



21世纪土木工程实用技术丛书



高性能混凝土结构

Gaoxingneng Hunningtu Jiegou

冯乃谦 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪土木工程实用技术丛书

高性能混凝土结构

冯乃谦 编著

机械工业出版社

为适应广大工程技术人员、科研人员学习和掌握高性能混凝土结构的基本理论和原理,加强对高性能混凝土结构的理解和应用,本书在编写中本着“阐明基本原理,侧重工程实践应用”的思路,全面介绍了高性能混凝土结构及其材料的力学性能、干缩、徐变、耐久性等关键核心问题。

本书适用于广大土建设计、施工和材料技术人员,同时对于相应专业的高校师生也有很大的帮助和指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

高性能混凝土结构/冯乃谦编著. —北京:机械工业出版社, 2004.1

(21世纪土木工程实用技术丛书)

ISBN 7-111-13294-7

I. 高… II. 冯… III. 高强混凝土-混凝土结构
IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 099411 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:薛俊高 版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云

封面设计:张静 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·14.75 印张·435 千字

0 001—4 000 册

定价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

《21 世纪土木工程实用技术丛书》

编 委 会

主任委员

赵国藩 大连理工大学 中国工程院院士

编委 (依姓氏笔画排序)

方鄂华	清华大学 教授
王永维	四川建筑科学研究院 教授
王清湘	大连理工大学 教授
冯乃谦	清华大学 教授
石永久	清华大学 教授
江见鲸	清华大学 教授
朱伯龙	同济大学 教授
李 奇	机械工业出版社 副社长
李 珠	太原理工大学 教授
宋玉普	大连理工大学 教授
杜荣军	北京建筑科学技术研究院 高工
沈祖炎	同济大学 教授
金伟良	浙江大学土建学院 教授
顾安邦	重庆交通学院 教授
陶学康	中国建筑科学研究院 教授
唐岱新	哈尔滨工业大学 教授
聂建国	清华大学 教授
黄承逵	大连理工大学 教授
蒋树屏	重庆交通科技研究院 教授
蔡中民	太原理工大学 教授

前 言

人类进入 21 世纪，面临着“人口膨胀、资源和能源短缺以及环境恶化”等三大问题。混凝土材料是资源和能源消耗的大户，也是环境污染源之一。混凝土材料和技术直接影响着人类的可持续发展。

我国目前水泥年产量达 6 亿多 t，是水泥产量的大国；混凝土年产量也高达 12~13 亿 m³，约占世界总产量的 40%，是世界上混凝土生产和应用最多的国家。

混凝土材料应用与发展的过程，也是人类对自然资源的开发、转移、消耗与报废的过程。在此期间伴随着巨大的资源和能源消耗以及环境的污染，直接威胁着人类的生态环境。因此混凝土材料与技术的发展，首先要考虑到资源的合理开发和利用，以及材料的再生与循环利用。尽可能少地破坏和开发天然资源，并逐步提高混凝土材料再生和循环利用的比例，使人类社会和生态环境在高度协调中得以发展。

混凝土的耐久性与长寿命，首先是保证结构的安全性和可靠性。从另一个角度来看，也是从根本上节约资源与能源，减少环境污染的重大课题。混凝土是一种人造石，应具有类似于天然石材的耐久性。但试验和应用证明，混凝土和钢筋混凝土在使用过程中，受到土壤中、水中及空气中有毒介质的侵蚀，或混凝土本身组成材料中有害成分的化学及物

理作用，会产生劣化。宏观上会出现开裂、溶蚀、剥落、膨胀、松软及强度倒缩下降等。严重者会使结构破坏倒塌。《高性能混凝土结构》主要讨论的就是关于混凝土和混凝土结构的耐久性和长寿命的问题。

本书由 11 章组成。第 1 章 高性能混凝土的发展与应用。从历史背景、定义与途径，组成材料、结构与性能，综合地论述了高性能混凝土技术。第 2 章 高性能混凝土的组成和选择。从混凝土的三个组成要素：水泥基相、界面过渡层和分散粒子（骨料）进行分析，指出了混凝土要达到高性能对这三个组成要素的要求及如何选择材料达到这些要求。第 3 章 高性能混凝土的施工性能。根据高性能混凝土拌合物水灰比低、粘性大的特点，通过流变学参数对高性能混凝土拌合物进行定量的评价和相应的测试，并对高性能混凝土可泵性提出了相应的指标。第 4 章 高性能混凝土的早期性能。高性能混凝土浇筑捣实以后到硬化初期阶段。描述这一阶段中混凝土性能变化，称为早期性能。包括水化反应、强度发展、早期收缩和早期冻害等。第 5 章 高性能混凝土养护。这是混凝土结构物获得充分强度和耐久性不可缺少的一项工程。除一般养护方法外，还阐述了养护条件与结构构件芯样强度的关系。第 6 章 高性能混凝土的组织结构和力学性能。从混凝土三相组成结构说明组成材料对力学性能的影响；养护、环境条件与力学性能的关系等。第 7 章 高性能混凝土的干缩与徐变。阐明了混凝土干湿行为特点及干缩机理，影响干缩的各种因素；高性能混凝土干缩特点及组成材料对干缩的影响。徐变是预应力钢筋混凝土设计中必须考虑的因素。高性能的混凝土的徐变明显地低于普通混凝土，随着环境湿度降低，这种差别越大。书中还介绍了钢筋混凝土构件的徐变及实际结构物中构件的变形。第 8 章 高性能混

凝土的耐久性。针对混凝土耐久性劣化外力,找出量化的评价指标,并采取相应技术措施和检测手段,保证高性能混凝土在所处环境下,抵抗劣化作用的功能,获得高的耐久性。第9章 高性能混凝土结构。这是本书的重点。从实际应用的角度出发,全面介绍了高性能混凝土结构材料的力学性能,梁、柱构件的力学性能,梁、柱结点及框架的性能,剪力墙的性能,为高性能混凝土结构设计提供参考。第10章 高强度高性能混凝土在混凝土结构中应用实例。介绍了辽宁省的第一幢高强高性能混凝土结构工程的设计与施工、技术经济效益及如何解决施工技术中的问题。还介绍了日本高层、大开间住宅中,采用设计基准强度80MPa、100MPa高性能混凝土施工应用,以及150MPa的超高强高性能混凝土在钢筋混凝土柱中实用化的研究,使读者对高性能混凝土的发展与应用有一个更具体的了解。第11章 高性能混凝土配合比设计。从耐久性角度对高性能混凝土进行配合比设计,并从耐久性病害综合症的角度如何完善配合比设计。

全书力图贯穿以混凝土及混凝土结构的耐久性为中心展开各章内容的阐述。但是,耐久性问题的深入论述,必然伴随着强度而出现。例如抗中性化问题,如果混凝土强度超过62.5MPa,就可不考虑中性化的影响;水胶比低、强度高的混凝土, Cl^- 扩散系数就低;在同样条件下低水灰比的混凝土抗硫酸盐腐蚀性能高……等等。大量的试验和应用证明,混凝土至某一龄期时,强度还会倒缩下降;混凝土结构为了达到设计的使用寿命,还需考虑一定的强度储备。因此,混凝土的强度和耐久性是相辅相承的。

作者认为高性能混凝土必须具有高强度,但是高强度不一定具有高性能,关键是否含有矿物质超细粉。这一点,在本书中列举了大量的实例。

仅以此书献给土建设计、施工和建筑工程材料工作者，以及高校有关专业的教师和学生。

感谢赵国藩先生及机械工业出版社对本书的帮助与支持。

朋改非先生对本书的校对也给予了很大帮助，在此一并表示感谢。

冯乃谦

2003年9月5日

目 录

前言

第 1 章 高性能混凝土的发展与应用	1
1.1 历史背景	1
1.2 定义与技术途径	4
1.3 矿物质超细粉是高性能混凝土的新组分	12
1.4 新型高效减水剂	18
1.5 工程应用实例	21
1.6 本书介绍的主要内容	23
 第 2 章 高性能混凝土的组成及其选择	 25
2.1 混凝土的组成和性能	25
2.2 水泥基相	26
2.3 分散粒子	29
2.4 界面过渡层	44
2.5 矿物质超细粉的应用	45
2.6 高效减水剂	91
2.7 混凝土拌合用水和养护用水	102
 第 3 章 高性能混凝土的施工性能	 106
3.1 高性能混凝土拌合物性能的评价指标	106
3.2 高性能混凝土的可泵性	115

第 4 章 高性能混凝土的早期性能	119
4.1 泌水与离析	120
4.2 凝结、硬化与放热	121
4.3 早期强度	124
4.4 早期收缩	131
4.5 早期开裂	148
4.6 早期冻害	158
 第 5 章 高性能混凝土的养护	 160
5.1 早期养护	161
5.2 湿润养护	164
5.3 养护期	165
5.4 自然养护	165
5.5 冬季施工期的养护	166
5.6 养护条件和结构构件芯样强度	167
 第 6 章 高性能混凝土的组织结构和力学性能	 172
6.1 骨料(分散粒子)对高性能混凝土力学 性能的影响	172
6.2 硬化水泥浆体结构与水的形态	174
6.3 水泥石与骨料界面过渡区的结构	178
6.4 孔隙结构和强度	182
6.5 异向性	183
6.6 混凝土的破坏特性	186
6.7 强度	189
6.8 弹性模量, 应力应变关系	203
6.9 复合应力效应	209
6.10 其他的性质	212
 第 7 章 高性能混凝土的干缩与徐变	 213

7.1	混凝土的干缩	213
7.2	高强度高性能混凝土的干缩	219
7.3	徐变	224
第 8 章	高性能混凝土的耐久性	234
8.1	体积变化	234
8.2	裂纹、剥落与散开	237
8.3	中性化	241
8.4	抗冻融性能	251
8.5	盐害	259
8.6	硫酸盐腐蚀	281
8.7	混凝土的高温力学性能	286
8.8	混凝土的耐磨性	289
8.9	碱-骨料反应	293
第 9 章	高性能混凝土结构	306
9.1	概述	306
9.2	高性能混凝土结构材料的力学性能	306
9.3	梁柱构件的力学性能	335
9.4	梁、柱结点及框架的性能	369
9.5	剪力墙的性能	385
第 10 章	高强度高性能混凝土在混凝土结构 中应用实例	397
10.1	辽宁省第一幢高强高性能混凝土工程（华星 大厦）设计施工简介	397
10.2	降低水泥用量和减小混凝土坍落度损失的探索	402
10.3	高强高性能混凝土技术经济效益	403
10.4	高层建筑采用高强高性能混凝土设计方法 的研究	404

10.5	设计基准强度 100MPa 的高强度高性能混凝土在高层建筑中应用的施工	410
10.6	150MPa 级的超高强高性能混凝土在钢筋混凝土柱中实用化研究	420
第 11 章	高性能混凝土配合比设计	433
11.1	耐久性设计的技术要求	433
11.2	配合比设计必须考虑耐久性病害 综合征	441
参考文献		449

第 1 章 高性能混凝土的发展与应用

高性能混凝土 (High Performance Concrete, 简称为 HPC) 是一种体积稳定性好、具有高耐久性、高强度与高工作性能的混凝土。

高性能混凝土在国内外已得到了较多的应用, 100MPa、150MPa 以及 230MPa 的高性能混凝土都在工程中得到了应用。我国最早应用高性能混凝土的是 1991 年广东国贸大厦工程, 当时采用了 C60 的粉煤灰泵送高性能混凝土。现在在公路桥、铁路桥、机场及超高层建筑中均得到了推广应用。强度等级 C80、C100 的高性能混凝土也在工程中得到了试验应用。台湾于 1992 年, 高雄 85 国际广场大楼工程, 在钢管柱内浇注了 55MPa 的高性能混凝土; 近年又在 101 大厦施工中应用了 C70 以上的 HPC。

HPC 的水灰比 ≤ 0.38 , 水泥石中只有凝胶孔, 无毛细孔, 具有较高的抗渗性和耐久性。HPC 的 ASTM C1202 6h 总导电量 $< 1000\text{C}$, 抗压强度 $> 60\text{MPa}$ 。HPC 组成材料中, 矿物质超细粉和新型高效减水剂是不可或缺的组成部分。

1.1 历史背景

据资料介绍, 当前国际上混凝土年产量约 30 亿 m^3 。人类进入 21 世纪, 混凝土仍为主要的工程材料之一。

我国是混凝土的生产和应用大国。我国大陆混凝土的总产量约占全世界的 40%, 为 12 亿 m^3 左右。但无论是国内还是国外, 混凝土结构在使用过程中, 在安全性和耐久性方面都出现了大量问题。1980 年 3 月 27 日, 北海 Stavanger 近海钻井平台 Alexander Kjell 号突然破坏, 导致 123 人死亡。乌克兰境内的切尔诺贝利核电站的泄漏, 造成了大面积的放射性污染, 生态环境遭受了严重的破坏。日本的一些钢

钢筋混凝土桥梁，投入使用不到 20 年，由于碱骨料反应，使桥梁到处遍布裂缝（见图 1-1），完全失去了使用能力。不得不炸掉重建。我国海滨的一些钢筋混凝土公路桥，自 1990 年左右建成投入使用，约经 10 年，混凝土保护层大片脱落，钢筋严重锈蚀（图 1-2），也只好在旁边另架新桥。我国某地的洗煤水塔，由于混凝土渗漏，钢筋锈蚀，突然断裂，水塔毁坏，水流像山洪一样冲下，造成人员很大伤亡和建筑设施严重破坏。

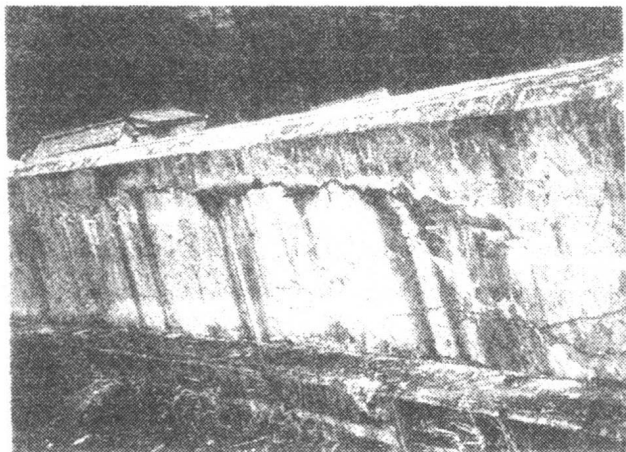


图 1-1 混凝土碱骨料反应钢筋混凝土桥开裂破坏实例

种种工程事故，使人们意识到，在结构设计时，对使用材料的耐久性应像力学性质一样予以仔细的考虑，现在很多人已意识到要把结构的耐久性放在首位。

过去，一般都认为混凝土是一种经验配制的材料，从原材料的选择配制工艺和施工应用都比较简单。但从 20 世纪 80 年代初开始，混凝土技术已有很大发展。混凝土所达到的强度已远远超出了工程所要求的范围。混凝土技术已进入了高科技的时代。其表现为：

(1) 在原材料方面，除了常用的水泥以外，新出现了球状水泥、调粒水泥等。这些水泥的标准稠度用水量低，在水胶比相同的情况下，比普通水泥浆的流动性大；如果流动性相同，这些新型水泥可以



图 1-2 钢筋混凝土桥梁的保护层成片剥落

减少用水量，降低水灰比，提高强度。利用硅粉、矿渣、粉煤灰、偏高岭土及天然沸石超细粉等，对改善与提高混凝土的性能起着重要的作用，成为高性能混凝土不可或缺的组成部分。氨基磺酸等高效减水剂，多羧酸系高效减水剂，对水泥粒子分散性好，减水率高，并能控制混凝土的坍落度损失，提高混凝土的耐久性。这些都为高性能混凝土的发展提供了一种关键性材料，使混凝土的性能设计和控制达到了更高的水平。

(2) 在混凝土技术方面，各种新型搅拌设备，原材料的检验与监测设备，计算机的应用等高新技术，很容易得到均匀的多组分的混凝土拌合物。根据新拌混凝土的检测，可以准确地预测混凝土 28d 的强度。更重要的是混凝土拌合物可以达到高流态，并在运输和施工过程中基本上无坍落度损失，泵送后的混凝土可以免振自密实，完全可以

保证混凝土的质量。在日本，还研制出了耐久性 500 年以上的混凝土。

以上情况说明，混凝土技术已取得很大进展。可以根据选择的原材料，设计并预测混凝土的性能。

长期的工程使用说明，混凝土及混凝土结构的耐久性是其有效服务的技术关键；另一方面混凝土技术也已进入高科技的范畴。高性能混凝土是混凝土进入高科技时代的产物，同时也具有优异的耐久性能。因此，高性能混凝土就自然而然地被提出来了。

可以说，20 世纪 60 年代高效减水剂的发明与应用，使混凝土技术进入了高强度与高流态的新领域；20 世纪 90 年代的粉体工程，进一步使混凝土进入了高性能时代。

在我国大陆，C60 的高性能混凝土已广泛应用于桥梁、高层建筑及机场建设等工程；C80 混凝土也在工程中试点应用。在国际上强度为 90MPa、100MPa、110MPa、120MPa、150MPa，甚至 230MPa 的高性能混凝土，在工程中都获得了应用。今后在高层与超高层建筑、桥梁和严酷条件下工作的结构上，HPC 会获得越来越多的应用。

1.2 定义与技术途径

高性能混凝土与高强度混凝土不同。高性能混凝土的重点是由非常高的强度转向在特定环境下所需要的其他性能，包括高弹性模量、低渗透性和高的抵抗有害介质腐蚀破坏的能力。

高性能混凝土与普通混凝土也不同。在高性能混凝土中常常含有硅粉，粉煤灰或矿渣等超细粉，或含有其复合成分，而普通混凝土中往往没有。高性能混凝土的水灰比一般小于 0.38，而普通混凝土的水灰比一般在 0.45 以上。高性能混凝土的骨料最大粒径一般小于 25mm，国外资料介绍为 10~14mm，都小于普通混凝土。

1.2.1 关于高性能混凝土定义

(1) 1990 年 5 月在马里兰州，由美国 NIST 和 ACI 主办的讨论会上，HPC 定义为具有所要求的性能和匀质性的混凝土。这些性能包括：易于浇筑、捣实而不离析；高超的、能长期保持的力学性能；早

期强度高、韧性高和体积稳定性好；在恶劣的使用条件下寿命长。也就是说，HPC 要求高的强度、高的流动性与优异的耐久性。

(2) 1990 年 P.K.Mehta 和 P.C Aitcin 发表的论文中指出：高性能混凝土应当具有以下两方面的特性：①抗渗性：按 AASHTD277，关于 Cl^- 渗透性检测，6h 总导电量 $\leq 500\text{C}$ 。②尺寸稳定性：具有高弹性模量，低干缩和徐变以及低的热变形性能。高性能混凝土的弹性模量应达到 $40\sim 45\text{GPa}$ ；而且 90d 的干缩变形 $< 0.04\%$ 。

(3) 美国战略公路研究项目 (SHRP) 定义 HPC 为：

1) $W/C \leq 0.35$ 。

2) 300 次冻融循环，相对动弹性模量 $\geq 80\%$ 。

3) 浇筑后 4h 内达到 21MPa ；24h 时 $\geq 34\text{MPa}$ ；28d 时 $\geq 67\text{MPa}$ 。

(4) ACI 定义。易于浇筑捣实但不影响强度；长期力学性能好；早期强度高；韧性好；体积稳定性好；在恶劣环境中长期强度高。

(5) 原 RILEM 主席 Wittmann 教授提出由普通混凝土达到高性能混凝土的技术途径如图 1-3 所示。

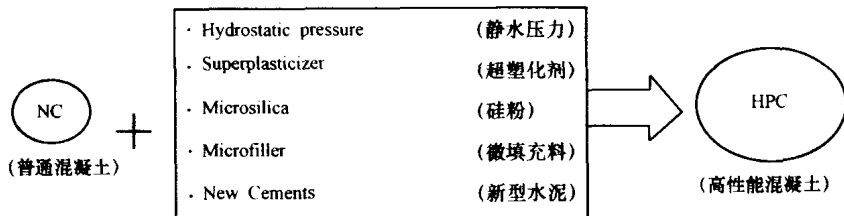


图 1-3 普通混凝土达到高性能混凝土的技术途径

通过高效减水剂降低混凝土的水灰比，利用硅粉或微填充料填充水泥粒子间的空隙，采用新型水泥，通过一定压力作用可使混凝土达到高性能。他还指出，如果将 475kg 硅酸盐水泥和 47kg 硅粉、138L 水、1790kg 骨料和 2% 的超塑化剂拌合，得到 1m^3 混凝土，28d 强度 80MPa 以上，而且耐久性提高。

(6) 以冈村为代表的一部分日本学派认为，高流态、免振自密实的混凝土就是高性能混凝土。也就是说他们强调的是新拌混凝土的性