

文章编号: 1008-2786-(2017)3-340-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000230

基于非对称联系云的边坡稳定性评价

汪明武 朱 宇 李亚峰 金菊良

(合肥工业大学 土木与水利工程学院 合肥 230009)

摘 要: 边坡稳定性受诸多随机、模糊和不完整因素影响,其评价是一个复杂系统不确定性问题。云模型则是处理随机不确定性问题的有效工具,但传统云模型应用于实际边坡评价时,可能面临指标分布形式不符正态分布的要求,为克服此缺陷,在此基于联系数理论和云模型耦合方法,探讨了边坡稳定性非对称联系云评价模型,即基于边坡分类标准求解非对称联系云数字特征和生成联系云,结合指标权重和实测指标计算综合确定度,以判定边坡的稳定性等级。实例应用和与其他方法对比分析表明,该模型应用于边坡稳定性评价是有效可行的,取得了较好效果,且评价结果的转化态势能用确定度统一量描述,更加符合边坡情况,为边坡稳定性评价提供了新的参考。

关键词: 边坡稳定性; 云模型; 集对; 联系数; 评价

中图分类号: TU457

文献标志码: A

边坡稳定性评价具有重要的实用和经济意义。然而,边坡是一个复杂的开放系统,其稳定性评价信息受诸多不完整性 and 不确定性指标影响与控制,使其一直是岩土工程中的难点。边坡稳定性评价方法目前大致分为定性和定量分析方法两大类^[1]。定性分析方法基于地质信息和工程经验综合考虑影响边坡稳定性因素给出定性结果,但缺失统一标准;基于极限平衡法或数值方法的定量分析结果是建立在假设基础之上的,而这会导致评价结果可靠性降低。为此,许多学者相继提出了模糊综合评判法^[2-3]、可靠度分析法^[4]、进化遗传算法^[5]、灰色聚类法^[6]、人工神经网络方法^[7]、突变理论^[8]等方法来克服以上缺陷,但这些评价方法都存在着一定的缺陷和局限性,有的算法过于复杂,使得可操作性不强,有的则由于考虑的因素太少,计算误差较大,如模糊综合评判法的隶属函数的选择具有主观性,不同的人或用不同的判断标准,所得的隶属度也不同,该方法不能比较细微地分类程度现象,而近期发展的云模型^[9]

能很好的解决评价指标的随机性或模糊性问题,通过算法自动生成样本对概念的确定度,避免了主观给定确定值的缺陷,为边坡稳定性分析提供了新途径,但传统云模型要求指标分布形式为无限区间正态分布,而这与实际指标分布形式不符,导致模拟分析结果和实际情况不符,不利于工程应用。为此,本文将联系数和云模型耦合,提出符合实际指标分布特点的非对称联系云模型,并能辩证统一分析评价指标的确定和不确定性,实现有限区间内云模型模拟,以提高边坡稳定性评价的可靠性和合理性。

1 联系云模型

1.1 云模型

云模型首先由李德毅院士提出^[10],其通过模糊性与随机性二者集成在一起,构成定性和定量之间的相互映射,实现用语言值表示的某个定性概念与其数值表示之间的不确定性转换,现已广泛应用于

收稿日期(Received date): 2016-09-11; 改回日期(Accepted date): 2017-01-12。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41172274; 51579059)。[National Natural Science Foundation of China(41172274; 51579059).]

作者简介(Biography): 汪明武(1972-),男,安徽歙县人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。[Wang Mingwu (1972-), male, born in Shexian, Anhui, Ph. D., professor. Mainly engaged in the teaching and research on geotechnical engineering.] E-mail: wanglab307@foxmail.com

工程中存在模糊性和随机性问题分析领域中。云模型由云滴组成,每个云滴的确定度反映了其模糊性,且它本身也是一个随机值。云的定义如下:设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$,是有稳定倾向的随机数,则 x 在论域 U 上的分布称为云,称每一个 x 为一个云滴^[11],即:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

正态云是最基本的云算法,其数字特征包括期望值 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。正态云定义如下:设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现,若 x 满足: $x \sim N(E_x, E_n^2)$,其中, $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$,且 x 对 C 的确定度满足:

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2E_n^2}\right) \quad (2)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为正态云。

由于实际问题的实测指标分布形式可能不符合传统云模型对评价指标分布的要求,故本文将联系数理论引入云滴生成过程^[12],提出非对称联系云,以解决传统云模型对指标要求的局限性,实现能真实反映评价指标的实际分布特点,并能定量描述指标与评价等级间的确定和不确定关系。

1.2 非对称联系云

非对称联系云定义如下:设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现,其中 $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$,且 x 对 C 的确定度满足:

$$\mu = \left[1 - \left(\frac{x - E_x}{a'}\right)^2\right]^k \quad (3)$$

式中 a' 表示非对称联系云修正后的半区间长度。若研究对象等级可划分为 m ($i = 1, 2, \dots, m$) 类,相应的评价指标有 n ($j = 1, 2, \dots, n$) 个,假设评价指标 j 的第 i 等级云以期望值 E_x^i 为分界点的左、右两个非对称云构成,且联系云的云滴数字特征由 (E_x, E_n, H_e, μ, k) 来表征,相应的计算模型如下:

$$E_x^i = \frac{N_{\max}^i + N_{\min}^i}{2} \quad (4)$$

$$a'_i = a_i \cdot \sqrt{2k_i + 3} \quad (5)$$

$$E_n^i = \frac{a_i}{\sqrt{2k_i + 3}} \quad (6)$$

$$H_e^i = \beta \cdot E_n^i \quad (7)$$

$$k_i = \frac{\lg 0.5}{\lg\left[1 - \left(\frac{y_i - E_x^i}{a_i}\right)^2\right]} \quad (8)$$

式中 a_i 和 a'_i 分别表示非对称联系云半区间长度和修正后的半区间长度,当 a'_i 为左半区间长度修正值时, $x_i \in [E_x^i - a'_i, E_x^i]$,当 a'_i 为右半区间长度修正值时, $x_i \in [E_x^i, E_x^i + a'_i]$; N_{\max}^i 和 N_{\min}^i 分别为区间的上、下限; β 为云模型的雾化参数,本文取 0.1; k_i 为相应的分布密度函数阶数,式中 y_i 取值为 N_{\min}^i 或 N_{\max}^i 。

2 基于非对称联系云的评价模型

2.1 基本原理

基于非对称联系云的边坡稳定性等级评价基本原理为:首先,根据评价指标标准计算各稳定级别的左、右半区间长度;其次,分别求出与左、右半区间长度相对应的非对称联系云左半支和右半支的数字特征 (E_x, E_n, H_e, μ, k) ;根据所求出的非对称联系云的左、右半支的数字特征生成相应有限区间内的随机数,并模拟评价指标隶属于各稳定等级的云模型;最后,根据样本指标实测值计算其属于各稳定等级的确定度,并结合指标权重求得综合确定度,根据最大确定度原则来综合判断样本的稳定性等级。

2.2 评价模型

在非对称联系云模型中,由于中间云和两端云的确定度计算模型不同,计算时应按照指标值的实际分布区间进行计算。当评价指标值 x_0 在两端等级云的远离中间云的一半范围内,应为确定度为 1 的均匀分布;其他范围内,样本 P 的第 j 指标的指标值 x_0 属于 i 等级的确定度 $\mu_{p,ij}$ 可由下式求得:

$$\mu_{p,ij} = \left[1 - \left(\frac{x_0 - E_x^i}{a'_i}\right)^2\right]^{k_i} \quad (9)$$

当评价指标为效益型指标,即分类标准等级区间值随着等级的增大而增大,则等级 i 的左、右半区间长度分别为:

$$\begin{cases} a_{i\text{左}} = E_x^i - N_{\min}^{i-1} \\ a_{i\text{右}} = N_{\max}^{i+1} - E_x^i \end{cases} \quad (10)$$

当评价指标为成本型指标,那么等级 i 的左、右半区间长度分别为:

$$\begin{cases} a_{i\text{左}} = E_x^i - N_{\min}^{i+1} \\ a_{i\text{右}} = N_{\max}^{i-1} - E_x^i \end{cases} \quad (11)$$

为统一定量描述评价结果在不同等级中的转化

态势,本文采用确定度来表示指标值属于各等级的可能性,并定义等级*i*的界限值(N_{\min}^i 和 N_{\max}^i)隶属于等级*i*和等级*i* - 1 或者等级*i* + 1 的确定度相等。如等级*i*的界限值属于等级*i*的可能性与不属于等级*i*的可能性相同,而这可用集对分析理论中差异关系表达其可向同一或对立关系转换的特性,故在此将联系云模拟获得的确定度属于[0.5, 1]区间定义为同一关系,属于(0, 0.5]区间则定义为差异关系,而将等于0定义为对立关系。非对称联系云生成还应考虑指标实际等级特点,如两端等级云中远离中间等级云的一半实际分布一般不为近似正态分布,而是确定度为1的均匀分布。

基于上面求得的各指标值隶属于各等级云的确定度,再结合评价指标的权重 $\lambda_{p,j}$ 可计算样本*P*属于等级*i*的综合确定度 $\mu_{p,i}$ 为:

$$\mu_{p,i} = \sum_{j=1}^n \mu_{p,ij} \lambda_{p,j} \tag{12}$$

根据综合确定度的值,按最大确定度原则即可判定样本*P*所属的等级*K*,

$$K = \max\{\mu_{p,1}, \mu_{p,2}, \dots, \mu_{p,m}\} \tag{13}$$

3 实例应用

以往研究表明岩石边坡稳定性影响因素多,总体上分为人为因素和自然因素,且对实际边坡而言,各因素所起到作用各不相同^[1-8],故评价指标选取至关重要,选取的评价指标应具有定量表征岩体边

坡稳定性程度,数据易于获取及形式简单等特点。根据工程岩体分级标准(GB/T 50218 - 2014)可知,边坡稳定性受到地层岩性、地质构造、岩体结构、地应力和水文地质条件等诸多因素的影响,但基于现有技术条件和为便于实际应用及同其他方法对比分析,参考已有文献本文选取了岩石质量指标(RQD)、岩体完整性指标、地应力(MPa)、粘聚力(MPa)、内摩擦角(°)、坡高(m)和日最大降水量(mm)共7个指标作为边坡稳定性评价的综合指标,选取指标的评价标准已经实际工程验证和成功应用^[13-16]。根据文献^[13]将稳定性等级分为5个等级,即稳定(I)、较稳定(II)、基本稳定(III)、不稳定(IV)和极不稳定(V),相应的分类标准和样本指标实测值见表1和表2。

表2中,文献[15]中的渝黔高速公路某边坡*P*₁位于丘陵斜坡地貌区,坡高46 m,边坡坡度角约64°,边坡岩体结构为上部砂岩下部泥岩层,且存在软弱夹层,对边坡稳定不利。文献[16]中首钢某矿区边坡*P*₂ ~ *P*₄,位于华北地台北缘、燕山沉降带中部,地层以太古界迁西群三屯营组变质岩系为主,矿床主体被F9断层破坏的向斜构造。

基于本文讨论的模型,根据评价指标分类标准,首先按公式(4)至(8)可求得各评价指标对应等级的联系云的数字特征(E_x, E_n, H_e, σ, k),再根据公式(9)模拟指标*j*属于等级*i*(*i* = 1, 2, 3, 4, 5)左半区间和右半区间的各2000个云滴,即可构成评价指标*j*对应等级*i*的非对称联系云,结果如图1所示。由于

表 1 边坡稳定性分类标准

Tab. 1 The grade standards of the slope stability

等级	岩石质量指标	岩体完整性指标	地应力/MPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	坡高/m	日最大降水量/mm
稳定 I	90 ~ 100	90 ~ 100	0 ~ 2	0.22 ~ 0.32	37 ~ 45	0 ~ 30	0 ~ 20
较稳定 II	75 ~ 90	75 ~ 90	2 ~ 8	0.12 ~ 0.22	29 ~ 37	30 ~ 45	20 ~ 40
基本稳定 III	50 ~ 75	50 ~ 75	8 ~ 14	0.08 ~ 0.12	21 ~ 29	45 ~ 60	40 ~ 60
不稳定 IV	25 ~ 50	30 ~ 50	14 ~ 20	0.05 ~ 0.08	13 ~ 21	60 ~ 80	60 ~ 100
极不稳定 V	0 ~ 25	0 ~ 30	20 ~ 25	0 ~ 0.05	0 ~ 13	80 ~ 100	100 ~ 150

表 2 边坡稳定性指标的实测值

Tab. 2 Measured values of indexes for slope stability

边坡	岩石质量指标	岩体完整性指标	地应力/MPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	坡高/m	日最大降水量/mm
<i>P</i> ₁	72.00	15	0.44	0.024	12.0	46	120
<i>P</i> ₂	65.23	63	3.65	0.130	44.5	43	344
<i>P</i> ₃	87.21	82	6.77	0.220	46.0	51	344
<i>P</i> ₄	89.46	84	12.23	0.210	42.0	47	344

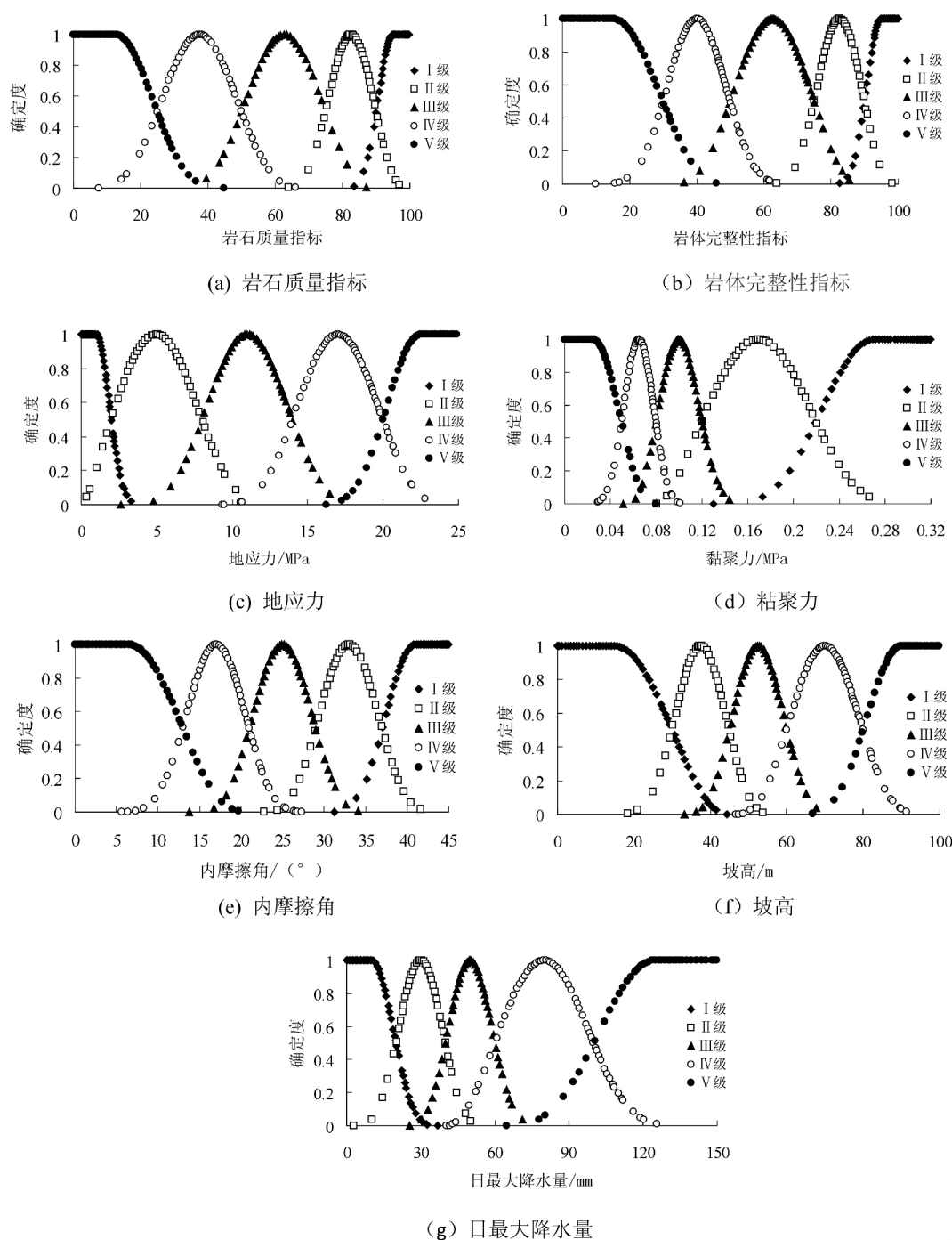


图1 评价指标隶属于稳定性级别的联系云

Fig. 1 The connection clouds of grades of stability for each evaluation index

边坡稳定性评价指标一般分布于某个区间内,且最大值存在动态性,如内摩擦角取值可能大于 45° ,为了便于数据处理,实际计算中当实测值超过了限定范围,则按区间的最大值进行计算。

图1中横坐标代表相应的评价指标值,纵坐标代表相应的确定度,其中图(a)、(b)、(d)和(e)从左到右分别代表指标等级V到等级I的联系云,而

图(c)、(f)和(g)从左到右分别代表指标等级I到等级V的联系云。为了便于计算结果的对比分析,权重采用文献[13]中的权重集,即 $\lambda_{pj} = \{0.034, 0.378, 0.023, 0.150, 0.094, 0.057, 0.250\}$ 。实例中边坡稳定性的评价结果及与其他方法评价结果的对比见表3和表4。

表 3 稳定性等级的评价结果
Tab. 3 Evaluation results of stability grade

样本	综合确定度					评价结果
	U(I)	U(II)	U(III)	U(IV)	U(V)	
P_1	0.0230	0.0321	0.0613	0.0464	0.8306	V
P_2	0.0966	0.16591	0.4753	0.0051	0.2500	III
P_3	0.1780	0.5031	0.1307	0.0034	0.2500	II
P_4	0.1716	0.5067	0.1025	0.0040	0.2500	II

表 4 不同方法评价结果对比
Tab. 4 Comparison of evaluation results of different methods

样本	本文方法	变全欧氏距离法 ^[14]	灰关联分析 ^[13]	动态权重和可拓方法 ^[15,16]
P_1	V	V	V	V
P_2	III	III	III	III
P_3	II	II	I	I
P_4	II	II	II	II

现以 P_1 边坡中的岩石质量指标 (RQD) ($x_0 = 72.00$) 为例,阐述其对稳定性等级 I ~ V 的确定度计算过程。由公式(11) 计算得到 $\mu_{1,11} = 0$ $\mu_{1,21} = 0.2110$ $\mu_{1,31} = 0.7000$ $\mu_{1,41} = 0.0001$ $\mu_{1,51} = 0$,表明 P_1 边坡中的岩石质量指标 $x_0 = 72.00$ 隶属于基本稳定 III 的程度最大,其次隶属于较稳定 II,隶属于不稳定 IV 的可能性极小,不可能隶属于稳定 I 和极不稳定 V。同理可求出其他指标属于各个等级的确定度,然后结合指标权重,通过式(12) 即可求得样本属于不同等级的综合确定度,最后按式(13) 由最大综合确定度值所对应级别判定为样本的稳定性等级。

由表 4 可知,本文模型评价结果与变权欧氏距离法完全一致,与灰关联分析法和动态权重与可拓方法基本一致。对于边坡 P_3 本文的评价结果为较稳定 II 级边坡,而后两种评价结果为稳定 I 级边坡。对边坡 P_3 进一步分析可知,它的七个评价指标实测值属于稳定性等级分别为:岩石质量标准(II)、岩体完整性指标(II)、地应力(II)、黏聚力(I)、内摩擦角(I)、坡高(III)、日最大降水量(V),且黏聚力和内摩擦角所占权重不是很大,直观分析很难将边坡 P_3 评价为稳定 I 级边坡。且对比边坡 P_3 和 P_4 的各项指标,发现其数值相差不大,2 个边坡的稳定性情况应该也差别不大,这与本文方法评价结果是比较一致的。同时,进一步对比文献[13]灰关联

分析法评价结果可知,边坡 P_3 和 P_4 稳定性 I、II 级的关联度差别很小,难以明确确定样本所属等级,识别度低,而本文评价结果最大综合确定度一目了然,识别度高能很好判定样本边坡的等级,故本文模型对边坡稳定性分析具有相对的优越性,且与指标分类的实际特征吻合较好,可行性强。

4 结 语

边坡稳定性的准确评价对确保实际工程安全具有重要意义。边坡稳定性分析涉及诸多方面,其中评价过程中如何真实再现指标实际分布是关键,为此本文构建了能反映评价指标实际分布特点的边坡稳定性非对称联系云评价模型,其不仅克服了传统正态云模型对指标分布要求的局限性,还实现了指标与评价等级间的确定和不确定关系的统一量描述。实例应用表明非对称云模型有利于提高边坡稳定性评价的合理性和应用,模型将远离中间的部分两端等级云确定度为 1 的均匀分布也更符合指标实际等级特点,而通过模型获得的边坡稳定性等级为确定度数值,其便于工程界决策应用,同其他方法的对比分析验证了模型的可靠性。

参考文献(References)

- [1] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社 2002: 430 - 440 [CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 430 - 440]
- [2] 张勇慧,李红旭,盛谦,等. 基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3151 - 3156 [ZHANG Yonghui, LI Hongxu, SHENG Qian, et al. Study of stability gradation of highway rock slopes based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3151 - 3156]
- [3] 黄建文,李建林,周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2627 - 2632 [HUANG Jianwen, LI Jianlin, ZHOU Yihong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl. 1): 2627 - 2632]
- [4] 林立相,徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 235 - 239 [LIN Lixiang, XU Hanbin. Reliability approach to the analysis of slope stability[J]. Mountain Research, 1999, 17(3): 235 - 239]
- [5] 柴贺军,王忠,刘浩吾. 土质边坡稳定性评价进化遗传算法[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 180 - 184 [CHAI Hejun, WANG Zhong, LIU Haowu. The research of evolution genetic algorithm of evalua-

- ting soil slope stability [J]. Mountain Research, 2001, 19(2): 180 – 184]
- [6] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 438 – 441 [XIE Quanmin, XIA Yuanyou. Extension classification prediction method for the stability of rock-mass slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 438 – 441]
- [7] 夏元友, 李新平. 基于人工神经网络的边坡稳定性工程地质评价方法 [J]. 岩土力学, 1996(3): 27 – 33 [XIA Yuanyou, LI Xinping, ZHU Ruigeng. Engineering geology evaluation method for slope stability based on artificial neural network [J]. Rock and Soil Mechanics, 1996(3): 27 – 33]
- [8] 赵志峰, 徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(z1): 2707 – 2712 [ZHAO Zhifeng, XU Weiya. Comprehensive assessment of slope safety and stability based on catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(z1): 2707 – 2712]
- [9] 汪明武, 李健, 徐鹏, 赵奎元. 膨胀土与石灰改良膨胀土胀缩性的云模型评价 [J]. 东南大学学报, 2014, 44(2): 396 – 400 [WANG Mingwu, LI Jian, XU Peng, ZHAO Kuiyuan. Cloud model for shrinkage-welling property classification of untreated and lime-treated expansive clays [J]. Journal of Southeast University, 2014, 44(2): 396 – 400]
- [10] LI Deyi, HAN Jianwei, SHI Xuemei. Knowledge representation and discovery based on linguistic atoms [J]. Knowledge-based System, 1998(10): 431 – 440
- [11] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计算机研究和发展, 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]
- [12] 汪明武, 金菊良. 联系数理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 74 – 77 [WANG Mingwu, JIN Juliang. The theory and applications of connection numbers [M]. Beijing: Science Press, 2017: 74 – 77]
- [13] 丁丽宏. 基于改进的灰关联分析和层次分析法的边坡稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3437 – 3441 [DING Lihong. Research on estimation of slope stability based on improved grey correlation analysis and analytic hierarchy process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3437 – 3441]
- [14] 乔景顺. 变权欧氏距离模型在边坡稳定性评价中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7): 81 – 85 [QIAO Jingshun. Application of Euclidean distance model with varying weights to slope stability estimation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(7): 81 – 85]
- [15] 李克钢, 侯克鹏, 李旺. 指标动态权重对边坡稳定性的影响研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 492 – 496 [LI Kegang, HOU Kepeng, LI Wang. Research on influences of factors dynamic weight on slope stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 492 – 496]
- [16] 王润生, 李存国, 郭立稳. 基于可拓理论的高陡边坡稳定性评价 [J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(6): 25 – 28 [WANG Runsheng, LI Cunguo, GUO Liwen. Research on evaluation of the high-steep slope stability based on the extension theory [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(6): 25 – 28]

An Asymmetric Connection Cloud Model for the Evaluation of Slope Stability

WANG Mingwu, ZHU Yu, LI Yafeng, JIN Juliang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The evaluation of slope stability is a complex system uncertainty problem because it involves various randomness, fuzzy and incomplete factors. Cloud model is a powerful tool to deal with the stochastic uncertainty problem; however, it may encounter such problem that the distribution of some indicators cannot meet the normal distribution requirement. To overcome this defect herein, an asymmetric connection cloud model for the slope stability evaluation based on connection numbers theory and cloud model was presented. In the model, according to the slope classification standard, the digital characteristics were simulated to generate asymmetric connection cloud. And combined with index weights and the measured indicators, the comprehensive certainty degree was calculated to determine the slope stability grade. The results of the case study and comparison with other methods showed that the model used to evaluate the slope stability is feasible and effective, and can obtain reasonable classification that is more consistent with the slope condition. Moreover, it can quantitatively describe the transformation trend of classification by the certainty degree, and provides a new reference for the slope stability evaluation.

Key words: slope stability; cloud model; set pair; connection number; evaluation