

基于联系矩阵的围岩稳定性组合评价模型*

汪明武¹, 魏东方¹, 周欣玮², 汪鹏程¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009;
2. 安徽建筑工业学院 电子与信息工程学院, 合肥 230022)

摘要: 围岩稳定性评价受诸多类型因素影响,是一个复杂不确定系统问题.为克服基于单一信息评价方法只能从特定角度分析围岩稳定性问题的缺陷,应用集对分析耦合理论探讨了可统一与融合各类信息特点的围岩稳定性组合评价新模型,以充分利用各类评价方法所包含的有用信息和避免单一方法预测错误的风险.该模型首先基于各种典型评价方法独立分析围岩稳定性,然后将获得的评价结果两两构成集对进行同异反分析,以构建联系矩阵和合理确定权重,最后基于组合原理综合评定围岩稳定性类别.实例应用结果表明,该模型用于围岩稳定性评价是有效可行的,且能综合各类评价方法的优点与提高预测精度,也为类似评价问题提供了参考.

关键词: 围岩稳定性; 组合; 集对分析; 联系矩阵; 评价

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.03.007

引 言

随着隧道、矿山以及地下储油库等地下工程建设规模的扩大和施工环境的日益复杂,从而使围岩稳定性分析问题受到工程界的广泛关注,但其受诸多类型不确定性因素影响与控制,导致该问题至今尚未很好解决.为科学合理评价围岩稳定性,国内外学者基于不同理论提出了许多分析方法,如可拓方法^[1]、云模型^[2]、BQ方法^[3]、投影寻踪权重-属性区间识别模型^[4]、粗糙集方法^[5]、集对分析-可变模糊集方法^[6]、模糊可变集合方法^[7]等.但这些基于单一方法或两种类型信息组合的方法,均是从不同角度利用部分信息片段对围岩稳定性进行评价,这势必造成某些重要信息的缺失,带来预测风险,并常出现不同方法获得的结果相差很大,导致结果存在局限性,使决策者难以抉择.故以往方法在处理由交叉和交融不确定性因素构成的复杂围岩稳定性问题时已很难满足要求.而近期发展起来的组合方法则可充分发挥不同方法的优势并相互取长补短,组合方法的探讨和应用已成为相关学科的研究热点^[8-11].因其能从统一融合角度去分析复杂围岩稳定性问题的各类信息,达到克服单一信息处理方法的局限性和片面性,从而避免因舍弃某类信息而引起的预报风险,并可充分利用各个模型的优点与有效信息,达到提高分析精度及对环境变化的适应性,也为解决复杂动态围岩稳定性评价问题提供了新途径.在预测活动中,不同的预测方法利用的信息不同,把不同的方法进行适当组合可以综合利用各单一

* 收稿日期: 2014-05-27; 修订日期: 2014-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(41172274)

作者简介: 汪明武(1972—),男,安徽歙县人,教授,博士,博士生导师(通讯作者. E-mail: wanglab307@foxmail.com).

类型信息预测方法提取的信息,有效提高预测精度^[10]。虽然曹文贵等^[12]、陈鹏宇等^[13]学者基于不同的理论探讨了组合评价方法,并成功应用于围岩工程分类。然而,以往组合评价方法很少从信息类型融合、指标确定和不确定性角度去整体分析组合模型;它们虽然组合了不同方法,但本质上不能全面考虑各类方法耦合过程中指标的确定性和不确定性,且难于充分反映类型间的中间转换过程。集对分析耦合理论可统一分析不确定系统中的确定和不确定性,集对联系系数则能从同异反三方面定量描述与有效刻画不同方法获取结果间的同一性、差异性和对立性,而这显然有益于有效分析不同方法组合过程中的可靠性,也为围岩稳定性组合模型的构建提供了新思路。为此,本文探讨了基于联系矩阵的组合评价新模型,试图从新的角度分析围岩稳定性问题,以提高预报精度。

1 基于联系矩阵的围岩稳定性组合评价模型

1.1 基本原理及流程

组合预测就是将不同的预测方法进行适当的组合,以综合利用各种方法所提供的信息。基于集对耦合理论的围岩稳定性组合评价基本原理如下:首先基于各类方法对研究对象进行评价,再将评价结果标准化处理,以便构成集对和联系矩阵及进行同异反分析,进而确定各类方法对最终结果的贡献程度,达到最优确定围岩稳定性类别。具体评价步骤如下:

1) 选择基础评价方法。围岩稳定性评价方法众多,基于可提取不同类型信息和能充分反映实际信息的准则选取不同方法作为基础评价方法。

2) 评价结果标准化处理。为便于对比分析,对基础方法的评价结果作标准化处理,并建立标准化后的等级标准。

3) 基于联系矩阵计算权重。基于标准化后评价结果构建集对及同异反分析准则,以建立联系矩阵与计算各基础评价方法在组合模型中的权重。

4) 基于线性加权方法,综合确定围岩稳定性所属等级。

实际围岩稳定性问题分析中,每一种评价方法的结果含有独有的信息特征,显然应用组合评价方法不仅能克服单一方法建模的局限性,且能充分利用各类评价方法的优势并获取有效信息,达到避免因舍弃某种方法而引起的预报风险,同时也可提高预测精度。

1.2 围岩稳定性组合评价模型

组合模型通过科学组合达到充分利用各个模型的优点与信息,弥补单个预测模型的片面性并提高模型对环境变化的适应性。在此采用线性加权法对各评价方法结果进行组合,相应的计算模型如下:

$$Q_p = \sum_{n=1}^N w_n x_n^p, \quad (1)$$

式中, p 为待评样本个数, $p=1,2,\dots,P$; Q_p 为样本围岩稳定性组合评价价值; w_n ($n=1,2,\dots,N$)为第 n 种评价方法在组合评价模型中的权重,在此采用集对分析耦合理论确定,详见后续分析; x_n^p 为样本 p 由方法 n 求得结果的标准化值。

由式(1)可知,组合评价方法中基础评价方法的选择,直接关系到模型建立的合理性和分析结果的可靠性。为确保组合模型构建的可靠性和适用性,组合模型在基础评价方法选择过程中,应选取已被工程实际应用的不同类型分析方法。本文选取了我国工程界广泛应用的BQ分类方法、可拓方法、云模型、投影寻踪模型和粗糙集方法作为组合模型的基础方法,各基础方法的优点在此不再赘述,相关介绍可参见文献[1-5]。实际应用中,上列基础方法单独应用时虽然

能体现独特的信息特征,但也存在一定的缺陷和弊端,如 BQ 工程岩体分级方法不能考虑指标的模糊性;可拓方法、云模型、投影寻踪模型和粗糙集方法虽然可避免人为评定的主观性,并克服了传统模糊数学方法不易区分相邻类别差异的局限性及隶属度函数难于确定的问题,但面对具有多样性、可变性、不确定性等特点的围岩稳定性评价问题时则很难处理。例如可拓学理论在计算关联度时常以区间中点为最优,而这会遗漏重要的约束条件,导致结果与实际情况存在差异;粗糙集方法在属性约简过程中可能删掉重要的评价因子,导致重要信息丢失;云模型方法处理指标分布形式一般为正态分布形式,而这与评价指标的实际分布形式可能不符。因此,在面对由交叉和交融不确定性因素构成的复杂围岩稳定性问题时,应用单一分析方法处理会力不从心,导致评价结果与实际情况存在偏差,而应用组合模型则能从新的角度去分析复杂围岩稳定性问题,并能使传递和表达的信息更加全面。

围岩稳定性评价过程中,不同基础评价方法的评价原理、评价指标或属性可能不同,而这可引起不可公度性和矛盾性。为消除量纲、数量级和类型对评价结果的影响,需进行规范化(标准化)处理,以获得可比的尺度。故在组合分析中,为统一对比分析,将不同评价方法的结果统一变换到某个区间上,从而使标准化结果具有可比性,同时将不同分析方法获得的定性围岩稳定性等级,转化为可表征相同等级内的差别和不同等级间转换过程的定量得分描述。为便于工程应用,在此选用了工程界应用最为广泛和简便的定量转换方法——百分制评分方法。基于既有研究成果^[12-13],将样本获得的围岩稳定性等级定量转换成平均分布在区间 $[0, 100]$ 内,以便组合分析。假设围岩样本处于各个等级的概率相等并将围岩稳定性等级划分为 5 级,则可将 100 分均匀划分为与 5 个等级相对应的区间,具体标准化等级标准如表 1 所示。

表 1 组合评价分类标准

Table 1 The classification standard for combination evaluation

stability class	very good (I)	good (II)	fair (III)	poor (IV)	very poor (V)
score range	$80 < Q_p \leq 100$	$60 < Q_p \leq 80$	$40 < Q_p \leq 60$	$20 < Q_p \leq 40$	$0 \leq Q_p \leq 20$

1.3 基于联系矩阵的权重计算模型

组合评价的核心是如何将各类方法评价结果按其重要性进行组合,故相应的权重确定是关键。另外,围岩稳定性组合评价问题,实质是各个评价方法间关系的整体分析问题,而以往组合方法对不同方法间的确定和不确定关系很少涉及,而辩证哲学则强调定性描述,难于数学表达此类问题。本文为整体考虑评价指标确定性和不确定性,以及消除权重计算过分依赖参考向量的缺陷和全面反映各类评价方法的特点,在此引入集对联系矩阵理论分析与计算各类评价方法获得结果的重要性,实现更加准确和全面地反映复杂围岩稳定性问题的全貌,确保满足一定条件的个体方法间的最优组合,以及预测的精度和稳定性。

集对分析理论是我国学者赵克勤先生提出的一种系统分析方法,核心思想是把确定性和不确定性作为一个系统加以处理,并通过集对联系数全面刻画有一定联系的两个集合之间的同异反关系^[14],该理论已在许多领域得到应用并取得了很好的效果^[14-17]。设 $H = (A, B)$ 表示由相互联系的两个集合 A 和 B 构成的集对,则集对同异反关系可用联系数 μ 表示为

$$\mu = a + bi + cj, \quad (2)$$

式中, a, b 和 c 分别为集对 H 的同一度、差异度和对立度,且 $a + b + c = 1$; i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$; j 为对立度系数,常取 -1 。

为整体分析围岩稳定性不同评价方法在组合过程中的重要性程度,本文依据集对分析耦合理论^[15],将同异反关系定义如下:若对样本 p ,基于评价方法 t 和 s 获得的标准化值分别为 x_t^p

和 x_s^p . 设 $t_1 = \min |x_i^p - x_s^p|$, $t_2 = \max |x_i^p - x_s^p|$, 并在区间 $[t_1, t_2]$ 中按集对分析三分原理选取两个点 t_3 和 t_4 ($t_3 < t_4$) 作为同异反分析的条件, 若取三等分点作为转换点, 则相应的同异反准则定义如下:

$$\begin{cases} t_1 \leq |x_i^p - x_s^p| < t_3, & \text{identity relation,} \\ t_3 \leq |x_i^p - x_s^p| < t_4, & \text{discrepancy relation,} \\ t_4 \leq |x_i^p - x_s^p| \leq t_2, & \text{contrary relation.} \end{cases} \quad (3)$$

显然, 基于以上准则可将不同评价方法获得的评价结果两两构成集对, 并可用式(2)和(3)定量表达两种评价方法结果间的关系。

由以上分析可知, 对于围岩稳定性组合评价问题, 实质是各个评价方法间的关系分析, 为此本文提出联系矩阵概念来统一分析它们对评价结果影响的确定性和不确定性。若两种评价方法结果经集对同异反分析获得的联系数为 u_{is} , 则可定义由 u_{is} 构建的对称矩阵为联系矩阵 M (connectional matrix):

$$M = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1N} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N1} & u_{N2} & \cdots & u_{NN} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

则联系矩阵 M 相应的特征值为 μ , 特征向量 $E = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$. 可见, 联系矩阵 M 是由联系数 u_{is} 构成的, 其全方位表达了各基础评价方法两两之间的确定和不确定关系及转化态势。同时, 联系矩阵 M 是一个对称矩阵, 而根据对称矩阵的性质可知, 存在特征值 λ 及其对应的特征向量 α 使得 $\lambda\alpha = M\alpha$. 根据概率源合并理论^[18], $\lambda\alpha$ 可作为测量数据的综合支持程度的度量, 故选取联系矩阵 M 的最大特征值 μ 对应的特征向量 E , 作为计算单一信息处理方法在组合评价中的重要性是合理的, 相应的计算模型为

$$w_n = \frac{v_n^u}{\sum_{n=1}^N v_n^u}, \quad (5)$$

式中, v_n^u 为最大特征值对应的特征向量元素。显然基础评价方法的结论正确与否关系到组合评价结果的正确性, 故在组合前对它们的合理性和可靠性分析是非常重要的。

2 实例应用

为验证本文模型的正确性和有效性, 选取文献[1-5]中的资料作为实例。实例为锦州天桥 LPG 洞库场地围岩稳定性分析问题, 选取了 BQ 方法、可拓方法、云模型、投影寻踪方法、粗糙集等分析方法作为组合模型的基础评价方法, 且它们的评价方法结果均经验证合理, 相应方法的评价过程和结果可参见文献[1-5]。实例选取了岩体质量、单轴抗压强度、岩体完整性指数、地下水渗水量和节理状况等 5 项指标作为评价指标, 实例样本实测值和围岩稳定性评价指标分类标准见表 2 和表 3。

在对基础方法评价结果规范化中, 针对不同方法本身特点, 采取了不同规范化模型。可拓方法、云模型、投影寻踪方法和粗糙集评价方法中样本与等级的关联程度是以向量的形式给出, 可采用下面标准化模型进行规范化:

$$x_n^p = \sum_{j=1}^5 c_{nj} z_{nj}^p, \quad (6)$$

$$z_{nf}^p = y_{nf}^p / \sum_{f=1}^5 y_{nf}^p, \quad (7)$$

式中, y_{nf}^p 为方法 n 对样本 p 的讨论中, 围岩稳定性类别 f 的计算结果; c_{nf} 为围岩稳定性 f 等级对应的标准化等级中值. 对于可拓方法, 因获得的评价结果分布在实数范围内, 应先根据下式作预处理:

$$y_{nf}^p = \left\{ \frac{y_f^p - \min \{y_1^p, y_2^p, \dots, y_5^p\}}{\max \{y_1^p, y_2^p, \dots, y_5^p\} - \min \{y_1^p, y_2^p, \dots, y_5^p\}} \right\}^2, \quad (8)$$

式中, y_f^p 为基于可拓方法获得的样本 p 与等级 f 的相关程度.

对于 BQ 方法, 因等级划分具有明确的上下限, 可采用线性插值方法进行标准化处理:

$$x_n^p = m_f^- + \frac{20(y^p - n_f^-)}{n_f^+ - n_f^-}, \quad (9)$$

式中, y^p 为 BQ 方法对样本 p 的评价值; n_f^+ 和 n_f^- 分别为 BQ 分类标准中 f 等级对应的上、下限值; m_f^- 为组合分类标准中等级 f 的下限值. 对 BQ 分级方法进行标准化处理时, 尚需确定等级 I 的上限值和等级 V 的下限值, 参考文献[19]上、下限值分别取 600 和 0.

表 2 样本实测值

Table 2 The measured values of the samples

sample	rock mass quality D	uniaxial compressive strength R_c /MPa	integrality degree of rock mass K_v	groundwater percolation capacity $Q / (L \cdot (\min \cdot m)^{-1})$	joint J_v
1	0.12	185.5	0.89	0.6	8
2	0.27	176.4	0.80	0.8	7
3	0.08	158.2	0.94	0.6	7
4	0.04	201.1	0.97	0.5	9
5	0.24	181.9	0.92	0.9	8

表 3 围岩稳定性评价指标分类标准

Table 3 The classification standard for the evaluation indexes of the surrounding rock stability

stability class	rock mass quality D	uniaxial compressive strength R_c /MPa	integrality degree of rock mass K_v	groundwater percolation capacity $Q / (L \cdot (\min \cdot m)^{-1})$	joint J_v
very good (I)	0~0.10	200~300	0.75~1.00	0~0.5	9~10
good (II)	0.10~0.25	100~200	0.55~0.75	0.5~1.0	7~9
fair (III)	0.25~0.40	50~100	0.30~0.55	1.0~2.5	4~7
poor (IV)	0.40~0.60	25~50	0.15~0.30	2.5~12.5	2~4
very poor (V)	0.60~1.00	0~25	0~0.15	12.5~25.0	0~2

基于上面讨论的标准化模型, 各类评价方法实例的结果经标准化处理后的值见表 4. 可见, 经标准化后的评价值相差不大且分布在区间 $[0, 9]$ 范围内. 按式 (3) 可知, 实例中同异反准则定义的参数可确定为: $t_1 = 0, t_2 = 9, t_3 = 3, t_4 = 6$. 若差异度系数 i 取 0.5, 则基于式 (2) 和 (4) 可求得联系矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.4 & 0.7 & 0.1 \\ 1 & 1 & 0.4 & 1 & -0.2 \\ 0.4 & 0.4 & 1 & 0.5 & 0.3 \\ 0.7 & 1 & 0.5 & 1 & 0.4 \\ 0.1 & -0.2 & 0.3 & 0.4 & 1 \end{bmatrix}.$$

再根据式(5)计算各类评价方法的评价结果在组合评价中的权重,见表5.将权重计算结果及各评价方法标准化后的值代入式(1),即可求得样本的围岩稳定性综合评价值,评价结果及对比见表6.

表4 基础评价方法评价结果的标准化值

Table 4 The standardized results of the fundamental methods

sample	extenics method ^[1]	cloud approach ^[2]	BQ grading standard ^[3]	projection pursuit method ^[4]	rough set theory ^[5]
1	74.110	74.973	74.500	77.660	81.850
2	68.293	67.676	65.050	70.460	69.350
3	75.842	73.064	79.760	75.300	75.000
4	84.988	82.707	85.760	81.080	90.000
5	70.779	71.931	77.660	73.880	79.428

表5 各评价方法在组合评价中占的权重

Table 5 The weights of the fundamental methods in the combination evaluation

extenics method ^[1]	cloud approach ^[2]	BQ grading standard ^[3]	projection pursuit method ^[4]	rough set theory ^[5]
0.247	0.266	0.167	0.259	0.060

表6 实例组合评价结果及对比

Table 6 The evaluated results with the proposed model in comparison with the fundamental methods

sample	score	combination evaluation method	extenics method ^[1]	cloud approach ^[2]	BQ grading standard ^[3]	projection pursuit method ^[4]	rough set theory ^[5]
1	75.787	II	II	II	II	II	I
2	68.210	II	II	II	II	II	II
3	75.567	II	II	II	II	II	II
4	83.794	I	I	I	I	I	I
5	73.558	II	II	II	II	II	II

由表6可知,基于联系矩阵的组合评价方法对围岩样本的评价结果与可拓方法、云模型、BQ方法、投影寻踪权重-属性区间识别模型的评价结果完全吻合.对样本1,则与粗糙集模型评价结果存在差别,但据样本指标实测值可知,样本1中除地下水渗水量指标外,其余4个指标值均位于II级.表明样本1判定为II等级的可能性明显,故本文方法用于围岩稳定性评价是有效可行的.同时,由实例的评价结果分析可得出,组合方法的数值相对基础评价方法值为中等水平,体现了集成不同信息来源的预测结果,并消除或淡化了不同方法的不足,有效避免了评价结果偏风险或偏保守的缺陷,使评价结果更具可靠性和更接近真实情况.组合模型将集对联系矩阵的概念引入权重计算可充分体现实际数据的不确定性,使分析结果体现了模型在充分利用各类方法的优势的同时,可避免预测错误的风险和有效保证预测精度,使各单一信息处理方法适用范围得到扩展.当然,组合模型评价过程较以往单一信息处理方法复杂,但可提高预测结果的可靠性与避免预测错误风险,而这对于确保重大工程的安全是非常重要的.总之,基于联系矩阵的组合评价方法可从本质上充分融合各种方法的优点,并通过最优组合提高了评价结果的可靠性并有效避免了偏风险或偏保守的预测风险.

3 结 语

围岩稳定性评价涉及多种类型信息,应用某一种评价方法可能存在预测错误的风险.为了

充分利用各类单一评价方法的有效信息,避免评价方法的局限性,本文在组合评价思想中引入联系矩阵概念,提出了基于联系矩阵的围岩稳定性组合评价模型.实例应用结果表明该模型不仅能充分利用单一信息评价方法的优势,还可耦合指标信息的确定和不确定性,可有效提高预测精度.任何一个模型的优势和实用性,需经大量工程实践和应用完善,文中实例工程具有一定的代表性,但样本数相对较少,而影响围岩稳定性的因素极其复杂且具有不确定性,故为确保模型的实际应用可靠性和适用性,该模型仍需开展大量的工程实例验证和分析,特别是在标准评分值区间的确定和基础评价方法合理选择方面仍需深入研究和完善,但作者相信该法将为类似评价问题提供新的途径.

参考文献(References):

- [1] 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 underground engineering based on extension method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(9): 1450-1453. (in Chinese))
- [2] 李健, 汪明武, 徐鹏, 徐鹏冲. 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, XU Peng-chong. The cloud model for classification of stability of surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(1): 83-87. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国建设部, 国家技术监督局. 工程岩体分级标准(GB50218-94)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995. (State Bureau of Technical Supervision, The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for Engineering Classification of Rock Masses (GB50218-94)[S]. Beijing: China Planning Press, 1995. (in Chinese))
- [4] 徐飞, 王珂, 刘造保. 围岩稳定性评价的投影寻踪权重-属性区间识别模型[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2587-2592. (XU Fei, WANG Ke, LIU Zao-bao. Attribute interval recognition model based on projection pursuit weight for evaluation of stability of surrounding rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(8): 2587-2592. (in Chinese))
- [5] 张继宝, 汪明武, 谢慧敏. 基于粗糙集理论的围岩稳定性模糊综合评价[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2008, **16**(2): 85-88. (ZHANG Ji-bao, WANG Ming-wu, XIE Hui-min. A fuzzy assessment method of surrounding rock stability based on rough set theory[J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry(Natural Science)*, 2008, **16**(2): 85-88. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 陈守煜, 韩晓军. 围岩稳定性评价的模糊可变集合工程方法[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))
- [8] 王硕, 杨善林, 马溪骏. 基于WNN-RAGA的非线性组合预测方法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, **28**(12): 160-165. (WANG Shuo, YANG Shan-lin, MA Xi-jun. Nonlinear combination forecasting approach based on WNN-RAGA[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2008, **28**(12): 160-165. (in Chinese))

- [9] 刘志成, 乔慧, 何佳洲. 基于加权证据距离的高度冲突证据组合方法[J]. 计算机工程与应用, 2014, **50**(3): 103-107. (LIU Zhi-cheng, QIAO Hui, HE Jia-zhou. Combination approach of highly conflict evidence based on weighted distance of evidence[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, **50**(3): 103-107. (in Chinese))
- [10] 陈国宏, 李美娟. 基于方法集的综合评价方法集化研究[J]. 中国管理科学, 2004, **12**(1): 101-105. (CHEN Guo-hong, LI Mei-juan. The research on the comprehensive evaluation method integration based on method set[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2004, **12**(1): 101-105. (in Chinese))
- [11] 陈涛. 基于 AGA-SVM 的非线性组合预测模型[J]. 数学的实践与认识, 2010, **40**(4): 57-62. (CHEN Tao. Nonlinear combined forecasting model based on AGA-SVM[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2010, **40**(4): 57-62. (in Chinese))
- [12] 曹文贵, 翟友成, 王江营. 基于漂移度的隧道围岩质量分级组合评价方法[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 978-984. (CAO Wen-gui, ZHAI You-cheng, WANG Jiang-ying. Combination evaluation method for classification of surrounding rock quality of tunnel based on drifting degree [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(6): 978-984. (in Chinese))
- [13] 陈鹏宇, 余宏明, 谢凯, 李科. 基于支持度的隧道围岩质量分级组合评价方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2233-2237. (CHEN Peng-yu, YU Hong-ming, XIE Kai, LI Ke. Combination evaluation method for classification of surrounding rock quality of tunnels based on support degree[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(12): 2233-2237. (in Chinese))
- [14] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. (ZHAO Ke-qin. *Set Pair Analysis and Its Application*[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [15] 汪明武, 金菊良, 周玉良. 集对分析耦合方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (WANG Ming-wu, JIN Ju-liang, ZHOU Yu-liang. *Set Pair Analysis Based Coupling Methods and Applications*[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [16] WANG Ming-wu, XU Peng, LI Jian, ZHAO Kui-yuan. A novel set pair analysis method based on variable weights for liquefaction evaluation[J]. *Natural Hazards*, 2014, **70**(2): 1527-1534.
- [17] 汪明武, 李丽, 金菊良. 岩爆预测的改进集对分析模型[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊): 511-514, 518. (WANG Ming-wu, LI Li, JIN Ju-liang. An improved set pair analysis model for the prediction of rockburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(S): 511-514, 518. (in Chinese))
- [18] Berger J O. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [19] 付正飞, 张世飙, 郭刚, 陈勇, 王元汉. 概率论方法在云岭隧道围岩分类中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊1): 3063-3068. (FU Zheng-fei, ZHANG Shi-biao, GUO Gang, CHEN Yong, WANG Yuan-han. Study on the application of probability method to surrounding rock classification in Yunling tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(S1): 3063-3068. (in Chinese))

Connectional Matrix-Based Combination Evaluation Method for Surrounding Rock Stability

WANG Ming-wu¹, WEI Dong-fang¹, ZHOU Xin-wei², WANG Peng-cheng¹

(1. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P.R.China;*

2. *School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, P.R.China)*

Abstract: Evaluation of surrounding rock stability is a complicated system problem involving various uncertain factors. To overcome the drawbacks of conventional evaluation methods based on single-type information, a new combination evaluation method based on set pair analysis was proposed. This method made full use of available information sources from the different conventional methods while avoiding the most erroneous evaluation. First, the problem was treated with the single-type evaluation methods. Then, the set pair consisting of double evaluation results was analyzed on the identical-discrepancy-contrary principle to establish a connectional matrix. And the weights of the realted single-type evaluation methods in the comprehensive model were determined respectively through the connectional matrix. Finally the surrounding rock stability level was evaluated with the linear combination method. The results of the application case show that the proposed model is effective and feasible in improving the prediction accuracy through coupling the advantages of the related conventional evaluation methods. This method makes a good reference for other similar evaluation problems.

Key words: surrounding rock stability; combination; set pair analysis; connectional matrix; evaluation

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(41172274)