

材料評価学 第4回

- 前回：
- 引張試験における
 - ・ 真ひずみの意義
 - ・ 降伏現象
 - ・ 耐力
 - ・ 材料の変形挙動



- 今回：
- 引張試験における
 - ・ 加工硬化指数
 - ・ くびれ発生時の応力とひずみ
 - ・ 材料の破壊

4. 引張試験 3

4.1 加工硬化指数

・問い: 降伏応力は塑性変形(=転位運動)に必要な下限応力である, では降伏応力以上の一定応力を負荷すれば塑性変形は進行するか?

A. 塑性変形を進行させるには
応力を上昇させる必要がある.

||

材料が加工硬化により強くなるため

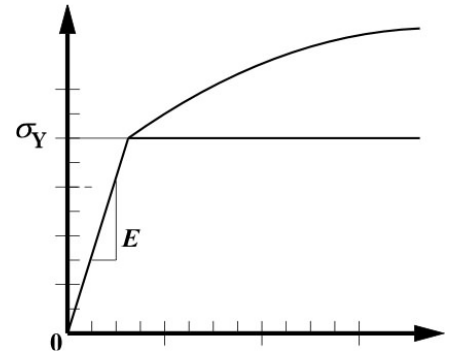


表 4.1 各金属材料における加工硬化指数

材	料	n
18-8	ステンレス鋼	0.53
七三	黄銅 焼なまし	0.48
六四	黄銅 "	0.39
Cu	"	0.34
Al	"	0.25
軟	鋼 0.05% C	0.25
	0.12% C	0.25

$$\sigma = K \epsilon^n$$

塑性係数

・加工硬化指数: 加工硬化の
度合いを示す
指数.

・鉛などの軟金属

・既に十分加工硬化した材料

} $n = 0$ (加工硬化しない)

・18-8 ステンレス鋼や黄銅[fcc]

n 低い

・軟鋼等[bcc]

n 高い

●くびれ発生時における加工硬化指数および真ひずみの関係

くびれ発生時(=公称応力-公称ひずみ線図における引張強さを示す時点)における真

ひずみ ϵ_t は加工硬化指数 n 値と一致する。

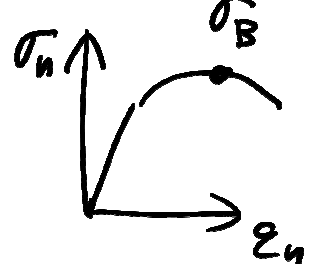
$$\sigma_t = K \epsilon_t^n \quad \leftarrow \sigma_t = \sigma_n(\epsilon_{n+1}), \quad \epsilon_t = \ln(\epsilon_{n+1})$$

$$\sigma_n = \frac{K}{\epsilon_{n+1}} \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^n$$

$$\frac{d\sigma_n}{d\epsilon_n} = \frac{K}{(\epsilon_{n+1})^2} \{ n - \ln(\epsilon_{n+1}) \} \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^{n-1} \quad \frac{d\sigma_n}{d\epsilon_n} = 0$$

$$\cancel{\frac{K}{(\epsilon_{n+1})^2}} \{ n - \ln(\epsilon_{n+1}) \} \cancel{\{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^{n-1}} = 0$$

$$n - \ln(\epsilon_{n+1}) = 0$$

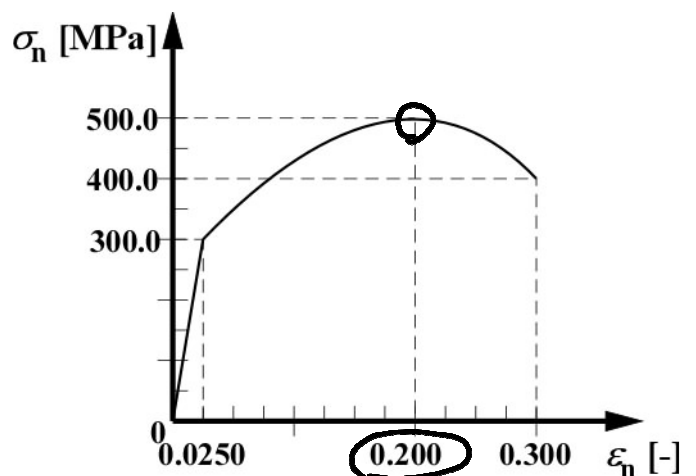


$$n = \ln(\epsilon_{n+1}) = \epsilon_t$$

- 加工硬化指数を求める1つの手法として、くびれ発生時($\sigma_n = \sigma_B$ の時)の ϵ_n を応力-ひずみ線図から読み取り、 ϵ_t へ換算すればそれが n 値となる。

例題: ある材料に引張試験を行った結果、図のような応力-ひずみ線図が得られた。この

材料の加工硬化指数 n を求めよ。



$$n = 0.182,$$

$$\epsilon_n = 0.200$$

↓

$$\epsilon_t = \ln(\epsilon_{n+1}) =$$

4.2 くびれ発生後の応力とひずみ

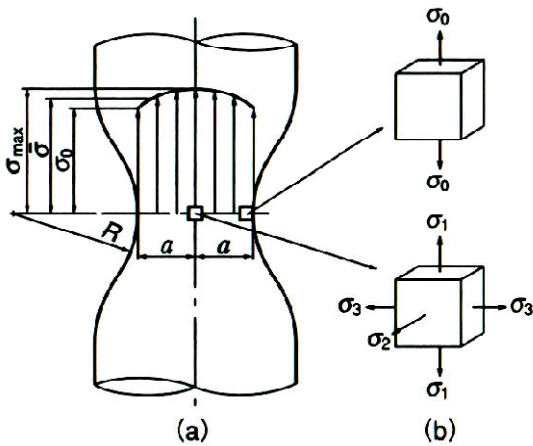


図 4.1 くびれ発生領域における応力状態

●くびれ発生後の応力

1): くびれ断面上の応力は一律ではない。

2): **応力状態**自体が異なる

・最小断面の表面部: 単軸応力状態の
 ・ " の中央部: 多軸

・平均的応力としての公称応力や真応力が意味を失うようになる。

・問い: 降伏応力 σ_Y は単軸応力状態と多軸応力状態で変化するか?

変化する (上昇する)

・くびれ部の表面応力 σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{W/A_0}{1 + \frac{(a/4R)}{2}}$$

くびれ部半径, くびれ部曲率が影響する。

●くびれ発生後のひずみ:

・均一な伸びではなく, くびれ部において局所的な伸びを生じる

・真ひずみの定義式 $\epsilon_t = \ln \frac{l}{l_0}$ ではなく
 断面積変化 $\epsilon_t = \ln \frac{A_0}{A_t}$ を用いる。

4.3 材料の破壊

- 材料が示す強度：「変形に対する抵抗」に加えて「破壊に対する抵抗」
- 破壊とは：一つの物体が「破断面」を形成して2つ以上に分離する現象
- 破壊形態の分類

・巨視的形態による分類

延性破壊：大きな塑性変形を伴う破壊
 ↳ 金属、高分子
 脆性破壊：塑性変形を伴わずに起こる破壊
 ↳ ガラス、セラミックス
 ↳ 条件によっては脆性破壊することもある。

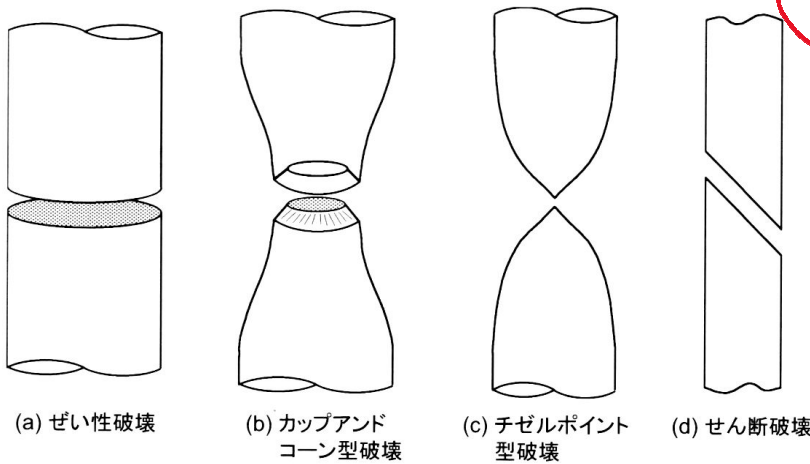


図 4.2 巨視的破壊形態

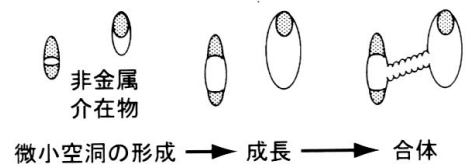


図 4.3 ボイド成長・合体

・微視的形態による分類

へき開面：面間隔が大きい特定の面

粒内破壊

微小空洞(ボイド)合体型

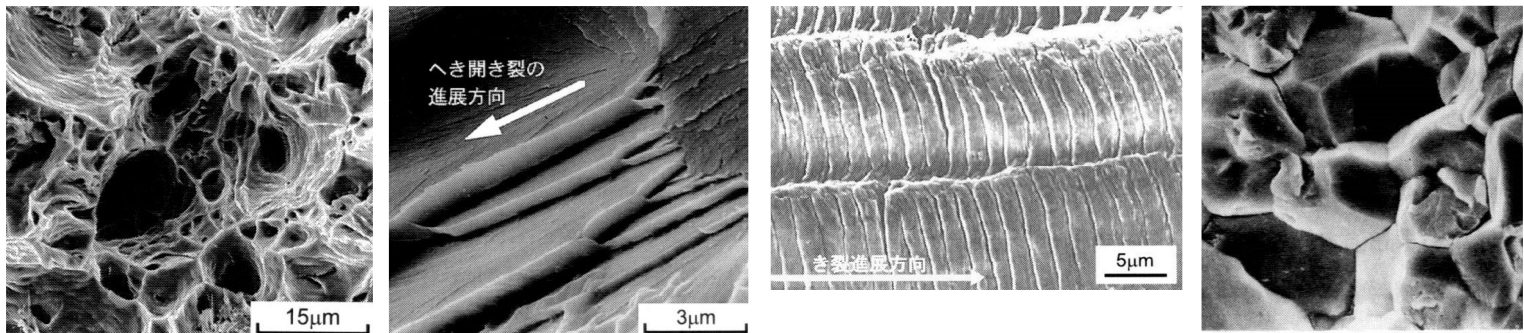
↳ 微視的延性破壊

へき開型

↳ 微視的脆性破壊

粒界破壊

疲労型



(a)ボイド型(ディンプル) (b)へき開型(リバーパターン) (c)疲労型(ストライエーション) (d)粒界破壊

図 4.4 微視的破壊形態

4.4 第4回講義に関する意見・感想・質問のまとめ

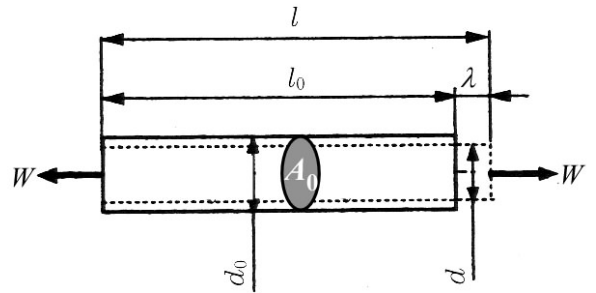
●意見

- ・小テストで式を混同してしまった、小テストの図が応力-ひずみ線図ではなかったので面食らった、小テストで横軸を変換する必要があった、小テスト解けへん、今回の小テストあんま解けなかった、耐力の求め方はわかっていたが $\varepsilon = 0.002$ の点を横軸からではなく計算から導こうとしてしまった、単位の変換を忘れていた、小テストを通じて定義の大切さを知った(0.2%はひずみであり伸びではない)、小テスト対策をしっかりしないと解答に詰まってしまう、小テストが応用した問題なので苦戦している、小テストが全くわからなかった、 $\sigma 0.2$ の求め方が曖昧だった:15 ← 今回の小テストは平均 5.5 点、満点 7 名でした。多くの人が、「なぜ横軸の 0.2mm の位置を取るのかを式から示していない」「直線の引き方が弾性変形領域と平行でない(鉛直方向に引いている)」「応力の計算ミス」といった誤りがありました。[今回は答えの有効数字の桁数については何桁でも OK としています]。
- ・内容が繋がってきて面白い、加工硬化について去年の授業で扱ったことを思い出した、とてもわかりやすい講義だった、巨視的形態と微視的形態について画像によりイメージしやすかった、微視的破壊形態がどれも全く違って驚いた、材料の扱いを学んでいる感じがしてとても楽しい、延性破壊やぜい性破壊は身近なものでイメージしやすい、一度動画を見ているのでイメージしやすい:15 ← 破壊については中々学ぶ機会はないと思いますので、次回・次々回も含めてよく勉強してください。
- ・前回までの復習をする、何を解けばいいのか理解できてないので復習する、もっと復習すべき、小テストのために復習に力を入れる、線図の読み取りを復習する:14
- ・くびれの表面応力の求め方を理解した、べき乗硬化則はとても理解できた、加工硬化指数の表す意味を理解できた、くびれ発生後は公称応力等が意味をなさなくなることが分かった:6
- ・破壊に関する理解があまりできなかった、微視的破壊形態の理解が難しかった、応力状態のあたりで少し混乱した、破壊形態について理解が深められなかった、破壊形態が多くて覚えるのが大変そう:5
- ・自然対数と常用対数のキーを間違えそうになるので気をつける、自分も自然対数と常用対数を間違えていた、無意識で使い分けられていたと信じたい:5 ← 一度きちんと把握しておけば今後は大丈夫だと思います。
- ・話し合いが今回はあまりうまくできなかった ← それは残念です。問いの内容にもよりますね。
- ・気づいたら寝てしまった ← これはわざわざ報告しなくていいです(取りようによっては失礼です)。
- ・今回は加工硬化指数や材料の破壊を学び次回の小テストに出ると思うのでしっかり復習する ← 毎回最後に「大事な場所」を知らせてるんですが、「小テストの問題はこういう内容ですよ」ってストレートに言わないとわからないですかね? 「材料の破壊」なんて出ません。
- ・例題で計算ミスを多くしているので気をつける ← 慣れることです。

●質問

- ・P3 の面積による真ひずみの式で A_0 が分子に来る理由がわからなかった ← $A_0 l_0 = A_t l$ の関係から、 $l/l_0 = A_0/A_t$ に変形して代入しています。
- ・なぜ $d\sigma_n/d\varepsilon_n = 0$ の条件を与えるのか? 応力-ひずみ線図上で連続ではない点では用いられない? ← 授業中でも説明しましたが、 $d\sigma_n/d\varepsilon_n$ とはつまり公称応力-公称ひずみ線図の傾きを表しますよね? 同線図中で傾きが 0 になる点とは、つまり塑性変形開始後に応力が最大点を示す点、つまり $\sigma_n = \sigma_B$ の位置だということです。あと、「応力-ひずみ線図上で連続ではない点」とは軟鋼の線図の降伏点周辺をイメージしているのかもしれませんが、これまでも説明してきた通りあれは特殊なケースであり通常は応力ひずみ線図は常に連続的に変化しますので問題はありません。

- 最初の問いで「塑性変形は原始配列1つ分ずれることなので σ_Y を超えずに直線的な動きは見せない」という説明は間違っているか？ ←「加工硬化」というキーワードが入っていない時点で誤りです。
- $n=0$ の軟金属はどのように変形するのか？ ←これはもちろん、応力-ひずみ線図的には水平になります。
- 焼き入れすると加工硬化指数は変化するのか？ ←これは良い質問ですね、加工硬化とは転位同士の相互作用による転位運動の障害であり、また焼入れや焼なましのような熱処理は材料の微細組織状態(転位密度等)に影響を及ぼしますので、加工硬化指数自体も変化することが考えられます。
- チゼルポイント型破壊の破面はどこなのか？ ←模式図では本当に点のように描かれていましたが、実際にはごく僅かであれ平行な2面(破面)は形成されています。
- 変形に対する抵抗は大きいが破壊に対する抵抗は小さい材料(またその逆)はあるのか？ ←例えばそれこそ加工硬化指数が高い(=加工硬化が顕著に生じる)材料であれば、降伏応力は低くても破壊応力は高くなります。
- 多軸応力状態で降伏応力が上昇するのは多軸により力が分散するからということか？ ←材料に応力が発生するのは、そこに何らかの拘束が存在するからです。例えば下図のような単軸応力状態を考えると、長手方向に引っ張ることにより半径方向も変形(半径の縮小)が生じますが、この半径方向には自由に変形できるため半径方向には応力は生じず、単軸応力状態となります。もしここで半径の縮小が起きないように試験片の側面を何らかの方法で固定したとすると、半径方向の変形を拘束されることで半径方向の応力も発生することになります。これが多軸応力状態です。つまり、多軸応力状態は単軸応力状態より変形が拘束されている(=塑性変形がしにくい)状態であり、そのため降伏応力が上昇するのです。



- P2の式の導出で" $n \cdot \ln(\epsilon_{n+1})$ "以外をキャンセルできる理由がわからなかった(2名) ←1つ目の括弧と3つ目の括弧に関しては、以下のように左辺と右辺に同じ逆数をかけることによりキャンセルすることができます(以下では1つ目の括弧のみをキャンセルしていますが、3つ目も同じ理屈です)。そうすると「2つ目も同じように消せるじゃないか」と思うでしょうが、2つ目を消してしまった後1つ目や3つ目が残ってしまうと、数式として成り立たなくなります。一方、2つ目の括弧のみを残した場合は数式として成り立ちます。ですので、この場合は2つ目のみを残して整理することが可能となります。

$$\left\{ \frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2} \right\} \cdot \{ n - \ln(\epsilon_{n+1}) \} \cdot \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^{n-1} = 0$$

$$\frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2} \cdot \frac{(\epsilon_{n+1})^2}{k} \cdot \{ n - \ln(\epsilon_{n+1}) \} \cdot \{ \ln(\epsilon_{n+1}) \}^{n-1} = 0 \cdot \frac{(\epsilon_{n+1})^2}{k}$$

$$\rightarrow \frac{k}{(\epsilon_{n+1})^2} \neq 0, \quad \text{しかし} \quad n - \ln(\epsilon_{n+1}) = 0 \quad \text{は成り立つ}$$

4.5 第3回小テスト解答

Q.1 元の長さ $l_0 = 100.0 \text{ mm}$, 元の直径 $d_0 = 5.00 \text{ mm}$ の丸棒に対し引張試験を行い, 以下の荷重-伸び線図を得た. この線図から 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]を求めよ. [10 点, 部分点あり]

A.1 0.2%ひずみに対応する伸び λ を求める・・・ $\lambda = \varepsilon \cdot l_0 = 0.002 \cdot 100.0 = 0.2 \text{ mm}$
 下図の $\lambda = 0.2 \text{ mm}$ の位置から, 弾性変形範囲の傾きと同一の直線を伸ばし, 線図との交点の荷重を読み取る・・・5000.0N とする

$$\therefore \sigma_{0.2} = \frac{5000.0}{\pi \times 5.00^2 / 4} = 254.64... \text{ N/mm}^2 = 255 \text{ MPa}$$

