

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

陈丽萍, 夏玲, 陈卫平

(湖南华置规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410076)

摘要: 为全面识别桥承台上部结构施工对既有桩基的安全风险因素, 采用文献调研法、德尔菲法进行风险因素二次识别, 从技术层面、组织管理、自然环境三方面建立安全风险指标体系; 建立长沙市先锋路匝道桥承台上部结构施工对桥桩基安全风险模糊综合评价模型, 分析各子风险的等级及整个项目的安全风险定量程度。结果表明, 一级指标中技术层面安全风险权重最大, 其次是组织管理安全风险、自然环境安全风险; 二级指标中桥梁承台与底下桩基位置关系的安全风险权重最大, 其次是施工信息反馈与处理风险; 安全风险因子等级方面, 支护结构、施工方案、桩基沉降或位移、桥梁承台与底下桩基位置关系、桩基安全防护体系、信息反馈与处理风险等级最高, 在施工中需重点关注; 长沙市先锋路匝道桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险为中等水平。

关键词: 工程管理; 桥梁; 承台; 桩基; 安全风险评价; 模糊综合分析法

中图分类号: U415.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0170-05

城市高架桥充分利用城市空间, 与城市隧道形成地下、地上、交叉穿行的空间格局, 成为诸多城市建设首选的交错交通结构。一些城市高架桥的桩基已与城市地铁隧道同时施工完毕, 而桥梁承台上部结构在桥桩施工完成较长时间后才进行, 其施工会对既有桩基安全造成威胁。史增朝等采用危险指数安全评价法建立风险评估模型, 评价了桥梁拆除施工对周边桥梁的影响。关莎莎建立道路下穿某桥梁上部结构的有限元模型, 分析了基坑开挖对桥梁结构变形的影响。国内对后施工影响周边建筑物安全的风险研究起步较晚, 未形成科学、合理的管理体系和风险评价体系, 造成这类工程不能顺利开展, 同时基础数据难以收集, 很难提供对相关建筑物受周边建筑物施工影响的判别依据。该文采用模糊综合分析法, 基于桥承台上部结构施工与既有桩基的位置关系进行桩基安全风险识别和评价。

1 模糊综合分析法简介

采用单因素模糊评价法进行桥承台上部结构施工对既有桥桩基的安全风险评价。计算过程如下:

(1) 建立指标集。建立因素指标集 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$, 确定评价对象。

(2) 计算指标权重。采用层次分析法确定指标权重。

(3) 建立评语集 V 。用 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$ 表示各种可能的评判结果, 它是模糊综合评价向量的一个集合, 用于构建等级隶属度函数。

(4) 建立隶属度 R 。依据指标集、评语集, 邀请专家对评价对象进行打分, 建立各评价对象的模糊关系矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

(5) 计算模糊综合评判集 B 。公式如下:

$$B = AR = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_m) \quad (1)$$

2 安全风险评价体系

2.1 筛选安全风险指标

采用文献调研法, 结合相关项目的风险评估报告, 从技术层面、组织管理、自然环境 3 个方面筛选桥承台上部结构施工对邻近桥桩的安全风险指标 (见表 1)。

2.2 安全风险二次构建

桥承台上部结构施工对邻近桥桩的安全风险包括 3 个部分共 16 项。考虑到承台上部结构施工对既有桩基的位置关系等, 部分风险因素发生概率极低, 或从因素间的相互关系角度来看可对一些风险进行合并或删减。为此, 运用德尔菲法进行风险因

表 1 桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险

| 一级风险 | 二级风险 |
|------|---|
| 技术层面 | 支护结构;桩基自身参数;施工方法;凿除桩头周边环境;桩基沉降或位移;桩基安全监测;桥梁承台与底下桩基的位置关系;桩基安全防护体系;施工工序 |
| | 施工场地布置;信息反馈与处理;施工自然环境应对;人员安排 |
| 组织管理 | 桩基土类别及性质;降雨量;地应力影响系数 |
| 自然环境 | |

素筛选。

2.2.1 构建初始问卷

按表 1 中安全风险指标制作初始调查问卷,考虑到识别的风险因素可能存在不足,在问卷中增加补充意见栏,以获得科学、系统的安全风险指标。同时将项目背景及相关信息作为调查问卷的附件,并对风险内容进行简单描述。

调研专家选择与调研内容相关的研究工作者,

包括 8 名高校老师、4 名政府质量监督管理人员、6 名参与交叉施工管理的建设单位人员、12 名高级工程师。共发放 30 份问卷,回收问卷 30 份,回收率 100%。

2.2.2 风险因素检验

根据风险因素的重要程度、专家对风险因素的熟悉程度、风险因素的判断依据进行风险因素评价。风险重要程度划分为很重要、重要、较重要、一般重要、不太重要、不重要,分别对应 10、8、6、4、2、0 分。风险因素的专家熟悉程度划分为很熟悉、熟悉、较熟悉、一般熟悉、不太熟悉、不熟悉,系数分别为 1.0、0.8、0.6、0.4、0.2、0.0。风险因素的判断依据划分为经验类、理论类、了解程度类、直观类,系数分别为 1.00、0.75、0.50、0.25。

依次进行风险因素重要程度、专家熟悉程度及判断依据判断,确定评价的权威程度和专家意见的一致性,结果见表 2。由表 2 可知:2 轮检验的权威程度值均大于 0.8,根据文献[6],问卷调查的一致

表 2 专家权威程度检验结果

| 指标 | 第 1 轮检验结果 | | | 第 2 轮检验结果 | | |
|------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | 判断依据 | 熟悉程度 | 权威程度 | 判断依据 | 熟悉程度 | 权威程度 |
| 技术层面 | 0.839 | 0.896 | 0.862 | 0.882 | 0.898 | 0.887 |
| 组织管理 | 0.866 | 0.875 | 0.865 | 0.867 | 0.937 | 0.912 |
| 自然环境 | 0.853 | 0.881 | 0.863 | 0.889 | 0.932 | 0.913 |
| 均值 | 0.853 | 0.884 | 0.863 | 0.879 | 0.922 | 0.904 |

性为可接受水平,问卷调研数据可靠。

结合肯德尔和谐系数 W 进一步确定调研专家意见的一致性,计算公式如下:

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

式中: R_i 为第 i 个被评安全风险因素数量之和; N 为被评定的安全风险数量; K 为问卷调研专家人数。

W 值为 $[0,1]$,其值越大,安全风险确认的一致性程度越高, $W=1$ 时安全风险因素评价结果为完全一致, $W=0$ 时安全风险因素评价结果为完全不一致。

采用 SPSS 软件进行处理,得第 1 轮、第 2 轮的 W 值分别为 0.878、0.872,2 轮 W 值较接近,表明调研专家意见较一致。

2.2.3 问卷初次调研

对收集的初始问卷调研结果进行统计,结果见

表 3。

表 3 桥承台上部结构施工对桥桩安全风险因素的初步调查结果

| 初次风险因素 | 调研专家人数比/% | 补充意见 |
|----------------|-----------|--------------|
| 支护结构 | 90 | |
| 桩基自身参数 | 80 | |
| 施工方法 | 80 | |
| 凿除桩头周边环境 | 90 | 与施工自然环境应对合并 |
| 桩基沉降或位移 | 80 | |
| 桩基安全监测 | 70 | 可并入桩基沉降或位移 |
| 桥梁承台与底下桩基的位置关系 | 100 | |
| 桩基安全防护体系 | 60 | |
| 施工工序 | 70 | 与施工方法合并为施工方案 |
| 施工场地布置 | 60 | |

续表 3

| 初次风险因素 | 调研专家人数比/% | 补充意见 |
|----------|-----------|----------|
| 信息反馈与处理 | 70 | |
| 施工自然环境应对 | 70 | |
| 人员安排 | 70 | 并入其他组织管理 |
| 桩基土类别及性质 | 80 | |
| 降雨量 | 60 | |
| 地应力影响系数 | 20 | 可忽略 |

由表 3 可知:根据专家意见,16 项风险中的 5 项可缩减,包括 4 项可与其他风险合并的风险、1 项可忽略的风险。另外,部分专家认为凿除桩头深度过大可能引起桩基不稳定,应增加“凿除桩头深度”。

2.2.4 问卷再次调研

按初始问卷调研结果制作二次调查问卷再次进行调研,收集专家意见,删除专家认可比例低的风险因素,最终确定的风险因素见表 4。

表 4 最终风险因素识别结果

| 一级风险 | 二级风险 |
|------|---|
| 技术层面 | 支护结构;桩基自身参数;施工方案;凿除桩头深度;桩基沉降或位移;桥梁承台与底下桩基的位置关系;桩基安全防护体系 |
| 组织管理 | 施工场地布置;信息反馈与处理;施工自然环境应对 |
| 自然环境 | 隧道与桩基土类别及性质;降雨量 |

3 案例分析

3.1 工程概况

长沙市先锋路匝道桥西起高升路,东至洞和路,与长株潭城际铁路相邻。图 1 为先锋路匝道桥平面图。

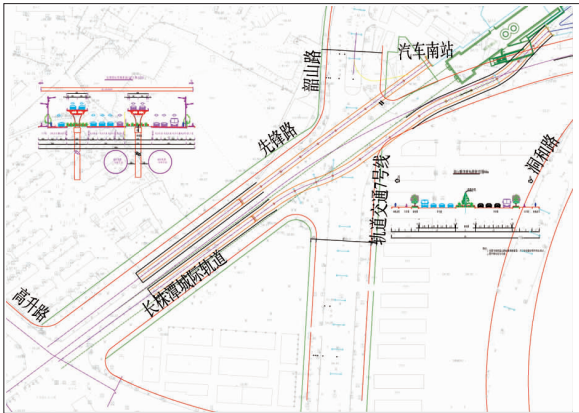


图 1 先锋路南、北匝道桥平面图

该匝道桥沿线基岩为白垩系泥质粉砂岩,为极软岩,水理性质差,且存在不均匀风化。桥的桩基和城际铁路隧道均已完成建设,即将进行桥承台上部结构施工。桥承台上部结构体积大,施工要求高,尤其是在施工前需破除部分桩头,破除时开挖深度最大处超过 4 m。考虑到破除桩头及承台上部结构施工可能对已有桩基及周边隧道造成影响,施工前应对周边隧道及桥梁桩基的安全性进行分析,识别、评价相关风险。

3.2 桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险评价

3.2.1 确定安全风险指标权重

采用层次分析法确定一级指标、二级指标的权重,一级指标权重乘以二级指标权重即为综合权重(见表 5)。

表 5 安全风险指标的权重

| 一级指标 | 一级指标权重 | 二级指标 | 二级指标权重 | 综合权重 |
|------|--------|----------------|--------|-------|
| 技术层面 | 0.6 | 支护结构 | 0.101 | 0.061 |
| | | 桩基自身参数 | 0.080 | 0.048 |
| | | 施工方案 | 0.133 | 0.080 |
| | | 凿除桩头深度 | 0.176 | 0.105 |
| | | 桩基沉降或位移 | 0.180 | 0.108 |
| | | 桥梁承台与底下桩基的位置关系 | 0.220 | 0.132 |
| 组织管理 | 0.3 | 桩基安全防护体系 | 0.110 | 0.066 |
| | | 施工场地布置 | 0.269 | 0.081 |
| | | 信息反馈与处理 | 0.374 | 0.112 |
| | | 施工自然环境应对 | 0.357 | 0.107 |
| 自然环境 | 0.1 | 桩基土类别及性质 | 0.600 | 0.060 |
| | | 降雨量 | 0.400 | 0.040 |

由表 5 可知:1) 一级指标中,技术层面安全风险的权重最大,其次是组织管理安全风险、自然环境安全风险。2) 二级指标中,桥梁承台与底下桩基的位置关系安全风险的综合权重最大,其次是施工信息反馈与处理风险,桩基沉降与位移、施工自然环境应对、凿除桩头深度等安全风险的权重也较大。这些风险因素对项目风险的影响最大,是需重点关注的风险因素。

3.2.2 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,风险隶属度打分分为高、较高、中等、较低、低 5 个等级。收集专家的打分情况,形成风险因素的影响等级隶属度矩阵:

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

同理,构建风险因素的概率矩阵,考虑篇幅,不再列出。

3.2.3 计算风险指标等级

根据 GB/T 23694—2013《风险管理 术语》、GB/T 27921—2011《风险管理 风险评估技术》等规范对风险等级的划分原则确定安全风险发生概率及等级分值范围(见表 6)。

表 6 桥承台上部结构施工对桥桩安全风险的概率及影响等级

| 指标 | 风险概率 | | 风险影响程度 | |
|----------------|---------|----|--------|----|
| | 概率/% | 分值 | 影响程度 | 分值 |
| 支护结构 | (40,60] | 3 | 较高 | 4 |
| 桩基自身参数 | (20,40] | 2 | 低 | 2 |
| 施工方案 | (40,60] | 3 | 较高 | 4 |
| 凿除桩头深度 | (40,60] | 3 | 中等 | 3 |
| 桩基沉降或位移 | (40,60] | 3 | 较高 | 4 |
| 桥梁承台与底下桩基的位置关系 | (60,80] | 4 | 较高 | 4 |
| 桩基安全防护体系 | (40,60] | 3 | 较高 | 4 |
| 施工场地布置 | (40,60] | 3 | 中等 | 3 |
| 信息反馈与处理 | (60,80] | 4 | 较高 | 4 |
| 施工自然环境应对 | (40,60] | 3 | 低 | 2 |
| 隧道与桩基土类别及性质 | (20,40] | 2 | 低 | 2 |
| 降雨量 | (0,20] | 1 | 中等 | 3 |

由表 6 可知:12 项安全风险中,风险发生概率较大的有桥梁承台与底下桩基的位置关系、信息反馈与处理(现场未建立信息化的反馈制度);风险影响等级较高的有支护结构、施工方案、桩基沉降或位移、桥梁承台与底下桩基的位置关系、桩基安全防护体系、信息反馈与处理;其余安全风险因素的发生概率及影响等级均不高。

对风险发生概率及风险影响程度进行权重相

乘,得到加权值(见表 7)。

表 7 风险等级计算结果

| 指标 | 加权分值 | 风险等级 |
|----------------|------|------|
| 支护结构 | 12 | 4 级 |
| 桩基自身参数 | 4 | 2 级 |
| 施工方案 | 12 | 4 级 |
| 凿除桩头深度 | 9 | 3 级 |
| 桩基沉降或位移 | 12 | 4 级 |
| 桥梁承台与底下桩基的位置关系 | 16 | 4 级 |
| 桩基安全防护体系 | 12 | 4 级 |
| 施工场地布置 | 9 | 3 级 |
| 信息反馈与处理 | 16 | 4 级 |
| 施工自然环境应对 | 6 | 2 级 |
| 隧道与桩基土类别及性质 | 4 | 2 级 |
| 降雨量 | 3 | 2 级 |

由表 7 可知:无风险等级为 5 级的风险因素,说明桥承台上部结构施工对桥桩的安全影响并未达到最严重状态;达到 4 级的安全风险因素较多,共 6 项,分别为支护结构、施工方案、桩基沉降或位移、桥梁承台与底下桩基的位置关系、桩基安全防护体系、信息反馈与处理,这些是桥承台施工中需重点考虑的安全风险因素;达到 3 级的风险因素有 2 项,风险等级为 2 级的安全风险因素有 4 项,没有 1 级等级的安全风险因素。舍弃对安全风险影响较小的风险因素,安全风险指标选择符合项目施工的监测需求。

3.2.4 风险模糊综合评价

设评价向量为 $B_i (i=1,2,3)$,则有:

$$B_1 = w_1 R_1 = (0.22, 0.12, 0.40, 0.15, 0.11)$$

$$B_2 = w_2 R_2 = (0.13, 0.15, 0.32, 0.23, 0.18)$$

$$B_3 = w_3 R_3 = (0.14, 0.14, 0.22, 0.30, 0.20)$$

将以上计算向量合并形成总的隶属度评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0.22 & 0.12 & 0.40 & 0.15 & 0.11 \\ 0.13 & 0.15 & 0.32 & 0.23 & 0.18 \\ 0.14 & 0.14 & 0.22 & 0.30 & 0.20 \end{bmatrix}$$

设综合权重为 w ,评语集 B_i 的综合权重为:

$$w = (0.6, 0.3, 0.1)$$

桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险综合评价向量 A 为:

$$A = wR = (0.120, 0.174, 0.450, 0.140, 0.125)$$

评语集 $V=(高,较高,中等,较低,低)$,评价向量 A 中的最大值为 0.45,对应评语集中的中等,桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险为中等水平。

4 结论

(1) 桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险主要包括技术层面、组织管理、自然环境三方面,共有 12 项子风险。

(2) 一级指标风险中,技术层面安全风险权重最大,其次是组织管理安全风险、自然环境安全风险。二级指标中,桥梁承台与底下桩基的位置关系安全风险的权重最大,其次是施工信息反馈与处理风险,桩基沉降与位移风险、施工自然环境应对、凿除桩头深度等安全风险的权重也较大,这些风险因素对项目风险程度的影响最大,是需重点关注的风险因素。

(3) 12 项安全风险中,风险发生概率较大的有桥梁承台与底下桩基的位置关系、信息反馈与处理;风险影响等级较高的有支护结构、施工方案、桩基沉降或位移、桥梁承台与底下桩基的位置关系、桩基安全防护体系、信息反馈与处理,这些是施工中需重点关注的安全风险因素;其余安全风险因素发生概率及影响等级均不高。

(4) 桥承台上部结构施工对桥桩的安全风险处

于中等水平。

参考文献:

- [1] 周乐平,陈俊波,姚进,等.新建桥梁施工对既有高速铁路桥梁的影响[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):83—88.
- [2] 王世清,林森斌.某深基坑工程邻近桥梁桩基施工影响分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(增刊 2):94—98+104.
- [3] 史增朝,孙智峰,李鑫.双曲拱桥拆除对邻近桥梁安全风险影响评估[J].四川理工学院学报(自然科学版),2013,26(1):60—63.
- [4] 关莎莎.新建道路开挖对邻近高铁桥梁施工及运营的影响分析[J].中外建筑,2019(5):244—246.
- [5] 姚鸟儿.初创科技型企业融资能力评价指标体系构建研究:基于模糊综合评价模型的分析[J].价格理论与实践,2020(12):135—138+164.
- [6] 沈婕,马凯悦,丁小彬,等.基于层次分析法的异形结构清水混凝土模板选型研究[J].土木建筑工程信息技术,2021(4):155—162.

收稿日期:2021—11—16

(上接第 169 页)



图 5 桥梁决策评估体系

4 结语

以王家河特大桥工程为依托,将 BIM 技术引入多塔斜拉桥运营管养领域,以 IDEA 为开发平台,选取 Java 为底层开发语言,结合 Javascript 等网页开发语言实现基于 B/S 架构的王家河特大桥管养一体化平台搭建。利用 Autodesk 官方提供的 Forge 技术实现 BIM 模型的轻量化,借助 View3D.js 和 Three.js 等脚本对其进行高质量渲染和可视化。基于轻量化 BIM 模型的管养信息化系统,不仅可在线录入、编辑桥梁检查信息和监控信息,还能结合桥梁构件病害数据库对不同在役状态桥梁制订详细的交

通资产管理方案。

参考文献:

- [1] 裴岷山,陈艾荣.桥梁管养信息化的发展与展望[J].公路,2019(10):209—215.
- [2] YABUKI N,LEBEGUE E,GUAL J,et al.International collaboration for developing the bridge product model "IFC-Bridge" [C]//Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering.Montreal,Canada,2006:1927—1936.
- [3] 沈海华,王银辉.基于 BIM 的桥梁养护管理应用初探[J].公路与汽运,2016(4):280—283.
- [4] 胡娟,刘海龙,汪涛.基于 BIM 的短线预制箱梁桥设计与线形控制[J].广东建材,2021,37(3):42—45+68.
- [5] 梁才.Bentley 数字孪生技术在公路品质工程建设中的应用[J].中国交通信息化,2020(6):121—124.
- [6] 姜玉龙,夏远靖,贺波.基于 GIS 的 BIM 轻量化技术在桥梁工程中应用研究[J].公路,2020(1):123—127.
- [7] 高静,段会川.JSON 数据传输效率研究[J].计算机工程与设计,2011,32(7):2267—2270.
- [8] 冯姣,刘志勤,黄俊,等.基于 Three.js 的飞行仿真系统设计[J].计算机测量与控制,2020,28(2):216—219.

收稿日期:2021—10—09