

混凝土结构设计原理

(第2版)

主编 朱平华 陈春红



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等院校土建类应用型人才培养系列规划教材

混凝土结构设计原理

(第2版)

主 编 朱平华 陈春红

副主编 王新杰

参 编 伍君勇 谢静静

主 审 金伟良

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书是在2013年8月出版的《混凝土结构设计原理》的基础上修订而成的。在本次修订过程中,作者听取和采纳了教师和学生的使用意见,在章节体系基本保持不变的前提下,对各章节内容进行了不同程度的修改,使之更趋于完善。全书共分为10章,主要内容包括绪论、混凝土结构材料的物理力学性能、混凝土结构设计方法、受弯构件正截面承载力计算、受弯构件斜截面承载力计算、受压构件承载力计算、受拉构件承载力计算、受扭构件承载力计算、构件挠度和裂缝宽度验算、预应力混凝土构件计算。各章节按混凝土结构构件的受力性能和特点划分,便于根据不同的教学要求对内容进行取舍。为了便于教学,使学生能更好地理解 and 掌握课程内容,每章均设有学习目标,并且附有本章小结、思考题与习题。

本书可作为高等院校土木工程类相关专业的教材,也可供工程技术和科研人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理 / 朱平华, 陈春红主编.—2版.—北京: 北京理工大学出版社, 2017.3
(2017.4重印)
ISBN 978-7-5682-3788-8

I. ①混… II. ①朱… ②陈… 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047726号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本 / 787毫米 × 1092毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 401千字

版 次 / 2017年3月第2版 2017年4月第2次印刷

定 价 / 39.00元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

第2版前言

本书第1版问世以来，经过三年多时间使用，受到广大师生的好评。限于编者水平，加之编写时间仓促，师生在使用过程中，反馈了教材的一些使用意见和修改建议。与第1版相比，本书主要修改之处如下：

（1）《混凝土结构设计规范（2015年版）》（GB 50010—2010）中关于钢筋的选用原则是：淘汰HPB235级钢筋，逐渐限制使用HRB335级钢筋，宜选用HRB400和HRB500级钢筋。近几年来，市场上HRB335级钢筋的使用率不断下降，故本书在钢材的选用上也做了相应的调整，例题中纵向受力钢筋不再选用HRB335级。

（2）朱平华教授和陈春红教师对全书内容重新进行了校核，对每一章节进行了勘误，力求更加完善。

浙江大学金伟良教授审阅了全部书稿，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者不吝赐教，欢迎批评指正。

编 者

第1版前言

本书是根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)及《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)编写的,其内容及教学要求符合《土木工程专业指导性规范》的要求,可以作为高等院校土建类本科专业的教材或教学参考书,也可以作为土木工程技术与管理人员的参考书。

本书共10章,主要内容包括:绪论,混凝土结构材料的物理力学性能,混凝土结构设计方法,受弯构件正截面及斜截面承载力计算,受压构件、受拉构件和受扭构件承载力计算,构件挠度和裂缝宽度验算,预应力混凝土构件计算等。本书在系统、完整介绍基本概念和理论的同时,每章章名与一、二级标题均中英对照,每章给出了学习目标、本章小结、思考与练习,以便于自学和检验学习效果。

本书由常州大学朱平华教授(编写第1、3章)、陈春红讲师(编写第4、5章)、王新杰博士(编写9、10章)、谢静静讲师(编写第6、7章)、伍君勇博士(编写第2、8章)共同编写,其中,朱平华、陈春红担任主编,王新杰担任副主编。朱平华负责大纲的制订与统稿。浙江大学金伟良教授审阅了全部书稿并提出了很多宝贵的建议和具体的修改意见;常州大学硕士生田斌、高燕蓉对计算题进行了复核并提供了部分插图,在此一并致谢。

限于编者水平,加之编写时间仓促,书中不妥之处在所难免,敬请读者不吝赐教,提出宝贵意见。

编者

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	混凝土结构的一般概念	1
1.2	混凝土结构的发展与应用概况	3
1.3	本课程内容与学习要点	8
第 2 章	混凝土结构材料的物理力学性能	11
2.1	钢筋的物理力学性能	11
2.2	混凝土的物理力学性能	14
2.3	钢筋与混凝土的粘结	24
第 3 章	混凝土结构设计方法	30
3.1	结构的功能要求与极限状态	30
3.2	概率极限状态设计方法	33
3.3	荷载的代表值	36
3.4	材料强度的标准值和设计值	37
3.5	极限状态的实用设计表达式	39
3.6	混凝土结构的耐久性设计	42
第 4 章	受弯构件正截面承载力计算	50
4.1	概述	50

4.2	受弯构件正截面的受力性能	51
4.3	受弯构件正截面承载力计算方法	59
4.4	单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	64
4.5	双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	69
4.6	T形截面受弯构件正截面承载力计算	74
第 5 章	受弯构件斜截面承载力计算	87
5.1	概述	87
5.2	无腹筋梁的斜截面受剪性能	88
5.3	有腹筋梁的斜截面受剪性能	94
5.4	受弯构件斜截面承载能力的设计与校核	99
5.5	斜截面受弯承载力的构造措施	104
第 6 章	受压构件承载力计算	116
6.1	受压构件基本构造要求	116
6.2	轴心受压构件正截面承载力计算	119
6.3	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	126
6.4	I形截面偏心受压构件正截面承载力计算	141
6.5	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	145
第 7 章	受拉构件承载力计算	149
7.1	轴心受拉构件正截面承载力计算	149
7.2	偏心受拉构件正截面承载力计算	150
7.3	偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	155
第 8 章	受扭构件承载力计算	158
8.1	概述	158
8.2	纯扭构件的试验研究	159
8.3	纯扭构件扭曲截面承载力计算	161

8.4	弯剪扭构件截面承载力计算	164
8.5	受扭构件构造要求	169
第 9 章	构件挠度和裂缝宽度验算	174
9.1	概述	174
9.2	受弯构件变形验算	175
9.3	正截面裂缝宽度验算	184
第 10 章	预应力混凝土构件计算	194
10.1	预应力混凝土的基本理念	194
10.2	预应力钢筋的张拉控制应力及预应力损失	201
10.3	预应力混凝土轴心受拉构件设计	209
10.4	预应力混凝土受弯构件设计	222
10.5	预应力混凝土结构构件构造要求	244
附 录	252
参考文献	262



第 1 章 绪论

Introduction



学习目标

本章叙述了混凝土结构的一般概念，钢筋和混凝土这两种性质不同的材料能够组合在一起共同工作的条件，以及混凝土结构的优缺点；介绍了混凝土结构在房屋建筑工程、交通土建工程、水利工程及其他工程中的应用；介绍了混凝土结构的发展前景，包括在材料、结构、施工技术、计算理论等方面的发展；还介绍了混凝土结构课程的特点和学习方法，以及指导工程设计的混凝土结构设计规范发展的概况。

1.1

混凝土结构的一般概念

Basic Concepts of Concrete Structures

混凝土结构是以混凝土为主要建筑材料制成的结构，是保证工程正常与安全使用的骨架，包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及配置各种纤维筋的混凝土结构。混凝土结构广泛应用于建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、港口等工程。我国年均混凝土用量约为 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中，房屋建筑用量约为 $9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，钢筋用量约为 $2 \times 10^7 \text{ t}$ ，用于混凝土结构的资金达 2 000 亿元以上。

混凝土材料的抗压强度较高，而抗拉强度却很低。因此，素混凝土结构的应用受到很大限制。例如，图 1.1(a)所示的素混凝土梁，随着荷载的逐渐增大，梁中拉应力及压应力也不断增大。当荷载达到一定值时，弯矩最大截面受拉边缘的混

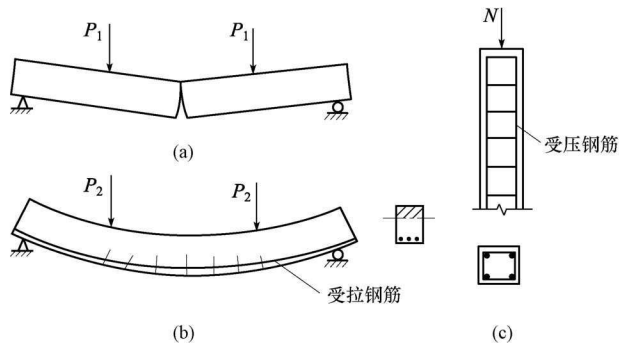


图 1.1 素混凝土梁及钢筋混凝土梁、柱

凝土首先被拉裂，而后由于该截面高度减小致使开裂截面受拉区的拉应力进一步增大，于是裂缝迅速向上伸展并立即引起梁的破坏。这种梁的破坏很突然，其受压区混凝土的抗压强度未充分利用，且由于混凝土抗拉强度很低，故其极限承载力也很低。所以，对于在外荷载作用下或其他原因会在截面中产生拉应力的结构，不应采用素混凝土结构。

与混凝土材料相比，钢筋的抗拉强度很高。若将混凝土和钢筋这两种材料结合在一起，则混凝土主要承受压力，而钢筋主要承受拉力，这就成为钢筋混凝土结构。例如，图 1.1(b) 所示作用集中荷载的钢筋混凝土梁，在截面受拉区配有适量的钢筋。当荷载达到一定值时，梁受拉区仍然开裂，但开裂截面的变形性能与素混凝土梁大不相同。因为钢筋与混凝土牢固地粘结在一起，所以，在裂缝截面原来由混凝土承受的拉力现转由钢筋承受；由于钢筋强度和弹性模量均很高，所以，此时裂缝截面的钢筋拉应力和受拉变形均很小，有效地约束了裂缝的开展，使其不会无限制地向上延伸而使梁发生断裂破坏。因此，钢筋混凝土梁上荷载可继续加大，直至其受拉钢筋应力达到屈服强度，随后截面受压区混凝土被压坏，这时梁才达到破坏状态。由此可见，在钢筋混凝土梁中，钢筋与混凝土两种材料的强度都得到了较为充分的利用，破坏过程较为缓和，且这种梁的极限承载力大大超过同条件的素混凝土梁。

钢筋的抗压强度也很高，所以，在轴心受压柱[图 1.1(c)]中也配置纵向受压钢筋与混凝土共同承受压力，以提高柱的承载能力和变形能力，减小柱截面的尺寸，还可以负担由于某种原因而引起的弯矩和拉应力。

为了提高混凝土结构的抗裂性和耐久性，可在加载前用张拉钢筋的方法使混凝土截面内产生预压应力，以全部或部分抵消荷载作用下产生的拉应力，这即为预应力混凝土结构；也可在混凝土中加入各种纤维筋(如钢纤维、碳纤维筋等)，形成纤维加强混凝土结构。

钢筋与混凝土两种力学性能完全不同的材料，能够有效地结合在一起而共同工作，主要基于以下三个条件：

(1) 钢筋与混凝土之间存在着粘结力，使两者能结合在一起。在外荷载作用下，结构中的钢筋与混凝土协调变形，共同工作。因此，粘结力是这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近，钢材为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，所以，钢筋与混凝土之间不会因温度变化产生较大的相对变形而使粘结力遭到破坏。

(3) 钢筋埋置于混凝土中，混凝土对钢筋起到了保护和固定作用，使钢筋不容易发生锈蚀，且使其受压时不致失稳，在遭受火灾时不致因钢筋很快软化而导致结构整体破坏。因此，在混凝土结构中，钢筋表面必须留有一定厚度的混凝土作为保护层，这是保持两者共同作用的必要措施。

混凝土结构的主要优点如下：

(1) 就地取材：砂、石是混凝土的主要成分，均可就地取材。在工业废料(如矿渣、粉煤灰等)比较多的地方，可利用工业废料制成人造集料用于混凝土结构。

(2) 耐久性好：对处于正常条件下的混凝土耐久性好，高性能混凝土的耐久性更好。在混凝土结构中，钢筋受到保护不易锈蚀，所以，混凝土结构具有良好的耐久性。对处于侵蚀性环境下的混凝土结构，经过合理设计及采取有效措施后，一般可满足工程需要。

(3) 耐火性好：混凝土为不良导热体，埋置在混凝土中的钢筋受高温影响远较暴露的钢

结构小。只要钢筋表面的混凝土保护层具有一定的厚度，在发生火灾时，钢筋不会很快软化，可避免结构倒塌。

(4)刚度大，整体性好：混凝土结构刚度较大，现浇混凝土结构具有良好的整体性，这有利于抗震、抵抗振动和爆炸冲击波。

(5)可塑性强：新拌和的混凝土为可塑的，因此，可以根据需要制成任意形状和尺寸的结构，这有利于建筑造型。

(6)节约钢材：钢筋混凝土结构合理地利用了材料的性能，发挥了钢筋与混凝土各自的优势，与钢结构相比能节约钢材并降低造价。

当然，传统混凝土结构也具有以下一些缺点：

(1)自重大：混凝土结构自身重力较大，这样，其所能负担的有效荷载相对较小。对大跨度结构、高层建筑结构都是不利的。另外，自重大会使结构地震作用加大，故对结构抗震也不利。

(2)抗裂性差：在正常使用情况下，钢筋混凝土结构构件截面受拉区通常存在裂缝，如果裂缝过宽，则会影响结构的耐久性和应用范围。

(3)模板耗用量大：混凝土结构的制作需要模板予以成型。若采用木模板，则可重复使用的次数少，并会增加工程造价。

另外，混凝土结构施工工序复杂，周期较长，且受季节气候影响；对于现浇混凝土结构，如遇损坏则修复困难；隔热、隔声性能也比较差。

随着科学技术的不断发展，传统混凝土结构的缺点正在被逐渐克服或改进。如采用轻质、高强度混凝土及预应力混凝土，可减小结构自身重力并提高其抗裂性；采用可重复使用的钢模板会降低工程造价；采用预制装配式结构，可以改善混凝土结构的制作条件，少受或不受气候条件的影响，并能提高工程质量及加快施工进度等。

结构在其使用年限内，需要承受各种永久荷载和可变荷载，有些结构可能还需要承受偶然荷载。除此之外，结构在其使用年限内，还将受到温度、收缩、徐变、地基不均匀沉降等影响。在地震区，结构还可能承受地震作用。在上述各种因素的作用下，结构应具有足够的承载能力，不发生整体或局部的破坏或失稳；应具有足够的刚度，不产生过大的挠度或侧移。对于混凝土结构而言，还应具有足够的抗裂性，满足裂缝控制要求；要有足够的耐久性，在规定的使用年限内，钢材不出现严重腐蚀，混凝土材料不发生严重劈裂、腐蚀、风化与剥落等现象。

1.2

混凝土结构的发展与应用概况

Historical Background and Application of Concrete Structures

1.2.1 发展概况

Development Situation

相对于木结构、钢结构、砌体结构而言，混凝土结构起步较晚，其应用仅有 160 多

年的历史，可大致划分为四个阶段。从 1850 年到 1920 年为第一阶段，这时由于钢筋和混凝土的强度都很低，仅能建造一些小型的梁、板、柱、基础等构件，钢筋混凝土本身的计算理论尚未建立，只能按弹性理论进行结构设计；自 1920 年至 1950 年为第二阶段，这时已建成各种空间结构，发明了预应力混凝土并应用于实际工程，开始按破损阶段进行构件截面设计；1950 年到 1980 年为第三阶段，由于材料强度的提高，混凝土单层房屋和桥梁结构的跨度不断增大，混凝土高层建筑的高度已达 262 m，混凝土的应用范围进一步扩大，普遍采用各种现代化施工方法，同时广泛采用预制构件，结构构件设计已过渡到按极限状态的设计方法；大致从 1980 年起，混凝土结构的发展进入第四阶段。尤其是近十余年来，大模板现浇和大板建筑等工业化体系进一步发展，高层建筑新结构体系(如框桁架体系和外伸结构等)有较多的应用。振动台试验、拟动力试验和风洞试验较普遍地开展。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，也减轻了设计工作量；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；结构构件的设计已采用极限状态设计方法。

随着技术的发展，混凝土结构在其所用材料和配筋方式上有了很多新进展，形成了一些新的混凝土结构形式，如高性能混凝土结构、纤维增强混凝土结构、钢与混凝土组合结构等。

(1)高性能混凝土结构。高性能混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性及高抗渗透性等优点，是今后混凝土材料发展的重要方向。一般将混凝土强度等级大于 C50 的混凝土划分为高强度混凝土。高强度混凝土的强度高、变形小、耐久性好，适应现代工程结构向大跨、重载、高层发展和承受恶劣环境条件的需要。配置高强度混凝土必须采用较低的水胶比，并应掺入粉煤灰、矿渣、沸石灰、硅粉等混合料。在混凝土中加入高效减水剂可有效地降低水胶比；掺入粉煤灰、矿渣、沸石灰则能有效地改善混凝土拌合料的和易性，提高硬化后混凝土的力学性能和耐久性；硅粉对提高混凝土的强度最为有效，并使混凝土具有耐磨和耐冲刷的特性。

高强度混凝土在受压时表现出较小的塑性和更大的脆性，因而，在结构构件计算方法和构造措施上与普通强度混凝土有一定差别，在某些结构上的应用受到限制，如有抗震设防要求的混凝土结构，混凝土强度等级不宜超过 C60(抗震设防烈度为 9 度时)和 C70(抗震设防烈度为 8 度时)。

(2)纤维增强混凝土结构。在普通混凝土中掺入适当的各种纤维材料而形成纤维增强混凝土，其抗拉、抗剪、抗折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震和抗爆等性能均有较大提高，因而获得较大发展和应用。

目前，应用较多的纤维材料有钢纤维、合成纤维、玻璃纤维和碳纤维等。

钢纤维混凝土是将短的、不连续的钢纤维均匀、乱向地掺入普通混凝土而制成，有无钢筋纤维混凝土结构和钢纤维钢筋混凝土结构。钢纤维混凝土结构的应用很广，如机场的飞机跑道、地下人防工程、地下泵房、水工结构、桥梁与隧道工程等。

合成纤维(尼龙基纤维、聚丙烯纤维等)可以作为主要加筋材料，能提高混凝土的抗拉、韧性等结构性能，用于各种水泥基板材；也可以作为一种次要加筋材料，主要用于提高水泥混凝土材料的抗裂性。碳纤维具有轻质、高强、耐腐蚀、施工便捷等优点，已广泛用于

建筑、桥梁结构的加固补强以及机场飞机跑道工程等。

(3)钢与混凝土组合结构。用型钢或钢板焊(或冷压)成钢截面,再将其埋置在混凝土中,使混凝土与型钢形成整体共同受力,这种结构称为钢与混凝土组合结构。国内外常用的组合结构有压型钢板与混凝土组合楼板、钢与混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构和外包钢混凝土结构五大类。

钢与混凝土组合结构除具有钢筋混凝土结构的优点外,还具有抗震性能好、施工方便,能充分发挥材料的性能等优点,因而可以得到广泛应用。各种结构体系,如框架、剪力墙、框架-剪力墙、框架-核心筒等结构体系中的梁、柱、墙均可采用组合结构。例如,美国的太平洋第一中心大厦(44层)和双联广场大厦(58层)的核心筒大直径柱子,以及北京环线地铁车站柱,都采用了钢管混凝土结构;上海金茂大厦外围柱、环球金融中心大厦的外框筒柱,采用了型钢混凝土柱;我国在电厂建筑中推广使用了外包钢混凝土结构。

1.2.2 应用概况

Application Profiles

混凝土结构广泛应用在土木工程各个领域,下面简要介绍其主要应用情况。

在混凝土结构材料应用方面,混凝土和钢材的质量不断改进、强度逐步提高。例如,美国20世纪60年代使用的混凝土平均抗压强度为28 MPa,20世纪70年代提高到42 MPa,近年来,一些特殊需要的结构混凝土抗压强度可达80~105 MPa,而实验室制备的混凝土抗压强度可高达1 000 MPa。目前,强度等级为C50~C80的混凝土甚至更高强度混凝土的应用已比较普遍。各种特殊用途的混凝土不断研制成功并获得应用,如超耐久性混凝土的耐久年限可达500年;耐热混凝土可达1 800℃的高温;钢纤维混凝土和聚合物混凝土、放射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等有特殊要求的混凝土也应用在实际工程中。20世纪70年代,苏联使用的钢材平均屈服强度为380 MPa,20世纪80年代提高到420 MPa,而美国在20世纪70年代所用钢材平均屈服强度已达420 MPa,预应力钢筋强度则更高。材料质量与强度的提高为混凝土结构在更大范围应用创造了条件。

目前,混凝土结构已成为土木工程中的主流结构。例如,房屋建筑中的住宅和公共建筑,广泛采用钢筋混凝土楼盖和屋盖;单层厂房很多采用钢筋混凝土柱、基础,钢筋混凝土或预应力混凝土屋架及薄腹梁等;高层建筑混凝土结构体系的应用甚为广泛。2010年投入使用的阿拉伯联合酋长国迪拜哈利法塔(Burj Khalifa Tower),是已建成的世界最高混凝土结构建筑物(图1.2)。哈利法塔原名迪拜塔(Burj Dubai),又称迪拜大厦或比斯迪拜塔,162层,总高828 m。号称“亚洲第一高楼”的上海中心127层,楼高632 m,是亚洲最高的混凝土结构建筑物(图1.3)。1998年建成的马来西亚石油双塔楼,88层,高452 m,以及2003年建成的中国台北国际金融中心,101层,高455 m,这两幢房屋均采用钢-混凝土组合结构,其高度已超过世界上最高的钢结构房屋(美国芝加哥Sears Tower大厦)。我国上海金茂大厦,88层,建筑高度420.5 m,为钢筋混凝土和钢构架混合结构,其中,横穿混凝土核心筒的三道8 m高的多方位外伸钢桁架,为世界高层建筑所罕见。已知世界上计划建造800 m以上的塔楼,有日本东京的千禧年大厦(Millennium Tower),高840 m,以及香港超群塔楼(Bionic Tower),高1 128 m等。



图 1.2 世界第一高楼——哈利法塔



图 1.3 亚洲第一高楼——上海中心

混凝土结构在桥梁工程中的应用也相当普遍，无论是中小跨度桥梁还是大跨度桥梁，大都采用混凝土结构建造。如分别于 1991 年与 1997 年建成的挪威 Skarnsundet 桥和重庆长江二桥，均为预应力混凝土斜拉桥；广东虎门大桥中的辅航道桥为预应力混凝土刚架公路桥，跨度达 270 m；攀枝花预应力混凝土铁路刚架桥，跨度为 168 m。公路混凝土拱桥应用也较多，其中，突出的如 1997 年建成的四川万县(现重庆万州)长江大桥，为上承式拱桥，采用钢管混凝土和型钢骨架组成三室箱形截面，跨长 420 m，为目前世界最大跨径拱桥；贵州江界河 330 m 的桁架式组合拱桥，广西邕宁江 312 m 的中承式拱桥等均为混凝土桥。尤为值得一提的是当今世界上最长的跨海大桥——青岛海湾大桥(又称胶州湾跨海大桥)，全长 41.58 km，分上部结构和下部结构两部分，其中，上部结构包括钢箱梁、混凝土主塔和悬索等，下部结构则包括混凝土承台、墩身及桩基等(图 1.4)。

位居世界跨海大桥第三的我国杭州湾跨海大桥(图 1.5)，全长 36 km，据初步核定，大桥共用钢材 76.7 万 t，水泥 129.1 万 t，石油沥青 1.16 万 t，木材 1.91 万 m³，混凝土 240 万 m³，各类混凝土桩基 7 000 余根，为国内特大型桥梁之最。



图 1.4 世界最长跨海大桥——青岛海湾大桥



图 1.5 世界第三长跨海大桥——杭州湾跨海大桥

混凝土结构在隧道工程、水利工程、地下工程、特种工程中的应用也极为广泛。中华人民共和国成立后，修建了约 2 500 km 长的铁路隧道，其中，成昆铁路线中有混凝土隧道

427 座, 总长 341 km, 占全线路长的 31%。我国除北京、上海、天津、广州等大城市已有地铁外, 许多二、三线城市也建有或正在筹划建造地铁。我国许多城市建有地下商业街、地下停车场、地下仓库、地下工厂、地下旅店等。

水利工程中的水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管等均采用钢筋混凝土结构。目前, 世界上最高的重力坝为瑞士的大狄仁桑坝, 高 285 m, 其次为俄罗斯的萨杨苏申克坝, 高 245 m; 我国于 1989 年建成的青海龙羊峡大坝, 高 178 m; 四川二滩水电站拱坝, 高 242 m; 贵州乌江渡拱形重力坝, 高 165 m; 黄河小浪底水利枢纽主坝, 高 154 m。我国的三峡水利枢纽, 水电站主坝, 高 190 m, 设计装机容量 $1\ 820 \times 10^4$ kW, 发电量居世界单一水利枢纽发电量的第一位。另外, 举世瞩目的南水北调大型水利工程, 沿线将建造很多预应力混凝土渡槽。

特种结构中的烟囱、水塔、筒仓、储水池、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也有很多采用混凝土结构建造。例如, 1989 年建成的挪威北海混凝土近海采油平台, 水深 216 m; 目前, 世界上最高的电视塔——加拿大多伦多电视塔, 塔高 553.3 m, 为预应力混凝土结构; 上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成, 高 456 m, 居世界第三位。另外, 还有瑞典建成的容积为 $10\ 000\ \text{m}^3$ 的预应力混凝土水塔, 我国山西云冈建成的两座容量为 $6 \times 10^4\ \text{t}$ 的预应力混凝土煤仓等。

1.2.3 我国混凝土结构规范编制简介

Brief Introduction of Chinese Code for Design of Concrete Structures

随着我国土木工程建设经验的积累、科研工作和世界范围内技术的不断进步, 体现我国混凝土结构学科水平的混凝土结构规范也在不断改进与完善。1952 年, 东北地区首先颁布了《建筑物结构设计暂行标准》; 1955 年, 借鉴苏联规范中的破损阶段设计法, 制定了《钢筋混凝土结构设计暂行规范》; 1966 年颁布了中国第一部《钢筋混凝土结构设计规范》(BJG 21—1966), 采用了当时较为先进、以三系数(材料匀质系数、超载系数、工作条件系数)表达的极限状态设计法; 1974 年编制的《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—1974), 采用了多系数分析、单一安全系数表达的极限状态设计法, 并辅以相关规定和规程。

为解决各类材料的建筑结构可靠度设计方法的合理与统一问题, 我国于 1984 年颁布了《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—1984), 规定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, 将极限状态的概念由定值转到非定值, 从而将我国结构可靠度方法提升到当时的国际水准。与此相适应, 1989 年我国颁布了《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—1989)。2001 年前后, 我国先后颁布了《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)等。然而, 2008 年 5 月 12 日, 震惊中外的汶川大地震造成约 700 万间房屋倒塌, 2 400 万间房屋受损, 给我国土木建筑工作者带来惨痛的教训, 也客观反映出我国原有规范中存在的不足。在进行汶川地震房屋倒塌与损害原因分析的基础上, 2009 年起, 我国先后颁布了《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010), 并首次提出了工程建设标准是最低要求的概念。但是, 以上规范、标准与国际上通用的设计规范相比还有一定的差距, 有待进一步发展与完善。不可否认的是, 每一次新规范、新标准的颁布, 必将极大推动新材料、新工艺与新结构的应用, 从而推动我国混凝土结构学科向前发展。

1.3

本课程内容与学习要点

The Course Contents and Learning Points

1.3.1 内容

Content

一般而言,土木工程专业的混凝土结构课程在内容上可分为混凝土结构基本原理与混凝土结构设计两个部分。混凝土结构基本原理主要内容包括混凝土结构计算原理、混凝土结构材料的性能、混凝土构件(受弯、受压、受拉、受剪、受扭和预应力混凝土构件)的计算方法和配筋构造,这部分内容是学习土木工程结构的基础。混凝土结构设计主要内容为混凝土梁板结构、单层厂房结构以及多层与高层框架结构。其中,混凝土梁板结构重点介绍了整体式单向板梁板结构、整体式双向板梁板结构、整体式楼梯和雨篷的设计计算方法;单层厂房结构重点介绍了单层厂房的结构类型和结构体系、结构组成和荷载传递、结构布置、构件选型与截面尺寸确定、排架结构内力分析、柱的设计、牛腿的设计等内容;多层与高层框架结构重点介绍了结构布置方法、截面尺寸估算、计算简图的确定、荷载计算、内力计算与组合、配筋计算及抗震构造要求等内容。

在混凝土结构设计中,首先根据结构使用功能要求及考虑经济、施工等条件,选择合适的结构方案,进行结构布置以及确定构件类型等;然后根据结构上所作用的荷载及其他作用,对结构进行内力分析,求出构件截面内力(包括弯矩、剪力、轴力、扭矩等)。在此基础上,对组成结构的各类构件分别进行构件截面设计,即确定构件截面所需的钢筋数量、配筋方式,并采取必要的构造措施。

1.3.2 学习要点

Learning Points

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是掌握钢筋混凝土及预应力混凝土结构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。学习本课程需要注意以下要点:

(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)掌握钢筋和混凝土材料的力学性能及其相互作用十分重要。混凝土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之间的相互作用,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,钢筋和混凝土不是任意结合的,钢筋的位置及形式是根据结构、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作了具体规定。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内的技术水平。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《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)(以下简称《统一标准》)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)(以下简称《荷载规范》)和《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)。

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)学习本课程的目的是能够进行混凝土结构的设计。结构设计是一个综合性的问题,包含了结构方案、材料选择、截面形式选择、配筋计算和构造等,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,才能作出合理的选择。因此,要搞好工程结构设计,除形式、尺寸、配筋数量等多种选择外,往往需要结合具体情况进行适用性、材料用量、造价、施工等指标的综合分析,以获得良好的技术经济效益。



本章小结

(1)混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构。在混凝土中配置适量钢筋,使混凝