

结构设计及计算丛书

预应力结构设计 及实用计算

王全凤（丛书主编） 方德平 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



预应力结构设计 及实用计算

王全凤 (丛书主编) 方德平 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内
容
提
要

本书以《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《预应力混凝土结构抗震设计规程》(JGJ 140—2004)和《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ 92—2004)等系列规范及技术标准为依据,系统介绍了预应力混凝土结构的基本性能和基本理论,内容包括预应力混凝土设计计算基础、受弯构件设计、受拉构件设计、受压构件设计、构件的抗裂验算、局部承压设计及构造措施、抗冲切设计与计算、超静定结构的设计与计算、结构的抗震设计、体外预应力结构设计等。本书内容兼顾预应力结构的计算原理与实用设计,简明扼要,深入浅出,概念明晰,系统全面,实用性强。

本书可供土建结构设计、施工和科研工程技术人员及大专院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

预应力结构设计及实用计算/王全凤,方德平编著. —北京:
中国电力出版社, 2009

(结构设计及计算丛书)

ISBN 978-7-5083-8518-1

I. 预… II. ①王…②方… III. ①预应力结构-结构设计
②预应力结构-结构计算 IV. TU378

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 025273 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.75 印张 209 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

在国民经济持续高、快速发展的大好形势下,作为国民经济重要支柱的建筑行业,正面临高质量、高标准的严峻要求和挑战,同时也提供了迅猛发展的大好机遇。此外,由于设计和施工可能错误、使用功能的改变以及灾害等事故的影响,也有大量的工程项目需要加固修复。如何经济合理地进行工程结构设计是一个既复杂而又在实际工作中需要解决的问题。为此,我们组织编写了结构设计及计算丛书,这套丛书的作者都是多年从事教学、科研、设计,具有丰富经验的、在一线工作的教师和工程师。

科学的东西往往是简洁的,内涵深刻的数学往往在形式上具有出奇的简洁之美。如牛顿第二运动定律,一个极简洁的数学公式就囊括了世间万事万物。隐含在科学中的工程技术与科学相通,简洁为至美。在英国泰晤士河畔有一座举世闻名的大本钟,世界一流的瑞士钟表制造商对这个超大型巨钟的准确走时也没有一点把握。英国人本杰明大胆承接下了这项工程。他解决走不准的方法极为简单,就是在钟摆上放置或取下一枚便士。一枚小小的便士,居然起到了四两拨千斤的作用。大自然的线条、古老而鲜活的禅语、质朴的人际关系等,无不因其简而美。追求简洁正是人类创造性思维的最普遍原则。为了进一步提高现有的工程结构技术人员的综合素质,帮助即将从事工程结构设计的人员尽快掌握这一门技术,挖土取金,简洁、实用易懂、便于自学是本丛书编写遵循的原则。

书中融入了近年来国内外学者及丛书作者在工程结构设计计算方面的理论研究成果,深入浅出地分析了设计计算方法的工程应用和典型的工程案例,力求达到理论推导删繁就简、基本概念清晰完整、计算方法简单实用、实际操作规范。

丛书内容包括工程结构设计计算的基本概念和简单的理论分析,重点放在结构设计计算的基本方法和应用。它的主要特点是:

第一,内容广泛,涵盖各种主要结构的设计;取材适当,重点突出,强调设计计算方法和应用。

第二,定位的结构设计计算方法大多是基础性的和应用较广、行之有效的方法。每章有概述和例题,枚举的例题都有浓厚的工程背景,力求典型、计算简单、便于验证。以例题为学习方法,举一反三。

第三，为了方便离开大学课堂有一定时间的读者，在介绍结构设计的某种方法之前，简要介绍其计算原理，为读者进一步提高奠定基础。

本丛书适合在职的工程技术人员和即将从事工程结构设计人员的进修、自学和参考。阅读本丛书只要具备一般理工科大专的基础即可。希望本丛书能为促进我国工程结构的健康发展作出有益的贡献，同时对从事工程结构检测、设计、施工、质量监督和建设工程监理等技术人员有所裨益。

王全凤

2009年6月于泉州

预应力结构由于其优良的结构性能已成为当今最有发展前途的现代结构之一。预应力技术以其独特的结构形式、结构体系和施工工艺及方法,使其应用领域不断得以拓宽。现代预应力结构的主要特征由原来较为简单的预应力构件(通常是简支构件)转变为复杂的预应力结构(通常是超静定件结构)。现代预应力技术已广泛地应用于各种结构材料领域,如大量的混凝土结构,还应用于钢结构、特种结构、组合结构和加固结构等。预应力结构还不断革新自身理论、技术和材料,以最大限度地发挥其潜在性能的优势。

本书系统地阐述了预应力混凝土结构的基本性能和基本理论,既包括传统的内容,如高强钢材与高强混凝土的物理力学性能,预应力工艺,预应力损失,受弯构件正截面和斜截面的承载力计算,受拉和受压构件的承载力计算以及构件的开裂、裂缝和挠度分析;也包括近年来国内外的成就,如部分预应力开裂截面分析、挠度与裂缝的控制;同时也包括作者的部分研究成果,如无粘结预应力筋的极限应力分析,体外预应力混凝土结构的分析,预应力度法和超静定结构的初内力、预应力度法等。

本书主要特色:

(1) 以往,不少预应力混凝土书籍是以规范条文和公式为基础编写的,起到介绍和解释规范的作用,其优点是简单适用、便于学习。但由于过分重视计算方法,对基本概念和基本理论的阐述却较少。读者虽易于接受规范条文和公式,但往往知其然而不知其所以然,不易深入地理解所设计结构的特性与本质。本书编著者从事建筑力学教学、预应力结构的教学和科研多年,在本书中力求突出预应力混凝土结构基本性能和基本理论,以期加深读者对预应力结构的特性与本质的理解。

(2) 本书包含了国内、外最新的研究成果和编著者近年来的研究成果。

(3) 本书介绍的预应力混凝土结构的分析和设计方法主要取材于国际上有较大影响的文献资料。这些方法大多是有理论依据且经试验校正过的公式,而不太取用过分依靠试验数据的经验公式。这些方法逻辑性强、推理清楚、概念明确,有利于读者对预应力结构基本原理的深入理解。

(4) 本书内容兼顾预应力结构的计算原理与实用设计,简明扼要,深入浅出,概念明晰,系统全面,实用性强。

由于编著者水平有限,对书中谬误及不妥之处,敬请各位专家学者批评指正。

编著者

2009年6月

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 预应力结构发展简史与展望	1
第二节 预应力结构的概念	4
第三节 预应力混凝土的分类	8
第四节 预应力结构的材料和锚固体系	11
第二章 预应力混凝土设计计算基础	18
第一节 张拉控制应力	18
第二节 预应力损失计算与算例	18
第三节 超静定预应力结构设计的次内力荷载组合	26
第三章 预应力混凝土受弯构件设计	27
第一节 受弯构件正截面承载力计算与算例	27
第二节 受弯构件斜截面承载力计算与算例	35
第三节 受弯构件挠度计算与算例	40
第四章 预应力混凝土受拉构件设计	45
第一节 受拉构件的破坏状态及基本假定	45
第二节 轴心受拉构件承载力的计算	45
第三节 偏心受拉构件承载力的计算与算例	45
第五章 预应力混凝土受压构件设计	48
第一节 受压构件的破坏状态及基本假定	48
第二节 偏心受压构件承载力的计算与算例	51
第六章 预应力混凝土构件的抗裂验算	53
第一节 预应力构件中裂缝的出现、分布及特征	53
第二节 环境对预应力混凝土结构裂缝控制等级的影响	54
第三节 正常使用阶段预应力混凝土构件裂缝宽度	55

第四节	预应力混凝土结构裂缝控制的名义拉应力法	59
第七章	预应力混凝土局部承压设计及构造措施	62
第一节	先张法预应力混凝土构件锚固区设计与算例	62
第二节	后张法预应力混凝土构件端部设计与算例	64
第三节	局部承压构造要求	68
第八章	预应力混凝土抗冲切设计与计算	71
第一节	概述	71
第二节	我国规范的抗冲切规定	71
第三节	有柱帽板	78
第四节	配型钢剪力架的板	79
第九章	超静定结构的设计与计算	84
第一节	概述	84
第二节	主弯矩、次弯矩和综合弯矩	85
第三节	预应力筋的线形布置	88
第四节	等效荷载法和荷载平衡法	92
第五节	超静定结构的综合内力预应力度法与算例	95
第六节	超静定结构的内力重分布	101
第七节	后张有粘结预应力混凝土框架设计	102
第十章	预应力混凝土结构的抗震设计	113
第一节	概述	113
第二节	预应力混凝土结构在地震作用下的反应特性	113
第三节	预应力混凝土结构抗震设计	117
第十一章	体外预应力结构设计	123
第一节	概述	123
第二节	体外预应力结构的预应力损失	124
第三节	体外预应力结构的承载力极限状态设计	125
第四节	体外预应力梁的设计与算例	126
参考文献		131

第一章

绪 论

第一节 预应力结构发展简史与展望

一、预应力结构的发展简史

预应力是指为了改善结构或构件在各种使用条件下的工作性能和提高其强度而在使用前预先施加的永久性内应力。预应力混凝土能发展到当今这样的高水平,是由过去一个世纪以来无数工程师和科学家不断持续钻研和实践的结果。回顾历史,预应力混凝土的概念几乎是与钢筋混凝土的概念同时产生的,无论采用钢筋还是施加预应力,其目的都是为了加强构件的抗拉能力以弥补混凝土抗拉强度过低的缺点。将预应力原理用于混凝土的实践始于 19 世纪 80 年代。

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。

用预应力以抵消荷载引起的应力的概念,是奥地利的孟特尔(J. Mandl)于 1896 首先提出的。1906 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。在混凝土强度较低的幼龄期时,进行第一次张拉以破坏钢筋与混凝土之间的粘结,在混凝土硬化后再二次张拉。奥地利的恩丕格(F. Empergor)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,于混凝土硬化后进行张拉并用螺帽锚固。德国的费勃(R. Fafber)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,防止钢筋与混凝土粘结的方法是:在钢筋表面涂刷石蜡,或者将预应力筋放在铁皮套管或硬纸套管内。

以上所述的预应力混凝土是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筋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,所以都没能得到推广和应用。

预应力混凝土进入实用阶段是与法国工程师弗雷西奈(F. Freyssinet)的贡献分不开的。他在对混凝土和钢筋性能进行了大量研究和总结前人经验的基础上,考虑到混凝土的收缩和徐变产生的预应力损失,于 1928 年指出了预应力混凝土必须采用高强钢筋和高强混凝土。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,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)研究成功了靠高强细钢丝(直径 $0.5\sim 2\text{mm}$)和混凝土之间的粘结力不靠锚头传力,可以在长达百米的墩式台座上一次同时生产多根构件。1939年弗雷西奈研究成功了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)研究成功一次可以同时张拉两根钢丝的麦式楔块锚。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。

预应力混凝土的大量推广,开始于第二次世界大战结束后。当时欧洲由于战争对工业、交通、城市建设造成的大量破坏,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,几年之内预应力混凝土结构在欧洲各国都取得了蓬勃的发展。应用的范围,开始是桥梁和工业厂房,后来扩大到土木、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),每四年举行大会一次,交流各国在理论和实践方面的经验。

由于受到预应力钢材的限制,我国建工系统预应力混凝土发展的整个历程,随着高强钢材生产、供应的进展,大体上可以分为两个阶段:即从1956~1978年改革开放,以中、低强钢材为主的早期阶段与改革开放以后大量采用高强钢丝、钢绞线预应力筋的近期阶段。两个阶段中,钢材强度高低、预应力混凝土结构设计与制作水平不同,结构构件形式与结构应用也有较大差异。

20世纪50年代初,我国第一个五年计划开始,大量工业厂房和民用建筑需要兴建,而结构材料,特别是型钢和木材奇缺,由于难以解决厂房钢结构屋盖与钢吊车梁的型钢用料,迫切要求改用预应力混凝土来代替。原建筑工程部建筑科学技术研究所(中国建筑科学研究院的前身)接受了国家计委的任务,沿着自力更生、走不同于国外的具有中国特色的低强钢材预应力的发展道路,开始了预应力混凝土的研究任务。1954年铁道部科学研究院首次进行了预应力混凝土的试制。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大梁。从此,预应力技术开始在全国范围内推广和应用。

在房屋建筑中,从20世纪50年代开始,预应力技术首先用在预制混凝土屋架和吊车梁中,后来逐步应用到其他预制混凝土构件中。既采用高强钢材制作大跨度、重荷载和技术要求高的预应力结构,也采用中、低强钢材制作中、小跨度的预应力构件。常见的预制预应力构件有 $12\sim 18\text{m}$ 屋面梁、 $18\sim 36\text{m}$ 屋架、 $6\sim 9\text{m}$ 屋面板、 $6\sim 12\text{m}$ 吊车梁、 $12\sim 33\text{m}$ T形梁、V形板和各种壳板等。20世纪80年代后,预应力技术得到了长足的发展,预应力混凝土结构、预应力钢结构和预应力砌体结构等多种预应力结构体系在我国房屋建筑领域得到了越来越广泛的应用。

预应力技术在我国桥梁工程中发展较快,尤其在20世纪60、70年代,公路与铁路桥梁大量采用标准化的后张法预制预应力混凝土梁,跨度开始为 24m ,后来扩大到 40m 。到1980年为止,我国已建成这类桥梁15000余座。另外,从20世纪80年代开始,我国修建的各类大桥几乎全部采用了预应力技术。

在我国水上结构、海工结构、港口码头以及特种结构中,预应力技术也得到了广泛的应用。目前,预应力结构已成为我国工程建设领域中的一种主要结构形式。

二、预应力结构的发展现状与展望

高效预应力混凝土结构指的是利用高性能材料（高强混凝土、高强钢材）、现代设计理论和先进施工工艺设计、建造起来的结构。与非预应力结构相比，高效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、耐久性强、轻巧美观等优点，而且较为经济、节材、节能，因此，高效预应力结构具有非常广阔的应用前景。目前，高效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、最为重要的工程结构形式之一，在我国“国民经济及社会发展十年规划”以及“八五计划”、“九五计划”中都把发展和推广高效预应力结构作为建筑业的基本国策之一。展望近5~15年内的高效预应力技术的前景，对于预应力混凝土结构工程建设具有深远的意义。

(1) 多高层大跨度居住和写字楼建筑将持续发展，在这类大跨度（7~12m）建筑中，无粘结预应力平板结构仍将广泛应用，成套的无粘结预应力平板设计体系和施工技术体系将大大提高设计和施工效率，充分保证结构的耐久性和其他结构与质量功能。

(2) 公路和铁路桥梁将大量采用高效预应力混凝土结构，大吨位预应力群锚固体系将得到更广泛的应用。大跨度斜拉桥和悬索桥的设计和建造水平将进一步完善和提高。

(3) 高效预应力特种结构，如高耸电视塔、核电站安全壳、大型容器结构以及海洋工程等，将更多地采用大吨位预应力群锚固体系。

(4) 大跨度单层、多层厂房和停车场将大量采用现浇或预制预应力混凝土结构，柱网尺寸可根据使用功能灵活选取，不受传统小柱网模式的限制，采用高强混凝土和高强钢绞线制作的大跨度预制先张空心板势必会大量使用。

(5) 为满足特殊功能和建筑学造型，预应力空间结构体系（如交叉梁体系、拱系、壳体与折板），将会得到进一步发展和应用。

(6) 体外预应力技术由于其独特的优越性，在建筑、桥梁工程设计及结构加固修复中将得到广泛的应用。

(7) 预应力组合结构，如预应力钢—混凝土组合结构、预应力钢管混凝土组合结构，具备钢—混凝土组合结构、钢管混凝土组合结构与预应力结构两者的优点，完善了钢—混凝土组合结构、钢管混凝土组合结构的受力性能，拓宽了应用范围，也将得到进一步发展和应用。

(8) 一些新型材料将得到进一步发展和应用。如缓粘结材料包裹着预应力筋，当混凝土硬化后，缓粘结材料尚未硬化，这时张拉预应力筋，预应力筋与缓粘结材料没有粘结，如同无粘结预应力一样。待施工完成后，缓粘结材料开始硬化，使预应力筋与混凝土牢固的粘结在一起，达到同有粘结预应力完全相同的效果。缓粘结预应力混凝土结构的优点是：①预应力筋与混凝土粘结牢固，不会出现后张法中有粘结的预留孔道灌浆不密实现象和无粘结预应力混凝土结构中预应力筋和锚具的防腐和疲劳问题；②不需预留孔道，从而省去了成孔、灌浆所需的材料和设备，简化了施工工艺。总之，缓粘结材料保留了有粘结和无粘结的优点，而排除了两者的缺点。又如FRP（Fiber Reinforced Plastic，纤维增强塑料）材料，包括玻璃纤维增强塑料（GFRP）、碳纤维增强塑料（CFRP）、芳纶纤维增强塑料（AFRP），能解决钢筋混凝土结构中钢筋的锈蚀而造成的耐久性的问题。所以FRP筋预应力混凝土结构特别适合于钢筋易锈蚀的环境下使用。FRP筋的主要特点有：①抗拉强度高；②强度—容重

比约为钢材的 5 倍；③抗腐蚀性能好；④非导电、非磁性和电磁波透过性材料；⑤容重较小，约为钢材的 25%；⑥热膨胀系数与混凝土相近；⑦弹性模量较低，约为钢材的 25%~75%；⑧抗剪强度和抗压强度很低，通常不超过其抗拉强度的 10%；⑨CFRP 和 AFRP 具有良好的抗疲劳性能；⑩成本较高，生产制作工艺较复杂。

第二节 预应力结构的概念

虽然预应力混凝土在 20 世纪 20 年代才进入实用阶段，但是，预应力的基本原理在古代就已经被祖先应用了。当时的藤箍或铁箍木桶就是一个很好的例子，铁箍或藤箍给松散の木桶楔块施加一定的压力，使其形成木桶能够承受足够的侧向水压力，这就是早先的预应力原理。

又如自行车车轮的辐条，就是利用预先收紧的拉应力来抵消以后承受的压应力，而钢圈则由于承受收紧辐条的拉力而受压。同样，带拉索的高耸桅杆，拉索也是利用预先施加的拉应力来抵消使用时出现的压应力，桅杆则由于承受拉索的拉力而受压。

上述各例表明应用预应力的原理和技术，既可以用预压应力来提高结构的抗拉能力，又可以用预拉应力来提高结构的抗压能力。因此，只要善于运用，就能获得改善结构性能和提高结构强度的效果。

混凝土是一种抗压强度高而抗拉强度低的脆性材料，它的抗拉强度比抗压强度要低得多。因此，素混凝土用途不广，只适用于抗压而不适用于抗拉、抗弯的结构或构件。但如果对混凝土构件的受拉部分预先施加压应力，用预压应力来抵消外荷载作用下所产生的拉应力，就可以克服混凝土抗拉强度过低的缺点。显然，这种拉、压强度相差悬殊的混凝土，是适合用预应力加强的一种理想材料。

对采用钢材作预应力筋的预应力混凝土，T. Y. Lin（林同炎）教授用三种不同的概念来理解和分析它的性能。

一、第一种概念——预应力是为了把混凝土变成弹性材料

预加应力的目的是为了改变混凝土的性能，变脆性材料为弹性材料。预应力筋的作用不是配筋，而是施加预压应力以改变混凝土性能的一种手段，即把抗压强度高、抗拉强度低的脆性材料变为弹性材料。如果预压应力超过外部荷载产生的拉应力，则混凝土就不承受拉应力，当然也就不会开裂。这正是全预应力混凝土结构的情形。

作为均匀的弹性材料，可以应用材料力学的理论公式来计算混凝土的应力。在预应力混凝土梁中，截面受两组力的作用，一组为内部预应力，另一组为外部荷载（包括自重）。这两种力引起的应力、应变和挠度（反拱）都可以分开考虑，并在需要时可以叠加。

图 1-1 为偏心预应力混凝土截面的应力分布。在预加力 P 的作用下，混凝土截面的应力为

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe_p y}{I} \quad (1-1)$$

在外荷载作用下，截面的应力为

$$\sigma = \pm \frac{My}{I} \quad (1-2)$$

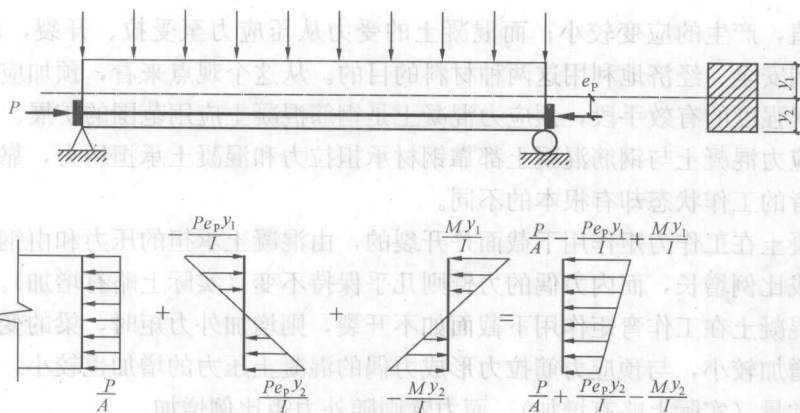


图 1-1 偏心预应力混凝土截面的应力分布

叠加预加力 P 和外荷载产生的应力，为两者共同作用所产生的应力，即

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Pe_p y}{I} \pm \frac{My}{I} \quad (1-3)$$

式中 A ——梁的横截面面积；

I ——梁的横截面惯性矩；

e_p ——预应力筋的偏心距；

M ——外荷载产生的弯矩。

式 (1-1) ~ 式 (1-3) 中出现正号“+”和负号“-”合并在一起的符号表达形式，是预应力混凝土梁弹性分析为了简化公式而采用的一种习惯写法。完整的写法，简支梁截面受压区应力和受拉区应力的计算公式应该分成两个。例如，当用式 (1-3) 计算截面上边缘的应力 σ_1 和下边缘的应力 σ_2 时，计算式分别为

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} - \frac{Pe_p y_1}{I} + \frac{My_1}{I} \quad (1-4)$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} + \frac{Pe_p y_2}{I} - \frac{My_2}{I} \quad (1-5)$$

应力 σ 正值表示压应力，负值表示拉应力。

二、第二种概念——预应力是为了使高强钢材和混凝土能共同工作

这个概念把预应力混凝土看作由高强钢材和混凝土两种材料组成的一种特殊的钢筋混凝土。如同普通钢筋混凝土一样，预应力混凝土梁也是由钢材承担拉力 P 、混凝土承担压力 C ，由拉力和压力组成的内力偶以抵抗外力矩（见图 1-2）。只是在预应力混凝土中，由于采用了高强钢材，而高强钢材的弹性模量与普通钢材的弹性模量基本相同，要充分利用它的强度必然会伴随着较大的应变，如果也像普通钢筋那样简单地浇筑在混凝土内，利用高强度钢材的强度势必会导致混凝土严重开裂，梁体出现不能容许的宽裂缝和大挠度。因此，需要将预应力钢材预先进行张拉并加以锚固，使钢材与混凝土产生预期的拉应力和压应力。这样，在外荷载作用下，钢材的应力由预应力增加到

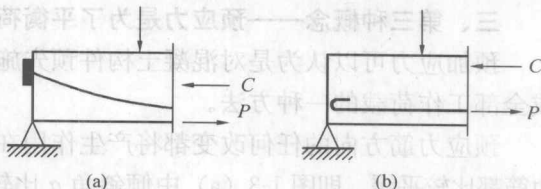


图 1-2 梁的内抵抗力偶

(a) 预应力混凝土梁 (b) 普通混凝土梁

其强度设计值,产生的应变较小;而混凝土的受力从压应力至受拉、开裂,许可的应变较大,从而达到安全、经济地利用这两种材料的目的。从这个观点来看,预加应力是一种充分利用高强钢材强度的有效手段,预应力混凝土是钢筋混凝土应用范围的扩展。

虽然预应力混凝土与钢筋混凝土都靠钢材承担拉力和混凝土承担压力,靠内力偶抵抗外力矩,但两者的工作状态却有根本的不同。

钢筋混凝土在工作力矩作用下截面是开裂的,由混凝土承担的压力和由钢筋承担的拉力都随外力矩成比例增长,而内力偶的力臂则几乎保持不变(实际上略有增加)。

预应力混凝土在工作弯矩作用下截面如不开裂,则增加外力矩时,梁的变形很小,预应力筋的拉力增加较小,与预应力筋拉力形成力偶的混凝土压力的增加也较小,可认为拉力和压力保持为常量(实际上略有增加),而力臂则随外力矩比例增加。

现在来阐明用内力偶计算截面应力的方法。图 1-2 为一根偏心预应力的简支梁的内力图,在预加力 P 的单独作用下,梁截面混凝土受有压力 C ,截面弯矩 $M=0$ 时,即 P 和 C 的合力偶为零, P 和 C 等值、共线、反向,力臂为零。截面作用弯矩 M 时,截面内的拉力 P 、压力 C 都保持不变, P 的作用点也是已知的,因此根据平衡条件可得

$$Ca = Pa = M \quad (1-6)$$

内力臂为

$$a = \frac{M}{C} = \frac{M}{P} \quad (1-7)$$

求得混凝土压力 C 作用点与预加力作用点之间的距离 a 后,即可得到 C 离开截面形心的距离 $(a - e_p)$ 。已知混凝土压应力合力 C 的大小和位置,由材料力学可得应力 σ 为

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{P(a - e_p)y}{I} \quad (1-8)$$

从形式上看,按第二种概念式(1-8)和按第一种概念式(1-3)得出的计算截面应力公式有很大的差别,其实只要用 $a=M/P$ 代入式(1-8)即可导出式(1-3)。因此,这两种概念求得的结果是完全一样的。

当然,随着弯矩的增加,预应力梁也会开裂,开裂后的预应力梁与普通混凝土梁相近,由混凝土承担的压力、由预应力筋钢筋和普通钢筋承担的拉力都随弯矩成比例增长,而内力偶的力臂则几乎保持不变(实际上略有增加)。从这一观点看,预应力只是一种充分利用高强钢材的有效手段,所以预应力混凝土又可看成是钢筋混凝土应用的扩展。这一概念清晰地告诉我们:预应力混凝土也不能超越材料本身强度的能力。

三、第三种概念——预应力是为了平衡荷载

预加应力可以认为是对混凝土构件预先施加与使用荷载方向相反的荷载,用以抵消部分或全部工作荷载的一种方法。

预应力筋方向的任何改变都将产生作用在混凝土上的横向力,如图 1-3 所示。通常预应力筋都比较平缓,即图 1-3(a)中倾斜角 α 比较小,可以近似的认为 $\sin\alpha \approx \tan\alpha = y'$, $\cos\alpha \approx 1$,即认为预应力筋的倾角不影响 x 方向的平衡。由 y 方向的平衡方程可得

图 1-3(a) 折角预应力筋的集中力

$$F = (y'_{CB} - y'_{BA})P \quad (1-9)$$

图 1-3 (b) 曲线预应力筋

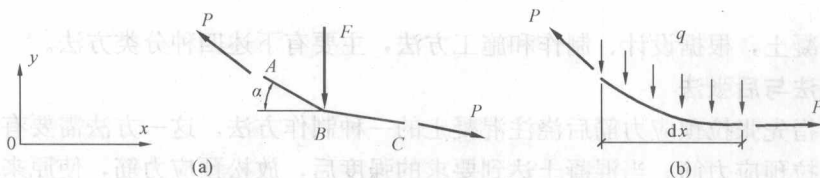


图 1-3 梁中预应力筋的受力

(a) 折角预应力筋; (b) 曲线预应力筋

$$qdx = [y'(x+dx) - y'(x)]P$$

$$q = y''P$$

以图 1-4 抛物线预应力筋简支梁为例, 抛物线的方程为

$$y = \frac{4e}{l^2}x^2 - \frac{4e}{l}x$$

预应力筋对梁的作用力为

$$q = y''P = \frac{8e}{l^2}P \quad (1-10)$$

式中 l ——梁的跨度;

e ——抛物线筋的垂度。

如果外荷载恰好被预应力筋对梁的作用力所平衡, 也称为等效荷载, 亦即外荷载对梁各截面产生的力矩均被等效荷载所产生的力矩抵消。此时, 梁如同轴心受压构件一样, 只承受一个均匀压应力 P/A , 而不弯曲。这样, 梁就既不发生挠曲, 又不产生反拱。如果外荷载超过预应力筋所产生的等效荷载, 则可用荷载差值来计算梁截面增加的应力。

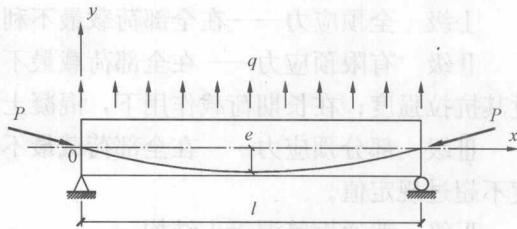


图 1-4 预应力筋对梁的作用力

荷载平衡法是美籍华人林同炎教授首先提出的。这个方法概念清晰, 计算简单。荷载平衡法主要是帮助设计人员选择合理的预应力筋线型和顶应力的尺寸, 以减少使用条件下的挠度。荷载平衡法对连续梁、平板、框架等较复杂结构的设计非常有用。

对于同一个预应力混凝土有三个不同的概念, 它们之间并没有相互的矛盾, 它们仅仅是从不同的角度来解释预应力混凝土的原理。预应力是为了把混凝土变成弹性材料的概念, 可看成是全预应力混凝土弹性分析的依据; 预应力是为了使高强钢材和混凝土能共同工作的概念则可看成是强度分析, 它指出预应力混凝土也不能超越其材料自身强度的界限; 预应力是为了平衡荷载的概念则为复杂的预应力混凝土超静定梁的设计与分析提供了简捷的方法。这三种不同的概念恰恰为预应力混凝土结构的弹性设计、塑性设计以及平衡设计提供了理论依据。

第三节 预应力混凝土的分类

预应力混凝土,根据设计、制作和施工方法,主要有下述四种分类方法。

一、先张法与后张法

先张法是指先张拉预应力筋后浇注混凝土的一种制作方法。这一方法需要有生产台座以便临时锚固张拉预应力筋。当混凝土达到要求的强度后,放松预应力筋,使原来由台座支承的预加力通过预应力筋与混凝土之间的粘结传递给构件。先张法适用于固定性的预制工厂。后张法指先浇灌混凝土,等达到规定强度后再张拉预应力筋的制作方法。预应力筋可以放在构件的预留孔道内,也可以放在构件的混凝土外面,即所谓的体外预应力。预应力筋张拉到所要求的应力数值时随即进行锚固。预加力通过锚头传给构件混凝土。

二、全预应力与部分预应力

钢筋混凝土与预应力混凝土在很长的时期内都是被划分为两个系列的构件,只是在部分预应力混凝土出现之后,人们逐渐将预应力混凝土与普通钢筋混凝土之间的界限打破,划分为统一的加筋混凝土系列。目前,国际上与我国对整个加筋混凝土系列按照受力性能及变形情况分为若干个等级,但两者稍有差别。国内、外在对加筋混凝土分类的同时又对预应力混凝土构件,按照其施加预应力的程度或预应力筋的含量与非预应力钢筋的含量之比,提出了预应力度的概念。

(一) 国外对加筋混凝土的分类

1970年国际预应力协会(FIP)、欧洲混凝土委员会(CEB)根据预应力度的大小,建议将加筋混凝土分为四个等级:

I级 全预应力——在全部荷载最不利组合作用下,混凝土不出现拉应力。

II级 有限预应力——在全部荷载最不利组合作用下,混凝土允许出现拉应力,但不超过其抗拉强度;在长期荷载作用下,混凝土不出现拉应力。

III级 部分预应力——在全部荷载最不利组合作用下,混凝土允许出现裂缝,但裂缝宽度不超过规定值。

IV级 普通钢筋混凝土结构。

这种分类是以全预应力混凝土与普通钢筋混凝土为两个边界,设计者可以根据对结构功能的要求和所处的环境条件,合理选用预应力度,以求得最优结构设计方案。这种等级的划分不能认为是质量等级的划分。预应力混凝土结构质量的优劣主要取决于它的使用性能、强度和耐久性等,而不取决于预应力度的高低。

(二) 我国对加筋混凝土的分类

中国土木工程学会《部分预应力混凝土结构设计建议》按照预应力度分为全预应力、部分预应力和钢筋混凝土三类。其中部分预应力包括国际分类法的II级有限预应力与III级的部分预应力。因此,部分预应力是指介于全预应力和钢筋混凝土结构为两个边界的中间广阔领域的预应力混凝土结构。部分预应力混凝土又分为A类构件与B类构件,A类构件指的是在正常使用极限状态构件的混凝土的正截面拉应力不超过规定的限值;B类构件则是混凝土的正截面拉应力允许超过规定的限值,但当出现裂缝时,其裂缝宽度不超过允许的限值。

预应力混凝土是由普通钢筋混凝土结构发展而来的。早期的预加力混凝土一般都指的是全预应力混凝土, 英文称为“Preshessed Concrete”, 与普通钢筋混凝土“Reinforced Concrete”含义不同。随着预应力结构的发展, 人们发现全预应力混凝土并非是完美的, 相反, 在某些环境与条件下, 当可变荷载占总荷载的比例较大时, 全预应力混凝土更表现出其不足之处, 如构件长期处于高压应力状态、反拱度大等缺点。为克服这一缺点, 需要减少预应力筋的面积, 增加非预应力的普通钢筋面积, 这样就拓展出了部分预应力混凝土结构。现在, 部分预应力的概念已经被人们普遍接受, 并得到了广泛的应用。

钢筋混凝土发展到预应力混凝土, 使得高强钢材与高强混凝土得到了协调使用, 改善了混凝土结构的刚度与抗裂性能, 并很大程度地解决了大跨度结构中应用混凝土构件的问题。部分预应力克服了全预应力混凝土长期处于高压应力状态、受徐变影响大、构件的反拱度大等缺点, 同时, 可适度解决构件端部的锚具过于集中的问题。部分预应力混凝土结构设置一定数量的非预应力普通钢筋, 还可提高构件的延性, 更有利于在地震区域的应用。因此, 部分预应力混凝土不是简单地替代全预应力混凝土, 而是其自身的完善与提高。部分预应力的概念使工程师对混凝土结构的设计有了更大的选择范围, 更符合结构的使用功能。但是部分预应力混凝土不可能完全替代全预应力混凝土, 它们分别适用于不同的环境与工作条件要求, 有些工作环境是必须要使用全预应力混凝土结构的, 比如严格要求不出现裂缝的容器结构。但对大部分允许出现拉应力甚至出现微细裂缝的结构而言, 部分预应力混凝土得到了更为广泛的应用, 它克服了全预应力混凝土的不足之处, 提高了结构的延性, 使结构设计既经济又合理。

不管对预应力混凝土如何进行分类, 它都与预应力混凝土构件被施加的预应力的程度有关。因此, 近年来, 国际上逐步统一用预应力度的分类方法。

(三) 预应力度的定义

预应力度的定义主要有两种, 分别为应力表示的预应力度和材料强度表示的预应力度。

(1) 应力表示的预应力度。对于受弯构件, 预应力度 λ 定义为

$$\lambda = \frac{M_0}{M} (\text{受弯构件}) \text{ 或 } \frac{N_0}{N} (\text{轴拉构件}) \quad (1-11)$$

$$\text{其中} \quad M_0 = \sigma_c W_0 \quad (1-12)$$

$$N_0 = \sigma_c A_0 \quad (1-13)$$

式中 M_0 ——消压弯矩, 即使构件控制截面受拉边缘应力抵消到零时的弯矩, 可按式 (1-12) 计算;

N_0 ——消压轴力, 即使构件截面应力抵消到零时的轴力, 可按式 (1-13) 计算;

σ_c ——受弯构件在预应力作用下受拉边缘的有效预压应力、轴拉构件在预应力作用下有效预压应力;

W_0 ——换算截面预压边缘的弹性抵抗矩;

A_0 ——换算截面积;

M ——使用荷载 (不包括预应力) 短期组合作用下控制截面的弯矩;

N ——使用荷载 (不包括预应力) 短期组合作用下的轴力。