



入門講座

鉄鋼の試験/評価-1

引張試験とその基礎

Basic of Tensile Tests

土田紀之

Noriyuki Tsuchida

兵庫県立大学
大学院工学研究科
准教授

1 はじめに

引張試験とは、丸棒または板など平行部を持つ試験片を用い、その軸方向に所定の速度で引張荷重を加えた時の荷重と伸びの変化を測定する試験である¹⁻⁹⁾。その測定結果からは応力-ひずみ曲線を得ることができ、材料の強さに関する様々な情報を得るための機械的試験の中で、最も基本的で重要な試験である。一軸引張変形のため、試験方法が単純であり、試験結果および変形挙動の整理も容易、引張変形挙動から他の応力状態の変形挙動をある程度類推できるといった特徴が、引張試験が広く利用されている理由であると考えられる。

本稿では、引張試験の概要、および、引張試験より求めることのできる応力とひずみ、機械的特性の定義を中心に引張試験の基礎について解説する。

2 引張試験機

まず引張試験機の構造は、試験片に荷重を負荷する装置と、荷重の測定装置の2つが重要となる。荷重を負荷する装置については、ねじや歯車を利用した機械的負荷と油圧式負荷の2種類がある³⁻⁶⁾。荷重の測定については、ロードセルによる測定が現在の装置では大半である。図1に機械的負荷による引張試験機の外観と各部の写真を示す。本試験機の場合、左右にあるねじの回転によりクロスヘッドが一定速度で移動する。クロスヘッドまたは試験機フレームにロードセルが設置され、伸びの測定には伸び計を用いるのが好ましい。

引張試験で重要な、荷重と伸びの測定について概説する^{3, 4, 10, 11)}。伸びの測定については、抵抗線ひずみゲージ、ストレインゲージ式伸び計、ビデオ伸び計などがある（これらを使わずに、図2に示すクロスヘッド変位 L_c より試験片の伸びを求める場合もある）。抵抗線ひずみゲージは、試験片に接着剤で直接貼り付け、外力によってこれがひずむと、ゲージの針金も変形し、その電気抵抗値が変化するため、この変

化量を計測することでひずみを求めることができる^{3, 4, 10)}。ストレインゲージ式伸び計は、抵抗線ひずみゲージが伸び計に組み込まれたものである。ビデオ伸び計では、デジタルカメラを用いて試験片に付けた2つのマーカーの間隔の変化を測定し、伸びやひずみを計測する^{3, 11)}。抵抗線ひずみゲージは、後述する弾性係数や降伏強さなどの測定で使われることが多く、ビデオ伸び計はひずみゲージやストレインゲージ式伸び計と違い非接触での測定であるため、破断までの測定が可能などの特長がある。一方で、荷重の測定は試験機に取り付けられたロードセルにより行われ、ここでもひずみゲージを使ったひずみゲージ式ロードセルが用いられている³⁻⁸⁾。ロードセルによる荷重測定では、ロードセルに力加わり変形すると、ひずみゲージも変形し、ひずみ量がわかる。その時のひずみ量と弾性係数の関係より荷重の大きさがわかる。ロードセルの場合、間接的に荷重を測定しているため、定期的に検定を行う必要がある^{3, 4)}。

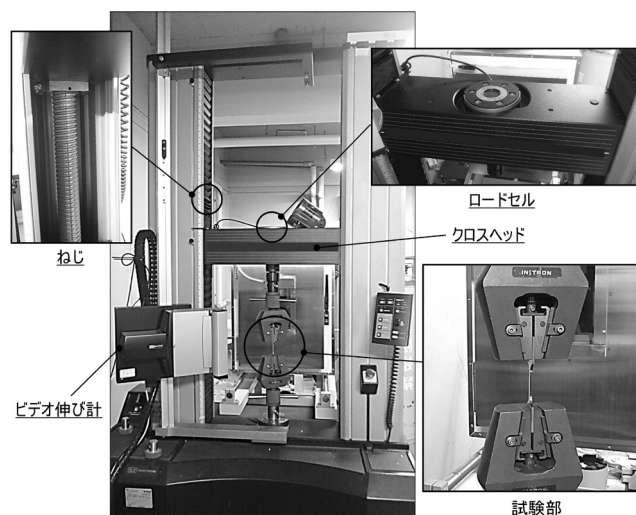


図1 引張試験機の外観と各部の説明

【注意したい点 その1：クロスヘッド変位】

図2における L_c をクロスヘッド変位という。クロスヘッド変位は、試験片の伸び（弾性伸び ΔL_e と塑性伸び ΔL_p ）に加えて、試験機剛性 K の弾性伸び（ Δl_e ）も含まれる。試験機剛性は実験材料のヤング率 E とは大きさが異なり（例えば鉄鋼材料のヤング率と比べると、1桁以上小さいこともある）、クロスヘッド変位を試験片の伸びとして扱うと、正確な試験片の伸びよりも大きくなってしまう。このような場合は、荷重-クロスヘッド変位線図における初期の傾き（＝試験機剛性）より、試験片の塑性伸びを求めるなど、注意が必要である。

3 試験片および引張試験条件

引張試験で用いられる試験片は、板状、棒状、管状、円弧状、線状試験片に分類され、材料の寸法によって使用する試験片形状が区分されている。JISでは1～14号試験片があり、比例試験片と定形試験片に分類される^{1,3)}。比例試験片とは、初期

の標点距離 L_0 と初期断面積 A_0 の間に、 $L_0 = k\sqrt{A_0}$ の関係を持つ試験片であり、ISOでは $k=5.65$ が用いられる^{1,2)}。一方で、定形試験片は、試験片各部の寸法が指定されている。表1には、引張試験片の分類について整理した^{3,5)}。

引張試験における重要な条件として、「温度」と「ひずみ速度」がある。鉄鋼材料の場合、これらの条件が変わることで、得られる応力-ひずみ曲線や機械的特性は大きく変化する。試験温度に関して、通常は室温で行うことが多い^{1,2)}が、恒温槽や加熱炉を用いて温度調整することで、試験温度を変え引張試験を行うことができる³⁻⁶⁾。温度調整は、雰囲気以外に液体窒素やメタノールなどの溶媒を使う場合もある。一方で、ひずみ速度とは、単位時間あたりのひずみの増分を示し、単位は s^{-1} である。引張試験の場合、目的のひずみ速度で引っ張るよう、 L_0 を基準に図1に示したクロスヘッドの速度（クロスヘッド変形速度）を設定する¹⁻⁴⁾。ひずみ速度の詳細については、先に「ひずみ」について説明した方が理解しやすいと思うので、次節で「ひずみ」について説明した後、6の補足で改めて説明することにする。鉄鋼材料において、単に引張試験結果と称される場合には、「準静的」と呼ばれる、ひずみ速度が $10^{-2} \sim 10^{-4} s^{-1}$ での試験で得られた結果を意味することが多いが、機械的特性によっては、規定のひずみ速度範囲で試験を行う場合もある^{1,2)}。また、油圧サーボ式試験機や検力ブロック式試験機等を用いることで、自動車衝突時に相当する約 $10^3 s^{-1}$ までの高速引張試験を行うことができる。

4 応力、ひずみと機械的特性

引張試験では、材料に一定速度で引張変形が加わったときの荷重 P と伸び ΔL の変化を測定する。引張変形、および、引張試験時の荷重-伸び曲線は図3および表2に示す3つの領域に大別される。測定された荷重と伸びからは、応力とひずみを求めることができ、この応力とひずみが応力-ひずみ曲線や様々な機械的特性へと繋がっていく。

応力 (Stress) とひずみ (Strain) には、見かけの大きさを意味する公称応力、公称ひずみと、真の値を示す真応力、真ひずみの2種類がある。

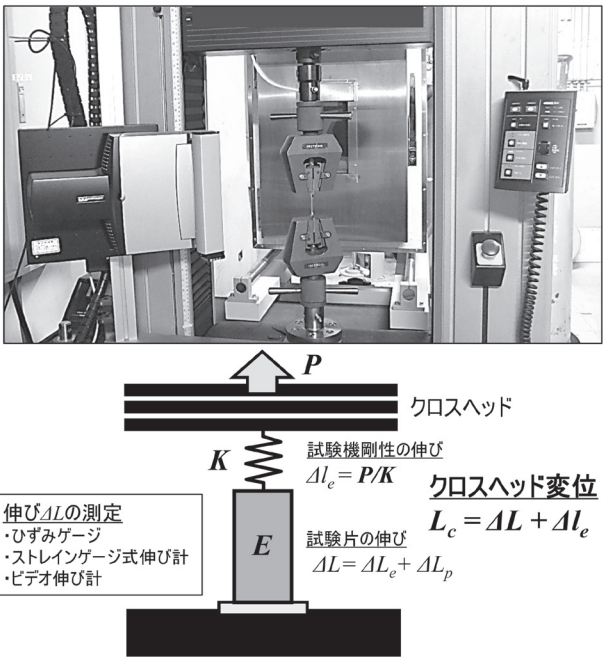


図2 引張試験における伸び ΔL とクロスヘッド変位 L_c 。

表1 JISにおける比例および定形試験片²⁾

試験片の形状	板状試験片	棒状試験片	管状試験片	円弧状試験片	線状試験片
比例試験片	14B 号	2 号, 14A 号	14C 号	14B 号	
定形試験片	1A 号, 1B 号, 5 号, 13A 号, 13B 号	4 号, 10 号, 8A 号, 8B 号, 8C 号, 8D 号	11 号	12A 号, 12B 号, 12C 号	9A 号, 9B 号

表2 引張変形における3つの変形領域

変形領域	説明	関係する機械的特性
1. 弾性変形のみの領域	変形は可逆的で除荷すると元の形状に戻る。荷重(応力)と伸び(ひずみ)の間に線形(比例)関係がみられる。	ヤング率(E), ポアッソン比(ν), 比例限(s_p), 弾性限(s_e)
2. 一様な弾塑性変形領域	試験片平行部全体にわたって巨視的に一様な変形が見られる。除荷すると弾性変形分が戻るのみで永久変形(塑性変形)が残る。塑性変形が進行すると, 材料の変形抵抗が大きくなり, 荷重を増やさなければならない。	降伏強さ($R_{p0.2}$, R_{eL}), 引張強さ(R_m), 均一伸び(e_u), 加工硬化指数(n), ランクフォード値(r), リューダース伸び(λ_L)
3. 変形が局所化する塑性不安定領域	平行部の一部分に変形が集中し, くびれ(ネッキング)が発生する。応力状態は試験片の場所によって異なり(不均一変形), くびれ部分の内部は3軸応力状態になる。	全伸び(e_f), 局所伸び(e_l), 絞り(Z)

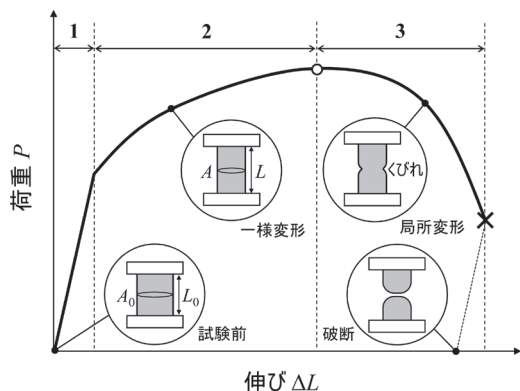


図3 荷重-伸び曲線と3つの変形領域(図に示した1~3は, 表2における3つの変形領域と対応する)

【注意したい点 その2: 「伸び」と「永久伸び」】^{1,2)}

引張試験で得られる伸び (Elongation, ΔL) は, 試験中の任意の時点での (荷重をかけた状態における) 標点距離の増分であり, 単位はmmである。表2に示したように, 変形の領域によって弾性伸び (ΔL_e), 塑性伸び (ΔL_p) に分類することもでき, これらを合わせたものが伸び (または, 全伸び $\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_p$) である。一方で, ΔL を L_0 で除し百分率で表す場合も伸びと呼ばれることがあり, この場合単位は%となるので, 本稿では伸び (%) (Percentage elongation) と分けて表記する。さらに, 後述する機械的特性のところでは, 永久伸び (%) (Percentage permanent elongation) という言葉が出てくるが, これは荷重を除荷した後の標点距離の増分を L_0 で除し百分率で表したものであり, 単位は%である。永久伸びには, 弾性伸びは含まれない。

4.1 公称応力と公称ひずみ

応力は単位面積あたりの力 (荷重) の大きさ, ひずみは単位長さあたりの伸びを意味する。公称応力 (Nominal stress, s) は面積として変形前の初期断面積 A_0 を用いて, 公称ひずみ (Nominal strain, e) は変形前の標点距離 L_0 を用いてそれぞれ次式で求められる。

$$s = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (2)$$

P の単位はN (ニュートン), s の単位はPa ($=\text{N}/\text{m}^2$) であり, 鉄鋼材料の強度としては, MPa (M (メガ) $=10^6$) やGPa (G (ギガ) $=10^9$) が使われる。MPa $=\text{N}/\text{mm}^2$ である。ひずみの単位については, (2) 式右辺の分母, 分子ともに長さ (mm) であるため, 定義としてひずみに単位はないが, 百分率にして%で表すこともある。

図4に, 代表的な2種類の公称応力-ひずみ曲線の模式的を示す。降伏後に降伏点降下を示す, 示さないにより「不連続降伏型」と「連続降伏型」に分類できる。図4の縦軸の公称応力に A_0 , 横軸の公称ひずみに L_0 を乗ざると図3の荷重-伸び曲線になる。

4.2 真応力と真ひずみ

図3にも示したように, 引張変形の進行とともに試験片の標点距離 L は伸び, 断面積 A は減少する。単位面積あたりに作用する力 (= 応力) を正しく知るためには, 荷重を試験片の初期断面積 A_0 ではなく, 変形中に刻々と変化する断面積 A

で除す必要がある。後者の方法で求めた応力を真応力 (True stress、 $\sigma = P/A$) と呼ぶ。一方、ひずみに関しても標点距離 L は時々変化するため、これを考慮した真ひずみ (True strain、 ε) を以下のように定義する。

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \left(\frac{L + dL}{L} \right) / L = \int_{L_0}^L dL / L = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 dL は微小伸びを示す。試験片平行部の体積を一定 ($A_0 L_0 = AL$) と仮定すれば、最高荷重点までは s と e を用いて次式より真応力-ひずみ曲線に変換することができる。

$$\sigma = \frac{P}{A} = s(1 + e) \dots\dots\dots (4)$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln(1 + e) \dots\dots\dots (5)$$

塑性変形では体積変化を伴わないと考えて良い近似となるため、表2の弾塑性変形領域では、塑性ひずみが弾性ひずみより

はるかに大きいので、全ひずみ (= 弾性ひずみ + 塑性ひずみ) に対して体積一定の仮定の下に (4)、(5) 式による換算が用いられる ((4)、(5) 式の導出については、6において補足する)。

【注意したい点 その3: 真応力-ひずみ曲線と塑性不安定条件】

真応力-ひずみ曲線において、ある真ひずみにおける真応力-ひずみ曲線の傾きを加工硬化率 (Work hardening rate、 $d\sigma/d\varepsilon$) という。通常、変形とともに真応力は増大し、加工硬化率は減少する。変形が進み、真応力と加工硬化率が等しくなる条件を、塑性不安定条件 (Plastic instability) と呼び、次式で表される⁹⁾。

$$\sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \dots\dots\dots (6)$$

塑性不安定条件以降、試験片はくびれが生じ、一様変形から局所変形になる (図3)。塑性不安定条件における公称応力は引張強さ、公称塑性ひずみの%表記は均一伸びである。 $d\sigma/d\varepsilon$ については、6において補足している。

4.3 引張試験で得られる機械的特性

引張試験および公称応力-ひずみ曲線からは様々な機械的特性を得ることができる。代表的な機械的特性の定義については、表3に整理し、一部は図4にも記号で示した。機械的特性における強度は公称応力であり、均一伸びや全伸びは塑性伸びまたは永久伸び (※いずれも塑性変形分の伸び量) を用いて求められる。

(1) 弾性係数と弾性限、比例限

弾性変形においては応力と弾性ひずみが常に比例する。ここで、単軸引張荷重が負荷された材料の弾性変形を考えると、

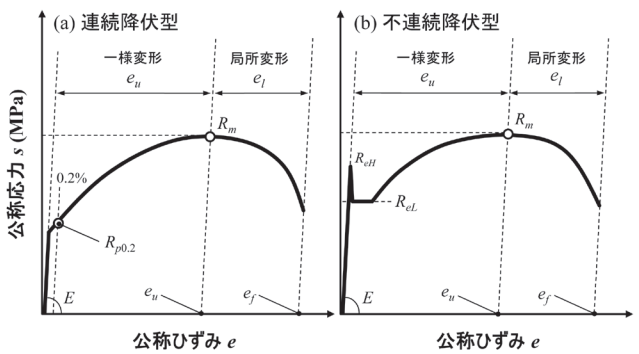


図4 公称応力-ひずみ曲線 ((a) 連続降伏型、(b) 不連続降伏型)

表3 引張試験から得られる様々な機械的特性 (図4も参照)

機械的特性	定義
降伏強さ $R_{p0.2}$, R_{eL} (MPa)	連続降伏型の場合 ($R_{p0.2}$): 塑性ひずみが 0.2% における公称応力 不連続降伏型の場合 (R_{eL}): 下降伏応力
引張強さ R_m (MPa)	最高荷重点における公称応力 ((9)式)
破断伸び e_f (%)	試験片破断後の永久伸び (%) ((10)式)
均一伸び e_u (%)	最高荷重点における塑性伸びを L_0 で除し%表記したもの ((12)式)
絞り Z (%)	円形断面の試験片 (= 丸棒試験片) に対して、初期および破断後の試験片断面積を用いて ((11)式) より求める
加工硬化指数 n	真応力-ひずみ曲線を Hollomon の式 ((13)式) で整理した時の n の値 (図 5, 6 も参照)
ランクフォード値 r	板材の引張試験において、引張方向の伸びが 10~20% になったとき、板幅方向、板圧方向の真ひずみをそれぞれ ε_w , ε_t とすると、 $r = \varepsilon_w / \varepsilon_t$ で求められる。実用上は塑性変形前後で体積一定を仮定して導かれる ((16)式) が使われる。

引張軸方向に伸び (e_z)、その垂直方向はポアソン効果により縮む ($e_x < 0$)。そこで、次の2種類の弾性係数、ヤング率 (縦弾性係数、Young's modulus, E) とポアソン比 (横弾性係数、Poisson's ratio, ν) を定義する。それぞれ次式で示される。

$$E = \frac{s}{e_z} \dots\dots\dots (7)$$

$$\nu = \left| \frac{e_x}{e_z} \right| \dots\dots\dots (8)$$

鉄鋼材料の E は約 200 GPa で ν は 0.3 である。例えば、高強度鋼に 1 GPa の応力をかけると 0.5 % の e_z が生じる。このように鋼に生じる弾性ひずみは 0.01 以下の値である。したがって、 E や ν の測定には精度の高いひずみ測定が要求され、抵抗線ひずみゲージや伸び計⁵⁻⁸⁾ が用いられることが多い。

公称応力-ひずみ曲線の変形初期の領域を直線近似しその直線から曲線が外れる点を比例限 (Proportional limit, s_p)、荷重を除荷した際に試験片が元の長さに戻る最大の荷重点を弾性限 (Elastic limit, s_e) と呼ぶ。教科書等を見ると $s_e \geq s_p$ であるが、通常は $s_e = s_p$ と考えて良い。塑性変形が開始する点を精確に測定するのは極めて難しく、ISO や JIS には s_p や s_e の規定はない (一部の教科書には、オフセット法^{1,2,4-6)} を適用して、残留ひずみ (永久伸びから求められる公称塑性ひずみ) が 0.001 ~ 0.03% における公称応力を s_e とするという記述もある⁵⁾。

(2) 降伏強さ (Yield strength)

s_p や s_e の測定は非常に難しいことを述べたが、機械設計や構造設計においては一般に弾性設計が基本であり、塑性変形開始に対して信頼性や再現性の高い測定値が必要である。ISO や JIS では次に述べる降伏強さを用い、設計等においては降伏強さに安全率を乗じて利用する。まず、図4 (a) のような連続降伏型の場合では、規定された塑性ひずみ (ΔL_p と L_0 より求められる公称塑性ひずみ) を起こすときの公称応力を耐力 (Proof strength, R_p) として用いる。特に規定のない場合は塑性ひずみの値を 0.2% とし、0.2% 耐力 (0.2% proof strength : $R_{p0.2}$) と呼ぶ。一方、図4 (b) の降伏点降下の現れる軟鋼のような場合には、上降伏応力 (Upper yield strength, R_{eH}) と下降伏応力 (Lower yield strength, R_{eL}) を測定する。この場合、降伏強さとしては下降伏応力を用いることが多い。

(3) 引張強さ (Tensile strength, R_m)

最大引張荷重 (P_m) を試験片平行部の初期断面積 (A_0) で除した商を引張強さ (R_m) という。

$$R_m = \frac{P_m}{A_0} \dots\dots\dots (9)$$

上降伏点が現れ、リューダース変形終了後に加工硬化がみられる場合には、降伏後の最大引張荷重を用いる。塑性設計においては R_m が設計基準として採用される。

(4) 破断伸び (Percentage elongation after fracture or elongation, e_f) と絞り (Reduction of area, Z)

試験片破断後における永久伸び (%) が破断伸び (e_f) である。単位は % である。 e_f はネッキングの位置に影響されるので、破断位置を試験結果に付記することがある¹⁻⁴⁾。

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 L_f は破断後の最終標点距離である。

絞り (Z) は円形断面の試験片 (= 丸棒試験片) に対して用い、破断後の試験片の最小断面積 A_f を測定し、 A_0 を用いて次式によって求める。

$$Z = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (11)$$

また、最高荷重点における塑性伸びを L_0 で除し % 表記したものを均一伸び (あるいは、一様伸び、Uniform elongation, e_u)、その後の塑性伸びから求められる伸び (%) を局所伸び (Local elongation, e_l) という。「均一伸び + 局所伸び = 破断伸び」となる。

$$e_u = \left(\frac{\Delta L_{p,m}}{L_0} \right) \times 100 = \left(\frac{\Delta L_m}{L_0} - \frac{R_m}{E} \right) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\Delta L_{p,m}$ 、 ΔL_m は最高荷重点における塑性伸びと伸びをそれぞれ示す。 Z 、 e_u の単位も % である。

(5) 加工硬化指数 (Work hardening exponent, n)

(4)、(5) 式により求めた真応力-ひずみ曲線 (σ - ϵ) 曲線を数式表現するために、次の n 乗硬化式 (Hollomon の式¹²⁾) が使われることが多い。

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 K を強度係数、 n を加工硬化指数 (または、 n 値) という。(13) 式より $\log \sigma$ 対 $\log \epsilon$ は直線関係になるので、測定結果を両対数グラフで整理するとその勾配から n 値が求められる (図5)。これ以外に、多数の実験値を用いた最小自乗法や2組の実験値から求める方法もある。 n 値が重視されるのは加工性に関係する均一伸びを予測できるからである^{6,9)}。図5にも示したが、ネッキング開始条件 (= 塑性不安定条件) を最大荷重点とすると、体積一定 ($A_0 L_0 = A L$) の仮定より $d\sigma / d\epsilon = \sigma$

の関係が導かれ、この塑性不安定条件式に (13) 式を代入すると $\epsilon = n$ となる (つまり、均一伸び $= n$ 値)。変形に伴う加工硬化と試験片の断面積減少のバランスによって塑性変形が安定に進行するので、 n 値が大きいほどネッキングが起これにくいことを意味する。

【注意したい点 その4: 加工硬化率と加工硬化指数の違い(図6)】

加工硬化率 ($d\sigma/d\epsilon$) と加工硬化指数 (n) は似たような言葉で、両者は同じであると扱われる場合があるが、実際は明確な違いがある。加工硬化率は、ある真ひずみにおける真応力-ひずみ曲線の傾きであるのに対し、加工硬化指数は、真応力-ひずみ曲線を Hollomon の式で整理した時の n の値である。ここで、 n 値を $d\sigma/d\epsilon$ 、 σ 、 ϵ を使って示すと以下のようなになる。

$$n = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \epsilon} = \frac{d \ln \sigma}{d \sigma} \cdot \frac{d \sigma}{d \ln \epsilon} \cdot \frac{d \ln \epsilon}{d \epsilon} = \frac{\epsilon}{\sigma} \cdot \frac{d \sigma}{d \epsilon} \quad \text{..... (14)}$$

また、 $d\sigma/d\epsilon$ を n 値、 σ 、 ϵ を使って示すと、

$$\frac{d \sigma}{d \epsilon} = n \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{..... (15)}$$

となる^{4,9)}。(14) 式と図6より、同じ真ひずみにおける加工硬化率が等しい場合であっても、真応力の大きさが異なれば n 値 (= 均一伸び) は違うことになる。

(6) ランクフォード値 (Lankford value, r)

板材の成形性を示す特性値にランクフォード値 (または、 r 値) がある。これは板材の引張試験において引張軸方向の伸びが 10~20 % になったとき板厚方向の真ひずみを ϵ_w 、板厚方向のそれを ϵ_t とすると、 $r = \epsilon_w / \epsilon_t$ で求められる。薄板で ϵ_t を精度よく求めることは至難の業なので、実用上は塑性変形前後で前述の体積一定を仮定して導かれる次式が使われる。

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(W/W_0)}{\ln(t/t_0)} = \frac{\ln(W/W_0)}{\ln((L_0 W_0)/(L W))} \quad \text{..... (16)}$$

ここで、 W_0 、 t_0 、 L_0 および W 、 t 、 L はそれぞれ試験前後の試験

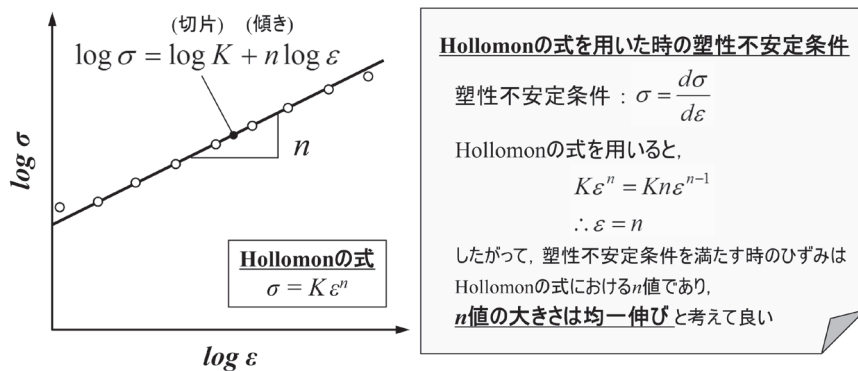


図5 Hollomon の式における n と K の求め方

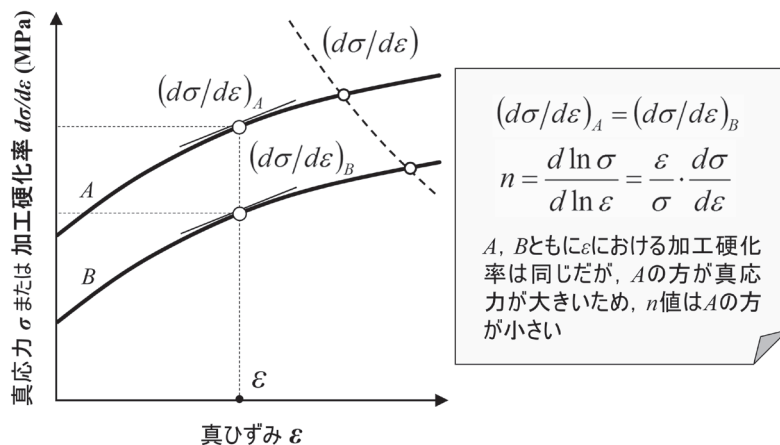


図6 加工硬化率と加工硬化指数の違い

片平行部の幅、厚さと標点距離を示す。等方性材料では $r=1.0$ ($\epsilon_w = \epsilon_d$) となり、塑性異方性があれば $r \neq 1$ となる。 r 値が大きい場合、板厚が薄くなりにくく、板幅方向に収縮しやすく、破断しにくいと、成形性は高くなる。また、板材の場合、試験片を採取する方向によって引張特性が異なることが多く、これを内面異方性という。 r 値の場合、圧延方向に対して 0° 、 45° 、 90° における値（それぞれ、 r_{0° 、 r_{45° 、 r_{90° とする）を求め、次式による平均値 $\bar{r}$ を用いることが多い。

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2r_{45^\circ}}{4} \dots\dots\dots (17)$$

(7) リューダース帯、リューダース伸び

軟鋼や低炭素鋼を引っ張ると、図4 (b) のような不連続降伏型の公称応力-ひずみ曲線が得られる。不連続降伏領域では上降伏点で試験片の一部が帯状に伸び、以後はその変形帯が広がるか帯の数が増えることによって試験片平行部が伸びる。平行部全域をこの帯が覆うと平行部全体で様な塑性変形が始まり、加工硬化がみられる¹³⁾。この変形帯をリューダース帯 (Lüders band) と呼び、この時得られる伸びをリューダース伸び（あるいは、降伏伸び Lüders elongation、 λ_d ）という¹³⁾。予め表面を磨いた平板試験片の場合、降伏後に試験片のある部分から塑性変形が伝播する様子を観察することができ、この領域はリューダース帯と呼ばれる。スチール缶やエアゾール缶の底に見える”しわ”は、リューダース帯と同じと考えることができる¹⁴⁾。また、リューダース伸びの大きさは、「下降伏応力における加工硬化率」を用いて整理することが可能であり、この時 (13) 式を用いて加工硬化率を計算すると便利である¹⁵⁾。

5 おわりに

引張試験において得られる応力、ひずみをはじめとする様々な物理量において最も重要なことは、ほとんどが測定された「荷重」と「伸び」のふたつを用いて求められる（または、計算される）ということである。つまり、全ては「荷重」と「伸び」からスタートしている。最近では、公称と真で定義される応力とひずみをはじめ、様々な機械的特性も試験機と連動しているパソコン上のソフトウェアが自動的に計算してくれるため、便利な反面、その中身や各物理量の定義をしっかりと理解していないと、正確な機械的特性の評価ができなくなる場合があるかもしれない。引張試験と応力-ひずみ曲線は、材料の機械的特性評価はもちろん、鉄鋼材料の基礎研究の立場においても、今後も変わらず重要性は高いと思うので、その基礎はしっかりと押さえておきたい。

6 補足

少し応用編の内容となるが、引張試験に関して重要な項目であるひずみ速度、真応力、真ひずみ、加工硬化率について、式でどう表されるか整理しておきたい。繰り返しとなるが、全て引張試験から得られる荷重 P と伸び ΔL を用いて記述することができる。

a. ひずみ速度について

ひずみ速度 $\dot{e}$ は、クロスヘッド速度 v_c と L_0 を用いて、次式より求めることができる。

$$\dot{e} = \frac{v_c}{L_0} \dots\dots\dots (*1)$$

(*1) 式からわかるように、ひずみ速度とは通常「公称ひずみ速度」のことを指す。また、(2) 式で示した公称ひずみ e の式より公称ひずみ速度を記述すると、次式のようにになる。

$$\dot{e} = \frac{v_c}{L_0} = \frac{de}{dt} = \frac{d\Delta L}{dt} \frac{1}{L_0} \dots\dots\dots (*2)$$

ここで、 $d\Delta L/dt$ は単位時間あたりの伸びである。また、(*1) , (*2) 式で示した公称ひずみ速度に対して、真ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ について考えてみると、以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d \ln(1+e)}{dt} = \frac{1}{1+e} \frac{de}{dt} \dots\dots\dots (*3) \\ &= \frac{1}{1+e} \left(\frac{d\Delta L}{dt} \cdot \frac{1}{L_0} \right) \end{aligned}$$

(*3) 式より考えると、通常引張試験ではクロスヘッド速度 v_c が一定であるので、真ひずみ速度は変形または時間とともに減少する。この点を考慮し、真ひずみ速度一定試験が行われる場合もある。

※細かな話となるが、ここでは全伸びから求めたひずみ速度を記述しており、塑性ひずみ速度となるとこれから弾性ひずみを引かねばならない。

b. 真応力 ((4) 式) と真ひずみ ((5) 式) の導出

・真応力 σ

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \frac{L}{L_0} = \frac{P}{A_0} \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = s(1+e) \dots\dots\dots (*4)$$

・真ひずみ ε

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) \dots\dots\dots (*5) \\ &= \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + e)\end{aligned}$$

※いずれも試験片の体積一定 ($A_0 L_0 = AL$) の仮定の下で成立する式である。つまり、引張試験における最高荷重点以降、試験片にくびれが生じた場合 (つまり、不均一変形の場合)、これらの式を使うことはできない。

c. 加工硬化率

加工硬化率 $d\sigma/d\varepsilon$ を公称応力 s と公称ひずみ e を用いて記述すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma}{d\varepsilon} &= \frac{d\{s(1+e)\}}{d\{\ln(1+e)\}} = \frac{d\{s(1+e)\}}{de} \cdot \frac{de}{d\{\ln(1+e)\}} \dots\dots\dots (*6) \\ &= \left[\frac{ds}{de}(1+e) + s \right] \cdot (1+e) = s(1+e) + (1+e)^2 \frac{ds}{de}\end{aligned}$$

ここで、右辺第一項は真応力 σ であり、第二項における ds/de は公称応力-ひずみ曲線の傾きである。最高荷重点においては、 $ds/de=0$ となるため、 $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ の塑性不安定条件式 (= (6) 式) が成立する。

参考文献

- 1) ISO6892-1 : Metallic materials – Tensile testing –, Part 1 : Method of test at room temperature, ISO, (2009), 1.

- 2) JIS Z 2241 : 2011 : 金属材料引張試験方法, 日本工業標準調査会 審議, 日本規格協会, (2011), 1.
- 3) G.E.Dieter : ASM Handbook, vol. 8, Mechanical testing and evaluation, ASM International, (2000), 99.
- 4) P.Han : Tensile Testing, ASM International, (1992), 1.
- 5) 中澤一 他: JIS使い方シリーズ 金属材料試験マニュアル, 日本規格協会, (1987), 23.
- 6) 須藤一 : 材料試験法, 内田老鶴圃, (1976), 23.
- 7) 河本実 : 材料試験, 朝倉書店, (1965), 3.
- 8) 中川元, 盛中清和, 遠藤達雄, 光永公一 : 新選 材料試験方法, 養賢堂, (1968), 6.
- 9) G.E. Dieter : Mechanical metallurgy, McGraw-Hill Book Company, (2001), 338.
- 10) 菅野昭, 高橋賞, 吉野利男 : 応力ひずみ解析, 朝倉書店, (1986), 25.
- 11) 高久泰弘 : IIC REVIEW, 46 (2011), 57.
- 12) J.H. Hollomon : Trans. AIME, 162 (1945), 268.
- 13) 周藤悦郎 : ストレッチャ・ストレイン, 日本金属学会, (1970)
- 14) 梅本実, 登坂章男, 小原隆史 : ふえらむ, 4 (1999), 543.
- 15) N. Tsuchida, Y. Tomota, K. Nagai, and K. Fukaura : Scripta Mater., 54 (2006), 57.

※本解説作成においては、友田陽先生 (現: 物質・材料研究機構) の入門講座 (鉄鋼材料の常温強度, ふえらむ, 4 (1999), 536.) を参考にさせていただいた。

(2016年4月25日受付)