

现浇桥梁施工安全风险评估的模糊层次分析法

俞素平

(福建船政交通职业学院道路工程系,福州 350007)

摘要:分析现浇桥梁施工发生安全事故的主要原因,建立安全风险评估指标体系,以模糊层次分析法为基础,构建现浇桥梁施工期安全风险综合评估模型。最后,将该模型运用于某现浇桥梁的施工期安全风险评估,分析结果为下阶段采取有针对性的应对措施提供了可靠性依据。

关键词:现浇桥梁;施工安全;风险等级;隶属函数

中图分类号:U447

文献标志码:A

随着我国交通基础设施建设规模的持续增长,经济社会发展方式转变对工程安全提出了更新更高的要求,生产安全仍然面临着巨大的压力和严峻挑战。公路和城市道路桥梁中采用现浇方法施工的占有较大比例,而现浇桥梁高处坠落、坍塌等安全事故时有发生。因此,针对其施工过程中的安全风险研究具有重要的理论意义和现实意义。

本文针对现浇桥梁工程特点,分析现浇桥梁施工发生安全事故的主要原因,提出了安全风险评估指标体系,综合考虑专家的工作经验、学术背景及对所评估项目了解程度等情况,运用层次分析法确定各级指标的权重。然后,将评价等级量化并构造对应的隶属函数,进而构建了风险评估模型,并结合实例进行评估分析。

1 现浇桥梁施工安全风险二级综合评估模型

1.1 评估指标的选取

现浇桥梁施工安全事故主要为高处坠落、坍塌、物体打击、机械伤害和触电事故,究其原因主要包括人的因素、物的因素、外部环境因素^[1]。在总结现有研究成果的基础上^[2-6],结合交通运输部有关要求,以本质安全为出发点,从人员(工作班组)、机械设备、材料、施工现场环境、施工作业工艺技术和现场管理等六个方面对施

工安全风险进行归类、识别^[7-8],建立了包含 6 个二级指标和 24 个一级指标的现浇桥梁施工安全风险评估指标体系(表 1)。

表 1 现浇桥梁施工安全风险评估指标体系

目标风险(目标层)	二级指标(主准则层)	一级指标(次准则层)
现浇桥梁施工安全风险	人员(工作班组) U ₁	三类人员和特种人员持证上岗 U ₁₁ ;员工基本素质、遵规守纪 U ₁₂ ;班组内部人员配置 U ₁₃ ;班组之间协调作业状况 U ₁₄ 。
	机械设备 U ₂	特种设备及专用设备的安装、使用、拆卸 U ₂₁ ;常用设备及机具的安装、使用、拆卸 U ₂₂ ;施工机械停放 U ₂₃ 。
	材料、构件 U ₃	不合格材料使用 U ₃₁ ;构配件、工厂预制件质量 U ₃₂ ;易燃易爆等危险品存放使用 U ₃₃ 。
	施工现场环境 U ₄	自然环境 U ₄₁ ;施工现场布设 U ₄₂ ;临时用电 U ₄₃ ;安全防护 U ₄₄ 。
	施工作业工艺技术 U ₅	作业施工方法和技术措施不当 U ₅₁ ;支架、脚手架及跨线施工安全防护棚的安装、使用、拆除 U ₅₂ ;登高设施安装、使用、拆除 U ₅₃ ;模板安装、使用、拆除模板安装、使用、拆除 U ₅₄ ;特殊或危险作业安全技术控制 U ₅₅ 。
	现场管理 U ₆	安生生产条件 U ₆₁ ;安全生产管理制度 U ₆₂ ;安全技术措施和安全专项施工方案 U ₆₃ ;安全生产事故应急预案 U ₆₄ ;施工区域交通管制情况 U ₆₅ 。

收稿日期:2014-01-11

基金项目:福建省交通运输厅基金项目(201334)

作者简介:俞素平(1968-),男,福建宁化人,副教授,高级工程师,硕士,主要从事公路工程管理方面的研究,(E-mail)32751793@qq.com

1.2 建立层次结构模型

现浇桥梁施工安全风险评估指标体系是一个二级三层的指标体系(表 1):最高层为目标层,表示现浇桥梁施工安全风险的大小;第二层为主准则层,表示现浇桥梁施工安全风险评估中的 6 个二级评价指标;第三层为次准则层,表示现浇桥梁施工安全风险评估中的 24 个一级评价指标;第一级评判为次准则层对主准则层的评判,第二级评判为主准则层对目标层的评判。

2 评估指标权重的确定

2.1 确定单个专家的评估指标权重

设某一子指标体系,其评估指标有 m 个,它构成的集合为 $U = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$,邀请 L 位专家用层次分析法确定各指标的权重,设第 k 位($k = 1, 2, \dots, L$)专家给出的权重向量为:

$$w^{(k)} = [w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_m^{(k)}]^T, k = 1, 2, \dots, L$$

2.2 计算综合权重

由于专家工作经验、学术背景及对所评估项目的了解程度不同,专家的权重也不尽相同。专家自身的权重主要考虑职称、从事桥梁工程时间、对工程风险理论及方法的熟悉程度及对本桥梁施工方案了解程度而综合确定,分指标分值按最高取 10 分,其它按五级制递减取定(表 2)。

表 2 专家权重体系

指 标	分指标(专家实际情况)				
	其它	初级职称	中级职称	副教授或高工	教授或教授高工
从事桥梁工程时间	2 年以下	2~5 年	5~10 年	10~20 年	20 年以上
对工程风险理论及方法的熟悉程度	不太了解	了解一点	比较了解	熟悉	非常熟悉
对桥梁施工方案了解程度	不太了解	了解一点	比较了解	熟悉	非常熟悉
分指标分值	2	4	6	8	10
分指标相对权值	0.067	0.133	0.200	0.267	0.333

表 2 中分指标相对权值为分指标对应分值除以分值之和 30。

由于职称、从事桥梁工程时间等几个指标的重要程度相近,可以认为各指标权重是相同的,将各位专家实际情况对应的分指标相对权值相加,得到每位专家的累计权重,然后求和并归一化处理,则可得专家自身的权重,记为 α_k 。 L 位专家确定的评价指标权重综合在一起

得到各评价指标权重的矩阵为:

$$w_i = \sum_{k=1}^L \alpha_k \cdot w_i^{(k)} \quad (1)$$

由各权重数 $w_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 组成的因素权重集 W 是因素集 U 上的模糊子集,可用模糊向量表示为:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\} \quad (2)$$

3 评价等级隶属函数的构造

3.1 评定等级的量化

将风险发生的可能性和事故严重程度评价等级分为四级,即评价集为 $V = \{A, B, C, D\}$ 。为了能够进行统一处理,将评定等级进行量化处理^[9](表 3)。

表 3 评定等级量化标准

等 级	A	B	C	D
定性描述 (风险发生可能性)	很可能	可能	偶然	不太可能
定性描述 (事故严重程度)	特大	重大	较大	一般
评分值范围	$80 < Q \leq 100$	$60 < Q \leq 80$	$40 < Q \leq 60$	$Q \leq 40$

3.2 隶属函数的构造

构造模糊隶属函数的方法很多,主要有模糊统计法、主观经验法、指派法、二元对比排序法等四种^[10]。本文采用指派法,选用梯形分布隶属函数,根据表 3 的评定等级量化标准,构建评价集 $V = \{A, B, C, D\}$ 对应的隶属函数:

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & Q \leq 75 \\ (Q - 75)/10 & 75 < Q \leq 85 \\ 1 & Q > 85 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_B = \begin{cases} 0 & Q \leq 55 \\ (Q - 55)/10 & 55 < Q \leq 65 \\ 1 & 65 < Q \leq 75 \\ (85 - Q)/10 & 75 < Q \leq 85 \\ 0 & Q > 85 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_C = \begin{cases} 0 & Q \leq 35 \\ (Q - 35)/10 & 35 < Q \leq 45 \\ 1 & 45 < Q \leq 55 \\ (65 - Q)/10 & 55 < Q \leq 65 \\ 0 & Q > 65 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_D = \begin{cases} 1 & Q \leq 35 \\ (45 - Q)/10 & 35 < Q \leq 45 \\ 0 & Q > 45 \end{cases} \quad (6)$$

4 实例应用

选取某高速公路 A3 合同段永福枢纽互通主线 1 号桥作为实证研究对象。该桥长 114 m,上部采用现浇后

张预应力连续箱梁结构,桥梁跨径组合设计为 30 + 32 + 32 + 20 m。梁体设计为单箱二室连续箱梁结构,箱梁高 1.8 m,顶宽 12 m,底宽 7 m,悬臂长 2.5 m。除 2#墩前后各 16 m 范围采用钢管柱加工字钢支架法跨越福厦高速,其余均用满堂支架法现浇施工。

4.1 确定因素集

在表 1 所建立的风险评价指标体系基础上,确定因素集。

第一级评判因素: $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}\}$; $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}\}$; $U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}\}$; $U_4 = \{U_{41}, U_{42}, U_{43},$

$U_{44}\}$; $U_5 = \{U_{51}, U_{52}, U_{53}, U_{54}, U_{55}\}$; $U_6 = \{U_{61}, U_{62}, U_{63}, U_{64}, U_{65}\}$ 。

第二级评判因素: $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}$

4.2 权重确定

4.2.1 专家权重的确定

邀请 5 位桥梁施工方面的专家对本桥梁施工安全进行风险评估,根据每位专家的实际情况及表 2 的分指标相对权值,确定对应的累计权重,然后求和并归一化处理,得到每位专家实际权重 $\alpha_k = [0.2373 \ 0.2125 \ 0.2001 \ 0.1876 \ 0.1625]$,见表 4。

表 4 每位专家实际权重

专家	职称	从事桥梁工程时间	对工程风险理论及方法的熟悉程度	对桥梁施工方案了解程度	累计权重	归一化权重
1	教授级高工(0.333)	25年(0.333)	非常熟悉(0.333)	熟悉(0.267)	1.266	0.2373
2	高工(0.267)	20年(0.267)	熟悉(0.267)	非常熟悉(0.333)	1.134	0.2125
3	高工(0.267)	17年(0.267)	熟悉(0.267)	熟悉(0.267)	1.068	0.2001
4	高工(0.267)	15年(0.267)	比较了解(0.200)	熟悉(0.267)	1.001	0.1876
5	工程师(0.200)	8年(0.200)	熟悉(0.267)	比较了解(0.200)	0.867	0.1625

注:()内数值为其相对权重。

4.2.2 指标权重的计算

首先,请专家分别应用层次分析法(AHP)确定各级指标权重,具体计算可用相关软件(如 MATLAB 或 YAAHP0.60)计算。然后,考虑专家的权重 α_k , 根据式(1)计算得到各级指标的最终权重。

$$w = [0.1366 \ 0.1043 \ 0.2043 \ 0.1615 \ 0.2672 \ 0.1261]$$

$$w_1 = [0.2806 \ 0.3606 \ 0.2052 \ 0.1536]$$

$$w_2 = [0.5831 \ 0.2606 \ 0.1563]$$

$$w_3 = [0.3647 \ 0.4321 \ 0.2032]$$

$$w_4 = [0.2751 \ 0.2812 \ 0.2016 \ 0.2421]$$

$$w_5 = [0.2627 \ 0.2972 \ 0.1708 \ 0.1418 \ 0.1275]$$

$$w_6 = [0.2582 \ 0.1823 \ 0.2523 \ 0.1621 \ 0.1451]$$

4.3 现浇桥梁施工安全风险评估

4.3.1 风险发生可能性估计

(1)一级综合评价。请评估小组,根据表 3 评定等级量化标准,结合项目现场实际情况打分。然后根据各指标的分值,按隶属函数式(3)、式(4)、式(5)、式(6)计算可分别得出一级指标的模糊评判矩阵。如对人员(工作班组) U_1 下各一级指标的评价结果见表 5。

得指标 U_1 的模糊评判矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

表 5 指标 U_1 的评价结果

二级指标	一级指标	风险发生可能性评分值 Q	评价等级指标值			
			A	B	C	D
人员(工作班组) U_1	三类人员和特种人员持证上岗 U_{11}	43	0	0	0.8	0.2
	员工基本素质、遵规守纪 U_{12}	50	0	0	1	0
	班组内部人员配置 U_{13}	40	0	0	0.5	0.5
	班组之间协调作业状况 U_{14}	45	0	0	1	0

用同样方法得到指标 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 、 U_6 的模糊评判矩阵:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对风险发生的可能性进行一级模糊综合评价,如 U_1 的计算:

$$B_1 = W_1 \circ R_1 = \{0 \ 0 \ 0.8413 \ 0.1587\}$$

根据最大隶属度原则, $b_{\max} = b_3 = 0.8413$, 对应的评价等级为 C 级。其它指标的评价结果见表 6。

表 6 一级模糊综合评价等级指标值及可能性等级

二级指标	B	指标值				可能性评价等级
人员(工作班组) U_1	B_1	0	0	0.8413	0.1587	C
机械设备 U_2	B_2	0	0	0.7916	0.2085	C
材料、构件 U_3	B_3	0	0	0.8984	0.1016	C
施工现场环境 U_4	B_4	0	0	0.7188	0.2812	C
施工作业工艺技术 U_5	B_5	0	0.4168	0.5832	0	C
现场管理 U_6	B_6	0	0	0.6827	0.3173	C

(2) 二级综合评价。

对风险发生的可能性进行二级综合评价:

表 7 一级模糊综合评价等级指标值及严重程度等级

二级指标	B	指标值				严重程度评价等级
人员(工作班组) U_1	B_1	0	0	0.7180	0.2820	C
机械设备 U_2	B_2	0	0	0.7134	0.2866	C
材料、构件 U_3	B_3	0	0.6145	0.1824	0.2032	B
施工现场环境 U_4	B_4	0	0.1376	0.8625	0	C
施工作业工艺技术 U_5	B_5	0.1486	0.4113	0.3251	0.1150	B
现场管理 U_6	B_6	0	0	0.3057	0.6943	D

根据最大隶属度原则, $b_{\max} = b_3 = 0.4744$, 对应的评价等级为 C 级, 即该桥施工安全风险发生的事故严重程度为 C 级。

4.3.3 2 号桥施工安全风险评估

本文采用风险矩阵法确定现浇桥梁施工安全风险等级。根据风险事故可能性和事故严重程度, 将桥梁支架安全风险等级分为四级, 建立的风险等级矩阵见表 8。在该风险等级矩阵中, I 级(低度)风险表示可忽略, 不需采取风险处理措施和监测; II 级(中度)风险表示可接受, 一般不需采取风险处理措施, 但需予以监测; III 级(高度)风险表示不期望, 必须采取风险处理措施降低风险并加强监测; IV 级(极高)风险表示不可接受, 必须高度重视, 采取切实可行的规避措施并加强监测, 否则要不惜代价将风险至少降低到不期望的程度。

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8413 & 0.1587 \\ 0 & 0 & 0.7916 & 0.2085 \\ 0 & 0 & 0.8984 & 0.1016 \\ 0 & 0 & 0.7188 & 0.2812 \\ 0 & 0.4168 & 0.5832 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6827 & 0.3173 \end{bmatrix}$$

$B = W \circ R = \{0 \ 0.1114 \ 0.7390 \ 0.1496\}$, 根据最大隶属度原则, $b_{\max} = b_3 = 0.7390$, 对应的评价等级为 C 级, 即该桥施工安全风险发生的可能性为 C 级。

4.3.2 事故严重程度估计

用同样的方法, 对风险发生的事故严重程度进行一级模糊综合评价, 结果见表 7。

对风险发生的事故严重程度进行二级综合评价:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.7180 & 0.2820 \\ 0 & 0 & 0.7134 & 0.2866 \\ 0 & 0.6145 & 0.1824 & 0.2032 \\ 0 & 0.1376 & 0.8625 & 0 \\ 0.1486 & 0.4113 & 0.3251 & 0.1150 \\ 0 & 0 & 0.3057 & 0.6943 \end{bmatrix}$$

$$B = W \circ R = \{0.0397 \ 0.2576 \ 0.4744 \ 0.2283\}$$

表 8 风险等级矩阵

严重程度等级可能性等级		特大	重大	较大	一般
		A	B	C	D
很可能	A	极高 IV	极高 IV	高度 III	高度 III
可能	B	极高 IV	高度 III	高度 III	中度 II
偶然	C	高度 III	高度 III	中度 II	中度 II
不太可能	D	高度 III	中度 II	中度 II	低度 I

1 号桥施工安全风险发生的可能性等级为“C”级, 事故严重程度为“C”级, 根据表 8 可知风险等级为中度 II 级风险, 属于可接受风险, 但在施工过程中需予以监测。

5 结论

(1) 以本质安全为出发点, 从人员(工作班组)、机械设备、材料(构件)、施工现场环境、施工作业工艺技

术、现场管理等六个方面建立了现浇桥梁施工安全风险
评估指标体系,包括6个二级指标和24个一级指标。

(2)结合多层次模糊评估理论,构建现浇桥梁施工
安全风险评估模型,并对某高速公路现浇桥梁施工期安
全风险管理工作进行了实证研究,分析结果为下阶段采
取有针对性的应对措施提供了可靠性依据,提高了企业
安全风险管理水平。另外,该方法的提出也为公路工程
安全风险评估分析提供了一条新的途径。

(3)由于现浇桥梁施工安全风险评估是一项复杂的
系统工程,考虑因素众多,是多学科的集成与交叉,仍然
存在值得进一步深入研究的问题。评估指标的选取有
待进一步调整优化,评价方法如何尽可能减少专家的
主观性有待深入探讨。

参 考 文 献:

- [1] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程
施工安全风险评估制度及指南解析[M].北京:人民
交通出版社,2011.
- [2] 金伟良,鲁征,刘鑫,等.支模架施工安全性的评价研

究[J].浙江大学学报:工学版,2006,40(5):800-803.

- [3] 阮欣,陈艾荣,石雪飞.桥梁工程风险评估[M].北京:
人民交通出版社,2008.
- [4] 上海城建(集团)公司,同济大学桥梁工程系,上海市
城市建设设计研究院.城市高架桥梁施工风险评估
和风险管理[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [5] 况星尧.应用事故轨迹交叉理论积极预防建筑生产
安全事故[J].建筑安全,2011,12(8):13-15.
- [6] 朱木锋.高速公路现浇桥梁施工期安全风险管理评
价研究[D].北京:中国地质大学,2012.
- [7] 江涛.论本质安全[J].中国安全科学学报,2000,5
(10):1-8.
- [8] 叶君乐,蒋军成,阴健康,等.基于模糊综合评价的化
工工艺本质安全指数研究[J].中国安全科学学报,
2010,20(6):125-130.
- [9] 董大旻.建设施工危险源研究与管理[M].北京:中
国劳动社会保障出版社,2008.
- [10] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].北京:
华中科技大学出版社,2013.

Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Evaluating the Risk of Construction Safety of Cast-in-Place Bridge

YU Suping

(Road Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The main reasons which resulted in safety accidents of cast-in-place bridges are analysed, and the security risk assessment target system is built. Based on the fuzzy analytic hierarchy process, the synthetical evaluation model of safety risk in the construction phase of cast-in-place bridges is built. At last, the model is used in the security risk assessment of a cast-in-place bridge in its construction phase. The result presents reliable basis for adopting specific response measures in the next phase.

Key words: cast-in-place bridge; construction safety; risk level; membership function