

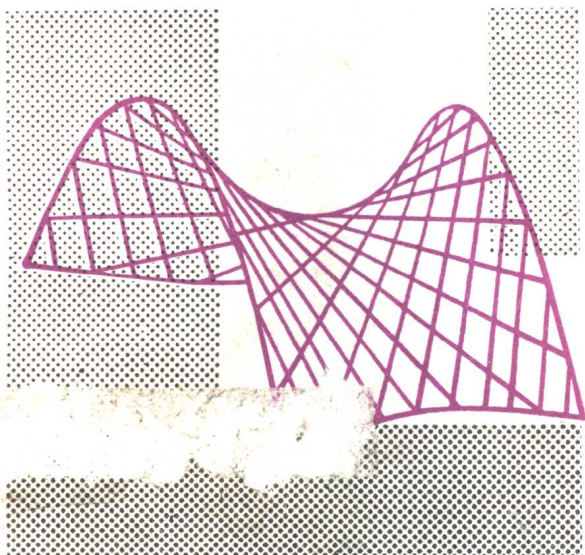
高等学校建筑工程专业系列教材

# 现代 预应力设计

995143

东南大学 吕志涛 孟少平 编著

● 中国建筑工业出版社



04

995143

高等学校建筑工程专业系列教材

# 现代预应力设计

东南大学 吕志涛 孟少平 编著

中国建筑工业出版社

目  
录  
1983

993

版社

构

Sec-

(6)  
动,

(京) 新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

现代预应力设计/吕志涛, 孟少平编著. --北京: 中国建筑工业出版社, 1998

高等学校建筑工程专业系列教材

ISBN 7-112-03538-4

I. 现… II. ①吕… ②孟… III. 预应力结构-结构设计-高等学校-教材 IV. TU378.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 23562 号

本书内容包括: 预应力材料与张锚体系, 预应力混凝土结构计算基础, 弯、剪、扭构件的承载力及局部承压计算, 部分预应力混凝土、超静定预应力混凝土结构设计与计算, 无粘结预应力混凝土结构, 预应力在高层建筑中的应用, 预应力转换层结构, 预应力混凝土特种结构, 预应力混凝土基础等。

读者对象: 结构工程专业研究生、本科生, 以及工程技术人员和教师等。

高等学校建筑工程专业系列教材

现代预应力设计

东南大学 吕志涛 孟少平 编著

\*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 插页: 1 字数: 354 千字

1998 年 12 月第一版 1998 年 12 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 15.00 元

ISBN 7-112-03538-4

TU·2759 (8778)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

1956年,当我国土木工程和建筑工程界在老一辈预应力专家带领下,开始研究和推广应用预应力混凝土的时候,我校于1958年也积极地开展了预应力混凝土的研究和工程实践。即使10年文革动乱期间,我校的预应力研究也没有中断。到了70年代后期,我国的经济建设突飞猛进,预应力科学技术及其应用也进入了一个新的发展时期,其显著特征是采用高强钢材,发展整体预应力结构和无粘结预应力技术。我校的预应力研究也有了飞速的发展,研究重点也由基本构件性能和计算为主转移到以现代预应力结构体系、性能和设计方法为主,更加注意理论联系实际,重视理论与工程应用的结合,并且积极投身于工程实践。40余年的研究和工程实践充分证明,预应力混凝土是当今世界上技术最先进、用途最广、最有发展前途的一种工程结构材料。大力提高这个领域的科学技术水平,对于节约材料、降低造价、发展新型结构体系和促进建筑业现代化都具有重要的意义。因此,为了适应现代预应力混凝土结构的应用和发展,为了培养预应力方面的高级人才,我们在1982年就为研究生开设了“现代预应力混凝土结构”课程,并编写了讲稿和部分教材。

最近十年来,校内外的老师、同事和我们的学生,其中有的已是教授、高级工程师和设计院院长,常要我编写出新的有关现代预应力混凝土结构设计方面的教科书,既阐述结构理论,又讲解设计方法。为此,我在为研究生编写的讲稿基础上,结合多年工程实践与研究,写成了本书,其中第九章(预应力转换梁结构)由冯健同志编写。

本书有两个显著的特点:一是不以讲述构件截面计算为重点,而着重阐述整体结构的设计;二是不局限于规范条文和公式的应用和解释,而重视现代预应力混凝土结构基本概念和设计方法的论述。希望在帮助读者学习和掌握现代预应力混凝土知识的同时,能较好地解决实际工程的设计问题和创造性地设计出能充分发挥预应力特长的新颖结构。

本书书名为“现代预应力设计”,即意味着不局限于预应力混凝土,还包括预应力钢结构、预应力技术在建筑物加固改造和加层工程中的应用等。限于篇幅,本书中没有列入预应力混凝土抗震设计和抗火设计、预应力钢结构设计、建筑物加固改造和加层工程中的预应力技术以及预应力结构的非线性分析和优化设计等内容,有待今后再版时补充。

本书虽然是一本供结构工程专业研究生试用的教材,但对土木建筑工程类其它专业的高年级大学生和工程技术人员及教师也有较好的参考价值。希望本书对他们了解和掌握现代预应力结构知识和设计方法有所帮助,为知识经济时代的到来和知识创新,加速现代预应力混凝土在我国的推广和应用,起到一定的作用。

限于编著者的水平,加上时间仓促,书中定有不妥甚至错误之处,衷心希望读者批评指正。

作 者

1998.5 南京

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第二章 材料与张锚体系 .....	8
第一节 预应力材料 .....	8
第二节 预应力张锚体系 .....	15
第三章 预应力混凝土结构计算基础 .....	20
第一节 张拉控制应力取值 .....	20
第二节 预应力损失计算 .....	20
第三节 等效荷载概念 .....	25
第四节 开裂前预应力构件的应力分析 .....	30
第四章 预应力混凝土弯、剪、扭构件的承载力及局部承压计算 .....	34
第一节 预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算 .....	34
第二节 预应力混凝土构件的受剪承载力计算 .....	39
第三节 预应力混凝土受扭构件承载力计算 .....	44
第四节 后张预应力混凝土构件的局部承压计算 .....	46
第五节 设计示例 .....	50
第五章 部分预应力混凝土 .....	59
第一节 部分预应力混凝土的历史与发展 .....	59
第二节 预应力度 .....	61
第三节 部分预应力混凝土的优点 .....	64
第四节 部分预应力混凝土梁开裂截面应力分析 .....	65
第五节 部分预应力混凝土结构裂缝控制 .....	67
第六节 部分预应力混凝土结构挠度控制 .....	73
第七节 部分预应力混凝土构件截面承载力计算 .....	74
第八节 设计示例 .....	74
第六章 超静定预应力混凝土结构 .....	79
第一节 引言 .....	79
第二节 次弯矩、主弯矩和综合弯矩 .....	81
第三节 次弯矩的计算方法 .....	82
第四节 压力线、线性变换与吻合束 .....	85
第五节 荷载平衡法 .....	88
第六节 预应力混凝土连续梁设计 .....	90
第七节 预应力混凝土框架设计 .....	99
第八节 预应力混凝土框架设计示例 .....	105
第七章 后张无粘结预应力混凝土结构 .....	117
第一节 概述 .....	117

第二节	无粘结预应力混凝土受弯构件的性能 .....	117
第三节	无粘结预应力混凝土楼盖形式及经济跨度 .....	120
第四节	预应力混凝土平板结构设计 .....	125
第五节	无粘结预应力混凝土平板结构设计示例 .....	143
第八章	预应力在高层建筑中的应用 .....	154
第一节	概述 .....	154
第二节	高层结构内力与变形 .....	155
第三节	高层建筑的基本构件种类 .....	156
第四节	高层建筑结构体系简述 .....	157
第九章	预应力转换层结构 .....	177
第一节	概述 .....	177
第二节	转换层结构的抗震问题 .....	179
第三节	转换层结构的内力分析 .....	179
第四节	梁式转换层结构中的柱子设计 .....	180
第五节	梁式转换层 .....	182
第六节	厚板转换层 .....	188
第七节	转换桁架 .....	190
第八节	分阶段张拉预应力 .....	191
第十章	特种预应力混凝土结构 .....	194
第一节	大悬挑结构 .....	194
第二节	预应力混凝土贮罐与筒仓 .....	200
第三节	预应力混凝土塔式结构 .....	204
第四节	预应力混凝土地坪及路面 .....	209
第十一章	预应力混凝土基础 .....	212
第一节	引言 .....	212
第二节	预应力混凝土基础的特点 .....	213
第三节	预应力混凝土基础设计要点 .....	214
第四节	工程实例 .....	216
附录	常用预应力筋的等效荷载及主弯矩 .....	223

# 第一章 绪 论

## (一)

对混凝土施加预应力的设想，早在 19 世纪后期就有学者提出了。而预应力混凝土进入实际应用，却是在研制出较高强度的钢材、锚具并充分认识到混凝土的收缩、徐变及其对预应力效应的影响之后，大约在本世纪 30 年代才开始的。

预应力混凝土的早期应用，主要集中在建造工业建筑、桥梁和轨枕、电杆、水池等结构、构件，即用它来代替钢结构、构件以及改进普通钢筋混凝土结构、构件的。近二三十年，已逐步扩大到居住建筑、大跨和大空间公共建筑、高层建筑、高耸结构、地下结构、海洋结构、压力容器、大吨位围船结构及跑道路面结构等各个领域。

预应力混凝土由于具有结构使用性能好、不开裂、刚度大、耐久性好以及经济等优点，目前已成为建筑工程、土木工程中的主要结构材料之一。它的应用已不再局限于简单地代替钢材和钢筋混凝土，而且还解决了一些连钢结构都解决不了的工程结构物的建造难题（即不止是替代），例如核电站的安全壳。因为数十米直径的安全壳，如采用钢结构，其壁厚需几十厘米，钢厂生产大有困难；这么厚的钢板弯成圆弧形，也是个大问题，如用薄的钢板焊接起来，则焊缝问题难以解决。而采用预应力混凝土，则较容易解决。

最近 20 年，同国际上先进国家一样，我国在预应力材料、张锚体系、设备、工艺和计算理论以及工程应用等方面的发展和进步是很快的。

## (二)

现代预应力混凝土是用高强度钢材和较高强度的混凝土经先进的生产工艺制作的、用现代设计概念和方法设计的高效预应力混凝土。它不同于我们过去所常见的用强度较低的冷拉Ⅱ级钢和冷拔低碳钢丝制作中、小型构件的预应力混凝土。它具有下列突出的优点：

1. 改善使用阶段的性能。受拉和受弯构件中采用预应力，可延缓裂缝出现并降低较高荷载水平时的裂缝开展宽度；采用预应力，也能降低甚至消除使用荷载下的挠度，因此，可跨越大的空间，建造大跨结构。

2. 提高受剪承载力。纵向预应力的施加可延缓混凝土构件中斜裂缝的形成，提高其受剪承载力。

3. 改善卸载后的恢复能力。混凝土构件上的荷载一旦卸去，预应力就会使裂缝完全闭合，大大改善结构构件的弹性恢复能力。

4. 提高耐疲劳强度。预应力作用可降低钢筋中应力循环幅度，而混凝土结构的疲劳破坏一般是由钢筋的疲劳（而不是由混凝土的疲劳）所控制的。

5. 能充分利用高强度钢材，减轻结构自重。在普通钢筋混凝土结构中，由于裂缝和挠度问题，如使用高强度钢材，不可能充分发挥其强度。例如：1860MPa 级的高强钢绞线，如

用于普通钢筋混凝土结构中，钢材强度发挥不到 20%，其结构性能早已满足不了使用要求，裂缝宽，挠度大；而采用预应力技术，不仅可控制结构使用阶段性能，而且能充分利用高强度钢材的潜能。这样，采用预应力，可大大节约钢材用量，并减小截面尺寸和混凝土用量，具有显著的经济效益。

6. 可调整结构内力。将预应力筋对混凝土结构的作用作为平衡全部和部分外荷载的反向荷载，成为调整结构内力和变形的手段。

因此，现代预应力混凝土是解决建造大（大跨度、大空间建筑—工艺上和使用上要求的）、高（高层建筑、高耸结构）、重（重荷载、重型结构、转换层结构）、特（特种结构—水池、电视塔、安全壳）等类建筑结构和工程结构物的不可缺少的、重要的结构材料和技术。

下面，举些突出的应用实例。

### 1. 低层建筑

对 18~36m 的屋架、12~18m 的薄腹屋面大梁、6m 的大型屋面板、6m 的工形吊车梁以及各种檩条等等在单层厂房中有广泛应用的预制预应力混凝土构件，这里不再提及，只重点介绍各种整体预应力结构。

#### (1) 珠海玻纤厂主厂房大跨门式刚架工程

原设计为钢排架结构，后来改用连续四跨大跨度预应力混凝土门式刚架 (31.5m+33m+31.5m+14m) (图 1-1)，并革新了预应力配筋方案，取得了良好的使用性能和经济效果，结构造价仅为原方案的 30%，且不必维修。

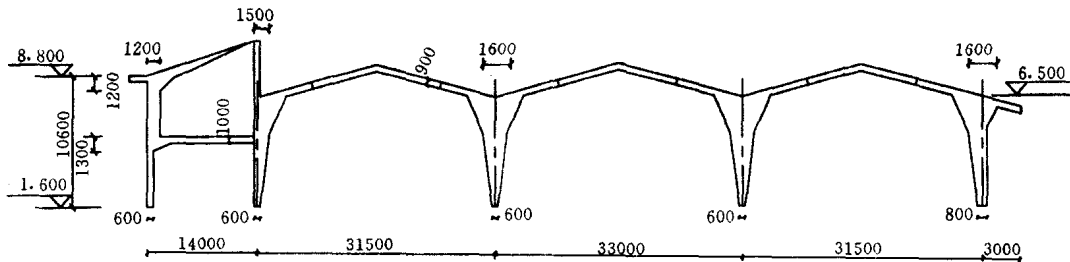


图 1-1 门架几何尺寸简图

#### (2) 上海闵行影剧院工程

采用了三向预应力混凝土交叉梁板大空间结构，屋盖平面为正六边形，对角线长 28m，正三角形网格边长为 3.5m，整个结构由六个角柱支承 (图 1-2)，屋面大梁截面尺寸为 0.3m×1.0m，梁高为其跨度的 1/20~1/30，屋面板厚 80mm。

#### (3) 安徽师大报告厅

采用预应力混凝土井式梁板结构，梁端由边柱支承。平面尺寸为 23.4m×23.4m，梁格为 3.9m×3.9m，梁高为 1.20m，为跨度的 1/20。

#### (4) 梁板合一的单层建筑，如：

马鞍形壳板：跨度为 12~27m，宽度为 2.5m，直线预应力筋；

V 形折板：跨度为 9~18m，宽为 2~3m，也为直线预应力筋；

T 形板梁和双 T 形板梁：跨度大于 15m，用单 T 板，跨度小于 15m，用双 T 板，跨高比达 30~40。德国还建造有 89m 跨的预应力 T 形板梁单层大跨结构，梁高 5.5m，截面厚



度仅为 180mm。

## 2. 多层建筑

### (1) 框架结构

多层预应力混凝土框架结构在我国应用极为广泛，常见的为 2~7 层，1~3 跨，也有更多的层数和跨数的。如上海色织四厂六层双跨框架结构是我国最早的大跨度预应力混凝土框架结构工程，每跨 20m，梁高 1.64m，柱距 7.2m。珠海拱北海关大楼为双向预应力混凝土框架结构，纵向、横向每跨都为 18m，纵向为 7 跨，横向为 5 跨。并且，在这一大面积大跨度结构工程中，由于采用预应力，没有设置伸缩缝和沉降缝。

### (2) 板柱建筑

采用预制装配式，靠预加应力将板与柱连成整体。

## 3. 高层建筑

(1) 高层平板结构：高层建筑中改钢筋混凝土梁板结构为无粘结预应力平板结构，可大大降低建筑高度，20 层可增加到 22~23 层，因为平板厚仅为跨度的 1/40~1/50，而且这种结构可节省水、电及空调管道，减少风和地震产生的弯矩，综合经济效益显著。因此，这种结构在我国近几年得到了广泛应用。

(2) 扁梁结构：通常，扁梁的宽度  $b >$  高度  $h$ ， $h/l = 1/20 \sim 1/25$ 。它用于高楼中，也采用无粘结预应力，很有经济效益，如建造在上海的安徽裕安大厦，采用的 8m 跨扁梁， $b \times h = 500\text{mm} \times 450\text{mm}$ 。

(3) 高层大跨框架结构：苏州八面风商厦，为 22 层的高层商住楼，14 层以下采用  $7.5\text{m} \times 24\text{m}$  柱网的大跨度结构，采用了高层预应力框架结构。在其基础结构中，也采用了预应力技术（图 8-19）。

### 4. 高耸结构

南京电视塔，高 318.5m，一改过去圆筒形的塔身为三肢腿塔身结构。它的竖向塔身结构、水平连梁和基础结构中都施加了预应力，保证了良好的使用性和耐久性。

### 5. 转换层结构

高层建筑中，从下到上往往用途不同，下面为大开间，供餐饮和娱乐之用，上层为小柱网的办公、住宅建筑。因此，不同柱网和开间的上、下部之间需采用转换层结构。迄今，我们已设计和研究并在实际高层建筑中应用的转换层结构有预应力混凝土梁式转换层（包括曲梁转换层）、预应力混凝土板式转换层、预应力混凝土桁架转换层等，它们与相应的钢筋混凝土转换层相比，具有结构性能好、结构高度小、综合经济效益好等优点。

### 6. 看台建筑

在江苏及南京地区体育场建筑中，建造过不少预应力看台建筑。由于采用预应力技术，可使大悬挑结构建造得十分轻巧，如图 10-4 所示为其中之一。

### 7. 预应力基础

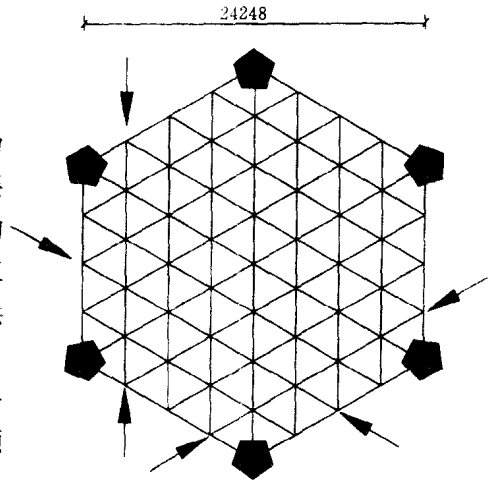


图 1-2 上海闵行影剧院工程 PC 交叉梁板屋盖结构

预应力混凝土基础有箱基、梁基、板基、筏基等多种形式。尽管在国内的应用还不多，但是我们的研究和工程实践表明，很有发展和应用前景（详见第十一章）。

### 8. 特种结构

(1) 核安全壳：它的尺寸大，并严格要求不开裂，因此，采用预应力混凝土技术是最好的选择。它的内径为 35~50m，高 40~50m，它的壁厚达 1m，底板厚 2.7m。它所需的预应力筋上千吨，普通钢筋则在千吨以上，它的球形顶盖、圆筒形筒壁和圆形底板都需施加预应力，且预应力筋有径向、环向以及曲线形等多种形式，见图 1-3。

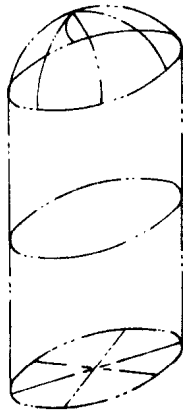


图 1-3 核电站安全壳

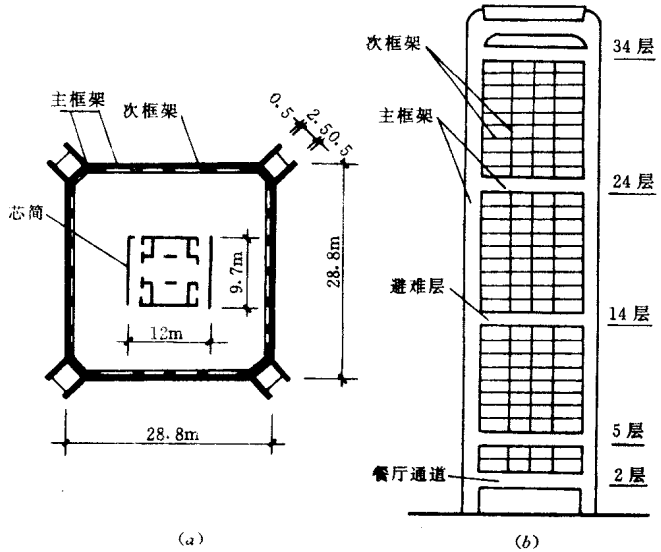


图 1-4 PC 巨型框架结构超高层建筑示意

(2) 巨型预应力混凝土结构：当高层建筑建造在跨越地铁、河道和其它特别的地基情况下，采用巨型结构往往是十分合理的。因为采用巨型结构的传力大梁，需承受其上的十多层竖向荷载，跨度又大，所以，它的截面尺寸较大，所需的预应力筋也很多。加拿大有一幢 40 层大楼，采用巨型框架结构，用三道预应力混凝土传力大梁，将高楼分为三节，每节 13 层（图 1-4）。一节仅 4 根传力大梁，它承受其上的 13 层竖向荷载，水平力由筒和四柱承受，柱截面为 4m×2m，柱距为 43m，梁跨 42m， $b \times h = 1\text{m} \times 6\text{m}$ ，每根传力大梁  $\Sigma N_p = 7000\text{t}$ 。为了保证施工阶段传力大梁的受拉区和受压区的应力、挠度、反拱以及预应力损失不致过大，不少情况下，需要采用分阶段后张预应力技术，以保证良好的结构性能和经济效益。

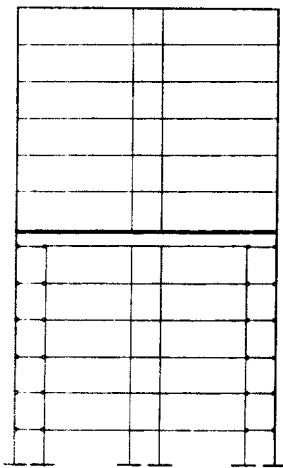


图 1-5 旧框架外套框架加层结构示意

### 9. 预应力在建筑物加固、改造和加层工程中的应用

采用预应力技术是建筑物加固的最快捷、经济和有效的方法。当建筑物的用途改变，需抽去其中的柱子时，采用预应力技术，也是很容易实现的；当原有建筑物上需加层若干层时，采用外套框架加层结构是一种重要方法，其中的框架大梁多采用预应力混凝土梁，如图 1-5 所示。

## 10. 预应力钢结构

将预应力技术扩大应用于钢结构，已有一定的研究和工程实践。如我校在北京西客站主站房 45m 跨、承载 5000t 的钢桁架设计中，采用了高强预应力技术，在该钢桁架上设计配置了三种预应力筋：下弦直线预应力筋①、折线预应力筋②、上弦端部预应力筋③（图 1-6），它们不仅使此结构性能提高，增加了技术先进性，而且节约了钢材近 20%。顺便指出，预应力在钢网架、钢网壳结构中，也很有应用前景。

至于预应力混凝土在各种桥梁结构中的应用更是十分广泛，这里不再赘述。

总之，现代预应力混凝土的应用有如下特点：一是应用范围广，数量大，在传统的钢筋混凝土结构基础上产生了预应力混凝土独特的结构形式和结构体系；二是已从单个预制预应力构件发展到整体预应力混凝土结构；三是无粘结预应力技术的大力发展和应用；四是预应力混凝土技术已应用于建筑物的加固改造和加层工程中，并扩展到预应力钢结构。我们预期预应力混凝土技术和应用还将有新的发展和变化。

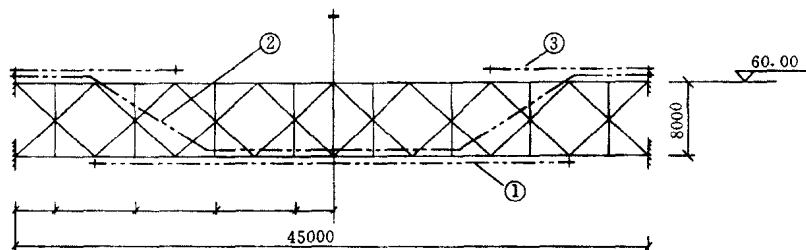


图 1-6 北京西客站主站房 45m 跨预应力钢桁架结构示意图

### (三)

近三十年来，预应力混凝土，在上述应用方面的发展促进了结构理论和设计方法的进步。按照传统的设计思想，预应力混凝土和钢筋混凝土是两种截然不同的结构材料。预应力混凝土是以弹性分析为基础的。1970 年布加勒斯特会议之后，工程界已普遍认识到早先不容许混凝土出现拉应力的“全”预应力混凝土并不一定都能满足使用性能的要求，也不一定经济，从而，使部分预应力混凝土的设计思想得到传播，并促进了具有全预应力混凝土和钢筋混凝土两者优点的部分预应力混凝土迅速的发展。据此，工程师们可以根据结构对外部荷载（或作用）和技术经济的要求选择合适的预应力度，设计出符合使用要求的各种预应力结构。

在预应力设计思想进步的同时，预应力混凝土结构理论也有突出的进展，特别体现在以下几方面：

1. 在设计理论上采用了概率极限状态设计法和结构可靠度理论。

2. 对部分预应力混凝土和无粘结预应力混凝土结构的性能和计算进行了较深入的研究。特别在裂缝控制方面，提出了应正确考虑与荷载状态的关系，并采用频遇组合，考虑与环境条件的关系，重视非预应力普通钢筋对控制裂缝的作用以及相应的计算方法。对无粘结预应力混凝土的极限承载力和刚度的计算也取得了显著的进展，对其适用范围有了新的认识，即特别适宜于建造无粘结预应力混凝土平板和扁梁结构，而对于地震区的主要承重结构（框架大梁等）和大悬臂结构构件，应慎用。

3. 对超静定预应力结构的次弯矩、非线性性能、弯矩重分布与调幅以及极限承载力等方面都有较深入的试验研究和计算分析,提出了相应的设计建议。

4. 对预应力混凝土结构的抗震性能及在地震区的应用,过去,国内外都有疑虑和争论。然而,通过近二三十年的震害调查和试验研究,预应力混凝土结构在地震区应用的争论趋于统一。预应力混凝土结构只要正确设计,特别是控制预应力度和配筋指数,并处理好节点构造,即具有良好的延性和耗能能力,在地震区应用是完全可能的。

此外,对现代预应力混凝土结构体系及其计算有了新的探索,对曲梁中的空间预应力束的计算、预应力在基础工程中的应用、预应力高强混凝土结构、预应力锚杆、预应力组合结构以及预应力损失、预应力作用下的混凝土局部承压等方面的研究,都取得了新的进展。

#### (四)

预应力混凝土结构在未来建筑及土木工程中的应用,将会有飞速的发展和变化。但是也可以肯定,它的发展过程带有很大的惯性,它不像化学和电器产品那样会因新技术的开发成功而立即改变面貌。所以在今后的二三十年间,它不会发生根本性的变化。因而可以对二十年后的预应力混凝土结构的发展和应用作出如下预测:

1. 居住建筑在几十年内将继续向高层化发展,尤其是50层和30层以下的高层居住建筑的比重将大大增加,200m以上的超高层建筑将在我国不少城市中兴建起来。7m以上的不同跨度的预应力混凝土平板结构、扁梁结构和密肋楼板及轻型挂墙板将在各种高层建筑结构体系中得到极广泛的应用。各种预应力混凝土转换层结构将在高层建筑中发挥更大的作用。

同时,一家一块预应力平板的大开间多层住宅将会在近期大量兴建。

耸立云天的巨型结构建筑、悬挂结构和广场建筑也将在我国一些国际化大都市中建造起来。

2. 今后,预应力混凝土多层框架厂房、单层厂房和多层车库将趋向定型化、标准化。多功能的单层建筑的柱网尺寸扩大到 $18\text{m}\times 18\text{m}\sim 30\text{m}\times 30\text{m}$ ,多层建筑主要采用 $9\text{m}\times 11\text{m}\sim 18\text{m}\times 24\text{m}$ ;单层厂房预应力混凝土构件将向大型化发展,宽度为 $2.4\sim 3.0\text{m}$ 的双T板也将生产和应用。

3. 在21世纪,大跨度公共建筑将大量兴建,并大量采用预应力混凝土框架、交叉梁体系、拱结构体系、网壳结构,以及预应力混凝土折板、薄板和悬索结构体系。跨度为50m的预应力混凝土折板结构、跨度为100m的预应力混凝土单层建筑以及直径为200m的预应力混凝土圆形建筑也将成功地建造起来。

4. 在今后的几十年间,在长江、黄河等大江、大河上将继续建筑几十座大桥。各型预应力混凝土桥梁将得到进一步发展和应用,跨度超过400m和600m的斜拉桥和跨度超过千米的特大型悬索桥也会在我国建成。

5. 特种结构工程中将越来越多地采用预应力混凝土结构。今后二三十年内,300m以上的预应力混凝土电视塔、直径为50~80mm的料库和贮罐、直径为20~40m的压力容器和安全壳等结构工程将会陆续建成并投入使用。

6. 预应力混凝土在未来的海洋开发中将发挥特别重要的作用。未来的人类必然要向海

洋开辟从食物到各种原料的新资源和新能源，我国沿海也将对开发大陆架发生兴趣并寄予希望。未来的海洋构筑物将会不断涌现，海洋石油开采平台、海洋储罐和运输船等海洋能源开发设施将大量建造。由于预应力混凝土的耐久性、强度和经济性，它很早就被认为是建造海洋结构的最好材料，因而，预应力混凝土结构将是今后海洋工程的最大支柱。

7. 预应力混凝土在今后水工建筑中将继续扩大应用。加固基岩和护坡工程中的预应力混凝土锚桩（地锚）以及大坝工程中的预应力混凝土闸墩等都将得到进一步发展。

8. 预应力混凝土还将进一步为已建工程的修复、加固、加层和改造，甚至拆除，发挥其独特的作用。

## 第二章 材料与张锚体系

### 第一节 预应力材料

#### 一、预应力钢材

现代预应力混凝土结构所用的预应力钢材主要有：碳素钢丝（又称高强钢丝）、钢绞线和钢筋（包括热处理钢筋和精轧螺旋钢筋）三类。此外，框架结构中的次梁、板等中、小型结构构件，也可采用冷拉Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级钢筋和冷轧带肋钢筋。国外（如日本）也有采用碳纤维作为预应力配筋材料的动向。

预应力钢材的发展趋势是高强度、粗直径、低松弛和耐腐蚀。

#### 1. 钢材品种

现将我国常用的预应力钢材分别简述如下：

##### (1) 碳素钢丝

碳素钢丝是用含碳量 0.5%~0.9% 的优质高碳钢盘条经索氏体化处理、酸洗、镀铜或磷化后经几次冷拔而成。

碳素钢丝的品种有：冷拔钢丝、矫直回火钢丝、刻痕钢丝、低松弛钢丝和镀锌钢丝等。钢丝的直径通常为 3~7mm，最大的可到 12mm。抗拉强度分为 1470、1570、1670、1770N/mm<sup>2</sup> 等级。

钢丝、钢绞线强度标准值 ( $f_{ptk}$ ) 及设计值 ( $f_{py}$  及  $f'_{py}$ )

表 2-1

种	类	标准值 $f_{ptk}$	设计值 $f_{py}$	设计值 $f'_{py}$	
碳素钢丝	$\phi 4 \sim \phi 9$	1770	1200	400	
		1670	1130	400	
		1570	1070	400	
		1470	1000	400	
钢绞线	二股	$d=10, 12$	1720	1170	360
	三股	$d=10.8, 12.9$	1720	1170	360
	七股	$d = 9.5, 11.1, 12.7, 15.2$ ( $d=9, 12, 15$ )	1860	1260	360
			1860	1260	360
			1720	1170	360
			(1770)	(1200)	360
			(1670)	(1130)	360
			(1570)	(1070)	360
	(1470)	(1000)	360		

注：1. 表中括号内的数值系根据 GB5224-85 生产、现尚在使用的钢绞线直径及其对应的强度标准和设计值；  
2. 本表中的碳素钢丝系指“国标”中的消除应力钢丝（即矫直回火钢丝）。

①冷拔钢丝 ( $\phi^b$ )

经冷拔后直接用于制造预应力混凝土铁路轨枕、压力水管和电杆等先张法构件的钢丝。因为它开盘后的伸直性差，存在有冷拔中产生的残余应力。

②矫直回火钢丝 ( $\phi^s$ )

冷拔后经高速旋转的矫直辊筒矫直并经回火处理的钢丝为矫直回火钢丝。它也是盘条供应，盘径不小于 1.5m。经矫直回火后的钢丝，可消除钢丝冷拔中产生残余应力，提高钢丝的比例极限、屈强比和弹性模量，并改善塑性，获得良好的伸直性，方便施工。因此，它被广泛用于建造预应力混凝土房屋、桥梁及市政工程。

③刻痕钢丝 ( $\phi^k$ )

用冷轧方法在钢丝表面剖出周期性变化的凹痕的钢丝。这种钢丝的性能与矫直回火钢丝基本相同，但是由于表面刻了痕，其与混凝土之间的握裹粘结力大大增加，故可用于先张法预应力混凝土构件。

④低松弛钢丝

冷拔后在张力状态下经回火处理的钢丝。这种钢丝，不仅弹性极限和屈服强度有提高，而且应力松弛率大为降低（由 8% 降到 2.5%）。因此，它特别适用于抗裂要求高的桥梁和特种结构工程中。

⑤镀锌钢丝

在表面上镀有锌的钢丝的性能与矫直回火钢丝基本相同，但它的抗腐蚀性能大为增强。因而，它主要用于污水池等环境条件恶劣的工程结构。

碳素钢丝的强度标准值及设计值见表 2-1。

(2) 钢绞线 ( $\phi'$ )

预应力混凝土用钢绞线是用多根（2, 3, 7 或 19 根）冷拉钢丝在绞线机上扭绞而成。用得最多的是 7 根钢丝组成的钢绞线。它是由 6 根钢丝围绕着一根中间钢丝（直径比外围的大 2.5%）顺一个方向扭结而成。由于钢绞线直径较大，比较柔软，施工方便，因而被越来越广泛的应用。由于它与混凝土的粘结性能也好，故 1×2 和 1×3 钢绞线多用于先张法预应力混凝土构件。

钢绞线的强度标准值及设计值见表 2-1，钢绞线的计算截面面积和公称质量见表 2-2。

钢绞线的计算截面面积及公称质量表

表 2-2

钢绞线规格	直径 $d$ (mm)	钢绞线计算 截面面积 (mm <sup>2</sup> )	单根钢绞线 公称质量 (kg/km)	钢绞线规格	直径 $d$ (mm)	钢绞线计算 截面面积 (mm <sup>2</sup> )	单根钢绞线 公称质量 (kg/km)
二股	10.0	39.5	310	七股钢绞线 (标准型)	(9.0)	49.9	392
	12.0	65.9	447		(12.0)	88.6	697
					(15.0)	138.6	1091
三股					9.5	54.8	432
	10.8	59.3	465		11.1	74.2	580
	12.9	85.4	671		12.7	98.7	774
				15.2	139.0	1101	

[编者注] 根据新华金属制品公司等厂多年统计， $\phi 12.7$  实际重 800kg/km， $\phi 15.2$  为 1140kg/km。

### (3) 钢筋

#### ① 热处理钢筋

热处理钢筋是由热轧中碳低合金钢筋盘条经淬火和回火的调质热处理而成。外形见图 2-1。其盘径为 2m，开盘后自行伸直，每根长 100~120m。这种钢筋粘结性好，多用于先张法预应力构件，如铁路轨枕、预制板等。

热处理钢筋的直径、强度标准值和设计值见表 2-3。

钢筋强度标准值 ( $f_{yk}$  或  $f_{pyk}$ ) 设计值 ( $f_y$  或  $f_{py}$  及  $f'_y$  或  $f'_{py}$ )

表 2-3

钢筋种类		$f_{yk}$ 或 $f_{pyk}$	$f_y$ 或 $f_{py}$	$f'_y$ 或 $f'_{py}$
热轧钢筋	I 级 (Q235)	235	210	210
	II 级 (20MnSi、20MnNb (b))	335	310	310
	III 级 (20MnSiV、20MnTi、K20MnSi)	400	360	360
	IV 级 (40Si2MnV、45SiMnV、45Si2MnTi)	540	500	400
冷拉钢筋	I 级 ( $d \leq 12$ )	280	250	210
	II 级 ( $d \leq 25$ )	450	380	310
	( $d \leq 28 \sim 40$ )	430	360	310
	III 级	500	420	360
冷拉带肋钢筋	IV 级	700	580	400
	LL550 ( $4 \sim 12$ )	550	360	360
	LL650 ( $d=4, 5, 6$ )	650	430	380
热处理钢筋	LL800 ( $d=5$ )	800	530	380
	40SiMn ( $d=6$ )	1470	1000	400
	48SiMn ( $d=8, 2$ )			
45Si2Cr ( $d=10$ )				

#### ② 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的粗钢筋 (图 2-2)。国产的精轧螺纹钢有  $\phi 25$ 、 $\phi 32$  两种直径。它可用螺丝套筒连接和螺帽锚固，因此不需再加工螺丝，也避免了接长时的对焊。但它只适用于结构构件的直线筋，也可用作起重或提升的工具式螺杆。

精轧螺纹钢的强度标准值和设计值与冷拉 IV 级钢筋相同。

#### ③ 冷轧带肋钢筋

冷轧带肋钢筋是由低合金钢盘条经轧制而成的。它是一种新列入设计规范的钢筋种，用以代替冷拔低合金钢丝。其强度取值

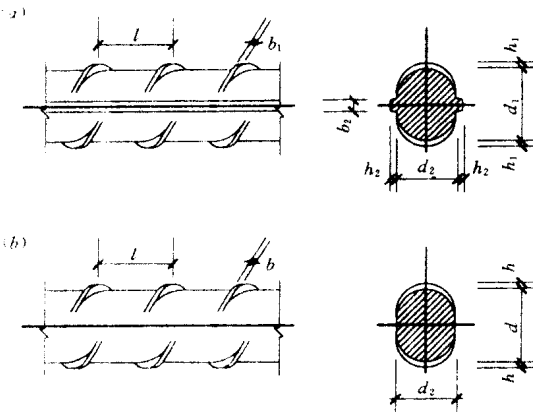


图 2-1 热处理钢筋

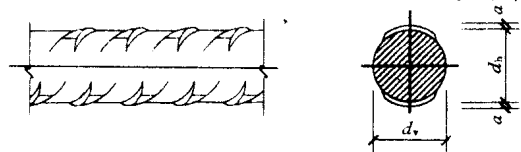


图 2-2 精轧螺旋粗钢筋



见表 2-3。这种钢筋的公称直径为 4~12mm，推荐钢筋公称直径为 5, 6, 7, 8, 9 和 10mm。

#### ④冷拉钢筋

冷拉钢筋是将低合金钢筋冷拉至钢筋强化段，随后卸荷而成。经冷拉后，钢筋的屈服点可获得提高，但延性降低。预应力混凝土中采用的是冷拉Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级钢筋，屈服强度在 450~750N/mm<sup>2</sup>。由于它们的强度不高，故现代预应力结构中被碳素钢丝、钢绞线等高强度钢材所替代。

冷拉钢筋的强度标准值和设计值见表 2-3。

### 2. 钢材特性

#### (1) 应力-应变曲线

钢材的应力-应变曲线是研究预应力混凝土结构性能和施工工艺的基础。图 2-3 为高强度钢丝和钢绞线的应力-应变曲线，热处理钢筋的应力-应变曲线与它相似。这些高强度钢材与低碳钢筋（包括冷拉钢筋）不同，它们没有明显的屈服点。一般以残余应变为 0.2% 时的应力定为特征屈服强度  $f_{0.2}$ ，这一应力  $f_{0.2}$  约为高强度钢材极限强度的 80%，在图 2-3 所示高强度钢材的应力-应变曲线中的  $f_p$  为比例极限点， $f_p$  之前  $\sigma \sim \epsilon$  关系为直线变化， $f_p$  之后  $\sigma \sim \epsilon$  关系变为非线性， $f_{0.2}$  之后  $\epsilon$  的增长加快。这种高强度钢材的  $\sigma \sim \epsilon$  曲线可用下列式子表达：

$$\sigma \leq f_p \text{ 时, } \sigma = E\epsilon$$

$$\sigma > f_p \text{ 时, } \sigma = f_b(A + B \ln \epsilon)$$

经东南大学试验测定，对钢丝  $\phi^5$ ：A=1.239，B=0.079

对钢绞线  $\phi^{15}$ ：A=1.254，B=0.083

为比较起见，图 2-3 中同时绘出热轧钢筋和冷拉钢筋的  $\sigma \sim \epsilon$  示意曲线。

#### (2) 钢材强度的确定

钢筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率。

热轧钢筋和冷拉钢筋的强度标准值系根据屈服强度确定，用  $f_{pyk}$  表示；钢丝、钢绞线、热处理钢筋、冷轧带肋钢筋的强度标准值系根据极限抗拉强度确定，用  $f_{ptk}$  表示。

钢筋的强度设计值是根据可靠度指标分析和工程经验校准二种方法确定的。通常，热轧钢筋  $f_{py} = 0.90f_{pyk}$ ；冷拉钢筋  $f_{py} = 0.84f_{pyk}$ ；冷轧带肋钢筋  $f_{py} = 0.66f_{ptk}$ ；碳素钢丝和钢绞线、热处理钢筋的  $f_{py} = 0.68f_{ptk}$ 。

#### (3) 弹性模量

规范规定各种钢材的弹性模量按表 2-4 取用。

#### (4) 应力松弛

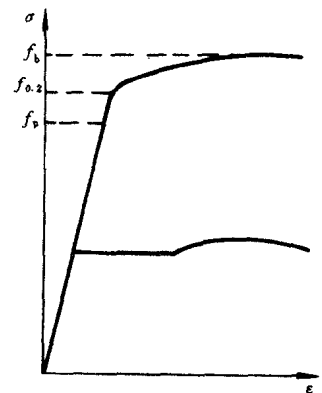


图 2-3 预应力钢丝的应力-应变曲线

钢材弹性模量  $E_s$  (N/mm<sup>2</sup>)

表 2-4

钢 种	$E_s$	钢 种	$E_s$
I 级钢筋、冷拉 I 级钢筋	$2.1 \times 10^5$	冷轧带肋钢筋	$1.9 \times 10^5$
II, III, IV 级钢筋, 热处理钢筋, 碳素钢丝	$2.0 \times 10^5$	冷拉 II, III, IV 级钢筋, 钢绞线	$1.8 \times 10^5$

注：经大量实测，钢绞线的弹性模量可提高到  $1.95 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>。