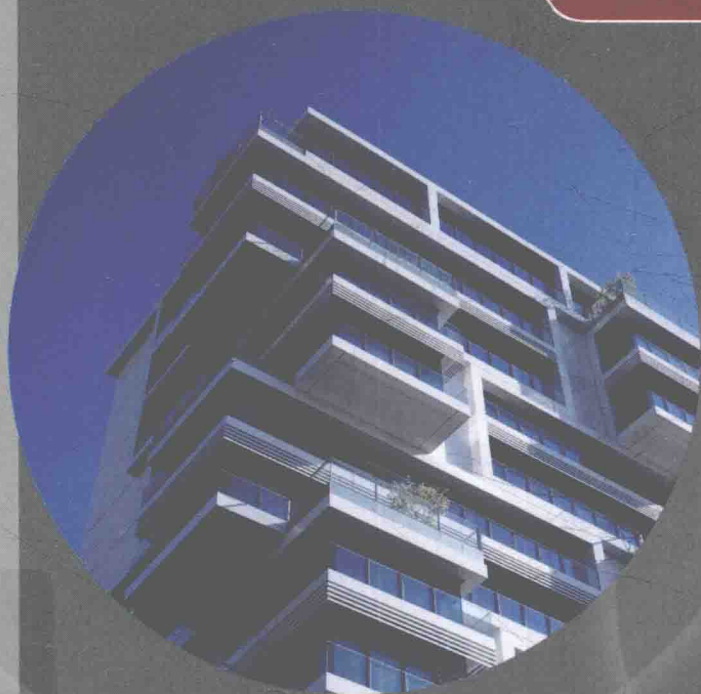


混凝土质量控制 原理与技术

王 冲 金 成 编著
张凌云 主审



科学出版社

混凝土质量控制原理与技术

王冲 金成 编著

张凌云 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

混凝土是工程建设中使用范围最广、应用量最大的人造材料,其质量决定着建设工程的质量高低与结构安全。本书全面概述混凝土的特性及其技术发展,系统阐述混凝土的组成与结构、原材料质量、性能、配合比等,详细介绍混凝土的生产与施工及混凝土质量评价,总结分析混凝土裂缝成因与裂缝控制技术,列举一些特殊混凝土的原材料、配合比要求,以及施工要点。

本书可作为高等院校土木工程专业与无机非金属材料专业的教材,也可作为建筑行业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土质量控制原理与技术/王冲,金成编著. —北京:科学出版社,2017.9
ISBN 978-7-03-054592-3

I. ①混… II. ①王… ②金… III. ①混凝土质量-质量控制-高等学校-教材 IV. ①TU528.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 236966 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年9月第一次印刷 印张:17

字数:324 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

王冲,男,1972年11月出生,博士。重庆大学材料科学与工程学院建筑材料工程系教授、博士生导师。负责国家自然科学基金、交通部西部交通科技项目、重庆市科学技术委员会及企业合作项目等,以第一作者或通讯作者发表SCI/EI检索论文30余篇,获得发明专利4项,主笔或参编住房和城乡建设部行业标准及重庆市地方工程建设标准多部。

金成,男,1973年4月出生。宁夏路桥工程股份有限公司总工程师。宁夏回族自治区交通工程技术带头人,宁夏回族自治区交通运输厅专家组成员。从事公路交通工程的技术与管理20余年。作为项目经理、技术负责人,负责宁夏境内第一条公路隧道工程建设,以及多项重点公路工程建设。

前 言

混凝土是工程建设中用量最大、使用范围最广的人造材料,几乎所有的建设工程都要用到混凝土材料。混凝土质量的好坏决定工程的质量与结构的安全。混凝土质量控制不仅是工程技术问题,还需要专业的基础理论知识的指导,要求参与混凝土质量控制的技术人员了解和掌握混凝土相关知识与技术,对确保工程质量至关重要。

为保障工程质量,提升员工技术水平,宁夏路桥工程股份有限公司对技术人员的培训已长期化和制度化,培训中一直在物色合适的培训教材。不过,现有著作或教材要么专注于介绍混凝土的基础理论,要么只偏重混凝土的工程技术,难以将混凝土基础理论与工程技术很好兼顾。基于这一原因,宁夏路桥工程股份有限公司组织编写了混凝土培训教材。教材内容要求涵盖混凝土的基础知识及工程应用技术各个层面,既可使有经验的员工了解混凝土技术原理,又可让已具备混凝土专业理论的新进人员尽快熟悉掌握混凝土工程应用技术。

本书内容编排分为9章。第1章是混凝土概述,目的是让读者了解混凝土的定义、特性与基本要求,清楚混凝土的技术发展历史与趋势;第2章是混凝土组成与结构,是混凝土质量控制的基础理论;第3~6章分别是原材料质量控制、混凝土性能、混凝土配合比及混凝土生产与施工,这4章内容在土木工程材料相关教材中出现较多,但本书注意与现有规范标准结合;第7章为混凝土强度评定与质量检测,内容与混凝土质量评价有关;第8章是混凝土裂缝成因及控制,特别强调混凝土开裂是混凝土的本质特性,关键是如何控制裂缝;第9章列举一些工程中已广泛应用的特殊混凝土及其应用技术。

本书由重庆大学王冲编写第1~5章,以及第9章;由宁夏路桥工程股份有限公司金成负责第6~8章;全书由王冲统稿。本书完稿后有幸邀请到宁夏交通运输厅总工程师张凌云担任主审。

在编写与成稿过程中,作者认为有必要与其他技术人员分享本书内容,希望有助于我国工程建设质量的共同提高,故而决定将之正式出版。

在编写本书过程中,参考了很多专家的文献,在此表示感谢!

因作者水平有限,本书难免存在不妥之处,恳请建设工程各界的技术人员批评指正,提出宝贵意见,谨此致谢!

王 冲 金 成

2017年5月

目 录

前言

第 1 章 混凝土概述	1
1.1 混凝土的定义	1
1.2 混凝土的分类	1
1.2.1 按表观密度分类	1
1.2.2 按用途分类	2
1.2.3 按胶凝材料分类	2
1.2.4 按生产和施工工艺分类	2
1.2.5 按配筋情况分类	2
1.3 混凝土的特性与基本要求	2
1.3.1 混凝土特性	2
1.3.2 土木工程对混凝土的基本要求	3
1.4 混凝土的历史与发展	3
1.4.1 现代混凝土的历史发展	3
1.4.2 混凝土发展趋势	6
1.5 混凝土在工程中的作用	8
1.5.1 结构承重	8
1.5.2 保温隔热	9
1.5.3 其他功能	9
1.6 混凝土的服役环境	9
1.6.1 荷载	9
1.6.2 化学物质侵蚀	10
1.6.3 湿度变化	10
1.6.4 温度变化	10
1.6.5 其他环境因素	11
第 2 章 混凝土组成与结构	12
2.1 混凝土组成	12
2.1.1 混凝土材料组成	12
2.1.2 混凝土的相组成	13
2.2 混凝土结构	13

2.2.1 水泥水化与水化产物	13
2.2.2 水泥石结构	17
2.2.3 水泥石组成与结构发展	23
2.2.4 过渡区结构	25
2.3 混凝土裂缝	28
第3章 原材料质量控制	30
3.1 胶凝材料	30
3.1.1 水泥	30
3.1.2 矿物掺合料	38
3.2 集料	45
3.2.1 细集料	45
3.2.2 粗集料	49
3.3 混凝土外加剂	54
3.3.1 减水剂	55
3.3.2 缓凝剂	60
3.3.3 早强剂	61
3.3.4 引气剂	63
3.3.5 膨胀剂	65
3.3.6 泵送剂	67
3.3.7 防冻剂	67
3.3.8 其他外加剂	68
3.4 混凝土用水	71
3.5 纤维	72
3.5.1 钢纤维	72
3.5.2 合成纤维	73
第4章 混凝土性能	75
4.1 混凝土拌合物性能	75
4.1.1 工作性	75
4.1.2 和易性评价指标	76
4.1.3 和易性影响因素	79
4.1.4 改善拌合物和易性的措施	81
4.2 混凝土的强度	81
4.2.1 混凝土强度理论	81
4.2.2 混凝土的裂缝扩展	83
4.2.3 混凝土强度类型	84

4.2.4 混凝土强度影响因素	86
4.2.5 混凝土增强技术	89
4.3 混凝土的变形性能	91
4.3.1 混凝土体积变形类型	91
4.3.2 混凝土体积变形影响因素	95
4.3.3 混凝土体积变形改善措施	96
4.4 混凝土的耐久性	96
4.4.1 混凝土耐久性类型	97
4.4.2 混凝土耐久性影响因素	101
4.4.3 混凝土耐久性改善技术	101
第5章 混凝土配合比	103
5.1 配合比表示方法与设计原则	103
5.1.1 配合比表示方法	103
5.1.2 混凝土配合比设计原则	103
5.2 普通混凝土配合比设计	104
5.2.1 普通混凝土配合比设计的步骤	104
5.2.2 配合比的试配、调整 and 确定	110
5.3 道路混凝土配合比设计	112
5.3.1 配合比设计技术要求	112
5.3.2 外加剂的要求	115
5.3.3 配合比参数计算	116
5.3.4 配合比确定与调整	119
5.4 纤维混凝土配合比设计	120
5.4.1 钢纤维混凝土	120
5.4.2 其他纤维混凝土	123
5.5 碾压混凝土配合比设计	124
5.5.1 基本要求	124
5.5.2 不掺粉煤灰的碾压混凝土	126
5.5.3 掺粉煤灰的碾压混凝土	127
5.6 自密实混凝土配合比设计	128
5.6.1 配合比参数计算	128
5.6.2 配合比的试配与调整	130
5.7 其他混凝土配合比	131
5.7.1 大体积混凝土	131
5.7.2 抗渗混凝土	132

5.7.3 轻集料混凝土	132
5.7.4 水下浇筑混凝土	135
5.7.5 透水混凝土	136
第6章 混凝土生产与施工	138
6.1 原材料计量	138
6.1.1 计量方法	138
6.1.2 计量设备	139
6.1.3 计量精度	139
6.2 混凝土搅拌	140
6.2.1 搅拌方式与类型	140
6.2.2 搅拌量	141
6.2.3 搅拌时间	141
6.2.4 投料顺序	142
6.3 混凝土运输	143
6.3.1 运输方法	143
6.3.2 混凝土泵送	144
6.4 混凝土浇筑与密实	145
6.4.1 浇筑工艺	145
6.4.2 混凝土振捣密实	148
6.4.3 自密实成型	150
6.5 混凝土养护	150
6.5.1 养护的重要性	151
6.5.2 养护方法	151
6.6 混凝土拆模	153
6.6.1 模板拆除顺序	153
6.6.2 拆模时间	153
6.7 混凝土表面修整	154
6.7.1 造成混凝土表观质量的原因	155
6.7.2 混凝土表面修整方法	156
第7章 混凝土强度评定与质量检测	158
7.1 混凝土强度评定	158
7.1.1 基本规定	158
7.1.2 混凝土的取样与试验	158
7.1.3 混凝土强度评定方法	160
7.1.4 混凝土强度检验评定	160

7.1.5 混凝土强度的合格性评定	164
7.2 回弹法推定混凝土实体结构强度	164
7.2.1 回弹仪要求	164
7.2.2 测区分布	165
7.2.3 回弹值测量	166
7.2.4 回弹值计算	166
7.2.5 碳化深度值测量	167
7.2.6 测强曲线	167
7.2.7 混凝土强度的推算	170
7.3 超声回弹综合法检测混凝土强度	171
7.3.1 基本原理	172
7.3.2 试验设备	172
7.3.3 测区数量及分布要求	173
7.3.4 回弹测试及回弹值计算	174
7.3.5 超声测试及声速值计算	176
7.3.6 结构混凝土强度推定	176
7.4 钻芯法检测混凝土强度	180
7.4.1 检测仪器	180
7.4.2 芯样钻取	181
7.4.3 芯样要求	182
7.4.4 芯样检测与抗压强度值计算	183
7.4.5 确定混凝土强度推定值	183
7.4.6 钻芯修正方法	184
7.5 混凝土弯拉强度评定	185
7.5.1 混凝土弯拉强度的合格判定	185
7.5.2 弯拉强度不合格时的处理	185
7.6 共振法检测混凝土强度	186
7.6.1 试验设备	186
7.6.2 试验步骤	186
7.6.3 结果计算	187
7.7 无损透水与透气法检测混凝土结构抗渗性	187
7.7.1 无损透水法检测混凝土结构抗渗性	187
7.7.2 无损透气法检测混凝土结构抗渗性	188
7.8 实体结构混凝土有害物质检验	189
7.8.1 氯离子含量检测	189

7.8.2 混凝土中碱含量检测	190
7.8.3 碱集料反应的危害性	191
7.8.4 游离氧化钙的危害性	192
7.9 混凝土结构现场在线监测技术	193
7.9.1 混凝土结构耐久性监测	193
7.9.2 大体积混凝土温升监测	194
第8章 混凝土裂缝成因及控制	195
8.1 混凝土裂缝成因	195
8.1.1 混凝土开裂原因	195
8.1.2 混凝土裂缝的形成	196
8.1.3 混凝土裂缝形成影响因素	201
8.2 混凝土裂缝预防	203
8.2.1 原材料质量控制	204
8.2.2 结构缝的布置	205
8.3 混凝土裂缝处理	206
8.3.1 掩饰裂缝	207
8.3.2 修补裂缝	207
8.3.3 封闭裂缝	208
8.3.4 加固处理	210
第9章 特殊混凝土及其应用	212
9.1 大体积混凝土	212
9.1.1 原材料要求	212
9.1.2 配合比要求	213
9.1.3 施工要点	213
9.2 自密实混凝土	214
9.2.1 原材料要求	214
9.2.2 配合比要求	215
9.2.3 自密实混凝土施工	215
9.3 道路混凝土	216
9.3.1 原材料要求	216
9.3.2 配合比要求	217
9.3.3 施工要点	217
9.4 抗渗混凝土	218
9.5 水下浇筑混凝土	219
9.5.1 原材料要求	219

9.5.2 配合比要求	221
9.5.3 施工要点	221
9.6 纤维混凝土	223
9.7 水泥类无机结合料	224
9.7.1 原材料要求	225
9.7.2 混合料组成要求	225
9.7.3 施工要点	226
9.8 轻集料混凝土	226
9.8.1 轻集料混凝土种类	226
9.8.2 轻集料混凝土技术特点	227
9.8.3 施工要点	227
9.9 透水混凝土	228
9.9.1 原材料要求	228
9.9.2 配合比要求	229
9.9.3 施工要点	229
9.10 清水混凝土	230
9.10.1 分类	230
9.10.2 施工要求	230
9.11 高性能混凝土	231
9.11.1 基本特征参数	231
9.11.2 主要技术途径	231
9.11.3 耐久性设计	232
9.11.4 高性能混凝土施工	235
9.12 活性粉末混凝土	237
9.12.1 活性粉末混凝土的特点	237
9.12.2 活性粉末混凝土的性能机理	238
9.12.3 活性粉末混凝土的应用	238
参考文献	240
附表 A 回弹法推算非泵送混凝土强度换算表	243
附表 B 回弹法推算泵送混凝土强度换算表	249
附表 C 非水平方向检测时的回弹修正值	255
附表 D 不同浇筑面的回弹修正值	256
附表 E 钻芯法强度推定区间系数表	257

第1章 混凝土概述

混凝土是工程建设中用量最大、使用范围最广的人造石材。混凝土类型繁多,优点与缺点都十分突出。结构承载是混凝土最主要的作用,但其主要承受压荷载,用于结构工程中一般需要与钢材等复合。特殊原材料与工艺制备的混凝土还可用于保温隔热、装饰、防水等工程。混凝土工程应用中必须考虑所处环境对混凝土结构与性能的影响。

1.1 混凝土的定义

混凝土是一种人造石材,简称砼,是以胶凝材料、粗集料、细集料和水按适当比例配合(必要时掺入各种外加剂),拌制成混合料,浇筑、成型密实后,经一定时间养护,硬化后具备一定强度和所需性能的材料。

混凝土所用胶凝材料种类非常广泛,如水泥、石灰、石膏、沥青以及聚合物、硫黄等,如果不作特别说明,工程中所指混凝土都是通用硅酸盐水泥拌制的混凝土;以其他胶凝材料制备的混凝土,通常冠有胶凝材料的名称,如硫黄混凝土、聚合物混凝土、沥青混凝土等。

1.2 混凝土的分类

混凝土可按照表观密度的大小、用途、胶凝材料种类、施工工艺、使用特性、掺合料和拌合物的流动性等多种方法进行分类。

1.2.1 按表观密度分类

工程中一般将混凝土按干表观密度,分为普通混凝土、轻混凝土和重混凝土。

1) 普通混凝土

按照国家行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55—2011^[1]的规定,干表观密度为 $2000\sim 2800\text{kg/m}^3$ 的混凝土称为普通混凝土。普通混凝土所用集料为常见砂、碎石,是土木工程中常用的承重结构材料。工程中常见干表观密度范围为 $2300\sim 2500\text{kg/m}^3$ 。

2) 轻混凝土

干表观密度不大于 1950kg/m^3 的混凝土为轻混凝土,采用陶粒等轻质材料作

为集料,或用发泡工艺等制备的多孔及大孔混凝土。轻混凝土主要用作轻质结构材料和保温绝热材料。

3) 重混凝土

干表观密度大于 2800kg/m^3 的混凝土为重混凝土。重混凝土一般由重晶石、铁矿石或钢渣等作集料配制而成,有时根据需要采用钡水泥、锶水泥等重水泥配制而成。重混凝土对 X 射线、 γ 射线屏蔽能力高,又称防辐射混凝土,主要用于核工业工程及其他有防辐射要求的工程。

1.2.2 按用途分类

混凝土按用途分类,可分为结构混凝土、抗渗混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、防辐射混凝土、道路混凝土、大体积混凝土、自应力混凝土和膨胀混凝土等。

1.2.3 按胶凝材料分类

混凝土按胶凝材料分类,可分为水泥混凝土、硅酸盐混凝土、沥青混凝土、聚合物混凝土、水玻璃混凝土和石膏混凝土等。土木工程中使用最多的是水泥混凝土,道路工程中多使用沥青混凝土。

1.2.4 按生产和施工工艺分类

混凝土按生产和施工工艺分类,可分为预拌混凝土(商品混凝土)、泵送混凝土、喷射混凝土、碾压混凝土、挤压混凝土和离心混凝土等。

1.2.5 按配筋情况分类

混凝土按配筋情况分类,可分为素混凝土、钢筋混凝土、纤维混凝土。

另外,混凝土还可按抗压强度分为低强混凝土($<30\text{MPa}$)、中强混凝土($30\sim 60\text{MPa}$)和高强混凝土($\geq 60\text{MPa}$);按每立方米混凝土的水泥用量分为贫混凝土(水泥用量 $<170\text{kg}$)和富混凝土(水泥用量 $\geq 230\text{kg}$)等。

1.3 混凝土的特性与基本要求

1.3.1 混凝土特性

混凝土是当今世界上用量最大的建筑材料,在工业与民用建筑、给排水工程、道路工程、桥梁工程、隧道工程、水利工程、地下工程、国防工程等方面都有广泛应用。混凝土的应用如此广泛,是由它的以下优点所决定,即:

(1) 与其他结构材料相比,耐久性好,用途广泛。

- (2) 主要组成材料——集料和水泥的原料来源丰富,可就地取材。
 - (3) 易成型为形状与尺寸变化范围很大的构件。
 - (4) 生产能耗比钢材低,可大量利用工业废料。
 - (5) 可以与钢材复合,能互补优缺点,扩大使用范围。复合方式包括:钢筋混凝土、预应力混凝土、钢纤维混凝土、钢管混凝土等。
 - (6) 与钢筋等复合使用时,有牢固的黏结力,可保护钢筋不易生锈。
- 当然,混凝土的缺点也很多,主要包括:
- (1) 凝结硬化较缓慢,施工周期长。
 - (2) 自重大(常用普通混凝土表观密度为 $2350 \sim 2450 \text{ kg/m}^3$)。
 - (3) 脆性大,抗拉强度低(为抗压强度的 $1/10 \sim 1/15$),变形性能差,易开裂。
 - (4) 与烧结砖、砌块等材料相比,混凝土导热系数(约为 $1.8 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)较大等。

1.3.2 土木工程对混凝土的基本要求

混凝土可适用于所有土木工程领域。在工程应用中,混凝土应满足以下几点基本要求:

- (1) 满足混凝土施工所要求的和易性,以便硬化后能得到均匀密实的混凝土。
- (2) 满足混凝土结构设计的强度要求,以保证构筑物能安全地承受各种设计荷载。
- (3) 具有与工程环境相适应的耐久性,以保证构筑物在所处环境中的服役寿命。
- (4) 满足经济与生态的要求,能源与资源消耗低、环境负荷少等。

1.4 混凝土的历史与发展

最早的混凝土采用石灰和火山灰作为胶凝材料,用水拌以砂、石制成。古罗马时代即以这种古代混凝土建成了许多有名的代表性建筑,如万神殿、竞技场、海港、灯塔、水渠等,这些古罗马建筑经历了 2000 多年,至今仍然保存。不过这种混凝土的缺点是硬化缓慢、强度较低,火山灰资源有限,品质不均,混凝土质量控制不易。

1.4.1 现代混凝土的历史发展

1. 混凝土与钢材的复合使用

1824 年英国学者 Joseph Aspdin 发明了波特兰水泥(我国称硅酸盐水泥),作为混凝土的胶凝材料才有了质的飞跃。不过,混凝土材料自身存在着抗拉强度低

的重大缺陷,只适用于抗压结构。19 世纪中期,钢铁工业得到发展并在混凝土中配入钢筋,形成钢筋混凝土复合材料(如图 1-1 所示),弥补了素混凝土抗拉强度不足的缺陷之后,才大大促进了混凝土应用于各种工程结构。1850 年法国学者 Lambot 用加钢筋网的方法制作了第一条钢筋混凝土船^[2]。1887 年 Koenen 首先发表了钢筋混凝土的计算方法^[2]。1928 年法国学者 Freyssinet 提出了混凝土收缩与徐变理论,并采用高强钢丝和锚具制出了预应力钢筋混凝土,为预应力钢筋混凝土的工程应用奠定了基础^[3]。预应力钢筋混凝土是混凝土技术的一次飞跃,使得混凝土结构的抗震、防裂性能极大提高,高度与跨度显著增加。

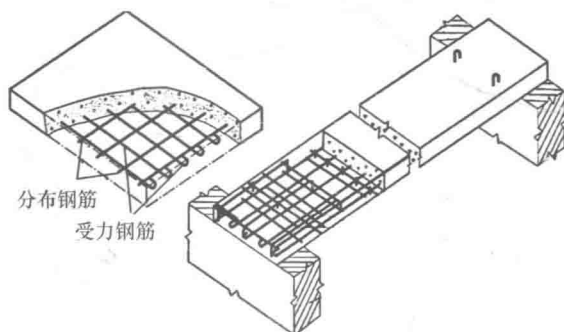


图 1-1 钢筋混凝土示意图

除了钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土这两种当前混凝土应用最主要的结构形式之外,另一种与钢材复合的结构形式正在兴起,那就是钢管混凝土。1879 年,英国就出现了用钢管混凝土修建的铁路桥桥墩,随后被用于多层工业厂房的结构柱。截止到现在,钢管混凝土已经被广泛应用于桥梁、建筑等工程中^[4,5]。

1907 年,苏联的涅克拉索夫(Иекрасов)首先应用了钢纤维增强混凝土^[6]。1940 年,意大利 Nervi 提出了钢丝网水泥这种配筋材料,于是出现了大跨度的钢筋混凝土建筑物和薄壳结构^[2]。后来,人们更进一步提出了纤维配筋的概念,由于纤维对混凝土的分散配筋,大大提高了混凝土的抗裂性,增加了混凝土的延性。目前,钢纤维、有机合成纤维、耐碱玻纤等已广泛应用于各类混凝土工程中。

2. 外加剂与掺合料是现代混凝土的基础

混凝土外加剂,特别是减水剂的问世,是混凝土技术的一个重大发展。20 世纪 40 年代,德国在废纸液中提取出了木质素磺酸盐减水剂,从此,木质素普通减水剂开始得到广泛应用。60 年代是混凝土外加剂发展最具有历史意义的时期,当时由于混凝土强度和流动性能的要求提高,必须开发新的减水剂品种。1962 年日本花王石碱公司的服部健一首先研制成功了萘系高效减水剂,即麦地减水剂^[7]。1964 年,联邦德国又研制成功磺化三聚氰胺高效减水剂(Melment)^[8,9],随后不