



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

混凝土及砌体结构 (上册)

(第二版)

哈尔滨工业大学 大连理工大学
北京建筑大学 华北水利水电大学 合编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土及砌体结构 (上册)/王振东, 邹超英主编. —2
版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 3

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材. 高校土
木工程专业指导委员会规划推荐教材 (经典精品系列教
材)

ISBN 978-7-112-16370-0

I. ①混… II. ①王…②邹… III. ①混凝土结构-高等
学校-教材 ②砌体结构-高等学校-教材 IV. ① TU37
② TU36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 022333 号

责任编辑: 朱首明 张 晶

责任设计: 李志立

责任校对: 姜小莲 关 健

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

混凝土及砌体结构 (上册)

(第二版)

哈尔滨工业大学	大连理工大学	合编
北京建筑大学	华北水利水电大学	
哈尔滨工业大学	王振东 邹超英	主编
清华大学	叶列平	主审

*

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

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 23 字数: 472 千字

2014 年 8 月第二版 2014 年 8 月第十八次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-16370-0

(25093)

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“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，也是高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材。本书是在2003年2月出版的《混凝土及砌体结构》的基础上，根据新颁布的《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010、《砌体结构设计规范》GB 50003—2011重新编写的。

本书介绍了混凝土和砌体结构的基本计算理论和设计方法，分上、下两册。上册内容10章：绪论、材性、设计方法、受弯构件正截面、受弯及偏心受力构件斜截面、受扭构件、受压构件正截面、受拉构件正截面、裂缝及变形、平面楼盖。下册内容3章：预应力混凝土构件的计算、单层厂房结构、砌体结构。

本书为高校土木工程专业教材，也可供土建设计、施工技术人员学习新颁布的《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010和《砌体结构设计规范》GB 50003—2011时参考。

出版说明

1998年教育部颁布普通高等学校本科专业目录,将原建筑工程、交通土木工程等多个专业合并为土木工程专业。为适应大土木的教学需要,高等学校土木工程学科专业指导委员会编制出版了《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》,并组织我国土木工程专业教育领域的优秀专家编写了《高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材》。该系列教材2002年起陆续出版,共40余册,十余年来多次修订,在土木工程专业教学中起到了积极的指导作用。

本系列教材从宽口径、大土木的概念出发,根据教育部有关高等教育土木工程专业课程设置的教學要求编写,经过多年的建设和发展,逐步形成了自己的特色。本系列教材投入使用之后,学生、教师以及教育和行业行政主管部门对教材给予了很高评价。本系列教材曾被教育部评为面向21世纪课程教材,其中大多数曾被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和普通高等教育土建学科专业“十五”、“十一五”、“十二五”规划教材,并有11种入选教育部普通高等教育精品教材。2012年,本系列教材全部入选第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

2011年,高等学校土木工程学科专业指导委员会根据国家教育行政主管部门的要求以及新时期我国土木工程专业教学现状,编制了《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。在此基础上,高等学校土木工程学科专业指导委员会及时规划出版了高等学校土木工程本科指导性专业规范配套教材。为区分两套教材,特在原系列教材丛书名《高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材》后加上经典精品系列教材。各位主编将根据教育部《关于印发第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材书目的通知》要求,及时对教材进行修订完善,补充反映土木工程学科及行业发展的最新知识和技术内容,与时俱进。

高等学校土木工程学科专业指导委员会
中国建筑工业出版社
2013年2月

第二版前言

本教材是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，也是高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材。本教材是在2003年2月出版的《混凝土及砌体结构》的基础上，根据新颁布的《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010、《砌体结构设计规范》GB 50003—2011、《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008、《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012和《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011等我国现行的标准、规范和规程重新编写的。

参加本教材上册重新编写的人员为：

哈尔滨工业大学：王振东（教授）、邹超英（教授）、张景吉（教授）、严佳川（博士）；大连理工大学：赵国藩（院士）；北京建筑大学：施岚青（教授）；华北水利水电大学：李树瑶（教授）。

本教材上册由王振东、邹超英担任主编，具体编写分工：赵国藩（第1章），王振东（第2章、第4章、第6章），施岚青、王振东（第3章），施岚青、王振东（第5章、第8章），王振东、邹超英、施岚青（第7章），李树瑶（第9章），邹超英、张景吉（第10章）。哈尔滨工业大学土木工程学院严佳川博士参加部分插图的绘制、例题试算、习题试算工作。全书由王振东、邹超英统稿，清华大学叶列平担任主审。我们谨向以上的专家表示衷心的感谢。

鉴于作者水平所限，书中有不妥或错误之处，恳请读者指正。

编者

2013年12月

第一版前言

本书为适应国家教育事业发展的需要,系根据全国高等学校土木工程专业普遍执行的“混凝土结构教学大纲”的要求编写而成,初稿于1996年由国家建设部审批为高等学校推荐教材,2002年由全国高校土木工程学科专业指导委员会审定为规划推荐教材。

此次出版的内容是在所编写初稿的基础上,根据专家评审和广大读者的意见,并按国内最新修订的《建筑结构荷载规范》GB 50009、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑地基基础设计规范》GB 50007和《砌体结构设计规范》GB 50003,进行全面整理编写而成,使教材内容更加完善,并反映了新的科技成果。

本书编写的主要特点:符合教学大纲的要求,同时为了减轻学生学习的负担,贯彻少而精的原则,在各章节中,尽量精炼内容,力求概念清楚,文字通顺,便利教学。书中带有“*”号的章节,可供学生自学参考。

参加本书上册编写的单位和人员:

哈尔滨工业大学:王振东(教授)、张景吉(教授)、邹超英(教授)、王凤来(博士);大连理工大学:赵国藩(院士);北京建筑工程学院:施岚青(教授);华北水利水电学院:李树瑶(教授)。

本书上册编写的分工:赵国藩(绪论),王振东(第1章、第3章、第5章),施岚青、王振东、王凤来(第2章),施岚青、王振东(第4章、第7章),施岚青、王振东、邹超英(第6章),李树瑶(第8章),张景吉(第9章)。

本书编写过程中,直接受到大连理工大学赵国藩院士的指导,同时还受到天津市第二预应力公司经理朱龙、冶金建筑科学研究院高级工程师束继华等专家热情的指导和帮助;哈尔滨工业大学土木工程学院王凤来博士、何政博士参加部分插图的制作和书稿的整理工作,我们谨向以上的专家表示衷心的感谢。

本书由哈尔滨工业大学王振东主编,东南大学丁大钧主审。由于水平所限,书中有不妥或错误之处,恳请读者指正。

编 者

2002年8月

目 录	
第 1 章 绪论	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 混凝土结构的发展简况	4
§ 1.3 学习本课程的目的及其特点	10
第 2 章 材料的力学性能	11
§ 2.1 钢筋	11
§ 2.2 混凝土	19
§ 2.3 钢筋与混凝土之间的粘结	37
第 3 章 混凝土结构的设计方法	41
§ 3.1 结构设计的要求	41
§ 3.2 结构的作用、作用效应和结构抗力	43
§ 3.3 结构按概率极限状态设计	48
§ 3.4 按承载能力极限状态计算	52
§ 3.5 按正常使用极限状态计算	55
§ 3.6 混凝土结构的耐久性	56
§ 3.7 混凝土结构防连续倒塌的设计原则	62
§ 3.8 结构设计方法的概述	64
§ 3.9 数理统计中的一些基本知识	65
§ 3.10 混凝土强度标准值指标*	70
习题	71
第 4 章 受弯构件正截面承载力	72
§ 4.1 概述	72
§ 4.2 受弯构件一般构造要求	72
§ 4.3 受弯构件正截面的试验研究	77
§ 4.4 正截面受弯承载力计算一般规定	80
§ 4.5 单筋矩形截面梁的受弯承载力计算	84
§ 4.6 双筋矩形截面梁的受弯承载力计算	89
§ 4.7 T 形截面梁的受弯承载力计算	94
§ 4.8 正截面受弯承载力计算的几个问题	100
习题	104

第5章 受弯构件斜截面承载力	105
§ 5.1 概述	105
§ 5.2 无腹筋梁的斜截面受剪承载力	106
§ 5.3 有腹筋梁的斜截面受剪承载力	112
§ 5.4 连续梁斜截面受剪承载力	121
§ 5.5 斜截面受弯承载力	122
§ 5.6 钢筋的构造要求	131
§ 5.7 偏心受力构件受剪承载力	138
习题	141
第6章 受扭构件扭曲截面承载力	143
§ 6.1 概述	143
§ 6.2 试验研究分析	143
§ 6.3 矩形截面纯扭构件的承载力	144
§ 6.4 矩形截面弯剪扭构件的承载力	147
§ 6.5 T形和工字形截面弯剪扭构件的承载力	150
§ 6.6 受扭构件的构造要求	152
§ 6.7 框架边梁协调扭转的设计*	156
§ 6.8 受扭构件计算的几个问题*	159
习题	163
第7章 受压构件正截面承载力	165
§ 7.1 概述	165
§ 7.2 受压构件的构造要求	166
§ 7.3 轴心受压构件正截面的承载力计算	168
§ 7.4 偏心受压构件正截面的承载力计算	175
§ 7.5 双向偏心受压构件正截面的承载力计算	210
§ 7.6 偏心受压构件考虑水平荷载二阶效应时内力分析的概念	216
习题	218
第8章 受拉构件正截面承载力	220
§ 8.1 概述	220
§ 8.2 大偏心受拉构件正截面的承载力计算	220
§ 8.3 小偏心受拉构件正截面的承载力计算	222
习题	224
第9章 钢筋混凝土构件裂缝及变形的验算	225
§ 9.1 概述	225
§ 9.2 裂缝宽度的验算	227
§ 9.3 变形的验算	239

习题.....	248
第 10 章 钢筋混凝土平面楼盖	249
§ 10.1 概述.....	249
§ 10.2 现浇单向板肋梁楼盖.....	252
§ 10.3 现浇双向板肋梁楼盖.....	287
§ 10.4 无梁楼盖.....	305
§ 10.5 装配式铺板楼盖*	313
§ 10.6 楼梯.....	321
附录 各种计算附表	330
参考文献.....	352

第1章 绪 论

§ 1.1 概 述

混凝土是一种抗压能力比较高的材料,但是它的抗拉能力却很低,这就使得混凝土结构的应用受到很大限制。例如,试验表明,一根截面为 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、跨度为 2.5m 、用 C30^① 混凝土做成的素混凝土简支梁,只承受约 16.5kN 作用在跨中的集中力,就因混凝土受拉而断裂为两半(图 1-1a)。但是,如果在混凝土构件的受拉区配置一定数量的钢筋,例如在上述这根混凝土梁中配置 2 根直径 20mm 、牌号 HRB 400 的钢筋,做成钢筋混凝土构件(图 1-1b),混凝土开裂后,由钢筋代替混凝土承受拉力,则构件的承载力就会大大提高。试验表明,该梁在破坏时能承受约 98kN 的集中力。这就说明,与素混凝土梁比较,同样截面形状和尺寸的钢筋混凝土梁可承受大得多的外荷载。钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的共同受力结构,除了以受压为主的构件外,通常是以混凝土承担压力、钢筋承担拉力。因此,钢筋混凝土结构能比较充分地利用混凝土和钢筋这两种材料的力学性能。

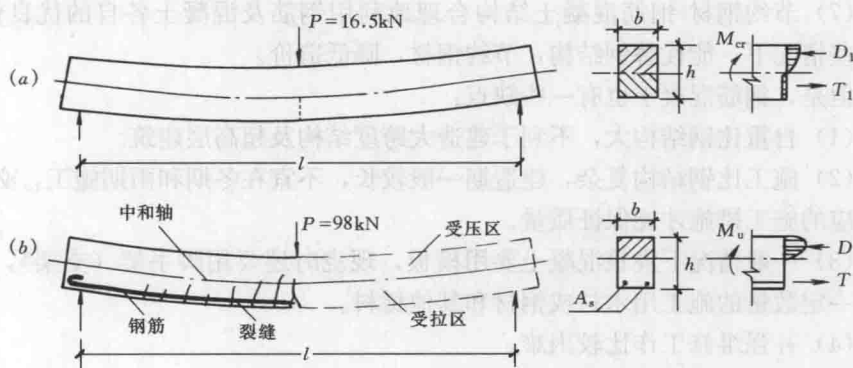


图 1-1 混凝土及钢筋混凝土简支梁的承载力

钢筋和混凝土这两种性能不同的材料能结合在一起受力,主要是由于它们之间有良好的粘结力,能牢固地粘结成整体。当构件承受外荷载时,钢筋和相邻的

^① C30 表示混凝土强度等级,其中 C 表示混凝土,30 表示其立方体抗压强度标准值为 $30\text{N}/\text{mm}^2$,具体见第 2.2 节中 2.2.2。

混凝土具有相同变形,两者共同工作不产生相对滑动。此外,钢筋与混凝土的线膨胀系数又较接近 [钢为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$], 当温度变化时,这两种材料不致产生相对的温度变形而破坏它们之间的结合。

钢筋混凝土除了较合理地利用钢筋和混凝土两种材料的性能外,还有下列优点:

(1) 耐久性好 处于良好环境的钢筋混凝土结构,混凝土的强度随时间不断增长,且钢筋受混凝土保护而不易锈蚀,所以钢筋混凝土结构的耐久性好,不像钢结构那样需要定期维修。

(2) 耐火性好 由传热性差的混凝土作钢筋的保护层,在遭受火灾时比钢、木结构的耐火性强。

(3) 整体性好 现浇整体式钢筋混凝土结构,整体性好,因而有利于抗震及防爆。

(4) 刚性好 钢筋混凝土结构的刚性大,在使用荷载下仅产生较小的变形,故有效地用于对变形要求较严格的各种建筑物。

(5) 可模性好 钢筋混凝土可根据设计需要,浇制成各种形状和尺寸的结构,特别适宜于建造外形复杂的大体积结构及空间薄壁结构。这一特点是砖石、钢、木等结构所没有的。

(6) 就地取材 钢筋混凝土中所用的砂、石材料,一般可以就地、就近取材,因而材料运输费用少,可以显著降低建筑造价。相对来说它的能源消耗也比钢结构和砖砌体结构少。

(7) 节约钢材 钢筋混凝土结构合理地利用钢筋及混凝土各自的优良性能,在某些情况下,能代替钢结构,节约钢材,降低造价。

但是,钢筋混凝土也有一些缺点:

(1) 自重比钢结构大,不利于建造大跨度结构及超高层建筑。

(2) 施工比钢结构复杂,建造期一般较长,不宜在冬期和雨期施工,必须采取相应的施工措施才能保证质量。

(3) 一般情况下浇筑混凝土要用模板,现浇时还要用脚手架(支架),因而需要一定数量的施工用木材或钢材和其他材料。

(4) 补强维修工作比较困难。

钢筋混凝土结构可作如下分类:

(1) 按结构的受力状态和结构外形可分为杆件系统和非杆件系统两大类。杆件系统中又有受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件等。非杆件系统可以是空间薄壁结构,也可以是外形复杂的大体积结构。

(2) 按结构的制造方法可分为整体式、装配式及装配整体式三种。整体式结构是在现场先架立模板、绑扎钢筋,然后现场浇捣混凝土而成的结构。它的整体性比较好,刚度也比较大,但生产较难工业化,施工期长,模板用料较多。装配

式结构则是在工厂预先制备各种构件,然后运往工地装配而成。采用装配式结构可使建筑事业工业化(设计标准化、制造工业化、安装机械化);制造不受季节限制,能加快施工进度;利用工厂有利条件,提高构件质量;模板可重复使用,还可免去脚手架,节约木料或钢材。但装配式结构的接头构造较为复杂,整体性较差,对抗震和高层结构均为不利,装配时还需要有一定的起重安装设备。装配整体式结构是一部分为预制的装配式构件,另一部分为现浇的混凝土。预制装配部分通常可作为现浇部分的模板和支架。它比整体式结构有较高的工业化程度,又比装配式结构有较好的整体性,但同样存在施工时需要吊装의 复杂性,特别是对高层结构施工不利。

近十多年以来,国家大力发展整体式的多高层房屋建筑,施工时混凝土可以在现场或工厂搅拌供应,浇筑时垂直运输采用泵送。采用这种房屋,不但施工便利,房屋的整体性好,而且减少了能源损耗,节约用地;目前国内各大城市中,大大减少了以往所采用的楼板为预制空心楼板、墙体为砖石砌体混合结构的低层建筑,据报道,全国将建造二千幢超高层房屋建筑,都市现代化的气氛,正在逐步形成。

(3) 按结构的初始应力状态可分为普通钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。预应力混凝土结构是在结构承受荷载以前,预先在混凝土中施加压力,造成人为的压应力状态,预加的压应力可全部或部分地抵消荷载产生的拉应力。预应力混凝土结构的主要优点是抗裂性能好,能充分利用高强度材料,可以用来建筑大跨度的承重结构。

钢筋混凝土结构在工程上的应用是极为广泛的,工业与民用建筑、桥梁、道路工程、地下工程、水利工程、核电站、港口、航道工程、海洋工程以及水压机、机床、船舶等都广泛使用这种组合材料。

用钢筋混凝土建筑的国外著名工程有:世界上最高的建筑——迪拜的哈利法塔(原名迪拜塔)。该建筑总高度为 828m,塔的下部(-30~601m)采用钢筋混凝土剪力墙体系结构,上部(601~828m)采用钢结构;马来西亚吉隆坡 88 层 450m 高的石油双塔楼;加拿大和前苏联分别建成高度为 549m 及 533m 的预应力混凝土电视塔。大跨度的预应力混凝土桥有跨度 530m 的挪威特隆赫姆 Skarnsundet 预应力混凝土斜拉桥(1991 年);跨度 390m 的克罗地亚克尔克 II 号拱桥(1980 年)等。英国北海石油开采平台 24 个预应力混凝土贮油罐,海下深度达 216m,油罐直径 28m,底板毛面积为 16000m²(1989 年)。

新中国成立以来新建的大型混凝土结构主要有:广州中信广场大厦,共 80 层(地下 2 层),总高度为 391m;香港的中环广场大厦,地面以上 78 层,楼高 374m,号称香港摩天大厦;广州的广州中天广场大厦(1997 年),楼高 321.9m;我国最高的建筑是上海的金茂大厦,地上 88 层,地下 3 层,总高度为 420.5m,是钢筋混凝土和钢结构混合建造的建筑物;高度 468m,具有独特的空

间框架形式的上海电视塔。著名的大桥有：世界上最长的桥是我国胶州湾跨海大桥（也称青岛海湾大桥），全长 41.58km，大部分是钢筋混凝土斜拉桥（跨度最大为 120m，桥宽 35m，2011 年）；目前世界上已经建成或在建的第三长桥，是我国浙江杭州湾跨海大桥，全长 36km，主体为钢箱梁斜拉桥，其余引桥为 30~80m 不等的预应力混凝土结构，施工中已有 5 项创新科技成果达到国际领先水平，其中大桥基础的钢管桩，超长达 89m，直径 1.5~1.6m 的设计，制造和在海上吊装施工，以及 50~70m 长，最重 2180t 的大吨位预应力混凝土箱梁的制造，和在海上架设的施工技术，都是目前举世无双的（2008 年）。此外还有跨度为 444m 的重庆预应力混凝土斜拉长江二桥，跨度为 420m 的四川万县混凝土拱桥等。近几十年以来，我国在桥梁建设上，有了飞跃的发展，单是横跨长江的各种大桥已达 60 多座，也是世界上跨河大桥最多的工程。在公路方面，世界上最长的高速公路，是我国的沪（上海）——渝（重庆）高速公路，全长 1768km，从上海至重庆只需 17h，从重庆到武汉，只需 8h，运行时间比空运和水运都要快，这条公路横贯我国西部、中部和东部三大经济区域，是我国一条联络东部和西部的“经济大动脉”。此外，该公路自湖北的宜昌至四川的重庆段，大部在山区里通过，施工条件复杂，开挖隧道 46 座，处理多处隧道底部的溶洞，建造 20 多座桥梁，也是世界上建造难度最大的高速公路。在隧道建设方面：陕西的终南山高速公路隧道，其公路，北至内蒙古的包头，南至广东的茂名，该隧道是贯通公路南北交通的重要枢纽，隧道的单洞长度为 18.02km，双洞长度为 36.04km，是世界第一座也是最长的双洞高速公路隧道，同时，隧道内部的灯光、防火、监控等设施非常完善，是现代化水平非常高的隧道；具有世界级水平的南京长江隧道，工程总长度约 5853m，开挖直径 14.93m，隧道最低点离长江水面约 65m，是我国第一次采用世界最先进的大型盾构机旋转式开挖和建造的机械化施工隧道，被列为具有国际水平、可作为今后国内外的江河隧道施工范例的工程（2012 年）。在水坝建设方面有：甘肃黄河刘家峡 147m 高的重力坝；青海黄河龙羊峡 172m 高的拱形重力坝；河南洛阳小浪底水利工程枢纽：坝高 281m，主要功能为治沙防洪，即利用拽洪的水流，快速冲刷河底泥沙，使急速水流将泥沙带至黄河下游或排拽入海，起到治沙防洪作用；湖北长江葛洲坝水利枢纽，年平均发电量 140 亿 kW·h；四川二滩的双曲拱形坝，高 240m，年平均发电量 170 亿 kW·h；世界上最大的混凝土重力坝为我国的长江三峡大坝，坝顶总长度 3035m，坝顶高度 185m，年平均发电量 849 亿 kW·h，左岸能通航万吨级船队。

§ 1.2 混凝土结构的发展简况

混凝土结构的应用虽然只有 160 年左右的历史，但它比砖石、钢木结构具有更多的优点。据不完全统计，目前在我国每年混凝土用量约 9 亿 m^3 ，钢筋用量

约 2000 万 t, 用量之大, 居世界前列。可以预见, 混凝土将是我国今后相当长时期内一种重要的工程结构材料。混凝土的发展可以从以下几个方面加以了解。

1.2.1 材 料

1. 混凝土

其发展的主要方向是高强、轻质、耐久、抗震(爆)。

(1) 高性能混凝土 (Highperformance Concrete)

所谓高性能混凝土是指具有高强度、高耐久性、高流动性等多方面优越性能的混凝土, 它是近年来混凝土材料发展的一个重要方面。从强度而言, 抗压强度大于 C50 的混凝土属于高强混凝土, 提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构、大跨度结构的重要措施。采用高强混凝土可以减小截面尺寸, 减轻自重, 获得较大的经济效益, 同时具有良好的耐久性。目前国际上混凝土已达到很高的强度, 如罗马尼亚已制成 C170 的混凝土, 美国已制成 C200 的混凝土, 我国已制成 C100 的混凝土。高强混凝土的主要缺点是延性差。

在我国, 为提高混凝土强度所采用的主要措施有: ①采用高效减水剂以降低水灰比是获得高强度混凝土的主要技术方法; ②采用优质水泥, 如采用 525、625 及 725 强度的硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥; ③采用优质骨料; ④利用优质掺合料, 如采用优质的磨细粉煤灰、硅灰、天然沸石矿粉或超细矿渣等。

(2) 轻骨料混凝土 (Light Aggregate Concrete)

利用天然轻骨料(如浮石、凝灰岩等)、工业废料轻骨料(如炉渣、粉煤灰、煤矸石等)及其轻砂, 人造轻骨料(页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等)制成的轻骨料混凝土, 具有自重较小(可减轻自重 10%~30%), 相对强度高以及保温、抗冻性能好等优点。一般常用的轻骨料混凝土的强度等级为 C15~C20, 自重为 17~18kN/m³。自 20 世纪 60 年代以来, 轻质高强混凝土是建造高层、大跨结构的主要材料。国外用于工程结构的轻骨料混凝土为 C30~C60, 自重为 10~14kN/m³; 用于保温而不承重的轻骨料混凝土一般为 C5~C20, 自重为 9~14kN/m³。目前, 我国生产的人造轻骨料的松散自重为 5~8kN/m³, 可配制成级别为 C7.5~C30、自重为 12~18kN/m³ 的轻骨料混凝土; 同时, 又生产出超轻陶粒, 松散自重为 3~5kN/m³, 达到了国际先进水平。我国发展轻骨料混凝土的重要途径是积极利用工业废渣废料, 降低混凝土生产成本, 变废为用, 减少城市或厂区的污染, 减少堆积废料占用的土地。另一个途径是大力开采和利用天然轻骨料, 我国吉林、黑龙江、内蒙古、山西等地均有丰富的天然轻骨料。

(3) 改良混凝土 (Modified Concrete)

1) 纤维增强混凝土。为了改善混凝土抗拉性能和延性差的缺点, 20 世纪 60 年代以后, 掺加纤维以改善混凝土性能的研究和应用发展得相当迅速, 研究较多

的有掺钢纤维、耐碱玻璃纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维、植物纤维等。

钢纤维混凝土具有抗拉、抗弯、抗剪、耐磨、抗疲劳、延性及韧性好的特点,工程应用较为广泛,例如用于构件的三维复杂受力部位、抗震框架节点区、刚性防水屋面、地下防水工程、混凝土拱桥拱体受拉区、桥梁桥面、公路路面、机场道面、水工建筑中的高速水流冲刷及腐蚀部位,喷射钢纤维混凝土用于隧洞衬砌工程以及结构加固工程等处,均取得了良好的效果。在国内,采用钢丝切断法、薄板剪切法、钢锭(厚板)切削法、熔钢抽丝法等几种主要方法进行钢纤维的生产。

在施工技术上,钢纤维混凝土体积率一般为 $0.6\% \sim 2.0\%$,体积率再增加容易结团成球,影响混凝土质量,但是国内外正在研究一种体积率为 $5\% \sim 20\%$,最高达 27% ,简称为SIFCON的砂浆掺钢纤维混凝土,施工时是先将钢纤维松散填入在模具内,然后浇筑水泥浆或砂浆,硬化成型,其特点是抗压强度大幅度地提高,可达 $100 \sim 200 \text{ N/mm}^2$,其抗拉、抗弯、抗剪以及延性、韧性等性能也比普通体积率的钢纤维混凝土有更大的提高。另一种名为SIMCON的施工方法与SIFCON基本相同,只是用钢纤维网(Mat)制成的产品预先填置在模具内,然后浇捣水泥浆,其钢纤维体积率一般为 $4\% \sim 6\%$,与前一种方法相比,可用较低钢纤维体积率而达到相同的强度和韧性,取得节约材料的效果。虽然以上两种材料力学性能优良,但由于钢纤维用量大,一次性投资高,施工工艺特殊,因此只是在必要时在某些特殊的结构或构件的局部(如火箭发射台等处)采用。

2) 钢丝网水泥。是在砂浆中铺设钢丝网及骨架钢筋作为薄壁结构,具有良好的抗裂能力和变形能力,在国内外造船、水利、建筑工程中应用较为广泛。我国的钢丝网水泥船制造,在世界上是具有先进水平的。

3) 树脂混凝土。是树脂和混凝土复合而成的新型材料,其强度可达 100 N/mm^2 以上。常用的树脂有聚酯树脂和环氧树脂。树脂混凝土强度高、成型性好、耐腐蚀性强,多用于冶金、化工部门有腐蚀介质作用的结构及容器(如酸洗槽)。

此外,膨胀混凝土、聚合物混凝土等也得到应用。

(4) 其他混凝土

如泵送混凝土、流态混凝土、喷射混凝土应用亦比较广泛,还有水下混凝土、将水泥砂浆用压力灌入粗骨料空隙中形成的压浆混凝土等也得到应用。

2. 配筋

混凝土结构的配筋材料是指除钢筋以外的其他配筋材料,在国际上研究较多的是树脂粘结的纤维筋(FRP),常用的有树脂粘结的碳纤维、玻璃纤维及芳纶(Aramid)纤维。国外研究指出,以上这些纤维制成的筋材强度都很高,只是玻璃纤维筋的抗碱化性能较差。

为了减少裂缝宽度和构件的变形,我国一些地区研究采用焊成梯格形的双钢

筋,它主要用在板式构件或跨度不大的小梁及直径不大的筒仓、水泥罐等处。

在海洋环境或有腐蚀性介质的环境中,如冬季撒盐的桥面,用环氧树脂涂敷钢筋表面,防止钢筋生锈,这一方法在日本、美国应用较多,我国亦在推广应用中。

1.2.2 结 构

对钢-混凝土组合结构的应用与发展是值得注意的事情,如钢板混凝土用于地下结构、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或桥梁,外包钢混凝土柱用于电厂主厂房等。在钢管内浇筑混凝土,在纵向压力作用下,使管内混凝土处于三向受压状态,而管内的混凝土又抑制管壁的局部失稳,因而使构件的承载力和变形能力大大地提高,而且钢管又是混凝土的模板,施工速度较快。这种结构已在国内逐步应用。

在钢-混凝土组合梁中,将工字型钢腹板按折线形切开,改焊成高度更大的蜂窝形梁,既提高了抗弯能力,又便于管道通过有洞的腹板,在电厂结构中已经应用。

在比利时、日本以及我国研究应用一种预弯型钢的预应力梁。即将预制的带有拱度的工字型钢梁,在加载状态下,在下翼缘浇筑混凝土,待达到一定强度后卸载,使下翼缘的混凝土预压,然后运至现场铺设预制梁板,再浇筑上部混凝土成为装配整体式构件,在使用荷载下,下翼缘产生的外加拉应力可与预加的压应力抵消,施工时无需锚具和张拉设备,国外已建成跨度达 60m 的公路桥,国内在辽宁、武汉、哈尔滨等地的桥梁工程中已有应用。

预应力混凝土结构在我国发展也较迅速,其中引人重视的是无粘结部分预应力混凝土结构。无粘结筋是由单根或多根高强度钢丝、钢绞线或钢筋,沿全长涂抹防腐油脂并用聚乙烯塑料护套包裹而成。张拉时无粘结筋与周围混凝土产生纵向相对滑动。无粘结筋像普通钢筋一样敷设,然后浇筑混凝土,待混凝土达到规定的强度后进行张拉和锚固,省去了传统后张预应力混凝土预埋管道、穿索、压浆工艺,节省施工设备,缩短工期,节约造价,可得到综合的经济效益,我国已在房屋建筑和公路桥梁中应用。

一种体外张拉的预应力索已在桥梁工程的修建、补强加固中应用,其特点是:与体内无粘结预应力筋一样大幅度减小预应力值的摩擦损失,简化截面形状和减小截面或壁厚尺寸,便于再次张拉、锚固、更换或增添新索,提高构件的承载力,我国汕头海湾大桥的索桥预应力混凝土加劲梁即采用了体外索。

国内在上海成都路高架桥工程中采用一种“缓粘结”预应力混凝土张拉工艺,与无粘结预应力筋类似,但预应力筋周围是用缓凝砂浆包裹,在钢筋张拉时砂浆不起粘结作用可以自由张拉,待钢筋锚固后砂浆缓慢凝结硬化,与预应力筋相粘结。这种施工工艺,在张拉时是“无粘结”,在砂浆凝结后又是“有粘结”

的,具有进一步研究的意义。

1.2.3 计 算 理 论

钢筋混凝土宏观上是两种材料的组合体,从微观上看,混凝土又是水泥浆、砂、石、孔隙等组合体,其力学性能相当复杂,分析钢筋混凝土结构的问题,要比分析以匀质材料制造的结构(如钢结构)困难复杂,其结构计算理论的发展,同时又与力学、数学、物理学等基础科学的发展密切相关,主要有:

1. 钢筋混凝土有限元分析方法

有限元分析的概念是人为地把弹性体划分成有限个单元(如取相邻两个节点之间的梁、柱或二力杆等),由有限个节点相互连接而成为离散结构物,计算时通过对单元的分析,建立节点与节点的力和位移关系的平衡方程式,并进一步进行整体分析,由节点平衡方程式集成结构的平衡方程组,最后通过解结构的线性代数平衡方程组,计算出各单元的内力及支承反力。由于有限元法可用计算机进行分析,确实使许多过去令人望而生畏的工程力学难题得到迅速而又可靠的解答。因此,其应用得到迅速的发展。

钢筋混凝土有限元是研究混凝土随着荷载的增加,由弹性状态过渡到塑性状态,最后达到丧失承载能力极限状态全过程中内力和变形发展的有效的弹塑性分析法,这种方法可以给出结构内力和变形的全过程,包括裂缝的形成和扩展,结构破坏过程及破坏形态,显示出结构的薄弱部位,给出结构极限承载能力等。

2. 钢筋混凝土结构的极限分析

对于板、壳、连续梁、框架结构的极限承载力,采用极限分析法直接求解,是一个发展的方向,并已有较多的成果,但需保证正常使用(限制裂缝和变形)和薄壁结构及细长压杆的稳定性,以及防止脆性的剪切破坏和钢筋锚固的失效。

3. 混凝土断裂力学

在计算理论中,另一个值得注意的发展方向是混凝土断裂力学在水工大坝中的应用,1995年在瑞士苏黎世举行的国际学术会议,对混凝土断裂的材料模型、复合型断裂、损伤模型、动态断裂、应用及设计规范等多项专题,进行了讨论。

1990年欧洲混凝土结构模式规范(CEB-FIP),给出了与最大骨料粒径 $d_{\max}$ 及混凝土强度等级有关的断裂能 G_F 的估算值以及 G_F 与温度和含水量的关系,这些规定虽然还不够完善,但为混凝土断裂力学的工程应用提供了基础。

4. 混凝土的收缩与徐变

混凝土收缩与徐变的研究一直是混凝土计算理论中的一个重要方面,对水工混凝土及预应力混凝土结构的计算理论影响甚大,中国水利水电科学研究院多年来进行了系统的研究,出版了专著《混凝土的收缩》及《混凝土的徐变》,结合我国工程实际情况,提出了估算收缩的方法,介绍了六种徐变计算理论,并以试验数据为依据进行了评述,还介绍了减小干缩和温度收缩的措施,介绍了结构徐