幸伯; 造船協会論文集, No. 108, 109, 110; 1960—61.
- 8) E. Epremian & R. F. Mehr; ASTM. Spec. Tech. Pub., No. 137, 1953.
- 9) 機械学会材料力学, 機械材料部門委員会報告, 機械学会, 1961.
- 10) 中村宏; 機械学会誌, 64—513, 1961.
- 11) 応力頻度測定に関するシンポジウム前刷, 日本非破壊検査協会, 1958.
- 12) T. Hass; I I W Document, XIII-315-63, 1963.
- 13) "Fatigue in Aircraft Structures", Proc. of Intern. Conf. on Fatigue in Flight Structures, 1956, ed. by Freudenthal, Academic Press Inc., 1956.
- 14) "Full Scale Fatigue Testing of Aircraft Structure", Proc. of Sympo. 1959, ed. by Plantema & Schijve, Pergamon Press, 1961.
- 15) N. H. Jasper; Trans. Soc. Naval Arch. & Mar. Engr., Vol. 64, 1956.

- 16) Shen-Lun Chuang ; David Taylor Model Basin Rep. No. 1560, 1962.
- 17) N.H. Jasper ; David Taylor Model Basin Rep. No. 1537, 1961 ; Rep. of the Commit. on Response to Wave Load, Intern. Ship Structure Cong. 1961.
- 18) R. Bennet ; European Shipbg., Vol. 8, No. 5 & 6, 1959.
- 19) 秋田好雄, 石山一郎 ; 造船協会論文集, No. 105, 1959.
- 20) Rep. of the Commit. on Environmental Conditions, 2nd Intern. Ship Structure Cong., 1954. (予定)
- 21) M.A. Miner ; J. Appl. Mechanics, Vol. 12, No. 3, 1945.
- 22) E.W.C. Wilkins ; Colloq. on Fatigue, 1955, ed. by Weibull, 1956.
- 23) A.M. Freudenthal & R.A. Heller ; Fatigue in Aircraft Structures, ed. by Freudenthal, Academic Press, 1956.
- 24) 材料試験協会 疲労部門委員会 ; 材料試験. 8—72. 1959, p. 684—725
- 25) 材料試験協会 疲労部門委員会 ; 同上, p. 726—761.
- 26) H. T. Corten, C. M. Sinclair & T. J. Dolan, Proc. ASTM, Vol. 54, 1954.
- 27) 多田美朝他 ; 溶接学会 溶接疲労強度研究委員会資料, FS 資料 115—62, 1962.
- 28) I.M. Yuille ; Trans. Roy. Inst. Naval Arch., 1962.