



石家莊鐵道大學  
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

网络精品课程

# 混凝土结构设计

## 预应力损失

主讲：李朝红

# 目录

---

1. 预应力损失
2. 预应力损失的分析与计算
3. 钢筋的有效预应力

# 1. 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的现象称为预应力损失。
- ❖ 由于最终稳定后的应力值才对构件产生实际的预应力效果。因此，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。

# 1. 预应力损失

《公路桥规》规定，预应力混凝土构件在持久状况正常使用极限状态中，应考虑以下6项损失：

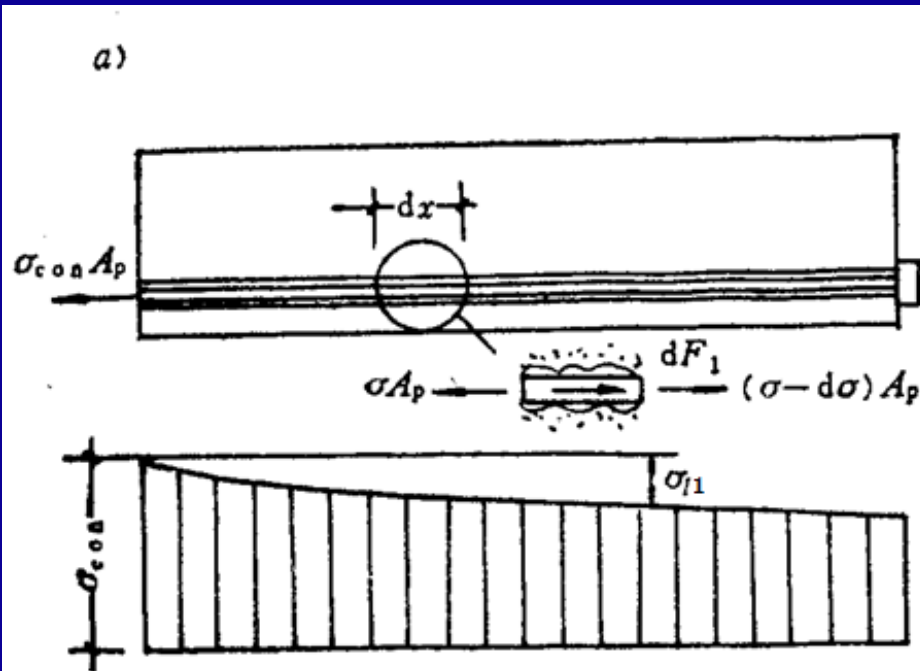
- 1) 预应力筋与管道壁之间摩擦损失 $\sigma_{l1}$
- 2) 锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩损失 $\sigma_{l2}$
- 3) 预应力钢筋与台座间的温差损失 $\sigma_{l3}$
- 4) 混凝土的弹性压缩损失 $\sigma_{l4}$
- 5) 预应力钢筋的应力松弛损失 $\sigma_{l5}$
- 6) 混凝土的收缩和徐变引起的应力损失 $\sigma_{l6}$

## 2. 预应力损失的分析与计算

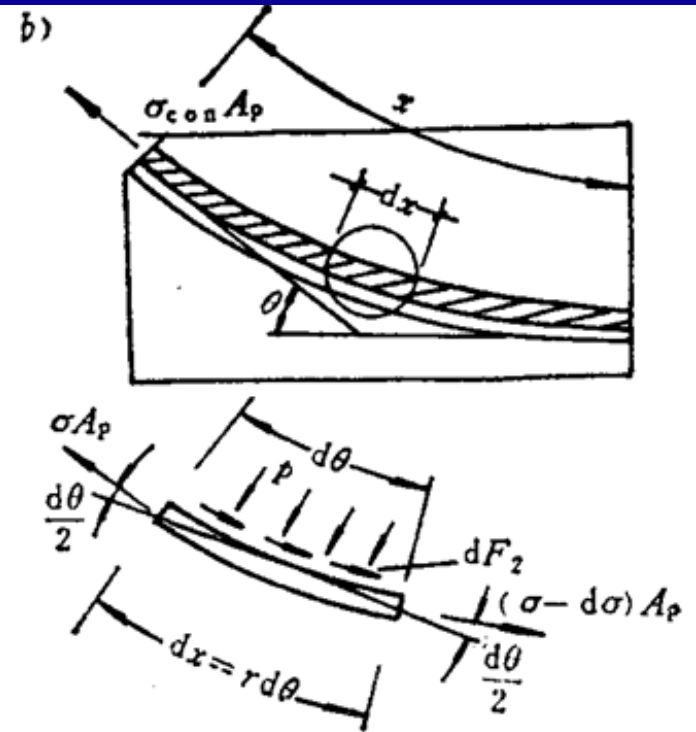
### 1 ) 预应力筋与管道壁间摩擦引起的应力损失—摩擦损失 $\sigma_{l1}$ (只存在于后张法构件中)

摩擦损失包括两部分：

(1) 由管道的位置偏差引起的、孔壁粗糙及钢筋表面的粗糙等原因，使得预应力钢筋与孔壁摩擦产生损失——也称为管道偏差影响摩擦损失，其数值较小；



直线预应力筋



曲线预应力筋

管道摩阻引起的钢筋预应力损失计算简图

## 2. 预应力损失的分析与计算

(2) 张拉曲线预应力钢筋，由于孔道的曲率，预应力筋与孔之间产生径向压力所引起的摩擦损失——称为**弯道影响摩擦损失**，其数值较大。

摩擦损失计算公式为：

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

$\mu$ —预应力钢筋与管道壁的摩擦系数，可按附表10.3-1采用；

## 2. 预应力损失的分析与计算

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

$\theta$ —从张拉端至计算截面间管道平面曲线的夹角之和 (rad) ;空间曲线  $\theta = \sqrt{\theta_H^2 + \theta_V^2}$

$k$ —管道每米局部偏差对摩擦的影响系数，可按附表10.3-1采用；

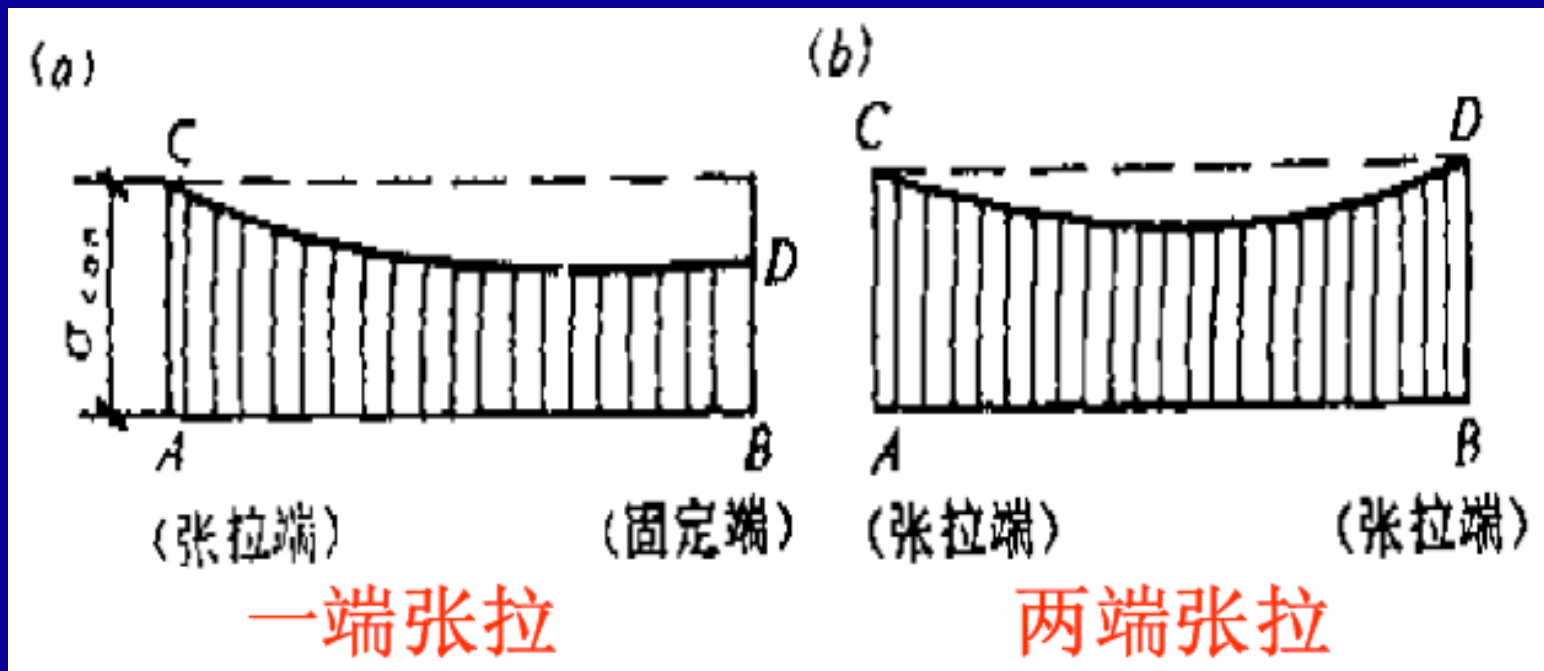
$x$ —从张拉端至计算截面的管道长度，可近似的取该段管道在构件纵轴上的投影长度 (m)。



## 2. 预应力损失的分析与计算

### 减少摩擦损失 $\sigma_{l1}$ 的措施：

- 采用两端张拉；



## 2. 预应力损失的分析与计算

### ● 采用超张拉。

超张拉可使构件截面应力也相应提高，当张拉回降至 $\sigma_{con}$ 时，钢筋因回缩受到反向摩擦力的作用，此回缩对受力最大的跨中截面影响很小，使跨中截面的预加应力得以提高。

注意：对于一般夹片式锚具（钢筋回缩自锚式锚具）不宜采用超张拉工艺。

## 2. 预应力损失的分析与计算

对于后张法预应力钢筋，其张拉工艺按下列要求进行：

对于钢绞线束

0 → 初应力 (  $0.1 \sim 0.15 \sigma_{con}$  左右 ) →  $1.05 \sigma_{con}$   
( 持荷  $2min$  ) →  $\sigma_{con}$  锚固

对于钢丝束

0 → 初应力 (  $0.1 \sim 0.15 \sigma_{con}$  左右 ) →  $1.05 \sigma_{con}$  ( 持荷  $2min$  ) → 0 →  $\sigma_{con}$  锚固

## 2. 预应力损失的分析与计算

### 2) 锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩引起的应力损失——锚固损失 $\sigma_{l2}$

当预应力张拉结束并进行锚固时，锚具受力变形、锚下垫板缝隙被压密以及钢筋向内回缩，此外，拼装式构件的接缝，在锚固后也将被压密变形引起的应力损失 $\sigma_{l2}$ 。

## 2. 预应力损失的分析与计算

直线管道可忽略钢筋回缩时的摩阻影响，近似按下式计算：

$$\sigma_{l2} = \frac{\Sigma \Delta l}{l} E_p$$

式中： $\Sigma \Delta l$ —张拉端锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值之和（ $mm$ ），可按附表10.3-2采用；

$l$ —张拉端至锚固端之间的距离；

$E_p$ —预应力钢筋的弹性模量。

## 2. 预应力损失的分析与计算

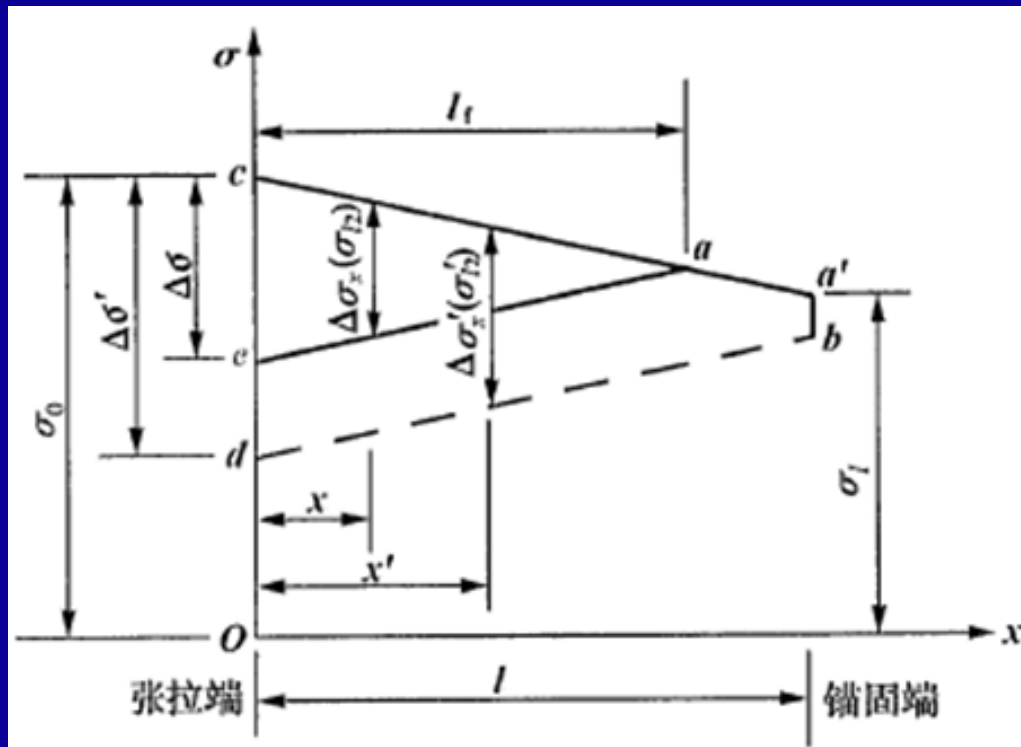
钢筋张拉时，曲线预应力筋与管道壁间摩擦力阻碍钢筋运动引起预应力损失 $\sigma_{l1}$ 。同样，锚固时预应力筋回缩，因管道壁的摩擦力受到阻碍，此摩阻力方向与张拉钢筋的摩阻力方向相反，称为**反向摩阻力**。

曲线管道应考虑反向摩阻的影响，反向摩阻的管道摩阻系数假定与正向摩阻的相同。

## 2. 预应力损失

### 《公路桥规》 $\sigma_{l2(x)}$ 简化计算方法

假定张拉端至锚固端范围内由管道摩阻引起的预应力损失沿梁长方向均匀分配。



## 2. 预应力损失的分析与计算

当 $l_f \leq l$ 时，预应力钢筋离张拉端 $x$ 处考虑反摩擦阻后的预应力损失 $\Delta\sigma_x(\sigma_{l2})$ ：

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

当 $l_f > l$ 时，预应力钢筋离张拉端 $x'$ 处考虑反摩擦阻后的预应力损失 $\Delta\sigma'_x(\sigma'_{l2})$ ：

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



## 2. 预应力损失的分析与计算

---

减小 $\sigma_{l2}$ 损失的方法:

- 采用超张拉；
- 选用 $\Sigma\Delta l$ 值小的锚具，尤其对于短小构件尤为重要。

注意：采用两端张拉会使 $\sigma_{l2}$ 损失增大。

## 2. 预应力损失的分析与计算

### 3) 钢筋与台座间的温差引起的应力损失—— 温差损失 $\sigma_{l3}$ （只存在于先张法构件中）

先张法构件在采用加热方法养护混凝土时，新浇混凝土尚未结硬，钢筋受热膨胀，而台座固定不动，钢筋长度保持不变，预应力筋相当于发生松弛引起应力下降 $\sigma_{l3}$ 。降温时预应力筋和混凝土已经形成整体，应力损失不能恢复。

## 2. 预应力损失的分析与计算

假设张拉时钢筋与台座的温度均为 $t_1$ ，混凝土加热养护时的最高温度为 $t_2$ ，此时钢筋尚未与混凝土粘结，温度由 $t_1$ 升为 $t_2$ 后钢筋在混凝土中自由变形 $\Delta l_t$ ：

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

## 2. 预应力损失的分析与计算

当停止升温养护时，混凝土已与钢筋粘结在一起，钢筋和混凝土将同时随温度变化而共同伸缩，因养护升温所降低的应力已不可恢复，形成温差应力损失 $\sigma_{l3}$ ：

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

## 2. 预应力损失的分析与计算

取预应力钢筋的弹性模量为

$E_p = 2 \times 10^5 \text{MPa}$ ，其温度线膨胀系数

$\alpha = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 则有：

$$\sigma_{l3} = 2(t_2 - t_1)$$

## 2. 预应力损失的分析与计算

减小温差损失  $\sigma_{l3}$  的措施:

### 1) 采用二次升温的养护方法

第一次由常温 $t_1$ 升温至 $t'_2$ 进行养护。初次升温的温度一般控制在 $20^{\circ}\text{C}$ 以内，待混凝土达到一定强度（例如 $7.5\text{-}10\text{MPa}$ ）能够阻止钢筋在混凝土中自由滑移后，再将温度升至 $t_2$ 进行养护。

## 2. 预应力损失的分析与计算

此时，钢筋将和混凝土一起变形，不会因第二次升温而引起应力损失，故计算的 $\sigma_{l3}$  温差只是 $(t_2'-t_1)$ 。

### 2) 在钢模上张拉预应力钢筋

如果张拉台座与被养护构件是共同受热、共同变形时，则不应计入此项应力损失。

## 2. 预应力损失的分析与计算

### 4) 混凝土弹性压缩引起的应力损失—— 弹性压缩损失 $\sigma_{l4}$

当混凝土受到预压力产生压缩变形时，已经锚固于构件上的预应力钢筋也会产生压缩应变 $\varepsilon_p = \varepsilon_c$ ，从而产生应力损失，即混凝土弹性压缩损失 $\sigma_{l4}$ 。



## 2. 预应力损失的分析与计算

### (1) 先张法构件

当预应力钢筋放张时，混凝土的弹性压缩应变引起的应力损失为：

$$\sigma_{l4} = \varepsilon_p \cdot E_p = \varepsilon_c \cdot E_p = \frac{\sigma_{pc}}{E_c} \cdot E_p = \alpha_{EP} \cdot \sigma_{pc}$$

$\sigma_{pc}$ —钢筋重心处，由预加力 $N_{p0}$ 产生的混凝土预压应力。

## 2. 预应力损失的分析与计算

### (2) 后张法构件

一次张拉时可不考虑 $\sigma_{l4}$ ，当采用分批张拉锚固，张拉后批钢筋时所产生的混凝土弹性压缩变形将使先批已张拉并锚固的预应力钢筋产生应力损失，称为分批张拉应力损失，也以 $\sigma_{l4}$ 表示。《公路桥规》规定 $\sigma_{l4}$ 可按下列公式计算：

$$\sigma_{l4} = \alpha_{Ep} \Sigma \Delta \sigma_{pc}$$

$\Sigma \Delta \sigma_{pc}$ ——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。

## 2. 预应力损失的分析与计算

简支梁近似求解 $\sum\Delta\sigma_{pc}$ 的方法:

(1) 取应力控制的截面作为全梁的平均截面进行计算, 其余截面不另计算, 简支梁可以取 $l/4$ 截面。

(2) 假定同一截面内的所有预应力钢筋, 都集中布于其合力作用点处, 并假定各批预应力钢筋的张拉力都相等, 等于各批钢筋张拉力的平均值。

## 2. 预应力损失的分析与计算

对于各批张拉预应力钢筋根数相同的情况, 计算得到分批张拉引起的平均应力损失为 :

$$\sigma_{l4} = \frac{m-1}{2m} \cdot \alpha_{Ep} \sigma_{pc}$$

$m$ —预应力钢筋的总批数 ;

$\sigma_{pc}$ —计算截面全部钢筋重心处由张拉所有预应力钢筋产生的混凝土法向应力。

## 2. 预应力损失的分析与计算

---

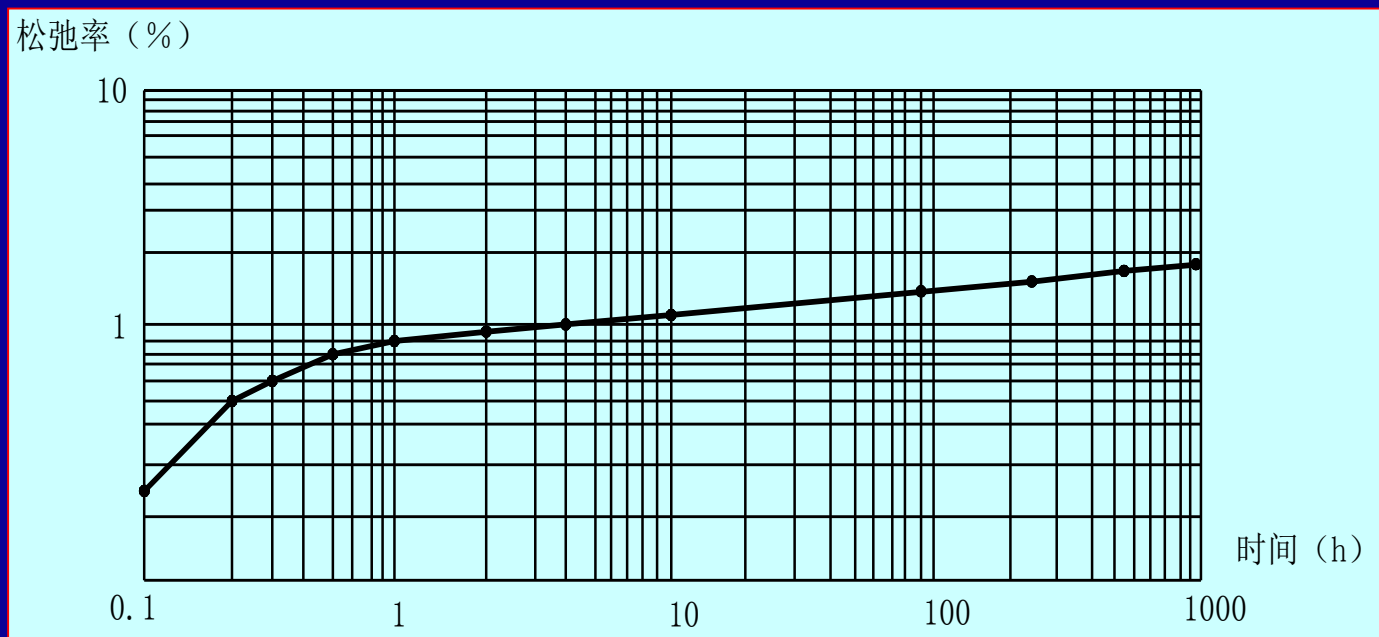
**分批张拉时，由于每批预应力钢筋损失不同，造成每批钢筋的实际有效预应力不同，常用的补救方法是：**

- 1) 对先张拉的钢筋进行超张拉；**
- 2) 对先张拉的钢筋进行重复张拉。**

## 2. 预应力损失的分析与计算

### 5) 钢筋松弛引起的应力损失—松弛损失 $\sigma_{l5}$

钢筋在应变保持不变的情况下，应力随时间的增长而降低的现象称作松弛。



预应力钢筋松弛曲线

## 2. 预应力损失的分析与计算

### 钢筋松弛特点:

- ❖ 钢筋初应力越高，应力松弛越大；
- ❖ 钢筋松弛量的大小主要与钢筋的品质有关，预应力钢丝和钢绞线按加工工艺分为Ⅰ级松弛（普通松弛）Ⅱ级松弛（低松弛）两种，低松弛钢筋的松弛值不到普通松弛钢筋的 $1/3$ ；
- ❖ 钢筋松弛时间有关，初期发展最快，24h内可完成50%。

## 2. 预应力损失的分析与计算

由钢筋松弛引起的应力损失终值，按下列规定计算：

对于精轧螺纹钢

一次张拉

$$\sigma_{l5} = 0.05\sigma_{con}$$

超张拉

$$\sigma_{l5} = 0.035\sigma_{con}$$



## 2. 预应力损失的分析与计算

### 对于预应力钢丝、钢绞线

$$\sigma_{l5} = \psi \cdot \zeta \cdot \left(0.52 \frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}} - 0.26\right) \cdot \sigma_{pe}$$

$\psi$ ——张拉系数，一次张拉 $\psi=1.0$ ，超张拉 $\psi=0.9$ ；

$\zeta$ ——钢筋松弛系数，I级松弛（普通松弛）

$\zeta=1.0$ ，II级松弛（低松弛） $\zeta=0.3$ ；

$\sigma_{pe}$ ——传力锚固时的钢筋应力，先张法构件 $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{l2}$ ；后张法构件 $\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_{l1} - \sigma_{l2} - \sigma_{l4}$ 。

## 2. 预应力损失

### 6) 混凝土收缩和徐变引起的应力损失— 收缩徐变损失 $\sigma_{l6}$

受拉区、受压区预应力钢筋的预应力损失为：

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

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

## 2. 预应力损失的分析与计算

### 减小 $\sigma_{l6}$ 的措施:

- ❖ 采用高标号水泥，减少水泥用量，降低水灰比；
- ❖ 采用级配良好的骨料，加强振捣，提高混凝土的密实性；
- ❖ 加强养护，以减少混凝土的收缩，
- ❖ 控制混凝土应力 $\sigma_{pc}$ ，要求 $\sigma_{pc} \leq 0.5f_{ck}$ ，以防止发生非线性徐变。

### 3. 钢筋的有效应力

预应力钢筋的有效应力 $\sigma_{pe}$ ，为预应力钢筋锚下控制应力 $\sigma_{con}$ 扣除相应阶段的预应力损失 $\sigma_l$ 后实际残存的预应力值。

**表10.3-5 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
传力锚固时的损失 $\sigma_{lI}$ (第一批)	$\sigma_{l2} + \sigma_{l3} + \sigma_{l4} + 0.5 \sigma_{l5}$	$\sigma_{l1} + \sigma_{l2} + \sigma_{l4}$
传力锚固后的损失 $\sigma_{lII}$ (第二批)	$0.5 \sigma_{l5} + \sigma_{l6}$	$\sigma_{l5} + \sigma_{l6}$

### 3. 钢筋的有效应力

在预加应力阶段，预应力筋中的有效预应力为：

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pI} = \sigma_{con} - \sigma_{II}$$

在使用阶段，预应力筋中的有效预应力，即永存预应力为：

$$\begin{aligned}\sigma_{pe} &= \sigma_{pII} = \sigma_{con} - (\sigma_{II} + \sigma_{III}) \\ &= \sigma_{con} - \sigma_l\end{aligned}$$

