

# 1 章

## はじめに～材料の強度評価

一般の構造用材料での疲労破壊<sup>注1)</sup>を防止するためには、破断予想面での引張応力・曲げ応力などの基本的な応力値に切欠係数をかけた値を求めて、その値を疲労強度<sup>注2)</sup>以下に抑えるように設計すればよい。この技術はきわめて簡単なため、このことを知っているだけで疲労破壊の防止を簡単に着実に行うことができる。

しかし、引張強さが1,000 MPaを超える高張力鋼レベルの材料や、ガラスに代表される脆性の強い材料、さらにはクラック状の高応力集中部を持つような部材に対しては、切欠係数を利用する対策方法だけでは疲労破壊を抑え込めない。これらの部材では、材料の強さを表す性質の強度のほかに、脆さを表す性質である靱性に対する検討を併せて行わなければならないからである。そのための解決方法は、「破壊力学を応用すること」であるのだが、この技術を知っているのは企業内の強度評価の専門技術者とごく一部に限られている。

破壊力学は、もともと脆性材料の内部に存在または発生するクラックの強度を検討する技術である。クラック先端は弾性計算による応力値が無限大になり、その強度評価に応力値が利用できないために開発された。しかし、クラックを応力集中の極端に大きい状態と考えることにより、破壊力学の対象はクラックに限られず、応力集中が非常に高い切欠きなどからの脆性破壊や疲労破壊の発生防止にも適用できることがわかってきている。

本特集では、主に疲労破壊を確実に防止するための強度評価に焦点を当て、そのための簡単な破壊力学の利用方法について紹介し、応力集中係数・切欠係数を使わずに疲労破壊発生を防止する方法について具体的に紹介する。

なお、バックデータや式の誘導などは説明の簡

略上、省略したところが多いが、もし興味があれば文献1)を参照するとよい。

### 強度評価の基本

構造物に静かに増加する単調な荷重や規則的に増減するような繰返し荷重が作用する場合、構造物がそれらの荷重に対して壊れないようにするためには、荷重を受けた構造部材に発生する引張応力・曲げ応力などの基本的な応力を計算し、それらの応力が材料の持つ引張強さや疲労強度などの限界値を超えないように設計すればよい。

$$\text{発生応力} \leq \text{限界値}^{\text{注3)}} \quad \dots (1.1)$$

このように構造物の破壊を防ぐために、発生応力が限界値を超えないようにすることを強度評価（または強度検討）と呼んでいる。

### 強度の限界値

引張強さや疲労強度などの値は、材料での発生応力がこれらを超えると破壊現象を起こす限界の値であるので、ここではそれらを「限界値」と呼ぶことにする。もし発生応力がこれらの限界値を超えたならば、その部材には破壊が発生する。その破壊の仕方は、同じ材料、同じ形状の部材であっても荷重の作用の仕方や発生応力の種類によって異なる。静かに増加する荷重で発生するのは静的破壊、繰返し荷重で発生するのは疲労破壊である。このような破壊の仕方に対応した限界値としては、ほかに耐力（降伏応力）、衝撃強度などがある。

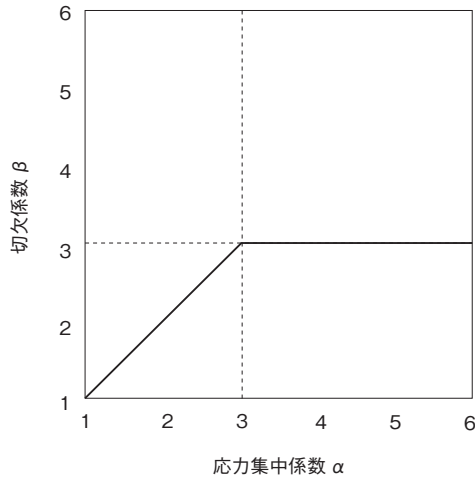


図1 応力集中係数 $\alpha$ と切欠係数 $\beta$ の関係

### 応力集中部の強度

切欠きのような応力集中が発生する場所でも、強度評価の基本は変わらない。しかし、応力集中がある場合には、ない場合に比べて強度が低下することを考慮しなければならない。そのためには、基本的な応力を計算した後に、応力集中係数 $\alpha$ から推定される切欠係数 $\beta$ <sup>注4)</sup>をかけた値が限界値以下となるように設計すればよい。

$$\text{発生応力} \times \beta \leq \text{限界値} \quad \dots (1.2)$$

### 応力集中と強度低下率の関係

通常使用される引張強さが600 MPa以下の構造用材料では、 $\beta$ の値は $\alpha$ が1~3の範囲では $\alpha$ に比例するが、3を超えると比例しなくなり、図1に示すように、 $\alpha$ がいくら大きくなっても、たとえ $\alpha$ が無限大となっても $\beta$ は3止まりという性質がある<sup>注5)</sup>。

設計者の立場から見れば、設計の初期で $\alpha$ の値がわからない場合であっても $\beta$ は3を超えないので、次の式(1.3)が成り立っていれば破壊が発生する心配はないのである。

$$\text{発生応力} \times 3 \leq \text{限界値} \quad \dots (1.3)$$

このことを知らずに切欠縁に発生する最大応力値を限界値以下に抑え込もうとするのは、 $\alpha$ が3

を超えたような切欠きでは過剰な設計になって無駄を招くということを意味している。特に $\alpha$ が無限大の場合には、応力が使えないので、このようなこともできない<sup>注6)</sup>。しかし、式(1.2)や式(1.3)を理解して実設計に利用できるようになると、5章で説明する寸法効果の影響を除いては、疲労破壊防止対策が簡単に、確実に、経済的に行うことができるようになる。

### 意外なところに顔を出すのが「靱性」

応力集中係数 $\alpha$ がある値に達するまでは強度低下はそれに比例し、そのある値を超えるとそれ以上は比例せずに一定値に落ち着くという現象は、材料の強度が必ずしも引張強さや疲労強度のようによく知られている強度の限界値からだけでは推測しきれず、別の要因が入り込んできていることを意味している。この別の要因の大きなものが、材料の粘り強さや脆さを表す「靱性」という性質である。

日常生活では、身の回りの多くのもの、特に電気製品・機械製品が粘り強い材料でできているので、それらから脆さを感じることはまずない。しかし、スマートフォンなどの電気製品を落とすときなどは、衝撃によってこの脆さが現れてくる。

その代表格は何と言ってもガラスだろう。ガラスは構造部材には積極的に使用されてこなかっ

たが、最近ではスマートフォンやタブレットのディスプレイには普通に使用されるようになっていく。このほか、身近なところでは家庭のキッチンにある茶碗や湯飲み、丼鉢などの陶器の食器類が挙げられる。

脆さが現れる機械構造材料としては、このほか鋳物、ダイカスト合金が挙げられる。また鉄鋼材料でも、引張強さが1,200 MPa以上の超高張力鋼では脆さが現れるようになり、疲労強度などが比例的には大きくなる。材料としては脆くなくても、内部にクラック状の欠陥があると、そこが原因で脆性破壊が発生する。溶接の不溶着部やプラスチック部品同士の接着不良部などがこれに当たる。さらに機械構造の設計者にとって重要となるのが、高応力集中部からの破壊である。応力集中が高くなると、クラックに近い状態に近づいていくので、設計者が気付かないうちに脆さが現れてくるのである。

これらの場合には、 $\beta$ は3を超えることも多く、式(1.3)による検討だけでは疲労破壊の発生を防ぐことができない。脆い材料が破壊するときは、応力が弾性状態であっても発生しやすいという特徴がある。

## 靱性が原因の破壊現象の捉え方～応力拡大係数( $K$ 値)と破壊靱性値( $K_{IC}$ 値)

このような靱性を扱わなければならない強度評価では、応力と強度の限界値との対比による評価には無理が生じてくる。そこで考え出されたのが、応力の代わりに応力拡大係数( $K$ 値)、強度の限界値の代わりに破壊靱性値( $K_{IC}$ 値)を使用してクラックの強度評価を行うという方法であり、これが破壊力学である。破壊力学を利用した強度評価では、寸法効果の影響も解決することができる。詳細は2章・3章で解説する。

注3) この評価式には安全率も考慮しなければならないので、「発生応力 $\leq$ 限界値/安全率」と書くべきなのだが、本特集では安全率については省略する。

注4) 切欠係数は、本来、疲労破壊での応力集中による強度低下率を指している。しかし、超高張力鋼やガラス材などの靱性を考慮しなければならないような材料を除けば、脆性材料の静的破壊にも適用できることがわかっている。本特集では静的破壊の場合にも切欠係数という用語を使用する。

注5) これは応力集中と強度低下の関係として有名な現象である。昨今のCAEの普及によって、その利用者は精度よく応力を求める技巧を教えられる。しかし、応力集中が強度低下に及ぼす影響については教えられない機会がほとんどないので、その知識がないことが多い。その結果、切欠縁に発生する最大応力ばかりに注目してこれを精度良く求め、限界値以下に抑え込もうとする場合が多いのだが、このようなことを行くと、部材の寸法がどんどん大きくなるという事態を招く。CAEツールはきわめて高価である場合が多く、これを購入する経営者は、部品が小さくでき、コストダウンが実現できることを期待するのだが、結果はその逆となり、部品がどんどん大きくなるという事態を招いているのも、原因はここにある。

注6) 応力集中係数が無限大になるということは、切欠きでの最大応力値も無限大になるということである。「応力値が無限大になるようなことがあるのか」といえば、実は機械装置のあちこちで無限大の応力は発生しているのである。その場所とは、簡単に言えば、クラックのような尖った切欠部や2つの部材の結合部などである。では、そのような部分は壊れる運命を免れないのか、といえば、決してそうでもないのである。このことについては、3章にて説明する。



注1) 材料力学での破壊とは、「構造物に荷重が作用した場合に、力や影響が加わることによりその構成部材の性質が変化して元に戻らないこと」を指す、幅広い意味の用語。日常生活上の破壊はかなり衝撃的な現象だが、たとえば材料の降伏現象も破壊のうちに入る。

注2) JIS用語では、疲労は疲れ、強度は強さと呼ぶことになっているが、本特集では多くの製造業で普通に使われている馴染み深い用語を用いることにする。