

土木工程系列

高等学校“十一五”规划教材

现代预应力结构设计

王连广 刘莉 编著

哈尔滨工业大学出版社

全国高等学校“十一五”规划教材·土木工程系列

现代预应力结构设计

王连广 刘莉 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书是结合现有设计规范和国内外最新研究成果编写,共计 14 章,主要包括:绪论、预应力结构材料与锚固体系、施加预应力方法与预应力损失估算、预应力混凝土受拉构件、预应力混凝土受弯构件、部分预应力混凝土结构、无黏结预应力混凝土结构、预应力混凝土超静定结构、预应力混凝土结构抗震设计、体外预应力混凝土结构、横张预应力混凝土结构、预应力 FRP 筋混凝土结构、预应力钢结构、预应力钢与混凝土组合梁。

本书可作为土木工程专业高年级本科生、研究生教材或参考用书,也可供从事土木工程科研、设计和施工的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代预应力结构设计/王连广,刘莉编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2008.12

ISBN 987-7-5603-2718-1

I. 现… II. ①王…②刘… 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(2008)第 082282 号

策划编辑 郝庆多

责任编辑 张 瑞

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16.75 字数 387 千字

版 次 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 987-7-5603-2718-1

印 数 1~3 000 册

定 价 29.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

自 20 世纪 20 年代以来,预应力技术在土木工程中应用已有 80 余年,这期间,在使用材料、设计理论和施工工艺等方面都得到迅速发展。在预应力技术发展的初期,实际工程中普遍采用的是全预应力混凝土设计观念,随着预应力技术与材料的发展和部分预应力混凝土、无黏结预应力混凝土的诞生,预应力混凝土结构得到飞速发展。至 20 世纪末,预应力技术又在钢结构、钢与混凝土组合结构,尤其是在空间钢结构中得到广泛的应用,不仅拓宽了预应力技术应用的领域,还涌现出很多新的结构体系。近几年,随着人们对预应力结构耐久性的认识,又将纤维增强塑料(Fiber Reinforced Polymer,简称 FRP)筋作为预应力筋应用于混凝土结构、钢结构和钢与混凝土组合结构中。随着新材料、新技术、新理论不断发展,预应力结构将有着广阔的发展前景。本书较系统地介绍了预应力结构的设计理论与分析方法,覆盖了预应力混凝土结构、预应力钢结构及预应力钢与混凝土组合结构等内容。

第 1 章绪论,介绍了预应力结构基本原理、特点、发展及分类;第 2 章预应力结构材料与锚固体系,介绍预应力结构中所采用的混凝土、钢筋、型钢等材料力学性能及锚固体系;第 3 章施加预应力方法与预应力损失估算,介绍预应力混凝土结构、预应力钢结构、预应力钢与混凝土组合梁的施加预应力方法及预应力损失的估算方法;第 4 章预应力混凝土受拉构件,介绍预应力混凝土受拉构件的受力分析、设计方法、承载力计算及局部受压承载力计算方法等;第 5 章预应力混凝土受弯构件,介绍预应力混凝土受弯构件的受力分析、承载力计算、刚度与变形验算等;第 6 章部分预应力混凝土结构,介绍部分预应力混凝土结构的受力性能、承载力计算及设计方法等;第 7 章无黏结预应力混凝土结构,介绍无黏结预应力混凝土结构的受力特性、承载力计算及设计方法等;第 8 章预应力混凝土超静定结构,介绍预应力混凝土超静定结构的受力特点、内力计算方法及设计方法等;第 9 章预应力混凝土结构抗震设计,介绍预应力混凝土结构抗震特点与一般规定、框架结构和板柱结构抗震设计方法等;第 10 章体外预应力混凝土结构,介绍体外预应力混凝土结构特点、受力分析、承载力验算及设计方法等;第 11 章横张预应力混凝土结构,介绍横张预应力混凝土梁的施工工艺、正常使用和承载能力极限状态计算、构造要求和施工技术;第 12 章预应力 FRP 筋混凝土结构,介绍 FRP 筋特点、预应力 FRP 筋锚固系统、预应力 FRP 筋混凝土受弯构件的抗弯、抗剪承载力计算方法;第 13 章预应力钢结构,介绍利用预应力钢索对钢轴心受拉构件和实腹式梁构件施加预应力的设计理论与方法;第 14 章预应力钢

与混凝土组合梁,介绍在钢与混凝土组合梁下翼缘按直线布置预应力钢索并施加预应力的简支组合梁设计方法。

本书以现有设计规范、规程为基础,参考了国内外诸多学者的著作、教材,在此对他们表示最衷心的感谢!

预应力结构的发展极其迅速,新材料、新结构及新理论会不断涌现,且由篇幅所限,书中难免有缺漏及不详尽之处。限于编者业务水平,书中不妥甚至错误之处,恳请读者批评、指正。

作 者

2008 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 预应力结构基本概念	1
1.2 预应力结构的历史与发展	3
1.3 预应力结构分类	7
第 2 章 预应力结构材料与锚固体系	9
2.1 预应力材料	9
2.2 预应力锚固体系与锚具	26
第 3 章 施加预应力方法与预应力损失估算	31
3.1 施加预应力方法	31
3.2 预应力损失估算	40
第 4 章 预应力混凝土受拉构件	47
4.1 轴心受拉构件破坏过程	47
4.2 轴心受拉构件受力分析	48
4.3 轴心受拉构件设计	52
4.4 偏心受拉构件承载力	54
4.5 局部承压承载力	56
4.6 设计计算示例	59
第 5 章 预应力混凝土受弯构件	62
5.1 弯曲破坏形态	62
5.2 应力分析	63
5.3 抗弯承载力	68
5.4 斜截面抗剪承载力	70
5.5 正常使用极限状态验算	72
5.6 设计计算示例	75
第 6 章 部分预应力混凝土结构	80
6.1 部分预应力混凝土结构特点	80
6.2 非预应力钢筋布置	81
6.3 正截面承载力计算	82
6.4 设计方法	84
6.5 裂缝宽度与挠度验算	91

6.6 设计计算示例	93
第 7 章 无黏结预应力混凝土结构	97
7.1 无黏结预应力混凝土结构受力特征	97
7.2 无黏结预应力混凝土梁设计	100
7.3 无黏结预应力混凝土板设计	113
第 8 章 预应力混凝土超静定结构	132
8.1 预应力混凝土超静定结构特点	132
8.2 压力线、线性变换与吻合束	132
8.3 内力重分布与弯矩调幅	134
8.4 内力计算的弹性分析法	135
8.5 连续梁等效荷载法	137
8.6 连续梁荷载平衡法	141
8.7 预应力混凝土超静定结构设计	143
8.8 连续梁设计示例	146
第 9 章 预应力混凝土结构抗震设计	153
9.1 抗震特点与一般规定	153
9.2 抗震设计验算	158
9.3 框架结构抗震设计	160
9.4 预应力混凝土板柱结构抗震设计	163
9.5 预应力混凝土门架结构	166
第 10 章 体外预应力混凝土结构	167
10.1 体外预应力混凝土结构特点	167
10.2 弹性受力分析	168
10.3 正截面抗弯承载力	173
10.4 斜截面抗剪承载力	174
10.5 受弯构件挠度	176
10.6 体外预应力加固方法	180
10.7 施工技术与构造要求	181
10.8 设计示例	185
第 11 章 横张预应力混凝土结构	189
11.1 张拉控制应力与预应力损失	189
11.2 弹性受力分析	191
11.3 极限抗弯承载力	193
11.4 斜截面承载力	195
11.5 抗裂验算	197
11.6 挠度验算	198

11.7 施工工艺	199
11.8 构造要求	201
第 12 章 预应力 FRP 筋混凝土结构	206
12.1 FRP 筋的特点	206
12.2 FRP 筋的锚固系统	208
12.3 FRP 筋预应力损失计算	210
12.4 抗弯承载力	211
12.5 抗剪承载力	215
第 13 章 预应力钢结构	219
13.1 预应力钢轴心受拉构件	219
13.2 预应力实腹式钢梁	227
第 14 章 预应力钢与混凝土组合梁	239
14.1 组合梁初步设计	239
14.2 弹性受力分析	245
14.3 抗弯承载力	247
14.4 抗剪承载力	250
14.5 挠度计算	250
14.6 剪力连接件设计	251
14.7 设计示例	253
参考文献	259

第1章 绪 论

1.1 预应力结构基本概念

1.1.1 预应力结构定义与原理

预应力结构是指在外荷载作用之前,预先对结构的受拉区域施加压力,以改善结构使用性能的结构。预应力结构已广泛应用于土木工程中的各个领域,如在房屋建筑、桥梁、水利、海洋、能源、电力及通信工程中得到了广泛应用,节约了大量的材料与资金,尤其是在桥梁结构与大跨度房屋结构中的应用更是日新月异。经过数十年的研究与应用,预应力技术取得了很大进展,预应力结构已经从传统的全预应力混凝土结构发展到部分预应力混凝土结构、无黏结预应力混凝土结构、预应力钢结构和预应力钢与混凝土组合结构。目前,世界各国都在大力发展预应力结构,可以说预应力结构作为一种先进的结构形式,其应用的范围和数量是衡量一个国家建筑技术水平的重要指标之一。

一般来说,混凝土的抗拉强度约为其抗压强度的 $1/6 \sim 1/20$,其极限拉应变也仅为极限压应变的 $1/5 \sim 1/20$ 。混凝土在结构中基本上用于承受压力,而结构中的拉力主要由钢筋来承受。在正常使用荷载作用下,普通钢筋混凝土结构中的钢筋应力达到 $20 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ 时,混凝土就基本达到极限抗拉应变而开裂。对于允许开裂的构件,当受拉钢筋应力达到 250 N/mm^2 时,裂缝宽度已达到 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$,此时,混凝土开裂而导致钢筋生锈,降低了构件的刚度,导致结构变形过大。避免混凝土开裂或减小裂缝开展宽度、降低构件变形的重要途径就是采用预应力技术。下面以预应力混凝土简支梁为例来说明预应力结构的基本受力原理。

预应力混凝土简支梁,见图 1.1。在外荷载作用之前,预先在梁的受拉区施加偏心压力 N ,使梁下边缘混凝土产生预压应力 σ_{cb1} ,梁的上边缘产生预拉应力 σ_{ct1} ,见图 1.1(a)。在外荷载 q 作用时,梁跨中截面下边缘产生拉应力 σ_{cb2} ,梁的上边缘产生压应力 σ_{ct2} ,见图 1.1(b)。这样在偏压力 N 和外荷载 q 的共同作用下,梁的下边缘混凝土应力降为 $\sigma_{cb} = \sigma_{cb2} - \sigma_{cb1}$,梁的上边缘一般为压应力,但也有可能为较小的拉应力,见图 1.1(c)。如果施加的预加力 N 比较大,梁下边缘就不会出现拉应力,由此可见,预应力混凝土构件可延缓混凝土构件的开裂,提高构件抗裂度和刚度,同时可以节约钢材,减轻构件自重,克服混凝土抗拉强度低的缺点。

1.1.2 预应力结构特点

1. 预应力混凝土结构特点

预应力混凝土与普通混凝土结构相比,主要特点如下:

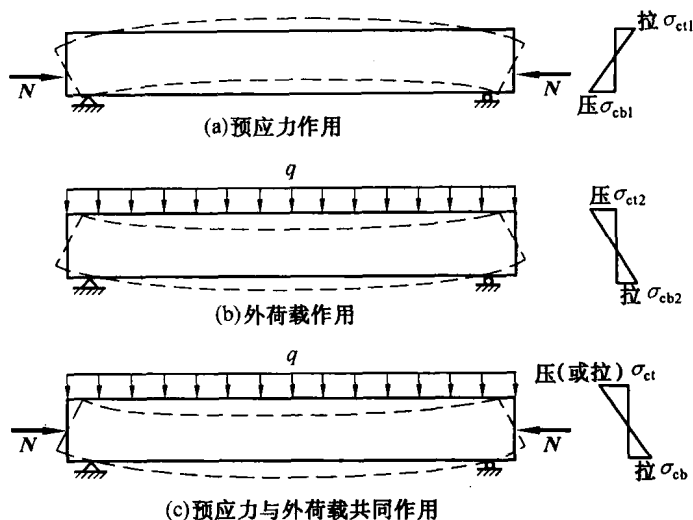


图 1.1 预应力混凝土简支梁

(1)改善和提高了结构或构件的受力性能。由于预应力的作用,克服了混凝土抗拉能力低的弱点,可以根据构件的受力特点和使用条件,控制裂缝的出现及裂缝开展的宽度。使用预应力后,能提高构件的刚度。

(2)充分利用高强度钢材。在普通钢筋混凝土中,由于裂缝宽度和挠度的限制,高强钢材的强度不能得到充分的利用。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。

(3)减轻构件自重。预应力混凝土使用高强度材料后,可以减小构件的截面尺寸,节省钢材和混凝土,并且由于预应力混凝土结构腹板可以做的较薄,从而减轻自重。

(4)提高抗剪承载力。由于预压应力阻止或延缓了混凝土斜裂缝的出现与发展,增加截面剪压区面积,从而提高了构件的抗剪能力。

(5)提高抗疲劳强度。预应力可以有效降低钢筋的应力循环幅度,增加疲劳寿命,并且预应力混凝土结构不出现裂缝或裂宽较小,有利于结构承受动荷载。

(6)具有良好的经济效益。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。

(7)预应力结构所用材料单价较高。因为预应力混凝土结构采用材料均为高强钢筋和高强混凝土,为此,材料单价相对较高。

(8)提高结构或构件的耐久性。预加应力能有效地控制混凝土的开裂或裂缝开展面宽度,避免或减少有害介质对钢筋的侵蚀,延长结构或构件的使用年限。另一方面,混凝土强度越高,耐久性就越好。

(9)抗震性能好。在同等条件下,由于预应力结构自重减轻,它受到的地震荷载就小,为此,其抗震能力比普通钢筋混凝土结构抗震能力高。

(10)适合建造各类大型、大跨、重荷载及高耸建筑工程。在楼盖与屋盖结构中,使用预应力技术,可以增加结构的跨度、降低层高、增加使用面积;采用预应力斜拉结构或预应力悬挂结构,可以解决大跨度桥梁建造中存在的跨度越大、自重越大、变形越大的技术难

题;在高耸结构中,使用预应力技术,可减少变形,有利于抗震、抗风等。

2. 预应力钢结构特点

预应力钢结构与非预应力钢结构相比,主要特点如下:

- (1)施加预应力扩大了结构的弹性范围,调整了结构中内力分布,减小了结构变形。
- (2)使用预应力技术可以有效地利用高强钢材,减轻结构自重,可以节约钢材 10% ~ 30%,降低总造价 10% ~ 20%。
- (3)增强了结构的疲劳抗力。预应力降低结构最大拉应力,使低韧性钢材的脆断可能性减小,且通过降低有效应力幅值来增强结构的疲劳使用寿命。
- (4)使用体外预应力体系,可以减小预应力摩擦损失,可以重复张拉、维护与更换已损坏的钢索。
- (5)锚固构造要求较高,防腐与防火要求比较严格。
- (6)减小构件截面高度。对于大跨度、承受重荷载的结构,预应力可以有效地提高结构的跨高比限值。
- (7)结构构造、施工工艺及设计计算复杂。

1.2 预应力结构的历史与发展

1.2.1 预应力结构发展史

1866年,美国工程师杰克逊(P. H. Jackson)首次将预应力技术应用于混凝土结构中,由于使用低强度预应力钢筋,并且其内部有效预应力由于锚固损失以及混凝土收缩、徐变而丧失,而没有达到预期效果。预应力混凝土结构得到大力发展,归功于法国著名工程师弗来西奈特(E. Freyssinet),1928年,他提出预应力混凝土结构必须采用高强钢材和高强混凝土,这一结论是预应力混凝土结构在理论上的关键突破。1938年,德国的霍友(E. Hoyer)研制成功依靠高强钢丝与混凝土黏结力而不依靠专用锚具传力的先张法预应力工艺,为预应力混凝土构件工厂化生产提供简单可靠的方法。1939年,弗来西奈特创造了锥形锚具及双作用千斤顶。1940年,比利时的麦尼尔(G. Magnel)研制了麦式楔形锚具,这一研究成果为后张预应力混凝土结构提供了切实可行的生产工艺。

第二次世界大战以后,由于钢材的短缺,预应力结构大量代替钢结构以修复被战争破坏的结构,从此,预应力结构在世界范围内得到蓬勃发展,其应用范围遍布于桥梁工程、工业建筑、民用建筑、公共建筑、地下结构、海港码头及水利水电工程等土木工程领域。1950年成立的国际预应力混凝土协会(FIP),更进一步促进了预应力混凝土结构的发展。近30年来,预应力技术已经从混凝土结构发展到钢结构中,出现部分预应力混凝土结构、无黏结预应力混凝土结构、预应力钢结构和预应力钢与混凝土组合结构。

我国的预应力混凝土结构始于20世纪50年代。1954年,原铁道部科学研究院首次进行了预应力混凝土结构的试制,1955年原建筑工程部建筑技术科学研究所首次进行了先张法预应力施工工艺的研究,并试制了先张法预应力混凝土梁,从此,预应力技术在全国范围内开始推广应用。预应力混凝土结构在桥梁工程中发展最快,尤其在20世纪70

年代后期,我国修建的各类大型桥梁几乎全部使用了预应力混凝土结构。近年来,预应力技术在桥梁工程以外的工业建筑、民用建筑、公共建筑、地下结构、海港码头及水利水电工程等领域也得到了广泛应用。目前,预应力结构已经成为我国工程建设领域中的一种主要结构,并且会得到越来越大的发展。

1.2.2 预应力结构进展

近 20 年来,随着建筑材料、预应力体系、设计理论及施工技术等领域的发展,预应力结构发生了很大的变化,各种新技术、新方法、新工艺及新的设计思想层出不穷。

1. 预应力结构新材料

(1) 预应力混凝土

在预应力混凝土结构中采用高强混凝土所带来的优越性是显著的,目前,世界上很多国家都有高强混凝土的设计规范或规程。我国于 2001 年编制出版了《高强混凝土结构设计施工指南》。实践证明,一些使用期限较长的混凝土结构在不利环境中破坏的原因,并不仅仅是混凝土强度的缺陷多数是混凝土耐久性问题,而高强混凝土具有耐久性较好、透水性低及弹性模量高等优点;随着人们对高性能混凝土特征认识的深入,其被认为是新世纪的结构混凝土。高性能混凝土是一种耐久性优异的混凝土,它的主要特点是高强度、高抗渗性、超和易性、低水化热、早强和体积稳定等;混凝土材料的强度容重比一般较低,随着预应力混凝土结构跨径的不断增大,自重也随之增大,导致结构的承载能力大部分耗于抵抗自重内力,所以追求更高的强度容重比是混凝土材料发展的目标之一。轻质高强、耐久性好是混凝土材料的发展方向。

(2) 预应力钢筋

预应力结构中的预应力钢筋必须采用强度高,且具有一定塑性性能的钢材,钢材的低松弛也是预应力钢筋的重要技术指标。随着预应力结构设计使用年限的延长以及预应力结构越来越多地应用于不利环境,预应力结构的耐久性问题显得越来越重要。预应力钢筋采用外涂环氧层以免遭腐蚀是增强其耐久性的一项重要措施。采用环氧涂层的钢绞线有两种,一是在先张和后张有黏结的体内预应力体系中,使用表面含有砂粒涂层的钢绞线以增强黏结性;二是在无黏结体系、体外预应力等体系中使用平滑涂层钢绞线。然而,无论是体外无黏结还是体内有黏结预应力,环氧涂层钢绞线仍需要有外包层混凝土的保护,环氧涂层仅起到防锈作用,并不能替代对钢绞线的整体防护。

(3) 非钢材预应力筋

近年来,非钢材预应力筋得到了很大发展,如纤维增强塑料(Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP)已经以预应力筋形式应用于预应力结构中,主要有玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋、芳纶纤维增强塑料(AFRP)筋及碳纤维增强塑料(CFRP)筋等。它们都具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳、非磁性等优点,表面可以是光滑或带螺纹。目前,很多国家都开始研究和应用 FRP 筋,德国、日本及美国研究和应用得最多,从 1980 年开始已经使用预应力 FRP 筋修建人行桥、公路桥梁。目前,预应力 FRP 筋仍处于研究试用阶段,预应力 FRP 筋力学性能的测试标准,如延性、黏结、锚具、松弛、疲劳等尚未有统一规范,但随着预应力 FRP 筋生产工艺的改进、原材料价格的降低以及预应力 FRP 筋研究与应用的不断发展,预应

力 FRP 筋在土木工程中的应用将具有广阔的前景。

2. 预应力体系

随着预应力结构所应用材料和技术的发展,预应力结构体系得到了史无前例的飞速发展,出现很多新型预应力结构体系,主要体现在以下几个方面。

(1) 部分预应力混凝土结构

部分预应力混凝土结构是指在全部荷载最不利组合下,构件截面混凝土允许出现裂缝,但裂缝宽度不超过规定允许值。预应力混凝土结构,早期是按照全预应力混凝土来设计的。全预应力混凝土的目的只是为了用混凝土承受的预压应力来抵消使用荷载引起的混凝土拉应力。这种在全部使用荷载下必须保持全截面受压的设计,通常称为全预应力设计。全预应力混凝土虽有抗裂性好、刚度大、节省钢材等优点,但也有一些严重的缺点。例如,使用过程反拱过大、裂缝有时仍存在、结构延性差、对抗震不利等。而部分预应力混凝土能够克服这些缺点,同时,可适度解决构件端部锚具过于集中的问题。由于部分预应力混凝土结构中布置了部分非预应力筋,可以提高构件延性,部分预应力混凝土结构不是简单地替代全预应力混凝土结构,而是其自身完善与提高,但是,部分预应力混凝土与全预应力混凝土适用于不同的环境与工作条件,有的工作环境必须要使用全预应力混凝土结构。部分预应力混凝土的出现使得预应力结构的应用更加广泛。

(2) 无黏结体内预应力混凝土结构

无黏结预应力技术的发展与成熟是预应力结构应用与发展中另一个重要的飞跃。无黏结预应力混凝土结构,一般是指采用无黏结预应力钢筋,按后张法制作的预应力混凝土结构。无黏结预应力钢筋采用专门的生产工艺,钢筋表面涂有一层专用防腐润滑油脂,外包一层塑料防腐材料(如聚乙烯或聚丙烯)。施工时同非预应力钢筋一样按设计要求进行铺放、绑扎,然后浇注混凝土。当混凝土强度达到一定要求后,再对预应力钢筋进行张拉、锚固。由于预应力钢筋受力时在塑料套管内变形,不与外围混凝土直接接触,二者之间当然不存在黏结应力。无黏结预应力混凝土结构在土木工程领域,尤其是在房屋建筑中得到了相当广泛的应用,改变了预应力混凝土在房屋建筑中应用停滞不前的状态。近年来,在国内外,无黏结预应力混凝土结构已经在跨度、高层与超高层建筑及特种结构中得到了迅速的推广和应用,取得了显著的经济效益,很多国家编制了相应设计规范或规程。我国也正式颁布实施了《无黏结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ 92—2004),这不仅标志着我国对无黏结预应力混凝土结构的研究、应力水平达到了较高的水准,而且对无黏结预应力混凝土结构在土木工程中的应用提供了技术依据。

(3) 预应力钢结构

预应力钢结构是指在钢构件上施加中心力或偏心力,使其在外荷载和预应力共同作用下的应力限制在特定范围内。预应力钢结构从诞生到现在已经历了 50 年的历史,从开始简单的节材思想发展到现代预应力张拉钢结构系列,经历了探索、观望、前进、突破、创新、繁荣的各个阶段。到 20 世纪 60 年代,德国、英国、比利时、前苏联、美国等许多研究者萌发了将预应力技术应用到钢结构工程中的想法,他们不但进行了理论分析,还进行了试

验研究。这一时期,研究的主要问题是集中在预应力钢结构带来的许多传统钢结构中没有的缺点与问题,如省钢率不高却带来了施工制造麻烦,新增预应力拉索易腐蚀,增大养护费用等;到20世纪80年代中期,经过探索与研究后,人们对预应力钢结构基本杆件、平面结构体系及构造、施工设备及工艺等有所掌握,专家学者们的关注焦点是如何进一步提高预应力钢结构的经济效益和创造高效预应力钢结构体系。在这一时期,预应力钢结构发展的特征是预应力新技术与空间结构新体系结合而衍生出来的预应力空间钢结构,它具有优秀的静、动力特性和良好的技术经济指标,可以称得上是当代建筑结构学科中的最新成就;从20世纪80年代末到21世纪初,预应力空间结构在国际上得到快速发展,不仅是数量上增多、规模上增大,而且在类型与品种上繁荣创新。预应力空间钢结构种类繁多,基本类型有“传统型”、“吊挂型”、“整体张拉型”、“张弦梁型”、“索膜(张拉膜)型”及“张弦式玻璃幕墙型”等。预应力钢结构以其具有能够充分利用材料的弹性强度的潜力来提高承载能力、改善结构受力状态来节约钢材,提高结构的刚度和稳定性及调整结构动力性能等优越性在很多工程实际中得到应用,可以说预应力钢结构的应用范围几乎覆盖了全部钢结构领域。

(4) 预应力钢与混凝土组合结构

随着预应力技术的日益成熟,预应力技术不仅仅用于混凝土结构和钢结构,它也逐渐应用于钢与混凝土组合结构中。随着建筑功能对结构的性能要求越来越高,预应力钢与混凝土组合结构也出现在土木建筑舞台。预应力钢与混凝土组合结构是按设计需求事先引入某种内应力,以全部或部分抵消外荷载应力的一种结构形式,使高强钢材与高强混凝土有效地结合,它不但节省了钢材和混凝土,改善结构使用功能,还解决了其他结构难以解决的实际问题。因此,预应力钢与混凝土组合结构的应用将更加广泛。我国一些较大的工程采用了预应力钢与混凝土组合结构,如北京西客站采用了预应力钢与混凝土组合梁,辽宁的桓仁县用预弯预应力混凝土梁建成了国内第一座跨度为16 m的三跨公路桥。但是,目前国内外对预应力钢与混凝土结构尚未有统一的设计规范或标准,很多问题尚处于研究过程中。

3. 预应力施工工艺

随着预应力技术的发展,预应力施工工艺也不断发展,最早的对混凝土结构施加预应力方法主要有先张法、后张法及电热张拉法,这些方法的特点是预应力钢筋位于构件体内,并且是通过沿构件纵向张拉预应力钢筋来施加预应力;随后,又出现了将预应力钢筋布置于构件体外,沿构件纵向张拉预应力钢筋来施加预应力,形成体外预应力结构,这种预应力结构中的预应力钢筋与结构构件一般不直接接触,而是通过锚具和转向块作用于结构上,预应力钢筋可以采用折线形或直线形布置;随着预应力技术的进一步发展,最近几年,出现了不同于上述提到的沿构件纵向对构件施加预应力的另一种施加预应力的方法,即利用沿构件纵向布置预应力钢筋,而通过横向张拉预应力钢筋来建立预应力;同时,随着大跨度与超大跨度预应力体系的发展,出现了大吨位预应力锚具和张拉设备。

1.3 预应力结构分类

1.3.1 预应力混凝土结构

1. 按预应力工艺分类

根据预应力工艺的不同,预应力混凝土结构可以分为先张法预应力混凝土结构和后张法预应力混凝土结构。

(1) 先张法预应力混凝土结构

先张法预应力混凝土结构采用永久或临时台座张拉预应力钢筋,待混凝土达到设计强度后,释放预应力钢筋中的应力,在预应力钢筋回缩的过程中利用预应力钢筋与混凝土的黏结力,对混凝土施加预应力。

(2) 后张法预应力混凝土结构

后张法预应力混凝土结构是指先浇混凝土,并预留孔道,待混凝土结硬达到设计强度后,穿入预应力钢筋,以构件本身作为支撑张拉钢筋,然后,用锚具将预应力钢筋锚固在构件上,形成永久预加力,最后在预留孔内压注水泥浆,使预应力钢筋与混凝土结成整体。

2. 按预应力程度分类

根据预应力程度的不同,预应力混凝土结构可以分为全预应力混凝土结构和部分预应力混凝土结构。

(1) 全预应力混凝土结构

全预应力混凝土结构是指在全部荷载最不利组合下,截面混凝土不出现拉应力,即在使用荷载作用下,截面上不允许出现拉应力。这种在全部使用荷载下必须保持全截面受压的设计,通常称为全预应力设计,“零应力”或“无拉应力”则为全预应力混凝土的设计基本准则。

(2) 部分应力混凝土结构

部分预应力混凝土结构是指在正常使用荷载下,允许构件截面的一部分处于受拉状态,甚至出现裂缝,因此,需要用一些非预应力钢筋来加强,所以,通常部分预应力混凝土结构是预应力比较低,且配有中等强度非预应力钢筋的预应力混凝土结构。

3. 按预应力体系分类

根据预应力体系特点的不同,预应力混凝土结构可分为体内预应力混凝土结构、体外预应力混凝土结构、有黏结预应力混凝土结构、无黏结预应力混凝土结构、预弯预应力混凝土结构等。

(1) 体内预应力混凝土结构

体内预应力混凝土结构是指预应力钢筋布置在混凝土内部的预应力混凝土结构。如先张预应力混凝土结构和后张预应力混凝土结构等。

(2) 体外预应力混凝土结构

体外预应力混凝土结构是指预应力钢筋布置在混凝土结构构件体外的预应力混凝土结构。

(3) 有黏结预应力混凝土结构

有黏结预应力混凝土结构是指预应力钢筋沿构件全长与混凝土黏结、握裹在一起的预应力混凝土结构。如先张预应力混凝土结构和后张预应力混凝土结构等。

(4) 无黏结预应力混凝土结构

无黏结预应力混凝土结构是指预应力钢筋沿全长不与外围混凝土直接接触,二者之间不存在黏结力,而依靠端部锚具来建立预应力并与混凝土构件形成整体的预应力混凝土结构。

(5) 预弯预应力混凝土结构

预弯预应力混凝土结构是指在加荷载预弯的钢梁上浇注混凝土,待混凝土与钢梁合并达到设计强度后卸载,利用钢梁反弹对混凝土施加预应力。

1.3.2 预应力钢结构

预应力钢结构是指在钢结构或钢构件上施加中心力或偏心力,使其在外荷载和预应力共同作用下的应力限制在特定范围内。对钢结构施加预应力可以通过拉索法、支座位移法、弹性变形法等方法来实现。预应力钢结构形式主要有预应力轴心受拉构件、预应力实腹钢梁、预应力钢桁架、预应力网架、预应力网壳、预应力膜结构、预应力索结构等。

1.3.3 预应力钢与混凝土组合结构

预应力钢与混凝土组合结构是在钢与混凝土组合结构中的型钢和混凝土内施加预应力的结构。预应力钢与混凝土组合结构主要有预应力钢与混凝土组合梁、预应力压型钢板与混凝土组合板、预应力钢骨混凝土结构、预应力外包钢混凝土结构及预应力钢管混凝土结构。

第2章 预应力结构材料与锚固体系

预应力结构中所需要的材料主要有混凝土、钢筋、型钢和锚具等。在混凝土结构中施加预应力的主要目的是提高混凝土构件的抗裂性能、提高其刚度、增加其耐久性,而预应力混凝土结构抗裂性能主要取决于预应力的大小和混凝土强度的高低,为此,预应力混凝土结构中的混凝土宜采用高强混凝土;在钢结构或钢与混凝土组合结构中,主要是在型钢或混凝土中施加预应力,充分地利用高强材料,发挥材料特性,为此,宜采用优质型钢钢材;为了充分发挥预应力作用,减小预应力损失,预应力钢筋宜采用高强度、低松弛的高强钢丝、钢绞线和热处理钢筋;锚固体系需要大吨位,并应具有更高的可靠性。本章主要介绍预应力结构中所需要的混凝土、钢筋、型钢等材料力学性能及锚固体系。

2.1 预应力材料

2.1.1 混凝土材料

1. 混凝土的特点

混凝土一般采用水泥为胶结材料,预应力混凝土应具有高强度(包括早期强度)、变形小(包括收缩和徐变)的特点。一般来说,预应力构件的混凝土强度等级不应低于 C30,当采用钢绞线、钢丝、热处理钢筋等作为预应力钢筋及应用于大跨度预应力结构时,则不宜低于 C40。

(1) 强度高

采用高强混凝土与高强钢筋相匹配,保证高强钢筋发挥作用,有效地减小构件截面尺寸和减轻自重。高强混凝土具有较高的弹性模量,从而具有更小的弹性变形和塑性变形,减小预应力损失。另外,高强混凝土具有较高的抗拉强度、局部抗压强度及较强的黏结性能,从而可以延缓或推迟混凝土构件截面裂缝的出现。

(2) 收缩与徐变小

在预应力混凝土结构中采用收缩与徐变小的混凝土,既可以减小由于混凝土收缩、徐变产生的预应力损失,又可以有效地控制预应力混凝土结构的徐变变形。改善混凝土的收缩、徐变性能,可以通过控制水灰比、选择合适的骨料种类、控制养护温度和湿度、掺加适量的纤维材料及增加减水剂等方法来实现。

(3) 快硬、早强

预应力混凝土结构中的混凝土应该具有快硬、早强的性质,以实现早施加预应力、加快施工进度、提高设备以及模板的利用率。可以通过掺加高效减水剂等办法来实现混凝土的快硬、早强。