

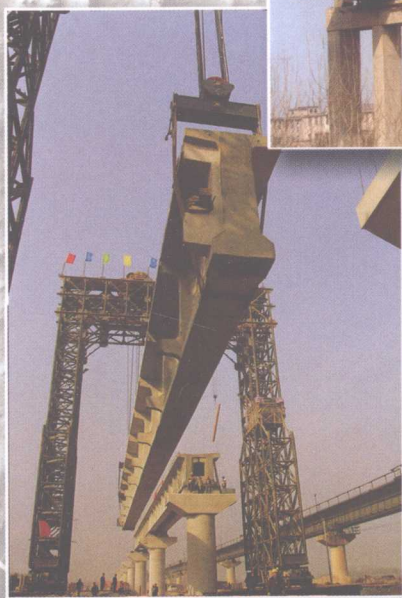


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

混凝土结构 设计原理

(第二版)

李乔 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

要 容 内



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材

混凝土结构设计原理

(第二版)

	李 乔	主 编
李 乔	龙若迅	李 力
	荣国能	黄雄军
		白国良
		编
		主 审

中 国 铁 道 出 版 社

2009年·北京

凡购买本书者，均可获赠《混凝土结构设计原理》一书，数量有限，送完即止。

地址：北京市丰台区右安门外大街22号 邮编：100054

电话：(010)51873100 传真：(010)51873104

网址：www.tdpress.com

ISBN 978-7-113-10344-6/ TU · 1051

定价：38.00元

内 容 提 要

本书主要介绍钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构基本构件的设计计算原理。主要内容包括材料的物理力学性能、结构设计方法、轴心受力构件正截面承载力计算、受弯构件正截面和斜截面承载力计算、受扭构件承载力计算、偏心受力构件正截面承载力计算、钢筋混凝土构件的变形和裂缝验算、预应力混凝土构件的设计计算等,对部分预应力混凝土结构和无黏结预应力混凝土结构也作了简要介绍。本书力求以讲原理为主,不过多地讲解规范条文规定,以避免因涉及几种规范的不一致而造成混乱,也不致于使内容过于繁杂。

本书为高等学校土木工程大类专业(包括桥梁工程、隧道工程、建筑工程、道路与铁道工程和岩土工程等专业方向)的本科教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/李乔编著. —2版. —北京:中国铁道出版社,2009.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-10344-6

I. 混… II. 李… III. 混凝土结构—结构设计—高等学校—教材
IV. TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 135272 号

书 名: 混凝土结构设计原理(第二版)

作 者: 李 乔 主编

策划编辑: 李丽娟

责任编辑: 李丽娟 电话:(010)51873135

封面设计: 马 利

责任校对: 孙 玫

责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 三河市华丰印刷厂

版 次: 2001年8月第1版 2009年8月第2版 2009年8月第7次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18.5 字数: 460千

书 号: ISBN 978-7-113-10344-6/TU·1051

定 价: 35.00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,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

再版前言

本教材第一版是在2001年根据教育部1996年高等学校新专业目录面向土木工程大类专业编写的,覆盖原桥梁工程、隧道工程、建筑工程、道路与铁道工程和岩土工程等专业方向。本次再版作了较大改动。首先,在内容的编排上作了调整,按照先易后难的原则,把轴心受力构件正截面承载力计算提前到了第4章,作为讲解具体计算的第一部分内容。同时把各章内容重新进行了编写,使得其更容易被学生所接受。其次,修改了由于设计规范变更而带来的内容变化。此外,还对原书中的一些不妥之处作了修正。

由于土木工程专业涉及面较广,与本课程相关的设计规范至少有三类,即住房与城乡建设部颁布的《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)及《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),交通部颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004),铁道部颁布的《铁路桥涵设计基本规范》(TB 1002.1—2005)及《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)。这些规范中相应的规定有所差异,所以,本书将侧重点放在基本原理的讲述上,而尽量少讲规范条文。

应该指出,现行《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)主要采用容许应力法,仅对预应力混凝土部分采用破坏阶段法,与建筑结构和公路桥梁的设计规范所采用的极限状态法不一致,所以本教材中涉及规范的地方大部分采用了后两者,只是在预应力混凝土构件部分参考了前者。但正如上所述,本书重在讲原理,因此直接涉及该规范的内容并不多。

本书由西南交通大学李乔教授主编,西安建筑科技大学白国良教授主审。其中第1、10、11、12章由李乔编写,第2、3章由李力编写,第4、8、9章由龙若迅编写,第5、6章由荣国能编写,第7章由黄雄军编写。

在此对未参加本教材第二版编写的第一版作者杜赞华、王春华和许惟国等老师表示衷心的感谢,对本书所列参考文献的作者表示感谢!

编者

2009年5月

第一版前言

本教材是根据教育部 1996 年高等学校新专业目录,面向土木工程大类专业编写的,内容覆盖原桥梁工程、隧道工程、建筑工程、道路与铁道工程和岩土工程等专业方向。

由于上述各原专业方向涉及三种规范,即建设部颁布的《建筑结构荷载规范》(GBJ 9—87)及《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89),交通部颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85),以及铁道部颁布的《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—99),这些规范中相应的规定有所差异,所以,本书将侧重点放在基本原理的讲述上,而尽量少讲规范条文。

应该指出,现行《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—99)主要采用容许应力法,在预应力混凝土部分采用破坏阶段法,与建筑结构和公路桥梁的设计规范所采用的极限状态法不一致,所以本教材中涉及规范的地方大部分采用了后两者,只是在预应力混凝土构件部分参考了前者和《铁路桥涵设计规范》(送审稿,按极限状态法)。但正如上所述,本书重在讲原理,因此直接涉及该规范的内容并不多。

全书共 12 章。其中第 1、10、12 以及第 2 章中关于混凝土徐变系数和收缩应变的计算部分由李乔编写;第 2、6、9 章由杜赞华编写;第 3、7、8 章由王春华编写;第 4、5 章由荣国能编写;第 11 章由许惟国和李乔编写。全书由李乔统稿主编。

本书在编写过程中得到了西南交通大学土木工程学院强士中教授、吕和林教授、赵慧娟教授、龙若迅讲师等的关心和指导,特此向他们表示衷心的感谢。

编 者

2001 年 3 月



目 录

82	.....	.....	.....
82	.....	.....	.....
10	.....	.....	.....
83	.....	.....	.....
57	.....	.....	.....
第 1 章 绪 论	.....	.....	1
88	1.1 钢筋混凝土结构的基本概念	.....	1
88	1.2 预应力混凝土结构的基本概念	.....	3
90	1.3 学习本课程应注意的问题	.....	5
10	.....	.....	.....
第 2 章 材料的物理力学性能	.....	.....	7
88	2.1 研究材料物理力学性能的目的	.....	7
88	2.2 钢筋的物理力学性能	.....	7
88	2.3 混凝土的物理力学性能	.....	14
107	2.4 钢筋与混凝土间的黏结	.....	27
110	2.5 小 结	.....	30
111	思考题	.....	31
第 3 章 结构设计方法	.....	.....	32
111	3.1 为什么需要合适的结构设计方法	.....	32
114	3.2 结构设计的要求与可靠性	.....	32
114	3.3 结构的极限状态	.....	33
119	3.4 作用效应和结构抗力	.....	35
118	3.5 概率极限状态法与可靠度	.....	36
123	3.6 概率极限状态法的设计表达式	.....	39
125	3.7 荷载效应组合	.....	42
125	3.8 小 结	.....	44
133	思考题	.....	45
第 4 章 轴心受力构件正截面承载力计算	.....	.....	46
139	4.1 概 述	.....	46
139	4.2 轴心受拉构件正截面承载力计算	.....	46
139	4.3 轴心受压构件正截面承载力计算	.....	49
181	4.4 小 结	.....	56
184	思考题	.....	56
184	习 题	.....	57
184	.....	.....	.....
184	.....	.....	.....
184	.....	.....	.....

第 5 章 受弯构件正截面承载力计算	58
5.1 概 述	58
5.2 受弯构件正截面各应力阶段及破坏形态	61
5.3 单筋矩形截面梁	63
5.4 双筋矩形截面梁	72
5.5 T 形及工字形截面梁	77
5.6 《公路桥规》关于受弯构件正截面受弯承载力计算简介	88
5.7 小 结	89
思考题	90
习 题	91
第 6 章 受弯构件斜截面承载力计算	93
6.1 概 述	93
6.2 斜截面受力特点及破坏形态	93
6.3 斜截面抗剪承载力	98
6.4 斜截面抗弯承载力	107
6.5 《公路桥规》关于受弯构件斜截面抗剪计算简介	110
6.6 小 结	111
思考题	112
习 题	113
第 7 章 受扭构件承载力计算	114
7.1 概 述	114
7.2 纯扭构件的受力性能	115
7.3 纯扭构件的承载力计算	118
7.4 弯—剪—扭构件的承载力计算 *	123
7.5 压—弯—剪—扭钢筋混凝土构件 *	132
7.6 受扭钢筋的构造要求	133
7.7 小 结	133
思考题	134
习 题	135
第 8 章 偏心受力构件正截面承载力计算	136
8.1 偏心受压构件	136
8.2 偏心受拉构件正截面承载力计算	181
8.3 偏心受力构件斜截面承载力计算	184
8.4 小 结	185
思考题	186
习 题	187

第 9 章 钢筋混凝土构件的变形和裂缝验算	189
9.1 概 述	189
9.2 受弯构件的变形验算	189
9.3 受弯构件的裂缝宽度计算	198
9.4 小 结	208
思考题.....	208
习 题.....	209
第 10 章 预应力混凝土构件概论	210
10.1 预应力混凝土构件的原理	210
10.2 施加预应力的方法和设备	213
10.3 小 结	219
思考题	220
第 11 章 预应力混凝土构件的设计计算	221
11.1 预应力混凝土受弯构件受力全过程	221
11.2 预应力混凝土受弯构件的承载力计算	223
11.3 有效预应力及预应力损失的计算	229
11.4 预应力混凝土受弯构件的应力计算	244
11.5 预应力混凝土受弯构件的变形计算	254
11.6 锚固区的计算	258
11.7 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	260
11.8 小 结	263
思考题	264
习 题	265
第 12 章 部分预应力及无黏结预应力构件*	267
12.1 部分预应力混凝土的概念及应力度	267
12.2 部分预应力混凝土受弯构件的计算**	270
12.3 无黏结预应力混凝土构件	273
12.4 小 结	274
思考题	275
附 录	276
参考文献	285

第 1 章

绪 论

1.1 钢筋混凝土结构的基本概念

1.1.1 钢筋混凝土的基本原理

由建筑材料知识可知,混凝土的抗压强度较高,抗拉强度很低,大约只有抗压强度的十分之一。如果只用混凝土材料制作一根受弯的梁(图 1.1a),则根据材料力学得知,在荷载(包括自重)作用下,梁的下部会产生拉应力,上部会产生压应力。由于混凝土的抗拉强度远低于抗压强度,所以在很小的荷载作用下梁的下部就会开裂,从而使梁失去承载能力。如果在构件的受拉区混凝土内设置钢筋,则当混凝土受拉开裂后,钢筋由于具有较高的抗拉强度,能够继续承受拉力。而在梁的受压区由于混凝土具有较高的抗压强度,也能继续承受压力。这样就可以充分发挥钢和混凝土两种材料的特长,使构件的承载能力较之素混凝土构件(即没有配钢筋的混凝土构件,图 1.1a)大大提高。这就是钢筋混凝土构件的设想(图 1.1b)。

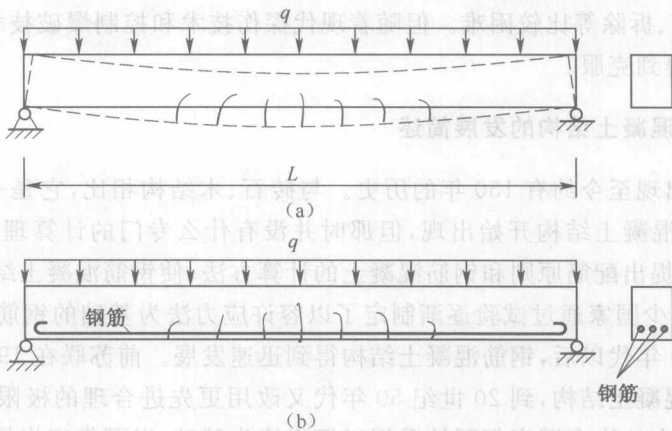


图 1.1 素混凝土与钢筋混凝土简支梁

混凝土由于抗拉强度低,在不大的拉应变时就会开裂,因此在受拉区混凝土开裂之前,混凝土的应变和应力很小。而钢筋混凝土中的钢筋由于与混凝土黏结在一起共同变形,其应变等于混凝土应变,因此钢筋的应变也很小,其应力远低于钢筋的抗拉强度,此时钢筋不能充分发挥作用。只有在混凝土开裂后,钢筋才可能产生较大的变形和拉应力,也才能充分发挥其作用。这就是说,一般情况下,钢筋混凝土构件的受拉区混凝土都设计为开裂状态下工作的。当然,构件的裂缝宽度不能超过一定的限度,否则会使钢筋发生锈蚀。

总结上述的介绍,可知在设计钢筋混凝土构件时,除了要计算承载力这一最重要的指标外,还要计算裂缝宽度以及变形的大小,使之满足使用要求。这也是本课程中有关钢筋混凝土构件的主要内容。

由于钢筋和混凝土是两种物理和力学性能很不相同的材料,要使它们能够有效地结合在一起工作,必须保证它们之间有足够的黏结,使得二者能够相互传递力,且变形协调。

钢筋和混凝土之间的黏结主要是由混凝土凝固时体积收缩而将钢筋紧紧地握裹住而产生的(混凝土体积收缩,而钢筋体积不收缩)。在钢筋两端设置弯钩(如图 1.1b 所示)或使用表面凹凸不平的钢筋(如螺纹钢筋,见第 2 章)时,黏结会更加有效。

钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-5}$ 。当温度变化时,两者变形大致相同,不致产生较大的相对变形,因而不会破坏二者之间的黏结。

由于钢筋表面至构件表面之间有混凝土作为保护层,因此钢筋不会发生锈蚀。但应该注意,作为保护层的混凝土必须有足够的厚度和密实度,并且如前所述,裂缝宽度要限制在一定的范围内,否则钢筋仍会发生锈蚀。

钢筋混凝土具有如下优点:

1. 充分发挥了钢筋和混凝土两种材料的特点,形成的构件有较大的承载能力和刚度;
2. 耐久性和耐火性较好,维护费用低;
3. 可模性好,可根据需要浇筑成各种形状和体积的结构;
4. 混凝土材料中大部分为砂石,便于就地取材;
5. 耐辐射、耐腐蚀性能较好。

钢筋混凝土也存在如下缺点:

1. 自重较大,使得结构很大一部分承载能力消耗在承受其自身重量上。例如在大跨度桥梁中,80%以上的内力是由结构自重产生的。
2. 检查、加固、拆除等比较困难。但随着现代探伤技术和控制爆破技术等的发展和应用,这些缺点正逐步得到克服。

1.1.2 钢筋混凝土结构的发展简述

钢筋混凝土出现至今约有 150 年的历史。与砖石、木结构相比,它是一种较年轻的结构。19 世纪中叶钢筋混凝土结构开始出现,但那时并没有什么专门的计算理论和方法。直到 19 世纪末期,才有人提出配筋原则和钢筋混凝土的计算方法,使钢筋混凝土结构逐渐得到推广。

20 世纪初,不少国家通过试验逐渐制定了以容许应力法为基础的钢筋混凝土结构设计规范。到 20 世纪 30 年代以后,钢筋混凝土结构得到迅速发展。前苏联在 1938 年首先采用破坏阶段法计算钢筋混凝土结构,到 20 世纪 50 年代又改用更先进合理的极限状态法。近二十几年来,包括我国在内的许多国家都开始采用以概率论为基础,以可靠度指标度量构件可靠性的分析方法,使极限状态法更趋完善、合理。

在材料方面,目前常用的混凝土强度等级为 C20~C50(立方体抗压强度 $f_{cu} = 20 \sim 50$ MPa);近年来各国都在大力发展高强、轻质、高性能混凝土,现行的设计规范也都把推荐使用的混凝土材料最高强度等级提高到了 C80。现已有强度高达 $f_{cu} = 100$ MPa 的混凝土。在轻质方面,现已有加气混凝土、陶粒混凝土等,其容重一般为 $14 \sim 18$ kN/m³(普通混凝土容重为 $23 \sim 24$ kN/m³),强度可达 50 MPa。为提高混凝土的耐磨性和抗裂性,还可在混凝土中加入金属纤维,如钢纤维、碳纤维等,形成纤维混凝土。

随着对混凝土结构性能的深入研究、现代测试技术的发展以及计算机和有限元法的广泛应用,对钢筋混凝土构件的计算分析已逐步向全过程、非线性、三维化方向发展,设计规范也不断修订和增订,使得钢筋混凝土结构设计日趋合理、经济、安全、可靠。

1.2 预应力混凝土结构的基本概念

1.2.1 预应力混凝土的基本原理

钢筋混凝土构件虽然已广泛应用于各种工程结构,但它仍存在一些缺点。例如混凝土的极限抗拉应变很小,一般只有 $(0.1\sim 0.15)\times 10^{-3}$ 左右,因此当钢筋中的应力为 $20\sim 30\text{ MPa}$ [相应的应变为 $(0.1\sim 0.15)\times 10^{-3}$]时,混凝土就已开裂。根据规范规定一般混凝土的裂缝宽度不得大于 $0.2\sim 0.3\text{ mm}$,与此相应的钢筋拉应力约为 $100\sim 250\text{ MPa}$ (光面钢筋)或 $150\sim 300\text{ MPa}$ (螺纹钢筋)。这就是说,在钢筋混凝土结构中,钢筋的应力最高也不过 300 MPa ,无法再提高,使用更高强度的钢筋是无法发挥作用的,相应的也无法使用高强度混凝土。

由于裂缝的产生,使构件的刚度降低。若要满足裂缝控制的要求,则需要加大构件的截面尺寸或增加钢筋用量,这将导致结构自重或用钢量过大,很难用于大跨度结构。

为解决这一矛盾,人们设想对在荷载作用下的受拉区混凝土预先施加一定的压应力(即储备一定的压应力),使其能够部分或全部抵消由荷载产生的拉应力,从而使混凝土避免开裂。这实际上是利用混凝土较高的抗压能力来弥补其抗拉能力的不足。这就是预应力混凝土的概念。

现以图1.2所示的简支梁为例,来说明预应力混凝土结构的基本原理。

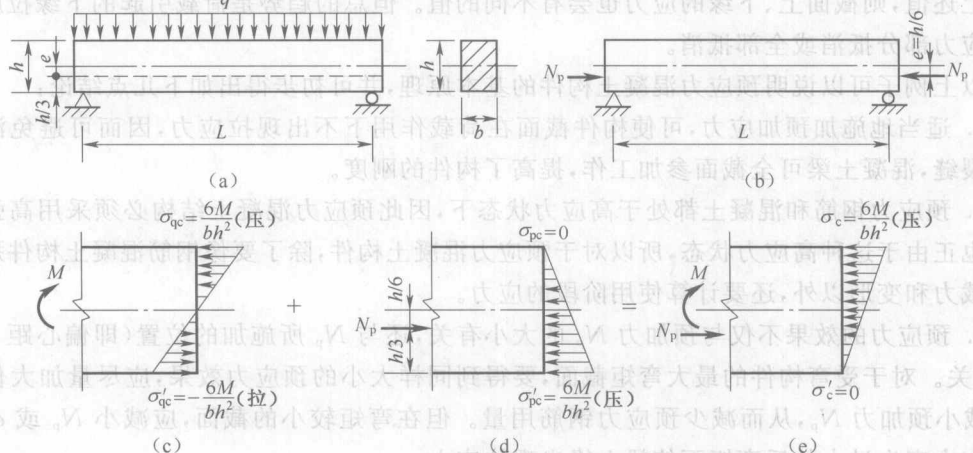


图 1.2 预应力混凝土构件原理

设该梁跨度为 L ,截面尺寸为 $b\times h$,截面面积 $A=bh$,抗弯截面模量 $W=bh^2/6$,承受满布均布荷载 q (含自重)。此时梁跨中弯矩为 $M=qL^2/8$,相应的截面上、下缘的应力(图1.2c)(以受压为正)

$$\text{上缘: } \sigma_{qc} = \frac{M}{W} = \frac{6M}{bh^2} (\text{压}), \quad \text{下缘: } \sigma'_{qc} = -\frac{6M}{bh^2} (\text{拉})$$

假若预先在中性轴以下距离为 e (e 称为偏心距)处沿梁长度方向设一孔道,在孔道内穿一高强钢丝束,并在两端张拉该钢丝束(拉长),然后在其两端紧贴梁端面处安装锚具(一种夹具),撤掉张拉力,钢丝束必然要回缩,但锚具将其卡住(锚固),于是钢丝束通过锚具对梁端混凝土施加了一个压力。设此时钢丝束中的拉力为 N_p ,则混凝土在钢丝束位置处受到一同样大

小的压力 N_p (图 1.2b)。根据材料力学,在偏心轴力 N_p 作用下,梁截面上、下缘产生的应力(称为预加应力,图 1.2d)由两部分组成,即轴力引起的部分 N_p/A 和偏心力产生的弯矩引起的部分 $N_p e/W$,即

$$\text{上缘: } \sigma_{pc} = \frac{N_p}{A} - \frac{N_p e}{W} = \frac{N_p}{bh} - \frac{6N_p e}{bh^2} = \frac{N_p}{bh} \left(1 - \frac{6e}{h}\right)$$

$$\text{下缘: } \sigma'_{pc} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p e}{W} = \frac{N_p}{bh} + \frac{6N_p e}{bh^2} = \frac{N_p}{bh} \left(1 + \frac{6e}{h}\right)$$

梁在荷载 q 和预加力 N_p 共同作用下,跨中截面上、下缘的应力(图 1.2e)为

$$\text{上缘: } \sigma_c = \sigma_{qc} + \sigma_{pc} = \frac{6M}{bh^2} + \frac{N_p}{bh} \left(1 - \frac{6e}{h}\right) \quad (1.1)$$

$$\text{下缘: } \sigma'_c = \sigma'_{qc} + \sigma'_{pc} = -\frac{6M}{bh^2} + \frac{N_p}{bh} \left(1 + \frac{6e}{h}\right) \quad (1.2)$$

若设 $e=h/6$, $N_p=3M/h$,代入式(1.1)和式(1.2),可得

$$\sigma_c = \sigma_{qc} + \sigma_{pc} = \frac{6M}{bh^2} + \frac{N_p}{bh} \left(1 - \frac{6e}{h}\right) = \frac{6M}{bh^2} \quad (\text{压})$$

$$\sigma'_c = \sigma'_{qc} + \sigma'_{pc} = -\frac{6M}{bh^2} + \frac{N_p}{bh} \left(1 + \frac{6e}{h}\right) = 0$$

显然,此时预加应力将荷载在截面下缘处产生的拉应力全部抵消。当然,如果 e 和 N_p 不等于上述值,则截面上、下缘的应力也会有不同的值。但总的趋势是荷载引起的下缘拉应力被预加应力部分抵消或全部抵消。

以上例子可以说明预应力混凝土构件的基本原理,并可初步得出如下几点结论:

1. 适当地施加预加应力,可使构件截面在荷载作用下不出现拉应力,因而可避免混凝土出现裂缝,混凝土梁可全截面参加工作,提高了构件的刚度。
2. 预应力钢筋和混凝土都处于高应力状态下,因此预应力混凝土结构必须采用高强度材料。也正由于这种高应力状态,所以对于预应力混凝土构件,除了要像钢筋混凝土构件那样计算承载力和变形以外,还要计算使用阶段的应力。
3. 预应力的效果不仅与预加力 N_p 的大小有关,还与 N_p 所施加的位置(即偏心距 e 的大小)有关。对于受弯构件的最大弯矩截面,要得到同样大小的预应力效果,应尽量加大偏心距 e ,以减小预加力 N_p ,从而减少预应力钢筋用量。但在弯矩较小的截面,应减小 N_p 或 e ,以免因预加力产生过大的反弯矩而使梁上缘出现拉应力。

4. 钢筋混凝土中的钢筋在受荷载后混凝土开裂的情况下代替混凝土承受拉力,是一种“被动”的受力方式。而预应力混凝土中的预应力钢筋是预先给混凝土施加压应力,是一种“主动”的受力方式。

1.2.2 预应力混凝土结构的发展概况

预应力混凝土的最早应用是由美国人 P. H. Jackson 于 1886 年实现的。他利用钢筋对一由混凝土块构成的拱施加预应力。1888 年,德国人 C. E. W. Doehring 利用钢筋对楼板施加预应力,并获专利。但那时采用的钢筋强度较低,预应力较小(不超过 120 MPa),由于混凝土收缩和徐变等原因使构件逐渐缩短,因而在施加预应力后不久,混凝土中的预应力就消失殆尽。直到 1928 年法国工程师弗莱西奈(E. Freyssinet)通过试验,才采用高强钢丝克服了上述问题。他使钢丝的预拉应力达到约 1 000 MPa。在混凝土发生收缩和徐变后,钢丝内仍存有

800 MPa左右的拉应力,足以实现对混凝土预压的效果。此后,预应力混凝土得到迅速发展和应用。我国虽然是在1949年新中国建立后才开始研究和应用预应力混凝土结构的,但发展非常迅速,在某些方面已达到世界先进水平。现在,预应力混凝土结构已在建筑结构、桥梁、核反应堆、海洋工程结构、蓄液池、压力管道等诸多方面应用,今后其应用范围会更加广泛。

1.2.3 预应力混凝土结构的主要优缺点

预应力混凝土结构具有下列主要优点:

1. 提高了构件的抗裂度和刚度。对构件施加预应力后,使构件在使用荷载作用下可不出裂缝,或可使裂缝大大推迟出现,有效地改善了构件的使用性能,提高了构件的刚度,增加了结构的耐久性。
2. 可以节省材料,减少自重。预应力混凝土由于采用高强材料,因而可减小构件截面尺寸,节省钢材与混凝土用量,降低结构物的自重。这对自重比例很大的大跨径桥梁来说,更有着显著的优越性。大跨度和重荷载结构,采用预应力混凝土结构一般是经济合理的。
3. 可以减小混凝土梁的竖向剪力和主拉应力。预应力混凝土梁的曲线钢筋(束)可使梁中支座附近的竖向剪力减小;又由于混凝土截面上预应力的存在,使荷载作用下的主拉应力也相应减小。这有利于减小梁的腹板厚度,使预应力混凝土梁的自重可以进一步减小。
4. 结构质量安全可靠。施加预应力时,钢筋(束)与混凝土都同时经受了一次强度检验。
5. 预应力可作为结构构件连接的手段,促进了大跨结构新体系与施工方法的发展。

此外,还可以提高结构的耐疲劳性能。因为具有强大预应力的钢筋,在使用阶段由加荷或卸荷所引起的应力变化幅度相对较小,所以引起疲劳破坏的可能性也小。这对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,对施工质量要求甚高,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。先张法需要有张拉台座;后张法还要耗用数量较多、质量可靠的锚具等。
3. 预应力反拱度不易控制。它随混凝土徐变的增加而加大,造成桥面不平顺。
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,但构件数量很多时,采用预应力混凝土结构就比较经济了。总之,只要从实际出发,因地制宜地进行合理设计和妥善安排,预应力混凝土结构就能充分发挥其优越性。所以它在近数十年来得到了迅猛的发展,尤其对桥梁新体系的发展起了重要的推动作用。这是一种极有发展前途的工程结构。

1.3 学习本课程应注意的问题

1. 本课程是一门重要的专业基础课,它的任务是要使学生掌握钢筋混凝土和预应力混凝土构件的设计计算原理、方法及构造。

2. 本课程面向土木工程大类专业,重在讲原理,而不是讲规范条文,书中所引用的规范规定和公式只是为了说明原理。但完全不涉及规范是不可能的。目前与此有关的规范有三种,即面向工业与民用建筑结构的《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)和《混凝土结构设计规

范》(GB 50010—2002),面向公路桥梁结构的《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004),面向铁路桥梁结构的《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005)和《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)。本书将以上三类规范分别简称为《混规》、《公路桥规》和《铁路桥规》。《铁路桥规》的钢筋混凝土构件内容采用容许应力法,而预应力混凝土构件内容则采用破坏阶段法。由于本教材采用极限状态法,为统一,本教材中使用的符号对于钢筋混凝土构件主要以《混规》为依据,对于预应力混凝土构件主要以《公路桥规》为依据。公式及一些参数的取值等,对钢筋混凝土结构主要以《混规》为依据,对预应力混凝土结构,由于《混规》对此规定较少,所以公式及参数主要以《公路桥规》和《铁路桥规》为依据。

必须指出,虽然基本原理都相近,但各规范的具体规定却各不相同。在实际应用时,应根据所设计的结构类型,按相应的规范规定进行,不可盲目套用,更不能将本书作为规范使用。例如,设计铁路桥梁时,应按现行的铁路桥涵设计规范进行。而设计房屋结构时,应按现行的混凝土结构设计规范进行。

3. 本课程的先修课程主要为材料力学和建筑材料等。钢筋混凝土在性质上与“材料力学”有很多相似之处,或可以称为“钢筋混凝土的材料力学”,但也有许多不同之处。

材料力学主要是研究单一匀质、连续、各向同性、弹性(或理想弹塑性)材料的构件,而钢筋混凝土结构研究的是钢筋和混凝土两种材料组成的构件,而混凝土本身也是非匀质、非弹性、非连续的材料。因此,除了预应力混凝土构件使用阶段的应力计算外,能够直接应用材料力学公式的情况并不多。但材料力学中通过几何、物理和平衡关系建立基本方程的方法,对本课程也是适用的,不过在每一种关系的具体内容上应考虑钢筋混凝土构件材料性能特点。例如,材料力学中关于梁的平截面假定在钢筋混凝土受弯构件中也适用,但在考虑应力分布时却认为受拉区混凝土已开裂并退出工作,拉力完全由钢筋承担,不像材料力学中那样全截面参加工作。

4. 由于混凝土材料本身的物理力学特性十分复杂,目前尚未建立起比较完善的强度理论。因此,钢筋混凝土构件的一些计算方法、公式等是在实验基础上建立的半理论半经验性质的。在学习和运用这些方法和公式时,要注意它们的适用范围和条件。

5. 结构设计原理并不仅仅包含强度和变形计算,这也是与材料力学的不同之处。结构设计应遵循适用、经济、安全和美观的原则,涉及方案比选、构件选型、材料选择、尺寸拟定、配筋方式和数量等诸多方面。

6. 本书中标题上有“*”标记的内容,表示在讲课时可根据实际情况适当取舍。而标有“**”的内容则表示可以不讲,同学们可以自学。

如前所述,本课程重在讲原理,至于规范的使用,则应在掌握了原理的基础上通过习题、课程设计及毕业设计等来熟悉运用。

第 2 章

材料的物理力学性能

2.1 研究材料物理力学性能的目的

钢筋混凝土和预应力混凝土的物理力学性能与力学课程中所学的理想弹性材料不同,因而其构件的受力性能与由单一弹性材料构成的结构构件有很大差异。本章主要讨论钢筋和混凝土材料在不同受力条件下强度和变形的变化规律,以及这两种材料的共同工作性能。它将为后续章节中建立有关计算理论和设计方法提供重要的依据,也是我们能合理选用材料的基本保证。本章的主要内容不是有关材料化学成分及组成,这与建筑材料课程有所区别,但复习好建筑材料的相关内容有助于本章的学习。此外,回顾一下材料力学中关于钢材力学特性的内容对理解本章内容也是有益的。

2.2 钢筋的物理力学性能

2.2.1 钢筋的形式和品种

钢筋的力学性能主要取决于它的化学成分,其主要成分是铁元素,此外还含有少量的碳、锰、硅、钒、钛、磷、硫等元素。增加含碳量可提高钢材的强度,但塑性和可焊性降低。根据钢材中含碳量的多少,通常可分为低碳钢(含碳量少于 0.25%)和高碳钢(含碳量在 0.6%~1.4% 范围内)。锰、硅等元素可提高钢材强度,并保持一定塑性;磷、硫是有害元素,其含量超过一定限度时,钢材塑性明显降低,磷使钢材冷脆,硫使钢材热脆,且焊接质量也不易保证。在钢材中加入少量合金元素,如锰、硅、钒、钛等即可制成低合金钢。低合金钢能显著改善钢筋的综合性能,根据其所加元素的不同,可分为锰系,硅钒系等多种。

目前我国钢筋混凝土中主要采用热轧钢筋,预应力混凝土中主要采用消除应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋。其中热轧钢筋属于有明显物理流限的钢筋,钢丝、钢绞线和热处理钢筋属于无明显物理流限的钢筋。

热轧钢筋包含 HPB235、HRB335、HRB400 和 RRB400 四种。HPB235 材质为低碳钢,工程界习惯称为 I 级钢筋,用符号 Φ 表示,其外形为光面圆钢筋。HRB335(习惯称为 II 级钢筋,用符号 Φ 表示)、HRB400(习惯称为 III 级钢筋,用符号 Φ 表示)和 RRB400(用符号 Φ^R 表示)的材质为低合金钢,外形不再为光圆,而是有肋纹,称为变形钢筋(图 2.1)。过去通用的肋纹有螺旋纹和人字纹,现在已改为月牙纹。RRB400 级钢筋为余热处理钢筋,通过热处理来提高强度并维持原有性能,不用增添稀土元素,降低了造价。2009 年上半年,国家发布了《钢铁产业调整和振兴规划》,把“提高建筑工程用钢标准”作为一项政策措施,明确了要淘汰强度 335 MPa 及以下热轧带肋钢筋,加快推广使用强度 400 MPa 及以上钢筋,促进建筑钢材的升级换代。

消除应力钢丝按外形分光面钢丝、螺旋肋钢丝(图 2.2a)和刻痕钢丝(图 2.2b)三种,直径

为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0 或 9.0 mm, 材质为高碳钢。

钢绞线(图 2.2c)分三股(1×3)和七股(1×7)两种, 是用 3 根或 7 根钢丝捻制而成的(类似于拧麻绳), 其外接圆直径为 8.6~15.2 mm 不等。由于钢绞线运输和使用都较为方便, 因而现已成为预应力钢筋的主要形式, 在中、大跨度结构中它正逐步取代钢丝束。在实际应用中, 一般采用由若干根钢绞线组成的钢绞线束。

热处理钢筋(图 2.3)是由特殊钢号的高强热轧钢筋经过淬火和回火处理制成的, 直径 6~10 mm。

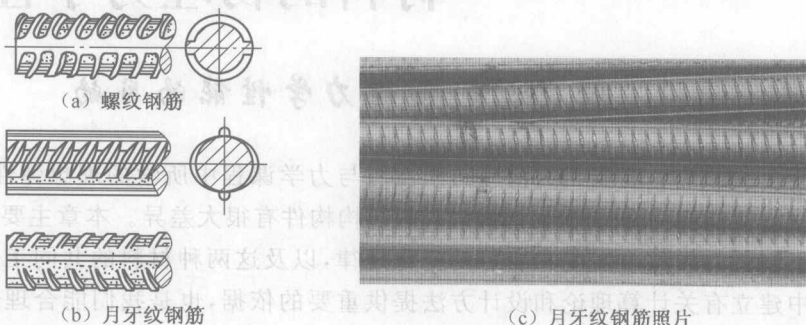


图 2.1 变形钢筋的外形

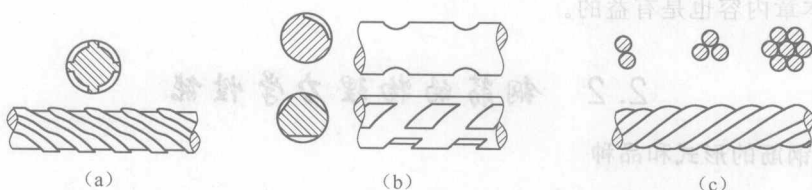


图 2.2 刻痕钢丝、螺旋肋钢丝和钢绞线



图 2.3 热处理钢筋的外形

2.2.2 短期荷载下钢筋的应力—应变曲线

根据钢筋在单调受拉时应力应变关系特点的不同, 可把钢筋分为有明显物理流限和无明显物理流限的两类。

1. 有明显物理流限的钢筋

一般热轧钢筋属此类。

有明显物理流限钢筋拉伸时的典型应力—应变曲线(σ - ϵ 曲线)如图 2.4 所示, 这与材料力学中的低碳钢拉伸实验得到的应力—应变曲线是相同的。图中所列各点应力应变性能的特点是: 在应力到达 a' 点之前(常称比例极限), 应力应变成比例增长, 钢筋具有理想的弹性性质, 若此时卸去荷载, 则应变能够全部恢复。

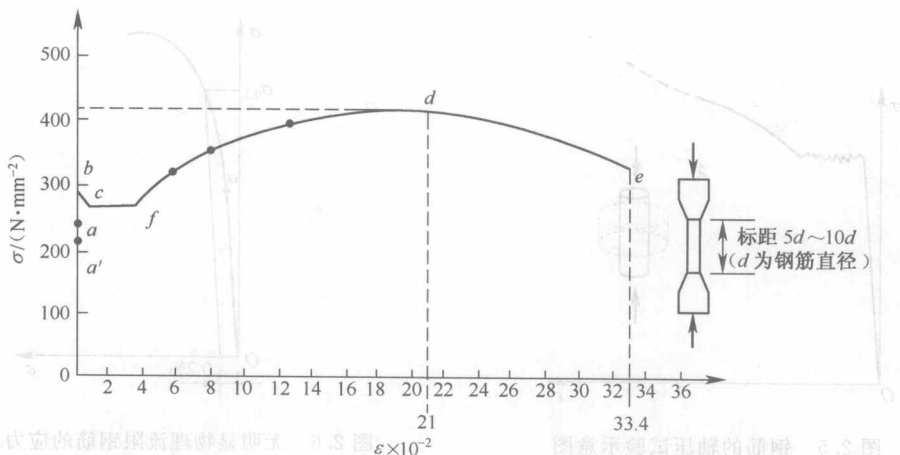


图 2.4 有明显物理流限钢筋的应力—应变曲线

在应力超过 a' 点, 达 a 点 (常称弹性极限) 之前, 应变增长速度比应力增长速度略快, 若此时卸载则应变中的绝大部分仍能完全恢复。在应力超过 b 点 (称屈服上限) 后, 钢筋即进入塑性阶段, 其应力应变性质将发生明显变化, 随之应力将下降到 c 点 (称屈服下限) 之后, 在应力基本不增长情况下, 应变将不断增长, 产生很大的塑性变形, 称为屈服 (或流动), 这种塑性应变可一直延续到 f 点。屈服上限不太稳定, 与许多因素有关, 如与加载速度、钢筋试件的截面形式、试件表面光洁度及试件形式等有关。屈服下限比较稳定, 因而取与屈服下限相对应的应力值为屈服强度或流限 (f_y^0)^{*}, c 、 f 两点之间的应变称为钢筋的流幅。

过 f 点后, 钢筋应力重新开始增长, 直到 d 点钢筋达到了它的极限抗拉强度, 曲线段 fd 通常称为“强化段”。超过 d 点后, 试件在某个薄弱部位应变急剧增长, 直径迅速变细, 产生“颈缩现象”, 最后被拉断, 若仍按初始横截面计算, 则应力是不断降低的, 从而出现了应力应变曲线上的下降段 de 。

一般在钢筋混凝土结构设计计算中, 采用屈服强度作为钢筋的强度限值, 而不采用 d 点所对应的极限抗拉强度值, 因为钢筋在到达物理流限后产生的塑性应变将使构件出现很大变形, 已经无法继续使用。

在分析计算中通常把钢筋应力—应变曲线简化成双折线形式, 即在屈服之前具有理想弹性性质 (此阶段的应力—应变曲线取一条斜直线), 而在屈服之后具有理想塑性性质 (此阶段的应力—应变曲线取一条水平直线)。但为了保证钢筋的综合强度性能, 在检验钢筋的质量时仍要保证它的极限抗拉强度, 并满足检验标准的要求。在抗震结构中, 由于构件要进入大变形工作, 考虑到钢筋可能受拉进入强化段, 还要控制极限抗拉强度与屈服强度之间具有一定的比值。

钢筋受压时的应力—应变曲线如图 2.5 所示, 在达到屈服强度之前, 也具有理想弹性性质, 其屈服强度值与受拉时基本相同。到达屈服强度之后, 受压钢筋也将在压应力不增长情况下, 产生塑性压缩, 然后进入强化段, 试件产生很明显的横向膨胀, 但因试件不会产生材料破坏, 很难得出明确的极限抗压强度。

* 本章中凡在各材料符号的左上角标“0”者均为材料强度的实测值, 以便与《混规》中各对应的强度设计值有所区别。