结构设计原理

2019年秋季

西安交通大学航天航空学院

刘益伦

教一楼东**405**

yilunliu@mail.xjtu.edu.cn

2019年**9-12**月

概述

➢施工阶段

●预加力阶段

✓受力情况 { 预加力的合力N_p(偏心压力）
一期恒载G_1

✓计算要求：

- 受弯构件控制截面上、下缘混凝土的最大拉应力和最大压应力不超过规范规定。
- 控制预应力筋的最大拉应力。
- 保证锚固区混凝土局部承压承载力满足要求，并保证梁体不出现水平纵向裂缝。

- 安装、运输阶段

构件仍受预加力和一期恒载的作用，但应注意：

✓预应力损失继续增加。

✓一期恒载应计入动力系数。

✓构件在运输及安装过程中，受力模式可能发生改变，应根据实际施工情况进行验算。

➢使用阶段

●受力情况
- 预加力的合力N_p(偏心压力）
- 一期恒载G_1
- 二期恒载G_2
- 车辆、人群等活载Q

●受力过程

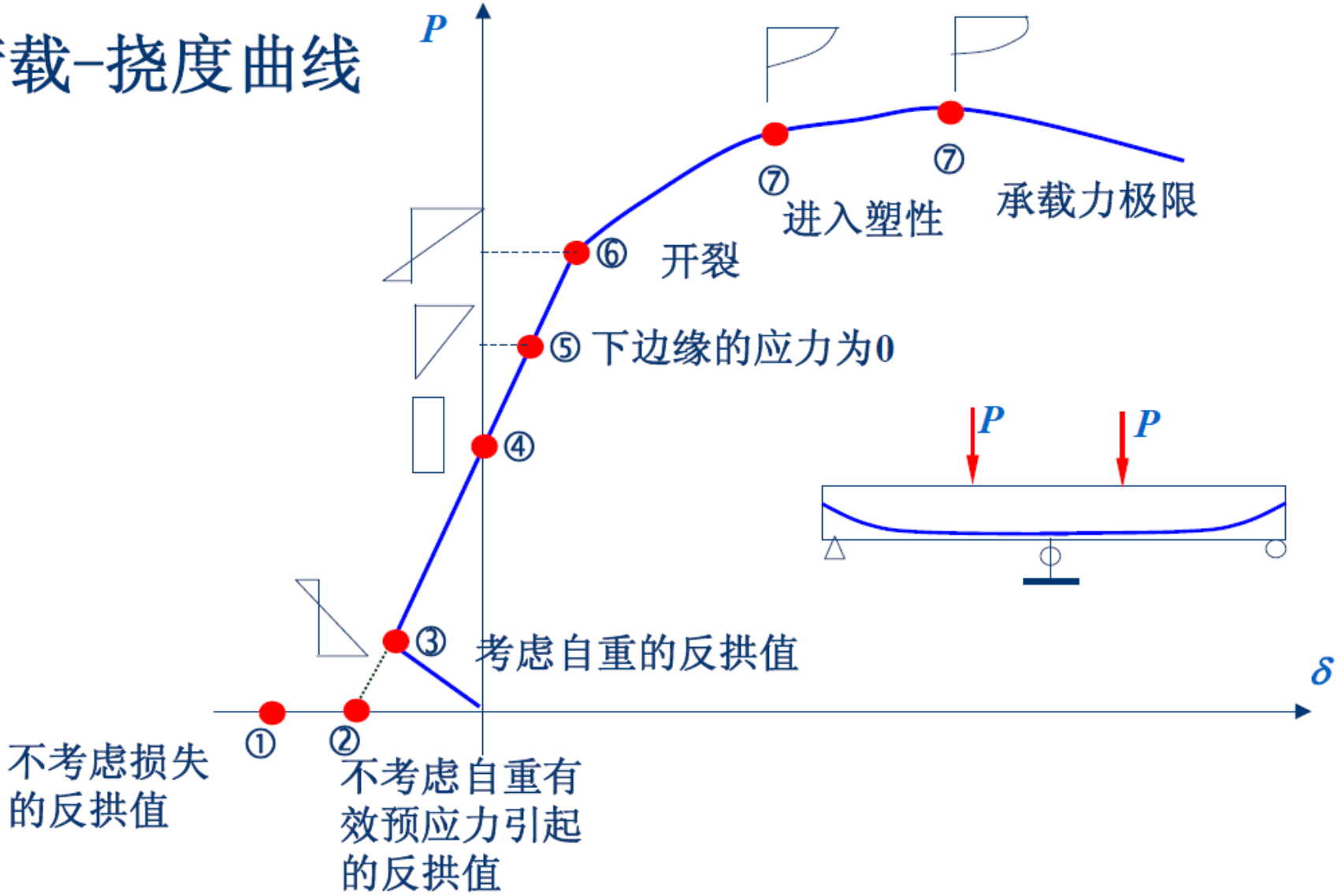
✓加载至混凝土受拉边缘混凝土预压应力为零。

✓加载至受拉区裂缝即将出现。

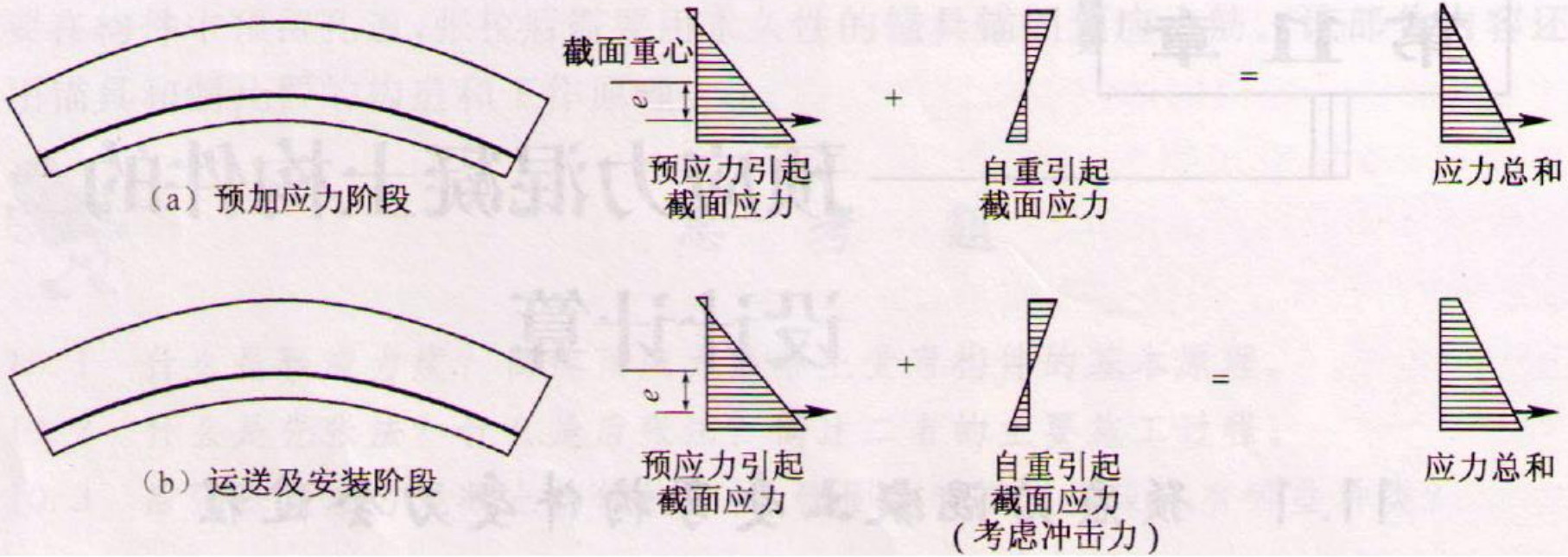
✓带裂缝工作。

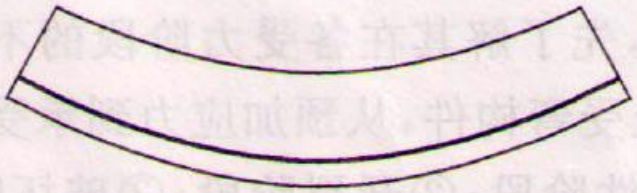
➢破坏阶段

荷载-挠度曲线

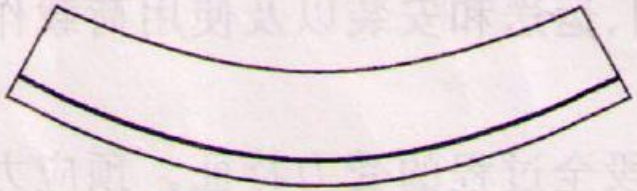

P
δ
⑦
进入塑性
⑦
承载力极限
⑥
开裂
⑤ 下边缘的应力为0
④
③
考虑自重的反拱值
①
②
不考虑损失的反拱值
不考虑自重有效预应力引起的反拱值
P
P

各阶段的截面应力

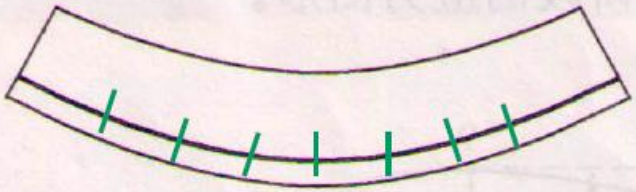

截面重心
e
+
=
（a）预加应力阶段
预应力引起
截面应力
自重引起
截面应力
应力总和
e
+
=
（b）运送及安装阶段
预应力引起
截面应力
自重引起
截面应力
（考虑冲击力）
应力总和



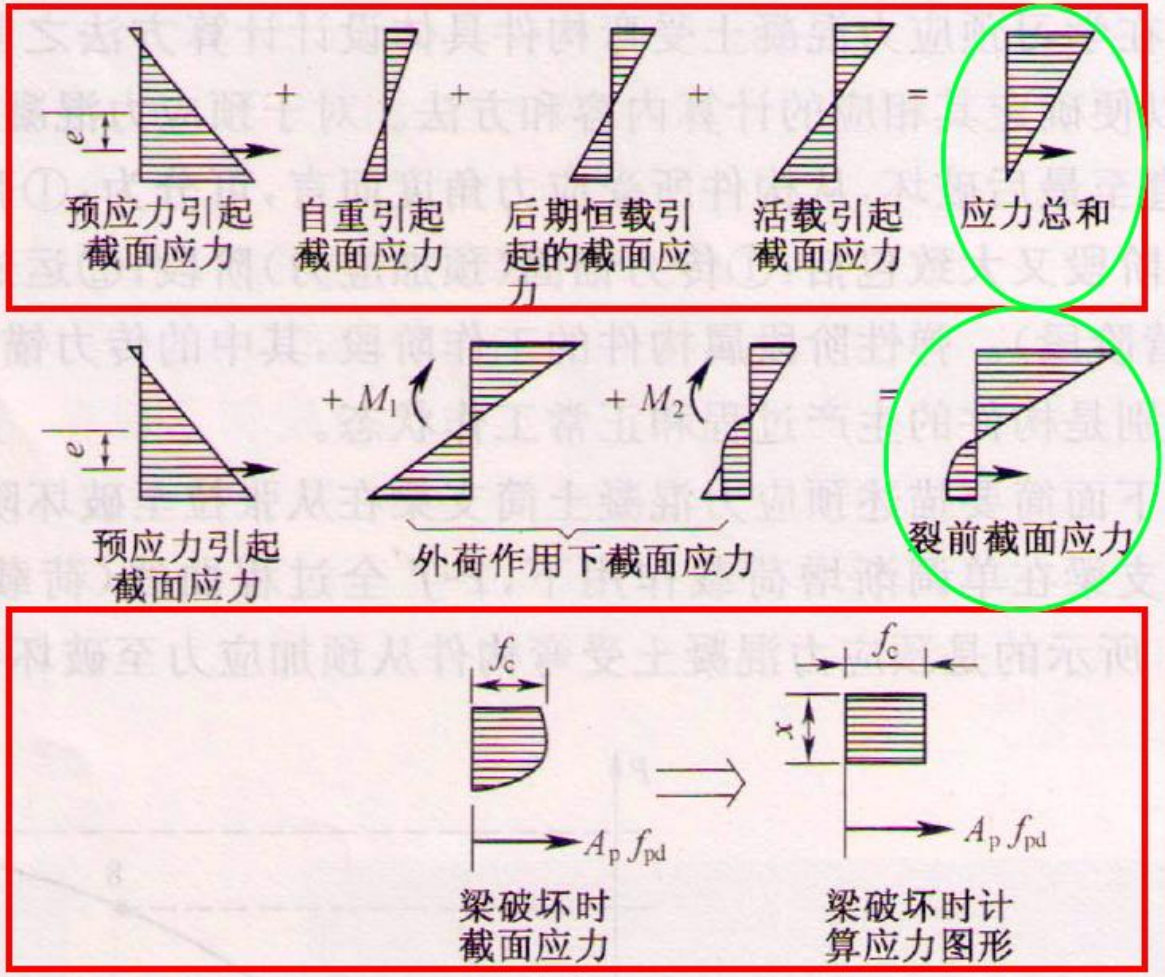
（c）使用荷载作用阶段



（d）裂缝即将出现阶段



（e）破坏阶段



- 消压弯矩M_0

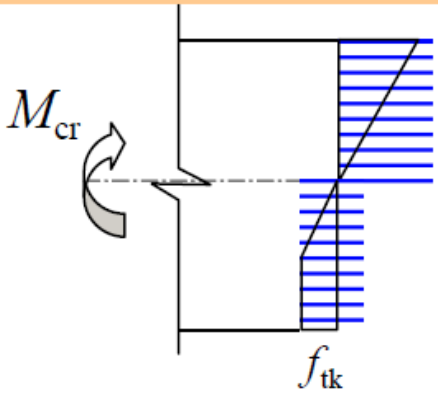
当外荷载作用的弯矩使截面受拉边缘产生的拉应力正好为预应力在此处的应力σ_{pc}，这时该处应力为0，称为消压状态，相应的预应力效应弯矩称为消压弯矩。

$$\boxed{\sigma_c - \sigma_{pc} = \frac{M}{I_0} y_0 - \sigma_{pc} = 0}$$

$$\boxed{M_0 = \sigma_{pc} \frac{I_0}{y_0} = \sigma_{pc} W_0}$$

W_0为换算截面对受拉边缘的弹性抵抗矩

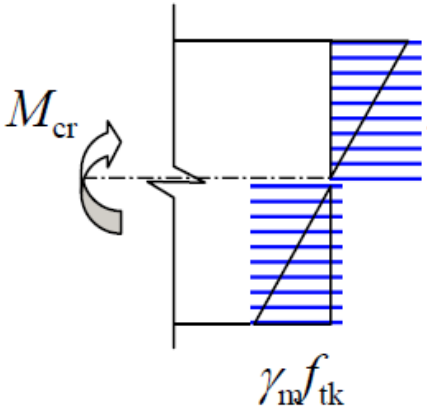
▪ 开裂弯矩M_{cr}



实际应力分布

$$M_{cr} = 0.256 f_{tk} b h^2$$

简化



三角形分布

γ_m=0.256×6=1.536

——截面抵抗矩塑性系数，与截面形状和截面高度有关

$$M_{cr} = \gamma_m f_{tk} W_e = \frac{1}{6} \gamma_m f_{tk} b h^2$$

$$\sigma_c - \sigma_{pc} = \frac{M}{I_0} y_0 - \sigma_{pc} = \gamma_m f_{tk}$$

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma_m f_{tk}) W_0$$

预应力混凝土受弯构件计算内容

正截面
承载力计算

斜截面
承载力计算

锚固区
承载力计算

持久状况构件
应力计算

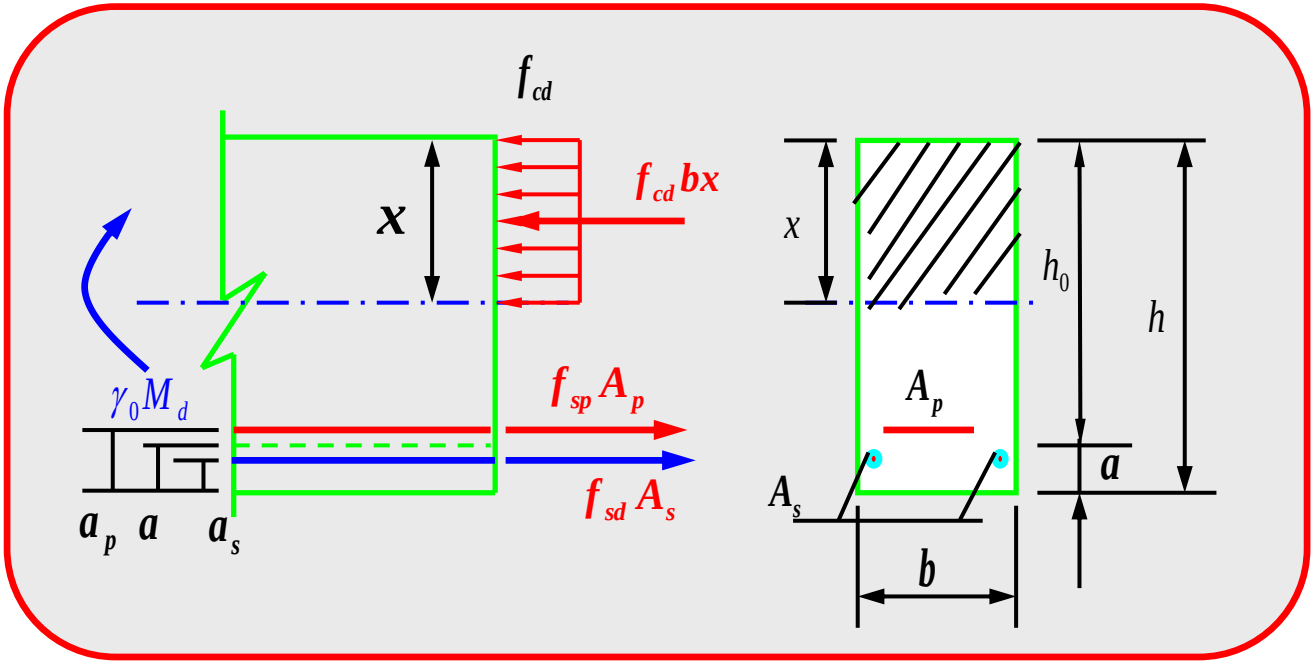
短暂状况构件
应力计算

抗裂性验算

挠度及变形
验算

预应力混凝土受弯构件承载力计算

正截面承载力计算



$$f_{sd}A_s + f_{sp}A_p = f_{cd}bx \qquad \gamma_0 M_d \le M_u = f_{cd}bx(h_0 - \frac{x}{2})$$

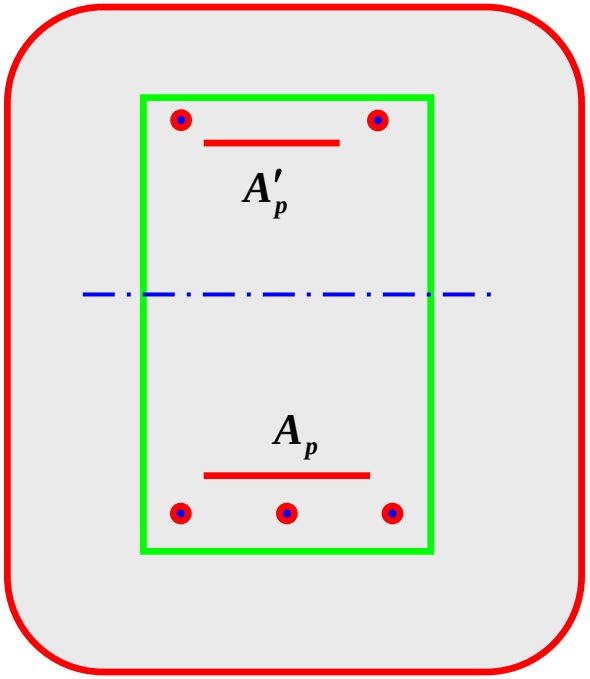
➢受压区配置预应力及非预应力钢筋的矩形截面

● 受压区预应力钢筋的应力。

$$\sigma'_{pa} = E'_p(\varepsilon'_c - \sigma'_c / E_c) - \sigma'_p$$

$$= f'_{pd} - \alpha'_{Ep}\sigma'_c - \sigma'_p$$

$$\sigma'_{pa} = f'_{pd} - (\alpha'_{Ep}\sigma'_c + \sigma'_p) = f'_{pd} - \sigma'_{p0}$$



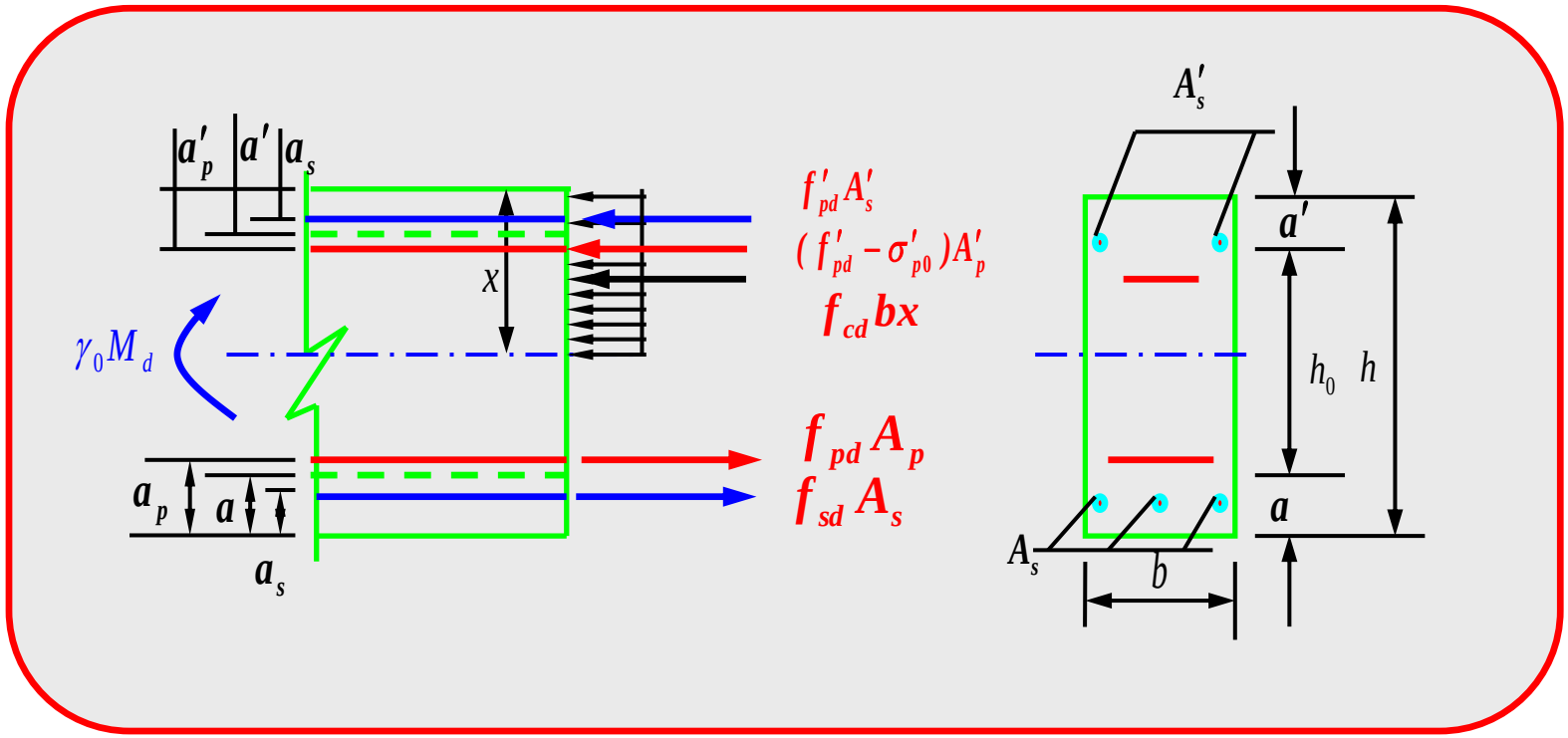
✓先张法构件：

$$\sigma'_{p0} = \sigma'_{con} - \sigma'_l + \sigma'_{l4}$$

✓后张法构件：

$$\sigma'_{p0} = \sigma'_{con} - \sigma'_l + \alpha'_{Ep}\sigma'_{pc}$$

●计算简图


a'_p
a'
a_s
x
$\gamma_0 M_d$
$f'_{pd}A'_s$
$(f'_{pd}-\sigma'_{p0})A'_p$
$f_{cd}bx$
$f_{pd}A_p$
$f_{sd}A_s$
a_p
a
a_s
A'_s
a'
h_0
h
a
A_s
b

- 受压区高度

$$f_{sd}A_s + f_{sp}A_p = f_{cd}bx + f'_{sd}A'_s + (f'_{pd} - \sigma'_{p0})A'_p$$

应满足： $x \le \xi_b h_0$

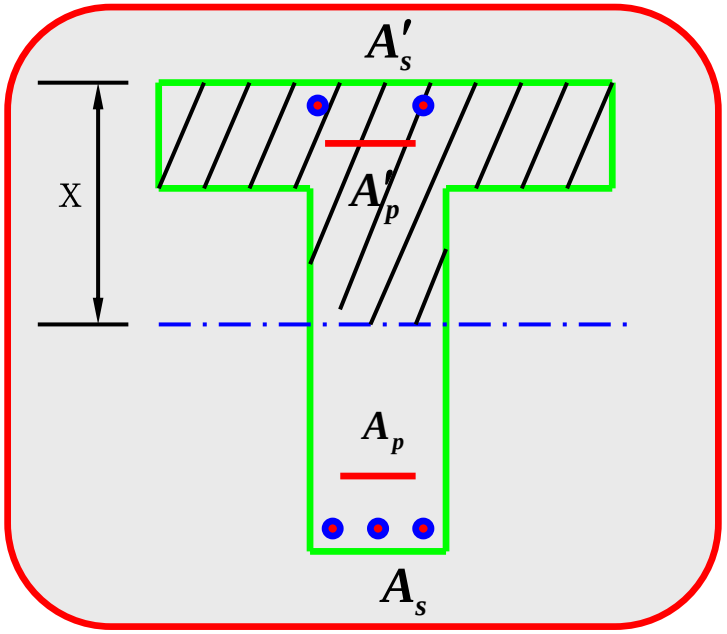
当$f'_{pd} - \sigma'_{p0} > 0$时，应满足$x \ge 2a'$

当$f'_{pd} - \sigma'_{p0} < 0$时，应满足$x \ge 2a'_s$

- 正截面承载力计算

$$\gamma_0 M_d \le M_u = f_{cd}bx(h_0 - \frac{x}{2}) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s) + (f'_{pd} - \sigma'_{p0})A'_p(h_0 - a'_p)$$

➢T形截面受弯构件



●判断T形截面类型

✓截面复核

$$f_{sd}A_s + f_{sp}A_p \le f_{cd}b'_f h'_f + f'_{sd}A's + (f'_{pd} - \sigma'_{p0})A'_p$$

✓截面设计

$$\gamma_0 M_d \le f_{cd}b'_f h'_f (h_0 - \frac{h'_f}{2}) + f'_{sd}A'_s(h_0 - a'_s)$$
$$+ (f'_{pd} - \sigma'_{p0})A'_p(h_0 - a'_p)$$

- 若为第二类T形截面，则重新求受压区的高度

$$f_{sd}A_s + f_{sp}A_p = f_{cd}\left[bx + (b'_f - b)h'_f\right] + f'_{sd}A's + (f'_{pd} - \sigma'_{p0})A'_p$$

- 承载力计算

$$\gamma_0 M_d \le f_{cd}\left[bx(h_0 - \frac{x}{2}) + (b'_f - b)h'_f(h_0 - \frac{h'_f}{2})\right] + f'_{sd}A's(h_0 - a'_s)$$

$$+ (f'_{pd} - \sigma'_{p0})A'_p(h_0 - a'_p)$$

斜截面承载力计算

- 斜截面抗剪承载力计算

$$\gamma_0 V_d \le V_{cs} + V_{pb}$$

- 斜截面内混凝土和箍筋共同的抗剪承载力设计值

$$V_{cs} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 (0.45 \times 10^{-3}) b h_0 \sqrt{(2 + 0.6p)\sqrt{f_{cu,k}}\rho_{sv} f_{sv}}$$

- 预应力弯起钢筋的抗剪承载力设计值。

$$Vsp = (0.75 \times 10^{-3}) f_{sd} \sum A_{sb} \sin\theta_s$$

- 斜截面抗弯承载力计算

预加力计算

- 钢筋的张拉控制应力
  - 钢丝、钢绞线：

$$\sigma_{con} \le 0.75 f_{pk}$$

  - 精轧螺纹钢

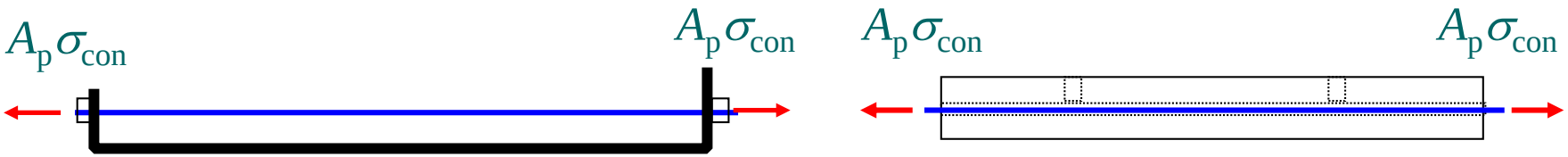
$$\sigma_{con} \le 0.90 f_{pk}$$

预预应力损失原因

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：

1. 摩擦损失：预应力筋张拉过程，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及折点处的摩擦
2. 锚固损失：锚具变形引起预应力筋的回缩、滑移
3. 温差损失：先张法中的热养护引起的温差损失
4. 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。
5. 松弛损失：长度不变，在高应力长期作用下产生松弛
6. 混凝土的收缩和徐变引起的损失

预预应力损失原因



前期损失或

第一批损失

发生在预应力传到混凝土之前

如锚具变形、管道摩擦、台座与钢筋的温差、钢筋松弛损失等

后期损失或

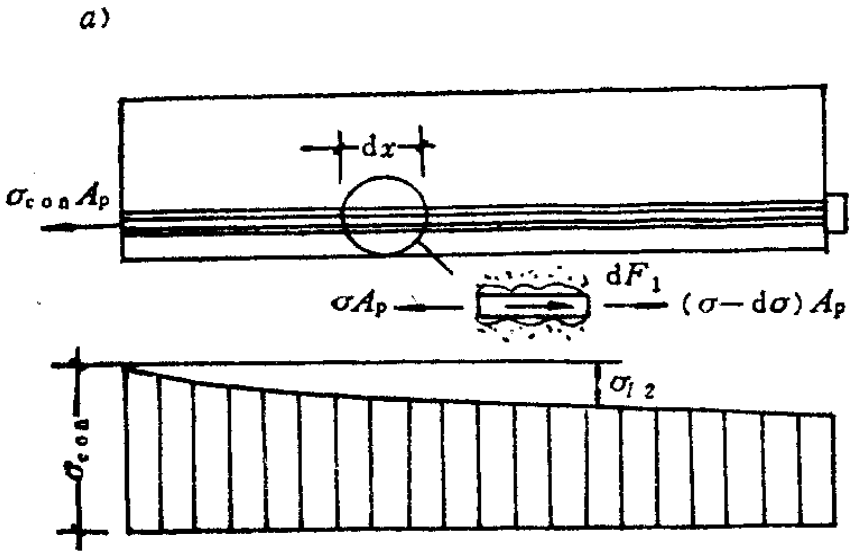
第二批损失

发生在预应力传到混凝土之后

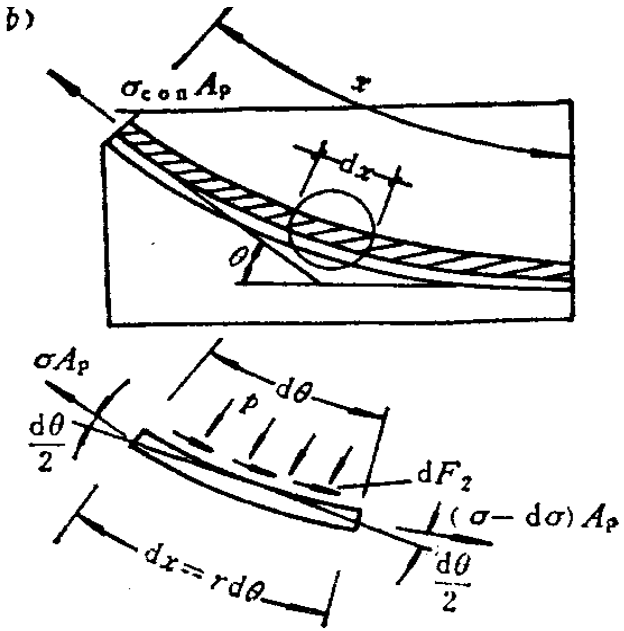
如混凝土收缩徐变、局部挤压损失等

●预应力筋与管道之间的摩擦引起的应力损失

摩擦损失：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



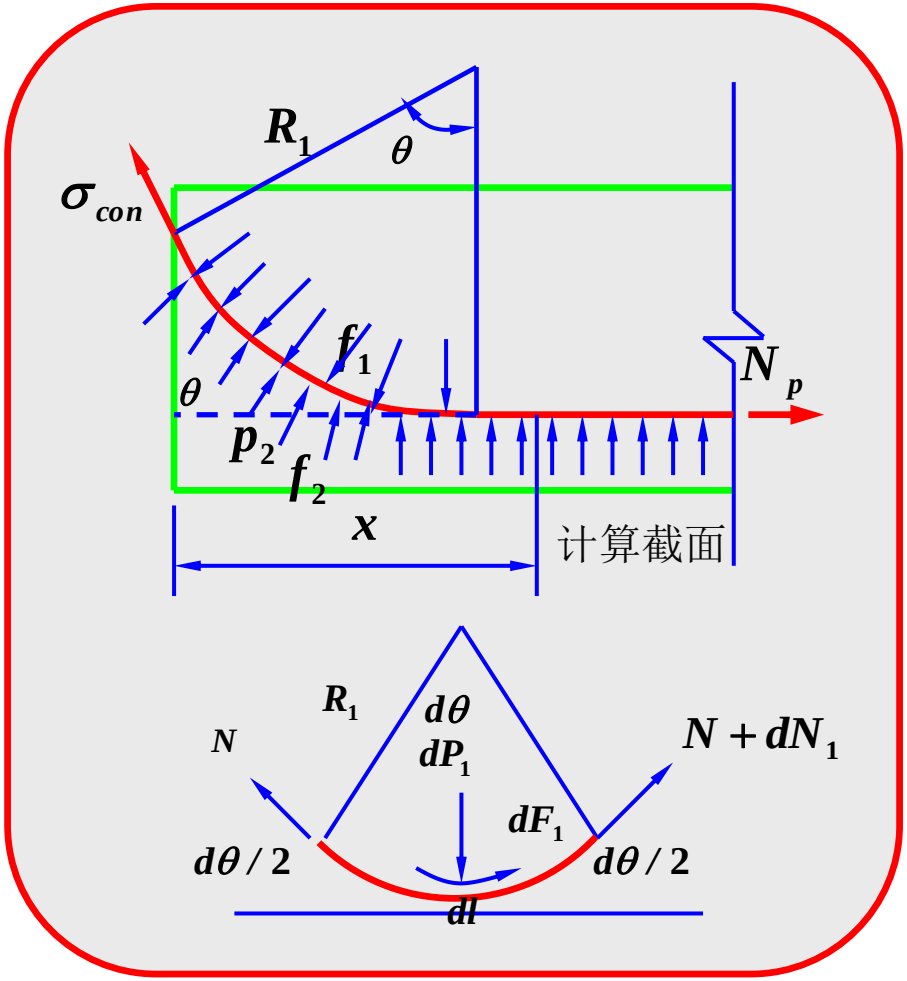
曲线预应力筋

●预应力筋与管道之间的摩擦引起的应力损失

（1）弯道影响引起的摩阻力

$$dP_1 = p_1 dl = N\sin\frac{d\theta}{2} + (N + dN_1)\sin\frac{d\theta}{2} \approx N d\theta$$

$$dF_1 = \mu dP_1 = \mu N d\theta$$



(2)管道偏差引起的摩擦力

$$dP_2 = p_2 dl = N\frac{dl}{R_2} \qquad dF_2 = \mu dP_2 \approx \mu N\frac{dl}{R_2} = k\cdot N\cdot dl = -dN_2$$

（3）弯道部分总的摩阻力

$$dF = dF_1 + dF_2 = N(\mu d\theta + kdl)$$

（4）钢筋计算截面处因摩擦力引起的应力损失

$$dN_1 + dN_2 + dF_1 + dF_2 = 0$$

$$dN = dN_1 + dN_2 = -dF_1 - dF_2 = -N(\mu\cdot d\theta + k\cdot dl)$$

$$\frac{dN}{N} = -\mu\cdot d\theta + k\cdot dl) \xrightarrow{\text{积分}} \ln N = -(\mu\cdot\theta + k\cdot l) + c$$

$$N = N_{con}\cdot e^{-(\mu\theta + kl)} \longrightarrow N = N_{con}\cdot e^{-(\mu\theta + kx)}$$

$$\sigma_{l1} = \frac{N_{con} - N_x}{A_p} = \sigma_{con}\left[1 - e^{-(\mu\theta + kx)}\right]$$

- 减小σ_{11}的措施：

✓采用两端张拉，减小θ值及管道的长度x值。

✓采用超张拉。

- 钢绞线束：

0 → 初应力（0.1 ~ 0.15σ_{con}左右）

↓

σ_{con}（锚固）← 1.05σ_{con}（持荷2分钟）

- 钢丝束

0 → 初应力（0.1 ~ 0.15σ_{con}左右）

↓

σ_{con}（锚固）← 0 ← 1.05σ_{con}（持荷2分钟）

●锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的应力损失

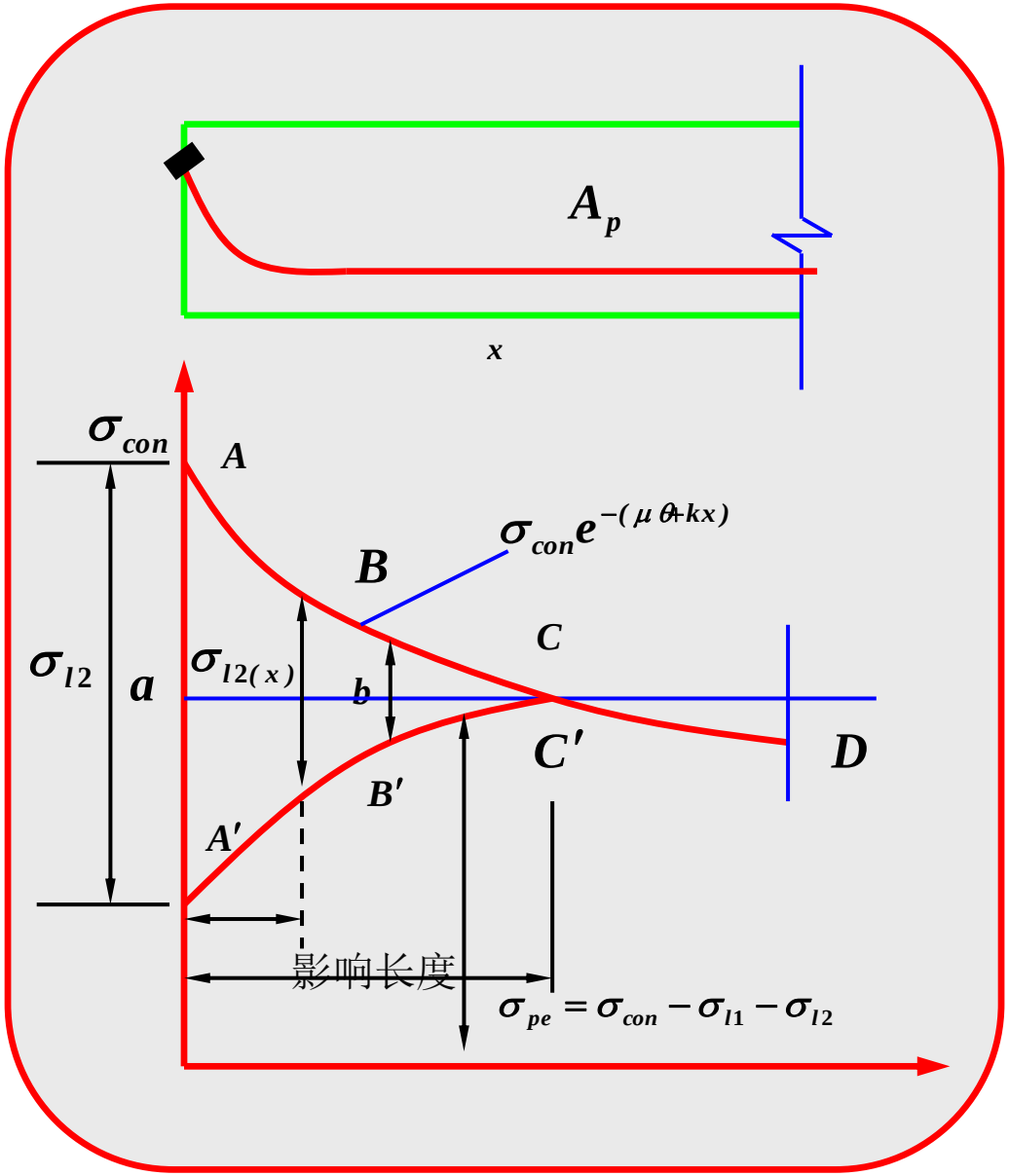
✓直线形管道

$$\sigma_{l2} = \frac{\sum \Delta L}{l} E_p$$

✓曲线形管道

$$\sum \Delta L = \int_a^c \varepsilon dx = \frac{1}{E_p} \int_a^c \sigma_{l2(x)} dx$$

$$\int_a^c \sigma_{l2(x)} dx = E_p \sum \Delta l$$



●简化计算方法

✓影响长度

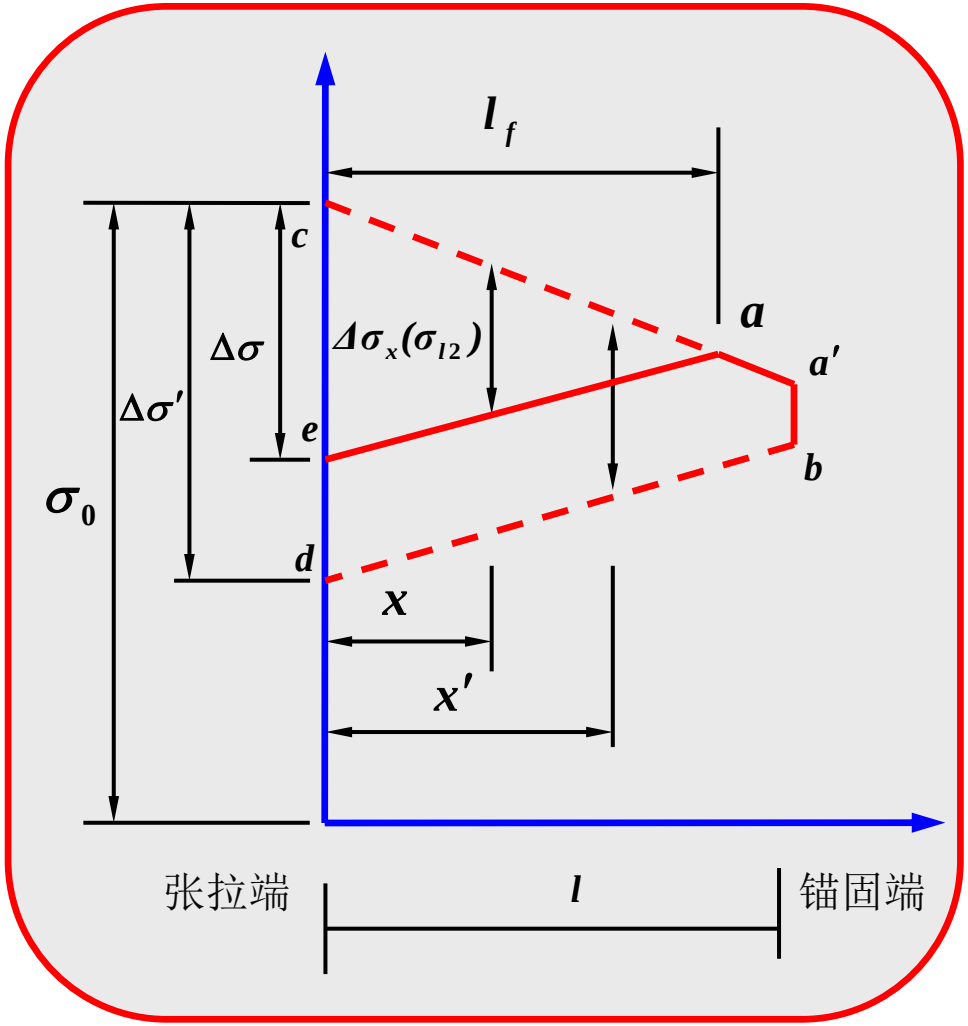
$$l_f = \sqrt{\frac{\sum \Delta L \cdot E_p}{\Delta\sigma_d}}$$

✓若 $l_f \le l$ 时

$$\Delta\sigma_x(\sigma_{l2}) = \Delta\sigma \cdot \frac{l_f - x}{l_f}$$

✓若 $l_f > l$ 时

$$\Delta\sigma'_x(\sigma_{l2}) = \Delta\sigma' - 2x'\Delta\sigma_d$$



锚具变形和钢筋内缩值Δl（mm）

锚 具 类 别		Δl
支承式锚具（钢丝束镦头锚具等）： 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

- **减小方法**
  - ✓**采用超张拉**
  - ✓**选用变形小的锚具**

➢钢筋与台座之间的温差引起的预应力损失

温差损失，亦即热养护损失σ_{l3}－钢筋和台座的温差引起的应力损失

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，但张拉台座是固定不动的，即钢筋松了——产生温差损失σ_{l3}。

降温时，混凝土达到了一定强度，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。

➢钢筋与台座之间的温差引起的预应力损失

$$\Delta l_t = \alpha \bullet (t_2 - t_1) \bullet l$$

$$\sigma_{l3} = \frac{\Delta l_t}{l} \bullet E_p = \alpha \bullet (t_2 - t_1) \bullet E_p$$

$$\sigma_{l3} = \frac{\Delta l_t}{l} \bullet E_p = 2(t_2 - t_1)$$

为了减小温差引起的应力损失

可以采用二次升温的养护方法：

初次升温一般在 20°C 以内，待混凝土达到一定强度能够阻止钢筋在混凝土中自由滑移后，再将温度升温进行养护。

钢筋和混凝土在第二次升温时一起变形，不会因第二次升温而引起应力损失。

➢混凝土的弹性压缩引起的应力损失

先张法构件放张时，预应力构件受压产生压缩变形，则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_{l4}为：

$$\sigma_{l4} = \varepsilon_p \cdot E_p = \frac{E_p}{E_c}\sigma_{pc} = \alpha_E \sigma_{pc}$$

$$\sigma_{pc} = \frac{N_{p0}}{A_0} + \frac{N_{p0} e_p^2}{I_0}$$

➢混凝土的弹性压缩引起的应力损失

后张法，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。

分批张拉锚固时，产生分批张拉应力损失σ_{l4}。《公路桥规》，规定σ_{l4}按下式计算：

$$\boxed{\sigma_{l4} = \alpha_{Ep} \sum \Delta\sigma_{pc}}$$

$\Delta\sigma_{pc}$ 在计算截面上先张拉的钢筋重心处，由后张拉各批钢筋所产生的混凝土法向应力之和。

✓取按应力计算需要控制的截面作为全梁平均截面进行计算，其余截面不另计算。简支梁可取1/4截面。

✓假定同一截面内所有的预应力钢筋，都集中布置于其合力作用点处，并假定各批预应力钢筋的张拉力都相等，其值等于各批钢筋张拉力的平均值。

$$\Delta\sigma_{pc} = \frac{N_p}{m}\left(\frac{1}{A_n} + \frac{e_{pn} \cdot y_i}{I_n}\right)$$

$$\sum \Delta\sigma_{pc} = m\Delta\sigma_{pc} = \sigma_{pc}$$

✓以同一截面上全部预应力筋重心处混凝土弹性压缩应力损失的总平均值，作为各批钢筋由混凝土弹性压缩引起的应力损失值。

$$\sigma_{l4(i)} = (m-i) \bullet \alpha_{Ep} \Delta\sigma_{pc}$$

$$\sigma_{l4} = \frac{\sigma_{l4(1)} + \sigma_{l4(m)}}{2} = \frac{(m-1)}{2} \bullet \alpha_{Ep} \Delta\sigma_{pc}$$

$$\sigma_{l4} = \frac{(m-1)}{2m} \bullet \alpha_{Ep} \sigma_{pc}$$

➢钢筋的应力松弛引起的预应力损失

- 特征：
  - ✓钢筋的初应力越高，其应力损失愈甚。
  - ✓钢筋的松弛量大小主要与钢筋的品质有关。
  - ✓钢筋的松弛与时间有关。
  - ✓钢筋的松弛随温度的增加而增加。
- 松弛引起的应力损失。
  - ✓精轧螺纹钢

    一次张拉：$\sigma_{l5} = 0.05\sigma_{con}$

    超张拉：$\sigma_{l5} = 0.035\sigma_{con}$
  - ✓预应力钢丝、钢绞线 $\sigma_{l5} = \psi \cdot \xi \cdot (0.52\frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26) \cdot \sigma_{pe}$

➢混凝土收缩和徐变引起的预应力损失

- 受拉区预应力钢筋的预应力损失值为：

$$\sigma_{l6}(t)=\frac{0.9\left[E_p\varepsilon_{cs}(t,t_0)+\alpha_{Ep}\sigma_{pc}\phi(t,t_0)\right]}{1+15\rho\rho_{ps}}$$

- 受压区预应力钢筋的预应力损失值为：

$$\sigma'_{l6}(t)=\frac{0.9\left[E_p\varepsilon_{cs}(t,t_0)+\alpha_{Ep}\sigma'_{pc}\phi(t,t_0)\right]}{1+15\rho'\rho'_{ps}}$$

钢筋的有效预应力计算

- 传力锚固时的损失
  - 先张法构件 $\sigma_{lI} = \sigma_{l2} + \sigma_{l3} + \sigma_{l4} + 0.5\sigma_{l5}$
  - 后张法构件 $\sigma_{lI} = \sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4}$
- 传力锚固后的损失
  - 先张法构件 $\sigma_{lII} = 0.5\sigma_{l5} + \sigma_{l6}$
  - 后张法构件 $\sigma_{lII} = \sigma_{l5} + \sigma_{l6}$
- 有效预应力
  - 预加力阶段 $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{lI}$
  - 使用阶段 $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - (\sigma_{lI} + \sigma_{lII})$

预应力混凝土受弯构件的应力计算

短暂状况应力计算

- 计算阶段　　制作、安装、运输阶段
- 作用种类　　预应力、构件自重、施工荷载
- 验算位置　　正截面、斜截面
- 预加力阶段的计算
  - 作用效应及特征：N_p最大，M_{G1}（外荷载最小）
  - 控制截面的位置：

    对于简支梁而言，其受力最不利截面往往在支点附近。特别是直线形配筋的等截面简支梁，支点上缘的拉应力，常常成为计算的控制。

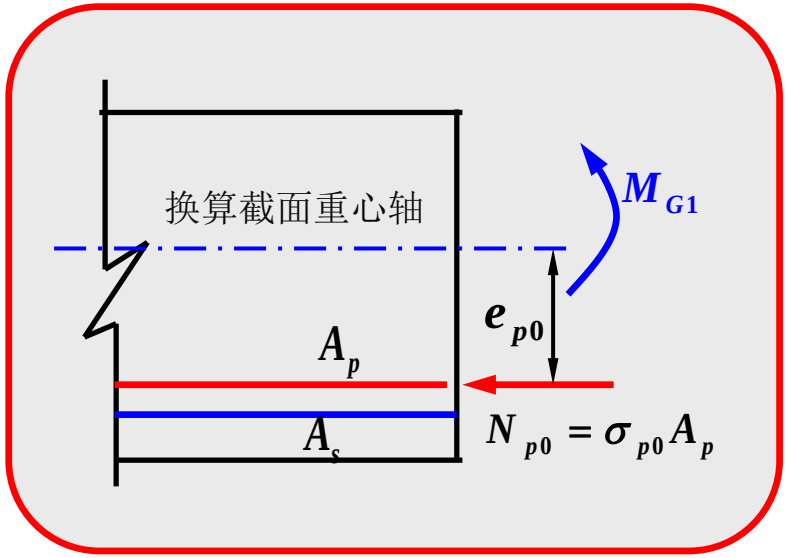
➢先张法构件

$$\sigma_{pc}=\frac{N_{p0}}{A_0}+\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{I_0}\cdot y_0$$

$$\sigma_{pt}=\frac{N_{p0}}{A_0}-\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{I_0}\cdot y_0$$

$$N_{p0}=\sigma_{p0}A_p,\sigma_{p0}=\sigma_{con}-\sigma_{lI}+\sigma_{l4}$$

$$\sigma_{G1}=\pm\frac{M_{G1}}{I_0}\cdot y_0$$



预加力阶段截面上、下缘正应力。

$$\sigma_{ct}^{t}=\frac{N_{p0}}{A_0}-\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{W_{0u}}+\frac{M_{G1}}{W_{0u}}$$

$$\sigma_{cc}^{t}=\frac{N_{p0}}{A_0}+\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{W_{0b}}-\frac{M_{G1}}{W_{0b}}$$

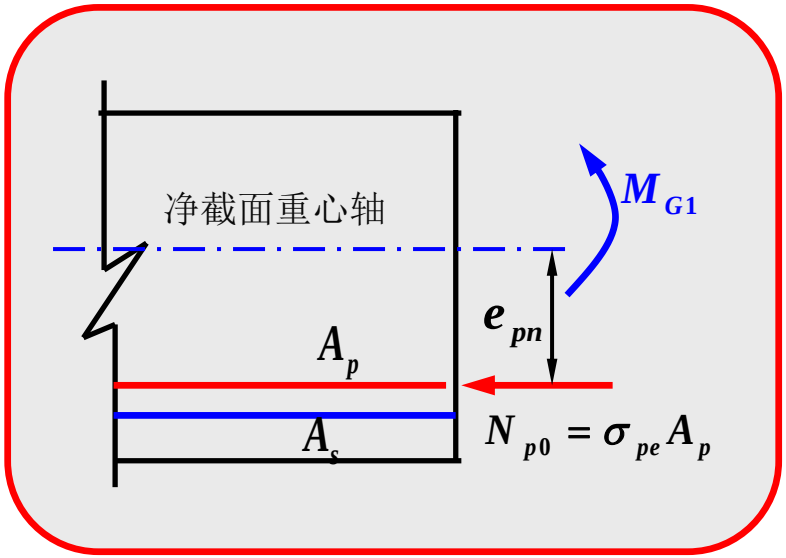
➢后张法构件

$$\sigma_{pc}=\frac{N_p}{A_n}+\frac{N_p\cdot e_{pn}}{I_n}\cdot y_n$$

$$\sigma_{pt}=\frac{N_p}{A_n}-\frac{N_p\cdot e_{pn}}{I_n}\cdot y_n$$

$$N_p=\sigma_{pe}A_p,\sigma_{pe}=\sigma_{con}-\sigma_{lI}$$

$$\sigma_{G1}=\pm\frac{M_{G1}}{I_n}\cdot y_n$$



预加力阶段截面上、下缘正应力。

$$\sigma_{ct}^{t}=\frac{N_p}{A_n}-\frac{N_p\cdot e_{pn}}{W_{nu}}+\frac{M_{G1}}{W_{nu}}$$

$$\sigma_{cc}^{t}=\frac{N_p}{A_n}+\frac{N_p\cdot e_{pn}}{W_{nu}}-\frac{M_{G1}}{W_{nu}}$$

➢施工阶段混凝土的限制应力

- 混凝土的压应力。

$$\sigma_{cc}^{t} \le 0.70 f_{ck}'$$

- 混凝土的拉应力。

当$\sigma_{ct}^{t} \le 0.70 f_{tk}'$时，预拉区应配置其配筋率不小于0.2%的纵向钢筋。

当σ_{ct}^{t}=$1.5 f_{tk}'$时，预拉区应配置其配筋率不小于0.4%的纵向钢筋。

当$0.70 f_{tk}' \le \sigma_{ct}^{t} \le 1.5 f_{tk}'$时，预拉区应配置的纵向钢筋配筋率在0.2%—0.4%直线内插。

持久状况的应力计算

- 计算内容

计算使用阶段截面混凝土法向压应力、混凝土的主应力和受拉区钢筋的拉应力。

- 作用的特点

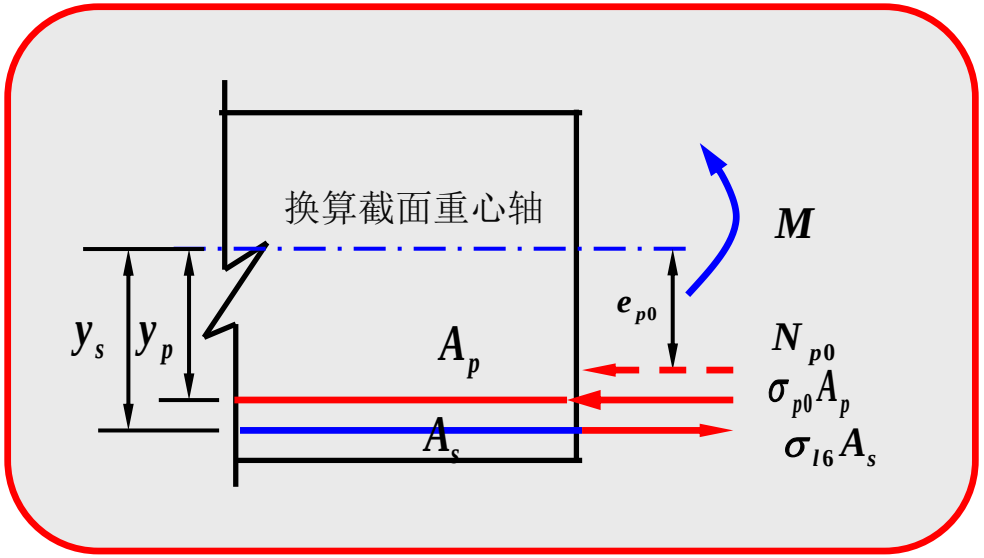
预应力损失已全部完成，有效预应力最小，计算时作用（荷载）取标准值，汽车荷载计入冲击系数，预加力效应应考虑在内，所有荷载分项系数取1.0。

- 计算位置

取控制截面进行计算。

➢正应力计算

●先张法构件



✓构件上缘产生的法向压应力为：

$$\sigma_{cu}=\sigma_{pt}+\sigma_{kc}=\left(\frac{N_{p0}}{A_0}-\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{W_{0u}}\right)+\frac{M_{G1}}{W_{0u}}+\frac{M_{G2}}{W_{0u}}+\frac{M_Q}{W_{0u}}$$

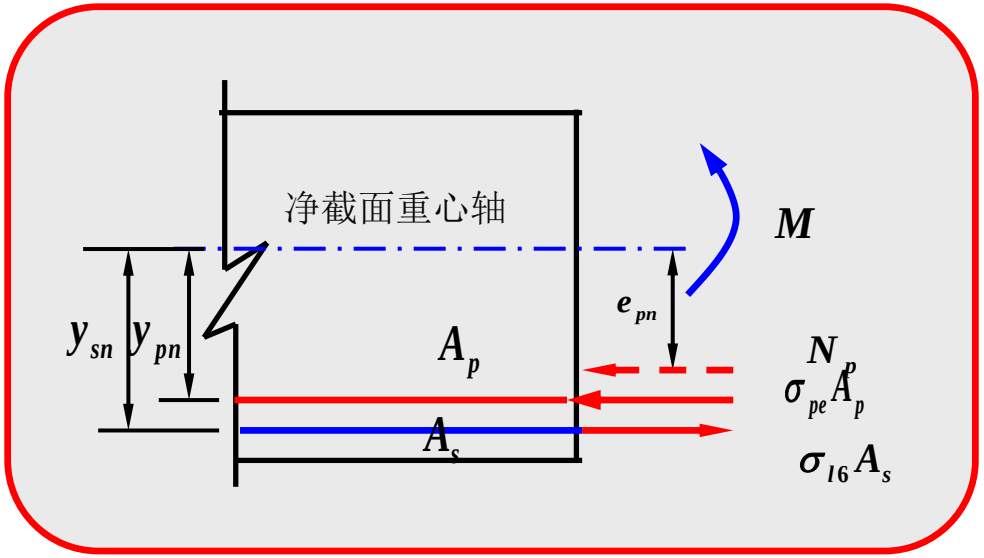
$$N_{p0}=\sigma_{p0}A_p-\sigma_{l6}A_s \qquad e_{p0}=\frac{\sigma_{p0}A_p y_p-\sigma_{l6}A_s y_s}{\sigma_{p0}A_p-\sigma_{l6}A_s}$$

✓预应力钢筋的最大拉力

$$\sigma_{p,max}=\sigma_{pe}+\alpha_{Ep}\left(\frac{M_{G1}}{I_0}+\frac{M_{G2}}{I_0}+\frac{M_Q}{I_0}\right)\bullet y_{p0}$$

●后张法构件

✓构件上缘产生的法向压应力为：



$$\sigma_{cu}=\sigma_{pt}+\sigma_{kc}=\left(\frac{N_p}{A_n}-\frac{N_{pn}\cdot e_{pn}}{W_{nu}}\right)+\frac{M_{G1}}{W_{nu}}+\frac{M_{G2}}{W_{0u}}+\frac{M_Q}{W_{0u}}$$

$$N_p=\sigma_{pe}A_p-\sigma_{l6}A_s \qquad e_{pn}=\frac{\sigma_{pe}A_p y_{pn}-\sigma_{l6}A_s y_{sn}}{\sigma_{pe}A_p-\sigma_{l6}A_s}$$

✓预应力钢筋的最大拉力

$$\sigma_{p,max}=\sigma_{pe}+\alpha_{Ep}\frac{M_{G2}+M_Q}{I_0}\bullet y_{0p}$$

➢混凝土主应力计算

$$\left.\begin{matrix}\sigma_{tp}\\ \sigma_{cp}\end{matrix}\right\}=\frac{\sigma_{cx}+\sigma_{cy}}{2}\mp\sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx}-\sigma_{cy}}{2}\right)^2+\tau^2}$$

- 先张法 $$\sigma_{cx}=\frac{N_{p0}}{A_0}-\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{I_0}\cdot y_0+\frac{M_{G1}+M_{G2}+M_Q}{I_0}\cdot y_0$$
- 后张法 $$\sigma_{cx}=\frac{N_p}{A_n}-\frac{N_{pn}\cdot e_{pn}}{I_n}\cdot y_n+\frac{M_{G1}}{I_n}\cdot y_n+\frac{M_{G2}+M_Q}{I_0}\cdot y_0$$

$$\sigma_{cy}=0.6\frac{n\sigma'_{pe}A_{pv}}{b\cdot s_v}$$

- 先张法 $$\tau=\frac{V_{G1}S_0}{bI_0}+\frac{(V_{G2}+V_Q)S_0}{bI_0}$$
- 后张法 $$\tau=\frac{V_{G1}S_n}{bI_n}+\frac{(V_{G2}+V_Q)S_0}{bI_0}-\frac{\sum\sigma''_{pe}A_{pb}\sin\theta_p S_n}{bI_n}$$

➢持久状况的钢筋和混凝土的应力限值

- 使用阶段预应力混凝土受弯构件正截面混凝土的最大压应力，应满足：

$$\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \le 0.5 f_{ck}$$

- 使用阶段受拉区预应力钢筋的最大拉应力值

  - ✓钢丝、钢绞线 $\sigma_{pe} + \sigma_p \le 0.65 f_{pk}$

  - ✓精轧螺纹钢 $\sigma_{pe} + \sigma_p \le 0.80 f_{pk}$

- 使用阶段混凝土的主应力限值

$\sigma_{cp} \le 0.6 f_{ck}$

$\sigma_{tp} \le 0.5 f_{tk}$的区段，按构造配置箍筋。

$\sigma_{tp} > 0.5 f_{tk}$的区段，箍筋的间距为 $s_v = f_{sk} A_{sv} / \sigma_{tp} b$

预应力混凝土构件的抗裂验算

正截面抗裂性验算

- 作用（荷载）短期效应组合下构件边缘混凝土的正应力
  - 预加力作用下构件抗裂验算边缘混凝土的预压应力。
    - ✓先张法构件 $$\sigma_{pc}=\frac{N_{p0}}{A_0}+\frac{N_{p0}\cdot e_{p0}}{W_0}$$
    - ✓后张法构件 $$\sigma_{pc}=\frac{N_p}{A_n}+\frac{N_p\cdot e_{pn}}{W_n}$$

●作用的短期效应产生的构件抗裂验算边缘混凝土的法向拉应力：

✓先张法构件 $$\sigma_{st} = \frac{M_s}{W} = \frac{M_{G1} + M_{G2} + M_{Qs}}{W_0}$$

✓后张法构件 $$\sigma_{st} = \frac{M_s}{W} = \frac{M_{G1}}{W_n} + \frac{M_{G2} + M_{Qs}}{W_0}$$

●长期效应组合下构件抗裂验算边缘混凝土的法向拉应力

➢混凝土正应力限值

- 全预应力混凝土构件，在作用的短期效应组合下：

$$\sigma_{st} - 0.85\sigma_{pc} \le 0$$

- A类部分预应力混凝土构件，在作用的短期效应组合下：

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \le 0.7 f_{tk}$$

- A类部分预应力混凝土构件，在作用的长期效应组合下：

$$\sigma_{lt} - \sigma_{pc} \le 0$$

斜截面抗裂性验算

变形验算

- 预加力引起的上拱度 $$\delta_{pe}=\int_0^l \frac{M_{pe}\cdot \overline{M}_x}{B_0}dx$$

- 使用荷载作用下的挠度 $$\omega_{Ms}=\frac{\alpha M_s l^2}{0.95E_c I_0}$$

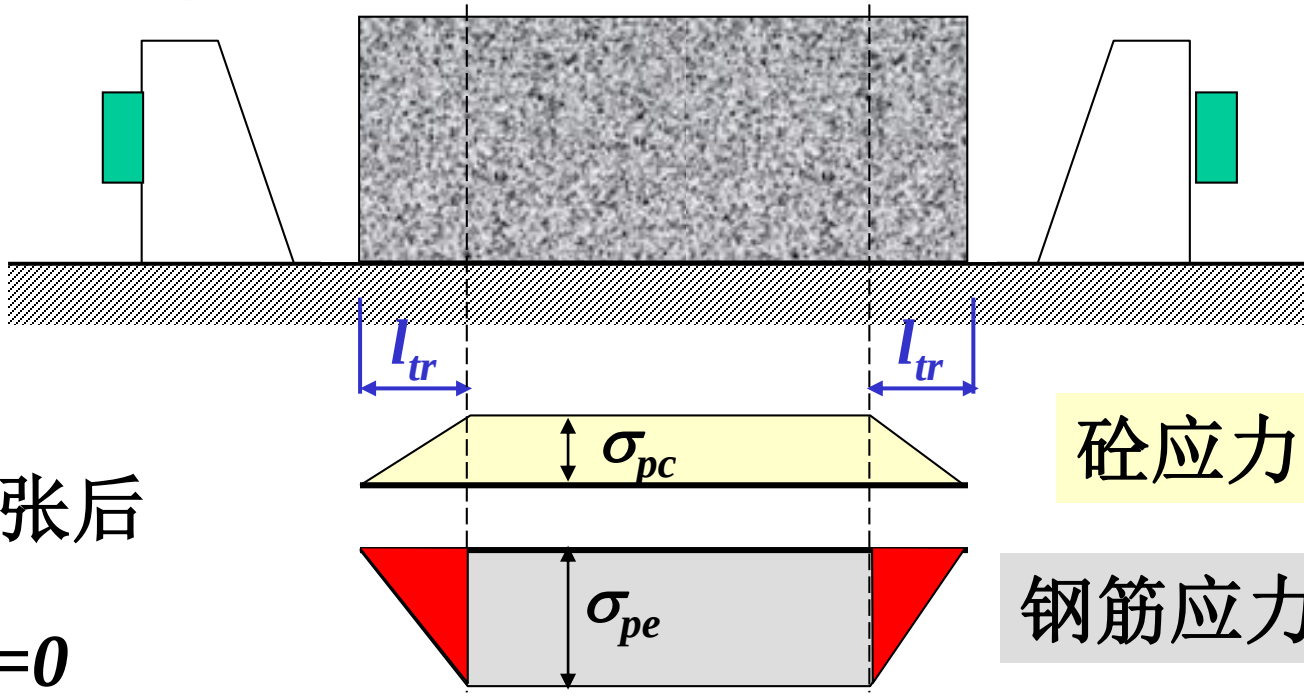
- 预应力混凝土受弯构件的总挠度
  - 荷载短期效应组合下的总挠度 $\omega_s=-\delta_{pe}+\omega_{Ms}$
  - 考虑长期效应的影响的挠度值 $\omega_s=-\eta_{\theta,pe}\delta_{pe}+\eta_{\theta,Ms}\omega_{Ms}$

- 预拱度的设置

$$\Delta=\eta_{\theta,Ms}\omega_{Ms}-\eta_{\theta,pe}\delta_{pe}$$

端部锚固区计算

一、预应力的传递长度l_{tr}



1、 l_{tr}的概念

先张法构件放张后

构件端部： $\sigma_c=0$

$\sigma_p=0$

经过某一长度l_{tr}后： $\sigma_c=\sigma_{pc}$

$\sigma_p=\sigma_{pe}$

2、 l_{tr}的计算

$$l_{tr} = \alpha \frac{\sigma_{pe}}{f'_{tk}} d$$

σ_{pe}--放张时预应力钢筋的有效预应力

α--预应力钢筋的外形系数，

与计算l_a时的取值相同。

3、 l_{tr}在设计中的应用

对先张法构件端部进行正、斜截面抗裂验算时，应考虑预应力钢筋在l_{tr}范围内的应力值的变化。

4、预应力钢筋的锚固长度l_a

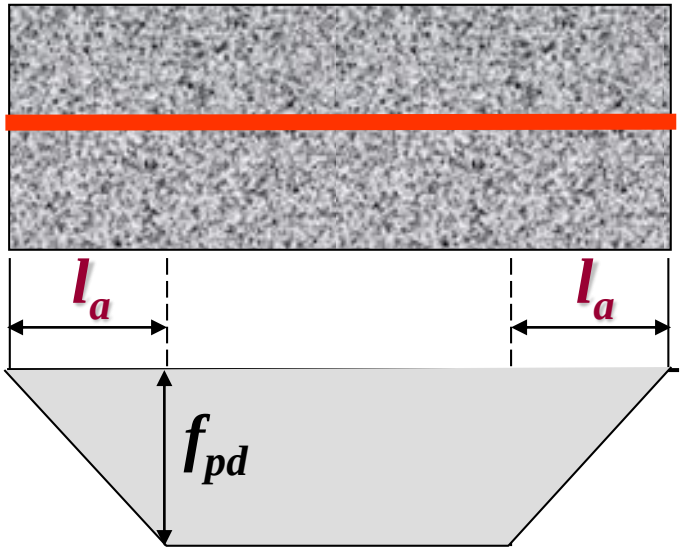
（1） l_a的计算

$$l_a = \alpha \frac{f_{pd}}{f_t} d$$

（2） l_a在设计中的应用

计算先张法构件锚固区的正、斜截面受弯承载力时，l_a范围内的预应力钢筋抗拉强度设计值：

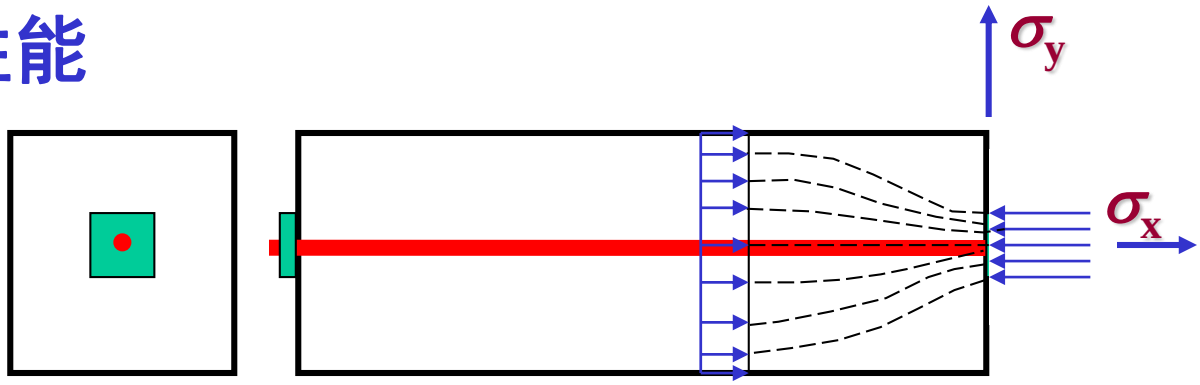
在锚固起点处取为零；
在锚固终点处取为f_{pd}；
其间按线性插值。



二、锚固区的局部受压

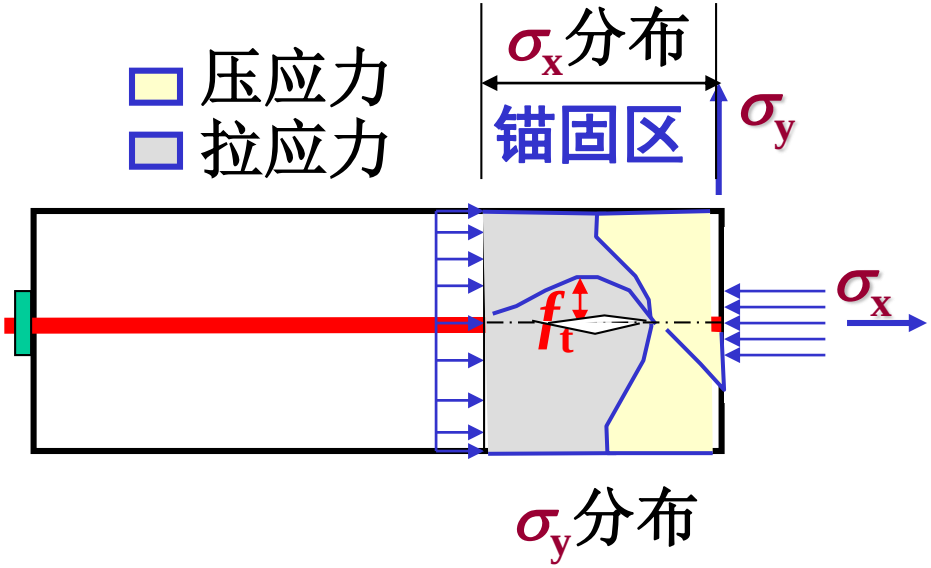
1、锚固区的受力性能

后张法构件，
张拉完毕时



当σ_y达f_t时，

出现纵向裂缝，
最后因局部压坏
而破坏。



2、局部受压区的截面尺寸限制条件

（1）限制条件

$$F_l = 1.35\beta_c \beta_l f_c A_{ln}$$

其中$F_l = 1.2\sigma_{con} A_p$

$$\beta_c = \begin{cases} 1.0 (\le C50) \\ 0.8 (= C80) \end{cases}$$

（2）β_l---局部受压的强度提高系数

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}}$$

其中A_l—局部受压面积；

预应力混凝土简支梁设计

一、设计计算步骤（后张法为例）

根据设计要求，初步选定构件截面形式及确定截面尺寸；

计算控制截面最大设计内力（弯矩和剪力）；

估算预应力钢筋数量，并进行合理布置；

计算主梁截面几何特性；

进行正截面及斜截面承载能力验算；

预应力混凝土简支梁设计

确定张拉控制应力，计算预应力损失及有效预应力；

进行施工阶段和使用阶段的应力验算；

进行正截面与斜截面的抗裂验算

主梁的变形计算；

进行梁端部局部承压与锚固区设计。

二、预应力混凝土简支梁截面设计

1.预应力混凝土梁抗弯效率指标

$$\rho = \frac{K_u + K_b}{h}$$

ρ—抗弯效率指标

K_u—混凝土截面上核心距：$K_u=W_b/A$

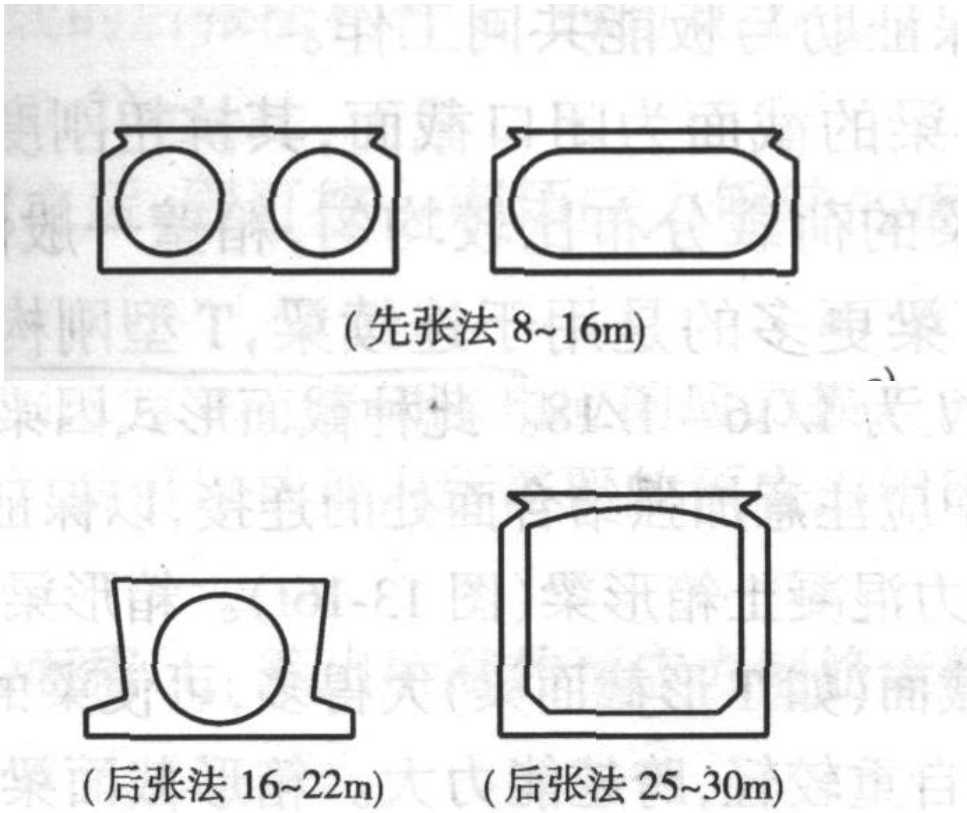
W_b—构件全截面对截面下缘的弹性抵抗矩。

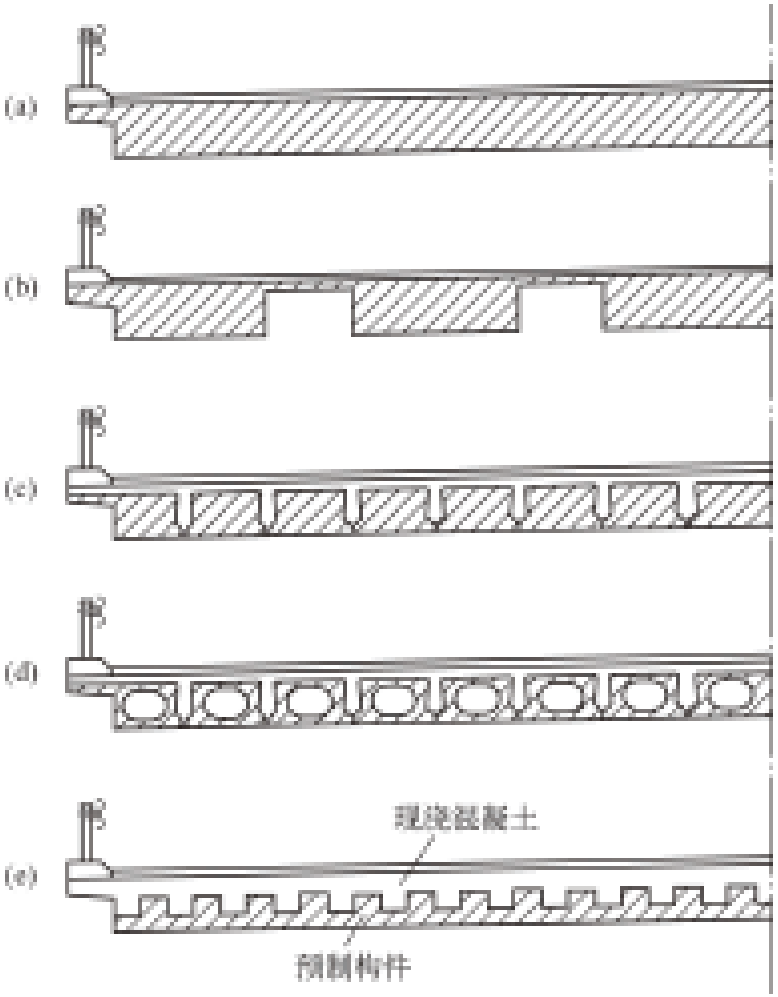
K_b—混凝土截面下核心距：$K_b=W_u/A$

W_u—构件全截面对截面上缘的弹性抵抗矩。

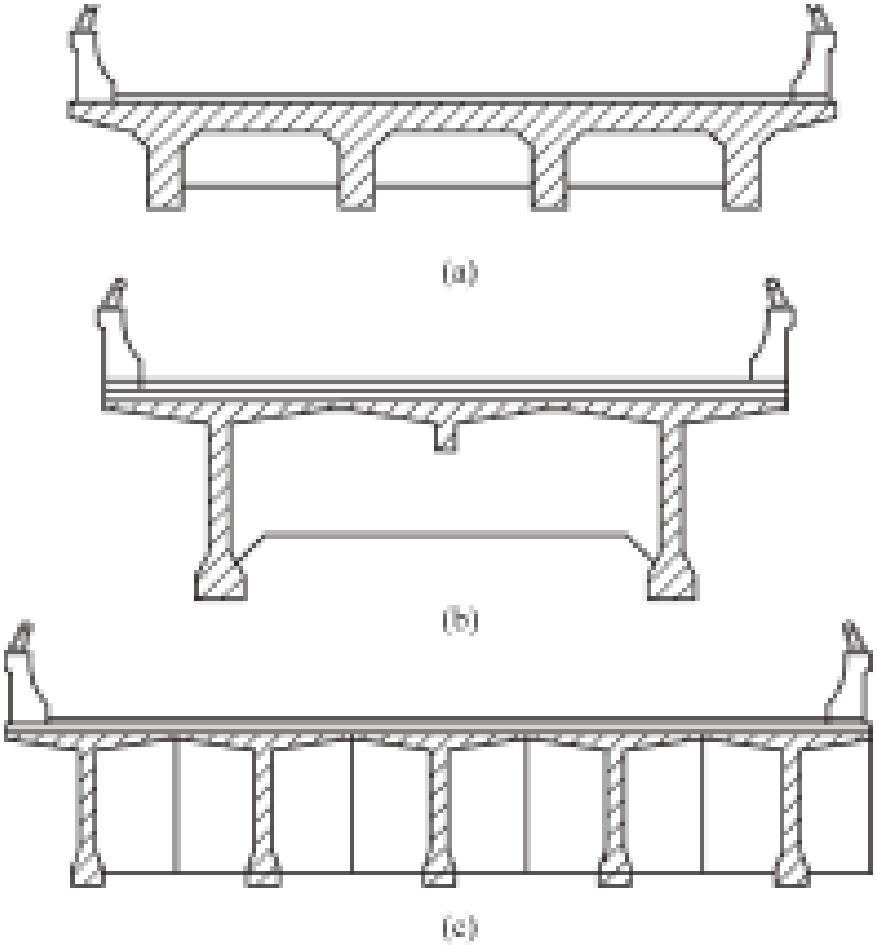
2.预应力混凝土常用的截面形式

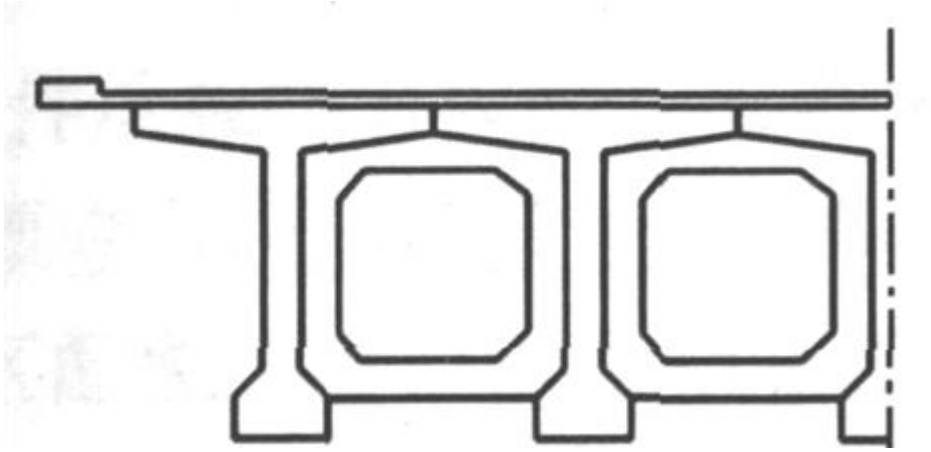
1）预应力混凝土空心板

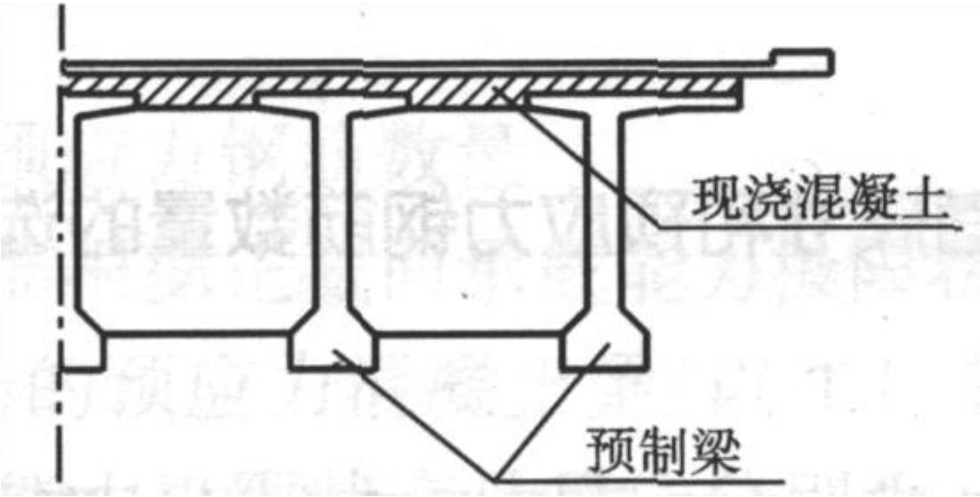




2）预应力混凝土T梁



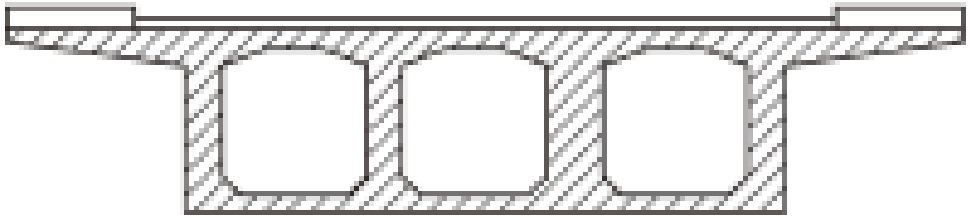




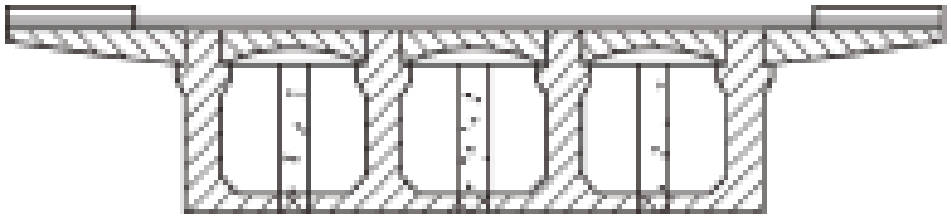
22 10:56AM

3）预应力混凝土箱梁

(a)



(b)



(c)

22 10:53AM

三、截面尺寸和预应力钢筋数量的选定

1. 截面尺寸

截面尺寸的选择，一般是根据已有的设计资料、经验方法及桥梁设计中具体要求事先拟定的，然后根据有关规范的要求进行配筋验算。

2. 预应力钢筋数量的估算

估算方法：　首先根据结构正截面抗裂性确定预应力钢筋的数量，然后再由构件承载能力极限状态要求确定非预应力钢筋的数量。

（1）按构件正截面抗裂性要求估算预应力钢筋的数量

全预应力混凝土梁满足作用短期效应组合抗裂验算所需的有效预应力

$$N_{pe} \geq \frac{\frac{M_s}{W}}{0.85(\frac{1}{A}+\frac{e_p}{W})} \qquad 13\text{-}122$$

N_{pe}—使用阶段预应力钢筋永存应力的合力。

e_p—预应力钢筋的合力作用点至截面重心轴的距离。

W—构件全截面对抗裂验算边缘弹性抵抗矩。

A类部分预应力混凝土构件满足作用短期效应组合抗裂验算所需的有效预应力

$$N_{pe} \geq \frac{\frac{M_S}{W} - 0.7 f_{tk}}{(\frac{1}{A} + \frac{e_p}{W})} \qquad 13\text{-}123$$

求得N_{pe}后，再确定适当的张拉控制应力并扣除相应的预应力损失，就可以估算出所需要的预应力钢筋的总面积A_p

$$A_p = \frac{N_{pe}}{(1-0.2)\sigma_{con}}$$

根据A_p可以求得钢筋的束数

$$n_1 = \frac{A_p}{A_{p1}} \qquad 13\text{-}124$$

（2）按构件承载能力极限状态要求估算非预应力钢筋的数量。

第一类T形 截面

$$f_{sd}A_s + f_{pd}A_p = f_{cd}b'_f x \qquad \gamma_0 M_d \le f_{cd}b'_f x(h_0 - \frac{x}{2})$$

第二类T形截面

$$f_{cd}bx + f_{cd}(b'_f - b)h'_f = f_{sd}A_s + f_{pd}A_p$$

$$\gamma_0 M_d \le f_{cd}bx(h_0 - \frac{x}{2}) + f_{cd}(b'_f - b)h'_f(h_0 - \frac{h'_f}{2})$$

估算时，先假定为第一类的T形梁，如果$x \le h_f'$，则受拉区非预应力钢筋的截面面积为

$$A_s = \frac{f_{cd} b_f' x - f_{pd} A_p}{f_{sd}} \qquad 13\text{-}129$$

如果算得的$x > h_f'$且$x \le \xi_b h_0$的限制条件，则可得到受拉区非预应力钢筋的截面面积为

$$A_s = \frac{f_{cd}[bx + (b_f' - b)h_f'] - f_{pd} A_p}{f_{sd}} \qquad 13\text{-}130$$

如果算得的$x > h_f'$且$x > \xi_b h_0$的限制条件，则需要修改截面尺寸，增加梁高。

（3）最小配筋率的要求

《公路桥规》规定，预应力混凝土受弯构件的最小筋率应满足的要求

$$\boxed{\frac{M_u}{M_{cr}} \geq 1.0} \qquad 13\text{-}131$$

M_{cr}—受弯构件正截面开裂弯矩值；M_{cr}的计算式

$$\boxed{M_{cr} = (\sigma_{pc} + \gamma f_{tk}) W_0}$$

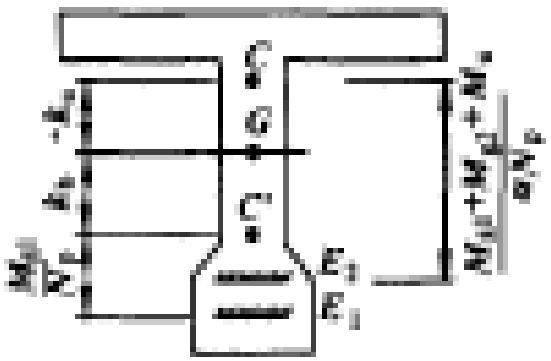
σ_{pc}—为扣除全部预应力损失预应力钢筋和普通钢筋合力在抗裂边缘产生的混凝土预压应力。

γ—计算参 数 $\boxed{\gamma = 2S_0 / W_0}$

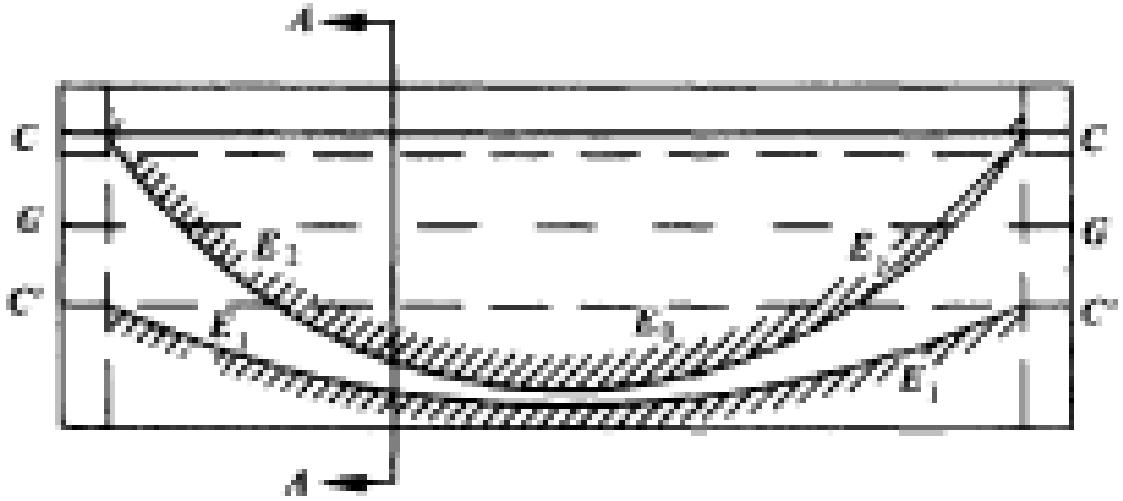
四、 预应力钢筋的布置

1.束 界

•根据全预应力混凝土构件要求使其上、下缘混凝土不出现拉应力的原则，可以按照在最小外荷载（构件的一期恒载），和最不利使用荷载（即一期恒载，二期恒载和可变荷载）作用下的两种情况，分别确定N_p在各个截面上偏心距的极限值。由此可以绘出如图13-7所示的两条e_p的限值线E_1和E_2。只要N_p（近似为预应力钢筋截面的重心）的位置落在由E_1和E_2所围成的区域内，就能保证构件在最小外荷载和最不利使用荷载作用下，其上、下缘混凝土均不会出现拉应力。



A—A



把E_1和E_2两条曲线所围成的布置预应力钢筋时的钢筋重心界限，称为束界。

预加力阶段，保证梁的上缘混凝土不出现拉应力的条件：

$$\boxed{\sigma_{ct} = \frac{N_{p_{\mathrm{I}}}}{A} - \frac{N_{p_{\mathrm{I}}} e_{p_{\mathrm{I}}}}{W_u} + \frac{M_{G_{\mathrm{I}}}}{W_u} \geq 0}$$

由此得到 $\boxed{e_{p_{\mathrm{I}}} \leq E_1 = K_b + M_{G1} / N_{P\,\mathrm{I}}}$

同理可得到 $\boxed{e_{p2} \geq E_2 = M_s / \alpha N_{P\,\mathrm{I}} - K_u}$

在预加应力阶段，保证梁上缘混凝土不出现拉应力的条件为

$$\boxed{\frac{M_s}{\alpha N_{p\mathrm{I}}} - K_u \le e_p \le K_b + M_{G1} / N_{P\mathrm{I}}}$$

2.预应力钢筋的布置原则

1) 钢束布置原则，应使其重心线不超出束界范围。
2) 钢束弯起角度，应与所承受的剪力变化规律相配合。弯起角α不宜大于20°；对于弯出梁顶锚固的钢束，α值往往超出此值，常常在20°~30°之间。
3) 预应力钢筋的布置应符合构造要求。

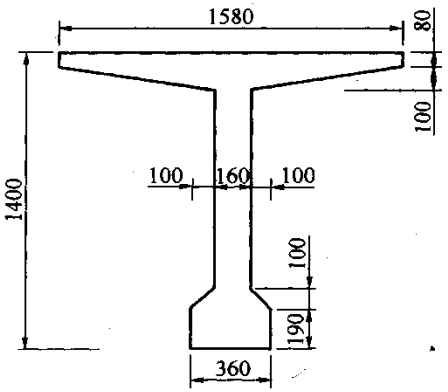
预应力混凝土简支梁计算示例（自学13.9）

预应力混凝土简支梁计算设计（课程设计）

一、课程设计的内容

根据给定的桥梁基本设计资料（主要结构尺寸、计算内力等）设计预应力混凝土简支T形主梁。主要内容包括：

1．预应力钢筋及非预应力钢筋数量的确定及布置；
2．截面几何性质计算；
3．承载能力极限状态计算（正截面与斜截面承载力计算）；
4．预应力损失估算；
5．应力验算（短暂状况和持久状况的应力验算）；
6．抗裂验算（正截面与斜截面抗裂验算）或裂缝宽度计算；
7．主梁变形（挠度）计算；
8．锚固局部承压计算与锚固区设计；
9．绘制主梁施工图。



1、施加预应力的目的是（　）

A.提高构件的承载力　　B.提高构件的抗裂度和刚度

C.提高构件的承载力和抗裂度　　D.对构件强度进行检验

2、受力及截面条件相同的钢筋混凝土轴心受拉构件和预应力混凝土轴心受拉构件相比较（　）

A.后者的抗裂度和刚度大于前者

B.后者的承载力大于前者

C.后者的承载力和抗裂度、刚度均大于前者

D.两者的承载力、抗裂度和刚度相等。

3、先张法和后张法预应力混凝土构件相比，以下论述（　）不正确。

A.先张法工艺简单，只需临时性夹具

B.先张法适用于工厂预制的中、小型构件，后张法适用于施工现场支座的大、中型构件

C.后张法需有台座或钢模张拉钢筋

D.先张法一般常采用直线钢筋作为预应力钢筋

4、预应力钢筋的张拉控制应力σ_{con}，先张法比后张法取值略高的主要原因是（　）。

A.后张法在张拉钢筋的同时，混凝土产生弹性压缩，张拉设备上所显示的张拉控制应力为已扣除混凝土弹性压缩后的钢筋应力

B.先张法临时锚具的变形损失大

C.先张法的混凝土收缩、徐变较后张法大

D.先张法有温差损失，后张法无此项损失

5、后张法预应力混凝土轴心受拉构件在施工阶段，完成第二批预应力损失后，混凝土所获得的有效预压力σ_{pcII}为（　）。

A. $\sigma_{\mathrm{pcII}} = (\sigma_{\mathrm{con}} - \sigma_l) A_{\mathrm{p}} / A_0$

B. $\sigma_{\mathrm{pcII}} = [(\sigma_{\mathrm{con}} - \sigma_l) A_{\mathrm{p}} - \sigma_{l5} A_{\mathrm{s}}] / A_0$

C. $\sigma_{\mathrm{pcII}} = [(\sigma_{\mathrm{con}} - \sigma_l) A_{\mathrm{p}} - \sigma_{l5} A_{\mathrm{s}}] / A_{\mathrm{n}}$

D. $\sigma_{\mathrm{pcII}} = [(\sigma_{\mathrm{con}} - \sigma_l) A_{\mathrm{p}} + \sigma_{l5} A_{\mathrm{s}}] / A_{\mathrm{n}}$

6、后张法预应力混凝土轴心受拉构件的开裂荷载N_{cr}为（　）。

A. $(\sigma_{\mathrm{pcII}} - f_{\mathrm{tk}}) A_0$　　B. $\sigma_{\mathrm{pcII}} A_0$

C. $f_{\mathrm{tk}} A_0$　　D. $(\sigma_{\mathrm{pcII}} + f_{\mathrm{tk}}) A_0$

7、对后张法预应力混凝土构件，按规范计算其第二批预应力损失值为（　）。

A. $\sigma_{l3}+\sigma_{l4}+\sigma_{l5}$　　B. $\sigma_{l4}+\sigma_{l5}$

C. $\sigma_{l4}+\sigma_{l5}+\sigma_{l6}$　　D. $\sigma_{l5}+\sigma_{l6}$

8、全预应力混凝土在使用荷载作用下，构件截面混凝土（　）

A.允许出现拉应力　　B.不出现拉应力

C.允许出现裂缝　　D.不出现压应力

9、对于预应力混凝土构件出现裂缝时的荷载与其极限荷载的说明正确的是（　）

A.开裂荷载远小于极限荷载　　B.开裂荷载与极限荷载比较接近

C.开裂荷载等于极限荷载　　D.无法确定

10、为减少预应力损失σ_{l3}，下列措施中，（　）是正确的。

A.提高台座长度和加强锚固　　B.提高混凝土强度等级或预应力钢筋级别

C. 采用二次升温养护或在钢模上张拉钢筋　　D.采用超张拉

作业：

13-14,13-15