



“十一五”高等学校通用教材（土木建筑类）

混凝土结构设计原理

HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

● 薛志成 程东辉 主编



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



“十一五”高等学校通用教材（土木建筑类）

HUNNINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI

混凝土结构设计原理

薛志成 程东辉 主编



中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构设计原理/薛志成, 程东辉主编. —北京: 中国计量出版社, 2010.1

“十一五”高等学校通用教材 (土木建筑类)

ISBN 978-7-5026-3209-0

I. ①混… II. ①薛… ②程… 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 (2009) 第 199008 号

内 容 提 要

本书依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 和最新的相关规范、标准编写而成。

内容包括绪论, 钢筋混凝土材料的力学性能, 混凝土结构受弯设计方法, 受弯构件正截面受弯承载力计算, 受弯构件斜截面受剪承载力计算, 受扭构件扭曲截面承载力计算, 受压构件承载力计算, 受拉构件承载力计算, 受冲切、局部受压承载力计算和疲劳验算, 钢筋混凝土构件裂缝、变形验算及结构的耐久性设计, 预应力混凝土构件设计。为了便于学生自学和自测, 各章均编写了本章学习要求、例题、本章小结、思考题与习题。

本书既可作为高校土木工程专业的专业基础课教材, 又可作为从事土木工程结构设计、施工和监理的工程技术人员和结构工程师注册考试人员的参考书。

中国计量出版社 出版

地 址 北京和平里西街甲 2 号 (邮编 100013)
电 话 (010) 64275360
网 址 <http://www.zgjl.com.cn>
发 行 新华书店北京发行所
印 刷 北京市媛明印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 19.75
字 数 473 千字
版 次 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷
印 数 1—2 000
定 价 35.00 元

如有印装质量问题, 请与本社联系调换
版权所有 侵权必究

— 教 材 编 委 会 —

主 任 赵惠新 刘国普 刘宝兰

副主任 李保忠 景海河 丁 琳 薛志成 杨国义

委 员 (按姓氏笔画排序)

邓一兵	王福彤	付伟庆	左宏亮
刘汉青	吕名云	乔雅敏	杜永峰
张燕坤	杨 璐	酆 伟	赵文军
姜连馥	高建岭	徐晓红	程 桢
程东辉	程选生	裴 强	潘 睿

策 划 刘宝兰 李保忠

— 本 书 编 委 会 —

主 编 薛志成（黑龙江科技学院）
程东辉（东北林业大学）

副主编 裴 强（大连大学）
杨 璐（沈阳工业大学）

委 员（按姓氏笔画排序）

李长凤（黑龙江科技学院）

杨 璐（沈阳工业大学）

程东辉（东北林业大学）

裴 强（大连大学）

薛志成（黑龙江科技学院）

编写说明

近年来，建筑业的快速发展对整个社会经济起到了良好的推动作用，尤其是房地产业和各项基础设施建设的深入开展与逐步完善，使国民经济逐步走上了良性发展的道路。与此同时，建筑行业自身的结构性调整也在不断进行，这种调整使其对本行业的技术水平、知识结构和人才特点提出了更高的要求。为此，教育部对普通高校“土木建筑类”各专业的设置和教材也多次进行了相应的调整，使“建筑工程”和“交通土建工程”等相关专业逐步向“土木工程”转化，“十一五”期间，这种转化进一步得到了完善，这使“土木工程”的内涵大大拓宽。所以，编写高等院校土木建筑类各专业所需的基础课和专业课教材势在必行。

针对这些变化与调整，由中国计量出版社牵头组织了“十一五”高等学校通用教材（土木建筑类）的编写与出版工作，该套教材主要适用于应用型人才培养院校的建筑工程、工程管理、交通土建以及水利工程等相关专业。该学科具有发展迅速、技术应用性强的特点，因此，我们有针对性地组织了黑龙江科技学院、黑龙江大学、兰州理工大学、北方工业大学、黑龙江工程学院、广东惠州学院、深圳大学、哈尔滨工程大学、东北林业大学、大庆石油学院、大连大学、哈尔滨学院以及黑龙江东方学院等 45 所相关高校中兼具丰富工程实践和教学经验的专家学者担当各教材的主编与主审，从而为我们成功推出该套框架好、内容新、适

应面广的好教材提供了必要的保障，以此来满足土木建筑类专业高等教育的不断发展和当前全社会范围内建设工程项目安全体系建设的迫切需要；这也对培养素质全面、适应性强、有创新能力的高技术专门人才，进一步提高土木建筑类专业教材的编写水平起到了积极的推动作用。

针对应用型人才培养院校土木建筑类各专业的实际教学需要，本次教材的编写尤其注重了理论体系的实用性与前沿性，不仅将建筑工程领域科技发展的新理论合理融入教材中，使读者通过教材的学习可以深入把握国际建筑业发展的全貌，而且使学生通过学习能将教材中的理论迅速应用于工程实践，这对我国新世纪应用型人才的培养大有裨益。相信该套教材的成功推出，必将会推动我国土木建筑类高校教材体系建设的逐步完善和不断发展，从而对国家的新世纪人才培养战略起到积极的促进作用。

教材编委会

2010年5月

前言

• FOREWORD •

本书是依照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和相关的最新规范及标准编写的高校土木工程专业教材。内容包括:绪论,钢筋混凝土材料的力学性能,混凝土结构的设计方法,受弯构件正截面受弯承载力计算,受弯构件斜截面受剪承载力计算,受扭构件扭曲截面承载力计算,受压构件承载力计算,受拉构件承载力计算,受冲切、局部受压承载力计算和疲劳验算,钢筋混凝土构件裂缝、变形验算及结构的耐久性设计,预应力混凝土构件设计。为了便于学生自学和自测,各章还编写了本章学习要求、例题、本章小结、思考题与习题。

本书在编写时力求紧密结合规范,语言通俗易懂,内容条理清晰、深入浅出、循序渐进、理论联系实际。

本书既可作为高等院校土木工程专业专业基础课教材,又可作为从事土木工程结构设计、施工和监理的工程技术人员和结构工程师注册考试人员的参考书。

本书由薛志成和程东辉任主编,裴强和杨璐任副主编,编写人员都是多年从事混凝土结构系列课教学工作的一线教师。编写分工为:薛志成(第4章、第7章、第8章、第9章),程东辉(第1章、第2章、第3章、第6章),裴强(第5章),薛志成、李长风(第10章),杨璐、薛志成(第11章)。

本书的编写得到了中国计量出版社刘宝兰和李保忠两位老师的大力支持和帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评和指正。

编 者

2010 年 5 月

目 录

• CONTENTS •

第 1 章 绪论	(1)
1.1 钢筋混凝土结构的概念和特点	(1)
1.2 混凝土结构发展简况	(3)
1.3 本课程的内容与学习中应注意的问题	(5)
第 2 章 钢筋混凝土材料的力学性能	(8)
2.1 钢筋	(8)
2.2 混凝土	(13)
2.3 钢筋与混凝土之间的粘结	(26)
第 3 章 混凝土结构的设计方法	(32)
3.1 概述	(32)
3.2 作用效应、结构抗力和极限状态方程	(34)
3.3 近似概率极限状态设计法	(36)
3.4 结构构件计算和验算规定	(44)
第 4 章 受弯构件正截面受弯承载力计算	(47)
4.1 概述	(47)
4.2 受弯构件的一般构造要求	(47)

4.3	受弯构件正截面工作的三个阶段	(50)
4.4	正截面承载力计算的基本原理	(54)
4.5	单筋矩形截面受弯构件的正截面承载力计算	(58)
4.6	双筋矩形截面受弯构件的正截面承载力计算	(62)
4.7	T形截面受弯构件的正截面受弯承载力计算	(68)
第5章	受弯构件斜截面受剪承载力计算	(78)
5.1	概述	(78)
5.2	无腹筋受弯构件斜截面受剪承载力计算	(78)
5.3	有腹筋受弯构件斜截面受剪承载力计算	(84)
5.4	连续梁、框架梁和外伸梁斜截面受剪承载力计算	(94)
5.5	受弯构件斜截面受弯承载力	(95)
第6章	受扭构件扭曲截面承载力计算	(111)
6.1	概述	(111)
6.2	纯扭构件的开裂扭矩计算	(112)
6.3	纯扭构件的扭曲截面承载力计算	(114)
6.4	弯剪扭构件承载力计算	(118)
6.5	在轴向压力、弯矩、剪力和扭矩共同作用下钢筋混凝土矩形截面 框架柱受扭承载力计算	(127)
6.6	属于协调扭转的钢筋混凝土构件扭曲截面承载力计算	(128)
第7章	受压构件承载力计算	(131)
7.1	概述	(131)
7.2	轴心受压构件正截面承载力计算	(134)
7.3	偏心受压构件正截面承载力计算的一般规定	(144)
7.4	非对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(149)
7.5	对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(162)
7.6	对称配筋工形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(166)
7.7	偏心受压构件的 N_u-M_u 相关曲线	(171)

7.8	腹部均匀配筋偏心受压构件正截面承载力计算	(173)
7.9	圆形和环形截面偏心受压构件正截面承载力计算	(176)
7.10	双向偏心受压构件正截面承载力计算	(178)
7.11	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	(179)
第 8 章	受拉构件承载力计算	(183)
8.1	概述	(183)
8.2	轴心受拉构件正截面承载力计算	(183)
8.3	偏心受拉构件正截面承载力计算	(186)
8.4	偏心受拉构件斜截面承载力计算	(188)
第 9 章	受冲切、局部受压承载力计算和疲劳验算	(192)
9.1	受冲切承载力计算	(192)
9.2	局部受压承载力计算	(201)
9.3	疲劳验算	(205)
第 10 章	钢筋混凝土构件裂缝、变形验算及结构的耐久性设计	(216)
10.1	裂缝验算	(216)
10.2	变形验算	(226)
10.3	混凝土结构耐久性设计	(234)
第 11 章	预应力混凝土构件设计	(239)
11.1	预应力混凝土结构的基本概念	(239)
11.2	施加预应力的方法	(241)
11.3	预应力混凝土的分类	(242)
11.4	预应力混凝土的材料和锚夹具	(244)
11.5	张拉控制应力和预应力损失	(246)
11.6	预应力混凝土结构设计计算的一般规定	(253)
11.7	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	(253)

11.8	预应力混凝土受弯构件的计算.....	(264)
11.9	预应力混凝土超静定结构.....	(279)
11.10	先张法构件预应力筋的预应力传递长度	(281)
11.11	预应力混凝土构件的构造要求	(282)
附表		(295)
参考文献		(303)

第1章 绪论

本章学习要求

1. 掌握钢筋混凝土结构的概念及钢筋和混凝土两种材料共同工作的原因;了解钢筋混凝土结构的特点。
2. 了解混凝土结构在土木工程中的发展及应用概况;了解混凝土结构设计规范的发展过程。
3. 掌握本课程的基本内容及学习时应注意的问题和学习方法。

1.1 钢筋混凝土结构的概念和特点

1.1.1 钢筋混凝土结构的概念

混凝土是由砂子、石子、水泥和水按一定的比例经过搅拌后,凝结而成的一种人工石材,简称砼。

在工程中,以混凝土为主要材料制作成的结构就称为混凝土结构。混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构及预应力混凝土结构。

素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土制成的结构。由于这种结构的承载力低、性质脆、易开裂、破坏前没有预兆,在建筑工程中,一般只用作基础的垫层或室内外地坪,很少用于主要受力构件。如图 1—1(a)所示的素混凝土梁,当荷载达到一定值时,弯矩最大截面处受拉边缘的混凝土首先开裂,裂缝迅速向上延伸,梁立即断为两部分,而发生没有预兆的破坏;破坏时受压区混凝土的抗压强度未得到充分利用,且由于混凝土抗拉强度很低,故此梁的受弯承载力很低。

钢筋混凝土结构,又称为普通钢筋混凝土结构,是指在混凝土中配置普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的结构。钢材的抗压强度和抗拉强度均很高,而且延性很好;而混凝土像天然石材一样,其抗压强度很高,抗拉强度较低,因此混凝土受拉时容易开裂。在工程中,通常在钢筋混凝土构件使用时的受拉区配置一定数量的纵向受力钢筋协助混凝土承担拉力,如图 1—1(b)所示

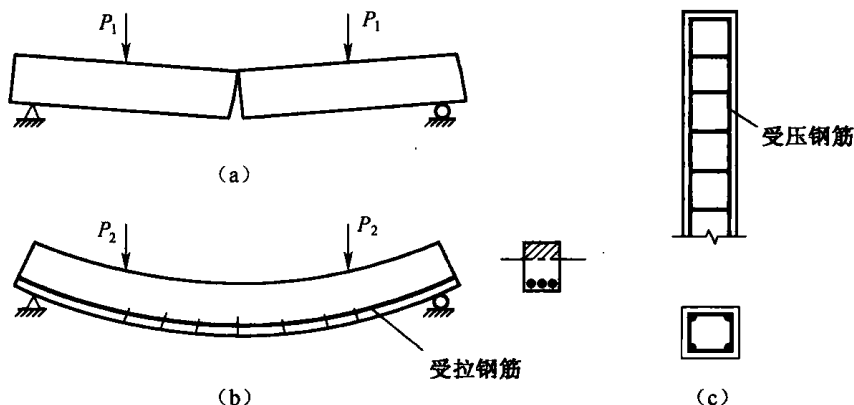
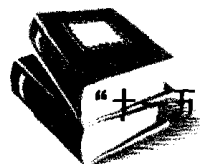


图 1—1 素混凝土梁及钢筋混凝土梁、柱



的钢筋混凝土梁,在截面受拉区配有适量的纵向受力钢筋。当荷载达到一定值时,梁受拉区开裂,裂缝截面处的拉应力转由受拉钢筋承受;荷载继续增大,直至受拉钢筋应力达到抗拉屈服强度后,截面受压区混凝土逐渐被压碎,梁发生了有预兆的破坏。破坏时,钢筋的抗拉强度与混凝土的抗压强度都得到了较为充分的利用,这种梁的极限受弯承载力明显超过了同样条件的素混凝土梁。当梁承受荷载较大时,在梁使用时受压区也可能配置一定数量的纵向受压钢筋,使钢筋和混凝土共同承受产生的压力,这样既可以减小构件截面尺寸,又可以提高构件的受弯承载力和变形能力。如图 1—1(c)所示,轴心受压柱中配置纵向受压钢筋与混凝土共同承受压力,既提高了柱子的受压承载力和变形能力,又减小了柱的截面尺寸,还可承受由于某种原因而引起的弯矩和拉应力。

钢筋和混凝土是两种物理力学性能不同的材料,它们能有效地结合在一起共同工作,主要原因是:

(1)钢筋和混凝土之间存在着粘结力。混凝土结硬以后能够和钢筋可靠地结合在一起,从而可以保证在荷载作用下,钢筋和周围混凝土能够共同变形。

(2)钢筋和混凝土的线膨胀系数相近。钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,混凝土的线膨胀系数为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,因此,当温度变化时,钢筋和混凝土之间不会产生较大的相对变形和温度应力,而使粘结力破坏。

此外,混凝土对钢筋还有防锈作用。混凝土结硬后,包裹在混凝土中的钢筋,只要构件具有足够的混凝土保护层厚度和裂缝控制,钢筋便不会锈蚀,因此使结构具有良好的耐久性能。

1.1.2 钢筋混凝土结构的特点

钢筋混凝土结构除了比较合理地利用钢筋和混凝土这两种材料的力学性能外,还有一些优点和不足之处。

1. 钢筋混凝土结构的主要优点

(1)便于就地取材和利用工业废料。混凝土中所用的砂、石材料,一般可以就地、就近取材,因而材料的运输费用少,可以降低工程造价。另外,还可以利用工业废料(如矿渣、粉煤灰等)作为掺合料或人工骨料,这样既做到废物利用,又有利于环保。

(2)节约钢材。钢筋混凝土结构充分利用了钢筋和混凝土各自的优良性能,在某些条件下可以代替钢结构,从而节约钢材。

(3)耐久性好。处于良好环境中的混凝土结构,混凝土的强度随时间不断地增长,且混凝土包裹住钢筋,使钢筋不易锈蚀,因此钢筋混凝土结构的耐久性较好。对于侵蚀性环境中的混凝土结构,经过合理设计及采取可靠的措施后,一般可以满足工程需要。

(4)耐火性强。钢筋外部的混凝土保护层的传热性能差,在发生火灾时不会像钢结构过早发生软化,也不会像木结构易燃。

(5)可模性好。钢筋混凝土可以根据设计的需要,浇筑成各种不同形状和尺寸的结构,特别适合于建造外形复杂的大体积结构和空间薄壁结构。

(6)整体性好,刚度大。现浇式混凝土结构具有较好的整体性,刚度大,抗震和防爆性能好。混凝土结构的刚度大,使用荷载作用下变形小,可用于对变形有严格要求的结构。

(7)保养费用低。混凝土结构耐久性好,不象钢结构和木结构需要经常进行保养。

2. 钢筋混凝土结构的主要缺点

(1) 自重大。在承受相同荷载的情况下,钢筋混凝土构件的自重要比钢结构构件大得多,这对于建造大跨度结构、高层建筑及结构抗震等都是不利的;同时,对于装配式结构也不利于构件的运输和施工吊装。

(2) 抗裂性差。混凝土的抗拉强度较低,钢筋混凝土结构的受弯、受拉等构件通常在使用时受拉区带裂缝工作。

(3) 现浇式钢筋混凝土结构施工时,费工时、费模板;同时,施工工序复杂、受季节影响。在严寒地区冬季施工,混凝土浇筑后可能被冻坏;在酷热地区和雨季施工,应严格控制水灰比,因此施工时必须采取可靠的保证措施。

(4) 损坏后,加固和维修困难。

随着科学技术的发展,混凝土结构的缺点正在被逐渐克服或改善。例如采用能利用高强度材料的预应力混凝土结构可以提高构件的抗裂性,减轻结构自重;采用装配式构件可以节约模板和支撑,加快施工速度,使工程不受季节气候条件的影响;采用轻质高强混凝土可以有效地减轻结构自重等。

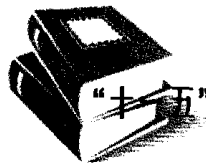
1.2 混凝土结构发展简况

1.2.1 混凝土结构的发展简况

随着水泥和钢铁工业的发展,混凝土结构逐渐发展起来,从应用至今已经有约 150 年的历史。与砌体结构、钢结构和木结构相比,混凝土结构的历史并不长,但是由于它在物理力学性能及材料来源等方面有许多优点,因此发展非常迅速,目前,已成为土木工程领域的主导结构形式。

1824 年,英国人阿斯普丁(Joseph Aspdin)发明了波特兰水泥并取得了专利。1850 年,法国人朗波(L. Lambot)制成了铁丝网水泥砂浆结构的小船。1861 年,法国人莫尼埃(Joseph Monier)获得了制造钢筋混凝土板、管道和拱桥等的专利。1872 年,在纽约建造了第一座钢筋混凝土房屋,混凝土结构开始在实际工程中应用。

混凝土结构的发展大体可分为三个阶段:从 19 世纪中叶至 20 世纪初为第一阶段,由于所采用的钢筋和混凝土的强度比较低,主要用于建造中小型楼板、梁、柱、拱和基础等构件。结构内力和构件截面计算均应用弹性理论,采用容许应力法进行设计。从 20 世纪 20 年代到第二次世界大战前后为第二阶段。开始出现了装配式钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和壳体空间结构,但其主要成就在于预应力混凝土的发明和应用,混凝土和钢筋的强度也得到了提高。同时,构件承载力开始按破损阶段法计算,计算理论开始考虑材料的塑性性能,如板的塑性铰线理论。50 年代又提出了更为合理的极限状态设计法。第二次世界大战后至现在为第三阶段。在设计计算理论方面,随着数学、力学及现代试验技术的进一步发展建立了以概率理论为基础的极限状态设计法;高强混凝土和高强钢筋的出现和广泛应用,以及装配式混凝土、泵送商品混凝土等工业化的混凝土生产结构的发展,使混凝土结构的应用范围不断扩大。同时,计算机技术的应用和先进施工机械设备的发明,促进了一大批超高层建筑、大跨度桥梁、特长隧道、特殊建筑物和构筑物等大型结构工程的建造。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。计算机技术的发展也促进了人们应用非



线性有限元分析方法对各种复杂结构进行全过程受力的模拟;同时,进一步推动了对混凝土强度理论和本构关系的深入研究。

混凝土结构在工业与民用建筑、桥梁工程、道路工程、地下工程、水利工程、核电站、港口工程、航道工程、海洋工程以及水压机、机床、船舶等结构中都得到了广泛应用。

上海环球金融中心大厦就是混凝土结构的建筑,95层,高460m,内筒为钢筋混凝土结构;马来西亚吉隆坡的双塔大厦,高450m,为钢骨混凝土结构;上海的金茂大厦,其主体为钢筋混凝土结构,88层,高382m;世界上全部为轻混凝土结构的最高建筑是美国的休斯敦贝壳广场大厦,52层,高215m;跨度最大的混凝土建筑为意大利都灵展览馆,其拱顶由装配式构件组成,跨度达95m。德国采用预应力轻质混凝土建造了跨度为90m的飞机库屋面梁。

最高的电视塔是加拿大多伦多电视塔,高549m(混凝土结构部分),采用预应力混凝土;上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成,高456m;目前正在建设的中国最高的电视塔是广州新电视塔,总高610m,主塔高约450m(混凝土结构部分)。

1991年建成的挪威 Skarnsundet 预应力斜拉桥,跨度达530m;重庆长江二桥为预应力混凝土斜拉桥,跨度达444m;上海杨浦大桥为斜拉桥,主跨602m,其桥塔和桥面均为混凝土结构;世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克Ⅱ号桥,为敞肩拱桥,跨度390m,拱圈厚6.5m;我国跨度最大的拱桥是四川涪陵乌江桥,全长351.83m,主跨200m;我国最大的铁路拱桥为丰沙线上的永定河七号桥,跨度达150m;我国最大的预应力连续刚架桥是南昆铁路线上的清水河大桥,主桥三跨为72m+128m+72m。

1989年建成的挪威北海混凝土近海采油平台,水深216m。

世界上最高的重力坝是瑞士狄克桑斯大坝,坝高285m,坝顶宽15m,坝底宽225m,坝长695m;我国最高的重力坝为龙羊峡水电站的拦河大坝,坝高178m,坝顶长393.4m,坝顶宽15m,坝底宽80m;长江三峡水利枢纽工程是世界上最大的水利工程,大坝高186m,坝体混凝土用量达1527万 m^3 。世界上最高的钢筋混凝土拱坝是格鲁吉亚的英古力坝,高272m;我国目前最高的混凝土拱坝是雅砻江二滩双曲拱坝,高240m。

混凝土的发展方向是高强、轻质、耐久(抗磨损、抗冻融、抗渗等)、抗灾(抗震、抗风、抗火、抗爆等)。目前国内常用的混凝土强度等级为C20~C40,国外常用的强度等级为C60,在实验室我国已制成C100以上的混凝土,在工程应用中达到C80。各种特殊用途的混凝土不断研制成功并获得应用,例如超耐久性混凝土的耐久年限可达500年;耐热混凝土可耐达1800℃的高温。高强高性能混凝土、钢纤维混凝土、聚合物混凝土、轻质混凝土、加气混凝土、碾压混凝土、再生骨料混凝土、陶粒混凝土,防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土以及智能型混凝土及其结构也正在研究,并且有些已应用于实际工程中。同时,工业废渣和废料(如炉渣、矿渣、粉煤灰、硅灰等)作为掺合料或骨料用于混凝土中,不但改善了混凝土的性能,而且对环保和利废具有重要的意义。

混凝土结构所用钢筋的发展方向是高强度、耐腐蚀、低松弛、较好的延性和良好的粘结锚固性能。我国用于钢筋混凝土结构的热轧钢筋强度已达420N/mm²,有的可达600~900N/mm²;用于预应力混凝土结构中的热处理钢筋的抗拉强度一般为1250~1450N/mm²,钢丝的抗拉强度已达1800N/mm²。为了提高钢筋的防腐性能,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋和钢绞线已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。最近在国际上研究较多的是树脂粘结的纤维筋(fibre reinforced plastics, FRP)作混凝土及预应力混凝土结构的非金属配筋。常用的纤