

预应力混凝土连续刚构桥模糊综合评估法研究

王红伟¹, 谢开仲^{2,3*}

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004;
3. 广西大学 防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 为了准确评估预应力混凝土连续刚构桥的健康状态, 提出了基于层次分析法和模糊理论的预应力混凝土连续刚构桥状态综合评估方法。首先采用层析分析法(AHP)建立了预应力混凝土连续刚构桥底层-中间层-顶层的三层状态评估指标体系, 确定了各层指标状态和总体评估状态的等级划分, 制定了预应力混凝土连续刚构桥状态评估体系中各层指标的定量指标评判标准。其次选择了梯形和半梯形的隶属函数, 建立了预应力混凝土连续刚构桥模糊综合评估法的主要步骤, 提出了状态评估体系中各层指标常数、变权和评判向量的计算方法, 最后将该方法应用在钦江三桥的状态评估中。结果表明: 预应力混凝土连续刚构桥状态评估方法可以评估预应力混凝土连续刚构桥的状态, 采用该方法评估的钦江三桥的状态为“优秀”, 与桥梁的荷载试验结果一致, 评估结果验证了提出的模糊综合评估方法的可行性与有效性。

关键词: 连续刚构桥; 状态评估; 层次分析法; 模糊理论; 变权

中图分类号: U448.23; U446

文献标识码: A

Study on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of Prestressed Concrete Continuous Rigid Frame Bridge

WANG Hongwei¹, XIE Kaizhong^{2,3*}

(1. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd, Nanning, Guangxi 530029, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
3. Guangxi Key Lab of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: In order to evaluate the health status of prestressed concrete continuous rigid frame bridge accurately, a comprehensive evaluation method based on Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy theory was proposed. Firstly, the three-layer state evaluation index system (bottom-middle-top) of prestressed concrete continuous rigid frame bridge was established with the method of chromatography analysis, the grade division for index state of each layer and overall evaluation state was determined, and the quantitative index evaluation standard of each layer in the state evaluation system of prestressed concrete continuous rigid frame bridge was established. Secondly, the membership function of trapezoid and semi trapezoid was selected, the main steps of fuzzy comprehensive evaluation method of prestressed concrete continuous rigid frame bridge were established, and the calculation methods of constant weight, variable weight and evaluation vector of each index in the state evaluation system were proposed. Finally, the method was applied to the state evaluation of Qinjiang third bridge. The results show that the state evaluation method of prestressed concrete continuous rigid frame bridge proposed can evaluate the state of prestressed concrete continuous rigid frame bridge, the state of Qinjiang third bridge evaluated by this method presents “good”, which is consistent with

收稿日期: 2020-04-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738004); 国家自然科学基金资助项目(51868007, 51368005, 51878186); 广西科技重大专项(桂科AA18118029); 广西科技计划项目(桂科AD17195096); 四川省科技计划资助项目(2018GZ0052)

作者简介: 王红伟(1988-), 男, 河南郑州人, 工学博士, 工程师, 主要从事大跨度桥梁检测、监测、状态评估与加固的研究工作。

* 通讯作者: 谢开仲(1974-), 男, 广东河源人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨度桥梁工程抗震与施工控制方面的研究工作。

load test results. Feasibility and effectiveness of the proposed method are verified.

Key words: continuous rigid frame bridge; state evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy theory; variable weight

预应力混凝土(Prestressed Concrete,简称PC)连续刚构桥在荷载、外界腐蚀因素等影响下,会出现各种病害^[1-3],威胁结构安全性^[4-5],准确高效评估其状态具有重要意义^[6]。目前,针对PC连续刚构桥的状态评估研究,监测数据的获取与存储^[7]、新型监测设备与技术^[8]的应用发展比较迅速,但监测数据的利用率不高^[9],根据监测数据评估PC连续刚构桥的状态发展比较缓慢^[10],亟需开展深入研究。国内学者提出了不同的方法和模型,例如王佶等^[11-18]这些学者多是考虑多种因素影响,将层次分析法与某种具体理论结合起来,建立PC连续刚构桥的状态评估模型,并与实桥测试进行验证对比,评估体系比较明确,有力地促进了PC连续刚构桥状态评估技术的发展。但不同学者的评估体系指标、指标的评判标准、权重的处理方法以及考虑的因素等各有差异,由于PC连续刚构桥承载力影响因素多,关于PC连续刚构桥状态评估体系的指标构成以及指标的评判标准,目前工程界和学术界还没有统一的标准,有待深入开展研究。为此,本文在现有研究的基础上,针对PC连续刚构桥的结构和受力特点,提出基于层次分析法和模型综合评估方法相结合的PC连续刚构桥状态评估方法,建立了PC连续刚构桥的状态评估体系,确定了评估体系中各个指标的评判标准和权重,并采用实桥测试验证了方法的可行性。

1 状态评估体系建立

在前人研究工作基础上,对PC连续刚构桥状态评估影响因素进行筛简^[19],建立了PC连续刚构桥的状态评估体系,见图1。

2 指标评判标准建立

在现行规范和前人研究工作的基础上,根据评估指标的状态及其对桥梁安全性的影响程度,将其分成优、良、中、差、危险共五种状态,并制定指标的评判标准。为了对比不同类型指标,将底层指标无量纲化处理,优、良、中、差和危险对应无量纲化分值分别为 $[0.8, 1]$ 、 $[0.6, 0.8]$ 、 $[0.4, 0.6]$ 、 $[0.2, 0.4]$ 和 $[0, 0.2]$ 。本文主要从上部结构、支座和下部结构三部分建立指标的评判标准。

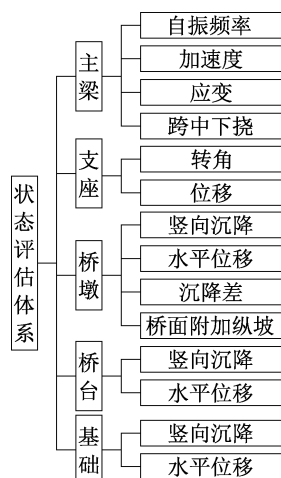


图1 PC连续刚构桥的状态评估体系

Fig. 1 State evaluation system of PC continuous rigid frame bridge

2.1 上部结构

根据主梁的受力状态及其影响因素,将其评判指标分为跨中下挠、应变、自振频率和加速度四个部分,具体评估标准如下。

(1)跨中下挠。基于2011版桥梁技术状况评定标准,结构PC连续刚构桥的受力特性和病害特征,将跨中最大挠度和计算跨径分别记为 $D_{mid}(m)$ 和 $L(m)$,优、良、中、差、危险分别对应评判标准为 $D_{mid} \leq L/3\ 000$ 、 $L/3\ 000 < D_{mid} \leq L/2\ 000$ 、 $L/2\ 000 < D_{mid} \leq L/1\ 000$ 、 $L/1\ 000 < D_{mid} \leq L/600$ 和 $L/600 < D_{mid}$ 。

(2)应变。应变 ε 能够反映PC连续刚构桥的受力状态。混凝土开裂或压碎后可认为是退出工作状态,以 ε 达到材料拉压强度设计值和0分别作为危险和良好的上限,线性内插确定其它状态。

(3)自振频率。参照规范[20]将自振频率评估标准分为五个区间。

(4)加速度。加速度也是PC连续刚构桥的重要动力指标。基于2004版铁路桥梁检定规范和加拿大Ontario桥梁规范中加速度的限值规定,将横向和竖向加速度分别记为 $a_x(m/s^2)$ 和 $a_y(m/s^2)$,横向和竖向加速度不同状态的评判标准见表1。

2.2 支座

支座评判指标包含位移和转角两部分。将支座位移记为 $d_p(mm)$,支座转角的设计值与实

表1 加速度的评判标准

Tab.1 Evaluation criteria of acceleration

状态	加速度评判标准/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	
	横向加速度 a_x	纵向加速度 a_y
优	$0 < a_x \leq 0.35$	$0 < a_y \leq 0.159$
良	$0.35 < a_x \leq 0.70$	$0.159 < a_y \leq 0.319$
中	$0.70 < a_x \leq 1.05$	$0.319 < a_y \leq 0.478$
差	$1.05 < a_x \leq 1.40$	$0.478 < a_y \leq 0.637$
危险	$1.4 < a_x \leq 1.75$	$0.637 < a_y \leq 0.796$

测值分别记为 θ_d 和 θ_t 。基于现行桥梁技术状况评定标准和支座设计规范,结合支座的受力特性和病害特征,支座位移和转角不同状态的评判标准见表2。

表2 支座位移和转角的评判标准

Tab.2 Evaluation criteria of displacement and angle of bearing

状态	加速度评判标准	
	支座位移 d_p /mm	支座转角 θ_t
优	$0 < d_p \leq 2$	$0 \leq \theta_t \leq 0.04\theta_d$
良	$2 < d_p \leq 4$	$0.04\theta_d < \theta_t \leq 0.08\theta_d$
中	$4 < d_p \leq 6$	$0.08\theta_d < \theta_t \leq 0.12\theta_d$
差	$6 < d_p \leq 8$	$0.12\theta_d < \theta_t \leq 0.16\theta_d$
危险	$8 < d_p \leq 10$	$0.16\theta_d < \theta_t \leq 0.20\theta_d$

2.3 下部结构

包括桥墩、桥台和墩台基础三部分,基于现行的2011版公路桥梁技术状况评定标准,结合桥墩、桥台和基础的受力特性和病害特征,具体评判标准如下。

(1) 桥墩。桥墩评判指标主要包括竖向沉降、水平位移、沉降差和桥面附加纵坡。具体评判标准如下:分别以 $2\sqrt{L}$ 、 $0.5\sqrt{L}$ 、 $0.5\sqrt{L}$ 、2% 作为这四个指标的危险的下限,以0作为这四个指标的良的下限,线性内插确定其它状态。

(2) 桥台和基础。桥台和基础的评判指标均包括竖向沉降和水平位移。具体评判标准如下:以 $2\sqrt{L}$ 作为桥台和基础竖向沉降的危险的下限, $0.5\sqrt{L}$ 作为桥台和基础水平位移的危险的下限,0作为桥台竖向沉降和水平位移、基础竖向沉降和水平位移的良的下限,其它线性内插。

3 模糊综合评估法

3.1 模糊综合评估步骤

PC连续刚构桥状态影响因素多且复杂,这些因素的影响水平也处于模糊状态,利用模糊理论

能够较好地解决PC连续刚构桥的状态评估。模糊理论在数学上已经比较成熟,包括集合定义、运算法则、主要算子和隶属函数等,此处不再详述。为了高效构建模糊集合和确定评估结果,基于指派法选择梯形和半梯形的隶属函数,见图2。应用模糊综合评估的步骤见图3。

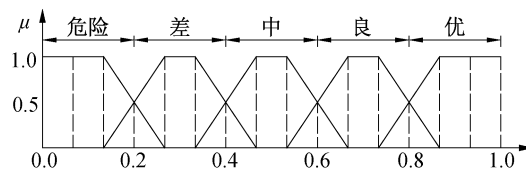


图2 隶属函数

Fig.2 Membership function

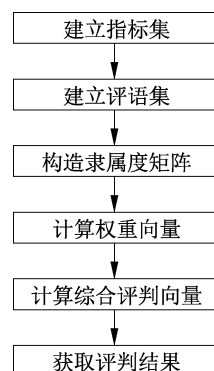


图3 模糊综合评估的主要步骤

Fig.3 Main steps of fuzzy comprehensive evaluation method

利用模糊评估方法进行PC连续刚构桥状态评估时,首先采用层次分析法建立大跨度PC连续刚构桥的评估体系,其次确定指标评判标准和隶属函数,最后由下向上逐层评估,主要步骤见图4。

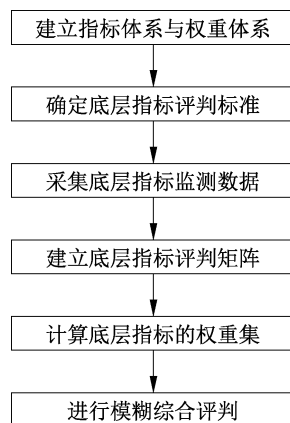


图4 PC刚构桥中模糊综合评估的主要步骤

Fig.4 Main steps of fuzzy comprehensive evaluation in PC rigid frame bridge

3.2 状态评估体系指标权重的求解

(1) 求解底层指标的常数。基于各指标相对重要性程度建立矩阵 B_k , 矩阵 B_k 中元素 b_{ij} 表示指

标 b_i 对指标 b_j 的重要性程度,分为相同——1 分、偏强——3 分、较强——5 分、强烈——7 分和极端——9 分,共计 5 个等级,且矩阵中元素满足 $b_{ij} > 0, b_{ii} = 1, b_{ij} \times b_{ji} = 1$ 。

求解 B_k 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和对应特征向量 $A_{\max}$ 。

计算矩阵的 CR 值,检验矩阵的一致性,若 $CR < 0.1$,则权重值合理,若 $CR \geq 0.1$,需调整 b_{ij} 值。

将 $A_{\max}$ 归一化可得指标常权值。

$$CR = (\lambda_{\max} - n) / [(n - 1) \times RI] \quad (1)$$

式中: CR 为随机一致性比率; RI 为随机一致性指标; n 为矩阵的阶数。

(2)求解底层指标的变权。针对常权存在的问题:个别危及桥梁安全性的局部严重损坏不能有效反映在整体评估结果中,引入变权公式(2)计算变权值。

$$\omega_j(v_1, v_2, \dots, v_n) = \omega_i^{(0)} v_i^{\alpha-1} / \sum_{k=1}^n (\omega_k^{(0)} v_k^{\alpha-1}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: $\omega_i^{(0)}$ 为指标常权; x_i 为评判向量与等级参数向量经过模糊计算得到, $\alpha = 0.5$ 。

(3)求解中层指标的常权与变权。中层与底层指标的常权与变权求解方法同理,此处省略。

3.3 状态评估体系指标评判向量的求解

(1)求解底层指标的评判向量。基于底层指标评判标准,由底层指标的实测值和理论值可得底层指标分值,将底层指标分值代入隶属函数中可得底层指标评判向量,将底层指标评判向量组

成评判矩阵,最后将评判矩阵按行归一,按列求和再归一,可得底层指标的评判向量。

(2)求解中层和顶层指标的评判向量。中层和顶层指标的评判向量均是通过判断矩阵与权重向量进行模糊运算 $M(\cdot, \oplus)$ 获得。针对顶层指标的评判向量,采用加权平均法得出 PC 刚构桥总体得分和状态等级。

4 工程实例

4.1 工程概况

钦江三桥主桥为三跨 PC 连续刚构桥,采用双薄壁墩和明挖扩大基础。钦江三桥主桥立面布置示意图见图 5。

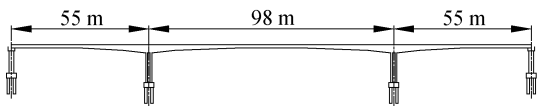


图 5 钦江三桥主桥立面布置示意图
Fig. 5 Elevation layout of Qinjiang third bridge

采用荷载试验方法针对钦江三桥开展静载和动载试验,基于静载和动载试验数据的分析,结果表明钦江三桥的静力和动力性能均满足规范要求,桥梁性能处于优秀等级。

4.2 状态评估结果

基于钦江三桥的荷载试验数据,采用文中提出的 PC 连续刚构桥状态评估方法,对钦江三桥的健康状态进行评估,具体结果见表 3。由加权平均原则可得钦江三桥状态为优(0.88 分),与荷载试验结果一致。

表 3 钦江三桥健康状态评估结果
Tab. 3 Health assessment results of Qinjiang third bridge

指标层次	指标名称	常权	变权	评判向量
底层指标	跨中下挠	0.12	0.11	[0.125, 0.339, 0.286, 0.250, 0]
	应变	0.16	0.15	[0, 0.224, 0.739, 0.037, 0]
	自振频率	0.46	0.44	[0, 0.224, 0.739, 0.037, 0]
	加速度	0.26	0.30	[1, 0, 0, 0, 0]
	转角	0.5	0.5	[1, 0, 0, 0, 0]
	位移	0.5	0.5	[1, 0, 0, 0, 0]
	竖向沉降	0.25	0.25	[1, 0, 0, 0, 0]
	水平位移	0.25	0.25	[1, 0, 0, 0, 0]
	沉降差	0.25	0.25	[1, 0, 0, 0, 0]
	桥面附加纵坡	0.25	0.25	[1, 0, 0, 0, 0]
	竖向沉降	0.5	0.5	[1, 0, 0, 0, 0]
	水平位移	0.5	0.5	[1, 0, 0, 0, 0]

表 3(续)

指标层次		指标名称	常权	变权	评判向量
底层指标	基础	竖向沉降	0.5	0.5	[1,0,0,0,0]
		水平位移	0.5	0.5	[1,0,0,0,0]
中层指标	—	主梁	0.520 4	0.49	[0.350,0.210,0.320,0.120,0]
		支座	0.050 5	0.05	[1,0,0,0,0]
		桥墩	0.186 6	0.20	[1,0,0,0,0]
		桥台	0.104 7	0.11	[1,0,0,0,0]
		基础	0.137 8	0.15	[1,0,0,0,0]
顶层指标	—	状态评估体系	1	1	[0.680,0.100,0.160,0.060,0]

5 结论

1)采用层次分析法建立的 PC 连续刚构桥状态评估体系和指标评判标准能够有效地反映 PC 连续刚构桥的受力特点和结构状态。

2)提出的 PC 连续刚构桥模糊综合评估方法以及指标权重和评判向量的计算方法,能够有效地计算和获取 PC 连续刚构桥的健康状态。

3)采用提出的模糊综合评估方法对钦江三桥进行状态评估,结果表明钦江三桥的得分为 0.88,健康状态为“优秀”,与荷载试验结果相符。

参考文献:

- [1]曾俊铖,刘志权. 大跨连续刚构桥长期下挠的设计成因参数化分析[J]. 公路,2019,64(11):88-93.
- [2]卫 星,赵骏铭,肖 林,等. 连续刚构桥施工过程中腹板裂缝检测与研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(7):38-43.
- [3]陈齐风,郝天之,张 磊,等. 施工阶段大跨径预应力混凝土刚构桥腹板开裂机理[J]. 土木建筑与环境工程,2016,38(5):66-73.
- [4]姜天华,王 强,杨 壮,等. 在役预应力混凝土桥梁损伤状态承载力评估[J]. 铁道建筑,2016(8):31-34.
- [5]臧巨宝,李文秀,张 宏. 预应力连续刚构桥裂缝损伤对其承载力的影响研究[J]. 中外公路,2016,36(2):139-144.
- [6]贾 毅,白伦华,纪云涛,等. 大跨连续刚构桥荷载试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(4):105-111.
- [7]王代君,华 鹏. 大型桥梁健康监测系统数据存储优化设计[J]. 中外公路,2019,39(5):176-178.
- [8]钟继卫,王 波,王 翔,等. 桥梁智能检测技术研究与应用[J]. 桥梁建设,2019,49(S1):1-6.

- [9]孙利民,尚志强,夏 烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报,2019,32(11):1-20.
- [10]李嘉维,夏樟华,余印根,等. 基于长期动力特性监测数据的大跨度桥梁安全性能评估[J]. 福州大学学报:自然科学版,2014,42(4):596-605.
- [11]王 佶,曾东山,范剑锋,等. 基于模糊推理规则的桥梁结构状态评估[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(10):70-72,100.
- [12]黄 侨,林阳子,任 远. 基于关联度的预应力混凝土梁桥综合评估方法[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(7):13-17.
- [13]石鹏程. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥健康监测评估系统研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
- [14]孙 磊,郝宪武,谭冬莲. 大跨径连续刚构桥健康监测与评估系统设计[J]. 广西大学学报:自然科学版,2010,35(4):621-626.
- [15]宗周红,朱三凡,夏樟华. 大跨径连续刚构桥安全性评估的综合分析方法[J]. 铁道学报,2011,33(7):110-117.
- [16]宗周红,朱三凡,夏樟华. 大跨径连续刚构桥安全性评估的基淮有限元模型[J]. 铁道学报,2011,33(9):94-101.
- [17]郭大进,宋 波,周文欢. 基于层次分析法的在役梁桥养护状况综合评估[J]. 公路交通科技,2011,28(3):108-112.
- [18]黄志伟,黄 侨,任 远. 基于程度分析的中小桥梁评估方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2012,42(2):358-362.
- [19]王红伟. 预应力混凝土连续刚构桥状态评估研究[D]. 南宁:广西大学,2014.
- [20]JTG/T J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].

(责任编辑 周雪梅)