

樊燕燕,李江龙,李子奇.在役公路梁式桥综合震害等级预测研究[J].地震工程学报,2021,43(4):951-957.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.951

FAN Yanyan, LI Jianglong, LI Ziqi. Prediction of synthetic seismic damage grade of in-service highway girder bridges[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 951-957. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.951

在役公路梁式桥综合震害等级预测研究

樊燕燕, 李江龙, 李子奇

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为客观预测在役公路梁式桥综合震害状况,考虑在役桥梁在运营期存在的病害问题,从压力和承压两方面建立在役公路梁式桥综合震害预测评价指标体系。以桥梁作为承灾体,建立在役公路梁式桥综合震害物元可拓模型,运用熵权法进行赋权,确定桥梁的综合震害状况。以一座在役梁式桥为例,运用上述模型确定算例的综合震害状况。研究表明,该桥的综合震害等级为Ⅲ级,破坏等级中等,且根据结果分析影响桥梁震害程度的主要影响因素;该模型通过对多个指标关联系数的综合分析来评价在役梁式桥的综合震害等级,极大地提高了该模型评估的准确率及可靠性,为桥梁震害等级的预测提供一定的参考,对提升桥梁综合抗震能力具有积极意义。

关键词: 梁式桥; 综合震害评价; 物元可拓理论; 熵权法

中图分类号: U44

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)04-0951-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.04.951

Prediction of synthetic seismic damage grade of in-service highway girder bridges

FAN Yanyan, LI Jianglong, LI Ziqi

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To objectively predict the synthetic earthquake damage of in-service highway girder bridges, an evaluation index system for synthetic earthquake damage prediction of highway girder bridges was established by considering existing problems of in-service bridges during operation. Taking the bridge as the disaster bearing body, a matter-element extension model for synthetic seismic damage of in-service highway girder bridges was established in this paper. Then the entropy method was used to determine the synthetic seismic damage status of the bridge. Taking an in-service girder bridge as an example, the synthetic seismic damage of the bridge was determined by using the above model. The research results show that the synthetic seismic damage level of the bridge is grade III, and the damage level is medium. According to the results, main factors influencing the seismic damage degree of the bridge were analyzed. The evaluation

收稿日期: 2020-08-03

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持(IRT15R29)

第一作者简介: 樊燕燕(1976—),女,河南禹州人,副教授,从事土木工程建设与管理研究。E-mail: 12062481@qq.com。

accuracy and reliability of the model was greatly improved by evaluating the synthetic seismic damage level of the in-service girder bridge through a comprehensive analysis of the correlation coefficient of multiple indexes. The study can provide a certain reference for predicting the seismic damage level of bridges, thus having a positive significance for improving the synthetic seismic capacity of bridges.

Keywords: girder bridge; synthetic seismic damage assessment; matter-element extension theory; entropy weight method

0 引言

地震是我国常见的自然灾害之一,破坏性地震给我国造成了巨大的灾难。近几年,我国地震频发,严重阻碍了我国经济的发展。桥梁作为生命线工程,是交通线路的重要枢纽,其抗震能力对道路的地震安全性具有重要影响^[1]。在各种类型的公路桥中,梁式桥由于制造、安装便捷成为我国桥梁最普遍的一种形式,同时也是地震中最容易遭受到破坏的桥型。如何准确预测在役公路梁式桥未来由于地震受到灾害破坏或损害程度的大小已成为目前的研究热点,其具有重要的科学实用价值与现实意义。

近年来,国内外研究者对公路梁式桥的抗震评估进行了一系列的研究,早在 1984 年,日本学者久保庆三郎等^[2]通过对遭受严重震害的 30 座公路桥梁统计,建立了桥梁抗震性能评定标准;Buckle 等^[3]根据美国桥梁地震受损的资料得出经验公式。在国内,孙海等^[4]利用投影寻踪模型构建了生命线桥梁震害预测模型;孙颖等^[5]采用模糊层次分析法建立震害评估模型,对公路梁式桥可能出现的破坏情况进行了预测;赵钊^[6]基于 BP 神经网络算法和典型桥梁震害训练样本,建立了梁式桥震害评估神经网络模型。截至目前,虽然对梁式桥的震害评估已取得大量的研究成果,但针对梁式桥所取的震害影响系数都是一个确定的数值,不利于提高模型的精度,且现有的文献中采用的震害资料相对久远,没有考虑在役桥梁的承载状况,需要重新选择震害影响因素。因此,本文在国内外研究成果的基础上,运用可拓模型进行梁式桥综合震害评价,可拓学评价法与其他法的不同之处在于,它具有统一的评价模型,特别是把实变函数中距离的概念拓展为距的概念,使得关联函数值域范围得到了拓展,把评价指标由单一的确定值转变为区间值,从而能更全面地评价对象属于集合的程度^[7],采用熵权法确定影响因素的权重,确定梁式桥的综合震害状况,为桥梁的维

修加固提供理论依据。

1 构建公路梁式桥综合震害的评价指标体系

在役公路梁式桥的综合震害评价指标体系是一个复杂系统,需要建立完整且科学的评价指标体系,才能实现对桥梁合理准确的评价。通过学习、借鉴现有研究成果^[4-6],根据《公路桥梁抗震设计细则》与《公路桥梁承载能力检测评定规程》,遵循指标体系构建的基本原则——全面性、代表性、层次性与可操作性,从压力与承压两个方面筛选出可操作性强、精度高且最能反映震害影响的指标,建立公路梁式桥综合震害的评价指标体系,如表 1 所列。

灾害学研究表明,构成震害压力大小主要与致灾因子的危险性与承灾体暴露性有关。为了定量分析,本文选取地震峰值加速度与地基液化衡量桥梁致灾的危险性,选取钢筋锈蚀等指标衡量桥梁自身的暴露性;承压指标体现为在面临震害压力时在役桥梁当前的状态,参考相关文献,主要包括一些不易甚至无法改变的因素(如场地条件、墩台高度等)及跨中挠度等因素为当前桥梁所处的一种状态。

参考文献^[8],将桥梁破坏等级划分为 I、II、III、IV、V 五个等级,分别表示基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏,并对指标分级依据作以阐述; C_1 、 C_2 、 C_6 、 C_7 依据文献^[4-6]中对指标的量化值进行划分; C_3 依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》对承重构件钢筋锈蚀电位水平进行划分; C_4 、 C_5 、 C_8 参考文献^[9]及《公路桥梁承载能力检测评定规程》进行划分; C_9 为定性指标,根据专家打分分值进行划分; C_{10} 根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》进行评定划分。

2 公路梁式桥综合震害可拓模型的建立

2.1 经典域、节域与待评物元的确定

可拓理论是我国学者蔡文于 20 世纪 80 年代初

提出的,以物元与可拓集合生成的知识体系,用来研究将定性描述转变为定量描述,并通过建立多指标的
究物元及其变换的理论,其通过描述事物的可变性,评估模型来完整评价事物^[10-11]。

表 1 公路梁式桥综合震害评价指标体系及分级标准

Table 1 Evaluation index system and classification standard of comprehensive seismic damage of highway beam bridge				
属性	评价指标	等级	定性描述	定量描述
压力指标	地震峰值加速度 C_1	I	$0.05g$	$C_1 < 1$
		II	$0.1g$	$1 \leq C_1 < 1.8$
		III	$0.15g$	$1.8 \leq C_1 < 2.6$
		IV	$0.2g$	$2.6 \leq C_1 < 3.4$
		V	$0.3g$	$C_1 \geq 3.4$
	地基液化 C_2	I	无	0
		II	轻微	$0 < C_2 \leq 1.3$
		III	中等	$1.3 < C_2 \leq 1.7$
		IV	严重	$1.7 < C_2 \leq 2$
		V	非常严重	$C_2 > 2$
	钢筋锈蚀 C_3	I	无锈蚀	$C_3 > -200$
		II	可能发生锈蚀	$-300 \leq C_3 < -200$
		III	锈蚀的概率大于 90%	$-400 \leq C_3 < -300$
		IV	可能严重锈蚀	$-500 \leq C_3 < -400$
		V	存在锈蚀开裂	$C_3 < -500$
	混凝土碳化深度 C_4	I	完好	$C_4 < 0.5$
		II	承重构件有少量碳化	$0.5 \leq C_4 < 1.0$
		III	主要受力部位出现碳化	$1.0 \leq C_4 < 1.5$
		IV	碳化明显增多,构件出现变形	$1.5 \leq C_4 < 2.0$
		V	主要受力构件发生严重碳化	$C_4 \geq 2.0$
	等效承载能力降低率 C_5	I	完好	$0 < C_5 \leq 0.01$
		II	有轻微损伤	$0.01 < C_5 \leq 0.025$
		III	有一定损伤	$0.025 < C_5 \leq 0.05$
		IV	损伤严重	$0.05 < C_5 \leq 0.15$
		V	损伤非常严重	$0.15 < C_5 \leq 0.2$
承压指标	场地条件 C_6	I	稳定岩石	$C_6 < 0.5$
		II	紧密的碎石土	$0.5 \leq C_6 < 1$
		III	中密的碎石土,坚硬黄土	$1 \leq C_6 < 1.4$
		IV	稍密的砂,可塑黄土	$1.4 \leq C_6 < 1.8$
		V	淤泥,松散的砂,流塑黄土	$C_6 \geq 1.8$
	墩台高度 C_7	I	$H < 5\text{ m}$	$C_7 < 1$
		II	$5\text{ m} \leq H < 7\text{ m}$	$1 \leq C_7 < 1.28$
		III	$7\text{ m} \leq H < 10\text{ m}$	$1.28 \leq C_7 < 1.7$
		IV	$10\text{ m} \leq H < 15\text{ m}$	$1.7 \leq C_7 < 2.5$
		V	$H \geq 15\text{ m}$	$C_7 \geq 2.5$
	跨中挠度 C_8	I	完好	$C_8 \leq 0.25$
		II	无明显变形	$0.25 < C_8 \leq 0.5$
		III	挠度小于限值	$0.5 < C_8 \leq 0.75$
		IV	挠度接近限值	$0.75 < C_8 \leq 1$
		V	挠度大于限值	$C_8 > 1$
	支座受损程度 C_9	I	完好	$0 < C_9 \leq 2$
		II	轻微损伤	$2 < C_9 \leq 4$
		III	中等损伤	$4 < C_9 \leq 6$
		IV	严重损伤	$6 < C_9 \leq 8$
		V	非常严重损伤	$8 < C_9 \leq 10$
	阻尼比 C_{10}	I	不考虑阻尼系统	0
		II	小	$0 < C_{10} \leq 0.03$
		III	中	$0.03 < C_{10} \leq 0.05$
		IV	较大	$0.05 < C_{10} \leq 0.08$
		V	大	$C_{10} > 0.08$

设物元为:

$$\mathbf{R}_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & [a_{1j}, b_{1j}] \\ & c_2 & [a_{2j}, b_{2j}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{nj}, b_{nj}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}_j$ 为第 j 个同征物元; N_j 为所划分的第 j 个评价等级; c_i 为第 i 个评价指标; $V_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$ 为 N_j 关于指标 c_i 所规定的量值范围, 即经典域; $j = 1, 2, \dots, m$ 。

$$\mathbf{R}_p(P, C, V_p) = \begin{bmatrix} P & c_1 & [a_{1p}, b_{1p}] \\ & c_2 & [a_{2p}, b_{2p}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{np}, b_{np}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P 为评价对象的全体; $V_{ip} = [a_{ip}, b_{ip}]$ 为 P 关于 c_i 所取的量值范围, 即 P 的节域, 且 $V_{ij} \subset V_{ip} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 。

对待评的桥梁 p , 将所收集的统计数据或分析结果用物元 R 表示, 则称 R 为待评物元。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} p & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: p 为某一待评的桥梁; v_i 为 p 关于评价指标 c_i 的量值, 即待评桥梁的各个评价指标值。

2.2 实测指标的无量纲化

由于在役梁式桥综合震害评价指标的量纲不同, 使得它们之间无法直接比较, 故对各指标进行归一化处理^[12]。具体处理方法见式(4)与式(5)。

$$c'_i = \frac{c_{i\max} - c_i}{c_{i\max} - c_{i\min}} \quad \text{逆向指标; 越小越好型} \quad (4)$$

$$c'_i = \frac{c_i - c_{i\min}}{c_{i\max} - c_{i\min}} \quad \text{正向指标; 越大越好型} \quad (5)$$

式中: c_i 为评价指标数值; c'_i 为评价指标转化值。

2.3 计算待评桥梁评价指标的关联函数

关联函数为:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, V_{ij})}{|V_{ij}|}, & v_i \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij})}, & v_i \notin V_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\rho(v_i, V_{ij}) = \left| v_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| + \frac{a_{ij} - b_{ij}}{2} \quad (7)$$

$$|V_{ij}| = |b_{ij} - a_{ij}| \quad (8)$$

$$\rho(v_i, V_{ip}) = \left| v_i - \frac{a_{ip} + b_{ip}}{2} \right| + \frac{a_{ip} - b_{ip}}{2} \quad (9)$$

2.4 熵权法确定评价指标权重系数

熵是一个热力学概念, 后由申农引入信息论, 称之为信息熵。在综合评价中, 一个指标的信息熵越小, 则该指标的变异程度越大, 在综合评价中所起的作用就越大, 指标的权重越大; 信息熵越大时, 则呈现相反变化趋势^[13]。熵权法的基本思路是根据各变量的变异程度来确定各指标的权重, 通过修正得到权重, 所以运用熵权法可以保证结果的客观性和准确性。假设有 m 个待评价项目, n 个评价指标, 形成原始判断矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$, 通过式(10)与式(11)分别计算第 j 个指标的信息熵值与权重。

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (10)$$

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$$

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (11)$$

式中: r_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个项目的评价值; p_{ij} 为第 i 个项目的第 j 个评价指标的权重值, 特别地, 当 $p_{ij} = 0$ 时, 规定 $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$; e_j 为第 j 个指标的信息熵值; ω_j 为第 j 个指标的权重。

2.5 待评桥梁震害等级的评估

待评价物元 p 的关联度计算式为:

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(v_i) \quad (12)$$

$$K_{j_0}(p) = \max[K_j(p)] \quad (13)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, m$ 。依据上式则判定待评价对象 p 属于评价等级 j_0 。

3 实例分析

河南省某高速公路段 K5+661 沟水坡 1 号桥于 2005 年竣工通车, 为预应力混凝土梁桥, 全桥总长 407.5 m, 上部结构形式为预应力混凝土连续 T 型梁, 桥面为沥青混凝土桥面铺装, 下部结构为柱式墩、柱式台、桩基础。经检测^[14], 该桥桥台台帽混凝土剥落、钢筋锈蚀、出现裂缝, 主梁空心板混凝土剥落、钢筋锈蚀, 支座的位置串动、垫石开裂, 立柱混凝土出现剥落露筋、裂缝。表 2 为表 1 各评价指标的实测值与归一化处理后的数值, 处理方法见式(4)和(5)。

3.1 对评价指标进行无量纲化处理

通过式(4)和(5)对表 1 各评价指标进行归一化处理, 结果列于表 3。其中, C_3 与 C_{10} 为逆向指标, 其余指标均为正向指标。

表 2 沟水坡 1 号桥评价指标实测值与无量纲处理值

评价指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
实测值	1.5	1.4	-270	1.4	0.05	0.8	1.9	0.65	3.5	0.03
无量纲值	0.44	0.70	0.23	0.60	0.25	0.23	0.60	0.53	0.35	0.63

表 3 桥梁震害指标归一化处理

Table 3 Normalization treatment of earthquake damage indexes of the bridge					
震害等级	I	II	III	IV	V
C ₁	0.00~0.20	0.20~0.36	0.36~0.52	0.52~0.68	0.68~1.00
C ₂	0.00~0.25	0.25~0.65	0.65~0.85	0.85~0.95	0.95~1.00
C ₃	0.00~0.25	0.25~0.45	0.45~0.70	0.70~0.80	0.80~1.00
C ₄	0.00~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~0.85	0.85~1.00
C ₅	0.00~0.21	0.21~0.35	0.35~0.55	0.55~0.75	0.75~1.00
C ₆	0.00~0.28	0.28~0.56	0.56~0.78	0.78~0.89	0.89~1.00
C ₇	0.00~0.40	0.40~0.51	0.51~0.68	0.68~0.84	0.84~1.00
C ₈	0.00~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~0.88	0.88~1.00
C ₉	0.00~0.20	0.20~0.40	0.40~0.60	0.60~0.80	0.80~1.00
C ₁₀	0.00~0.38	0.00~0.38	0.38~0.63	0.63~0.82	0.82~1.00

3.2 桥梁震害物元的构造

由式(1)和(2)可得桥梁综合震害的经典域 R_j 和节域 R_p 。

经典域 R_j ($j=1,2\cdots,5$) 中的 a, b 值即为表 3 的归一化结果。比如对于 $c_1, [a_{11}, b_{11}]$ 的量值范围为 $[0.00, 0.20]$, 同样可知其他相对应的量值范围。

根据式(3)得沟水坡 1 号桥综合震害的同征物元 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} p & c_1 & 0.44 \\ & c_2 & 0.70 \\ & c_3 & 0.23 \\ & c_4 & 0.60 \\ & c_5 & 0.25 \\ & c_6 & 0.23 \\ & c_7 & 0.60 \\ & c_8 & 0.53 \\ & c_9 & 0.35 \\ & c_{10} & 0.63 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & [a_{1j}, b_{1j}] \\ & c_2 & [a_{2j}, b_{2j}] \\ & c_3 & [a_{3j}, b_{3j}] \\ & c_4 & [a_{4j}, b_{4j}] \\ & c_5 & [a_{5j}, b_{5j}] \\ & c_6 & [a_{6j}, b_{6j}] \\ & c_7 & [a_{7j}, b_{7j}] \\ & c_8 & [a_{8j}, b_{8j}] \\ & c_9 & [a_{9j}, b_{9j}] \\ & c_{10} & [a_{10j}, b_{10j}] \end{bmatrix}$$
$$R_p = \begin{bmatrix} P & c_1 & [0.00, 1.00] \\ & c_2 & [0.00, 1.00] \\ & c_3 & [0.00, 1.00] \\ & c_4 & [0.00, 1.00] \\ & c_5 & [0.00, 1.00] \\ & c_6 & [0.00, 1.00] \\ & c_7 & [0.00, 1.00] \\ & c_8 & [0.00, 1.00] \\ & c_9 & [0.00, 1.00] \\ & c_{10} & [0.00, 1.00] \end{bmatrix}$$

3.3 桥梁震害评价等级关联函数值的计算

根据式(6)~(9)计算该桥梁单项评价指标 c_i 的关联度,因为 $v_1 \in V_{13}$, 所以 v_1 对第 3 等级的关联度为

$$K_3(v_1) = \frac{-\rho(v_1, V_{13})}{|V_{13}|} =$$
$$= \frac{\left| 0.44 - \frac{1}{2}(0.36 + 0.52) \right| + \frac{1}{2}(0.36 - 0.52)}{|0.52 - 0.36|}$$
$$= 0.5$$

因为 $v_1 \notin V_{11}$, 所以 v_1 对第 1 等级的关联度为

$$K_1(v_1) = \frac{\rho(v_1, V_{11})}{\rho(v_1, V_{1p}) - \rho(v_1, V_{11})} =$$
$$= \frac{\left| 0.44 - \frac{1}{2}(0.00 + 0.20) \right| + \frac{1}{2}(0.00 - 0.20)}{\rho(v_1, V_{1p}) - \left| 0.44 - \frac{1}{2}(0.00 + 0.20) \right| - \frac{1}{2}(0.00 - 0.20)}$$
$$= -0.35$$

其中: $\rho(v_1, V_{1p}) = \left| 0.44 - \frac{1}{2}(0.00 + 1.00) \right| +$

$$\frac{1}{2}(0.00 - 1.00) = -0.44$$

同理,按上述原则进行判断和计算,可得出该桥梁各评价指标关于 5 个震害等级的单指标关联度,结果列于表 4。

表 4 各指标关于震害等级的关联度
Table 4 Relevance of various indicators on earthquake damage level

指标	震害评价等级				
	I	II	III	IV	V
C ₁	-0.35	-0.18	0.50	0.46	-0.35
C ₂	-0.60	-0.14	0.75	-0.40	-0.45
C ₃	0.08	-0.08	-0.49	-0.67	-0.71
C ₄	-0.47	-0.20	0.60	-0.27	-0.38
C ₅	-0.14	0.29	-0.29	-0.55	-0.67
C ₆	0.18	-0.18	-0.59	-0.71	-0.74
C ₇	-0.33	-0.18	0.47	-0.63	-0.38
C ₈	-0.37	-0.06	0.12	-0.32	-0.43
C ₉	-0.30	0.17	-0.25	-0.42	-0.56
C ₁₀	-0.40	-0.40	0.00	0.00	-0.34

3.4 桥梁震害评价指标权重的确定

根据参考文献[15]确定评价指标判断矩阵的方法,依据式(10)和(11),求得各评价指标的权重,结果如下所示:

$$W_1\{C_1 \sim C_{10}\} = \{0.076, 0.158, 0.139, 0.094, 0.114, 0.185, 0.109, 0.036, 0.058, 0.031\}$$

3.5 桥梁综合震害评价

根据式(12),可以得到待评桥梁关于各等级的综合关联度为:

$$\{K_1(p) \sim K_5(p)\} = \{-0.217, -0.090, 0.044, -0.446, -0.545\}$$

结合式(13), $K_{j_0}(p) = 0.044$,判定待评桥梁综合震害等级 j_0 为Ⅲ级。根据桥梁的破坏等级,该桥未来由于震害造成的破坏属于中等破坏。

3.6 分析结果

根据表 2 可知, C_1 、 C_2 、 C_4 处于Ⅲ级,导致该桥梁面临的震害压力较大; C_7 、 C_8 、 C_{10} 处于Ⅲ级,说明这几方面承压状态较差,总体状况较差。该桥未来由于地震发生可能会出现结构轻微变形,桥墩混凝土出现明显裂缝,梁端混凝土脱落,墩台微移,总体状况较差,但经修复可使用。目前需要对该桥梁进行养护加固,在延长其使用寿命周期的同时,还可以预防地震发生产生的破坏及损失。

4 结论

(1) 参考已有文献和现行规范,考虑在役桥梁

的病害状况,基于能够修复改进的前提,从压力与承压两个方面选取 10 个最能反映影响桥梁震害指数的因素构成评价指标体系。

(2) 运用物元可拓理论,建立了公路梁式桥综合震害可拓模型,利用熵权法赋权,确定桥梁的综合震害等级。采用该方法对沟水坡 1 号桥进行震害评价。结果表明,该桥梁的综合震害等级为Ⅲ级,经适当修复可使用。

(3) 熵权物元可拓模型为桥梁综合震害等级预测评价提供了一种操作性较强的方法,但该方法在评价指标的量值范围界定上存在主观性,需进一步完善。

参考文献(References)

[1] 冯莉,樊燕燕,王力,等.基于性能的高速铁路钢管混凝土拱桥地震经济风险分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):573-580.
FENG Li, FAN Yanyan, WANG Li, et al. Performance-based seismic financial risk assessment of a CFST arch bridge over high-speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3): 573-580.

[2] 久保庆三郎,张尚识.桥梁的震害预测[J].世界地震工程,1984(5):8-11,17.
KUBO Keiburo, ZHANG Shangzhi. Seismic damage prediction of bridges[J]. World Earthquake Engineering, 1984(5): 8-11, 17.

[3] BUCKLE I G, KIM S H. A vulnerability assessment model for highway bridges[C]//Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No.6, Lifeline Earthquake Engineering, Proceedings of the Forth U.S. Conference. American Society of Civil Engineers, New York, Aug. 1995: 493-500.

[4] 孙海,高惠瑛.基于粒子群优化投影寻踪概率模型的桥梁地震震害预测方法研究[J].世界地震工程,2017,33(3):152-159.
SUN Hai, GAO Huiying. Study on seismic damage prediction method for urban bridges based on PSO-PPE[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 152-159.

[5] 孙颖,邢文杰,游福科.基于模糊层次分析法的公路梁式桥地震震害预测研究[J].福州大学学报(自然科学版),2013,41(4):776-781,800.
SUN Ying, XING Wenjie, YOU Fuke. The research on the earthquake damage prediction of highway girder bridges based on fuzzy analytical hierarchy approach[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 776-781, 800.

[6] 赵钊.梁式桥震害评估方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011.
ZHAO Zhao. Study on methodologies for seismic estimation of beam bridges[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics,

- CEA,2011.
- [7] 梁桂兰,徐卫亚,谈小龙.基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J].岩土力学,2010,31(2):535-540.
LIANG Guilan,XU Weiya,TAN Xiaolong.Application of extension theory based on entropy weight to rock quality evaluation[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(2):535-540.
- [8] 冯莉,樊燕燕,王力,等.基于模糊理论的高铁连续梁桥地震风险评估[J].地震工程学报,2020,42(3):639-645.
FENG Li,FAN Yanyan,WANG Li,et al.Seismic risk assessment of high-speed railway continuous girder bridges based on fuzzy theory[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):639-645.
- [9] 王引兄,郝伟,崔晶晶.西北干寒地区在役混凝土梁桥可靠性评价[J].铁道科学与工程学报,2019,16(11):2766-2774.
WANG Yinxiong,HAO Wei,CUI Jingjing.Reliability evaluation of in-service concrete girder bridges in the dry cold region of northwestern China[J].Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(11):2766-2774.
- [10] 刘兵,李晓璐,张彭,等.基于熵权可拓物元模型的城市轨道交通线路运营风险评价[J].中国安全生产科学技术,2019,15(12):175-181.
LIU Bing,LI Xiaolu,ZHANG Peng,et al.Evaluation on operational risk of urban rail transit line based on entropy weight extension matter-element model[J].Journal of Safety Science and Technology,2019,15(12):175-181.
- [11] 杨卓,戎晓力,卢浩,等.基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J].安全与环境学报,2016,16(2):15-19.
YANG Zhuo,RONG Xiaoli,LU Hao,et al.Risk assessment on the tunnel collapse probability by the theory of extenics in combination with the entropy weight and matter-element model[J].Journal of Safety and Environment,2016,16(2):15-19.
- [12] CAI W.The extension set and non-compatible problem[C]//Advances Mathematics and Mechanics in China.Beijing:International Academic Publishers,1990.
- [13] 李江龙,樊燕燕,李子奇.基于熵权-云模型的城市群综合承灾度评价[J].中国安全生产科学技术,2020,16(7):48-54.
LI Jianglong,FAN Yanyan,LI Ziqi.Evaluation on comprehensive disaster-bearing degree of city cluster based on entropy weight-cloud model[J].Journal of Safety Science and Technology,2020,16(7):48-54.
- [14] 周方.公路桥梁的技术状况评价及预测研究[D].大连:大连理工大学,2015.
ZHOU Fang.Technological condition assessment and prediction research of highway bridge[D].Dalian:Dalian University of Technology,2015.
- [15] 柴乃杰,刘鑫淼,鲍学英,等.基于熵权可拓理论的我国再生混凝土粗骨料质量等级评价[J].硅酸盐通报,2018,37(1):1-9.
CHAI Naijie,LIU Xinmiao,BAO Xueying,et al.Evaluation of coarse aggregate quality grade of recycled concrete in China based on entropy weight extension theory[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2018,37(1):1-9.