

滑坡稳定性综合区划研究

徐兴华, 尚岳全

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 滑坡的稳定性分区和影响因子分析是工程治理区划的关键问题。构建模糊聚类-灰色关联综合决策模型, 可实现其稳定性综合区划研究。基于官家滑坡实际地质条件, 进行稳定性模糊聚类分区, 并结合详细地质调查分析和滑坡属性特征研究将其整体分为深层易滑区和浅层坍塌区, 即碎石土深层滑动区和含碎石黏土浅层滑坡及局部坍塌区; 再对各区构建影响因子决策矩阵进行灰色关联分析, 判决各因子对滑坡稳定性的影响程度。结果表明: 易滑区主要影响因子是滑体重量、地下水、下滑推力, 坍塌区主要影响因子是下滑推力, 并且经工程治理评价证实综合决策模型对滑坡工程治理区划具有十分重要的指导意义。

关键词: 滑坡; 稳定性区划; 模糊聚类; 灰色关联; 决策模型; 工程治理评价

中图分类号: TU43; P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)05-0669-06

作者简介: 徐兴华(1983-), 男, 江苏常州人, 博士研究生, 主要从事边坡工程治理和地质灾害防治研究。E-mail: xxhxxh@zju.edu.cn。

Integrated zonation of landslide stability

XU Xing-hua, SHANG Yue-quan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Stability subarea and factor analysis of landslides are the key problems of engineering treatment zonation. The stability zonation can be realized by constituting compound decision model of fuzzy clustering and grey correlation analysis. Firstly, based on the geological conditions of Guanjia landslide, the stability zonation is proceeded through fuzzy clustering. By geological investigation and attribute property analysis, the landslide is divided into deep easy skating area and shallow slumping area. It is also said that the gravel soil area which can slide deeply and the gravelly clay area which can slide shallowly or slump partially. Secondly, by taking the factor decision matrix to perform grey correlation analysis, the influence degree of factors is adjudicated. The results indicate that the primary factors of easy skating area are weight, groundwater and sliding force, and the primary factor of shallow slumping area is sliding force. In addition, the compound decision model is confirmed to be of important guiding significance by engineering treatment evaluation.

Key words: landslide; stability zonation; fuzzy clustering; grey correlation; decision model; engineering treatment evaluation

0 引言

我国是个多山国家, 滑坡灾害频繁, 给工程建设和人民生命财产安全造成极大危害。随着国民经济发展和道路交通建设的开展, 滑坡灾害尤其是大型滑坡灾害的发生率越来越高^[1]。其中, 大规模人类工程活动和灾害性降雨天气是其相对频繁发生的主要因素。

目前, 滑坡稳定性分析和工程治理主要依据工程地质类比、自然历史分析、工程地质力学分析、极限平衡力学计算、弹塑性有限元计算等进行的^[2-6], 都有一定的实效性和可靠性。滑坡是一个复杂的、非线性的动态系统, 且大型滑坡规模大、机制复杂、破坏性强, 不仅失稳影响范围广, 而且防治难度高、治理措施复杂。采用工程地质类比、历史反演和地质力学分析, 需弄清地层结构、地质构造、地壳演化历史等问

题, 其相似和反演过程具有主观臆断性; 力学和有限元计算需解决原型建模、材料参数、破坏准则等问题, 难以真正反映滑坡稳定性性状及为采取科学合理的工程治理措施提供可靠依据。同时, 滑坡地层结构、区域构造特征复杂, 地层参数、工程性状、稳定性影响因子等多因素之间存在较大的模糊性、过渡性和灰色性。因此, 将模糊数学方法和灰色关联理论引入滑坡稳定性评价和相关因子分析。结合官家滑坡实际地质条件, 构建模糊聚类-灰色关联综合决策模型, 实行稳定性模糊聚类分区, 再建立影响因子决策矩阵进行

基金项目: 浙江省重大科技专项社会发展重点项目(2006C13027); 国家自然科学基金项目(40672185)

收稿日期: 2008-03-25

灰色关联分析, 判决各因子对稳定性的影响程度, 确定关键因子, 为滑坡分区治理采取针对性的工程措施提供可靠依据。

1 研究区域

1.1 规模及类型

官家滑坡^[7]位于龙丽高速公路龙游段官家附近(龙丽高速桩号 K15+100 附近), 因开挖施工诱发公路左侧山坡出现裂缝, 并受降雨等影响山坡上多处出现新的裂缝, 且前缘出现小规模崩塌及泉点等现象。滑坡总投影面积约 18.8 万 m², 滑坡总体积约 323.5 万 m³, 滑体组成物质为残坡积含黏性土碎石, 含碎石黏土及全风化基岩等, 滑床为基岩面, 综合确定其为大型土质滑坡。

1.2 形态特征

滑坡体位于丘陵区, 海拔高程 80~150 m, 地形坡度上陡中缓下陡。滑坡东部为陡坡, 西部(前缘)为陡坡、稻田及灵山溪, 滑坡区及其南部、北部、后缘附近一带为中缓坡, 中部有多处小凹部, 植被发育较好。滑坡平面形态呈半圆弧状, 周界清楚, 主滑方向 283°~300°。北部滑坡体上拉张、鼓胀裂缝发育, 纵横交错; 前缘变形迹象也较明显, 护坡墙开裂、隆起, 公路路基隆起等; 中部后缘排水沟、原有裂缝局部出现了新的变形, 前缘护坡墙局部出现了少量的鼓胀变形; 南部前缘高陡边坡出现局部崩滑现象。

1.3 地层结构

滑坡区地层简单, 岩性较单一, 主要为早元古代龙游岩群全旺岩组 Pt₁qw、侏罗系上统西山头组 J₃x、高坞组 J₃g 和第四系残坡积 Q^{el-dl} 地层, 出露以第四系残坡积层为主。滑区地下水类型主要为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水, 松散岩类孔隙水主要赋存于第四系残坡积层中, 受大气降水和山上土体渗流补给, 埋深 3.20~21.0 m; 基岩裂隙水主要赋存于基岩风化、节理裂隙中, 由于裂隙不发育, 水量较贫乏, 局部受构造影响。

2 综合决策模型构建

2.1 理论模型

(1) 稳定性模糊聚类分区

设论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是滑坡稳定性分区的对象集, 每个对象又由 m 个指标表示其性状, 由此得到数据矩阵为

$$U = [x_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。

实际问题中, 由于各指标具有不同的量纲, 为了

使不同量纲的量也能进行比较, 则需要依据模糊矩阵的要求进行数据标准化, 将数据压缩到区间[0, 1]上。数据标准化方式如下:

a) 标准差变换

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_k} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

其中, $\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik}$, $s_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}$ 。经由变换后, 每个变量的均值为 0, 标准差为 1, 并消除了量纲的影响, 但不一定在区间[0, 1]上, 需进行极差变换方可将数据压缩到区间[0, 1]上。

b) 极差变换

$$x''_{ik} = \frac{x'_{ik} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\}} \quad (3)$$

经过数据变换后有 $0 \leq x''_{ik} \leq 1$, 且消除了量纲的影响。

确定相似系数, 标出衡量分类对象集间相似程度的统计量 $r_{ij} = R(x_i, x_j)$, 建立模糊相似矩阵。计算 r_{ij} 的方法很多^[8], 参照数据矩阵特性主要采用指数相似法,

$$r_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \exp\left\{-\frac{3}{4} \cdot \frac{(x_{ik} - x_{jk})^2}{s_k^2}\right\} \quad (4)$$

由此建立的模糊相似矩阵 R 满足自反性和对称性, 但不具备传递性, 应通过传递闭包法求模糊等价矩阵 R^* ^[9]。一般采用平方法: $R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow \dots \rightarrow R^{2^l} \rightarrow \dots$, 当第一次出现 $R^k \cdot R^k = R^k$ 时, 则 R^k 具有传递性, 其即为所求的传递包 $t(R)$, 即 $R^k = t(R) = R^*$ 。

采用不同的 λ -截矩阵对 R^* 进行动态聚类^[8],

$$r_{ij}^\lambda = \begin{cases} 1 (r_{ij} \geq \lambda) \\ 0 (r_{ij} < \lambda) \end{cases}, \quad (\lambda \in [0, 1]) \quad (5)$$

对于 $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1 \leq 1$, 则 $R_{\lambda_1}^*$ 所分出的每一类是 $R_{\lambda_2}^*$ 的某一类的子类, $R_{\lambda_1}^*$ 分类是 $R_{\lambda_2}^*$ 分类的细化, 由此 λ 从大到小则分类由细到粗实现不同 λ 水平的动态聚类。

对不同 λ 水平的分类实行 F 检验以剔除不满足显著水平的类。对原始数据矩阵 $[x_{ij}]_{n \times m}$, 令其样本中心向量为 $\bar{u} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k, \dots, \bar{x}_m\}$, 其中

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik} \quad (6)$$

若对应 λ 值的分类数为 h , 第 l 类的对象数为 n_l , 聚类中心向量为 \bar{u}^l , F 统计量为

$$F = \frac{\sum_{l=1}^h n_l \|\bar{u}^l - \bar{u}\|^2 / (h-1)}{\sum_{l=1}^h \sum_{i=1}^{n_l} \|x_i^l - \bar{u}^l\|^2 / (n-h)} \quad (7)$$

其中, $\|\bar{u}^l - \bar{u}\| (= \sqrt{\sum_{k=1}^m (\bar{u}_k^l - \bar{u}_k)^2})$ 为 \bar{u}^l 与 \bar{u} 的距离,

$\|x_i^l - \bar{u}^l\|^2$ 为第 l 类中对象 x_i^l 与中心 \bar{u}^l 的距离。其遵从

自由度为 $(h-1, n-h)$ 的 F 分布, 分子表征类与类之间的距离, 分母表征类内对象间的距离, 因此 F 值越大, 说明类与类之间的距离越大, 类与类之间的差异也就越大, 分类也就越好。在一定的显著性水平 (如 $\alpha=0.05$) 下, 若 $F > F_{\alpha}(h-1, n-h)$, 则认为类与类之间的差异是显著的, 也说明在此显著性水平下分类是合理的。通过给定更严格的显著性水平, 从而确定能够反映滑坡稳定性状的最佳分类。

(2) 影响因子灰色关联分析

多因素系统中, 各因素间的影响程度或对目标要素的贡献程度可用灰色关联理论予以分析和确定^[10]。滑坡影响因素评价, 可用灰色关联分析来确定各因素之间的影响程度和关键因子的提取。首先建立影响因子决策矩阵 $X = [x_{ij}]_{u \times w}$, 为消除量纲影响, 对其进行区间极值标准化处理, 记标准化后的决策矩阵为

$$Y = [y_{ij}]_{u \times w}, y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (8)$$

确定稳定系数为参考母序列 $C = (k_1, k_2, \dots, k_u)^T$, 并计算关联系数。第 i 个对象第 j 个评价因子与参考母序列的第 i 个参数的灰色关联系数

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - k_i| + \rho \cdot \max_i \max_j |y_{ij} - k_i|}{|y_{ij} - k_i| + \rho \cdot \max_i \max_j |y_{ij} - k_i|} \quad (9)$$

式中, $|y_{ij} - k_i|$ 是因子差异值, $\min_i \min_j |y_{ij} - k_i|$ 是两级最小极值, $\max_i \max_j |y_{ij} - k_i|$ 是两级最大极值, ρ 是分辨率, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

第 j 个评价因子与参考母序列的关联度为

$$g_j = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

依据各因子关联度大小确定其影响程度, 关联度越大表示对稳定性的影响程度越高, 反之越低, 由此进行影响因素决策, 确定影响滑坡稳定性的关键因子。

2.2 流程结构与程序实现

依据上述理论模型原理, 模糊聚类 - 灰色关联综合决策模型的实现步骤如下:

- (1) 确定滑坡稳定性分区的对象集及指标参数。
- (2) 数据无量纲化处理: 标准差变换和极差变换。
- (3) 建立模糊相似矩阵: 计算相似系数, 确定模糊相似关系。
- (4) 求解模糊等价矩阵: 传递闭包法求解模糊等价矩阵, 并进行动态聚类。
- (5) 分类 F 统计检验: 对不同的分类水平进行 F 检验, 剔除不满足显著水平的分类。
- (6) 确定稳定性最佳分区: 在分类 F 检验的基

础上, 结合滑坡详细地质调查分析和工程属性特征研究, 依据聚类流程确定最符合滑坡性状的稳定性分区。

(7) 影响因子灰色关联分析: 针对滑坡不同稳定性分区的情况, 对各区综合选取稳定性影响因素, 建立因子判别决策矩阵, 进行灰色关联分析, 求解各影响因子的关联度, 确定各因子影响程度和关键因子, 从而为工程治理规划和设计提供依据。

依据模糊聚类 - 灰色关联综合决策模型的分析流程, 采用 Visual Basic 语言编制了综合决策模型的计算机软件程序, 极大地提高了数据运算速度和模型处理能力, 流程结构见图 1。

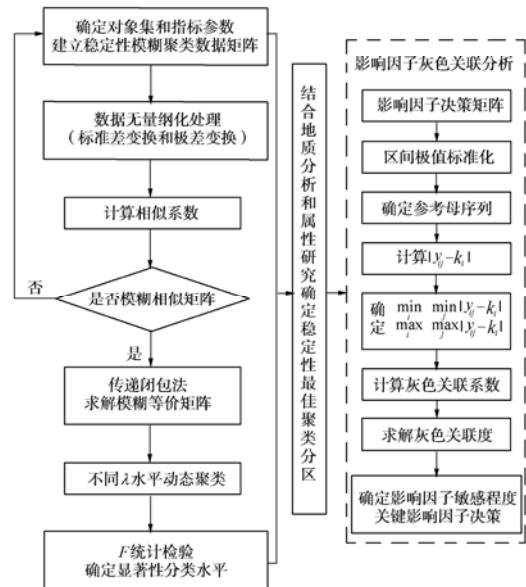


图 1 综合决策模型软件程序流程结构图

Fig. 1 The flow chart of model program

3 滑坡稳定性区划研究

3.1 模型参数选取

基于滑坡地质剖面分析及其参数特性研究, 经试验、实测和反算等综合确定滑坡稳定性综合决策模型参数, 如表 1 所示。滑体重量、滑面长度、浸水面积是基于滑坡剖面区块累加取值, 滑面倾角、水力坡度为其整体加权均值, c , ϕ 是经试验、反算综合所得, 下滑推力、稳定系数是采用传递系数法的折线形滑面稳定系数计算所得。各指标均基于滑坡剖面分析及其参数特性综合取值, 体现其整体性状, 彼此间相对独立, 结合滑坡属性特征与稳定分析指标构建综合决策模型参数, 其反映滑坡实际地质条件及其稳定性状况。

3.2 滑坡稳定性区划分析

(1) 滑坡稳定性模糊聚类分区

参照综合决策模型各指标参数, 由于剖面 K - O 未见地下水的作用和影响, 故选择除水力坡度和浸水

表1 滑坡稳定性综合决策模型参数

Table 1 The parameters of compound decision model of landslide stability

序号	剖面号	滑体重量 /($\times 10^3$ kN)	滑面倾角 /($^\circ$)	滑面长度 /m	水力坡度 /($^\circ$)	浸水面积 /m ²	c/kPa	ϕ ($^\circ$)	下滑推力 /kN	稳定系数 K
1	A-A'	84.710	18.58	133.21	31.60	2269	13	10	3134	0.932
2	B-B'	52.538	6.61	215.26	12.73	996	13	10	3505	0.841
3	C-C'	63.421	15.38	169.12	15.14	1931	13	10	3652	0.904
4	D-D'	83.936	9.96	178.70	15.50	2474	14	11	4298	0.955
5	E-E'	108.212	7.61	213.50	14.50	3414	14	11	5926	0.914
6	F-F'	65.699	13.33	197.05	14.96	1798	14	11	4758	0.959
7	G-G'	89.969	15.83	206.52	16.21	1126	14	11	2595	1.072
8	H-H'	80.433	11.90	200.28	12.42	1829	14	11	3218	1.027
9	J-J'	31.098	30.32	108.16	19.56	317	15	16	2280	1.032
10	K-K'	15.187	20.10	96.00	0	0	15	16	471	1.148
11	L-L'	28.890	19.00	116.25	0	0	15	16	1081	1.124
12	M-M'	9.014	23.43	78.26	0	0	15	15	267	1.159
13	N-N'	6.427	23.48	64.32	0	0	15	15	110	1.196
14	O-O'	7.496	20.33	59.62	0	0	15	15	352	1.097

注: 剖面 I-I' 由于参数资料不全, 未予列入。

面积以外的其它所有指标参数进行稳定性聚类分析, 即论域 $U=[$ 滑体重量, 滑面倾角, 滑面长度, $c, \phi,$ 下滑推力, 稳定系数 $]$ 。依据综合决策模型的分析流程, 通过软件程序对其实现计算自动化求解与处理。

先求解模糊相似矩阵 R , 并在此基础上采用传递闭包法解算模糊等价矩阵 R^* , 其所得等价矩阵 R^* 即具有自反性、对称性和传递性。然后再采用 λ -截矩阵实现动态聚类, 并对其进行 F 统计检验以剔除不够格的分类。在显著性水平 $\alpha_1=0.01, \alpha_2=0.005$ 的情况下, 可获得四种具有显著性水平的分类, 如下所示:

a) $\lambda=0.823$ 时, $F_{0.01}=6.422 < F_{0.005}=7.956 < F_{\text{临}}=9.24$, 分类为 5 种: $\{A,C\}, \{B\}, \{D,E,F,G,H\}, \{J\}, \{K,L,M,N,O\}$ 。

b) $\lambda=0.791$ 时, $F_{0.01}=6.552 < F_{0.005}=8.081 < F_{\text{临}}=11.275$, 分类为 4 种: $\{A,B,C\}, \{D,E,F,G,H\}, \{J\}, \{K,L,M,N,O\}$ 。

c) $\lambda=0.784$ 时, $F_{0.01}=7.206 < F_{0.005}=8.912 < F_{\text{临}}=13.628$, 分类为 3 种: $\{A,B,C,D,E,F,G,H\}, \{J\}, \{K,L,M,N,O\}$ 。

d) $\lambda=0.766$ 时, $F_{0.01}=9.33 < F_{0.005}=11.754 < F_{\text{临}}=25.485$, 分类为 2 种: $\{A,B,C,D,E,F,G,H\}, \{J,K,L,M,N,O\}$ 。

结合滑坡详细地质信息调查、地质结构分析及其属性特征研究, 依据动态聚类的流程确定最佳分类为 d) 种, 即滑坡稳定性整体分两个区域, A-I 为深层第易滑区, J-O 为浅层坍塌区。易滑区为极不稳定区, 滑体为碎石土层, 滑面深, 覆盖厚, 地下水丰富, 下滑力大, 整体稳定性差, 有深层滑动可能性。浅层塌

塌区含碎石黏土, 滑面浅, 覆盖薄, 无地下水的影响作用, 下滑力较小, 整体稳定性较好, 发生整体滑动的可能性不大, 但可能发生浅层滑坡及局部坍塌现象。

(2) 滑坡分区影响因子灰色关联分析

依据稳定性模糊聚类分区, 滑坡整体分为两个区域, 各区的地质结构、滑体材料、地下水的影响、滑面深度、滑坡范围等均不同, 那么对应不同滑区的稳定性影响因素就不一样, 关键因子也不同, 应分区进行滑坡稳定性影响因子的灰色关联分析, 实现影响因子的决策评价, 分别确定各区稳定性的主要影响因素。

对于易滑区, 滑面倾角和滑面长度为其固有属性值, 无需评价, 则可构建决策矩阵 $X=[$ 滑体重量, 水力坡度, 浸水面积, $c, \phi,$ 下滑推力 $]$, 并确定参考母序列 $C=[$ 稳定系数 $]$ 。实现数据区间极值标准化处理后计算 $|y_{ij}-k_i|$, 并确定 $\min_j |y_{ij}-k_i|$ 和 $\max_j |y_{ij}-k_i|$, 从而得到灰色关联系数矩阵如下:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.7311 & 0.4521 & 0.7906 & 0.5593 & 0.5593 & 0.6831 \\ 1.0000 & 0.9687 & 0.9999 & 0.9999 & 0.9999 & 0.6466 \\ 0.8662 & 0.7925 & 0.8148 & 0.6471 & 0.6471 & 0.9184 \\ 0.8765 & 0.6003 & 0.8098 & 0.4968 & 0.4968 & 0.9658 \\ 0.4223 & 0.7066 & 0.4223 & 0.4223 & 0.4223 & 0.4223 \\ 0.6456 & 0.5692 & 0.7362 & 0.5055 & 0.5055 & 0.7831 \\ 0.6041 & 0.3839 & 0.3457 & 0.9999 & 0.9999 & 0.3333 \\ 0.6218 & 0.3831 & 0.5204 & 0.7196 & 0.7196 & 0.4471 \end{bmatrix}$$

由此求解各影响因子的灰色关联度为 $\gamma=[0.7209 \ 0.6071 \ 0.6800 \ 0.6688 \ 0.6688 \ 0.6500]$, 所以可知各因子对滑坡稳定性的影响程度排序为滑体重量>浸水面积> $c(\phi)$ >下滑推力>水力坡度。

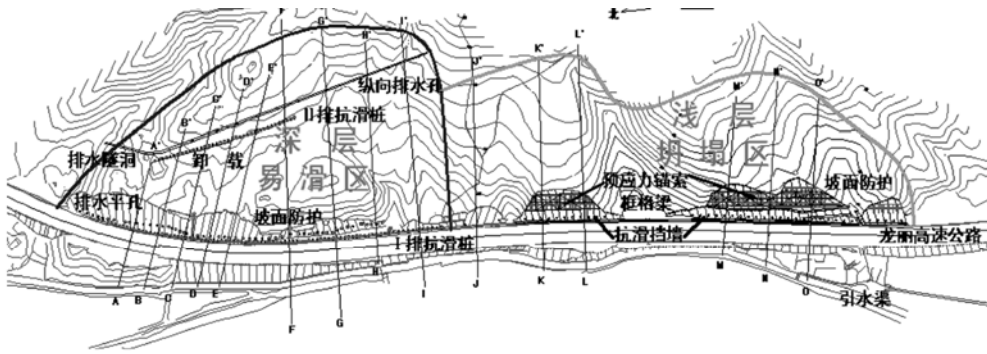


图2 滑坡工程治理平面图

Fig. 2 The engineering treatment of a landslide

同样,对于坍塌区构建决策矩阵 $X=[\text{滑体重量}, \varphi, \text{下滑推力}]$ (c 值没有变异性未予列入), 确定参考母序列 $C=[\text{稳定系数}]$, 计算灰色关联系数矩阵如下:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.4090 & 0.4090 & 0.4090 \\ 0.7199 & 0.7740 & 0.5894 \\ 0.7222 & 0.6533 & 1.0000 \\ 0.5246 & 0.4814 & 0.5104 \\ 0.4090 & 0.4090 & 0.4090 \\ 0.7192 & 0.6845 & 0.7817 \end{bmatrix}$$

由此可得各影响因子的灰色关联度为 $\gamma=[0.5840 \ 0.5685 \ 0.6166]$, 所以可知各因子对滑坡稳定性的影响程度排序为下滑推力>滑体重量> φ 。

至此,经由综合决策模型实现滑坡稳定性综合区划如下:滑坡整体分为深层易滑区和浅层坍塌区,即碎石土深层滑动区和含碎石黏土浅层滑坡及局部坍塌区。易滑区稳定性差,主要影响因子是滑体重量、地下水和下滑推力;坍塌区稳定性较好,主要影响因子是下滑推力。滑坡工程治理宜结合稳定性整体分区和主要影响因子提取进行合理规划和科学设计,从而避免仅依据稳定系数的臆断性和片面性。

4 工程治理评价

4.1 工程治理概述

参照滑区地形地质条件及其属性特征,依据综合决策模型分析结果,滑坡分区治理,且采取合适的工程措施。滑坡工程治理区划如图2所示。

深层易滑区(A-I段):采取主滑段卸载、表里截排水、设置双排抗滑桩、坡面防护、桩挡墙等措施;浅层坍塌区(J-O段):采取预应力锚索框格梁、前坡卸载、表层排水和坡面防护、抗滑挡墙等措施。

4.2 深层易滑区地下水对滑坡稳定性的影响

滑体以碎石土层为主,存在较多孔隙,地表水极易入渗增大滑体重量、降低黏聚力和内摩擦角、潜蚀

滑体、润滑滑动面以致下滑力增大,抗滑力降低,而使滑动失稳。应在地表设置截排水沟和水平排水孔阻止地表水进入滑体,并在滑区上缘滑面以下完整基岩内设置排水隧洞,连接滑体内纵向排水孔以截排地下水。降低地下水位对滑坡稳定性的影响作用如图3所示,地下水位降低1, 2, 3 m时,滑坡稳定系数明显提高,表明降水作用对提高滑坡稳定性效果显著。

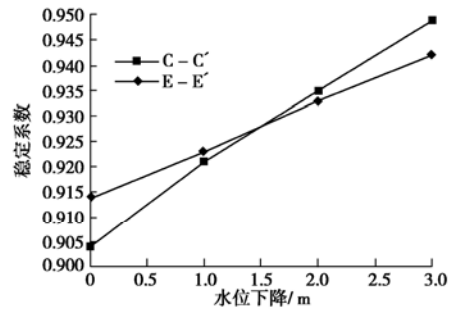


图3 水位下降与稳定系数的关系曲线图

Fig. 3 The relationship between groundwater and stability factors

4.3 双排抗滑桩对滑坡稳定性的影响

易滑区坡脚路基挡墙处设置I排抗滑桩,由于主滑段(B-F段)下滑推力大,滑区后缘应设置II排抗滑桩方可保证稳定。抗滑桩对滑坡稳定性的影响作用见图4,滑区初始稳定性差($K < 1.0$),设置双排抗滑桩稳定性显著提高,达到稳定系数 $K=1.25$ 的要求。

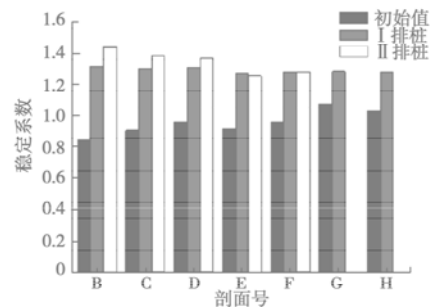


图4 设置抗滑桩与稳定系数的关系图

Fig. 4 The relationship between anti-slide piles and stability factors

4.4 浅层坍塌区预应力锚索框格梁对滑坡稳定性的影响

滑体为含碎石黏土,滑面浅,下滑推力小,设置预应力锚索框格梁体系可满足整体稳定性要求。锚索设计锚固力为 1000 kN,锚固深度穿过滑体直达完整基岩内。滑坡稳定性变化如表 2 所示,设置预应力锚索框格梁对提高滑坡整体稳定性的效果显著,既阻止发生浅层滑坡的可能性,也避免局部坍塌现象的发生。

表 2 浅层坍塌区稳定系数对比表

Table 2 The correlation table of stability factors

剖面号	K-K'	L-L'	M-M'	N-N'	O-O'
初始稳定系数	1.148	1.124	1.159	1.196	1.097
治理稳定系数	1.323	1.312	1.342	1.445	1.403

由此,经分区各关键因子对滑坡稳定性的影响作用分析表明:综合决策模型对滑坡稳定性区划和工程治理设计具有积极的指导意义,为滑坡分区治理和采取科学合理的工程措施提供可靠依据。

5 结 语

详细阐述了模糊聚类-灰色关联综合决策模型的理论模型和流程结构,并编制了相应的计算机软件程序,实现对官家滑坡的稳定性综合区划研究。基于滑坡综合模型参数进行稳定性模糊聚类分区,并结合详细地质调查分析和滑坡属性特征研究将其整体分为深层易滑区和浅层坍塌区;再对各区分别构建影响因子决策矩阵进行灰色关联分析,求解各因子的关联度,判决各因子对滑坡稳定性的影响程度,确定关键因子,为工程治理提供理论依据。通过工程治理评价分析了各主要影响因子对滑坡稳定性的影响作用,证实综合决策模型为采取有效的工程治理区划指明了方向,对滑坡工程治理具有极其重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 432 - 454. (HUANG Run-qiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 432 - 454. (in Chinese))
- [2] 黄波林, 陈小婷. 香溪河流域白家堡滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 938 - 942. (HUANG Bo-lin, CHEN Xiao-ting. Deformation failure mechanism of Baijiabao landslide in Xiangxi River Valley[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 938 - 942. (in Chinese))
- [3] 陈万业, 董兰凤. 某水电站库区一大型滑坡的形成机制与环境评价影响[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 282 - 287. (CHEN Wan-ye, DONG Lan-feng. The research of formation mechanism and stability on a landslide in a hydropower station[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 282 - 287. (in Chinese))
- [4] 李守定, 李 晓, 刘艳辉. 清江茅坪滑坡形成演化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 377 - 384. (LI Shou-ding, LI Xiao, LIU Yan-hui. Study on ceneration and evolution of Maoping landslide on Qingjiang River[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 377 - 384. (in Chinese))
- [5] 姚 环, 郑 振, 简文彬, 等. 公路岩质高边坡稳定性的综合评价研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 558 - 563. (YAO Huan, ZHENG Zhen, JIAN Wen-bin, et al. Comprehensive evaluation and research on stability of high lithological slope of expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 558 - 563. (in Chinese))
- [6] 戴自航, 卢才金. 边坡失稳机理的力学解释[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1191 - 1197. (DAI Zi-hang, LU Cai-jin. Mechanical explanations on mechanism of slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1191 - 1197. (in Chinese))
- [7] 浙江省交通规划设计研究院. 龙丽高速公路龙游官家滑坡治理设计说明[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2005. (Zhejiang Provincial Plan & Research Institute of Communications. Treatment design specification of Guanjia landslide[R]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Plan & Research Institute of Communications, 2005. (in Chinese))
- [8] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000. (XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Methods of fuzzy mathematics and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 张 跃, 邹寿平, 宿 芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. (ZHANG Yue, ZOU Shou-ping, SU Fen. Methods of fuzzy mathematics and its application[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [10] 刘思峰, 党建国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (LIU Si-feng, DANG Jian-guo, FANG Zhi-geng. Theory of grey system and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))