

寿命期内钢筋混凝土连续梁退化过程分析

田浩^{1,2}, 陈艾荣¹

(1. 同济大学 桥梁工程系, 200092 上海, tianhao_8@163.com; 2. 浙江省交通科学研究所, 310006 杭州)

摘要:为实现寿命期内混凝土桥梁退化过程定量分析的目标,在给出退化全过程中3个关键时刻的计算数学模型以及特有力学问题模拟方法的基础上,建立基于有限元数值模拟的混凝土桥梁退化过程分析方法.在理论分析的基础上利用FORTRAN 95编写了分析程序CBDAS,以一座钢筋混凝土连续梁为对象,研究其在氯离子侵蚀作用时给定寿命期内桥梁结构整体力学性能的演变规律.结果表明:氯离子侵蚀作用时,普通钢筋具有开始锈蚀时间早、锈蚀速率快的特点;成桥80 a后,模型梁2个关键截面处的抗弯承载力均小于对应的包络弯矩.对于钢筋混凝土桥梁,其承载能力极限状态时可能会出现耐久性不足.

关键词:钢筋混凝土连续梁;寿命期;退化过程;关键时刻;数值模拟;氯离子侵蚀

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)06-0086-05

Analysis of the degradation process for a reinforced concrete continuous girder bridge in life-cycle

TIAN Hao^{1,2}, CHEN Ai-rong¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China, tianhao_8@163.com;
2. Zhejiang Scientific Research Institute of Communication, 310006 Hangzhou, China)

Abstract: For the purpose of the degradation assessment of concrete bridges in life-cycle, a finite element-based methodology for the degradation process of concrete bridges is proposed. This is done by: (a) the computation formulas of the three critical times; and (b) the simulation methods of several special mechanics problems in the degradation process. Based on the theoretical analysis, a program named CBDAS is written in FORTRAN 95. The research on the variation of structural performance in given service life with chloride penetration is carried out by means of a reinforced concrete continuous girder bridge. The results show that: the initiation time of reinforcement corrosion is early and the corrosion rate is fast with chloride penetration. In 80 years after structure completion, bending capacities are smaller than the relative envelope moments at two critical sections for the ultimate limit state. As a result, as for the reinforced concrete bridges, the ultimate limit states are more likely to have durability defects.

Key words: reinforced concrete continuous bridge; life-cycle; degradation process; critical times; numerical simulation; chloride penetration

混凝土和钢筋在劣化环境作用下会出现了一系列影响结构耐久性的物理、化学现象,如混凝土碳化、保护层剥落、裂缝的发展以及钢筋锈蚀

等^[1].我国近几十年建造的混凝土桥梁中也有不少已暴露出病害,更有一些桥梁在远没达到预期使用寿命时出现耐久性严重退化的现象,甚至发生倒塌等毁灭性事故.目前混凝土桥梁的耐久性研究在材料和构件层面已取得许多成果^[2-4],但是在结构层面则相对较少,现有分析方法或是人为因素较多,或是考虑的影响因素不够全面,缺乏能准确定量模拟混凝土桥梁在劣化环境作用下

收稿日期: 2009-12-12.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2007AA11Z104);
西部交通建设科技项目(200631822302-01).

作者简介: 田浩(1982—),男,博士;
陈艾荣(1963—),男,教授,博士生导师.

结构整体力学性能演变过程的退化全过程分析方法及相应的分析工具. 本文根据氯离子侵蚀作用时混凝土桥梁耐久性退化全过程的受力特点, 首先给出退化过程中3个关键时刻的计算数学模型以及特有力学问题的数值模拟方法; 在理论分析的基础上利用计算机高级语言 FORTRAN 95 编写了相应的分析程序 CBDAS (Concrete bridge durability analysis system); 最后, 以一座钢筋混凝土连续梁为对象, 研究在氯离子侵蚀作用下给定寿命期内模型梁整体力学性能的演变规律.

1 耐久性退化全过程

耐久性退化全过程大致可分为4个阶段, 如图1所示^[5]. 第1阶段为氯离子侵蚀阶段, 从结构建成到钢筋表面氯离子到达临界浓度而导致钢筋开始锈蚀时刻 t_1 ; 第2阶段为钢筋锈蚀产物膨胀阶段, 从钢筋开始锈蚀到混凝土开裂时刻 t_2 , 随着钢筋锈蚀程度的加深, 锈蚀率达到某临界值时进一步锈蚀产生的锈胀力将引起周围混凝土开裂; 第3阶段为混凝土开裂阶段, 从混凝土开裂到保护层完全剥落时刻 t_3 , 钢筋锈蚀程度达到某一临界值时混凝土保护层完全剥落; 第4阶段为裂缝发展导致结构性能严重退化阶段, 钢筋将继续锈蚀, 但混凝土截面不再继续削弱直至结构达到极限状态而无法继续服役.

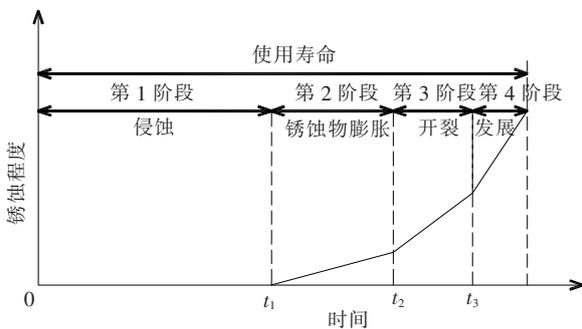


图1 退化全过程

整个退化过程中共有3个关键时刻(临界时刻), 即: t_1 、 t_2 和 t_3 , 关键时刻前后结构整体力学性能将发生明显变化. 因此, 准确模拟混凝土桥梁退化全过程需要解决2个问题: 1) 如何确定退化过程中的3个关键时刻; 2) 如何准确模拟退化过程中出现的特有力学问题, 如材料力学性能退化, 不同材料的截面面积削弱以及由此引起的结构整体力学性能的演变, 结构自重损失以及削弱截面上的内力重分布等.

1.1 退化关键时刻

在归纳和比较现有以实验或理论分析为基础

建立的众多数学模型^[2,6-7]的基础上, 本文选取了连贯性和适用性较好的关键时刻计算数学模型.

钢筋开始锈蚀时刻 t_1 为^[7]

$$t_1 = \left\{ \frac{c^2 \times 10^{-6}}{4D_0 t_0^\alpha [\text{erf}^{-1}(1 - M_{cr}/M_s)]^2} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (1)$$

其中: c 为混凝土保护层厚度, α 为氯离子扩散系数的时间依赖系数, 对普通硅酸盐混凝土近似取为0.2, t_0 为结构建成至检测时的时间, 当无有效实测数据时取为5 a, D_0 为 t_0 时刻的氯离子有效扩散系数, erf 为误差函数, M_{cr} 为引起钢筋锈蚀的临界氯离子浓度, M_s 为混凝土表面氯离子浓度.

混凝土开裂时刻 t_2 按下列公式进行计算^[7]:

$$t_2 = t_1 + \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cl}} \quad (2)$$

$$\delta_{cr} = 0.015(c/d)^{1.55} + 0.0014f_{ck} + 0.0016 \quad (3)$$

$$\lambda_{cl} = 11.6 \times i \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$\ln i = 8.617 + 0.618 \ln M_{sl} - \frac{3034}{T + 273} - 5 \times 10^{-3} \rho + \ln m_{cl} \quad (5)$$

$$M_{sl} = M_{s0} + (M_s - M_{s0}) \left(1 - \text{erf} \left(\frac{c \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_2}} \right) \right) \quad (6)$$

$$D = D_0 (t_0/t_2)^\alpha \quad (7)$$

$$\rho = k_p (1.8 - M_{cl}^\mu) + 10(\phi - 1)^2 + 4 \quad (8)$$

其中: δ_{cr} 为保护层开始时刻临界钢筋锈蚀深度, d 为钢筋直径, f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值, λ_{cl} 为氯腐蚀环境保护层开裂前钢筋的平均锈蚀速度^[7], i 为钢筋的腐蚀电流密度, M_{sl} 为钢筋表面氯离子浓度, T 为钢筋表面处温度, 可近似取大气环境温度, m_{cl} 为局部环境影响系数, ρ 为混凝土电阻率, M_{s0} 为腐蚀环境混凝土制备时已经含有的部分氯离子浓度, D 为氯离子有效扩散系数, k_p 为与水灰比相关的系数, M_{cl}^μ 为混凝土保护层中氯离子平均浓度, 可近似取混凝土表面和钢筋表面氯离子浓度的平均值, ϕ 为大气湿度.

式(6)和(7)中方程的右半部分均含有变量 t_2 , 混凝土开裂时刻 t_2 无法直接通过式(2)求得. 因此混凝土开裂时刻 t_2 将按照下述步骤计算: 1) 假定保护层开裂时刻 $t_2^1 = t_1$; 2) 将 t_2^1 代入式(6)~(8), 求出 M_{sl} 和 ρ ; 3) 将 M_{sl} 和 ρ 代入式(5)求出 i ; 4) 将 i 代入式(4)求出 λ_{cl} ; 5) 将 λ_{cl} 代入式(2)求出保护层开裂时刻 t_2^2 , 如果 $t_2^1 < t_2^2$, $t_2^1 = t_2^1 + \Delta t$, 重复(2)~(4)步; 如果 $\text{abs}(t_2^1 - t_2^2) < m$, 则 $t_2 = t_2^1$, 计算结束. 这里, Δt 为给定的时间增量,

m 为给定的微量.

保护层完全剥落时刻 t_3 计算公式^[7]为

$$t_3 = t_2 + \frac{\delta_d - \delta_{cr}}{\lambda_{chl}} \quad (9)$$

其中: δ_d 为保护层完全剥落时刻的钢筋锈蚀深度, λ_{chl} 为保护层开裂后钢筋锈蚀速度.

1.2 退化过程中的力学问题

在劣化环境作用时材料力学性能的退化和截面面积的削弱引起结构整体力学性能演变,将引出一些在桥梁常规力学分析中不会出现的力学问题,即:材料力学性能的退化过程、不同材料截面面积的削弱过程、以及材料力学性能退化和截面面积削弱引起的结构整体力学性能演变^[8].

2 耐久性分析程序 CBDAS

在理论分析的基础上,本文利用 FORTRAN 95 编写了混凝土桥梁耐久性分析程序 CBDAS. 整个程序包括 2 部分:施工至结构成型分析部分和结构成型到结构退化直至极限状态分析部分.

1) 施工至结构成型分析部分. 接文献[9-10]的模拟方法,本文编写了可考虑多种施工方法的混凝土桥梁施工至结构成型阶段分析程序,可以模拟施工过程中的结构体系变化、预应力效应、施工挂蓝作用以及混凝土徐变收缩作用等力学问题.

2) 结构成型到退化至极限状态分析部分. 结构成型至结构退化至极限状态分析部分的功能为:a. 将施工至结构成型分析得到的成型状态转化成结构退化分析的初始状态,并生成相应的时间信息;b. 根据相应退化关键时刻的计算数学模型考虑某时间段内材料力学性能的退化、截面面积的削弱,由此重新生成结构的永久状态分析模型;c. 考虑材料和截面的退化对桥梁结构整体力学性能的影响. 然后在每个时间段内重复步骤 b 和 c,得到该时间段结束时刻结构的各项响应,直至桥梁结构退化到安全性或适用性极限状态.

CBDAS 由 8 个分析模块组成,其构成见图 2,图 3 为 CBDAS 的总体分析流程.

3 算例分析

3.1 模型介绍

本文选取一座现浇 3 跨全长 66 m 等高度钢筋混凝土箱形连续梁桥为研究对象,主梁为单箱单室直腹板箱梁. 主梁构造及普通钢筋布置如图 4 所示. 箱梁采用 C50 级混凝土,普通钢筋选用 HRB335 钢筋.

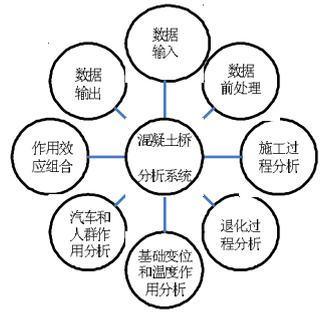


图 2 CBDAS 结构

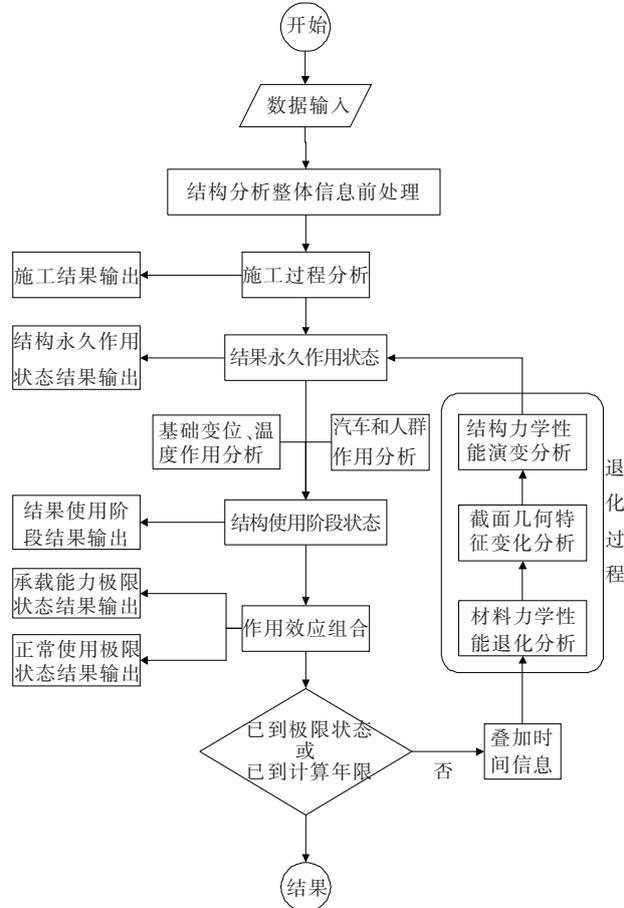


图 3 CBDAS 分析流程

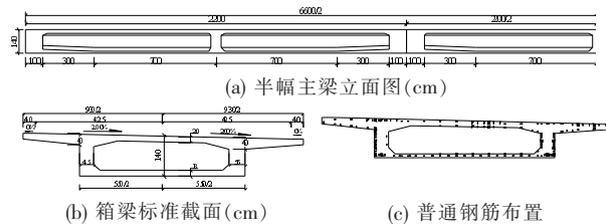


图 4 箱梁构造示意图

参照文献[7]中的相关规定以及模型梁的具体结构构造,表 1 给出了主要设计参数的取值. 整体升降温、梯度升降温以及汽车荷载等参照相应的设计资料和规范选取,这里不再详述.

表1 主要设计参数

参数描述	取值
大气年平均温度	25 °C
大气年平均湿度	70%
混凝土抗压强度标准值 f_{ck}	32.4 MPa
混凝土弹性模量 E_c	34.5 GPa
普通钢筋抗拉强度标准值 f_s	335 MPa
普通钢筋弹性模量 E_s	200 GPa
钢筋锈蚀临界氯离子浓度 M_{cr}	1.5 kg/m ³
混凝土表面氯离子浓度 M_s	6.9 kg/m ³
局部环境系数 m_{cl}	4.5

3.2 计算结果分析

给定结构设计使用寿命和计算子步骤时间分别为100 a和10 a。为了研究结构在劣化环境作用时由于材料力学性能和截面面积的削弱对结构整体力学性能演变的影响程度,同时判断不同极限状态下结构各项力学性能指标随时间的推移是否仍能满足规范要求,以下分析中将考虑结构成型后不计入和计入混凝土徐变收缩作用2种情况,而在结构成型前均考虑混凝土徐变收缩作用。

图5给出模型梁中跨跨中截面处普通钢筋和混凝土截面面积损失率随时间的变化过程。氯离子侵蚀作用时普通钢筋在18.8 a时开始锈蚀,在100 a时面积损失率达到72.9%;混凝土截面在21 a时由于钢筋锈蚀膨胀导致其截面面积开始损失,到100 a时面积损失率达到26.0%。可见,混凝土截面在钢筋开始锈蚀后不到3 a就开裂,说明在氯离子侵蚀作用时钢筋锈蚀速度非常快。

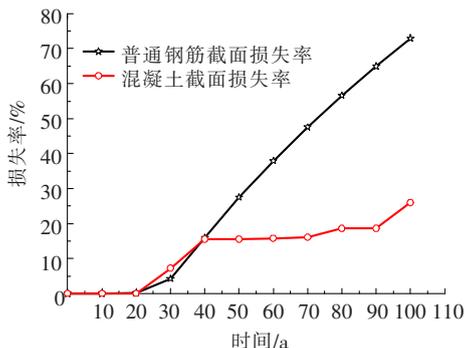


图5 普通钢筋和混凝土截面面积损失率

图6给出了不考虑混凝土徐变收缩作用时模型梁2个关键截面处竖向位移随时间的变化率。边跨跨中竖向位移由成桥时的-7.6 mm(假定竖向位移以结构整体坐标系的Y轴正向为正)变化到成桥100 a时的-11.8 mm,变化率为55.3%;而中跨跨中竖向位移由成桥时的-2.4 mm变化到100 a时的-3.6 mm,变化率达到50%。

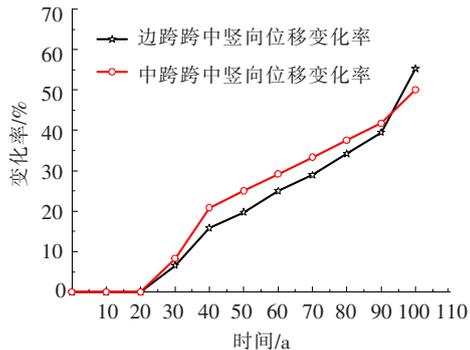


图6 关键截面竖向位移变化率

图7给出了考虑混凝土徐变收缩作用时模型梁2个关键截面处混凝土截面竖向位移随时间的演变过程。从中可以发现,成桥后10 a内由于徐变收缩作用导致结构的竖向位移变化明显;成桥20 a后,由于混凝土截面的削弱又引起竖向位移发生明显变化。此外,根据文献[11]:钢筋混凝土梁式桥主梁最大挠度不应超过计算跨径的1/600,在本算例中主梁的最大挠度应不超过37 mm。可以看出,虽然模型梁关键截面处的竖向位移随时间的推移有所增加,但由于成桥时刻结果变形的富裕度较大,在成桥100 a时竖向位移仍未超过容许挠度,结构变形依然满足规范要求。

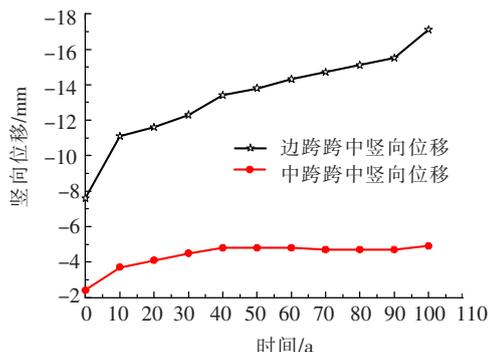


图7 关键截面竖向位移演变过程

图8给出了不考虑混凝土徐变收缩作用时模型梁关键截面处全截面的包络弯矩随时间的变化率。其中,边跨跨中处截面的包络弯矩由成桥时的12.56 MN·m(假定弯矩以使混凝土截面下缘受拉为正)变化到成桥100 a时的11.952 MN·m,变化率为4.8%;中墩墩顶处截面的包络弯矩由成桥时的-12.502 MN·m变化到成桥100 a时的-12.245 MN·m,在成桥90 a时变化达到峰值-11.959 kN·m,变化率为4.3%。注意到包络弯矩随时间并非单调变化,这是因为:1)截面的削弱导致其形心位置不断发生改变;2)削弱导致结构自重损失;3)承担的内力引起结构的内力重分布。在以上3个因素交互作用下,包络弯矩就可能随时间出现增大或减小的情况。

图9给出了模型梁2个关键截面抗弯承载力随时间的损失率.其中,边跨跨中处截面的弯矩承载能力由成桥时的23.794 MN·m减小到100 a后的6.797 MN·m,损失率为71.4%;中墩墩顶处截面的弯矩承载能力由成桥时的-35.282 MN·m减小到100 a后的-7.330 MN·m,损失率为79.2%.

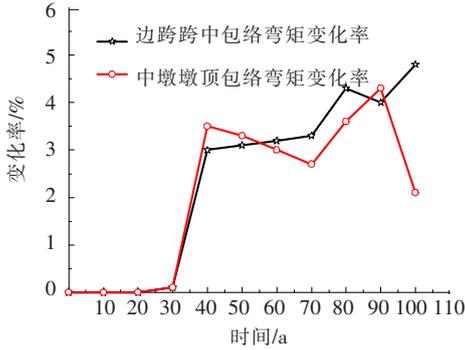


图8 关键截面包络弯矩变化率

图10给出了模型梁边跨跨中和中墩墩顶处截面的抗弯承载力和考虑混凝土徐变收缩效应的包络弯矩随时间的演变过程.由图可以发现,在成桥80 a后2个关键截面的抗弯承载力均小于对应的包络弯矩,结构承载能力极限状态下的相应力学性能指标已无法满足规范要求.

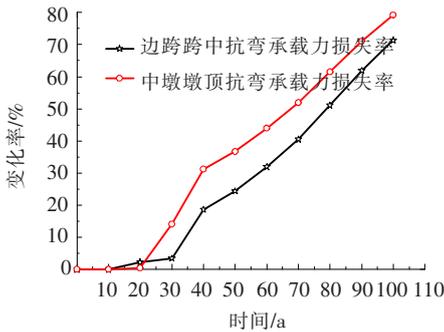


图9 关键截面抗弯承载力损失率

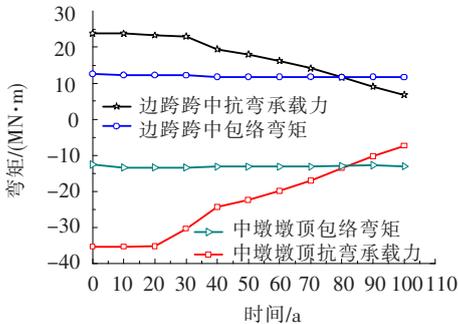


图10 关键截面抗弯承载力和包络弯矩演变过程

4 结 论

1)在氯离子侵蚀环境作用时,普通钢筋具有开始锈蚀时间早、锈蚀速率快的特点.因此,混凝土截面在普通钢筋开始锈蚀后数年内都有可能开始削弱.

2)对于钢筋混凝土桥梁,由于没有预应力钢筋,普通钢筋的截面面积对抗弯承载力的大小影响显著,普通钢筋截面的损失将显著降低结构的抗弯承载力.而在氯离子侵蚀作用下,钢筋锈蚀速率又非常迅速,所以结构抗弯承载力损失的速率相应就很快.因此,在设计使用寿命期内,钢筋混凝土梁耐久性问题的关键是其承载能力能否满足规范要求.

3)提出的基于有限元数值模拟的混凝土桥梁退化全过程分析方法及编写的分析程序能综合考虑桥梁施工方法、混凝土徐变收缩和预应力效应等常规力学问题以及材料力学性能退化、截面面积削弱和结构整体力学性能演变等退化力学问题,所以可以较全面准确地反映劣化环境作用时混凝土桥梁耐久性退化的全过程.

参 考 文 献:

- [1] RICHARDSON M G. Fundamentals of durable reinforced concrete[M]. London: Spon Press, 2002:1-26.
- [2] The European Union-Brite Euram III. General guidelines for durability design and redesign[R]. Bruxelles: Brite-Euram, 2000.
- [3] LEE H S, NOGUCHI T, TOMOSAWA F. FEM analysis for structural performance of deteriorated RC structures due to rebar corrosion[C]//Proceeding of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions. Tromso: E & FN SPON, 1998: 327-336.
- [4] WOO Y J, YOUNG S Y, YONG M S. Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(5): 663-677.
- [5] CHEN D, MAHADEVAN S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(3): 227-238.
- [6] 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,2007:37-40.
- [7] DARMAWAN M S. Spatial time-dependent reliability analysis of pretensioned prestressed concrete bridge girder subject to pitting corrosion[D]. Australia: The University of Newcastle, 2005.
- [8] 田浩. 给定寿命期内混凝土桥梁性能演变分析[D]. 上海:同济大学,2009.
- [9] 李国平. 桥梁结构分析综合系统[M]. 上海:同济大学出版社,1998:16-25.
- [10] 肖汝诚. 桥梁结构分析及程序系统[M]. 北京:人民交通出版社,2002:102-130.
- [11] JTGD62—2004. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004:68-69.

(编辑 魏希柱)