

Experimental Study on Fracture Properties and Durability of High Performance Concrete

# 高性能混凝土

## 断裂性能与耐久性能试验研究

李清富 郑连群 靳九贵 张 鹏 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

Experimental Study on Fracture Properties and Durability of High Performance Concrete

# 高性能混凝土断裂性能与耐久性能试验研究

李清富 郑连群 靳九贵 张 鹏 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书以粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维为掺合料,通过混凝土拌合物工作性试验(包括坍落度和扩展度试验、L形流动仪试验)、基本力学性能试验(包括立方体抗压强度试验、立方体劈裂抗拉强度试验、棱柱体抗压强度试验、弹性模量试验、抗弯拉强度试验及抗弯拉弹性模量试验)、断裂试验和耐久性试验(包括抗渗性试验、抗冻融性试验、碳化试验及干燥收缩试验),较为系统地研究了粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别在“单掺”和“混掺”的情况下对高性能混凝土性能的影响规律,为高性能混凝土的推广应用提供了技术支持。

本书可供从事建筑材料和工程建设行业的研究人员及工程技术人员使用,也可作为有关专业研究生的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土断裂性能与耐久性能试验研究 / 李清富等著.

——北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.2

ISBN 978-7-114-12060-2

I. ①高… II. ①李… III. ①高强混凝土-断裂性能-试验研究②高强混凝土-耐用性-试验研究 IV. ①TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 027919 号

书 名:高性能混凝土断裂性能与耐久性能试验研究

著 作 者:李清富 郑连群 靳九贵 张 鹏

责任编辑:张征宇 郭红蕊

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门内外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:8.75

字 数:180 千

版 次:2015 年 2 月 第 1 版

印 次:2015 年 2 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12060-2

印 数:0001-1000 册

定 价:39.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

混凝土材料是现代建筑、水利、港口、公路和桥梁等工程中使用最广泛的建筑材料,发挥着其他材料无法替代的作用和功能。最初,混凝土技术的优劣是以强度作为主要依据,特别是20世纪70年代末,由于减水剂和高活性混凝土掺合料的开发和应用,使高强混凝土的制备进入了一个新阶段,采用普通混凝土施工工艺,已能较容易地配制出80~100MPa的高强混凝土。但是,随着破坏造成的结构崩塌事故在各地接连发生,人们意识到混凝土强度的增加带来的脆性问题以及裂缝问题已严重影响到高强混凝土的使用安全,特别是一些大跨结构工程提出的各种苛刻要求,迫使混凝土朝着高性能化方向发展。

随着科学技术和生产技术的发展,在各种复杂环境下使用的重要混凝土结构,如高层建筑、大跨度桥梁、海上平台、海底隧道等,都在不断增加,这些混凝土结构的施工难度大,耐久性要求高,一旦出现意外,后果十分严重。同时,混凝土结构在服役过程中,会产生裂纹、混凝土剥落、局部损伤等病害,使混凝土结构的性能不断降低,不仅直接影响混凝土结构的正常使用,甚至会导致结构坍塌破坏等严重事故,而且,加固和维修这些混凝土结构将会耗资巨大。因此,采用高性能混凝土材料是这些结构的首选。

本书紧紧围绕高性能混凝土的基本力学性能、断裂性能和耐久性能等开展试验研究。全书共分7章,主要内容包括:在分析高性能混凝土(简称HPC)的制备原理的基础上,采用全计算法确定了HPC的配合比,对粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别“单掺”、“混掺”的HPC的拌和物工作性进行了研究,得出了各掺合料掺量对HPC工作性的影响规律;通过抗压强度、抗拉强度和静压弹性模量试验,得出了各掺合料掺量对HPC各力学性能指标影响的规律,并对HPC弹性模量计算公式进行研究,以混凝土重度和立方体抗压强度为变量,对试验数据进行回归分析,得出了HPC弹性模量计算公式;采用三分点加载试验方法,对所配制的HPC进行了抗弯拉强度和抗弯拉弹性模量试验,得出了各掺合料掺量对HPC抗弯拉性能影响的规律;采用三点弯曲试验法,对HPC梁式试件进行了断裂性能试验,得出了各掺合料掺量对HPC各断裂参数影响的规律;通过HPC的抗渗性试验、抗冻融试验、碳化试验和干缩性能试验,得出了各掺合料掺量对HPC各耐久性评价指标影响的规律等。

本书在编写过程中,得到了河南省交通运输厅、河南省工程材料和土工结构重点实验室、濮阳豫龙高速公路有限责任公司等单位的大力支持和帮助,河南省交通规划勘察设计院有限责任公司的张海洋同志和河南省交通职业技术学院的孙振华同志参与了本书研究内容的试验和数据整理工作。另外,本书编写过程中还引用了大量的文献资料。在此,谨向为本书完成提供支持和帮助的单位、参考文献的原作者及所有试验人员表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中尚有许多不妥之处,敬请各界读者朋友批评指正。

著 者

2014年11月于郑州大学

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第1章 绪论 .....                   | 1   |
| 1.1 研究的目的与意义 .....             | 1   |
| 1.2 国内外研究现状 .....              | 2   |
| 1.3 本书主要研究内容 .....             | 7   |
| 第2章 原材料、试验方案及配合比设计 .....       | 9   |
| 2.1 HPC 原材料 .....              | 9   |
| 2.2 配合比设计 .....                | 13  |
| 2.3 小结 .....                   | 17  |
| 第3章 HPC 工作性试验研究 .....          | 18  |
| 3.1 坍落度和扩展度试验 .....            | 18  |
| 3.2 L形流动仪试验 .....              | 22  |
| 3.3 小结 .....                   | 28  |
| 第4章 高性能混凝土基本力学性能试验研究 .....     | 30  |
| 4.1 立方体抗压强度试验 .....            | 30  |
| 4.2 劈裂抗拉强度试验 .....             | 36  |
| 4.3 轴心抗压强度及弹性模量试验 .....        | 43  |
| 4.4 抗弯拉强度及抗弯拉弹性模量试验 .....      | 49  |
| 4.5 小结 .....                   | 53  |
| 第5章 高性能混凝土断裂性能试验研究 .....       | 55  |
| 5.1 试验方法概述 .....               | 55  |
| 5.2 断裂韧度试验结果与分析 .....          | 57  |
| 5.3 断裂性能试验结果与分析 .....          | 64  |
| 5.4 裂缝嘴和裂缝尖端张开位移的试验结果与分析 ..... | 70  |
| 5.5 小结 .....                   | 78  |
| 第6章 高性能混凝土耐久性试验研究 .....        | 80  |
| 6.1 高性能混凝土抗渗性试验研究 .....        | 80  |
| 6.2 高性能混凝土抗冻融试验研究 .....        | 89  |
| 6.3 高性能混凝土碳化试验研究 .....         | 102 |
| 6.4 高性能混凝土干缩性试验研究 .....        | 112 |
| 6.5 小结 .....                   | 123 |
| 第7章 结论与展望 .....                | 124 |
| 7.1 主要结论 .....                 | 124 |
| 7.2 研究展望 .....                 | 126 |
| 参考文献 .....                     | 127 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究的目的与意义

混凝土材料是现代建筑、水利、港口、公路和桥梁等工程中使用最广泛的建筑材料,发挥着其他材料无法替代的作用和功能<sup>[1]</sup>。2007 年我国生产了超过 25 亿  $\text{m}^3$  的混凝土,位居世界第一<sup>[2]</sup>。目前我国仍然处于高速建设时期,对于混凝土的需求增长稳定,根据有关专业研究机构的预测,我国的混凝土产量在今后几年仍然会保持 6% ~ 8% 的年增长率。

最初,混凝土技术的优劣是以强度作为主要依据,特别是 20 世纪 70 年代末,由于减水剂和高活性混凝土掺合料的开发和应用,使高强混凝土的制备进入了一个新阶段,采用普通混凝土施工工艺,已能较容易地配制出 80 ~ 100MPa 的高强混凝土。但是,随着破坏造成的结构崩塌事故在各地接连发生,人们意识到混凝土强度增加带来的脆性问题以及裂缝问题已严重影响到高强混凝土的使用安全,特别是一些大跨结构工程提出的各种苛刻要求,迫使混凝土朝着高性能化方向发展。随着科学技术和生产技术的发展,在各种复杂环境下使用的重要混凝土结构,如高层建筑、大跨度桥梁、海上平台、海底隧道等,都在不断增加,这些混凝土结构的施工难度大,耐久性要求高,一旦出现意外,后果十分严重。同时,混凝土结构在服役过程中,会产生裂缝、混凝土剥落和局部损伤等老化问题,混凝土结构的性能不断降低,直接影响着其正常使用,加固和维修这些混凝土结构耗资巨大。人们开始追求更好的混凝土材料,使其具有高耐久性和高工作性等性能,能适用各种严酷的环境。高性能混凝土就这样应运而生。

1990 年 5 月,美国国家标准与技术研究所 (NIST) 和美国混凝土协会 (ACI) 率先给出了高性能混凝土 (High Performance Concrete, 简称 HPC) 的定义<sup>[3]</sup>。HPC 是用优质水泥、集料、水和活性细掺料与高效外加剂制成的,同时具有优良耐久性、工作性和强度的匀质混凝土<sup>[4]</sup>。各国根据不同的工程需要提出了不尽相同的要求和含义,大多数学者认为 HPC 的强度不应低于 50 ~ 60MPa。日本学者对 HPC 则更注重混凝土的耐久性和工作性:新拌混凝土不经振捣能够填满模板内所有空间;硬化前期混凝土内不存在因水化作用与干缩引起的初始裂缝;硬化后期具有足够的强度等力学性能与抗渗性,更重视早期强度<sup>[5]</sup>。欧洲的学者更重视 HPC 的强度与耐久性,常与高强混凝土并提 (HSC/HPC)<sup>[6]</sup>。

HPC 在我国的研究开展虽然较晚,却得到了高度重视,使该项工作取得较大进展。赵国藩认为 HPC 应具备高强度、高工作性、高耐久性三项指标<sup>[7]</sup>。冯乃谦认为 HPC 应满足以下几点要求:水胶比要不大于 0.38,组成材料中必须含有高性能减水剂和矿物外加剂;混凝土 56d 按照 ASTM C1202 规范 6h 总导电量  $< 1000\text{C}$ ;冻害地区冻融 300 次相对动弹模  $\geq 80\%$ ,抗

压强度 $\geq 60\text{MPa}$ ,并具有满足施工要求的流动性<sup>[8]</sup>。目前对 HPC 的定义比较多,但在国内最具有代表性的是吴中伟所提的定义。吴中伟认为:HPC 是一种新型高技术混凝土,是在大幅度提高混凝土性能的基础上,采用现代混凝土施工技术,选用优质原材料,在严格的质量管理条件下制成的;除了水泥、集料、水以外,必须掺加足够数量的矿物掺合料与高性能外加剂,并具有良好的耐久性、工作性、适用性、体积稳定性、经济合理性和必备的各种力学性能;HPC 应根据用途与经济合理等条件对其性能有所侧重,HPC 可以向中低强度等级( $30\text{MPa}$ )混凝土适当延伸,并指出 HPC 是一种可持续发展的绿色建筑材料<sup>[9]</sup>。

根据 HPC 的定义及其应用中的情况可总结出 HPC 的特点如下:

(1) 工作性能好。高性能混凝土拌和物具有良好的和易性,不泌水,不离析,坍落度、扩展度、坍落度损失等指标均好于普通混凝土,从而保证在施工过程中新拌混凝土的工作性能,提高硬化后混凝土的耐久性。

(2) 硬化过程中体积稳定,水化热低,温度峰值及时间可形成梯度,冷却时收缩小,硬化后体积致密,不会因为膨胀或收缩产生微观裂缝。

(3) 高性能混凝土可对同强度等级的普通混凝土力学性能加以改善。如提高不同时期的强度,提高弹性模量,减小徐变系数等。

(4) 大量使用粉煤灰、硅粉、矿渣等矿物掺合料是配制高性能混凝土不可或缺的保障,同时使用高效减水剂。这些都是使混凝土高性能化的重要保障,并能减少工业废料的污染。

(5) 耐久性大大提高。高性能混凝土不一定是高强的,但其工作性能、耐久性等必须是好的,这也是其与普通混凝土的最重要区别。因此,高强混凝土不一定是高性能混凝土,高性能混凝土也不一定是高强的。这个“高”指的是性能好,耐久性好。

随着 HPC 的广泛应用和发展,目前,配制 HPC 的途径也很多,可在混凝土中掺加矿物掺合料,如磨细矿渣、粉煤灰、硅灰、天然沸石粉等,还可在混凝土中掺加化学外加剂,如高效减水剂、泵送剂、引气剂、塑化剂、缓凝剂以及掺入纤维材料等。由于每种矿物掺合料、外加剂和纤维材料对 HPC 力学性能的影响是不一样的,特别是当多种掺合料复合掺入混凝土时,这种“复掺”对 HPC 的力学特性影响到底如何,目前国内外相关的研究成果比较缺乏。本书将着重研究多掺合料的 HPC 材料的各种力学性能、耐久性和断裂性能等,以期为高性能混凝土的推广应用提供依据。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 粉煤灰在混凝土中的应用

1933 年,美国学者 R. E. Davis 开始致力于砂浆和混凝土中添加粉煤灰的研究,并发表了粉煤灰在混凝土中应用的研究成果,揭开了粉煤灰在混凝土中应用的新纪元。20 世纪 50 年代,由于发展能源工业的需要,使得粉煤灰在水坝这种大体积混凝土中的应用得到普遍推广,并且开始尝试将粉煤灰混凝土用于其他结构中。1953 年美国在建造 Hungry Horse 大坝工程中使用粉煤灰约 13 万吨,这是粉煤灰在混凝土中的第一个重要的实际应用,也是粉煤灰混凝土技术发展史上的第一座里程碑<sup>[10]</sup>。在随后几十年的发展中,粉煤灰在混凝土中的

应用开始作为一种新的混凝土技术被人们广泛接受。1977年,芝加哥高层建筑委员会的报告中提出:“符合ASTMC618(F级)要求的高品质粉煤灰是生产粉煤灰混凝土的必要组成部分。”<sup>[11]</sup>1978年,英国开始研究掺40%粉煤灰在混凝土结构中的应用。美国于1984年开始研究粉煤灰与高性能减水剂复合配制的混凝土;1989年,加拿大政府大力资助HPC项目的研究开发,该国研究的大掺量粉煤灰HPC具有低水胶比、低水化热、高弹性模量、低徐变系数、后期强度增长大、渗透系数低等良好的性能,并且抗氯离子渗透比普通混凝土高,碳化也满足要求。日本亦在20世纪80年代研究粉煤灰和矿渣复掺的混凝土<sup>[12]</sup>。另外,粉煤灰混凝土结构在长期使用中的结果表明其具有比普通混凝土更好的耐久性能。在随后的研究中,人们把掺加粉煤灰确定为配制HPC的一个有效手段,能使混凝土结构的长期性能得到大幅度改善,延长结构物的使用寿命。

我国粉煤灰混凝土应用技术的研究起于20世纪50年代,沈旦申等学者首先提出了使用粉煤灰水泥混合材料的建议。三门峡大坝、刘家峡大坝等水利工程中都使用过粉煤灰,起到了降低混凝土水化热、改善混凝土性能的效果,并且节约水泥用量,更主要的是防止了大坝出现裂纹,提高了大坝的防渗性能<sup>[13]</sup>。1956年,冶金工业部在干硬性混凝土中开始尝试使用粉煤灰。1958年,上海在地下工程中采用了粉煤灰混凝土。20世纪80年代初期,沈旦申等学者通过对粉煤灰在混凝土中的作用和行为以及现象学的研究,提出了“粉煤灰效应”理论,即形态效应、活性效应和微集料效应<sup>[14]</sup>。在广西岩滩水电站的围堰施工中,采用粉煤灰掺量70%的碾压混凝土,取得了良好的技术和经济效益;1989年,广西水电科研所将这项技术推广到道路工程。1991年,交通部公路科学研究所江苏淮阴以近似46%的粉煤灰掺量的碾压混凝土铺筑了一个楼前广场,得到了满意的强度和耐磨性<sup>[15]</sup>。1994年,三峡工程正式开工,在大坝混凝土中,通过掺加30%的Ⅰ级粉煤灰、高性能减水剂以及引气剂制备出水泥用量少、水化热低、用水量少、抗渗性好、耐久性好的HPC<sup>[16]</sup>。近年来,粉煤灰高性能混凝土广泛用于水利、公路、桥梁和高层建筑等工程中,并且在粉煤灰HPC中添加其他矿物掺合料,得到性能更优越的混凝土。混凝土中掺入粉煤灰可以节省水泥,减少生产水泥需消耗的能量和减轻生产水泥给人类生存环境带来的负面影响,更重要的是可以改善混凝土的某些性能。因此,粉煤灰混凝土是一种可持续发展的绿色材料。

### 1.2.2 硅粉在混凝土中的应用

20世纪50年代,斯堪的纳维亚国家就开始对硅粉的作用进行研究,但直到20世纪70年代硅粉才用于实际工程中<sup>[17]</sup>。在挪威和瑞典等北欧国家的港口码头、北海油田及地下矿井中率先采用了硅粉混凝土,1982年挪威在伏诺维斯坝上正式采用了硅粉混凝土<sup>[18]</sup>。20世纪80年代初,加拿大在魁北克建立了硅粉混凝土预制场,并进行了大体积硅粉混凝土研究<sup>[19]</sup>。1983年,美国用硅粉混凝土修补了奥里夫尼河上的卡查坝消力池,效果良好<sup>[20]</sup>。随后各国都相继开始对硅粉混凝土进行研究,并大量用于道路、桥梁、水坝、高层建筑等工程中。日本的Yamato等人<sup>[21]</sup>通过试验得出非引气混凝土水胶比为0.25时,不管硅粉的掺量多少,都有良好的抗冻耐久性。1999年,美国的Houssam A, Toutanji和Ziad Bayasi<sup>[22]</sup>的研究结果表明,蒸汽养护比湿润养护和自然干燥条件下的硅粉混凝土抗压强度都高,当硅粉掺入

量超过 15% 后,任何养护方式下混凝土的抗弯强度都将显著降低。2003 年,新加坡 M. H. Zhang 等人<sup>[23]</sup>的研究结果表明,混凝土干缩随着水胶比的减小而增大,随着硅粉掺量的增加而增大。2004 年,沙特阿拉伯 Abdullah A. Almusallam 等人<sup>[24]</sup>的研究表明,粗集料种类对硅粉混凝土抗压强度和抗拉强度有重要的影响。2007 年,韩国 Ha - Won song 等人<sup>[25]</sup>的研究结果表明:混凝土中加入硅粉提高了混凝土的密实度,从而可明显降低氯离子的侵蚀速度,当硅粉掺量超过 12% 时,硅粉对氯离子侵蚀速度的影响不再提高。

我国对硅粉研究和应用的时间只有二十几年。1985 年,水利电力部东北勘测设计院科研院所和水利电力部第十工程局首次在四川渔子溪二级电站中使用了硅粉混凝土,在厂房混凝土中采用 3% ~ 7% 的硅粉掺量,提高了混凝土早期强度,加快了模板周转;在引水隧洞喷射混凝土中,采用 7.5% 的硅粉掺量,减少了混凝土的回弹量。南京水利科学研究院在大伙房水库工程、龙羊峡泄水建筑物和葛洲坝泄水闸修补等工程中都采用了硅粉混凝土,并在一些水电站工程修补中应用了硅粉水泥灌浆液<sup>[26]</sup>。1990 年,范沈抚<sup>[27]</sup>的研究表明,在相同含气量的情况下,掺 15% 的硅粉混凝土比不掺硅粉混凝土的气孔结构有很大的改善。1991 年,丁雁飞和孙景进<sup>[28]</sup>通过试验得出结论:非引气硅粉混凝土的抗冻耐久性比基准混凝土要高。2001 年,黄河小浪底水利工程<sup>[29]</sup>采用了粉煤灰和硅粉双掺的混凝土,结果表明双掺比单掺早期强度增长系数要高,与基准混凝土早期增长系数相当,并且双掺能最大限度地代替水泥,但不影响混凝土的早期强度。2006 年,薛航<sup>[30]</sup>研究了掺硅粉路面混凝土的路用性能和施工工艺及技术经济性,研究结果表明,掺入适量硅粉可以极大改善路面混凝土的路用性能,尤其是抗折强度、抗疲劳性能、耐磨性能、抗冻性能和脆性等,从而延长了路面的使用年限。硅粉大量地用于混凝土中,能大幅度提高混凝土的强度,但是用于 HPC 中还不多,主要是由于硅粉颗粒极细,加入 HPC 后将对混凝土的工作性能产生不利影响,但是加大减水剂的用量能很好地解决这一问题,将扩大硅粉 HPC 的应用范围。

### 1.2.3 聚丙烯纤维在混凝土中的应用

20 世纪 60 年代中期,Goldfein 开始用合成纤维作水泥砂浆增强材料的研究,发现聚丙烯、尼龙、聚乙烯等纤维有助于提高砂浆的抗冲击性<sup>[31]</sup>,开启了人们对聚丙烯研究的序幕。Zollo 等人<sup>[32]</sup>的研究结果表明:混凝土中添加体积率为 0.1% ~ 0.3% 的聚丙烯纤维,可使混凝土的塑性收缩减少 12% ~ 25%。20 世纪 70 年代,聚丙烯纤维混凝土制品得到了蓬勃发展。国外的诸多研究结果表明<sup>[33-34]</sup>,聚丙烯纤维对混凝土的作用主要是限制了混凝土早期裂缝的生成与发展,增强了混凝土抗裂性,改善了混凝土的延性。目前,在国外广泛应用的聚丙烯纤维大多为美国希尔兄弟化工公司生产的杜拉纤维(Durafiber),它能有效地控制混凝土或砂浆的塑性收缩、干缩、温差变形等因素引起的微裂缝,防止及抑制裂缝的形成及发展<sup>[35]</sup>。

我国关于合成纤维混凝土的研究和应用始于 20 世纪 90 年代,并且主要集中于对聚丙烯纤维混凝土的物理、力学性能的研究。曹诚等人<sup>[36]</sup>的研究结果表明:聚丙烯纤维能有效降低混凝土塑性裂缝的宽度,随着聚丙烯纤维的细度和掺量的增大,能进一步减小混凝土中纤维的间距,增强阻裂效应。华渊等人<sup>[37]</sup>的研究结果表明:与基准混凝土相比,随着聚丙烯

纤维体积率的增加(0% ~ 1.1%),混凝土抗压强度变化很小,抗折强度提高了12% ~ 26%,韧性也随之增加。大连理工大学戴建国和黄承逵等人<sup>[38]</sup>研究了网状聚丙烯纤维混凝土,结果表明低弹性模量纤维混凝土不仅可以防止塑性收缩裂缝,而且还可以改善结构的延性和韧性。

聚丙烯纤维能有效限制早期混凝土的塑性收缩,阻止混凝土原生裂缝的发生和发展,减少原生裂缝的数量,聚丙烯纤维混凝土能提高混凝土的抗冲击、抗疲劳能力。这些优异的性能,使聚丙烯纤维广泛用于工业与民用建筑、水利与水电工程、道路与桥梁工程以及隧道工程中。

#### 1.2.4 高性能混凝土耐久性研究现状

自从高性能混凝土的概念出现后,很多国家都予以充分重视,对高性能混凝土及其耐久性进行了深入的研究。高性能混凝土是近年来混凝土技术发展的主要方向,国外学者曾称之为“21世纪混凝土”,挪威于1986年首先对此进行了研究,在1990年由美国国家标准与技术研究院(NIST)与美国混凝土学会(ACI)共同主办的一次研讨会上正式定名<sup>[39-40]</sup>,认为高性能混凝土是采用优质水泥、集料、水和活性细掺料与高效外加剂制成的,同时具有优良的耐久性、工作性和强度的匀质混凝土。之后,不同国家不同学者对高性能混凝土提出了不同的解释或定义,尽管侧重点各有不同,但在主要功能方面都能达成共识,即认为在达到强度的同时,具有良好的工作性、经济性和耐久性,特别适用于桥梁、港工、核反应堆以及高速公路等重要的混凝土建筑结构。

在高性能混凝土出现或被定义之前,人们也针对普通混凝土耐久性问题进行深入思考和研究。早在1880~1890年,第一批钢筋混凝土构件问世,人们就开始考虑钢筋混凝土能否在化学腐蚀条件下安全使用,虽然没有提出“耐久性”一词,但这是人们开始思考耐久性的雏形<sup>[41]</sup>。此后,针对混凝土长期作用下的不同损伤,各国学者进行了深入研究<sup>[42]</sup>,如20世纪40年代,美国学者T. E. Stanton发现并定义了碱—集料反应;1945年,Powers等人针对冻融破坏提出了静水压假说和渗透压假说等,都为后来混凝土耐久性问题的全面提出和研究奠定了基础。1957年,美国混凝土学会(ACI)成立了“ACI-201委员会”,负责指导和协调混凝土耐久性方面的研究。此后,各国及国际组织都相应成立了有关耐久性研究的组织,或定期召开学术会议,以此来推动混凝土耐久性的研究。

高性能混凝土于20世纪80年代出现后,各国在原有混凝土发展的基础上开始对其进行研究。1986~1993年,法国组织政府研究机构、高等院校、建筑公司等23个单位开展了“混凝土新方法”的研究项目,进行高性能混凝土的研究,并建成了示范工程;1996年,法国公共工程部、教育与研究部组织了为期四年的国家研究项目“高性能混凝土2000”,投入研究经费550万美元;1988~1993年,日本建设省进行了一项综合开发计划“钢筋混凝土结构建筑物的超轻质、超高层化技术的开发”(简称“新RC计划”),为实施该项计划研究,共成立了5个分会,其中高强混凝土材料分会由水泥协会、建筑协会建设省研究所、建材试验中心、化学外加剂协会等机构和多所高等院校以及有关公司参加;1994年,美国联邦政府16个机构联合提出了一个在基础设施工程建设中应用高性能混凝土的建议,并决定在10年内投资

2 亿美元进行研究和开发;美国国家自然科学基金(NSF)、美国国家标准与技术研究所(NIST)、美国联邦公路管理局(FHWA)以及一些州政府的运输部和美国工程兵等机构,都一直投入大量经费,资助高强混凝土和高性能混凝土的研究;1991~1997年,瑞典政府联合出资5200万,实施高性能混凝土研究的国家计划;1999年,美国NIST的建筑与防火研究实验室(BFRL)在国际互联网上公布了一个“高性能混凝土技术的伙伴关系(PHPCT)”,由工业界四个大企业和国家预拌混凝土协会、波特兰水泥协会协作,承担“商品高性能混凝土结构项目中计算机集成知识系统(CIKS)的开发”的国家重点研究计划<sup>[43]</sup>。

在应用上,日本早在20世纪70年代就采用HPC预应力桁架修建了几座铁路桥梁,以减少交通静荷载,降低活载作用下的结构反应,消除火车营运过程中产生的噪声和振动问题;法国自1986年起就进行了高性能混凝土研究并建造示范工程,1989年采用C70的高性能混凝土建造了伊沃纳(Yvonne)河桥,并采用体外预应力索的结构形式,使混凝土的用量减少30%,自重降低24%<sup>[44]</sup>;在美国,随着对HPC的研究和认识的深入,1993年美国联邦公路管理局发起了在全国公路桥梁建设中推广应用高性能混凝土的计划,1995年修建完成了首座全部采用HPC的桥梁—洛埃塔跨线桥(Louetta Road Overpass),混凝土设计强度为69MPa;挪威结合北海海洋石油开发的需要,是较早对高性能混凝土开展研究的国家之一,至今已建造了数十个海洋采油平台,成功地经受了非常恶劣的海洋环境。为了提高结构的耐久性,挪威所有的桥梁混凝土必须掺粉煤灰或硅粉,水胶比不得超过0.4<sup>[45]</sup>。近二十年来,挪威在HPC方面的研究发展非常迅速,在HPC的抗渗性研究等方面已走在世界的前列,而且是最先用HPC修筑公路路面的国家,已经拥有C105级混凝土结构设计规范,成为目前应用超高强混凝土最好的国家<sup>[43]</sup>。

我国对HPC及其耐久性的研究是在高强混凝土和普通混凝土耐久性研究的基础上发展起来的。从20世纪80年代末90年代初,清华大学率先把高强混凝土列为国家自然科学基金重点项目进行研究,此后各省市相继列项研究,取得一批成果<sup>[46]</sup>。在此基础上,随着对高强混凝土仅仅片面的高强度而工作性等不能满足要求的局限性的深入认识,及生产实际中对结构物更高的耐久性追求,又掀起了HPC的研究热潮。结合过去几十年我国混凝土耐久性研究的成果和高性能混凝土的理念,进行了高性能混凝土耐久性的研究,取得了一定的研究成果。针对不同外加剂、不同掺合料对高性能混凝土耐久性的影响和贡献进行了大量的理论和试验研究。如认识到粉煤灰、硅粉、矿渣等矿物作为混凝土胶凝材料的一部分,能改善传统混凝土的孔结构及工作性能,同时能增加混凝土的致密性,减少水泥用量,提高抗渗性、抗冻性、降低水化热等;纤维能减少高性能混凝土的塑性收缩,提高其抗裂性等。同时国家也越来越重视新型HPC及其耐久性的研究应用,设立了国家重点科技攻关项目<sup>[47]</sup>,如1993年国家自然科学基金会、建设部、铁道部和国家建材局联合资助了重点科研项目《高强与高性能混凝土材料的结构力学性态研究》;1999年中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会(HSCC)编写了《高强混凝土结构设计及施工技术规范》(CECS104:99);南京水利科学研究院开发了耐磨蚀高性能混凝土,并提供了这类混凝土的综合参数和性能等。

除了与研发并进,在应用上也取得了很大进展,完成了多个高性能混凝土工程试点项

目<sup>[47]</sup>。目前,C60的HPC已广泛应用于桥梁、高层建筑及海洋结构等工程,C80混凝土也在工程中试点应用。如上海东方明珠电视塔下部塔身采用C60粉煤灰混凝土,并将这种混凝土成功地泵送到350m的高处;上海金茂大厦4m厚底板一次连续浇筑1.35万m<sup>3</sup>的C50粉煤灰高性能混凝土;北京首都机场新候机楼共26万m<sup>3</sup>的混凝土中,除基础外,所有墙、梁、板、柱均采用坍落度为20~22cm的C60高性能混凝土。桥梁工程方面相继采用高性能混凝土技术建成了C60三门峡黄河公路大桥、C50上海杨浦大桥、C50武汉长江二桥、C60万县长江大桥、C50广州虎门大桥等。

虽然HPC在我国已经有了一些应用实例,但与美国、日本、挪威等国家相比,HPC的应用水平和规模均相当落后,在工程中应用尚处于初级阶段,关于HPC的技术标准也尚需修改和制定。近年来,我国的高强混凝土和高性能混凝土的研究、应用发展较快,也正在逐步地走向正规和系统。1997年3月,吴中伟教授在高强高性能混凝土会议上又指出<sup>[48]</sup>,高性能混凝土应更多地掺加以工业废渣为主的掺合料,更多地节约水泥熟料,并提出了绿色高性能混凝土(GHPC)的概念,对绿色高性能混凝土必须走可持续发展道路的观念深入人心起到了重要的作用。从世界范围看,人类对陆地的开发已日趋饱和,高性能混凝土正适合今后开发有巨大潜力的海洋资源的需要,因此高性能混凝土是可持续发展的混凝土。

### 1.3 本书主要研究内容

基于国内外HPC的研究现状,按照高性能混凝土的设计理念,配制以粉煤灰、硅粉、聚丙烯纤维和化学外加剂复掺的HPC,着重研究粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维“单掺”、“双掺”和“三掺”HPC的各种力学性能、断裂韧性和耐久性,主要研究内容为:

(1)分析HPC的制备原理,并采用全算法确定HPC的配合比。对粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别“单掺”、“双掺”和“三掺”的新型HPC的拌和物工作性进行研究,在试验结果基础上分析粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别在“单掺”、“双掺”和“三掺”的情况下对HPC工作性影响的作用机理,得出各掺合料掺量对HPC工作性的影响规律。

(2)通过抗压强度、抗拉强度和静压弹性模量试验,分析粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别在“单掺”、“双掺”和“三掺”的情况下对HPC抗压强度、抗拉强度和静压弹性模量影响的作用机理,得出各掺合料掺量对各力学性能指标影响的规律,并对HPC弹性模量计算公式进行研究,以混凝土重度和立方体抗压强度为变量,对试验数据进行回归分析,得出HPC弹性模量计算公式。

(3)采用三分点加载试验方法,对所配制HPC进行抗弯拉强度和抗弯拉弹性模量试验,分析粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别在“单掺”、“双掺”和“三掺”的情况下对HPC抗弯拉强度和抗弯拉弹性模量影响的作用机理,得出各掺合料掺量对HPC抗弯拉性能影响的规律。

(4)采用三点弯曲试验法,对HPC梁式试件进行断裂性能试验,以断裂韧度( $K_{IC}$ )、断裂能( $G_F$ )、裂缝嘴张开位移( $CMOD$ )和裂缝尖端张开位移( $CTOD$ )等断裂参数为评价指标,分析粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别在“单掺”、“双掺”和“三掺”的情况下对高性能混凝土断裂性能影响的作用机理,得出各掺合料掺量对HPC各断裂参数影响的规律。

(5) 通过 HPC 的抗渗性试验、抗冻融试验、碳化试验和干缩性能试验,分析粉煤灰、硅粉和聚丙烯纤维分别在“单掺”、“双掺”和“三掺”的情况下对 HPC 渗水高度、300 次冻融循环后的相对动弹性模量、不同龄期(3d、7d、14d、28d 和 35d)碳化深度和试件 90d 干缩值影响的作用机理,得出各掺合料掺量对各耐久性评价指标影响的规律。

## 第 2 章 原材料、试验方案及配合比设计

### 2.1 HPC 原材料

高性能混凝土使用的原材料基本上与普通混凝土所使用的原材料相同,包括水泥、粗集料、细集料、水,同时还必须包括矿物掺合料和外加剂。由于高性能混凝土的要求和特点,原材料中对普通混凝土影响不明显的因素,对 HPC 可能影响显著。本试验所用的原材料有水泥、I 级粉煤灰、硅粉、聚丙烯纤维、粗集料、细集料、水和高性能减水剂。

#### 2.1.1 水泥

HPC 一般所用的水胶比很低,要满足施工的工作性要求,水泥用量就得增大;为了减小收缩和降低混凝土内部升温,又要降低水泥用量。因此,用于高性能混凝土的水泥要同时具有高强度和较好的流变性能。对于高性能混凝土,为了保证水泥质量的稳定,要求禁止使用立窖水泥<sup>[49]</sup>。

本试验采用河南孟电集团水泥有限公司生产的 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥。各项性能指标根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)进行测试<sup>[50]</sup>,结果见表 2.1。

水泥各项指标

表 2.1

| 序号 | 测试内容                            | P. O. 42.5 标准指标 | 测试结果  |
|----|---------------------------------|-----------------|-------|
| 1  | 比表面积 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) | $\geq 300$      | 374   |
| 2  | 密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )   | —               | 3.05  |
| 3  | 标准稠度 (%)                        | —               | 26.5  |
| 4  | 初凝时间 (min)                      | $\geq 45$       | 164   |
| 5  | 终凝时间 (min)                      | $\leq 600$      | 224   |
| 6  | 安定性 (mm) (雷氏值)                  | $\leq 5$        | 1.5   |
| 7  | 细度 (%) ( $80\mu\text{m}$ 筛余)    | $\leq 10.0$     | 0.5   |
| 8  | 3d 抗折强度 (MPa)                   | $\geq 3.5$      | 5.4   |
| 9  | 28d 抗折强度 (MPa)                  | $\geq 6.5$      | 8.6   |
| 10 | 3d 抗压强度 (MPa)                   | $\geq 17.0$     | 26.7  |
| 11 | 28d 抗压强度 (MPa)                  | $\geq 42.5$     | 47.5  |
| 12 | 总碱含量 (%)                        | —               | 0.81  |
| 13 | $\text{SO}_3$ (%)               | $\leq 3.5$      | 2.56  |
| 14 | MgO (%)                         | $\leq 5.0$      | 3.15  |
| 15 | 烧失量 (%)                         | $\leq 5.0$      | 2.7   |
| 16 | 氯离子 (%)                         | $\leq 0.06$     | 0.021 |

2.1.2 粉煤灰

粉煤灰也称飞灰<sup>[51]</sup>,是由燃煤电厂从烟道收集的灰尘,其中含有大量球状玻璃珠,以及莫来石、石英和少量的矿物结晶等物质。粉煤灰一般分为低钙粉煤灰和高钙粉煤灰两类。低钙粉煤灰是无烟煤和烟煤的燃烧物,CaO 的含量小于 10%;高钙粉煤灰为褐煤和亚烟煤的燃烧物,CaO 含量一般大于 10%。拌制混凝土和砂浆用的粉煤灰分为三个等级:Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级。高性能混凝土中掺入Ⅰ级粉煤灰有利于降低水胶比,提高化学外加剂的作用效果,提高混凝土的强度等级。

本试验所用的粉煤灰为山西长治易天粉煤灰有限公司生产的Ⅰ级粉煤灰,其品质指标检验按照《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2005)标准进行<sup>[52]</sup>,其结果见表 2.2。

Ⅰ级粉煤灰品质检验结果 表 2.2

| 序号 | 测试内容                   | Ⅰ级  | 测试结果 |
|----|------------------------|-----|------|
| 1  | 细度(%) (0.045mm 方孔筛余)   | ≤12 | 8.9  |
| 2  | 需水量比(%)                | ≤95 | 92   |
| 3  | 烧矢量(%)                 | ≤5  | 2.15 |
| 4  | 含水率(%)                 | ≤1  | 0.27 |
| 5  | SO <sub>3</sub> (%)    | ≤3  | 0.21 |
| 6  | 密度(g/cm <sup>3</sup> ) | —   | 2.16 |

2.1.3 硅粉

硅粉又称硅灰,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,在袋滤器中收集。硅粉的主要成分是 SiO<sub>2</sub>,一般占 85%~96%,绝大部分是无定形氧化硅,其他成分含量都较少。SiO<sub>2</sub>的含量和细度是硅粉的重要指标,SiO<sub>2</sub>含量越高,细度越细,则硅粉对混凝土的效果越好<sup>[53]</sup>。

本试验用 SiO<sub>2</sub>含量为 92%的硅粉,密度为 2.21g/cm<sup>3</sup>。

2.1.4 粗集料

高性能混凝土的粗集料,应选用级配良好的碎石或卵石。粗集料的粒径、粒形、表面状况、级配以及软弱颗粒和石粉含量等,都影响着混凝土的工作性能和强度。与普通混凝土相比,粗集料的最大粒径对 HPC 的影响更为显著。用小粒径的石子时,水泥浆体和单个石子界面过渡层的周长和厚度都要小些,难以形成较大的缺陷,有利于界面强度的提高;另外,小粒径的石子,本身缺陷的概率就小些<sup>[49]</sup>。一般,高性能混凝土粗集料的最大粒径不宜大于 25mm。

本试验所用的粗集料为石灰岩碎石,颗粒级配符合 4.75~19.5mm 的连续级配,最大粒径为 20mm,其中粒径为 4.75~9.5mm 的碎石占 30%,粒径为 9.5~19.5mm 的碎石占 70%,

筛分结果见图 2.1,粗集料性能检验指标按照《公路工程集料试验规程》( JTG E42—2005 ) 进行<sup>[54]</sup>,结果见表 2.3。

碎石物理性能 表 2.3

| 粒径<br>( mm ) | 表观密度<br>( g / cm <sup>3</sup> ) | 饱和面干密度<br>( g / cm <sup>3</sup> ) | 含泥量<br>( % ) | 针、片状颗粒含量<br>( % ) | 压碎值<br>( % ) | 坚固性<br>( % ) | 有机物含量<br>( 比色法 ) |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|------------------|
| 4.75 ~ 9.5   | 2.740                           | 2.712                             | 0.6          | 5                 | —            | —            | 符合要求             |
| 9.5 ~ 19.5   | 2.756                           | 2.731                             | 0.4          | 3                 | 9.1          | 2            | 符合要求             |

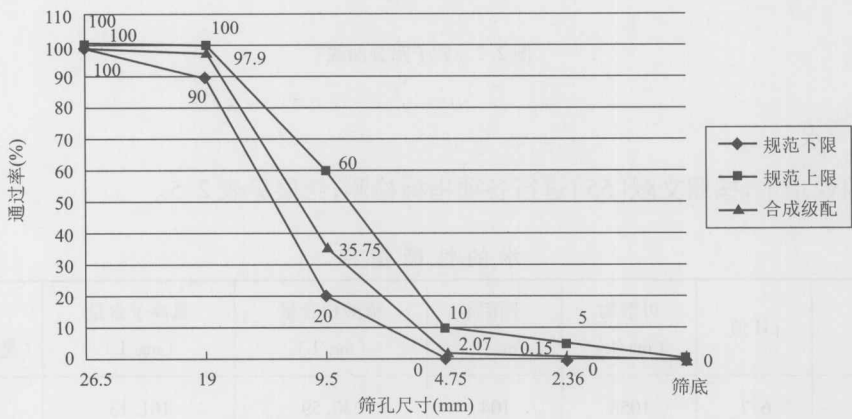


图 2.1 碎石筛分曲线

2.1.5 细集料

混凝土中的细集料,一般采用河砂、海砂和人工砂等。其中,河砂品质最好。本试验采用天然河砂,按照文献[54]进行河砂的质量检测,其结果见表 2.4,细度模数为 2.82,其筛分曲线见图 2.2。

砂子物理性能 表 2.4

| 项目  | 表观密度<br>( g / cm <sup>3</sup> ) | 堆积密度<br>( g / cm <sup>3</sup> ) | 紧装密度<br>( g / cm <sup>3</sup> ) | SO <sub>3</sub> 含量<br>( % ) | 轻物质含量<br>( % ) |
|-----|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 检测值 | 2.619                           | 1.471                           | 1.686                           | 0.02                        | 0.2            |
| 项目  | 云母含量<br>( % )                   | 含泥量<br>( % )                    | 坚固性<br>( 按质量损失计 % )             | 有机物含量<br>( 比色法 )            | 泥块含量<br>( % )  |
| 检测值 | 0.2                             | 1                               | 4                               | 合格                          | 0.1            |

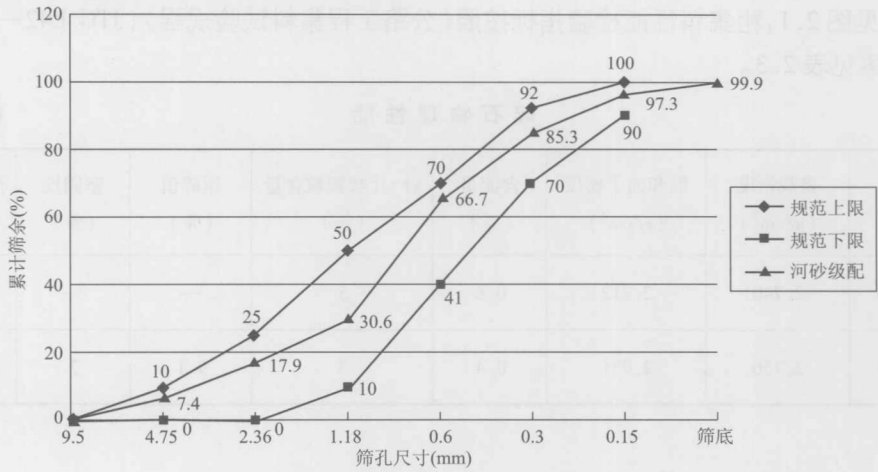


图 2.2 砂子筛分曲线

2.1.6 水

水采用饮用水,按照文献[55]进行各项指标检测,结果见表 2.5。

水的性能指标

表 2.5

| 检测项目 | pH 值 | 可溶物<br>(mg/L) | 不溶物<br>(mg/L) | 硫酸根含量<br>(mg/L) | 氯离子含量<br>(mg/L) | 总碱度<br>(毫克当量/升) |
|------|------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 检测结果 | 6.7  | 1058          | 104           | 230.59          | 161.13          | 9.0             |

2.1.7 高性能减水剂

高性能减水剂是制备高性能混凝土必不可少的外加剂。正确使用高性能减水剂,能降低混凝土的水胶比,使混凝土具有良好的工作性,得到更加均匀的混凝土拌和物。目前,高性能减水剂主要有萘系高性能减水剂、蜜胺系高性能减水剂、氨基磺酸盐系高性能减水剂、脂肪族高性能减水剂和聚羧酸盐系高性能减水剂<sup>[51,56]</sup>。减水率一般都在 15% ~30%。

本试验用的是山西黄河新型化工有限公司生产的 HJSX - A 聚羧酸高性能减水剂,减水率为 22.0%。其性能指标按照《混凝土外加剂》(GB 8076—2008)规范进行检测<sup>[57]</sup>,结果见表 2.6。

高性能减水剂的各项指标

表 2.6

| 检测项目 | 固体含量<br>(%) | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | pH 值 | 氯离子含量<br>(%) | 总碱量<br>(%) | 水泥净浆流动度<br>(mm) | 减水率<br>(%) |
|------|-------------|----------------------------|------|--------------|------------|-----------------|------------|
| 检测结果 | 24.36       | 1.062                      | 4.92 | 0.078        | 1.2        | 260             | 22.0       |