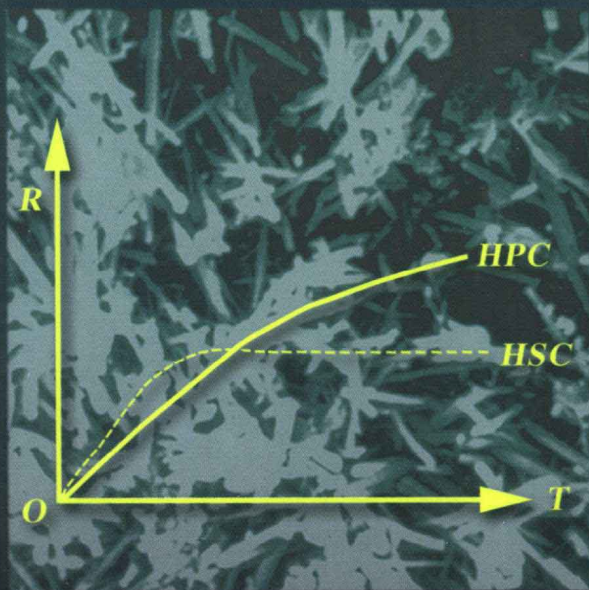


高性能混凝土的 配制与应用

GAOXINGNENG HUNNINGTU DE
PEIZHI YU YINGYONG

● 张明征 编著 ●



中国计划出版社

高性能混凝土的配制与应用

张明征 编著

中国计划出版社

图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土的配制与应用 / 张明征编著. —北京:
中国计划出版社, 2003. 3
ISBN 7-80177-161-3

I. 高... II. 张... III. 混凝土-生产工艺
IV. TU528.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 003521 号

高性能混凝土的配制与应用

张明征 编著

☆

中国计划出版社出版

(地址: 北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 4 层)

(邮政编码: 100038 电话: 63906413 63906414)

新华书店北京发行所发行

世界知识印刷厂印刷

850 × 1168 毫米 1/32 10.25 印张 263 千字

2003 年 3 月第一版 2003 年 3 月第一次印刷

印数 1—5000 册

☆

ISBN 7-80177-161-3/TU · 077

定价: 18.00 元

编著人员名单

主 编：张明征

顾 问：周惠南 奚正楷

编委会委员（以姓氏笔画为序）：

王宝国 王惠忠 王文杰 马移军 孙宽和 刘明河

邢继宪 崔安远 崔志成 高名顺 袁惠星 曹怀武

参加编写人员（单位不分先后，编者按姓氏笔画为序）：

中国建筑材料科学研究院：单文华 隋同波

中国建筑科学研究院：许鹤力

北京市建筑材料质监站：朱连滨

光大国际建设工程总公司：崔志成

山东省建筑材料工业设计研究院：

王文杰 刘传明 李继文 李金润 张明征 陈衍真

林乐友 姚荣明 简 荣 秦光彤

山东省华冠建材技术开发有限公司：

门会兵 田延刚 生向阳 田兆红 刘甲旺 刘金鹏

邵海涛 李金利 温 江 梁瑞庆 鲍求培

同济大学：刘巍青

山东大学：张 锐

山东省建筑设计研究院：周 睿 魏晓东

山东省水利科学研究院：马移军

山东省公安厅：郭永喜

山东省建设监理公司：张宗华 程 毅

山东省水泥质监站：

于仲伟 王利国 刘 荣 刘 强 高名顺 窦兆祥

山东邹县发电厂鲁源粉煤灰开发总公司

毕建军 石 新 毕 业 周永军 王振中 李鹏伟

山东省广播电视厅： 王 力 王光金

山东科技大学： 尹燕梅 孙建峰

济南市建筑质监站：

孙宽和 吕仁才 张公富 陈晓春 郑光明 董全文

济南市建材质监站： 张建茂 冀成新

济南市市政质监站试验中心： 刘希海 庞京春

淄博市建筑质监站： 吴奎军 孔传孔 黄文涛 韩林贤

济南铁路局： 杨晓军 张甲广 姚光明 董 健

济南大学： 宋桂兰 刘玉亭 徐永前 贾茂森

青岛市建筑质监站： 张玉忠

青岛东方建设监理公司： 杨忠安

山东对外建设总公司： 温守亮

山东省建设建工集团：

孔凡刚 王洪宇 田 杰 李玉泉 李 勇 李 强

李 超 刘宗国 刘 军 刘 勇 何庆旭 张善海

苏灿臣 邱 磊 郑立兰 金利华 宋秀方 杨全新

杨贵军 唐天雨 郭洪涛 秦廷龙 黄启政 程相伟

中建八局： 张贺涛 赵相君

济南市房地产综合开发集团公司：

王 海 李 军 杜 兵 鲍毓东 孙明刚

山东华鲁房地产有限公司：

王金明 太清涛 赵玉刚 郭洪涛

济南一建集团：于式亮 方 勇 李福山 宋玉金 姜亦东

济南二建集团：卜庆元 孙 伟 姜 峰 寇学武 曹怀武

山东三箭集团：胡 伟 范 磊 赵长斌

济南四建集团：

王子新 于建增 史永军 田庆吉 邢继宪 孙仁东

李艳芹 李四宝 李洪金 迟召宾 刘成贤 刘立松

宋光玉 张 冬 邱富勇 杨晔新 袁惠星 秦玉洁

崔安远 韩贺风 鲍建光 詹 伟 张宏程 孙艳文

山东华森混凝土有限公司：王建坤 江 涛 谢慧东

济南市建工总承包集团：牛祺刚 许 弘 陈 力 赵 宁

济南鲁冠混凝土有限公司：王存杰 王宝文 张秀芝

济南城建材料中心：

王同军 巴明芳 吴玉涛 杨孝先 董文浩

济南一建天泰混凝土有限公司：刘金艳 李 杰 胡丽萍

济南金奎混凝土制品中心：王业民 冯正义 李 勇

铁道部十四局：汤占华 孙继民

铁道部平顶山轨枕工厂：赵明友

铁道部大桥局三处：罗少宜 谭康荣

临沂市建筑质检站：主静民

泰安建筑科学研究所：国跃民 范立国 韩兴安 董加兰 谢 红

泰安医学院基建科：高 翔

莱芜市第三水泥厂：毕逢和 刘 强

山东省电建集团公司：王 克 孙玉健 陈维凤 郭金伦

青岛市建设集团混凝土构件厂：吴月高

山东天元建设有限公司：张会军 赵恒树

山东平阴县建筑质检站：董金和

山东莒南县水泥厂：主静江 杨增金 陈晓明 郭仕兵

江苏赣榆建筑质监站：彭 光

山东嘉恒房地产开发有限公司：王 超

济南华居建业有限责任公司：李海岗 李 煜

济南鸿旺混凝土有限公司：王兴安 汪丕明

山东天齐建筑集团混凝土站：沈玉婷 胡业晓

济南平安集团混凝土搅拌站：孙立光

山东英格利实业有限公司：白孝元 李林千

莒南县温泉实业公司：刘长森 刘长刚

序

水泥混凝土是现代土木建筑工程中使用最广泛的建筑材料。一百多年来，混凝土的应用技术经历了许多重要变革，不断取得新的突破。经过广大科技人员长期研究与实践，普通混凝土在大幅度提高性能的基础上发展为高性能混凝土，并成为混凝土技术发展的主要方向。

近十多年来，高性能混凝土已成为国内外土木建筑界研究的热点。很多单位和学者对高性能混凝土进行了大量的研究开发工作，取得了重要进展，发表了大量论文与专著，在各类大型工程中进行了广泛应用，取得了显著的经济效益。

高性能混凝土的出现和在研究应用领域取得的重大进展，标志着混凝土技术已进入高科技的新时代。虽然迄今不同国家、不同学派对高性能混凝土提出了不同的定义，但是都认为，除高强度指标外，高性能混凝土应具有高耐久性和良好的工作性，否定了过去太偏重于发展强度的道路，把耐久性作为必须重点保证的首要技术指标。通过掺加超塑化剂、超细矿粉等技术手段，使混凝土硬化前后的各种性能大幅度改善和提高，以满足不同用途对性能提出的特殊要求。

本书作者张明征高级工程师长期从事混凝土外加剂的研制开发和应用工作，近几年来又致力于高性能混凝土的试验研究和工程应用实践。本书是作者根据多年的研究成果和实践经验，综合国内外有关文献编著而成。书中阐述了高性能混凝土的发展历程和前景，论述了高性能混凝土的配制技术，包括原材料和配合比设计等重要技术环节。书中还详细阐述了作者研究的 JFA 系列

超塑化剂和泵送剂、JEA 系列膨胀防水剂、JDA 系列早强防冻剂等研究成果，并介绍了利用上述新型外加剂配制的高性能混凝土在大型工程中的应用经验，对广大从事高性能混凝土研制开发和施工应用部门能起到良好的指导作用。

在近代水泥基材料科学与工程学不断取得新成就，科学技术快速发展的今天，高性能混凝土的性能将不断发展提高和完善，其应用范围将不断扩大和普及。

希望本书的出版，对高性能混凝土的推广、应用和发展能起到有益的促进作用，为我国蓬勃发展的建设事业作出应有的贡献。

周惠南

2002 年 7 月 1 日

目

录

第一章 概论	(1)
第一节 高性能混凝土的由来与发展过程	(1)
第二节 高性能混凝土的含义及其发展应用前景	(3)
第二章 高性能混凝土的研制	(6)
第一节 原材料及其特性	(6)
第二节 配制技术途径与原理	(8)
第三节 配合比设计	(13)
第四节 性能及其试验成果	(18)
第五节 高性能混凝土效益分析	(26)
第六节 小结	(26)
第三章 高性能混凝土材料的研制	(28)
第一节 JFA 超塑化剂(高效减水剂或流化剂)	(28)
第二节 JFA 系列泵送剂	(36)
第三节 明矾石膨胀水泥	(50)
第四节 低热微膨胀水泥	(58)
第五节 膨胀防水剂	(72)
第六节 高效防水剂	(87)
第七节 早强防冻剂	(94)
第八节 微集料	(101)

第四章 高性能混凝土在大型工程中的应用	(109)
第一节 自密实(免振捣)混凝土的应用	(109)
第二节 膨胀防水混凝土的应用.....	(140)
第三节 粉煤灰高性能混凝土的应用.....	(196)
第四节 矿渣微粉高性能混凝土的应用.....	(238)
第五节 矿物掺合料高性能混凝土的应用.....	(246)
第六节 高性能混凝土的其他应用.....	(285)
 附录 A 高性能混凝土(材料)(企业标准)	 (308)
 参考文献.....	 (313)

第一章 概 论

第一节 高性能混凝土的由来与发展过程

普通混凝土是当代用量最多的人造材料。因其原料易得，成本低，操作简便、耐久性较好而得到了普遍应用。但是，普通混凝土并不总是耐久的，在正常使用条件下，其使用期限约为 50 年，而在严酷条件下经 20 年、10 余年或更短的时间就遭到了本质的破坏，需补强、修理，甚至重建。据我国“高强和高性能混凝土材料的结构与力学性态研究”课题组的资料表明：在一般环境下有 40% 工业民用建筑结构的混凝土已碳化到钢筋表面，而在较潮湿环境下，有 90% 构件的钢筋已不同程度的锈蚀……。而另一方面，许多巨型工程，施工期较长（有的长达 10 年以上），投资巨大，需要大大延长工程使用寿命。正当全球为大量混凝土工程耐久性所困扰之际，现代高性能混凝土（以下简称 HPC）技术为解决该问题开辟了一条新途径。

近十年，HPC 的研究开发得到了各国政府的高度重视。1986 年，法国政府组织其国内 23 个单位进行一项名为“混凝土的新途径”研究项目，进行 HPC 的研究，该项目于 1993 年完成，建成的样板工程如后张预应力桥梁；核电站反应堆预应力安全壳，直径 44m，高 85m，采用的 C70HPC，水泥用量仅 240 kg/m^3 ，用水量 161 kg/m^3 ，具有很高的气密性。

1989 年，加拿大政府两次投资近 1000 万美元，资助 HPC 项目的研究开发，该国矿产资源部研究的大掺量粉煤灰低水灰比 HPC 耐久性很好，水化热很低，弹性模量高，徐变系数低，长

期强度增长大, 渗透系数低, 抗氯离子渗透比普通混凝土高许多, 混凝土碳化也满足要求。其典型配比为每方水泥 155kg, 低钙粉煤灰 215kg, 水 120kg, 粗骨料 1195kg, 细骨料 645kg, 外加引气剂及高效减水剂, 拌和物坍落度 180 ~ 200mm, 含气量 5% ~ 7%。

大掺量粉煤灰混凝土在英国有较多的研究与应用, 粉煤灰占胶凝材料总体积的 60%。并认为不少情况下, 粉煤灰用量大于水泥时, 混凝土性能会变得更好。英国 Dunstan 等人调查了从 1979 年起用大掺量粉煤灰混凝土建成的一些工程建筑物, 使用 10 年后钻芯取样进行强度和耐久性测定, 结果表明: 混凝土后期强度较 28d 有大幅度增长, 碳化深度小, 耐久性优良, 即使用了活性骨料也未发生明显的碱骨料反应。减小水灰比和外掺粉煤灰已成为提高混凝土结构使用寿命的重要手段, 而严格控制粉煤灰质量及其均质性则是正确使用粉煤灰的前提。

挪威是较早对 HPC 开展研究的国家之一。至今已建造了几十个海洋采油平台, 成功地承受了恶劣海洋环境的考验, 其中较大的平台高 369m, 沉入水下 303m, 为了提高结构的耐久性, 挪威规定所有的桥梁的混凝土必须掺粉煤灰或其他微集料, 水胶比不得超过 0.4。该国混凝土结构设计规范所覆盖的混凝土强度等级已高至 C105。

美国联邦政府 16 个机构 1994 年联合提出在基础设施工程建设中应用 HPC 的建议, 并计划 10 年内在混凝土项目方面投资两亿美元进行研究和开发。

日本建设厅 1988 年设立一项简称“新 RC”的研究计划, 研究的高流态自密实免振混凝土用于世界上最长的悬索桥——明石大桥 (中跨 1990m, 三跨总长 3910m) 的桥墩, 在两个桥墩中分别用了 24 万 m³ 和 15 万 m³ 的低热免振自密实混凝土, 并在众多的建筑物中进行了应用, 取得了相当系统的成果。

德国在法兰克福 1992 年建成的 51 层, 高 186m 的高楼中采用了 B80 级 (相当于我国的 C80 级) HPC, 并进行了从材料、

构件到防火性能的系统研究,德国还有用 B115 级混凝土建造 100 层高楼的计划,在高速铁路中也采用了 B80 级混凝土。

近几年,我国为 HPC 组织了多项重大研究课题,如建设部与国家自然科学基金会联合资助的“七五”重点科技项目“高强混凝土结构性能、设计方法及施工工艺的研究”;国家自然科学基金会、建设部、铁道部和建材总局联合资助的“八五”重点科技项目“高强和高性能混凝土材料的结构与力学性能研究”以及国家计委在 1996 年设立的“重大工程中的混凝土安全性”重大科研项目(资助 1000 万元,由中国建筑材料科学研究院等建材系统的单位承担)其中也包含了 HPC 的内容。

我国地方政府(如上海市、北京市科委)也组织过高强混凝土方面的研究课题,并建造了典型工程,如北京城建集团总公司构件厂在北京财税大楼首层柱子施工中,选定四根柱子用 C110 级商品预拌 HPC 浇注成功(用 42.5 级水泥,掺硅粉等, $W/B=0.23$, 混凝土平均强度 127.5MPa, 变形模量 54GPa);上海世界广场和国际大厦进行 C80 商品 HPC 泵送施工,东方明珠将 HPC 泵送到 350m 高度;辽宁物产大楼设计应用了 C80 现浇 HPC 等。笔者近几年利用本省地方材料,也进行了高强、高性能混凝土材料的研究开发,其中高性能混凝土材料研究于 1998 年通过山东省科委组织的鉴定,并获得 1999 年山东省科技进步奖,建设的典型工程有山东青岛海景大厦采用 C60 商品 HPC;中行济南大区银行整楼采用 C35 ~ C50HPC 泵送施工;山东省立医院保健楼顶层、济南五环花苑几栋高层大面积采用 C35 ~ C50 级免振自密实混凝土施工等。

第二节 高性能混凝土的含义及其发展应用前景

进入 20 世纪 90 年代,由美国首先提出高性能混凝土(high performance concrete, 简称 HPC)的新概念,其基本要求是混凝

土应具有良好的耐久性、工作性和强度。在国内,吴中伟教授最早提到了 HPC 并指出它的意义,当时称之为高功能混凝土。近 10 年, HPC 已被国际土木工程界所接受,但至今国内外材料科学与工程界对 HPC 的确切含义仍存在不同认识。现代高强混凝土属 HPC,这点比较清楚,但 HPC 是否必须高强,就存在不同看法。不少学者认为, HPC 也应该是高强混凝土(HSC),而加拿大一项国家科研网研究计划——HPC 研究中,将用于回填采矿后的井巷并利用尾矿废渣材料制作的 1MPa 低强混凝土,以及活性粉料压制的强度高达 200~800MPa 的混凝土,还有维修加固用的钢纤维喷射混凝土等都列入 HPC 之列。在我国,通常将强度等级大于(或等于) C60 的混凝土称高强混凝土。但高强并不一定是高性能,况且需要高强度的工程结构在数量上并不是很多,将强度虽然稍低,但仍具有优良耐久性和工作性的混凝土排除在 HPC 之外在我国是不太合适的。就现状而言,研究开发 C30~C50 级 HPC 可能具有更普遍的实用意义。为此笔者认为:高性能混凝土(HPC)应具备高施工性、高抗渗性、高体积稳定性(硬化过程中不开裂,收缩徐变小)、较高强度(C30 级以上),并保持其强度持续增长,最终获得高耐久性能(耐久性提高到 200 年以上)。

HPC 之所以成为当前发展研究的热点以及这一名词的提出,显然与世界对混凝土耐久性的需求以及人类日益关心的可持续发展最为密切相关。耐久性不仅是对混凝土的一种功能要求,它也是节约天然资源(矿产、砂石),减少建筑垃圾产生,保护自然环境的需要。大量使用粉煤灰等矿物掺合料,也不仅为了改善混凝土的性能,而是处理利用工业废料,形成良好的生产循环。合理降低水泥用量既能提高混凝土的质量,又能减少生产水泥所带来的能耗与 CO₂ 排放量。混凝土是用量最大的人造材料,必须将它的生产放到保护环境和人类可持续发展的高度上加以考虑,这也是 HPC 倍受人们关注的关键所在。另外,推广应用 HPC 也许

是提高许多基础设施耐久性最为省力和投资最少的办法。如果说传统混凝土为 20 世纪人类文明和改造自然作出了无可估量的贡献的话, HPC 在 20 世纪末的出现, 则适应了人们更大规模改善环境和保护环境的需求, 这种混凝土可为基础设施工程提供 200 年以上的使用寿命, 更适合工业化、自动化生产并具有更高的施工质量可靠性。从世界范围看, 人们对陆地的开发已日趋饱和, 而 HPC 的功能也正适合今后大规模开发海洋的需要。或许, 我们正处在从传统混凝土向 HPC 过渡的年代, HPC 将作为跨世纪的新型高效建筑材料而被广泛应用。

应指出, HPC 是混凝土技术进步的产物, 由于现行混凝土规范使用 R_{28} 作为混凝土的强度指标, 以往人们过分追求早强、 R_{28} 强度 100% 等指标, 认为水泥用量越高强度越高, 使掺加粉煤灰、矿渣等掺合料的混凝土受到很大的阻碍。经验证明: 水泥用量较低的 HPC (如水泥用量在 $350\text{kg}/\text{m}^3$ 以下的 C40 混凝土) 不仅工作性好, 而且混凝土一般不开裂, 后期强度持续增长, 耐久性好。应说明: 在技术上我国已具备了推广应用的能力。随着技术进步, 人们对事物的认识有一个逐渐深入的过程。新技术、新材料的出现, 在推广过程中出现一些曲折和反复也是正常的。也正是这些问题的出现才不断地推动科学研究和技术创新。作者认为: 推广 HPC 首先应制定 HPC 应用技术规范, 使设计、监理、施工等方面提高认识, 冲破以往普通混凝土使用规范 (规定) 的束缚。另外, HPC 的生产需高素质的操作人员, 较完善的生产施工设备和高水平的质量管理与控制, 提倡现代计算机技术在 HPC 配比设计、生产过程以及质量管理中的应用。现代 HPC 及其计算机化代表了当前混凝土技术的发展方向。

第二章

高性能混凝土的研制

第一节 原材料及其特性

一、水泥

所用水泥分别为鲁南水泥厂 42.5MPa 硅酸盐水泥；山东水泥厂、山东铝厂水泥厂、临沂地区水泥厂等厂生产的 42.5MPa 或 32.5MPa 普通硅酸盐水泥、其化学成分和主要物理性能见表 2-1-1 和表 2-1-2。

水泥的化学成分

表 2-1-1

序 号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量	SO ₃
1	20.24	5.82	5.82	65.14	0.96	0.82	2.78
2	21.84	5.69	4.59	58.04	4.35	—	—
3	21.90	5.09	3.61	63.08	3.14	1.26	—
4	21.74	5.19	3.59	58.04	4.35	—	—

水泥的主要物理性能

表 2-1-2

序 号	凝结时间		抗折强度 (MPa)		抗压强度 (MPa)	
	初 凝	终 凝	3d	28d	3d	28d
1	3:20	6:45	6.7	10.0	38.5	68.2
2	4:35	7:10	6.0	8.4	28.1	58.5
3	4:45	7:40	7.5	9.9	40.2	58.8
4	3:40	4:35	5.85	8.1	29.0	54.4