



普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
清华大学 985 名优教材立项资助

高校土木工程
专业指导委员会规划推荐教材

混凝土结构 上册

(第二版)

叶列平 编著

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
清华大学 985 名优教材立项资助
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材

混凝土结构

(上册)
(第二版)

叶列平 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构 (上册) / 叶列平编著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 6

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材. 清华大学985名优教材立项资助. 高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
ISBN 978-7-112-16640-4

I. ①混… II. ①叶… 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 (2014) 第 059067 号

**普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
清华大学 985 名优教材立项资助
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
混凝土结构 (上册)
(第二版)**

叶列平 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 29 字数: 602 千字

2014 年 8 月第二版 2014 年 8 月第四次印刷

定价: 58.00 元 (含光盘)

ISBN 978-7-112-16640-4
(25453)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书是土木工程专业《混凝土结构》教材，分为上、下两册。上册内容包括：绪论，钢筋和混凝土的材料性能，钢筋混凝土构件的基本受力性能，结构设计方法，受弯构件正截面和斜截面承载力计算、粘结、锚固及钢筋布置，受压、受拉和受扭构件的承载力计算，正常使用阶段变形与裂缝验算及耐久性，预应力混凝土的原理及计算规定、受力性能分析和受弯构件的设计等。

每章都收入了适量例题，并在每章后都附有一定的思考题和习题，书后附水平题集、钢筋混凝土主要性能参数表和主要符号表，并附有教学课件，供老师、同学使用。

本教材按国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010编写，并介绍了有关最新进展。

本书可作为大专院校土木工程专业教学用书，也可作为广大从事土木工程设计和施工人员学习混凝土结构基本理论和结构设计方法的参考资料。

* * *

责任编辑：王 跃 吉万旺
责任校对：张 颖 陈晶晶

第二版前言

本书是根据高等学校土木工程本科指导性专业规范的要求，并按清华大学土木工程系的教学计划和教学大纲，结合编者多年来的教学实践经验编写的，可作为大专院校土木工程专业的教材，也可供从事土木工程的技术人员学习参考。

《混凝土结构》是土木工程专业的主干专业基础课程，其教学指导思想是：注重建立工程概念，注重提炼科学问题，注重培养综合能力，注重激发创新意识；从理论转向实际，从简单转向综合；理论分析与工程应用相结合，科学方法与工程创新相结合；培养土木工程师的基本素质。

全书分为上、下两册。本书为上册，共14章，除绪论外，包括钢筋和混凝土的材料性能，钢筋混凝土构件的基本受力性能，结构设计方法，受弯构件正截面和斜截面承载力计算、粘结、锚固与钢筋布置，受压、受拉和受扭构件的承载力计算，正常使用阶段变形、裂缝及耐久性的验算，预应力混凝土的原理及计算规定、受力性能分析和受弯构件的设计。

本书下册共8章，包括：工程结构设计概论，荷载与作用，梁板结构，框架结构，钢-混凝土组合梁板结构，钢管混凝土结构，钢管混凝土结构。

根据编者多年的教学经验，本书编写时不仅注意教学和学习规律，使教学内容的安排尽可能符合认识规律，同时也及时反映本学科的最新发展和编者的科研及参加规范工作的成果，如高强混凝土结构构件、受剪桁架模型、非荷载裂缝、耐久性、结构抗连续倒塌等。考虑到土木工程结构类型多，设计计算方法不统一的情况，编写中注重基本概念、基本原理和分析方法的讲述，使学生能正确理解和掌握混凝土结构构件各种受力机理和设计计算方法以及相关的知识综合运用。由于混凝土结构是一门理论性强，并注重实际应用能力的学科，为避免初学者混淆不同类型工程结构设计规范的方法，在设计计算部分主要按《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010编写。

本书编写时力求语言通俗易懂、深入浅出。每章均有例题，每章末有一定数量的习题和思考题，并从十多年来历届考试中精选了水平题集，供读者检验所学知识的能力。

作者在参与《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002和《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010修订的工作中，与规范编制组其他成员共同讨论和交流混凝土结构各方面问题的过程中，受益匪浅，对混凝土结构的知识有更进一步的深入理解，在此特别感谢李明顺、白生翔等许多老一辈混凝土结构专家以及《混

混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 主编徐有邻和黄小坤研究员等规范组各位专家；此外在与清华大学土木工程系的老一辈教师滕智明教授、江见鲸教授、过镇海教授、方鄂华教授和钱稼茹教授等共事工作中，也从他们那里收获很多；陈肇元院士十分关心我国混凝土结构的安全性和耐久性，提供了很多相关资料给我参考；我的同事赵作周、冯鹏、潘鹏、陆新征和樊健生等协助了本书有关内容的编写，硕士研究生胥晓光协助了有关绘图工作；在教学过程中，我的学生和不少读者也提出过很多宝贵意见，在此一并表示衷心感谢！

混凝土结构的理论和应用所涉及的内容很多，并且还在不断的发展，本书编写中难免存在不足和错误，欢迎读者提出批评和指正。

叶列平

2014年2月于清华园

第一版前言

本书是根据高等学校土木工程本科指导性专业规范的要求,并按清华大学土木工程系(2005年清华大学《混凝土结构》课程获国家级精品课程称号)的教学计划和教学大纲,结合编者多年来的教学实践经验编写的,可作为大专院校土木工程专业的教材,也可供从事土木工程的技术人员学习参考。

《混凝土结构》是土木工程专业的主干专业基础课程,其教学指导思想是:注重建立工程概念,注重培养综合能力,注重提炼科学问题,注重激发创新意识;从理论转向实际,从简单转向综合;理论分析与工程应用相结合,科学方法与工程创新相结合;培养土木工程师的基本素质。

全书分为上、下两册。本书为上册,共14章,除绪论外,包括钢筋和混凝土的材料性能,钢筋混凝土构件的基本受力性能,结构设计方法,受弯构件正截面和斜截面承载力计算、钢筋的锚固与布置,受压、受拉和受扭构件的承载力计算,正常使用阶段变形和裂缝的验算,预应力混凝土的原理及计算规定、受力性能分析和受弯构件的设计。

本书下册共8章,包括:工程结构设计概论,荷载与作用,梁板结构,框架结构,排架结构,钢-混凝土组合梁板结构,钢管混凝土结构,钢管混凝土结构。

根据编者多年的教学经验,本书编写时不仅注意教学和学习规律,使教学内容的安排尽可能符合认识规律,同时也及时反映了一些学科的最新发展和编者的科研及参加规范工作的成果,如高强混凝土结构构件、受剪桁架模型、非荷载裂缝、耐久性、结构抗连续倒塌等。考虑到土木工程结构类型多,设计计算方法不统一的情况,编写中注重基本概念、基本原理和分析方法的讲述,使学生能正确理解和掌握混凝土结构构件各种受力形式的设计计算方法以及知识综合运用能力。由于混凝土结构是一门理论性强,并注重实际应用能力的学科,为避免初学者混淆不同类型工程结构设计规范的方法,在设计计算部分主要按《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010编写。

本书编写时力求语言通俗易懂、深入浅出。每章均有例题,每章末有一定数量的习题和思考题,并从十多年来历届考试中精选了水平题集,供读者检验所学知识综合能力。

在参与《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002和《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010修订的工作中,与规范编制组其他成员共同讨论和交流混凝土结构各方面问题的过程中,受益匪浅,对混凝土结构的知识有更进一步的深入理

解,在此特别感谢李明顺、白生翔等许多老一辈混凝土结构专家以及《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 主编徐有邻和黄小坤研究员等规范组各位专家;此外在与清华大学土木工程系的老一辈教师滕智明教授、江见鲸教授、过镇海教授、方鄂华教授和钱稼茹教授等共事工作中,也从他们那里也收获很多;陈肇元院士十分关心我国混凝土结构的安全性和耐久性,提供了很多相关资料给我参考;我的同事赵作周、冯鹏、潘鹏、陆新征和樊健生等协助了本书有关内容的编写,硕士研究生胥晓光协助了有关绘图工作;在教学和使用中,我的学生和不少读者也提出过很多宝贵意见,在此一并表示衷心感谢!

混凝土结构的理论和应用所涉及的内容很多,并且还在不断发展,本书编写中难免存在不足和错误,欢迎读者提出批评和指正。

叶列平

2011年11月于清华园

目 录

第1章 绪论	1
1.1 混凝土结构的概念	1
1.2 混凝土结构的优缺点	4
1.3 混凝土结构的发展简况及其应用	5
1.4 学习中应注意的问题	11
思考题	13
第2章 钢筋和混凝土的材料性能	14
2.1 钢筋的品种	14
2.2 钢筋的力学性能	16
2.3 钢筋的强度与弹性模量	20
2.4 钢筋的性能要求	21
2.5 混凝土的强度	21
2.6 混凝土破坏机理	26
2.7 混凝土的变形模量	30
2.8 混凝土的单轴应力-应变关系	32
2.9 复杂应力下混凝土的强度*	39
2.10 混凝土的收缩和徐变	44
思考题	49
第3章 钢筋混凝土构件的基本受力性能	51
3.1 轴心受拉构件的受力性能	51
3.2 轴心受压构件的受力性能	55
3.3 收缩和徐变的影响*	58
3.4 梁的受弯性能	61
3.5 承载力和延性	70
思考题	72
习题	73
第4章 结构设计方法	75
4.1 概述	75
4.2 作用效应和结构抗力	75

* 为内容较深部分。

4.3	结构设计中的不确定性与结构的安全储备	77
4.4	结构的功能	78
4.5	结构的可靠性	81
4.6	结构的极限状态	81
4.7	结构的设计基准期、设计使用年限与设计状况	83
4.8	基于概率理论的极限状态设计方法	85
4.9	作用代表值和作用效应组合	86
4.10	结构抗力和材料强度代表值	88
4.11	实用结构设计方法	88
4.12	其他结构设计方法及其设计表达式*	91
	思考题	94
第5章	受弯构件正截面承载力计算	96
5.1	受弯构件的形式及基本要求	96
5.2	正截面承载力计算的基本规定	99
5.3	单筋矩形截面梁的设计	105
5.4	双筋矩形截面梁的设计	110
5.5	T形截面梁的设计	117
	思考题	122
	习题	124
第6章	受弯构件斜截面承载力计算	126
6.1	斜裂缝的形成	126
6.2	无腹筋梁的受剪性能	128
6.3	有腹筋梁的受剪性能	136
6.4	斜截面受剪承载力的计算	144
6.5	基于拉-压杆模型的受剪承载力计算*	149
	思考题	153
	习题	154
第7章	粘结、锚固及钢筋布置	156
7.1	概述	156
7.2	钢筋与混凝土的粘结	157
7.3	钢筋的锚固	166
7.4	钢筋的连接	169
7.5	受弯构件的钢筋布置	172
7.6	设计例题	179
	思考题	185
	习题	187

第8章 受压构件	189
8.1 轴心受压构件的承载力计算	189
8.2 压力和弯矩共同作用下的正截面承载力	196
8.3 结构及受压构件的二阶效应	203
8.4 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	212
8.5 T形及工形截面偏心受压构件的正截面承载力计算	227
8.6 双向偏心受压构件的正截面承载力计算	231
8.7 矩形截面受压构件的受剪承载力	236
8.8 受压构件的延性	239
8.9 受压构件的配筋构造要求	242
思考题	244
习题	246
第9章 受拉构件	248
9.1 轴心受拉构件的承载力计算	248
9.2 矩形截面偏心受拉构件的承载力计算	249
9.3 矩形截面 N_u - M_u 相关关系*	253
9.4 受拉构件的斜截面受剪承载力	255
思考题	255
习题	256
第10章 受扭构件	257
10.1 概述	257
10.2 开裂扭矩	259
10.3 矩形截面纯扭构件的承载力计算	262
10.4 箱形截面、T形与工形截面纯扭构件的承载力计算	270
10.5 弯-剪-扭构件的承载力计算	271
10.6 压-弯-剪-扭构件和拉-弯-剪-扭构件的承载力计算*	282
10.7 受扭构件的配筋构造要求	284
思考题	284
习题	285
第11章 正常使用阶段的验算	286
11.1 正常使用极限状态及其计算规定	286
11.2 受弯构件的挠度变形验算及舒适度验算	290
11.3 受弯构件的裂缝宽度验算	300
11.4 非荷载原因引起的裂缝及其控制措施*	313
11.5 混凝土结构的耐久性	321
思考题	330

习题	330
第 12 章 预应力混凝土的原理及计算规定	332
12.1 预应力混凝土的概念	332
12.2 施加预应力的方法	336
12.3 开裂前预应力混凝土截面的基本分析	338
12.4 预应力混凝土的材料及锚夹具	341
12.5 张拉控制应力和预应力损失	346
思考题	359
习题	360
第 13 章 预应力混凝土构件的受力性能分析	361
13.1 预应力混凝土轴心受拉构件的分析	361
13.2 预应力混凝土受弯构件的分析	367
13.3 一般受弯构件预压应力的计算	373
思考题	375
习题	376
第 14 章 预应力混凝土受弯构件的设计	377
14.1 设计计算内容与设计方法	377
14.2 预应力混凝土的分类	378
14.3 截面形状与跨高比	380
14.4 预应力筋数量的确定	381
14.5 承载力计算	382
14.6 正常使用阶段验算	385
14.7 预应力混凝土连续梁*	388
14.8 施工阶段验算	392
14.9 预应力混凝土构件的构造要求	396
14.10 无粘结预应力混凝土计算简介*	408
思考题	410
习题	410
附录 1 《混凝土结构》(上册) 水平题集	412
附录 2 钢筋混凝土主要性能参数表	430
附录 3 主要符号表	438
参考文献	452

第1章 绪 论

1.1 混凝土结构的概念

以混凝土材料为主，并根据需要配置钢筋、预应力筋、钢筋、钢管等形成的承力构件所组成的土木工程结构，均可称为**混凝土结构**（Concrete Structure），如素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢筋混凝土结构和钢管混凝土结构等（图 1-1），其中以钢筋混凝土和预应力混凝土结构在实际工程中应用最多。

混凝土结构中的主要材料——混凝土，其抗压强度高，但抗拉强度却很低，一般只有抗压强度的 $1/20 \sim 1/8$ ，且破坏时具有明显的脆性。因此，素混凝土构件在实际工程中的应用很有限，主要用于以受压为主的基础和柱墩（图 1-1a）。

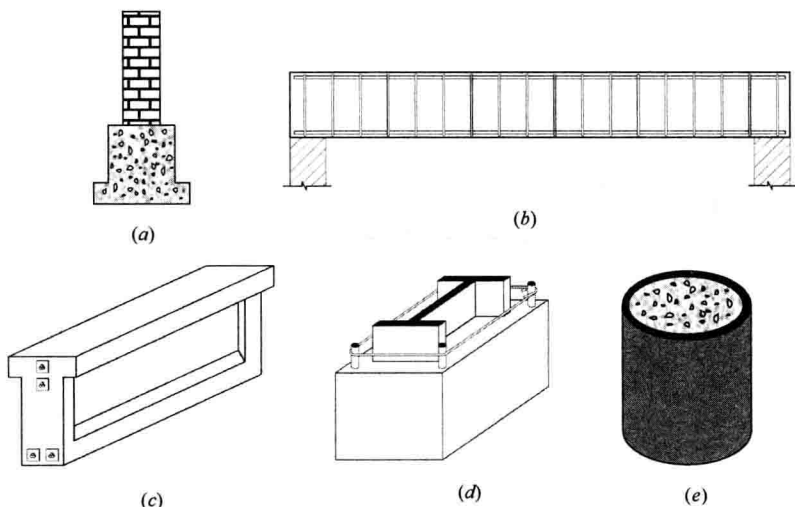


图 1-1 常见混凝土结构构件形式

(a) 素混凝土基础；(b) 钢筋混凝土简支梁；(c) 预应力混凝土吊车梁；
(d) 钢筋混凝土；(e) 钢管混凝土

钢材的抗拉和抗压强度都很高，且钢材一般具有屈服现象，破坏过程有显著的**塑性变形能力**（Plastic deformation capacity）。但细长的钢筋受压时极易压曲，仅适宜作为受拉构件；而其他形式的受压钢构件和钢结构，其承载能力也往往取

决于其稳定承载力, 钢材的材料强度一般得不到充分发挥。

将混凝土和钢材这两种材料有机地结合在一起, 可以取长补短, 充分利用两种材料各自的承力性能特性制成高效经济的承力构件。下面通过素混凝土简支梁和钢筋混凝土简支梁的实验分析对比来说明。

图 1-2 (a) 为一根 C20 素混凝土简支梁, 在跨中集中荷载 P 作用下, 梁跨中截面底部受拉边产生的拉应力一旦达到混凝土的抗拉强度 f_t , 梁便很快因开裂而产生脆性断裂, 破坏无明显预兆。因此素混凝土梁的开裂荷载 P_{cr} (crack load) 即为其破坏荷载 P_u (ultimate load), 根据线弹性材料力学和混凝土抗拉强度 $f_t = 1.54\text{MPa}$ 可得 $P_{cr} = 9.7\text{kN}$, 其承载力很低, 破坏时梁跨中截面顶部受压边缘的压应力 σ_c 与混凝土抗拉强度 f_t 相近, 远未达到混凝土的抗压强度 f_c , 故素混凝土梁的承载力取决于混凝土的抗拉强度 f_t , 混凝土抗压强度高的特点没有得到充分发挥。因此, 素混凝土梁不能在工程中应用。

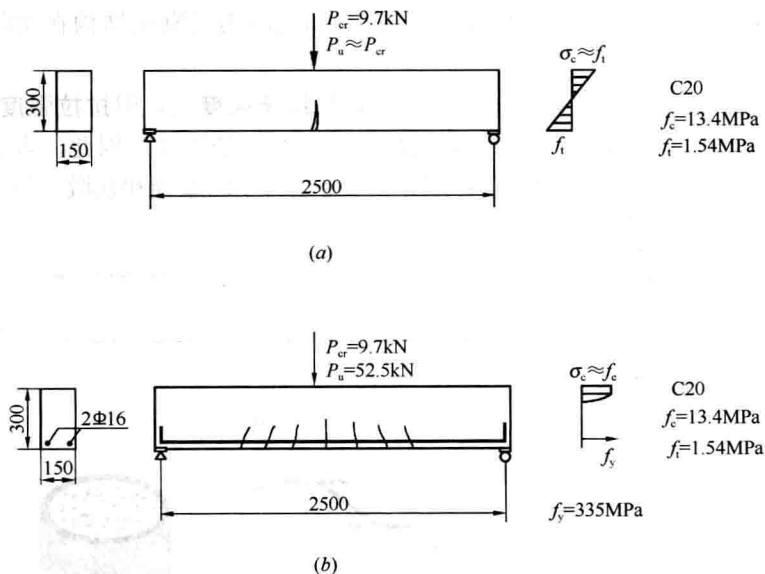


图 1-2 混凝土简支梁

(a) 素混凝土简支梁; (b) 钢筋混凝土简支梁

图 1-2 (b) 为另一根截面尺寸、跨度、混凝土材料与图 1-2 (a) 完全相同的钢筋混凝土简支梁, 在梁的受拉区配置了适量的钢筋。虽然当荷载达到约 $P_{cr} = 9.7\text{kN}$ 时, 梁的受拉区还会开裂, 但开裂后受拉区钢筋仍可承担拉力, 荷载可以继续增加, 直至钢筋达到其受拉屈服强度 f_y , 此时梁的荷载为 $P_y = 50\text{kN}$, 称为屈服荷载 (yield load)。由于钢筋屈服后有较大塑性变形能力 (plastic deformation capacity), 梁达到屈服荷载后还可在保持荷载略有增加的情况下持续一段较长的变形过程, 最后因受压区混凝土受压破坏而达到极限荷载 (ultimate

load) $P_u=52.5\text{kN}$, 破坏时受压区混凝土达到受压强度 f_c 。由此可见, 与素混凝土梁相比, 钢筋混凝土梁的承载力显著提高, 钢筋的抗拉强度 f_t 和混凝土的抗压强度 f_c 均得到充分利用, 且破坏过程梁的变形显著, 有明显预兆。但钢筋混凝土梁从开裂荷载 $P_{cr}=9.7\text{kN}$ 到屈服荷载 $P_y=50\text{kN}$ 的受力过程中是带裂缝工作的, 通常情况下裂缝宽度很小, 不致影响梁的正常使用。但裂缝问题以及开裂后导致梁刚度的显著降低等不利影响, 使得钢筋混凝土梁不能应用于大跨度结构。解决这一问题可采用预加应力的方法, 这将在第 12 章中介绍。

钢筋混凝土的英文为 Reinforced Concrete, 直译为“被加强的混凝土”。实际工程中, 除在构件的受拉区配置钢筋加强外, 还有许多其他配筋的加强方式(图 1-1b~e 和图 1-3), 如可以在构件的受压区配置钢筋协助混凝土承受压力(图 1-3a); 在复杂应力区域(如梁在受剪区段、受扭构件、节点区、剪力墙等)配置箍筋或纵横交错的钢筋, 增强构件在复杂受力下的承载力和变形能力(图 1-3b); 当构件受力很大时, 可以直接配置钢筋(型钢或由钢板焊接拼制而成, 见图 1-1d); 还可以利用螺旋箍筋约束混凝土来提高混凝土的抗压强度(图 1-3c), 甚至直接采用钢管, 形成钢管混凝土(concrete filled steel tube, 图 1-1e)。采用各种短纤维(钢纤维、聚丙烯纤维等)与混凝土一起搅拌形成的纤维混凝土(fiber reinforced concrete), 可增强混凝土的抗拉强度, 提高混凝土的抗冲击韧性。因此, 两种(或两种以上)材料的有机组合, 可以充分发挥不同材料的各自长处, 创造出多种形式的结构构件形式, 以适应各种工程结构的要求, 取得很好的综合经济效益。实际工程中, 钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构应用最多, 本书上册主要介绍钢筋混凝土和预应力混凝土基本构件的受力性能、计算理论和设计方法, 为以后学习混凝土结构设计奠定基础。

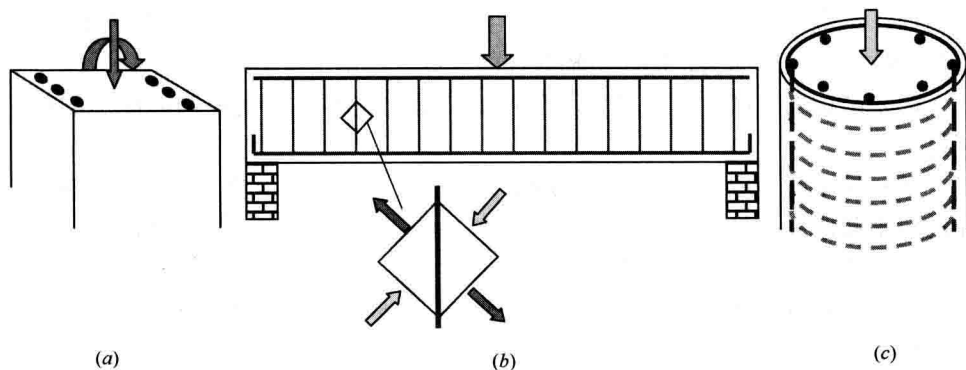


图 1-3 钢筋混凝土常见配筋方式

(a) 受压构件中配置受压钢筋; (b) 梁中配置箍筋; (c) 螺旋箍筋约束混凝土

钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能差别很大, 它们之所以可结合在一起共同工作, 并能有效可靠地承担外荷载, 是因为:

(1) 钢筋和混凝土之间有良好的粘结力 (bond), 在荷载作用下, 可以保证两种材料受力的变形协调, 共同受力。

(2) 钢材与混凝土具有基本相同的温度线膨胀系数 [钢材为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$], 因此当温度变化时, 两种材料不会因温度变化产生过大的变形差而导致两者间的粘结力破坏。

(3) 钢筋的弹性模量约为混凝土的 6~10 倍, 在相同的变形下, 钢筋可承担更大的应力, 有利于钢筋强度的发挥。

1.2 混凝土结构的优缺点

混凝土结构在土木与建筑工程中的应用十分广泛, 主要是因为有以下优点:

(1) 材料利用合理: 钢筋和混凝土的材料强度可以得到充分发挥, 结构的承载力与其刚度比例合适, 结构和构件基本无整体稳定和局部稳定问题, 单位应力造价低, 对于一般工程结构, 经济指标优于钢结构。

(2) 可模性好: 混凝土可根据工程设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构构件, 适用于各种形状复杂的结构, 如空间薄壳、箱形结构等。

(3) 耐久性和耐火性较好, 维护费用低: 钢筋与混凝土具有良好的化学相容性, 混凝土属碱性性质, 会在钢筋表面形成一层氧化膜, 能有效地保护钢筋, 防止钢筋锈蚀, 且钢筋还有混凝土的保护层, 因此在一般环境下钢筋不会产生锈蚀。混凝土是不良导热体, 使钢筋不致因发生火灾时而很快丧失强度, 一般 30mm 厚的混凝土保护层可耐火约 2.5 小时; 在常温至 300°C 范围, 混凝土的抗压强度基本不降低。

(4) 现浇混凝土结构的整体性好, 且通过合适的配筋, 可获得较大的延性, 适用于抗震、抗爆结构; 同时防辐射性能较好, 适用于防护结构。

(5) 结构的刚度大、阻尼大, 有利于结构的变形和振动控制, 使用的舒适性好。

(6) 易于就地取材: 混凝土所用的大量砂石易于就地取材。近年来, 利用工业废料来制造人工骨料, 或利用粉煤灰作为水泥的外加组分来改善混凝土性能, 既可达到废物利用, 又可保护环境。

(7) 具有特殊的质感, 可用于建筑表现, 形成清水混凝土建筑。

但是, 混凝土结构也有一些缺点, 主要有:

(1) 自重: 不适用于建造超大跨、超高层结构。因此需发展和研究预应力混凝土、轻质混凝土、高强混凝土, 并可与各种形式的钢构件组合形成钢骨混凝土和钢管混凝土等各种巨型钢—混凝土组合构件。目前我国工程应用的高强混凝土可达 C100 级; 高强轻质混凝土达 CL60 级, 密度为 $1800\text{kg}/\text{m}^3$ 左右 (普通混凝土的密度一般为 $2400\text{kg}/\text{m}^3$)。

(2) 抗裂性差: 由于混凝土的抗拉强度较小, 普通钢筋混凝土结构在正常使用阶段往往是带裂缝工作的。一般情况下, 因荷载作用产生的微小裂缝不会影响混凝土结构的正常使用。但由于开裂, 限制了普通钢筋混凝土用于大跨结构, 也影响到高强钢筋的应用。而且近年来混凝土过多地使用各种外加剂, 导致混凝土收缩过大, 且由于环境温度、复杂边界约束、过多配筋等的影响, 十分容易导致混凝土结构开裂, 影响正常使用, 或引起用户不安。此外, 在露天、沿海、化学侵蚀等环境下, 裂缝的存在会影响混凝土结构的耐久性。采用预应力混凝土可较好地解决开裂问题。利用树脂涂层钢筋可防止在恶劣工作环境下因混凝土开裂而导致钢筋的锈蚀。

(3) 承载力有限: 与钢材相比, 混凝土的强度还是很低, 普通钢筋混凝土构件的承载力有限, 对于承受重载结构和高层建筑底部结构, 构件尺寸往往很大, 影响使用空间。发展高强混凝土、钢骨混凝土、钢管混凝土等钢—混凝土组合构件可较好地解决这一问题。

(4) 施工复杂, 工序多(支模、绑钢筋、浇筑、养护、拆模), 工期长, 施工受季节和天气的影响较大。利用钢模、飞模、滑模等先进施工技术, 采用泵送混凝土、早强混凝土、商品混凝土、高性能混凝土、免振自密实混凝土等, 可大大提高施工效率。

(5) 混凝土结构一旦损坏, 其修复、加固、补强比较困难。但近年来发展了很多新型高效的混凝土结构加固修复技术, 如采用粘贴碳纤维布加固混凝土结构技术, 不仅快速简便, 且不增加原结构的重量。

(6) 混凝土结构报废拆除后的建筑废料回收再利用困难较大。2008年汶川大地震中许多倒塌破坏建筑的混凝土废料处理问题引起关注, 同时许多远超过设计使用年限的老旧建筑的拆除也会产生大量的混凝土废料, 近年来我国已研发出再生混凝土技术。

(7) 混凝土的生产会消耗大量的能源和资源。混凝土中用的水泥在生产中会消耗大量的能源, 并产生大量的 CO_2 , 每吨水泥的碳排放量为 $0.30\sim 0.45\text{t}$, 此外还会消耗石灰岩、黏土、河砂、石、水等自然资源, 影响自然生态环境。2010年我国水泥产量已经达到 18.68亿t , 占全世界产量的一半以上。在结构中合理高效地使用混凝土是节能减排的有效途径。同时各国研究者也在研发低碳水泥, 改进水泥的生产工艺, 减少碳排放量。

1.3 混凝土结构的发展简况及其应用

1824年英国人阿斯普丁(J. Aspdin)发明硅酸盐水泥; 1850年法国人朗波(L. Lambot)制造了第一只钢筋混凝土小船(图1-4a); 1854年, 英国人W. Wilkinson在建筑中采用配置铁棒的混凝土楼板(图1-4b), 这是最早的钢筋混凝土楼