

基于未确知测度理论的岩溶路基稳定性分析

宁树理¹,康 虔^{1,2},张新兵²

1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083

2. 中南大学 湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410075

摘要: 随着岩溶区干线公路建设的发展, 针对岩溶区路基稳定性的研究成为亟待解决的问题。本文采用未确知测度理论对岩溶路基稳定性进行评价, 选取 16 个对其影响较大的因子作为评价指标, 建立各评价指标的未确知测度函数, 利用熵权法求得各评价指标权重值, 最后参考置信度准则判断岩溶路基风险性等级。将该方法应用到湖南省石门县干线公路改造当中, 得出 1#段路基和 2#段路基的风险性等级分别为IV级、III级, 这与采用专家经验法及模糊评判分析法得到的结果相符。该方法可作为岩溶路基稳定性分析的一种新手段, 其分析结果可作为设计和施工的依据。

关键词: 岩溶路基; 稳定性分析; 未确知测度; 熵权法

中图分类号: TU413.6+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)01-0118-06

Analysis on the Stability of Subgrade in Karst Area Based on Uncertainty Measurement Theory

NING Shu-li¹, KANG Qian^{1,2}, ZHANG Xin-bing²

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2. Hunan Zhongda Design Institute Co.,Ltd, Central South University, Changsha 410075, China

Abstract: As the development of highway construction in Karst Area, the researches based on subgrade stability in Karst region have become the problems being urgent to solve. This paper analyzed the model of uncertainty measurement based on sixteen indexes having the greatest impact on the subgrade stability in Karst Area. Also, the uncertain measurement functions of all indicators were built, after each index weight was calculated by using information entropy theory, and then the risk grade prediction of subgrade stability was made according to grade determination based on confidence identification criteria. When this model was applied to the highway rebuilding project in Shimen County Hunan Province, the results showed that the risk grade of 1# subgrade and 2# subgrade were IV and III respectively, which were highly consistent with the forecast results based on the expert experience method or the fuzzy evaluation method. The methods in the present paper are capable of providing a new way for subgrade stability analysis and a reference for design and construction.

Keywords: Subgrade in Karst Area; stability analysis; uncertainty measurement; entropy weight method

随着我国公路建设的蓬勃发展, 路网规模不断扩大, 公路建设开始向西南岩溶地区延伸^[1]。在该区修建公路, 必须对路基的稳定性给出分析与评价, 对公路规划设计人员来说是一项新挑战。目前, 岩溶区的稳定性分析已经取得一定成果, 但主要集中在岩溶区顶板稳定性研究与评判^[2,3], 对岩溶区路基的稳定性分析与评价方法的研究较少, 目前的设计过程中主要依靠工程人员的经验, 结合公路设计手册(路)的公式估算安全厚度判断。然而, 岩溶区路基稳定性问题涉及因素众多, 包括线路走向、溶洞分布、地下水、交通载荷、岩体构造及物理力学参数等^[4], 上述参数的选取又受到地质条件、实验条件、人为误差的局限, 具有很大的不确定性, 并且它们对岩溶路基稳定性的影响机理不明, 采用以往经验做出的岩溶路基稳定性评判往往偏离工程实际, 据此进行的岩溶区公路设计往往在安全性或经济性上存在诸多问题。因此, 开展岩溶区路基稳定性分析与评价已迫在眉睫。

1990年, 王光远等提出了未确知信息及其数学处理理论^[5]。由此发展而成的未确知测度法^[6]已被广泛应用到矿业、农业、交通等自然科学的研究中^[7-9]。本文基于未确知测度理论将岩溶区路基稳定性评价与其影响因素之间的关系看成一种未确知系统, 并引入熵权法确定各指标权重, 将二者优化组合, 构建了岩溶区路基稳定性评价模型, 综合考虑岩体单轴抗压强度、软化系数、完整性系数等 16 项因素对路基稳定性的影响, 最终得到岩溶路基风险水平的评估值。该方法有效地消除了人为因素带来的偏差, 使评价结果较为准确, 弥补了以往研究的不足, 从而使工程决策更为科学合理。

收稿日期: 2013-06-12

修回日期: 2013-06-18

作者简介: 宁树理(1989-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程灾害分析与防治。E-mail:ningzhao88888@163.com

1 岩溶区路基稳定性评价模型

1.1 模型流程

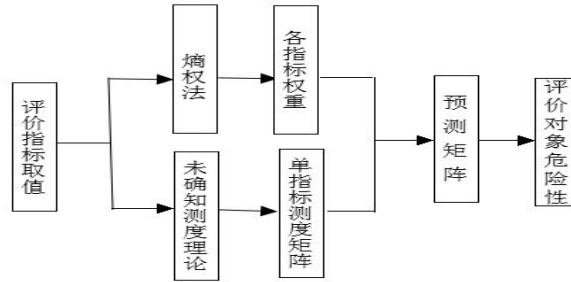


图 1 岩溶路基稳定性评价流程图

Fig.1 Evaluation on the stability of subgrade in Karst Area

1.2 未确知测度理论

设 n 个评价对象构成对象集 $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, 评价对象的 m 个评价指标构成评价指标集 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$, 评价对象的 p 个评价等级构成评价等级集 $U = \{C_1, C_2, \dots, C_k, \dots, C_p\}$, C_k 为第 k 个评价等级值。评价对象 X_i 的评价指标 I_j 对应的测量值记为 x_{ij} , x_{ij} 归类于第 k 个评价等级 C_k 的程度记为 μ_{ijk} , 如果 μ_{ijk} 同时满足: $\mu(x_{ij} \in U) = 1, 0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1$, $\mu \left| x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right| = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l)$, 则 μ_{ijk} 称为未确知测度, 简称测度^[10]。

1.3 单指标未确知测度矩阵

构造单指标测度函数 $\mu(x_{ij} \in C_k), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p)$, 计算得对象 X_i 的单指标未确知测度值 μ_{ijk} , 则称 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 为单指标未确知测度矩阵。

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.4 熵权法确定各评价指标权重

熵权法作为一种客观赋权方法, 既克服了等权法未考虑各指标对系统影响不同的缺点, 又避免了相似系数定义相似权法的复杂计算, 本文拟采用熵权法计算各评价指标权重。

假设评价指标权集 $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}\}$, w_{ij} 表示第 i 个评价对象的第 j 个评价指标相对于其它评价指标的重要程度, 同时满足归一化条件: $\sum_{j=1}^m w_{ij} = 1, w_{ij} > 0$, 即可利用熵权法确定权重:

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{k=1}^p \mu_{ijk} \cdot \lg \mu_{ijk} \quad (2)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^m v_i \quad (3)$$

1.5 预测矩阵的确定

如果存在 μ_{ik} 同时满足: $0 \leq \mu_{ik} \leq 1, \sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1, \mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \cdot \mu_{ijk} (k = 1, 2, \dots, p)$, 则称 $(\mu_{ik})_{n \times p}$ 为样本 x_i 的多指标未确知测度矩阵。

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.6 置信度识别及结果评判

为了实现岩溶路基稳定性等级分类的属性识别,引入置信度准则^[1],设λ为置信度,(λ ≥ 0.5,通常取λ = 0.5或0.6),若C₁ > C₂ > ... > C_p,且

$$p_0 = \min \left| p : \sum_{k=1}^p \mu_{ik} > \lambda, i = 1, 2, \dots, n \right| \quad (5)$$

则认为该路基稳定性等级属于第 p₀ 个评价等级 C_{p₀}。

2 岩溶路基稳定性评价模型指标体系的建立

综合考虑评价指标选取的原则及干线公路功能,通过查阅相关规范、文献^[12-18]并与地质、路基设计专家协商,从溶洞岩体特征、溶洞特性及工程环境特征三方面综合考虑对岩溶路基稳定性的影响。选取岩体单轴抗压强度(I₁)、岩体完整性系数(I₂)、岩体软化系数(I₃)、顶板厚度(I₄)、溶洞跨度(I₅)、岩溶发育情况(I₆)、高跨比(I₇)、溶洞充填情况(I₈)、裂隙发育及胶结情况(I₉)、顶板上覆土厚度(I₁₀)、地下水位变幅(I₁₁)、地下水发育情况(I₁₂)、公路路线与岩层构造线夹角(I₁₃)、折算交通量(I₁₄)、车辆荷载强度(I₁₅)、车辆荷载动态效应(I₁₆)共 16 个参数作为评价指标,通过赋值方法实现定性指标到半定量指标的转化,以便参与模型预测。采用分级标准化法,将每个指标分为 5 级,记评价等级集为 {C₁, C₂, C₃, C₄, C₅} ,即I级、II级、III级、IV级、V级,岩溶路基稳定性评价等级见表 1。

表 1 岩溶区路基稳定性评价的分级标准

Table 1 The classification criterion of subgrade stability in Karst Area

路基稳定性等级 Level of subgrade stability	评价结果 The evaluation results	风险程度及管理建议 The degree of risk and management suggestions
I 级	路基极不稳定	风险不可接受,需进行方案研究,考虑变更设计进行路线绕避
II 级	路基不稳定	风险部分可接受,需采取一定的治理措施进行控制
III 级	路基一般稳定	风险可接受,需引起重视,施工期间加强监管监控
IV 级	路基较稳定	风险可容许,需引起注意,进行正常施工和管理
V 级	路基稳定	风险可忽略,进行正常施工和管理

每级评价指标都根据干线公路功能及建设标准按单因素分类法设置一个取值标准,分级标准见表 2 与表 3,并据此构建岩溶区路基稳定性评价指标的测度函数,进而确定各评价指标的未确知测度值。定量指标的单指标测度函数见图 2~图 10。

表 2 岩溶路基稳定性评价模型的定量指标分级标准

Table 2 Classification criterion of quantitative indexes in stability evaluation of subgrade in Karst Area

稳定性等级 Stability level	抗压强度 I ₁ /MPa Compressive strength	岩体完整性指数 I ₂ /K _v Integrity index of rock mass	岩体软化系数 I ₃ /K _w Softening coefficient of rock mass	顶板厚度 I ₄ /m Thickness of top plate	溶洞跨度 I ₅ /m Cave span	覆土厚度 I ₁₀ /m Thickness of covering soil	地下水位变幅 I ₁₁ /m Variation of underground water	路线与岩层构造线夹角 I ₁₃ /° Angle of route and strata tectonic line	交通量 I ₁₄ /pcu·h ⁻¹ Traffic flow
I 级(C ₁)	≤5	≤0.15	≤0.40	≤1.5	≥7.0	≤6	≥2.0	≤30	≥2500
II 级(C ₂)	15~5	0.35~0.15	0.55~0.40	1.5~3.0	5.0~7.0	10~6	2.0~1.0	45~30	2100~2500
III 级(C ₃)	30~15	0.55~0.35	0.68~0.55	3.0~4.5	3.0~5.0	15~10	1.5~1.0	60~45	1700~2100
IV 级(C ₄)	60~30	0.75~0.55	0.80~0.68	4.5~6.0	1.5~3.0	20~15	1.0~0.5	75~60	1200~1700
V 级(C ₅)	>60	>0.75	>0.80	>6.0	<1.5	>20	<0.5	>75	<1200

表 3 岩溶路基稳定性评价模型的定性指标分级标准

Table 3 Classification criterion of qualitative indexes in stability evaluation of subgrade in Karst Area

影响程度分级 Grade of effect	赋值 Value given	岩溶发育情况 Degree of karst development	高跨比 High-span ratio	充填情况 Filling situation	裂隙发育及胶结情况 Development of fissures and cementation	地下水发育情况 Groundwater developmental situation	车辆荷载强度 Vehicle load strength	车辆荷载动态效应 Dynamic effect of vehicle load
I 级(C ₁)	1	极发育	不利	无充填	极发育且少数胶结	地下水相当丰富,有大量涌水	大	强
II 级(C ₂)	2	发育	稍微有利	少部分充填	发育且少数胶结	地下水丰富,有少量涌水	较大	较强
III 级(C ₃)	3	较发育	一般有利	半充填	发育且大部分胶结	地下水较发育	一般	一般
IV 级(C ₄)	4	稍发育	有利	大部分充填	稍发育且多数胶结	地下水发育	较小	较弱
V 级(C ₅)	5	不发育	非常有利	全充填	不发育或稍发育但胶结好	地下水不发育	小	弱

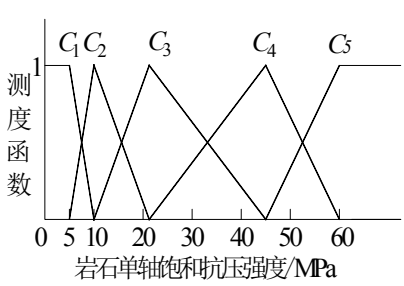


图 2 岩石单轴饱和抗压强度的单指标测度函数
Fig.2 Single-index measurement function of single-axe saturated rock's compression strength

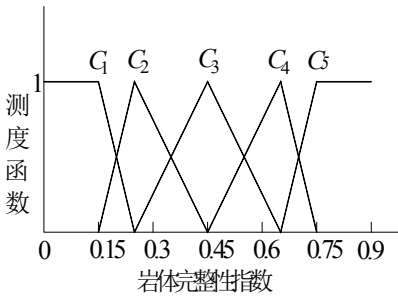


图 3 岩体完整性系数的单指标测度函数
Fig.3 Single-index measurement function of rock mass intact coefficient

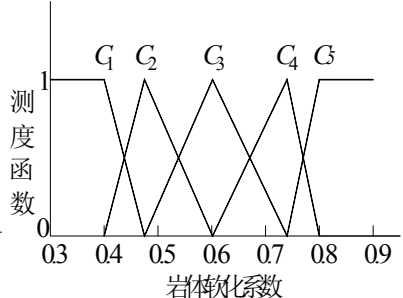


图 4 岩体软化系数的单指标测度函数
Fig.4 Single-index measurement function of rock mass softening coefficient

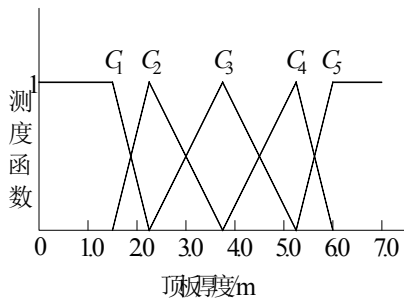


图 5 顶板厚度的单指标测度函数
Fig.5 Single-index measurement function of top plate thickness

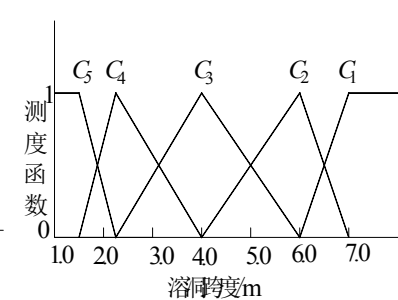


图 6 溶洞跨度的单指标测度函数
Fig.6 Single-index measurement function of cave's span

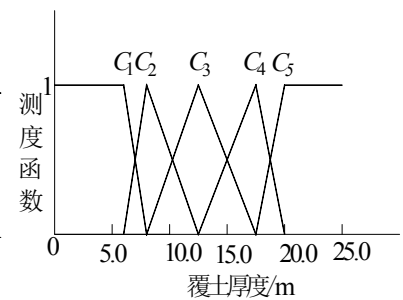


图 7 覆土厚度的单指标测度函数
Fig.7 Single-index measurement function of soil thickness

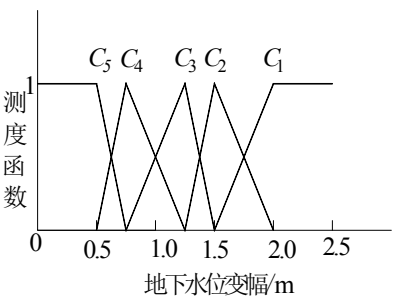


图 8 地下水位变幅的单指标测度函数
Fig.8 Single-index measurement function of amplitude of ground water level

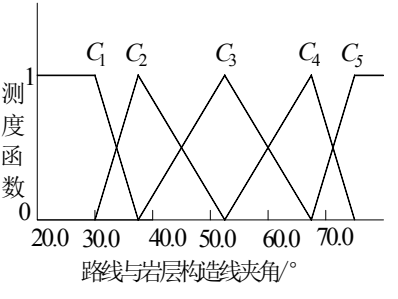


图 9 路线与岩层构造线夹角的单指标测度函数
Fig.9 Single-index measurement function of angle of route and rock structure line

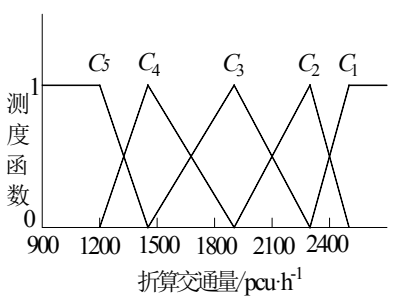


图 10 预测交通量的单指标测度函数
Fig.10 Single-index measurement function of forecasting traffic

3 实例应用

3.1 确定单指标测度矩阵

湖南省石门县冉闫公路项目所在地属中低山地貌, 沿线主要为山地, 区域地质稳定、地质构造简单且沿线存在多处岩溶发育地质段。施工期间分别在 K10+800(1#)与 K11+580(2#)处发现两处溶洞。根据现场资料, 各指标统计值见表 4, 通过计算得到单指标未确知测度矩阵。

表 4 岩溶路基各评价指标统计值

Table 4 Measured data of all indexes of subgrade in Karst Area

路基编号 NO. of subgrade	评价指标 The evaluation index															
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}
1#	32.6	0.79	0.82	6.2	2.4	4	2	3	4	1	0.3	5	48	1654	5	2
2#	30.4	0.68	0.76	7.1	1.8	3	3	2	3	1	0.2	5	82	1654	3	2

$$(\mu_{1jk})_{16 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5221 & 0.4779 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.1000 & 0.9000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.3000 & 0.7000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3804 & 0.6196 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (\mu_{2jk})_{16 \times 5} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6147 & 0.3853 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7879 & 0.2121 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0.3333 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.3804 & 0.6196 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 计算各评价指标权重

由公式(2)、(3)可得, 1#段路基和 2#段路基各评价指标权重向量分别为:

$$W_1 = \{0.0391, 0.0686, 0.0686, 0.0686, 0.0547, 0.0686, 0.0686, 0.0686, 0.0686, 0.0686, 0.0686, 0.0686, 0.0426, 0.0403, 0.0686, 0.0686\};$$

$$W_2 = \{0.0405, 0.0470, 0.0418, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0692, 0.0406, 0.0692, 0.0692\};$$

3.3 预测结果

由公式(4)得多指标未确知测度矩阵:

$$(\mu_{ik})_{2 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.0686 & 0.1653 & 0.1493 & 0.2052 & 0.4116 \\ 0.0692 & 0.1538 & 0.3268 & 0.1497 & 0.3697 \end{bmatrix}$$

选取置信度 $\lambda=0.5$, 由式(5)可得 1#段路基和 2#段路基的风险性等级分别为IV级、III级。即 1#段路基较稳定, 风险可容许, 需引起注意, 可进行正常施工管理; 2#段路基稳定性一般, 风险部分可接受, 需采取一定的治理控制措施。这与采用专家经验法及模糊评判分析法得到的结果相符, 设计人员根据本次评价结果对 2#路段设计现浇钢筋混凝土板上跨该溶槽。

4 结论

(1) 基于未确知测度理论, 建立岩溶区公路路基稳定性评价模型, 综合考虑溶洞岩体特征、溶洞特性及工程环境特征等影响因素的相互作用, 对岩溶区公路路基稳定性进行评价分级, 将路基稳定性分为极不稳定、不稳定、一般稳定、较稳定、稳定五个等级, 并根据评判等级对公路施工管理给出相应的建议。

(2) 对影响岩溶区路基稳定性的因素进行分析, 选取岩溶区公路路基下伏岩溶的岩体单轴饱和抗压强度、岩体完整性系数、岩体软化系数、顶板厚度、溶洞跨度、岩溶发育情况、高跨比、溶洞充填情况、裂隙发育及胶结情况、顶板上覆土厚度、地下水位变幅、地下水发育情况、公路路线与岩层构造线夹角、折算交通量、车辆荷载强度、车辆荷载动态效应共计十六项指标作为该评判模型的判别指标。

(3) 将该模型对湖南省石门县干线公路两段下伏岩溶路基进行稳定性评价。分析结果表明, 两段岩溶路基风险等级分别为: 1#段路基风险性等级为Ⅳ级, 2#段路基风险性等级为Ⅲ级。根据分析结果, 1#段路基可进行正常施工管理; 设计人员针对 2#段路基设计现浇钢筋混凝土板上跨该区域。该评价模型具有可靠性, 可作为公路设计人员进行岩溶路基稳定性分析的方法, 具有推广价值。

(4) 该模型在地质因素方面只考虑了对溶洞影响较大的围岩性质以及道路通行情况, 工程土体的性质, 地下水等, 气候、最大降水等因素尚未在系统中反映, 有待进一步研究将其完善。

参考文献

- [1] 马 磊,毛雪松,刘保健,等.中国道路工程学术研究综述[J].中国公路学报,2013,26(3):1-36
- [2] Jiang Chong, Zhao Ming-hua, Cao Wen-gui. Stability analysis of subgrade cave roofs in karst region[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008,15:38-44
- [3] 龚先兵,赵明华,张永杰.桩端下伏溶洞顶板稳定非概率可靠性分析方法[J].湖南大学学报,2011,38(1):13-17
- [4] 孙映霞,张智浩,张慧乐.岩溶区桩基稳定性影响参数敏感性分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):297-303
- [5] 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
- [6] LIU KD, CAO QK, PANG YJ. A method of fault diagnosis based on unascertained set [J]. Acta Automatic Sinica, 2004,30(5):747-756
- [7] 朱兴琳,方守恩,王俊骅.基于未确知测度理论的高等级公路交通安全评价[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(7):1012-1017
- [8] Yan Hui-zhe, Ma Li-hua, Chen Ming-ming. Research on assessing about the index of county agriculture science and technology innovation ability based on the uncertainty measurement theory[C]//Advanced in control engineering and information science, 2011:4763-4767
- [9] DONG Long-jun, PENG Gang-jian, FU Yu-hua, *et al.* Unascertained measurement classifying model of goaf collapse prediction[J]. Journal of Coal Science & Engineering: English Edition, 2008,12(2):221-224
- [10] LIU Ai-hua, DONG Lei, DONG Long-jun. Optimization model of unascertained measurement for underground mining method selection and its application [J]. Journal of Central South University of Technology, 2010,17:949-961
- [11] ZHOU Jian, LI Xi-bing. Integrating unascertained measurement and information entropy theory to assess blastability of rock mass[J]. Journal of Central South University, 2012(7):1953-1960
- [12] 中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范 GB 50021-2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2009
- [13] 张永杰,曹文贵,赵明华,等.岩溶区公路路基稳定性的区间模糊评判分析方法[J].岩土工程学报,2011,33(1):38-44
- [14] 程 晔,曹文贵,赵明华.高速公路下伏岩溶顶板稳定性二级模糊综合评判[J].中国公路学报,2003,16(4):21-24
- [15] 苏永华,封立志,蒋德松.西南山区公路建设场地模糊分类系统研究[J].湖南大学学报,2008,35(3):19-23
- [16] 中交第一公路勘察设计研究部.公路路线设计规范 JTG D20-2006[S].北京:人民交通出版社,2006
- [17] 工程地质手册编写委员会.工程地质手册[M].第IV版.北京:中国建筑工业出版社,2007
- [18] 交通部第二公路勘察设计院.公路设计手册:路基[M].第II版.北京:人民交通出版社,1997