

全国水利水电高职教研会
中国高职教研会水利行业协作委员会

规划推荐教材

高职高专土建类专业系列教材

● 结构设计原理 ●

主 编 张天俊 曹广占
副主编 史美东 郑元锋 郑 睿



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全国水利水电高职教研会
中国高职教研会水利行业协作委员会

规划推荐教材

高职高专土建类专业系列教材

结构设计原理

主 编 张天俊 曹广占

副主编 史美东 郑元锋 郑 睿



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是高职高专土建类专业规划教材,是根据全国水利水电高职教研会制定的《结构设计原理》教学大纲,并结合高等职业教育的教学特点和专业需要进行设计和编写的。本书主要包括:绪论、钢筋混凝土结构的基本概念及材料物理力学性能、钢筋混凝土结构设计的基本原理、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、钢筋混凝土受压构件承载力计算、钢筋混凝土受弯构件的变形和裂缝计算、钢筋混凝土受弯构件在施工阶段的应力计算、预应力混凝土结构的基本原理及材料、预应力混凝土受弯构件的设计与计算、圬工结构的基本概念与材料、圬工结构构件的承载力计算。

本教材主要作为高等职业教育土建类专业的教学用书,也可作为岗位培训教材或供相关专业技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构设计原理/张天俊,曹广占主编. —北京:中国水利水电出版社,2008

全国水利水电高职教研会、中国高职教研会水利行业协作委员会规划推荐教材. 高职高专土建类专业系列教材

ISBN 978-7-5084-6024-6

I. 结… II. ①张…②曹… III. 建筑结构—结构设计—高等学校:技术学校—教材 IV. TU318

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第171333号

书 名	高职高专土建类专业系列教材 全国水利水电高职教研会 规划推荐教材 中国高职教研会水利行业协作委员会 结构设计原理
作 者	主编 张天俊 曹广占 副主编 史美东 郑元锋 郑睿
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010) 63202266(总机)、68367658(营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.5印张 312千字
版 次	2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

高等职业教育培养的是一线岗位的应用型技术人才。随着我国社会主义市场经济的飞跃发展,培养能很快适应社会需要的理论功底扎实、实践动手能力强、具有较强创新意识的高素质实用型人才是职业技术学院的任务。为此我们在编写本教材的过程中,着力贯彻能力本位思想,注重技能培养;在教材内容取舍上,突出介绍结构基本概念和结构构造,并强调针对性和实用性,坚持必需、够用的原则,努力做到理论联系实际。

本教材根据交通部新近颁布的公路桥涵设计系列规范——JTJ D60—2004《公路桥涵设计通用规范》、JTJ D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》、JTJ D61—2005《公路圬工桥涵设计规范》等编写。

本教材均采用国家法定计量单位。

全书由张天俊、曹广占任主编,史美东、郑元铎、郑睿任副主编,中煤国际工程集团武汉设计研究院教授级高工谭友春任主审。

本教材绪论和第1、2章由湖北水利水电职业技术学院张天俊编写;第5、6章由浙江水利水电专科学校史美东编写;第8、9章由山东水利职业学院曹广占编写;第7、10、11章由安徽水利水电职业技术学院艾思平编写;第3、4章由湖北水利水电职业技术学院徐宏广编写。

限于编者的水平,书中难免有疏漏和不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008年8月

目 录

前言

绪论	1
0.1 课程的性质、任务及其与其他课程的关系	1
0.2 课程的特点和学习方法	1
第1章 钢筋混凝土结构的基本概念及材料物理力学性能	3
1.1 钢筋混凝土结构的基本概念及特点	3
1.2 混凝土的物理力学性能	5
1.3 钢筋的物理力学性能	10
1.4 钢筋与混凝土之间的黏结	16
本章小结	17
复习思考题	17
第2章 钢筋混凝土结构设计的基本原理	19
2.1 结构设计的理论发展	19
2.2 结构的功能和极限状态	19
2.3 结构的可靠度和极限状态方程	20
2.4 极限状态的设计表达式	23
2.5 结构设计状况	28
本章小结	29
复习思考题	29
第3章 受弯构件正截面承载力计算	31
3.1 受弯构件的截面形式与构造	31
3.2 受弯构件正截面受力全过程和破坏形态	35
3.3 受弯构件正截面承载能力计算的基本原则	40
3.4 单筋矩形截面受弯构件	43
3.5 双筋矩形截面受弯构件	48
3.6 T形截面受弯构件	52
本章小结	57
复习思考题	58
习题	59

第4章 受弯构件斜截面承载力计算	60
4.1 受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态	60
4.2 影响受弯构件斜截面抗剪能力的主要因素	62
4.3 受弯构件的斜截面抗剪承载力	63
4.4 受弯构件的斜截面抗弯承载力	67
4.5 全梁承载能力校核与构造要求	71
本章小结	81
复习思考题	81
习题	82
第5章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	83
5.1 受压构件的一般构造要求	84
5.2 轴心受压构件承载力计算	85
5.3 矩形截面偏心受压构件承载力计算	88
5.4 圆形截面偏心受压构件承载力计算	96
本章小结	97
复习思考题	97
习题	98
第6章 钢筋混凝土受弯构件的变形和裂缝计算	99
6.1 钢筋混凝土受弯构件的变形计算	99
6.2 钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算	101
本章小结	105
复习思考题	105
习题	106
第7章 钢筋混凝土受弯构件在施工阶段的应力计算	107
7.1 换算截面	107
7.2 受弯构件在施工阶段的应力计算	111
本章小结	113
复习思考题	114
习题	114
第8章 预应力混凝土结构的基本原理及材料	115
8.1 预应力混凝土的基本原理	115
8.2 预应力锚具与孔道成型材料	118
8.3 预应力混凝土结构的材料	121
本章小结	122
复习思考题	122
第9章 预应力混凝土受弯构件的设计与计算	123
9.1 概述	123

9.2 预加力的计算与预应力损失的估算	125
9.3 预应力混凝土受弯构件的承载力计算	132
9.4 预应力混凝土受弯构件的应力计算	137
9.5 端部锚固区计算	144
9.6 使用阶段正截面和斜截面抗裂验算	148
9.7 变形计算	150
9.8 预应力混凝土受弯构件的基本构造	152
9.9 预应力混凝土简支梁设计计算示例	158
本章小结	165
复习思考题	166
习题	166
第 10 章 圬工结构的基本概念与材料	168
10.1 圬工结构的基本概念	168
10.2 圬工砌体材料及种类	168
10.3 圬工砌体的强度	170
本章小结	170
复习思考题	171
第 11 章 圬工结构构件的承载力计算	172
11.1 受压构件的承载力计算	172
11.2 截面局部承压以及受弯、受剪构件的承载力计算	177
本章小结	179
复习思考题	179
习题	180
附表	181
参考文献	192

绪 论

0.1 课程的性质、任务及其与其他课程的关系

所谓结构,是由若干基本构件(如梁、板、柱、墩、索等)组成的能承受“作用”的平面或空间体系。这里的“作用”是指施加在结构上的荷载(如恒载、活荷载等)或引起结构外加变形或约束变形的原因(如地震、地基不均匀沉降、混凝土收缩、温度变化等)。前者称为直接作用,后者称为间接作用。

桥梁结构就是由板、横梁、桥墩(台)、拱、索等基本构件所组成。《结构设计原理》课程就是以这些基本构件为主要研究对象的一门学科。具体讲,主要研究钢筋混凝土、预应力混凝土、砖石及混凝土(通称圬工)结构的构件设计原理,主要内容包括如何合理选择构件截面形式、尺寸及其配筋,并根据承受荷载的情况验算构件的承载力、刚度、稳定性和裂缝等问题,是学习桥梁工程和其他构造物设计的基础。

基本构件的形式虽然多种多样,但根据其受力与变形的特点可分为受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件等类型。在实际工程中,有些构件的受力和变形比较简单,但有些构件则比较复杂,有可能是几种受力状态的组合。在外荷载作用下,构件有可能由于强度不足而破坏或由于变形过大而不能正常使用。因而,在设计基本构件时,要求构件本身必须具有一定的抵抗破坏和变形的能力,即“承载能力”。构件承载能力的大小与构件的材料性质、几何形状、截面尺寸、受力特点、工作条件、构造特点及施工质量等因素有关。在一定条件下,如果构件的尺寸过小,则结构将有可能因产生过大的变形而不能正常使用,或因材料强度不足而导致结构物的破坏。反之,如果截面尺寸过大,则构件的承载能力又过分富裕,从而造成人力、物力上的浪费。即要在保证结构安全的基础上尽可能的经济,这是结构设计的基本原则。为此,研究如何正确地处理荷载与承载能力之间的关系,是本课程的主要任务。

《结构设计原理》是一门重要的技术基础课,它是在学习《工程力学》、《道路建筑材料》等课程的基础上,结合实际桥梁工程来研究结构构件设计的一门学科,并为学习《桥梁工程》、《基础工程》等课程奠定基础。本教材以交通部新近颁布的公路桥涵设计系列规范——JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》(以下简称《通用规范》);JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(以下简称《公路桥规》);JTG D61—2005《公路圬工桥涵设计规范》等为主要依据。

0.2 课程的特点和学习方法

0.2.1 课程的特点

本课程主要有以下几个特点:

(1) 半理论、半经验性。《结构设计原理》中的计算公式与《材料力学》中的公式有所



不同,《材料力学》所涉及的材料都是理想的弹性材料,而《结构设计原理》中的材料是非均质、非弹性的钢筋混凝土材料,其计算公式是根据理论分析及试验研究得到的半理论、半经验公式,有些则是工程经验的总结。因此在学习和运用这些公式时,要正确理解公式的本质,特别注意公式的适用范围及适用条件。

(2) 设计的多方案性。在数学和力学等基础学科中,问题的答案一般是唯一的。而结构设计则是要综合考虑总体布置、结构形式、材料选择和构件选型等多个方面,是一个多因素的综合性问题,应遵循安全、经济、适用、美观和有利于环保的原则。同一构件在给定荷载的作用下,可以采用不同的截面形式,选择不同的截面尺寸和配筋方式等,进而可得到不同的设计结果。合理的设计往往要经过多方案的技术经济比较,从施工、造价、使用、维护和环保等方面综合考虑。事实上,不同的设计理念造就了不同的设计结果。

0.2.2 学习方法

学习时要注意以下几点:

(1) 重视构造要求。结构设计主要包括结构计算及构造设计两个方面,结构计算是在对结构进行假定、简化的基础上进行的,因而计算结果与实际情况仍有一定差距。而构造要求是构件受力性能的保证措施,是长期的科学实验和工程实践的总结,属于概念设计的范畴。因此,一定要重视构造细节的设计,理解构造原理,懂得计算和构造同等重要。

(2) 重视实践和规范应用。《结构设计原理》课程是一门理论性和实践性都较强的课程,学习时一方面应重视理论知识学习,另一方面还应有针对性地去施工现场参观学习,增强感性认识,积累工程经验。此外,在学习本课程中要学会应用设计规范。设计规范是相关领域进行系统的科学研究和长期工程经验的总结,有相对的科学性,它是工程技术人员进行设计、施工时应该或必须遵守的准则。

第1章 钢筋混凝土结构的基本概念及材料物理力学性能

1.1 钢筋混凝土结构的基本概念及特点

1.1.1 钢筋混凝土结构的基本概念

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和各种其他形式的加筋混凝土结构。素混凝土结构是由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构；预应力混凝土结构是在结构或构件中配置了预应力钢筋并施加预应力的结构。在多数情况下，混凝土结构是由钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土结构。

钢筋和混凝土都是土木工程中重要的建筑材料。钢筋的抗拉和抗压强度都很高，但价格也相对较高；混凝土是一种典型的脆性材料，其抗压强度高，但抗拉强度很低（约为抗压强度的 $1/18\sim 1/8$ ）。为了充分发挥材料的性能，把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起共同工作，使钢筋主要承受拉力，混凝土主要承受压力，就组成了钢筋混凝土。

图1.1 (a) 所示为一用素混凝土制成的简支梁，在两个对称的集中力 P_1 的作用下，梁的上部受压、下部受拉。取跨中纯弯曲段为研究对象，随着荷载 P_1 的增加，梁下部受拉区的拉应变（拉应力）和上部受压区的压应变（压应力）不断增大。当下部受拉区边缘混凝土的拉应变达到混凝土极限拉应变时，下缘即出现竖向的裂缝。在裂缝截面处受拉区混凝土退出工作，受压区高度减小，即使荷载不再增加，竖向裂缝也会急速向上发展，导致梁的突然断裂。对应于下部受拉区边缘拉应变等于混凝土极限拉应变的荷载 P_c 为素混凝土梁受拉区出现裂缝的荷载，一般称为素混凝土梁的开裂荷载，也就是素混凝土梁的破坏荷载。换句话说，素混凝土梁的承载力是由混凝土的抗拉强度控制的，而混凝土的抗拉强度又很小，因此

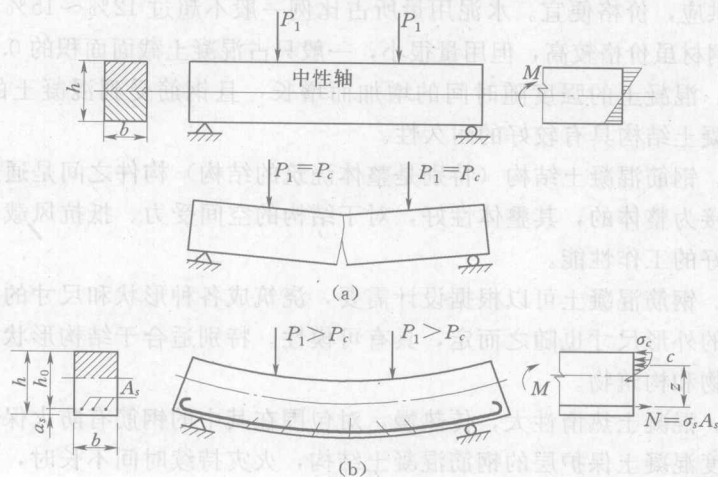


图1.1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的破坏情况

(a) 素混凝土梁；(b) 钢筋混凝土梁



素混凝土梁的承载力较小,使得混凝土所具有的优越的抗压性能远远未能得以充分利用。

为了提高混凝土梁的承载能力,充分发挥混凝土的抗压性能,可在梁的受拉区配置适量的纵向钢筋,形成钢筋混凝土梁如图 1.1 (b) 所示。

在梁的受拉区配置纵向钢筋,用以承担拉力,混凝土则承担梁受压区的压力,两者结合分工明确、共同工作。钢筋混凝土梁的试验研究表明,钢筋混凝土梁与截面尺寸相同的素混凝土梁的开裂荷载 P_c 基本相同。当荷载略大于开裂荷载 P_c 时,梁的受拉区仍会出现裂缝,裂缝处截面受拉区混凝土逐渐地退出工作,拉力转由钢筋来承担。随着荷载的增加,钢筋的拉应力和受压区混凝土的压应力将不断加大,直至钢筋的拉应力达到其屈服强度,继而受压区混凝土被压碎,梁才宣告破坏。由此可见,在钢筋混凝土梁中混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都得到了充分发挥,同时其承载力较素混凝土梁提高很多。

钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料,结合在一起之所以能有效地共同工作,是基于以下三个原因:

(1) 混凝土硬化后,钢筋与混凝土之间存在黏结力,形成整体,相互能传递力和变形。黏结力是使这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋与混凝土具有大致相同的温度膨胀系数,钢材为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ 。这样,当温度变化时,不致因产生过大的温度应力而破坏两者之间的黏结力,可以保证两者的共同工作。

(3) 混凝土包裹钢筋,可以保护钢筋免于锈蚀,保证结构具有良好的耐久性。这是因为水泥水化作用后,产生碱性反应,在钢筋表面产生一种水泥石质薄膜,可以防止有害介质的直接侵蚀。因此,为了保证结构的耐久性,混凝土应具有较好的密实度,并留有足够的保护层厚度。另外混凝土还可以提高结构的耐火性能。

1.1.2 钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土结构问世大约已有一百年,在世界各国的土木工程中得到了广泛的应用,其原因主要在于它具有下述一系列优点:

(1) 就地取材。作为钢筋混凝土的主要材料之一的混凝土,其主要成分砂和石子,属于地方材料,可就地供应,价格便宜。水泥用量所占比例一般不超过 $12\% \sim 15\%$,其价格也比钢材、木材便宜。钢材虽价格较高,但用量很小,一般只占混凝土截面面积的 $0.33\% \sim 3\%$ 。

(2) 耐久性。混凝土的强度随时间的增加而增长,且钢筋受到混凝土的保护而不易锈蚀,所以钢筋混凝土结构具有较好的耐久性。

(3) 整体性。钢筋混凝土结构(特别是整体浇筑的结构)构件之间是通过钢筋和混凝土的一次性浇筑连接为整体的,其整体性好,对于结构的空间受力、抵抗风载、地震及强烈冲击作用都具有较好的工作性能。

(4) 可模性。钢筋混凝土可以根据设计需要,浇筑成各种形状和尺寸的构件。只要模板设计成形,结构的外形尺寸也随之而定,具有可模性。特别适合于结构形状复杂或对造型有较高要求的建筑物和构筑物。

(5) 耐火性。混凝土热惰性大,传热慢,对包围在其中的钢筋有防火保护作用。实践表明,对有足够厚度混凝土保护层的钢筋混凝土结构,火灾持续时间不长时,不致因钢筋受热软化而造成结构的整体坍落破坏。

但同时钢筋混凝土结构也存在一些缺点:



(1) 自重大。钢筋混凝土结构本身自重大。设计结构物时,若结构本身自重过大,则结构抗力大部分用来承受恒载,这样是不经济的。为了改善混凝土结构自重大的缺点,世界各国都大力发展轻质、高强度混凝土,轻质混凝土制成的结构自重较普通混凝土可减少 20%~30%。

(2) 抗裂性差。混凝土的抗拉强度低,钢筋混凝土结构往往带裂缝工作。实践表明,只要将裂缝宽度控制在允许宽度(一般规定为 0.15~0.2mm)之内,裂缝对结构的耐久性影响不大。

(3) 施工受季节性气候影响大。在冬季和雨季现场就地浇筑混凝土时,须采取必要的防护措施,增加了施工费用,且质量也不易得到保证。因此,钢筋混凝土的发展方向之一,就是要大量发展工业化、工厂化的装配式结构。

1.2 混凝土的物理力学性能

1.2.1 混凝土强度

混凝土强度是指混凝土抵抗外力产生的某种应力的能力,即混凝土达到破坏或开裂极限状态时所能承受的应力。混凝土强度是混凝土的重要力学性能指标,是设计钢筋混凝土结构的重要依据,它直接影响结构的安全性和耐久性。

1.2.1.1 混凝土的抗压强度

在混凝土及钢筋混凝土结构中,混凝土主要用以受压,因而研究混凝土的抗压强度是十分必要的。试验研究表明,混凝土的抗压强度除受组成材料的性质、配合比、养护环境、施工方法等因素影响外,还与试验方法及试件的尺寸、形状有关。

如果在试件的表面和压力机的压盘之间涂一层油脂,其抗压强度比不涂油脂的试件低很多,破坏形式也不相同(图 1.2)。

未加油脂的试件表面与压力机压盘之间有向内的摩擦力存在,摩擦力像箍圈一样,对混凝土试件的横向变形产生约束,延缓了裂缝的开展,提高了试件的抗压极限强度。当压力达到极限值时,试件在竖向压力和水平摩擦力的共同作用下沿斜向破坏,形成两个对称的角锥形破坏面。

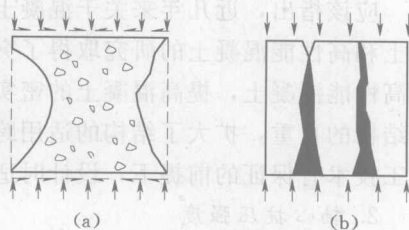


图 1.2 混凝土立方体试件的破坏形态
(a) 不涂润滑剂; (b) 涂润滑剂

如果在试件表面涂抹一层油脂,试件表面与压力机压盘之间的摩擦力大大减小,对混凝土试件横向变形的约束作用几乎没有。最后,试件由于形成了与压力方向平行的裂缝而破坏。所测得的抗压极限强度较不加油脂者低很多。

混凝土的抗压强度还与试件的形状有关。试验表明,试件的高宽比 h/b 越大,所测得的强度越低。这反映了试件两端与压力机压盘之间存在的摩擦力,对不同高宽比的试件混凝土横向变形的约束影响程度不同。试件的高宽比 h/b 越大,端部摩擦力对试件中部的横向变形的约束影响程度就越小,所测得的强度也越低。当高宽比 $h/b \geq 3$ 时,支端摩擦力对混凝土横向变形的约束作用就影响不到试件的中部,所测得的强度基本上保持一个定值。

此外,试件的尺寸对抗压强度也有一定影响。试件的尺寸越大,实测强度越低。这种现象称为尺寸效应。一般认为这是由混凝土内部缺陷和试件承压面摩擦力影响等因素造成的。试件尺寸大,内部缺陷(微裂缝、气泡等)相对较多,端部摩擦力影响相对较小,故实测强度较



低。根据我国的试验结果,若以 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体试件的强度为准,对 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 立方体试件的实测强度应乘以尺寸修正系数 1.05;对 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 立方体试件的实测强度应乘以尺寸修正系数 0.95。

为此,我们在定义混凝土抗压强度指标时,必须把试验方法、试件形状及尺寸等因素确定下来,在统一基准上建立的强度指标才有可比性。

混凝土抗压强度有以下两种表示方法。

1. 立方体抗压强度

我国规范习惯于用立方体抗压强度作为混凝土强度的基本指标。《公路桥规》规定的立方体抗压强度标准值系指采用按标准方法制作、养护至 28d 龄期的边长为 150mm 立方体试件,以标准试验方法(试件支承面不涂油脂)测得的具有 95% 保证率的抗压强度(以 MPa 计),记为 $f_{cu,k}$,同时用此值来表示混凝土的强度等级,并冠以 C 表示,如 C30 表示 30 级混凝土,其抗压强度标准值为 30MPa。

按照立方体抗压强度的大小将混凝土强度划分为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80 共 14 个等级。C50 以下为普通强度混凝土,C50 及以上为高强度混凝土。

公路桥涵受力构件的混凝土强度等级应满足:

(1) 钢筋混凝土构件不应低于 C20,当采用 HRB400、KL400 级钢筋配筋时,不应低于 C25。

(2) 预应力混凝土构件不应低于 C40。

应该指出,近几年来关于混凝土结构的耐久性问题,引起了国内外的广泛关注,高强混凝土和高性能混凝土的研究取得了突破性进展。从解决混凝土结构的耐久性的需要出发,采用高性能混凝土,提高混凝土的密实度是十分必要的。另外,由于采用高强度混凝土,减轻了结构的自重,扩大了结构的适用跨度,收到的经济效益也是十分显著的。因此,在混凝土施工技术有保证的前提下,设计时适当地提高混凝土的强度等级是适宜的。

2. 轴心抗压强度

用高宽比 $h/b \geq 3$ 的棱柱体试件所测得的抗压强度称为轴心抗压强度。在实际结构中,绝大多数受压构件的高度比其截面的边长要大得多。所以,采用轴心抗压强度能更好地反映混凝土的实际受力状态。同时,由于试件的高宽比较大,可摆脱端部摩阻力的影响,所测强度趋于稳定。我国采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 450\text{mm}$ 的棱柱体作为混凝土轴心抗压试验的标准试件,按与上述立方体试件相同的制作、养护条件和标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度称轴心抗压(或棱柱体抗压)强度标准值(以 MPa 计),记为 f_{ck} 。

1.2.1.2 混凝土抗拉强度

混凝土的抗拉强度是混凝土的基本力学特征之一,其值约为立方体抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$ 。混凝土抗拉强度的测试方法各国不尽相同。我国较多采用的测试方法是用钢模浇筑成

型的 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的柱体试件,通过预埋在试件轴线两端的钢筋,对试件施加拉力,试件破坏时的平均应力即为混凝土的轴心抗拉强度,记为 f_{tk} (图 1.3)。

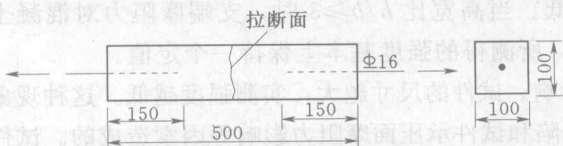


图 1.3 混凝土抗拉强度试验(尺寸单位: mm)



应该指出,用上述直接受拉试验测定混凝土抗拉强度时,试件的对中比较困难,稍有偏差就可能引起偏心受拉破坏,影响试验结果。因此,目前国外常采用劈裂试验间接测定混凝土抗拉强度。

1.2.2 混凝土的变形性能

混凝土的变形可分为两类:一类是在荷载作用下产生的受力变形,其数值和变化规律与加载方式及荷载作用持续时间有关,包括单调短期加载、多次重复加载以及荷载长期作用下的变形等;另一类是体积变形,包括混凝土收缩、膨胀和由于温度、湿度变化产生的变形。

1.2.2.1 混凝土在一次短期加载时的应力—应变曲线

混凝土受压的应力—应变曲线(图1.4),通常采用 $h/b=3\sim 4$ 的棱柱体试件来测定。

从试验分析得知:

(1) 当应力小于其极限强度30%~40%(a点)时,应力—应变关系接近直线。

(2) 当应力继续增大时,应力—应变曲线就逐渐向下弯曲,呈现出塑性性质。当应力增大到接近极限强度的80%左右(b点)时,应变增加得更快。

(3) 当应力达到极限强度(c点)时,试件表面出现与压力方向平行的纵向裂缝,试件开始破坏,这时达到的最大应力 σ_0 称为混凝土轴心抗压强度 f_c ,相应的应变为 ϵ_0 ,一般为0.002左右。

(4) 试件在普通材料试验机上进行抗压试验时,达到最大应力后试件就立即崩碎,呈脆性破坏特征,所得的应力—应变曲线如图1.4中的 $oabcd$,下降段曲线 cd 无一定规律。这种突然性破坏是由于试验机的刚度不足所造成的,因为试验机在加载过程中产生变形,试件受到试验机的冲击而急速破坏。

(5) 如果在普通压力机上用高强弹簧(或油压千斤顶)与试件共同受压,以吸收试验机内所积蓄的应变能,防止试验机的回弹对试件的冲击造成的突然破坏,到达最大应力后,随试件变形的增大,高强弹簧承受的压力所占的比例增大,对试件起到卸载作用,使试件受的压力稳定下降,就可以测出混凝土的应力—应变全过程曲线,如图1.4中的 $oabcd'$ 。曲线中 oc 段称为上升段, cd' 段称为下降段。相应于曲线末端的应变称为混凝土的极限压应变 ϵ_{cu} , ϵ_{cu} 越大,表示塑性变形能力大,也就是延性越好。

混凝土受压时应力—应变曲线的形态还与混凝土强度等级和加载速度等因素有关。试验结果表明,随着混凝土强度等级的提高,相应的峰值应变 ϵ_0 也略有增加,曲线的上升段形状相似,但下降段的形状有明显不同。强度等级较低的混凝土下降段较长,顶部较平缓;强度等级较高的混凝土下降段顶部陡峭,曲线较短。这表明强度等级低的混凝土受压时的延性比强度等级高的要好。

加载速度对混凝土应力—应变曲线的形状影响是:加载速度越快,下降段越陡;反之,下降段要平缓些。

1.2.2.2 混凝土在重复荷载作用下的应力—应变曲线

混凝土在多次重复荷载作用下,其应力、应变性质和短期一次加载情况有显著不同。由

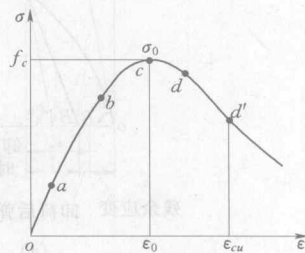


图1.4 实测的混凝土
受压应力—应变曲线



于混凝土是弹塑性材料，初次卸载至应力为零时，应变不可能全部恢复。可恢复的那部分称之为弹性应变 ϵ_e ，弹性应变包括卸载时瞬时恢复的应变和卸载后弹性后效两部分；不可恢复的部分称之为残余应变，如图 1.5 (a) 所示，因此在一次加载卸载过程中，混凝土的应力—应变曲线形成一个环状。

混凝土在多次重复荷载作用下的应力—应变曲线如图 1.5 (b) 所示。当加载应力相对较小（一般认为 σ_1 或 $\sigma_2 < 0.5f_c$ ）时，随着加载卸载重复次数的增加，残余应变会逐渐减小，一般重复 5~10 次后，加载和卸载应力—应变曲线环就越来越闭合，并接近一直线，混凝土呈现弹性工作性质。

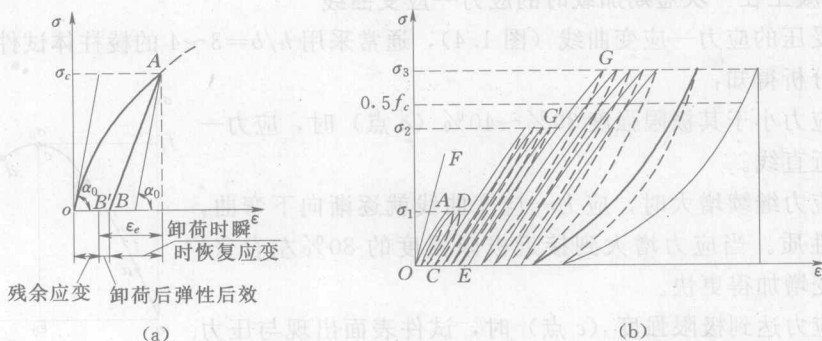


图 1.5 混凝土在重复荷载作用下的应力—应变曲线

(a) 一次加载 $\sigma-\epsilon$ 曲线；(b) 多次重复加载 $\sigma-\epsilon$ 曲线

如果加载应力超过某一个限值（如图中 $\sigma_3 \geq 0.5f_c$ ，但仍小于 f_c ）时，经过几次重复加载卸载，应力—应变曲线就变成直线，再经过多次重复加载卸载后，应力—应变曲线出现反向弯曲，逐渐凸向应变轴，斜率变小，变形加大，重复加载卸载到一定次数时，混凝土试件将因严重开裂或变形过大而破坏，这种因荷载多次重复作用而引起的破坏称为疲劳破坏。

桥梁工程中，通常要求能承受 200 万次以上反复荷载不得产生疲劳破坏，这一强度称为混凝土的疲劳强度 f_c^f ，一般取 $f_c^f \approx 0.5f_c$ 。

1.2.2.3 混凝土的变形模量

在钢筋混凝土结构内力分析及构件的变形计算中，混凝土的弹性模量是不可缺少的基础资料之一。前已指出混凝土的应力—应变关系是一条曲线，只是在应力较小时才接近于直线，因此在不同的应力阶段反映应力与应变关系的变形模量是一个变数。

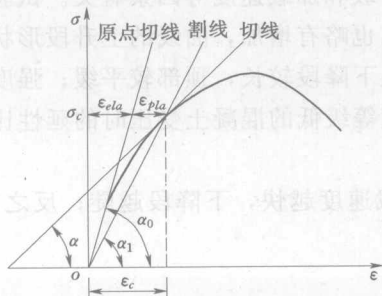


图 1.6 混凝土变形模量的表示方法

图 1.6 所示为混凝土应力—应变的典型曲线，图中 ϵ_c 为当混凝土压应力为 σ_c 时的总应变，其中包括弹性应变和塑性应变两部分，即

$$\epsilon_c = \epsilon_{ela} + \epsilon_{pla} \quad (1.1)$$

式中 ϵ_{ela} ——混凝土的弹性应变；

ϵ_{pla} ——混凝土的塑性应变。

混凝土的变形模量有以下三种表示方法。

1. 原点弹性模量，简称弹性模量 E_c 。

混凝土的弹性模量相当于应力—应变图上过原点 o 所



作的切线的斜率（正切值），其表达式为：

$$E_c = \sigma_c / \epsilon_{ela} = \tan \alpha_0 \quad (1.2)$$

式中 α_0 ——应力—应变图原点处的切线与横坐标轴的夹角。

2. 割线模量 E'_c

混凝土的割线模量相当于应力—应变图上连接原点 o 至任意应力 σ_c 相对应的曲线点处割线的斜率（正切值），其表达式为：

$$E'_c = \sigma_c / \epsilon_c = \tan \alpha_1 \quad (1.3)$$

式中 α_1 ——对应于应力 σ_c 处的割线与横坐标轴的夹角。

由于总应变 ϵ_c 中包含弹性应变 ϵ_{ela} 和塑性应变 ϵ_{pla} 两部分，由此所确定的模量又称为弹塑性模量。

3. 切线模量 E''_c

混凝土的切线模量相当于应力—应变曲线上某一应力 σ_c 处所作切线的斜率（正切值），即应力增量与应变增量的比值，其表达式为：

$$E''_c = d\sigma_c / d\epsilon_c = \tan \alpha \quad (1.4)$$

式中 α ——某点应力 σ_c 处的切线与横坐标轴的夹角。

1.2.2.4 混凝土在荷载长期作用下的变形性能

在不变的应力长期持续作用下，混凝土的变形随时间而不断增长的现象，称为混凝土的徐变。混凝土的徐变对结构构件的变形、承载能力以及预应力钢筋的应力损失都将产生重要的影响。

关于徐变产生的原因，目前尚无统一的解释，通常可这样理解：一是混凝土中水泥凝胶体在荷载作用下产生黏性流动，并把它所承受的压力逐渐转给骨料颗粒，使骨料压力增大，试件变形也随之增大；二是混凝土内部的微裂缝在荷载长期作用下不断发展和增加，也使应变增大。当应力不大时，徐变的发展以第一种原因为主；当应力较大时，以第二种原因为主。

影响徐变的因素有以下几个方面：

- (1) 混凝土的徐变与混凝土的应力有着密切的关系。
- (2) 混凝土的徐变与时间参数有关。
- (3) 混凝土加荷龄期愈短，徐变越大。
- (4) 水泥用量越多，徐变越大。
- (5) 集料越坚硬、养护相对湿度越高，徐变越小。

1.2.2.5 混凝土的收缩和膨胀

混凝土在空气中结硬时其体积会缩小，这种现象称为混凝土收缩；混凝土在水中结硬时体积会膨胀，称为混凝土的膨胀。一般说来，混凝土的收缩值比膨胀值大得多。

混凝土产生收缩的原因，一般认为是由水泥凝胶体本身的体积收缩（凝缩）以及混凝土因失水产生的体积收缩（干缩）共同造成的，如图 1.7 所示。

由图 1.7 可见收缩应变也是随时间而增长的。结硬初期收缩应变发展很快，以后逐渐减慢，整个收缩过程可延续两年左右。蒸汽养护时，由于高温高湿条件能加速混凝土的凝结和结硬过程，减少混凝土的水分蒸发，因而混凝土的收缩值要比常温养护时小。一般情况下，混凝土的收缩应变终值约为 $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ 。

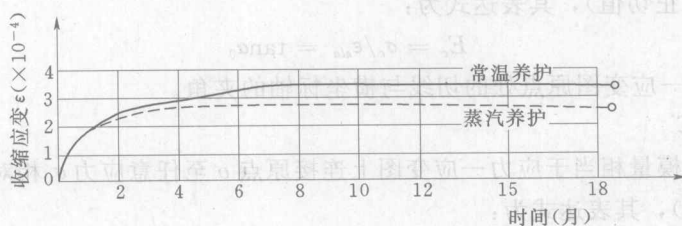


图 1.7 混凝土的收缩

影响混凝土收缩的因素很多,如混凝土的组成、外部环境等因素对收缩和徐变有类似的影响。

当混凝土受到各种制约不能自由收缩时,将在混凝土中产生拉应力,甚至导致混凝土产生收缩裂缝。在钢筋混凝土构件中,钢筋因受到混凝土收缩影响产生压应力,而混凝土则产生拉应力,如果构件截面配筋过多,构件就可能产生收缩裂缝;在预应力混凝土构件中,混凝土收缩将引起预应力损失。收缩对某些钢筋混凝土超静定结构也将产生不利影响。

1.3 钢筋的物理力学性能

1.3.1 钢筋的成分、级别、品种

钢筋混凝土结构所采用的钢筋按其化学成分可分为碳素钢及普通低合金钢两大类。

碳素钢除了铁、碳两种基本元素外,还含有少量硅、锰、硫、磷等元素。根据含碳量的多少又可分为低碳钢(含碳量小于 0.25%),中碳钢(含碳量为 0.25%~0.6%)及高碳钢(含碳量为 0.6%~1.4%)。含碳量越高强度越高,但塑性和可焊性降低。

普通低合金钢除碳素钢中已有的成分外,再加入少量的合金元素如硅、锰、钛、钒和铬等,可有效地提高钢材的强度和改善钢材的其他性能。

按钢筋的加工方法,钢筋可分为热轧钢筋、冷拉钢筋、冷轧带肋钢筋、热处理钢筋和钢丝五大类。《公路桥规》推荐,用于钢筋混凝土桥梁结构的钢筋主要选取热轧钢筋、碳素钢丝和精轧螺纹钢等三大类。

1. 热轧钢筋

是将钢材在高于再结晶温度状态下,用机械方法轧制成不同外形的钢筋。热轧钢筋按外形可分为光面钢筋和带肋钢筋两大类。

光面钢筋的强度等级代号为 R235,相当于原标准的 I 级钢筋、厂家生产的公称直径范围为 8~20mm。R235 钢筋属于低碳钢,其强度较低,但塑性和可焊性能较好,广泛用于钢筋混凝土结构中。

带肋钢筋按强度分为 HRB335 和 HRB400、KL400 两个等级。HRB335 钢筋相当于原标准的 II 级钢筋,厂家生产的公称直径范围为 6~50mm,推荐采用直径一般不超过 32mm。HRB335 钢筋属于普通低合金钢,强度、塑性和可焊性等综合性能都比较好,钢筋表面带肋与混凝土黏结性能也较好。HRB400 和 KL400 钢筋相当于原标准的 III 级钢筋。其中 HRB400 为按 GB 1499.2—2007《钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋》生产的热轧钢筋,公称直径范围为 6~50mm;KL400 为按 GB 13014—1991《钢筋混凝土用余热处理钢