

中文引用格式:陈资,邱华婉,刘家宇,等. 基于可变模糊集的地铁深基坑坍塌风险评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6):105-110.

英文引用格式:CHEN Zi, QIU Huawan, LIU Jiayu, et al. Risk assessment of deep foundation pits in subway stations based on variable fuzzy sets [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 105-110.

基于可变模糊集的地铁深基坑坍塌风险评估^{*}

陈资 讲师, 邱华婉, 刘家宇, 杨斯羽, 黎志勇 副教授

(广东理工学院 智能制造学院, 广东 肇庆 526100)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1019

资助项目:广东省科技创新战略专项资金立项项目(pdjh2024b486);广东理工学院科研项目(2024GCJS002)。

【摘要】 为准确判识深基坑坍塌风险等级,提升深基坑施工安全性,建立基于可变模糊集理论的深基坑坍塌风险评估模型,从水文地质、支护情况、施工操作和管理监测4个方面筛选出16个影响因素,构建深基坑坍塌风险指标体系并明确相应等级标准;采用乘法合成法对逐步加权评估比率分析法(SWARA)确定的主观权重与熵权法计算的客观权重进行优化组合,形成综合权重;运用可变模糊集理论对样本数据进行处理,求得综合等级特征值以此判定深基坑坍塌风险等级。结果表明:该评估方法所得结果与实际施工情况一致,具有一定的科学性和有效性;相较于现有评估方法,该方法能更准确地反映深基坑坍塌风险状况。

【关键词】 地铁; 深基坑; 坍塌; 可变模糊集; 风险评估

Risk assessment of deep foundation pits in subway stations based on variable fuzzy sets

CHEN Zi, QIU Huawan, LIU Jiayu, YANG Siyu, LI Zhiyong

(School of Intelligent Manufacturing, Guangdong Polytechnic College,
Zhaoqing Guangdong 526100, China)

Abstract: To accurately identify deep foundation pit collapse risk levels and improve construction safety, a risk assessment model was developed using variable fuzzy set theory. Sixteen influencing factors were screened from four categories: hydrogeology, support conditions, construction operations, and management monitoring. A risk index system was constructed based on these factors with clearly defined grade standards for risk classification. The multiplicative synthesis method was applied to optimally combine subjective weights derived from Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and objective weights calculated via the entropy weight method, forming comprehensive weights that integrate expert judgment and data objectivity. Variable fuzzy set theory was then utilized to process sample data, generating comprehensive grade characteristic values to determine collapse risk levels. Engineering case results show that the evaluation outcomes of method align with actual construction conditions, confirming its scientific validity and effectiveness. Compared to existing approaches, it more accurately reflects risk status by addressing the fuzzy nature of risk boundaries in deep foundation pit projects. This study provides a scientific and practical framework for risk assessment, enhancing safety management in deep foundation pit construction and offering practical value for ensuring project safety and informed risk management decisions.

Keywords: subway; deep foundation pit; collapse; variable fuzzy set; risk assessment

0 引言

当前,在我国城市中心区域的地铁深基坑工程,因其复杂性、隐蔽性及地质条件的异质性等特征,坍塌事故时有发生。2003—2024年,坍塌事故在地铁施工事故中的占比高达40%,导致数百人伤亡^[1]。合理评估深基坑坍塌风险,是确保深基坑安全施工的前提。

国内外学者们研究了深基坑施工过程中的坍塌风险。陈绍清等^[2]从人为因素、施工技术、环境因素、管理因素4个方面,深入分析了导致深基坑坍塌事故的原因;王成汤等^[3]基于多态模糊贝叶斯网络,构造了地铁车站深基坑坍塌概率模型;陈楠^[4]则采用灰色聚类算子,评估了地铁车站深基坑的施工安全等级;ZHANG Guohua等^[5]基于模糊贝叶斯和模糊层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP),定量分析了基坑坍塌的风险;许德俊等^[6]将云模型与改进的D-S理论相融合,提出一种创新性的多源信息融合评估方法,用于预测隧道深基坑的风险等级。以上研究为深基坑坍塌风险的研究奠定了基础,但仍存在风险评估指标体系尚不全面系统、风险指标权重的确定过于主观,以及无法有效应对深基坑风险指标数据的模糊性和不确定性等挑战。可变模糊集理论^[7]在处理数据的模糊性和不确定性上表现突出,已在水资源质量评价^[8]等多个工程技术领域得到了广泛应用,但目前尚未应用于地铁深基坑坍塌风险评估领域。

综上所述,在深入分析地铁深基坑坍塌诸多影响因素的基础上,笔者拟基于乘法合成法确定指标主客观综合权重,运用可变模糊集描述各评估指标与等级间的不确定性关系,并将该方法应用于广州某线路地铁站深基坑工程中,以便为预防和控制深基坑坍塌事故提供实践依据。

1 深基坑坍塌风险评估指标体系

结合《深基坑工程设计施工手册》^[9]、110起国内地铁坍塌事故原因分析结果^[10]和施工对坍塌风险的影响^[11],忽略占比相对较低的机械因素(9.3%),从水文地质(56.5%)、支护情况(17.1%)、管理监测(17.1%)和施工操作4个方面,选取16个坍塌风险指标,构建评估体系。

1) 水文地质方面。土的黏聚力 X_1 和内摩擦角 X_2 越大,越能抵抗坍塌风险。渗透系数 X_3 影响地下水流动,高渗透性可能导致水力侵蚀,增加坍塌风

险。平均地下水位 X_4 上升会增大孔隙水压力,降雨量 X_5 增加会导致 X_4 上升和土体含水量增加,增加坍塌风险。

2) 支护情况方面。围护结构厚度 X_6 增加,能显著提升基坑边坡稳定性,降低坍塌风险。合理的围护插锚比 X_7 ,可确保围护结构深入稳定土层,增强抗坍塌能力。内支撑类型与间距 X_8 的选择需根据基坑深度和土质条件确定,合理的内支撑能有效分散基坑侧壁压力,防止坍塌。

3) 施工操作方面。超挖深度 X_9 过大、开挖速度 X_{10} 过快均会造成土体稳定性受损,增加深基坑坍塌风险。不合理的开挖方案 X_{11} 易导致坍塌。降排水及时性 X_{12} 不足,地下水位高,土体强度降低,加剧坍塌可能。开挖深度 X_{13} 越深,施工难度及坍塌风险增大。

4) 管理监测方面。管理施工规范性 X_{14} 不足,易导致施工违规,增加坍塌风险;监测频率 X_{15} 过低,难以及时发现安全隐患;坑周超载比 X_{16} 过高,加大基坑负荷,降低稳定性。

16个坍塌风险指标中,内支撑类型与间距 X_8 、开挖方案合理性 X_{11} 和施工规范性 X_{14} 用半定量方法取值,其余13个指标为定量指标,用实测值评估。

表1为深基坑坍塌风险指标及等级标准。将风险评估细分为4个等级:I级(低风险:围岩结构完整,无裂缝)、II级(中风险:围岩结构相对完整,存在细微裂缝)、III级(高风险:围岩结构完整性一般,存在明显裂缝)和IV级(极大风险:围岩结构存在滑塌风险)。

2 基于可变模糊集理论的风险评估模型

2.1 确定中点值矩阵 M

将评估对象每个指标按优到差分成 k 个区间等级,形成评估区间矩阵 I_{ab} 。

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [a_{11}, b_{11}] & [a_{12}, b_{12}] & \cdots & [a_{1k}, b_{1k}] \\ [a_{21}, b_{21}] & [a_{22}, b_{22}] & \cdots & [a_{2k}, b_{2k}] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [a_{m1}, b_{m1}] & [a_{m2}, b_{m2}] & \cdots & [a_{mk}, b_{mk}] \end{bmatrix}$$

$$= ([a_{ih}, b_{ih}]) \quad (1)$$

式中: i 为评估指标序号, $i=1, 2, \dots, m$; h 为指标所属等级, $h=1, 2, \dots, k$; a_{ih} 、 b_{ih} 分别为 I_{ab} 区间值的上限和下限。

表 1 深基坑坍塌风险指标及等级标准

Table 1 Risk indicators and critical standards for collapse of deep foundation pits

类别	评估指标	等级			
		I 低风险)	II (中风险)	III (高风险)	IV (极大风险)
水文地质	土的黏聚力 X_1/kPa	>40	$(30,40]$	$(15,30]$	≤ 15
	土的内摩擦角 $X_2/(\text{°})$	>24	$(19,24]$	$(14,19]$	≤ 14
	渗透系数 $X_3/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	≤ 0.25	$(0.25,2]$	$(2,10]$	>10
	平均地下水位 X_4/m	>15	$(10,15]$	$(8,10]$	≤ 8
	降雨量 X_5/mm	≤ 15	$(25,15]$	$(25,50]$	>50
支护情况	围护结构厚度 X_6/m	>1.2	$(1,1.2]$	$(0.8,1]$	≤ 0.8
	围护插挖比 X_7	>2	$(1.8,2]$	$(1.6,1.8]$	≤ 1.6
	内支撑类型与间距 X_8	1(混凝土 <3.5)	2(混凝土 >3.5)	3(钢支撑 <3.5)	4(钢支撑 >3.5)
施工操作	超挖深度 X_9/m	≤ 0.5	$(0.5,1]$	$(1,2]$	>2
	开挖速度 $X_{10}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$\leq 2\,000$	$(2\,000,3\,000]$	$(3\,000,4\,000]$	$>4\,000$
	开挖方案合理性 X_{11}	1(非常合理)	2(合理)	3(基本合理)	4(不合理)
	降排水及时性 X_{12}/min	≤ 60	$(60,120]$	$(120,180]$	>180
	开挖深度 X_{13}/m	≤ 8	$(8,15]$	$(15,25]$	>25
管理监测	施工规范性 X_{14}	1(非常规范)	2(规范)	3(基本规范)	4(不规范)
	监测频率 $X_{15}/(\text{次} \cdot \text{d}^{-1})$	3	2	1	0
	坑周超载比 X_{16}	≤ 1	$(1,1.4]$	$(1.4,2]$	>2

由 I_{ab} 可得到可变区间矩阵 $I_{cd} = ([c_{ih}, d_{ih}])$:

$$[c_{ih}, d_{ih}] = \begin{cases} [c_{ih-1}, d_{ih+1}], & k-1 > 0 \text{ and } h < k \\ [c_{ih}, d_{ih+1}], & k-1 = 0 \\ [c_{ih-1}, d_k], & h = k \end{cases} \quad (2)$$

式中 c_{ih} 、 b_{ih} 分别为 I_{cd} 区间值的上限和下限。

由 I_{ab} 确定中点值矩阵 $M = (M_{ih})$, M_{ih} 为:

$$M_{ih} = \begin{cases} c_{i1}, & h = 1 \\ \frac{c_{ih} + d_{ih}}{2}, & 1 < h < k \\ d_{ik}, & h = k \end{cases} \quad (3)$$

2.2 计算相对隶属度

比较样本指标特征值 t_{ij} 与 M_{ih} , 若 t_{ij} 在 M_{ih} 的左侧, 则相对隶属度为 $\mu_A(t_{ij})_h$ 为:

$$L_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ \frac{L_{i-1}}{s_i + 1}, & i > 1 \end{cases} \quad (4)$$

若 t_{ij} 在 M_{ih} 的右侧, 则相对隶属度 $\mu_A(t_{ij})_h$ 为:

$$L_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ \frac{L_{i-1}}{s_i + 1}, & i > 1 \end{cases} \quad (5)$$

2.3 确定指标综合权重

2.3.1 SWARA 确定指标主观权重

逐步加权评估比率分析法 (Stepwise Weight

Assessment Ratio Analysis, SWARA) 的特点是通过专家意见对指标的相对重要性进行赋权^[12]。与 AHP 相比, SWARA 减少了指标间成对比较的次数, 降低了计算的复杂性。该方法具体步骤如下:

- 1) 得到各专家指标重要性矩阵 $A = (r_{ij})_{m \times n}$ 。
- 2) 计算指标初始权重 L_i :

$$L_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ \frac{L_{i-1}}{s_i + 1}, & i > 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 s_i 为相邻指标间的得分值之差。

- 3) 确定第 i 个指标主观权重 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (7)$$

2.3.2 熵权法确定指标客观权重

熵权法根据指标所包含的信息量来确定各指标的权重^[13]。

- 1) 得到标准矩阵 $B = (z_{ij})_{m \times n}$ 。
- 2) 确定各评估指标熵值 Q_i 。在 m 个指标、 n 个评估等级体系中, 第 i 个评估指标的熵值为:

$$Q_i = - \frac{1}{\ln m} \sum \eta_{ij} \ln \eta_{ij} \quad (8)$$

式中 η_{ij} 为第 i 个指标第 j 个等级的数据占比。

- 3) 计算指标客观权重 β_i 。

$$\beta_i = \frac{1 - Q_i}{\sum_{i=1}^n (1 - Q_i)} \quad (9)$$

2.3.3 基于乘法合成法的综合赋权

乘法合成法将主、客观赋权法确定的权重系数,对应相乘并取算术平方根,最后归一化处理乘积^[14]。综合权重 w_i 为:

$$w_i = \frac{(\gamma_i \times \beta_i)^{1/2}}{\sum_{i=1}^n (\gamma_i \times \beta_i)^{1/2}}, i = 1, 2 \cdots, n \quad (10)$$

2.4 计算综合相对隶属度

评估对象对级别 h 的综合相对隶属度为 U_h :

$${}_jU_h = \left\{ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i(1 - u_A(t_{ij})_h)]^p}{\sum_{i=1}^m [w_i u_A(t_{ij})_h]^p} \right]^{\frac{\alpha}{p}} \right\}^{-1} \quad (11)$$

式中: w_i 为指标 i 的权重; α 为准则优化参数, α 通常取值 1 或 2; p 为可变距离参数,取 1 或 2。因此,式(11)中 α 与 p 有 4 种组合,即: $\alpha=1, p=1$; $\alpha=1, p=2$; $\alpha=2, p=1$ 和 $\alpha=2, p=2$ 。

2.5 利用综合等级特征值进行等级评估

求取评估对象的等级特征值 H :

$$H = \sum_{h=1}^c {}_jU_h \quad (12)$$

表 2 4 个站点指标数据调查统计

Table 2 Survey statistics of indicator data for four stations

站点	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
A	45	20	1.89	12.6	32	1.13	1.75	2	0.2	3 048	2	105	16.3	3	1	1.1
B	38	18	2.15	12.8	41	1.08	1.72	2	1.2	3 213	3	108	17.2	3	1	1.5
C	48	27	1.65	10.9	34	1.31	1.83	2	0.2	2 890	2	71	14.6	2	2	0.89
D	32	22	2.45	10.3	45	0.98	1.54	2	1.7	3 867	3	105	19.1	3	1	1.3

3.1 中点值矩阵的确定

由式(1)一式(3)可得中点值矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} 60 & 35 & 23 & 0 \\ 35 & 22 & 17 & 0 \\ 0 & 1 & 6 & 15 \\ 20 & 13 & 9 & 0 \\ 0 & 20 & 38 & 80 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 2\ 500 & 3\ 500 & 5\ 000 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 90 & 150 & 210 \\ 0 & 12 & 20 & 35 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \\ & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

3.2 相对隶属度矩阵的计算

以站点 A 为例,比较 t_{ij} 与 M_{ih} ,由式(4)、式(5)计算指标实测值相对隶属矩阵。

$$\mu_A = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.38 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.70 & 0.40 & 0.00 \\ 0.00 & 0.56 & 0.47 & 0.00 \\ 0.26 & 0.98 & 0.24 & 0.00 \\ 0.00 & 0.36 & 0.78 & 0.14 \\ 0.33 & 0.85 & 0.18 & 0.00 \\ 0.00 & 0.38 & 0.75 & 0.13 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.80 & 0.20 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.48 & 0.55 & 0.02 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.13 & 0.75 & 0.38 & 0.00 \\ 0.00 & 0.44 & 0.63 & 0.07 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.38 & 0.75 & 0.13 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$\bar{H} = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 H \quad (t = 1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

式中 t 为参数 p 和 α 的组合方式。

综合等级特征值 H' 为:

$$H' = \sum_{i=1}^s (\bar{H}_i w_i) \quad (14)$$

当 $1 < H' \leq 1.5$, 属于风险 I 级; 当 $1.5 < H' \leq 2.5$, 属于风险 II 级; 当 $2.5 < H' \leq 3.5$, 属于风险 III 级; 当 $3.5 < H' \leq 4.5$, 属于风险 IV 级。

3 深基坑坍塌风险评估实例分析

以广州市某地铁线作为研究对象展开应用研究。该地铁线路总长 61.3 km, 其中首通段长达 58.3 km, 全线均为地下线路, 并设有 9 座地下车站。为有效预防地铁站深基坑坍塌事故, 选取该线路上的 4 个站点的深基坑作为坍塌风险评估重点, 收集 4 个站点定量指标的实测数据; 组建由 4 名专家组成的评估小组, 对半定量指标进行专业评分。该专家组包括 2 名地铁安全管理人员、1 名事故应急管理人员以及 1 名高校专业教师。4 个站点各指标数据见表 2。

3.3 指标权重的计算

由式(6)、式(7)计算 γ_i ,由式(8)、式(9)得到 β_i ,由式(10)可得 w_i ,结果见表 3。

表 3 指标综合权重

Table 3 Comprehensive weights of indicators							
指标	γ_i	β_i	w_i	指标	γ_i	β_i	w_i
X_1	0.06	0.08	0.07	X_9	0.02	0.01	0.01
X_2	0.05	0.03	0.04	X_{10}	0.03	0.01	0.02
X_3	0.02	0.02	0.02	X_{11}	0.08	0.09	0.09
X_4	0.08	0.06	0.07	X_{12}	0.04	0.06	0.05
X_5	0.06	0.08	0.07	X_{13}	0.02	0.04	0.03
X_6	0.12	0.13	0.13	X_{14}	0.08	0.10	0.09
X_7	0.14	0.08	0.11	X_{15}	0.06	0.03	0.04
X_8	0.04	0.06	0.05	X_{16}	0.10	0.12	0.11

3.4 综合等级特征值的确定

由式(11)计算 4 种参数组合下的综合相对隶属度矩阵,归一化处理后,结合式(12)一式(14)可得各站点的坍塌风险等级,结果见表 4。可以看出,站点 B 和 D 的风险等级为Ⅲ级,属于高风险;站点 A 和 C 的风险等级为Ⅱ级,属于中风险。在实际施工过程中,站点 A 和 C 的围岩结构出现了细微裂缝现象,而站点 B 和 D 的围岩结构裂缝现象则较为明显,并且基坑周围地表还出现了沉降现象。由此可见:该评估结果与实际情况高度相符。

表 4 深基坑坍塌风险评估结果

Table 4 Results of collapse risk assessment in deep foundation pit							
站 点	不同参数组合下等级特征值 $\bar{H}$				综合等 级特征 值 H'	风险 等级	现场 调查 结果
	$\alpha=1,$ $p=1$	$\alpha=1,$ $p=2$	$\alpha=2,$ $p=1$	$\alpha=2,$ $p=2$			
A	2.24	2.23	2.26	2.20	2.23	Ⅱ	Ⅱ
B	2.95	2.89	3.11	2.77	2.93	Ⅲ	Ⅲ
C	1.59	1.44	1.56	1.72	1.58	Ⅱ	Ⅱ
D	2.89	3.22	3.08	3.35	3.13	Ⅲ	Ⅲ

图 1 为 4 种参数组合下各站点的等级特征值 $\bar{H}$ 三维效果图。由图 1 可以看出,同一站点在不同参数组合下的 $\bar{H}$ 变化较小,而不同站点在相同参数组合下则呈现波动性。例如:在特定参数组合下,站点 B 的 $\bar{H}$ 高于站点 D。为降低误差,风险评估需综合不同参数组合的结果。风险等级为Ⅱ级的站点中,站点 C 的 $\bar{H}$ 平均高于站点 A,意味着坍塌风险更高;在Ⅲ级风险的站点中,站点 D 的平均 $\bar{H}$ 高于站点 B。

3.5 对比分析

为验证可变模糊集理论的有效性,在风险评估指标及等级标准、指标权重相同的情况下,分别采用

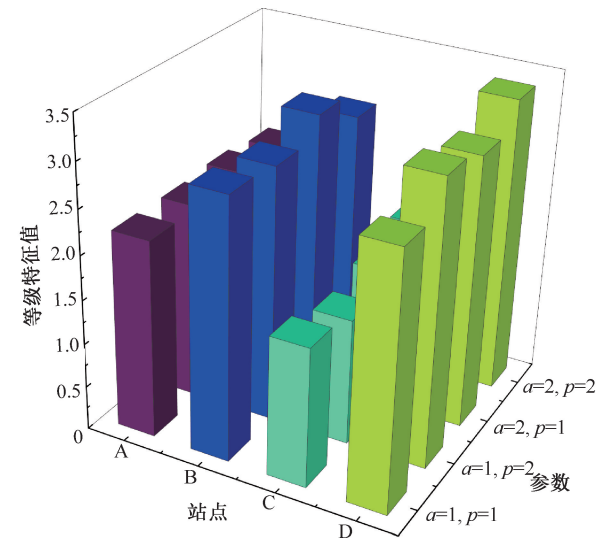


图 1 在同参数组合下各站点的等级特征值

Fig.1 Characteristic-level values for 4 subway stations under different parameter combinations

可变模糊集方法、未确知测度法^[15]和物元可拓法^[16]分别计算各站点深基坑坍塌风险等级。未确知测度法选取置信度 λ 为 0.8。表 5 为 3 种方法的评估结果。可以看出,3 种方法在站点 C 和站点 D 的风险等级相同;3 种方法对于站点 A 和站点 B 的风险等级存在一定差异,可变模糊集理论结果更贴近实际情况(站点 A 深基坑围岩结构完整性较好,隐蔽裂隙发育,局部轻微掉块,处于风险等级Ⅱ;站点 B 的围岩结构完整性则明显较差,存在明显的裂缝,处于较高的风险等级Ⅲ)。

表 5 不同方法对 4 站点深基坑风险评估结果

Table 5 Risk assessment results for four sites using different methods						
站 点	风险评估方法					
	未确知测度法 ^[15]		物元可拓法 ^[16]		可变模糊集理论	
	综合未 知测度	评估 等级	最大 贴近度	评估 等级	综合等级 特征值 H'	评估 等级
A	0.91	Ⅱ	0.99	Ⅲ	2.23	Ⅱ
B	0.81	Ⅳ	0.91	Ⅲ	2.93	Ⅲ
C	0.89	Ⅱ	0.89	Ⅱ	1.58	Ⅱ
D	0.88	Ⅲ	0.98	Ⅲ	3.13	Ⅲ

尽管未确知测度法和可变模糊集理论在站点 A 和 C 上都是风险等级Ⅱ,但可变模糊集理论得到的站点 B 和站点 C 的 H' ,相较未确知测度法的综合未知测度,数值差异更为显著,对同等风险等级站点的区分更精细,增强了风险评估的准确性和区分度。同理,可变模糊集理论在站点 B 和站点 D 的风险评估中,相较于物元可拓法,展现出了更大的区分度。

可变模糊集理论与其他 2 种方法结果差异的原因主要是:未确知测度法的描述性相对不够细化,导致部分信息丢失,可变模糊集通过构建相对差异函数,能够更全面地描述评估对象的风险;模糊数学评估法遵循最大隶属度原则,存在隶属函数静态化的问题,可变模糊集则通过构建相对差异函数,动态划分等级边界,从而避免了这一问题。

4 结 论

1) 案例风险等级评估结果表明:站点 A、C(Ⅱ

级)和 B、D(Ⅲ级)风险等级与实际施工中围岩裂缝及地表沉降现象完全吻合,证明文中所提方法具有一定的科学性和有效性。

2) 在风险评估指标及等级标准、权重相同情况下,对比未确知测度法、物元可拓法与可变模糊集理论评估结果,可知:可变模糊集理论结果更贴近实际,对同等风险等级站点区分更精细。

3) 将 SWARA 法与熵权法相结合进行综合赋权,能够有效避免主观因素对指标权重分配的干扰,从而显著提高评估结果的准确性和可靠性。

参 考 文 献

[1] 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(3):206-210.
LIU Ge, TONG Guozhu, FENG Shuangxi, et al. Research on risk evaluation and countermeasures of deep foundation pit construction based on comprehensive analysis method of AHP-DEA [J]. Architecture Technology, 2016, 47(3): 206-210.

[2] 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 Shaoqing, XIONG Sisi, HE Chaoyuan, 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.

[3] 王成汤,王浩,覃卫民,等. 基于多态模糊贝叶斯网络的地铁车站深基坑坍塌可能性评价[J]. 岩土力学, 2020, 41(5):1 670-1 679.
WANG Chengtang, WANG Hao, QIN Weimin, et al. Evaluation of collapse possibility of deep foundation pits in metro stations based on multi-state fuzzy bayesian networks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5):1 670-1 679.

[4] 陈楠. 基于 IOWA 算子的地铁车站深基坑施工安全综合评价[J]. 隧道建设:中英文, 2020, 40(2):202-208.
CHEN Nan. Comprehensive evaluation of construction safety of deep foundation pit of metro station based on IOWA operator[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2):202-208.

[5] ZHANG Guohua, WANG Chengtang, JIAO Yuyong, et al. Collapse risk analysis of deep foundation pits in metro stations using a fuzzy bayesian network and a fuzzy AHP[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 42:379-385.

[6] 许德俊,李军,兰新乐,等. 基于多源数据融合深基坑风险评估方法[J]. 公路, 2023, 68(9):439-443.
XU Dejun, LI Jun, LAN Xinle, et al. Risk assessment method for deep excavation based on multi-source data fusion[J]. Highway, 2023, 68(9):439-443.

[7] 王婧,靳春玲,贡力,等. 基于可变模糊集理论的铁路隧道塌方风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5):1 364-1 372.
WANG Jing, JIN Chunling, GONG Li, et al. Risk assessment of railway deep foundation pit collapse based on variable fuzzy theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5):1 364-1 372.

[8] FANG Yunhai, ZHENG Xilai, HUI Peng, et al. A new method of the relative membership degree calculation in variable fuzzy sets for water quality assessment[J]. Ecological Indicators, 2019, 98:515-522.

[9] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998: 64-73.

[10] 彭玉林. 基于 FLAC3D 的城市地铁深基坑支护风险研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
PENG Yulin. Risk study on deep excavation support of urban subway based on FLAC3D[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021.

[11] SHEN Yuanshun, WANG Peng, LI Meiping, et al. Application of subway foundation pit engineering risk assessment: a case study of Qingdao rock area China[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4 621-4 630.

[12] AYYILDIZ E. A novel pythagorean fuzzy multi-criteria decision-making methodology for e-scooter charging station location-selection[J]. Transport and Environment, 2022, 39:324-330.

[13] BANADKOUKI M. Selection of strategies to improve energy efficiency in industry: a hybrid approach using entropy weight method and fuzzy TOPSIS[J]. Energy, 2023, 279:DOI: 10.1016/j.energy.2023.128070.

[14] MIRALLES D, HOLMES T, DEJEU R A, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 453-469.

[15] 邓权龙,蒋仲安,王佩. 矿井防尘供水管网可靠性未确知测度评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3):135-140.
DENG Quanlong, JIANG Zhongan, WANG Pei. Uncertainty measurement model for evaluating reliability of mine dust-proofing water supply network[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3):135-140.

[16] 王丹,梁靖涵. 装配式建筑施工风险评价模型构建及应用[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10):69-75.
WANG Dan, LIANG Jinghan. Development and application of risk assessment model for prefabricated building construction[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10):69-75.

作者简介: 陈 资 (1995—),男,湖南株洲人,硕士,讲师,主要从事安全管理与研究工作。E-mail: czi826_1@163.com。