

矮塔斜拉桥工程施工安全风险评价研究

姚勇 贾闯 王路豪

中铁一局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 063000

[摘要]随着城市化进程的加速,桥梁建设的信息化发展成为趋势,矮塔斜拉桥的风险评价在其中显得尤为重要。本研究旨在通过综合风险评价方法,确保矮塔斜拉桥工程的施工安全。研究采用工作分解结构(WBS)和风险分解结构(RBS)方法,结合层次分析法(AHP)和模糊综合评价法,构建了一个包含人员、施工工艺、管理、方法和环境五个方面的全面评价指标体系。并以任丘市矮塔斜拉桥项目为例,对其进行风险评估。结果表明,该评价方法能有效识别关键风险因素,为施工过程中的安全稳定提供了保障,对提升工程质量具有重要意义。

[关键词]矮塔斜拉桥工程; 风险识别; 安全风险评价; 层次分析法

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15377

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

Research on Safety Risk Assessment of Short Tower Cable-stayed Bridge Construction

YAO Yong, JIA Chuang, WANG Luhao

China Railway First Group Second Engineering Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract: With the acceleration of urbanization, the informatization development of bridge construction has become a trend, and the risk assessment of low tower cable-stayed bridges is particularly important in this regard. This study aims to ensure the construction safety of low tower cable-stayed bridge projects through comprehensive risk assessment methods. The study adopted the Work Breakdown Structure (WBS) and Risk Breakdown Structure (RBS) methods, combined with Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method, to construct a comprehensive evaluation index system that includes five aspects: personnel, construction technology, management, methods, and environment. And taking the low tower cable-stayed bridge project in Renqiu City as an example, conduct a risk assessment on it. The results indicate that this evaluation method can effectively identify key risk factors, providing a guarantee for safety and stability during the construction process, and is of great significance for improving project quality.

Keywords: low tower cable-stayed bridge project; risk identification; safety risk assessment; analytic hierarchy process

引言

随着我国经济快速增长和城市的发展,基础设施建设成为关键推动力,其中桥梁工程至关重要,是连接地区经济和保障人民生活的基础设施。桥梁的安全性和稳定性对交通安全和人民生命财产安全至关重要。矮塔斜拉桥作为新兴桥梁结构,因其结构特点和外观受到广泛关注。与传统桥梁相比,它设计更轻巧、现代,提高了美观性和结构效率。这种桥梁在我国建设领域越来越受欢迎。

国内很多学者在桥梁安全风险管理领域进行了许多研究。伍鹏^[1]将层次分析法应用于桥梁建设工程安全风险评价,并详细阐述了如何运用该方法进行安全风险评价。刘永莉、席铭洋等^[2]人,结合层次分析法与BP神经网络,利用层次分析法处理专家经验数据,并用BP神经网络进行训练,评估高速铁路桥梁工程的安全风险。王景春等^[3]在评估桥梁施工风险等级时,从“现状”“环境”“建设”和“管理”四个层次识别出11个“风险指标”,并通过构建的“属性区间识别”法,实现了多个风险指标的综合评估。蓝昭明采用层次分析法和模糊聚类法等技术,综合考虑桥梁结构方案、施工条件和工艺等因素,

进行了风险评估,并确定了危险源的分级指标权重及综合风险水平。

国外对桥梁的风险管理进行了大量的研究。Mashrur等^[4]学者提出了一种基于故障树模型的桥梁失效风险分析方法,并以某箱梁桥为例,实现了桥梁破坏机理的高效辨识和总体破坏风险的定量评价。Mark G^[5]通过建立考虑时间相关的可靠度分析的方法,对桥梁进行安全风险评价,从而为桥梁的维修保养和安全检测奠定基础。HassanHashemi^[6]通过采用非参数二次抽样和区间计算等手段,能够更高效地辨识出桥梁施工过程中的复杂决策,并能精确地给出部分或所有区间值。Inyeol^[7]对混凝土公路桥梁安全评价进行了研究,引入了概率评估,对各种可靠度评价与规范评价方法进行了对比,并提出了一种新方法,对降低随机与不确定性进行了改进。

目前国内外桥梁施工风险评估方法变得多样化和精细化。我们从传统的影像图分析和事故树理论,发展到使用模糊分析法、贝叶斯网络等先进技术。这些方法结合了定性和定量分析,也综合了多种手段,显示出强大的潜力和优势。但实际应用中,这些评估方法存在局限和挑战,

影响了其效用的发挥。特别是在矮塔斜拉桥施工风险评估方面,研究还不够充分,因此需要在方法和理论上进一步深入研究和完善。

2 桥梁风险评估的方法

2.1 桥梁工程项目的风险评估

桥梁工程项目的风险评估根据流程可以分为风险识别、风险分析以及风险评估三个方面。

(1) 风险识别

风险事件识别需通过多种方式,如现场调查、讨论、分析和咨询,以确定作业活动中的潜在风险,并列出风险事件清单。在识别矮塔斜拉桥施工风险时,首先收集相关工程资料,然后实地考察以精确识别风险点。通过不确定性分析,全面分析并分类风险因素,最终形成风险清单和评价指标体系,以便深入分析风险并支持后续监控和应对措施。

(2) 风险分析

风险分析是风险评估的关键部分,它利用科学方法评估已识别风险源的重要性,以及这些风险可能发生的概率和影响程度。通过这一过程,可以清晰地识别风险的本质和原因,以及它们可能产生的负面效果。全面的风险分析帮助工程风险管理人员更准确地理解项目风险,并制定有效的应对措施。

(3) 风险评估

评估风险概率需考虑施工环境、项目规模和人员技能等因素。采用工作结构分解与风险结构分解(WBS-RBS法)、层次分析法(AHP法)和模糊综合评价法等方法,这些技术有助于深入理解并有效应对建设风险,帮助管理者和团队精准识别风险,制定管理策略和措施,以减少风险的负面影响。

① 工作结构分解与风险结构分解(WBS-RBS法) WBS-RBS法结合了工作分解结构(WBS)和风险分解结构(RBS)的优势,确保项目团队全面系统地识别和分析项目风险,提升风险管理的全面性和系统性。该方法为每个工作包分配特定风险,使风险管理更具针对性,精确识别和管理潜在风险,为项目成功实施提供保障。

因此 WBS-RBS 法是有效的项目风险管理工具,能显著提高项目成功率和效益。

② 层次分析法(AHP法)

层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称 AHP 法)是一种有效的决策工具,它通过将决策相关的元素分解为不同的层次,如目标、准则和方案,来进行深入的定性和定量分析。

③ 模糊综合评价法

模糊综合评价法利用模糊数学原理,将难以量化的因素定量化,实现全面评价。它将主观定性评价转换为客观定量评价,提高评价的科学性和客观性。

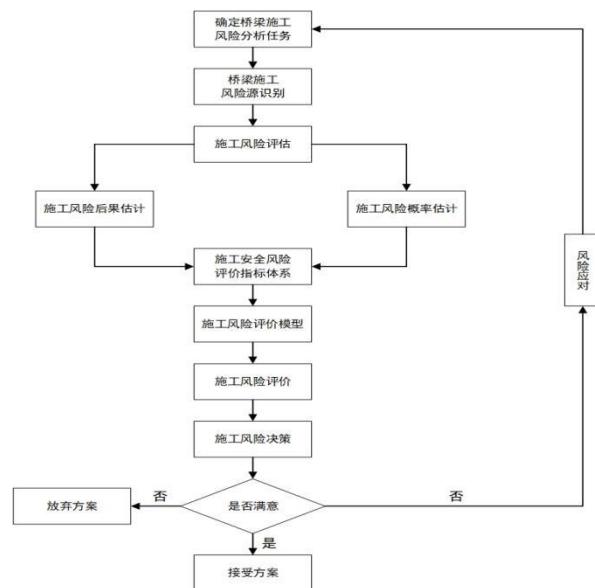


图1 矮塔斜拉桥施工风险分析流程

3 指标权重的计算

3.1 层次分析法确定权重

层次分析法通过构建一个包含相互关联要素的层次模型来指导决策。模型分为三个主要层次:顶层是目标层,中间是准则层,底层是方案层或指标层。这种结构便于系统评估和决策。本文以“矮塔斜拉桥施工安全风险评价”为目标层,准则层为U1-U5,指标层为U6-U25。然而判断矩阵是层次分析法的关键,用于评估不同因素和子因素的相对重要性。此过程涉及对各因素进行两两比较,并使用9级标度法确定评价指标的优先级顺序,形成判断矩阵。该矩阵为正互反矩阵,满足 a_{ij} 与 a_{ji} 乘积等于1的条件。

表1 9级标度含义表

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有一样的重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者略微重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者特别重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	代表上述两邻近判定的中值
倒数	因素 i 与因素 j 两者的判断比值为 a_{ij} , 则因素 j 与因素 i 两者的判断比值为 $1/a_{ij}$

在构建了详尽的矮塔斜拉桥工程安全风险评价指标体系之后,为了确保评价的科学性和准确性,我们特别邀请了一支由10位在斜拉桥施工领域具有深厚研究背景和丰富实践经验的专家学者组成的专家小组。这些专家不仅在学术界享有盛誉,而且在实际工程中也积累了大量的第一手资料和宝贵经验。

专家小组采用了一种经过验证的9级标度法,这种方法能够有效地量化专家们对不同安全风险指标重要性的

主观判断。在这一过程中，每位专家都需要对指标体系中的各个指标进行两两对比，根据其相对重要性给出相应的分值。通过这种方式，可以将专家们的定性评价转化为定量数据，从而为后续的风险分析和决策提供更加精确的依据。

在专家小组的共同努力下，通过细致的讨论和反复地比较，最终得出了各种安全风险。这个过程涉及了多方面的专业知识和深入的分析，还考虑了各种潜在的威胁和可能的漏洞，为后续的风险缓解措施提供了坚实的基础。

表 2 准则层判断矩阵

	U1	U2	U3	U4	U5
U1	1	2	2	1/2	2
U2	1/2	1	1/3	1/3	1/4
	U1	U2	U3	U4	U5
U3	1/2	3	1	1/3	2
U4	2	3	3	1	3
U5	1/2	4	1/2	1/3	1

表 3 人员因素判断矩阵

U1	U6	U7	U8	U9
U6	1	4	2	1/2
U7	1/4	1	1/3	1/2
U8	1/2	3	1	1/2
U9	2	2	2	1

表 4 施工工艺因素判断矩阵

U2	U10	U11	U12	U13
U10	1	2	3	2
U11	1/2	1	3	2
U12	1/3	1/3	1	1/2
U13	1/2	1/2	2	1

表 5 管理因素判断矩阵

U3	U14	U15	U16	U17
U14	1	3	2	1/2
U15	1/3	1	2	1/3
U16	1/2	1/2	1	1/2
U17	2	3	2	1

表 6 环境因素判断矩阵

U5	U22	U23	U24	U25
U22	1	2	3	4
U23	1/2	1	1/2	3
U24	1/3	2	1	2
U25	1/4	1/3	1/2	1

3.2 计算各判断矩阵

层次单排序算法通过比较各层元素的重要性来排序。它基于判断矩阵 A 计算权重向量 (W)，即最大特征根

($\lambda_{\max}$) 与特征向量 (W) 的乘积。确定 $\lambda_{\max}$ 后，标准化特征向量 W 的分量 w_i 固定，反映元素的重要性。此方法确定目标层次中变量的相对权重。方根法用于计算权重向量 (W) 和最大特征根 ($\lambda_{\max}$)。

①计算判断矩阵 A 各行各个元素的乘积：

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

②计算每个 M_i 的 n 次方根：

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

③对进行归一化处理，得到权重向量其中：

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \quad (3)$$

④计算最大特征值：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i} \quad (4)$$

⑤接着进行一致性检验，计算一致性指标 CI：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

⑥比对平均随机一致性表，如表 7 所示：

表 7 1-5 阶 RI 值

阶数 n	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.58	0.90	1.12

⑦计算一致性比率：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

在进行层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 等决策分析时，构建判断矩阵是关键步骤之一。如果计算出的一致性比率 CR 小于 0.1。在这种情况下，我们可以认为判断矩阵是符合一致性要求的，决策者所做出的判断被认为是合理且可靠的。

然而，如果一致性比率 CR 的值大于或等于 0.1，这意味着判断矩阵的一致性存在问题，在这种情况下，需要进行改正。CR 值小于 0.1，从而确保决策分析的准确性和可靠性。只有当判断矩阵的一致性得到保证，我们才能信赖其在决策过程中的应用，确保最终的决策结果是基于逻辑一致且合理的判断。

表 8 人员指标权重分析结果

U1	U6	U7	U8	U9	$\lambda_{\max}=4.241$ $CR=0.089<0.1$
U6	1	4	2	1/2	
U7	1/4	1	1/3	1/2	
U8	1/2	3	1	1/2	
U9	2	2	2	1	
权重	0.316	0.101	0.208	0.376	

表9 施工工艺指标权重分析结果

U2	U10	U11	U12	U13	$\lambda_{\max}=4.071$ CR=0.026<0.1
U10	1	2	3	2	
U11	1/2	1	3	2	
U12	1/3	1/3	1	1/2	
U13	1/2	1/2	2	1	
权重	0.413	0.292	0.108	0.187	

表10 环境指标权重分析结果

U5	U22	U23	U24	U25	$\lambda_{\max}=4.174$ CR=0.065<0.1
U22	1	2	3	4	
U23	1/2	1	1/2	3	
U24	1/3	2	1	2	
U25	1/4	1/3	1/2	1	
权重	0.474	0.199	0.230	0.097	

4 基于模糊综合评价法的综合风险评价

4.1 确定评价对象的因素集和评语集

因素集是指构成评价对象的各种影响因素的集合体,在本项目中,我们定义的因素集为A,它包含了五个主要的影响因素,具体为 $A=\{A1, A2, A3, A4, A5\}$ 。详细来说,A1代表的是人员相关的因素,其中包括了人员的专业技术水平、身体素质、安全意识以及操作规范等方面;A2则涵盖了与材料和设备相关的因素,如材料的质量、设备的可靠性、维修保养的频率以及吊装作业的性能;A3涉及到的是管理层面的因素,包括了规章制度的完善程度、现场管理的有效性、应急预案的制定以及安全培训的实施情况;A4则包含了组织设计、施工技术、方案的合理性以及温度控制等因素;而A5则关注的是环境因素,如河流的水文状况、气候的多变性、邻近建筑的影响以及可能发生的自然灾害等。

评语集是评价者在评价时可能给出的各种结果的集合,通常分为不同等级以便量化。本项目中,评语集分为五个等级:“大”“较大”“中等”“较小”和“小”,用符号“V”表示,即 $V=\{\text{大}, \text{较大}, \text{中等}, \text{较小}, \text{小}\}$ 。每个等级对应一个数值,组成集合K,即 $K=\{100, 80, 60, 40, 20, 0\}$ 。评价者可以根据实际情况进行量化分析。对每个影响因素进行量化评分,从而得出一个综合的评价结果。

4.2 构建模糊评价矩阵

评价过程中,评价价值与评价因素的关系通过隶属度函数描述,该函数关系用矩阵B表示,其中元素 b_{ij} 表示第i个因素对第j个评价价值的隶属度。评价价值与评价因素间的关系可能不是直接的,本文通过专家讨论等方法获取平均评价价值,形成隶属度向量。这些隶属度向量整合成矩阵R,构成模糊评价矩阵。

依据第所述的安全风险评价指标体系,本文建立了包含5个一级风险指标和20个二级风险指标的评价框架。将设计好的问卷调查表发布给专家组,其成员与提到的专

家小组保持一致。10位专家在分析了任丘矮塔斜拉桥工程的概况以及施工现场的实际状况后,根据评价集对各个风险指标进行风险级别的判断,通过累加计算来处理相同等级的评分,得出各项评级的比例,以构建隶属度矩阵。最终的专家评分综合结果见表11。

表11 专家评级表

一级指标	二级指标	大	较大	中等	较小	小
人员 U1	人员专业技术水平 U6	0	3	1	4	2
	人员身体素质 U7	0	1	3	5	1
	人员安全意识 U8	2	1	4	1	2
	人员未按施工步骤操作 U9	3	2	0	3	2
施工工艺 U2	材料的质量 U10	2	3	4	1	0
	机械设备可靠性检测 U11	1	2	5	0	2
	机械设备维修保养 U12	0	1	2	4	3
	吊装系统性能 U13	2	0	3	4	1
管理 U3	规章制度落实情况 U14	0	2	5	2	1
	施工现场管理 U15	1	3	2	4	0
	应急预案制定 U16	0	4	3	3	0
	施工人员安全培训 U17	3	3	1	3	0
环境 U5	河流流速、水位变化 U22	0	3	5	2	0
	气候条件多变 U23	1	0	4	4	1
	临近建筑物对施工影响 U24	1	0	5	3	1
	自然灾害 U25	0	1	0	7	2

根据上表,构建模糊评价矩阵,人员 R_1 ,施工工艺 R_2 管理 R_3 方法 R_4 环境 R_5 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.1 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0.4 & 0.1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.2 & 0 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 \\ 0.2 & 0 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.4 \\ 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.3 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0.1 & 0 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.7 & 0.2 \end{bmatrix}$$

4.3 一级模糊综合评价

已经运用层次分析法确定了各指标的权重,则采用表11的权重作为评价因素的权向量,与各模糊评价矩阵展开矩阵合成运算:计算出各一级指标的综合风险得分如表12所示。

表12 一级指标综合风险得分

一级指标	大	较大	中等	较小	小	综合风险得分
人员	0.1549	0.2005	0.1436	0.3114	0.1896	56.383
工艺	0.1495	0.1942	0.3904	0.1583	0.1096	62.272
管理	0.1399	0.2843	0.2608	0.2865	0.0295	64.403
方法	0.1172	0.3056	0.1200	0.3172	0.1400	58.887
环境	0.0437	0.1502	0.4329	0.3115	0.0627	56.028

4.4 施工综合风险评价结果与控制措施

在施工过程中,混凝土和其他材料的选择必须满足严格的标准,并提供合格证明,接受检测以确保质量。库房管理人员应妥善管理材料,定期检查库存,并及时解决问题以保障施工进度。施工方案需通过专家评审,确保安全性和科学性,同时建立以总工程师为核心的管理体系,优化资源配置,遵循技术规范。施工现场管理应建立安全制度,进行定期检查,设立警示标识,加强危险品管理。施工人员需接受全面安全培训,建立奖惩机制,分享安全经验。为应对河流流速和水位变化,应监测水文特征,勘察

河床,设置安全防护,加强船舶交通管理,优化施工工艺,并制定应急预案。

5 结论

本文使用层次分析法对矮塔斜拉桥工程施工安全风险评价指标体系进行了权重分析,确定了各指标的相对重要性。层次总排序确定了指标权重,模糊评价得分用于划分风险等级。通过计算,施工阶段综合评价风险值为59.124,属于中等风险。管理层应注意施工现场和人员培训的管理,采取科学的控制手段以规避风险,确保桥梁项目质量。本研究为矮塔斜拉桥工程风险管理提供了理论与实践指导,有助于提升工程安全水平。

[参考文献]

- [1]伍鹏.层次分析法在桥梁施工安全风险评估中的应用研究[J].运输经理世界,2023(32):106-108.
 - [2]刘永莉,席铭洋,朱方一,等.基于AHP+BP法高铁桥梁施工安全风险评估模型研究[J].世界桥梁,2023,51(3):66-73.
 - [3]王景春,吴雨航,王利军,等.基于改进属性区间识别模型的跨线公路桥施工风险评估[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):1-7.
- 作者简介:程晓东(1986—),职务:项目总工,主要研究方向:岩土工程施工技术优化。