

文章编号: 1002-0268 (2009) 09-0059-05

# 杭州湾跨海大桥 70 m 箱梁结构寿命随机分析

赵卓<sup>1</sup>, 滕海文<sup>2</sup>, 徐爱敏<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;  
3. 杭州湾大桥工程指挥部, 浙江 宁波 315327)

**摘要:** 基于 70 m 整孔预制箱梁的结构、材料及海域环境特点, 结合现场箱梁结构保护层厚度、氯离子初始浓度以及氯离子扩散系数等的实际检验检测结果, 对混凝土保护层厚度、氯离子初始浓度、氯离子扩散系数、氯离子临界浓度以及结构表面氯离子浓度等各类耐久性影响因素的不确定性进行概率统计分析, 确定其统计分布特征。通过 Monte Carlo 随机模拟, 得出了 70 m 箱梁结构使用寿命的近似概率密度分布, 通过假设检验, 确定其服从对数正态分布, 并给出在不同保证率情况下箱梁结构设计使用寿命的取值。

**关键词:** 桥梁工程; 服役寿命; 随机分析; 结构耐久性

中图分类号: U448.35

文献标识码: A

## Stochastic Analysis of Durability of 70 m Box Girder Structure of Hangzhou Bay Bridge

ZHAO Zhuo<sup>1</sup>, TENG Haiwen<sup>2</sup>, XU Ai' min<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450002, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Hangzhou Bay Bridge Engineering Headquarters, Ningbo Zhejiang 315327, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of structural design, material, corrosiveness of service environment of 70 m box girder structure of Hangzhou Bay Bridge and the site detection results of concrete cover thickness, initial concentration and diffusion coefficient of chloride ions, the stochastic characters of durability influencing factors such as concrete cover thickness, initial concentration and critical concentration of chloride ions, chloride ions diffusion coefficient in concrete, and structural surface concentration of chloride ions were analysed and the statistical distribution characteristics were determined. Through Monte Carlo stochastic simulation, the approximate probability density distribution of service life of 70 m PC box girder was obtained. The log-normal distribution character of the structure was determined by hypothesis testing. The values of designed service life of box girder under different reliability index were given.

**Key words:** bridge engineering; service life; stochastic analysis; structural durability

## 0 前言

杭州湾跨海大桥工程地处杭州湾海域, 常年气温较高, 湿度大, 海域海水含盐度高, 氯离子含量大, 桥位处于出海口, 涨落潮的干湿侵蚀效应、海洋大气

的腐蚀环境, 对大桥的使用寿命将产生极大的不利影响。因此, 基于杭州湾跨海大桥 70 m 整孔预制箱梁的设计、施工特点, 综合考虑杭州湾海域环境的腐蚀性, 建立杭州湾跨海大桥 70 m 预应力混凝土箱梁结构耐久使用寿命的随机预测分析理论和方法, 丰富完

收稿日期: 2008-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50808005); 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAJ27B04); 北京市科技计划课题资助项目 (Y060506000007022)

作者简介: 赵卓 (1970-), 男, 河南郑州人, 博士, 教授, 从事工程结构耐久性研究. (zhao\_99@163.com)

善海洋环境下混凝土结构的耐久性设计以及评估理论, 以确保杭州湾跨海大桥在 100 a 设计使用寿命内的正常使用, 具有重大的实际意义和理论意义。

## 1 杭州湾海域环境特点

海水是一种含有大量以氯化钠为主的近中性盐类电解质溶液, 并溶有一定量的氧。海水腐蚀的影响因素主要有含盐量、电导率、溶解物质(如二氧化碳、碳酸盐等)、pH 值、温度、流速和波浪等的影响。海水的组成中, 氯离子含量最高, 氯度为 19‰, 占离子总含量的 55%, 是造成结构混凝土中钢筋腐蚀以及结构耐久性降低的主要原因<sup>[1]</sup>。

杭州湾为典型的半日潮强潮海域, 海水平均含砂量 1.25 kg/m<sup>3</sup>, 平均含盐度 10.8 g/kg, 为 pH > 8 的弱碱性 Cl-Na 型咸水。相关调查资料表明: 杭州湾海域受长江与钱塘江等排放的影响, 氯离子含量小于 10 kg/m<sup>3</sup>。

## 2 70 m 箱梁结构的耐久使用寿命

### 2.1 基于氯离子侵蚀的 70 m 箱梁结构的腐蚀损伤

对于氯离子侵蚀环境下的混凝土结构, 一般采用如图 1 所示的 Tuutti<sup>[2]</sup> 模型来定性描述结构受腐蚀损伤的发展过程。可以看出, 为准确描述混凝土结构腐蚀的整个进程, 并对受腐蚀结构的剩余使用寿命做出合理预测, 结构钢筋腐蚀的初始时间  $t_0$  的确定是至关重要的。

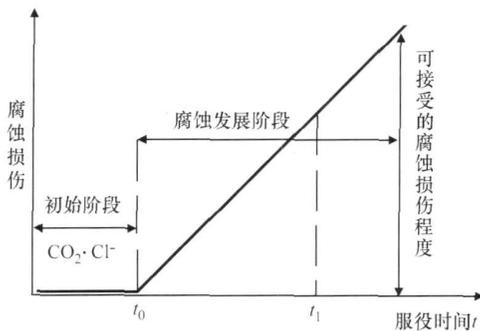


图 1 Tuutti 腐蚀损伤模型

Fig. 1 Tuutti corrosion damage model

对于普通钢筋混凝土结构而言, 其腐蚀过程一般可划分为 3 个阶段<sup>[3]</sup>: 结构钢筋腐蚀的初始阶段, 以作为其阶段标志时间; 结构混凝土开裂前的腐蚀发展阶段, 以混凝土开裂作为其阶段标志时间; 结构混凝土开裂后的腐蚀发展以至结构破坏的阶段。

与普通钢筋混凝土结构相比, 预应力混凝土结构的腐蚀破坏特点则有其特殊性<sup>[4]</sup>。其中, 后张预应力

混凝土结构的耐久性问题尤其突出。因此, 对于杭州湾跨海大桥 70 m 预应力混凝土箱梁结构而言, 可偏安全地近似将结构钢筋的初始腐蚀时间  $t_0$  作为其结构腐蚀破坏的临界状态。

### 2.2 氯离子在混凝土中的扩散

通常情况下, 基于 Fick 第二扩散定律, 氯离子在没有开裂的混凝土中的扩散模型为:

$$C_x = (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + C_0 \quad (1)$$

式中,  $C_x$  为时刻  $x$  处的浓度;  $C_s$  为结构表面处的浓度;  $C_0$  为初始浓度;  $d$  为扩散系数; erf 为误差函数,

$$\operatorname{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt。$$

当  $t$  时刻  $x$  处的浓度  $C_x$  达到导致钢筋锈蚀的临界氯离子浓度  $C_{cr}$  时, 则可求解出氯离子侵蚀引起深度  $x$  处钢筋锈蚀的初始时间  $t_0$ :

$$t_0 = \frac{x^2}{4D} \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_0} \right) \right]^2 \quad (2)$$

对于杭州湾跨海大桥 70 m 预应力混凝土箱梁结构, 当  $x$  等于结构保护层厚度  $a$  时, 则可保守认为其结构耐久性失效, 达到其耐久使用寿命  $T = t_0$ 。

## 3 70 m 箱梁结构耐久使用寿命随机分析

杭州湾跨海大桥 70 m 箱梁结构耐久使用寿命的确定, 基于 Fick 第二扩散定律, 主要在于  $C_s$ 、 $C_0$ 、 $C_{cr}$ 、 $D$  及  $a$  等相关参数的确定。

由于混凝土结构耐久寿命影响因素的复杂性、基础数据的缺乏以及耐久性基础理论研究等的不完善, 目前所建立的氯离子扩散模型, 较少依据工程实际考虑氯离子扩散系数、氯离子临界浓度、混凝土表面氯离子浓度、混凝土保护层厚度等耐久性影响因素的概率分布特性, 这样得到的氯离子侵蚀深度、氯离子侵蚀耐久寿命等都是确定的值。而对于氯离子侵蚀过程中混凝土材料性能的离散性、施工质量及环境条件等的变异性而言, 用确定性方法研究氯离子侵蚀, 其局限性是不言而喻的。

### 3.1 混凝土保护层厚度 $a$

混凝土保护层可以有效的保护钢筋免受腐蚀, 混凝土结构中钢筋周围混凝土碱性环境的包裹可使其免遭锈蚀(钝化)。保护层厚度反映了混凝土结构抵御氯离子侵蚀的一种能力, 混凝土保护层厚度越大, 则外界腐蚀介质到达钢筋表面所需的时间将越长, 混凝土结构就越耐久。

GB/T 50283-1999<sup>[5]</sup> 通过实际调查和统计分析, 认

为混凝土保护层厚度  $a$  不拒绝正态分布, 其建议的统计特征参数分别为  $\mu_a = 1.0178, \delta_{\Omega_a} = 0.0496$ 。

在杭州湾跨海大桥 70 m 预应力混凝土箱梁的设计、施工中, 为保证钢筋保护层厚度, 除明确要求考虑施工中可能出现的负偏差外<sup>[6]</sup>, 在施工中还采用了定制的保护层钢筋定位夹(块), 以克服传统水泥砂浆垫块易碎、易移位、难固定、尺寸不准等质量不稳定的弱点。通过 4 片预制箱梁结构的保护层厚度检测分析表明: 箱梁结构保护层厚度不拒绝正态分布, 其统计特征参数分别为  $\mu_{\Omega_a} = 1.0325, \delta_{\Omega_a} = 0.0901$ 。

### 3.2 氯离子初始浓度 $C_0$

混凝土中的氯离子主要由 2 部分组成: 一部分是由拌和水、水泥、细骨料、粗骨料、矿物掺和料以及各种外加剂等混凝土组成材料带进混凝土的氯离子; 一部分是通过混凝土保护层由外界环境渗透进入混凝土内部的氯离子。目前, 针对混凝土拌和物中由各种原材料引入的氯离子总量, 各国规范均对其做出了相应的规定加以限制<sup>[7]</sup>。

杭州湾跨海大桥结合 70 m 整孔预制箱梁的特点, 规定混凝土拌和物中由各种原材料引入的氯离子总含量应不超过胶凝材料总量的 0.06%<sup>[6]</sup>。现场施工配合比结果表明<sup>[8]</sup>, 箱梁混凝土拌和物中的氯离子含量一般为胶凝材料总量的 0.006% ~ 0.008% 左右。

应该指出的是, 由于施工、环境、材料等各种不确定性因素的影响, 混凝土拌和物中氯离子的初始浓度  $C_0$  为具有一定分布特征的随机变量。基于相关规范及已有研究成果, 可假定其服从正态分布, 并可通过实际测试数据进行修正。

### 3.3 氯离子扩散系数 $D$

氯离子扩散系数  $D$  是用来反映混凝土对外界环境中氯离子侵蚀抵抗能力的参数。氯离子在混凝土中的扩散受到混凝土材料的组成、内部孔结构的特征等因素的影响, 如水灰比、水泥品种、骨料级配、外加剂种类和掺量, 还受到外界因素包括养护条件、暴露时间、环境温湿度等的影响。

杭州湾跨海大桥结合工程服役环境特点, 对结构混凝土的抗氯离子渗透性也进行了相应规定, 如表 1 所示<sup>[6]</sup>。表 2 为杭州湾跨海大桥工程 267 片 70 m 箱梁结构氯离子渗透系数实测值 (RCM 法) 的统计分析结果, 其检测龄期均大于 12 周。

由于技术标准的不统一及实测数据的缺乏, 目前关于氯离子扩散系数分布特性的研究结论并不多见。基于 70 m 箱梁结构氯离子渗透系数的实际检测数据可以看出, 氯离子扩散系数的分布较为均匀, 分布规

表 1 混凝土抗氯离子渗透性 (8 周龄期)

Tab 1 The required chloride ion diffusivity resistance in concrete (8 weeks age)

结构类别	钢筋混凝土构件			预应力构件	
	D	E	F	D-F	
抗氯离子渗透性	氯离子扩散系数/ ( $\times 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	2.5	2.0	1.5	1.5
	直流电量测定/C	< 1000	< 800	< 500	< 500

表 2 70 m 箱梁结构实测氯离子渗透系数

Tab 2 Site detection results of chloride ion diffusion coefficient of 70 m box girder structure

测试箱梁片数	平均值/ ( $\times 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	标准差/ ( $\times 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	变异系数
267	0.8411	0.0821	0.0976

律呈钟乳状, 如图 2 所示。K-S 检验的结果不否定其服从正态分布的假设。氯离子扩散系数标准正态化后的检验分析也表明氯离子扩散系数服从正态分布, 如图 3 所示。

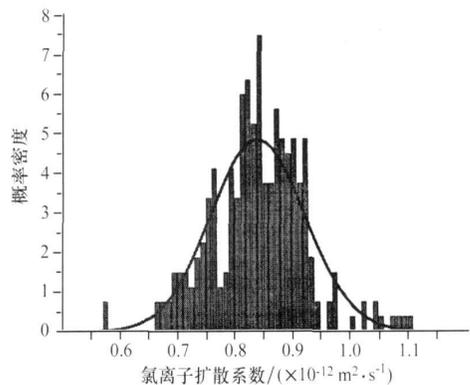


图 2 氯离子扩散系数的近似概率密度分布

Fig 2 Approximate probability density distribution of chloride ion diffusion coefficients

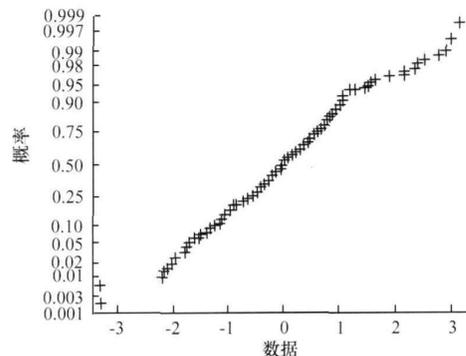


图 3 标准正态化后的氯离子扩散系数分布

Fig 3 Verification of chloride ion diffusion coefficient distribution after normalization

应该指出的是, 由于混凝土是一种水硬性材料,

其水化过程需要经过很长时间才能完成,混凝土的成熟度对氯离子的扩散存在很大的影响,水化越充分,混凝土内部越密实,抗侵蚀能力则越强,随着混凝土的不断水化,其内部结构越来越密实。实际检测结果表明<sup>[9]</sup>,混凝土的扩散系数随着龄期增长而越来越小,特别是开始的1~3 a内扩散系数下降最为明显,只有在龄期较长时,扩散系数  $D$  才基本趋于一个常量。由于相关统计数据的缺乏,在进一步的分析中,可保守假设混凝土氯离子扩散系数在投入运营3 a后趋于稳定常量:

$$D(t) = \begin{cases} D_{84} \times \left( \frac{84}{t \times 365} \right)^m & t \leq 3 \\ D_{84} \times \left( \frac{84}{t \times 365} \right)^m & t > 3 \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $m$  为龄期系数,  $m = 0.6^{[10]}$ 。

### 3.4 氯离子临界浓度 $C_{cr}$

氯离子临界浓度是分析氯离子引起钢筋锈蚀过程的一个重要参数,它受到服役环境、混凝土配合比、水泥含量、水泥类型、水胶比、掺合料含量、温湿度、施工质量、钢筋表面状态、氯离子来源等多种因素的影响,对应于不同的结构部位及使用环境,氯离子的临界浓度也有所差异。由于氯离子临界浓度受到多种随机因素的影响,因此是具有有一定概率分布特征的综合随机变量,即:

$$C_{cr} = X(x_1, x_2, \dots, x_i), \quad (4)$$

式中,  $x_i$  为服役环境、混凝土配合比、水泥含量、水泥类型、水胶比、掺合料含量、温湿度、施工质量、钢筋表面状态以及氯离子来源等随机变量。

关于引起钢筋锈蚀的氯离子临界值,目前看法并不一致,研究者所用的材料、规定的试验条件及试验目的的不同,其结果也有一定差异,但一般界定于占水泥重量的0.35%~1%范围内。

结合杭州湾跨海大桥70 m箱梁的结构、材料及环境特点,可将胶凝材料重量的0.4%作为导致钢筋锈蚀的极限容许量,并假定其服从  $\mu = 0.35\%$ ,  $\sigma = 0.05\%$ , (占胶凝材料重量)的正态分布<sup>[11]</sup>。在进一步的工作中,结合杭州湾跨海大桥所建立的长期暴露试验站,通过实际检测和模拟试验,来确定实际临界浓度的概率分布特征,从而达到在一定概率基础上取值的目的,保证70 m箱梁结构在设计使用寿命内的耐久性。

### 3.5 结构表面氯离子浓度 $C_s$

混凝土结构表面氯离子浓度的大小与结构服役环境有较大关系,而结构混凝土的水胶比、胶凝材料种

类及表面状态等,也将可能影响环境中氯离子在结构混凝土表面的集聚和吸附,并进而影响  $C_s$  的取值。

混凝土结构经过一段时间的使用后,其表面基本达到离子饱和,在稳定的使用环境中,不会发生太大的变化,因此,在基础调查数据较为缺乏的条件下,可假定在任一时刻点,混凝土结构表面氯离子浓度取值相对稳定,为围绕其平均值有微小波动的随机变量。

处于近海大气区或海上盐雾区的混凝土结构,混凝土表面氯离子逐渐累积,根据其所处地理位置的不同,可能需要10 a或更长的时间氯离子浓度方能达到稳定值。其聚积过程如式(5)所示。

$$C_s = a\sqrt{t}, \quad (5)$$

式中,  $a$  为聚积常数。

我国目前尚缺乏近海大气混凝土表面氯离子浓度的实测资料。CECS 220:2007<sup>[12]</sup>参考国外相关资料和我国实测数据,给出了不同区域混凝土表面氯离子浓度参考表,如表3所示。

表3 潮汐区、浪溅区混凝土表面氯离子浓度

Tab 3 Structural surface concentration of chloride ion at tidal zone and waves splash zone

$f_{ck}/\text{MPa}$	40	30	25	20
$C_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8.1	10.8	12.9	15.0

注:海上盐雾区可按表3取用,达到稳定值的聚积时间可取10 a。

由于相关基础检测数据的缺乏,目前针对表面氯离子浓度分布特征的研究并不多见。基于已有研究成果<sup>[11,13]</sup>,可暂假设其服从正态分布。在进一步的工作中,通过实际结构检测和模拟试验等,对不同环境条件下混凝土结构表面的氯离子浓度取值和分布进行完善和修正,从而达到在一定概率基础上取值的目的,保证结构在设计使用寿命内的耐久性。

### 3.6 70 m箱梁结构耐久使用寿命的概率分布特性

基于上述分析研究,影响杭州湾跨海大桥70 m箱梁结构耐久使用寿命的各类参数的统计分布特征如表4所示。

表4 影响使用寿命的各类参数的统计分布特征

Tab 4 Statistical distribution characters of influencing factors on service life

参数	概率分布特征
混凝土保护层厚度 $a/\text{mm}$	$N(41.3, 3.72)$
氯离子初始浓度 $C_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$N(0.032, 0.0026)$
氯离子扩散系数 $D/(10^{-12}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$N(0.841, 0.0821)$
氯离子临界浓度 $C_{cr}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$N(1.65, 0.24)$
表面氯离子浓度 $C_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$N(5.4, 0.316)$

注:1. 氯离子扩散系数为84 d龄期的分布参数;2. 结构表面氯离子浓度为10 a聚积后的参数值。

利用上述影响参数的统计分布值,综合考虑氯离子扩散系数的变化和结构表面氯离子的聚积时间的影响,通过 Monte Carlo 随机模拟,可求得 70 m 预应力混凝土箱梁结构耐久使用寿命的分布情况,模拟后所得到的结构耐久使用寿命  $t_0$  的近似概率密度分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,结构耐久使用寿命  $t_0$  呈现中间高,两头低的偏态分布特征。

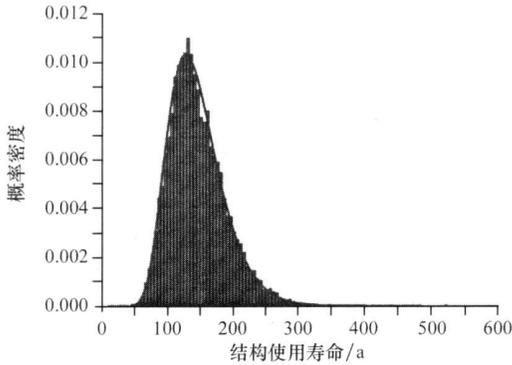


图 4 结构耐久使用寿命的近似概率密度分布

Fig 4 Approximate probability density distribution of structural service life

K-S 检验的结果否定 70 m 箱梁结构的耐久使用寿命  $t_0$  服从正态分布的假设,而不否定其服从 LOGN (4.940 5, 0.287 7) 的对数正态分布的假设。耐久使用寿命  $t_0$  标准正态化后的检验分析也表明其服从对数正态分布,如图 5 所示。

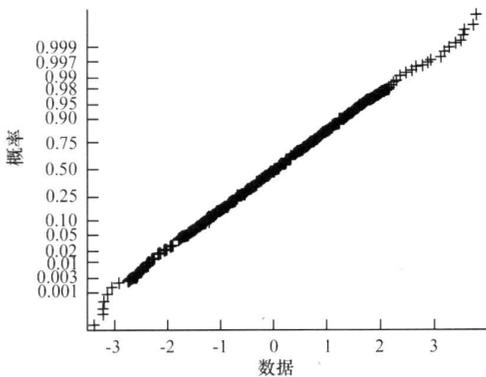


图 5 标准正态化后的结构使用寿命分布检验

Fig 5 Verification of structural service life distribution after normalization

若取保证率为 95%,即失效概率  $p_f = 5%$ ,相应可靠性指标  $\beta = 1.645$ ,则其耐久使用寿命设计标准值可取  $T_k = 90$  a;若取保证率为 90%,即失效概率  $p_f = 10%$ ,相应可靠性指标  $\beta = 1.288$ ,则其耐久使用寿命设计标准值可取  $T_k = 100$  a。

基于上述计算分析可以认为,杭州湾跨海大桥

70 m 箱梁结构耐久使用寿命  $t_0$  服从对数正态分布。应该指出的是,随着结构服役年限的增长,其相关影响因素也将随之而发生改变。因此,当在预应力结构服役期内某时刻对其剩余使用寿命进行统计预测分析时,则应基于各影响因素在该时刻的实际检测数据来进行。

#### 4 结论

本文基于杭州湾海域环境腐蚀性特点和 70 m 预应力混凝土箱梁结构的实际相关检测数据,分析研究了结构耐久使用寿命影响因素,如混凝土保护层厚度  $a$ 、氯离子初始浓度  $C_0$ 、氯离子扩散系数  $D$ 、氯离子临界浓度  $C_a$  以及结构表面氯离子浓度  $C_s$  等的概率分布特征,得出了 70 m 箱梁结构耐久使用寿命的统计分布特征和近似概率密度函数,建议了耐久使用寿命的标准设计取值,为同类工程的耐久性设计、施工及质量控制提供了理论方法及依据。

参考文献:

#### References:

- [1] 赵尚传,贡金鑫,水金锋. 氯离子环境下既有钢筋混凝土桥梁耐久性的概率分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (7): 82-86  
ZHAO Shangchuan, GONG Jinxin, SHUI Jinpeng. Probability Analysis of Durability for Existing Reinforced Concrete Bridge in Chloride Environment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (7): 82-86.
- [2] TUUTTI K. Corrosion of Steel in Concrete [R]. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [3] 赵卓,马亚丽,李锋. 氯离子环境下钢筋腐蚀速度分阶段模型 [J]. 工业建筑, 2005, 35 (382): 1-4  
ZHAO Zhuo, MA Yali, LI Feng. Phase-model of Corrosion Rate of Steel Bar under Chloride Environment [J]. Industrial Construction, 2005, 35 (382): 1-4.
- [4] 张德峰,吕志涛. 现代预应力混凝土结构耐久性的研究现状及其特点 [J]. 工业建筑, 2000, 30 (11): 1-4  
ZHANG Defeng, LV Zhitao. The Research Status and Characteristics of Modern Pre-stressed Concrete Structures on Durability [J]. Industrial Construction, 2000, 30 (11): 1-4.
- [5] 中国国家质量技术监督局,中华人民共和国建设部. GB/T 50283-1999 公路工程结构可靠度设计统一标准 [S]. 北京:中国计划出版社,1999.  
P. R. China General Administration of Quality Supervision, P. R. China Ministry of Construction. GB/T 50283-1999 Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.

(下转第 69 页)

- 梁的综合疲劳评定方法研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (2): 60–67.
- WANG Ying, LI Zhaoxia, CHAN T H T, et al Preliminary Investigation of Synthetic Fatigue Evaluation Method for Box-shaped Steel Trussed Girder of Long-span Suspension Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (2): 60–67.
- [3] 李莹, 黄侨, 孙永明. 焊接钢桥腹板出平面变形疲劳问题的有限元分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (1): 74–78.
- LI Ying, HUANG Qiao, SUN Yongming. Finite Element Analysis of Out-plane Distortion Induced Fatigue of Welded Steel Bridge Web [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (1): 74–78.
- [4] 熊健民, 叶勇, 余天庆. 正交异性钢桥面板的疲劳寿命评估 [J]. 世界桥梁, 2003 (3): 24–27.
- XIONG Jianmin, YE Yong, YU Tianqing. Evaluation of Fatigue Life of Orthotropic Steel Deck Plates [J]. World Bridge, 2003 (3): 24–27.
- [5] 徐俊, 陈惟珍, 谭金华. 赣江大桥基于应力谱的疲劳寿命可靠度分析 [J]. 钢结构, 2004, 19 (4): 35–37.
- XU Jun, CHEN Weizhen, TAN Jinhua. Fatigue Life Reliability Analysis of Ganjiang River Bridge [J]. Steel Construction, 2004, 19 (4): 35–37.
- [6] WONG K Y. Structural Identification of Tsing Ma Bridge [J]. Transaction of the Hong Kong Institute of Engineers, 2003, 10 (1): 38–47.
- [7] 周太全. 桥梁构件局部热点应力分析及其疲劳损伤累积过程模拟 [D]. 南京: 东南大学, 2003.
- ZHOU Taiquan. Analysis of Local Hot Stress and Simulation of Fatigue Damage Accumulative Course of Bridge Members [D]. Nanjing: Southeast University, 2003.
- [8] WONG K Y. Instrumentation and Health Monitoring of Cable supported Bridges [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11: 91–124.
- [9] TSAKOPOULOS P A, FISHER J W. Full-scale Fatigue Tests of Steel Orthotropic Decks for the Williamsburg Bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 10 (2): 332–333.
- [10] 李兆霞. 损伤力学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 7–31.
- LI Zhaoxia. Damage Mechanics and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2002: 7–31.
- [11] 李荣. 角焊缝搭接接头疲劳寿命预测研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- LI Rong. Research on Prediction of Fatigue Life of Welding Conformation [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.

## (上接第63页)

- [6] 杭州湾大桥工程指挥部. 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性设计指南 [R]. 宁波: 杭州湾大桥工程指挥部, 2003.
- Hangzhou Bay Bridge Engineering Headquarters. Guide to Concrete Structure Durability Design of Hangzhou Bay Bridge [R]. Ningbo: Hangzhou Bay Bridge Engineering Headquarters, 2003.
- [7] 赵卓, 蒋晓东. 受腐蚀混凝土结构耐久性检测诊断 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- ZHAO Zhuo, JIANG Xiaodong. The Durability Monitoring & Diagnosis of Corroded Concrete Structures [M]. Zhengzhou: Yellow River Hydraulic Press, 2006.
- [8] 蔡以智, 王文学, 薄祥照. 杭州湾跨海大桥 50 m 箱梁 C50 海工耐久混凝土配合比试验研究 [J]. 混凝土, 2006 (200): 69–72.
- CAI Yizhi, WANG Wenxue, BO Xiangzhao. Study on the Concrete Formulation of C50 Durable Concrete of Box Beam Used in Oceanic Condition of the Box Beam of the Hangzhou bay Bridge [J]. Concrete, 2006 (200): 69–72.
- [9] 马亚丽. 基于可靠性分析的钢筋混凝土结构耐久寿命预测 [D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- MA Yali. Reliability Based Durable Life Prediction of Reinforced Concrete Structures [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [10] 刘秉京. 概率性能基础的使用寿命设计 [J]. 中国港湾建设, 2006, 2 (142): 20–26.
- LIU Bingjing. Probabilistic Performance Based Service Life Design [J]. China Harbour Engineering, 2006, 2 (142): 20–26.
- [11] CHRISTENSEN P T. Modeling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures [R]. Denmark: Aalborg University, 2001.
- [12] 中国工程建设标准化协会. CECS 220: 2007 混凝土结构耐久性评定标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- China Association for Engineering Construction Standardization. CECS 220: 2007 Standard for Durability Assessment of Concrete Structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [13] 马亚丽, 张爱林. 混凝土结构钢筋初锈时间的概率模型 [J]. 水利学报, 2007, 38 (5): 630–635.
- MA Yali, ZHANG Ailin. Probabilistic Model of Corrosion Initiation Time of Steel Bar in Concrete Structure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (5): 630–635.