

大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险评估

林 晶, 肖汝诚

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为建立大跨度混合梁斜拉桥的耐久性失效风险评估体系, 在分析耐久性和风险已有定义的基础上, 从评估角度明确了耐久性失效风险的相关概念. 考虑耐久性时间跨度大的特点, 通过调研咨询识别了长期作用类型的风险因素, 建立了大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险源库. 综合专家调查法、模糊综合评判法和层次分析法, 研究了基于专家调查的模糊层次分析法用以评估耐久性失效风险. 将重要度分析该概念引入耐久性失效风险评估, 提出了耐久性失效风险重要度分析, 该方法可以评价底层风险源对顶上风险事件的影响程度. 以某长江大桥算例实践了上述风险评估体系, 证明了其可行性. 该体系可为大跨度混合梁斜拉桥的安全运营和预防性养护提供参考.

关键词: 桥梁工程; 混合梁斜拉桥; 耐久性; 风险评估; 风险重要度

中图分类号: U448.2

文献标志码: A

Risk Assessment of Durability Failure for Large-span Hybrid Girder Cable-stayed Bridge

LIN Jing, XIAO Rucheng

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To construct a risk assessment system of durability failure for large span hybrid girder cable-stayed bridge, new definitions related to durability failure risk were proposed from an assessment view based on the analysis of existing concepts of durability and risk. Considering the long time span of durability, risk factors which have long-term effect were identified through investigation and consultation, thus the durability failure risk factor database of large span hybrid girder cable-stayed bridge was built. Combining expert investigation method, fuzzy comprehensive evaluation method and analytic hierarchy process, the fussy analytic hierarchy

process based on professor research was studied to assess the risk of durability failure. Introducing the analysis of importance rate to risk assessment of durability failure, durability failure risk importance analysis was proposed which can assess the impact on top risk event of bottom risk factors. Based on a certain Changjiang Bridge, the foregoing risk assessment system was practiced and the feasibility was proved, providing reference to security operation and preventive maintenance for large-span hybrid girder.

Key words: bridge engineering; hybrid girder cable-stayed bridge; durability; risk assessment; risk importance rate

桥梁在生命周期中会受到各种物理、化学和生物作用, 出现材料劣化和结构损伤等现象, 对其耐久性造成威胁. 根据交通部资料, 截止 2010 年底, 我国公路桥梁总数 65.81 万座, 评定为危桥的 93 525 座, 占比超 10%^[1]; 根据 2003 年秋的统计, 我国铁路桥梁总数 41 727 座, 其中发生钢筋锈蚀、保护层脱落等病害的混凝土梁 7 179 孔, 严重腐蚀、开裂的桥墩 3 277 个, 裂损、开焊或主要节点松动的钢梁 478 孔^[2].

影响桥梁耐久性的因素涉及诸多方面, 如自然环境、结构方案、施工过程及养护管理的疏忽等. 任何一方面因素的疏忽, 都会给桥梁埋下严重的耐久性隐患. 受当地环境及结构方案的影响, 每座桥梁都有其特性, 如果能在桥梁建造之前, 识别出影响桥梁耐久性的主次要因素, 对各种因素有一全局的把握, 进而获得桥梁整体耐久性的评价, 不仅可以有的放矢地制定提高耐久性的措施, 还可以为拟建桥梁设计、施工及养护方案的优化提供参考. 由于耐久性影响因素多具有不确定性, 桥梁耐久性失效风险评估

收稿日期: 2014-04-14

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036300); 国家自然科学基金(51378387); 江西省交通厅重点科技项目(2012C0002)

第一作者: 林 晶(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁耐久性、桥梁加固与改造. E-mail: retrograder@163.com

通讯作者: 肖汝诚(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁设计与分析理论、桥梁管理系统.

E-mail: xiaorc@tongji.edu.cn

不失为实现上述可能的一种有效的选择。

桥梁耐久性失效风险评估主要涉及风险评估和耐久性评估两方面。关于风险评估,就国内外突发研究现状而言,桥梁设计、施工安全^[3-4]或运营期突发事件的风险评估已有不少深入的研究,在风险评估方法和决策工具方面(如风险源辨识的方法,风险源发生概率和损失的量化方法,风险评价矩阵模型等)有了一定的积累。关于耐久性评估,已有研究一般针对服役结构,大致可以分为材料和结构两个层次。材料层次,如通过检测混凝土碳化、钢筋锈蚀程度等数据与材料理论退化模型比较,间接评估结构耐久性^[5];结构层次的评估目前主要针对整体技术状况、承载能力或剩余使用寿命等,相应发展了基于专家经验和实桥调查、基于结构分析与实桥调查、基于可靠度理论的方法^[6-7]等。

虽然在上述两方面均积累了一些成果,但是将风险评估和耐久性评估结合起来,从风险角度来评估拟建结构的耐久性在桥梁乃至土木工程领域的研究还较少,探索一套包括合理概念和适用方法的评估体系对于提升拟建结构的耐久性是有意义的。此外,桥梁耐久性失效风险评估涉及工程全寿命周期,具有时间跨度大,影响因素多的特点,评估起来较特定事件的风险研究更为复杂。

鉴于大跨度混合梁斜拉桥跨度大、结构复杂、施工难度大等特点,该桥型的耐久性失效潜在风险较

大。本文以此为背景,尝试建立耐久性失效风险评估体系。

1 耐久性失效风险相关概念

1.1 风险定义

由于专业领域关注的重点不同,风险概念一般可以分为以下4种定义:①评估对象发生损失的概率和严重程度的组合;②评估对象发生损失的可能性;③评估对象本身所具有的不确定性;④评估对象可能获得的收益与损失之间差异。

总结而言,虽然以上定义各有差异,但总体上是围绕评估对象、发生概率和造成后果3个问题展开的。基于工程风险评估的特点,《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》^[3]及《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》^[4]采用了第①种定义,本文在此基础上,将风险 R 定义为评估对象发生损失的概率 P 及其严重程度 C 的组合,即 $R=f(P,C)$ 。在该定义基础上,第②,③种定义可分别理解成风险概率、风险属性;第④种定义一般用于投资风险评估,因此不适用。

1.2 耐久性定义

对耐久性的理解不同著作或学者间有较大的差异,总结认为一般具备4个基本要素,见表1。

表1 耐久性概念中四个基本要素的不同定义

Tab.1 Different definitions of four fundamentals of durability concept

| 基本要素 | 文献编号 | | | | |
|------|------------|--------------|----------------------|------------------|----------------------------------|
| | [8] | [9] | [2] | [10] | [11] |
| 时间 | 设计使用年限 | 设计使用年限 | 长期 / 预定的期限 | 设计要求的目标使用期 | 规定的时间 / 预定的时间 / 要求的目标使用期 |
| 作用 | 预定的作用 | 设计确定的环境作用 | 引起材料性能劣化的各种作用 / 预定作用 | 自然环境、使用环境及材料内部因素 | 构件性能劣化 / 化学的、生物的或其他不利因素 / * |
| 条件 | 预期的使用与维护条件 | 设计确定的维修、使用条件 | * / 预期的维修与使用条件 | 不需花费大量资金加固处理 | 正常设计、施工、使用和维护 / * / 不需花费大量资金加固处理 |
| 保持性能 | 适用性和安全性 | 适用性和安全性 | 必要性能 / 所需的最低性能 | 安全、使用功能和外观要求 | 预定的功能 / 不出现不可接受的失效 / 安全性和适用性 |

注: * 表示无此项定义。

由于研究针对的是拟建结构,将“时间”定义为设计使用年限。由于耐久性具有时间跨度大的特点,也为了区别于其他风险评估专题,将“作用”定义为自然环境、使用环境和材料内部因素中的长期作用。从拟建结构的角度考虑,设计、施工和使用中存在的不足应视作风险源,因此仅从维护方面定义“条件”,同时为量化评估,将“条件”定义为不超过预算管养费用的维护条件,下称常规养护管理。由于工程风险

评估的着眼点一般为质量和安全,同时考虑外观要求不易量化,将“保持性能”定义为安全性和适用性。

综上所述,本文将耐久性定义为:结构或构件在设计使用年限内由于设计、施工的不足或受到自然环境、使用环境及材料内部因素中的长期作用,在常规养护管理下仍能保持其安全性和适用性的能力。

1.3 耐久性失效风险定义

结合耐久性和风险的定义,可以明确以下概念:

(1) 耐久性失效风险——结构或构件在设计使用年限内,由于设计、施工的不足,或受到自然环境、使用环境和材料内部因素中的长期作用,导致常规养护管理后仍不能满足安全性和适用性要求的可能性及由此带来的损失的组合。

(2) 耐久性失效风险因素——导致结构或构件在设计使用年限内通过常规养护管理后仍不能满足安全性和适用性要求的不确定性因素,包括设计、施工的不足或自然环境,使用环境和材料自身等方面。在层次模型中,一般称底层因素为风险源。

(3) 耐久性失效风险概率——不确定性因素导致结构或构件在常规养护管理后仍不能满足安全性和适用性要求的可能性。

(4) 耐久性失效风险损失——不确定性因素导致结构或构件在常规养护管理后,其安全性和适用性要求仍不能得到满足而带来的损失。

2 耐久性失效风险源识别

广义而言,只要是对设计使用年限内桥梁安全性、适用性不利的因素都可看作耐久性风险源,但是不同专题风险评估的目的是不同的。为区别于传统的工程安全风险评估,本文识别的耐久性失效风险源不包含地震、飓风、洪水、火灾和船撞等突发事件,侧重于设计、施工的不足和运营阶段中的长期作用。通过对已有斜拉桥的病害进行调研^[12],对大跨度混合梁斜拉桥结构方案进行分析并向有关专家咨询,从自然环境及材料、结构受力、施工过程和运营管理 4 个方面识别了风险源,见表 2。

需要说明的是:①由于桥梁结构材料及受力的实际情况与目前采用的简化设计方法存在差异,可能导致结构建造后开裂损坏,将此类在荷载作用下的构件开裂归入结构受力部分的风险源。②施工过程中的不合理使结构在建造后即产生各种病害,此类病害会长期存在;运营管理中超载、病害维修不及时等因素对结构耐久性的影响也长期存在。因此将上述因素归入风险源。

3 耐久性失效风险评估方法

评估风险有多种方法,总体上可以分成 4 类:定性分析方法(专家调查法、失效模式和后果分析法等),半定量分析方法(事故树法、事件树法等),定量分析方法(层次分析法、蒙特卡罗法等),综合分析法

(专家信心指数法、模糊事故树法等)。

本文采用基于专家调查的模糊层次分析法,即将层次分析法、专家调查法和模糊综合评判法综合起来。层次分析法能够针对复杂的风险事件建立简洁的层次结构;本文通过该方法建立大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险因素层次模型。专家调查法由于能够直接利用专家经验且简便易行等特点,适用于难以精确计算风险概率或损失而依靠专家的直观判断进行预测的风险分析问题;本文通过该方法获得风险源的风险概率和损失的评语。模糊综合评判法用模糊数学的方法分析风险因素对系统的影响程度,合理地处理了各层次因素间关系的模糊性;本文通过该方法逐层计算各因素风险概率以及损失的隶属度。该方法主要步骤为:

(1) 对风险事件进行层次分解,分解到足以能够具体分析风险概率和损失的程度,在识别风险源的基础上建立层次模型,如图 1 所示。

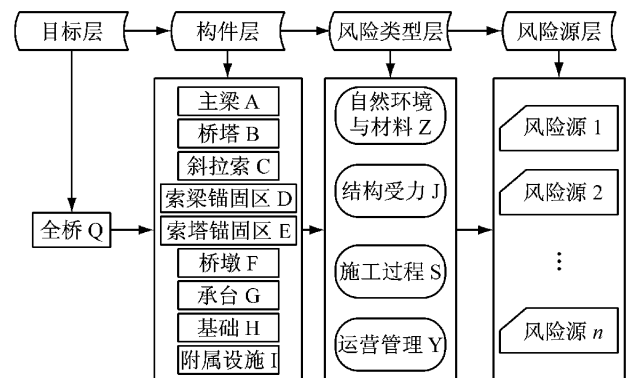


图 1 大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险因素层次模型
Fig. 1 Hierarchy model for durability's failure risk factors of large span hybrid girder cable-stayed bridge

将单项编码按顺序集合可以表示风险源。以 F_{QAzi} 为例,它表示主梁自然环境与材料类 1 号风险源,风险源的个数及内容可以在表 2 中通过桥梁构件和风险类型明确。 F_{QAzi} 既可以表示风险类型层中的主梁自然环境与材料风险因素,又可作为风险源层中的主梁自然环境与材料类风险因素集,下文提及时会详细说明。

(2) 通过专家对风险源层中的每个风险源的风险概率和损失所属的类别按照表 3^[3] 的描述进行评判。统计每个风险源的风险概率和损失相对于评语集的隶属度(即每个评语的评判数量除以评判专家总数),在此基础上构建风险源层各因素集的模糊隶属关系矩阵。以风险源层主梁自然环境与材料类因

表 2 大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险源

Tab.2 Durability failure risk factors of large span hybrid girder cable-stayed bridge

| 构件 | 风险类型 | 风险源 |
|-------|-------------|---|
| 主梁 | 自然环境与材料结构受力 | 混凝土碳化,氯离子侵蚀,碱骨料反应,硫酸盐侵蚀,冻融循环,金属材料大气腐蚀,预应力松弛 混凝土梁开裂,钢梁疲劳裂缝,钢-混结合段混凝土开裂 |
| | 施工过程 | 低温冻害,预应力孔道压浆不密实,混凝土外观缺陷(蜂窝、麻面),钢结构焊接缺陷,螺栓连接缺陷, 混凝土保护层厚度不符合设计要求,防裂钢筋设置不符合设计要求,材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 桥塔 | 自然环境与材料结构受力 | 混凝土碳化,氯离子侵蚀,碱骨料反应,硫酸盐侵蚀,水流冲刷,冻融循环,预应力松弛 混凝土开裂 |
| | 施工过程 | 低温冻害,大体积混凝土施工开裂,预应力孔道压浆不密实,混凝土外观缺陷(蜂窝、麻面),混凝土 保护层厚度不符合设计要求,防裂钢筋设置不符合设计要求,材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 斜拉索 | 自然环境与材料结构受力 | 金属材料大气腐蚀,预应力松弛,风振损伤 疲劳断丝 |
| | 施工过程 | 材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 索梁锚固区 | 自然环境与材料结构受力 | 金属材料大气腐蚀 混凝土锚固块开裂,钢锚箱裂缝,剪力键损坏 |
| | 施工过程 | 低温冻害,钢结构焊接缺陷,混凝土保护层厚度不符合设计要求,防裂钢筋设置不符合设计要求,材 料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 索塔锚固区 | 自然环境与材料结构受力 | 金属材料大气腐蚀 混凝土锚固块开裂,钢锚梁裂缝,剪力键损坏 |
| | 施工过程 | 低温冻害,钢结构焊接缺陷,螺栓连接缺陷,混凝土保护层厚度不符合设计要求,防裂钢筋设置不符 合设计要求,材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 桥墩 | 自然环境与材料结构受力 | 混凝土碳化,氯离子侵蚀,碱骨料反应,硫酸盐侵蚀,水流冲刷,冻融循环 混凝土开裂 |
| | 施工过程 | 低温冻害,大体积混凝土施工开裂,混凝土外观缺陷(蜂窝、麻面),混凝土保护层厚度不符合设计要 求,防裂钢筋设置不符合设计要求,材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 承台 | 自然环境与材料结构受力 | 混凝土碳化,氯离子侵蚀,碱骨料反应,硫酸盐侵蚀,水流冲刷,冻融循环 混凝土开裂 |
| | 施工过程 | 低温冻害,大体积混凝土施工开裂,混凝土外观缺陷(蜂窝、麻面),混凝土保护层厚度不符合设计要 求,防裂钢筋设置不符合设计要求,材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 基础 | 自然环境与材料结构受力 | 混凝土碳化,氯离子侵蚀,碱骨料反应,硫酸盐侵蚀,水流冲刷 混凝土开裂 |
| | 施工过程 | 低温冻害,混凝土保护层厚度不符合设计要求,防裂钢筋设置不符合设计要求,材料质量不符合设 计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |
| 附属设施 | 自然环境与材料结构受力 | 金属材料大气腐蚀 桥面铺装开裂,支座、伸缩装置及排水设施损坏 |
| | 施工过程 | 材料质量不符合设计要求 |
| | 运营管理 | 超载,病害维修不及时 |

素集 F_{QAZ} 为例,共有 n 个风险源,称矩阵 R_{QAZ} 为 F_{QAZ} 在评语集上的风险概率或损失模糊隶属关系矩阵,如下式:

$$R_{QAZ} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{n5} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,元素 r_{ij} 为隶属度(即第 i 个风险源对于第 j 个

评语的隶属度)。

风险源层其他因素集的模糊隶属关系矩阵可由相同方法得到。

(3)采用层次分析法^[13]构建不同层次各因素集的判断矩阵,确定同一因素集中不同因素的权重。以风险源层主梁自然环境与材料类因素集 F_{QAZ} 为例,由层次分析法可以得到该因素集中不同因素的权重 $A_{QAZ} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 。风险源层其他因素集、风险类

表 3 风险概率和损失的分类

Tab.3 Classification of risk probability and loss

| 级别 | 评语集 | 风险概率 P_i 描述 | | 经济损失 L_e 描述 | 评分集 |
|----|-----|----------------------------|---------|-------------------------------|------------------|
| | | 定量 | 定性 | | |
| 1 | 极低 | $P_i < 0.0003$ | 几乎不可能发生 | $L_e < 500$ 万元 | $> 0 \sim 0.2$ |
| 2 | 低 | $0.0003 \leq P_i < 0.0030$ | 很少发生 | 500 万元 $\leq L_e < 1000$ 万元 | $> 0.2 \sim 0.4$ |
| 3 | 中 | $0.003 \leq P_i < 0.030$ | 偶然发生 | 1000 万元 $\leq L_e < 5000$ 万元 | $> 0.4 \sim 0.6$ |
| 4 | 高 | $0.03 \leq P_i < 0.30$ | 可能发生 | 5000 万元 $\leq L_e < 10000$ 万元 | $> 0.6 \sim 0.8$ |
| 5 | 极高 | $P_i \geq 0.3$ | 频繁发生 | $L_e \geq 10000$ 万元 | $> 0.8 \sim 1.0$ |

型层及构件层相应的因素集中不同因素的权重可由相同方法得到。

(4)一级模糊评价. 基于模糊隶属关系矩阵 R_{QAZ} 和权重计算结果 A_{QAZ} , 运用 Zadeh 模糊算子^[14] 计算得到风险类型层各因素的风险概率和损失相对于评语集的隶属度向量. 以风险类型层主梁自然环境与材料因素 F_{QAZ} 为例, 其隶属度向量 B_{QAZ} 的计算过程如下:

$$B_{QAZ} = A_{QAZ} \cdot R_{QAZ} = [a_1, a_2, \dots, a_n] \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{n5} \end{bmatrix} = [b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}] \quad (2)$$

式中, \cdot 代表模糊运算符, 采用 Zadeh 模糊算子.

风险类型层其他因素的隶属度向量可由相同方法获得, 从而仿照式(1)构建风险类型层各构件因素集的模糊隶属关系矩阵. 以风险类型层主梁构件因素集 F_{QA} 为例, 其模糊隶属关系矩阵 R_{QA} 为

$$R_{QA} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, 第 2, 3, 4 行分别代表风险类型层主梁的结构受力、施工过程及运营管理的隶属度向量.

(5)在风险类型层构件因素集的模糊隶属关系矩阵基础上, 进行二级模糊评价(过程同(3), (4)步骤), 得到构件层主梁、桥塔、斜拉索、索梁锚固区、索塔锚固区、桥墩、承台、基础及附属设施因素的风险概率或损失隶属度向量 $C_{QA}, C_{QB}, C_{QC}, C_{QD}, C_{QE}, C_{QF}, C_{QG}, C_{QH}, C_{QI}$; 在此基础上构成构件层全桥因素集模糊隶属矩阵 R_Q 后, 进行三级模糊评价(过程同(3), (4)步骤), 得到目标层全桥因素的风险概率或损失隶属度向量 D_Q .

(6)取风险概率或损失评分集区间范围的中间数值形成矩阵 $G=[0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9]$, 将其分别与构件层各因素的风险概率或损失的隶属度向

量 $C_{QA} \sim C_{QI}$ 相乘, 获得构件层各因素的风险概率或损失评分 $S_{QA} \sim S_{QI}$; 将矩阵 G 与目标层全桥因素风险概率或损失的隶属度向量 D_Q 相乘, 获取目标层全桥因素的风险概率或损失评分 S_Q . 以 S_Q 为例, 即

$$S_Q = D_Q \cdot G^T = [d_1, d_2, d_3, d_4, d_5] \cdot [0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9]^T \quad (4)$$

(7)根据构件层各因素(即各构件)、目标层因素(即全桥)的风险概率和损失对应的评分按表 3 的描述确定相应级别. 综合概率和损失的级别, 按照风险矩阵评估方法^[3] 确定构件层各因素和目标层因素的风险等级(见表 4).

综上所述, 本文风险评估方法流程如图 2 所示.

表 4 风险等级

Tab.4 Risk rank

| 风险概率级别 | 风险损失级别 | | | | |
|--------|--------|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | I | I | II | II | III |
| 2 | I | II | II | III | III |
| 3 | II | II | III | III | IV |
| 4 | II | III | III | IV | IV |
| 5 | III | III | IV | IV | IV |

注: I 级表示风险可容忍, 不必另采取措施; II 级表示处于可容忍的边缘, 可能需要预防措施; III 级表示明确并执行预防措施以减小风险; IV 级表示为减小风险必须执行预防措施.

4 耐久性失效风险重要度分析

通过上述研究, 已经可以计算桥梁及其构件的风险, 从评估体系的完整性出发, 尚需从众多风险源中识别出主次要因素, 分析哪一项风险源最值得规避. 将故障树分析法中重要度分析的概念引入桥梁耐久性失效风险评估可以实现这一点.

故障树分析法^[15] 以树状的图形出现, 由一些基本的图形元素(包括底事件、中间事件、逻辑门及顶事件符号等)依据一定的逻辑关系组合形成. 其中底事件处在故障树底层, 以输入事件形式出现; 顶事件处在故障树顶端, 以输出事件形式出现; 中间事件介于两者之间. 为了分析底事件对顶事件的贡献, 提出了重要度分析的概念, 即通过变化底事件发生的状态由故障树逻辑关系得到顶事件的不同状态, 从而

得到底事件的重要度。

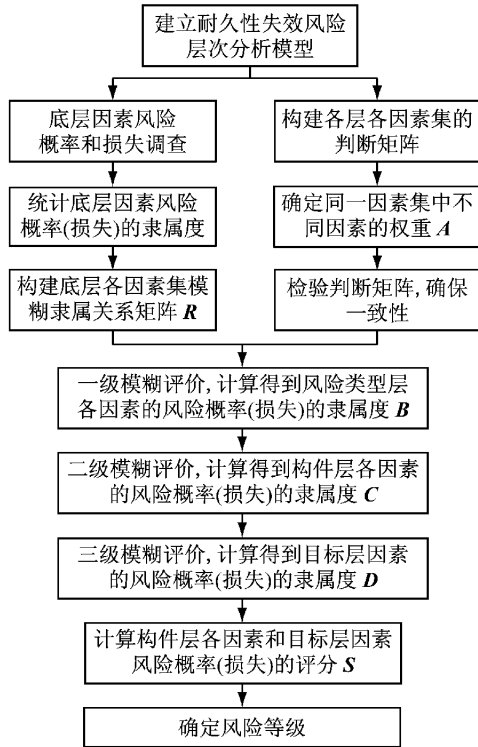


图 2 大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险评估方法

Fig.2 Risk assessment method of durability failure for large span hybrid girder cable-stayed bridge

本文参照故障树法,将大跨度混合梁斜拉桥各构件耐久性失效定义为顶事件,各风险源为底事件,提出风险源 i 的风险重要度 I_i 的概念,具体计算公式如下:

$$I_i = S_g S_s - S_{g_i} S_{s_i} \quad (5)$$

式中: S_g 和 S_s 分别代表全部风险源发生时按图 2 所述步骤得到的某构件耐久性失效风险概率和损失对应的评分; S_{g_i} 和 S_{s_i} 分别代表当第 i 个风险源不发生,其他风险源的发生概率不变时,同样按图 2 所述步骤得到的同一构件耐久性失效风险概率和损失的评分。

由此可见,风险重要度 I_i 综合反映了系统底事件对顶事件产生的影响,其在风险评估中具有非常重要的作用.如果发现 $I_i > I_j$,就认为 i 因素比 j 因素更重要,也就是说 i 因素对系统风险的影响要大于 j 因素,所以为了降低系统风险,必须首先规避和防止 i 因素的发生。

5 案例分析

5.1 工程概况

某长江公路大桥主桥为整体箱花瓶式塔混合梁双塔双索面斜拉桥(跨径布置:70+75+84+818+

233.5+124.5 m),斜拉索采用平行钢丝,主梁宽 38.9 m(其中钢箱梁材料为 Q390qD/Q370qD/Q345qD,混凝土箱梁强度等级 C55),H 型索塔高 201.6 m(材料为 C50 混凝土),基础为钻孔灌注桩(材料为 C30 水下混凝土)。

桥位地质资料显示,表层覆粉质黏土,工程地质性质一般.桥位区域属亚热带内陆季风气候区,气候温和湿润,具有四季分明、无霜期长、雨量丰富、雨热同季的气候特征.年最高气温 41.2 °C,年最低气温 -10 °C;年最大降水量 2 165.7 mm、最小降水量 868.3 mm、年平均降水量 1 400 mm,降雨主要集中在 4~7 月,占全年降雨的 50%;全年平均无霜期 249 d;多年平均湿度 79%,全年以东北风出现频率最高,年平均风速 3 m·s⁻¹。

5.2 风险评估结果

结合大桥的实际情况,运用上文提出的评估方法得到各构件和全桥的耐久性失效风险概率、损失评分及等级,见表 5。

表 5 各构件及全桥的耐久性失效风险评分和等级

Tab.5 Durability failure risk score and rank of each component and whole bridge

| 构件 | 风险概率 | | 风险损失 | | 等级 |
|-------|---------|----|---------|----|----|
| | 评分 | 等级 | 评分 | 等级 | |
| 主梁 | 0.564 9 | 3 | 0.730 0 | 4 | Ⅲ |
| 桥塔 | 0.487 1 | 3 | 0.720 0 | 4 | Ⅲ |
| 斜拉索 | 0.590 5 | 3 | 0.590 0 | 3 | Ⅲ |
| 索梁锚固区 | 0.597 1 | 3 | 0.480 0 | 3 | Ⅲ |
| 索塔锚固区 | 0.597 1 | 3 | 0.490 0 | 3 | Ⅲ |
| 桥墩 | 0.332 0 | 2 | 0.430 0 | 3 | Ⅱ |
| 承台 | 0.490 5 | 3 | 0.750 0 | 4 | Ⅲ |
| 基础 | 0.451 7 | 3 | 0.790 0 | 4 | Ⅲ |
| 附属设施 | 0.536 4 | 3 | 0.350 0 | 2 | Ⅱ |
| 全桥 | 0.502 7 | 3 | 0.609 7 | 4 | Ⅲ |

由表 5 可知,除桥墩和附属设施外,主梁、桥塔、斜拉索、锚固区、承台及基础的风险等级均为Ⅲ级,需明确实施削减风险的预防措施.针对上述Ⅲ级风险的构件,通过风险重要度分析得到影响各构件耐久性的主要风险源,见表 6。

表 6 Ⅲ级风险构件的耐久性失效主要风险源

Tab.6 Main risk factors of durability failure of component of Ⅲ degree risk

| 构件 | 排名 | | |
|-------|---------|------------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 主梁 | 超载 | 钢结构大气腐蚀 | 钢箱梁开裂 |
| 桥塔 | 桥塔混凝土开裂 | 超载 | 硫酸盐侵蚀 |
| 斜拉索 | 钢丝腐蚀 | 疲劳断丝 | 超载 |
| 索梁锚固区 | 超载 | 钢锚箱开裂 | 钢锚箱大气腐蚀 |
| 索塔锚固区 | 超载 | 钢锚梁开裂 | 钢锚梁大气腐蚀 |
| 承台 | 硫酸盐侵蚀 | 大体积混凝土施工开裂 | 氯离子侵蚀 |
| 基础 | 硫酸盐侵蚀 | 水流冲刷 | 氯离子侵蚀 |

由表6可知,除承台及基础外,超载对于其余构件耐久性失效概率的贡献均排在前3位之一;桥塔、承台及基础这些构件的前3位风险因素中均有硫酸盐侵蚀;包含钢材料的构件主梁、斜拉索、锚固区中,环境腐蚀属于前3位风险因素之一。管理人员应对这些因素采取预防措施。

6 结语

(1)从评估角度定义了耐久性和风险,结合两者明确了桥梁耐久性失效风险、风险因素、风险概率及风险损失的概念。

(2)在调研咨询的基础上建立了大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险源库,并按自然环境及材料、结构受力、施工过程和运营管理四方面进行分类。

(3)研究得到用以评估大跨度混合梁斜拉桥耐久性失效风险的基于专家调查的模糊层次分析法,该方法结合了专家调查法、模糊综合评判法和层次分析法的优点。

(4)提出了耐久性失效风险重要度分析,该法可以计算底层风险因素对大跨度混合梁斜拉桥耐久性的影响程度,并对风险因素进行排序。

参考文献:

- [1] 交通运输部公路科学研究院. 公路桥梁耐久性状况调查分析报告[R]. 北京:交通运输部公路科学研究院,2013.
Research Institute of Highway of Ministry of Transport. Investigation and analysis on the durability situation of highway bridges in China[R]. Beijing: Research Institute of Highway of Ministry of Transport,2013.
- [2] 中国工程院土木水利建筑学部. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
Civil Engineering, Water Conservancy and Architecture Department of Chinese Academy of Engineering. The guide of durability design and construction of concrete structure [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2004.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design safety risk assessment guide of highway bridge and tunnel engineering[M]. Beijing:China Communications Press,2010.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Construction safety risk assessment guide of highway bridge and tunnel engineering [M]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [5] 张劲泉,宿健,程寿山,等. 混凝土旧桥材质状况与耐久性检测

- 评定指南及工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
ZHANG Jinquan, SU Jian, CHENG Shoushan, *et al.* Examples and evaluation guidelines of concrete quality and durability of old bridges[M]. Beijing:China Communications Press,2007.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T H21—2011 公路桥梁技术状况评定标准[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T H21—2011 Standards for technical condition evaluation of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T J21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T J21—2011 Specification for inspection and evaluation of load bearing capacity of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [8] 中华人民共和国铁道部. TB 10005—2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2011.
Ministry of Railway of the People's Republic of China. TB 10005—2010 Code for durability design on concrete structure of railway [S]. Beijing:China Railway Publishing House,2011.
- [9] 中华人民共和国建设部. GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T 50476—2008 Code for durability design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008.
- [10] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社,2000.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structure [M]. Beijing:Science Press,2000.
- [11] 牛获涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版社,2000.
NIU Ditao. Durability and life prediction of concrete structures [M]. Beijing:Science Press,2000.
- [12] 同济大学土木工程学院. 大跨度混合梁斜拉桥病害及成因调研报告[R]. 上海:同济大学土木工程学院,2014.
College of Civil Engineering, Tongji University. Investigation report on the diseases and causes of long-span hybrid cable-stayed bridge [R]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University,2014.
- [13] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: Mc Graw Hill, 1980.
- [14] 宋满荣,李惠强. 模糊综合评判模型运算情形的探讨[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2005,22(增1):13.
SONG Manrong, LI Huiqiang. Discussion on the essence of the fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2005,22(Suppl. 1):13.
- [15] 史定华,王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京:北京师范大学出版社,1993.
SHI Dinghua, WANG Songrui. Fault tree analysis method and theory [M]. Beijing: Beijing Normal University Press,1993.