

基于模糊因素的岩质边坡地震稳定性 多模型组合评价

马 毅¹, 王希良², 刘 振¹, 郭阳阳²

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘 要: 岩质边坡地震稳定性评价是岩土边坡地震失稳防治的基础工作, 针对评价过程中评价因素的多源模糊性, 借鉴工程可变模糊集理论, 将模糊可变评价模型应用于岩质边坡地震稳定性评价中。综合考虑岩质边坡内在结构和外部自然条件, 选取岩土体特性、新构造运动特征、坡高、坡角、年均降雨量和场地地震烈度 6 个指标作为评价指标体系并建立等级标准; 将改进熵权算法引入该模型中, 利用指标实际数据离散性求权重; 通过改变模糊可变评价模型参数对岩质边坡地震稳定性进行线性与非线性组合评价, 并将均值作为最终评价结果。将该方法应用于天然边坡与路堑边坡实例中, 结果表明, 模糊可变评价模型评价结果合理、客观, 具有更高的可靠性与稳定性, 为岩质边坡地震稳定性评价工作提供了一种新的研究方法思路。

关 键 词: 岩质边坡; 地震; 边坡稳定性; 模糊集; 相对隶属度; 评价; 信息熵

中图分类号: TU 413.62; O 159

文献标识码: A

Multiple model combination evaluation of seismic stability of rock slopes based on fuzzy factors

MA Yi¹, WANG Xi-liang², LIU Zhen¹, GUO Yang-yang²

(1. College of Transportation, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China; 2. College of civil engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Evaluation of seismic stability of rock slopes is the important foundation for prevention of seismic instability of rock and soil slopes. In view of the multi-source and fuzzy characteristics in evaluation process, by using engineering variable fuzzy set theory for reference, fuzzy variable evaluation model is applied to evaluate the seismic stability of rock slopes. First, by comprehensive consideration of the rock slopes internal structure and external natural conditions, six parameters including the characteristics of the geotechnical body, the characteristics of the neotectonics, slope height, slope angle, the annual average precipitation, site seismic intensity are selected as the indices for evaluation index system and established rating standard, then the weights of evaluation factors in the model are obtained from the index practical data discreteness by using improved entropy weight method; finally, by changing the fuzzy variable evaluation model parameters to evaluated seismic stability of rock slopes by linear and nonlinear, and obtained stability level by mean value. The method has been applied to natural slope and cutting slope instances. The results show that the fuzzy variable evaluation model results are reasonable and objective; and they have better reliability and stability so as to provide a new research method and idea for seismic stability of rock slopes.

Key words: rock slopes; earthquake; slope stability; fuzzy set; relative membership degree; evaluation; information entropy

1 引 言

解决岩质边坡稳定性与地震诱发边坡失稳的矛盾一直是岩土工程界与地震工程界研究的热点之一, 特别是针对山地丘陵地区, 加上交通、水电枢

纽、矿山等基础工程的建设, 使得这些地区含有大量自然边坡与人工边坡, 迫切需要对岩质边坡地震稳定性进行分析评价。

目前, 对岩质边坡地震稳定性的评价研究, 从评价体系的构建到分析方法的选用均无统一规范,

已有较为成熟的几类方法有拟静力法、滑块分析法、数值模拟法、试验法^[1], 研究地震作用下岩质边坡的岩土体行为、动力特征及破坏机制, 适用于 3 级评价预测^[2]。近几年, 应于区域性多点评价和预测的需要, 灰色聚类法^[3]、综合指标法^[4]、属性识别法^[5]、突变级数法^[6]等也引入到岩质边坡地震稳定性评价研究, 这类方法建立在研究岩质边坡地震稳定性影响因子的基础上, 要求必须建立能系统反映岩质边坡地震失稳的指标体系, 从应用的结果来看, 评价结果较难达到统一。

岩质边坡地震稳定性本身是一个复杂的问题, 包含大量模糊不确定信息, 且信息往往难以用准确的数值来表示, 如何在岩质边坡地震稳定性评价工作中找到一种可靠性较高、评价结果较为稳定的方法是一大难题。鉴于此, 本文借鉴工程可变模糊集理论, 将模糊可变评价法应用于岩质边坡地震稳定性评价中, 利用其独特的可变评价模型进行线性与非线性的组合评价, 试图探索出一种在岩质边坡地震稳定性中适用范围更广、评价结果更为稳定、可靠的理论方法。

2 模糊可变评价模型

模糊可变评价模型是在可变模糊集理论的基础上建立的, 可变模糊集理论是大连理工大学陈守煜^[7]教授于 2005 年提出的, 以模糊理论为基础, 运用辩证唯物理论关于相对性、差异性的思想, 将隶属度与隶属函数作为一个可变量, 建立起的一种以相对隶属度为基础的工程可变模糊集理论方法。

2.1 可变模糊集定义

可变模糊集合定义^[7]: 设论域 U 上的一个模糊概念 A , 对 U 中的任意元素 $u (u \in U)$, 对于相对隶属度函数的连续轴上任一点, u 对表示吸引性质 A 的相对隶属度为 $\mu_A(u)$, 对表示排斥性质 A^c 的相对隶属度为 $\mu_{A^c}(u)$, 设

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u) \quad (1)$$

称 $D_A(u)$ 为 u 对 A 的相对差异度。映射

$$\begin{cases} D_A: D \rightarrow [-1, 1] \\ u \mapsto D_A(u) \in [-1, 1] \end{cases} \quad (2)$$

称 u 为 A 对的相对差异度函数。

由模糊集的余集定义

$$\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1 \quad (3)$$

推导:

$$\mu_A(u) = (1 + D_A(u)) / 2 \quad (4)$$

根据对立模糊集可得

$$V = \{(u, D) | u \in D, D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u), D \in [-1, 1]\} \quad (5)$$

$$A_+ = \{u | u \in U, \mu_A(u) > \mu_{A^c}(u)\} \quad (6)$$

$$A_- = \{u | u \in U, \mu_A(u) < \mu_{A^c}(u)\} \quad (7)$$

$$A_0 = \{u | u \in U, \mu_A(u) = \mu_{A^c}(u)\} \quad (8)$$

式中: V 称模糊可变集合; A_+ 、 A_- 、 A_0 分别为模糊可变集合 V 的吸引域、排斥域和渐变式质变域。

2.2 相对差异函数模型^[7]

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 V 的吸引域, 即 $\mu_A(u) > \mu_{A^c}(u)$ 区间, $X = [c, d]$ 为包含 $X_0 (X_0 \subset X)$ 的某一上下界范围域区间, M 为吸引域 $[a, b]$ 区间的中点值, 由模糊可变集合定义可知 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均为其排斥域, 即 $\mu_A(u) < \mu_{A^c}(u)$ 区间。 X_0 、 X 、 M 的关系如图 1 所示。



图 1 点 M 与区间 X_0, X 的位置关系

Fig.1 Relationship between point M and interval X_0, X

设 x 为实轴上任意点的量值, 根据 x 与吸引域 X_0 和范围域 X 的关系, 求相对差异度 $D_A(u)$ 。

①若 x 落入点 M 左侧, 则

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right); x \in [a, M] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right); x \in [c, a] \end{cases} \quad (9)$$

②若 x 落入点 M 右侧, 则

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right); x \in [M, b] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b}\right); x \in [b, d] \end{cases} \quad (10)$$

③若 x 不在范围域 X 内, 则

$$D_A(u) = -1; x \notin (c, d) \quad (11)$$

$D_A(u)$ 确定以后, 即可利用式 (4) 求相对隶属度 $\mu_A(u)$ 。

2.3 模糊可变评价模型

设样本评价指标体系为 $R = (r_1, r_2 \cdots r_m)$, 等级标准 $C = (c_1, c_2 \cdots c_n)$, 为了得到样本对于各级别的综合相对隶属度, 应用式 (12) 模糊可变评价模型计算公式, 计算综合相对隶属度,

$$\mu_h = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_A(u_{ih}))]^p}{\sum_{i=1}^m (w_i \mu_A(u_{ih}))^p} \right]^{\frac{a}{p}}} \quad (12)$$

式中: $i=1,2,\dots,m$; $h=1,2,\dots,n$; μ_h 为样本关于级别 h 的非归一化综合相对隶属度; w_i 为指标权重; $\mu_A(u_{ih})$ 为样本指标 I_i 隶属于级别 h 相对隶属度; a 为模型优化准则参数; p 为距离参数。

由于 a , p 为可变参数, 因此, 该评价模型是可变的, 在研究中, 取参数 $a=1$, $p=1$, 此时为线性评价模型, 即模糊综合评估模型; 取参数 $a=1$, $p=2$, 此时为非线性评价模型, 即理想点模型; 取参数 $a=2$, $p=1$, 此时为一特殊非线性评价模型; 取参数 $a=2$, $p=2$, 此时为非线性评价模型, 即模糊优选模型^[8]。应用中通常对评价对象进行上述线性与非线性组合评价, 以获得稳定性与可靠性较高的评价结果。

利用式 (12) 计算出综合相对隶属度之后, 用级别特征值式 (13) 评价各样本的等级:

$$H = \sum_{h=1}^c (\mu'_h h) \quad (13)$$

式中: $\mu'_h = \mu_h / \sum_{h=1}^c \mu_h$

3 实例应用

以四川叠溪、炉霍和云南龙陵3次地震中的4个失稳边坡、云南丽江地震中的4个稳定边坡、云南通海、昭通2次地震中的4个失稳的路堑边坡以及河北邢台、云南通海、辽宁海城3次地震中的4个稳定边坡为例, 对其进行岩质边坡地震稳定性评价, 借以说明模糊可变评价方法在岩质边坡地震稳定性评价中的适用性。

3.1 指标体系与等级标准的建立

统计资料表明, 岩质边坡地震稳定性与边坡本身地质、地貌以及边坡所处的自然地理环境均有关系, 建立系统科学的评价指标体系必须从上述两点来考虑, 并将岩质边坡地震失稳滑移影响因素分为内部因素和外部因素, 内部因素是边坡本身具备失稳产生的内在条件, 如岩土性质结构、新构造运动、地质构造等, 外部因素是各种作用在边坡上, 促使其内部条件发生变化的因素, 如地震、降雨、地下水等。另外, 岩质边坡地震失稳滑移的产生并不需要具备上述所有条件, 应根据边坡所处地域, 统计以往地震边坡失稳资料, 对上述影响因素进行适当的“数据挖掘”, 以与该地区边坡失稳滑移有必然联系的影响因素作为评价指标, 确保其实用性与可测量性。王余庆等^[3]通过统计西部地区地震与失稳滑移的关系, 建立了一套较完善的指标体系与等级标准, 该指标体系与等级标准在文献[3-6]的应用中取得

了较好结果。因此, 本文借鉴其研究成果, 并参考文献[9], 同时考虑评价地域的实际情况, 选取岩土体特性 r_1 、新构造运动特征 r_2 、坡高 r_3 、坡角 r_4 、年均降雨量 r_5 和场地地震烈度 r_6 6个参数作为岩质边坡地震失稳的评价指标, 将评价等级分为5级, 即I级表示极稳定、II级表示稳定、III级表示中等稳定、IV级表示不稳定和V级表示极不稳定, 将岩土体特性、新构造运动特征两定性指标进行量化, 见表1, 并将最终评价指标等级标准列于表2。

表1 岩土体结构完整性及构造运动特征分级与等级赋值
Table 1 Geotechnical mass structural integrity and tectonic movement feature classification and rating assignment

编号	岩土体特性	新构造运动特性	影响程度	等级赋值
1	岩石坚硬, 结构完整	新构造运动微弱, 没有发生过6级以上地震, 只有少量小型断裂	低	I
2	岩石较坚硬, 结构较完整	新构造运动不强烈, 发生少量6级以上地震, 只有小型断裂	较低	II
3	岩石较破碎, 结构不完整	新构造运动较强烈, 发生过6级以上地震, 有主干断裂	中等	III
4	岩石破碎, 岩土体不完整	新构造运动强烈, 发生过7级以上地震, 大型断裂带, 断裂较密集	高	IV
5	岩石特别破碎, 软弱结构面发育, 岩土体特别不完整, 有易滑地层	新构造运动特别强烈, 发生过多次7级以上地震, 巨大断裂带, 断裂复合带, 断裂复合带	很高	V

表2 岩质边坡地震稳定性评价指标等级标准
Table 2 Rock slope seismic stability evaluation index level standard

评价指标	等级标准				
	I级: 极稳定	II级: 稳定	III级: 中等稳定	IV级: 不稳定	V级: 极不稳定
r_1 : 岩土体特性	1	2	3	4	5
r_2 : 新构造运动特征	1	2	3	4	5
r_3 : 坡高/m	(0, 75]	(75, 175]	(175, 300]	(300, 500]	(500, +∞)
r_4 : 坡角(滑坡)/(°)	(0, 10]	(10, 20]	(20, 30]	(30, 40]	(40, 90]
r_5 : 年均降雨量/mm	(0, 400]	(400, 800]	(800, +∞)	(800, +∞)	(800, +∞)
r_6 : 场地地震烈度/度	(0, 5]	(5, 6]	(6, 7]	(7, 8]	(8, 12]

3.2 权重系数的确定

引入信息论中的信息熵原理^[10-12]求权重, 其理论依据在于, 指标的离散程度越强, 熵值就越大; 反之, 熵值就越小。岩质边坡地震稳定性评价过程中包含大量模糊不确定信息, 因此, 熵值原理能够作为岩质边坡地震稳定性评价的赋权方法, 应用于本文, 其主要计算步骤如下:

①假设评价对象的评价指标 r_i 隶属于等级 h 的相对隶属度为 $\mu_A(u_{ih})$, 则指标的信息熵为

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{h=1}^n \mu_A(u_{ih}) \ln \mu_A(u_{ih}) \quad (14)$$

显然上式在 $\mu_A(u_{ih})=0$ 时, $\ln \mu_A(u_{ih})$ 无意义, 因此, 对 e_i 进行修正, 修正后的信息熵定义为

$$e'_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{h=1}^n [\mu_A(u_{ih}) + 1] \ln [\mu_A(u_{ih}) + 1] \quad (15)$$

②定义第 i 个指标的差异因素:

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [0,1.5] & [1.5,2.5] & [2.5,3.5] & [3.5,4.5] & [4.5,5.5] \\ [0,1.5] & [1.5,2.5] & [2.5,3.5] & [3.5,4.5] & [4.5,5.5] \\ [0,75] & [75,175] & [175,300] & [300,500] & [500,1\ 000] \\ [0,10] & [10,20] & [20,30] & [30,40] & [40,90] \\ [0,400] & [400,800] & [800,1\ 050] & [1\ 050,1\ 375] & [1\ 375,2\ 500] \\ [0,5] & [5,6] & [6,7] & [7,8] & [8,12] \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [0,2.5] & [0,3.5] & [1.5,4.5] & [2.5,5.5] & [3.5,5.5] \\ [0,2.5] & [0,3.5] & [1.5,4.5] & [2.5,5.5] & [3.5,5.5] \\ [0,175] & [0,300] & [75,500] & [175,1\ 000] & [300,1\ 000] \\ [0,20] & [0,30] & [10,40] & [20,90] & [30,90] \\ [0,800] & [0,1\ 050] & [400,1\ 375] & [800,2\ 500] & [1\ 050,2\ 500] \\ [0,6] & [0,7] & [5,8] & [6,12] & [7,12] \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: 范围域 $[c,d]$ 的上下限是吸引域 $[a,b]$ 上下限外延一个标准域的结果, 若 $a(b)$ 为指标值域边界, 则 $c=a(d=b)$ 。

$$M_{6 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.75 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0.75 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 37.5 & 125 & 237.5 & 400 & 750 \\ 5 & 15 & 25 & 35 & 65 \\ 200 & 600 & 925 & 1\ 212.5 & 1\ 937.5 \\ 2.5 & 5.5 & 6.5 & 7.5 & 10 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: 点值 M_{ih} ($i=1,2,\dots,6; h=1,2,\dots,5$) 取吸引域 $[a,b]$ 的中点。

本例中所采集数据^[3]如表 3 所示。

根据表 3 中指标原始值与 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M_{ih} 的关系, 利用式 (9)~(11) 计算出相对差异度, 并由式 (4) 计算出指标观测值隶属于等级 h 相对隶属度。

按照修正后的熵权算法, 应用式 (15)~(17) 计算得指标权重, $W=(0.212\ 9, 0.187\ 1, 0.149\ 3, 0.164\ 1, 0.157\ 8, 0.128\ 8)$

模糊可变评价模型中取 $a=1$, $p=2$ 为例, 并结合表 3 中 16 个岩土边坡数据说明综合相对隶属度矩阵求导过程。由式 (12) 解得综合相对隶属度, 并归一化处理, 得标准综合隶属度矩阵。

$$g_i = 1 - e'_i \quad (16)$$

③计算第 i 个指标的权重:

$$\omega_i = g_i / \sum_{i=1}^n g_i \quad (17)$$

得指标体系的权重向量: $W=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$

3.3 评价过程

表 2 中尚未给出指标 r_3 与 r_5 的上限值, 且某些指标等级划分相对“粗糙”。本文参考指标的物理意义, 在此基础上确定岩质边坡地震稳定性评价的吸引域矩阵 I_{ab} , 范围域矩阵 I_{cd} 以及点值矩阵 $M_{6 \times 5}$ 。

$$U' = \begin{bmatrix} 0 & 0.170\ 3 & 0.219\ 0 & 0.327\ 8 & 0.283\ 0 \\ 0.172\ 4 & 0.153\ 8 & 0.081\ 9 & 0.273\ 1 & 0.318\ 7 \\ 0.141\ 5 & 0.150\ 6 & 0.174\ 9 & 0.262\ 9 & 0.270\ 1 \\ 0.091\ 9 & 0.220\ 8 & 0.211\ 4 & 0.251\ 4 & 0.224\ 6 \\ 0.192\ 3 & 0.287\ 4 & 0.195\ 7 & 0.152\ 4 & 0.172\ 2 \\ 0.213\ 4 & 0.301\ 3 & 0.178\ 5 & 0.142\ 6 & 0.164\ 2 \\ 0.182\ 9 & 0.257\ 1 & 0.205\ 6 & 0.186\ 5 & 0.167\ 9 \\ 0.201\ 6 & 0.274\ 8 & 0.215\ 7 & 0.147\ 8 & 0.160\ 2 \\ 0.166\ 7 & 0.113\ 7 & 0.103\ 0 & 0.288\ 4 & 0.328\ 2 \\ 0.106\ 3 & 0.122\ 6 & 0.202\ 5 & 0.302\ 2 & 0.266\ 5 \\ 0.123\ 3 & 0.133\ 6 & 0.198\ 4 & 0.291\ 7 & 0.253\ 0 \\ 0.113\ 1 & 0.121\ 0 & 0.211\ 9 & 0.300\ 0 & 0.254\ 0 \\ 0.240\ 7 & 0.239\ 1 & 0.085\ 9 & 0.211\ 8 & 0.222\ 4 \\ 0.231\ 1 & 0.247\ 4 & 0.120\ 4 & 0.213\ 6 & 0.187\ 5 \\ 0.216\ 9 & 0.241\ 4 & 0.119\ 9 & 0.215\ 5 & 0.206\ 3 \\ 0.185\ 1 & 0.218\ 5 & 0.203\ 2 & 0.233\ 7 & 0.159\ 4 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

根据式 (13) 计算出 16 个边坡的综合评价特征值

$$H = [1\ 2\ \dots\ 5] \begin{bmatrix} 0 & 0.172\ 4 & \dots & 0.185\ 1 \\ 0.170\ 3 & 0.153\ 8 & \dots & 0.218\ 5 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.283\ 0 & 0.318\ 7 & \dots & 0.159\ 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.72 & 3.41 & 3.37 & 3.30 & 2.82 & 2.74 & 2.90 & 2.79 \\ 3.50 & 3.50 & 3.42 & 3.46 & 2.94 & 2.88 & 2.95 & 2.95 \end{bmatrix} \quad (22)$$

表3 岩土边坡数据
Table 3 Data of rock and soil slopes

边坡类型	序号	地震	名称	评价指标					
				岩土体特性	新构造运动特性	坡高/m	坡角/(°)	年均降雨量/mm	场地地震烈度/度
天然边坡	1	四川叠溪	较长台滑坡	5	4	270	40	800	X
	2	四川炉霍	马山滑坡	5	5	100	65	750	IX
	3	云南龙陵	磺厂1号滑坡	5	3	40	46	2 122	VIII
	4	云南龙陵	对门坡1号滑坡	5	3	90	29	2 122	VII
	5	云南丽江	团山1号斜坡	2	5	80	22	937	V
	6	云南丽江	红水塘斜坡	2	5	120	14	937	VI
	7	云南丽江	黑水队2号斜坡	2	5	130	33	937	VI
	8	云南丽江	文化西南斜坡	2	5	169	25	937	V
路堑边坡	9	云南通海	晋元公路	5	4.5	35	45	800	X
	10	云南昭通	小绥公路木-青段	5	4	10	45	900	IX
	11	云南昭通	小绥公路K113	5	4	54	45	900	VIII
	12	云南昭通	小绥公路分-蒿段	5	4	15	60	900	VII
	13	河北邢台	石太路K17	2	5	28	79	650	VIII
	14	云南通海	易城公路	2	4.5	40	82	800	VIII
	15	云南通海	晋元公路	2	4.5	20	79	800	IX
	16	辽宁海城	镁矿采场	2	4	15	80	900	IX

依照上述步骤, 计算出模型参数取 $a=1$, $p=1$; $a=2$, $p=1$; $a=2$, $p=2$ 时的评价特征值, 以此 4 种模型的评价均值作为最终评价特征值, 并根据表 4 中稳定性评价等级标准, 确定稳定性评价结果, 见表 5。

表 4 稳定性评价等级标准
Table 4 Stability evaluation level standard

稳定性等级	极稳定	稳定	中等稳定	不稳定	极不稳定
等级标准	(1, 1.5]	(1.5, 2.5]	(2.5, 3.5]	(3.5, 4.5]	(4.5, 5.0)

表5 边坡稳定性评价结果
Table 5 Slope stability evaluation results

评价对象	参数赋值				评价均值	评价等级	实际情况
	$a=1, p=1$	$a=1, p=2$	$a=2, p=1$	$a=2, p=2$			
较长台滑坡	3.32	3.72	4.08	3.94	3.89	不稳定	滑坡
马山滑坡	3.66	3.41	4.26	3.88	3.80	不稳定	滑坡
磺厂1号滑坡	3.69	3.37	4.26	3.79	3.78	不稳定	滑动
对门坡1号滑坡	3.36	3.30	3.47	3.49	3.40	中等稳定	滑动
团山1号斜坡	2.62	2.82	2.27	2.61	2.58	中等稳定	稳定
红水塘斜坡	2.50	2.74	2.12	2.46	2.46	稳定	稳定
黑水队2号斜坡	2.80	2.90	2.59	2.77	2.77	中等稳定	稳定
文化西南斜坡	2.59	2.79	2.29	2.57	2.56	中等稳定	稳定
晋元公路	3.84	3.50	4.44	4.05	3.96	不稳定	滑坡
小绥公路木-青段	3.77	3.50	4.18	3.93	3.84	不稳定	滑坡
小绥公路K113	3.65	3.42	4.08	3.82	3.74	不稳定	滑坡
小绥公路分-蒿段	3.67	3.46	4.02	3.86	3.75	不稳定	滑坡
石太路K17	2.92	2.94	2.81	2.85	2.88	中等稳定	稳定
易城公路	2.93	2.88	2.82	2.71	2.83	中等稳定	稳定
晋元公路	3.06	2.95	3.14	2.88	3.01	中等稳定	稳定
镁矿采场	3.06	2.96	3.17	2.94	3.03	中等稳定	稳定

分析表 5 中的评价结果可以看出, 模糊可变评价模型的岩质边坡地震稳定性评价结果与实际边坡失稳情况基本相符, 具有较好一致性, 从而验证本文所述方法在岩质边坡地震稳定性评价应用中的合理性, 另外, 评价结果是一个线性模型与 3 个非线性

性模型的评价均值, 因此, 又具有较好的稳定性与可靠性。

4 结 论

(1) 本文从岩质边坡内在结构和外部自然条

件出发, 综合考虑影响岩质边坡地震稳定性的影响因素, 选取岩土体特性、新构造运动特征、坡高、坡角、年均降雨量和场地地震烈度 6 个因素作为岩质边坡地震稳定性的评价指标, 比较系统地反映了岩质边坡地震失稳的真实情况, 亦使得评价过程中具有较好的可操作性。

(2) 将改进熵权算法应用于本文的指标赋权过程中, 利用指标实际值的特征来反映指标的重要情况, 由此确定的权重更为客观、合理, 提高了评价结果的准确度。

(3) 本文将模糊可变评价模型引入岩质边坡地震稳定性评价中, 根据模型参数的不同取值, 对岩质边坡地震稳定性进行线性与非线性的组合评价, 并将均值作为最终评价结果, 与单种方法模型相比, 评价结果具有更好的稳定性与可靠性, 也更加符合实际情况, 为岩质边坡地震稳定性评价工作提供了一种新的研究方法思路, 具有一定的理论与现实意义。

(4) 边坡地震稳定性评价中, 每一种评价方法都有体现其优越性的使用范围, 换言之, 本文所述方法在哪些范围及领域内使用具有较好的先进性与合理性, 在今后的应用中应该注意这个问题, 这可作为本文今后进一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1] 刘红帅, 薄景山, 刘德东. 岩土边坡地震稳定性评价方法研究进展[J]. 防灾科技学院学报, 2007, 9(3): 20—27.
LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, LIU De-dong. Development on study of seismic stability evaluation methods of rock-soil slopes[J]. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 2007, 9(3): 20—27.
- [2] 孙进忠, 陈祥, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑的三级评判预测[J]. 地震研究, 2004, 27(3): 256—264.
SUN Jin-zhong, CHEN Xiang, WANG Yu-qing. The estimation and prediction of the slide and collapse of soil and rock slope triggered by earthquakes with three steps[J]. *Journal of Seismological Research*, 2004, 27(3): 256—264.
- [3] 王余庆, 高艳平, 辛鸿波. 用灰色聚类方法预测边坡地震稳定性研究[J]. 工业建筑学报, 2002, 32(6): 44—47.
WANG Yu-qing, GAO Yan-ping, XIN Hong-bo. A research on prediction of seismic stability of slopes by grey clustering method[J]. *Journal of Industrial Construction*, 2002, 32 (6): 44—47.
- [4] 王余庆, 辛鸿波, 高艳平. 预测岩土边坡地震崩滑的综合指标法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 311—314.
WANG Yu-qing, XIN Hong-bo, GAO Yan-ping. Study on comprehensive index method for predicting earth-quake-induced landslides[J]. *China Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(3): 311—314.
- [5] 文畅平, 杨果林. 基于属性数学理论的岩土边坡地震稳定性评价[J]. 中国铁道科学学报, 2010, 31(5): 8—14.
WEN Chang-ping, YANG Guo-lin. The seismic stability evaluation of the rock and soil slope based on the attribute mathematical theory[J]. *Journal of China Railway Science*, 2010, 31(5): 8—14.
- [6] 高科, 李夕兵, 宫凤强. 基于突变级数法的边坡地震稳定性综合评价[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 406—412.
GAO Ke, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. Integrative evaluation on seismic stability of slopes based on catastrophe progression method[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(2): 406—412.
- [7] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型—模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 308—312.
CHEN Shou-yu. Theory and model of engineering variable fuzzy set mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45(2): 308—312.
- [8] 周惠成, 张丹. 可变模糊集理论在旱涝灾害评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 56—61.
ZHOU Hui-cheng, ZHANG Dan. Assessment model of drought and flood disasters with variable fuzzy set theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 10(1): 38—42.
- [9] 张业成, 胡景江, 张春山. 中国地质灾害危险性分析与灾变区划[J]. 地质灾害与环境保护学报, 1995, 16(3): 1—13.
ZHANG Ye-cheng, HU Jing-jiang, ZHANG Chun-shan. Hazardous analysis and zonation of China geological disasters[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1995, 16(3): 1—13.
- [10] 石华旺, 高爱坤, 牛俊萍. 一种基于熵权的未确知测度评价方法及应用[J]. 统计与决策, 2008, (12): 162—164.
SHI Hua-wang, GAO Ai-kun, LIU Jun-ping. A method based on entropy weight of unascertained measure evaluation methods and application[J]. *Statistics and Decision*, 2008, (12): 162—164.
- [11] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257—262.
MENG Xian-meng, HU He-ping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(3): 257—262.
- [12] 尤天慧, 樊治平, 俞竹超. 不确定性多属性决策中确定属性熵权的一种方法[J]. 东北大学学报, 2004, 25(6): 598—601.
YOU Tian-hui, FAN Zhi-ping, YU Zhu-chao. Method of determining entropy weights on attributes in uncertain multiple attribute decision making[J]. *Journal of Northeastern University*, 2004, 25(6): 598—601.