

一般大气环境中混凝土桥梁长期受力性能分析

田飞龙¹, 李国平¹, 张春雷²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 一般大气环境中混凝土桥梁性能衰变与碳化和受力作用引起的材料损伤有较大的相关性。为定量分析这两种作用对混凝土桥梁长期性能的影响, 总结归纳了材料损伤的数学模型, 建立了混凝土桥梁长期性能演变分析方法, 并编制了相应的有限元程序。以一座预应力混凝土简支梁为分析对象, 研究模型梁在一般大气环境下的长期性能演变规律。结果表明, 碳化作用和受力作用均对桥梁长期性能产生明显的影响, 使截面有效受力面积减少, 结构受力性能衰变; 综合考虑碳化作用和受力损伤时跨中断面的截面损失率、挠度和抗弯承载力退化均大于仅考虑碳化作用时的情况。

关键词: 混凝土桥梁; 碳化作用; 受力作用; 损伤; 性能演变

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

Long-term Mechanical Performance Analysis of Concrete Bridges in Atmospheric Environment

TIAN Feilong¹, LI Guoping¹, ZHANG Chunlei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Performance degradation of concrete bridges in atmospheric environment is closely related to material damage caused by carbonation and forces. In order to evaluate quantitatively the effects of the two actions, the authors summarized the material damage models. Besides, the method for analyzing long-term evolution of the concrete bridge performance was proposed and a finite element program was written in this paper. A prestressed concrete simply supported beam in atmospheric environment was investigated. The results show that both carbonation and forces have significant effect on the long-term performance of the bridge, which include the loss of the cross section area and deterioration of the mechanical behavior. When considering the effects of carbonation and mechanical damage, the section loss,

deflection, and degradation of flexural capacity at the mid-span were more serious than those when only carbonation effect was considered.

Key words: concrete bridges; carbonation effect; forces effect; damage; performance evolution

混凝土桥梁的性能受到多种因素的影响。施工过程中桥梁的受力性能会随着结构体系的变化而改变, 而在使用阶段, 混凝土桥梁还承受着环境、荷载等多种作用, 这些作用最终导致结构性能衰变, 使混凝土桥梁出现钢筋锈蚀、混凝土开裂、承载力下降等问题。

在一般大气环境下, 混凝土碳化导致的钢筋锈蚀和长期受力作用引起的混凝土损伤是导致混凝土桥梁性能衰变的主要因素, 且这两种作用之间相互耦合。现有研究一般只考虑碳化作用造成的长期损伤, 研究内容集中在材料和构件层面, 研究手段包括碳化试验^[1-3]和数值模拟^[4-6], 并提出了相应的理论模型^[7-8]及寿命预测方法^[9]。田浩^[10]、胡方健^[11]等考虑了施工过程中混凝土桥梁受力性能的变化并从结构层面模拟环境作用造成的结构损伤, 但并未考虑混凝土材料在长期受力作用下的损伤以及受力损伤和环境作用耦合导致的混凝土桥梁长期性能衰变。

本文在上述研究成果基础上, 模拟施工过程中对混凝土桥梁受力性能的影响, 重点分析碳化作用及受力作用造成的材料损伤以及两者之间相互耦合对混凝土桥梁长期性能的影响; 解决了材料损伤、截面退化、内力重分布、挠度增长、承载力下降等混凝土桥梁长期受力性能退化的关键问题; 建立了混凝土桥梁性能演变分析方法, 并编制了基于平面杆系有限元的结构性能演变分析程序; 最后以一座预应力混凝土简支梁为分析对象, 研究其在碳化作用和受

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036303)

第一作者: 田飞龙(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为混凝土桥梁耐久性。E-mail: tianfl@tongji.edu.cn

通讯作者: 李国平(1958—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混凝土桥梁结构。E-mail: lgtpj@tongji.edu.cn

力作用下性能退化的基本规律。

1 材料损伤模型

1.1 碳化作用下材料损伤模型

碳化作用会导致混凝土的碱性降低,从而失去对钢筋的保护作用,在充足的水分和供氧条件下钢筋便发生锈蚀。钢筋锈蚀后,不但其自身的性能发生退化,锈蚀物的积累还会导致混凝土锈胀开裂甚至于保护层脱落,因此钢筋锈蚀的发展和结构性能退化有密切的关系。根据钢筋锈蚀进程,混凝土结构的性能退化过程可划分为图 1 中的三个阶段。

图 1 中包括三个关键时间点,由此可定义截面“退化关键时刻”,即:钢筋开始锈蚀时刻 t_1 ,在此时刻后钢筋的有效面积开始削弱,力学性能发生改变;保护层锈胀开裂时刻 t_2 ,在此时刻后钢筋的有效截面、力学性能继续改变,混凝土截面开始削弱;保护层完全剥落时刻 t_3 ,在此时刻后钢筋的有效截面、力学性能继续改变,而混凝土截面不再继续削弱。钢筋锈蚀关键时刻的分析模型可参考《混凝土结构耐久性评定标准》^[12],并引入文献[1]的应力修正,这里就不再赘述。

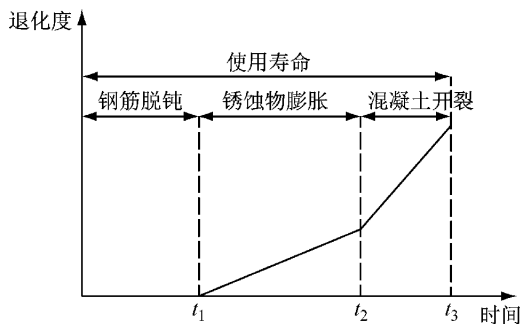


图 1 材料损伤过程

Fig.1 Material damage process

钢筋性能的退化主要表现为钢筋有效受力面积的减小和钢筋力学性能的退化。钢筋有效受力面积的减小与钢筋锈蚀量有关,其计算模型在《混凝土结构耐久性评定标准》^[12]中有详细介绍。假定钢筋锈蚀后锈蚀产物附在钢筋表面,钢筋的自重未发生变化,但锈蚀部分的钢筋不再承担内力,采用损伤后的钢筋面积计算结构的刚度和承载力。

锈蚀钢筋力学性能的退化主要表现为应力-应变曲线、弹性模量和屈服强度等的改变。张伟平等^[13]通过试验研究认为随着钢筋锈蚀量的加大,钢筋的极限变形能力下降,屈服强度和极限强度退化,屈服平台缩短甚至消失,但钢筋的弹性模量基本保持不

变。本文采用线弹性模型计算结构内力状态,其屈服强度的变化采用《混凝土结构耐久性评定标准》^[12]附录 D 给出的公式进行计算,即钢筋锈蚀截面损失率 $\eta_s \leq 5\%$ 且锈蚀比较均匀时取原屈服强度,当 $5\% < \eta_s \leq 12\%$ 或 $\eta_s \leq 5\%$ 但锈蚀不均匀时取

$$f_{yc} = \frac{(1 - 1.077\eta_s)}{(1 - \eta_s)} f_y \quad (1)$$

式中: f_y 为钢筋锈蚀前的强度设计值; f_{yc} 为钢筋锈蚀后的强度设计值。

钢筋锈蚀不但使其自身性能发生退化,还会导致钢筋与混凝土粘结强度的降低。本文引入钢筋强度利用系数 α_s , 将锈蚀钢筋的屈服强度乘以该系数作为承载力计算时受拉钢筋的强度,强度利用系数的取值见《混凝土结构耐久性评定标准》^[12]附录 D。

1.2 受力作用下混凝土损伤模型

基于几何损伤理论,混凝土的损伤用“有效承载面积”的损失来描述,并定义相应的损伤变量。对于单轴均匀受力的混凝土截面,损伤变量 D 可定义为

$$D = \frac{A'}{A} = \frac{A - A_c}{A} = 1 - \frac{A_c}{A} \quad (2)$$

式中: A 为未施加荷载时的面积; A' 为受损面积; A_c 为有效承载面积。

显然, $D=0$ 时对应无损伤状态; $D=1$ 对应完全损伤(断裂)状态; $0 < D < 1$ 对应于不同程度的损伤状态。

混凝土损伤程度可用应力或应变的相关函数来描述,由此可得到混凝土的应力计算方法或应变计算方法,但两种方法的实现有所不同。采用应力计算方法时,徐变应变和弹性应变会耦合在一起,计算损伤的难度增加;而采用应变计算方法时,可以比较方便地采用累积位移计算相应的应变,进而求得计算损伤所需应变值,因此本文通过比较后提出了一种采用应变计算损伤的方法。

假定构件截面满足平截面假定,截面上任何一点的应变可由轴向应变和弯曲应变两部分叠加得到,相应的应变通过式(3)和式(4)计算:

$$\epsilon_1 = \frac{u_j - u_i}{l} \quad (3)$$

$$\epsilon_2 = \frac{d^2 v}{dx^2} y \quad (4)$$

式(3)~(4)中: ϵ_1 为轴向应变; ϵ_2 为弯曲应变; x 为构件轴向坐标; y 为构件竖向坐标; l 为构件长度; u_j 为构件右端水平位移; u_i 为构件左端水平位移; v 为构件竖向位移。

求得截面各部分的应变后,就可以根据应变与

损伤变量的关系求得截面各部分的损伤变量 D , 本文采用文献[14]推荐的方法, 计算公式如下:

$$D = \begin{cases} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^{c_1} \right] D_0, & \epsilon \leq \epsilon_p \\ 1 - \frac{1 - D_0}{c_2 \left(1 - D_0 \right) \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^{c_3} + 1}, & \epsilon > \epsilon_p \end{cases} \quad (5)$$

式中: D_0 为混凝土在峰值应力时的损伤变量; ϵ 为应变; ϵ_p 为受压(拉)峰值应变; c_1 、 c_2 、 c_3 为计算参数. 各参数具体取值见文献[14].

计算得到截面各部分损伤后, 就可以根据式(2)计算截面的有效承载面积, 进而引起结构刚度的变化和结构内力重分布, 这部分内容将在第 2 部分具体介绍.

2 结构性能演变分析方法

混凝土桥梁成桥后的受力状态与施工过程中密切相关, 需考虑施工过程中混凝土桥梁力学性能的变化, 并累积受力作用造成的结构损伤. 桥梁投入运营后还受到徐变收缩、汽车荷载等作用. 本文依据《公路桥涵设计通用规范》^[15] 分析自重、徐变收缩、汽车荷载等产生的效应, 并随时间增长累积受力作用造成的结构损伤, 分析混凝土桥梁受力性能改变以及其对碳化进程的影响. 成桥后期, 钢筋和混凝土材料因碳化作用将产生显著劣化, 使得混凝土桥梁受力性能进一步改变, 并造成受力损伤的进一步累积. 本文模拟上述过程对混凝土桥梁受力性能的影响, 形成混凝土桥梁长期性能演变分析方法, 并编制相应的分析程序, 图 2 给出了程序的具体流程.

2.1 控制信息表示

常规的力学性能分析如施工过程模拟、徐变收缩效应分析等和其他有限元分析软件没有太大区别, 但在进行结构性能退化分析时需要准确模拟碳化作用和受力作用导致的混凝土和钢筋截面退化过程, 因此建模时需要输入截面的详细控制信息. 如图 3a 所示, 通过对截面控制节点和边缘进行编号(外边缘节点逆时针编号, 内边缘节点顺时针编号)可以很容易地识别获得截面的几何特性, 同时混凝土截面的削弱过程也可以利用截面边缘的移动来模拟. 图 3b 则显示了普通钢筋的模拟方法. 截面的每条边都包含有一组普通钢筋信息, 这些信息包含普通钢筋的数量、直径、保护层厚度、钢筋距截面形心的距离等.

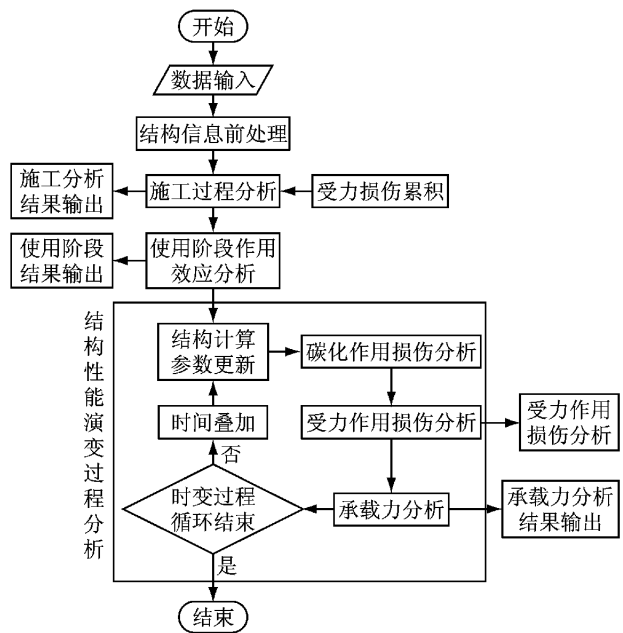


图 2 分析流程

Fig.2 Flow chart

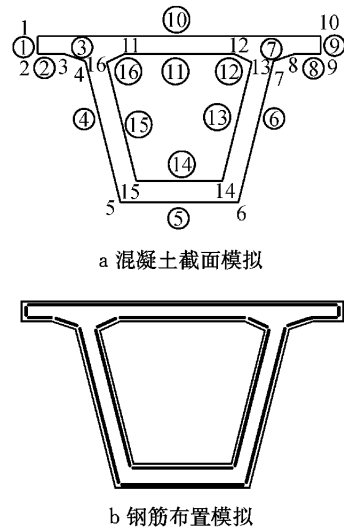


图 3 截面模拟

Fig.3 Simulation of cross section

2.2 性能演变过程模拟

模拟混凝土桥梁性能演变过程, 首先, 需要更新结构计算参数, 判断构件时变状态; 其次, 计算碳化作用和受力作用下钢筋混凝土的损伤, 根据所有构件最新的截面特性形成本阶段的结构刚度矩阵; 再次, 计算截面特性变化引起的结构内力重分布, 求出本阶段结构响应的初始值; 然后, 以结构响应的初始值分析本阶段的徐变、收缩作用, 修正结构响应的结果; 最后, 对结构重要构件进行承载力分析. 下面对混凝土桥梁性能演变过程中的主要问题进行详述.

2.2.1 碳化作用损伤过程

模拟碳化作用损伤过程,首先根据构件的时变状态判断混凝土截面钢筋是否已经达到锈蚀的关键时刻.若钢筋开始锈蚀,则计算钢筋锈蚀导致的钢筋截面面积减小、自身力学性能以及钢筋混凝土粘结性能的退化.若保护层开始剥落,则还需根据钢筋锈蚀量计算混凝土边缘的剥落深度,进而更新截面边缘的节点坐标,形成新的截面分析数据;最后,根据更新后的锈蚀钢筋和混凝土截面数据计算损伤后构件的截面特性.

2.2.2 受力作用损伤过程

模拟受力作用损伤过程,首先将构件截面进行分块,计算截面各部分的应变值,进而根据应变和损伤变量的关系式计算相应的损伤变量.其次,计算截面各部分损伤变量的面积加权平均值即“等效损伤变量”,并以此来代表截面整体损伤;最后,根据截面损伤变量计算损伤后构件的截面特性.具体计算方法见 1.2 节.

2.2.3 结构内力重分布

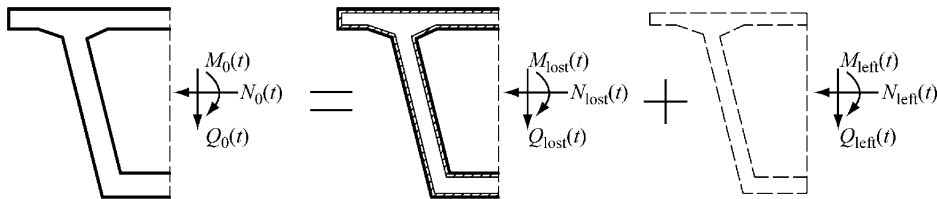


图 4 截面内力分配

Fig.4 Internal force distribution

2.2.4 承载力分析

承载力分析包括抗弯承载力分析和抗剪承载力分析.抗弯承载力按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[16]计算,其中钢筋截面、钢筋屈服强度等按 1.1 节的方法计算.

构件抗剪承载力采用式(6)计算,考虑钢筋锈蚀后混凝土抗剪能力的折减和箍筋抗剪能力的折减.

$$V'_{cs} = \sqrt{\alpha_4 \alpha_5} V_{cs} \quad (6)$$

式中: V'_{cs} 为折减后的抗剪承载力; α_4 为混凝土抗剪能力折减系数; α_5 为箍筋抗剪能力折减系数; V_{cs} 为构件抗剪承载力.

其中 V_{cs} 按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[16]计算,但钢筋采用锈蚀后的面积和锈蚀后的钢筋强度设计值. α_4 、 α_5 的取值则采用文献^[17]中推荐的方法计算.

3 算例

3.1 分析模型及参数

碳化作用下保护层脱落会引起截面自重损失,同时碳化作用和受力作用下构件的截面特性也会发生改变,两者均导致结构内力重分布.截面自重损失引起内力重分布的计算相对简单,只需根据截面损失量计算损失的自重值并将其作为外荷载反向加载于剩余结构上计算其响应.计算截面特性变化引起的内力重分布时,可将截面内力分解为损失截面承担的内力和剩余截面承担的内力,截面内力分配如图 4 所示.

图中, $N_0(t)$ 、 $Q_0(t)$ 、 $M_0(t)$ 分别为初始截面轴力、剪力、弯矩,记为 $F_0(t)$; $N_{lost}(t)$ 、 $Q_{lost}(t)$ 、 $M_{lost}(t)$ 分别为损失截面承担的轴力、剪力、弯矩,记为 $F_{lost}(t)$; $N_{left}(t)$ 、 $Q_{left}(t)$ 、 $M_{left}(t)$ 分别为剩余截面承担的轴力、剪力、弯矩,记为 $F_{left}(t)$;假设 $F_r(t)$ 为释放的混凝土截面内力($-F_{lost}(t)$)引起的剩余结构截面内力,则内力重分布后的截面内力值 $F_{new}(t)$ 为: $F_{new}(t) = F_{left}(t) + F_r(t)$.

本文以一座跨径 25 m 预应力混凝土简支梁为分析对象,其截面及普通钢筋布置如图 5 所示.主梁采用 C50 混凝土,预应力钢筋采用 $\phi^s 15.2$ mm 钢绞线,普通钢筋采用 HRB335 钢筋,保护层厚度为 30 mm.边缘 5 普通钢筋直径为 16 mm,其余边缘普通钢筋直径均为 12 mm.

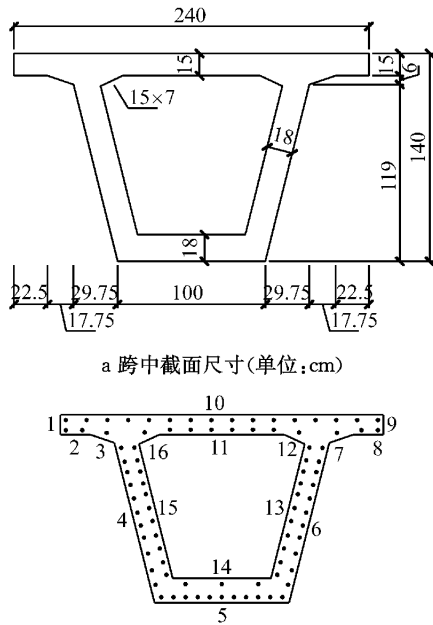
取模型梁环境作用等级为 I_e,根据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》^[18]及《混凝土结构耐久性评定标准》^[12]相关规定,其主要的的环境作用计算参数取值见表 1.由于截面内边缘较为封闭,空气流动性较差,程序中对相应位置 CO₂ 浓度、环境局部系数等环境作用参数等给予一定折减.计算时间取 120 年,分析时考虑两种工况:工况一综合考虑碳化作用和受力作用造成的损伤;工况二仅考虑碳化作用造成的损伤,荷载效应同工况一,但不计入受力作用造成的损伤.

3.2 结果分析

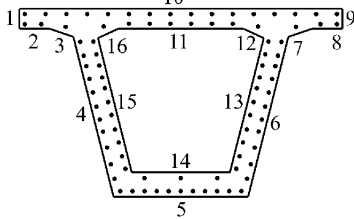
3.2.1 退化关键时刻分析

截面的边缘线可分为两类,其中 1~10 为第一

类,即外边缘线,11~16 为第二类,为内边缘线.由于桥面铺装的存在,本次分析不考虑边缘 10 的退化.图 6 给出了跨中断面各边缘线退化关键时刻的取值.由于外边缘环境作用强度大于内侧,其退化关键时刻明显小于内边缘,其中边缘 5 由于普通钢筋直径最大,压应力最小,其退化各关键时刻的取值也最小.边缘 5 在综合考虑碳化作用和受力作用以及仅考虑碳化作用时截面退化关键时刻取值分别为 51.6、74.4、92.7 年和 55.1、83.3、103.7 年.综合考虑两种作用时截面各边缘退化的关键时刻均比仅考虑碳化作用时的取值要小,因此其截面退化、变形发展、承载力退化也相对较早.



a 跨中截面尺寸(单位:cm)



b 截面边缘编号及普通钢筋布置图

图 5 截面及普通钢筋布置

Fig.5 Arrangement of cross section and reinforcement

表 1 环境作用计算参数

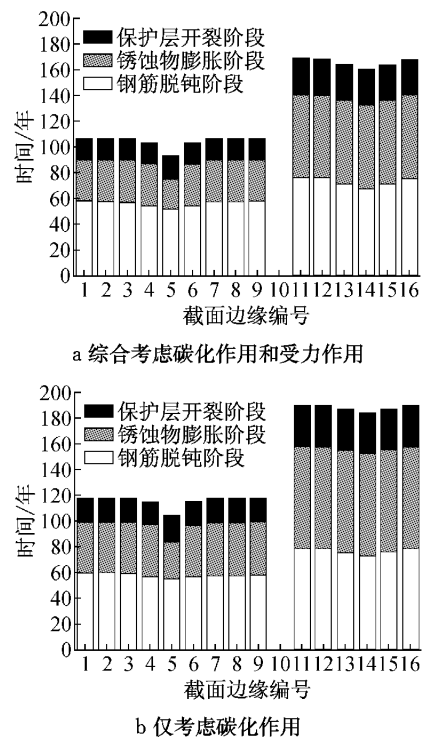
Tab.1 Parameters of environmental action

参数名称	环境平均温度 $T/^\circ\text{C}$	环境年平均相对湿度 H_R	环境 CO_2 浓度 $C_0/\%$	环境局部系数 m
参数取值	25	0.75	0.187 5	4.0

3.2.2 截面损失分析

碳化作用会使钢筋脱钝锈蚀,进一步发展后将导致钢筋和混凝土截面损失以及钢筋和混凝土粘结作用损失,受力作用则使混凝土有效受力面积减小,进而使得结构处于更不利的应力状态,导致跨中截面退化关键时刻提前,钢筋和混凝土截面损失也相应增大.模型中预应力钢筋保护层厚度远大于普通钢筋,120 年内预应力钢筋不会出现退化,因此不计预应力钢筋退化的影响.图 7 给出了跨中断面混凝土和普通钢筋截面损失率的时变曲线.

从图中可以看出,综合考虑两种作用时普通钢筋开始锈蚀时间比仅考虑碳化时大致早 5 年,混凝土截面退化时间则大致早 10 年,同一时刻综合考虑两种作用时混凝土和普通钢筋截面损失率大于仅考虑碳化作用时的情况.综合考虑两种作用时,在 120 年内混凝土和普通钢筋的截面损失率分别达 14.2%和 8.4%,由于在 106 年~120 年混凝土截面外边缘已完全剥落而内边缘尚未开裂,因此这段时间内混凝土截面的退化基本停止;仅考虑碳化时在 120 年内混凝土和普通钢筋的截面损失率则分别达 14.2%和 6.0%.



a 综合考虑碳化作用和受力作用

b 仅考虑碳化作用

图 6 跨中截面退化关键时刻

Fig.6 Critical moment of mid-span cross section degradation

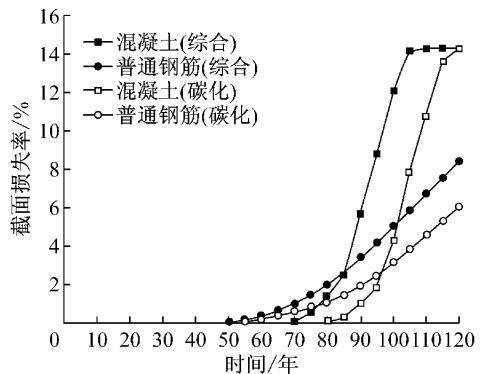


图 7 截面损失率时变曲线

Fig.7 Time-varying curve of section loss

3.2.3 变形分析

成桥初期跨中挠度的增长主要由混凝土徐变引起,而成桥后期碳化作用下截面损失会使得跨中挠度进一步发展.受力作用下由于有效承载面积的减小,跨中挠度值也会增加,因此综合考虑碳化和受力损伤时结构的长期挠度值大于仅考虑碳化作用时的挠度值.图 8 给出了短期效应组合下跨中截面挠度的时变曲线.成桥初期两种工况下跨中挠度约为 28.5 和 25.5 mm,10 年内跨中挠度快速增长,且工况一挠度值增长明显大于工况二.成桥后期综合考虑两种作用时挠度的发展比仅考虑碳化时较早,两种工况下 120 年时的挠度值分别达到 50.3 和 43.2 mm.

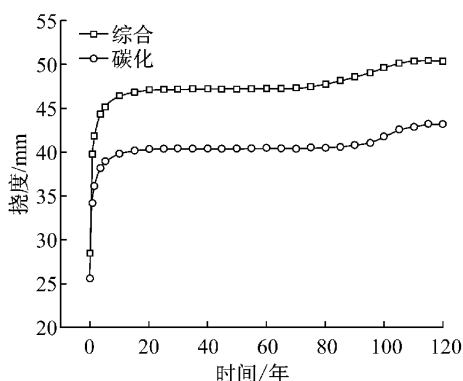


图 8 挠度时变曲线

Fig. 8 Time-varying curve of deflection

3.2.4 承载力分析

抗弯承载力的损失主要由钢筋和混凝土截面损失引起.综合考虑碳化作用和受力作用时截面损失率大于仅考虑碳化作用时的情况,因此其抗弯承载力的损失也相应较大.图 9 给出了跨中截面抗弯承载力时变曲线.跨中截面抗弯承载力时变过程可明显划分为三个阶段:钢筋锈蚀前、钢筋锈蚀后至混凝土开裂前、混凝土开裂后.抗弯承载力的退化起始于钢筋锈蚀后,此时抗弯承载力的退化仅由钢筋锈蚀引起,混凝土开裂后随着混凝土截面损失,抗弯承载力

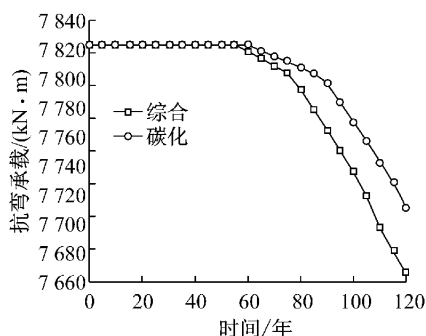


图 9 抗弯承载力时变曲线

Fig. 9 Time-varying curve of flexural capacity

的退化加快.跨中截面初始抗弯承载力为 7 823 kN·m,120 年时两种工况下抗弯承载力取值分别为 7 666 和 7 709 kN·m,由于全截面尚未完全退化,抗弯承载力的损失不是很明显.

4 结论

本文综合考虑碳化和受力作用导致材料损伤以及两者之间的相互耦合对混凝土桥梁长期受力性能的影响,建立了一般大气环境作用下混凝土桥梁长期受力性能分析的一般方法,并通过一座预应力混凝土简支梁数值算例分析得出如下结论:

(1)考虑受力损伤时,混凝土桥梁跨中断面的截面损失率、挠度、抗弯承载力退化均大于不考虑受力损伤时的情况,证明了本文考虑受力损伤对混凝土桥梁长期受力性能影响的合理性.

(2)考虑受力损伤时,混凝土桥梁受力状态更为不利,使跨中截面“退化关键时刻”有所提前,表明受力损伤会加速碳化作用进程;另一方面,碳化作用影响混凝土桥梁的内力分布,也会造成受力损伤的进一步累积.因此碳化作用和受力损伤相互耦合加剧了混凝土桥梁性能的退化.

(3)本文建立的方法可作为评价混凝土桥梁性能退化及混凝土桥梁使用寿命的一种有效手段.

参考文献:

- [1] 吴用贤. 预应力混凝土构件碳化及氯离子侵蚀试验[D]. 上海: 同济大学, 2009.
WU Yongxian. Experiments on carbonation and chloride erosion of prestressed concrete members [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [2] Chang C F, Chen J W. The experimental investigation of concrete carbonation depth [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1760.
- [3] 田浩, 李国平, 刘杰, 等. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 200.
TIAN Hao, LI Guoping, LIU Jie, et al. Experimental research on carbonation of forced concrete specimens [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 200.
- [4] Saetta A V, Schrefler B A, Vitaliani R V. 2-D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(8): 1703.
- [5] Isgor O B, Razaqpur A G. Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(1): 57.
- [6] Steffens A, Dinkler D, Ahrens H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures [J]. Cement

- and Concrete Research, 2002, 32(6): 935.
- [7] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation [J]. *AIChE Journal*, 1989, 35(10): 1639.
- [8] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型 [J]. *工业建筑*, 1998, 28(1): 16.
ZHANG Yu, JIANG Lixue. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism [J]. *Industrial Construction*, 1998, 28(1): 16.
- [9] 牛获涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Niu Ditao. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [10] 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.
TIAN Hao. Research on performance evolution of concrete bridges in given service life [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [11] 胡方健. 考虑环境作用的混凝土桥梁受力性能时变规律及可靠性 [D]. 上海: 同济大学, 2012.
HU Fangjian. Time-dependent law and reliability of mechanical performance of concrete bridges considering environmental actions [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [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] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究 [J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(5): 586.
ZHANG Weiping, SHANG Dengfeng, GU Xianglin. Stress-strain relationship of corroded steel bars. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2006, 34(5): 586.
- [14] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2008, 28(4): 70.
DING Faxing, YU Zhiwu, OU Jinping. Damage constitutive model for concrete under uniaxial stress conditions [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2008, 28(4): 70.
- [15] 中华人民共和国交通部. JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D60—2004 General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [16] 中华人民共和国交通部. JTG D62—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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D62—2004 Code for design of reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [17] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
XU Shanhu. The deteriorated models and durability evaluation of reinforced concrete structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [18] 中国土木工程学会. CCES 01—2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南 (2005 年修订版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Civil Engineering Society. CCES 01—2004 guide to durability design and construction of concrete structures (2005 revised edition) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.