

Theory and Design of Prestressed Concrete Structures

预应力混凝土结构 理论与设计

● 熊学玉 著

中国建筑工业出版社

预应力混凝土结构理论与设计

熊学玉 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力混凝土结构理论与设计/熊学玉著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-112-21662-8

I. ①预… II. ①熊… III. ①预应力混凝土结
构-结构设计 IV. ①TU378.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 310779 号

本书内容涉及预应力混凝土结构理论的许多方面, 这些理论与创新大多源于本书作者近 30 年的理论研究和大量工程实践的不断积累。本书结合作者的研究成果以及近年来承担的多项重大工程, 介绍了其在预应力混凝土结构理论方面的研究、创新和实践。

本书主要内容包括: 预应力混凝土结构约束作用对次内力的影响及全面考虑次内力的设计理论与方法, 新型预应力混凝土结构体系的理论研究及设计方法, 大跨预应力混凝土结构防灾性能研究, 超长预应力混凝土结构设计方法、施工过程分析及裂缝控制, 预应力结构分析与设计实例等。

本书可供从事预应力混凝土结构理论研究和设计、施工人员参考, 也可作为高等学校土木工程专业研究生或高年级本科生选修课教材。

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任校对: 焦 乐 李美娜

预应力混凝土结构理论与设计

熊学玉 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 43 字数: 1072 千字

2017 年 12 月第一版 2017 年 12 月第一次印刷

定价: 98.00 元

ISBN 978-7-112-21662-8

(31518)

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

我国预应力混凝土结构技术已日益广泛地应用于各类土木建筑工程之中，有关预应力混凝土结构设计理论和设计方法也已取得了大量的研究成果，但是针对现代预应力混凝土结构特点的设计理论和设计方法仍需不断研究加以充实完善。本书是融合本人与团队近 30 年在预应力领域所取得的成果，其中大部分设计理论与方法已收录到本人主编的我国首部《预应力混凝土结构设计规范》JGJ 369—2016，以及本人主持重新修编的上海市《预应力混凝土结构设计规程》DGJ 08—69—2015 中。本书从以下四个方面开展问题的讨论与研究：

1. 设计中全面考虑次内力的必要性

现代预应力混凝土结构的主要特征已由原来预应力简单受力结构构件（往往是简支构件）转变成预应力复杂受力结构（往往是超静定结构且空间效应显著）。预应力具有“转移荷载”的能力，能动地利用这种能力，将为预应力结构设计带来理念上重要的突破。预应力混凝土超静定结构中由于施加预应力产生的附加内力，称为预应力次内力。预应力次内力包括次弯矩、次剪力、次轴力和次扭矩等，已有对结构两类极限状态的设计仅考虑有较重要影响的预应力次弯矩，而对于当今超长、超大体量特别是复杂约束的结构，其包括次轴力等次内力在许多情况下的显著影响不可忽略。

在工程设计中，由于部分设计人员对预应力的原理、分布形式和特点、影响因素等不十分清楚，因此不能合理考虑和利用预应力次内力的影响，而只是生搬硬套设计规范或规程中预应力次内力的有关条款。我国现行《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010（2015 年版）中两种状态的设计方法虽然采纳本人主编的上海预应力混凝土结构设计规程的意见要求考虑了次内力的影响，但没有系统的设计理论与设计公式，事实上无法应用。一些相关论著中关于预应力次内力的条款或研究结论也存在一定的局限性，因而会造成设计结果偏于不安全。因此，关于复杂约束作用下如何在设计中全面考虑次内力的影响是当前需要解决的一大难点。本书第 2 章除介绍国内外已有的次内力计算方法外，还介绍了本人提出的约束次内力法。第 3 章则介绍了约束作用对次内力的影响及全面考虑次内力的设计理论与方法。

2. 新型预应力混凝土结构体系的设计方法

为满足现代预应力结构在大跨、超长、重载、超大体量工程中的设计特点和要求，一些新型预应力体系得到应用，如预应力型钢混凝土结构、有粘及无粘预应力混合配筋混凝土结构、缓粘结预应力混凝土结构、体外预应力混凝土结构、后张预应力叠合混凝土结构等。但当前对相关结构受力性能及其系统的设计理论和设计方法的研究是缺乏的。本书第 4～8 章结合课题组近年来的试验及理论研究成果，对体外预应力混凝土、预应力型钢混凝土、缓粘结预应力混凝土、有粘无粘预应力混合配筋混凝土、后张预应力叠合混凝土等结构的受力性能及计算方法进行了探讨。

3. 预应力混凝土防灾性能的研究

防灾减灾一直以来是土木建筑结构的重要课题之一。地震、火灾、泥石流等灾害严重威胁结构的安全,可能带来巨大的经济损失及人员伤亡。近年来,对预应力混凝土结构抗火性能、耐久性能、抗震性能的研究也引起了行业的重视。本书第9章介绍了大跨度预应力型钢混凝土框架梁及大跨度预应力井式楼盖的抗震性能试验和理论研究。第10章介绍了火灾下预应力混凝土结构的计算分析理论及相关的抗火设计建议。第11章介绍了预应力钢绞线的腐蚀试验研究,并在已有方法的基础上提出了腐蚀预应力筋混凝土梁截面的承载力及刚度计算公式。

4. 预应力解决超长结构的设计方法

随着社会和经济的发展,人们对建筑物功能和布局的要求日益提高,在超大型公共建筑、仓储、商业中心以及工业厂房等工业和民用建筑物中,越来越多地出现了超长、超大体量结构体系。鉴于建筑与结构的整体性要求,此类建筑往往采用连续超长结构,并且不设温度伸缩缝或伸缩缝间距远远超过规范要求。

超长结构体系的裂缝控制是设计和施工过程中必须予以重视和解决的问题。因此,该部分的研究对于大量超长结构体系的裂缝控制具有较大的实践意义,合理设计可以缩短施工周期,节省设置收缩缝费用,提高整体结构的承载力和抗变形性能,满足建筑物美观和功能的要求,具有良好的经济效益,同时也是对已有规范的一个重要突破。本书第12章介绍超长预应力混凝土结构设计的基本原则及方法,提出了“广义超长”的概念,建立了约束系数的定量判别方法;在超长结构“抗”、“放”原则的基础上,基于预应力的技术提出了更为能动的“防”原则,通过预应力筋布置、调整结构的约束及其约束分布、提高预应力效应、减少局部应力集中,将“抗”、“防”、“放”贯穿设计建造的全过程。第13章以某体育场超长环形预应力混凝土框架结构为研究对象,介绍了超长预应力混凝土结构施工过程的数值模拟方法。考虑到工程结构的不确定性,如材料物理特性、结构尺寸、自然与人为作用的不确定性。本书14章基于拉丁超立方抽样的MC法,进行材料时随特性的敏感性分析,考察10000天内,季节性温差作用下结构长轴方向端柱顶部位移和结构中部楼板应力的变化与收缩、徐变不确定性之间的关系。另外,结合上海虹桥SOHO及国家会展中心等超长及超大体量结构,本书第15章介绍了相关问题的研究情况,供读者参考。

本书的内容涉及预应力结构及理论的许多方面,这些理论与创新许多源于大量工程实践的不断积累,源于本人长期对预应力事业的执着追求。在长期的理论研究与工程实践中,感谢恩师黄鼎业先生的指导与关怀,由先生创立领导的同济大学预应力研究所的大量研究成果丰富了本书的内容,衷心感谢研究所团队各成员的精诚合作帮助支持。本书研究与多项重大工程紧密结合,感谢在上海火车南站、上海东方体育中心、上海虹桥SOHO和国家会展中心等项目中周建龙、李亚明、王美华、包联进等总工以及其他科技人员的帮助支持。感谢耿耀明博士、蔡跃博士、顾炜博士、高峰博士等的贡献。感谢参与整理工作的博士和硕士研究生:向瑞斌、姚刚峰、华楠、王怡庆子、肖启晟、张仪放、余鹏程、巫韬、高心宇。真诚感谢中国建筑工业出版社为本书的出版给予的帮助和支持。

由于作者水平有限,本书所述内容难免有欠缺之处,敬请各位专家学者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 预应力结构在国内外的的发展简史	1
1.1.1 国外的发展简史	1
1.1.2 国内的发展简史	2
1.2 预应力结构的发展现状	3
1.3 预应力结构的概念	10
1.3.1 预应力混凝土的定义	11
1.3.2 对预应力混凝土的四种理解	12
1.4 预应力结构的优越性及应用范围	15
1.4.1 预应力结构的优越性	15
1.4.2 预应力混凝土的使用范围	17
参考文献	17
第 2 章 次内力计算理论	19
2.1 国内外次内力计算方法	19
2.1.1 已有方法介绍	19
2.1.2 次剪力计算	21
2.1.3 约束次内力法	25
2.1.4 约束次内力法与现有方法的比较	26
2.2 设计中考虑次内力的必要性	27
2.2.1 两种极限状态的定义	28
2.2.2 各国历年规范有关次内力预应力效应的规定	29
2.2.3 现有计算方法的分析 and 公式推导	33
参考文献	36
第 3 章 全面考虑约束影响的设计方法	37
3.1 概述	37
3.1.1 现代预应力结构特点	37
3.1.2 已有的研究工作及其不足	37
3.2 约束作用对次内力的影响因素分析	42
3.2.1 现有的几种影响因素总结	42
3.2.2 有效预应力	47

3.2.3	线形分布	52
3.2.4	预应力结构中预应力筋偏移的影响	56
3.2.5	路效、时效问题	62
3.2.6	空间效应影响	63
3.3	全面考虑次内力的设计公式	74
3.3.1	荷载效应组合	74
3.3.2	现代预应力混凝土结构两阶段设计建议	76
3.3.3	小结	81
	参考文献	81
第4章	体外预应力混凝土结构	83
4.1	概述	83
4.2	体外预应力混凝土受弯构件承载力计算	84
4.2.1	受弯构件正截面破坏形态及承载力计算的特点	84
4.2.2	体外预应力筋的应力增量计算研究	87
4.2.3	体外预应力受弯构件斜截面承载力计算方法研究	93
4.3	体外预应力受弯构件使用性能计算方法研究	98
4.3.1	基于等效折减系数的受弯构件短期挠度计算方法	99
4.3.2	基于等效折减系数的最大裂缝宽度验算方法	104
4.3.3	受弯构件长期使用性能分析方法	105
4.4	体外预应力梁动力性能研究	116
4.4.1	体外预应力梁的自由振动方程	116
4.4.2	体外索自由长度与预应力结构共振的预防	121
4.5	小结	123
	参考文献	124
第5章	预应力型钢混凝土结构设计理论研究	127
5.1	概述	127
5.2	预应力型钢混凝土框架竖向静力试验	129
5.2.1	试验设计	129
5.2.2	试验现象与结果	132
5.2.3	总结与探讨	139
5.3	预应力型钢混凝土框架梁截面承载力计算	141
5.3.1	正截面抗弯承载力	141
5.3.2	斜截面抗弯承载力	144
5.4	预应力型钢混凝土框架梁使用性能计算	146
5.4.1	开裂弯矩	146
5.4.2	挠度	146
5.4.3	最大裂缝宽度	148

5.5 预应力型钢混凝土框架梁塑性设计方法	150
5.5.1 塑性设计方法	150
5.5.2 弯矩调幅	156
参考文献	160
第6章 缓粘结预应力混凝土结构	162
6.1 概述	162
6.2 缓粘结筋特点	163
6.3 预应力损失	164
6.3.1 测试设备及测试方法	164
6.3.2 张拉测试结果	166
6.3.3 实测结果分析	170
6.3.4 小结	174
6.4 缓粘结预应力混凝土梁对比试验	175
6.4.1 概述	175
6.4.2 试验加载制度	175
6.4.3 试验结果	176
6.4.4 缓粘结与有粘结的对比研究	187
6.4.5 小结	189
6.5 小结	190
参考文献	191
第7章 有粘、无粘预应力混合配筋结构	192
7.1 概述	192
7.2 有限元模拟方法	193
7.2.1 概述	193
7.2.2 有限元模型的建立	193
7.2.3 试验验证有限元方法的合理性	197
7.3 无粘结筋应力增量计算	198
7.3.1 参数分析	199
7.3.2 计算公式的建立	216
7.4 承载力及正常使用极限状态计算	219
7.4.1 抗弯承载力	219
7.4.2 短期刚度	220
7.4.3 最大裂缝宽度	224
7.5 小结	225
参考文献	227

第 8 章 后张预应力叠合结构理论及设计方法	228
8.1 概述	228
8.2 后张叠合结构受力特点	228
8.3 受力各阶段状态计算	229
8.3.1 先张法对预制梁施加预应力	229
8.3.2 预应力预制梁一次受力	230
8.3.3 后张法对叠合梁施加预应力	237
8.3.4 混合配预应力筋叠合梁二次受力	243
8.3.5 配筋界限	249
8.4 有限元模拟方法	251
8.4.1 叠合层的模拟	251
8.4.2 无粘结预应力筋模拟	252
8.4.3 模型中主要接触关系的选用	252
8.4.4 模拟实例	253
8.5 小结	256
参考文献	257
第 9 章 大跨预应力混凝土结构的抗震设计	258
9.1 概述	258
9.2 竖向低周反复荷载下预应力型钢混凝土框架试验研究	259
9.2.1 实验设计	259
9.2.2 试验现象及破坏形态	263
9.2.3 试验结果分析	265
9.2.4 小结	277
9.3 预应力井式梁框架的振动台模型试验	278
9.3.1 试验概况及目的	278
9.3.2 试验模型的设计制作	280
9.3.3 测试内容及测点布置	289
9.3.4 试验用地震波波形	293
9.3.5 加载阶段	296
9.3.6 模型的基本动力特性	298
9.3.7 模型的动力反应	303
9.3.8 小结	308
9.4 预应力井式梁框架的弹性地震反应分析	309
9.4.1 简介	309
9.4.2 振型组合方法和振型截断	310
9.4.3 竖向地震内力	313
9.4.4 小结	321

9.5 预应力井式梁框架地震反应的静力弹塑性分析方法	321
9.5.1 简介	321
9.5.2 结构抗震的静力弹塑性分析	322
9.5.3 能力谱方法的基本原理	324
9.5.4 预应力井式梁框架结构竖向地震反应的静力弹塑性分析方法	328
9.5.5 基于非弹性需求谱的能力谱法	330
9.5.6 小结	331
9.5.7 算例分析	331
9.6 混合配置预应力筋混凝土梁在竖向低周反复荷载下的抗震性能	335
9.6.1 概述	335
9.6.2 低周反复荷载下的有限元模型	336
9.6.3 试验验证	340
9.6.4 竖向低周反复荷载下梁的有限元分析	341
9.6.5 小结	356
参考文献	356
第 10 章 火灾下预应力混凝土结构计算理论及抗火设计方法	358
10.1 概述	358
10.2 高温下材料的热工及力学性能	360
10.2.1 混凝土	360
10.2.2 钢筋	367
10.2.3 预应力钢丝、钢绞线	371
10.3 高温下材料的蠕变模型及试验研究	375
10.3.1 蠕变的基本力学行为	375
10.3.2 蠕变行为的本构描述	376
10.3.3 高温下混凝土的非弹性变形模型	377
10.3.4 高温下钢筋的蠕变模型	378
10.3.5 预应力钢丝的高温蠕变试验研究	379
10.3.6 预应力钢筋高温蠕变引起预应力损失有限元分析	381
10.4 火灾下结构非线性温度场分析	384
10.4.1 概述	384
10.4.2 火灾下结构非线性温度场有限元理论	384
10.4.3 火灾下结构温度场非线性有限元程序 PFIRE-T 编制	388
10.4.4 PFIRE-T 程序在仿真分析中的应用	392
10.5 火灾下预应力混凝土结构有限元计算理论与分析	399
10.5.1 结构分析的基本假定	399
10.5.2 温度场和应力场耦合的增量有限元格式	400
10.5.3 火灾下预应力混凝土结构非线性有限元程序 PRC-FIRE 编制	406
10.5.4 程序计算与试验结果比较	412

10.5.5	结构参数对抗火性能影响分析	414
10.6	预应力混凝土结构抗火设计方法	416
10.6.1	现有抗火设计方法评述	416
10.6.2	基于计算的预应力结构抗火设计思想	419
10.6.3	火灾荷载的确定及荷载组合	420
10.6.4	预应力混凝土结构抗火设计方法	423
10.6.5	预应力混凝土结构抗火设计实例	431
10.6.6	本节小结	437
10.7	小结	437
	参考文献	438
第 11 章	预应力混凝土耐久性设计	442
11.1	概述	442
11.2	氯离子侵蚀钢绞线试验	444
11.2.1	研究背景	444
11.2.2	试验方案	446
11.2.3	试验数据分析	459
11.3	有限元模拟方法	463
11.3.1	坑蚀钢绞线模拟	463
11.3.2	锈蚀钢绞线预应力梁模拟	473
11.4	既有构件承载力计算	484
11.4.1	锈蚀普通钢筋混凝土梁承载力计算	484
11.4.2	预应力筋锈蚀的影响	485
11.4.3	基本假定及破坏模式	486
11.4.4	锈蚀预应力计算公式及应用	487
11.5	预应力筋锈蚀对刚度及变形的影响和修正	492
11.5.1	预应力梁刚度计算方法简介	492
11.5.2	规范中梁刚度计算方法	493
11.5.3	预应力筋锈蚀后对刚度的影响	495
11.5.4	变形计算	496
11.6	小结	499
	参考文献	500
第 12 章	超长预应力混凝土结构设计方法	503
12.1	超长混凝土结构	503
12.1.1	超长与广义超长概念	503
12.1.2	“抗”、“放”与“防”在超长结构中的应用	504
12.2	超长预应力混凝土结构简化计算理论	505
12.2.1	(等效)温度作用及作用效应组合	505

12.2.2	预应力控制超长混凝土结构开裂的本质	506
12.2.3	超长混凝土结构的长度限值问题	510
12.2.4	规则平面多跨框架结构的约束系数与预应力作用	511
12.2.5	具有连续约束刚度结构的约束系数与预应力作用	514
12.2.6	基于临界约束系数的超长混凝土结构定义	516
12.2.7	考虑混凝土时随特性的约束系数修正	517
12.3	温度作用及基本理论	517
12.3.1	传热基本理论	517
12.3.2	混凝土结构中气温变化的影响范围	519
12.3.3	楼板的一维准稳态温度场	521
12.3.4	楼盖的二维温度场有限元分析	521
12.3.5	太阳辐射的影响	524
12.3.6	某超长结构温度应力初步分析	525
12.4	泵送混凝土收缩徐变试验	531
12.4.1	引言	531
12.4.2	混凝土收缩徐变	532
12.4.3	泵送混凝土收缩徐变预测模型	532
12.4.4	国家会展中心泵送混凝土收缩徐变试验研究	534
12.4.5	泵送混凝土收缩徐变效应有限元分析	538
12.4.6	小结	542
	参考文献	542
第 13 章	超长预应力混凝土结构施工过程分析	543
13.1	研究意义	543
13.2	研究现状	543
13.3	超长预应力结构施工过程计算理论	545
13.3.1	结构的预应力施工过程	545
13.3.2	考虑施工过程的温差反应计算	550
13.3.3	超长结构施工过程中的时间效应、路径效应耦合	551
13.4	结构施工过程的有限元实现	554
13.4.1	结构构件的有限元模拟	554
13.4.2	结构体系建造过程模拟	556
13.4.3	预应力作用的有限元模拟	558
13.4.4	结构热应力计算	561
13.4.5	混凝土收缩徐变作用的有限元计算方法	561
13.4.6	非线性有限元方程的求解	563
13.4.7	施工临时支撑体系的处理	563
13.5	环形预应力混凝土超长结构施工模拟	565
13.5.1	结构温湿度与收缩徐变作用取值	566

13.5.2	有限元模型简化	566
13.5.3	模拟施工过程	567
13.6	结果分析	569
13.6.1	施工顺序对预应力效应的影响	569
13.6.2	施工顺序对温差效应的影响	572
13.6.3	综合作用下的结构反应	573
13.6.4	不同施工时间段对结构的影响	576
13.7	小结	580
	参考文献	580
第14章	超长预应力混凝土结构的概率分析方法	583
14.1	结构概率计算方法简介	583
14.2	拉丁超立方抽样方法基本原理	584
14.3	样本点生成策略改进	586
14.4	超长预应力混凝土结构的概率分析实例	589
14.4.1	工程概况与有限元分析模型	589
14.4.2	分析中的不确定性因子	592
14.4.3	敏感性分析	594
	参考文献	601
第15章	预应力结构分析与设计实例	602
15.1	非荷载作用下的复杂超长结构内力分析算例分析	602
15.1.1	水化放热引起的温降值计算	602
15.1.2	混凝土随龄期变化的应力松弛系数	603
15.1.3	混凝土随龄期变化的弹性模量	604
15.1.4	混凝土的收缩应变	605
15.1.5	超长混凝土结构非荷载应力的计算	607
15.2	复杂超长预应力混凝土结构的有限元分析	610
15.2.1	屋面有限元分析	610
15.2.2	地下室梁板有限元分析	622
15.2.3	地下室墙板有限元分析	622
15.2.4	地下室墙板施工过程分析	638
15.3	大体量超长预应力结构多点激励作用下的地震反应分析	648
15.3.1	工程概况	648
15.3.2	行波效应分析	650
15.3.3	分析结果	654
	参考文献	673

第 1 章 绪 论

1.1 预应力结构在国内外的的发展简史^[1~3]

1.1.1 国外的发展简史

预应力的原理应用于生产已有很悠久的历史。我国早就利用这一原理制造木桶、木盆和车轮。但是预应力技术真正地应用在工程中还不到一个世纪。1886 年,美国的杰克森 (P. H. Jackson) 取得了用钢筋对混凝土拱进行张拉以制作楼板的专利。德国的陶林 (W-Dohring) 于 1888 年取得了用加有预应力的钢丝浇入混凝土中以制作板和梁的专利。这也是采用预应力筋制作混凝土预制构件的首次创意。

奥地利的孟特尔 G (J. Mandle) 于 1896 年首先提出用预加应力以抵消荷载引起的应力的概念。1900 年德国的柯南 (M. Koenen) 进行了将张拉应力为 60MPa 的钢筋浇筑于混凝土中的实验,观察到混凝土的初始预压应力由于混凝土收缩而丧失的现象。1908 年美国的斯坦纳 (C. R. Steiner) 提出两次张拉以减少预应力损失的建议并取得了专利,于混凝土强度较低的幼龄期进行第一次张拉以破坏钢筋与混凝土之间的粘结,于混凝土硬化后再二次张拉。奥地利的恩丕格 (F. EmPegger) 于 1923 年创造了缠绕预应力钢丝以制作混凝土压力管的方法,钢丝应力为 160~800MPa。

无粘结预应力筋的概念是美国的迪尔 (R. H. Dill) 于 1925 年提出的。他采用涂隔离剂的高强钢筋,于混凝土结硬后进行张拉并用螺帽锚固。德国的费勃 (R. Farber) 于 1927 年取得了在混凝土中能滑动的无粘结预应力筋的专利,当时采用在钢材表面涂刷石蜡或将预应力筋放在铁皮套管或硬纸套管内以防止钢材与混凝土的粘结。

1928 年以前,预应力混凝土技术基本上处在探索阶段,那时只有一些少量的局部的设想和试制,而且先后都失败了。预应力混凝土在早期活动中提出的各种方法与专利,由于当时对混凝土和钢材在应力状态下的性能缺少认识,施加的预应力太小,效果不明显,所以都没有能得到推广应用。

预应力混凝土进入实用阶段与法国工程师弗雷西奈 (F. Freyssinet) 的贡献是分不开的。他在对混凝土和钢材性能进行大量研究和总结前人经验的基础上,考虑到混凝土收缩和徐变产生的损失,于 1928 年指出了预应力混凝土必须采用高强钢材和高强混凝土。弗氏这一论断是预应力混凝土在理论上的关键性突破。从此,人们对预应力混凝土的认识开始进入理性阶段,但对预应力混凝土的生产工艺,当时并没有解决。

1938 年德国的霍友 (E. Hoyer) 成功研究靠高强细钢丝 (直径 0.5~2mm) 和混凝土之间的粘结力而不靠锚头传力的先张法,可以在长达百米的墩式台座上一次同时生产多根构件。1939 年,弗雷西奈成功研究锚固钢丝束的弗式锥形锚具及其配套的双作用张拉千

斤顶。1940年，比利时的麦尼尔（G. Magnel）成功研究一次可以同时张拉两根钢丝的麦式模块锚。这些成就为推广先张法与后张法预应力混凝土提供了切实可行的生产工艺。德国1934年用后张法建成了较大跨度的桥梁，1938年制造了预应力钢弦混凝土；1938年法国用双作用千斤顶张拉钢丝束；1940年英国采用预应力混凝土芯棒和薄板制作预应力混凝土构件；1941年苏联采用连续配筋法；1943年美国、比利时提出了电热法；1944年法国设想采用膨胀水泥的化学方法获得预应力。

预应力混凝土的大量推广，开始于第二次世界大战结束后的1945年。当时西欧由于战争给工业、交通、城市建设造成大量破坏，亟待恢复或重建，而钢材供应异常紧张，一些原来采用钢结构的工程，纷纷改用预应力混凝土结构代替，几年之内西欧和东欧各国都取得了蓬勃的发展。预应力混凝土应用的范围从桥梁和工业厂房逐步扩大到土木、建筑工程的各个领域。从20世纪50年代起，美国、加拿大、日本、澳大利亚等国也开始推广预应力混凝土。为了促进预应力技术的发展，1950年还成立了国际预应力混凝土协会（简称FIP），有40多个会员国参加，每四年举行一次大会，交流各国在理论和实践方面的经验，这是预应力技术进入推广和发展阶段的重要标志。1953年在英国伦敦举行了首届国际预应力混凝土会议，以后先后在荷兰阿姆斯特丹、德国柏林、捷克布拉格等地召开了第二届至第六届国际预应力混凝土会议。在这段时间，有些国家拟定了预应力混凝土设计规范，许多国家在土木建筑、交通、桥梁、水利、港口及其他工程上采用预应力混凝土。

1.1.2 国内的发展简史^[4,5]

预应力混凝土技术在我国应用和发展时间较短。1956年以前基本上处于学习试制阶段，先是1950年在上海等地开始学习和介绍国外预应力混凝土的经验，后于1954年铁道部试制预应力混凝土轨枕，1955年丰台桥梁厂开始试制12m跨度的桥梁。1956年是准备推广预应力混凝土的重要一年，原建筑工程部北京工业设计院等单位试设计了一些预应力拱形和梯形屋架、屋面板和吊车梁。太原工程局等重点单位成功试制了跨度为24m、30m的桁架，跨度为6m、吨位30t的吊车梁，宽1.5m、长6m的大型屋面板和预应力芯棒空心板等预应力混凝土构件。铁道部、冶金部和电力部亦先后设计和试制一些预应力混凝土构件，为推广预应力混凝土做了技术方面的准备。从1957年到1964年，预应力混凝土处于逐步推广阶段，1957年3月和1958年1月分别在北京和太原召开了两次预应力混凝土技术经验交流会，原建筑工程部、铁道部、电力部、交通部和北京建工局等所属单位，交流了预应力混凝土生产经验和科研成果。同年我国建筑科学研究院编制了《预应力钢筋混凝土施工及验收规范》（建规3—60）。北京工业设计院等单位于1960年左右设计了一批预应力混凝土标准构件和参考图集。在材料方面，根据我国合金资源建立了普通低合金钢体系；在设计方面，制订了我国钢筋混凝土和预应力混凝土设计规范；在构件方面，设计和试制了一批新型的预应力混凝土结构；在施工工艺和机具设备方面，根据我国的生产特点采用土洋结合的办法，试制成功了许多新的机具设备，出现了许多新的生产工艺，使我国预应力技术焕然一新。

在我国房屋建筑工程中，开始主要用预应力混凝土代替单层工业厂房中的一些钢屋架、木屋架和钢吊车梁，后来逐步扩大到代替多层厂房和民用建筑中的一些中小型钢筋混凝土构件和木结构构件。既采用高强钢材制作跨度大、荷载重和技术要求高的结构；又不

为国外经验所束缚,结合我国实际,采用中强、低强钢材制作中、小跨度的预应力构件。常用的预应力预制构件有12~18m的屋面大梁,18~36m的屋架,6~9m的槽形屋面板,6~12m的吊车梁,12~33m的T形梁和双T形梁,V形折板,马鞍形壳板,预应力圆孔空心板和檩条等。此外,还少量采用一些无粘结预应力升板结构和预应力框架结构。

近二三十年,预应力混凝土的应用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、大吨位围船结构等各个领域。

1.2 预应力结构的发展现状^[6,7]

预应力发展到今天,不仅广泛应用于桥梁、建筑、轨枕、电杆、桩、压力管道、贮罐、水塔等,而且也扩大应用到高层、高耸、大跨、重载与抗震结构、土木工程、能源工程、海洋工程、海洋运输等许多新的领域。例如美国发展推广的后张法平板结构在新加坡40层办公楼中得到了应用。马来西亚预应力建筑高达76层,泰国的无粘结预应力平板建造的35层、27层、22层的商场、办公、贸易用大楼及印度尼西亚雅加达的办公贸易大厦等。

美国芝加哥的一幢50层公寓,采用了7.9m长、17.8cm厚的预应力楼板,跨高比为44.3。德克萨斯州的一幢35层的公寓建筑应用了预应力楼板,并有5.5m的悬臂梁。联邦德国建造了预应力悬挂式的高层建筑,还建造了预应力悬索大跨空间结构,室内净空面积达27m×100m;在贝尔格莱德建造的大跨度飞机库中,其双坡预应力桁架的跨度达135.8m。

在桥梁方向,国外最大跨度的简支梁桥是阿尔姆桥,跨径为76m,最大跨径的T形梁桥是270m的巴拉丰来松森大桥,预应力连续梁桥的最大跨径是92m的瑞士摩塞尔大桥。英国用悬臂法施工的箱形桥梁跨度最大的达240m;西班牙建成的预应力桥面梁板斜拉索桥,跨度达440m。世界上最大跨度预应力连续刚构桥是20世纪80年代建成的澳大利亚的给脱威桥,主跨260m。

在特种结构方面,如原子反应堆压力容器(PCRV),美国、联邦德国已建造了高温气体炉,原子反应堆存储容器(PCCV)以美国及法国为中心已建造了100座以上。

加拿大建成贮存12000t水泥烧结料后张预应力圆形筒仓,内仓直径65.2m,地上高度40m,地下深度24m。加拿大还建成了553m高的预应力混凝土电视塔。

法国建造12000m²大型预应力液化气罐多个。

此外,印尼还有预应力巨型货船、石油开采平台也采用了预应力混凝土。挪威于北海水深216m处建造了格尔法克斯(Gullfakesc)C形采油平台,油罐底部面积有16000m²,总高度262m,在油罐壁、底板、环梁与裙壁板均水平施加预应力,在管桩与罐壁中采用竖向预加应力,这是世界上最大的混凝土平台。

在预应力高强混凝土管桩方面(简称PHC桩),日本采用量很大,其用量占整个基础用桩量的80%以上,美国、德国、意大利、苏联以及东南亚地区也已大量发展和生产使用。美国后张预应力管桩,直径为0.914~2.389m,壁厚12.7~17.78cm,管段长4.88m,采用C70混凝土。苏联最大预应力管桩管径达5m,管长6~12m,壁厚为8~14cm。管桩为方桩混凝土用量的10%,省钢30%~50%,价格为钢桩的1/3。

预应力基础应用也有新的发展，在新加坡 71 层旅馆的建筑中，后张法预应力筏形基础得到了应用。上海政德路车库（如图 1.6 所示）亦采用了超长预应力基础。

我国预应力混凝土也有不少新的应用与发展，如图 1.1～图 1.10 所示。在房屋建筑中，我国应用预应力建造了不少多层和高层建筑，并在工业与民用建筑中的大跨度、大柱网及承重荷载中得到推广，其结构有现浇后张预应力（有粘结或无粘结和缓粘结）和预制先张预应力两大类。



图 1.1 上海大剧院工程



图 1.2 上海东方明珠电视塔



图 1.3 福州宜发大厦 33 层预应力平板结构