

DAOLU GONGCHENG
CHANGYONG HUNNINGTU
SHIYONG JISHU SHOUC

道路工程 常用混凝土 实用技术手册

李继业 刘福臣 林世乐 主编
张峰 黄怀峰 副主编

中国建材工业出版社

道路工程常用混凝土 实用技术手册

李继业 刘福臣 林世乐 主编
张 峰 黄怀峰 副主编

中国建材工业出版社

7.

2.

35

图书在版编目 (CIP) 数据

道路工程常用混凝土实用技术手册/李继业 刘福臣,
林世乐主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-80227-349-8

I. 道… II. ①李…②刘…③林… III. 道路工程—水泥
混凝土路面—技术手册 IV. U416.216-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 179182 号

内 容 简 介

本书比较全面、系统地介绍了一般道路工程和城市道路工程常用混凝土的发展概况、原材料组成、配合比设计、施工工艺及其他方面。实际上在道路工程中所用的混凝土种类很多,但由于篇幅的原因,本书只主要介绍了高性能混凝土、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、路面彩色混凝土、聚合物混凝土、纤维增强混凝土等。

本书具有较强的实用性,特别适合设计和施工单位在工程中的应用,既可供道路工程和城市道路工程等领域的工程技术人员参考,也可作为其他建筑行业 and 高等院校相关专业的辅助教材或参考资料。

道路工程常用混凝土实用技术手册

李继业 刘福臣 林世乐 主编

张 峰 黄怀峰 副主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 22.75

字 数: 566 千字

版 次: 2008 年 1 月第 1 版

印 次: 2008 年 1 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-349-8

定 价: 41.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

21 世纪是我国国民经济发展的关键阶段,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,交通部提出了我国交通发展的宏伟蓝图,即:2010 年前东部地区基本形成高速公路网,国省干线公路等级全面提高,农村公路交通条件得到明显改善。再经过 15 年的努力,全国基本形成国家高速公路网。

在 2006 年全国交通工作会议上,新任交通部部长李盛霖同志指出:“十一五”交通工作的总体要求是以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,以科学发展观统领交通工作全局,不断提高交通发展的全面性、协调性和可持续性,推进交通改革,建设便捷、通畅、高效、安全的公路交通运输体系,促进经济社会全面、协调、可持续发展。

“十一五”期间公路发展的具体目标是:进一步完善公路网络,发挥路网整体效率;全国公路总里程将达到 230 万 km,五年增加 38 万 km;高速公路里程达 6.5 万 km,五年增加 2.4 万 km;继续完善国省干线公路网络,提高技术等级,二级及二级以上公路里程达 45 万 km,五年增加 13 万 km;县乡公路达 180 万 km,五年增加 30 多万 km,新改建农村公路 120 万 km。由此可见,我国的公路工程建设任重而道远。

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从高从新要求,对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,用于道路工程的混凝土的种类很多,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《道路工程常用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、刘福臣、林世乐担任主编,张峰、黄怀峰担任副主编,林建军、张岩参加了编写。李继业负责全书的规划,刘福臣负责第一章至第五章的统稿,林世乐负责第六章至第九章的统稿,张峰负责全书的绘图,黄怀峰负责全书的校对。具体编写分工为:李继业撰写第二章;刘福臣撰写第一章、第五章;林世乐撰写第七章、第八章;张峰撰写第六章;

黄怀峰撰写第四章；张岩撰写第三章；林建军撰写第九章。另外，李海燕、李海豹对全书进行校对和制图。

由于新型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，错误和不妥之处在所难免，敬请专家和读者提出宝贵的意见。

编 者

2007 年 10 月于泰山

目 录

第一章 高性能混凝土	1
第一节 高性能混凝土的发展概况.....	1
第二节 高性能混凝土的组成材料.....	6
第三节 高性能混凝土配合比设计	15
第四节 高性能混凝土的施工工艺	23
第五节 高性能混凝土的技术性能	28
第六节 高性能混凝土的工程应用	34
第二章 道路水泥混凝土	41
第一节 道路水泥混凝土概述	41
第二节 道路水泥混凝土的组成材料	43
第三节 道路水泥混凝土配合比设计	67
第四节 道路水泥混凝土的施工工艺	77
第五节 道路水泥混凝土的质量控制	85
第六节 道路水泥混凝土的维修	92
第三章 道路沥青混凝土	96
第一节 道路沥青混凝土概述	96
第二节 道路沥青混凝土的组成材料	99
第三节 道路沥青混凝土配合比设计.....	120
第四节 道路沥青混凝土的施工工艺.....	129
第五节 道路沥青混凝土的质量控制.....	143
第六节 沥青混凝土在工程上的应用.....	155
第四章 道路碾压混凝土	156
第一节 道路碾压混凝土概述.....	156
第二节 道路碾压混凝土的组成材料.....	160
第三节 道路碾压混凝土配合比设计.....	164
第四节 道路碾压混凝土的施工工艺.....	168
第五节 钢纤维增强碾压混凝土.....	177
第五章 道路耐磨损混凝土	184
第一节 道路耐磨损混凝土概述.....	184

第二节	道路耐磨损混凝土的组成材料	186
第三节	道路耐磨损混凝土配合比设计	190
第四节	道路混凝土耐磨性影响因素	198
第五节	道路耐磨损混凝土的施工工艺	199
第六章	道路透水性混凝土	206
第一节	道路透水性混凝土概述	206
第二节	道路透水性混凝土的组成材料	212
第三节	道路透水性混凝土配合比设计及性能	213
第四节	道路透水性混凝土的施工工艺	221
第五节	透水性沥青混凝土路面	222
第七章	路面彩色混凝土	227
第一节	路面彩色混凝土概述	227
第二节	路面彩色混凝土的组成材料	229
第三节	路面彩色混凝土配合比设计	236
第四节	彩色混凝土的着色方法	240
第五节	路面彩色混凝土的应用	245
第六节	路面彩色混凝土的施工工艺	247
第七节	彩色沥青混凝土路面	250
第八章	聚合物混凝土	257
第一节	聚合物混凝土概述	257
第二节	聚合物浸渍混凝土	259
第三节	聚合物水泥混凝土	269
第四节	聚合物胶结混凝土	284
第五节	聚合物混凝土的施工工艺	298
第六节	聚合物混凝土在公路工程中的应用	307
第九章	纤维增强混凝土	315
第一节	纤维增强混凝土概述	315
第二节	纤维增强混凝土增强机理	317
第三节	钢纤维增强混凝土	321
第四节	玻璃纤维增强混凝土	335
第五节	其他纤维增强混凝土	342
第六节	纤维混凝土的施工工艺	350
参考文献		357

第一章 高性能混凝土

水泥混凝土自问世以来,随着建筑业和建材科学的发展,混凝土的配制技术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;直至今天,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 高性能混凝土的发展概况

高性能混凝土是 20 世纪 90 年代初提出的,它是根据混凝土的耐久性要求而设计的一种新型混凝土。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、社会和环境效益。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。

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。

1988 年,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,一般混凝土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,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。1987 年,

山西大同的钢筋混凝土大水塔突然毁坏，水流如同山洪暴发一样冲下，造成很大的人员伤亡和建筑设施的破坏。

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，变形严重；③掺加硅灰的混凝土，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不再是普通混凝土的 50 年左右，而是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缺的建筑材料；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% 左右，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技术性能的多元化,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高性能混凝土一个确切的定义。

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、韧性高和体积稳定性好;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练的定义:“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、浇筑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“库仑”为单位,如果某种混凝土进行 6h 渗透试验后,通过的电量小于等于 500 库仑,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。为了获得良好的尺寸稳定性,需要限制单位体积水泥用量,选用高弹性模量、高强度的粗骨料。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作为研究目标, 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骨料, 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

我国已故中国工程院院士吴中伟教授早在 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应具有高强度、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 is 高性能混凝土的最重要技术指标。

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,高性能混凝土的含义有了进一步延伸,人们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。这不仅是为了混凝土和建筑工程业的健康发展,更是为了人类生存和更好的发展。

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是: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。

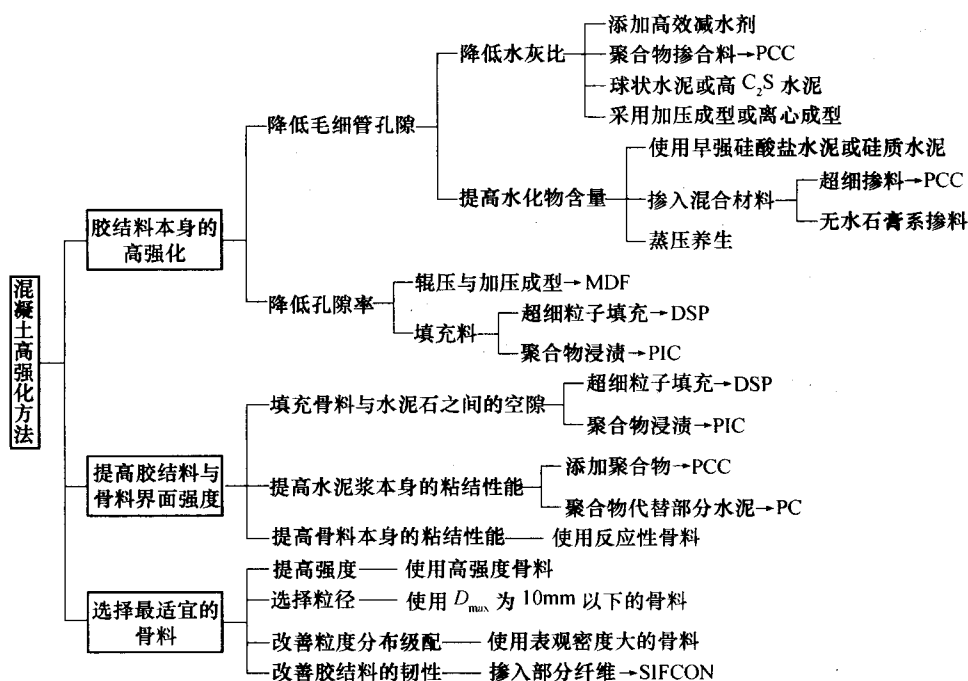


图 1-1 混凝土高强化的技术途径

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。如调粒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。

从骨料与胶结料之间的界面结构看,界面过渡层约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,其强度很低。为了改善其界面结构,可在混凝土中掺入矿物掺合料,如硅灰、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,骨料对强度的影响不太明显。但在高强混凝土中,骨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,用不同粗骨料配制的混凝土,其抗压强度相差约 40MPa;而不同细骨料配制的混凝土,其抗压强度差值也达 20MPa。因此,在配制高强度混凝土时,粗细骨料的品种与品质、单位体积混凝土中粗骨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骨料的界面。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骨料界面的结合情况,应设法减少在骨料-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,主要从以下几方面技术措施提高高性能混凝土的性能:

1. 选用优质、符合国家现行标准要求的水泥和粗、细骨料,这是配制高质量混凝土的基本条件,更是配制高性能混凝土的必要条件。如在《建筑用砂》(GB/T 14684—2001)、《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2001)和《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2003)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. 选用具有一定水硬性的活性超细粉,如硅灰、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、微骨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,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

普通水泥混凝土的受力破坏,主要出现在水泥石与骨料界面或水泥石中,因为这些部位

往往存在有孔隙、水隙和潜在微裂缝等结构缺陷，这是混凝土中的薄弱环节。而在高性能混凝土中，其性能除受制作工艺影响外，主要受原材料的影响。只有选择符合高性能要求的原材料，才能配制出符合高性能设计要求的混凝土。选择原材料时，要根据工程的实际要求及所处环境而定。

一、胶凝材料

胶凝材料（水泥）是高性能混凝土中最关键的组分，不是所有的水泥都可以用来配制高性能混凝土的，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，从而使混凝土在低水灰比时也能获得较大的流动性；②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。

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。

（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，完全可满足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 所示。

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	560	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

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。

中热硅酸盐水泥实际上是一种铝酸三钙 (C₃A) 的含量不超过 6%，硅酸三钙 (C₃S)

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，水化热呈中等，有利于混凝土体积的稳定，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 $1 \sim 30\mu\text{m}$ 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 所示。

表 1-2 球形水泥的主要粉体特性

粉体特性	球状水泥（A）	普通水泥（B）	两者对比
形状（球状度）	0.85	0.67	$A > B$
平均粒径（ μm ）	10.1	13.5	$A < B$
比表面积值（ cm^2/g ）	2698	3231	$A < B$
充填性（ g/cm^3 ）	1.2	1.0	$A > B$
微粉量（ μm ）	15.3	18.0	$A < B$

（四）调粒水泥

超细矿粉是指平均粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的矿物质粉体。在水泥混凝土中使用超细粉是从利用硅灰（平均粒径为 $0.1\mu\text{m}$ 或更小）发展起来的，北欧一些国家在利用硅灰的实践中，开发出了一种以硅酸盐水泥和硅灰为主要材料的高强混凝土，称为 DSP 材料。利用硅灰的物理填充和高火山灰活性，改善了水泥混凝土的微观结构，大大地提高了水泥混凝土的早期及远期强度，改善了混凝土的耐久性。受 DSP 材料的启发，后来发展了超细矿粉掺合料，用于制备高性能混凝土。调粒水泥也是在其基础之上发展起来的。

所谓调粒水泥是将水泥组成中的粒度分布进行调整，提高胶凝材料的填充率；使水泥粒子的最大粒径增大，粒度分布向粗的方向移动；同时还掺入适量的超细粉，以获得最密实的填充。这样就能获得流动性良好的水泥浆，具有早期强度适当、水化热低、水化放热速度慢等方面的优良性能。

（五）活化水泥

将粉状超塑化剂和水泥熟料按适当比例混合磨细，即制得活性较高的活化水泥。活化水泥的活性大幅度提高，低强度等级的活化水泥可以代替高强度等级的普通硅酸盐水泥。采用活化水泥配制的高性能混凝土如表 1-3 所示。

表 1-3 活化水泥混凝土的性能

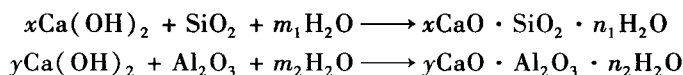
混凝土所用 水泥种类	水灰比 （W/C）	坍落度 （cm）	抗压强度 （MPa）	弹性模量 （ $\times 10^4 \text{MPa}$ ）	冻融 循环次数	抗冻性 系数
普通 32.5MPa 水泥	0.42	3.5	36.2	2.85	300	0.88
活化 32.5MPa 水泥	0.29	20	75.2	3.70	500	1.23

二、矿物质掺合料

矿物质掺合料是高性能混凝土中不可缺少的组分，其掺入的目的是：减少水泥用量，改善混凝土拌合物的工作性；降低混凝土水化中的水化热；增进混凝土的后期强度；改善混凝土的内部结构；提高混凝土的抗渗性和抗腐蚀能力；防止碱-骨料反应等。

在高性能混凝土中所用的各种超磨细的矿物原料，与用于普通混凝土中的矿物原料在作用和性能上有显著不同。配制高性能混凝土常用的矿物质掺合料主要有：硅粉、磨细矿渣、优质粉煤灰、超细沸石粉、无水石膏及其他微粉等。

矿物质掺合料的主要活性成分，在混凝土中的主要反应过程如下：



(一) 硅粉

硅粉是铁合金厂在冶炼硅铁合金或金属硅时，从烟气净化装置中回收的工业烟尘。在北欧各国将硅粉又称为凝聚硅灰。我国是世界硅铁、工业硅生产大国，硅铁实际年生产量达80~90万t，硅灰的潜在资源每年达15~20万t，实际年产量已达4000t。

硅粉的颗粒主要呈球状，粒径小于1 μm ，平均粒径约0.1 μm 。硅粉中的主要活性成分为无定形的 SiO_2 ，其含量约占90%左右。硅粉的小球状颗粒填充于水泥颗粒之间，使胶凝材料具有良好的级配，降低了其标准稠度下的用水量，从而提高了混凝土的强度和耐久性。因此，硅灰配制的混凝土多用于有特殊要求的工程，如高强度、高抗渗性、高耐磨性、高耐久性及对钢筋无侵蚀作用的混凝土中。

硅灰用于混凝土是研究最早、应用最广的一个领域，它在混凝土中可以起到加速胶凝材料水化，提高混凝土致密度，改善混凝土离析和泌水性能，提高混凝土的抗渗性、抗冻性、抗化学腐蚀性，提高混凝土的强度和耐磨性等作用。

由于硅灰是生产硅铁和工业硅的副产品，其生产条件基本相似，所以各国硅灰的物理性质和化学成分也差不多，表1-4为我国某生产单位生产的硅灰各种性能指标。

表 1-4 我国某生产单位生产的硅灰各种性能指标

序 号	性能指标名称	检测值	序 号	性能指标名称	检测值
1	SiO_2 (%)	95.48	10	含碳量 (%)	0.250
2	Al_2O_3 (%)	0.400	11	烧失量 (900℃) (%)	0.900
3	Fe_2O_3 (%)	0.032	12	密度 (g/cm^3)	2.230
4	CaO (%)	0.440	13	比表面积 (m^2/g)	30.10
5	MgO (%)	0.400	14	45 μm 筛余量 (%)	0
6	K_2O (%)	0.720	15	含水率 (%)	1.400
7	Na_2O (%)	0.250	16	表观密度 (kg/m^3)	173.0
8	SO_3 (%)	0.420	17	耐火度 (℃)	1710~1730
9	P_2O_5 (%)	0.690	—	—	—

(二) 磨细矿渣

矿渣是在炼铁炉中浮于铁水表面的熔渣，在排出时用水急冷处理，则得到水淬矿渣，生

产矿渣水泥和磨细矿渣用的都是这种粒状渣。磨细矿渣是将粒化高炉矿渣干燥，再采用专门的磨细工艺磨细到比表面积 $7500\text{cm}^2/\text{g}$ 左右，颗粒粒径小于 $10\mu\text{m}$ ，在混凝土配制时掺入的一种矿物外加剂。

自 20 世纪 80 年代以来，磨细矿渣作为混凝土用矿物外加剂的研究和应用已成为国际范围的热点，美国、日本、英国、法国、奥地利等国家相继制定了产品标准，我国于 1994 年制定了《用于水泥中的粒化高炉矿渣》(GB/T 203—1994)，2000 年颁布了《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2000)，为掺加磨细矿渣配制高性能混凝土明确了质量标准。

在混凝土拌合物中掺入适量的磨细矿渣，在水泥水化初期，胶凝材料系统中的矿渣微粉分布并包裹在水泥颗粒的表面，能起到延缓和减少水泥初期水化产物相互搭接的隔离作用，从而改善了混凝土拌合物的工作性。

磨细矿渣绝大部分是不稳定的玻璃体，不仅储有较高的化学能，而且具有较高的活性。这些活性成分一般为活性 Al_2O_3 和活性 SiO_2 ，即使在常温条件下，以上活性成分也可与水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应而产生强度。用磨细矿渣取代混凝土中的部分水泥后，流动性提高，泌水量降低，具有缓凝作用，其早期强度与硅酸盐水泥混凝土相当，但表现出后期强度高、耐久性好的优良性能。

表 1-5 列出了在相同用水量的条件下，单掺硅灰胶砂的流动性下降，单掺不同比表面积及不同比例的磨细矿渣，均可不同程度地改善胶砂的流动性；同时掺加硅灰和磨细矿渣时，磨细矿渣可以改善因掺加硅灰流动性下降的性能。表 1-6 列出了掺加不同磨细矿渣后胶砂试体的抗压强度与抗折强度。

表 1-5 掺加磨细矿渣和硅灰的水泥胶砂配合比和流动度

序 号	水泥胶砂配合比 (g)							流动度 (mm)
	水 泥	硅 灰	磨细矿渣细度 (m ² /kg)			砂 子	用水量	
			400	600	800			
1	500	—	—	—	—	1350	250	148
2	450	50	—	—	—	1350	250	141
3	350	—	—	—	150	1350	250	160
4	300	50	—	—	150	1350	250	147
5	350	—	150	—	—	1350	250	160
6	350	—	—	150	—	1350	250	165
7	400	—	—	—	100	1350	250	170
8	300	—	—	—	200	1350	250	160
9	250	—	—	—	250	1350	250	165
10	400	—	100	—	—	1350	250	175
11	300	—	200	—	—	1350	250	160
12	250	—	250	—	—	1350	250	170