

# 〔連載講座〕子供では分からない優しい科学

## 第4回 「強い」と「弱い」(3)

### 2.5 引張試験

では、実際に「強さ」を測ってみましょう。その前に、「強さ」とは何かの復習です。大雑把に言えば、強いとは外部から力が加えられたときに、よく耐えることです。耐えるとは、壊れないことです。ですが、力が加わると必ず変形し、その変形には弾性変形と塑性変形があり、ある力による変形の程度は弾性率に規定されて異なる、といったことを考えると、耐え方が問題になります。建てたビルが塑性変形して次第に傾いていった、では困ります。そこで、外力が加わったときにどのような変形挙動がどの程度起こるのかを知らねばなりません。単に「壊れなければよい」のではないのです。強さを測るとは、材料のこうした挙動を知り、実用に供しうる特性を知ることなのです。

#### 2.5.1 応力 - 歪み曲線（引張り曲線）

ある材料の「強さ」を試験します。試験する材料を一定の大きさに切り出し、その両端を固定して、大きな機械で両端を無理やり引き伸ばしていったとします（これを引張り試験といいます）。引き伸ばしていく速さは一定だとします。どれくらいの力が必要かは大きなバネ秤りか何かで測るとします。このときの、経過時間と秤りの目盛の変化をグラフ用紙に描いていきます（図7、

図8参照）。材料の最初の寸法は分かっていますから、グラフの横軸は、固定した両端間の距離と引き伸ばしていく速さから歪みに換算することができます。縦軸の秤りの目盛は試料の最初の断面積で割ることにより応力に換算できます。こうしてこのグラフは、負荷応力とそれによる歪みの関係に書き換えることができます。先の図7のようになりますが、もう一度これを図8に示します。換算前だと「荷

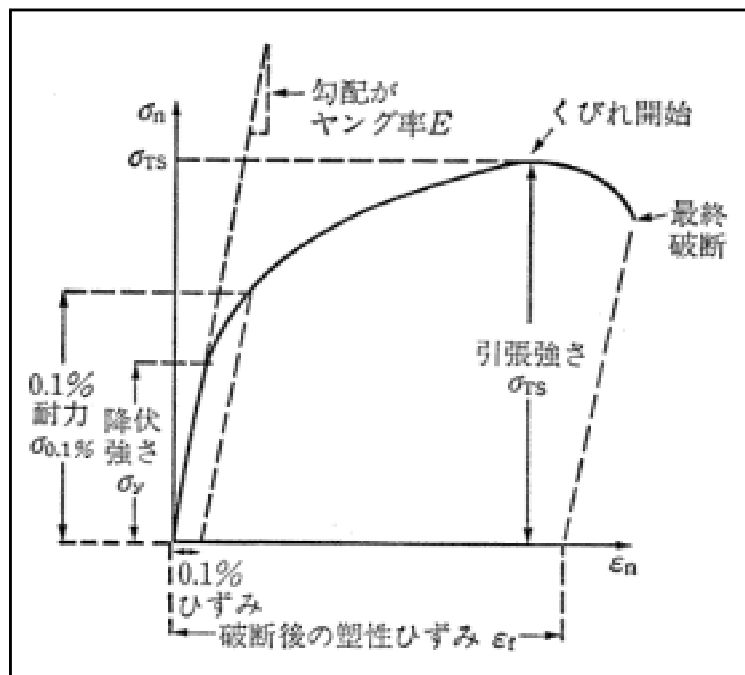


図8 引張りによる応力 - 歪み曲線

重 - 伸び曲線」ですし、換算後は「応力 - 歪み曲線」ですが、基本的には同じ図になることは容易に分かるでしょう。図 8 は引っ張った時の変化ですから、引張り試験による「応力 - 歪み曲線」、あるいは単に「引張り曲線」といいます。

### 2.5.2 降伏強さと耐力

少しずつ加える力を増やすと、最初のうちは直線的に応力も歪みも増えていきます。フックの法則に従う弾性変形が起こっているのです。ある限界を超えると、この直線関係はずれを生じるようになります。永久的に変形したままの塑性変形が起きるためです。弾性変形の限界点となる応力を一般には「降伏強さ」と呼びます。弾性の限界を超えると、その材料は「参った」といって、塑性変形が始まります。弾性範囲の直線の勾配は弾性率です（引張りの場合には、ヤング率と呼ぶことの方が多いのですが）。図 8 の原点近くの状態です。

ところで、図 8 のこの領域には「耐力」という言葉も出てきます。弾性挙動が材料によって異なることは前記しました。非線形挙動や擬弾性は比較的珍しいのですが、決して珍しくないのが図 9 (a) (b) のような場合です。図 9 (a) は普通の鉄材料などに見られる挙動で、ある明確な限界まではっきりとした弾性挙動を示します。その後応力が一旦下がって、波打ちながら横ばいしているのは、ここでは特別な塑性現象が起きているからなのですが、詳細は省略です。限界を超えると塑性変形する、すなわち、曲線は曲がってくると覚えておいてください。この弾性範囲では、力を加えたり除いたりすることで直線に沿った変化をしますが、力を除けば完全に元通りです。つまり、この範囲であれば実用に十分耐えうると云うことです。

一方、図 9 (b) のような場合には問題が生じます。この種の材料の代表例は、鉄に次ぐ第 2 の金属材料であるアルミニウムです。アルミニウムの真の弾性限は極めて小さく、たとえば、1cm ほどもある厚さや太さを持つ材料でも、手で簡単に曲げられるほどです（程

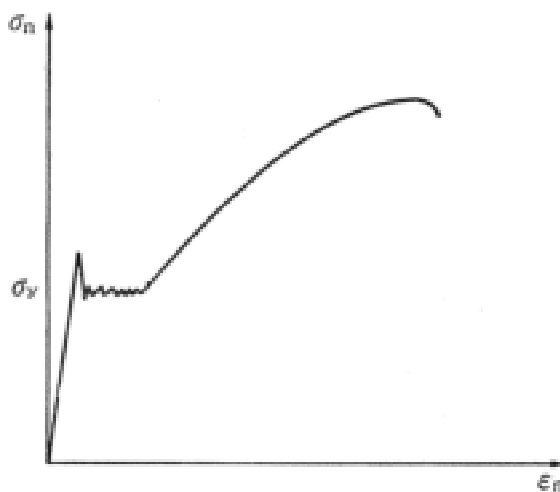


図 9 (a) 鉄材料の典型的な引張り曲線

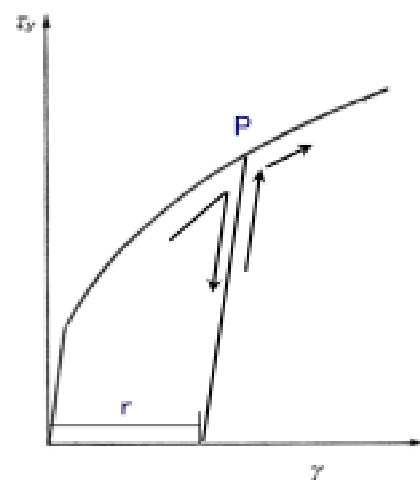


図 9 (b) アルミニウムの引張り曲線

度は僅かですが)。つまり、鉄と同じように評価すれば、実用にはとても耐えられないほど弱いのです。ところが、ある程度塑性変形したところ(P点)で力を除くと、図9(b)のように、最初の弾性域の直線と平行に歪みが戻ってきます。そして再び力を加えると、今度は戻ったときの直線に沿って歪みが増えていき、P点まで行くと再び元通りの塑性変形を始めます。これは、変形することで材料に微妙な変化が生じ、この変化がその後の挙動にそのまま反映されるからですが、学問的詳細は別にして、実用上は大きな意味を持っています。すなわち、たとえばアルミニウムでビルを建てたとします。このビルは僅かな風によってさえも傾いてしまいます。ところが、一旦風が止んだのち再び風が吹いても、最初の風と同等以下であれば、今度は完全な弾性挙動をします(最初に傾いた分だけは、傾きばなっしですが)。つまり、最初の傾き[r]が実用上差し支えない範囲(たとえば、このビルで働いている人々が傾いていると感じない程度)であれば、このビルは立派に機能します。P点までが弾性範囲と見なしても、大きな問題は生じないのです。真の弾性範囲ではないので、これを区別して「耐力」と呼んでいます。残る問題は、塑性変形の程度[r]をどこまで認めるかです。図9(b)は0.1%の歪みとなっています。0.1%の永久的な変形は是認して、それに対応する応力[P]を弾性限と同等に扱おうと云うことです。「0.1%耐力」と、認める歪みを明記して呼びます。よく使われるのは「0.2%耐力」、少し厳しいと「0.1%耐力」、他にもっと厳格な設計を必要とする場合には、0.05%や0.01%が採用されることもあります。

### 2.5.3 均一伸びと局部伸び

ある材料を使おうとする場合、まず降伏強さあるいは耐力が重要です。どれほどの外力に耐えられるかがこれで決まるからです。しかももう一つ、伸び(変形の程度)も重要です。

図8に示したように、ある材料を引張り続けると、ある限界まで応力が増していき、頂点に達した後、逆に低下してきます。頂点まではほぼ材料全体が均一に変形していくのに対し、頂点を超えると材料の一部のみが選択的に変形するようになるからです(「くびれ」といいます)。どうして「くびれ」が生じるかは、専門的学問領域です。くびれが生じると変形はもう止められません。同じ力が加わり続けているとすると、一部の断面積が減ることで力の集中が起き、一層変形の進行を加速し、ついには破断に至るからです。そこで、頂点までに起きる変形の程度を「均一伸び」、頂点以後の変形を「局部伸び」といって、区別します。実際に重要なのは均一伸びです。ここまでは、材料が破壊することはないからで、その材料の耐えられる限界を現しているからです。これに対応する応力を「引張り強さ」または「抗張力」といいます。

「引張り強さ」または「抗張力」は、その材料の強さを代表するものとしてしばしば教科書や参考書、便覧類にでてきます。しかし注意すべきは、「引張り強さ」や「抗張力」は破壊せずに耐えられる限界という意味での「強さ」の代表値であって、利用に耐えうる

限界という意味ではないことです。こちらの方の「強さ」は、「降伏強さ」あるいは「耐力」で評価すべきことを忘れてはなりません。

#### 2.5.4 引張り特性

上記のような試験を行うことで得られる特性値を簡単に纏めておきます。ただし、こうした試験で得られるのは、「公称応力 - 公称歪み」の関係です。見かけ上の（これを「公称」と称します）応力と歪みの関係なのです。試験中に時々刻々変化する真の断面積を知ることが困難なので、最初の断面積で除して応力換算するのが普通だからです。「伸び」も最初の寸法に対するものです。

(1)  $\sigma_y$  : 降伏強さ；塑性変形開始時の応力。弾性限とも云う。

(2)  $\sigma_{0.2}$  : 0.2%耐力 (0.2% proof stress)；永久変形 0.2%における応力値。材料によっては完全な弾性挙動範囲が非常に狭く、徐々に降伏するような場合がある。この種の材料では、厳密な降伏強さは非常に小さくなるが、多少の永久歪みは実用上の障害とならない。これを耐力と称し、降伏強さと同等の扱いをする。歪み量は 0.2% とすることが多い。0.1% もしばしば使われる。

(3)  $\sigma_{TS}$  : 引張強さ；くびれ開始時の応力。抗張力とも云う。

(4)  $\epsilon_f$  : 破断(塑性)歪み。引張伸びともいう。；破断後の永久変形量から計算する。

(5)  $\epsilon_u$  : 均一伸び；くびれ開始時までの伸び。

(6)  $\epsilon_n$  : 局部伸び；くびれ開始から破断までの伸び。

(7) RA : 断面収縮率 (reduction of area)；元の断面積に対する破断時の破断部断面積の割合。絞りともいう。局部的な変形が何処まで続くかを現し、粘っこさを現す。

(8) E : ヤング率；最初の弾性範囲における直線の勾配。縦弾性率とも云う。負荷応力に対する歪みの現れる程度を意味する。大きいほど同じ負荷に対して変形が小さい。

表1 種々材料の強さ (ヤング率で表示)

セラミックス材料		金属系材料		ポリマー系材料	
ダイヤモンド	1000 (GPa)	タングステン	400	炭素繊維	50~700
高密度炭化珪素	400~480	クロム	240	高強度アラミド繊維	50~130
アルミナ	350~400	ニッケル	210	木材 (木目に平行)	7~15
窒化珪素	200~300	鋼	200	高強度ナイロン繊維	5~10
マグネシア	200~300	銅	120	ポリプロピレン	1.5~4
安定化ジルコニア	120~160	チタン	110	ナイロン	1~3
ガラス	60~70	亜鉛	90	ポリ塩化ビニル	0.5~4
大理石	50~90	アルミニウム	70	ポリエチレン	0.1~1
コンクリート	20~40	マグネシウム	45	天然ゴム	0.001~0.05
氷	~9	鉛	15	発泡樹脂	~0.001

引張性質の代表的なデータは表 1 に示している。この表では強さを代表する指標としてヤング率を示しています。降伏強さや抗張力は材料の作り方や組成によって種々に異なり、大きな変化を持っていますが、ヤング率はほぼ材料固有の値と見なしうるからです。約 6 桁の範囲にわたっていることが分かるでしょう。一般的に云えば、セラミックス系は非常に大きなヤング率を持っており、非常に大きな強さを持っています。ただし、多くは降伏する以前に破断してしまう脆さを併せ持っています。金属系は通常かなり軟らかいですが、高い延性(よく伸びる)を有しており、過大な力が加わっても破壊前に大きく変形する特性を持っており、この点で構造物の安全性確保などには役立っています。プラスチック系(ポリマー系)は非常に小さなヤング率しか持たないものが多く、弱い材料です。しかし、これはプラスチックの本質ではなく、特別な理由があり、作り方によってはセラミックス系に匹敵する強さを現します。

材料の強さは種々の要因によって影響され、本質的な性質とはかなりのずれを生じる場合があるので、その利用に当たっては注意が必要であると共に、上手く利用するには何がどのように影響するのか、その本質的機構はどうなっているのかなど、知るべきことが多くあります。その概略を広く知っておかねば、有効利用どころか、時として大きな事故に繋がりがねません。少しずつ、その辺の話も進めていきます。

(2007.5.7)