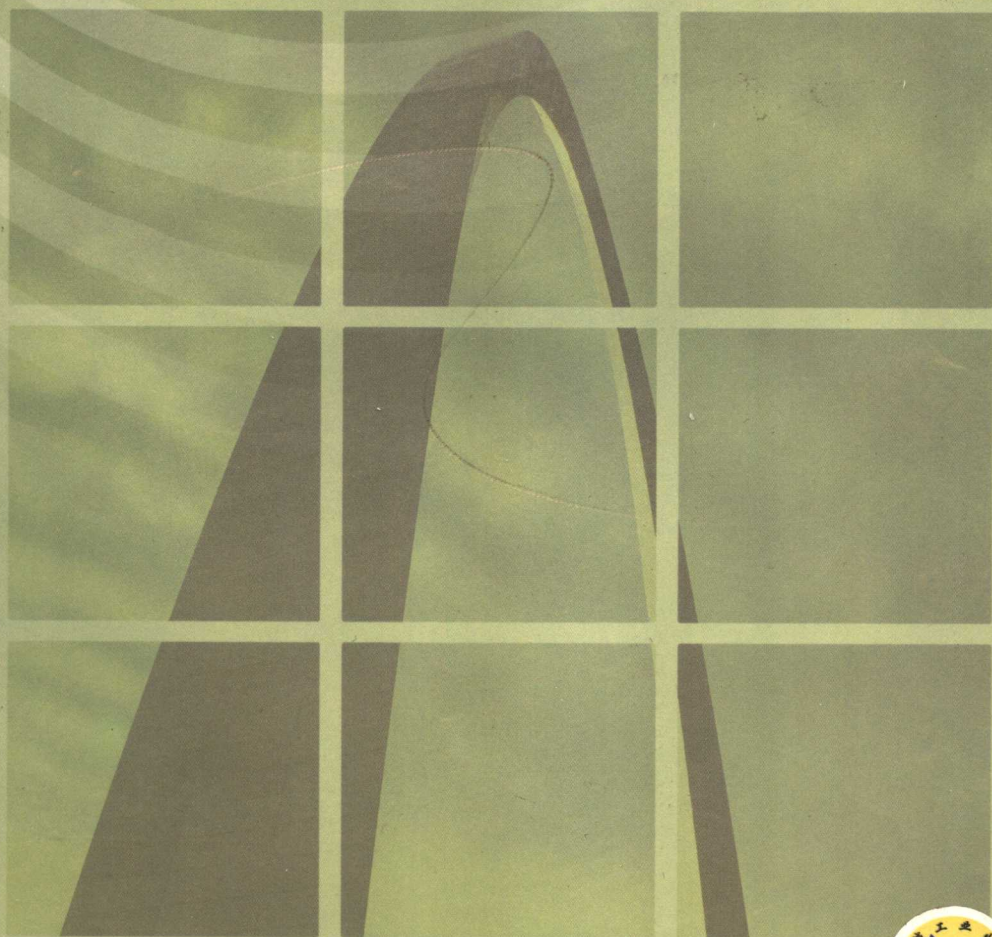


第四届混凝土结构耐久性科技论坛论文集

混凝土结构耐久性 设计与评估方法

金伟良 赵羽习 主编



TU370.4-53

1

混凝土结构耐久性设计与评估方法

——第四届混凝土结构耐久性科技论坛论文集

金伟良 赵羽习 主编



机械工业出版社

第四届混凝土耐久性科技论坛于 2005 年 12 月在浙江大学召开。根据论坛期间与会代表投票和论坛学术委员会讨论情况,精选论文 30 篇,汇编成本论文集。论文集体现了国内相关研究领域的专家学者对混凝土结构耐久性各方面的最新研究进展,并为今后混凝土结构耐久性研究发展方向起到一定的导向作用。

本论文集可供业内同行参考,也可作为相关研究领域高校研究生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构耐久性设计与评估方法:第四届混凝土结构耐久性科技论坛论文集/金伟良,赵羽习主编. —北京:机械工业出版社,2006.7
ISBN 7-111-19374-1

I. 混… II. ①金…②赵… III. 混凝土结构-耐用性-结构设计-文集 IV. TU370.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 064545 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:薛俊高 责任编辑:张晶 版式设计:冉晓华

责任校对:张晓蓉 封面设计:鞠杨 责任印制:洪汉军

中国农业出版社印刷厂印刷

2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm 9.125 印张·353 千字

0001—3000 册

定价:29.00 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)68326294

编辑热线电话(010)68327259

封面无防伪标均为盗版

前 言

混凝土结构是国家基本建设中最广泛应用的结构形式。由于混凝土碳化、氯离子腐蚀、冻融等，导致混凝土结构中钢筋锈蚀，混凝土顺筋胀裂和剥落等破坏，这已成为影响混凝土结构耐久性的主要问题。混凝土结构耐久性不足而造成的直接和间接损失之大，已远远超出人们的预料，这在欧美发达国家中已构成严重的财政负担；而处于基本建设高峰期的我国，如果不充分认识到耐久性问题的严重性，忽视混凝土结构耐久性的要求，那么若干年之后也会发生类似的情况，从而制约我国经济整体健康快速的发展。

鉴于这一问题对我国当前大规模基础工程建设的重要意义，2001年由中国工程院土木水利与建筑工程学部发起，分别在北京和深圳举办了三届混凝土结构耐久性工程科技论坛。2005年12月10~12日，第四届混凝土耐久性科技论坛在浙江大学举行。本次论坛由中国工程院土木水利与建筑工程学部、国家自然科学基金委员会工程与材料科学部共同主办，浙江大学建筑工程学院承办，在杭州浙江大学召开。本次论坛旨在为国内从事混凝土和混凝土结构耐久性研究的科技人员、设计施工人员和标准管理部门人员，提供一个交流的平台，促进相关标准体系的编制与完善，推动我国《混凝土结构耐久性设计规范》早日完成与全面推广。

本次论坛共收到论文总计70余篇，围绕混凝土结构耐久性研究的现状与发展进行了广泛探讨。为保证论文集的质量，论坛会务组根据大会期间与会代表投票和论坛学术委员会讨论情况，精选论文30篇，汇编成本论文集。论文集体现了国内相关研究领域的专家学者对混凝土结构耐久性各方面的最新研究进展，并为今后混凝土结构耐久性研究发展方向起到一定的导向作用。

混凝土结构耐久性是关系到我国长期稳定发展的重要问题，希望有志于混凝土结构耐久性研究的学者和技术人员，共同努力，致力于该领域的研究和技术推广，为实现我国土建行业的可持续发展作出贡献。



2006年3月

目 录

前言

提高基建工程寿命是最大的节约·····	唐明述	1
考虑耐久性退化的钢筋混凝土结构可靠度设计实用方法 ·····	欧进萍 侯爽 周道成 侯纲领	7
混凝土结构耐久性设计区划标准的研究 ·····	金伟良 吕清芳	19
杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性方案研究 ·····	张宝胜	30
三峡工程混凝土耐久性研究及控制措施 ·····	李文伟 陈文耀 刘文彦 邹一宝	43
海工钢筋混凝土耐久性室内与现场长期暴露试验研究 ·····	林宝玉 蔡跃波	50
概率性能基础的使用寿命设计 ·····	刘秉京	63
WD 13823 的概念与结构耐久性设计方法研讨 ·····	邸小坛 周燕 顾红祥	80
多因素复合劣化作用下混凝土的耐久性 ·····	缪昌文 刘加平 慕儒 关宇刚 孙伟	93
干湿循环环境混凝土性能的研究 ·····	邢锋 袁雄洲 丁铸	102
高速公路混凝土桥梁的全寿命耐久性分析与对策 ·····	雷俊卿 付春晓	114
硅烷浸渍剂在混凝土保护中的应用研究 ·····	吴平	119
海洋混凝土的施工质量控制 ·····	冯士明	126
杭州湾跨海大桥方案与混凝土结构耐久性的研究 ·····	孙国强 周云琴	132
环境水对水工混凝土耐久性的影响 ·····	沈志名、赵羽习 金伟良	143
混凝土含气量及气孔特征对混凝土抗冻性能影响的研究 ·····	李家正 杨华全 董芸	152
混凝土结构外防腐涂料防腐机理及应用 ·····	丁示波 杨群燕	163
混凝土氯离子扩散试验预处理方法的对比试验 ·····	吴朝晖 蒋冬蕾 干伟忠	167
混凝土氯离子扩散系数预测的数值方法 ·····	毛科峰 郑建军 Chunqing Li 徐卫敏	175
碱-硅酸反应和冻融循环对混凝土及砂浆体的复合效应研究 ·····	杨彦克 龙庆	182

渐进破坏下劣化混凝土的应力应变关系研究·····	卫军 刘红庆 罗昕	187
近海陆上盐雾区的分区研究·····	王冰 王命平 赵铁军	193
某地铁既有线区间钢筋混凝土框架碱-集料反应检测分析 ·····	郝挺宇 惠云玲	201
石灰石粉对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性的影响及其机理 ·····	邓德华 肖佳 元强 刘赞群 张文恩	210
碳化混凝土桥梁再碱化过程控制理论模型研究·····	屈文俊 朱鹏 张翔	221
弯曲荷载作用下混凝土氯离子扩散规律的试验研究 ·····	赵尚传 贡金鑫 水金锋	227
乌鲁木齐地区碱-集料反应及预防措施的研究·····	徐虎 宗永红 于江	247
烟威高速公路大气中氯离子含量测试与分析·····	赵尚传 方德金 彭辉	253
影响混凝土耐久性的微观因素——孔结构的理论分析 ·····	郭剑飞 金惠珍 任文祥 金贤玉	259
在役混凝土桥梁结构耐久性评估方法 ·····	朱平华 倪国荣 金伟良	267

提高基建工程寿命是最大的节约

唐明述

(南京工业大学, 南京, 210009)

摘要:当前全社会都在倡导节约型社会, 力求节省能源、资源、财力、人力和保护环境, 以达到可持续发展的目的。2004 年我国水泥产量达 9.7 亿 t, 占世界的 46%; 钢产量达 2.97 亿 t, 约占世界的 30%。即中国的基础设施建设达世界的 30%~40%。但我国人口仅占世界的 1/5, GDP 约占世界的 4%, 这些对比数字充分表明我国的基础设施建设在国民经济中占有很大的比例, 从目前的发展趋势来看, 这一趋势还会保持很长的时间。我国水泥产量有可能逼近世界的 2/3。因此保证重大基础设施使用期达 100 年以上, 是极其值得重视的领域。机场、公路、桥梁、大坝的短寿命将导致灾难性的后果, 重建与维修费将不堪重负。

关键词: 基建工程; 使用寿命; 节约

1 我国基建工程规模空前

全球建筑业耗费世界总资源能源的 40%, 美国基础设施价值占其社会总财富的 70%, 因此, 在倡导节约型社会的今天, 要节约资源、能源, 保护环境。基础设施工程: 大坝、桥梁、公路、铁路、港口、隧道、海上海下工程, 地下工程以及工业和民用建筑的使用寿命是最值得予以充分重视的领域。对于经济蓬勃发展的我国, 基建工程在整个国民经济中占有极大的比例, 情况就更加值得注意。

从表 1^[1]可以看出, 2004 年中国水泥产量达 9.7 亿 t, 占世界的 45.8%, 而中国的 GDP 仅 1.65 万亿美元, 占世界的 4%。人口仅为世界的 1/5。同时 2004 年我国钢产量达 2.97 亿 t, 约占世界的 30%。水泥和钢产量数据表明我国的基础设施建设可能占有世界总量的 30%~40%。表 2 所示为七个发达国家与中国相对比的数据。从中可以看出, 2004 年中国水泥产量为七个先进西方国家水泥总产量的 3.5 倍, 但我国 GDP 仅为七国 GDP 总和的 6.4%, 相比之下仍可看出基建工程在我国的经济投资中所占比例极大。我国在建大坝规模约占世界的一半, 桥梁、公路、机场、工业民用等建筑在我国任何一个城市均有大兴土木之势, 这是世界任何国家所罕见的。

表 1 世界水泥产量及其他经济指标

序号	国 家	产量/百万 t (2004)	人口/百万	人均/ (kg/人)	GDP/万亿美元 (2004) ^②
1	中国	850 (970) ^①	1299	654 (746)	1.65
2	印度	110	1065	103	0.69
3	美国	97	293	331	11.67
4	日本	69	127	543	4.62
5	韩国	60	49	1224	
6	俄罗斯	46	144	319	
7	西班牙	40	40	1000	0.99
8	巴西	38	184	206	
9	意大利	38	58	655	1.67
10	墨西哥	35	105	333	
11	埃及	35	76	461	
12	泰国	35	65	538	
13	土耳其	34	69	492	
14	印度尼西亚	30	239	125	
15	伊朗	30	69	434	
16	德国	28	82	341	2.71
17	沙特阿拉伯	25	26	962	
18	法国	19	60	316	2.00
	其他	380			
	全球	2000 (2120)	6379	313 (332)	40.80

① () 内系按我国统计数字以 970 百万 t 计。

② 根据世界银行数据。

实际上,水泥产量与国民经济的发展是密切相关的。表 3 示出世界、美国和我国水泥产量的发展历程。美国在过去半个世纪之内变化不大,而我国增加了几百倍之多。就以我国一个省而论,江苏省 2004 年水泥产量达 8000 万 t,超过德、英、法的总和,人均水泥用量也远远超过它们。可以说我国目前的基建规模是古今中外前所未有、举世瞩目是当之无愧的。

表 2 七个发达国家的水泥产量及 GDP 与中国对比

序号	国 家	水泥产量/百万 t (2004)	GDP/万亿美元 (2004)
1	美国	97	11.67
2	日本	69	4.62

(续)

序号	国 家	水泥产量/百万 t (2004)	GDP/万亿美元 (2004)
3	德国	28	2.71
4	法国	19	2.00
5	英国	13	2.14
6	意大利	38	1.67
7	加拿大	15	0.98
	总和	279	25.79
	中国	970	1.65

表 3 世界、美国和中国水泥产量的发展 (单位: 百万 t)

名称	1900 年	1920 年	1950 年	1960 年	1970 年	1980 年	1990 年	2000 年	2004 年
世界	20	32	133	314	578	1000	1150	1660	2000
美国	—	—	—	55	—	77	80	90	97
中国	0.2 (1908)	0.32 (1918)	2.9	6.0 (1962)	25.7	65.2 (1978)	210	597	970

2 未来的 20 ~ 30 年内我国的基建规模还将进一步扩大的理由

2.1 城市化的需要

改善农民的生活水平是当前我国关注的大问题, 重要措施之一就是 will 部分农业人口迁移到城市。当前我国城市化程度为 42%^[2], 即有 5 亿多人居住在城市, 100 万人口以上的特大城市 40 个; 50 ~ 100 万人口的大城市 54 个; 20 ~ 50 万人口的中等城市 217 个。到 2050 年, 若将城市化程度提高到 70% ~ 80%, 届时总人口为 16 亿, 则将有 7 亿多农民由农村转移到城市, 为此必需修建相应的住宅、办公和商业用房、学校、通信和交通等设施, 水泥用量必将大增。

2.2 基础设施建设的需要

目前还收集不到我国基础设施远景规划的完整数据, 但仅就已有的一些资料^[3], 也可预见其规模之庞大:

公路: 将从 1.7×10^6 km 扩大到 2.74×10^6 km。

高速公路: 将从 2.5×10^4 km 扩大到 2020 年的 6.44×10^4 km。

铁路: 将从 7.2×10^4 km 扩大到 14×10^4 km。

电力设施: 总装机容量到 2049 年将达到 15×10^9 kW, 其中水电将达到 4.3×10^9 kW。

此外, 还有隧道、机场、港口以及海上海下和地下建筑等。

2.3 综合实力的提高

在未来的半个世纪内，我们将提高我国的综合实力，跻身世界各强国之列，为此有必要审视当前重要经济和工业数据与世界对比^[4]：

人口：根据 2005.4.21 数据（百万），世界总人口：6437，中国人口：1305，占世界人口的 20.3%。

国土面积（百万平方千米）：俄罗斯：17.00，中国：9.35，美国：9.16，加拿大：9.09，巴西：8.46，我国居世界第二位，大体与美国、加拿大、巴西相当。

铁路里程（万千米）：美国：19.5，俄罗斯：8.7，加拿大：7.3，中国：7.0，印度：6.4，德国：4.6，我国居第四位。

公路里程（百万千米）：美国：6.41，印度：3.32，巴西：1.73，加拿大：1.41，中国：1.40，日本：1.16，我国居第五位。

发电量（万亿千瓦时）：美国：3.72，中国：1.42，日本：1.04，俄罗斯：0.92，加拿大：0.57，我国居第二位。

世界机场数（个）：美国：14807，巴西：3803，俄罗斯：2609，墨西哥：1827，中国：507，我国居 15 位。

由于我国国土面积辽阔，人口众多，要真正跻身世界强国之列，大幅度增加公路、铁路、机场、电力等基础设施建设是非常必要的。2004 年我国 GDP 为 13.65 万亿人民币，约 1.65 万亿美元，到 2020 年我国 GDP 将达到 4 万亿美元，因此，基建投资的规模在这个时期内增速是不可能降低的。

3 长基建工程的寿命是最大的节约

本人曾多次撰文论述提高混凝土工程的耐久性及其对节约资源、能源，保护环境的重大意义。无论从资料的论述及本人在国外考察大坝、桥梁、公路、工业及民用建筑的破坏均深感问题之严重，在当前超速发展的基建工程若耐久性不好，寿命不长，其损失之严重将不是资源、能源不丰富的我国所能承受的。

从材料科学的角度出发，当前在我国延长混凝土工程寿命要注意下面几个方面：

(1) 必须大力推广应用超塑化剂和引气剂。国内外资料一致认为减少水灰比，减少孔隙率，提高混凝土的致密性是增强耐久性的最关键措施。提出一般工程水灰比应保持在 0.45 以下，严酷条件下宜保持在 0.40 以下。引气剂是提高抗冻性的最有效方法。我国北方地区大力推广使用，定将获益匪浅。

(2) 我国有漫长的海岸线，海砂大量应用于建筑工程，但其中含有氯、碱等有害成分，必须洗净使用，以减轻钢筋锈蚀。

(3) 在我国西南和西北地区，地下水和土中硫酸根含量较高，必须充分注意

硫酸盐腐蚀。最近在新疆还发现生成碳硫硅钙石的破坏^[5]现象，值得注意。

(4) 自 20 世纪 90 年代以来，在我国相继发现碱集料反应引起的桥梁、轨枕、机场的破坏，同时发现各种碱活性集料，包括碱硅酸反应和碱碳酸盐反应的集料，分布相当广泛（详见我国碱活性集料的分布图^[6]），对大型混凝土工程必须事先详细检定所用粗细集料的碱活性。

在这里我们不能仅从科学技术角度探讨如何改善和提高耐久性，还要着重探讨怎样才能真正重视耐久性，而且愿意为提高耐久性付出经济代价。当前我国工程实行招标制，业主希望价格越低越好，加之建筑业竞争激烈，保持低利润也容易中标，但中标之后无能力也不可能再采取措施为提高耐久性而付出经济代价。有时明知需采取某项新技术措施有好处也只能不用，工程技术人员也无法效力。有的工程也提出保证 100 年寿命，但如何界定工程的寿命困难太大，也就不具备约束力。为此特提出工程招标时明确指出“工程不小修和不大修的年限”，如规定沥青混凝土路面 2 年不小修、5 年不大修。桥梁 10 年不小修、20 年不大修等（见表 4），并与公司和个人的经济收入挂钩，有奖有罚，只有这样才有可能真正把耐久性和提高寿命付诸到工程实践中去。这项工作意义特别重大，实施过程中遇到的问题特别复杂，需要政府、企业和科技工作者、社会科学家共同合作拟定详细法规和指南。

表 4 各种工程耐久性的规定方案（草案）

工 程	不小修年限/年	不大修年限/年	使用寿命/年
桥梁	10	20	120
水泥混凝土路面	5	10	40
机场道面	5	10	40
沥青混凝土路面	2	5	15
大坝	10	20	100
港口	10	20	100
隧道	10	20	100

注：这仅是初步设想，需要修改。

4 充分利用工业废渣

利用工业废渣、矿渣、粉煤灰、硅灰，代替熟料生产水泥不仅能节约能源、资源，保护环境，而且能改善混凝土的性能，特别是耐久性。2004 年我国煤产量为 19.56×10^8 t，预期今后将达到 24×10^8 t，则粉煤灰量将达到 3×10^8 t，再加上煤矸石，将达 6×10^8 t 以上，若能充分利用定将获得很大经济效益和社会效益。

5 开发利用生物资源

考虑到矿物能源——石油和煤, 储量的有限性, 现在倡导从植物中提取燃料, 植物是可再生资源。用植物纤维代替合成纤维^[7], 用竹筋代替钢筋^[8], 选择用于适当混凝土工程之中, 将十分有利于可持续发展。

6 结论

我国的 GDP 约为世界 GDP 的 4%, 人口为世界总人口的 1/5, 但水泥产量近世界总产量的 1/2, 钢产量近 1/3, 这表明我国基础设施建设有可能达到世界总量的 40%。从目前的发展趋势来看在未来的长时间内还将继续发展。从科学技术和措施两个层面采取有力措施保证重大工程使用寿命达 100 年以上将是节约能源、资源, 保护环境最值得注意的问题, 这不仅有利于我国的可持续发展, 同时也是对世界的贡献。

参 考 文 献

- [1] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, 2005 (1): 43.
- [2] 张保淑. 中国稳步推进城市化 [N]. 人民日报海外版, 2005-5-12.
- [3] 唐明述. 水泥混凝土与可持续发展 [J]. 有色金属学报, 2004, 14 S1 (5): 164-172.
- [4] [http: //www. Photius. com](http://www.Photius.com)
- [5] 胡明玉, 唐明述, 龙伏海. 新疆永安坝混凝土的碳硫硅钙石型硫酸盐腐蚀 [J]. 混凝土, 2004 (11): 5-7.
- [6] Deng Min, Lan Xianghui, Xu Zhongzi, et al. Petrographic characteristics and distributions of reactive aggregates in China [C]. Proc. of 12th International Conference on Alkali - Aggregate Reaction in Concrete. 2004, October, 15-19, Beijing China, Vol: 1: 87-98.
- [7] Agopyan, V., Savas Tano, H. Jr., John, et al. Developments on vegetable fibre - cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27 (5): 527-536.
- [8] Ghavami, K.. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27 (6): 637-649.

考虑耐久性退化的钢筋混凝土 结构可靠度设计实用方法

欧进萍 侯爽 周道成 侯纲领

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨, 150090)

摘要: 侵蚀环境下, 钢筋锈蚀引起混凝土结构耐久性退化和抗力衰减。如何考虑耐久性退化, 保证钢筋混凝土结构在预期使用期内最低可靠度满足现行规范要求的设计方法是一个值得研究的重要问题。目前, 国内外在混凝土结构耐久性设计方面进行了很多研究, 提出了许多结构耐久性退化预测模型以及考虑耐久性退化的可靠度分析方法。但是, 目前尚无与我国结构可靠度设计规范相协调的钢筋混凝土结构可靠度设计的实用方法。为此, 考虑钢筋锈蚀对混凝土结构的抗力的影响, 根据我国现行结构可靠度设计规范的设计原理, 提出了钢筋混凝土建筑结构预期使用期可靠度设计的实用方法。首先, 考虑多种荷载组合以及不同恒荷载与可变荷载效应比影响, 给出了代表性钢筋混凝土构件在给定环境下可靠度分析方法; 提出了预期使用期结构设计可靠度水平的确定原则; 在我国结构可靠度设计表达式基础上引入耐久性折减系数, 给出了该系数的确定方法。最后, 通过算例验证了该方法的有效性和简便性。

关键词: 钢筋混凝土结构; 预期使用期; 耐久性; 可靠度; 实用设计方法

1 概述

结构可靠度是指结构在规定的时间内, 在规定的条件下, 完成预定功能的概率^[1]。结构可靠度是对结构的设计使用年限而言的, 当结构的设计年限超过设计使用年限后, 结构失效概率可能较设计预期值增大^[2]。显然, 结构的使用年限是结构可靠度的时间特征^[3]。国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)^[1]中, 借鉴了国际标准《结构可靠度总原则》(ISO 2394: 1998)提出的“设计工作年限 (design working life)”的概念, 将结构“设计使用年限”定义为: 设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。根据结构性质、重要性不同, 提出了5年、25年、50年、100年4个等级的设计使用年限, 要求针对不同的设计使用年限进行结构设计。结构的设计使用年限还与业主的要求有关, 例如, 英国耐久性指南 BS7543^[4]中结构设计使用寿命定义为: 设计人员考虑施工现场条件、预期施工质量和预期的维护水平, 尽可能

地将建筑物业主的要求与有关预测寿命协调起来给出的判断结果。虽然结构的设计使用年限并不完全等同于结构的设计使用寿命,但应该承认结构的设计使用年限将必须考虑满足业主要求。本文将这种考虑了业主需求的结构设计使用年限称为预期使用期。但现行的结构可靠度分析和设计方法并未考虑结构抗力随使用年限增加而降低,而抗力降低是耐久性不足的结构性能劣化的必然结果,在这种情况下,预期使用期结构可靠度设计是工程设计及结构性能评估中极为关注的问题。

钢筋锈蚀是引起混凝土结构性能劣化和抗力衰减的主要原因。混凝土中钢筋锈蚀的机理主要有两种:即混凝土碳化和氯离子侵入。碳化会降低混凝土的碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,使混凝土失去对钢筋的保护作用,进而导致混凝土中钢筋锈蚀。目前,国内外学者对混凝土碳化进行了深入的研究,提出了许多碳化预测模型^[5-9]以及一般大气环境下混凝土中钢筋锈蚀的模型^[10-15]。氯离子的侵入是以几种侵入方式的组合而作用的,另外还受到氯离子与混凝土材料之间的化学结合、物理粘结、吸附等作用的影响。目前,尚无实用的氯离子入侵模型^[16]。依据目前的结构的耐久性退化的模型,学者们提出了许多耐久性分析和设计的方法。对于不允许锈蚀的混凝土结构构件,邱小坛^[17]、牛荻涛^[8]等提出基于混凝土碳化深度的耐久性评估方法。对于允许钢筋锈蚀的构件,金伟良等^[18]提出了以结构锈胀开裂作为正常使用极限状态的可靠度设计方法。惠云玲^[14]提出了通过验算耐久性损伤引起的承载力降低系数是否满足相应的评定等级的耐久性设计方法。贡金鑫等^[19]考虑结构抗力随时间降低,研究了大气环境条件下钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构承载能力可靠度的影响。李田、刘西拉^[20]在结构设计表达式中引入耐久性系数以满足结构目标使用期内耐久性要求。张苑竹^[21]、周建民^[22]、Steward^[23]、Frangopol D M^[24]分别提出了基于承载能力可靠度的耐久性分析和优化设计方法。通常,增大保护层厚度是提高结构耐久性的常用措施,但研究表明^[25],对于受弯构件,增大保护层厚度的同时,还需要增加结构配筋以满足承载力要求。同时过大的保护层厚度容易引起混凝土开裂,影响结构的耐久性^[23]。提高混凝土结构耐久性的构造措施还有采用较小的水灰比、增加水泥含量、提高水泥的碱性、对混凝土进行罩面或设置隔离层以及钢筋表面设置环氧涂层等,目前这些措施的工程成本是含糊不清的^[26]。因此,在结构设计中,还需要根据工程的实际情况决定采用哪种提高结构耐久性的措施。

尽管在结构耐久性分析和设计方面进行了很多研究,但目前还没有一种与我国现行的结构可靠度设计标准相协调的考虑耐久性退化因素影响的建筑结构可靠度设计实用的方法。本文根据我国现行建筑结构可靠度设计原理,考虑耐久性退化影响因素,设计了抗力统计参数与我国调查结果一致的五种代表性钢筋混凝土构件,考虑多种荷载效应组合以及不同荷载效应比,研究了不同使用期内代表性

构件的可靠度变化规律, 为保证预期使用期内结构可靠度水平仍可满足现行规范要求, 提出了根据预期使用期和抗力衰减幅度确定结构设计可靠度指标的方法, 并通过优化的方法确定了预期使用期内的耐久性折减系数, 给出了预期使用期结构可靠度设计的实用设计方法。该方法中的耐久性折减系数意义明确, 形式简单, 易于设计人员掌握。最后, 通过算例验证了本文提出方法的有效性。

2 混凝土中钢筋锈蚀模型

本文考虑环境为一般大气环境。一般大气环境下混凝土中钢筋锈蚀是由于混凝土碳化至钢筋表面处, 钢筋钝化膜被溶解所引起的。混凝土碳化速度与结构所处环境 CO_2 浓度、相对湿度和混凝土本身的抗碳化能力有关。目前国内外公认的碳化深度 x 与碳化时间 t 的关系式为:

$$x = K\sqrt{t} \quad (1)$$

式中, K 为碳化速度系数, 它不仅与混凝土的水灰比、水泥品种、水泥用量、养护方法、气孔尺寸与分布有关, 而且还与环境的相对湿度、温度及二氧化碳浓度有关。学者们基于混凝土碳化机理或实测统计结果得出了多种碳化预测模型^[5-9]。王庆霖、牛荻涛^[8]利用国内外长期暴露试验结果和实际结构调查结果, 得出混凝土碳化深度预测模型, 该模型表明, 碳化深度较好地服从正态分布, 碳化深度预测模型可以表示为:

$$\mu_x(t) = K_a K_{ei} K_l \left(\frac{24.48}{\sqrt{f_{cu,k}}} - 2.74 \right) \sqrt{t} \quad (2)$$

$$\sigma_x(t) = 5.19 + 0.00384t^2 \quad (3)$$

式中, K_a 为地区影响系数, 南方 0.5 ~ 0.8, 北方 1.0; K_{ei} 为室内外影响系数, 室外 1.0, 室内 1.87。 K_l 为考虑养护时间的修正系数, 对一般结构可取 1.5。

邸小坛、周燕^[5]通过对检测数据统计回归得出如下碳化预测模型:

$$a = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \left(\frac{60}{f_{cu,k}} - 1.0 \right) \quad (4)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 分别是混凝土养护成型与养护条件修正系数、水泥品种修正系数(矿渣水泥 1.3, 普硅水泥 1.0)、环境作用系数。

混凝土碳化至钢筋表面导致钝化膜破坏, 钢筋则发生锈蚀。钢筋锈蚀速度主要与结构所处环境、混凝土保护层厚度、混凝土强度及水泥品种等因素有关。

王庆霖、牛荻涛等^[27]利用腐蚀电化学原理建立了一般大气环境下钢筋锈蚀开裂前和锈蚀开裂后的锈蚀量预测公式, 并考虑环境相对湿度和氧在水中的溶解度对公式进行了修正。

对于潮湿环境, 单位长度钢筋锈蚀质量损失可表示为:

$$W_i = \begin{cases} 2.35 P_{RH} D_0 \frac{R}{K_c^2} \left[\sqrt{R^2 - (R + c - K_c \sqrt{t})^2} - \right. \\ \left. (R + c - K_c \sqrt{t}) \arccos \frac{R + c - K_c \sqrt{t}}{R} \right] & (t_p \leq t \leq t_{cr}) \\ W_{cr} + 1.173 P_{RH} D_0 (t - t_{cr}) & (t_{cr} < t) \end{cases} \quad (5)$$

式中, W_i 为单位长度钢筋锈蚀质量损失 (g/mm); t 为结构使用时间 (年); R 为钢筋半径 (mm); P_{RH} 为环境湿度 RH 的修正系数, 取大于腐蚀相对临界湿度 (一般为 60%) 的概率 (RH 服从正态分布); W_{cr} 为锈蚀开裂时的锈蚀量 (g/mm); D_0 为氧气在混凝土中的扩散系数 (mm^2/s); t_p 和 t_{cr} 分别为锈蚀开始时间和锈蚀开裂时间 (年); c 为混凝土保护层厚度 (mm); K_c 为碳化系数。

邸小坛、周燕^[5]通过对实测结果进行统计得出锈蚀量与时间的关系为:

$$\lambda = Kt \quad (6)$$

$$K = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \left(\frac{4.18}{f_{cu,k}} - 0.073 \right) (1.85 - 0.04c) \left(\frac{5.18}{d} + 0.18 \right) \quad (7)$$

式中, λ 为混凝土中钢筋锈蚀量; β_1 、 β_2 、 β_3 分别为钢筋截面允许锈蚀损失率 (%)、水泥品种修正系数、环境作用系数; t 是锈蚀开始后的时间。

3 抗力的统计特征

对结构构件抗力的随机性的主要影响因素有三个: 材料性能的不定性、几何参数的不定性和计算模式的不定性。在考虑这三个主要因素的情况下, 并且考虑材料强度及其构件几何尺寸在使用期内的变化, 构件抗力可采用随机变量表达, 即

$$R(t) = \Omega_p R_p(t) = \Omega_p R(f_{ci}(t) a_i(t)) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中, Ω_p 为计算模式不确定性, 假定不随使用期变化; $R_p(t)$ 为由计算公式确定的结构在使用期 t 时刻的抗力; $f_{ci}(t)$ 和 $a_i(t)$ 分别为结构构件中第 i 种材料的材料性能及其相应的结构构件在使用期 t 时刻的几何参数。则构件的抗力统计参数为:

$$\kappa_R(t) = \frac{\mu_R}{R_k} = \frac{\mu_{\Omega_p} \mu_{R_p}(t)}{R_k(t)}, \quad \delta_R = \sqrt{\delta_{\Omega_p}^2 + \delta_{R_p}^2(t)} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mu_{R_p}(t) &= R(\mu_{f_{ci}}(t), \mu_{a_i}(t)) \\ \delta_{R_p}(t) &= \frac{\sigma_{R_p}(t)}{\mu_{R_p}(t)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sigma_{R_p}(t) = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial R_R(t)}{\partial X_i(t)} \right|_m \sigma_{X_i} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中, κ_R 和 δ_R 分别为抗力的均值系数和变异系数; $X_i(t)$ 表示函数 $R(\cdot)$ 的有关变量 $f_{ci}(t)$ 、 $a_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$); 下标 $|_m$ 表示偏导数中的变量及其均值。

根据钢筋混凝土构件的材料强度、几何尺寸以及计算模式的统计参数及式 (9) 和式 (10) 可以求得使用期内抗力的统计参数 κ_R 和 δ_R 。本文为考虑钢筋锈蚀对钢筋与混凝土之间粘结强度的影响。对于工程问题, 通常可以假定结构抗力服从对数正态分布。因此, 在使用期内考虑抗力衰减的情况下可以认为结构抗力符合非平稳对数正态随机过程。

4 考虑耐久性退化的结构可靠度设计实用方法

考虑永久荷载与一种可变荷载组合的情形, 并假定永久荷载效应为 S_G , 设计基准期内的最大可变荷载效应为 S_Q , 钢筋混凝土结构由于耐久性退化因素影响, 结构的功能函数为:

$$Z = R(t) - S_G - S_Q \quad (12)$$

本文荷载取值为 50 年基准期的统计参数, 没有考虑其在使用期内的差异, 该影响可通过不同使用期荷载系数来调整^[3]。通过一次二阶矩的方法可求得结构可靠度指标随使用期的变化。在计算中应考虑不同荷载组合以及不同永久荷载与可变荷载效应比的情况, 求得可靠度指标取以上情况下的均值。

由于耐久性的退化, 结构的可靠度指标将随使用期降低。为使结构在预期使用期内的最低可靠度指标仍满足现行规范要求, 则可考虑通过调整结构的设计可靠度指标实现, 调整幅度与结构的抗力衰减程度以及结构的预期使用期长短有关。如图 1 所示, 当结构设计可靠度指标调整为 $\beta + \Delta\beta$ 时, 则可保证在预期使用期 t_0 内结构可靠度指标不低于初始设计可靠度指标 β 。为了简化计算, 本文假设在不同初始结构设计参数下结构可靠度指标的衰减规律是相同的。研究表明,

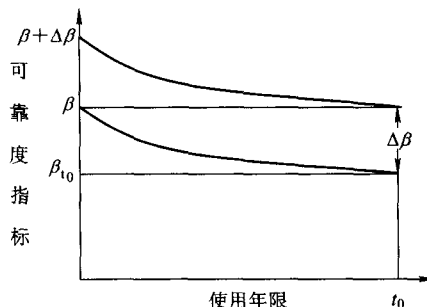


图 1 可靠指标衰减