

普通高等教育“十三五”规划教材

► 赠电子教案及课件



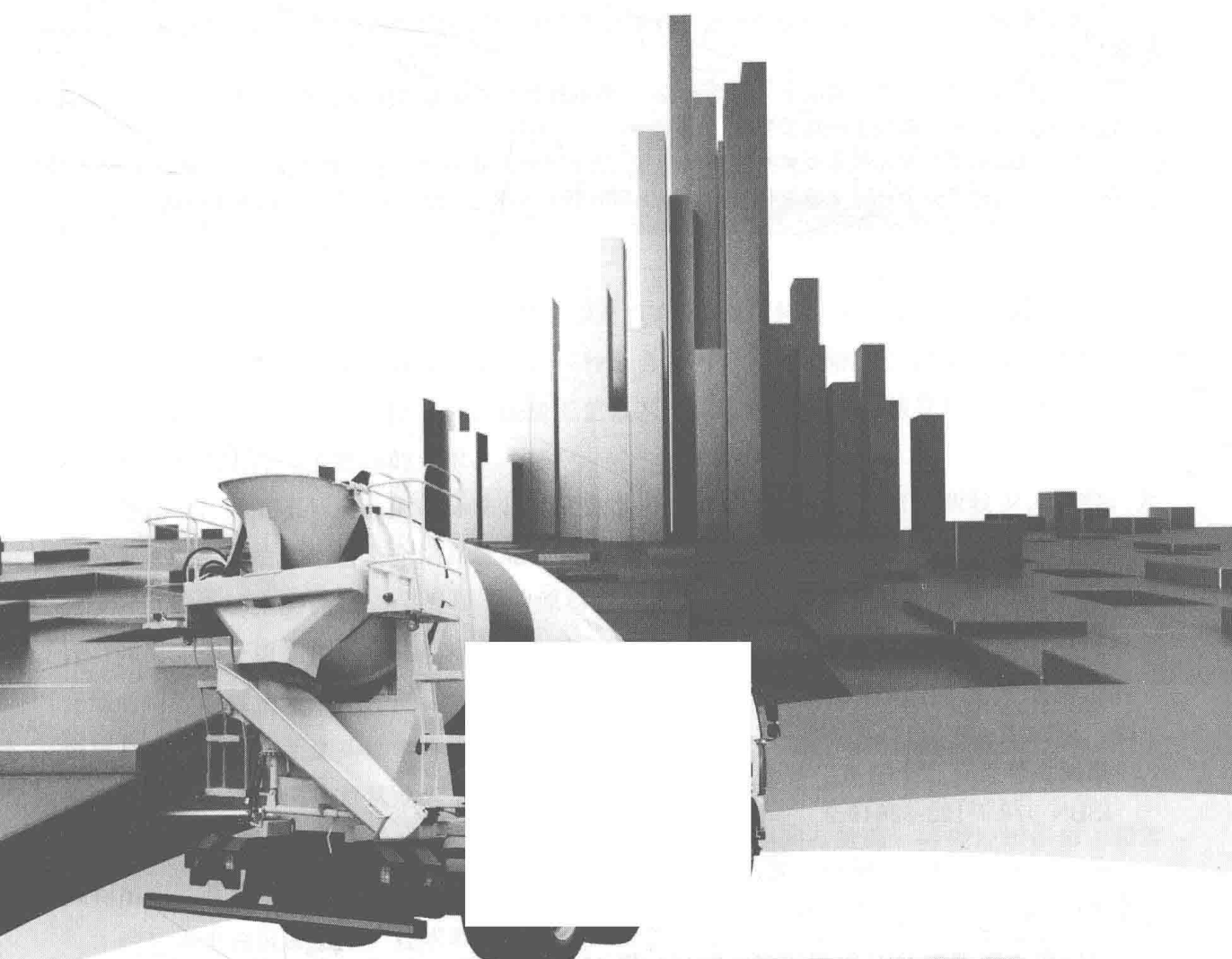
混凝土工艺学

侯 伟 主编 李坦平 吴锦杨 副主编 马保国 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材



混凝土工艺学

侯伟 主编 李坦平 吴锦杨 副主编 马保国 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

《混凝土工艺学》结合高等学校“卓越工程师教育培养计划”“工程教育专业认证”要求，着重介绍了混凝土生产技术和生产设备相关知识。内容共分为 10 章，主要包括混凝土的结构和组成材料、混凝土拌合物的性能、混凝土的力学性能、混凝土的耐久性、混凝土的配合比设计、混凝土的搅拌工艺、混凝土的输送工艺、混凝土的施工工艺、特种混凝土；附录中给出了混凝土工程常见外观质量弊病和防治措施以及常用标准目录。

本书配有丰富的电子资源（电子教案、PPT 电子课件以及模拟试卷），为教师多媒体授课、编写教案提供方便条件。

本书配套实验教材为《混凝土工艺学实验》，两本教材在理论和实验部分侧重点有所不同，建议读者结合使用，从而更全面地了解相关知识。

本书可供高等学校无机非金属材料工程专业、土木工程专业的师生作为教材使用，也可供从事相关研究的专业人员阅读参考；对于建筑材料方向师生和混凝土行业的工作人员也有较高的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土工艺学/侯伟主编. —北京：化学工业出版社，2018.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-32649-2

I. ①混… II. ①侯… III. ①混凝土-生产工艺-高等学校-教材 IV. ①TU528.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 153710 号

责任编辑：朱 理 闫 敏 杨 菁
责任校对：宋 夏

文字编辑：陈 雨
装帧设计：张 辉

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：三河市延风印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 18¾ 字数 500 千字 2018 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。



前言

混凝土是世界上使用量最大、使用范围最广的建筑材料。混凝土是由水泥、砂、石、水、外加剂和掺合料等多组分材料组成的一种复合材料，其性能除了受混凝土配合比设计影响以外，还受到混凝土的搅拌工艺、输送工艺以及施工工艺的影响。随着技术的进步，人们对混凝土的性能提出了更高的要求。

近几年，混凝土行业的国家标准和行业标准更新较多，而相关教材出版较少。目前，大部分关于混凝土的教材都是介绍高性能混凝土，对于大学生入门课程“普通混凝土”的介绍较少；主流教材主要侧重介绍混凝土的原材料、拌合物性能、力学性能及混凝土配合比设计，并未详细介绍搅拌设备、运输设备、浇筑设备、密实成型设备以及养护设备；主流教材介绍的特种混凝土，知识点更新较少，关于近十年内新型 3D 打印混凝土、透光混凝土的介绍更是极少提及，无法拓展学生视野。因此，现有的混凝土方面的教材既不能充分满足师生教学要求，也不能满足对从业人员进行技术指导的要求。鉴于此，笔者联合武汉理工大学、湖南工学院、安徽建筑大学城市建设学院、洛阳理工学院的同行教师，将理论知识和工程实践相结合，共同编写了本书。本书主要特点如下：

(1) 本书将混凝土生产技术和混凝土生产设备结合在一起来讲述。书中系统全面地对混凝土原材料、拌合物性能、力学性能、耐久性、配合比设计、搅拌工艺、输送工艺、施工工艺进行了介绍。

(2) 本书附录中增设了混凝土工程常见外观质量弊病和防治措施，目的就是为了让学生能够用所学理论知识分析实际工程中遇到的问题，培养学生分析解决实际问题的能力。

(3) 由于近几年混凝土相关的国家标准和行业标准更新较多，本书及时将知识点更新至目前最新标准，同时将标准代号附在每个知识点的位置，便于读者能够知晓理论知识来源。

(4) 本书配套实验教材为《混凝土工艺学实验》，理论教材侧重理论知识讲解，实验教材侧重实验操作，能够让学生做到学-做结合，提高学生动手能力。建议读者两本书结合使用，从而更全面地了解相关知识。

本书由侯伟担任主编，李坦平、吴锦杨担任副主编。第 1 章～第 5 章由侯伟编写；第 6 章由李坦平编写；第 7 章和附录由吴锦杨编写；第 8 章由石明明编写；第 9 章由茹晓红编

写；第10章由朱莉云编写。在本教材的编写过程中，王文革、周学忠、曾利群、赵洪、王宇东、袁龙华、吴智、张婵娟对教材初稿的审阅和修订提出了宝贵的意见，在此一并表示感谢。全书由侯伟统稿。

本书由武汉理工大学博士生导师马保国教授主审。编者对主审人的精心审阅表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，得到了教育部卓越工程师教育培养计划、湖南省重点建设学科“材料学”的资助，在此表示衷心的感谢。

由于建筑材料种类繁多，近几年混凝土理论和技术发展较快，且行业内各标准并不完全统一，加之编者水平有限，教材中如有不妥或遗漏之处，敬请广大读者和同仁批评指正，以便再版时修订和更正。(E-mail: 2007houwei@163.com)

编者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 混凝土发展概况及趋势	1
1.1.1 混凝土发展概况	1
1.1.2 混凝土发展趋势	3
1.2 混凝土的基本特征	4
1.2.1 混凝土的定义及分类	4
1.2.2 混凝土的特点	5
思考题	6
第2章 混凝土的结构和组成材料	7
2.1 混凝土的结构特点	7
2.1.1 混凝土内部结构概述	9
2.1.2 水泥石的组成	10
2.1.3 混凝土界面过渡区	10
2.2 水泥	12
2.2.1 水泥的组成与分类	12
2.2.2 硅酸盐水泥的质量指标	14
2.2.3 水泥的水化与凝结硬化	16
2.2.4 水泥组成对混凝土性能影响	20
2.3 矿物掺合料	25
2.3.1 粉煤灰	27
2.3.2 磨细矿渣	33
2.3.3 硅灰	36
2.3.4 偏高岭土超细粉	38
2.3.5 沸石粉	39
2.3.6 石灰石粉	40
2.4 骨料	42
2.4.1 骨料的定义与分类	42
2.4.2 骨料的作用	42
2.4.3 骨料的质量与性能	43

2.4.4	细骨料的技术要求	47
2.4.5	粗骨料的技术要求	50
2.5	外加剂	53
2.5.1	外加剂简介	53
2.5.2	减水剂	56
2.5.3	缓凝剂	63
2.5.4	早强剂	64
2.5.5	膨胀剂	66
2.5.6	速凝剂	67
2.5.7	泵送剂	68
2.5.8	引气剂	70
2.5.9	阻锈剂	73
2.5.10	防冻剂	74
2.6	混凝土用水	75
2.6.1	混凝土拌合用水	75
2.6.2	混凝土养护用水	76
	思考题	76

第3章 混凝土拌合物的性能 77

3.1	和易性	77
3.1.1	和易性的概念	77
3.1.2	和易性测定方法及指标	78
3.1.3	影响和易性的主要因素	82
3.1.4	改善混凝土和易性的措施	85
3.2	匀质性	85
3.2.1	影响混凝土匀质性的主要因素	86
3.2.2	提高混凝土匀质性的技术措施	87
3.3	含气量	88
3.4	凝结时间	88
	思考题	88

第4章 混凝土的力学性能 90

4.1	抗压强度	90
4.1.1	混凝土受压破坏理论	90
4.1.2	混凝土抗压强度	92
4.2	抗拉强度	93
4.2.1	轴心抗拉强度	93
4.2.2	劈裂抗拉试验	94
4.2.3	混凝土抗压强度与抗拉强度的关系	94
4.3	抗折强度	95
4.4	混凝土与钢筋的粘结强度	96
4.5	混凝土强度检测其他方法	96

4.6 混凝土强度早期推定及影响因素	97
4.6.1 混凝土强度早期推定	97
4.6.2 影响混凝土强度的因素	98
4.7 普通混凝土强度检验评定方法	102
4.7.1 统计法评定	102
4.7.2 非统计法评定	104
4.8 混凝土的变形	104
4.8.1 混凝土在非荷载作用下的变形	104
4.8.2 混凝土在荷载作用下的变形	107
思考题	109

第5章 混凝土的耐久性

5.1 混凝土的抗渗性	110
5.1.1 抗渗性表征方法	110
5.1.2 抗渗性的影响因素和提高措施	111
5.2 混凝土的抗碳化性	112
5.2.1 碳化对混凝土性能的影响	112
5.2.2 影响碳化速度的主要因素	113
5.2.3 提高抗碳化性能的措施	114
5.3 混凝土的抗冻性	114
5.3.1 冻融破坏对混凝土性能的影响	115
5.3.2 影响抗冻性的主要因素	115
5.3.3 提高抗冻性的措施	115
5.4 混凝土的化学侵蚀	116
5.4.1 硫酸盐侵蚀	116
5.4.2 酸性侵蚀	117
5.4.3 海水侵蚀	118
5.4.4 碱类侵蚀	118
5.5 混凝土中钢筋的锈蚀	119
5.5.1 钢筋锈蚀的机理	119
5.5.2 钢筋锈蚀的过程	120
5.5.3 影响钢筋锈蚀的因素	121
5.5.4 防止钢筋锈蚀的措施	122
5.6 混凝土的碱-骨料反应	122
5.6.1 碱-骨料反应的分类和机理	122
5.6.2 碱-骨料反应的条件	123
5.6.3 碱-骨料反应的特征	123
5.6.4 碱-骨料反应的预防	125
5.7 混凝土的耐磨性	126
5.8 混凝土的耐火性	126
思考题	127

第 6 章 混凝土的配合比设计	128
6.1 普通混凝土配合比设计流程	128
6.2 混凝土配合比设计步骤	130
6.2.1 确定初步配合比	131
6.2.2 确定基准配合比	135
6.2.3 确定试验室配合比	136
6.2.4 确定施工配合比	137
6.3 混凝土特殊性能校核	137
6.4 普通混凝土配合比设计实例	143
思考题	146
第 7 章 混凝土的搅拌工艺	148
7.1 混凝土搅拌的基本理论	148
7.1.1 混凝土搅拌的任务	148
7.1.2 混凝土搅拌的过程	148
7.1.3 混凝土的搅拌理论	149
7.1.4 影响混凝土搅拌质量的因素	149
7.1.5 混凝土拌合物匀质性的评价方法	150
7.1.6 提高混凝土搅拌质量的方法	150
7.2 混凝土搅拌机	153
7.2.1 搅拌机的工作原理及分类	154
7.2.2 搅拌机的机型代号	156
7.2.3 常用的混凝土搅拌机	157
7.3 混凝土搅拌楼	161
7.3.1 搅拌楼的分类及机型代号	161
7.3.2 输送系统	164
7.3.3 储料系统	167
7.3.4 计量系统	169
思考题	170
第 8 章 混凝土的输送工艺	171
8.1 常用混凝土输送设备简介	171
8.1.1 水平输送设备	171
8.1.2 垂直输送设备	172
8.2 混凝土搅拌运输车	173
8.2.1 搅拌运输车的工作方式	173
8.2.2 搅拌运输车的分类、组成及型号	174
8.2.3 搅拌运输车的传动系统	175
8.2.4 搅拌筒构造及工作原理	176
8.2.5 搅拌筒装料和卸料装置	178
8.2.6 供水系统	179

8.3 混凝土泵送设备	179
8.3.1 混凝土泵	179
8.3.2 混凝土布料装置及混凝土泵车	190
8.3.3 混凝土泵送设备维护	193
思考题	194
第9章 混凝土的施工工艺	195
9.1 混凝土的浇筑	195
9.1.1 浇筑前准备工作	195
9.1.2 浇筑的一般规定	195
9.1.3 混凝土的冬季施工	196
9.1.4 分缝处理	198
9.1.5 大体积混凝土浇筑	200
9.1.6 水下混凝土浇筑	201
9.1.7 柱基础混凝土浇筑	203
9.1.8 柱子混凝土浇筑	203
9.1.9 梁、板混凝土浇筑	204
9.1.10 剪力墙混凝土浇筑	204
9.1.11 楼梯混凝土浇筑	204
9.2 混凝土的密实成型	205
9.2.1 振动密实成型	206
9.2.2 压制密实成型	210
9.2.3 离心脱水密实成型	212
9.2.4 真空脱水密实成型	216
9.2.5 喷射成型	220
9.3 混凝土养护工艺	223
9.3.1 标准养护	223
9.3.2 自然养护	224
9.3.3 快速养护	225
思考题	230
第10章 特种混凝土	231
10.1 纤维增强混凝土	231
10.1.1 发展历程	231
10.1.2 性能概述	232
10.1.3 工程应用	236
10.2 聚合物混凝土	238
10.2.1 发展历程	238
10.2.2 性能概述	239
10.2.3 工程应用	242
10.3 大体积混凝土	243
10.3.1 发展历程	244

10.3.2	性能概述	245
10.3.3	工程应用	250
10.4	自密实混凝土	251
10.4.1	发展历程	251
10.4.2	性能概述	252
10.4.3	工程应用	255
10.5	清水混凝土	256
10.5.1	发展历程	256
10.5.2	性能概述	258
10.5.3	工程应用	260
10.6	透水混凝土	261
10.6.1	发展历程	262
10.6.2	性能概述	263
10.6.3	工程应用	265
10.7	透光混凝土	266
10.7.1	发展历程	266
10.7.2	性能概述	267
10.7.3	工程应用	268
10.8	3D打印混凝土	270
10.8.1	发展历程	270
10.8.2	性能概述	271
10.8.3	工程应用	272
	思考题	274

附录	275
----	-----

附录1	混凝土工程常见外观质量弊病和防治措施	275
附录1.1	蜂窝	275
附录1.2	麻面	276
附录1.3	孔洞	277
附录1.4	露筋	278
附录1.5	烂根	279
附录1.6	缺棱掉角	280
附录1.7	表面疏松脱落	281
附录1.8	裂缝	282
附录1.9	松顶	282
附录1.10	胀模	283
附录2	常用标准目录	284

参考文献	290
------	-----

第 1 章

绪 论

1.1 混凝土发展概况及趋势

1.1.1 混凝土发展概况

早在公元前，古罗马人就利用石灰与火山灰混合料浆加入石渣、砖块、天然卵石等制成混凝土。利用这种混凝土建成的各种建筑，如著名的万神庙、古罗马竞技场等已有 2000 年左右的历史，其整体结构或主要部分至今依然完好。我国也有利用石灰与火山灰筑造的部分长城和城墙，而且进一步利用人造火山灰——烧黏土或红砖粉拌合石灰，在明代和清代建成各种储水和输水建筑，其功效也历经考验。不同的是古罗马火山灰本身含有约 10% 的 Na_2O 和 K_2O （与石灰混合后实质就是最原始的碱激发水泥），我国和世界上大多数国家的火山灰含 Na_2O 和 K_2O 较少。因此，世界上大多数石灰火山灰混凝土，凝结硬化较慢、早期强度较低。随着历史的发展，石灰火山灰胶凝材料逐步被天然水泥和波特兰水泥所取代。对比混凝土所用胶凝材料种类的变化过程，可发现其实质上是矿物组成由基本独立的活性 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 矿物体系向合成的活性硅铝酸钙矿物体系的转变，也是其化学成分当中 CaO 含量与 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量之比大体上由低向高的转变。因而使混凝土具有更优良的工作性、凝结时间和早期强度。

1824 年英国工程师约瑟夫·阿斯普丁（Joseph Aspdih）获得第一份水泥专利，标志着水泥的发明。这以后，水泥以及混凝土才开始广泛应用到建筑上。19 世纪中叶，法国人约瑟夫·莫尼哀（1823—1906）制造出钢筋混凝土花盆，并在 1867 年获得了专利权。在 1867 年巴黎世界博览会上，莫尼哀展出了钢筋混凝土制作的花盆、枕木，另一名法国人兰特姆展出了钢筋混凝土制造的小瓶、小船。1928 年，美国人 Freyssinet 发明了一种新型钢筋混凝土结构形式：预应力钢筋混凝土，并于二次世界大战后被广泛地应用于工程实践。钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土解决了混凝土抗压强度高，抗折、抗拉强度较低的问题，使高层建筑与大跨度桥梁的建造成为可能。

19 世纪中后期，清朝洋务派进步人士掀起学习西方先进工业技术的高潮，并在上海建成了我国第一家水泥厂，当时，称水泥为“洋灰”。在 19 世纪末 20 世纪初，我国也开始有了钢筋混凝土建筑物，如上海市的外滩、广州市的沙面等，但工程规模很小，建筑数量也很少。1949 年以后，我国在落后的国民经济基础上进行了大规模的社会主义建设。随着工程建设的发展及国家进一步的改革开放，混凝土结构在我国各项工程建设中得到迅速的发展和广泛的应用。

早期混凝土组分简单(水泥、砂、石子、水),强度等级低,施工劳动强度巨大,靠人工搅拌或小型自落式搅拌机搅拌,施工速度慢,质量控制粗糙。高性能混凝土外加剂的广泛应用,是混凝土发展史上又一座里程碑。外加剂不但可以减少用水量、实现大流动性,还能够使混凝土施工变得省力、省时、经济。

20世纪30年代末,美国发明了松脂类引气剂和纸浆废液减水剂,使混凝土的耐久性以及和易性得到前所未有的提高。20世纪60年代,日本和德国相继成功研制出了萘系高效减水剂和三聚氰胺树脂系高效减水剂。在相同水胶比的条件下,掺入高效减水剂可以使混凝土的坍落度成倍提高,即使是水胶比很低的高性能混凝土,坍落度仍能达到200~250mm。其实,在混凝土中掺入外加剂的做法并非现代才有,罗马建筑告诉我们,当时的混凝土中经常加入动物血或鸡蛋白,来改善混凝土的工作性和耐久性。唐宋以来用桐油、糯米汁、牛马血、杨桃藤汁掺入石灰砂浆中提高防水与耐久性。近代的各种增强混凝土,掺加混合材与各种外加剂,都是用来改善混凝土性能,以达到增强、耐久、经济等目的。

20世纪末期,出现了集中搅拌的专业混凝土企业,使泵送混凝土施工中混凝土的搅拌供料有了保证。1978年,在江苏省常州市,中国建成第一家混凝土搅拌站,当时每盘混凝土只能搅拌 1m^3 。十一届三中全会后,我国确立了经济改革开放的基本国策,城市建设突飞猛进,混凝土搅拌站在沿海地区如雨后春笋般大量涌现。

跨入21世纪,计算机技术、机械工业技术、先进检测分析研究技术、现代管理技术的飞速进步,我国预拌混凝土技术的发展与时俱进,取得了世界瞩目的成就。天津117大厦其混凝土泵送高度达621m,创下混凝土泵送高度吉尼斯世界纪录。天津117大厦的建造成为中国乃至世界的又一标志性建筑,从混凝土实际泵送高度上,621m的泵送高度一举超越了迪拜哈利法塔601m的“净身高”,同时也超越了上海中心大厦606m的混凝土泵送高度,创造了世界混凝土泵送第一高度。

目前一些发达国家,如日本、美、英等许多国家已基本在全部混凝土中掺用外加剂,其中必掺的外加剂是引气剂,只有在少数的特种混凝土中才不掺引气剂。我国在20世纪50年代就开始使用外加剂,在70年代中期,又掀起了使用和研制外加剂的热潮,但与国外发达国家相比仍存在很大差距。尤其是引气剂的使用情况,目前与发达国家的使用情况几乎相反,只在少数的混凝土中掺用了引气剂。

20世纪50年代,国际上将高强混凝土定义为抗压强度35MPa及以上,70年代为50MPa及以上,80年代为60MPa及以上,90年代为80MPa及以上。我国《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)和《建筑材料术语标准》(JGJ/T 191—2009)将高强混凝土定义为:强度等级不低于C60的混凝土。我国天津117大厦,其中混凝土最高强度等级达到C120。现在人们已经能够配制150MPa的混凝土;配制200MPa的活性粉末混凝土(掺入纤维,去除粗骨料,增大堆积密度和匀质性)。活性粉末混凝土在薄壁钢管的约束下,抗压强度可提高至375MPa;使用金属粉末取代砂子时,混凝土的抗压强度甚至可达800MPa。

然而,在混凝土强度不断提高的进程中,混凝土的耐久性并非全部得到了提高,其中甚至还有降低的情况。从20世纪70年代起,发达国家已有投入使用的诸多基础建设和重大工程出现了过早破坏的问题。如美国有25.3万座混凝土桥梁,桥面板使用不到20年就开始破裂。英国英格兰的中环城快车道上有8座高架桥,全长21km,总造价约2800万英镑,而2004年修补费用达1.2亿英镑。我国房屋与基础设施的使用年限低于世界平均水平,且远远达不到设计的要求。有的公路桥梁甚至仅使用3~5年就出现了破损现象,个别桥梁建成

后尚未投入使用便开始维修,甚至边建边修,大大缩短了混凝土结构的服役寿命。其内在原因与水泥中 C_3S 含量和粉磨细度的盲目提高以及混凝土水胶比的不适当变化都有必然的联系。

为提高混凝土的耐久性,1968年以来,日本、美国、加拿大、法国、德国等国家大力投入开发和研究高性能混凝土。1990年,美国国家标准与技术研究院(NIST)和ACI201委员会将其定名为“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是一种易于浇筑、捣实、不离析,能长期保持高强度、高韧性和体积稳定性,在严酷条件下使用寿命很长的混凝土。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。然而,在何种应用环境下何种结构的混凝土才具有最佳的技术经济性能,以及如何采用切实可行的手段使各种混凝土具有相对的高性能,目前尚需不断深入的研究。

1.1.2 混凝土发展趋势

现代科技革命给混凝土的研究和发展带来巨大的冲击和挑战,同时也带来了机遇和促进。随着混凝土朝着高性能、智能和绿色化的方向不断发展,随着人类社会经济的高速发展,基础设施建设的不断加快,人民生活水平逐渐提高而对住房的需求日益增大,混凝土材料必将以其经济、耐久、智能、绿色等特点成为建筑工程领域中使用最广泛的材料。

(1) 高性能化

混凝土的高性能化主要体现在高工作性、高强度和高耐久性(水工混凝土的抗渗、寒冷地区的抗冻、机场和公路混凝土路面的抗冲耐磨、海工或化工混凝土工程的抗酸性侵蚀、大体积混凝土的抗裂等)几个方面。高工作性可通过复合超塑化剂来实现,使得混凝土能够无须振捣靠自重流平模板的每一个角落,即自密实混凝土。高强度可以通过复合各种纤维来实现,法国研究人员通过特殊工业复合直径0.15mm、长度13mm、最大体积掺量为2.5%的钢纤维,在400℃的养护条件下,制备出的超高强混凝土其抗压强度达到800MPa。这种混凝土在韩国得到了商业应用,如Cheong人行桥,跨度120m,拱高130m,其细长比创造了世界纪录。高的耐久性,根据不同要求复合不同的材料,如复合化学纤维、超细矿物掺合料或引气剂等可以提高混凝土的抗渗性和抗冻性,复合钢纤维和硅灰可以提高路面的抗冲耐磨性能,复合高炉矿渣和粉煤灰可以有效提高混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力,复合大掺量粉煤和相变材料(如冰)可以减少大体积混凝土内部温升从而控制其开裂等。

(2) 智能化

所谓智能化,就是在混凝土原有的组分的基础上复合智能型组分,使混凝土材料成为具有自感知、自记忆、自调节、自修复特性的多功能材料。自感知混凝土就是在混凝土基材中加入导电相可使混凝土具备本征自感应功能,例如在混凝土中加入具有温敏性的碳纤维,使得混凝土具有热电效应和电热效应。

日本学者研制了自动调节环境湿度的混凝土,该混凝土本身即可完成对室内环境湿度的探测,并根据需求对其进行调控。这种为混凝土材料带来自动调节环境湿度功能的关键组分是沸石粉,其作用机理为:沸石中的硅钙酸盐含有 $3 \times 10^{-10} \sim 9 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的孔隙,这些孔隙可以对水分、 NO_x 和 SO_x 气体选择性吸附,通过对沸石种类进行选择(天然的沸石有40多种),可以制备出符合实际需要的自动调节环境湿度的混凝土复合材料。它具有如下特点:优先吸附水分;水蒸气压低的地方,其吸湿容量大;吸放湿与温度相关,温度上升时放湿,温度下降时吸湿。这种材料已成功用于多家美术馆的室内墙壁,取得非常好的效果。

自修复混凝土是模仿动物的骨组织结构和受创伤后的再生、恢复机理,采用粘结材料和

基材相复合的方法，对材料损伤破坏具有自行愈合和再生功能，恢复甚至提高材料性能的新型复合材料。日本学者将内含粘结剂的空心胶囊掺入混凝土材料中，一旦混凝土材料在外力作用下发生开裂，空心胶囊就会破裂而释放粘结剂，粘结剂流向开裂处，使之重新粘结起来，起到愈伤的效果。

(3) 绿色环保化

混凝土虽然拥有众多优势，但其对环境的影响却不能忽视。混凝土每年大约消耗 15 亿吨的水泥和近 90 亿吨的天然砂石料，可以说是世界上最大的天然资源用户，其生产和应用必将给生态环境带来许多不利的影响。所以混凝土就必然面临这一问题所带来的冲击，可持续经济、循环经济、节能减排等一系列国家政策要求混凝土必须走绿色环保之路。

① 以工业废料代替水泥 许多工业废料如煤热电厂排放的粉煤灰、炼钢厂排放的粒化高炉矿渣（磨细）、工业燃煤后留下的未能充分燃烧的煤矸石（磨细），生产硅金属时排放的硅灰等都可以用来部分代替水泥，而不降低混凝土的性能。事实上，这些工业废料等量代替水泥后，如果配料得当，往往能够提高混凝土的各种性能，如强度和耐久性能。我国的三峡大坝，使用 2800 万立方米混凝土，混凝土约 6720 万吨，其中的粉煤灰替代水泥的量为 40%，既减少了成本，又成功解决了三峡大坝大体积混凝土温升的问题。硅灰已成为现代高强高性能混凝土必不可少的矿物掺合料之一。

② 建筑垃圾循环利用 如果将占混凝土质量 80%左右的天然骨料（砂、石）全部用工业和建筑垃圾代替，将具有重要意义。将工业和建筑垃圾（如拆迁的废砖和废旧混凝土）破碎后，经过分级、清洗和配比都可以制成再生骨料，再用其部分或全部代替天然骨料制成混凝土（再生混凝土），这种再生骨料的替代率越高，混凝土的绿色度自然就越高。香港理工大学的 S. C. Kou 等人将废旧混凝土破碎后制成再生粗细骨料，100%代替天然砂石，配制出 28d 强度为 64.2MPa 的高性能再生自密实混凝土。

1.2 混凝土的基本特征

1.2.1 混凝土的定义及分类

凡由胶凝材料、粗细骨料、水（必要的时候可加入外加剂）按一定比例，均匀搅拌、密实成型，经过一定的时间养护硬化后而制成的一种人造石材，称为混凝土（也称为砼）。

商品混凝土，又称预拌混凝土，简称为商砼，是由水泥、骨料、水及根据需要掺入的外加剂、矿物掺合料等组分按照一定比例，在搅拌站经计量、拌制后出售并采用运输车在规定时间内运送到使用地点的混凝土拌合物。

混凝土的种类很多，从不同的角度考虑，有以下几种分类方法。

(1) 按表观密度分类

① 轻混凝土：干表观密度小于 2000kg/m³，采用陶粒、页岩等轻质多孔骨料或掺加引气剂、泡沫剂形成多孔结构的混凝土，具有保温隔热性能好、质量轻等优点，多用作保温材料或高层、大跨度建筑的结构材料。

② 普通混凝土：干表观密度 2000~2800kg/m³，由天然砂石做骨料制成。是土建工程中最常用的混凝土，主要用作各种土木工程的承重结构材料。

③ 重混凝土：干表观密度大于 2800kg/m³，常采用重晶石、铁矿石、钢屑等做骨料和锶水泥、钡水泥共同配制防辐射混凝土，作为核工程的屏蔽结构材料。具有不透过 X 射线和 γ 射线的性能。

(2) 按所用胶凝材料分类

按照所用胶凝材料的种类,混凝土可以分为水泥混凝土、硅酸盐混凝土、石膏混凝土、水玻璃混凝土、沥青混凝土、聚合物混凝土等。

(3) 按流动性分类

按照新拌混凝土流动性的大小,可分为干硬性混凝土(坍落度小于10mm且需用维勃稠度表示)、塑性混凝土(坍落度为10~90mm)、流动性混凝土(坍落度为100~150mm)及大流动性混凝土(坍落度大于或等于160mm)。

(4) 按生产和施工方法分类

按生产和施工方法可分为预拌混凝土(商品混凝土)、泵送混凝土、喷射混凝土、压力灌浆混凝土(预填骨料混凝土)、造壳混凝土(裹砂混凝土)、碾压混凝土、挤压混凝土、离心混凝土、真空脱水混凝土、热拌混凝土等。

(5) 按用途分类

按用途分类,可分为结构混凝土、大体积混凝土、防水混凝土、耐热混凝土、膨胀混凝土、防辐射混凝土、道路混凝土等。

(6) 按强度等级分类

① 低强度混凝土,抗压强度 $f_{cu} < 30\text{MPa}$ 。

② 中强度混凝土,抗压强度 $30 \leq f_{cu} < 60\text{MPa}$ 。

③ 高强度混凝土,抗压强度 $60\text{MPa} \leq f_{cu} \leq 100\text{MPa}$ 。

④ 超高强混凝土,抗压强度在 $f_{cu} > 100\text{MPa}$ 。

(7) 按配筋方式分类

按配筋方式可分为素混凝土、钢筋混凝土、纤维混凝土、钢丝网混凝土、预应力混凝土等。

混凝土分类方式较多,本书并未逐一列举。混凝土的品种虽然繁多,但在实际工程中还是以普通的水泥混凝土应用最为广泛,如果没有特殊说明,狭义上通常称其为混凝土,也是本书所涉及的内容。

1.2.2 混凝土的特点

(1) 混凝土的优点

混凝土作为用量最大的土木工程材料,必然有其独特之处。它的优点主要体现在以下几个方面:

① 可塑性强。现代混凝土可以具备很好的可塑性,可以通过改变模板的尺寸和形状制成形态各异的建筑物及构件。

② 握裹力好。与钢筋等有牢固的粘结力,与钢材有基本相同的线膨胀系数,能在混凝土中配筋或埋设钢件制成钢筋混凝土构件或整体结构。

③ 经济性好。同其他材料相比,混凝土所需原材料价格较低,来源广,容易就地取材,结构建成后的维护费用也较低。

④ 安全性高。硬化混凝土具有较高的抗压强度,同时与钢筋有牢固的粘结力,使结构安全性得到充分保证。

⑤ 耐火性好。混凝土一般可有1~2h的防火时效,比钢铁更为耐火,钢结构建筑物在高温下很快软化,容易造成坍塌的现象。

⑥ 应用范围广。混凝土在土木工程中适用于多种结构形式,满足多种施工要求,可以根据不同要求配制出不同强度等级的混凝土加以满足,所以被称为“万用之石”。

⑦ 耐久性好。混凝土水化反应是一个长期而漫长的过程，水化需要数十年甚至上百年的时间才能完成，因此，混凝土本身就是一种耐久性很好的材料。古罗马建筑经过几千年的风雨仍然屹立不倒，这本身就意味着混凝土应该“历久弥坚”。

⑧ 能耗相对较低。混凝土及其制品的生产相对其他建筑材料能耗较低。

(2) 混凝土的缺点

① 抗拉强度低。混凝土抗拉强度是混凝土抗压强度的 $1/10$ 左右，是钢筋抗拉强度的 $1/100$ 左右。

② 延展性差。混凝土属于脆性材料，变形能力差，只能承受少量的张力变形（约 0.003 ），否则就会因无法承受而开裂；抗冲击能力差，在冲击荷载作用下容易产生脆性断裂。

③ 自重大。高层、大跨度建筑物要求材料在保证力学性质的前提下，以轻为宜，而普通混凝土干表观密度一般为 $2000 \sim 2800 \text{ kg/m}^3$ 。

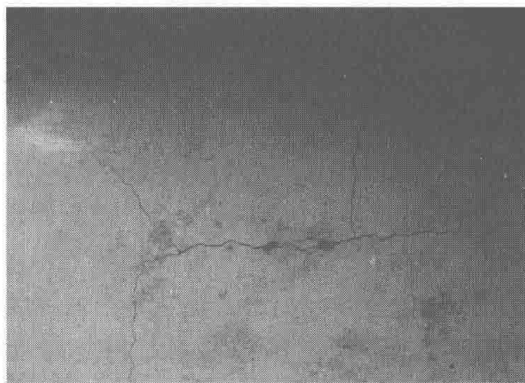


图 1-1 水泥用量多导致混凝土干缩开裂

④ 体积稳定性差。尤其是当水泥浆量过大时，这一缺陷表现得更加突出。随着温度、湿度、环境介质的变化，容易引发体积变化，产生裂纹等内部缺陷，直接影响建筑物的使用寿命，如图 1-1 所示。

⑤ 热导率大，保温性差。普通钢筋混凝土热导率高达 $1.74 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，而泡沫混凝土（ $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ ）的热导率为 $0.22 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，相差约 8 倍。

⑥ 生产周期长。混凝土硬化较慢，水化至少 28d 才能达到设计强度值，并且在之后的漫长

时间内，混凝土水化可达数十年甚至上百年。

⑦ 生产工艺复杂，质量难以控制。混凝土的性能受到原材料、配合比、搅拌、运输、浇筑、成型及养护工艺的影响，由于各个阶段均存在许多不确定因素，各因素波动均有可能导致混凝土性能降低。如砂石含泥量过高导致的拌合物流动性较差，混凝土后期容易产生开裂；浇筑过程中工人加水导致混凝土强度不足；振捣过程中的过振或漏振导致密实性较低；养护时间不足引起的一系列问题等，均会降低混凝土的工程质量。

与此同时，在混凝土新技术平台上，混凝土还呈现出如下特点：减少了强度对水泥的依赖性；水胶比较低，浆骨比较大；严酷环境下的工程增加，使耐久性要求日益突现；在水泥水化热增大、强度提高的同时，结构尺度增大，改变了大体积混凝土的概念；混凝土强度使用范围很宽，从 C10 到 C120 都可适用。

思考题

- 1.1 混凝土的分类方法有哪几种？
- 1.2 你对你所在城市周边混凝土的发展过程和发展趋势有什么看法？
- 1.3 为什么混凝土是使用最广泛的工程材料？
- 1.4 与钢材相比，将混凝土用于结构工程中能带来哪些好处？
- 1.5 混凝土的缺点是什么？