

DOI: 10.11779/CJGE201811021

基于联系云的围岩稳定性可拓评价模型

汪明武, 董景铨, 董昊, 周天龙, 金菊良

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对围岩稳定性评价具有模糊随机性及评价指标的区间离散分布特点, 构建了基于联系云的围岩稳定性可拓评价模型, 该模型首先依据评价指标的分类标准确定联系云数字特征, 并通过联系云表达物元和标准可拓域, 以模拟分析待评样本与评价标准间的关系, 进而由云贴适度构建可拓综合评判矩阵, 结合主、客观组合权重评定围岩稳定性类别, 实现统一定量表征待评样本与等级间的动态联系, 并给出待评样本所属等级的可靠度。实例应用及与其他方法对比的结果表明, 该模型应用于围岩稳定性评价是有效可行的, 为多重不相容指标的随机模糊性不确定分析提供了可能, 克服了正态云模型不能有效模拟区间分布数据的缺陷。

关键词: 围岩稳定性; 联系云; 可拓学; 组合权重; 评价

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)11-2136-07

作者简介: 汪明武(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土工抗震、非饱和土、智能岩土工程及不确定性分析等方面教学与科研工作。E-mail: wanglab307@foxmail.com。

Novel extension evaluation model for stability of surrounding rock based on connection clouds

WANG Ming-wu, DONG Jing-quan, DONG Hao, ZHOU Tian-long, JIN Ju-liang

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

Abstract: In view of the problem that fuzziness, randomness and the interval and dispersion characteristics of the evaluation indexes exist in the process of evaluation of stability of surrounding rock, a novel evaluation model coupled with the extension theory and connection cloud model is described here. The evaluation process of this model is as follows. Firstly, the digital features of the connection cloud model are generated according to the classification standards. The relationship between the samples and the evaluation standards is simulated by the matter-element expression and standard extension field based on the connection cloud model. Then, the generation algorithm of connection clouds is discussed to analyze the certainty degrees of measured indexes to each evaluation standard, and they are used to set up the comprehensive evaluation matrix. Finally, the integrated evaluation vectors specified according to the measured data and the combination weights composed of subjective and objective weights are used to determinate the stability grades of surrounding rock and the dynamic relationship between the samples and each grade, and the credible degree of the evaluation results is further given. Case studies and comparison with other methods show that the proposed model is feasible and effective. It provides the possibility of uncertainty analysis for multiple incompatible indexes with fuzziness and randomness, and it can overcome the defects that the normal cloud model cannot effectively simulate the interval distribution data.

Key words: surrounding rock stability; connection cloud; extenics; combination weight; evaluation

0 引言

围岩稳定性分类一直是隧道、水电站、矿山硐室和地下工程建设中的关键问题之一。随着中国经济快速持续发展, 隧道工程规模和数量迅猛增长, 工程建设环境也日益复杂, 而围岩稳定性合理分类问题直接关系到工程的安全性、可靠性和经济效益, 故围岩稳定性评价一直受到工程界的关注。但围岩稳定性评价涉及诸多不确定因素, 其合理评估十分困难。为此,

许多学者基于不同理论探讨了众多围岩稳定性评价方法, 如可变模糊集方法^[1-2]、粗糙集方法^[3]、可拓方法^[3-5]、云理论方法^[6-7]、物元分析法^[7]等, 并应用于工程实践, 取得了有益的进展。然而这些方法也存在弊端, 如模糊数学方法在应用中隶属度函数往往不好确定; 可拓

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401303; 2017YFC1502405); 国家自然科学基金项目(41172274; 51579059)

收稿日期: 2017-09-19

方法对离散的优化问题处理效果差, 可能缺漏重要的约束条件; 传统云模型对评价指标的正态分布假设, 这些不足均可导致评价结果与实际情况有所偏差。另外, 以往这些评价方法侧重于某一类不确定性的分析, 忽略了实际围岩稳定性问题中多种信息交叉融合产生的不确定性; 评价方法权重确定也多为仅依据专家经验和知识主观或指标信息确定, 而这往往导致评价结果产生偏差; 加上实测样本数据的采集受技术、人员等影响较大, 全面准确的数据难以获得, 从而导致以往评价方法很难同时考虑指标的不相容性和随机性及交融不确定性, 从而限制了它们应用于复杂围岩稳定性的评价。为提高围岩稳定性评价方法的适应性和可靠性, 本文基于可拓论和联系云理论, 探讨可考虑指标的模糊性和随机性及指标不相容性的围岩稳定性联系云可拓评价模型, 同时基于熵权-层次分析法耦合综合确定指标权重, 以体现指标重要性和指标本身信息对围岩稳定性分析的影响, 从新的角度分析围岩稳定性。

1 基于联系云的围岩稳定性可拓评价模型

1.1 基本原理

基于联系云的可拓评价模型基本原理为: 首先根据评价标准确定每一等级的联系云半区间长度, 进而求出联系云数字特征, 并应用联系云发生器生成标准联系云; 然后根据可拓原理构造基于联系云的物元表示, 通过计算样本指标属于各级别的确定度来构建综合判断矩阵; 最后结合指标组合权重评定样本围岩稳定性级别。

1.2 基本理论简介

(1) 联系云理论

云模型是由李德毅等^[8-9]提出的一种处理定性概念与定量不确定性转换的理论方法, 其能够反映客观事物的模糊性和随机性, 现在广泛应用的云模型大多为无限区间的正态云, 而围岩稳定性评价指标常为区间分布, 故应用传统云模型往往不能很好反映指标实际分布特点, 且忽视了指标的不相容性和联系, 以及在相邻等级区间之间的转化关系, 而这可能造成评价结果与实际情况存在偏差, 不利于工程应用。近期发展起来的联系云则可很好反映样本实测指标分布的实际情况, 并能实现评价指标与评价等级间的确定和不确定关系的统一定量描述^[10]。联系云定义如下: 若研究对象等级可划分为 m 类($i=1, 2, \dots, m$), 相应的评价指标有 n 个($j=1, 2, \dots, n$), 并假设评价指标 j 的第 i 等级云由以期望值 E_x^i 为分界点的左、右两个联系云构

成, 且云滴基于数字特征 (E_x, E_n, H_e, a, k) 和云滴数 N 产生, 云滴 x_i 的确定度 μ_i 计算模型为

$$\mu_i = \left[1 - \left(\frac{x_i - E_x^i}{a_i'} \right)^2 \right]^{k_i}, \quad (1)$$

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

式中, E_x^i 为左半支或右半支 i 等级联系云的期望值; a_i' 为联系云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, $x_i \in [E_x^i, E_x^i + a_i']$; 其中 $E_n^i \sim \text{Normrnd}(E_n^i, H_e^i)$ 。

(2) 可拓学理论

可拓理论是研究元素内部结构和事物可变性的一种不确定性分析方法, 其中物元是可拓学的逻辑细胞, 它是用有序三元组统一表达事物的量与质, 即将事物名称 N 、事物特征 C 和事物性质 V 来表示事物的基本元 R , 记为 $R=(N, C, V)^{[4-5, 11]}$ 。对具有多重属性对象进行可拓评价时, 物元模型可表达为

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ N & C_2 & V_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & C_n & V_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

可见, 可拓理论可很好处理指标间不相容性, 但其在计算关联度时, 需通过划分经典域和节域, 这对于离散性的问题相对困难, 且可能导致遗漏重要约束条件而造成结果错误。为弥补可拓评价这种局限性, 在此将联系云引入可拓物元的表达, 实现有限区间分布指标的有效随机模糊分析, 并能充分发挥联系云和可拓评价的优点, 促进围岩稳定性问题的有效定量描述和随机模拟分析。

1.3 基于联系云的物元表达

基于联系云的物元表达就是用联系云的数字特征表征物元确定值 V , 则基于联系云的可拓物元可记为

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}, a_1, k_1) \\ N & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}, a_2, k_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}, a_n, k_n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, 联系云数字特征 (E_x, E_n, H_e, a, k) 按下列公式确定

$$E_x^i = \frac{L_{\max}^i + L_{\min}^i}{2}, \quad (5)$$

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

$$H_e^i = \alpha, \quad (7)$$

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

式中 E_x^i , E_n^i 和 H_e^i 分别为左半支或右半支 i 等级联系云的期望值、熵和超熵; L_{\max}^i 和 L_{\min}^i 分别为等级 i 的区间上、下限; α 为常数, 体现了云漂浮的模糊阈值, 表达了联系云模型自身的稳定性, 用雾化参数表征, 越小则越稳定, 本文结合参数特点和经验, 取 0.01; k_i 为 a_i' 相对应的分布密度函数的阶数, 其值受等级 i 的区间长度和相应的半区间长度 a_i 的影响; l_i 为 L_{\max}^i 或 L_{\min}^i ; a_i 为联系云半区间长度。

若评价指标分类标准等级区间值随着等级的增大而增加, 等级 i 的左、右半区间长度为

$$\left. \begin{aligned} a_{iL} &= E_x^i - L_{\min}^{i-1}, \\ a_{iR} &= L_{\max}^{i+1} - E_x^i. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

若评价指标分类标准等级区间值随着等级的增大而减小, 等级 i 的左、右半区间长度为

$$\left. \begin{aligned} a_{iL} &= E_x^i - L_{\min}^{i+1}, \\ a_{iR} &= L_{\max}^{i-1} - E_x^i. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对于单边等级界限指标, 如 $[L_{\min}, +\infty]$ 或 $[-\infty, L_{\max}]$, 或者两端等级实际区间长度相对中间等级偏大或不对称时, 可根据相邻等级已求出的左或右半区间长度 a 并以其期望值 E_x 为对称点在该等级区间范围内确定一个值 L_{mid} 当做等级区间下限值或者上限值, 如评价指标分类标准区间值由等级 1~ m 单调递增, 则在一级端等级 $i=m$ 区间内确定一个 $L_{\text{mid}} = E_x^{m-1} + (E_x^{m-1} - L_{\min}^{m-2})$ 作为上限, 即可代入上述公式进行分析。

根据等级区间分类标准, 按前述式 (5) ~ (10) 计算联系云数字特征 (E_x, E_n, H_e, a, k) , 并据此生成标准联系云, 将标准联系云数字特征代入物元模型中, 形成基于联系云的标准可拓域

$$R_{oi} = \begin{bmatrix} N_i & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}, a_1, k_1)_i \\ N_i & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}, a_2, k_2)_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_i & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}, a_n, k_n)_i \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中 R_{oi} 为所划分的围岩稳定性等级; C_j 为等级指标; $(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}, a_j, k_j)_i$ 为 R_{oi} 关于 C_j 表示的标准联系云, 则相应的待评物元为

$$R = \begin{bmatrix} P & C_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}, a_1, k_1) \\ P & C_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}, a_2, k_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P & C_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}, a_n, k_n) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, P 为待评事物, $(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}, a_j, k_j)_i$ 为待评事物关于特征 C_j 的联系云表示。

1.4 综合判据矩阵确定

由于联系云的引入, 传统可拓关联度的计算方法不再适用, 在此应用样本与标准联系云的确定度来表示这种关系, 即将待评价的每一个样本指标值视为一个云滴, 则计算步骤如下:

(1) 根据等级区间分类标准, 按前述方式计算联系云数字特征生成标准联系云。

(2) 生成均值为 E_n^i 、标准差为 H_e^i 的随机数 $E_n^{i'}$, 按式 (2) 计算半区间长度修正值 a_i' 。

(3) 令待评指标为 x_i , 则 (x_i, μ_i) 成为一个云滴。

(4) 按照式 (1) 计算 x_i 与标准联系云的确定度 μ_i , 即该指标值与标准联系云表示事物指标之间的贴近度。

(5) 将全部的云贴近度组成综合判据矩阵如下

$$U = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中, m 为围岩稳定性分类等级, n 为评价指标个数。

1.5 评价指标权重计算

为避免权重的确定偏于主观或者客观, 克服单一赋权法的缺陷, 使权重分配更加合理, 本文依据最小信息熵原理^[12], 采用主观权重和客观权重组合赋权的方式确定最终的综合权重, 相应的计算模型为

$$\left. \begin{aligned} \min H &= \sum_{j=1}^n \omega_j (\ln \omega_j - \ln \omega_{aj}) + \sum_{j=1}^n \omega_j (\ln \omega_j - \ln \omega_{bj}), \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n \omega_j &= 1 \quad (\omega_j > 0), \\ \omega_j &= \frac{\sqrt{\omega_{aj}\omega_{bj}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\omega_{aj}\omega_{bj}}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 ω_j 为组合权重; ω_{aj} 和 ω_{bj} 分别为主观权重和客观权重。本文主观权重采用层次分析法确定, 即先由专家根据指标的相对重要性进行排序, 按照“1~9 标度法”对评价对象逐一进行对比得到评判矩阵 $A_i = (a_{ij})_{n \times n}$, 然后计算各指标权重得到主观权重向量 $W_a = (\omega_{a1}, \omega_{a2}, \dots, \omega_{an})^T$; 客观权重采用熵权法计算, 依据熵来度量系统的无序度并反映各指标对决策评价提供的有用信息量的大小, 得到客观权重向量 $W_b = (\omega_{b1}, \omega_{b2}, \dots, \omega_{bn})^T$ 。

1.6 围岩稳定性等级评价模型

综合权重向量 W 和综合判据矩阵 U 相乘得到综合评判向量 D , 即 $D = WU$, 则围岩稳定性等级评价模

表 1 围岩稳定性评价指标分类标准

Table 1 Classification standards of evaluation indexes for stability of surrounding rock

评价指标	RQD/%	R_w /MPa	K_v	K_f	ω /(L·(min·10m) ⁻¹)
I	90~100	120~200	0.75~1.0	0.8~1.0	0~5
II	75~90	60~120	0.45~0.75	0.6~0.8	5~10
III	50~75	30~60	0.30~0.45	0.4~0.6	10~25
IV	25~50	15~30	0.20~0.30	0.2~0.4	25~125
V	0~25	0~15	0.00~0.20	0.0~0.2	125~300

型为

$$d_{i0} = \max \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad , \quad (15)$$

式中, d_{i0} 为综合评判向量 \mathbf{D} 的最大分量值, i 即为样本评价等级为第 i 级。

为使评价结果的可靠性更加直观, 本文提出辅助参数置信因子 θ 来表征评判结果的分散程度和可靠性, θ 越小则表明评价结果可信任度越高, 一般认为当 $\theta < 0.01$ 时即表明结果可信。相应的综合评判分数 g 为

$$g = \frac{\sum_{i=1}^m d_i f_i}{\sum_{i=1}^m d_i} \quad , \quad (16)$$

式中, i 为评判等级, d_i 为向量 \mathbf{D} 对应的分量, f_i 为评判等级 i 对应的分值, 分别取 1, 2, \dots , m 。

因根据式(1)计算的云贴近度具有一定的随机性, 为减小随机性的影响, 采用多次重复运算取均值的方式来处理, 相应的模型为

$$\theta = \frac{E_{xg}}{E_{ng}} \quad , \quad (17)$$

$$E_{xg} = \frac{g_1(x) + g_2(x) + \dots + g_n(x)}{n} \quad , \quad (18)$$

$$E_{ng} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [g_i(x) - E_{xg}]^2} \quad , \quad (19)$$

式中, θ 为置信因子, n 为重复运算次数, 本文取 500; $g_i(x)$ 为第 i 次加权平均法求出的综合评判分数。 E_{xg} 为多次运算的期望值, E_{ng} 为多次运算的熵值。

2 实例应用

2.1 评价指标分类及标准联系云的确定

为验证上述模型的合理性和可靠性, 采用文献[7]中的实例数据进行验证和对比分析。围岩稳定性受到诸多复杂因素的影响, 在对其进行稳定性分类时既要

从每个独立因素出发综合考虑, 又要考虑实际工程中获取相关数据的难易程度和准确性, 根据已有研究成果^[2]、文献资料^[7, 13]、相关标准^[14]和实际经验, 选取代表性强、实际获取简单、可尽量避免人为主观评价

的岩石质量指标 RQD、岩石单轴饱和抗压强度 R_w 、岩体完整性系数 K_v 、结构面强度系数 K_f 和地下水渗水量 ω 等 5 个指标作为围岩稳定性评价指标, 并把围岩稳定性划分为稳定 I、较稳定 II、基本稳定 III、不稳定 IV 和极不稳定 V 等 5 个级别。分类标准见表 1, 样本实测值见表 2。

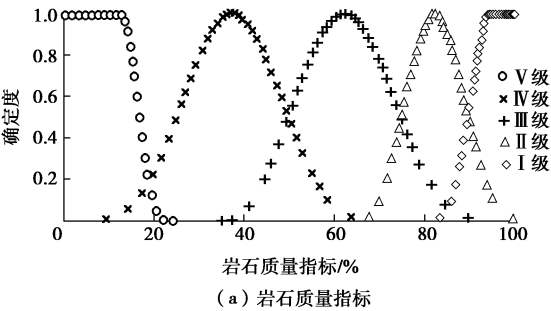
表 2 样本实测指标^[7]

Table 2 Measured values of evaluation indexes^[7]

样本	RQD /%	R_w /MPa	K_v	K_f	ω /(L·(min·10m) ⁻¹)
P1	26.0	36.0	0.22	0.35	5
P2	50.0	40.2	0.50	0.50	10
P3	52.0	25.0	0.20	0.50	5
P4	71.0	90.0	0.35	0.30	18
P5	75.0	95.0	0.70	0.50	0
P6	77.5	90.0	0.57	0.45	10
P7	50.0	70.0	0.50	0.25	5
P8	50.9	34.0	0.32	0.35	21

根据前述联系云模型的生成步骤, 由式(5)~(10)计算出评价指标对应的联系云数字特征值 (E_x , E_n , H_e , a , k), 再根据式 (1) 模拟指标 j 属于等级 i 的 2000 个云滴, 即可构成评价指标 j 对应于等级 i 的标准联系云。

在实际围岩稳定性问题中, 联系云的生成还应结合指标等级特点, 中间等级 ($i=2, 3, \dots, m-1$) 的区间正态云与两端 ($i=1, m$) 等级云形态有明显区别, 两端等级云中远离中间一侧的 1/2 云并不是正态分布, 而是确定度为 1 的均匀分布, 如图 1 所示。图 1(a)~1(d) 从左到右分别为等级 I~V 的标准联系云, 而图 1(e) 从左到右则分别对应等级 V~I 的标准联系云。



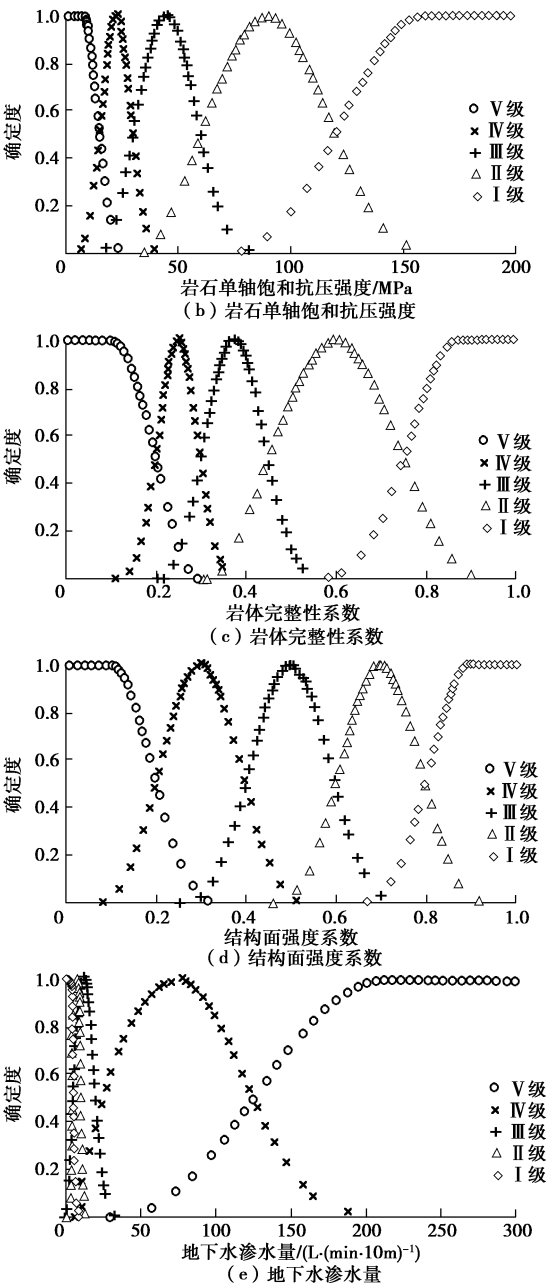


图1 评价指标隶属于围岩稳定性级别的标准联系云

Fig. 1 Standard connection clouds of each evaluation index under different stability grades

2.2 确定综合权重

为便于对比分析，本文主观权重判据矩阵取文献[7]中给出的参考值。由于文献中有5个专家给出的判据矩阵，在此仅以第一个矩阵 A_1 为例按层次分析法进行计算并判断其一致性，其余只给出结果，最终的主观权重值取所得5个计算值的均值。过程如下

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 2 & 1/2 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1 & 1/2 \\ 2 & 2 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

计算得到 $\omega_{a1}=(0.2214, 0.1928, 0.0756, 0.1547, 0.3555)$ ，检验一致性： $\lambda_{\max}=5.0618$ ， $CI=0.01545$ ， $CR=0.0109<0.1$ ，则判断矩阵 A_1 一致性良好。同理可得， $\omega_{a2}=(0.1437, 0.2231, 0.0874, 0.1791, 0.3667)$ ， $CR=0.0144<0.1$ ； $\omega_{a3}=(0.1877, 0.1311, 0.1634, 0.1634, 0.3544)$ ， $CR=0.0450<0.1$ ； $\omega_{a4}=(0.2154, 0.3750, 0.0734, 0.1208, 0.2154)$ ， $CR=0.0058<0.1$ ； $\omega_{a5}=(0.2667, 0.2667, 0.0667, 0.1333, 0.2667)$ ， $CR=0.0000<0.1$ ；取均值作为最终的主观权重 $W_a=(0.2070, 0.2377, 0.0933, 0.1503, 0.3117)$ 。客观权重可利用样本数据构建判据矩阵 $B=(b_{ij})_{m \times n}$ ；得到 $W_b=(0.2277, 0.1935, 0.2088, 0.2313, 0.1387)$ 。按照式(14)计算组合权重，得到组合权重向量为 $W=(0.2249, 0.2221, 0.1445, 0.1931, 0.2153)$ 。

2.3 评价围岩稳定性等级

本文以样本 P1 为例来说明具体计算过程，相应流程如下：

- (1) 根据表1的评价指标分类标准，按式(5)~(10)得到联系云数字特征值(E_x, E_n, H_e, a, k)；
- (2) 利用 MATLAB 编程计算并生成指标 j 属于等级 i 的2000个云滴，形成围岩稳定性评价的标准联系云。
- (3) 代入指标实测值，运用式(1)求得云贴近度，构成综合判据矩阵 U 。
- (4) 分别按熵权法和层次分析法计算客观权重和主观权重，并按式(14)得到综合权重向量 W 。
- (5) 计算综合评判向量 D ，即 $D=WU$ ， $d_{1,1}=0.1076$ ， $d_{1,2}=0.1117$ ， $d_{1,3}=0.2158$ ， $d_{1,4}=0.4238$ ， $d_{1,5}=0.1521$ ，按贴近度最大的原则确定，则样本1评价为IV等级(不稳定)，如表3所示。
- (6) 根据式(16)计算综合评判分数 g 。
- (7) 重复步骤(1)~(6)500次并储存每一次计算的结果，按照式(18)、(19)得到最终的评价结果 E_{xg} 和 E_{ng} ，再按照式(17)求出置信因子 θ 。经过重复计算得到最终的 $E_{xg}=3.392$ ； $E_{ng}=0.0033$ ； $\theta=0.0009<0.01$ 结果可信。

2.4 实例评价结果及对比

为进一步说明该模型的准确性和可行性，将该方法所有样本的评价结果与物元分析法和 RS-TOPSIS 法的结果进行对比，见表4。由表4结果可知，本文模型与文献[7]中的其他方法结果吻合，表明应用基于组合赋权的可拓联系云模型评价围岩稳定性是有效可行的。另外，传统云理论中指标分布为无限区间正态分布，这与实际指标的分布形式不符，会导致模拟结果与实际情况不符，而近期发展的联系云理论通过联系数理论确定生成云的相关区间，使之更加符合实际

表 3 样本 P1 计算结果
Table 3 Results of sample P1

评价指标	权重	实测数据	云关联度				
			I	II	III	IV	V
RQD /%	0.2249	26.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.5593	0.4419
R_w /MPa	0.2221	36.0	0.0000	0.01828	0.7967	0.0948	0.0000
K_v	0.1445	0.22	0.0000	0.0000	0.0075	0.7843	0.3635
K_f	0.1931	0.35	0.0000	0.0000	0.1957	0.8471	0.0011
$\omega / (L \cdot (\min \cdot 10 \text{ m})^{-1})$	0.2153	5	0.4998	0.4998	0.0000	0.0000	0.0000
综合评判向量 D			0.1076	0.1117	0.2158	0.4238	0.1521

表 4 实例评价结果及对比
Table 4 Evaluation results of example and comparison with other methods

样本	综合评判向量					置信系数	稳定性等级			
	I	II	III	IV	V	θ	本文方法	物元分析法 ^[7]	RS-TOPSIS ^[7]	可拓方法
P1	0.1076	0.1117	0.2158	0.4238	0.1521	0.0009	IV	IV	IV	IV
P2	0.0000	0.2368	0.6411	0.1220	0.000	0.0012	III	III	III	III
P3	0.1077	0.1150	0.3860	0.3630	0.0721	0.0032	III	III	III	III
P4	0.0153	0.2717	0.5207	0.2696	0.0077	0.0018	III	III	III	III
P5	0.2757	0.4446	0.3055	0.0061	0.0000	0.0017	II	II	II	II
P6	0.0159	0.6369	0.3494	0.0355	0.0000	0.0028	II	II	II	II
P7	0.1079	0.1604	0.3838	0.2785	0.0393	0.0044	III	III	III	II
P8	0.0000	0.0026	0.5992	0.4305	0.0003	0.0016	III	III	III	III

情况；同时针对可拓理论在计算关联度时常以区间中点为最优，会遗漏重要约束条件这一问题，如表 4 所示个别评价结果出现误差，采用联系云进行定性问题向定量问题转化可以有效解决实际指标的区间分布问题和边界模糊性转化难题，同时利用联系云随机模糊性表示信息的不确定性，使之更符合分类指标和信息获取的实际特点。证明结合可拓物元分析方法，用联系云确定度来表示待评价指标与标准联系云之间的量化关系，即用云贴适度取代传统可拓学中关联函数所确定的关联度是可行的，使联系云融合了可拓学辩证描述事物质与量关系的优点。故本文所讨论的模型不仅拓宽了传统云模型的应用范围，也拓展了传统可拓学中关联度的确定方法，具有一定的优越性。

3 结 论

围岩稳定性评价受诸多信息和不确定性因素共同影响，是一个非常复杂的不确定性问题。本文基于联系云和可拓理论耦合方法，以充分发挥二者的优势，实现评价效果更好的目标，并通过实例应用分析，得出如下 3 点结论。

(1)针对目前围岩稳定性分级指标和评价结果存在随机性、模糊性和离散性等问题，把联系云模型的定性和定量转化过程融入可拓学的物元理论中，构建

基于联系云的围岩稳定性可拓评价模型，将传统云模型和可拓学理论进行了新的拓展和尝试。

(2)联系云模型综合考虑了评价过程中的模糊性和随机性，并解决了传统云模型无限区间正态分布的缺陷；应用待评指标与标准联系云之间的云贴适度替代传统可拓学中的关联度，拓展了可拓学的应用方式；熵权-层次分析法耦合赋权兼顾了主观因素和客观因素的影响，避免权重偏于主观或者客观的缺陷；辅助参数置信因子则可反映评价结果的可靠程度，使评价结果更加直观。

(3)实例应用的结果表明联系云可拓评价方法应用于围岩稳定性评价是有效可行的，并且能够反映围岩稳定性的整体状况和实测指标属于不同等级的不确定性与转化态势，为围岩稳定性评价和其他类似工程提供了一种新的参考。

参考文献：

[1] 陈守煜, 韩晓军. 围岩稳定性评价的模糊可变集工程方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1857 - 1861. (CHEN Shou-yu, HAN Xiao-jun. Engineering method of variable fuzzy set for assessment of surrounding rock stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1857 - 1861. (in Chinese))

- [2] 汪明武, 李 丽, 金菊良. 围岩稳定性集对分析 - 可变模糊集综合评价模型[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 941 - 944. (WANG Ming-wu, LI Li, JIN Ju-liang. Set pair analysis-variable fuzzy set model for evaluation of stability of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 941 - 944. (in Chinese))
- [3] 张 鹏, 陈剑平, 邱道宏. 基于粗糙集的隧道围岩质量可拓学评价[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 246 - 250. (ZHANG Peng, CHEN Jian-ping, QIU Dao-hong. Evaluation of tunnel surrounding rock quality with extenics based on rough set[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 246 - 250. (in Chinese))
- [4] 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(9): 1450 - 1453. (LIAN Jian-fa, SHEN Nai-qi, ZHANG Jie-kun. Research on surrounding rock evaluation of under ground engineering based on extension method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(9): 1450 - 1453. (in Chinese))
- [5] 梁桂兰, 徐卫亚, 谈小龙. 基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 535 - 540. (LIANG Gui-lan, XU Wei-ya, TAN Xiao-long. Application of extension theory based on entropy weight to rock quality evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 535 - 540. (in Chinese))
- [6] 李 健, 汪明武, 徐 鹏, 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. (LI Jian, WANG Ming-wu, 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))
- [7] 周志勇, 韩章程. 基于物元分析与云模型的地下工程围岩稳定性评价[J]. 工程设计学报, 2017, **24**(1): 57 - 63. (ZHOU Zhi-yong, HAN Zhang-cheng. Evaluation of underground engineering surrounding rock stability based on matter-element analysis and cloud model[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, **24**(1): 57 - 63. (in Chinese))
- [8] 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): 16 - 21. (LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership clouds and membership cloud generations[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, **32**(6): 16 - 21. (in Chinese))
- [9] LI D Y, SHI X M, WARD P. Soft inference mechanism based on cloud models[C]// proceedings of the 1st International Workshop on Logic Programming and Soft Computing. Bonn: Reach Studies Press, 1997: 38 - 63.
- [10] 汪明武, 金菊良. 联系数理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (WANG Ming-wu, JIN Ju-liang. The Theory and Applications of Connection Numbers[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [11] 蔡 文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1190 - 1199. (CAI Wen, YANG Chun-yan. The basic theory and method system of extenics[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1190 - 1199. (in Chinese))
- [12] 魏博文, 黄海鹏, 徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊 1): 3092 - 3099. (WEI Bo-wen, HUANG Hai-peng, XU Zhen-kai. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3092 - 3099. (in Chinese))
- [13] 常利营, 卢建移, 段 波, 等. 基于 Hopfield 网络的地下工程围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 194 - 197. (CHANG Li-ying, LU Jian-yi, DUAN Bo, et al. Stability classification of adjoining rock of underground engineering based on Hopfield network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **33**(S1): 194 - 197. (in Chinese))
- [14] GB50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 2014. (GB50218—2014 Classification criterion of engineering rocks[S]. 2014. (in Chinese))