围岩稳定性集对分析－可变模糊集综合评价模型

汪明武[1]，李 丽[2]，金菊良[1]

（1. 合肥工业大学土木建筑工程学院，安徽 合肥 230009；2. 合肥工业大学资源与环境学院，安徽 合肥 230009）

摘 要：围岩稳定性评价是一个复杂不确定系统问题。应用集对分析和可变模糊集合理论，建立了围岩稳定性评价的集对分析－可变模糊集综合评价模型，简化了构建相对差异度过程，提高了评价结果的准确性和可靠性，并应用于实际工程，与其它分类方法进行了对比分析，结果表明该法是有效可行的，且更客观。

关键词：围岩稳定性；集对分析；可变模糊集

中图分类号：TU457；U452.12 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)06－0941－04

作者简介：汪明武(1972－)，男，教授，主要从事城市环境岩土工程、防灾减灾工程和智能岩土工程的教学和科研工作。E-mail: geotechnics@163.com

Set pair analysis-variable fuzzy set model for evaluation of stability of surrounding rock

WANG Ming-wu[1]，LI Li[2]，JIN Ju-liang[1]

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China；2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The evaluation of stability of surrounding rock is a complicated uncertainty system problem. Based on the set pair analysis (SPA) and the variable fuzzy sets theory, a new fuzzy comprehensive classification model was established. In order to simplify the evaluation procedure and improve the accuracy and reliability of results, a new method to construct relative difference degree was proposed. Moreover, it was shown by comparison of results between a practical example and other methods that the proposed method used to evaluate the stability of surrounding rock was feasible and effective, and more objective.

Key words: surrounding rock stability; set pair analysis; variable fuzzy set

0 引 言

围岩稳定性的评价受诸多因素控制与影响，且各因素具有多样性、可变性、不确定性等特点，从而使围岩稳定性的评价成为一个复杂的不确定系统分析问题。然而，围岩稳定性的正确评价是地下工程岩体开挖支护设计及施工的前提，一直受到工程界的普遍关注，诸多学者对此问题进行了研究，并提出了各种工程评价方法。但随着地质条件复杂化、施工方法的多样化和超深超长隧道的开展，以往传统方法现已不能满足工程界的需求，如应用单个或少数指标的评判方法（如普氏分类法）会遗漏一些重要信息，很难全面准确体现实际围岩所处的地质环境，且可能不同分类法得出的结果相互矛盾，使决策者难以抉择。为此提出了将定性与定量方法有机结合起来的围岩稳定性多指标评价方法，以解决此难题，如模糊数学方法[1]、人工神经网络方法[2]、可拓方法[3]、模糊可变集合[4]等方法，但这些方法也有自身局限性，如传统模糊数学方法不易区分相邻两类的差异；人工神经网络分类方法虽可克服了人为确定权重的缺陷，但实际应用中受知识获取瓶颈的限制[2]；可拓评价方法[3]能比较全面地考虑各个因素，但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，导致结果与实际某些情况存在差异；可变模糊集评价方法虽可避免以上问题[4]，但在构造相对差异度时需要根据实际问题的物理分析或经验，确定可变吸引域和可变范围域区间及可变吸引域中隶属度值为1的点值矩阵，计算过程较复杂。本文提出应用集对分析方法（Set pair analysis method, SPA）来构造可变模糊集的相对差异度函数的新方法，以建立围岩稳定性的集对分析－可变模糊集综合评价模型，试图从新的角度探索围岩稳

基金项目：国家自然科学基金资助项目（70771035）；国家自然科学基金资助项目（40702049）；安徽省优秀青年科技基金资助项目（08040106830）

收稿日期：2007－07－03

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定性的综合评价方法。

1 集对分析－可变模糊集综合评价模型

1.1 基本原理及流程

基于集对分析－可变模糊集理论的围岩稳定性评价基本原理：基于待评样本的评价指标实测值与围岩稳定性类别评价指标标准集 B_k 之间的同异反模糊联系度集对分析，构建可变模糊集的相对差异度，进而计算相对隶属度和定量化评定样本的围岩稳定性类别。

实际具体评价步骤如下：

（1）确定围岩稳定性的分类指标和类别标准集。

（2）基于集对模糊联系度分析样本指标值 x_{pj}（p=1~n，j=1~m）与围岩稳定性类别 k（k=1~K）之间的单指标联系度 u_{pjk}，并结合样本分类指标权重，构建样本与评价标准等级 k 之间的相对差异度 u_{pk}。

（3）应用上述构建的可变模糊集相对差异度，计算样本隶属于模糊集评价等级 k 的相对隶属度 r_{pk}。

（4）按求得的相对隶属度评定级别，并计算级别特征变量值 k*，以定量描述样本属于某类别趋势。具体操作流程如图 1 所示。

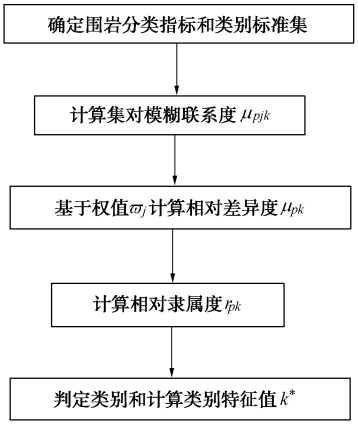


图 1 集对分析－可变模糊集评价流程图

Fig. 1 Evaluation of set pair analysis-variable fuzzy set

1.2 集对分析理论及同异反标准

集对分析方法是由我国学者赵克勤提出的一种关于确定不确定系统同异反定量分析方法[5]，可实现完整有效刻画确定不确定系统的对立统一关系，最基本的概念是集对和联系度。集对是指具有一定联系的两个集合组成的整体。若对给定集合 A 和 B，则两个集合组成的集对表示为 H=(A,B)，信息意义上的确定性与不确定性模糊结构函数式为[5]

$$\mu_{(A,B)} = a + bi + cj \quad 。 \tag{1}$$

式中 i 为差异度系数，$i \in [-1,1]$；j 为对立度系数，常取 j=−1。a，b，c 分别为待评样本 x_{pj} 指标 j 与围岩稳定性类别 k 之间的同一度、差异度和对立度，且 a+b+c=1。可见，围岩稳定性评价问题的集对 $H(A,B_k)$ 中集合 A 由待评样本的评价指标 j（如岩体质量、岩体完整性指数、地下水渗水量、节理状况等）实测值构成，集合 B_k（k=1,2,…5）由围岩稳定性各类别对应的评价指标标准集构成。

围岩稳定性集对同异反判别标准定义如下：当样本评价指标值处于所讨论类别标准集内则为同一；当评价指标值处于讨论类别的相邻类别标准集中则为异；当处于相隔类别内则为对立。

1.3 综合评价模型

围岩稳定性评价是典型的复杂系统问题，基于相对差异度的可变模糊集不确定性分析方法具有明显的优越性，但可变模糊集构建过程复杂。本文探讨应用样本与等级评价标准集间的集对分析模糊联系度来构建可变模糊集，以简化评价过程和提高定量分析的可靠性和通用性。

若以样本与围岩稳定性类别评价指标准集间的数值接近属性来表达 x_{pj} 与 k 级标准集合间的模糊联系度 μ_{pjk}，则按围岩稳定性集对分析的同异反判别标准可知，x_{pj} 落在类别 k 内相应的 μ_{pjk}=1，落在相邻标准类别的接近程度 $\mu_{pjk} \in [-1, 1]$，而落在相隔标准集内则为−1。设指标 j 的评价标准集之间的界限为 $M_{j,k}$，则样本与讨论围岩稳定性类别 k 的接近程度计算公式为

$$\mu_{pjk} = \begin{cases} 1 - 2\left|\dfrac{M_{j,k-1} - x_{pj}}{M_{j,k-1} - M_{j,k-2}}\right| & (x_{pj}\text{落在相邻标准集 } k-1\text{内}), \\ 1 & (x_{pj}\text{落在讨论集 } k\text{ 内}), \\ 1 - 2\left|\dfrac{x_{pj} - M_{j,k}}{M_{j,k+1} - M_{j,k}}\right| & (x_{pj}\text{落在相邻标准集 } k+1\text{内}), \\ -1 & (x_{pj}\text{落在其他标准集内}), \end{cases} \tag{2}$$

式中，$M_{j,k}$ 为各等级 j 指标的界限值。则计算样本 p 与评价标准等级 k 之间的综合联系度 μ_{pk} 可按下式求得，

$$\mu_{pk} = \sum_{j=1}^{m} \varpi_j \mu_{pjk} \quad , \tag{3}$$

式中，ϖ_j 为评价指标综合权重，其可按主观和客观信息权重来综合确定[6]。可见，μ_{pk} 值越接近−1，则反映样本 p 与讨论类别 k 间的差异性就越大，样本越趋于其他等级，反亦然，故是一种可变模糊集的相对差异度，则由可变模糊集评价理论可知[4]，相应地相对隶属度 r_{pk} 如下：

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 围岩稳定性评价指标分类标准

Table 1 Classification standard for the evaluation of indexes for stability of surrounding rock

类　别	岩体质量	单轴抗压强度 / MPa	岩体完整性指数	地下水渗水量 / (L·(min·10m)$^{-1}$)	节理状况
稳定Ⅰ	0～0.10	200～300	0.75～1.00	0～5	9～10
较稳定Ⅱ	0.10～0.25	100～200	0.55～0.75	5～10	7～9
基本稳定Ⅲ	0.25～0.40	50～100	0.30～0.55	10～25	4～7
不稳定Ⅳ	0.40～0.60	25～50	0.15～0.30	25～125	2～4
极不稳定Ⅴ	0.60～1.00	0～25	0～0.15	125～250	0～2

表 2 样本实测值

Table 2 Measured values of samples

样 本 p	岩体质量 j=1	单轴抗压强度 j=2	岩体完整性指数 j=3	地下水渗水量 j=4	节理状况 j=5
p=1	0.12	185.5	0.89	6	8
p=2	0.27	176.4	0.80	8	7
p=3	0.08	158.2	0.94	6	7
p=4	0.04	201.1	0.97	5	9
p=5	0.24	181.9	0.92	9	8

表 3 围岩稳定性评价结果及对比

Table 3 Evaluated results of stability of surrounding rock and comparison

样本 p	r_{p1}	r_{p2}	r_{p3}	r_{p4}	r_{p5}	集对分析－可变模糊集综合模型		可拓方法[3]	模糊可变集方法[4]
						类别	特征值 k*		
p=1	0.7628	0.9238	0.2372	0.0000	0.0000	Ⅱ	1.73	Ⅱ	Ⅱ
p=2	0.3601	0.9483	0.6399	0.0000	0.0000	Ⅱ	2.17	Ⅱ	Ⅱ
p=3	0.5912	0.8598	0.4088	0.0000	0.0000	Ⅱ	1.84	Ⅱ	Ⅱ
p=4	1.0000	0.7679	0.0000	0.0000	0.0000	Ⅰ	1.32	Ⅰ	Ⅰ
p=5	0.4870	0.9075	0.5130	0.0000	0.0000	Ⅱ	2.00	Ⅱ	Ⅱ

$$r_{pk}=\frac{1+\mu_{pk}}{2} \quad 。 \tag{4}$$

基于上面计算的相对隶属度，按最大隶属度对应的类别作为评价结果的准则来判定围岩稳定性类别。为避免应用最大隶属度原则造成判定失真，采用了特征值 k^* 来定量化评定结果，计算公式为

$$k^*=\sum_{k=1}^{K}k\cdot\left|\frac{r_{pk}}{\sum_{i=1}^{K}r_{pi}}\right| \quad , \tag{5}$$

式中，k^* 为待评样本的围岩稳定性类别特征值。

2　实例应用

为验证构建模型的正确性和有效性，采用文献[3,4]中的实例数据进行应用及验证对比分析。实例中围岩稳定性评价指标选用了岩体质量、单轴抗压强度、岩体完整性指数、地下水渗水量、节理状况等5个指标，类别分为稳定Ⅰ、较稳定Ⅱ、基本稳定Ⅲ、不稳定Ⅳ、极不稳定Ⅴ，围岩稳定性评价指标分类标准和样本指标实测值见表1和表2所示。

由表 1 可得出各指标对应的类别间界限值 $M_{j,k}$，将样本实测值按围岩稳定性集对同异反判别标准分析后，代入式（2）即可求得样本对讨论类别 k 的接近程度。采用文献[4]权值，代入式（3）可求得相应综合联系度，再由式（4）可计算得相对隶属度，再按判定准则即可得相应类别，并按式（5）可求得样本所属类别向另一类别的定量变化趋势。基于集对分析－可变模糊集理论的围岩稳定性综合评价结果及与其他方法的对比分析结果见表 3。可见，样本 1，2，3，5 的围岩稳定性属于较稳定，样本 4 则属于稳定，本文方法的评价结果与文献[3,4]方法的评价结果完全吻合，故应用基于集对分析－可变模糊集理论综合评价围岩稳定性是有效可行的。评价指标权值的合理确定是影响结果的重要因素，有待深入探讨。

3　结　　语

建立了基于集对分析－可变模糊集理论的围岩稳定性综合评价新模型，探索了基于集对模糊联系度来构建可变模糊集理论的相对差异度的新方法，使评价过程更加客观、简单和直观。实例应用及对比分析结

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

果表明，应用集对分析－可变模糊集理论来综合评价围岩稳定性是有效可行的，此将有益于水电洞室工程、地下工程等的围岩稳定性分类，也为其他不确定工程问题的评价提供了一种新的参考。

参考文献：

[1] 陆兆溱, 王 京, 吕亚平. 模糊模式识别法在围岩稳定性分类上的应用[J]. 河海大学学报, 1991, **19**(6): 97－101. (LU Zhao-zhen, WANG Jing, LU Ya-ping. Direct method of fuzzy pattern recognition and its application to stability classification of surrounding rocks[J]. Journal of Hohai University, 1991, **19(**6): 97－101. (in Chinese))

[2] 杨朝晖, 刘浩吾. 地下工程围岩稳定性分类的人工神经网络模型[J]. 四川联合大学(工程科学版), 1999, **3**(4): 66－72. (YANG Zhao-hui, LIU Hao-wu. Artificial neural network model for the stability classification of adjoining rock of underground construction[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science), 1999, **3**(4): 66－72. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 陈守煜, 韩晓军. 围岩稳定性评价的模糊可变集合工程法[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))

[5] 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 preliminary application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))

[6] 李 丽, 汪明武. 熵模糊物元分析方法在水库正常高水位决策中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2006(4): 62－66. (LI Li, WANG Ming-wu. Application of information entropy-based fuzzy matter-element analysis in decision of normal high water level of reservoirs[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(4): 62－66. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net