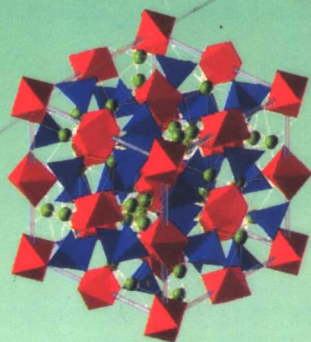


WUTP

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

混凝土工程与技术

文梓芸 钱春香 杨长辉 主编



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

混凝土工程与技术

主编 文梓芸 钱春香 杨长辉

Wuhan University of Technology Press

武汉理工大学出版社

【内容简介】

《混凝土工程与技术》是根据普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材建设与出版委员会拟定的计划编写的。其主要内容包括:混凝土结构形成与基本性能、混凝土原材料及生产技术、混凝土施工技术、预应力混凝土技术、混凝土制品生产技术、特殊混凝土技术、混凝土产品的检验与测试、混凝土的劣化诊断与修补加固和混凝土工程实例分析等内容。

本教材适合于材料科学与工程一级学科中材料专业及材料加工工程专业本科生使用,也适合土木建筑工程类各专业和交通、能源、建设等工程类专业选用,同时也可以作为建设工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土工程与技术/文梓芸,钱春香,杨长辉主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2004.12
普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

ISBN 7-5629-2173-3

I. 混… II. ①文… ②钱… ③杨… III. 混凝土-研究 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 084774 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:tiandq@mail.whut.edu.cn

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:25.25

字 数:646 千字

版 次:2004 年 12 月第 1 版

印 次:2004 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:35.00 元

《混凝土工程与技术》主编介绍

文梓芸 华南理工大学教授,博士生导师,水泥基复合材料学术团队负责人。长期从事水泥及混凝土化学、工艺学、混凝土耐久性及新型胶凝材料的科研与教学工作;在复合矿化剂用于水泥生产的机理研究,混凝土碱骨料反应机理及检测技术研究,新型胶凝材料的研究与开发,高性能混凝土技术的开发应用和商品混凝土产业的技术管理等方面都作出过重要的贡献;主持过国家自然科学基金、国家高技术发展(863)计划、广东省自然科学基金和广州市科技攻关等项目;发表过有影响的科技论文 90 余篇,合作发表重要学术专著两部 and 参与大型技术手册一部;培养过硕士、博士研究生 20 多人,是我国有名的水泥混凝土与胶凝材料科学专家。

钱睿香 东南大学教授,博士生导师。现任东南大学学术委员会委员、东南大学工程结构与材料试验中心常务副主任、中国土木工程学会高强高性能混凝土委员会、中国土木工程学会纤维水泥与纤维混凝土委员会委员、中国建筑学会建材分会理事,江苏省“333”工程培养对象。

主要研究领域为高性能土木工程材料,特别是高性能混凝土材料。曾承担和完成国家与省部级科研项目 10 余项、国际合作项目 1 项、企业和工程单位委托项目 10 余项。作为第一和第二完成人,完成国家自然科学基金项目两项,其中一项获得江苏省科技进步奖。参加国家自然科学基金重点项目 1 项。出版专著两部,在国内外重要学术刊物发表论文 60 余篇。

杨长辉 重庆大学教授,现任重庆大学材料学院基础教学实验中心副主任、重庆大学建设工程质量检测中心副总工程师,兼任重庆市硅酸盐学会理事长、中国硅酸盐学会混凝土与水泥制品委员会第六届理事、中国硅酸盐学会水泥分会水泥化学专业委员会第八届委员、重庆市建筑学会建材专委会副主任委员、国家计量认证评审员、重庆市科协注册咨询专家、重庆市混凝土协会理事。

从事的研究工作主要涉及水泥混凝土、碱性胶凝材料及其混凝土、固体废渣建材资源化、建筑结构加固材料与施工等方面。先后主持和参加国家、省部级项目 12 项,横向科研项目 5 项;获国家发明专利一项,科研获奖两项,发表科技论文 30 余篇,指导硕士研究生 11 人。

出版说明

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。教育部颁布重新修订的《普通高等学校本科专业目录》后,为适应 21 世纪人才培养需要,及时组织并实施了面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划、世界银行贷款 21 世纪初高等理工科教育教学改革项目,部分高等学校承担了其中材料科学与工程专业教学改革项目的研究与实践。已经拓宽了专业面的材料科学与工程专业,相应的业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的材料科学与工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。武汉理工大学出版社在教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会的指导和帮助下,经过大量的调研,组织国内几十所大学材料科学与工程学科的知名教授组成“普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材编审委员会”,共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问,遵照教育部材料科学与工程专业教学指导委员会的有关会议及文件精神,经过充分研讨,决定首批编写出版 14 种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。本套新编系列教材的编写具有以下特色:

教材体系体现人才培养目标——本套系列教材的编写体现了高等学校材料科学与工程专业的培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程专业的课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合后,组成一套完整的、各门课程有机联系的系列化教材。本套教材的编写除正文以外,还增加了本章内容提要、本章小结、思考题与习题等内容,以使教材既适合于教学需要,又便于学生自学。

教材内容反映教改成果——本套系列教材的编写坚持“少而精”的原则,紧跟教学内容和课程体系改革的步伐,教材内容注重更新,反映教学改革的阶段性成果,以适应 21 世纪材料科学与工程专业人才的培养要求。本套系列教材的编写中,凡涉及材料科学与工程学科的技术规范与标准,全部采用国家最新颁布实施的技术规范和标准。

教材出版实现立体化——本套教材努力使用和推广现代化的教学手段,实现立体化出版,凡具备条件的课程都将根据教学需要,及时组织编写、制作和出版相应的电子课件或教案,以适应教育方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施重新修订的本科专业目录后,组织全国多所高等学校材料科学与工程学科的具有丰富教学经验的教授们共同编写的一套面向新世纪、适应新专业的全新的系列教材。能够为新世纪我国材料科学与工程专业的教材建设贡献微薄之力,这是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为一套开创性的系列教材,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。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提宝贵的意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为我国高等教育事业的发展作出贡献。

武汉理工大学出版社

前 言

混凝土是世界上使用量最大、使用范围最广的工程材料,是人类文明建设中不可缺少的物质基础。混凝土工程与技术近三十年来获得飞速的发展,同时又面临着巨大的挑战。目前已进入高性能、高技术混凝土时代。混凝土生产已经从分散的、半机械作坊式的生产进入现代大工业的、集团式的产业化生产,包括混凝土生产的上下游产业一体化的“混凝土工业”(Concrete Industry)正在形成。大量高技术含量的混凝土品种不断涌现;高耐久性、高工作性、轻质而高强已经成为普通混凝土可实现的目标。高韧性、高抗冲击强度、超高抗压强度、高耐久性、智能型的高技术混凝土品种也已经陆续开发出来。与此相衔接,混凝土施工设备与技术发生了翻天覆地的变化,新的施工理念和施工方法层出不穷,机电一体化的、计算机自动控制的施工设备逐渐取代旧设备,施工效率成倍增长,施工质量不断提高。大量超高层建筑、大跨度桥梁、巨型水利水电大坝等混凝土建筑物已经成为现代文明的一个重要标志。与混凝土技术进步相联系,混凝土原材料质量与品种的重要性已经被人们认识,原材料生产技术上的革命也正在进行。水泥工业的现代化和水泥性能的提高与混凝土技术的进步始终互相推动,高性能水泥已经提上技术日程;混凝土集料质量的进步、品种的更新与生产的现代化虽然落后于混凝土技术的发展步伐,但已经受到重视;混凝土化学工业在外加剂方面的研制与使用促进了混凝土技术的长足发展;矿物掺合料的发展与产业化虽仍然落后于整体的发展水平,但正在迎头赶上。上述这些发展充分说明混凝土技术教育的重要性。

与此同时,混凝土工业正面临着前所未有的可持续发展问题的严重挑战。人类必须在基础设施建设和环境资源保护这两个同等重要的社会需求之间,找出解决矛盾的办法。作为发展基础设施最重要的参与者以及地球天然资源的主要消费者,混凝土工业需要重新定向,接受所有有利于环境的工艺技术,即与环境友好的混凝土技术。它们必须建立在下列四个要素组成的基础上:一是节约混凝土原材料(包括资源和能源);二是提高混凝土结构的耐久性;三是解决混凝土生产和使用中生态环境保护的问题;四是寻找能替代或部分替代硅酸盐水泥的新材料。在人类社会急速地膨胀性发展,但又严重缺乏科技投入和材料技术教育的背景下,上述问题没有一个是容易地解决的,这正是混凝土技术教育的迫切性和混凝土科学与技术工作者面临的巨大挑战。

本教材考虑到混凝土工程与技术涉及混凝土结构形成理论、原材料生产、拌合物生产、施工技术、工程质量检测、建筑物保养维护等方面的完整性、连续性和复杂性,故把内容分为 11 章。每一章都自成体系,有相对独立的内容。编写的宗旨是使全教材具有代表当今发展水平的先进性,较普遍应用的成熟性和作为本科生全面学习教材的基础性。同时,通过比较全面的叙述也向读者传达一个强烈的信息:混凝土工业必须把原材料生产、混凝土施工和使用过程中的维护整合成为一个体制上统一管理的体系,才能从根本上解决混凝土目前存在的问题。混凝土新品种、新技术、新工艺和新设备还有很多,作为大学教材不可能一一列入,只能选择重要的作介绍。

学习本课程必须高度重视理论联系实际的原则,注意把课堂学习、讨论和现场参观实习紧

密结合起来,并安排必要的实验课。课堂教学中应该充分利用多媒体展示工程、工艺和设备的内容。课程考核应该注重学生对工程实际的认识和解决实际问题的能力。本教材编写的内容总量比较大,与不同学校、不同专业方向的需要会有所出入,各学校可以根据实际情况有所取舍,并确定本课程的实际学时数,突出重点教学内容。本教材建议学时数为70标准学时,其中课内学时数54学时,实验课8学时和现场参观实习8学时,具体可作如下安排:

《混凝土工程与技术》教学建议学时数安排

内 容	课堂教学学时数	实验学时数	参观实习学时数
第1章 绪论	2		
第2章 混凝土的材料与工程质量	6		
第3章 混凝土结构形成与基本性能	4	2	
第4章 混凝土生产技术	6		2
第5章 混凝土工程施工技术	6		2
第6章 预应力混凝土工程	3		2
第7章 混凝土制品生产工艺	6		2
第8章 特殊混凝土技术	7		
第9章 混凝土结构维修与加固	6	2	
第10章 混凝土的检验与测试	6	4	
第11章 混凝土工程实例	2		
合 计	54	8	8
总 计	70		

本教材参加编写的人员及分工如下:文梓芸负责编写第1章、第8章和前言;吴笑梅、文梓芸负责编写第2章;钱春香负责编写第3章;钱春香与薛峰负责编写第4章;陈春、耿飞、钱春香负责编写第5章;张亚梅、钱春香负责编写第6章;李效椿负责编写第7章;杨长辉负责编写第9章;殷素红、文梓芸负责编写第10章;陈剑雄负责编写第11章。全教材由文梓芸负责统稿并整理。

混凝土工程涉及面纷繁浩大,行业多,战线长,影响因素错综复杂。鉴于编写人员认识水平所限,本教材的错漏在所难免,敬请读者多提宝贵意见,在将来再版时补充和修订。

编 者

2004年6月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 混凝土工程与技术研究对象与内容	(1)
1.2 混凝土技术的发展史及现状	(2)
1.2.1 混凝土技术的发展史	(2)
1.2.2 混凝土技术的现状	(4)
1.3 混凝土工程的主要工艺过程	(6)
1.4 混凝土工业可持续发展的问题	(6)
思考题与习题	(7)
2 混凝土的材料与工程质量	(8)
2.1 概述	(8)
2.1.1 混凝土与建筑工程质量	(8)
2.1.2 原材料性能与混凝土质量	(9)
2.2 水泥	(10)
2.2.1 水泥的品种与性能	(10)
2.2.2 硅酸盐(系列)水泥的组成、生产工艺与性能	(12)
2.2.3 水泥建筑性能	(15)
2.2.4 水泥与工程质量	(16)
2.3 集料	(17)
2.3.1 集料品质与混凝土性能	(17)
2.3.2 粗集料与细集料	(21)
2.3.3 天然集料与人工集料	(25)
2.4 外加剂(Concrete Admixtures)	(26)
2.4.1 混凝土外加剂的分类及主要技术要求	(26)
2.4.2 减水剂的性能与应用	(27)
2.4.3 缓凝剂及缓凝减水剂的性能与应用	(30)
2.4.4 引气剂及引气减水剂的性能与应用	(31)
2.4.5 其他混凝土外加剂	(32)
2.4.6 外加剂与水泥及混凝土的相容性	(34)
2.5 矿物掺合料	(37)
2.5.1 矿物掺合料的定义及分类	(37)
2.5.2 粉煤灰	(38)
2.5.3 细磨高炉矿渣	(40)
2.5.4 硅灰	(43)
2.5.5 其他矿物掺合料	(44)

思考题与习题	(46)
3 混凝土结构形成与基本性能	(47)
3.1 混凝土内部结构的形成原理	(47)
3.1.1 混凝土内部结构概述	(47)
3.1.2 硅酸盐水泥的水化	(49)
3.1.3 水泥石的物理结构	(51)
3.1.4 界面过渡区	(54)
3.2 混凝土的基本性能	(55)
3.2.1 混凝土拌合物性能	(55)
3.2.2 硬化混凝土性能	(62)
思考题与习题	(76)
4 混凝土生产技术	(78)
4.1 混凝土配合比设计	(78)
4.1.1 普通混凝土配合比设计	(78)
4.1.2 高强及高性能混凝土配合比设计	(85)
4.2 预拌混凝土生产工艺	(87)
4.2.1 原材料的质量管理与控制	(87)
4.2.2 原材料的计量与调整	(90)
4.2.3 混凝土搅拌工艺	(92)
4.2.4 混凝土质量控制与管理	(95)
4.2.5 混凝土搅拌楼工艺设计	(102)
4.3 预拌混凝土的运输	(112)
4.3.1 运输方法及选择原则	(112)
4.3.2 运输车辆种类与性能	(112)
4.3.3 现场运输方式及设备	(114)
思考题与习题	(116)
5 混凝土工程施工技术	(118)
引言	(118)
5.1 模板工程	(119)
5.1.1 模板工程概述	(119)
5.1.2 各类模板的特性与应用	(124)
5.2 钢筋工程	(132)
5.2.1 钢材的种类	(132)
5.2.2 钢筋冷加工	(132)
5.2.3 钢筋的连接	(137)
5.2.4 钢筋的验收	(144)
5.3 混凝土的浇注与密实成型	(148)
5.3.1 混凝土浇注的目的	(148)
5.3.2 混凝土浇注的工艺及设备	(148)
5.3.3 振捣密实成型工艺	(151)

5.3.4	不振捣自密实成型工艺	(155)
5.3.5	混凝土工程施工缝	(156)
5.4	混凝土的养护	(157)
5.4.1	养护的重要性	(157)
5.4.2	养护方法	(157)
5.5	拆模与表面修整	(162)
5.5.1	模板拆除	(162)
5.5.2	混凝土表面修整	(164)
5.6	混凝土工程质量检查和验收	(165)
5.6.1	施工过程中的质量检查	(165)
5.6.2	混凝土强度检验与评定	(166)
5.6.3	混凝土外观质量及允许偏差检验	(169)
5.6.4	混凝土结构钢筋保护层厚度	(170)
	思考题与习题	(171)
6	预应力混凝土工程	(172)
6.1	概述	(172)
6.1.1	预应力混凝土的基本原理及分类	(173)
6.1.2	预应力的施加方法	(173)
6.2	预应力混凝土对材料的要求	(173)
6.2.1	混凝土材料的要求	(173)
6.2.2	预应力钢筋的选择与制作	(175)
6.3	预应力混凝土施工器具与设备	(178)
6.3.1	预应力锚具和夹具	(178)
6.3.2	预应力张拉设备	(181)
6.4	预应力混凝土施工	(183)
6.4.1	先张法及工艺要点	(183)
6.4.2	后张法及工艺要点	(185)
6.4.3	电热张拉及工艺要点	(186)
6.4.4	预应力损失及减少损失的措施	(187)
	思考题与习题	(189)
7	混凝土制品生产工艺	(190)
7.1	概述	(190)
7.1.1	混凝土制品的主要类型	(190)
7.1.2	混凝土制品的生产工艺过程	(193)
7.1.3	混凝土制品的生产组织方法	(194)
7.2	常见混凝土制品生产工艺举例	(196)
7.2.1	混凝土板材生产工艺	(196)
7.2.2	预应力混凝土管、桩材生产工艺	(200)
7.2.3	混凝土墙材生产工艺	(218)
	思考题与习题	(234)

8 特殊混凝土技术	(235)
8.1 大体积混凝土	(235)
8.1.1 概述	(235)
8.1.2 控制温度裂缝的技术措施	(236)
8.1.3 大体积混凝土工程实例	(240)
8.2 道路混凝土	(241)
8.2.1 概述	(241)
8.2.2 混凝土路面技术要求和材料要求	(242)
8.2.3 道路混凝土配合比设计	(245)
8.2.4 水泥混凝土路面的施工	(246)
8.3 纤维混凝土	(248)
8.3.1 概述	(248)
8.3.2 纤维增强混凝土的基本原理	(250)
8.3.3 钢纤维混凝土	(253)
8.3.4 玻璃纤维混凝土	(257)
8.3.5 聚丙烯纤维混凝土	(258)
8.4 喷射混凝土	(261)
8.4.1 喷射混凝土的用途	(261)
8.4.2 喷射混凝土的原材料选择和配合比设计	(262)
8.4.3 喷射混凝土施工工艺与施工机具	(264)
8.4.4 喷射混凝土特性	(265)
8.5 水下浇筑混凝土	(266)
8.5.1 概述	(266)
8.5.2 水下浇筑混凝土原材料选择	(267)
8.5.3 水下浇筑混凝土配合比设计	(268)
8.5.4 水下浇筑混凝土的性能	(269)
8.6 碾压混凝土	(270)
8.6.1 引言	(270)
8.6.2 碾压混凝土压实机理	(270)
8.6.3 碾压混凝土的分类、原材料与配合比设计	(271)
8.6.4 碾压混凝土施工要点	(273)
思考题与习题	(275)
9 混凝土结构维修与加固	(276)
9.1 混凝土工程的维修管理	(276)
9.1.1 维修管理的意义	(276)
9.1.2 混凝土工程维修管理的内容	(276)
9.1.3 维持和提高混凝土结构使用功能的措施	(277)
9.1.4 混凝土工程维修改造程序	(278)
9.2 混凝土的劣化	(278)
9.2.1 物理劣化	(278)

9.2.2 化学劣化	(279)
9.3 混凝土工程质量缺陷及检测	(279)
9.3.1 混凝土工程缺陷及产生原因	(279)
9.3.2 预防混凝土工程缺陷的措施	(280)
9.3.3 混凝土工程缺陷检测方法	(282)
9.4 裂缝及其修补	(286)
9.4.1 裂缝及其危害	(286)
9.4.2 裂缝的成因	(286)
9.4.3 裂缝的分类	(288)
9.4.4 裂缝检测	(288)
9.4.5 裂缝的控制与修补	(289)
9.5 混凝土结构可靠性鉴定	(293)
9.5.1 鉴定程序	(294)
9.5.2 混凝土结构构件可靠性评级	(294)
9.5.3 混凝土结构可靠性鉴定方法	(298)
9.6 混凝土结构加固技术	(298)
9.6.1 概述	(298)
9.6.2 混凝土结构加固方法及施工	(301)
思考题与习题	(316)
10 混凝土的检验与测试	(317)
10.1 混凝土原材料品质检验	(317)
10.1.1 水泥检验	(317)
10.1.2 集料检验	(323)
10.1.3 外加剂检验	(331)
10.1.4 掺合料检验	(334)
10.2 混凝土拌合物性能检验	(334)
10.2.1 工作性能	(334)
10.2.2 容积密度试验	(339)
10.2.3 含气量试验	(340)
10.3 混凝土力学性能检验	(341)
10.3.1 强度检验	(341)
10.3.2 非破损性检验	(346)
10.3.3 弹性模量试验	(347)
10.4 混凝土体积稳定性试验	(348)
10.4.1 收缩试验	(348)
10.4.2 受压徐变试验	(349)
10.5 混凝土抗渗性能试验	(350)
10.5.1 常规检验	(350)
10.5.2 非常规试验	(350)
10.6 混凝土抗冻融性能试验	(351)

10.7	混凝土碳化与钢筋锈蚀试验	(353)
10.8	混凝土抗硫酸盐腐蚀试验	(354)
10.9	碱集料反应试验	(355)
10.9.1	岩相法(ASTM C295)	(355)
10.9.2	测长法	(355)
10.9.3	化学法(ASTM C289)	(356)
10.10	其他性能试验	(356)
10.10.1	混凝土与钢筋握裹力试验	(356)
10.10.2	氯离子渗透性试验	(357)
	思考题与习题	(359)
11	混凝土工程实例	(360)
11.1	三峡大坝混凝土工程与耐久性试验研究	(360)
11.1.1	概述	(360)
11.1.2	坝体混凝土特点	(360)
11.1.3	主要材料的选择	(362)
11.1.4	混凝土裂缝的防止	(363)
11.1.5	三峡工程混凝土的长期性能和相关耐久性能研究	(365)
11.2	重庆轻轨交通现浇PC倒T梁混凝土工程施工与耐久性	(369)
11.2.1	重庆轨道交通线工程概述	(369)
11.2.2	PC倒T梁现浇混凝土工程概况	(370)
11.2.3	施工特点及难点	(372)
11.2.4	施工方案与工法制定	(372)
11.2.5	倒T梁混凝土配合比及性能	(373)
11.3	上海金茂大厦混凝土工程	(377)
11.3.1	工程简介	(377)
11.3.2	金茂大厦的混凝土工程	(378)
11.3.3	地下连续墙体与“超大超深”基坑支护技术	(379)
11.3.4	承台混凝土浇筑及降温措施	(379)
11.3.5	主楼核心筒体与外围“巨型柱”、楼面混凝土的施工	(381)
11.4	超高层住宅超高强钢筋混凝土柱的施工	(383)
11.4.1	工程概要	(383)
11.4.2	结构设计概要	(383)
11.4.3	混凝土配制材料及性能要求	(383)
11.4.4	实大施工实验	(384)
11.4.5	施工	(384)
11.4.6	混凝土质量管理	(385)
	思考题与习题	(387)
	参考文献	(388)

1 绪 论

1.1 混凝土工程与技术研究对象与内容

混凝土一词源于拉丁文术语“Concretus”，其意思是共同生存。

当今混凝土主要是指以水泥为主要胶凝材料的复合材料。它是目前世界上建筑工程中使用量最大、使用范围最广的工程材料。目前全球水泥年产量近 22 亿吨，由此估算的混凝土年用量超过 60 亿 m^3 ，其中，中国的水泥和混凝土产量约占全球的 40%（2003 年中国水泥产量已达 8.6 亿吨）。由此可见，混凝土的使用量和使用范围都比金属材料、其他无机非金属材料 and 有机材料大得多。正如英国的悉尼·明德斯(Sianey. Mindess)先生、美国的 J. 弗朗西斯·扬(J. Francis. Young)先生指出的“混凝土已经成为现代社会的基础，在日常生活中几乎各个方面都直接或间接地涉及到混凝土”。另一方面，混凝土构成了土木建筑工程结构的主体或框架，是承受荷载和气候环境侵蚀的主体，因此，混凝土结构与这些工程的使用性能、安全性能、耐久性能和与环境的适应性能都有着极其重要的联系。现在人们已经认识到，混凝土性能的最重要特征莫过于其耐久性，而这正是混凝土与其他材料相比较最优越之处。

混凝土工程与技术研究首先要解决的是混凝土材料生产的技术问题，包括混凝土原材料的生产技术和品种选择，混凝土配方的设计，混凝土产品的检验以及混凝土生产的工艺和工业装备的选择等。混凝土及其原材料的生产技术与装备一百多年来历经不断的更新与进步，至今已经进入了以高强和高性能为代表的高技术混凝土与各种特殊用途混凝土并驾齐驱以及自动化、信息化高效率生产混凝土的时代。但是，混凝土生产技术本身至今仍然是一门经验性很强的实验科学，还没有达到以理论为指导的目标成品设计和以原材料设计为基础的剪裁与组装设计的水平。

混凝土工程与技术研究另一个要解决的重大问题是混凝土工程施工的技术问题。混凝土拌合物的生产提供了达到最终设计要求的可能性和满足施工要求的工作性能，但是否能够得到合格的产品还要靠施工技术来实现。因此现代混凝土的施工必须不断地强化施工技术水平和采用各种新技术来保证产品的最终质量和施工的高效率，其中包括现场施工和工厂预制两种技术。混凝土性能与品种的不断扩展与进步促使了这两方面施工技术的不断更新。目前，施工技术方面要解决的问题较多地集中在如何控制混凝土的温度变化和体积变化，控制和减少开裂。

混凝土工程与技术研究的第三方面的内容是混凝土产品与工程的检验、测试与质量评估。分析对象首先是实验室混凝土试件和构件，但归根结底是已完成工程的混凝土质量。这两方面的检测结果必须有很好的 consistency，而目前对现场混凝土的质量还缺乏很好的监控手段。现代混凝土在性能方面的多样性促使检测项目不断扩大与更新，尤其是向耐久性性能方面的扩大与更新。但是，对耐久性的检测需要研究和开发的新项目还很多。

混凝土工程与技术研究面临的第四个重大问题是使用中的工程混凝土的劣化诊断与修补

加固。这方面技术在工程中应用十分迫切,很多新技术已经开始在工程中大量使用。但是这种技术必须建立在强大的混凝土科学研究基础之上,同时要以整体论的观点与方法作指导,否则,难以解决根本问题。

“混凝土工程与技术”是无机非金属材料专业本科生的专业主干课程和其他材料工程专业本科生的选修课程。其主要内容包括:混凝土拌合物的生产技术、混凝土的现场和工厂(预制)施工技术、预应力混凝土技术、混凝土制品生产技术、特殊混凝土技术、混凝土产品的检验与测试、混凝土的劣化诊断与修补加固以及混凝土工程实例分析等。

1.2 混凝土技术的发展史及现状

1.2.1 混凝土技术的发展史

专家指出,混凝土在工程领域发挥着其他材料无法替代的作用,已经成为现在社会文明的基石,是人类社会文明史发展的见证。从1824年发明硅酸盐水泥开始,混凝土就开始使用。这180年中,混凝土科学与工程经历了四个发展阶段。

(1) 混凝土材料科学探索时期

混凝土可以大量使用的胶凝材料——硅酸盐水泥出现于1824年。英国利兹的一个施工人员约瑟夫·阿斯普丁(Joseph. Aspdin)提出了“波特兰”水泥的一个专利。它是由煅烧某些磨细(粉状或加水成糊状)的石灰石,再掺入磨细的粘土,再将混合物在窑内燃烧至 CO_2 被分解逸出,最后将烧成物磨细制成水泥。因为硬化后的水泥酷似英国波特兰石场天然建筑石料,故命名为波特兰水泥。初时波特兰水泥是用立窑生产,1886年开始回转窑生产。1900年水泥的基本试验大部分标准化。1909年美国的托马斯·爱迪生(Thomas. Edison)发布一系列回转窑专利。我国1889年开始创建水泥工业。从此,水泥开始大量使用于土木建筑工程。各种用水泥拌制的混凝土陆续问世。

1850年,法国朗波特(Lambot)用钢筋网建造了第一条小型水泥船,萌发了预制钢筋混凝土的意念。1887年英国M.科伦(M. Koenen)首次发表了钢筋混凝土结构计算方法,不仅标志着钢筋混凝土时代的开始,并且开始了混凝土材料科学探索的时期。1918年,美国的D. A. 艾布拉姆斯(D. A. Abrams)建立了水灰比(W/C)强度公式。当混凝土充分密实时,其强度与 W/C 成反比。1930年,瑞士的鲍罗米(Belomey)根据大量试验数据,应用数理统计方法,纳入了水泥强度因素后,提出了混凝土强度与水泥强度等级及 W/C 之间的关系。确认了混凝土强度取决于水泥石性能,而水泥石性能又取决于自身的孔隙率。从此开始了混凝土材料设计的新时代。后来T. C. 鲍尔斯(T. C. Powers)又确立了混凝土强度增长与胶空比的关系,即已水化水泥浆体积与已水化水泥浆体积加毛细孔体积加气孔之和的比值,进一步反映了混凝土强度与毛细空隙的关系。可见,减少空隙率,增加大胶空比,能够提高混凝土强度。鲍尔斯的理论不仅对混凝土强度理论与实践有重要意义,而且对混凝土的渗透性、变形性的研究都有重要的意义。

(2) 干硬性混凝土和预应力及预制混凝土的时期

1928年,法国的E. 弗列辛涅(E. Freyssinet)提出了混凝土收缩和徐变理论,并采用了高强钢丝和研制了锚具,为预应力技术在混凝土中应用奠定了基础。1934年,美国发明了振动

器;随后,前苏联根据 W/C 理论开发了干硬性混凝土,通过降低水灰比获得高强度,并研制了许多高效重型设备。从此低水灰比、干硬性的高强度等级混凝土飞速发展;以干硬性混凝土技术为依托,又建立起预制混凝土构件工业。与此同时,预应力混凝土亦开始应用于工程之中。预应力混凝土主要从外部施力对混凝土进行改性。依靠机械张拉钢筋,称为机械预应力混凝土。20 世纪 50 年代,前苏联依靠膨胀混凝土在硬化过程中产生膨胀能,通过与钢筋的粘结力和末端锚固张拉钢筋而产生预应力,称之为化学预应力混凝土。1940 年,日本的吉田德次郎配制了 $W/C < 0.22$ 的混凝土,经加压与振动处理及施高温养护,获得了 28d 抗压强度 $> 100\text{MPa}$ 成果。但是人们已经认识到,通过干硬性混凝土达到高强是很不经济的。

(3) 外加剂使用和流动性混凝土时代

1937 年,美国的 E. W 斯克里彻取得了用亚硫酸盐纸浆废液改善混凝土和易性、提高强度和耐久性专利,昭示着外加剂和流动性混凝土时期的萌动。1962 年,日本的服务部健一等将萘磺酸甲醛高缩合物(聚合度 $n \approx 10$ 核体)用作混凝土分散剂,1964 年花王石碱公司将其作为商品出售,名为“麦地”(MT-150)高效减水剂。几乎与此同时(1963 年),前联邦德国研制成功三聚氰胺磺酸盐甲醛缩聚物,随后出现的还有多环氧树脂(NO89)。上述减水剂减水率都高达 20% ~ 30%。前联邦德国首先用三聚氰胺(Melment)研制成功坍落度为 18 ~ 22cm 的流态混凝土,标志了流动性混凝土时代的开始。我国 20 世纪 50 年代开始大量生产使用外加剂,最初主要产品有松香热聚物和松香皂类的引气剂、纸浆废液(木质素磺酸钙)、氯盐防冻剂等。1970 年,国家建材院、清华大学、江西水泥制品研究所率先推出萘系和三聚氰胺系高效减水剂。20 世纪 70 年代至 80 年代是我国高效减水剂发展的高潮时期,1999 年全国拥有外加剂骨干企业 482 家,总产量达 123.5 万 t,已居世界前列。

1936 年,保尔(Bell)提出了可泵性问题。随后格莱(Gray)、波波维茨等人对可泵性作了不同的解释。在此之前,1913 年,美国的柯尼尔·开(Cornell. Kee)设计出曲轴机构立式缸混凝土泵,并取得专利。1927 年,德国的弗得茨·海尔(Fritz. Hell)亦设计出同类型混凝土泵,并第一次获得成功的应用。1932 年,荷兰的库依曼将立式缸改为卧式缸,制造了库依曼型混凝土泵。这些都为泵送混凝土打下了基础,促成了 20 世纪 60 年代以后大流动性泵送混凝土的大量应用。

(4) 高强和高性能混凝土时代

人们很早就十分关注混凝土的高强(HSC)和高耐久性(HPC)问题,但不同时期的高强和高耐久性的含义并不相同。20 世纪 30 年代前全世界用体积配合比,混凝土强度只有 10 ~ 30MPa,二战后改为质量配合比,强度普遍为 25 ~ 40MPa。我国建国初期混凝土强度为 11MPa、14MPa、20MPa。国际上 20 世纪 50 年代的“HSC 强度”为 35MPa,60 年代为 40MPa,70 年代为 50MPa,80 年代为 60MPa,90 年代为 80MPa。美国混凝土学会(ACI)、国际预应力混凝土联合会(FIP)和欧洲混凝土委员会(CEB)在 1990 年、1992 年公布的报告都将“HSC 强度”界定为大于或等于 41MPa(不包括应用特种材料和技术制备的混凝土),其理由是超过 40MPa 后混凝土性能与生产工艺都会开始变化。随着研究工作的不断深化而逐步提高,目前抗压强度为 50MPa 或 60MPa 通常才被认为是 HSC。世界许多国家 20 世纪 60、70 年代开始大量使用 HSC 于高层建筑底桩、高强钢筋砂浆桩、公路桥的桩基、钻井平台、钢管柱混凝土、核电站等。我国已建成逾 150m 的超高层建筑已有 100 幢,其中一批使用了 C60 泵送混凝土,最高达 110MPa。如果考虑实验室研制的 HSC,则强度要高得多,例如使用优质天然骨料在实

验室可生产 230MPa 的混凝土,使用优质陶瓷骨料可以得到 460MPa 的混凝土,甚至使用轻骨料亦可配制大于 100MPa 的轻质混凝土。HSC 的技术发展经过三个阶段:没有减水剂前,靠低 W/C 、振动加压和高温养护制备为第一阶段;以高效减水剂为主开创了 HSC 发展的第二阶段;采用矿物质细粉料和高效减水剂双掺,以普通工艺制备(亦是当前配制 HSC 技术路线的主要特征)为第三阶段。

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)是 20 世纪 60 年代以后形成的新概念。1968 年以来日本、美国、加拿大、法国、德国等国家投入了大量财力、人力和物力致力于开发和研究具有高于普通混凝土性能的混凝土,并用于一些重要工程。1990 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)和 ACI201 委员会定名为“HPC”,它否定了过去过于偏重强度的发展道路,美国学者认为:HPC 是一种易于浇注、捣实、不离析,能长期保持高强度、高韧性和体积稳定性,在严酷条件下寿命很长的混凝土。ACI 认为 HPC 并不需要很高的抗压强度,但仍要大于或等于 50MPa。这种混凝土耐久性是指能抵抗气候的作用、化学侵蚀、腐蚀以及其他方面的劣化作用。加拿大学者认为:HPC 是一种具有高弹性模量、高密度、抗侵蚀、低渗透的混凝土。可见美国和加拿大学者侧重于硬化后的性能,特别是耐久性。日本学者则重视新拌混凝土的流动性和自密实性。我国学者及专家认为:高性能应体现在工程力学特性、新拌混凝土施工特性、使用寿命和节能利废(经济学特性)的综合能力之上,其技术特性是高密实与自密实性、高抗渗性、体积(或尺寸)稳定性和较高抗压强度。

由此可见,高强混凝土(HSC)是混凝土技术的高科技开发项目,已经在工程中大量采用;高性能混凝土(HPC)是混凝土科学技术的前沿领域,目前还处在研究和开发之中。

1.2.2 混凝土技术的现状

现代建筑结构与施工包括现场浇注与预制装配两种形式。围绕着这两种建筑方式,混凝土技术经历了从干硬性到流动性直至大流动性混凝土的发展过程;混凝土生产方式经历了现场加工到工厂化的预拌商品混凝土的转变;混凝土的施工技术也经历了从人工操作到全面机械化,以及泵送混凝土及预应力混凝土大量使用的转变。混凝土工程的生产效率与二次大战前相比已有翻天覆地的变化。混凝土工程的现状可以总结如下:

(1) 预拌商品混凝土的生产已成为土木建筑工程的骨干产业

20 世纪 60 年代以后,以大流动性混凝土技术为支撑,以建筑现代化为目标,各国纷纷建立起预拌商品混凝土行业,以取代现场加工混凝土的做法,取得了技术上、经济上和环保上的巨大效益。我国在 20 世纪 80 年代以后也开始出现该行业。至今,预拌商品混凝土行业在发达国家和我国的大、中城市已经成为土木建筑工程的重要支柱。目前,发达国家的预拌混凝土在混凝土总量中的比例已经达到 80% 以上。我国的北京、上海、天津、广州、常州等城市的比例也达到 70% 以上。我国预拌商品混凝土的远距离泵送、大体积、大方量、冬季和炎热条件下的施工技术已经成熟并普及,一些标志性工程达到了世界先进水平。

(2) 流动性和大流动性的泵送混凝土大量代替干硬性及塑性混凝土

由于外加剂性能的提高和磨细矿物掺合料的大量使用,大流动性、不泌水、不离析、宜泵送、宜成型、达到自密实的混凝土已经在日本、美国、欧洲和中国出现,混凝土的流动性(坍落度)已经达到历史的最高水平。泵送混凝土在建筑行业中已经普遍使用,自流平、自密实的混凝土在工程中也开始使用。干硬性及塑性混凝土所占的份额已经大幅下降。例如,上海的金