

项目 4 预应力混凝土构件

学习目标

- ▶ 了解预应力混凝土构件对材料的要求。
- ▶ 掌握先张法、后张法的施工工艺及锚具的分类。
- ▶ 熟悉预应力损失的种类、估算方法以及预防措施。
- ▶ 掌握预应力混凝土轴心受拉构件的计算方法。



4.1 预应力混凝土构件概述

4.1.1 预应力混凝土构件的基本概念

预应力混凝土构件即在构件承受荷载之前预先对受拉区的混凝土施加压力,使构件产生压缩变形和预压应力,当荷载作用使构件产生拉应力时,首先要抵消混凝土截面的预压应力,然后随着荷载的增加逐渐使混凝土受拉,进而出现裂缝,这就推迟了裂缝的出现,也相应地减小了裂缝宽度。

图 4-1 为轴心受拉构件的受力状态。此轴心受拉构件在荷载作用之前,通过预应力钢筋或锚固装置在构件两端施加一对大小相等、方向相反的预压力 N_p ,此时预压力在构件截面上产生的预压应力为 σ_{pc} 。当轴心受拉构件只作用于轴向拉力 N 时,截面上产生的拉应力为 σ_t 。若把两种应力相互叠加,则此时预应力混凝土轴心受拉构件截面上的实际应力减小为 $\sigma_t - \sigma_{pc}$,若 $\sigma_t - \sigma_{pc} \leq f_{tk}$,构件不开裂;若 $\sigma_t - \sigma_{pc} > f_{tk}$,则构件出现裂缝,但裂缝宽度比普通钢筋混凝土构件小得多。故预应力混凝土构件的抗裂度高,裂缝宽度小。

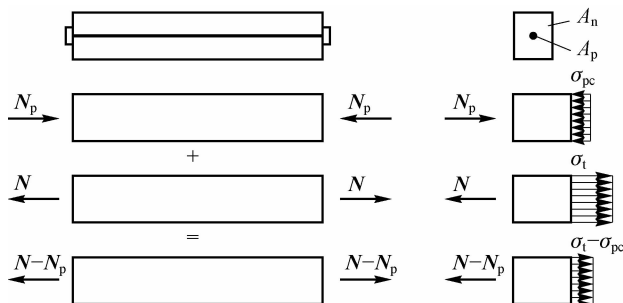


图 4-1 轴心受拉构件的受力状态

4.1.2 预应力混凝土构件的特点

1. 预应力混凝土构件的优点

预应力混凝土构件的主要优点如下：

(1) 抗裂性能较好。预应力混凝土构件对使用阶段可能开裂的受拉区施加了预压应力，而且预压应力的大小可根据需要人为进行控制，因而可避免普通混凝土构件在正常使用情况下出现裂缝或裂缝过宽的现象，改善了结构的使用性能，提高了结构的耐久性。

(2) 刚度较大。预应力混凝土构件由于施加了预应力，截面抗裂度提高，因而构件的刚度增大，所以可以减小构件变形。

(3) 充分利用高强度材料。预应力混凝土构件在承受外荷载作用之前，其预应力钢筋就有一定的拉应力存在，同时混凝土受到较高的预压应力。外荷载作用之后，预应力钢筋应力进一步增加，因而在预应力混凝土构件中高强度钢筋和高强度混凝土都能够被充分利用。同时高强度材料的采用可以减小截面尺寸，节省材料，减轻结构自重。

(4) 提高构件的抗剪能力。试验表明，纵向预应力钢筋有着锚栓的作用，阻碍了构件斜裂缝的出现与开展。此外，由于预应力混凝土梁中曲线钢筋合力的竖向分力将部分抵消剪力，因而提高了构件的抗剪能力。

2. 预应力混凝土构件的缺点

预应力混凝土构件虽然具有很多优点，但也存在着一些缺点，如设计计算比较复杂、施工工艺复杂、对质量要求较高、需要有专门的施工设备和技术条件、造价较高等。上述缺点正在不断地被克服，这将使预应力混凝土构件的发展前景更加广阔。

4.1.3 预应力的施加方法

预应力混凝土的主要特征是在构件承受荷载之前，钢筋和混凝土已建立起较大的预应力（钢筋为拉应力，混凝土为压应力），这种预应力是通过张拉钢筋实现的。根据预应力钢筋张拉时间的先后，习惯上把预加应力方法分为先张法和后张法。

1. 先张法

在浇筑混凝土之前先张拉预应力钢筋的方法称为先张法。

先张法的施工工序为：在台座上张拉钢筋，当钢筋应力达到规定值时锚固预应力钢筋，浇筑混凝土并养护构件，混凝土结硬达到一定强度（不低于强度设计值的 75%）后切断钢筋，由于钢筋回缩，混凝土产生预压应力，如图 4-2 所示。先张法的施工工艺简单、工序少、效率高，质量容易保证，是目前我国生产中小型预应力混凝土构件的主要方法。

在先张法构件中，预应力是通过构件端部的钢筋与混凝土之间的黏结力建立起来的，并且在一定长度内传递完成。通常假定预应力在此范围内按直线分布，预应力钢筋的应力从端部为零增大到 σ_{pe} ，这段长度称为传递长度 l_{tr} ，其值为

$$l_{tr} = \alpha \frac{\sigma_{pe}}{f_{tk}} d \quad (4-1)$$

式中， σ_{pe} 为放张时预应力钢筋的有效预应力值； d 为预应力钢丝、钢绞线的公称直径； α 为预

应力钢筋外形系数,按表 4-1 的规定确定; f'_{tk} 为放张时混凝土立方体抗压强度 f'_{cu} 相应的抗拉强度标准值。

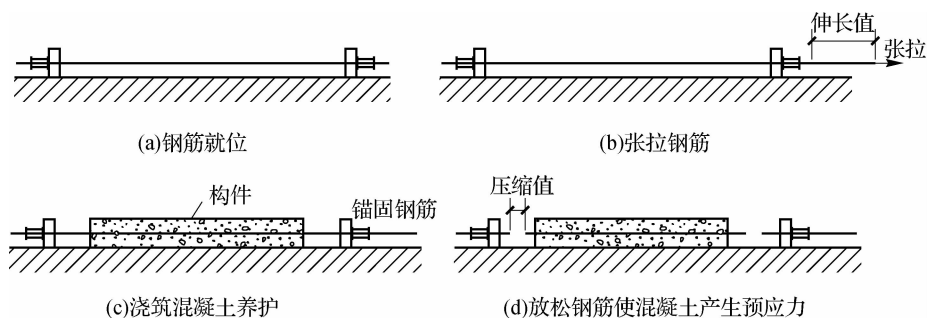


图 4-2 先张法的施工工序

表 4-1 预应力钢筋外形系数

预应力钢筋种类	刻痕钢丝	螺旋肋钢丝	钢绞线	
			三股	七股
α	0.19	0.13	0.16	0.17

注 1:当采用骤然放松预应力钢筋的施工工艺时, l_{tr} 的起点应从距构件末端 $0.25l_{tr}$ 处开始计算。

注 2:对热处理钢筋,可不考虑预应力传递长度 l_{tr} 。

2. 后张法

构件成型混凝土结硬后,在构件上张拉钢筋的方法称为后张法。

后张法的施工工序是:浇筑混凝土并在构件中预留孔道;当混凝土达到一定强度后(不低于设计强度值的 75%),将钢筋穿入孔道,依附于构件端部张拉预应力钢筋,同时混凝土受到挤压产生弹性压缩;当钢筋达到规定应力值时,锚固预应力钢筋,钢筋形成的回弹力通过锚具传给混凝土,从而使混凝土获得预压应力;最后在孔道内进行压力灌浆,防止钢筋锈蚀,使钢筋和混凝土更好地黏结成整体,如图 4-3 所示。

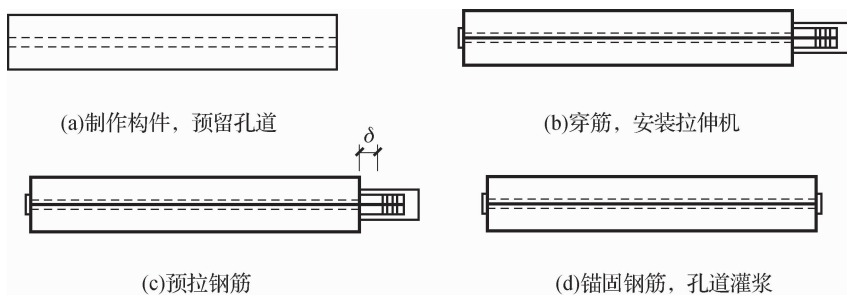


图 4-3 后张法的施工工序

后张法是在构件上张拉预应力钢筋,不需要台座,适用于现场制作生产受力较大的大型构件。但孔道抽芯和压力灌浆等工序复杂,构件两端需设有特制锚具,故后张法构件造价较高。后张法是目前我国生产大型预应力混凝土构件的主要方法。

后张法在张拉钢筋时混凝土也同时受到压缩,两者是同时建立起预应力的。换句话说,

在预应力钢筋张拉完毕时,混凝土已产生弹性压缩,即混凝土的预压应力等于钢筋的张拉力。

▶▶▶ 4.1.4 预应力混凝土构件对材料的要求

1. 对混凝土的要求

预应力混凝土构件对混凝土的要求如下:

(1)高强度。预应力混凝土构件需要采用高强度混凝土,才能建立起较高的预压应力。预应力混凝土构件的混凝土强度等级不宜低于 C40,且不应低于 C30。

(2)收缩和徐变小。混凝土的收缩和徐变小,可以减小由于混凝土的收缩和徐变引起的预应力损失。

(3)快硬、早强。混凝土的快硬、早强可以提高张拉设备的周转率,加快施工进度。

2. 对预应力钢筋的要求

我国目前在预应力混凝土构件中采用的预应力钢筋分为中强度预应力钢丝、预应力螺旋钢筋、消除应力钢丝和钢绞线四种。对预应力钢筋的力学性能有如下要求:

(1)高强度。预应力钢筋首先要具有很高的强度,因为混凝土预压应力的大小取决于预应力钢筋张拉应力的大小。张拉应力较大,才能在构件中建立起较高的预压应力,才能保证构件在发生各项预应力损失后仍能满足使用要求。

(2)一定的塑性。高强度钢筋的塑性能一般较低,为了避免预应力混凝土构件发生脆性破坏,要求预应力钢筋在拉断前应具有一定的伸长率,特别是对处于低温环境和受冲击荷载作用的构件,更应注意钢筋对塑性能 and 抗冲击韧性的要求。各类预应力钢筋在最大拉力下的总伸长率不得小于 3.5%。

(3)良好的加工性能。预应力钢筋应具有良好的可焊性,焊后不裂,不产生大的变形。同时,要求钢筋在镦粗前后,其物理力学性能基本不变。

(4)钢筋与混凝土之间应有较好的黏结强度。先张法构件的预应力主要依靠钢筋与混凝土之间的黏结强度来传递,因此钢筋与混凝土之间必须有良好的黏结强度。当采用光面高强度钢丝时,表面应做刻痕处理。

4.2 预应力混凝土轴心受拉构件计算

▶▶▶ 4.2.1 预应力混凝土轴心受拉构件在施工阶段的验算

在用后张法预应力混凝土构件张拉预应力筋时,或在先张法预应力混凝土构件放松预应力筋时,由于预应力损失尚未完成,混凝土受到的压力最大,而此时混凝土的强度一般最低(只达到设计强度的 75%),因此,为保证此时混凝土不被压碎,应予以验算。

对预应力混凝土轴心受拉构件,预压时一般处于全截面均匀受压。截面上混凝土法向压应力 σ_{cc} 应符合下列条件:

$$\sigma_{cc} \leq 0.8f'_{ck} \quad (4-2)$$

对于先张法:

$$\sigma_{cc} = \sigma_{pc, I} = \frac{A_p(\sigma_{con} - \sigma_{lI})}{A_0} \quad (4-3)$$

对于后张法:

$$\sigma_{cc} = \frac{A_p \sigma_{con}}{A_n} \quad (4-4)$$

式中, σ_{cc} 为施工阶段构件计算截面混凝土的最大法向压应力; f'_{ck} 为与各施工阶段混凝土立方体抗压强度 f'_{ck} 相应的抗压强度标准值, 按线性内插法查确定。

预应力钢筋及非预应力钢筋的合力位置如图 4-4 所示, 其大小分别按式(4-5)、式(4-6)计算。

$$\sigma_{pc} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_l)A_p - \sigma_{l5}A_s}{A_0} = \frac{N_p}{A_0} \quad (4-5)$$

$$\sigma_{pc} = \frac{(\sigma_{con} - \sigma_l)A_p - \sigma_{l5}A_s}{A_n} = \frac{N_p}{A_n} \quad (4-6)$$

用式(4-4)及式(4-6)求 $\sigma_{pc, I}$ 时, 令式中的 $\sigma_l = \sigma_{lI}$, $\sigma_{l5} = 0$; 求 $\sigma_{pc, II}$ 时, 令 $\sigma_l = \sigma_{lI} + \sigma_{lII}$ 。

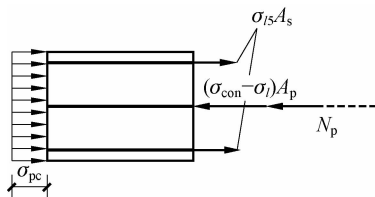


图 4-4 预应力钢筋及非预应力钢筋的合力位置

计算时所用构件截面为: 先张法用构件的换算截面面积 A_0 , 而后张法用构件的净截面面积 A_n 。

4.2.2 预应力混凝土轴心受拉构件在使用阶段的计算

1. 受弯构件预应力度

预应力度是由预加应力大小确定的消压弯矩与外荷载产生的弯矩的比值。受弯构件预应力度的表达式为

$$\lambda = M_0 / M \quad (4-7)$$

式中, M_0 为消压弯矩, 即使构件控制截面受拉边缘应力抵消到零时的弯矩, 可取 $M_0 = \sigma_{pc} W_0$, W_0 为换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩; M 为荷载(不包括预应力)的短期效应组合下控制截面的弯矩, 通常用 M_{sc} 表示, 如果截面不开裂, 则 $M_{sc} = \sigma_{sc} W_0$ 。

因此, 当框架大梁等受弯构件截面不开裂时, 式(4-7)可改写为

$$\lambda = \sigma_{pc} / \sigma_{sc} \quad (4-8)$$

对于全预应力混凝土, $\lambda \geq 1$; 对于部分预应力混凝土, $1 > \lambda > 0$; 对于钢筋混凝土, $\lambda = 0$ 。

部分预应力在这里采用了广义的定义, 包括限值预应力与部分预应力两个部分。限值预应力表明拉应力没有达到混凝土抗拉强度的设计值; 部分预应力表明混凝土拉应力没有限制, 但应进行裂缝宽度验算。按照荷载的短期效应组合下正截面混凝土的应力状态, 又将部分预应力混凝土分为以下两类:

(1) A类: 正截面中混凝土的拉应力不超过规定的限值。

(2)B类:允许正截面中拉应力超过规定的拉应力限值,但裂缝宽度不超过规定值。

2. 预应力度强度比

预应力度强度比的表达式为

$$i = \frac{A_p f_{pyk}}{A_p f_{pyk} + A_s f_{yk}} \quad (4-9)$$

式中, A_p 为控制截面处预应力筋的截面面积; A_s 为控制截面处普通钢筋的截面面积; f_{yk} 为普通钢筋强度标准值; f_{pyk} 为预应力钢筋强度标准值(残余变形为 0.2% 时的条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$)。

3. 承载力计算

当预应力混凝土轴心受拉构件达到承载能力极限状态时,全部轴心拉力由预应力钢筋和普通钢筋承担,此时,预应力钢筋和普通钢筋均已屈服,其正截面受拉承载力计算式为

$$\gamma_0 N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (4-10)$$

式中, γ_0 为结构重要性系数; N 为构件的轴心拉力设计值; f_{py} 、 f_y 分别为预应力钢筋与普通钢筋的抗拉强度设计值; A_p 、 A_s 分别为预应力钢筋与普通钢筋的截面面积。

4. 抗裂度验算及裂缝宽度验算

当构件截面上的应力超过预压应力 σ_{pc} 与混凝土实际抗拉强度 f_{tk} 之和时,截面将开裂。由于结构的使用功能及所处环境的不同,对构件裂缝控制的要求也会不同。因此,对预应力混凝土轴心受拉构件,应根据所处环境和使用要求选用相应的裂缝控制等级,并按下列规定进行受拉区边缘应力或正截面裂缝宽度验算。

(1)对使用阶段严格要求不出现裂缝的预应力混凝土轴心受拉构件,在荷载效应标准组合下应符合下列要求:

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (4-11)$$

(2)对使用阶段一般要求不出现裂缝的预应力混凝土轴心受拉构件,应符合下列要求:

①在荷载效应的标准组合下,

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq f_{tk} \quad (4-12)$$

②在荷载效应的准永久组合下,

$$\sigma_{cq} - \sigma_{pc} \leq 0 \quad (4-13)$$

$$\sigma_{ck} = N_k / A_0 \quad (4-14)$$

$$\sigma_{cq} = N_q / A_0 \quad (4-15)$$

$$A_0 = A_c + \alpha_{Es} A_s + \alpha_{Ep} A_p \quad (4-16)$$

式中, σ_{ck} 为荷载效应标准组合下的混凝土法向应力; σ_{cq} 为荷载效应准永久组合下的混凝土法向应力; N_k 、 N_q 分别为按荷载效应标准组合、准永久组合计算的轴向拉力值; A_0 为换算截面面积; A_c 为混凝土净截面面积。

(3)对使用阶段允许开裂的轴心受拉构件,按荷载效应标准组合计算,并考虑荷载效应的准永久组合影响的最大裂缝宽度 w_{max} ,要求不应超过最大裂缝允许值 w_{lim} ,即

$$w_{max} \leq w_{lim} \quad (4-17)$$

裂缝宽度限值 w_{lim} 的取值:一类环境条件为 0.3 mm;二、三类环境条件为 0.2 mm。最大裂缝宽度 w_{max} 的计算及验算公式同普通钢筋混凝土构件的计算。

$$w_{max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left[1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right] \quad (4-18)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}} \quad (4-19)$$

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (4-20)$$

$$\rho_{te} = A_s + A_p A_{te} \quad (4-21)$$

$$\sigma_{sk} = N_k - N_{p0} A_p + A_s \quad (4-22)$$

$$N_{p0} = \sigma_{p0} A_p - \sigma_{l5} A_s \quad (4-23)$$

式中, α_{cr} 为构件受力特征系数, 对预应力混凝土轴心受拉构件取 $\alpha_{cr} = 2.2$; E_s 为钢筋的弹性模量; c 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离, 当 $c < 20$ mm 时, 取 $c = 20$ mm, 当 $c > 65$ mm 时, 取 $c = 65$ mm, 其间按线性内插法取值; A_{te} 为有效受拉混凝土的截面面积, 对轴心受拉构件取构件截面面积; A_s 为受拉区纵向非预应力钢筋截面面积; A_p 为受拉区纵向预应力钢筋截面面积; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, 当 $\psi < 0.2$ 时, 取 $\psi = 0.2$, 当 $\psi > 1.0$ 时, 取 $\psi = 1.0$, 对直接承受重复荷载的构件, 取 $\psi = 1.0$; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径; d_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的公称直径; n_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的根数; v_i 为受拉区第 i 种纵向钢筋的相对黏结特性系数, 如表 4-2 所示; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率, 在最大裂缝宽度计算中, 当 $\rho_{te} < 0.01$ 时, 取 $\rho_{te} = 0.01$; σ_{sk} 为按荷载效应的标准组合计算的预应力钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力; N_{p0} 为混凝土法向预应力等于零时预应力钢筋及非预应力钢筋的合力; σ_{p0} 为受拉区预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋的应力。

对于先张法:

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l \quad (4-24)$$

对于后张法:

$$\sigma_{p0} = \sigma_{con} - \sigma_l + \alpha_E \sigma_{pc, II} \quad (4-25)$$

式中, α_E 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值。

表 4-2 钢筋的相对黏结特性系数

钢筋类别	非预应力钢筋		先张法预应力钢筋			后张法预应力钢筋		
	光面钢筋	带肋钢筋	带肋钢丝	螺旋肋 钢丝	刻痕钢丝、 钢绞线	带肋钢筋	钢绞线	光面钢丝
v_i	0.7	1.0	1.0	0.8	0.6	0.8	0.5	0.4

注: 对环氧树脂涂层带肋钢筋, 其相对黏结特性系数应按表列系数的 0.8 倍取用。

4.3 预应力损失值计算

4.3.1 张拉控制应力

张拉控制应力是指张拉预应力钢筋时钢筋所控制达到的最大应力值, 用 σ_{con} 表示。

$$\sigma_{con} = \frac{N}{A_p} \quad (4-26)$$

式中, N 为张拉设备所指示的总张拉力; A_p 为预应力钢筋截面面积。

张拉控制应力的取值大小直接影响预应力混凝土构件的使用效果。从提高预应力钢筋的利用率来看, σ_{con} 越高越好, 这样在构件抗裂性相同的情况下可以减少用钢量。另外, σ_{con} 越高, 混凝土的预压应力越高, 构件的抗裂性能也越好。但 σ_{con} 也不能过高, 以免造成构件出现裂缝时的荷载与极限荷载接近, 使构件在破坏前没有明显预兆且延性变差; 此外, σ_{con} 过高, 会使在施工阶段构件的预拉区可能因拉力过大而直接开裂, 对后张法构件则可能造成端部混凝土局部受压破坏。如果 σ_{con} 取值过低, 则预应力钢筋经过各种损失后对混凝土产生的预压力过小, 达不到使用效果。

预应力钢筋的 σ_{con} 不宜超过表 4-3 规定的限值, 且消除应力钢丝、钢绞线、中强度预应力钢筋的张拉控制应力值不应小于 $0.4f_{ptk}$, 预应力螺纹钢筋的张拉控制应力值不宜小于 $0.5f_{pyk}$ 。

表 4-3 σ_{con} 限值

钢筋种类	消除应力钢丝、钢绞线	中强度预应力钢丝	预应力螺纹钢筋
σ_{con}	$\leq 0.75f_{ptk}$	$\leq 0.70f_{ptk}$	$\leq 0.85f_{pyk}$

注: f_{ptk} 为预应力钢筋极限强度标准值, f_{pyk} 为预应力螺纹钢筋屈服强度标准值。

当符合下列情况之一时, 表 4-3 中的张拉控制应力限值可相应提高 $0.05f_{ptk}$ 或 $0.05f_{pyk}$:

- (1) 要求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) 要求部分抵消由于应力松弛、摩擦、钢筋分批张拉以及预应力筋与张拉台座之间的温差等因素产生的预应力损失。

4.3.2 预应力损失和减少损失的措施

预应力损失是在受到张拉工艺和材料特性等因素的影响下, 使得预应力混凝土构件从张拉钢筋开始直到构件使用的整个过程中, 预应力钢筋的张拉应力不断降低的现象。由于预应力损失会降低混凝土中的预压应力, 从而降低构件的抗裂度及刚度, 因此正确分析、估算预应力损失并且尽可能采取措施减少预应力损失是非常重要的。

1. 张拉端锚具变形和预应力钢筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1}

当预应力钢筋张拉至 σ_{con} 且锚固在台座或构件上时, 由于锚具受力后变形, 锚具、垫板与构件之间的缝隙被挤紧, 以及钢筋在锚具中的内缩滑移, 造成预应力钢筋松动回缩而引起的预应力损失, 用 σ_{l1} 表示。 σ_{l1} 既出现在先张法构件中, 又出现在后张法构件中。对于预应力直线钢筋, σ_{l1} 可按式(4-27)计算。

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_s \quad (4-27)$$

式中, a 为张拉端锚具变形和钢筋内缩值, 可按表 4-4 规定的值取用; l 为张拉端至锚固端之间的距离; E_s 为预应力钢筋的弹性模量。

表 4-4 锚具变形和预应力钢筋内缩值 a

单位: 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
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6~8

对于块体拼成的结构,其预应力损失还应考虑块体间填缝的预压变形。当采用混凝土或砂浆为填缝材料时,每条填缝的预压变形值可取 1 mm。

减小此种预应力损失的措施如下:

- (1) 选择变形小和钢筋内缩小的锚(夹)具,并尽量减少垫板的数量。
- (2) 增加先张法台座的长度,当台座长度超过 100 m 时, σ_{l1} 可忽略不计。

2. 预应力钢筋的摩擦引起的预应力损失 σ_{l2}

σ_{l2} 包括后张法预应力混凝土构件中的预应力筋与孔道壁之间的摩擦损失、张拉端锚口摩擦损失及构件内预应力筋在转向装置处的摩擦损失等。

对后张法预应力混凝土构件,当采用直线孔道张拉钢筋时,孔道尺寸偏差、孔壁粗糙、预应力钢筋不直、表面粗糙等,使预应力钢筋与孔道壁之间产生摩擦阻力而引起预应力损失。这种摩擦损失距离预应力钢筋张拉端越远,影响越大。当采用曲线孔道张拉钢筋时,因钢筋贴紧孔道壁,摩擦损失会更大。这种预应力损失 σ_{l2} 可按式(4-28)计算。

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{1}{e^{kx + \mu\theta}} \right) \quad (4-28)$$

当 $kx + \mu\theta \leq 0.3$ 时, σ_{l2} 可按式(4-29)计算。

$$\sigma_{l2} = (kx + \mu\theta) \sigma_{\text{con}} \quad (4-29)$$

式中, x 为张拉端至计算截面的孔道长度,可近似取该段孔道在纵轴上的投影长度; θ 为张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角; k 为考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数,按表 4-5 规定的值取用; μ 为预应力筋与孔道壁之间的摩擦系数,按表 4-5 规定的值取用。

表 4-5 摩擦系数 k 及 μ 值

孔道成型方式	k	μ	
		钢绞线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
预埋金属波纹管	0.001 5	0.25	0.50
预埋塑料波纹管	0.001 5	0.15	—
预埋钢管	0.001 0	0.30	—
抽芯成型	0.001 4	0.55	0.60
无黏结预应力筋	0.004 0	0.09	—

为了减少摩擦损失,常采取以下措施:

- (1) 两端张拉。对较长的构件可在两端同时进行张拉,则计算孔道长度可减少一半,但将引起 σ_{l2} 的减少。

(2)超张拉。张拉程序为:0→1.1 σ_{con} ,保持荷载 2 min→0.85 σ_{con} ,保持荷载 2 min→ σ_{con} 。

3. 预应力钢筋与张拉设备之间的温差引起的预应力损失 σ_{l3}

为了缩短先张法构件的生产周期,加快台座的周转,在混凝土浇筑后,常采用加热养护的办法加速混凝土的凝结硬化。升温时,新浇筑的混凝土尚未结硬,钢筋因受热自由膨胀而伸长,但两端的台座温度基本不升高,距离保持不变,所以预应力钢筋变松,即因张拉应力降低而产生预应力损失 σ_{l3} 。降温时,混凝土已结硬,并与钢筋结成整体而一起回缩,加之两者具有相近的温度膨胀系数,故两者的回缩基本相同,所损失的 σ_{l3} 无法恢复。这项预应力损失只发生在采用蒸汽养护的先张法构件中。

当混凝土采用加热养护时,设预应力钢筋与承受拉力的台座之间的温差为 $\Delta t(^{\circ}\text{C})$,钢筋的线膨胀系数 $\alpha=1\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,台座间的距离为 l ,则 σ_{l3} 可按式(4-30)计算。

$$\sigma_{l3} = \epsilon_s E_s = \frac{\Delta l}{l} E_s = \frac{\alpha l \Delta t}{l} E_s = \alpha E_s \Delta t \quad (4-30)$$

$$\sigma_{l3} = \alpha E_s \Delta t = 1.0 \times 10^{-5} \times 2.0 \times 10^5 \times \Delta t = 2\Delta t$$

减小 σ_{l3} 的措施如下:

(1)采用两次升温养护。先在常温下养护,待混凝土强度达到 7.5~10 N/mm² 时,再逐渐升温至规定的养护温度,此时可以认为钢筋与混凝土已结成整体,能一起胀缩而无应力损失。

(2)在钢模上张拉预应力钢筋。由于预应力钢筋在钢模上,所以升温时两者温度相同,因而不会产生温差引起的预应力损失。

4. 预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4}

钢筋在高应力作用下,由于预应力钢筋的塑性变形,在钢筋长度保持不变的条件下,钢筋的应力会随时间的增长而逐渐降低,这种现象称为预应力钢筋的应力松弛。其所降低的拉应力值即为预应力损失 σ_{l4} 。

钢筋的应力松弛与时间有关,在张拉完毕后的前几分钟内发展较快,24 h 内大约完成 80%,之后趋于缓慢。应力松弛的大小还与钢筋的品种和张拉控制应力有关。钢筋应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4} 可按下列规定计算:

1)消除应力钢丝、钢绞线

(1)普通松弛。

$$\sigma_{l4} = 0.40 \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}} \quad (4-31)$$

(2)低松弛。

①当 $\sigma_{\text{con}} \leq 0.7 f_{\text{ptk}}$ 时

$$\sigma_{l4} = 0.125 \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.5 \right) \sigma_{\text{con}} \quad (4-32)$$

②当 $0.7 f_{\text{ptk}} < \sigma_{\text{con}} \leq 0.8 f_{\text{ptk}}$ 时

$$\sigma_{l4} = 0.2 \left(\frac{\sigma_{\text{con}}}{f_{\text{ptk}}} - 0.575 \right) \sigma_{\text{con}} \quad (4-33)$$

2)中强度预应力钢丝、预应力螺纹钢筋

(1)中强度预应力钢丝。

$$\sigma_{l4} = 0.08\sigma_{\text{con}}$$

(2) 预应力螺纹钢筋。

$$\sigma_{l4} = 0.03\sigma_{\text{con}}$$

减少钢筋应力松弛损失的措施是采用超张拉工艺。此外,当 $\sigma_{\text{con}}/f_{\text{ptk}} \leq 0.5$ 时, σ_{l4} 可取零。

5. 混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5}

混凝土在空气中结硬时会产生体积收缩,而在预应力作用下,混凝土沿受压方向会产生徐变。两者均会导致构件长度缩短,预应力钢筋也随之回缩,造成预应力损失 σ_{l5} 。由于混凝土的收缩和徐变是互相伴随产生的,而且两者引起的钢筋应力变化规律也基本相同,故可将两者合并在一起考虑。混凝土收缩和徐变引起的受拉区及受压区预应力钢筋的应力损失分别用 σ_{l5} 与 σ'_{l5} 表示,其值可按下列方法确定:

(1) 先张法构件。

$$\sigma_{l5} = \frac{60 + 340 \frac{\sigma_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho} \quad (4-34)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{60 + 340 \frac{\sigma'_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho'} \quad (4-35)$$

(2) 后张法构件。

$$\sigma_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho} \quad (4-36)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma'_{\text{pc}}}{f'_{\text{cu}}}}{1 + 15\rho'} \quad (4-37)$$

式中, σ_{pc} 、 σ'_{pc} 分别为受拉区、受压区预应力钢筋合力点处的混凝土法向压应力; f'_{cu} 为施加预应力时的混凝土立方体抗压强度; ρ 、 ρ' 分别为受拉区、受压区预应力钢筋和普通钢筋的配筋率,对于先张法构件, $\rho = (A_p + A_s)/A_0$, $\rho' = (A'_p + A'_s)/A_0$, 对于后张法构件, $\rho = (A_p + A_s)/A_n$, $\rho' = (A'_p + A'_s)/A_n$, 对于对称配置预应力钢筋和普通钢筋的构件,配筋率 ρ 、 ρ' 应按钢筋总截面面积的一半计算; A_0 为构件换算截面面积; A_n 为构件净截面面积。

当结构处于年平均相对湿度低于 40% 的环境下时, σ_{l5} 和 σ'_{l5} 值应增加 30%。混凝土收缩和徐变引起的预应力损失是所有损失中最大的一种,为了减少此项损失,应采取减小混凝土收缩和徐变的各种措施。

(1) 采用高强度等级水泥,减少水泥用量,降低水胶比,采用干硬性混凝土。

(2) 采用级配好的集料,加强振捣,提高混凝土的密实性。

(3) 加强养护,以减少混凝土的收缩。

6. 环形构件采用螺旋式预应力钢筋时局部挤压混凝土引起的预应力损失 σ_{l6}

用螺旋式预应力钢筋作配筋的环形构件,如水池、油罐、压力管道等,当采用后张法直接

在混凝土构件上进行张拉时,预应力钢筋将对环形构件的外壁产生径向压力,混凝土在预应力钢筋的挤压下会发生局部压陷,造成构件直径有所减小,预应力钢筋中的拉应力降低,从而引起预应力损失 σ_{l6} 。该项预应力损失只发生在后张法构件中。

σ_{l6} 的大小与环形构件的直径 d 成反比,即 d 越小, σ_{l6} 越大。为了简化计算,《混凝土结构设计规范》规定,当 $d \leq 3$ m 时, $\sigma_{l6} = 30$ N/mm²; 当 $d > 3$ m 时, $\sigma_{l6} = 0$ 。

4.3.3 预应力损失值的组合

上述六项预应力损失有的只在先张法构件中出现,有的只在后张法构件中出现,有的在两种构件中均出现。另外,这些损失不是同时发生的,而是在不同阶段分批产生的,为了便于分析和计算预应力构件在各阶段的预应力损失值,按照混凝土预压结束前和预压结束后,分别对先张法构件和后张法构件的预应力损失值进行组合,见表 4-6。通常把混凝土预压结束前产生的应力损失称为第一批损失 (σ_{l1}),混凝土预压结束后产生的应力损失称为第二批损失 (σ_{lC})。

表 4-6 各阶段预应力损失值的组合

预应力损失值的组合	先张法构件	后张法构件
混凝土预压结束前(第一批)的损失 σ_{l1}	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l3} + \sigma_{l4}$	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2}$
混凝土预压结束后(第二批)的损失 σ_{lC}	σ_{l5}	$\sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l6}$

注:如需区分先张法构件由于钢筋应力松弛引起的损失值 σ_{l4} 在第一批和第二批损失中所占的比例,可根据实际情况确定。

当计算求得的预应力总损失值 σ_l 小于下列数值时,应按下列数值取用:先张法构件为 100 N/mm²,后张法构件为 80 N/mm²。

4.4 预应力混凝土构件的构造要求

4.4.1 先张法预应力混凝土构件的构造要求

1. 先张法预应力筋尺寸及预留孔道尺寸

(1)先张法预应力筋之间的最小净间距如表 4-7 所示。

表 4-7 先张法预应力筋之间的最小净间距

钢筋类型	预应力钢丝	三股钢绞线	七股钢绞线
绝对值/mm	15	20	25
相对值	2.5d 或 1.25d _e		

注:d 为预应力筋的公称直径, d_e 为混凝土粗骨料的最大粒径。

(2)预留孔道的内径宜比预应力束外径及需穿过孔道的连接器外径大 6~15 mm,且孔道的截面面积宜为穿入预应力束截面面积的 3.0~4.0 倍。这是施工时穿筋布置预应力束

及锚具的最基本条件。

(3)端面孔道的相对位置应综合考虑锚(夹)具的尺寸、张拉设备压头的尺寸、端面混凝土的局部承压能力等因素来妥善布置,必要时应适当加大端面尺寸,以避免施工误差等意外因素造成的张拉施工困难。

(4)对预制构件,预留孔道之间的水平净间距不宜小于 50 mm,且不宜小于粗骨料粒径的 1.25 倍;孔道至构件边缘的净间距不宜小于 30 mm,且不宜小于孔道直径的 1/2。

(5)现浇混凝土梁中的预留孔道在竖直方向的净间距不应小于孔道外径,水平方向的净间距不宜小于 1.5 倍孔道外径,且不应小于粗骨料粒径的 1.25 倍;从孔道外壁至构件边缘的净间距,梁底不宜小于 50 mm,梁侧不宜小于 40 mm,对裂缝控制等级为三级的梁,梁底、梁侧分别不宜小于 60 mm 和 50 mm。

(6)大跨度受弯构件往往在制作时需要预先起拱,以抵消正常使用时产生的过大挠度,此时预留孔道宜随构件同时起拱,以免引起计算以外的次应力。

2. 先张法预应力混凝土构件端部的加固措施

(1)单根配置的预应力筋,其端部宜设置长度不小于 150 mm 且不少于 4 圈的螺旋筋。当有可靠经验时,也可利用支座垫板上的插筋代替螺旋筋,但插筋数量不应少于 4 根,其长度不宜小于 120 mm。

(2)如果在支座处布置螺旋筋有困难,为满足预制构件及搁置支座连接的需要,有时需在构件端部预埋支座垫板,并相应配有埋件的锚筋,可以利用支座垫板上的锚筋(插筋)代替螺旋筋约束预应力筋。预应力筋必须从两排插筋中穿过,并且插筋数量不少于 4 根,长度不小于 120 mm。在我国,预制的屋面板端部多采取这种措施。

(3)分散布置的多根预应力筋,宜在构件端部 $10d$ 且不小于 100 mm 长度范围内设置 3~5 片与预应力筋垂直的钢筋网片,此处 d 为预应力筋的公称直径。钢筋网片一般用细直径钢筋焊接或绑扎。

(4)采用预应力钢丝配筋的薄板,由于端面尺寸有限,前述局部加强配筋的措施均难以执行,在板端 100 mm 长度范围内宜适当加密横向钢筋。

4.4.2 后张法预应力混凝土构件的构造要求

后张法预应力混凝土构件的构造要求具体如下:

(1)对预应力屋面板、吊车梁等构件,宜将一部分预应力筋在靠近支座处弯起,弯起的预应力筋宜沿构件端部均匀布置。

(2)出于构件安装的需要,预制构件端部预应力筋锚固处往往有局部凹进。此时应增设折线构造钢筋,连同支座垫板上的竖向构造钢筋(插筋或埋件的锚筋)共同构成对锚固区域的约束。

(3)由于构件端部尺寸有限,集中的应力来不及扩散,端部局部承压区以外的孔道仍可能劈裂。因而,在局部受压间接钢筋配置区以外,在构件端部长度 l 不小于 $3e$ (e 为截面重心线上部或下部预应力筋的合力点至邻近边缘的距离)、但不大于 $1.2h$ (h 为构件端部截面高度),高度为 $2e$ 的附加配筋区范围内,应均匀配置附加防劈裂箍筋或网片,且体积配筋率 ρ_v 不应小于 0.5%。

(4)当构件端部预应力筋需集中布置在截面下部或集中布置在截面上部和下部时,应在构件端部 $0.2h$ (h 为构件端部截面高度)的范围内设置附加竖向防端面裂缝构造钢筋。

(5)预制构件安装就位后,往往以焊接的形式与下部支承结构相连。若构件长度较大,则应在构件端部配置足够的非预应力纵向构造钢筋。

(6)后张法预应力构件在张拉锚固后应在孔道内灌浆以保护预应力筋免受锈蚀并具备一定的黏结锚固作用。

(7)在预应力筋的锚(夹)具下及张拉设备压头的支承处,应有事先放置的钢垫板以避免巨大的预压应力直接作用在混凝土上,其尺寸根据构造布置确定。

(8)后张法预应力筋的锚固应选用可靠的锚具,其形式和质量要求应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接器》(GB/T 14370—2015)的规定。此外,对外露金属锚具应采取可靠的防锈措施,或者浇筑混凝土加以封闭。

思考与练习

- (1)什么是预应力混凝土结构?它可分为哪些类型?
- (2)试述预应力混凝土构件对材料的要求。
- (3)施加预应力的方法有哪几种?它们的主要区别是什么?
- (4)确定张拉控制应力时应遵循哪些原则?
- (5)预应力损失有哪些?它们是如何产生的?采取什么措施可以减少这些损失?