

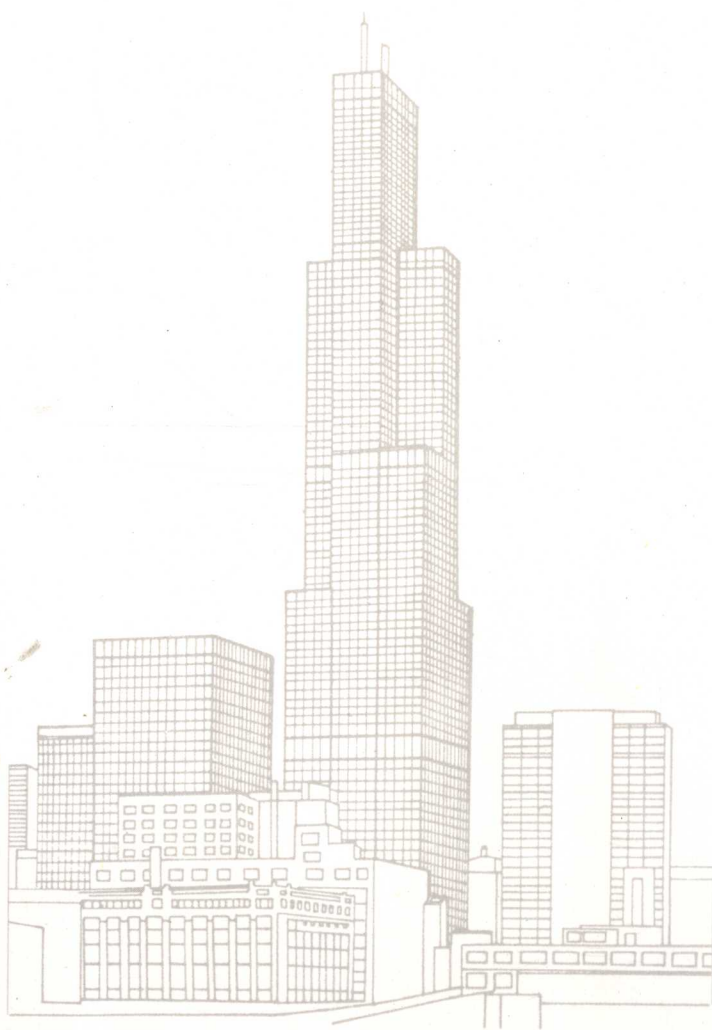
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

混凝土结构（上）

（第2版）

H N T J G

吴培明 主编



WUTP

武汉理工大学出版社

普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

混凝土结构

(上册)

(第2版)

主 编 吴培明
副主编 刘立新



武汉理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构(上册)(第2版)/吴培明主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2008.5 重印

ISBN 978-7-5629-1932-2

I. 混…

II. 吴…

III. 混凝土-结构-高等学校-教材

IV. TU37

【主编简介】

吴培明 西南交通大学教授。美国麦迪逊威斯康辛大学博士,主攻结构工程。曾于清华大学土木系从事博士后研究。现任职西南交通大学建筑工程系主任。学术兼职为四川省土木建筑学会理事。多年从事高等学校土木工程专业教学和科研工作,曾先后主讲“混凝土基本构件”、“混凝土结构设计”以及“钢筋混凝土基本理论”等课程,出版的教材曾获得部级奖励。主要研究方向为“土建结构优化设计”及“土建结构计算机辅助设计”。现已完成科研项目多项,公开发表学术论文多篇,结合研究方向完成建筑工程结构设计项目10余项,培养研究生数十名。

E-mail:pmwu@swjtu.edu.cn

刘立新 郑州大学教授,博士生导师。1997年被国务院批准为享受政府特殊津贴专家,1998年被评为全国优秀教师。长期从事土木工程专业教学和科研工作,主要研究方向为混凝土结构、砌体结构基本理论及工程应用。曾荣获省级教学成果特等奖1项,部省级科技进步二等奖3项、三等奖4项,出版学术专著、教材8本,在国内外学术刊物发表论文40多篇。主要社会兼职为全国混凝土结构标准技术委员会委员、全国砌体结构标准技术委员会委员等。

E-mail:liu lixin@371.net

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路122号 邮编:430070)

印刷者:通山县九宫印务有限公司

发行者:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:13.75

字 数:450千字

版 次:2004年5月第2版

印 次:2008年5月第15次印刷

印 数:93 001—98 000册

定 价:25.00元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

编 审 委 员 会

顾 问:成文山 滕智明 罗福午 魏明钟 李少甫 甘绍熹

施楚贤 白绍良 彭少民 范令惠

主 任:江见鲸 吕西林 高鸣涵

副主任:朱宏亮 李永盛 辛克贵 袁海庆 吴培明 李世蓉

刘立新 赵明华 孙成林

委 员:(按姓氏笔画顺序排列)

于书翰	丰定国	毛鹤琴	王天稳	王社良	邓铁军
白晓红	包世华	田道全	叶献国	江见鲸	吕西林
刘立新	刘长滨	刘永坚	刘伟庆	朱宏亮	朱彦鹏
孙家齐	孙成林	过静君	闵小莹	李永盛	李世蓉
李必瑜	李启令	吴培明	吴炎海	吴炜煜	辛克贵
何铭新	汤康民	陈志源	汪梦甫	张立人	张子新
张建平	邵旭东	罗福午	周 云	赵明华	赵均海
尚守平	杨 平	柳炳康	姚甫昌	胡敏良	俞 晓
桂国庆	顾敏煜	徐茂波	袁海庆	徐 伟	徐礼华
高鸣涵	蒋沧如	彭少民	覃仁辉	雷俊卿	蔡德明
廖 莎	燕柳斌	戴国欣	魏明钟		

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

出版说明

(第2版)

1998年教育部颁布了高等学校本科专业的专业目录后,1999年全国的高等学校都开始按照新专业目录招生。为解决土木工程专业教材缺乏的燃眉之急,武汉理工大学出版社(原武汉工业大学出版社)于2000年年初率先组织编写了这套“普通高等学校土木工程专业新编系列教材”。经中国土木工程学会教育工作委员会审订并向全国高校推荐,三年来,本套教材已为众多院校选用,并受到了普遍欢迎。其中多种教材荣获教育部全国高等学校优秀教材奖或优秀畅销书奖。截至2002年年底,系列教材中单本销量最高的已接近7万册。这充分说明了系列教材编审委员会关于教材的定位、特色和编写宗旨符合新专业的教学要求,满足了新专业的教学急需。

正如初版的出版说明中所说,本套教材是新专业目录颁布实施后的第一套土木工程专业系列教材,因此,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。首先是教材中涉及的各种国家规范问题。教材编写时正值各种规范全面修订,尚未定稿,新规范正式颁布的时间还不能确定,而专业教学对新教材需求的急迫又使编写、出版工作不能等待,因此系列教材中很多涉及到规范的地方只能按照当时基本定稿的新规范内容进行讲解或说明。当各种新的国家规范陆续正式颁布后,本套教材中相关的部分就已按照新规范及时编写了修订稿,准备作为第2版出版。其次,2002年10月,高等学校土木工程专业指导委员会编制的本科教育培养目标、培养方案及课程教学大纲正式公布,各门课程教材的修订有了更明确的方向。第三,初版教材在各院校使用过程中,师生们根据教学实践提出了很多中肯的意见,我们虽然在每本教材重印时进行了局部的修改,但仍感到存在一些问题,需要做较大的修订。因此,系列教材编审委员会决定全面修订、出版全套教材的第2版。根据土木工程专业的教学需求,本套系列教材还将增补13种,也与第2版教材同时推出。教材的编审委员会也相应地进行了增补和调整。

第2版教材的修订及增补教材的编写仍然秉承编审委员会一贯的宗旨,把教材的质量放在第一位,力求更好地满足课程教学的需要。我们更希望使用教材的师生一如既往,继续关心本套教材,及时反馈各校专业建设和教学改革的信息与要求,多提意见和建议,以便我们及时修订,不断完善和提高,把教材打造成名副其实的精品。

武汉理工大学出版社

2003.2

前 言

(第2版)

本书的第1版得到了读者的惠顾,现在第2版也与读者见面了。

这本书的内容和混凝土结构设计规范密切相关。第1版系根据《混凝土结构设计规范》(GB50010)的未定稿编写,存在着一些与以后定稿的正式规范不相符之处。现在该规范已正式颁布执行,本次修订工作即以国家正式颁布的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)的相关内容作为依据,对书中的部分内容作出相应的修改;对书中正文、插图、例题、附表中发现的一些错误和不妥之处一并作出订正;此外也对文字作了少量的增删。

在该书的修订工作中,刘立新教授作了大量细致的工作,促进了修订工作的顺利完成。

一本适合于教学工作使用的教材,往往要经过多次反复教学使用,发现其中存在的问题并进行修订才能逐步完善。对于本书中的错误或不妥之处,热忱欢迎读者批评指正。

借此,也向使用过这本书的老师和同学们致意!

编 者

2003年4月

前 言

(第 1 版)

为适应我国高等学校本科土木工程专业教育的发展和变化,根据全国普通高校土木工程专业教学指导委员会制定的大纲,编写了《混凝土结构》(上册)教材。书中与规范有关的内容参照了即将颁布的国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010)。

本教材的内容共分为 10 章,主要内容包括钢筋混凝土材料的力学性能,基于概率理论的极限状态设计原理,普通钢筋混凝土受弯、受扭、受压、受拉构件的正截面、斜截面承载力计算,受拉、受弯构件的裂缝宽度计算,受弯构件的刚度、变形计算;以及预应力混凝土构件的基本概念、计算原理和预应力混凝土轴心受拉、受弯构件的承载力计算和裂缝计算等。章节中包括了典型的例题,而且各章均有提要、小结、思考题和习题,以便于作为教材使用。

尽管本书是作为高等学校土木工程专业的教科书编写的,但也完全可供土木行业中的工程技术人员参考使用。

本书由吴培明教授任主编,刘立新教授任副主编。书中的第 1、5、8 章由刘立新编写,第 2、7、10 章由吴培明编写,第 3、4、9 章由徐茂波编写,第 6 章由何培玲编写。

由于编者水平有限,且由于接触新规范时间较短,在对规范的深入理解和使用经验等方面多有欠缺,书中不免有不足之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2001 年 8 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 混凝土结构的一般概念	(1)
1.2 混凝土结构的发展简况及其工程应用	(2)
1.2.1 混凝土结构发展的几个阶段	(2)
1.2.2 混凝土结构的工程应用	(2)
1.2.3 混凝土结构发展概况	(3)
1.2.4 混凝土结构计算理论的发展概况	(5)
1.3 本课程的特点与学习方法	(6)
本章小结	(6)
思考题与习题	(7)
2 钢筋混凝土材料的力学性能	(8)
2.1 钢筋的形式和品种	(8)
2.2 钢筋的力学性能	(9)
2.3 钢筋的冷加工和热处理	(10)
2.4 对钢筋质量的要求	(10)
2.5 钢筋的蠕变、松弛和疲劳	(11)
2.6 混凝土的强度等级	(12)
2.7 混凝土的强度	(12)
2.7.1 立方体抗压强度	(12)
2.7.2 混凝土的轴心抗压强度(棱柱体强度)	(12)
2.7.3 混凝土的轴心抗拉强度	(13)
2.7.4 复杂受力状态下混凝土的强度	(14)
2.8 荷载作用下混凝土的变形性能	(14)
2.8.1 混凝土的应力-应变关系	(14)
2.8.2 混凝土在多次重复荷载下的应力-应变关系	(15)
2.8.3 混凝土的弹性模量	(16)
2.9 混凝土的徐变和收缩	(17)
2.10 钢筋与混凝土间的粘结	(18)
2.11 钢筋混凝土的一般构造规定	(21)
2.11.1 混凝土保护层	(21)
2.11.2 钢筋的锚固	(21)
2.11.3 钢筋的连接	(21)
2.11.4 纵向钢筋的最小配筋率	(22)
本章小结	(22)
思考题和习题	(22)
3 混凝土结构基本设计原则	(24)
3.1 结构的功能要求	(24)
3.1.1 混凝土结构的组成与作用	(24)
3.1.2 结构上的作用、结构抗力	(23)
3.1.3 结构的功能要求	(25)

3.1.4	结构的可靠性与安全等级	(25)
3.2	结构极限状态	(26)
3.2.1	极限状态的概念	(26)
3.2.2	极限状态分类	(26)
3.2.3	结构极限状态方程	(27)
3.3	随机变量的统计特征	(27)
3.3.1	随机变量及其概率分布	(27)
3.3.2	结构主要荷载与抗力参数的分布	(27)
3.3.3	概率分布的特征值	(28)
3.4	概率极限状态设计法	(28)
3.4.1	结构可靠度	(28)
3.4.2	结构目标可靠指标	(29)
3.4.3	实用设计表达式	(30)
3.4.4	材料强度代表值	(32)
3.4.5	荷载组合	(33)
3.5	混凝土结构设计方法的演变	(33)
	本章小结	(34)
	思考题与习题	(35)
4	受弯构件正截面承载力计算	(36)
4.1	概述	(36)
4.2	试验研究分析	(36)
4.2.1	梁的受力性能	(36)
4.2.2	梁正截面工作的三个阶段	(37)
4.2.3	配筋率对正截面破坏性质的影响	(38)
4.3	受弯构件正截面承载力计算方法	(39)
4.3.1	基本假设	(39)
4.3.2	受力分析	(40)
4.3.3	等效矩形应力图形	(41)
4.3.4	界限相对受压区高度与最小配筋率	(41)
4.4	单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(42)
4.4.1	基本公式与适用条件	(42)
4.4.2	基本公式的应用	(44)
4.4.3	计算表格	(46)
4.5	双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(48)
4.5.1	受压钢筋的应力	(48)
4.5.2	基本计算公式与适用条件	(49)
4.5.3	基本公式的应用	(51)
4.6	T形截面受弯构件正截面承载力计算	(53)
4.6.1	概述	(53)
4.6.2	基本公式与适用条件	(54)
4.6.3	基本公式的应用	(57)
	本章小结	(60)
	思考题与习题	(60)
5	受弯构件斜截面承载力计算	(63)
5.1	概述	(63)

5.2	无腹筋梁斜截面的受力特点和破坏形态	(63)
5.2.1	无腹筋梁斜裂缝出现前的应力状态	(63)
5.2.2	无腹筋梁斜裂缝出现后的应力状态	(64)
5.2.3	无腹筋梁沿斜截面破坏的主要形态	(65)
5.3	有腹筋梁斜截面的受力特点和破坏形态	(66)
5.3.1	有腹筋梁斜裂缝出现前后的受力特点	(66)
5.3.2	有腹筋梁沿斜截面破坏的形态	(66)
5.4	影响斜截面受剪承载力的主要因素	(67)
5.4.1	剪跨比	(67)
5.4.2	混凝土强度	(68)
5.4.3	配箍率和箍筋强度	(68)
5.4.4	纵向钢筋的配筋率	(69)
5.5	受弯构件斜截面承载力计算公式	(69)
5.5.1	建立计算公式的原则	(69)
5.5.2	无腹筋梁受剪承载力计算公式	(69)
5.5.3	有腹筋梁受剪承载力计算公式	(70)
5.5.4	公式的适用范围	(72)
5.5.5	计算截面位置	(73)
5.6	连续梁斜截面承载力	(73)
5.7	T形截面梁斜截面承载力	(74)
5.8	受弯构件斜截面承载力的计算方法	(75)
5.8.1	截面设计	(75)
5.8.2	截面校核	(75)
5.9	纵向钢筋的弯起和截断	(80)
5.9.1	材料抵抗弯矩图	(80)
5.9.2	纵筋弯起的构造要求	(82)
5.9.3	纵向钢筋的截断和锚固	(83)
5.9.4	箍筋的构造要求	(84)
5.9.5	弯起钢筋的构造要求	(85)
5.10	桥梁斜截面承载力计算要点	(86)
5.10.1	桥梁斜截面受力特点	(86)
5.10.2	钢筋混凝土桥梁受剪承载力的计算	(86)
	本章小结	(89)
	思考题与习题	(90)
6	受压构件截面承载力计算	(92)
6.1	概述	(92)
6.2	受压构件的一般应用和基本构造要求	(92)
6.2.1	材料强度等级	(93)
6.2.2	截面形式和尺寸	(93)
6.2.3	纵向钢筋	(93)
6.2.4	箍筋	(93)
6.2.5	柱中钢筋的搭接	(94)
6.3	配有普通箍筋的轴心受压构件正截面承载力计算	(95)
6.3.1	轴心受压短柱的应力分布及破坏形态	(95)
6.3.2	轴心受压长柱的应力分布及破坏形态	(95)

6.3.3	正截面受压承载力计算	(98)
6.4	配有螺旋式(或焊环式)箍筋的轴心受压构件正截面承载力计算	(99)
6.4.1	箍筋的横向约束作用	(99)
6.4.2	正截面受压承载力计算	(99)
6.5	偏心受压构件正截面承载力计算的有关原理	(101)
6.5.1	偏心受压构件正截面的破坏形态和机理	(101)
6.5.2	偏心受压构件的纵向弯曲影响	(103)
6.5.3	偏心受压构件正截面承载力计算的基本假定	(106)
6.5.4	附加偏心距	(106)
6.5.5	两种破坏形态的界限	(106)
6.5.6	小偏心受压构件中远离纵向偏心力一侧的钢筋应力	(107)
6.6	不对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(107)
6.6.1	大偏心受压构件的截面计算	(107)
6.6.2	小偏心受压构件的截面计算	(109)
6.6.3	截面复核	(110)
6.6.4	大、小偏心的判别	(111)
6.7	对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(111)
6.7.1	大、小偏心受压构件的判别	(112)
6.7.2	截面计算与复核	(112)
6.8	I形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(116)
6.8.1	不对称配筋偏心受压构件	(116)
6.8.2	对称配筋偏心受压构件	(118)
6.9	偏心受压构件 $N-M$ 相关曲线	(119)
6.10	双向偏心受压构件正截面承载力计算	(121)
6.11	偏心受压构件斜截面承载力计算	(122)
	本章小结	(123)
	思考题与习题	(123)
7	受拉构件承载力计算	(126)
7.1	概述	(126)
7.2	轴心受拉构件正截面承载力计算	(127)
7.3	两种偏心受拉构件	(127)
7.4	小偏心受拉构件正截面承载力计算	(128)
7.5	大偏心受拉构件正截面承载力计算	(129)
7.6	偏心受拉构件斜截面承载力计算	(130)
	本章小结	(130)
	思考题与习题	(131)
8	受扭构件承载力计算	(132)
8.1	概述	(132)
8.2	构件的开裂扭矩	(133)
8.2.1	矩形截面构件的开裂扭矩	(133)
8.2.2	T形截面构件的开裂扭矩	(134)
8.3	纯扭构件的受扭承载力计算	(135)
8.3.1	抗扭配筋的形式	(135)
8.3.2	受扭构件的试验研究结果	(135)
8.3.3	矩形截面纯扭构件承载力计算	(136)

8.3.4	T形和I形截面纯扭构件承载力计算	(137)
8.4	弯剪扭构件承载力的计算	(137)
8.4.1	剪扭构件承载力的计算	(137)
8.4.2	在弯、剪、扭共同作用下承载力的计算	(139)
8.4.3	计算公式的适用范围和构造要求	(139)
	本章小结	(144)
	思考题与习题	(144)
9	钢筋混凝土构件的变形与裂缝验算	(146)
9.1	概述	(146)
9.2	裂缝验算	(146)
9.2.1	裂缝控制的目的与要求	(146)
9.2.2	裂缝的出现与分布规律	(147)
9.2.3	平均裂缝间距	(148)
9.2.4	平均裂缝宽度	(149)
9.2.5	最大裂缝宽度与裂缝宽度验算	(151)
9.3	变形验算	(153)
9.3.1	变形控制的目的和要求	(153)
9.3.2	截面抗弯刚度的主要特点	(153)
9.3.3	短期刚度计算公式的建立	(154)
9.3.4	长期刚度	(155)
9.3.5	受弯构件的变形验算	(156)
	本章小结	(157)
	思考题与习题	(157)
10	预应力混凝土构件	(159)
10.1	概述	(159)
10.2	施加预应力的方法	(161)
10.3	预应力混凝土使用的材料和机具	(163)
10.4	张拉控制应力	(165)
10.5	预应力损失	(165)
10.5.1	张拉端锚具变形和钢筋松动引起的预应力损失 σ_{l1}	(165)
10.5.2	预应力钢筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失 σ_{l2}	(167)
10.5.3	混凝土加热养护时受张拉的钢筋与承受拉力设备之间的温度差引起的预应力损失 σ_{l3}	(167)
10.5.4	钢筋松弛引起的预应力损失 σ_{l4}	(168)
10.5.5	混凝土收缩、徐变引起的预应力损失 σ_{l5}	(168)
10.5.6	环形构件采用螺旋预应力筋时局部挤压引起的预应力损失 σ_{l6}	(169)
10.5.7	预应力损失的组合	(169)
10.6	预应力轴心受拉构件各阶段的应力分析	(170)
10.6.1	先张法预应力混凝土轴心拉杆各阶段应力状态	(170)
10.6.2	后张法预应力轴心拉杆各阶段应力状态	(172)
10.7	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(174)
10.7.1	使用阶段强度计算	(174)
10.7.2	使用阶段裂缝验算	(174)
10.7.3	施工阶段验算	(175)
10.8	受弯构件各阶段的应力分析	(176)

10.8.1	先张法构件各阶段应力分析	(176)
10.8.2	后张法预应力受弯构件各阶段应力分析	(177)
10.9	预应力混凝土受弯构件计算	(179)
10.9.1	使用阶段正截面承载力计算	(179)
10.9.2	斜截面抗剪强度计算	(180)
10.9.3	使用阶段正截面裂缝验算	(180)
10.9.4	使用阶段斜截面裂缝验算	(181)
10.9.5	使用阶段的变形验算	(181)
10.9.6	施工阶段验算	(182)
10.10	预应力的传递长度和锚固区的局部承压	(183)
10.11	预应力混凝土构件的构造要求	(185)
10.12	部分预应力混凝土的基本原理	(187)
10.13	无粘结预应力混凝土的基本原理	(189)
10.14	预应力混凝土构件计算实例	(191)
	本章小结	(200)
	思考题与习题	(200)
附表		(202)
附表 1	混凝土强度标准值	(202)
附表 2	混凝土强度设计值	(202)
附表 3	混凝土弹性模量 E_c	(202)
附表 4	普通钢筋强度标准值	(202)
附表 5	普通钢筋强度设计值	(202)
附表 6	预应力钢筋强度标准值	(202)
附表 7	预应力钢筋强度设计值	(203)
附表 8	钢筋弹性模量	(203)
附表 9	钢筋混凝土结构中钢筋疲劳强度设计值	(203)
附表 10	混凝土保护层最小厚度	(203)
附表 11	受拉钢筋搭接接头面积百分率系数 ζ_{ψ}	(204)
附表 12	锚固钢筋的外形系数 α	(204)
附表 13	厚度修正系数	(204)
附表 14	受拉钢筋的最小锚固长度	(204)
附表 15	受弯构件的允许挠度	(204)
附表 16	结构构件的裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值	(204)
附表 17	钢筋混凝土矩形截面受弯构件正截面受承载力计算系数表	(205)
附表 18	钢筋的计算截面面积及公称质量表	(206)
附表 19	钢筋混凝土板每米宽的钢筋面积表	(206)
	参考文献	(207)

1 绪 论

本章提要

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。本章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的概况。

1.1 混凝土结构的一般概念

混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和各种其他形式的加筋混凝土结构。素混凝土结构常用于路面和一些非承重结构,预应力混凝土结构是在结构或构件中配置了预应力钢筋并施加预应力的结构;在多数情况下,混凝土结构是由钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土结构。

钢筋和混凝土都是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,但价格也相对较高;混凝土的抗压强度较高而抗拉强度却很弱。为了充分发挥材料的性能,把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起共同工作,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,就组成了钢筋混凝土。

图 1.1a 为一用素混凝土制成的简支梁,由试验可知,由于混凝土抗拉强度很低,在不大的荷载作用下,梁下部受拉区边缘的混凝土即出现裂缝,而受拉区混凝土一旦开裂,裂缝迅速发展,梁瞬时断裂而破坏。此时受压区混凝土的抗压强度还远远没有充分利用,梁的承载力很低。如果在梁的底部受拉区配置抗拉强度较高的钢筋(图 1.1b),形成钢筋混凝土梁,当荷载增加到一定值时,梁的受拉区仍会开裂,但钢筋可以代替混凝土承受拉力,裂缝不会迅速发展,梁的承载力还会继续提高。如果配筋适当,梁可以在较大的荷载作用下才被破坏,破坏时钢筋的应力可以达到屈服强度,受压区混凝土的抗压强度也能得到充分利用。而且在破坏前,裂缝充分发展,梁的变形迅速增大,有明显的破坏预兆。因此,在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后,可以使构件的承载力得到很大提高,构件的受力性能也得到显著改善。

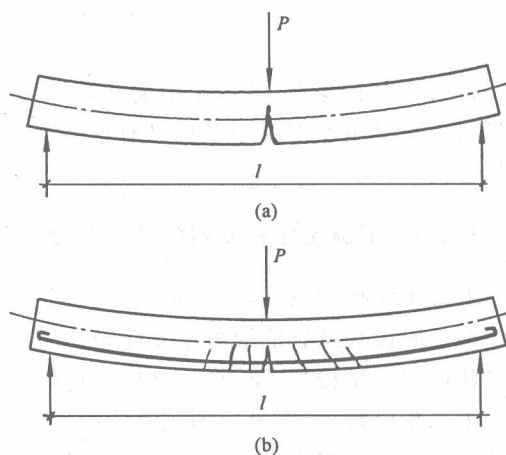


图 1.1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的破坏情况
(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土是两种物理力学性能很不相同的材料,它们能够有效地结合在一起共同工作的主要原因是:

(1) 混凝土硬化后,钢筋和混凝土之间存在粘结力,使两者之间能传递力和变形。粘结力是使这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数接近,钢筋为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,所以当温度变化时,钢筋和混凝土的粘结力不会因两者之间过大的相对变形而破坏。

以钢筋混凝土为主要承重骨架的土木工程构筑物,就称为钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构是由一系

列受力类型不同的构件所组成,这些构件称为基本构件。钢筋混凝土基本构件按其主要受力特点的不同可以分为:

- (1) 受弯构件,如各种单独的梁、板以及由梁组成整体的楼盖、屋盖等。
- (2) 受压构件,如柱、剪力墙和屋架的压杆等。
- (3) 受拉构件,如屋架的拉杆、水池的池壁等。
- (4) 受扭构件,如带有悬挑雨篷的过梁、框架的边梁等。

也有不少构件受力情况较复杂,如压弯构件、拉弯构件、弯扭构件、拉弯扭构件等。

钢筋混凝土结构在土木工程结构中有广泛的应用,这是因为它有很多优点,其主要优点有:

(1) 强度高。和砌体、木结构相比,其强度高。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。

(2) 耐久性好。在一般环境条件下,钢筋可以受到混凝土的保护不易生锈,而且混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长;能减少维护费用。

(3) 耐火性好。当发生火灾时,由于有混凝土作为保护层,混凝土内的钢筋不会像钢结构那样很快达到软化温度而破坏。

(4) 可模性好。可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸的结构。

(5) 整体性好。现浇式或装配整体式的钢筋混凝土结构整体性好,对抗震、抗爆有利。

(6) 易于就地取材。在混凝土结构中,钢筋和水泥这两种工业产品所占的比例较小,砂、石等材料所占比例虽然较大,但属于地方材料,可就地供应。

但是钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要是结构自重、抗裂性较差、一旦损坏修复比较困难、施工受季节环境影响较大等,这也使钢筋混凝土结构的应用范围受到某些限制。随着科学技术的发展,上述缺点已在一定程度上得到了克服和改善。如采用轻质混凝土可以减轻结构自重,采用预应力混凝土可以提高结构或构件的抗裂性能,采用植筋或粘钢等技术可以较好地对发生局部损坏的混凝土结构或构件进行修复等。

1.2 混凝土结构的发展简况及其工程应用

混凝土结构是在 19 世纪中期开始得到应用的,与砌体结构、木结构、钢结构相比,是一种出现较晚的结构形式。但是由于混凝土结构具有很多明显的优点,使其在各方面的应用发展很快,现已成为世界各国占主导地位的结构。

1.2.1 混凝土结构发展的几个阶段

混凝土结构的发展,大体上可分为三个阶段。

第一阶段是从钢筋混凝土发明至 20 世纪初。这一阶段,所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低,主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件。计算理论套用弹性理论,设计方法采用容许应力法。

第二阶段是从 20 世纪初到第二次世界大战前后。这一阶段混凝土和钢筋的强度有所提高,预应力混凝土结构的发明和应用,使钢筋混凝土被用来建造大跨的空间结构。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,已开始按破损阶段计算结构的破坏承载力。

第三阶段是从第二次世界大战以后到现在。这一阶段的特点是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,如超高层建筑、大跨度桥梁、跨海隧道、高耸结构等。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,在设计方法上已过渡到以概率论为基础的多系数表达的设计公式。

1.2.2 混凝土结构的工程应用

(1) 房屋建筑工程

在房屋建筑工程中,厂房、住宅、办公楼等多高层建筑广泛采用混凝土结构。在 7 层以下的多层房屋中虽然墙体大多采用砌体结构,但其楼板几乎全部采用预制混凝土楼板或现浇混凝土楼盖。采用混凝土结构

的高层和超高层建筑已十分普遍,我国 20 世纪 90 年代建成的广州国际大厦(高 200m,地上 63 层,地下 2 层)、1990 年建成于美国芝加哥的威克·德赖夫大楼(高 296m,65 层)、德国的密思埃姆大厦(高 256m,70 层)、香港中心大厦(高 374m,78 层)等都采用了混凝土结构。

在大跨度建筑方面,预应力混凝土屋架、薄腹梁、V 形折板、SP 板,钢筋混凝土拱、薄壳等已得到广泛应用。法国巴黎国家工业与发展技术展览中心大厅,平面为三角形,屋盖结构采用拱身为钢筋混凝土装配整体式薄壁结构的落地拱,跨度为 206m。美国旧金山地下展厅,采用钢筋混凝土拱 16 片,跨度为 83.8m。澳大利亚悉尼歌剧院的主体结构由三组巨大的壳片组成,壳片曲率半径为 76m,建筑涂白色,状如帆船,已成为世界著名的风光建筑。

(2) 桥梁工程

在桥梁建设方面,中小跨度桥梁中很大一部分采用钢筋混凝土建造,结构形式有梁、拱、桁架等。一些大跨度桥虽已采用钢悬索或钢斜拉索,但其桥面结构也有用混凝土结构的。洛阳黄河大桥,共 67 孔,由跨度为 50m 的预应力混凝土简支梁组成。厦门高崎-集美跨海大桥,主跨 46m,桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成。用钢筋混凝土建造拱桥有较大优势,目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克 1 号桥,形式为敞肩拱桥,跨度达 390m。公路拱桥在我国应用很广,1989 年建成的涪陵岛江桥,全长 351.8m,主跨 200m,为拱结构,矢跨比为 1/4,是我国目前跨度最大的拱桥。我国最大的铁路拱桥为丰沙线上的永定河 7 号桥,跨度达 150m。在我国西南交通干线上,有许多桥梁采用钢筋混凝土结构,其中清水河大桥,主跨为 72m+128m+72m,为预应力连续刚架结构,其 4 号桥墩高 100m,是世界上最高的铁路桥墩。跨度超过 500m 的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥,但目前也常与混凝土结构混合使用。如香港的青马大桥,跨度 1377m,桥体为悬索结构,其中支撑悬索的两端立塔高 202m,是混凝土结构。又如上海杨浦大桥,主跨 602m,为斜拉桥,其桥塔和桥面均为混凝土结构。

(3) 特种结构与高耸结构

混凝土结构在道路、港口工程中也有大量应用,许多贮水池、贮仓构筑物、电线杆、上下水管道等均可见到混凝土结构的应用。由于滑模施工技术的发展,许多高耸建筑可以采用混凝土结构。加拿大多伦多电视塔,高 549m,是目前世界上最高的混凝土结构建筑物。混凝土结构高耸建筑物还有莫斯科奥斯坦金电视塔(高 533.3m)、天津电视塔(高 415.2m)、北京中央电视塔(高 405m)等。

(4) 水利及其他工程

在水利工程中,因混凝土自重大,其中砂石比例大、易于就地取材,故常用来修建大坝。瑞士狄克桑斯坝,坝高 285m,坝顶宽 15m,坝底宽 225m,坝长 695m,库容量 4 亿 m^3 ,是目前世界上最高的混凝土重力坝。我国龙羊峡水电站拦河大坝为混凝土重力坝,坝高 178m,坝顶宽 15m,坝底宽 80m,坝长 393.34m,是我国目前已建坝中最高。长江葛洲坝水利枢纽工程,发电能力 271.5 万 kW,库容量 15.8 亿 m^3 ,整个工程混凝土用量达 983 万 m^3 。

混凝土结构在其他特殊的结构中也有广泛的应用,如地下铁道的支护和站台工程,核电站的安全壳,机场的跑道,海上采油平台,填海造地工程等。

1.2.3 混凝土结构发展概况

混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一,中国更是广泛应用这一材料的国家。目前,我国水泥年产量已超过 4 亿 t,年混凝土用量约为 5 亿 m^3 ,年钢筋用量接近 2000 万 t,混凝土结构在各类工程结构中占有主导地位。可以预见,今后混凝土仍将是一种重要的工程材料,并将在材料、结构、施工技术和计算理论等方面得到进一步发展。

(1) 材料方面

混凝土材料主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型,钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的粘结锚固性能。

目前国内常用的混凝土强度等级为 20~40N/mm²,国外常用的强度等级为 60N/mm²。在实验室内,我国已制成 100N/mm² 以上的混凝土,在工程应用中将达到 80N/mm²,美国已制成 200N/mm² 的混凝土。今后常用的混凝土强度可达 100N/mm²,在特殊结构(如高耸、大跨、薄壁空间结构等)的应用中,可配制出

400N/mm² 的混凝土。

为了减轻混凝土结构的自重,国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质混凝土主要采用轻质骨料。轻质骨料主要有天然轻集料(浮石、凝灰岩等)、人造轻集料(页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等)和工业废料(炉渣、矿渣粉煤灰陶粒等)。轻质混凝土的体积密度一般为 14~18kN/m³,可在预制或现浇混凝土结构中使用。目前国外轻质混凝土的强度为 30~60N/mm²,国内轻质混凝土的强度为 20~40N/mm²。由轻质混凝土制成的结构自重可比普通混凝土减少 20%~30%,在地震区采用轻质混凝土结构可有效地减小地震作用,节约材料降低造价。

为了提高混凝土的抗裂性和耐久性,掺入高分子化合物的混凝土,如浸渍混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土等将会得到发展和应用。实验室研究显示,这类混凝土不仅抗压强度高,抗拉性能也很好,而且耐磨、抗渗、抗冲击、耐冻等性质大大优于普通混凝土。纤维混凝土因改善了混凝土的抗裂性、耐磨性及延性,在一些有特殊要求的工程中已开始应用。

外加剂的发明与应用对改善混凝土的性能起到了很大作用。目前的外加剂主要有四类:① 改善混凝土拌合物流动性的外加剂,如各种减水剂、增塑剂等;② 调节混凝土凝结时间的外加剂,如缓凝剂、早强剂、速凝剂等;③ 改善混凝土耐久性的外加剂,如引气剂、防水剂、阻锈剂等;④ 改善混凝土其他性能的外加剂,如加气剂、防冻剂、膨胀剂、着色剂等。今后一段时间内各种高性能的外加剂还会不断地研制出来。

对于钢筋,主要是向高强并有较好延性、防腐、高粘结锚固性等方向发展。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 435N/mm²,在中等跨度的预应力构件中将采用强度为 800~1370N/mm² 的中强螺旋肋钢丝,在大跨度的预应力构件中将采用强度为 1570~1860N/mm² 的高强钢丝和钢绞线。试验结果显示,中强和高强螺旋肋钢丝不仅强度高、延性好,而且与混凝土的粘结锚固性能也优于其他钢筋。为了提高钢筋的防腐性能,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

(2) 结构方面

预应力混凝土是 20 世纪工程结构的重大发明之一,现在已有先张法、后张法、无粘结预应力和体外张拉等技术,预应力技术将来还会有重大发展。在锚具方面将发展高效而耐久的锚夹具,在施加预应力方面也有新的技术出现,近期在国内外已研究将预应力用于组合结构。又如体外张拉预应力筋的技术,初期只是用于结构的加固补强,因体外张拉预应力筋可以避免制孔、穿筋、灌浆等工序,并且发现问题时易于更换预应力筋,目前已开始用于新建结构。在预制构件方面正在发展采用高强钢丝、钢绞线和高强度混凝土的大跨度高效预应力楼板,以适应大开间住宅的需要。

钢和混凝土组合结构近年来应用范围逐渐扩大。在约束混凝土概念的指导下,钢管混凝土柱、外包钢混凝土柱已在高层建筑、地下铁道、桥梁、火电厂厂房以及石油化工企业构筑物中应用。钢-混凝土组合梁、钢-骨混凝土(劲性钢筋混凝土)构件,由于其具有强度高、截面小、延性好以及简化施工等优点,今后也将得到更加广泛的应用。

在工程结构实践的基础上,将会有更多的大型、巨型工程采用混凝土结构。

(3) 施工技术

在混凝土结构施工过程中,施工技术的改进起了很大作用。预应力技术的发明使混凝土结构的跨度大大增加,滑模施工法的发明使高耸结构和贮仓、水池等特种结构的施工进度大大加快。泵送混凝土技术的出现使高层建筑、大跨桥梁可以方便地整体浇注。蒸汽养护法使预制构件成品出厂时间大为缩短。喷射混凝土、碾压混凝土等施工技术也日益广泛地应用于公路、水利工程中。

在模板方面,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。

在钢筋的绑扎成型方面,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。钢筋的连接方面,除了现有的绑扎搭接、焊接、螺栓及挤压连接方式外,随着化工胶结材料的发展,将来胶接方式也会有较大发展。

可以预见,今后混凝土结构的施工技术还将有很大发展。