

基于多测点位移与多评价指标的滑坡状态评价方法

蒋中明^{1,2}, 袁振¹, 王亚雄³, 戴田³, 肖喆臻¹

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 中国电建中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要:为全面利用滑坡地表布置的所有位移测点的数据信息、消除不同位移趋势分析评价方法对滑坡稳定性状态的误判,提出了一种融合多测点位移信息和多指标评价结果的滑坡稳定性状态模糊综合评价方法。实例验证结果表明,该方法避免了采用单一测点位移变化趋势对滑坡稳定性状态评价的不足,而考虑多种评价方法得到的评价结果也避免了单一评价方法对滑坡实际稳定状态评价的局限性,评价结果更加合理。

关键词:滑坡;多测点分析;多指标评价;模糊综合评价;指标权重

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0048-07

A landslide state evaluation method based on multiple measuring point displacement and multiple evaluation indices/JIANG Zhongming^{1,2}, YUAN Zhen¹, WANG Yaxiong³, DAI Tian³, XIAO Zhezhen¹ (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to make full use of the data information of all the measuring points on the landslide surface and to eliminate the misjudgment of the landslide stability state due to different evaluation methods based on displacement trend analysis, a fuzzy comprehensive evaluation method for landslide stability state was proposed, integrating the displacement information from multiple measurement points and the evaluation results of multiple indices. The validation results from case studies show that this method avoids the shortcomings of evaluating landslide stability based on the displacement trend of a single measuring point. Additionally, by considering the results from multiple evaluation methods, it also avoids the limitations of using a single evaluation method for assessing the actual landslide stability state, making the evaluation results more reasonable.

Key words: landslide; multi-measuring point analysis; multi-index evaluation; fuzzy comprehensive evaluation; index weight

滑坡灾害是最常见的自然灾害之一^[1-2]。国家统计局统计资料显示,仅2020年我国就发生了4810起滑坡灾害,造成197人伤亡,直接经济损失达50.2亿元。如何准确有效地感知自然界中滑坡的状态,并对其进行预测预报,以最大程度降低其对人类造成的危害和经济损失,是世界各国学者长期以来的研究热点。为及时掌握滑坡安全性的动态变化状态,国内外众多学者基于滑坡监测的位移时序数据,提出了众多预测滑坡状态和临滑时间的模型,如Saito^[3]提出的滑坡临滑时间预测模型、晏同珍等^[4-5]提出的Verhulst时间预测模型、黄润秋等^[6]提出的斜坡失稳时间协同预测模型、许强等^[7]提出的

滑坡预警改进切线角模型等。上述预测模型必须有能代表滑坡状态的监测点位移时间曲线才能对滑坡状态进行较为准确的预测与分析。

在实际工程中,通常会沿滑坡体的纵向和横向两个方向来布置滑坡位移监测系统的监测剖面,每个剖面包括若干监测点。现有预测模型建模时往往只使用其中一个代表性测点的数据,而选择滑坡状态评价模型使用的代表性测点也存在较大的难度,影响了现有评价模型的应用效果。实际上,滑坡体上不同位置的测点变形是对滑坡状态的综合反应,轻易剔除或不使用所获得的测点数据不仅不科学,也是对监测信息的浪费。为此,徐卫亚等^[8-10]探讨

基金项目:中国电建中南勘测设计研究院科技项目(20220030150)

作者简介:蒋中明(1969—),男,教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:zzmmjiang@163.com

了将滑坡体中众多监测信息(含多个测点位移)纳入同一监测模型的滑坡状态分析方法,但未考虑不同模型得出的评价结果之间的协调一致性。事实上,不同滑坡状态评价模型采用的评价指标(位移速率、改进切线角、位移矢量角、垂直位移方向率等^[11-18])的差异可导致对同一组数据的评价结果各不相同。但滑坡的稳定状态具有唯一性,因此需要一种能兼顾多源信息和多种评价结果的滑坡状态综合评价法。

近年来,模糊综合评价法在滑坡稳定性评价中得到了越来越广泛的应用^[19-21]。模糊综合评价法可将众多影响滑坡状态的因素作为参评指标并纳入同一评价模型中,充分利用各类监测数据。本文基于模糊综合评价法提出一种综合考虑滑坡中所有测点信息和多种方法评价结果的滑坡状态改进评价方法,并通过实例验证了该方法的正确性与合理性。

1 多测点多指标综合评价方法

基于滑坡监测信息的多测点多指标综合评价方法的关键是建立单测点多指标评价模型和多测点评价模型,即构建基于单测点位移时间曲线的滑坡状态评价模型,以及基于多测点位移时间曲线的滑坡状态评价模型。

1.1 单测点滑坡状态评价模型构建

1.1.1 因素集元素及权重的确定

单测点滑坡状态评价首先需要确定因素集和决断集。因素集为参与滑坡状态评价的指标集合,决断集为滑坡发生的不同风险等级的集合。本文选用位移速率 v 、位移矢量角 θ 、改进切线角 α_i 和垂直位移方向率 η 等4种评价指标组成因素集。将滑坡发生风险等级划分为稳定、欠稳定、不稳定、极不稳定和临滑阶段5种,构成决断集。

对于同一测点的位移时间监测数据,采用不同的评价指标分析得到的滑坡稳定性结果可能并不一致。现有的滑坡监测数据评价方法都不够完美,但也都有其自身的合理性。当采用不同的评价方法对同一数据进行评价时,面对不同评价结果,任何主观的取舍都是不科学的。因此,本文提出将不同评价

方法得到的评价结果进行综合分析进而判断滑坡状态的模糊评价方法。同样,对滑坡上不同测点来说,各单测点得到的综合评价结果也可能并不相同,且不可随意取舍。在模糊评价方法中,各评价结果在综合评价模型中的权重与各测点之间的权重均可采用层次分析法确定^[22-23]。具体流程是:先构建判断矩阵,获得基于该判断矩阵的权重向量;然后,对权重向量进行一致性检验^[22,24],若通过检验则认为该判断矩阵合理,得到的权重向量可被采用,否则需要重新建立判断矩阵。

依据工程实际需求的不同,用于滑坡状态评价的各评价指标与各测点对于判断滑坡稳定性的重要程度也有所不同,通过比较不同因素对判断滑坡状态的重要程度得到判断矩阵。

1.1.2 模糊评价矩阵的构建

模糊评价矩阵的构建首先需要通过隶属函数对评价指标进行量化。本文的评价指标隶属函数均采用连续型函数^[25-26]。参考相关研究^[12,14-16,27]建立4种评价指标稳定性的分级标准,如表1所示。根据表1确定隶属函数中的分界值 $S_1 \sim S_5$,见表2。

单测点模糊评价矩阵构建流程如下:设共有 m 个测点参与评价,第 k 个单测点模糊评价矩阵为 $R_k(k=1,2,\cdots,m)$, $R_k=(r_1,r_2,r_3,r_4)^T$, r_i 为第 $i(i=1,2,3,4)$ 个指标的评价结果,隶属函数 $U_1(x) \sim U_5(x)$ 依次对应决断集中5种稳定性状态(稳定~临滑阶段),将第 i 个评价指标的具体值代入隶属函数公式中,则对应得到 r_i 中组成元素 $r_{ij}(j=1,2,\cdots,5)$ 的值。对其他评价指标采用同样方法,得到该单测点的模型评价矩阵 R_k :

$$R_k = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{41} & \cdots & r_{45} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 r_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个决断上的概率分布值,满足 $\sum_{j=1}^5 r_{ij} = 1$ 。

1.1.3 模糊综合评价向量

将层次分析法得到的第 k 个单测点因素集权重向量与该单测点模糊评价矩阵 R_k 进行模糊运算,可

表1 评价指标稳定性分级

分级	位移速率	改进切线角/(°)	位移矢量角	垂直位移方向率
稳定	$(-\infty, 3v]$	$[0, 45]$	$(\bar{Y}-0.5\sigma, \bar{Y}+0.5\sigma)$	$(\bar{Z}-\sigma, \bar{Z}+\sigma)$
欠稳定	$(3v, 10v]$	$(45, 70.9]$	$(\bar{Y}-\sigma, \bar{Y}-0.5\sigma] \cup [\bar{Y}+0.5\sigma, \bar{Y}+\sigma)$	$(\bar{Z}-2\sigma, \bar{Z}-\sigma] \cup [\bar{Z}+\sigma, \bar{Z}+2\sigma)$
不稳定	$(10v, 20v]$	$(70.9, 81.5]$	$(\bar{Y}-1.5\sigma, \bar{Y}-\sigma] \cup [\bar{Y}+\sigma, \bar{Y}+1.5\sigma)$	$(\bar{Z}-2.5\sigma, \bar{Z}-2\sigma] \cup [\bar{Z}+2\sigma, \bar{Z}+2.5\sigma)$
极不稳定	$(20v, 24v]$	$(81.5, 86.03]$	$(\bar{Y}-2\sigma, \bar{Y}-1.5\sigma] \cup [\bar{Y}+1.5\sigma, \bar{Y}+2\sigma)$	$(\bar{Z}-3\sigma, \bar{Z}-2.5\sigma] \cup [\bar{Z}+2.5\sigma, \bar{Z}+3\sigma)$
临滑阶段	$(24v, \infty)$	$(86.03, 90]$	$(-\infty, \bar{Y}-2\sigma] \cup [\bar{Y}+2\sigma, \infty)$	$(-\infty, \bar{Z}-3\sigma] \cup [\bar{Z}+3\sigma, \infty)$

注: $\bar{Y}$ 、 $\bar{Z}$ 分别为位移矢量角和垂直位移方向率序列均值; σ 为相应序列的均方差。位移矢量角与垂直位移方向率在不同稳定性分级上的取值范围关于坐标轴零点对称。

表 2 各评价指标分界值

分界值	位移 速率	改进 切线角/(°)	位移 矢量角	垂直位移 方向率
S_1	$3v$	45.00	$0.5\sigma, -2\sigma$	$\sigma, -3\sigma$
S_2	$6.5v$	57.95	$0.75\sigma, -1.75\sigma$	$1.50\sigma, -2.75\sigma$
S_3	$15v$	76.20	$1.25\sigma, -1.25\sigma$	$2.25\sigma, -2.25\sigma$
S_4	$20v$	83.76	$1.75\sigma, -0.75\sigma$	$2.75\sigma, -1.50\sigma$
S_5	$24v$	86.09	$2\sigma, -0.5\sigma$	$3\sigma, -\sigma$

注:因位移矢量角与垂直位移方向率的取值范围包含围绕零点的正负两部分值,故这两个指标的分界值也包括两部分,评价指标实测值为正时采用正分界值,反之用负分界值。

获得滑坡状态评价的单测点模糊评价向量如下:

$$\mathbf{B}_k = (b_{k1}, b_{k2}, b_{k3}, b_{k4}, b_{k5}) \tag{2}$$

对滑坡体上其他测点采用相同的方法,可得到 m 个测点的模糊评价向量 $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \cdots, \mathbf{B}_m$ 。

1.2 多测点滑坡状态评价模型构建

多测点评价模型的因素集变化为由 m 个测点评价集组成,决断集保持不变。多测点评价指标体系层次结构以进行多测点多评价指标的滑坡状态评价为目的,设为目标层。目标层之下各测点共同组成准则层,该体系是基于各单测点的位移监测数据而展开。每个单测点之下又包含 4 种评价指标(位移速率、位移矢量角、改进切线角、垂直位移方向率),这些评价指标可利用该测点的位移监测数据进行状态评价,经第 1.1 小节的流程处理后得到该测点对滑坡的状态评价,再利用本小节的模型将多测点的结果融合后,得到考虑多测点多指标的滑坡整体状态评价。低层次的若干个元素都隶属于上一层级中的某个元素,且对其起支撑作用。要实现多测点间的信息融合,需要利用第 1.1 小节部分各单测点评价向量来组建多测点评价模型部分的模糊评价矩阵 $\mathbf{R}_D$,以量化的形式来评判滑坡整体稳定性状态。多测点因素集的权重向量记为 $\mathbf{W}_D$,其构建方法与前述判断矩阵的方法相同,即根据不同测点对判断滑坡稳定性状态的重要程度构建。判断滑坡上各测点之间的权重关系是一个复杂的工程问题,其主要与测点布设区域及其地质结构与地形条件等有关。本文在确定上述权重时,主要考虑测点在滑坡上布设位置的重要性,再结合本领域专家经验评估方法来划分测点之间的相对重要程度,从而构建判断矩阵。

多测点模糊评价矩阵 $\mathbf{R}_D$ 由单测点评价中得到的 m 个单测点模糊评价向量组成,即

$$\mathbf{R}_D = (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \cdots, \mathbf{B}_m)^T \tag{3}$$

考虑滑坡体上所有测点评价结果影响的滑坡整体安全状态评价结果为

$$\mathbf{B}_D = \mathbf{W}_D \mathbf{R}_D \tag{4}$$

根据最大隶属度原则, $\mathbf{B}_D$ 向量中的最大值对应的状态即为评价时刻滑坡整体稳定性状态的评价结果。

2 实例验证

2.1 工程概况

东岭信库岸位于三板溪水库上游剑河县境内,岸坡由滑坡堆积体组成。东岭信堆积体岸坡坡面地形较零乱,南侧后坡高陡,北西侧后坡低缓。滑坡体部分主要由含碎石、块石粉质黏土夹层,块石、碎石夹粉质黏土层以及碎裂岩体层组成。滑坡体在纵向上具有中部和前缘厚、后部薄的特点,在横向上具有南侧厚、北侧薄的特点。北侧、后缘、南侧黏土含量较高,中部块石、碎石含量增大,前缘块石、碎石含量高。滑面纵向上总体形态平直,横向上形态北侧倾角较缓,主要受岩层层面和东北向缓倾角追踪结构面控制;底部滑面较平缓,主要受岩层层面控制;南部侧裂面为断层结构面控制,倾角较陡;滑坡前缘剪出口高程由南侧向北侧逐渐上升。水库蓄水后,2007 年 7 月库岸边坡地面出现裂缝,岸坡显现出变形现象。修缮后堆积体整体变形速率明显减小,但总体仍呈持续向水库方向运动的趋势,坡体处于临界稳定状态,不能满足长期稳定要求。边坡上设有多个测点,监测设备采用上海华测导航技术股份有限公司生产的 P5 测地型 GNSS 接收设备,选用 7 个典型测点(DB1~DB7)参与滑坡稳定性综合评价,取 2018 年 12 月 15 日开始的 60 d 位移监测数据。测点的布设位置如图 1 所示。

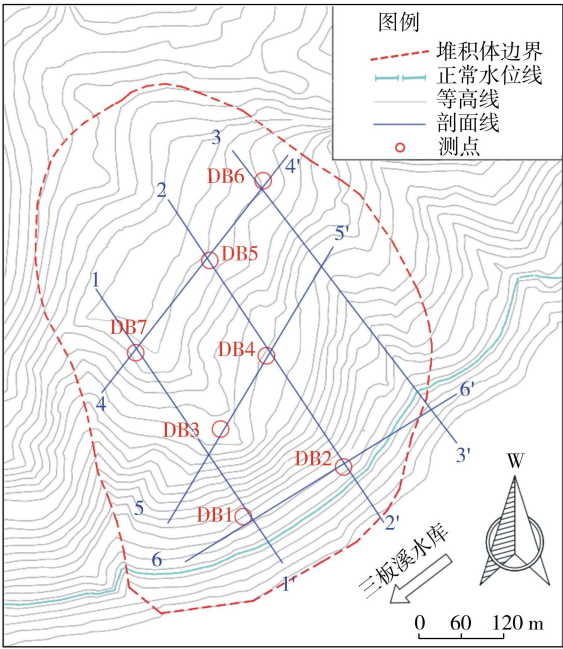


图 1 东岭信滑坡测点分布

2.2 评价流程

2.2.1 确定单测点因素集权重

根据不同评价指标对滑坡稳定性影响的重要程度和表 1,通过 4 种评价指标的两两比较,建立单测点判断矩阵 U 如表 3 所示。可求得东岭信滑坡各预警指标权重向量为 (0. 125, 0. 375, 0. 375, 0. 125)。

表 3 单测点判断矩阵

U	v	θ	a_i	η
v	1	1/3	1/3	1
θ	3	1	1	3
a_i	3	1	1	3
η	1	1/3	1/3	1

依据文献[22,24]对单测点判断矩阵进行一致性检验,计算得该矩阵特征向量的最大特征值 $\lambda = 4. 0$,故一致性比例系数 $C_R = 0. 0$,非负且小于 0. 1,满足一致性检验要求。

2.2.2 建立单测点模糊评价矩阵

a. 由位移监测数据计算得到各评价指标值。由于实测位移数据过多,下面以东岭信滑坡上 DB5 测点数据为例说明各评价指标值的确定过程。DB5 测点位移监测数据如图 2 所示,分析时位移速率的计算每隔一天取一个,位移速率具体值见图 2。

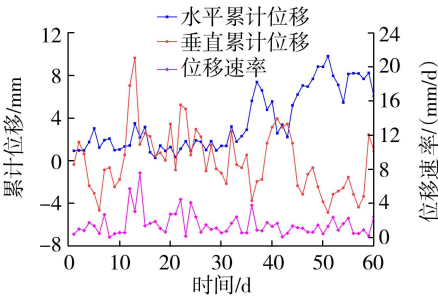


图 2 DB5 测点位移监测数据

其他评价指标数据的选取参考相关文献[16,18,28-31]每隔一周取值进行计算求得,可得位移矢量角数据分别为 - 23. 39°、34. 99°、- 66. 74°、38. 37°、10. 87°、42. 96°、- 15. 42°、- 20. 92°,改进切线角数据分别为 27. 58°、30. 78°、5. 55°、26. 38°、38. 10°、42. 40°、67. 21°、65. 67°,垂直位移方向率数据分别为 - 0. 43、0. 70、- 2. 33、0. 79、0. 19、0. 93、- 0. 28、- 0. 38。

b. 构建 DB5 测点的模糊评价矩阵。根据图 2 中位移速率序列值求得位移速率均值 $v = 1. 53 \text{ mm/d}$,结合表 2 可得该指标的各分界值 $S_1 \sim S_5$,代入隶属函数中,将位移速率序列中最新时刻的具体值 2. 45 mm/d 隶属函数中,得到 $r_1 = (1. 0, 0. 0, 0. 0, 0. 0, 0. 0)$ 。同理,对位移矢量角、垂直位移方向率数据序列求均值与均方差,以及改进切线角

数据序列,并将最新时刻的值代入 5 个隶属函数中可求得 $r_2、r_3、r_4$ 。DB5 测点模糊评价矩阵 R_5 为

$$R_5 = \begin{bmatrix} 1. 0 & 0. 0 & 0. 0 & 0. 0 & 0. 0 \\ 0. 664 & 0. 336 & 0. 0 & 0. 0 & 0. 0 \\ 0. 0 & 0. 577 & 0. 423 & 0. 0 & 0. 0 \\ 1. 0 & 0. 0 & 0. 0 & 0. 0 & 0. 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.3 计算单测点模糊综合评价向量

根据式(2)得到 DB5 测点的模糊综合评价向量为 $B_5 = (0. 499, 0. 342, 0. 159, 0. 000, 0. 000)$ (6)

同理,可得到滑坡上其他测点的模糊评价向量为

$B_1 = (0. 625, 0. 228, 0. 147, 0. 000, 0. 000)$ (7)

$B_2 = (0. 647, 0. 353, 0. 000, 0. 000, 0. 000)$ (8)

$B_3 = (0. 500, 0. 000, 0. 261, 0. 114, 0. 125)$ (9)

$B_4 = (0. 155, 0. 411, 0. 375, 0. 059, 0. 000)$ (10)

$B_6 = (0. 250, 0. 618, 0. 122, 0. 000, 0. 000)$ (11)

$B_7 = (0. 481, 0. 351, 0. 168, 0. 000, 0. 000)$ (12)

基于最大隶属度的评判原则,在以上 7 个测点得到的单测点评价向量中,除了多数测点评价结果为稳定之外,DB4、DB6 测点评价结果为欠稳定。不难发现,如果按传统方法取一个代表性测点以表征滑坡整体的状态,则同一滑坡可能会出现多种不同的稳定性状态,这与实际中滑坡状态的唯一性相矛盾。

2.2.4 构建多测点模糊因素集

根据多测点位移时间曲线的滑坡状态评价模型可知,多测点模糊评价的决断集不变,仍为 5 种滑坡稳定性状态。因素集则变化为以多测点 DB1、DB2、DB3、DB4、DB5、DB6、DB7 组成的元素。

根据 7 个测点在滑坡上的布设位置结合专家评估意见判断两两测点间的相对重要程度,结合表 1 建立多测点判断矩阵 U ,见表 4。DB4、DB5 测点处于滑坡中部,地势高,滑坡体厚,最能反映滑坡的整体稳定状态,因此其相对重要程度处于第一梯队;DB6、DB7 测点位于滑坡后缘,后缘部位有缓慢蠕变迹象,对滑坡整体稳定性有较大影响,划分为第二梯队;DB2、DB3 测点处于滑坡偏前缘位置,对滑坡稳定状态的代表性一般,纳入第三梯队;DB1 测点处于滑坡最前沿且偏南侧,地势极低,其代表性较差,归为最末梯队。

表 4 多测点判断矩阵

U	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7
DB1	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3
DB2	3	1	1/2	1/3	1/3	1/3	1/3
DB3	3	2	1	1/3	1/3	1/3	1/3
DB4	5	3	3	1	3	3	3
DB5	5	3	3	1/3	1	3	3
DB6	3	3	3	1/3	1/3	1	1
DB7	3	3	3	1/3	1/3	1/2	1

根据表 4 求得该滑坡上各测点权重分布,即多测点的权重向量为

$$\mathbf{W}_D = (0.038, 0.069, 0.083, 0.311, 0.225, 0.148, 0.125) \quad (13)$$

对多测点判断矩阵进行一致性检验,得一致性比例系数 $C_R = 0.073$,通过一致性检验。

2.2.5 建立多测点模糊评价矩阵

根据式(3)可得多测点的模糊评价矩阵 $\mathbf{R}_D$ 为

$$\mathbf{R}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_3 \\ \mathbf{B}_4 \\ \mathbf{B}_5 \\ \mathbf{B}_6 \\ \mathbf{B}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.625 & 0.228 & 0.147 & 0.0 & 0.0 \\ 0.647 & 0.353 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.500 & 0.0 & 0.261 & 0.114 & 0.125 \\ 0.155 & 0.411 & 0.375 & 0.059 & 0.0 \\ 0.499 & 0.342 & 0.159 & 0.0 & 0.0 \\ 0.250 & 0.618 & 0.122 & 0.0 & 0.0 \\ 0.481 & 0.351 & 0.168 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2.6 多测点模糊综合评价

利用式(4)和多测点的权重向量 $\mathbf{W}_D$ 与多测点模糊评价矩阵 $\mathbf{R}_D$ 计算得到多测点的模糊综合评价向量 $\mathbf{B}_D$:

$$\mathbf{B}_D = \mathbf{W}_D \mathbf{R}_D = (0.368, 0.373, 0.219, 0.028, 0.012) \quad (15)$$

在得到的最终评价向量 $\mathbf{B}_D$ 里,根据最大隶属度原则,0.373 所对应的评价集“欠稳定”,表明东岭信滑坡在综合考虑了 7 个测点位移监测数据的评价结果之后为欠稳定。与各单测点的状态评价结果相比,多测点评价结果具有唯一性。尽管单测点中存在较多的“稳定”结论,也存在着“非稳定”的评价结果,但通过组成多测点模糊评价矩阵将各个测点的评价结果都纳入多测点评价模型计算处理后得到滑坡整体安全性评价结果为“欠稳定”结论,从而消除单测点评价可能带来的误差,也可避免因代表性测点确定错误带来的误判。多测点模糊综合评价法兼顾了滑坡各个部位测点反映的滑坡状态,其结果更加科学合理。

2.3 敏感性分析

单测点模糊评价法理论相对成熟,对滑坡的稳定性评价可以是“稳定”“欠稳定”“不稳定”“极不稳定”“临滑阶段”5 种状态中的任意一种,如在上文

实例中既出现了“稳定”情况,也有“欠稳定”的状态。但对于多测点融合后的滑坡整体综合评价结果的合理性还有待进一步考察。为此,本文通过改变实例中各单测点的评价结果,采用敏感性分析方法研究滑坡上不同位置的单测点评价结果对滑坡整体稳定性评价结果的影响。

改变式(15)中各单测点的模糊综合评价向量,依据最大隶属度原则改变其稳定性状态,继续按照多测点滑坡状态评价模型运算,由式(3)(4)计算得多测点模糊综合评价向量 $\mathbf{B}_D$,具体工况下的综合评价结果见表 5。

由图 1 可知,工况 1 设定位于滑坡后缘即横剖面线 4—4' 上的 3 个测点稳定性状态为“稳定”,其他测点设为“不稳定”,工况 2 则将滑坡前缘两测点即横剖面线 6—6' 上测点设为“稳定”,其余测点为“不稳定”。工况 3 与工况 4 则是分别将滑坡纵剖面线 2—2' 上测点与横剖面线 5—5' 上测点设为“稳定”,其余测点为“不稳定”。工况 1~4 将滑坡前后,横纵不同剖面线上的测点设定为不同的稳定性状态,得到的滑坡整体稳定性也有两种不同的状态。可见利用该综合评价模型处理不同的工况会有不同的评价结果。分析工况 2、3 可知,滑坡整体稳定性状态主要得益于其中权重占比较大的测点,如 DB4 测点,这类关键测点对滑坡整体稳定性的评价有较大的影响。但这并不等同于权重大测点的稳定性评价结果就直接决定滑坡整体的稳定性评价结果。由工况 1、4 可看出,DB4 测点设定的状态与最终综合多测点评价后的滑坡整体稳定性状态不一致,这也表明其他权重相对较小站点的评价结果依然可影响最终评价结果。从以上几种工况的评价结果可以看出,本文提出方法并不通过其中一两个单测点决定滑坡整体的稳定性状态,而是兼顾每个参与评价测点的影响,综合分析得到最终评价结果。

3 结 语

基于滑坡模糊综合评价方法,采用 4 种滑坡状态评价指标(位移速率、改进切线角、位移矢量角及垂直位移方向率)作为参评指标,通过层次分析法计算多指标权重,结合选用的连续性隶属函数构建单测点模糊评价矩阵,得到单测点模糊综合评价向

表 5 敏感性分析结果

工况	测点状态设计	$\mathbf{B}_D$	对应状态
1	DB5~7:“稳定”;DB1~4:“不稳定”	(0.340, 0.308, 0.313, 0.030, 0.009)	稳定
2	DB1~2:“稳定”;DB3~7:“不稳定”	(0.232, 0.289, 0.439, 0.030, 0.010)	不稳定
3	DB2, 4~5:“稳定”;DB1, 3, 6~7:“不稳定”	(0.370, 0.220, 0.369, 0.030, 0.010)	稳定
4	DB3~4:“稳定”;DB1~2, 5~7:“不稳定”	(0.269, 0.220, 0.471, 0.030, 0.010)	不稳定

量。利用各单测点的综合评价向量构建多测点共同融合的多测点模糊评价矩阵,与再次通过层次分析法计算得到的多测点权重向量相结合可得到滑坡整体的最终状态评价结果。通过这一系列流程构建了完整的多测点多评价指标滑坡稳定性综合评价模型。模型将滑坡上不同位置测点的位移时间监测数据以4种不同方式处理,与传统评价模型单一测点、单一指标的形式相比更加科学合理,更接近实际状态。需要注意的是,模型中4种评价指标间的权重需根据滑坡实际需求来调整,评价指标稳定性分级标准与分界值也需要根据具体滑坡进行微调。多测点权重的确定也需要综合考虑测点布设位置、地质结构与地形条件等因素的影响。评价模型的实例研究与敏感性分析表明,本文提出的多测点滑坡稳定性评价方法合理可行,为传统的滑坡多源信息融合提供了新思路,也为滑坡状态稳定性评价扩展了新方法。

参考文献:

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (3) : 433-454. (HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (3) : 433-454. (in Chinese))

[2] NADIM F, KJEKSTAD O, PEDUZZI P, et al. Global landslide and avalanche hotspots [J]. Landslides, 2006, 3 (2) : 159-173.

[3] SAITO M. Forecasting time of slope failure by tertiary creep [C] // Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City : [s. n.], 1969 : 677-683

[4] 晏同珍,殷坤龙,伍法权,等. 滑坡定量预测研究的进展 [J]. 水文地质工程地质, 1988 (6) : 8-14. (YAN Tongzhen, YIN Kunlong, WU Faquan, et al. Progress in landslide quantitative prediction research [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1988 (6) : 8-14. (in Chinese))

[5] 武鑫,郑东健,刘永涛,等. 滑坡失稳时间预测方法研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4) : 89-94. (WU Xin, ZHENG Dongjian, et al. A review of temporal prediction methods for landslide failure [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4) : 89-94. (in Chinese))

[6] 黄润秋,许强. 斜坡失稳时间的协同预测模型 [J]. 山地研究, 1997, 15 (1) : 7-12. (HUANG Runqiu, XU Qiang. Synergetic prediction model of slope instability [J]. Journal of Mountain Research, 1997, 15 (1) : 7-12. (in Chinese))

[7] 许强,曾裕平,钱江澎,等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据 [J]. 地质通报, 2009, 28 (4) : 501-505. (XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28 (4) : 501-505. (in Chinese))

[8] 徐卫亚,胡业凡,吴伟伟,等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (1) : 59-66. (XU Weiya, HU Yefan, WU Weiwei, et al. Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (1) : 59-66. (in Chinese))

[9] 霍冬冬,亓星. 多源数据融合在岩质滑坡监测预警中的应用 [J]. 四川理工学院学报 (自然科学版), 2019, 32 (5) : 63-68. (HUO Dongdong, QI Xing. Application of multi-source data fusion in monitoring and early warning of rock landslide [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2019, 32 (5) : 63-68. (in Chinese))

[10] 杨军,旺加,吕赓赓,等. 基于多源信息融合的高原库区滑坡动态安全评价研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2022, 53 (4) : 165-171. (YANG Jun, WANG Jia, LYU Zhibin, et al. Multi-source information fusion-based study on dynamic safety evaluation of landslide in plateau reservoir area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (4) : 165-171. (in Chinese))

[11] 贺可强,阳吉宝,王思敬. 堆积层边坡表层位移矢量角及其在稳定性预测中的作用与意义 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (12) : 1976-1983. (HE Keqiang, YANG Jibao, WANG Sijing. Displacement vector angle of colluvial slope and its significance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (12) : 1976-1983. (in Chinese))

[12] 李新源. 堆积层滑坡位移矢量角与稳定性定量关系及其优化治理研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.

[13] 许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (6) : 1104-1112. (XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (6) : 1104-1112. (in Chinese))

[14] 蔡嘉伦. 基于表面位移的滑坡稳定性评价及预警阈值探讨 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.

[15] 王珣,李刚,刘勇,等. 基于滑坡等速变形速率的临滑预报判据研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (12) : 3670-3679. (WANG Xun, LI Gang, LIU Yong, et al. Critical sliding prediction criterion of landslide based on constant deformation rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (12) : 3670-3679. (in Chinese))

- [16] 贺可强,郭栋,张朋,等.降雨型滑坡垂直位移方向率及其位移监测预警判据研究[J].岩土力学,2017,38(12):3649-3659. (HE Keqiang, GUO Dong, ZHANG Peng, et al. The direction ratio of vertical displacement for rainfall-induced landslides and its early warning criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (12): 3649-3659. (in Chinese))
- [17] CORSINI A, MULAS M. Use of ROC curves for early warning of landslide displacement rates in response to precipitation (Piagneto landslide, Northern Apennines, Italy) [J]. Landslides, 2017, 14(3): 1241-1252.
- [18] 李聪,朱杰兵,汪斌,等.滑坡不同变形阶段演化规律与变形速率预警判据研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1407-1414. (LI Cong, ZHU Jiebing, WANG Bin, et al. Critical deformation velocity of landslides in different deformation phases [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1407-1414. (in Chinese))
- [19] ZHAO Hongliang, YAO Leihua, MEI Gang, et al. A fuzzy comprehensive evaluation method based on AHP and entropy for a landslide susceptibility map [J]. Entropy, 2017, 19(8): 396.
- [20] YAO Xuelin, DENG Hongwei, ZHANG Ti, et al. Multistage fuzzy comprehensive evaluation of landslide hazards based on a cloud model [J]. PLoS One, 2019, 14(11): e0224312.
- [21] 王富良,李宗发.基于模糊综合评价法对滑坡稳定性的分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊2):1016-1024. (WANG Fuliang, LI Zongfa. Analysis on landslide stability based on fuzzy comprehensive evaluation method: a case study of Dashi extra large landslide in Yinjiang, Guizhou Province [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15 (Sup2): 1016-1024. (in Chinese))
- [22] 刘莉,余宏明,程江涛.层次分析-模糊综合评价法在滑坡工程中的应用[J].三峡大学学报(自然科学版),2008,30(2):43-47. (LIU Li, YU Hongming, CHENG Jiangtao. Application of analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method to landslide engineering [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2008, 30(2): 43-47. (in Chinese))
- [23] 谢全敏,夏元友.岩体边坡治理决策的模糊层次分析方法研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(7):1117-1120. (XIE Quanmin, XIA Yuanyou. Fuzzy hierarchy analysis on decision making of rockmass slope treatment based on entropy weight [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1117-1120. (in Chinese))
- [24] 罗路广,裴向军,裴钻,等.天山北麓溜砂坡分布特征及易发性研究[J].灾害学,2018,33(2):200-205. (LUO Luguang, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Distribution characteristics and susceptibility of talus slopes in the northern piedmont of Tian-Shan Mountain [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 200-205. (in Chinese))
- [25] 胥孝川,王忠康,叶鲁青,等.基于二级层次分析的模糊综合评判法评价露天矿边坡稳定性[J].矿业研究与开发,2022,42(5):76-81. (XU Xiaochuan, WANG Zhongkang, YE Luqing, et al. Evaluation of open-pit slope stability by fuzzy comprehensive evaluation based on two-level analytic hierarchy process [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(5): 76-81. (in Chinese))
- [26] 夏卜敬.基于模糊综合评价和神经网络对边坡稳定性的分析研究[D].武汉:武汉科技大学,2008.
- [27] 许强,曾裕平.具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1099-1106. (XU Qiang, ZENG Yuping. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1099-1106. (in Chinese))
- [28] 史笑凡,杨春风.基于支持向量机的边坡垂直位移方向率预测及边坡稳定性研究[J].河北工业大学学报,2021,50(1):92-98. (SHI Xiaofan, YANG Chunfeng. Support vector machine for vertical displacement direction rate of slope estimate and slope stability research [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2021, 50(1): 92-98. (in Chinese))
- [29] 王一帆,亓星,程倩,等.基于切线角预警的滑坡匀速变形速率数据处理方法[J].水利水电技术(中英文),2021,52(12):185-190. (WANG Yifan, QI Xing, CHENG Qian, et al. Tangent angle early warning-based method for data processing of landslide uniform deformation rate [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 (12): 185-190. (in Chinese))
- [30] 王珣,刘勇,李刚,等.基于西原模型的蠕变型滑坡预警判据及滑坡智能监测预警系统研究[J].水利水电技术,2018,49(8):29-38. (WANG Xun, LIU Yong, LI Gang, et al. Nishihara model-based study on pre-warning criteria for creeping landslide and landslide intelligent monitoring and pre-warning system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (8): 29-38. (in Chinese))
- [31] 亓星,朱星,许强,等.基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法改进及应用[J].工程地质学报,2020,28(4):832-839. (QI Xing, ZHU Xing, XU Qiang, et al. Improvement and application of landslide proximity time prediction method based on Saito model [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28 (4): 832-839. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-17 编辑:俞云利)