

〔連載講座〕子供では分からない優しい科学

第6回 「強い」と「弱い」(4)

2.6 真応力と真歪み

先に述べた応力の定義では、応力 () とは付加された荷重 (F) を断面積 (A) で割った値で定義されています (2.1 参照)。すなわち、

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

です。ところが実際には、たとえば引張試験を行ってある加重を付加した場合、加重 F に対応してある歪みが生じ、断面積が変化します。1cm 角で 10cm 長さの棒を 11cm まで引き伸ばしたとすると、体積が変わらなければ、断面積は $10/11\text{cm}^2$ 、すなわち、一辺は約 0.953cm に縮みます。したがって、定義からすると、正確な応力は付加加重をこの断面積で割らねばならないはずですが、しかし、この測定は簡単にはいきません。なぜなら、どの程度縮むかは材料によって微妙に異なるからです。縦横の歪みの比をポアソン比と呼ぶことは先に述べました。この値は約 0.3 付近にあることが多いのですが、材料によって微妙に異なっています。つまり、材料によって縮み方が異なるのです。時々刻々変化し、しかも材料毎に異なる断面積の変化が起きるとすれば、これを測ることは通常かなり困難です。そこで私たちは普通、付加加重を最初 (加重を付加していない) の断面積で割ることで、応力としているのです。これなら簡単に測定できるからです。これを「公称応力」といいます。正確ではありませんが、大雑把な目安にはなるからです。また、正確な応力を算出しなければならないようなシビアな使い方をされるケースは実際上ほとんど無いからです。しかし、公称応力はその材料に加わっている正確な力 (応力) ではないことは、是非とも知っておく必要があります。その時の実際の断面積で割った値は「真応力」と呼びます。厳密な力学的取り扱いをする場合には重要になります。

一方、歪みについても似たような状況にあります。長さ l のものが u だけ歪んだとすると、その歪み (ϵ_n) の定義は次式の様です (2.2 参照)。

$$\epsilon_n = \frac{u}{l}$$

たとえば、長さ 10cm のものを 11cm まで歪ませたとすると歪みは 10% です。ところが、この 11cm まで伸びたものをさらに 1cm 伸ばして 12cm にしたとすると、このときの歪み量は $1/11$ で 9.1% です。歪みもまた時々刻々変わっているのです。これまた、実際に厳密な測定をするのは困難です。そこで大抵は、最初の寸法を基準に歪みを算出しています。これを「公称歪み」といい、時々刻々変化する真の歪みを「真歪み」といいます。歪みが

小さければ両者の差は少なくなりますから、実用上はこれで十分です。

真応力も真歪みも、測定には困難を伴いますが、厳密な科学的考証には欠くことのできない重要なものです。そこで、必要なときにはこれを算定できることが必要です。体積一定(応力や歪みの変化が小さいときは近似的に成り立つ)を仮定すると、真応力、真歪みは公称応力、公称歪みから次式のように換算できます。

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{Fl}{A_0 l_0} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon_n) = \sigma_n (1 + \varepsilon_n)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_n)$$

ここで、 σ が真応力、 ε が真歪み、 σ_n 、 ε_n が公称応力、公称歪みです。取りあえずは必要ありませんが、簡単に測定できる公称応力、公称歪みから、学問的に厳密な真応力、真歪みが算定できる(近似的に)ことは記憶に留めておくべきです。

なお、単に「応力」「歪み」と呼ばれたり書かれたりするときは、概ね「公称応力」「公称歪み」のことです。

2.7 硬さ

ある材料の「強さ」は、上述したように、普通は引張試験のような方法で算定されます。しかし、より簡単には「硬さ」を測ることで算定できます。硬さは先の尖ったダイヤモンド、あるいは硬い鋼球(これらを圧子といいます)を、材料の表面に押し込むことで測定されます。圧子が材料中に深く沈むほどその材料は弱く、降伏強さは低いことを意味します。真の硬さ H は荷重 F を圧痕の投影面積 A で割った値として定義されるのが普通である(図10 M. F. Ashby and D. R. H. Jones : Engineering Materials、 Pergamon Press、 (1980). (材料工学入門：堀内良、金子純一、大塚正久訳、内田老鶴圃、(1985).による)。やや大雑把な目安ですが、硬さと降伏強さには次のような関係のあることを覚えておけば便利です。

$$H = 3\sigma_y$$

なお、硬さの測定はセラミックスのような固く脆い材料の降伏強さを推定する優れた方法であると同時に、材料を壊すことなく強さを測定する(推定する)極めて簡単で安価な方法でもあります。

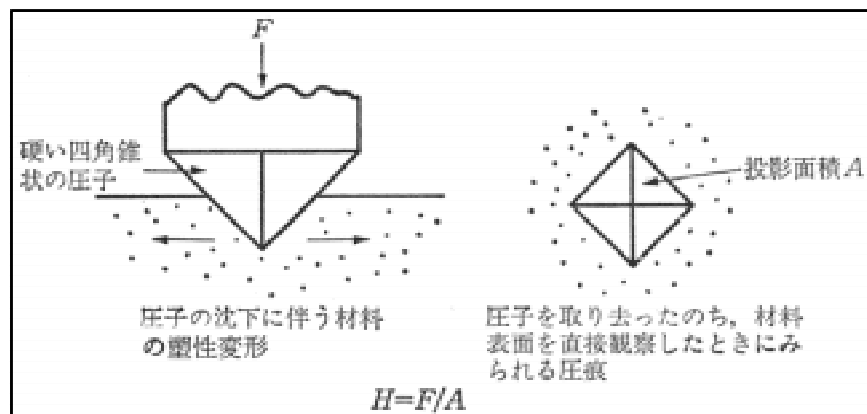


図10 降伏強さを藻詰める硬さ試験法

2.8 破壊靱性

「強さ」とは何かについてざっとしたお話をしてきました。強さとは、ある材料が壊れるまでに付加しうる力(応力)であるといえます。材料毎に異なる特性です。「弱さ」という学問的概念はありません。弱いとは強くないことです。

一般的にいう強い、弱い概念には、しかしながら、若干注意しておくべき事柄があります。私たちが「強い」と感じるのは、大きな力にも耐えて壊れないことです。この文学的表現である「強い」には、単に耐えられる力の限界が大きいのみならず、簡単には最終的な破壊に至らないという概念も含まれています。耐えられる力が大きい(降伏強さが大きい)ということと、簡単には最終的な破壊に至らないということは、学問的には異なる概念です。実用上、このことは十分に承知しておく必要があります。なぜなら、通常、降伏強さの大きい「強い」材料ほど、「壊れやすい」傾向にあるからです。詳しくは別に述べますが、簡単に「壊れやすさ」の概念について述べておきます。

2.8.1 破壊の様式

降伏強さ以上の力が加わるとものは壊れます(破壊といえます)。この破壊は表2のように進行します。

まず、破壊の核となるき裂(クラック)が発生します。その後、このき裂が徐々に広がっていき安定なき裂成長が起きます。そして最後に、残った部分が一気に破断してしまう不安定なき裂成長が起き、最終的な破壊に至るのです。この各段階に影響する主な因子は表2に示すようなものですが、その詳細はまた別の機会に述べます。ともあれ、色々な因子が影響して、降伏強さよりもずっと小さな応力の下で、破壊に至る最初のステップであるき裂が発生します。次に、やはり降伏応力よりも小さな応力の下でこのき裂が徐々に広がっていきます。き裂

とは文字通り裂け目のことですから、き裂を有する材料はその部分において既に局部的には破断しており、残る部分だけで外力に耐えていることになります。こうした材料は、残る部分が耐えられる強さ以下の外力であっても、ある限界以上の外力が加われば一気に破断に

表2 破壊の進行様式

1. き裂の発生	腐食 摩耗 表面の凹凸 脆い結晶粒界 転位の堆積 固溶ガスの反応
2. 安定き裂成長	静的応力下でのき裂成長 クリープ条件下 環境の影響下(応力腐食) 疲労
3. 不安定き裂成長	脆性破壊 局所くびれのない延性破壊 局所くびれを伴う延性破壊(ディンプル破壊)

至ります。これが不安定なき裂成長と呼ばれるもので、その最大速度は音速にも達する急速なものです。したがって防ぎようが無く、怖いのです。

2.8.2 破壊靱性値

この最終的な破断を引き起こす外力の目安は「破壊靱性」という概念で表現されます。この分野の基礎の一つとなっている「グリフィスの脆性破壊条件」によれば、

$$K = \sigma(\pi a)^{1/2}$$

と表すことができます（ σ は外力、 a はき裂の長さです）。ここで、 K は「応力拡大係数」と呼ばれる値で、存在するき裂が最終破壊を導くときの指標となる値です。この K 値がある限界 K_c に達したとき、最終的な破壊が起きるのだとされています。 K_c は「破壊靱性」と呼ばれ、

$$K_c = (EG_c)^{1/2}$$

で表されます（ E はヤング率、 G_c は破壊の全仕事量です）。

この K_c 、すなわち破壊靱性は材料の破壊しやすさを表す材料常数と考えられており、この値が小さいほど容易に最終的な破壊が起きるとされているのです。この二つの式から分かるように、ある外力が加わったとき、存在するき裂が大きいくほど K が大きくなり、限界値 K_c に容易に到達します。つまり、壊れやすくなります。き裂とは繋がっていない部分ですから、当たり前のように見えますが、実際は残る部分の耐えられる力よりも遙かに小さな力で破断します。また、 K_c 値が小さいほどあるき裂の大きさに対応する外力は小さくなりますから、壊れやすいのです。

この K_c 値は実験的に求めることが出来ますが、実験的にも理論的にも、どうやら材料の持つ「強さ」の指標である降伏強さに比較すると、反比例的な関係にあるらしいのです。すなわち、「強い」と評価されるような材料ほど K_c 値は小さい、つまり、壊れやすいようなのです。

これは実用上、重大な問題です。我々がモノ作りに携わるとき、少々乱暴に扱っても、予期せぬ大きな力が加わっても、十分耐えうるように設計します。安心して使うためには必要なことです。そこで、十分に「強い」材料を選択することになるのですが、こうした材料ほど壊れやすい、すなわち、脆いということなのです。

2.8.3 破壊事故

一般にいう「強い」という評価には、上記した「脆さ」は入っていません。しかし、この両者を十分に考慮しなければ、安全なモノ作りは出来ないのです。一二の実例を上げておきます。

最近、遊園地のジェットコースターが事故を起こし、犠牲者が出ました。車軸にき裂が生じており、走行中に車軸の折れたのが原因でした。き裂の発生原因は長年の使用による

金属疲労き裂でした。長期にわたって点検を怠っていた施設側の責任は明白で、点検さえしていれば防げたのです。

「金属疲労」の詳細は省略しますが、長年の使用で出来たき裂は、上述した式のき裂長さ a として「応力拡大係数 K 」を大きくします。車軸は重要部品の一つですから、安全のために強く丈夫な材料が選択されています（一般的には降伏強さの大きな材料）。ところが、この種の材料は一般的に破壊靱性値 K_{Ic} が小さいのです。したがって、小さな傷があっても破壊しやすく、大きな力が加わる（本来の材料を壊すほどでなくとも）と破壊しやすくなります。表2から分かるように、実際の破壊は、それが起きる前にき裂の発生とその安定な成長が起きます。この段階でき裂を見つけることが出来れば予防できるのですが、見かけ上強い材料ほど、小さなき裂でも破壊しますので見つけにくいのです。「丈夫な材料を使っているから」大丈夫ではありません。むしろ逆で、そうした場合ほど、普段の整備点検が重要だということを知っておくべきです。

もう一つ、最近の航空機は非常に安全な乗物です。他の交通機関より事故率は遙かに少ないのですが、最初からそうだったわけではありません。過去の事故の反省から、徹底的に整備点検が行われるように義務付けられるようになったからです。航空機は空を飛ぶモノですから、軽いというのが一つの絶対的な条件です。そのために、設計には十分な余裕を持たせられません。破壊に繋がるき裂が絶対に生じないような設計も理論的には可能ですが、それでは飛行機が重くなりすぎて飛べないからです。そこで、破壊の元となるき裂が発生しないようにするのはではなく、発生したき裂が不安定な成長を起こす前に、き裂を見つけられるように整備点検するのです。不安定な成長前にき裂を検知し補修修理することで、航空機は安全を確保しています。

航空機部材の材料選択にも工夫があります。たとえば、翼の表皮はアルミニウム合金製が普通ですが、上面と下面では材料の種類が異なります。上面は超々ジュラルミンと呼ばれる Al-Zn-Mg 系の材料が、下面はジュラルミン Al-Cu-Mg 系の材料が選定されます。超々ジュラルミンの方が普通のジュラルミンより降伏強さは大きいのですが、破壊靱性値は小さく、丈夫でも壊れやすいのです。そこで、上面は超々ジュラルミンで作ります。なぜなら、翼に上から下に力が働くのは、翼の自重が加わる地上に駐機している場合のみだからです。万が一地上で壊れても、被害は最小限に抑えられます。一方、翼に下から上に力が働くのは飛行中です。飛行機は空気の揚力で飛ぶからです。飛行中に翼が損傷すれば致命的な大事故に繋がります。そこで、翼の下面は超々ジュラルミンより降伏強さでは劣るが、破壊靱性値は大きくて壊れにくい普通のジュラルミンが選定されているのです。

2.9 強いと脆い

以上述べたように、基本的にいえば、ある材料はその材料に固有の「強さ」を持っています。この「強さ」は一般的には、引張試験のような静的な（静かな）力を加えるる試験

で測定される「降伏強さ」を指標として評価されます。一般にいう強い材料とは、この降伏強さの大きな材料です。

学問的には「弱さ」というのはありません。強くないのが弱いのです。

実用的には、「強さ」に劣らず重要なのが「脆さ」です。これは普通、「破壊靱性」を指標に評価されます。「強い」ほど「脆い」という反比例的関係にありますので、要注意です。

強いとか弱いとかを評するときには、「強さ」と「脆さ」の両面を見ることが必要と、是非とも覚えておく必要があります。例示的にいうと、「ガラス」の降伏強さは「鉄」よりも大きいのですが、金槌で叩くとガラスは簡単に割れ、鉄は曲がるか凹むだけです。鉄の破壊靱性の方がガラスより遙かに大きいからです。

最後に一つ注意事項です。破壊靱性値は「 $\text{Nm}^{-3/2}$ 」という単位を持っています。先の「単位の話し」でも述べたように、理論的にはこのような単位は存在しません。つまり、応力拡大係数や破壊靱性といった破壊に関する理論や量は、まだ明確な科学的根拠を持っていないのです。実用的に極めて有用だから、ということで使われているのです。「実用的」ということは大きな意味を持っていますが、少し注意しておくべきことでもあります。

(2007.9.15)