

普通高等教育“十三五”土木工程系列规划教材

混凝土结构 基本原理

● 主编 王海军 魏华

EDUCATION



配套教师课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”土木工程系列规划教材

混凝土结构基本原理

主 编 王海军 魏 华
副主编 谢 镭 高华国 鲁丽华
参 编 刘小敏 高振星 李兴权



机械工业出版社

《混凝土结构基本原理》为普通高等教育“十三五”土木工程系列规划教材之一,是根据全国高等院校土木工程专业指导委员会对土木工程专业学生的基本要求和审定的教学大纲,并参照最新的国家规范和标准编写而成的。

全书分为9章,主要讲述混凝土结构基本理论和基本构件,包括绪论、混凝土结构材料的物理力学性能、受弯构件的基本原理、受压构件的基本原理、受拉构件的基本原理、受扭构件的承载力计算原理、预应力混凝土构件的基本原理、混凝土受弯构件的疲劳验算、混凝土结构的耐久性设计。各章均有学习目标、拓展阅读、思考题和习题,同时,本书还采用了二维码技术,通过扫描二维码,可以观看相关的动画、录像及视频,便于学生深入理解和学习。

《混凝土结构基本原理》可作为高等院校土木工程等专业的教材,也可作为相关专业的结构设计、施工和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构基本原理/王海军,魏华主编. —北京:机械工业出版社,2016.12

普通高等教育“十三五”土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-55507-0

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第280395号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 吴苏琴 臧程程 商红云

封面设计:张静 责任校对:刘雅娜 樊钟英

责任印制:李飞

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2017年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·454千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55507-0

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前言

为了适应 21 世纪国家建设对建筑类专业人才的需求,满足高等学校强化培养学生工程能力和创新能力的需要,根据全国高等学校土木工程专业指导委员会审定通过的教学大纲并参照最新的国家规范和标准编写了本教材。

《混凝土结构基本原理》主要介绍混凝土结构基本构件的受力性能和设计计算方法,可以作为土木工程专业的基础课教材。本书内容主要包括混凝土结构材料的物理力学性能,受弯构件、纵向受力构件、受扭构件等基本构件的受力性能分析、设计计算和构造措施,预应力混凝土构件的基本原理,混凝土受弯构件的疲劳验算,混凝土结构的耐久性设计等。

“混凝土结构基本原理”课程兼具理论性和实践性,具有“内容多、概念多、公式多、经验参数多、构造条文多”的特点,不利于学习掌握。为此,编写本书时力求做到以下几点:强调以学生为中心,提高学生的工程能力和创新能力;强调基本概念和基本分析的逻辑,培养思维能力;强调试验对理论形成的重要性,以培养动手能力;强调规范规定的构造措施,养成“计算与构造”同等重要的工程意识;例题注重理论联系实际;思考题与习题强调对知识的归纳和拓展。另外,为便于学生学习和理解,本书采用二维码技术集成了相关的动画、录像及视频资源,可通过扫描二维码观看。

本书由王海军、魏华担任主编,谢镭、高华国、鲁丽华担任副主编。参加编写的人员有:王海军(第1、3、8章)、魏华(第2章)、鲁丽华(第4章)、高华国、高振星(第5、6章)、谢镭(第7章)、刘小敏(第9章)、李兴权(附录)。全书由王海军修改定稿。

在本书编写过程中,参考了国内同行的论文资料、各类教材和著作,在此向各位作者表示衷心感谢。同时,也感谢辽宁省教育科学“十二五”规划立项课题——混凝土结构课程中强化实践和创新能力培养的对策研究与实践(JG15DB316)对本书所给予的支持。

由于作者水平有限,书中不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

目 录

前 言

第1章 绪论..... 1

- 1.1 混凝土结构的基本特点 1
- 1.2 混凝土结构的发展简况 2
- 1.3 本课程的任务和特点 6
- 1.4 拓展阅读——门外汉发明了钢筋
混凝土结构 7
- 思考题 9

第2章 混凝土结构材料的物理力学 性能 10

- 2.1 混凝土的物理力学性能 10
- 2.2 钢筋的物理力学性能 23
- 2.3 混凝土与钢筋的黏结与锚固 29
- 2.4 拓展阅读——钢筋的冷加工 34
- 思考题 35
- 习题 36

第3章 受弯构件的基本原理 37

- 3.1 受弯构件的一般构造要求 38
- 3.2 受弯构件的正截面承载力 42
- 3.3 受弯构件斜截面承载力 73
- 3.4 受弯构件的裂缝宽度验算 99
- 3.5 受弯构件的变形验算 105
- 3.6 拓展阅读——钢筋的代换与并筋 113
- 思考题 114
- 习题 115

第4章 受压构件的基本原理..... 116

- 4.1 受压构件的基本构造要求 117
- 4.2 轴心受压构件正截面受压承载力
计算 119
- 4.3 偏心受压构件的正截面承载力
计算 128
- 4.4 偏心受压构件斜截面受剪承载力
计算 162
- 4.5 偏心受压构件的裂缝验算 163

- 4.6 拓展阅读——环形和圆形截面偏心
受压构件正截面承载力计算 166

思考题 168

习题 169

第5章 受拉构件的基本原理..... 170

- 5.1 轴心受拉构件正截面承载力计算 171
- 5.2 偏心受拉构件正截面承载力计算 171
- 5.3 偏心受拉构件斜截面承载力计算 175
- 5.4 偏心受拉构件的裂缝验算 176
- 思考题 177
- 习题 177

第6章 受扭构件的基本原理..... 178

- 6.1 纯扭构件的试验研究 179
- 6.2 纯扭构件的承载力计算 181
- 6.3 剪扭共同作用下的构件承载力计算 188
- 6.4 弯剪扭共同作用下的构件的承载力
计算 194
- 6.5 压弯剪扭共同作用下的矩形截面框
架柱的受扭承载力计算 197
- 6.6 拓展阅读——协调扭转构件的受扭
承载力计算 197
- 思考题 198
- 习题 198

第7章 预应力混凝土构件的基本 原理 199

- 7.1 预应力混凝土概述 199
- 7.2 预应力施工工艺 203
- 7.3 张拉控制应力与预应力损失 209
- 7.4 预应力混凝土轴心受拉构件计算 216
- 7.5 预应力混凝土受弯构件的计算 228
- 7.6 预应力混凝土结构构件的构造
要求 249
- 7.7 拓展阅读——预应力混凝土结构
大师林同炎 252
- 思考题 254



第8章 混凝土受弯构件的疲劳验算	255	9.5 拓展阅读——混凝土的冻融耐久性	280
8.1 混凝土和钢筋的疲劳性能	255	思考题	283
8.2 钢筋混凝土受弯构件的疲劳验算	258	附录	284
思考题	267	附录1 《混凝土结构设计规范》规定的	
第9章 混凝土结构的耐久性设计	268	材料力学指标	284
9.1 混凝土结构耐久性的概念	269	附录2 钢筋的计算截面面积及公称	
9.2 混凝土耐久性的影响因素	269	质量	286
9.3 《混凝土结构设计规范》规定的		附录3 《混凝土结构设计规范》对构件	
耐久性设计	277	的有关规定	288
9.4 混凝土耐久性的施工控制	278	参考文献	291

第1章

绪论

【学习目标】

1. 熟悉混凝土结构的基本概念、组成原理和基本特点。
2. 了解混凝土结构的应用及发展。
3. 了解混凝土结构基本原理的主要内容及其在结构设计中的地位与作用。
4. 了解课程的主要特点及其学习中应注意的主要问题。



动画-框架的建设

混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构,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。素混凝土结构是指由无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构,这种材料具有较高的抗压强度,而抗拉强度却很低,故一般在以受压为主的结构构件中采用,如柱墩、基础墙等构件;钢筋混凝土结构是指由配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土制成的结构,广泛应用于建筑、桥梁、隧道、矿井及水利、海港等工程;预应力混凝土结构是指由配置受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土制成的结构,主要应用于对抗裂和刚度要求高、大跨的结构中,如桥梁、水利、海洋及港口工程等。工程中应用最广泛的是钢筋混凝土和预应力混凝土结构。

1.1 混凝土结构的基本特点

1.1.1 共同工作原理



录像-素混凝土梁

钢筋和混凝土是钢筋混凝土结构的基本材料。钢筋的抗拉和抗压强度都很高,破坏时表现出良好的变形能力。混凝土的抗压强度高而抗拉强度很低,一般抗拉强度只有抗压强度的 $1/20 \sim 1/8$,受拉破坏前无预兆,具有明显的脆性性质。钢筋混凝土结构是将钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式组合,让钢筋主要承受拉力、混凝土主要承受压力,二者共同工作充分发挥其材料特性,以满足工程结构的使用要求。

钢筋和混凝土这两种物理力学性能不同的材料,能够有效地结合在一起共同工作,其主要原因是:

- 1) 钢筋与混凝土之间产生了良好的黏结力,能牢固地形成整体,保证在荷载作用下,钢筋和外围混凝土能够协调变形,共同受力。

2) 钢筋与混凝土的线膨胀系数接近。钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，混凝土的线膨胀系数为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，当温度变化时，两者之间不会产生较大的相对变形而导致它们之间的黏结力破坏。

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结构的耐久性。

1.1.2 混凝土结构的主要优缺点

混凝土结构与其他结构相比，主要有如下优点：

(1) 合理用材 能充分合理地利用钢筋（高抗拉强度）和混凝土（高抗压强度）两种材料的受力性能，结构的承载力与其刚度比例合适，基本无局部稳定问题。单位应力价格低，对于一般工程结构，经济指标优于钢结构。

(2) 整体性好 现浇配筋混凝土结构的整体性好，可获得较好的延性，有利于抗震、防爆；同时防辐射性能好，适用于防护结构；刚度大、阻尼大，有利于结构的变形控制。

(3) 耐久性好，维护费用低 在一般环境下，钢筋受到混凝土保护而不易发生锈蚀，而混凝土的强度随着时间的增长还有所提高，因而提高了结构的耐久性。对处于侵蚀性气体或受海水浸泡的钢筋混凝土结构，经过合理的设计及采取特殊的防护措施，一般也可以满足工程需要。

(4) 可模性好 混凝土可根据设计需要支模浇筑成各种形状和尺寸的结构，适用于建造形状复杂的结构及空间薄壁结构，这一特点是砌体、钢、木等结构所不具备的。

(5) 耐火性好 混凝土是不良热导体，遭受火灾时，30mm 厚混凝土保护层可耐火 2h，使钢筋不至于很快升温到失去承载力的程度，这是钢、木结构所不能比拟的。

(6) 易于就地取材 混凝土所用的大量砂、石，产地普遍，易于就地取材。另外，还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

混凝土结构也存在一些缺点，主要有：

(1) 自重重大 钢筋混凝土的重力密度约为 $25\text{kN}/\text{m}^3$ ，比砌体和木材的重度都大。尽管比钢材的重度小，但结构的截面尺寸较大，因而其自重远远超过相同宽度或高度的钢结构，这对于建造大跨度结构和高层建筑结构是不利的。因此需要研究和开发轻质混凝土、高强混凝土和预应力混凝土。

(2) 抗裂性差 由于混凝土的抗拉强度较低，在正常使用时钢筋混凝土结构往往是带裂缝工作的，裂缝存在会降低抗渗和抗冻能力，影响使用性能。在工作条件较差的环境，如露天、沿海、化学侵蚀，会导致钢筋锈蚀，影响结构物的耐久性。

(3) 施工比较复杂，工序多 需要支模、绑钢筋、浇筑、养护、拆模等工序，工期长，施工受季节、天气的影响较大。现浇钢筋混凝土使用模板多，模板材料耗费量大。

(4) 新老混凝土不易形成整体 混凝土结构一旦破坏，修补和加固比较困难。

1.2 混凝土结构的发展简况

混凝土结构从 19 世纪中叶开始应用以来，距今已经有 150 多年。1824 年英国人约瑟夫·阿斯普丁（Joseph Aspdin）调配石灰岩和黏土，烧制成了波特兰水泥，并取得专利，

成为水泥工业的开端。但混凝土的抗拉强度很低,限制了混凝土的应用,直到1849年法国技师兰伯特(Louis Lambot)将钢丝网设置于混凝土中制成了小船,并于第二年在巴黎博览会上展出,这是最早的混凝土制品。1861年法国花匠约瑟夫·莫尼埃(Joseph Monier)用钢丝配筋制成花盆并取得专利权,于1867年取得了用格子状配筋制作桥面板的专利,后又申请了钢筋混凝土梁、板、管、拱桥等专利,他被认为是钢筋混凝土结构的发明者。1866年,德国学者Wayss、Bauschinger和Koenen等发表了相应的计算理论和计算方法,1887年Koenen发表了试验结果,提出了用混凝土承担压力和用钢筋承担拉力的概念,德国的J. Bauschinger确认了混凝土中的钢筋不受锈蚀等问题。之后,钢筋混凝土的推广应用有了较快的发展。1872年纽约建造了第一所钢筋混凝土房屋。1892年法国的Hennebique阐述了箍筋对抗剪的有效作用,并于1898年提出了T形梁的方案。Conigine对混凝土柱进行研究,取得了混凝土柱的专利,Considerere根据实验于1902年取得了螺旋钢筋柱的专利。1928年,法国学者尤金·弗雷赛纳特(Eugene Freyssinet)发明了预应力混凝土结构;1954年美籍华人林同炎提出了预应力混凝土设计三大基础理论之一的“荷载平衡法”(图1-1)。

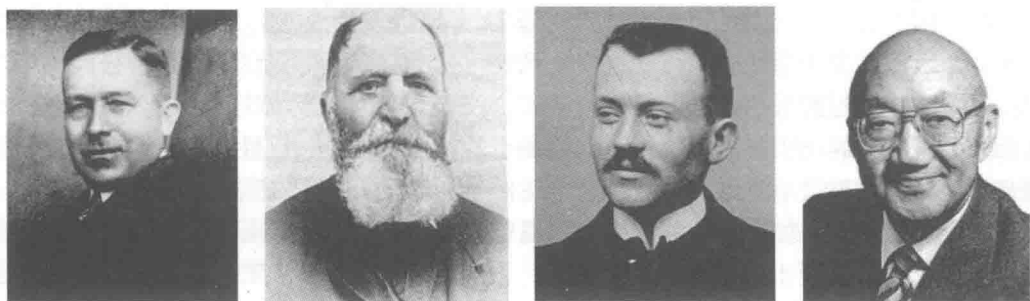


图1-1 约瑟夫·阿斯普丁、约瑟夫·莫尼埃、尤金·弗雷赛纳特、林同炎

总而言之,与砖石结构、木结构和钢结构相比,混凝土结构的历史并不长。19世纪末以来,随着生产的发展,试验工作的开展、计算理论的研究、材料及施工技术的改进,这一结构得到了迅速发展,目前已成为世界各国现代土木工程建设中占主导地位的结构。为了克服混凝土结构的缺点,发挥其优势,以适应社会建设不断发展的需要,对混凝土结构的材料制造与施工技术、结构形式、结构设计计算理论等方面的研究也在不断发展。

1.2.1 材料与施工技术方面的发展

1. 混凝土材料

具有高强度、高工作性和高耐久性的高性能混凝土是混凝土的主要发展方向之一。随着水泥工业的发展,混凝土的质量不断改进、强度逐步提高。例如在美国20世纪60年代使用的混凝土抗压强度平均为 28N/mm^2 ,20世纪70年代提高到 42N/mm^2 ,目前立方体抗压强度为 $50\sim 80\text{N/mm}^2$ 、坍落度为 $12\sim 16\text{cm}$ 的高性能混凝土已在工程中广泛应用;立方体抗压强度为 $100\sim 200\text{N/mm}^2$ 的超高强混凝土也得到了实际工程应用;而实验室做出的抗压强度最高已达 266N/mm^2 ,采用活性细粉配制的混凝土立方体抗压强度可达 $200\sim 800\text{N/mm}^2$,抗拉强度可达 $25\sim 150\text{N/mm}^2$ 。商品混凝土的发展保证了混凝土质量,减少了环境污染,对提高

和推广高性能混凝土起到了推动作用。

轻集料混凝土是利用天然轻集料（如浮石、凝灰石等）、工业废料轻集料（如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石及其轻砂）、人造轻集料（如页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等及其轻砂）制成，可以大大减轻结构自重（重度仅为 $14 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ ，自重减少 $20\% \sim 30\%$ ）、相对强度高，同时具有优良的保温、耐火和抗冻性能。天然轻集料及工业废料轻集料还具有节约能源、减少堆积废料占用土地、减少厂区或城市污染、保护环境等优点。承重的人造轻集料混凝土，由于弹性模量低于同等级的普通混凝土，吸收冲击能量快，能有效减小地震作用，节约材料、降低造价。

再生集料混凝土的研究和利用是解决城市改造与拆除重建建筑废料、减少环境建筑垃圾、变废为宝的途径之一。将拆除建筑物的废料如混凝土、砖块经破碎后得到的再生粗集料，清洗以后可以代替全部或部分石子配制混凝土，其强度、变形性能视再生粗集料代替石子的比率而有所不同。

具有自身诊断、自身控制、自身修复等功能的机敏型高性能混凝土，得到越来越多的研究和重视。如自密实混凝土，无须机械振捣，而是依靠自身的重量达到密实。混凝土具有高工作性，质量均匀、耐久，钢筋布置较密或构件体型复杂时也易于浇筑，施工速度快，使无噪声混凝土施工成为现实，从而实现了文明施工。

此外，碾压混凝土适用于大体积混凝土结构（如水工大坝、大型基础）、公路路面与厂房地面等，其浇筑过程采用先进的机械化施工，浇筑工期可大为缩短，并能节约大量材料。纤维混凝土是在混凝土中掺加纤维以改善混凝土的抗拉性能差、延性差等缺点。目前研究较多的有钢纤维、耐碱玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维混凝土等。各种特殊性能混凝土，如聚合物混凝土、耐腐蚀混凝土、微膨胀混凝土和水中不分散混凝土等的应用，可提高混凝土的抗裂性、耐磨性、抗渗和抗冻能力等，对混凝土的耐久性十分有利。

2. 配筋材料

钢筋的发展方向是高强、防腐、较好的延性和良好的黏结锚固性能。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 500 N/mm^2 ，预应力构件中已采用强度为 1960 N/mm^2 的钢绞线。为了提高钢筋的防腐性能，带有环氧树脂涂层的热轧钢筋和钢绞线已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

在钢筋的连接成型方面，正在大力发展各种钢筋成型机械及绑扎机具，以减少大量的手工操作。除了常用的绑扎搭接、焊接连接方式外，套筒连接方式得到越来越多的推广应用。

3. 模板材料

模板材料除了目前使用的木模板、钢模板、竹模板、硬塑料模板外，今后将向多功能方向发展。发展薄片、美观、廉价又能与混凝土牢固结合的永久性模板，将使模板可以作为结构的一部分参与受力，还可省去装修工序。透水模板的使用，可以滤去混凝土中多余的水分，大大提高混凝土的密实性和耐久性。

1.2.2 结构形式方面的发展

混凝土结构在土木工程各个领域得到了广泛的应用，目前混凝土结构的跨度和高度都在不断地增大。在城市建筑中，上海市的金贸大厦是 20 世纪中国第一、世界第二的高楼，建



筑总高度为420.5m,主楼地上88层、地下3层,为框筒结构体系,核心筒为现浇钢筋混凝土,外框为钢结构与混凝土结构复合成巨型框架。在桥梁工程中,武汉长江二桥是一座主跨400m双塔双索面自锚式悬浮体系的预应力混凝土斜拉桥,桥式组成以跨径5m+180m+400m+180m+5m双塔双索面的预应力混凝土斜拉桥为主桥,两侧布置跨径125m+130m+83m预应力混凝土连续刚构,在北岸边滩地布置跨径7m×60m预应力混凝土连续箱梁,斜拉桥部分桥面宽29.4m,其他部分为26.4m,车行道宽均为23m(六车道),建筑规模与同类斜拉桥相比,仅次于美国达姆角桥,居世界第二;世界上跨度最大的混凝土拱桥——克罗地亚的克尔克Ⅱ号桥,跨度达390m。在水利工程中,世界上最高的钢筋混凝土拱坝——格鲁吉亚的英古力坝,高272m;我国目前最高的混凝土拱坝——雅砻江二滩双曲拱坝,高240m。在特种结构中,上海电视塔主体为混凝土结构,高415.2m,是我国目前最高的电视塔。

近年来,钢-混凝土组合结构得到迅速发展应用,如钢板混凝土用于地下结构和混凝土结构加固、压型钢板-混凝土板用于楼板、型钢与混凝土组合而成的组合梁用于楼盖和桥梁、外包钢混凝土柱用于电站主厂房等。以型钢或以型钢和钢筋焊成的骨架做筋材的钢骨混凝土结构,由于其筋材刚度大,施工时可用其来支撑模板和混凝土自重,可以简化支模工作。在房屋建筑工程中,世界上最高的混凝土高层建筑——马来西亚吉隆坡的双塔大厦,为钢骨混凝土结构,高450m。在钢管内浇筑混凝土形成的钢管混凝土结构,由于管内混凝土在纵向压力作用下处于三向受压状态并起到抑制钢管的局部失稳,因而使构件的承载力和变形能力大大提高;由于钢管即为混凝土的模板,施工速度较快。因此,在高层建筑结构的底层和拱桥等工程中得到了逐步推广应用。这些高性能新型组合结构具有充分利用材料强度、较好的变形能力、施工较简单等特点,从而大大拓宽了钢筋混凝土结构的应用范围。

预应力混凝土结构由于抗裂性能好、可充分利用高强度材料,发展迅速。同时结合传统预应力工艺和实际结构特点,发展了以增强后张预应力孔道灌浆密实性为目的的真空辅助灌浆技术、以减小张拉力减轻张拉设备为目的的横张预应力技术、以实现筒形断面结构环向预应力为目的的环形后张预应力技术、以减小结构建筑高度为目的的预拉预压双预应力技术等。在高耸结构与特种结构中,世界上最高的预应力混凝土电视塔为加拿大多伦多电视塔,高达549m;某些有特殊要求的结构,例如核电站安全壳和压力容器、海上采油平台、大型蓄水池、贮气罐及贮油罐等结构,抗裂及抗腐蚀能力要求较高,更适合采用预应力混凝土结构。将预应力钢筋(索)布置在混凝土结构体外的预应力技术,因大幅度减小预应力损失,简化结构截面形状和减小截面尺寸,便于再次张拉、锚固、更换或增添新索,已在桥梁工程的修建、补强加固及其他建筑结构的补强加固中得到应用。

1.2.3 设计计算理论方面的发展

混凝土结构的设计理论从把材料看作弹性体的容许应力理论,到考虑材料塑性的极限强度理论,再到按极限状态设计的理论体系。目前在工程结构设计规范中已采用基于概率论和数理统计分析的可靠度理论。

作为反映我国混凝土结构学科水平的混凝土结构设计规范也随着工程建设经验的积累、科研工作的成果和世界范围技术的进步而不断改进。1952年东北地区首先颁布了《建筑物

结构设计暂行标准》；1955年制定的《钢筋混凝土结构设计暂行规范》（结规6—55），采用了前苏联规范中的按破坏阶段设计法；1966年颁布了我国第一本《钢筋混凝土结构设计规范》（BJG 21—66），采用了当时较为先进的以多系数表达的极限状态设计法；1974年编制了采用单一安全系数表达的极限状态设计法的《钢筋混凝土结构设计规范》（TJ10—74）。规范（BJG 21—66）和（TJ 10—74）的颁布标志着我国钢筋混凝土结构设计规范步入了从无到有、由低向高发展的阶段。为了解决各类材料的建筑结构可靠度设计方法的合理和统一问题，1984年颁布的《建筑结构设计统一标准》（GB J68—84）规定我国各种建筑结构设计规范均统一采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，其特点是以结构功能的失效概率作为结构可靠度的量度，由定值的极限状态概念转变到非定值的极限状态概念上，从而把我国结构可靠度设计方法提高到当时的国际水平，对提高结构设计的合理性具有深刻意义。为配合（GB J68—84）的执行，1989年颁布的《混凝土结构设计规范》（GB J10—89）使我国混凝土结构设计规范提高到了一个新的水平。1997年起，我国对工程建设标准进行了全面修订，并先后颁布了《建筑结构可靠度设计统一标准》（GB 50068—2001）及《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）等。2010年颁布了《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）和《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2010），《混凝土结构规范》又于2015年进行了局部修订。新标准的颁布，将推动新材料、新工艺、新结构的应用，使混凝土结构不断地发展，不停地演进，达到新的水平。

1.3 本课程的任务和特点

本课程是土木工程专业重要的专业基础理论课程。学习本课程的主要目的和任务是：掌握钢筋混凝土及预应力混凝土结构构件设计计算的基本理论和构造知识，为学习有关专业课程和顺利地从事混凝土建筑物的结构设计和研究奠定基础。

学习本课程时需要注意以下特点：

1. 本课程是研究钢筋混凝土材料的力学理论课程

由于钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成的复合材料，钢筋混凝土的力学特性及强度理论较为复杂，难以用力学模型和数学模型来严谨地推导建立，因此，目前钢筋混凝土结构的计算公式常常是经大量试验研究结合理论分析建立起来的半理论半经验公式。学习时应注意每一理论的适用范围和条件，而且能在实际工程设计中正确运用这些理论和公式。这就使得本课程与研究单一弹性材料的“材料力学”课程有很大的不同，在学习时应注意它们之间的异同点，体会并灵活运用“材料力学”课程中分析问题的基本原理和基本思路，即由材料的物理关系、变形的几何关系和受力的平衡关系建立的理论分析方法，对学好本课程是十分有益的。

2. 钢筋和混凝土两种材料的力学性能及两种材料间的相互作用

结构构件的基本受力性能主要取决于钢筋和混凝土两种材料的力学性能及两种材料间的相互作用，因此掌握这两种材料的力学性能和它们之间的相互作用至关重要。同时，两种材料在数量上和强度上的比例关系，会引起结构构件受力性能的改变，当两者的比例关系超过一定界限时，受力性能会有显著的差别，这也是钢筋混凝土结构的特点，几乎所有受力形态都有钢筋和混凝土的比例界限，在课程学习过程中应予以重视。

3. 配筋及其构造知识和构造规定具有重要地位

在不同的结构和构件中,钢筋的位置及形式各不相同,钢筋和混凝土不是任意结合的,而是根据结构和构件的形式和受力特点,主要在其受拉部位(有时也在受压部位)布置。构造是结构设计不可缺少的内容,与计算是同样重要的,有时甚至是计算方法是否成立的前提条件。因此,要充分重视对构造知识的学习。在学习过程中不必死记硬背构造的具体规定,但应注意弄清其中的道理,通过平时的作业和课程设计逐步掌握。

4. 学会运用设计规范至关重要

为了贯彻国家的技术经济政策,保证设计质量,达到设计方法上必要的统一化、标准化,国家各部委制定了适用于各工程领域的混凝土结构设计规范,对混凝土结构构件的设计方法和构造细节都做了具体规定。规范反映了国内外混凝土结构的研究成果和工程经验,是理论与实践的高度总结,体现了该学科在一个时期的技术水平。对于规范特别是其规定的强制性条文,设计人员一定要遵循,并能熟练应用。因此,要注意在本课程的学习中,有关基本理论的应用最终都要落实到规范的具体规定中。由于土木工程建设领域广泛,不同领域的混凝土结构设计有不同的设计规范(或规程),因此,本课程注重与各规范相通的混凝土结构的基本理论,涉及的具体设计方法以国家标准为主线,主要有 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》(简称《统一标准》)、GB 5009—2012《建筑结构荷载规范》(简称《荷载规范》)和 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015年版)(简称《规范》)。

由于科学技术水平和生产实践经验是在不断发展的,设计规范也必然要不断进行修订和补充。因此,要用发展的眼光来看待设计规范,在学习和掌握钢筋混凝土结构理论和设计方法的同时,要善于观察和分析,不断进行探索和创新。由于设计工作是一项创造性工作,在遇到超出规范规定范围的工程技术问题时,不应被规范束缚,而需要充分发挥主动性和创造性,经过试验研究和理论分析等可靠性论证后,积极采用先进的理论和技术。

5. 学习本课程的目的能够进行混凝土结构的设计

结构设计是一个综合性的任务,包含了结构方案设计、材料选择、截面形式选择、配筋计算和构造设计等,需要考虑安全、适用、经济和施工的可行性等各方面的因素。同一构件在给定荷载作用下,可以有不同的截面,需经过分析比较,才能做出合理的选择。因此,要搞好工程结构设计,除了形式、尺寸、配筋数量等多种选择,往往需要结合具体情况进行适用性、材料用量、造价、施工等项指标的综合分析,以获得良好的技术经济效益。

1.4 拓展阅读——门外汉发明了钢筋混凝土结构

钢筋混凝土的问世,引起了建筑材料的一场革命。然而,令人惊奇的是,发明钢筋混凝土的既不是建筑业的科学家,也不是著名的工程师,而是一个和建筑不搭界的园艺师。他就是法国的约瑟夫·莫尼埃。

约瑟夫·莫尼埃(1823—1906)是19世纪中期法国巴黎的一位普通园艺师。他管理花园时,常为花盆的脆弱所困扰。那时的花盆都是由一些普通的泥土和陶土烧制而成的瓦盆,不坚固,一碰就破。莫尼埃去咨询其他花匠朋友,可他们也都面临着同样的困扰;去找专门制作盆罐的工人,也没什么好办法。

莫尼埃决定自己想办法改进花盆。恰好那时，水泥开始作为建筑材料使用，用水泥加砂子制成混凝土。混凝土有良好的黏结性，变硬固化后又具有很高的强度。这引起了莫尼埃的注意，于是他使用水泥加上砂子制造了混凝土花盆。混凝土花盆果然非常坚固，尤其是不怕压。但混凝土花盆和瓦盆一样也有缺点，就是经不起拉伸和冲击，有时，对花木进行松土和施肥都会导致花盆破碎。

“再想办法改进！”莫尼埃勉励自己。1865年，在一个花盆摔碎时，他发现虽然花盆被摔得七零八落，但花盆里的土壤却抱成一团，仍然保持着原状，好像比水泥还要结实。莫尼埃仔细观察，原来是植物的根系在土壤里互相交叉、盘根错节，形成一种网状结构，使松散的土壤抱成了坚实的一团。莫尼埃得到了启示，他打算仿照植物的根系，制作新的花盆。他先用细小的钢筋编成花盆的形状，然后在钢筋里外两面都涂抹上水泥砂浆，干燥后，花盆果然既不怕拉伸也能经受冲击。

莫尼埃发明的钢筋混凝土花盆，在巴黎的园艺界得到快速推广。莫尼埃于1867年获得专利权（图1-2）。

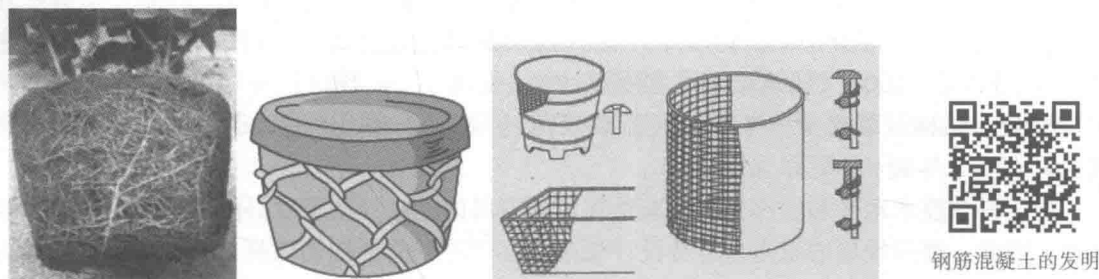


图1-2 钢筋混凝土花盆的发明

莫尼埃的发明并没有局限在花圃里，而是逐渐运用到了土木工程中。有一天，巴黎一位著名的建筑师到莫尼埃的花圃里看花。他看到了莫尼埃用钢筋混凝土制作的花盆，大为惊讶。他鼓励莫尼埃把这项技术运用到工程上，并为他牵线搭桥。莫尼埃开始应用这项技术制作台阶、铁路的枕木、预制板，并逐渐得到一些设计师的支持和社会的承认。

1867年，在巴黎的世博会上，莫尼埃展出了钢筋混凝土制作的花盆、枕木。同时展出的还有法国人兰特姆用钢筋混凝土制造的小瓶、小船。一些建筑商在世博会上亲眼看见了钢筋混凝土的优点：既能承受压力，又能承受张力，造价还便宜。钢筋混凝土引起了他们广泛的兴趣。

1875年，在设计师的帮助下，莫尼埃主持建造了世界上第一座钢筋混凝土桥（图1-3）。这座桥长16m、宽4m，是座人行的拱式体系桥。当时，人们还不明白钢筋在混凝土中的作用和钢筋混凝土受力后的物理力学性能，因此，桥梁的钢筋配置全是按照体型构造进行，在拱式构件的截面中和轴上也配置了钢筋。

1884年，德国一家建筑公司购买了莫尼埃的专利，并对钢筋混凝土进行了一系列科学试验。一位叫怀特的土木建筑工程师研究了它的耐火性能、强度，混凝土和钢筋之间的黏结力等，并在此基础上研究出了制造钢筋混凝土的最佳方法。从此，钢筋混凝土这种复合材料就成为土木建筑工程中的主角之一。



图 1-3 约瑟夫·莫尼埃主持建造的首座钢筋混凝土桥

思 考 题

1. 什么是混凝土结构？试列举出常见的混凝土结构。
2. 在素混凝土结构中配置一定形式和数量的受力钢筋以后，结构的性能会发生怎样的变化？
3. 钢筋和混凝土两种材料为什么能结合在一起工作？
4. 钢筋混凝土结构有哪些优缺点？
5. 请查找资料，举例说明混凝土结构的发展趋势。
6. 请归纳本课程的任务与内容。

第2章

混凝土结构材料的物理力学性能

【学习目标】

1. 熟悉混凝土的等级及强度和变形性能，了解各种性能的影响因素，掌握混凝土的选用原则。
2. 熟悉钢筋的品种、级别及其力学性能，掌握钢筋的选用原则。
3. 了解混凝土与钢筋的黏结与锚固机理，熟悉保证混凝土与钢筋协同工作的构造措施。
4. 了解混凝土和钢筋的材料强度试验的仪器、方法、现象和结果处理，是进行试验创新的基础。

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两种材料制作而成，材料的物理力学性能直接影响结构及构件的力学性能。对混凝土和钢筋的物理力学性能及共同工作特性的把握，是学习混凝土结构计算理论和设计方法的基础。

2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.1 混凝土的组成与结构

普通混凝土是以水泥、石子、砂子和水为主要材料，根据需要加入外加剂或矿物掺合料，经搅拌、成型、养护等工艺，凝结硬化而形成的一种复合材料。混凝土的内部结构非常复杂，按尺度特征，可分为微观结构、亚微观结构和宏观结构三种基本结构层次。微观结构即水泥石结构；亚微观结构即混凝土中水泥砂浆结构；宏观结构即砂浆和粗集料两组分体系。

该组成结构理论认为：混凝土中的水泥结晶体、集料和未水化的水泥颗粒组成弹性骨架，承受外荷载并产生弹性变形，是混凝土的强度来源；水泥凝胶体中的凝胶、孔隙和界面初始微裂缝，起着调整和扩散混凝土应力的作用，使混凝土产生塑性变形；同时，混凝土中的孔隙、界面微裂缝等初始缺陷又是混凝土受力破坏的根源。

2.1.2 混凝土的强度

虽然实际工程中的混凝土大多处于多向复合应力状态，但单向应力状态下的混凝土强度是多向应力状态下混凝土强度的基础和重要参数。

影响混凝土强度的因素很多,如水泥强度、水胶比、集料性质和级配、制作方法、硬化条件及龄期等,同时,试件的尺寸和形状、试验方法和加载速率等也影响试验结果。因此,各国对混凝土的单向受力下的强度都规定了统一的标准试验方法。

1. 混凝土立方体抗压强度和强度等级

立方体抗压强度是衡量混凝土强度的基本指标,是评定混凝土强度等级的标准。我国《规范》规定:以边长为150mm的立方体试件,按标准方法制作,在 $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度不低于90%的环境下养护28d,以每秒 $0.3 \sim 0.8 \text{ N/mm}^2$ 的速度加载试验,并取具有95%保证率的强度值作为混凝土的立方体抗压强度标准值(单位为 N/mm^2),以符号 $f_{\text{cu},k}$ 表示。

根据 $f_{\text{cu},k}$,将混凝土强度分为C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75和C80共十四个强度等级。其中,C代表混凝土,15~80表示立方体抗压强度的大小,单位为 N/mm^2 。JGJ/T 281—2012《高强混凝土应用技术规程》规定,C60以上为高强混凝土。

《规范》规定:钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C15;当采用HRB335级钢筋时,混凝土强度等级不宜低于C20;采用HRB400和RRB400级钢筋以及承受重复荷载的构件,混凝土强度等级不得低于C20。预应力混凝土结构的混凝土强度等级不应低于C30;当采用钢绞线、钢丝和热处理钢筋作为预应力钢筋时,混凝土强度等级不宜低于C40。另外,还应根据建筑物所处的环境条件确定混凝土的最低强度等级,以保证建筑物的耐久性。

试验方法对混凝土的 $f_{\text{cu},k}$ 值有较大影响。试件在试验机上受压时,纵向会压缩,横向会膨胀,由于混凝土与压力机垫板的弹性模量与横向变形系数不同,导致垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形。当试件端面不涂润滑剂时,试件端面与压板之间形成的摩擦力会约束试件的横向变形,阻滞了裂缝的发展,从而提高了试块的抗压强度值。破坏时,试件呈两个对顶的角锥体,如图2-1a所示。如果在承压板和试块上下端面之间涂以油脂润滑剂,则加压时摩擦力将大大减少,对试块的横向约束也就大为减小,试件沿着与作用力平行的方向产生几条裂缝而破坏,这样测得的极限抗压强度值较低,如图2-1b所示。《规范》规定的标准试验方法是不涂润滑剂,更符合工程实际情况。

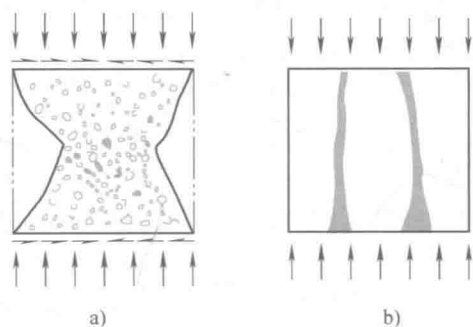


图 2-1 混凝土立方体试块的受压破坏特征

a) 不涂润滑剂 b) 涂润滑剂



录像-立方体
抗压强度

混凝土的 $f_{\text{cu},k}$ 值与试件的龄期及养护条件有关。在一定的温度和湿度条件下,混凝土的强度开始时增长很快,以后逐渐减慢,这个过程往往持续几年。从图2-2中可以看出,混凝土