

文章编号: 1000-7598 (2010) 10-3151-06

# 基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究

张勇慧<sup>1</sup>, 李红旭<sup>1</sup>, 盛 谦<sup>1</sup>, 李志勇<sup>2</sup>, 岳志平<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩石力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

**摘 要:** 公路岩质边坡具有点多线长、规模小的特点, 缺乏详细的岩体力学参数, 现有岩体分级系统难以应用。根据公路岩质边坡的特点, 考虑建模过程的系统全面性、简明科学性、相对独立性及灵活可操作性, 选取合理的边坡稳定性评价指标, 建立了边坡稳定性的两层综合评价体系, 运用层次分析法确定了评价指标的权重矩阵, 采用模糊综合评判方法建立了公路岩质边坡的稳定性分级模型。运用该模型对湖南省常德—吉首高速公路路段内 142 个岩质边坡稳定性进行了模糊综合评判分级, 结果表明, 该方法是合理实用的, 可供同类工程借鉴。

**关 键 词:** 公路工程; 岩质边坡; 模糊综合评判; 稳定性分级

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

## Study of stability gradation of highway rock slopes based on fuzzy comprehensive evaluation

ZHANG Yong-hui<sup>1</sup>, LI Hong-xu<sup>1</sup>, SHENG Qian<sup>1</sup>, LI Zhi-yong<sup>2</sup>, YUE Zhi-ping<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Hunan Communications Scientific Academy, Changsha 410015, China)

**Abstract:** Highway rock slopes have the characteristics including spot distribution along the road, long interval, small scale and large quantity, little statistics and easy to be influenced by engineering and environment, lack of detailed rock mechanical parameters; and it is difficult to apply the current evaluation system. Based on the characteristics of highway rock slope, considering the systematicness and comprehensiveness, conciseness and scientificity, independence and operability, a reasonable slope stability evaluation index system has been set up; and the stability gradation model for highway rock slopes has been established by using the fuzzy comprehensive evaluation. This model has been applied to Changde-Jishou Highway in Hunan province to analyze the stability of 142 high rock slopes; and the results are reasonable and confirm to reality. Practical so as to provide for reference to other similar projects.

**Key words:** highway engineering; rock slope; fuzzy comprehensive evaluation; stability gradation

## 1 引 言

公路边坡具有沿公路呈点状分布、间隔距离长、规模小、数量多、历史数据积累少且易受人类工程活动和环境变化影响等特点, 无法获取每个边坡详细的岩体特征及力学参数。因此, 现有的岩体 Q 系统分类、岩体权值系统 RMR、边坡岩体评价系统 SMR 和 CSMR 等并不适用于公路岩质边坡稳定性评价和分级。如何建立一套快速有效的评价分级方法使公路管理、研究、设计、施工人员对工程有更全面的认识和把握, 为工程决策、施工提供更为重

要、直观和有效的参考依据, 合理设计、控制工程造价和工程风险, 已成为公路建设中亟待解决的难题。

大量的力学试验与工程实践表明, 边坡本身特性及其稳定性的界限实际上不是很清楚, 具有相当的模糊性, 很难用经典的数学模型加以统一量度。而模糊综合评价是应用模糊变换原理和最大隶属度原则, 综合考虑被评事物或其属性的相关因素, 进而进行等级或类别评价。它为多变量、多因素影响的边坡稳定性分析提供了一种有效的手段。

最早将模糊数学引入岩土力学与工程研究领域借以分析天然岩石不确定性的是我国学者陶振

收稿日期: 2009-12-31

基金项目: 国家863计划专题课题 (No. 2007AA11Z121); 交通部科技项目 (No. 200831878542); 岩土力学与工程国家重点实验室开放课题 (No. Z000705)。

第一作者简介: 张勇慧, 男, 1969年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程与地质灾害方面的研究。E-mail: yhzhang@whrsm.ac.cn

字<sup>[1]</sup>和王靖涛<sup>[2]</sup>,他们将模糊数学中的模糊评判系统应用于岩石工程分类之中,提出了建立在Q系统分类基础上,考虑岩体物理力学参数不确定性的岩石分类方法。日本的樱井春埔等<sup>[3]</sup>也利用模糊数学对岩石分类进行了研究,同时将模糊数学用于处理边坡问题。近年来,我国许多学者将模糊数学应用于边坡稳定性分析,取得了一系列的成果<sup>[4-12]</sup>。这些研究多是针对单体边坡,是在获得较为详细的岩土力学参数和结构特征参数的基础上进行评价的,而对于公路沿线众多的边坡,在缺乏详细的参数时如何进行评价分级则涉及较少。

本文以湖南省常德—吉首公路工程为依托,根据公路岩质边坡的特点,选取了合理的稳定性评价指标,采用模糊综合评判和层次分析相结合的方法,开展了公路岩质边坡稳定性分级研究。

## 2 模糊综合评判原理

所谓模糊综合评判,就是对多种因素影响的事物或现象进行总的评价,这种评价过程若涉及模糊因素,就叫做模糊综合评判。

实现模糊综合评判的重要数学手段是模糊变换。利用模糊变换形成模糊综合评判方法,从而解决实际所需要的综合评判问题,其原理简述如下。

设有两个论域:因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  ( $u_i$ 为评判因素);评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  ( $v_j$ 为评判等级)。

如果对 $U$ 中的每一个元素 $u_i$ 单独作一个评判 $f(u_i)$ ,就可以看作是从 $U \sim V$ 的模糊映射,通过模糊映射 $f$ ,可以推导出模糊矩阵 $R$ :

$$R = (r_{ij})_{n \times m}, 0 \leq r_{ij} \leq 1 \quad (1)$$

式中: $R$ 为从 $U$ 到 $V$ 的单因素评判矩阵。若存在一个集合 $U$ 上的模糊子集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , $A$ 以向量表示,且有:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (2)$$

式中: $a_i$ 为第 $i$ 种因素的权重,则可惟一确定一个从 $U \sim V$ 的模糊变换 $B$ , $B$ 为模糊合成结果:

$$B = A \cdot R \quad (3)$$

记 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ ,其中 $b_j (j=1, 2, \dots, m)$ 反映了第 $j$ 种评判 $v_j$ 与模糊集 $B$ 的隶属度。

根据最大隶属度原则,在 $B$ 中择其最大者 $\max(b_1, b_2, \dots, b_m)$ ,相对应的等级就是该模糊综合评判的最终结果。

## 3 公路岩质边坡的模糊综合评判模型

### 3.1 确定评判指标并建立因素集 $U$

根据公路岩质边坡的特点,考虑建模过程的系统全面性、简明科学性、相对独立性及灵活可操作性,确定评判指标选择原则为:①选择宏观因素,避开具体的物理力学性质指标;②全面性与代表性协调,突出代表性因素,但也尽可能涵盖主要影响因素;③因素的独立性越大越好,关联性强的因素宜合并,以避免模糊合成模型选择的困难。

秉承上述原则,根据国家标准、行业规范、前人研究成果与实践经验进行综合分析<sup>[4-6]</sup>,确定出公路岩质边坡评判指标并进行如下分类:内因主要有地形地貌、岩土体特征两个分类指标。地形地貌包括自然坡高、自然坡角、坡面形态、植被发育4个基础指标。岩土体特征包括岩体结构、岩性及岩性组合、结构稳定特征、风化程度、地下水5个基础指标;外因主要有人工开挖、降雨、地震3个分类指标,人工开挖包括开挖高度比、开挖坡角、开挖方式3个基础指标,降雨包括降雨强度、过程降雨2个基础指标,地震则只有地震烈度1个基础指标。

将分类指标及基础指标编号后,把影响边坡稳定性的15个基础指标构成5个一级因素集:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \{D_1, D_2, D_3, D_4\} \\ C_2 &= \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\} \\ C_3 &= \{F_1, F_2, F_3\} \\ C_4 &= \{G_1, G_2\} \\ C_5 &= \{H_1\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

5个分类指标构成二级因素集:

$$U = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\} \quad (5)$$

### 3.2 确定二级因素的评判区域并形成评判集 $V$

在查阅了大量的文献资料的基础上,参考相关研究成果把公路岩质边坡的稳定性分成5个等级,即稳定(I级)、较稳定(II级)、基本稳定(III级)、较不稳定(IV级)、不稳定(V级),并由此得出评判集 $V$ :

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} \quad (6)$$

根据相关文献统计资料,并结合工程实际进行综合分析,得出单因素稳定性评价指标分级标准,表1提供了每种评价指标对应不同稳定性等级的基本参考条件。

### 3.3 隶属函数的确定

在模糊数学中，是以隶属度来描述事物权重的模糊界限的。在公路岩质边坡稳定性评价指标中，按数学分类法分类，涉及的指标有两类：离散型（定性指标）和连续型（定量指标），分别采用了德尔斐

法和公式法两种方式建立评价指标相应的隶属度。

表 1 中的离散型评价指标有：坡面形态、植被发育特征、岩体结构、岩性及岩性组合、风化程度、地下水、开挖方式等，其隶属度采用德尔斐法确定，其值见表 2。

表 1 单因素稳定性评价标准  
Table 1 Stability evaluation standard of single index

| 因素集            | 分类指标  | 基础指标参数         | 基础指标        | 评价指标分级标准（稳定性等级由高→低） |                 |                           |                       |                                    |
|----------------|-------|----------------|-------------|---------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------------|
|                |       |                |             | I                   | II              | III                       | IV                    | V                                  |
| C <sub>1</sub> | 地形地貌  | D <sub>1</sub> | 自然坡高/m      | 0~5                 | 5~15            | 15~30                     | 30~50                 | >50                                |
|                |       | D <sub>2</sub> | 自然坡角/(°)    | 0~10                | 10~25           | 25~40                     | 40~60                 | 60~90                              |
|                |       | D <sub>3</sub> | 坡面形态        | 坡面纵横向均凹，缓~陡坡地形      | 坡面纵横向均平直，缓~陡坡地形 | 冲沟不发育，坡面纵向外凸或平直，横向平直状陡坡地形 | 冲沟发育，坡面纵向外凸，横向平直状缓坡地形 | 等高线紊乱，同源双沟发育，坡面纵向外凸或 s 形，横向台阶状缓坡地形 |
|                | 岩土体特征 | D <sub>4</sub> | 植被发育特征      | 乔木、草灌茂盛             | 乔木发育少，草灌发育较好    | 乔灌不发育，草覆盖率>80%            | 乔灌不发育，草覆盖率>50%        | 乔灌不发育，坡面零星长草                       |
|                |       | E <sub>1</sub> | 岩体结构        | 整体状结构               | 块状结构            | 层状结构                      | 碎裂结构                  | 散体结构                               |
|                |       | E <sub>2</sub> | 岩性及岩性组合     | 极硬岩及其组合             | 硬岩及其组合          | 软硬互层                      | 软岩                    | 极软岩                                |
|                |       | E <sub>3</sub> | 结构稳定特征      | 很有利                 | 有利              | 一般                        | 不利                    | 很不利                                |
|                |       | E <sub>4</sub> | 风化程度        | 微风化及未风化             | 中风化             | 强风化                       | 全风化                   | 残积土                                |
| C <sub>3</sub> | 人工开挖  | F <sub>1</sub> | 开挖高度比       | 0~0.2               | 0.2~0.4         | 0.4~0.6                   | 0.6~0.8               | 0.8~1.0                            |
|                |       | F <sub>2</sub> | 开挖坡角/(°)    | 0~10                | 10~25           | 25~40                     | 40~60                 | 60~90                              |
|                |       | F <sub>3</sub> | 开挖方式        | 自然边坡                | 预裂爆破            | 光面爆破                      | 一般或机械开挖               | 欠缺爆破                               |
| C <sub>4</sub> | 降雨    | G <sub>1</sub> | 降雨强度/(mm/d) | 0~20                | 20~50           | 50~100                    | 100~150               | >150                               |
|                |       | G <sub>2</sub> | 过程降雨/mm     | 0~50                | 50~100          | 100~150                   | 150~250               | >250                               |
| C <sub>5</sub> | 地震    | H <sub>1</sub> | 地震烈度        | 0~3                 | 3~6             | 6~7                       | 7~8                   | >8                                 |

表 2 离散型指标隶属度取值表  
Table 2 The membership degree value of discrete indexes

| 级别  | 隶属度取值          |                |                |                |                |                |                |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|     | D <sub>3</sub> | D <sub>4</sub> | E <sub>1</sub> | E <sub>2</sub> | E <sub>4</sub> | E <sub>5</sub> | F <sub>3</sub> |
| I   | 0.50           | 0.45           | 0.65           | 0.60           | 0.55           | 0.50           | 0.20           |
|     | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.30           | 0.20           |
|     | 0.15           | 0.15           | 0.10           | 0.10           | 0.15           | 0.10           | 0.20           |
|     | 0.07           | 0.10           | 0.00           | 0.05           | 0.05           | 0.07           | 0.20           |
|     | 0.03           | 0.05           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.03           | 0.20           |
| II  | 0.25           | 0.20           | 0.30           | 0.30           | 0.20           | 0.20           | 0.20           |
|     | 0.45           | 0.40           | 0.40           | 0.45           | 0.40           | 0.45           | 0.20           |
|     | 0.15           | 0.20           | 0.15           | 0.15           | 0.25           | 0.15           | 0.20           |
|     | 0.10           | 0.12           | 0.10           | 0.07           | 0.10           | 0.12           | 0.20           |
|     | 0.05           | 0.08           | 0.05           | 0.03           | 0.05           | 0.08           | 0.20           |
| III | 0.10           | 0.10           | 0.20           | 0.08           | 0.08           | 0.10           | 0.15           |
|     | 0.20           | 0.20           | 0.20           | 0.20           | 0.17           | 0.20           | 0.20           |
|     | 0.40           | 0.38           | 0.20           | 0.40           | 0.40           | 0.40           | 0.30           |
|     | 0.20           | 0.20           | 0.20           | 0.20           | 0.23           | 0.20           | 0.20           |
|     | 0.10           | 0.12           | 0.20           | 0.12           | 0.12           | 0.10           | 0.15           |
| IV  | 0.05           | 0.08           | 0.05           | 0.03           | 0.05           | 0.08           | 0.10           |
|     | 0.10           | 0.12           | 0.10           | 0.07           | 0.10           | 0.12           | 0.15           |
|     | 0.15           | 0.20           | 0.15           | 0.15           | 0.25           | 0.15           | 0.25           |
|     | 0.45           | 0.40           | 0.40           | 0.45           | 0.40           | 0.45           | 0.30           |
|     | 0.25           | 0.20           | 0.30           | 0.30           | 0.20           | 0.20           | 0.20           |
| V   | 0.03           | 0.05           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.03           | 0.05           |
|     | 0.07           | 0.10           | 0.00           | 0.05           | 0.05           | 0.07           | 0.10           |
|     | 0.15           | 0.15           | 0.10           | 0.10           | 0.15           | 0.10           | 0.20           |
|     | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.25           | 0.30           | 0.30           |
|     | 0.50           | 0.45           | 0.65           | 0.60           | 0.55           | 0.50           | 0.35           |

对表 1 中的连续型指标：自然坡高、自然坡角、结构稳定特征、开挖高度比、开挖坡角、降雨强度、过程降雨、地震烈度等，采用“降半梯形”分布建立了隶属度与指标取值之间的函数关系，即隶属函数，其公式如下：

$$U_I(x) = \begin{cases} 1, & x \leq S_1 \\ \frac{S_2 - x}{S_2 - S_1}, & S_1 < x \leq S_2 \\ 0, & x > S_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$U_{II}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq S_1 \text{ 或 } x > S_3 \\ -\frac{S_1 - x}{S_2 - S_1}, & S_1 < x \leq S_2 \\ \frac{S_2 - x}{S_3 - S_2}, & S_2 < x \leq S_3 \end{cases} \quad (8)$$

$$U_{III}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq S_2 \text{ 或 } x > S_4 \\ -\frac{S_2 - x}{S_3 - S_2}, & S_2 < x \leq S_3 \\ \frac{S_4 - x}{S_4 - S_3}, & S_3 < x \leq S_4 \end{cases} \quad (9)$$

$$U_{IV}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq S_3 \text{ 或 } x > S_5 \\ -\frac{S_3 - x}{S_4 - S_3}, & S_3 < x \leq S_4 \\ \frac{S_5 - x}{S_5 - S_4}, & S_4 < x \leq S_5 \end{cases} \quad (10)$$

$$U_V(x) = \begin{cases} 0, & x < S_4 \\ -\frac{S_4 - x}{S_5 - S_4}, & S_4 \leq x < S_5 \\ 1, & x \geq S_5 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $x$  为边坡相关评价指标的实际值;  $S_1 \sim S_5$  分别为各评价指标在 5 种稳定状态下的标准值。

### 3.4 建立单因素评判矩阵

由评价指标实际值选用适合的隶属函数, 求出各评价指标对各个评价等级相应的隶属度, 对基础评价指标作模糊评判, 得到反映  $U$  和  $V$  模糊关系的一级模糊关系矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: 第  $n$  行反映的是被评对象各因素分别取评价集中第  $n$  个等级的可能性; 第  $m$  列反映的是被评对象的第  $m$  个因素对应评价集中各等级的隶属度。

### 3.5 确定权重系数, 构成权重矩阵 $A$

评价指标权重大小对模糊综合评价结果有直接的影响, 必须按照各个指标的重要性及其对稳定性的影响程度来客观地确定。权重的确定主要有 3 种方法: 德尔斐法、专家调查法、层次分析法。前面

两种方法都是由专家来进行操作的, 以专家的意见为主给出各因素的权重值, 虽然操作简单, 但主观性太强。本文拟采用层次分析法来确定各评价指标的权重值。

层次分析法简称 AHP 法, 是美国匹兹堡大学运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代中期提出的一种多层次权重分析决策方法。其特点是具有高度的逻辑性、系统性、简洁性和实用性, 结合了专家打分法定性分析的优点, 又采用适当的数学模型进行定量分析, 弥补了定性与定量的不足, 比较适合于既具有定性指标, 又具有定量指标的评价领域。

本文在建立了图 1 所示的两层层次结构模型后, 采用 1~9 标度法 (表 3) 对各层中的因子相对上一层次目标的重要性进行两两比较, 构造相应的判断矩阵。本文以基础指标  $\{D_1, D_2, D_3, D_4\}$  的权重确定为例, 构造判断矩阵  $C_1$ , 计算其最大特征根和对应的特征向量, 并进行判断矩阵一致性检验, 当判断矩阵随机一致性比率  $CR < 0.1$  时, 即认为判断矩阵具有满意的一致性, 说明权重分配是合理的。

#### (1) 构造判断矩阵

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

#### (2) 计算最大特征根及特征向量 (即权重)

最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.1315$ , 归一化特征向量为 (0.248 0.483 0.191 0.078)

#### (3) 一致性检验

判断矩阵阶数  $m = 4$ , 查表得到相应的一致性指标  $RI = 0.90$ ,  $CI$ 、 $CR$  按下式计算:

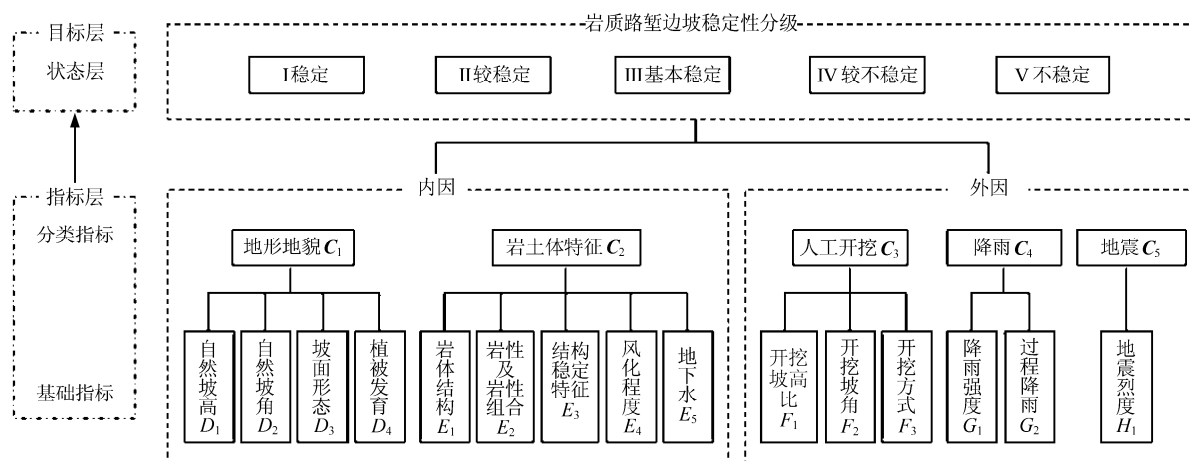


图 1 公路岩质边坡稳定性两层综合评价体系

Fig.1 Two-layer synthetic evaluation index system for highway rock slope stability

表 3 1~9 标度各因子重要性大小比较量化表

Table 3 Comparison of index importance

| 标度         | 两两因子重要性比较结果说明                                   |
|------------|-------------------------------------------------|
| 1          | $i$ 因子与 $j$ 因子完全一样重要, 或 $i$ 与 $i, j$ 与 $j$ 自身比较 |
| 3          | $i$ 因子比 $j$ 因子稍微重要一点                            |
| 5          | $i$ 因子比 $j$ 因子明显重要                              |
| 7          | $i$ 因子比 $j$ 因子重要得多                              |
| 9          | $i$ 因子比 $j$ 因子极为重要                              |
| 2, 4, 6, 8 | 两两因子重要性比较介于上述标度两值之间                             |
| 倒数         | 上述重要性相反情况, 即 $j$ 比 $i$ 重要的情况                    |

$$\left. \begin{aligned} CI &= \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} = \frac{4.1315 - 4}{4 - 1} = 0.043833 \\ CR &= \frac{CI}{RI} = 0.0487 < 0.1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

故判断矩阵满足一致性检验, 权重分配合理。

经过两层层次分析得到公路岩质边坡各评价指标权重见表 4。

表 4 公路岩质边坡各评价指标权重分配表

Table 4 Weight distribution of evaluation indexes for highway rock slope

| 评价因子  |         | 权重       |          |
|-------|---------|----------|----------|
| 分类指标  | 基础指标    | 分类指标 $B$ | 基础指标 $A$ |
| 地形地貌  | 坡高      | 0.235    | 0.248    |
|       | 坡度      |          | 0.483    |
|       | 坡面形态    |          | 0.191    |
|       | 植被发育特征  |          | 0.078    |
| 岩土体特征 | 岩体结构    | 0.425    | 0.360    |
|       | 岩性及岩性组合 |          | 0.117    |
|       | 结构稳定特征  |          | 0.206    |
|       | 风化程度    |          | 0.041    |
|       | 地下水     |          | 0.070    |
| 人工开挖  | 开挖高度    | 0.165    | 0.297    |
|       | 开挖坡率    |          | 0.540    |
|       | 开挖方式    |          | 0.163    |
| 降雨    | 降雨强度    | 0.108    | 0.333    |
|       | 过程降雨    |          | 0.667    |
| 地震    | 地震烈度    | 0.067    | 1.000    |

### 3.6 模糊综合评判

一级综合评判是通过一级模糊关系矩阵  $R$  与基础指标权重矩阵  $A$  复合运算得到, 即

$$V' = R \times A = \{V'_1, V'_2, V'_3, V'_4, V'_5\} \quad (15)$$

$V'$  作为二级评判的模糊关系矩阵与二级权重矩阵  $B$  运算, 即得到最大隶属度  $V$ , 即

$$V = V' \times B = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} \quad (16)$$

式中:  $V_i$  为评判集  $V$  中因子  $i$  的隶属度, 由最大隶属度原则,  $V_i = \max\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ , 则  $V_i$  所对应的等级就是该边坡所处的稳定性级别。

## 4 工程实例

常吉高速公路起于湖南省常德市斗姆湖, 经桃源县、沅陵县、泸溪县, 终于湘西自治州的吉首市。常吉高速公路属亚热带季风性湿润气候, 为山岭重丘区, 沿线地形地质条件复杂, 山势陡峻, 沟谷纵横交错, 地表植被发育, 主要为灌木丛、果树等。山体坡度多在  $20^\circ \sim 50^\circ$  之间, 高程在 100~1 500 m。部分地段基岩裸露, 山坡表层为第四系全新统种植土或亚黏土层、碎石土、松散坡积体, 下伏板溪群板岩、白垩系红砂岩等“湘西红层”或更老地层。湘西地区常吉公路沿线多年平均降雨量为 1 480 mm, 降雨多集中于 4~10 月份, 占全年降雨量的 80.3%, 历史日最大降雨量为 340 mm。据《中国地震烈度区划图》, 场地基本地震烈度为 VI 度。

采用上述模糊综合评价方法对湘西地区常吉高速公路的 142 个岩质高边坡进行了稳定性分级评价, 部分典型边坡稳定性分级评价结果见表 5, 所有边坡的稳定性分级评价的统计结果为: I 级边坡 37 个, 占所评价边坡总数的 26%; II 级边坡 43 个, 占 31%; III 级边坡 14 个, 占 10%; IV 级边坡 36 个, 占 25%; V 级边坡 12 个, 占 8%。根据现场的施工资料, 实际上发生失稳或局部失稳边坡全部分布在 III、IV、V 级: 14 个 III 级边坡中有 3 个发生失稳, 36 个 IV 级边坡中有 22 个发生失稳, 12 个 V 级边坡中有 11 个发生失稳 (如图 2、3 所示), 可见使用该方法的评判结果与实际边坡失稳情况较为吻合。

表 5 常吉公路典型岩质边坡评价结果

Table 5 Evaluation results for typical rock slopes of Changde-Jishou highway

| 边坡<br>序号 | 模糊评判  |       |       |       |       | 评价<br>结果 | 实际<br>情况 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
|          | I     | II    | III   | IV    | V     |          |          |
| 4        | 0.081 | 0.149 | 0.115 | 0.227 | 0.149 | IV       | 失稳       |
| 13       | 0.211 | 0.175 | 0.121 | 0.139 | 0.092 | I        | 稳定       |
| 36       | 0.038 | 0.114 | 0.161 | 0.254 | 0.173 | IV       | 失稳       |
| 46       | 0.017 | 0.030 | 0.142 | 0.235 | 0.323 | V        | 局部失稳     |
| 53       | 0.063 | 0.166 | 0.161 | 0.223 | 0.127 | IV       | 局部失稳     |
| 65       | 0.094 | 0.074 | 0.174 | 0.174 | 0.230 | V        | 失稳       |

## 5 结 论

模糊综合评判是对受多因素影响的事物作出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法, 适合于边坡这类由多因素控制其稳定性的工程项目。采用模糊综合评判方法可以将本来模糊的、主观性很大的定性评估转变为定量评判, 其思路清晰、评判结果直观, 是提高评估结果科学性的一种有效方法。

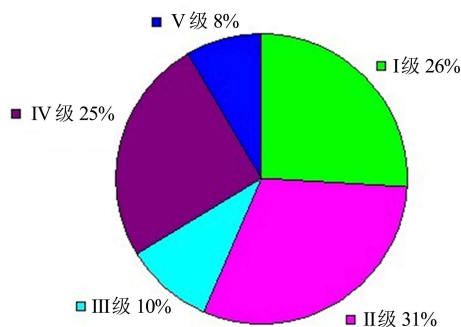


图2 常吉公路各等级边坡百分比图

Fig.2 The slope grade distribution of Changde-Jishou highway

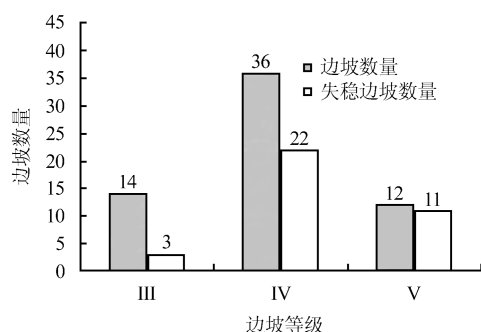


图3 常吉公路实际失稳边坡数量分布图

Fig.3 Distribution of the factual failure slopes of Changde-Jishou highway

公路岩质边坡具有沿公路呈点状分布, 间隔距离长, 规模小、数量多, 历史数据积累少且易受人类工程活动和环境变化影响, 无法获取每个边坡详细的岩体特征及力学参数等特点, 适合采用模糊综合评判方法进行稳定性分级。其关键是评价指标的选取、因素的权重、单因素评判的选择是否科学合理、切合实际。本文提出的模糊综合评判模型在常吉高速公路上应用效果良好, 评判结果与实际情况较为吻合, 而更为完善的评判模型仍需进一步探索和改进。

### 参考文献

- [1] 陶振宇, 彭祖赠. 模糊数学在岩石工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 36—45.  
TAO Zhen-yu, PENG Zu-zeng. Application of fuzzy mathematics to the engineering classification of rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1981, 3(1): 36—45.
- [2] 王靖涛. 模糊集合论在岩体的综合评价和工程分类上的应用[J]. 岩土力学, 1980, 2(2): 33—46.  
WANG Jing-tao. Application of fuzzy mathematics in comprehensive evaluation and engineering classification of rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1980, 2(2): 33—46.
- [3] 蒋中明. 重大工程岩石力学模糊分析理论与方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [4] 孟衡. 模糊数学在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(4): 178—181.  
MENG Heng. Application of fuzzy mathematics to rock-slope stability analysis[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2008, 22(4): 178—181.
- [5] 黄建文, 李建林, 周宜红. 基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(Supp.1): 2627—2632.  
HUANG Jian-wen, LI Jian-lin, ZHOU Yi-hong. Application of fuzzy analysis based on AHP to slope stability evaluation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.1): 2627—2632.
- [6] 洪海春, 徐卫亚, 叶明亮. 基于模糊综合评判的边坡稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 557—562.  
HONG Hai-chun, XU Wei-ya, YE Ming-liang. Slope stability analysis based on fuzzy comprehensive assessment[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005, 33(5): 557—562.
- [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, 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.
- [8] 温世亿, 李建林, 杨学堂, 等. 卸荷高边坡稳定性分析的多级模糊综合评判[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2041—2044.  
WEN Shi-yi, LI Jian-lin, YANG Xue-tang, et al. Multistage fuzzy comprehensive evaluation for analyzing unloading high-steep slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 2041—2044.
- [9] 俞敏, 胡杰刚, 全洪波, 等. 桂柳高速公路边坡稳定性二级模糊综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 130—135.  
YU Min, HU Jie-gang, QUAN Hong-bo. Two magnitude fuzzy comprehensive evaluation model of slope stability along Guilin-Liuzhou Expressway[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(3): 130—135.
- [10] 吴茂明. 边坡失稳灾害的模糊综合评估技术及其应用[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [11] 毛斌. 高速公路边坡加固与防护技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] 陈科平. 高速公路边坡稳定性模糊评价及加固治理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.