

高等学校教材

预应力混凝土结构 设计基本原理

胡 狄 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校教材

**预应力混凝土结构
设计基本原理**

胡 狄 编著

中国铁道出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本书主要包括：预应力混凝土材料及预应力施工工艺，预应力筋有效应力计算，预应力混凝土构件承载能力计算，预应力混凝土受弯构件截面应力分析，预应力混凝土构件变形与裂缝计算，预应力混凝土受弯构件设计等。

本书可作为高等院校土木类各专业的教材，也可供土建技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

预应力混凝土结构设计基本原理/胡狄编著. —北京：
中国铁道出版社，2009.7
ISBN 978-7-113-10234-0

I. 预… II. 胡… III. 预应力混凝土结构—结构设计
IV. TU378.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 105417 号

书 名：预应力混凝土结构设计基本原理
作 者：胡 狄 编著

责任编辑：程东海 编辑部电话：010-51873135
封面设计：崔丽芳
责任校对：孙 玫
责任印制：陆 宁

出版发行：中国铁道出版社（北京市宣武区右安门西街8号 100054）
印 刷：北京市彩桥印刷有限责任公司
版 次：2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷
开 本：787mm×1092mm 1/16 印张：11.75 字数：292千
书 号：ISBN 978-7-113-10234-0/TU·1043
定 价：23.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书，如有缺页、倒页、脱页者，请与本社发行部调换。

联系电话：(市电) 010-51873170 (路电) 021-73170

网址：<http://www.tdpress.com>

前 言

目前我国没有关于预应力混凝土结构设计的统一规范,现行各技术标准、设计规范中预应力混凝土结构设计方法不尽相同,符号存在差异,部分内容计算原理、计算公式差别大。将预应力混凝土基本原理与各规范相应内容有机结合,编写《预应力混凝土结构设计基本原理》宽口径教材,培养学生具有宽阔视野、独立思考和创新能力知识体系,是编写本教材的出发点,亦是教材内容编排的指导思想。

围绕预应力混凝土知识体系,以建立基本概念、阐述基本原理和设计方法为主线,总结、剖析《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《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—2005)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)中相应内容为辅线,同时引入国内外相关研究成果,本教材介绍预应力钢筋和混凝土黏结的预应力混凝土设计基本原理,教材共七章,主要内容如下:

第一章简要介绍预应力混凝土基本概念、发展与应用,阐述预应力混凝土知识体系及学习方法。

第二章介绍预应力混凝土材料及其物理力学性能、预应力施加方法及施工工艺、预应力锚固体体系及锚具类型。

第三章介绍预应力筋有效应力计算方法,讨论张拉控制应力和各项预应力损失的确定或计算。

第四章介绍预应力混凝土构件承载能力计算,包括受弯构件正截面、斜截面承载能力计算和受拉、受压、受扭构件承载能力计算,以及预应力锚固区局部受压承载能力计算。

第五章介绍预应力混凝土受弯构件截面应力分析,包括构件工作全过程截面应力分析、未开裂截面应力计算、开裂弯矩计算和开裂截面的应力计算,并叙述预应力混凝土受弯构件抗裂性验算、疲劳应力计算和疲劳验算等内容。

第六章介绍预应力混凝土构件变形与裂缝的计算原理和计算方法以及裂缝控制方法。

第七章以预应力混凝土受弯构件为依托,结合预应力混凝土构件设计的基本要求和设计步骤,介绍预应力混凝土构件截面形式及截面设计、预应力效应分析及预应力筋设计等内容。

本教材是将预应力混凝土设计基本原理与多种设计规范结合、同步比较与学习的尝试,适于交通土建、桥梁、建筑结构等工程领域学科的教学和自学;不同工程学科可根据教学需要选取教材中相应内容进行课堂教学,其他内容则让学生自学以扩展知识视野、完善知识体系。

感谢中南大学土木建筑学院对本教材编写的支持。特别感谢土木工程学会预应力混凝土分会委员、中南大学余志武教授,在百忙中审阅了全书书稿并提出了许多宝贵意见。戴公连教授、盛兴旺教授十分关心本教材的编写,审阅了部分书稿,并提出了许多修改意见;方淑君副教授参与了例题编写和审校工作,卢钦先、汪来发、蔡东和袁文辉参与了图形绘制和例题核算工作,在此一并感谢。

本书在编写过程中参考了国内外诸多学者的专著、教材及有关文献的研究成果,谨致谢意。

由于编著者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,敬请使用者批评指正。意见请寄湖南省长沙市韶山南路 22 号中南大学土木建筑学院(邮编 410075, E-mail:hudee@yahoo.cn)。

编者

2009 年 6 月

第一章 绪 论	1
第一节 预应力混凝土的基本概念.....	1
第二节 预应力混凝土的发展与应用	7
第三节 预应力混凝土知识体系及学习方法	11
第二章 预应力混凝土材料及预应力施工工艺	13
第一节 预应力筋	13
第二节 混凝土	21
第三节 预应力施加方法及施工工艺	31
第四节 预应力锚固体系	33
第三章 预应力筋有效应力计算	39
第一节 预应力筋有效应力的概念	39
第二节 锚固瞬间预应力筋初始有效应力的计算	41
第三节 任意时刻预应力筋有效应力的计算	51
第四节 规范中关于预应力筋有效应力的计算	54
第四章 预应力混凝土构件承载能力计算	64
第一节 构件承载力计算一般表达式及基本假定	64
第二节 预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算	66
第三节 预应力混凝土受弯构件斜截面承载力计算	78
第四节 预应力混凝土受拉构件截面承载力计算	90
第五节 预应力混凝土偏心受压构件截面承载力计算	92
第六节 预应力混凝土受扭构件承载力计算	98
第七节 预应力锚固区局部受压承载力计算.....	105
第五章 预应力混凝土受弯构件截面应力分析	114
第一节 预应力混凝土受弯构件工作全过程截面应力分析	114
第二节 预应力混凝土受弯构件未开裂截面应力计算	116
第三节 预应力混凝土受弯构件开裂弯矩计算	124
第四节 预应力混凝土受弯构件开裂截面的应力计算	126
第五节 预应力混凝土受弯构件抗裂性验算	130

第六节	预应力混凝土受弯构件疲劳应力计算和疲劳验算	135
第七节	先张法构件预应力筋锚固区计算	138
第六章	预应力混凝土构件变形与裂缝计算	141
第一节	预应力混凝土受弯构件变形计算	141
第二节	预应力混凝土构件裂缝计算	153
第七章	预应力混凝土受弯构件设计	165
第一节	预应力混凝土构件设计基本要求和设计步骤	165
第二节	预应力混凝土构件耐久性设计	166
第三节	预应力混凝土构件截面形式及截面设计	166
第四节	预应力效应分析及预应力筋设计	169
参考文献		181

第一章 绪 论

第一节 预应力混凝土的基本概念

由于原材料丰富且易就地取材、施工简便、易浇筑成形、性能价格比高等优点,钢筋混凝土成为土木工程中应用最广泛的建筑材料之一。然而,钢筋混凝土自身存在的一些缺点使其应用范围受到很大限制。首先,混凝土的低抗拉强度导致钢筋混凝土受拉区在正常工作时通常无法避免开裂,这使钢筋混凝土不能用于储油罐、核反应容器等对裂缝控制要求很高的结构;其次,开裂后结构刚度降低、受拉区混凝土不能被充分利用,降低了钢筋混凝土结构的使用性能和经济性;第三,为保证结构的耐久性,必须根据工作环境来严格控制裂缝宽度,当将裂缝宽度控制在规范许可的容许值时,受拉区钢筋的应力一般只能达 150~250 MPa,即高强度钢材不适用于钢筋混凝土;第四,随着跨度增加,钢筋混凝土受弯构件只有通过增大截面尺寸和增加配筋量来满足裂缝宽度限值要求,结构自重占总荷载效应中的比例将快速增加,当此比例达一定程度时钢筋混凝土结构就丧失承受外荷载的能力,即钢筋混凝土不能适用于大跨度结构。钢筋混凝土的上述缺点源于混凝土的低抗拉强度,如果在结构使用前对受拉区混凝土进行预压、储备抗拉能力,即采用预应力混凝土,使预压应力能全部或大部分抵消荷载产生的拉应力,则可克服钢筋混凝土的上述缺点,改善结构的工作性能,拓宽混凝土结构的应用范围。

一、预应力混凝土的概念及其理解

预应力混凝土就是在使用前预先引入永久内应力以降低荷载应力或改善工作性能的配筋混凝土。引入的内应力称为预加应力,其性质根据欲抵消的荷载应力特征而确定,其分布与荷载应力的分布规律相似、方向相反。最常用的是在混凝土中预加压应力,当外荷载作用时,预压应力首先用来抵消荷载拉应力,只有当荷载拉应力值超过预压应力值后,混凝土结构才产生拉应力、甚至开裂,因此,预加应力可实现混凝土结构受拉区在正常使用时不开裂或延迟开裂的目的。

图 1-1 为轴心受拉混凝土构件截面应力分布示意图。外荷载作用下全截面混凝土受拉[图 1-1(a)],甚至可能开裂;为了使截面不出现拉应力,在构件受外荷载作用前预先在构件两端施加一对大小相等的轴向压力 N_p ,使预加力在截面上产生的压应力大于或等于外荷载产生的拉应力,这样,在预加力 N_p 和外荷载作用下截面上将不出现拉应力[图 1-1(c)]。这说明,为了使轴心受拉混凝土构件在正常使用时截面不出现拉应力(不开裂),所引入的预加力 N_p 产生的内应力必须与外荷载应力方向相反,内应力的大小必须大于或等于荷载应力。

可以采用多种方法建立预加应力,最常用的方法是在混凝土中埋设高强度钢材(预应力筋),张拉预应力筋并锚固(通过在预应力筋端部设置锚具或借助预应力筋端部附近的力筋与混凝土间的黏结力进行锚固),为平衡预应力筋的拉力,混凝土必然受到压力,从而使混凝土在使用前获得预压应力。对于采用高强度钢材的预应力混凝土,可以用三种不同的概念或从三个不同的角度来理解其原理。

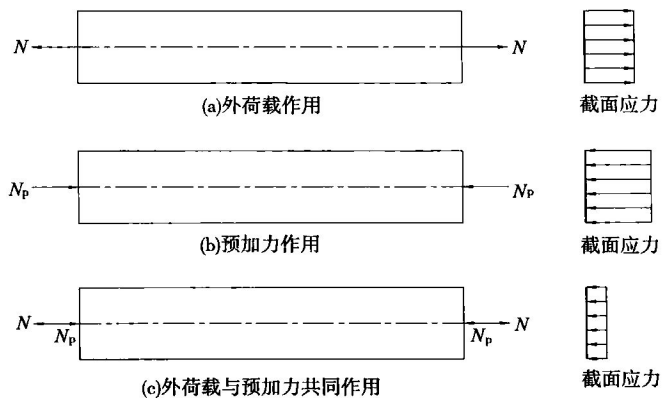


图 1-1 轴心受拉构件截面应力分布示意图

1. 第一种概念——预加应力使混凝土成为弹性材料

此概念将经过预压后的抗拉强度低的脆性材料——混凝土看成既能抗拉又能抗压的弹性材料。由此观点,混凝土被看作承受两个力系,即内部预应力和外部荷载。如果混凝土中的预压应力能够将外荷载产生的拉应力全部抵消,则在正常使用状态下混凝土将不会开裂,甚至不会出现拉应力。此时,混凝土在预加力和使用荷载作用下均可按弹性材料的计算公式进行应力、应变及变形分析,且叠加原理有效。

图 1-2 为配置弯曲预应力筋的简支梁跨中截面应力分布示意图。预应力筋受到张拉后在梁两端锚固,在跨中截面预应力筋的合力为 N_p , N_p 合力作用点至截面重心轴距离为 e_p , 则预加力 N_p 作用下跨中截面下缘混凝土正应力为

$$\sigma_{c,p} = \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p e_p y_1}{I_c} \quad (1-1)$$

由梁体自重等荷载弯矩 M 引起的跨中截面下缘混凝土正应力为

$$\sigma_{c,M} = -\frac{My_1}{I_c} \quad (1-2)$$

跨中截面下缘混凝土正应力最终为

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p e_p y_1}{I_c} - \frac{My_1}{I_c} \quad (1-3)$$

式中 A_c ——跨中混凝土截面面积;

I_c ——跨中混凝土截面抗弯惯性矩。

其他符号意义见图 1-2。

式(1-3)表明,只要预应力筋的布置(偏心距 e_p)及预加力 N_p 取值合理,则跨中混凝土截面不会出现拉应力,在预加力和外荷载作用下均可按弹性材料的公式进行计算,直接可采用叠加原理。

2. 第二种概念——预加应力使高强度钢材和混凝土协同工作并充分发挥两者的强度优势

此概念首先将预应力混凝土看成是高强度钢材和混凝土的组合,其中高强度钢材承受拉力、混凝土承受压力,两者形成力偶以抵抗外弯矩(图 1-3);其次,高强度钢材和混凝土必须在引入预加应力后才能有效组合。如果像钢筋混凝土一样将钢材和混凝土简单组合在一起,则

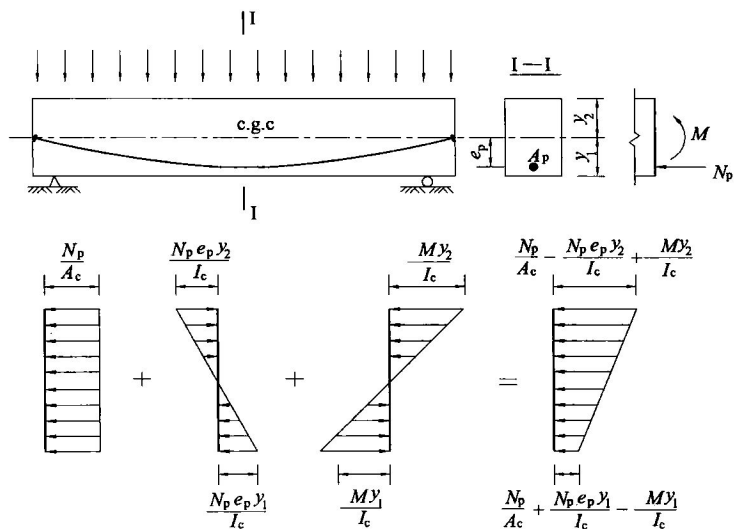


图 1-2 预应力混凝土简支梁跨中截面应力分布

在使用荷载作用下混凝土必然发生开裂,在限制裂缝宽度同时亦限制了拉区高强度钢材的变形,此时高强度钢材远不能发挥其强度,若采用高强混凝土则其压区强度亦不能充分发挥;如果在与混凝土黏结前将高强度钢材预先进行张拉并锚固,且在使用荷载作用下高强钢材进一步受拉,则其高抗拉强度能够充分发挥,而混凝土由于预压、储备了抗拉能力,极大地改变了工作性状,从而可实现两者的协调工作,且又能充分发挥两者的强度优势。这一概念同时亦表明,预应力混凝土不能超越其材料本身的强度能力。

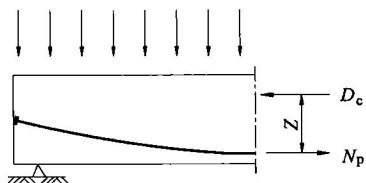


图 1-3 预应力混凝土梁内力偶

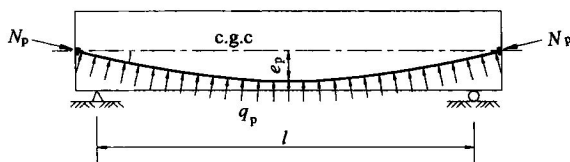


图 1-4 抛物线型配筋的预应力混凝土梁

3. 第三种概念——预加应力实现荷载平衡

这种概念由 T. Y. Lin 教授于 1963 年提出。当结构中引入的预加应力的效应与使用荷载效应方向相反时,预加应力将部分或全部抵消使用荷载产生的应力,则认为预加应力实现部分或全部荷载平衡。这种概念的实质是将施加预加应力视为施加预加力,当预加力效应抵消使用荷载效应时,相当于预加力平衡了使用荷载;特别地,当预加力与使用荷载性质相同、大小相同、方向相反时,则认为预加力完全平衡了使用荷载。例如对图 1-4 所示的简支梁,如果预应力筋配置适当,简支梁各截面使用荷载作用下产生的弯矩将被预应力筋产生的预弯矩完全抵消,那么,一个受弯构件将转换成一个轴心受压构件(预加力平衡了使用荷载弯矩的同时,却在构件中产生轴向压力,这说明预加力只能实现有条件的荷载平衡)。在图 1-4 中,抛物线形预应力筋对梁体的作用可以近似等效为作用于梁端的集中力 N_p 及方向向上的均布荷载 q_p ,即

$$q_p = -\frac{8N_p e_p}{l^2} \quad (1-4)$$

如果使用荷载为方向向下的均布荷载 q , 则只要使预应力筋产生的 q_p 与 q 绝对值相等, 梁体中混凝土就仅受轴向力 $N_p \cos\theta$ 作用, 即预加力平衡了使用荷载弯矩, 梁体不发生下挠亦不发生上拱; 如果 q_p 绝对值小于 q 绝对值, 预加力平衡了部分使用荷载弯矩, 可依据 q_p 、 q 差值进行结构分析。

上述三种概念从三个不同角度阐释了预应力混凝土的原理。第一种概念是预应力混凝土弹性分析的依据, 揭示预应力混凝土主要为弹性工作的性状; 第二种概念是预应力混凝土的强度理论, 表明预加应力可充分发挥高强钢材和高强混凝土强度, 但却不能超越材料自身强度的界限; 第三种概念将预加应力看成是改善使用荷载作用下结构工作性能的有效手段, 指出了预加应力效应和荷载效应之间的相互关系, 此概念为分析、设计复杂的预应力混凝土结构(如超静定结构)提供简捷的方法。

二、预应力混凝土的优缺点

与钢筋混凝土结构相比, 预应力混凝土结构具有如下优点:

1. 结构抗裂性好

通过对截面受拉区施加预压应力, 可部分或全部消除使用荷载作用下的截面拉应力, 使结构在正常使用阶段不开裂或延缓裂缝出现, 提高了结构抗裂性能。

2. 结构刚度大、变形小

预压应力有效地限制裂缝开展, 使截面混凝土整体或大部分参与抗弯, 从而提高了截面抗弯刚度, 降低使用荷载作用下的变形; 预加力可以部分或全部平衡外荷载, 极大地降低结构变形, 改善结构使用性能。

3. 结构自重轻, 跨越能力大

由于采用高强材料, 预应力混凝土结构可以减少用钢量、减少截面尺寸, 从而减轻自重。降低结构自重效应在整个荷载效应中的比值, 有利于提升结构跨越能力。

4. 抗剪承载力高

曲线布置的预应力筋提供与剪力方向相反的竖向力, 可有效地提高截面抗剪承载力; 预压应力抵消部分使用荷载产生的拉应力, 降低主拉应力值, 亦提高了抗剪承载力。另一方面, 高抗剪承载力为减小预应力混凝土梁的腹板厚度提供条件, 可进一步减轻结构自重。

5. 耐久性好

对于不允许出现裂缝的预应力混凝土结构, 钢筋受到良好保护, 避免外界空气、水分进入而发生钢筋锈蚀; 对于允许出现裂缝的预应力混凝土结构, 当作用于结构上的活载部分或全部卸载时, 预应力使裂缝闭合、结构变形恢复, 降低了钢筋发生锈蚀的几率或锈蚀程度, 提高了结构的耐久性。

6. 抗疲劳性能强

结构服役期间预应力筋始终保持很高的拉应力、混凝土全截面或基本全截面工作, 使用荷载的加载和卸载引起的应力相对变化较小, 疲劳应力幅值较低, 结构抗疲劳性能强。这对于以承受动力荷载为主的桥梁或吊车梁结构是非常有利的。

7. 高强材料得到充分利用

在钢筋混凝土结构中, 受拉区裂缝宽度和构件挠度的限制使高强钢材抗拉强度和高强混

混凝土抗压强度不能被充分利用；而在预应力混凝土结构中，通过预先张拉高强钢材，可以使高强钢材在结构破坏时达到其抗拉屈服强度或名义屈服强度、混凝土达到抗压极限强度，充分发挥材料高强度。

8. 经济性好

采用高强材料并充分发挥其强度，对适合采用预应力技术的混凝土结构而言，预应力混凝土结构比钢筋混凝土结构节约混凝土 20%~40%、纵向钢材用量 30%~50%，而与钢结构相比可节约一半以上造价。预应力混凝土用于大跨度、大开间结构时，开阔空间的使用亦带来良好的经济价值和社会效益。

预应力混凝土结构也存在一些缺点，如设计计算比较复杂、施工技术要求高、需要专门的预应力张拉设备、所用材料单价较高等，且针对预应力结构的分析理论和研究尚待进一步发展和完善。

三、预应力度

预应力度是指预应力混凝土结构中预应力大小的程度，是进行预应力混凝土结构设计和研究的重要指标。目前国内外对预应力度的表示方式有多种，最常用的是用内力比（弯矩比、轴力比）、应力比、承载能力比的形式表示。

1. 用内力比和应力比表示预应力度

对于受弯构件，预应力度可以用弯矩比形式表示，即

$$\lambda = \frac{M_0}{M} \quad (1-5)$$

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；

M ——使用荷载作用下构件控制截面的弯矩。

我国《部分预应力混凝土结构设计建议》(1985)（本文后面简称为《PPC 设计建议》）和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)（本文后面简称为《公路桥涵设计规范》）预应力度采用式(1-5)的形式。

对于轴心受拉构件，预应力度可以用轴力比形式表示，即

$$\lambda = \frac{N_0}{N} \quad (1-6)$$

式中 N_0 ——消压轴向力，即使构件截面预压应力被抵消至零时的轴向拉力；

N ——使用荷载作用下构件控制截面的轴向拉力。

对于受弯构件、轴心受拉构件，亦可以用应力比形式表示预应力度，即

$$\lambda = \frac{\sigma_{pc}}{\sigma_c} \quad (1-7)$$

式中 σ_{pc} ——由预加力（扣除全部预应力损失）引起的构件控制截面受拉边缘的预压应力；

σ_c ——由使用荷载（不包括预加力）引起的构件控制截面受拉边缘的应力。

《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—2005)（本文后面简称为《铁路桥涵设计规范》）预应力度采用式(1-7)的形式。

用式(1-5)~式(1-7)表示预应力度的优点是根据预应力度大小就可以判断构件截面是否出现拉应力。当 $\lambda \geq 1$ ，构件截面不出现拉应力；当 $\lambda < 1$ ，构件截面出现拉应力，甚至出现裂缝。

2. 用承载能力比表示预应力度

称预应力筋提供的极限弯矩 $[M_u]_p$ 与预应力筋和普通钢筋提供的极限弯矩 $[M_u]_{p+s}$ 之比

为部分预应力比率,用部分预应力比率表示的预应力度计算式为

$$\lambda = \frac{[M_u]_p}{[M_u]_{p+s}} \quad (1-8)$$

这是美国的内曼(A. E. Naaman)教授首先提出的。如果用材料强度表示,上式可写成

$$\lambda = \frac{A_p f_{py} Z_p}{A_p f_{py} Z_p + A_s f_y Z_s} \quad (1-9)$$

式中 A_p 、 A_s ——预应力筋和普通钢筋的截面积;

f_{py} 、 f_y ——预应力筋和普通钢筋的抗拉强度设计值;

Z_p 、 Z_s ——预应力筋合力和普通钢筋合力点至受压合力点的距离。

若取 $Z_p \approx Z_s$, 式(1-9)成为

$$\lambda = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_y} \quad (1-10)$$

对于没有明显屈服台阶的高强钢筋,上式写成

$$\lambda = \frac{A_p f_{0.2}}{A_p f_{0.2} + A_s f_y} \quad (1-11)$$

式中 $f_{0.2}$ ——预应力筋的名义屈服强度,取对应于 0.2% 残余塑性应变的应力值。

式(1-11)右端项又称为预应力指标,由瑞士舒尔曼(Thürlimann)提出。

预应力度使加筋混凝土成为一个连续谱。按预应力度大小不同,我国《PPC 设计建议》和《公路桥涵设计规范》将加筋混凝土结构分为三类:

第Ⅰ类:全预应力混凝土结构, $\lambda \geq 1$;

第Ⅱ类:部分预应力混凝土结构, $0 < \lambda < 1$;

第Ⅲ类:钢筋混凝土结构, $\lambda = 0$ 。

四、预应力混凝土的分类

根据预应力施加工艺、预应力度、裂缝控制、结构体系及预应力筋布置位置特点等,可将预应力混凝土分为如下几种类型。

1. 按预应力施加工艺分类

按预应力施加工艺可分为先张预应力混凝土和后张预应力混凝土两种。

先张法是指在浇注混凝土前进行张拉预应力筋的施工方法。在两个永久或临时台座间张拉预应力筋并临时锚固,然后浇注混凝土,待混凝土凝结硬化到一定强度,截断台座处构件两端的预应力筋,预应力筋回缩,通过其与混凝土间的黏结握裹力,实现对混凝土施加预应力。先张法制作先张预应力混凝土。

后张法是指在浇注混凝土后进行张拉预应力筋的施工方法。在浇注混凝土构件、养护至一定强度后,在混凝土构件内预埋的孔道中穿入预应力筋,张拉预应力筋(以混凝土构件本身为支承张拉千斤顶),然后在张拉端用特制锚具将预应力筋锚固,实现对混凝土施加预应力。后张法制作后张预应力混凝土。

2. 按预应力度分类

根据预应力大小程度可分为全预应力混凝土($\lambda \geq 1$)和部分预应力混凝土($0 < \lambda < 1$)两类。

我国《公路桥涵设计规范》又将部分预应力混凝土结构分为 A 类和 B 类。A 类指在正常使用极限状态下,构件预压区的混凝土正截面拉应力不超过规定的容许值;B 类指在正常使用

极限状态下,构件预压区的混凝土正截面的拉应力允许超过规定的限值,但当裂缝出现时,其宽度不超过容许值。

3. 按裂缝控制等级分类

我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)按裂缝控制要求,将预应力混凝土构件分为三类:

第一类:严格要求不出现裂缝的构件,按荷载效应的标准组合进行计算时,构件受拉边缘混凝土不产生拉应力;

第二类:一般要求不出现裂缝的构件,按荷载效应的准永久组合进行计算时,构件受拉边缘混凝土不产生拉应力,按荷载效应的标准组合进行计算时,构件受拉边缘混凝土允许出现拉应力,但拉应力不超过规定允许值;

第三类:允许出现裂缝的构件,最大裂缝宽度计算值不超过允许值。

美国房屋建筑规范 ACI 318—05 对预应力混凝土的分类与上述分类相似,亦分为三类:

U类:不允许出现裂缝的构件;

C类:允许出现裂缝的构件;

T类:在不允许出现裂缝和允许出现裂缝状态之间的构件。

4. 按预应力筋位置分类

按预应力筋与混凝土位置的相互关系,可分为体内预应力混凝土和体外预应力混凝土。

预应力筋埋设于混凝土体内的称为体内预应力混凝土。按预应力筋是否与周围混凝土黏结,又可分为有黏结预应力混凝土和无黏结预应力混凝土。先张预应力混凝土和管道压浆的后张预应力混凝土均为有黏结体内预应力混凝土,钢筋与混凝土变形协调;无黏结预应力混凝土中预应力筋伸缩自由、不与周围混凝土黏结,钢筋全长涂有防锈油脂,并外套防老化的塑料管保护。无黏结预应力混凝土通常采用后张法施工、制作。

体外预应力混凝土的预应力筋布置于混凝土体外。预应力筋可以布置于构件截面外,亦可以布置于构件截面内(如箱形梁的箱体内),仅在锚固区及转向块处与构件相连接。

另外,按预应力体系还可分为双预应力混凝土、预弯预应力混凝土等。双预应力混凝土是指在荷载作用下的受拉区布置受拉预应力筋、受压区布置受压预应力筋,以提高抗弯能力,其截面尺寸较小、自重较轻。按下列过程制作的称为预弯预应力混凝土:对制成预弯的劲性钢梁施加荷载,使其上拱度或挠度接近为零(钢梁产生预弯矩),然后浇注混凝土,待混凝土与钢梁结合为整体并达到设计强度后卸载,利用钢梁反弹实现对混凝土施加预应力。

第二节 预应力混凝土的发展与应用

在使用之前于结构中施加可以抵消使用荷载效应的预加力,这种概念很早就为人们所利用。如盛水的木桶,用藤、麻绳或铁丝箍紧木桶周边,使沿圆周拼接的木板承受环向挤压力,从而能够承受水压引起的环向拉力[图 1-5(a)];由薄铁条或钢条作成的细而长的锯片,在纵向力作用下易失稳,当在与其平行的位置添加绳子并张紧,使锯片在使用前承受很大的拉应力,以抵抗锯木时产生的压应力,锯子就成为裁木的重要工具[图 1-5(b)]。在我们的日常生活中亦可处处遇到运用预应力原理的例子,如同时搬运多本竖向的书本时,搬运前需预先压紧书本,使其相互间受到的压力产生的摩擦力足以克服书本的重力[图 1-5(c)]。

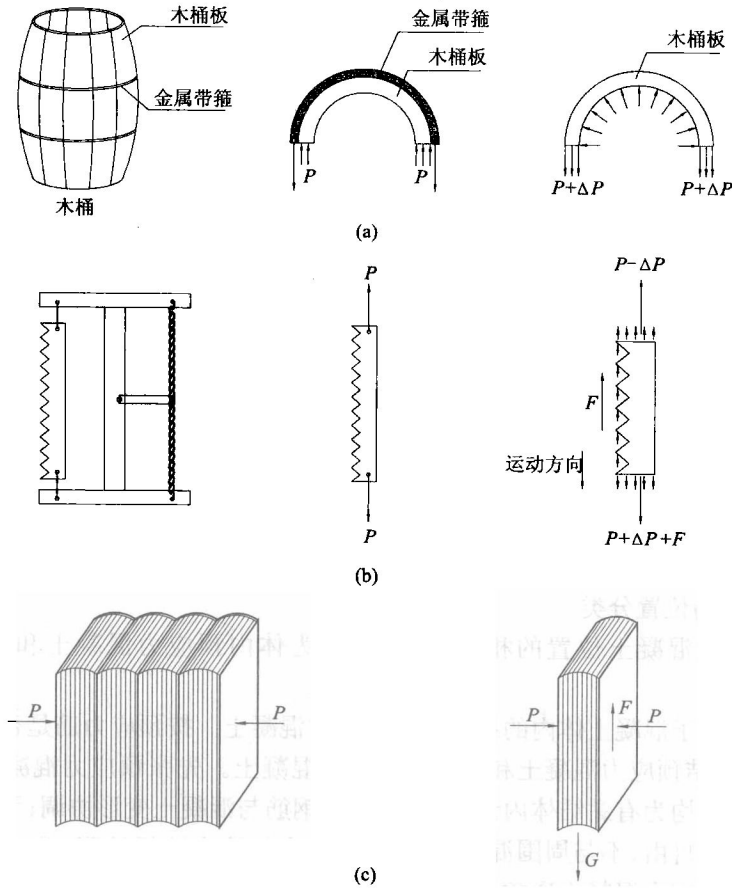


图 1-5 预应力原理应用示意图

1886年,美国工程师 P. H. Jackson 申请了在混凝土拱内张紧钢拉杆以作楼板的专利; 1888年前后,德国的 C. E. W. Doehring 获得了在楼板受荷载前配置已经施加拉力的钢筋的专利。但这些最初的应用并没有获得成功,其原因是所采用的低强度预应力筋的预拉应力几乎被混凝土收缩、徐变引起的应力损失所抵消。1919年德国 B. K. Wettstein 用绷紧的琴弦制成预应力薄板,是第一个用高强度钢材制作预应力混凝土的人,但他本人并不明确采用高强度钢材是预应力混凝土成功的关键,直到 1923年美国 R. H. Dill 才真正认识到预应力混凝土必须采用高强度钢材。

1928年,法国工程师 E. Freyssinet 开始将高强度钢丝应用于预应力混凝土,研究了预应力混凝土的收缩、徐变性能,申请了用大于 400 MPa 应力的钢筋施加预应力的专利,为预应力混凝土进入实用阶段作出了巨大贡献。1938年德国 E. Hoyer 成功应用预应力钢筋和混凝土的黏结应力来建立预应力制作先张构件,1939年 E. Freyssinet 发明了用于端部锚固高强钢丝的锥塞式锚具并设计了双作用千斤顶,1940年比利时 G. Magnel 研制出了一次张拉两根钢丝并在每端用一个钢楔锚固,这些预应力钢材锚固体系的发明和实际运用为预应力混凝土的广泛应用提供了基础。

第二次世界大战后,欧洲为了在战后钢材紧缺的条件下尽快恢复和重建基础设施,大量运

用预应力技术,预应力混凝土得到了很快的发展。随着地伟达(Dywidag)公司开发了粗钢筋螺栓锚固体系、瑞士工程师发明了 BBRV 锚头锚固体系、洛辛格(Losinger)公司研制了 VSL 钢绞线群锚体系,以及预应力混凝土理论的不提高,预应力混凝土在世界范围内得到了广泛的应用。在用预应力混凝土建造的结构中,目前国外已经建成的最高建筑为加拿大多伦多国家电视塔(高 553.34 m,1976 年),最大跨度连续梁桥为瑞士莫塞尔桥(跨径 192 m,1974 年),最大跨度连续刚构桥为挪威斯多而玛桥(跨径 301 m,1998 年),最大跨度简支梁桥为奥地利阿尔姆桥(跨径 76 m,1977 年),规模最大的建筑为法国巴黎新凯旋门(110.9 m×106.9 m×112 m,1989 年)。现在,预应力混凝土已经大量应用于桥梁、建筑结构、压力储罐、水工结构、地下结构、核反应容器、船体结构、海洋工作平台、大坝等领域,极大地推动了各种结构形式的发展。

我国预应力混凝土的开发、应用始于 20 世纪 50 年代。1954 年中国铁道科学研究院研制成第一根预应力混凝土轨枕,1955 年铁道科学研究院、丰台桥梁厂和原铁道部专业设计院联合研制成功第一孔 12 m 后张预应力混凝土铁路桥梁,在此基础上设计了我国第一座预应力混凝土梁桥——跨度为 23.9 m 的新沂河道 T 梁桥(位于陇海铁路线上);1956 年公路部门在芦沟桥前哑吧河上试建了第一座公路预应力混凝土梁桥——20 m 装配式后张预应力混凝土简支 T 梁桥;1955 年原建筑工程部建筑科学技术研究所初步完成采用高强钢丝和冷拉螺纹钢配筋的预应力先张工艺研究,接着完成了 18 m 预应力屋面大梁和后张拼块式屋面大梁的研制。此后预应力混凝土在我国得到了蓬勃发展和广泛应用,已经大量应用于大、中、小跨度的各种结构中。在我国采用预应力混凝土建造的结构中,目前最高建筑为上海东方明珠电视塔(高 468 m,1994 年),最大跨度连续梁桥为南京长江二桥北汊桥(跨径 165 m,2001 年),最大跨度连续刚构桥为虎门大桥辅航道桥(跨径 270 m,1997 年),最大跨度简支梁桥为东海大桥(跨度 70 m,2005 年)。

随着社会的发展和科学技术的不断创新,人类征服自然界障碍的能力快速提升,同时对居住和办公环境的要求亦越来越高,预应力技术在其中正发挥着越来越重要的作用。总结近年来工程实践和研究成果,预应力混凝土呈现出下面一些发展趋势。

1. 混凝土材料

预应力混凝土中采用高强度混凝土材料,可减少构件的截面尺寸、降低结构自重、节约高强钢材,同时减轻结构质量对结构抗震有利,且在建筑结构中可增加使用面积、利于总体布局设计,即提高了经济效益又改善了结构工作性能。实验室已能制作 800 MPa 以上混凝土,工程中主要采用 40~80 MPa 混凝土。目前西方发达国家的结构用混凝土普遍达到 50~60 MPa,技术先进的搅拌站可生产 100~120 MPa 商用混凝土。我国桥梁工程、建筑工程预应力混凝土结构中已大量应用 40~50 MPa 混凝土,50~60 MPa 混凝土的应用也已得到较大推广,80~100 MPa 混凝土仅在少量工程中得到应用。可以预计,在不久的将来,100~200 MPa 混凝土将会在预应力结构中得到大量应用。

20 世纪 80 年代以来,世界各地为混凝土的劣化和失效所困扰,大量调查和研究发现,将抗压强度作为衡量混凝土各种性能指标的观点是片面的,必须考虑混凝土的耐久性。采用高强高性能混凝土建造高抗渗性、高耐腐蚀性、高抗冻性、高抗碳化性、高耐磨性的预应力混凝土结构,将不仅拓宽预应力混凝土的应用范围,且可延长结构使用寿命,降低维护、维修费用,节约能源。20 世纪 80 年代末期,以耐久性作为主要设计指标的高性能混凝土概念被正式提出。1993 年,法国 BOUYGUES 公司 P. Richard 工程师研制成功超高性能结构混凝土,是材料堆

积最密实理论与纤维增强理论相结合的先进水泥基复合无机材料。超高性能结构混凝土,又称为超高性能结构材料活性粉末混凝土 RPC(Reactive Powder Concrete),或超高性能纤维增强混凝土 UHPFRC(Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete),具有高强度、高耐久性、高韧性、高环保性等优点,可代替部分钢结构。RPC 按抗压强度可分为 200 MPa、500 MPa、800 MPa 级,试验研究表明其使用寿命可达 50 年。1997 年加拿大采用 200 MPa 级 RPC 在魁北克省 Sherbroke 建造了世界上第一座体外预应力 RPC 桥。超高性能、超高强度结构混凝土由于其优越的力学性能和工作性能,具有广阔的应用前景。

轻质、高强混凝土是建造更大跨度预应力混凝土结构的重要推动力,目前 $14\sim 19\text{ kN/m}^3$ 轻混凝土已经在结构工程中应用。开发和利用轻质、高强、高性能混凝土,追求更高的强度和容重比混凝土材料是混凝土技术发展的另一重要目标。

2. 预应力筋

目前世界上预应力筋以高强钢材为主体,标准强度在 2 000 MPa 以内。我国近年来预应力筋大量采用标准强度为 1 570 MPa、1 770 MPa、1 860 MPa 的 $\phi^s 5\text{ mm}$ 、 $\phi^s 7\text{ mm}$ 高强钢丝和钢绞线(钢绞线常用规格为 $\phi^s 8.0\sim\phi^s 15.2$)及标准强度为 785 MPa、930 MPa 的 $\phi^{25}\text{ mm}$ 、 $\phi^{32}\text{ mm}$ 精轧螺纹钢。随着预应力混凝土结构体系向大跨、高耸发展,结构规模不断增大、荷载量级不断增加,为方便施工并考虑经济因素,需要发展大规格、高强度预应力筋和大吨位张拉设备和锚固体系。目前,国内已研制开发生产出规格 $1\times 7-\phi^s 17.8\text{ mm}$ 、强度 2 000 MPa 和规格 $1\times 7-\phi^s 21.6\text{ mm}$ 、强度 1 770 MPa、1 860 MPa 的大规格和高强度预应力钢绞线产品,并已经在工程中使用。目前,吨位超过 10 000 kN 的大吨位预应力锚具已经运用于桥梁工程。

第二次世界大战后至今,世界范围内已经修建了大量预应力混凝土结构,随着时间推移,这些使用中的预应力混凝土结构大量出现耐久性问题,其中问题之一是预应力钢筋发生腐蚀现象,影响结构正常使用甚至导致结构失效,造成巨大经济损失。研究表明,预应力钢筋腐蚀主要源于电化腐蚀和应力腐蚀。电化腐蚀必须有水溶液和空气同时存在,后张法预应力混凝土中灌浆不密实将易导致预应力钢筋电化腐蚀;应力腐蚀是在一定的应力和环境共同作用下引起钢材脆化的腐蚀。为提高预应力钢筋的抗腐蚀能力,研究者和工程师们提出了两个有效途径,一是在预应力钢筋外面涂上能抗腐蚀的材料,二是预应力筋采用具高抗腐蚀能力的非金属材料制作,前者推动了无黏结预应力技术和体外预应力技术的发展,后者则直接导致并推动非金属预应力筋的产生及其发展。

20 世纪 70 年代后期,德国、日本、加拿大等国开始研究非金属预应力筋的力学性能并试验用于预应力混凝土结构,80 年代后期开始用于桥梁工程。非金属预应力筋主要采用纤维增强复合材料 FRP(Fiber Reinforced Polymer),目前常用的有碳纤维塑料筋(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)、芳纶纤维塑料筋(Aramid Fiber Reinforced Polymer, AFRP)、玻璃纤维塑料筋(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)、超强聚乙烯纤维塑料筋(Polythene Fiber Reinforced Polymer, PFRP)等。FRP 筋截面形状有棒形、绞线形、编织束形、网格形、矩形带等,表面形状为光滑、螺纹、网状等形态。FRP 筋具轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳、非磁性等优点,具有广阔的应用前景。

3. 预应力技术体系

不断研究和运用高强、高性能材料及创新、发展预应力技术体系,是预应力技术自身发展的要求,更是预应力技术拓宽应用范围和完善预应力结构工作性能的必然要求。相对于应用最为广泛、发展最为完善的使用荷载作用下拉区不允许出现拉应力的预应力筋和混凝土黏结