



**GREEN**  
**HIGH PERFORMANCE**

CONCRETE TECHNOLOGY AND APPLICATION IN CONSTRUCTION

**绿色高性能混凝土**  
**技术与工程应用**

刘娟红 宋少民 编著



中国电力出版社

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

GREEN HIGH PERFORMANCE CONCRETE  
TECHNOLOGY AND APPLICATION IN CONSTRUCTION

# 绿色高性能混凝土 技术与工程应用

刘娟红 宋少民 编著



中国电力出版社

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

本书总结了作者近年来对绿色高性能混凝土领域的研究成果,并结合国内外相关文献与资料对绿色高性能混凝土做了系统和全面的论述。全书共分12章,内容包括概论、绿色高性能混凝土的理论要点、绿色高性能混凝土用水泥、绿色高性能混凝土用骨料、绿色高性能混凝土用化学外加剂、矿物细粉掺合料、绿色高性能混凝土的配合比设计、绿色高性能混凝土的性能、大掺量矿物细粉活性粉末混凝土、建筑垃圾再生混凝土优化技术、绿色高性能混凝土的典型工程应用、绿色高性能混凝土技术发展的障碍及对策等。

本书可供混凝土结构设计单位、混凝土原材料供应企业、混凝土搅拌站、施工单位、监理单位、检测与建筑质量管理机构、政府建设管理部门的科研、技术与管理人员,以及高等学校的教师、研究生、本科生参考,也可作为高等学校硕士研究生课程、本科生选修课程教材使用。

#### 图书在版编目(CIP)数据

绿色高性能混凝土技术与工程应用/刘娟红,宋少民编著. —北京:中国电力出版社,2010.7  
ISBN 978-7-5123-0622-6

I. ①绿… II. ①刘… ②宋… III. ①高强混凝土-无污染技术-研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第123267号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑:未翠霞 联系电话:010-63412611

责任印制:郭华清 责任校对:李亚

航远印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2011年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·19印张·460千字

定价:46.00元

#### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

# 序

1997年，我国混凝土科学技术的先驱与奠基人吴中伟先生到江西庐山出席高强高性能混凝土学会组织的会议时，以“绿色高性能混凝土——混凝土的发展方向”为题做了一个重要的报告。他指出：“科学技术的任务已从过去‘最大限度向自然索取财富’变为合理应用资源，保护环境，保持生态平衡”。在详细论述绿色高性能混凝土（GHPC）内涵的同时，他语重心长地提出：“混凝土能否长期维持作为最主要的建筑结构材料，关键在于能否成为绿色材料，GHPC是混凝土的发展方向，是混凝土的未来”；“GHPC将是多少代混凝土工作者的奋斗目标”。吴先生逝世至今已经整十年，在纪念这位将毕生精力贡献给中国混凝土事业的先辈时，这本题名为《绿色高性能混凝土技术与工程应用》的书问世了，两位作者让我来写序，藉此重温吴先生的教导，反复思考，写下一点体会。

高强混凝土只是简单地将人们熟知的、传统的一个性能参数作为量化评价指标，从而可以为结构设计人员提供选取的直观依据。高性能混凝土（HPC）则是充分考虑了现今范围宽广的不同工程和环境条件的不同，对新拌与硬化混凝土性能要求迥异的前提下，所提出新的概念和定义。美国混凝土学会（ACI）在1998年将HPC的定义整理发表时，曾强调指出：“HPC的特性，是针对一定的应用和环境所要求的”，也就是说，HPC并不是一类具有特定性能的混凝土。举个例子，1998年笔者到加拿大出席HPC国际研讨会时，主办方为与会代表演示了用HPC修补繁忙的城市街道路面的过程，为了尽量缩短交通中断时间，它使用沥青混凝土摊铺机浇筑配制得异常干硬的新拌水泥混凝土（外观与沥青混凝土近似）。在将其从翻斗车卸到准备好的基层上之后，经摊铺机压实，再用振动碾反复碾压几遍，整个过程仅约半小时，该路段就修补完毕，可以立即开放交通。鉴于当地冬季气温很低且多雪，该混凝土里掺用了自行研发适用于干硬拌和物的新型引气剂，以保证需要的含气量，抵御盐冻侵蚀。主办方为代表们演示的另一个HPC范例，是采用自密实混凝土（SCC）浇筑一段连续壁，尽管SCC无需振捣，可以避免引发噪声，又可免除拌和物瞬间液化出现泌水、离析的弊病，已为代表们熟知，但是这类富浆拌和物里的气泡和自由水较多，影响硬化后混凝土的密实度是许多代表的疑虑。演示时使用了操作简便且可反复几次的新型透水模板垫层，引起了许多代表的高度关注。因为用了这种材料可以使表层混凝土内的气泡和自由水逸出，从而显著提高密实度、大大改善外观。

充分认识了HPC的内涵所在，就不难理解它的应用，尤其是在绝大部分工程普遍采用的设计要求为中低强度等级混凝土应用中，通过大幅度地减少熟料水泥用量，掺用不同种类和掺量的矿物掺合料，以及外加剂与其他组分材料，并且与工程的设计、施工各个环节紧密结合，不仅是满足不同工程与环境条件要求HPC必要的技术路线，其实也就是实现节能减排、减少污染，使混凝土成为GHPC，即绿色材料的必经之路。长期以来，许多人认为降低水泥用量提高绿色，与应用HPC两者之间存在着矛盾，这其中主要的原因之一，在于人们被传统意义上对混凝土不同组分的活性大小的思维定式所困扰，却忽略了影响混凝土硬化过



程其他决定性参数的作用，忽略了近几十年来混凝土技术发展所带来巨大变化的影响。由此也说明，不断更新观念、更新知识，仍然是我们今天所处的信息社会里进行科技创新的基础。

我国每年要生产和消耗几乎占全世界一半的水泥和混凝土，同时，我国又有着十分丰富的矿物掺合料资源，从这个意义上我们就不难理解吴老在十多年前高瞻远瞩地提出“GHPC是混凝土的发展方向，是混凝土的未来”这一事关土木工程建设发展全局的战略目标。

当然，任何新生事物的发展都需要大力宣传，正如吴老所指出的：加强宣传，尤其对GHPC的意义与作用，使人人来关心并为之努力。这本介绍GHPC书籍的出版，正是一种很好的宣传方式，也是对吴老最好的纪念！

覃维祖

2010年9月26日

# 前 言

自1994年清华大学向国内介绍高性能混凝土技术以来,历经16年,高性能混凝土技术理念对我国混凝土工程技术界产生了深刻的影响。我国已故工程院院士吴中伟先生生前曾嘱托同仁大力开发绿色高性能混凝土技术,贡献于国家的基础设施建设。

多年来,作者及其研究团队受诸多前辈及同仁学术思想的引领,不断学习现代混凝土理论与技术,总结体会与心得,便成此书。拙作之目的,在于进一步弘扬与传播绿色高性能混凝土的理念、技术精髓与工程意义,让更多混凝土研究与技术人员以及工程建设者建立和受益于此种理念,以慰前辈们的初衷与期望。

纵观我国绿色高性能混凝土技术的发展,一方面是成绩喜人,十年来绿色高性能混凝土技术研究与应用取得丰硕成果,许多重要工程的混凝土质量也因此得到充分保障;另一方面,我国绿色高性能混凝土技术的推广应用可以说刚刚起步,任重道远,阻力重重。例如,混凝土原材料品质得不到有效保证,砂石不合格率越来越高,粒形差,级配不好,含泥量高;矿物细粉掺合料没有形成一个质量稳定、供应有保证的产业;同时水泥生产不能很好地适应混凝土的要求,而是为了追求利润把水泥越磨越细,开裂敏感性越来越大;目前,一些混凝土结构设计单位、施工单位、监理单位人员总体上对当代混凝土的发展与特点不够了解,混凝土工程出现质量问题倾向于认为是混凝土搅拌的责任;有的施工队伍职业道德缺失,浇筑混凝土时随意加水,不认真养护,野蛮施工现象普遍;有的施工单位不适当地加快工程进度,追求施工速度,以施工速度快为荣;有的政府建设管理机构对工程进度应符合现代材料制备和工程建造规律的常识认识不够,没有严格限制和控制过快的工程进度;混凝土质量验收方法只顾及28天强度,而不考虑综合性能的指标和要求等。这些问题从各个角度制约着绿色混凝土技术的广泛应用。总体上看,绿色高性能混凝土技术的春天还没有到来,冰雪融化还需要一个过程,先进的技术理念需要宣传,需要建筑行业相关人员改变观念、统一认识、齐心协力,这也是作者撰写本书的初衷。

本书介绍了从高性能混凝土的提出到绿色高性能混凝土的技术发展过程;论述了绿色高性能混凝土技术的理论要点;从水泥、骨料、矿物掺合料、外加剂等方面介绍了绿色高性能混凝土对原材料的要求,详细分析了目前原材料存在的问题与危害,提出了解决问题的途径和发展的方向;详细介绍了当前绿色高性能混凝土配合比的设计思想、设计原则与几种配合比设计方法;翔实论述了绿色高性能混凝土的性能,分析了其微观结构特征,并介绍了绿色高性能混凝土技术在工程中的应用实例。同时,结合作者的研究成果,介绍了大掺量矿物掺合料活性粉末混凝土的配制技术与性能、建筑垃圾再生混凝土技术及其性能优化。书的最后分析了绿色高性能混凝土技术发展面临的问题及对策。

感谢给予作者指导的清华大学廉慧珍教授、覃维祖教授,台湾科技大学黄兆龙教授,北京矿业大学王栋民教授。正是有了专家们的教诲和帮助,包括引用的大量数据资料,才使本书更臻完善。团队中的王林、徐国强、卞立波等青年教师以及华军舰、颜岳、霍文霖、张

勇、孙永梅等同学做了大量工作，同时，本书的出版得到了北京市“绿色建筑与节能技术”重点实验室的资助。在此一并表示衷心感谢。也愿以本书的面世，告慰已故的工程院院士吴中伟先生生前的嘱托与期望。

由于作者学术水平有限，书中难免有疏漏与错误之处，敬请国内外同仁批评指正。

刘娟红 宋少民  
于北京

# 目 录

序  
前言

第1章 概论	1
1.1 高性能混凝土的提出	2
1.2 从“三高”混凝土到高强高性能混凝土	3
1.3 混凝土高性能化的认识误区与发展重点	5
1.4 绿色高性能混凝土	15
参考文献	16
第2章 绿色高性能混凝土的理论要点	18
2.1 新型胶凝体系	19
2.2 密实堆积理论	23
2.3 中心质假说	24
2.4 超细粉的作用与功能	27
2.5 硬化体微结构的变化	30
参考文献	36
第3章 绿色高性能混凝土用水泥	37
3.1 古代胶凝材料	37
3.2 水泥的“功与过”	39
3.3 我国水泥存在的问题	42
3.4 绿色高性能混凝土对水泥的选择	50
3.5 水泥发展的两种途径	53
参考文献	56
第4章 绿色高性能混凝土用骨料	58
4.1 概述	58
4.2 粗骨料	59
4.3 细骨料	64
4.4 人工砂	67
4.5 骨料的吸水率	70
4.6 骨料的有害物质	71
4.7 尾矿骨料	74
4.8 建筑垃圾再生骨料	76
4.9 绿色高性能混凝土对骨料的选择	79
参考文献	82

<b>第5章 绿色高性能混凝土用化学外加剂</b> .....	84
5.1 新型高效减水剂的技术特点与作用机理 .....	85
5.2 新型高效减水剂对绿色高性能混凝土的适应性 .....	89
5.3 聚羧酸系高性能减水剂使用的现状与技术难题 .....	92
5.4 绿色高性能混凝土用新型化学外加剂对混凝土性能的影响 .....	98
参考文献 .....	102
<b>第6章 矿物细粉掺合料</b> .....	104
6.1 粉煤灰 .....	104
6.2 水淬磨细矿渣粉 .....	110
6.3 石灰石粉 .....	116
6.4 硅灰 .....	124
6.5 研究现状与存在的问题 .....	126
6.6 矿物掺合料的发展方向 .....	130
参考文献 .....	133
<b>第7章 绿色高性能混凝土的配合比设计</b> .....	136
7.1 配合比设计的原则 .....	137
7.2 简易配合比设计方法 .....	139
7.3 高密实混凝土配合比设计 .....	140
7.4 据以饱和面干骨料的配合比设计 .....	146
7.5 全计算配合比设计 .....	153
7.6 对混凝土配合比设计方法看法 .....	160
参考文献 .....	162
<b>第8章 绿色高性能混凝土的性能</b> .....	163
8.1 新拌混凝土的性能 .....	163
8.2 强度与发展规律 .....	170
8.3 变形与开裂 .....	179
8.4 环境与耐久性 .....	187
参考文献 .....	195
<b>第9章 大掺量矿物细粉活性粉末混凝土</b> .....	197
9.1 活性粉末混凝土的定义及国内外发展概况 .....	197
9.2 大掺量矿物细粉活性粉末混凝土的配制 .....	199
9.3 砂子颗粒级配和比例的确定 .....	202
9.4 不同胶凝材料组成和活性粉末混凝土的配合比对流动性与强度的影响 .....	204
9.5 大掺量矿物细粉活性粉末混凝土最优配合比与成型、养护工艺 .....	212
9.6 大掺量矿物细粉活性粉末混凝土力学性能 .....	213
9.7 大掺量矿物细粉活性粉末混凝土耐久性能 .....	218
9.8 大掺量矿物细粉活性粉末混凝土高性能机理及其微观结构 .....	226
9.9 结论 .....	233
参考文献 .....	235

<b>第 10 章 建筑垃圾再生混凝土优化技术</b>	237
10.1 建筑垃圾再生混凝土概述	237
10.2 建筑垃圾再生骨料的基本性能	239
10.3 废砖骨料对建筑垃圾再生混凝土性能的影响	245
10.4 全级配骨料对建筑垃圾再生混凝土性能的影响	251
10.5 建筑垃圾再生混凝土试验建筑工程实例	257
10.6 结论	262
10.7 再生混凝土发展存在的问题及展望	263
参考文献	265
<b>第 11 章 绿色高性能混凝土的典型工程应用</b>	265
11.1 国家游泳中心工程	268
11.2 首都机场三号航站楼清水混凝土工程	269
11.3 中央电视台新台址工程	271
11.4 上海环球金融中心工程	273
11.5 北京电视中心工程	274
11.6 首都国际机场停车楼工程	275
11.7 杭州湾跨海大桥工程	277
11.8 苏通大桥工程预制箱梁	278
11.9 苏通大桥工程大体积承台	279
11.10 珠江特大桥工程	280
11.11 广州保利国际广场工程	282
11.12 武广客运专线预制梁工程	283
11.13 日本明石海峡大桥工程	284
11.14 加州大学伯克利分校 Barker 会堂工程	286
11.15 法国西瓦克斯 (Civaux) 核能电站工程	286
11.16 多伦多 Scotia 大厦工程	287
11.17 西雅图双联合广场大厦工程	287
11.18 大掺量粉煤灰混凝土在加拿大的应用	289
参考文献	290
<b>第 12 章 绿色高性能混凝土技术发展的障碍及对策</b>	290
12.1 绿色高性能混凝土技术发展的障碍	293
12.2 对策与出路	294
参考文献	294





# 概 论

传统的混凝土虽然已有 180 年以上的历史,也经历了几次大的飞跃。而近些年由于工程应用中出现的和形势的发展,使人们认识到混凝土材料的耐久性应受到高度重视。新世纪,混凝土技术面临着前所未有的挑战。

随着建筑与结构设计形式的发展,各种超长、超高、超大型混凝土构筑物,以及在严酷环境下使用的重大混凝土结构,如高层建筑、跨海大桥、海底隧道、海上采油平台、核反应堆、有毒有害废物处置工程等的建造需要不断增加。这些混凝土工程施工难度大,使用环境恶劣、维修困难,因此要求混凝土不但施工性能要好,尽量在浇筑时不产生缺陷,更要耐久性好,使用寿命长。

进入 20 世纪 70 年代以来,不少工业发达国家正面临一些钢筋混凝土结构,特别是早年修建的桥梁等基础设施老化问题,需要投入巨资进行维修或更新。1987 年美国国家材料咨询局的一份政府报告指出:在美国当时的 57.5 万座桥梁中,大约有 25.3 万座处于不同程度的破坏状态,有的使用期不到 20 年,而且受损的桥梁每年还增加 3.5 万座。美国 1975 年由于混凝土腐蚀引起的损失为 700 亿美元,1985 年则达 1680 亿美元,而今后每年用于维修或重建的费用预计高达 3000 亿美元<sup>[1-1]</sup>。英国每年用于修复钢筋混凝土结构的费用达 200 亿英镑(合 280 亿美元)<sup>[1-2]</sup>,而日本目前每年用于房屋结构维修的费用为 400 亿日元(合 3.3 亿美元)以上。在加拿大,为修复劣化损坏的全部基础设施工程估计要耗费 5000 亿美元。

我国结构工程中混凝土耐久性问题也非常严重。原建设部于 20 世纪 90 年代组织了对国内混凝土结构的调查,发现大多数工业建筑及露天构筑物在使用 25 ~ 30 年后即需大修,处于有害介质中的建筑物使用寿命仅 15 ~ 20 年,民用建筑及公共建筑使用及维护条件较好,一般可维持 50 年。我国最早建成的北京西直门立交桥由于混凝土结构耐久性的不足而造成破损严重,使用不到 19 年就被迫拆除<sup>[1-3]</sup>;北京东直门、大北窑桥等 20 几座立交桥也不得不提前进行大修或部分更换;山东潍坊白浪河大桥按交通部公路桥梁通用标准图建造,但因位于盐渍地区,受盐冻侵蚀仅使用 8 年就成危桥,现已部分拆除并加固重建。港口、码头、闸口等工程因处于海洋环境,腐蚀情况更为严重。1980 年,交通部四航局等单位对华南地区 18 座码头进行调查,结果有 80% 以上均发生严重或较严重的钢筋锈蚀破坏,出现破坏的码头有的距建成的时间仅 5 ~ 10 年;青岛市临海某 16 层混凝土结构大楼,1989 年 11 月竣工,3 年后就由于楼盖板钢筋严重锈蚀,致使结构失效,16 层楼盖全部拆除。1990 年以后,随着混凝土等级提高,大量建筑出现早期开裂,损失严重<sup>[1-4]~[1-8]</sup>。同时,随着经

济的发展、社会的进步,各类投资巨大、施工期长的大型工程日益增多,如大跨度桥梁、超高层建筑、大型水工结构物等,人们对结构耐久性的期待日益提高,希望混凝土构筑物能够有数百年的使用寿命,做到历久弥坚。同时,由于人类开发领域的不断扩大,地下、海洋、高空环境建筑越来越多,有些结构物使用的环境可能越来越苛刻,客观上要求混凝土有优异的耐久性。

另外,混凝土作为用量最大的人造材料,不能不考虑它的使用对生态环境的影响。传统混凝土的原材料都来自天然资源。每用1t水泥,大概需要0.6t以上的洁净水,2t砂、3t以上的石子;每生产1t硅酸盐水泥约需1.5t石灰石和大量燃煤与电能,并排放1t的 $\text{CO}_2$ ,而大气中 $\text{CO}_2$ 浓度增加是造成地球温室效应的原因之一,美国媒体最近评出七大生态隐形杀手,混凝土位列第二。尽管与钢材、铝材、塑料等其他建筑材料相比,混凝土本身也是一种节能型材料,但由于近年来用量庞大,过度开采矿石和砂、石骨料,已在不少地方造成资源破坏并严重影响环境和天然景观。有些大城市现已难以获得质量合格的砂石。另一方面,由于混凝土过早劣化,如何处置废旧工程拆除后的建筑垃圾也成为我们必须面对和认真解决的严峻课题<sup>[1-9]</sup>。

因此,未来的混凝土必须从根本上减少水泥用量;必须更多地利用各种工业废渣作为其原材料;必须充分考虑废弃混凝土的再生利用;未来的混凝土必须是高性能的,尤其是耐久的,耐久和高强都意味着节约资源。

## 1.1 高性能混凝土的提出

针对混凝土的过早劣化,发达国家在20世纪80年代中期掀起了一个以改善混凝土材料耐久性为主要目标的“高性能混凝土”开发研究的高潮,并得到了各国政府的重视。

1990年,加拿大政府提出了一个协作网研究计划,专门用来资助对国家今后长远发展有影响的科研项目,这就是“高性能混凝土协作网”研究计划,获得了640万加元资助进行为期4年的研究。法国在1986年由政府组织开展了“混凝土的新途径”研究项目,进行高性能混凝土的研究并建造示范工程。这一项目已于1993年完成,建成的示范工程有Joigny城的1座3跨后张法预应力钢筋混凝土桥,其混凝土强度等级相当于我国的C70,比原设计的C40减少混凝土量30%,减少自重24%;Civaux核电站2号反应堆预应力钢筋混凝土安全壳,高85m,直径44m,混凝土强度等级C70,其水泥用量只有 $240\text{kg}/\text{m}^3$ ,有很高的气密性;1996年法国政府公共部和教育与研究部又组织了为期4年的“高性能混凝土2000”的国家研究计划,投入研究经费550万美元<sup>[1-9]</sup>。

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,计划在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、高性能混凝土的研究,NSF以每年200万美元的经费,定期资助以西北大学为首的水泥基复合材料联合研究中心对高性能混凝土的研究。德国、瑞典、挪威等国家在发展高性能混凝土上也有很大投入,挪威是较早对高强高性能混凝土开展研究的国家之一,挪威皇家科技学院的科学与工业研究基金(SINTEF)持续资助高性能混凝土的研究。瑞典1991~1997年由政府和企业联合出

资 5200 万克朗, 实施高性能混凝土研究的国家计划。日本则在发展自密实混凝土方面取得很大的成就, 其初衷也是为了消除混凝土振捣中的缺陷和增加混凝土的密实性, 以改善混凝土的耐久性为目标。

从 20 世纪 80 年代开始, 各国混凝土结构设计规范中逐渐突出了耐久性设计的考虑, 从只重视强度设计向强度和耐久性并重。进入 20 世纪 90 年代以后, 混凝土结构耐久性设计方法成为土木工程领域中的研究重点。针对不同环境类别的侵蚀作用, 提出材料性能劣化的理论或经验模式, 并据此估算结构的使用寿命, 成为发展和研究耐久性设计方法的主流。日本于 1986 年提出“考虑耐久性的建筑物设计、施工维护大纲”, 在 1989 年制定了《混凝土结构耐久性设计准则(试行)》, 把耐久性设计定义为: 全面地考虑材料质量、施工工序和结构构造, 使结构在一定的环境中正常工作, 在要求的期限内不需要维修。它采用了与结构设计相同的思路, 要求构造各部位的耐久性指数大于或等于环境指数。欧洲混凝土委员会(CEB) 1989 年通报了“耐久性混凝土结构设计指南”。1995 年欧共体资助了一项名为 DuraCrete 的研究项目, 2000 年出版了一份名为《混凝土结构耐久性设计指南》的技术文件。1998 年欧共体又资助成立了为期 3 年的 DuraNet 工作网, 全名为“支持、发展与应用以性能为基础的混凝土结构耐久性设计与评估的工作网”, 有欧洲的 19 个单位参与, 旨在改善欧洲混凝土的耐久性设计、评估与维修水平。美国 ACI201 委员会 1992 年提出了“耐久性混凝土指南”, 2000 年又对该指南进行了修改。欧洲国际混凝土委员会编制的混凝土结构 CEB—FIP 模式规范(1990), 欧洲规范 2 暂行本(1992) 以及美国 AASH—TO《公路桥梁设计规范(1994)》都列有“耐久性”的条款。

在我国, 自从 20 世纪 90 年代初清华大学向国内介绍高性能混凝土以来, 高性能混凝土的研究与应用在我国得到了空前的重视。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与施工技术规程》(中国工程建设协会标准 CECS 104: 99)。中国工程院土木水利与建筑学部于 2000 年提出了一项名为“工程结构安全性与耐久性研究”的咨询项目, 由陈肇元院士负责, 并编写了中国土木工程学会第一个标准 CCES 01—2004《混凝土结构耐久性设计与施工指南》。

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC) 是 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出的一种全新概念的混凝土, 它以耐久性为首要设计指标。

区别于传统混凝土, 高性能混凝土由于具有高耐久性、高工作性和高体积稳定性等许多优良特性, 被认为是目前全世界性能最为全面的混凝土, 至今已在不少重要工程中被采用, 特别是在桥梁、高层建筑、海港建筑等工程中显示出其独特的优越性, 在工程安全使用期、经济合理性、环境条件的适应性等方面产生了明显的效益, 因此被各国学者所接受, 被认为是今后混凝土技术的发展方向。

## 1.2 从“三高”混凝土到高强高性能混凝土

对高性能混凝土的定义或含义, 国际上迄今为止尚没有一个统一的理解, 各个国家不同人群有不同的理解。一些美国学者更强调高强度和尺寸稳定性(北美型), 欧洲学者更注重耐久性(欧洲型), 而日本学者偏重于高工作性(日本型), 这可能由于日本更重视混凝土

振捣工艺对工人听力的不利作用以及抗震结构的较高配筋率，因而推广不需振捣的自密实混凝土。

1990年5月在美国国家标准与技术研究所（AIST）和混凝土协会（ACI）主办的第一届高性能混凝土会议后，对高性能混凝土（HPC）的涵义可概括为：HPC是符合特殊性能组合和匀质性要求的混凝土，不是采用传统的原材料和一般的拌和、浇筑与养护方法可以获得的。

例如，这些可选性能包括：

- (1) 易于浇筑压力，压力泵送时不离析。
- (2) 提高长龄期力学性能。
- (3) 高早期强度。
- (4) 高韧性。
- (5) 体积稳定性。
- (6) 在恶劣环境中的长寿命。

1998年美国ACI又发表了一个定义为：“高性能混凝土是符合特殊性能组合和匀质性要求的混凝土，如果采用传统的原材料组分和一般的拌和、浇筑与养护方法，未必总能大量地生产出这种混凝土”。ACI对该定义所作的解释是：“当混凝土的某些特性是为某一特定的用途和环境而制定时，这就是高性能混凝土。例如，下面所举的这些特性对某一用途来说可能是非常关键的：易于浇筑，压送时不离析，早强，长期的力学性能，抗渗性，密实性，水化热，韧性，体积稳定性，恶劣环境下的较长寿命。因为高性能混凝土的许多特性是相互联系的，改变其中之一常会使其他的特性发生变化，当混凝土为某一用途生产而必须考虑若干特性时，则每一个特性都必须清楚地规定在合同文件中”。1998年ACI定义与1990年ACI、NIST定义的区别是：后者特殊性能组合中列入了“抗渗性、密实性、水化热”等内容。

在我国，对高性能混凝土的理解也有一个发展的过程。在九十年代中期许多学者认为：高性能混凝土必须是高强的<sup>[1-10]</sup>，因为一般情况下高强对耐久性有利，同时他认为高性能混凝土发展的物质基础是现在有了好的掺合料和减水剂，因此高性能混凝土必须掺加掺合料。这些观点代表了当时我国大多数混凝土学者对高性能混凝土的认识。国内学术界认为“三高”混凝土就是高性能混凝土。据此观点，高性能混凝土应该是高强度、高工作性、高耐久的，或者说，高强混凝土才可能是高性能混凝土；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；耐久性是高性能混凝土的重要指标，但混凝土达到高强后，自然会有较高的耐久性。

我国著名的混凝土科学家吴中伟院士针对当时科研界过度追求高强度的趋向，在1996年提出“有人认为高强度必然高耐久性，这是不全面的，因为高强混凝土会带来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。”<sup>[1-11]、[1-12]</sup>吴中伟院士高度重视耐久性，并早在1986年就提出“高强未必一定高耐久，低强也不一定就不耐久”的观点是非常有前瞻性的，而且在今天他的这个观点也是正确的。吴院士定义高性能混凝土为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制作的混凝土，它以耐久性作为设计的首要指标，针对不同用途要求，对下列性能有重点地予以保证；耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性以及经济合理性。为此，高性能混凝土在配制上的特点是低水胶比，选用优质原材料，并除水泥、骨料外，必须掺加

足够数量的矿物细掺料和高效外加剂。1997年3月吴中伟教授在**高强高性能混凝土**会议上又指出,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,提出了**绿色高性能混凝土(GHPC)**的概念。当然,吴先生所提倡的**绿色混凝土**虽然28d只满足中等强度,但由于是采用低水胶比,从长龄期而言,仍然是具有较高强度的。

结合我国的推广应用高性能混凝土十几年的情况,2003年清华大学的廉慧珍教授专门撰文反思了对高性能混凝土的理解存在的若干误区,造成对高性能混凝土使用的盲目和混乱,她对高性能混凝土的理解为,“高性能混凝土不是混凝土的一个品种,而是达到工程结构耐久性的质量要求和目标,是满足不同工程要求的性能和具有匀质性的混凝土。高强不一定耐久,高流动性也不是任何工程都需要的,也不是只要有掺合料就能高性能;混凝土的质量不是实验室配出来的,而是优选配合比的混凝土由生产、设计、施工和管理人员在结构中实现的,开裂的就不是高性能混凝土,除了特殊结构(如临时性结构)外,没有什么混凝土结构不需要耐久。针对不同工程的特点和需要,对混凝土结构进行满足具体要求的性能和耐久性设计,比笼统强调高性能混凝土的名词更要科学”。在这里,高性能混凝土强调的是混凝土的“性能”或者质量、状态、水平,或者说是一种质量目标,对不同的工程,高性能混凝土有不同的强调重点(即“特殊性能组合”)。高性能混凝土的英文翻译是 High Performance Concrete。Performance(性能)这个词不同于 Property(性能),Property是指可以通过特定方法和仪器对混凝土材料进行测定和定量表征的性能;而 Performance 有成果、表演、技能的意思。在此处是指在特定工程、特定结构、特定施工与管理、特定环境中混凝土表现出的绩效、状态或效果。相同组成材料、配合比的混凝土可以有相同的 Property,但 Performance 可能不同。所以 ACI 对高性能混凝土定义的注释中强调: **高性能混凝土的特性是针对具体应用和环境而开发的**。离开这一点谈高性能混凝土没有意义。

我国工程建设标准 CECS 207—2006《高性能混凝土应用技术规程》的相关规定,高性能混凝土是“采用常规材料和工艺生产的能保证混凝土结构所要求的各项力学性能,并具有高耐久性、高工作性和高体积稳定性的混凝土。”该标准强调的重点是耐久性,其规定根据混凝土结构所处环境条件,高性能混凝土应满足下列的一种或几种技术要求:

- (1) 水胶比小于或等于 0.38。
- (2) 56d 龄期的 6h 总导电量小于 1000 库仑。
- (3) 300 次冻融循环后相对动弹性模量大于 80%。
- (4) 胶凝材料抗硫酸盐腐蚀试验试件 15 周膨胀率小于 0.4%,混凝土最大水胶比小于或等于 0.45。
- (5) 混凝土中可溶性碱的总含量小于  $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。

综上所述,高性能混凝土是混凝土技术从传统理念向现代转变和革新过程中的产物,并非一个能做精确界定的简单术语。其所具有的技术路线和追求目标,表明国内外土木工程界科技人员已开始意识到,通过一定的技术措施,在一定的技术参数条件下,是能够赋予混凝土高耐久性的,从而保障混凝土结构在特定环境中具备足够长的使用寿命。

### 1.3 混凝土高性能化的认识误区与发展重点

近年来,随着混凝土技术的飞速发展,高强高性能混凝土已在工程中大量应用。然而混



凝土的耐久性问题仍然是困扰工程界的难题,尤其是其体积稳定性已成为高性能混凝土发展的瓶颈。由于高强高性能混凝土具有水胶比低、胶凝材料用量大、粗骨料用量较少、浆体含量多、且掺加了各种类型外加剂等特点,以及对高性能混凝土的认识不足等问题,使得目前的高性能混凝土“性能并不高”,例如,尚存在收缩大、早期易开裂、脆性大、耐火性差等缺陷,加上缺乏配套的设计、试验、施工和应用标准规范,因此高性能混凝土在施工阶段比普通混凝土更容易形成表面上的裂缝。其形成原因十分复杂,涉及的因素有:混凝土材料的变形,施工因素,气候条件的变化,设计方面防裂构造措施不足,对掺加矿物掺合料新拌混凝土的塑性收缩引发开裂的重视不够等。各种因素综合作用相互叠加,最终使混凝土所受到的拉应力大于当时的混凝土极限强度,造成混凝土早期的表面裂缝。特别是受力的重要部位,在浇筑混凝土后几天,即有裂缝产生。所形成的表面裂缝形态各异,分布不规则,程度大小不一。这样不仅影响混凝土建筑物的外观,也严重损害其结构强度和耐久性。

廉慧珍教授在《对“高性能混凝土”十年来推广应用的反思》<sup>[1-13]</sup>一文中指出:就我国的情况来看,十年来由于对高性能混凝土的理解存在若干误区,造成“高性能混凝土”使用上的盲目和混乱。大多数对“高性能混凝土”的理解是“高强”、“高流动性”、“掺用矿物掺合料”,而用现行规范在实验室制作的小试件、以简化的条件和强制的过程进行的“耐久性”试验结果,与在实际结构中的表现又不一致。

### 1.3.1 “高强”与“高性能”

高强混凝土技术的发展对建设事业发挥了重大作用。近50年,混凝土的强度不断提高,是科学技术不断进步的体现,并促进了建设事业的发展。但在高强混凝土的推广应用上,仍受到某些传统观念的有害束缚:有些技术人员总觉得多用水泥或少用掺合料会对混凝土质量带来好处,而不是尽量使用粉煤灰等矿物掺合料和将水泥用量限制到最小程度。目前,还有些人仍把高性能和高强联系在一起,甚至有人盲目追求混凝土的“高强”、“超高强”以至“特超高强”,并以此为“水平”的标准。另外,对高强混凝土自身的一些弱点缺乏足够的重视,从而在结构的设计构造和施工的各个环节中完全沿用普通混凝土中的做法而无视高强混凝土的性能特征和特殊要求,结果造成工程严重开裂或留下结构延性不足等安全隐患。

“高强”仅仅是混凝土性能的一个方面。大量的工程实践表明,混凝土设计强度不足而导致工程破坏的实例虽有但却较为鲜见。而另一方面,许多混凝土结构尤其是处于严酷环境中的结构,由于较差的耐久性已经或正在遭受严重的损坏。西方国家报道的许多开裂的“高性能混凝土”,其实都是高强度的混凝土。因此,强度和耐久性之间并不存在着密切的关系,在一般情况下,较高强度的混凝土相对而言也是比较耐久的,但两者却不同。许多人认为“混凝土强度愈高,它在严酷环境下就愈耐久”。但这需要一个重要的前提就是混凝土是坚固的,也即混凝土是体积稳定性好的。

高强混凝土虽然有较高的抗拉强度,但抗拉强度与抗压强度的比值随抗压强度的增加而减小。抗压强度为30MPa时,拉压比约为1/12;抗压强度为60MPa时,拉压比约为1/14。这样,就使得混凝土的强度越高,其脆性越大,断裂韧性越小,抵抗突发荷载(如地震、爆炸)和疲劳(如高耸结构承受的风荷载、道路承受的动力荷载)的能力越差。另外高强混凝土弹性模量也高,在相同收缩变形下会引起较高的拉应力,更由于高强混凝土的徐变能力低,应力松弛量较小,所以抗裂性能甚差。



此外, 高强混凝土一般使用强度等级高的水泥, 同时, 为了满足施工性的要求, 水胶比很低的高强混凝土一般用较大的水泥用量, 尤其是不掺或掺量小的矿物掺合料时, 会使混凝土中水化温升很高, 控制不好会产生较大的温度应力, 再加上低水胶比会造成较大的自收缩应力, 增加了混凝土的易裂性。

高强混凝土制备技术应该注意克服追求高早强的倾向, 这对混凝土的体积稳定性意义重大。

### 1.3.2 “高流动性”与“高性能”

混凝土拌和物的流动性从10年前普遍的70~90mm发展到现在大量预拌混凝土的180~200mm, 还有的工程用自密实混凝土来浇筑。自密实混凝土减轻了振捣的工作量, 推动了预拌混凝土的发展, 泵送高度已可达300m以上, 并大大减少了“蜂窝”、“麻面”和“狗洞”等现象, 提高了混凝土的匀质性。目前很多人以“高流动性”为“高性能混凝土”的特征。

普通混凝土需要坍落度在160mm以上才适于泵送; 而粉煤灰混凝土坍落度只需80~100mm就可以轻易地进行泵送<sup>[1-14]</sup>。同时, 由于粉煤灰的滚珠润滑效应, 掺粉煤灰混凝土有较大的有效振捣半径, 还易于振捣密实。看上去与普通的干硬混凝土外观相似的粉煤灰混凝土, 在高频振动棒的振动作用下十分易于成型密实。而按照普通混凝土的粘度来衡量时, 就会造成不必要地增加用水量、扩大水胶比, 追求大流动性, 在浇筑后过渡振捣, 不仅影响其作用正常发挥, 而且使较轻的粉煤灰易于上浮, 出现人为的分层现象<sup>[1-15]</sup>。

影响混凝土流动性的因素是用水量和高效减水剂, 而影响相同流动性混凝土用水量的主要因素是骨料的质量。我国目前骨料质量越来越差, 20多年前砂、石的空隙率一般都在43%以下, 而现今北京和深圳的砂石空隙率经常在46%以上, 有时接近50%。由于绝大多数采石场仍使用成本低廉的颚式破碎机, 材质越硬的石料, 破碎后针、片状颗粒越多, 粒径小于10mm的颗粒几乎都是针片状颗粒, 实际上缺少5~10mm粒级的颗粒。同时非常不规则形状的粗骨料比例大。砂子由于资源几近枯竭, 北京大部分混凝土搅拌站用的砂子是细砂加豆石, 砂子含石率在25%左右。因此, 这几年来混凝土的用水量居高不下, 一般都超过175kg/m<sup>3</sup>, C30以下混凝土用水量更大。

因此, 对混凝土大流动性的追求, 导致混凝土中用水量增大、浆骨比增大。混凝土中浆骨比增大意味着收缩引起开裂的可能性加大。由于混凝土的流动性过大, 易于操作, 易使工人操作不规范, 反而影响它的匀质性; 且在混凝土浇筑成型后到混凝土初凝前, 由于混凝土中的骨料在自重作用下缓慢下沉, 水上浮。掺用过细的大掺量掺合料时易产生泌浆而造成硬化后表面起粉。另外, 骨料在混凝土内部的下沉是不均匀的; 在钢筋下面的混凝土沿钢筋下方继续下沉, 钢筋上面的混凝土被钢筋支顶, 使混凝土沿钢筋表面产生顺筋裂缝。

高性能混凝土在工作性方面, 必须具备较强的保塑性和一定的流动度保持能力。但在流动性指标上, 不必拘泥于坍落度大于180mm以上。只要具有一定的流动性, 满足施工所需的和易性、密实性即可。实践表明: 掺入大量的粉煤灰后, 因其存在大量玻璃微珠而能减少混凝土的需水量, 同时可增加拌和物内部黏聚性而大大改善混凝土泌水、离析的性能, 并可减小拌和物与泵管之间的黏附力而增加可泵性。P K Mehta在美国加州大学伯克利分校一项加固工程中, 密配筋的基础和剪力墙的C30和C40混凝土掺粉煤灰50%和60%, 在施工中实测拌和物的坍落度为125mm时, 与坍落度为180mm的普通混凝土的泵送性能相当, 不