

第7章 预应力工程



➤ 定义

预应力混凝土——在外荷载作用前，预先建立起有内应力的混凝土，其内应力的分布应能抵消或减少给定外荷载所产生的应力。

（注：混凝土中的预应力一般通过张拉预应力筋来实现。）

预应力钢结构——在设计、制造、安装、施工期间和使用过程中，采用人为方法引入预应力以提高结构承载力、刚度、稳定性的各类钢结构。

➤ 预应力混凝土分类

按预应力大小——全预应力混凝土和部分预应力混凝土。

按施加预应力方式——先张法、后张法和自应力。

按预应力筋粘结状态——有粘结、无粘结和缓粘结。

按施工方法——预制、现浇和叠合。

➤ 优点

利用高强钢材和混凝土，提高抗裂度和刚度，减少构件截面，节省材料，耐久性好，适用于大跨度结构等。

➤ 内容

包含：预应力钢材、锚（夹）具、张拉设备、预应力施工工艺等。



油压表

预应力混凝土构件

预应力筋

千斤顶

油泵

15.12.2004

◆ 7.1 预应力钢材和锚（夹）具

➤ 1) 预应力筋

✓ 预应力筋是使结构或构件产生预压应力的受力材料。

- 钢筋——精轧螺纹钢；
- 钢丝——高强低合金钢丝、碳素钢丝；
- 钢绞线

✓ 要求：高强、低松弛、耐腐蚀。

➤ 2) 锚（夹）具

✓ 预应力筋用**锚具**——预应力结构或构件中为保持预应力筋的拉力并将其传递到结构或构件上所用的**永久性**锚固装置。

✓ 预应力筋用**夹具**——预应力结构或构件施工时为保持预应力筋拉力并将其固定在张拉台座（设备）上的**临时**锚固装置。

✓ 按锚固原理分类：

- 支承式——螺母锚具，镦头锚具；
- 楔紧式——锥销锚具，夹片式锚具等。

✓ 基本要求：

- 可靠的锚固能力，并不超过预期的滑移值；
- 构造简单、加工方便、体形小、价格低、全部零件互换性好；
- 夹具和工具锚应具有多次重复使用的性能。

●7.1.1 精轧螺纹钢筋体系

包括：精轧螺纹钢筋、锚具（螺母）和连接器。

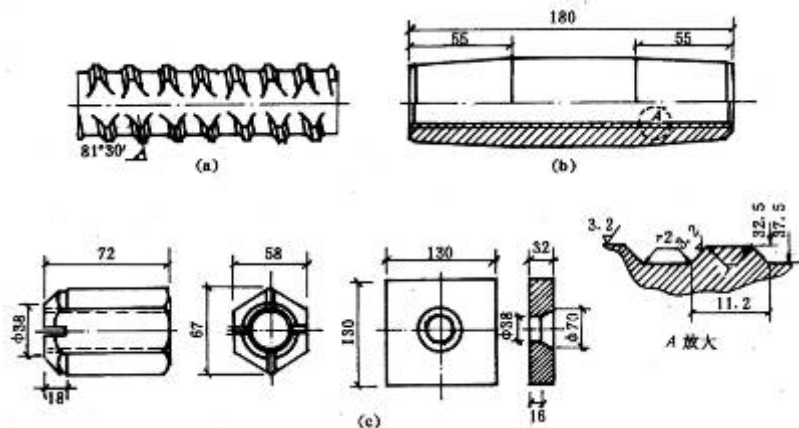
✓精轧螺纹钢筋外形为无纵肋而横肋不相连的螺扣，螺母与连接器的内螺纹应与之匹配，防止钢筋从中拉脱。

✓螺母分为平面和锥形两种。

✓锥形螺母可通过锥体与锥孔的配合，保证预应力筋的正确对中；开缝的作用是增强螺母对预应力筋的夹持作用。

✓螺母材料采用45号钢，调质热处理。

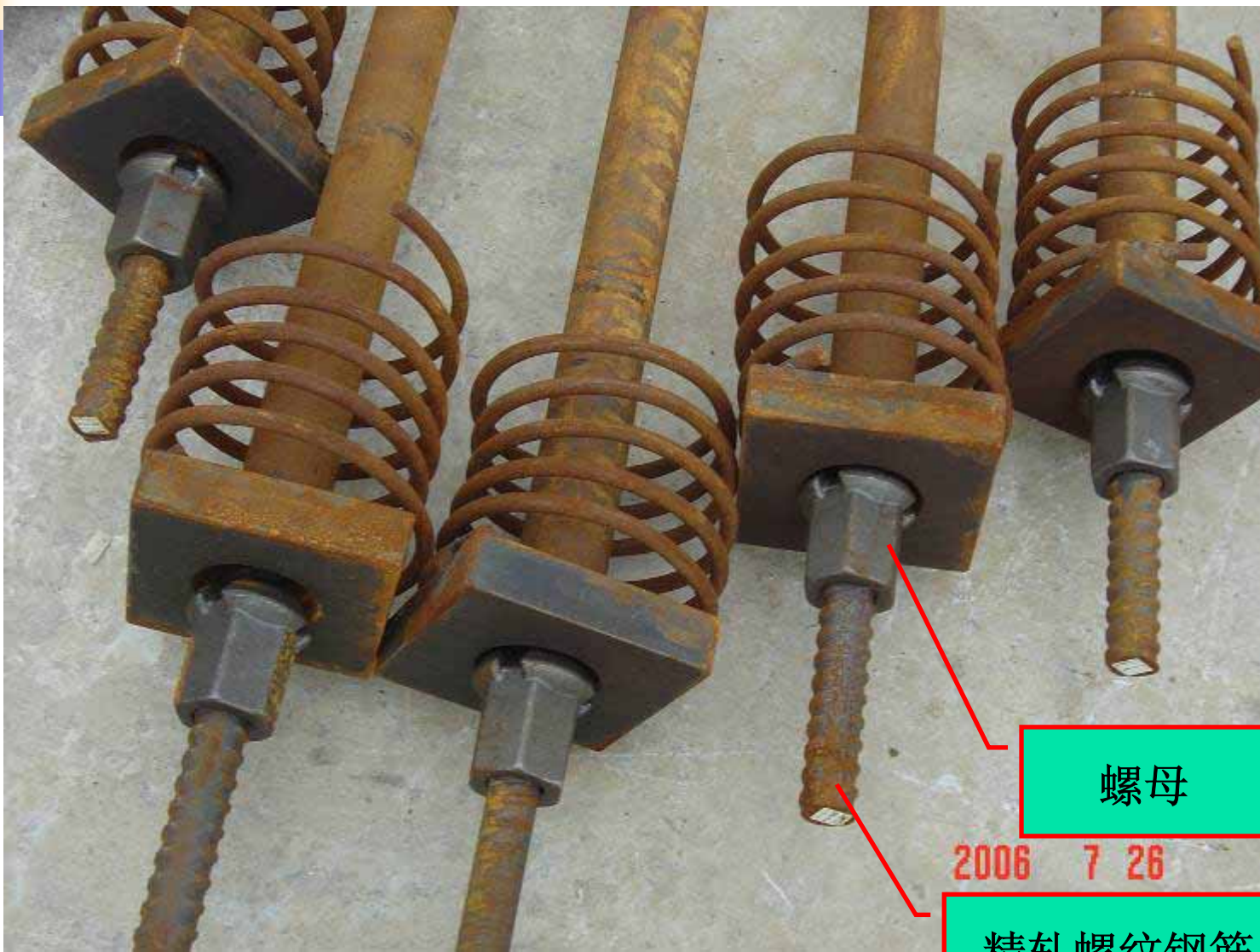
✓垫板也相应分为平面垫板和锥形垫板。



精轧螺纹钢筋锚具与连接器图

(a) 精轧螺纹钢筋外形；(b) 连接器；

(c) 锥形螺母与垫板




精轧螺纹钢筋体系

精轧螺纹钢筋

螺母

2006 7 26



● 7.1.3 钢丝体系

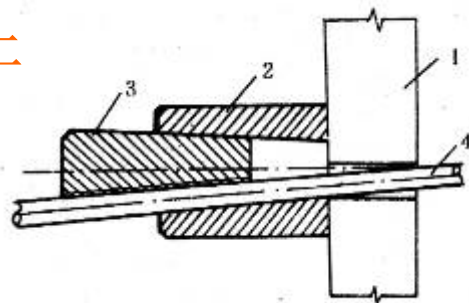
钢丝的锚（夹）具：单根锥销夹具、钢质锥形锚具和镦头锚具。

➤1) 碳素钢丝

- ✓ 碳素钢丝又称高强钢丝，采用优质高碳钢盘条制成。
- ✓ 主要品种有：矫直回火钢丝和低松弛钢丝。
- ✓ 常用直径为5mm，最大达7mm。5mm钢丝的力学性能指标为：抗拉强度常为1670、1770和1860N/mm²；伸长率不小于4%；反复弯曲次数不小于4次。其比例极限不小于抗拉强度的75%，屈服强度不小于抗拉强度的85%。
- ✓ 低松弛钢丝是冷拉钢丝在张力状态下（抗拉强度的30%~50%）经回火处理而成。
- ✓ 在先张法预应力混凝土构件中，为了增强钢丝与混凝土的握裹力，高强度钢丝的表面加工成螺旋肋。

➤ 2) 单根锥销夹具——用于先张法预应力混凝土

- ✓ 单根锥销夹具由套筒与锥销组成。
- ✓ 套筒采用45号钢，调质热处理。
- ✓ 适用于夹持直径为3~5mm的各类钢丝。



单根锥销夹具图

1一定位板；2一套筒；3一锥销；4一钢丝

➤ 3) 钢质锥形锚具

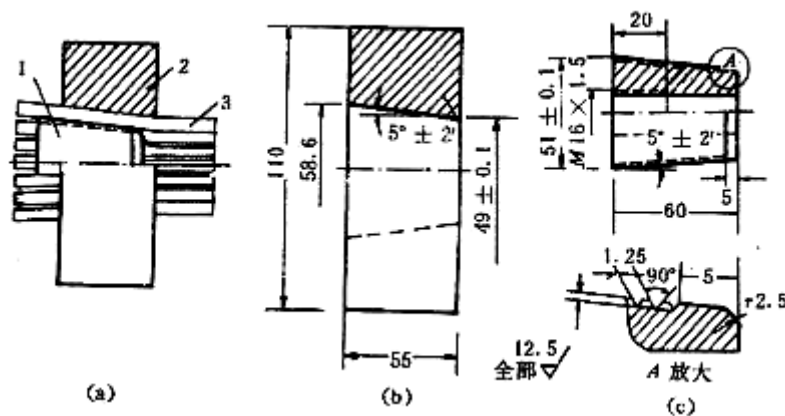
- ✓ 由锚环和锚塞组成。
- ✓ 锚环和锚塞采用45号钢，调质热处理，锚塞表面有细齿。

✓ 为防止钢丝在锚具内卡伤或卡断，锚环两端出口处必须有倒角，锚塞小头还应有5mm无齿段。

✓ 适用于锚固12~24 ϕ 5钢丝束。

✓ 使用时应保证锚环孔中心、预留孔道中心和千斤顶轴线三者同心，以防压伤钢丝或断丝。

✓ 锚塞的预压力宜为张拉力的50%~60%。



钢质锥形锚具图

(a) 组装图；(b) 锚环；(c) 锚塞
1—锚环；2—锚塞；3—钢丝束

✓ 自锁和自锚

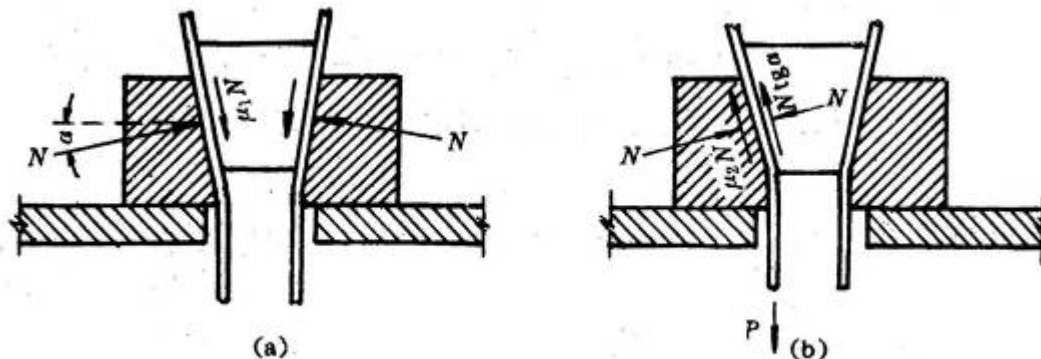
• **自锁**——就是使锚塞在顶压后不致弹回脱出。

自锁条件： $N \sin \alpha < \mu_1 N \cos \alpha$ ，即 $\operatorname{tg} \alpha \leq \mu_1$ 。

• **自锚**——就是使钢丝在拉力作用下带着锚塞楔紧而又不发生滑移。

$$\text{自锚条件：} K = \frac{F_{\max}}{P} = \frac{\mu_1 N + \mu_2 N}{\mu_2 N + N \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_2 + \operatorname{tg} \alpha} \geq 1$$

注：当 α 、 μ_2 值减小， μ_1 值越大时，则 K 值越大，自锚性能越好。但 α 值也不宜过小，否则锚环承受的环向张力过大，易导致锚具失效。



钢质锥形锚具受力分析图

(a) 锚具自锁；(b) 锚具自锚

P—钢丝拉力；N—正压力； α —锥角；

μ_1 —锚塞与钢丝间的摩擦系数； μ_2 —钢丝与锚环间的摩擦系数

➤4) 墩头锚具

✓墩头锚具利用钢丝两端的墩粗头来锚固预应力钢丝。

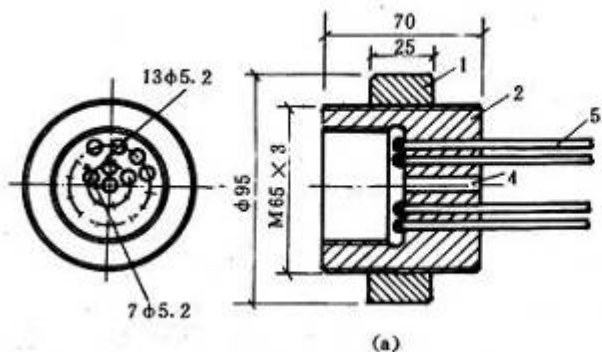
✓常用墩头锚具：锚杯与螺母(张拉端用)、锚板(固定端用)。

✓加工简单，锚具材料采用45号钢，张拉方便，锚固可靠，成本较低，但对钢丝束的等长要求较严。

✓调质热处理。

✓钢丝墩头，可采用液压冷墩器。

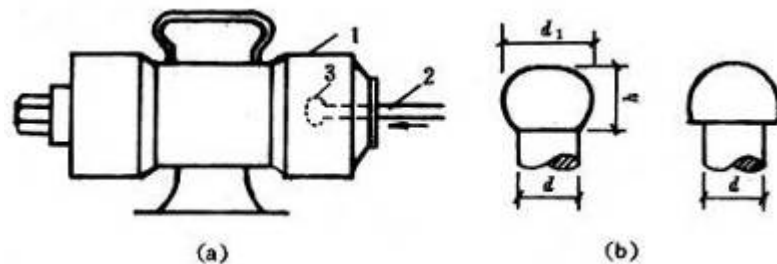
✓墩头要求：墩头尺寸要足，头型圆整，不偏歪，颈部母材不受损伤，钢丝的墩头强度不得低于钢丝强度标准值的98%。



钢丝束墩头锚具图

(a)张拉端锚环与螺母；(b)固定端锚板

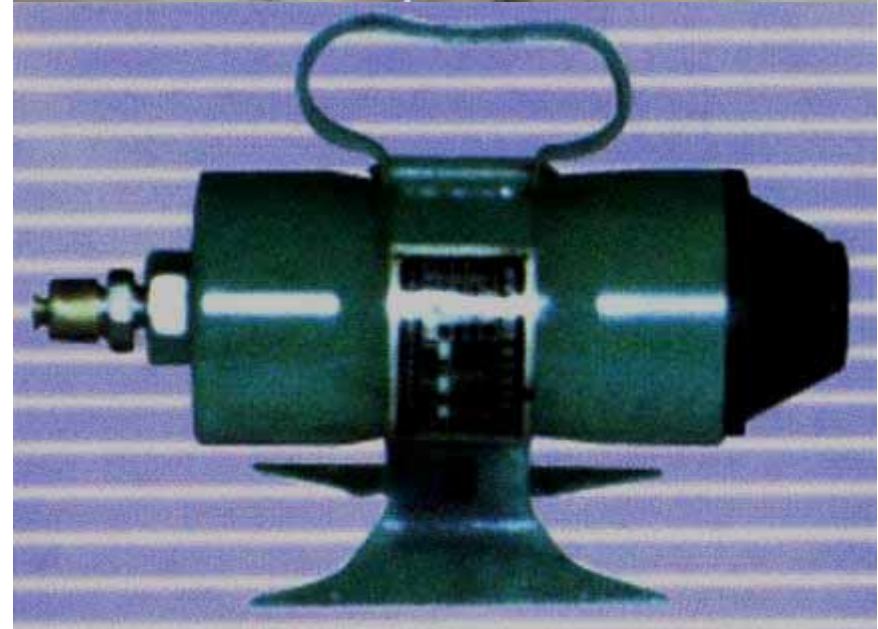
1—螺母；2—锚杯；3—锚板；4—排气孔；5—钢丝



钢丝墩头图

(a)液压冷墩器；(b)头型

1—冷墩器；2—钢丝；3—墩头



LD-10 (20) 型镦头器

● 7.1.4 钢绞线体系

钢绞线锚（夹）具：单孔夹片锚（夹）具、多孔夹片锚具和挤压锚具。

➤ 1) 钢绞线

✓ 钢绞线是用多根冷拔钢丝在绞线机上成螺旋形绞合，并经回火处理而成，捻距为钢绞线公称直径的12~16倍。

✓ 按构造不同分为：1×7、1×3与1×2钢绞线。

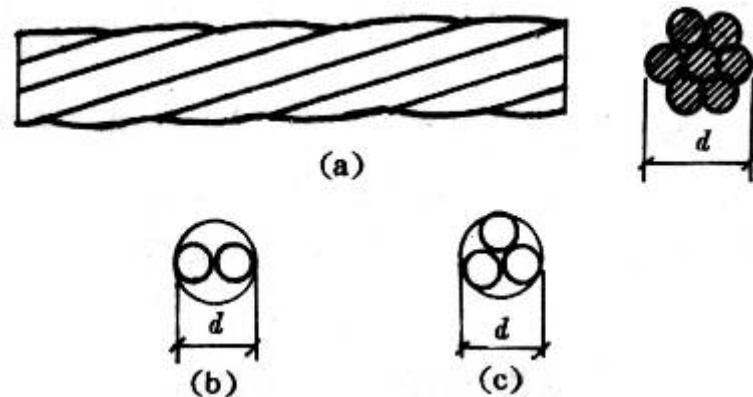
✓ 按直径不同分为：12.7mm、15.2mm和15.7mm。

✓ 1×3与1×2钢绞线仅用于先张法预应力混凝土构件。

✓ 1×7钢绞线是由6根外层钢丝围绕一根中心钢丝（直径加大2.5%）绞成。

✓ 1×7 φ^s15.2钢绞线的截面积为140mm²，线重1.101kg/m。

✓ 常用钢绞线抗拉强度级别为1860MPa。



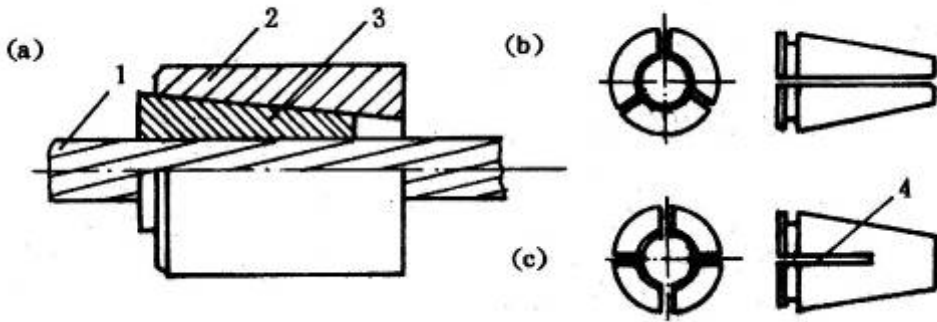
预应力钢绞线图

(a) 1×7钢绞线；(b) 1×2钢绞线；
(c) 1×3钢绞线；d—钢绞线公称直径



➤2) 单孔夹片锚(夹)具

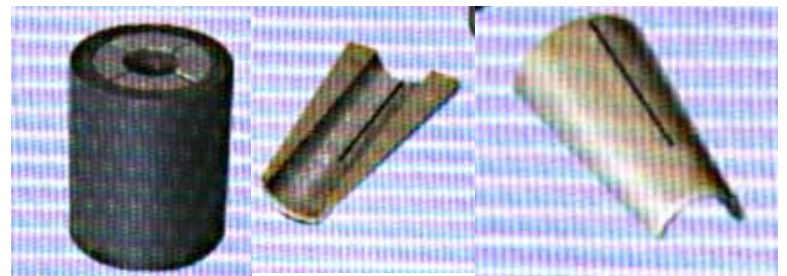
- ✓由锚环和夹片组成。锚环的锥角约为 7° ，45号钢，调质热处理。
- ✓夹片有三片式与二片式两种。三片式夹片按 120° 铣分，二片式夹片的背面上有一条弹性槽，以提高锚固性能。
- ✓主要用于无粘结预应力混凝土结构（后张法），也可用作先张法钢绞线夹具。
- ✓夹片式锚具应具有连续反复张拉的功能，利用行程不大的千斤顶经倒缸后可张拉任意长度的预应力筋。
- ✓夹片式锚具用于先张法夹具时，应在夹片与锚环之间垫塑料薄膜或涂石墨、石腊等，张拉后容易松开锚具重复使用。



单孔夹片式锚具图

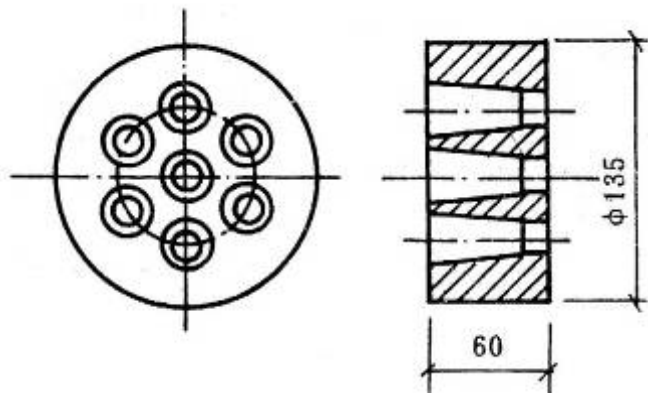
(a) 组装图；(b) 三夹片；(c) 二夹片

1—钢绞线；2—锚环；3—夹片；4—弹性槽



➤3) 多孔夹片锚具

- ✓ 多孔夹片锚具也称群锚，由多孔的锚板与夹片组成。在每个锥形孔内装一副夹片，夹持一根钢绞线。
- ✓ 每束钢绞线的根数不受限制；任何一根钢绞线锚固失效，都不会引起整束锚固失效。
- ✓ 锚板的材料及锥形孔与单孔夹片锚具的锚环相同，且夹片通用。
- ✓ 对于多孔夹片锚具，如采用大吨位千斤顶整束张拉有困难的情况下，也可采用小吨位千斤顶逐根张拉锚固。



7孔夹片锚具图



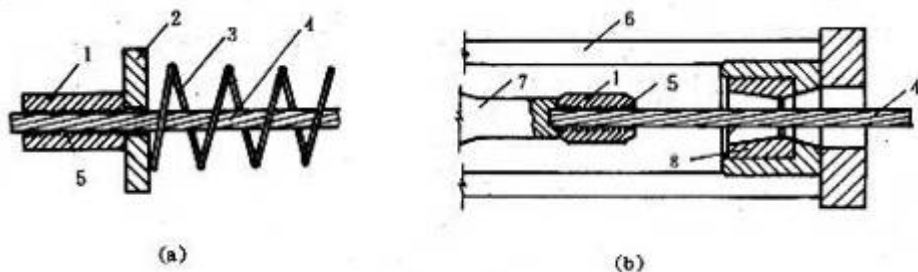
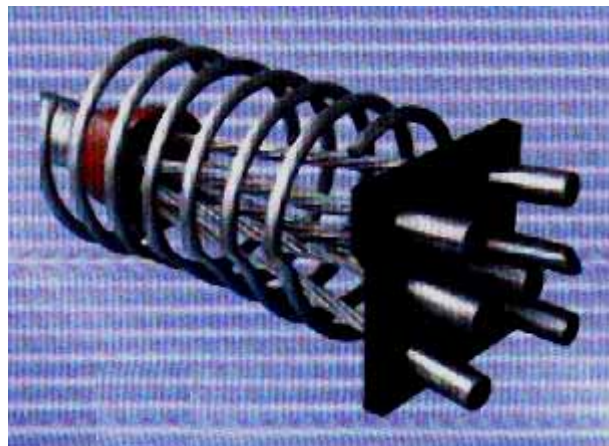
➤4) 挤压锚

✓挤压锚具是用液压挤压机将套筒挤紧在钢绞线端头上的一种锚具。

✓套筒采用45号钢（调质），套筒内衬有硬钢丝螺旋圈。

✓挤压锚具组装时，挤压机的活塞杆推动套筒通过喇叭形挤压模，使套筒变细，硬钢丝衬圈碎断，一半嵌入外钢套，一半压入钢绞线，从而增加钢套筒与钢绞线之间的摩阻力，形成挤压头。挤压后预应力筋外端应露出挤压套筒1~5mm。

✓宜用于内埋式固定端。



(a) 挤压锚具；(b) 成型工艺

1—挤压套筒；2—垫板；3—螺旋筋；4—钢绞线；

5—硬钢丝衬圈；6—挤压机机架；7—活塞杆；8—挤压模



➤5) 扁锚



扁锚锚板、夹片



扁锚张拉端部组装件

● 7.1.5 预应力筋—锚具组装件的锚固性能检验

➤ 1) 锚固性能要求

✓ 静载锚固性能——锚具效率系数 η_a 和总应变 ε_{apu} 。

$$\eta_a = \frac{F_{apn}}{\eta_p F_{pm}} \geq 0.95 \quad \varepsilon_{apu} \geq 2\%$$

式中：

F_{apu} ——预应力筋—锚具组装件的实测极限拉力；

f_{ptm} ——试验用预应力钢材的极限抗拉强度平均值；

A_p ——预应力筋—锚具组装件中各根预应力钢材总截面面积；

η_p ——预应力筋的效率系数，预应力筋—锚具组装件中钢绞线为1~5根时，预应力筋的效率系数， $\eta_p=1$ ；6~12根时， $\eta_p=0.99$ ；13~19根时， $\eta_p=0.98$ ；20根以上时， $\eta_p=0.97$ 。

✓ 疲劳性能

——须满足循环次数为200万次的疲劳性能试验；抗震结构中，还应满足循环次数为50次的低周荷载试验。

➤ 2) 锚固性能试验

- ✓ 试件应由锚具的全部零件和预应力钢材组成，锚具各零件应合格。
- ✓ 组装时不得在锚固零件上添加影响锚固性能的物质。

✓ 各根预应力钢材应等长平行，其受力长度不应小于3m。

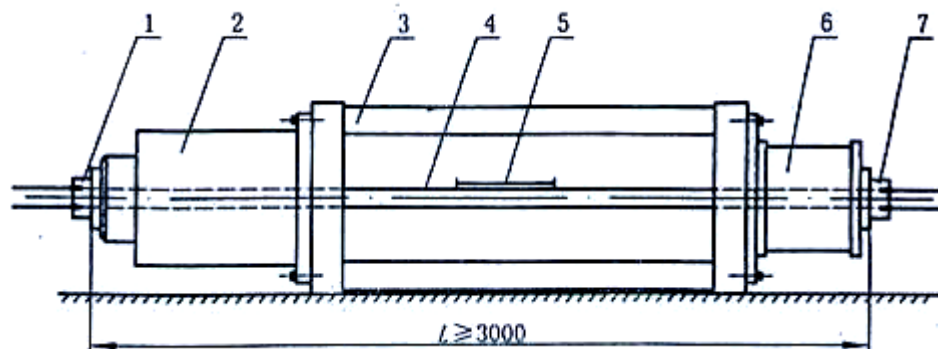
试验工作应在无粘结状态下将试件置于专门的试验台上进行。

✓ 试验时先用张拉设备分四级（每级20%）等速（每分钟约100MPa）张拉至预应力钢材强度标准值的80%，锚固持荷1h后，再用试验设备逐步加载至破坏。对支承式锚具，也可先安装锚具，直接用试验设备加载。

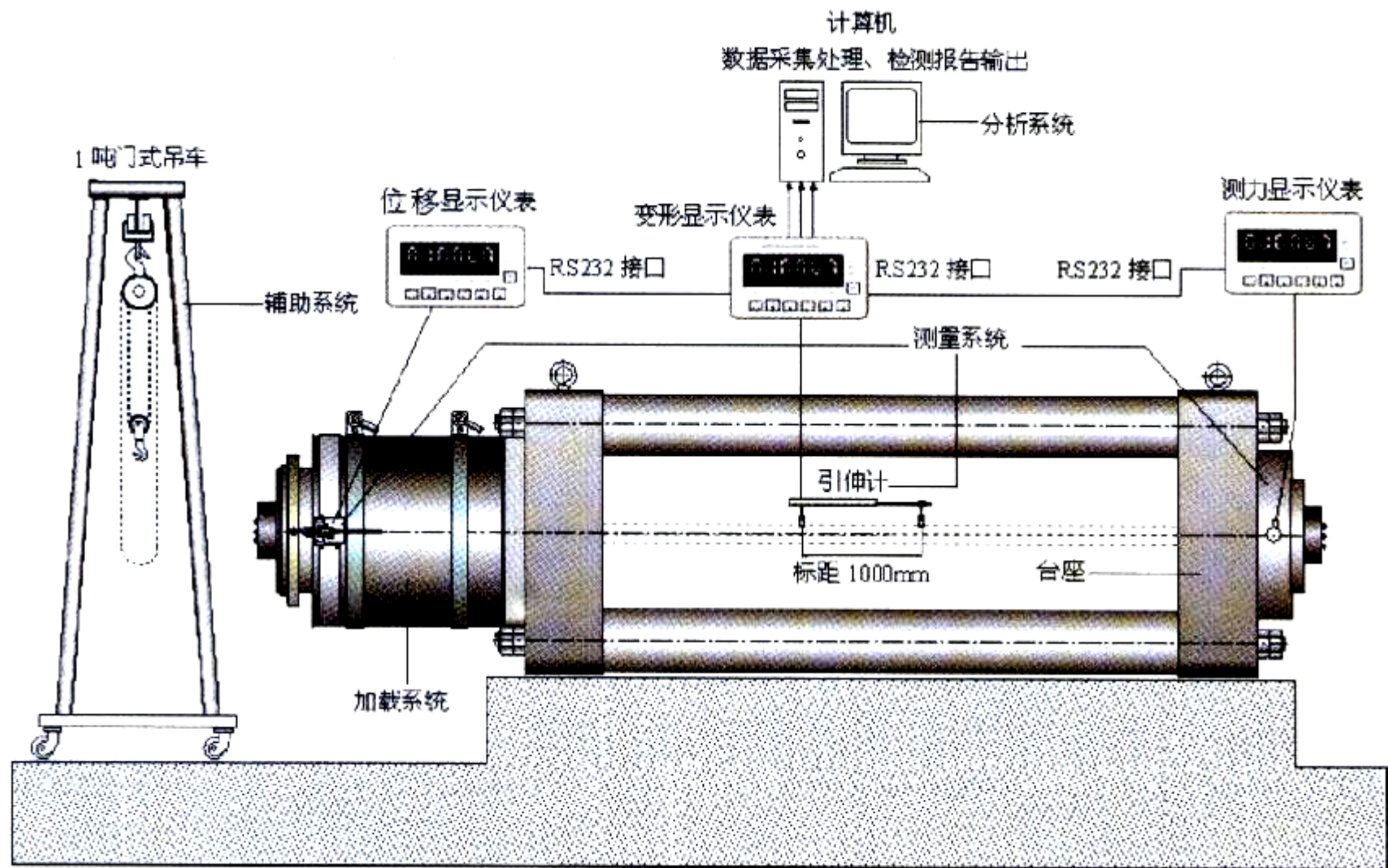
✓ 试验过程中应观察和测量：

预应力钢材与锚具之间以及锚具各零件之间的相对位移；预应力筋破坏时的伸长和荷载以及破坏部位和形态等。

✓ 全部（一组为3束）试验结果均应做出记录，并据此计算锚具的效率系数 η_a 和预应力筋极限应变 ε_{apu} 。



1—张拉端试验锚具或夹具；2—加载用千斤顶；3—承力台座；4—预应力筋；5—测量总应变的量具；6—荷载传感器；7—固定端试验锚具或夹具



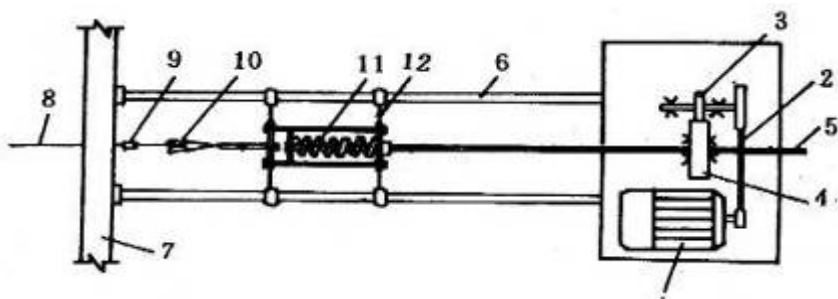
◆ 7.2 预应力张拉设备

张拉设备： { 电动张拉机——先张法单根钢丝张拉
 { 液压张拉机——先张法和后张法各类预应力筋张拉

重点

● 7.2.1 电动张拉机

按传动方式可分为：电动螺杆张拉机和电动卷筒张拉机。



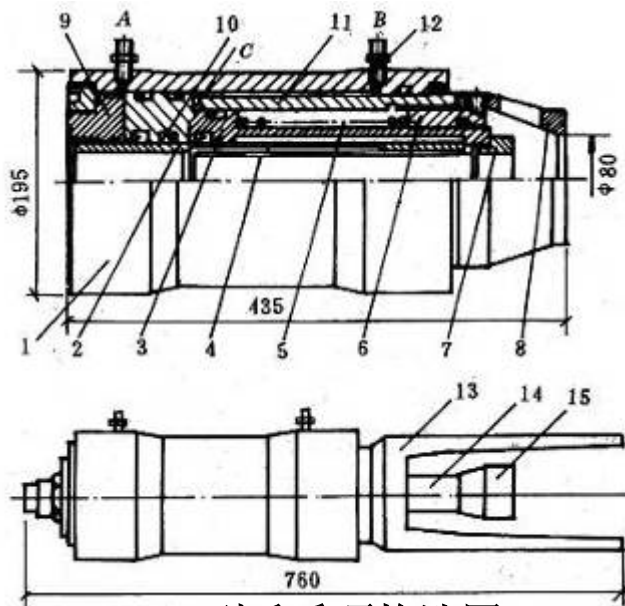
电动螺杆张拉机图

1—电动机；2—皮带；3—齿轮；4—齿轮螺母；5—螺杆；6—顶杆；7—台座横梁；
8—钢丝；9—锚固夹具；10—张拉夹具；11—弹簧测力计；12—滑动架

● 7.2.2 液压张拉机

- ✓ 液压张拉机包括：**液压千斤顶、油泵与压力表等。**
- ✓ 液压千斤顶常用的有：**穿心式和锥锚式千斤顶二类。**

(**注：**选用千斤顶型号与吨位时，应根据预应力筋的张拉力和所用的锚具形式确定。)



YC-60型千斤顶构造图

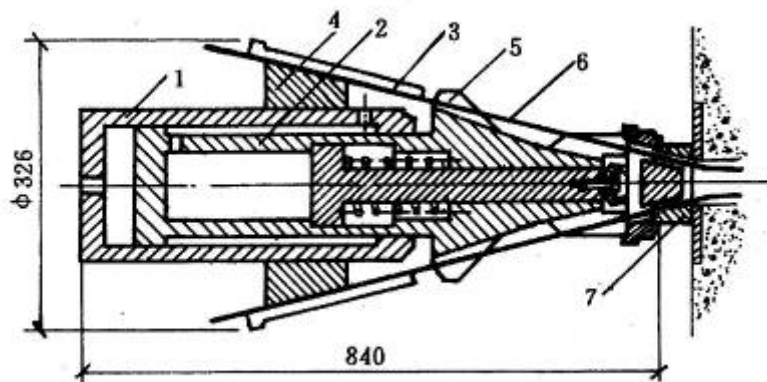
1—大缸缸体；2—穿心套；3—顶压活塞；4—护套；5—回程弹簧；6—连接套；7—顶压套；8—撑套；9—堵头；10—密封圈；11—二缸缸体；12—油嘴；13—撑脚；14—拉杆；15—连接套

➤ 1) 双作用穿心式千斤顶

- ✓ **双作用：张拉和顶压。**
- ✓ 由张拉油缸、顶压油缸(即张拉活塞)、顶压活塞回程弹簧等组成，
- ✓ 常用型号YC-60，公称张拉力为600kN，张拉行程为150mm，顶压力为300kN，顶压行程为50mm。
- ✓ **适用于张拉带夹片锚具的钢筋束或钢绞线束；配上撑脚、拉杆等也可作为拉杆式千斤顶使用。**

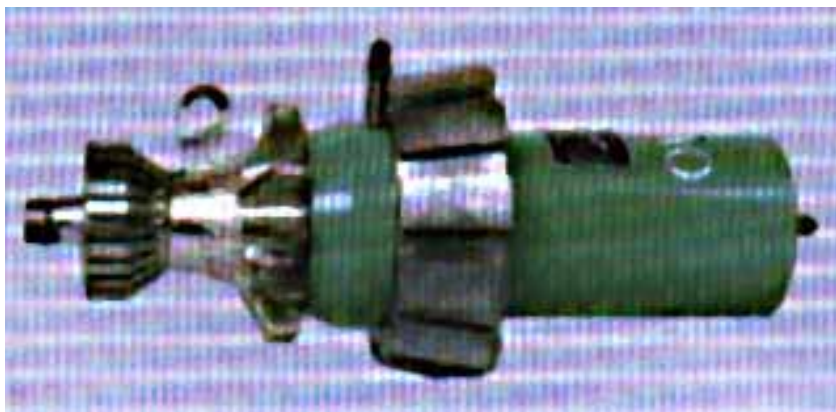
➤ 2) 锥锚式千斤顶

- ✓ **三作用千斤顶：张拉、顶压与退楔。**
- ✓ 由主缸、副缸、退楔块、锥形卡环、退楔翼片、楔块等组成。
- ✓ 常用型号为YZ—85，公称张拉力为850kN，张拉行程为250mm，顶压行程为60mm，顶压力为415kN，额定油压为51.5MPa。
- ✓ **专门用于张拉带锥形锚具的钢丝束。**



YZ—85型千斤顶构造简图

- 1—主缸；2—副缸；3—楔块；
4—锥形卡环；5—退楔翼片；
6—钢丝；7—锥形锚头



➤ 3) 大孔径穿心式千斤顶——群锚千斤顶

✓ 具有大孔径的单液缸千斤顶。

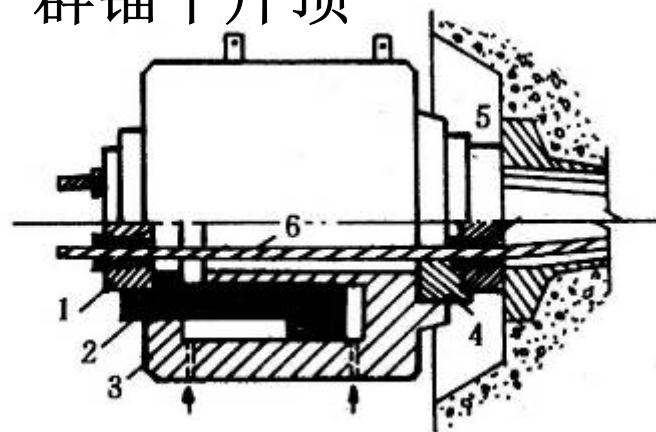
✓ 千斤顶的前端安装顶压器(液压、弹簧)或限位板，尾部安装工具锚。

• **限位板**——在钢绞线束张拉过程中限制工作锚夹片的外露长度，以保证在锚固时夹片内缩一致，并不大于预期值。

• **工具锚**——专用的，锚固后退夹片方便。

✓ 张拉力大(1000~10000kN)、构造简单、**不顶锚**、操作方便，但要求锚具有良好的自锚性能。

✓ 广泛用于张拉大吨位钢绞线束。

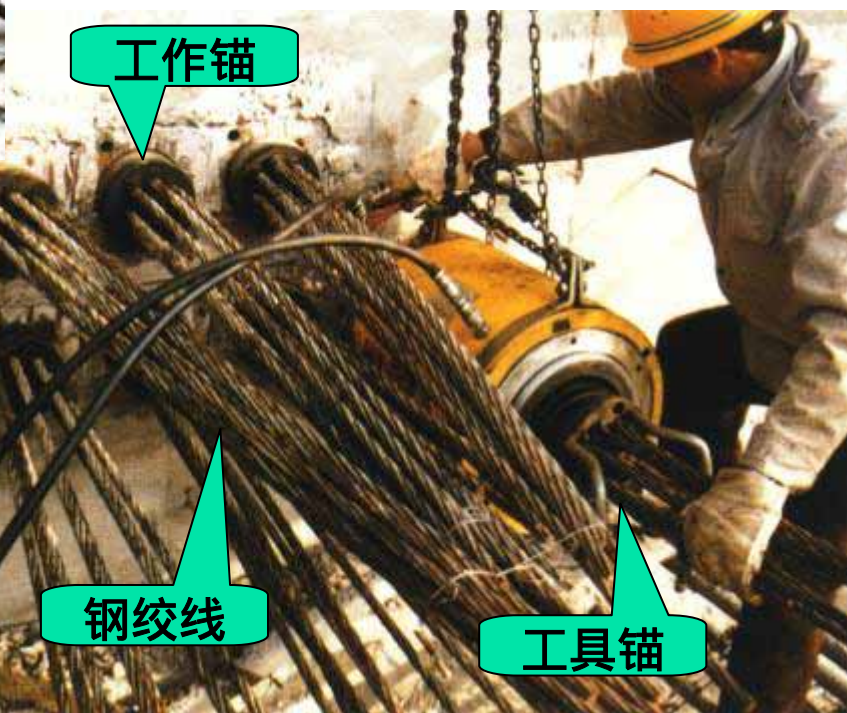
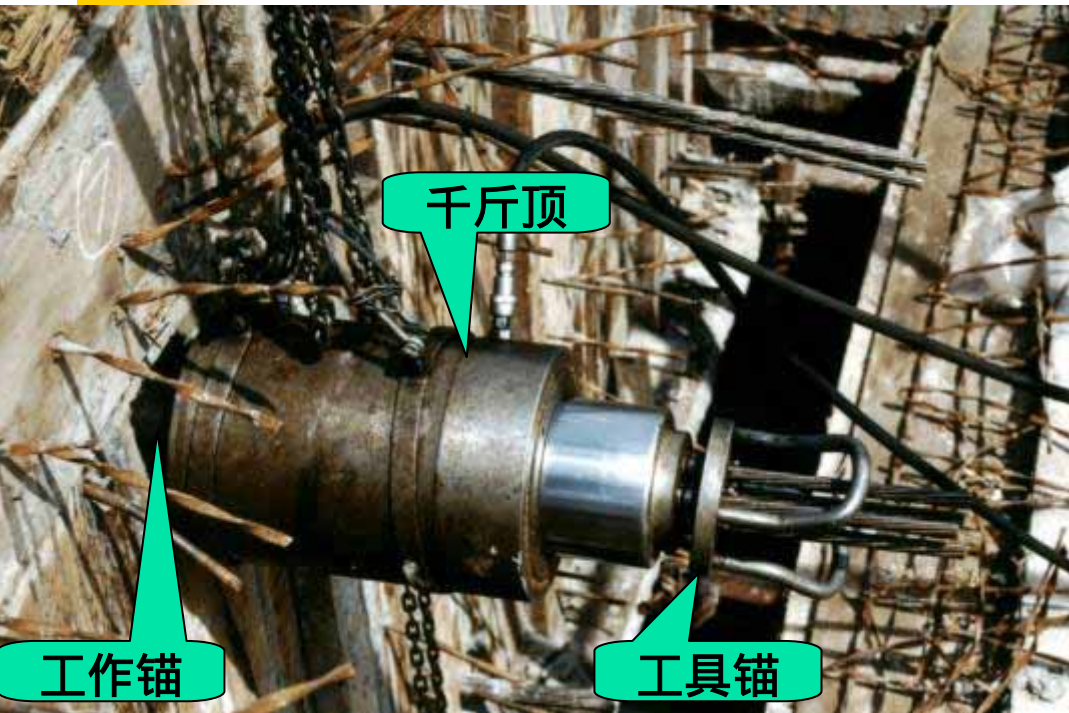


YCQ型千斤顶构造简图

1—工具锚；2—千斤顶活塞；
3—千斤顶缸体；4—限位板；
5—工作锚；6—钢绞线

工具锚



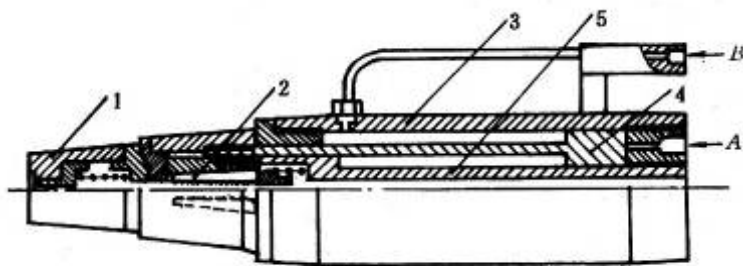


4) 前卡式千斤顶

✓前置内卡式千斤顶是一种小型千斤顶，由外缸、内缸、活塞、前后端盖、顶压器、工具锚组成。

✓张拉力为180~250kN，张拉行程为160mm，预应力筋的外露长度短(250mm)。

✓适用于张拉单根钢绞线和7 ϕ 5钢丝束。



前置内卡式千斤顶构造简图

A—进油；B—回油

1—工具锚；2—外缸；4—活塞；5—拉杆



● 7.2.3 液压千斤顶标定

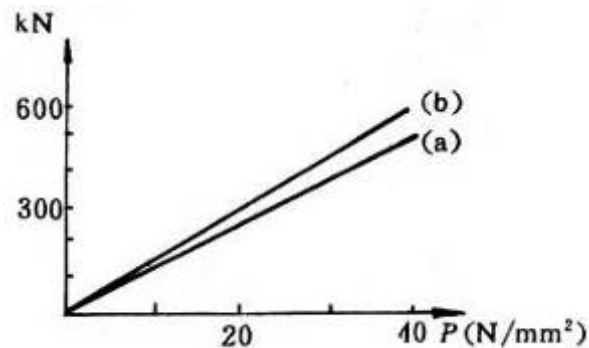
✓ 由于活塞与油缸之间存在摩擦力，使得实际张拉力比理论计算（千斤顶油缸活塞面积×油压）的张拉力要小。

✓ 标定——直接测定千斤顶的实际张拉力与压力表读数之间的关系，绘制出N与P的关系曲线，供施工时使用。

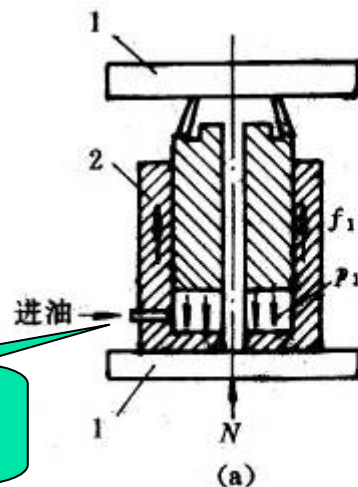
✓ 立放与卧放时内摩阻力差异很小，可采用立放标定，卧放使用。

✓ 张拉设备（千斤顶和油压表）应配套标定，以减少积累误差。

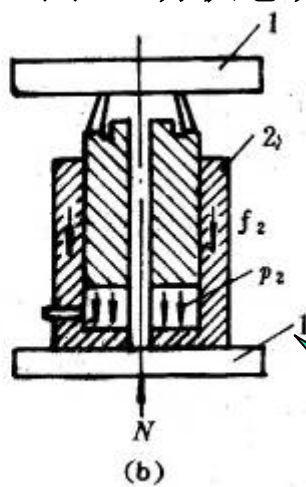
✓ 标定千斤顶时，千斤顶活塞的运动方向应与实际张拉工作状态一致。



千斤顶标定曲线图
(a) 主动状态；(b) 被动状态

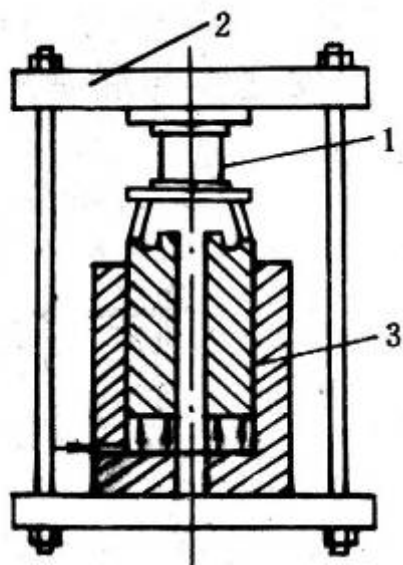


主动标定：
 $N = P \times A - f$

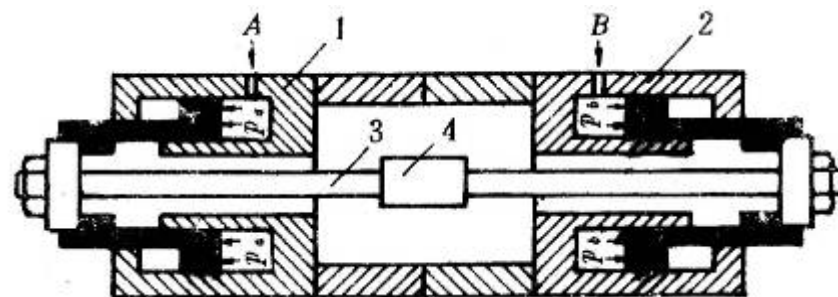


被动标定：
 $N = P \times A + f$

在压力试验机上标定穿心式千斤顶图
(a) 千斤顶顶试验机；(b) 试验机压千斤顶



用压力传感器标定千斤顶图
1—压力传感器；2—框架；3—千斤顶



千斤顶卧放对顶标定图
1—千斤顶A；2—千斤顶B；
3—拉杆；4—测力计

◆ 7.3 预应力混凝土施工

施工方法：{ 先张法
后张法——有粘结和无粘结预应力施工

● 7.3.1 后张法施工

✓ **后张法**——是在构件混凝土达到一定强度之后，直接在构件或结构上张拉预应力筋的方法。

✓ **后张法有粘结预应力施工过程：**

- 混凝土构件制作时，在预应力筋的部位预先留出孔道，接着浇筑混凝土并进行养护；
- 将预应力筋穿入孔道；
- 待混凝土达到设计规定的强度后，利用张拉设备张拉预应力筋，并用锚具将其锚固在构件端部，使混凝土产生预压应力；
- 最后进行孔道灌浆与封头。

➤1) 孔道留设

✓预应力筋孔道形状：直线、曲线和折线。

✓预应力筋孔道成型可采用：

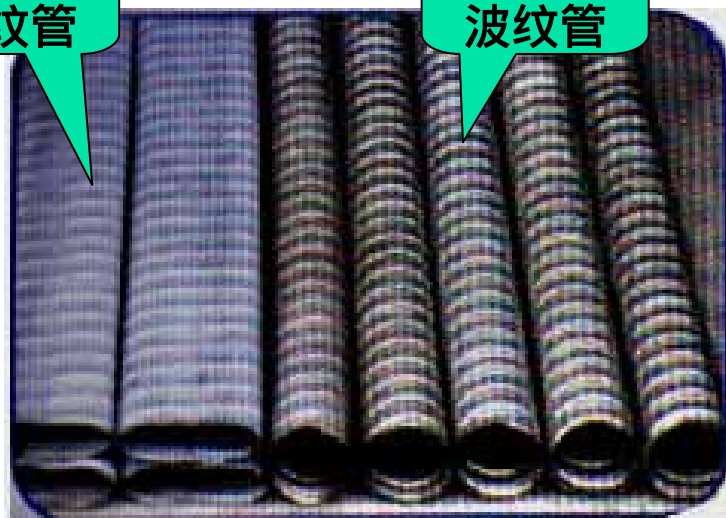
钢管抽芯——只适用于直线孔道

胶管抽芯——适用于直线孔道或一般的折线
与曲线孔道

预埋波纹管法——金属波纹管和塑料波纹管

扁金属
波纹管

圆金属
波纹管



✓孔道内径应比预应力筋外径或需穿过孔道的锚具外径大10~15mm(粗钢筋)或8~12mm(钢丝束或钢绞线束)；且孔道面积应大于预应力筋面积的3~4倍。此外，在孔道的端部或中部应设置灌浆孔，其孔距不宜大于12m(抽芯成形)或30m(波纹管成形)。

✓孔道成型的基本要求：

——孔道的尺寸与位置应正确，孔道的线形应平顺，接头不漏浆等。孔道端部的预埋钢板应垂直于孔道中心线。

金属波纹管



施工现场卷制金属波纹管

钢带

预应力
筋孔道

金属
波纹管



➤ 2) 预应力筋制作

✓ (1) 采用镦头锚具的钢丝束

- 钢丝束的制作一般包括：下料、编束、镦头等工序。
- 钢丝下料长度 L ，按预应力张拉后螺母位于锚杯中部进行计算：

$$L = l + 2h + 2\delta - K(H - H_1) - \Delta l - C$$

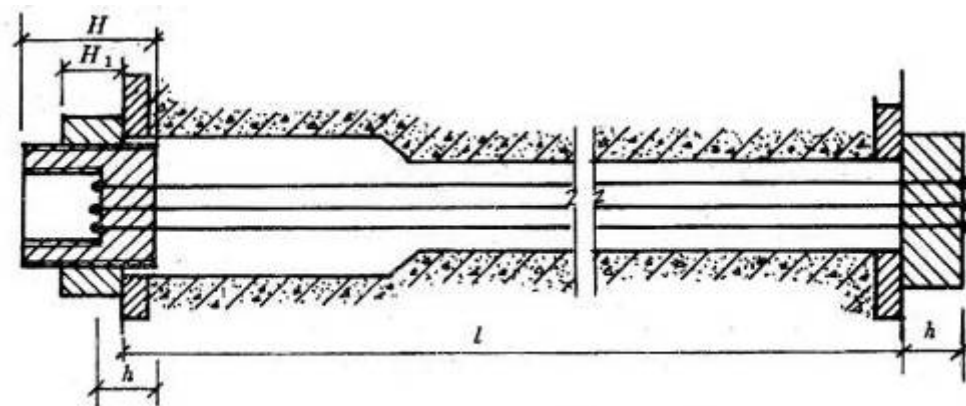
式中： δ —— 钢丝镦头预留量，取10mm；

K —— 系数，一端张拉时取0.5，两端张拉时取1.0；

ΔL —— 钢丝束张拉伸长值(mm)；

C —— 张拉时构件混凝土弹性压缩值(mm)。

- **同束钢丝应等长下料**，相对误差应 $\leq L / 5000$ ，且 $\leq 5\text{mm}$ 。当成组张拉长度不大于10m的钢丝时，同组钢丝的极差不得大于2mm。



钢丝下料长度计算简图



✓ (2) 钢绞线束

- 钢绞线下料长度，当一端张拉另一端固定时：

$$L = l + l_1 + l_2$$


式中：

l ——孔道的实际长度(mm)；

l_1 ——张拉端预应力筋外露的工作长度，应考虑工作锚厚度、千斤顶长度与工具锚厚度等，一般取600~900mm；

l_2 ——固定端预应力筋的外露长度，一般取150~200mm。

- 钢绞线的切割，宜采用砂轮锯；不得采用电弧切割，以免影响材质。



➤ 3) 预应力筋张拉

- ✓ (1) 预应力筋张拉对构件混凝土强度的要求：
 - 预应力筋张拉时，构件的混凝土强度应符合设计要求；
 - 如设计无要求时，混凝土强度不应低于设计强度等级的75%。
- ✓ (2) 张拉力

$$P_j = \sigma_{con} \cdot A_p$$

σ_{con} ——张拉控制应力，应根据设计图纸确定(对碳素钢丝与钢绞线不大于 $0.70 \sim 0.75 f_{ptk}$ 对高强钢筋不大于 $0.85 \sim 0.90 f_{pyk}$ ；施工中如遇到超张拉，可将上述数值提高 $0.05 f_{ptk}$ 或 $0.05 f_{pyk}$ (N / mm²)。

✓ (3) 张拉程序

- 预应力筋采用低松弛钢绞线、钢丝或在设计中预应力筋的松弛损失取大值时，则张拉程序为：

$0 \rightarrow \sigma_{con}$ 或 按设计要求采用

- 预应力筋采用钢筋体系或普通松弛的钢丝时，采用超张拉方法减少预应力筋的应力松弛损失，其张拉程序为：

$0 \rightarrow 1.05 \sigma_{con}$ (持荷2分钟) σ_{con} 或 $0 \rightarrow 1.03 \sigma_{con}$

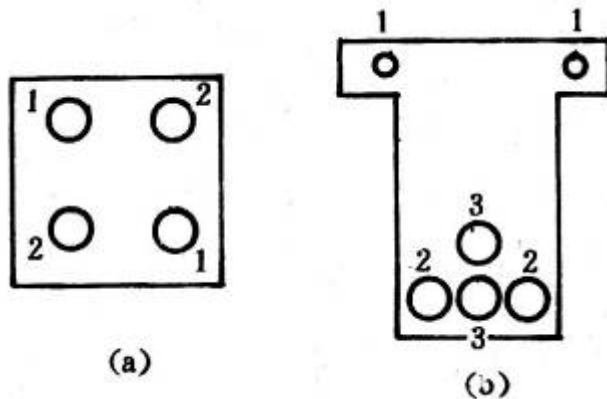
- 预应力筋张拉时，宜分级加载如下：

$0 \rightarrow 0.2 \sigma_{con}$ (量伸长初读数) $\rightarrow 0.6 \sigma_{con} \rightarrow 1.0 \sigma_{con}$

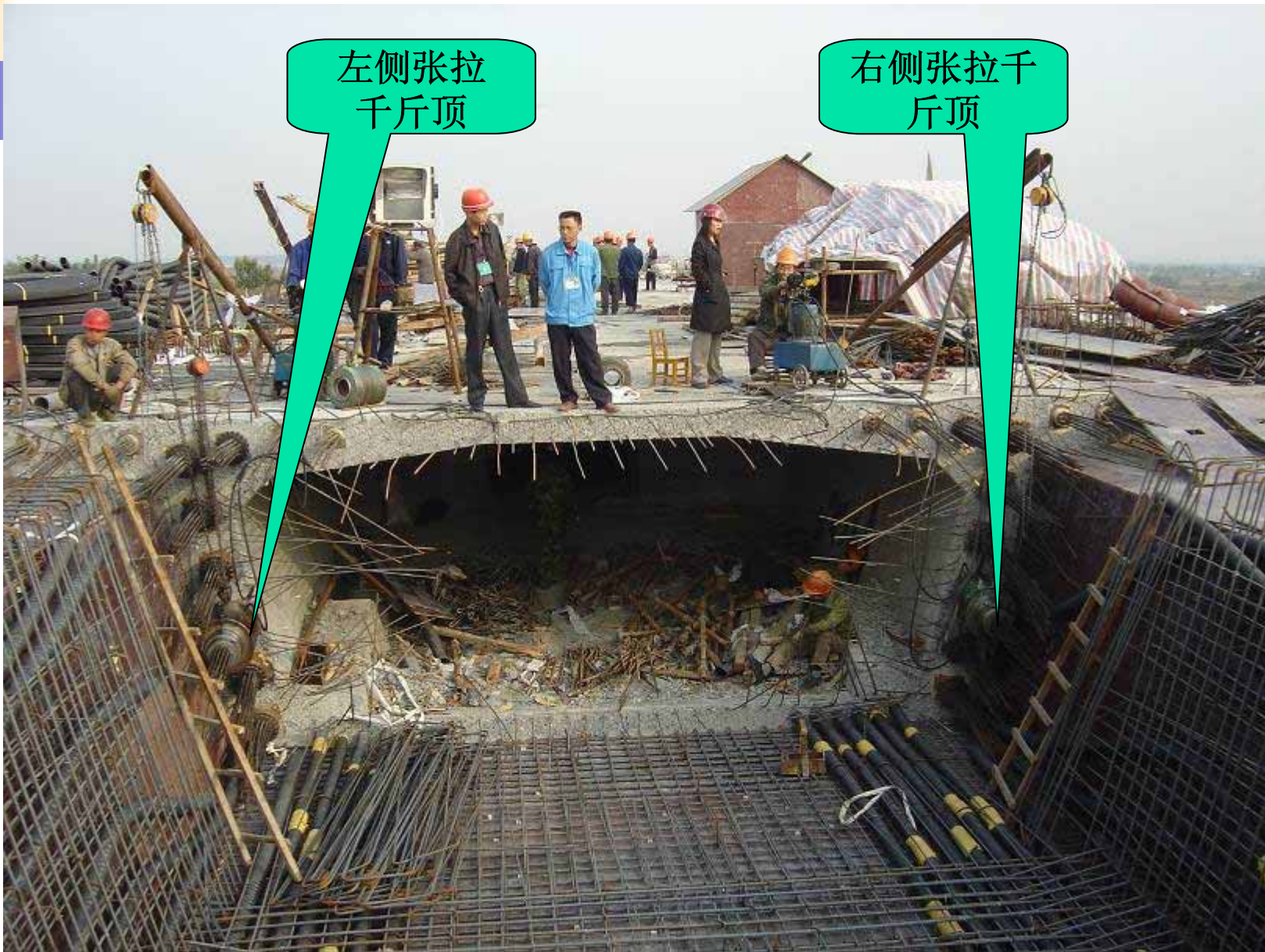
✓ (4) 张拉顺序

- 预应力筋张拉顺序的重要原则：**对称张拉**。
——应使混凝土不产生超应力、构件不扭转与侧弯、结构不变位等。

- 先批张拉预应力筋的预应力损失：
——多根预应力筋采用分批张拉时，由于后批预应力筋张拉所产生的混凝土弹性压缩对先批张拉的预应力筋造成预应力损失，所以先批张拉的预应力筋张拉力应加上该弹性压缩损失值或将弹性压缩损失平均值统一增加到每根（束）预应力筋的张拉力内。



预应力筋的张拉顺序图
(a) 屋架下弦杆；(b) 吊车梁



桥梁箱梁对称张拉

✓ (5) 张拉方法

张拉方法

一端张拉
两端张拉

两端同步张拉

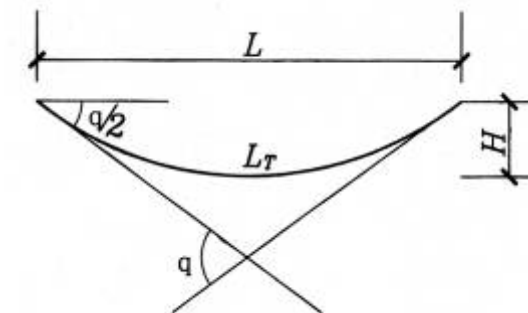
一端先张拉，然后另一端补足

• 孔道摩擦损失 (σ_{l1}) 和孔道摩擦损失斜率 (m)

——预应力筋张拉时，由于孔道摩擦引起的预应力损失。该损失沿构件长度方向逐步增大。

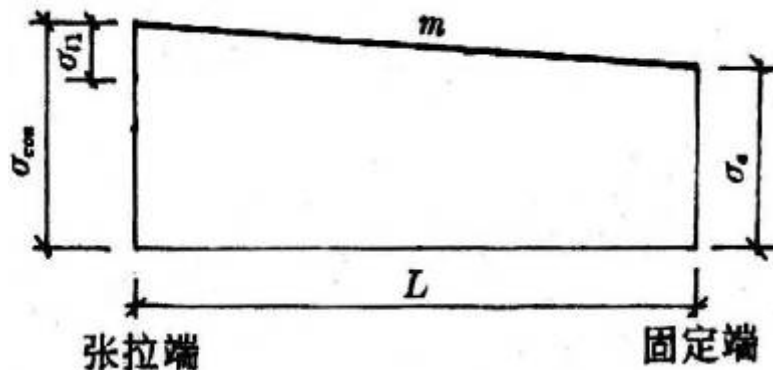
$$\sigma_{l1} = \sigma_{con} (kl + \mu\theta) \text{ 或 } = \sigma_{con} [1 - e^{-(kl + \mu\theta)}]$$

$$m = \frac{\sigma_{l1}}{l} \quad l = (1 + \frac{8H^2}{3L^2}) \cdot L \quad \theta = \frac{8H}{L}$$



式中：

- l ——从张拉端至计算截面的孔道长度(m)；
- k ——每m孔道局部偏差对摩擦影响系数；
- μ ——预应力筋与孔道壁的摩擦系数；
- θ ——从张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角(rad)。



• 锚固损失 (σ_{l2}) 及其影响长度 L_f)

——预应力筋锚固时，由于锚具内缩引起的预应力损失。该损失受孔道反摩擦的影响在张拉端最大，逐步减至零。

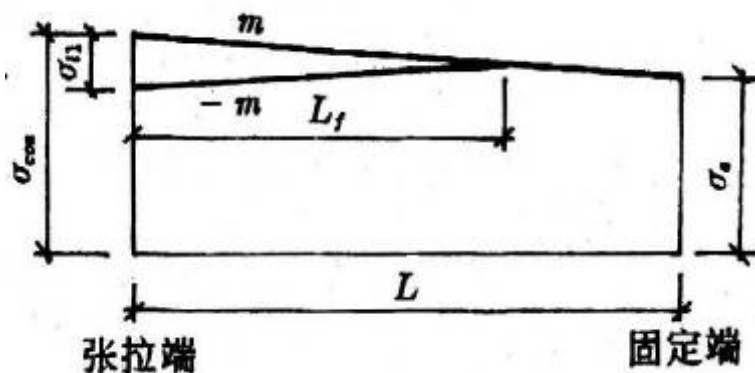
对单一曲率的预应力筋：
$$L_f = \sqrt{\frac{\alpha E_s}{m}} \quad \sigma_{l2} = 2mL_f$$

式中： α ——张拉端锚固时预应力筋的内缩值，mm；

E_s ——预应力钢材弹性模量，N/mm²。

张拉端预应力筋的内缩量限值表 (mm)

锚具类别		内缩量 限值
支承式锚具 (镦头锚具等)	螺帽缝隙	1
	每块后加垫板的缝隙	1
锥锚式锚具		5
夹片式锚具	有顶压	5
	无顶压	6~8



•张拉方法的确定

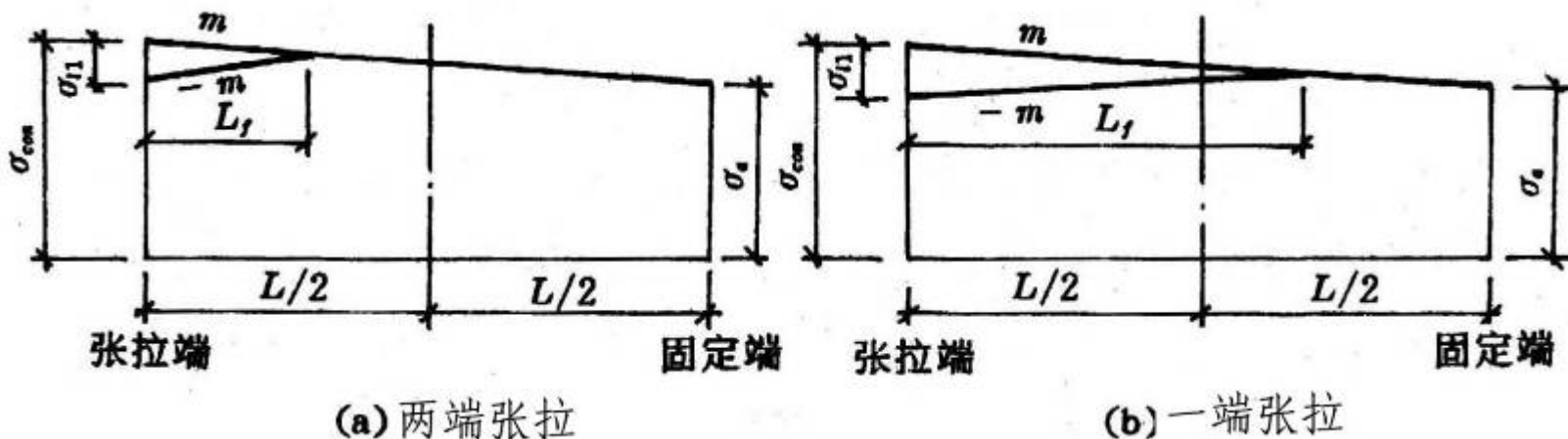
——关键看锚固损失长度是否超过半跨。

两端张拉： $L_f < L/2$ $(\sigma_{con} - \sigma_{l2}) > \sigma_{中}$

——一般是在曲线预应力筋弯起角度较大，孔道摩擦系数较大、锚具内缩值较小时发生。采用两端张拉，可有效地提高固定端的应力，但对跨中应力没有影响。

一端张拉： $L_f > L/2$ $(\sigma_{con} - \sigma_{l2}) < \sigma_{中}$

——一般是在曲线预应力筋弯起角度不大，孔道摩擦损失较小、锚具内缩值较大时发生，应采用一端张拉较为有利。



✓ (6) 叠层构件张拉

• 叠层构件张拉的预应力损失

——后张预应力混凝土屋架等构件一般在施工现场平卧重叠制作，重叠层数为3~4层。预应力筋张拉时宜先上后下逐层进行。该项预应力损失的弥补

——可采取逐层加大张拉力的方法，但底层超张拉值不得比顶层张拉力大5%（钢丝、钢绞线），且不得超过最大超张拉的限值。克服叠层摩阻损失的超张拉值与减少松弛损失的超张拉值可以结合起来，不必叠加。



✓ (6) 张拉伸长值校核

——用应力控制方法张拉时，应校核预应力筋张拉伸长值，可综合反映张拉力是否足够，孔道摩阻损失是否偏大，以及预应力筋是否有异常现象。

• 预应力筋张拉计算伸长值 ΔL :
$$\Delta L = \frac{P_m \cdot l}{A_p E_s}$$

• 预应力筋张拉伸长值的量测，应在建立初应力之后进行。其实际伸长值 $\Delta L'$:

$$L' = L_1 + L_2 - C$$

• 规范规定 :
$$\left| \frac{\Delta L - \Delta L'}{\Delta L} \right| \leq 0.06 (\pm 6\%)$$

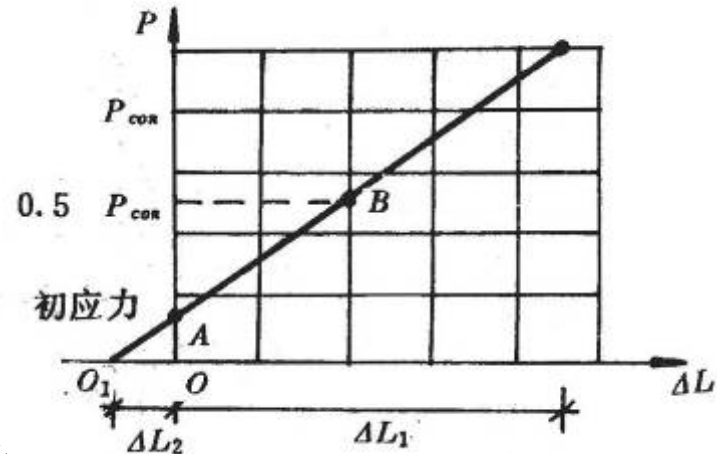
式中:

P_m ——预应力筋的平均张拉力(kN); 取张拉端拉力与计算截面处扣除孔道摩损失后拉力的平均值;

ΔL_1 ——从初应力至最大张拉力之间实测伸长值;

ΔL_2 ——初应力以下的推算伸长值;

C ——施加预应力时，后张预应力混凝土构件的弹性压缩值等。



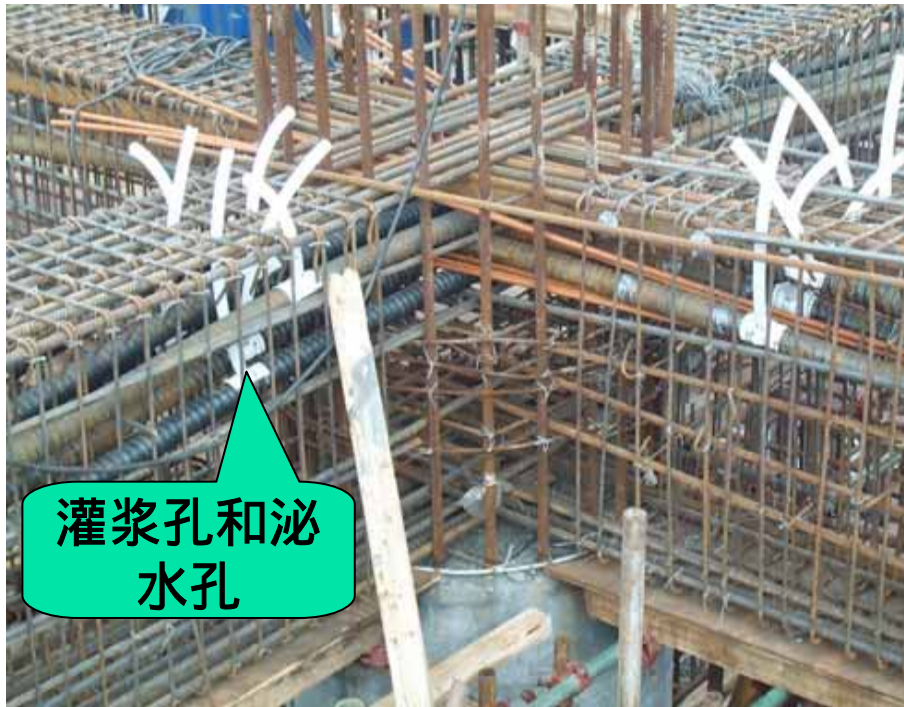
推算实际张拉伸长值图解

➤4) 孔道灌浆与端头封裹

后张法孔道灌浆的作用：

- 保护预应力筋，防止锈蚀；
- 使预应力筋与构件混凝土有效地粘结，以控制裂缝的开展并减轻梁端锚具的负载。

注： 在高应力状态下预应力筋容易生锈，预应力筋张拉后孔道应尽快灌浆。



✓ (1) 灌浆材料

——水泥浆应具有较大的流动性、较小的干缩性与泌水性，其强度不应小于30MPa。

✓ (2) 灌浆施工

- 灌浆前孔道应洁净，抽孔成形的孔道孔壁应湿润。
- 灌浆用的水泥浆要过筛，宜采用机械制浆，在灌浆过程中应不断搅拌，以免沉淀析水。
- 灌浆设备采用灰浆泵。灌浆工作应连续进行，并应排气通顺。在灌满孔道并封闭排气孔后，宜再继续加压至0.5~0.6MPa，稍后再封闭灌浆孔。
- 在曲线孔道的上曲部位应设置泌水管。

✓ (3) 端头封裹

- 预应力筋锚固后外露长度应 $\geq 30\text{mm}$ ，多余部分宜用砂轮锯切割。
- 锚具应采用封头混凝土保护。封头混凝土的尺寸应大于预埋钢板尺寸，厚度 $\geq 100\text{mm}$ ，且端部保护层厚度不宜小于20~50mm（凸出式）。
- 封头处原有混凝土应凿毛，以增加粘结性。封头内应配有钢筋网片，细石混凝土强度为C30~C40。

搅浆机制浆



从一端灌浆
孔灌入



孔道灌浆

➤ 5) 无粘结预应力施工

• 无粘结预应力混凝土

——指配有无粘结预应力筋靠锚具传力的一种预应力混凝土。

• 施工过程

——先将无粘结预应力筋按设计要求铺设完毕，待混凝土浇筑并达到强度后进行张拉锚固。

• 优点

——**无需留孔和灌浆**，施工简便，但对锚具要求高。

✓ (1) 无粘结预应力筋制作

• 无粘结预应力筋

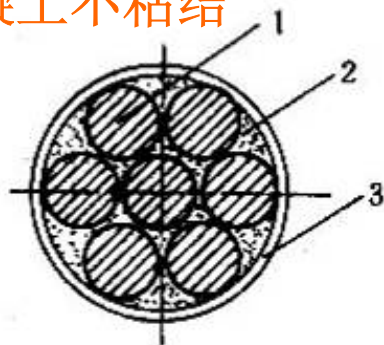
——指施加预应力后沿**全长与周围混凝土不粘结**的预应力筋。

• 构成

预应力钢材—— ϕ^s12 和 ϕ^s15 钢绞线

涂料层——防腐润滑油脂

外包层——高密度聚乙烯护套



无粘结预应力筋图
1—钢绞线或钢丝束；
2—油脂； 3—塑料护套

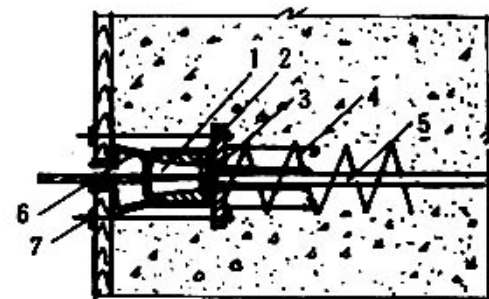
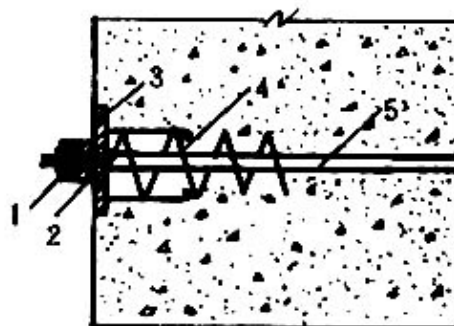
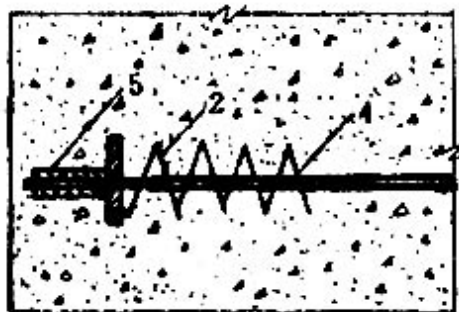




南京国际展览中心楼板中铺放双向无粘结预应力筋

✓ (2) 无粘结预应力筋铺设

- 铺设时曲线坐标宜采用钢筋托架或支撑钢筋控制，其间距为1~2m，并用铁丝与无粘结筋扎牢。
- 固定端采用内埋式时，可选用挤压锚具、镦头锚板等。挤压锚具应与承压钢板贴紧，钢丝镦头必须与锚板贴紧。
- 张拉端可采用凸出式与凹入式做法。端头预埋钢板应垂直于预应力筋，螺旋筋应紧靠预埋钢板。凹口可采用塑料穴模或泡沫块木块做成。



无粘结预应力筋内埋式固定端构造

(a) 挤压锚具

2—螺旋筋；4—钢绞线；5—预埋钢板；6—挤压锚具

(a)

夹片锚具系统张拉端构造

(a) 夹片锚具凸出混凝土表面

(b) 夹片锚具凹入混凝土表面

1—夹片；2—锚环；3—承压板；4—螺旋筋；5—无粘结预应力筋；6—塑料穴模；7—钩螺丝和螺母

✓ (3) 无粘结预应力筋张拉

- 宜采取单根张拉。张拉设备宜选用前置内卡式千斤顶；
- 锚固体体系选用单孔夹片锚具，其静载锚固性能应满足要求。
- 无粘结预应力筋由于摩阻损失小，用于楼面结构时曲率也小，因此不论直线或曲线形状在长度不大于25m时都可采取一端张拉。当筋长超过50m时，宜采取分段张拉与锚固。
- 无粘结预应力筋的张拉力、张拉顺序与张拉伸长值校核与一般预应力筋张拉相同。

✓ (4) 锚固区防腐蚀措施

- 锚固区必须有严格的密封防护措施，严防水汽进入，锈蚀预应力筋。
- 锚具表面经上述处理后，再用微胀混凝土或低收缩水泥砂浆密封。也可用外包钢筋混凝土圈梁封闭。
- 对不能使用混凝土或砂浆包裹层的部位，应对无粘结预应力筋的锚具全部涂以与无粘结预应力筋涂料层相同的防腐油脂，并用具有防腐和防火性能的保护层将锚具封闭。

➤ 6) 缓粘结预应力施工

✓ 缓粘结预应力筋

——由带外肋的PE管,内涂在常温下延迟硬化树脂的钢绞线,兼有无粘结筋张拉摩阻小、施工方便和有粘结筋安全性好的特点。

✓ 缓粘结预应力筋一般采用大直径钢绞线,如 $\phi^S 28.6$ 和 $\phi^S 21.8$ 。

✓ 常温下延迟硬化树脂可根据工程的要求控制在2~5个月,树脂硬化后的强度可达70MPa。

✓ 锚具为相应的夹片锚具。

✓ 其施工方法与无粘结预应力筋施工基本一致。

$\phi^S 28$ 缓粘结
预应力筋



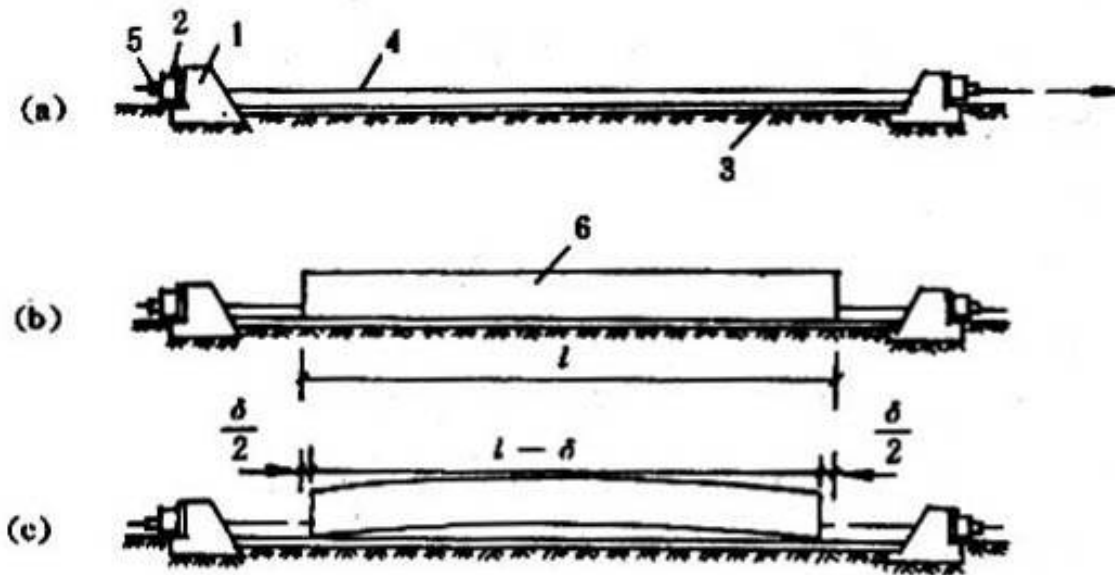
●7.3.2 先张法施工

✓先张法

——是在构件浇筑混凝土之前，在台座或钢模上张拉预应力筋的方法。

✓施工过程：

- 首先张拉预应力筋并临时锚固在台座或钢模上；
- 然后浇筑构件的混凝土；
- 待混凝土达到一定强度后放松预应力筋，借助混凝土与预应力筋的粘结，使混凝土产生预压应力。



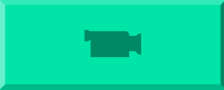

先张法生产示意图

1—台座承力结构；2—横梁；3—台面
；4—预应力筋；5—夹具；6—构件

✓广泛适用于中小型预制预应力混凝土构件生产。



有粘结预应力后张法 现场施工录像

- 下料与铺束： (5' 54")
- 张拉与灌浆： (8' 19")