

上海市普通高校“九五”重点教材



预应力混凝土结构设计原理

(土木工程专业用)

李国平 主编

YUYINGLI HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

人民交通出版社

上海市普通高校“九五”重点教材

预应力混凝土结构设计原理

(土木工程专业用)

世界银行贷款资助项目
上海市教育委员会组编

李国平 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以预应力混凝土结构为主要内容,分十章详细阐述了先张与后张、有粘结和无粘结、体内及体外等工艺、构造与受力特点的预应力混凝土结构设计的基本原理和方法,反映了土木工程专业有关领域各种预应力混凝土结构的特点,为一本较完整描述预应力混凝土结构设计原理的书籍。

本书是根据教育部1998年新编专业目录有关土木工程专业教学大纲的要求而编写的,主要作为土木工程专业本科学生的教材,也可作为土木工程相关领域的工程技术人员、大专院校学生和教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土结构设计原理 / 李国平主编. —北京:
人民交通出版社, 2000. 9
ISBN 7-114-03759-7

I. 预... II. 李... III. 预应力混凝土结构-结构设计 IV. TU378

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第70655号

上海市普通高校“九五”重点教材

预应力混凝土结构设计原理

(土木工程专业用)

世界银行贷款资助项目

上海市教育委员会组编

李国平 主编

责任印制:张 凯 责任校对:刘高彤

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

新世纪印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:294千

2000年10月 第1版

2000年10月 第1版 第1次印刷

印数:0001—4500册 定价:25.00元

ISBN 7-114-03759-7
U·02725

前 言

《预应力混凝土结构设计原理》为土木工程专业的专业基础课,是根据教育部 1998 年新编专业目录有关土木工程专业教学大纲的要求而编写的教材,它包含了原交通土建工程、建筑工程等土建类专业中有关预应力混凝土结构部分的教学内容。

本教材的内容以预应力混凝土结构设计理论、原理及设计方法为主。根据土木工程专业涉及工程领域广、适应性强的特点,本教材在内容方面作了较大改变:

首先,教材内容的覆盖面扩大,收入了一些预应力混凝土结构发展的最新成果,添加了原土建类有关教材中未包含的内容,如体外预应力混凝土结构、预应力混凝土结构的抗震性能,细化了如无粘结预应力混凝土结构等内容。这些内容的扩展,使本教材能够适应土木工程专业宽口径的教学要求,在具体教学过程中,教材中部分内容也可根据需要作为学生自学、扩展知识之用。

其次,重点突出原理、方法,构筑土木工程宽口径专业共同的知识平台;基本解决了原土建类专业领域规范及教材中计算公式、符号等的不统一问题,并统一在以国标(GBJ 10—89)为基础、适当考虑目前使用习惯的范围内。本教材在这方面的特点,增强了土木工程专业毕业生对土建类各工程领域的适应性,也为我国在这些工程领域逐步建立统一的技术标准、规范,并与国际惯例接轨创造了基本条件。

值得注意的是,由于目前我国土木工程专业各工程领域的技术标准、规范不统一,且所涉及的基本理论、方法也不尽相同,这给本教材的编写带来了困难。为此,本教材在一些差异较大的基本理论、方法叙述中,采取了先进性、广泛性相结合的选择原则。为了提高学生的动手能力,熟悉有关技术标准、规范,加深对实际工程设计的认识,以及巩固教材阐述的基础理论、原理及方法,本教材应配以与土木工程专业各工程领域技术标准、规范相结合的习题和课程设计或大型习题,而《预应力混凝土结构设计》则是与本教材配套的后续教材。

本教材共有十章和一个附录,主要内容如下:

第一章主要阐述了预应力混凝土结构的基本概念、历史与发展,以及本课程的任务和学习要求。

第二章介绍了预应力混凝土结构对材料性能的要求,列出了国内外常用的预应力混凝土材料;同时介绍了预应力混凝土结构的预应力工艺及相应的设备,包括国内外常用的预应力锚具类型等。

第三章叙述了预应力筋的张拉控制应力、预应力损失计算及有效预应力的计算原理和方法,并介绍了减少预应力损失的措施。

第四章至第六章以预应力混凝土构件为基础,从基本原理出发分别阐述了下列计算内容:受弯构件正截面、斜截面承载能力的计算方法,偏心拉、压构件截面承载能力的计算方法;构件截面正应力、剪应力、主应力及考虑截面开裂的应力的计算方法;构件各阶段变形的计算方法;构件的裂缝、疲劳强度的计算方法,预应力筋锚固区计算方法。

第七章以预应力混凝土构件的设计为主,叙述了构件设计的基本思路,构件内力计算中预

应力效应计算的几个基本概念,以及构件设计的基本方法和步骤。

第八章主要介绍了无粘结预应力混凝土结构的基本概况,受弯构件的受力性能、计算和设计方法。

第九章的主要内容为体外预应力混凝土结构的基本概况、结构的组成包括构造特点以及结构的力学性能等。

第十章以预应力混凝土结构的抗震问题为基本内容,介绍了地震对预应力混凝土结构的影响、抗震性能研究的成果、抗震设计方法以及抗震构造措施。

附录集中给出了本教材有关章节的计算示例和习题,以帮助读者加深对教材内容的理解,巩固所学知识。

本教材第四章至第七章内容主要以体内有粘结预应力混凝土结构为主。在教学过程中,各章、节内容顺序安排可由教师根据具体情况决定。

本教材由同济大学李国平主编,各章节均由同济大学教师编写。其中第一章由李国平编写;第二章由郑步全、张国泉编写;第三章由张国泉编写;第四章由薛二乐编写;第五章由柳惠芬编写;第六章由柳惠芬、李国平编写;第七章由周宗泽、熊学玉、张国泉编写;第八章由薛伟辰编写;第九章由徐栋编写;第十章由薛伟辰编写;附录由李国平编写。全书由李国平统一修改定稿,由周玉生主审。

本书为土木工程专业预应力混凝土结构设计原理统一化教材的首次编写实践,由于作者水平有限,加之编写时间紧张,故不可避免地存在一些缺点和错误,敬请使用者给予批评、指正。有关意见可径寄上海四平路 1239 号同济大学桥梁工程系(200092),以便再版时修正。

编 者

2000 年 8 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 预应力混凝土结构的基本概念.....	1
第二节 预应力混凝土结构的历史与发展.....	8
第三节 本课程的任务与学习要求	11
第二章 预应力混凝土材料和预应力工艺及设备	12
第一节 预应力混凝土材料	12
第二节 预应力工艺及设备	23
第三章 预应力及预应力损失计算	30
第一节 预应力筋张拉控制应力	30
第二节 预应力损失计算	31
第三节 有效预应力计算	40
第四节 减少预应力损失的措施	41
第四章 预应力混凝土构件截面承载能力计算	43
第一节 预应力混凝土受弯构件正截面承载能力计算	43
第二节 预应力混凝土受弯构件斜截面承载能力计算	52
第三节 预应力混凝土偏心受压构件截面承载能力计算	57
第四节 预应力混凝土偏心受拉构件截面承载能力计算	65
第五章 预应力混凝土构件截面应力及变形计算	68
第一节 预应力混凝土构件截面正应力计算	68
第二节 预应力混凝土构件截面剪应力与主应力计算	71
第三节 预应力混凝土构件考虑截面开裂的应力计算	73
第四节 预应力混凝土构件变形计算	77
第六章 预应力混凝土构件的裂缝、疲劳及锚固区计算	81
第一节 预应力混凝土构件的裂缝计算	81
第二节 预应力混凝土构件的疲劳强度计算	83
第三节 预应力筋锚固区计算	85
第七章 预应力混凝土构件设计	92
第一节 预应力混凝土构件设计的基本思路	92
第二节 预应力效应计算的几个基本概念	94
第三节 预应力混凝土构件的设计方法	99
第八章 无粘结预应力混凝土结构	107
第一节 概述.....	107
第二节 无粘结预应力混凝土受弯构件的受力性能.....	111
第三节 无粘结预应力混凝土受弯构件计算.....	116

第四节	无粘结预应力混凝土受弯构件设计	120
第九章	体外预应力混凝土结构	126
第一节	引言	126
第二节	体外预应力混凝土结构的组成	128
第三节	体外预应力混凝土结构的力学性能	132
第十章	预应力混凝土结构的抗震性能	138
第一节	概述	138
第二节	预应力混凝土结构抗震性能研究	139
第三节	预应力混凝土结构抗震设计方法	143
第四节	预应力混凝土结构抗震构造措施	147
附录	计算示例与习题	149
第一节	计算示例	149
第二节	习题	174
主要参考文献		177

第一章 绪 论

第一节 预应力混凝土结构的基本概念

现代混凝土结构工程发展的总趋势,是通过不断改进设计、施工方法和采用高强、高性能的轻质材料建造更为经济合理的结构。高强、高性能轻质材料的发展,对加筋混凝土结构来说尤为重要。然而,混凝土是一种抗压强度高、抗拉强度低的结构材料,它的抗拉强度不仅很低,只有抗压强度的 $1/10 \sim 1/15$,而且还很不可靠;它的抗拉变形能力也很小,脆性破坏没有明显预兆。钢筋混凝土结构利用钢筋来承受混凝土的拉应力,如果假设不允许混凝土开裂,则钢筋的拉应力只能达到 $20 \sim 30\text{MPa}$ 左右;而将裂缝宽度限制在容许的 $0.2 \sim 0.25\text{mm}$ 范围,钢筋的拉应力也只能达到约 $150 \sim 250\text{MPa}$ 。

钢筋混凝土虽然改善了混凝土抗拉强度过低的缺点,但仍存在两个不能解决的问题:一是在带裂缝工作状态下,裂缝的存在不仅造成受拉区混凝土材料不能充分利用、结构刚度下降和自重比例上升,而且限制了它的使用范围;二是从保证结构耐久性的要求出发,必须限制混凝土裂缝开展的宽度,这就使高强度钢筋无法在钢筋混凝土结构中充分发挥其作用,相应也不可能使高强混凝土的作用发挥出来。因此,当荷载或跨度增加时,钢筋混凝土结构只有靠增加构件的截面尺寸或增加钢筋用量的方法来控制裂缝和变形。显然,这种做法既不经济又必然增加结构的自重,因而使钢筋混凝土结构的使用范围受到很大限制。为了使钢筋混凝土结构能得到进一步发展,就必须解决混凝土抗拉性能弱这一缺陷。预应力混凝土结构就是为克服钢筋混凝土结构的缺点,经人们长期实践而创造出来的一种具有广泛发展潜力、性能优良的结构。

一、预应力的概念

预应力是预加应力的简称。这一名字出现的历史虽不很长,但预应力的思想是古老的,其基本原理在几世纪以前就已被聪明的祖先所运用。

木桶是预加压力抵抗拉应力的一个典型的例子。采用藤、竹或铁箍的木桶,当箍套紧时便对桶壁产生环向的压应力,如施加的环向压应力超过水压力引起的拉应力,木桶就不会开裂和漏水。现代预应力混凝土圆形水池的原理与上述套箍木桶是一样的,所以套箍木桶实质上是一种预应力木结构。

木锯是利用预拉应力抵抗压应力的一个典型的例子。采用线绳绞拧而拉紧的木锯给锯条施加了一个拉应力,使其挺直而能承受锯木来回运动中受到重复变化的拉、压力,避免抗弯能力很低的锯条受压失稳、弯折破坏。

现实生活和工作中利用预应力原理的例子也很多,如拧紧的螺丝、钢丝收紧的自行车车轮的钢圈,以及为稳定烟囱、电线杆、桅杆的拉索等等。

上述例子和许多实践都表明,既可以用预压应力来抵抗结构承受的拉应力或弯矩,又可用

预拉应力来抵抗结构承受的压应力。因此,只要善于运用预应力原理和技术,就可能获得改善结构性能和提高结构承载能力的效果。

在预应力原理和技术运用最广泛的预应力混凝土结构中,通常是以预拉的高强钢筋的弹性回缩力对混凝土结构施加一个预设的应力,使混凝土在荷载作用下以最合适的应力状态工作,从而克服混凝土性能的弱点,充分发挥材料强度,达到结构轻型、大跨、高强、耐久的目的。

对于采用高强钢材作配筋的预应力混凝土,可以用三种不同的概念或三种不同的角度来理解和分析其性状。设计者同时理解这三种概念及其相应的计算方法是十分重要的,只有这样才能更灵活有效地去选择和设计预应力混凝土结构。

(1)第一种概念——预加应力能使混凝土在使用状态下成为弹性材料

经过预压混凝土,使原先抗拉弱、抗压强的脆性材料变为一种既能抗压又能抗拉的弹性材料。由此,混凝土被看作承受两个力系,即内部预应力和外部荷载。若预应力所产生的压应力将外荷载所产生的拉应力全部抵消,则在正常使用状态下混凝土没有裂缝甚至不出现拉应力。在这两个力系的作用下,混凝土构件的应力、应变及变形均可按材料力学公式计算,并可在需要时采用叠加原理。

如图 1-1 在一根混凝土梁轴线以下偏心距 e 处预留孔道,穿以高强钢筋后将其张拉并锚固在梁端,给梁施加的预加力为 N_p 。在预加力 N_p 的作用下,混凝土截面的正应力(应力以压为正)为:

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p e y}{I_c} \quad (1-1)$$

外荷载弯矩 M (包括梁自重)产生的混凝土截面正应力为:

$$\sigma_c = -\frac{M y}{I_c} \quad (1-2)$$

混凝土截面的最终正应力为:

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p e y}{I_c} - \frac{M y}{I_c} \quad (1-3)$$

式中: A_c 、 I_c ——混凝土截面面积和抗弯惯性矩;

y ——应力计算点至截面形心轴的距离,在截面形心轴以下取正。

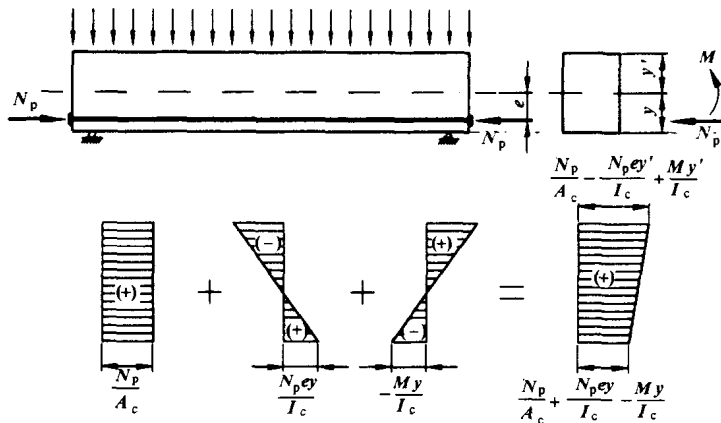


图 1-1 偏心预加力和外荷载作用下的应力分布

(2)第二种概念——预加应力能使高强钢材和混凝土共同工作并发挥两者的潜力

这种概念是将预应力混凝土看作高强钢材和混凝土两种材料的一种协调结合。在混凝土构件中采用高强钢筋,要使高强钢筋的强度充分发挥,就必须使其有很大的伸长变形。如果高强钢筋只是简单地浇筑在混凝土体内,那么在使用荷载作用下混凝土势必严重开裂,构件将出现不能允许的宽裂缝和大挠度。预应力混凝土构件中的高强钢筋只有在与混凝土结合之前预先张拉,使在使用荷载作用下受拉的混凝土预压、储备抗拉能力,才能使受拉的高强钢筋的强度进一步发挥。因此,预加应力是一种充分利用高强钢材的能力、改变混凝土工作状态的有效手段,预应力混凝土可看作钢筋混凝土应用的扩展。但也应明确,预应力混凝土不能超越材料本身的强度极限。

(3)第三种概念——预加应力实现荷载平衡

预加应力的作用可以认为是对混凝土构件预先施加与使用荷载(外力)方向相反的荷载,用以抵消部分或全部使用荷载效应的一种方法。预应力筋位置的调整可对混凝土构件造成横向力。以采用抛物线形的预应力筋(图 1-2)为例,预应力筋对混凝土梁的作用可近似为梁端的集中力 N_p 和方向向上、集度为 q 的均布荷载:

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

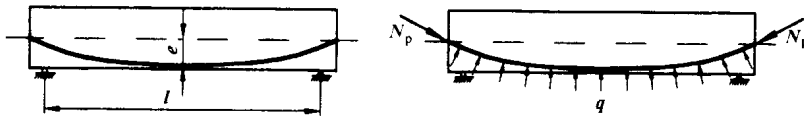


图 1-2 采用抛物线形配筋的预应力混凝土梁

如果在梁上作用方向向下、集度为 q 的外荷载,那么,两种荷载对梁产生的弯曲效应相互抵消,即梁不发生挠曲也不产生反拱,成为仅受轴力 N_p 的状态。如果外荷载超过预加力所产生的反向荷载效应,则可用荷载差值来计算梁截面增加的应力。这种把预加力看成实现荷载平衡的概念是由林同炎教授提出的。

预应力混凝土三个不同的概念,是从不同的角度来解释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,指出了预应力混凝土的主要工作状态;第二种概念反映了预加应力对发挥高强钢材和混凝土潜力的必要性,也指出了预应力混凝土的强度界限;第三种概念则在揭示预加力和外荷载效应相互关系的同时,也为预应力混凝土结构设计与分析提供了一种简捷的方法。

二、预应力混凝土的等级与分类

由于预应力技术及其应用的不断发展,国际上对预应力混凝土迄今还没有一个统一的定义。一个概括性较强、由美国混凝土协会(ACI)作出的广义的定义是:“预应力混凝土是根据需要人为地引入某一分布与数值的内应力,用以全部或部分抵消外荷载应力的一种加筋混凝土”。

以钢材为配筋和施加预应力的预应力混凝土,实际上与普通钢筋混凝土同属于一个统一的加筋混凝土系列。国际上对整个加筋混凝土系列按照其受力性能及变形情况分为若干个等级。

1. 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)根据预应力程度大小的不同,建议将加筋混凝土分为四个等级:

(1) 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。

(2) 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,但不超过其强度容许值;在长期持续荷载作用下,混凝土不出现拉应力。

(3) 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,但裂缝的宽度不超过规定值。

(4) IV级——普通钢筋混凝土。

以上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结构所处的环境条件,合理选用预应力等级,以求最优的结构设计方案。

2. 中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》(1986年,以下简称《PPC建议》),根据预应力程度的不同,把加筋混凝土分为全预应力、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中II级的有限预应力和III级的部分预应力。对于部分预应力混凝土,我国又将其分为A类和B类。A类指在正常使用极限荷载状态下,构件预压区混凝土正截面的拉应力不超过规定的容许值;B类则指在正常使用极限荷载状态下,构件预压区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. 预应力度的定义及表达方式

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在用预应力度进行分类的方法。

(1) 预应力比率及预应力指标

在极限状态下,由预应力筋所提供的抵抗弯矩与由预应力和非预应力筋共同提供的抵抗弯矩的比值,称为预应力比率PPR。这是美国的内曼(A. E. Naaman)教授首先提出的,即:

$$PPR = \frac{(M_u)_p}{(M_u)_{p+s}} \quad (1-5)$$

式中: $(M_u)_p$ ——由预应力筋提供的抵抗弯矩;

$(M_u)_{p+s}$ ——由预应力和非预应力筋共同提供的抵抗弯矩。

根据混凝土构件抗弯强度设计理论,当材料充分发挥其强度时,式(1-5)可表示成如下的形式:

$$PPR = \frac{A_p f_{py} \left(h_p - \frac{x}{2} \right)}{A_p f_{py} \left(h_p - \frac{x}{2} \right) + A_s f_{sy} \left(h_s - \frac{x}{2} \right)} \quad (1-6)$$

式中: A_p, A_s ——预应力和非预应力筋的截面面积;

f_{py}, f_{sy} ——预应力和非预应力筋的抗拉强度设计值;

h_p, h_s ——预应力和非预应力筋截面形心至混凝土受压区最外边缘的距离;

x ——混凝土受压区高度。

如果 $h_p = h_s$, 则式(1-6)简化为:

$$PPR = \frac{A_p f_{py}}{A_p f_{py} + A_s f_{sy}} \quad (1-7)$$

高强预应力钢材没有显著的流限平台,瑞士的瑟尔利曼(Thürliman)建议采用预应力指标为:

$$i_p = \frac{A_p f_{0.2}}{A_p f_{py} + A_s f_{sy}} \quad (1-8)$$

式中: $f_{0.2}$ ——预应力钢筋取 0.2% 残余应变时的屈服强度;其余符号意义同前。

(2) 预应力度

印度学者拉曼斯瓦迈(G. S. Ramaswamy)在他的著作中提出了预应力度($D. P.$)的新概念,他认为 $D. P.$ 应定义为:

$$D. P. = \frac{M_o}{M} \quad (1-9)$$

式中: M_o ——消压弯矩,即使构件控制截面受拉边缘预加应力抵消至零时的弯矩;

M ——使用荷载(不包括预加力)短期组合作用下控制截面的弯矩。

式(1-9)把预应力度和预压受拉区是否出现拉应力或开裂联系起来,当 M_o/M 大于或等于 1 时,构件不出现拉应力;当 M_o/M 小于 1 时,则构件出现拉应力,甚至可能开裂。

我国的《PPC 建议》将式(1-9)定义为受弯构件的预应力度,用 λ 表示,并将轴向受拉构件的预应力度定义为:

$$\lambda = \frac{N_o}{N} \quad (1-10)$$

式中: N_o ——消压轴向力,即把构件控制截面预应力抵消到零时的轴向拉力;

N ——使用荷载(不包括预加力)短期组合作用下控制截面的轴向拉力。

预应力度的范围可以从全预应力混凝土变化到钢筋混凝土。《PPC 建议》认为:当预应力度 $\lambda \geq 1.0$ 时为全预应力混凝土,当预应力度 $\lambda = 0$ 时为普通钢筋混凝土,预应力度在 $0 < \lambda < 1.0$ 时为部分预应力混凝土。

用应力比 K_{fo} 表达预应力度,是一种不仅适用于受弯构件同时可推广到偏心受力构件和轴心受力构件的方法,即:

$$K_{fo} = \frac{\sigma_{pc}}{\sigma_t} \quad (1-11)$$

式中: σ_{pc} ——混凝土的有效预压应力;

σ_t ——使用荷载产生在混凝土中的拉应力。

三、预应力混凝土结构的类型

预应力混凝土结构,根据其工艺、预应力度、体系及构造特点等可划分为如下几种类型。

1. 按预应力工艺分类

预应力混凝土结构根据其预应力施加工艺可分为先张法和后张法两种。

先张法 指采用永久和临时台座在构件混凝土浇筑之前施张预应力筋,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握裹力,对混凝土施加预应力,见图 1-3 所示。

后张法 指在混凝土构件浇筑、养护和强度达到设计值后,利用预设在混凝土构件内的孔

道穿入预应力筋,以混凝土构件本身为支承采用千斤顶张拉预应力筋,然后用特制锚具将预应力筋锚固形成永久预加力,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,见图 1-4 所示。

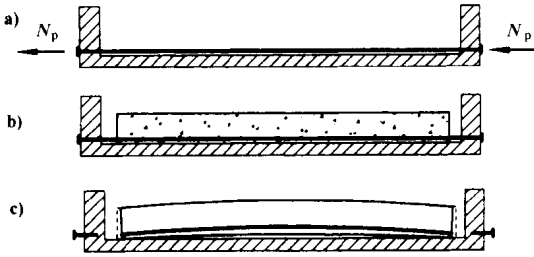


图 1-3 先张法预应力混凝土工艺

a) 预应力筋张拉、锚固; b) 混凝土施工; c) 预应力筋放松

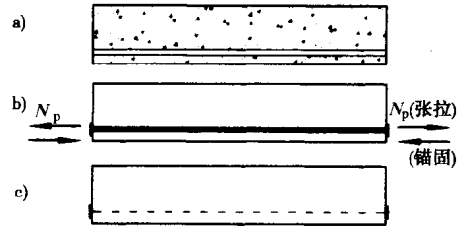


图 1-4 后张法预应力混凝土工艺

a) 预留孔道混凝土施工; b) 穿筋、张拉、锚固; c) 孔道压浆粘结成整体

2. 按预应力度分类

根据预应力度度的不同和我国对预应力混凝土结构的分类法,预应力混凝土结构被分为**全预应力**、**部分预应力**两类。

全预应力混凝土结构指沿预应力筋方向正截面,在全部荷载最不利组合作用下,混凝土不出现拉应力。

部分预应力混凝土结构指沿预应力筋方向正截面,在全部荷载最不利组合作用下,混凝土出现拉应力或出现不超出规定宽度的裂缝。我国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荷载状态下,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 类则指在正常使用极限荷载状态下,构件预压区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. 按预应力体系分类

根据预应力体系的特点,预应力混凝土结构可分为**体内预应力**、**体外预应力**、**有粘结**和**无粘结预应力**、**预拉应力**及**预弯预应力**等几类:

预应力筋布置在混凝土构件体内的称为**体内预应力结构**。先张预应力结构和预设孔道穿筋的后张预应力结构等均属此类。

体外预应力混凝土结构为预应力筋(称为体外索)布置在混凝土构件体外的预应力结构(图 1-5)。混凝土斜拉桥属此类结构的特例。

有粘结预应力混凝土结构,是指沿预应力筋全长预应力筋周围完全与混凝土粘结、握裹在一起的预应力混凝土结构。先张预应力结构和预设孔道穿筋压浆的后张预应力结构均属此类。

无粘结预应力混凝土结构,指预应力筋伸缩变形自由、不与混凝土粘结的预应力混凝土结构。这种结构采用的预应力筋全长涂有特制的防锈材料,外套防老化的塑料(PE)管。无粘结预应力混凝土结构通常与后张预应力工艺相结合。

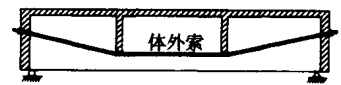


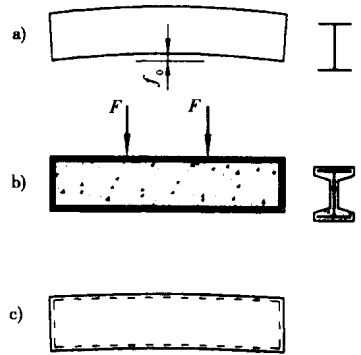
图 1-5 体外预应力混凝土结构

预拉应力混凝土结构,是指在混凝土受压区采用预压的预应力筋(件)或其它施力措施,使混凝土产生预拉应力的预应力混凝土结构。这种预应力方式和通常的预应力方式相结合,将形成混凝土受拉区预压、受压区预拉的双向预应力体系,从而提高了构件的抗弯能力,构件的

截面尺寸、自重荷载将可能减小。

预弯预应力混凝土结构，是指在加荷预弯的劲性钢梁上浇筑混凝土，待混凝土与钢梁结合为整体并达到设计强度后卸载，利用钢梁反弹随之对混凝土施加预应力的预应力混凝土结构(图 1-6)。

预应力混凝土结构根据其不同的构造特点、设计思路，还有其它分类方法，如无粘结部分预应力结构、体外有粘结和无粘结预应力结构等等，在此不再进一步叙述。



四、预应力混凝土结构的优缺点

预应力混凝土结构与钢筋混凝土结构相比，具有下列主要优点：

(1)提高了构件的抗裂性和刚度。构件施加预应力之后，裂缝的出现将大大推迟；在使用荷载作用下，构件可不出现裂缝或推迟出现，因而构件的刚度相应提高，结构的耐久性增强。

(2)可以节省材料，减少自重。预应力混凝土由于必须采用高强度材料，因而可以减少钢筋用量和减小构件截面尺寸，节省钢材和混凝土，从而降低结构物的自重。对于自重占总荷载比例很大的大跨径公路桥梁来说，采用预应力混凝土有着显著的优越性。一般大跨度或重荷载结构，采用预应力混凝土是比较经济合理的。

(3)可以减小混凝土梁的剪力和主拉应力。预应力混凝土梁的曲线筋(束)，可使混凝土梁在支座附近承受的剪力减小，又由于混凝土截面上预压应力的存在，使荷载作用下的主拉应力也相应减小，有利于减薄混凝土梁腹的厚度，这也是预应力混凝土梁能减轻自重的原因之一。

(4)结构安全、质量可靠。施加预应力时，预应力筋(束)与混凝土都将经受一次强度检验。如果在预应力筋张拉时预应力筋和混凝土都表现出良好的质量，那么，在使用时一般也可以认为是安全可靠的。

此外，预应力混凝土还能提高结构的耐劳性能。因为具有强大预应力筋、混凝土全截面或基本全截面参加工作的构件，在使用阶段因加荷或卸荷所引起的应力相对变化很小，因而引起疲劳破坏的可能性也小。这对于承受动荷载的桥梁结构来说是很有利的。

预应力混凝土结构也存在着一些缺点：

(1)工艺较复杂，质量要求高，因而需要配备一支技术较熟练的专业队伍。

(2)需要有一定的专门设备，如张拉机具、灌浆设备等。

(3)预应力反拱不易控制，它将随混凝土的徐变增加而加大，可能影响结构使用效果。

(4)预应力混凝土结构的开工费用较大，对于跨径小、构件数量少的工程，成本较高。

但是，以上缺点是可以设法克服的。例如应用于跨径较大的结构，或跨径虽不大但构件数量很大时，采用预应力混凝土就比较经济。总之，只要我们从实际出发，合理地进行设计和妥善安排，预应力混凝土结构就能充分发挥其优越性。

五、预应力混凝土的使用范围

预应力混凝土，由于它具有许多优点，目前在国内外应用非常广泛，特别是在大跨度或重荷载结构，以及不允许开裂的结构中得到了广泛的应用。我国在解放后不久，即开始研究预应力混凝土在桥梁结构中的应用。目前预应力混凝土结构在我国桥梁建设中的应用已得到了迅速

图 1-6 预弯预应力混凝土结构
a)预拱劲性钢梁；b)加载预弯、混凝土施工；c)卸载反弹、预应力作用

速发展。可以预见,预应力混凝土结构也必将在房屋结构、塔桅结构、蓄液池、压力管道、原子能反应堆容器、船体结构,以及飞机跑道等方面,得到更加广泛的应用。

第二节 预应力混凝土结构的历史与发展

一、发展简史

1866年美国工程师杰克逊(P. H. Jackson)及1888年德国的道克林(C. E. W. Doehring)首先把预应力用于混凝土结构。但这些最初的运用并不成功,低值的预应力很快在混凝土徐变和收缩后而丧失。

预应力混凝土技术进入实用阶段,归功于法国工程师弗莱西奈(E. Freyssinet),他在对混凝土和钢材性能进行大量研究和总结的基础上,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。此论断是预应力混凝土在理论上的关键性突破。1938年德国的霍友(E. Hoyer)研究成功了不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了简单可靠的方法;1939年E. Freyssinet创制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。这些研究成果为后张预应力混凝土提供了切实可行的生产工艺,为预应力技术在更大范围发展作出了贡献。

第二次世界大战后,由于钢材的紧缺,预应力混凝土结构大量代替钢结构以修复战争破坏的结构,于是预应力混凝土技术得到了蓬勃发展。1950年成立的国际预应力混凝土协会(FIP)更是极力促进预应力混凝土技术的发展。近30年来,预应力混凝土技术在土建结构的各个领域扮演着重要的角色。

我国的预应力混凝土结构是在20世纪50年代发展起来的,最初试用于预应力钢弦混凝土轨枕,之后预应力混凝土在全国范围内开始推广。预应力混凝土技术在桥梁工程中发展最快,尤其在20世纪70年代后期,我国修建的各类大桥几乎全是预应力混凝土结构。近年来,预应力混凝土技术在桥梁以外的土建结构中也得到了迅速发展,一个发生在我国土建结构领域内的变革已经到来。

二、新的发展

纵观预应力混凝土结构的历史与发展,其已经从一个婴儿成长为巨人。然而,近二十几年来由于材料、预应力体系、施工技术等领域的发展,预应力混凝土结构仍然发生着很大的变化,各种新技术、新方法及新的设计构思层出不穷。

1. 预应力混凝土材料

抗压强度高达100MPa的混凝土早在20世纪30年代便能够工业化生产,现在实验室里已能制出强度200MPa的混凝土。虽然随着科技进步,更高强度的混凝土能被生产出来,但其在预应力混凝土结构中的应用却很有限。采用高强混凝土所带来的优越性是显著的。1989年法国建造了一座采用高强混凝土的试验桥梁,混凝土标号为87(60MPa),它与采用50号(35MPa)混凝土相比用量减少了约30%,下部结构基底反力减少了约24%。世界各国目前正致力于把高强混凝土的研究成果编入设计规范。1989年挪威新规范NS5473普通密度混凝土的抗压强度已允许达到105MPa,轻质混凝土为85MPa。我国目前规范中混凝土容许抗压强度仅约42MPa(28d圆柱体抗压强度),与先进国家相比有很大差距。

大量实践证明,一些使用期限较长的混凝土结构在不利环境中毁坏的原因,并不是混凝土强度的缺陷,而是混凝土耐久性问题。高强混凝土具有较好的耐久性,但高性能混凝土除具有良好的耐久性,还具有低透水性及很高的弹性模量。随着人们对高性能混凝土特征认识的深入,高性能混凝土的含义也在不断扩大,超和易性、低水化热、高早强等,也成为高性能混凝土的重要特征。

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,故追求更高的强度容重比是混凝土材料发展的目标之一。虽然兼有高强度和低容重的混凝土的研究进展缓慢,但其显著的优越性已受到各国的重视,其中应用实例有:原联邦德国的 Koln Deutz 桥为减轻中跨自重而采用容重为 18kN/m^3 的轻质混凝土;日本一座人行观光斜拉桥,混凝土标准强度为 40MPa ,使用了容重为 19.5kN/m^3 及 15.6kN/m^3 的超轻质集料。

2. 预应力筋

预应力混凝土结构必须采用高强度且有一定塑性性能的钢材。目前能满足塑性性能要求的钢材的极限强度为 $1\ 800 \sim 2\ 000\text{MPa}$ 。钢材的低松弛也是预应力钢筋的重要技术指标。虽然预应力钢材的本身性质无重大进展,但在耐久性、新材料预应力筋和大吨位预应力锚具及张拉设备方面均有所发展。

随着预应力结构设计使用年限的延长和预应力结构用于不利环境越来越多,预应力结构的耐久性问题逐步反映出来。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,用在无粘结、体外预应力体系和斜拉索时为平滑涂层钢绞线;先张和后张有粘结的体内预应力体系,则使用表面含有砂粒涂层的钢绞线以增强粘结性。然而,不论是体外或无粘结还是体内有粘结,环氧涂层钢绞线仍需要外包层或混凝土的保护。环氧涂层钢绞线仅起到钢筋防锈作用,并不能替代对钢绞线的整体防护。

近年来非钢材预应力筋得到了很大发展,它们主要是纤维加劲塑料(FRP)预应力筋,如玻璃纤维加劲塑料(GFRP)、芳纶纤维加劲塑料(AFRP)及碳素纤维加劲塑料(CFRP)预应力筋。它们具有轻质、高强(强度接近或大于预应力钢筋)、耐腐蚀、耐疲劳、非磁性等优点,表面形态可以是光滑的、螺纹或网状的,形状包括棒状、绞线形及编织物形。研究与使用非钢材预应力筋的主要国家是德国与日本,20世纪70年代后期,原联邦德国首先对用玻璃纤维加劲塑料替代预应力钢材作了大量试验。1980年起开始用GFRP预应力筋修建人行试验桥,1986年非钢材预应力筋开始用于公路桥梁。日本是较早使用CFRP和AFRP预应力筋的国家,1988年、1996年CFRP和AFRP预应力筋分别被用于公路桥梁和悬索板桥。20世纪90年代后期,用FRP预应力筋修建的混凝土桥梁已有二十余座,公路桥梁的最大跨径已达 32.5m 。目前,纤维加劲塑料力学性能的测试标准,如延性、粘结、锚具、松弛、疲劳等等,有待统一的规范,各种FRP预应力筋仍处于研究试用阶段,其材料的价格相当昂贵。然而,FRP预应力筋的发展前景将是很广阔的。

大吨位预应力锚具和张拉设备,是因大跨径预应力结构的布束和施工要求而发展起来的。大吨位预应力锚具的吨位已超过 $10\ 000\text{kN}$,这为体外预应力体系发展提供了必要的条件。

3. 预应力结构体系

现代预应力混凝土的产生是具有革命性意义的,其意义不只在于对高强材料的使用,而且还表现在结构体系的不断创新。

部分预应力混凝土结构因其兼有预应力和钢筋混凝土结构的优点,克服了全预应力混凝土

土结构预压应力过高的缺点,20世纪70年代以来倍受重视而得以发展。无粘结体内预应力混凝土结构,消除了后张预应力筋管道的压浆,降低了预应力在管道内的摩阻损失,已在简单的实心板式结构中广泛应用。混凝土受拉区预压、受压区预拉的双向预应力体系是预应力概念的一个发展,从而使结构的高跨比显著减小、预应力产生同样预弯矩的情况下混凝土的压应力降低,这种预应力技术已在桥梁上得到了应用。预弯预应力混凝土结构体系是预应力概念的另一种发展,其原理是在加荷预弯的劲性钢梁上浇筑混凝土,当混凝土与钢梁结合为整体后卸荷,钢梁反弹随之对混凝土施加预应力。

20世纪70年代,欧洲一些国家发现了体内预应力混凝土桥梁,由于对预应力管道摩阻损失、混凝土徐变及温度影响估计不足,致使桥梁在使用期破损严重而需要加固;另外,使用荷载等级的不断提高也需要对桥梁进行加固。由于现有结构的限制,加固采用的预应力索只能布置在混凝土体外,这反而使预应力索布置构造简化、补索方便、施工操作简单,预应力管道摩阻损失大大减小。这些优点的存在,加之体外预应力索防腐的不断完善,以及体内预应力桥梁因管道压浆不密而造成事故的教训,都促进了体外预应力桥梁的发展。随着体外预应力索锚固器具的发展,实现了体外索的简单可换,使人们对之安全性的认识进一步加深。因此,体外预应力已不仅作为一种加固措施,而是成为新设计桥梁更可选择和更能实施的方案。体外预应力技术的发展也已不限于永久结构,施工阶段结构的临时预应力等都适宜采用体外预应力。美国和法国是体外预应力技术发展较快的国家,由于体外预应力结构在经济上、功能上、施工质量和安全性等方面的优势,已成为最有竞争力的标或成为政府的强制技术措施。在其它国家,如英国、比利时、德国、日本、瑞典等,体外预应力结构也在推广应用。我国对体外预应力技术的研究及试验很少,20世纪80年代起,才逐步开始在桥梁加固和新桥设计中采用这一技术。可以预计,在不久的将来体外预应力及相关技术,将成为我国预应力结构发展的重要方向。

4. 预应力结构施工技术

预应力混凝土结构施工技术的新发展,在桥梁结构方面最具有代表性。节段施工法是预应力混凝土桥梁施工技术发展的结果。在大跨径桥梁的施工中,一般多采用悬臂施工法,即桥梁沿纵向被划分为若干段,在墩梁(临时)固结的条件下,对称悬臂拼装预制梁段或现场浇筑梁段,并通过预应力筋使桥梁逐段连续,最终形成结构整体。这种施工方法克服了建桥对桥下通行的影响,能轻松跨越深险的江海和山谷。节段施工法的另一种形式是整跨施工法,即桥梁采用整跨预制整体吊装,或在支架上拼装分段预制的梁段并由通长串联的预应力筋组成整体。这种施工方法充分利用了现代化机械设备,大大提高了施工速度,并将对环境的不利影响降低到最小程度。其它通过预应力技术发展起来的桥梁施工方法,还有节段现浇顶推施工法、转体施工法等,这些施工方法分别适用于不同的桥型结构。

作为预应力技术的进一步运用而产生的施工技术也很多,如利用预应力设备提升大型建筑结构就是其中一例。

我国在预应力结构施工方面的技术同国际水平相比还有较大差距,随着目前大跨、大型预应力结构的建造实践和预应力施工技术研究的发展,这个差距在逐渐减小,并将在不久的将来赶上世界水平。

5. 结构耐久性设计

预应力结构耐久性问题是国内外工程界日益关注的课题,20世纪60年代建造的预应力混凝土桥梁腐蚀破坏的现象,使人们认识到研究耐久性的必要性。1990年CEB—FIP模式混