



HUNNINGTU GONGCHENG  
NAIJIUXING YANJIU HE YINGYONG

# 混凝土工程

## 耐久性研究和应用

主编 | 杨彦克 陈改新

# 混凝土工程耐久性研究和应用

主编 杨彦克 陈改新

西南交通大学出版社  
·成都·

-----  
**图书在版编目 (CIP) 数据**

混凝土工程耐久性研究和应用 / 杨彦克, 陈改新主编.  
成都: 西南交通大学出版社, 2006.10  
ISBN 7-81104-466-8

I. 混... II. ①杨... ②陈... III. 混凝土结构 - 耐用性 - 研究 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 123346 号  
-----

**混凝土工程耐久性研究和应用**

**主编 杨彦克 陈改新**

责任编辑	王 婷
特邀编辑	郭 剑
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	<a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a>
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司印刷
成品尺寸	203 mm × 280 mm
印 张	34.375
字 数	1 050 千字
版 次	2006 年 10 月第 1 版
印 次	2006 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-81104-466-8
定 价	70.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

主办单位：中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土分会混凝土耐久性专业委员会

承办单位：西南交通大学土木工程学院

会议技术委员会：（按拼音顺序排名）

毕重良	曹建国	陈改新	陈蔚凡	邸小坛	方 璟	傅 智
高 伟	何 真	何忠茂	胡力平	惠云玲	纪进旭	蒋林华
金树新	冷发光	李家正	李文伟	李志国	刘宝举	刘红飞
路新瀛	覃维祖	屈文俊	隋同波	田俊峰	汪在芹	王德庠
王东林	王栋民	卫 红	文梓芸	翁永红	谢凯军	谢永江
邢 峰	徐名涛	杨全兵	杨彦克	杨永强	姚 燕	于无私
于新文	张子华	赵铁军	赵志曼	周 燕	朱狄涛	

# 前 言

随着我国各种基础设施建设规模的不断扩大，作为用量最大的建筑工程材料，混凝土在服役环境中的耐久性与工程安全日渐受到人们的广泛关注。建设可持续发展、节约型和环境保护的混凝土结构工程，已成为土木工程界普遍关注的焦点和混凝土材料科学研究的热点。为加强高校、科研、设计、施工、工程管理和专业公司等混凝土工程耐久性研究和应用领域的交流与合作，促进创新和推广，混凝土耐久性专业委员会于2006年10月下旬在四川成都组织召开了“混凝土工程耐久性研究和应用研讨会”，会议征集到论文100余篇，涵盖了混凝土工程耐久性研究和应用的各个方面，其中不乏近年的最新研究成果、学术思想、新材料新技术、工程实践、思考与总结。我们从中选出80余篇编辑出版。全书共分五部分：第一部分综述、第二部分耐久性机理研究、第三部分耐久性预防与补救、第四部分检测与评估、第五部分其他。由于时间仓促，错误难免，敬请原谅。

由于众多论文作者的热忱与支持，本书得以如期出版，编者在此特向论文作者谨致谢意！

编 者

2006年10月

## 目 录

## 综 述

中国高性能混凝土及混凝土耐久性的研究和应用	姚燕 王玲 吴浩	3
腐蚀与混凝土耐久性预测的发展和难点讨论	洪乃丰	9
表层混凝土结构特点及有害介质沉积过程简述	李虹燕 曹征良 邢锋 丁铸	15
关于混凝土结构耐久性设计的若干问题	陈蔚凡	25
国内外几个水电工程中的混凝土碱—骨料反应情况综述	刘艳霞 刘晨霞 陈改新 鲁一晖	29
国内外碱—骨料反应试验方法标准综述及混凝土棱柱体试验方法的现状、发展趋势	郝挺宇	35
混凝土表面与表层温湿度效应	殷慧 丁铸 曹征良	44
不同环境条件下混凝土的抗盐蚀性能研究	谢友均 刘运华 龙广成 石明霞 唐旭光	54
聚合物乳液改性水泥混凝土的试验研究	杨学贵 汤惠工 何唯平	60
提高水泥混凝土路面结构耐久性的重要措施	高伟	65
沿海混凝土建筑结构耐久性的分阶段分层次设计	石建光	71

## 耐久性机理研究

LMPA 碱集料反应加速测试法影响因素探讨	赵青林 周明凯 Ernst FREYBURG2 Jochen STARK2	81
不同硫酸盐溶液对普通混凝土侵蚀机理的研究	刘赞群 邓德华 肖佳 元强 黄海 唐威燕 陈峰	90
采用养护剂养护混凝土对耐久性的影响	李莉 李广森	102
防腐阻锈型防水剂对混凝土耐久性的影响	李景欢 陈翠红	106
大掺量粉煤灰在电厂大体积混凝土中的应用	周建红 廖武华	112
恶劣环境下预应力混凝土的耐久性研究	薛伟辰	117
粉煤灰和矿粉对高强高性能混凝土耐久性的影响	周明凯 王稷良 查进 李进辉	122
复合矿物掺和料混凝土强度效应研究	孟云芳 孙庆合 陆有军	127
混凝土内钢筋锈蚀速率的时变特征与机理	袁迎曙 姬永生	137
高性能混凝土抗氯离子渗透性能研究	黄君哲 王胜年 潘德强	145
高性能轻集料混凝土抗氯离子渗透性能研究	刘宝举 程智清 杨元霞	149
高性能轻质骨材混凝土耐久性质之研究	王和源 钟志仁 施静杰	155
高性能引气剂改善混凝土冻融耐久性能的机理研究	丁蓓 刘加平 慕儒	164
高云母含量砂对水工混凝土抗冻性的影响	钟贻辉 周中贵 冉琛	168
混凝土材料耐久性的研究进展和发展方向	冉琛 钟贻辉	172
大掺量矿物掺和料抑制混凝土碱骨料反应试验研究	赵考生 高怀英 张振 李广智	177
混凝土芯样抗冻性试验研究	李文伟 陈文耀 刘文彦 邹一宝	183
两种抑制碱—硅酸反应有效性评价方法对比试验研究	严章荣 杨彦克 叶跃忠 赵世运 张修立	188

氯离子临界浓度确定与利用钢筋表面氯离子浓度检测值对桥梁结构抗氯离子			
侵蚀耐久寿命的预测	赵尚传	傅智	193
试论钙矾石型硫酸盐侵蚀与混凝土劣化的机理	邓德华	肖佳元	200
水环境对水泥灌浆体腐蚀的研究	赵玉龙		213
水泥用量对混凝土抗压强度和 $Cl^-$ 渗透性的相关性研究	田冠飞	冷发光	219
铁路预应力梁超细粉煤灰高性能混凝土试验研究	李益进	周士琼	225
外加剂对硫铝酸盐水泥混凝土的影响	张德成	肖传明	232
温度对碱—硅酸反应的影响	刘震霞	陈改新	237
纤维增强混凝土路面的抗冻耐磨性研究	刘彦书	吕丽华	243
岩滩水电站大坝及围堰高掺粉煤灰碾压混凝土长龄期性能试验与研究	黄锦添	蓝文坚	247
养护条件对混凝土抗冻性能的影响	陈文耀	李文伟	253
引气剂对混凝土抗裂性能的影响	徐彦	李天德	257
引气剂与水泥混凝土路面的耐磨性	吕丽华	柳俊哲	261
杂散电流对钢筋混凝土的腐蚀破坏作用	丁庆军	耿健	265
主动抑制碱—骨料反应病害研究	徐学东	钟志锦	270

### 耐久性预防与补救

C40 混凝土剪力墙早期裂缝成因及防治措施	韦华	何真	胡曙光	279
KNC 修补混凝土耐久性能的研究	鲁统卫	郭蕾	刘志国	286
采用粉末聚合物改性的混凝土修补砂浆			张量	293
高寒地区预应力后张梁裂缝综合处理材料及技术研究	陈辉	杨彦克	宋登富	300
混合骨料混凝土早期收缩开裂性能的研究	张宝生	孔丽娟	葛勇	307
混凝土结构维修策略研究	王增忠	张新华	施建刚	313
混凝土修补材料粘结性能现场测试方法试验研究	肖辉	惠云玲	郝挺宇	319
江苏省水闸混凝土构件维修加固施工技术			朱炳喜	323
李家峡泄水道底板抗冲磨混凝土修复方案及施工工艺的研究	纪国晋	乔吉庆	辛龙	327
跨海大桥混凝土抗裂技术措施研究			孙家瑛	333
七里集装箱码头混凝土构件受损调查检测及修复	梁昊文	刘普军	蔡伟成	339
水下及潮湿区域的混凝土结构裂缝修补新材料	吕子义	周冰	周锡萑	347
现浇大体积混凝土用永久性钢筋混凝土护筒模板的防裂措施试验研究			李俊毅	351
砖混结构现浇混凝土楼板的裂缝分析	尚尧	白燕荣	吴宜春	356

### 检测与评估

掺矿渣和粉煤灰混凝土的快速抗氯离子性能评价方法研究	梁松	杨医博	莫海鸿	陈尤雯	367
灌浆空洞 X 射线无损检测的试验研究与应用			安琳	郑亚明	373
早期推定海洋环境下混凝土抗氯化物侵蚀能力研究	汪冬冬	胡力平	王成启		382
海洋环境下免振自密实混凝土的力学性能研究	陈正	冯庆革	杨绿峰	程飞	389
含氯盐混凝土亚硝酸盐临界摩尔浓度的探讨	柳俊哲	吕丽华	刘彦书		394
混凝土干燥收缩开裂评价及其试验新方法			赵顺增	刘立	399
混凝土结构钢筋锈蚀初期损伤动力鉴定初探	张喜德	杨涛	李东超	王明星	406

混凝土中氯离子迁移的试验和计算方法综评 .....	史才军 元 强 邓德华 郑克仁	411
碱骨料反应膨胀值测试方法适宜性述评 .....	朱惠英 李 珍	424
结构混凝土内部钢筋锈蚀状态检测方法研究 .....	马立国 徐丽娜	429
水泥基材料早期收缩开裂敏感性的预测与评价体系 .....	陈美祝 周明凯 李北星	432
用交流阻抗谱方法评定集料碱活性初探 .....	杨正宏 尹义林 史美伦	436

## 其 他

低水灰比对硅酸盐水泥水化程度的影响 .....	封孝信 孙晓华	443
高强陶粒结构混凝土的应用优势和潜能 .....	马芸仙	447
高性能膨胀混凝土试验研究 ..... 马德富 于方明 王锦龙 刘 征 刘 魁 刘珊文 张爱民 张广贞		452
混凝土在硫酸钠溶液中的抗冻融干湿循环性能 .....	袁 杰 葛 勇 杨文萃 张宝生 张国平	459
混杂配筋混凝土梁的延性分析 .....	屈文俊 梁志强 黄海群	464
加固型混凝土界面剂的研究与应用 .....	张冬梅 王丽娜 冯 伟 徐 娟	471
锦屏一级水电站石英砂岩碱活性及碱活性抑制试验研究 .....	周麒雯 李光伟	477
聚丙烯纤维聚合物砂浆和混凝土基本性能研究及在铁路桥梁应用探讨 ..... 徐学东 钟志锦 王宏伟 安乐进		485
抗氯盐硅酸盐水泥在洋山港三期工程中的应用研究 .....	王成启 胡力平 时蓓玲 汪冬冬	493
矿物掺和料对除冰盐环境下混凝土的氯离子扩散劣化效应系数的影响 ..... 陈浩宇 李俊毅 陈蔚凡 肖 鹤		498
氯化钠浓度对溶液结冰膨胀率和混凝土溶液吸入量的影响 .....	杨全兵	503
南水北调中线工程(北京段)西四环暗涵喷射混凝土及碱骨料反应试验研究 ..... 周子昌 张大成 石维新 刘卫东 安 森 鲍维猛		508
石灰石粉对水泥胶砂在硫酸盐侵蚀下强度的影响 .....	肖 佳 邓德华 刘赞群 陈 雷	514
现浇混凝土结构早期养护的重要性 .....	程 波 朱耀台	520
新建钢筋混凝土结构的阴极防护 .....	田俊峰 王胜年 阿迪夫·奇亚塔尼	525
珍珠岩掺和料对水泥石微孔结构的影响 .....	喻乐华 欧 辉 段庆普 陈梦成	533



# 综 述





# 中国高性能混凝土及混凝土耐久性的研究和应用

姚燕\* 王玲 吴浩

中国建筑材料科学研究总院 北京 100024

**【摘要】** 本文介绍了 2000 年以来,中国在高性能混凝土和混凝土耐久性方面研究和工程应用的进展。内容涉及混凝土早期收缩开裂研究、自密实高性能混凝土规程编制、工程中碱—集料反应和抗钢筋锈蚀性能的预防、中等强度等级高性能混凝土和新型胶凝材料的研究和应用、化学外加剂和高性能预制混凝土构件的快速发展等方面,在此基础上还提出了混凝土耐久性研究的方向。

**【关键词】** 高性能混凝土 耐久性

## 1 前言

混凝土的耐久性是指混凝土结构在自然环境、使用环境及材料内部因素作用下保持其工作能力的性能。最常见的劣化过程有钢筋锈蚀、冻融循环、硫酸盐侵蚀和碱—集料反应。混凝土耐久性与国民经济、社会安定、环境保护、可持续发展等密切相关,是混凝土材料科学的重大研究课题,是工程界关注的重大科技问题。

混凝土用于工程建设已经有近 160 年的历史,国外从 20 世纪 30 年代开始重视和研究混凝土的耐久性,认为混凝土的耐久性与其强度同等重要。中国则是从 20 世纪 80 年代开始对混凝土的耐久性进行系统的研究。从“七五”计划开始,国家有关部门逐步加大了对混凝土耐久性研究的支持力度,先后设立和资助了多项科技计划,特别是由中国建筑材料科学研究总院、中国水利水电科学研究院、南京化工大学等多家科研单位、高等院校共同承担的国家“九五”重点科技攻关项目“重点工程混凝土安全性的研究”围绕混凝土耐久性研究取得了的大量科研成果,整体推进了中国混凝土耐久性研究的进程。<sup>[1]</sup>

在这随后的 6 年里,开展高性能混凝土的系统研究,全国混凝土界对耐久性问题投入了越来越多的关注,高性能混凝土的研究得到推广和普及,并在多个重点工程中进行实践。以下从几个方面介绍近 6 年来中国在混凝土耐久性和高性能混凝土研究和应用方面取得的突出进展。

## 2 高性能混凝土及耐久性研究的新进展

### 2.1 混凝土早期收缩开裂问题成为高性能混凝土研究的焦点之一

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。高强混凝土是目前比较热门的混凝土研究领域。配制时通常都使用较高的胶凝材料总量,并且掺加有大量磨细矿物掺和料,以达到高强度的目的,这些措施也引起了较大的混凝土自收缩<sup>[2]</sup>。从混凝土新拌开始一直持续到混凝土硬化后的较长一段时间内都有可能发生收缩,工程上表现为混凝土的开裂趋势增加,收缩开裂问

\* 姚燕,教授级高工,北京朝阳区管庄东里 1 号,电话:010-51167111。

题成为高性能混凝土推广应用的一个障碍。

近年来,混凝土研究的重点是高性能混凝土的早期收缩的机理、影响因素和改善措施。由大连理工大学和中国建筑材料科学研究总院共同承担的国家自然科学基金重点项目“混凝土结构裂缝的形成与发展机理及控制技术研究”是近年来针对混凝土早期收缩开裂问题开展系统研究的项目之一<sup>[3]</sup>,该项目从材料和结构两个不同角度深入研究了影响混凝土早期收缩开裂的因素,在对裂缝形成与发展机理深入了解的基础上,给出评价混凝土结构裂缝的断裂准则和预测预报方法,提出结构裂缝诊断、控制与修复的新方法。项目研究内容涉及混凝土集料和胶凝材料体系对混凝土体积变化和收缩裂缝的影响机理;在复杂应力条件下混凝土裂缝形成和发展的机理,裂缝发展的基本力学特征与控制参数,不同几何形状试件中裂缝尖端弱化奇异场的表征因子及其双 K 断裂参数,钢筋的桥联作用及钢筋混凝土的断裂特征,建立裂缝生成及扩展的断裂判据及使用条件下裂缝的预测预报方法;研制裂缝监测光纤光栅网络,实时监测混凝土裂缝的产生,确定裂缝位置,探索用混凝土电磁感应法对裂缝特性及危害程度进行诊断的新方法。项目还采用一种新型纤维编织网增强高性能混凝土,对已开裂部分局部加强,探索出对结构裂缝无害性分散化和对裂缝控制的有效方法;研制纤维编织网喷射 ECC 复合薄层,发展对已裂结构有效修复的新途径。该项研究工作有重要的学术意义和普遍的工程应用价值。

高性能混凝土早期收缩开裂的测量一直是困扰着国内外混凝土学术界的难点,我国早期收缩开裂研究的另一亮点是测试装置的创新。以哈尔滨工业大学土木学院巴恒静教授研制成功的感应式混凝土早期收缩智能测量实验装置和约束状态下混凝土早期开裂应力综合智能测定实验装置为代表<sup>[4]</sup>。感应式混凝土早期收缩智能测量实验装置,实现了非接触测量、自动化控制、数据采集等功能,能够测量混凝土的早期收缩和长期收缩,测量精度高,并消除了人为因素造成的测量误差。约束状态下混凝土早期开裂应力综合智能测定实验装置在国内外首次实现了高性能混凝土早期收缩应力、徐变的测量,既能定性又能定量地测量出早期收缩应力及开裂时间等参数,克服了某些设备只能定性测试到早期开裂趋势,不能测到具体的混凝土性能参数的缺点。

## 2.2 制定了自密实高性能混凝土规程

自密实混凝土(Self-compacting Concrete, SCC)又称自流平混凝土、免振捣混凝土,可用于预制混凝土工程或现浇混凝土工程,是一种在浇注时不需要振捣,仅通过自重即能充满配筋密集的模板,并且保持良好匀质性的混凝土。SCC 被认为是几十年来结构工程最具革命性的进步,易于浇注,提高劳动生产率,减少噪音对环境的污染;减小混凝土断面,达到更好的表面装饰效果;满足特殊施工需要,对于钢筋密集、截面复杂而间隙过于狭窄等情况。SCC 技术最初从 20 世纪 80 年代起在日本获得发展,现在,已经引起了整个世界的关注,我国在自密实混凝土方面也开展了较多的研究<sup>[1~3]</sup>,近几年在应用技术规程编制方面取得了突出成果。

自密实混凝土和常用混凝土有所不同,因此在材料选择、配合比设计和施工具体措施及工程质量评定等方面都有特殊的要求。在大量科研和工程应用的基础上,结合欧洲自密实高性能混凝土的成果,中南大学组织编著了中国土木工程学会标准 CCES 02—2004《自密实混凝土设计与施工指南》,2005 年 5 月还组织召开了第一届自密实混凝土技术国际会议;福州大学主编了福建省工程建设地方标准 DBJ 13—55—2004《自密实高性能混凝土技术规程》;中国建筑标准设计研究院、清华大学主编了中国工程建设标准化协会标准 CECS\*\*：2006《自密实混凝土应用技术规程》。这一系列规程,有助于自密实高性能混凝土工程材料的选择、配合比设计、生产和施工、质量检验与验收,对于保证自密实混凝土的质量起到重要的指导作用。

## 2.3 碱—集料反应预防和抗钢筋锈蚀性能的控制工程中得到充分重视

碱—集料反应指混凝土中的碱与集料中的活性组分之间发生的破坏性膨胀反应,是影响混凝土

安全性的主要因素之一。在唐明述院士的呼吁下,研究单位和工程部门开始重视混凝土的碱—集料反应的预防。钢筋锈蚀是引起钢筋混凝土结构破坏最主要的病害之一,特别是在恶劣的海洋环境和冬天撒除冰盐的盐污染环境,更会严重影响混凝土结构的耐久性和安全性,造成巨大损失。近期的大型工程建设在考虑混凝土耐久性问题时都把预防碱—集料反应和钢筋锈蚀问题放在非常重要的位置上<sup>[4, 5]</sup>。在选择混凝土材料时,采取下列具体措施来保证这两个方面的耐久性:准确判定集料碱活性、选用低碱水泥、控制混凝土总碱含量、采用矿物外加剂抑制集料碱活性、控制混凝土各组分中的氯离子含量。北京市要求所有的商品混凝土配合比设计均需要提供混凝土碱含量和氯离子含量计算书。在混凝土结构设计时,采取增加混凝土保护层厚度,表面涂刷等技术措施减少环境对混凝土的侵蚀。

## 2.4 中等强度等级高性能混凝土的研究和应用

一般认为高性能混凝土的抗压强度应 $\geq 50$  MPa。已故的吴中伟院士结合中国水泥和混凝土强度的实际情况,创新性地提出中等强度等级高性能混凝土的理念,这一主张具有重大的技术经济意义。中国建筑材料科学研究总院在2001年将高性能混凝土的研究范围由高强度高性能混凝土扩大到中等强度等级高性能混凝土<sup>[6]</sup>,针对C30~C50强度范围内的高性能混凝土进行了系统的研究,主要选用磨细矿渣和粉煤灰两种工业废渣作为辅助性胶凝材料,通过降低水泥用量,增加胶凝材料总量等措施来保障混凝土的耐久性能,又使混凝土的强度不过分超过设计强度。结果表明:中等强度等级的C30~C50混凝土可以通过材料优选、混凝土配合比设计、严格的施工管理达到高性能化,不仅材料成本没有大的增加,而且从延长混凝土使用寿命,减少工程维修费用的角度来说意义更为重大。在北京地区,C30~C50混凝土产量占到70%以上,而C50以上的混凝土只占到5%左右,所以大型商品混凝土搅拌站针对中等强度的混凝土,采用粉煤灰、矿渣复合掺加的技术路线,辅以优质混凝土外加剂实现了中等强度等级混凝土的高性能化,取得了较好的技术经济效益。

## 2.5 新型胶凝材料的研究和开发

2002年建材行业实现国家973项目零的突破,由中国建筑材料科学研究总院组织申报的《高性能水泥制备和应用的基础研究》项目被科技部批准,并列于《国家重点基础研究发展规划》(国家973项目)“十五”第一批项目计划。项目研究目标是建立具有高的强度、优异的耐久性、良好的环境协调性等特征的高性能水泥的科学理论,为提高我国水泥的综合性能提供理论依据<sup>[7]</sup>。该项目所研究的高性能水泥,是高胶凝性水泥熟料和高度激活的、具有性能调节作用的、辅助性胶凝组分构成新的高性能低钙水泥材料体系。这一体系在大幅度提高水泥性能的同时,增加工业废渣的掺量;以这一水泥为胶结组分的水泥基材料水硬化体具有致密的和稳定的亚微观结构,从而赋予其优异的耐久性能。项目专题研究了高性能水泥和水泥基材料的稳定性及其在抗碱集料反应、化学介质和冻融循环及协同作用下的环境行为与失效机理。2006年,该项目已经成功地在工业回转窑上稳定地烧出 $C_3S$ 含量高达70%的高胶凝性水泥熟料,并且在煤矸石活化技术取得突破,低钙复合体系优良的耐久性能也得到验证。

## 2.6 高性能混凝土用化学外加剂快速发展

混凝土化学外加剂和矿物外加剂是配制高性能混凝土必不可少的原材料。我国自20世纪50年代开始研制和少量使用混凝土化学外加剂,在1982年和1986年分别成立了中国混凝土外加剂学会和中国混凝土外加剂协会后,行业整体进步很快,基本满足了混凝土技术发展的需要。近年来,在高性能混凝土快速发展的带动下,合成高效减水剂和复合外加剂得到了快速发展,也促进了各种外加剂的升级换代(见表1)。<sup>[8]</sup>

表 1 几种混凝土外加剂的产量(万吨)和产品发展趋势

各种外加剂	2005年产量(万吨)	产品发展趋势
高效减水剂	111	从原来较为单一的萘系产品向氨基磺酸盐高效减水剂、新型三聚氰胺高效减水剂、脂肪族高效减水剂、聚羧酸盐高效减水剂等多品种共存发展
膨胀剂	100	由高碱高掺(15%~20%)、中碱中掺(10%~12%)逐步向低碱低掺(6%~8%)发展
速凝剂	10	由高碱固体速凝剂向无碱液体速凝剂方向发展
引气剂	0.8	由传统松香皂型向改性松香皂型和三萜皂甙类等新型引气剂发展

以聚羧酸盐为代表的新型高效减水剂是合成高效减水剂的发展方向,其生产工艺比萘系简单,投资比萘系少,在性能上又具有明显的特点,具有较好的技术经济效益。在工业萘供应不稳定、持续涨价的影响下,新型合成外加剂在原料供应、价位上就有了竞争优势,因此也有了较好的发展空间。我国现有近 20 家工厂有生产聚羧酸盐高效减水剂的能力,2005 年聚羧酸盐外加剂的总产量约为 6 万吨,其中,上海建筑科学研究院年产量在 7 000 吨左右,并在多个重点工程中应用。我国聚羧酸盐高效减水剂生产技术与国外产品还有差距,关键国外厂家的基础化工比较好,分子量分布精确,我国的聚羧酸盐高效减水剂还需要解决好吸附、消泡等问题。

通过各种不同功能组分的恰当复配,可以得到综合性能优异的复合型混凝土外加剂,满足工程混凝土多种要求。由于我国水泥品种多、厂家多,水泥与外加剂之间存在着严重的适应性问题,因此外加剂厂家在产品销售时都很注意通过大量试验确定复合外加剂的组成,解决适应性问题。

## 2.7 高性能预制混凝土构件快速发展

从 1956 年投建了我国第一个大型构件企业(为“一五”期间 156 个重点建设项目之一)北京市第一建筑构件厂以来,中国的预制混凝土行业发展起伏不一,从主要产品类型上看,20 世纪 70 年代受东欧各国“房屋工厂”的启发,构件主要是全装配大板,80 年代巅峰期构件主要是三板一梁(预应力大型屋面板、长短向板、吊车梁)。

随着近年来建筑技术和高性能混凝土的发展,我国的预制混凝土构件发生了巨大变化。现在预应力高强混凝土管桩(PHC 桩)、大口径预应力钢筒混凝土管(PCCP 管)、方桩、板梁、管片、排水管、地铁隧道盾构管片成为预制构件家族的主要成员。为南水北调引水工程而设计生产的直径 4 米的 PCCP 管(自重近 50 吨)是目前国内最大直径的 PCCP 管材,刷新了我国大口径 PCCP 管的生产记录,填补了国内管材品种的一项空白,北京河山引水管业公司等单位经过系统研究,成功生产了高耐久性的 PCCP 管用于南水北调及支配线引水工程。PHC 桩是一种新型建材,承载力高,抗冲击抗弯性能好,对地质结构的适应性较强,在我国江浙、广东等沿海软土地基城市高层建筑中都是不可缺少的。

无渣轨道就是在路基上不再铺设石子,这样就避免了可能存在的路基下沉问题,保证铁路线长时间安全运行。随着我国高速铁路网的大规模建设,无渣轨道成为铁路轨道建设新形式,无渣轨道用新型轨道板、新型轨枕等预制构件的材料选择、结构与性能、应用技术成为高性能预制混凝土构件领域新的研究内容。

当今中国的混凝土预制构件都朝着大型化、高强、表面无裂纹、加快模具周转方向发展,在水泥和外加剂品种的选择、水泥和外加剂适应性问题上都需要进行大量的科研实验工作。

## 3 百年寿命高性能混凝土工程

近年颁布执行的 GB50010—2002《混凝土结构设计规范》对混凝土结构耐久性设计提出了基本规定,混凝土结构耐久性的损伤主要是结构在使用期间环境有害介质的物理化学侵蚀损害,随着环境条件

与设计使用年限不同,其可能出现的侵蚀丧害程度也不同,为此,耐久性设计应按照环境类别和设计使用年限进行。按照规范,设计使用寿命年限分为 50 年和 100 年 2 个耐久性预期目标,对于重大、重要工程应该按照 100 年寿命来设计混凝土。

几年来,我国已有若干工程采用设计寿命为 100 年,工程中结合环境条件和特点,采取专门有效措施。比较著名的百年工程有:三峡大坝、东海大桥、南京地铁 1 号线、崇明越江通道北港桥梁、重庆朝天门大桥空心桥墩、杭州湾大桥等。

举世瞩目的三峡大坝高性能混凝土在施工中有着严格的要求。三峡工程大坝为混凝土重力坝,最大坝高 181 m,主体工程的混凝土总量达 2 800 万  $m^3$ ,其中大坝混凝土约 2 000 万  $m^3$ 。三峡工程高性能大坝混凝土的要求是使混凝土具有较高的耐久性、抗裂性、低热性、体积稳定性、良好工作性和经济合理性。其配合比设计思想及采取的技术措施主要是通过采用优质缓凝高效减水剂、引气剂、I 级粉煤灰、具有微膨胀性质的中热水泥 ( $MgO$  含量 3.5%~5.0% 的水泥)、限制原材料及混凝土中总碱含量、增大粉煤灰掺量等综合措施和技术路线,成功地把四级配混凝土用水量由 110  $kg/m^3$  降低到 90  $kg/m^3$  以下,降低了混凝土绝热温升和干缩,提高了混凝土的抗裂性和施工和易性;外部混凝土抗冻性可达 D300;使三峡工程大坝混凝土配合比实现了高性能的目标。<sup>[9]</sup>

针对大体积施工的特点,在混凝土温度控制上采取了多种技术措施,从混凝土配合比设计、外加剂选择等方面,尽量优化设计,使用骨料粒径较大的级配,以减少胶凝材料用量和水化热。采取预冷混凝土方式降低机口温度、入仓温度,确保浇筑温度,并结合后冷(通常温水或制冷水)措施控制块体实际最高温度不超过设计允许值(见表 2)。

表 2 三峡工程高温季节浇筑混凝土温度控制

混凝土种类	浇筑机口温度	浇筑温度
主体建筑物基础约束区或重要结构部位	7°C	在 14°C 之内
一般部位	14°C	在 18°C 以内

## 4 混凝土耐久性研究的方向

混凝土耐久性已成为中国混凝土追寻的目标和技术热点。在混凝土耐久性和高性能混凝土研究和应用还有许多问题亟待去解决,以下三个方面应该成为今后研究的重点:

### 4.1 扩大高性能混凝土在铁路、公路等行业的应用

各行业所用的混凝土具有不同的特点,铁路和公路混凝土用量相当可观,在其中推广应用高性能混凝土技术具有良好的社会效益。唐明述院士就认为水泥路面成本为沥青路面的 1/10,应该通过大量推广高性能水泥路面,将其寿命提高 5~6 倍,可以节约资源和能源。在他的倡议下,中国建筑材料科学研究总院已经组织申报了“十一五”科技攻关项目《新型水泥混凝土路面的研究和应用》,项目的研究目标是针对目前水泥混凝土路面存在的承载力不足、行车舒适性差两大问题,通过研究开发高性能水泥混凝土路面、防滑降噪柔韧型水泥混凝土路面、轻集料混凝土在桥面上的铺装技术,在实现大量利用工业废弃物的同时,开发出抗弯拉强度大于 7~8 MPa(韧性保持不变)、高耐磨性能、具有防滑降噪功能、使用年限超过 30 年的路面材料;解决钢箱梁桥面铺装材料“推移”和“拥包”难题。

### 4.2 建立混凝土耐久性数据库

中国幅员辽阔,气候差异很大,混凝土耐久性的要求也很不相同。协调、联合相关单位建立起全国典型地区混凝土耐久性资料汇集和连续检测网络对研究混凝土耐久性是非常重要的。

### 4.3 耐久性定量设计

耐久性定量设计就是按工程要求设计混凝土结构的使用寿命和耐久性,是耐久性研究的发展趋势,已经成为当前最活跃的混凝土研究方向之一。现有的使用寿命估算评价体系包括:基于可靠度的混凝土材料寿命的损伤评价方法和基于钢筋锈蚀原理的结构寿命评价方法,目前正在研究发展的有碳化、碱集料反应、氯离子扩散理论模型,今后应该进一步研究破坏机理,给出耐久性使用寿命。

#### 参 考 文 献

- [1] 王媛利,姚燕. 重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2001
- [2] 李家和,刘铁军,欧进萍. 高强与高性能混凝土及其应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2004, 77~82
- [3] 徐世焱. 混凝土结构裂缝的形成与发展机理及控制技术研究. 国家自然科学基金重点项目: 大连理工大学, 项目编号: 50438010
- [4] 刘瑞峰. 土木学院教学实验装置填补国内外空白. 哈尔滨工业大学学报, 2005
- [5] 袁勇,柳献. 高强与高性能混凝土及其应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2004, 94~99
- [6] 丁一宁,董香军,王岳华. 混杂纤维自密实混凝土的强度和抗弯韧性. 建筑材料学报, 2005, 6 (3): 294~298
- [7] 丁一宁,王岳华,董香军,等. 混凝土外加剂及其应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2004, 362~366
- [8] 秦鸿根,孙伟,朱德玉,等. 高强与高性能混凝土及其应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2004, 145~153
- [9] 刘连新,张伟勤,代大虎. 高强与高性能混凝土及其应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2004, 163~170
- [10] 姚燕. 新型高性能混凝土耐久性的研究与工程应用. 北京: 中国建材工业出版社, 2004
- [11] 陈益民,许仲梓. 高性能水泥基础研究. 北京: 中国纺织出版社, 2004
- [12] 田培,姚燕,王玲,等. 混凝土外加剂及其应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2004, 28~31



# 腐蚀与混凝土耐久性预测的发展和难点讨论

洪乃丰

中冶集团建筑研究总院 北京 100088

**【摘要】** 当今世界建筑工程，仍以钢筋混凝土结构为主体。混凝土的耐久性已成为重大课题。在使用环境中，混凝土自身的腐蚀、特别是混凝土中钢筋腐蚀，已是影响耐久性的主要因素。本文重点讨论腐蚀与耐久性关系中，相关寿命预测方面的进展与难点问题。

**【关键词】** 腐蚀 耐久性 寿命预测 经济分析

## 1 引言

从 1987 年世界第一次混凝土耐久性会议召开以来，到 2003 年第六次国际混凝土耐久性会议在希腊召开，数年来，混凝土耐久性问题一直是世界关注的焦点之一。这是一个带有普遍性、实际性问题，与国民经济和可持续发展紧密相连。许多国家投入大量人力、物力，以期解决这个世界性问题与难题，同时也取得长足的进展。

我国正在进行空前规模的土木工程建设，混凝土用量连续多年来处于世界第一位，混凝土的耐久性是我国面临的重大而迫切的问题之一；同时，我国大量已有的钢筋混凝土结构，达不到设计寿命、过早破坏的问题也凸现出来。这是需要我们认真对待的。

混凝土耐久性研究，涉及到广泛的技术、学术领域，其中，相关寿命预测的课题成为国内外研究的热点。寿命预测的必要性与重要性是不言而喻的。新建工程的设计阶段，就需要以寿命预测作基础，这种预测的准确度越高，该工程的寿命保障的可靠性就越大（反之也成）。

而对于已有工程，何时需要修复、修复后的耐久性如何等，也是需要预测的。

目前，世界上公布的混凝土耐久性寿命预测“模型”已经有不少，更多的研究正在进行中。研究最多的“模型”，是与腐蚀相关，特别是有关钢筋腐蚀与混凝土耐久性关系的“模型”研究，是最普遍和深入的。目前，进入工程使用的“模型”，多以氯离子引起钢筋腐蚀为出发点。其中原因，正如梅塔教授（V. M. Malhotra）强调的那样，钢筋腐蚀是排名第一位的影响混凝土耐久性的因素。当然，其他因素（冻融、碱集料、硫酸盐等）也在研究之中。人们的研究已经由单一因素向多因素发展，但其中的复杂性和难点是不能回避的。即使是单一因素（如氯离子），仍然有许多问题需要探讨。正如一些学者指出的，目前，“模型”研究虽然取得了长足进展，但从工程使用的角度看，还仍然是“初步的”。各类“模型”的可靠性有很多差别。关键是大量基础数据的采集与积累。仅有少量试验室数据或靠“假设”所建立起来的“模型”，是很少有使用价值的。以下，以氯盐引起钢筋腐蚀的相关问题，进行讨论与探讨。

## 2 氯盐引起钢筋腐蚀与混凝土的耐久性

统计数据表明，美国近期每年的腐蚀损失达 2 760 亿美元，而其中基础设施、公共设施的腐蚀损失占总损失的 52% ([http://www.exponent.com/practices/materials/corrosion\\_](http://www.exponent.com/practices/materials/corrosion_))，这些设施大多以钢筋混凝土为主体。据悉，美国因钢筋腐蚀的成本（包括修复）每年超过 1 500 亿美元。钢筋腐蚀是结构破坏的