

新编

道路工程混凝土 实用技术手册

李继业 主 编
段绪胜 孙 勇 副主编



化学工业出版社

新编

道路工程混凝土 实用技术手册

王德胜 主编

王德胜 副主编



中国建材工业出版社

新编道路工程混凝土 实用技术手册

李继业 主 编
段绪胜 孙 勇 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书比较全面系统地介绍了在道路工程和城市道路工程常用的混凝土的发展概况、原材料组成、配合比设计、施工工艺及其他方面的内容。在道路工程上所用的混凝土种类很多,但限于篇幅的原因,本书主要介绍了高性能混凝土、高强度混凝土、道路水泥混凝土、道路沥青混凝土、道路碾压混凝土、道路耐磨混凝土、道路透水性混凝土、聚合物混凝土、纤维增强混凝土和再生集料混凝土等。

本书具有较强的实用性,特别适用于设计和施工单位在工程中的应用,既可作为道路工程和城市道路工程等领域的工程人员混凝土实用技术手册,也可作为其他建筑行业 and 高等学校相关专业的辅助教材或参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

新编道路工程混凝土实用技术手册/李继业主编.

北京:化学工业出版社,2012.2

ISBN 978-7-122-13257-4

I. 新… II. 李… III. 道路工程-混凝土施工-技术手册 IV. U415-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 004232 号

责任编辑:刘兴春
责任校对:边涛

文字编辑:颜克俭
装帧设计:杨北

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)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张24¼ 字数700千字 2012年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 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。

定 价:85.00 元

版权所有 违者必究

前 言

进入 21 世纪,这是我国国民经济发展的重要阶段,也是全面推进交通新的跨越式发展的关键时期。根据我国的基本国情,交通运输部提出了我国交通发展的宏伟蓝图。交通运输部发布的《交通运输“十二五”发展规划》中提出:“十二五”末,我国国家高速公路网将基本建成,高速公路总里程达到 10.8 万公里,届时将覆盖 90%以上的 20 万以上城镇人口城市。在公路交通方面,要全面完善公路网规划,推进国家公路网规划建设,形成层次清晰、功能完善、权责分明的干线公路网络系统,重点建设国家高速公路,实施国道与省道改造,继续推进农村公路建设。公路网规模进一步扩大,技术质量明显提升,公路总里程达到 450 万公里,二级及以上公路里程达到 65 万公里,国道、省道总体技术状况达到良好水平。

在 2011 年召开的全国农村公路工作会议上,交通运输部部长指出,“十二五”中央对农村公路建设投资将逾 2000 亿元,超过“十一五”投资力度,补助标准也会提高。资金投放优先考虑西部地区建制村通沥青(水泥)路建设,同时要加强危桥改造、安保工程建设,支持尚未通沥青(水泥)路的乡镇和建制村的农村公路建设、县乡道改造、连通工程、乡镇客运站等。根据“十二五”规划,到 2015 年,我国农村公路总里程将达 390 万公里;农村公路管理养护体制改革落实到位,基本实现“有路必养”。完成县、乡道中桥以上危桥改造。大力发展农村客货运输,实现所有乡镇和 90%的建制村通班车。由此可见,我国的公路工程建设任重而道远。

混凝土是现代建筑中运用最广泛的材料之一,它具有结构性能好、可塑性高、工程造价低、防水性能优良和适合工业化生产等优点。混凝土经过 20 世纪的发展,已经从一种简单的结构材料转变成一种富有诗意的浪漫型建筑材料,从一种单一性能的材料扩展成一种多性能的材料,从一种低技术含量的材料发展成一种高技术含量的材料。根据有关专家预测,到 21 世纪以后的更长一个时期,混凝土材料必然仍是现代公路和城市道路建设的主要建筑材料。随着高速高等级道路对道路工程功能的更广泛要求,对在道路工程常用混凝土也提出了一系列更高更新的要求。

工程实践证明:用于道路工程混凝土的种类很多,各自具有其独特的技术性能和施工方法,又分别适用于某一场合和环境。随着我国交通事业和城市建设规模的不断扩大,有些道路常用混凝土技术与施工工艺已在工程中广泛应用,并积累了丰富的施工经验;有些道路常用混凝土技术与施工工艺正处于探索和研究阶段,纵观其未来它们都具有广阔的发展前景。

我们根据一些混凝土公路工程的实践和科研项目,参考近几年国内外有关专家的研究成果,在总结、学习和发展的基础上,组织编写了这本《新编道路工程混凝土实用技术手册》,目的是通过介绍这些道路工程中常用的混凝土的发展历史、物理力学性能、组成材料、配合

比设计、施工工艺等，大力推广应用、发展这些道路混凝土的技术与施工工艺，为我国的公路和城市道路建设事业做出更大的贡献。

本书在编写的过程中注重实践与理论相结合，特别注意突出工程的应用性、实用性，尽量为设计和施工技术人员的应用创造有利条件。

本书由李继业担任主编，段绪胜、孙勇担任副主编，李海豹、李妮、王海宇参加了编写。由李继业负责全书的规划，段绪胜负责第一章至第六章的统稿，孙勇负责第七章至第十章的统稿。具体编写分工为：李继业编写第二章、第四章；段绪胜编写第一章、第五章；孙勇编写第七章、第八章；李海豹编写第三章、第六章；李妮编写第九章；王海宇编写第十章。

由于公路工程混凝土技术与施工工艺发展非常迅速，加上编者掌握的技术资料不全和水平有限，很难编写出一本内容非常齐全且技术比较先进的技术参考书。因此，疏漏和不当之处在所难免，敬请专家和读者提出宝贵的意见。

编 者
2012 年 2 月于泰山

目 录

第一章 高性能混凝土	1	一、普通高强混凝土的原材料	43
第一节 高性能混凝土的概述	1	二、高强混凝土配合比设计	51
一、研制高性能混凝土的重要性	2	三、高强混凝土应用实例	54
二、高性能混凝土的定义	3	四、高强混凝土的施工	58
三、实现混凝土高性能的技术途径	5	第三节 普通高强粉煤灰混凝土	67
第二节 高性能混凝土的组成材料	6	一、磨细粉煤灰在混凝土中的作用	68
一、胶凝材料	7	二、高强粉煤灰混凝土的配制	69
二、矿物质掺合料	8	三、高强粉煤灰混凝土的性能	71
三、粗细集料	11	四、配制高强粉煤灰混凝土对材料的要求	72
四、高效减水剂	13	和配制实例	72
第三节 高性能混凝土配合比设计	13	第四节 超细粉煤灰混凝土	76
一、配合比设计的基本原则	13	一、超细粉煤灰混凝土的性能	76
二、配合比设计的基本要求	14	二、超细粉煤灰混凝土的注意事项	78
三、配合比设计中应考虑的几个方面	15	三、超细粉煤灰混凝土的配合比	78
四、配合比设计的方法步骤	16	第五节 碱矿渣混凝土	78
第四节 高性能混凝土的施工工艺	20	一、碱矿渣混凝土胶凝材料的配制	79
一、施工前准备	20	二、碱矿渣混凝土的配合比设计	80
二、高性能混凝土的拌制	21	三、碱矿渣混凝土的技术性能	82
三、高性能混凝土的运输	21	第六节 超细矿渣混凝土	85
四、高性能混凝土的浇筑	22	一、矿渣的化学成分与性能	85
五、高性能混凝土的振捣	23	二、超细矿渣对混凝土性能的影响	86
六、高性能混凝土的养护	23	三、影响超细矿渣混凝土的主要因素	87
七、高性能混凝土的质量评价	24	第七节 硅灰粉混凝土	89
第五节 高性能混凝土的技术性能	26	一、硅灰粉混凝土的性能	89
一、高性能混凝土拌和物的性能	26	二、硅灰粉混凝土配合比设计	90
二、高性能混凝土硬化后的性能	28	第八节 混凝土的施工要点	93
第六节 高性能混凝土的工程应用	31	一、混凝土施工的一般规定	93
一、高性能混凝土在路桥工程中的应用	32	二、混凝土施工的其他规定	93
二、超塑早强高性能混凝土在道路工程中的应用	34	第三章 道路水泥混凝土	95
三、高性能聚合物混凝土和高性能纤维混凝土的应用	35	第一节 道路水泥混凝土的概述	95
四、高性能轻集料混凝土在桥梁工程中的应用	36	一、水泥混凝土路面的特点	95
第二章 高强度混凝土	39	二、水泥混凝土的发展概况	96
第一节 高强度混凝土的概述	39	第二节 道路水泥混凝土的组成材料	97
一、国际高强混凝土的研究和应用	39	一、水泥	97
二、国内高强混凝土的研究和应用	40	二、粗集料	99
三、高强混凝土的定义	42	三、细集料	103
四、高强混凝土的特点与分类	42	四、混凝土拌和用水	106
第二节 普通高强度混凝土	43	五、混凝土外加剂	106
		六、水泥混凝土路面对掺合料的要求	113
		七、接缝材料	114

八、钢筋材料	115	第七节 其他种类的沥青路面	192
九、其他材料	116	一、沥青玛蹄脂碎石路面	192
第三节 道路水泥混凝土配合比设计	117	二、透水性沥青路面	196
一、道路混凝土配合比设计的基本 要点	117	三、半刚性沥青路面	200
二、水泥混凝土配合比设计	119	四、浇注式沥青混凝土路面	201
三、道路水泥混凝土的参考配合比	124	五、环氧沥青混凝土路面	202
第四节 道路水泥混凝土的施工工艺	125	第五章 道路碾压混凝土	203
一、轨道式摊铺机铺筑施工	125	第一节 道路碾压混凝土的概述	203
二、滑模式摊铺机	131	一、碾压混凝土的发展概况	203
第五节 道路水泥混凝土质量控制	132	二、碾压混凝土的特点	204
一、施工质量控制的一般规定	132	三、碾压混凝土的主要种类	205
二、进行铺筑试验路段工作	132	四、碾压混凝土的压实机理	205
三、施工质量管理与检查	134	第二节 道路碾压混凝土的组成材料	206
四、交工质量检查验收	136	一、水泥	206
五、工程施工总结	137	二、细集料	207
第六节 道路水泥混凝土维修	138	三、粗集料	208
一、水泥混凝土路面的病害	138	四、掺和料	209
二、水泥混凝土路面的维修	139	五、外加剂	209
第四章 道路沥青混凝土	142	六、拌和水	210
第一节 道路沥青混凝土的概述	142	第三节 道路碾压混凝土配合比设计	210
一、道路沥青混凝土的特点	142	一、碾压混凝土配合比设计的特点和 原则	210
二、道路沥青混凝土的分类	143	二、碾压混凝土配合比设计步骤	211
三、沥青混合料的强度机理	144	三、碾压混凝土参考配合比	213
第二节 道路沥青混凝土的组成材料	145	第四节 道路碾压混凝土的施工工艺	213
一、沥青材料	145	一、碾压混凝土的施工工艺	213
二、粗集料	147	二、碾压混凝土的施工设备和施工 要点	216
三、细集料	147	三、提高碾压混凝土路面施工质量的 措施	219
四、矿粉填料	148	第五节 钢纤维增强碾压混凝土	221
五、其他品种的沥青	149	一、钢纤维增强碾压混凝土的原材料	221
第三节 道路沥青混凝土配合比设计	161	二、钢纤维增强碾压混凝土拌和料的 性能	222
一、沥青混凝土的配合比设计的目标	161	三、钢纤维增强碾压混凝土的力学 性能	225
二、沥青混合料配合比设计步骤	163	四、钢纤维增强碾压混凝土的韧性	226
三、沥青混凝土参考配合比	169	五、钢纤维增强碾压混凝土的工程 应用	227
第四节 道路沥青混凝土的施工工艺	170	六、钢纤维混凝土配合比设计	227
一、按施工工艺不同分类	171	第六章 道路耐磨混凝土	231
二、沥青路面类型的选择	171	第一节 道路耐磨混凝土的概述	231
三、沥青混凝土的施工工艺	172	一、混凝土磨损的类型	231
第五节 道路沥青混凝土的质量控制	181	二、混凝土产生磨损的危害性	233
一、沥青混凝土施工质量的一般规定	181	三、提高混凝土耐磨性的措施	233
二、施工前的材料与设备检查	182	第二节 道路耐磨混凝土的组成材料	234
三、铺筑试验路段的检查	182	一、胶凝材料	234
四、施工过程中的质量管理与检查	183		
五、交工验收阶段的工程质量检查与 验收	189		
六、文明施工措施	192		
第六节 沥青混凝土在工程上的应用	192		

二、粗细集料	236	性能	276
三、掺合料	237	第三节 聚合物水泥混凝土	278
四、外加剂	238	一、聚合物水泥混凝土的原材料	279
五、拌和水	238	二、聚合物对水泥混凝土（砂浆）的改性机理	282
第三节 道路耐磨损混凝土配合比设计	238	三、聚合物水泥混凝土的配合比	283
一、耐磨损混凝土配合比设计的原则	238	四、聚合物水泥混凝土的物理力学性能	284
二、工程中常用耐磨损混凝土配合比设计	239	五、聚合物改性混凝土（砂浆）的应用	289
第四节 道路混凝土耐磨性影响因素	244	第四节 聚合物胶结混凝土	292
一、混凝土抗压强度	244	一、聚合物胶结混凝土的原材料	292
二、混凝土砂率大小	244	二、聚合物混凝土配合比设计	296
三、粗集料最大粒径	244	三、聚合物胶结混凝土的物理力学性能	297
第五节 道路耐磨损混凝土的施工工艺	245	第五节 聚合物混凝土施工工艺	303
一、耐磨损混凝土施工注意事项	245	一、聚合物浸渍混凝土的施工工艺	303
二、耐磨损混凝土的真空处理	246	二、聚合物水泥混凝土的施工工艺	308
第七章 道路透水性混凝土	251	三、聚合物胶结混凝土的施工工艺	309
第一节 道路透水性混凝土的概述	251	第六节 聚合物混凝土在公路工程的应用	311
一、透水性混凝土的分类	251	一、聚合物混凝土罩面层的类型	311
二、透水性混凝土的特点	252	二、聚合物混凝土罩面层的技术性能	312
三、透水性混凝土的应用	253	第九章 纤维增强混凝土	317
四、透水混凝土砖的应用	254	第一节 纤维增强混凝土概述	317
第二节 道路透水性混凝土的组成材料	256	第二节 钢纤维增强混凝土	318
一、对水泥的要求	256	一、钢纤维混凝土的组成材料	319
二、对集料的要求	257	二、钢纤维混凝土的配合比设计	322
三、对外加剂的要求	257	三、钢纤维混凝土的技术性能	327
四、对拌和水的要求	257	第三节 玻璃纤维增强混凝土	330
第三节 道路透水性混凝土配合比设计	257	一、玻璃纤维增强混凝土的发展概况	330
一、透水性混凝土的原材料选择	258	二、玻璃纤维增强混凝土的特点	331
二、混凝土配合比设计参数的确定	258	三、玻璃纤维增强混凝土的组成材料	331
三、无砂透水混凝土配合比设计与试验	259	四、玻璃纤维混凝土强度影响因素及配合比	334
四、透水性混凝土的技术性能指标	262	第四节 其他纤维增强混凝土	336
第四节 道路透水性混凝土施工工艺	263	一、碳纤维增强混凝土	336
一、透水性混凝土的搅拌	264	二、聚丙烯纤维混凝土	339
二、透水性混凝土的成型	264	三、玄武岩纤维混凝土	342
三、透水混凝土的养护	265	第五节 纤维增强混凝土施工工艺	344
第五节 透水性沥青混凝土路面	265	一、钢纤维混凝土的施工工艺	344
一、透水沥青混凝土的性能	265	二、玻璃纤维混凝土的施工工艺	346
二、透水性沥青混合料设计	266	三、聚丙烯纤维混凝土施工工艺	348
第八章 聚合物混凝土	269	第十章 再生集料混凝土	350
第一节 聚合物混凝土概述	269	第一节 再生集料混凝土概述	350
第二节 聚合物浸渍混凝土	270	一、国外对再生混凝土的研究与应用	350
一、聚合物浸渍混凝土概况	270	二、国内对再生混凝土的研究与应用	351
二、聚合物浸渍混凝土的原材料	271		
三、聚合物浸渍混凝土的配合比设计	274		
四、聚合物浸渍混凝土的增强机理	274		
五、聚合物浸渍混凝土的物理力学			

三、建筑固体废弃物循环利用可行性	353	第四节 再生混凝土配合比设计	370
四、废弃混凝土材料完全循环再利用	353	一、再生集料混凝土单位用水量的	
第二节 再生集料性能与制备	355	确定	371
一、再生集料在路面工程中应用的优		二、再生集料混凝土的水灰比确定	372
越性	356	三、基于自由水灰比的再生集料混凝土配	
二、再生混凝土集料的性能	356	合比设计	373
三、再生集料的改性处理	358	第五节 再生混凝土的环境评价	374
四、再生集料的制备技术	359	一、再生集料混凝土组成及 LCA 参数的	
第三节 再生集料混凝土的性能	361	确定	374
一、再生集料混凝土性能影响因素	361	二、再生集料混凝土的环境评价	377
二、再生集料和再生集料混凝土的性质	361	参考文献	379
三、再生混凝土的基本性能	361		

第一章 高性能混凝土

水泥混凝土自问世以来，为人类的各类工程建设做出了巨大贡献，成为现代建筑中不可缺少的重要建筑材料。随着建筑业和建材科学的发展，混凝土的配制技术、品种和使用功能也随之发展。从混凝土工作性和性能角度来看，水泥混凝土技术，由初期的大流动性混凝土，发展到塑性混凝土；第二次世界大战后，由于混凝土施工机械的发展，需要提高混凝土质量，发展了半干硬性混凝土与干硬性混凝土；新型高效减水剂问世后，发展了流态混凝土；直至今日，由于混凝土技术水平的提高及工程特种性能的要求，高强度、高性能混凝土才得到迅速发展。

第一节 高性能混凝土的概述

高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）是20世纪80年代末、90年代初期，一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出的一种全新概念的混凝土，这是一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土。它以耐久性作为设计的主要指标，针对不同用途要求，对下列性能重点予以保证：耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性和经济性。高性能混凝土最突出的特点是以耐久性为首要设计指标，这种混凝土有可能为基础设施工程提供100年以上的使用寿命。

高性能混凝土区别于传统混凝土，高性能混凝土由于具有高耐久性、高工作性、高强度和高体积稳定性等许多优良特性，被认为是目前全世界性能最为全面的混凝土，至今已在不少重要工程中被采用，特别是在桥梁、高层建筑、海港建筑等工程中显示出其独特的优越性，在工程安全使用期、经济合理性、环境条件的适应性等方面产生了明显的效益，因此被各国学者所接受，被认为是今后混凝土技术的发展方向。

20世纪80年代以来，一些发达国家相继研制成功高性能混凝土，使混凝土进入了高科技时代，日益受到国际材料界和工程界的重视。很多国家把高性能混凝土作为跨世纪的新材料加以探究和利用，使其成为当代混凝土探究和应用领域中的一个热点。经过十几年的工程实践证明，高性能混凝土具有优良的工作性、较好的体积稳定性和很高的耐久性，而且具有显著的技术经济效益、社会效益和环境效益。高性能混凝土技术使混凝土的生产过程和应用过程实现了绿色化，混凝土从传统概念上得到飞跃，符合人类寻求与自然和谐、可持续发展的趋势，是一种具有广阔发展前景的环保型绿色建筑材料。

早在1992年，吴中伟教授首次将高性能混凝土介绍到国内。如今，我国高性能混凝土的探究、应用发展迅速。我国是生产和使用混凝土的大国，混凝土的质量在不断地提高，涉足高性能混凝土的探究和应用还是近10年的事。随着高性能混凝土的优越性不断地得到认可、混凝土应用技术的进步、城市建设速度的加快，高性能混凝土获得了迅速发展。

高性能混凝土在实际工程中获得了越来越广泛的应用，尤其是在高层建筑、大跨度桥梁、海上采油平台、矿井工程、海港码头等工程中的应用日益增多。例如，上海金茂大厦（C60）、北京静安中心大厦（C80）、辽宁物产大厦（C80）、南京希尔顿国际大酒店（C30和C50）、长春国际商贸城（C55）、广州虎门大桥（C50）、上海杨浦大桥（C50）等都是应用的典范。

全国很多研究单位已经研制出普通泵送高性能混凝土、大掺量粉煤灰高性能混凝土、高流态自密实高性能混凝土、纤维增加高性能混凝土、轻集料高性能混凝土、水下不分散高性能混凝土、港口工程和海洋工程高性能混凝土、高抛纤维高性能混凝土等。

一、研制高性能混凝土的重要性

(一) 混凝土耐久性是混凝土学科的重大研究课题

在原来的普通水泥混凝土结构设计中,往往只重视混凝土的强度,尚未意识到材料耐久性的重要性。在很多国家,至今在耐久性指标的测试方法上还没有统一的标准,再加上混凝土具有强的耐蚀性和耐候性,耐久性不良的质量事故要经过长时间后才会出现,所以在设计时忽视了对耐久性的全面考虑。但是,很多混凝土结构由于长期暴露于有害气体中或埋置于地下,或处于海水或海滩上,受到各种有害介质的侵蚀,很容易引起结构的破坏。

20 世纪 90 年代末,我国的一项抽样调查结果表明,大约有 40% 的混凝土碳化深度已达钢筋表面,在潮湿环境下建筑物中 90% 构件内钢筋已经锈蚀;我国所修建的高等级水泥混凝土公路,很多因达不到设计的使用年限而被迫提前维修或重新修筑,不仅严重影响交通和安全,而且造成巨大的浪费。为此,人们希望致力于提高混凝土的强度,已经不能满足更加坚固、更加耐久和更长寿命的要求。特别是 21 世纪开发重点将转向海洋、沙漠,甚至南极、太空和月球,因此对特殊性能和特殊用途的混凝土要求日趋突出,仅靠提高混凝土的强度,已无法满足这些要求。

众多工程实例证明,有些钢筋混凝土结构发生过早破坏,其原因不是由于强度不足,而主要是混凝土的耐久性不够。例如,1980 年 3 月 27 日,北海近海钻井平台 Alexander Kjell 号突然发生倒塌,造成 123 人死亡的恶性事故。前苏联的切尔诺贝利核电站,由于钢筋混凝土耐久性不足,造成因泄漏出现大面积的放射性污染,生态环境遭受严重破坏。日本的一些钢筋混凝土桥梁,投入不到 20 年因不能使用而被炸毁等。此外,由于混凝土耐久性不高,致使混凝土工程的维修费急剧增大。如何延长混凝土的使用寿命,发展高性能混凝土势在必行。

经过长期的工程实践充分证明,高强混凝土存在着如下缺陷:①强度越高,脆性越大;②自身收缩大,变形性能严重;③掺加硅灰粉的混凝土,后期强度增长减少。这就需要改善高强混凝土的性能,高性能混凝土也由此诞生。

工程实践经验和教训告诉人们,在进行钢筋混凝土结构设计时,对其耐久性要像对其强度一样对待。混凝土的高耐久性,是高性能混凝土非常重要的一个方面。因此,提高混凝土的耐久性是混凝土学科的重大研究课题。

(二) 混凝土在特种结构中应用范围更加广泛

随着科学技术的飞速发展,混凝土的应用范围越来越广泛。在未来的几十年里,海底隧道、海上采油平台、污水管道、核反应堆外壳、有害化学物的容器等恶劣环境下的混凝土结构物,对混凝土要求的使用寿命,而不再是普通混凝土的 50 年左右,将要达到上百年至几百年。这样,对混凝土的耐久性提出了更高要求。

高性能混凝土已在城市建设、建筑工程、地下及水下工程、海洋开发、宇宙航天、核能工程中广泛应用。英国在煤矿井壁衬砌工程中,采用了强度高达 100MPa 的高性能混凝土,以此来抵抗很高的水压力;美国芝加哥在城市建设中,采用了强度等级为 C95 的大坍落度高性能混凝土,不仅加快了施工速度,而且提高了工程质量。

综上所述,在很多特种结构中,混凝土是一种必不可少的建筑材料;而对这些结构工程来说,混凝土的耐久性与长期性显得更加重要,甚至比强度还重要。

(三) 混凝土新技术已进入高科技时代

对于普通水泥混凝土来说,从原材料的选择、配制,到其施工工艺,是比较简单的一种经验性总结。但从 20 世纪 70 年代末期,混凝土技术发生突破性进展,其强度已远远超出了工程所要求的范围,从而使混凝土技术进入高科技时代。

在胶凝材料(水泥)方面,球状水泥、调粒(级配)水泥、活化水泥、高强度等级水泥等的出现,为降低水灰比或增大流动性,配制高性能混凝土创造了物质基础;利用矿渣、粉煤灰、沸石、硅灰粉等超细掺合料,对改善和提高混凝土的性能起着重要的作用,成为配制高性能混凝土

不可缺少的组分；特别是高性能 AE 减水剂的问世，为高性能混凝土的发展提供了一种关键性的材料。

在日本已研制出耐久性达 500 年的混凝土。在水灰比为 0.50 的普通混凝土中，加入乙二醇醚衍生物及氨基醇衍生物，混凝土的耐久性可大幅度提高；其干燥收缩仅为普通混凝土的 50%~60%；其碳化的速度约为普通混凝土的 30%，可以有效防止钢筋的锈蚀；其密实度比较高，氯离子渗透速度仅为普通混凝土的 25%。另外，这种混凝土还具有优异的耐酸性，能有效地控制盐酸、硝酸对混凝土的渗透。

二、高性能混凝土的定义

何谓高性能混凝土？在 20 世纪 80 年代末，美国首次提出高性能混凝土这一名称，而后世界各国迅速开始研究和应用。在 20 世纪 90 年代以前，由于人们的认识不够统一，高性能混凝土没有一个确切的定义。

高性能混凝土可以认为是在高强混凝土基础上的发展和提高，也可说是高强混凝土的进一步完善。由于近些年来，在高强混凝土的配制中，不仅加入了超塑化剂，往往也掺入了一些活性磨细矿物掺合料，与高性能混凝土的组分材料相似，而且在有的国家早期发表的文献报告中曾提到：“高性能混凝土并不需要很高的混凝土抗压强度，但仍需达到 55MPa 以上”。因此，至今国内外有些学者仍然将高性能混凝土与高强混凝土在概念上有所混淆。在欧洲一些国家常常把高性能混凝土与高强混凝土并提。

高强混凝土仅仅是以强度的大小来表征或确定其何谓普通混凝土、高强混凝土与超高强混凝土，而且其强度指标随着混凝土技术的进步而不断有所变化和提高。而高性能混凝土则由于其技术物性的多元化，诸如良好的工作性（施工性）、体积稳定性、耐久性、物理力学性能等，而难以用定量的性能指标给其一个确切的定义。

不同的国家，不同的学者，因对高性能混凝土有各自的认识、实践、应用范围和目的要求上的差异，所以，不仅对高性能混凝土曾提出过不同的解释和定义，而且在性能特征上各有所侧重。

（一）美国对高性能混凝土的认识

1990 年 5 月，在美国马里兰州 Gaithersburg 城，由美国国家标准与工艺研究院（NIST）和美国混凝土学会（ACI）主办的讨论会上，高性能混凝土（High Performance Concrete，简称 HPC）定义为：具有所要求的性能和匀质性的混凝土。这些性能主要包括：易于浇筑、捣实而不产生离析；高超的、能长期保持其力学性能；早期强度高、韧性和体积稳定性好；在恶劣的使用条件下，使用寿命长。这种混凝土特别适用于高层建筑、桥梁以及暴露在严酷环境中的建筑物。

近年来，美国混凝土学会又给出一个文字上较精炼的定义：“高性能混凝土是一种要能符合特殊性能综合与均匀性要求的混凝土，此种混凝土往往不能用常规的混凝土组分材料和通常的搅拌、浇捣和养护的习惯做法所获得。”

美国教授 P. K. Mehta 早在 1990 年就提出：“把高强混凝土假定为高性能混凝土，严格地说，这种假定是错误的。”美国学者 S. P. Shah 教授最近也提出：“尽管高强混凝土具有较高的强度和较低的渗透性，但是高强混凝土并不具有所需要的综合耐久性。”美国学者 Virendra K. Varma 最近也撰文认为，应该把高性能混凝土与高强混凝土有所区分。

（二）加拿大对高性能混凝土的认识

他们强调的是硬化后混凝土的性质，认为对于近年来建造的暴露于腐蚀环境下的混凝土结构物，其受腐蚀的速率之快表明：抗压强度高已不是能否满足高性能混凝土的主要指标，而耐久性应当放在高性能混凝土的首位，其主要是指混凝土的抗渗性和尺寸稳定性。

1. 高性能混凝土的抗渗性

混凝土的大多数化学侵蚀，都是在水分和有害离子渗透进入结构内部的条件下产生的，混凝土的抗渗性是防止化学侵蚀的第一道防线。混凝土的抗渗性是以美国的 AASHTO277 方法为标准，在该方法中，氯离子的渗透速度以“库伦 C”为单位，如果某种混凝土进行 6h 渗透试验后，通过的电量 $\leq 500C$ ，则认为该混凝土抗渗性较好。

2. 高性能混凝土的尺寸稳定性

尺寸稳定性良好的混凝土的主要特征是：高弹性模量、低干燥收缩、徐变及温度应变率小。尺寸稳定性好的混凝土，可以降低预应力的损失，可以减少混凝土的原生裂纹。为了获得良好尺寸稳定性，需要限制单位体积水泥用量，选用高弹性模量、高强度的粗集料。经验证明，选用适当的原材料、进行合理的配合比设计，混凝土 90d 龄期的干缩值可以降低到小于 0.04%。

（三）日本对高性能混凝土的认识

1. 以冈村为代表的部分日本学派

他们认为高流态、免振自密实的混凝土为高性能混凝土。也就是说，他们强调的是新拌混凝土的性质。其理由是：①混凝土技术熟练的工人越来越少，自密实的混凝土不需要很高的技术，就可以保证混凝土的施工质量，同时也可以保证施工速度；②可以有效地减少混凝土施工时产生的噪声，避免环境污染。

2. 日本大多数学者及工业界观点

日本建设省综合技术开发计划“钢筋混凝土结构建筑物的超轻量与超高层技术的开发”（简称新 RC 总计划），从 1988 年开始为期五年的研究工作，其结果受到了人们的普遍关注。在新 RC 总计划中，把混凝土的高强与超高强为研究目标，同时与钢筋的高强度相匹配，并把研究对象分为：高强材料的 RC 结构、超高强混凝土的 RC 结构、超高强钢筋的 RC 结构和超高强材料的 RC 结构 4 个区。

日本许多商品混凝土公司、生产与开发高性能减水剂的公司，纷纷从事高强度、高流态混凝土的开发研究。如日本三菱材料（株）开发了一种超高强、耐磨的混凝土，使用硅灰、高性能减水剂和天然的特殊集料，成型后蒸养 16h 后脱模，混凝土的脱模强度达到 140MPa。按照美国 ASTM C666 方法进行抗冻试验，质量损失小于 0.2%，耐久性系数为 97。此外，混凝土的耐磨性明显提高，按雷氏磨耗试验法测定，耐磨性比普通混凝土提高 10 倍。他们认为：高强、超高强与高流态的混凝土就是高性能混凝土。

以上几个学派的观点虽然都有一定的道理，但均强调了某一方面的重要性，都是比较片面的。

（四）我国对高性能混凝土的认识

中国工程院院士吴中伟教授在 1996 年就明确提出：“有人认为混凝土高强度必然是高耐久性，这是不全面的，因为高强混凝土会带来一些不利于耐久性的因素……高性能混凝土还应包括中等强度混凝土，如 C30 混凝土。”

1999 年他又提出：“单纯的高强度不一定具有高性能。如果强调高性能混凝土必须在 C50 以上，大量处于严酷环境中的海工、水工建筑对混凝土强度要求并不高（C30 左右），但对耐久性要求却很高，而高性能混凝土恰能满足此要求。”

随着对高性能混凝土的深入研究，吴中伟教授结合可持续发展战略问题，提出高性能混凝土不仅具有高强度、高流动性和高体积稳定性，而且还应当包括节约资源、保护环境、符合可持续发展的原则。

我国混凝土专家冯乃谦教授认为：高性能混凝土首先必须是高强度；高性能混凝土必须是流动性好的、可泵性能好的混凝土，以保证施工的密实性，确保混凝土质量；高性能混凝土一般需要控制坍落度的损失，以保证施工要求的工作度；耐久性是高性能混凝土最重要的技术指标。

根据混凝土技术的不断发展和结构对混凝土性能的需求，现代高性能混凝土的定义可简单概

括为：HPC 是一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上，采用现代混凝土技术，选用优质的原材料，在严格的质量管理条件下制成的高质量混凝土。它除了必须满足普通混凝土的一些常规性能外，还必须达到高强度、高流动性、高体积稳定性、高环保性和优异耐久性的混凝土。

随着人口急剧增长、生产高度发达，大自然承受的负担日益加剧，以资源枯竭、环境污染最为严重，人类的生存受到严重威胁。1992 年巴西里约热内卢世界环境会议后，绿色事业受到全世界的普遍重视。在建筑领域中，人们对高性能混凝土的涵义有了进一步延伸，提出了将绿色高性能混凝土（GHPC）作为今后发展的方向。目的在于加强人们在建筑界对绿色的重视，加强绿色意识，要求混凝土科学和生产工作者自觉地提高 HPC 的绿色含量，节约更多的资源和能源，将对环境的污染降低到最小程度。这不仅为了混凝土和建筑工程的健康发展，更是对人类生存和更好发展的必需，是造福千秋万代的辉煌事业。

三、实现混凝土高性能的技术途径

根据以上各种观点所述，高性能混凝土的内涵中共同的一点：高性能混凝土首先必须是高强度混凝土，如何实现混凝土的高强度，这是配制高性能混凝土的核心问题。实现混凝土高强化的技术途径如图 1-1 所示。

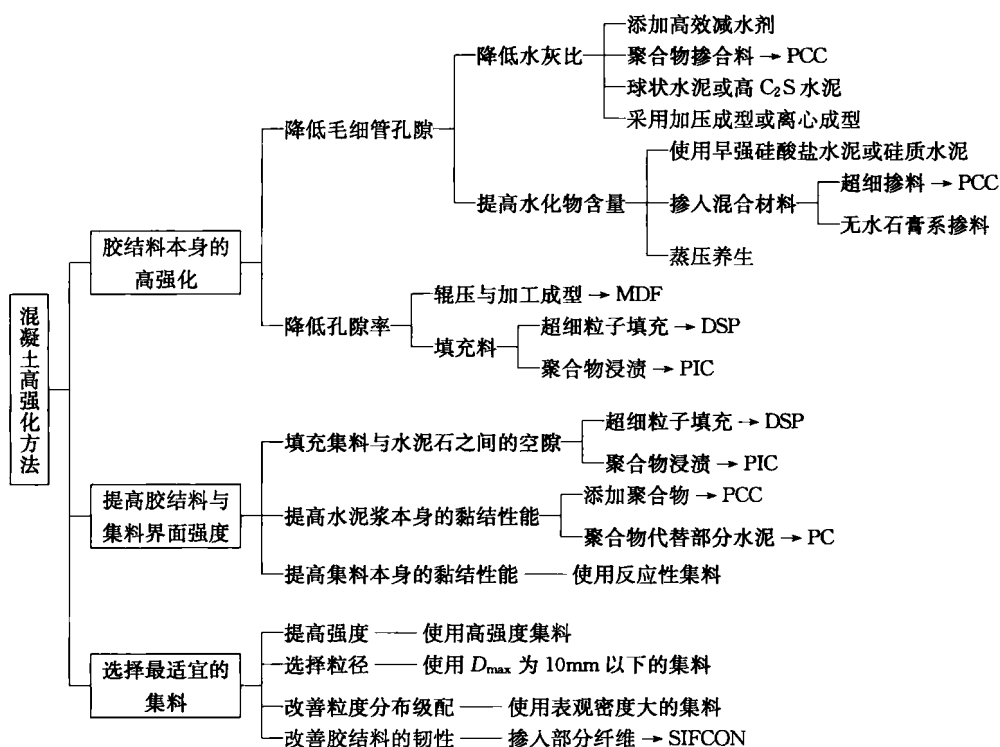


图 1-1 混凝土高强化的技术途径

实现混凝土的高强化，首先必须使胶结材料本身高强化，这是混凝土高强度、高性能的必要条件。配制混凝土的胶结料，除了常用的硅酸盐水泥外，还有球状水泥、调粒径水泥和活化水泥等。这些水泥最大特点是标准稠度用水量低。因此，在相同水灰比的情况下，水泥浆的流动性大，或者说达到相同的流动性时，混凝土的水灰比可以降低。例如调粒径水泥混凝土的水灰比可降低 17.5%，坍落度仍可以达到 25cm 以上。

从集料与胶结材料之间的界面结构来看，在界面过渡层大约 20 μ m 范围内，氢氧化钙富集及定向排列情况，与其他部分的水泥石相比，是一种多孔质的结构，这种结构的强度很低。为了改

善其界面结构,可在混凝土中掺入矿物掺合料,例如硅灰粉、超细矿渣、磨细粉煤灰及超细沸石粉等。这些超细的粒子与界面上存在的氢氧化钙反应,生成 C-S-H 凝胶,降低了氢氧化钙的富集及定向排列,因而可提高界面强度,同时还有利于提高混凝土的抗渗性和耐久性。

在普通混凝土中,集料对强度的影响不太明显。但在高强混凝土中,集料的数量和质量对混凝土的强度影响很大。当水灰比为 0.25 时,用不同粗集料配制的混凝土,其抗压强度相差约 40MPa;而不同细集料配制的混凝土,其抗压强度差值也达 20MPa。因此,在配制高强度混凝土时,粗细集料的品种与品质、单位体积混凝土中粗集料的体积含量与最大粒径,是三个必须要考虑的因素。

高性能 AE 减水剂是配制高性能混凝土不可缺少的材料,高性能 AE 减水剂在混凝土中除了降低水灰比、提高混凝土的强度和流动性以外,新型的高性能 AE 减水剂还能降低混凝土的坍落度损失,这也是配制高性能混凝土不可缺少的功能。

大量科学研究表明,影响混凝土强度和耐久性的最主要因素有两个方面:一是混凝土中硬化水泥浆体的孔隙率、孔的分布状态和孔的特征;二是混凝土硬化水泥浆体与集料的界面。要想提高混凝土的强度和耐久性,必须降低混凝土中水泥石的孔隙率,改善孔的分布,减少开口型孔隙。为改善混凝土中硬化水泥浆体与集料界面的结合情况,应设法减少在集料-浆体界面上主要由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体定向排列组成的过渡带的厚度,从而增强界面连接强度。

根据高性能混凝土的施工经验,用于高等级道路工程的高性能混凝土,主要从以下几方面技术措施提高其性能。

(1) 选用优质、符合国家现行标准要求的水泥和粗集料、细集料,这是配制高性能混凝土的基本条件,更是配制高性能混凝土的必要条件。如在现行国家和行业标准《建筑用砂》(GB/T 14684—2001)、《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2001)、《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007/XG1—2009)、《道路硅酸盐水泥》(GB 13693—2005)和《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2004)及《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2004)等中均有明确的规定。

(2) 选用品质优良的高效减水剂,这是当今配制高性能混凝土的主要技术措施之一,也是不可缺少的外加剂。在满足新拌混凝土大流动性(工作性)的同时,掺加高效减水剂可以降低水灰比,从而使混凝土中水泥石的孔隙率大大降低,使混凝土的强度大幅度提高。

(3) 选用具有一定潜在水硬性的活性超细粉,例如硅灰粉、超细沸石粉、超细粉煤灰、超细石灰石粉等。通过掺用活性超细粉,在混凝土中可以起到活性效应、微集料效应和复合胶凝效应,从而可以起到二次水化反应、降低孔隙率、增大流动性、提高混凝土的密实性、强度和耐久性等作用。

(4) 改善混凝土的施工工艺,这是制备高性能混凝土的有效途径之一。工程实践证明,再采用制备普通水泥混凝土的方法配制高性能混凝土,不可能使制备的混凝土符合高性能的设计要求,因此,必须采用一些比较先进的施工工艺。目前,采用较多的高性能混凝土的施工工艺有:水泥裹砂混凝土搅拌工艺、超声波振动或高频振动密实工艺和成型新拌混凝土真空吸水工艺等。

第二节 高性能混凝土的组成材料

材料试验和工程实践证明,普通水泥混凝土的受力破坏,主要出现在水泥石与集料界面处或水泥石中,因为这些部位往往存在有孔隙和潜在微裂缝等结构缺陷,这是水泥混凝土中的薄弱环节。而高性能混凝土中,其性能除了受制作工艺外,主要还受原材料的影响。因此,只有选择符合高性能要求的混凝土原材料,才能配制出符合高性能设计要求的混凝土。在选择原材料时,必须根据工程的实际要求及所处环境等因素,经综合考虑后而确定。

一、胶凝材料

胶凝材料(水泥)是高性能混凝土中非常关键的组分,材料试验表明,并不是所有的胶凝材料(水泥)都可以用来配制高性能混凝土,高性能混凝土选用的水泥必须满足以下条件:①标准稠度用水量要低,从而使混凝土在较低水灰比时,也能获得较大的流动性,确保混凝土达到规定的密实度;②水泥的水化放热量和放热速率要低,以避免因混凝土的内外温差过大而使混凝土产生裂缝;③水泥硬化后的强度要高,以保证以使用较少的水泥用量获得高强混凝土,使混凝土符合经济性的要求。

国外用于配制高性能混凝土的水泥,主要为特种水泥,其中有中热硅酸盐水泥、球形水泥、调粒径水泥、活化水泥、超细磨水泥和高贝利特水泥等。但是,这些水泥有的尚处于试验研究阶段,有些水泥我国还未生产,所以在国内一般不推荐首先使用特种水泥,主要采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥,在道路工程中也可选用道路硅酸盐水泥。

(一) 硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥

根据高性能混凝土的特点,从我国的实际情况出发,选用的水泥应具有足够的强度、良好的流变性、与高效减水剂的相容性和容易控制坍落度的损失。经过工程实践和材料配比试验证明,我国生产的强度等级 42.5MPa 以上的普通硅酸盐水泥和硅酸盐水泥,完全可配制高强高性能混凝土的要求。

我国有关专家在“新型高性能混凝土及其耐久性的研究”中,对不同强度等级、不同水泥品种的水泥,进行了品种与混凝土强度关系的试验,试验结果如表 1-1 所列。

表 1-1 水泥品种与混凝土强度

序号	水泥品种	强度 /MPa	混凝土配合比 水泥:砂子:石子	水泥用量 /(kg/m ³)	外加剂 /%	水灰比	抗压强度/MPa			
							3d	7d	28d	60d
1	硅酸盐水泥	62.5	1:1.128:2.098	560	1.50	0.289	68.0	72.4	81.5	88.7
2	硅酸盐水泥	52.5	1:1.128:2.098	560	1.50	0.284	72.0	74.0	84.5	92.9
3	LN 硅酸盐水泥	42.5	1:1.128:2.098	560	1.50	0.321	52.1	60.2	75.0	81.0
4	LLH 普通硅酸盐水泥	42.5	1:1.128:2.098	560	1.50	0.286	61.5	74.6	87.5	89.1
5	HS 中热水泥	42.5	1:1.128:2.098	560	1.50	0.290	72.0	78.0	92.0	94.8
6	JD 硅酸盐水泥(R)	42.5	1:1.128:2.098	5460	1.50	0.286	60.0	67.5	72.5	79.9
7	LN 普通硅酸盐水泥	32.5	1:1.128:2.098	560	1.50	0.299	56.5	63.0	74.8	79.2

注:表中所用外加剂,系指 JB-1 型外加剂。

(二) 中热硅酸盐水泥

现行国家标准《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥》(GB 200—2003)中规定:中热硅酸盐水泥是指以适当成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量石膏,磨细制成的具有中等水化热的水硬性胶凝材料(代号为 P·MH)。

中热硅酸盐水泥实际上是一种铝酸三钙(C_3A)的含量不超过 6%,硅酸三钙(C_3S)和铝酸三钙(C_3A)的总含量不超过 58%的硅酸盐水泥。中热硅酸盐水泥具有较高的抵抗硫酸盐侵蚀的能力、水化热呈现中等、有利于混凝土体积的稳定、干缩性较低、耐磨性能好等优点,可以避免混凝土表面因温差过大而出现裂缝。

(三) 球形水泥

球形水泥是由日本小野田水泥公司与清水建设共同研究开发的,是水泥熟料通过高速气流粉碎及特殊处理而制成的。球形水泥的表面,由于摩擦粉碎,熟料矿物表面没有裂纹,凹凸部分和棱角部分消失,成为 1~30 μm 大小的粒子,平均粒径较小,微粉含量较低。因此,水泥粒子具有较高的流动性与填充性,在保持坍落度相同的条件下,球形水泥的用水量比普通水泥的用水量降低 10%左右。球形水泥与普通水泥相比,粉体特性如表 1-2 所列。