

第二章 钢筋混凝土材料的 力学性能

教学要求

- 1、掌握钢筋和混凝土的主要力学性能。
- 2、理解钢筋与混凝土粘结的意义、影响因素及构造措施。

第一讲 混凝土的力学性能

一、内容

2.1.1 混凝土的组成结构

1、普通混凝土的组成

普通混凝土是由水泥、砂、石材料用水拌合硬化后形成的人工石材，是多相复合材料。

2、混凝土材料结构的三种基本类型

通常把混凝土的结构分为三种基本类型：微观结构即水泥石结构；亚微观结构即混凝土中的水泥砂浆结构；宏观结构即砂浆和粗骨料两组分体系。

2.1.2 单轴向应力状态下的混凝土强度

1、混凝土的抗压强度

(1) 混凝土的立方体抗压强度和强度等级

我国国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》规定以边长为150mm的立方体为标准试件，标准立方体试件在 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的温度的相对湿度90%以上的潮湿空气中养护28d, 按照标准试验方法测得的抗压强度作为混凝土的立方体抗压强度，单位为。

$$N / mm^2$$

《混凝土结构设计规范》规定混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定，用符号 $f_{cu, k}$ 表示。即用上述标准实验方法测得的具有95%保证率的立方体抗压强度作为混凝土的强度等级。《混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度等级有C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75和C80，共14个等级。例如，C30表示立方体抗压强度标准值为 30 N/mm^2 。其中，C50~C80属高强度混凝土范畴。

(2) 混凝土的轴心抗压强度

我国《普通混凝土力学性能试验方法》规定以150mm×150mm×300mm的棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件。

《混凝土结构设计规范》规定以上述棱柱体试件试验测得的具有95%保证率的抗压强度为混凝土轴心抗压强度标准值，用符号 f_{ck} 表示。

《混凝土结构设计规范》基于安全取偏底值，轴心抗压强度标准值与立方体抗压强度标准值的关系按下式确定：

$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-1)$$

2、混凝土的轴心抗拉强度

抗拉强度是混凝土的基本力学指标之一，也可用它间接地衡量混凝土的冲切强度等其它力学性能。《混凝土结构设计规范》考虑了从普通强度混凝土到高强度混凝土的变化规律，取轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系为

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_2 \quad (2-2)$$

2.1.3 复合应力状态下混凝土的强度

1、混凝土在双向应力状态下的强度

在两个平面作用着法向应力 σ_1 和 σ_2 ，第三个平面上应力为零的双向应力状态下，不同的混凝土强度的二向破坏包络图如教材图2-7所示。

2、混凝土在三向受压状态下的强度

混凝土在三向受压的情况下，由于受到侧向压力的约束作用，最大的主压应力轴的抗压强度 $f'_{cc}(\sigma_1)$ 有较大的增长，由试验得到的经验公式为：

$$f'_{cc} = f'_c + (4.0 \sim 7.0) f_L$$

公式中 f'_{cc} —有侧向压力约束试件的轴心抗压强度；

f'_c —无侧向压力约束试件的轴心抗压强度；

f_L —侧向约束压应力。

2.1.4 混凝土的变形

1、 一次短期加载下混凝土的变形性能

(1) 混凝土受压时的应力-应变关系

我国采用棱柱体试件测定一次短期加载下混凝土受压应力-应变全曲线。图2-1为实测的典型混凝土棱柱体受压应力-应变全曲线。从图中可以看到，这条曲线包括上升段和下降段两个部分。



(2) 混凝土单轴向受压应力-应变曲线的数学模型

1) 美国E. Hognestad建议的模型

如图2-2所示，模型的上升段为二次抛物线，下降段为斜直线。

$$\text{上升段: } \varepsilon \leq \varepsilon_0, \quad \sigma = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2-4)$$

$$\text{下降段: } \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u, \quad \sigma = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_u - \varepsilon_0} \right] \quad (2-5)$$

式中 f_c — 峰值应力（棱柱体极限抗压强度）；
 ε_0 — 相应于峰值应力时的应变，取 $\varepsilon_0 = 0.002$ ；
 ε_u — 极限压应变，取 $\varepsilon_u = 0.0038$ ；

2) 德国Rusch建议的模型

如图2-3所示，该模型形式较简单，上升段也采用二次抛物线，下降段则采用水平直线。

$$\text{上升段: } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad , \quad \sigma = f_c \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2-6)$$

$$\text{下降段: } \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \quad , \quad \sigma = f_c \quad (2-7)$$

式中，取 $\varepsilon_0 = 0.002$; $\varepsilon_u = 0.0035$ 。

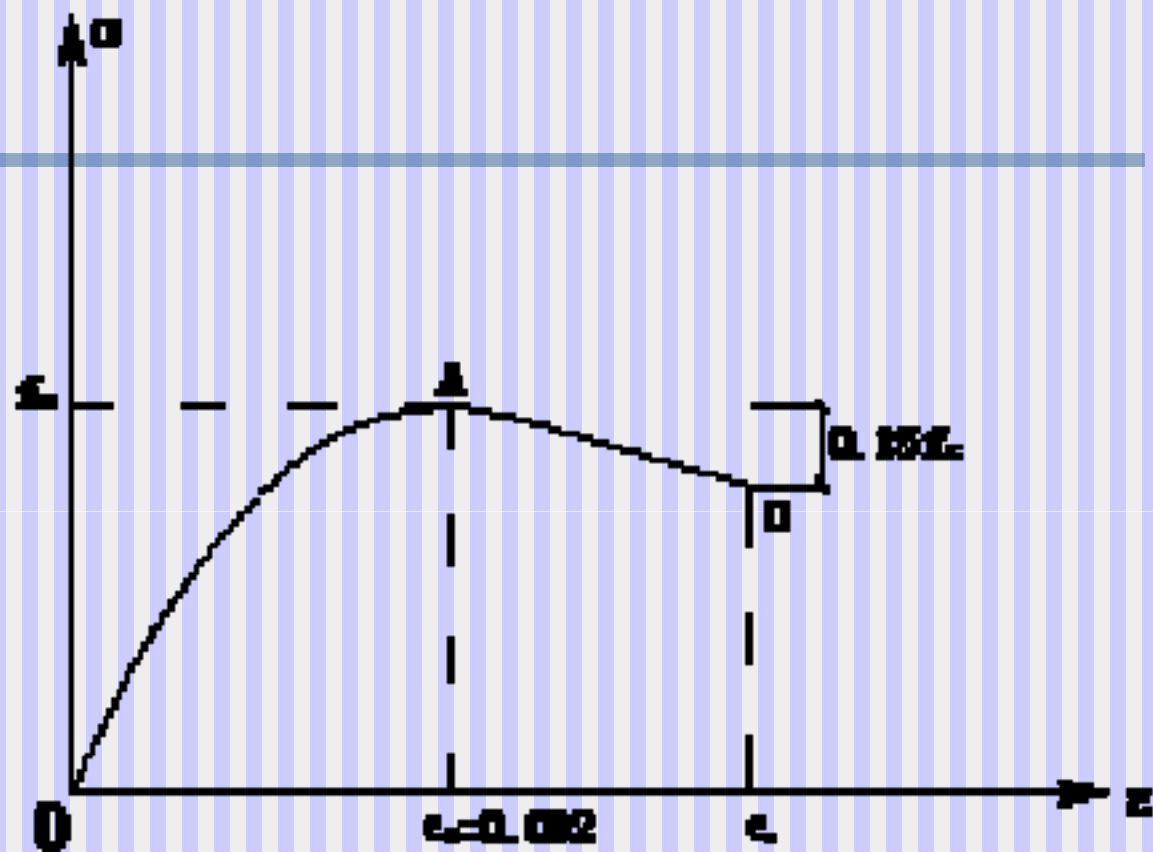


图2-2 Hognestad建议的应力-应变曲线

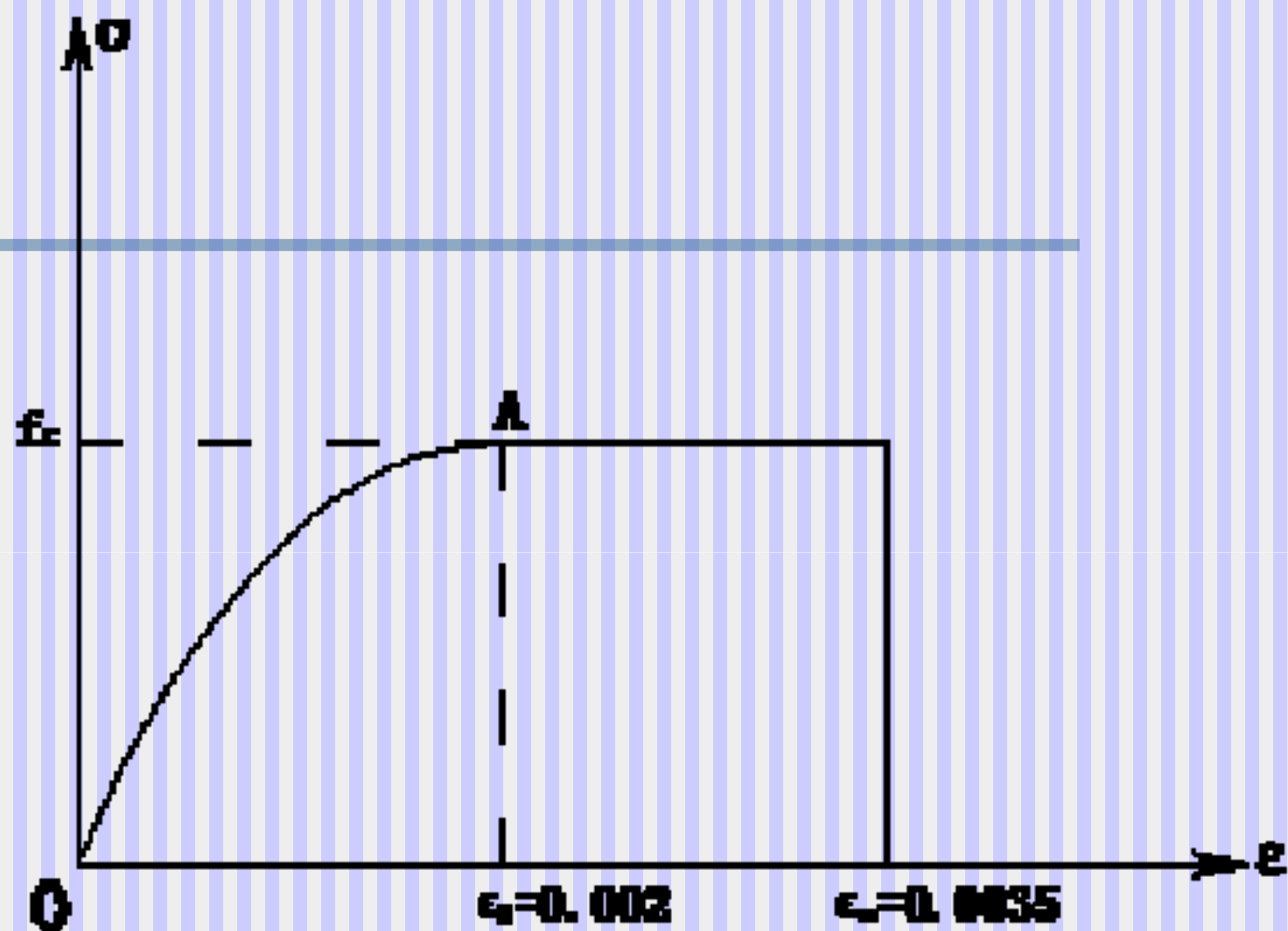


图2-3 Rusch建议的应力-应变曲线

(3) 三向受压状态下混凝土的变形特点

混凝土试件横向受到约束时，可以提高其抗压强度，也可以提高其延性。随着侧向压力的增加，试件的强度和延性都有显著的提高。

(4) 混凝土的变形模量

1) 混凝土的弹性模量（即原点模量）

如图2-4所示，混凝土棱柱体受压时，在应力-应变曲线的原点（图中的0点）作一切线，其斜率为混凝土的原点模量，称为弹性模量，以表示 E_c 。

$$E_c = \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{10^2}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} (\text{KN} / \text{mm}^2) \quad (2-8)$$

2) 混凝土的变形模量

连接图2-4中0点至曲线任一点应力为 σ_c 处割线的斜率，称为任意点割线模量或称变形模量。它的表达式为：

(2—9)

$$E'_c = \operatorname{tg} \alpha_1$$

3) 混凝土的切线模量

在混凝土应力-应变曲线上某一应力 σ_c 处作一切线，其应力增量与应变增量之比值称为相应于应力 σ_c 时混凝土的切线模量。

$$E_c'' = \operatorname{tg} \alpha \quad (2-10)$$

(5) 混凝土轴向受拉时的应力-应变关系
详见教材图2-16

2、荷载长期作用下混凝土的变形性能

结构或材料承受的荷载或应力不变，而应变或变形随时间增长的现象称为徐变。影响混凝土徐变的因素很多，通常认为混凝土产生徐变的原因主要可归结为三个方面：内在因素；环境因素；应力因素。

3、混凝土在荷载重复作用下的变形（疲劳变形）

混凝土的疲劳是在荷载重复作用下产生的。混凝土在荷载重复作用下引起的破坏称为疲劳破坏。疲劳破坏的特征是裂缝小而变形大，在重复荷载作用下，混凝土的强度和变形有着重要的变化。

4、混凝土的收缩与膨胀

混凝土凝结硬化时，在空气中体积收缩，在水中体积膨胀。通常，收缩值比膨胀值大很多。影响混凝土收缩的因素有水泥的品种，水泥的用量等。

二、教学提示

- 1、混凝土常用强度指标的概念、确定方法及工程应用；
- 2、混凝土受压时应力-应变关系实测曲线与数学模型的区别及理论意义。

三、思考题及习题

1. 如何确定混凝土立方体抗压强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度？
2. 混凝土强度等级是如何确定的？《混凝土结构设计规范》GB50010覆盖的混凝土强度等级范围是什么？
3. 混凝土轴心受压应力-应变曲线的主要特点是什么？试举混凝土受压常用的应力-应变曲线数学模型。

4. 如何确定混凝土的变形模量和弹性模量？
5. 什么是混凝土的疲劳强度？重复荷载下混凝土应力-应变曲线有何特点？
6. 什么是混凝土的徐变和收缩？影响混凝土徐变和收缩的因素有哪些？
7. 混凝土的徐变和收缩对钢筋混凝土构件的受力状态各有何影响？

第二讲 钢筋的力学性能

一、内容

2.2.1 钢筋的品种和级别

1、钢筋的分类

混凝土结构中使用的钢材按化学成分，可分为碳素钢及普通低合金钢两大类。

《混凝土结构设计规范》规定，用于钢筋混凝土结构的国产普通钢筋可使用热轧钢筋。用于预应力混凝土结构的国产预应力钢筋可使用消除应力钢丝、螺旋肋钢丝、刻痕钢丝、钢绞线、也可使用热处理钢筋。

2、钢筋的级别

热扎钢筋是低碳钢、普通低合金钢在高温状态下轧制而成。热扎钢筋为软钢，热扎钢筋根据其力学指标的高低。分为HPB300级（I级），HRB335级（II级），HRBF335级（II级），HRB400级（III级），HRBF400级（III级）和RRB400级（余热处理III级），HRB500（IV级），HRBF500（IV级）等种类。钢筋混凝土结构中的纵向受力钢筋宜优先采用HRB400级钢筋。

2.2.2 钢筋的强度与变形

1、 钢筋的应力-应变曲线 钢筋的应力-应变曲线，有的有明显的流幅，例如热扎低碳钢和普通热扎低合金钢所制成的钢筋；有的则没有明显的流幅，例如高碳钢制成的钢筋。

图2-5是有明显流幅钢筋的应力-应变曲线。对没有明显流幅或屈服点的预应力钢丝、钢绞线和热扎处理钢筋，为了与钢筋国家标准相一致，《混凝土结构设计规范》中也规定在构件承载力设计时，取极限抗拉强度 σ_b 的85%作为条件屈服点，如图2-6所示。

2、衡量钢筋的塑性指标

衡量钢筋的塑性指标通常用伸长率和冷弯性能两个指标。

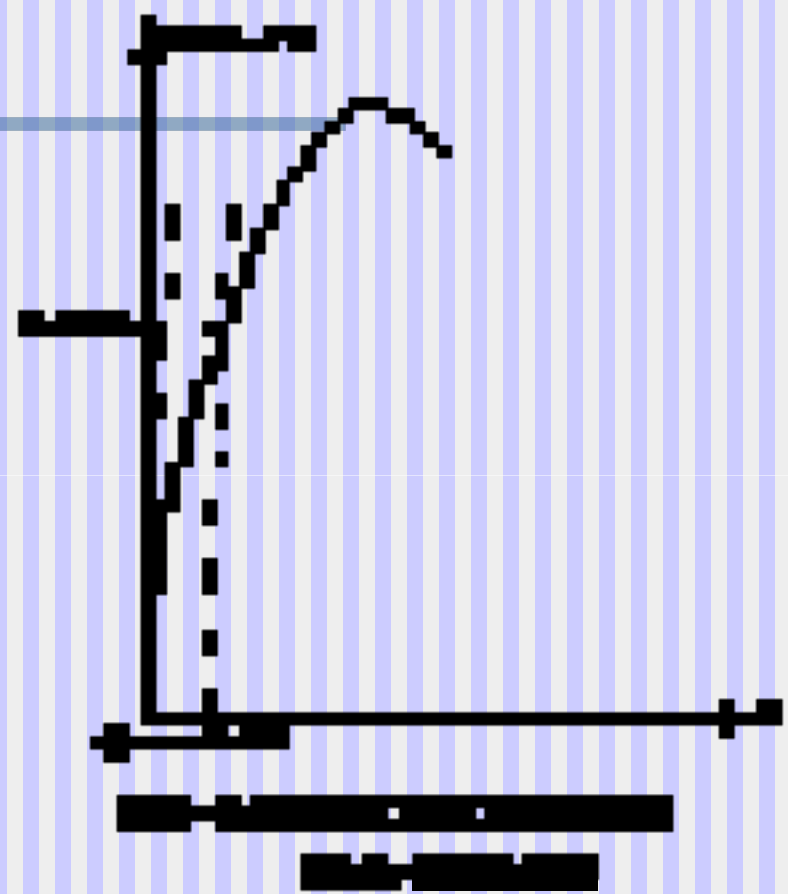
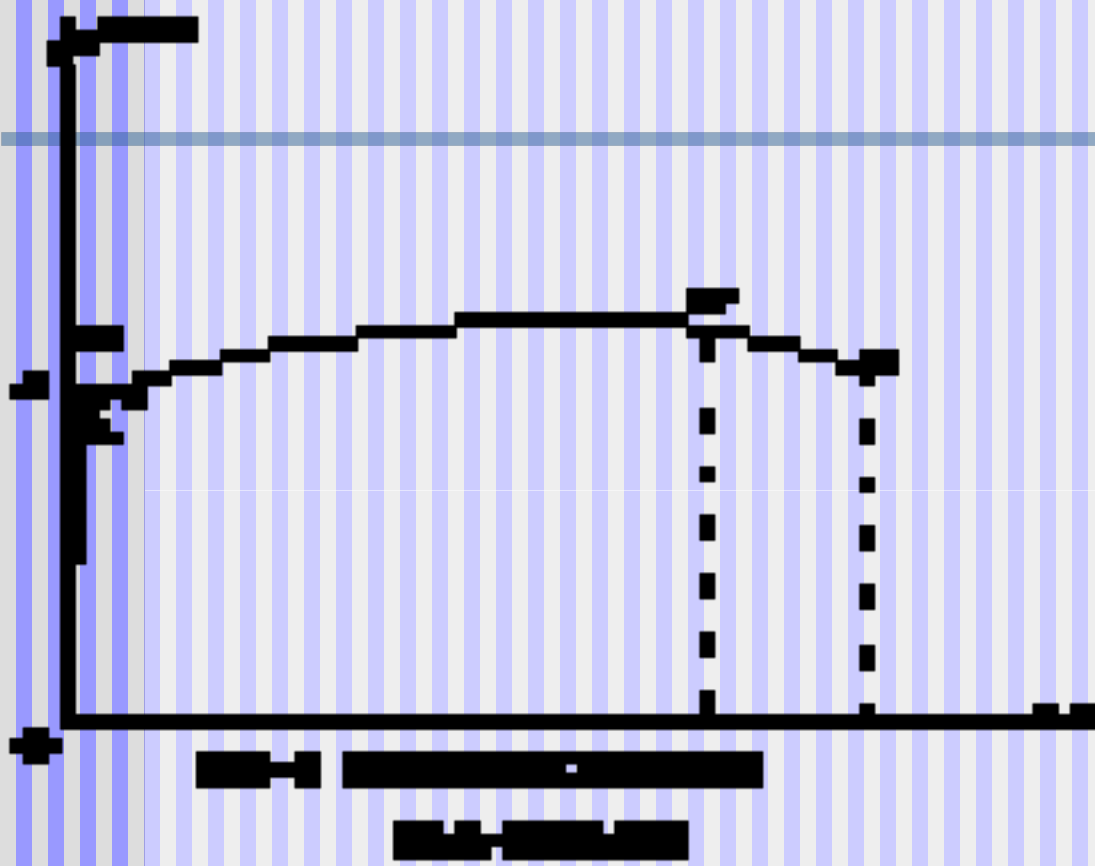
2.2.3 钢筋应力-应变曲线的数学模型

1、描述完全弹塑性的双直线模型

双直线模型适用于流幅较长的低强度钢材。模型将钢筋的应力-应变曲线简化为图2-7 (a) 所示的两段直线，不计屈服强度的上限和由于应变硬化而增加的应力。双直线模型的数学表达式如下：

$$\text{当时 } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \left(E_s = \frac{f_y}{\varepsilon_y} \right) \quad (2-11)$$

$$\text{当时 } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h} \quad \sigma_s = f_y \quad (2-12)$$



2、描述完全弹塑性加硬化的三折线模型

三折线模型适用于流幅较短的软钢，可以描述屈服后立即发生应变硬化（应力强化）的钢材，正确地估计高出屈服应变后的应力，如图2-7（b）所示。折线模型的数学表达形式如下：

当 $\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$ ， $\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h}$ 时，

表达式同式（2-11）和（2-12）；

当 $\varepsilon_{s,h} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u}$ 时， $f_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_{s,h}) \operatorname{tg} \theta'$ （2—13）

$$\operatorname{tg} \theta' = E'_s = 0.01 E_s \quad (2—14)$$

3、描述弹塑性的双斜线模型

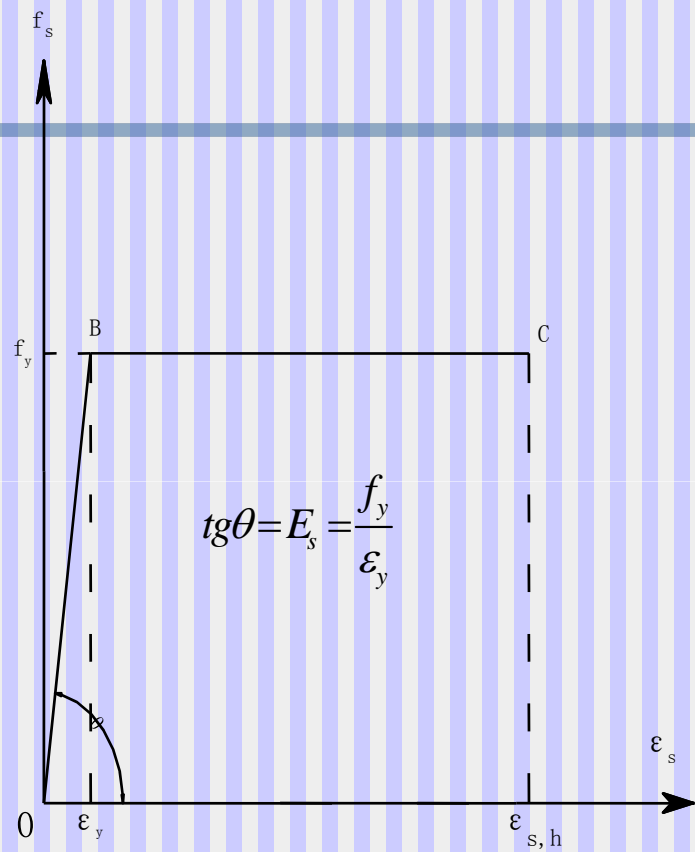
双斜线模型可以描述没有明显流幅的高强钢筋或钢丝的应力-应变曲线。如图2-7（c）所示。

双斜线模型数学表达式如下：

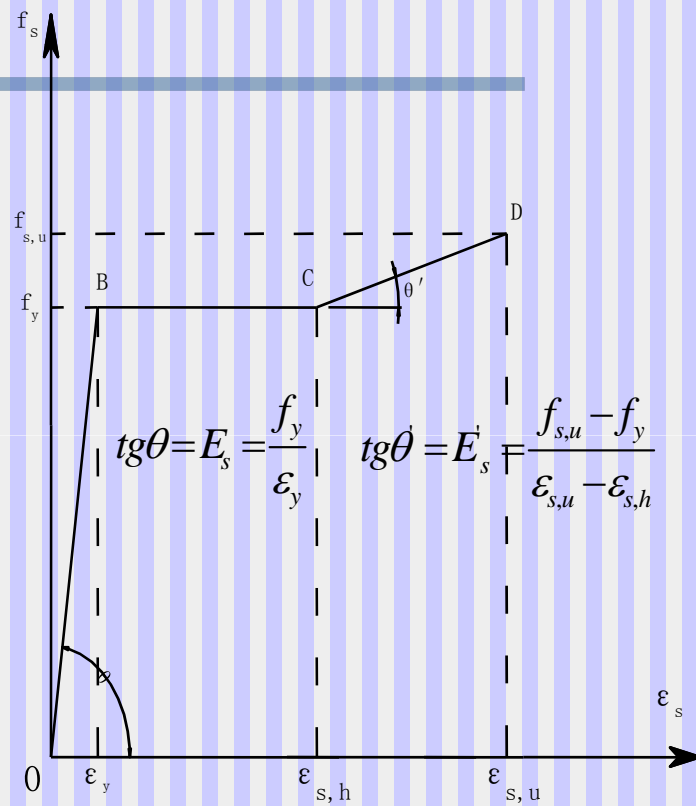
$$\text{当 } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \text{ 时, } \sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \left(E_s = \frac{f_y}{\varepsilon_y} \right) \quad (2-15)$$

$$\text{当 } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \text{ 时, } f_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_{s,h}) \operatorname{tg} \theta'' \quad (2-16)$$

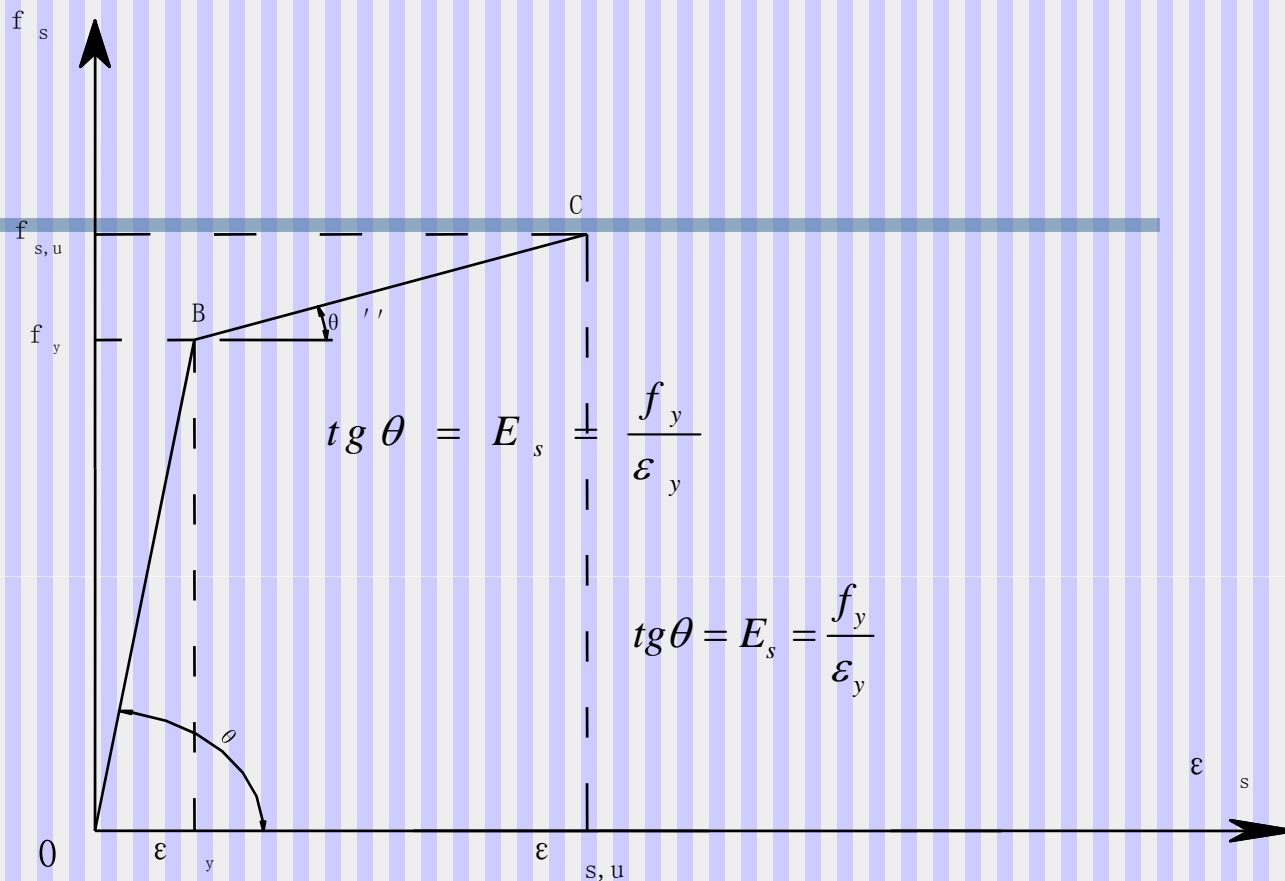
$$\operatorname{tg} \theta'' = E_s'' = \frac{f_{s,u} - f_y}{\varepsilon_{s,u} - \varepsilon_y} \quad (2-17)$$



(a)



(b)



(c)

图2-7 钢筋应力-应变曲线的数学模型

(a) 双直线 (b) 三折线 (c) 双斜线

2.2.4 钢筋的疲劳

1、钢筋的疲劳的概念

钢筋的疲劳是指钢筋在承受重复、周期性的动荷载作用下，经过一定次数后，突然脆性断裂的现象。

2、钢筋疲劳断裂的原因

钢筋疲劳断裂的原因，一般认为是由于钢筋内部和外部的缺陷，在这些薄弱处容易引起应力集中。应力过高，钢材晶粒滑移，产生疲劳裂纹，应力重复作用次数增加，裂纹扩展，从而造成断裂。

3、钢筋的疲劳试验方法

钢筋的疲劳试验方法有两种方法：一种是直接进行单根原状钢筋轴拉试验；另一种是将钢筋埋入混凝土中使其重复受拉或受弯的试验。

4、影响钢筋疲劳强度的因素

钢筋的疲劳强度与应力变化的幅值有关，其他影响因素还有：最小应力值的大小、钢筋外表面几何尺寸和形状、钢筋的直径、钢筋的强度、钢筋的加工和使用环境以及加载的频率等。

2.2.5 混凝土结构对钢筋性能的要求

1、钢筋的强度

所谓钢筋强度是指钢筋的屈服强度及极限强度。

2、钢筋的塑性

要求钢材有一定的塑性是为了使钢筋在断裂前有足够的变形。钢筋的伸长率和冷弯性能是施工单位验收钢筋是否合格的塑性指标。

3、钢筋的可焊性

可焊性是评定钢筋焊接后的接头性能的指标。可焊性好，即要求在一定的工艺条件下钢筋焊接后不产生裂纹及过大的变形。

4、钢筋的耐火性

结构设计时应注意混凝土保护层厚度满足对构件耐火极限的要求。

5、钢筋与混凝土的粘结力

为了保证钢筋与混凝土的共同工作，要求钢筋与混凝土之间必须有足够的粘结力。

二、教学提示

- 1、软钢和硬钢的应力-应变曲线分布特点；
- 2、常用的钢筋应力-应变曲线数学模型及适用范围。

三、思考题及习题

- 1、钢筋可以如何分类？
- 2、软钢和硬钢的应力-应变曲线有何不同？它们的屈服强度是如何取值的？
- 3、钢筋应力-应变曲线的理论模型有哪几种？它们适用于何种情况？
- 4、冷拉和冷拔会对钢筋的力学性能有怎样的影响？
- 5、对混凝土结构中的钢筋性能有哪些要求？

第三讲 混凝土与钢筋的粘结

一、内容

2.3.1 粘结的意义

1、钢筋和混凝土协同工作的原理

钢筋和混凝土这两种材料能够结合在一起共同工作，除了二者具有相近的线膨胀系数外，更主要的是由于混凝土硬化后，钢筋和混凝土之间产生了良好的粘结力。

2、粘结应力

(1) 粘结应力的概念

钢筋混凝土受力后会沿钢筋和混凝土接触面上产生剪应力，通常把这种剪应力成为粘结应力。

(2) 粘结应力的分类

钢筋和混凝土之间的粘结应力可分为裂缝间的局部粘结应力和钢筋端部的锚固粘结应力两种。

2.3.2 粘结力的组成

1、光圆钢筋与混凝土的粘结机理

光圆钢筋与混凝土的粘结作用主要由三部分所组成：

- 1) 钢筋和混凝土接触面上的化学吸附作用力（胶结力）。
- 2) 混凝土收缩握裹钢筋而产生摩阻力。
- 3) 钢筋表面凹凸不平与混凝土之间产生的机械咬合作用力（咬合力）。对于光面钢筋这种咬合力来自表面的粗糙不平。

2、变形钢筋与混凝土的粘结机理

变形钢筋与混凝土的之间有机械咬合作用，改变了钢筋和混凝土之间相互作用的方式，显著提高了粘结强度。对于变形钢筋，咬合力是由于变形钢筋肋间嵌入混凝土而产生。

3、二者的差别

光圆钢筋和变形钢筋与混凝土的粘结机理机理的主要差别是，光圆钢筋粘结力主要来自胶结力和摩阻力，而变形钢筋的粘结力主要来自机械咬合作用。

2.3.3 粘结强度

1、测定粘结强度的拔出试验

钢筋的粘结强度通常采用直接拔除实验来测定。

由直接拔除实验，钢筋和混凝土之间的平均粘结应力 τ 可表示为

$$\tau = \frac{N}{\pi dl} \quad (2-18)$$

式中 N —钢筋的拉力； d —钢筋的直径； l —粘结长度。

2、粘结应力和相对滑移的关系

随着混凝土强度的提高，粘结锚固性能有较大的改善，粘结强度增加，相对滑移减小。

2.3.4影响粘结强度的因素

- 1、混凝土强度
- 2、保护层厚度
- 3、钢筋净间距
- 4、横向配筋
- 5、侧向压应力
- 6、浇筑混凝土时钢筋的位置

2.3.5 钢筋的锚固与搭接

1、保证粘结的构造措施

保证粘结的构造措施有如下几个方面：

- 1) 对不同等级的混凝土和钢筋，要保证最小搭接长度和锚固长；。
- 2) 为了保证混凝土与钢筋之间有足够的粘结，必须满足钢筋最小间距和混凝土保护层最小厚度的要求；
- 3) 在钢筋的搭接接头范围内应加密箍筋；
- 4) 为了保证足够的粘结在钢筋端部应设置弯钩。

2、基本锚固长度

钢筋的基本锚固长度取决于钢筋强度及混凝土抗拉强度，并与钢筋的外形有关。为了充分利用钢筋的抗拉强度，《混凝土结构设计规范》规定纵向受拉钢筋的锚固长度作为钢筋的基本锚固长度 l_0 。

3、钢筋的搭接

搭接是指将两根钢筋的端头在一定长度内并放，并采用适当的连接将一根钢筋的力传给另一根钢筋。力的传递可以通过各种连接接头实现，机械连接接头能产生较牢固的连接力，所以应优先采用机械连接。

受拉钢筋绑扎搭接接头长度按下式计算：

$$l_l = \zeta l_a \quad (2-19)$$

式中， ζ 为受拉钢筋搭接长度修正系数，它与同一连接区段内搭接钢筋的截面面积有关，详见教材第5章相关表格。

二、教学提示

- 1、钢筋和混凝土粘结的意义及主要机理；
- 2、影响粘结强度的因素及保证粘结的构造措施

三、思考题及习题

- 1、什么是钢筋和混凝土之间的粘结力？
- 2、影响钢筋和混凝土粘结强度的主要因素有哪些？
- 3、为保证钢筋和混凝土之间有足够的粘结力应采取哪些措施？

本章重点与难点

- 1、混凝土：立方体和棱柱体抗压强度，抗拉强度；应力-应变关系实测曲线与常用数学模型；变形模量；在三轴受压时的强度与变形特点；混凝土徐变与收缩的特性及影响。
- 2、钢筋：常用钢筋的种类、应力-应变关系的实测曲线及数学模型；强度与塑性性能；混凝土结构对钢筋性能的要求。
- 3、钢筋和混凝土共同工作的机理及构造措施。