

文章编号:1673-9469(2015)02-0010-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.003

基于模糊理论的高桥墩腐蚀损伤综合评价

安新正¹,杨硕¹,张晓婧²,申彦利¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 河北工程大学 建筑学院,河北 邯郸 056038)

摘要:针对腐蚀环境作用下钢筋混凝土高桥墩工作性能的损伤状况,建立了一个系统的、能够反映钢筋混凝土高桥墩腐蚀损伤状况的评价体系,并在层次分析法(AHP)分析各个指标因素权重的基础上,建立钢筋混凝土高桥墩腐蚀损伤状况的模糊综合评价模型。借助于腐蚀环境下一在役高桥墩的现场试验数据,基于该模糊综合评价模型,对该在役高桥墩的工作性能进行模糊综合评价,计算得到该在役高桥墩腐蚀损伤状况的总体评价质量为轻微损伤。

关键词:在役钢筋混凝土高桥墩;腐蚀;损伤;模糊综合评价

中图分类号:U447

文献标识码:A

Comprehensive evaluation on corrosive damage of high bridge piers using a fuzzy theory model

AN Xin-zheng¹, YANG Shuo¹, ZHANG Xiao-jing², SHEN Yan-li¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. School of Architecture, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: For the damage situation of reinforced concrete high bridge piers' performance in corrosive environmental effects, a systematic evaluation system was established which can reflect corrosion damage condition of reinforced concrete high bridge piers, and fuzzy comprehensive evaluation model of the reinforced concrete high bridge piers' corrosion damage condition was established based on each index weighting factor analyzed by the way of Analytic Hierarchy Process (AHP). With the aid of field test data of a existing high bridge pier in corrosive environment and based on fuzzy comprehensive evaluation model, fuzzy comprehensive evaluation was made to the existing high bridge piers' performance. The case evaluation of overall quality is "slight damage". The project example shows that fuzzy evaluation is significance for project, as a way to evaluate corrosion damage situation of reinforced concrete high bridge piers' performance.

Key words: existing reinforced concrete high bridge pier; corrosion; damage; fuzzy comprehensive evaluation

桥梁灾害调查表明,大多数在役钢筋混凝土桥墩,在外界环境因素(气候、车辆荷载、地下水和土壤等因素)的直接作用下,其工作性能将会由于其组成材料(混凝土、钢筋)的损伤劣化而退化^[1],给桥梁体系的运行安全性带来严重威胁。因此,了解环境侵蚀造成钢筋混凝土高桥墩的损伤程度对钢筋混凝土高桥墩的使用安全尤为重要。在钢筋混凝土高桥墩工作性能损伤的影响因素中,混

凝土强度损失、钢筋截面积腐蚀损失、桥墩混凝土裂缝等因素是相互关联和相互影响的,它们对钢筋混凝土高桥墩工作性能损伤的影响程度难以准确计量,具有模糊性。因此通过常规评价模型评价环境侵蚀下钢筋混凝土高桥墩的腐蚀损伤水平存在一定的困难。模糊数学是一门描述模糊理论与方法的知识体系,目前广泛地应用于解决工程领域里不能用一般方法来解决的一些有争议的难

收稿日期:2015-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51378169)

特约专稿

作者简介:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,从事混凝土结构耐久性方面的研究。

题^[2-8]。综合考虑环境侵蚀下影响钢筋混凝土高桥墩工作性能腐蚀损伤的众多因素,本文应用模糊理论,建立钢筋混凝土高桥墩工作性能腐蚀损伤模糊综合评价模型,为桥梁管理者的动态管理、维修和加固改造提供依据。

1 工作性能损伤评价

1.1 模糊评价指标体系

当前大多数高桥墩桥梁体系工作在寒区、介质侵蚀区等腐蚀环境之中,而且无相关的管理经验可以参考,因此在实地考察了寒区、硫酸盐和氯离子侵蚀区公路、铁路高桥墩桥的服役过程与管理经验,考虑到影响寒区、硫酸盐和氯离子侵蚀区高桥墩工作性能损伤的相关因素。本文基于冻融循环侵蚀、硫酸盐和氯离子侵蚀在高桥墩工作性能腐蚀损伤方面的作用特征,对这些因素进行了一定的分类和优选。基于模糊理论,应用二级模糊综合评价方法建立以混凝土质量、高桥墩竖向状态质量、钢筋与混凝土粘结质量、高桥墩底部截面裂损等4个方面作为准则层的寒区、硫酸盐和氯离子侵蚀区高桥墩工作性能腐蚀损伤评价指标体系,同时选取对高桥墩工作性能状况影响较大的9个主要影响因素作为该评价指标体系的评价因素层因子(见图1)。

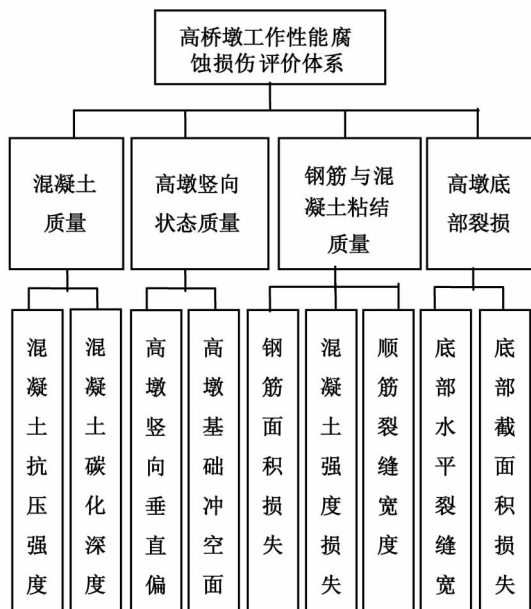


图1 高桥墩工作性能腐蚀损伤评价模型

Fig.1 Evaluation model in working performance of high bridge pier suffering from corrosion

1.2 模糊评价方法

高桥墩工作性能腐蚀损伤的模糊综合评价指标因素集 U 可用如下关系表示:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} \quad (1)$$

式中 u_1 —混凝土质量,由混凝土抗压强度损失(u_{11})和混凝土碳化深度(u_{12})因素组成; u_2 —高墩竖向垂直偏差,由高墩竖向垂直偏差度(u_{21})和高墩基础冲空面积率(u_{22})因素组成; u_3 —钢筋与混凝土粘结质量,由钢筋面积损失量(u_{31})、混凝土抗压强度损失量(u_{32})和顺筋裂缝宽度增长量(u_{33})因素组成; u_4 —高墩底部截面裂损,由底部截面面积损失(u_{41})和底部水平裂缝宽度(u_{42})因素组成。计算方法为

$$u_{11} = f_{ct}/f_{c0} \quad (2)$$

$$u_{21} = \nabla_t / [\nabla] \quad (3)$$

$$u_{31} = s_{gt}/s_{g0} \quad (4)$$

$$u_{32} = f_{ct}/f_{c0} \quad (5)$$

$$u_{33} = W_{\max} / [W] \quad (6)$$

$$u_{41} = A_{ct}/A_{c0} \quad (7)$$

式(2)~式(7)中 A_{c0} 、 f_{c0} 和 S_{g0} —钢筋混凝土高桥墩环境腐蚀作用前的底部截面面积、混凝土抗压强度和周边纵向受力钢筋截面积的实测结果; A_{ct} 、 f_{ct} 、 ∇_t 和 S_{gt} —钢筋混凝土高桥墩在腐蚀环境作用 t 时刻后底部的截面面积、混凝土抗压强度、高桥墩竖向垂直偏差度和周边纵向受力钢筋截面积的实测结果; $[\nabla]$ —高桥墩的允许倾斜量,其值可取为钢筋混凝土高桥墩竖向高度计算值的 $1/3\ 000$; W_{\max} —周边纵向受力钢筋位置处混凝土外表面的最大裂缝宽度; $[W]$ —混凝土裂缝的允许宽度,可取 0.2 mm 。

基于文献[9-10],同时结合钢筋混凝土高桥墩构件的实际工作情况,本文中将钢筋混凝土高桥墩工作性能腐蚀损伤的评语集 Z 划分为4个等级,即: $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4\} = \{\text{无损伤, 轻微损伤, 中等损伤, 严重损伤}\}$,其对应的数值评语集可取为: $Z = \{85, 75, 65, 55\}$ 。相关的钢筋混凝土高桥墩工作性能腐蚀损伤程度的具体划分标准与范围列于表1。

基于模糊理论,钢筋混凝土高桥墩工作性能腐蚀损伤的各评价因素与评价标准之间可建立如下的模糊评判矩阵^[11]:

表 1 损伤程度的划分标准与范围

Tab. 1 Divided standard and scope of damage degree

因素	损伤程度			
	严重损伤	中等损伤	轻微损伤	无损伤
u_{11}	≤ 0.75	0.75 - 0.85	0.85 - 0.95	≥ 0.95
u_{12}	≥ 35	20 - 35	6 - 20	≤ 6
u_{21}	≥ 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.95	≤ 0.95
u_{22}	≥ 0.20	0.10 - 0.20	0.01 - 0.10	≤ 0.01
u_{31}	≤ 0.85	0.85 - 0.90	0.90 - 0.95	≥ 0.95
u_{32}	≤ 0.75	0.75 - 0.85	0.85 - 0.95	≥ 0.95
u_{33}	≥ 2.0	1.2 - 1.5	1.0 - 1.2	≤ 1.0
u_{41}	≤ 0.78	0.78 - 0.88	0.88 - 0.98	≥ 0.98
u_{42}	≥ 1.00	0.50 - 1.00	0.20 - 0.50	≤ 0.20

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \Lambda & a_{2m} \\ M & M & a_{ij} & M \\ a_{n1} & a_{n2} & \Lambda & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 a_{ij} —因素集中第 i 个因素相对于第 j 个评价的隶属度; n —模糊评价因素的数量; m —评语集中的项目数。

在模糊综合评价分析中,各评价因素的权重非常重要,它不仅反映了不同评价因素在评价指标上的重要程度,而且也反映了不同评价因素在评价指标上的影响程度。结合当前获得各评价因素权重的常用方法(如:主观赋值法、德尔斐法、层次分析法等)基本特点^[12-13],文中各评价因素的权重将依据层次分析法通过比较各评价因素的相对重要程度来确定。

依据模糊综合评价中隶属函数的构建原则及 Kalkan 等人的相关研究成果,采用典型函数法中的降半梯形分布来构建各评价指标的隶属函数 $b(x)$ (x 为评价指标实测计算值)^[14-15]。设 z_i 和 z_{i+1} 为二级标准,其隶属函数可表示为

$$z_i \text{ 的隶属函数} \\ b(x) = \begin{cases} 0 & x < z_{i+1}, x > z_i \\ (x - z_{i+1}) / (z_i - z_{i+1}) & z_{i+1} \leq x \leq z_i \end{cases} \quad (9)$$

$$z_{i+1} \text{ 的隶属函数} \\ b(x) = \begin{cases} 0 & x < z_{i+1}, x > z_i \\ (z_i - x) / (z_i - z_{i+1}) & z_{i+1} \leq x \leq z_i \end{cases} \quad (10)$$

文中的 9 个一级指标(因素层)分别隶属于 4 个二级指标(准则层)(见图 1 所示)。

一级指标模糊综合评价结果 B_i 可以通过模糊关系矩阵 A_i 和权重向量 Q_i 建立。

$$Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ij}) \quad (11)$$

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij})^T \quad (12)$$

$$B_i = Q_i \cdot A_i \quad (13)$$

在一级指标模糊综合评价结果的基础上可以通过模糊关系矩阵 B_i 和权重向量 Q 得到二级指标模糊综合评价结果 B 。

$$Q = (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) \quad (14)$$

$$B = Q \cdot (B_1, B_2, B_3, B_4)^T \quad (15)$$

在二级指标模糊综合评价结果的基础上可以得到模糊综合评分 P 。

$$P = Z \cdot (B)^T \quad (16)$$

2 实例分析

某在役桥梁为某省级公路与国道相连的较为重要交通枢纽。桥梁下部结构为柱式钢筋混凝土椭圆形高桥墩,设计的混凝土强度等级为 C35。桥梁地处北方寒冷地区,同时勘察资料显示,桥墩处的地下水中常年富含硫酸盐、氯离子等腐蚀性介质。在遭受以上因素作用下,钢筋混凝土高桥墩腐蚀病害日益严重,宏观表现主要有:钢筋混凝土高桥墩接近底部的钢筋锈蚀日益严重,部分高桥墩底部表面由于钢筋的严重锈蚀而出现纵向顺筋裂缝。在高桥墩底部的干湿交替区,其混凝土的表面侵蚀较为严重,混凝土大面积起鼓剥落、疏松与风化现象也很突出。这些病害已影响到了钢筋混凝土高桥墩的工作安全。为了解该钢筋混凝土高桥墩的实际腐蚀损伤状况,对该高桥墩的外观质量、混凝土质量、高墩竖向垂直偏差、钢筋锈蚀、桥墩底部截面裂损等进行了相关检测。结合检测数据,采用模糊综合评价方法,对该桥墩进行工作性能损伤综合评估。

依据层次分析法,在比较各评价因素的相对重要程度的基础上确定的本算例的权重系数值详见表 2。依据式(2)~式(7),并结合各指标因素的现场实际试验与检测结果,得到的各个评价指标的实际计算值见表 2。

依据式(8)~式(13)和由各个评价指标因素计算值得到的一级评价指标的换算值,经计算可以得到高桥墩工作性能腐蚀损伤的一级模糊综合评价结果(见表 3)。

在高桥墩工作性能腐蚀损伤一级模糊综合评价结果(见表 3)的基础上,结合式(14)、式(15)和式(16)可得到高桥墩工作性能腐蚀损伤的二级模糊综合评价的结果为(0.270, 0.610, 0.120, 0),综

合评分的结果为 77.8 分。由此可见,在环境的侵蚀作用下该钢筋混凝土高桥墩目前的工作性能腐蚀损伤状况是轻微损伤,应考虑对该高桥墩的腐蚀损伤部位进行适当地维护与加固。

表 2 评价指标权重及计算值

Tab. 2 Weight and calculated value of evaluation indexes

准则层	权重系数	因素层	权重系数	计算值
u1	0.33	u ₁₁	0.67	0.81
		u ₁₂	0.33	13.4
u2	0.28	u ₂₁	0.65	0.90
		u ₂₂	0.35	0.16
		u ₃₁	0.34	0.92
u3	0.25	u ₃₂	0.30	0.87
		u ₃₃	0.36	1.1
		u ₄₁	0.71	0.91
u4	0.14	u ₄₂	0.29	0.23

表 3 高桥墩工作性能腐蚀损伤一级评价

Tab. 3 First class assessment of the working performance to high bridge pier

二级指标	一级模糊综合评价结果
混凝土质量	(0.201, 0.738, 0.061, 0)
高墩竖向状态质量	(0.520, 0.148, 0.332, 0)
钢筋-混凝土粘结质量	(0.051, 0.935, 0.034, 0)
高墩底部裂损	(0.321, 0.679, 0, 0)

3 结语

采用本文建立的高桥墩工作性能损伤模糊综合评价方法评价的某钢筋混凝土高桥墩工作性能腐蚀损伤的最终得分为 77.8 分,显示出该高桥墩的工作性能处于轻微损伤的状态。评价结果与现场实际调查的工程状况基本一致,表明此模型用于环境腐蚀作用下钢筋混凝土高桥墩工作性能的腐蚀损伤评价是合理的、可靠的。管理者可依据评价结果制定相应的管理、维修和加固改造。

参考文献:

[1] 陈艾荣,冯师蓉,马如进. 基于退化机理的混凝土桥梁耐久性环境区划[J]. 同济大学学报:自然科学版,

2014, 42(3): 331-336.

[2] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用(第3版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.

[3] 李士勇. 工程模糊数学及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.

[4] 陈水利,李敬功,王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.

[5] 王飞,胡静娴,黄晶. AHP 和模糊综合评判在绿色建筑中的评价研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2014, 31(2): 106-109.

[6] 毕小玉,张靖岩,王佳. 基于模糊综合评价的建筑综合防灾能力评估体系[J]. 自然灾害学报,2014, 23(4): 257-262.

[7] HUANG QIAO, REN YUAN, LIN YANGZI. Application of uncertain type of AHP to condition assessment of cable-stayed bridges [J]. Journal of Southeast University, 2007, 23(4): 599-603.

[8] 任远,黄侨,林阳子. 大跨度斜拉桥综合评估系统的研制与开发[J]. 南京航空航天大学学报,2007, 39(4): 535-539.

[9] JTG H10-2009,公路养护技术规范[S].

[10] JTG H11-2004,公路桥涵养护规范[S].

[11] 刘华,牛富俊,牛永红,等. 基于模糊数学的寒区高速铁路路基稳定性评价及应用分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2014, 46(3): 367-375.

[12] PERRONE G, NOTO LA DIEGA S. Fuzzy methods for analyzing fuzzy production environment [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1998, 14(56): 465-474.

[13] 刘沐宇,林驰,高宏伟. 桥梁生命周期环境影响的多级模糊综合评价[J]. 土木工程学报,2009, 42(1): 55-59.

[14] KALKAN E, KUNNATH S K. Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings [J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 305-316.

[15] 孙杰,牟在根,张晓. 基于隶属函数选取的岩土工程模糊可靠度分析[J]. 岩土工程技术,2006, 20(4): 200-203.

(责任编辑 刘存英)