

西藏地区在役桥梁安全评价体系研究

张娅婷 侯升起 梁锦浩 李鑫

西藏大学工学院 西藏拉萨 850000

摘要: 桥梁是公路设施的重要组成部分,在其生命周期暴露于多种危险之中。通过对西藏地区在役桥梁潜在安全风险进行识别,基于层次分析法计算评价指标各因素的权重值,结合模糊综合评价法建立多层次综合评判,根据安全风险概率确定其等级标准。运用上述评价体系对西藏地区内的一座钢筋混凝土桥梁进行了分析评价,验证提出的多灾害下西藏地区在役桥梁安全评价体系的有效性。

关键词: 西藏地区;在役桥梁;安全评价

Study on Safety Evaluation System of Existing Bridges in Tibet

Yating Zhang, Shengqi Hou, Jinhao Liang, Xin Li

(School of Engineering, Tibet University, Lhasa, Tibet 850000)

Abstract: Bridge is an important part of highway facilities, and it is exposed to many dangers in its life cycle. By identifying the potential safety risks of bridges in service in Tibet, the weight of each factor in the evaluation index is calculated based on the analytic hierarchy process, and a multi-level comprehensive evaluation is established by combining the fuzzy comprehensive evaluation method, and its grade standard is determined according to the safety risk probability. Using the above evaluation system, a reinforced concrete bridge in Tibet is analyzed and evaluated, and the effectiveness of the proposed safety evaluation system for existing bridges in Tibet under multiple disasters is verified.

Keywords: Tibet; Bridges in service; safety evaluation

随着桥梁的结构和跨度不断增加,各种不确定因素对桥梁结构的影响也越来越大,桥梁在公路基础设施系统中起着至关重要的作用,在公路基础设施系统中,桥梁是最脆弱的组件。西藏位于高原地区,高寒、高温差、日照时间长、常年冻土、大风天气,这对桥梁的运营将产生不利的影响。为了使大桥能够正常使用和运营,通过正确的评估在役桥梁的各种风险,对促进西藏地区在役桥梁的养护管理提供技术依据使之继续为公路运输事业服务具有重要意义。

目前,有关在役桥梁的安全评价的研究主要集中在评价方法和评价指标体系两个方面。运营期安全风险评估研究主要针对桥梁结构安全或耐久性安全方面。运营期多因素安全服役评价成果较少,已有的研究也多针对单体桥梁单因素分析。目前对在役桥梁安全性能的主要有基于专家系统评价法^[1]、基于实桥调查的经验方法、模糊层次分析法、人工神经网络、贝叶斯网络和灰色层次分析法^[2]。

本文以西藏地区在役桥梁安全为研究对象,使用模糊层次分析法对安全风险进行评级和排序,而灰色理论方法适用于风险评价。对西藏地区在役桥梁安全评价研究不仅可以用于桥梁日常运营和养护管理,同时可以有效降低桥梁运营安全风险。

一、桥梁运营阶段风险源的识别

桥梁是公路基础设施的重要组成部分,在桥梁建设项目的规划、设计、施工、运行阶段,其生命周期暴露于多种危险之中。通过对运营期桥梁的危险进行识别,可知风险源主要包括以下几个部分,地质灾害、洪涝灾害、风暴灾害、交通危险、建筑危害、人为危害以及气象灾害。

二、桥梁运营期安全风险评估 AHP-FCE 模型的建立

在不同的多目标决策问题中,采用了层次分析法(AHP)、模糊层次分析法(FAHP)、贝叶斯法等类似的方法来解决这类问题^[3]。AHP是一种多目标决策的实用方法。AHP中的决策问题被分解成不同的层次结构,以确定每个指标的重要性。AHP法是美国运筹学家

Saaty于20世纪70年代初提出^[4],它将层次结构分解为目标、因素和子因素。

2.1 建立评价指标集

层次结构包括三个层次。第一层是问题的目标,即总的桥梁风险。受到了两个危险类别的影响。因此,桥梁风险被分解成两个结构:自然和人为的风险。它们位于第二层次。每个标准中最相关的次级标准已被放在第三层。滑坡、洪涝、冲刷、泥石流、飓风、冻融、桥梁使用年限和冰雹都属于自然灾害的范畴。这几类风险因素不可预测和控制,因为它们的源头在自然界。另一类包括火灾、恐怖袭击、爆炸、超载、施工方案和结构设计。与第一类风险因素相比,人为的危险因素更加可控。

基于对桥梁安全风险源的识别,将安全风险的指标引述集U进行分类,分为m个因子集 $U_i, i=1, 2, 3, \dots, m$ 。得到的相应的一级指标集 $=\{U_1, U_2\}=\{\text{人为因素}, \text{自然因素}\}$ 。

对应于每一个一级指标 U_i 又有n个因数,得到相应的二级指标集 $U_i=\{u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, \dots, u_{in}\}$,其中 u_{ij} 表示第i类的第j个因数, $i=1, 2, 3, \dots, m, j=1, 2, 3, \dots, n$ 。 $U_1=\{u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{1n}\}=\{\text{火灾}, \text{恐怖袭击}, \text{爆炸}\}$ 。 $U_2=\{u_{21}, u_{22}, u_{23}, \dots, u_{2n}\}=\{\text{滑坡}, \text{洪涝}, \text{冲刷}\}$ 。这样便将安全风险指标分为了两级,即一级指标集及二级指标集,得到一个三层结构的桥梁安全风险评价指标体系,如图2所示。

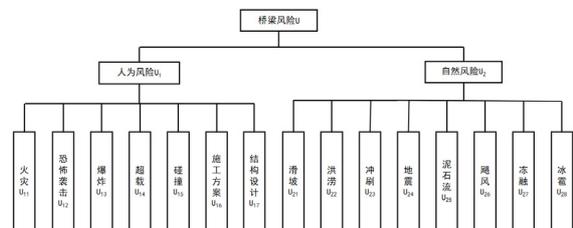


图1 桥梁安全风险评价指标体系

2.2 建立权重集

权重集的建立是层次分析法的重要内容,权重集是各个指标在整体评价中的相对重要程度^[5]。

(1) 构造各指标层的判断矩阵

根据专家调查问卷对同一层次因素对桥梁安全风险的重要性进行判断,并对其他因素进行比较,形成判断矩阵。如二级指标集的判断矩阵为:

$$U = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式中: a_{ij} 为影响因子 i 相对于影响因子 j 的比较值,满足如下关系:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ij} = 1/a_{ji} \\ a_{ii} = 1 \end{cases} \quad (2-2)$$

比较值 a_{ij} 的取值是由 Satty1-9 值法来确定。按文献[5]中的标度表进行取值。(2) 确定各个层次中指标的权重值

计算判断矩阵的特征向量求得矩阵权重,本文采用方根法计算特征向量,计算判断矩阵行积后开 n 次方根:

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2-3)$$

再求权重:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{w}_k} \quad (2-4)$$

计算各个指标的权重值,主要利用层次分析法构造桥梁安全层次模型,由加权法从最底部的方案层计算得到上一层的状况,逐层计算,最终得出每层指标的权重值。

根据判断矩阵,利用数学理论,求出矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及特征向量。

$$\lambda_{\max} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (2-5)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征根, W 为特征向量(权重), n 为判断矩阵的维数。

(3) 对判断矩阵进行一致性检验

对安全风险体系的判断矩阵建立之后,为了避免出现非一致阵和误差的情况,保证分析结果的合理性与准确性,需要进行一致性检验。随机一致性指标 RI 的取值参考文献[5]所示。一致性指标 CI 的计算公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2-6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI} \quad (2-7)$$

式中,其中 CI 表示一致性指数,CR 是一致性比率。

一般认为,若随机一致性比率 $CR < 0.10$,则认为矩阵具有满意的一致性,否则判断矩阵不具有可接受的一致性,因此需要返回重新修正。

2.3 建立评语集

用于评定因素集中每个因素状态评语的集合,即 $V = \{V_1, V_2,$

$V_3, \dots, V_k\}$,例如可以取 $V = \{\text{优秀, 良好, 合格, 较差, 极差}\}$ 。与评语集相对应的有评分集 $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_k\}$;例如 $G = \{100, 80, 60, 20, 0\}$ 。

2.4 确定各层次的隶属矩阵 R

根据模糊控制理论,每一个指标对应不同的等级会有不同的隶属度。确定隶属度函数有较多的方法,常用的有模糊分布中的高斯型隶属函数、梯形隶属函数、三角形隶属函数以及柯西型隶属函数等。在桥梁的模糊分析过程中,各个指标评分值对应的隶属函数通常采用梯形隶属函数来表示。本文采用指标隶属函数的偏小型半梯形分布函数表示^[6]:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq a \\ \frac{b-x_{ij}}{b-a} & a < x_{ij} < b \\ 0 & x_{ij} \geq b \end{cases} \quad (2-8)$$

式中: r_{ij} 为第 i 个指标关于第 j 个评语的隶属度,在 $[0, 1]$ 分布, x_{ij} 为第 i 个因素的绝对量值, a, b 是第 i 个因素的最大值和最小值。

以一级指标为例,指标因素集为 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_m\}$; 相对应的评价集为 $\{V_1, V_2, \dots, V_k\}$ 。 k 为评价集中的项目数。 U 到 V 上的模糊隶属关系矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mk} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

式中, r_{ij} 表示 U 中的第 i 个因素对第 j 个评价的隶属度。由相同的方法可得到相应二级指标的隶属矩阵。

2.5 模糊矩阵运算

进行模糊综合评价得到的二级评价的评判集 B_i , 即

$$B_i = A_i \circ R_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots, a_{in}) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nk} \end{bmatrix} \\ = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, \dots, b_{ik}) \quad (2-10)$$

本文模糊合成的合成算子采用主因素决定型,即 $M(\wedge, \vee)$ 型。这种模型突出了评估中的主要因素而忽略了其余指标的影响。运算过程如下:

$$b_{ij} = \bigvee_{j=1}^n (a_{ij} \wedge r_{je}) \quad (2-11)$$

其中 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, n; e=1, 2, 3, \dots, k$ 。最后对 B_i 做归一化处理,使得 $\sum_{j=1}^k b_{ij} = 1$ 。由相同的方法可得到相应二级模糊判断指标,在这里不再赘述。

2.6 综合评价结果

由于需要对安全风险概率进行度量,需要对结果做一定的量化分析,因此,对结果采用加权平均法来处理。设 M 为综合评价,评分集 $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_k\}$ 与评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_k\}$ 相对应,即 $M = D * G^T$ 。

2.7 桥梁安全风险概率以及等级确定

桥梁发生安全事故导致桥梁发生损坏和倒塌,由此发生的损失主要包括重建或恢复过程的成本、交通中断的成本以及人员伤亡等。如果将风险损失按等级进行定义分类,则文献[7][8]给出了各风险损失等级的标准,风险率赋值标准按其赋值。

三、实例分析

3.1 工程概况

以西藏境内一座钢筋混凝土桥梁为例,验证本文提出的西藏地区在役桥梁安全评价体系的有效性。桥梁位于 G109 上,上部结构为预应力混凝土空心板梁,桥跨组合为 3×13m,桥面净宽为 10m。桥梁所处地区为高原大陆性气候区,冬季严寒且冰冻期较长,昼夜温差大,桥梁处于冻融循环的环境中。

3.2 评价指标权重确定

选定 5 位相关领域的有经验的技术的专家及一线操作人员对上述所建立的层次分析指标体系的权重进行打分,采用 1~9 标度法进行打分,并构建判断矩阵。

计算准则层矩阵的特征向量,对 5 位专家给出的判断矩阵进行一致性检验,并计算各个指标的权重,取 5 位专家的平均值,得出准则层的人为因素与自然因素的权重为: [0.167, 0.833]。同理得到指标层权重的计算结果,详见表 4。

3.3 确定指标模糊隶属度

确定指标模糊隶属度采用发放问卷的形式向专家征求二级指标的单因素模糊综合评判意见。结合公式(2-10)得到模糊综合评判结果,以人为因素风险对应的二级指标为例,如表 5 所示。

表 1 人为因素 U₁ 风险模糊综合评判结果

指标项	一级	二级	三级	四级	五级
滑坡 U ₁₁	0.1	0.6	0.3	0.0	0.0
洪涝 U ₁₂	0.0	0.6	0.3	0.1	0.0
冲刷 U ₁₃	0.0	0.5	0.3	0.2	0.0
地震 U ₁₄	0.0	0.2	0.5	0.3	0.0
泥石流 U ₁₅	0.0	0.2	0.5	0.3	0.0
飓风 U ₁₆	0.1	0.6	0.3	0.0	0.0
冻融 U ₁₇	0.0	0.1	0.2	0.6	0.1
冰雹 U ₁₈	0.1	0.5	0.4	0.0	0.0

由此可得 U₁ 人为因素风险对应的二级指标的等级隶属度矩阵为:

$$A1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.6 & 0.1 \\ 0.1 & 0.5 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理可得 U₂ 自然因素风险对应的二级指标的等级隶属度矩阵为:

$$A2 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.4 评价结果与分析

由求得的指标权重向量 A 和二级指标单因素模糊综合评判结果可得 一级指标的模糊评判结果以及总目标模糊评判结果,分别为 R₁, R₂ 和 R。

$B_1 = A_1 \circ R_1 = (0.563, 0.2, 0.372, 0.3, 0.1)$ 。可知该桥人为因素风险等级为三级,其等级隶属度为 56.25%。

$B_2 = A_2 \circ R_2 = (0.396, 0.3, 0.192, 0.192, 0.1)$ 。可知该桥自然因素风险等级为二级,其等级隶属度为 39.56%。

$$B = A \circ (R_1 \ R_2)^T = (0.342, 0.229, 0.179, 0.169, 0.081)$$

由以上计算结果可知,此次检测,此桥的安全风险等级风险为 34.2%,风险等级为二级,此风险桥梁使用功能影响较小。应规划在不久的将来采取削减风险的预防措施。

四、结论

桥梁是公路基础设施的重要组成部分,在国民经济发展和人民生活水平中占据着重要的地位^[9]。通过以上研究可以得出以下结论。

(1) 系统的分析了西藏地区在役桥梁运营期内可能存在的风险及影响因素,提出了基于西藏地区的在役桥梁安全评价指标体系。

(2) 结合层次分析法和模糊综合评价法,提出了桥梁安全风险评估层次分析-模糊综合评估模型。该模型应用层次分析法计算得到各指标体系的权重,利用 Zadeh 模糊算子进行桥梁的安全风险评价,最终得到桥梁安全风险水平等级。

(3) 以西藏地区内一座钢筋混凝土桥梁为例,证明了所提出的安全评价体系的适用性,经调研对比,与常规的评估方法结果基本一致。

参考文献:

- [1]JTG/T H21-2011, 公路桥梁技术状况评定标准[S].
 - [2]杨耀生, 陈嘉伟, 张舜. 基于模糊层次分析法的既有公路桥梁抗震性能评估[J]. 建筑结构, 2021, 51 (S2): 581-585.
 - [3]Andrić J M, Lu D G. Risk assessment of bridges under multiple hazards in operation period[J]. Safety science, 2016, 83: 80-92.
 - [4]Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw Hill, 1980
 - [5]项盼强, 吴强强, 张婷婷. 基于 AHP-FCE 模型的桥梁设计风险评估研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (S2): 275-280.
 - [6]李安贵, 张志宏, 孟艳等. 模糊数学及其应用[M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
 - [7]施洲, 纪锋, 余万庆等. 大型桥梁施工风险动态评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49 (05): 634-642.
 - [8]阚有俊. 基于 BORA 法的长大桥梁运营安全风险评价技术研究[J]. 安全与环境工程, 2018, 25 (03): 155-159+165.
 - [9]赵成章. 提高青海高寒地区桥梁结构耐久性的措施[J]. 交通世界, 2018, (23): 109-110.
- 作者简介: 张娅婷 (1998-), 女, 汉, 河南南阳人, 在读研究生, 单位: 西藏大学工学院土木水利专业, 公路运输。
注: 项目资助: 西藏大学研究生高水平人才培养计划项目(项目编号: 2020-GSP-S067)。