



基于层次分析－未确知测度的深基坑施工风险评估

王龙飞¹, 赵运春¹, 杨 宇², 刘 奥², 黄金坤¹, 邓权龙²

(1. 中国十七冶集团有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 2. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 深基坑施工具有危险性大、工序复杂、致灾因素多的特点, 如何评判其安全状态成为风险管控首要解决的问题。文章将层次分析法赋权与未确知测度理论高度融合, 构建风险评估模型, 从安全管理、外部及地质环境、施工质量和监测因素4个方面甄选了22个二级评价指标, 并从5个等级对定性指标和定量指标进行量化, 建立评估指标体系; 采用未确知测度理论求解单指标评估矩阵并建立测度函数, 运用层次分析法确定各指标的客观权重, 根据识别准则评判深基坑施工风险级别。将模型应用于工程项目深基坑施工风险评估中。评价结果为Ⅱ级, 属于低风险, 与实际情况相互吻合。该评估模型对深基坑施工风险进行了合理且客观的评估, 为有效识别和准确评估深基坑施工风险提供新的方法。

关键词: 深基坑; 层次分析法; 未确知测度理论; 风险评估; 评估模型

中图分类号: TU753; U231+.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)12-0075-08

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.12.154

Risk assessment model of deep foundation pit construction based on analytic hierarchy process and unascertained measure theory

WANG Longfei¹, ZHAO Yunchun¹, YANG Yu², LIU Ao², HUANG Jinkun¹, DENG Quanlong²

(1. China MCC17 Group Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China; 2. Civil Engineering & Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: Deep foundation pit construction has the characteristics of high risk, complex process and many disaster-causing factors. How to reasonably judge its safety state has become the primary problem to be solved in risk management and control. The analytic hierarchy process is highly integrated with the unascertained measure theory, and the risk assessment model is constructed and applied in the construction process of deep foundation pit. 22 secondary evaluation indexes were selected from four aspects of safety management, external and geological environment, construction quality and monitoring factors, and the qualitative and quantitative indexes are quantified from five levels to establish the evaluation index system. The unascertained measure theory is used to solve the single index evaluation matrix and establish the measure function. The analytic hierarchy process is used to determine the objective weight of each index, and the risk level of deep foundation pit construction is judged according to the identification criteria. The model is applied to the risk assessment of deep foundation pit construction in engineering projects. The evaluation result is level II, which belongs to low risk, which is consistent with the actual situation. The evaluation model makes a reasonable and objective evaluation of the construction risk of deep foundation pit, and provides a new method for effectively identifying and accurately evaluating the construction risk of deep foundation pit.

Key words: deep foundation pit; analytic hierarchy process; unascertained measure theory; risk assessment; evaluation model

收稿日期: 2025-03-21

基金项目: 安徽省大学生创新创业训练项目(编号:S202410360234)

作者简介: 王龙飞(1988—), 男, 博士, 工程师, 从事建筑安全管理与技术研发的工作。

通信作者: 邓权龙(1990—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 从事施工安全与风险评价的研究工作。

随着我国城市化率突破 65%，地下空间开发已经成为城市集约化发展的重要路径。深基坑工程作为核心支撑技术，其建设规模持续攀升，并呈现“超大规模、超深开挖、超近间距”的发展趋势，导致工程的复杂成度呈指数型增长。尤其在富水软土地区施工时，复杂地质条件与动态施工扰动形成耦合效应，致使基坑事故频发，造成重大经济损失和社会影响^[1]。典型案例显示，2019 年 4 月南通市某地铁车站基坑施工过程中，地下连续墙渗漏引发单日 21.4 mm 的墙体内侧位移，直接导致工程暂停及千万元级经济损失^[2]。深基坑工程具有显著的空间叠加效应和风险传导性，其支护结构变形、水土流失等风险呈现动态演化特征^[3-4]。现行基坑施工风险识别管控体系尚有诸多局限：风险感知实时性不足、多源风险耦合机理不明确、防控措施碎片化，难以实现全过程系统防控。因此，建立科学的风险评估定级体系对指导工程实践具有重要实现意义。

目前，在深基坑工程施工风险识别方向已有专业学者开展不少研究工作。龚颖超等^[5]研究了地铁站深基坑施工中存在的安全风险，构建出 CIM-AHP 风险评估模型；马行耀^[6]利用多层次关联度对地铁站基坑施工风险评价进行研究，给出工程项目施工风险控制方法；张震中^[7]采用改进 AHP-熵值法对深基坑工程施工进行了评估，制定了风险识别应对方案；甘淑清等^[8]从合成法则修正和证据源精准赋权两方面进行改进研究，并开展实例应用分析；吴波等^[9]提出决策实验室法与解释结构模型，研究各因素之间的联系。以上研究工作在工程实践应用中获得了不错效果，然而深基坑施工过程中的诸多风险因素往往具有不确定性与随机性，且一些定性的评判指标难以系统地量化评价，所以利用科学有效的方法对其进行精准评价是十分必要的。

由王光远教授首次提出的未确知数学理论能够有效分析不确定因素，并提供相应的量化评估方法，现已被广泛应用于矿山、公路边坡、管道工程、隧道工程等领域^[10-13]。层次分析法将复杂的决策问题分解成多层次权重，并聚合成多个层级，从而进行综合的系统性分析^[14-15]。层次分析

法通过系统层级架构实现风险要素结构化分解，而未确知测度理论依托测度函数量化不确定性信息，两者融合可构建多维风险测度空间，优化权重计算的可信度，同时解决复杂工程系统中模糊性、动态性与指标耦合性难题。

本文将层次分析法赋权与未确知测度理论耦合建立了深基坑施工风险评估体系，运用置信度识别准则判断待测对象所属等级，以期可为深基坑施工风险评价提供新的思路，为采取预防措施提供指导性意见。

1 层次分析—未确知测度模型理论

1.1 层次分析法确定评价指标权重

1.1.1 构建比较标度

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是以多目标决策问题为基础，通过对复杂的决策要素进行系统化的组织和结构化处理，建立多层次阶梯式结构的综合系统分析方法。该方法根据层级间各因素的相对重要性，科学确定各评估指标的权重系数，从而实现对复杂问题的系统性评价。各层次指标比较的标度^[16-17]，根据 9 级标度法与判断原理进行比较，结果如表 1 所示。

表 1 层次分析标度法

标度	含义
1	表示两项指标相比,重要意义等同
3	表示两指标相比,前者略重要于后者
5	表示两指标相比,前者明显重要于后者
7	表示两指标相比,前者强烈重要于后者
9	表示两指标相比,前者极端重要于后者
2,4,6,8	表示相邻指标重要程度的折中值
倒数	表示上述评估对象的比较分值

1.1.2 构建判断矩阵

基于构建的递阶层次结构模型，结合前述评估标准，逐层比较各要素，从而形成判别矩阵 D 。根据其定义可知：

$$D = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{X_1}{X_1} & \cdots & \frac{X_1}{X_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X_m}{X_1} & \cdots & \frac{X_m}{X_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

针对构建的判别矩阵 D ，其权重向量计算公

式如下:

$$DW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 表示其最大特征值, 并具有唯一性, 同时权重向量 W 的所有分量均为正数, 保证其唯一性^[18-19]。

1.1.3 检验判断矩阵一致性

为避免因经验判断导致评价结果失真, 需要通过一致性检验来评判所构造的判断矩阵是否符合逻辑, 一般采用一致性比率算法进行检验, 见式(3)、(4)。

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} \quad (3)$$

$$C_I = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (4)$$

式中: C_I 表示一致性指标, R_I 表示平均随机一致性指标, 其值与 n 相关, n 表示阶数, 具体数值如表 2 所示。其中, 当 $C_R < 0.1$ 时, 则检验通过; 否则认为判断矩阵不符合逻辑, 需调整或从样本中剔除。

表 2 各阶数 R_I 取值

阶数	R_I	阶数	R_I
1	0	6.00	1.24
2	0	7.00	1.32
3	0.58	8.00	1.41
4	0.89	9.00	1.45
5	1.12	10.00	1.49

1.2 未知测度计算理论

设研究对象 A 有 n 个指标, 那么其评判指标空间 $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, a_i 为该对象 A 第 i 个指标的测度值, 评估等级共有 p 个, 则评估等级空间 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$, $C_r (r=1, 2, \dots, p)$ 为第 r 个评估等级, 满足 $C_r > C_{r+1}$, $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ 或者 $C_1 < C_2 < \dots < C_p$, 则 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 是等级空间 C 的有序分割类。

1.2.1 单指标测度矩阵

设 $a_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为单指标测度, 且满足下式:

$$0 \leq a(a_i \in C_r) \leq 1 \quad (5)$$

$$a(a_i \in A) = 1 \quad (6)$$

$$a|a_i \in \bigcup_{j=1}^r c_j| = \sum_{j=1}^r a(a_i \in c_j) \quad (7)$$

式(5)为测度非负有界性, 式(6)为测度归一性, 式(7)为可加性。

可得到单指标测度矩阵为

$$a_{n \times p} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{np} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.2.2 单指标测度函数构建

测度函数的构建旨在精确的得出未知测度值, 众多构建测度函数的方法中, 直线法被普遍认可, 且应用较为广泛。用 x 表示指标测量值, x_r 、 x_{r+1} 分别为测量值 x 属于 C_r 、 C_{r+1} 状态的测度, d_r 、 d_{r+1} 分别表示 C_r 、 C_{r+1} 上测量值 x 的中间值。则测度函数表达为

$$\begin{cases} x_r = \begin{cases} \frac{-x}{d_{r+1} - d_r} + \frac{d_{r+1}}{d_{r+1} - d_r}, d_r < x \leq d_{r+1} \\ 0, x > d_{r+1} \end{cases} \\ x_{r+1} = \begin{cases} 0, x \leq d_r \\ \frac{x}{d_{r+1} - d_r} - \frac{d_r}{d_{r+1} - d_r}, d_r < x \leq d_{r+1} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

1.2.3 多指标综合测度

设 a_{ir} 为对象 a_i 属于第 r 个评估等级的测度值, 则 u_r 为对象 A 在第 r 个评估等级中的多指标测度, 多指标测度向量为 $\{u_1, u_2, \dots, u_p\}$ 。

$$u_r = \sum_{i=1}^m w_i a_{ir} \quad (10)$$

1.2.4 置信度识别准则

若 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 为评估等级空间 C 的有序分割类, 则可按置信度识别准则, 设 ξ 为置信度, 取值为 $\xi \geq 0.5$, 则结果为第 K_0 个评估等级 C_{K_0} 。

$$K_0 = \min \left| K: \sum_{r=1}^p u_r > \xi, r = 1, 2, \dots, p \right| \quad (11)$$

2 深基坑施工风险评估模型

2.1 确定评价等级

目前, 在复杂环境深基坑施工风险等级划分方面, 尚未形成统一的参照标准。因此, 本文在划分风险等级时, 依据各评价指标对危险性等级

的影响程度，采用分级法将其分成 5 个等级。评估等级空间为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ ，分别表示深基坑施工风险为：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级，其等级定义为“极低风险、低风险、中等风险、高风险、极高风险”，如表 3 所示。

表 3 评估指标风险等级取值区间

风险等级	取值区间
Ⅰ级	$[80,100)$
Ⅱ级	$[60,80)$
Ⅲ级	$[40,60)$
Ⅳ级	$[20,40)$
Ⅴ级	$[0,20)$

2.2 构建评价指标体系

为建立深基坑施工安全风险的指标体系，通过相关文献调研、结合专家评价意见以及借鉴

《建筑基坑工程监测技术标准》^[20]来构建。

2.2.1 指标选取

从安全管理、外部和地质环境、施工质量和监测因素等 4 个方面综合考虑深基坑施工的工艺、特点和事故机理进行分析，并参考相关标准和参考已有的相关文献成果，归纳出 22 项评价指标，进而构建出如图 1 所示的深基坑施工安全风险指标体系。

2.2.2 指标量化

风险评估指标体系建立后，按标准对风险因素分级量化，部分指标参考标准及文献数据，其余赋值量化，具体数据如表 4 所示。

2.3 构建单指标未确知测度函数

单指标测度函数如图 2 所示。

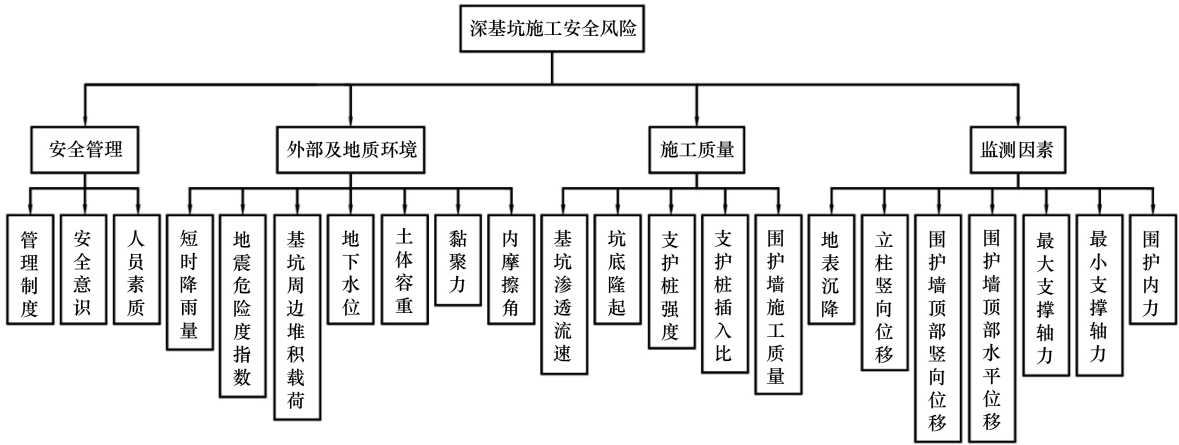


图 1 风险评判指标

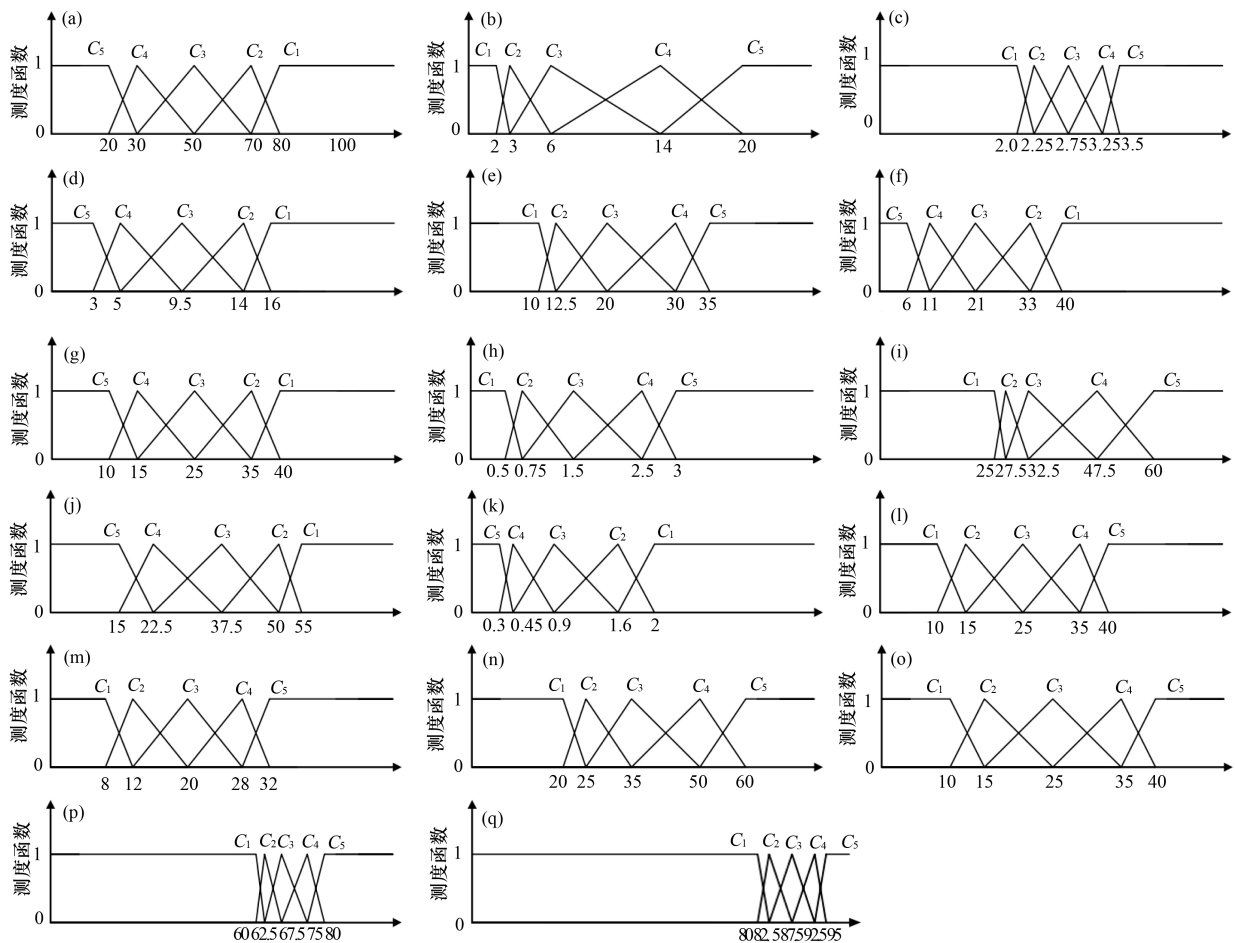
表 4 风险评判指标和评估等级

评价指标	各评价等级划分标准				
	Ⅰ级(C_1)	Ⅱ级(C_2)	Ⅲ级(C_3)	Ⅳ级(C_4)	Ⅴ级(C_5)
管理制度 J_1	极完善	完善	较完善	不完善	极不完善
安全意识 J_2	极高	高	一般	较低	低
人员素质 J_3	优秀	良好	中等	合格	较差
短时降雨量 $J_4/(\text{mm}\cdot\text{h})$	0~2.0	2.0~4.0	4.0~8.0	8.0~20.0	≥ 20.0
地震危险度指数 J_5	<2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	≥ 3.5
基坑周边堆积荷载情况 J_6	极高	高	一般	较低	低
地下水位 J_7/m	16.0~20.0	12.0~16.0	7.0~12.0	3.0~7.0	0~3.0
土体容重 $J_8/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	0~10.0	10.0~15.0	15.0~25.0	25.0~35.0	35.0~45.0
黏聚力 J_9/kPa	40.0~60.0	26.0~40.0	16.0~26.0	6.0~16.0	0~6.0
内摩擦角 $J_{10}/(^{\circ})$	40.0~50.0	30.0~40.0	20.0~30.0	10.0~20.0	0~10.0
基坑渗透流速 $J_{11}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~4.0

表 4(续)

评价指标	各评价等级划分标准				
	I 级(C_1)	II 级(C_2)	III 级(C_3)	IV 级(C_4)	V 级(C_5)
坑底隆起 J_{12}/mm	<25.0	$25.0 \sim 30.0$	$30.0 \sim 35.0$	$35.0 \sim 60.0$	>60.0
支护桩强度 J_{13}/MPa	$55.0 \sim 60.0$	$45.0 \sim 55.0$	$30.0 \sim 45.0$	$15.0 \sim 30.0$	$0 \sim 15.0$
支护桩插入比 J_{14}	$2.0 \sim 3.0$	$1.2 \sim 2.0$	$0.6 \sim 1.2$	$0.3 \sim 0.6$	$0 \sim 0.3$
围护桩墙施工质量 J_{15}	优秀	良好	中等	合格	较差
地表沉降 J_{16}/mm	$0 \sim 10.0$	$10.0 \sim 20.0$	$20.0 \sim 30.0$	$30.0 \sim 40.0$	$40.0 \sim 50.0$
立柱竖向位移 J_{17}/mm	$0 \sim 8.0$	$8.0 \sim 16.0$	$16.0 \sim 24.0$	$24.0 \sim 32.0$	$32.0 \sim 40.0$
围护墙顶部竖向位移 J_{18}/mm	<20.0	$20.0 \sim 30.0$	$30.0 \sim 40.0$	$40.0 \sim 60.0$	>60.0
围护墙顶部水平位移 J_{19}/mm	<10.0	$10.0 \sim 20.0$	$20.0 \sim 30.0$	$30.0 \sim 40.0$	>40.0
最大支撑轴力比例 $J_{20}/\%$	<60.0	$60.0 \sim 65.0$	$65.0 \sim 70.0$	$70.0 \sim 80.0$	>80.0
最小支撑轴力比例 $J_{21}/\%$	<80.0	$80.0 \sim 85.0$	$85.0 \sim 90.0$	$90.0 \sim 95.0$	$95.0 \sim 100.0$
围护墙内力比例 $J_{22}/\%$	<60.0	$60.0 \sim 65.0$	$65.0 \sim 70.0$	$70.0 \sim 80.0$	>80.0

注: 最大支撑轴力比例 J_{20} 表示实际支撑轴力与构建承载能力设计值的比值; 最小支撑轴力比例 J_{21} 表示实际支撑轴力与钢支撑、锚杆预应力设计值的比值; 围护墙内力比例 J_{22} 表示是实际围护墙内力与钢支撑、锚杆预应力设计值的比值。



(a) 管理制度、安全意识、人员素质、基坑周边堆积荷载情况、围护桩墙施工质量; (b) 短时降雨量;
(c) 地震危险度指数; (d) 地下水位; (e) 土体容重; (f) 黏聚力; (g) 内摩擦角; (h) 基坑渗透流速;
(i) 坑底隆起; (j) 支护桩强度; (k) 支护桩插入比; (l) 地表沉降; (m) 立柱竖向位移; (n) 围护墙顶部竖向位移;
(o) 围护墙顶部水平位移; (p) 最大支撑轴力比例、围护墙内力比例; (q) 最小支撑轴力比例

图 2 各单指标测度函数

2.4 评价模型求解步骤

评估模型求解步骤如图 3 所示。

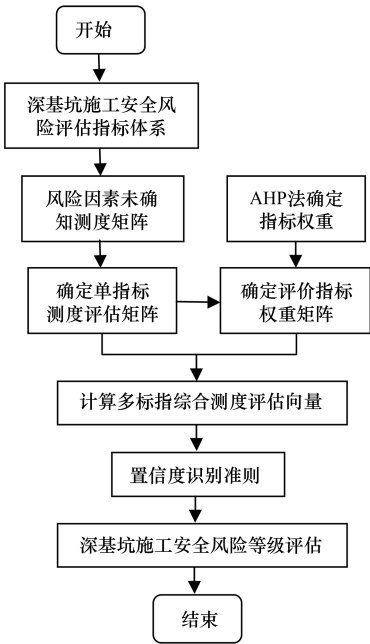


图 3 评估模型求解流程

3 实例应用

3.1 工程概况

某城市地铁站为双层单柱两跨框架结构，站台有效长度约为 112 m，车站总长度约为 225 m，总建筑面积约为 11 800 m²，基坑深度约为 31 m，属于深基坑工程。通过对该项目的深基坑施工相关情况进行调研和参数测量，量化各评估指标值，如表 5 所示。

表 5 该工程评估指标量化取值

J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8
78.0	70	75.000	1	0.5	70.00	15.80	20.0
J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}	J_{16}
37.9	28	0.725	10	53.5	1.80	70.00	14.5
J_{17}	J_{18}	J_{19}	J_{20}	J_{21}	J_{22}	—	—
20.0	10	18.000	70	80.0	60.00	—	—

3.2 计算 AHP 评价指标权重

根据行业内专家和基坑施工经验颇丰的施工人员综合意见，对所构建的深基坑施工安全风险评估体系中的一、二级指标分别进行判断矩阵的构造，如表 6 ~ 10 所示。

表 6 一级指标判断矩阵

一级指标	安全管理	外部环境	施工质量	监测因素
安全管理	1.000	2.000	3.000	3.000
外部及地质环境	1/2	1.000	2.000	2.000
施工质量	1/3	1/2	1.000	1.000
监测因素	1/3	1/2	1.000	1.000
$\bar{W}(A_0)$	0.454	0.263	0.141	0.141
$\lambda_{\max}$	4.010 36			

注： $C_R = 0.003\ 88 < 0.1$ ，满足一致性检验。

表 7 安全管理判断矩阵

二级指标	J_1	J_2	J_3
J_1	1.000	3.000	2.000
J_2	1/3	1.000	1/3
J_3	1/2	3.000	1.000
$\bar{W}(A_1)$	0.524	0.141	0.333
$\lambda_{\max}$	3.058 32		

注： $C_R = 0.046\ 40 < 0.1$ ，满足一致性检验。

表 8 外部及地质环境判断矩阵

二级指标	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}
J_4	1	2	3	4	3	3	4
J_5	1/2	1	2	3	2	2	3
J_6	1/3	1/2	1	2	1	1	2
J_7	1/4	1/3	1/2	1	1/2	1/2	1
J_8	1/3	1/2	1	2	1	1	2
J_9	1/3	1/2	1	2	1	1	2
J_{10}	1/4	1/3	1/2	1	1/2	1/2	1
$\bar{W}(A_2)$	0.322	0.204	0.115	0.064	0.115	0.115	0.064
$\lambda_{\max}$	7.042 19						

注： $C_R = 0.005\ 33 < 0.1$ ，满足一致性检验。

表 9 施工质量判断矩阵

二级指标	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}
J_{11}	1	2	3	3	2
J_{12}	1/2	1	2	2	1
J_{13}	1/3	1/2	1	1	1/2
J_{14}	1/3	1/2	1	1	1/2
J_{15}	1/2	1	2	2	1
$\bar{W}(A_3)$	0.368	0.206	0.109	0.109	0.206
$\lambda_{\max}$	5.013 26				

注： $C_R = 0.002\ 96 < 0.1$ ，满足一致性检验。

表 10 监测因素判断矩阵

二级指标	J_{16}	J_{17}	J_{18}	J_{19}	J_{20}	J_{21}	J_{22}
J_{16}	1	4	3	3	2	2	3
J_{17}	1/4	1	1/2	1/2	1/3	1/3	1/2
J_{18}	1/3	2	1	1	1/4	1/4	1
J_{19}	1/3	2	1	1	1/4	1/4	1
J_{20}	1/2	3	4	4	1	1	3
J_{21}	1/2	3	4	4	1	1	3
J_{22}	1/3	2	1	1	1/3	1/3	1
$\bar{W}(A_4)$	0.282	0.053	0.076	0.076	0.216	0.216	0.081 0
$\lambda_{\max}$	7.222 98						

注: $C_R = 0.028\ 15 < 0.1$, 满足一致性检验。

3.3 单指标评估矩阵

结合表 4 中量化数据与图 2 中测度函数图, 可确定该工程深基坑施工安全风险评估因素的矩阵分别如下:

$$\begin{aligned}
 (u_{11})_{3 \times 5} &= \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 (u_{12})_{7 \times 5} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 (u_{13})_{5 \times 5} &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 (u_{14})_{7 \times 5} &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.67 & 0.33 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3.4 多指标向量

由上述所求评估矩阵进行权重赋值, 按式(10)可计算得:

$$u_1 = \bar{W}_{A_1} \times u_{11} = [0.393\ 5 \quad 0.523\ 1 \quad 0.083\ 4 \quad 0 \quad 0]$$

$$u_2 = \bar{W}_{A_2} \times u_{12} = [0.657\ 8 \quad 0.182\ 0 \quad 0.160\ 2 \quad 0 \quad 0]$$

$$u_3 = \bar{W}_{A_3} \times u_{13} = [0.356\ 0 \quad 0.644\ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$u_4 = \bar{W}_{A_4} \times u_{14} = [0.401\ 2 \quad 0.306\ 9 \quad 0.220\ 8 \quad 0.071\ 1 \quad 0]$$

$$U = \bar{W}_{A_0} \times u_{1-4} = [0.458\ 8 \quad 0.419\ 9 \quad 0.111\ 3 \quad 0.01 \quad 0]$$

3.5 置信度识别

根据识别准则, 条件取值范围为 $\xi \geq 0.5$, 由式(11)知, 置信度识别从小到大为 $(U_5 + U_4 + U_3 + U_2 = 0.541\ 2$ 满足取值条件), 则 $K_0 = 2$, 判定为 II 级(低风险)。

4 结 论

(1) 综合现场调研资料与相关研究成果, 选取安全管理、外部及地质环境、施工质量和监测因素作为一级指标, 甄选二级指标有管理制度、安全意识等 5 个定性指标和短时降雨量、地震危险度、地下水位等 17 个定量指标, 构建其评估指标体系。

(2) 结合单指标测度函数, 利用未确定测度理论的模型结合层次分析法进行评估, 可以有效地量化处理施工过程中的不确定因素和模糊性因素, 从而达到精确评估目标的目的。与传统的评估方法相比, 这种方法显著减少了人为主观因素的干扰, 避免了因主观判断而导致的评估结果失真。

(3) 通过层次分析法与未确知测度理论构建的评价模型应用于深基坑实例, 最后置信度识别得出评价结果为低风险, 与现场实际结果一致, 具有科学的严谨性, 能够应用于工程实践, 对深基坑施工安全风险评估具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 曹丙柄, 朱金贤, 陈彬. 软土地区某地铁车站深基坑施工监测分析[J]. 工程建设, 2022, 54(12): 72-78.
- [2] 樊冬冬, 刘祥勇, 景旭成, 等. 南通富水砂性地层地铁深基坑墙体渗漏原因分析[J]. 隧道建设, 2020, 40

- (增刊 1):225-231.
- [3] 付新政,崔春雨,张乾青,等. 基于遗传算法的基坑多指标变化量动态预测研究[J]. 工业建筑,2024,54(11):33-40.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 马行耀. 基于多层次关联度的地铁车站基坑施工风险评价研究[J]. 公路,2023,68(12):264-268.
- [7] 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(增刊 2):13-21.
- [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(增刊 1):234-243.
- [9] 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.
- [10] 盛佳,万文,张海云,等. 金川二矿区上盘贫矿采矿方法优选及采动效应分析[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(4):1389-1400.
- [11] 李佳美,邓唯,田学泽. 基于组合赋权-未确知测度理论的高速公路高陡边坡施工安全风险评价[J]. 公路,2023,68(1):204-211.
- [12] 陈利琼,曾志强,张开. 基于未确知测度理论的山区管道地质灾害风险评估[J]. 科学技术与工程,2022,22(35):15528-15535.
- [13] 刘湘慧,陈玉斌,占庆林,等. 隧道施工塌方安全风险状态判断研究[J]. 工程建设,2021,53(8):1-7.
- [14] 武金料. 基于层次分析法的大跨度钢结构监测综合评估方法研究[J]. 工业建筑,2023,53(6):218-223.
- [15] 杨凯博. 基于层次分析法和模糊综合评价法的建筑工程项目应急能力评价研究[J]. 城市建筑,2024,21(20):186-189.
- [16] 谭玲,张帮鑫,黄河,等. 基于层次分析法的土质边坡风险分区研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(12):18-26.
- [17] 李炎峰,刘志祥,闵晨笛. 金属矿深部采场结构参数的模糊层次分析综合评判优化[J]. 矿冶工程,2022,42(1):24-29.
- [18] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [19] 陈雪娇,王晓宇,安高军,等. 基于层次分析法的吸热碳氢燃料评估指标体系设计[J]. 火箭推进,2024,50(5):44-52.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2020.