

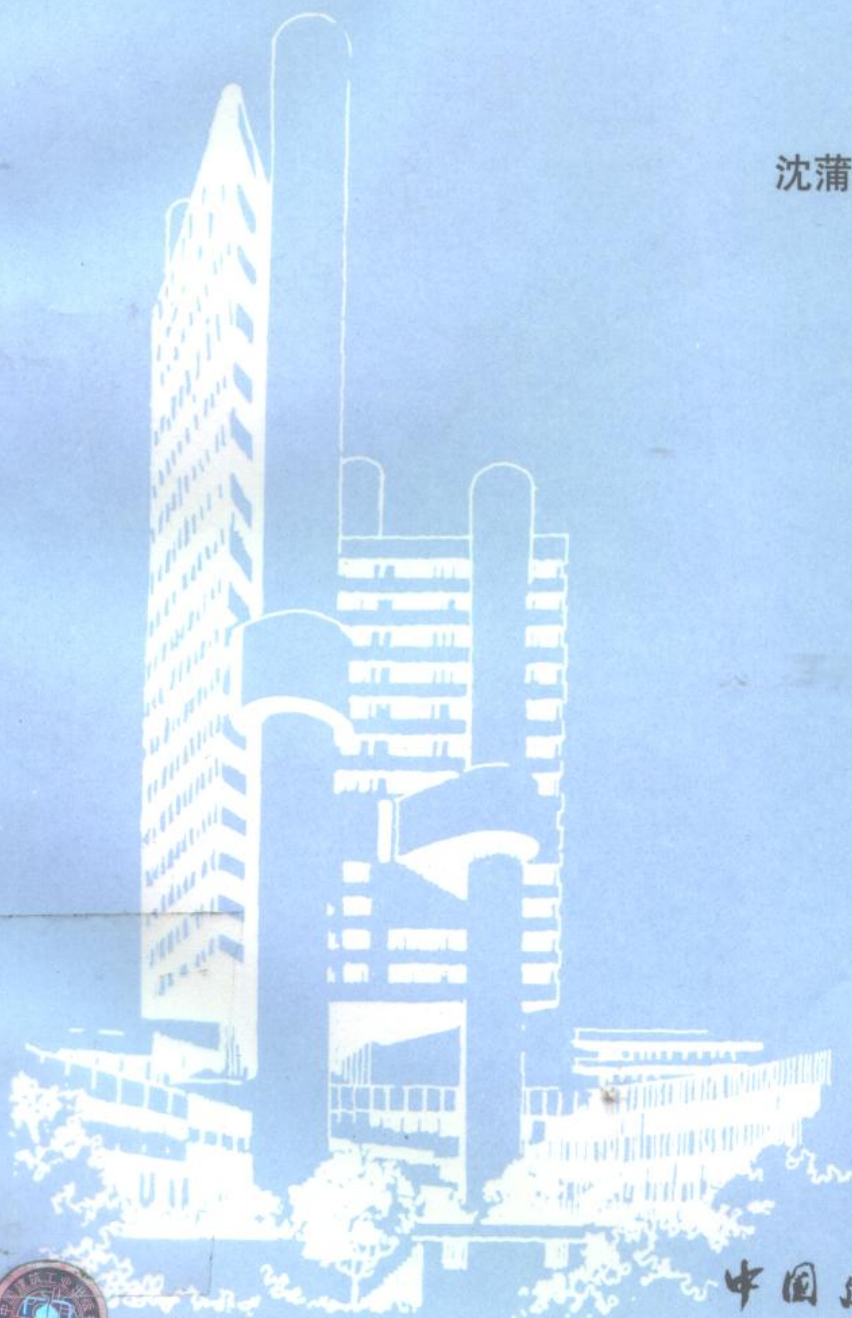
高等专科工业与民用建筑专业系列教材

混凝土结构

(下册)

(第三版)

沈蒲生 罗国强 熊丹安 编著



中国建筑工业出版社

高等专科工业与民用建筑专业系列教材

混凝土结构

(下 册)

(第 三 版)

沈蒲生 罗国强 熊丹安 编著



403004

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书系根据高等专科“工业与民用建筑专业”《混凝土结构》课程要求编写的教材,按我国《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89),及两次局修订条文编写。全书分上、下两册,本书为下册,内容包括预应力混凝土构件、混凝土梁板结构、单层厂房结构、多层房屋框架结构等内容,每章开头有提要,末尾有小结、思考题和习题。

本书第三版是在第二版的基础上修订而成的,全书内容有了进一步完善和提高。

本书可作为高等专科工业与民用建筑专业的教材,还可供土建工程技术人员学习参考。

2/26/99

高等专科工业与民用建筑专业系列教材

混凝土结构

(下册)

(第三版)

沈蒲生 罗国强 熊丹安 编著

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京云浩印制厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21¼ 字数: 517 千字

1997 年 6 月第三版 1999 年 6 月第三次印刷

印数: 11, 501—16, 500 册 定价: 24.00 元

ISBN 7-112-03001-3

TU·2293 (8116)

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)

出版说明

为了满足高等专科学校房屋建筑工程（工业与民用建筑）专业的教学需要，培养从事建筑工程施工、管理及一般房屋建筑设计的高等工程技术人才，中国建筑工业出版社组织编写了这套“高等专科工业与民用建筑专业系列教材”。全套教材共15册，其中《混凝土结构》（上、下）、《砌体结构》、《钢结构》、《土力学地基与基础》、《建筑工程测量》、《建筑施工》、《建筑工程经济与企业管理》8册是由武汉工业大学、湖南大学等高等院校编写的原高等专科“工业与民用建筑专业”系列教材，经原作者重新精心修订而成的。按照教学计划与课程设置的要求，我们又新编了《建筑制图》、《建筑制图习题集》、《房屋建筑学》、《建筑材料》、《理论力学》、《材料力学》、《结构力学》等7册。

本系列教材根据国家教委颁发的有关高等专科学校房屋建筑工程专业的培养目标和主要课程的教学要求，紧密结合现行的国家标准、规范，以及吸取近年来建筑领域在科研、施工、教学等方面的先进成果，贯彻“少而精”的原则，注重加强基本理论知识、技能和能力的训练。考虑到教学的需要和提高教学质量，我们还将陆续出版选修课教材及辅助教学读物。

本系列教材的编写人员主要是武汉工业大学、湖南大学、西安建筑科技大学、哈尔滨建筑大学、重庆建筑大学、西北建筑工程学院、沈阳建筑工程学院、山东建筑工程学院、南京建筑工程学院、武汉冶金科技大学等有丰富教学经验的教师。

本系列教材虽有8册书已在我国出版发行近10年，各册书的发行量均达10~20万册，取得了一定的成绩，但由于教学改革的不断深入，以及科学技术的进步，这套教材的安排及书中不足之处在所难免，希望广大读者提出宝贵意见，以便不断完善。

前 言

本书是在沈蒲生和罗国强主编、武汉工业大学出版社出版的《混凝土结构》(上、下册)第二版的基础上修订而成的。原书因合同到期,经与武汉工业大学出版社协商后,改由中国建筑工业出版社出版。原书自1988年3月问世以来,在武汉工业大学出版社与作者的共同努力下,已出两版,发行17.8万册,在全国各高等专科学校中广为采用,受到广大师生的好评。作者谨向武汉工业大学出版社及广大读者表示深切谢意。

本书分上、下两册。上册内容为绪论、混凝土结构的材料性能、概率极限状态设计法、轴心受力构件承载力计算、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、受扭构件承载力计算、偏心受力构件承载力计算和钢筋混凝土构件的裂缝和变形验算;下册内容为预应力混凝土构件、混凝土梁板结构、单层厂房结构以及多层房屋框架结构等内容。在本书的修订过程中,除了按《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)1993、1996年局部修订条文对有关部分进行了修改外,还对各章节的内容作了必要的增删。本书保留了前两版的优点,内容上能更好地反映教学及使用上的要求。

本书由沈蒲生(绪论、第二、四、六、九章)、罗国强(第八、十、十一章)和熊丹安(第一、三、五、七、十二章)编写。上册由沈蒲生统稿,下册由罗国强统稿。

由于我们水平所限,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

目 录

第九章 预应力混凝土构件	1
第一节 预应力混凝土的基本知识	1
第二节 预应力混凝土构件设计的一般规定	7
第三节 预应力混凝土轴心受拉构件的应力分析	14
第四节 预应力混凝土轴心受拉构件的计算和验算	19
第五节 先张法预应力混凝土受弯构件计算	27
第六节 先张法预应力混凝土受弯构件的构造要求	50
第七节 部分预应力混凝土和无粘结预应力混凝土的概念	52
小结	53
思考题	54
习题	54
第十章 混凝土梁板结构	56
第一节 概述	56
第二节 钢筋混凝土现浇单向板肋形楼盖	59
第三节 钢筋混凝土现浇双向板肋形楼盖	99
第四节 装配式混凝土楼盖	110
第五节 楼梯、雨篷计算与构造	114
小结	130
思考题	130
习题	131
第十一章 单层厂房结构	134
第一节 单层厂房的结构选型	134
第二节 单层厂房排架结构组成、构件选型和布置	136
第三节 排架计算	152
第四节 单层厂房柱设计	170
第五节 柱下单独基础设计	174
第六节 屋架设计要点	188
小结	216
思考题	217
习题	217
第十二章 多层房屋框架结构	222
第一节 多层框架的结构布置	222
第二节 框架杆件的截面尺寸和框架计算简图	226
第三节 荷载	229
第四节 竖向荷载作用下的内力近似计算——分层法	231
第五节 水平荷载作用下的内力近似计算——反弯点法和D值法	233

第六节 水平荷载作用下侧移的近似计算	238
第七节 框架的内力组合	239
第八节 框架梁柱的截面配筋	242
第九节 现浇框架的一般构造要求	243
第十节 多层框架柱基础	246
第十一节 多层现浇框架结构设计例题	247
第十二节 设防烈度为 6 度的框架结构抗震构造要求	275
小结	278
思考题	278
附录	280
附录 1 连续梁板的计算跨度表	280
附录 2 等截面等跨连续梁在常用荷载作用下按弹性分析的内力系数表	281
附录 3 双向板按弹性分析的计算系数表	294
附录 4 等效均布荷载表	299
附录 5 屋面积雪分布系数表	301
附录 6 电动桥式和单梁式吊车数据表	304
附录 7 风荷载体型系数表	307
附录 8 风压高度变化系数表	320
附录 9 单层厂房排架柱柱顶反力与位移系数图	321
附录 10 采用刚性屋盖的单层工业厂房柱、露天吊车柱和栈桥柱的计算长度表	325
附录 11 计算柱下单独基础底面尺寸的 $\beta-C_0$ 曲线图	326
附录 12 规则框架承受均布水平荷载作用时标准反弯点高度比表	328
附录 13 上下层横梁线刚度比变化时的修正系数表	330
附录 14 上下层柱高度变化时的修正系数表	330
附录 15 截面抵抗矩塑性系数表	331
参考书目	333

第九章 预应力混凝土构件

提 要

预应力混凝土构件是不同于钢筋混凝土构件的另一种类型的构件。本章要求：

1. 了解预应力混凝土的基本概念；
2. 熟练掌握预应力混凝土轴心受拉构件的设计计算方法；
3. 了解先张法预应力混凝土受弯构件与钢筋混凝土受弯构件在受力特点、设计计算方面的联系和区别。掌握先张法预应力混凝土受弯构件的设计计算方法；
4. 熟悉预应力混凝土构件的构造要求；
5. 了解部分预应力混凝土与无粘结预应力混凝土的基本概念。

本章的难点是：预应力混凝土构件中预应力钢筋的应力损失及由此引起的各阶段应力变化。由于引起预应力损失的因素较多，各种预应力损失出现的时刻和延续的时间各不相同，先张法构件和后张法构件在同一应力阶段上发生的预应力损失也不尽相同，因而增加了计算的复杂性。

第一节 预应力混凝土的基本知识

一、预应力混凝土的基本原理

(一) 钢筋混凝土的缺点

如同前面几章所介绍的，钢筋混凝土受拉构件、受弯构件、大偏心受压构件等构件，在受到各种作用时，构件内都存在受拉区，而混凝土的抗压强度高、抗拉强度低，抗压极限应变大、抗拉极限应变小（混凝土抗拉强度约为抗压强度的 $1/10$ ，抗拉极限应变也约为抗压极限应变的 $1/10$ ），这就导致钢筋混凝土构件存在以下一些自身难以克服的缺点：

1. 使用荷载下受拉区混凝土有可能开裂

在开裂之前，混凝土与钢筋牢固地粘结在一起，二者有相同的应变值。但是由于混凝土抗拉极限应变值 ϵ_{ctk} 大约为 0.00015 ，则可以推算出构件即将开裂时的钢筋拉应力为：

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s = E_s \epsilon_{ctu} = 2 \times 10^5 \times 0.00015 = 30 \text{N/mm}^2$$

这个数值远低于钢筋的屈服强度，此时的荷载也很小。因此，钢筋混凝土结构构件一般都带裂缝工作。

2. 高强度钢筋和高强混凝土得不到利用

从第八章裂缝宽度的验算中可知，在钢筋混凝土受弯构件中，当裂缝宽度达到其允许限值 $0.2 \sim 0.3 \text{mm}$ 时，受拉钢筋的应力值不过 200N/mm^2 左右，配筋量也往往由裂缝宽度控制。现代冶炼技术已可生产强度高达 1600N/mm^2 以上的钢筋，但是将它们用于钢筋混凝土结构，则在其强度远未充分利用之前，裂缝的开展宽度和变形早已超过允许限值，不能

满足正常使用要求。

因此，在钢筋混凝土结构中，高强度钢筋不能发挥作用，只能采用强度较低的Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级热轧钢筋。

随着混凝土强度等级的提高，混凝土的轴心抗压强度和弯曲抗压强度都有相当大的提高，但轴心抗拉强度则提高很小。如果为了提高构件的抗裂而提高混凝土的强度等级，不但效果甚微，而且受压强度更加得不到充分利用，费用需要增加。因此，钢筋混凝土结构中一般采用强度等级为C15至C30的混凝土。

3. 结构的自重大，使用性能不好

由于高强度钢筋和高强度混凝土得不到利用，因此，钢筋混凝土结构构件的截面尺寸通常都比较大，导致结构的自重大。即使如此，由于结构一般都带裂缝工作，结构的刚度较小，变形较大，使用性能不好。

若要结构在使用阶段不出现裂缝，其截面尺寸需要增加，构件的自重将进一步加大。

(二) 预应力混凝土的基本原理

预应力混凝土的基本原理是，在结构承受外荷载之前，在其可能开裂的部位，预先人为地施加压应力，以抵消或减少外荷载产生的拉应力，使构件在正常使用的情况下不开裂，或裂缝开得较晚、开展宽度较小。

如图9-1所示的混凝土受弯构件，如果在构件使用之前在其两端的截面核心区内施加一对集中压力，则构件各截面均处于全截面受压状态，截面上压应力的分布如图9-1a所示；在使用荷载($g_k + q_k$)作用下，截面重心轴以下纤维受拉，重心轴以上纤维受压，应力分布如图9-1b所示；利用材料力学的叠加原理，便得到预应力混凝土构件使用阶段的应力图(图9-1c)，这时，截面上的拉应力大为减少。

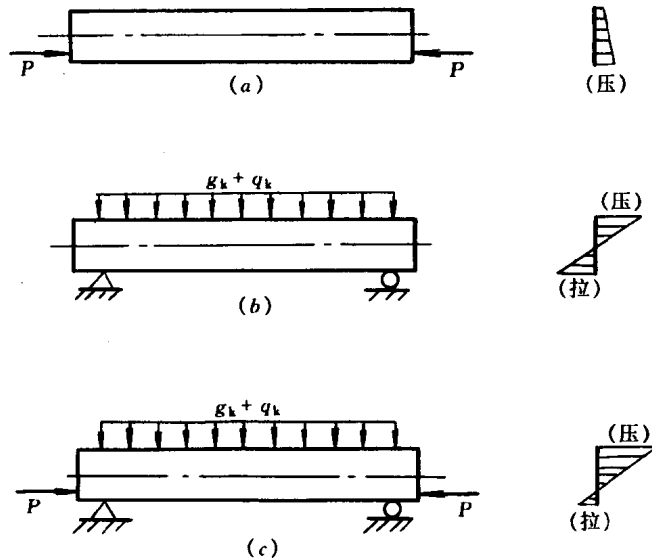


图 9-1 预应力混凝土构件受力分析

(三) 预应力混凝土构件的受力特征

对照图9-1c和图9-1b，可得到预应力混凝土构件具有以下的一些特点：

1. 对混凝土构件施加预应力可以提高构件的抗裂性

构件在承受使用荷载之前,混凝土受拉区受到预压应力(图 9-1a)。构件在使用荷载作用下产生的受拉区混凝土拉应力首先要抵消该预压应力,因而构件的拉应力远小于钢筋混凝土构件相同纤维处的拉应力,从而使构件的抗裂性得到提高。

2. 预应力的大小和位置可以根据需要调整

预应力是一种人为施加的应力,因此它的大小和施加位置可以由设计人员根据需要调整。例如,将图 9-1 中的 P 力加大,则可使构件使用时下边缘纤维的应力也变为压应力。显然,施加的预压应力越高,构件在使用阶段的抗裂性也越高。

3. 在使用荷载作用下,预应力混凝土构件基本上处于弹性工作阶段

正因为使用荷载作用下产生的拉应力需要抵消预压应力,预应力混凝土构件在使用荷载作用下往往不开裂,因而构件处于弹性工作阶段,材料力学的公式可以一直应用到预应力混凝土构件截面开裂为止。

4. 施加预应力对构件的正截面承载力无明显影响

对构件施加预应力主要是改善构件使用阶段的性能(抗裂性、刚度),克服钢筋混凝土的固有缺点,预应力的存在对构件承载力无明显影响。

图 9-2 所示为三根简支梁的荷载-跨中挠度试验曲线。这三根梁的混凝土强度相同,钢筋品种和数量一样,梁的截面尺寸也完全相同,只是预应力的大小各不相同。其中,钢筋张拉控制应力 $\sigma_{\text{con}}=0$ 的梁是钢筋混凝土梁, $\sigma_{\text{con}}=0.655f_{\text{ptk}}$ 的梁是三根试件中预应力最高的梁(f_{ptk} 为这种钢筋的抗拉强度标准值)。由图可见,尽管三根试件的开裂荷载随预应力的增大而明显提高,使用荷载下挠度随预应力的增大而显著减小,但三根试件的破坏荷载 P_u 却基本相同。因此,预应力的存在对构件的承载力并无明显的影响。

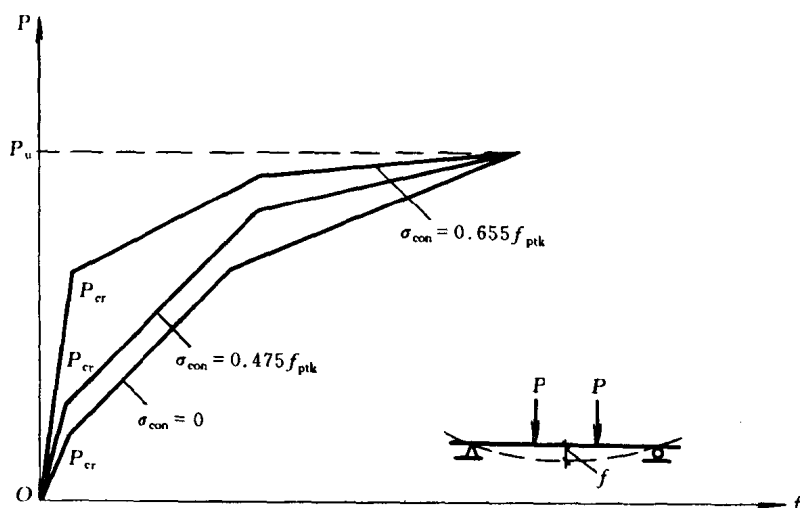


图 9-2 预应力混凝土简支梁荷载-挠度试验曲线

二、预应力的建立方法

预应力的建立方法有多种。但是,最常用也是较简便的方法是通过张拉配置在结构构件内的纵向受力钢筋并使其产生回缩,达到对构件施加预应力的目的。按照张拉钢筋与浇

捣混凝土的先后次序，可将建立预应力的方法分为下面两种。

(一) 先张法

先张法要求设置台座（或钢模），钢筋先在台座（或钢模）上张拉并锚固，然后支模和浇捣混凝土，待混凝土达到一定的强度后放松和剪断钢筋。钢筋放松后将产生弹性回缩，但钢筋与混凝土之间的粘结力阻止其回缩，因而对构件产生预应力。先张法的主要工序如图 9-3 所示。

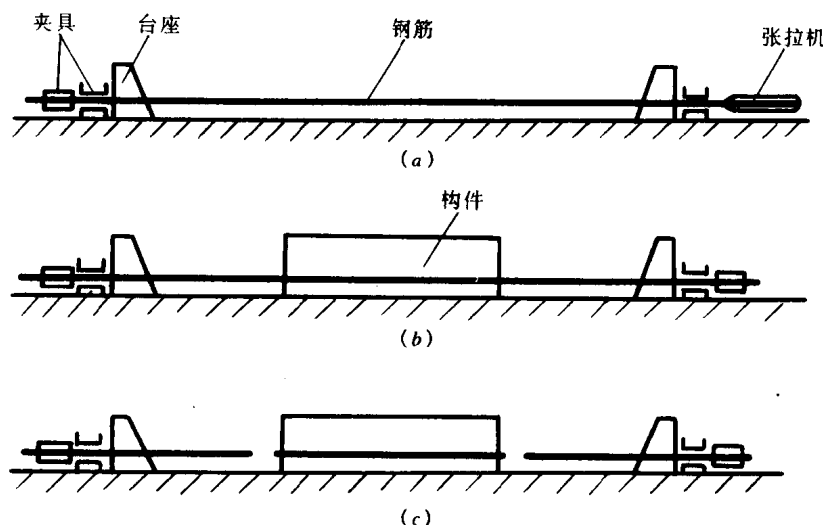


图 9-3 先张法主要工序示意图

(a) 张拉钢筋；(b) 支模并浇捣混凝土；(c) 放松并截断预应力钢筋

(二) 后张法

后张法要求在制作构件时预留孔道，待混凝土达到一定的强度后在孔道内穿入钢筋，并按照设计要求张拉钢筋，然后用锚具在构件端部将钢筋锚固，阻止钢筋回缩，从而对构件施加预应力。钢筋锚固完毕后，为了使预应力钢筋与混凝土牢固结合并共同工作，防止预应力钢筋锈蚀，应对孔道进行压力灌浆。为了保证灌浆密实，在远离灌浆孔的适当部位应预留出气孔。后张法的主要工序如图 9-4 所示。

将先张法和后张法对比可以看出，先张法的生产工序少，工艺简单，质量容易保证。同时，先张法不用工作锚具，生产成本较低，台座越长，一条长线上生产的构件数量越多，所以适合于工厂内成批生产中、小型预应力构件。但是，先张法生产所用的台座及张拉设备一次性投资费用较大，而且台座一般只能固定在一处，不够灵活。后张法不需要台座，比较灵活，构件在现场施工制作时，张拉工作可以在工地进行。但是，后张法构件只能单一逐个地施加预应力，工序较多，操作也较麻烦。同时，后张法构件的锚具耗钢量大，锚具加工要求的精度较高，成本较贵。因此，后张法适用于运输不便的大、中型构件。

三、预应力混凝土构件的锚、夹具

为了阻止被张拉的钢筋发生回缩，必需将钢筋端部进行锚固。锚固预应力钢筋和钢丝的工具通常分为夹具和锚具两种类型。在构件制作完毕后，能够取下重复使用的，称为夹具；锚固在构件端部，与构件联成一体共同受力，不能取下重复使用的，称为锚具。有时

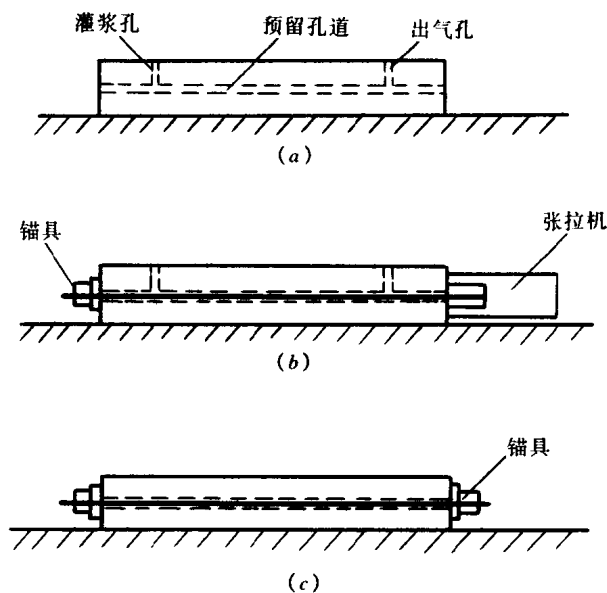


图 9-4 后张法主要工序示意图

(a) 制作混凝土构件；(b) 张拉钢筋；(c) 张拉端锚固并对孔道灌浆

为了简便起见，将锚具和夹具统称为锚具。

锚、夹具的种类很多，图 9-5 所示为几种常用锚、夹具示意图。其中，图 9-5a 为锚固钢丝用的套筒式夹具，图 9-5b 为锚固粗钢筋用的螺丝端杆锚具，图 9-5c 为锚固光面钢筋束用的 JM12 夹片式锚具。

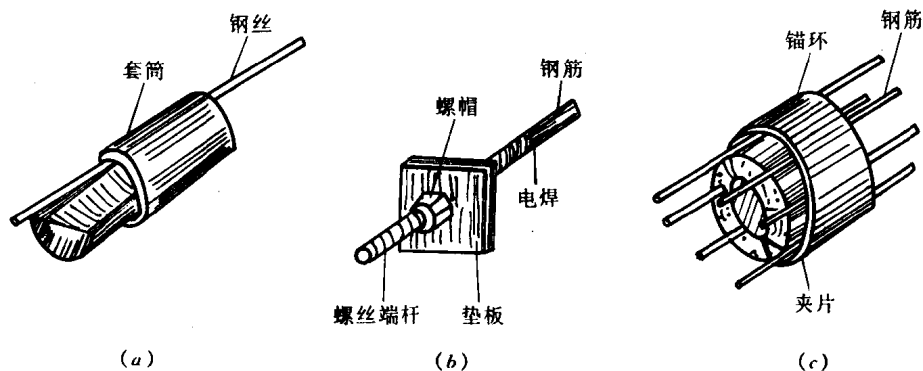


图 9-5 几种常见的锚、夹具示意图

(a) 套筒式夹具；(b) 螺丝端杆锚具；(c) JM12 夹片锚具

四、预应力混凝土构件对材料的要求

预应力钢筋在张拉时就受到很高的拉应力，在使用荷载作用下，钢筋的拉应力会继续提高；在张拉时，混凝土也受到高压应力的作用。为了提高预应力的效果，预应力混凝土构件要求采用强度等级较高的混凝土和钢筋。

(一) 混凝土

预应力混凝土构件的混凝土强度等级不宜低于 C30；当采用碳素钢丝、钢绞线、热处理钢筋作预应力钢筋时，混凝土强度等级不宜低于 C40。

（二）钢筋

预应力钢筋宜采用碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线和热处理钢筋，以及冷拉Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级钢筋。

对中小型构件的预应力钢筋，以往采用甲级冷拔低碳钢丝以及冷拔低合金钢丝。由于冷拔低碳钢丝表面不带肋，与混凝土的粘结锚固性能较差，加之它的延伸率较小，因此，国家科委和建设部曾先后发文，要求用冷轧带肋钢筋取代冷拔低碳钢丝做中小型构件的预应力钢筋。

五、预应力混凝土构件的优缺点

与钢筋混凝土构件相比，预应力混凝土构件具有下列优点：

（一）抗裂性好

由于对构件受力后可能开裂的部位施加了预压应力，且预应力的大小可根据需要人为地控制，因而可避免钢筋混凝土构件在正常使用情况下出现裂缝或裂缝过宽的现象。对于某些抗裂性要求较高的结构和构件，如钢筋混凝土屋架下弦、水池、油罐、压力容器等，施加预应力尤为必要。

（二）耐久性好，刚度大，变形小

由于预应力可以使构件在使用荷载作用下不出现裂缝，避免钢筋受外界有害因素的侵蚀，从而大大提高了这类构件的耐久性。

钢筋混凝土构件开裂后，刚度迅速降低，变形显著增大。预应力构件由于在使用阶段可避免裂缝，因而刚度不发生突变，变形也不明显增大。同时，预应力还将使受弯构件产生一定的反拱。所以，在使用荷载下，预应力混凝土梁、板构件的挠度，往往只有相同情况下钢筋混凝土梁、板构件的几分之一。

（三）可利用强度等级高的钢筋，减轻结构自重

由于预应力混凝土构件中钢筋强度的发挥不再受混凝土抗拉极限应变的限制，而且为了提高预应力的效果，预应力混凝土构件中要求采用强度等级较高的钢筋和混凝土。材料的强度等级较高时，其耗用量降低，使构件截面减小，故结构自重一般可减轻 20%~30%，工程造价相应地也将降低。

（四）可提高构件的抗剪能力

试验表明，纵向预应力钢筋起着锚栓的作用，阻碍着构件斜裂缝的出现与开展，因而可提高构件的抗剪能力。在剪力较大的受弯构件中，可将预应力钢筋在端部弯起，曲线钢筋预应力合力的竖向分力将部分地抵消剪力，因而也对构件抗剪能力的提高产生积极作用。

（五）可提高受压构件的稳定性

混凝土的抗压强度很高，钢筋混凝土受压构件一般都能有效地工作。但是，当受压构件的长细比较大时，在受到一定的压力后便容易被压弯，以致丧失稳定而破坏。如果对钢筋混凝土柱施加预应力，使纵向受力钢筋张拉得很紧，不但预应力钢筋本身不容易压弯，而且可以帮助周围的混凝土提高抵抗压弯的能力，从而提高了构件的稳定性。这也是为什么在必要时将钢筋混凝土桩做成预应力混凝土桩的道理。

（六）可提高构件的抗疲劳性能

在承受多次重复荷载作用的构件中（如吊车梁和桥梁等），当这种反复过程变化频繁，并且超过一定次数时，混凝土和钢筋便会因疲劳而降低强度，从而引起构件破坏。构件的这种破坏称为疲劳破坏。在预应力混凝土构件中，由于受力钢筋事先已张拉，在往复移动荷载的作用下，钢筋应力的变化幅度一般在 10% 左右，不会引起钢筋疲劳，因而提高了构件的抗疲劳性能。

当然，预应力混凝土构件也存在下列缺点：施工制作要求较高的机械设备与技术条件，施工工序较多。此外，预应力混凝土构件的设计计算比钢筋混凝土构件的要复杂一些。但是，从某种意义上来说，预应力混凝土从本质上改善了钢筋混凝土构件的性能。因此，应该尽量推广使用预应力混凝土构件。

六、预应力混凝土结构的发展和应用

预应力混凝土结构于 19 世纪末开始出现，但早期的预应力混凝土由于采用的材料强度低，对预应力损失（尤其是混凝土收缩、徐变等引起的损失）认识不深，预应力效果不显著，预应力混凝土未能很好地发挥其作用。本世纪 30 年代以来，随着高强钢材的大量生产，预应力混凝土得到了真正的发展，目前已在世界各国的房屋建筑、公路与铁道桥梁等工程中广泛应用。在工业与民用建筑中，预应力混凝土不仅用于屋架、折板、吊车梁以及空心板、小梁、檩条等预制构件，而且在大跨度、高层房屋的现浇结构中也得到应用。

第二节 预应力混凝土构件设计的一般规定

一、计算内容

预应力混凝土构件的设计计算，一般应包括以下内容：

（一）使用阶段计算

1. 承载力计算。对预应力混凝土轴心受拉构件，应进行正截面承载力计算。对预应力混凝土受弯构件，除应进行正截面承载力计算外，还须进行斜截面承载力计算。

2. 裂缝控制验算。根据结构物使用及耐久性要求。对于使用阶段不允许开裂的构件，应进行抗裂验算；对于使用阶段允许开裂的构件，则须进行裂缝开展宽度的验算。

3. 变形验算。对于预应力混凝土受弯构件，还应进行挠度验算。

（二）施工阶段验算

预应力混凝土构件除应根据使用条件进行承载力计算及变形、抗裂、裂缝宽度和应力验算外，还应根据具体情况对制作、运输、吊装等施工阶段进行验算，以防止这些构件在制作、运输或吊装时便开裂或破坏。

二、张拉控制应力 σ_{con}

（一）定义

张拉控制应力是指张拉钢筋时，张拉设备（如千斤顶）上的测力计所指示的总张拉力除以预应力钢筋截面面积得出的应力值，用 σ_{con} 表示。

由于摩擦阻力等因素的影响，有时张拉控制应力不一定等于预应力钢筋在张拉时所受到的拉应力。

（二）张拉控制应力的确定原则

张拉控制应力的数值与预应力钢筋的强度标准值 f_{pyk} （软钢）或 f_{ptk} （硬钢）有关。其

确定的原则是：

1. 张拉控制应力应定得高一些。 σ_{con} 越高，在预应力混凝土构件配筋相同的情况下产生的预应力就越大，构件的抗裂性能越好。《混凝土结构设计规范》GBJ10-89（以下简称《规范》）规定：碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线、热处理钢筋的张拉控制应力值不应小于 $0.4f_{ptk}$ ；冷轧带肋钢筋、冷拔低碳钢丝的张拉控制应力值不宜小于 $0.4f_{ptk}$ ；冷拉钢筋的张拉控制应力值不宜小于 $0.5f_{pyk}$ 。

2. 张拉控制应力不能过高。 σ_{con} 过高时，张拉过程中可能发生将钢筋拉断的现象；同时，构件抗裂能力过高时，开裂荷载将接近破坏荷载，使得构件发生破坏前会缺乏预兆。

3. 根据钢筋种类及张拉方法确定适当的张拉控制应力

冷拉热轧钢筋（软钢）可以定得高一些，而高强钢丝、钢绞线等（硬钢）应定得低一些；先张法构件的 σ_{con} 可以定得高一些，后张法构件的应定得低一些。

《规范》确定的张拉控制应力允许值见表 9-1。

张拉控制应力允许值

表 9-1

钢 种	张 拉 方 法	
	先 张 法	后 张 法
碳素钢丝、刻痕钢丝、钢绞线	$0.75f_{ptk}$	$0.70f_{ptk}$
热处理钢筋、冷轧带肋钢筋、冷拔低碳钢丝	$0.70f_{ptk}$	$0.65f_{ptk}$
冷拉钢筋	$0.90f_{pyk}$	$0.85f_{pyk}$

在下列情况下，表 9-1 中的张拉控制应力允许值可提高 $0.05f_{ptk}$ 或 $0.05f_{pyk}$ ：（1）为了提高构件在施工阶段的抗裂性能而在使用阶段受压区内设置的预应力钢筋；（2）为了部分抵消由于应力松弛、摩擦、钢筋分批张拉以及预应力钢筋与张拉台座之间的温差等因素产生的预应力损失。

三、预应力损失 σ_l

按照某一控制应力值张拉好的预应力钢筋的初始张拉应力，会由于各种原因而降低。这种预应力降低的现象称为预应力损失*。

引起预应力损失的因素很多，主要有：张拉端锚具变形和钢筋内缩、预应力钢筋与管道壁的摩擦、混凝土加热养护时被张拉钢筋与承受拉力的设备之间的温差、钢筋的应力松弛、混凝土的收缩与徐变以及配置螺旋式预应力钢筋的环形构件中由于混凝土的局部挤压等。下面将分别对它们进行介绍。

（一）张拉端锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1}

在台座上或直接在构件上张拉钢筋时，一般总是先将钢筋的一端锚固，然后在另一端张拉，待钢筋应力达到设计规定的控制应力值后，再将钢筋在张拉端锚固（图 9-6）。在张拉过程中，锚固端的锚具变形（包括锚具本身的弹性变形、锚具各部件与钢筋之间的相对滑移以及锚具下垫块之间缝隙被压紧等）引起的应力损失，能够为张拉设备及时补偿。而张拉端的锚具变形和钢筋内缩引起的损失，是在该钢筋张拉结束并且传力后产生的，不能再由张拉设备补偿，因此在计算中必须考虑这种预应力损失。

* 由于混凝土弹性压缩引起预应力钢筋初始张拉应力降低的预应力损失，我国现行《规范》未列入。

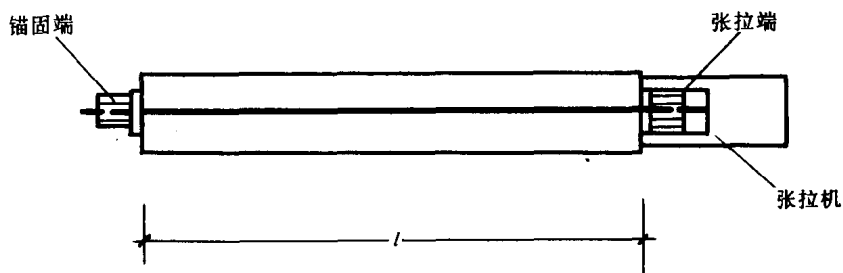


图 9-6 预应力钢筋张拉示意图

预应力直线钢筋由于锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1} ，可按下列公式计算：

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_s \quad (9-1)$$

式中 a ——张拉端锚具变形和钢筋内缩值，按表 9-2 取用；

l ——张拉端至锚固端之间的距离（mm）。

锚具变形和钢筋内缩值 a (mm)

表 9-2

项次	锚具类别	a
1	带螺帽的锚具（包括钢丝束的锥形螺杆锚具、筒式锚具等）：	1
	螺帽缝隙 每块后加垫板的缝隙	1
2	钢丝束的墩头锚具	1
3	钢丝束的钢制锥形锚具	5
4	JM12 锚具：	
	当预应力筋为钢筋时 当预应力筋为钢绞线时	3 5
5	单根冷轧带肋钢筋和冷拔低碳钢丝的锥形夹具	5

注：1. 表中的锚具变形和钢筋内缩值也可根据实测数据确定。

2. 其他类型的锚具变形和钢筋内缩值应根据实测数值确定。

块体拼成的结构，其预应力损失尚应考虑块体间填缝的预压变形。当采用混凝土或砂浆为填缝材料时，每条填缝的预压变形值应取 1mm。

采用预应力曲线钢筋的后张法构件，由于曲线孔道上反摩擦力的影响，使同一钢筋不同位置处的 σ_{l1} 各不相同（图 9-7）。当预应力钢筋为圆弧形曲线，且其对应的圆心角 θ 不大于 30° 时， σ_{l1} 可按下列公式计算：

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_{con} l_t \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_t} \right) \quad (9-2)$$

反向摩擦影响长度 l_t (m) 按下列公式计算：

$$l_t = \sqrt{\frac{a E_s}{1000 \sigma_{con} (\mu/r_c + \kappa)}} \quad (9-3)$$

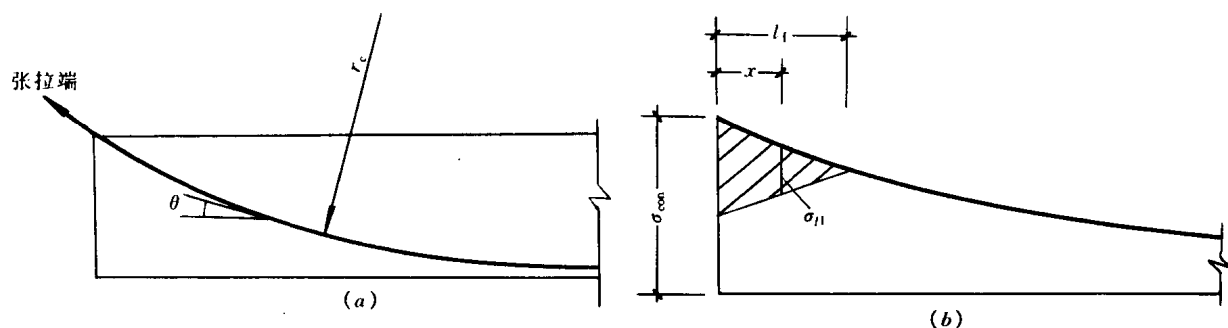


图 9-7 圆弧形曲线预应力钢筋因锚具变形和钢筋内缩引起的损失值

(a) 圆弧形曲线预应力钢筋；(b) σ_{l1} 的分布图

式中 r_c ——圆弧形曲线预应力钢筋的曲率半径 (m)；
 μ ——预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦系数，按表 9-3 取用；
 κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数，按表 9-3 采用；
 x ——张拉端至计算截面的距离 (m)，且应符合 $x \leq l_t$ 的规定；
 a ——锚具变形和钢筋内缩值 (mm)，按表 9-2 取用。

系 数 μ 及 κ 值

表 9-3

项 次	孔道成型方法	κ	μ	
			钢丝束、钢绞线、光面钢筋	变形钢筋
1	预埋铁皮管	0.003	0.35	0.40
2	预埋波纹管	0.0015	0.25	—
3	抽芯成型	0.0015	0.55	0.60

注：当采用钢丝束的钢制锥形锚具及类似形式锚具时，尚应考虑锚环口处的附加摩擦损失，其值可根据实测数据确定。

(二) 预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失 σ_{l2}

后张法构件在张拉钢筋时，预应力钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失 σ_{l2} 可按下列公式计算：

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} \left(1 - \frac{1}{e^{\kappa x + \mu \theta}} \right) \quad (9-4)$$

式中 x ——从张拉端至计算截面的孔道长度 (m)，亦可近似取该段孔道在纵轴上的投影长度；

θ ——从张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角 (rad)。

当 $\mu \theta + \kappa x$ 不大于 0.2 时， σ_{l2} 可按下列公式近似计算：

$$\sigma_{l2} = \sigma_{\text{con}} (\kappa x + \mu \theta) \quad (9-5)$$

先张法构件中，张拉钢筋时混凝土尚未浇灌，因此无此项损失。

(三) 受张拉的钢筋与承受拉力的设备之间的温差引起的预应力损失 σ_{l3}

在先张法构件中，预应力钢筋在台座上张拉锚固且构件浇灌成型后，如采用加热养护，在加热养护初期，混凝土强度尚来不及发展，钢筋则处在自由变形状态中，因受热膨胀而