

基于模糊层次分析法的建筑物整体平移 施工风险评估

陈大川¹, 王 孜¹, 郭 健²

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学设计研究院有限公司, 湖南, 长沙 410006)

摘 要 目的 研究建筑物整体平移施工风险评估体系, 以此对平移施工风险进行有效的评估和控制. 方法 通过识别影响平移施工安全性的各种因素, 构建多层次建筑物整体平移施工风险评价指标体系. 结合模糊层次分析法和模糊综合评判法的优点, 建立风险评估模型, 以此估计风险概率和风险损失; 引入风险损失修正参数, 对风险损失等级进行修正, 并通过风险矩阵结合修正后风险损失等级和风险概率等级评价建筑物整体平移施工风险; 最后通过工程实例进行验证. 结果 利用该风险评估体系对湘江宾馆中栋整体平移施工风险进行评价, 获得施工风险等级为Ⅲ级, 根据风险控制准则, 必须采取有效的处理措施降低风险等级. 该风险评估结果与工程实际基本符合. 结论 建立的风险评估体系具有可操作性, 能有效评估建筑物整体平移施工风险.

关键词 模糊层次分析法; 模糊综合评价法; 整体平移; 风险识别; 风险评估

中图分类号 TU714

文献标志码 A

Risk Assessment of Integral Building Translation Construction Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process

CHEN Dachuan¹, WANG Zi¹, GUO Jian²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, China, 410082; 2. Hunan University Design Co. Ltd., Changsha, China, 410006)

Abstract: The overall translational construction risk assessment system of buildings was studied to effectively evaluate and control the translational construction risks. First, a multilayer evaluation index system of the integral building translation construction was proposed by identifying various factors affecting the reliability of translational construction. Then, combining the advantages of fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method, the FAHP-FCE method was presented for evaluating the risk probability and risk loss. Finally, the risk loss correction parameter is introduced to modify risk loss grade, and risk matrix combined with modified risk loss grade and risk probability grade is used to evaluate the integral building

收稿日期: 2019-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778067); 国家重点研发计划(2016YFC0701308)

作者简介: 陈大川(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构加固改造理论与技术、施工技术及工程项目管理方面研究.

translation construction risk. As an example of engineering application, the construction risk level of the overall translation engineering was assessed by using the proposed construction risk assessment system. The result shows that the risk level of the overall translation construction of Xiangjiang Hotel main building is Grade III, so effective treatment measures must be taken to reduce it. The results of evaluation are basically consistent with the actual project. All in all, the risk assessment system established in this paper is operational and can effectively assess to the overall translation engineering.

Key words: fuzzy analytical hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; monolithic movement; risk identification; risk evaluation

随着我国城镇化进程不断的推进,城市规划、旧城改造以及道路拓宽与一些既有建筑的矛盾加剧。大量使用状况良好的建筑因此被拆除,造成了巨大的资源浪费和经济损失,特别是具有文物价值的历史建筑拆除所造成的损失更加难以弥补。建筑物整体平移技术的出现能有效地解决这些问题,带来显著的经济、环境效益以及社会效益。但由于建筑物平移技术的特殊性,平移工程本身存在一定的风险,同时随着建筑物平移技术的推广,平移工程的规模越来越大,事故发生概率和损失也随之增大,这对建筑物平移的可靠性提出了巨大的挑战。因此,为保障平移施工过程的安全、可靠,对建筑物整体平移施工风险进行有效的评估和控制十分重要。徐章雄^[1]、李国雄^[2]、吴二军^[3]等针对整体移位工程的质量和安全性,介绍了相关移位技术在工程实践中的应用。周广东等^[4]对建筑物平移施工全过程进行实时监测分析,确保平移施工过程的安全和评价建筑物平移就位后结构状态。仇圣华等^[5]建立了建筑物整体移位托换体系模拟计算模型,预测整体移位托换体系的变形及千斤顶的受力状况。杜永峰等^[6]结合相关工程实例,对建筑带基础整体移位的过程进行模拟,分析结构的受力状态,为工程施工提供参考。吴二军等^[7]对建筑物整体平移4个阶段运用基于可靠性的风险评估方法,确定建筑物整体平移工程的风险水平。梁峰等^[8]介绍和分析了建筑物移位技术所涉及的结构安全问题,并提出了相应的解

决措施。郑东强等^[9]对建筑物移位工程的位移控制临界值进行分析,为安全经济地将建筑物移位到位提供依据。商冬凡等^[10]通过对移位工程沉降控制进行优化设计,确保建筑安全的同时,并获得了良好的经济效益。但利用风险管理理论对平移施工风险进行评估与控制的研究很少。笔者针对建筑物整体平移施工风险,考虑风险概率和风险损失的影响,建立包括风险识别、估计、评价以及控制4个阶段的建筑物整体平移施工风险评估体系。通过识别影响平移施工安全性的各种因素,构建多层次的建筑物整体平移施工风险指标体系;结合模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)^[11]与模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)^[12]的优点,建立评估模型,计算风险概率和风险损失综合评价价值,评价建筑物整体平移施工风险,并提出风险控制准则。

1 风险指标体系的构建

构建科学合理的风险指标体系是有效评估建筑物整体平移施工风险的基础。笔者分析总结了平移施工各阶段中影响平移安全性的因素,依据指标体系构建的原则^[13],从结构加固、托换结构及轨道梁施工、切割分离、迁移、就位连接5个方面建立三级平移施工风险评价指标体系(见图1)。

(1) 结构加固。建筑物整体平移前的结构现状对平移工程有着较大的影响,当原结构刚度较低、整体性和稳定性差,迁移过程可

能造成构件或结构破坏,因此平移前应对建筑物进行加固处理,保障平移过程建筑物的安全.由于加固处理效果将直接影响平移工程的可靠性,因此结构加固阶段的风险因素主要考虑加固后建筑物的刚度、整体性和稳定性是否满足加固设计要求.结构加固的风险因素包括:建筑物刚度、建筑物整体性和建筑物稳定性.

生的振动以及对相邻部位的损伤会影响结构的可靠性,同时上部荷载转移过程可能造成托换结构开裂和轨道梁沉降.其风险因素包括:振动过大、相邻部位损伤、托换结构开裂、轨道梁沉降.

(4) 迁移. 迁移是建筑整体平移工程中最关键和最危险的阶段,也是风险事件集中发生的阶段. 迁移过程中首推力过大、振动加速度过大、移位不同步、不均匀沉降、滚轴压坏以及反力支座失稳等影响平移的稳定性和安全性,严重时甚至导致结构严重破坏,使得平移失败. 迁移阶段风险因素包括:首次顶推力过大、振动加速度过大、位移不同步、轨道梁差异沉降、轨道梁开裂破坏、托换结构变形开裂、反力支座失稳、风荷载过大、牵引移动装置故障.

(5) 就位连接. 建筑迁移到位后,上部荷载由轨道梁转移到新基础上,当新基础产生不均匀沉降的高低位置与原沉降相近时,则会对建筑物的结构安全产生较大的影响. 就位连接阶段风险因素为:新基础不均匀沉降.

2 综合评价模型的建立

风险评估模型如图 2 所示.

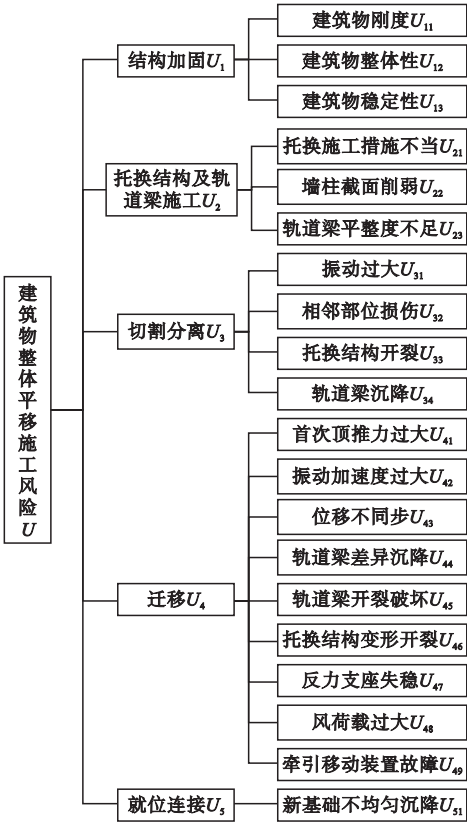


图 1 评价指标体系
Fig. 1 Evaluation index system

(2) 托换结构及轨道梁施工. 托换结构和轨道梁施工主要从 3 个方面影响平移工程的安全和稳定. ①施工措施不当,使结构存在安全隐患. ②墙、柱截面削弱使承载力降低. ③轨道梁施工质量问题. 该阶段风险因素包括:托换施工措施不当、墙柱截面削弱、轨道梁平整度不足.

(3) 切割分离. 切割分离是将建筑物的上部结构与原基础进行分离,上部荷载通过托换结构转移到轨道梁上. 切割过程可能产

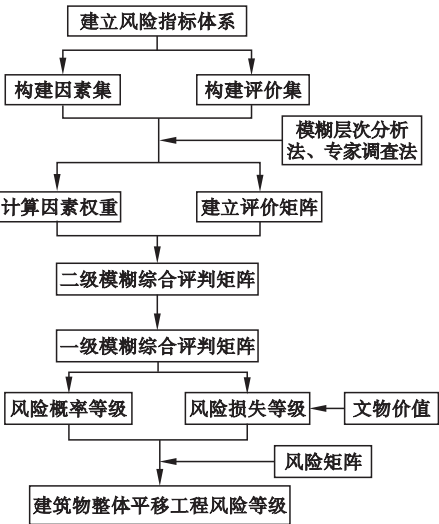


图 2 建筑物整体平移施工风险评估模型
Fig. 2 Risk assessment model of integral buildings translation construction

模糊层次分析法将模糊数学与层次分析法相结合,解决了层次分析法中判断矩阵一致性检验困难,且与人类思维的一致性差异较大等问题,使判断矩阵一致性检验更科学、准确和简便^[11]. 笔者在模糊层次分析法计算因素权重的基础上,考虑因素指标的不确定性和模糊性,运用模糊综合评判法对建筑物整体平移施工进行综合评判,计算风险概率和风险损失综合评价值,并通过风险矩阵确定风险等级.

2.1 建立因素集

根据建筑物整体平移施工风险评价指标体系,建立两级因素集. 设第一级因素集用 U 表示,因素集 U 中的子因素为 $U_i (i = 1, 2, \cdots, m)$, 则一级因素集表示为 $U = (U_1, U_2, \cdots, U_m)$; U 中每个子因素 U_i 中包含 n 个风险因素,由 $U_{ij} (j = 1, 2, \cdots, n)$ 表示则二级因素集. 文中一级因素集 $U = (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5)$, 即 $U = (\text{结构加固, 托换结构及轨道梁施工, 切割分离, 迁移, 就位连接})$; 文中二级风险因素集 $U_1 = (U_{11}, U_{12}, U_{13})$, 即 $U_1 = (\text{建筑物刚度, 建筑物整体性, 建筑物稳定性})$.

2.2 建立评语集

评语集是对评判对象可能做出的各种评判结果的集合. 平移施工风险概率和风险损失评语集分别用 $V = (V_1, V_2, \cdots, V_k)$ 和 $V' = (V'_1, V'_2, \cdots, V'_k)$ 表示,其中 V_k 为风险概率等级, V'_k 为风险损失等级.

参考铁路建设工程风险管理对于风险概率等级的划分标准^[14],并结合建筑物整体平移相关资料,将风险概率分为 5 个等级,即 $V = (\text{极不可能, 不可能, 偶尔, 可能, 很可能})$. 分险概率等级标准如表 1 所示.

风险损失等级划分主要考虑结构破坏以及经济损失两方面,根据《危险房屋鉴定标准》[GJG125—2016]及参考文献[15],将风险损失划分为 5 个等级,即 $V' = (\text{轻微, 一般, 中度, 重大, 特别重大})$. 风险损失等级划分标准如表 2 所示.

表 1 风险概率等级标准

Table 1 Risk probability evaluation criteria		
V_k	评分	等级
极不可能	0 ~ 2	I 级
不可能	2 ~ 4	II 级
偶尔	4 ~ 6	III 级
可能	6 ~ 8	IV 级
很可能	8 ~ 10	V 级

表 2 风险损失等级标准

Table 2 Risk loss evaluation criteria			
V'_k	评分	等级	描述
轻微	0 ~ 2	I 级	个别构件轻微破损,结构满足安全使用要求,对平移施工无影响;财产损失 3 万元以下
一般	2 ~ 4	II 级	存在个别一般构件为危险构件,不影响主体结构安全,对平移施工存在轻微影响;财产损失 3 ~ 30 万元
中度	4 ~ 6	III 级	存在个别重要构件为危险构件,影响主体结构安全,对平移施工存在较重影响;财产损失 30 ~ 300 万元
重大	6 ~ 8	IV 级	部分承重结构不满足安全使用要求,建筑物局部处于危险状态,对平移施工存在严重影响;财产损失 300 ~ 3000 万元
特别重大	8 ~ 10	V 级	承重结构不满足安全使用要求,建筑物整体处于危险状态,平移施工无法进行;财产损失 3000 万元以上

2.3 确定因素权重

由于每个指标因素对目标评价结果的影响程度不同,需对每个因素赋予不同的权重. 权重值对目标的综合评价至关重要,为使因素权重更客观、科学,笔者采用模糊层次分析法计算各级因素权重.

2.3.1 构造模糊互补判断矩阵

模糊互补判断矩阵表示各级不同因素之间两两比较的重要程度. 笔者采用专家调查法,结合 0.1 ~ 0.9 标度法^[16](见表 3),构造各级因素集的模糊互补判断矩阵. 如平移施工二级风险因素集 U_i 的模糊互补判断矩阵

为 a .

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}.$$

(1)

式中: a_{ij} ($i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, n$) 根据 0.1~0.9 标度法取值,表示因素 U_{hi} 相对于因素 U_{hj} 的重要程度 ($h = 1, 2, \cdots, m$).

表 3 0.1~0.9 标度

Table 3 The number of 0.1~0.9 scale

标度	比较	定义
0.5	同等重要	两个因素相比,具有相同重要性
0.6	稍微重要	两个因素相比,一因素比另一因素稍微重要
0.7	明显重要	两个因素相比,一因素比另一因素明显重要
0.8	重要得多	两个因素相比,一因素比另一因素重要得多
0.9	极端重要	两个因素相比,一因素比另一因素极端重要
0.1,0.2, 0.3,0.4	反比较	若因素 U_{hi} 与因素 U_{hj} 相比较得到判断 a_{ij} ,则元素 U_{hj} 与元素 U_{hi} 相比较得到的判断为 $a_{ji} = 1 - a_{ij}$

2.3.2 构造模糊一致判断矩阵

模糊一致判断矩阵具有良好的鲁棒性和中分传递性,利用模糊一致判断矩阵可以避免由于判断的主观性带来的一致性检验. 由判断矩阵 a 可得到符合人类思维一致性的模糊一致判断矩阵 $A = (A_{ij})_{n \times n}$ ^[17].

$$A_i = \sum_k^n a_{ik}, i = 1, 2, \cdots, n,$$

(2)

$$A_{ij} = \frac{A_i - A_j}{2(n - 1)} + 0.5.$$

(3)

2.3.3 计算权重

模糊一致矩阵排序的方法主要有方根法、按行求和归一化法及基于一致矩阵元素与权重关系求排序的方法^[18-19]. 笔者采用考虑标度的基于模糊一致矩阵元素与权重关系求排序的方法计算权重,由此得二级因素集 U_i 的权重集 $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in})$.

$$w_{ij} = \frac{1}{n} - \frac{n}{4\alpha(n - 1)} + \frac{1}{2\alpha(n - 1)} \sum_{k=1}^n A_{jk}.$$

(4)

式中: $j = 1, 2, \cdots, n$, 变量参数 $\alpha \geq 2(n - 1)/5$, 为保证因素相对重要程度的权重值之间的差异性,参数 α 取最小值.

一级因素集 U 的权重集 W 可通过同样的方法求得.

2.4 建立评判矩阵

评判矩阵表示因素集与评语集之间的关系. 建筑物整体平移施工评价指标难以量化,因素对评语 V_k 和 V'_k 的隶属度可由专家调查法得到. 各因素集的评判矩阵 R 由因素集中单因素评价结果 r_i 按行排列组合而成.

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \cdots, r_{ik}),$$

(5)

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nk} \end{bmatrix}.$$

(6)

式中: r_{ij} ($i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, k$) 表示因素集中第 i 个因素对评语集中第 j 评价等级的隶属度.

2.5 多级模糊综合评判

建筑物整体平移施工风险因素分为两级,需进行多级模糊综合评判,计算过程为:根据已求得的二级因素集的权重以及评判矩阵,对每一类因素进行综合评判,并将评判结果作为上一级单因素评判结果,再结合因素权重对一级因素集进行综合评判,获得目标指标综合评判结果.

(1) 二级模糊综合评判:运用模糊算子对因素权重 W_i 和相应的评判矩阵 R_i 进行模糊变换,获得综合评判结果 B_i ,并将 B_i 作为上一级单因素评判结果.

$$B_i = W_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \cdots, b_{ik}) =$$

$$(w_{i1}, w_{i2}, \cdots, w_{in}) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nk} \end{bmatrix},$$

$i = 1, 2, \cdots, m$. (7)

式中:“ \circ ”表示 $M(+, \cdot)$ 算子; $M(+, \cdot)$ 为加权平均模型.

该模型充分利用了因素权重以及单因素评判的全部信息使评判结果更加合理. 加权平均模型为

$$b_{ie} = \sum_{j=1}^n w_{ij} r_{je}, e = 1, 2, \cdots, k. \quad (8)$$

(2)一级模糊综合评判:一级模糊综合评判结果 B 是在二级综合评判结果 B_i 的基础上,利用因素权重 W ,通过模糊运算获得.

$$B = W \circ R = (w_1, w_2, \cdots, w_m) \circ \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \cdots, b_k). \quad (9)$$

(3)模糊综合评价:通过加权平均法,计算平移施工风险的综合评价值,将评价结果量化.按照评价等级划分标准,对风险概率评语集 V 中的元素 V_k 进行赋值,评语 V_k 数值取自划分区间的中间值,获得评分集 $L = (1, 3, 5, 7, 9)$. 风险损失评语集中的元素 V'_k 采用相同的赋值方法. 平移施工风险综合评价值 G 为

$$G = B \times L^T = (b_1, b_2, \cdots, b_k) \times (l_1, l_2, \cdots, l_k)^T. \quad (10)$$

3 风险等级评定与控制

3.1 风险损失等级修正

建筑类不可移动文物存在年限久远,结构的安全性能较差,平移需考虑的因素多,与一般建筑相比,其平移施工风险较高,特别是建筑类不可移动文物承载着历史、艺术、科学价值,其损伤所带来的损失更高,更难以估计.为使风险评价更加严谨、全面,考虑建筑的历史、艺术、科学价值对风险损失的影响,笔者参考《中华人民共和国文物保护法》对建筑类不可移动文物保护单位等级的划分,引入文物价值修正因子,对建筑物整体平移

施工风险损失等级进行修正.修正思路为:根据不同保护单位等级建筑所具有的历史、艺术、科学价值的高低,对风险损失等级进行修正.对于一般建筑及一般不可移动文物,其风险损失等级维持原有等级;已核定为文物保护单位的建筑类不可移动文物,其风险损失等级根据其保护单位等级的高低,对风险损失等级进行不同程度的调整.如市、县级文物保护单位的建筑类不可移动文物平移施工风险损失等级调高1级.具体修正因素等级划分及处理如表4所示.

表 4 风险损失等级修正
Table 4 Risk loss level correction

因子等级	处理方法
一般建筑、一般不可移动文物	维持原有等级
市、县级文物保护单位	调高1个风险损失等级
省级文物保护单位	调高2个风险损失等级
国家重点文物保护单位	风险损失等级直接判别为V级

3.2 风险等级评定

风险等级评定是在估计风险概率和风险损失的基础上,按照一定的方法和标准确定目标风险等级. 平移施工风险等级评定是根据已获得的风险概率评价值 Gp 和风险损失评价值 Gc ,依照风险概率和损失等级划分标准,初步评定风险概率和损失等级,再通过修正因子对风险损失等级进行调整,最后利用风险矩阵确定平移施工风险等级,并对不同风险等级提出相应的风险控制准则. 风险评判矩阵及风险控制准则如表5、表6所示.

表 5 风险等级评判矩阵
Table 5 Risk level evaluation matrix

风险概率等级	风险损失等级				
	I级	II级	III级	IV级	V级
I级	I	I	II	II	III
II级	I	II	II	III	III
III级	I	II	III	III	IV
IV级	II	III	III	IV	IV
V级	III	III	IV	IV	IV

表 6 风险控制准则

Table 6 Risk control principle		
风险等级 接受准则		控制准则
Ⅰ级	接受	低风险,可不采取风险控制措施,但仍需关注防止风险等级
Ⅱ级	可接受	中风险,应采取适当的处理措施,并进行风险监控
Ⅲ级	不期望	高风险,必须采取有效的处理措施,降低风险等级,加强风险监控
		极高风险,必须高度重视并规避,否则要
Ⅳ级	不可接受	不惜代价将风险至少降低到不期望水平

4 工程案例

4.1 工程概况

湘江宾馆中栋总长为 66.37 m,总宽为 16 m,其建筑面积为 6 564.8 m²,总重量约为 5 000 t,2010 年评为一般不可移动文物.该建筑物为砖混结构,局部区域为砖柱框架结构,设有少量构造柱,未设置圈梁.湘江宾馆中栋由于其重量大、整体性差,笔者对湘江宾馆中栋平移工程进行风险进行评估.

4.2 确定因素权重

由专家调查法得到模糊互补判断矩阵,然后根据式(1)~式(4)计算各因素权重.

$$a_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

一级因素集 U 和二级因素集 U_i 中各因素权重见表 7.

表 7 二级风险因素权重

Table 7 Weigh of secondary risk factor	
名称	权重
结构加固 U_1	0.190 2
托换结构及轨道梁施工 U_2	0.180 5
切割分离 U_3	0.200 0
迁移 U_4	0.258 6
就位连接 U_5	0.170 7

4.3 建立评价矩阵

根据专家对单因素的评价的结果,获得二级因素集的评判矩阵.单因素风险概率评价结果如表 8 所示.

表 8 单因素风险概率评价结果

Table 8 Single factor risk probability evaluation results					
因素	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
U_{11}	0.20	0.50	0.15	0.10	0.05
U_{12}	0.13	0.34	0.17	0.25	0.11
U_{13}	0.20	0.29	0.18	0.19	0.14
U_{21}	0.28	0.46	0.16	0.06	0.04
U_{22}	0.11	0.15	0.43	0.18	0.13
U_{23}	0.05	0.09	0.13	0.16	0.57
U_{31}	0.26	0.29	0.21	0.16	0.08
U_{32}	0.22	0.44	0.17	0.13	0.04
U_{33}	0.34	0.21	0.19	0.17	0.09
U_{34}	0.21	0.27	0.32	0.12	0.08
U_{41}	0.07	0.05	0.11	0.31	0.46
U_{42}	0.21	0.33	0.24	0.12	0.10
U_{43}	0.16	0.19	0.30	0.23	0.12
U_{44}	0.08	0.13	0.21	0.46	0.12
U_{45}	0.07	0.10	0.17	0.51	0.15
U_{46}	0.15	0.21	0.43	0.12	0.09
U_{47}	0.60	0.16	0.09	0.10	0.05
U_{48}	0.33	0.31	0.26	0.06	0.04
U_{49}	0.15	0.21	0.37	0.17	0.10
U_{51}	0.39	0.35	0.12	0.09	0.05

4.4 综合评判

结合已获得的因素权重和因素评判矩阵(见表 7、表 8),根据式(7)~式(10)依次进行多级模糊综合评判,并计算综合评价值.风险概率综合评判过程及结果:

$$B_1 = (0.175\ 0, 0.392\ 6, 0.164\ 3, 0.175\ 1, 0.093\ 0)$$

$$B_2 = (0.146\ 4, 0.236\ 4, 0.212\ 6, 0.129\ 1, 0.275\ 5)$$

$$B_3 = (0.262\ 8, 0.289\ 2, 0.226\ 7, 0.146\ 1, 0.075\ 3)$$

$$B_4 = (0.202\ 2, 0.187\ 7, 0.243\ 6, 0.233\ 4, 0.133\ 1)$$

$$B_5 = (0.390\ 0, 0.350\ 0, 0.120\ 0, 0.090\ 0, 0.050\ 0)$$

$$B = (0.190\ 2, 0.180\ 5, 0.200\ 0, 0.258\ 6,$$

$$0.170\ 7) \circ \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = (0.231\ 1, 0.283\ 5, 0.198\ 4, \\ 0.161\ 6, 0.125\ 4)$$

$$G_p = B \times L^T = B \times (1, 3, 5, 7, 9)^T = 4.333\ 3$$

同样地可对平移施工风险损失进行综合评判,获得综合评价值 $G_c = 5.261\ 9$.

4.5 风险评定与控制

由已获得的风险概率评价值 $G_p = 4.333$ 和风险损失评价值 $G_c = 5.261\ 9$,结合风险概率和风险损失等级划分标准以及修正因子确定风险概率和损失的修正后等级(见表9),最后根据风险矩阵获得湘江宾馆中栋整体平移施工风险等级为Ⅲ级.

表9 风险等级评价
Table 9 Risk level evaluation

施工风险	综合评价值	原始等级	修正等级
风险概率	4.33 3	Ⅲ级	Ⅲ级
风险损失	5.261 9	Ⅳ级	Ⅳ级

根据风险控制准则,必须采取有效的处理措施,降低风险等级.湘江宾馆中栋整体平移施工风险可从设计、施工及管理等方面采取措施,降低风险等级.

(1)设计:前期准确评估房屋结构现状,结合结构现状及文物保护相关规定采用合适的加固措施,提高建筑物的刚度及整体性.轨道梁和托换结构设计应考虑水平力及各种因素引起的附加应力的影响,保障轨道梁和托换结构的承载力和刚度,严格控制轨道梁及新基础的沉降.

(2)施工:采用成熟、可靠的施工措施,保障施工质量.加固托换施工应减少对建筑的不利影响,严格控制轨道梁平整度;切割分离顺序必须按照施工技术方案的施工组织的相关要求,并实时监测结构现状,采取相关措施减少切割对结构的损伤;移位施工采用先

进、稳定的移动牵引设备,移位前检查各结构体系是否存在安全隐患,清除所用影响移位的障碍物,移位过程实时监测结构状况、轨道梁沉降量及房屋的整体姿态,严格控制移位速度,确保移位同步、均匀、缓慢进行;就位连接后应继续监测房屋是否出现不均匀沉降.

(3)管理:建立完善的管理机构,确保各施工技术标准执行到位,选用素质高、施工经验丰富的施工人员.

5 结 论

(1)分析总结建筑物整体平移施工各阶段中影响平移安全性的因素,从结构加固、托换结构及轨道梁施工、切割分离、迁移、就位连接5方面建立风险评价指标体系.

(2)建筑整体平移施工风险考虑风险概率和风险损失两方面的影响.在运用模糊层次分析法确定因素权重的基础上,采用模糊综合评判法对目标指标进行综合评判,建立风险评估模型.

(3)引入风险损失修正参数,对风险损失等级进行修正.利用风险等级评判矩阵结合修正后的风险损失等级和风险概率等级确定建筑物整体平移施工风险等级.

(4)将建立的建筑物整体平移施工风险评估体系运用到实际工程,获得湘江宾馆中栋整体平移施工风险等级为Ⅲ级,根据控制准则,必须采取有效处理措施,降低风险等级.案例分析表明,该风险评估体系具有可操作性,能有效评估建筑物整体平移施工风险.

参考文献

[1] 徐章雄,卢文胜.某混凝土框架结构移位技术及就位连接方法探讨[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2015,33(2):167-170.
(XU Zhangxiong, LU Wensheng. Discussion on moving technology and joint re-connecting method of a RC frame[J]. Journal of Jiamusi university (natural science edition), 2015, 33 (2):167-170.)

[2] 李国雄.锦纶会馆整体组合移位设计与施工[J].施工技术,2012,41(21):85-89.
(LI Guoxiong. Design and construction of

- integral combinational shift of jinlun hall [J]. Construction technology, 2012, 41 (21): 85 - 89.)
- [3] 吴二军,曹兆娜,杨勇,等. 可调移动支座在大体型建筑物移位工程中的应用[J]. 施工技术, 2013, 42(16): 46 - 49.
(WU Erjun, CAO Zhaona, YANG Yong, et al. Application of adjustable moving-feet in large size building moving project [J]. Construction technology, 2013, 42(16): 46 - 49.)
- [4] 周广东,李爱群,李杏平,等. 高层建筑结构平移施工全过程实时监测分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 139 - 143.
(ZHOU Guangdong, LI Aiqun, LI Xingping, et al. Analysis of real-time whole process monitoring for high-rise structural relocation moving [J]. Building structure, 2012, 42(4): 139 - 143.)
- [5] 仇圣华,李伟. 建筑物整体移位托换体系的计算机模拟[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(5): 91 - 93.
(QIU Shenghua, LI Wei. Computer simulation of buildings integer shift's underpinned system [J]. Sichuan building science, 2010, 36(5): 91 - 93.)
- [6] 杜永峰,杨巧红,张太亮. 建筑物带基础整体移位模拟及结构受力状态监测参数[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(6): 112 - 117.
(DU Yongfeng, YANG Qiaohong, ZHANG Tailiang. Simulation of unitary shifting of buildings with foundation and parameters of loading condition monitoring [J]. Journal of Lanzhou university of technology, 2012, 38(6): 112 - 117.)
- [7] 吴二军,李爱群. 建筑物整体平移工程的可靠度计算和风险评估[J]. 建筑技术, 2004, 35(6): 412 - 414.
(WU Erjun, LI Aiqun. Reliability calculation and risk assessment of integral building translation work [J]. Architecture technology, 2004, 35(6): 412 - 414.)
- [8] 梁峰,卢文胜. 移位技术与建筑结构安全问题[J]. 结构工程师, 2004, 20(5): 24 - 27.
(LIANG Feng, LU Wensheng. Translocation technology and structural security [J]. Structural engineers, 2004, 20(5): 24 - 27.)
- [9] 郑东强,阎祥安. 建筑物移位工程位移控制临界值分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 714 - 718.
(ZHENG Dongqiang, YAN Xiangan. Analysis of critical displacement in building moving project [J]. Journal of China coal society, 2007, 32(7): 714 - 718.)
- [10] 商冬凡,王铁成,强万明,等. 古塔移位工程沉降控制复合地基优化设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(24): 70 - 75.
(SHANG Dongfan, WANG Tiecheng, QIANG Wanming, et al. Optimum design of composite foundation for settlement control of ancient tower translocation project [J]. Building structure, 2016, 46(24): 70 - 75.)
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP) [J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(2): 80 - 88.
(ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) [J]. Fuzzy systems and mathematics, 2000, 14(2): 80 - 88.)
- [12] 李希灿. 模糊数学方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
(LI Xican. Fuzzy mathematics method and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.)
- [13] 刘文莉. 高层房屋建筑工程施工安全风险管理工作研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
(LIU Wenli. Study on the construction safety risk management of high-rise building [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.)
- [14] 中国铁路总公司. 铁路建设工程风险管理技术规范: Q/CR 9006—2014 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
(China Railway. Technical code for risk management of railway construction engineering: Q/CR 9006—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.)
- [15] 张杰. 大跨度桥梁施工期风险分析方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
(ZHANG Jie. Study on risk analysis method of long-span bridges during construction [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.)
- [16] 田林钢,靳聪聪,巴超. 改进的模糊层次分析法在海堤工程安全评价中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(3): 317 - 320.
(TIAN Lingang, JIN Congcong, BA Chao. Application of improved fuzzy AHP to safety evaluation of sea wall engineering [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2013, 46(3): 317 - 320.)
- [17] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311 - 314.
(XU Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix [J]. Journal of systems engineering, 2001, 16(4): 311 - 314.)
- [18] 张吉军. 模糊一致判断矩阵3种排序方法的比较研究[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1370 - 1372.
(ZHANG Jijun. Comparison of three ranking methods for the fuzzy consistent judgement matrix [J]. Systems engineering and electronics, 2003, 25(11): 1370 - 1372.)
- [19] 刘卫锋,常娟,孟金涛,等. 考虑标度的加型一致性模糊判断矩阵的排序方法[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(7): 1836 - 1841.
(LIU Weifeng, CHANG Juan, MENG Jintao, et al. Ranking method of additive consistent fuzzy judgement matrix considering scale [J]. Systems engineering-theory & practice, 2018, 38(7): 1836 - 1841.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)