

建筑施工工程师技术丛书

现代预应力混凝土施工

杨宗放 方先和 编著

中国建筑工业出版社

建筑施工工程师技术丛书

现代预应力混凝土施工

杨宗放 方先和 编著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书系统地介绍现代预应力混凝土工程的施工技术。内容包括：高强预应力钢材、高强混凝土、后张预应力体系、现代预应力工艺、预应力施工计算、部分预应力现浇框架结构施工、无粘结预应力现浇楼面结构施工、整体预应力板柱结构施工、特种预应力结构施工、预应力桥梁施工、预应力结构经济分析。

本书可供建筑施工、设计人员与土建大专院校师生学习，也可供桥梁与水利工程技术人员参考。

* * *

责任编辑 林婉华

建筑施工工程师技术丛书
现代预应力混凝土施工
杨宗放 方先和 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

新华书店经销
北京市平谷县大华山印刷厂印刷

•

开本：850×1168毫米 1/32 印张：7⁸/₈ 字数：197 千字

1993年6月第一版 1993年6月第一次印刷

印数：1—8,700册 定价：5.35元

ISBN7-112-01944-3/TU·1483

(6967)

出版说明

当前，新技术革命浪潮冲击着一切经济部门，建筑业也不例外。许多现代化的科学技术方法和管理手段正逐步地应用在建筑业中，取得了越来越大的经济效益。党的十一届三中全会以来，我国的建筑事业得到了蓬勃发展，各种现代化的建筑如雨后春笋，逐年增多。常年奔波在施工生产第一线的建筑施工工程师们，担负着繁重而复杂的施工任务。他们渴望学习新技术，提高业务水平；渴望更新自己的知识以适应现代化的要求。从科学技术的发展和四化建设的需要考虑，对在职科技人员进行继续教育的重要性和迫切性也日益突出。为此，我们组织出版了这套丛书，希望这套书能对他们有所裨益，并在工程实践中广泛应用新技术，建造出更多优良的工程，取得更佳的经济效益。

城乡建设环境保护部曾委托同济大学、重庆建筑工程学院、哈尔滨建筑工程学院从一九八一年开始举办建筑施工工程师进修班。这套丛书就是根据这些班的教学内容，结合当前施工技术的发展，将施工新技术、新材料、新结构的课题适当加多，以同济大学的老师为主组织编写的。可作为工程师进修班的教材，也可作为建筑施工工程师和有关人员自学丛书。计划列题十余种，三年左右出齐。成书时尽量做到内容完整系统，文字叙述深入浅出，以便于现场施工工程师和技术员自学。当然，书中的内容选材是否适当，能否满足读者的要求，还希望广大读者提出意见，以便我们改进。谢谢！

城乡建设环境保护部干部局
中国建筑工业出版社

1986年6月

前 言

现代预应力混凝土，又称高效预应力混凝土，主要是指采用高强预应力钢材、高强混凝土为特征的预应力混凝土。这种预应力混凝土的节材效果大、结构功能质量好。在我国国民经济和社会发展十年规划及“八五”计划纲要中列为重点开发和推广的项目。

80年代，由于现代工业、交通、能源、商业和公用事业等发展的需要，高效预应力混凝土的出现，我国预应力技术从单个预制构件发展到预应力结构新阶段。几年来，在北京、上海、江苏、浙江、广东、湖南、四川等地陆续建造了一批大柱网预应力混凝土房屋结构、大跨度预应力混凝土桥梁结构、大型预应力混凝土特种结构等，取得了显著的综合经济效益。

几年来，通过预应力技术开发和工程实践，我国现代预应力混凝土材料与施工水平有了很大的提高。主要的新技术项目有：低松弛钢丝与钢绞线、钢绞线束群锚体系、大吨位张拉设备、金属波纹管留孔技术、后张预应力成套技术、无粘结预应力成套技术等。此外，所提出的预应力筋与孔道壁之间的反摩擦理论，为张拉阶段预应力损失和工艺计算奠定基础。

本书系统地介绍了现代预应力混凝土的新材料、新设备和新技术，并在这一基础上介绍了各类预应力混凝土结构的施工。此外，本书还增加了预应力混凝土结构构造与经济分析知识。

本书第二章第三节、第三章第一节和第五章第一节部分内容及第五章第三节由方先和同志编写，书中插图由刘群等同志绘制。

本书在编写过程中，有关设计、施工和科研单位提供了技术

目 录

前言

第一章 材料	1
第一节 高强预应力钢材	1
一、钢材品种	1
二、钢材特性	8
三、钢材检验	12
四、钢材存放与加工	13
第二节 高强混凝土	14
一、高强混凝土配制	15
二、混凝土的应变特性	20
第二章 后张预应力体系	23
第一节 钢丝束锚头锚固体系	23
一、锚头锚具类型	23
二、锚头锚具设计	26
三、锚头锚具加工	29
四、施工应用	31
五、冷铸锚头锚具	34
第二节 钢绞线束夹片锚固体系	35
一、JM型锚具	35
二、群锚体系	38
三、张拉设备	43
四、固定端锚具	46
五、联结器	48
六、施工应用	49
第三节 精轧螺纹钢钢筋锚固体系	52
一、联结器与锚具	52

二、施工应用	55
三、冷轧螺纹锚具	56
第四节 预应力筋-锚具组装件的锚固性能检验	57
一、预应力筋锚具的质量检验	57
二、预应力筋的效率系数	59
三、锚具的效率系数与预应力筋的极限应变	62
四、预应力筋-锚具组装件试验	63
第三章 预应力施工工艺	67
第一节 后张法预应力工艺	67
一、预埋波纹管留孔	67
二、预应力筋穿入孔道	73
三、预应力筋张拉	75
四、曲线孔道灌浆	82
第二节 无粘结预应力工艺	85
一、无粘结筋制作	85
二、无粘结筋铺设	91
三、无粘结筋张拉	92
第三节 先张法预应力工艺	94
一、预应力混凝土台面	94
二、高强预应力钢材的应用	96
第四章 预应力施工计算	100
第一节 张拉力	100
第二节 预应力损失	101
一、孔道摩擦损失	101
二、锚固损失	105
三、弹性压缩损失	110
四、钢材应力松弛损失	112
五、混凝土收缩徐变损失	112
第三节 曲线预应力筋张拉伸长值计算	113
一、计算公式	113
二、公式应用	114
三、计算示例	116
第四节 曲线预应力筋一端张拉工艺计算	118

一、理论分析	118
二、计算示例	118
第五章 预应力混凝土房屋结构施工	121
第一节 部分预应力混凝土框架结构施工	121
一、结构布置特点	122
二、预应力筋布置	123
三、细部构造	125
四、施工顺序	131
五、预应力混凝土框架梁施工	134
六、预应力混凝土框架柱施工	138
第二节 无粘结预应力混凝土楼面结构施工	142
一、结构型式与预应力筋布置	143
二、细部构造	147
三、大面积预应力楼板施工	150
四、超高层预应力楼板施工	152
第三节 整体预应力板柱结构施工	153
一、结构特点	154
二、施工顺序	160
三、构件安装	162
四、预应力施工	165
第六章 特种预应力结构施工	171
第一节 预应力混凝土贮池施工	171
一、绕丝预应力贮池施工	171
二、无粘结预应力贮池施工	173
第二节 预应力混凝土筒仓施工	174
一、有粘结预应力筒仓施工	175
二、无粘结预应力筒仓施工	177
第三节 预应力混凝土安全壳施工	179
第四节 预应力混凝土电视塔施工	183
第五节 预应力岩土锚杆	188
一、预应力锚杆设计	188
二、预应力锚杆施工	191
三、无粘结预应力锚杆	194

第七章 预应力混凝土桥梁结构施工	197
第一节 预应力混凝土简支梁桥施工	197
一、预应力混凝土空心板桥施工	197
二、预应力混凝土T形梁桥施工	199
三、预弯预应力混凝土梁桥施工	200
第二节 预应力混凝土连续梁桥施工	201
一、等截面预应力混凝土连续梁桥施工	202
二、变截面预应力混凝土连续梁桥施工	207
三、预应力混凝土弯梁桥施工	209
第八章 预应力混凝土结构经济评价	211
第一节 推广高效预应力混凝土结构的综合经济效益	212
一、单层工业厂房	212
二、多层框架结构	213
三、多层与高层楼面结构	213
四、预应力混凝土结构体系	214
第二节 部分预应力混凝土框架结构与钢筋混凝土框架结构 经济比较	214
一、设计资料	215
二、预算价格	217
三、对比分析	218
参考文献	222

第一章 材 料

第一节 高强预应力钢材

高强预应力钢材包括：碳素钢丝、钢绞线、热处理钢筋和精轧螺纹钢等。

预应力钢材的发展趋势为高强度、粗直径、低松弛和耐腐蚀。

一、钢材品种

1. 碳素钢丝

碳素钢丝（又称高强钢丝）是用优质高碳钢盘条经索氏体化处理、酸洗、镀铜或磷化后冷拔而成（图1-1）。碳素钢丝采用80号钢，其含碳量为0.7~0.9%。为了使高碳钢盘条能顺利拉

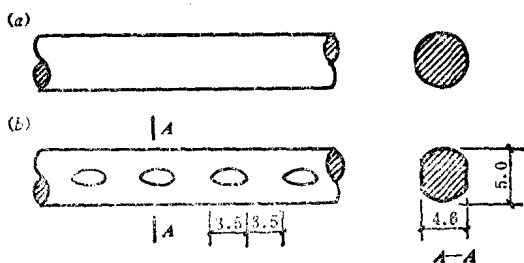


图 1-1 碳素钢丝
(a) 光面钢丝；(b) 刻痕钢丝

拔，并使成品钢丝具有较高的强度和良好的韧性，盘条的金相组织应从珠光体变为索氏体。盘条的索氏体化处理：一是采用传统

的铅浴淬火方法；二是由于轧钢技术的进步，采用轧后控制冷却方法，直接得到索氏体化盘条。轧后控制冷却方法可取消铅浴淬火，节约能源，避免铅作业对人体和环境的污染，但易出现盘条索氏体化程度差或盘条的匀质性差等问题。

碳素钢丝的品种有：冷拉钢丝、矫直回火钢丝、刻痕钢丝、低松弛钢丝和镀锌钢丝等。钢丝的直径为3~7mm，抗拉强度分为1470、1570和1670MPa三级。

（1）冷拉钢丝（ Φ^1 ）

经冷拔后直接用于预应力混凝土的钢丝。其盘径基本等于拔丝机卷筒的直径，开盘后钢丝呈螺旋状，没有良好的伸直性。这种钢丝存在残余应力，屈强比^①低（0.75），伸长率小（3%），仅用于铁路轨枕、压力水管和电杆等。

（2）矫直回火钢丝（ Φ^2 ）

冷拔后经高速旋转的矫直辊筒矫直，并经回火（350~400℃）处理的钢丝，属于普通松弛级钢丝。其盘径不小于1.5m。钢丝经矫直回火后，可消除钢丝冷拔中产生的残余应力，提高钢丝的比例极限、屈强比和弹性模量，并改善塑性；同时获得良好的伸直性，施工方便。这种钢丝广泛用于房屋、桥梁、市政、水利等工程。

（3）刻痕钢丝（ Φ^k ）

用冷轧方法在钢丝表面刻出周期变化的凹痕的钢丝。刻痕钢丝的直径为5mm，其性能与矫直回火钢丝相同。表面刻痕，可增加钢丝与混凝土的握裹力。这种钢丝可用于先张法预应力构件。

（4）低松弛钢丝

冷拔后在张力状态下经回火处理的钢丝。钢丝的张力为抗拉强度的30%~50%，可以用下列二种方法获得。一是利用二组张力轮的速差使钢丝得到张力（图1-2a）。二是利用拉拔力作为钢丝的张力，即放线架上的半成品钢丝的直径要比成品钢丝的直径大

① 屈服强度与抗拉强度的比值。

(留有10%~15%的压缩变形量), 该钢丝通过机组中的拉丝模拉成最终成品, 拉丝机的拉拔卷筒相当于第二组张力轮(图1-2b)。钢丝在热张力的状态下产生微小应变(约0.9%~1.3%), 从而使钢丝在恒应力下抵抗位错转移的能力大为提高, 达到稳定化。

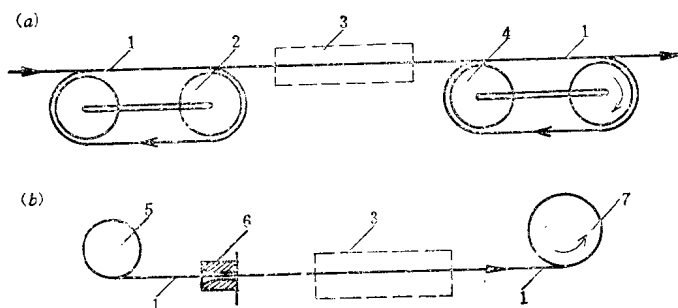


图 1-2 钢丝的稳定化处理

(a)张力轮法; (b)拉拔力法

1—钢丝; 2—第一组张力轮; 3—中频回火; 4—第二组张力轮; 5—放线架; 6—拔丝模; 7—拉拔卷筒

经稳定化处理的钢丝, 弹性极限和屈服强度提高, 应力松弛率大大降低, 但价格较贵; 考虑到构件抗裂度提高、钢材用量减少等因素, 综合经济效果是好的。这种钢丝主要用于桥梁、特种结构等重点工程。

(5) 镀锌钢丝

用热镀或电镀方法在表面镀锌的钢丝。其性能与矫直回火钢丝相同。热镀的锌层厚度为 $250\text{g}/\text{m}^2$, 大大提高了钢丝的抗腐蚀能力。这种钢丝主要用于斜拉桥的钢索和污水池等环境条件恶劣的工程结构。

碳素钢丝的品种和性能应符合国家标准《预应力混凝土用钢丝》(GB5223—85)的规定。表1-1列出光面钢丝的直径允许偏差、横截面积与重量。表1-2列出矫直回火钢丝的力学性能。

近年来, 预应力钢丝的强度在国标的基础上又进一步提高到 $1770\text{N}/\text{mm}^2$ 与 $1860\text{N}/\text{mm}^2$ 。

光面钢丝的尺寸和重量

表 1-1

钢丝公称直径 (mm)	直径允许偏差 (mm)	横 截 面 积 (mm ²)	每米理论重量 (kg)
3.0	+0.06 -0.02	7.07	0.058
4.0	+0.06 -0.02	12.57	0.099
5.0	+0.07 -0.03	19.63	0.154
6.0	+0.07 -0.03	28.27	0.222
7.0	+0.07 -0.03	38.48	0.302

矫直回火钢丝的力学性能

表 1-2

公称 直径 (mm)	抗拉强度	屈服强度	伸长率	弯 曲 次 数		松 弛			
	f_b (N/mm ²)	$f_{0.2}$ (N/mm ²)	(%) $L_0 =$ 100mm	次数	弯曲半径	初始应力 相当于公 称强度的 百分数(%)	1000h应力损失 (%)不大于		
	不 小 于			R (mm)			I 级 松弛	II 级松弛	
3.0	1470	1255	4	3	7.5	70	8	2.5	
	1570	1330		3	7.5				
4.0	1570	1410		3	10				
5.0	1470	1255		4	15				
	1570	1330							
	1670	1410							
6.0	1570	1330		4	15				
	1670	1410							
7.0	1470	1255		4	20				
	1570	1330							

- 注：1. I级松弛即普通松弛级，II级松弛即低松弛级；
 2. 屈服强度不小于抗拉强度的85%；
 3. 弹性模量为 $1.95 \sim 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ；
 4. 表中 $\phi 6$ 与 $\phi 7$ 钢丝系根据1987年国家标准修改通知单列入。

2. 钢绞线 (Φ^1)

预应力混凝土用钢绞线是用多根冷拉钢丝在绞线机上成螺旋形绞合, 并经回火处理而成。按其构造不同, 可分为: 1×2 、 1×3 、 1×7 钢绞线 (图 1-3)。 1×7 钢绞线是由 6 根外层钢丝围绕着一根中心钢丝 (直径加大 2.5%) 绞成, 用得最多。 1×2 与 1×3 钢绞线仅用于先张法预应力混凝土构件。

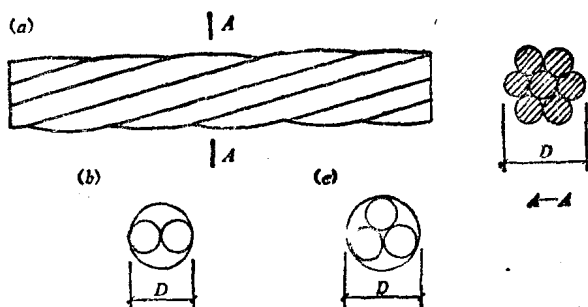


图 1-3 预应力钢绞线

(a) 1×7 钢绞线; (b) 1×2 钢绞线; (c) 1×3 钢绞线

D —钢绞线公称强径

1×7 钢绞线的有关技术资料

表 1-3

钢绞线公称直径 (mm)	直径允许偏差 (mm)	钢绞线公称截面积 (mm ²)	钢绞线理论重 (kg/m)	强度级别 (N/mm ²)	整根破断负荷 (kN)	屈服负荷 (kN)	伸长率 (%) $L_0 = 600$
					不小于		
9.0	+0.30	50.34	0.392	1670	83.89	71.80	3.5
	-0.15			1770	88.79	75.46	
12.0	+0.40	89.45	0.597	1570	140.24	119.17	
	-0.20			1670	149.06	126.71	
15.0	+0.40	139.98	1.091	1470	205.80	174.93	
	-0.20			1570	219.52	186.59	

注: 1. 屈服负荷是整根钢绞线破断负荷的 85%;

2. 松弛值与矫直回火钢丝相同;

3. 弹性模量为 $1.90 \sim 2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

钢绞线的捻向有左捻和右捻三种。国标规定为左捻。钢绞线的捻距为钢绞线公称直径的12~16倍。钢绞线的性能与矫直回火钢丝相同。钢绞线的整根破断力大、柔性好、施工方便，具有广阔的发展前景。

钢绞线的品种和性能应符合国家标准《预应力混凝土用钢绞线》(GB5224—85)的规定，见表1-3。

近年来，预应力钢绞线在国标的基础上有了新发展。一是新华金属制品公司生产的超 高 强 低 松 弛钢绞线，规格有： $\phi 12$ 、 $\phi 12.7$ 、 $\phi 15$ 、 $\phi 15.3$ 等，强度为 1860N/mm^2 。二是天津预应力钢丝厂生产的 1×2 与 1×3 钢绞线，见表1-4。

1×2与1×3钢绞线的有关技术资料

表 1-4

钢绞线 结 构	钢 绞 线 公称直径 (mm)	钢绞线公 称截面积 (mm ²)	钢绞线 理论重 (kg/m)	强度级别 (N/ mm ²)	整根破 断负荷 (kN)	屈服负荷 (kN)	伸长率(%) $L_0=200$
					不 小 于		
1×2	8.0	25.3	0.199	1470	37.19	31.61	3.5
	10.0	39.5	0.310		58.06	49.35	
	12.0	56.9	0.447		83.61	71.07	
1×3	8.6	38.0	0.298	1470	55.80	47.43	3.5
	10.75	59.3	0.465		87.16	74.08	
	12.9	85.4	0.670		125.55	106.72	

注：1.钢绞线为普通松弛级，与矫直回火钢丝相同；

2.根据用户需要，可供应其他强度级别的钢绞线。

3. 热处理钢筋

热处理钢筋由普通热轧中碳低合金钢筋经淬火和回火的调质热处理或轧后控制冷却方法制成，外形尺寸见图1-4。其盘径为2m，开盘后自行伸直。这种钢筋的强度高、成本低，但易出现匀质性差，主要用于铁路轨枕，也有用于先张法预应力混凝土楼板等。

热处理钢筋的品种和性能应符合国家标准《预应力混凝土用热处理钢筋》(GB4463—84)的规定，见表1-5。

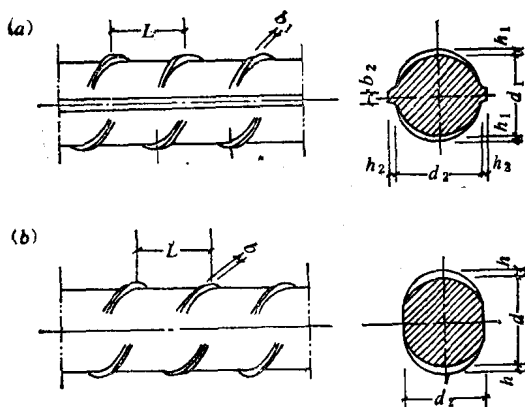


图 1-4 热处理钢筋的外形

(a)带纵肋; (b)无纵肋

热处理钢筋的技术资料

表 1-5

公称直径 (mm)	牌 号	公称截面 面 积 (mm ²)	理论重量 (kg/m)	屈服强度 (N/ mm ²)	抗拉强度 (N/ mm ²)	伸长率 δ_{10} (%)	1000h 松弛值
				不 小 于			不大于
6	40Si ₂ Mn	28.3	0.23	1325	1470	6	3.5%
8, 2	48Si ₂ Mn	52.8	0.43				
10	45Si ₂ Cr	78.5	0.62				

注: 1. 表中松弛值是在初始应力为抗拉强度的70%下测定的;

2. 弹性模量为 $2.0 \sim 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

4. 精轧螺纹钢

精轧螺纹钢是用热轧方法在整根钢筋表面上轧出不带纵肋的螺纹外形成型的(图1-5)。这种钢筋的连接简单、锚固可靠、施工方便,主要用于房屋、桥梁等直线筋。

精轧螺纹钢由于不用冷拉焊接,可通过加合金元素或改善轧制方法来达到高强度。

精轧螺纹钢的外形尺寸与力学性能见表1-6与表1-7。

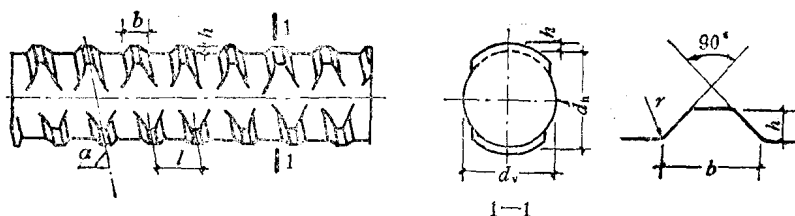


图 1-5 精轧螺纹钢筋的外形

精轧螺纹钢筋的外形尺寸

表 1-6

公称 直径 (mm)	标准尺寸 (mm)							计算面积 (cm ²)	理论重量 (kg/m)
	基圆直径		螺纹高	螺 纹 底 宽	螺距	螺纹圆弧	导 角		
	d_n	d_v	h	b	l	r	α		
25	25	25	1.6	6.0	12	1.0	81°33'	4.91	3.85
32	32	32	2.0	7.0	16	2.0		8.04	6.31

精轧螺纹钢筋的力学性能

表 1-7

公称 直径 (mm)	牌 号	屈服点 (N/ mm ²)	抗拉强度 (N/ mm ²)	伸长率 δ_s (%)	冷 弯	100h松弛率
		不 小 于				不 大 于
25	40Si ₂ MnV	735	885	8	90° 6d	一次张拉3% 超张拉2%
	15Mn ₂ SiB	930	1030	8	90° 8d	
32	40Si ₂ MnMoV	735	885	7	90° 7d	

注：弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \sim 2.05 \times 10^5$ N/mm²。

二、钢材特性

1. 应力-应变曲线

预应力钢材的应力-应变特性是研究预应力混凝土结构性能和施工工艺的基础。工程师感兴趣的预应力钢材力学性能都可以直接从其应力-应变曲线中找到，如比例极限、屈服强度、抗拉