

DOI: 10.7672/sgjs2026100126

基于组合赋权与灰色关联的深基坑施工 风险评估与控制研究*

范海军¹, 周阳¹, 于磊¹, 肖明阳¹, 刘子扬²
(1. 中铁七局集团西安铁路工程有限公司, 陕西 西安 710032;
2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 以绿岛湖北站深基坑工程为背景, 构建了基于组合赋权与灰色关联分析的风险评估模型。通过建立涵盖技术、结构、管理、环境与组织风险的多层次指标体系, 分别采用层次分析法与熵权法确定指标的主客观权重, 并利用组合加权法融合二者优势, 克服单一赋权的局限性。在此基础上, 运用灰色关联分析量化评估各风险因素, 实现对工程风险水平的定量评价。应用表明, 该模型可有效识别地下连续墙接缝渗漏、高压电塔不均匀沉降及地基加固质量差等关键风险, 整体风险等级属于Ⅲ级。针对上述风险, 提出包括防绕流水囊技术、电塔隔离加固与监测体系及预制 U 形槽加固基底在内的控制措施, 工程应用表明其应用效果显著。

[关键词] 深基坑; 熵权法; 灰色关联; 风险评估; 控制措施

[中图分类号] TU753 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2026)10-0126-08

Research on Risk Assessment and Control of Deep Foundation Excavation Construction Based on Combined Weighting and Grey Relational Analysis

FAN Haijun¹, ZHOU Yang¹, YU Lei¹, XIAO Mingyang¹, LIU Ziyang²
(1. China Railway Seventh Bureau Group Xi'an Railway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Based on the deep foundation excavation project of Green Island Hubei Station, a risk assessment model based on combination weighting and grey correlation analysis is constructed. By establishing a multi-level index system covering technology, structure, management, environment and organizational risk, the subjective and objective weights of the indicators are determined by the analytic hierarchy process and the entropy weight method respectively, and the combined weighting method is used to integrate the advantages of the two to overcome the limitations of single weighting. On this basis, the grey correlation analysis is used to quantitatively evaluate the risk factors and realize the quantitative evaluation of the project risk level. The application shows that the model can effectively identify the key risks such as joint leakage of underground continuous wall, uneven settlement of high-voltage tower and poor quality of foundation reinforcement, and the overall risk level is grade III. In view of the above risks, control measures including anti-circumfluence water bag technology, tower isolation reinforcement and monitoring system and prefabricated U-shaped groove reinforcement base are proposed. Engineering application shows that its application effect is remarkable.

Keywords: deep foundation excavation; entropy weight method; grey correlation; risk assessment; control measures

0 引言

随着我国城市化进程的深入推进和土地资源的日益紧缺, 地下空间的开发利用已成为可持续发

* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)
[作者简介] 范海军, 正高级工程师, E-mail: 524633226@qq.com
[收稿日期] 2025-10-17

展的重要战略方向^[1]。地下商业中心、地铁交通网络及综合管廊等地下工程不仅有效缓解了城市交通拥堵,还极大地提升了城市运行效率与居民生活质量。然而,在地铁车站的开发建设过程中,地铁站等大型深基坑工程的施工风险问题日益凸显,成为制约地下空间安全建设的关键因素之一^[2]。深基坑施工通常紧邻城市主干道、既有建筑物及各类市政管线,周边环境极为敏感。此外,施工中还常面临软弱地基、富水砂层、高水位等复杂地质条件。一旦控制不当,可能引发围护结构失稳、基底隆起超标、周边建筑沉降等重大工程事故,严重威胁城市运行与居民生命财产安全。大量学者围绕深基坑施工过程中的风险评估与控制进行了研究^[3-5]。刘波等^[6]通过模糊层次分析法评估了北京地铁大电路站深基坑工程的施工风险,发现主要风险因素包括施工人员风险意识缺失及支撑体系失稳等,并提出优化支撑体系设计和施工、加强地下水控制等针对性措施保障施工安全;程敏等^[7]提出了基于灰色关联分析的改进 FMEA 方法,更精确地评估了深基坑施工中支护施工未按设计要求进行、支撑变形过大和桩位测量不准等关键风险因素,并对其进行排序,为深基坑施工风险管理提供了新思路;陈蓉芳等^[8]基于熵权法和可拓模型提出了深基坑施工风险评估模型,对某地铁站深大基坑施工风险进行评估并提出相应的改进建议;陈绍清等^[9]基于重庆某地铁站深基坑坍塌事故案例,通过改进的层次分析法结合事故树研究了基坑边坡顺层滑塌、周围建筑物影响及南侧施工扰动等主要致灾因素,并提出加强安全培训、应急管理和动态监测的对策,以降低事故发生概率;张振中^[10]通过改进的层次分析法与熵值法对长春地铁 5 号线深基坑工程进行风险评估,发现围护结构和开挖方式是主要风险来源,邻近建筑物的风险尤其突出,应重点关注;吴波等^[11]基于熵权法建立了动态风险评估模型,识别了富水软土层深基坑施工过程中的关键风险因素及其影响路径,发现施工质量管理是关键影响因素,并将综合施工风险等级评定为Ⅱ级,为相关施工风险分析提供了参考;Liu 等^[12]基于组合赋权与非线性模糊层次分析法构建了深基坑施工风险评估模型,并将该模型应用于西安荣民科技创新园区深基坑工程风险评估中;Momeni 等^[13]通过随机集有限元法与事件树分析相结合的方法对采用锚杆支护的城市深基坑进行可靠性分析与人员伤亡风险评估,为相关工程的安全决策提供了科学依据。本文在已有研究基础上,进一步探索科学的深

基坑施工风险评估与控制方法。通过构建风险评价指标体系,结合组合赋权与灰色关联分析,对深基坑施工风险进行综合评估;并以绿岛湖北站深基坑工程为例,验证所提模型的有效性。

1 深基坑施工风险评价模型

1.1 风险评价指标体系构建

遵循系统性与科学性原则,构建了基于组合赋权与灰色关联的地铁深基坑施工风险评估与控制流程,如图 1 所示。采用熵权法和层次分析法分别计算各风险指标的客观权重和主观权重,并通过组合赋权法对权重进行优化,形成科学合理的权重体系。在此基础上,利用灰色关联分析法对风险因素进行量化评估,针对高风险指标制定相应的控制措施。

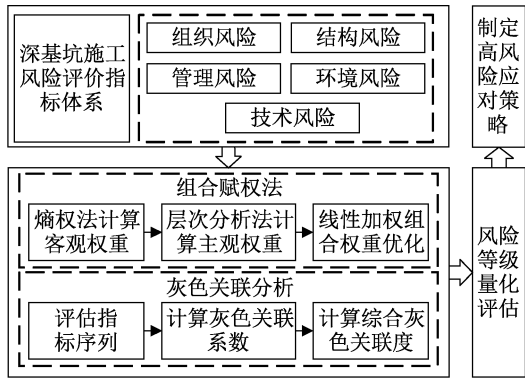


图 1 地铁深基坑施工风险评估与控制流程

Fig. 1 Risk assessment and control process for subway deep excavation construction

结合绿岛湖北站深基坑工程的施工与环境特点,并参考现有文献与工程实践经验,构建多层次风险评价体系。该体系包括技术、环境、管理、结构与组织风险等 5 项一级指标及 25 项二级指标,具体如图 2 所示。该体系为深基坑施工风险的识别和量化提供了理论依据,并为制定有效的风险控制措施奠定了基础。

1.2 组合赋权法简介

1.2.1 熵权法计算客观权重

熵权法根据指标数据的离散程度确定权重^[14]。信息熵越小,指标携带的信息量越大,权重越高。

$$E_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \tag{1}$$

式中: E_j 为第 j 个风险指标的信息熵; n 为样本数; P_{ij} 为第 j 项指标下第 i 个评价指标的比重, $p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$, $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

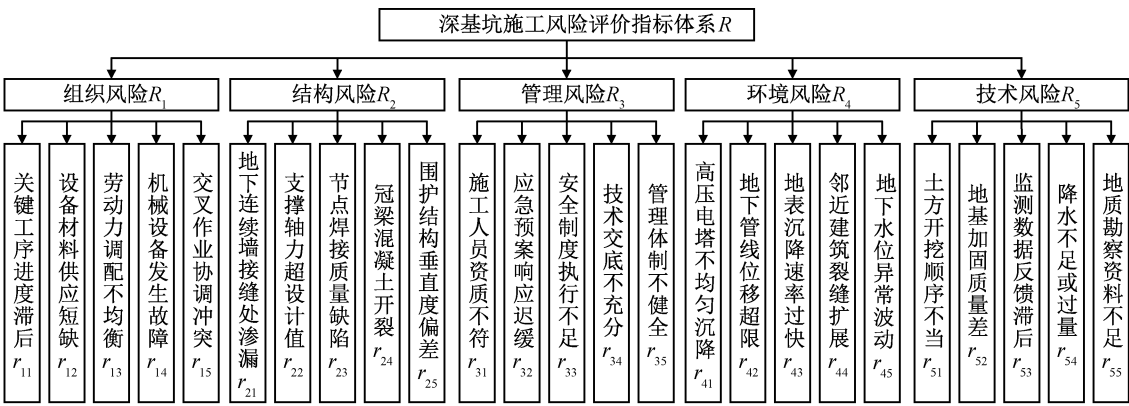


图 2 深基坑施工风险评价指标体系

Fig. 2 Risk evaluation index system for deep excavation construction

根据信息熵可计算指标客观权重 w_{oj} 为:

$$w_{oj} = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (2)$$

式中: $1 - E_j$ 为第 j 个风险指标的差异系数。

1.2.2 层次分析法计算主观权重

采用 1-9 标度法构建判断矩阵,邀请专家对各层次指标进行两两比较^[15],计算特征向量,得到主观权重 w_{sj} ,并按式(3)进行一致性检验:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)RI} \quad (3)$$

式中:CR 为一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时,矩阵通过检验,否则需对判断矩阵进行调整; $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征值; n 为矩阵阶数;RI 为随机一致性指标, $n = 5$ 时, $RI = 1.12$ 。

1.2.3 组合权重优化

将熵权法计算得到的客观权重 w_{oj} 与层次分析法计算得到的主观权重 w_{sj} 进行线性加权:

$$w_{cj} = \alpha w_{oj} + (1 - \alpha)w_{sj} \quad (4)$$

式中: w_{cj} 为组合权重; α 为权重系数, $\alpha \in [0, 1]$, α 的取值要保证组合权重与主客观权重的综合偏离最小。

$$\min \sum_{j=1}^n [(w_{cj} - w_{oj})^2 + (w_{cj} - w_{sj})^2] \quad (5)$$

对式(5)求导,当一阶导 = 0 时,满足权重差值的平方和最小,此时可得:

$$2(w_{cj} - w_{oj}) + 2(w_{cj} - w_{sj}) = 0 \quad (6)$$

由式(6)可知, $\alpha = 0.5$,则最终的组合权重计算公式为:

$$w_{cj} = \frac{w_{oj} + w_{sj}}{2} \quad (7)$$

1.3 灰色关联分析模型

灰色关联分析是通过量化系统因素间关联程度来评估风险等级的方法^[16]。基于组合赋权得到的指标权重,结合灰色关联分析模型,对深基坑施工风险因素进行评估。先确定参考数列和比较数列。选取原始评分矩阵作为比较序列 X_i ,各指标的专家评分最大值构成参考序列 X_0 。为方便计算先用极差法对数列进行标准化处理,则第 i 个评价样本中第 j 个风险指标与参考序列的灰色关联系数 γ_{ij} 为:

$$\gamma_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}} \quad (8)$$

式中: $\Delta_{\min}$, $\Delta_{\max}$ 和 Δ_{ij} 分别为 X_i 与 X_0 之间的最小、最大和绝对差值, $\Delta_{\min} = \min_i \min_j |x_{0j} - x_{ij}|$, $\Delta_{\max} = \max_i \max_j |x_{0j} - x_{ij}|$, $\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$; ρ 为分辨系数,通常取 0.5。

结合组合权重 w_{cj} ,计算各指标的综合灰色关联度:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_{cj} \gamma_{ij} \quad (9)$$

S_i 值越大,施工风险等级越高。参考相关工程风险评估文献^[11],结合专家经验,将灰色关联度区间等分为 5 个等级:关联度在 (0, 0.2] 为 I 级低风险, (0.2, 0.4] 为 II 级较低风险, (0.4, 0.6] 为 III 级中等风险, (0.6, 0.8] 为 IV 级较高风险, (0.8, 1] 为 V 级高风险,以此实现深基坑施工风险状态的量化分级。

2 实例分析

2.1 工程概况

绿岛湖北站深基坑工程位于佛山市,车站总长 239.2m,为单柱双层明挖地铁车站。标准段基坑宽 19.7m,开挖深度 17.08m。支护结构采用 800mm 厚

地下连续墙+3道内支撑体系,车站两端均设有始发盾构井。工程地质条件复杂,深基坑围护结构剖面如图3所示。基底主要位于淤泥质土及粉质黏土层,地下水以孔隙承压水为主,水位埋深0.70~4.80m。基坑周边环境敏感,基坑东侧存在110kV高压电塔,西南侧为绿岛湖公馆,东北侧毗邻市第二人民医院,且周围地下管线众多,施工过程中需严格控制周边环境沉降,确保施工安全。

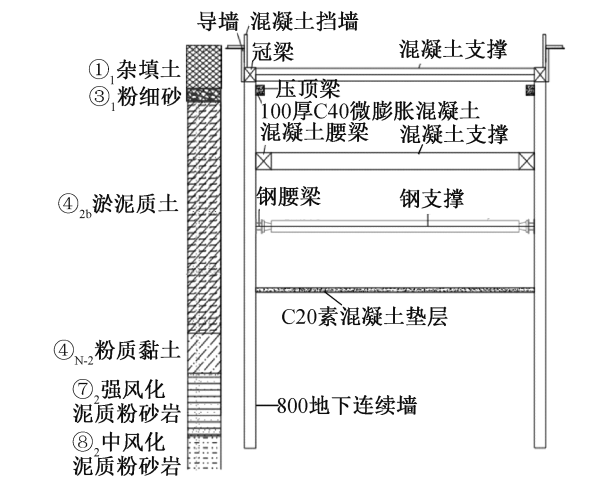


图3 深基坑标准段围护结构剖面

Fig. 3 Enclosure structure section of standard section of deep foundation excavation

2.2 组合权重计算过程

2.2.1 客观权重计算

为合理确定各风险指标的权重,组建由深基坑施工专家、项目总工及监理工程师等10人构成的评价团队对图2中的25个二级指标进行评分,打分标准如表1所示。

表1 风险评分标准

Table 1 Risk scoring criteria

影响程度	小	较小	中等	较大	大
分数	[0,2]	(2,4]	(4,6]	(6,8]	(8,10]

以组织风险 R_1 为例,整理10位专家的打分,并对其进行标准化处理得到矩阵 U_1 。

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.20 & 1.00 & 0.40 & 0.20 & 0.40 & 0.00 & 0.20 & 0.40 & 0.60 \\ 0.60 & 0.40 & 0.80 & 0.20 & 1.00 & 0.40 & 0.60 & 0.80 & 0.40 & 0.00 \\ 1.00 & 0.50 & 0.75 & 0.75 & 1.00 & 0.00 & 1.00 & 0.50 & 0.75 & 0.75 \\ 1.00 & 0.75 & 0.25 & 0.75 & 0.50 & 1.00 & 0.50 & 0.00 & 0.75 & 1.00 \\ 0.50 & 0.25 & 0.75 & 0.00 & 0.25 & 1.00 & 0.75 & 0.25 & 0.50 & 0.75 \end{bmatrix}$$

(10)

结合式(1)和式(2),计算可得:

$$E_1 = -\frac{1}{\ln 10} \sum_{i=1}^{10} p_{ij} \ln p_{ij} = 0.893$$

(11)

同理可得, $E_2 = 0.916, E_3 = 0.942, E_4 = 0.926, E_5 = 0.906$ 。将求出的信息熵分别代入式(2),可计算得出5个二级指标的客观权重为: $w_{o1}=0.256, w_{o2}=0.201, w_{o3}=0.139, w_{o4}=0.178, w_{o5}=0.225$ 。

2.2.2 主观权重计算

邀请包含施工单位技术人员和高校学者在内的5位专家对一级指标及二级指标进行两两重要性比较,然后构建判断矩阵,并通过式(3)进行一致性判断,汇总如表2~7所示。

表2 一级指标判断矩阵及分析

Table 2 Judgment matrix and analysis of primary indicators

R_i	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	$\lambda_{\max}$	w_{sj}	CR
R_1	1	1/6	1/3	1/5	1/7		0.041	
R_2	6	1	4	3	1/2		0.300	
R_3	3	1/4	1	1/2	1/5	5.150	0.086	0.033
R_4	5	1/3	2	1	1/3		0.149	
R_5	7	2	5	3	1		0.424	

表3 组织风险判断矩阵及评价指标

Table 3 Judgment matrix and evaluation indicators of organizational risk

r_{ij}	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	$\lambda_{\max}$	w_{sj}	CR
r_{11}	1	2	5	4	4		0.432	
r_{12}	1/2	1	4	3	2		0.250	
r_{13}	1/5	1/4	1	1/3	1/5	5.211	0.051	0.047
r_{14}	1/4	1/3	3	1	1/2		0.102	
r_{15}	1/4	1/2	5	2	1		0.164	

表4 结构风险判断矩阵及评价指标

Table 4 Judgment matrix and evaluation indicators of structural risk

r_{ij}	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{25}	$\lambda_{\max}$	w_{sj}	CR
r_{21}	1	2	6	7	3		0.431	
r_{22}	1/2	1	5	6	2		0.281	
r_{23}	1/6	1/5	1	4	1/3	5.223	0.080	0.050
r_{24}	1/7	1/6	1/4	1	1/5		0.038	
r_{25}	1/3	1/2	3	5	1		0.170	

表5 管理风险判断矩阵及评价指标

Table 5 Judgment matrix and evaluation indicators of management risk

r_{ij}	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}	r_{35}	$\lambda_{\max}$	w_{sj}	CR
r_{31}	1	1/7	1/8	1/3	1/4		0.038	
r_{32}	7	1	1/3	2	5		0.260	
r_{33}	8	3	1	4	6	5.228	0.493	0.051
r_{34}	3	1/2	1/4	1	2		0.126	
r_{35}	4	1/5	1/6	1/2	1		0.083	

2.2.3 组合权重计算

基于熵权法计算的客观权重与层次分析法确定的主观权重,通过式(7)和式(2)进行线性组合赋权,结果如表8所示。

表 6 环境风险判断矩阵及评价指标

Table 6 Judgment matrix and evaluation indicators of environmental risk								
r_{ij}	r_{41}	r_{42}	r_{43}	r_{44}	r_{45}	$\lambda_{\max}$	w_{sj}	CR
r_{41}	1	2	7	5	6	5.235	0.477	0.052
r_{42}	1/2	1	4	3	3		0.256	
r_{43}	1/7	1/4	1	1/5	1/3		0.044	
r_{44}	1/5	1/3	5	1	2		0.136	
r_{45}	1/6	1/3	3	1/2	1		0.086	

2.3 灰色关联度分析

上文已求出各指标的组合权重,另外选取 10 名专家按照表 3 对一级指标进行评分,构建专家评分矩阵,采用极差法对其进行标准化处理得到矩阵

$$X_1 = \begin{bmatrix} 0.800 & 0.200 & 0.600 & 0.400 & 1.000 & 0.200 & 0.600 & 0.600 & 0.400 & 0 \\ 0.667 & 0.000 & 1.000 & 0.333 & 0 & 0.667 & 0.333 & 1.000 & 0.000 & 0.667 \\ 0.333 & 0.667 & 0 & 1.000 & 0.333 & 0.000 & 0.667 & 0.333 & 0.667 & 0 \\ 0.600 & 0.400 & 0.800 & 0.400 & 0.200 & 0.600 & 0.800 & 0.400 & 0 & 1.000 \\ 0.667 & 0.333 & 1.000 & 0 & 0.333 & 0.667 & 1.000 & 0.333 & 0 & 0.667 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 0.714 & 0.385 & 0.556 & 0.455 & 1.000 & 0.385 & 0.556 & 0.556 & 0.455 & 0.333 \\ 0.600 & 0.333 & 1.000 & 0.429 & 0.333 & 0.600 & 0.429 & 1.000 & 0.333 & 0.600 \\ 0.429 & 0.600 & 0.333 & 1.000 & 0.429 & 0.333 & 0.600 & 0.429 & 0.600 & 0.333 \\ 0.556 & 0.455 & 0.714 & 0.455 & 0.385 & 0.556 & 0.714 & 0.455 & 0.333 & 1.000 \\ 0.600 & 0.429 & 1.000 & 0.333 & 0.429 & 0.600 & 1.000 & 0.429 & 0.333 & 0.600 \end{bmatrix} \quad (13)$$

表 8 深基坑施工风险评价指标权重

Table 8 Weight of risk evaluation indicators for deep foundation excavation construction							
一级指标	客观权重	主观权重	组合权重	二级指标	客观权重	主观权重	组合权重
组织风险 R_1	0.201	0.041	0.121	关键工序进度滞后 r_{11}	0.256	0.432	0.344
				设备材料供应短缺 r_{12}	0.201	0.250	0.226
				劳动力调配不均衡 r_{13}	0.139	0.051	0.095
				机械设备发生故障 r_{14}	0.178	0.102	0.140
				交叉作业协调冲突 r_{15}	0.225	0.164	0.195
结构风险 R_2	0.194	0.300	0.247	地下连续墙接缝处渗漏 r_{21}	0.240	0.431	0.336
				支撑轴力超设计值 r_{22}	0.275	0.281	0.278
				节点焊接质量缺陷 r_{23}	0.184	0.080	0.132
				冠梁混凝土开裂 r_{24}	0.144	0.038	0.091
				围护结构垂直度偏差 r_{25}	0.157	0.170	0.164
管理风险 R_3	0.170	0.086	0.128	施工人员资质不符 r_{31}	0.191	0.038	0.115
				应急预案响应迟缓 r_{32}	0.210	0.260	0.235
				安全制度执行不足 r_{33}	0.231	0.493	0.362
				技术交底不充分 r_{34}	0.170	0.126	0.148
				管理体制不健全 r_{35}	0.198	0.083	0.141
环境风险 R_4	0.229	0.149	0.189	高压电塔不均匀沉降 r_{41}	0.269	0.477	0.373
				地下管线位移超限 r_{42}	0.232	0.256	0.244
				地表沉降速率过快 r_{43}	0.198	0.044	0.121
				邻近建筑裂缝扩展 r_{44}	0.170	0.136	0.153
				地下水位异常波动 r_{45}	0.132	0.086	0.109
技术风险 R_5	0.206	0.424	0.315	土方开挖顺序不当 r_{51}	0.219	0.285	0.252
				地基加固质量差 r_{52}	0.190	0.454	0.322
				监测数据反馈滞后 r_{53}	0.167	0.053	0.110
				降水不足或过量 r_{54}	0.228	0.174	0.201
				地质勘察资料不足 r_{55}	0.195	0.034	0.115

由式(13)可知,各一级指标的灰色关联系数均值向量为 $\gamma = [0.540 \quad 0.566 \quad 0.509 \quad 0.562 \quad 0.575]$,由表 8 可知,一级指标的组合权重向量为 $w_c = [0.121 \quad 0.247 \quad 0.128 \quad 0.189 \quad 0.315]$,由式(9)可计算出本深基坑工程的综合灰色关联度如下:

$$S = w_c \gamma^T$$

(14)

由式(14)计算得出本工程综合灰色关联度 $S = 0.558$,根据表 1 的风险等级划分标准,该数值落在 $(0.4, 0.6]$,对应 III 级(中等风险),表明本工程整体施工风险处于中等水平,需加强施工过程中的风险监测与控制,需重点关注权重较高的指标。

3 深基坑施工高风险应对措施

对绿岛湖北站深基坑工程施工风险进行综合评估后,发现技术风险、结构风险与环境风险是权重较高的一级指标,对施工安全的影响更显著。为进一步揭示这 3 个一级指标内部各二级指标的风险分布特征,对技术、结构与环境风险包含的二级指标进行权重可视化分析,如图 4 所示。通过直观分析图中各指标权重的空间分布,识别需优先管控的高风险二级指标为地下连续墙接缝渗漏 r_{21} 、高压电塔不均匀沉降 r_{41} 和地基加固质量差 r_{52} ,并针对其关联的施工环节提出针对性防控策略,为动态风险管控提供专项治理策略。

3.1 地下连续墙接缝渗漏风险防控措施

采用防绕流水囊技术作为地下连续墙接缝渗漏核心防控手段^[17],如图 5 所示。

在工字钢接头外侧翼板空腔内布置分体式水囊,通过向水囊注入 1.5MPa 的水压,使其充分膨胀形成柔性屏障,达到多维度质量控制目标。水囊膨胀后能紧密填充工字钢腹板与槽壁之间的空隙,切实阻断混凝土绕流通道,防止混凝土在接缝处形成渗水薄弱带;注水加压产生的均衡支撑力,可有效稳定软弱土层,抑制槽壁因塌落引起的接缝错位;施工完成并拆除水囊后,接缝处形成了光滑、连续的混凝土界面,进一步减少了渗流通道的生成。为验证防绕流水囊的防渗效果,在基坑开挖过程中对已施工地下连续墙接缝布设 5 组监测点并进行了 1 次/2d 的持续性监测。结果表明所有监测点均未出现渗漏现象,接头处施工面干燥无渗水,整体防渗效果优异,有效保障了深基坑工程的施工安全。

3.2 高压电塔不均匀沉降风险防控措施

针对高压电塔不均匀沉降风险,构建隔离加固与监测协同控制体系。首先在电塔基础与基坑间

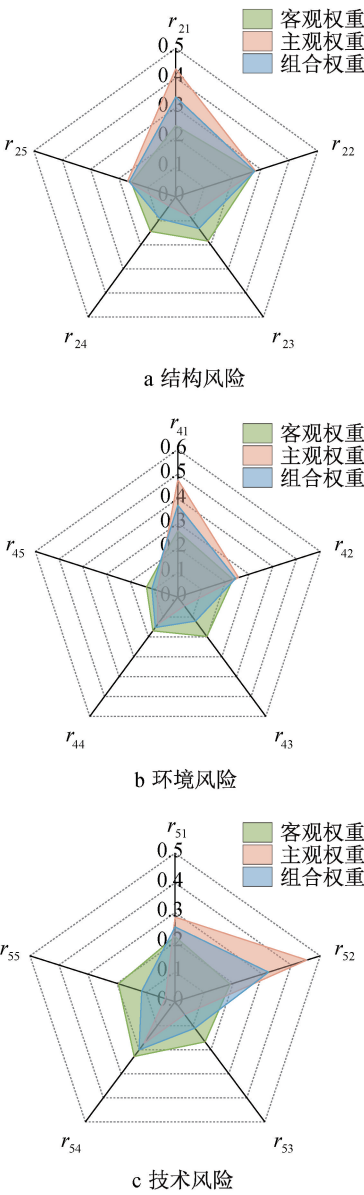


图 4 深基坑施工高风险权重分布

Fig. 4 Risk weight distribution of high-risk factors in deep excavation construction

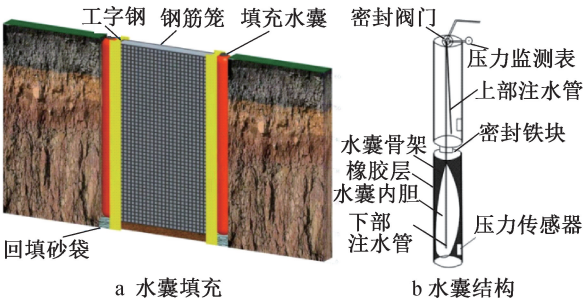


图 5 防绕流水囊技术

Fig. 5 Anti-tangling flow bag technology

设置高压旋喷桩隔离带,采用双液注浆工艺形成帷幕从而缩小土体扰动范围。施工过程中在高压电塔基础周边布置沉降监测点,实施实时动态监测,

发现异常时及时采取措施。制定详细的施工计划,避免在高压电塔附近进行大规模土方开挖和重型机械作业,减少对电塔基础的直接压力和振动影响。在高压电塔基础四周布设 4 个沉降监测点(编号 G1~G4)进行持续性监测。各测点累积沉降监测数据如图 6 所示。由图 6 可知,高压电塔各基础测点的最大累积沉降量仅为 4.1mm,远低于 10mm 的设计预警值。通过这些综合防控措施,能降低高压电塔的不均匀沉降风险,保障深基坑施工和电塔运行的安全。

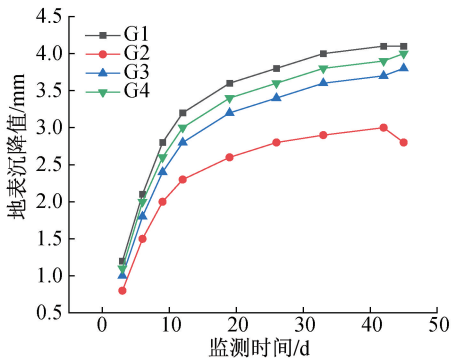


图 6 高压电塔四周地表沉降监测结果

Fig. 6 Ground surface settlement monitoring results around the high-voltage tower

3.3 地基加固质量差风险防控措施

针对地基加固质量差风险,结合绿岛湖北站深基坑工程地质特点,提出预制 U 形槽复合加固技术体系,如图 7 所示。



图 7 预制 U 形槽加固体系

Fig. 7 Precast U-shaped channel reinforcement system

基坑开挖范围内存在深厚淤泥土层,具有低渗透率且遇水易泥质化特点,导致坑底土体稳定性不足,易受扰动而发生局部坍塌。本工程采用预制 U 形槽技术,以替代基坑底部传统下翻梁基槽开挖方式。该技术在减少对软弱土体加固后的扰动方面具有显著优势。U 形槽能为下翻梁提供直接的侧壁支撑,有效防止侧壁坍塌和涌水问题的发生;预制 U 形槽确保了其尺寸和质量精确性,为后续的钢筋绑扎和混凝土浇筑提供了稳定的作业面;预制 U 形槽技术在水位埋藏浅、存在承压水层的淤泥质土层中能有效预防因地下水位变化引起的水土喷涌和

基坑坍塌等问题。

为验证预制 U 形槽复合加固技术对地基施工质量的实际改善效果,本研究对车站底板下翻梁基槽施工质量进行了统计,在未采用该技术的初始施工轴段中,现场共记录到渗水现象 13 处、侧壁轻微坍塌 12 处,施工质量较差,而在后续采用预制 U 形槽的同等长度施工轴段中,同类质量问题急剧减少,反映该技术控制效果显著,降低了软弱土体中基槽开挖的风险。

4 结语

1)构建了一套融合组合赋权与灰色关联分析方法的深基坑施工风险评估体系,并以绿岛湖北站工程为案例验证了该模型的有效性。

2)实例分析表明,该工程整体施工风险为Ⅲ级,其中技术、结构与环境风险为主要影响因素,地下连续墙接缝渗漏、高压电塔不均匀沉降及地基加固质量差被识别为关键风险因素。

3)针对高风险因素提出了防绕流水囊技术、隔离加固与监测协同体系及预制 U 形槽复合加固技术。工程应用表明,这些措施有效降低了渗漏、沉降及地基失稳风险。

4)本模型在融合主客观权重、处理信息不确定性方面具有一定优势,但其适用性仍依赖于具体工程条件与专家经验,后续研究可进一步拓展其在多类型深基坑工程中的适应性。

参考文献:

[1] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(1):13-20.
HUANG H W. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2006, 2 (1): 13-20.

[2] 刘培路. 基于 TOPSIS 方法的明挖基坑风险识别[J]. 都市轨道交通,2024,37(2):84-91.
LIU P L. Identification of risk factors of excavation based on the TOPSIS method [J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37 (2): 84-91.

[3] 张申,李锦,王群敏,等. 基于贝叶斯网络的富水砂层深基坑渗漏动态风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024, 52(6):60-68.
ZHANG S, LI J, WANG Q M, et al. Dynamic risk analysis of deep foundation pit leakage in water-rich sand layer based on Bayesian network [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2024, 52 (6): 60-68.

[4] 魏良丰,吕志林. 地铁深基坑开挖渗漏灾变应急管控研究——以南通地铁建设为例[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(S1):195-201.
WEI L F, LÜ Z L. Research on emergency management and control of leakage during deep foundation pit excavation of

subways;taking Nantong subway construction as an example[J]. Journal of safety science and technology, 2024, 20 (S1): 195-201.

[5] 张宇航,戎思达,李慧,等. 基于动态监测与事故树分析的超大深基坑风险分析方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023,19(9):89-95.

ZHANG Y H,RONG S D,LI H,et al. Research on risk analysis method of super-large deep foundation pit based on dynamic monitoring and fault tree analysis [J]. Journal of safety science and technology,2023,19(9):89-95.

[6] 刘波,王凯强,黄晃,等. 地铁深基坑工程风险模糊层次分析研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(S1):257-264.

LIU B, WANG K Q, HUANG M, et al. Research on fuzzy hierarchical risk assessment of metro deep excavation pit [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2015,11 (S1):257-264.

[7] 程敏,王倩露,林慧龙,等. 基于改进 FMEA 法的深基坑施工风险评价[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(1):54-59,72.

CHENG M,WANG Q L,LIN H L,et al. Risk assessment of the deep foundation pit based on the improved FMEA method [J]. Journal of civil engineering and management,2018,35 (1): 54-59,72.

[8] 陈蓉芳,姜安民,董彦辰,等. 基于熵权可拓模型的深大基坑施工风险评估 [J]. 数学的实践与认识, 2019, 49 (2): 311-320.

CHEN R F,JIANG A M,DONG Y C,et al. Construction risk assessment of deep and large foundation pit based on entropy weight extension model[J]. Mathematics in practice and theory, 2019,49(2):311-320.

[9] 陈绍清,熊思斯,何朝远,等. 地铁深基坑坍塌事故安全风险分析[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):52-58.

CHEN S Q,XIONG S S,HE C Y,et al. Safety risk analysis for the deep foundation pit collapse accidents in the subway construction system[J]. Journal of safety and environment,2020,20(1):52-58.

[10] 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.

ZHANG Z Z. Risk assessment of deep foundation pit construction in metro stations based on improved AHP and entropy value algorithm [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59 (S2): 13-21.

[11] 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.

WU B,DU J,WEN X D,et al. Safety risk assessment of deep foundation pit construction in water-rich soft soil layer based on entropy weight-DEMATEL-ISM[J]. Journal of safety science and technology,2023,19(10):106-114.

[12] LIU S H,SONG Z P,ZHANG Y,et al. Risk assessment of deep excavation construction based on combined weighting and nonlinear FAHP [J]. Frontiers in earth science, 2023, 11:1204721.

[13] MOMENI E,POORMOOSAVIAN M,SALMANI TEHRANI H,et al. Reliability analysis and risk assessment of deep excavations using random-set finite element method and event tree technique [J]. Transportation geotechnics,2021,29:100560.

[14] 张姣. 熵权分析方法在深基坑工程风险评估中的应用研究 [J]. 铁道建筑,2011,51(1):43-45.

ZHANG J. Application of entropy weight analysis method in risk assessment of deep foundation pit engineering [J]. Railway engineering,2011,51(1):43-45.

[15] 孙可,王俊明,戴煜坤. 基于模糊层次分析法的基坑健康状态定量评价[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2021,35(6):107-112.

SUN K, WANG J M, DAI Y K. Quantitative evaluation of foundation pit health based on fuzzy-AHP method [J]. Journal of Jiangsu university of science and technology (natural science edition),2021,35(6):107-112.

[16] 时林丰,谢建斌,刘克文,等. 基于灰色关联度理论的钢管支护桩沉桩位移[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):32-39.

SHI L F,XIE J B,LIU K W,et al. Displacement of steel pipe supporting piles based on grey relational theory [J]. Journal of Shandong university of science and technology (natural science), 2019,38(1):32-39.

[17] 张耀洪,武玉山,马玉龙,等. 地下连续墙防绕流水囊设计与施工[J]. 施工技术(中英文),2024,53(10):84-88,137.

ZHANG Y H,WU Y S,MA Y L,et al. Design and construction of anti-flow around water sac for underground diaphragm wall [J]. Construction technology,2024,53(10):84-88,137.

(上接第 118 页)

LIU C Y,ZHENG C F. Contrastive analysis of seasonal damage of asphalt pavement in alpine high altitude area [J]. Highway engineering,2018,43(6):62-67.

[4] 张震. 高寒高海拔地区级配碎石路用性能研究 [D]. 西安:长安大学,2017.

ZHANG Z. Study on performance characteristics of graded crushed stone in cold region [D]. Xi'an: Changan University,2017.

[5] 何成勇. 云南高海拔地区级配碎石基层材料组成及性能研究 [D]. 重庆:重庆交通大学,2008.

HE C Y. Research on graded gravel basic material composition and performance in high-altitude region of Yunnan [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2008.

[6] 王兴超. 水泥稳定碎石基层中预设缩缝技术研究与应 [J]. 施工技术(中英文),2025,54(23):122-125,131.

WANG X C. Research and application of preset shrinkage joint technology in cement stabilized macadam base [J]. Construction technology,2025,54(23):122-125,131.