

隧道围岩分级判别的未确知均值聚类模型

史秀志, 周 健

(中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要:基于未确知测度理论,建立隧道围岩分级的未确知均值聚类分析模型。针对隧道围岩分级判别中等级评价中许多不确定性影响因素,选用岩石等级、风化程度、岩体弹性纵波波速、岩体结构、地质构造影响程度、节理裂隙发育程度和地下水情况等 7 个指标作为隧道围岩分级的判别因子;以 20 组隧道围岩实测数据作为训练样本,建立各评价因子的未确知测度函数,用各分类样本平均值表示其分类中心;根据信息熵理论计算各评价因子的权重,依照置信度识别准则进行等级判定;用建立的模型对 20 组实测数据逐一进行回检,正确率为 100%。将建立的模型对待分类的 10 个样本进行测试,并与实际结果进行比较。研究表明:该模型判别预测结果与实际结果吻合,比较客观地反映了隧道围岩分级的复杂状况;且方法科学合理,意义明确,为隧道围岩分级判别提供了一种新思路。

关键词:隧道;围岩;分级;未确知均值聚类法;预测;熵

中图分类号:U451.2

文献标识码:A

文章编号:1674-4764(2009)02-0062-06

Application of Uncertainty Average Clustering Measurement Model to Classification of Tunnel Surrounding Rock

SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

Abstract: Based on the uncertainty measurement theory, a uncertainty average clustering measurement model for tunnel surrounding rock classification was established. Due to the uncertain factors in judging the engineering quality of rock masses, seven indexes, i. e., the rock grade, rock weathering degree, rock mass structure, elasticity longitudinal-wave velocity of rock mass, influence degree of geological structure, development of joint fissure and ground water regime, were used as the discriminating factors. the indexes functions of unascertained measurement of 20 sets of rock samples were established, and the centre of the classification was indicated by using the average of classification of samples. The weight of indexes was calculated by entropy weight theory, and a prediction for the classification of residual tunnel surrounding rock was carried out using the rules of credible recognition. Each of the 20 sets of tunnel surrounding rockmass samples was tested according to the model, and the correctness rate is 100%. The other 10 sets of tunnel surrounding rock samples were predicted by using this model. The results show that the uncertainty measurement model classification agrees well with the actual measured ones. Therefore, it shows that the uncertainty measurement model is effective, available and can be applied to classification of tunnel surrounding rock in underground engineering.

Keywords: tunnel; surrounding rock; classification; unascertained average clustering model; prediction; entropy

收稿日期:2008-07-15

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB02A02)

作者简介:史秀志(1966-),男,中南大学教授,博士,主要从事采矿与岩土工程灾害控制及安全评价研究,(E-mail) shixiuzhi@263.net。

隧道围岩分级是评价隧道围岩稳定性的重要参数,也是指导隧道设计施工的重要指标和主要依据,分级的正确与否直接影响隧道施工过程中的多项工艺,如施工方法、钻孔难易、爆破单位炸药消耗量、支护形式等等,因此正确划分隧道围岩的等级是沟通岩体工程勘察、设计和施工的桥梁与纽带,也是岩石力学与岩石工程中的一项重要研究课题^[1]。

目前国内外关于隧道围岩分级评价方法体系繁多,从Q分类法、RMR分类法到SRC分类法等等^[1-8]。传统的方法虽然简便、快速,但考虑的因素偏少,而实际工程中围岩情况千差万别,各方法中的考虑因素由于评分标准不同难以彼此选用。近年来,随着科学技术的方法,一些新的理论与软计算方法^[9-13]被广泛地运用于岩体质量的评价中。如严薇^[9]等采用熵度量法对地下工程围岩稳定性进行分级评价;曾杰等^[10]建立公路隧道围岩动态分级评价模型;周翠英等^[11-12]建立了评价隧道围岩分级的神经网络方法;宫凤强等^[13]借鉴判别分析理论的思想,建立距离判别分析模型对隧道围岩进行分级。在这些指标体系的研究及其评价方法中,一个重要的问题就是如何合理地确定各评价指标的权重,目前赋权的方法多种多样,如模糊评判法、专家打分法、人工神经网络法等。虽然这些方法在一定程度上能满足评价的要求,但均存在一定的不足。专家打分法主观性较强,且实现比较困难,距离判别法没有考虑各影响因子的重要度及在距离判别中错判造成的损失,人工神经网络法的评价精度不高。

影响隧道围岩分级的因素,具有模糊性,复杂性和不确定性,如何将这些不确定的信息考虑在内并进行分析,是值得研究的一个重要问题。在这方面,由王光远院士^[13]提出的未确知数学理论为此提供了一条比较好的研究途径,尤其在解决有序分割问题上具有显著的优越性^[14-15]。笔者借鉴未确知测度评价模型的理论 and 思想,将未确知数学理论运用到隧道围岩分级判别中去,考虑实际工程中影响隧道围岩等级的因素,试图建立未确知均值聚类分析模型对隧道围岩等级进行分类;同时利用信息熵理论^[16]对各判别因子进行客观赋权,较好消除人为因素带来的偏差,使评价结果更符合实际,并在实际工程中进行运用,取得了良好的效果,从而为地下工程中定量判定隧道围岩级别提供理论依据并指导施工。

1 未确知均值聚类计算理论

设某评价对象 Γ 有 n 个,则评价对象空间 $\Gamma = \{\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n\}$ 。对于每个评价的对象 $\Gamma_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 有 m

个单项评价指标空间,即 $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ 。则 Γ_i 可表示为 m 维向量 $\Gamma_i = \{\omega_1^i, \omega_2^i, \dots, \omega_m^i\}$,其中, φ_j^i 表示研究对象关于评价指标的测量值。对于每个子项 $\varphi_j^i (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$,假设有 p 个评价等级 $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 。

评价空间记为 Θ ,则有 $\Theta = \{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 。设 $R_k (k = 1, 2, \dots, p)$ 为第 k 级评价等级,且 k 级比 $k+1$ 级胀缩等级“高”,记为 $R_k > R_{k+1}$ 。若满足 $R_1 > R_2 > \dots > R_p$,则称 $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 是评价空间 Θ 的一个有序分割类^[14-15]。

假设某个分类样本集有 t 个样本属于类,则第 k 个分类等级中各样本的评判指标可表示为,求其平均值,即可知该分类样本集的分类中心。

1.1 单指标测度

若 $v_{jk}^i = v(\varphi_j^i \in R_k)$ 表示测量值 φ_j^i 属于第 k 个评价等级的程度,且要求满足:

$$0 \leq v(\varphi_j^i \in R_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$v(\varphi_j^i \in \Theta) = 1 \quad (2)$$

$$v[\varphi_j^i \in \bigcup_{s=1}^k R_s] = \sum_{s=1}^k v(\varphi_j^i \in R_s) \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

式(1)称为“非负有界性”,式(2)称为“归一性”,式(3)称为“可加性”。满足式(1)~(3)称为未确定测度(Uncertainty measurement),简称测度^[14-15]。

称矩阵为单指标测度评价矩阵,且有

$$K_{jk}^i = \begin{bmatrix} v_{j1}^1 & v_{j1}^2 & \dots & v_{j1}^p \\ v_{j2}^1 & v_{j2}^2 & \dots & v_{j2}^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{jm}^1 & v_{jm}^2 & \dots & v_{jm}^p \end{bmatrix} \quad (4)$$

该矩阵的第 j 个行向量 $(v_{j1}^1, v_{j1}^2, \dots, v_{j1}^p)$ 为 φ_j^i 的单指标测度评价向量。

1.2 确定各指标权重

在确定评价指标的权重时,往往多采用主观赋权法,如Delphi法、AHP法等。这样就会造成评价结果可能由于人的主观因素而形成偏差。在信息论中,熵^[16]既用来度量系统无序程度,还可用来度量数据本身所提供信息的有效性,故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及其效用,即由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重,它可尽量消除各指标权重计算的认为干扰,使评价结果更符合实际。

设 w_j 表示测量指标 φ_j 与其他指标相比具有的相对重要度,要求满足: $0 \leq w_j \leq 1$,且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$,称 w_j 为 φ_j 的权重,称 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ 为指标权重向量,根据熵确定权重,定义熵值

$$\chi_i = 1 + \frac{1}{\ln p} \left(\sum_{j=1}^p v_{ji} \ln v_{ji} \right) \quad (5)$$

式中 χ_i 为指标 i 所提供的信息量; p 为评价等级数目; v_{ji} 为单指标未确知测度。显然, $0 \leq \chi_i \leq 1$ 。

$$\text{令 } w_j = \frac{\chi_j}{\sum_{i=1}^n \chi_i} \quad (6)$$

因矩阵(4)已知,可由式(5),(6)求得各指标权重 w_j 。

1.3 多指标综合测度评价向量

令 $v_{ik} = v(\Gamma_i \in R_k)$ 为评价样本属于 Γ_i 第 k 个评价类 R_k 的程度,则有

$$v_i^k = \sum_{j=1}^m \omega_j v_{ij}^k \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

由于 $0 \leq v_{ik} \leq 1$ 且 $\sum_{k=1}^p v_{ik} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m \omega_j v_{ij}^k = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^p v_{ij}^k \right) \omega_j = 1$, 所以 v_{ik} 是未确知测度,称矩阵

$$K_{ik} = \begin{bmatrix} v_1^1 & v_1^2 & \dots & v_1^p \\ v_2^1 & v_2^2 & \dots & v_2^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_n^1 & v_n^2 & \dots & v_n^p \end{bmatrix} \quad \text{为多目标综合未确知测}$$

度评价矩阵,称 $\{v_1^1, v_1^2, \dots, v_1^p\}$ 为 Γ_i 的多指标综合测度评价向量^[14-15]。

1.4 属性识别模型

当 $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 有序时,最大隶属度识别准则不再适用。为此采用置信度准则^[17],设 λ 为置信度,取值范围通常为 $\lambda \geq 0.5$,且满足 $R_1 > R_2 > \dots > R_p$ 时,其识别模型为:

$$k_i = \min \left\{ k: \sum_{s=1}^k v_{is}(R_s) \geq \delta, 1 \leq k \leq p \right\} \quad (8)$$

取 k 值直到满足上式,则认为 φ_i 属于 k_i 类或 R_{k_i} 级别。

2 隧道围岩分级判别的未确知均值聚类模型及应用

2.1 确定分类判别因子

体现隧道围岩基本性质的指标较多,隧道围岩分级与多种不确定性因素相关,是典型的复杂非线性组合和相关关系问题。参考有关隧道围岩评判指标体系研究^[1-13],经综合分析后,确定以岩石等级(X_1)、风化程度(X_2)、岩体弹性纵波波速(X_3)、岩体结构(X_4)、地质构造影响程度(X_5)、节理裂隙发育程度(X_6)和地下水情况(X_7)作为未确知均值聚类分析模型的判别因子。它们基本综合反映了岩体的岩性、地质构造、岩体结构等特性,且这些指标具有可操作性、广泛性和适用性;并对各评价因子进行分级取值,评价集为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$,即将隧道围岩分为 I 级围岩、II 级围岩、III 级围岩、IV 级围岩和 V 级围岩 5 个类别。

2.2 分类判别指标的未确知测度函数

为验证该模型的检验效果,以文献[8,10]提供的 30 组工程岩体实测数据(表 1)为例,并采用取其中 20 组数据作为训练样本,其余 10 组样本数据作为待判样本以对模型进行检验。建立各评判因子的未确知测度函数,求得各分类级的中心,即各级的样本评判指标平均值,分别用 $\overline{X_1}, \overline{X_2}, \overline{X_3}, \overline{X_4}, \overline{X_5}, \overline{X_6}, \overline{X_7}$ 表示。其计算结果见表 2,根据表 2 中的计算结果分别建立岩石等级(X_1)、风化程度(X_2)、岩体弹性纵波波速(X_3)、岩体结构(X_4)、地质构造影响程度(X_5)、节理裂隙发育程度(X_6)和地下水情况(X_7)的未确知测度函数,见图 1-7。

表 1 工程岩体学习样本实测数据

样本序号	岩石类型	判别因子							判别结果			
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	本文方法	实测等级	距离判别法	神经网络法
1	片岩	0.9	0.3	0.38	0.3	0.3	0.3	0.5	IV	IV	IV	IV
2	硅质岩	0.9	0.5	0.47	0.3	0.3	0.3	0.5	III	III	III	III
3	花岗闪长岩	0.9	0.2	0.29	0.3	0.1	0.1	0.5	IV	IV	IV	IV
4	花岗闪长岩	0.9	0.5	0.74	0.3	0.3	0.3	0.5	III	III	III	III
5	花岗闪长岩	0.9	0.7	0.96	0.7	0.6	0.6	0.9	II	II	II	II
6	花岗闪长岩	0.9	0.7	0.82	0.9	0.6	0.6	0.9	I	I	I	I
7	石英片岩	0.1	0.4	0.39	0.5	0.3	0.3	0.1	IV	IV	IV	IV
8	石英片岩	0.1	0.6	0.64	0.5	0.6	0.6	0.5	III	III	III	III

续表 1

样本序号	岩石类型	判别因子							判别结果			
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	本文方法	实测等级	距离判别法	神经网络法
9	石英片岩	0.9	0.6	0.83	0.9	0.6	0.6	0.9	II	II	II	II
10	灰岩	0.9	0.8	0.80	0.9	0.6	0.6	0.7	I	I	I	I
11	灰岩	0.9	0.3	0.49	0.5	0.6	0.6	0.5	III	III	III	III
12	灰岩	0.9	0.4	0.81	0.7	0.6	0.6	0.5	II	II	II	II
13	黏性土夹泥灰岩	0.1	0.3	0.11	0.3	0.6	0.6	0.5	IV	IV	IV	IV
14	灰岩	0.9	0.8	0.76	0.9	0.9	0.9	0.5	I	I	I	I
15	角砾状泥灰岩	0.5	0.8	0.61	0.7	0.9	0.9	0.5	II	II	II	II
16	泥质白云岩夹页岩	0.5	0.3	0.39	0.5	0.6	0.6	0.6	IV	IV	IV	IV
17	泥质白云岩夹页岩	0.5	0.5	0.64	0.5	0.6	0.6	0.6	III	III	III	III
18	断层破碎带	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.3	V	V	V	V
19	卵石层砂土填充	0.1	0.1	0.6	0.1	0.3	0.3	0.3	V	V	V	V
20	凝灰熔岩	0.9	0.7	0.85	0.9	0.9	0.6	0.3	I	I	I	I

注: $X_1 \sim X_7$ 数据已经归一化处理,具体方法见文献[8]。

表 2 样本分类数据

样本序号	$C_5(V)$	$C_4(IV)$	$C_3(III)$	$C_2(II)$	$C_1(I)$
18,19	1,3,7,13,16	2,4,8,11,17	5,9,12,15	6,10,14,20	
\bar{X}_1	0.1	0.5	0.66	0.8	0.9
\bar{X}_2	0.1	0.3	0.48	0.625	0.75
\bar{X}_3	0.55	0.312	0.596	0.802 5	0.807 5
\bar{X}_4	0.1	0.38	0.42	0.75	0.9
\bar{X}_5	0.2	0.38	0.48	0.675	0.75
\bar{X}_6	0.2	0.38	0.48	0.675	0.675
\bar{X}_7	0.3	0.44	0.5	0.7	0.6

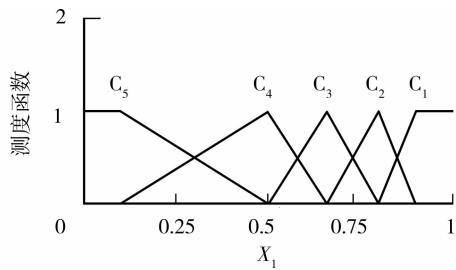


图 1 岩石等级(X_1)单指标测度函数

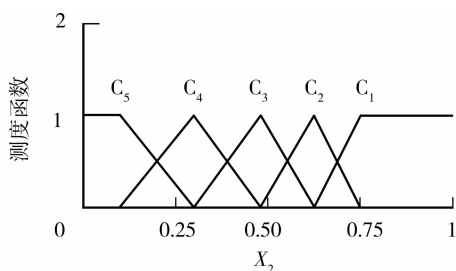


图 2 风化程度(X_2)单指标测度函数

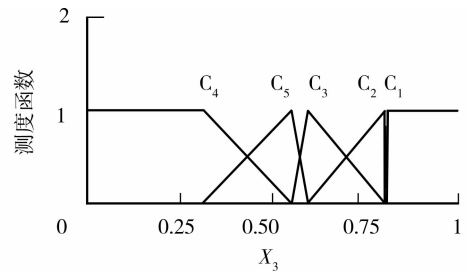


图 3 岩体弹性纵波波速(X_3)单指标测度函数

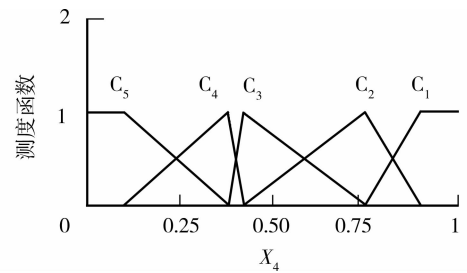


图 4 岩体结构(X_4)单指标测度函数

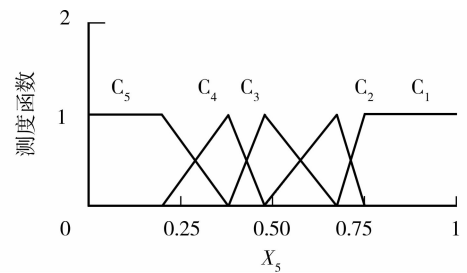


图 5 地质构造影响程度(X_5)单指标测度函数

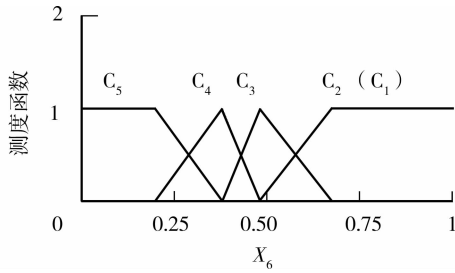


图 6 节理裂隙发育程度(X_6)单指标测度函数

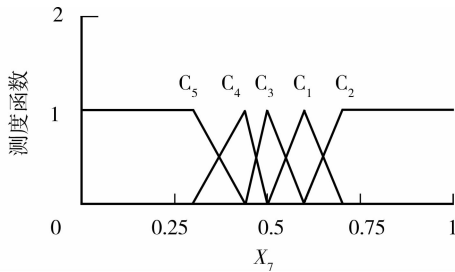


图 7 地下水情况(X_7)单指标测度函数

2.3 分类模型的检验及应用

为了考察隧道围岩等级判定的未确知测度分析模型的有效性和正确性,用判别模型对训练样本 1~20 逐一进行回检,评判结果完全与实际结果相吻合,则可认为建立的未确知测度分类判别模型已经比较稳定,且有较高的判别率。

下面对 10 个待判样本 21-30(表 2)进行评判,根据表 2 中具体评判指标的取值和未确知测度函数(图 1-7),可求得各待判样本的单指标测度评价矩阵。以样本 21 为例,根据表 2 中 7 个评价因子的取值,分别代入图 1-7 的单指标测度函数中,计算可知样本 21 的单指标评价矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.794\ 2 & 0.205\ 8 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.615\ 4 & 0.384\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

用式(5)-(6)确定各评价指标权重,样本 21 的评价指标权重: $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\} = \{0.159\ 5, 0.159\ 5, 0.109\ 1, 0.159\ 5, 0.159\ 5, 0.093\ 5, 0.159\ 5\}$,根据单指标矩阵和式(7)可求得样本 21 的多指标综合测度评价向量: $\{0.637\ 9, 0.144\ 2, 0.058\ 4, 0.159\ 5, 0.000\ 0\}$ 。

取置信度 $\lambda = 0.5$,由多指标综合测度评价向量(7)和置信度评价准则公式(8)可以判别样本 21 的等级为 I 级,与实际等级相吻合。同理,对待判样本 22-30 进行评判,评价结果见表 4。表 4 同时列出了利用人工神经网络模型^[12]、距离判别分析方法^[13]所得到的评价结果。可见,采用本文方法所得评判结果实际等级十分吻合,判误率为 0,而采用其他 2 种方法所得结果均存在误判的情况。所以,将未确知测度分析模型应用于隧道围岩等级的判定完全可行,精度很高,能够满足实际工程应用的需要。

表 3 待判样本分类指标实测值

样本序号	岩石类型	判别因子						
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
21	灰岩	0.9	0.8	0.76	0.9	0.9	0.9	0.7
22	灰岩	0.9	0.4	0.72	0.5	0.6	0.6	0.7
23	灰岩	0.9	0.5	0.76	0.9	0.6	0.6	0.7
24	泥质灰岩	0.9	0.5	0.80	0.5	0.6	0.6	0.7
25	泥质白云岩夹页岩	0.5	0.5	0.39	0.5	0.6	0.6	0.6
26	泥质白云岩	0.5	0.5	0.64	0.5	0.6	0.6	0.5
27	断层破裂带	0.1	0.1	0.10	0.1	0.1	0.1	0.3
28	角砾状泥灰岩	0.1	0.4	0.39	0.7	0.6	0.6	0.1
29	角砾状泥灰岩	0.1	0.6	0.64	0.5	0.6	0.6	0.5
30	凝灰熔岩	0.9	0.7	0.85	0.9	0.9	0.6	0.3

表 4 未确知测度模型评价结果对比表

样本序号	综合未确知测度					判定结果			
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	本文方法	实际等级	神经网络	距离判别
21	0.637 9	0.144 2	0.058 4	0.159 5	0.000 0	I	I	I	I
22	0.200 7	0.246 8	0.300 7	0.251 8	0.000 0	III	III	II*	III
23	0.356 7	0.244 0	0.220 9	0.178 3	0.000 0	II	II	II	II
24	0.180 6	0.348 8	0.290 1	0.180 6	0.000 0	II	II	II	III
25	0.000 0	0.189 7	0.307 6	0.271 5	0.231 2	IV	IV	IV	III*

续表 1

样本 序号	综合未确知测度					判定结果			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	本文方法	实际等级	神经网络	距离判别
26	0.000 0	0.214 6	0.595 1	0.190 2	0.000 0	III	III	III	III
27	0.142 9	0.000 0	0.000 0	0.142 9	0.714 3	V	V	V	V
28	0.000 0	0.264 5	0.173 1	0.130 3	0.432 2	IV	IV	III*	IV
29	0.000 0	0.309 6	0.498 9	0.000 0	0.191 6	III	III	III	III
30	0.867 3	0.096 2	0.036 5	0.000 0	0.000 0	I	I	I	I

注:带*号的为发生误判的样本。

3 结 论

1)隧道围岩等级的判定受多种因素的影响。针对隧道围岩分级中许多因素的不确定性、模糊性和隐蔽性,综合考虑岩体的岩性、岩体结构、赋存环境等因素,引入未确知数学理论,建立了隧道围岩分类的未确知均值聚类模型。

2)该模型选取选用岩石等级、风化程度、岩体弹性纵波波速、岩体结构、地质构造影响程度、节理裂隙发育程度和地下水情况等7个指标作为隧道围岩分级的判别因子,根据实测数据建立相应的未确知测度函数。在评价过程中,用信息熵理论确定权重,充分利用评价样本信息本身来判别隧道围岩等级,减少人为的主观因素对判别结果的影响,使评价结果更符合实际。

3)实例研究表明:隧道围岩分类的未确知均值聚类分析模型的误判率为0,可以考虑在实际工程中推广使用,为解决工程隧道围岩等级判定和分类提供了一条新途径。

4)将未确知数学理论应用到隧道围岩分类的评价中,构建隧道围岩分类的未确知均值聚类分析模型,能够得出各围岩样本的类别,这丰富了隧道围岩分级的评价方法,具有一定的应用意义。但是评价的结果好坏依赖于评价指标分级的合理与否,目前,隧道围岩指标分级标准还没有一个统一的标准,仍有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 沈中其,关宝树. 铁路隧道围岩分级方法[M]. 成都:西南交通大学出版社,2000.
- [2] HOEK E. Practical rock engineering [EB/OL]. <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>.
- [3] GONZALEZDE VALLEJO L I. SRC rock mass classification of tunnel sunder high tectonic stress[J]. Engineering Geology, 2003(69): 273-285.
- [4] SAPIGNI M, BERTI M, BETHAZ E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications [J]. Internal Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002(39): 771-788.
- [5] HAMDI E, DU MOUZA J. Amethodology for rock mass characterisation and classification to improve blast results[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2005(42): 177-194.
- [6] CHAO-SHI CHEN, YA-CHING LIU. A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007(22): 377-387.
- [7] MILNE D, HADJIGEORGIOU J, PAKALNIS R. Rock mass characterization for underground hard rock mines [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(4): 393-391.
- [8] 何发亮,谷明成,王石春. TBM施工隧道围岩分级方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9): 1350-1354. HE FA-LIANG, GU MING-CHENG, WANG SHI-CHUN. Study on surrounding rockmass classification of tunnel cut by TBM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(9): 1350-1354.
- [9] 严薇,林娴,周朝长. 熵度量法在地下工程围岩稳定性分级中的应用[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(1): 75-77. YAN WEI, LIN XIAN, ZHOU CHAO-ZHANG. Application of entropy measurement to stability of rock in underground engineering[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(1): 75-77.
- [10] 曾杰,靳晓光,高永,等. 公路隧道围岩动态分级方法研究[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(6): 76-79. ZENG JIE, JIN XIAO-GUANG, GAO YONG, et al. Dynamic classification of the highway tunnel surrounding rock [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(6): 76-79.
- [11] 周翠英,张亮,黄显艺. 基于改进BP网络算法的隧洞围岩分类[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2005,30(4): 480-486. ZHOU CUI-YING, ZHANG LIANG, HUANG XIAN-YI. Classification of rocks surrounding tunnel based on improved BP network algorithm[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005,30(4):480-486.

(下转第84页)

- 7.0[J]. Hydrometallurgy, 2003,71:149-158.
- [9] JEFFREY M S, MICHAEL T L. Cell-cycle progression and the generation of asymmetry in *Caulobacter crescentus*[J]. Nature Reviews Microbiology, 2004(2):325-337.
- [10] 周芳琴, 罗鸿禧, 王银善. 微生物对某些岩土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1997, 18(2):17-22.
ZHOU FANG-QIN, LUO HONG-XI, WANG YIN-SHAN. The effect of microbes on some geotechnical engineering properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2):17-22.
- [11] 胡春香, 刘永定, 张德禄, 等. 荒漠藻结皮的胶结机理[J]. 科学通报, 2002(12):931-937.
HU CHUN-XIANG, LIU YONG-DING, ZHANG DE-LU et al. Cementing mechanism of algal crusts from desert area [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(16):1361-1368(in English).
- [12] 周东, 欧孝夺, 杜静, 等. 生物技术改良膨胀土探讨[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2004, 29(3):197-200.
ZHOU DONG, OU XIAO-DU, DU JING, et al. The discussion of improving expansive clay with Biotechnology [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2004, 29(3):197-200.
- [13] 崔艳红, 黄现青. 微生物胞外多糖研究进展[J]. 生物技术通报, 2006(2):25-28.
CUI YAN-HONG, HUANG XIAN-QING. The advance in investigation of microbial[J]. Biotechnology Bulletin, 2006(2):25-28.
- [14] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 微生物沉积碳酸钙研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(S1):191-195.
WANG RUI-XING, QIAN CHUN-XIANG, WANG JIAN-YUN. Study on microbiological precipitation of CaCO₃[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(S1):192-195.
- [15] 张莉. 微生物改性粉土的试验及机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
ZHANG LI. Experiment and mechanism analysis for silt by microorganisms [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.

(编辑 陈蓉)

(上接第 67 页)

- [12] 裘军良, 夏永旭. 人工神经网络在公路隧道围岩判别中应用[J]. 广西交通科技, 2003, 28(4): 15-18.
QIU JUN-LIANG, XIA YONG-XU. The application of artificial neural network in highway tunnel's rock masses classification[J]. Guangxi Communication Science & Technology, 2003, 28(4):15-18.
- [13] 宫凤强, 李夕兵, 张伟. 隧道围岩分级的距离判别分析模型及应用[J]. 铁道学报, 2008, 30(3):119-123.
GONG FENG-QIANG, LI XI-BING, ZHANG WEI. Study and application on distance discriminant analysis model in tunnel surrounding rock classification[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(3):119-123.
- [14] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4):52-58.
WANG GUANG-YUAN. Uncertainty information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.
- [15] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 膨胀土胀缩等级分类的未确知均值聚类方法及应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2008, 39(5): 1075-1080.
DONG LONG-JUN, LI XI-BING, GONG FENG-QIANG. Unascertained average clustering method for classification of grade of shrink and expansion for expansive soils and its application [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(5): 1075-1080.
- [16] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.
CAO QING-KUI, LIU KAI-ZHAN, ZHANG BO-WEN. Calculation method of objective index weight by entropy[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(3): 40-42.
- [17] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 12-20.
CHENG QIAN-SHENG. Attribute recognition theoretical model with application [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(1): 12-20.

(编辑 王秀玲)