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

部分预应力混凝土受弯构件：

- 部分预应力结构的概念与特点。
- 部分预应力结构的受力特性。
- 实现部分预应力的可行方法。
- 允许开裂的部分预应力混凝土受弯构件的设计计算。
- 配筋的构造要求。

§ 14.1 部分预应力结构的概念与特点

一、概 述

全预应力结构在工程应用中的不足:

- 主梁的反拱大，以至于桥面铺装施工的实际厚度变化较大，易造成桥面损坏，影响行车顺适;
- 预加力过大时，锚下混凝土横向拉应变超出极限拉应变，出现沿预应力钢筋方向不能恢复的裂缝。

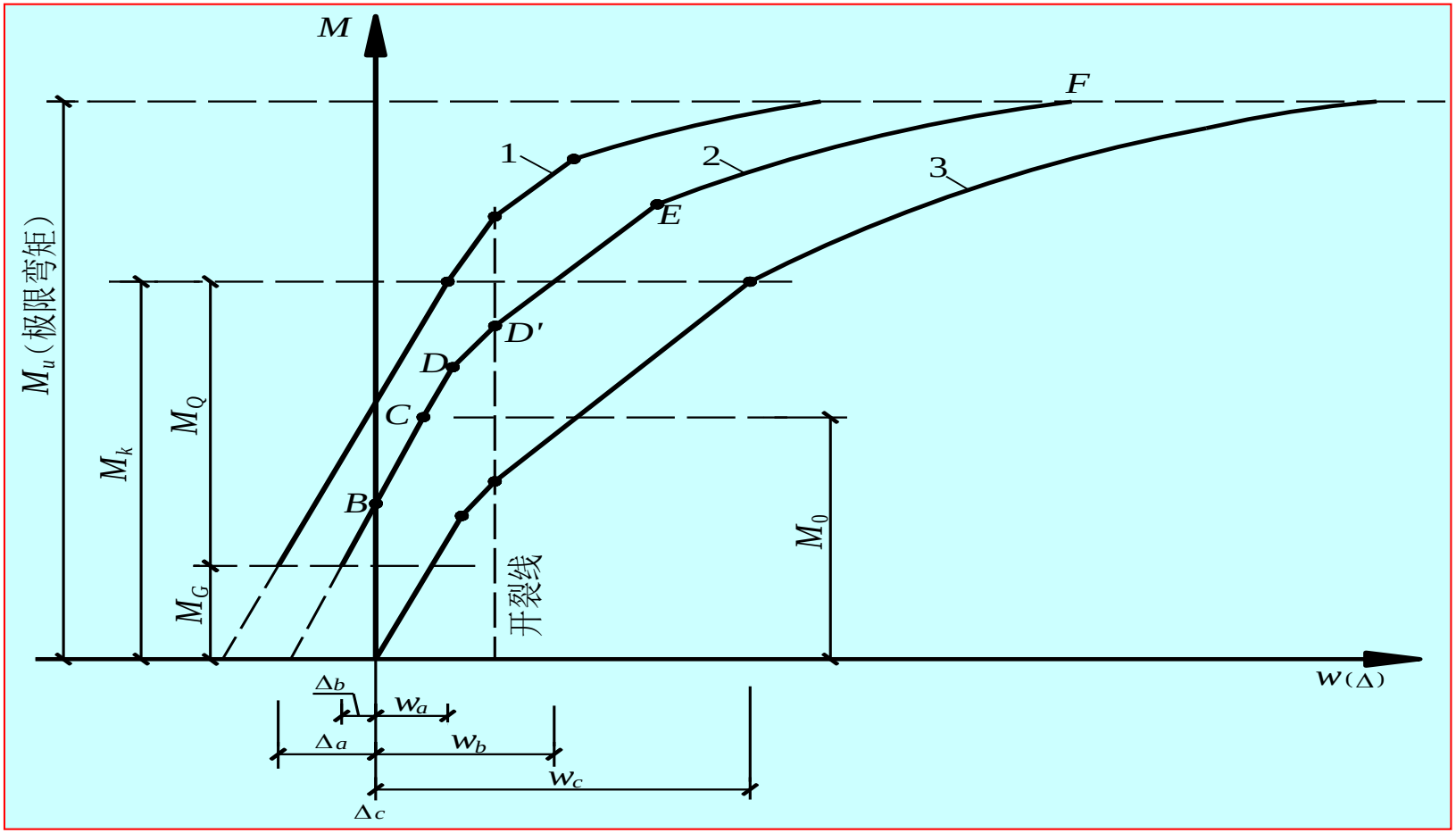
1、基本概念：

介于全预应力混凝土与普通钢筋混凝土之间的结构，根据要求施加适量的预应力，配置普通钢筋以保证承载力要求。

2、特点：

- 充分发挥预应力钢筋的作用，利用普通钢筋的作用；
- 允许在使用期间出现裂缝，扩大了应用范围；
- 设计人员可以根据结构使用要求来选择预应力度的高低.

二、弯矩—挠度关系曲线



部分预应力混凝土梁的受力特性：

- 在荷载作用较小时，在自重与有效预加力作用下，它具有反拱度，但其值较全预应力混凝土梁的反拱度小——线弹性；
- 随着外加荷载作用增加，弯矩M达到B点，这时表示外荷载作用下产生的梁下挠度与预应力反拱度相等，两者正好相互抵消，此时梁的挠度为零——零挠度；

- 当荷载增加，达到曲线2的C点时，外荷载作用产生的梁底混凝土拉应力正好与有效预压应力互相抵消，使梁底受拉边缘的混凝土应力为零，此时相应的外荷载作用产生的弯矩，称为消压弯矩——零应力；
- 梁的下边缘消压后，继续加载至D点，混凝土的边缘拉应力达到极限抗拉强度。达到D′点时表示构件即将出现裂缝，此时相应的弯矩就称为部分预应力混凝土构件的抗裂弯矩,它就相当于相应的钢筋混凝土梁截面的抗裂弯矩，即$M_{pcr}=M_{cr}-M_0$——出现裂缝；

- 外荷载作用加大，从D′点开始，裂缝开展，刚度继续下降，挠度迅速增加。到达E点时，受拉钢筋屈服。E点以后裂缝进一步扩展，刚度进一步降低，挠度增加速度更快，直到F点，这时构件达到极限承载能力状态而破坏——破坏。

二、部分预应力混凝土结构分类：

1、A类部分预应力混凝土结构：

在使用阶段允许出现拉应力，但“拉而无裂”。A类构件的设计与全预应力混凝土结构完全相同。

2、B类部分预应力混凝土结构：

在使用阶段允许裂缝出现，但“裂而有限”，裂缝宽度在限制范围内。

三、部分预应力混凝土结构的优点：

- 1）节省预应力钢筋与锚具
- 2）改善结构性能
- （1） 由于预加力减少，构件由弹性变形和徐变变形所引起的反拱度减少，锚下混凝土的局部应力降低。
- （2） 构件开裂前刚度较大，而开裂后刚度降低，但卸荷后，刚度部分恢复，裂缝闭合能力强，故综合使用性能优于普通钢筋混凝土。
- （3） 部分预应力混凝土构件，由于配置了非预应力钢筋，提高了结构的延性和反复荷载作用下结构的能量耗散能力，这对结构抗震有利。

四、实现部分预应力的可行方法

1、 全部采用高强钢筋，将其中的一部分张拉到最大容许应力，保留其余一部分作为非预应力钢筋；

2、 将全部预应力钢筋都张拉到一个较低的应力水平。

3、 采用张拉的预应力钢筋与普通钢筋的混合配筋。

五、非预应力钢筋的主要作用：

（1）协助受力。

受拉或受压

（2）承受意外荷载。

承担运输、堆置和吊装过程中的特殊或意外荷载。

（3）改善梁的正常使用性能和增加梁的承载力。在受拉区配置非预应力钢筋有利于分散裂缝和约束裂缝宽度，并能增加梁的抗弯承载力。

B类部分预应力混凝土受弯构件的设计计算

部分预应力混凝土结构与全预应力混凝土结构的设计计算有许多的相同点，也有一些特殊问题：

- 相同点：持久状态正截面、斜截面承载力计算，局部承压计算，预应力损失估算。
- 不同点：使用阶段截面的正应力计算，裂缝宽度计算（验算），变形计算，疲劳计算，截面配筋计算，构造要求。

1、开裂截面的弹性分析法

梁开裂后仍具有一个良好的弹性工作性能阶段，即开裂弹性阶段（由预应力混凝土梁的弯矩-挠度曲线可知）。因此部分预应力混凝土梁开裂后使用阶段的应力计算可以采用弹性分析法。

由开裂截面的应力及应变图可进行计算。（图14-2）

混凝土压应力的合力　式（14-2）

预应力钢筋的合力　式（14-7）

普通钢筋的合力　式（14-8）

当给定一个截面上缘混凝土应力（或压应变）值时，根据内力平衡条件，可以通过试算得出受压区高度x，即可得到预应力钢筋和普通钢筋的应力和应变值，则相应于给定的截面上缘混凝土压应变值的弯矩值就可以求出，式（14-9）。

实际工程中，一般需选定两个有较大差距的混凝土应力（或应变）值，求出相应的钢筋应力、弯矩，中间的数值则可以通过线形比例关系求得。

弹性分析法是根据内力平衡和应变协调两个条件通过试算分析开裂截面的方法。这个方法的有优点是概念清楚，但计算比较麻烦。

2、给定弯矩直接求出开裂截面应力的消压分析法

- 部分预应力混凝土梁截面开裂后的应力状态，与钢筋混凝土大偏心受压很相似。钢筋混凝土大偏心受压构件截面开裂后，可以用钢筋混凝土结构在使用荷载阶段处于弹性受力的特点求解钢筋应力与混凝土应力。但应该注意到，当外力为零时，钢筋混凝土大偏心受压构件截面混凝土应力均等于零（称为“零应力”状态）。

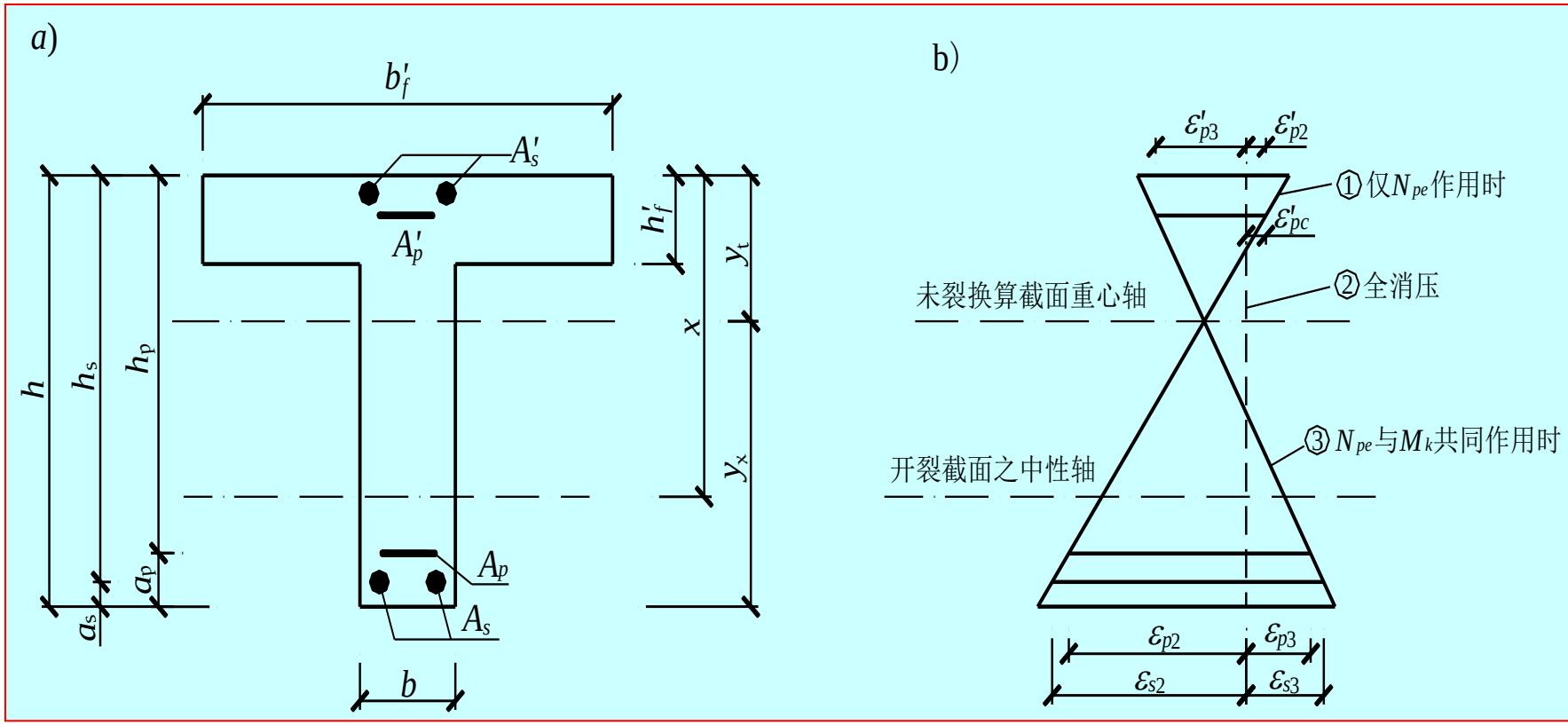
- B类预应力混凝土受弯构件截面上由作用产生的弯矩 M_k，虽然可以用等效的偏心压力来代替，但是偏心压力所产生的应力效应，并不能直接用上述钢筋混凝土大偏心受压构件求解应力的方法来求解。

  因为部分预应力混凝土构件尚存在着预加力的作用，所以，即使截面上没有作用，但是由于预加力的作用，梁的截面上已经存在着由预加力所引起的混凝土正应力。

- 鉴于钢筋混凝土大偏心受压构件求解截面应力的公式是在“零应力”状态下建立的，如果能把这个预加力引起的截面应力的特点加以考虑，从计算方法上进行某些处理，将截面上由预加力引起的混凝土压应力退压成“零应力”状态，暂时先消除预加力的影响，就可以借助大偏心受压构件的计算方法来求解截面上钢筋和混凝土的应力。

- 预应力混凝土受弯构件开裂截面的应力计算，就是把在作用弯矩 M_k 和预应力钢筋及非预应力钢筋合力 N_p 共同作用下的受弯构件，转化为轴向力作用点距截面重心轴 e_{0N} 的钢筋混凝土偏心受压构件进行计算。
- 对后张法预应力连续梁等超静定结构，上述外弯矩 M_k 还应计入由预加力引起的次弯矩 M_{p2}

对后张法T形截面B类受弯构件截面弯矩 $M > M_{cr}$，将开裂截面正应力状态分解成如下几个阶段来分析。



a)开裂截面　　**b)**截面应变分布

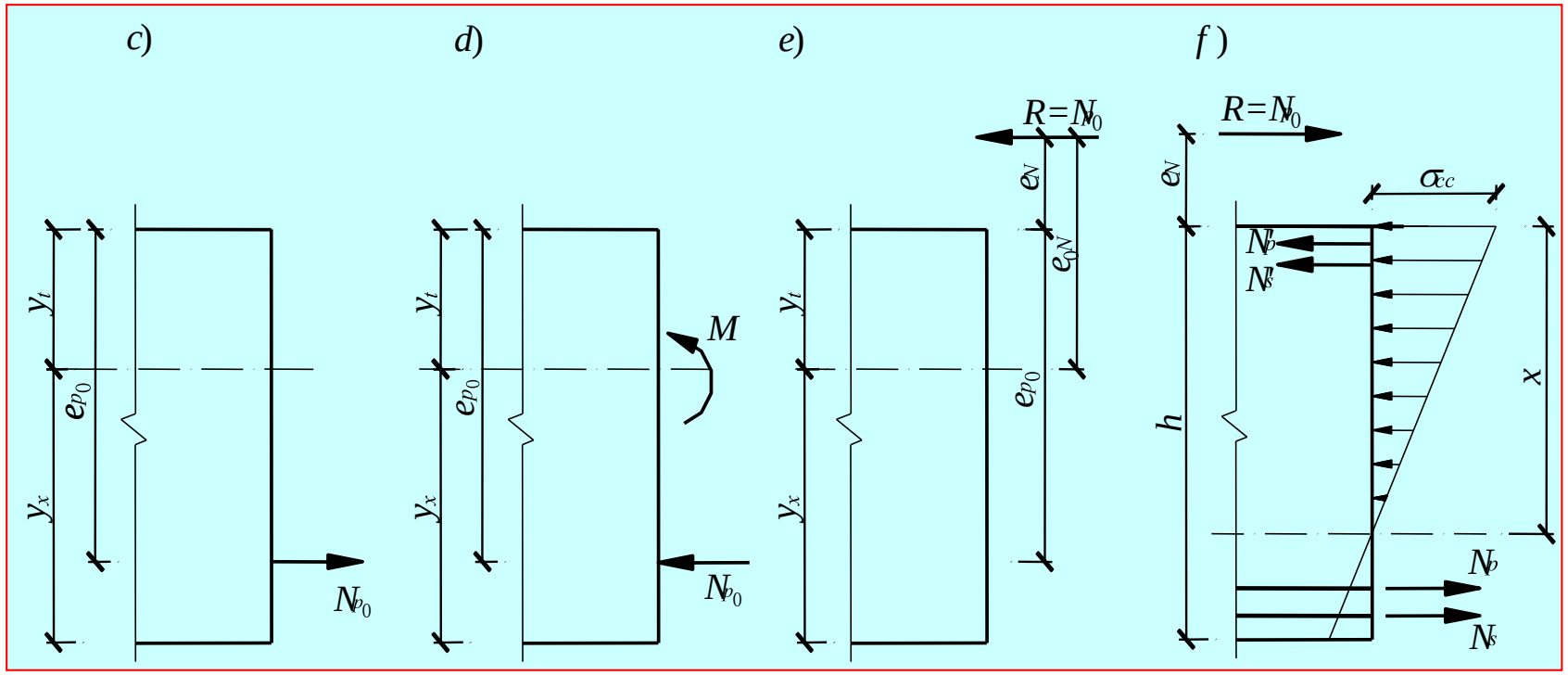


图14-3　大偏心受压等效过程

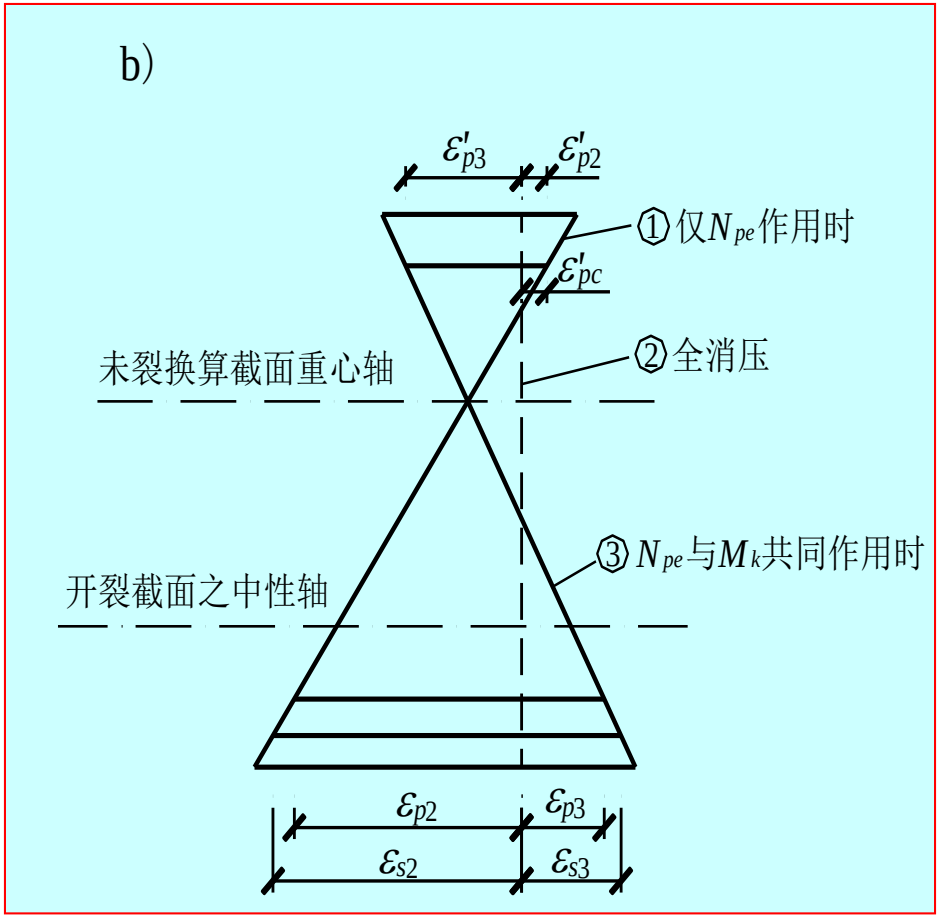
c)虚拟拉力 d)、e)开裂截面上的力　f)偏心压力产生的开裂截面应力

（1）有效预加力作用 N_{pe}（获得零应力以前的应力状态）

在有效预加力 N_{pe} 单独作用下的应变图此时，受拉区和受压区预应力钢筋中的拉应力为不计梁自重作用的有效预拉力

$$\sigma_{pe}=\sigma_{\mathrm{con}}-\sigma_{l}$$

$$\sigma'_{pe}=\sigma'_{\mathrm{con}}-\sigma'_{l}$$



普通钢筋的应力取值：近似取为混凝土收缩徐变引起的应力损失值。

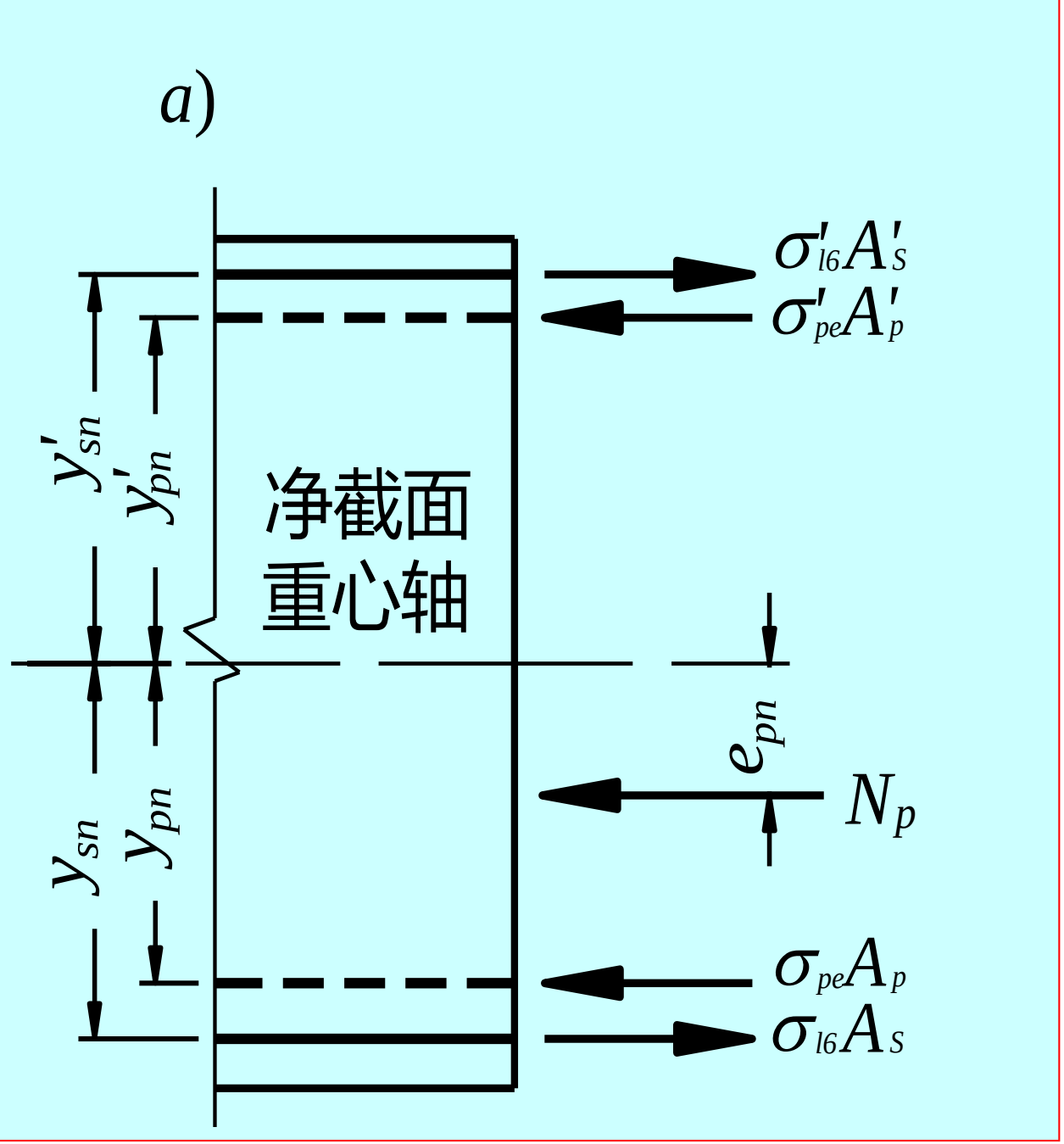


图14-4　预应力钢筋和普通钢筋合力及其偏心距

a）仅Npe作用时

注：字母的含义见P319 页

$$N_p = \sigma_{pe} A_p + \sigma'_{pe} A'_p - \sigma_{l6} A_s - \sigma'_{l6} A'_s$$

$$e_{Pn} = \frac{\sigma_{pe} A_p y_{pn} - \sigma'_{pe} A'_P y'_{pn} - \sigma_{l6} A_s y_{sn} + \sigma'_{l6} A'_s y'_{sn}}{\sigma_{pe} A_p + \sigma'_{pe} A'_p - \sigma_{l6} A_s - \sigma'_{l6} A'_s}$$

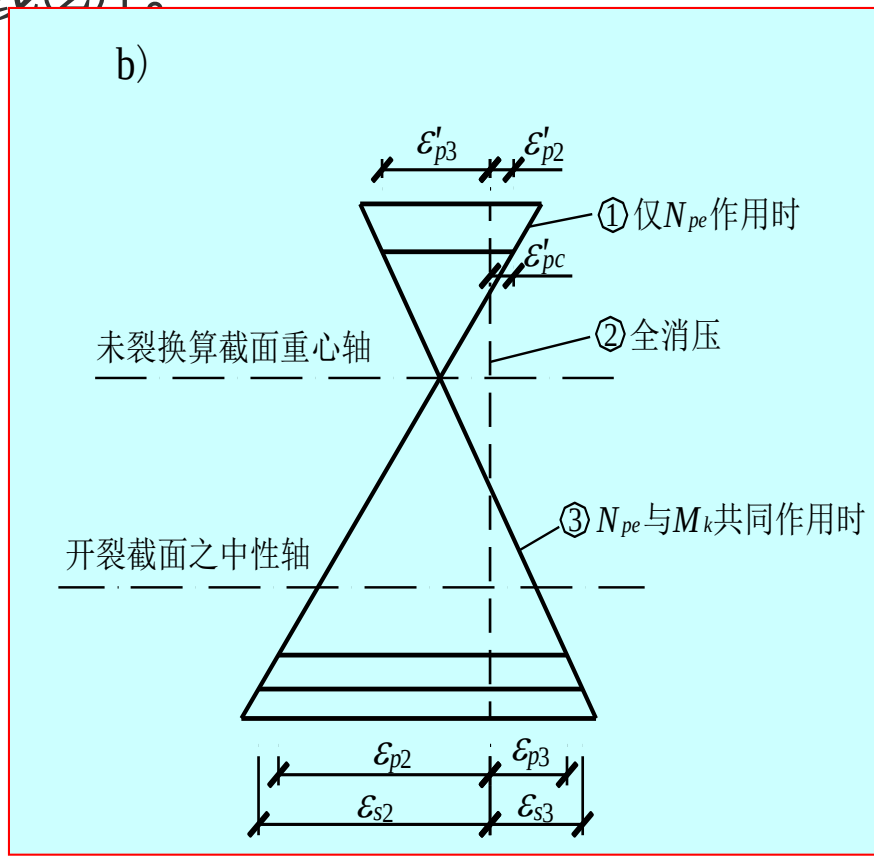
$$\sigma_{pc} = \frac{N_p}{A_n} + \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y_{pn}$$

$$\sigma'_{pc} = \frac{N_p}{A_n} - \frac{N_p e_{pn}}{I_n} y'_{pn}$$

（2）全消压状态（获得虚拟零应力状态）

这是一个为计算需要（使截面呈“零应力”状态）的“虚拟作用”阶段。在“虚拟作用”下，全截面消压，即构件截面各点的混凝土的应变恰好为零[线②]。

为了使截面达到完全消压状态，必须对截面施加一个拉力 N_{p0}（又称为虚拟荷载），使之消除混凝土的预压应力。



混凝土消压后，在受拉区和受压区预应力钢筋重心处混凝土应变值分别由ε_{pc}和ε'_{pc}变化为零时，受拉区和受压区预应力钢筋应变增量为（$-\varepsilon_{p2}$）和（$-\varepsilon'_{p2}$），其绝对值等于其重心处对应的混凝土应变ε_{pc}、ε'_{pc}。故受拉区和受压区预应力钢筋的拉应力增量为：

$$\boxed{\sigma_{p2} = E_p \cdot (-\varepsilon_{p2}) = E_p \varepsilon_{pc} = \alpha_{\mathrm{EP}} \sigma_{pc}}$$

$$\boxed{\sigma'_{p2} = E_p \cdot (-\varepsilon'_{p2}) = E_p \varepsilon'_{pc} = \alpha_{\mathrm{EP}} \sigma'_{pc}}$$

这里假定受拉和受压区预应力钢筋为同一类钢筋，同时 $\alpha_{Ep} = E_p / E_c$ 。

在全消压状态下，受拉区和受压区预应力钢筋中的总拉应力σ_{p0}、σ'_{p0}分别为：

$$\boxed{\sigma_{p0} = \sigma_{pe} + \sigma_{p2} = \sigma_{\mathrm{con}} - \sigma_l + \alpha_{\mathrm{EP}} \sigma_{pc}}$$

$$\boxed{\sigma'_{p0} = \sigma'_{pe} + \sigma'_{p2} = \sigma'_{\mathrm{con}} - \sigma'_l + \alpha_{\mathrm{EP}} \sigma'_{pc}}$$

全消压状态下，普通钢筋压应力，近似取为混凝土收缩和徐变引起的预应力损失值。

$$\boxed{N_{s2} = -\sigma_{l6} A_s}$$

$$\boxed{N'_{s2} = -\sigma'_{l6} A'_s}$$

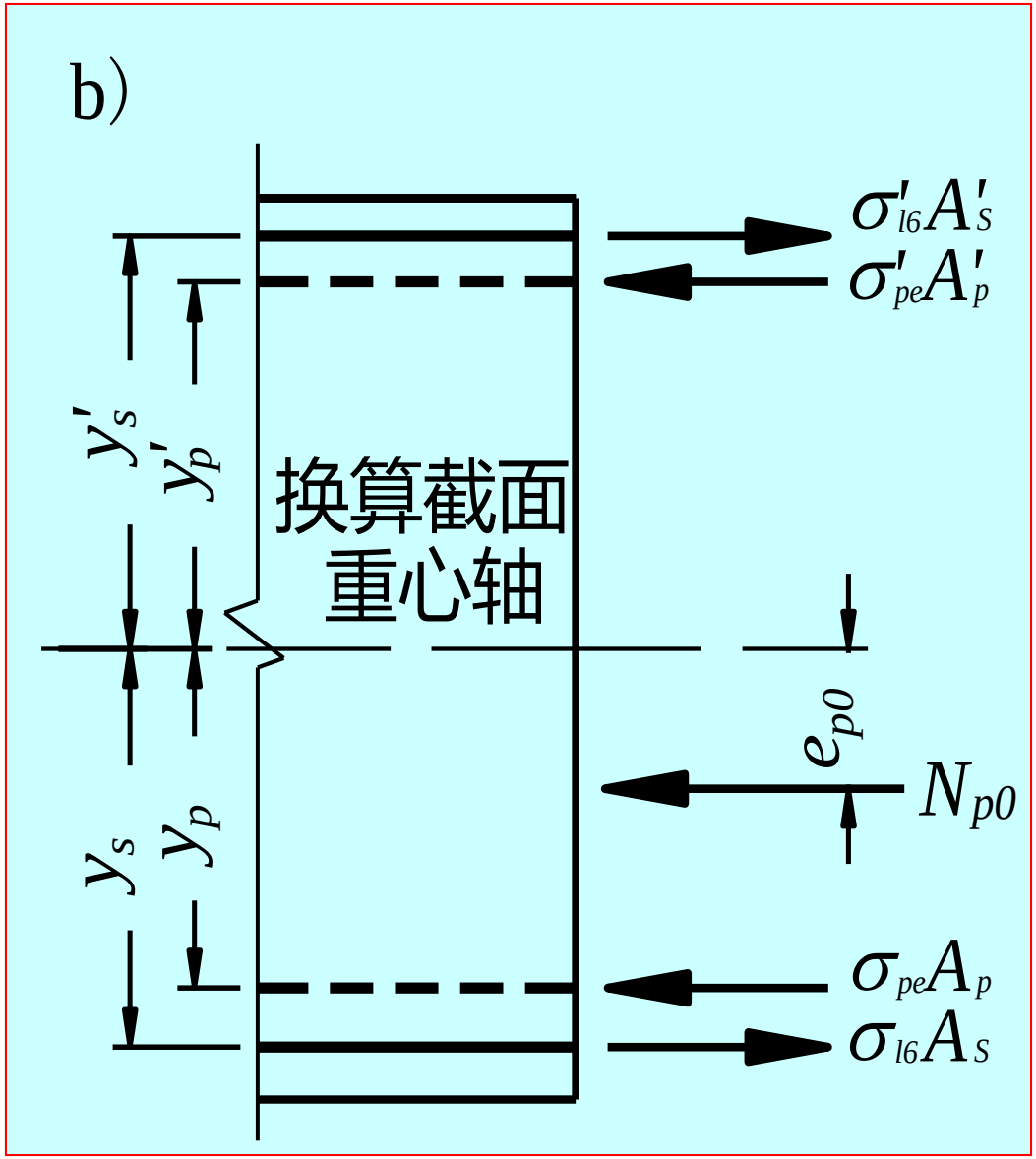


图14-4　预应力钢筋和普通钢筋合力及其偏心距

b）全消压状态

全消压状态下，预应力钢筋和普通钢筋合力 N_{p0} 就为：

$$\boxed{N_{po}=\sigma_{po}A_p-\sigma_{l6}A_s+\sigma'_{po}A'_{po}-\sigma'_{l6}A'_s}$$

N_{p0} 作用点距截面重心轴距离为：

$$\boxed{e_{pn}=\frac{\sigma_{p0}A_p y_{pn}-\sigma'_{p0}A'_p y'_{pn}-\sigma_{l6}A_s y_{sn}+\sigma'_{l6}A'_s y'_{sn}}{\sigma_{p0}A_p-\sigma_{l6}A_s+\sigma'_{p0}A'_p-\sigma'_{l6}A'_s}}$$

对于先张法预应力混凝土构件，计算 N_{p0} 时，应取

$$\boxed{\sigma_{p0}=\sigma_{\mathrm{con}}-\sigma_l+\sigma_{l4}}$$

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

（3）开裂截面应力计算中虚拟作用的处理（对虚拟状态处理）

虚拟拉力（N_{p0}）是为了计算处理而虚设的，因此，最终应消除其影响，必须在预应力钢筋和普通钢筋合力作用点处施加一个与 N_{p0} 大小相等，方向相反作用力（$-N_{p0}$）。

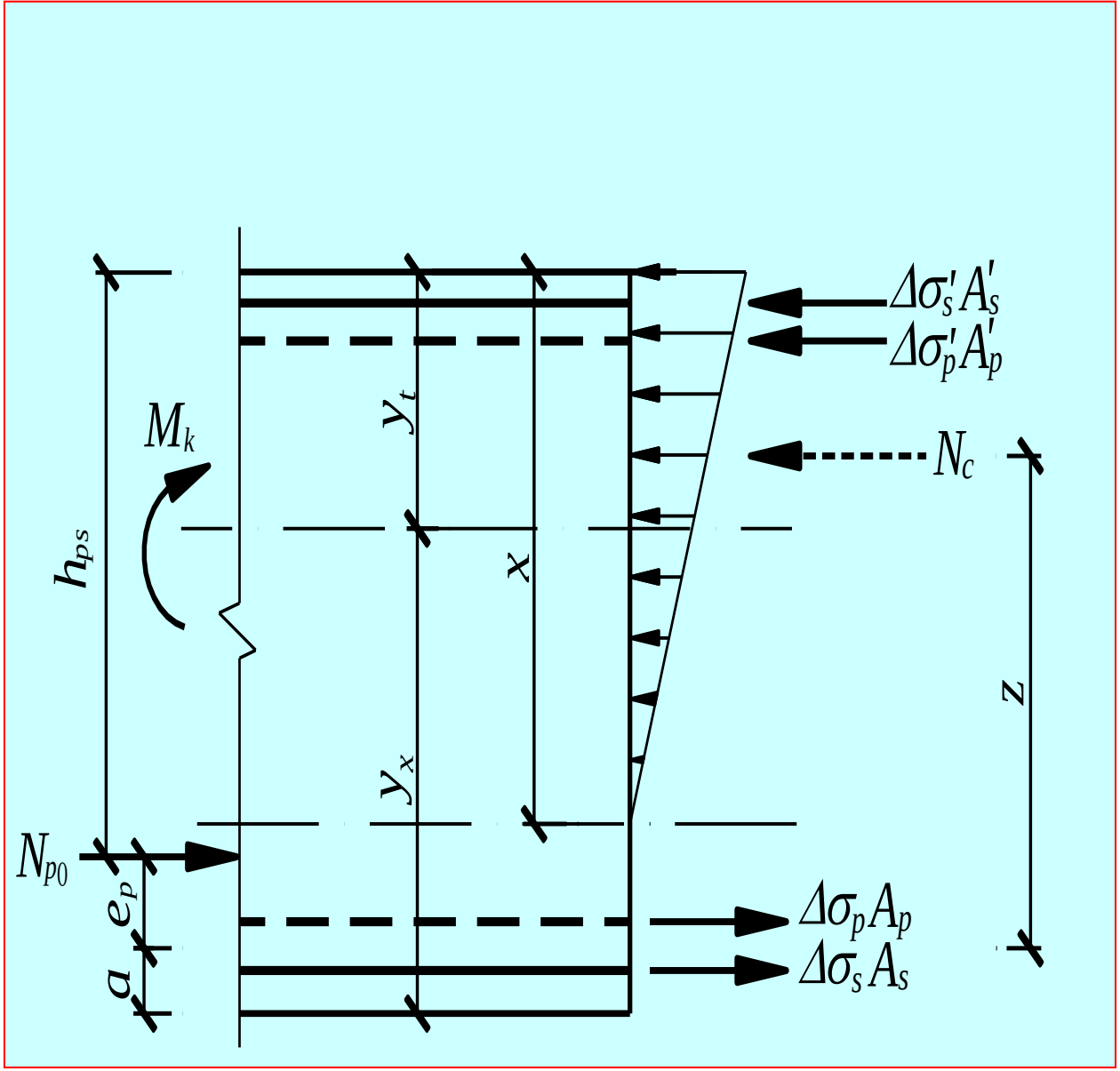


图14-5　等效的钢筋混凝土偏心受压构件

此时， M_k N_{p0} ⇨ R， （e_N）

现取 $R=N_{p0}$，由隔离体对N_{p0} 作用点的力矩平衡，

$$\boxed{M_k = R(h_{ps} + e_N) = N_{p0}(h_{ps} + e_N)}$$

$$e_N = \frac{M_k}{N_{p0}} - h_{ps}$$

这样，承受预加力合力 N_p 和弯矩 M_k 作用的预应力混凝土B类受弯构件就转化为承受距受压边缘的偏心距 e_N 为的压力 $R = N_{p0}$ 的钢筋混凝土偏心受压构件（图14-5）。

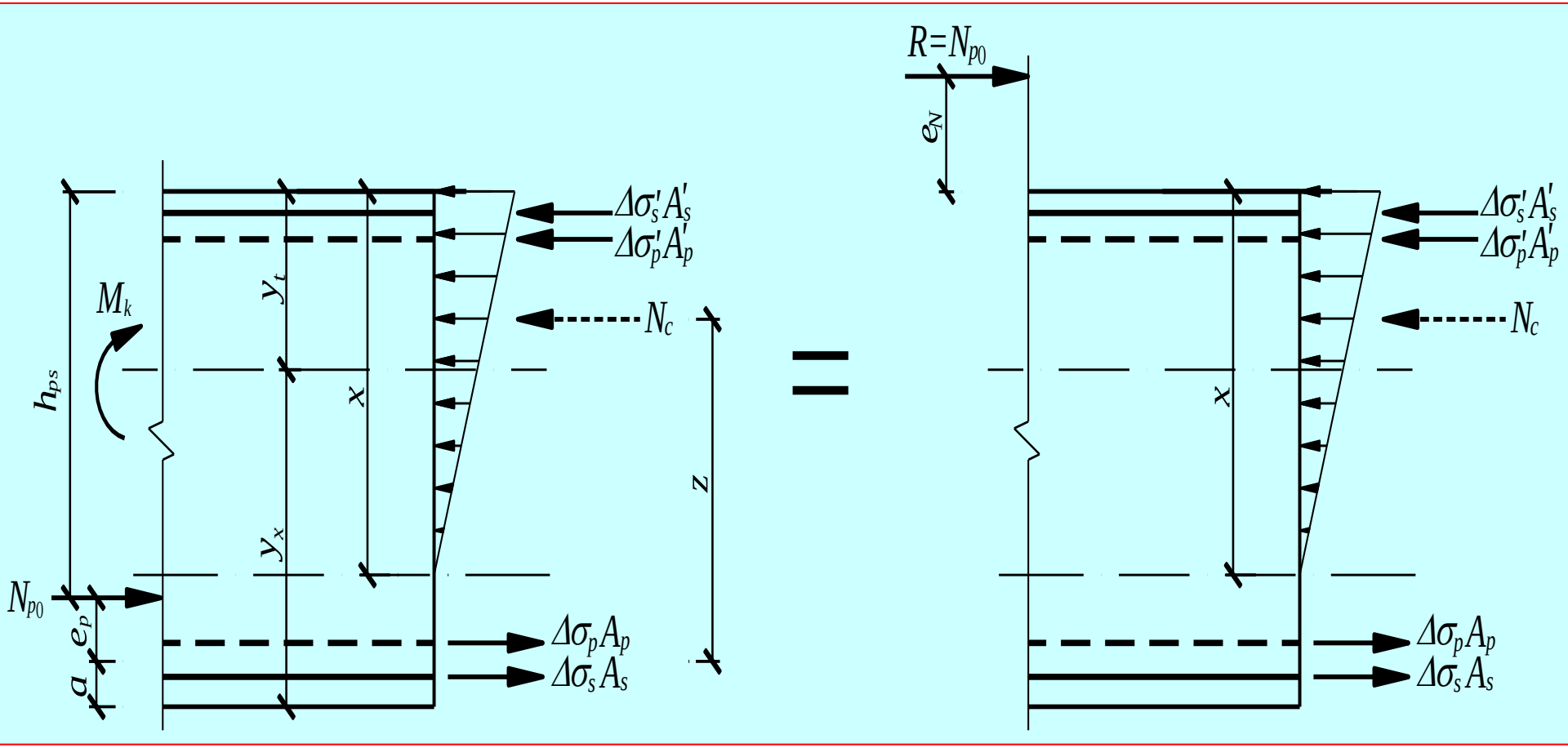


图14-5　等效的钢筋混凝土偏心受压构件

（4）按钢筋混凝土结构大偏心受压构件计算梁开裂截面的受压区高度（建立大偏压构件状态）

开裂后的B类预应力混凝土受弯构件，按钢筋混凝土偏心受压构件计算时，采用以下假定：

- 截面变形符合平截面假定；
- 受压混凝土正应力分布取三角形；
- 不考虑受拉区混凝土参加工作，拉力全部由钢筋承担。

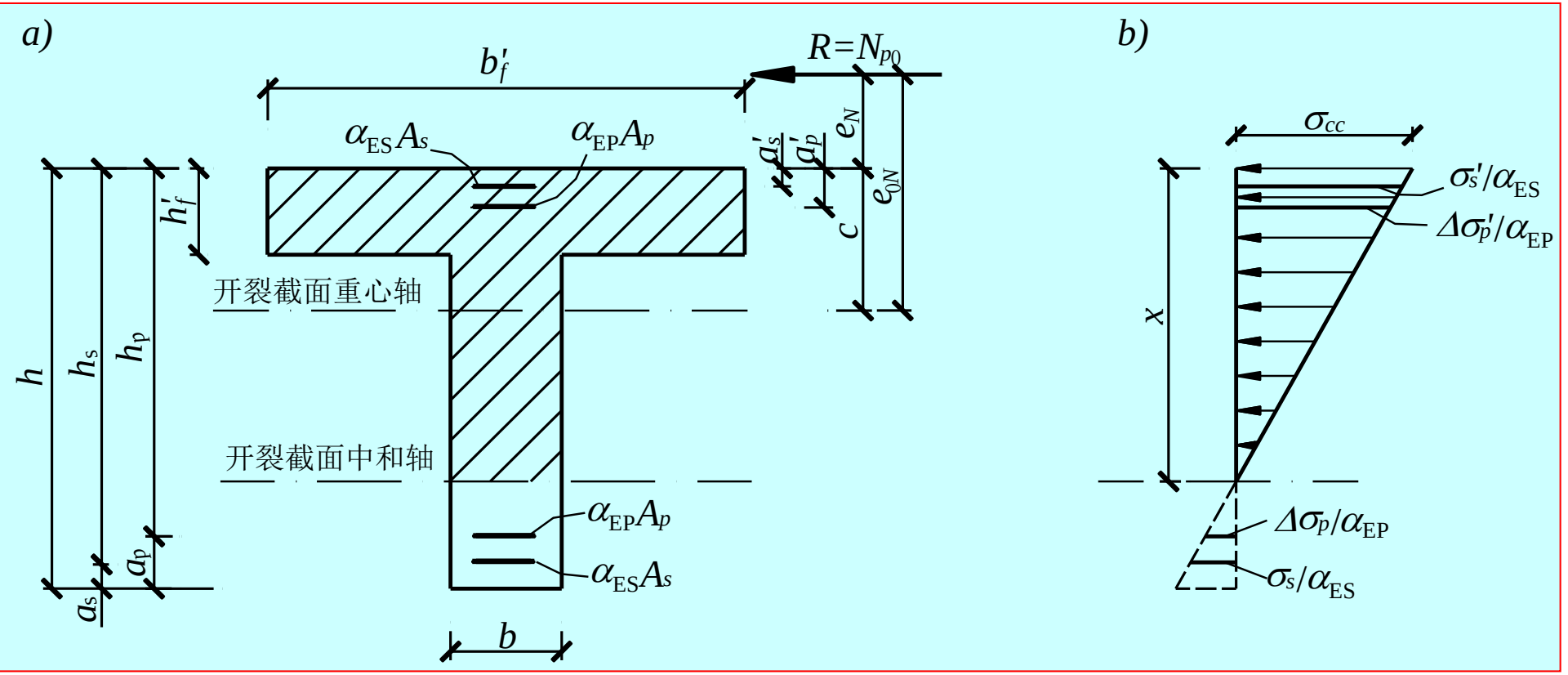


图14-6　开裂截面及应力图
a）开裂截面 b）截面应力

假定开裂截面的中和轴位于肋板内，按内外力对偏心压力 N_{p0} 作用点取矩为零，整理后得到开裂截面受压区高度x的计算方程：

$$\boxed{Ax^3 + Bx^2 + Cx + D = 0}$$

$$\boxed{A = b} \qquad \boxed{B = 3be_N}$$

$$\boxed{C = 3b_0 h_f'(2e_N + h_f') + 6\alpha_{\mathrm{EP}}(A_p g_p + A_p g_p') + 6\alpha_{\mathrm{ES}}(A_s g_s + A_s' g_s')}$$

$$\boxed{D = -b_0 h_f'^2(3e_N + 2h_f') - 6\alpha_{\mathrm{EP}}(A_p h_p g_p + A_p' a_p' g_p') - 6\alpha_{\mathrm{ES}}(A_s h_s g_s + A_s' a_s' g_s')}$$

求解开裂截面受压区高度x中应注意：

- 受压区普通钢筋的应力应符合规范的要求。
- 当受压区预应力钢筋为拉应力时，即 $\alpha_{\mathrm{ES}}\sigma_{cc}-\sigma'_{p0}<0$ 时，公式中含有 σ_{cc} 项前面的正号应改为负号，此处为受压区预应力钢筋合力点处的混凝土压应力。
- 当受压区未设预应力钢筋或非预应力钢筋时，公式中的 A'_s 项或 A'_p 项令其等于零.

公式适用于T形和工字形截面的B类预应力混凝土受弯构件；对于矩形截面，令有关计算式中的h'_f等于零即可。

（5）开裂截面混凝土压应力

《公路桥规》依照消压分析法提出允许开裂的B类预应力混凝土受弯构件，由作用标准值产生的开裂截面混凝土压应力计算式为：

$$\sigma_{cc} = \frac{N_{p0}}{A_{\mathrm{cr}}} + \frac{N_{p0} e_{0\mathrm{N}} c}{I_{\mathrm{cr}}} \leqslant 0.5 f_{ck}$$

$$e_{0\mathrm{N}} = e_{\mathrm{N}} + c$$

$$e_{\mathrm{N}} = \frac{M_k}{N_{p0}} - h_{ps}$$

$$h_{ps} = \frac{\sigma_{p0} A_p h_p - \sigma_{l6} A_s h_s + \sigma'_{p0} A'_p a'_p - \sigma'_{l6} A'_s a'_s}{N_{p0}}$$

（6）开裂截面预应力钢筋的应力

开裂截面预应力钢筋的应力增量为：

$$\Delta\sigma_p = \alpha_{\mathrm{EP}}\left[\frac{N_{p0}}{A_{cr}} - \frac{N_{p0}e_{0\mathrm{N}}(h_p - c)}{I_{\mathrm{cr}}}\right]$$

开裂截面受拉区预应力钢筋总拉应力为：

受拉区预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时预应力钢筋的应力

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + \Delta\sigma_p$$

使用阶段开裂截面受拉预应力钢筋的计算总拉应力应满足：

对钢绞线、钢丝 $\boxed{\sigma_{p0}+\Delta\sigma_p \le 0.65 f_{pk}}$

对精轧螺纹钢筋 $\boxed{\sigma_{p0}+\Delta\sigma_p \le 0.80 f_{pk}}$

预应力混凝土受弯构件受拉区的普通钢筋，其使用阶段的应力很小可不必验算。

§ 14.3 裂缝宽度计算

一、裂缝宽度计算

对B类预应力混凝土受弯构件，《公路桥规》采用的最大裂缝宽度计算式为

$$W_{tk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s}\left(\frac{30+d}{0.28+10\rho}\right) \quad \text{（mm）}$$

应当指出：对于超静定B类预应力混凝土受弯构件，在计算钢筋应力的时候，应考虑由预加力产生的次弯矩的影响。

二、裂缝宽度的限值

《公路桥规》规定，B类预应力混凝土构件计算的最大裂缝宽度不应超过下列规定限值：

- 采用精轧螺纹钢筋的预应力混凝土构件：

  I类和II类环境条件下为0.20mm；

  III类和IV类环境条件下0.15mm。

- 采用钢丝或钢绞线的预应力混凝土构件：

  I类和II类环境条件下为0.10mm；

  III类和IV类环境条件下不得进行带裂缝的B类构件设计。

三、 变形计算

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定B类预应力混凝土受弯构件的变形计算，应采用作用短期效应组合并考虑长期效应组合的影响，计算原理与全预应力混凝土受弯构件的相同。（采用乘以变形长期增长系数）

预应力混凝土B类构件的抗弯刚度按作用短期效应组合分段取用：

在开裂弯矩 M_{cr} 作用下 $B_0 = 0.95 E_c I_0$

在 $(M_s - M_{cr})$ 作用下

$$B_{cr} = E_c I_{cr}$$

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

$$\Upsilon = 2S_0 / W_0$$

四、疲劳计算

1、疲劳计算的内容

部分预应力混凝土受弯构件的疲劳校核，主要验算受拉区钢筋的应力，斜截面的疲劳验算主要是控制箍筋的应力。

2、疲劳计算的方法

受拉钢筋的疲劳按计算应力变化幅 $\Delta\sigma_m = (\sigma_{P\max} - \sigma_{P\min})$校核，其允许值$[\Delta\sigma_p]$应由试验确定，当缺少该项试验数据时，可参照表14-1采用。

钢筋应力变化幅度容许值（MPa）

钢筋种类	光面圆钢筋	规律变形钢筋	光面预应力钢丝	钢绞线	高强钢筋
$[\Delta\sigma_p]$	250	150	200	200	80

允许开裂的部分预应力混凝土受弯构件的设计

一、截面配筋设计的λ法

以λ表示预应力度，即：$\lambda = M_0 / M_s$ 式中 M_0 被称为消压弯矩，对受弯构件是指其下边缘混凝土的预压应力恰被抵消为零时弯矩， M_0 的表达式为 $\boxed{M_0 = \sigma_{pc} W_0}$

且 $\boxed{\sigma_{pc} = \frac{N_{pe}}{A}(1 + \frac{e_p \cdot y_x}{i^2})}$ ⇒ $\boxed{N_{pe} = \frac{\lambda M_s}{W_0} \cdot \frac{A}{1 + \frac{e_p \cdot y_x}{i^2}}}$

又 $\boxed{A_p = \frac{N_{pe}}{\sigma_{con} - \sigma_l}}$ ⇒ $\boxed{A_p}$

普通钢筋 A_s 则由受弯构件正截面承载能力来求所需。

例如对于仅在受拉区配置预应力钢筋和普通钢筋的单筋矩形截面，截面宽度为b，高度为h，由基本静力平衡方程可得到联立方程

$$f_{cd}bx = f_{pd}A_p + f_{sd}A_s$$

$$\gamma_o M_d = f_{pd}A_p(h - a_p - \frac{x}{2}) + f_{sd}A_s(h - a_s - \frac{x}{2})$$

由联立方程式可求得受压区高度和普通钢筋面积 A_s，求得的应满足 x 。

$$x \le \xi_b h_o$$

计算步骤（以矩形截面受弯构件为例）：

1、计算混凝土毛截面的几何特征 A、I、W 和 y_x；

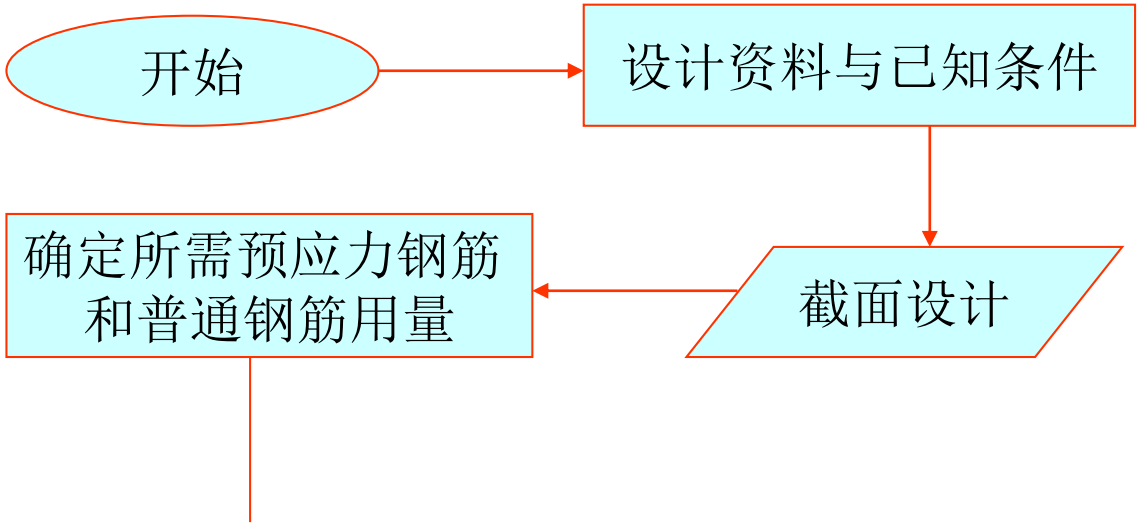
2、假定预应力钢筋的合力作用点位置，求得偏心距 e_p；假定预应力钢筋和普通钢筋合力作用点位置，计算有效高度；

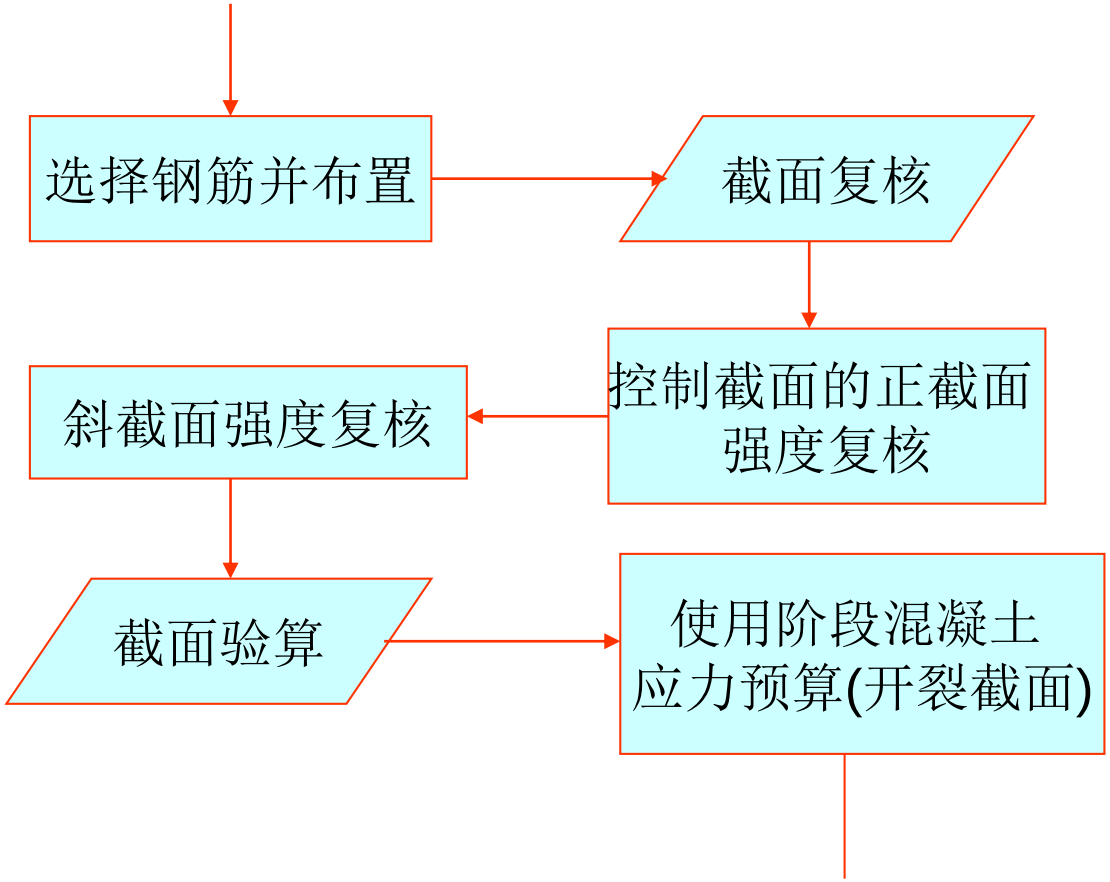
3、选择预应力度，一般 λ =0.6～0.8；

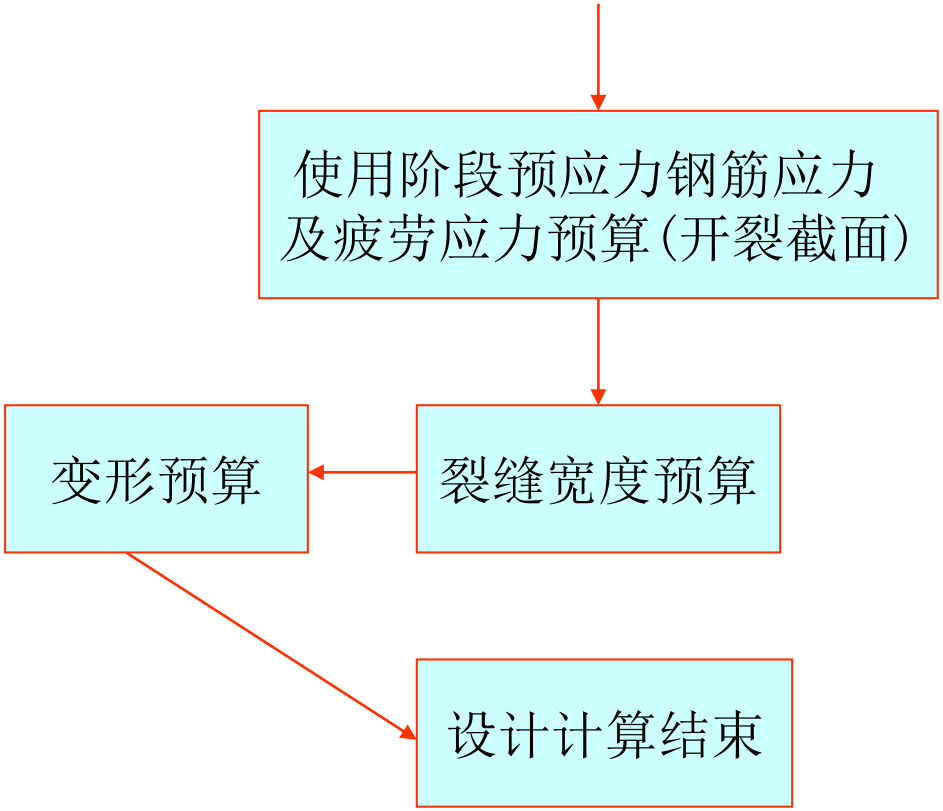
4、由式（51）求得所需预应力钢筋面积，解联立方程式（52）和式（53）求得相应的普通钢筋的面积。

5、选择预应力钢筋和普通钢筋并布置在截面上，按正截面抗弯承载能力要求，进行截面复核。

图14-7　B类预应力混凝土受弯构件的设计流程图




选择钢筋并布置
截面复核
控制截面的正截面强度复核
斜截面强度复核
截面验算
使用阶段混凝土应力预算(开裂截面)


使用阶段预应力钢筋应力
及疲劳应力预算(开裂截面)
变形预算
裂缝宽度预算
设计计算结束

二、截面配筋设计的名义拉应力法

根据部分预应力混凝土构件在使用阶段的裂缝宽度的限制要求，计算控制截面上预应力钢筋和普通钢筋所需面积的方法。

具体方法：把带裂缝的构件假设为未开裂的构件，用一般材料力学公式算出构件受拉边缘的最大拉应力，因为构件已开裂，所以这个拉应力必定大于混凝土的弯曲抗拉强度，成为名义上的概念，故称为“名义拉应力”。在大量试验的基础上，可以定出对应于不同裂缝宽度限值的容许名义拉应力。

在使用荷载阶段，按匀质未开裂混凝土截面，用材料力学公式计算，仅由使用荷载作用引起的截面边缘最大拉应力σ_{st}与相应位置混凝土截面边缘所受的有效预应力σ_{pc}叠加，其结果就是相应截面混凝土边缘所受的总的拉应力，也就是名义拉应力。这个名义拉应力值是有限制的，应满足：

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \le [\sigma_{ct}]$$

采用名义拉应力法进行配筋估算的步骤为：

（1）进行混凝土截面几何特性的计算；

（2）计算σ_{st}；

$$\sigma_{st} = \frac{M_s}{W}$$

（3） 确定混凝土的容许名义拉应力 $[\sigma_{ct}]$：

根据构件的使用要求及环境条件，根据裂缝宽度限值规定 $[\sigma_{ct}]$ 可用以下简单公式计算

后张法 $$[\sigma_{ct}] = \beta[\sigma'_{ct}] + 4\rho \le f_{cu,k}/4$$

先张法 $$[\sigma_{ct}] = \beta[\sigma'_{ct}] + 3\rho \le f_{cu,k}/4$$

混凝土基本容许名义拉应力　　（MPa）表14-2

注：仅适用于C60以下混凝土

构件名称	裂缝宽度限值（mm）	混凝土强度等级		
		C30	C40	≥C50
先张法构件	0.1	—	4.6	5.5
	0.15	—	5.3	6.2
	0.20	—	6.0	6.9
构件名称	裂缝宽度限值（mm）	混凝土强度等级		
		C30	C40	≥C50
后张法构件	0.1	3.2	4.1	5.0
	0.15	3.5	4.6	5.6
	0.20	2.8	5.1	6.2

混凝土容许名义拉应力的构件高度修正系数　表14-3

构件高度(mm)	≤200	400	600	800	≥1000
修 正 系 数	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7

（4）求所需的有效预加力 N_{pe}及相应的预应力钢筋面积 A_p

根据式（14-54）计算梁受拉边缘混凝土所需要的有效预压应力 σ_{pc}，即：

$$\boxed{\sigma_{pc} \geq \sigma_{st} - [\sigma_{ct}]}$$

$$\boxed{\sigma_{pc} = N_{pe}\left(\frac{1}{A} + \frac{e_p}{W}\right)}$$

由式表示 σ_{st} ，可得到：

$$N_{pe} \geq \frac{\frac{M_s}{W} - [\sigma_{ct}]}{\frac{1}{A} + \frac{e_p}{W}}$$

相应所需要的预应力钢筋面积：

$$A_p = \frac{N_{pe}}{\sigma_{\text{con}} - \sum \sigma_l}$$

（5）根据受弯构件正截面承载力要求，计算所需的非预应力钢筋面积 A_s ；

（6）按正截面强度计算，检查受压区高度x是否满足 $x \leq \xi_b h_o$ ，防止超筋破坏。

三、 构造要求

1、 部分预应力混凝土梁应采用混合配筋。位于受拉区边缘的非预应力钢筋宜采用直径较小的带肋钢筋，以较密的间距布置。

2、采用混合配筋的受弯构件，其普通钢筋数量，应根据预应力度的大小按下列原则配置：

①当预应力度较高（$\lambda > 0.7$）时，按最小配筋率 $\rho_s = A_s / A_{he}$ ＝(0.2～0.3)%，设置普通钢筋；

②当预应力度中等（0.4≤ λ≤0.7）时，由于非预应力钢 A_{he} 筋得数量相对增多，因此，钢筋的直径，特别是最外排得直径应予以加大；

③当预应力度较低（$\lambda < 0.4$）时，非预应力钢筋的数量已超过了预应力钢筋数量，构件受力性能已接近钢筋混凝土构件，故可按钢筋混凝土梁的构造规定配置普通钢筋。

3、 普通钢筋宜采用HRB335级、HRB400级热轧钢筋。

4、 截面配筋率

①最小配筋率。对部分预应力混凝土受弯构件的最小配筋率要求满足

$$M_u / M_{cr} > 1.25$$

满足条件的部分预应力混凝土构件，从开裂到破坏将具有一定的安全储备，可避免一旦开裂即发生破坏的现象。

②最大配筋率。满足受压区高度 $x \le \xi_b h_o$ 。

本章小节

- 部分预应力混凝土的基本概念、特点。
- 部分预应力混凝土受弯构件设计的内容、方法，注意与全预应力混凝土受弯构件设计的相同和不同点。
- 部分预应力混凝土受弯构件钢筋设计的方法、特点，名义拉应力和预应力度法计算的特点。
- 部分预应力混凝土梁开裂后使用阶段的应力计算的弹性分析计算方法。