



# 第十章 预应力混凝土构件

---

- 10.1 概述
- 10.2 预加应力的方法
- 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备
- 10.4 张拉控制应力
- 10.5 预应力损失的计算
- 10.6 预应力轴拉构件的应力分析
- 10.7 预应力轴拉构件的设计
- 10.8 预应力受弯构件的应力分析
- 10.9 预应力受弯构件的设计
- 10.10 预应力混凝土构件的构造要求



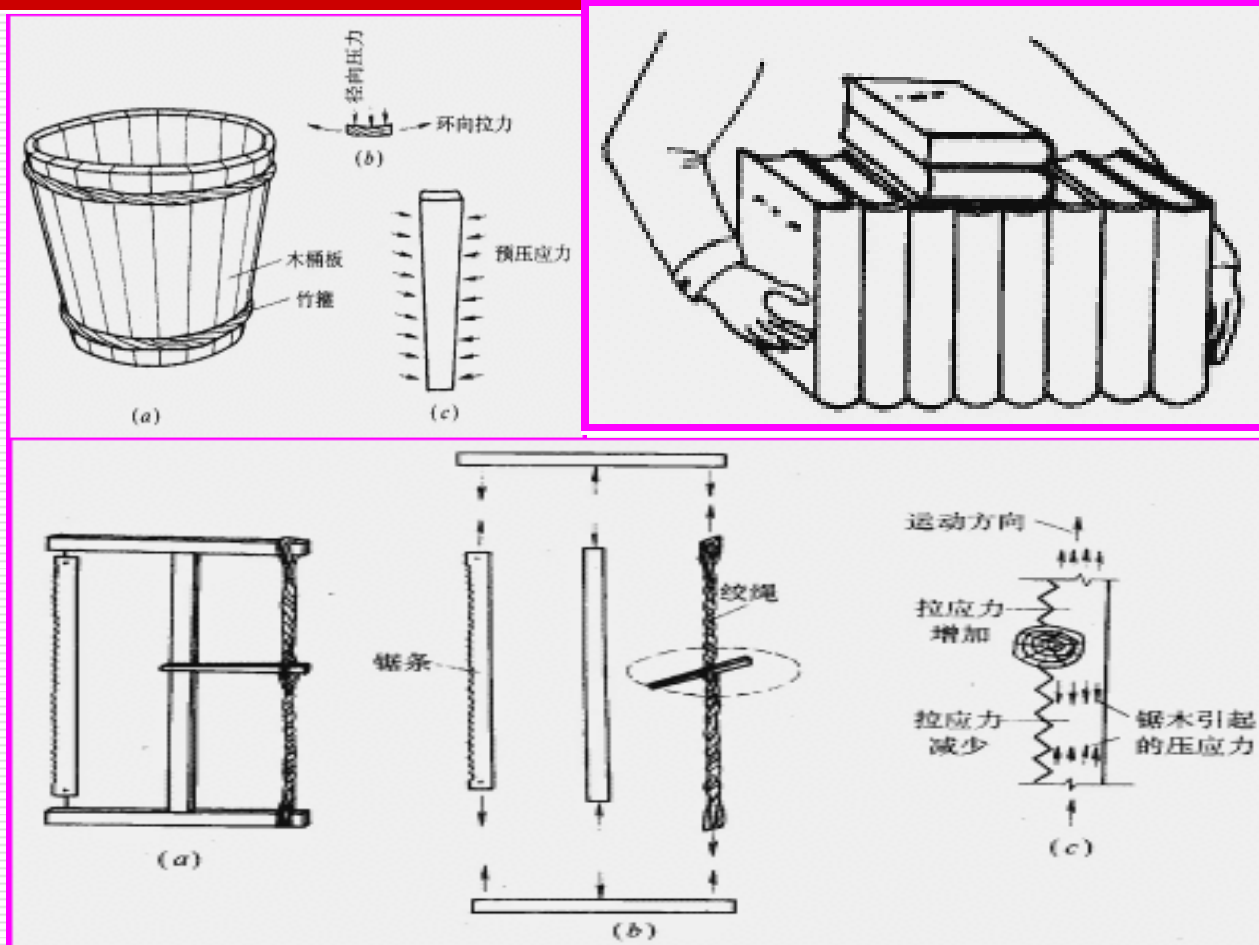
## 10.1 概述

### 什么是预应力

在构件使用前，通过预加外力，使受拉区预先产生压应力，以抵消或减小外荷载产生拉应力，这样就可利用混凝土的抗压强度来弥补混凝土的抗拉强度不足的缺陷，达到防止受拉区混凝土过早开裂的要求，从而提高截面抗弯刚度和减小裂缝宽度，甚至可以做到在使用荷载下不出现裂缝。



# 10.1 概述





# 10.1 概述

## 为什么要加预应力

克服钢筋混凝土的缺点：

- 1、抗拉强度低；
- 2、自重大；
- 3、不能充分利用高强材料；

## 预应力的分类

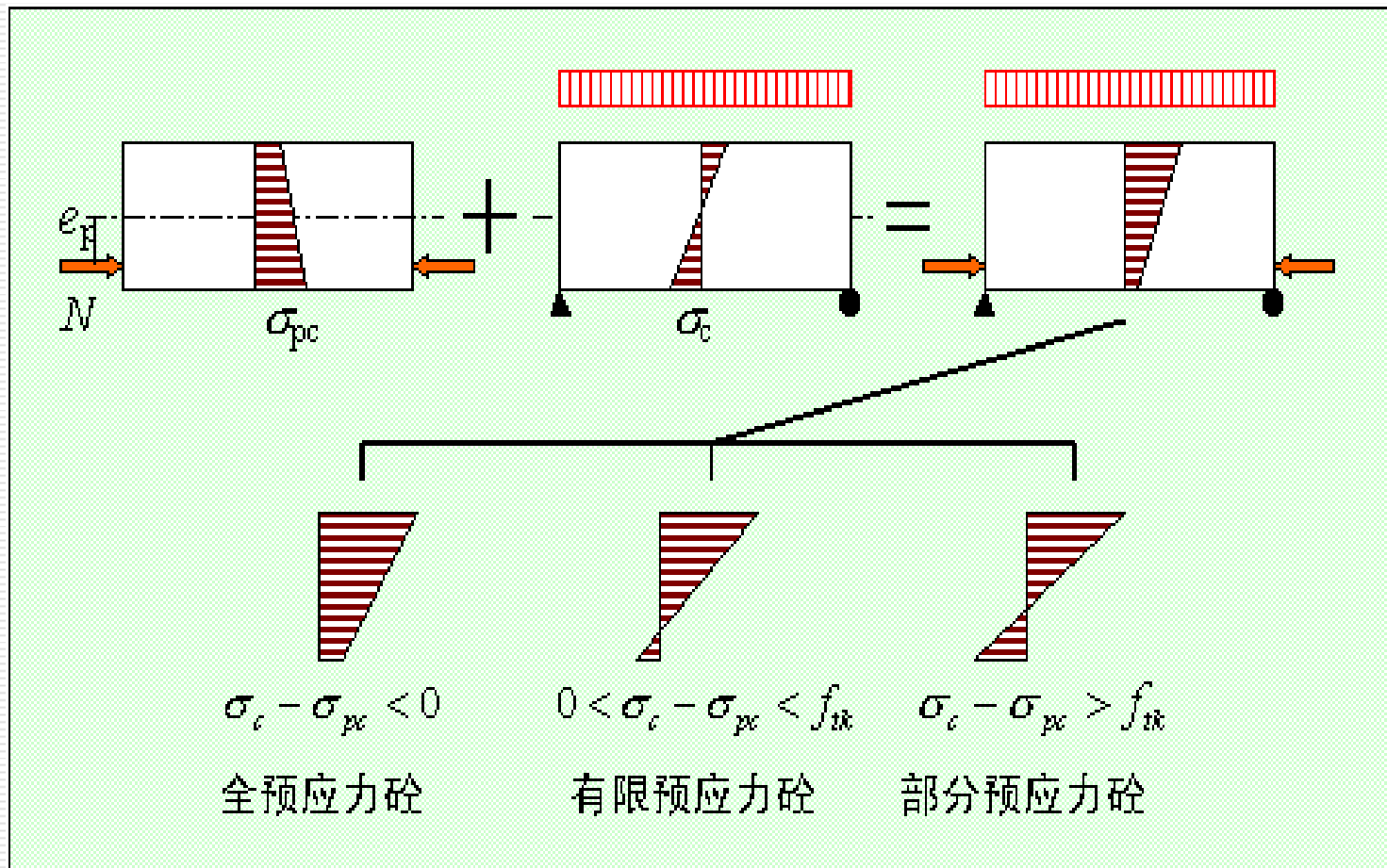
加力方法、施工方式、与混凝土的关系、 预应力程度

## 预应力的应用

大、重、高、特



# 10.1 概述





## 10.1 概述

### 预应力混凝土的优缺点

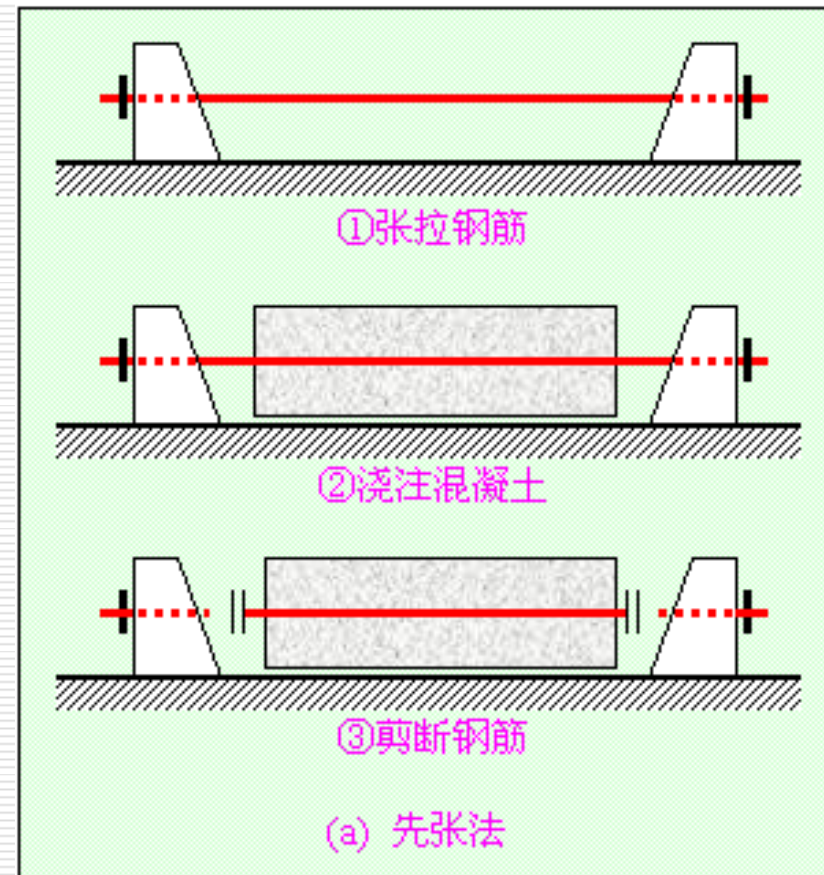
- 优**
- a. 提高构件的抗裂能力
  - b. 增大了构件的刚度，耐久性好，耐疲劳，提高抗剪承载力。
  - c. 充分利用高强度材料的性能。
  - d. 扩大了构件的使用范围：减轻自重，加大跨度，提高适用能力。
- 缺** 成本高，材料质量要求高。工序复杂，技术水平要求高。



## 10.2 预加应力的方法

### 先张法

- 1、将预应力钢筋用夹具固定于台座或钢模上
- 2、支模、绑扎非预应力钢筋、浇注混凝土
- 3、待混凝土达到预定强度后，切断或放松钢筋，使混凝土产生预压应力。

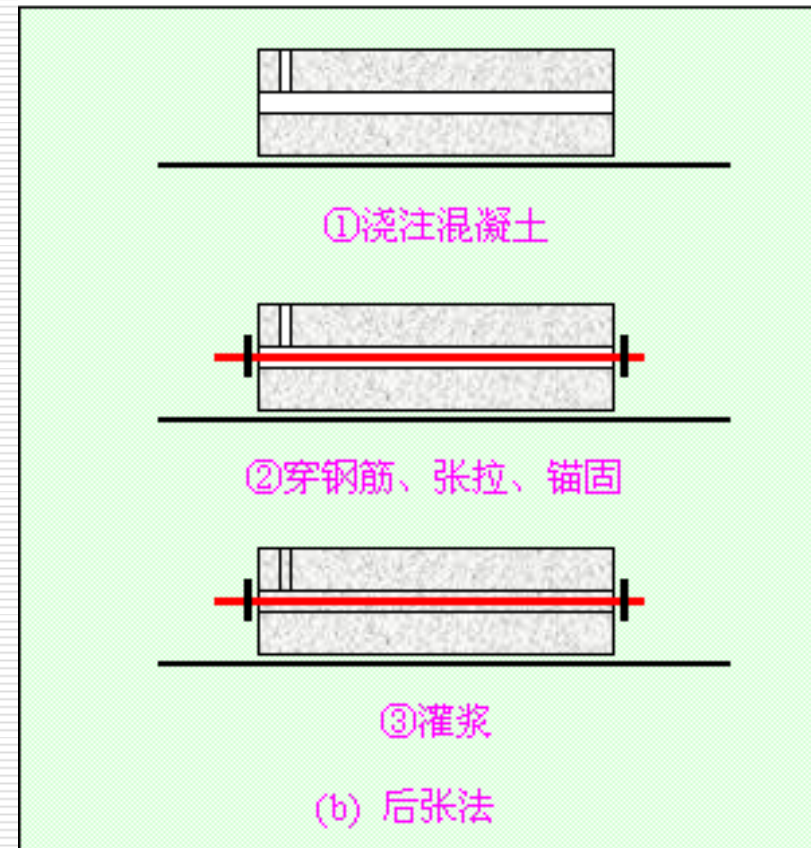




## 10.2 预加应力的方法

### 后张法

- 1、浇筑混凝土构件，并在构件中预留孔道
- 2、待混凝土达到预定强度后，用千斤顶张拉钢筋，用锚具将张拉端预应力钢筋锚固
- 3、用压力泵将高强水泥浆灌入预留孔道，使预应力钢筋与孔道壁产生粘结力







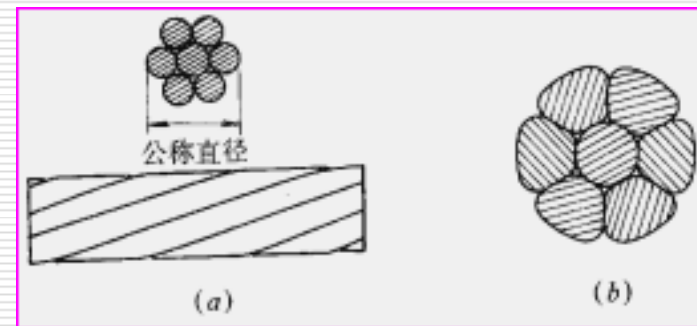
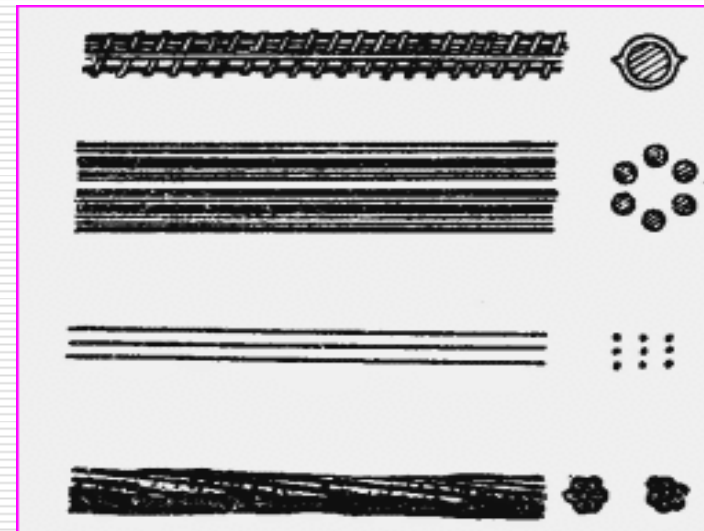
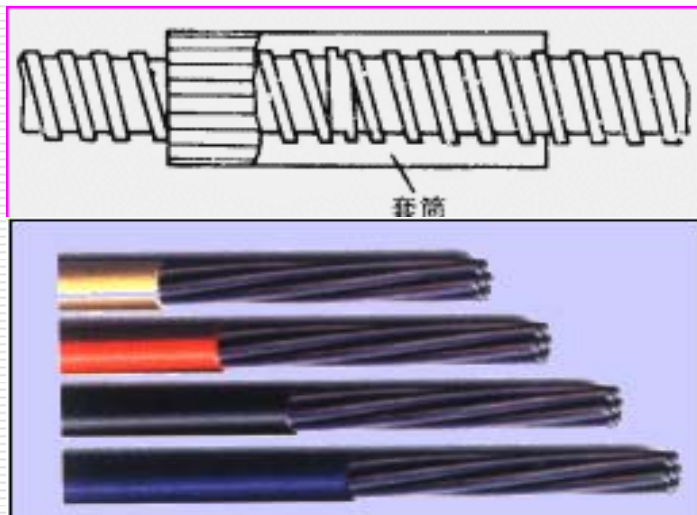
# 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备

## 材料

混凝土

预应力钢筋

波纹管





## 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备

### 锚夹具

#### 夹具

用于先张法构件，可重复使用。

#### 锚具

用于后张法构件，永久固定在构件上。

#### 锚夹具的要求

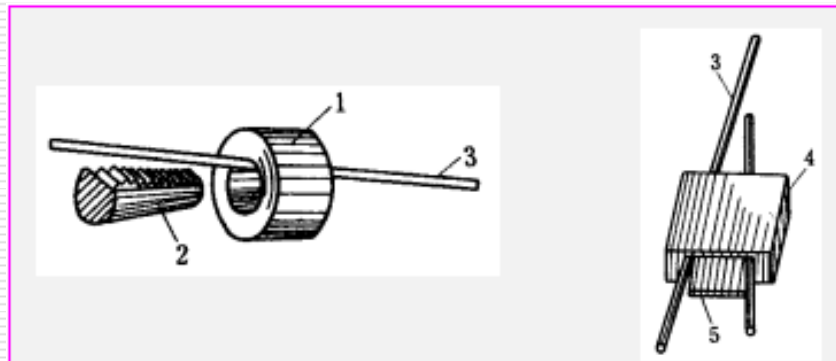
- 受力可靠
- 操作方便
- 价格低





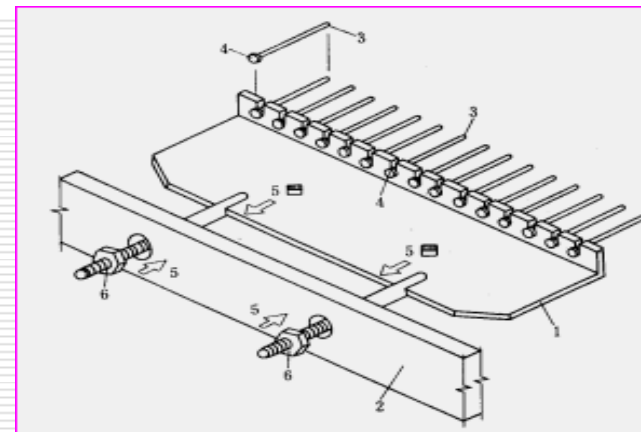
## 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备

### I、锥形夹具和楔形夹具



1 套筒 2 锥销 3 预应力钢筋 4 锚板 5 楔块

### II、钢模张拉用梳子板夹具

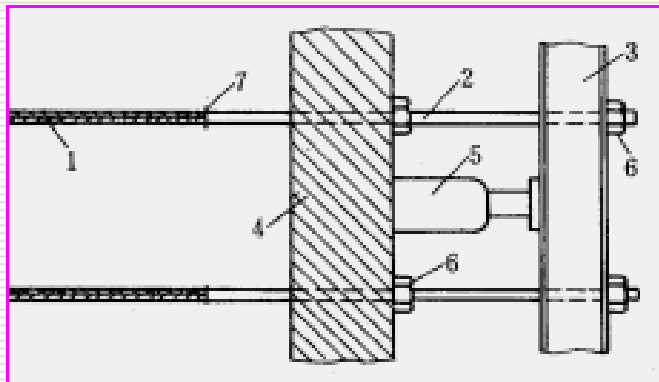


1 梳子板 2 钢模横梁 3 钢丝 4 锚头 5 千斤顶张拉时爪钩孔及支撑位置示意 6 固定用螺冒



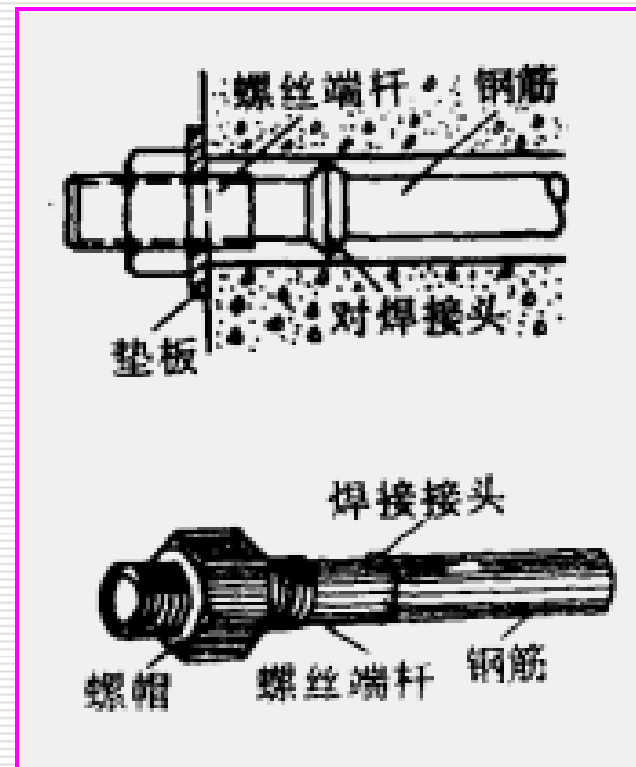
## 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备

### III、工具式夹具



- 1 预应力钢筋 2 工具式螺杆 3 活动钢横梁  
4 台座固定传力架 5 千斤顶  
6 螺冒帽 7 焊接接头

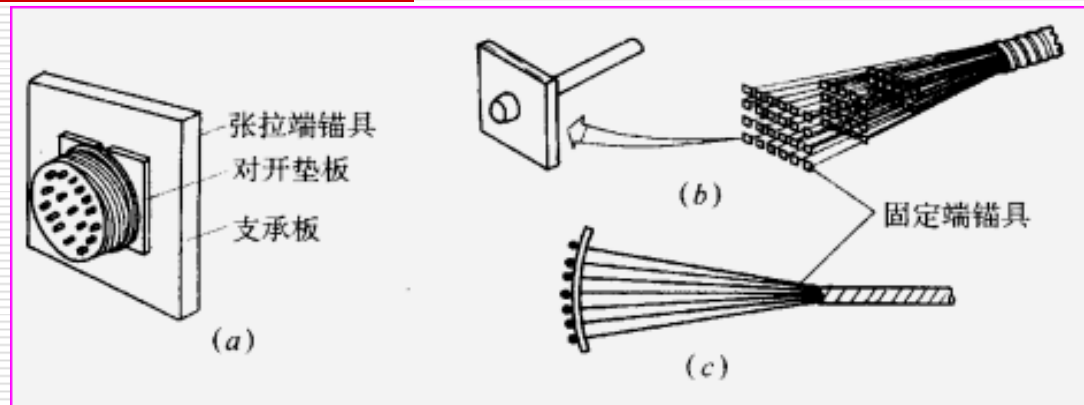
### IV、螺丝端杆锚具





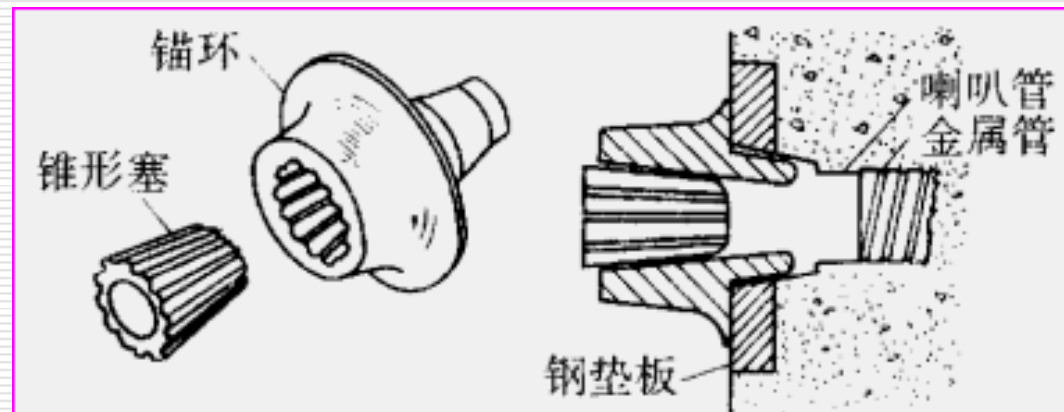
## 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备

### V、锚头锚具



(a) 张拉端 (b) 分散式固定端 (c) 集中式固定端

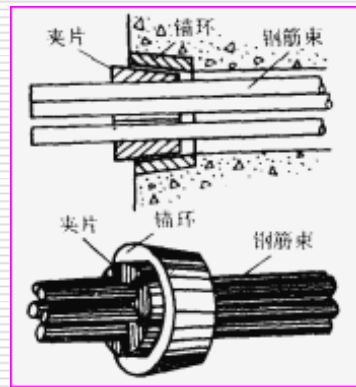
### VI、锥塞式锚具



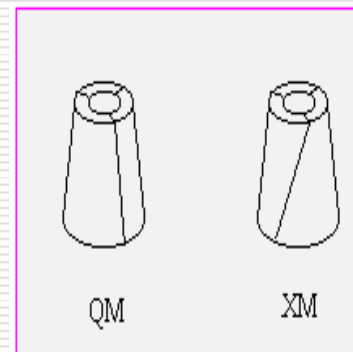


## 10.3 预应力混凝土结构的材料和设备

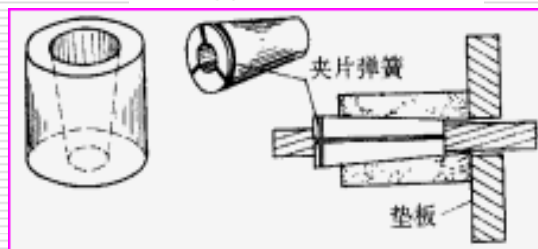
### VII、夹片式锚具——JM12型、QM型和XM型锚具



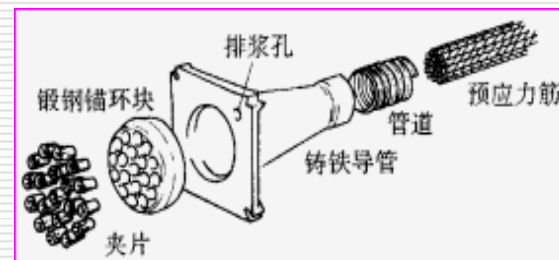
(a) JM12 型锚具



(b) XM 型与 QM 型锚具夹片



(c) QM 型单孔锚具



(d) QM 型多孔锚具



## 10.4 张拉控制应力

### 张拉控制应力 $\sigma_{\text{con}}$

是指张拉预应力钢筋时所控制的最大应力值，其值为张拉设备所控制的总的张拉力除以预应力钢筋面积得到的应力值。

$$\sigma_{\text{con}} = \frac{N_{\text{p, con}}}{A_{\text{p}}}$$



## 10.4 张拉控制应力

### 张拉控制应力的确定

1.张拉控制应力要高，以提高预应力钢筋对混凝土的预压作用。

2.但不能过高，以免导致张拉时引起断筋事故，产生应力松弛，破坏前无明显预兆，造成端部混凝土局部受压破坏，预应力损失增大。

3.与所采用的钢筋种类和张拉方式有关。软钢 $\uparrow$ ，硬 $\downarrow$ ，先张 $\uparrow$ ，后张 $\downarrow$ 。

。





## 10.5 预应力损失的计算

### 预应力损失的种类

1. 张拉端锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 $\sigma_{l1}$
2. 预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的损失 $\sigma_{l2}$
3. 钢筋与设备之间温差引起的预应力损失 $\sigma_{l3}$
4. 预应力钢筋的应力松弛引起的损失 $\sigma_{l4}$
5. 由于砼收缩、徐变引起的预应力损失 $\sigma_{l5}$
6. 环向预应力损失 $\sigma_{l6}$



## 10.5 预应力损失的计算

### 1. 张拉端锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 $\sigma_{l1}$

$$\text{无摩擦: } \sigma_{l1} = \frac{a}{l} \cdot E_s$$

$$\text{有摩擦: } \sigma_{l1} = 2\sigma_{l1}l_f \left( \frac{\mu}{r_c} + k_c \right) \left( 1 - \frac{x}{l_f} \right)$$

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_c}{1000\sigma_{\text{con}}(\mu/r_c + k_c)}}$$

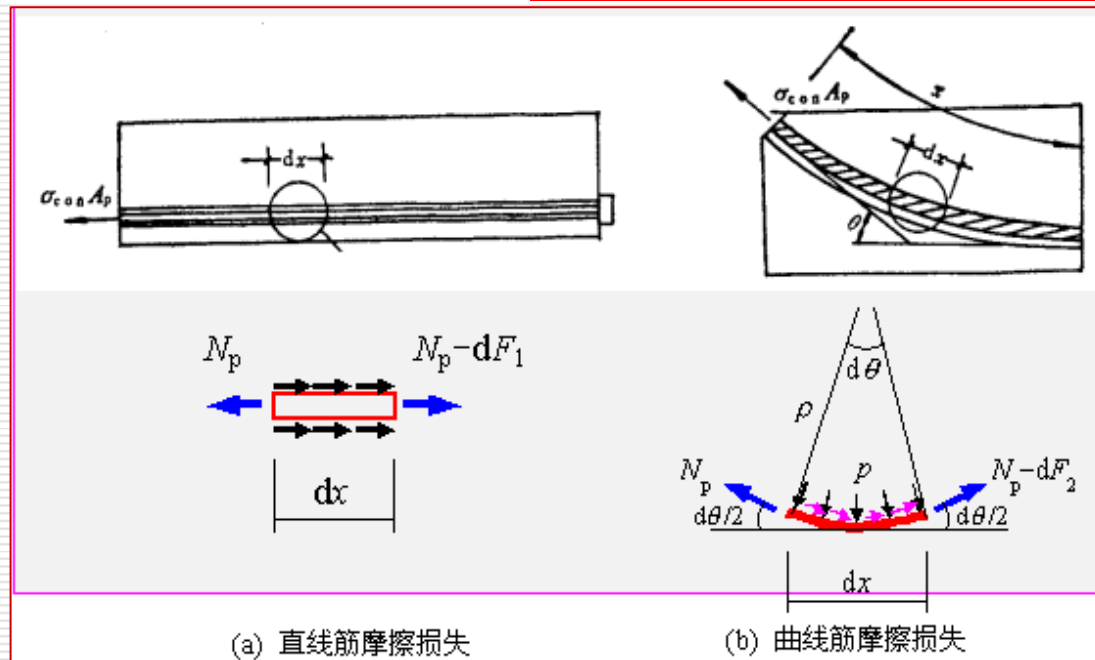


## 10.5 预应力损失的计算

### 2. 预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的损失 $\sigma_{l2}$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} \left[ 1 - \frac{1}{e^{(kx + \mu\theta)}} \right]$$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} (kx + \mu\theta)$$





## 10.5 预应力损失的计算

### 3. 钢筋与设备之间温差引起的预应力损失 $\sigma_{13}$

$$\sigma_{13} = 0.00001 E_s \Delta t = 0.00001 \times 2 \times 10^5 \times \Delta t = 2\Delta t$$

### 4. 预应力钢筋的应力松弛引起的损失 $\sigma_{14}$

$$\sigma_{14} = 0.4\psi \left( \frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{tk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}}$$

$$\sigma_{14} = 0.125\psi \left( \frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}}$$

$$\sigma_{14} = 0.2\psi \left( \frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.575 \right) \sigma_{\text{con}}$$



## 10.5 预应力损失的计算

### 5. 由于砼收缩、徐变引起的预应力损失 $\sigma_{15}$

$$\sigma_{15} = \frac{45 + 220 \times \frac{\sigma_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho}$$

$$\sigma'_{15} = \frac{45 + 220 \times \frac{\sigma'_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'}$$

$$\sigma_{15} = \frac{25 + 220 \times \frac{\sigma_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho}$$

$$\sigma'_{15} = \frac{25 + 220 \times \frac{\sigma'_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'}$$

### 6. 环向预应力损失 $\sigma_{16}$

$$d > 3m, \quad \sigma_{16} = 0$$

$$d \leq 3m, \quad \text{取 } \sigma_{16} = 30\text{N/mm}^2$$



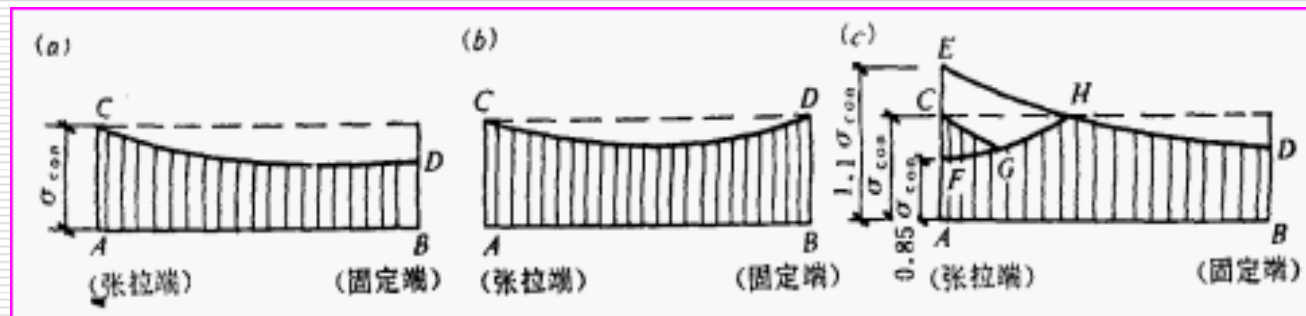
## 10.5 预应力损失的计算

### 减小预应力损失的措施

选择变形小或预应力钢筋内缩小的锚具，尽量减少垫板数；

对先张法构件，选择长台座；

两端张拉



(a)一端张拉

(b)两端张拉

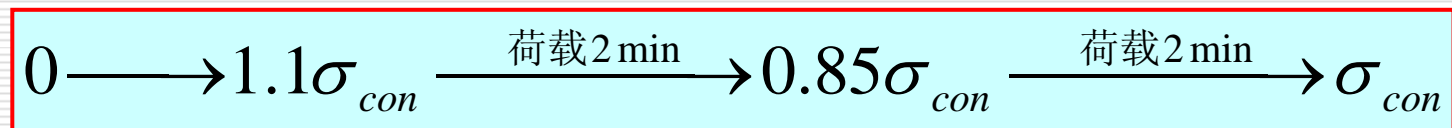
(c)超张拉



## 10.5 预应力损失的计算

### 减小预应力损失的措施

超张拉



两阶段升温

选用低松弛钢筋

提高混凝土质量



## 10.5 预应力损失的计算

### 预应力损失的组合

为了计算方便，《规范》把预应力损失分为两批，混凝土受预压前产生的预应力损失为第一批预应力损失  $\sigma_{I I}$ ，而混凝土受预压后产生的预应力损失为第二批预应力损失  $\sigma_{I I I}$ 。

### 各阶段预应力损失值的组合

预应力损失值的组合	先张法构件	后张法构件
混凝土预压前（第一批）的损失 $\sigma_{I I}$	$\sigma_{I I} + \sigma_{I 2} + \sigma_{I 3} + \sigma_{I 4}$	$\sigma_{I I} + \sigma_{I 2}$
混凝土预压后（第二批）的损失 $\sigma_{I I I}$	$\sigma_{I 5}$	$\sigma_{I 4} + \sigma_{I 5} + \sigma_{I 6}$





## 10.6 预应力轴拉构件的应力分析

### 开裂前预应力混凝土截面的基本分析

预压力 $N_p$ 产生的应力为

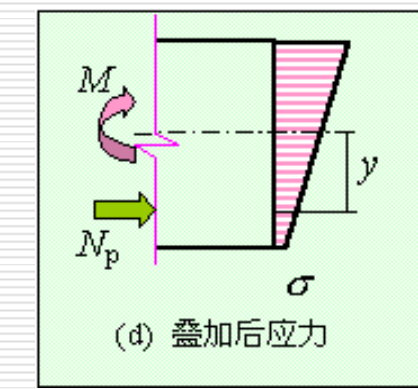
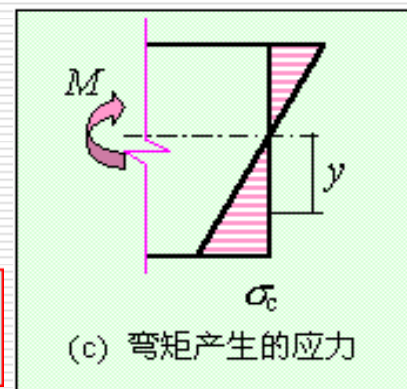
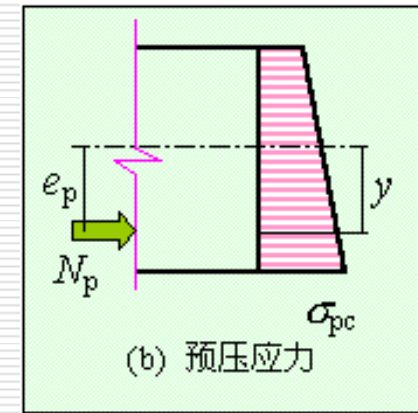
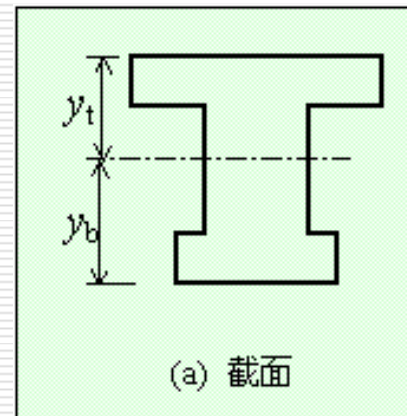
$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y$$

外荷载产生的弯矩 $M$ 引起的应力为

$$\sigma_c = \frac{M}{I} y$$

预压力 $N_p$ 和弯矩 $M$ 叠加，截面应力为

$$\sigma = \sigma_c - \sigma_{pc} = \frac{M}{I} y - \left( \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y \right)$$





## 10.6 预应力轴拉构件的应力分析

### 开裂前预应力混凝土截面的基本分析

截面顶部的应力为

$$\sigma_{\text{top}} = \frac{M}{I} y_t + \left( \frac{N_p}{A} - \frac{N_p e_p}{I} y_t \right)$$

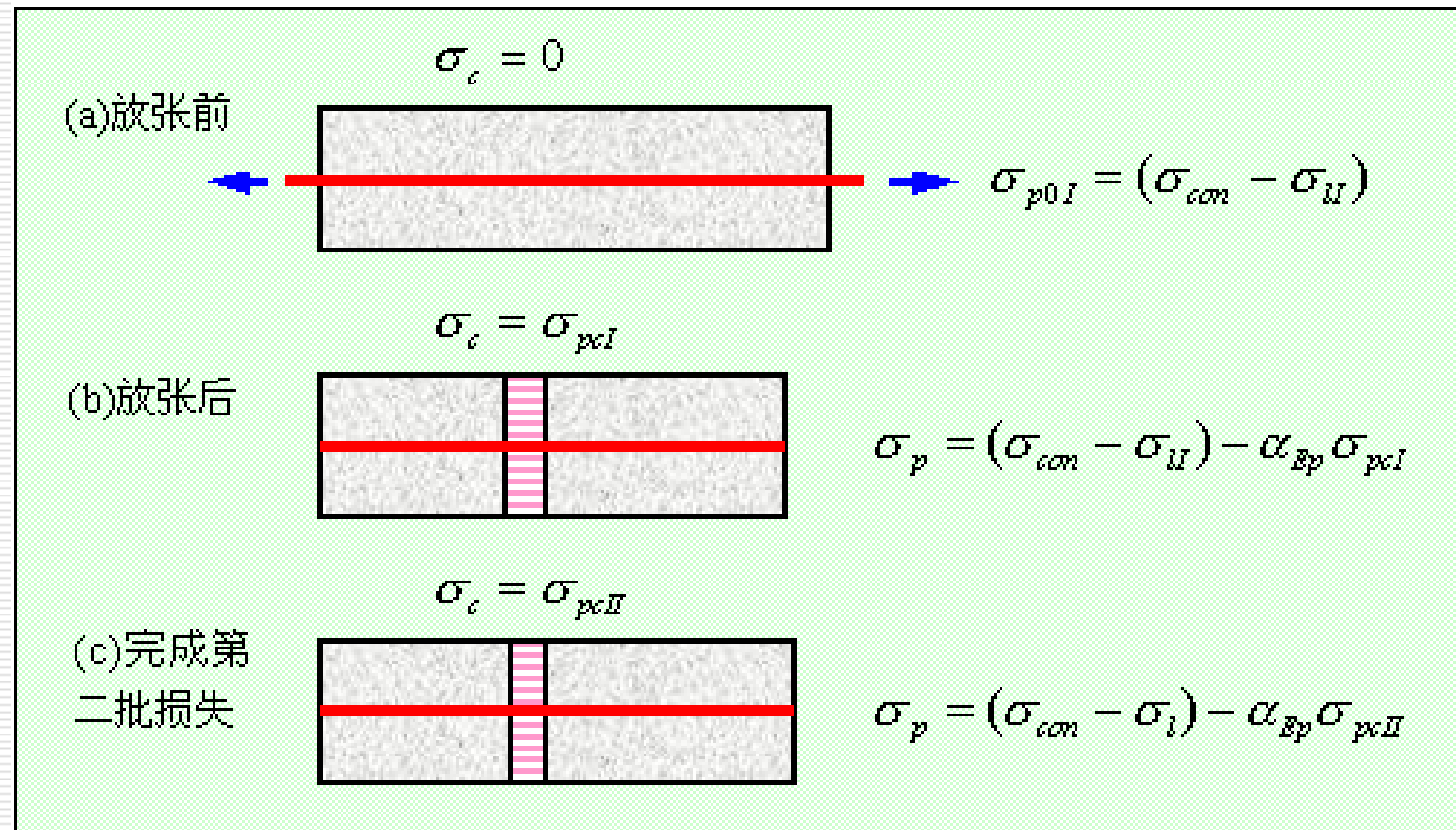
截面底部的应力为

$$\sigma_{\text{bot}} = \frac{M}{I} y_b - \left( \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y_b \right)$$



## 10.6 预应力轴拉构件的应力分析

### 先张法





## 10.6 预应力轴拉构件的应力分析

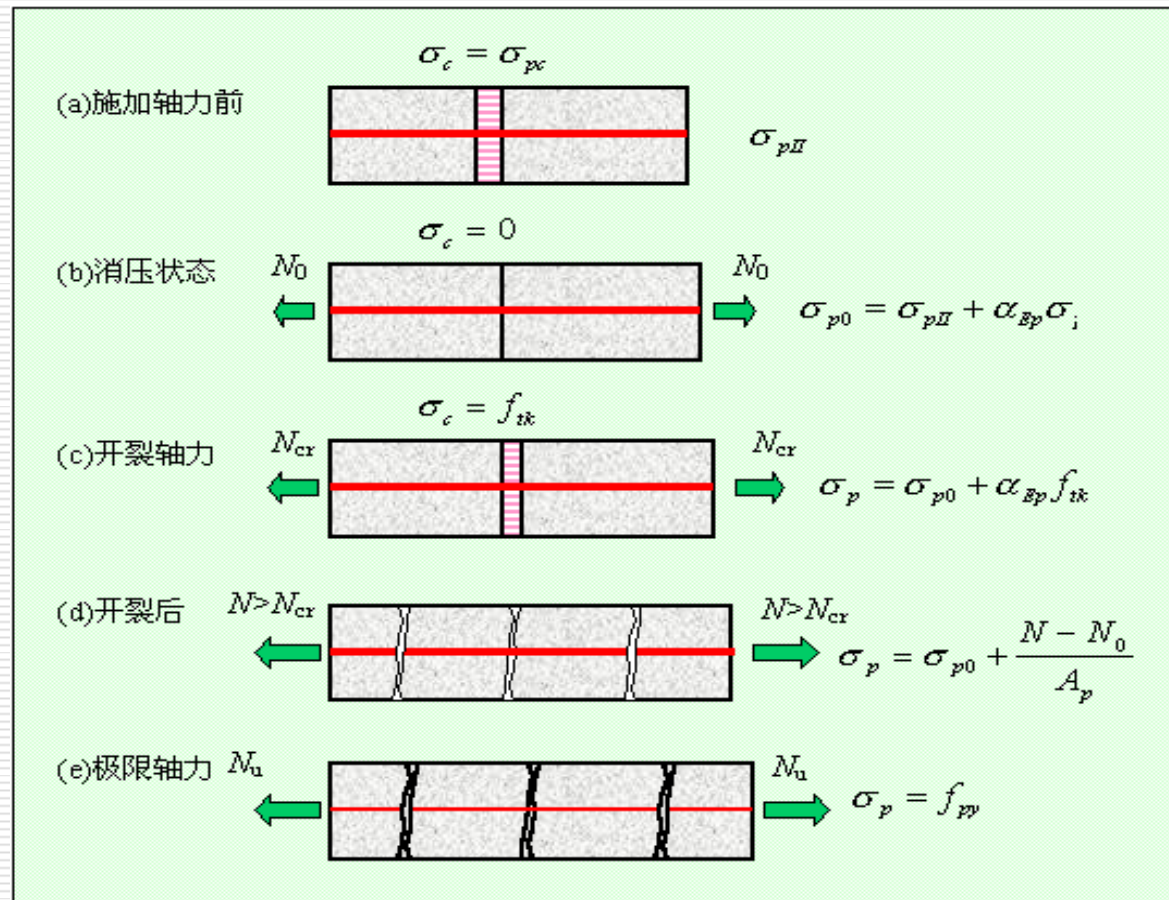
先张法轴心受拉构件各阶段应力分析

受 力 阶 段		预应力钢筋应力 $\sigma_p$	混凝土应力 $\sigma_{pc}$	非预应力钢筋应力 $\sigma_s$
施 工 阶 段	张拉并锚固钢筋	$\sigma_{con} - \sigma_{l1}$	0	0
	混凝土预压前	$\sigma_{con} - \sigma_{l1}$	0	0
	混凝土预压	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_{l1} - \alpha_E \sigma_{pc1}$	$\sigma_{pc1} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{l1}) A_p}{A_0}$	$\sigma_{s1} = -\alpha_E \sigma_{pc1}$
	完成第二批损失	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_l - \alpha_E \sigma_{pc1}$	$\sigma_{pc1} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_l) A_p - \sigma_{l5} A_s}{A_0}$	$\sigma_{s1} = -(\alpha_E \sigma_{pc1} + \sigma_{l5})$
使 用 阶 段	混凝土消压	$\sigma_{con} - \sigma_l$	0	$-\sigma_{l5}$
	混凝土即将开裂	$\sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E f_{tk}$	$f_{tk}$	$\alpha_E f_{tk} - \sigma_{l5}$
	构件破坏	$f_{py}$	0	$f_y$



## 10.6 预应力轴拉构件的应力分析

### 后张法





## 10.6 预应力轴拉构件的应力分析

后张法轴心受拉构件各阶段应力分析

受 力 阶 段		预应力钢筋应力 $\sigma_p$	混凝土应力 $\sigma_{pc}$	非预应力钢筋应力 $\sigma_s$
施 工 阶 段	预应力钢筋张拉并锚固	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_{l1}$	$\sigma_{pc1} = \frac{N_p}{A_n} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{l1}) A_p}{A_n}$	$\sigma_{s1} = -\alpha_E \sigma_{pc1}$
	完成第二批损失	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_l$	$\sigma_{pc1} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_l) A_p - \sigma_{l5} A_s}{A_n}$	$\sigma_{s1} = -(\alpha_E \sigma_{pc1} + \sigma_{l5})$
使 用 阶 段	加载至消压	$\sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc1}$	0	$-\sigma_{l5}$
	加载至构件即将开裂	$\sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc1} + \alpha_E f_{tk}$	$f_{tk}$	$\alpha_E f_{tk} - \sigma_{l5}$
	加载至破坏	$f_{py}$	0	$f_y$



## 10.7 预应力轴拉构件的设计

### (1) 使用阶段承载力计算

$$r_0 N \leq N_u = f_y A_s + f_{py} \cdot A_p$$

### (2) 使用阶段裂缝验算

严格要求不出现裂缝的构件 (一级)

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

一般要求不出现裂缝的构件 (二级)

$$\text{短期效应组合: } \sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk}$$

$$\text{长期效应组合: } \sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0$$

允许开裂, 但限制裂缝密度 (三级)

$$W_{\max} \leq W_{\lim}$$



## 10.7 预应力轴拉构件的设计

### (3) 施工阶段验算

先张法：放松预应力钢筋时构件承载力验算。

后张法：张拉钢筋时构件承载力验算，端部锚固区局压验算。

应力验算：
$$\sigma_{cc} \leq 0.8 f'_{ck}$$





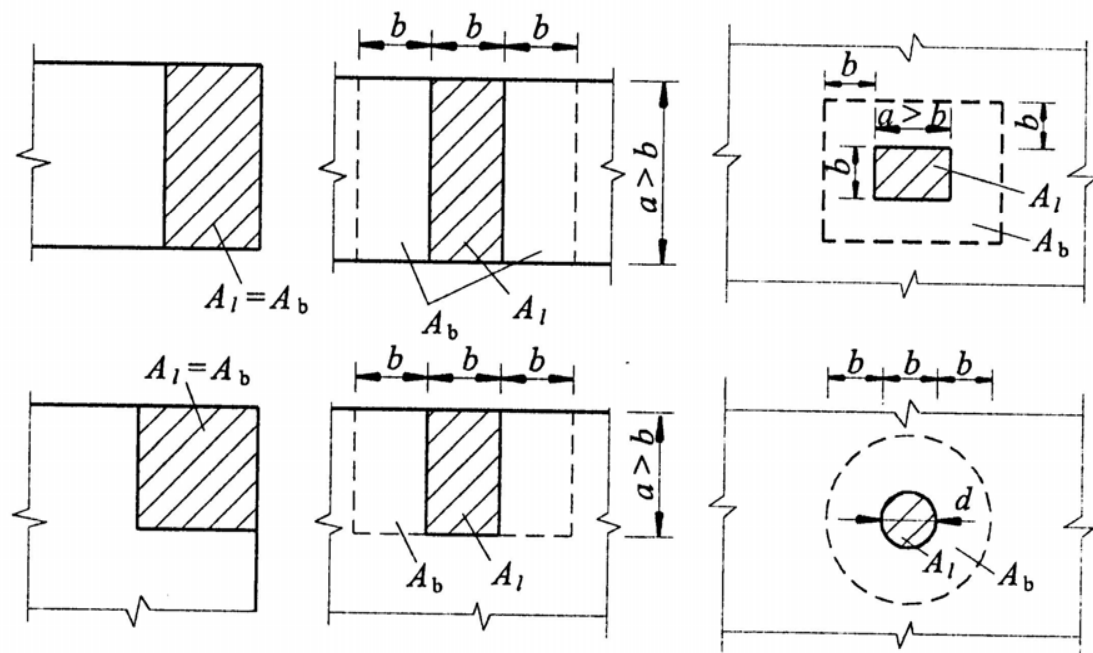
# 10.7 预应力轴拉构件的设计

锚固区验算

传递长度:

锚固长度:

局压验算:



局部承压时计算底面积



# 10.8 预应力受弯构件的应力分析

## 先张法

先张法预应力混凝土受弯构件各阶段应力分析

受 力 阶 段		钢筋应力 $\sigma_p$	混凝土应力 $\sigma_{pc}$ (截面下边缘)
施 工 阶 段	张拉钢筋	$\sigma_{con}$	—
	完成第一批损失	$\sigma_{con} - \sigma_{l1}$	0
	放松钢筋	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_{l1} - \alpha_E \sigma_{pc1}$	$\sigma_{pc1} = \frac{N_{p01}}{A_0} + \frac{N_{p01} e_{p01}}{I_0} y_0$ $N_{p01} = (\sigma_{con} - \sigma_{l1}) A_p$
	完成第二批损失	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_l - \alpha_E \sigma_{p01}$	$\sigma_{pc1} = \frac{N_{p01}}{A_0} + \frac{N_{p01} e_{p01}}{I_0} y_0$ $N_{p01} = (\sigma_{con} - \sigma_l) A_p$
使 用 阶 段	加载至 $\sigma_{pc}$	$\sigma_{con} - \sigma_l$	0
	加载至裂缝即将出现	$\sigma_{con} - \sigma_l + 2\alpha_E f_{tk}$	$f_{tk}$
	加载至破坏	$f_{py}$	0



# 10.8 预应力受弯构件的应力分析

## 后张法

后张法预应力混凝土受弯构件各阶段应力分析

受 力 阶 段		钢筋应力 $\sigma_p$	混凝土应力 $\sigma_{pc}$ (截面下边缘)
施 工 阶 段	穿钢筋	0	0
	张拉钢筋	$\sigma_{con} - \sigma_{l2}$	$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} + \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_n$ $N_p = (\sigma_{con} - \sigma_{l2}) A_p$
	完成第一批损失	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_{l1}$	$\sigma_{pc1} = \frac{N_{p1}}{A_1} + \frac{N_{p1} e_{pn1}}{I_n} y_n$ $N_{p1} = (\sigma_{con} - \sigma_{l1}) A_p$
	完成第二批损失	$\sigma_{p1} = \sigma_{con} - \sigma_l$	$\sigma_{pc1} = \frac{N_{p1}}{A_n} + \frac{N_{p1} e_{pn1}}{I_n} y_n$ $N_{p1} = (\sigma_{con} - \sigma_l) A_p$
使 用 阶 段	加载至 $\sigma_{pc} = 0$	$(\sigma_{con} - \sigma_l) + \alpha_E \sigma_{pc1}$	0
	加载至裂缝即将出现	$\sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc1} + 2\alpha_E f_{tk}$	$f_{tk}$
	加载至破坏	$f_{py}$	0



## 10.9 预应力受弯构件的设计

---

### 使用阶段

承载力计算:

抗裂验算:

变形验算:

### 施工阶段

### 锚固区验算



## 10.10 预应力混凝土构件的构造要求

---

截面尺寸

1/20 左右

力筋布置形式

锚固区构造