

公路边坡安全模糊综合预警方法

李元松,段 鑫,李 洋

(武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:针对目前单一判据评判公路边坡稳定性状态存在种种不足的现状,分析了公路边坡地质灾害发生的特点和影响边坡安全的主要因素,提出了安全模糊综合预警方法.运用案例统计回归分析法、数值模拟分析法和边坡围岩蠕变理论,分别确定公路边坡稳定极限状态的累计位移阈值、降雨量阈值、变形速率阈值与变形加速度阈值.在此基础上,运用专家评分法确定各判据的权重,构建判断矩阵,经模糊逻辑推理判明边坡稳定性状态,从而实现安全预警.利用所建预警模型分析边坡近两年的监测数据,进行了两次预警,其最危险结果均达到Ⅲ级.结果表明:预警结果与实际情况完全吻合,在该工程中取得了良好的效果,很好的弥补单一判据的局限性.

关键词:公路边坡;模糊推理;多判据;预警方法

中图分类号:TU 443 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.03.006

0 引 言

边坡稳定性预测预报、监测预警研究涉及到工程地质调查,数据库建立,滑坡实时监测,信息采集、传输、处理和管理,预警判据的研究,预警模型和预警信息发布等众多学科的交叉领域.其中,最为关键的问题是稳定性判据与预警阈值的确定.由于地质环境条件复杂多变,人们对滑坡机理的认识不足,尽管各类判据均有成功的案例,但仍存在高度的不协调和不统一,目前还处于探索阶段^[1-4].模糊理论由于能综合考虑各种不确定性因素的作用,特别适用于边坡工程稳定性预测和评价^[5-8].本文试图将基于监测与调查数据的几种常用判据作为评价因子,结合专家经验与案例分析赋予各因子权重,运用模糊逻辑推理,确定边坡稳定性综合预警等级,为高速公路灾害预警系统建立提供科学的理论依据.

1 模糊评价步骤

模糊评判模型可分为多级模型,以一级模型为例,模糊综合评判步骤可归纳为^[9]:

a. 建立评判因素集 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$.因素就是对象的各种属性,它们能综合反映对象的质量,可由因素评价对象.

b. 建立评判结果集 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$.评判集是适应度的集合.

c. 建立评判关系,即从 G 到 $F(H)$ 的模糊映射:

$$f: G \rightarrow F(H), \forall g_i \in G$$

$$R_j = f(g_j) = \frac{r_{j1}}{h_1} + \frac{r_{j2}}{h_2} + \dots + \frac{r_{jm}}{h_m}$$

式中: r_{ji} 为第 j 个因素对 i 个等级的隶属度.

n 个因素对 m 个等级评判隶属度构成的矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

d. 模糊综合评判.对 G 中各因素有不同的权重,可表示为 H 中的一个模糊子集 $A = (W_1, W_2, \dots, W_n)$,并且有 $\sum_{i=1}^n = 1$.在给定 R, A 之后,模糊综合评判模型为 $B = A \circ R$.假设 $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$,它为 H 中的一个模糊子集.根据 $A \circ R$ 的不同算法,相应有不同的评价模型.

2 边坡综合安全预警模型

2.1 评价因子

2.1.1 安全系数 安全系数是指通过极限平衡法、极限分析理论或有限元强度折减法计算的边坡稳定性系数.安全系数小于 1,边坡不稳定;安全系数大于 1,边坡稳定;安全系数等于 1 时,边坡处于临界状态.安全系数适用于边坡的长期预

报,是长期预报中的常用判据。

2.1.2 监控点累计位移 滑坡预报的方法或手段有较多,但最有效的是位移监测。在均质岩土体与特定的环境条件下,边坡的稳定性与监测监控点的位移密切相关。隧道围岩稳定性位移判别是在隧道施工实测位移 U 与隧道极限位移 U_0 之间建立判别准则,即: $U < U_0$ 时,隧道围岩稳定; $U > U_0$ 时,隧道围岩不稳定。近年来,根据位移-时间曲线变化趋势预报边坡滑动时间是常用的方法。

2.1.3 边坡变形速率 边坡滑坡的发生属围岩物质以一定的速度沿特定滑移面向下移动所致。因此以物质变形速率的大小作为滑坡发生的预报判据更直观、更可靠。目前,业界都直接或间接使用边坡变形速率作为判据对边坡作出临滑预报。但边坡变形速率受边坡围岩物质组成、变形破坏方式以及外界诱发因素等诸多因素影响,失稳前的变形速率存在很大差异,要确定统一的边坡变形速率判据是不现实的。用变形速率作为边坡临滑判据时,必须对所预报边坡进行深入的工程地质调查分析。

2.1.4 变形加速度 大量滑坡实例的监测数据表明:在重力作用下,边坡岩土体的变形演化曲线具有如图1所示的演化特征^[10]。

研究表明,边坡岩体进入加速变形阶段是滑坡发生的基础和前提,加速变形阶段对于滑坡的预测预报具有重要意义。加速度 $a > 0$ 可以作为边坡预警的一项指标。

2.1.5 降雨强度 降雨量判据是指一定地区突降大暴雨或持续降大雨,降雨量达到一定量使

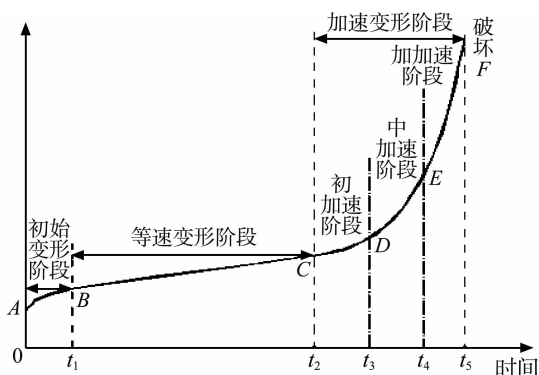


图1 边坡变形演变过程

Fig.1 Evolution process of slope deformation

潜在危险的边坡围岩发生失稳和快速滑动;属于外施的临界诱发判据,不同地区的边坡结构和地质环境条件差异较大,诱发滑坡的临界降雨量存在较大差异,仍然难以形成统一的通用判据。但是,由于降雨量易于监测,特别易于连续实时监测和数据传输,是目前使用较为成功的滑坡预

警判据。

因此,选取上述5种判据作为评价因子,建立评价因子模糊集合:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$$

边坡预警等级分为稳定、一级、二级、三级和四级,建立模糊集合:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

2.2 隶属度的确定

对于上述离散型变量的隶属度的取值,目前还没有精确的确定方法,只能根据专家经验,结合现场情况评定,其值可参考表1^[10-11]。

2.3 各因子权重的确定

确定评价边坡稳定性因子的权重有多种方法。因边坡环境的复杂性、模糊性和不可逆性,用精确的数学模型难以求得评价因子的权重。往往由于对边坡的地质、力学条件和环境条件分析不够,而过分地相信数学模型,反而使权重不尽合理;相反,根据专家的经验综合判断,其结论相对较为可靠。本文采用层次分析法,结合专家经验判断建立适当的数学模型,经运算确定权重,是一种较为合理、可行、新颖的系统分析方法^[12-13]。层次分析法确定权重的矩阵 T 。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 & 4/5 & 3/4 & 3/4 \\ 3/2 & 1 & 4/3 & 3/4 & 3/4 \\ 5/4 & 3/4 & 1 & 3/4 & 3/5 \\ 4/3 & 4/3 & 4/3 & 1 & 5/4 \\ 4/3 & 4/3 & 5/3 & 4/5 & 1 \end{bmatrix}$$

然后分别按下列步骤进行和积法运算:

第一步,将判断矩阵每一列归一化:

$$\bar{u}_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^m u_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

第二步,每一列归一化的判断矩阵按行相加:

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^m \bar{u}_{kj} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

第三步,对向量: $\bar{w}_i = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_m)^T$ 作正则化处理:

$$\bar{a}_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^m \bar{w}_j} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

依次求得 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$,即为所求权重向量。

$$A = \{0.16, 0.20, 0.17, 0.24, 0.23\}$$

2.4 边坡综合预警

依据模糊综合评判理论,结合专家经验,按如下步骤确定预警等级:

a. 预警级别 = {正常,一级,二级,三级,四级};

表 1 边坡稳定性相关因素隶属度取值(离散型变量)

Table 1 The value of membership degree of evaluation factor with slope stability

评价因子	状态类别	隶属度 μ				
		正常	一级	二级	三级	四级
累计位移值* /mm	$<U_0/3$	1.0	0.3	0.1	0.0	0.0
	$U_0/3 \sim 2U_0/3$	0.3	0.6	0.5	0.1	0.0
	$2U_0/3 \sim 3U_0/4$	0.0	0.3	0.5	0.1	0.0
	$3U_0/4 \sim U_0$	0.0	0.0	0.3	0.6	0.3
	$>U_0$	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
变形速率* /(mm/d)	$<v_0/3$	0.8	0.7	0.3	0.0	0.0
	$v_0/3 \sim 2v_0/3$	0.5	0.6	0.5	0.2	0.0
	$2v_0/3 \sim 3v_0/4$	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5
	$3v_0/4 \sim v_0$	0.0	0.0	0.5	0.6	0.6
	$>v_0$	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8
变形加速度	>0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0
	$0.06 \sim 0.2$	0.3	0.3	0.7	0.8	0.8
	$-0.06 \sim 0.05$	0.5	0.5	0.8	0.9	0.5
	$-0.2 \sim -0.05$	0.8	0.8	0.5	0.6	0.3
	<-0.2	1.0	0.8	0.3	0.0	0.0
一次累计 降雨量/mm	$0 \sim 70$	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0
	$71 \sim 125$	0.3	0.7	0.2	0.0	0.0
	$126 \sim 150$	0.0	0.3	0.5	0.5	0.5
	$151 \sim 180$	0.0	0.0	0.5	0.6	0.6
	>180	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8
安全系数	>1.35	0.9	0.6	0.5	0.3	0.0
	$1.26 \sim 1.35$	0.8	0.6	0.7	0.5	0.5
	$1.10 \sim 1.25$	0.6	0.7	0.9	0.8	0.6
	$1.0 \sim 1.09$	0.5	0.8	0.8	0.9	0.8
	<1.0	0.0	0.0	0.3	0.8	1.0

* 此值因监测点位置不同而异,表中显示研究边坡最低点的阈值.

b. 判据因子集 $= \{ \text{累计位移, 变形速率, 变形加速度, 一次累计降雨量, 安全系数} \}$;

c. 权重集合 $A = \{0.16, 0.20, 0.17, 0.24, 0.23\}$;

d. 根据隶属度函数,确定因素的模糊隶属度,从而建立监控点单因素评判矩阵 R ;

e. 计算模糊评判集 $B = A \circ R$;

f. 根据最大隶属度准则确定边坡各监控点的预警等级.

3 工程应用

3.1 工程概况

宜巴高速第 3 标段, K23+353~K23+373 有一长 200 m, 高 60 m 边坡, 出露基岩为白垩系下统五龙组强~中风化粉砂岩, 节理裂隙发育, 岩体破碎, 属软质岩类, 力学强度较不均匀; 表层零星分布第四系残坡积粘性土等松散土层. 地下水为

基岩裂隙水, 水量受降雨控制, 设计按五级开挖. 由于其地质环境条件, 施工方法具有典型代表性, 因此选择该边坡作为背景工程. 设计降雨量监测仪 1 台, 地表位移 GPS 监测点 5 个, 自 2011 年 4 月安装, 至今已积累大量数据. 运用上述多判据综合模型, 研究宜巴高速公路边坡破坏的安全预警模式.

3.2 综合预警

运用上述综合预警模型, 对背景边坡 5 个监控点两年来的监测结果进行预警判断. 两次典型的预警数据及结果见表 2.

由表 2 可以看出, 两次预警最危险结果均达到 III 级. 上述各监控点具有一定的代表性, 其稳定性状态直接决定研究边坡整体的稳定性, 由此可以进一步推定研究边坡处于稳定状态; 事实上, 研究边坡自加固竣工两年来一直处于稳定状态, 与模型预测结果基本吻合.

表 2 背景边坡工程两次典型预警信息
Table 2 Studied slope samples used for model testing

日期/ 测点	累计位移/mm		变形速率/(mm/d)		变形加速度		降雨量/mm		安全系数		预警 级别	一致性 检验 ^[14]
	实测	阈值	计算	阈值	计算	阈值	测量	阈值	计算	阈值		
2011-7-25												
YDZ1	15.5	20.0	0.11	0.15	0	>0	150	180	1.25	1	II	
YDZ2	10.1	15.0	0.08	0.15	0	>0	150	180	1.25	1	II	$\lambda_{max}=5.25$
YDZ3	7.6	7.5	0.07	0.15	0	>0	150	180	1.25	1	III	$CI=0.06$
YDZ4	13.2	14.5	0.10	0.15	0	>0	150	180	1.25	1	II	$CR=0.05<0.1$
YDZ5	6.0	7.0	0.04	0.15	0	>0	150	180	1.25	1	II	
2012-8-20												
YDZ1	18.5	20.0	0.12	0.15	0	>0	170	180	1.20	1	III	
YDZ2	12.6	15.0	0.10	0.15	0	>0	170	180	1.20	1	II	$\lambda_{max}=5.30$
YDZ3	7.8	7.5	0.05	0.15	0	>0	170	180	1.20	1	II	$CI=0.075$
YDZ4	13.5	14.5	0.11	0.15	0	>0	170	180	1.20	1	II	$CR=0.07<0.1$
YDZ5	6.2	7.0	0.04	0.15	0	>0	170	180	1.20	1	II	

4 结 语

a. 边坡稳定性是一个模糊性非线性问题. 模糊理论能恰当地处理类似边坡工程稳定性等影响因素众多, 定量与半量化混合的问题, 能将专家经验有效结合, 逻辑推理明确, 用于边坡稳定性安全预警可较好地弥补传统单一判据的不足;

b. 工程实例应用表明, 本文提出的公路边坡模糊预警模型, 数据获取便捷, 意义明确, 效果良好. 综合预警结果表明: 目前研究边坡处于稳定状态.

致 谢

本文的研究工作是在宜巴高速指挥部的支持帮助下完成的, 在此表示诚挚的谢意!

参 考 文 献:

[1] 吴树仁, 金逸民, 石菊松, 等. 滑坡预警判据初步研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(4): 596-600.
WU Shu-ren, JIN Yi-min, SHI Ju-song, et al. A primary study on landslide warning criterion[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(4): 596-600. (in Chinese)

[2] 陈洪凯, 魏来, 谭玲. 降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 990-996.
CHEN Hong-kai, WEI Lai, TAN Ling. Review of research on empirical rainfall threshold of rainfall-Induced landslide[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(5): 990-996. (in Chinese)

[3] 易顺民. 滑坡活动时间预测预报研究现状与展望[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(2): 157-163.
YI Shun-min. Status and prospect of the temporal prediction of landslide activity[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(2): 157-163. (in Chinese)

[4] 李秀珍, 许强, 黄润秋. 滑坡预报判据研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 5-11.
LI Xiu-zhen, XU Qiang, HUANG Run-qi. Research on prediction criterion for temporary prediction of landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 5-11. (in Chinese)

[5] 徐卫亚, 蒋中明, 石安池. 基于模糊集理论的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 409-413.
XU Wei-ya, JIANG Zhong-ming, SHI An-chi. Slope stability analysis using fuzzy sets theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 409-413. (in Chinese)

[6] 李彰明. 模糊分析在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 16(5): 90-95.
LI Zhang-ming. Application of fuzzy analysis in slope stability evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 16(5): 90-95. (in Chinese)

[7] 刘端伶, 谭国焕, 李启光, 等. 岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 170-175.
LIU Duan-ling, THAM L G, LEE P K K, et al. The stability of rock slope and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 170-175. (in Chinese)

[8] 李建华. 岩坡稳定的层次模糊综合评价法[J]. 贵州

工学院学报,1992,21(4):27-35.

LI Jian-hua. The method of synthetical evaluation of hierarchy and fuzzy of rock slope stability[J]. Journal of Guizhou Institute of Technology 1992, 21(4): 27-35. (in Chinese)

- [9] 李元松,陈文峰,李新平. 基于模糊神经网络的边坡稳定性评价方法[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(1):113-118.

LI Yuan-song, CHEN Wen-feng, LI Xin-ping. Stability assessment of rock slope based on fuzzy neural network[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(1): 113-118. (in Chinese)

- [10] 许强,曾裕平. 具有蠕变特点滑坡的加速度变化特征及临滑预警指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1099-1106.

XU Qiang, ZENG Yu-ping. Research on acceleration variation characteristics of creep landslide and early-warning prediction indicator of critical sliding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1099-1106. (in Chinese)

- [11] 刘合寨,孙世国,阚生雷,等. 模糊综合评判在高陡边坡稳定性评价中的应用[J]. 北方工业大学学报, 2011, 22(3): 82-86.

LIU He-zhai, SUN Shi-guo, KAN Sheng-lei, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation to

high steep slope stability[J]. J North China Univ of Tech, 2011, 22(3): 82-86. (in Chinese)

- [12] 董永康,邓媛媛,张丛林. 巫奉高速公路边坡稳定性的模糊综合评价[J]. 公路交通科技, 2010(9): 169-171.

DONG Yong-kang, DENG Yuan-yuan, ZHANG Cong-lin. Fuzzy comprehensive evaluation on slope stability of Wufeng highway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010(9): 169-171. (in Chinese)

- [13] 任玉林,路勋,谷天峰. 西藏妥昌公路某土质边坡稳定性的模糊综合评判研究[J]. 公路交通科技, 2011(8): 138-140.

REN Yu-lin, LU Xun, GU Tian-feng. Fuzzy comprehensive evaluation on soil-slope stability of tuochong highway in Tibet[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011(8): 138-140. (in Chinese)

- [14] 张鸿,刘优平,黎剑华,等. 基于模糊理论的隧道施工安全预警模型研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(4): 5-9.

ZHANG Hong, LIU You-ping, LI Jian-hua, et al. Application and study of fore warning model for tunnel construction safety based on fuzzy theory [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(4): 5-9. (in Chinese)

Fuzzy comprehensive early-warning method for highway slope safety

LI Yuan-song, DUAN Xin, LI Yang

(School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aimed at the limitation of single criterion to judge the highway slope stability, fuzzy comprehensive early-warning method was put forward. Based on analyzing the characteristics of highway slope geological disaster and the main factors affecting the safety of slope, the thresholds of cumulative displacement, the rainfall amount, deformation rate and acceleration were determined using the statistical regression analysis, the numerical simulation and the characteristic of rock creep. Experts grading method was used to determine each criterion weight values. Consequently, the judgment matrix was formed. Finally the safety early-warning was carried out through fuzzy logic inference to judge the state of slope stability. Two early-warnings were conducted using the presented early-warning model in one slope, and the most dangerous result achieves III level with the observed data in recent two years. The results show that the early-warning results are consistent with the actual situation, and they make up for the limitations of a single criterion.

Key words: highway slope; fuzzy logic; multi-criterion; early-warning method

本文编辑: 龚晓宁