# 中國地質灾害共防治學秘

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

# 基于因子权重反分析的新近失稳土质边坡稳定性评价云模型

陈忠源, 戴自航, 简文彬

Cloud model for stability evaluation of recently failed soil slopes based on weight inversion of influencing factors

CHEN Zhongyuan, DAI Zihang, and JIAN Wenbin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202207010

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model 陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9–17

# 基于理想点-可拓云模型的隧道围岩稳定性评价

Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model 何乐平, 罗舒月, 胡启军, 蔡其杰, 李浴辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 126-134

#### 基于贝叶斯-粒子群算法的溜砂坡稳定性评价

Stability evaluation of sand slopes based on the Bayesian-PSO algorithm 娄超华, 田荣燕, 旺久, 孙威宇, 罗进 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 53-59

#### 基于主成分层次聚类模型的采空塌陷场地稳定性评价

Goaf-collapse sites stability evaluation based on principal component hierarchical clustering model 郭松, 郭广礼, 李怀展, 杨向升 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 116-121

# 基于压力状态响应模型框架的城市地震综合易损性评价

Comprehensive evaluation of urban earthquake vulnerability under the framework of PSR 李江龙, 樊燕燕 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 117–125

# 降雨条件下建筑边坡稳定性的云模型评价方法

\${suggestArticle.titleEn}

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(2): 50-56



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202207010

陈忠源, 戴自航, 简文彬. 基于因子权重反分析的新近失稳土质边坡稳定性评价云模型 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 125-133.

CHEN Zhongyuan, DAI Zihang, JIAN Wenbin. Cloud model for stability evaluation of recently failed soil slopes based on weight inversion of influencing factors[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 125-133.

# 基于因子权重反分析的新近失稳土质边坡 稳定性评价云模型

陈忠源1,戴自航2,简文彬3

- (1. 福州外语外贸学院,福建福州 350202; 2. 福州大学土木工程学院,福建福州 350108;
  - 3. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建福州 350108)

摘要:在强降雨等因素影响下,新近失稳土质边坡易再次发生滑动,并对现场救援人员的安全构成威胁。如何对该类边坡的稳定性进行快速、准确地评价,亟须解决。由于古滑坡的滑动面处土体的抗剪强度随着时间的推移有所提高,故无法直接套用古滑坡复活的评价方法。常用的极限平衡条分法或有限元等数值分析法又需要事先进行现场勘察,耗时较长影响救援进度。因云模型评价方法对评价因子的精度要求较低,可弥补上述方法的不足之处。但目前对云模型评价因子权重的研究,仍存在一些不足之处,故提出采用反分析法来计算各评价因子的权重。选取坡高等9个易于获取且是决定边坡稳定性的主要因素为评价因子,参照《地质灾害调查技术要求》和前人的研究成果对各评价因子的稳定分级区间进行划分,利用MATLAB程序语言平台生成相应的综合云模型。根据滑坡前各评价因子的数值反分析其权重的云模型特征参数,建立可方便快捷地对新近失稳边坡进行稳定性评价的云模型,使用Python语言和Qt Designer 工具进行应用程序的开发。使用该应用程序对福建省永春县冷水村一新近失稳边坡2016年11月3—8日的稳定性进行评价,得到的结果与现场情况基本吻合,初步验证了该方法准确性。该程序的运行过程耗时较短,也验证了该方法的快速性。

关键词:反分析法:新近失稳边坡;云模型;稳定性评价;应用程序

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2023)04-0125-09

# Cloud model for stability evaluation of recently failed soil slopes based on weight inversion of influencing factors

CHEN Zhongyuan<sup>1</sup>, DAI Zihang<sup>2</sup>, JIAN Wenbin<sup>3</sup>

- (1. Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou, Fujian 350202, China;
  - 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;
- 3. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** The stability of newly failed soil slopes, particularly under the influence of heavy rainfall, presents a significant threat to the safety of on-site rescue personnel. It is urgent to find a quick and accurate method for evaluating the stability of such slopes. The evaluation methods used for reactivating ancient landslides cannot be directly applied because the shear strength of the soil at the sliding surface of ancient landslides improves over time. Common numerical analysis methods such as limit

收稿日期: 2022-07-08; 修订日期: 2022-09-30 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2005205); 福建省自然科学基金项目(2023J011130)

第一作者: 陈忠源(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事边坡稳定分析与监测等方面的研究。E-mail: 42134489@qq.com

通讯作者: 戴自航 (1966-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土工程数值分析。E-mail: dzhang@fzu edu.cn

equilibrium slice method or finite element method require time-consuming on-site surveys, which may affect the progress of rescue operations. The cloud model evaluation method is suitable for evaluating the stability of these slopes as it has lower accuracy requirements for evaluation factors, thus compensating for the limitations of the aforementioned methods. However, the current research on the weight of evaluation factors in cloud model evaluation still has some deficiencies. Therefore, a weight inversion method is proposed to calculate the weights of each evaluation factor. Nine primary influencing factors, including slope height, which are easily obtainable, were selected as evaluation factors. By referencing the "Technical Requirements for Geological Hazard Investigation" and previous research findings, grading intervals for each evaluation factor were determined. The corresponding comprehensive cloud model was generated using the MATLAB programming platform. According to the value of each evaluation factor before sliding, the cloud model's characteristic parameters for weight inversion were obtained. And the cloud model for evaluating the stability of the newly failed slope was established. The Python language and the Qt Designer tool were used to develop the application of stability evaluation. The stability of a newly failed slope in Lengshui Village, Yongchun County, Fujian Province, during November 3-8 2016, was assessed using this application. The result align closely with the actual on-site conditions, validating the accuracy of the proposed evaluation method. The efficient runtime of the application further demonstrates its speed.

Keywords: inversion; newly failed slope; cloud model; stability evaluation; application

# 0 引言

边坡在自然条件下和人类工程活动影响下分布广 泛。如何对边坡的稳定性进行客观合理地评价,成为众 多学者的研究内容。如 PARK 等[1]、邓夕胜等[2]、黄明 奎等[3]使用数学统计分析方法分析边坡失稳与降雨条 件之间关系,并据此对滑坡进行预测。Saito等[4]、简文 彬等[5]、苏永华等[6]则采用理论模型数值模拟方法研究 雨水在边坡中的渗透过程以及孔隙水压力的变化规律, 以此对边坡的稳定性进行评价。各学者的研究取得了 一系列的成果,但大部分学者的研究集中在边坡发生首 次滑动前的稳定性。一般而言,边坡失稳滑动后,边坡 的坡度和高度会因滑动变形而减小,并最终达到临界稳 定状态而停止滑动。然而,处于临界稳定状态的边坡在 外界因素如降雨的影响下,很可能再次滑动。此将对参 与滑坡灾害现场救援工作人员的安全构成威胁。因此, 实际工程中,很有必要对刚发生滑动不久处于临界稳定 状态的边坡是否会在降雨影响下再次滑动进行评价。

对曾发生过滑动的边坡稳定性研究,目前主要集中在古滑坡复活方面。如 Notti 等<sup>[7]</sup>、窦晓东等<sup>[8]</sup>以及张永双等<sup>[9]</sup>采用时间序列分析、遥感解译、数值模拟以及物理模型试验等一系列的方法对各类古滑坡的复活机理开展了研究,也取得一定的成果。一般而言,边坡发生滑动后,滑动面或滑动带处的土体已发生剪切破坏。因此从理论上来说,该处土体的抗剪强度会降低至残余强度。而上述所研究的古滑坡,其发生滑动的时间距今较为久远,其滑动面处土体的抗剪强度会随着时间的推

移有所提高。本文的新近失稳边坡,指近期刚刚发生过滑动,暂时处于临界稳定状态的边坡,其滑动面或滑动带处土体的抗剪强度尚相当于残余强度,且边坡上的裂缝均处于张开状态。因此该边坡的基本特征与古滑坡有所区别,故在对其进行稳定性评价时不能直接套用古滑坡复活的评价方法。目前,若使用常用的极限平衡条分法或有限元等数值分析法在对该类边坡进行稳定性评价,则需要进行现场钻孔勘察,确定滑动面的位置或边坡的物理力学参数。但是,在未对边坡的稳定性做出评价前进行现场勘察又存在着一定的安全隐患。同时,滑坡发生后需要尽快对边坡的稳定性做出判断,以便开展救援工作,而现场勘察耗时较长,故极限平衡条分法或有限元等数值分析法较难满足及时评价要求。因此,探索一种方便快捷的针对该类边坡稳定性评价方法,可为紧急救援决策的制定提供帮助。

云模型由李德毅院士提出,可用来描述概念中的随机性和模糊性的一种模型[10]。该模型主要用期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)三个数字特征来表征某一概念[11]。因该模型具有一定的模糊性,对评价因子的精度要求较低,通过对当地同类边坡已有勘察统计资料类比得到的评价因子数值也能满足精度要求。因此,采用云模型评价方法,可弥补极限平衡条分法或有限元等数值分析法的不足。近年来,国内外学者已将云模型理论应用于边坡稳定性的评价,并从评价因子选取、因子权重的确定、隶属函数的选用以及云模型特征参数的选取方面开展了一系列的研究[12-16]。学者们的研究取得了

较多成果,但对于如何确定评价因子的权重尚未有统一的方法。目前学者们主要采用层次分析法(AHP)[17]、熵权法[18]和组合赋权法[19]等方法来确定权重。但是AHP 法和组合赋权法具有一定主观成分的不足之处,而熵值法又不能体现决策者对不同因子的重视程度。反分析法作为一种推理方法,可以根据已知的结果反分析出各未知数的情况,其得到的数值也相对更为客观。为此,笔者拟采用反分析法计算各评价因子的权重,构建新近失稳边坡稳定性评价云模型,进而开发方便快捷的应用程序,以更好地预防二次滑坡伤害的发生和提高全社会紧急救援水平。

# 1 新近失稳边坡稳定性评价云模型

# 1.1 稳定性分级标准及评价因子的确定

为了评价结果能与国家规范保持统一,参考《建筑 边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)将稳定性状态 的分级标准划分为不稳定(Ⅰ级)、欠稳定(Ⅱ级)、基本 稳定(Ⅲ级)、稳定(Ⅳ级)四个等级[20]。在因子的选取 方面,首先考虑各因子数据的易获取性,以确保选取因 子值易于获得; 其次考虑行业规范要求, 以保证选用的 因子具有政策的针对性。为此,在总结前人研究的基础 上,参考《地质灾害调查技术要求》(DD 2019-08)[21],选 取坡高(H)、坡角 $(\beta)$ 、边坡土体饱和重度 $(\gamma_{sat})$ 、黏聚力 (c)、内摩擦角 $(\varphi)$ 、前期降雨量(P)、降雨历时(T)、降 雨强度(I)以及边坡植被覆盖率( $\eta$ )作为评价因子。其 中H和 $\beta$ 的数据可通过测绘仪器快速测得; $\gamma_{sat}$ ,c和 φ 的数据可通过对当地同类边坡已有勘察统计资料类 比方便得到;P、T和I的数据可通过大数据查询或咨询 当地气象部门获得; $\eta$ 的数据可通过现场踏勘目测估 算。对于上述评价因子的取值,统一规定如下: ①c 和  $\varphi$  值均采用其饱和不排水时的数值; ②T 值根据气象部 门的观测标准,以前一日 20:00:00 至当日 19:59:59 内的 降雨时长为准。若某场降雨历时多日,则当日之前的降 雨量均折算为前期降雨量; ③I 值取当日降雨量与降雨 历时的比值; ④P 值取当日降雨前 15 天内的有效降雨 量总和,可按式(1)计算[22]。

$$P = aR_1 + a^2R_2 + \dots + a^nR_n \tag{1}$$

式中:  $R_n$  ——降雨诱发滑坡前 n 日气象站当天 20—20 时的降雨量;

*a*——有效降雨系数, 根据 Bruce. J. P 的统计分析, 取 0.8。

1.2 评价因子在各等级区间的划分 在参考《地质灾害调查技术要求》划分标准的同时 借鉴其他学者的做法,将各因子的区间划分如下:

对于 H,《地质灾害调查技术要求》将其分为 [0, 10)、[10, 30)、[30, 50)、 $[50, +\infty)$  m。为了便于云模型的特征参数的计算,根据上述的分类趋势将  $[50, +\infty)$  修改为 [50, 70) m。其他区间的划分采用《地质灾害调查技术要求》的标准。则该因子的各稳定性区间划分为 [0, 10)、[10, 30)、[30, 50)、[50, 70) m。

对于 $\beta$ ,《地质灾害调查技术要求》将其划分为[50,90]、[35,50)、[20,35)、[0,20)°。本评价方法采用此分类标准。

根据《工程地质手册》[23]中的"表 3-1-24 土的平均物理力学性质指标"取值,砂土、粉土和黏性土c的最小值为0kPa,最大值为94kPa。一般的土质边坡主要由这三类土组成,故对于c值,本评价方法采用等间距法对其进行四等分为[0, 23.5)、[23.5, 47)、[47, 70.5)、[70.5, 94)kPa。

根据《工程地质手册》,上述三类土 $\varphi$ 的最小值为15°,最大值为42°。同理对 $\varphi$ 值进行四等分为[15,21.75)、[21.75, 28.5)、[28.5, 35.25)、[35.25, 42)°。

根据《工程地质手册》,上述三类土 $\gamma_{sat}$ 的最小值为 15.5 kN/m³,最大值为 23.5 kN/m³。同理对其进行四等 分为 [15.5, 17.5)、[17.5, 19.5)、[19.5, 21.5)、[21.5, 23.5) kN/m³。

我国气象部门将降雨量等级划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨以及特大暴雨,其 24 小时内的降雨量区间分别为 [0,10)、[10,25)、[25,50)、[50,100)、[100,250)、 $[250,+\infty)$  mm。本评价方法参照气象部门的划分,将大暴雨和特大暴雨均视为暴雨的极值,则前期降雨量 P 的各稳定性区间划分为 [0,10)、[10,25)、[25,50)、[50,100) mm。

对于 T, 本评价方法采用等间距法对 24h 进行四等分,则该因子的各稳定性区间划分为 [0,6)、[6,12)、[12,18)、[18,24) h。

对于 I, 本评价方法参照前期降雨量因子的划分办法, 将该因子的各稳定性区间划分为 [0, 10)、[10, 25)、[25, 50)、[50, 100) mm/d。

对于 $\eta$ ,本评价方法也采用等间距法将该因子的各稳定性区间划分为[0,0.25)、[0.25,0.5)、[0.5,0.75)、[0.75,1)。

故各评价因子在相应稳定性状态中的分级区间如 表1所示。

1.3 各评价因子综合隶属度云模型的生成 根据笔者的建议公式<sup>[16]</sup>,将表 1 的各评价因子等级

表 1 边坡稳定性评价因子各等级区间

Table 1 Grade intervals of slope stability evaluation factors

评价因子	分级区间					
许忻囚丁	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定		
H/m	[50, 70)	[30, 50)	[10, 30)	[0, 10)		
β/(°)	[50, 90)	[35, 50)	[20, 35)	[0, 20)		
c/kPa [0, 23.5]		[23.5, 47)	[47, 70.5)	[70.5, 94)		
φ/(°)	[15, 21.75)	[21.75, 28.5)	[28.5, 32.25)	[32.25, 42)		
$\gamma_{\rm sat}/({\rm kN}\cdot{\rm m}^{-3})$	[23.5, 21.5)	[21.5, 19.5)	[19.5, 17.5)	[17.5, 15.5)		
P/mm	[50, 100)	[25, 50)	[10, 25)	[0, 10)		
$T/\mathrm{h}$	[18, 24)	[12, 18)	[6, 12)	[0, 6)		
$I/(\mathbf{mm} \cdot \mathbf{d}^{-1})$	[50, 100)	[25, 50)	[10, 25)	[0, 10)		
η	[0, 0.25)	[0.25, 0.5)	[0.5, 0.75)	[0.75, 1]		

区间代入可得各评价因子的云模型参数。利用 MAT-LAB 程序语言平台生成各评价因子相对应的综合云模型。截取坡高和黏聚力因子的综合隶属度云模型如图 1 和图 2 所示。

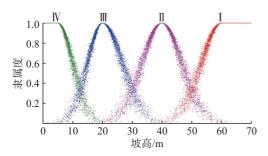


图 1 坡高因子稳定性状态的综合云模型

Fig. 1 Comprehensive cloud model for stability status of slope height factors

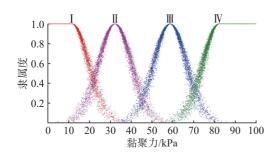


图 2 黏聚力因子稳定性状态的综合云模型

Fig. 2 Comprehensive cloud model for stability status of cohesion factor

图 1 和图 2 中的绿、蓝、紫、红四种颜色的"云滴"分别对应于稳定、基本稳定、欠稳定以及不稳定四个状态。从图 1 可以看出,随着坡高的增大,其状态由稳定逐渐过渡到不稳定。而从图 2 则可看出,随着黏聚力的增大,其状态由不稳定逐渐过渡到稳定。利用云模型可以较为直观地得到各因子不同取值时其相应的稳定性

状态。如当坡高为 25 m 时,该边坡基本稳定状态的隶属度最大,约为 0.6; 欠稳定状态的隶属度次之,为 0.15; 稳定和不稳定的隶属度最低,均为 0。当黏聚力为 70 kPa 时,其基本稳定和稳定两个状态的隶属度基本相当,均为 0.3; 欠稳定和不稳定的隶属度均为 0。

# 2 评价因子权重反分析

边坡发生滑动时,可视为其处于不稳定状态。故可将该边坡滑动前各评价因子的数值作为已知条件反分析其权重。由于已知条件只有一个,所以只能反分析得到该9个评价因子权重的多种组合。根据《地质灾害调查技术要求》中单体地质灾害(隐患)风险评估(半定性半定量打分表),坡高、坡角、降雨以及天然植被因子的权重存在一定的关系,即降雨:坡高:坡度:天然植被=2.0:0.8:0.4:0.2。本方法亦参考上述比值,并将前期降雨量、降雨历时和降雨强度视为降雨因素的三个组成部分。主要反分析的步骤如下:

- (1)根据各评价因子的数值计算其各稳定状态的隶属度。
- (2)以 0 为权重下限, 0.02 为步长, 1.0 为权重上限, 对各评价因子权重进行任意组合。同时参考《地质灾害调查技术要求》中的权重关系, 上述组合满足以下三个条件:①坡高权重与边坡植被覆盖率权重之比为 4:1;②坡角权重与边坡植被覆盖率权重之比为 2:1;③前期降雨量、降雨历时和降雨强度三个因子的权重之和与边坡植被覆盖率权重之比为 10:1。
- (3)将各因子的隶属度与其权重相乘,得到各评价因子综合隶属度。
- (4)将各评价因子的综合隶属度按其所属的稳定性状态分别求和,得到该边坡在各稳定性状态的隶属度。若不稳定状态的隶属度均大于另外三个稳定性状态,则根据最大隶属度原理可判断为该边坡的稳定性状态为不稳定。也即步骤(2)的权重组合为满足条件,并记录该组合值。若为其他情况,则不记录该组合值。
- (5)继续遍历步骤(2)中的所有组合的符合情况,可得到多个符合条件的组合。
- (6)根据式(2)—(4)计算各评价因子的权重云模型特征参数<sup>[24]</sup>。

$$Ex = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$
 (2)

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |x_i - Ex|$$
 (3)

$$He = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - Ex)^2 - En^2}$$
 (4)

式中: x<sub>i</sub>——满足条件的评价因子取值。 上述反分析步骤的主要流程如图 3 所示。

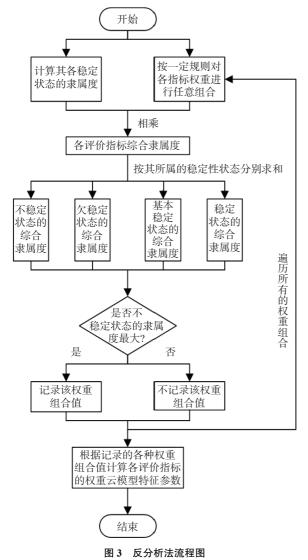


Fig. 3 Flow chart of the inversion method

#### 3 新近失稳边坡稳定性评价软件的开发

使用 Python 语言进行评价因子权重的反分析及新近失稳边坡稳定性评价云模型算法的编写,并使用 Qt Designer 工具进行应用程序窗口交互式界面的设计。在 DOS 环境中使用 PyInstaller 命令对所有的算法和交互式界面的设计内容进行打包,可生成 EXE 格式应用程序软件,如图 4 所示。该应用程序可在电脑上直接双击运行,无须额外安装任何插件,且在数秒内即可得到相应结果。因此,本应用程序可为紧急救援决策提供便



图 4 新近失稳边坡稳定性评价软件界面

Fig. 4 The user interface of software for stability evaluation of newly failed soil slope

捷的评价。

# 4 工程实例分析

# **4.1** 工程概况

福建省永春县东平镇冷水村边坡位于省道 S306 线 三明至仙游郊尾道路 K103+400—K103+600 段南侧山 体,区域上为构造侵蚀低山丘陵地貌。在"鲇鱼"台风 的影响下,该边坡 2016年9月28—29日的总降雨量达 240 mm。边坡出现明显的裂缝,后缘开始出现明显的 下错, 左前侧产生次级滑坡, 前缘公路挡墙向前倾倒。 滑坡总体上呈东西向展布,滑体周界较为清晰,前缘以 S306 省道开挖断面为界, 其余三侧均以陡缓交接处作 为滑坡周界。滑坡后缘高程 165~175 m, 前缘高程 125~135 m, 前后缘高差约 40 m, 横向宽 99~220 m, 纵 向长约 150 m, 面积 29 000 m<sup>2</sup>。滑体厚度 10~15 m, 平 均厚度 12 m, 体积约 34.8×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>, 整体坡度 30°~35°。 坡面植被覆盖一般,主要为毛竹、灌木。坡顶为民房, 砖混结构,浅基础,2~3层。滑体主要由残坡积黏性土 组成,平面上呈倒"喇叭口"型,其主要变形迹象可分叙 如下:

(1)滑体后缘房屋已整体沿滑动方向倾斜,最靠近滑体的厨房已部分与建筑主体结构脱离,并形成斜拉裂缝,张开度 0.3~1.0 m,角度约 40°。电线杆向内倾倒,而坡体后缘约 30 m的村道已整体下错 2.0~2.5 m。水泥硬化路面已断成多段,下部土体已经被掏空,深度约1 m。

(2)滑坡圈椅状地貌明显,后缘已整体下错 1.5 ~ 2.5 m,形成负地形。后缘滑坡壁产状 310° ∠75°,可见清晰镜面及擦痕,擦痕倾斜角度约 15°。坡体负地形地

表变形较为紊乱, 裂缝切割分块现象较为明显, 裂缝呈弧形, 延伸长度 10~20 m, 宽约 0.3 m, 下错 0.3~0.5 m, 可见深度约 0.5 m, 发育密度约 1条/m。从微地貌上看,此处形成"槽脊相间"的地貌特征,并可见一定的"反坡台坎", 反向倾角约 5°~10°, 如图 5 所示。坡体前部发育一条鼓胀裂缝, 延伸长约 25 m, 宽度 0.2~0.3 m, 可见深度约 0.3 m, 走向 80°, 如图 6 所示。



图 5 边坡现场情况之后缘反坡台坎 Fig. 5 Site photo of reverse slope of the trailing edge



图 6 边坡现场情况之前缘鼓胀裂缝 Fig. 6 Site photo of bulging slits of leading edge

从 2016 年 10 月 27 日—11 月 10 日期间, 该边坡前 缘土体向前推移了约 0.5 m, 如图 7 和图 8 所示。



图 7 2006 年 10 月 27 日边坡前缘推移情况 Fig. 7 Slope anteslope displacement of landslide body on October 27, 2006

# **4.2** 评价因子的权重反分析 根据工程概况,该边坡坡高取 40 m。因该坡度



图 8 2006 年 11 月 10 日边坡前缘推移情况
Fig. 8 Slope anteslope displacement of landslide body on
November 10, 2006



图 9 各评价因子权重反分析结果

Fig. 9 Inverse Analysis Results of weighting evaluation factors

从表 2 可以看出, 坡高权重的期望最大, 为 0.16; 边 坡植被覆盖率权重的期望最小, 为 0.04。若将前期降雨量、降雨历时和降雨强度三个因子权重的期望合计, 则 为 0.4, 说明降雨情况对边坡的稳定性影响很大。根据表 2 中的特征参数可生成各评价因子的权重云模型, 截取坡高因子的权重云模型如图 10 所示。

表 2 各评价因子的权重云模型特征参数

Table 2 Characteristic parameters of weight cloud model for each evaluation factors

评价因子	期望	熵	评价因子	期望	熵
H/m	0.160	0.010	P/mm	0.134	0.027
β/(°)	0.080	0.000	T/h	0.134	0.046
c/kPa	0.103	0.027	$I/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.131	0.046
φ/(°)	0.103	0.027	η	0.040	0.000
$\gamma_{\rm sat}/({ m kN}{\cdot}{ m m}^{ ext{-}3})$	0.115	0.027			

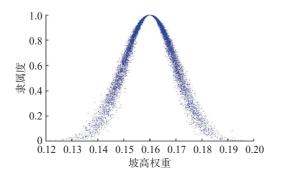


图 10 坡高权重的云模型 Fig. 10 Cloud model of weighting for slope height

从图 10 可以看出, 当坡高的权重为 0.16 时, 其隶属度最大,接近于 1。当权重的取值由中间向两边逐渐增大或减小,该权重的隶属度均随之降低。当权重取值为 0.13 或 0.19 时, 其隶属度接近于 0。故从云模型上可以直观地看出,坡高的权重取值的主要范围为 [0.13,0.19], 且不同的取值所对应的隶属度亦不同。其他评价因子的权重云模型亦相似。

#### 4.3 边坡稳定性评价

根据工程概况,该边坡后缘下错约2m,故坡高取38m。进而可推算该边坡的坡角约32.2°。根据唐宏

阳<sup>[25]</sup>、任三绍等<sup>[26]</sup>人的研究,滑带土的黏聚力为滑体土的 25%~35%,滑带土的内摩擦角为滑体土的 60%~70%。故该滑带土的黏聚力取 7.5 kPa,内摩擦角取 15.6°。通过中国气象数据网可知 2016 年 11 月 4—7 日期间有较大的降雨,使用公式(1)可得该边坡各日的前期降雨量分别为 10.5mm、8.4 mm、30.4 mm、74.3 mm、76.1 mm以及 71.4 mm。故 2016 年 11 月 3—8 日的降雨情况如表 3 所示。该边坡的饱和容重和边坡植被覆盖率因滑坡前后变化不大,其取值可与原坡体相同。

将表 3 的数据分别输入所开发的应用程序并点击程序中的"稳定性评价"按键,可得评价结果。选取2016年11月5日的运行结果如图11所示。2016年11月3—8日该边坡的稳定性评价结果如表 4 所示。

表 3 2016年11月3—8日的降雨情况 Table 3 Rainfall distribution from November 3 to 8, 2016

日期	降雨量/mm	降雨历时/h	降雨强度/(mm·d <sup>-1</sup> )	前期降雨量/mm
11月3日	0	0	0	10.5
11月4日	29.6	12	59.2	8.4
11月5日	62.5	24	62.5	30.4
11月6日	20.8	24	20.8	74.3
11月7日	13.2	12	26.4	76.1
11月8日	0	0	0	71.4



图 11 2016 年 11 月 5 日边坡的稳定性评价结果 Fig. 11 Stability evaluation results of landslide body on November 5, 2016

表 4 2016 年 11 月 3—8 日的边坡稳定性评价结果
Table 4 Stability evaluation results of landslide body from November 3 to 8, 2016

日期 -	不稳定		欠稳定		基本稳定		稳定		;u; (A, b+ H)
	隶属度区间	平均隶属度	隶属度区间	平均隶属度	隶属度区间	平均隶属度	隶属度区间	平均隶属度	评价结果
11月3日	[0.036,0.112]	0.074	[0.113,0.124]	0.119	[0.043,0.103]	0.073	[0.168,0.661]	0.415	稳定
11月4日	[0.049,0208]	0.129	[0.132,0.247]	0.190	[0.049,0.144]	0.097	[0.126,0.401]	0.264	稳定
11月5日	[0.083, 0.392]	0.238	[0.132,0.261]	0.197	[0.044,0.087]	0.066	[0.099,0.26]	0.180	不稳定
11月6日	[0.093, 0.427]	0.260	[0.11,0.135]	0.123	[0.059, 0.19]	0.125	[0.092,0.247]	0.170	不稳定
11月7日	[0.068, 0.288]	0.178	[0.13,0.248]	0.189	[0.056,0.2]	0.128	[0.099,0.265]	0.182	欠稳定
11月8日	[0.062,0.263]	0.163	[0.109,0.127]	0.118	[0.035,0.049]	0.042	[0.149,0.562]	0.356	稳定

以表 4 中的 11 月 3 日稳定性状态为例,该边坡处于不稳定状态的隶属度上限为 0.112,下限为 0.036,平均值为 0.074。同理其欠稳定、基本稳定以及稳定状态的隶属度平均值分别为 0.119, 0.073, 0.415。可以看出

该边坡处于稳定状态的隶属度平均值最大,故可判断出该边坡在11月3日处于稳定的可能性最大。其主要原因是11月3日无降雨且其前期降雨量亦很小。11月4日虽然已开始降雨,但因前期降雨较小的缘故,同理

可判断该边坡仍处于稳定状态的可能性最大,但该隶属 度平均值较11月3日已减小,同时其不稳定和欠稳定 的隶属度平均值较11月3日有所增加。11月5日继续 降雨且降雨历时与降雨强度增大,同时因11月4日的 降雨而引起前期降雨量的增大,判断该边坡的不稳定的 可能性最大,欠稳定的可能性次之。上述工程概况中提 到的从 2016 年 10 月 27 日至 11 月 10 日该边坡前缘土 体向前推移了约 0.5 m, 可推测是该日开始滑动的。 11月6日继续降雨,但降雨强度较11月5日降低,前期 降雨量仍增加,判断该边坡不稳定性可能性最大,该边 坡继续下滑。虽然11月7日仍有降雨,但降雨强度和 降雨历时均较11月6日有所下降,前期降雨量较之略 有增加,判断该边坡欠稳定的可能性最大,也即该边坡 的下滑可能性逐渐降低。11月8日无降雨,前期降雨 量较11月7日也有所降低,故判断该边坡稳定的可能 性最大,也即该边坡逐渐趋于稳定,停止下滑。

# 5 结论

- (1)新近失稳边坡稳定性评价云模型方法可较为准 确地对边坡的稳定性进行评价,所选用的评价因子对精 度要求较低且易获取性较强,也较容易满足紧急情况下 对边坡稳定性进行评价的要求。采用的权重反分析方 法利用了边坡发生首次滑动的已知条件,又通过云模型 的方法对权重的多种组合进行特征参数计算,得到的权 重云模型更为客观,也较为合理。开发的应用程序可操 作性强,能够较为便捷地进行评价,可为紧急救援决策 的制定提供帮助。
- (2)使用开发的应用程序对福建省永春县东平镇冷 水村的一新近失稳边坡 2016年11月3—8日的稳定性 进行评价后认为,11月5—6日该新近失稳边坡的不稳 定可能性最大,7日其欠稳定的可能性最大,其他时间 段稳定的可能性最大。该分析结果与现场情况基本吻 合,验证了本评价方法的便捷性和准确性。
- (3)边坡发生滑动后,形成的新近失稳边坡本身及 后缘会有裂缝产生,这也是新近失稳边坡与常规边坡的 不同之处。鉴于裂缝的长度、宽度、深度以及位置等对 新近失稳边坡的稳定性影响程度不一,较难量化评价,故 本评价方法暂未将其列为评价因子。如何合理地考虑裂 缝对该类边坡稳定性的影响,也将是下一步的研究方向。

### 参考文献(References):

PARK J, VILAYVONG K, SON Y, et al. Slope stability evaluation of an agricultural embankment by statistically derived rainfall patterns [J]. Paddy and Water Environment, 2019, 17(3): 303 - 313.

- 邓夕胜,张元,唐煜.基于失效概率的边坡降雨阈值曲 [2] 面探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 70-75. [ DENG Xisheng, ZHANG Yuan, TANG Yu. Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probablolity [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 70 - 75. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黄明奎,马璐.极端降雨对边坡土体强度的影响及其 稳定性分析[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 6-9. [HUANG Mingkui, MA Lu. Stability and soil strength analysis of alope under extreme rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 6-9. (in Chinese with English abstract)
- SAITO M, MASUDA R. Numerical study on seepage flow in slope at heavy rain considering non-uniformity and pore air flow [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser B1 (Hydraulic Engineering), 2018, 74(4); I\_7 - I\_12.
- 简文彬,黄聪惠,罗阳华,等.降雨入渗下非饱和坡残积 土湿润锋运移试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1123 - 1133. [ JIAN Wenbin, HUANG Conghui, LUO Yanghua, et al. Experimental study on wetting front migration induced by rainfall infiltration in unsaturated eluvial and residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1123 - 1133. (in Chinese with English abstract)
- [6] 苏永华,李诚诚.强降雨下基于Green-Ampt模型的边坡 稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 389-398. [SU Yonghua, LI Chengcheng. Stability analysis of slope based on Green-Ampt model under heavy rainfall [ J ] . Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 389 - 398. (in Chinese with English abstract)
- NOTTI D, WRZESNIAK A, DEMATTEIS N, et al. A [7] multidisciplinary investigation of deep-seated landslide reactivation triggered by an extreme rainfall event; a case study of the Monesi di Mendatica landslide, Ligurian Alps [J]. Landslides, 2021, 18(7): 2341 - 2365.
- 窦晓东,张泽林.甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因 探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 51. [ DOU Xiaodong, ZHANG Zelin. Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes(Zhouqu County, Gansu, China) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 51. (in Chinese with English abstract)
- 张永双,吴瑞安,任三绍.降雨优势入渗通道对古滑坡复 活的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(4): 777-789. [ ZHANG Yongshuang, WU Ruian, REN Sanshao. Influence of rainfall preponderance infiltration path on reactivation of ancient landslides [ J ] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 777 - 789. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计 算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20. [LI Deyi, MENG

- Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15 20. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李健, 汪明武, 徐鵬, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83 87. [LIJian, WANG Mingwu, XU Peng, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 83 87. (in Chinese with English abstract)]
- [ 12 ] WANG Mingwu, WANG Xiao, LIU Qiuyan, et al. A novel multidimensional cloud model coupled with connection numbers theory for evaluation of slope stability [ J ] . Applied Mathematical Modelling, 2020, 77: 426 – 438.
- [13] LIU Zaobao, SHAO Jianfu, XU Weiya, et al. Comprehensive stability evaluation of rock slope using the cloud model-based approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 2239 2252.
- [14] 方前程,商丽.基于博弈论-云模型的露天矿岩质边坡稳定性分析 [J].安全与环境学报,2019,19(1):8-13. [FANG Qiancheng, SHANG Li. Analysis of the rock slope stability for the open-pit mine based on the game theory and the cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1):8-13. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 吴孟龙, 叶义成, 胡南燕, 等. RAGA-PPC云模型在边坡稳定性评价中的应用 [J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 57-63. [WU Menglong, YE Yicheng, HU Nanyan, et al. Application of RAGA-PPC cloud model in slope stability evaluation [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 57-63. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈忠源, 戴自航.水库边坡稳定性评价的改进云模型[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 619-625. [CHEN Zhongyuan, DAI Zihang. Improved cloud model for stability evaluation of reser-voir slopes [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 619-625. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈忠源, 戴自航. 基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 9-17. [CHEN Zhongyuan, DAI Zihang. A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 9-17. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李江龙, 樊燕燕. 基于压力-状态-响应模型框架的城市 地震综合易损性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 117-125. [LI Jianglong, FAN Yanyan.

- Comprehensive evaluation of urban earthquake vulnerability under the framework of PSR [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 117 125. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 何乐平, 罗舒月, 胡启军, 等. 基于理想点-可拓云模型的 隧道围岩稳定性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 126-134. [HE Leping, LUO Shuyue, HU Qijun, et al. Stability evaluation of tunnel surrounding rock based on ideal point-extension cloud model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 126-134. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013 [S].北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)]
- [21] 自然资源部中国地质调查局. DD 2019-08. 地质灾害调查技术要求[S]. 2019. [China Geological Survey Bureau, Ministry of Natural Resources. DD 2019-08. Technical Requirements for Geological Hazard Investigation [S]. 2019. (in Chinese)]
- [ 22 ] BRUCE J P, CLARK R H. Introduction to hydrometeorology [ M ] . London; Pergamon Press, 1969.
- [23] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册 [ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. [Editorial Board of Handbook of Engineering Geology. Handbook of engineering geology [ M ]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018. (in Chinese)]
- [24] 王国胤, 李德毅, 姚一豫, 等. 云模型与粒计算 [ M ] . 北京: 科学出版社, 2012. [ WANG Guoyin, LI Deyi, YAO Yiyu, et al. Cloud model and granular computing [ M ] . Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [25] 唐宏阳. 缓倾斜土质斜坡失稳机理及碎石盲沟治理方法研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学. [TANG Hongyang. Study on instability mechanism of gently inclined soil slope and treatment method of gravel blind ditch [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 任三绍, 张永双, 徐能雄, 等。含砾滑带土复活启动强度研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 863 873. [REN Sanshao, ZHANG Yongshuang, XU Nengxiong, et al. Mobilized strength of sliding zone soils with gravels in reactivated landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 863 873. (in Chinese with English abstract)]