




普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

# 钢筋混凝土结构

罗向荣 主编



 高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 钢筋混凝土结构

罗向荣 主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),是根据目前高职高专院校建筑工程专业的教学基本要求,参照我国最新修订的有关结构设计新规范、新标准编写的。

内容包括:钢筋混凝土材料的力学性能、钢筋混凝土结构的设计方法、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、受压构件承载力计算、受拉构件承载力计算、钢筋混凝土构件变形和裂缝宽度验算、预应力混凝土构件、梁板结构、单层工业厂房、多层框架结构房屋。各章节正文后均附有小结、思考题和习题。

本书可作为高等职业技术学校、高等专科学校、成人高校、本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校建筑工程专业的专业课教材。也可作为土建类相关专业的教材,同时可供相关工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土结构/罗向荣主编. —北京:高等教育出版社,2003.7

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-04-012620-6

I. 钢... II. 罗... III. 钢筋混凝土结构—高等学校—教材 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 025886 号

---

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16  
印 张 19.25  
字 数 460 000

版 次 2003 年 7 月第 1 版  
印 次 2003 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 22.30 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

# 前 言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)。是根据土建类高职、高专建筑工程技术专业教学的基本要求,参照我国最新修订的国家标准 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》、GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》、GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》和 JGJ3—2002《高层建筑混凝土结构技术规程》等新规范、新标准编写的。

本书力求体现高职高专教育的特色,服务于高职、高专培养技术应用型人才的大目标,对基本理论的讲授以应用为目的,教学内容以必须够用为度,语言精练、概念清楚、重点突出。为了便于学生学习,本书在每章正文之前有学习目标,正文之后有小结、思考题、习题。

本书由罗向荣主编并编写第 1、4、5、7、8 章;由李玉编写第 6、9、11 章;由张克跃编写第 2、3、13 章;由李晓枫编写第 10、12 章。

哈尔滨工业大学邹超英教授主审了全书,并提出了许多宝贵意见;另外,本书在编写过程中还有不少同志提供了许多帮助,在此一并表示感谢。同时感谢黑龙江建筑职业技术学院、平顶山工学院、西南交通大学峨眉分校等单位的大力支持。

限于编者的理论水平和实践经验,书中不足之处在所难免。欢迎广大师生和其他读者批评指正。

编 者

2003 年 3 月

策划编辑	毛红斌
责任编辑	李 澈
封面设计	于 涛
责任绘图	朱 静
版式设计	王艳红
责任校对	尤 静
责任印制	韩 刚

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 82028899 转 6897 (010)82086060

**传真：**(010) 82086060

**E-mail：**dd@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

**邮编：**100011

**购书请拨打读者服务部电话：**(010)64054588

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	思考题 .....	83
1.1 混凝土结构的概念 .....	1	习题 .....	83
1.2 混凝土结构的应用和发展概况 .....	2	第 6 章 受扭构件承载力计算 .....	85
1.3 本课程的目的及特点 .....	3	6.1 纯扭构件承载力计算 .....	86
第 2 章 钢筋混凝土材料的力学性能 .....	5	6.2 弯剪扭构件承载力计算 .....	88
2.1 混凝土 .....	5	小结 .....	93
2.2 钢筋 .....	11	思考题 .....	94
2.3 钢筋与混凝土的粘结 .....	13	习题 .....	94
小结 .....	14	第 7 章 受压构件承载力计算 .....	95
思考题 .....	15	7.1 受压构件的构造要求 .....	96
第 3 章 钢筋混凝土结构的设计方法 .....	16	7.2 轴心受压构件承载力计算 .....	98
3.1 结构设计的基本要求 .....	16	7.3 矩形截面偏心受压构件正截面承载力 计算 .....	103
3.2 结构的作用、作用效应和结构抗力 .....	17	7.4 工字形截面偏心受压构件正截面承 载力计算 .....	114
3.3 概率极限状态设计法 .....	20	7.5 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算 .....	118
3.4 混凝土结构的耐久性规定 .....	24	小结 .....	119
小结 .....	25	思考题 .....	120
思考题 .....	25	习题 .....	120
习题 .....	26	第 8 章 受拉构件承载力计算 .....	122
第 4 章 受弯构件正截面承载力计算 .....	27	8.1 轴心受拉构件承载力计算 .....	122
4.1 梁、板的一般构造要求 .....	27	8.2 偏心受拉构件承载力计算 .....	123
4.2 受弯构件正截面承载力的试验研究 .....	31	小结 .....	126
4.3 受弯构件正截面承载力计算的一般 规定 .....	34	思考题 .....	127
4.4 单筋矩形截面正截面承载力计算 .....	37	习题 .....	127
4.5 双筋矩形截面正截面承载力计算 .....	44	第 9 章 钢筋混凝土构件变形和裂缝 宽度验算 .....	128
4.6 T 形截面正截面承载力计算 .....	50	9.1 受弯构件的变形验算 .....	128
小结 .....	58	9.2 裂缝宽度验算 .....	134
思考题 .....	59	小结 .....	136
习题 .....	59	思考题 .....	137
第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算 .....	61	习题 .....	137
5.1 受弯构件斜截面承载力的试验研究 .....	62	第 10 章 预应力混凝土构件 .....	138
5.2 受弯构件斜截面受剪承载力计算 .....	63	10.1 概述 .....	138
5.3 保证斜截面受弯承载力的构造要求 .....	73		
5.4 受弯构件钢筋构造要求的补充 .....	76		
小结 .....	82		



10.2 施加预应力的方法 .....	139	附表 A.2 钢筋强度标准值、设计值和弹性 模量 .....	270
10.3 预应力混凝土材料 .....	141	附表 A.3 预应力钢筋强度标准值、设计值 和弹性模量 .....	270
10.4 张拉控制应力和预应力损失 .....	142	<b>附录 B</b> .....	272
10.5 预应力混凝土轴心受拉构件 .....	146	附表 B.1 混凝土结构的环境类别 .....	272
10.6 预应力混凝土构件的构造要求 .....	159	附表 B.2 纵向受力钢筋的混凝土保护层 最小厚度 .....	272
小结 .....	162	附表 B.3 钢筋混凝土结构构件中纵向 受力钢筋的最小配筋百分率 .....	272
思考题 .....	162	附表 B.4 受弯构件的挠度限值 .....	273
习题 .....	162	附表 B.5 结构构件的裂缝控制等级及 最大裂缝宽度限值 .....	273
<b>第 11 章 梁板结构</b> .....	164	<b>附录 C</b> .....	274
11.1 整体式单向板肋梁楼盖 .....	165	附表 C.1 钢筋截面面积及理论质量 .....	274
11.2 整体式双向板肋梁楼盖 .....	189	附表 C.2 每米板宽各种钢筋间距的钢筋 截面面积 .....	274
11.3 装配式楼盖 .....	196	附表 C.3 钢绞线、钢丝公称直径、公称截面 面积及理论质量 .....	275
11.4 楼梯 .....	198	附表 C.4 矩形和 T 形截面受弯构件正截面 承载力计算系数表 .....	276
小结 .....	206	<b>附录 D</b> .....	277
思考题 .....	206	附表 D.1 均布荷载和集中荷载作用下等跨 连续梁的内力系数 .....	277
习题 .....	207	附表 D.2 按弹性理论计算矩形双向板在 均布荷载作用下的弯矩系数表 .....	285
<b>第 12 章 单层工业厂房</b> .....	209	<b>附录 E 单阶柱柱顶反力与位移系数表</b> ..	288
12.1 单层工业厂房的组成及受力特点 .....	209	<b>附录 F</b> .....	293
12.2 支撑的种类和布置 .....	216	附表 F.1 均布水平荷载下各层柱标准反 弯点高度比 $y_0$ .....	293
12.3 单层工业厂房排架计算 .....	219	附表 F.2 倒三角形荷载下各层柱标准反 弯点高度比 $y_0$ .....	294
12.4 单层工业厂房排架柱设计 .....	229	附表 F.3 上下梁相对刚度变化时的修正 值 $y_1$ .....	296
12.5 柱下钢筋混凝土独立基础 .....	234	附表 F.4 上下层柱高度变化时的修正 值 $y_2$ 和 $y_3$ .....	296
小结 .....	239	<b>参考文献</b> .....	297
思考题 .....	240		
习题 .....	240		
<b>第 13 章 多层框架结构房屋</b> .....	241		
13.1 框架结构的分类和布置 .....	241		
13.2 框架结构的计算简图 .....	245		
13.3 框架结构的内力与位移计算 .....	251		
13.4 框架结构的内力组合 .....	262		
13.5 框架构件截面设计要点和节点构造 .....	265		
小结 .....	268		
思考题 .....	269		
习题 .....	269		
<b>附录 A</b> .....	270		
附表 A.1 混凝土强度标准值、设计值和 弹性模量 .....	270		

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 混凝土结构的概念

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构及预应力混凝土结构。

混凝土是建筑工程中应用非常广泛的一种建筑材料，混凝土抗压强度较高，而抗拉强度却很低。因此，不配置钢筋的素混凝土构件，只适用于受压构件，且破坏比较突然，故在工程中极少使用。例如，两根截面尺寸、跨度和混凝土强度等级(C20)完全相同的简支梁，其中一根为素混凝土梁，由试验可知，当加荷  $F = 12.5 \text{ kN}$  时，素混凝土梁便由于受拉区混凝土被拉裂而突然折断(图 1.1a)。但如在梁的受拉区配置一定数量的钢筋，例如，在上述这根梁的底部配置 2 根直径为 20 mm 的 HRB335 级钢筋，做成钢筋混凝土梁(图 1.1b)，虽然当荷载达一定程度时，受拉区混凝土仍然开裂，但钢筋可以代替开裂的混凝土承受拉力，直到钢筋达到其屈服强度裂缝迅速向上延伸，受压区面积减小，导致混凝土压应力达到抗压强度而被压碎破坏。此时，梁的破坏荷载  $F = 76 \text{ kN}$ 。在钢筋混凝土受弯构件中，通常是混凝土承受压力，钢筋承受拉力，钢筋与混凝土两种材料的强度均得到充分利用，大大提高了构件的承载力。此外，在受压混凝土构件中，配置抗压强度较高的钢筋，也可协助混凝土承受压力，从而减小构件截面尺寸，改善受压构件的脆性性质。

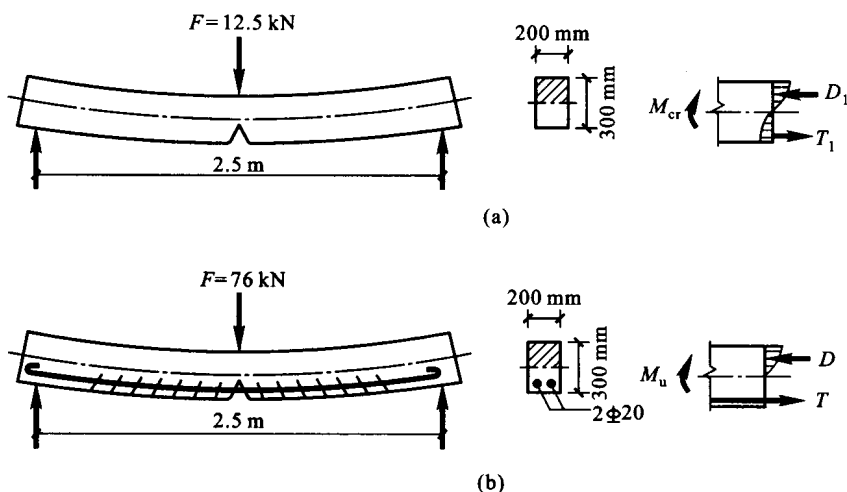


图 1.1 钢筋混凝土梁与素混凝土梁的比较

钢筋和混凝土是两种性质不同的材料,其所以能有效地共同工作,是由于下述特征:

(1) 钢筋和混凝土之间有着可靠的粘结力,能牢固结成整体,受力后变形一致,不会产生相对滑移。这是钢筋和混凝土共同工作的主要条件。

(2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数大致相同(钢约  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,混凝土约为  $1 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),因此,当温度变化时,不致产生较大的温度应力而破坏两者之间粘结。

(3) 钢筋外边有一定厚度的混凝土保护层,可以防止钢筋锈蚀,从而保证了钢筋混凝土构件的耐久性。

钢筋混凝土构件受力性能虽然比素混凝土构件有了很大改善,但还存在难以克服的缺点:一是由于混凝土受拉强度较低,导致混凝土梁过早开裂,从而构件刚度降低变形加大。其二是为了限制裂缝开展的宽度,钢筋混凝土构件中高强材料无法充分利用。为了避免钢筋混凝土构件中变形过大,裂缝出现过早和充分利用高强材料,人们在生产实践中创造了预应力混凝土结构。所谓预应力混凝土结构,是在结构构件受外荷载作用之前,人为地对混凝土构件的受拉区预先施加一定的压力,由此产生预压应力状态,以减小或抵消外荷载作用下引起的拉力,推迟裂缝的开展,减小裂缝的宽度,从而加大构件刚度减小变形,同时还可采用高强材料。

钢筋混凝土结构的主要优点是:

- (1) 混凝土中所用的砂石材料,一般可以就地就近取材;
- (2) 耐久性和耐火性均比钢结构好;
- (3) 现浇及装配整体式钢筋混凝土结构整体性好,因而有利于抗震防爆;
- (4) 比钢结构节约钢材;
- (5) 可模性好,可以根据设计要求浇成各种形状。

但是,钢筋混凝土结构也存在一些缺点:

- (1) 自重过大,施工复杂;
- (2) 浇筑混凝土时需要模板、支撑;
- (3) 户外施工受季节条件限制;
- (4) 补强维修工作比较困难。

## 1.2 混凝土结构的应用和发展概况

混凝土结构是一种新兴的结构,迄今只有 150 年的历史。早期的混凝土结构所用的钢筋与混凝土强度都很低,因此,主要用于小型钢筋混凝土梁、板、柱和基础等构件。进入 20 世纪以后,随着生产的需要和科学技术的发展,出现了预应力混凝土结构、装配式钢筋混凝土结构和钢筋混凝土薄壁空间结构,使钢筋混凝土结构在组成材料、结构形式、应用范围、施工方法和计算理论等方面都得到了迅速发展。从目前情况看,混凝土结构已成为建筑工程中最为广泛的一种结构,有着很大的发展潜力。

在材料方面,现在国内钢筋混凝土结构采用 C20~C40 的混凝土,预应力钢筋混凝土结构采用 C40~C80 的混凝土。近年来国内外高性能混凝土的研究正方兴未艾,如美国已制成 C200 的混凝土,我国已制成 C100 的混凝土,为混凝土结构在高层建筑、高耸建筑和大跨度桥梁等方面

的应用创造了条件。为了减轻结构自重,充分利用工业废渣废料,国内外都在发展轻集料混凝土,如浮石混凝土、陶粒混凝土等,其自重 $14\sim 18\text{ kg/m}^3$ ,与普通混凝土相比可减少自重 $10\%\sim 30\%$ 。此外,各种纤维混凝土的应用,大大地改善了混凝土抗拉性能和延伸性差的缺点。

钢筋的强度也将有新的提高,高强钢筋首先是 HRB400 级(即新 III 级)钢筋将在混凝土结构中得到广泛的应用。此外,最近在国际上研究较多的是树脂粘结的纤维筋,常用的有树脂粘结的碳纤维、玻璃纤维,研究证明这些纤维制成的筋材强度都很高。

在结构形式方面,钢-混凝土组合结构是近年来值得注意的发展方向之一。如压型钢板-混凝土组合而成的组合楼盖,型钢-混凝土组合而成的组合梁及钢管混凝土柱等。另外,预应力混凝土结构近年来发展也比较迅速,特别引人重视的是无粘结部分预应力混凝土结构。无粘结筋由单根或多根高强钢丝、钢绞线或钢筋沿全长涂抹防腐油脂并用聚乙烯热塑管包裹而成,像普通钢筋一样敷设,然后浇筑混凝土,待混凝土达到规定的强度后进行张拉和锚固。省去了传统预应力混凝土的复杂施工工序,缩短了工期,降低了造价。

在设计理论方面,从 1955 年我国有了第一批建筑结构设计规范,至今,建筑结构设计规范已经修订了四次。现行 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》就是在总结 50 多年的丰富工程实践经验、设计理论和最新科学研究成果的基础上编制的。它采用以概率理论为基础的极限状态法,从对结构仅进行线性分析发展到对结构进行非线性分析,从对结构侧重安全发展到全面侧重结构的性能,更加严格地控制裂缝和变形。随着对混凝土弹塑性性能的深入研究,现代测试技术的发展及计算机的广泛应用,混凝土结构的计算理论和设计方法将向更高阶段发展。

在混凝土结构应用方面,工业建筑的单层和多层厂房已广泛采用了钢筋混凝土结构;在民用和公共建筑中钢筋混凝土结构住宅、旅馆、剧院、体育馆等大量涌现。此外,钢筋混凝土结构在桥梁工程、水工及港口工程、地下工程、海洋工程、国防工程及特种结构中得到广泛应用。尤其是近年来钢筋混凝土高层建筑正迅速发展,如我国香港特别行政区的中环广场,建成于 1992 年,78 层,372 m 高,是目前世界上最高的钢筋混凝土建筑。上海浦东的金茂大厦,建于 1998 年,88 层,421 m 高,钢-混凝土结构,是我国第一、世界第三高度的高层建筑。江阴长江大桥,建成于 1999 年,跨度为 1 385 m,列为中国第一、世界第四跨度的钢筋混凝土桥塔和钢悬索组成的特大桥。随着改革开放的深入和建设事业的发展,钢筋混凝土结构的应用会更加丰富多彩,范围也将日益扩大。

### 1.3 本课程的目的及特点

本课程是建筑工程技术和工民建专业课程之一,学习本课程的主要目的是:掌握混凝土结构的基本概念、基本理论及构造要求,能进行一般工业与民用建筑结构设计,并具有绘制和识读结构施工图的能力,为将来从事设计工作、施工及管理岗位的技术工作打下牢固的基础。

本课程是一门结构设计课,要搞好工程结构设计,不仅要有扎实的基础理论,还须综合考虑结构方案,构件选型、截面尺寸、材料选择、构造要求、经济合理和施工可行等,是一个综合性的问题。同一个问题,往往有多种可能的解决办法。因此,学习本课程时还要逐步掌握对各种错综复杂因素的综合分析能力。

另外,混凝土的力学特性及强度理论非常复杂,目前钢筋混凝土结构的计算公式就是在理论分析和大量试验基础上建立起来的。因此,应用公式时要特别注意它的适用范围和限制条件。

本课程还具有实践性很强的特点,不仅要通过课程教学学习结构设计的理论知识,还要经常到施工现场、预制构件厂进行参观,重视和积累工程经验。

本课程的直接依据是 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》(以下简称《统一标准》)、GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》)和 GB 50009—2002《建筑结构荷载规范》(以下简称《荷载规范》)。设计规范和标准是国家颁布的关于结构设计计算和构造要求的技术规定和标准,是具有技术法律性质的文件,每个设计人员都必须遵守。所以在学习本课程时,要注意熟悉规范,并正确运用规范。

## 第 2 章 钢筋混凝土材料的力学性能

### 学习目标

(1) 了解影响混凝土强度的因素,掌握混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、轴心抗拉强度和弹性模量测定方法;

(2) 掌握混凝土在一次短期加荷时的变形性能,了解混凝土收缩、徐变现象及其影响因素,理解收缩、徐变对钢筋混凝土结构的影响;

(3) 了解钢筋的种类、级别与形式,掌握有明显屈服点钢筋和无明显屈服点钢筋的应力-应变曲线的特点和设计时强度的取值标准;

(4) 理解钢筋与混凝土之间粘结应力的作用,了解钢筋和混凝土之间粘结产生的原因及影响因素。

## 2.1 混 凝 土

### 2.1.1 混凝土的强度

普通混凝土是由水泥、砂、石和水按一定配合比拌合,经凝固硬化后做成的人工石材。混凝土强度的大小不仅与组成材料的质量和配合比有关,而且与混凝土的养护条件、龄期、受力情况以及测定其强度时所采用的试件形状、尺寸和试验方法也有密切的关系。因此,在研究各种单向受力状态下的混凝土强度指标时必须以统一规定的标准试验方法为依据。

#### 1. 立方体抗压强度 $f_{cu}$

我国以立方体抗压强度值作为混凝土最基本的强度指标以及评价混凝土强度等级的标准,因为这种试件的强度比较稳定。《规范》规定,用边长为 150 mm 的标准立方体试件,在标准养护条件(温度在  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度不小于 90%)下养护 28 d 后在试验机上试压。试验时,试块表面不涂润滑剂,全截面受力、加荷速度每秒钟约为  $(0.3 \sim 0.8)\text{N}/\text{mm}^2$ 。试块加压至破坏时,所测得的极限平均压应力作为混凝土的立方体抗压强度,用符号  $f_{cu}$  表示,单位为  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

《规范》规定的混凝土强度等级,是按立方体抗压强度标准值(即具有不小于 95% 保证率)确定的,用符号 C 表示,共有 14 个等级,即 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80。字母 C 后面的数字表示以  $\text{N}/\text{mm}^2$  为单位的立方强度标准值。

在试验过程中可以看到,当试件的压力达到极限值时,在竖向压力和水平摩擦力的共同作用下,首先是试块中部外围混凝土发生剥落,形成两个对顶的角锥形破坏面(如图 2.1)。这也说

明,试块和试验机垫板之间的摩擦对试块有“套箍”作用,而且这种“套箍”作用,越靠近试块中部则越小。

试验还表明,混凝土的立方体抗压强度还与试块的尺寸有关,立方体尺寸越小,测得混凝土抗压强度越高。当采用边长为 200 mm 或 100 mm 立方体试件时,须将其抗压强度实测值乘以换算系数 1.05 或 0.95 转换成标准试件的立方体抗压强度值。

## 2. 轴心抗压强度 $f_c$

在实际工程中,受压构件往往不是立方体,而是棱柱体。因此采用棱柱体试件比立方体试件能更好地反映混凝土的实际抗压能力。用标准棱柱体试件测定的混凝土抗压强度,称为混凝土的轴心抗压强度或棱柱体强度,用符号  $f_c$  表示。

试验表明,当棱柱体试件的高度  $h$  与截面边长  $b$  之比值在 2~4 之间时,混凝土的抗压强度比较稳定。这是因为在此范围内既可消除垫板与试件之间摩擦力对抗压强度的影响,又可消除可能的附加偏心距对试件抗压强度的影响。因此,我国混凝土材料试验中规定以 150 mm × 150 mm × 300 mm 的试件作为试验混凝土轴心抗压强度的标准试件。

混凝土的轴心抗压强度与立方抗压强度之间关系很复杂,与很多因素有关。根据试验分析,混凝土轴心抗压强度平均值  $\mu_{f_c}$  与边长为 150 mm 立方体抗压强度平均值  $\mu_{f_{cu}}$  的经验关系为:

$$\mu_{f_c} = 0.88 \alpha_1 \alpha_2 \mu_{f_{cu}} \quad (2.1)$$

式中  $\alpha_1$ ——轴心抗压强度平均值与立方抗压强度平均值的比值,对 C50 及以下混凝土取  $\alpha_1 = 0.76$ ,对 C80 混凝土取  $\alpha_1 = 0.82$ ,中间按线性规律变化;

$\alpha_2$ ——高强度混凝土脆性折减系数,对 C40 及以下混凝土取  $\alpha_2 = 1.0$ ,对 C80 混凝土取  $\alpha_2 = 0.87$ ,中间按线性规律变化;

0.88——考虑到结构中混凝土强度与试件混凝土强度之间的差异修正系数。

在钢筋混凝土结构中,计算受弯构件正截面承载力、偏心受拉和受压构件时,采用混凝土的轴心抗压强度作为计算指标。

## 3. 轴心抗拉强度 $f_t$

混凝土的抗拉强度远小于其抗压强度,一般只有抗压强度的  $\frac{1}{18} \sim \frac{1}{9}$ 。因此,在钢筋混凝土结构中,一般不采用混凝土承受拉力。混凝土的轴心抗拉强度用符号  $f_t$  表示。

《规范》采用直接测试法来测定混凝土抗拉强度,即对棱柱体试件(100 mm × 100 mm × 500 mm)两端预埋钢筋(每端长度为 150 mm,直径为 16 mm 的变形钢筋),且使钢筋位于试件的轴线上,然后施加拉力(如图 2.2),试件破坏时截面的平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度。

根据试验分析,并考虑到构件与试件的差别、尺寸效应及加荷速度等因素的影响,混凝土轴心抗拉强度平均值  $\mu_{f_t}$  与立方抗压强度平均值  $\mu_{f_{cu}}$  经验关系为:

$$\mu_{f_t} = 0.88 \times 0.395 \mu_{f_{cu}}^{0.55} \times \alpha_2 \quad (2.2)$$

在钢筋混凝土结构中,当计算受弯构件斜截面受剪、受扭构件及对某些构件进行开裂验算

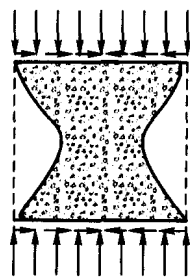


图 2.1 混凝土立方体试件的破坏情况

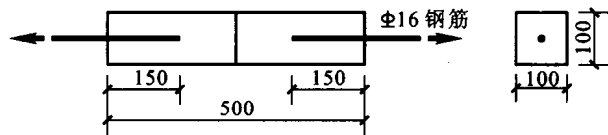


图 2.2 用直接测试法测定混凝土抗拉强度

时,会用到混凝土的轴心抗拉强度。

#### 4. 复合应力状态下混凝土的强度

在钢筋混凝土结构中,混凝土很少处于理想的单向应力状态,而往往处于轴向力、弯矩、剪力甚至扭矩的多种组合的复合应力状态,如双向应力状态或三向应力状态。

双向应力状态(两个平面上作用有法向应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,第三个平面上应力为零)下的混凝土强度试验曲线如图 2.3。

压剪或拉剪复合应力状态(在一个单元体上除作用有切应力  $\tau$  外,并在一个面上同时作用有法向应力  $\sigma$ )下的混凝土强度试验曲线如图 2.4。

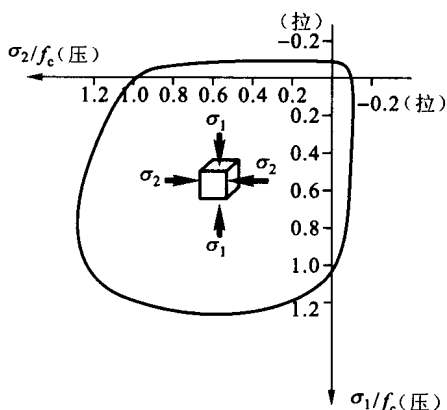


图 2.3 混凝土双向应力下的强度曲线

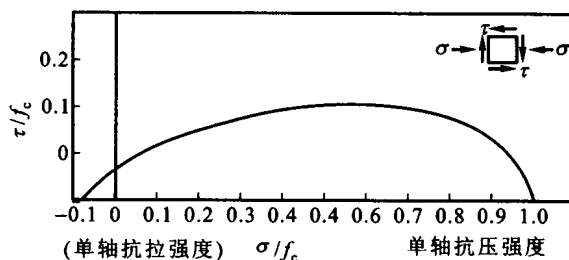


图 2.4 法向应力和切应力组合的破坏曲线

混凝土三向受压时,其任一向的抗压强度和极限应变都会随其他两向压应力的增加而有较大程度的增加。根据对圆柱体周围加液压约束混凝土,并在轴向加压(图 2.5),直至试件破坏,得到下列关系式:

$$f_{cc} = f_c + 4.1\sigma_r \quad (2.3)$$

式中  $f_{cc}$ ——有侧向压力约束试件的轴心抗压强度;

$f_c$ ——无侧向压力约束试件的轴心抗压强度;

$\sigma_r$ ——侧向约束压应力。

在实际工程中,常常采用横向钢筋约束混凝土的办法提高混凝土的抗压强度。如在柱中采用密排螺旋钢筋,由于这种钢筋有效地约束了混凝土的横向变形,所以使混凝土的强度和延性都有较大的

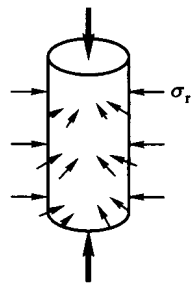


图 2.5 混凝土三向受压



提高。

### 2.1.2 混凝土的变形

混凝土的变形分为两类,一类称为混凝土的受力变形,包括一次短期加荷的变形,荷载长期作用下的变形等。另一类称为混凝土的体积变形,包括混凝土由于收缩和温度变化产生的变形等。

#### 1. 混凝土在一次短期加荷时的变形性能

##### (1) 混凝土的应力-应变曲线

混凝土在一次单调加载(荷载从零开始单调增加至试件破坏)下的受压应力-应变关系是混凝土最基本的力学性能之一,它可以较全面地反映混凝土的强度和变形特点,也是确定构件截面上混凝土受压区应力分布图形的主要依据。

测定混凝土受压的应力-应变曲线,通常采用标准棱柱体试件。由试验测得的典型受压应力-应变曲线如图 2.6 所示。图上以 A、B、C 三点将全曲线划分为四个部分:

OA 段: $\sigma_c$  约在  $(0.3 \sim 0.4) f_c$ 。混凝土基本处于弹性工作阶段,应力-应变呈线性关系。其变形主要是骨料和水泥晶体的弹性变形,水泥胶凝体的粘性流动以及初始微裂缝变化的影响很小。

AB 段:裂缝稳定发展阶段。混凝土表现出塑性性质,应变的增加开始大于应力的增加,应力-应变关系偏离直线,曲线逐渐弯曲。这是由于水泥胶凝体的粘结流动以及混凝土中微裂缝的发展,新裂缝不断产生的结果。

BC 段:裂缝随荷载的增加迅速发展,塑性变形显著增大。C 点的应力达峰值应力,即  $\sigma_c = f_c$ ,相应于峰值应力的应变为  $\epsilon_0$ ,其值在  $0.0015 \sim 0.0025$  之间波动,平均值为  $\epsilon_0 = 0.002$ 。

C 点以后:试件承载能力下降,应变继续增大,最终还会留下残余应力。

OC 段为曲线的上升段,C 点以后为下降段。试验结果表明,随着混凝土强度的提高,上升段的形状和峰值应变的变化不很显著,而下降段的形状有较大的差异。混凝土的强度越高,下降段的坡度愈陡,即应力下降相同幅度时变形愈小,延性愈差(如图 2.7)。

混凝土受拉时的应力-应变曲线与受压相似,但其峰值时的应力、应变都较受压时的小得多,对应于  $f_t$  的应变  $\epsilon_{0t}$  很小,计算时可取  $\epsilon_{0t} = 0.00015$ 。

##### (2) 混凝土的弹性模量、变形模量

###### ① 弹性模量 $E_c$

通过应力-应变曲线上原点 O 引切线,该切线的斜率(图 2.8)为混凝土的原点切线模量,也即混凝土的弹性模量。

$$E_c = \tan \alpha_0 \quad (2.4)$$

式中  $E_c$ ——弹性模量;

$\alpha_0$ ——混凝土应力-应变曲线在原点处的切线与横坐标轴的夹角。

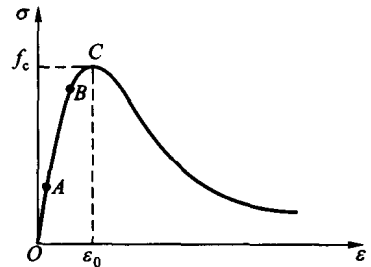


图 2.6 混凝土受压的应力-应变曲线