

城市立体有轨交通拼宽桥梁施工安全风险模糊综合评价

景语

(山西诚达公路勘察设计有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 以德尔菲法识别风险指标, 实施两轮专家调研, 构建适宜于拼宽桥梁空间特殊情形的施工安全风险指标体系, 包括施工技术风险、施工环境风险、施工管理风险三方面共 18 项子风险; 以某城市立体有轨交通拼宽桥梁工程为例, 构建拼宽桥梁施工安全风险模糊综合评价体系, 进行拼宽桥梁施工安全风险指标权重、隶属度、风险等级等计算, 对该工程的风险水平进行模糊综合评价。结果表明, 该工程的施工安全风险水平属于中等; 一级风险指标中施工环境风险和施工管理风险的权重一致, 二级指标中破坏既有桥梁结构风险的权重最大, 其次是设计合理度、桥位特征、高支模工程、高空作业、占道施工影响交通、施工及运营对已有高压杆线的影响等; 破坏既有桥梁结构风险、施工及运营对已有高压杆线的影响的风险等级最高, 为 5 级, 达到 4 级风险等级的指标包括高支模工程、预应力施工、高空作业、设计合理度、邻近既有铁路线施工等。在施工前应有针对性地对风险等级较高的因素进行风险全过程分析, 同时加强对施工现场的管控。

关键词: 工程管理; 施工安全风险; 拼宽桥梁; 模糊综合评价

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0141-05

目前, 以有轨电车为代表的城轨交通系统建设在全国多个地区铺展开来。该类工程具有建设规模大、建设周期长、施工环境复杂、工艺工法特殊等特点, 在一定程度上增加了其施工难度, 施工过程中的风险类型比其他工程项目多, 且其施工阶段的风险发生概率、风险等级较高。尤其是在旧桥上进行拼宽改造, 面临的问题更多、更复杂: 被拼宽的桥梁自身已运营一段时间, 暴露了一些缺陷; 原有旧桥的设计及施工时并未考虑拼宽, 特殊结构设计、预留的各项参数可能存在不足; 缺少相关施工经验, 施工中对安全管理可能做不到位, 安全风险发生概率增大^[1]。王峰重点分析某桥梁工程技术、环境等层面的现状, 构建该工程施工风险指标体系, 建立全过程模糊评价模型, 通过模型综合评价, 得到了各风险指标的风险等级及风险发生概率^[2]。熊山铭采用文献调研法识别桥梁施工对周边建筑结构安全影响的风险指标, 结合模糊评价法对某市政桥梁工程的施工安全风险进行模糊评价, 确定了其风险等级^[3]。现有研究以相关经验分析和可行性研究阶段给出的风险内容及建议为基础, 易受工作人员自身综合能力的影

响, 获得的风险指标全面性及科学性不足。本文采用德尔菲法识别风险指标, 采用模糊综合分析法对某城市立体有轨交通拼宽桥梁工程施工安全风险进行综合评价, 分析桥梁施工过程中风险因素的风险等级。

1 模糊综合分析理论

模糊综合分析法是从模糊数学的角度对受多因素影响的事物进行综合评价的方法^[4]。采用模糊综合分析法评价拼宽桥梁施工安全风险步骤:

(1) 构建评价因素的指标集。拼宽桥梁施工安全风险评价指标集用 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$ 表示, 其中 U_n 为风险指标。

(2) 计算指标权重。采用层次分析法计算拼宽桥梁施工安全的各层次风险指标的权重^[5]。

(3) 构建评价结果的评语集 V 。拼宽桥梁施工安全风险评价水平用 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$ 表示, 其中 V_n 为评价水平。结合风险特点, 确定拼宽桥梁施工安全风险评价水平 $V = (\text{高}, \text{较高}, \text{中等}, \text{较低}, \text{低})$ 。

(4) 建立隶属度矩阵 R 。邀请专家按照评语集对风险指标进行归类, 统计归类结果构建模糊关系

矩阵。

(5) 按式(1)计算模糊综合评判集 B , 按照最大隶属度原则对风险水平进行评价。

$$B=AR=(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) \quad (1)$$

式中: A 为指标权重向量; R 为隶属度矩阵; b_j ($j=1, 2, \dots, m$) 为评语集元素。

2 拼宽桥梁施工安全风险评价体系

2.1 筛选拼宽桥梁施工安全风险指标体系

从施工安全控制的角度, 分析拼宽桥梁施工中的风险因素。在中国知网搜索拼宽桥梁施工、施工安全风险、施工安全对策等关键词, 筛选出 33 篇文献, 从桥梁、既有建筑物施工、桥梁施工技术、桥梁施工环境、桥梁施工组织管理等方面进行风险指标筛选, 获得 19 项风险因素(见表 1)。

表 1 城市立体有轨交通拼宽桥梁施工安全风险初次识别结果

风险大类	风险子因素
施工技术风险	设计合理度、工艺成熟度、桥位特征、拼接规模、与周边建筑物的位置关系、拼装方案
施工环境风险	施工及运营对已有高压杆线的影响、自然灾害、对既有道路的破坏、高压燃气管、未探明管线、邻近既有铁路线施工、占道施工影响交通、污染环境
施工管理风险	高支模工程、预应力施工、工期、组织管理、邻近高压线施工

2.2 结合德尔菲法识别拼宽桥梁施工安全风险指标

2.2.1 构建初始问卷

根据表 1 设计调查问卷, 除风险因素外, 还包括工程项目背景介绍、项目风险介绍、调研目的等, 同时设置专家意见栏, 目的是希望专家提出建设性意见, 进一步完善拼宽桥梁施工安全风险指标体系。选择 118 名调研人员, 包括 32 名市政桥梁工程方面的高级工程师、19 名质监部门及住建部门的工作人员、16 名高校土木工程专业的教授、26 名市政工程建设单位管理人员、13 名拼宽桥梁设计人员、12 名监理工程师。共发放 118 份问卷, 回收 118 份问卷,

问卷回收率 100%, 达到预期回收效果。

2.2.2 检验风险因素的一致性

对专家对决策指标的熟悉程度及判断依据赋予合理系数, 根据专家的判断依据和熟悉程度大小形成权威程度。其中: 熟悉程度包括不熟悉、不太熟悉、一般熟悉、熟悉、很熟悉, 系数分别为 0.0、0.2、0.6、0.8、1.0; 判断依据包括经验类、理论类、了解程度类、直观类, 系数分别为 1.00、0.75、0.50、0.25。权威程度 = (判断依据 + 熟悉程度) / 2。收集各专家的判断依据及熟悉程度, 整理形成专家权威程度检验值, 经两轮检验, 权威程度值均大于 0.7。根据文献[6], 问卷调查权威程度为可接受。

采用肯德尔和谐系数 W 对专家意见一致性进行判断, 其取值为 $[0, 1]$ 。 W 值越大, 数据结果展示的一致性程度越高。 $W=1$, 专家意见完全一致; $W=0$, 专家意见完全不一致。计算公式如下:

$$W = \frac{\sum R_i^2 - (\sum R_i)^2 / N}{1/12 K^2 (N^3 - N)} \quad (2)$$

式中: R_i 为第 i 个评价对象数量之和; N 为评价对象数量; K 为评定人数。

采用 SPSS 软件进行数据处理。两轮的 W 值分别为 0.876、0.896, 较接近, 专家意见的一致性较高。

2.2.3 问卷初次调研

初始问卷调研结果见表 2。

表 2 拼宽桥梁施工安全风险因素初始问卷调研结果

风险因素	专家确认人数占比/%	补充意见
设计合理度	90	
工艺成熟度	100	
桥位特征	90	
拼接规模	80	
与周边建筑物的位置关系	90	可由设计合理度、桥位特征等因素体现
拼装方案	80	和拼接规模重复, 可归一为一个因素
施工及运营对已有高压杆线的影响	90	
自然灾害	40	
对既有道路的破坏	50	
高压燃气管	80	

续表 2

风险因素	专家确认人数占比/%	补充意见
未探明管线	60	
邻近既有铁路线施工	70	
占道施工影响交通	70	
污染环境	50	较笼统,各环节均可能产生污染环境风险
高支模工程	100	
预应力施工	60	
工期	60	
组织管理	40	
邻近高压线施工	60	

根据表 2,19 项风险中,拼装方案风险和拼装规模风险在概念上有重复,用拼装规模可展现拼装方案;与周边建筑物的位置关系可由设计合理度、桥位特征等因素展现;污染环境风险较笼统,各环节均可能产生污染环境风险,不必单独作为一个风险指标。

另外,有 65 位专家建议在一级指标的施工技术风险中增加破坏既有桥梁结构风险,在施工管理风险中增加高空作业风险。拼宽桥梁施工会对既有桥梁产生扰动,可能引起既有桥梁结构破坏。拼宽桥梁施工中,高空作业是经常性的,在施工管理中须重视高空作业的科学管控。

2.2.4 问卷再次调研

以初次问卷调研结果为基础形成二次问卷内容,将二次问卷发放给一次问卷调研中的 93 位专

家,问卷回收率为 100%。调研结果见表 3。

表 3 最终问卷风险因素识别结果

风险分类	风险因素
施工技术风险	破坏既有桥梁结构、设计合理度、工艺成熟度、桥位特征、拼接规模
施工环境风险	施工及运营对已有高压杆线的影响、自然灾害、对既有道路的破坏、高压燃气管、未探明管线、邻近既有铁路线施工、占道施工影响交通
施工管理风险	高支模工程、预应力施工、高空作业、工期、组织管理、邻近高压线施工

根据表 3,拼宽桥梁施工安全风险包括 18 项。

3 案例分析

3.1 工程概况

3.1.1 拼宽桥梁概况

为降低某立体轨道交通道路增设有轨电车对道路通行的影响,对某路段 A 线和 B 线引桥的一侧分别新建一车道拼宽桥梁。拼宽桥梁主梁采用与既有桥梁一致的预应力混凝土梁,桥面宽 4.50 m,梁高 1.40 m。考虑到桥梁宽度较小,整体侧向刚度小,采用连续梁以提高结构体系的整体性。主梁采用单箱单室直腹板截面,翼缘板悬挑长度为 1.00 m,箱梁顶板厚度为 0.25 m,底板厚度为 0.25~0.30 m,腹板厚度为 0.30~0.40 m。拼宽桥梁采用现浇施工。桥墩采用独柱 T 形墩,墩柱截面尺寸为 1.20 m×1.20 m。墩基础采用 1.50 m 桩,设双桩承台,承台尺寸为 4.50 m×2.00 m×1.50 m。A 线拼宽桥梁的结构形式见图 1。

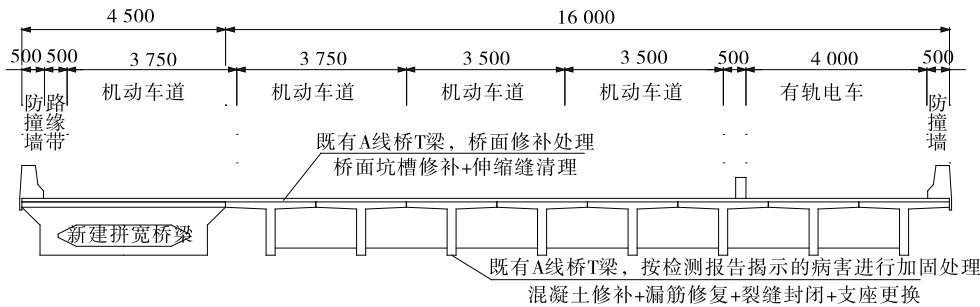


图 1 A 线拼宽桥梁的结构形式(单位:mm)

3.1.2 关键风险描述

(1) 破坏既有桥梁结构。有轨电车占用既有桥梁内侧一条车道,拆除外侧车道的防撞墙并新增拼宽车道,对应机动车道整体外移,拼宽桥梁实施后既

有桥梁承受的荷载发生变化,进而影响既有桥梁结构受力。桥梁拼宽后横向梁数量增加,荷载横向分布系数减小,拼宽桥梁施工对既有桥梁的影响显著。新建拼宽桥梁下部基础施工可能导致较大的基础变

形。拼宽桥梁桩基与既有桥梁桩基之间的距离较小,最小的只有 3.5 m,桩基或承台基坑施工会对自身及周边既有桥梁基础产生影响,如造成周边桥梁桩基变形、下陷等。

(2) 邻近既有铁路线施工。该工程施工涉及横跨铁路的公路桥梁病害处理,病害处理作业区过于靠近既有营运铁路,一旦发生危及火车正常运行的行为,将直接影响铁路运营及人员、设备安全。

(3) 施工及运营对已有高压杆线的影响。拼宽桥梁北段引桥前段的路基中央存在 220 kV 高压输电线路铁塔,拼宽桥梁施工会对既有高压线铁塔结构安全产生影响,导致铁塔基础水平位移和垂直不均匀沉降,造成铁塔顶部发生倾斜或偏移等。

(4) 扰动高压燃气管。北段引桥第一跨地下存在 3 根高压燃气/输油管,既有桥梁为“先桥后管”,实测距离不足 5 m(规范要求桥梁基础距管道净距不得小于 5 m)。拼宽桥梁的建设拉大了第一跨和管线的距离,第二跨跨度相应减小,施工过程中存在破坏既有市政管线的风险。施工现场存在工程车辆及运输车辆,其作业过程对土体产生交通荷载,并间接对管道施加应力,重载车辆碾压路面可能造成管道变形或破坏等。

(5) 占道施工影响交通。拼宽桥梁施工封闭部分车道,造成周边道路交通拥堵,拥堵导致的交通分流也会在一定程度上增加其他相邻路段的交通压力。施工期间,拼宽桥梁核心施工区域的路网服务水平将显著降低。

3.2 拼宽桥梁施工安全风险评价

3.2.1 确定安全风险指标权重

采用层次分析法计算各风险指标的权重,计算结果见表 4,其中综合权重=一级指标权重×二级指标权重。

由表 4 可知:一级指标中,施工环境和施工管理的权重一致,施工技术的权重较小;二级指标中,破坏既有桥梁结构的权重最大,其次是设计合理度、桥位特征、高支模工程、高空作业、占道施工影响交通、施工及运营对已有高压杆线的影响等,这些因素对整个项目施工安全的影响较大。

3.2.2 计算风险指标等级

按照 GB/T 23694—2013《风险管理 术语》^[7]、GB/T 27921—2023《风险管理 风险评估技术》^[8]等规范对风险概率、影响程度、风险等级的划分要

表 4 拼宽桥梁施工安全风险评价指标的权重 w

一级指标	一级指标权重	二级指标	二级指标权重	综合权重
施工技术	0.292	破坏既有桥梁结构	0.241	0.070
		设计合理度	0.225	0.066
		工艺成熟度	0.160	0.047
		桥位特征	0.201	0.059
		拼接规模	0.173	0.051
施工环境	0.354	施工及运营对已有高压杆线的影响	0.189	0.067
		自然灾害	0.091	0.032
		对既有道路的破坏	0.146	0.052
		高压燃气管	0.123	0.044
		未探明管线	0.112	0.040
施工管理	0.354	邻近既有铁路线施工	0.148	0.052
		占道施工影响交通	0.191	0.067
		高支模工程	0.193	0.068
		预应力施工	0.173	0.061
		高空作业	0.193	0.068
		工期	0.136	0.048
		组织管理	0.147	0.052
		邻近高压线施工	0.158	0.056

求计算拼宽桥梁施工安全二级指标的风险发生概率及影响程度,综合确定各风险的加权分值,据此确定风险等级(见表 5)。

表 5 风险等级计算结果

评价指标	加权分值	风险等级
破坏既有桥梁结构	20	5 级
设计合理度	12	4 级
工艺成熟度	12	4 级
桥位特征	12	4 级
拼接规模	12	4 级
施工及运营对已有高压杆线的影响	20	5 级
自然灾害	6	3 级
对既有道路的破坏	12	4 级
高压燃气管	12	5 级
未探明管线	12	4 级
邻近既有铁路线施工	12	4 级
占道施工影响交通	20	5 级

续表 5

评价指标	加权分值	风险等级
高支模工程	16	4 级
预应力施工	16	4 级
高空作业	16	4 级
工期	9	3 级
组织管理	12	4 级
邻近高压线施工	15	4 级

由表 5 可知:破坏既有桥梁结构、施工及运营对已有高压杆线的影响、占道施工影响交通的风险等级最高,为 5 级;达到 4 级风险的风险指标包括高支模工程、预应力施工、高空作业、邻近高压线施工、设计合理度等;自然灾害和工期的风险等级最低。拼宽桥梁施工中,可结合表 7 有针对性地进行风险防范,通过加强现场施工管理、完善技术方案等尽可能地降低风险发生概率及损失程度。

3.2.3 计算隶属度矩阵

风险隶属度矩阵由专家对各风险指标的等级判断统计获得。拼宽桥梁施工安全风险隶属度分为 5 个等级,即高、较高、中等、较低、低。收集专家的打分,形成风险因素等级隶属度矩阵:

$$\begin{aligned}
 R_{D1} &= \begin{bmatrix} 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\
 R_{D2} &= \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.0 \end{bmatrix} \\
 R_{D3} &= \begin{bmatrix} 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3.2.4 风险模糊综合评价

设拼宽桥梁施工风险的一级指标评价向量为 $B_i (i=1,2,3,4,5)$,则有:

$$B_1 = w_1 \times R_1 = (0.22, 0.16, 0.40, 0.12, 0.10)$$

$$B_2 = w_2 \times R_2 = (0.15, 0.25, 0.39, 0.10, 0.11)$$

$$B_3 = w_3 \times R_3 = (0.11, 0.17, 0.36, 0.26, 0.10)$$

式中: w_1, w_2, w_3 分别为施工技术风险、施工环境风险、施工管理风险指标权重集合; R_1, R_2, R_3 分别为 3 个一级指标的隶属度矩阵。

将一级风险指标的评价向量汇总形成拼宽桥梁施工安全的总隶属评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0.22 & 0.16 & 0.40 & 0.12 & 0.10 \\ 0.15 & 0.25 & 0.39 & 0.10 & 0.11 \\ 0.11 & 0.17 & 0.36 & 0.26 & 0.10 \end{bmatrix}$$

拼宽桥梁施工安全风险程度综合评价结果 A 为:

$$A = w \times R = (0.150, 0.155, 0.460, 0.110, 0.035)$$

按照最大隶属度原则,该拼宽桥梁施工整体风险处于中等水平。

4 结论

(1) 一级指标中,施工环境和施工管理的权重一致,施工技术的权重较低。二级指标中,破坏既有桥梁结构的权重最大,其次是设计合理度、桥位特征、高支模工程、高空作业、占道施工影响交通、施工及运营对已有高压杆线的影响等,权重大的风险因素对拼宽桥梁施工安全的影响较大。

(2) 拼宽桥梁施工的整体风险处于中等水平。单项风险指标中,破坏既有桥梁结构、施工及运营对已有高压杆线的影响、占道施工影响交通的风险等级最高,为 5 级;达到 4 级风险的指标包括高支模工程、预应力施工、高空作业、邻近高压线施工、设计合理度等。风险等级较高的因素是施工中应重点监测的指标,施工前应针对这些指标进行风险全过程分析,制定专项施工方案,并加强施工现场管控。

参考文献:

- [1] 洪流,张人文,满先慧,等.基于 WBS-RBS 的桥梁工程施工安全风险评价[J].公路与汽运,2014(3):242-246.
- [2] 王峰.小区市政管线工程业主方风险管理研究[D].北京:清华大学,2014.
- [3] 熊山铭.基于肯特指数法的市政工程安全风险评价[J].交通世界,2017(27):146-147.
- [4] 陈丽萍,夏玲,陈卫平.基于模糊综合分析法的桥承台上部结构施工对桥桩基的安全风险评价[J].公路与汽运,2022(3):170-174.

(下转第 151 页)