

材料システム実験

－ 「引張試験」と「硬さ試験」 －

予習課題

(専用予習書を使用・実験当日最初に回収)

材料記号「S45C」の意味, 基本的な化学成分, 用途について調べ予習書に書きなさい。また鋼の熱処理方法について種類とその内容を調べ予習書に書きなさい。また本テキストを読み, 特に太字で示す重要な用語の意味を覚えること。(当日確認します)

1 目的

引張試験では炭素鋼の引張試験を行い, 炭素鋼の機械的特性を評価する。実験を通してヤング率, 降伏応力等の基本的な材料特性について確認する。

硬さ試験では炭素鋼のビッカース硬さ試験により硬さを評価し, 硬さ値の物理的な意味および硬さ試験の利点について理解する。

2 原理

2.1 引張試験

2.1.1 はじめに

機械・構造物に材料を使用するためには, 使用する材料の弾性率, 降伏応力等の基本的な材料特性が分かっているなければならない。また高い安全性や信頼性が必要となる場合には, 想定される状況に応じて材料の耐熱性や疲労寿命等種々の材料特性を把握する必要がある。

2.1.2 応力

応力(stress)とは材料内部における単位断面積あたりに加わる内力のことである。図1に示すように同じ断面においてもその面に対して垂直方向の内

力に対応する**垂直応力**(normal stress) σ と、その面に対して平行な方向の内力に対応する**せん断応力**(shear stress) τ がある。 σ および τ は以下の式で表される。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

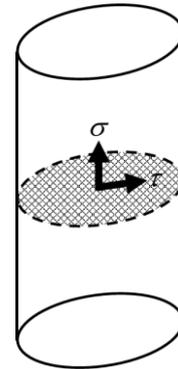


Fig. 1 Directions of stresses

ここで A は応力を定義する断面の面積、 P は定義した面に対して垂直な力、 F は平行な力とする。実際の複雑な応力場では垂直応力とせん断応力とが合成された状況となり、また定義する面の角度により各応力成分は変化する。なお今回行う単純引張試験では引張軸方向に直交する断面に対して垂直応力のみが作用する状況となり、最も基本的な材料特性を評価することが可能となる。なお、本テキストでは以降垂直応力のみを扱うため、垂直応力を応力と略して記述する。また応力の経時変化を評価する際に初期の断面積のみを使用して算出した応力を**公称応力**(engineering stress または nominal stress)と呼ぶ。実際には材料の断面は伸びる過程で減少していくため、それを考慮して応力を算出したものが**真応力**(true stress)と呼ばれる。真応力は定義される断面積が引張では徐々に小さくなり、圧縮では断面積が徐々に大きくなることから公称応力よりも高い値となる。なお真応力は変形解析、数値計算では重要となる。実際の実験や評価において実用上は公称応力を用いるのが便利である。本実験では公称応力を用いることとする。

2.1.3 ひずみ

ひずみ(strain)は応力に対応した形状の変化率を意味し、垂直応力に対応する**垂直ひずみ**(normal strain) ϵ とせん断応力に対応した**せん断ひずみ**(shear

strain) γ とがある。ここでは単純引張試験で扱う垂直ひずみについて説明する。以降では垂直ひずみをひずみと略して記述する。ひずみは元の長さに対する長さの変化分の比であり図2の初期状態から変形状態1への変形で生じるひずみは以下の式で表される。

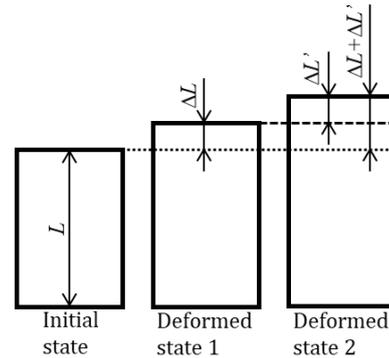


Fig. 2 Definition of normal strain

$$\varepsilon_{d01} = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

ここで L は材料の元の長さ、 ΔL は変形による長さの変化分である。このように定義されるひずみは**公称ひずみ**(engineering strain または nominal strain)と呼ばれる。ここからさらに変形状態2への変形を考えると、追加の長さ変化分は $\Delta L'$ となり、初期状態を基準とすればこの時のひずみは以下のようになる。

$$\varepsilon_{d02} = \frac{\Delta L + \Delta L'}{L} \quad (4)$$

また基準を変形状態1とした場合には以下のようになる。

$$\varepsilon_{d12} = \frac{\Delta L'}{L + \Delta L} \quad (5)$$

初期状態から変形状態2までのひずみ ε_{d02} は、初期状態から変形状態1までのひずみ ε_{d01} と変形状態1から変形状態2までのひずみ ε_{d12} との和として考えることができるが、公称ひずみの定義では以下の通り成り立たない。

$$\varepsilon_{d01} + \varepsilon_{d12} \neq \varepsilon_{d02} \quad (6)$$

これに対し上の式が成り立つように、各区間のひずみの総和として最終的な

ひずみを表したものを**真ひずみ**(true strain)または対数ひずみと呼ぶ。各変形状態の直前の基準長さを L_i とし、各変形状態のその直前からの長さの微小変分を dL とすると真ひずみは以下の様に表される。

$$\varepsilon^t = \frac{dL}{L_0} + \frac{dL}{L_1} + \frac{dL}{L_2} + \dots + \frac{dL}{L_i} = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln \left(1 + \frac{L_i - L_0}{L_0} \right) \quad (7)$$

また図2の初期状態から変形状態2までの変形に当てはめれば以下のようになる。

$$\varepsilon_{d02}^t = \ln \frac{L + \Delta L + \Delta L'}{L} = \ln(1 + \varepsilon_{d02}) \quad (8)$$

真ひずみと公称ひずみの関係は、基本的に真ひずみの方が低く評価されるもののひずみが非常に小さい場合はほぼ同じ値となり、正または負に変形が大きくなるほど真ひずみの方がより低く評価される。これらは定義が異なるためどちらが正しいということは無いが、用途に対して適した方を使用すべきである。なお真ひずみは大変形の評価や変形解析、数値計算では重要となる。実際の実験や評価において実用上は公称ひずみを用いるのが便利である。本実験では公称ひずみを用いることとする。

2.1.4 応力－ひずみ線図

引張試験により得られる情報として最も重要なものが**応力－ひずみ線図**(stress-strain curve)である。引張試験装置には一般的に荷重センサ(ロードセル)と変位センサが設置されており、引張試験中の荷重と伸び量を時系列的に測定する。得られたデータから応力とひずみを求め、グラフに示したものが応力－ひずみ線図となる。その例を図3に示す。

図3(a)は炭素鋼以外の金属の一般的な応力－ひずみ線図のモデルである。縦軸は応力で単位はPaとなり、構造用材料では一般的にMPaで表示する。横軸はひずみで無次元量となる。百分率に直し%として表示する場合もある。

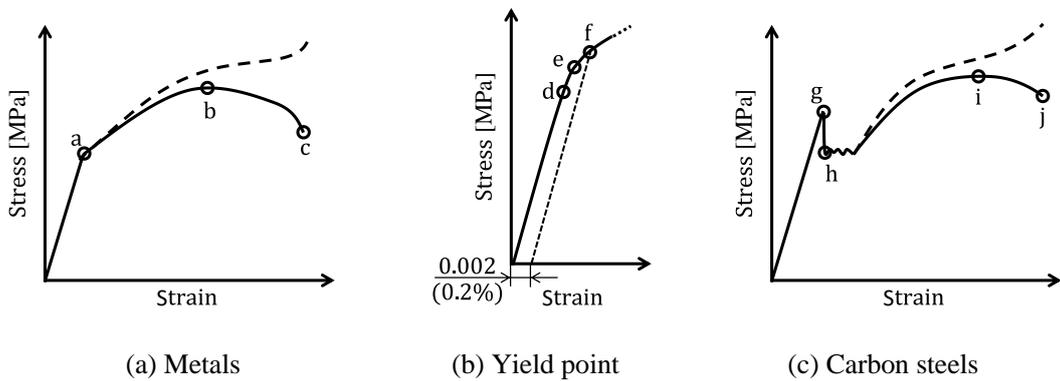


Fig. 3 Stress-strain diagrams

a点は降伏点(yield point)と呼ばれ、この時の応力とひずみを**降伏応力**(yield stress)、**降伏ひずみ**(yield strain)と呼ぶ。基本的にはこの降伏点までが**弾性変形**(elastic deformation)、この点以降が永久ひずみをともなう**塑性変形**(plastic deformation)となる。また弾性変形における直線部分は応力とひずみが比例関係にあり、これを**フックの法則**(Hooke's law)と言う。その関係式は以下のように表される。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (9)$$

$$\tau = G\gamma \quad (10)$$

ここで E は直線部分の傾きであり、**縦弾性係数**(elastic modulus)または**ヤング率**(Young's modulus)と呼ぶ。 G は**せん断弾性係数**(shear modulus)であり、横弾性係数また剛性率と呼ぶ場合もある。また引張軸方向のひずみが正の値であるのに対し、引張軸に直交する方向のひずみは負の値となる。この引張軸方向のひずみに対する直交方向のひずみの比を**ポアソン比**(Poisson's ratio)と呼び以下の様に表す。

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (11)$$

ここで ε は負荷方向のひずみ、 ε' は負荷方向に直交方向のひずみであり、弾性

変形範囲では一般的な金属で0.3前後の値となる。塑性変形過程では一般的には**加工硬化**(work hardening)をともなうため緩やかな応力の上昇をともなう。塑性変形が進行しb点で最大値を迎えた後、応力は下降しc点で破断する。b点の応力を**最大応力**(ultimate stress)または**引張強度**(tensile strength)と呼ぶ。c点は破断点(fracture point)と呼ばれ、この時の応力とひずみを**破断応力**(fracture stressまたはrupture stress)、**破断ひずみ**(fracture strainまたはrupture strain)と呼ぶ。実線で示すのは公称応力-ひずみ線図であり、応力の算出に初期の断面積のみを用いている。真応力を評価した場合は図中の破線で示されるような挙動となる。なお公称応力-ひずみ線図のb点以降、すなわち最大応力から応力が下降していく過程はおおよそ材料の一部にくびれ(necking)を生じていく過程となっており、やがて最も断面が減少した位置で破断が起きる。

図3(b)に示すのは降伏点近傍の現象を詳細に説明するために拡大したものである。d点は**比例限度**(proportional limit)と呼ばれこの点までは応力とひずみの関係は比例関係にある。e点は**弾性限度**(elastic limit)と呼ばれややカーブしているもののこの点までは弾性変形であり、この点以降では塑性変形となる永久ひずみが生じる。降伏点は塑性変形の開始する点であり厳密にはe点とすべきであるが、これを精密に評価することは極めて困難である。そこで一般的には**0.2%耐力**(0.2% offset yield strength または proof stress) (または単に耐力)として、除荷した際に永久ひずみが0.002(0.2%)残るf点を評価する。評価の方法としてはd点までの直線と同じ傾きの線をひずみが0.002となる点から平行に描き、応力-ひずみ線図との交点すなわちf点を求める。機械設計においてはこのようにして求めた耐力を降伏応力とみなして計算に用い

る。

図3(c)は炭素鋼の応力-ひずみ線図のモデルである。他の金属とは異なり**降伏現象**(yield behavior)を生じる。この場合、g点で降伏と同時に応力が低下しh点から若干の応力の変動をともないながら加工硬化せずに塑性変形が進行し、その後加工硬化を始めi点で最大応力、j点で破断となる。g点は**上降伏点**(upper yield point)、h点は**下降伏点**(lower yield point)と呼ばれる。また下降伏点から加工硬化を開始するまでの区間を**降伏点伸び**(yield point elongation)と言う。この降伏点伸びの過程では、実際にはリュース帯と呼ばれる局所ひずみ帯の発生と伝播が生じており、これが全面に広がった後に加工硬化が始まる。なお炭素鋼の場合でも真応力-ひずみ線図は破線で示すような挙動となる。また炭素鋼の内、比較的炭素濃度の低い低炭素鋼では降伏現象が顕著に現れるのに対し、炭素濃度の高い高炭素鋼では降伏現象は現れ難くなる。

2.2 硬さ試験

2.2.1 はじめに

ここで評価する硬さ(hardness)とは、手で触れた際の感覚的な変形しやすさや剛性ではなく、硬さ試験法により測定された硬さ値を意味する。基本的には試料表面に圧子を用いて圧痕(hollow)を付け、その圧痕に関係する量を評価する。一般的には圧痕の周囲や下部には塑性変形の影響があるため試料は圧痕よりも十分に大きい厚さが必要である。硬さ試験で得られる値は引張試験で得られるようなヤング率や降伏応力とは異なり定量性には劣るものの、引張試験より非常に簡便であり、得られる値が材料強度、塑性変形抵抗や耐摩耗性等の実用上重要な特性と関係し、材料の比較評価や材料組織の状態評

価に有用である。また機械加工を要する場合には加工条件の決定にも使用される。材料、軸やボルト等の製品カタログでは硬さ値が示されている場合が多い。本実験ではビッカース硬さ試験を実施するが、以下では種々の硬さ試験の原理についても説明する。

2.2.2 主種の硬さ試験方法

2.2.2.1 ショア硬さ試験(JIS Z 2246)

ショア硬さ(Shore hardness)はダイヤモンドの球面圧子を一定の高さ h_0 から試料表面に落下させ跳ね返りの高さ h から硬さを求める。ショア硬さの記号はHSであり以下の式で計算される。

$$HS = k \frac{h}{h_0} \quad (12)$$

ここで k は係数である。これにより評価される値は、試料表面に圧子が衝突した際に形成されるくぼみの形成過程で消費されるエネルギーに対応した比を評価している。

利点として装置が最も簡便であり軽量で移動しやすく、試験自体も簡単であり、また圧痕が目立たない点である。欠点としては試料の大きさの影響を受けやすく、比較的試験結果のばらつきが大きい点である。

2.2.2.2 ブリネル硬さ試験(JIS Z 2243)

ブリネル硬さ(Brinell hardness)は鋼球や超硬合金球の圧子を用い、これを所定の荷重で試料表面に押し付けてくぼみを付け、くぼみの直径から硬さ求める。負荷の保持時間は30秒である。ブリネル硬さの記号はHBで表され、超硬合金球を使用した場合はHBWで表す。また球体の直径を D [mm] , くぼみの直径を d [mm] , 加えた荷重を P [kgf]とすれ

ばHBは以下の式で計算される。

$$HB = \frac{P}{A_H} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (13)$$

ここで A_H はくぼみの表面積[mm²]である。次元は面積あたりの力であるため圧力や応力と同じであり、単位はkgf/mm²となる。表記する際は単位を付けず試験条件も付記し例えば、300HBW10/3000のように書く。この意味は直径10mmの超硬合金球を用い3000kgf負荷した結果、300という値が得られたということである。圧痕のサイズは数ミリメートル程度になる。

利点としてはある程度広い範囲の平均的な値を評価できる点である。欠点は、小さい試料には向いていないこと、また基本的には試験荷重が異なると結果が変わってしまい異なる条件の試験結果を比較できないことである。

2.2.2.3 ロックウェル硬さ試験(JIS Z 2245)

ロックウェル硬さ(Rockwell hardness)はダイヤモンド円錐圧子、鋼球または超硬合金球の圧子を用い、まず所定の基準荷重 P_0 により初期押し込み状態とし、続けて試験荷重 P を追加で負荷してから基準荷重 P_0 まで除荷する。初期の基準荷重の際の押し込み深さと試験荷重を追負荷した後に基準荷重まで除荷した際の押し込み深さの差分 Δh [mm]を用いて硬さを求める。硬さの記号はHRであり、圧子の種類や試験荷重レベルを区別する記号が加えられる。例えばダイヤモンド圧子を用いた場合にはHRC、鋼球の圧子を用いた場合にはHRBとなる。硬さ値は以下の式で計算される。

$$HR = 130 - 500\Delta h \quad (14)$$

これは試験荷重による永久変形としてのくぼみ深さの変化を評価している。最大値は130となる。また試験荷重は例えば基準荷重が1kgfで試験荷重が150kgfのようになる。ダイヤモンド圧子を用いて硬さ値が45となれば45HRCのように書く。圧痕のサイズは数十～数百マイクロメートル程度になる。

利点としては、基準荷重で初期押し込み状態をつくるため、試料表面に酸化膜等の表面層がある場合にその影響を受けずに母材の硬さを評価できること、比較的誤差が生じ難いことがあげられる。欠点としては圧子の種類や試験荷重を変えると試験結果が変わってしまい、異なる条件の結果を比較できない点である。

2.2.2.4 ビッカース硬さ試験(JIS Z 2244)

ビッカース硬さ(Vickers hardness)は対面角が136°のダイヤモンド四角錐圧子を用いて所定の試験力 P [kgf]で一定時間試料表面に押し込み、圧子を取り除いた後に残ったひし形の圧痕の対角線長さ d [mm]から硬さを評価する。記号はHVであり、試験荷重を圧痕の表面積で除した値を求め、以下の様に計算される。

$$HV = \frac{P}{A_s} = \frac{2P}{\left(\frac{d^2}{2\sin(136^\circ)}\right)} = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (15)$$

ここで A_s はビッカース圧子による圧痕の表面積[mm²]である。対角線長さ d は2つの対角線で異なる場合が多いので両者の平均を用いる。測定値の次元はブリネル硬さと同様に面積当たりの力であり単位はkgf/mm²となる。試験力は例えば5～100kgfのような荷重であり、荷重保持時間は10～15sであるがこれよりも長い保持時間としてもよい。試

料の厚さは $1.5d$ 以上が必要とされ、測定位置は試料の縁から $2.5d$ 以上、測定間隔は圧痕中心間距離が $3d$ 以上必要とされる。表記としては例えば測定値が150であれば150HVのように書く。圧痕のサイズは数十～数百マイクロメートル程度になる。またマイクロビッカース試験といったより低荷重でさらに小さい圧痕で評価する方法もある。

利点としては基本的には試験荷重によらず同じ硬さ値を評価できる点が多い。またマイクロビッカース試験であれば薄膜のような非常に薄い試料や小さい試料でも評価可能である。欠点としては対角線長さ測定について測定者毎の誤差が生じやすく、これが測定結果に影響する点である。

3 実験

3.1 引張試験

3.1.1 実験装置

引張試験に用いる装置は、負荷容量250 k Nの万能試験機（島津製作所，Autograph AG-X plus 250kN）を用いる。またヤング率測定のために120□の汎用箔ひずみゲージを用い、その測定にはブリッジボックス（共和電業，DP-120A）および動ひずみアンプ（共和電業，DPM-911B）を用いる。

3.1.2 試験片

本実験では、比較的良好に使用される中炭素鋼のS45Cの焼鈍(Annealing)材と焼入(Quenching)材の2種類について評価する。形状は図4に示すドッグボーン型の丸棒試験片であり、形状はJIS Z 2201定形10号試験片に従っている。直径の細い中央の60mmの区間内に材料特性を評価する標点部をとり、両端

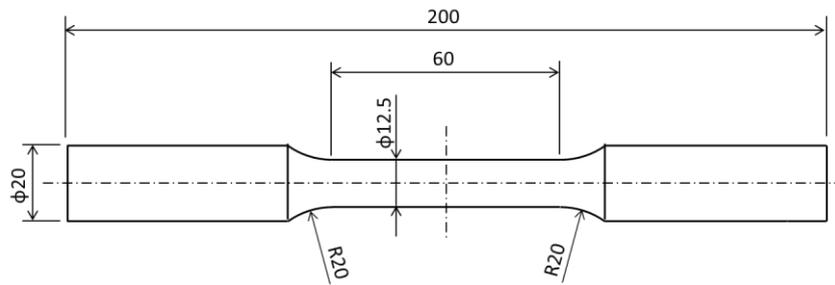


Fig. 4 Geometry of specimen

の直径が太い部分は試験機のチャック（固定具）に固定する範囲となる。本実験ではこの試験片の長手方向が上下方向となるように試験機に固定し引張試験を実施する。また試験片にはヤング率測定のために中央に表裏対称となる位置に2枚のひずみゲージを軸方向に合わせて貼付し、さらに破断伸びを測定するために中央60mmの範囲内に標点部として50mmの範囲の両端を示す線を描く。応力算出のために必要となる断面積は、標点部の範囲で3点の直径を測定する。また試験前の試験片の状態を写真等で記録する。

3.1.3 実験条件

3.1.3.1 ヤング率測定試験

最初にヤング率測定を実施する。最大負荷を弾性変形範囲の応力（例えば100MPa程度）とし段階的に負荷および除荷を行い、各段階のひずみを記録する。

3.1.3.2 破断試験

破断試験は2mm/minの変位制御で実施し、試験中の荷重および変位を記録する。破断後には試験片の破断部を突き合わせ、標点部の長さおよび破断部の直径を測定する。標点部の長さ変化および破断部の直径変化から破断伸び δ および破断絞り φ を求める。それぞれ以下の式で計算する。

$$\delta = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100 \quad [\%] \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{(A_0 - A)}{A_0} \times 100 \quad [\%] \quad (17)$$

ここで L は破断後に突き合わせて測定した標点部長さ、 L_0 は元の標点部長さ、 A は破断後に突き合わせて測定した最小断面積、 A_0 は元の断面積である。

3.2 硬さ試験

3.2.1 実験装置

本実験ではビッカース硬さ試験機（松沢精機, Hardness Tester, Model MV-1）を用い材料の硬さを評価する。また付属の光学顕微鏡により図5に示すような圧痕を観察し、付属のマイクロメーターにより圧痕の対角線長さを測定する。

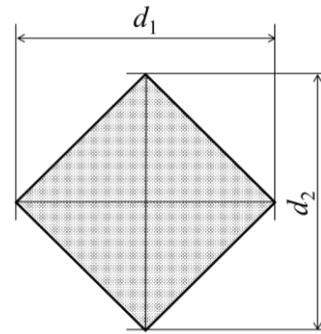


Fig. 5 Diagonals of hollow

3.2.2 試験片

硬さ試験に用いる試験片は、引張試験で用いた焼鈍材および焼入材の試験片端部を20mm程度に切断したものをを用いる。切断面はエメリーペーパーにより研磨し、鏡面に仕上げる。この際、試験片の上下面の平行を保つこと、仕上げ面の平面を保つことが重要である。

3.2.3 実験条件

圧子の押し込み荷重は10kgfとし、その荷重保持時間は30sとする。圧痕の測定は上下左右の対角幅 d_1 および d_2 をマイクロメーターで測定する。硬さ値の計算（式15）には d_1 と d_2 の平均値を用いる。また圧痕のサイズ測定状況を写真等で記録する。

4 課題

4.1 引張試験

4.1.1 結果について（詳細は実験後に指示する）

4.1.1.1 ヤング率測定試験の結果を表及びグラフで示し、ヤング率を適切に評価すること。

4.1.1.2 破断試験結果から公称応力－ひずみ線図を作成すること。

4.1.1.3 公称応力－ひずみ線図から降伏応力または0.2%耐力，引張強度，破断応力を評価すること。

4.1.1.4 破断後の試験片から破断伸びおよび破断絞りを評価すること。

4.1.1.5 破断面の状況を写真等で示すこと。

4.1.2 考察について

4.1.2.1 得られたヤング率，公称応力－ひずみ線図およびそこから得られた各値の妥当性について文献値も調べたうえで検討しなさい。

4.1.2.2 熱処理の違いによりなぜ強度や破断の様子が異なるのか考察しなさい。
(破断までの過程や破壊形式の違い等についても考慮すること)

4.1.2.3 その他独自の考察を加えること。

4.2 硬さ試験

4.2.1 結果について（詳細は実験後に指示する）

4.2.1.1 圧痕のサイズ測定状況を写真等で示すこと。

4.2.1.2 圧痕のサイズ測定結果，硬さ算出結果を表にまとめること。

4.2.1.3 試験片断面の中央から端部にかけての硬さ変化をグラフで示すこと。

4.2.2 考察について

4.2.2.1 硬さ測定結果の妥当性について検討しなさい。

4.2.2.2 試験片断面の硬さ分布に変化がある場合、その理由について考察しなさい。

4.2.2.3 その他独自の考察を加えること。