

文章编号:1005-0523(2013)04-0007-07

桥梁工程设计的综合安全风险评估法研究

彭可可^{1,2}, F. Necati. Catbas², 万志勇³

(1. 佛山科学技术学院环境与土木建筑学院, 佛山 528000; 2. 佛罗里达大学土木与环境工程系, 奥兰多佛罗里达州, 32816; 3. 广东省公路勘察规划设计院有限公司, 广州 510510)

摘要:以江顺大桥的斜拉桥方案初步设计阶段安全风险评估为工程背景,采用层次分析(AHP)-模糊聚类(Fuzzy Clustering)-德尔菲(Delphi method)综合风险评估法(AFD法),进行建设条件风险评估、结构方案风险评估、施工技术风险评估和工程运营管理4个准则层风险评估的研究。以工程实际情况及专家经验为基础确定风险源,通过层次分析确定风险准则层权重、子层权重和风险源权重。采用模糊聚类分析的方法对每个风险源的专家打分给出综合总评结果以确保专家打分结果的有效性。对专家打分数据进行分析后,结合层次分析权重结果,获得单项风险源风险水平、准则层风险水平和该项目方案整体风险水平。结果表明,该方案综合风险等级为Ⅱ级,属中度风险。本文提出的AFD法用于工程设计安全风险评估是可行的。

关键词:安全风险评估; AFD法; 风险概率; 风险损失; 风险等级

中图分类号: U447

文献标志码: A

进行设计阶段安全风险评估研究,能更科学准确地预测桥梁工程的风险,加强桥梁安全管理,提高工程建设和运营安全性^[1-3]。根据《中华人民共和国交通部公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》^[1](以下简称《指南》)和《关于在初步设计阶段实行公路桥梁和隧道工程安全风险评估制度的通知》^[4],多跨或跨径大于等于40 m的石拱桥,跨径大于等于250 m的钢筋混凝土拱桥,跨径大于等于350 m的钢箱拱桥,钢桁架、钢管混凝土拱桥;跨径大于等于200 m的梁式桥,跨径大于400 m的斜拉桥,跨径大于1 000 m的悬索桥;墩高或桥高大于100 m的桥梁;桥址处地震烈度大于7度且跨径大于150 m的桥梁均需进行初步设计阶段工程安全风险评估。《指南》^[1]给出了初步设计阶段风险评估的基本要求和推荐方法。但在实际工程评估中,尚存在以下问题:一是不同的风险源对风险等级的影响程度不同,需研究如何运用现代数学方法确定风险源的权重,以控制各风险源对风险等级的影响程度,准确确定主要风险源和次要风险源。二是不同专家对于同一风险源的打分可能相距甚远,如何排除个别专家的意见,采用大多数专家的意见,对于确保评估结果的合理性具有重要意义。现有的文献虽提及了层次分析法^[5]、专家打分法^[6-8]、模糊聚类与层次分析组合法^[9]、德尔菲与层次分析组合法^[10],但这些研究均不是针对桥梁的初步设计阶段,且无法同时解决上述两个问题。本文基于《指南》要求,以一座斜拉桥初步设计阶段安全风险评估为工程背景,提出基于模糊聚类、层次分析、德尔菲法的综合风险评估法(AFD法),并对这一方法进行了应用研究。

1 风险评估流程及评估方法

基于AFD法,桥梁工程设计安全风险评估的流程如下:第一步,通过对类似结构工程的安全风险发生

收稿日期:2013-06-20

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(2011-02-050, 2012-02-023);广东高校土建工程技术开发中心建设项目(GC-ZX-B1001)

作者简介:彭可可(1978—),女,讲师,工学博士,主要从事桥梁结构设计、结构可靠度、风险评估等领域研究。

情况的调查,以及专家的现场或书面调查,确定主要风险源及次要风险源;第二步,专家填写层次分析判断矩阵表,用层次分析法计算风险准则层权重、风险子层权重和主要风险源权重;第三步,专家小组判断风险概率级别,用模糊聚类的方法,对专家判断结果进行分类筛选,确保判断结果的客观性。对风险源的风险发生概率及损失进行分析和评估,确定其发生的可能性及严重程度;第四步,结合风险权重,根据已确定的风险发生概率等级和风险损失等级,按照风险水平等级矩阵表^[1],确定安全风险等级;第五步,针对不同的安全风险等级,提出相应的应对措施。风险评估流程图详见图1。

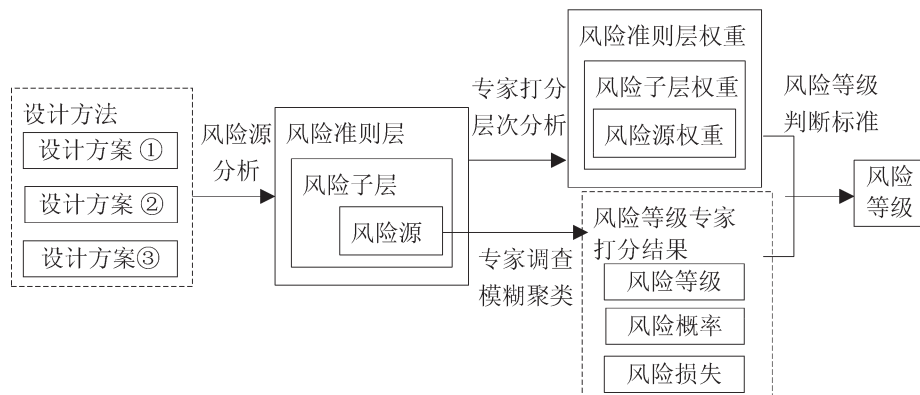


图1 AFD法安全风险评估流程图

Fig. 1 The flow figure of AFD risk assessment method

2 工程概况

江顺大桥是广佛江快速通道的一座跨江特大桥,连接江门市蓬江区与佛山市顺德区两地,采用双向六车道的一级公路标准,设计速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。本阶段,主桥推荐两种方案做综合比选:①主跨 700 m 斜拉桥方案,桥长 2 199 m。②主跨 700 m 三跨吊悬索桥方案,桥长 2 199 m。限于篇幅,本文仅分析斜拉桥方案,见图2。

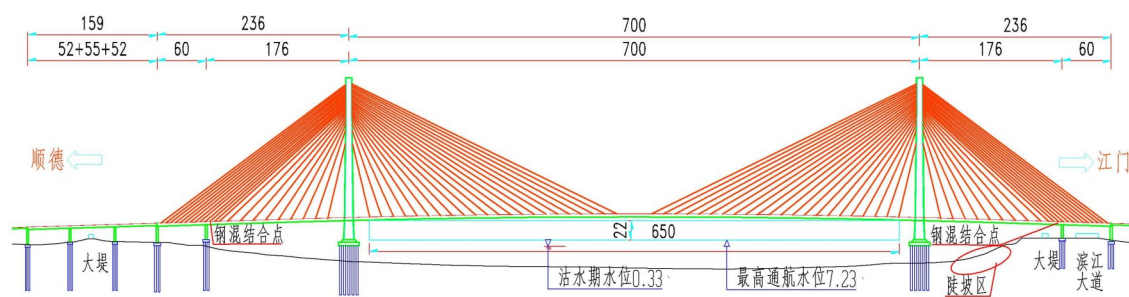


图2 700 m斜拉桥方案立面图(单位:m)

Fig. 2 Elevation drawing of cable stayed bridge (Unit: m)

3 安全风险分析

采取层次分析、模糊聚类和德尔菲综合风险评估法(AFD法),结合同类工程经验和专家打分结果,进行多层次动态的风险识别、排序、量化和分析评估。具体分析过程如下。

3.1 风险源分析

按照《指南》^[1],通过对类似工程风险发生情况的调查,在研究设计、施工、运营阶段可能发生安全风险诱因的基础上,确定主要风险源及次要风险源,风险列表详见表1。

表1 江顺大桥斜拉桥方案风险列表

Tab.1 Risk list of Jiangshun bridge (cable stayed bridge scheme)

序号	风险源层次	检查项目	主要风险	次要风险	判断依据
1	建设条件	断层 V1	✓		位于西江断裂中段。
2		地质		✓	沙土及液化。
3		地基土层土性不确定性		✓	炭质石灰岩,有岩溶的可能。
4		气象	✓		设计风速 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有强热带气旋。
5		水文		✓	建桥后压缩河道,冲刷加剧。
6		洪水	✓		年平均降雨量 1 750 mm,易发生洪水。
7		环境		✓	占用农田,但影响有限。
8		运输通行	✓		3墩位于水中,有船撞风险。
9		资金及政策	✓		资金不到位可能引起经济损失。
10	结构方案	设计理论	✓		设计依据上存在风险。
11		技术成熟性		✓	技术已经成熟,但存在一定难度。
12		设计方案	✓		混合梁结合段有可能开裂损伤。
13		斜拉索塔梁锚固构造	✓		锚固区易发生局部应力集中。
14	新材料新技术	新材料、新技术		✓	对新技术掌握不熟练。
15	主桥下部结构	钻孔桩基础施工	✓		桩长 100 m 以上,超长桩施工难度大。
16		承台施工	✓		大体积砼散热困难,易产生裂缝。
17		索塔施工	✓		大跨径斜拉桥主塔施工难度较大。
18	主桥上部结构	钢箱梁及预应力砼主梁施工	✓		台风区,钢箱梁抗风稳定存在风险。
19		斜拉索施工		✓	斜拉索易出现腐蚀、疲劳。
20	施工技术	设计因素		✓	设计效率及质量的影响。
21		施工因素		✓	施工组织不当。
22		机械设备因素		✓	施工机械设备故障。
23		材料因素		✓	材料准备不充分、材料不合格。
24		人		✓	施工人员技术及安全意识不足。
25		机		✓	仪器误差。
26	工程质量	料		✓	建筑材料不合格。
27	施工技术、管理水平	施工技术、管理水平	✓		技术力量不足、管理不到位、缺乏工程经验。
28	新工艺	新技术、新设备		✓	施工条件、技术不达标。
29	工程运营管理	结构自身	✓		近海酸性环境中,材料易腐蚀、老化。
30		风致灾害	✓		颤振、驰振、涡振、抖振、风雨振等风致振动现象。
31		地震	✓		存在地震风险。
32		超载	✓		超载造成桥梁结构破坏。
33		汽车撞桥事故		✓	可能发生汽车撞桥事故。
34		危险品运输车事故		✓	危险品泄漏、污染环境。
35		恐怖袭击		✓	重要的基础设施存在恐怖袭击可能。
36		运营期船撞	✓		河道繁忙天气恶劣,易致船撞事故。
37		运营期火灾	✓		钢材受热后,易出现结构破坏。
38		管理养护	✓		养护不当,影响运营安全。

3.2 确定风险准则层权重、子层权重和风险源层次总排序权重

1) 专家调查(德尔菲(Delphi method))。① 编制专家调查表,包括项目名称、项目基础资料、风险检查表、风险源列表(见表1)、层次分析专家打分表(见表2)、风险等级调查表(见表4)。② 选择专家,专家的人数不少于10人。专家的选择宜做到行业内专家平衡。③ 填写风险源层次分析表及风险等级调查表。

以斜拉桥方案的准则层层次分析为例,专家判别矩阵(即层次分析专家打分表)如表2。

2) 层次分析(AHP)。利用专家评分方法构造各级风险因素的判断矩阵,对同层因素间的相对重要性给出评判,求出风险准则层权重、子层权重及各风险因素层内权重,最终确定各风险因素的总排序权重值。根据专家打分结果(表2)进行层次分析,获得斜拉桥方案风险准则层和主要风险源层内权重及层次总排序权重数据见表3。

表2 专家判别矩阵列表

Tab.2 The judgment matrix

项目	建设条件 C_1	结构方案 C_2	施工技术 C_3	工程运营管理 C_4
建设条件 C_1	1	1/2	1/3	1/2
结构方案 C_2	2	1	1/2	1/2
施工技术 C_3	3	2	1	2
工程运营管理 C_4	2	2	1/2	1

表3 斜拉桥风险准则层和主要风险源层次单排序权重及层次总排序权重

Tab.3 The weights of the risk layers and the key risk factors in single ranking and general ranking

序号	风险准则层	准则层权重	风险子层	子层权重	风险源	层次单排序权重	层次总排序权重
1	建设条件	0.120 9	地质	0.087 5	断层	1	0.010 6
2			气象	0.195 8	雾、台风、雷暴、热带气旋	1	0.023 7
3			水文	0.195 8	洪水	1	0.023 7
4			运输通行	0.195 8	建设施工期船撞	1	0.023 7
5			资金及政策	0.325 0	政策变化、资金不到位	1	0.039 3
6	结构方案	0.192 8	设计理论	0.333 3	设计规范的系统性完整性	1	0.064 3
7			设计方案	0.666 7	钢箱梁及钢砼结合段构造	0.5	0.064 3
8					斜拉索塔梁锚固构造	0.5	0.064 3
9	施工技术	0.416 8	结构施工	0.5	钻孔桩基础施工	0.164 6	0.034 3
10					承台施工	0.164 6	0.034 3
11					索塔施工	0.279 2	0.058 2
12					钢箱梁及预应力砼梁施工	0.391 7	0.081 6
13			施工技术、管理水平	0.5	施工单位技术、管理水平	1	0.208 4
14	工程运营管理	0.269 5	结构自身	0.333 3	结构耐久性、稳定性	1	0.089 8
15			外在因素	0.666 7	风致灾害	0.167 356	0.030 1
16					地震	0.082 541	0.014 8
17					超载	0.275 584	0.049 5
18					运营期船撞	0.138 361	0.024 9
19					运营期火灾	0.140 732	0.025 3
20					管理养护	0.195 426	0.035 1

3.3 确定风险源风险发生概率及风险损失

1) 请专家小组判断风险概率级别。对于斜拉桥方案的结构方案准则层,专家填写的风险等级调查表详见表4。

表4 斜拉桥结构方案准则层风险等级调查表
Tab. 4 The risk ranking questionnaire of rule layers (cable stayed bridge)

风险源 层次	典型风险 事件	评价项目 专家序号	风险发生概率级别										子项风险 水平	单项风险 水平
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
结构 方案	设计 理论	风险发生概率级别		2	1	2	1	1	1	1	1	1	II	
		设计规范的 系统性、完 整性	人员伤亡	1	2	3	1	2	1	2	2	1		
			经济损失	3	3	4	2	3	2	2	3	3		
			风险损失 级别	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			环境影响	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			总评	3	3	4	2	3	2	2	3	3		
	设计 方案	最终风险等级		II	II	III	I	II	I	I	II	II	II	II
		风险发生概率级别		2	2	2	2	2	2	2	2	2		
		钢混凝土结 合段构造	人员伤亡	1	2	1	1	1	1	1	1	1		
			经济损失	2	2	2	2	2	3	2	2	2		
			风险损失 级别	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			环境影响	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			总评	2	2	2	2	2	3	2	2	2		
		最终风险等级		II	II	II	II	II	II	II	II	II		
	设计 方案	风险发生概率级别		2	2	2	2	2	2	2	2	2	II	
		斜拉索塔梁 锚固构造	人员伤亡	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			经济损失	3	3	1	2	3	2	2	2	2		
			风险损失 级别	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			环境影响	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
			总评	3	3	1	2	3	2	2	2	2		
	设计 方案	最终风险等级		II	II	I	II	II	II	II	II	II		

2) 模糊聚类(Fuzzy Clustering)。由于每个专家的打分带有一定的主观性。如何吸收大部分专家的意见,排除个别相左的专家意见,对于确保层次分析结果的客观性极为重要。本文采用模糊聚类分析方法来实现该目的。模糊聚类分析可在不同λ水平上将专家打分的结果进行分类,对每个风险源的专家打分给出综合总评结果。以表4中钢混凝土结合段构造风险源为例,在λ=0.6水平下,风险发生概率级别专家总评结果取2,风险损失级别总评结果剔除一个相左意见3,取2。根据该模糊聚类分析结果查《指南》^[1],即可得到该子项风险水平为II。对于准则层,则需考虑风险子项权重,计算经模糊聚类处理后的专家打分结果的加权平均值,即可得到相应的准则层加权风险概率级别和加权风险损失级别,再由此确定子项风险水平。

3.4 综合安全风险评价结论

对于斜拉桥方案,综合安全风险评价结果,主要结论为

1) 建设条件风险准则层中,风险源重要性排序为资金政策变化(权重0.039 3)、热带灾害性气候(雾、台风、雷暴、热带气旋)(权重0.023 7)、洪水(权重0.023 7)、建设施工期船撞(权重0.023 7)、断层(权重0.010 6)。由于建设条件风险源导致风险的概率为2级,即0.000 3≤P_f<0.003;建设条件准则层风险等级为II级(中度风险)。

2) 结构方案风险准则层中,设计规范的系统性完整性(权重0.064 3)、钢箱梁及钢混凝土结合段构造(权重0.064 3)、斜拉索塔梁锚固构造(权重0.064 3)重要性相同。对于结构方案准则层,斜拉桥方案风险等级均为Ⅱ级(中度风险),斜拉桥方案由于结构方案导致的风险发生概率为2级,即 $0.000\ 3 \leq P_f < 0.003$ 。

3) 施工技术风险准则层中,风险源重要性排序为:施工单位技术、管理水平(权重0.208 4)、钢箱梁及预应力混凝土梁施工(权重0.023 7)、索塔施工(权重0.058 2)、承台施工(权重0.034 3)、钻孔桩基础施工(权重0.034 3)。对于施工技术准则层,斜拉桥方案由于施工技术导致的风险发生概率为2级,即 $0.000\ 3 \leq P_f < 0.003$;风险等级为Ⅱ级(中度风险)。

4) 工程运营管理风险准则层中,风险源重要性排序为结构耐久性、稳定性(权重0.089 8)、超载(权重0.049 5)、管理养护(权重0.035 1)、风致灾害(权重0.030 1)、运营期火灾(权重0.025 3)、运营期船撞(权重0.024 9)、地震(权重0.014 8)。对于运营管理准则层,斜拉桥方案和悬索桥方案由于运营管理导致的风险发生概率均为2级,即 $0.000\ 3 \leq P_f < 0.003$ 。风险等级均为Ⅱ级(中度风险)。

经对上述四方面成果的综合评定,斜拉桥方案风险概率级别、风险损失级别和风险等级见表5。

表5 斜拉桥方案风险概率、风险损失级别和风险等级
Tab. 5 Risk probability, risk loss and risk rank of cable stayed bridge

桥型方案	风险发生 概率级别	风险损失级别				准则层 风险等级
		人员伤亡	经济损失	环境影响	损失总评	
斜拉桥方案	2	2	2	1	2	Ⅱ

3.5 高度风险和极高度风险及应对策略

经风险分析可知,斜拉桥方案存在如下高度风险:① 超载风险发生的概率为3级,即 $0.003 \leq P_f < 0.03$;风险等级均为Ⅲ级(高度风险),表明当前风险水平有条件接受,必须实施削减风险的应对措施,并需要准备应急计划。② 政策及资金变化风险发生概率为2级,即 $0.000\ 3 \leq P_f < 0.003$;风险等级为Ⅲ级,属高度风险。政策及资金变化可能导致工程停顿,除造成经济损失外,未建成的桥梁结构有安全隐患。

4 结论

提出的综合风险评估法(AFD法),用层次分析和专家打分的形式定量分析了风险源的重要性,并给出了风险源层次总排序权重结果。采用模糊聚类分析法对每个风险源的专家打分给出综合总评结果,在一定的精确度分类水平上,剔除了个别相左专家的意见,确保专家打分结果的有效性。对专家打分数据进行分析后,结合层次分析准则层权重、子层权重、底层因素权重结果,获得了准则层风险水平和该方案整体风险水平。该斜拉桥方案运用本文方法评估综合风险等级为Ⅱ级,属中度风险。本文提出的综合风险评估方法将专家经验与现代数学方法有机结合,具有一定的科学性、可行性和合理性,可用于工程设计安全风险评估。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南(试行)[S]. 北京, 2011.
- [2] HON C K H, CHAN A P C, WONG F K W. An analysis for the causes of accidents of repair, maintenance, alteration and addition works in Hong Kong[J]. Safety Science, 2010, 48(7): 894-901.
- [3] 许铎. 桥梁工程施工中事故环境风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(8): 46-50.
- [4] 中华人民共和国交通部. 关于在初步设计阶段实行公路桥梁和隧道工程安全风险评估制度的通知(交公路发[2010]175号文件)[Z]. 北京, 2010.
- [5] 高显义, 陈立文. 基于区间数层次分析法的工程项目风险评估[J]. 项目管理技术, 2011, 9(7): 74-78.

- [6] HALLOWELL M R, GAMBATESE J A. Qualitative research: application of the Delphi method to CEM research[J]. Journal of construction engineering and management, 2009, 136(1): 99-107.
- [7] 陶小兰, 王鹏. 桥梁设计方案风险评估分析[J]. 公路交通技术, 2011(2): 86-90.
- [8] 李得昌, 杨兴安, 王树杰. 基于 AHP-模糊综合法的浅埋隧道施工风险评估[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(3): 67-73.
- [9] LIU W F, FENG W, ZHEN W L. The Application of Fuzzy-AHP on Risk Assessment of Construction Project[C]// Computer and Management (CAMAN), 2011 International Conference on IEEE, 2011: 1-3.
- [10] 刘光富, 陈晓莉. 基于德尔菲法与层次分析法的项目风险评估[J]. 前沿, 2008(1): 23-26.

Combined Method of Safety Risk Assessment for Bridge Engineering Design

Peng Keke^{1,2}, F. N. Catbas², Wan Zhiyong³

(1. Environment and Civil Engineering College, Foshan University, Foshan 528000; 2. Civil, Environmental and Construction Engineering Department, University of Central Florida, Orlando, FL 32816; 3. Guangdong Highway Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510510)

Abstract: As part of design stage, the combined AHP-Fuzzy Clustering-Delphi method (AFD method) is put forward to analyze and assess the safety risk of Jiangshun cable-stayed bridge. Risk assessment of Jiangshun cable-stayed bridge scheme is carried out in the following four standard layers construction condition risk, structure scheme risk, technology risk and management risk. Based on the engineering background and experience of experts, the risk factors are defined. In order to ensure the accuracy of experts' assessment, fuzzy clustering method is used to analyze the results from experts. Then, combined with the result of risk weight from AHP, the risk rank of risk factors, risk layers and the whole bridge scheme are worked out. The result shows that the risk rank of cable-stayed bridge is II, which is of medium risk. The paper concludes that the AFD method is feasible.

Key words: safety risk assessment; AFD method; risk probability; risk loss; risk rank