



9.2 张拉控制应力与预应力损失

9.2.1 张拉控制应力 σ_{con}

张拉控制应力是指预应力钢筋张拉时需要达到的最大应力值，即用张拉设备所控制施加的张拉力除以预应力钢筋截面面积所得到的应力，用 σ_{con} 表示。

张拉控制应力值大小主要与张拉方法及钢筋种类有关。先张法的张拉控制应力值高于后张法。后张法在张拉预应力钢筋时，混凝土即产生弹性压缩，所以张拉控制应力为混凝土压缩后的预应力钢筋应力值；而先张法构件，混凝土是在预应力钢筋放张后才产生弹性压缩，故需考虑混凝土弹性压缩引起的预应力值的降低。消除应力钢丝和钢绞线这类钢材材质稳定，对后张法张拉时的高应力，在预应力钢筋锚固后降低很快，不会发生拉断，故其张拉控制应力值较高些。

《规范》规定，预应力钢筋的张拉控制应力不宜超过表9-2规定的限值。

表9-2 张拉控制应力限值

钢筋种类	张拉方法	
	先张法	后张法
消除应力钢丝、钢绞线	$0.75f_{ptk}$	$0.75f_{ptk}$
中强度预应力钢丝	$0.70f_{ptk}$	
预应力螺纹钢筋	$0.85f_{pyk}$	$0.65f_{ptk}$

消除应力钢丝、钢绞线、中强度预应力钢丝的张拉控制应力限不应小于 $0.4f_{ptk}$ 。 f_{ptk} 为预应力钢筋抗拉强度标准值；预应力螺纹钢筋的张拉控制应力限不宜小于 $0.5f_{pyk}$ 。 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9-2中的张拉控制应力限值可提高 $0.05f_{ptk}$ 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钢筋；
- (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钢筋与张拉台座之间的温差等因素产生的预应力损失。

9.2.2 预应力损失

在预应力混凝土构件施工及使用过程中，预应力钢筋的张拉应力值由于张拉工艺和材料特性等原因逐渐降低。这种现象称为预应力损失。预应力损失会降低预应力的效果，我国规范采用的是将各种因素产生的预应力损失值分别计算然后叠加的方法。下面对这些预应力损失分项进行讨论。

1. 锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1}

预应力钢筋张拉完毕后，用锚具锚固在台座或构件上。由于锚具压缩变形、垫板与构件之间的缝隙被挤紧以及钢筋和楔块在锚具内的滑移等因素的影响，将使预应力钢筋产生预应力损失，以符号 σ_{l1} 表示。

(1) 直线形预应力钢筋 σ_{l1} 可按下式计算：

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_s \quad (9-1)$$

式中： a ——张拉端锚具变形和钢筋内缩值（mm），按表 9-3 取用；

l ——张拉端至锚固端之间的距离 (mm);
 E_s ——预应力钢筋弹性模量 (N/mm²)。

表9-3 锚具变形和钢筋内缩值 a (mm)

锚具类别		a
支撑式锚具 (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	有预压时	5
	无预压时	6~8

(2) 后张法曲线预应力钢筋, 对圆心角 $\theta \leq 30^\circ$ 的圆弧形 (抛物线形) 曲线预应力钢筋的锚固损失 σ_{l1} 可按下式计算:

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_{con} l_f \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_f} \right) \quad (9-2)$$

反向摩擦影响长度 l_f (mm) 可按下列公式计算:

$$l_f = \sqrt{\frac{\alpha E_s}{1000 \sigma_{con} (\mu / r_c + \kappa)}} \quad (9-3)$$

式中: r_c ——圆弧形曲线预应力钢筋的曲率半径 (m);

μ ——预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦系数, 按表9-3取用;

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数, 按表9-3取用;

x ——张拉端至计算截面的距离 (m);

a ——张拉端锚具变形和钢筋内缩值 (mm), 按表9-2取用。

减小 σ_{l1} 的措施: ①选择锚具变形和钢筋内缩值 a 较小的锚具; ②尽量减少垫板的数量; ③对先张法, 可增加台座的长度。

2. 预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失 σ_{l2}

后张法张拉预应力钢筋时, 预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失 σ_{l2} , 按下列公式计算:

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\kappa x + \mu \theta)}] \quad (9-4)$$

当 $(\kappa x + \mu \theta) \leq 0.3$ 时, σ_{l2} 可按近似公式计算:

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} (\kappa x + \mu \theta) \quad (9-5)$$

式中: x ——张拉端至计算截面的孔道长度 (m), 可近似取该段孔道在纵轴上的投影长度;

θ ——张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角 (rad);

κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数, 按表9-4采用;

μ ——预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦系

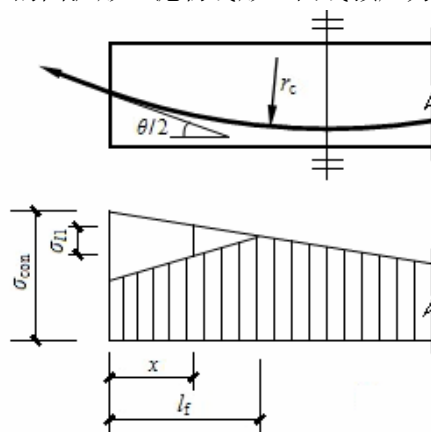


图9-12 圆弧形曲线预应力钢筋的预应力损失 σ_{l1}

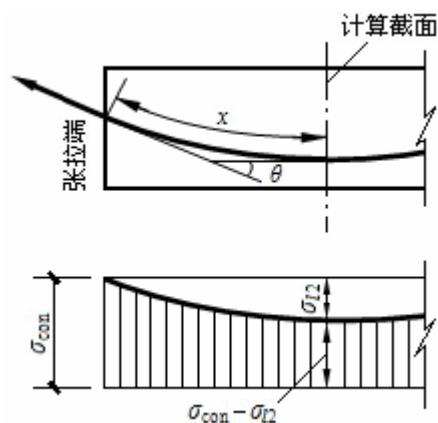


图9-13 摩擦引起的预应力损失 σ_{l2}



数，按表9-3采用。

表9-4 摩擦系数

孔道成型方式	κ	μ	
		钢绞线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
预埋金属波纹管	0.0015	0.25	0.50
预埋塑料波纹管	0.0015	0.15	—
预埋钢管	0.0010	0.30	—
橡胶管或钢管抽芯成型	0.0014	0.55	0.60
无粘结预应力筋	0.0040	0.09	—

减小 σ_{l2} 的措施：(1) 采用两端张拉。采用两端张拉时孔道长度可取构件长度的1/2计算，其摩擦损失也减小一半。(2) 采用超张拉。 $0 \rightarrow 1.1\sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷2min}} 0.85\sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷2min}} \sigma_{con}$

当采用电热后张法时，不考虑这项损失。先张法构件当采用折线形预应力钢筋时，在转向装置处也有摩擦力，由此产生的预应力摩擦损失按实际情况确定。

3. 预应力钢筋与台座之间温差引起的预应力损失 σ_{l3}

先张法构件在浇筑混凝土后采用蒸气养护时，升温阶段钢筋受热伸长，台座长度不变，故钢筋应力值降低，而此时混凝土尚未硬化。降温时，混凝土已经硬化并与钢筋产生了粘结，能够一起回缩，由于这两种材料的线膨胀系数相近，原来建立的应力关系不再发生变化。

预应力钢筋与台座之间的温差为 Δt ，钢筋的线膨胀系数 $\alpha=0.00001/^\circ\text{C}$ ，则预应力钢筋与台座之间的温差引起的预应力损失为

$$\sigma_{l3} = E_s \varepsilon_s = E_s \Delta l / l = E_s \alpha l \Delta t / l = E_s \alpha \Delta t = 2.0 \times 10^5 \times 0.00001 \times \Delta t = 2\Delta t \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (9-6)$$

为了减小温差引起的预应力损失 σ_{l3} ，可采取以下措施：①采用二次升温养护方法：先在常温或略高于常温（20~25） $^\circ\text{C}$ 下养护，待混凝土达到一定强度（7.5~10）MPa后，再逐渐升温至养护温度，这时二者可共同变形，不再有预应力损失；②采用整体式钢模板：预应力钢筋锚固在钢模上，因钢模与构件一起加热养护而无温差，不会引起此项预应力损失。

4. 预应力钢筋应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4}

在高拉应力作用下，随着时间的增长，钢筋中将产生塑性变形，在钢筋长度保持不变的情况下，钢筋的拉应力会随着时间的增长而逐渐降低，这种现象称为钢筋的应力松弛。 σ_{l4} 按下列公式计算：

(1) 预应力钢丝、钢绞线

$$\sigma_{l4} = 0.4 \left(\frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.5 \right) \sigma_{con} \quad (9-7)$$

(2) 中强度预应力钢丝

$$\sigma_{l4} = 0.08 \alpha_{con} \quad (9-10)$$

(3) 预应力螺纹钢筋

$$\sigma_{l4} = 0.03 \alpha_{con} \quad (9-11)$$

当 $\sigma_{con} / f_{ptk} \leq 0.5$ 时，预应力钢筋应力松弛损失值可取为零。当需考虑不同时间的松弛损失时，可参考《规范》附录E。

为减小预应力钢筋应力松弛损失可采用超张拉，先将预应力钢筋张拉至 $1.05\sigma_{con}$ ，持荷2分钟，再卸荷至张拉控制应力 σ_{con} 。因为在高应力状态下，短时间所产生的应力松弛值即可达到在低应力状态下较长时间才能完成的松弛值。所以，经超张拉后部分松弛已经完成，锚

固后的松弛值即可减小。

5. 混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5}

混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 σ_{l5} 在预应力总损失中占的比重较大, 约为 40%~50%, 混凝土收缩、徐变引起受拉区和受压区预应力钢筋的预应力损失 σ_{l5} 、 σ'_{l5} 可按下列公式计算:

(1) 一般情况

①先张法构件

$$\sigma_{l5} = \frac{60 + 340 \frac{\sigma_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho} \quad (9-12)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{60 + 340 \frac{\sigma'_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'} \quad (9-13)$$

②后张法构件

$$\sigma_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho} \quad (9-14)$$

$$\sigma'_{l5} = \frac{55 + 300 \frac{\sigma'_{pcI}}{f'_{cu}}}{1 + 15\rho'} \quad (9-15)$$

式中: σ_{pcI} 、 σ'_{pcI} ——在受拉区、受压区预应力钢筋合力点处的混凝土法向压应力。此时, 预应力损失值仅考虑混凝土预压前 (第一批) 的损失。 σ_{pcI} 、 σ'_{pcI} 值不得大于 $0.5 f'_{cu}$; 当 σ_{pcI} 为拉应力时, 则式 (9-13)、(9-15) 中的 σ_{pcI} 应取为零。计算混凝土法向应力 σ_{pcI} 、 σ'_{pcI} 时, 可根据构件的制作情况考虑自重的影响;

f'_{cu} ——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非预应力钢筋的配筋率:

对先张法构件: $\rho = (A_p + A_s) / A_0$, $\rho' = (A_p' + A_s') / A_0$;

对后张法构件: $\rho = (A_p + A_s) / A_n$, $\rho' = (A_p' + A_s') / A_n$ 。

其中 A_0 为混凝土换算截面面积, A_n 为混凝土净截面面积。对于对称配置预应力钢筋和非预应力钢筋的构件, 配筋率 ρ 、 ρ' 应按钢筋总截面面积的一半计算。

当结构处于年平均相对湿度低于 40% 的环境下, σ_{l5} 与 σ'_{l5} 值应增加 30%。当采用泵送混凝土时, 宜根据实际情况考虑混凝土收缩、徐变引起应力损失值的增大。

减少混凝土的收缩和徐变的措施有: ①采用高标号水泥, 以减少水泥用量; ②采用高效减水剂, 以减小水灰比; ③采用级配好的骨料, 加强振捣, 提高混凝土的密实性; ④加强养护, 以减小混凝土的收缩。

6. 用螺旋式预应力钢筋作配筋的环形构件, 因混凝土的局部挤压引起的预应力损失 σ_{l6}

采用螺旋式预应力钢筋作配筋的环形构件, 由于预应力钢筋对混凝土的挤压, 使构件的直径减小 (图 9-15), 从而引起预应力损失 σ_{l6} 。

σ_{l6} 的大小与构件的直径成反比, 直径愈小, 损失愈大。

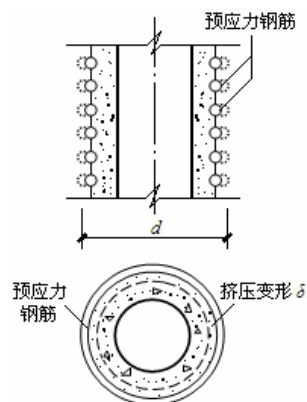


图 9-15 螺旋式预应力钢筋对环形构件的局部挤压变形



《结构规范》规定：

当构件直径 $d \leq 3\text{m}$ 时， $\sigma_{l6} = 30\text{N/mm}^2$ ；

当构件直径 $d > 3\text{m}$ 时， $\sigma_{l6} = 0$ 。

9.2.3 预应力损失值的组合

1. 预应力损失值的组合

有的预应力损失只发生在先张法中，有的则发生于后张法中，有的在先张法和后张法中均有，而且是分批出现的。为了便于分析和计算，设计时可将预应力损失分为两批：（1）混凝土预压完成前出现的损失，称第一批损失 σ_{l1} ；（2）混凝土预压完成后出现的损失，称第二批损失 σ_{l11} 。先、后张法预应力构件在各阶段的预应力损失组合见表9-5，其中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，如需区分，可根据实际情况定；先张法构件的 σ_{l2} ，是对折线预应力钢筋，考虑钢筋转向装置处摩擦引起的应力损失，其数值按实际情况确定。

表9-5 各阶段的预应力损失组合

预应力的损失组合	先张法构件	后张法构件
混凝土预压前（第一批）损失	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l3} + \sigma_{l4}$	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2}$
混凝土预压后（第二批）损失	σ_{l5}	$\sigma_{l4} + \sigma_{l5} + \sigma_{l6}$

2. 预应力总损失的下限值

考虑到预应力损失的计算值与实际值可能存在一定差异，为确保预应力构件的抗裂性，《规范》规定，当计算求得的预应力总损失 $\sigma_l = \sigma_{l1} + \sigma_{l11}$ 小于下列数值时，应按下列数据取用：

先张法构件： $\sigma_l = 100\text{N/mm}^2$ ；

后张法构件： $\sigma_l = 80\text{N/mm}^2$ 。