

李继业 刘福胜 编著

新型混凝土实用技术手册



Chemical Industry Press

 化学工业出版社

新型混凝土实用技术手册

李继业 刘福胜 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

新型混凝土实用技术手册/李继业, 刘福胜编著.
北京: 化学工业出版社, 2005. 2
ISBN 7-5025-6532-9

I. 新… II. ①李…②刘… III. 混凝土施工-技术手册 IV. TU755-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 143498 号

新型混凝土实用技术手册

李继业 刘福胜 编著

责任编辑: 王蔚霞

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 王素芹

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 34½ 字数 998 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6532-9/TU·77

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书重点介绍现代新型混凝土的新材料、新技术与新工艺。主要内容包括：高性能混凝土、高强混凝土、流态混凝土、商品混凝土、泵送混凝土、喷射混凝土、聚合物混凝土、轻质混凝土、道路混凝土、膨胀混凝土、防水混凝土、防射线混凝土、纤维混凝土、大体积混凝土、水下混凝土、预应力混凝土、耐酸混凝土、冬季施工混凝土和耐火混凝土。

本书可作为工程单位设计和施工人员的技术参考书，也可以作为高等院校土木建筑类专业的辅助教材。

前 言

混凝土是土建工程中应用最广、用量最大的建筑材料之一，任何一个现代建筑工程都离不开混凝土。据有关部门初步估计，目前全世界每年生产的混凝土材料已超过100亿吨，预计今后每年生产混凝土将达到120亿~150亿吨，随着科学技术的进步，混凝土不仅广泛地应用于工业与民用建筑、水工建筑和城市建设，而且还可以制成轨枕、电杆、压力管道、地下工程、宇宙空间站及海洋开发用的各种构筑物等。

进入21世纪以来，我国各项建设事业飞速发展，给混凝土科学技术的发展带来欣欣向荣的景象，各种现代化的大型建筑如雨后春笋，新型混凝土技术和施工工艺不断涌现，并在工程应用中获得巨大的经济效益和社会效益，为我国社会主义现代化建设插上了腾飞的翅膀，有力地促进了国民经济各项事业的发展。

根据专家预测，到21世纪以后的更长时期，混凝土材料必然仍是现代建筑的主要建筑材料。随着现代建筑对功能的更广泛要求，对混凝土也提出了一系列更高更新的要求。混凝土今后发展的基本趋势是：(1) 混凝土技术已进入高科学技术时代，正向着高强度、高工作性和高耐久性的高性能方向发展；(2) 混凝土科学技术的任务已从过去的“最大限度向自然索取财富”，变为合理应用、节省能源、保护生态平衡；(3) 混凝土能否长期维持作为最主要的建筑结构材料，关键在于其能否成为绿色材料，因此，“绿色高性能混凝土”是今后混凝土的努力方向，也是混凝土的未来和希望。

新型混凝土的种类已经很多，各自具有其独特的技术性能和施工方法，又分别适用于某一特殊的领域。随着我国基本建设规模的不断扩大，有些新型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；有些新型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《新型混凝土实用技术手册》，目的是通过介绍这些新型混凝土的发展历史、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、发展新型混凝土技术与施工工艺，为我国的基本建设事业做出更大的贡献。

本书在编写的过程中，注重理论与实践相结合，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。全书由山东农业大学李继业教授和刘福胜教授担任主编，由李继业负责全书的统编，由邱秀梅、叶芳、徐羽白担任副主编，贺如泓、卢宝松参加了编写，邱秀梅负责全书的校稿工作。编写具体分工为：李继业撰写第一章、第三章、第十一章；刘福胜撰写第二章、第六章、第八章；邱秀梅撰写第四章、第九章、第十二章；叶芳撰写第五章、第十六章、第十九章；徐羽白撰写第十章、第十七章、第十八章；贺如泓撰写第七章、第十四章；卢宝松撰写第十三章、第十五章。

由于新型混凝土技术与施工工艺发展非常迅速，加上编著者掌握的技术资料不全和水平有限，很难编写出一本内容比较齐全、技术比较先进的技术参考书。因此，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。

本书可以作为土木工程设计和施工技术人员的技术参考书，也可以作为建筑类技术工人的自学教材，还可以作为建筑类高等院校教师与学生的参考和辅助教材。

编著者

2004年11月于泰山

目 录

第一章 高性能混凝土	1
第一节 高性能混凝土概述	1
第二节 高性能混凝土的组成材料	4
第三节 高性能混凝土配合比设计	7
第四节 高性能混凝土的基本性能	12
第五节 高性能混凝土的制备施工	17
第六节 高性能混凝土的质量评价	18
第二章 高强混凝土	21
第一节 高强混凝土概述	21
第二节 普通高强混凝土	24
第三节 粉煤灰高强混凝土	47
第四节 碱矿渣高强混凝土	55
第五节 硅灰高强混凝土	61
第三章 流态混凝土	65
第一节 流态混凝土概述	65
第二节 普通流态混凝土	66
第三节 粉煤灰流态混凝土	83
第四节 F 矿粉高流态混凝土	87
第四章 商品混凝土	94
第一节 商品混凝土概述	94
第二节 商品混凝土搅拌系统	97
第三节 商品混凝土配合比设计	110
第四节 商品混凝土的运输	115
第五节 商品混凝土的质量控制	118
第五章 泵送混凝土	120
第一节 泵送混凝土概述	120
第二节 普通泵送混凝土材料组成	122
第三节 普通泵送混凝土配合比设计	127
第四节 影响混凝土泵送的因素	131
第五节 泵送混凝土的施工	132
第六节 粉煤灰泵送混凝土	144
第六章 喷射混凝土	150
第一节 喷射混凝土概述	150
第二节 喷射混凝土原材料与配合比	152
第三节 喷射混凝土的性能	162

第四节	喷射混凝土的施工	165
第五节	钢纤维喷射混凝土	169
第七章	聚合物混凝土	171
第一节	聚合物混凝土概述	171
第二节	聚合物浸渍混凝土	171
第三节	聚合物水泥混凝土	179
第四节	聚合物胶结混凝土	183
第八章	轻质混凝土	191
第一节	轻质混凝土概述	191
第二节	轻骨料混凝土	193
第三节	轻骨料大孔混凝土	208
第四节	浮石轻混凝土	211
第五节	大孔轻质混凝土	212
第六节	加气混凝土	218
第七节	泡沫混凝土	220
第九章	道路混凝土	226
第一节	道路混凝土概述	226
第二节	水泥道路混凝土对材料的要求	228
第三节	水泥道路混凝土的配合比设计与制备	235
第四节	水泥道路混凝土的施工	239
第五节	沥青道路混凝土的施工	245
第六节	施工中注意问题及新技术	266
第十章	膨胀混凝土	270
第一节	膨胀混凝土概述	270
第二节	膨胀混凝土的技术性能	278
第三节	补偿收缩混凝土	283
第四节	自应力混凝土	288
第五节	铝粉微膨胀混凝土	297
第六节	膨胀混凝土的施工	300
第十一章	防水混凝土	304
第一节	防水混凝土概述	304
第二节	普通防水混凝土	305
第三节	外加剂防水混凝土	310
第四节	膨胀水泥防水混凝土	325
第五节	防水混凝土的施工	328
第十二章	防射线混凝土	330
第一节	防射线混凝土概述	330
第二节	防射线混凝土的原材料	331
第三节	防射线混凝土的配合比设计	334
第四节	防射线混凝土的物理力学性能	342
第五节	防射线混凝土的施工	344

第十三章	纤维混凝土	345
第一节	纤维混凝土概述	345
第二节	纤维混凝土的增强机理	346
第三节	钢纤维混凝土	348
第四节	玻璃纤维混凝土	360
第五节	聚丙烯纤维混凝土	366
第六节	植物纤维混凝土	368
第七节	碳纤维增强混凝土	370
第十四章	大体积混凝土	375
第一节	大体积混凝土概述	375
第二节	控制温度裂缝的技术措施	379
第三节	大体积混凝土配合比设计	389
第四节	大体积混凝土结构施工	390
第五节	大体积混凝土的性能	395
第六节	大体积混凝土温度裂缝控制工程实例	398
第十五章	水下混凝土	406
第一节	水下混凝土概述	406
第二节	水下混凝土对拌和物的基本要求	407
第三节	水下混凝土配合比设计	413
第四节	水下混凝土的施工工艺	423
第五节	高压力水下混凝土	431
第六节	水下不分散混凝土	432
第十六章	预应力混凝土	440
第一节	预应力混凝土概述	440
第二节	预应力混凝土原材料要求	441
第三节	减少预应力损失的措施	444
第四节	预应力混凝土的施工工艺	445
第五节	预应力施工计算	462
第十七章	耐酸混凝土	467
第一节	耐酸混凝土概述	467
第二节	水玻璃耐酸混凝土	467
第三节	沥青耐酸混凝土	477
第四节	硫磺耐酸混凝土	479
第十八章	冬季施工混凝土	482
第一节	冬季施工混凝土概述	482
第二节	冬季施工混凝土的原材料	485
第三节	冬季施工混凝土配合比设计	487
第四节	冬季施工混凝土施工工艺	488
第十九章	耐火混凝土	500
第一节	耐火混凝土概述	500

第二节	耐火混凝土原材料技术要求.....	502
第三节	耐火混凝土配合比设计.....	509
第四节	耐火混凝土的性能.....	532
第五节	耐火混凝土的设计施工.....	535
主要参考文献		540

第一章 高性能混凝土

第一节 高性能混凝土概述

混凝土技术的发展,归纳起来,可以说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、高性能混凝土迅速发展。

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。

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。

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,已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、硅灰等超细掺和料，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。

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。以后不少学者根据不同工程的要求，提出了不尽相同的高性能混凝土的涵义。大多数认为 HPC 的强度指标应不低于 50~60MPa；日本学者更重视其工作性和耐久性，认为 HPC 应具有高耐久性、高流动性和高体积稳定性。

在高性能混凝土发展的初期，不同学派对高性能混凝土的看法也不同。

（一）以 Mehta 为代表的美国与加拿大学派

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 AASHTO 277 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，通过的电量不大于 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 90 天龄期的干缩值可以降低到小于 0.04%。

（二）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。

（三）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骨料, 成型后蒸养 16h 后脱模, 混凝土的脱模强度达到 140MPa。按照 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。

以上三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。

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, 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

如上所述, 高性能混凝土的内涵包括多方面, 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。

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 $20\mu\text{m}$ 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和料, 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。

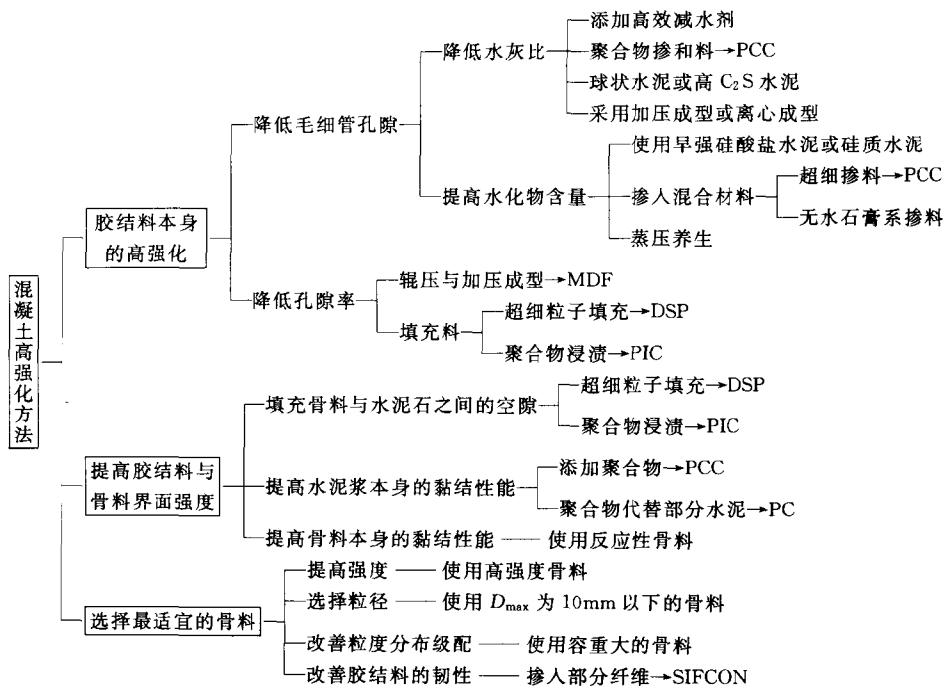


图 1.1 混凝土高强化的技术途径

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。

第二节 高性能混凝土的组成材料

高性能混凝土的性能除受制作工艺外，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。

用来配制高性能混凝土的水泥，主要有中热硅酸盐水泥、球状水泥、调粒水泥和活化水泥。

（一）中热硅酸盐水泥

中热硅酸盐水泥，是指水泥中 C_3A 的含量不超过 6%， C_3S 和 C_3A 的总含量不超过 58% 的硅酸盐水泥。该种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。

（二）球状水泥

球状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。球状水泥的表面，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，球状水泥的用水量比普通水泥的用水量降低

10%左右。球状水泥与普通水泥相比，粉体特性见表 1.1 所列。

表 1.1 球状水泥与普通水泥的粉体特性

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

(三) 调粒水泥

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，具有适当的早期强度，水化热低，水化放热速度慢等方面的优良性能。

(四) 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见表 1.2 所列。

表 1.2 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、矿物质掺和料

矿物质掺和料是高性能混凝土中不可缺少的组分，其掺入的目的是增加活性、流动性、抗分离性，调节黏度及塑性，填充水泥石中的微孔，以利于提高混凝土的强度、密实性、特别是对改善混凝土的耐久性及防止碱骨料反应、降低混凝土水化热等有明显效果。配制高性能混凝土常用的矿物质掺和料主要有：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。

(一) 硅粉

硅粉是铁合金厂在冶炼硅铁合金或金属硅时，从烟尘中收集起来的一种飞灰。硅粉的颗粒主要呈球状，粒径小于 $1\mu\text{m}$ ，平均粒径约 $0.1\mu\text{m}$ 。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。

(二) 磨细矿渣

磨细矿渣是将粒化高炉矿渣磨细到比表面积 $7500\text{cm}^2/\text{g}$ 左右，颗粒粒径小于 $10\mu\text{m}$ 。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。

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。

(三) 优质粉煤灰

粉煤灰是火力发电厂锅炉以煤粉作为燃料，从其烟气中收集下来的灰渣。优质粉煤灰一般是指粒径为 $10\mu\text{m}$ 的分级灰，其比表面积约为 $7850\text{cm}^2/\text{g}$ ，烧失量为 1%~2%，且含有大量的球状玻璃珠。粉煤灰中的主要活性成分，与磨细矿渣基本相同，也是活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 。

（四）超细沸石粉

超细沸石粉是采用天然沸石粉经磨细而制成，其平均粒径小于 $10\mu\text{m}$ 。天然沸石是一族架状构造的含水铝硅酸盐矿物，其主要活性成分也是活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 ，两种活性成分的总含量在 80% 左右。

三、粗细骨料

高性能混凝土骨料的选择，对于保证高性能混凝土的物理力学性能和长期耐久性至关重要。清华大学冯乃谦教授认为，要选择适宜的骨料配制高性能混凝土，必须注意骨料的品种、表观密度、吸水率、粗骨料强度、粗骨料最大粒径、粗骨料级配、粗骨料体积用量、砂率和碱活性组分含量等。

（一）细骨料的选择

细骨料宜选用石英含量高、颗粒形状浑圆、洁净、具有平滑筛分曲线的中粗砂，细度模数控制在 2.6~3.2 之间，砂率控制在 36% 左右。

（二）粗骨料的选择

1. 粗骨料的表面特征

粗骨料的形状和表面特征对混凝土的强度影响很大，尤其在高强混凝土中，骨料的形状和表面特征对混凝土的强度影响更大。表面较粗糙的结构，可使骨料颗粒和水泥石之间形成较大的黏着力。同样，具有较大表面积的角状骨料，也具有较大的黏结强度。但是，针状、片状的骨料会影响混凝土的流动性和强度，因此，针状、片状的骨料含量不宜大于 5%。

2. 粗骨料的强度

由于混凝土内各个颗粒接触点的实际应力可能会远远超过所施加的压应力，所以选择的粗骨料的强度应高于混凝土的强度。但是，过硬、过强的粗骨料可能因温度和湿度的因素而使混凝土发生体积变化，使水泥石受到较大的应力而开裂。所以，从耐久性意义上说，选择强度中等的粗骨料，反而对混凝土的耐久性有利。试验证明，高性能混凝土所用的粗骨料，其压碎指标宜控制在 10%~15% 之间。

3. 粗骨料的粒径

高性能混凝土粗骨料最大粒径的选择，与普通混凝土完全不同。普通混凝土粗骨料最大粒径的控制，主要由构件截面尺寸及钢筋间距决定的，粒径的大小对混凝土的强度影响不大；但对高性能（高强）混凝土来说，粗骨料最大粒径的大小对混凝土的强度影响较大。试验证明，加大粗骨料的粒径，会使混凝土的强度下降，强度等级越高影响越明显。造成强度下降的主要原因是：骨料尺寸越大，黏结面积越小，造成混凝土不连续性的不利影响也越大，尤其对水泥用量较多的高性能混凝土，影响更为显著。因此，高性能混凝土的粗骨料宜选用最大粒径不大于 15mm 的碎石。

4. 其他几方面的要求

粗、细骨料的表观密度应在 2.65 以上；粗骨料的吸水率应低于 1.0%，细骨料的饱和吸水率应低于 2.5%；粗骨料的级配良好，孔隙率达到最小；粗骨料的体积用量一般为 400L，即 1050~1100kg/m³；粗骨料中无碱活性组分。

四、高性能减水剂

由于高性能混凝土的胶凝材料用量大、水灰比低、拌和物黏性大为了使混凝土获得高工作性，所以在配制高性能混凝土时，必须采用高性能减水剂。选好高效减水剂、高效 AE 减水剂、流化剂或超塑化剂、超流化剂等外加剂，是制备高性能混凝土的关键材料。在日本称之为高性能 AE 减水剂，其主要特点是：既具有较高的减水率（20%~30%），又有控制混凝土坍落度损失的能力。

目前，我国生产高效减水剂的厂家很多，产品遍及萘系、多羧酸系、三聚氰胺系、氨基磺酸系等，且有了与改性木质素磺酸盐系相结合的复合型减水剂，这为制备高性能混凝土打下了一定基

础。但是,我国生产的普通高效减水剂还不能同时具备高性能 AE 减水剂的性能,因此,在我国通常将普通高效减水剂与缓凝剂复合使用。在实际工程施工中,将萘磺酸盐甲醛缩合物与多羧酸盐复合起来,基本上可具备与高性能 AE 减水剂相似的性能。

为使粗、细骨料具有较强的抗分离性,还需加入适量的纤维素类、丙烯酸类、聚丙烯酰胺、发酵多糖聚合物、改性水下混凝土外加剂等增黏剂,以防止混凝土发生分离、泌水等质量问题。为降低高性能混凝土的收缩,除选好粗细骨料及控制胶结材料、用水量外,也可加入铝粉、硫铝酸盐系、石膏、石灰系膨胀调节剂。

第三节 高性能混凝土配合比设计

在高性能混凝土配合比设计方面,原来的普通混凝土配合比设计方法和原则已不适用。其主要原因是:通常的高强度与较低的水灰比不再成反比例关系,较大的水泥用量中有不容忽视的不能水化部分,改变超塑化剂用量(不改变用水量)可以调节坍落度以及所掺加矿物掺和料品种和数量等,均直接影响混凝土的强度和其他性能。

但是,迄今为止,世界上尚没有更为适合高性能混凝土配合比的设计方法,各国研究人员在各自的试验基础上,粗略地计算具体的配合比,然后通过试验,确定最终配合比。

一、高性能混凝土配合比设计的基本要求

高性能混凝土配合比设计的任务,就是要根据原材料的技术性能、工程要求及施工条件,科学合理地选择原材料,通过计算和试验,确定能满足工程要求的技术经济指标的各项组成材料的用量。根据现代建筑对混凝土的要求,高性能混凝土配合比设计应当满足以下基本要求。

(一) 高耐久性

高性能混凝土与普通混凝土有很大区别,最重要特征是其具有优异的耐久性,在进行配合比设计时,首先要保证耐久性要求。因此,必须考虑到抗渗性、抗冻性、抗化学侵蚀性、抗碳化性、抗大气作用性、耐磨性、碱-骨料反应、抗干燥收缩的体积稳定性等。

以上这些性能受水灰比的影响很大。水灰比越低,混凝土的密实度越高,各方面的性能越好,体积稳定性亦越强,所以高性能混凝土的水灰比不宜大于 0.40。为了提高高性能混凝土的抗化学侵蚀性和碱-骨料反应,提高其强度和密实度,一般宜掺加适量的超细活性矿物质混合材料。

(二) 高强度

各国试验证明,混凝土要达到高耐久性,必须提高混凝土的强度。因此,高强度是高性能混凝土的基本特征,高强混凝土也属于高性能混凝土的范畴,但高强度并不一定意味着高性能。高性能混凝土与普通混凝土相比,要求抗压强度的不合格率更低,以满足现代建筑的基本要求。

由于高性能混凝土在施工过程中不确定因素很多,所以,结构混凝土的抗压强度离散性更大。为确保混凝土结构的安全,必须按国家有关规定控制不合格率。

我国施工规范规定,普通混凝土的强度等级保证率为 95%,即不合格率应控制在 5% 以下;对于高性能混凝土,其强度等级的保证率为 97.5%,即不合格率应控制在 2.5% 以下,其概率度 $t \leq -1.960$ 。

(三) 高工作性

在一般情况下,对新拌混凝土施工性能可用工作性进行评价,即混凝土拌和物在运输、浇筑以及成型中不分离、易于操作的程度,这是新拌混凝土的一项综合性能。它不仅关系到施工的难易和速度,而且关系到工程的质量和经济性。

坍落度是表示新拌混凝土流动性大小的指标。在施工操作中,坍落度越大,流动性越好,则混凝土拌和物的工作性也越好。但是,混凝土的坍落度过大,一般单位用水量也增大,容易产生离析,匀质性变差。因此,在施工操作允许的条件下,应尽可能降低坍落度。根据目前的施工水平和条件,高性能混凝土的坍落度控制在 18~22cm 为宜。