

建筑结构设计及工程应用丛书

预应力混凝土结构设计 及工程应用

李晨光 薛伟辰 邓思华 编著

中国建筑工业出版社

建筑结构设计及工程应用丛书

预应力混凝土结构设计 及工程应用

李晨光 薛伟辰 邓思华 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土结构设计及工程应用/李晨光等编著.
北京:中国建筑工业出版社,2013.1
(建筑结构设计及工程应用丛书)
ISBN 978-7-112-14904-9

I. ①预… II. ①李… 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(2012)第 276581 号

本书较系统地介绍了预应力混凝土结构设计及工程应用,既反映了预应力混凝土结构设计基本理论与设计规范的要求,也吸收了国内外有关资料的部分最新内容,并提供了构造设计、设计计算实例和工程应用等。全书共 14 章,内容包括:预应力概论;预应力材料与锚固体系;预应力施工工艺;预应力结构设计原则;预应力损失值计算;承载能力极限状态计算;正常使用极限状态验算;超静定预应力结构设计;无粘结预应力结构设计;预应力混凝土空心楼盖设计;预应力结构抗震设计;FRP 筋预应力混凝土梁设计;预应力结构构造设计;预应力结构设计实例及工程应用。

本书希望为从事预应力结构工程设计与施工等相关行业的工程技术人员及大专院校师生提供阅读和参考。

* * *

责任编辑:赵梦梅 刘瑞霞 刘婷婷
责任设计:李志立
责任校对:姜小莲 刘 钰

建筑结构设计及工程应用丛书
预应力混凝土结构设计及工程应用
李晨光 薛伟辰 邓思华 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京天成排版公司制版
北京市燕鑫印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:14 $\frac{3}{4}$ 字数:363 千字
2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月第一次印刷
定价:38.00 元

ISBN 978-7-112-14904-9
(22975)

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)

丛书编写委员会

主 编：(以姓氏笔画为序)

王亚勇 朱炳寅 江见鲸 郭继武

编 委：王昌兴 李 静 李晨光 何浙浙

宋振森 张惠英 胡天兵 胡孔国

姚 谏 蒋秀根 黎 钟

“建筑结构设计及工程应用丛书”出版说明

随着我国建设事业的迅猛发展，需要越来越多素质高、实践能力强的建设人才。高等院校已为学生打下坚实的理论及其应用的基础，但从学校到社会实践还需学生向有经验的工程人员学习，并结合实践磨练和提高。在技术日新月异、专业纷繁交错的今天，即使已有一些经验的工程人员，也要不断巩固已有的理论，吸收新的知识和借鉴别人的经验。我社早年出版过一套“建筑结构基本知识丛书”，供在职的初级技术人员学习参考应用，且随着我国建筑工程技术人员水平的提高而经多次修订，但今日的要求远非昔日可比，这套丛书已不能满足今日走向社会的大学生和在职人员的需要。

为了沟通理论与实践、学校教育与社会实际，我社在清华大学、浙江大学、中国建筑科学研究院、中国建筑设计研究院等多所高等院校和研究设计单位部分具有深厚理论基础和丰富实践经验的教授和高级工程师大力支持下，对上述丛书重新组织，编写了这套“建筑结构设计及工程应用丛书”，目的是给新参加建筑结构设计的大专院校学生，以及建筑结构设计、施工、监理人员提供参考。

丛书内容本着加深对基本概念和基本理论的理解，淡化理论计算分析过程的推导，着重理论分析与工程实践的联系，尤其突出从理论、规范规定到在实际工程中的具体应用，以及对实际问题包括电算结果的判断与分析，尽量介绍一些在实践中已得到广泛应用的实用分析方法和简捷设计图表，以求指出一条通向实践的方便之路。

本丛书包括以下 10 个分册：

- ◆《钢筋混凝土结构设计及工程应用》
- ◆《预应力混凝土结构设计及工程应用》
- ◆《砌体结构设计及工程应用》
- ◆《钢结构设计及工程应用》
- ◆《轻型钢结构设计及工程应用》
- ◆《建筑结构抗震设计及工程应用》
- ◆《多高层混凝土结构设计及工程应用》
- ◆《建筑地基基础设计及工程应用》
- ◆《建筑加固与改造》
- ◆《工程力学》

希望本丛书的出版能对即将从事建筑结构设计的大学生给予引导，对正在从事建筑结构设计的人员进一步提高提供参考。在设计、施工专家们的支持下，我社将会组织出版更多实用的技术丛书，以满足广大工程技术人员的需要。

中国建筑工业出版社

前言

预应力混凝土结构经历了自诞生、成长发展和日趋成熟的历程，已经成为一种在土木工程结构设计中普遍和广泛应用的常规的、高效的和先进的实用结构形式。本书作为建筑结构设计及工程应用丛书之一，在编写中主要考虑全书内容的系统性和可读性并特别努力从以下几方面着手进行：

1. 近年来国内与预应力混凝土结构设计有关的规范陆续进行了修订或编制并颁布实施，如《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010、《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010及《建筑结构体外预应力加固技术规程》JGJ/T 279—2012等，本书采用了新规范的有关内容，力图体现新规范的应用；同时本书也强调概念设计的重要性，希望结构工程师不盲从规范而寻求利用自然规律，并不断创新。

2. 本书吸收了《PTI后张预应力手册》（第六版）等国内外资料的部分最新内容，希望为读者提供一些有益的参考，并能够充分了解和认识到国内外预应力技术发展仍然具有广阔的空间，工程技术人员在设计中合理采用新材料、新产品、新技术和新工艺，可以促进预应力混凝土结构的可持续发展并使预应力混凝土结构保持巨大的活力。

3. 本书选用的设计实例与工程应用为近年来完成的预应力混凝土结构与施工实际工程。考虑丛书读者对象，一方面希望反映预应力混凝土结构设计基本理论，另一方面尽可能加强构造设计、工程计算和实践经验等内容。

本书的撰写由李晨光、薛伟辰和邓思华三位作者密切合作完成，薛伟辰教授为本书提供了大量的基本素材，全书由李晨光教授负责统稿。由郭继武教授审稿并提出了宝贵的意见和建议。

本书的完成得到北京建工集团有限责任公司和北京市建筑工程研究院有限责任公司的支持；“建筑结构设计及工程应用丛书”编委会和中国建筑工业出版社的有关专家和编辑给予了热忱的关注；在本书的撰写过程中，陈嵘、仝为民、王丰、刘航、张开臣和杨洁等同事为本书的编写提供了相关章节的内容和鼎力帮助。在此一并表示衷心感谢。

限于作者的水平，书中的不足或错误之处在所难免，敬请专家和读者批评指正，以便今后进一步改正与提高。

李晨光

2012年10月于北京

目录

第1章 预应力概论	1
1.1 预应力简史	1
1.2 定义与分类	6
1.3 优势和经济性	7
1.4 预应力基本概念	9
1.5 技术发展趋势	13
参考文献	15
第2章 预应力材料与锚固体系	17
2.1 混凝土	17
2.2 普通钢筋及预应力筋	22
2.3 制孔、灌浆与涂层材料	28
2.4 锚固体系	31
参考文献	37
第3章 预应力施工工艺	39
3.1 先张预应力	39
3.2 后张有粘结预应力	41
3.3 后张无粘结预应力	42
3.4 体外预应力	43
参考文献	45
第4章 预应力结构设计原则	46
4.1 一般规定	46
4.2 内力分析方法	50
4.3 耐久性设计	52
4.4 防火设计	57
参考文献	58

第5章 预应力损失值计算	60
5.1 张拉控制应力	60
5.2 预应力损失值计算	61
5.3 有效预应力值计算	68
5.4 张拉伸长值计算	69
参考文献	70
第6章 承载能力极限状态计算	72
6.1 一般规定	72
6.2 正截面承载力计算	76
6.3 斜截面承载力计算	80
6.4 扭曲截面承载力计算	84
6.5 受冲切承载力计算	87
6.6 局部受压承载力计算	88
参考文献	92
第7章 正常使用极限状态验算	93
7.1 裂缝控制验算	93
7.2 受弯构件挠度验算	98
参考文献	101
第8章 超静定预应力结构设计	103
8.1 概述	103
8.2 次弯矩与荷载效应组合	104
8.3 压力线、线性变换与吻合束	106
8.4 等效荷载	108
8.5 荷载平衡法	110
8.6 约束次弯矩	112
8.7 弯矩重分布与调幅	114
参考文献	116
第9章 无粘结预应力结构设计	118
9.1 结构形式选用	118
9.2 受弯构件性能研究	123
9.3 单向板与双向板设计	125
9.4 无梁双向平板结构设计	128
参考文献	134

第10章	预应力混凝土空心楼盖设计	135
10.1	概述	135
10.2	结构分析	136
10.3	设计计算要求	139
10.4	构造设计	141
10.5	空心楼盖应用形式	144
	参考文献	149
第11章	预应力结构抗震设计	150
11.1	一般规定	150
11.2	预应力框架结构	154
11.3	预应力板柱结构	158
11.4	构造措施与要求	159
	参考文献	160
第12章	FRP筋预应力混凝土梁设计	162
12.1	概述	162
12.2	正截面抗弯承载力计算	165
12.3	抗裂度与裂缝宽度计算	171
12.4	挠度计算	172
	参考文献	174
第13章	预应力结构构造设计	176
13.1	一般要求	176
13.2	预应力混凝土板构造设计	179
13.3	预应力混凝土梁构造设计	182
13.4	体外预应力构造设计	185
13.5	锚固区节点构造设计	189
	参考文献	193
第14章	预应力结构设计实例及工程应用	194
14.1	预应力空心楼板设计实例	194
14.2	预应力框架梁设计实例	199
14.3	预应力悬挑梁设计实例	204
14.4	预应力井字梁设计实例	208
14.5	预应力结构工程应用	212
	参考文献	224

第 1 章

预应力概论

1.1 预应力简史

1.1.1 概述

早在 19 世纪后期, 土木工程领域的工程师为了克服钢筋混凝土裂缝问题而提出了预应力混凝土的概念, 并开始了探索试验和实践。由于受到当时科学技术和工业化整体水平等的制约, 尽管这段时期产生了许多预应力技术专利, 如 1886 年 P. H. Jackson 取得了用钢筋对混凝土进行张拉制作楼板的专利; 1888 年 W. Dohring 取得了施加预应力钢丝制作混凝土板和梁的专利, 但直到 1928 年法国著名工程师 Eugene Freyssinet 提出预应力混凝土必须采用高强度钢材和高强度混凝土, 并认识到了混凝土的徐变和收缩等对预应力损失的影响之后, 预应力混凝土方获得实用性成功。20 世纪是现代预应力混凝土结构和技术取得巨大进展的时期, 诞生了许多为预应力发展作出创造性贡献的科学家和杰出的工程师, 以下仅列举几位有代表性的预应力杰出人物。

Eugene Freyssinet(1879~1962, 图 1-1)为公认的预应力混凝土发明人和预应力技术先驱, 他还于 1939 年研制出锚固钢丝束的弗式锥形锚具及配套双作用张拉千斤顶。

Franz Dischinger(1887~1953, 图 1-2)是德国著名工程师, 国际知名的预应力和桥梁专家, 在混凝土收缩与徐变理论、体外预应力桥梁和斜拉桥设计等方面有杰出贡献。



图 1-1 Eugene Freyssinet

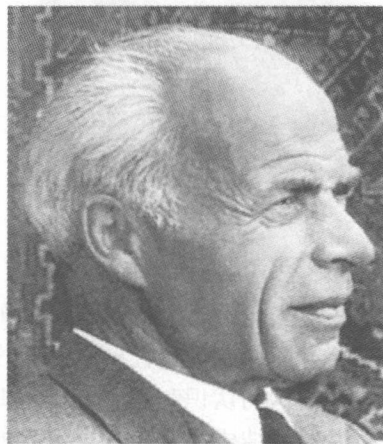


图 1-2 Franz Dischinger

Gustave Magnel(1889~1955, 图 1-3)是比利时根特大学教授, 在预应力混凝土结构早期理论研究、设计和应用方面作出了重要贡献, 也是预应力技术先驱之一。1940 年他研究成功了夹持钢丝的麦式楔块锚。这些成就为推广应用先张法和后张法预应力混凝土提供了基本条件。

1945 年第二次世界大战结束, 战后土木工程重建任务数量巨大, 由于钢材供应异常紧张, 采用钢结构设计的许多工程纷纷改用预应力混凝土结构代替, 因此预应力技术在欧洲得到了蓬勃发展, 技术上也处于世界领先地位。自 20 世纪 50 年代起, 美国、加拿大、日本、澳大利亚等国家也开始大量推广应用预应力混凝土。

美国的第一座预应力混凝土桥梁 Walnut Lane Bridge 即由 Gustave Magnel 教授设计, 1950 年建造完成, 这一工程引起了北美工程界的极大兴趣和对预应力混凝土结构的重视。从此之后预应力技术在北美开始了工业化式的不断发展和大量工程推广应用。

国际预应力协会(FIP)于 1952 年在英国剑桥成立, Eugene Freyssinet 和 Gustave Magnel 为该协会的创建发挥了重要作用, 第一届 FIP 主席是 Eugene Freyssinet, 副主席及秘书长为 Gustave Magnel, FIP 的会员遍布全世界, 每四年举办一次大会, 在国际预应力领域有非常重要的影响力。

Ulrich Finsterwalder(1897~1988, 图 1-4)是德国著名工程师, 他对现代预应力混凝土作出了显著贡献, 特别是发明了桥梁施工中的预应力双悬臂法, 二战之后这种施工方法在莱茵河上 Bendorf 桥成功采用。他还设计了双层桁架结构 Mangfall 大桥, 也采用预应力双悬臂施工法。



图 1-3 Gustave Magnel



图 1-4 Ulrich Finsterwalder

林同炎(T. Y. Lin, 1912~2003, 图 1-5)是美国加州大学教授, 国际公认的预应力混凝土结构权威, 当代最伟大的结构设计师之一。他在大跨度桥梁、大跨建筑、高层建筑的设计与施工等方面均有创造性的贡献, 设计的工程遍布世界很多国家和地区。T. Y. Lin 对预应力混凝土结构的认识和实践突破了 Eugene Freyssinet 的经典观念, 为 20 世纪 60 年代以后预应力混凝土结构在北美和全世界的发展与大规模应用作出了杰出贡献, 因此土木工程界尊称他为“预应力混凝土先生”。

Eugene Freyssinet 虽然是预应力混凝土的发明人,但他认为预应力混凝土不能用牛顿的静力学与普通材料力学来进行设计计算, Gustave Magnel 教授和部分英国学者并不认同这种观点。1953 年 T. Y. Lin 获得 Fullbright Award 资助,作为研究学者在比利时根特大学进行了预应力混凝土连续梁试验研究,证明了预应力混凝土结构可以用静力学与材料力学来进行设计计算,并提出了“预应力混凝土是由高强钢材和混凝土组成的先进的、改进的钢筋混凝土”。T. Y. Lin 还提出了荷载平衡法,这对于理解和设计预应力混凝土结构有重大意义。

Jean Müller(1925~2005,图 1-6)是法国著名工程师,国际知名的预应力和桥梁专家,在预应力混凝土节段桥梁和斜拉桥设计与施工等方面有杰出贡献。



图 1-5 林同炎(T. Y. Lin)



图 1-6 Jean Müller

20 世纪 70 年代对部分预应力混凝土概念的广泛认可可是加筋混凝土设计思想的重大发展。虽然早已存在“部分”预应力的设想,但并未引起工程界的重视,直到 1970 年国际预应力协会(FIP)第 6 届大会上,才接受欧洲混凝土委员会(CEB)与 FIP 联合提出的、根据使用条件下混凝土的拉应力大小、将预应力混凝土分成四类的建议:即“全”预应力混凝土、“限值”预应力混凝土、“部分”预应力混凝土和“非预应力”普通钢筋混凝土四类。在 1980 年罗马尼亚召开的 FIP 专题讨论会上,这一分类法方得到世界各国的普遍接受。

1998 年 FIP 与欧洲混凝土委员会(CEB)正式宣布合并,成为国际混凝土协会(FIB)。FIB 的成立表明预应力技术日益成熟,成为一门新兴的技术学科。

我国预应力混凝土是随着第一个五年计划的实施于 20 世纪 50 年代中期开始发展起来的。早期采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,之后逐步扩大到替代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。1976 年唐山大地震后,为了加强纯装配式结构的连接和提高结构的抗震能力,在房屋建筑中,预应力连续结构有了较大的发展,结构连接的负弯矩筋采用预应力与非预应力混合配筋,有时也全部采用普通钢筋或全部预应力筋。大量采用了预制预应力混凝土标准构件与制品,包括预应力空心楼板、槽形屋面板、压力水管、轨枕、电杆和桩等。公路桥梁、铁路桥梁、市政工程、水利工程和特种结构等也广泛采用了预应力混凝土结构。

公路与铁路桥梁一直是预应力混凝土结构应用最多、最为广泛的工程领域。20 世纪

70年代铁路桥梁大量采用标准化的后张法预应力混凝土预制梁,跨度由24m扩展到40m,到1981年年底为止,已建成这种铁路桥15000孔以上。近二十多年来,随着我国高速公路和铁路客运专线建设的大规模开展,预应力混凝土结构与配套产品呈现出高速发展趋势。桥梁工程建造技术已跻身于国际先进行列,如苏通长江大桥、香港昂船洲大桥、东海大桥和杭州湾大桥等分别创造出许多具有世界先进水平的施工技术与工程记录。京沪高速铁路等大批铁路桥梁普遍采用预应力混凝土结构。

预应力混凝土结构在建筑工程得到了广泛应用,如北京饭店贵宾楼、广东国际大厦、北京东方广场等大型、高层与超长结构工程等。近年来,预应力混凝土结构在北京2008年奥运工程、2010年上海世界博览会、广州亚运会等大量体育场馆和重要工程中得到采用。

1.1.2 预应力钢材

20世纪30~40年代期间,可用的预应力材料主要是钢筋,欧洲人尝试了用琴钢丝做预应力电线杆,以后逐渐开始采用直径最大达6mm的钢丝。1950年前后一些生产钢丝绳的欧美企业开发了预应力钢绞线。中国20世纪50年代开始为铁路轨枕生产预应力钢丝,20世纪60年代开发出普通松弛的预应力钢绞线,80年代开发出低松弛的预应力钢丝和钢绞线,90年代开发出镀锌预应力钢丝和钢绞线,以及涂环氧树脂的预应力钢绞线。

预应力钢棒,或称管桩钢丝,主要用于高强度预应力混凝土管桩(PHC)的配筋,预应力钢棒于1964年由日本高周波株式会社研制成功,当时叫U L Bond,是超级握裹力(粘结力)的意思。大型钢结构等采用的大尺寸钢棒(或称钢拉杆)直径可达20~210mm,也可用作体外预应力拉杆。

涂环氧树脂的预应力钢绞线最早于1981年在美国开发出来,技术源自环氧涂层普通钢筋。1983年第一次应用于弗吉尼亚州朴次茅斯港的后张预应力混凝土浮动码头中,1984年应用于伊里诺伊州昆西市湾景(Bayview)斜拉桥,后来在日本、德国及中国等国家逐渐推广开来。

精轧螺纹钢筋是20世纪70年代原联邦德国开发的产品,美、日、英等国家引进后,经过20世纪80年代大力发展,广泛用于大型建筑、桥梁、特种结构等工程。我国“六五”期间组织联合攻关,研制生产出直径32mm,735MPa/900MPa级余热处理高强度精轧螺纹钢筋,填补了国内空白;之后经成分及工艺调整又生产出850MPa/1080MPa, $\delta_s \geq 8\%$ 级精轧螺纹钢筋。

纤维增强复合材料FRP(Fiber Reinforced Polymer)属于新型预应力材料,1957年在美国采用棉花及人造纤维开始了小规模的生产,逐渐应用于飞机、体育器材、游艇、结构加固及新建桥梁。20世纪70年代末FRP筋开发成功,并应用于工程中。80年代末,德国、日本相继建成FRP筋预应力混凝土桥梁。

预应力钢材标准制定的年代从另一个侧面反映了预应力材料的发展历史,德国于1953年颁布了预应力钢材的标准,其他国家颁布标准的时间分别为:英国1955年,瑞士1956年,美国1957年,中国1964年。

鉴于低松弛预应力钢绞线的优良特性和经济性,目前其仍是全球最广泛采用的预应力材料。大量采用的尺寸规格有12.7mm、15.24mm和15.7mm,常用的强度级别为1860MPa,2000MPa级也已在工程中应用。对于耐腐蚀性要求较高的使用条件,如体外预

应力索,广泛采用无粘结钢绞线、镀锌钢绞线、涂环氧树脂钢绞线等,其中无粘结钢绞线中的钢材可以是无涂层的钢绞线,也可以是镀锌钢绞线或涂环氧树脂的钢绞线。1980年国内研制成功无粘结筋涂塑自动化生产线,无粘结筋预应力混凝土得到了大规模的广泛应用。镀锌钢绞线在欧洲和亚洲都广泛采用,强度级别可达到 1860MPa。

目前中国的低松弛预应力钢绞线生产制造规模已达到世界第一,2005年的产量在100万吨以上,2006年的产量约在140万吨以上,2009年使用量约在380万吨,预应力钢材大产量和用量均保持稳定增长。高强度低松弛预应力筋已成为我国预应力筋的主导产品。

1.1.3 预应力产品体系

预应力锚固体系主要包括夹具、锚具、连接器、配套的传力与锚下构造等,锚固体系的发展与预应力用钢材产品品种的不断发展和密切相关,即新的预应力用钢材产品规模化生产带动新的锚固体系不断出现。早期预应力用钢材主要有钢筋和钢丝,因此锚夹具有用于钢筋的镦粗夹具、螺丝端杆锚具、帮条锚具等;用于钢丝的圆锥形夹具、楔形夹具、波形夹具、弗式锥形锚具、麦式楔块锚具和钢管混凝土螺杆锚具等。

1945年后,预应力体系得到了快速发展,起初 Freyssinet 的 $\phi 5\text{mm}$ 弗式锥形锚具应用较多,之后 Dywidag 公司开发了 $\phi 25\text{mm}$ 粗钢筋锚固体系。1949年由4位瑞士工程师 Birkenmaier, Brandestini, Ros 和 Vogt 发明了 BBRV 镦头锚体系。1949~1950年 Leonhardt 和 W. Baur 研制了集中配筋的预应力钢绞线锚固体系。1965年瑞士的 Losinger 开发出了用于锚固钢绞线的 VSL 体系。

20世纪50年代之后,随着预应力用钢材的性能大幅度提高,相应的国际化预应力锚固体系逐渐形成,如国外著名体系有 Freyssinet、VSL、CCL、Dywidag 及 BBRV 等,国内著名体系有 OVM、QM、LQM、B&S 等。目前常用的锚夹具形式包括:用于钢绞线的夹片式锚固体系与握裹式(挤压和压花锚具)锚具,用于钢丝的镦头锚具及锥塞式(钢质、冷铸与热铸)锚具,用于高强钢筋的支撑式锚具等。2006年以来,国内每年使用锚具约6000万标准锚固单元(孔),近几年锚具年产量已达1亿孔以上,数量达到世界第一。

1.1.4 技术标准与知识体系

从20世纪80年代初至今,伴随着中国经济的高速发展,预应力技术得到了前所未有的大发展,预应力混凝土结构应用出现在超高层、超大跨、超大体积、超长和大面积、超重荷载等工程中,创造出许多具有国际先进水平的工程纪录。建筑工程、桥梁工程和特种结构工程的大量建设促进和推动了现代高效预应力体系和产品的发展与成熟,适应现代预应力结构发展的设计理论研究和设计规范标准也有较快发展。

1980年中国土木工程学会成立了混凝土与预应力混凝土学会,并于同年召开第一届预应力混凝土学术会议。1983年底编成《部分预应力混凝土结构设计建议》,该建议于1985年出版,在国内工程界引起巨大反响,并促进了预应力混凝土的广泛应用。近三十多年来,预应力混凝土结构理论和试验研究取得了巨大进展,获得了大量的科研成果,出版了一系列重要专著和设计施工手册等;相应的设计标准、规范与规程不断更新和发展,如《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010、《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92—2004、《预应力混凝土结构抗震设计规程》JGJ 140—2004及《建筑结构体外预应力加固技术规程》JGJ/T 279—2012等。2009年《预应力混凝土结构设计规范》国家标准

已立项并开始编制。综合预应力混凝土结构设计、施工与规模空前的工程应用实践，构成了中国当代预应力混凝土结构与技术的丰富知识体系。

1.2 定义与分类

预应力混凝土是根据需要人为地引入某一数值与分布的内应力，用以部分或全部抵消外荷载应力的一种加筋混凝土。根据预应力度、粘结方式、预应力筋束的位置、施工工艺及预应力结构构件的制作方式等，预应力混凝土可作如下分类。

1. 按预应力度分类

1970年国际预应力协会(FIP)、欧洲混凝土委员会(CEB)根据预应力程度的不同，建议将加筋混凝土分为四个等级：(1)全预应力混凝土，即在全部荷载最不利组合作用下，混凝土不出现拉应力；(2)限值预应力混凝土，即在全部荷载最不利组合作用下，混凝土允许出现拉应力，但不超过其容许值，在长期持续荷载作用下，混凝土不出现拉应力；(3)部分预应力混凝土，即在全部荷载最不利组合作用下，混凝土允许出现裂缝，但裂缝的宽度不超过规定值；(4)普通钢筋混凝土。

中国土木工程学会《部分预应力混凝土结构设计建议》(1986年)，根据预应力度的不同，将加筋混凝土分为全预应力混凝土、部分预应力混凝土和钢筋混凝土三类。其中部分预应力混凝土包括限值预应力混凝土和部分预应力混凝土两种。

2. 按粘结方式分类

按粘结方式可分为有粘结、无粘结及缓粘结等种类。有粘结预应力混凝土，是指预应力筋完全被周围混凝土或水泥浆体粘结、握裹的预应力混凝土。先张预应力混凝土和预设孔道穿筋并灌浆的后张预应力混凝土均属于此类。无粘结预应力混凝土，是指预应力筋伸缩变形自由、不与周围混凝土或水泥浆体产生粘结的预应力混凝土，无粘结预应力筋全长涂有专用的防锈油脂，并外套防老化的塑料管保护。缓粘结预应力混凝土，是指在施工阶段预应力筋可伸缩变形自由、不与周围缓粘结剂产生粘结，而在施工完成后的预定时期内预应力筋通过固化的缓粘结剂与周围混凝土产生粘结作用。

3. 按预应力筋束的位置分类

按预应力筋在体内与体外位置的不同，预应力混凝土可分为体内预应力混凝土与体外预应力混凝土两类。

预应力筋布置在混凝土构件体内的称为体内预应力混凝土。先张预应力混凝土以及预设孔道穿筋的后张预应力混凝土等均属此类。按预应力筋与周围混凝土之间是否有粘结，体内预应力混凝土又可分为无粘结预应力混凝土与有粘结预应力混凝土两种。

体外预应力混凝土为预应力筋布置在混凝土构件体外的预应力混凝土。即体外预应力系由布置于承载结构主体截面之外的预应力束产生的预应力，预应力束通过与结构主体截面直接或间接相连接的锚固与转向实体来传递预应力。

4. 按施工工艺分类

预应力混凝土根据其预应力施工加工工艺的不同，可分为先张法、后张法及横张法等种类。

先张法指采用永久或临时台座，在构件混凝土浇筑之前张拉预应力筋，待混凝土达到

设计强度和龄期后,将施加在预应力筋上的拉力逐渐释放,在预应力筋回缩的过程中利用其与混凝土之间的粘结力,对混凝土施加预压应力。

后张法是指在构件混凝土的强度达到设计值后,利用预设于混凝土构件内的孔道穿入预应力筋,以混凝土构件本身为支承张拉预应力筋,然后用特制锚具将预应力筋锚固形成永久预应力,最后在预应力筋孔道内压注水泥浆防锈,并使预应力筋和混凝土粘结成整体。

横张法预应力混凝土是沿预应力束横向张拉获得纵向预应力的混凝土。主要特点是预留明槽、粘结自锚和横向张拉。

5. 按预应力结构构件的制作方式分类

按预应力结构构件的制作方式可分为现浇、预制及预制现浇组合预应力构件等类型。

1.3 优势和经济性

1.3.1 预应力混凝土的优势

预应力混凝土结构最适用于跨度大、荷载重、在限定建筑高度时要求层数多等情况,与非预应力结构相比,预应力结构具有如下优势:

(1) 通过对混凝土结构构件截面受拉区施加预压应力,可使结构内力均匀分布,降低截面应力峰值,结构在使用荷载下不开裂或裂缝宽度减小,预应力反拱可减小结构的变形,从而改善结构的使用性能,并提高结构的耐久性。

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

(3) 由于预应力筋的预压力延缓了截面斜裂缝的产生,增加了截面剪压区面积,从而提高了构件的受剪承载力。因此预应力混凝土梁的腹板宽度可减小,从而进一步减轻结构自重。

(4) 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。对于以承受动力荷载为主的桥梁结构是很有利的,可提高预应力混凝土结构的抗疲劳强度。

(5) 预应力特别适用于工业化生产的预制混凝土构件,预制预应力混凝土具有全现浇预应力混凝土的各方面优势,在大跨度及大型预制构件中结构性能优越。

(6) 由于预应力可充分发挥材料潜力、提高构件的抗裂度和刚度,提高抗疲劳强度等,因此预应力可有效地减小构件截面尺寸,减轻自重,节约材料并降低造价;对于大跨度、承受重荷载的混凝土结构,预应力可有效提高结构的跨高比限值,从而获得优良的结构性能和可观的经济效益。

1.3.2 部分预应力混凝土的优越性

部分预应力结构与全预应力结构相比具有如下优越性:

(1) 全预应力结构设计常由使用荷载下不出现拉应力的条件控制,其受弯承载力安全系数往往偏大,预应力钢材用量较大;部分预应力结构设计适当放宽限制条件,有利于节约预应力钢材。

(2) 全预应力结构在恒载较小、活荷载较大的情况下,可能产生长期反拱。这是由于

预压区混凝土长期处于高压应力状态引起的徐变，使反拱不断增长的缘故。部分预应力由于预加力适宜，可避免长期反拱过大的问题。

(3) 部分预应力混凝土设置适量的预应力筋，在正常使用状态下，其裂缝经常是闭合的。即使当全部活荷载偶然出现时，构件将出现裂缝，但这些裂缝将随活荷载的移去而闭合或仅有微裂缝。裂缝对部分预应力结构的危害性并不像对普通钢筋混凝土结构那样严重，因为后者的裂缝始终存在且不易闭合。

(4) 部分预应力结构由于配置有普通钢筋，在破坏时呈现的延性和能量吸收能力，较全预应力结构好，对结构抗震非常有利。

(5) 全预应力构件支座不能自由滑动时，其纵向缩短(收缩与徐变)，由于受相邻构件的约束而引起的拉应力可能造成严重的裂缝。此外，当预压应力过大时会发生沿预应力筋方向的水平裂缝；采用部分预应力结构可有效地解决这类问题。

全预应力混凝土结构在加筋混凝土中并不一定是最佳方案，存在的一些缺点主要是由于预应力高强钢材的性能和预加力过大所引起的。采用混合配筋以降低预应力度并用普通钢筋来控制开裂后结构的裂缝与挠度是克服全预应力缺点的有效方法。所以，部分预应力混凝土既具有全预应力混凝土与普通钢筋混凝土二者的主要优点，又基本上克服了两者的主要缺点，现已成为加筋混凝土系列中的主要发展趋势之一。

1.3.3 预应力混凝土的经济性

预应力结构的经济性评价，宜采用多指标综合评价法，即以一系列经济指标(综合造价、单位材料用量、单位人工用量、总工期等)和功能性指标作为评价的基础。单个指标仅反映某一方面的情况，将选定的相关评价指标综合起来考虑，所反映的情况就比较全面。

大跨度预应力混凝土结构的施工工期与普通钢筋混凝土结构相比较，增加了预应力施工工序。实践表明，预应力施工技术日趋成熟，已形成一套完整的施工组织体系。如现浇预应力结构多高层建筑的预应力筋铺设与钢筋绑扎可组织流水施工；混凝土浇筑后，与普通钢筋混凝土结构一样可继续上一楼层施工，预应力筋张拉待混凝土达到强度后穿插进行，基本上不影响总工期。

预应力混凝土结构节约成本的主要途径之一是减少结构钢筋和混凝土用量，节约的数量直接与结构的跨度等因素有关。研究表明，相同设计条件下，单跨跨度小于10m左右的框架梁采用预应力结构并不经济(图1-7)，即跨度小于10m左右时所节约的成本不能抵消预应力施工所增加的费用。当框架梁采用预应力单跨跨度大于10m左右后，所节约的成本则可以抵消预应力施工所增加的费用，经济性显著。

对其他影响参数，如跨数、柱距、荷载或功能性指标的研究证明，预应力混凝土在多高层楼盖结构、大跨度预应力混凝土框架梁等结构构件中应用，其综合经济效益明显。

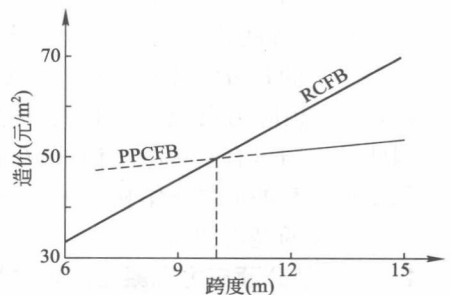


图 1-7 预应力梁的最小经济跨度示意图
RCFB—钢筋混凝土框架梁；
PPCFB—预应力混凝土框架梁