

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0711-04

基于范数灰色理论的滑坡稳定性敏感因子分析

朱良峰^{1,3}, 李 建², 潘 信¹, 吴信才³

(1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 山东大学 土建学院, 济南 250061;
3. 中国地质大学 信息工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 灰色关联分析模型可用于滑坡稳定性敏感因子的定量分析。将范数灰色理论引入到滑坡稳定性敏感因子分析之中, 确定了影响滑坡稳定性系数的因素权重, 较为直观地反映了各影响因子对滑坡稳定性的影响程度。以重庆市綦江县土台镇滑坡为例, 进行滑坡稳定性敏感因子的范数灰关联度计算。结果显示, 滑动面岩土体强度参数是影响土台镇滑坡稳定性最重要的因素, 地震作用和地下水位的变化对该滑体稳定性的影响要稍弱一些。

关 键 词: 滑坡稳定性分析; 范数灰关联度; 敏感性; 影响因素; 权重系数

中图分类号: O 159

文献标识码: A

Sensitive factor analysis of landslide stability based on norm gray relational grade

ZHU Liang-feng^{1,3}, LI Jian², PAN Xin¹, WU Xin-cai³

(1. Key Laboratory of GISciences for Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Gray correlation model can be applied to the sensitive factor analysis of landslide stability; but the traditional approach for computing gray relational grade, which is based on average values, may obliterate information of the specific characteristics of gray coefficients, and possibly make miscalculation of the order relationship with whole approximation. The norm gray relational grade has a better approximation than the traditional approach; and it can express the specific characteristics of gray correlation coefficients. The norm gray relational grade is used to analyze sensitive factors that control the stability of the landslide; and the weight coefficients of each sensitive factor can be calculated. A case study of Tutaizhen landslide in Chongqing Municipality indicate that the shear strength parameters of the sliding surface are the key factors influencing the stability; and the actions of the earthquake and the groundwater are nonessential to the stability of Tutaizhen landslide.

Key words: landslide stability analysis; norm gray relational grade; sensitivity; influencing factor; weight coefficient

1 引 言

滑坡是一类重大的工程地质灾害, 其发生受诸多因素的影响。从宏观上来看, 这种区域性的地质灾害, 滑坡受控于工程地质岩土体组合、地形地貌、大气降水分布、地震烈度等级、人类工程活动影响等诸多因素^[1,2]。对于单体滑坡, 造成滑坡体不稳定的内因主要是滑动带岩土体的抗剪强度参数(如 c 、 ϕ 值), 外因主要是地下水位以及外界各种荷载(特别是地震荷载)作用方式、作用强度的变化。为了定量比较各种因素对滑坡稳定性影响的大小, 可采

用基于统计分析的方法(如概率分析、回归分析等), 或采用灰色关联分析的方法^[3]。基于统计分析的方法需要大量的试验数据, 具有很大的局限性, 而基于灰色系统理论的灰色关联分析方法则是一种相对理想的事物趋势分析方法^[4~6], 可用于滑坡稳定性敏感因子的定量分析之中, 但传统的基于均值方法的灰关联度计算方法可能会湮没关联因数的个性化信息, 并可能产生对整体接近性序列关系的误判。基于范数概念计算的灰关联度则比基于均值方法的灰关联度具有更好的整体接近性, 且能够体现关联系数的个性化特征, 能充分利用计算出的灰关联度,

收稿日期: 2006-04-10

基金项目: 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室开放课题基金; 上海市自然科学基金项目 (No. 06ZR140317)。

作者简介: 朱良峰, 男, 1978 年生, 博士, 主要从事地质灾害预测预报与地学空间信息建模工作。E-mail: LFZHU@geo.ecnu.edu.cn

使灰色关联分析量化^[6,7]。

2 范数灰色理论

灰色系统理论 (grey system theory) 是由邓聚龙于 20 世纪 80 年代初提出的, 经过 20 多年的发展, 已形成了以系统分析、信息处理、建模预测、决策控制为主要内容的理论体系, 广泛应用于工程控制、经济管理、社会系统等众多领域^[4,5]。灰色关联分析模型是分析贫信息系统因素间关联关系的一种灰色模型。在灰色关联分析时, 灰关联度是确定因素间关联关系的尺度指标, 常用的是由邓聚龙提出的邓氏关联度^[4,6,7], 其定义如下: 对于一参考序列 $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$, 与 X_0 相比较的比较序列 $X_j = \{x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(n)\}$, $j=1, 2, \dots, m$, 则 X_j 对 X_0 在第 k 点的灰关联系数为 $r_j(k)$, X_j 对 X_0 的灰关联度为 r_j :

$$\left. \begin{aligned} r_j(k) &= \frac{\min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| + \rho \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|}{|x_0(k) - x_j(k)| + \rho \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|} \\ r_j &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_j(k) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 ρ 为分辨系数。第 j 个比较序列所有灰关联系数构成灰关联系数列, 即 $\eta_j = \{r_j(k) | k=1, 2, \dots, n\}$, $j=1, 2, \dots, m$ 。对于 $\eta_j (j=1, 2, \dots, m)$, 可引入关联系数的理想列和负理想列的概念: 关联系数的理想列 $\eta^+ = \{\max_j r_j(k) | (j=1, 2, \dots, m); k=1, 2, \dots, n\} = \{\eta^+(k) | k=1, 2, \dots, n\}$; 关联系数的负理想列 $\eta^- = \{\min_j r_j(k) | (j=1, 2, \dots, m); k=1, 2, \dots, n\} = \{\eta^-(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ 。

对于第 j 个比较序列 $X_j (j=1, 2, \dots, m)$, 可定义其关联系数的 2 个范数:

$$\left. \begin{aligned} d_j^+ &= \sqrt{\sum_{k=1}^n (\eta_j(k) - \eta^+(k))^2}, (k=1, 2, \dots, n); \\ d_j^- &= \sqrt{\sum_{k=1}^n (\eta_j(k) - \eta^-(k))^2}, (k=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, d_j^+ 为第 j 个比较序列的近距离; d_j^- 为第 j 个比较序列的远距离。确定关联序时, 近距离越小, 远距离越大, 则比较列的关联性越强, 因此可将范数灰关联度定义为

$$\varepsilon_j = d_j^+ / (d_j^+ + d_j^-), j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

为了确定各个比较序列 (子因素) 对参考序列 (母因素) 的影响程度, 可将各比较序列的范数灰关联度进行归一化处理, 并将其结果作为因素权重:

$$\omega_j = \varepsilon_j / \sum_{j=1}^m \varepsilon_j, j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中, ω_j 为第 j 个子因素对比母因素的因素权重; ε_j 为第 j 个比较序列的范数灰关联度。可以看出, 范数灰关联度是对邓氏关联度的改进。邓氏关联度在计算过程中所采用的均值算法是对关联个性信息的一次湮没过程, 可能会产生对整体接近性序列关系的误判^[6], 而范数灰关联度所采用的范数方法则是对个性信息的再挖掘过程, 它是在不改变关联系数的前提下对信息进行的再补充, 这一过程对贫信息系统的白化显得至关重要。

3 建模分析流程

根据范数灰色关联理论, 结合滑坡稳定性敏感因子分析的实际需要, 构建出滑坡稳定性敏感因子分析的基本流程 (图 1)。下文将以一典型滑坡体的稳定性分析为例, 说明建模分析的详细步骤。

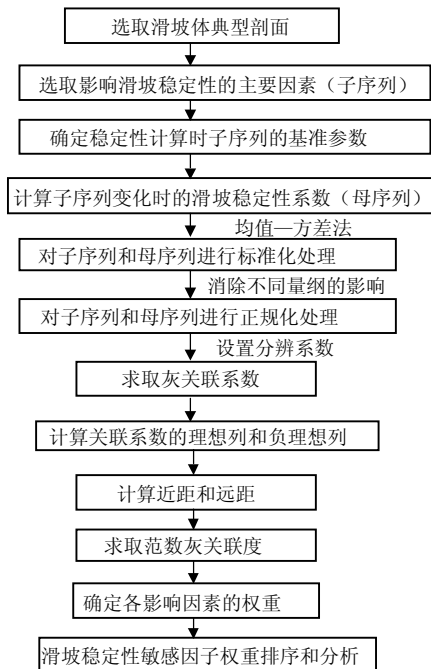


图 1 基于范数灰色理论的滑坡稳定性敏感因子分析流程
Fig.1 Flow chart of sensitive factor analysis of landslide stability based on norm gray relational grade

4 应用实例

土台镇滑坡位于重庆市綦江县土台镇集镇后山斜坡上, 分布面积约为 0.17 km^2 , 体积约为 600 万

m^3 ，是重庆市的重点地质灾害点之一^[8]。该滑坡体属大型厚层岩质滑坡，其后缘依附集镇后山斜坡东南部，前缘一部分临斜坡西侧陡坡，一部分临斜坡北侧坡脚，平面形状呈不规则扇形（典型剖面见图2）。该滑坡为一正在活动的滑坡，滑坡体的变形严重危及前缘土台镇居民、政府机关、企事业单位及有关厂矿建筑物的安全，有必要对土台镇滑坡的稳定性及其影响因素进行系统地分析评价。

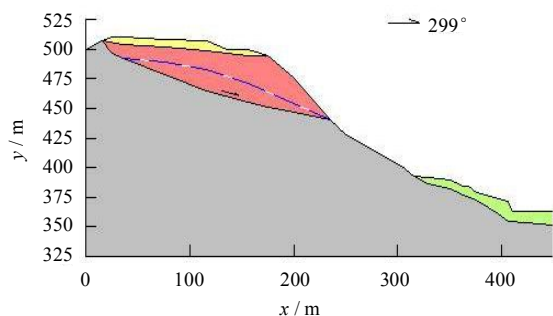


图2 土台镇滑坡稳定性计算剖面(11-11'剖面)

Fig.2 The profile used to calculate stability factor of Tutaizhen landslide (profile 11-11')

该滑坡的稳定性与外界各种荷载作用方式、作用强度有关。根据影响该滑坡稳定性系数的主要因素（滑动面岩土体强度、降雨引起的滑体中地下水位的抬升以及可能的地震荷载），选取 c 、 ϕ 、地震加速度系数 g 和水中滑体厚度与滑体总厚度之比等4个影响因素作为比较数列，选取滑坡稳定性系数 K 作为参考数列。运用剩余推力法进行土台镇滑坡稳定性系数计算时的基准参数： $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$ ， $c = 36 \text{ kPa}$ ， $\phi = 15.5^\circ$ ， $g = 0.069$ ，水中滑体厚度/滑体总厚度为0.33。以基准参数为基础，计算在某一参数改变，而其他参数固定不变的情况下的滑坡稳定性系数 K 。参数取值及计算结果见表1。接着采用均值一方差法对表1中的原始数据进行标准化处理，然后利用正规化处理消除不同量纲的影响。处理后的结果见表2。

下面求取关联系数。取分辨系数 $\rho = 0.5$ ，根据灰关联系数的计算公式，求出表2中各数据的关联系数。计算结果见表3。计算关联系数的理想列和负理想列。根据表3中的关联系数，计算出关联系数的理想列为： $\eta^+ = (0.93, 0.83, 0.86, 0.73, 1.00, 1.00, 1.00, 0.73, 0.99, 1.00, 0.87, 0.82, 0.73, 0.89, 0.55, 0.73, 0.72, 0.82, 0.81, 0.84)$ ；关联系数的负理想列为： $\eta^- = (0.33, 0.41, 0.54, 0.46, 0.34, 0.34, 0.47, 0.46, 0.38, 0.33, 0.34, 0.39, 0.46, 0.51, 0.46, 0.46, 0.52, 0.56, 0.53, 0.48)$ 。

表1 土台镇滑坡稳定性系数计算结果

Table 1 Calculation results of landslide stability

序号	c /kPa	ϕ /(°)	地震加速度 系数/ g	水中滑体厚度 滑体总厚度	稳定性系数 K
1	0				0.602
2	15				0.701
3	30	15.5	0.069	0.33	0.806
4	36				0.883
5	40				1.095
6		5.0			0.576
7		10.0			0.762
8	36	15.5	0.069	0.33	0.883
9		17.0			0.997
10		20.0			1.103
11			0		1.095
12			0.025		0.982
13	36	15.5	0.069	0.33	0.883
14			0.10		0.803
15			0.20		0.789
16				0.33	0.883
17				0.35	0.880
18	36	15.5	0.069	0.40	0.851
19				0.45	0.822
20				0.50	0.814

表2 经标准化、正规化处理后的滑坡稳定性系数计算数据

Table 2 Processed data by standardization and normalization

序号	c /kPa	ϕ /(°)	地震加速度 系数/ g	水中滑体厚度 滑体总厚度	稳定性系数 K
1	0				0.049
2	0.375				0.237
3	0.75	0.7	0.345	0	0.436
4	0.9				0.583
5	1				0.985
6		0			0
7		0.3333			0.353
8	0.9	0.7	0.345	0	0.583
9		0.8			0.799
10		1			1
11			0		0.985
12			0.125		0.770
13	0.9	0.7	0.345	0	0.583
14			0.5		0.431
15			1		0.404
16				0	0.583
17				0.117 6	0.577
18	0.9	0.7	0.345	0.411 8	0.522
19				0.705 9	0.467
20				1	0.452

计算近距和远距。根据近距和远距的计算公式，计算出各比较列的近距和远距，求取范数灰关联度。根据范数灰关联度的定义和近距、远距的计算结果，求得各比较列的范数灰关联度，见表4。

确定各影响因素的权重。将表 4 中的范数灰关联度计算结果代入因素权重计算公式,求得各个因素对滑坡稳定性系数的因素权重,见表 5。

表 3 关联系数数据表
Table 3 Correlation coefficients

序号	c / kPa	ϕ / (°)	地震加速度 系数/ g	水中滑体厚度 滑体总厚度
1	0.93	0.33	0.63	0.91
2	0.79	0.41	0.83	0.68
3	0.61	0.55	0.86	0.53
4	0.61	0.73	0.69	0.46
5	1.00	0.53	0.44	0.34
6	0.34	1.00	0.60	1.00
7	0.47	0.94	1.00	0.59
8	0.61	0.73	0.69	0.46
9	0.84	0.99	0.53	0.38
10	0.85	1.00	0.44	0.33
11	0.87	0.53	0.34	0.34
12	0.80	0.82	0.44	0.39
13	0.61	0.73	0.69	0.46
14	0.51	0.55	0.89	0.54
15	0.49	0.52	0.46	0.55
16	0.61	0.73	0.69	0.46
17	0.60	0.73	0.69	0.52
18	0.56	0.65	0.75	0.82
19	0.53	0.58	0.81	0.68
20	0.52	0.57	0.84	0.48

表 4 各参数的近距、远距和范数灰关联度
Table 4 Near distance, far distance and norm gray
relational grade of each parameter

参数	c / kPa	ϕ / (°)	地震加速度 系数/ g	水中滑体厚度 滑体总厚度
近距	1.14	1.11	1.25	1.62
远距	1.40	1.45	1.18	0.97
范数灰关联度	0.55	0.57	0.49	0.37

表 5 滑坡稳定性影响因素的权重系数
Table 5 The weight coefficients of each influencing factor

参数	c / kPa	ϕ / (°)	地震加速度 系数/ g	水中滑体厚度 滑体总厚度
权重	0.28	0.29	0.24	0.19

根据表 5 中计算出来的因素权重可以看出,在选取的 4 个滑坡稳定性影响因素中,各因素对滑坡稳定性系数的影响程度是不同的: c 、 ϕ 值是影响土台镇滑坡稳定性最重要的因素(其中 ϕ 值的重要性要稍高于 c 值的变化),其次是地震加速度系数 g ,而相对于其他因素,水中滑体厚度与滑体总厚度之比的影响要偏小一些;这也反映了滑动面岩土体强度参数是影响土台镇滑坡稳定性最重要的因素,而地震作用和地下水位的变化对该滑体稳定性的影响要稍弱一些。对比该滑坡的有限元模拟分析

结果^[8]以及实际验证,以上分析结果是比较合理的。

5 结 语

本文将范数灰色理论引入到滑坡稳定性敏感因子分析之中,以重庆市綦江县土台镇滑坡为例,进行了滑坡稳定性敏感因子的范数灰关联度计算。结果显示,滑动面岩土体强度参数是影响土台镇滑坡稳定性最重要的因素,而地震作用和地下水位的变化对该滑体稳定性的影响要稍弱一些。研究成果对土台镇滑坡稳定性分析和防治工程设计具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 乔建平,蒲晓虹.涪江上游滑坡相关因素研究[J].长江流域资源与环境,1995,4(2):170—176.
QIAN Jian-ping, PU Xiao-hong. On the relative factors of landslides over the upper reaches of the Fujiang River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 1995, 4(2): 170—176.
- [2] 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等.基于 GIS 的中国滑坡灾害风险分析[J].岩土力学,2003,24(S2):221—224.
ZHU Liang-feng, WU Xin-cai, YIN Kun-long, et al. Risk assessment of landslide in China using GIS technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(S2): 221—224.
- [3] 汪洋,殷坤龙,安关峰.滑坡敏感因子的灰色关联分析[J].岩土力学,2004,25(1):91—93.
WANG Yang, YIN Kun-long, AN Guan-feng. Grey correlation analysis of sensitive factors of landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(1): 91—93.
- [4] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [5] 王学萌,张继忠,王荣,等.灰色系统分析及实用计算程序[M].武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [6] 张岐山,梁亚东,吕作良,等.灰关联计算的新方法[J].大庆石油学院学报,1999,23(4):61—63.
ZHANG Qi-shang, LIANG Ya-dong, LV Zuo-liang, et al. A new method for computing grey relational grade[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1999, 23(4): 61—63.
- [7] 张志龙,王兰生.范数灰关联度分析法在灌浆加固工程中的应用[J].工程地质学报,2005,13(1):140—143.
ZHANG Zhi-long, WANG Lan-sheng. Application of the grey correlation analysis of the norm in the grouting reinforcement project[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(1): 140—143.
- [8] 朱良峰,殷坤龙,李征南,等.土台镇滑坡成因机制分析及稳定性评价[J].地下空间,2001,21(4):287—294.
ZHU Liang-feng, YIN Kun-long, LI Zheng-nan, et al. Analysis of mechanism of landslide formation in Tutai Town and evaluation of its stability[J]. *Underground Space*, 2001, 21(4): 287—294.