

基于模糊层次分析法的深基坑施工风险评价

李 枝^{1,2}, 邓 涛²

¹ 中冶成都勘察研究总院有限公司 四川成都

² 中国五冶集团有限公司 四川成都

【摘要】本研究采用模糊层次分析法 (FAHP) 构建了深基坑施工风险评价体系, 确定了包括施工环境、施工管理、施工监测在内的三大类别共 13 项综合评价指标。通过实例分析, 运用模糊综合评价方法对具体项目进行风险评估, 结果显示施工环境因素权重最高, 监测点布置在综合权重中占据主导地位, 且该项目的施工风险相对较低。该评价体系为深基坑施工风险评价提供了科学依据。

【关键词】深基坑施工; 模糊层次分析法; 指标权重; 风险评价

【收稿日期】2024 年 12 月 16 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 19 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.202500040

Risk assessment of deep excavation construction based on fuzzy analytic hierarchy process

Zhi Li^{1,2}, Tao Deng²

¹ Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu, Sichuan

² China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】 This study established a risk evaluation system for deep foundation pit construction using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), identifying three categories encompassing 13 comprehensive evaluation indicators: construction environment, construction management, and construction monitoring. Through case analysis, the fuzzy comprehensive evaluation method was applied to assess risks in specific projects. Results revealed that construction environmental factors held the highest weight, monitoring point layout dominated comprehensive weights, and the project exhibited relatively low construction risks. This evaluation system provides a scientific basis for risk assessment in deep foundation pit construction.

【Keywords】 Deep Excavation Construction; Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP); Indicator Weight; Risk Evaluation

引言

近年来, 随着我国城市化进程的加速, 高层建筑和地下空间开发规模不断扩大, 深基坑工程数量急剧增加。然而, 深基坑施工过程中坍塌事故频发, 如 2019 年扬州某桩锚基坑因局部垂直超挖导致的边坡土体坍塌事件, 以及南宁某基坑因支护变形与长期水管渗漏引发的坍塌事故, 凸显了深基坑施工风险评价的重要性^[1]。目前, 国内外在深基坑施工风险分析领域已探索出多种方法, 如控制区间与记忆模型^[2]、云模型^[3]、直觉模糊优劣解距离法^[4]及耦合模型评估^[5-6]等。这些方法在实际应用中取得了一定成果, 但在综合考虑多因素权重和模糊不确定性方面仍存在不足^[7-8]。因此, 本研究采用模糊层次分析

法 (FAHP) 对深基坑施工风险项权重进行科学计算与排序分析, 并运用模糊综合评价方法对特定项目深基坑施工风险进行系统性评估, 旨在为深基坑施工风险管理提供更为科学和有效的决策支持。

1 深基坑施工风险评价

1.1 模糊层次分析模型

1.1.1 建立风险层次结构模型

模糊层次分析法是一种结合了定量与定性分析的层次权重决策方法, 在施工风险评价领域具有广泛的应用价值^[9-11]。根据现有研究成果^[12], 将深基坑施工风险指标体系科学地划分为目标层、准则层及指标层这三个层次。

具体而言, 目标层聚焦于深基坑施工风险这一

核心议题；准则层则涵盖了施工环境、施工管理以及施工监测这三个关键维度；指标层则进一步细化为地质条件、开挖深度、地下水位、支护设计、周边环境等施工环境因素，以及人材机管理、组织管理、施工方案管理、应急管理、工艺管理等施工管理因

素，还有监测周期、监测点布置、监测预警等施工监测因素。基于上述划分，构建了如图 1 所示的深基坑施工风险层次分析模型。在进行层级划分以后，对图 1 中指标层所包括的各个指标进行详细，如表 1。

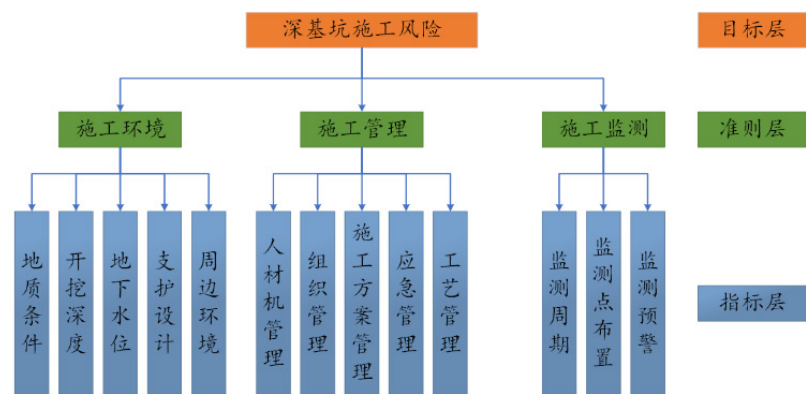


图 1 深基坑施工风险层次结构模型

表 1 准则层指标及其说明

指标	指标说明
地质条件	岩土层的特性、分布格局、厚度大小，以及岩层结构、节理发育情况、裂隙存在状态等地质条件，对基坑的稳定性具有至关重要的影响。其中，不良的地质状况可能会成为基坑安全的重大隐患，极易诱发基坑坍塌、涌砂等严重事故，因此，在设计和施工过程中，必须将这些不良地质条件作为重点考虑因素。
开挖深度	开挖深度的具体数值是评估基坑工程最直接且基础性的依据，一般而言，开挖深度的增加直接意味着施工难度的提升及潜在风险的加剧。因此，专家需密切注意开挖深度的动态变化，并依据这一关键指标，综合考量其对施工难度和风险的影响，从而进行科学、合理的评分。
地下水位	地下水位同样是评估基坑施工风险不可忽视的关键因素。大幅度的水位波动预示着在施工周期内可能需采取更为频繁且复杂的排水作业与处理措施，这无疑加剧了施工过程的复杂性和结果的不确定性。
支护设计	在确保基坑安全稳定的基本前提下，支护设计方案应当周全地考虑基坑周边建筑物、道路、管线以及其他重要基础设施的安全保护需求。
周边环境	在深基坑施工的安全风险评估过程中，精确衡量道路与交通设施、地下管线及设施以及邻近建筑物等周边环境对施工安全风险的潜在影响程度是至关重要的。鉴于此，周边环境是一个核心且关键的评价指标。
人材机管理	人员管理的专业性、材料管理的合规性以及机械管理的可靠性，共同构成了基坑施工安全的重要基石，其管理水平的高低直接影响着施工过程中的风险控制、事故预防及整体安全性。
组织管理	施工组织管理的科学性、规范性和有效性，通过优化资源配置、强化安全监控、确保施工流程顺畅等措施，对基坑施工安全起着决定性的保障作用，直接关系到施工过程中的风险控制与整体安全水平。
施工方案管理	施工方案管理的精细化与合理性，通过科学规划施工步骤、明确安全控制措施、优化资源配置等，对基坑施工安全具有至关重要的影响，是确保施工顺利进行、降低事故风险的关键所在。
应急管理	制定全面的应急管理方案，并系统性地组织定期的应急培训与实战演练活动，深化员工的应急响应意识，提升其应对突发事件的能力，同时，通过实践检验并不断优化方案的可行性与实效性，确保在紧急情况下能够迅速、有序地采取行动。
工艺管理	施工工艺管理作为关键指标，是否严格按照施工工艺和工序进行施工，确保每一步骤的准确性和规范性。
监测周期	通过设定合理的监测周期，可以定期对基坑的变形、位移、地下水位等关键参数进行监测，从而及时发现异常变化。
监测点布置	监测点的布置是基坑施工安全监测的基础。合理的监测点布置能够全面、准确地反映基坑的变形和受力状态。
监测预警	通过设定合理的预警阈值，当监测数据超出阈值时，监测预警系统能够立即发出警报，提醒工程团队关注并采取相应措施。

1.1.2 构造模糊判断矩阵

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。建立风险因素层次分析模型后, 确立了上下隶属关系, 然后建立模糊一致判断矩阵 A , 如式 (1), 以确定上下层元素之间的相对重要性。

采用专家调查法, 结合 0.1~0.9 标度法^[13], 如表 2, 以此对矩阵进行赋值。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 利用 0.1~0.9 标度法对 $a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 取值。

表 2 0.1~0.9 标度法及其说明

标度	比较	详细说明
0.9	极端重要	两个因素相比, 一因素比另一因素极端重要
0.8	强烈重要	两个因素相比, 一因素比另一因素强烈重要
0.7	明显重要	两个因素相比, 一因素比另一因素明显重要
0.6	稍微重要	两个因素相比, 一因素比另一因素稍微重要
0.5	同等重要	两个因素相比, 具有相同重要性
0.1~0.4	反比较	若因素 a_i 与因素 a_j 相比较得到判断 a_{ij} , 则元素 a_j 与元素 a_i 相比较得到的判断为 $a_{ji}=1-a_{ij}$

1.1.3 权重计算

$w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ 为模糊判断矩阵 A 的重要性权重矩阵, 利用式 (2) 求解模糊互补判断矩阵的权重。

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (2)$$

式中: w_i 为因素 a_i 的权重。

1.1.4 一致性检验

为了验证权重计算的合理性, 首先依据式 (3) 逐一计算各个元素的值, 并据此构造出判断矩阵 A 的特征矩阵 W , 具体形式如式 (4) 所示。接着们采用模糊判断矩阵 A 与其特征矩阵 W 的相容性指标 $I(A, W)$ 来进行一致性检验, 该检验过程遵循公式 (5)。当相容性指标 $I(A, W)$ 小于或等于 α (α 代表决策者的可接受阈值, 通常设定为 0.1^[14]) 时, 则认为判断矩阵 A 满足一致性要求, 从而确认权重计算的合理性。

$$w_{ij} = \frac{w_i}{w_i + w_j} \quad (3)$$

$$W = (w_{ij})_{n \times n} \quad (4)$$

$$I = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n |a_{ij} + w_{ji} - 1| \quad (5)$$

1.1.5 综合权重计算

在通过上述计算流程得出每一层级中不同因素相对于其上一级别的权重结果后, 进一步将这些权重进行综合, 具体方法是: 将准则层的权重与指标层相对于准则层的权重相乘, 从而得出综合权重。综合权重值将作为决策者在进行相关判断时的重要依据。

1.2 风险评价指标权重计算

基于图 1 所展示的深基坑施工风险层次结构模型框架, 邀请该领域 20 位具有高级职称的教授或专家参与意见征集与打分活动。每位专家根据表 2 中设定的 0.1~0.9 标度法, 对各层次要素之间的相对重要性进行两两比较打分。收集所有专家的打分结果后, 首先对每个指标对的打分进行平均处理, 以减少个体差异带来的偏差。然后, 对平均后的判断值进行归一化处理, 确保判断矩阵的每一行元素之和为 1, 从而构建模糊互补判断矩阵。具体步骤如下:

(1) 收集专家打分: 针对每个指标对 (a_i, a_j) , 收集 20 位专家的打分值 a_{ij} (表示 a_i 相对于 a_j 的重要性)。(2) 计算平均值: 对每个指标对的打分值进行平均, 得到平均判断值 a_{ij_avg} 。(3) 归一化处理: 将平均判断值 a_{ij_avg} 进行归一化, 确保每一行元素之和为 1, 得到模糊互补判断矩阵 A 。(4) 权重计算: 利用公式 (2) 求解模糊互补判断矩阵 A 的权重向量 W 。(5) 一致性检验: 根据公式 (3)~(5)

进行一致性检验, 确保判断矩阵的一致性。

1.2.1 建立模糊判断矩阵

依据计算流程, 构建涵盖二、三层级指标的模糊互补判断矩阵, 如式 (6) ~ (9)。

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.6 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.5 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.6 \\ 0.7 & 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.2.2 权重计算

利用式 (2) 对二、三层级的指标权重进行计算得到式 (10) ~ (13)。

$$w = [0.4 \quad 0.35 \quad 0.25] \quad (10)$$

$$w_1 = [0.23 \quad 0.21 \quad 0.19 \quad 0.21 \quad 0.16] \quad (11)$$

$$w_2 = [0.23 \quad 0.21 \quad 0.19 \quad 0.18 \quad 0.19] \quad (12)$$

$$w_3 = [0.32 \quad 0.42 \quad 0.26] \quad (13)$$

1.2.3 一致性检验

根据计算式 (3) ~ (4) 得到特征矩阵 W , 如式 (14) ~ (17)。

$$W = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.53 & 0.62 \\ 0.47 & 0.5 & 0.58 \\ 0.38 & 0.42 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.52 & 0.55 & 0.52 & 0.59 \\ 0.48 & 0.5 & 0.53 & 0.5 & 0.57 \\ 0.45 & 0.47 & 0.5 & 0.47 & 0.54 \\ 0.48 & 0.5 & 0.53 & 0.5 & 0.57 \\ 0.41 & 0.43 & 0.46 & 0.43 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.52 & 0.55 & 0.56 & 0.55 \\ 0.48 & 0.5 & 0.53 & 0.54 & 0.53 \\ 0.45 & 0.47 & 0.5 & 0.51 & 0.5 \\ 0.44 & 0.46 & 0.49 & 0.5 & 0.49 \\ 0.45 & 0.47 & 0.5 & 0.51 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.43 & 0.55 \\ 0.57 & 0.5 & 0.62 \\ 0.45 & 0.38 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

接下来依据一致性检验公式 (5) 检验权重结果的一致性, 得到式 (18) ~ (21)。

$$I = 0.082 < 0.1 \quad (18)$$

$$I_1 = 0.078 < 0.1 \quad (19)$$

$$I_2 = 0.094 < 0.1 \quad (20)$$

$$I_3 = 0.08 < 0.1 \quad (21)$$

经过计算, 所得结果均保持在 0.1 以下, 表明排序结果通过了一致性检验的标准。因此, 所分配的权重是可靠且有效的。

1.2.4 综合权重计算及汇总

通过将准则层的权重与指标层中各因素的相对权重进行相乘运算, 得出了每一个评价指标的综合权重。随后, 基于上述所有评价指标的计算结果, 整理并汇总这些信息于表 3。

在准则层风险评价指标体系中, 各因素依据其对总目标风险的影响程度进行了排序。具体而言, 施工环境以 40% 的权重比例占据首位, 显示出对项目总目标影响最为显著; 施工管理紧随其后, 权重为 35%; 施工监测则以 25% 的权重位列第三。

进一步细化各风险评价指标的权重排序如下:

1) 施工环境方面, 地质条件的影响最为突出, 开挖深度与支护设计并列其次, 地下水位和周边环境则相对较轻, 但均不可忽视。

2) 施工管理领域, 人材机管理的权重最高, 组织管理次之, 施工方案管理与工艺管理并重, 而应急管理则稍显逊色。

3) 施工监测环节, 监测点布置的权重最高, 监测周期次之, 监测预警则位于最后。综合考量各因素, 前五名权重最高的指标依次为: 监测点布置 (10.5%)、地质条件 (9.2%)、开挖深度与支护设计 (均为 8.4%) 以及人材机管理 (8.1%)。这一排序凸显了深基坑施工中需首要关注的重点。

表 3 深基坑施工风险评价指标体系的权重计算结果

目标层	准则层	权重	指标层	相对权重	综合权重
深基坑施工风险	施工环境	0.4	地质条件	0.23	0.092
			开挖深度	0.21	0.084
			地下水位	0.19	0.076
			支护设计	0.21	0.084
			周边环境	0.16	0.064
			人材机管理	0.23	0.081
	施工管理	0.35	组织管理	0.21	0.074
			施工方案管理	0.19	0.067
			应急管理	0.18	0.063
			工艺管理	0.19	0.067
			监测周期	0.32	0.080
	施工监测	0.25	监测点布置	0.42	0.105
			监测预警	0.26	0.065

施工环境作为施工作业的基础背景,其安全性直接影响整体风险,合理的地质勘探、选址及支护设计是降低风险的关键。特别的是,监测点布置以最高的综合权重排名第一,成为施工作业中至关重要的一环。其布局的合理性直接关系到监测数据的准确性和预警的及时性,因此,在深基坑施工中应给予高度重视。

1.3 模糊综合评价

在进行模糊综合评价时,根据某具体工程项目的概况特点,利用上述构建的风险评价模型,使用专家打分法和模糊综合分析法,对具体工程项目的风险进行定量和定性相结合的风险评价。

参考文献^[4],将深基坑施工风险等级划分为{小,较小,一般,较大,大}五个等级,专家以此对指标层进行打分,从而构造模糊判断矩阵 R 。然后,基于前文计算的权重向量 W 和模糊判断矩阵 R ,即可求得深基坑施工风险的模糊综合评价矩阵 B 如下:

$$\begin{aligned}
 B_{1 \times m} &= W_{1 \times m} \times R_{m \times n} \\
 &= [w_1, w_2, \dots, w_m] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (22) \\
 &= [b_1, b_2, \dots, b_n]
 \end{aligned}$$

$$b_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} \quad (23)$$

式中: b_j 为隶属于第 j 等级的隶属度; w_i 为第 i

个因素指标的权重。进行计算时,从指标层起始,逐层递进进行综合计算,直至最终求得目标层的评价向量 B 。

2 实例分析

2.1 工程概况

某项目基坑约为 $200 \times 180\text{m}$ 的长方形,基坑周长约 788m ,面积约 35659m^2 ,基坑开挖深度在 $9.25\text{--}12.7\text{m}$ 。周边建筑及环境及地下管线情况:本工程场地北侧与东侧红线均紧邻道路,支护排桩距离红线约为 5.0m ,南侧红线外约 14.0m 为一宽约 8m 的水渠,支护桩距红线约 $5.5\text{--}20.0\text{m}$,西侧为已建成的小区,支护桩距离红线约 $5.0\text{--}6.0\text{m}$ 。

地质勘探结果显示,该场地的地层结构相对简单,主要由第四系人工填土 (Q_4^{ml})、第四系中更新统冰水堆积层 (Q_2^{gl}) 中的粘土和粉质粘土,以及中生界白垩系上统灌口组 (K_2g) 的泥岩构成。场地内的地下水主要分为两类:一类是赋存于第四系人工填土及粘土层裂隙中的上层滞水,另一类是埋藏于白垩系上统灌口组基岩裂隙中的基岩裂隙水。值得注意的是,这些地下水位的埋深存在显著差异,因此场地内并没有一个统一的地下水位线。

2.2 深基坑施工风险评价

在进行模糊综合评价时,首先根据具体工程项目的概况特点,确定各评价指标的隶属度。以某具体项目为例,邀请 10 位专家(包括项目负责人和熟悉该项目的施工单位技术人员)对各个指标进行评级。每位专家根据风险等级划分原则,对每个指标

进行打分, 确定其所属的风险等级。然后, 统计每个指标在各个风险等级上的频次, 计算其隶属度。具体步骤如下: (1) 风险等级划分: 将深基坑施工风险等级划分为{小, 较小, 一般, 较大, 大}五个等级。

(2) 专家打分: 组织专家对每个评价指标进行打分, 确定其所属的风险等级。(3) 隶属度计算: 统计每个指标在各个风险等级上的频次, 计算其隶属度。

(4) 构建模糊判断矩阵: 根据隶属度构建模糊判断矩阵 R 。(5) 计算综合评价矩阵: 利用权重向量 W 和模糊判断矩阵 R , 计算模糊综合评价矩阵 B 。(6) 风险等级判断: 根据最大隶属度原则, 确定项目的总体风险等级。

根据式 (22) 进行计算, 结果如下:

$$B_1 = [0.23 \quad 0.21 \quad 0.19 \quad 0.21 \quad 0.16] \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$= [0.41 \quad 0.31 \quad 0.09 \quad 0.16 \quad 0.03]$$

$$B_2 = [0.23 \quad 0.21 \quad 0.19 \quad 0.18 \quad 0.19] \begin{bmatrix} 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$= [0.13 \quad 0.36 \quad 0.29 \quad 0.2 \quad 0.02]$$

$$B_3 = [0.32 \quad 0.42 \quad 0.26] \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$= [0.41 \quad 0.51 \quad 0.08 \quad 0 \quad 0]$$

$$B = [0.4 \quad 0.35 \quad 0.25] \begin{bmatrix} 0.41 & 0.31 & 0.09 & 0.16 & 0.03 \\ 0.13 & 0.36 & 0.29 & 0.2 & 0.02 \\ 0.41 & 0.51 & 0.08 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$= [0.312 \quad 0.378 \quad 0.157 \quad 0.134 \quad 0.019]$$

根据上述计算结果, 该项目深基坑施工中, “较小风险” 的占比最高, 达到了 0.378。遵循最大隶属度原则, 可以判断该项目深基坑施工的总体风险为较小风险。进一步分析准则层指标的风险程度, 我们得到以下结论:

施工环境的风险等级被评定为小风险。根据专家评级, 该项目的地质条件简单且地下水位影响微乎其微, 从而获得了小风险的评价, 同时开挖深度和支护设计也被评定为较小风险。尽管周边环境相对复杂, 被归为较大风险, 但综合考量后, 施工环境最终被评定为小风险。

在施工管理方面, 整体风险等级被评定为较小。然而, 其中组织管理的风险等级相对较高, 这主要

是因为项目周边存在紧邻的房屋、道路等建筑物和构筑物, 导致施工面积和空间受限, 从而增加了组织管理的难度。

至于施工监测方面, 所有相关指标的风险等级均被评定为较小, 表明该方面的安全性相对较高。

3 结论

本研究采用模糊层次分析法 (FAHP), 对深基坑施工风险的多维度影响因素进行了系统分析和权重确定, 构建了一个科学、全面的深基坑施工风险评价体系。该体系不仅为施工风险的量化评估提供了坚实的理论基础, 也为实际工程中的风险管理和决策支持提供了有效的工具。研究表明, 施工环境因素在风险评价中占据主导地位, 特别是监测

点布置的权重最高, 这为施工过程中监测点的合理布置和优化提供了重要依据。该评价体系在实际工程中的成功应用, 验证了其科学性和实用性, 具有广泛的推广价值, 能够有效降低深基坑施工风险, 保障工程安全和人员生命财产安全。

参考文献

- [1] Wang Z, Shen X, Tian X, et al. Study on the Influence and deformation control of rich water foundation excavation on adjacent buildings[J]. Buildings, 2024, 15(1): 52-52.
- [2] 龚颖超, 路婉妮, 陶红雨. 基于 CIM-AHP 模型地铁深基坑施工风险研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(10): 1422-1427.
- [3] 余贵良, 周剑. 深基坑施工邻近建筑物风险评估研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(11): 3838-3847.
- [4] 刘培路. 基于 TOPSIS 方法的明挖基坑风险识别[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(02): 84-91.
- [5] 吴波, 杜君, 温小栋, 等. 基于改进熵权-DEMATEL-ISM 的富水软土层深基坑施工安全风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(10): 106-114.
- [6] 阮永芬, 梁龙元, 朱靖帅, 等. 基于改进博弈论组合赋权-模糊集基坑风险评估[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(04): 72-83.
- [7] 黄震, 曹琛, 张薇, 等. 基于二维云模型的深基坑施工风险评价方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(10): 1504-1512.
- [8] 甘淑清, 刘择帅, 张立华, 等. 基于模糊核聚类加权证据融合的深基坑施工风险评价方法及其应用[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(S1): 234-243.
- [9] 张振中. 基于改进 AHP-熵值法的地铁车站深基坑施工风险评估[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S2): 13-21.
- [10] 张胜昔, 陈为公, 王会会, 等. 基于 G-FAHP 的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(05): 104-109.
- [11] 刘戈, 全国柱, 冯双喜, 等. 基于 AHP-DEA 综合分析法的深基坑施工风险评价及对策研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(03): 206-210.
- [12] Annur S, Naharudin N, Azmi A, et al. Application of Fuzzy-AHP in GIS in finding E-Scooter trail for street art[J]. Revue Internationale de Géomatique, 2025, 34(1): 53-69.
- [13] Li L, Shi Z H, YIN Wei, et al. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou Reservoir area, China[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23): 3439-3447.
- [14] 宫晓华, 张强, 李枫. 模糊层次分析法在淤地坝风险评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(05): 131-137+147.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS