

基于未确知测度理论和欧氏距离判别法的 基坑边坡稳定性评价^①

喻鲲鹏¹, 张海行¹, 黄攀衡¹, 余游¹, 贺彬¹, 陈顺满²

(1. 中铁隧道局集团三处有限公司, 广东 深圳 518051; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于未确知测度理论, 选取水文工程地质条件、边坡高度、边坡坡度、基坑深度、排水设施、临近荷载、临近荷载坑边距、日最大降雨量、支护方式和施工方式共 10 个影响因素, 利用熵权法确定各指标的权重, 建立某基坑边坡未确知测度理论模型, 结合欧氏距离判别法确定边坡的稳定性程度。结果表明, 在强降雨且排水设施和支护方式均差时, 基坑边坡稳定性差; 无降雨且排水设施和支护方式均好时, 基坑边坡较稳定; 排水设施和支护方式对边坡稳定性的影响显著。现场监测数据表明, 评价结果与实际情况较为一致, 证明未确知测度理论和欧氏距离判别法评价基坑边坡稳定性的可靠性较高。

关键词: 边坡; 未确知测度理论; 欧氏距离; 评价模型; 边坡稳定性; 测度函数; 排水设施; 支护方式; 降雨

中图分类号: TD854; U455

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.009

文章编号: 0253-6099(2025)03-0057-06

Evaluation of Foundation Pit Slope Stability Based on Unascertained Measure Theory and Euclidean Distance Discriminant Method

YU Kunpeng¹, ZHANG Haixing¹, HUANG Panheng¹, YU You¹, HE Bin¹, CHEN Shunman²

(1. China Railway Tunnel Group No.3 Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518051, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: Based on the unascertained measure theory, ten influencing factors, including hydrological and engineering geological conditions, slope height, slope gradient, foundation pit depth, drainage facilities, adjacent loads, distance from adjacent loads to the pit edge, maximum daily rainfall, support method and construction method, were selected. The weight of each indicator was determined by using the entropy weight method, and an unascertained measure theory model for a certain foundation pit slope was established. Then the slope's stability level was determined by adopting Euclidean distance discriminant method. The results indicate that when there is heavy rainfall and both drainage facilities and support methods are poor, the foundation pit slope is instable. When there is no rainfall and both drainage facilities and support schemes are good, the slope is relatively stable. It is shown that drainage facilities and support schemes have a significant impact on slope stability. Field monitoring data show that the evaluation results are consistent with the actual situation, demonstrating high reliability of the proposed unascertained measure theory and Euclidean distance discriminant method for evaluating foundation pit slope stability.

Key words: slope; unascertained measure theory; Euclidean distance; evaluation model; slope stability; measure function; drainage facility; support method; rainfall

边坡稳定性一直是工程领域备受瞩目的问题之一, 边坡失稳不仅会造成经济损失, 也会给人们生命安全带来严重威胁^[1-2]。影响边坡稳定性的因素众多, 因此, 有必要对边坡稳定性开展深入研究^[3]。随着计算

机技术的发展, 层次分析法^[4]、灰色理论^[5]、模糊数学理论^[6]、CRITIC-蛛网灰靶法^[7]和 AHP-FCE 模型^[8]等综合评价方法在边坡稳定性分析中得到了广泛应用, 但这些方法还存在一定不足, 例如模糊综合评判方法

① 收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 江西省自然科学基金(20224BAB214033)

作者简介: 喻鲲鹏(1989—), 湖南长沙人, 高级工程师, 主要从事地铁隧道的施工与管理工。E-mail: 787212684@qq.com

和层次分析法受人为因素(专家打分法)的影响,其确定的权重往往有较大主观性。

未确知测度理论主要采用熵权法确定权重,可避免人为因素的影响,适用于影响因素较多的工程问题评价^[9],且变权欧氏距离对不同维度数据进行权重赋值^[10],可较好处理有尺度信息的样本问题,提高计算精度。本文采用未确知测度理论,选取影响基坑边坡稳定性的关键因素,构建基坑边坡稳定性未确知测度理论计算模型,并采用欧氏距离判别法确定边坡稳定性等级。

1 未确知测度理论原理

未确知测度理论通过构造单指标测度函数,确定指标权重,设立多指标综合测度向量,最终采用欧氏距离判别法确定评价等级。

设优选对象空间 $R_i = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, 每个优选对象有 m 个指标, 记为 $M_j = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$, x_{ij} ($j=1, 2, 3, \dots, m$) 表示第 i 个优选对象关于评价指标 M_j 的测量值。每个评价指标又分为 p 个评价等级, 记为 $U = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_p\}$, 其中 C_k 为评价指标的第 k 个等级, 且高于第 $k+1$ 个等级, 即 $C_k > C_{k+1}$ 。

1.1 单指标测度及未确知测度矩阵

如果 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$ 表示 x_{ij} 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度, 则应满足下式:

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in C_k) = 1 \quad (2)$$

$$\mu(x_{ij} \in \bigcup_{i=1}^k C_i) = \sum_{i=1}^k \mu(x_{ij} \in C_i) \quad (3)$$

式(1)为 μ 对评价空间 U 的非负有界性, 式(2)为归一性公式, 式(3)为 μ 对评价空间 U 的可加性, 即可加性公式。满足式(1)、(2)和(3)的 μ 为未确知测度; $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 为边坡稳定性评价的单指标测度决策矩阵:

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 指标权重的确定

根据熵权法的定义, 对既定指标的权重, 熵值越小, 指标离散程度越大, 即该指标对边坡稳定性影响越大。熵值越大, 指标离散程度越小, 该指标对边坡稳定性影响越小。该方法的优点在于不受人为因素干扰, 可用于处理不同量纲的多指标数据问题, 且结果较为准确。

以 w_j 表示测量指标 X_j 的权重, 且 $0 \leq w_j \leq 1$,

$\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。根据各指标的归一化处理结果, 综合得到某方案的指标权重向量为: $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ 。其中权重 w_j 的计算式为:

$$w_j = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (5)$$

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^p \mu_{ijk} \lg \mu_{ijk} \quad (6)$$

式(5)、式(6)确定各指标的权重主要依据各方案实际指标值与未确知测度模型。在计算时, 根据文献规定, $\mu_{ijk} = 0$ 时, $\lg \mu_{ijk} = 0$ 。

1.3 多指标综合测度评价向量

如果 $\mu_{ijk} = \mu(R_i \in C_k)$ 的评价样本 R_i 属于第 k 个评价等级, 可得到多指标测度向量:

$$\mu_k = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

$$0 \leq \mu_{ijk} \leq 1, \sum_{k=1}^p \mu_{ijk} = 1$$

式中 μ_k 为该样本第 k 个评价等级的未确知测度。

1.4 欧氏距离判别法

采用欧氏距离判别法作为属性判别法则, 令 d_k 为多指标综合测度 u_{ik} 到分类等级 C_k 的距离, 其表达式为:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(u_{i1} - 1)^2 + (u_{i2} - 0)^2 + (u_{i3} - 0)^2 + (u_{i4} - 0)^2} \\ d_2 = \sqrt{(u_{i1} - 0)^2 + (u_{i2} - 1)^2 + (u_{i3} - 0)^2 + (u_{i4} - 0)^2} \\ d_3 = \sqrt{(u_{i1} - 0)^2 + (u_{i2} - 0)^2 + (u_{i3} - 1)^2 + (u_{i4} - 0)^2} \\ d_4 = \sqrt{(u_{i1} - 0)^2 + (u_{i2} - 0)^2 + (u_{i3} - 0)^2 + (u_{i4} - 1)^2} \end{cases} \quad (8)$$

则对象的分级等级为: $\min d_k (1 \leq k \leq 4)$ 。

在判别边坡稳定性等级后, 对边坡稳定性进行排序, 若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 令 C_1 的分值为 $I_i, I_i > I_{i+1}$, 则:

$$q_{R_i} = \sum_{i=1}^p I_i d_k \quad (9)$$

式中 q_{R_i} 为评价对象 R_i 的未确知重要度。 $q = (q_{R_1}, q_{R_2}, \dots, q_{R_n})$ 被称为未确知稳定性程度向量, 可按照其大小对评价对象的稳定性程度进行排序与计算。

2 基坑边坡稳定性评价指标体系建立

基坑边坡稳定性的影响因素较为复杂, 基于国内外相关边坡失稳理论及案例^[11-13], 确定影响基坑边坡稳定性的关键因素主要有: ① 地质条件(水文工程地质条件); ② 工程条件(边坡高度、边坡坡度、基坑深度、排水设施、临近荷载、临近荷载坑边距); ③ 气象条件(日最大降雨量); ④ 人为条件(支护方式、施工方式)。

考虑将上述定性指标进行定量化,定性指标按照安全等级分别赋值为1,2,3和4。根据国内外类似工程评价^[11-13],将基坑边坡分为4个等级,分别为稳定 C_1 、较稳定 C_2 、一般稳定 C_3 和 C_4 ,基坑边坡稳定性评判标准如表1所示,定性指标定量标准如表2所示。

表1 基坑边坡稳定性评判标准

Table 1 Assessment criteria for slope stability of foundation pit

评价指标	符号	稳定 C_1	较稳定 C_2	一般稳定 C_3	不稳定 C_4
边坡高度/m	M_1	<50	50~100	100~150	>150
边坡坡度/(°)	M_2	<15	15~30	30~45	>45
水文工程地质条件	M_3	1	2	3	4
基坑深度/m	M_4	<4	4~6	6~13	>13
排水设施	M_5	1	2	3	4
日最大降雨量/mm	M_6	<25	25~55	55~90	>90
临近荷载/kPa	M_7	<30	30~100	100~200	>200
临近荷载坑边距/m	M_8	>15	10~15	5~10	<5
支护方式	M_9	1	2	3	4
施工方式	M_{10}	1	2	3	4

表2 定性指标定量标准

Table 2 Quantitative criteria for qualitative indicators

定性指标	等级赋值			
	稳定 C_1	较稳定 C_2	一般稳定 C_3	不稳定 C_4
水文工程地质条件	简单水文地质和工程地质(1)	水文地质和工程地质至少一项为中等复杂(2)	复杂水文地质或工程地质(3)	复杂水文地质和工程地质(4)
排水设施	非常好(1)	较好(2)	一般(3)	非常差(4)
支护方式	合理(1)	一般合理(2)	较合理(3)	不合理(4)
施工方式	非常好(1)	较好(2)	一般(3)	非常差(4)

未确知测度函数通常包含线性函数、一元二次函数等多种方式,而线性函数应用较为方便、直观。本文采用线性函数构建边坡各因素的未确知测度函数,其中定性指标按照表2进行定量化,从而得到各指标单指标测度函数,如图1所示,对应的4个定性指标单指标测度函数相同。

结合该基坑边坡实际工况及工程地质情况,得到该典型基坑边坡稳定性分析指标汇总,如表3所示。

表3 某典型基坑边坡稳定性分析指标汇总

Table 3 Analysis indicators for slope stability of a typical foundation pit

计算工况	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	备注
I	6.5	45	2	7	2	0	200	2	2	2	无降雨、支护较好、排水设施好
II	6.5	45	2	7	2	107	200	2	2	2	降雨量大(实测最大值107 mm/d)、排水设施较好、支护较好
III	6.5	45	2	7	4	107	200	2	2	2	降雨量大(实测最大值107 mm/d)、排水设施非常差、支护较好
IV	6.5	45	2	7	2	0	200	2	4	2	无降雨、支护非常差、排水设施好
V	6.5	45	2	7	2	107	200	2	4	2	降雨量大(实测最大值107 mm/d)、排水设施较好、支护非常差
VI	6.5	45	2	7	4	107	200	2	4	2	降雨量大(实测最大值107 mm/d)、排水设施非常差、支护非常差

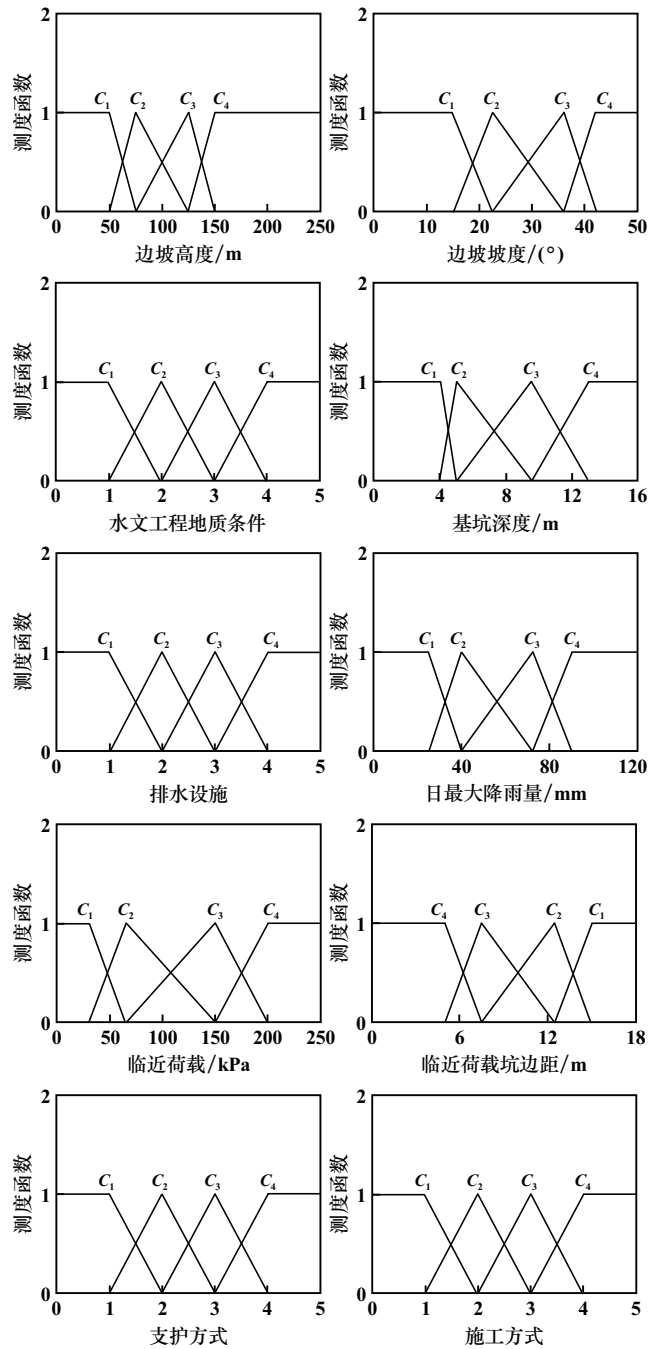


图1 各指标单指标测度函数

Fig. 1 Measure function of each indicator

3 某典型基坑边坡稳定性评价

3.1 单指标评价矩阵构建

根据各指标单指标测度函数和表3数据,确定各工况单指标评价矩阵如下:

$$\begin{aligned} \mu_{1jk} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mu_{2jk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mu_{3jk} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mu_{4jk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mu_{5jk} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mu_{6jk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0.86 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

3.2 多指标测度评价

工况I各指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{10}\} = \{0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.053 1, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2\}$; 对应的多指标综合测度评价向量为: $\{0.210 4, 0.450 4, 0.023 6, 0.315 6\}$ 。

工况II各指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{10}\} = \{0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.053 1, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2,$

$0.105 2, 0.105 2, 0.105 2\}$; 对应的多指标综合测度评价向量为: $\{0.105 2, 0.450 4, 0.023 6, 0.420 9\}$ 。

工况III各指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{10}\} = \{0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.053 1, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2\}$; 对应的多指标综合测度评价向量为: $\{0.105 2, 0.345 2, 0.023 6, 0.526 1\}$ 。

工况IV各指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{10}\} = \{0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.053 1, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2\}$; 对应的多指标综合测度评价向量为: $\{0.210 4, 0.345 2, 0.023 6, 0.420 9\}$ 。

工况V各指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{10}\} = \{0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.053 1, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2\}$; 对应的多指标综合测度评价向量为: $\{0.105 2, 0.345 2, 0.023 6, 0.526 1\}$ 。

工况VI各指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{10}\} = \{0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.053 1, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2, 0.105 2\}$; 对应的多指标综合测度评价向量为: $\{0.105 2, 0.239 9, 0.023 6, 0.631 3\}$ 。

3.3 欧氏距离判别法识别及重要性程序排序结果

采用最小未确知测度欧氏距离判别法对上述计算得到的各综合测度评价向量进行排序,可得到各工况下基坑边坡稳定性等级及稳定性程度,如表4所示。由表4可以看出,工况I、工况II下基坑边坡较稳定,工况III、工况IV、工况V和工况VI下基坑边坡不稳定。对比工况I、工况II及工况III可以发现,强降雨对基坑边坡稳定性的影响较大,特别是排水设施较差时,边坡基坑由较稳定转化为不稳定状态,其稳定性程度大幅下降;出现强降雨情况时,如果现场排水设施较好,基坑边坡稳定性程度虽有所下降,但仍为较稳定状态。对比工况I和工况IV可以发现,无降雨时,如果基坑边坡支护方式差,基坑边坡为不稳定状态,表明支护方式对基坑边坡的稳定性影响较大。出现强降雨且支护方式差(工况V)时,基坑边坡为不稳定状态,与工况IV相比,其稳定性程度进一步下降。出现强降雨且排水设施和支护方式均很差(工况VI)时,基坑边坡为不稳定状态,其稳定性程度极低。

各工况下基坑边坡稳定性程度排序为:工况I > 工况II > 工况IV > 工况III = 工况V > 工况VI,即在降雨量大且排水设施和支护方式均很差时,基坑边坡稳定性极差;无降雨且排水设施和支护方式均好时,基坑边坡稳定性很好。因此,在基坑边坡施工时,应加强对边坡及基坑的支护,并增强周围设施的排水功能,以减少强降雨对基坑边坡稳定性的影响。

表4 各工况下基坑边坡稳定性等级及稳定性程度

Table 4 Slope stability level and stability coefficient of foundation pit under different working condition

计算工况	d_1	d_2	d_3	d_4	最小值	边坡稳定性	稳定性程度	稳定性程度排序
I	0.962 5	0.668 3	1.140 2	0.846 2	d_2	较稳定	9.104 5	1
II	1.086 8	0.700 6	1.159 5	0.741 5	d_2	较稳定	8.932 6	2
III	1.094 1	0.846 9	1.166 3	0.596 1	d_4	不稳定	8.671 4	4
IV	0.959 3	0.806 7	1.137 5	0.706 7	d_4	不稳定	8.812 0	3
V	1.094 1	0.846 9	1.166 3	0.596 1	d_4	不稳定	8.671 4	4
VI	1.121 3	0.993 9	1.191 9	0.452 9	d_4	不稳定	8.496 5	5

4 现场监测结果分析

图2为基坑边坡位移和降雨量变化曲线图。由图2可知,边坡位移与降雨量、有无支护密切相关。3月8日至4月4日,基坑边坡处于无支护阶段,3月8—12日受连续降雨的影响,边坡位移达到0.77 mm/d;3月21—23日,受强降雨影响,边坡位移超过1 mm/d,对应强降雨且无支护的工况VI,边坡位移明显,稳定性十分差;4月4日施加锚索支护后,4月14—18日无降雨期间,边坡位移小于0.1 mm/d,对应无降雨、支护较好的工况I,边坡位移无明显变化,稳定性较好;4月19—24日降雨期间,边坡位移增大,最大达到0.73 mm/d,对应降雨量大、支护好的工况III,边坡稳定性处于工况I与工况VI所对应的稳定性之间。

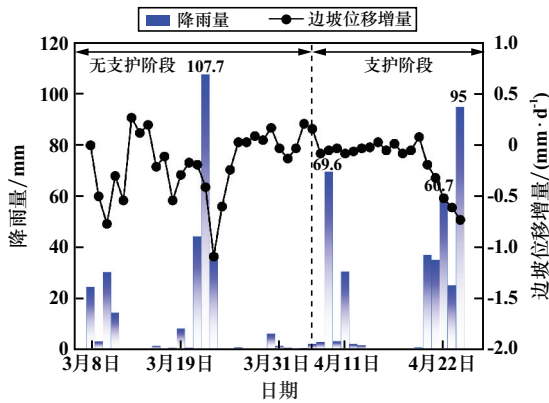


图2 基坑边坡位移和降雨量变化曲线图

Fig.2 Curves of foundation slope displacement and rainfall change

5 结论

1) 应用未确知测度理论,构建了某基坑边坡未确知测度理论模型,采用熵权法确定各指标权重,采用欧氏距离判别法确定边坡稳定性等级。

2) 考虑地质条件、工程条件、气象条件和人为条件4个影响方面,选择水文工程地质条件、边坡高度、边坡坡度、基坑深度、排水设施、临近荷载、临近荷载坑

边距、日最大降雨量、支护方式和施工方式为基坑边坡影响因素。

3) 各工况基坑稳定性排序为:工况I > 工况II > 工况IV > 工况III = 工况V > 工况VI,即强降雨且排水设施和支护方式差时,基坑边坡稳定性极差;无降雨且排水设施和支护方式均好时,基坑边坡稳定性为较稳定。排水设施和支护方式对边坡稳定性的影响显著。对比现场实测数据,采用未确知测度理论和欧氏距离判别法评价的结果与现场实际情况吻合,表明采用未确知测度理论和欧氏距离判别法对基坑边坡进行稳定性评价可靠性较高。

参考文献(References):

[1] 庞俊勇,刘俊,郑靓婧,等. 基于GA-PSO混合优化SVR的边坡危岩体稳定性评价模型[J]. 金属矿山, 2024(9):237-244.
PANG Junyong, LIU Jun, ZHENG Jingjing, et al. Stability evaluation model of slope dangerous rock mass based on GA-PSO hybrid optimization SVR[J]. Metal Mine, 2024(9):237-244.

[2] 李延超,王飞飞,姜安民,等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):150-154.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):150-154.

[3] SHAH MALEKPOOR P, LOPEZ-QUEROL S, JAVANKHOSHEL S. Pseudo-static approach for slope stability analysis within a stochastic probabilistic framework for moderate earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024,184:108846.

[4] 赵黎,李正国,栗登峰,等. 基于GRA-AHP联合极差分析复合算法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):31-34.
ZHAO Li, LI Zhengguo, SU Dengfeng, et al. Sensitivity analysis of slope stability influencing factors based on GRA-AHP combined range analysis composite algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):31-34.

[5] 杨明财,盛建龙,叶祖洋,等. 基于FLAC^{3D}的露天矿边坡稳定性及影响因素敏感性分析[J]. 黄金科学技术, 2018,26(2):179-186.
YANG Mingcai, SHENG Jianlong, YE Zuyang, et al. Analysis of sensitivity factors of open-pit mine slope stability and impact based on FLAC^{3D}[J]. Gold Science and Technology, 2018,26(2):179-186.

[6] 任鹏召,谢盛青,齐路路,等. 基于层次分析法和模糊数学理论的

- 露天矿边坡稳定性分析[J]. 中国矿山工程, 2024,53(3):1-6.
- REN Pengzhao, XIE Shengqing, QI Lulu, et al. Analysis of slope stability in open-pit mines based on analytic hierarchy process and fuzzy mathematics theory[J]. China Mine Engineering, 2024,53(3):1-6.
- [7] 肖亮,张千俊. 基于组合赋权-蛛网灰靶模型的岩爆等级评价[J]. 矿业研究与开发, 2024,44(7):149-155.
- XIAO Liang, ZHANG Qianjun. Evaluation of rock burst level based on combination weighting-cobweb grey target model[J]. Mining Research and Development, 2024,44(7):149-155.
- [8] 赵志强,王勇,李晓俊,等. 基于 AHP-FCE 模型的露天煤矿外排土场边坡稳定性评价[J]. 露天采矿技术, 2024,39(5):54-58.
- ZHAO Zhiqiang, WANG Yong, LI Xiaojun, et al. Slope stability evaluation of open-pit coal mine external dump based on AHP-FCE model[J]. Opencast Mining Technology, 2024,39(5):54-58.
- [9] ZHANG G R, WANG E Y, ZHANG C L, et al. A comprehensive risk assessment method for coal and gas outburst in underground coal mines based on variable weight theory and uncertainty analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,167:97-111.
- [10] 王晓龙,李英晟,付锐棋,等. 基于多元精细复合多尺度波动散布熵和累积欧氏距离矩阵测度的风电机组变桨轴承退化状态评估[J]. 动力工程学报, 2024,44(5):782-791.
- WANG Xiaolong, LI Yingsheng, FU Ruiqi, et al. Degradation state evaluation of wind turbine generator set pitch bearing based on multi-variant refined composite multiscale fluctuation dispersion entropy and cumulative Euclidean distance matrix measure [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024,44(5):782-791.
- [11] 罗广彬. 基于智能监测与欧氏距离的深基坑安全评估研究[D]. 深圳:深圳大学,2023.
- LUO Guangbin. Research on safety assessment of deep excavation based on intelligent monitoring and Euclidean distance[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2023.
- [12] 胡斌,李剑飞,李京,等. 基于软弱夹层蠕变特性的边坡长期稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):6-11.
- HU Bin, LI Jianfei, LI Jing, et al. Analysis of long-term slope stability based on creep characteristics of its weak intercalation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):6-11.
- [13] 刘汉露,李新生,谢冬洲,等. 基于未确知测度理论的基坑边坡稳定性评价[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019,36(1):11-16.
- LIU Hanlu, LI Xinsheng, XIE Dongzhou, et al. Stability evaluation of foundation pit based on unascertained measure theory[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019,36(1):11-16.
- 引用本文:喻鲲鹏,张海行,黄攀衡,等. 基于未确知测度理论和欧氏距离判别法的基坑边坡稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):57-62.
- YU Kunpeng, ZHANG Haixing, HUANG Panheng, et al. Evaluation of foundation pit slope stability based on unascertained measure theory and Euclidean distance discriminant method [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):57-62.

《矿冶工程》征订启事

《矿冶工程》(双月刊)由长沙矿冶研究院有限责任公司、中国金属学会主办,面向国内外公开发行人。本刊是中国期刊方阵“双效期刊”、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CACJ 中国应用型核心期刊,是集学术性和技术性于一体的综合性刊物,已被中国知网(CNKI)、万方数据库、重庆维普资讯、长江文库等全文收录,是国外多家知名检索机构的检索对象。

《矿冶工程》读者对象是采矿、选矿、冶金、材料、地质、化工等系统的有关生产人员、院校师生和管理人员。主要栏目为采矿、选矿、冶金、材料、矿冶行业企业管理等,内容新颖,是开拓、激发创造力的良师益友。

《矿冶工程》编辑部承接彩色、黑白及文字广告业务,欢迎各企事业单位来电来函联络。

《矿冶工程》真诚欢迎新、老订户向全国各地邮局订阅本刊,也可直接向编辑部订阅。邮发代号:42—58,大16开,定价20元/册,全年6册共120元。

地 址:湖南省长沙市麓山南路966号
 邮 编:410012
 电 话:(0731)88657070/88657176/88657173
 传 真:(0731)88657186
 E-mail:kuangyegongchengzz@163.com

联 系 人:黄小芳
 开户名称:矿冶工程杂志(长沙)有限公司
 开户银行:工商银行长沙左家垅支行
 账 号:1901013009201095502
 网 址:http://www.kygcz.com