

# 第八章 钢筋混凝土构件的裂缝、 变形和耐久性

教学要求：

---

- 1.**了解混凝土结构的耐久性问题。 强化两种极限状态的概念；
- 2.**掌握受弯构件在荷载作用下的挠度验算方法；
- 3.**掌握轴心受力构件、偏心受力构件、受弯构件的  
抗裂度和裂缝宽度验算方法。

# 第一讲

---

## 一、内容

### (一) 正常使用极限状态的特点

- 1.** 可靠指标 $\beta$ 取值低于承载能力极限状态;
- 2.** 材料强度取标准值;
- 3.** 荷载取标准值。

## (二) 裂缝控制的三个等级

- 1.一级** 严格要求不出现裂缝，构件在荷载效应的标准组合下，构件的受拉边缘不产生拉应力：即

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0$$

- 2.二级** 一般要求不出现裂缝的构件，在荷载效应的标准组合下，构件的受拉边缘的拉应力不超过限值：即

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk}$$

在荷载的准永久组合下，构件的受拉边缘不宜产生拉应力：即

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0$$

- 3.三级** 允许出现裂缝构件，按荷载效应的标准组合并考虑长期作用的影响，计算的最大裂缝宽度不超过限值：即

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim}$$

### (三) 受弯构件挠度控制

受弯构件的最大挠度应按荷载效应的标准组合并考虑荷载长期作用影响进行计算，其计算值不超过《混凝土结构设计规范》**GB50010—2002**规定限值。即：

$$f \leq [f]$$

### (四) 混凝土结构的耐久性

#### 1. 耐久性的概念

混凝土结构的耐久性是指在设计工作寿命期内，在正常维护下，必须保持适合于使用，而不需要进行维修加固。

混凝土结构的设计使用年限，主要根据建筑物的重要程度确定。我国规定的设计使用年限为50年或100年。

## 2. 影响耐久性的主要因素

### (1) 内因

混凝土强度、密实性、水泥用量、水灰比、氯离子及碱含量、外加剂用量、保护层厚度等。

### (2) 外因

主要是环境条件 包括：温度、湿度、**CO<sub>2</sub>**含量、侵蚀性介质等。

### (3) 几个概念

1) 混凝土的水灰比。

2) 钢筋锈蚀的充分必要条件。

## (五) 受弯构件的挠度计算

### 1. 截面抗弯刚度的主要特点

#### (1) 材料力学中计算挠度的公式

以均布荷载作用下的简支梁挠度为例

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql_0^2}{EI} = \frac{5}{48} \frac{Ml_0^2}{EI}$$

## (2) 混凝土受弯构件挠度计算公式的特点

- 1) 在混凝土受弯构件中不再是常量，用 $B$ 表示 $EI$ ，则在一定荷载范围内， $B$  随  $M$  增大而减小；
- 2)  $B$  随配筋率  $\rho$  的降低而减小；
- 3) 沿构件跨度方向  $B$  随  $M$  的变化而不同；
- 4)  $B$  随荷载作用的时间增长而减小，因此有长期刚度  $B$  和短期刚度  $B_s$  之分。

## 2. 短期刚度 $B_s$

### (1) 试验研究

取构件的纯弯段正常使用时的应力、应变、弯矩、挠度的图形 构件刚度公式

### (2) 短期刚度公式推导

#### 1) 平截面假定

$$\operatorname{tg} \phi \doteq \phi = \frac{\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{cm}}{h_0} = \frac{M_s}{B_s}$$

#### 2) 曲率与弯矩的关系得出 $B_s$ 表达式



### (3) 平均应变与最大应变的关系

$$\varepsilon_{sm} = \psi \varepsilon_{sk} = \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s}$$

$$\varepsilon_{cm} = \psi_c \varepsilon_{ck} = \psi_c \frac{\sigma_{ck}}{\nu E_c}$$

(4) 求  $M_s$

由受弯构件二阶段截面应力分布图得:

$$M_k = A_s \sigma_{sk} \eta h_0 = \left( \xi_0 + \gamma'_f \right) \omega \eta \sigma_c b h_0^2$$

式中:

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{\eta h_0 A_s} \quad \sigma_{ck} = \frac{M_k}{\left( \xi_0 + \gamma'_f \right) \omega \eta b h_0^2}$$

### (5) $B_s$ 公式

将  $M_k$ 、 $\varepsilon_{cm}$ 、 $\varepsilon_{sm}$  代入公式得

$$B_s = \frac{M_k h_0}{\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{cm}} = \frac{E_s A_s h_0^2}{\frac{\psi}{\eta} + \frac{\rho \alpha E}{\zeta}}$$

式中：

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c} \quad \rho = \frac{A_s}{bh_0} \quad \zeta = \frac{v(\xi_0 + \gamma'_f)\omega\eta}{\psi_c}$$

## 二、教学提示

1. 本讲内容以课堂讲授方式有利于学生接受公式推导，要配合截面应力图式，讲解推导思路。
  - (1) 从材力挠度公式出发
  - (2) 指出混凝土受弯构件挠度公式中刚度的不同
  - (3) 用曲率与弯矩表达刚度  $B_s$
  - (4) 逐个推导公式中的物理、几何参数
2. 注意联系耐久性。正常使用极限状态与裂缝变形的关系。

## 三、思考题及习题

# 第二讲

## 一、内容

### 3、短期刚度 $B_s$ 公式中的有关参数确定

- (1) 裂缝截面处的内力臂系数 $\eta$
- (2) 裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数 $\psi$
- (3)  $\xi$

### 4、长期刚度 $B$

- (1) 长期荷载作用下刚度降低的原因
- (2) 长期刚度与短期刚度的关系:

$$B = \frac{M_s}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s$$

- (3) 公式中系数 $\theta$ 的取法

## 5、受弯构件挠度验算

(1) 最小刚度原则

(2) 挠度验算公式

$$f = S \frac{M_0}{B} \leq [f]$$

## 6、减小受弯构件挠度的措施

减小挠度的措施即提高刚度的措施，从刚度公式中分析影响刚度的因素，进而得到有效的措施。

## (四) 混凝土构件裂缝宽度计算

### 1、混凝土裂缝宽度的计算方法

(1) 实测分析的经验法

(2) 半理论半经验的方法

我国规范采用第二种方法

### 2、试验研究—裂缝出现与开展的过程

以受弯构件为例，取如图纯弯段作为研究对象

纯弯段弯距从**0**增加到正常使用的 **$M_k$** ,分四个阶段分析裂缝出现和开展过程。

(1) 当  $M < M_{cr}$  时

特征：压区混凝土、拉区混凝土、钢筋基本上处于弹性阶段。

(2) 当  $M = M_{cr}$  时

特征：受拉区混凝土出现塑性，受拉区边缘混凝土达到将裂而未裂的极限状态。



(3) 当  $M = M_{cr} + \Delta M$  时

特征：受拉区边缘最薄弱处出现第一条（批）裂缝，裂缝处混凝土退出工作，钢筋应力增加，截面应力重分布；由于粘结应力的存在，裂缝之间混凝土仍参与工作，沿梁轴方向，随着离开裂缝截面的距离增大，钢筋应力的分布逐渐减小，混凝土的应力逐渐增加。若足够长，可使混凝土应力再次增长到极限值，导致第二批裂缝的出现，随裂缝的陆续出现，裂缝间距逐渐减小，新的裂缝基本不再出现，此前阶段称为裂缝出现阶段。

(4) 当  $M_{cr} < M < M_s$  时

随  $M$  加大，裂缝不断开展，称为裂缝开展阶段。

## 二、教学提示

- 1、本讲适合讲授，逐步导出公式。
- 2、描述裂缝出现和开展过程的大量图例，可制作幻灯荷挠图，可节约课内时间。
- 3、减小挠度的措施中应强调最有效的措施,即加大  $h_0$ 。

## 三、思考题及习题

# 第三讲

## 一、内容

### 3. 平均裂缝宽度

---

#### (1) 平均裂缝宽度公式的概念

设  $l_m$  为平均裂缝间距，平均裂缝宽度即为：在  $l_m$  范围内，钢筋和混凝土相对滑移的总和，也就是  $l_m$  内钢筋与混凝土的变形差。用公式表达：

$$W_m = 2 \int_0^{l_m} (\varepsilon_s - \varepsilon_c) dx$$

将公式中  $\varepsilon_s$ 、 $\varepsilon_c$  用平均值  $\varepsilon_{sm}$ 、 $\varepsilon_{cm}$  表示，则

$$W_m = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) l_m = \left(1 - \frac{\varepsilon_{ctm}}{\varepsilon_{sm}}\right) l_m \varepsilon_{sm}$$

由试验确定  $\frac{\varepsilon_{cm}}{\varepsilon_{sm}} \doteq 0.15$

$$W_m = 0.85 l_m \varepsilon_{sm} = 0.85 \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

## (2) 公式中参数确定

### 1) $\sigma_{sk}$ 的确定

接受弯构件第 II 阶段截面的应力图可推得:

受弯构件

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{A_s h_0 \eta}$$

轴拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k}{A_s}$$

偏拉构件

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k e'}{A_s (h_0 - a'_s)}$$

偏压构件

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k (e - \eta h_0)}{A_s h_0 \eta}$$

2) 平均裂缝间距可用轴心受拉构件或受弯构件 取两裂缝之间的一半构件为隔离体 如图 轴拉构件

由图 (a)  $\sum X = 0$

$$\sigma_{s1} A_s = \sigma_{s2} A_s + f_t A_{te} \quad (a)$$

由图 (b)  $\sum X = 0$

$$\sigma_{s1} A_s = \sigma_{s2} A_s + \tau_m l \mu \quad (b)$$

由 (a) - (b)

$$\tau_m l \mu = f_t A_{te}$$

令平均裂缝间距为上式推导的最小裂缝间距的1.5倍  
则有：

$$l_m = 1.5l = 1.5 \frac{f_t A_{te}}{\tau_m \mu}$$

实验表明  $l_m$  不仅与有  $\frac{d}{\rho_{te}}$  关，还与保护层厚度  $c$  有关  
取

$$l_m = k_1 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} + k_2 c$$

式中：  $k_1 = \frac{3f_t}{8\tau_m}$ ，  $k_2$  由试验确定

## 1. 最大裂缝宽度 $w_{\max}$

### (1) 确定最大裂缝宽度的方法

1) 最大裂缝宽度由平均裂缝宽度乘以扩大系数确定

2) 扩大系数由统计结果和使用经验确定

受弯和偏心受压构件  $\alpha_{cr} = 2.1$

偏心受拉构件  $\alpha_{cr} = 2.4$

轴心受拉构件  $\alpha_{cr} = 2.7$

### (2) 最大裂缝宽度的验算公式

$$w_{\max} \leq w_{\lim}$$

## 2. 减小裂缝宽度的措施

(1) 增大钢筋面积

(2) 提高混凝土强度

(3) 采用变形钢筋

(4) 采用直径细的钢筋

(5) 加大截面尺寸

使用上述措施应具体问题具体分析，从裂缝宽度公式中可分析出有些措施，例如加大构件断面， $\sigma_{cr}$  的加大也有可能导致裂缝宽度的加大。



## 二、教学提示

1. 本讲有大量公式推导，不宜采用PPT课件直接给出公式，应理清建立公式的思路，逐步推导。
2. 因本讲公式与上两讲公式有较多共同之处，在上两讲授课时，强调复习本讲和预习下讲内容，有利于学生接受知识。
3. 推导公式时，可用轴拉构件、受弯构件两种构件推导，有利于显示规律性。

## 三、思考题及习题

### 1. 重点

- (1) 裂缝宽度的计算原理
- (2) 裂缝宽度及挠度的计算方法
- (3) 刚度计算公式的推导

### 2. 难点

- (1) 受弯构件挠度公式中刚度公式建立过程
- (2) 受弯构件裂缝宽度计算公式的建立过程
- (3) 理解混凝土构件Ⅱ阶段受力特征与内容的相关性