



入門講座

材料試験法編 機械的性質-1

鉄鋼材料の常温強度

友田 陽
Yo Tomota

茨城大学工学部 教授

Strength of Steels at Room Temperature

1 はじめに

今月号より鉄鋼材料の使用あるいは販売に係わる人達や学生等を主たる対象にして材料試験法の講座を始める。市販される鉄鋼材料には材料試験による特性表が添付されていることが多い。それらの特性値がどのようにして測定され何を意味するのかを簡単に知りたいが専門書を紐解く余裕がないという人達を念頭において、本講座では、常温強度(筆者)、高温強度(東北大学工学部・丸山公一教授)、疲労、破壊靱性(豊橋技科大学・新家光雄教授)および企業で行われている各種機械試験(日本鉄鋼協会：三浦和哉氏)に関する平易な解説を試みる。第1回目の常温強度では引張試験と硬さ試験を取り上げた。両試験法には国際規格(ISO)に準じた日本工業規格(JIS)^{1)*}が制定されているので、JISを基本にして説明を行う。

2 引張試験

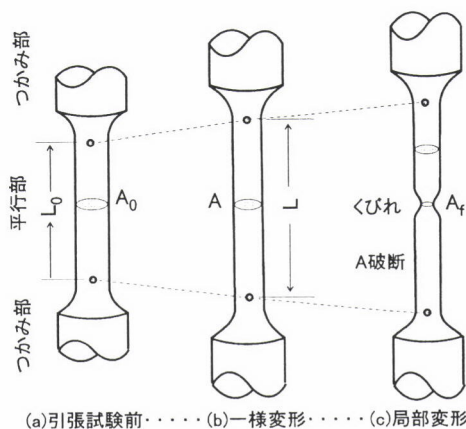
2.1 引張試験方法 (JIS Z2241-1993)

材料の強度には、①弾性変形に対する抵抗(剛性：バネ定数に対応する弾性係数で表す)、②塑性変形に対する抵抗(ひずみ、ひずみ速度、温度、変形履歴等に依存し、変形応力で表す)、および③破壊に対する抵抗(環境や力学的条件に依存する。破壊靱性や破断応力で表す)がある。状況に応じてこれらの強度を無意識に使い分けることが多い。たとえば「②の強度は高いが③の強度が低いので使えない」といった表現は初学者を惑わせるかもしれない。強度を②の意味で用いる場合にも、その内容は弾性限、比例限、降伏強度あるいは0.2%耐力、引張強さ、変形抵抗(変形応力)な

ど多様である。このように単に強度といっても内容が複雑であるが、その基本は応力-ひずみ曲線であり、通常、引張試験によって得られる。対象とする材料から試験片を採取し試験機を用いて引張り、負荷荷重と変形量の関係を測定するわけであるが、測定結果は試験片の形状・寸法や試験条件(温度、引張速度等)の影響を受けるので試験方法を規定する必要がある。商用鋼に対してはJISによる方法が適用される。金属材料以外の工業材料や特殊な用途によっては異なる規定があったり、研究開発段階においては種々な制限から便宜的な方法も用いられる。

試験片は図1(a)のように断面が一樣な平行部と断面積の大きなつかみ部からなる。两部分の間は適当な曲率で断面積が変化させてあり、JISでは幾何学的形状と寸法が種々な観点から検討して決められている。たとえば、曲率半径が小さすぎると単軸応力状態とみなせなくなる。

試験片のつかみ部を試験機に固定して荷重(試験力)を負



(a)引張試験前・・・(b)一様変形・・・(c)局所変形

図1 引張試験片と変形の様相の模式図

* 材料試験に関するJISは最初の制定以来、数回にわたって改正が重ねられている。SI単位系への移行や硬さの表示法等の変更がなされているので、昔の教科書等の記述には現在の状況に合わないところがある。そこで、本稿で参考にした規格に制定年度を付記してまとめて末尾に示す。

荷する。荷重を負荷する速度は均一であることが望ましく、JISによる指定は、応力増加率、ひずみ増加率、あるいは経過時間のいずれかで制御することになっている。材料によってひずみ速度感受性が異なるので規定も異なるが、銅の場合は $20\sim 80\%/min$ ($3.33\times 10^{-3}\sim 1.33\times 10^{-2}/s$)とされている。使用される試験機には油圧駆動型と歯車駆動型がある。荷重の検出には振り子型力量計やロードセル等が、変形変位の検出には伸び計、差動トランス、抵抗線ひずみゲージや光学式方法等が使われる。変形変位の測定には測定するひずみの範囲と要求精度によって適した手法が用いられる。変形開始から破断までの全体の概略を知るには、つかみ具を移動させるクロスヘッドの移動量(一定速度で移動させているときは試験時間)から推定されることもある。

2.2 応力－ひずみ曲線

2.2.1 荷重－伸び(変形変位)曲線と公称応力－公称ひずみ曲線

平行部を有する丸棒もしくは板状試験片を一定速度で引張り、荷重(F)と伸び(ΔL)を記録する。次に、単位面積あたりの力(公称応力： σ)と単位長さあたりの伸び(公称ひずみ： ε)を算出する。すなわち、

$$\text{公称応力：} \quad \sigma = F/A_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{公称ひずみ：} \quad \varepsilon = \Delta L/L_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 A_0 と L_0 はそれぞれ初期断面積と初期標点間距離を表す。 F の単位はNで、 σ の単位はPa(=N/m²)である(鉄鋼材料の強度としてはMPa(=N/mm²；M≡10⁶)あるいはGPa(G≡10⁹)が使われる)。ひずみは百分率にして%で表すことも多い。代表的な2種類の公称応力－公称ひずみ曲線を図2に模式的に示す。縦軸に A_0 、横軸に L_0 を乗ずると生データの荷重－伸び(変形変位)曲線になる。

鉄鋼材料において、常温で得られる応力－ひずみ曲線は以下の3つの領域に大別される。

- ①弾性変形のための領域：変形は可逆的で除荷すると元の形状に戻る。荷重(応力)と変形変位(ひずみ)の間に線形(比例)関係がみられる。
- ②一様な弾塑性変形の領域：図1(b)のように試験片平行部全域にわたって巨視的に一様な変形がみられる。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、通常は材料の変形抵抗が大きくなり、これを加工硬化と呼ぶ。変形を継続させるには荷重を増やさねばならない。
- ③変形が局所化する塑性不安定領域：図1(c)に示すように平行部の一部分に変形が集中して、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、くびれ部分の内部は3軸応力状態になる。一般に、塑性不安定

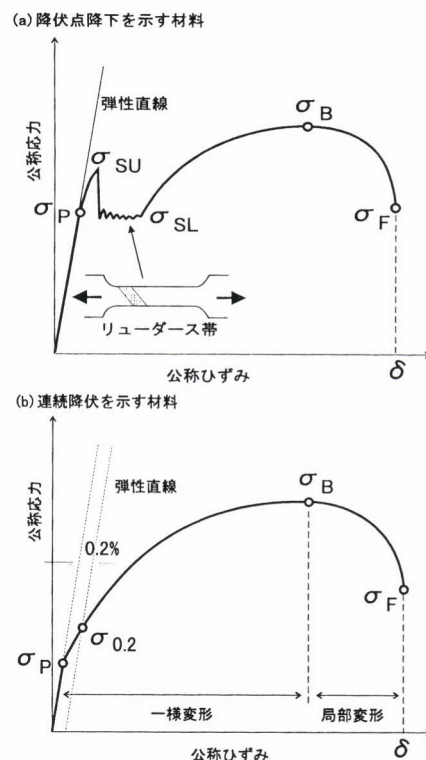


図2 代表的な公称応力－公称ひずみ曲線の模式図と引張性質の定義

の開始点が荷重最大点($dF=0$)に対応すると考えられる。くびれ変形が進行すると内部でボイドの発生が起こる。ボイドはやがて成長・合体して、残された外輪部分が最後にせん断で離れ試験片は破断する。このような破壊は延性破壊であり、試験片破断部分の形状の特徴からカップ&コーン破断と呼ばれる。場合によっては上記①や②の段階で試験片が急に破断し応力－ひずみ曲線が途中で寸断されることがあり脆性破壊と呼ばれる。破壊に関しては講義「疲労」と「破壊靱性」で説明される。

2.2.2 真応力－真ひずみ曲線

引張変形の進行とともに試験片平行部が伸びて断面積は減少する。単位面積あたりに作用する力を正しく知るためには、荷重を試験前の断面積で除すのではなく、変形中に刻々変化する断面積で除す必要がある。後者の方法で求めた応力を真応力(σ^*)と呼ぶ。一方、ひずみに関して標点間距離は刻々変化する。そこで、真ひずみ(ε^*)を以下のように定義する。

$$\varepsilon^* = \int_{l_0}^l dl/l = \ln(l/l_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

真ひずみ ε^* は公称ひずみ ε と異なり加算できる(たとえば、長さが L_A から L_B に変化し、さらに L_C に変化した場合に $\ln(L_B/L_A) + \ln(L_C/L_B) = \ln(L_C/L_A)$ と加算できるが、公称ひずみでは $(L_B - L_A)/L_A + (L_C - L_B)/L_B \neq (L_C - L_A)/L_A$)

L_A)となり加算できない。(3)式より真ひずみは対数ひずみとも呼ばれる。ひずみが小さい場合は級数展開すれば自明のように公称ひずみと真ひずみ、さらに公称応力と真応力はほとんど差がないので両者を区別して用いる必要はほとんどない。試験片平行部の体積を一定($A_0L_0=AL$)と仮定すれば、ネッキング開始点までの応力-ひずみ曲線は次式を用いて真応力-真ひずみ曲線に変換される。

$$\text{真応力: } \sigma^* = F/A_0 = \sigma(1+\epsilon) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$\text{真ひずみ: } \epsilon^* = \ln(L/L_0) = \ln(1+\epsilon) \quad \cdots\cdots(5)$$

弾性変形では原子間の距離が変化するので体積変化を伴う。一方、塑性変形では原子が並んだ面(格子面)が線状の格子欠陥(転位)の移動によりすべり変形することで形状が変わる。原子の数は変化しないから塑性変形は体積変化を伴わないと考えても良い近似となる(格子欠陥の生成等があり厳密に言えば変化する)。上記②の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わけである。

ネッキング開始後の上記③の領域では幾何学的形状変化を考慮した真応力の推定方法が提案されている²⁾。くびれた部分で真応力と真ひずみが最も大きくなる。このことを考慮して $\sigma^*-\epsilon^*$ 曲線を模式的に示すと図3のようになる。等方性材料を用いた同じ単軸変形でも圧縮試験による $\sigma-\epsilon$ 曲線は絶対値で表すと引張試験による $\sigma-\epsilon$ 曲線より変形応力が高い。これは圧縮変形では断面積が変形に伴って増大するためであり、 $\sigma^*-\epsilon^*$ 曲線で表すと両者は一致する。変形に伴う断面変化の特徴から圧縮変形ではネッキングが起らないので試験法として便利かと言えばそうではない。なぜならば、圧縮試験では試験片端部の拘束による樽型変形、挫屈あるいは曲げが起りやすく単軸応力状態を保つのが難しいからである。

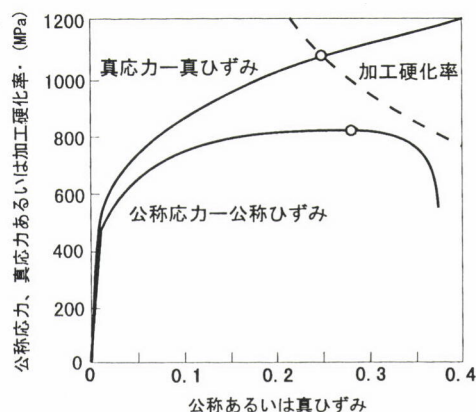


図3 公称応力-公称ひずみ曲線と真応力-真ひずみ曲線
(9)式: $K=1500\text{MPa}$ $n=0.25$ の関係を表す模式図

2.3 引張性質

2.3.1 弾性係数・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(塑性ひずみは応力と直接には関係がないことに注意:弾塑性変形域において塑性応力という言葉が使われることがあるが紛らわしいので避けたい)。ここで、単軸引張荷重が負荷された円柱の弾性変形を考えると、引張軸方向に伸び(ϵ_L)、その垂直方向にはポアッソン効果により縮む($\epsilon_T < 0$)。そこで、次の2種類の弾性係数を定義する。

$$\text{ヤング率(縦弾性係数)} \quad E = \sigma / \epsilon_L \quad \cdots\cdots(6)$$

$$\text{ポアッソン比(横弾性係数)} \quad \nu = |\epsilon_T / \epsilon_L| \quad \cdots\cdots(7)$$

鉄鋼材料の E は約200GPaで ν は0.3程度である。たとえば、高強度鋼に2GPaの応力をかけると1%の ϵ_L が生じる。このように鋼に通常生じる弾性ひずみは0.01以下の小さい値である。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を貼り付けたり、マルテンスの鏡式伸び計を用いる等、工夫が凝らされる。また、体積一定を仮定すると ν は0.5と計算されるが、弾性変形における ν の値はそれより小さいことに留意されたい。一方、塑性ひずみに対しては体積一定と近似できるので、等方性物質が単軸変形で引張方向に10%の塑性変形を示す場合には、垂直方向には5%縮むと考えてよい。

応力-ひずみ曲線の最初の領域を直線近似しその直線から曲線がはずれる点を比例限(σ_p)と呼ぶ。荷重を除荷した際に試験片が元の長さに戻る最大の負荷荷重の点を弾性限(σ_e)と呼ぶ。塑性変形が開始する時点を精確に測定するのはきわめてむづかしく、JISには σ_p や σ_e の規定はない。

2.3.2 降伏強さ(σ_s)

前節で σ_p や σ_e の測定はむづかしく信頼性に乏しいことを述べた。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・再現性の高い測定値が必要である。JISでは次に述べる降伏強さ(σ_s)を用い、設計等においては σ_s に安全率を乗じて利用する。まず、図2(a)の降伏点降下の現れる(不連続降伏)軟鋼のような場合には、上降伏点(σ_{su})と下降伏点(σ_{sl})を測定する。不連続降伏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一様な塑性変形が始まり加工硬化がみられる。この変形帯をリュージェス帯と呼び、このとき得られる伸びを降伏伸びあるいはリュージェス伸び(λ_r)という。一方、図2(b)のような連続降伏を示す材料の場合では、規定された永久伸び(塑性ひずみ)を起こすときの荷重を原断面積で除した商を耐力(σ_e)として用いる。特に規定のない場合は永久伸びの値を0.2%とする(0.2%耐力: $\sigma_{0.2}$)。

2.3.3 引張強さ(σ_B)

最大引張荷重を試験片平行部の原断面積で除した商を引張強さ(σ_B)という。上降伏点が大きくり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荷重を用いる。塑性設計(極限設計)においては σ_B が設計基準として採用される。

2.3.4 伸び(δ)と絞り(ϕ)

全伸びは荷重をかけた状態における標点間の長さから試験前のその長さから(2)式で求め、永久伸びは荷重を除荷した後の長さから求める。JISでは延性を表す量として破断伸び(δ)と絞り(ϕ)を定義している。試験片破断後における永久伸びが δ である。 δ はネッキングの位置に影響されるので図1に示すように標点間の中心から標点間距離の1/4以内で破断した場合をA、1/4を越え標点間内で破断した場合をB、標点間の外で破断した場合をCとして破断位置を試験表に付記する。

絞り(ϕ)は円形断面の試験片に対して用い、破断後に試験片の破断面を注意深く突き合わせて最小断面積 A_f を測定し次式によって求める。

$$\phi = (A_0 - A_f) \times 100 / A_0 (\%) \quad \dots\dots\dots (8)$$

上記以外にネッキング開始までの伸びを一樣(均一)伸び、その後の伸びを局部伸びと呼びよく利用する。

2.3.5 加工硬化指数(n 値: JIS Z2253-1996)

図3の真応力-真ひずみ($\sigma^* - \epsilon^*$)曲線を数式表現するために、次の n 乗硬化式(Hollomonの式)が使われることが多い。

$$\sigma^* = K(\epsilon^*)^n \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 K を強度係数、 n を加工硬化指数という。(9)式より $\ln \sigma^*$ 対 $\ln \epsilon^*$ 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 値が得られる。 n 値の計算法には最小自乗法と2点間法があり、計算に用いるひずみの範囲は材料規格などによって決められている。 n 値が重視されるのは加工性に関係する一樣伸びを予測できるからであろう。すなわち、ネッキング開始条件を荷重最大点($dF(=\sigma^* dA + A d\sigma^*)=0$)とすると、体積一定($A_0 L_0 = AL$)の仮定より $d\sigma^*/d\epsilon^* = \sigma^*$ の関係が導かれ($d\sigma^*/d\epsilon^*$ は加工硬化率: 図3参照)、(9)式を代入すると $\epsilon^* = n$ となる。試験片の一部で塑性変形が先行して断面積が減少しても加工硬化によってその部分が強化されれば塑性変形は他の弱い部分へ広がりネッキングは生じない。変形に伴う加工硬化と断面積減少の均衡によって塑性変形が安定に進行するので、 n 値が大きいほど塑性不安定が起こりにくいことを意味する。

2.3.6 塑性ひずみ比

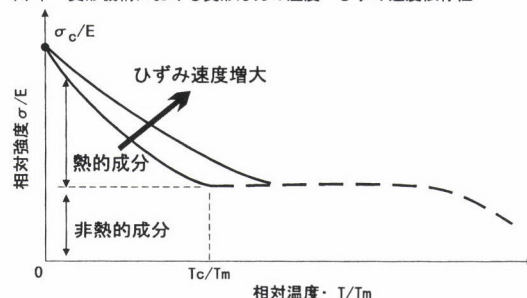
(ランクフォード値、 r 値: JIS Z2254-1996)

板材の成形性を示す特性値に塑性ひずみ比(r)がある。これは板材の引張試験において長手方向の伸びが10~20%になったとき板幅方向の真ひずみを 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 を精度良く求めることは至難の技なので、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 $\ln(W_0/W)/\ln(LW/L_0W_0)$ が使われる。ここで、 W_0 、 L_0 および W 、 L はそれぞれ試験前後の試験片の平行部の幅と標点間距離を表す。等方性材料では $r=1.0$ となるが、集合組織を制御し塑性異方性を発達させると板幅の減少に対して板厚変化の少ない、すなわち r 値の高い材料が製造できる。

2.4 変形応力に及ぼす温度(常温以下)とひずみ速度の影響

常温における鋼の塑性変形を担うのは前述の転位の運動である。そのため、変形応力に及ぼす温度やひずみ速度の影響を理解するには転位論の知識が不可欠である。しかし本稿では頁数の都合から転位の詳しい説明はできないので必要に応じて専門書を参照されたい。ここでは転位の運動における熱活性化機構が重要な役割をすることを強調しておく。転位の運動に対する短範囲障害は転位線の熱振動に基づくボルツマン確率で乗り越えられる。一般的な変形応力の温度依存性を模式的に示すと図4(a)のようである。絶対ゼロ度Kでは熱活性化の助けがないので最も大きな力(σ_c)が必要である。温度が十分高いとき(臨界温度 T_c 以上:

(a) 単一変形機構における変形応力の温度・ひずみ速度依存性



(b) 低炭素鋼の降伏強さの温度依存性

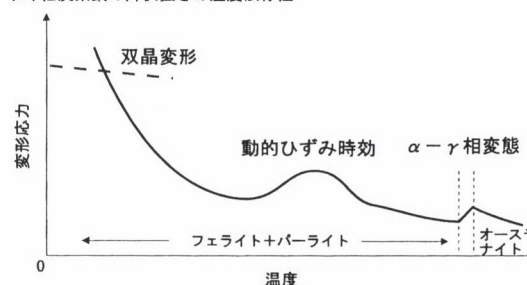


図4 変形応力の試験温度とひずみ速度依存性に関する説明

図の T_m は融点)は熱活性化によって運動転位はすべての短範囲障害を乗り越えることができる。 T_c 以上では結晶粒界のような熱活性過程で超えることのできない障害による抵抗のみが残る(非熱的成分という)。ひずみ速度の増加は熱活性化確率から考えると温度の低下に対応し、温度とひずみ速度の間には同じ変形機構の働く範囲内では互換性がある。 T_c 以上の温度依存性の小さい領域からさらに高温になると、回復・再結晶・結晶粒成長など内部組織変化に関する熱活性化現象による変形応力の温度・ひずみ速度依存性が現れるが、これに関しては講義「高温変形」で説明される。低炭素鋼では、図4(b)のように低温(あるいは高ひずみ速度)になると転位運動によるすべりの他に変形双晶の発生がみられることがある。また473~673Kを中心に広い温度範囲で炭素や窒素による動的ひずみ時効(運動転位が炭素や窒素原子により固着される。拡散が支配するので温度・ひずみ速度依存性が大きい)が起こり変形抵抗が増大する。それらの結果として低炭素鋼の変形応力の温度依存性は図4(b)のように複雑である。低炭素鋼では、常温付近で転位運動に対する熱的成分が小さく、さらに動的ひずみ時効領域にかかり始めるため、変形応力のひずみ速度依存性は小さいという特徴がみられる。

近年、地震や自動車の衝突における安全性等から高速変形における強度が問題にされている。ひずみ速度が約 $5 \times 10^3/s$ 以上になると熱活性化機構はほとんど関与せず転位の運動に対してはフォノンや伝導電子による抵抗力が支配的になる。高速変形の実験にはホプキンソン棒法をはじめ種々な試験方法が利用されているが、まだ標準化された方法はない。

3 硬さ試験

3.1 硬さ試験方法

硬さにはいろいろ異なる定義と測定方法がある。鉄鋼材料でよく利用されるブリネル硬さ、ビッカース硬さおよびロックウェル硬さは押し込み硬さに属する。すなわち、硬い球もしくは多角錐の圧子を試料表面に押しつけて試料の塑性変形量から硬さを求める方法である。

3.1.1 ブリネル硬さ試験方法(JIS Z2243-1992)

ブリネル硬さ HB は硬い球状の圧子(直径 D :mm)を用いて静かに荷重を加えて試験面にくぼみをつけ、除荷した後に残った永久くぼみの表面積を測定し、荷重を表面積で除した商で表す(図5参照)。くぼみの直径 d (mm)、荷重 F (N)より

$$HB = 0.102 \times 2F / [\pi D \{D - (D^2 - d^2)^{1/2}\}] \cdots (10)$$

硬さの値には通常単位をつけない(硬さは最初にkgfで定

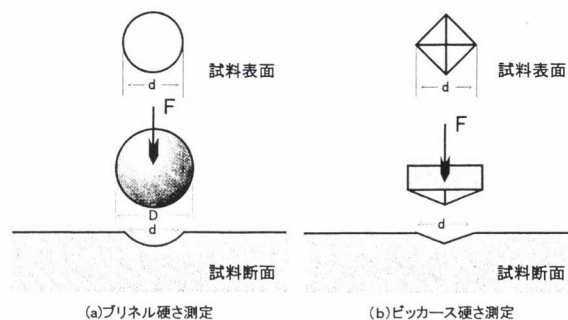


図5 硬さ試験の説明

義されたので右辺の0.102はNからの換算係数)。試験機には油圧型として型があり、圧子には直径1~10mmの軸受用鋼球(記号HBSで表す)あるいは超硬合金球(HBN)、荷重は9.807N~29.42kNの中から適当な組み合わせを選択し、 d が $0.24 \sim 0.6D$ となるようにする。原則として数値が450 HBSあるいは650 HBWを越える材料には用いない。試験結果は硬さ値、硬さ記号の順に表示する。たとえば直径10mmの鋼球と29.42kN(3000kgf)の荷重(試験力)を用いた場合の結果が250であったなら250 HBS10/3000のように記す。試験荷重を加え始めてから終わるまでの所要時間は2~8s、荷重保持時間は10~15sとする。

3.1.2 ビッカース硬さ試験方法(JIS Z2244-1998)

対面角が 136° のダイヤモンド四角錐圧子を用い、試験面にピラミッド型のくぼみをつけた時の荷重 F (N)をくぼみの表面積で除した商で表す。表面積は除荷後に残った永久くぼみの対角線長さ d (mm)から求める。

$$HV = 0.102 \times 2F \cdot \sin(\alpha/2) / d^2 = 0.1891 F / d^2 \cdots (11)$$

ここで、 $\alpha = 136^\circ$ 、数値に単位は通常つけない。1998年のJIS改正により荷重は0.09807~980.7N(0.01~100kgf)の中から選ぶことに変更された(従来は荷重9.8N(1kgf)以下のマイクロビッカース硬さ測定は微小硬さ試験として区別されていた)。荷重の保持時間は10~15sで、これ以外を用いた場合には表示する。たとえば、294.2N(30kgf)の荷重を20s負荷して求めた試験結果が(11)式により120であったならば、120 HV30/20のように表す。この試験方法は圧子形状が四角錐のために試験荷重とくぼみの寸法の関係が連続体塑性力学的には相似関係になるので、測定値に荷重依存性が現れにくいのが特長である。試験機のカム機構により荷重の負荷、保持および除荷が行われ負荷所要時間はダッシュポットにより調整できるようになっている。最近では極小荷重を用いる超マイクロビッカース計が開発され、荷重-変位(押し込み深さ)曲線から薄膜の硬さや弾性係数等が測定されている。このとき、4角錐では圧子の頂点を精度よく加工できないため三角錐圧子が利用される。試験荷重が小

さくなると、試料の表面状態、ミクロ組織の不均一性、結晶塑性の異方性等の影響が現れるので大きな荷重で測定した結果との対応において注意しなければならない。

3.1.3 ロックウェル硬さ試験方法(JIS Z2244-1992)

圧子として頂角120°の円錐形で先端半径0.2mmの丸みをもつダイヤモンドコーンもしくは直径の異なる鋼球を用いて、まず基準荷重を負荷し、続いて試験荷重をかけ、再び基準荷重に戻す。試験荷重を負荷する前後で基準荷重負荷状態のくぼみの深さ変化($h(\mu\text{m})$)をダイヤルゲージで読みとる。圧子と荷重の組み合わせで種々なスケールが用意されている。鉄鋼材料の場合は通常、ダイヤモンド圧子-基準98.07N(10kgf)-試験1471N(150kgf)のCスケール、あるいは直径1.5875mm(1/16インチ)鋼球-基準98.07N(10kgf)-試験980.7N(100kgf)のBスケールが用いられる。硬さはそれぞれ次式で計算して表す。

$$HRC = 100 - 0.5h \quad \dots\dots\dots (12-a)$$

$$HRB = 130 - 0.5h \quad \dots\dots\dots (12-b)$$

フェライト系鉄鋼材料では20HRCは大略100HRBに相当する。硬さの定義と測定法の相違からわかるように各種硬さの間には普遍的な換算法はないので、汎用換算表の使用にあたってはその表が対象とする材料に限定して用いるべきである。

3.2 硬さと引張性質の関係

押し込み硬さ試験は簡便なため品質管理などにおいてよく用いられてきたが、物理的意義は曖昧である。古くはTaborにより押し込み変形の塑性力学的解析および実験結果に基づいて応力-ひずみ曲線と押し込み硬さの関係が次のように考察されている³⁾。

$$HV = cY \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 Y は変形応力(kgf/mm^2 で表す)で c は2.9から3.0の値をとる。多くの塑性解析は加工硬化のない場合なので Y は引張強さか降伏強さかの区別はない。加工硬化材の場合

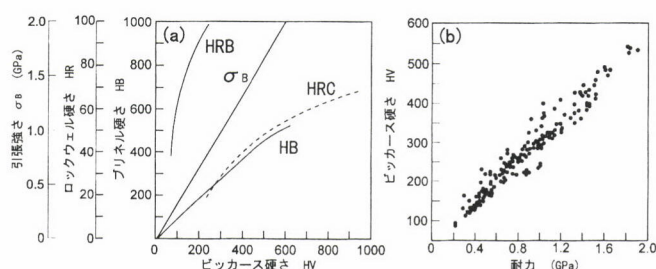


図6 各種硬さおよび引張性質の相互関係の例
(a)各種硬さ(HB,HV,HR)および引張強さ(σ_B)の関係(鋼)⁴⁾
(b)ビッカース硬さと耐力の関係(18-8ステンレス鋼、洋白、ベリリウム銅、パーマロイ、CuNiおよびリン青銅の各焼き鈍し材や加工材の結果)⁵⁾

合には、Taborによる軟鋼と銅に関する実験で、 Y として8%変形応力を採用すると良い近似となることが示された。これは球圧子押し込みの連続体塑性力学解析において圧痕周囲の代表的塑性ひずみが10%程度であることにも対応しており、8%変形応力が代表的変形抵抗に相当することを意味する。世の中に出回っている対応表においては引張強さの3倍という関係を良くみかけ、炭素鋼や低合金鋼など加工硬化の小さい材料に適用される。一方、オーステナイト鋼など加工硬化の大きい材料の場合は図6のようにHVが耐力に対して整理されている⁴⁾。材料の種類に応じて種々な換算式が提案されている⁵⁾が、一般的な換算式としては8%変形応力を用いるのが妥当と考えられる。1956年以降日本機械学会カタサ研究会を中心に展開された国内における研究^{5,6)}によってもTaborのまとめた上記の結論が再確認されている。

4 おわりに

最近、書店でみかけた材料試験法に関する書籍を4冊紹介するので参考にされたい。試験原理は変わらないが測定装置、制御方法や計測技術が年々進歩しているので、実際に試験される場合には日本工業規格協会発行の最新のJIS規格をみられるようお奨めする。関連JIS規格一覧を下記に示す。

(1)材料試験法に関する参考書

- ①機械材料(初版)(1991)、機械材料およびその機械的性質と試験方法(第9版)、日本材料学会(1989)
- ②須藤 一：材料試験法、内田老鶴圃、第1版(1976)、訂正2版5刷(1998)
- ③砂田久吉：演習・材料試験入門(1987) 大河出版
- ④中川 元、遠藤達雄、盛中清和、光永公一：材料試験方法、養賢堂、第1版(1968)、第25版(1994)

(2)引張試験と硬さ試験に関連する日本工業規格(JIS)

G0202-1987鉄鋼用語(試験)、Z2201-1993金属材料引張試験片、Z2241-1998金属材料引張試験方法、Z2253-1996薄板金属材料の加工硬化指数試験方法、Z2254-1996薄板金属材料の塑性ひずみ比試験方法、Z2243-1992ブリネル硬さ試験方法、Z2244-1998ビッカース硬さ試験-試験方法、Z2245-1992ロックウェル硬さ試験方法、Z8401-1961数値の丸め方、B7721-1997引張試験機-力の検証方法、B7724-1994ブリネル硬さ試験機、B7725-1997ビッカース硬さ試験-試験機の検証、B7726-1997ロックウェル硬さ試験-試験機の検証、B7728-1997一軸試験機の検証に関する力計の校正方法、B7730-1997ロックウェル硬さ試験-基準片の校正、B7735-1997ビッカース硬さ試験-基準片の校正、B7736-1994ブリネル硬さ基準片、B7741-1991

金属材料引張試験機用伸び計

参考文献

- 1) JISハンドブック 鉄鋼, 日本規格協会, 前述のJIS規格一覧参照
- 2) たとえば, R. G. Thomsen, C. T. Yang and S. Kobayashi, 工藤英明他訳: 金属塑性加工の力学, コロナ社, (1967), 83.
- 3) D. Tabor: The Hardness of Metals, Oxford University Press, (1951)
- 4) たとえば, 機械材料, 日本材料学会, (1991), 88.
- 5) 吉沢武男編: 硬さ試験法とその応用, 裳華房, (1967), 287.
- 6) 吉沢武男, 黒木剛司郎: かたさの材料力学的意義, 日本機械学会誌, 64 (1961), 1453.

補遺 鉄鋼ユーザーのためのQ&A

鉄鋼ユーザーが引張試験および硬さ試験について疑問に思われるかもしれない下記の項目について簡単な説明を加える。

Q1:「板の状態で使用したいのに丸棒試験片による試験結果しかない場合にはどうすれば良いか」

A1:「板状試験片を作製して再試験するのが良い」では不親切な回答なので、ネッキング開始までは試験片の形状・寸法にあまり依存しないことを知っておくと良いであろう。すなわち、設計の計算に用いる降伏強さ等は試験片依存性が小さいので、多くの場合は問題ないと予想される。

Q2:「実際に使う部材の応力状態がねじりあるいは多軸応力状態であるとき、引張試験結果をどう使えば良いのか」

A2: 材料力学の教科書をみると、多軸応力下の降伏条件の説明がある。通常、ミーゼスやトレスカの条件が解説されているので、そこでの材料定数として引張試験結果を用いればよい。塑性変形の解析では多軸応力下の塑性変形状態を相当(等価)応力と相当(等価)塑性ひずみに換算するが、両者の関係は引張試験結果から与えられる。多軸塑性変形解析に関して詳しく知りたいならば塑性力学の教科書を勉強しなければならない。すなわち、等方性とみなされる材料では、引張試験結果のみで多軸応力状態の検討がある程

度できるということである。

Q3:「実際に部材にかかるひずみ(負荷)速度の影響はどうか考えれば良いか」

A3: 2.4節で説明したように、鉄鋼材料を常温で使用する場合にはほとんど影響がないと考えてよい。ただし、衝撃負荷あるいはオーステナイト系ステンレス鋼の常温クリープ変形のような極端な条件下では変形応力に及ぼすひずみ速度の影響を考慮しなければならない。また、チタン合金等の変形応力は常温でかなり大きなひずみ速度依存性を示すので注意されたい。

Q4:「ユーザーはどのようなときに n 値に注意して材料選定を行えばよいか」

A4: まず成形加工を行う場合である。張り出し成形や曲げ加工をはじめ引張応力が関与する場合の材料の加工限界は n 値の大小に主として依存する。次に機械・構造物に何らかの理由で過大荷重が負荷された場合の安全性(たとえば耐震性)を重視する場合は n 値の大きい材料が有利と思われる。

Q5:「どのような加工において r 値を考慮して鋼材を選定したらよいか」

A5: 端的な答は塑性加工の教科書に出てくる成形限界線図であろう。板材の成形可能範囲は n 値と r 値が大きくなるほど広がる。具体的に言えば、自動車の車体プレス成形において r 値が大きいことが望ましい。深絞り成形では特に重要であり限界絞り比は r 値にほぼ比例する。

Q6:「現場ではショア硬さを良く使うがどういう硬さなのか」

A6: 国内で広く使われている方法にショア硬さ試験がありJIS Z2246-1992の規定があるが、ISO規格にはない。試験面に一定の高さから落下させたハンマーの跳ね上がり高さから求める方法で動的な反発硬さである。試験機が小型軽量で持ち運びが容易な上、圧痕がほとんど残らないことから、製品の品質管理や大型部材の測定等に便利なポータブル型試験機として重宝されている。測定に要する時間も数秒程度で瞬時に結果がわかる。しかし、表面粗さや弾性係数に依存するなどの測定精度や物理的解釈において前述の静的押し込み硬さに比べて正確さの点で劣ると思われる。

(1999年2月3日受付)