

文章编号:1673-2049(2012)01-0001-07

# 基于损伤演化方程的混凝土寿命预测方法

余红发<sup>1</sup>, 孙伟<sup>2</sup>, 麻海燕<sup>1</sup>, 张云升<sup>2</sup>, 缪昌文<sup>3</sup>, 金祖权<sup>4</sup>, 刘建忠<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 江苏 南京 210016; 2. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210096;  
3. 江苏省建筑科学研究院有限公司, 江苏 南京 210008; 4. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:**基于混凝土的冻融或腐蚀损伤演化方程,提出了一套预测混凝土结构使用寿命的基本方法与理论体系;用单一冻融因素作用下的大量试验数据验证了混凝土的损伤演化方程;通过专门设计的盐湖卤水腐蚀单一因素和(干湿循环+盐湖卤水腐蚀)双重因素、3.5%质量浓度的 NaCl 盐冻试验,研究了青海盐湖钾肥和北京城市立交桥主体结构混凝土的使用寿命预测问题。结果表明:青海盐湖钾肥工程不宜采用普通混凝土和高强混凝土;C60 引气高性能混凝土在盐冻作用下满足北京城市立交桥 50 年的使用要求。

**关键词:**高强混凝土;高性能混凝土;冻融;腐蚀;使用寿命;预测

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A

## Predicting Method of Concrete Service Life Based on Damage Development Equation

YU Hong-fa<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>2</sup>, MA Hai-yan<sup>1</sup>, ZHANG Yun-sheng<sup>2</sup>, MIAO Chang-wen<sup>3</sup>,  
JIN Zu-quan<sup>4</sup>, LIU Jian-zhong<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210008, Jiangsu, China; 4. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

**Abstract:** Based on the damage development equation of concrete subjected to freezing-thawing cycles or chemical attacks, a systematic theory and the basic operation for the prediction on service life of concrete structure were presented. Validity of the damage development equation of concrete was established by the vast data obtained through single factor. Service life prediction of some national key projections, such as the potassic manure plant in salt lake of Qinghai and Beijing Cloverleaf Bridge, were studied by specially designed durability experiments, which included single factor (salt lake bittern attack), double factor (wet-dry cycles compound with salt lake bittern attack), 3.5% mass concentration NaCl solution salt-frost experiments. Results show that either ordinary Portland cement concrete or high strength concrete is not applicable to the potassic manure plant in salt lake of Qinghai. Service life of Beijing Cloverleaf Bridge can also meet the requirements of 50 years since C60 air-entrained high performance concrete subjected to salt-frost action are adopted.

收稿日期:2011-11-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2009CB623203);国家自然科学基金项目(51178221);  
中央高校基本科研业务费专项资金项目(NS2010015)

作者简介:余红发(1964-),男,湖北武穴人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:yuhongfa@nuaa.edu.cn.

**Key words:** high strength concrete; high performance concrete; freeing-thawing; attack; service life; prediction

## 0 引言

混凝土在冻融或腐蚀条件下的损伤演化规律具有一定的损伤初速度和损伤加速度特征<sup>[1]</sup>。当混凝土在实际工程的环境、气候和受力状态服役条件下,其损伤初速度和损伤加速度与其原材料、配合比和养护条件密切相关<sup>[2]</sup>。为进一步完善混凝土损伤演化方程在土木工程中的应用,笔者在研究混凝土的冻融或腐蚀损伤演化方程的基础上,提出了一套预测结构混凝土使用寿命的方法;然后,设计了单一冻融因素的耐久性试验,并结合大量的文献数据对混凝土的损伤演化方程进行了广泛的试验验证;最后,针对实际工程的服役条件,重点研究了该方法在国家重点工程——青海盐湖钾肥工程和北京城市立交桥结构混凝土使用寿命预测中的应用问题。

## 1 基于损伤演化方程的混凝土使用寿命预测方法

在冻融或腐蚀因素作用下,用相对动弹性模量  $E_r$  表示的混凝土损伤演化方程有 2 种模式:单段损失模式和双段损伤模式。该损伤演化方程含有 3 个重要的损伤劣化参数,分别为损伤初速度(IDV)、二次损伤初速度(SDV)、损伤加速度(DA)。

以冻融为例,单段损伤模式的表达式为

$$E_r = 1 + aN + 0.5cN^2 \quad (1)$$

式中: $N$  为快速冻融循环次数; $a$  为损伤初速度的负值; $c$  为损伤加速度的负值。

以冻融为例,双段损伤模式的表达式为

$$E_{r1} = 1 + aN \quad N \leq N_{12} \quad (2)$$

$$E_{r2} = 1 + 0.5(b-a)^2/c + bN + 0.5cN^2 \quad N > N_{12}, a < b \quad (3)$$

式中: $N_{12}$  为损伤变速点; $b$  为二次损伤初速度的负值。

对于腐蚀条件,只需要将方程中的  $N$  换成腐蚀时间  $t$  即可。

### 1.1 混凝土使用寿命计算方法

当冻融破坏是影响混凝土结构失效的主要耐久性因素时,可以借助 1986 年 Vesikari<sup>[3]</sup>、李金玉等<sup>[4]</sup> 和林宝玉等<sup>[5]</sup> 调查的中国不同地区混凝土室内外冻融循环次数之间的关系,计算混凝土结构的使用寿命,其计算公式为

$$t = \frac{kN}{M} \quad (4)$$

式中: $k$  为冻融试验系数,即室内一次快速冻融循环相当于室外自然冻融循环次数的比例,平均值一般可取  $t=12$  年; $M$  为混凝土结构在实际环境中 1 年可能经受的冻融循环次数。

这里需要特别指出的是,上述方法近期在中国学术界受到了一定程度的置疑,其实,这种方法并非中国首创,而是 1986 年 Vesikari 在研究混凝土的冻融循环次数与实际结构寿命之间的关系时提出的,并且进行了许多成功的工程应用。

当腐蚀破坏是影响混凝土结构失效的主要耐久性因素时,混凝土的腐蚀过程受侵蚀性离子的扩散控制,根据 Fick 第一扩散定律,扩散时间与环境的侵蚀性离子浓度成反比,如果忽略腐蚀的化学反应时间,扩散时间就可以近似于化学腐蚀导致混凝土结构失效的时间,因此,借助 Fick 第一扩散定律能够计算混凝土结构的使用寿命<sup>[6]</sup>

$$t = \frac{C_0}{C} t_0 \quad (5)$$

式中: $t_0$  为实验室快速试验时混凝土相对动弹性模量  $E_r=60\%$  的腐蚀时间; $C, C_0$  分别为实际环境水和快速试验时腐蚀溶液的侵蚀性离子浓度。

### 1.2 前期准备工作

混凝土使用寿命设计的前期准备工作包括:

(1) 建立混凝土在实验室的快速耐久性试验方法体系和测试技术。

(2) 建立不同混凝土在各种冻融、腐蚀等条件下损伤演化方程的基本参数数据库。

(3) 研究混凝土在冻融或腐蚀等条件下损伤参数与其原材料、配合比和养护条件之间的相关性。

(4) 建立混凝土的单一因素、双重因素和多重因素损伤失效模式的线性判别函数。

(5) 建立混凝土在实验室的快速冻融寿命与在工程服役环境中使用寿命之间的关系。

### 1.3 基本步骤

混凝土使用寿命设计的基本步骤为:

第 1 步:根据工程所在地的气候、水文地质条件以及结构用途,确定实际工程可能遭受的主要耐久性破坏因素,尤其应该注意荷载因素的影响<sup>[7]</sup>。

第 2 步:根据混凝土的原材料、配合比和养护条

件等初始条件,由损伤模式判别函数确定混凝土的冻融或腐蚀等损伤失效模式。

第 3 步:根据已经建立的混凝土损伤参数与其原材料、配合比和养护条件之间的相关计算公式,进一步确定损伤初速度和损伤加速度等参数,得到混凝土的损伤演化方程。

第 4 步:根据损伤演化方程,计算当  $E_r = 60\%$  时混凝土在快速试验条件下的寿命。

第 5 步:依据式(4)或式(5)计算结构混凝土在实际服役条件下的使用寿命。

#### 1.4 试验工作基本思路

混凝土使用寿命预测的试验工作基本思路为:

(1)与使用寿命设计的第 1 步相同,首先要确定实际工程在荷载、环境和气候等因素作用下的主要耐久性破坏因素。

(2)考虑工程的服役条件下,优选在实验室进行的快速耐久性试验方案。对于北方地区:一般大气暴露条件可选择进行(荷载+冻融)双重因素试验,地下结构若没有腐蚀性可进行(荷载+冻融)双重因素试验,若有腐蚀性可进行(荷载+腐蚀)或(腐蚀+干湿循环)双重因素以及(荷载+腐蚀+冻融)三重因素试验,腐蚀介质可选用实际环境水;对于冬季撒除冰盐的高速公路或城市立交桥,可进行(冻融+3%质量浓度的 NaCl 溶液腐蚀)双重因素试验和(荷载+冻融+3%质量浓度的 NaCl 溶液腐蚀)三重因素试验。对于南方地区:考虑冻融破坏的工程可进行(荷载+冻融)双重因素试验,不考虑冻融破坏的工程或地下结构可进行(荷载+腐蚀)双重因素试验。为了加快损伤失效过程,得到完整的损伤曲线,必须提高腐蚀介质的浓度,常用 5%质量浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液或硫酸盐与氯盐的混合溶液。

(3)根据实际原材料、配合比和养护条件,设计制作混凝土试件,进行上述的多重因素耐久性加速试验,得到混凝土在快速试验条件下的损伤演化方程。

(4)最后 2 步与使用寿命设计的第 4 步和第 5 步相同,预测出混凝土结构的使用寿命。

## 2 混凝土损伤演化方程的验证

### 2.1 验证方法

采用的原材料包括:江苏南京江南水泥厂生产的 P. II 42.5R 硅酸盐水泥,青海华电铁合金股份有限公司生产的硅灰(SF),青海桥头电厂生产的粉煤灰(FA),江苏江南粉磨公司生产的 S95 级磨细矿渣(SG),安徽巢湖速凝剂总厂生产的铝酸盐混凝土膨

胀剂(AEA),南京产河砂,江苏省句容市产玄武岩碎石,江苏省建筑科学研究院有限公司生产的 JM-B 型萘系高效减水剂,江西工程纤维科学技术研究所生产的工顺牌 GS-2000 盾铃型工程纤维,中国产高强高模聚乙烯纤维(HEMPF),饮用水。混凝土的配合比、试件制作与冻融试验同文献[8]。

### 2.2 验证结果

表 1 中给出了混凝土的单一冻融因素损伤演化方程中损伤参数和冻融寿命实测值与预测值的比较,其中,损伤参数数值均为量纲一的量,除本文中数据以外,还采用了慕儒<sup>[9]</sup>、关宇刚<sup>[10]</sup>、高建明等<sup>[11]</sup>和曹建国等<sup>[12]</sup>的大量文献数据。验证步骤分为 3 步:

(1)按照损伤模式判别计算公式确定混凝土的冻融损伤失效模式。

(2)按照损伤参数与原材料、配合比和养护条件相关关系计算公式估算不同混凝土的损伤初速度和损伤加速度。

(3)将估算的损伤参数代入混凝土的损伤演化方程中,并且令  $E_r = 60\%$ ,获得不同混凝土在实验室快速冻融条件下冻融寿命的预测值。由此可见,运用本文中提出的混凝土损伤演化方程及其部分数据库,预测混凝土在实验室条件下的冻融寿命与试验值是比较接近的,这说明将损伤演化方程应用于混凝土的寿命预测是切实可行的。

在实际应用时,先通过大量、系统的试验,建立涵盖不同工程使用环境的混凝土配合比与损伤参数的数据库,其实用价值会更大<sup>[13-28]</sup>。

## 3 损伤演化方程在重大土木工程寿命预测中的应用

### 3.1 原材料与配合比

腐蚀环境下混凝土的寿命预测,以青海盐湖钾肥工程混凝土为例,采用的普通混凝土(OPC)和高强混凝土(HSC)的原材料和配合比与上述验证试验相同。冻融环境下混凝土的寿命预测,以北京市立交桥混凝土为例。采用 P. II 52.5 硅酸盐水泥、埃肯牌微硅粉(SF)、砂、碎石、高效减水剂和引气剂,分别设计了 C30 普通混凝土和 C60 引气高性能混凝土(A60SF10),原材料性能和混凝土配合比见文献[29]。

### 3.2 耐久性试验方案

青海盐湖地区混凝土的破坏主要由化学腐蚀引起<sup>[30]</sup>。青海盐湖钾肥工程分 2 期建设,在 20 世纪 90 年代初建成的 I 期工程中采用的是强度等级 C30

表1 在单一冻融因素作用下混凝土冻融寿命预测值与实测值的比较

Tab. 1 Comparisons Between Predicted Life and Measured Life of Concrete Subjected to Freezing-thawing Cycles

数据来源	试件编号	损伤模式	损伤参数/ $10^{-2}$			冻融寿命/次	
			IDV 值	SDV 值	DA 值	实测值	预测值
文献[9]	NPC40	单段		0.219 08	0.013 111 20	120	108
	NPC80	双段	-0.012 6	-1.363 00	0.001 550 00	1 100	1 134
	NSFRC80	双段	0.000 0	-1.086 92	0.001 223 09	1 620	1 813
文献[10]	C80	双段	-0.012 6	-1.363 00	0.001 550 00	955	1 134
文献[11]	F0S30	单段		-590.550 00	3.098 500 00	354	381
	F0S40	单段		-590.550 00	3.098 500 00	327	381
	F0S50	单段		-590.550 00	3.098 500 00	309	381
	F15S20	单段		-590.550 00	3.098 500 00	257	381
	F15S30	单段		-590.550 00	3.098 500 00	283	381
	F15S40	单段		-590.550 00	3.098 500 00	219	381
文献[12]	C80	单段		-53.184 00	0.039 720 00	3 426 *	2 679
本文	OPC	单段		0.520 20	0.025 548 00	20	35
	HSC	双段	0.012 5	-1.095 80	0.001 200 00	1 550	1 573
	HPC	单段		-0.069 40	0.000 400 00	800	653
	SFRHPC	单段		-0.039 20	0.000 160 00	1 050	993
	PFRHPC	单段		-0.082 30	0.000 400 00	475	698

注：\* 表示按文献[12]中的曲线趋势估算值。

的 OPC, 在 2003 年底建成的 II 期工程中主要采用油毡隔离的方法, 对与地面接触的交界面处 OPC 进行防护, 试用了部分强度等级 C40~C50 的 HSC。本文中选取的混凝土耐久性试验方案是: 青海盐湖卤水的单一因素腐蚀试验和(干湿循环+腐蚀)双重因素试验, 盐湖卤水的化学成分见文献[8]。

北京城市立交桥混凝土的破坏主要由除冰盐的冻融破坏引起。盐冻试验采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009) 中的“快冻法”, 冻融设备为 CDR-2 型混凝土快速冻融试验机, 冻融介质为 3.5% 质量浓度的 NaCl 溶液, 混凝土试件的规格为 40 mm×40 mm×160 mm。

### 3.3 青海盐湖钾肥工程的混凝土寿命预测

表 2 为 OPC 和 HSC 在青海盐湖卤水条件下的损伤初速度 IDV、损伤加速度 DA 及其寿命预测结果。结果表明, 2 种混凝土的损伤失效模式均为单段损伤模式, 依据式(5), 当考虑实际环境每 2 d 发

生 1 次干湿循环, 则青海盐湖钾肥 I 期工程 OPC 的实际寿命只有 1.3~2.2 年, 这与抗压腐蚀系数低(0.44~0.65)是非常吻合的。在 II 期工程试用的 HSC, 其使用寿命有所延长, 但是即使混凝土强度等级达到 C70, 如果不采取防护措施也仅有 2.4~3.3 年的使用寿命, 其抗压腐蚀系数不高(0.65~0.81)也表明, HSC 在青海盐湖地区是不耐久的, 青海盐湖钾肥 II 期工程在混凝土配合比设计时可能存在不足。

### 3.4 北京城市立交桥的混凝土寿命预期

图 1 为 C30 普通混凝土和 C60 引气高性能混凝土在 3.5% 质量浓度的 NaCl 盐冻作用下的损伤失效过程。由图 1 可见, 混凝土在盐冻作用下的损伤失效模式为单段损伤模式, 回归得到的盐冻损伤演化方程的损伤参数见表 3。在损伤演化方程中令  $E_r = 60\%$ , 即可求得不同混凝土在实验室的除冰盐作用下的抗冻融循环次数。根据文献[4],[5], 北京

表 2 青海盐湖钾肥工程混凝土的损伤参数与预期使用寿命

Tab. 2 Damage Parameters and Expantancy Service Life of Concrete Used in Potassic Manure Plant in Salt Lake of Qinghai

工程阶段	混凝土试样	环境作用	损伤参数/ $10^{-4}$		快速试验寿命	预期使用寿命/年
			IDV 值	DA 值		
I 期	OPC	腐蚀	-5	0.000	800 d	2.2
	OPC	干湿循环+腐蚀	-17	0.000	235 次循环	1.3
II 期	HSC	腐蚀	4	-0.012	1 215 d	3.3
	HSC	干湿循环+腐蚀	4	-0.060	438 次循环	2.4

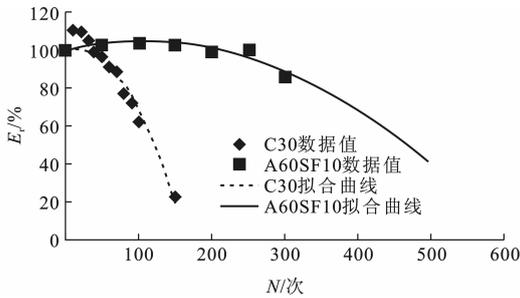


图 1 不同混凝土在盐冻作用下的损伤失效过程

Fig. 1 Damage Failure Processes of Different Concrete Subjected to Salt-frost Action

表 3 不同混凝土在除冰盐作用下的冻融损伤参数与预期使用寿命

Tab. 3 Freeze-thaw Damage Parameters and Life Service Expanancy of Different Concrete Subjected to Deicing Salt Action

混凝土种类	IDV 值/ $10^{-4}$	DA 值/ $10^{-4}$	相关系数	抗冻融循环次数	预期使用寿命/年
C30	-12.00	0.88	0.979 5	110	16
A60SF10	-8.16	0.08	0.971 3	434	62

地区每年的自然冻融循环次数约为 84 次,混凝土在实验室快速冻融循环 1 次相当于自然条件下循环 12 次,因此,依据式(4)预测 C30 普通混凝土用于北京城市立交桥的预期使用寿命为 16 年,这与北京旧西直门立交桥在使用 18 年后因严重破坏而拆除重建的实际寿命完全相符<sup>[31]</sup>。图 1 和表 3 中的结果还表明,当采用 C60 引气高性能混凝土时,北京城市立交桥的预期使用寿命可以满足 50 年的使用要求。

## 4 结 语

(1)提出了运用混凝土的损伤演化方程预测重大工程混凝土结构使用寿命的基本思路和理论框架。确定了混凝土在实验室的荷载、腐蚀和冻融等多种因素作用下的快速冻融寿命与实际工程服役条件下使用寿命之间换算关系的基本原则。初步建立了混凝土在实验室的快速耐久性试验方法体系和测试技术。

(2)运用已经建立的混凝土损伤演化方程及部分数据库,预测混凝土在实验室快速冻融条件下的冻融寿命与试验值非常接近,证明将损伤演化方程应用于混凝土的寿命预测是切实可行的。在实际应用时,如果建立涵盖不同工程使用环境的更加广泛的数据库,其实用价值会更大。

(3)通过快速腐蚀和快速冻融试验,运用混凝土

的损伤演化方程,对青海盐湖钾肥工程和北京城市立交桥关键结构混凝土的使用寿命进行了预测,解决了非海洋环境地区或气候条件下重大混凝土工程的寿命设计和寿命预测问题。

(4)混凝土结构的寿命预测不可能是一个很精确的科学问题。今后应该进一步完善有关数据库,引进工程结构设计的可靠度理论,逐步形成一套完整的混凝土寿命预测体系。

## 参考文献:

### References:

- [1] 余红发,孙伟,张云升,等.在冻融或腐蚀条件下混凝土使用寿命预测方法 I——损伤演化方程与损伤失效模式[J].硅酸盐学报,2008,36(增1):128-135.  
YU Hong-fa, SUN Wei, ZHANG Yun-sheng, et al. Service Life Prediction Method of Concrete Subjected to Freezing-thawing Cycles and/or Chemical Attack I—Damage Development Equation and Degradation Mode[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008,36(S1):128-135.
- [2] 余红发,孙伟,麻海燕,等.冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析[J].建筑科学与工程学报,2011,28(4):1-8.  
YU Hong-fa, SUN Wei, MA Hai-yan, et al. Analysis of Damage Degradation Parameters of Concrete Subjected to Freezing-thawing Cycles and Chemical Attack[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011,28(4):1-8.
- [3] VESIKARI E. Service Life Design of Concrete Structure with Regard to Frost Resistance of Concrete. Publication[R]. Oslo: Nordic Concrete Federation, 1986:215-228.
- [4] 李金玉,彭小平,邓正刚,等.混凝土抗冻性的定量设计[J].混凝土,2000(9):61-65.  
LI Jin-yu, PENG Xiao-ping, DENG Zheng-gang, et al. Quantitative Design on the Frost-resistance of Concrete[J]. Concrete, 2000(9):61-65.
- [5] 林宝玉,蔡跃波,单国良.保证和提高我国港工混凝土耐久性措施的研究与实践[C]//阎培渝,姚燕.水泥基复合材料科学与技术.北京:中国建材工业出版社,1999:16-23.  
LIN Bao-yu, CAI Yue-bo, SHAN Guo-liang. Insurance and Improvement Measures on Durability of Harbor Structures: Research and Practice[C]//YAN Pei-yu, YAO Yan. Science and Technology of Cement-based Composite Materials. Beijing: China Building Materials Press, 1999:16-23.
- [6] 余红发,孙伟,金祖权,等.土木工程结构混凝土寿

- 命预测的损伤演化方程[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2006, 36(增2): 216-220.
- YU Hong-fa, SUN Wei, JIN Zu-quan, et al. Damage Evolution Equation for Service Life Prediction of Concrete Structures in Key Civil Engineering[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(S2): 216-220.
- [7] 余红发, 孙伟, 刘连新, 等. 在盐湖卤水环境中混凝土应力腐蚀行为[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1965-1968.
- YU Hong-fa, SUN Wei, LIU Lian-xin, et al. Stress Corrosion of Concretes Exposed to Salt Lake Bittern [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12): 1965-1968.
- [8] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- YU Hong-fa. Study on High Performance Concrete in Salt Lake: Durability, Mechanism and Service Life Prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [9] 慕儒. 冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 南京: 东南大学, 2000.
- MU Ru. Durability and Service Life Prediction of Concrete Subjected to the Combined Action of Freezing-thawing, Sustained External Flexural Stress and Salt Solution [D]. Nanjing: Southeast University, 2000.
- [10] 关宇刚. 单一和多重破坏因素作用下高强混凝土的寿命评估[D]. 南京: 东南大学, 2002.
- GUAN Yu-gang. Service Life Evaluation of High Strength Concrete Subjected to Single or Multiple Damage Factors[D]. Nanjing: Southeast University, 2002.
- [11] 高建明, 王边, 朱亚菲, 等. 掺矿渣微粉混凝土的抗冻性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(5): 3-5.
- GAO Jian-ming, WANG Bian, ZHU Ya-fei, et al. Experimental Study on Frost-resisted Property of Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag[J]. China Concrete and Cement Products, 2002(5): 3-5.
- [12] 曹建国, 李金玉, 林莉, 等. 高强混凝土抗冻性的研究[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(4): 292-297.
- CAO Jian-guo, LI Jin-yu, LIN Li, et al. Study on Frost-resistance of High-strength Concrete[J]. Journal of Building Materials, 1999, 2(4): 292-297.
- [13] 郭育霞, 贡金鑫. 电化学除氯后钢筋混凝土桥墩的抗震性能[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 72-79.
- GUO Yu-xia, GONG Jin-xin. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Pier After Electrochemical Chloride Extraction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 72-79.
- [14] 任更锋, 徐岳, 石利强, 等. 基于层次分析法的在役RC桥梁耐久性评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 41-45.
- REN Geng-feng, XU Yue, SHI Li-qiang, et al. Durability Evaluation of Existing Reinforced Concrete Bridges Based on AHP[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 41-45.
- [15] 李世秋, 汪厚植, 胡新民. 桥梁预应力钢筋混凝土结构耐久性影响因素及对策[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(6): 41-43, 52.
- LI Shi-qiu, WANG Hou-zhi, HU Xin-min. Influencing Factors on Durability and Counter Measure of Bridge Prestressed Concrete Structure[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(6): 41-43, 52.
- [16] 郭猛, 刘洪, 白文静. 混凝土桥梁结构的等耐久性设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 117-121.
- GUO Meng, LIU Hong, BAI Wen-jing. Equal Durability Design of Concrete Bridge Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 117-121.
- [17] 肖建庄, 雷斌. 再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 66-72.
- XIAO Jian-zhuang, LEI Bin. Carbonation Model and Structural Durability Design for Recycled Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 66-72.
- [18] 张云清, 余红发, 王甲春. 盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 57-63.
- ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, WANG Jia-chun. Study of Surface Damage Rule of Concrete Structure Exposed to Salt Freezing Condition[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 57-63.
- [19] 叶英华, 马彬, 孙洋. 盐冻损伤钢筋混凝土纯弯构件截面非线性分析[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 16-20.
- YE Ying-hua, MA Bin, SUN Yang. Section Nonlinear Analysis of Salt-freezing Reinforced Concrete Pure Bending Component Based on Damage Theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 16-20.
- [20] 丰茂东, 李建波, 林皋, 等. 随机力学参量对混凝土细观损伤演化的影响[J]. 建筑科学与工程学报,

- 2010,27(4):1-6.
- FENG Mao-dong, LI Jian-bo, LIN Gao, et al. Influence of Stochastic Mechanical Parameters on Meso-damage Evolution of Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 1-6.
- [21] 黄海东, 向中富, 郑皆连. 混凝土结构早期非均匀收缩试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 64-69.
- HUANG Hai-dong, XIANG Zhong-fu, ZHENG Jie-lian. Test of Non-uniform Shrinkage in Concrete Structure at Early Ages[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 64-69.
- [22] 张峰, 李术才. 考虑海水冻融和侵蚀耦合作用的混凝土 Ottosen 强度准则[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 64-69.
- ZHANG Feng, LI Shu-cai. Ottosen Strength Criterion of Concrete by Sea Water Freeze-thaw and Erosion Coupling Action[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 64-69.
- [23] 贡金鑫, 李金波, 程玲. 锈蚀钢筋混凝土圆柱加固后的抗震性能[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 41-48.
- GONG Jin-xin, LI Jin-bo, CHENG Ling. Seismic Behavior of Strengthened Corrosion-damaged Circular Reinforced Concrete Columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 41-48.
- [24] 李会艳. 矿物掺和料对高性能混凝土性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(3): 63-67.
- LI Hui-yan. Effect of Mineral Admixture on Performance of High Performance Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(3): 63-67.
- [25] 唐小祝, 于卫国. 预应力混凝土上拱度分析及控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 267-269.
- TANG Xiao-zhu, YU Wei-guo. Analysis and Control of Deflection Upwards of Prestressed Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 267-269.
- [26] 于峰, 牛荻涛, 贺拴海. 纤维复合材料约束混凝土柱的统一强度模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 70-74.
- YU Feng, NIU Di-tao, HE Shuan-hai. Unified Compressive Strength Model of FRP-confined Concrete Column[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 70-74.
- [27] 闫磊, 吕颖钊, 贺拴海. 在役混凝土桥梁可靠度分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 50-53.
- YAN Lei, LU Ying-zhao, HE Shuan-hai. Reliability of Existing Concrete Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 50-53.
- [28] 冯忠绪, 王卫中. 增强混凝土界面粘结强度的方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 91-94.
- FENG Zhong-xu, WANG Wei-zhong. Reinforcement Methods of Concrete Interfacial Bond Strength[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 91-94.
- [29] 张云清, 余红发, 王甲春. 钢筋混凝土构件的抗盐冻性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2): 345-351.
- ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, WANG Jia-chun. Study of Salt-freezing-resistance of Concrete Member[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2): 345-351.
- [30] 余红发, 孙伟, 王甲春, 等. 盐湖地区的环境条件与混凝土和钢筋混凝土结构的耐久性[J]. 工业建筑, 2003, 33(3): 1-4, 10.
- YU Hong-fa, SUN Wei, WANG Jia-chun, et al. Circumstance of Salt Lakes and the Durability of Concrete or Reinforced Concrete[J]. Industrial Construction, 2003, 33(3): 1-4, 10.
- [31] 王玲, 田培, 姚燕, 等. 西直门旧桥混凝土破坏原因分析[C]//阎培渝, 姚燕. 水泥基复合材料科学与技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1998: 79-82.
- WANG Ling, TIAN Pei, YAO Yan, et al. Analyzes on Destruction of Xizhimen Cloverleaf Bridge[C]//YAN Pei-yu, YAO Yan. Science and Technology of Cement Based Composite. Beijing: China Building Material Industry Press, 1998: 79-82.