

第12章 预应力混凝土结构

Prestressed Concrete Structure

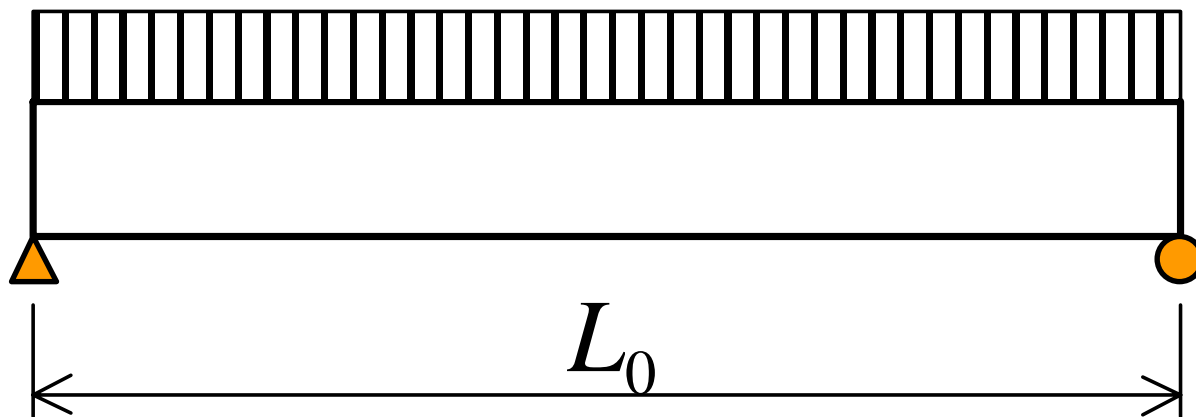
Question:

- 1 What disadvantages do RC structures have ?
- 2 How to overcome the disadvantages ?
- 3 What is the concept of prestressed concrete ?
- 4 What is the difference in performance of prestressed concrete beam compared with RC beam?

12.1 预应力混凝土的概念 (Concept of PC)

一、钢筋混凝土的缺欠 (Disadvantages of RC)

$$q_k = 10 \text{ kN/m}$$



$L_0 = 5.2 \text{ m}$ 的简支梁

均布活荷载标准值 $q_k = 10 \text{ kN/m}$

截面尺寸为 $200 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$

均布恒荷载标准值 $g_k = 5 \text{ kN/m}$

		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	级 310	级 310	级 310	冷拉 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	264MPa		453MPa
$[w_{\max}]=0.3$	0.25	0.4		0.75

产生上述问题原因主要是因为**混凝土抗拉强度太低**

受拉区混凝土的**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**。

如果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。

设计控制条件：

一般RC梁——承载力

大跨RC梁——挠度变形

高强钢筋——裂缝宽度

$$w_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sk}}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{\text{te}}} \right)$$

裂缝宽度与钢筋应力基本成正比

$$w_{\max} = 2.1 \times 0.75 \frac{\sigma_{\text{sk}}}{E_s} \times 100 \sim 150 = 0.3$$

$$\sigma_{\text{sk}} = 250 \sim 380$$

$$w_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sk}}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{\text{te}}} \right)$$

$$\sigma_{\text{sk}} = 250 \sim 380$$

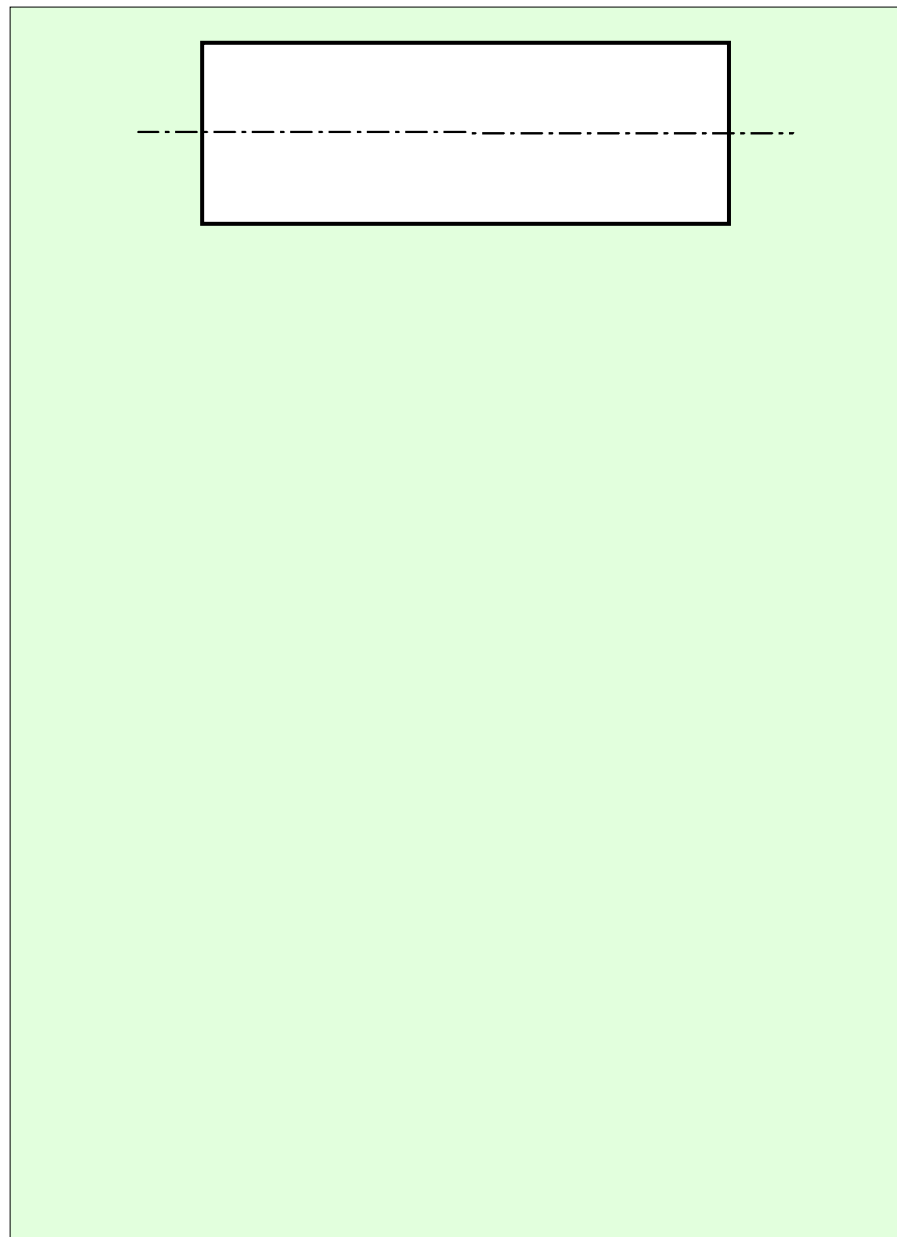
一般 $M_{\text{sk}} = (0.5 \sim 0.7) M_y$ ，如配筋按正截面承载力计算， M_{sk} 下 $\sigma_{\text{sk}} = (0.5 \sim 0.7) f_y$ 。

对于HRB335级钢筋， $f_y = 300 \text{MPa}$ ， $\sigma_{\text{sk}} = 150 \sim 210 \text{MPa}$ ，裂缝宽度已达 $(0.15 \sim 0.25) \text{mm}$ 。

如采用高强钢筋， $f_y = 580 \text{MPa}$ ，则 $\sigma_{\text{sk}} = 290 \sim 406 \text{MPa}$ ，裂缝宽度已超过容许限值。

二、预应力的基本概念

Concrete is weak in tension
but strong in compression

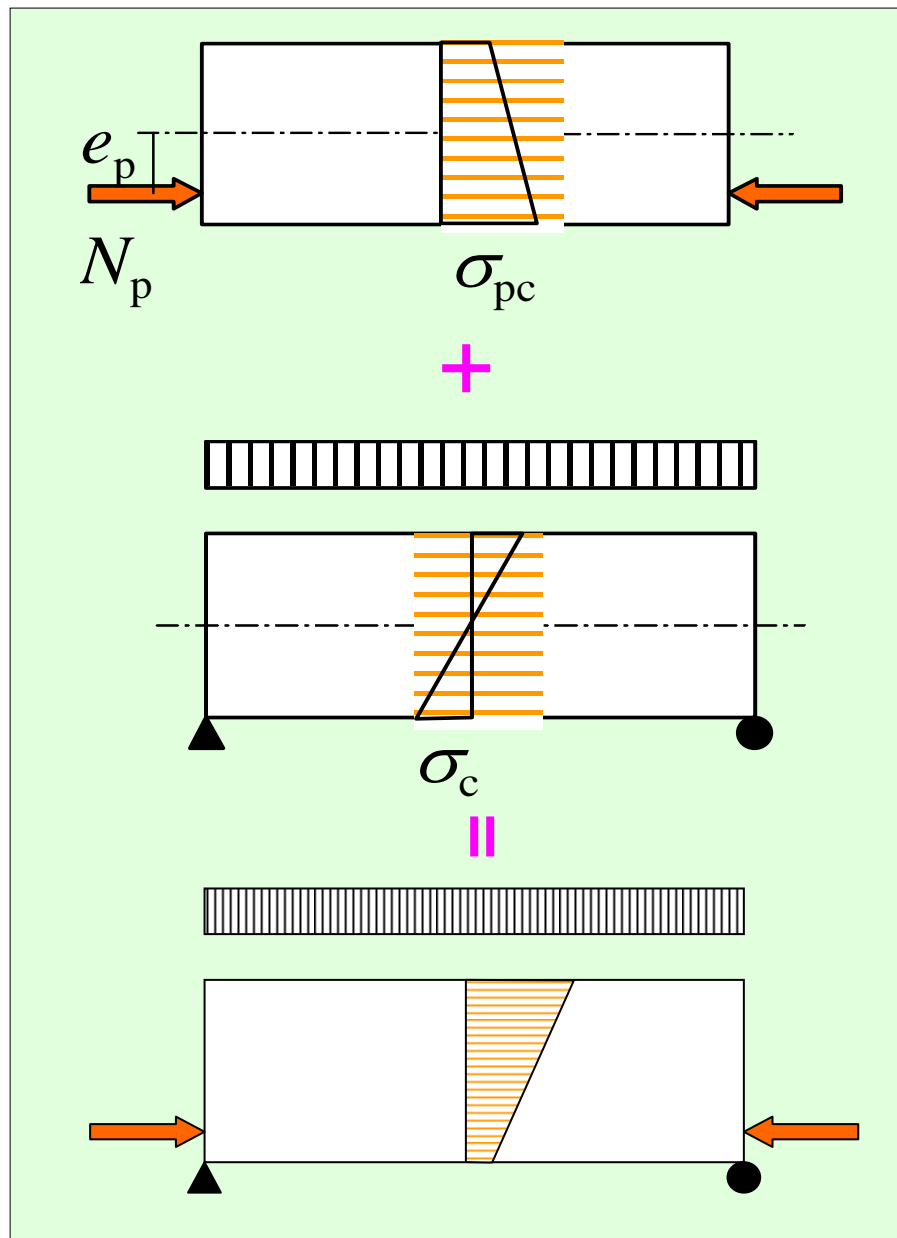


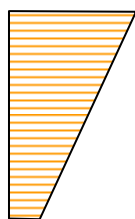
二、预应力的基本概念

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

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

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

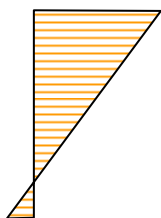




由于预加应力 σ_{pc} 较大，受拉边缘仍处于受压状态，**不会出现开裂**；

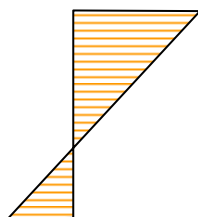
$$\sigma_c - \sigma_{pc} < 0$$

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



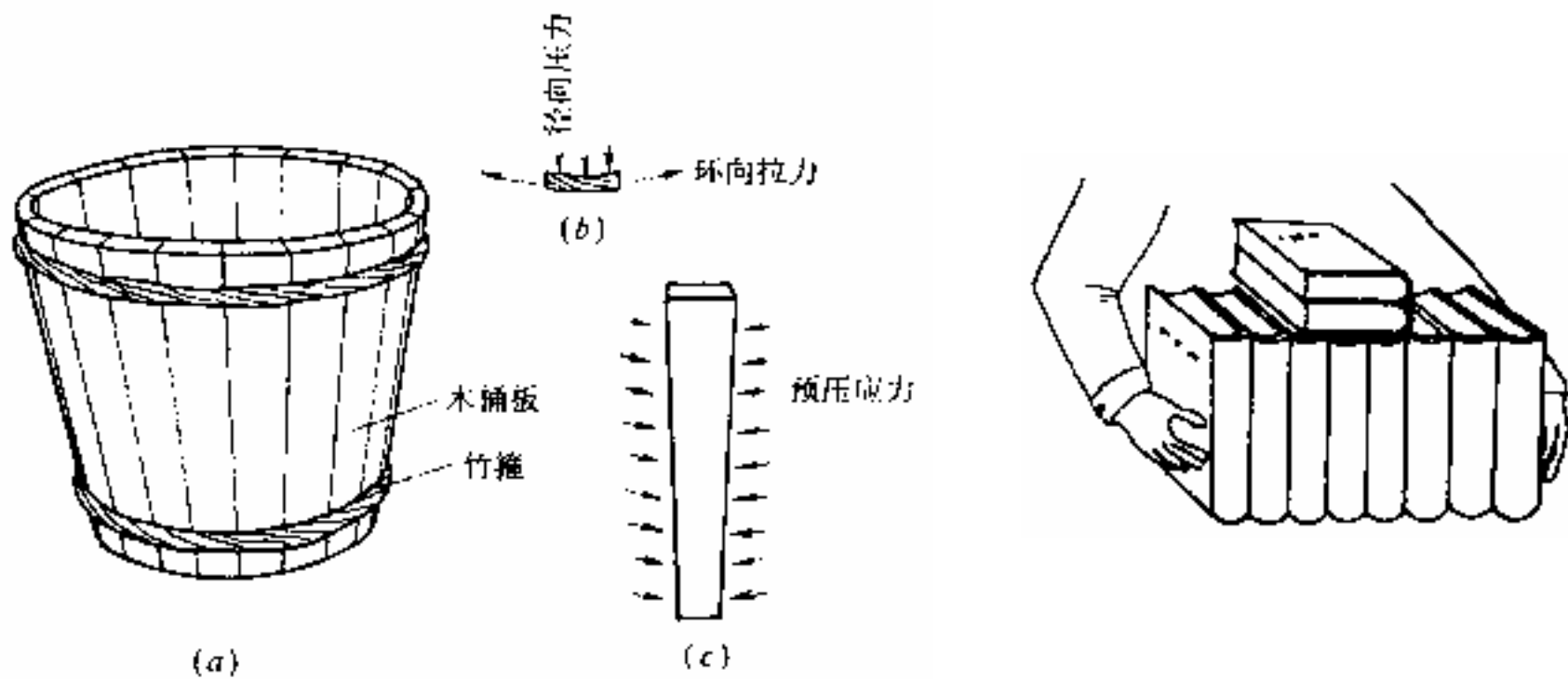
受拉边缘应力虽然受拉，但拉应力小于混凝土的抗拉强度，**一般不会出现开裂**；

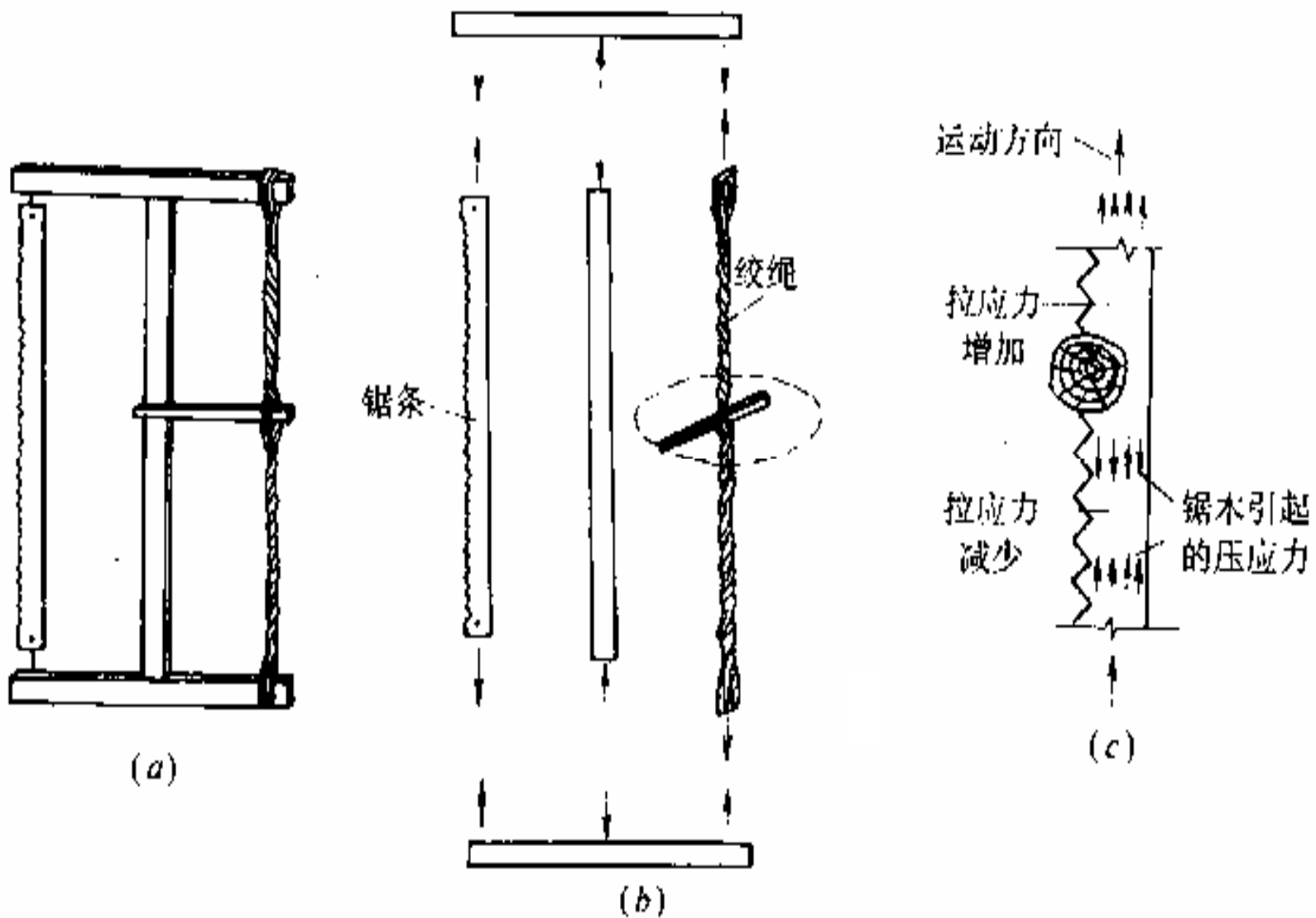
$$0 < \sigma_c - \sigma_{pc} < f_{tk}$$

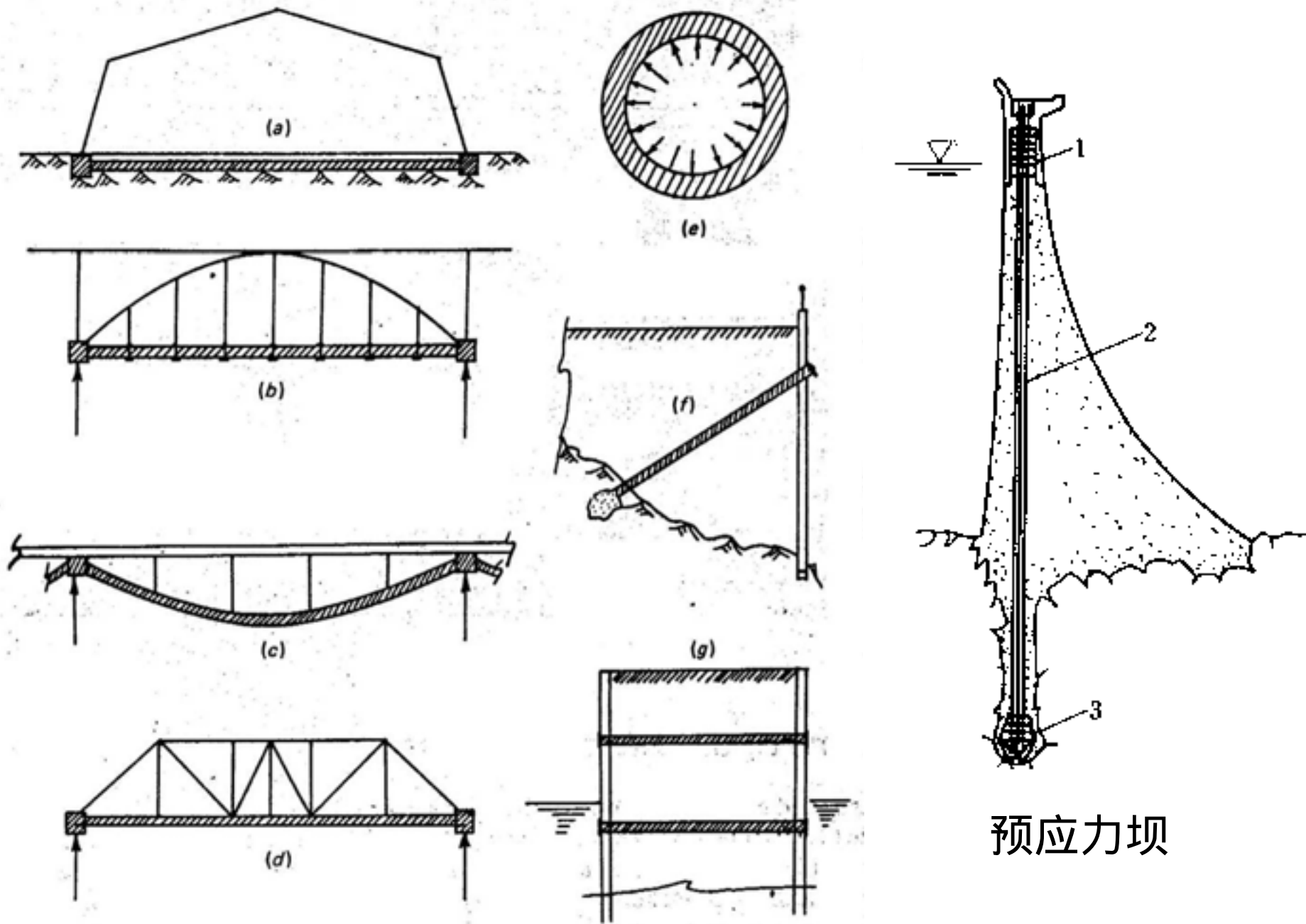


受拉边缘应力超过混凝土的抗拉强度，虽然会产生裂缝，但比钢筋混凝土构件 ($N_p = 0$) 的**开裂明显推迟**，裂缝宽度也显著减小。

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

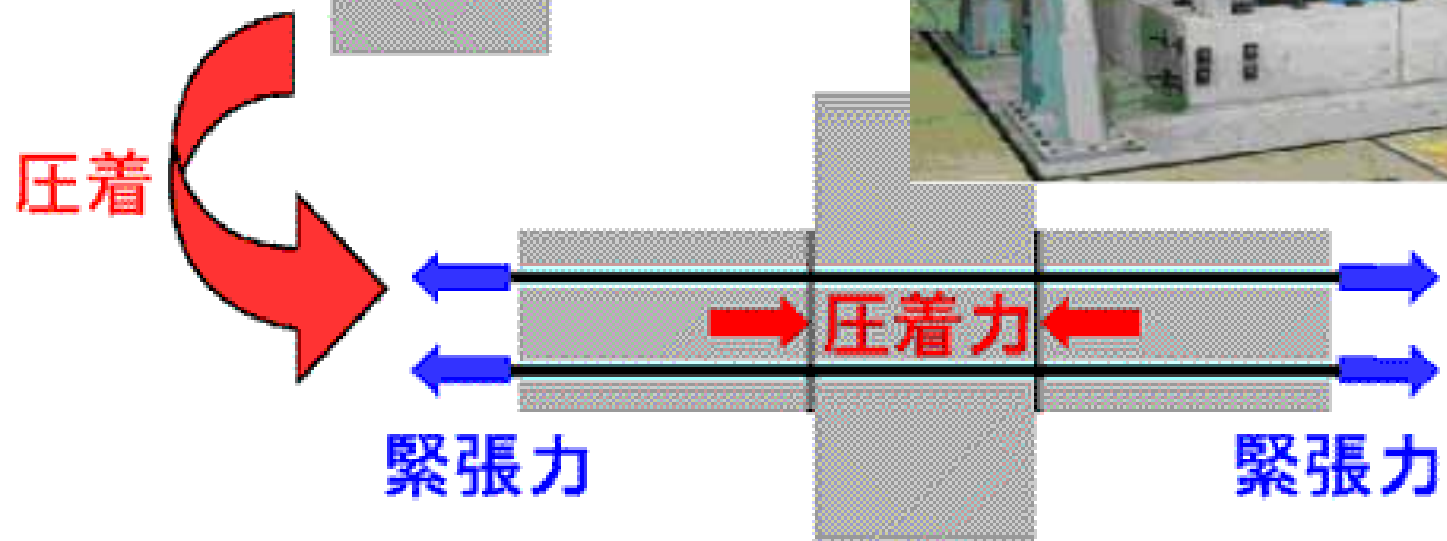
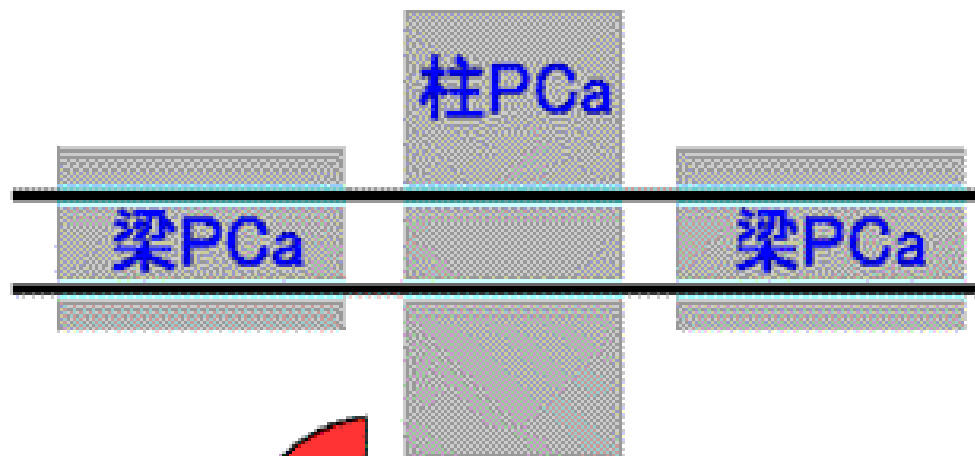






预应力坝

Figure 12.1 Typical examples of tension members.



预应力装配式框架





张拉结构

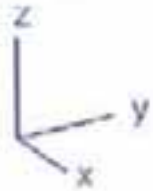


伦敦千年桥

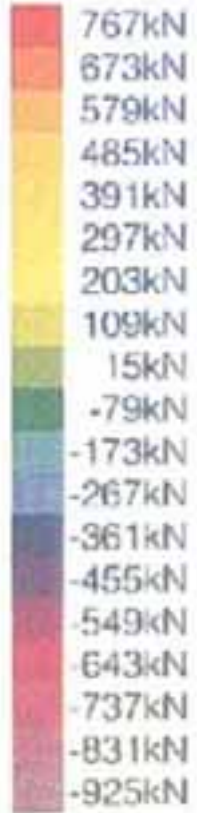
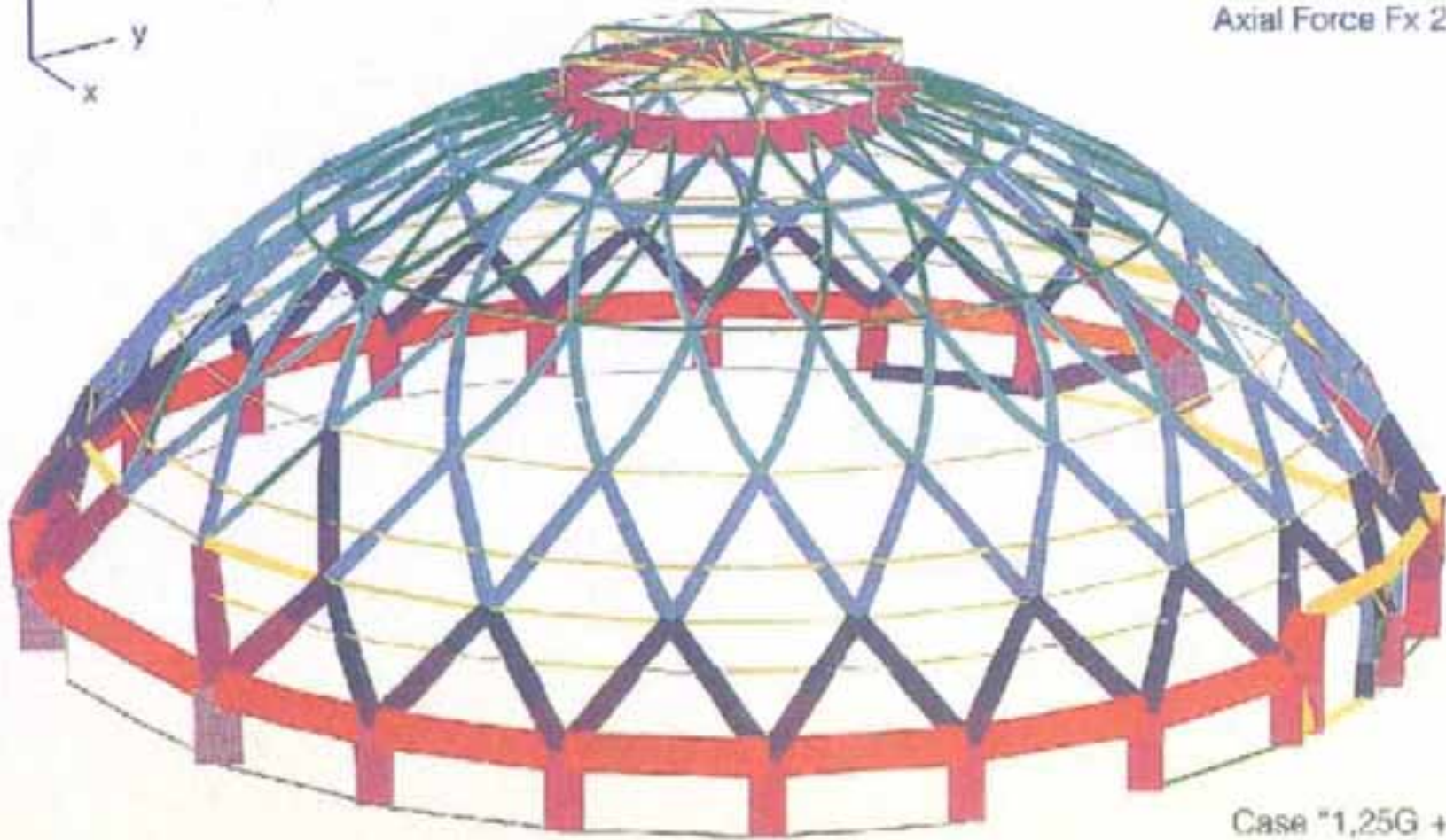


08.20.2004





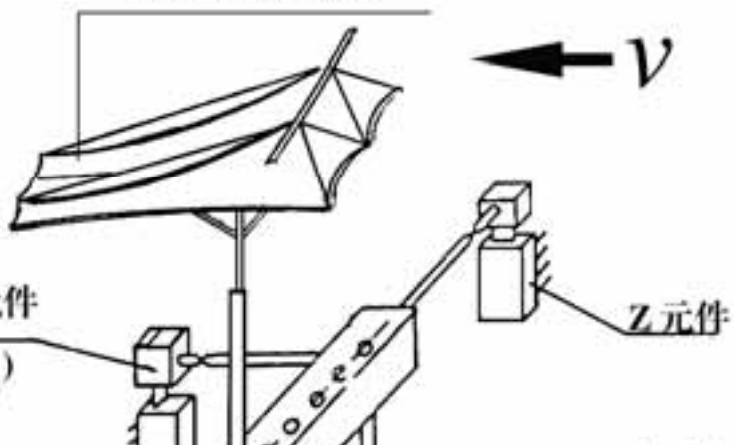
Scale 1 : 1 673.5
Deformation magnification 6 250
Axial Force Fx 2.000E+3kN/pic



Case "1,25G + 1.5Q ultimate"



膜蓬盖节段模型



X₂元件
(My₂)

Z 元件

X₁元件
(My₁)

x

y

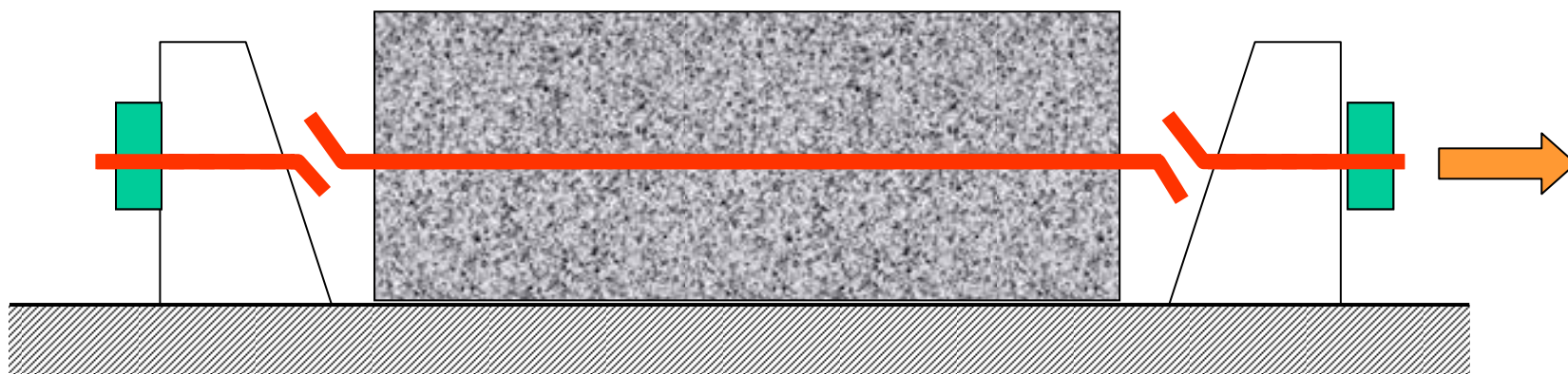


英国Picketts Lock国家体育场

National Athletics Stadium Picketts Lock, UK

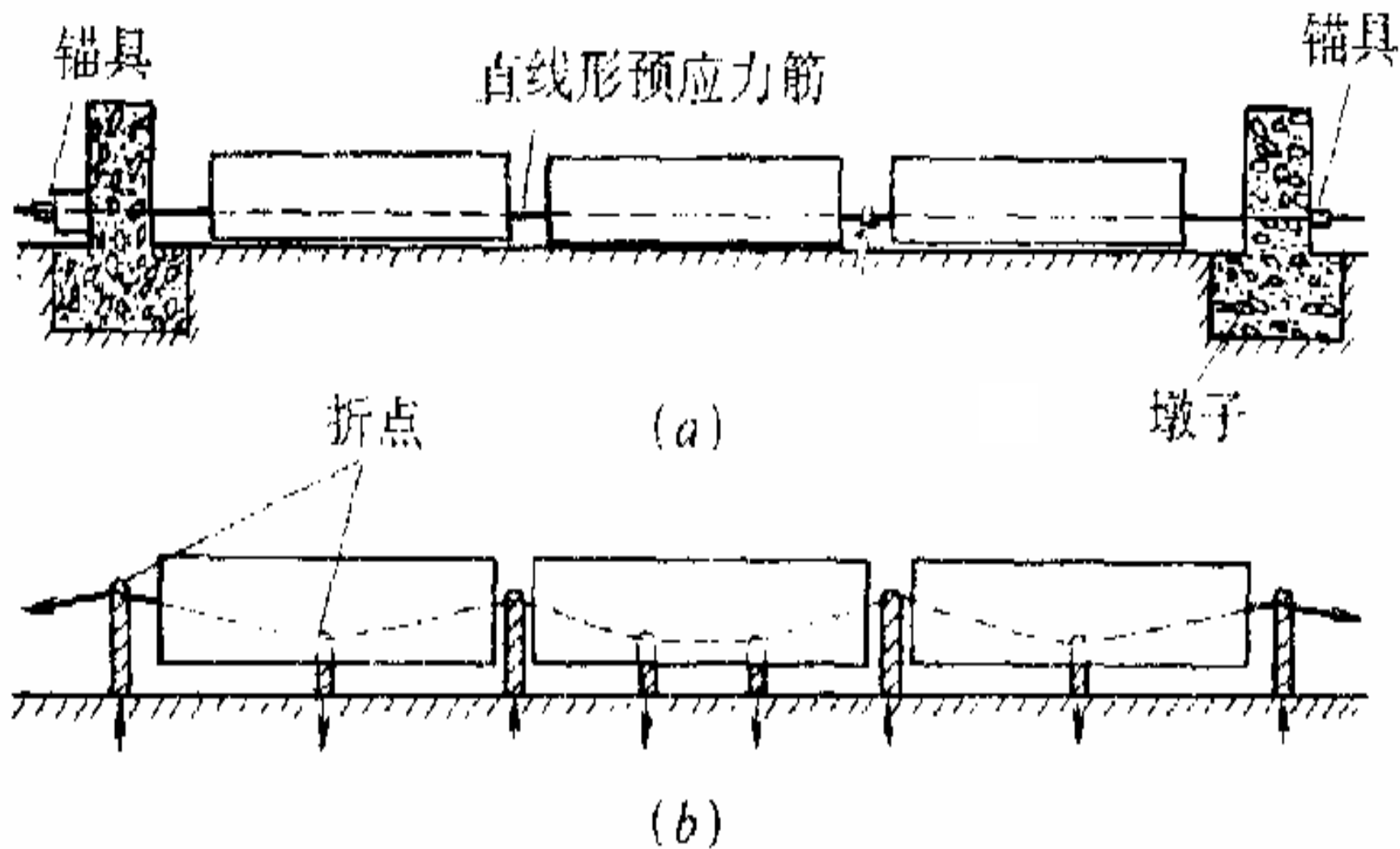


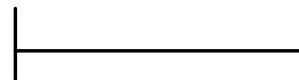
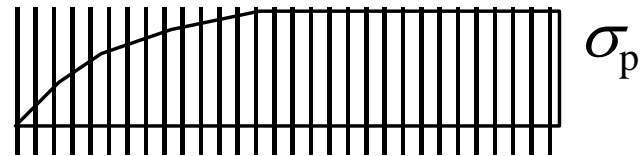
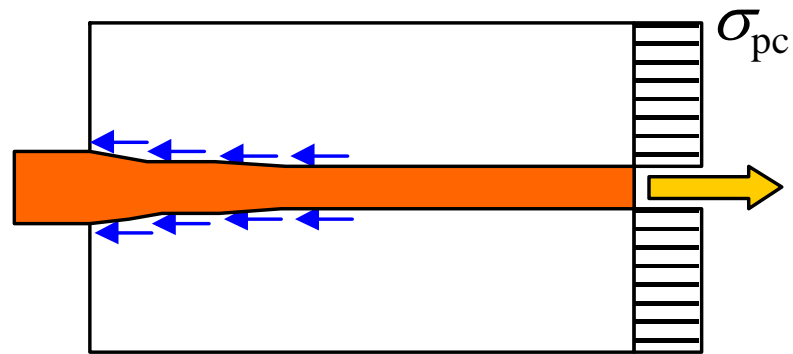
12.2 施加预应力的方法



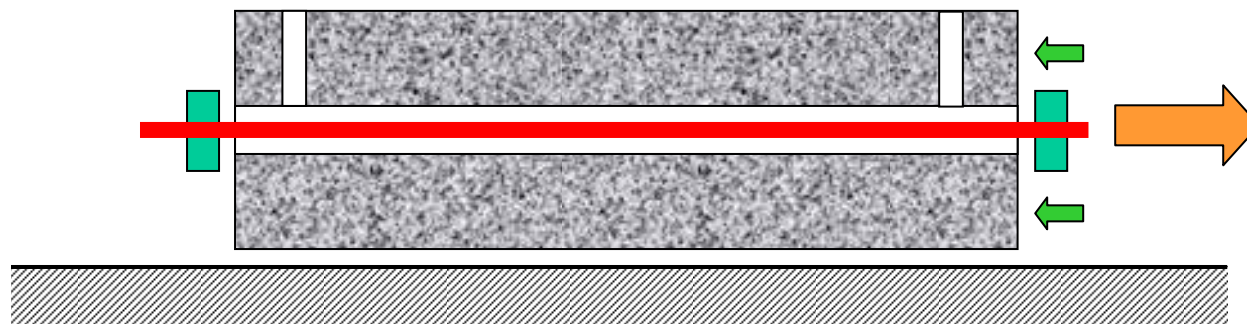
先张法

Pre-tension Method



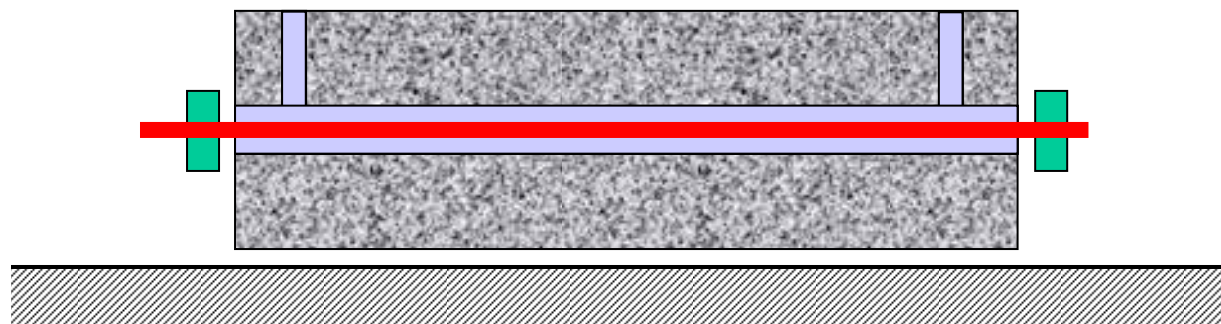


传递长度 l_{tr}



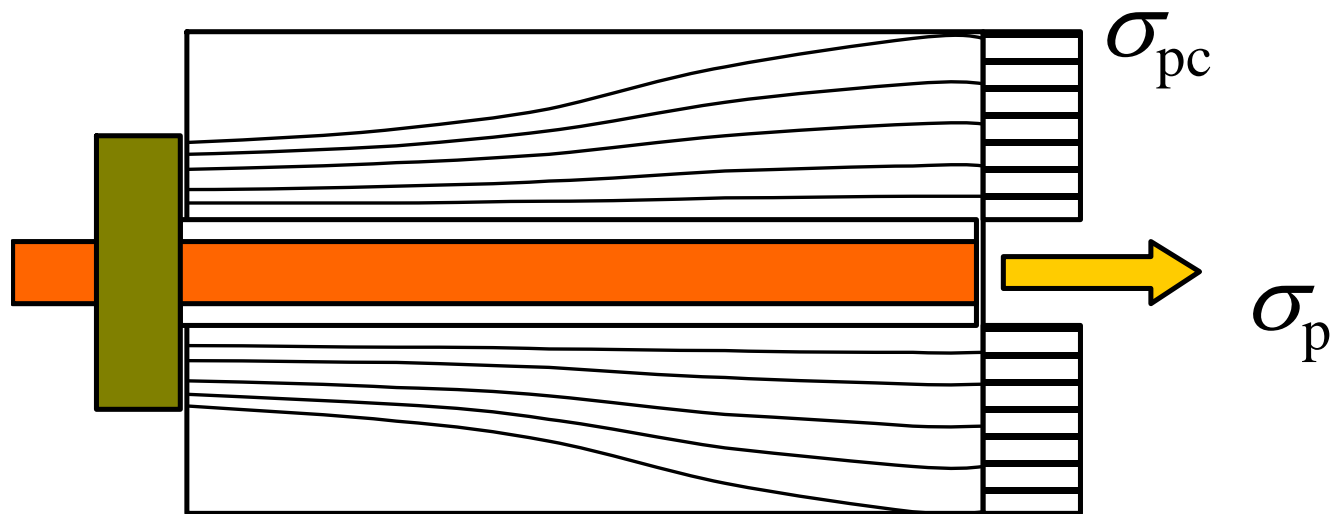
后张法

Post-tension Method



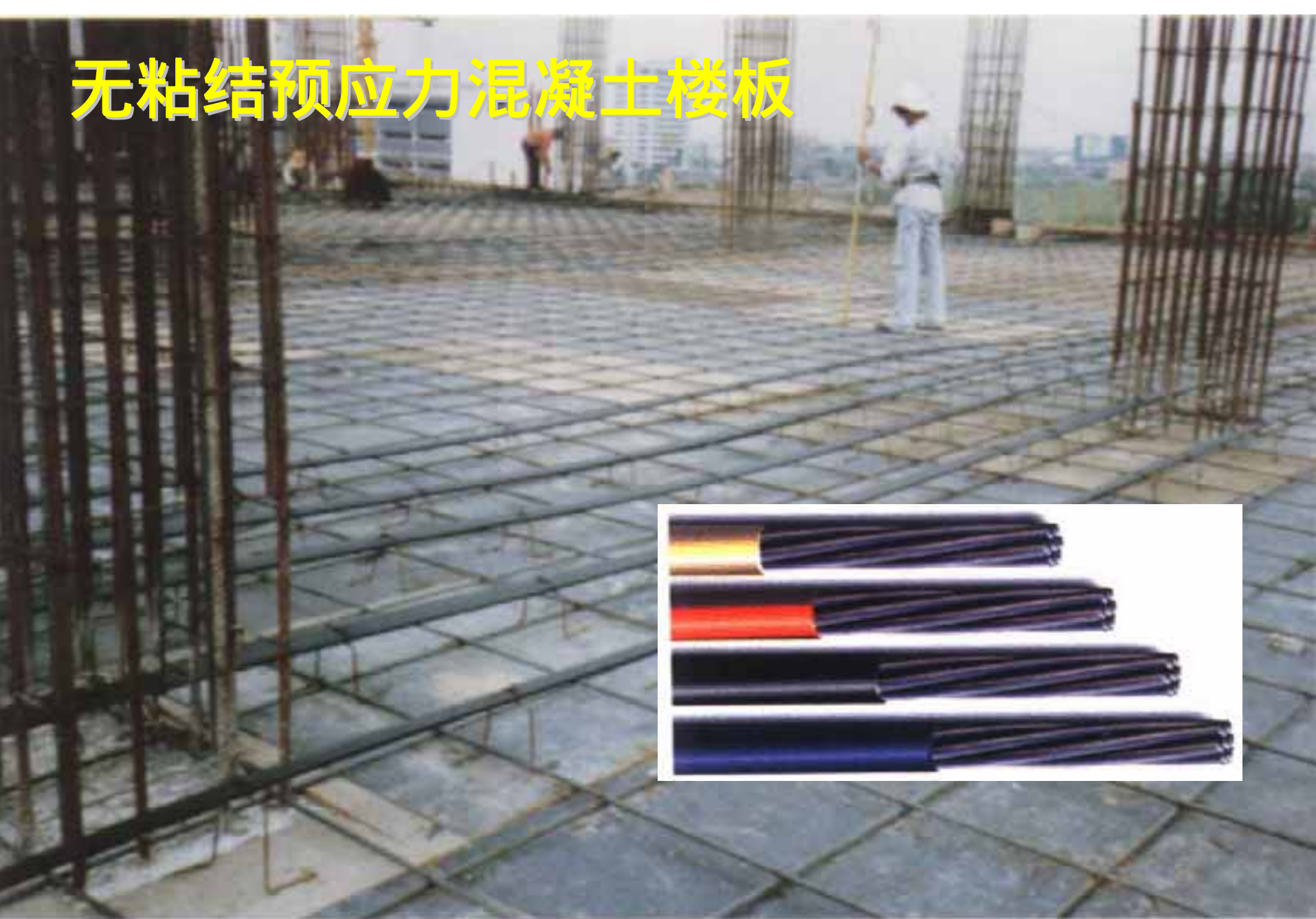
后张法

Post-tension Method



锚具下混凝土局部承压问题

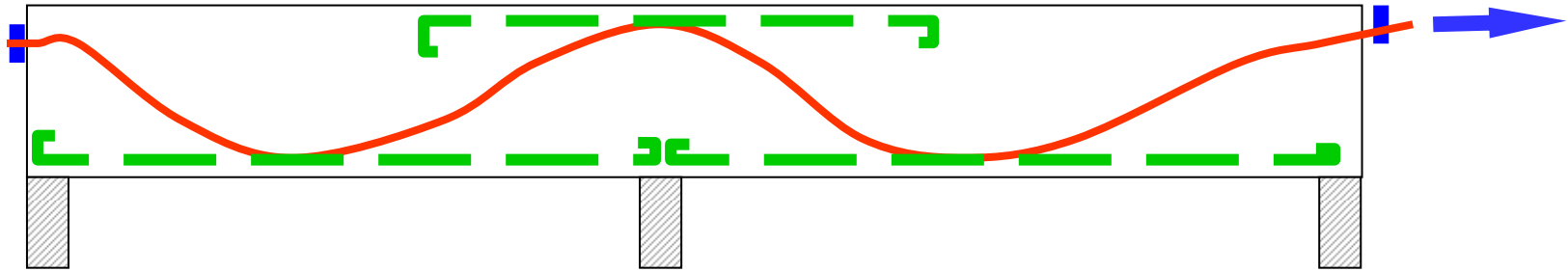
无粘结预应力混凝土楼板



无粘结预应力平板铺筋



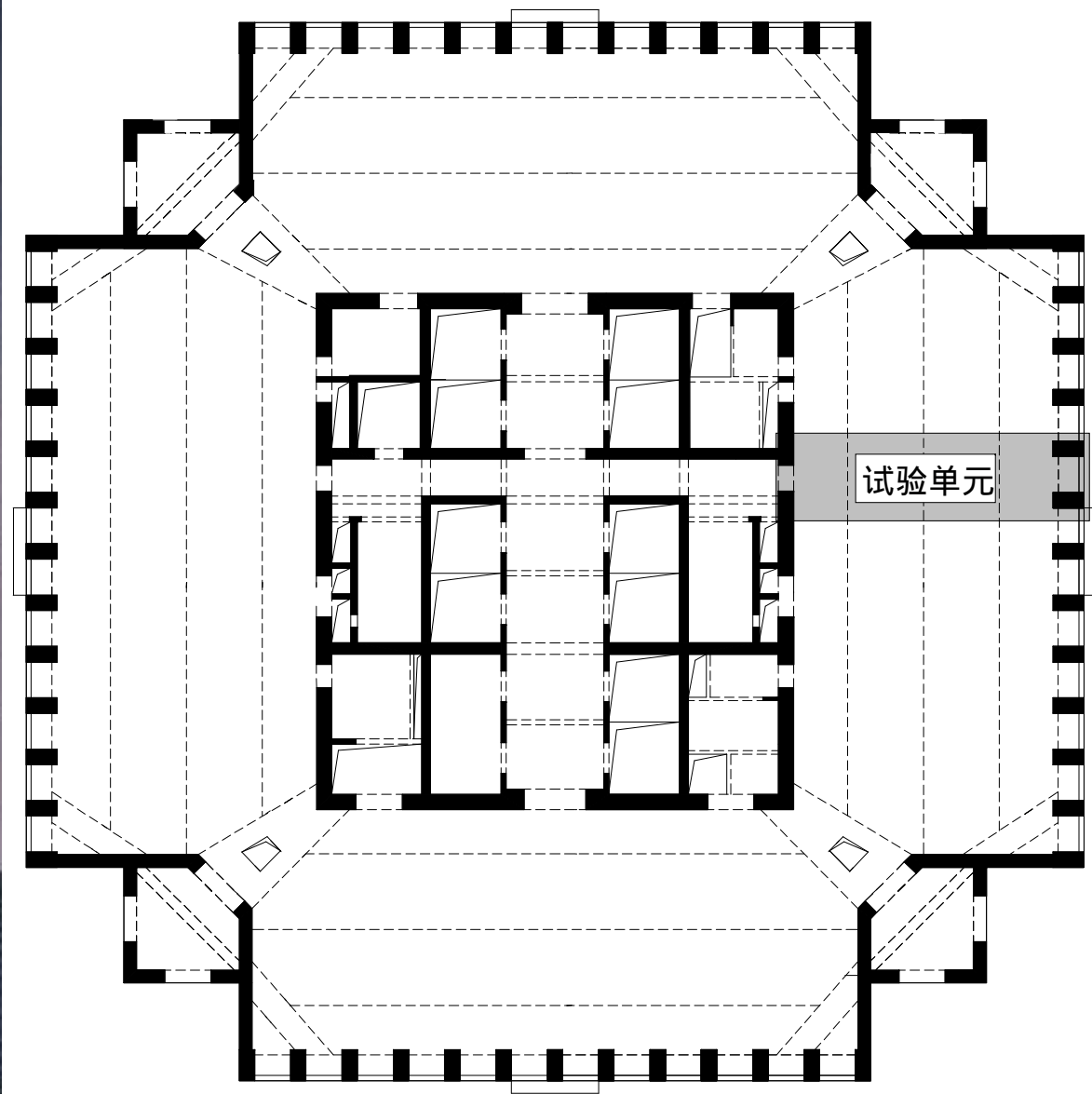
无粘结预应力混凝土



一定要有非预应力筋

锚具的可靠性

高强钢丝的可靠度

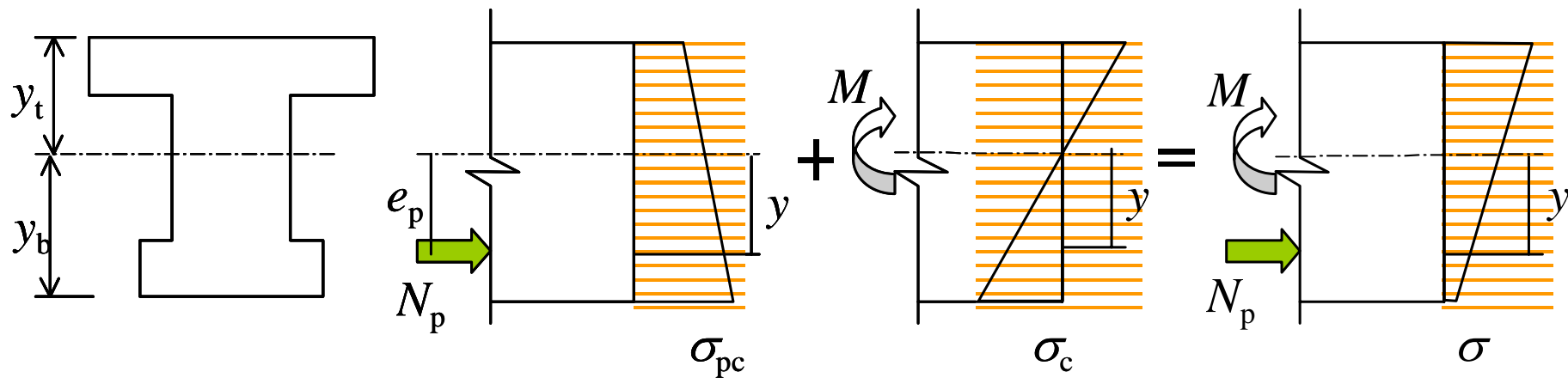






12.3 预应力混凝土的基本受力分析

一、截面应力计算

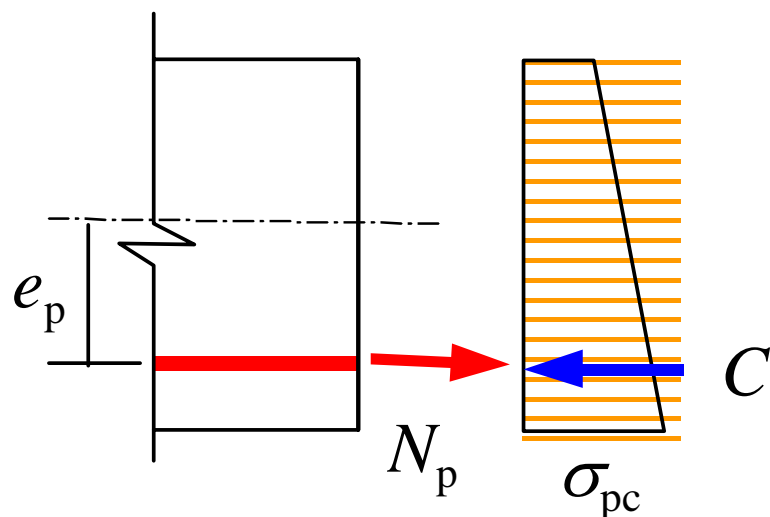


$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y$$

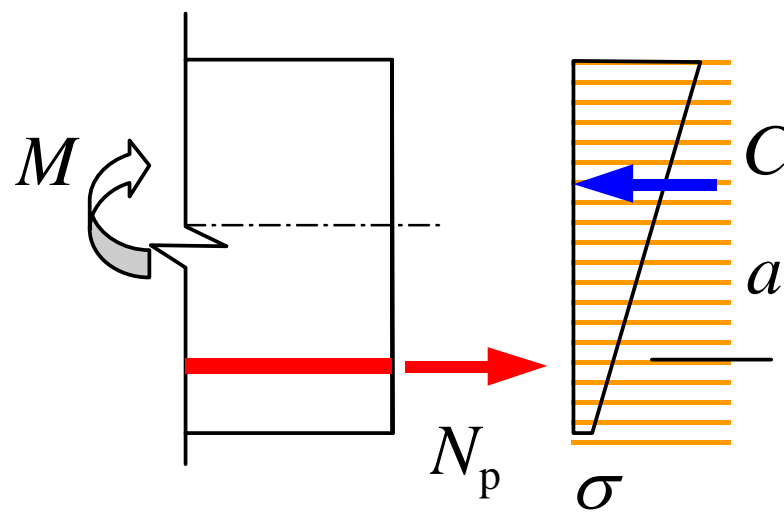
$$\sigma_c = \frac{M}{I} y$$

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

二、截面受力特点



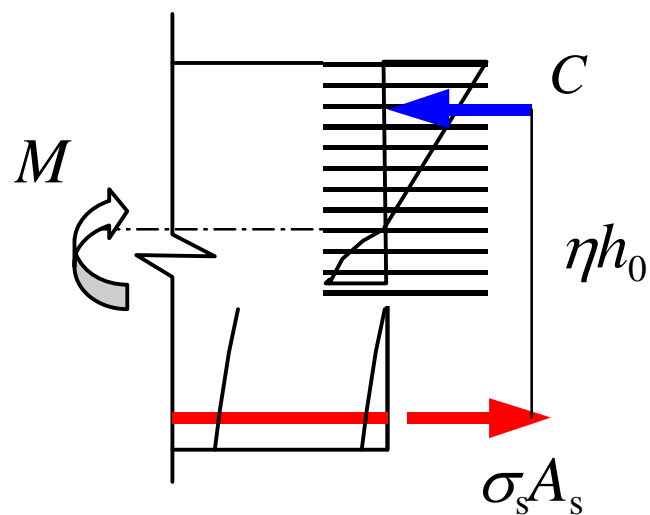
受荷以前



受荷以后

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

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



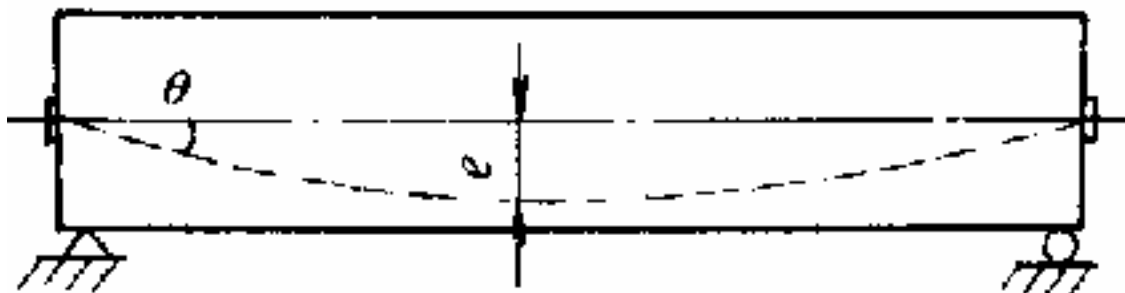
预应力混凝土受弯构件是依靠内力臂的变化来抵抗外弯矩的作用，在受力过程中预应力筋一直承受较大的拉力 N_p ，而截面混凝土则一直主要承受压力 C

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的特性，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

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

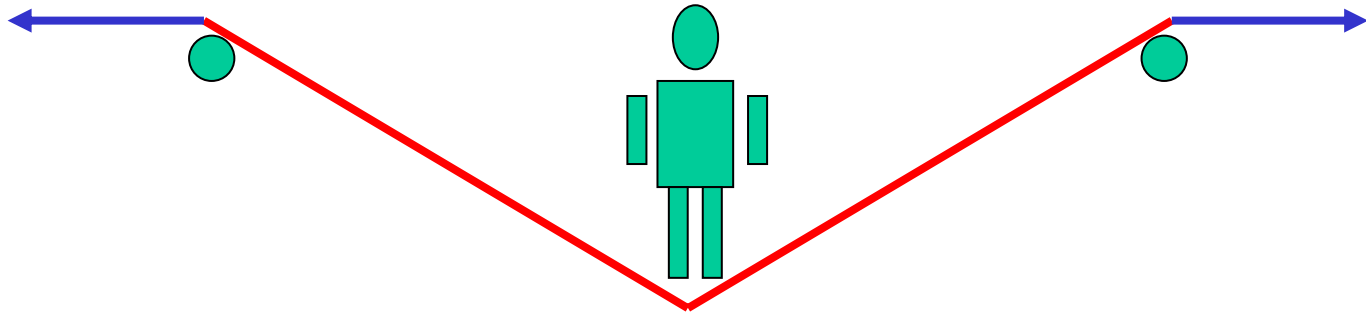


$$e_p = 4e_0 \frac{(lx - x^2)}{l^2} \quad \text{取} \quad e_0 = \frac{1}{8} \frac{g_k l^2}{N_p}$$

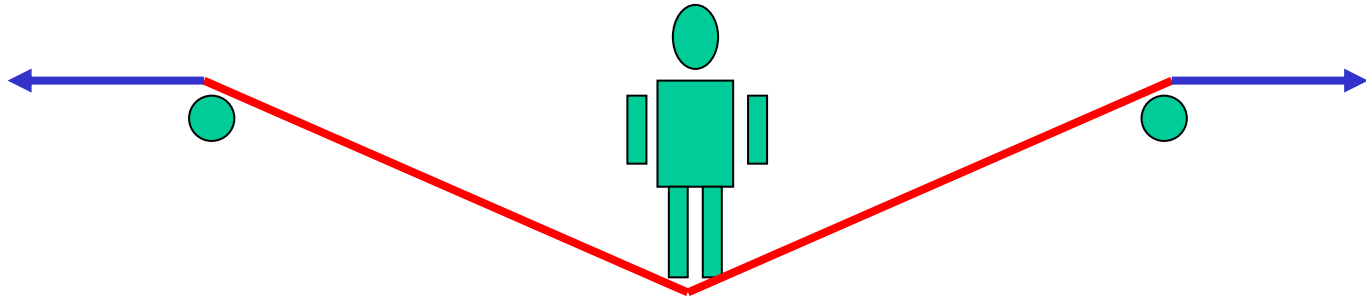
$$N_p e_p = 4 \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{g_k l^2}{N_p} \cdot \frac{(lx - x^2)}{l^2} = \frac{1}{2} g_k (lx - x^2) = M_g$$

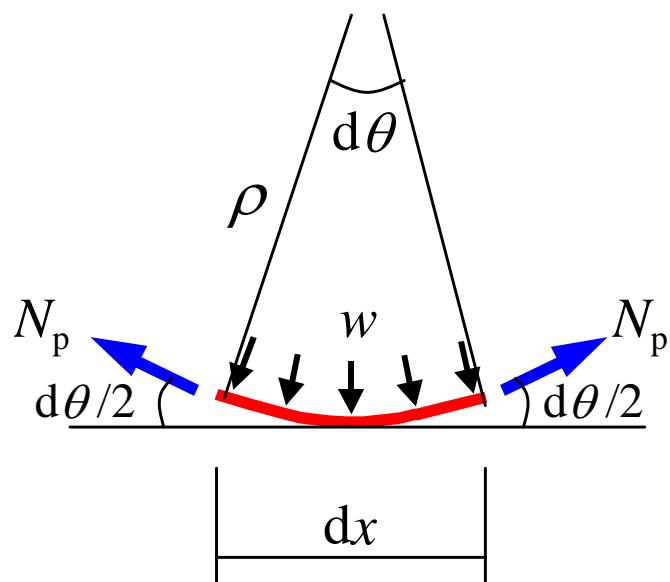
$$\sigma = \frac{M_g}{I} y - \left(\frac{N_p}{A} + \frac{N_p e_p}{I} y \right) = - \frac{N_p}{A}$$

三、平衡荷载概念



三、平衡荷载概念





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

$$w = N_p \cdot \frac{d\theta}{dx} = N_p \cdot \frac{1}{\rho}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} = -\frac{d^2 e_p}{dx^2} \quad \boxed{\frac{1}{\rho} = \frac{8e_0}{l^2}}$$

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

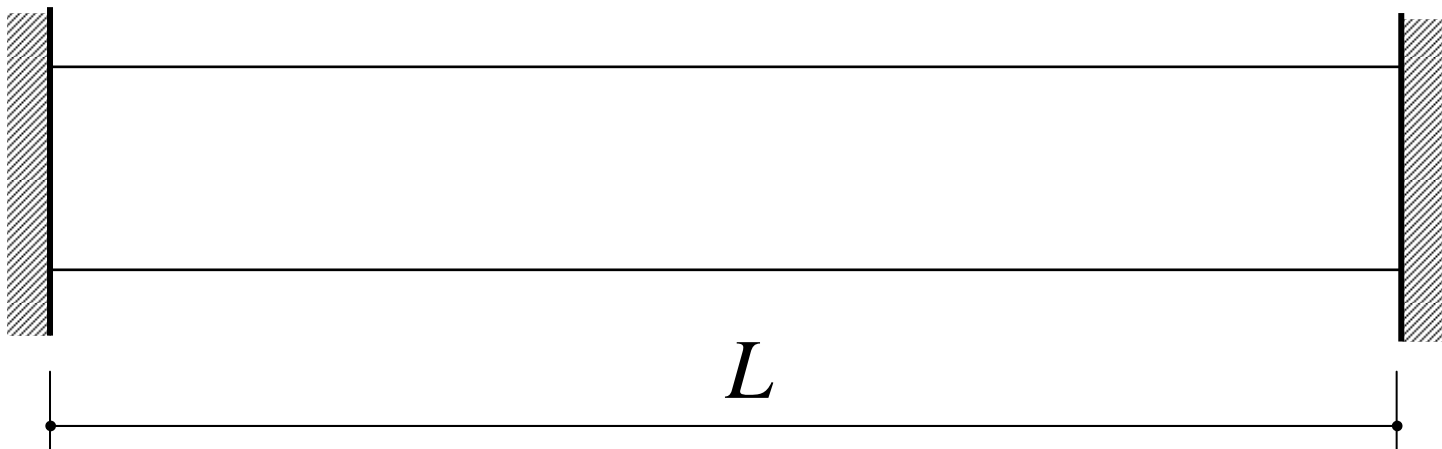
$$w = N_p \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{8N_p e_0}{l^2}$$

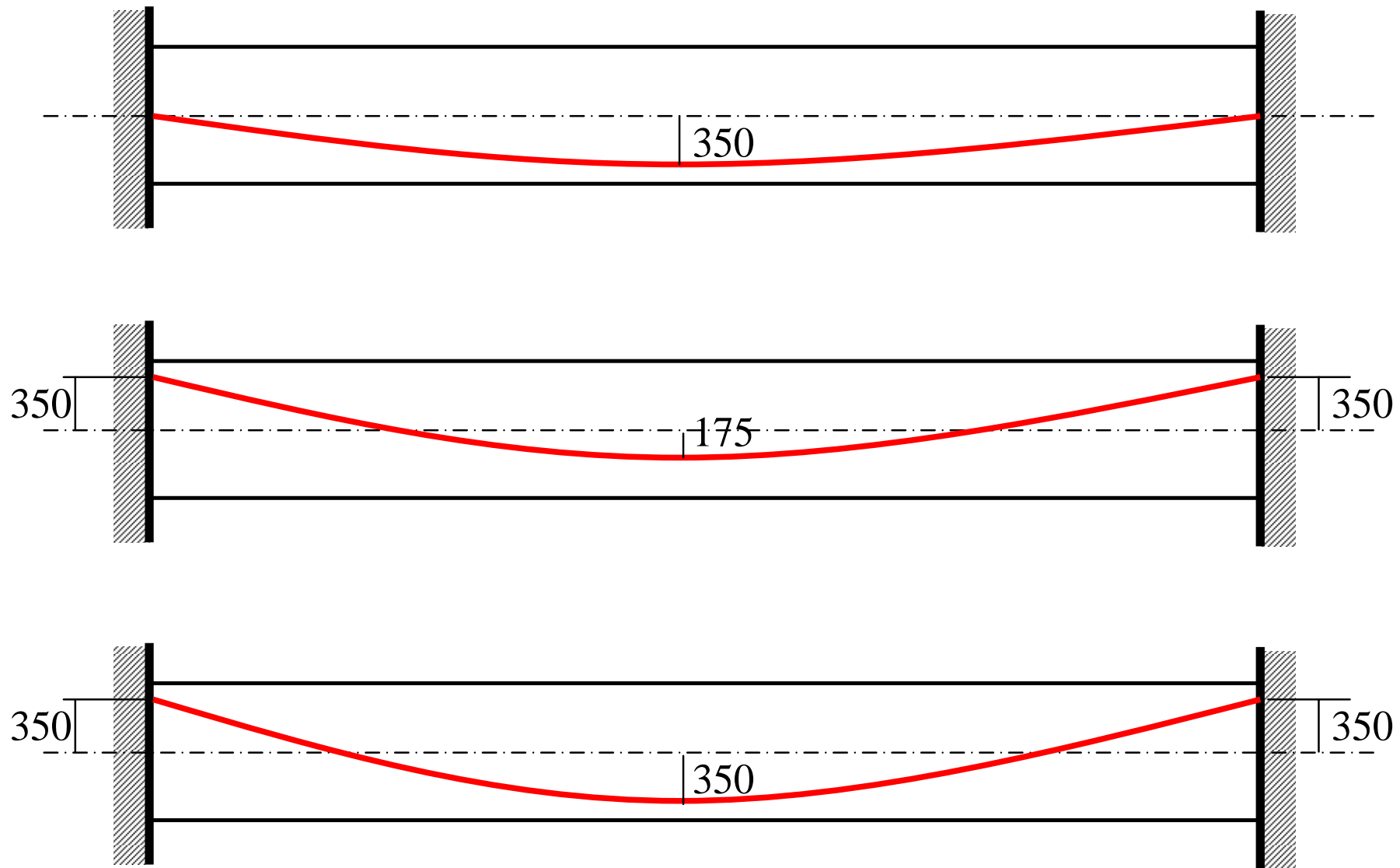
当 $w = g_k$ 时，曲线预应力筋对混凝土产生横向分布压力恰好抵消梁的均布恒载 g_k 。

按这种方法设计的预应力混凝土结构称为平衡荷载法。

试题：

试根据荷载平衡法估计以下均布荷载作用下两端固定梁的预应力筋面积，并确定预应力筋曲线形状和布置。均布恒载为 30kN/m ，梁截面尺寸为 $250\text{mm} \times 800\text{mm}$ ，跨度 $L=10\text{m}$ 。（预应力筋采用 $f_{\text{ptk}}=1860\text{MPa}$ 的 $7\phi 5$ 钢绞线，一根钢绞线的面积为 139mm^2 ；预应力筋布置要给出两端和跨中预应力筋的偏心尺寸）





12.4 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。

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，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。

钢丝 Wire：中强钢丝的强度为800~1200MPa，高强钢丝、钢绞线(Strand or Tendon)的为 1470 ~1860MPa；**延伸率** $d_{10}=6\%$ ， $d_{100}=3.5\sim 4\%$ ；钢丝的直径3~9mm；外形有光面、刻痕和螺旋肋三种，另有二股、三股和七股钢绞线，外接圆直径9.5~15.2mm。中高强钢丝和钢绞线均用于预应力混凝土结构。

冷加工钢筋 Cold Working Rebar：是由热轧钢筋和盘条经冷拉、冷拔、冷轧、冷扭加工后而成。冷加工的目的是为了**提高钢筋的强度，节约钢材。但经冷加工后，钢筋的延伸率降低。**近年来，冷加工钢筋的品种很多，应根据专门规程使用。

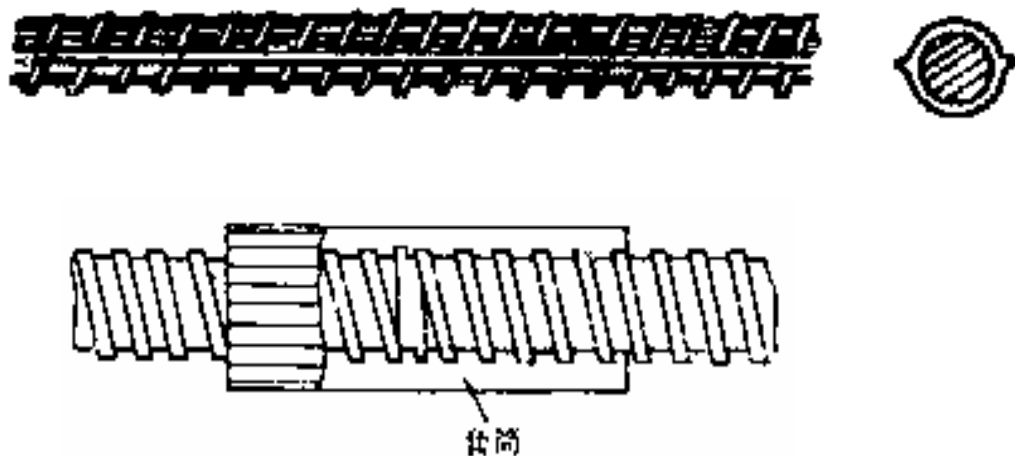
热处理钢筋 Heat Treatment：是将 级钢筋通过加热、淬火和回火等调质工艺处理，使强度得到较大幅度的提高，而延伸率降低不多。用于预应力混凝土结构。

1. 冷拉低合金钢筋

通常将 Ⅱ级热轧钢筋经冷拉后作为预应力筋，抗拉强度可达**580MPa**。

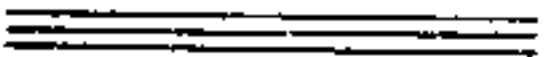
为解决粗直径钢筋的连接问题，钢筋表面轧制成不带纵向肋的精制螺纹，可用套筒直接连接。

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。



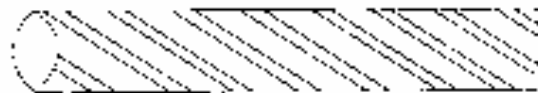
2. 中高强钢丝

- ◆ 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

D



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。

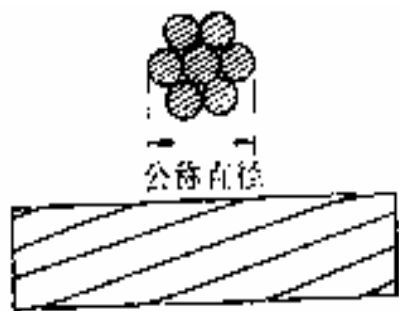
消除应力钢丝的比例极限、条件屈服强度和弹性模量均比消除应力前有所提高，塑性也有所改善。

4. 热处理钢筋

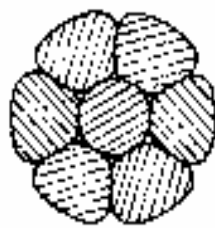
用热轧中碳低合金钢经过调质热处理后制成的高强度钢筋，直径为6~10mm，**抗拉强度为1470MPa**。

3. 钢绞线

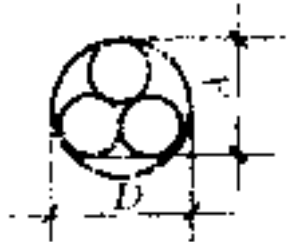
钢绞线是用2、3、7股高强钢丝扭结而成的一种高强预应力筋，其中以**7股钢绞线应用最多**。7股钢绞线的公称直径为9.5~15.2 mm，通常用于无粘结预应力筋，强度可高达1860MPa。2股和3股钢绞线用途不广，仅用于某些先张法构件，以提高与混凝土的粘结强度。



(a)



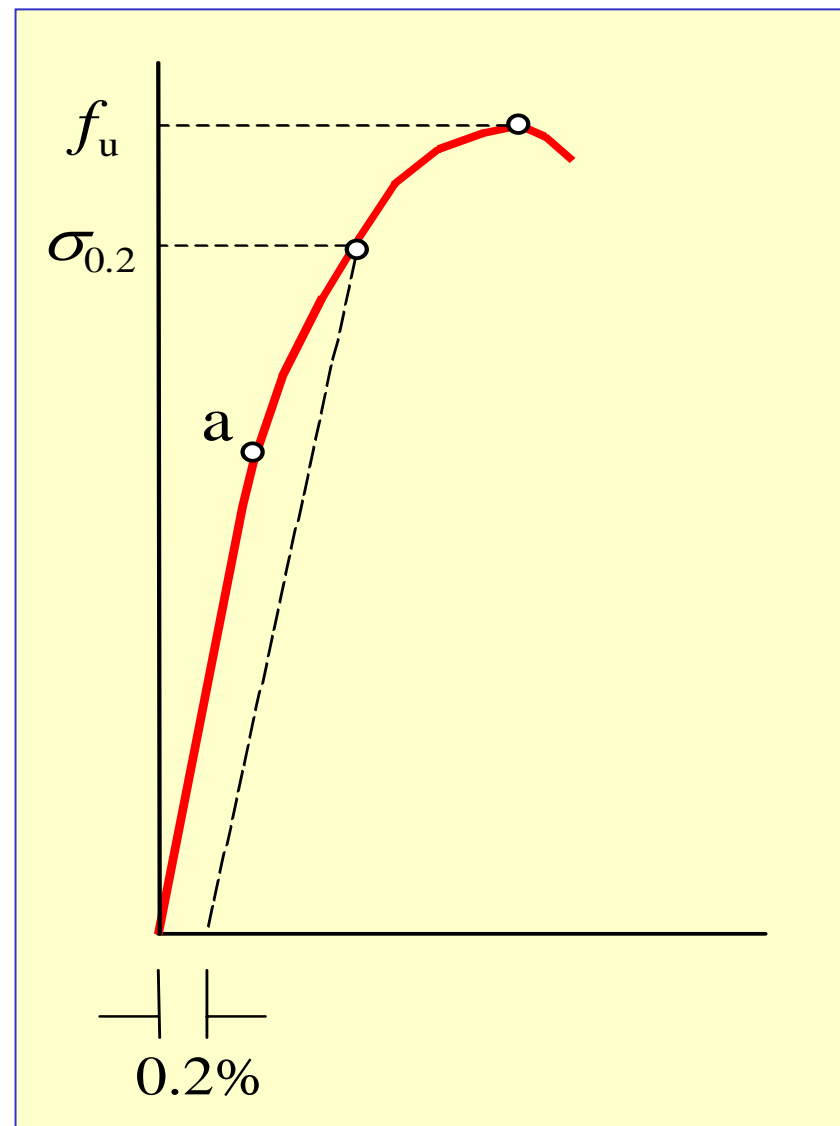
(b)



无粘结预应力束

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	1110	360	
		1570	1040		
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)	1470	1040	400	
	48Si ₂ Mn(d=8.2)				
	45Si ₂ Cr(d=10)				

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；

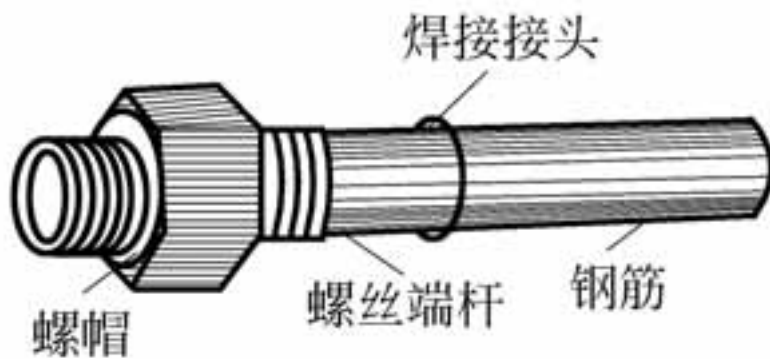
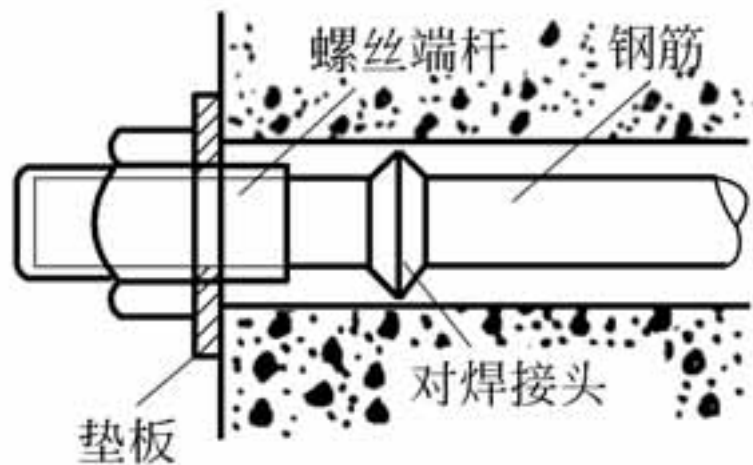
与钢筋有较大粘结强度，减少先张法预应力筋的应力传递长度

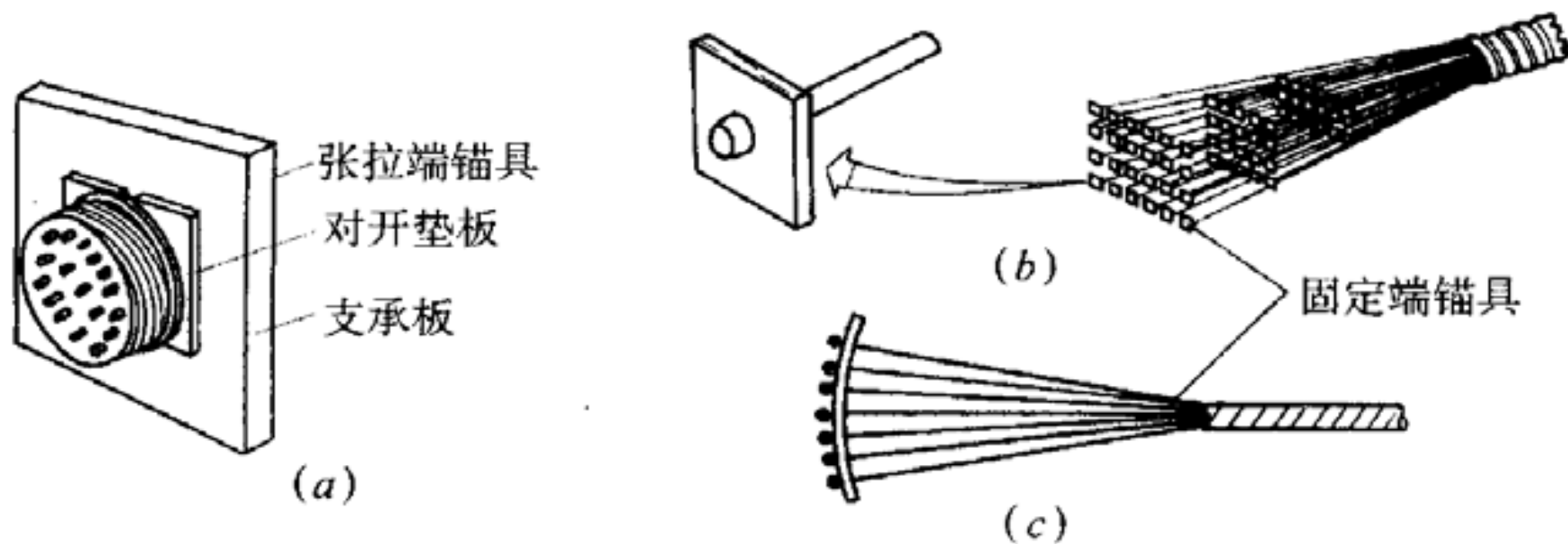
有利于提高局部承压能力，便于后张锚具的布置和减小锚具垫板的尺寸；

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

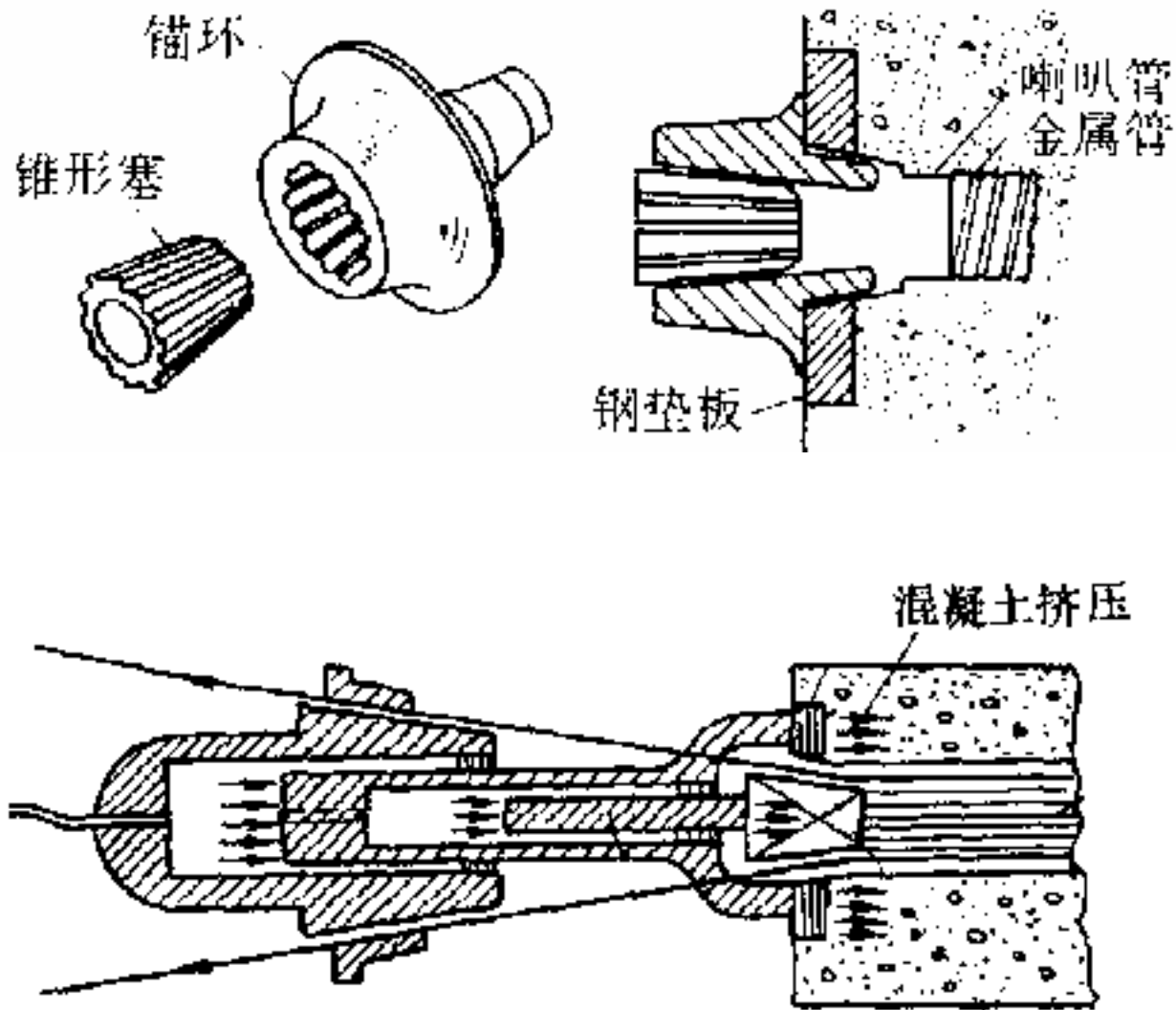
一般预应力混凝土构件的混凝土强度等级不低于C30，当采用高强钢丝时不低于C40。

三、锚具和夹具

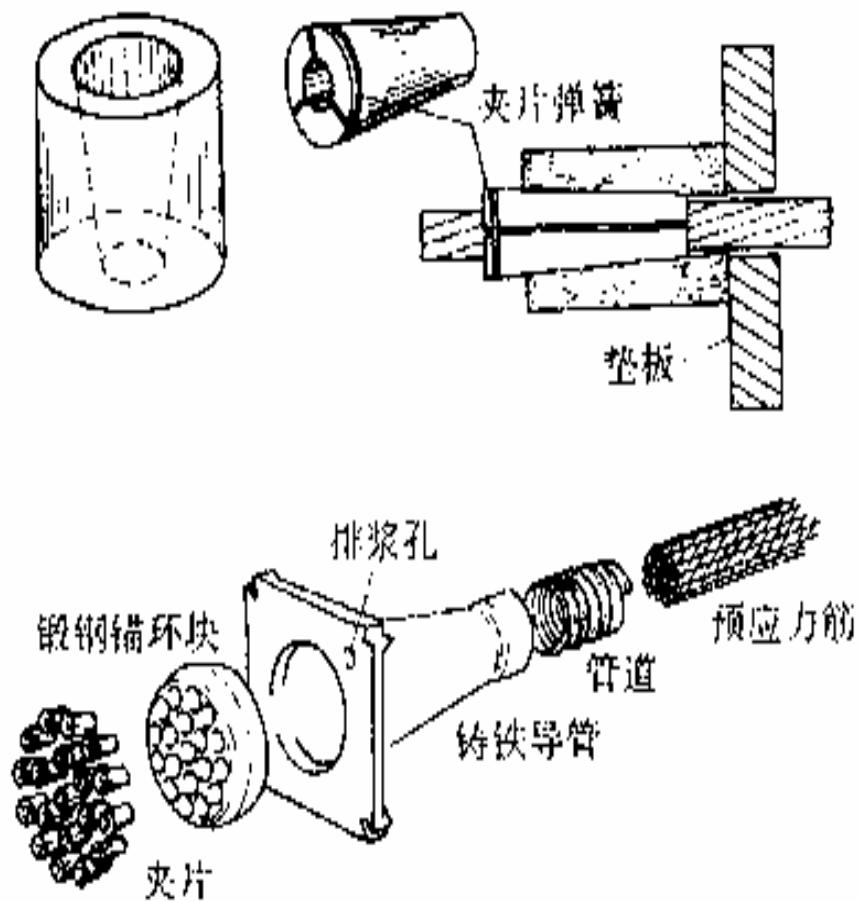
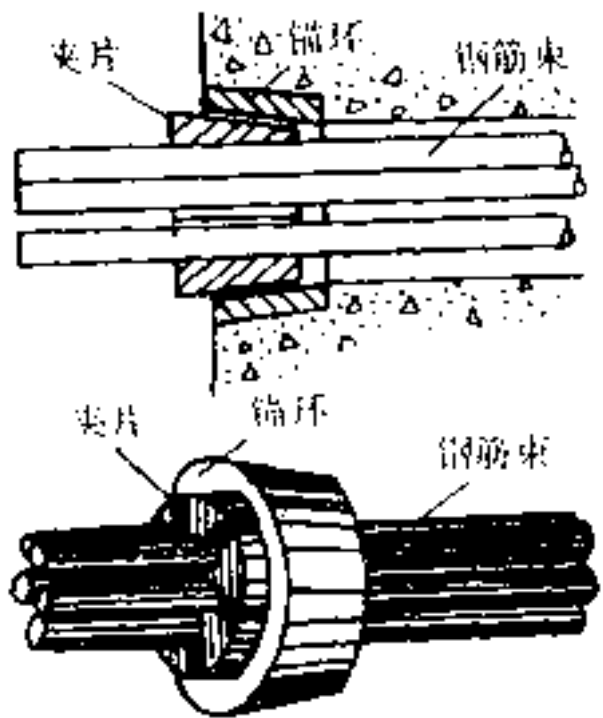


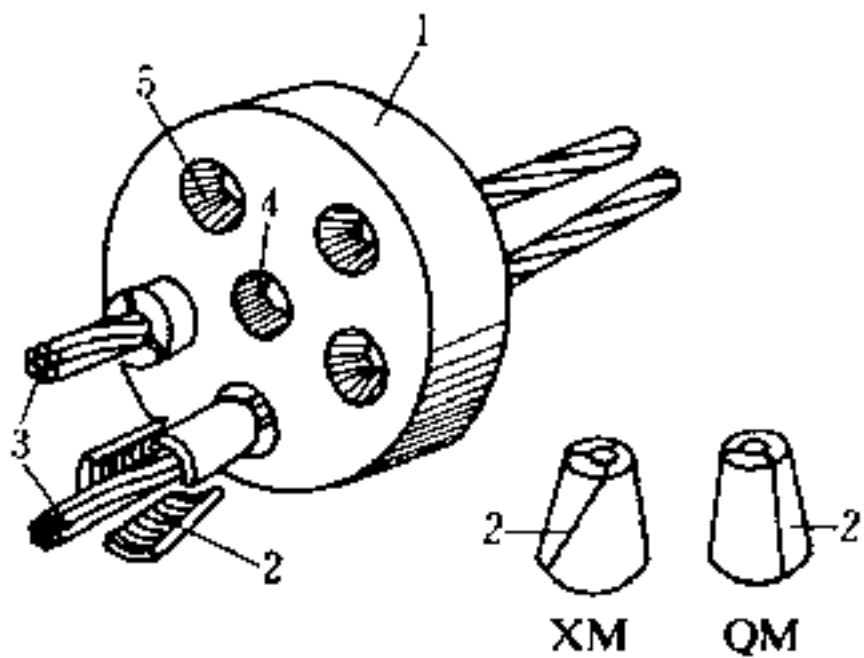


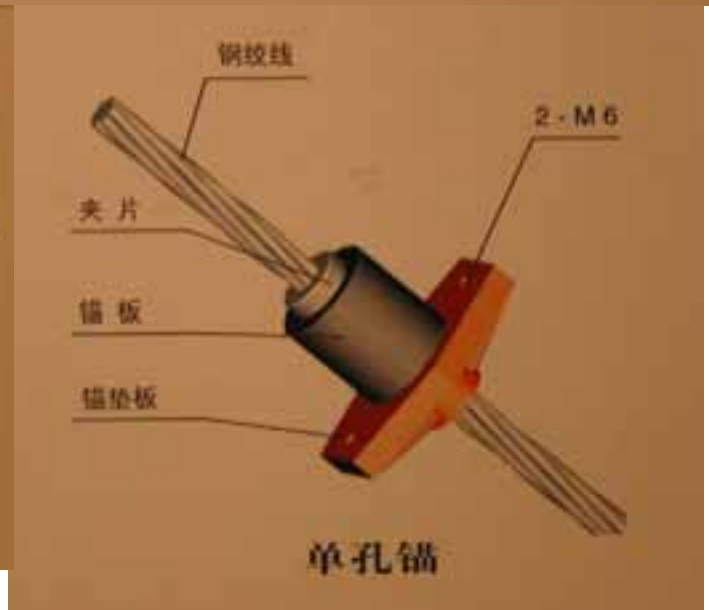
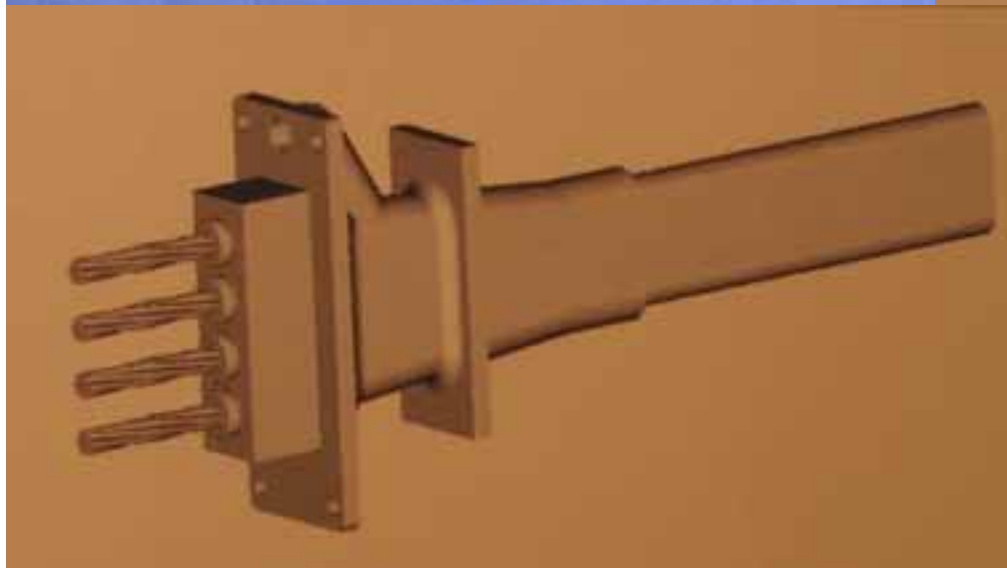
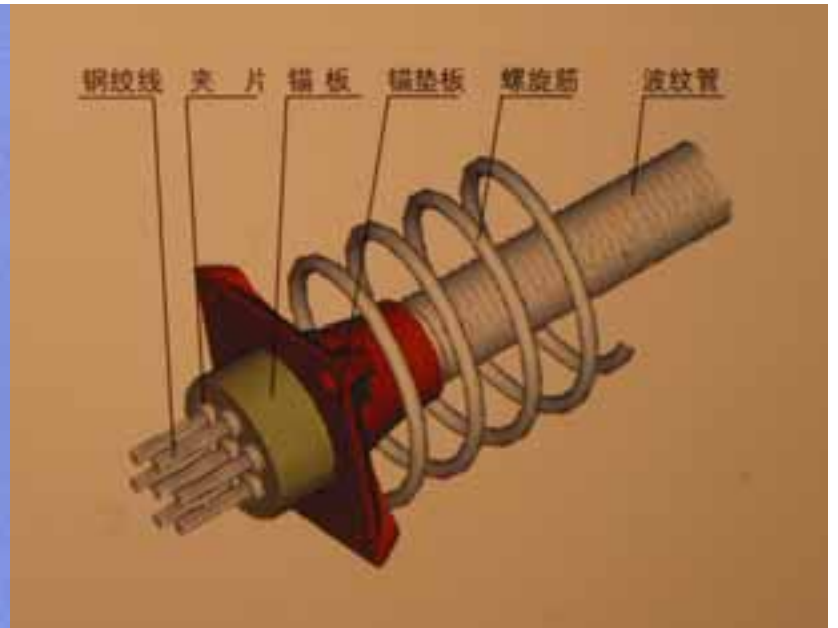
(a) 张拉端 (b) 分散式固定端 (c) 集中式固定端
图 墩头锚具

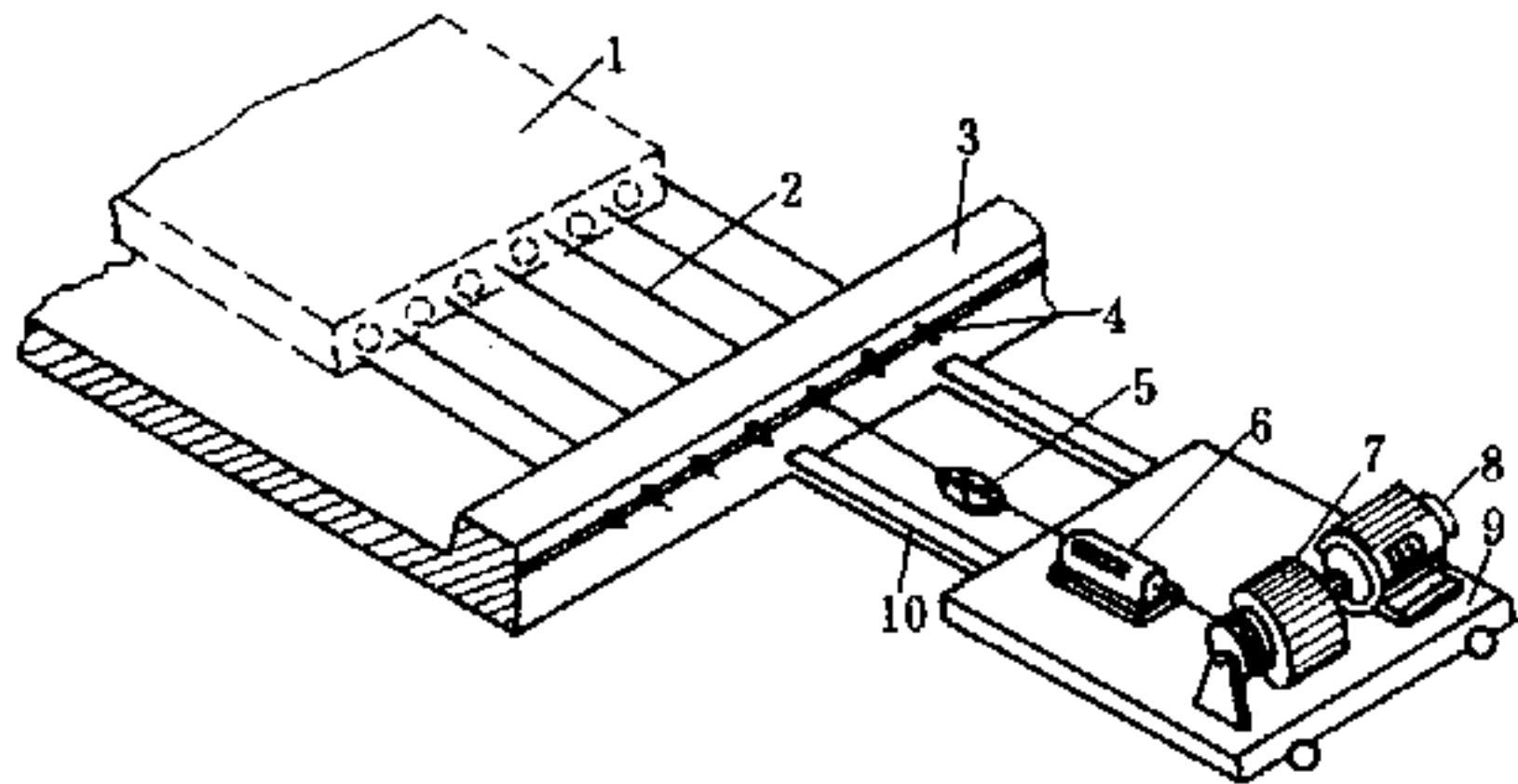


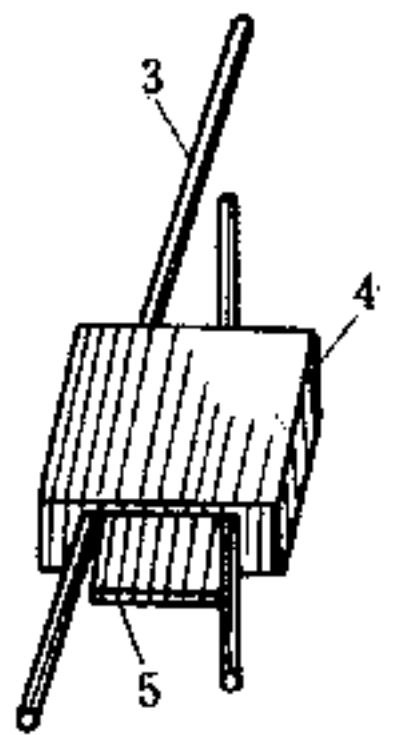
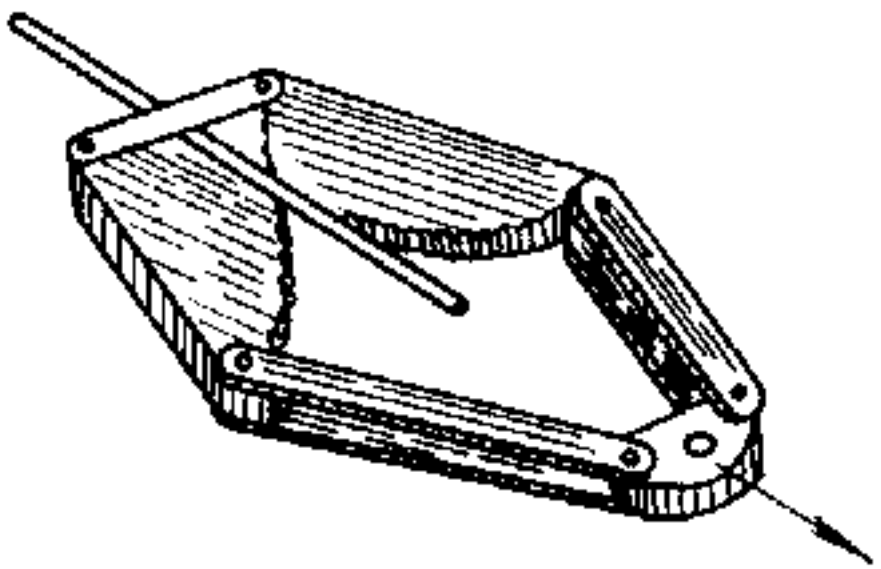
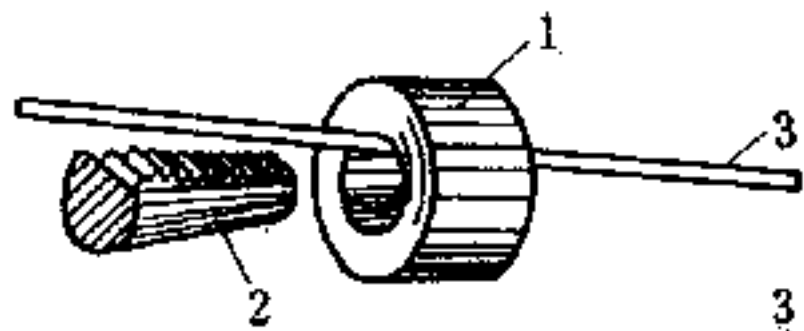
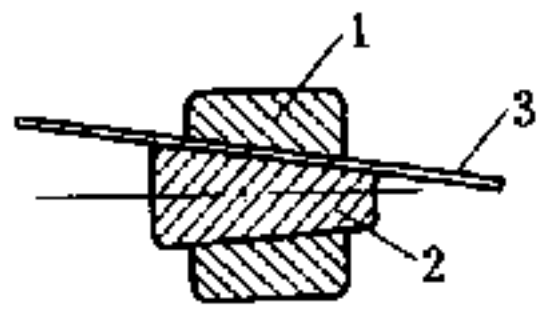
夹片式锚具

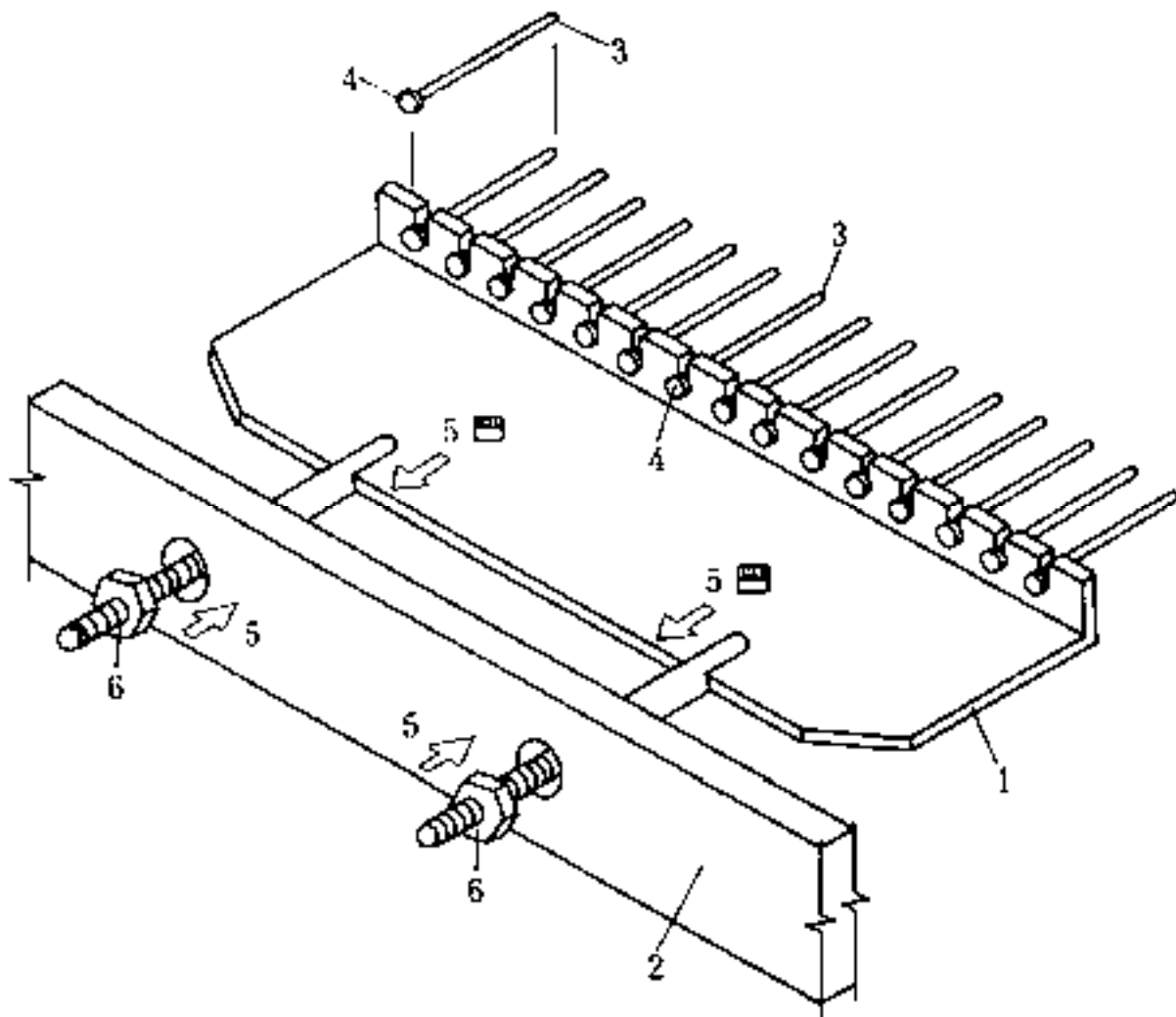


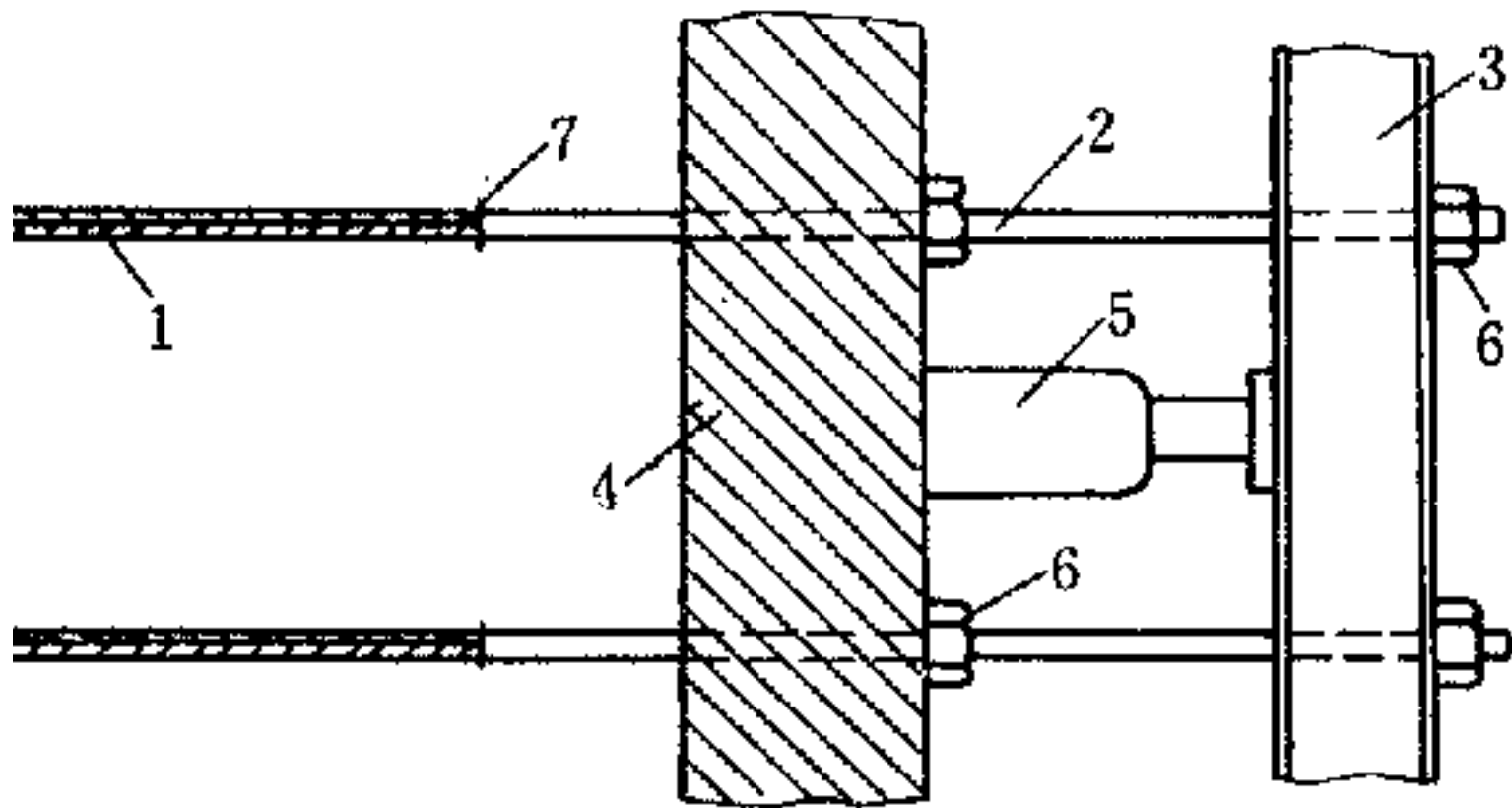


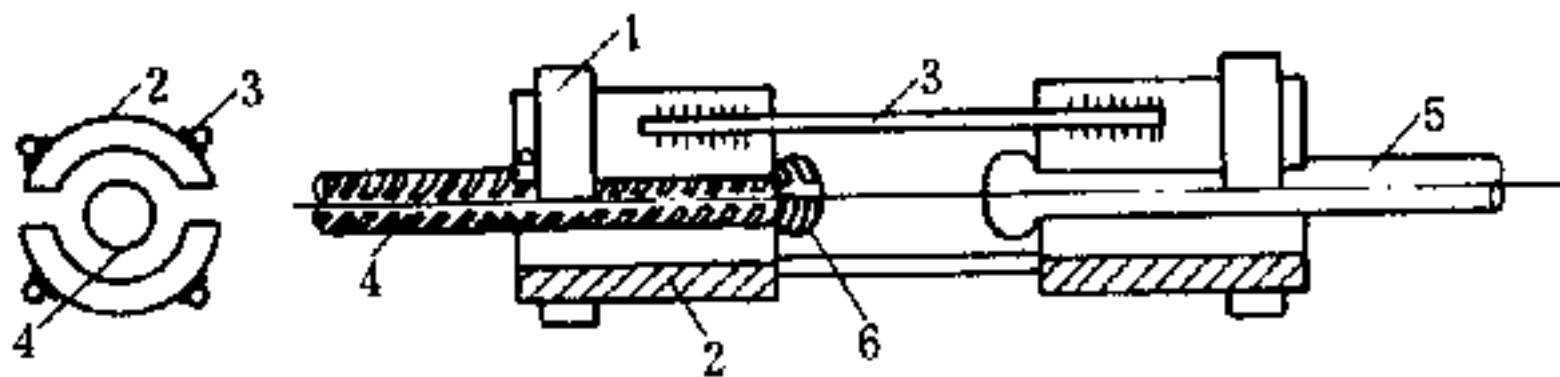
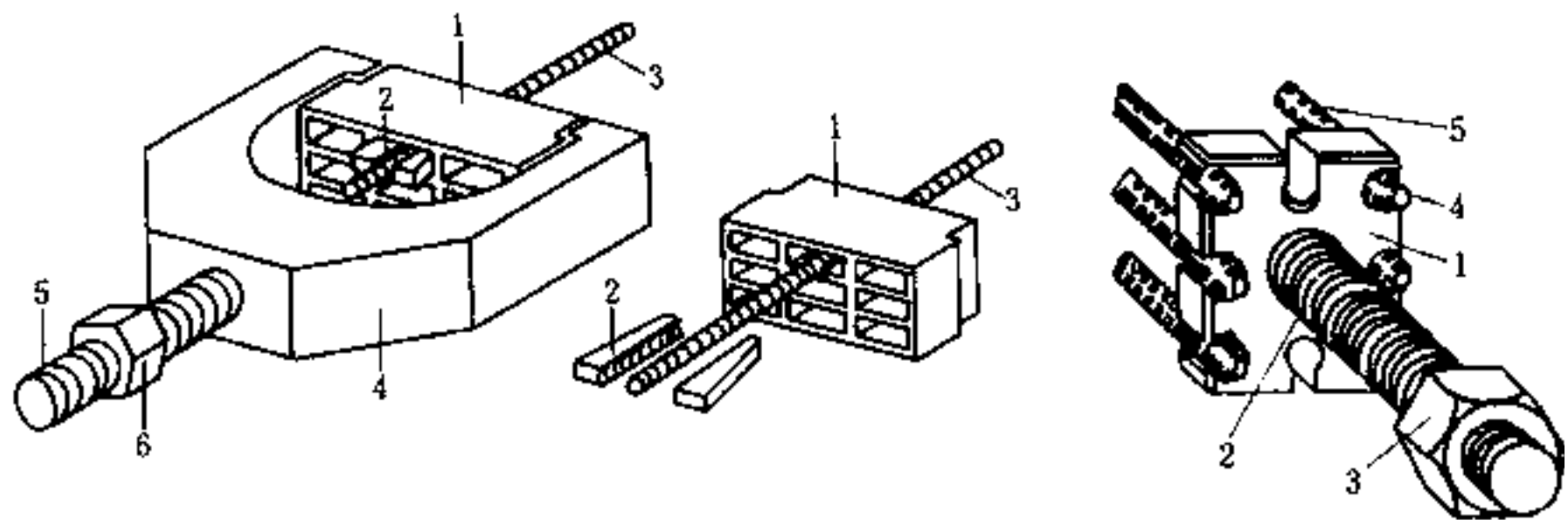












12.5 张拉控制应力和预应力损失

张拉预应力筋对构件施加预应力时，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	$0.70 f_{ptk}$	$0.65 f_{ptk}$

张拉预应力筋的过程是在施工阶段进行的

是对预应力筋进行的一次检验

所以表中 $[\sigma_{con}]$ 是以预应力筋的标准强度给出的

且 $[\sigma_{con}]$ 可不受抗拉强度设计值的限制

张拉控制应力限值 $[\sigma_{\text{con}}]$

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

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

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；

为抵消应力松弛、摩擦、分批张拉和温差产生的预应力损失

张拉控制应力限值 [σ_{con}]

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

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，由于混凝土和钢材的性质以及制作方法上原因，**预应力筋中应力会从 σ_{con} 逐步减少**，并经过相当长的时间才最终稳定下来，这种**应力降低现象称为预应力损失**。

最终稳定后的应力值才对构件产生实际的预应力效果

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。

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：

锚固损失：锚具变形引起预应力筋的回缩、滑移

摩擦损失：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，先张法预应力筋与锚具之间以及折点处的摩擦，也会使张拉应力造成损失。

混凝土的收缩和徐变引起的损失：是引起损失的主要部分

松弛损失：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。

温差损失：先张法中的热养护引起的温差损失

弹性压缩损失：混凝土弹性压缩，后张法中后拉束对先张拉束造成的压缩变形而产生分批张拉损失等。

1. 锚固损失 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，

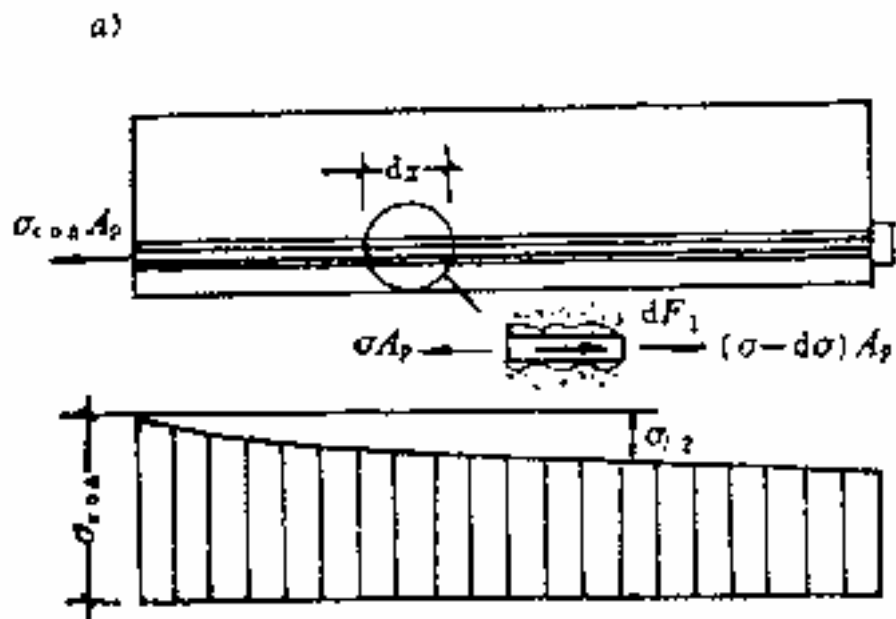
$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} \cdot E_s$$

锚具变形和钢筋内缩值 a (mm)

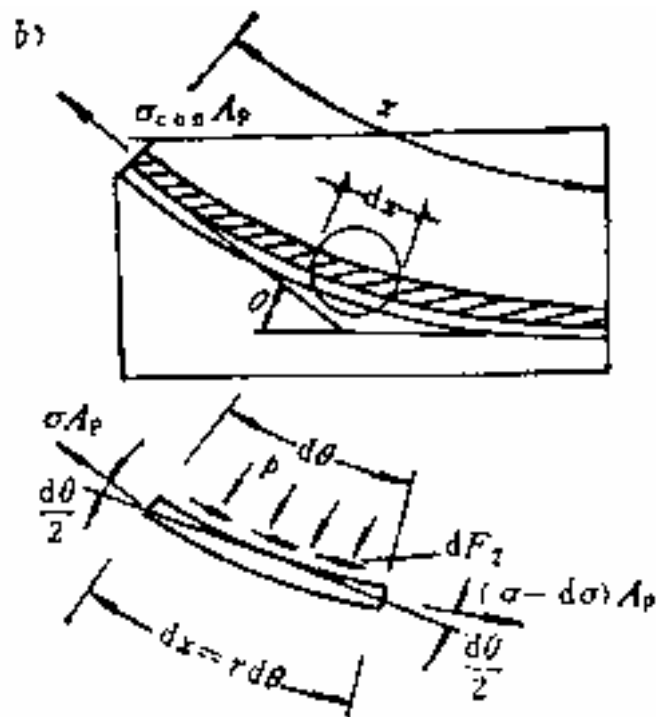
锚具类别		a
支承式锚具（钢丝束墩头锚具等）： 螺帽缝隙 每块后加垫板的缝隙		1 1
锥塞式锚具（钢丝束的钢质锥形锚具等）		5
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6~8

2. 摩擦损失 σ_l

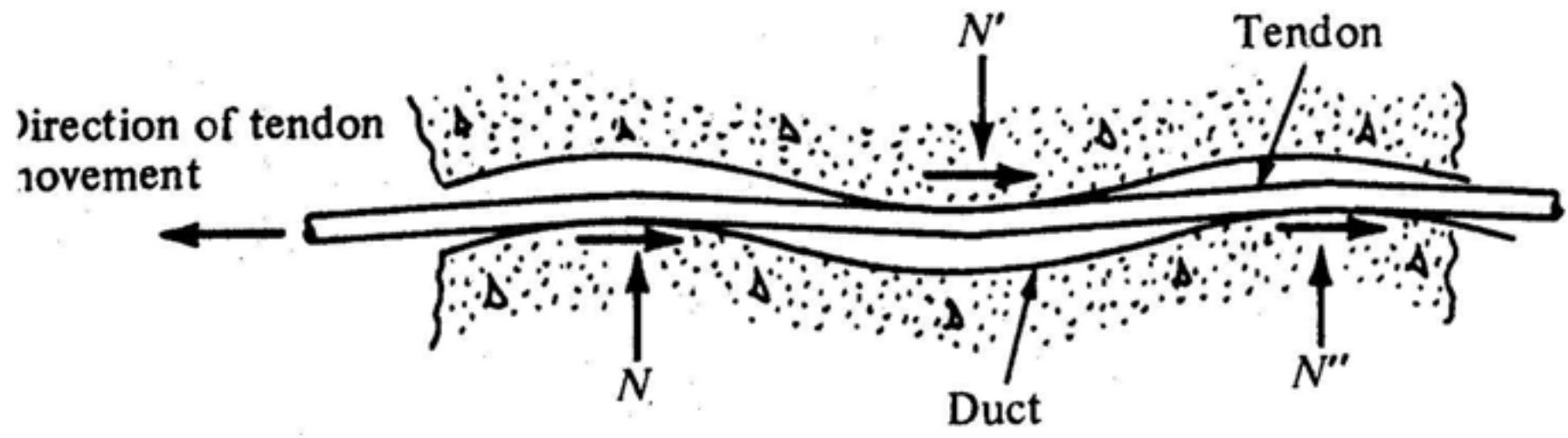
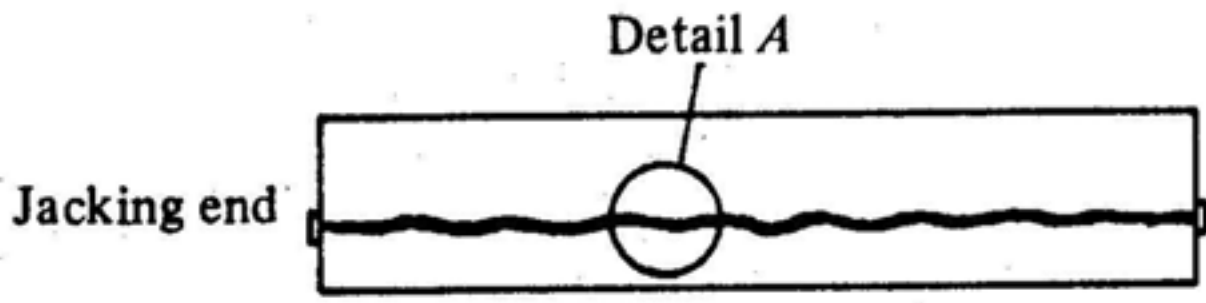
摩擦损失是指在**后张法**张拉钢筋时，由于预应力筋与周围接触的混凝土或套管之间存在摩擦，引起预应力筋应力随距张拉端距离的增加而逐渐减少的现象。

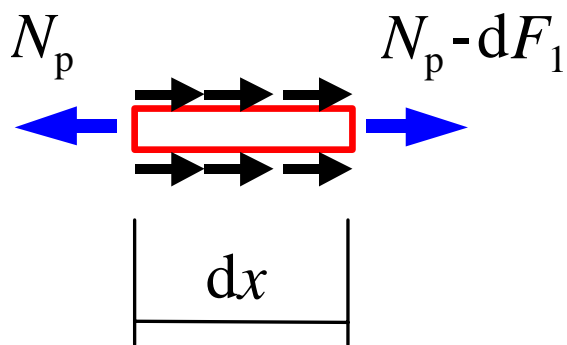


直线预应力筋



曲线预应力筋



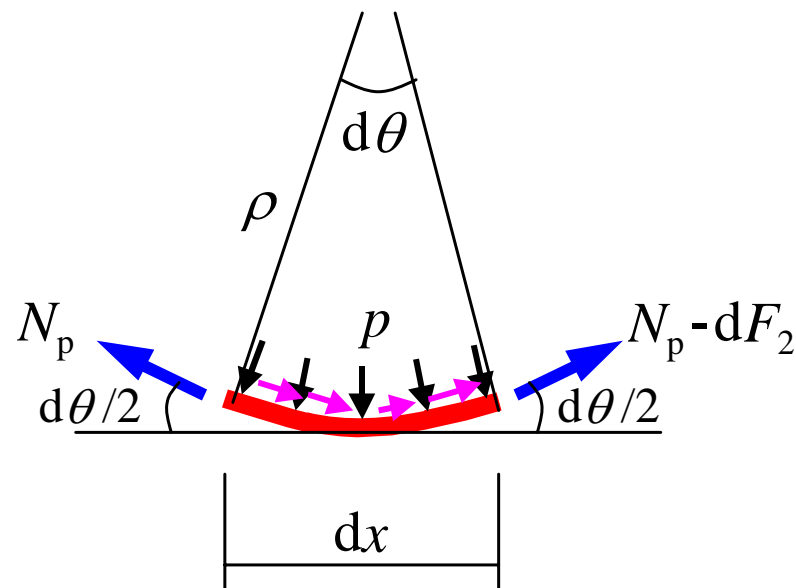


$$dF_1 = \kappa N_p dx$$

取 $dx = r d\theta$, $N_p = \sigma_p A_p$

$$\begin{aligned} dF &= -A_p d\sigma_p = dF_1 + dF_2 \\ &= (\kappa r + \mu) \sigma_p A_p d\theta \end{aligned}$$

$$\frac{d\sigma_p}{\sigma_p} = -(\kappa r + \mu) d\theta$$



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

$$dF_2 = \mu p dx = \mu N_p d\theta$$

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

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



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

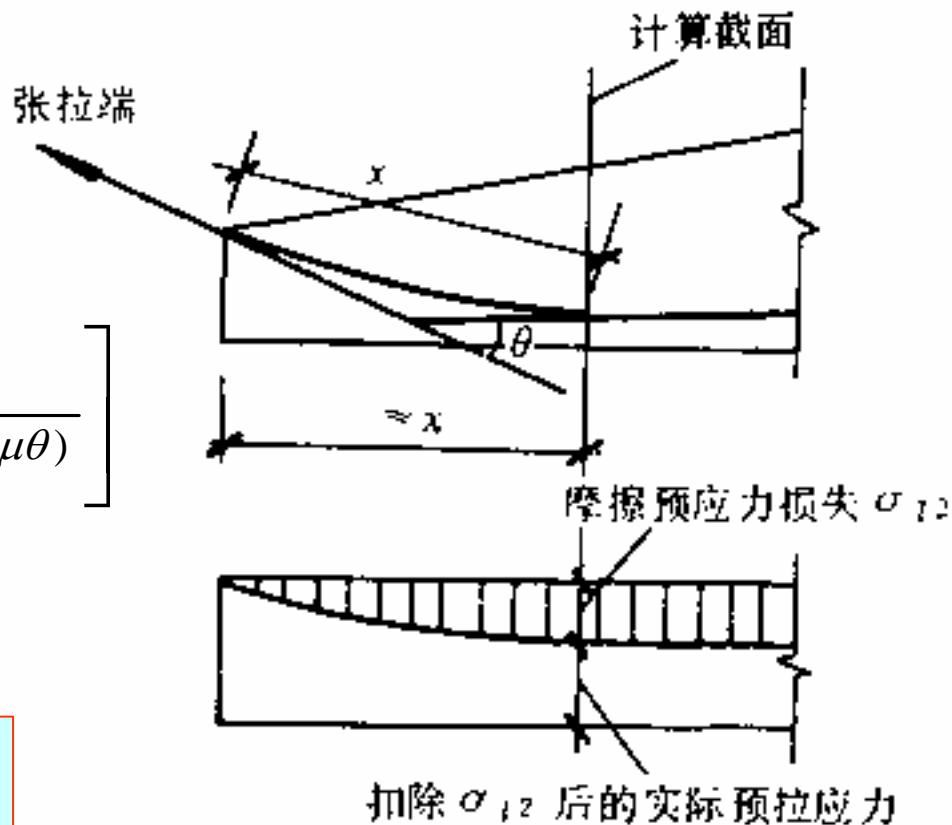
θ 为张拉端与计算截面曲线部分的切线夹角 (Rad)

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 $(\kappa x + \mu\theta) < 0.2$

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

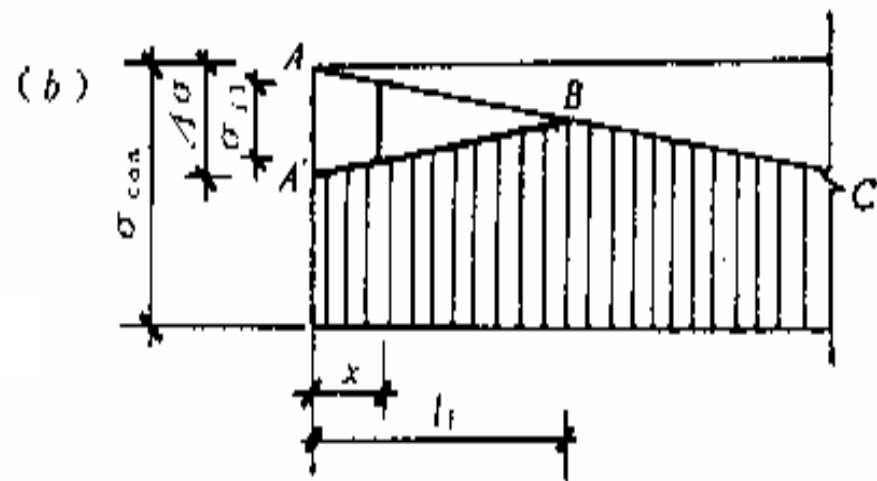
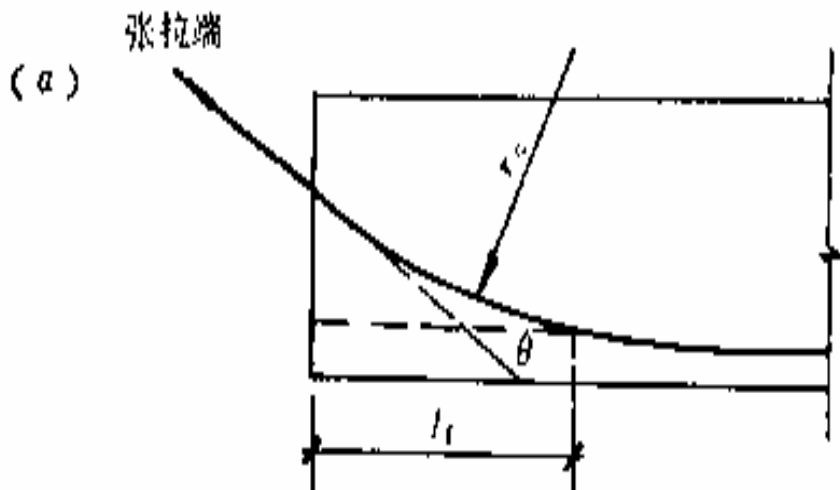


钢丝束、钢绞线摩擦系数

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 (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 (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

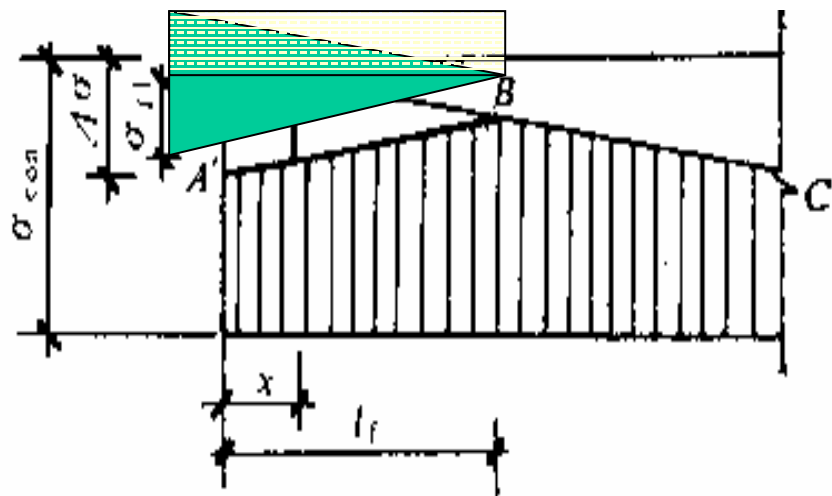
$$\Delta\sigma = 2\sigma_{l2}$$

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

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

内缩值

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



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

设反向摩擦和正向摩擦相同

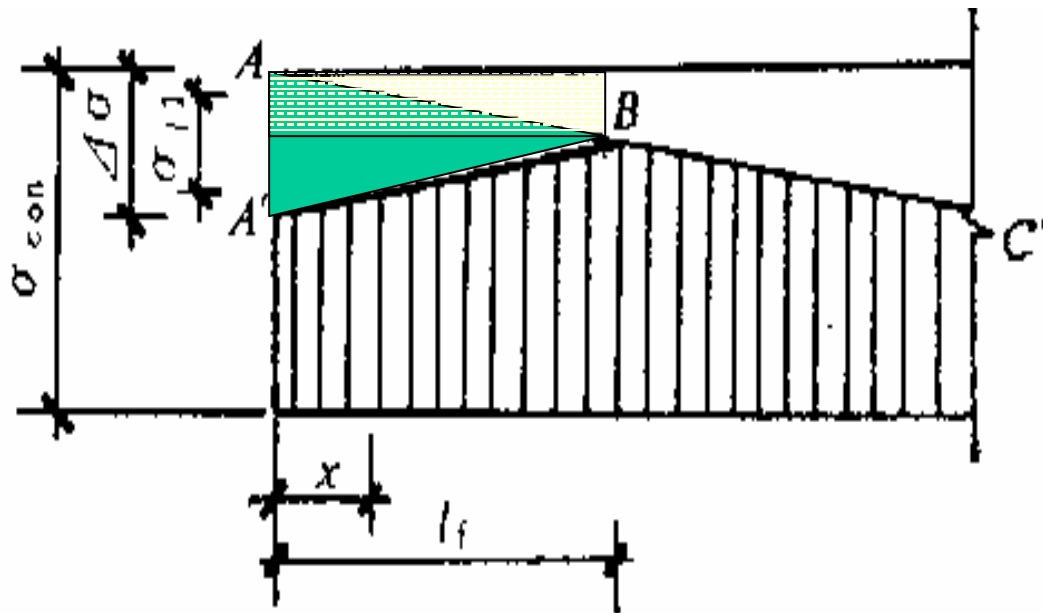
$$\Delta\sigma = 2\sigma_{l2}$$

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

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

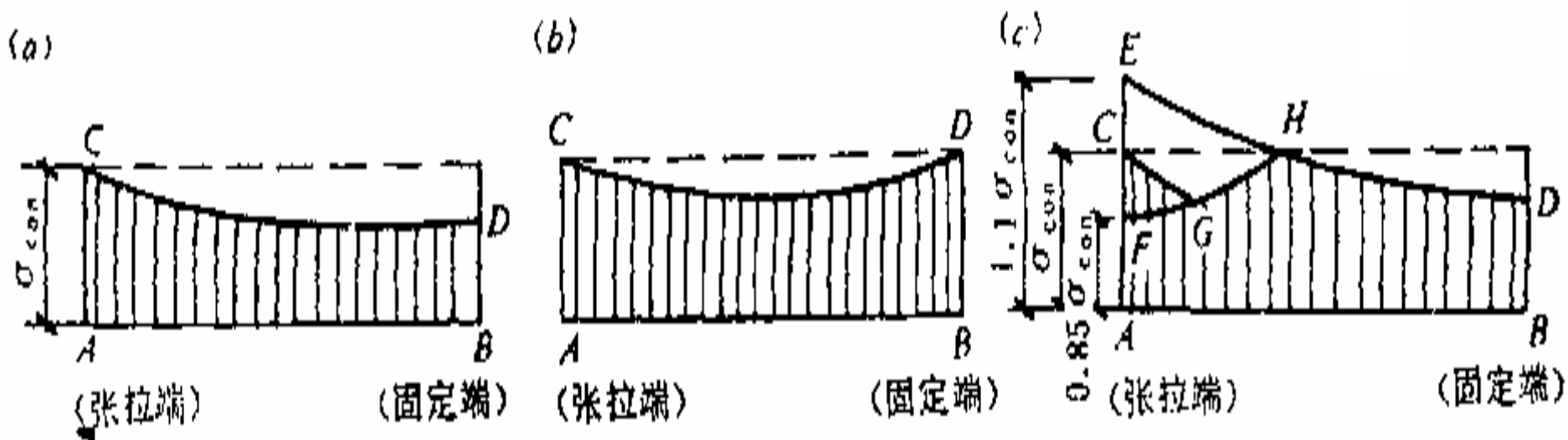
$$\sigma_{l1} = \Delta\sigma \left(1 - \frac{x}{l_f} \right)$$

$$= 2\sigma_{\text{con}} l_f \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_f} \right)$$



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

减少摩擦损失的措施



一端张拉

两端张拉

超张拉

3. 热养护损失 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 ，取钢筋的温度膨胀系数为 $1 \times 10^{-5}/$ ，则有

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

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：

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

低松弛预应力钢丝和钢绞线：

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

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

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

$$\sigma_{l4} = 0.2\psi \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}}$$

为超张拉系数：

一次张拉时，取 $\psi = 1$

超张拉时，取 $\psi = 0.9$

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

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

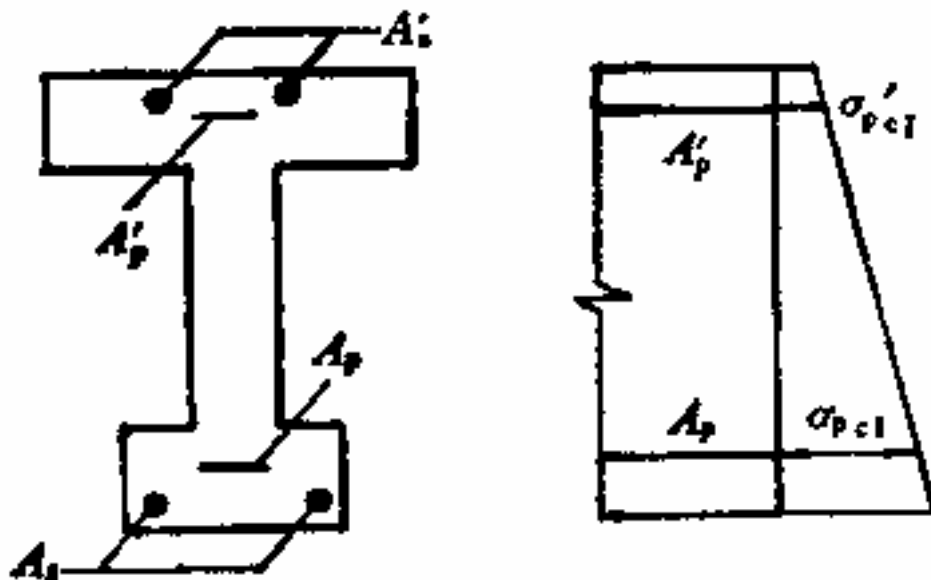
$$\sigma_{l5} = \frac{45 + 220 \times \frac{\sigma_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho}$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{45 + 220 \times \frac{\sigma'_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'}$$

后张法

$$\sigma_{l5} = \frac{25 + 220 \times \frac{\sigma_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho}$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{25 + 220 \times \frac{\sigma'_{pc}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'}$$



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

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

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

$$A_n = A_c + \alpha_s A_s$$

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。

混凝土预压前完成的损失 σ_{II} ；

混凝土预压后完成的损失 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}	$\sigma_{I1} + \sigma_{I2} + \sigma_{I3} + \sigma_{I4}$	$\sigma_{I1} + \sigma_{I2}$
混凝土预压后 (第二批)损失 σ_{III}	σ_{I5}	$\sigma_{I4} + \sigma_{I5}$

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、混凝土弹性压缩引起的损失 σ_{le}

先张法构件放张时，预应力筋与混凝土一起受压缩短，引起预应力筋应力降低。

设混凝土预压应力在弹性范围，则根据钢筋与混凝土共同变形的条件，可得混凝土弹性压缩引起的损失 σ_{le} 为

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

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。