

高性能

# 混凝土 施·工·问·答

■ 姚燕 王玲 林晖 编著

GAOXINGNENG  
HUNNINGTU  
SHIGONG WENDA



化学工业出版社

# 高性能 混凝土 施·工·问·答

■ 姚燕 王玲 林晖 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

高性能混凝土施工问答/姚燕, 王玲, 林晖编著.

北京: 化学工业出版社, 2010.1

ISBN 978-7-122-06960-3

I. ①高… II. ①姚…②王…③林… III. 高强  
混凝土-工程施工-问答 IV. TU755-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195668 号

---

责任编辑: 常 青  
责任校对: 王素芹

文字编辑: 冯国庆  
装帧设计: 史利平

---

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: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 5½ 字数 128 千字

2010 年 1 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: 20.00 元

版权所有 违者必究

原

20 世纪 90 年代初出现的高性能混凝土具有诸多性能特点，如优良的工作性、好的体积稳定性、高的耐久性，以及显著的技术、经济、社会和环境效益，因而成为国内外工程界研究的热点。在进入 21 世纪以后，跨海大桥、高速铁路、煤矿矿井、高层建筑等工程中越来越多地应用高性能混凝土。

大量的工程实践表明，高性能混凝土的生产实践需要在正确的理论指导下进行，以达到正确使用高性能混凝土的目的，避免质量的缺陷，收到良好的综合效益。

《高性能混凝土施工问答》一书的作者长期以来一直从事高性能混凝土的研究工作，对材料、性能和结构之间的关系研究深入，在高性能混凝土领域有着丰硕的研究成果和丰富的实践经验。该书从高性能混凝土施工技术出发，阐述了高性能混凝土原材料选择、配合比设计、性能检验和施工技术方面的知识，深入浅出，在细节之处显示出作者深厚的研究基础。该书应能成为同样是由他们撰写的《高性能混凝土》一书的姊妹篇，供高性能混凝土施工技术人员参考使用。相信该书一定能对高性能混凝土的工程应用起到很好的指导作用！

中国工程院院士

李颖  
2009.10.14

## 前言

自“九五”以来，中国建筑材料科学研究总院参加了多个国家科技攻关项目、国家自然科学基金项目、国家“973 计划”项目，在对高性能混凝土的各项性能和配制技术进行深入研究的基础上，也在越来越多的国家重点工程中实施高性能混凝土技术，从高性能混凝土原材料选择、配合比设计、施工工程控制给予施工单位积极的指导。

本书即是根据高性能混凝土工程施工过程中，业主、施工和监理单位的技术人员及施工人员经常咨询的问题编写的，是笔者及同事长期从事混凝土研究和试验工作的经验总结。本书根据当前高性能混凝土研究领域新的动态、高性能混凝土在实际工程中的应用情况以及现行规范中的具体要求，阐述了高性能混凝土及其施工技术。本书从高性能混凝土的概念、原材料、性能及配合比设计和工程施工几个方面，详细地介绍了高性能混凝土常用各种原材料（水泥、矿物外加剂、化学外加剂和集料）对高性能混凝土性能的影响，对选用材料的技术要求；高性能混凝土的工作性能、力学性能、抗碱-集料反应性能、收缩性能、冻融性能、抗渗性能、碳化和抗化学腐蚀性能等。

高性能混凝土在节能利废、资源环保、工程经济等方面都具有重大意义。愿本书对于高性能混凝土的正确施工和推广应用起到引导与促进的作用。

另有两点需要向阅读本书的读者说明。

一是由于高性能混凝土是近年来正在快速发展的新技术，一些

名词还没有固定、规范的叫法，如磨细矿渣、粉煤灰、硅灰等有“掺合料”、“掺和料”、“混合材”、“矿物外加剂”等多种叫法，本书根据 GB/T 18736 标准和国际高性能混凝土发展趋势把高性能混凝土中加入的、主要用于改善混凝土耐久性能的这些磨细材料统一称为“矿物外加剂”。

二是笔者及其团队从 1995 年以来一直从事高性能混凝土的研究，其间适逢水泥标准向 ISO 标准转换，1999 年以前使用的水泥是按老标准采用强度标号（425<sup>#</sup>、525<sup>#</sup>等），1999 年以后使用的水泥按照新标准采用强度等级（32.5 强度等级、42.5 强度等级等）表示，鉴于两套标准的试验方法完全不同，强度标号和强度等级之间没有对应关系，本书编写时保留原检验结果，不加调整，即采用强度标号表示的是采用老标准时的检验结果，采用强度等级表示的是采用新标准时的检验结果。

上述两点给读者带来的不便，敬请原谅。

笔者衷心感谢书中所有引用文献的作者和项目合作单位的同行们。本书部分内容直接摘自现行或即将发布的标准、技术条件，衷心感谢这些作者的辛勤劳动。

由于笔者的技术水平和工程实践经验所限，对于书中疏漏和不当之处，敬请读者予以指正，笔者不胜感谢。

**编著者**

**2009 年 9 月**

# 目 录

## 第一章 高性能混凝土的概念 ..... 1

1. 什么是高性能混凝土? ..... 1
2. 什么是高性能混凝土的工作性? ..... 3
3. 什么是高性能混凝土的体积稳定性? ..... 3
4. 什么是混凝土的耐久性? ..... 4
5. 影响混凝土结构耐久性能的因素有哪些? ..... 5
6. 高强混凝土有什么特点? ..... 6
7. 高性能混凝土原材料组成有何特点? ..... 7
8. 为什么说高性能混凝土是绿色混凝土? ..... 8
9. 高性能混凝土在水化结构上有何特点? ..... 8

## 第二章 高性能混凝土的原材料 ..... 11

### 第一节 水泥 ..... 11

10. 高性能混凝土选择水泥的原则是什么? ..... 11
11. 我国通用硅酸盐水泥品种有哪些? ..... 12
12. 水泥对混凝土耐久性的影响有哪些? ..... 13
13. 配制高强混凝土一定要使用高强度等级水泥吗? ..... 14

### 第二节 矿物外加剂 ..... 15

14. 什么是矿物外加剂? ..... 15
15. 混合材、矿物掺合料和矿物外加剂的区别是什么? ..... 15
16. 矿物外加剂在高性能混凝土中的作用是什么? ..... 16

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 17. 常用的矿物外加剂有哪些种类? 如何选用? .....        | 17 |
| 18. 磨细矿渣对高性能混凝土性能有哪些影响? .....         | 17 |
| 19. 粉煤灰是如何分级和分类的? .....               | 18 |
| 20. 什么是高钙粉煤灰? .....                   | 19 |
| 21. 高钙粉煤灰能用于高性能混凝土的配制吗? .....         | 20 |
| 22. 掺加粉煤灰的混凝土耐久性好吗? .....             | 21 |
| 23. 硅灰是如何包装运输的? .....                 | 22 |
| 24. 硅灰对混凝土性能有哪些有利的影响? .....           | 23 |
| 25. 硅灰对混凝土性能有哪些不利的影响? .....           | 25 |
| 26. 矿物外加剂对大体积混凝土温升有何影响? .....         | 25 |
| 第三节 化学外加剂 .....                       | 27 |
| 27. 什么是化学外加剂? .....                   | 27 |
| 28. 化学外加剂的作用是什么? .....                | 28 |
| 29. 混凝土减水剂的作用和分类是什么? .....            | 28 |
| 30. 高性能混凝土如何选择混凝土外加剂? .....           | 29 |
| 31. 萘系高效减水剂的分子结构和特点是什么? .....         | 30 |
| 32. 蜜胺系高效减水剂的分子结构和特点是什么? .....        | 31 |
| 33. 氨基磺酸盐系高效减水剂的分子结构和特点是<br>什么? ..... | 33 |
| 34. 脂肪族高效减水剂的分子结构和特点是什么? .....        | 34 |
| 35. 高性能减水剂的分子结构和特点是什么? .....          | 35 |
| 36. 高性能减水剂在我国的发展情况如何? .....           | 38 |
| 37. 引气剂在提高混凝土耐久性方面有何作用? .....         | 39 |
| 38. 混凝土泵送剂的组成如何? .....                | 41 |
| 第四节 集料 .....                          | 43 |
| 39. 什么是集料? 在混凝土中的作用是什么? .....         | 43 |

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 40. 石子对高性能混凝土的性能有何影响? 石子的质量要求的检验标准有哪些? ..... | 44 |
| 41. 砂子对混凝土性能有哪些影响? 砂子质量检验标准有哪些? .....        | 45 |
| 42. 如何准确检验砂、石的碱活性? .....                     | 46 |
| 43. 岩相法的原理和方法如何? .....                       | 48 |
| 44. 化学法的原理和方法如何? .....                       | 49 |
| 45. 砂浆棒法的原理和方法如何? .....                      | 50 |
| 46. 快速砂浆棒法的原理和方法如何? .....                    | 51 |
| 47. 混凝土柱法的原理和方法如何? .....                     | 52 |
| 48. 中国压蒸快速法的原理和方法如何? .....                   | 53 |
| 49. 岩石圆柱体法的原理和方法如何? .....                    | 54 |
| 50. 化学组成法的原理和方法如何? .....                     | 55 |

### **第三章 高性能混凝土的性能及检验** ..... 56

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第一节 混凝土的工作性能 .....                          | 56 |
| 51. 什么是水泥与混凝土外加剂之间的适应性? .....               | 56 |
| 52. 如何快速检验水泥与外加剂之间的适应性? .....               | 59 |
| 53. 如何改善水泥与混凝土外加剂之间的适应性? .....              | 62 |
| 54. JC/T 1083《水泥与减水剂相容性试验方法》的核心内容是什么? ..... | 64 |
| 55. JC/T 1083《水泥与减水剂相容性试验方法》应用范围是什么? .....  | 65 |
| 56. 水泥性能差异对混凝土成本的影响有多大? .....               | 65 |
| 57. 如何检测和评价高性能混凝土的工作性? .....                | 69 |
| 第二节 混凝土的力学性能 .....                          | 72 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 58. 混凝土如何能够达到高强度? .....             | 72  |
| 59. 准确测试高强混凝土的抗压强度需要注意什么问题? .....   | 73  |
| 60. 高强混凝土立方体抗压强度尺寸系数是 0.95 吗? ..... | 73  |
| 61. 为什么说高强混凝土的脆性增加了? .....          | 75  |
| 第三节 混凝土抗碱-集料反应性能 .....              | 78  |
| 62. 什么是混凝土的碱-集料反应? .....            | 78  |
| 63. 混凝土碱含量如何计算? .....               | 79  |
| 64. 混凝土的碱含量安全限值是多少? .....           | 80  |
| 65. 高性能混凝土如何抑制混凝土碱-集料反应? .....      | 82  |
| 66. 我国京津塘地区砂石集料有碱活性吗? .....         | 82  |
| 67. 京津塘地区碱活性集料分布有规律吗? .....         | 83  |
| 68. 在京津塘地区有不发生碱集料反应的砂石资源吗? .....    | 84  |
| 第四节 混凝土的收缩 .....                    | 86  |
| 69. 什么是混凝土的收缩? .....                | 86  |
| 70. 混凝土收缩与开裂是什么关系? .....            | 88  |
| 71. 高性能混凝土的自收缩有什么特点? .....          | 89  |
| 72. 如何减少高性能混凝土的自收缩? .....           | 91  |
| 73. 高强混凝土为何容易出现早期收缩开裂现象? .....      | 92  |
| 74. 怎样减少高强混凝土的早期收缩开裂? .....         | 92  |
| 75. 钢纤维减少高强混凝土早期收缩开裂的机理是什么? .....   | 93  |
| 76. 膨胀剂减少高强混凝土早期收缩开裂的机理是什么? .....   | 94  |
| 77. 减缩剂减少高强混凝土早期收缩开裂的机理是什么? ...     | 100 |
| 第五节 混凝土的冻融性能 .....                  | 102 |
| 78. 什么是混凝土的冻融破坏? .....              | 102 |
| 79. 混凝土结构的冻融破坏环境是如何划分的? .....       | 103 |
| 80. 检验混凝土抗冻性能的“快冻法”和“慢冻法”有何         |     |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 区别? .....                                        | 104 |
| 81. 混凝土“慢冻法”如何检验? .....                          | 105 |
| 82. 混凝土“快冻法”如何检验? .....                          | 107 |
| 第六节 混凝土的抗渗性能 .....                               | 108 |
| 83. 混凝土的耐久性和抗渗透性能之间是什么关系? .....                  | 108 |
| 84. 抗渗透性能试验有哪些? .....                            | 108 |
| 85. GBJ 82—85 混凝土抗渗透试验方法的原理和操作关键是<br>什么? .....   | 109 |
| 86. “溶液气压法”耐久性快速测试方法的原理和操作关键是<br>什么? .....       | 110 |
| 87. ASTM C1202 标准试验方法的原理和操作关键是<br>什么? .....      | 113 |
| 88. 混凝土氯离子扩散系数快速检测的 NEL 方法的原理和<br>操作关键是什么? ..... | 116 |
| 89. 混凝土氯离子扩散系数快速检测的 RCM 方法的原理和<br>操作关键是什么? ..... | 116 |
| 第七节 混凝土的碳化 .....                                 | 117 |
| 90. 什么是混凝土的碳化? .....                             | 117 |
| 91. 混凝土的碳化有何危害? .....                            | 118 |
| 92. 混凝土碳化环境如何分级? .....                           | 120 |
| 第八节 混凝土的抗化学腐蚀性能 .....                            | 121 |
| 93. 混凝土结构常见的化学腐蚀有哪些? .....                       | 121 |
| 94. 混凝土的化学腐蚀环境是如何划分等级的? .....                    | 122 |
| 95. 硫酸盐环境对水泥混凝土有何危害? .....                       | 124 |
| 96. 混凝土发生硫酸盐侵蚀破坏的机理和反应类型有<br>几种? .....           | 124 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 97. 硫酸盐侵蚀破坏生成碳硫硅钙石有几种途径? .....           | 127        |
| 98. 如何检验硬化混凝土中的氯离子? .....                | 128        |
| 99. 混凝土中的氯离子含量限值是如何规定的? .....            | 131        |
| 100. 混凝土结构发生钢筋锈蚀破坏有何危害? .....            | 131        |
| <b>第九节 高性能混凝土的配合比设计</b> .....            | <b>132</b> |
| 101. 高性能混凝土的试配工作为什么要尽量提前? .....          | 132        |
| 102. 如何进行高强高性能混凝土配合比设计? .....            | 133        |
| 103. 高性能混凝土耐久性设计的基本规定有哪些? .....          | 136        |
| 104. 一般环境下高性能混凝土耐久性设计的规定有<br>哪些? .....   | 138        |
| 105. 冻融环境下高性能混凝土耐久性设计的规定有<br>哪些? .....   | 140        |
| 106. 氯化物环境下高性能混凝土耐久性设计的规定有<br>哪些? .....  | 142        |
| 107. 化学腐蚀环境下高性能混凝土耐久性设计的规定<br>有哪些? ..... | 144        |
| 108. 中等强度等级混凝土高性能化的意义是什么? .....          | 146        |
| 109. 中等强度等级的混凝土如何达到高性能化? .....           | 147        |
| 110. 混凝土能自流平、自密实吗? .....                 | 149        |
| 111. 配制自流平混凝土的关键是什么? .....               | 150        |

#### **第四章 高性能混凝土的施工 ..... 151**

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 112. 高性能混凝土能在哪些工程中应用? .....            | 151 |
| 113. 高性能混凝土在施工前需要做哪些准备? .....          | 154 |
| 114. 高性能混凝土施工中原材料管理应该注意什么<br>问题? ..... | 155 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 115. 高性能混凝土的拌制应该注意什么问题? .....         | 156        |
| 116. 高性能混凝土的运输应该注意什么问题? .....         | 157        |
| 117. 高性能混凝土的浇筑应该注意什么问题? .....         | 157        |
| 118. 高性能混凝土的振捣应该注意什么问题? .....         | 159        |
| 119. 高性能混凝土的养护应该注意什么问题? .....         | 159        |
| 120. 进行高性能混凝土施工前应进行那些复检和<br>核查? ..... | 160        |
| 121. 如何确认已经施工的高性能混凝土的质量? .....        | 161        |
| <b>参考文献 .....</b>                     | <b>162</b> |

# 第一章 高性能混凝土的概念

## 1. 什么是高性能混凝土？

高性能混凝土 (high performance concrete, HPC) 是一种以耐久性为目标, 兼顾高强度、高工作性和高耐久性的新型的高技术混凝土。它可以大幅度提高普通混凝土性能, 是针对不同用途要求, 采用现代技术制作的低水胶比的混凝土。高性能混凝土对下列性能重点予以保证: 耐久性、工作性、适用性、体积稳定性、强度、经济性。为此, 高性能混凝土在配制上的特点是水胶比低, 选用优质原材料, 并除水泥、水、集料外, 必须掺加足够数量的矿物外加剂和化学外加剂。高性能混凝土在节能、节料、工程经济、劳动保护以及环境保护等方面都具有重要意义, 是一种环保型、集约型的新型材料, 亦被称为“绿色混凝土”。

高性能混凝土的概念是 20 世纪 90 年代初提出的 (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) 在美国马里兰州盖瑟斯堡召开的会议上首先正式提出高性能混凝土这一名词的定义。实际上, 此前的一些重要工程中已采用了高工作性和高耐久性的高强混凝土。在最近的十多年中, 高性能混凝土很快地被各国工程界所接受。这主要

是因为高性能混凝土的使用对于各方都具有明显的效益：对于业主或用户来说，混凝土的耐久性好，安全使用期长，可减少维修费，保证安全；对于社会来说，高性能混凝土降低能耗、料耗，利用工业废渣，减少噪声污染，对环境有利，并消除不安全感；对于施工者来说，高性能混凝土操作方便，改善劳动条件，加快进度，减少模板和劳力，可提前交工；对于设计者来说，高性能混凝土减小断面，减轻自身质量，增加使用空间，取得明显的节约效果，还能帮助人们实现建筑的艺术性和灵活性。高性能混凝土在不少工程中得以推广应用，如高层建筑、海上石油钻采平台、桥梁工程、大型结构、隧洞衬砌、放射性废物贮罐等。而且随着人们逐渐重视工程质量，强调安全和环境保护，高性能混凝土真正进入推广应用时期。

目前，不同国家、地区以及不同学者对高性能混凝土的涵义的理解和见解还不统一。多数人认为，高性能混凝土必须具有高强度，这就限制了高性能混凝土的应用范围，不可能形成混凝土的发展方向。我国已故的吴中伟院士指出：“实现中低强度等级混凝土的高性能化，高性能混凝土的发展才具有广泛的现实意义。”法国科学家已经提出，即使从结构角度上不要求用高强度的混凝土，但要求长期耐久性的一切工程必须采用高性能混凝土。这些观点是全面的，是符合发展方向的。

高性能混凝土针对混凝土结构所处的环境特点而进行相应的性能设计，并通过施工过程控制使得相应性能得到保证，能更好地满足结构功能要求和施工工艺要求，能最大限度地延长混凝土结构使用年限，降低工程造价。因此，高性能混凝土是混凝土结构耐久性得以保证的重要措施和必要措施之一。

## 2. 什么是高性能混凝土的工作性？

混凝土的工作性是指其流动性、可塑性、稳定性和密实性，是混凝土拌合物塑性状态下所表现的若干基本性质的综合效应。高性能混凝土应具有良好的工作性，其新拌混凝土在成型过程中不分层、不离析，混凝土拌合物应具有较高的流动性，易充满模型；泵送混凝土、自密实混凝土还具有良好的可泵性、自密实性能。

与普通混凝土相比，高性能混凝土胶凝材料用量增大，尽管拌合物的流动性大，但黏性增大，变形需要一定的时间。常用于高性能混凝土中的辅助胶凝材料主要有磨细矿渣、磨细粉煤灰和硅灰等，对高性能混凝土的工作性有不同影响，它们的掺量、细度和颗粒级配等都会影响混凝土的工作性。

一般不采用单一的混凝土坍落度值来评价高性能混凝土的工作性。从理论上讲，高性能混凝土的流变性仍近似于宾汉流体，可以用屈服剪切应力和塑性黏度两个参数来表达其流变特性。在实际工程中，采用变形能力和变形速度两个指标来综合反映高性能混凝土的工作性更为合理。基于这种理论基础，许多学者提出了一些评价高性能混凝土工作性的方法，Texas 大学的 Eric P. Koehler 对世界范围内使用的工作性测试方法进行了汇总，一共列出了 61 种测试方法，其中用于混凝土工作性测试方法有 46 种，自密实混凝土测试方法有 8 种，砂浆和净浆测试方法有 7 种<sup>[1]</sup>。

## 3. 什么是高性能混凝土的体积稳定性？

混凝土的体积稳定性主要与混凝土的收缩性能有关。混凝

土的收缩是指由于混凝土中所含水分的变化、化学反应及温度变化等因素引起的体积缩小。混凝土的收缩按作用机理可分为自收缩、塑性收缩、硬化混凝土的干燥收缩、温度变化引起的收缩变形及碳化收缩变形五种。混凝土由于各种收缩而引起的开裂问题一直是混凝土结构物裂缝控制的重点和难点。

高性能混凝土应具有较高的体积稳定性，即混凝土在硬化早期应具有较低的水化热，硬化后期具有较小的收缩变形。低水胶比与矿物外加剂的大量掺入使高性能混凝土的硬化结构与普通混凝土相比有着很大的差异，结构的差异在带来高性能混凝土诸多性能上的突破的同时，随之带来了它的一些本质上的缺点：①自收缩大，主要发生在早期；②温度收缩大，温度收缩出现的时间提前；③混凝土施工后，早期收缩（其中包括部分自收缩值和干燥收缩）实测值较大、早期弹性模量增长快、抗拉强度并无显著提高、比徐变变小等因素共同导致了高性能混凝土（特别是高强混凝土）的早期抗裂性差。

近几年来，高性能混凝土在我国的应用实践表明，早期开裂问题已成为其在工程中应用时最容易出现的问题。

---

#### **4 什么是混凝土的耐久性？**

---

混凝土的耐久性是使用期内结构保证正常功能的能力，关系到混凝土结构物的使用寿命，随着结构物老化和环境污染的加重，混凝土耐久性问题已引起了各主管部门和广大设计、施工部门的重视。混凝土的耐久性劣化是指结构在所使用的环境下，由于内部原因或外部原因引起结构的长期演变，最终使混凝土丧失使用能力，即耐久性失效。耐久性失效的原因有抗冻失效、碱-集料反应失效、化学腐蚀失效和钢筋锈蚀造成结构