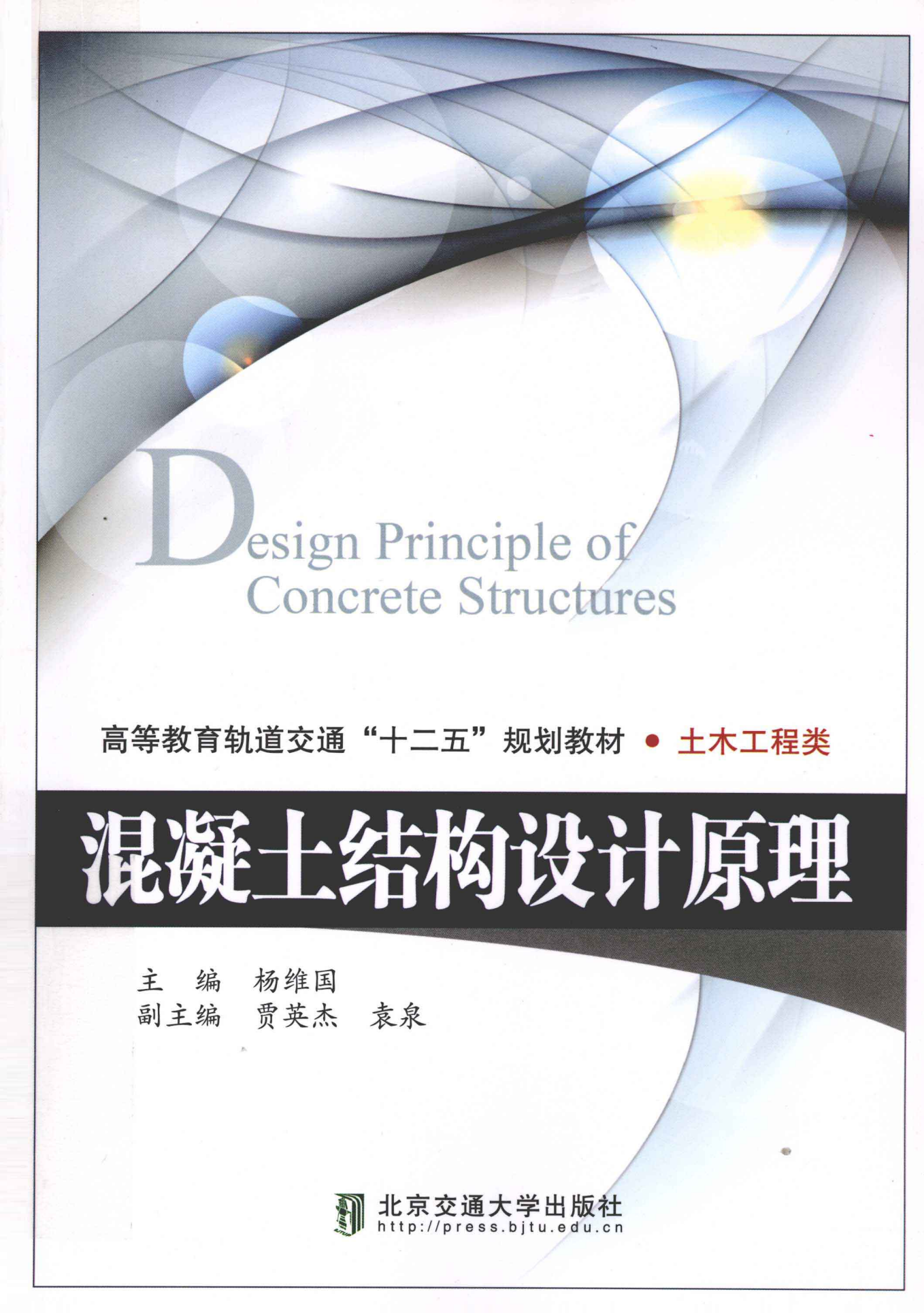




Design Principle of Concrete Structures

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 土木工程类

混凝土结构设计原理

主 编 杨维国
副主编 贾英杰 袁泉



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·土木工程类

混凝土结构设计原理

杨维国 主 编
贾英杰 袁 泉 副主编

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

“混凝土结构设计原理”是土木工程专业的一门专业基础课,本书根据全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程学生的基本要求和审定的教学大纲而编写。全书共分为10章:绪论;材料的物理和力学性能;混凝土结构设计的基本原则;受弯构件正截面承载力计算;受弯构件斜截面承载力计算;受压构件的截面承载力;受拉构件承载力计算;受扭构件承载力计算;钢筋混凝土构件的变形和裂缝;预应力混凝土构件。各章开头有章节概要、章节重点和难点。每章结束后有小结,并附有思考题和习题,便于教学使用。本教材可作为高等学校土木工程及相关专业的教学用书,也可用做继续教育的教材或土木设计和工程技术人员参考用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/杨维国主编. —北京:北京交通大学出版社, 2012.7

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1076-2

I. ①混… II. ①杨… 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(2012)第150747号

责任编辑:郝建芳 吴嫦娥

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街44号

印 刷 者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:15.75 字数:394千字

版 次:2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1076-2/TU·86

印 数:1~2 000册 定价:32.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·土木工程类

编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：张顶立 陈 庚

委 员：(按姓氏笔画排序)

王连俊 毛 军 白 雁

李清立 杨维国 张鸿儒

陈 岚 朋改非 赵国平

贾 影 夏 禾 黄海明

编委会办公室

主 任：赵晓波

副 主 任：贾慧娟

成 员：(按姓氏笔画排序)

吴嫦娥 郝建英 徐 琤

出版说明

为促进高等轨道交通专业交通土建工程类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学土木建筑工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划系列教材·土木工程类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。

本系列教材从2012年1月起陆续推出,首批包括:《材料力学》、《结构力学》、《土木工程材料》、《水力学》、《工程经济》、《工程地质》、《隧道工程》、《房屋建筑学》、《建设项目管理》、《混凝土结构设计原理》、《钢结构设计原理》、《建筑施工技术》、《施工组织及概预算》、《工程招投标与合同管理》、《工程监理》、《铁路选线》、《土力学与路基》、《桥梁工程》、《地基基础》、《结构设计原理》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养,特别是轨道交通土木工程专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会
2012年6月

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到18万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展的需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关关系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电力牵引和交通土木工程四个系列,涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域,每本教材都是由该领域的专家执笔,教材覆盖面广,内容丰富实用。在教材的组织过程中,我们进行了充分调研,精

心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献一点绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会

2012 年 7 月

前 言

本书是根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)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,可以作为高等学校土建类函授或夜大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用书。

《混凝土结构设计原理》教材主要讲述混凝土结构基本构件的受力性能和设计计算方法,是土木工程专业重要的专业基础课。本教材内容主要包括混凝土结构材料的物理力学性能、混凝土结构设计方法,以及基本构件(受弯构件、受压构件、受扭构件、受拉构件)的受力性能分析、设计计算和构造措施,正常使用阶段变形和裂缝的验算,预应力混凝土构件的原理与设计。通过本课程的学习,学生可掌握混凝土结构的基本理论和基本设计方法,并为学习后续专业课程、毕业设计,以及毕业后从事土木工程领域相关工作打下坚实的基础。

同学们从力学课程转到混凝土结构课程的学习,开始会感到“内容多、概念多、公式多、符号多、构造条文多”,部分同学还会出现概念不清、公式理解不透、计算步骤掌握不到位的情况。因此,本教材在叙述方法上,由浅入深,循序渐进,力求对基本概念论述清楚,使读者能够较容易地掌握结构构件的力学性能及理论分析方法;突出应用,有明确的计算方法和实用设计步骤。教材中有一定数量的计算例题,有利于理解和掌握设计原理。为了便于自学,每章均有小结、思考题和习题等内容。

本书由长期担任“混凝土结构设计原理”课程教学工作的教师共同编写。参加编写的人员有:北京交通大学杨维国(第1、2、3、7章)、贾英杰(第4、5、8章),袁泉(第6、9、10章)。全书由杨维国任主编,贾英杰、袁泉任副主编。

鉴于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者
2012年7月

目 录

第 1 章 绪论.....	1	4.5 单筋矩形截面正截面受弯承载力计算.....	63
1.1 混凝土结构的一般概念	1	4.6 双筋矩形截面正截面受弯承载力计算.....	68
1.2 钢筋和混凝土共同工作的可能性与有效性	2	4.7 T 形截面受弯构件的正截面受弯承载力计算.....	73
1.3 钢筋混凝土结构的特点	3	小结	78
1.4 钢筋混凝土结构的发展与应用 ...	4	思考题	79
1.5 本课程的主要内容及特点	8	习题	79
小结	10	第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算	81
思考题	10	5.1 概述.....	81
第 2 章 材料的物理和力学性能	11	5.2 无腹筋梁斜截面受剪的破坏形态.....	83
2.1 混凝土.....	11	5.3 无腹筋梁斜截面受剪承载力影响因素及计算公式.....	86
2.2 钢筋.....	23	5.4 有腹筋梁的受剪性能.....	88
2.3 钢筋与混凝土的粘结.....	29	5.5 梁斜截面受弯承载力.....	97
小结	31	5.6 梁、板内钢筋的其他构造要求	100
思考题	32	5.7 连续梁受剪性能及其承载力计算	106
习题	33	小结.....	107
第 3 章 混凝土结构设计的基本原则 ...	34	思考题.....	108
3.1 结构的功能要求和极限状态.....	34	习题.....	108
3.2 结构的可靠度和极限状态方程.....	36	第 6 章 受压构件的截面承载力.....	109
3.3 极限状态设计表达式.....	40	6.1 受压构件的一般构造要求	110
小结	47	6.2 轴心受压构件的正截面承载力计算	112
思考题	48	6.3 偏心受压构件的正截面受压破坏形态	118
习题	48		
第 4 章 受弯构件正截面承载力计算 ...	50		
4.1 概述.....	50		
4.2 梁板结构的一般构造.....	51		
4.3 梁正截面受弯承载力的试验研究.....	55		
4.4 正截面承载力计算的基本假定及应用.....	59		

6.4	偏心受压中长柱的二阶弯矩	121
6.5	矩形截面偏心受压构件正截面承载力的基本计算公式	125
6.6	矩形截面不对称配筋偏心受压构件的计算方法	129
6.7	矩形截面对称配筋偏心受压构件的计算方法	136
6.8	正截面承载力 $N_u - M_u$ 的相关曲线及其应用	139
6.9	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	141
	小结	143
	思考题	143
	习题	143
第7章	受拉构件承载力计算	145
7.1	轴心受拉构件正截面承载力计算	145
7.2	偏心受拉构件正截面承载力计算	146
	小结	149
	思考题	149
	习题	150
第8章	受扭构件承载力计算	151
8.1	概述	151
8.2	纯扭构件的试验研究	152
8.3	纯扭构件承载力的计算	153
8.4	弯剪扭构件承载力的计算	156
8.5	构造要求	160
	小结	165
	思考题	165
	习题	166

第9章	钢筋混凝土构件的变形和裂缝	167
9.1	概述	167
9.2	裂缝验算	167
9.3	变形验算	175
	小结	181
	思考题	182
	习题	182
第10章	预应力混凝土构件	183
10.1	概述	183
10.2	预应力混凝土构件的一般规定	189
10.3	预应力混凝土轴心受拉构件各阶段的应力分析	195
10.4	预应力混凝土受弯构件的计算	207
10.5	预应力混凝土构件的构造要求	217
	小结	220
	思考题	221
	习题	221
	混凝土结构期末试题(一)	223
	混凝土结构期末试题(二)	225
附录A	术语及符号	228
附录B	《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的材料力学指标	232
附录C	钢筋的计算截面面积、公称质量、轴心受压构件的稳定系数及相关计算表格	236
附录D	《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的有关规定	239
	参考文献	242

第1章

绪论

【本章内容概要】

本章叙述了混凝土结构的基本概念及分类，混凝土中钢筋和混凝土共同工作的原理，以及混凝土结构的优缺点。介绍了混凝土结构在国内外的的发展、应用情况及本课程的特点和学习方法。

【本章学习重点与难点】

1. 深刻理解、掌握钢筋和混凝土的共同工作条件。
2. 充分认识钢筋混凝土结构的优缺点。
3. 理解本课程的学习方法。

1.1 混凝土结构的一般概念

由水泥等胶凝材料、砂子和石子等粗细骨料、水和其他掺和料及外加剂，按适当比例配制，拌和并硬化而成的具有一定强度和耐久性的人造石材，称为混凝土，也常被称为“砼”。而混凝土结构则是以混凝土为主要材料，并根据需要配置钢筋、预应力筋、型钢等，组成承力构件的结构，如素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢管或钢骨混凝土结构和纤维混凝土结构等。

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，常用于路面、基础等和一些非承重结构；钢筋混凝土结构是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；预应力混凝土结构是由配置受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法建立预应力的混凝土结构；纤维混凝土结构是在钢筋混凝土中加入钢纤维、碳纤维筋等形成的混凝土结构。

钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构常用做土木工程中的主要承重结构，广泛应用于建筑、桥梁、隧道、矿井以及水力、港口等工程。

钢筋和混凝土都是现代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，但混凝土的抗压强度较高而抗拉强度却很低。为充分发挥两种材料各自的性能优势，把钢筋和混凝土按照合理的组合方式有机地结合起来，共同工作，使钢筋主要承受拉力，混凝土主要承受压力，以满足工程结构的使用要求。

对于图 1-1 所示的混凝土简支梁，在外力作用下会产生弯曲变形，梁上部材料受压，下部材料受拉。当此梁由素混凝土制成时，由于混凝土抗拉强度很低，当荷载作用值还很小

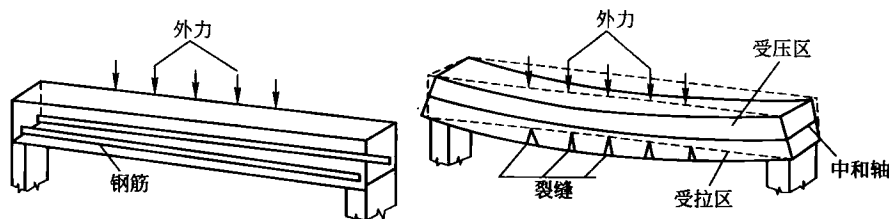


图 1-1 混凝土简支梁受力分析

时, 梁下部受拉区边缘的混凝土就会出现裂缝, 而受拉区混凝土一旦开裂, 在荷载的持续作用下, 裂缝迅速向上发展, 梁在瞬间骤然脆裂断开, 而梁上部混凝土的抗压能力还未能充分利用。素混凝土梁的承载力很低, 变形发展不充分, 属脆性破坏。当在梁受拉区配置适量的钢筋, 形成钢筋混凝土梁时, 在荷载作用下, 梁的受拉区混凝土仍会开裂, 但由于钢筋的存在, 可以代替受拉区混凝土承受拉力, 裂缝不会迅速发展, 受压区的压应力仍由混凝土承受, 而梁可以承受继续增大的荷载, 直到钢筋的应力达到其屈服强度。随后荷载仍略有增加, 致使受压区混凝土被压碎, 混凝土抗压强度得到了充分利用。此时梁达到极限承载力, 挠度变形明显, 发展充分, 属延性破坏。可见, 在受拉区配置钢筋明显地提高了梁在受拉区的抗拉能力, 从而使钢筋混凝土梁的承载力比素混凝土梁有很大的提高。在钢筋混凝土梁中, 混凝土的抗压能力和钢筋的抗拉能力都得到了充分利用, 而且在梁破坏前, 其裂缝充分发展, 变形明显增大, 有明显的破坏预兆, 结构的受力特性得到显著改善。

承受压力的构件——柱 (如图 1-2 所示), 通常也配置钢筋, 并协助混凝土承受压力, 以达到减小柱截面尺寸、改善柱的受力性能、提高柱承载能力和增加柱延性的目的。

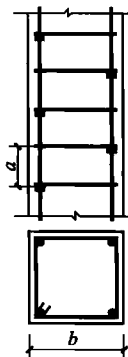


图 1-2 柱配筋构造

1.2 钢筋和混凝土共同工作的可能性与有效性

钢筋和混凝土这两种物理和力学性能不同的材料, 之所以能够有效地结合在一起共同工作, 主要是基于下述 3 个条件。

1) 钢筋和混凝土之间良好的粘结力

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, 构件中的钢筋与混凝土变形协调, 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) 接近的温度线膨胀系数

钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近, 钢材为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, 混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, 因此当温度变化时, 两种材料不会因产生过大的变形差而使粘结力遭到破坏。

3) 混凝土对钢筋的保护作用

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,

且使其受压时不易失稳,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,一定厚度的混凝土保护层是保证二者共同工作的必要措施。

1.3 钢筋混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构之所以有广泛的应用,是因为它有诸多的优点。其主要优点有以下几个方面。

1) 取材较方便

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

2) 承载力高

和砌体结构、木结构相比,钢筋混凝土结构的承载力高,在一定条件下,可以用来代替钢结构,达到节约钢材、降低造价的目的。

3) 耐久性佳

混凝土结构中,由于钢筋受到混凝土的保护不易锈蚀,所以混凝土结构的耐久性得到了提高。处于正常环境下的混凝土耐久性较好,高强混凝土的耐久性更好。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,也可满足工程需要。

4) 整体性强

现浇或装配整体式混凝土结构具有良好的整体性,所以结构的刚度及稳定性均较好,不仅有利于抗震,而且有利于抵抗振动和爆炸冲击波。

5) 耐火性优

混凝土为不良热导体,埋置在混凝土中的钢筋受高温影响远较暴露在外的钢结构小。只要钢筋表面的混凝土保护层具有一定厚度,在发生火灾时钢筋就不会很快软化,即可避免结构倒塌。

6) 可模性好

新拌合的混凝土可塑性很强,因此可根据需要制成不同尺寸和任意形状的结构,有利于建筑造型。

7) 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,与钢结构相比可节约钢材、降低工程造价。

8) 保养维护费用低

与钢、木结构相比,钢筋混凝土结构很少需要维修,能有效降低维护成本。

钢筋混凝土结构同时也存在着不少缺点,主要表现在以下几个方面。

1) 自重大

钢筋混凝土结构自重较大,能承担的有效荷载相对较小,在大跨度结构、高层建筑结构中的应用十分不利。另外,自重大会使结构地震作用加大,不利于结构抗震。

2) 抗裂性差

钢筋混凝土结构在正常使用情况下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适用性。

3) 需用大量模板

混凝土结构的制作需要模板予以成型。如采用木模板,则可重复使用的次数较少,从而增加工程造价。

4) 施工受季节性影响

混凝土结构施工工序复杂,周期较长,且受季节气候影响大。

随着科学技术的不断发展,混凝土结构的缺点正在被逐渐克服。例如,采用轻质、高强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,可以降低工程造价;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。

1.4 钢筋混凝土结构的发展与应用

1.4.1 钢筋混凝土结构的发展概况

钢筋混凝土结构与砖石砌体结构、钢结构和木结构相比,历史并不长,出现至今约有160年,但发展很快,可大致分为4个阶段。

第一阶段(1850—1920)。1824年英国人阿斯普汀(J. Asptin)发明了硅酸盐水泥,1856年转炉炼钢成功,为钢筋混凝土的发明提供了充分而坚实的物质基础。当时,钢筋和混凝土的强度较低,计算理论采用弹性理论,设计方法采用容许应力法。所以,混凝土结构在建筑工程中的应用发展较慢,直到1903年才在美国辛辛那提建造了世界上第一栋混凝土结构的高层建筑——16层的英格尔夫大楼(Ingalls Building)。而且,在第一次世界大战前,混凝土结构只是在多层房屋的基础和楼盖中得到了应用。

第二阶段(1920—1950)。这一阶段混凝土和钢筋的强度均有所提高,1928年法国工程师弗雷西内(Freyssinet)成功研制了预应力混凝土,为钢筋混凝土结构向大跨度发展提供了保障,并且装配式钢筋混凝土和薄壁空间混凝土结构也有了很大的发展。1930年以后,混凝土结构的试验研究开始进行,在计算理论上已开始考虑材料的塑性,按破损阶段计算结构的破坏承载力。

第三阶段(1950—1980)。第二次世界大战后,随着高强混凝土和高强钢筋的出现,预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构、泵送商品混凝土以及各种新的施工技术等广泛地应用于各类土木工程,在计算理论上已过渡到充分考虑混凝土和钢筋塑性的极限状态设计理论,在设计方法上已发展到以概率为基础的多系数表达的设计公式。

第四阶段(从1980年起至今的30多年来)。混凝土结构出现了前所未有的发展与应用,如超高层建筑、大跨度桥梁、跨海隧道和高耸结构等。振动台试验、拟动力试验和风洞试验较普遍的开展,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,并且结构构件的设计也采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法。同时,由于非线性有限元分析方法的广泛应用,也推动了混凝土强度理论和本构关系的深入研究,并形成了“近代钢筋混凝土力学”这一分支学科。

混凝土结构在材料应用、结构体系和计算理论 3 个方面的发展都具有明显的特征。

1. 材料应用

1) 混凝土

目前,常用的普通混凝土尚存在强度和耐久性不高、工作性能欠佳、抗裂性较差、脆性较大、抗渗能力和抗蚀能力较弱、水化热偏高、易产生裂缝等不足。针对这些缺点,混凝土的性能研究出现了许多重大变革。如采用聚合物混凝土,以改善其脆性、提高其抗渗能力和抗蚀能力;发明浸渍混凝土,以提高混凝土的耐久性和抗蚀性;用玻璃纤维增强水泥等,以改善混凝土的抗裂性、耐磨性及延性。其他以水泥为基材的各种混凝土,如轻质混凝土、加气混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土、浸渍混凝土、纤维混凝土以及根据性能要求发展的高强混凝土、高流动性混凝土、耐热混凝土、耐火混凝土、膨胀混凝土等,则突出了复合化的性能。20 世纪 80 年代末到 90 年代初出现的高性能混凝土 (High Performance Concrete, HPC),对混凝土的耐久性、工作性、强度、适用性、体积稳定性等均有很好的保证。其他如绿色高性能混凝土 (Green HPC) 和超高性能混凝土 (Ultra HPC),前者用以工业废渣为主的细掺料代替大量水泥熟料,以更有效地减少环境污染;后者如活性粉末混凝土和纤维增强混凝土,其特点是高强度、高密实性、或以大量纤维增强来克服混凝土材料的脆性。按施工方法不同配制的混凝土,如碾压混凝土、泵送混凝土和流态混凝土,应用比较广泛;水下混凝土、压浆混凝土和喷射混凝土等也得到了应用。现在,我国常用混凝土强度可达到 C50~C60,特殊工程可用 C80~C100;而美国常用混凝土强度已达到 C80~C135,特殊工程中用到的活性粉末混凝土,强度等级可达到 400 MPa。

2) 钢材

钢材的发展以提高其屈服点和综合性能 (包括防锈和防火) 为主。通过不同的制作工艺、冷热处理方式、合金元素的添加等,可大幅提高钢筋的屈服强度。同时对其塑性、冷弯性、粘结力、抗高温、可焊性、抗冲击和抗爆性等方面也都可加以改善,以有效地提高钢材的使用效率。此外,在预应力混凝土构件中采用的高强钢筋也有较大的发展,如调质钢筋屈服强度/抗拉强度可达 1 350/1 500~1 450/1 600 MPa,用高频感应炉热处理预应力钢筋,屈服强度/抗拉强度可达 800/950~1 350/1 450 MPa。预计未来混凝土采用的钢筋强度可能会超过 13 500 MPa。我国在工程结构的钢材应用研究方面正向着高强度、高延性、低松弛和耐腐蚀的方向发展。

3) 其他化学合成材料

化学合成材料用于抗力结构是材料发展的崭新领域。20 世纪以来,聚合物纤维 (聚丙烯、尼龙、聚酯和聚乙烯等) 类复合化材料在混凝土中的掺加,形成纤维加强混凝土,可大幅提高混凝土的韧性、抗冲击性能、抗热爆性能等与韧性有关的物理性能;而高弹模纤维 (钢纤维、玻璃纤维、碳纤维等) 的掺加,不仅能提高上述性能,而且还能使混凝土的抗拉强度和刚性有较大的提高。在实际应用中,还可采用树脂将纤维粘结成束形成纤维筋替代钢筋,以利用其抗腐蚀、高强度、抗疲劳性、弹性大变形、高电阻及低磁导性等特点。

新研制的自修复混凝土,是在混凝土中掺入灌以树脂的纤维,当结构构件出现超过允许宽度的裂缝时,混凝土内的微细纤维管孔破裂,树脂自动流出封闭裂缝。再如,将结构的梁和柱之间用聚合物作为缓冲材料连接,它在一般荷载作用下是刚性连接,而在振动作用较大时则变成柔性连接,起到吸收和缓冲地震或风力带来的加速度作用。化学合成材料还可用于

建筑的外围部件,如用之代替钢、木等传统材料;或用于改善建筑制品的性能,包括保温、隔热、隔声、耐高温、耐高压、耐磨、耐火等新的需求。

2. 结构体系

用两种或两种以上材料组合,利用各自的优越性开发出高性能的便于使用的结构产品,将成为 21 世纪土木工程的一个重要特征。目前,钢与混凝土组合结构是采用钢构件和混凝土构件或钢与混凝土组合构件共同组成的承重结构体系或抗侧力结构体系。这种组合可使钢和混凝土两种材料取长补短,得到良好的技术经济效果。钢与混凝土组合构件有组合板、组合梁、组合柱等,其中钢管混凝土柱的应用已有 80 多年的历史。在组合结构中,组合剪力墙体系、组合框架体系、组合筒体系、组合巨型框架体系等,目前已得到广泛的应用。

钢与混凝土组合结构除具有钢筋混凝土结构的优点外,还有抗震性能好、施工方便、能充分发挥材料的性能等优点,因而得到了广泛应用。各种结构体系,如框架、框架-剪力墙、剪力墙、框架-核心筒等结构体系中梁、柱、墙均可采用组合结构。

3. 计算理论

近年来,钢筋混凝土结构的基本理论和设计方法研究正在不断发展与完善中。目前,考虑混凝土非线性变形的计算理论已有很大进展,在连续板、梁及框架结构的设计中考虑塑性内力重分布的分析方法已得到较为广泛的应用。随着对混凝土强度和变形理论的深入研究,现代化测试技术的发展及有限元分析方法的应用,对混凝土结构,尤其是体形复杂或受力状况特殊的二维、三维结构已能进行非线性的全过程分析。并开始从个别构件的计算过渡到考虑结构整体空间工作、结构与地基相互作用的分析方法,使混凝土结构的计算理论和设计方法日趋完善,并向着更高的阶段发展。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(以下简称《混凝土规范》)将混凝土强度等级提高到了 C80,混凝土结构中的非预应力钢筋以 HRB400 级作为主导钢筋,并适当调整了材料设计强度的取值,以提高结构的安全度;增加了混凝土结构内力及应力分析的基本方法。为适应复杂结构分析的需要,增加了混凝土及钢筋本构关系及破坏准则的有关内容。《混凝土规范》还对结构构件承载力计算方法、各类构件的构造措施等进行修订、补充和完善。此外,《混凝土规范》还明确了工程设计人员必须遵守的强制性条文。本书除了介绍混凝土结构设计的基本原理外,在设计方法上将主要讲述《混凝土规范》的内容。

1.4.2 混凝土结构在实际工程中的应用

混凝土结构除在一般工业与民用建筑中得到了极为广泛的应用外,令人瞩目的是它在高层及超高层建筑、大跨桥梁和高耸结构中的应用和发展。

1. 高层及超高层结构

目前世界上已建成的最高的钢筋混凝土超高层建筑是马来西亚吉隆坡的石油双塔大厦。它由两个并排的圆形建筑组成,地上 88 层,高 390 m,连同桅杆总高 450 m,底层至 84 层均为钢筋混凝土及钢骨混凝土结构。我国已建成的上海金茂大厦,为钢与混凝土组合结构,其中部分柱配置了钢骨,88 层,高度为 420.5 m;其结构体系是一个用外伸桁架与外侧 8 个巨型组合柱连接的混凝土核心筒,截面为 $1.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}\sim 1\text{ m}\times 4.9\text{ m}$ 。

2. 大跨空间结构

法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅的钢筋混凝土薄壳结构是当前世界上跨度最大的公共建筑。它的平面呈三角形,边长 219 m,壳顶离地面 46 m,是双层波形拱壳。悉尼歌剧院位于澳大利亚悉尼港,建造在伸入海中的一块狭小地段上,由 3 组、10 对壳片组成,以环境优美和建筑造型独特而闻名于世。该建筑为钢筋混凝土结构,其外部造型已完全无墙、柱的概念,它的外部造型与内部功能无直接联系,内部形状由吊在钢筋混凝土壳上的钢桁架决定。

3. 桥梁结构

桥梁工程中的中小跨度桥梁大部分采用混凝土结构建造,大跨度桥梁也有相当多的是采用混凝土结构建造的。如 1991 年建成的挪威预应力斜拉桥 (Skarnsundent),跨度达 530 m;重庆长江二桥为预应力混凝土斜拉桥,跨度达 444 m;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,为目前世界上单拱跨度最大的桥梁;贵州江界河 330 m 的桁架式组合拱桥和 312 m 的广西邕宁江中承式拱桥等均为混凝土桥。

预应力混凝土箱形截面斜拉桥或钢与混凝土组合梁斜拉桥是当前大跨桥梁的主要结构形式之一。我国在 1993 年 10 月建成通车的上海杨浦大桥,主跨 602 m,是当今世界最大跨径的钢与混凝土结合梁斜拉桥,桥全长 1 172 m。

4. 隧道及地下结构

隧道及地下工程多采用混凝土结构建造。我国自 1949 年以来修建了约 2 500 km 长的铁路隧道,其中成昆铁路线中有隧道 427 座,总长 341 km,占全线路长度的 31%;修建的公路隧道约 400 条,总长约 80 km。我国除北京、上海、天津、广州已有地铁在运营外,已有十余个大城市正在建造及筹划之中。另外,许多城市均采用混凝土结构建造了地下商业街、地下停车场、地下仓库和地下旅店等,而海底隧道和过江隧道的修建也均采用混凝土结构。

5. 水利工程结构

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克桑斯坝,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;三峡水利枢纽中水电站主坝高 190 m,设计装机容量 $1\,820 \times 10^4$ kW,该枢纽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。

6. 特种结构

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是采用混凝土结构建造的。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为预应力混凝土结构,塔高 553.3 m;上海东方明珠电视塔由 3 个钢筋混凝土筒体组成,高 456 m,居世界第三位;瑞