

混凝土结构

Concrete Structure

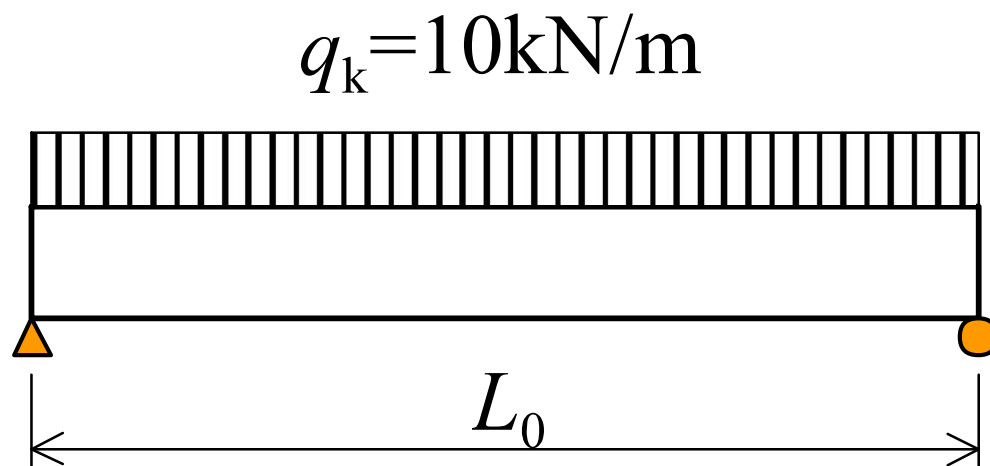
主讲教师：孙修礼 盖玉龙

建筑工程学院工程结构教研室

第十章 预应力混凝土的原理及计算规定

10.1 预应力混凝土的概念(Concept of PRC)

一、钢筋混凝土的缺欠



跨度为**5.2m**的简支梁，截面尺寸为 **$200 \times 450 \text{ mm}^2$** ，作用均布活荷载标准值 **$q_k = 10 \text{ kN/m}$** ，均布恒荷载 **$g_k = 5 \text{ kN/m}$** 。

		跨度增加一倍	跨度增加两倍	采用高强钢筋
L_0	5.2m	10.4m	20.8m	5.2m
$b \times h$	200×450	400×900	800×1900	200×450
自重 g_k	5kN	20kN	80kN	5kN
M	67.6kN.m	513.96kN.m	5948.8kN.m	67.6kN.m
f_y	II级 310	II级 310	II级 310	冷拉IV级 580
A_s	603mm ²	2106mm ²	12650mm ²	308mm ²
M_s	50.7kN.m	405.6kN.m	4867.2kN.m	50.7kN.m
$[f] = \frac{L_0}{300}$	$16.4 = \frac{L_0}{317}$	$38.1 = \frac{L_0}{273}$	$88.8 = \frac{L_0}{234}$	$32.2 = \frac{L_0}{161.5}$
σ_{ss}	232MPa			453MPa
$[w_{\max}] = 0.3$	0.25			0.75

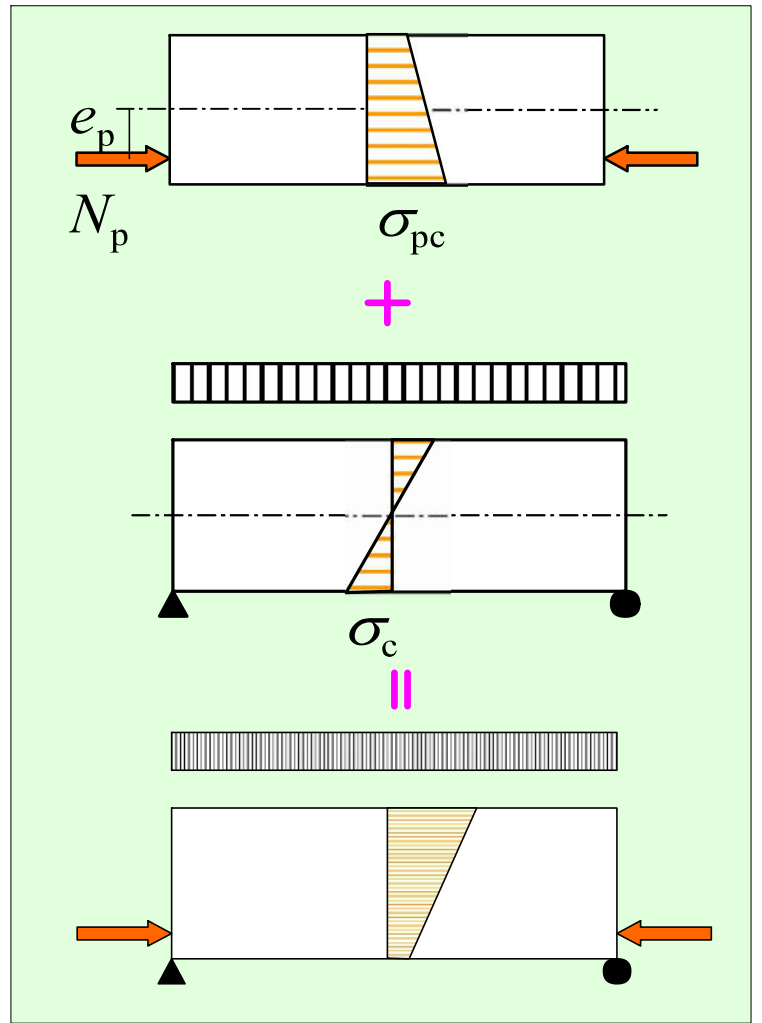
- ★ 产生上述问题原因主要是因为**混凝土的抗拉强度太低**，导致受拉区混凝土过早开裂，截面抗弯刚度显著降低。
- ★ 钢筋混凝土梁应用于大跨度结构时，如为增加刚度而加大截面尺寸，会导致自重进一步增大，**形成恶性循环**。
- ★ 如增加钢筋来提高刚度，则钢材的强度得不到充分利用，造成浪费。
- ★ 采用高强钢筋，按正截面承载力要求可减少配筋，截面抗弯刚度基本与配筋面积成比例降低，故**挠度变形控制**难以满足。
- ★ **裂缝宽度与钢筋应力基本成正比**，一般 $M_s=(0.6\sim 0.8)M_y$ ，如配筋按正截面承载力计算， M_s 下 $\sigma_{ss}=(0.5\sim 0.7)f_y$ 。对于II级钢筋， $f_y=300\text{MPa}$ ， $\sigma_{ss}=150\sim 210\text{MPa}$ ，裂缝宽度已达(0.15~0.25) mm。如采用VI级高强钢筋， **$f_y=580\text{MPa}$** ，则 **$\sigma_{ss}=290\sim 406\text{MPa}$** ，裂缝宽度已远远超过容许限值。

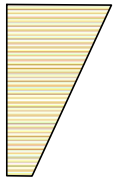
二、预应力的基本概念

$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

$$\sigma_c = \frac{M}{W} = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \sigma_c - \sigma_{pc} \\ &= \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} - \left(\frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} \cdot \frac{h}{2} \right) \end{aligned}$$

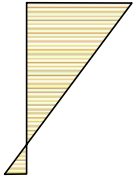




由于预加应力 σ_{pc} 较大，受拉边缘仍处于受压状态，**不会出现开裂**；

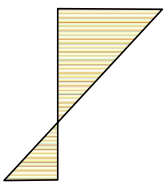
$$\sigma_c - \sigma_{pc} < 0$$

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \sigma_c - \sigma_{pc} \\ &= \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} - \left(\frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} \cdot \frac{h}{2} \right) \end{aligned}$$



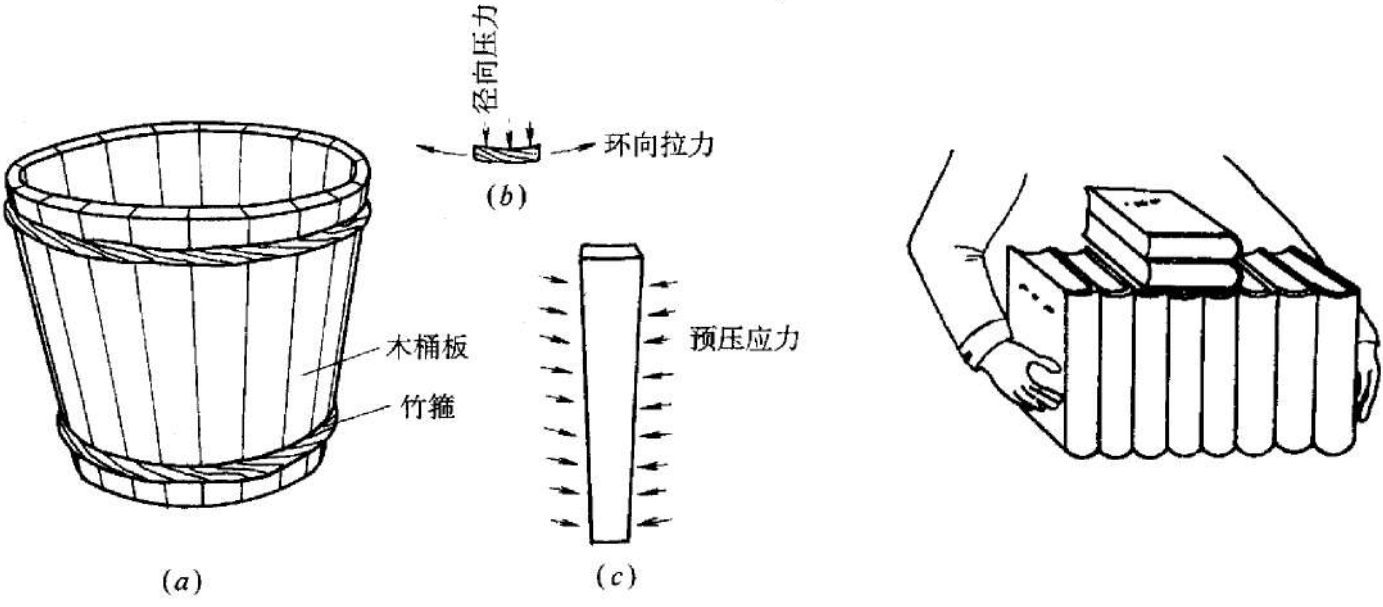
受拉边缘应力虽然受拉，但拉应力小于混凝土的抗拉强度，**一般不会出现开裂**；

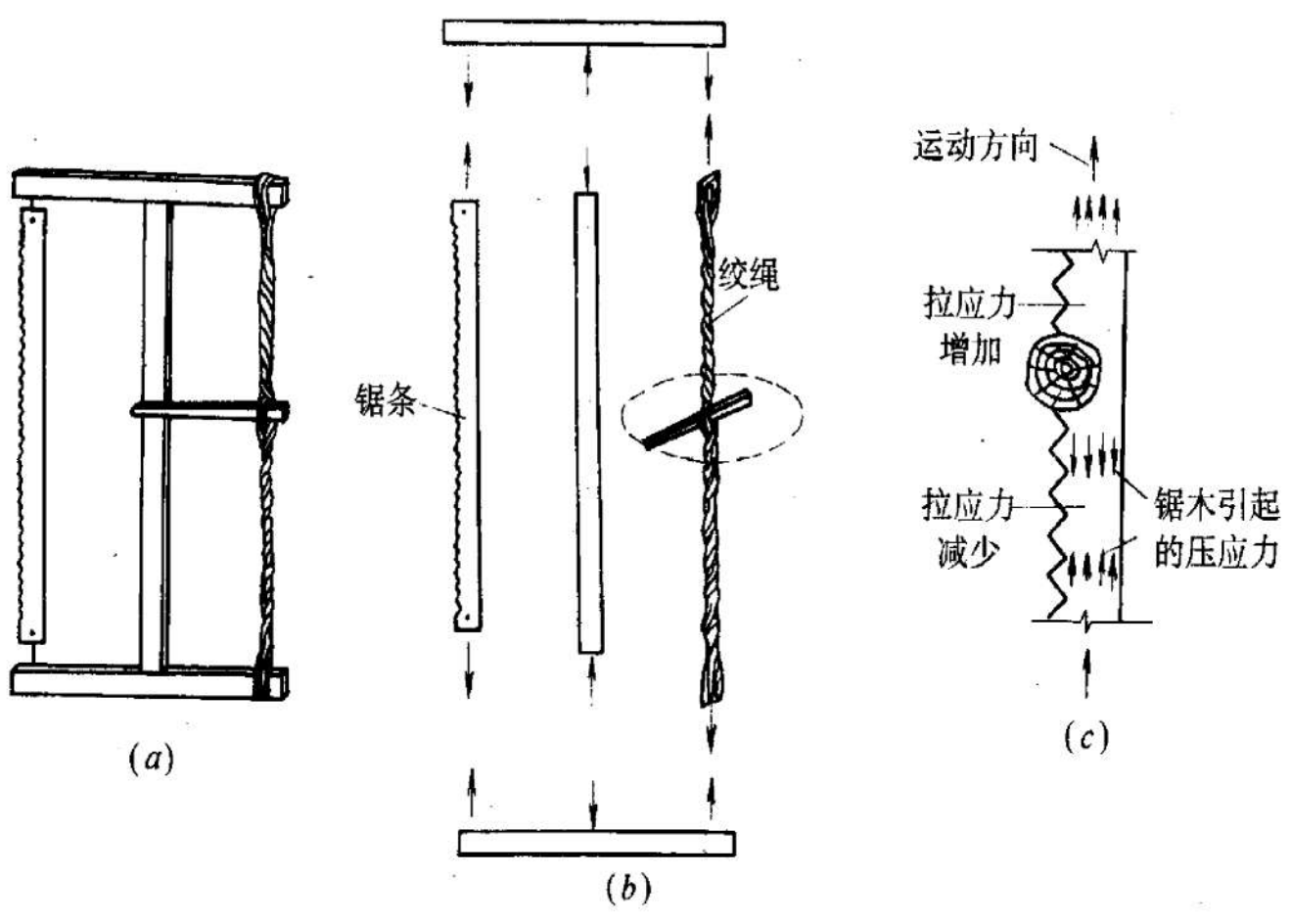
$$0 < \sigma_c - \sigma_{pc} < f_{tk}$$



受拉边缘应力超过混凝土的抗拉强度，虽然会产生裂缝，但比钢筋混凝土构件（ $N_p=0$ ）的**开裂明显推迟**，**裂缝宽度也显著减小**。

$$\sigma_c - \sigma_{pc} > f_{tk}$$





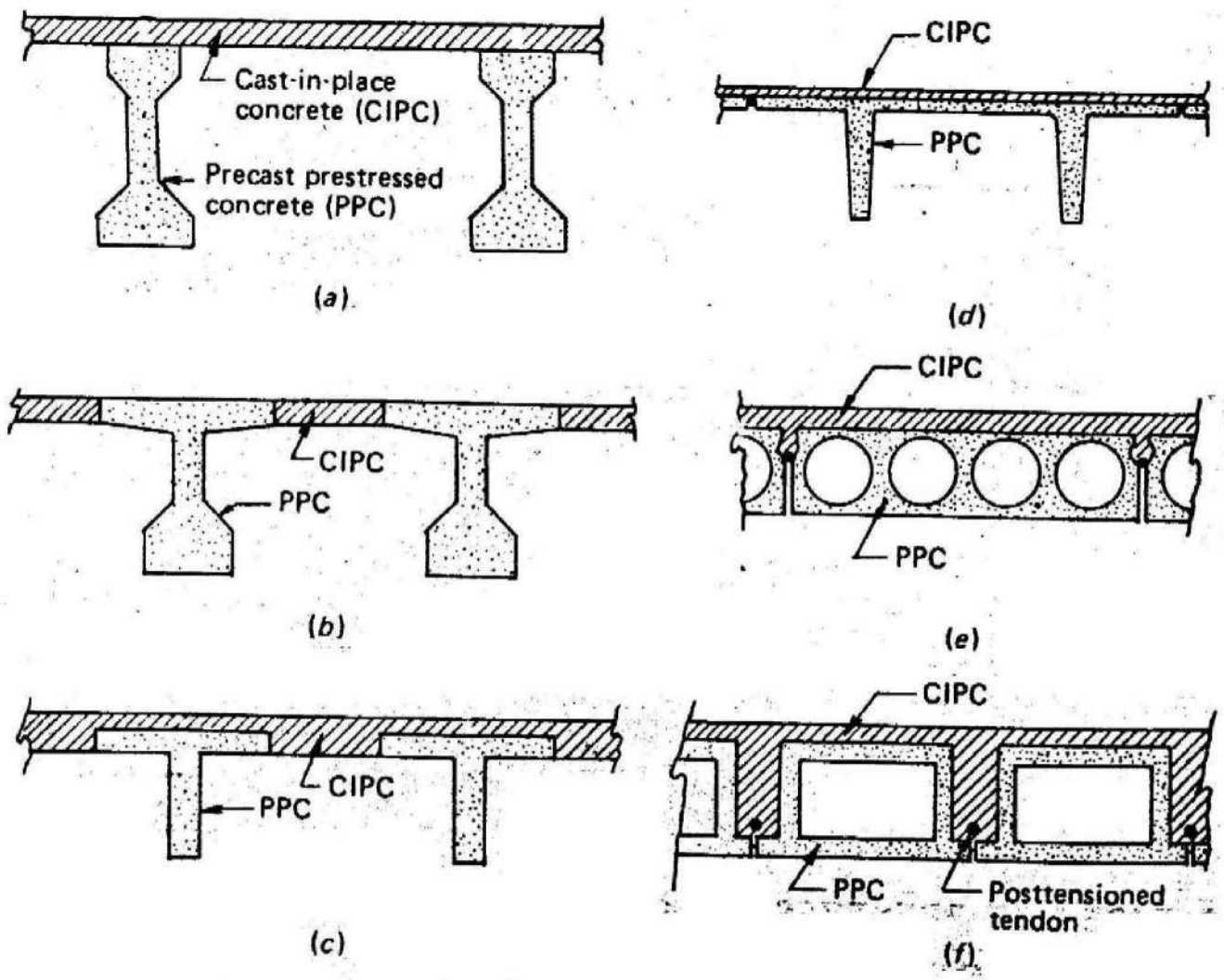
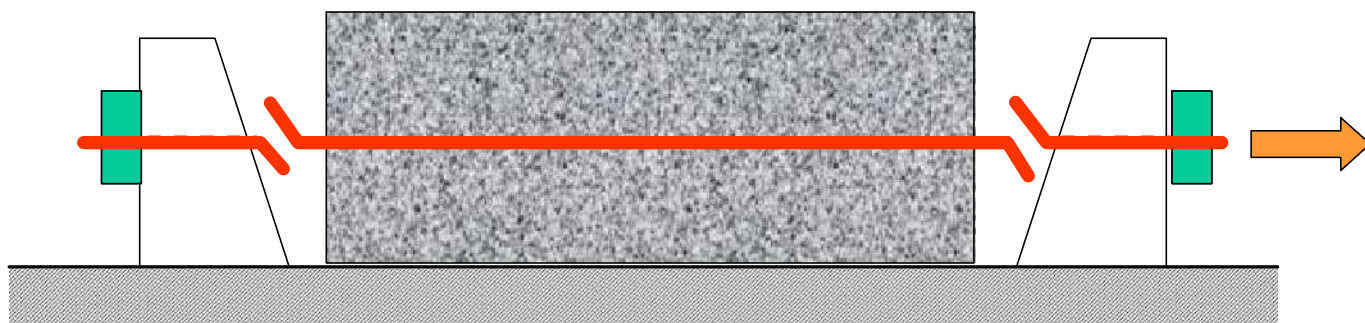
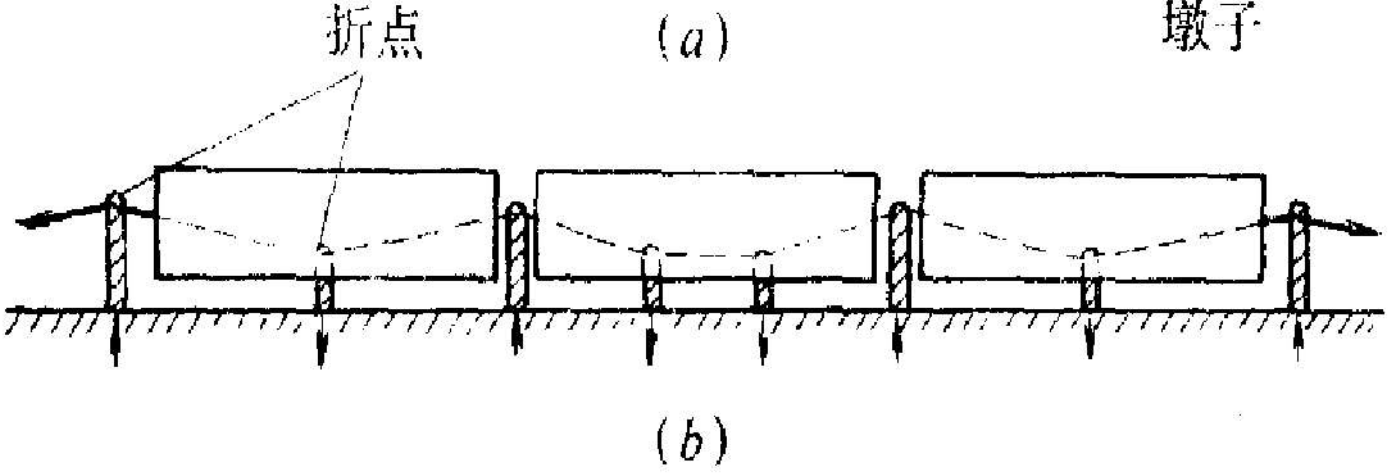
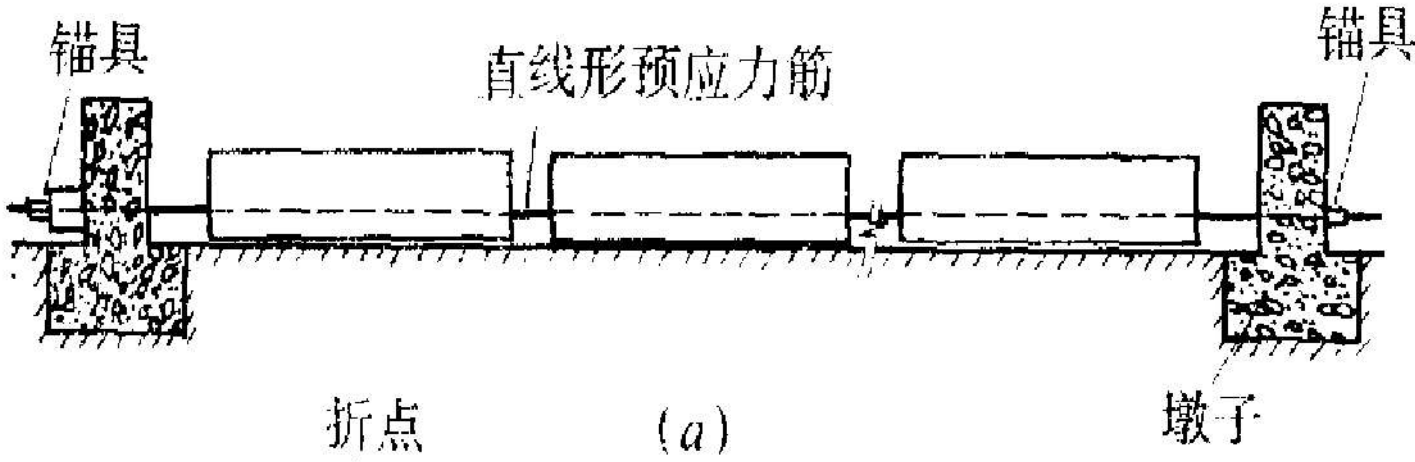


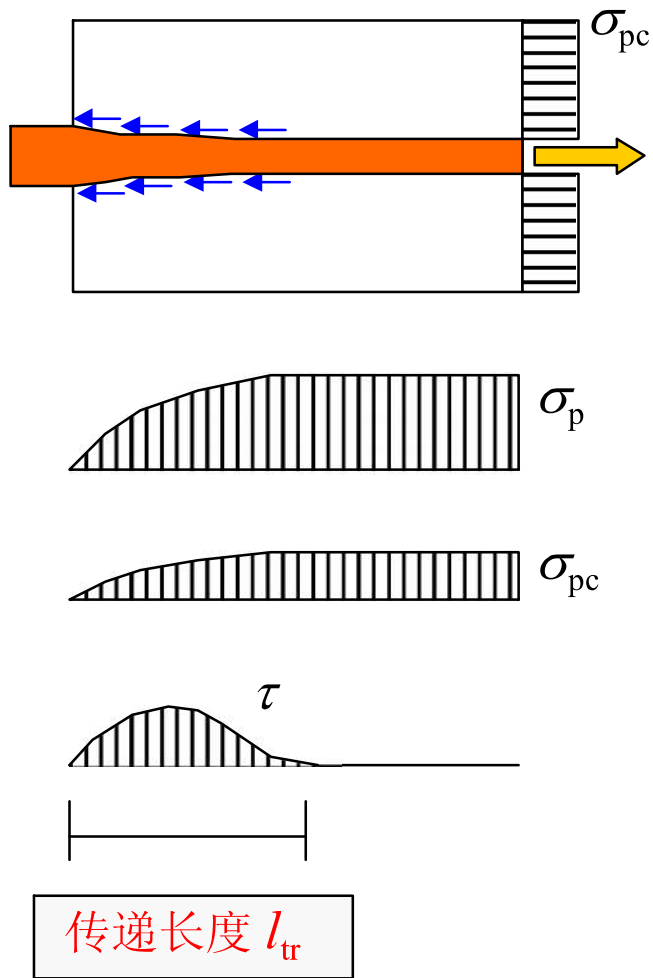
Figure 9.1 Typical cross sections of composite beams.

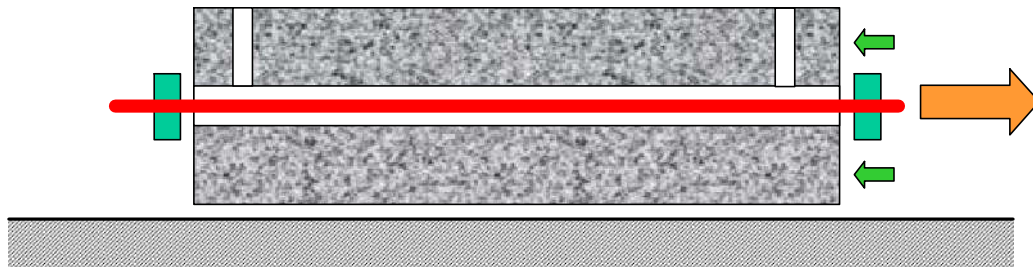
10.2 施加预应力的方法



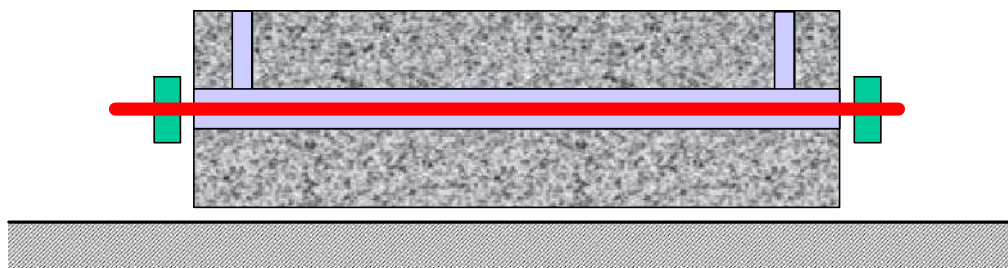
先张法





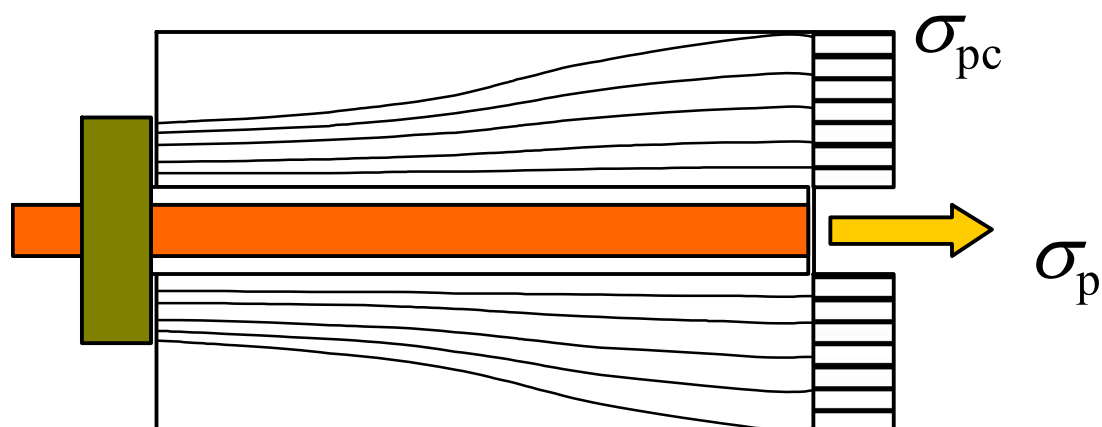


后张法 (Pretension)



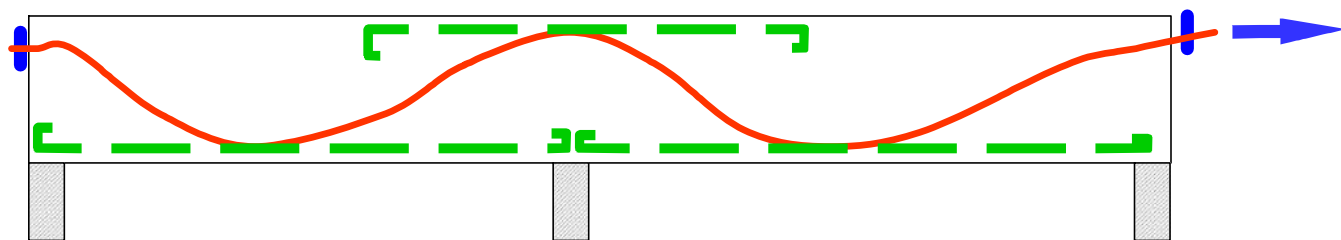
后张法

Post-tension



锚具下混凝土局部承压问题

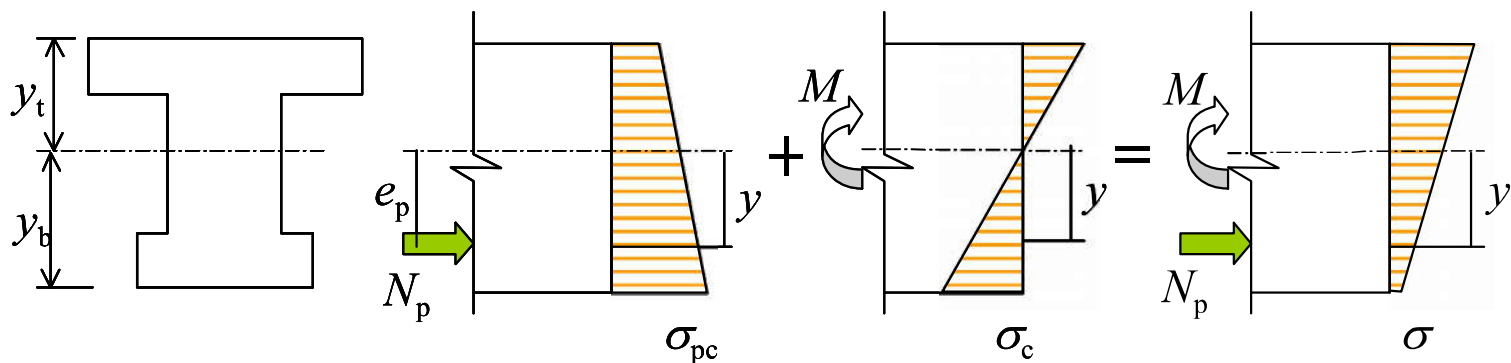
无粘结预应力混凝土



- ★ 一定要有非预应力筋
- ★ 锚具的可靠性
- ★ 高强钢丝的可靠度

10.3 预应力混凝土的基本受力分析

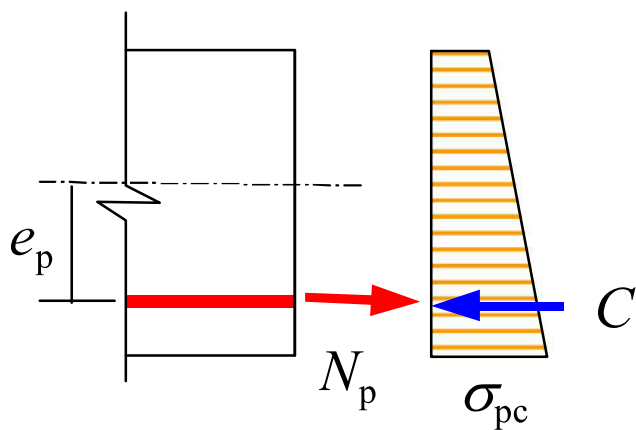
一、截面应力计算



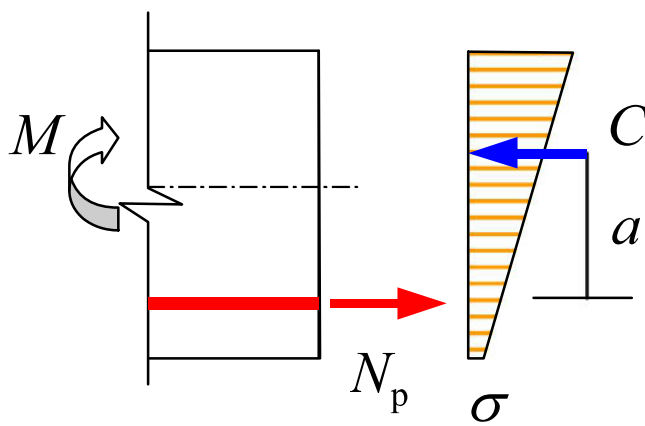
$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y \quad \sigma_c = \frac{M}{I} y$$

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

二、截面受力特点



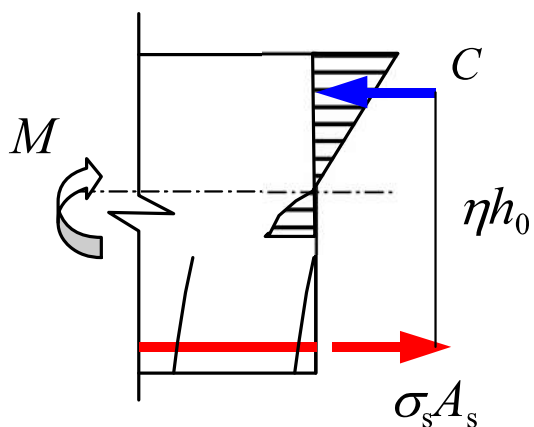
受荷以前



受荷以后

$$N_p \cdot a = C \cdot a = M$$

$$a = \frac{M}{N_p} = \frac{M}{C}$$

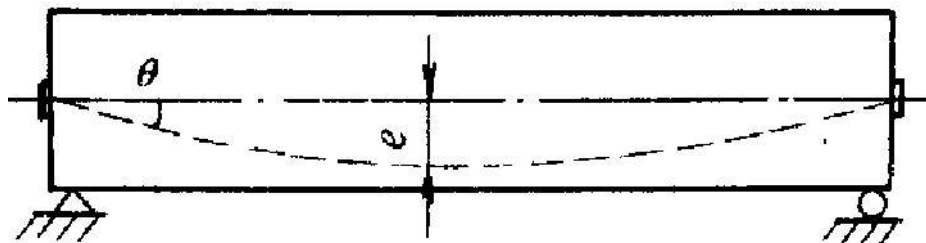


预应力混凝土受弯构件是**依靠内力臂的变化**来抵抗外弯矩的作用，在受力过程中预应力筋一直承受较大的拉力 N_p ，而截面混凝土则一直主要承受压力 C 。

钢筋混凝土受弯构件开裂后，**内力臂基本保持不变**，而钢筋拉力 T 和压区混凝土的压力 C 随弯矩增长而不断增大。

预应力混凝土的这种受力特点，充分利用了钢筋抗拉强度和混凝土抗压强度高特性，可以使得高强度材料强度高的性能得以发挥。

三、平衡荷载概念

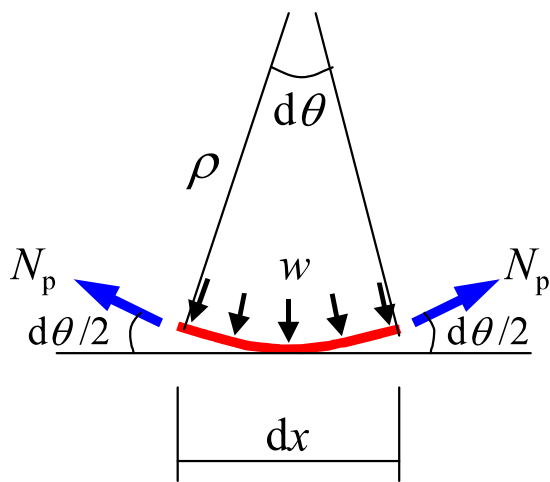


$$M_g = \frac{1}{2} g_k (lx - x^2)$$

$$e_p = 4e_0 \frac{(lx - x^2)}{l^2} \quad \text{取} \quad e_0 = \frac{1}{8} \frac{g_k l^2}{N_p}$$

$$N_p e_p = 4 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{g_k l^2}{N_p} \cdot \frac{(lx - x^2)}{l^2} = \frac{1}{2} g_k (lx - x^2) = M_g$$

$$\sigma = \frac{M_g}{I} y - \left(\frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y \right) = -\frac{N_p}{A}$$



$$w \cdot dx = N_p \cdot d\theta$$

$$w = N_p \cdot \frac{d\theta}{dx} = N_p \cdot \rho$$

$$\rho = \frac{d\theta}{dx} = -\frac{d^2 e_p}{dx^2}$$

$$\rho = \frac{8e_0}{l^2}$$

$$e_p = 4e_0 \frac{(lx - x^2)}{l^2}$$

$$w = N_p \cdot \rho = \frac{8N_p e_0}{l^2}$$

当 $w = g_k$ 时，曲线预应力筋对混凝土产生横向分布压力恰好抵消梁均布恒荷载 g_k 。

按这种方法设计的预应力混凝土结构称为平衡荷载法。

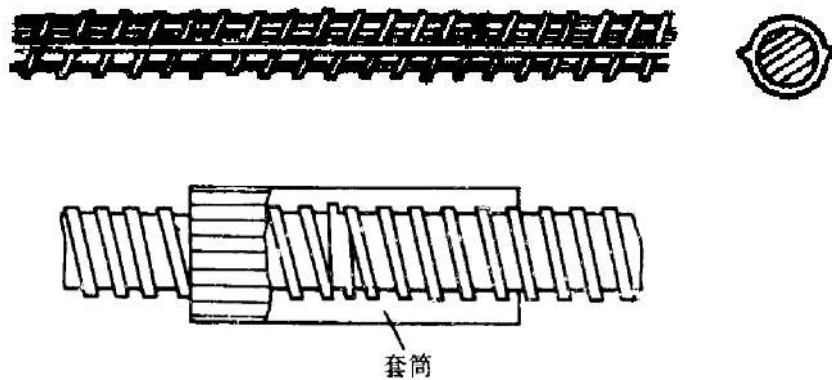
10.4 预应力混凝土的材料及锚夹具

一、预应力钢筋

- ◆ 预应力钢筋的强度越高越好。
- ◆ 而且在预应力混凝土制作和使用过程中，由于种种原因，预应力筋中预先施加的张拉应力会产生损失，因此，为使得扣除应力损失后仍具有较高的张拉应力，也必须使用高强钢筋（丝）作预应力筋。
- ◆ 为避免在超载情况下发生脆性破断，预应力筋还必须具有一定的塑性。同时还要求具有良好的加工性能，以满足对钢筋焊接、镦粗的加工要求。
- ◆ 对钢丝类预应力筋，还要求具有低松弛性和与混凝土良好的粘结性能，通常采用‘刻痕’或‘压波’方法来提高与混凝土粘结强度。

1、冷拉低合金钢筋

- ◆ 通常将Ⅳ级热轧钢筋经冷拉后作为预应力筋，抗拉强度可达**580MPa**。
- ◆ 为解决粗直径钢筋的连接问题，钢筋表面轧制成不带纵向肋的精制螺纹，可用套筒直接连接。
- ◆ 但随着近年来高强钢丝和钢绞线的大量生产，这种预应力筋的应用已很少。



2、中高强钢丝

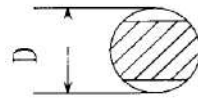
中高强钢丝是采用优质碳素钢盘条，经过几次冷拔后得到。

中强钢丝的为**800~1200MPa**，

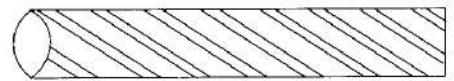
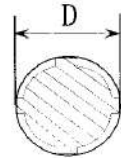
高强钢丝的强度为**1470~1860MPa**。

钢丝直径为**3~9mm**。

为增加与混凝土粘结强度，钢丝表面可采用‘刻痕’或‘压波’，也可制成螺旋肋。



刻痕钢丝

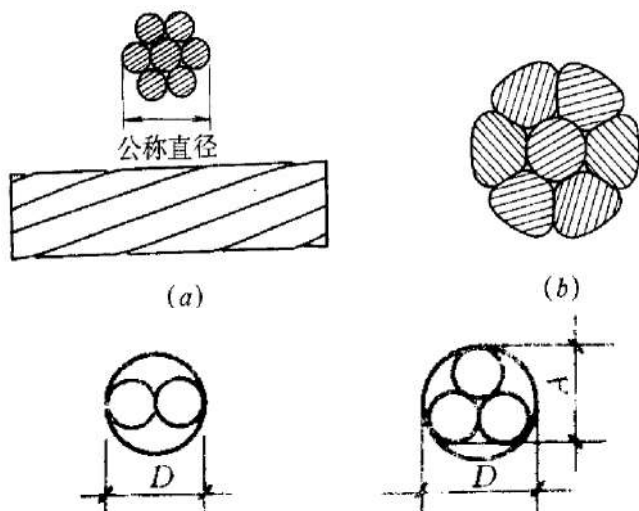


螺旋肋钢丝

消除应力钢丝：钢丝经冷拔后，存在有较大的内应力，一般都需要采用低温回火处理来消除内应力。消除应力钢丝的比例极限、条件屈服强度和弹性模量均比消除应力前有所提高，塑性也有所改善。

3、钢绞线

钢绞线是用2、3、7股高强钢丝扭结而成的一种高强预应力筋，其中以**7股钢绞线应用最多**。7股钢绞线的公称直径为**9.5~15.2 mm**，通常用于无粘结预应力筋，强度可高达**1860MPa**。2股和3股钢绞线用途不广，仅用于某些先张法构件，以提高与混凝土的粘结强度。

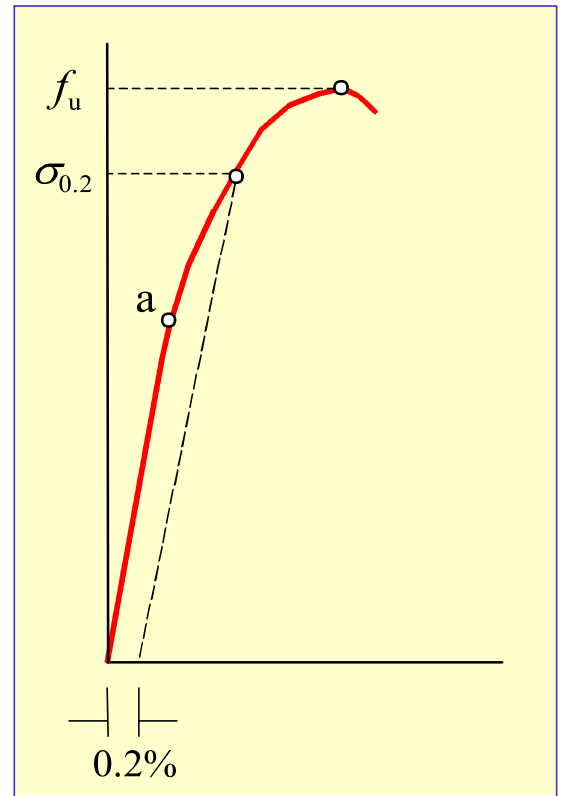


无粘结预应力钢丝束

4、热处理钢筋

用热轧中碳低合金钢经过调质热处理后制成的高强度钢筋，直径为6~10mm，**抗拉强度为1470MPa**。

除冷拉低合金钢筋外，其余预应力筋的应力-应变曲线均无明显屈服点，采用残余应变为**0.2%**的**条件屈服点**作为抗拉强度设计指标。



预应力钢筋强度标准值和设计值 (N/mm²)

种 类		f_{ptk}	f_{py}	f'_y	
消除应力钢丝 螺旋肋钢丝	$\Phi 4 \sim \Phi 9$	1470	1250	400	
		1570	1180		
		1670	1110		
		1770	1040		
刻痕钢丝	$\Phi 5$ 、 $\Phi 7$	1470 1570	1110 1040	360	
钢绞线	二股	d=10.0	1720	1220	360
		d=12.0			
	三股	d=10.8	1720	1220	360
		d=12.9			
	七股	d=9.5	1860	1320	360
		d=11.1	1860	1320	
		d=12.7	1860	1320	
d=15.2		1860	1320		
		1820	1290		
	1720	1220			
热处理钢筋	40Si ₂ Mn(d=6) 48Si ₂ Mn(d=8.2) 45Si ₂ Cr(d=10)	1470	1040	400	

二、混凝土——预应力混凝土要求采用高强混凝土

- ★可以施加较大的预压应力，提高预应力效率；
- ★有利于减小构件截面尺寸，以适用大跨度的要求；
- ★具有较高的弹性模量，有利于提高截面抗弯刚度，减少预压时的弹性回缩；
- ★徐变较小，有利于减少徐变引起的预应力损失；
- ★与钢筋有较大粘结强度，减少先张法预应力筋的应力传递长度；
- ★有利于提高局部承压能力，便于后张锚具的布置和减小锚具垫板的尺寸；
- ★强度早期发展较快，可较早施加预应力，加快施工速度，提高台座、模具、夹具的周转率，降低间接费用

一般预应力混凝土构件的混凝土强度等级不低于**C30**，当采用高强钢丝时不低于**C40**。

三、锚具和夹具

当预应力构件制成后能够取下重复使用的称为**夹具**,而留在构件上不再取下的称为**锚具**

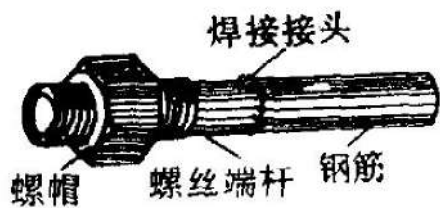
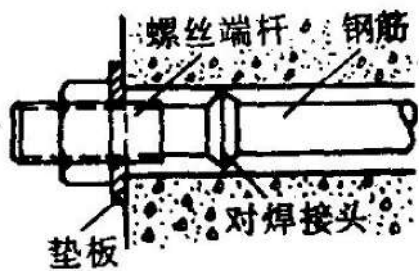
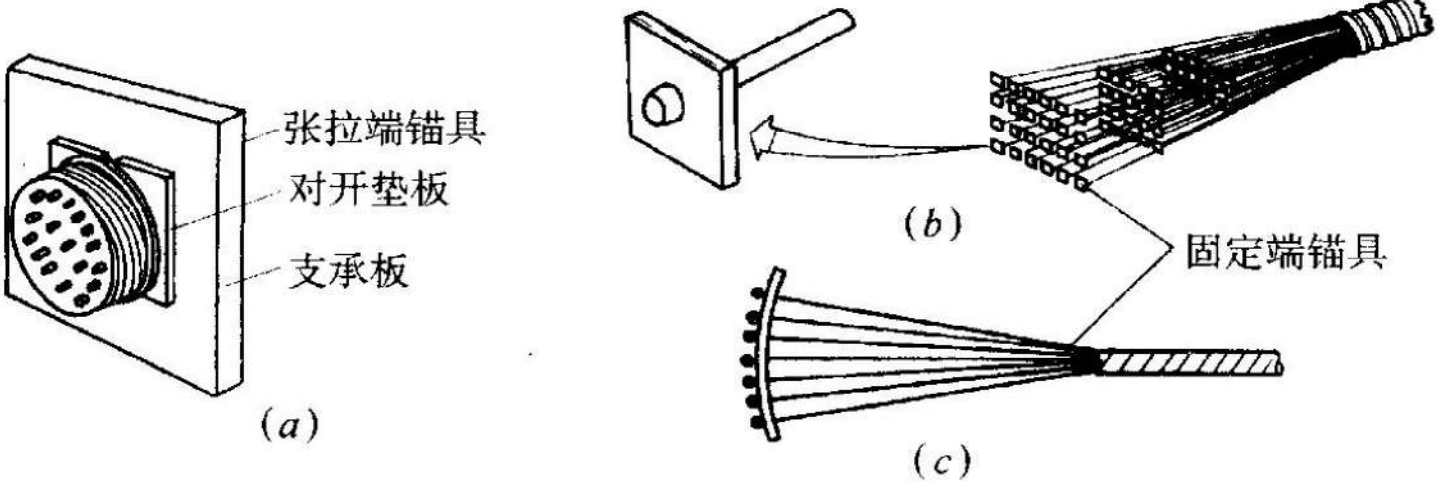
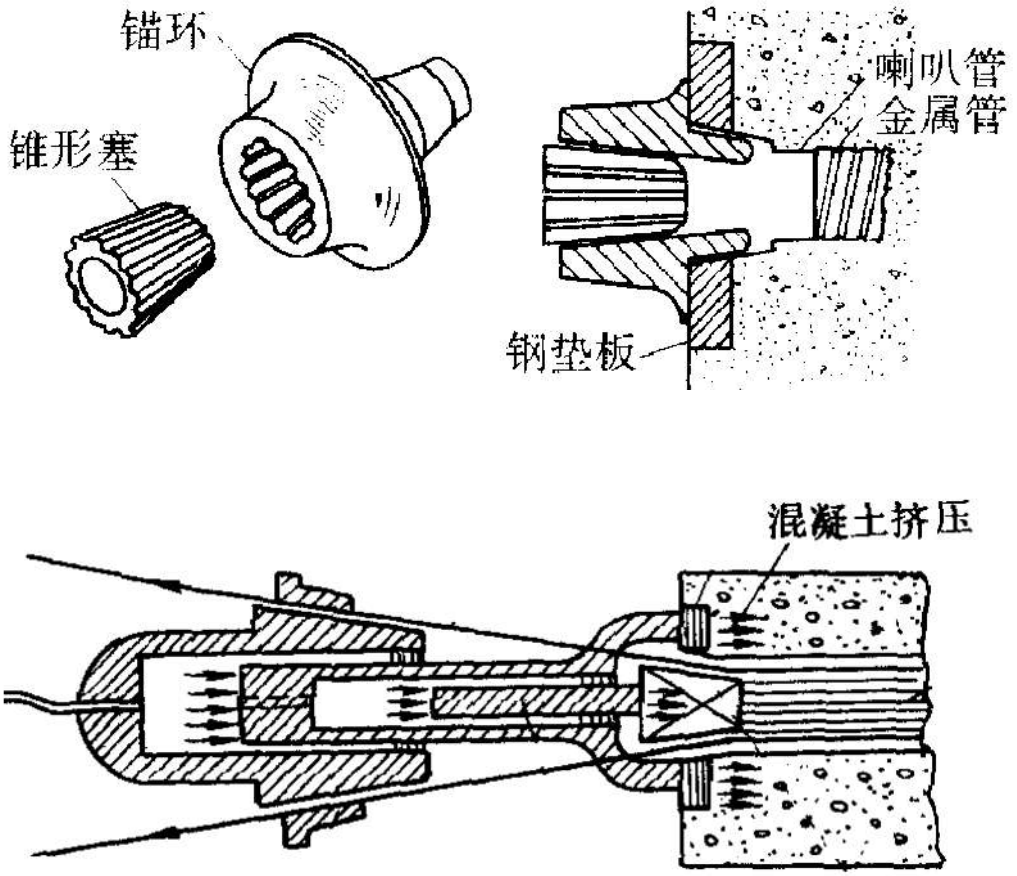


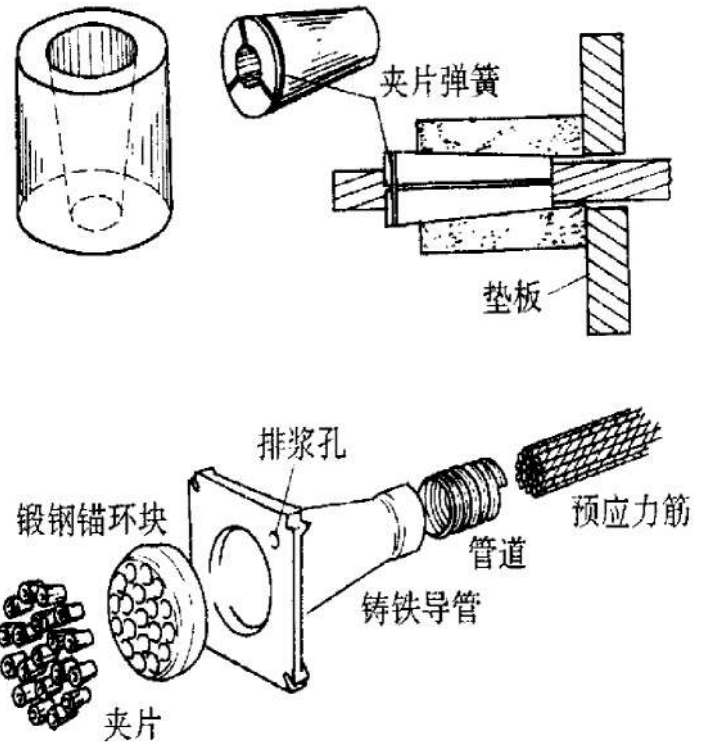
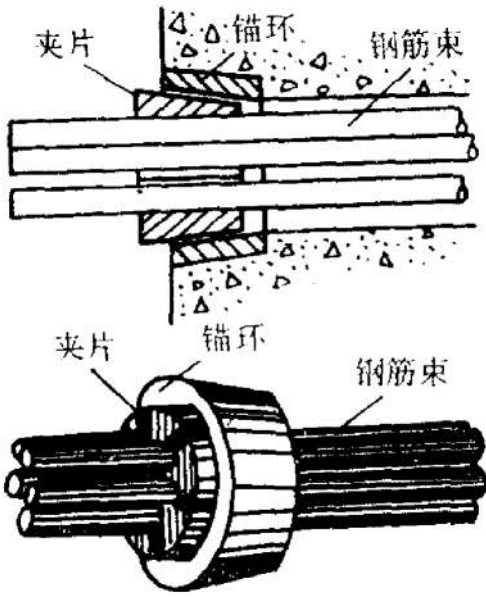
图 螺丝端杆锚具

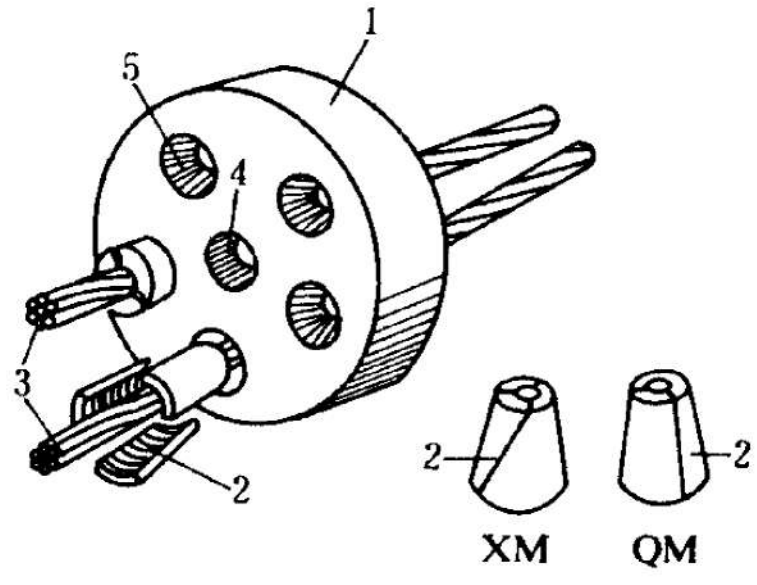


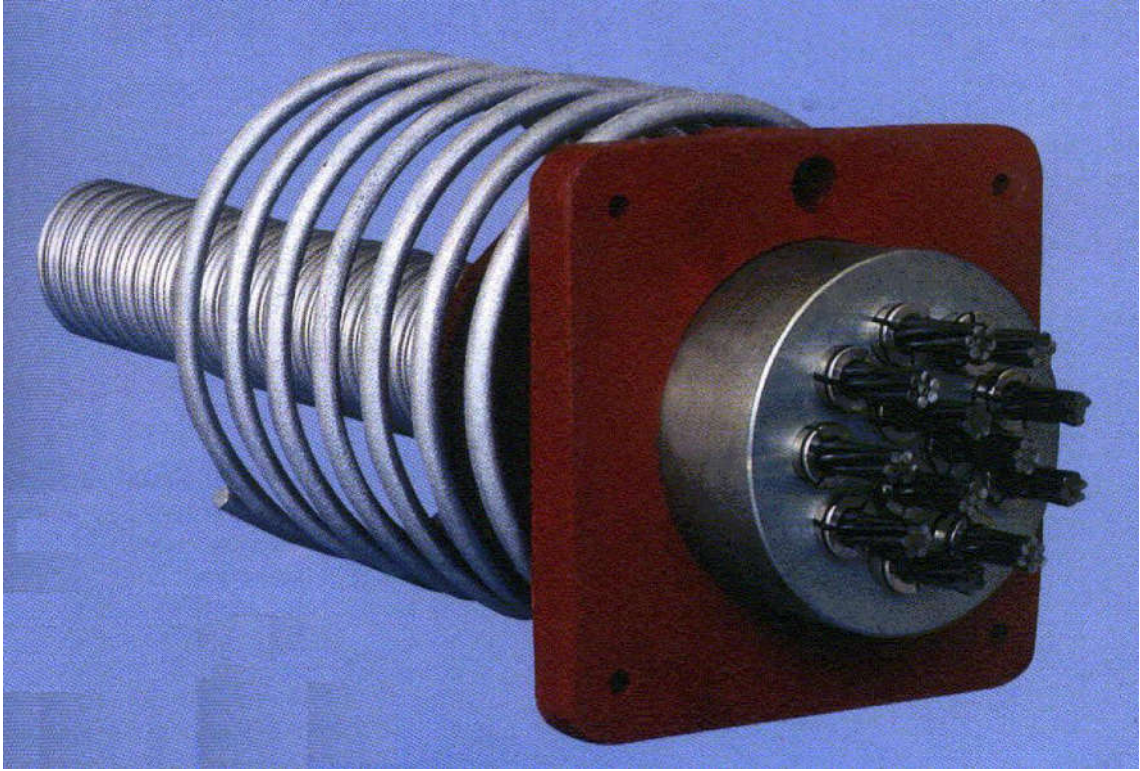
(a) 张拉端 (b) 分散式固定端 (c) 集中式固定端
图 锚头锚具

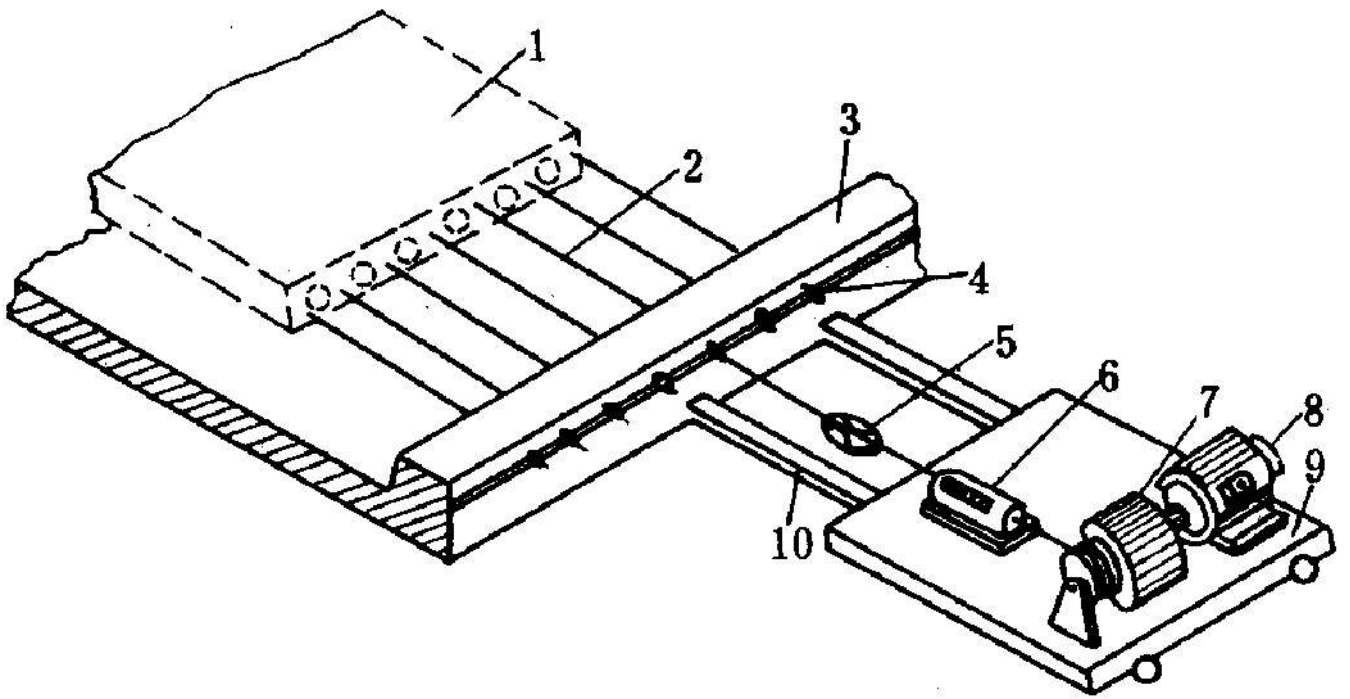


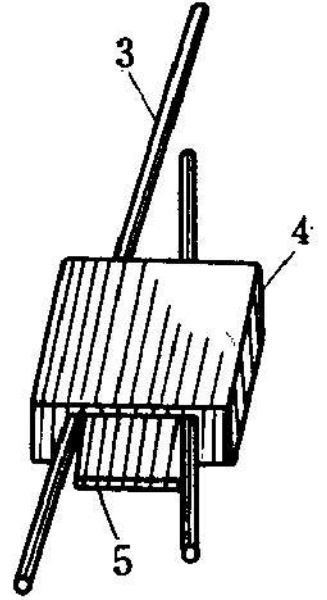
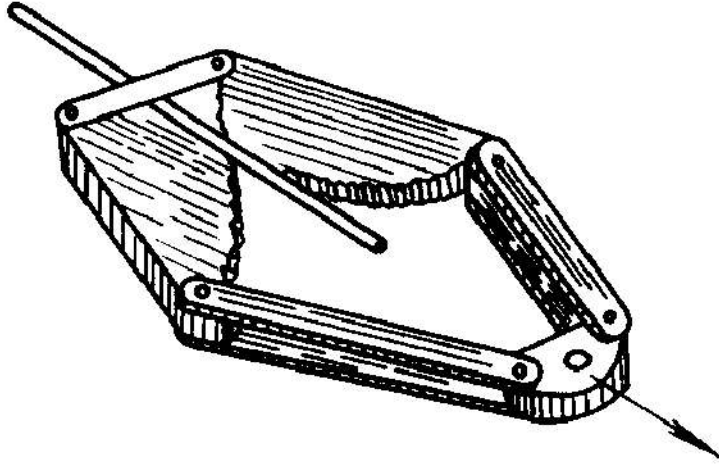
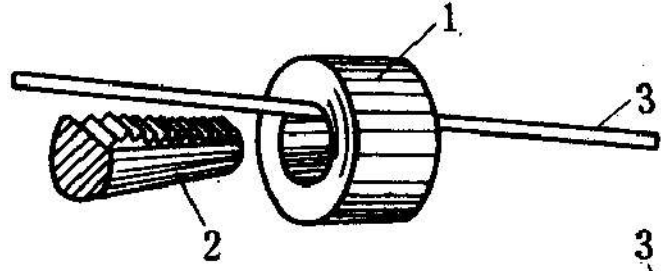
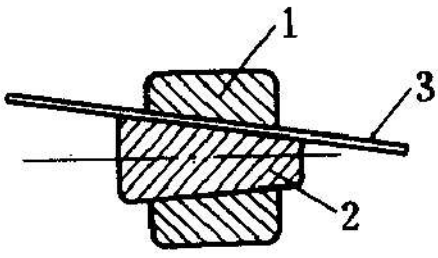
夹片式锚具

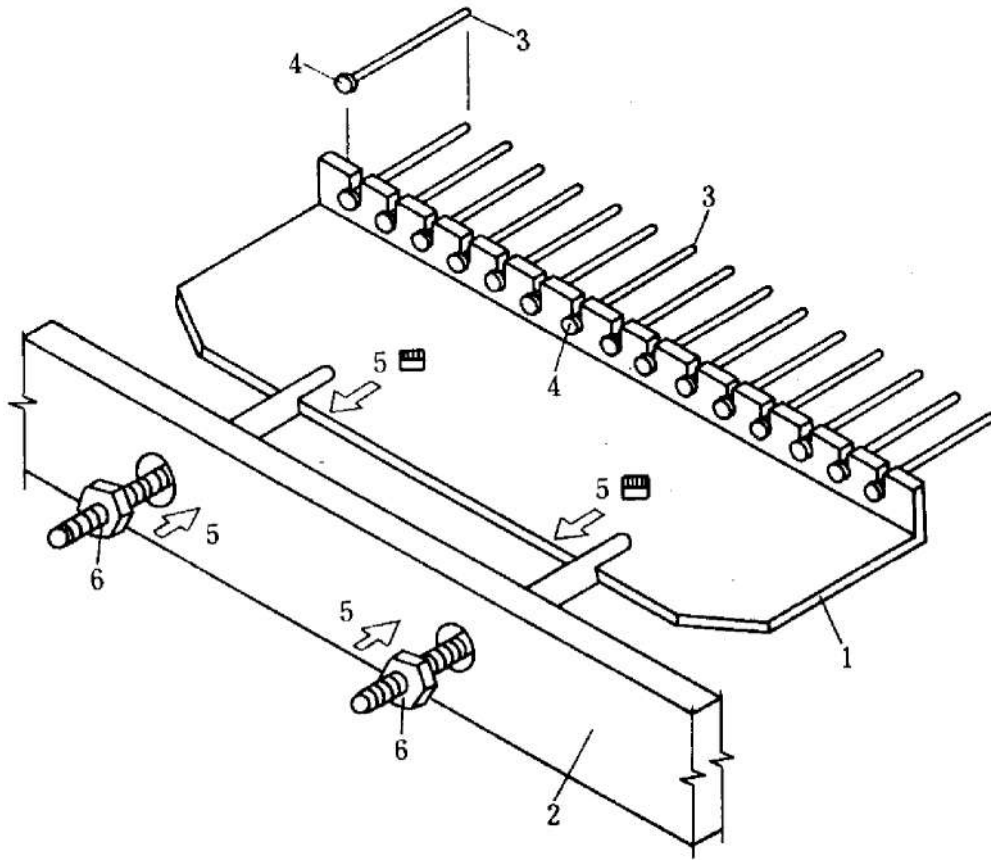


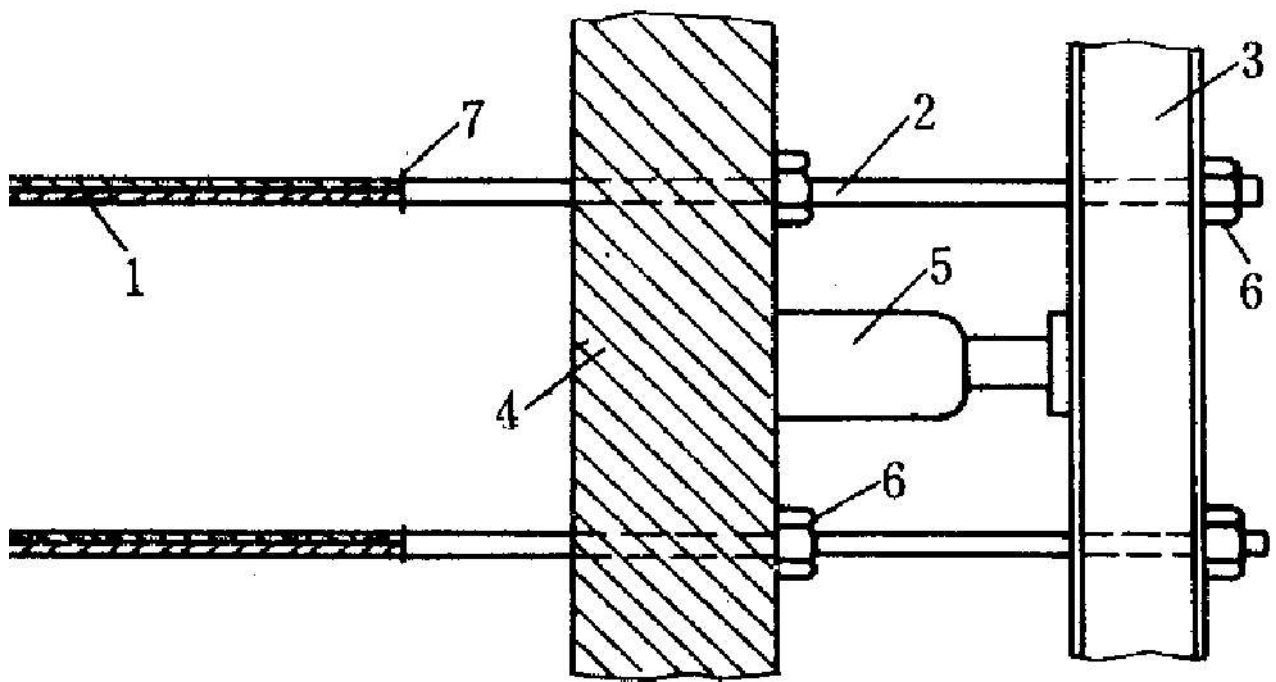


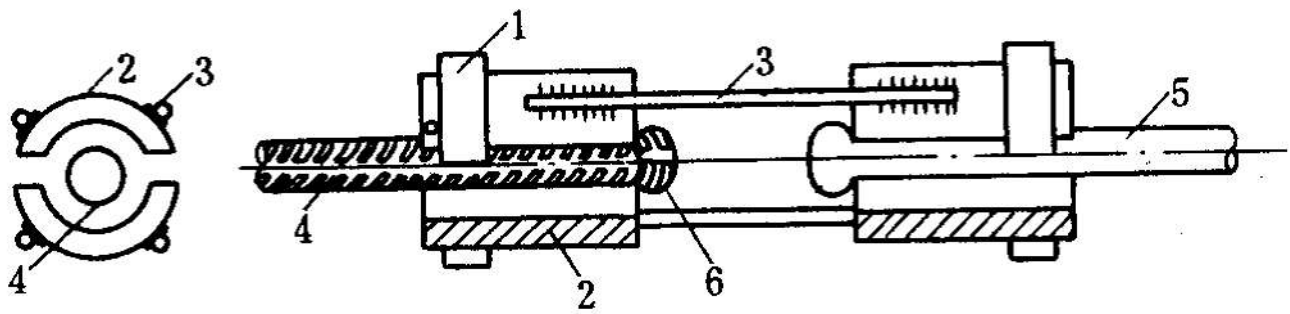
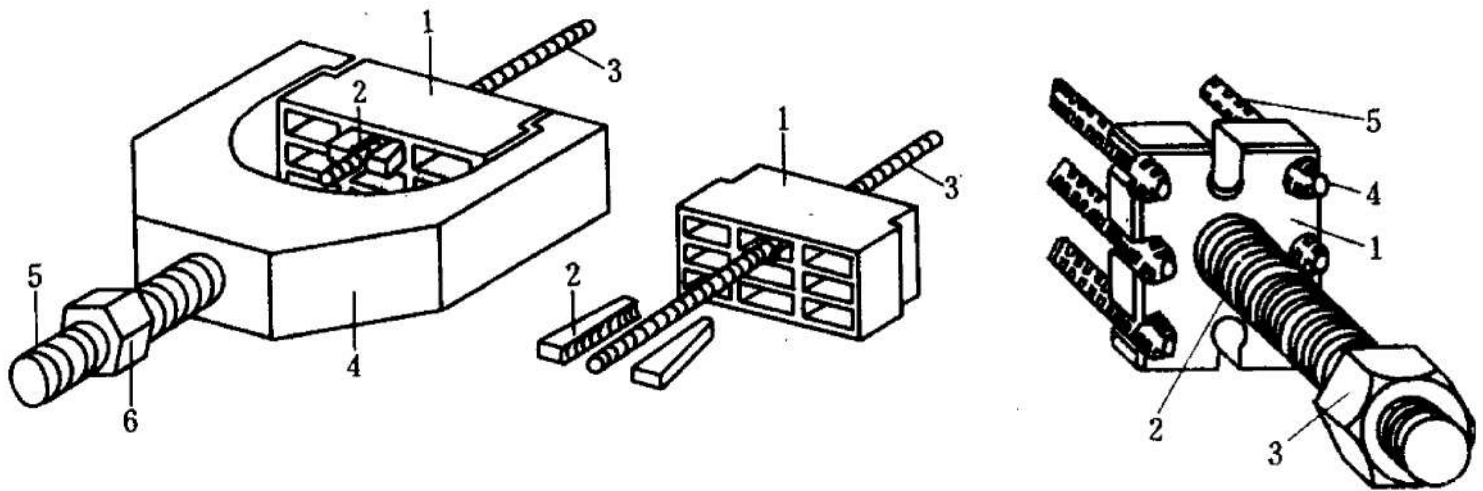












10.5 张拉控制应力和预应力损失

- ◆ 在张拉预应力筋时，张拉设备（千斤顶油压表）所控制的**总张拉力** $N_{p,con}$ 除以预应力筋面积 A_p 得到的应力称为**张拉控制应力** σ_{con} 。

$$\sigma_{con} = \frac{N_{p,con}}{A_p}$$

- ◆ 它是预应力筋在在构件受荷以前所经受的最大应力。
- ◆ 张拉控制应力 σ_{con} 取值越高，预应力筋对混凝土的预压作用越大，可以使预应力筋充分发挥作用。
- ◆ 但 σ_{con} 取值过高，可能会在张拉时引起破断事故，产生过大应力松弛。因此，《规范》规定了张拉控制应力限值 $[\sigma_{con}]$ 。

张拉控制应力限值 $[\sigma_{con}]$

钢筋种类	张拉方法	
	先张法	后张法
预应力钢丝、钢绞线	$0.75 f_{ptk}$	$0.75 f_{ptk}$
热处理钢筋	$0.70 f_{ptk}$	$0.65 f_{ptk}$

因为对预应力筋的张拉过程是在施工阶段进行的，同时张拉预应力筋也是对它进行的一次检验，所以表中 $[\sigma_{\text{con}}]$ 是以预应力筋的标准强度给出的，且 $[\sigma_{\text{con}}]$ 可不受抗拉强度设计值的限制。

在下列情况下， $[\sigma_{\text{con}}]$ 可提高 $0.05 f_{\text{ptk}}$ ：

- (1) 为提高构件在施工阶段的抗裂性能，而在使用阶段受压区内设置的预应力筋；
- (2) 为部分抵消应力松弛、摩擦、分批张拉和温差产生预应力损失。

为避免 σ_{con} 的取值过低，影响预应力筋充分发挥作用，《规范》规定 σ_{con} 不应小于 $0.4 f_{\text{ptk}}$ 。

二、预应力损失

- ◆ 预应力筋张拉后，由于制作方法以及混凝土和钢材的性质上原因，**预应力筋中应力会从 σ_{con} 逐步减少**，这种应力降低现象称为预应力损失。
- ◆ **由于最终稳定后的应力值才对构件产生实际的预应力效果。**因此，预应力损失是预应力混凝土结构设计和施工中的一个关键的问题。
- ◆ **过高或过低估计预应力损失，都会对结构的使用性能产生不利影响。**

由于预应力是通过张拉预应力筋得到，凡是能使预应力筋产生缩短的因素，都将引起预应力损失，主要有：

- ◆ 张拉端夹具、锚具变形引起损失：
- ◆ 摩擦引起损失：在预应力筋张拉过程中，后张法预应力筋与孔道壁之间的摩擦。
- ◆ 温差引起损失：先张法中的热养护引起的温差损失
- ◆ 钢筋松弛引起损失：长度不变的预应力筋，在高应力的长期作用下会产生松弛，会引起预应力损失。
- ◆ 混凝土的收缩和徐变引起的损失：
- ◆ 预应力螺旋箍筋局部挤压引起损失：

1、张拉端夹具、锚具变形损失 σ_{l1}

预应力筋张拉后锚固时，由于锚具受力后变形、垫板缝隙的挤紧以及钢筋在锚具中的内缩引起的预应力损失记为 σ_{l1} 。

对直线预应力筋，

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} \cdot E_s$$

锚具变形和钢筋内缩值 a (mm)

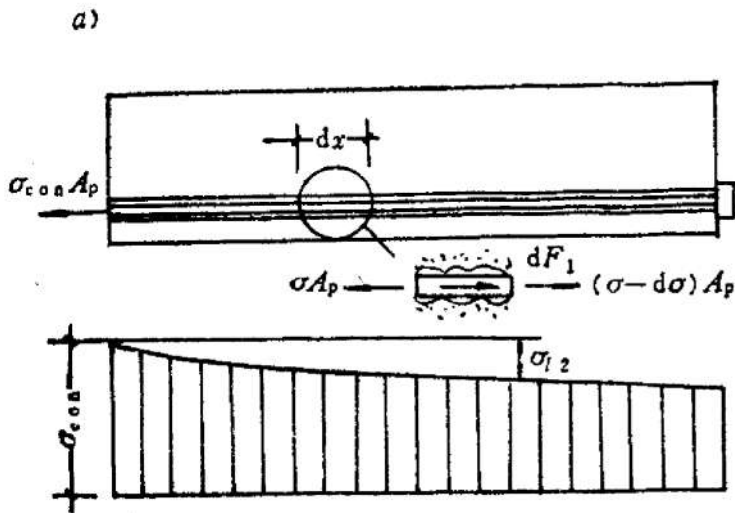
锚具类别		a
支承式锚具（钢丝束镦头锚具等）：		
螺帽缝隙		1
每块后加垫板的缝隙		1
锥塞式锚具（钢丝束的钢质锥形锚具等）		5
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6~8

减少预应力损失措施

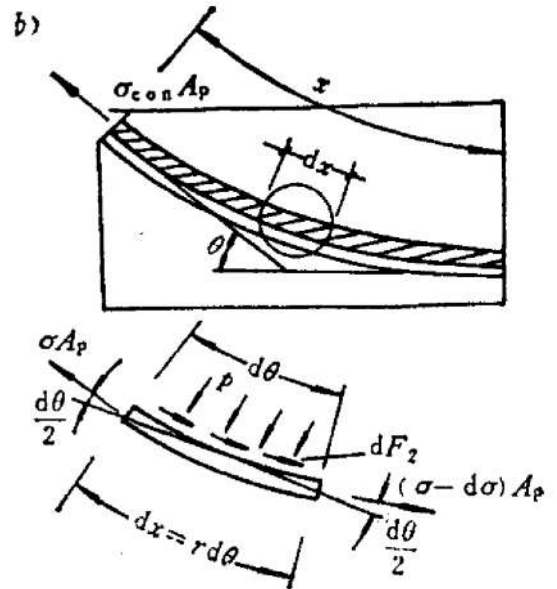
- 1 选择变形小锚具
- 2 增加台座长度

2、摩擦引起损失 σ_l

摩擦损失是指在**后张法**张拉钢筋时，由于预应力筋与孔道壁之间存在摩擦，引起预应力筋应力随距张拉端距离的增加而逐渐减少的现象。

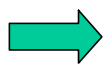


直线预应力筋



曲线预应力筋

$$\ln \sigma_p - \ln \sigma_{\text{con}} = -(\kappa r + \mu)\theta$$



$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{\text{con}}} = e^{-(\kappa r + \mu)\theta}$$

θ 为张拉端与计算截面曲线部分的切线夹角 (rad)

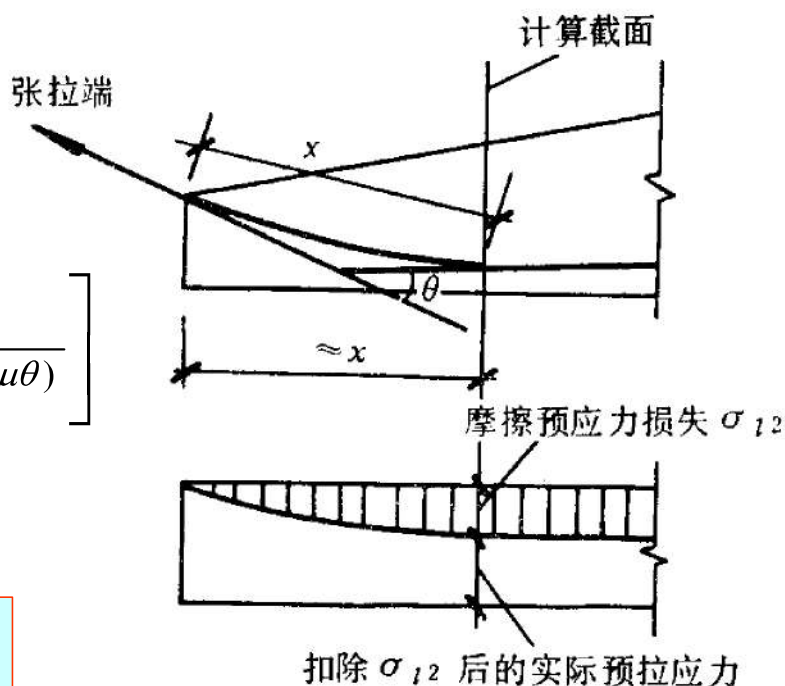
设该夹角很小, 可近似取张拉端到计算截面的距离 $x = r\theta$,

则摩擦损失 σ_{l2} 为,

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

若 $(\kappa x + \mu\theta) < 0.2$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} (\kappa x + \mu\theta)$$

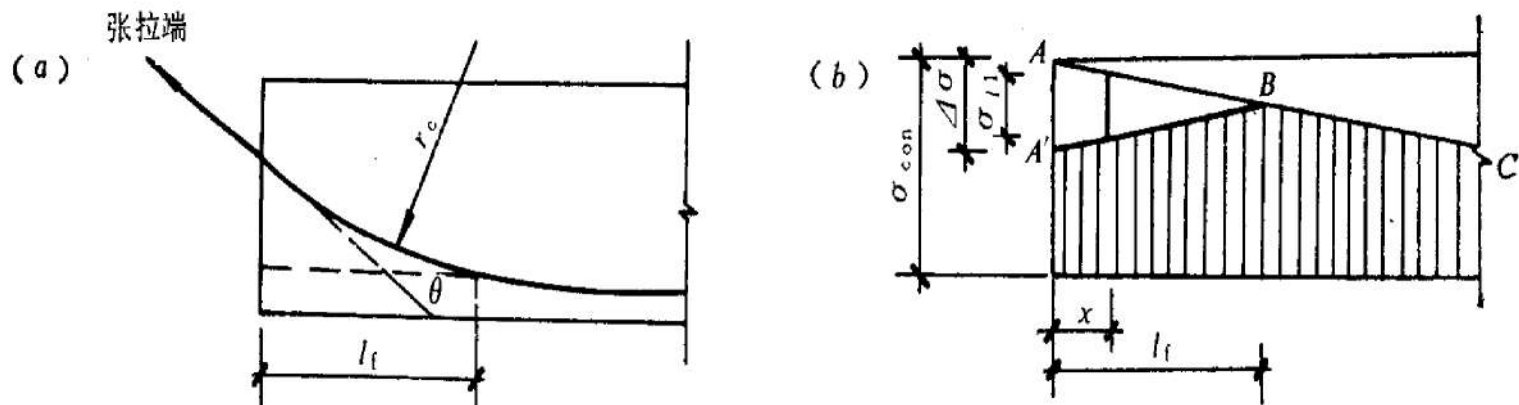


钢丝束、钢绞线摩擦系数

孔道成型方式	K	μ
预埋金属波纹管	0.0015	0.25
预埋钢管	0.0010	0.25
抽芯成型	0.0015	0.55
无粘结预应力钢绞线	0.0035	0.09

- 注：1、当有可靠的试验数据资料时，表列系数值可根据实测数据确定；
- 2、当采用钢丝束的钢质锥形锚具及类似形式锚具时，尚应考虑锚杯口处的附加摩擦损失，其值可根据实测数据确定；
- 3、无粘结预应力钢绞线的数据适用于由公称直径 12.70mm 或 15.20mm 钢绞线制成的无粘结预应力钢筋。

对于曲线预应力筋张拉锚固时，由于锚具变形和钢筋内缩 $a(\text{mm})$ ，使预应力筋有回缩的趋势，从而产生**反向摩擦力**以阻止其内缩。



反向摩擦力只在一定的影响长度 $l_f(\text{m})$ 内发生，即在距张拉端 l_f 处，预应力筋的内缩值为零。

设反向摩擦和正向摩擦相同

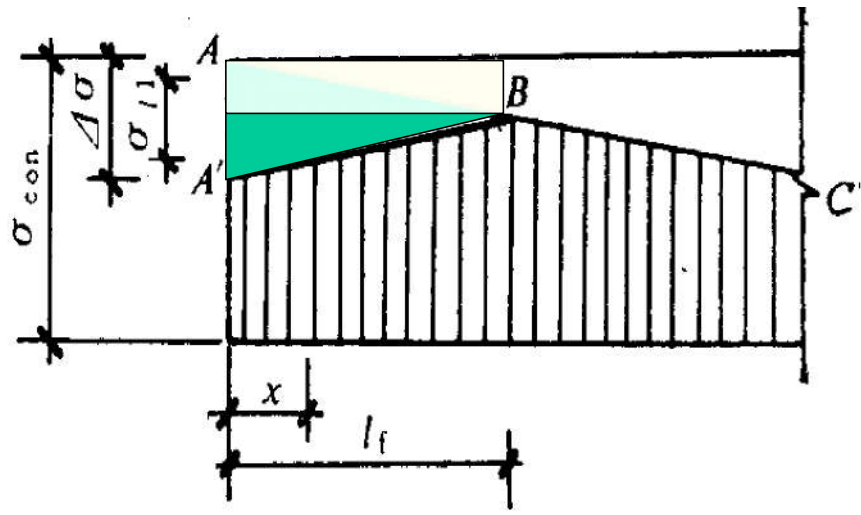
$$\Delta\sigma = 2\sigma_{l2}$$

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

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} \left(\kappa + \frac{\mu}{r_c} \right) x$$

内缩值

$$a = \frac{\sigma_{l2}}{E_p} l_f = \frac{\sigma_{con} \left(\kappa + \frac{\mu}{r_c} \right) l_f}{E_p} \cdot l_f$$



$$l_f = \sqrt{\frac{aE_p}{1000\sigma_{con} \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right)}} \quad (\text{m})$$

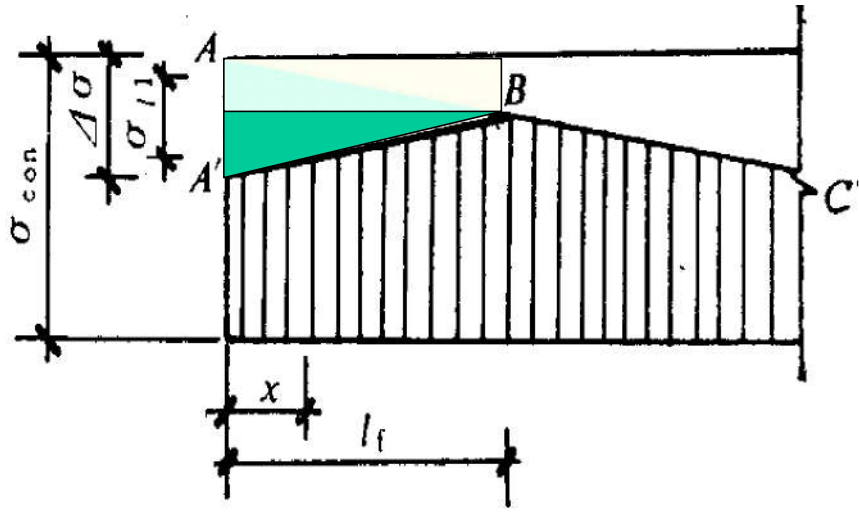
设反向摩擦和正向摩擦相同

$$\Delta\sigma = 2\sigma_{l2}$$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} (\kappa x + \mu\theta)$$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} \left(\kappa + \frac{\mu}{r_c} \right) x$$

$$\begin{aligned} \sigma_{l1} &= \Delta\sigma \left(1 - \frac{x}{l_f} \right) \\ &= 2\sigma_{\text{con}} l_f \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_f} \right) \end{aligned}$$

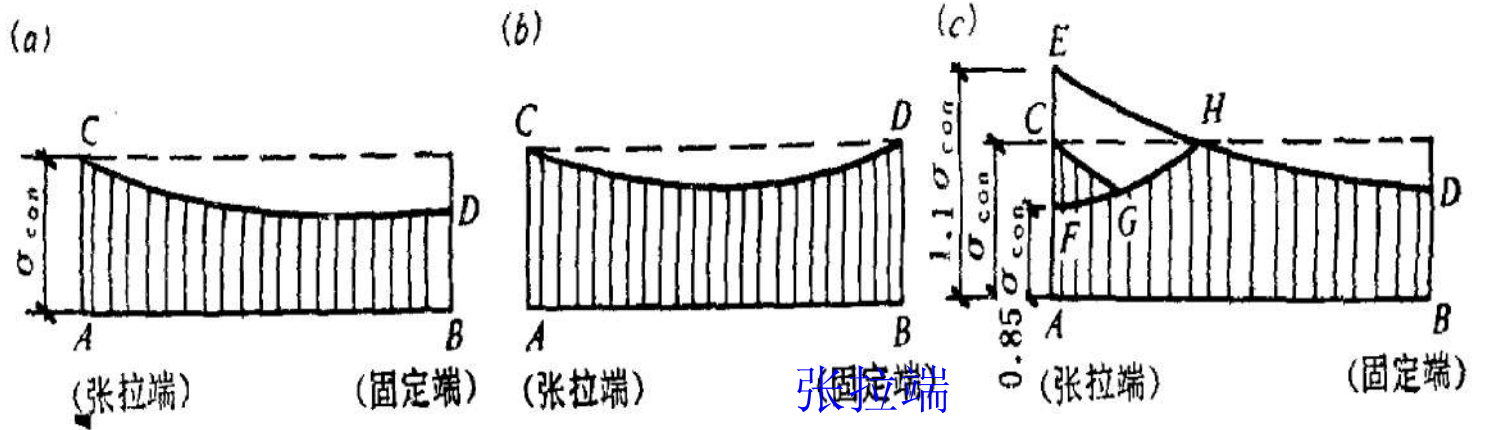


$$l_f = \sqrt{\frac{aE_p}{1000\sigma_{\text{con}} \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right)}} \quad (\text{m})$$

减少摩擦损失的措施

1. 两端张拉

2. 超张拉



一端张拉

两端张拉

超张拉

3、加热养护温差损失 σ_{l3}

为缩短先张法构件的生产周期，常采用蒸汽养护加快混凝土的凝结硬化。

升温时，新浇混凝土尚未结硬，钢筋受热膨胀，但张拉预应力筋的台座是固定不动的，亦即钢筋长度不变，因此预应力筋中的应力随温度的增高而降低，产生预应力损失 σ_{l3} 。

降温时，混凝土达到了一定的强度，与预应力筋之间已具有粘结作用，两者共同回缩，已产生预应力损失 σ_{l3} 无法恢复。

设养护升温后，预应力筋与台座的温差为 Δt °C，取钢筋的温度膨胀系数为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，则有，

$$\sigma_{l3} = 1 \times 10^{-5} E_s \Delta t = 1 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^5 \times \Delta t = 2 \Delta t$$

$$\sigma_{l3} = 2 \Delta t \quad \text{N/mm}^2$$

- 减少温差损失措施
- 二次升温
- 采用钢模板

4、钢筋松弛损失 σ_{l4}

钢筋在高应力长期作用下具有随时间增长产生塑性变形的性质。
在长度保持不变的条件下，应力值随时间增长而逐渐降低，这种现象称为松弛。

应力松弛与初始应力水平和作用时间长短有关。

根据应力松弛的长期试验结果，《规范》取

普通预应力钢丝和钢绞线：

$$\sigma_{l4} = 0.4\psi\left(\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5\right)\sigma_{con}$$

低松弛预应力钢丝和钢绞线：

当 $\sigma_{con} \leq 0.7f_{ptk}$ 时，

$$\sigma_{l4} = 0.125\left(\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5\right)\sigma_{con}$$

当 $0.7f_{ptk} < \sigma_{con} \leq 0.8f_{ptk}$ 时，

$$\sigma_{l4} = 0.2\left(\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.575\right)\sigma_{con}$$

ψ 为超张拉系数，一次张拉时，取 $\psi=1$ ；超张拉时，取 $\psi=0.9$ 。

当 $\sigma_{con} \leq 0.5f_{ptk}$ 时，可不考虑应力松弛损失，即取 $\sigma_{l4}=0$ 。

- 减小预应力松弛损失措施
- 超张拉
- 选择松弛小的钢筋

5、收缩徐变损失 σ_{l5}

混凝土的收缩和徐变，都会导致预应力混凝土构件长度的缩短，预应力筋随之回缩，引起预应力损失。

由于收缩和徐变是同时随时间产生的，且影响二者的因素相同时随变化规律相似，《规范》将二者合并考虑。

《规范》对混凝土收缩和徐变引起的损失，按下列公式计算：

先张法

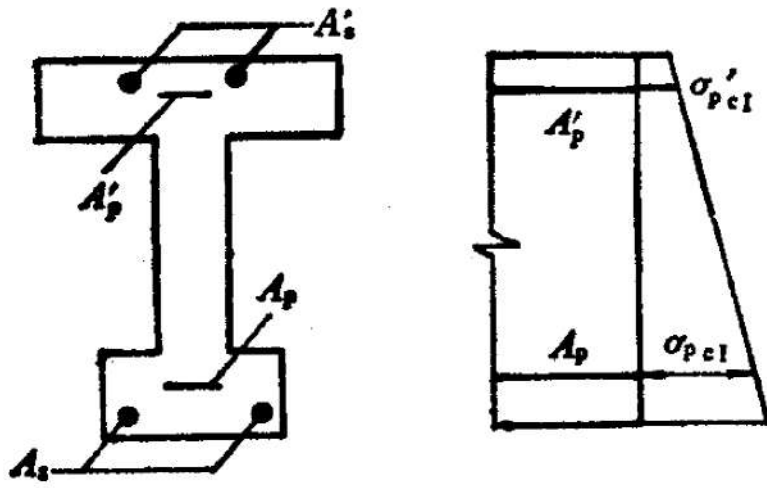
$$\sigma_{l5} = \frac{45 + 280 \times \frac{\sigma_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho}$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{45 + 280 \times \frac{\sigma'_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'}$$

后张法

$$\sigma_{l5} = \frac{35 + 280 \times \frac{\sigma_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho}$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{35 + 280 \times \frac{\sigma'_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'}$$



先张法

$$\rho = \frac{A_p + A_s}{A_0}$$

$$\rho' = \frac{A'_p + A'_s}{A_0}$$

$$A_0 = A_c + \alpha_p A_p + \alpha_s A_s$$

后张法

$$\rho = \frac{A_p + A_s}{A_n}$$

$$\rho' = \frac{A'_p + A'_s}{A_n}$$

$$A_n = A_c + \alpha_s A_s$$

6.螺旋箍筋对混凝土挤压引起的损失 σ_{l6}

配螺旋箍筋后张法构件，螺旋预应力筋对混凝土挤压，引起预应力筋应力降低。

$D < 3m$

$$\sigma_{l6} = 30 N / mm^2$$

$D > 3m$

$$\sigma_{l6} = 0 N / mm^2$$

三、预应力损失的组合

预应力混凝土构件从预加应力开始即需要进行计算，而预应力损失是分批发生的。因此，应根据计算需要，考虑相应阶段所产生的预应力损失。

(1)混凝土预压前完成的损失第一批损失 σ_{II} ；

(2)混凝土预压后完成的损失第二批损失 σ_{III} 。

根据上述预应力损失发生时间先后关系，具体组合见表。

预应力损失的组合

预应力损失的组合	先张法构件	后张法构件
混凝土预压前 (第一批) 损失 σ_{II}	$\sigma_{I1} + \sigma_B + \sigma_{I4}$	$\sigma_{I1} + \sigma_{I2}$
混凝土预压后 (第二批) 损失 σ_{III}	σ_{I5}	$\sigma_{I4} + \sigma_{I5} + \sigma_{I6}$

考虑到预应力损失计算的误差，在总损失计算值过小时，产生不利影响，《规范》规定当总损失值 $\sigma_l = \sigma_{II} + \sigma_{III}$ 小于下列数值时，按下列数值取用，

先张法构件 **100MPa**

后张法构件 **80MPa**

四、

$$\sigma_{le} = \frac{E_p}{E_c} \sigma_{pc} = \alpha_E \sigma_{pc}$$

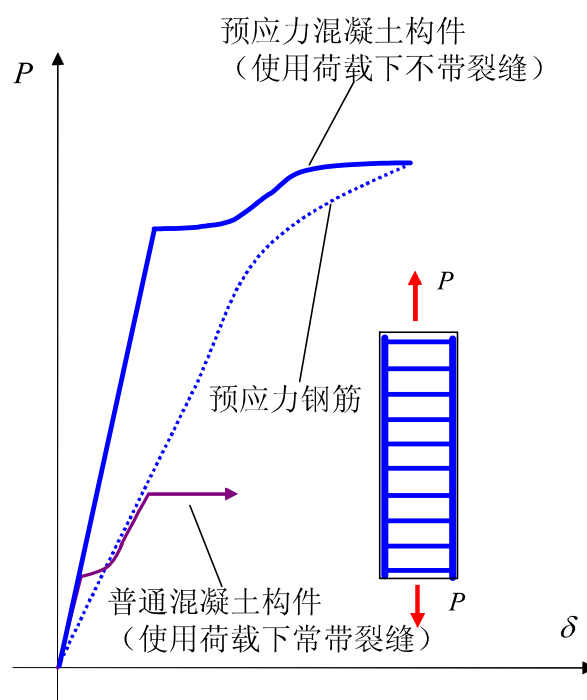
对后张法构件，当一次张拉所有预应力筋时，无弹性压缩损失。

六、轴心受拉构件的分析

1. 受力特征

开裂前，荷载-位移关系为线性的，预应力钢筋的应力增长较少

开裂后，预应力钢筋的应力急增，进入非线性阶段



六、轴心受拉构件的分析

1. 先张法构件各阶段的应力分析

$$\alpha_E = E_s / E_c$$

张拉钢筋

钢筋应力

混凝土应力:

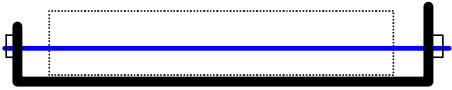


$$\sigma_p = \sigma_{con}$$

$$\sigma_c = 0$$

施工阶段

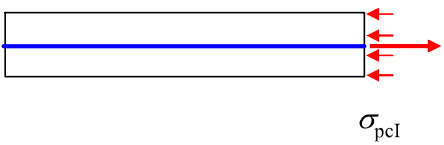
完成第一批预应力损失



$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II}$$

$$\sigma_c = 0$$

放松钢筋



$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \alpha_E \sigma_{pcl}$$

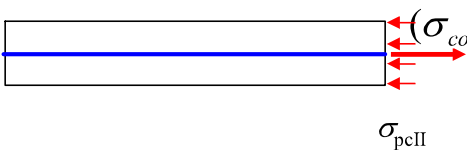
$$\sigma_{pcl} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{II}) A_p}{A_0}$$

$$(\sigma_{con} - \sigma_{II} - \alpha_E \sigma_{pcl}) A_p = \sigma_{pcl} (A - A_p)$$

$$A_0 = A + (\alpha_E - 1) A_p$$

完成第二批损失

$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} - \alpha_E \sigma_{pcII}$$



σ_{pcII}

$$(\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} - \alpha_E \sigma_{pcII}) A_p = \sigma_{pcII} (A - A_p)$$

$$A_0 = A + (\alpha_E - 1) A_p$$

$$\sigma_{pcII} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}) A_p}{A_0}$$

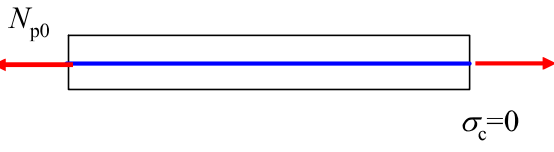
加载至混凝土中的应力为0

钢筋应力

混凝土应力:

$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} - \alpha \sigma_{pc}$$

使用阶段

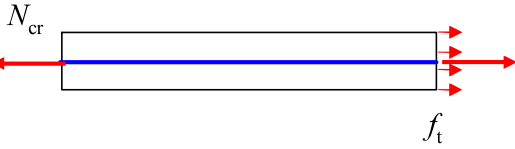


$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}$$

$$\sigma_c = 0$$

$$N_{p0} = (\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}) A_p$$

加载至混凝土开裂

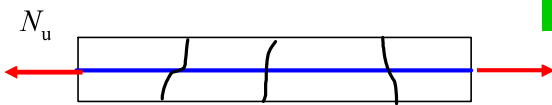


$$\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E f_t$$

$$\sigma_c = f_t$$

$$N_{cr} = (\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E f_t) A_p + f_t (A - A_p)$$

加载到破坏



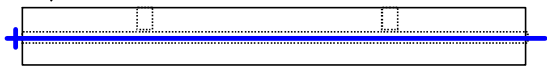
$$\sigma_p = f_{py}$$

$$\sigma_c = 0$$

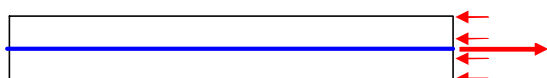
$$N_u = f_{py} A_p$$

2. 后张法构件各阶段的应力分析

穿钢筋



张拉钢筋完成第一批预应力损失



σ_{pcl}

钢筋应力

$$\sigma_p = 0$$

$$\sigma_p = \sigma_{con}$$

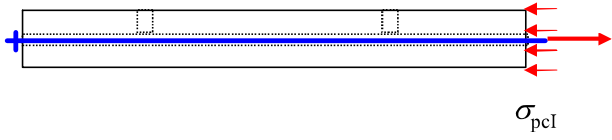
混凝土应力

$$\sigma_c = 0$$

$$\sigma_c = 0$$

钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \alpha_E \sigma_{pcl}$

混凝土应力: $\sigma_{cpl} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{II}) A_p}{A_0}$



钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{ll}$

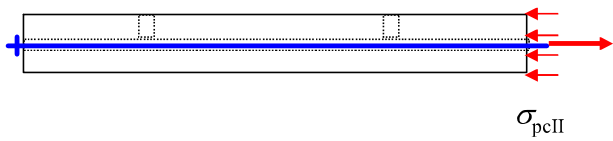
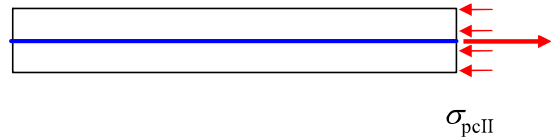
混凝土应力: $\sigma_{pcl} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{ll})A_p}{A_n}$

净面积: $A_n = A - A_p$

钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} - \alpha_E \sigma_{pcII}$

施工阶段----完成第二批损失

混凝土应力: $\sigma_{pcI} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}) A_p}{A_0}$



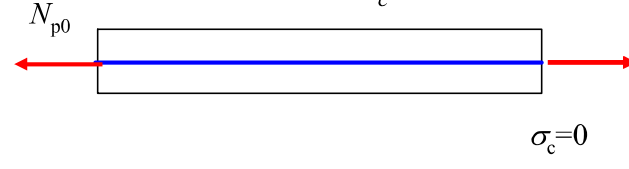
混凝土中的有效预压应力

钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}$

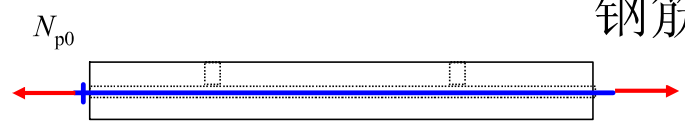
混凝土应力: $\sigma_{pcII} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}) A_p}{A_n}$

加载阶段----加载至混凝土中的应力为0

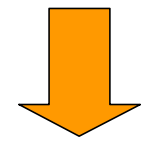
钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III}$
 混凝土应力: $\sigma_c = 0$



钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E \sigma_{pcII}$



混凝土应力: $\sigma_c = 0$

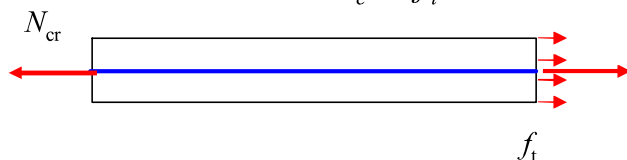


$$N_{p0} = (\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E \sigma_{pcII}) A_p$$

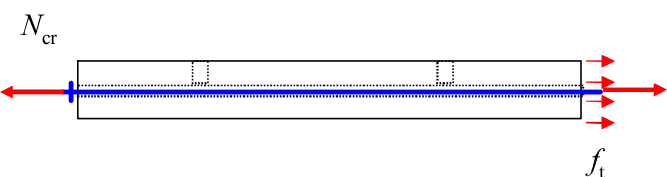
钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E f_t$

加载阶段----加载至混凝土开裂

混凝土应力: $\sigma_c = f_t$



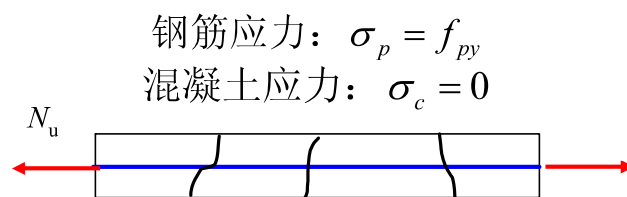
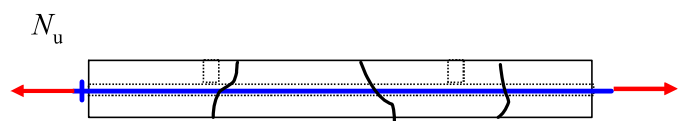
钢筋应力: $\sigma_p = \sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E \sigma_{pcII} + \alpha_E f_t$



混凝土应力: $\sigma_c = f_t$

$$N_{cr} = (\sigma_{con} - \sigma_{II} - \sigma_{III} + \alpha_E \sigma_{pcII} + \alpha_E f_t) A_p + f_t A_n$$

加载阶段----加载到破坏

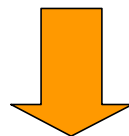


钢筋应力: $\sigma_p = f_{py}$

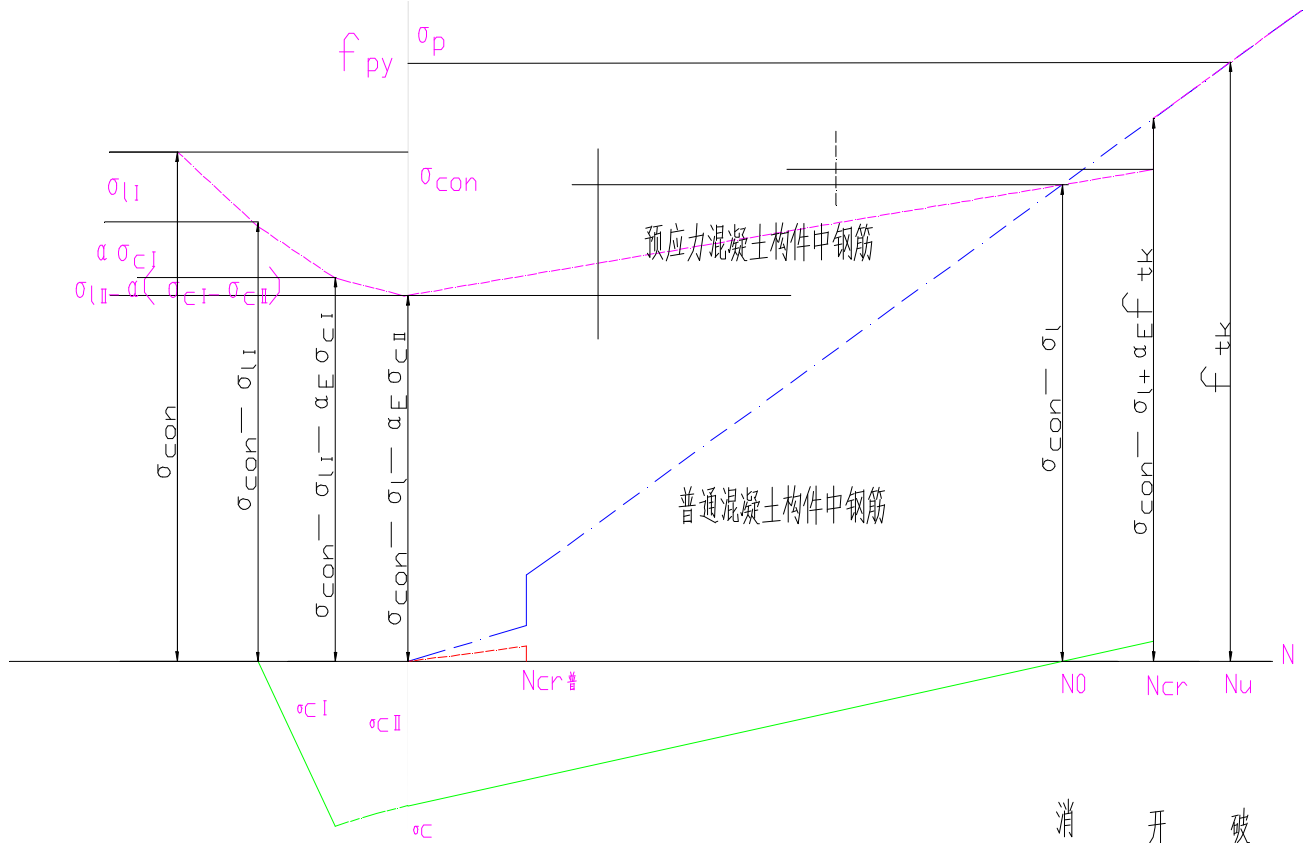
混凝土应力: $\sigma_c = 0$

钢筋应力: $\sigma_p = f_{py}$

混凝土应力: $\sigma_c = 0$



$$N_u = f_{py} A_p$$



消压 开裂 破坏

张拉
锚固
放松预应力
投入使用