

文章编号: 1672 3031(2009) 02 0120 06

混凝土耐久性的研究、应用和发展趋势

陈改新

(中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038)

摘要: 实现混凝土工程的高耐久和长寿命是效益巨大的节能减排和可持续发展之举, 混凝土的耐久性成为影响混凝土技术未来发展的关键技术已成为共识。本文在钢筋锈蚀、冻融作用、环境水和盐类侵蚀及碱骨料反应等4个方面总结了混凝土耐久性研究现状, 综述了近半个世纪以来部级规范和技术规定, 列举了混凝土耐久性研究成果在长江三峡、青藏铁路、杭州湾跨海大桥和南水北调中线等工程中的应用, 还分析了混凝土耐久性整体理论模型和混凝土结构寿命周期评定两个方面的新认识和新发展。

关键词: 混凝土; 耐久性; 定量分析; 预测模型

中图分类号: TV431

文献标识码: A

1 研究概述

水泥混凝土以其原材料易得、易浇筑成型、适应性强、性价比高、综合能耗低等优点而成为当今世界上应用最广泛、用量最大的建筑材料。尽管现代材料科学发展日新月异, 但仍然没有科学家能预言可替代水泥混凝土的建筑材料新品种。从20世纪30—40年代开始, 西方国家出于战后重建、工业化、城市化以及能源开发的需要, 用混凝土修建了大量的基础设施, 混凝土用量持续增长。之后, 发展中国家经济的强劲增长进一步助推了混凝土用量的迅猛增长^[1]。1987年, 美国国家材料顾问委员会提交的调查报告使混凝土结构的耐久性在美国乃至世界范围内引起轰动。该报告指出, 大约25.3万座混凝土桥梁的桥面板, 其中部分仅使用不到20年就已经发生不同程度地损坏, 使用年限远低于40~50年的设计寿命^[2]。是混凝土不耐久, 还是对混凝土用于严酷腐蚀环境的认识和技术储备不足, 笔者坚信是后者。大量混凝土结构过早出现严重劣化引起了世界范围内对混凝土耐久性的高度关注, 不仅是因为需要花费巨资修补加固甚至重建, 还在于当今世界人口膨胀、能源供应紧张、环境污染、温室效应导致的气候变暖和生态恶化对可持续发展的迫切需要。混凝土耐久性成为关注焦点促进了世界范围内混凝土理论和技术的快速发展和进步, “混凝土耐久性的整体论模型”、“混凝土结构的寿命预测”、“混凝土结构寿命周期评价(影响评价、成本分析)”等新认识、新方法的出现, 将会为克服混凝土结构在服役过程中的过早劣化问题、实现混凝土技术的可持续发展提供强有力支撑。

我国于20世纪80年代末开始注意混凝土耐久性问题。1992年, 中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土分会成立了混凝土耐久性专业委员会, 其推动了混凝土耐久性的研究、应用、技术交流和普及, 至2008年, 共举办过7次全国性的学术交流会和2次专题讨论会。2000年1月, 国务院颁布的第279号令《建设工程质量管理条例》第二十一条明确规定:“设计文件应当符合国家规定的设计深度要求, 注明工程合理使用年限”, 同年7月建设部146号文又下达了“关于建设单位执行建设工程合理使用年限问题的通知”。这两个文件从国家和政府主管部门层面对工程建管、设计提出了明确要求, 引起了土木工程界的高度重视, 各部委都加大了对耐久性研究的支持力度, 并纷纷制定具有行业特点的混凝土耐久性规范和技术规定。近年来召开的混凝土材料科学和技术的学术会议, 混凝土耐久性都是重点议题。

收稿日期: 2009-04-10

基金项目: 水利部公益性行业科研专项项目(200701041)

作者简介: 陈改新(1966-), 男, 河南宜阳人, 教授级高级工程师, 主要从事水工混凝土材料试验及应用研究。

E-mail: chengx@iwhr.com

2001年中国工程院土木水利与建筑工程学部发起混凝土结构耐久性科技论坛,到2006年已连续举办了5届。可以说,重视混凝土耐久性已成为共识,渗透到工程建设的各个阶段和层次,这对我国混凝土耐久性的研究和应用及混凝土技术的可持续发展而言是迈出的坚实而有力的一步。

2 混凝土耐久性研究现状

混凝土的耐久性贯穿混凝土结构设计、材料选择、施工和运行管理的全过程。研究混凝土的耐久性不能脱离结构型式、应力状态、环境条件(包括大环境和局部环境)。根据研究对象可分为材料层次、构件层次和结构层次。材料层次的研究重点是劣化机理、劣化技术措施、评定标准和劣化状态识别等;结构(构件)层次的研究更注重劣化对结构(构件)层次承载力和安全性的影响评价(健康诊断)、极限状态判断、使用寿命预测、修复补救措施等。

根据造成混凝土劣化的主导因素和机理,混凝土耐久性问题研究主要集中在以下4个方面:(1)钢筋锈蚀:氯盐腐蚀(海洋及近海环境、除冰盐环境、盐湖环境、海砂及外加剂),保护层中性化(碳化、大气污染及酸雨、酸性介质),杂散电流腐蚀;(2)冻融作用:淡水冻融,盐水冻融(海水、盐湖等),盐冻(除冰盐);(3)环境水和盐类侵蚀:硫酸盐(镁盐)侵蚀,溶出性侵蚀(渗透溶蚀、碳酸侵蚀),土壤腐蚀(中碱性土、酸性土、内陆盐土、海滨盐土),盐卤腐蚀(海洋及近海、盐湖),泛酸性侵蚀($\text{pH} \leq 4$ 的环境水、污水);(4)碱骨料反应:碱硅酸反应,碱碳酸反应。

回顾混凝土耐久性的研究历史可以发现,劣化形式的研究都遵循着相同的轨迹,即劣化机理研究、提高材料耐久性的措施研究、耐久性测试方法和评定标准,劣化状态对材料性能的影响,然后过渡到结构承载力和安全性的影响评价、极限状态判断、使用寿命预测、修复补救措施。世界范围内的大量文献资料表明,在材料层次上对各种破坏形式的劣化机理和对策、耐久性测试和评定标准、劣化状态识别等方面取得了丰富成熟的定性分析成果,但在劣化状态对材料性能的影响方面的研究不足,将劣化机理和性能衰变规律由定性分析转变成定量分析存在很大困难;大多数基于材料层次研究成果提出的材料耐久性测试方法和评定标准不适合用作混凝土结构工程的使用寿命预测和安全性评价,造成了当前混凝土耐久性研究在材料层次和结构层次的脱节。

以混凝土的冻融耐久性为例。1945年, Powers 提出了混凝土冻融破坏的毛细孔水结冰静水压假说,之后又与 Helmut 一起提出了渗透压假说;1975年, Fagerlund 提出了混凝土抗冻性的临界水饱和度理论,很好地解释了混凝土的冻融破坏现象^[3]。降低混凝土水胶比提高强度和密实性,掺加引气剂适当引气,降低饱水程度、释放结冰水压力,选用低吸水性骨料成为提高和保证混凝土抗冻性的重要技术措施,制定的检测混凝土抗冻耐久性的试验方法、评定标准(耐久性指数,抗冻标号)和技术要求也成为规范性文件,在保障混凝土结构在冻融环境中的耐久性方面发挥了巨大作用。但耐久性指数、抗冻标号很难直接用于定量预测混凝土在特定环境中的使用寿命,也很难用于已建工程的耐久性和安全性评价。原因在于耐久性指数、抗冻标号仅是评定混凝土配合比是否耐久的指标,主要用于优选混凝土配合比和施工质量控制,其中不包含混凝土随冻融循环作用而出现损伤积累,进而发生材料性能退化的信息。文献[4]曾以动弹性能量损失作为损伤参数开展了室内外冻融作用的对比关系和冻融作用下混凝土力学性能退化规律的研究,初步探讨了在冻融环境中混凝土的耐久性量化设计和寿命预测。

由碳化和氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀导致混凝土结构破坏而造成的经济损失和危害名列首位,针对钢筋锈蚀进行耐久性定量分析和寿命预测也是相对比较系统和全面的。对碳化引起的钢筋锈蚀破坏,现在已经能够用数学模型比较准确地评估和预测。对氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀破坏,尽管全世界范围内基于 Fick 第二定律描述氯离子在混凝土中的扩散过程建立了许多模型,但模型中关键参数取值的科学性以及模型计算结果的可靠性尚不能取得共识。理论上讲,只要知道混凝土表面的氯离子浓度、氯离子在混凝土中的扩散系数、钢筋混凝土的保护层厚度,再确定一个使钢筋脱钝的临界氯离子浓度的情况下,就可以计算出钢筋开始锈蚀的时间,亦即可以推算和预知混凝土结构的使用寿命,但工程的实际情况并非如此简单。首先,氯离子扩散系数受温度、湿度的影响很大,而且初期随着混凝土龄期增长

和水泥水化程度的提高逐渐减小,后期由于混凝土在各种因素作用下(荷载、温度应力、干湿循环等)受到损伤产生可见与不可见裂缝而迅速增大,准确表达氯离子扩散系数变化过程非常困难;其次,钢筋脱钝“临界氯离子浓度”的确定方法和取值还缺乏共识,不同研究者给出的临界值可能相差数倍,这可能与具体工程混凝土的材料特性、钢筋特性、混凝土结构所处地域的温湿度和水环境等多方面因素有关。因此,要想比较合理地预测混凝土结构的“使用寿命”还需做大量深入细致的理论和试验研究工作,获取足够的试验室和现场数据积累与验证^[5]。

有关碱集料反应和硫酸盐侵蚀方面的使用寿命预测模型也已开始研究,但和钢筋锈蚀相比,公开发表的文献资料较少。目前,世界各国在工程设计和施工中对混凝土工程耐久性的要求和控制仍然采用基于材料层次研究成果和工程实践经验积累形成的“deem to safety”定性经验方法,对于重要的混凝土结构工程已开始使用“预测模型”进行辅助性的定量分析校核。混凝土耐久性研究从定性描述逐步转向“模型”定量或半定量分析已成为主要方向和热点^[6]。基于“deem to safety”定性经验、模型定量分析和计算机数据库集成的混凝土耐久性专家系统应该有较好的应用前景。

3 成果与应用

我国对混凝土耐久性的研究起步于20世纪50年代初的治淮工程(修建梅山、佛子岭水库大坝)。1962年,原水电部颁发的“水工混凝土试验规程”中就列入了碱活性骨料鉴定方法、抗冻、抗渗等耐久性试验方法。60年代初进行了海港码头混凝土破坏调查和钢筋锈蚀研究,以及青藏线混凝土耐久性野外试验。到90年代,混凝土的耐久性问题才真正受到政府主管部门的高度重视。2000年国务院颁布的第279号令《建设工程质量管理条例》促使各行业部委纷纷出台了针对行业特点的混凝土耐久性规范和技术规定。

已经发布和正在编制的规范和技术规定如下:水利部 SL211-2006 水工建筑物抗冰冻设计规范;交通部 JTJ275-2000 海港工程混凝土结构防腐技术规范;中国土木工程学会 CCES01-2004 混凝土结构耐久性与施工指南;铁道部 铁建设[2005]157号 铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定;交通部 JTG/T B07-01-2006 公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范;建设部 GB/T 混凝土结构耐久性设计规范;水利部 SL***-*** 水利工程合理使用年限规定(在编);中国电力企业联合会 DE***-*** 水工混凝土耐久性技术规范(在编)

近10余年来,我国在若干重大工程的建设中已经充分贯彻了“混凝土耐久性设计”理念,并提升到了“强度设计与耐久性设计并重,强度服从耐久性”的认识高度。

(1) 长江三峡水利枢纽工程是世界上最大的水利水电工程,具有防洪、发电、航运、供水、养殖等综合功能,对长江和长江流域的自然生态、人文环境、经济发展的影响巨大。水库总库容393亿 m^3 ,电站总装机容量22400MW,年均发电846.8亿 $kW\cdot h$,拦河坝最大坝高183m,混凝土方量2700万 m^3 。1993年开工后,各方专家对三峡工程混凝土大坝的耐久性和工程安全运行年限进行了广泛的讨论,提出了“三峡大坝混凝土耐久性寿命500年的设计构想”。“确保三峡工程一流质量的建议案”1997年曾被列为全国政协八届五次会议的“一号提案”,引起中央和国家领导人的高度重视,特别召开了关于三峡大坝混凝土耐久性的高层决策会议。在这个会议上,明确提出了三峡大坝的设计思想要突出耐久性设计的概念,同时明确了三峡大坝要采用微膨胀型低碱中热硅酸盐水泥,掺用优质引气剂和优质高效减水剂,确定必须掺用I级粉煤灰,尽可能降低用水量,严格控制水胶比,并明确三峡大坝外部混凝土,特别是水位变化区混凝土的抗冻等级要达到F250。为预防混凝土的碱活性骨料反应,采用人工制备的花岗岩骨料,并限定水泥中的含碱量 $\leq 0.5\%$ 以及混凝土的总碱含量 $\leq 2.5kg/m^3$,在施工过程中执行严格的温控防裂措施^[7]。防裂关键部位混凝土出机口温度控制在 $7^\circ C$,浇筑温度 $\leq 12^\circ C \sim 14^\circ C$ 。三峡工程1994年开始的大坝混凝土配合比优化设计理念就符合高性能混凝土思想,三峡工程采取的提高混凝土耐久性措施与2000年P. Mehta发表的论文Monolith Foundation: Built to last a “1000 Years”有异曲同工之妙^[8]。

(2) 穿越“世界屋脊”的青藏铁路格拉段全长1180多公里,其中海拔高度大于4000m的路段约965km,穿越多年冻土地带的路段约550km。除格尔木和拉萨外,沿线年平均气温为 $-2^\circ C \sim -6^\circ C$,极端

最高气温为 25℃, 极端最低气温为 -45℃。沿线气候干燥, 干湿交替频繁, 年日正负温天数高达 180d 左右, 冻融作用强烈, 一些地段的河流中存在有害离子的侵蚀危害。在如此恶劣的自然环境条件下进行铁路工程建设, 对混凝土材料的长期耐久性是个严峻挑战。为保证工程的长期耐久性使用要求, 青藏铁路明确提出了必须按高性能混凝土原则配制桥隧结构用混凝土的要求: 水胶比 ≤ 0.4 , 抗冻耐久性指数 0.6 ~ 0.9, 电通量 ≤ 1000 库仑, 粉煤灰掺量 10% ~ 15%, 同时掺入多重效能的复合高效外加剂达到高效减水、早强、防冻、引气、增实、保坍、抗硫酸盐腐蚀和抑制碱硅酸反应膨胀的功效^[9]。

(3) 杭州湾跨海大桥全长 36 km, 其中跨越海域长度近 32km。大桥主体结构除南、北航道桥采用钢箱梁外, 其余均为混凝土结构。全桥混凝土用量约 250 万 m^3 , 设计使用寿命 100 年。杭州湾跨海大桥保证混凝土结构的耐久性措施包括: 以氯离子扩散系数为混凝土耐久性的主要控制指标, 采用大掺量掺合料(42.5P. II 硅酸盐水泥 + 55% ~ 70% 矿粉粉煤灰复掺料) 和低水胶比 (≤ 0.4), 低氯离子扩散系数 ($\leq 1.5 \times 10^{-12} \sim 3.5 \times 10^{-12} m^2/s$); 设置合理的钢筋保护层厚度(承台水变区 90mm, 桥墩浪溅区 60mm); 对特殊部位采取附加防护措施, 作为目前对耐久性问题认识不足的储备(环氧涂层钢筋、阴极防护、钢筋阻锈剂、表面防护涂层), 安装耐久性检测系统进行长期动态跟踪监测和验证评估等^[10]。

(4) 南水北调中线工程从湖北丹江口水库陶岔渠首引水至北京团城湖, 输水总干线全长 1 267km, 天津干线从河北徐水向东至天津长 154km, 横跨江、淮、黄、海四大水系的 700 余条大小河流, 是我国实现水资源合理调配的特大型调水工程, 沿途需兴建 1 000 多座穿越河流、道路、山体、山冲、谷口等众多复杂地形的土工建筑物。工程的耐久性问题主要有冻融、碳化、碱活性骨料, 重点是抑制碱骨料反应, 确保工程的长期耐久性。针对华北地区太行山脉和燕山山脉骨料的碱活性比较普遍的现状, 工程在开工之前就制订了《预防混凝土工程碱骨料反应技术条例》, 规定了骨料碱活性的检验规则(取样、检验方法、检验程序、评定标准)、工程分类(环境、结构分类)、预防措施、混凝土碱含量计算方法、工程管理与验收等^[11]。

4 新的认识

人类对复杂事物的研究过程是一个“认识 实践 再认识 再实践”的螺旋式循环上升过程。对混凝土耐久性这样一个涉及原材料选用、制备、浇注、养护和多因素环境作用的复杂寿命周期过程的研究也是一个渐进式的螺旋上升过程。“混凝土耐久性的整体论模型”和“混凝土结构寿命周期评定”称得上是对混凝土耐久性问题的全新认识和理解, 将会对混凝土耐久性研究的方向和混凝土工程的建设管理产生重要影响, 而且这种影响已经发生。

(1) 美国著名混凝土材料科学家 P. Mehta 综合导致混凝土劣化破坏的因素和过程, 提出了“混凝土耐久性的整体论模型”^[12], 见图 1。

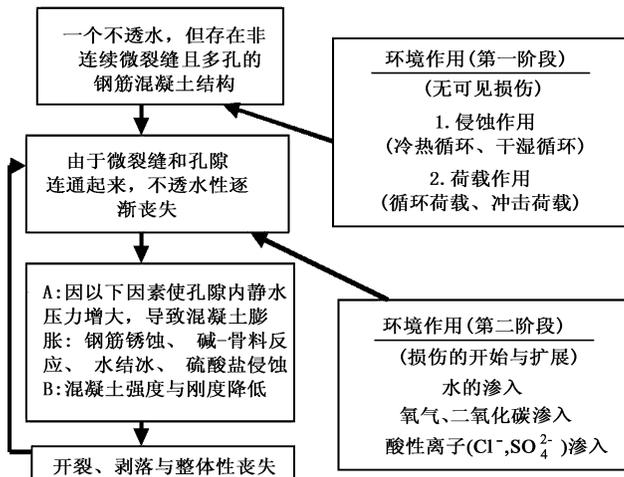


图1 混凝土受外界环境作用而劣化的整体模型

混凝土制备、浇注、养护完成后,形成了一个相对不透水,但存在非连续微裂缝且多孔的混凝土结构;在服役期的第一个阶段,受荷载和大气环境作用(干湿和冷热循环)促使微裂缝扩展直到连通,使混凝土渗透性显著增大;从第二阶段开始,水、氧气、二氧化碳和酸性离子能容易地渗入混凝土,这些介质的存在又促使各种物理、化学反应易于进行,结果是一方面孔隙水压增大,另一方面混凝土强度和刚度部分丧失。在这两个同步发生过程的影响下,材料逐渐开裂、剥落和体积减小,这反过来又引起渗透性显著增大,加速了混凝土破坏。该模型明确提出,不透水性是防止混凝土发生任何物理-化学破坏过程的第一道防线,在混凝土材料制备、浇注、养护期必须充分重视,否则由于施工过程中的变异(离析、含气量损失、泌水、温度收缩、自生收缩、干缩)导致混凝土发育不良而从一开始就失去耐久性屏障,这就是为什么试验室混凝土性能与现场实体混凝土性能有巨大差异的根本原因所在。模型还告诉人们,在进行混凝土耐久性研究中必须考虑多因素的联合作用,在高应力作用下混凝土的抗冻性和抗硫酸盐侵蚀性能会显著降低,冻融和收缩引发的钢筋混凝土保护层细微裂缝会使室内测定的混凝土的氯离子扩散系数失去意义。

在混凝土结构服役过程中,干湿循环、冷热循环、冻融循环和加载、卸载循环都会对混凝土的微结构产生影响,进而影响混凝土的劣化破坏进程。模型的第三方面的启示是:基于数学模型的寿命预测在选择关键参数方面更应注意现场数据采集和分析,避免重走用试验室数据代替现场数据做简单假设、精确复杂计算的老路。

(2)“混凝土结构寿命周期评价”(Life cycle assessment of concrete, 缩写 LCA)是在世界人口膨胀、能源供应紧张、环境污染、温室效应导致的气候变暖和生态恶化的大背景下提出的。LCA 考虑了混凝土使用周期的全过程,包括原材料开采、混凝土制备、施工、寿命周期内的维护、破坏、处置和再循环利用等^[13]。LCA 包含寿命周期环境影响评价(Life cycle impact assessment, 缩写 LCIA)和寿命周期成本分析(Whole life costing, 缩写 WLC)两方面内容。使用 LCA 对混凝土材料方案或单元结构设计方案进行寿命周期内的环境影响评价和成本分析,能达到在全寿命周期内优选采用对环境影响小且经济合理的最优目标方案的目的。LCA 构建了一种科学系统的分析评价模式,在欧盟国家很受推崇,多个组织纷纷提出了各自的方法,但还没有一种方法得到公认。LCA 是一个相当复杂的体系,涉及使用寿命、使用寿命设计和预测(耐久性预测)、寿命终止等概念,要达到用 LCA 定量地进行寿命周期成本分析,还要做大量的研究工作^[14]。

5 结束语

人口膨胀、城市化和生活条件改善需要使得基础设施建设规模不断扩大,混凝土消耗量迅猛增长。为了获取资源和维持经济高增长,在有害的严酷环境修建了大量的混凝土结构,这些混凝土结构出乎预期地出现了过早破坏。环境污染、温室效应导致的气候变暖和生态恶化也对用量最大的混凝土材料提出了可持续发展要求。实现混凝土工程的高耐久和长寿命是效益巨大的节能减排和可持续发展举措,因此混凝土的耐久性成为影响混凝土技术未来发展的关键问题。混凝土耐久性研究始于材料层次,构件(结构层次)的研究起步较晚,因此形成目前在材料层次和构件(结构)层次的脱节。基于材料层次研究成果和工程实践经验积累形成的“deem to safety”定性经验方法仍是目前混凝土工程耐久性设计和质量控制的依据。混凝土耐久性研究从定性描述逐步转向“模型”定量或半定量分析已成为主要方向和热点。我国对混凝土耐久性的研究晚于西方发达国家,但近 20 年来取得了丰富成果和巨大进步,编制了多部耐久性规范和标准,在重大工程的建设中已经充分贯彻了“混凝土耐久性设计”理念,并提升到了“强度设计与耐久性设计并重,强度服从耐久性”的认识高度。“混凝土耐久性的整体论模型”和“混凝土结构寿命周期评价”是在更科学、更全面层次上对混凝土耐久性问题的全新认识和理解,会对混凝土耐久性研究的方向和混凝土工程的建设管理产生重要影响,而且这种影响已经发生。混凝土的耐久性问题是涉及多因素综合作用和寿命周期全过程的复杂问题,要实现基于数学模型的定量分析和设计还需要做大量的科学研究工作。

参 考 文 献:

- [1] 覃维祖译自: P. - C. Aitcin. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow[J]. Cement and Concrete Research, 2000(9) :
- [2] 覃维祖. 混凝土技术进展现状与可持续发展前景[J]. 施工技术, 2006(4).
- [3] 李金玉, 曹建国. 水工混凝土耐久性的研究与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 李金玉. 混凝土抗冻性的定量化设计[C]// 第五届全国混凝土耐久性学术交流会论文集. 大连, 2000.
- [5] 洪乃丰. 腐蚀与混凝土耐久性预测的发展和难点讨论[C]// 混凝土工程耐久性研究与应用(论文集). 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [6] 邢锋, 明海燕. 沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [7] 李文伟, 陈文耀. 三峡工程混凝土的耐久性[C]// 第五届全国混凝土耐久性学术交流会论文集. 大连, 2000.
- [8] Mehta P, Langley S. Monolith Foundation: Built to last a “1000 Years”, Concrete International, 2000(7) .
- [9] 谢永江, 仲新华, 朱长华, 等. 青藏铁路高性能混凝土的配制对策及其耐久性[C]// 沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛与全国第六届混凝土耐久性学术交流会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [10] 张宝胜, 干伟忠, 陈涛. 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性解决方案[C]// 青岛海湾大桥防腐蚀技术研讨会论文集. 青岛, 2007.
- [11] 预防混凝土工程碱骨料反应技术条例, 南水北调中线干线工程标准[S]. 2004.
- [12] 覃维祖. 混凝土结构耐久性的整体论[C]// 全国道路混凝土耐久性学术交流会论文集. 兰州, 2002.
- [13] Concrete Society's Materials Group. Life cycle assessment/ analysis of concrete[J]. Concrete, 2004(3).
- [14] Philip Nixon, Keith Quillin, George Somerville. Sustainable concrete construction[J]. Concrete, 2004(3) .

Application and development tendency of concrete durability research

CHEN Gaixin

(Dept. of Structures and Materials, IWHR, Beijing 100038, China)

Abstract: Realization of high durability and long life of concrete projects is a beneficial measure for energy-saving and emission-reducing. It has become a common understanding that concrete durability is one of the key points for future development of concrete technologies. In this paper, the current research situation, achievements and application of concrete durability are presented in 4 aspects: reinforcement corrosion, freezing and thawing, corrosion by ambient water and salts, and alkali aggregate reaction. The research results have been applied in many giant projects, such as Three Gorges Project, Qinghai-Tibet railway, Hangzhou Bay Cross-sea Bridge and the Mid-route Project of Water Transfer from South to north, etc. The author discusses research works on integrated theoretical models of concrete durability and life cycle assessment for concrete structures.

Key words: concrete; durability; quantitative analysis; prediction model

(责任编辑:王冰伟)