



普通高等学校土木建筑类“十三五”应用型规划教材



混凝土结构设计原理

谢成新 盛明强 © 主编

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

普通高等学校土木建筑类“十三五”应用型规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 谢成新 盛明强

副主编 魏 伟 王凌云

陈雅云 谢栋明

参 编 廖玉凤 邹志云

内容简介

本书是根据新修订的国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)等编写的,内容包括概论、混凝土结构的物理力学性能及设计的基本原则,以及受弯构件、受压构件、受扭构件、受拉构件、预应力混凝土构件的性能分析、设计计算及构造措施。

本书文字通俗易懂,论述由浅入深,循序渐进。为便于教学,方便学生自学、自测,各章均设有本章导学、学习目标、本章小结、思考题等栏目,并设有有一定数量的计算习题。

本书可作为高等院校土木工程专业的学科基础教材,也可供相关工程技术和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/谢成新,盛明强主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5661-1623-9

I. ①混… II. ①谢… ②盛… III. ①混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV. ①TU370.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第199836号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区东大直街124号
邮 编 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 北京紫瑞利印刷有限公司
开 本 850mm×1168mm 1/16
印 张 15
字 数 433千字
版 次 2017年8月第1版
印 次 2017年8月第1次印刷
定 价 42.00元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

对本书内容有任何疑问及建议,请与本书编委会联系。邮箱 designartbook@126.com

随着建筑产业规模的不断发展,建筑行业已成为国民经济的支柱产业。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出“建设现代高效的城际城市交通”“加快城市群建设发展”“加快新型城市建设”“构建全方位开放新格局”等方针,既明确了建筑业未来的发展目标,也对建筑业的发展提出了更高的要求。

与此同时,“一带一路”战略提出的基础设施建设也给建筑业带来了机遇和挑战,新型城镇化进程中涌现出的建筑从业人员、建筑类新型服务人员的发展,进一步扩展了建筑行业教育的发展空间。在这种背景下,建筑产业现代化和信息化都需要培养大量的新型复合型人才,要求建筑业不断优化人才队伍结构,加强人才队伍建设。为了更好地贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》及建筑业发展规划,进一步深化高等教育教学改革,提高土木与建筑专业人才培养质量,满足建筑业对人才的需求,我们在充分调研的基础上,联合高校及企业,共同策划出版了普通高等学校土木建筑类“十三五”应用型规划教材。

本系列教材的编写原则及特点为:

1. 充分体现土木与建筑专业的特色,结合建筑业发展趋势,融入“绿色建筑、节能建筑、科技创新、可持续发展”等行业理念,紧扣土木与建筑专业教育教学改革精神,培养高素质、高质量的专门人才和拔尖人才。
2. 以适应社会实际需要为宗旨,注重理论与实践结合,力求教材内容实用,重点突出,深入浅出;围绕高等教育的培养目标和教学要求,注重学生基本技能的培养。
3. 与建筑业相关执业资格考试紧密结合,与建筑业最新的标准、规范一致,突出应用型特点,围绕工程生产实际,紧扣当前行业需求,更好地为人才培养服务。
4. 理论知识体系完整,引用大量实例,根据不同课程需要设置学习目标、小结、思考题等,同时穿插“知识链接”“课堂讨论”“小提示”等栏目,激发学生的学习兴趣,增强趣味性。

本系列教材是为推动土木建筑类教材建设,体现教学改革成果及行业新理念,融合时代背景下行业发展新趋势的一种探索和尝试。希望本系列教材的出版,能促进土木与建筑专业教育的发展,为建筑业人才培养做出贡献。

“混凝土结构设计原理”是一门理论性和实践性均很强，且与现行国家工程建设标准密切相关的课程。它适用于土木工程领域内所有的混凝土结构设计，如房屋建筑工程、交通土建工程、水利工程、港口工程等，其内容是土木工程专业本科学生应具备的基础知识，是学习专业课的基础。

本书主要阐述混凝土结构构件的受力性能和设计计算方法，包括钢筋和混凝土材料的基本性能、混凝土结构构件设计的基本原则，以及基本构件的性能分析、设计计算和构造措施等。由于目前我国土木工程专业一般不再强调学生掌握两个课程群组专业知识的学习要求，所以本书突出混凝土结构构件的受力性能分析，且仅介绍房屋建筑工程相关规范的内容。读者在掌握了基本构件的受力性能及混凝土结构的设计原理后，通过自学将不难掌握其他工程的混凝土结构设计原理。

本书在叙述上，根据学生从数学、力学等基础课到专业课学习的认知规律，由浅入深，循序渐进，力求对基本概念论述清楚。为了便于学生自学、自测，每章均设有本章导学、学习目标、本章小结、思考题等栏目，并设相当数量的计算习题。本书部分思考题配有答案，请读者扫描教材封底二维码，登录慧了APP，自行下载使用。

本书由福建农林大学谢成新、南昌大学盛明强担任主编，四川农业大学魏伟、西昌学院王凌云、福建农林大学陈雅云、福建农林大学金山学院谢栋明担任副主编，西南石油大学廖玉凤、南昌工学院邹志云参编。具体编写分工如下：第1、7、9章由谢成新编写，第3、8章由盛明强编写，第5章由魏伟编写，第2章由王凌云编写，第6章由陈雅云编写，第11章的11.2、11.3节由谢栋明编写，第10章、附录由廖玉凤编写，第4章、第11章的11.1节由邹志云编写，全书由谢成新统稿、定稿。福建农林大学土木工程系的全体教师对本书的编写给予了很大的帮助，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

目录 Contents

第1章 概论	1
1.1 混凝土结构的概念与特点	1
1.2 混凝土结构的发展与应用	3
1.3 本课程的主要内容与特点	5
第2章 混凝土结构的物理力学性能	7
2.1 混凝土的物理力学性能	7
2.2 钢筋的物理力学性能	14
2.3 钢筋与混凝土的黏结	17
第3章 混凝土结构设计的基本原则	23
3.1 结构设计的要求	23
3.2 概率极限状态设计法	26
3.3 概率极限状态设计法的实用设计表达式	28
第4章 梁受弯性能试验研究与分析	35
4.1 适筋梁正截面受弯性能的试验研究	35
4.2 配筋率对梁破坏特征的影响	38
4.3 正截面受弯承载力分析	39
第5章 受弯构件正截面承载力计算	44
5.1 概述	44
5.2 单筋矩形截面	45
5.3 双筋矩形截面	49
5.4 T形截面	54
5.5 构造要求	61



第 6 章	受弯构件斜截面承载力计算	66
6.1	概述	66
6.2	无腹筋梁的受剪性能	67
6.3	有腹筋梁的受剪性能	71
6.4	斜截面受剪承载力计算	73
6.5	受弯构件斜截面受剪承载力设计计算	76
6.6	保证斜截面受弯承载力的构造措施	82
第 7 章	受压构件承载力计算	91
7.1	概述	91
7.2	受压构件的构造要求	92
7.3	轴心受压柱的承载力计算	93
7.4	矩形截面偏心受压构件	99
7.5	I 形截面偏心受压构件	125
7.6	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	132
第 8 章	受扭构件承载力计算	136
8.1	概述	136
8.2	纯扭构件的试验研究	137
8.3	纯扭构件承载力计算	139
8.4	复合受扭构件承载力计算	143
第 9 章	受拉构件承载力计算	156
9.1	轴心受拉构件	157
9.2	矩形截面偏心受拉构件	157
9.3	偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	161
第 10 章	正常使用极限状态验算及耐久性设计	163
10.1	概述	163
10.2	混凝土构件的变形验算	164
10.3	混凝土构件的裂缝宽度验算	169
10.4	混凝土结构的耐久性	174

第 11 章 预应力混凝土构件设计	177
11.1 概述	177
11.2 预应力混凝土轴心受拉构件	191
11.3 预应力混凝土受弯构件	203
附录	222
参考文献	230

第 1 章 概 论



本章导学

本章叙述了混凝土结构的概念与特点，主要有两方面内容：一是将钢筋和混凝土组合在一起形成钢筋混凝土结构的原因，二是钢筋与混凝土共同工作的基础。同时简要介绍了混凝土结构的发展与应用，以及本课程的主要内容与特点。



学习目标

通过本章的学习，掌握混凝土结构的概念与特点；了解混凝土结构在国内外土木工程中的发展与应用；了解本课程的主要内容与特点。

1.1 混凝土结构的概念与特点

1.1.1 混凝土结构的概念

以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。其中，无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构称为素混凝土结构；配置受力普通钢筋的混凝土结构称为钢筋混凝土结构；通过张拉或其他方法建立预加应力，配置受力的预应力筋的混凝土结构称为预应力混凝土结构。

混凝土是现代工程结构中应用极为广泛的一种建筑材料。近些年我国每年的混凝土用量约为 $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，其中在房屋建筑上的混凝土用量约为 $9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，钢筋用量约为 $2 \times 10^7 \text{ t}$ 。混凝土是由胶凝材料、粗集料、细集料、水和外加剂等，按适当比例配制，经拌和、养护硬化而成的具有一定强度的人工石材。其中，胶凝材料包括水泥、石灰、水玻璃、粉煤灰和矿粉等，但目前工程结构中使用最为广泛的是以水泥为胶凝材料的混凝土。

混凝土是一种抗压能力较强而抗拉能力很弱的材料，这使得素混凝土结构的应用受到很大的限制。钢筋混凝土结构是目前土木工程中使用最为广泛的结构形式，由钢筋和混凝土两种不同力学性能的材料组成。利用混凝土的抗压能力较强，钢筋的抗拉能力较强的特点，将钢筋和混凝土通过合理方式组合在一起，使钢筋主要承受拉力，混凝土主要承受压力，二者共同工作，充分发挥两种材料的性能优势，以满足工程结构既安全可靠又经济合理的要求。

图 1-1(a) 所示的素混凝土梁在荷载作用下，梁截面上部受压，下部受拉。当梁跨中截面下边缘的

混凝土应变达到其极限拉应变时，该部位开裂，随后由于该截面高度减小导致开裂截面受拉区的拉应力不断增大，裂缝迅速向上延伸并立即引起梁的破坏。这种破坏很突然，属无预兆的脆性破坏。同时由于混凝土的抗拉强度很低，所以梁破坏时的变形和极限承载力均很低。因此，对于在各种作用下会在截面中产生拉应力的结构不应采用素混凝土结构。



图 1-1 简支梁的受压破坏情况
(a)素混凝土梁；(b)钢筋混凝土梁

为了改变这种情况，在梁的受拉区配置适量的钢筋而形成钢筋混凝土梁，如图 1-1(b)所示。在外荷载作用下，钢筋混凝土梁同样是跨中截面下边缘的混凝土首先开裂，这是由于钢筋与混凝土牢固地黏结在一起，此时开裂截面原先由混凝土承担的拉力转由钢筋承担。同时，由于钢筋的强度和弹性模量均很高，能有效地约束裂缝的开展，使其不能无限制地向上延伸而导致梁断裂破坏，故钢筋混凝土梁还能继续承受外荷载，直到受拉钢筋达到屈服强度，受压区混凝土被压碎，梁才达到破坏状态。可见，钢筋混凝土梁不仅能承受较大的外荷载，而且能使钢筋的抗拉强度和混凝土的抗压强度都得到较为充分的利用，破坏前的变形大，有明显的预兆，属延性破坏，且其承载能力和变形能力大大超过同等条件下的素混凝土梁。图 1-2 给出了素混凝土梁和钢筋混凝土梁的跨中截面的弯矩 M 与构件变形 f 的关系曲线。

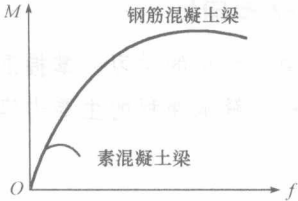


图 1-2 素混凝土梁与钢筋混凝土梁 M - f 关系曲线

在轴心受压的柱中通常也配置抗压能力较高的钢筋，一则可以协助混凝土承受压力，以提高柱的承载力及减小柱的截面尺寸；二则可以提高柱的变形能力，以改善构件破坏时的脆性，同时还可以承担偶然因素引起的拉力。

钢筋和混凝土这两种物理力学性能极不相同的材料能够有效地结合在一起共同工作，主要原因有：

- (1)混凝土硬化后，钢筋与混凝土之间存在着良好的黏结力，使钢筋和混凝土在荷载作用下能够协调变形，共同受力。因此，黏结力是二者能够共同工作的基础。
- (2)钢筋与混凝土的温度线膨胀系数相近，钢筋为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。因此，钢筋与混凝土之间的黏结力不会因为温度变化产生较大的相对变形而破坏。
- (3)钢筋到构件边缘的混凝土保护层对钢筋起到保护作用。混凝土的碱性环境使钢筋不易发生锈蚀，而且在遭遇火灾时不致因钢筋很快软化而导致结构破坏。因此，在混凝土结构中，钢筋表面必须有一定厚度的混凝土作保护层。

1.1.2 混凝土结构的特点

混凝土结构在土木工程中之所以能够得到广泛的应用，是因为其具有以下优点：

- (1)取材容易。配制混凝土所用的砂、石均易于就地取材，也可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。
- (2)合理用材。钢筋混凝土结构合理地发挥了钢筋和混凝土两种材料的性能优势，与钢结构相比，可以节约钢材、降低造价。

(3)整体性好。现浇或装配整体式钢筋混凝土结构既具有良好的整体性,又具备较好的延性,适用于抗震结构;同时其防振性、防辐射性能也较好,适用于防护结构中。

(4)耐久性好。在钢筋混凝土结构中,由于钢筋受到混凝土的包裹而不易锈蚀,所以具有良好的耐久性。

(5)耐火性好。由于混凝土为不良导热体,且包裹在钢筋的外面,所以火灾时钢筋不会很快达到软化温度而导致结构整体破坏。因此,与木结构、钢结构相比,混凝土结构具有良好的耐火性。

(6)可塑性好。新拌和的混凝土具有可塑性,可根据建筑造型的需要制作成各种形状和尺寸的混凝土结构。

但是混凝土结构也存在一些缺点,例如:

(1)自重大。这对大跨度结构、高层建筑结构以及结构抗震均是不利的,也给运输和施工吊装带来困难。

(2)抗裂性差。由于混凝土的抗拉强度较低,所以在正常使用阶段钢筋混凝土构件的受拉区通常存在裂缝。如果裂缝宽度过大,就会影响结构的耐久性和使用性能。因此,对一些不允许出现裂缝或对裂缝宽度有严格限制的结构,就应采取相应措施。

此外,混凝土结构还存在施工复杂,施工周期长,工序多,浇筑混凝土时需要模板支撑,施工时易受季节气候影响,结构的隔热隔声性能较差以及修复加固困难等缺点。

随着科学技术的不断发展,这些缺点正在逐步被克服或逐渐被改进。如采用轻质高强度混凝土,以减轻结构自重;采用预应力混凝土结构,以提高结构的抗裂性,扩大其应用范围;采用预制装配式构件,可以节约模板和支撑,加快施工进度等。

1.2 混凝土结构的发展与应用

1.2.1 混凝土结构的发展

混凝土结构自19世纪中期出现至今,只有150多年的历史,与砖石砌体结构、钢木结构相比,虽然历史并不长,但发展却很快,现已成为土木工程领域最为重要的结构形式。其发展大致分为以下四个阶段:

第一阶段:1850—1920年。1824年英国人阿斯普丁(J. Aspdin)取得波特兰水泥(现称为硅酸盐水泥)专利后,制作混凝土的胶结材料发生了质的变化,此后水泥与混凝土的生产技术迅速发展,混凝土的用量急剧增加。1850年,法国人朗波(L. Lambot)用水泥砂浆涂在钢丝网的两面做成小船——标志着钢筋混凝土结构的诞生。1861年,法国花匠J. Monier用钢丝作为配筋制作成花盆并申请了专利,并相继申请了板、管道、拱桥等专利,因此,他被认为是钢筋混凝土结构的发明者。1884年,德国人Wayss, Bauschinger和Koenen等提出了钢筋应配置在构件中受拉力的部位和钢筋混凝土板的计算理论。随后,钢筋混凝土结构逐渐得到了推广应用。该阶段钢筋与混凝土的强度都很低,只能建造一些板、梁、柱和拱等简单构件。此阶段是采用材料力学中的容许应力法,按弹性理论进行结构的内力计算和截面设计的。

第二阶段:1920—1950年。这一阶段钢筋和混凝土的强度得到提高,开始出现装配式钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和壳体空间结构等。1928年,法国工程师E. Freyssinet提出了混凝土收缩和徐变理论,采用了高强度钢丝,并发明了预应力锚具,为预应力混凝土技术在工程上的应用奠定

了基础。此阶段计算理论是在考虑材料塑性性能的基础上,按破损阶段进行构件的截面承载能力计算的。

第三阶段:1950—1980年。该阶段材料强度不断提高,各种新的结构形式和施工技术相继得到了应用,同时广泛采用了预制构件。混凝土结构所能达到的跨度和高度不断被刷新。混凝土结构不断向新的应用领域拓展。结构构件计算理论已过渡到多系数极限状态设计方法,但还没有给出结构可靠度的定义和计算方法,各种系数取值仍然带有不少主观经验成分。

第四阶段:1980年至今。这一阶段高强度混凝土、高性能混凝土以及高强度钢筋等新型材料的相继出现并在工程上得到应用,大板和大模板现浇等工业化体系进一步发展,高层建筑新结构体系有较多的应用。振动台试验、拟动力试验和风洞试验得到较普遍的开展。同时,计算机辅助设计和绘图的程序化,改进了设计方法并提高了设计质量。非线性有限元分析方法的广泛应用,推动了混凝土强度理论和本构关系的深入研究,并形成了“近代混凝土力学”这一分支学科。结构构件的设计计算方法也已发展到以概率理论为基础的极限状态设计方法,该方法可分为三个水准:半概率法、近似概率法和全概率法。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中采用的是近似概率法。全概率法是完全基于概率论的设计方法,还处于研究阶段。

1.2.2 混凝土结构的应用

混凝土结构在工业与民用建筑、桥梁、隧道、道路工程、地下工程、水利工程、海洋工程及特种结构等方面都得到了广泛的应用。

混凝土结构在其所用材料和配筋方式上不断取得许多新的进展,形成了一些新型混凝土及其结构形式,如高性能混凝土、纤维增强混凝土及钢-混凝土混合结构等。随着高强度钢筋、高强度高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制使用,混凝土的应用范围不断扩大,钢纤维混凝土,聚合物混凝土,防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等有特殊要求的混凝土以及智能型混凝土也不断应用于工程实践中。此外,轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土以及利用工业废渣的“绿色混凝土”,不仅能改善混凝土的性能,而且对节能和环保具有重要的意义。

我国是使用混凝土结构最多的国家。在房屋建筑工程中,住宅、学校等民用建筑以及单层、多层工业厂房大量使用混凝土结构,其中钢筋混凝土结构在一般工业与民用建筑中使用最为广泛。高层建筑中的框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、筒体结构等也多采用混凝土结构。在桥梁工程中,中小跨度的桥梁绝大部分采用钢筋混凝土结构建造,大跨度桥梁也有相当一部分采用混凝土结构建造,或者采用预应力混凝土结构、钢-混凝土组合结构及钢结构建造。即使在悬索桥、斜拉桥等大跨度桥梁中,桥塔一般也采用混凝土结构,桥面板有的也采用混凝土结构。水利水电工程中的水电部分、拦洪坝、水工隧洞、溢洪道等均采用混凝土结构。特种结构中的水塔、烟囱、筒仓、电视塔、核电站反应堆安全壳等也大都采用混凝土结构建造。

世界上较高的混凝土结构建筑包括:1996年建成的广州中信广场,80层,高391m,为筒中筒结构;1998年建成的马来西亚吉隆坡石油双塔楼,88层,高452m,为钢-混凝土混合结构;1999年建成的上海金茂大厦,88层,高420.5m,为钢筋混凝土核心筒和外框架所组成的钢-混凝土混合结构;2003年建成的中国台北国际金融中心,101层,高455m,为钢-混凝土混合结构;2008年建成的上海环球金融中心大厦,95层,高492m,为筒中筒结构体系,其中内筒为钢筋混凝土结构,外筒为型钢混凝土框架;2010年建成的阿联酋迪拜哈利法塔,高828m,其中600m以下为钢筋混凝土结构,以上为钢结构,为当前世界上最高的建筑;2016年建成的上海中心大厦,建筑主体118层,高632m,采用巨型框架伸臂-核心筒结构体系,为当前我国第一高楼。

在应用混凝土结构的桥梁工程中,1991年建成的挪威特隆赫姆(Skarnsundet)预应力混凝土斜拉桥,跨度530m。1997年建成的虎门大桥中的辅航道桥,主跨270m,为预应力混凝土连续刚架桥。1997年建成的万县长江大桥,为上承式拱桥,主跨420m,采用钢管混凝土拱为劲性骨架的箱形拱桥,为世界首创。2000年建成的福州市青州闽江大桥,主跨605m,为双塔双索面钢-混凝土结合梁斜拉桥,其桥塔和桥面板均为混凝土结构,在同类桥中跨度居世界第一位。2005年建成的巫山长江大桥,为中承式拱桥,主跨492m,为钢管混凝土拱桥,在钢管混凝土拱桥中居世界第一位。

在水坝建设方面,世界海拔最高拱坝是我国雅砻江流域梯级开发龙头电站的锦屏一级拱坝,其为混凝土双曲拱坝,坝高305m,2005年开工建设。我国清江梯级开发第一级电站的水布垭大坝,坝高233m,为世界第一高混凝土面板堆石坝,2007年建成。目前世界上最高的重力坝为瑞士的大狄桑坝,高285m。我国的三峡水利枢纽,水电站主坝高185m,设计装机容量 $1.82 \times 10^7 \text{ kW}$,发电量居世界第一位,坝体混凝土用量达到 $2.79 \times 10^7 \text{ m}^3$,为世界之最。

1.3 本课程的主要内容与特点

1.3.1 本课程的主要内容

本课程为土木工程专业的学科基础课,主要讲述混凝土基本构件的受力性能、计算方法和构造措施等基本理论。首先学习混凝土结构材料的物理力学性能和以概率理论为基础的极限状态设计方法,然后讨论受弯构件正截面和斜截面承载力计算,受压、受扭和受拉构件承载力计算,正常使用极限状态验算及耐久性设计,以及预应力混凝土构件设计等。这些内容是土木工程混凝土结构中的共性问题,即混凝土结构的基本理论。

1.3.2 本课程的特点

从某种意义上说,本课程是研究钢筋混凝土这一具体材料的力学理论课程。但是,钢筋混凝土是由非线性的、拉压强度相差悬殊的混凝土和钢筋组合而成的,受力性能复杂。它与研究弹性体的材料力学完全不同,在学习时应注意它们之间的异同点。

(1)钢筋混凝土构件是由钢筋和混凝土两种不同力学性能的材料组成的复合材料,且混凝土是非均匀、非连续和非弹性材料。这与材料力学中单一理想的弹性材料不同,所以材料力学公式可以直接应用的不多。故要搞清钢筋混凝土的受力性能和破坏特性,首先要掌握好钢筋和混凝土材料的物理力学性能。

(2)钢筋混凝土既然是一种复合材料,就存在两种材料在数量比例和强度搭配的问题,超过一定范围就会引起构件受力性能的改变,从而引起构件设计方法的改变,学习时应予以注意。

(3)钢筋混凝土材料的力学性能和构件的计算方法都是建立在试验研究基础上的。根据一定数量的试验研究,在试验数据的基础上拟合出半理论半经验公式。因此,学习时不仅要深刻理解构件的破坏机理和受力性能,还应特别注意构件计算方法的适用条件和应用范围。同时,本课程还包括结构和构件的选型、截面尺寸的确定、荷载分析与内力分析等,它是一个综合性的问题,需要考虑各方面的因素。在学习本课程时要学会对多种因素进行综合分析,培养综合分析判断能力。

(4)本课程的实践性强,课程内容及其设计计算等应符合现行规范的要求,主要涉及《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(以下简称《规范》)、《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)

(以下简称《统一标准》)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)(以下简称《荷载规范》)等规范。设计规范是国家颁布的有关计算和构造要求的技术规定和标准,规范条文特别是强制性条文是设计中必须遵守的法律性技术文件。因此,只有深刻理解规范条文的概念和本质,才能正确地应用规范而不被规范所束缚,充分发挥设计者的主动性和创造性。随着科学技术的不断发展,设计规范必然需要不断修订和补充。因此,要用发展的观点来看待设计规范,要善于观察和分析,不断地探索和创新。

(5)构件设计时离不开计算,但现行的实用计算方法一般只考虑荷载效应。对其他作用,如混凝土收缩、温度变化及地基不均匀沉降等,难以用计算公式来表达。设计规范根据长期的工程实践经验,总结出一些构造措施来解决这些因素带来的影响。因此,在学习本课程时,不仅要掌握各种计算方法,对于各种构造措施也应给予足够的重视。在设计混凝土结构时,除了进行各种计算外,还必须检查各项构造措施是否满足要求。



本章小结

(1)以混凝土为主制成的结构称为混凝土结构。钢筋混凝土是将钢筋和混凝土这两种材料按照合理方式结合在一起共同工作,充分发挥钢筋和混凝土各自优点的一种复合材料。配置适量钢筋后,混凝土构件的承载力得到大大提高,构件的受力性能得到显著改善。

(2)混凝土结构有许多优点,同时也有一些缺点。只有通过不断的研究和技术开发,进行合理的设计,方可充分发挥其优点,克服其缺点。

(3)钢筋与混凝土能够共同工作的原因:钢筋与混凝土之间有良好的黏结力;钢筋与混凝土的温度线膨胀系数相接近;混凝土对钢筋的保护作用。

(4)混凝土构件的力学性能和设计计算与材料力学既有共同之处又有显著区别,且其比材料力学更复杂,学习时应予以注意。



思考题

1. 什么是混凝土结构?混凝土结构有哪些优点和缺点?应如何克服缺点?
2. 钢筋与混凝土能够共同工作的原因有哪些?
3. 以简支梁为例,说明素混凝土构件和钢筋混凝土构件在承载能力和变形能力方面的差异。
4. 简述混凝土结构的发展与应用情况。
5. 本课程主要包括哪些内容?学习时应注意哪些问题?

第2章 混凝土结构的物理力学性能



本章导学

本章主要讲述混凝土与钢筋的物理力学性能，以及它们之间的黏结力。在学习时应重点抓住材料的强度和变形性能两个方面指标，同时了解其试验方法。混凝土的强度包括在单向应力作用下的强度和在复合应力作用下的强度。混凝土的变形包括在荷载作用下的变形和在非荷载作用下的变形(主要是混凝土的收缩变形)。其中混凝土在单向应力作用下的强度和在荷载作用下的变形是学习混凝土力学性能的基础。钢筋分为有物理屈服点的钢筋和无物理屈服点的钢筋，有物理屈服点的钢筋是学习的重点。钢筋与混凝土之间的黏结力主要是通过构造措施来保证的，构造措施内容多而细，学习时可以结合相关图集资料来认识。



学习目标

通过本章的学习，熟悉混凝土在各种受力状态下的强度与变形性能，掌握混凝土的选用原则；熟悉土木工程用钢筋的品种、级别及性能，掌握土木工程对钢筋性能的要求及选用原则；了解钢筋与混凝土的共同工作原理，熟悉钢筋与混凝土之间协同工作的构造原理。

混凝土结构的受力性能与钢筋和混凝土材料的力学性能密切相关。对钢筋和混凝土材料的力学性能以及二者共同工作原理进行较为深入的了解是掌握钢筋和混凝土构件计算理论、合理地进行混凝土结构设计的基础。

2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.1 混凝土的强度

混凝土的强度与水泥的强度等级和水灰比有很大的关系，集料的性质、混凝土的配合比、硬化条件、制作方法、龄期等也不同程度地影响混凝土的强度。在试验时，因试件形状、尺寸、试验方法和加载时间的不同，所测得的强度也不同，因此，混凝土在各种单向受力状态下的强度指标必须以统一规定的标准试验方法为依据。

1. 混凝土在单向应力作用下的强度

(1)立方体抗压强度。《规范》规定，混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度标准值是指按标准方法制作、养护的边长为 150mm 的立方体试件，在 28d 或设计规定的龄期

以标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度值。立方体抗压强度标准值是混凝土各种力学指标的基本代表值，用 $f_{cu,k}$ 表示， f_{cu} 表示立方体轴心抗压， k 表示标准值，单位为 N/mm^2 。

混凝土立方体抗压强度不仅与养护时的温度、湿度和龄期等因素有关，而且与立方体试件的尺寸和试验方法也有密切关系。试验表明，用边长 200mm 的立方体试件测得的强度偏低，而用边长 100mm 的立方体试件测得的强度偏高，因此对非标准试件的实测值应乘以换算系数以换算成标准试件的立方体抗压强度。根据对比试验结果，采用边长为 200mm 的立方体试件的换算系数为 1.05，采用边长为 100mm 的立方体试件的换算系数为 0.95。有些国家采用直径为 150mm、高度为 300mm 的圆柱体试件作为标准试件，采用圆柱体试件测得的抗压强度与采用边长 150mm 的标准立方体试件测得的抗压强度之比为 0.79~0.81。

在标准试验方法下，试件加载后，竖向发生压缩变形，水平向为伸长变形。试件的上、下端因受加载垫板的约束而横向变形小，中部的横向膨胀变形最大。随着荷载的增大，试件的变形逐渐加快增长。试件接近破坏前，首先在试件高度的中央、靠近侧表面的位置上出现竖向裂缝，然后往上和往下延伸，逐渐转向试件的角部，形成正倒相连的“八”字形裂缝。继续增加荷载，新的“八”字形裂缝由表层向内部扩展、中部混凝土向外鼓胀、开始剥落，最终成为正倒相接的四角锥破坏形状，如图 2-1(a) 所示。

如果在试件的上下表面涂一些润滑剂，试验时摩擦力就会大大减小，试件将沿着平行力的作用方向产生几条裂缝而破坏，所测得的抗压强度较低，其破坏形状如图 2-1(b) 所示。

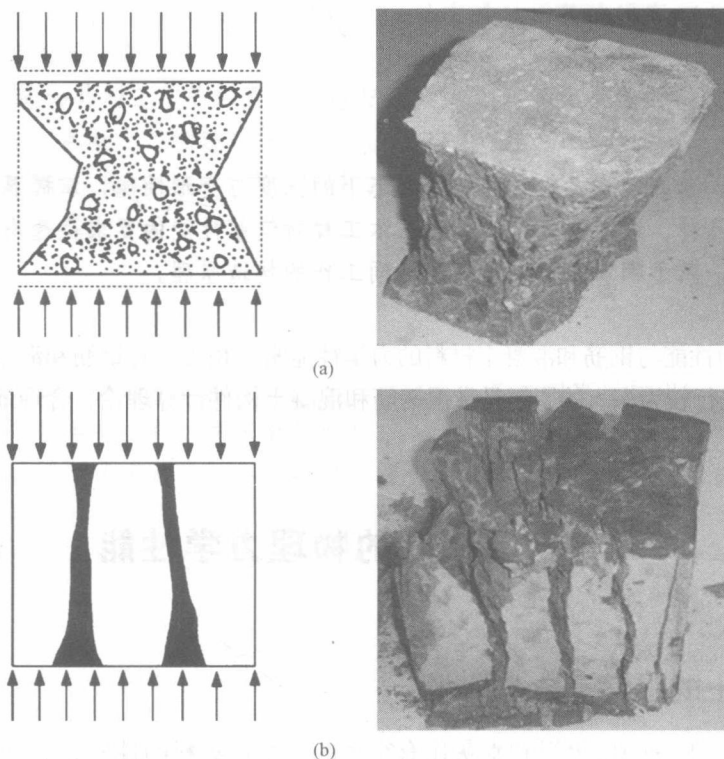


图 2-1 混凝土立方体试件的破坏情况

(a) 标准试验方法；(b) 涂润滑剂的试验方法

按照标准试验方法，试件应在相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护，试验时，试件的承压面不涂润滑剂，普通混凝土加荷速度为每秒 $0.3 \sim 0.8 N/mm^2$ 。立方体试件的强度比较稳定，制作与试验比较方便。

由于粉煤灰等矿物掺合料在水泥及混凝土中大量应用以及现代混凝土工程的发展,确定混凝土立方体抗压强度标准值的试验龄期不仅限于 28d,而且可由设计根据具体情况适当延长。如粉煤灰混凝土因早期强度增长较慢,其试验龄期可为 60d。

混凝土强度等级由符号 C 和混凝土立方体抗压强度标准值表示。例如, C35 表示立方体抗压强度标准值为 35N/mm^2 的混凝土强度等级。《规范》规定的混凝土强度等级有 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80 共 14 个等级,其中 C50 及以下的为普通混凝土, C50 以上的为高强度混凝土。C80 以上的高强度混凝土,目前虽偶有工程应用但用量较少,且对其性能的研究尚不够,故《规范》中未列入。

我国建筑工程实际应用的混凝土强度低于发达国家。我国建筑结构安全度总体上比国际水平低,但材料用量并不少,其原因在于国际上较高的安全度是依靠较高强度的材料实现的。为了提高材料的利用率,工程中应用的混凝土强度等级应适当提高。因此,《规范》规定,素混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C15;钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20;采用强度等级为 400MPa 及以上的钢筋时,混凝土强度等级不应低于 C25。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C40,且不应低于 C30。承受重复荷载的钢筋混凝土构件,混凝土强度等级不应低于 C30。

(2)轴心抗压强度。在工程中,混凝土受压构件大多是棱柱体,采用棱柱体抗压强度能更好地反映混凝土结构的实际抗压能力。用棱柱体试件测得的抗压强度称为轴心抗压强度或棱柱体抗压强度。

我国采用 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 300\text{mm}$ 棱柱体作为轴心抗压强度的标准试件。棱柱体试件与立方体试件的制作条件相同,试件承压面不涂润滑剂。如图 2-2 所示,棱柱体试件比立方体试件高,试验机承压板与试件间摩擦力对试件高度中部横向变形的约束影响小,试件中部基本上处于单向均匀受压的应力状态。试件破坏是由于中间区段竖向裂缝的发展,导致混凝土被压碎,因而测得的棱柱体试件的抗压强度比立方体抗压强度小。《规范》规定,以棱柱体标准试件试验测得的具有 95% 保证率的抗压强度为混凝土轴心抗压强度标准值,用符号 f_{ck} 表示, c 表示棱柱体轴心抗压, k 表示标准值。轴心抗压强度是混凝土构件抗压计算的强度指标。

考虑到结构中混凝土的实体强度与立方体试件混凝土强度之间的差异,根据经验,结合试验数据分析并参考其他国家的有关规定,对试件混凝土强度的修正系数取为 0.88。轴心抗压强度标准值 f_{ck} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 的关系按下式计算:

$$f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k} \quad (2-1)$$

式中 α_{c1} ——棱柱体抗压强度与立方体抗压强度的比值,对 C50 及以下普通混凝土取 $\alpha_{c1}=0.76$,对 C80 高强度混凝土取 $\alpha_{c1}=0.82$,其间按线性内插法确定;

α_{c2} ——C40 以上普通混凝土的脆性折减系数,对 C40 普通混凝土取 $\alpha_{c2}=1.00$,对 C80 高强度混凝土取 $\alpha_{c2}=0.87$,其间按线性内插法确定。

(3)轴心抗拉强度。混凝土试件的轴心抗拉强度是确定混凝土抗裂度的重要指标,用符号 f_{tk} 表示, t 表示棱柱体轴心抗拉, k 表示标准值。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 5%~10%;抗拉强度与立方体抗压强度不呈线性关系,混凝土强度等级越高, $f_{tk}/f_{cu,k}$ 越小。

由于混凝土内部不均匀性,加之安装时的偏差等,准确测定抗拉强度是很困难的。国内外常采用立方体($150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$)或圆柱体试件的劈裂抗拉试验来间接测定混凝土的轴心抗拉强度。如图 2-3 所示,混凝土劈裂抗拉试验在立方体或圆柱体试件上通过钢制弧形垫块施加均匀线荷载。除垫条附近很小的范围以外,在中间垂直截面上产生与该面垂直且均匀分布的拉应力。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件被沿中间垂直截面劈裂为两部分而破坏。根据弹性理论,劈裂抗拉强度 σ_t 可按式计算: