

基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

陈忠源, 戴自航

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

CHEN Zhongyuan and DAI Zihang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-02>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

吴兵, 梁瑶, 赵晓彦, 唐晓波, 吴晓春, 罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108

降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析

Analysis on the slope stability of Fushun West Open-pit Mine under superimposed action of rainfall, mine and earthquake

刘向峰, 郭子钰, 王来贵, 高晗 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 40-46

基于失效概率的边坡降雨阈值曲面探讨

Investigation on slope rainfall threshold surface based on failure probability

邓夕胜, 张元, 唐煜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 70-75

基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划

Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan-Tibet Railway based on contributing weights model

边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 王栋 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 84-93



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-02

基于指标变权重复合云模型的岩质边坡 稳定性评价初探

陈忠源^{1,2}, 戴自航²

(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 350116)

摘要:近年来,云模型评价方法在边坡的稳定性评价中得到了较深入的应用。但目前评价指标的权重多为某一精确值,没有考虑指标权重的不确定性和模糊性。为解决这一问题,尝试用指标变权重云模型表示各指标的权重,并引入权重范围系数以调整指标的权重变化幅度。参照《水电水利边坡工程地质勘察技术规程》和《地质灾害调查技术要求》对评价指标进行选取。参考行业规范、学者们的研究经验以及福建省的实际情况,采用等间距法对各评价指标相应的稳定分级区间进行划分。根据上述方法在 MATLAB 程序中编写算法,得到了基于指标变权重的复合云模型,并开发了相应的应用程序。通过对福建省连江县黄岐镇边坡的分析,认为该边坡总体处于基本稳定状态,但仍存在转化为不稳定的可能性。根据勘察报告,该坡段于 2016 年 6 月 17 日曾因强降雨发生崩塌,初步验证了本方法的分析结果。

关键词: 指标变权重; 复合云模型; 岩质边坡; 权重范围系数

中图分类号: TU43; P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0009-09

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

CHEN Zhongyuan^{1,2}, DAI Zihang²

(1. Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou, Fujian 350202, China;

2. College of civil engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: In recent years, cloud model evaluation methods has been deeply applied in slope stability evaluation. However, the current evaluation index weight was a precise value, which has not take uncertainty and ambiguity of the index weight into consideration. In order to solve this problem, the paper tried to using the index variable weight cloud model, and introduced the weight range coefficient to adjust the change range of the index. The evaluation indexes were selected by referring to "Technical Regulations for Hydropower and Water Conservancy Slope Engineering Geological Survey" and "Technical Requirements for Geological Hazard Survey". With reference to industry standards, the research experience of scholars and the actual situation in Fujian Province, the equidistant method was used to divide the stable grading intervals of each evaluation index. According to the above method, the algorithm was developed in the MATLAB program. The compound cloud model based on the variable weight of the index and the corresponding application program were developed. Based on the analysis of the slope of Huangqi Town, Lianjiang County, Fujian Province, it was believed that the slope was generally stable, but there still has the possibility of turning into instability. According to the survey report, the slope section collapsed due to heavy rainfall on June 17, 2016, which preliminarily verified the analysis results of this method.

Keywords: index variable weight; compound cloud model; rock slope; weight range coefficient

收稿日期: 2020-11-03; 修订日期: 2021-05-23

基金项目: 福建省高校杰出青年科研人才培育计划资助项目(JYTJQ201801)

第一作者: 陈忠源(1983-),男,福建仙游人,硕士,副教授,研究方向为边坡稳定分析。E-mail: 42134489@qq.com

通讯作者: 戴自航(1966-),男,教授,博导,研究方向为岩土工程数值分析。E-mail: dzhang@fzu.edu.cn

0 引言

滑坡是世界上分布广、发生频率高、造成危害大的一种地质灾害。如何对边坡的稳定性进行合理的评价以更好地预警,显得尤为重要。云模型是由李德毅等^[1]提出出来的一种模型,该模型在结合概率论和模糊数学理论的基础上,以样本的随机度来描述概念中的随机性和模糊性。

近年来,云模型在水文^[2]、气象^[3]、医疗^[4]、地质灾害^[5]以及隧道管理^[6]等各个方面得到了较好的应用。部分学者也对云模型在岩质边坡稳定性评价中的应用开展了较为深入的研究。张军等^[7]选取影响边坡稳定性的 11 项指标,结合正向正态云模型和指标权重,计算边坡的综合隶属度。LIU 等^[8]提出了一种基于云模型的山区水电站复杂岩质边坡综合稳定性评价方法。该方法应用隶属度云模型分析每个排序因子以生成云隶属度,并将获得的云隶属度与专家给出的因子权重进行综合,以对岩石边坡进行综合稳定性评估。于伟等^[9]建立了包含指标层、因子层和状态层的风险评价指标体系,并通过专家调查法和正向正态云发生器建立了风险评价模型,以最大综合确定度对应的风险等级作为边坡风险评价的结果。袁爱平^[10]综合考虑坡高、坡度等多个影响因子,选出 10 项影响边坡稳定性的指标,并结合正向正态云模型和指标权重,计算岩质边坡的综合隶属度。方成杰等^[11]根据勘察规范选取了 14 个评价指标,利用正向正态云发生器模拟实测样本值隶属于各等级的隶属度,并按照最大隶属度原则选择泥石流易发性等级。徐镇凯等^[12]通过构建多因素协同驱动的高边坡稳定性评价指标方法及其等级划分标准,引入模糊熵和云模型,建立了适应于高边坡稳定性多维评价梯级云模型。杨文东等^[13]选取坡高等 7 项因素作为评估风险集,通过正、逆向云发生器计算权系数矩阵和综合评判矩阵,利用 Matlab 软件生成评价云和“云滴”图来对比分析评价边坡风险等级。崔涛等^[14]选取坡度、黏聚力、岩体基本质量指标、日最大降雨量等 8 个评价因子,利用层次分析法和熵权法综合得出评价因子的权重,并根据隶属度最大原则判定边坡稳定性级别。WANG 等^[15]提出了一种新颖的多维连接云模型,以解决指标的多重不确定性和分布特征,并描述了边坡稳定性分析中属于分类标准的实测指标值的随机性和模糊性。陈忠源等^[16]对传统云模型的特征参数进行了改进,提出左右半云不对称的正态云模型,同时用区间值 Fuzzy 集来表达该云模型的隶属度。陈忠源等^[17]同时引入云模型的评价方法对不同降雨工况下的建筑边坡稳定性进行评价,

确定出滑坡时各参数的降雨阈值方程。

虽然学者们从各个角度对边坡的稳定性评价进行了深入的研究,取得了大量的成果,但仍然存在一些不足。目前大部分的模糊评价方法采用主观赋权法、客观赋权法以及主客观赋权法来确定各评价指标的权重。但无论是常权重还是变权重方法,最终得到的权重均为某一精确值。而实际上评价指标对边坡稳定性的影响是不确定的、模糊的,如果仅用某一精确值来表示其权重不太符合实际情况。因此本文拟使用信心指数的群决策层次分析法来构造指标变权重云模型以表示各指标的权重,并利用该方法对福建省的岩质边坡稳定性评价进行初步探讨。

1 评价指标隶属于各稳定性级别的综合云模型的建立

评价指标的选取首先考虑一般的工程地质勘察的勘察要素,以确保各指标数据的易获取性,其次考虑行业规范要求,以保证各指标的政策针对性。为此,本文在总结前人研究的基础上,综合考虑《水电水利边坡工程地质勘察技术规程》(DLT5337—006)^[18](以下简称《边坡规程》)中的 CSMR(边坡岩体质量分类标准)方法和《地质灾害调查技术要求》(DD 2019—08)^[19]中的单体地质灾害(隐患)风险评估(半定性半定量打分表)等相关规范,选取坡高、坡角等 10 个因素作为评价指标,并将稳定性等级分为很稳定(I)、稳定(II)、基本稳定(III)、不稳定(IV)、很不稳定(V)五个等级。

《边坡规程》将 $h < 10 \text{ m}$ 、 $10 \text{ m} \leq h < 30 \text{ m}$ 、 $30 \leq h < 100 \text{ m}$ 、 $h \geq 100 \text{ m}$ 划分为低、中、高以及超高边坡。因本方法将边坡的稳定性分为五个等级,故采用等间距法将 $10 \text{ m} \leq h < 30 \text{ m}$ 和 $30 \leq h < 100 \text{ m}$ 两个区间进行等分。最终坡高指标的各稳定性区间可划分为 $[0,10)$ 、 $[10,20)$ 、 $[20,30)$ 、 $[30,65)$ 、 $[65,100)$ 。

对于坡角各稳定性区间划分,《边坡规程》分别将 $\alpha \leq 10^\circ$ 、 $10^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ 、 $30^\circ < \alpha \leq 45^\circ$ 、 $45^\circ < \alpha \leq 65^\circ$ 、 $65^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 以及 $\alpha > 90^\circ$ 划分为缓坡、斜坡、陡坡、峻坡、悬坡和倒坡。故将坡角指标的各稳定性区间划分为 $[0,10)$ 、 $[10,30)$ 、 $[30,45)$ 、 $[45,65)$ 、 $[65,90)$ 。

对于岩石强度、岩石质量指标 RQD、结构面间距、结构面条件以及地下水条件评分值指标,《边坡规程》有相应评分标准(表 1)。对于结构面方向修正评分值,其为结构面条件系数(λ)与结构面方位系数(F_1 、 F_2 、 F_3)的乘积。当结构面条件为断层夹泥层、层面贯穿裂隙、节理时, λ 分别取 1.0, 0.8 ~ 0.9, 0.7。结构面方位系数

(F_1 、 F_2 、 F_3)的取值如表2所示。对于开挖方法系数修正值,当该边坡为自然边坡、预裂爆破、光面爆破、常规爆破、无控制爆破时,其值分别取5,10,8,0,-8。对

于上述指标,本文采用等间距法进行区间划分,即以指标最高评分值为区间最大值,将各稳定性区间划分五个长度相等的区间,具体结果如表3所示。

表1 评价指标评分标准表
Table 1 Scoring standard table of evaluation indexes

参数		评分标准				
岩石强度 /MPa	点荷载	>10	4~10	2~4	1~2	<1不宜采用
	单轴抗压强度	250~100	100~60	60~30	30~15	15~5
	评分	15~10	8	5	3	2~0
岩石质量指标RQD /%		250~100	100~60	60~30	30~15	15~5
	评分	20	17	13	8	3
	结构面间距 /cm	200~100	100~50	50~30	30~5	<5
	评分	20~15	13	10	8	5
	粗糙度	很粗糙	粗糙	较粗糙	光滑	擦痕、镜面
	评分	6	4	2	1	0
结构面条件	充填物 /mm	无	<5(硬)	>5(硬)	<5(软)	>5(软)
	评分	6	4	2	2	0
	张开度 /mm	未张开	<0.1	0.1~1	1~5	>5
	评分	6	5	4	1	0
	结构面长度 /m	<1	1~3	3~10	10~20	>20
	评分	6	4	2	1	0
	岩石风化程度	未风化	微风化	弱风化	强风化	全风化
地下水条件	评分	6	5	3	1	0
	状态	干燥	湿润	潮湿	滴水	流水
	透水率(Lu)	<0.1	0.1~1	1~10	10~100	>100
	评分	15	10	7	4	0

表2 结构面方位系数取值
Table 2 Orientation coefficient of structural plane

破坏机制	情况	非常有利	有利	一般	不利	非常不利
滑动	$\gamma_1= \alpha_j-\alpha_s $	>30°	30°~20°	20°~10°	10°~5°	<5°
倾倒	$\gamma_1= \alpha_j-\alpha_s-180^\circ $					
滑动, 倾倒	F_1	0.15	0.4	0.7	0.85	1
滑动	$\gamma_2= \beta_j $	<20°	20°~30°	30°~35°	35°~45°	>45°
滑动	F_2	0.15	0.4	0.7	0.85	1
倾倒	F_2	1	1	1	1	1
滑动	$\gamma_3=\beta_j-\beta_s$	>10°	10°~0°	0°	0°~-10°	<-10°
倾倒	$\gamma_3=\beta_j+\beta_s$	<110°	110°~120°	>120°	—	—
滑动, 倾倒	F_3	0	5	25	50	60

注: α_s 为边坡倾向; α_j 为结构面倾向; β_s 为边坡倾角; β_j 为结构面倾角。

对于年平均降雨量指标,《地质灾害调查技术要求》将降雨对边坡的影响分为正常降雨、十年一遇、二十年一遇、五十年一遇以及百年一遇五种情况。谢晓平等^[20]对福建省18个站点1957—2011年逐日气象资料进行了分析后得出,1957—2011年期间福建省多年平均降雨量为1580.6mm,最大降雨量为1790mm,最低降雨量为1070mm^[20]。因此本文可近似认为五十年一遇的年降

雨量为1790mm;同时将多年平均降雨量1580.6mm视为正常降雨的区间最大值。再根据等间距法在1580.6mm和1790mm之间进行等值插分出十年一遇、二十年一遇以及百年一遇的年降雨量,计算可得分别为:1650.4mm、1720.2mm以及1859.8mm。则可将降雨指标的各稳定性区间进行划分,具体如表3所示。

对于评价指标的云模型特征,本文采用改进后的云

表 3 岩质边坡稳定性评价指标及其各分级区间
Table 3 Stability evaluation index of rock slope and its grade intervals

评价指标	稳定性等级				
	很稳定	稳定	基本稳定	不稳定	很不稳定
坡高 /m(I1)	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,65)	[65,100)
坡角 /°(I2)	[0,10)	[10,30)	[30,45)	[45,65)	[65,90)
岩石强度评分值(I3)	[12,15)	[9,12)	[6,9)	[3,6)	[0,3)
岩石质量指标评分值(I4)	[16,20)	[12,16)	[8,12)	[4,8)	[0,4)
结构面间距评分值(I5)	[16,20)	[12,16)	[8,12)	[4,8)	[0,4)
结构面条件评分值(I6)	[24,30)	[18,24)	[12,18)	[6,12)	[0,6)
地下水条件评分值(I7)	[12,15)	[9,12)	[6,9)	[3,6)	[0,3)
结构面方向修正值(I8)	[0,12)	[12,24)	[24,36)	[36,48)	[48,60)
边坡开挖方法修正值(I9)	[6,10)	[3,6)	[0,3)	[-4,0)	[-8,-4)
年平均降雨量(I10)	[1 070,1 580.6)	[1 580.6,1 650.4)	[1 650.4,1 720.2)	[1 720.2,1 790)	[1 790,1 859.8)

模型为左右半云不对称的正态云模型。该云模型较符合人类对边坡稳定性评价的正常思维及常理^[16]。其云模型特征参数可由式(1)得到。

$$\begin{cases} Ex_{ij} = \frac{x_j^1 + x_j^2}{2} \\ En_{Lij} = \left| \frac{Ex_{ij} - Ex_{i,j-1}}{3} \right| \\ En_{Rij} = \left| \frac{Ex_{i,j+1} - Ex_{ij}}{3} \right| \\ He = k \cdot En \end{cases} \quad (1)$$

式中： Ex_{ij} ——某一评价指标 $z_i(i=1,2,\dots,n)$ 对应的评价等级 $s_j(j=1,2,\dots,n)$ 的期望；

En_{Lij} ——某一评价指标 $z_i(i=1,2,\dots,n)$ 对应的评价等级 $s_j(j=1,2,\dots,n)$ 左半云的熵；

En_{Rij} ——某一评价指标 $z_i(i=1,2,\dots,n)$ 对应的评价等级 $s_j(j=1,2,\dots,n)$ 右半云的熵；

k ——调整云模型的雾化程度指标。

将表 1 中各分级区间代入式(1)，可得各评价指标的云模型三个特征参数。同时笔者在 Matlab 程序语言平台上开发了综合隶属度云模型程序。该程序可根据上述 10 个评价指标所得到的云模型特征参数分别生成相对应的综合云模型。选取坡高指标隶属于各稳定性级别的综合云模型如图 1 所示。

2 评价指标的复合云模型的建立

邀请 n 位专家按 1~9 标度法对各评价指标的权重进行打分赋值，并对自己的判断给定一个“信心指数” θ ， θ 的取值范围为 [0,1]， θ 越高代表信心越强。笔者通过问卷调查的方法获取各位专家对评价指标的判断数据。调查问卷通过电子邮件的方式发送至专家期刊投稿时的通信邮箱。使用层次分析法分析求出专家们对

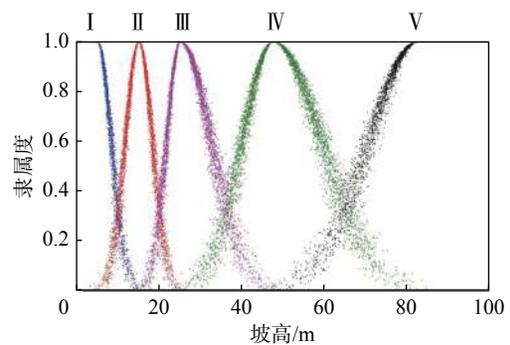


图 1 坡高隶属于各稳定性级别的综合云模型图
Fig. 1 Comprehensive cloud model of the slope height attached to various stability grades

各指标的初始权重，其结果如表 4 所示。

根据整理各调查问卷，可得到各专家对本次调查问卷的总体信心指数分别为 0.90, 0.83, 0.88, 0.84, 0.91, 0.85, 0.86, 0.90, 0.85, 0.87, 0.85, 0.86。将该信心指数乘以表 4 中的相应的初始权重，同时进行归一化处理，可得基于信心指数的权重。同时根据式(2)，可得该基于信心指数的权重云模型的特征值，其结果如表 5 所示。

$$\begin{cases} Ex = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{Ai} \\ En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_{Ai} - Ex| \\ He = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_{Ai} - Ex)^2 - En^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中： Ex ——云模型特征参数之期望；

n ——各指标基于信心指数的权重个数；

En ——云模型特征参数之熵；

u_{Ai} ——各指标基于信心指数的权重取值；

表 4 各专家对评价指标的初始权重

Table 4 Initial weight of each expert on the evaluation index

/10⁻³

指标	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	专家6	专家7	专家8	专家9	专家10	专家11	专家12
I1	19	21	20	15	22	18	17	19	25	24	21	22
I2	76	72	60	66	76	83	79	72	78	75	78	71
I3	32	37	38	40	39	34	37	38	33	40	40	48
I4	106	103	99	93	89	87	84	105	99	97	101	93
I5	24	26	31	33	43	29	37	31	38	39	43	48
I6	158	159	158	156	158	164	164	160	166	169	182	188
I7	18	22	29	25	23	29	27	24	39	32	30	26
I8	277	283	288	280	276	275	261	271	279	261	246	220
I9	14	18	22	20	20	23	20	17	30	28	23	20
I10	276	259	255	272	253	258	273	263	213	236	237	264

表 5 各指标的基于信心指数云模型特征值

Table 5 Characteristic values of various indicators based on confidence index cloud model

/10⁻³

指标	<i>Ex</i>	<i>En</i>	<i>He</i>
I1	40	5.1	1.0
I2	66	5.4	1.9
I3	55	4.9	1.2
I4	86	7.6	1.7
I5	53	9.8	2.2
I6	148	7.3	2.3
I7	45	6.4	1.5
I8	240	20.9	8.5
I9	41	6.4	1.1
I10	227	21.2	8.6

He——云模型特征参数之超熵。

另根据高斯云的“3*En* 规则”, 指标权重的主要取值范围为 [*Ex*-3*En*, *Ex*+3*En*]. 设某指标的取值区间为 [*a_A*, *b_A*], 其实测值为 *x_A*, 则该指标的权重 ω_A 的表达式为:

$$\omega_A = Ex_A - 3\alpha_\omega En_A + \frac{x_A - a_A}{b_A - a_A} \times 6\alpha_\omega En_A \quad (3)$$

式中: α_ω ——权重范围系数。

$\alpha_\omega \in [0, 1]$, 可根据该指标的权重变化幅度进行选取。当 α_ω 取 0 时, 式(3)变为 $\omega_A = Ex_A$, 即该指标的权重为某一常数。当 α_ω 取 1 时, 式(3)变为 $\omega_A = Ex_A - 3En_A + \frac{x_A - a_A}{b_A - a_A} \times 6En_A$, 也即该指标的权重在 [*Ex*-3*En*, *Ex*+3*En*] 均匀分布。

以指标坡高为例, 其取值范围为 [0,100], *Ex*=0.04, *En*=0.005 1, *He*=0.001, 利用 Matlab 程序编写算法, 则其权重云模型图如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 指标坡高的权重在 [0.035,0.045] 区间的隶属度较大, 在 [0.03,0.035] 和 [0.035,0.05] 区间的隶属度较小, 在其他区间的隶属度更小, 甚至为 0。假设指标坡高的实测值为 30 m, 若 α_ω 取 1, 则代入

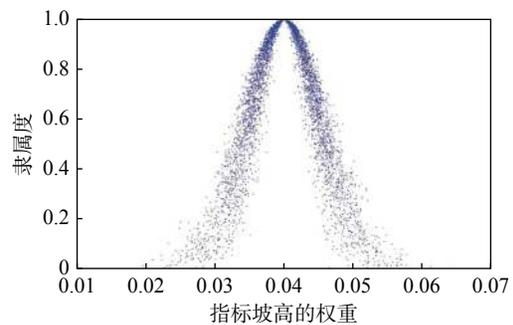


图 2 指标坡高的权重云模型图

Fig. 2 Weighted cloud model of index slope height

式(4)可计算出此时指标坡高的权重 $\omega_A=0.034$ 。再从图 2 可以看出, 该权重的隶属度约在 [0.25,0.60] 范围之内。若 α_ω 取 0.5, 则此时 $\omega_A=0.003 7$, 其隶属度约在 [0.45, 0.8] 范围之内。因此可以看出, 使用权重云模型的方法, 不仅可以达到变权重的目的, 而且还可以直观地表达权重的模糊性。因此 α_ω 的取值越小, 权重的取值越靠近权重云模型的均值, 其隶属度越大, 隶属度范围也相对集中。反之权重值越偏离权重云模型的均值, 其隶属度越小, 隶属度范围也越分散。 α_ω 具体如何取值, 可根据边坡的实际情况适当选用, 建议在 [0.2,0.5] 之间选取, 在进行“变权”的同时也能使最终的权重范围相对集中。

将各指标综合云模型及其相应的权重云模型进行复合, 可得到该指标的复合云模型。选取坡高指标的复合云模型图如图 3 和图 4 所示。

以图 3 为例, 同时参照图 4 的示意图, 可以看出, II、III、IV 三个稳定性等级的复合云模型呈类圆锥状, 且各云滴较为均匀地分布在图 4 中的①号曲面与②号曲面围成的空间里。当评价指标的权重取其 *Ex* 值, 且其实测值亦为某一稳定性等级区间的 *Ex* 值时, ①号曲面与②号曲面共同相交于图 4 中的 O 点。稳定性等级为 I 级的复合云模型左半侧和 V 复合云模型右半侧也

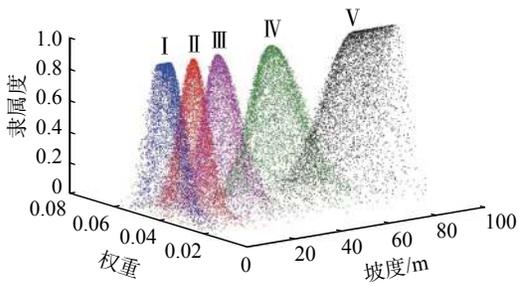


图 3 结构面间距指标的复合云模型图

Fig. 3 Composite cloud model of structural plane spacing

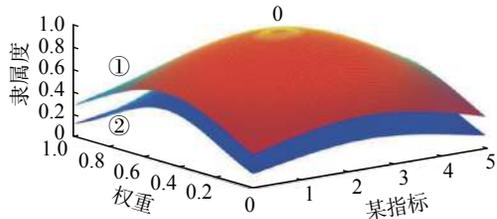


图 4 复合云模型类圆锥状分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of conical distribution of composite cloud model

同样呈类圆锥状, 该类圆锥状的曲线形状也是正态分布曲线。当坡高大于 82.5 m 时, 其在单一指标的云模型中属于 V 级的隶属度为 1, 则其复合云模型退化为单一指标的结构面间距权重云模型, 如图 3 中的稳定性等级为 V 级的复合云模型左半侧所示。因此, 利用该复合云模型可以较为直观地看到评价指标在各稳定性等级中的隶属度及其相应的权重。

3 云模型评价方法计算结果的判定

因本方法的权重函数和隶属度函数均为云模型, 笔者引入区间模糊函数, 用区间值 Fuzzy 集来表达该云模型的隶属度^[16]。也即设 $C(x)=[C(x), C(-)(x)]$ 。 $C(-)(x)$ 和 $C(x)$ 分别称为 $C(x)$ 的上、下隶属函数, 其表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} \bar{C}(x) = \exp\left[-\frac{(x-Ex)^2}{2(En+3He)^2}\right] \\ \underline{C}(x) = \exp\left[-\frac{(x-Ex)^2}{2(En-3He)^2}\right] \end{cases} \quad (4)$$

根据区间值 Fuzzy 集的相关定义, 设 A 和 B 是 X 上的两个指标隶属度的区间值 Fuzzy 集, 则该两个指标的隶属度之并集可采用式(5)进行计算。

$$(A \cup B)(x) = [\max(\underline{A}(x), \underline{B}(x)), \max(\bar{A}(x), \bar{B}(x))] \quad (5)$$

利用上述式(5)将所有指标的隶属度区间进行并集计算, 可得到该边坡在各稳定性等级的综合隶属度区间。

最后根据最大隶属度原理, 综合隶属度区间上下限平均值最大值所在的稳定性等级即为该边坡的稳定性等级。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

福建省连江县黄岐镇对台客运站边坡(以下简称黄岐镇边坡)位于客运站东侧。该区域气候温暖较湿、雨量适中、台风频繁, 多年平均降雨量 1 528.2 mm。该边坡原始地貌为低丘, 场地最高海拔位于东南侧斜坡山脊, 高程约 50 m, 最低海拔位于坡脚水泥道路路面, 高程约 6 m, 相对高差约 44 m。斜坡高程 36 m 以上坡段为自然斜坡, 坡度约 25°, 植被发育, 为原始生态林; 斜坡高程 36 m 以下坡段因人工开挖改造形成阶梯状边坡, 边坡高度 4~20 m, 未支护, 边坡坡度约 62°。边坡主要由碎块状强风化-中风化花岗岩组成、节理裂隙发育, 其产状分别为: 200°∠40°。裂隙主要为张裂隙, 长度 0.5~4 m 不等, 裂隙张开宽度 2~40 mm, 间距 0.3~1.2 m, 无充填, 边坡岩体被主要结构面分割成块状或楔形体。RQD 为 32%~53%, 岩石单轴抗压强度平均为 38.2 MPa。结构面强度经验指标 $c=30$ kPa, $\varphi=35^\circ$ 。地下水的含水层主要赋存于④砂土状强风化花岗岩、⑤碎块状强风化花岗岩、⑥中风化花岗岩中的裂隙潜水, 并且由于风化作用, 水量分布不均匀, 渗透性能一般, 为弱透水层, 以潜水为主。根据野外钻探取芯肉眼鉴别, 结合场地原位测试和室内土工试验成果综合分析, 在钻探控制深度范围内各岩土层主要特性参数如表 6 所示。

4.2 稳定性分析

根据上述勘察报告, 可知该边坡的坡高为 24.15 m, 坡角为 62°, 该地区多年平均降雨量为 1 528.3 mm。因该边坡的岩石单轴抗压强度平均为 38.2 MPa, 查表 1 可得该项评分值为 5。因该边坡的 RQD 为 32%~53%, 大部分处于 25%~50% 的区间, 故查表 1 可得该项评分值为 8。因结构面间距为 0.3~1.2 m, 大部分处于 0.5~1.0 m 的区间, 故查表 1 可得该项评分值为 13。同理可根据勘察报告计算得到结构面条件评分值为 15。因该边坡为弱透水层, 相当于含水率为 1~10 Lu, 故该项评分值为 7。根据勘察报告, 可求得 λ 、 F_1 、 F_2 、 F_3 分别为 0.7、0.15、0.85、60, 故结构面方向修正值为 5.36。因该边坡为自然边坡, 未经爆破过, 故边坡开挖方法修正值为 5。将表 5 中的数值代入式(4)和式(5), 可计算出该边坡各评价在评价等级中的隶属度(表 7)。

表 6 黄岐镇边坡场地内岩土层特性参数
Table 6 Property parameters of strata in slope of Huangqi town

序号	地层名称	天然重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和重度 γ_{sat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然快剪		饱和快剪		厚度/m
				c_k/kPa	$\varphi_k/(\text{°})$	c_k/kPa	$\varphi_k/(\text{°})$	
①	素填土	17.5	18.0	10.0	15.0	8.5	11.5	0.50 ~ 1.40
②	坡积粉质黏土	18.64	18.78	22.0	20.0	19.19	17.45	0.5 ~ 1.3
③	残积砂质黏土	18.5	19.0	23.0	22.0	20.0	18.0	1.5 ~ 2.8
④	全风化花岗岩	19.0	19.5	25.0	27.0	22.0	23.0	0 ~ 3.0
⑤-1	砂土状强风化花岗岩	21.0	21.5	30.0	32.0	26.0	28.0	2.3 ~ 7.3
⑤-2	碎块状强风化花岗岩	22.0	22.5	35.0	35.0	28.0	30.0	1.1 ~ 2.4
⑥	中风化花岗岩	24.0	—	40.0	50.0	—	—	7.4 ~ 15.4

表 7 指标评价在各评价等级中的隶属度范围
Table 7 The range of the membership degree of the index evaluation in each evaluation grade

评价指标	稳定性等级				
	很稳定	稳定	基本稳定	不稳定	很不稳定
I1	[0,0]	[0,0]	[0.74,0.82]	[0.04,0.11]	[0,0]
I2	[0,0]	[0.15,0.28]	[0.39,0.53]	[0,0]	[0,0]
I3	[0,0]	[0.01,0.05]	[0.96,0.97]	[0,0]	[0,0]
I4	[0,0]	[0,0]	[0.25,0.39]	[0.25,0.39]	[0,0]
I5	[0,0]	[0,0.02]	[1,1]	[0,0]	[0,0]
I6	[0,0.02]	[0,1]	[0,0]	[0,0]	[0,0]
I7	[0,0]	[0.95,0.97]	[0.01,0.04]	[0,0]	[0,0]
I8	[1,1]	[0,0]	[0,0]	[0,0]	[0,0]
I9	[0,0]	[0,0]	[0,0]	[0,0]	[1,1]
I10	[0,0]	[0.98,0.99]	[0.01,0.04]	[0,0]	[0,0]

从表 7 看出, 大部分评价指标的隶属度在其中的两个稳定性等级中均有取值, 而在另外三个稳定性等级取值为 0。这是由于本文的云模型考虑该指标实测值的隶属度较大的两个等级, 而另外三个次要等级的隶属度较小, 故忽略不计。

本次评价的各评价指标的变权重复合云模型均取 $\alpha_\omega=0.3$ 。将表代入式(3)和式(4), 可求得各指标权重及其隶属度范围(表 8)。

从表 8 可以看出, 当权重的取值越靠近其均值, 其平均隶属度也越大, 反之越小。如表中的 I7 指标, 其取值接近取值范围的均值, 故其权重取值也接近云模型权重均值, 同时其平均隶属度较大; 而 I5 指标则相反。同时表中的 I8 和 I10 两个指标的隶属度范围变化幅度较大, 其范围几乎为从 0 至 0.99。此为各专家在问卷调查时对该两个指标的权重判断差异较大的原因, 使得 He 的值较大。根据李德毅等^[1]对云模型的特征值 He 取值研究发现, 当 $He>0.3 En$ 时, 其云模型较为发散, 故其隶属度范围较大。

将上述的数值输入笔者开发的应用程序可得该边坡的稳定性评价结果(图 5)。

表 8 评价指标的指标权重及其隶属度范围
Table 8 Weight of evaluation index and its range of membership degree

评价指标	E_x	权重取值	隶属度
I1	0.040	0.037	[0.763,0.944]
I2	0.066	0.067	[0.641,0.985]
I3	0.055	0.054	[0.549,0.991]
I4	0.086	0.085	[0.975,0.989]
I5	0.053	0.050	[0.214,0.682]
I6	0.148	0.147	[0.904,0.998]
I7	0.045	0.045	[0.992,0.999]
I8	0.240	0.223	[0.009,0.870]
I9	0.041	0.043	[0.799,0.960]
I10	0.227	0.230	[0,0.997]

虽然模糊数学中的隶属度与事件发生概率是从不同角度刻画不确定性的两种方法, 不能等同而论, 但可以将隶属度理解为发生的可能性。从图可以看出, 该坡段现状是处于基本稳定状态的最小可能性为 0.525, 最大可能性为 0.638。一般情况下, 人们对某一事件判断无法给出一个精确的数值, 而比较习惯给定某一范围。本方法的隶属度评价结果为某一区间, 也即具有一定的模糊性, 相对符合人类的判断习惯。可算出上述基本稳



图 5 边坡稳定性评价应用程序的运行结果

Fig. 5 Result of the stability evaluation application

定状态的综合隶属度区间上下限平均值, 可得 0.582, 同理其很稳定、稳定、不稳定以及很不稳定的上下限平均值分别为 0, 0.101, 0.128 以及 0。可以看出, 该坡段的稳定性为基本稳定的可能性最大, 不稳定的可能性次之。也即该边坡总体处于基本稳定状态, 但仍存在转化为不稳定的可能性。根据勘察报告, 2016 年 6 月 17 日该坡段因强降雨发生了崩塌, 崩塌情况如图 6 所示。此结果初步验证了本方法的分析结果。



图 6 2016 年 6 月 17 日黄岐镇边坡崩塌情况

Fig. 6 Slope collapse in Huangqi Town on June 17, 2016

5 结论

文章尝试用云模型方法构建指标变权重模型, 提出基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价方法, 并在福建省连江县黄岐镇边坡进行了应用分析。使用该方法得到的稳定性等级隶属度结果为某一区间, 相对更符合人类的判断习惯。通过对黄岐镇边坡的分析表明, 该边坡的处于基本稳定的状态可能性最大, 但仍存在不稳定的可能性。根据现场的勘察情况, 也初验证了该分析结果。该方法考虑了权重的模糊性和随机性特点, 对岩质边坡稳定分析的模糊分析方法进行了尝试, 具有一定的可行性。但是影响岩质边坡稳定性的影响因素较多, 且部分指标具有一定的地域性, 如多年平

均降雨量, 如何根据不同的地域特点确定合理的评价指标及其分级区间, 值得进一步深究。另外本文对在评价指标的隶属函数选取上均假定其服从较为广泛使用的正态函数分布, 尚未进行论证其合理性。此亦是本文的下一步研究方向。

致谢: 研究过程中, 收到了林斌、陈仕淇、兰俊杰、程武、俞伟宏、陈林靖、徐祥、林智勇、谢裕鑫、王旭、陈德璠、姜珂 12 位学者的有效问卷, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

- [1] 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)]
- [2] SHI Y Z, ZHOU H C. Research on monthly flow uncertain reasoning model based on cloud theory [J]. Science China (Technological Sciences), 2010, 53(9): 2408-2413.
- [3] SPIRIDONOV V, CURIC M. A storm modeling system as an advanced tool in prediction of well organized slowly moving convective cloud system and early warning of severe weather risk [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 51(1): 61-75.
- [4] SHI H, LIU H C, LI P, et al. An integrated decision making approach for assessing healthcare waste treatment technologies from a multiple stakeholder [J]. Waste Management, 2017, 59: 508-517.
- [5] 梁伟章, 赵国彦. 矿山泥石流险情的变权云模型综合预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 82-88. [LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan. Comprehensive prediction of mine debris flow risk based on weight-varying cloud model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 82-88. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄仁东, 吴寒, 张惕, 等. 基于云模型的岩溶隧道涌水灾害危险性评价及其在青岩头隧道的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 44-51. [HUANG Rendong, WU Han, ZHANG Ti, et al. Evaluation of water burst hazard in Karst tunnel based on cloud model and its application in Qingyantou Tunnel [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 44-51. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张军, 陈征宙, 刘登峰. 基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 44-50. [ZHANG Jun, CHEN Zhengzhou, LIU Dengfeng. Stability

- evaluation of a rock slope based on the cloud model [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6): 44 - 50. (in Chinese with English abstract)]
- [8] LIU Z B, SHAO J F, XU W Y, 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.
- [9] 于伟,张浩,杨鹏,等.基于云模型的黄土区公路边坡灾害风险评价 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(4): 111 - 115. [YU Wei, ZHANG Hao, YANG Peng, et al. Risk assessment of highway slope disasters in loess areas based on cloud model [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(4): 111 - 115. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 袁爱平.基于层次分析法-正态云模型的岩质边坡稳定性预测 [J] . *水电能源科学*, 2016, 34(9): 153 - 156. [YUAN Aiping. Stability evaluation of rocky slope based on AHP-normal cloud model [J] . *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 153 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 方成杰,钱德玲,徐士彬,等.基于云模型的泥石流易发性评价 [J] . *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(12): 1659 - 1665. [FANG Chengjie, QIAN Deling, XU Shibin, et al. An evaluation model of debris flow susceptibility based on cloud model [J] . *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2017, 40(12): 1659 - 1665. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 徐镇凯,温勇兵,魏博文,等.基于组合赋权模糊云理论的高边坡稳定性评价 [J] . *水利水运工程学报*, 2017(1): 10 - 17. [XU Zhenkai, WEN Yongbing, WEI Bowen, et al. Stability evaluation method for high slope based on fuzzy cloud theory combined with weights [J] . *Hydro-Science and Engineering*, 2017(1): 10 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨文东,杨栋,谢全敏.基于云模型的边坡风险评估方法及其应用 [J] . *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 30 - 34. [YANG Wendong, YANG Dong, XIE Quanmin. Study on slope risk assessment method based on cloud model and its application [J] . *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(4): 30 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 崔涛,郑淑芬.基于组合赋权-改进云模型的边坡稳定性评价方法 [J] . *中外公路*, 2019, 39(5): 33 - 38. [CUI Tao, ZHENG Shufen. Slope stability evaluation method based on combination weighting approach and improved cloud model [J] . *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(5): 33 - 38. (in Chinese)]
- [15] WANG M W, WANG X, LIU Q Y, et al. A novel multi-dimensional cloud model coupled with connection numbers theory for evaluation of slope stability [J] . *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 77: 426 - 438.
- [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 reservoir slopes [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 619 - 625. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈忠源,戴自航.降雨条件下建筑边坡稳定性的云模型评价方法 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 50 - 56. [CHEN Zhongyuan, DAI Zihang. Cloud model evaluation method for building slope stability under rainfall [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 50 - 56. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.水电水利工程边坡工程地质勘察技术规程:DLT5337-2006.[M].北京:中国电力出版社,2006.[National Development and Reform Commission, People's Republic of China. Technical specification for slope engineering geological survey of hydropower and water conservancy projects: DLT5337-2006[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. (in Chinese)]
- [19] 自然资源部中国地质调查局.地质灾害调查技术要求:DD 2019-08[S]. 2019. [China Geological Survey, MNR. Technical requirements for geological disaster investigation: DD 2019-08.[S]. 2019. (in Chinese)]
- [20] 谢晓平,刘光生.近60年来福建省降雨时空分布特征 [J] . *水电能源科学*, 2020, 38(8): 5 - 8. [XIE Xiaoping, LIU Guangsheng. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall in Fujian Province in recent 60 years [J] . *Water Resources and Power*, 2020, 38(8): 5 - 8. (in Chinese with English abstract)]