

现代预应力 结构设计

(按新规范编写)

薛伟辰 编著

中国建筑工业出版社

现代预应力结构设计

(按新规范编写)

薛伟辰 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代预应力结构设计 (按新规范编写) / 薛伟辰编著.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2003

ISBN 7-112-05616-0

I. 现… II. 薛… III. 预应力结构-结构设计

IV. TU378.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 108604 号

本书系统地介绍了现代预应力结构设计的主要内容, 全面反映了近二三十年来国内外有关现代预应力结构设计的新理论、新方法和新工艺。内容包括: 预应力材料与施工工艺; 预应力混凝土构件两类极限状态设计; 预应力混凝土超静定结构设计; 无粘结预应力混凝土结构设计; 预应力混凝土结构抗震与防火设计; 预应力钢-混凝土组合梁设计; 预应力钢结构设计; 预应力砌体结构设计; 预应力 FRP 筋混凝土梁设计等。另外, 书中还编入了各类典型预应力结构体系的工程设计实例, 可供设计参考。

本书基于国内有关最新研究成果以及我国有关最新设计规范编写, 既可供大专院校土木工程专业师生作教材或教学参考书, 也可供从事土木工程科研、设计和施工的广大技术人员阅读参考。

现代预应力结构设计

(按新规范编写)

薛伟辰 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

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16¼ 字数: 389 千字

2003 年 3 月第一版 2003 年 3 月第一次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 21.00 元

ISBN 7-112-05616-0

TU·4943 (11255)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

现代预应力结构是利用高性能材料、现代设计理论和先进施工工艺进行设计、建造的高效结构。与非预应力结构相比，现代预应力结构不仅具有跨越能力大、受力性能好、使用性能优越、耐久性高、轻巧美观等优点，而且与其他结构相比具有比较经济，节材、节能的效果。现代预应力结构具有广阔的发展前景。

近二三十年来，国内外在现代预应力结构的受力性能研究、设计方法以及施工工艺研究等方面均获得了重大进展，取得了丰富的研究成果，其中大部分成果已在工程实践中得到了成功的应用。目前，现代预应力结构已渗透到土木工程的各个领域，是建造高（高层建筑、高耸结构）、大（大跨度、大空间结构）、重（重载结构）、特（特种结构及特殊用途）工程中不可缺少的、最为重要的结构型式之一。在我国建设部的“八五计划”、“九五计划”中都把发展和推广现代预应力结构作为我国建筑业的基本国策之一。

编写本书的目的在于全面系统地反映近二三十年来国内外有关现代预应力结构设计的最新成果，并系统介绍我国现行规范中有关现代预应力结构的设计方法与构造要求，使读者通过本书的学习，在认识和掌握现代预应力结构基本知识体系的同时，能够独立进行各类典型预应力结构体系的设计工作。需要说明，编写本书时参照的我国现行规范包括：《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）、《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2002）、《无粘结预应力混凝土结构技术规程》（JGJ/T 92—93）、《钢结构设计规范》（GB 50017 送审稿，2001）、《预应力混凝土结构抗震设计规程》（征求意见稿，2001）以及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（送审稿，2002）和《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》（TB 10002.3—99）等。

本书在编写过程中努力做到以下几点：

1. 尽力使内容全面、系统、新颖，以达到既全面系统地介绍我国现行规范中有关现代预应力结构的设计方法与构造要求，又及时反映近二三十年来国内外有关现代预应力结构在受力性能、设计理论与设计方法等方面的最新研究成果，其中多半为近五六年的最新成果。

2. 书中不打算只局限于对规范条文和公式的解释与说明，而着重对现代预应力结构的基本思想、基本原理的分析和阐述，使读者既能了解新规范在设计中满足规范要求、又不拘泥于规范地设计出形式新颖、受力合理的现代预应力结构。

3. 为便于读者学习与应用，书中给出了各类典型现代预应力结构（包括简支梁、连续梁、框架结构以及平板结构等）的工程设计例题，并尽量详细地介绍其设计步骤与计算过程，并给出结构施工简图以便读者参考使用。

4. 书中包括作者和所指导研究生的有关研究成果，其字数约占全书总字数（不包括第十五章“预应力结构设计实例”）的30%左右，以使本书显示自身的特色。

在本书出版之际，作者非常感激他的博士导师、我国著名预应力大师、中国工程院院士、东南大学土木工程学院吕志涛教授，正是吕院士的指引和指导，使作者走上了现代预应力结构研究与应用之路并一步步走向深入。作者也非常感谢他的硕士导师、哈尔滨工业

大学土木工程学院刘文如教授和博士后导师、河海大学土木工程学院周氏教授多年来所给予的指导和帮助。同时，作者要特别感谢教育部“长江学者奖励计划”首批特聘教授、同济大学土木工程学院李杰教授，李教授的大力支持和帮助对作者完成本书是非常重要的。另外，作者衷心感谢哈尔滨工业大学钟善桐教授、中国建筑科学研究院陶学康总工和冯大斌高工、同济大学土木工程学院黄鼎业教授、李国平教授以及苏小卒教授、东南大学土木工程学院孟少平教授和孙宝俊教授、福州大学房贞政教授、重庆大学骆万康教授等各位专家和同仁，他们的大量研究成果和资料使作者受益匪浅。作者所指导的研究生李昆、何池、茅卫兵、程斌、刘华杰等参加了本书的部分科研工作，研究生王小辉、徐壮涛、钱卫、王骅等参加了本书例题的编写和文字编辑等工作，对此作者深表谢意。作者也非常感谢同济大学科研处、土木工程学院和建筑工程系的各位领导、前辈和同仁们，是他们始终给予的巨大的帮助和支持。使本书得以完成和出版。

需要着重指出，本书反映的作者研究成果，在研究中得到了有关国家与省部级科研部门对科研项目的支持，其中由作者负责承担的项目主要有：国家自然科学基金项目“预应力纤维塑料钢筋混凝土梁设计理论与锚固体系研究”（编号：50008012，主持人）、水利部水利科技基金项目“模拟钢材料的研制和应用”（编号：J9548，主持人）、教育部首批高等学校骨干教师资助项目“高性能混凝土框架抗震及性能设计研究”（编号：1183，主持人）、中国博士后科技基金项目“预应力在钢-混凝土组合结构中的应用及其抗震研究”（第20期，主持人）、2002年度上海市青年科技启明星计划资助项目“新型FRP筋混凝土梁疲劳性能研究”（主持人）、上海磁悬浮列车发展基金项目“叠合式磁悬浮轨道梁的优化设计研究”（主持人）、上海市科学技术发展基金项目“新型预应力组合梁框架结构研究”（编号：992012044，技术负责人）、长江水利委员会科研项目“南水北调中线工程刁河渡槽结构、材料、预应力研究”（子项负责人）等，在此一并致谢。

由于现代预应力结构在国内外的的发展极其迅速，限于作者的学识、时间与精力，本书中可能会有诸多不妥甚至错误之处，敬请广大读者批评、指正。

薛伟辰
于同济大学
2002年10月

目 录

第一章 预应力总论	1
第一节 预应力基本概念	1
第二节 预应力结构基本形式	3
第三节 预应力混凝土的分类	10
第四节 预应力结构发展历史	11
第五节 现代预应力结构最新进展	12
参考文献	16
第二章 预应力材料	19
第一节 预应力筋	19
第二节 非预应力筋	25
第三节 混凝土	26
第四节 孔道及灌浆材料	37
参考文献	38
第三章 预应力施工工艺	39
第一节 预应力锚具	39
第二节 预应力施工工艺	43
参考文献	45
第四章 预应力损失计算	46
第一节 预应力张拉控制应力	46
第二节 预应力损失计算	47
第三节 有效预应力的计算及减小预应力损失的措施	59
参考文献	61
第五章 预应力混凝土构件承载能力极限状态计算	62
第一节 一般规定	62
第二节 受弯截面计算	66
第三节 受拉截面计算	68
第四节 受剪截面计算	70
第五节 受扭截面计算	72
第六节 局压承载力计算	75
第七节 受冲切承载力计算	79
第八节 疲劳验算	80
参考文献	81
第六章 预应力混凝土构件正常使用极限状态验算	82
第一节 裂缝控制验算	82
第二节 受弯构件挠度验算	87

参考文献	89
第七章 预应力混凝土超静定结构设计	90
第一节 概述	90
第二节 预应力主内力、综合内力、次内力与荷载效应组合	91
第三节 压力线、线性变换与吻合束	93
第四节 等效荷载法	95
第五节 荷载平衡法	97
第六节 单位次弯矩法	100
第七节 约束次弯矩法	102
第八节 内力重分布与弯矩调幅	104
参考文献	106
第八章 无粘结预应力混凝土结构设计	107
第一节 概述	107
第二节 结构型式	111
第三节 受弯构件的受力性能	114
第四节 单向板与双向板设计	116
第五节 平板结构设计	120
参考文献	133
第九章 预应力混凝土结构抗震设计	135
第一节 概述	135
第二节 预应力混凝土结构抗震性能	138
第三节 国外对预应力混凝土结构的抗震设计规定	143
第四节 我国对预应力混凝土结构的抗震设计方法	145
参考文献	151
第十章 预应力混凝土结构防火设计	154
第一节 预应力筋与混凝土的耐火性能	154
第二节 预应力混凝土构件的耐火性能	156
第三节 预应力锚具的耐火性能	158
第四节 防火设计方法	160
参考文献	161
第十一章 预应力钢-混凝土组合梁设计	162
第一节 概述	162
第二节 预应力钢-混凝土组合梁的受力性能	164
第三节 预应力钢-混凝土组合梁的设计	169
第四节 剪力连接件设计	176
参考文献	178
第十二章 预应力钢结构设计	180
第一节 概述	180
第二节 轴拉构件	183

第三节 受弯构件	186
参考文献	190
第十三章 预应力砌体结构设计	191
第一节 概述	191
第二节 受力性能	192
第三节 预应力损失计算	193
第四节 设计方法	195
参考文献	197
第十四章 预应力 FRP 筋混凝土梁设计	198
第一节 概述	198
第二节 FRP 筋的粘结性能	205
第三节 非预应力 FRP 筋混凝土梁	207
第四节 有粘结预应力 FRP 筋混凝土梁	210
第五节 无粘结预应力 FRP 筋混凝土梁	212
参考文献	214
第十五章 预应力设计实例	216
第一节 有粘结预应力混凝土简支梁	216
第二节 无粘结预应力混凝土连续梁	223
第三节 有粘结预应力混凝土框架结构	234
第四节 无粘结预应力混凝土平板结构	240

第一章 预 应 力 总 论

第一节 预应力基本概念

一、预应力结构的定义

在荷载作用下,当普通钢筋混凝土构件中受拉钢筋应力为 $20 \sim 30\text{MPa}$ 时,其相应的拉应变为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-4}$,这大致相当于混凝土的极限抗拉应变,此时受拉混凝土可能会产生裂缝。但在正常使用荷载下,钢筋应力一般在 $150 \sim 200\text{MPa}$ 左右,此时受拉混凝土不仅早已开裂,而且裂缝已展开较大宽度,另外构件的挠度也会比较大。因此,为限制截面裂缝宽度、减小构件挠度,往往需要对普通钢筋混凝土构件施加预应力。

对普通钢筋混凝土施加预应力的设想,早在 19 世纪后期就有学者提出^[1]。但是直到 20 世纪 30 年代人们研制出高强钢材和锚具并充分认识到混凝土的收缩徐变对预应力的影响之后,预应力结构才开始实际工程应用。

国内外对预应力结构的定义有很多种,最常用的定义为^[2]:在结构承受外荷载之前,预先对其在外荷载作用下的受拉区施加压应力,以改善结构使用性能的这种结构型式称之为预应力结构。

这里以一预应力混凝土简支梁为例(如图 1-1),说明预应力结构的基本受力原理:在外荷载作用之前,预先在梁的受拉区作用有偏心压力 P , P 在梁截面的下缘纤维产生压应力 σ_c (图 1-1a);在外荷载作用下,梁截面的下缘纤维产生拉应力 σ_t (图 1-1b);在预应力和外荷载共同作用下,梁截面下缘纤维的应力状态应是两者的叠加,可能是压应力(当 $\sigma_c > \sigma_t$ 时),也可能是较小的拉应力(当 $\sigma_c \leq \sigma_t$ 时),见图 1-1(c)。从图中可见,预应力的作用可部分或全部抵消外荷载产生的拉应力,从而提高结构的抗裂性,对于在使用荷载下出现裂缝的构件,预应力也会起到减小裂缝宽度的作用。

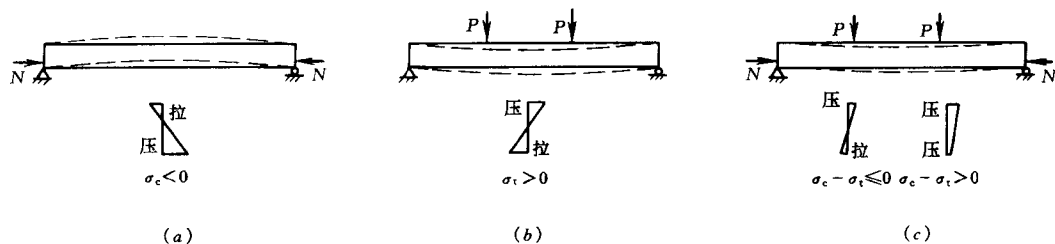


图 1-1 预应力混凝土简支梁的截面应力

(a) 在预应力作用下; (b) 在外荷载作用下; (c) 在预应力和外荷载共同作用下

二、预应力结构的特点

与非预应力结构相比,预应力结构具有如下的一些特点^{[3][4][5]}:

(1) 改善结构使用性能 通过对截面受拉区施加预压应力,可以均匀结构内力分布,降低截面应力峰值,使结构在使用荷载下不开裂或减小裂缝宽度,并由于预应力反拱而降

低结构的变形,从而改善结构的使用性能,提高结构的耐久性。

(2) 减小构件截面高度,减轻自重 对于大跨度、承受重荷载的结构,预应力可以有效提高结构的跨高比限值。

(3) 充分利用高强钢材 在普通钢筋混凝土结构中,由于裂缝宽度和挠度的限制,高强钢材的强度不可能被充分利用。而在预应力混凝土结构中,通过对高强钢材预先施加较高的拉应力,可以使高强钢材在结构破坏前能够达到其屈服强度或名义屈服强度。

(4) 具有良好的裂缝闭合性能与变形恢复性能 当作用在结构上的活载部分或全部卸载时,预应力混凝土结构具有良好的裂缝闭合性能与变形恢复性能,从而提高了截面刚度,进一步改善结构的耐久性。

(5) 提高抗剪承载力 由于预压应力延缓了截面斜裂缝的产生,增加了截面剪压区面积,从而提高了构件的抗剪承载力。另一方面,预应力混凝土梁的腹板宽度也可以做得薄些,以进一步减轻自重。

(6) 提高抗疲劳强度 预压应力可以有效降低钢筋的应力循环幅度,增加疲劳寿命。这对于以承受动力荷载为主的桥梁结构是很有利的。

(7) 具有良好的经济性 对适合采用预应力技术的混凝土结构来说,预应力混凝土结构比普通钢筋混凝土结构节省 20% ~ 40% 的混凝土和 30% ~ 60% 的纵筋钢材;而与钢结构相比,则可节省一半以上的造价。

(8) 预应力结构所用材料单价较高,相应的设计、施工等比较复杂,而且针对预应力结构的研究工作也有待进一步地深入与完善。

三、预应力度

预应力度是衡量结构预应力水平的参数,是进行预应力结构研究与设计的最重要的指标。目前国内外对预应力度的定义有以下三种^{[6][7]}:

1. 基于抗弯承载力的预应力度定义

在极限状态下,由预应力筋提供的抵抗弯矩 $(M_u)_p$ 与由预应力筋和非预应力筋共同提供的抵抗弯矩 $(M_u)_{p+s}$ 的比值,称为预应力度 PPR,即公式 (1-1)。这是美国的内曼 (A. E. Naaman) 教授首先提出的。

$$PPR = \frac{(M_u)_p}{(M_u)_{p+s}} \quad (1-1)$$

式中 $(M_u)_p$ ——由预应力筋提供的抵抗弯矩;

$(M_u)_{p+s}$ ——由预应力筋和非预应力筋共同提供的抵抗弯矩。

如用材料强度与截面特性来表达,则公式 (1-1) 可表示成如下的形式

$$PPR = \frac{A_p f_{py} \left(h_p - \frac{x}{2} \right)}{A_p f_{py} \left(h_p - \frac{x}{2} \right) + A_s f_y \left(h_s - \frac{x}{2} \right)} \quad (1-2)$$

式中 A_p, A_s ——预应力筋和非预应力筋的截面面积;

f_{py}, f_y ——预应力筋和非预应力筋的抗拉强度设计值;

h_p, h_s ——预应力筋和非预应力筋形心至混凝土受压区最外纤维的距离;

x ——混凝土截面受压区高度。

2. 基于钢筋拉力的预应力度定义

如果 $h_p = h_s$, 则公式 (1-2) 简化为

$$PPR = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_y} \quad (1-3)$$

由于高强预应力钢材没有显著的屈服台阶, 瑞士的瑟尔利曼 (Thürliman) 建议预应力度定义为

$$PPR = \frac{A_p f_{0.2}}{A_p f_{0.2} + A_s f_y} \quad (1-4)$$

式中 $f_{0.2}$ ——预应力筋的名义屈服强度, 取预应力筋的残余应变为 0.2% 时对应的应力值。

3. 基于消压弯矩或消压轴力的预应力度定义

印度学者拉曼斯瓦迈 (G. S. Ramaswamy) 提出了预应力度 (PPR) 的新概念

$$PPR = \frac{M_0}{M} \text{ 或 } \frac{N_0}{N} \quad (1-5)$$

式中 M_0 ——消压弯矩, 即将构件控制截面受拉边缘预压应力抵消至零时的弯矩值;

M ——使用荷载 (不包括预应力) 下控制截面的弯矩值;

N_0 ——消压轴向力, 即将构件控制截面受拉边缘预应力抵消至零时的轴向力值;

N ——使用荷载 (不包括预应力) 下控制截面的轴向拉力。

公式 (1-5) 的优点在于, 将预应力度和截面预压受拉区是否出现拉应力或开裂联系起来: 当 M_0/M 大于或等于 1 时, 截面不出现拉应力; 当 M_0/M 小于 1 时, 则截面出现拉应力, 甚至可能开裂。

第二节 预应力结构基本形式

目前, 在工程实践中广泛采用的 18~36m 屋架、12~18m 薄腹屋面大梁、6m 大型屋面板、6m 工字形吊车梁、10~50m 预制桥梁、梁板合一的壳体与折板、铁路轨枕等, 都属于预制预应力构件, 这里不再赘述。

这里主要介绍各种现浇整体预应力结构, 按房屋建筑、桥梁工程、特种结构、路面结构、加固改造结构等分类, 其典型结构形式有^[8]:

一、房屋建筑

1. 预应力混凝土框架结构

预应力混凝土框架结构是预应力结构中应用最广的结构形式。如上海色织四厂六层双跨框架结构, 是我国最早的现浇预应力混凝土框架结构, 跨度 20m, 梁高 1.64m。珠海拱北海关大楼为双向预应力混凝土框架结构, 纵向与横向每跨均为 18m, 纵向为 7 跨, 横向为 5 跨。深圳车港工程是我国柱网尺寸最大的预应力混凝土框架结构, 总建筑面积 9.5 万 m^2 , 标准柱网 16m $\times$ 25m, 标准层平面尺寸 159m $\times$ 103.5m, 横向框架梁截面 1200mm $\times$ 1200mm, 纵向框架梁及次梁截面均为 1000mm $\times$ 1000mm。

2. 预应力混凝土平板结构

由于预应力混凝土平板结构中预应力筋为无粘结预应力筋, 因此又常被称为无粘结预

应力平板结构。典型的四柱平板结构如图 1-2 所示。广州国际大厦主楼建筑面积 8.8 万 m²，共 63 层，筒中筒结构，内外筒之间的楼板从第 7 层到第 63 层均为无粘结预应力混凝土平板结构，板厚 200mm，内外筒间跨度 7.0~9.4m。由同济大学设计的上海福源商厦位于上海老城区豫园，总建筑面积 2 万多平方米，共 7 层，剪力墙-平板结构，所有楼板均采用无粘结预应力混凝土平板，横向跨度为 10m + 9.32m + 6.78m + 5.9m + 7.2m，纵向跨度为 11 × 8m，板厚 230mm。

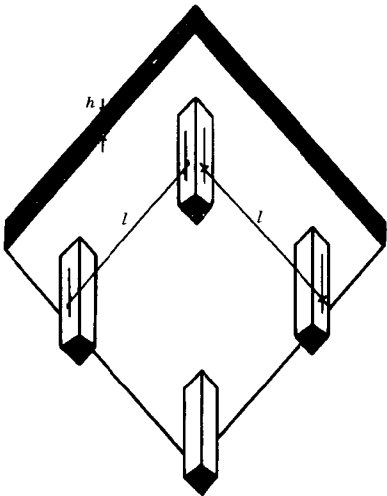


图 1-2 预应力混凝土平板结构

3. 预应力混凝土门架结构

预应力混凝土门架结构具有梁柱合一、结构简单、受力合理和施工方便等特点，适用于大跨度、大柱网的工业厂房与公共建筑。珠海玻纤厂主厂房为连续四跨预应力混凝土门架，跨度 31.5m + 33m + 31.5m + 14m^[3]（图 1-3）。大跨门架工程原设计为钢排架结构，后来改用门架结构并优化了预应力配筋方案，取得了良好的使用功能和经济效益，结构造价仅为原方案的 30%，且维修费用大幅降低。

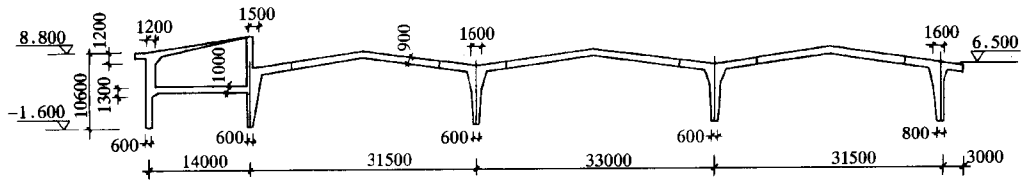


图 1-3 预应力混凝土门架结构

4. 预应力混凝土转换层结构

高层建筑中，由于上、下部建筑功能的不同，上部需要小开间的轴线布置和较多的墙体来满足旅店与住宅的要求，中部办公用房需要较小的室内空间，下部公用部分则往往要求尽可能大的自由空间，柱网尺寸尽量大，而墙体尽量少。为实现这种结构布置，就必须在结构型式转换的楼层设置转换层结构。预应力混凝土转换层结构的主要型式有预应力混凝土梁式转换层、预应力混凝土板式转换层、预应力混凝土桁架式转换层和预应力混凝土巨型框架转换层等，如图 1-4。

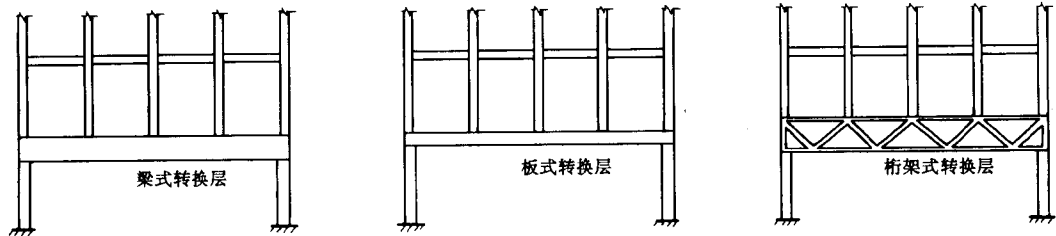


图 1-4 预应力混凝土转换层结构

5. 预应力钢桁架结构

将预应力技术应用于钢结构,可以改善结构的内力分布,减小变形。1953年建成的布鲁塞尔飞机库大门即为预应力双跨连续钢桁架。北京西客站主站房45m跨、承载5000t($\approx 50000\text{kN}$)的钢桁架也采用了预应力技术^[9],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和上弦端部预应力筋③(图1-5)。

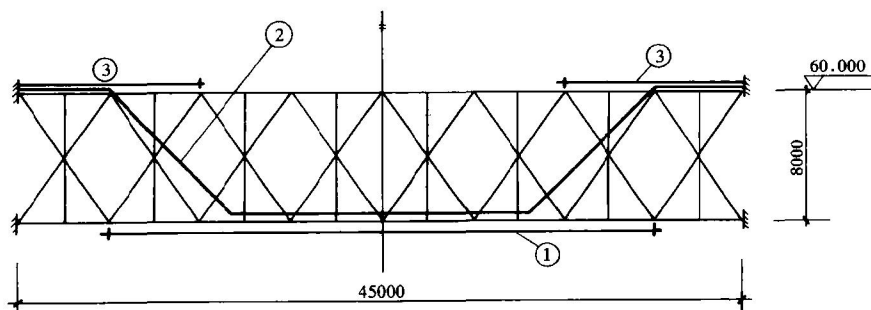


图 1-5 预应力钢桁架结构

6. 预应力空间钢结构

预应力空间钢结构发展至今可概括地分为4类^[10]: 1) 双曲悬索结构,著名的建筑有耶鲁大学冰球馆、东京代代木体育馆及我国浙江省人民体育馆等; 2) 传统空间结构,如预应力网架,网壳,立体桁架等,代表性的建筑有攀枝花体育馆、莫斯科室内溜冰馆等; 3) 吊挂式空间结构,这类结构由支承吊索的主承重结构、竖向或斜向吊索系以及屋盖结构组成,如慕尼黑奥林匹克公园溜冰馆、北京朝阳体育馆、蒙特利尔奥运会大体育场活动屋盖等属此类; 4) 整体张拉式结构,这是由压杆群和拉索系组成的全新空间结构体系,已建成的建筑物有沙特利雅德国际体育场的索膜天篷、美国圣迭戈新会议中心展厅的索网屋盖、汉城奥运会体操馆和击剑馆、亚特兰大奥运会主赛馆及我国上海浦东国际机场等。

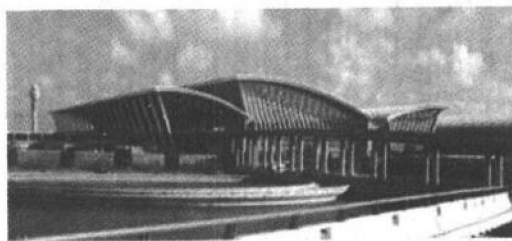


图 1-6 预应力空间钢结构

典型的预应力空间钢结构见图1-6。

7. 预应力钢-混凝土组合结构

预应力钢-混凝土组合结构兼有组合结构与预应力结构的优点,如图1-7所示^[11]。美国加州在1964年专门设计了三跨连续预应力钢-混凝土组合梁来支撑地下停车库之上的三层房屋。南京金山大厦采用预应力钢-混凝土组合梁作为转换大梁。福建会堂也采用跨度为35m的预应力钢-混凝土组合梁。

8. 预应力砌体结构

预应力可以增加砌体结构的抗弯和抗剪承载力,提高砌体结构的变形能力与延性,从而改善砌体结构的抗震性能。早在1967年英国就建成了一座竖向与环向均施加预应力的砖水池^[12](内径12m,高5m,壁厚230mm)。我国重庆也建成了预应力砖砌筒仓^[13](外

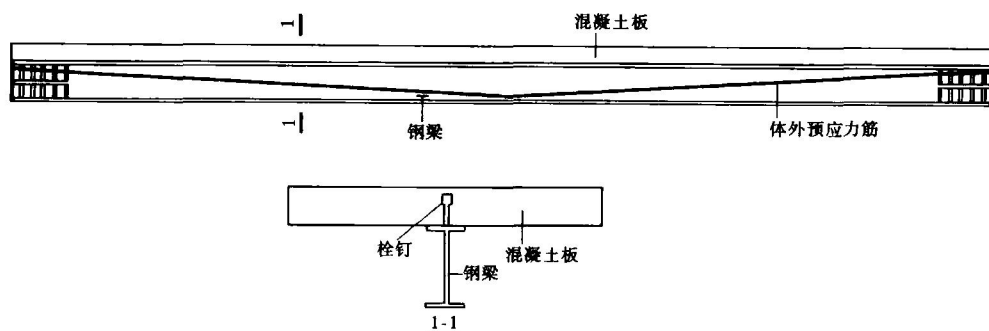


图 1-7 预应力钢-混凝土组合结构

径 5m，高 12m）和机械化立窑（外径 3.5m，高 10m）。

二、桥梁工程

与建筑结构相比，预应力在桥梁结构中的应用更为普及与深入。预应力在梁桥、刚构桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等各类桥梁中均有广泛的应用。可以毫不夸张地说，在现代桥梁结构中，70%以上的桥梁结构都采用了预应力技术。

1. 预应力梁桥



图 1-8 预应力梁桥

预应力梁桥包括简支梁桥与连续梁桥两种，跨度为 76m 的 ALM 桥为世界上最大跨度的简支梁桥^[14]。科威特巴比延桥为预应力混凝土连续梁桥，全长 2400m，主跨 54m。我国的洛阳黄河大桥^[15]，跨径 50m，全长 3000m，是我国目前最长的公路桥。南京长江二桥北汊桥，主跨为 $3 \times 165\text{m}$ 的

预应力混凝土连续梁桥。即将于 2003 年初竣工的上海磁悬浮铁路轨道梁也采用预应力混凝土梁桥的结构型式。

典型的预应力梁桥见图 1-8。

2. 预应力刚构桥

由于桥跨主梁与墩台刚性连接，减小了刚构桥的跨中弯矩，从而降低了刚构桥的主梁高度。广西横县峦城大桥^[16]，是我国第一座双桥面的预应力混凝土连续桁架刚构公路桥，该桥跨度为 $19 \times 16\text{m} + 60\text{m} + 3 \times 100\text{m} + 60\text{m} + 3 \times 16\text{m}$ 。我国重庆长江大桥、台北圆山桥、黄石长江大桥、攀枝花铁路大桥等均为大跨径预应力混凝土刚构桥。1998 年建成的、主跨为 301m 的挪威 Stolmsundet 桥则为世界上主跨最长的预应力混凝土刚构桥^[17]。

典型的预应力刚构桥见图 1-9。

3. 预应力拱桥

光滑曲线型的拱桥可以充分发挥混凝土



图 1-9 预应力刚构桥

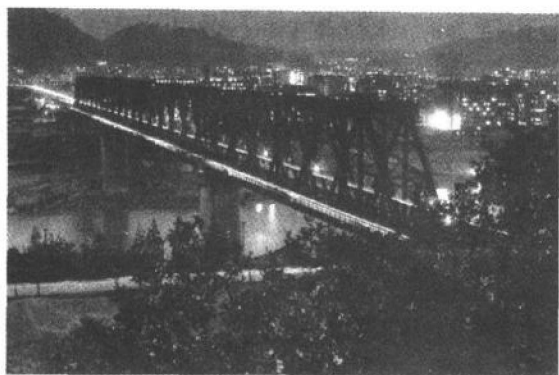


图 1-10 预应力拱桥

土的抗压性能，在大跨度桥梁中应用广泛。我国拱桥建设水平处于世界领先地位。如跨度为 330m 的贵州江界河桥^[18]，为上承式预应力混凝土拱桥。1990 年建成的、跨度为 240m 的宜宾金沙江桥^[15]，为当时世界上最大跨度的预应力混凝土中承式拱桥。下承式预应力混凝土拱桥较少，我国的典型工程有：主跨 62.4m 的甘肃新城黄河桥^[15]，主跨 80m 的云南下关-保山公路桥等。

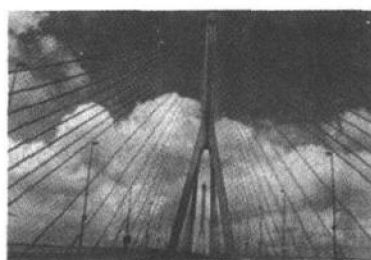
典型的预应力拱桥见图 1-10。

4. 预应力斜拉桥

斜拉桥具有受力合理、跨越能力大、节省材料和造型美观等优点，近年来这种桥型如异军突起，发展迅速。1962 年，预应力混凝土首次应用于斜拉桥，即委内瑞拉的马拉开波桥^[19]，跨度 135m，A 形塔，采用预应力刚性索。我国是世界上建成预应力混凝土斜拉桥最多的国家，达 70 余座。其中有主跨 432m 的铜陵长江公路大桥、主跨 444m 的重庆长江二桥等。上海杨浦大桥、南浦大桥则为预应力钢-混凝土组合梁斜拉桥^[15]。典型的预应力斜拉桥见图 1-11。



(a)



(b)

图 1-11 预应力斜拉桥

5. 预应力悬索桥

与斜拉桥相比，悬索桥具有更大的跨越能力。早期如 1964 年建成的加拿大赫得逊·霍普预应力混凝土悬索桥，主跨 207m。1995 年建成的、我国汕头海湾预应力混凝土悬索桥^[15]，主跨为 154m + 452m + 154m。正在建设中的润扬长江大桥，为主跨 1490m 的预应力混凝土悬索桥，如图 1-12 所示。

三、特种结构

1. 预应力混凝土储液池、筒仓

在储液池、筒仓结构中采用预应力技术可以有效控制混凝土的开裂。我国在 20 世纪 90 年代建成了近百余座、直径在 18 ~ 60m 的预应力混凝土储液



图 1-12 预应力悬索桥

池。如杭州四堡污水处理厂的污泥消化池，内径 24m，水位高 15m，采用了缠绕预应力高强钢丝来施加预应力。

典型的预应力筒仓如图 1-13 所示^[2]。

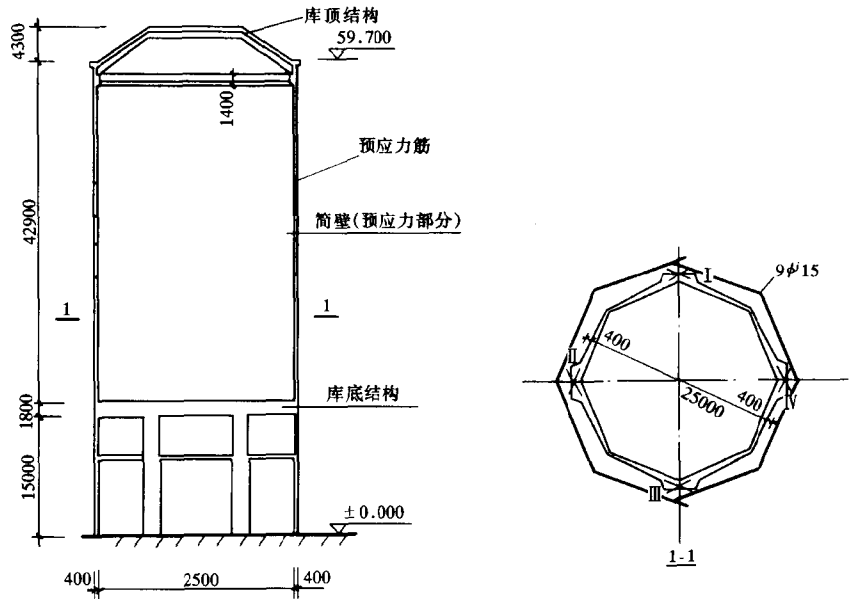


图 1-13 预应力筒仓

2. 预应力混凝土核安全壳

核安全壳尺寸大，内径为 35 ~ 50m，高 40 ~ 50m，壁厚达 1m，底板厚 2.7m，并严格要求不开裂。因此，核安全壳的球形顶盖、圆筒形筒壁和圆形底板都需要施加预应力，且预应力筋有径向、环向以及曲线形等多种形式^[20]，见图 1-14。

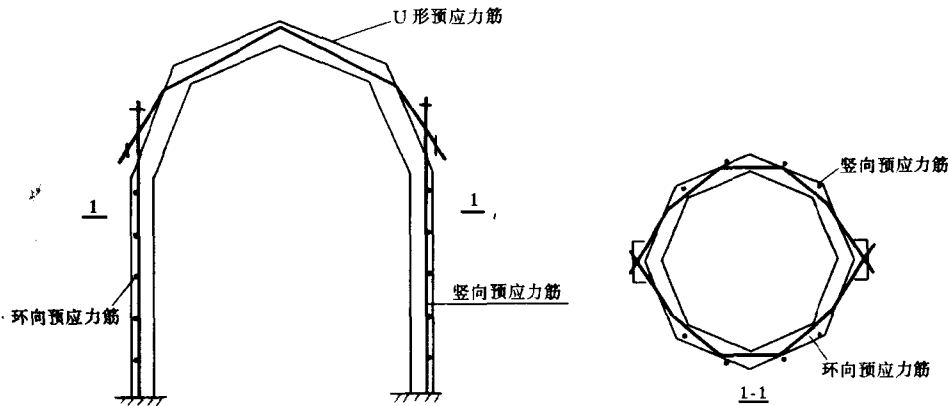


图 1-14 预应力核安全壳

3. 预应力混凝土看台建筑

在体育场建筑中，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，图 1-15 为其中之一^[2]。

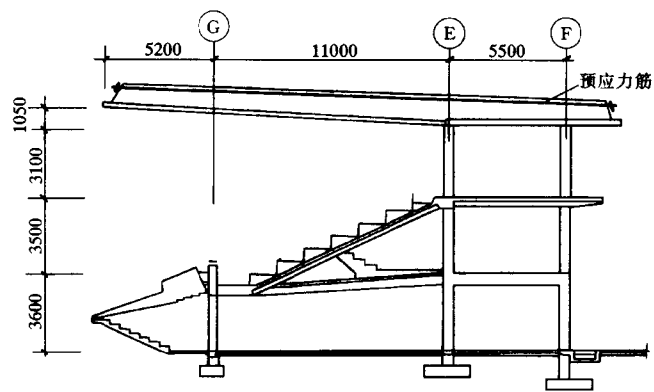


图 1-15 预应力混凝土看台

4. 预应力混凝土高耸结构

对高耸结构施加竖向预应力和环向预应力，可以有效控制结构开裂，增强结构整体性和抗侧稳定性，从而保证高耸结构具有良好的使用性能与耐久性。中央电视台电视塔是我国首座预应力混凝土高耸结构。随后在天津电视塔、南京电视塔中也采用了预应力混凝土结构^[21]。

典型的预应力混凝土电视塔见图 1-16 所示。

四、路面结构

与普通钢筋混凝土路面相比，预应力混凝土路面具有面板薄、接缝数量少、行车平稳、整体性强、使用性能优良、维修费用少、耐久性高等优点，缺点是施工复杂、工期较长、初期投资较大等。世界上第一条预应力混凝土路面出现在法国 Luzancy 的一座桥梁的引桥路面上^[22]。1947 年，闻名于世的、长 490.5m 的 Orly 跑道的建成奠定了预应力混凝土路面的地位。我国在 1997 年和 1998 年分别在南京和徐州建成了两条预应力混凝土路面试验段^[23]，两条路面均采用了无粘结预应力连续配筋。

典型的预应力混凝土路面见图 1-17。

五、加固改造结构

与非预应力加固技术相比，预应力加固技术的最大优点是加固后结构的整体性好，加固部分与原结构具有良好的共同工作性能。因此，预应力技术在加固改造工程中

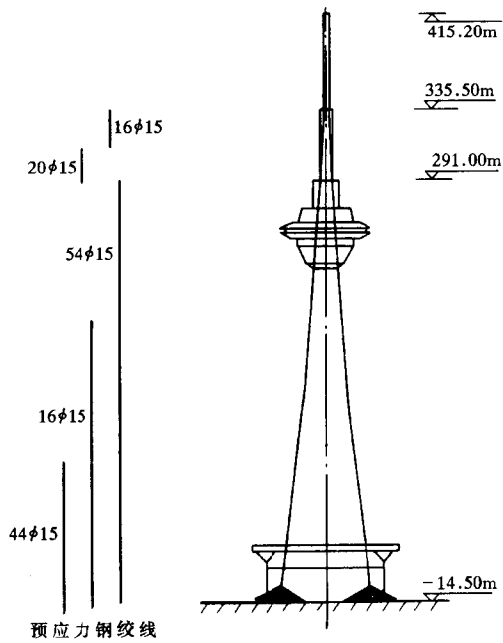


图 1-16 预应力电视塔