

高校土木工程
专业指导委员会规划推荐教材

混凝土及砌体结构

(下册)

哈尔滨工业大学 合编
华北水利水电学院
东南大学 主审



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

混凝土及砌体结构

(下 册)

哈尔滨工业大学	合 编		
华北水利水电学院			
哈尔滨工业大学	王振东	主编	
东南大学	丁大钧	主审	

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土及砌体结构·下册/王振东主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2002
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
ISBN 7-112-04786-2

I. 混... II. 王... III. ①混凝土结构—高等学校—教材 ②砌块结构—高等学校—教材 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 110717 号

本书下册内容共 3 章: 预应力混凝土构件的计算、单层厂房结构、砌体结构。

本书可作为高校土木工程专业教材, 也可供土建设计和施工技术人员学习新修订的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002) 和《砌体结构设计规范》(GB50003—2002) 时参考。

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材 混凝土及砌体结构 (下册)

哈尔滨工业大学 合编
华北水利水电学院
哈尔滨工业大学 王振东 主编
东南大学 丁大钧 主审

*

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
北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 266 千字
2003 年 2 月第一版 2003 年 6 月第二次印刷
印数: 6001—13000 册 定价: 19.00 元

ISBN 7-112-04786-2

TU·4275 (10132)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

本书是“混凝土及砌体结构”教材的下册，和上册一起是根据全国高等学校土木工程专业普遍执行“混凝土结构教学大纲”的要求编写而成的。初稿于1996年由国家建设部审批为高等学校推荐教材，2002年由全国高校土木工程学科专业指导委员会审定为规划推荐教材。

此次出版的内容，在编写上和上册具有相同的特点：

首先是根据国内最新修订的《建筑结构荷载规范》(GB50009)、《混凝土结构设计规范》(GB50010)、《建筑地基基础设计规范》(GB50072)和《砌体结构设计规范》(GB50003)等有关设计规范编写而成的，反映了新的科技成果。其次是教材力求内容精炼，便利教学的要求，其中带有“*”号的章节，可供学生自学参考。

参加本下册编写的单位和人员：

哈尔滨工业大学：王振东（教授）、唐岱新（教授、博导），华北水利水电学院：李树瑶（教授）。

本下册编写的分工：李树瑶（第10章）、王振东（第十一章）、唐岱新（第十二章）。

本书由哈尔滨工业大学王振东主编，东南大学丁大钧主审。

由于水平所限，书中有不妥或错误之处，恳请读者指正。

编者

2002年12月

目 录

第 10 章 预应力混凝土构件的计算	(1)
§ 10.1 概述	(1)
§ 10.2 施加预应力的方法及锚夹具	(3)
§ 10.3 预应力混凝土的材料	(7)
§ 10.4 预应力混凝土构件计算的一般规定	(8)
§ 10.5 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(16)
§ 10.6 预应力混凝土受弯构件的计算	(34)
§ 10.7 预应力混凝土构件的构造要求	(52)
参考文献	(55)
第 11 章 单层厂房结构	(56)
§ 11.1 概述	(56)
§ 11.2 单层厂房结构的组成和布置	(57)
§ 11.3 排架计算	(63)
§ 11.4 单层厂房柱	(80)
§ 11.5 柱下独立基础(扩展基础)	(91)
§ 11.6 单层厂房各构件与柱连接	(97)
§ 11.7 单层厂房屋盖结构	(100)
§ 11.8 吊车梁	(107)
§ 11.9 单层厂房结构设计例题	(109)
参考文献	(128)
第 12 章 砌体结构	(129)
§ 12.1 概述	(129)
§ 12.2 砌体材料	(130)
§ 12.3 砌体及其力学性能	(133)
§ 12.4 砌体结构的强度计算指标	(139)
§ 12.5 无筋砌体构件的承载力计算	(143)
§ 12.6 混合结构房屋墙、柱设计	(156)
§ 12.7 配筋砌体结构构件的承载力计算	(171)
§ 12.8 混合结构房屋其他结构构件设计	(178)
参考文献	(192)
附录	(194)
附录 A 与时间相关的预应力损失	(206)

第 10 章 预应力混凝土构件的计算

§ 10.1 概 述

预应力混凝土结构，是在结构承受外荷载之前，预先对其施加压力，使其在外荷载作用时的受拉区混凝土内产生压应力，以抵消或减小外荷载产生的拉应力，使构件在正常使用情况下不裂或裂得较晚（裂缝宽度较小）。预应力混凝土结构广泛应用于土木工程各个领域，如工业与民用建筑中的预应力空心楼板、屋面大梁、屋架及吊车梁等；其他，在桥梁、水利、海洋及港口工程中均已得到广泛的应用和很大的发展。采用预应力结构的原因有以下几个方面：

(1) 为了满足裂缝控制的要求 普通钢筋混凝土构件抗裂性能较差，在正常使用情况下往往会开裂，甚至会产生较宽的裂缝。有些结构，如水池、油罐、原子能反应堆、受到侵蚀性介质作用的工业厂房以及水利、海洋、港口工程结构物等，应具有较高的密闭性或耐久性，在裂缝控制上要求较严。采用预应力混凝土结构易于满足这种要求（不出现裂缝或裂缝宽度不超过允许的极限值）。

(2) 为了充分利用高强度材料 在工程结构中，特别是对跨度大及承受重型荷载的构件，应采用高强度钢筋及高强度混凝土，以提高结构承载力，减轻自重，降低造价。而在普通钢筋混凝土构件中，采用高强钢筋虽能较大地提高结构承载力，但因钢筋应力过高，致使裂缝开展过宽，影响结构物正常使用；对于允许开裂的普通钢筋混凝土构件，当最大裂缝宽度允许值限制在 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ 范围内时，钢筋应力只达到 $15 \sim 25\text{N/mm}^2$ 左右，配置高强钢筋远不能充分发挥作用；因而需要这些构件事先预加压力，对裂缝加以控制，以达到充分利用高强度钢筋，使结构达到高强轻质的目的。

(3) 为了提高构件刚度，减小变形 有些结构物对于变形控制亦有较高要求，如工业厂房中的吊车梁，桥梁中的大跨度梁式构件等。采用预应力结构由于提高了抗裂度或减小了裂缝宽度，可使刚度不至于因裂缝原因而降低过多，有利于控制变形。同时，由于预加压力的偏心作用而使构件产生的反拱，还可以抵消或减小在使用荷载下产生的变形。

上面所列采用预应力混凝土结构的原因，都与它具有较好控制裂缝的性能有关。现以一预应力简支梁为例来说明其基本受力原理（图 10-1）。在外荷载作用前，预先在混凝土梁拉区施加一对偏心轴向压力 P ，在梁的下缘纤维产生压应力 σ_{pc} （图 10-1a），在外荷载作用下，梁下缘产生拉应力 σ_t （图 10-1b），截面上最后的应

力状态应是二者的叠加,梁的下缘可能是压应力(当 $\sigma_{pc} > \sigma_t$ 时),也可能是较小的拉应力(当 $\sigma_{pc} < \sigma_t$ 时)(图10-1c)。由于预应力 σ_{pc} 的作用,可部分抵消或全部抵消外荷载引起的拉应力,因而能延缓裂缝的出现(提高抗裂荷载)。对于在使用荷载下出现裂缝的构件,也将起减小裂缝宽度的作用。

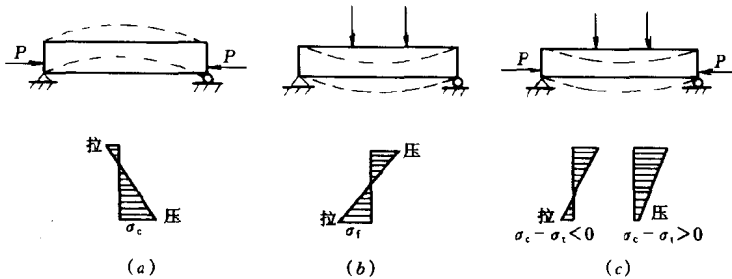


图 10-1

(a) 在预压力作用下; (b) 在外荷载作用下; (c) 在预压力及外荷载共同作用下

对于预应力混凝土结构,可依据其预应力度不同,划分为若干等级。1970年国际预应力混凝土协会和欧洲混凝土委员会(CEB—FIP)曾建议将钢筋混凝土分成四个等级:

I级(全预应力混凝土)——在最不利荷载效应组合作用下,混凝土中不允许出现拉应力;

II级(有限预应力混凝土)——在最不利荷载效应组合作用下,混凝土中允许出现低于抗拉强度的拉应力,但在长期荷载效应作用下,不得出现拉应力;

III级(部分预应力混凝土)——允许开裂,但应控制裂缝宽度;

IV级(普通钢筋混凝土)。

在预应力混凝土发展初期,设计时要求在全使用荷载作用下,混凝土永远处于受压状态,而不允许出现拉应力,即要求为“全预应力混凝土”。但实践表明,要求混凝土中严格不准出现拉应力实属过严,在某些情况下,预应力混凝土中不仅可以允许出现拉应力,甚至可允许出现宽度不超过限值的裂缝。有时在最不利荷载效应组合(包括长、短期作用的荷载)作用下出现了裂缝,而在长期荷载效应作用下,裂缝还可以重新闭合。

部分预应力混凝土有以下优点:①由于部分预应力混凝土所需施加的预应力较小,张拉钢筋应力值可取得较低,降低了对张拉设备及锚夹具的要求,或可用一部分中强度的非预应力钢筋来代替高强度的预应力钢筋(混合配筋);这些都将降低造价。②由于施加预应力较小,可避免产生过大反拱。

预应力混凝土构件的设计计算,一般包括以下几个方面的内容:

1. 使用阶段

①承载力计算;②裂缝控制验算;③变形验算。

2. 施工阶段

①应力校核；②后张法构件端部局部受压验算。

§ 10.2 施加预应力的方法及锚夹具

10.2.1 施加预应力的方法

使构件混凝土中产生预应力的方法有多种，一般采用张拉钢筋的方法，由于受张拉钢筋的弹性回缩，使混凝土获得压应力。预加应力的方法主要有两种：

1. 先张法（浇灌混凝土前张拉钢筋，图 10-2）

先张法的主要工序为：在台座上张拉钢筋至预定长度后，将锚筋固定在台座的传力架上，然后浇灌混凝土。待混凝土达到一定强度后（约为设计强度的 70% 以上），切断钢筋。由于钢筋的弹性回缩，使得与钢筋粘结在一起的混凝土受到预压应力。因此，先张法是靠钢筋与混凝土间的粘结力来传递预应力的。

先张法适宜于用长线台座（台座长 50~200m）成批生产配直线预应力钢筋的构件，如房屋的槽条、屋面板及空心楼板等。其优点为生产效率高，施工工艺及程序较简单。

除台座外，先张法为张拉及固定预应力钢筋，还需要一套传力架、千斤顶和锚固及夹持钢筋的设备。也可以不用台座而在钢模上张拉。

2. 后张法（混凝土结硬后在构件上张拉钢筋，图 10-3）

后张法的主要工序为：先浇灌好混凝土构件，并在构件中预留孔道（直线形或曲线形）。待混凝土达到预期强度（不低于设计强度的 70%）后，将预应力钢筋穿入孔道，利用构件本身作为受力台座进行张拉（一端锚固，另一端张拉或两端同时张拉）。在张拉钢筋的同时，混凝土受到压缩，张拉完毕后，将张拉端钢筋用工作锚具锚紧（此种锚具将永远留在构件内）。最后，在孔道内进行压力灌浆，以

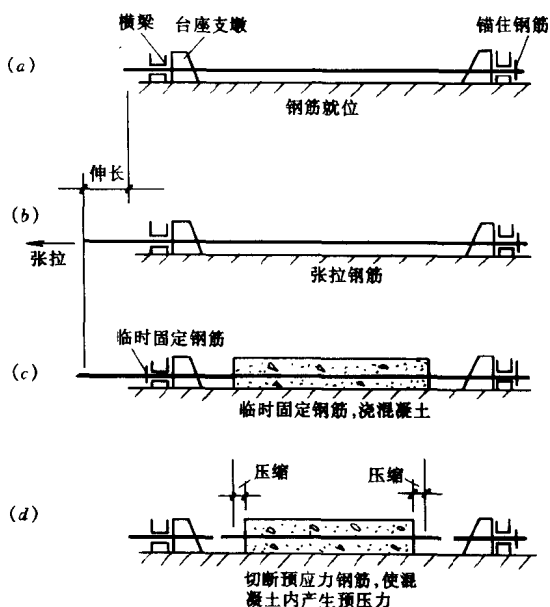


图 10-2 先张拉工艺

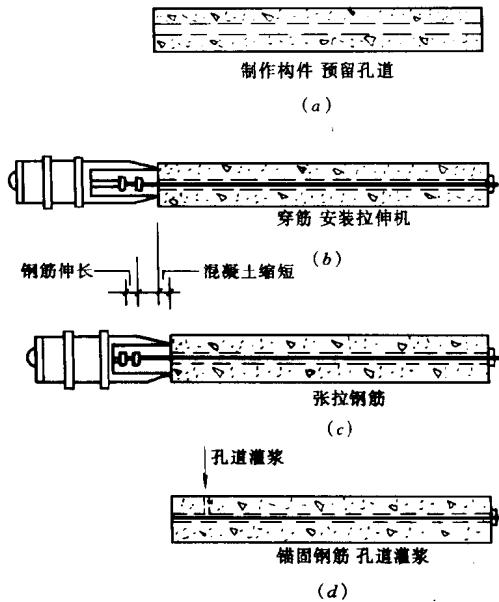


图 10-3 后张拉工艺

防止钢筋锈蚀,并使钢筋与混凝土较好地结成一个整体。后张法的特点是钢筋内的预应力靠构件两端工作锚具传递给混凝土。

后张法不需要专门台座,便于在现场制作大型构件或对结构的某一部分施加预应力,适宜于采用配置直线及曲线预应力钢筋的构件。采用后张法,预应力钢筋布置灵活,施加预应力时可以整束张拉,也可以单根张拉。其缺点有:施工工艺较复杂(钢筋中预应力需分别建立,并需增加在混凝土中预留孔道、穿筋及灌浆等工序),每个构件均需附有工作锚具,耗钢量较大及成本较高等。

随着建筑结构技术和建筑材料技术不断发展,从传统后张预应力方法中又派生出多种门类的后张预应力:

(1) **无粘结预应力** 其方法是使用工厂专门制作的无粘结钢绞线;这种钢绞线是在普通钢绞线外表涂一层油脂,然后外包一层 0.8mm 厚塑料套管 (PE 管),使套管和钢绞线之间可以相对滑动。制作时只需将这种无粘结钢绞线象普通钢筋一样放入模板内,浇注混凝土并在结硬以后张拉钢绞线,张拉完毕后不必压力灌浆。这种方法施工相当方便,但钢绞线的极限应力比有粘结情况略低。

(2) **体外预应力** 在桥梁等大型构件中应用较多,有时也用于房屋结构的体外预应力加固。这种方法是预应力筋的张拉端和固定端分别有一个固定在构件上的锚具和支座,如果是曲线配筋,在弯折处要设预应力筋的转向块。预应力钢绞线穿过锚具和转向块,但预应力筋并不埋入构件混凝土内部,而是在构件外部或箱形截面梁的“箱”内。这种方法多用于薄壁的大型构件中。

10.2.2 锚具与夹具

锚具和夹具是锚固及张拉预应力钢筋时所用的工具。在先张法中,张拉钢筋时要用张拉夹具夹持钢筋,张拉完毕后,要用锚固夹具将钢筋临时锚固在台座上。如预应力钢筋与混凝土之间的握裹力达不到自锚要求时,还要设置附加锚具。在后张法中则要用锚具来张拉及锚固钢筋。一般在构件制成后能够取下重复使用的称为夹具(也称工具锚)。留在构件端部,与构件连成为一个整体共同受力不再取下的称为锚具(也称工作锚)。对锚具的要求应保证安全可靠,其本身应有足够的

强度及刚度，使预应力钢筋尽可能不产生滑移，以保证预应力得到可靠传递，减少预应力损失，并尽可能使构造简单，节省钢材及造价。

锚具的形式很多。选择哪一种锚具与构件外形、预应力钢筋的品种、规格和数量有关，同时还要与张拉设备相配套。从不同角度来区分，有下面几种锚具：

按所锚固的钢筋类型区分，可分为锚固粗钢筋的锚具、锚固平行钢筋（丝）束的锚具及锚固钢绞线束的锚具等几种。对于粗钢筋，一般是一个锚具锚住一根钢筋，对于钢丝束和钢绞线，则一个锚具须同时锚住若干根钢丝或钢绞线。

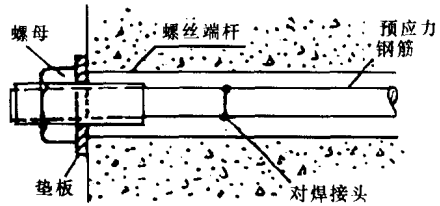


图 10-4 螺丝端杆锚具

按锚固和传递预拉力的原理来分，可分为：依靠承压力的锚具，依靠摩擦力的锚具及依靠粘结力的锚具等几种。

下面介绍几种国内常用锚具的形式：

1. 螺丝端杆锚具 (图 10-4)

这是单根预应力粗钢筋常用的锚具，在张拉端采用，由端杆和螺母两部分组成 (图 10-4)。预应力钢筋张拉端通过对焊与一根螺丝端杆连接。张拉端的螺丝杆连接在张拉设备上。张拉后预应力钢筋通过螺帽和钢垫板将预压力传到构件或台座上。这种形式的锚具适用于直径为 12~40mm 经冷拉的 HRB335 级及 HRB400 级钢筋。

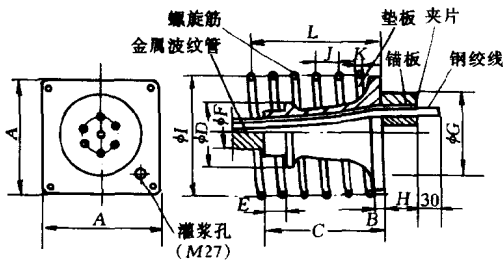


图 10-5 夹片式 (OM) 锚具

2. 夹片式锚具

这类锚具是目前在后张法预应力系统中应用最广泛的锚具 (图 10-5)，它可以根据需要，每套锚具锚固 1~100 根钢绞线。所锚固的钢绞线通常分直径为 15.2mm (0.6") 和 12.7mm (0.5") 两种。每套锚具由一个锚座、一个锚环和若干个夹片组成。

每个锚环上的锥形圆孔数目与钢绞线根数相同，每个孔道通过两片 (或三片) 有牙齿的钢夹片夹住钢绞线，以阻止其滑动。国内常见的夹片式锚具有 HVM、OVM、XM、QM 等型号。国际著名的 VSL 夹片式锚具产品也已逐渐在我国的预应力工程中应用。图 10-6 为一套典型的夹片式锚具中 VSLEC 型锚具示意图。

目前国内外对夹片式锚具系统作了进一步研制开发工作，如柳州海威姆建筑机械有限公司，推出了新一代 HVM 型 2000 级超高强预应力锚固体系；该型锚具

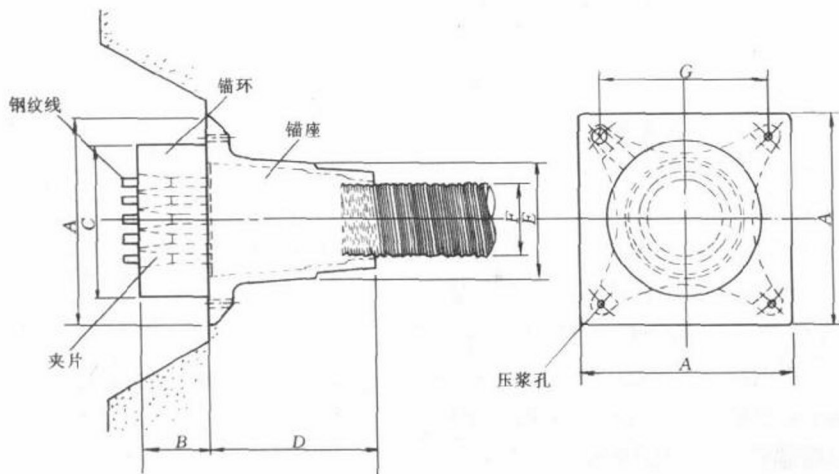


图 10-6 VSL EC 型锚具

在研制开发过程中,对夹片、锚板及锚垫板等主要部件,进行了三维有限元弹塑性分析和优化设计,与以往国内同类产品比较,各部件的尺寸有所减小,能可靠地夹持极限强度为 2000MPa 及以下的预应力钢绞线。

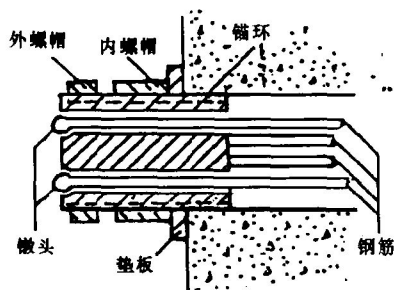


图 10-7 墩头锚具

最近 VSL 国际集团又推出新一代全封闭、全绝缘的 CS 型超级锚固系统。它采用高性能混凝土锚座、塑料波纹管 and 塑料密封锚具保护盖帽,配合真空辅助压浆新工艺,可以使预应力钢绞线与外界完全隔绝且不导电,彻底防止了钢绞线因导电而产生松弛和电化学腐蚀以及空气对钢绞线的腐蚀。这套工艺已成功应用于南京长江二桥等工程中。

3. 墩头锚具 (图 10-7)

这种锚具用于锚固多根直径为 10~18mm 的平行钢筋束或 18 根以下直径为 5mm 的平行钢丝束。锚具由锚环、外螺帽、内螺帽和垫板组成(均由 45 号钢制成)。锚环应先进行热处理调质后再加工。锚环上的孔洞数和间距均由被锚固的预应力钢筋(或钢丝)的根数和排列方式来决定。

操作时,将钢筋(或钢丝)穿过锚环孔眼,用冷墩或热墩的方法将钢筋或钢丝的端头墩粗成圆头,与锚环固定。然后将预应力钢筋(丝)束穿过构件的预留孔道。待钢筋伸出孔道口后,套上螺帽进行张拉,边拉边旋紧内螺帽。张拉后依靠螺帽把整个预应力钢筋(丝)束锚固在构件上。它具有锚固性能可靠、锚固力大及张拉操作方便等优点,但要求钢筋或钢丝的下料长度有较高的准确性。

§ 10.3 预应力混凝土的材料

10.3.1 钢 筋

在预应力混凝土结构中，对预应力钢筋有下列要求：

(1) 强度要高 强度越高，可建立的预应力越大。在构件制作、使用过程中，预应力钢筋中将出现各种应力损失，其总和有时可高达 200N/mm^2 以上。如果钢筋强度不高，则达不到预期的预应力效果。

(2) 与混凝土间有足够的粘结强度 在先张法构件中预应力钢筋与混凝土之间必须有较高的粘结自锚强度。如采用光面高强钢丝，表面应经过“刻痕”或“压波”等措施处理后方能使用。

(3) 具有足够的塑性 钢材强度越高，其塑性越低。塑性用拉断钢筋时的伸长率来度量，即要求具有一定的伸长率以保证不发生脆性断裂。当构件处于低温或受到冲击荷载作用时，更应注意塑性和抗冲击性的要求。

(4) 具有良好的加工性能（即要求钢筋有良好的可焊性）在钢筋（丝）“墩粗”后，其原有的物理力学性能基本不受影响。

预应力钢筋宜采用钢绞线、钢丝、也可采用热处理钢筋。

1. 钢丝、钢绞线

预应力钢丝系指国家标准《预应力混凝土用钢丝》(GB5223)中的三面刻痕钢丝、螺旋肋钢丝和光面并经消除应力的高强度圆形钢丝。

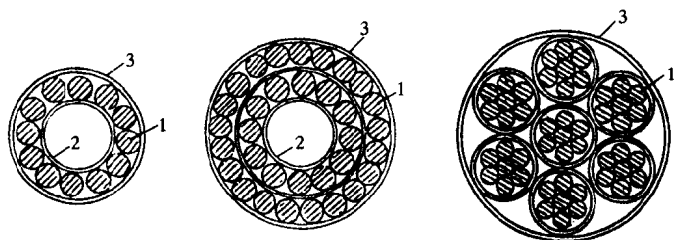


图 10-8

1—钢丝；2—芯子；3—绑轧铁丝

高强钢丝大多用于大跨度构件中。在后张法构件中，当需要钢丝数量很多时，钢丝常成束布置，就是将几根或几十根钢丝按一定规律平行排列，用铁丝扎在一起，称为钢丝束。排列的方式有好几种，如图 10-8 所示。

钢绞线是由多根（例如 7 根）平行的钢丝用铰盘按一个方向绞成（图 10-9）。钢绞线与混凝土粘结较好，比钢筋及钢丝束柔软，运输及施工方便，先张法与后张法均可使用。

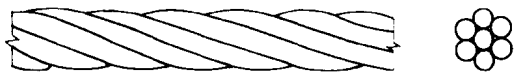


图 10-9 钢绞线

2. 热处理钢筋

热处理钢筋有 40Si2Mn、48Si2Mn 及 45Si2Cr 等品种, 其强度标准值为 $1470\text{N}/\text{mm}^2$, 且具有

应力松弛小等特点。它以盘圆形式供应, 可省掉冷拉、对焊、整直等工序, 使得施工方便。

10.3.2 混 凝 土

在预应力混凝土构件中, 对混凝土有下列要求:

(1) 强度较高 为与高强度预应力钢筋(丝)相适应, 保证钢筋充分发挥作用, 减小构件截面尺寸及自重, 宜采用强度较高的混凝土。混凝土强度越高, 则施加的预应力也可以越大, 有利于控制构件的裂缝及变形, 并能减小由于混凝土徐变引起的预应力损失。《规范》规定, 预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C30。当采用钢丝、钢绞线、热处理钢筋作预应力钢筋时, 混凝土的强度等级不应低于 C40。

(2) 收缩徐变较小 减小预应力损失。

(3) 快硬、早强 尽快能施加预应力, 提高施工效率, 在先张法中可提高台座的周转率。

§ 10.4 预应力混凝土构件计算的一般规定

10.4.1 预应力钢筋的张拉控制应力

张拉控制应力是指张拉钢筋时预应力钢筋中达到的最大应力值, 即用张拉设备(如千斤顶)所控制的总张拉力除以预应力钢筋截面面积所得出的应力值, 以 σ_{con} 表示。

张拉控制应力定得越高, 混凝土中获得的预压应力越大, 预应力钢筋被利用得越充分, 构件的抗裂性则提高得越多; 但 σ_{con} 定得过高, 也有不利的一面: ①钢筋的强度是有一定离散性的, 如将 σ_{con} 定得过高, 张拉时可能使钢筋应力接近或达到实际的屈服强度。对于高强度硬钢, 还应考虑到张拉力不够准确, 焊接质量不好而将高强度钢筋(丝)拉断, 可能出现事故; ②如 σ_{con} 定得过高, 在施工阶段会使预拉区混凝土产生拉应力甚至开裂, 对后张法则可能不满足端部混凝土局部受压承载力验算的要求。

张拉控制应力 σ_{con} 主要与钢筋种类及张拉方法关。钢丝、钢绞线塑性较差, 没有明显的屈服台阶, 其强度标准值是根据极限抗拉强度确定的, 故 σ_{con} 就定得低些。为使构件由施加张拉控制应力所获得的预应力值大致相等, 一般先张法的 σ_{con}

值应定得比后张法大一些，这是由于先张法中张拉钢筋达到控制应力时，混凝土尚未浇灌，而当放松预应力钢筋使混凝土受到预压应力时，钢筋即随着混凝土的弹性压缩而回缩，此时钢筋的预拉应力已小于控制应力。而对后张法构件，在张拉钢筋的同时，混凝土已受到弹性压缩，可不必考虑由于混凝土弹性压缩而引起钢筋应力值的降低。此外，对由于混凝土收缩所引起的预应力损失，先张法构件亦较后张法为大。

《规范》规定，预应力钢筋的张拉控制应力值 σ_{con} 不宜超过表10-1规定的数值。但在表10-1中，无论是先张法或后张法对钢丝、钢绞线的取值是相等的，这是考虑到对后张法在张拉过程中的高应力在预应力钢筋锚固后降低很快，同时这类钢筋材质稳定，对控制应力取值稍高，一般不会引起预应力钢筋拉断事故，但提高了预应力的经济效益。

设计预应力构件时，表10-1所列的数值可根据情况和施工经验作适当调整。在下列情况下，表10-1中的张拉控制应力允许值可提高 $0.05f_{ptk}$ （ f_{ptk} 为预应力钢筋强度标准值）：

(1) 要求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) 要求部分抵消由于钢筋应力松弛、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。

张拉控制应力限值 表 10-1

钢筋种类	张拉方法	
	先张法	后张法
消除应力钢丝、钢绞线	$0.75f_{ptk}$	$0.75f_{ptk}$
热处理钢筋	$0.70f_{ptk}$	$0.65f_{ptk}$

预应力钢丝、钢绞线、热处理钢筋的张拉控制应力值 σ_{con} 不应小于 $0.4f_{ptk}$ 。

10.4.2 预应力损失

自钢筋张拉、锚固到后来经历运输、安装、使用的各个过程，由于张拉工艺和材料特性等种种原因，钢筋中的张拉应力将逐渐降低，称为预应力损失。预应力损失会影响预应力效果从而降低预应力混凝土构件的抗裂性能及刚度。因此，正确分析估算各种预应力损失，并探求减少这些损失的措施是预应力混凝土结构设计、施工及科研工作中的重要课题之一。下面对这些损失分项进行讨论。

1. 张拉端锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 σ_{l1}

预应力张拉完毕后，用锚具加以锚固。由于锚具的变形（如螺帽、垫板缝隙被挤紧）及由于钢筋在锚具内的滑移使钢筋松动内缩而引起预应力损失。对于直线形预应力钢筋， σ_{l1} （ N/mm^2 ）可按下式计算：

$$\sigma_{l1} = \frac{a}{l} E_s \quad (10-1)$$

式中 a ——张拉端锚具变形和钢筋内缩值,按表 10-2 取用;

l ——张拉端至锚固端之间的距离 (mm);

E_s ——预应力钢筋的弹性模量 (N/mm^2)。

锚具损失只考虑张拉端,因为在张拉钢筋时,固定端的锚具已被压紧,不会引起预应力损失。

为了减小 σ_{l1} ,应尽量少用垫板块数,因为每增加一块垫板, a 值就增大 1mm。

锚具变形和钢筋内缩值 a (mm)

表 10-2

锚具类别		a
支承式锚具 (钢丝束锚头锚具等)		
螺帽缝隙		1
每块后加垫板的缝隙		1
锥塞式锚具 (钢丝束的钢质锥形锚具等)		5
夹片式锚具	有顶压时	5
	无顶压时	6~8

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据确定。

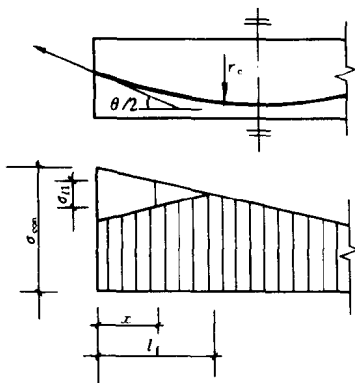


图 10-10 圆弧形曲线预应力钢筋的预应力损失 σ_{l1} 值

(a) 圆弧形曲线预应力钢筋;

(b) 预应力损失值 σ_{l1} 分布

对于后张法构件预应力曲线钢筋,因为张拉时预应力钢筋与孔道壁间已产生指向锚固端的摩擦力,而当锚具变形、预应力钢筋回缩时,在离张拉端 l_f 范围内,使预应力钢筋与孔道壁之间摩擦力随之逐渐减小,最后转为与原来相反方向的摩擦力,以阻止预应力钢筋的回缩,考虑这种反向摩擦的影响而引起预应力钢筋应力的损失值为 σ_{l1} (N/mm^2)。计算时,该 σ_{l1} 值可根据锚具变形和钢筋内缩等于 l_f 范围内的钢筋变形值的条件来确定, l_f 为预应力曲线钢筋与孔道壁之间反向摩擦影响长度。预应力曲线配筋实际有多种形式,《规范》对常用的圆弧形曲线(抛物线形预应力钢筋可近似按圆弧形曲线考虑 $\theta \leq 30^\circ$)的预应力钢筋应力损失值给出了

计算公式。在推导时假定预应力钢筋与孔道壁的摩擦阻力系数在正向及反向相等。此时,预应力损失 σ_{l1} 按下式计算^[10-5] (图 10-10)。

$$\sigma_{l1} = 2\sigma_{\text{con}} l_f \left(\frac{\mu}{r_c} + \kappa \right) \left(1 - \frac{x}{l_f} \right) \quad (10-2)$$

反向摩擦影响长度 l_f (以米计, 从构件张拉端计算) 按下列公式计算:

$$l_f = \sqrt{\frac{aE_s}{1000\sigma_{con}(\mu/r_c + \kappa)}} \quad (10-3)$$

- 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 10-3 取用;
 κ ——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数, 按表 10-3 取用;
 x ——张拉端至计算截面的距离 (m), 且应符合 $x \leq l_f$ 的规定;
 a ——锚具变形和钢筋内缩值 (mm), 按表 10-2 取用;
 E_s ——预应力钢筋弹性模量 (N/mm²).

2. 预应力钢筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失 σ_{l2}

后张法张拉钢筋时, 由于钢筋与混凝土孔道壁之间的摩擦, 钢筋的实际预应力从张拉端往里逐渐减小(图 10-11)。产生摩擦损失的原因为: ①孔道直线长度的影响。从理论上讲, 当孔道为直线时, 其摩擦阻力为零, 但实际上由于在施工时孔道内壁凹凸不平和孔道轴线的局部偏差, 以及钢筋因自重下垂等原因, 使钢筋某些部位紧贴孔道壁而引起摩擦损失; ②孔道曲线布置的影响。预应力钢筋在弯曲孔道部分张拉, 产生了对孔道壁垂直压力而引起摩擦损失。 σ_{l2} 宜按下式计算(图 10-11)。

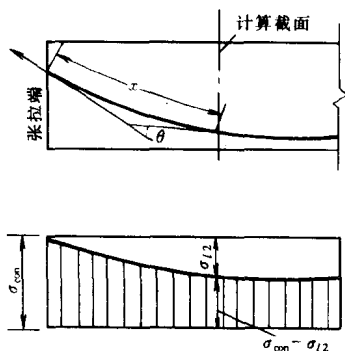


图 10-11 摩擦损失示意图

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} \left(1 - \frac{1}{e^{Kx - \mu\theta}} \right) \quad (10-4)$$

- 式中 x ——从张拉端至计算截面的孔道长度 (m), 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(以弧度 rad 计)。系数 K 及 μ 的意义同上, 列于表 10-3。

摩擦系数

表 10-3

孔道成型方式	K	μ
预埋金属波纹管	0.0015	0.25
预埋钢管	0.0010	0.30
橡胶管或钢管抽芯成型	0.0014	0.55

注: 1. 表中系数值也可根据实测数据确定;

2. 当采用钢丝束的钢质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。

3. 混凝土加热养护时, 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}

对于先张法构件, 预应力钢筋在常温下张拉及锚固在台座上并浇灌好混凝土后, 为了缩短生产周期, 常将构件进行蒸汽养护。在养护升温时, 混凝土尚未结硬, 与钢筋未粘成整体。由于钢筋的温度升高较台座为高, 二者之间引起温差, 钢筋的伸长值大于台座的伸长值。而钢筋已被拉紧并锚固在台座上不能自由伸长, 故钢筋的拉紧程度较前变松, 即张拉应力有所降低 (钢筋的部分弹性变形转化为温度变形)。降温时, 混凝土已与钢筋粘成整体, 能够一起回缩, 相应的应力不再发生变化。

受张拉的钢筋与承受拉力设备之间的温差为 Δt , 钢材的线膨胀系数为 $0.00001/\text{C}$, 则单位长度钢筋伸长 (即放松) 为 $0.00001 \times \Delta t$, 故应为损失为:

$$\sigma_{l3} = 0.00001 \times \Delta t \times E_s = 0.00001 \times 2 \times 10^5 \Delta t = 2\Delta t \quad (10-5)$$

为了减小温差损失, 可采用两次升温养护。先在常温下养护, 待混凝土立方强度达到 $7.5 \sim 10 \text{N/mm}^2$ 时再逐渐升温, 因为这时钢筋与混凝土已结成整体, 能够在一起膨胀而无应力损失。对于在钢模上张拉预应力钢筋的构件, 因钢模和构件一起加热养护, 可以不考虑此项损失。

4. 预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失 σ_{l4}

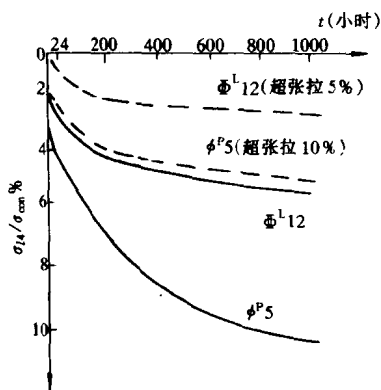


图 10-12 预应力钢筋、
钢丝应力松弛损失曲线
注: 图中 ϕ^L12 为原
《规范》规定的冷拉 IV 级钢筋。

在高应力作用下, 随着时间的增长, 钢筋中将产生塑性变形 (徐变)。在预应力混凝土构件中, 钢筋长度基本不变, 其中拉应力会随时间增长而逐渐降低, 此种现象称为松弛 (或称徐舒)。所降低的应力值称为应力松弛的损失。不论是先张法还是后张法都有此项损失。图 10-12 表示常温下钢筋和预应力钢丝实测的应力松弛随时间而变化的关系。

由试验可知:

(1) 应力松弛损失在开始阶段发展快, 以后发展较慢。根据试验, 当钢丝中的初始应力为钢丝极限强度的 70% 时, 第一小时的松弛损失值约为 1000 小

时的 22%, 第 120 天的松弛损失约为 1000 小时的 114%。

(2) 张拉控制应力 σ_{con} 越高, 应力松弛损失值越大。

(3) 应力松弛损失与钢筋品种有关。试验表明, 预应力钢丝、钢绞线的应力松弛损失较大。

《规范》根据国内试验资料, 对不同钢种钢筋的应力松弛损失 σ_{l4} 分别按以下规定计算: