

边坡稳定性的聚类未确知综合识别方法及应用

薛锦春^{1,2}, 李夕兵¹, 董陇军¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 江西理工大学 南昌校区, 南昌 330013)

摘 要: 影响岩石边坡稳定性的因素众多且关系复杂, 且存在大量未确知信息, 很难用简单的方法进行分析判断, 借鉴工程类比的思想, 采用聚类与未确知测度相结合的方法进行研究。针对边坡工程问题环境的复杂性, 以大量的历史数据为训练样本, 通过动态聚类分析, 求得其分类中心。针对大量的未确知信息, 利用未确知测度方法对其进行评价, 提出一种分析边坡稳定问题的新方法。研究表明, 该算法可以对边坡的稳定状态进行预测, 正确率在 90% 以上, 为比较合理快速地分析边坡稳定分析方法提供了一条新的途径。

关 键 词: 岩石边坡; 稳定性分析; 聚类; 未确知识别

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Study of rock slope stability based on clustering uncertained measurement complicated algorithm

XUE Jing-chun^{1,2}, LI Xi-bing¹, DONG Long-jun¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Application Sciences, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: For the big disaster of landslide, it is important to study the stability of slopes. For the influence factors of rock slopes are numerous and their relationships are very complicated; it can not be solved by traditional methods; so generally based on engineering analogy, the clustering methods are used widely. For the complicated environment influence of slopes, this clustering is a complicated uncertained measurement optimization problem, and can not be solved by traditional methods very well. So, here the clustering uncertained measurement complicated algorithm has been introduced into slope engineering field for the first time. Based on this method, one new method for study stability of rock slope is proposed. Based on analyzing the data of slope examples, using clustering uncertained measurement complicated algorithm, the stability of rock slopes can be estimated. The engineering application can prove that, this new algorithm can automatically sort the slope samples, and the validity is more than 90%, so it is a very practical and new method for slope stability analysis.

Key words: rock slope; stability analysis; clustering; uncertained estimate

1 引 言

边坡失稳产生的灾害是最为重要的地质灾害之一, 特别是随着大量开采业、水利水电业、公路业的不断发展, 期滑坡现象日益严峻。鉴于此, 边坡稳定性的评价与预测是边坡工程研究的根本问题, 也是边坡研究中最难和最迫切的课题之一。影响边坡体稳定性的因素很多, 而且各因素之间关系复杂。目前已经有很多学者在此方面进行了很多卓有成效研究, 对这些研究进行分类, 不难发现, 目前的方

法大致可以分为 3 类, 第 1 为传统的极限平衡计算方法^[1], 该方法的优点是可对边坡进行定量的计算而得到其稳定安全系数, 而且有时计算也比较方便, 但其缺点是计算中需要做一些假设和限制, 且稳定性的判断主要依赖于经验, 主观性较强; 第 2 为数值计算的方法^[2], 如强度折减法等, 这类方法的优点是对边坡的计算比较直观且比较方便, 但其缺点是计算中需要人为给定一些计算参数, 而这些参数往往很难获得, 且稳定性的判断也要依赖于一些经验, 也有主观性因素的存在; 第 3 类方法是基于工

程类比的方法,如模糊综合评价方法、灰色聚类评价方法、可靠度评价方法、系统聚类评价方法以及神经网络评价方法等^[3-7],这类方法的优点是可以从不同的侧面反映影响边坡稳定性的不确定因素,工程应用方便,但其缺点就是需要大量类似工程的资料。这类工程类比法中一个很主要的思想就是聚类分析,其实质就是通过将边坡样本按相似性分类,按照相似性原则对边坡稳定性进行判断。传统的聚类方法往往只完成了对历史数据资料的聚类,如何利用这些聚类的结果对类似工程的稳定性进行预测呢?为了很好地解决此类问题,以历史资料的聚类中心作为分级标准,建立未确知测度分析模型,进而可以根据建立的模型对待预测边坡的稳定新进行估计。

2 聚类未确知综合识别方法计算理论

2.1 确定待预测事物的分类模式系统

设 $R_1, R_2, \dots, R_n$ 为待分类(或已经分类)的 n 个对象,则分类对象空间 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 。对 $R_i \in R$ ($i \leq n$),有 m 个评判指标 $x^1, x^2, \dots, x^m$,则评判指标空间为 $X = (x^1, x^2, \dots, x^m)$,于是 R_i 可表示为 m 维向量 $R_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m\}$,其中 x_i^j 表示研究对象 R_i 关于测量指标 x^j 的测量值,对每个 x_i^j 有 K 个分类等级 $C_1, C_2, \dots, C_K$,分类空间记为 Ω , $\Omega = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 。设 C_k 标示分类等级,则 k 级高于 $k+1$ 级,记作 $C_1 > C_2 > C_3 \dots > C_K$,若 $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 满足 $C_1 > C_2 > C_3 \dots > C_K$ 或 $C_1 < C_2 < C_3 \dots < C_K$,则称 $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ 是分类对象空间 $R_1, R_2, \dots, R_n$ 的一个有序分割类^[8-11]。则分类矩阵可以表示为

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_k \\ \begin{matrix} x^1 \\ x^2 \\ \vdots \\ x^m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mk} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

式中: a_{jp} ($1 \leq j \leq m, 1 \leq p \leq k$) 为某一类样本的聚类中心(通过动态聚类的方法求其分类中心),作为分类标准,要求满足 $a_{j1} > a_{j2} > \dots > a_{jk}$ 或 $a_{j1} < a_{j2} < \dots < a_{jk}$ 。

2.2 未确知均值分级方法的主要步骤

(1) 求取各分类总体指标的平均值,可得分类矩阵^[8]。

(2) 根据分类矩阵求个指标的未确知测度函数,具体方法可参见文献^[7-12]。

(3) 指标权重确定,用 w_j 表示测量指标 x_j 与其他指标相比具有的相对重要程度,要求 w_j 满足:

$0 \leq w_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 称 w_j 为 x_j 的权重, $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 称为指标权重向量。设由未确知测度 μ_{ik}^j 所确定的信息熵为

$$H_j = \sum_{i=1}^K \mu_{ik}^j \lg \mu_{ik}^j \quad (2)$$

$$\text{令 } v_j = 1 + \frac{1}{\lg K} \sum_{k=1}^K \mu_{ik}^j \lg \mu_{ik}^j \quad (3)$$

$$\text{令 } w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (4)$$

则 w_j 体现 x_i 的重要程度, 且 $0 \leq w_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 故 w_j 可作为 x_j 的权重^[12]。

(4) 多指标加权综合测度分类向量及结果识别

令 $\mu_{ik} = \mu(\mu_i \in C_k)$ 表示样本 R_i 属于第 k 个评价类 C_k 的程度, 则

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ik}^j \quad (5)$$

由于 $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$, 并且 $\sum_{i=1}^K \mu_{ik} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ik}^j = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^K \mu_{ik}^j \right] w_j = \sum_{j=1}^m w_j = 1$, 所以 μ_{ik} 是未确知测度。

称 $(\mu_{11}, \mu_{12}, \dots, \mu_{1K})$ 为样本 R_1 的多指标加权综合测度分类向量。若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 引入置信度识别准则如下^[12]:

设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$, 常取 0.6 或 0.7), 若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 令

$$k_0 = \min \left\{ k : \sum_{l=1}^k \mu_l > \lambda, k = 1, 2, \dots, p \right\} \quad (6)$$

则认为评价因素 R 属于第 k_0 个评价类 C_{k_0} 。

3 工程实例

为了研究聚类未确知综合识别方法在实际边坡稳定分析中的应用情况, 本文采用收集到的几个工程实例进行说明。

3.1 工程实例 1

采用文献^[4]给出的 36 个边坡工程资料进行分析。36 个边坡的稳定性影响因素指标及量化处理的结果如表 1 所示。以前 30 组样本建立聚类未确知综合识别模型, 并用该模型对其回判验证, 进而对待

预测的检验样本进行评估。结果如表 2 所示。为了进行比较,在表 2 中也列出了常规聚类法及文献[4]中的计算结果。可见回判估计正确率在 90%以上,预测样本正确率高。

表 1 边坡实例
Table 1 Slope samples

边坡 编号	外形 特征	滑面 特征	滑带 强度	近期 活动	河流 作用	后缘 加载	暴雨 作用	地震 作用	人工 活动
1	1.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.0	1.0	0.5	0.0
2	0.5	1.0	0.0	0.5	0.5	0.0	1.0	0.5	0.0
3	0.5	1.0	0.0	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	0.0
4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0
5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0
6	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0	0.5
7	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.0	0.0
8	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0	0.0
9	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.5	0.0	0.0
10	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0
11	1.0	0.5	1.0	1.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
12	1.0	0.5	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0
13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0
14	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0
15	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0
16	1.0	0.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0
17	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0
18	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0
19	1.0	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0
20	0.5	0.5	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0
21	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.0	0.5
22	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	0.5
23	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	1.0
24	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0
25	0.5	0.0	1.0	0.5	0.0	1.0	1.0	0.0	0.5
26	1.0	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.5
27	0.5	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.0	0.5
28	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0
29	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.0	1.0
30	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.0	0.0
31*	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0
32*	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0
33*	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.5	0.0	0.0
34*	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0
35*	0.5	0.5	0.0	0.5	1.0	0.0	0.5	0.0	0.0
36*	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0

注：注*的样本为带预测的检验样本，下同。

表 2 边坡稳定性分析结果

Table 2 Computing results

边坡编号	常规聚类法	文献[4]方法	本文方法
	级别	级别	级别
1	IV	IV	IV
2	IV	IV	IV
3	IV	III	III
4	I	I	II
5	III	III	III
6	II	II	II
7	II	II	II
8	II	II	II
9	II	II	II
10	III	II	II
11	III	III	III
12	V	V	V
13	III	II	II
14	III	III	III
15	III	III	III
16	III	III	III
17	III	II	II
18	III	III	III
19	V	V	V
20	V	IV	IV
21	IV	IV	V
22	I	I	II
23	I	I	II
24	V	V	V
25	IV	IV	IV
26	V	VI	V
27	V	V	V
28	IV	III	III
29	IV	IV	IV
30	IV	IV	IV
31*	VI	VI	V
32*	III	III	III
33*	VI	V	V
34*	VI	VI	V
35*	V	VI	V
36*	V	V	V

由表 2 亦发现,聚类未知综合识别算法得到的结果与文献[4]中方法及传统聚类方法的结果基本相同,但与极限平衡法的结果^[5]相比误差较小。

而且,聚类未知综合识别算法不同于文献方法及常规聚类方法之处在于传统的聚类方法往往只完成了对历史数据资料的聚类,如何利用这些聚类的结果对类似工程的稳定性进行预测没有考虑,为了很好地解决此类问题,以历史资料的聚类中心作为分级标准,建立未知测度分析模型,进而可以根据建立的模型对待预测边坡的稳定新进行估计。

3.2 工程实例 2

为了再次验证聚类未知综合识别算法在已边坡稳定分析中的应用效果,以文献[6]中列出的 38 组边坡工程的资料进行研究,边坡资料见表 3 所示,

表 3 待处理边坡的地质资料及稳定情况
Table 3 Slope samples and their stabilities

编号	$\gamma /(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi /(^{\circ})$	$\psi_r /(^{\circ})$	H/m	γ_w	安全 系数	稳定 状态
1	22.4	10.0	35.0	45.0	10.0	0.40	0.90	0
2	20.0	20.0	36.0	45.0	50.0	0.50	0.83	0
3	20.0	0.1	36.0	45.0	50.0	0.25	0.79	0
4	20.0	0.1	36.0	45.0	50.0	0.50	0.67	0
5	22.0	0.0	40.0	33.0	8.0	0.35	1.45	1
6	24.0	0.0	40.0	33.0	8.0	0.30	1.58	1
7	20.0	0.0	24.5	20.0	8.0	0.35	1.37	1
8	18.0	0.0	30.0	20.0	8.0	0.30	2.05	1
9	27.0	40.0	35.0	43.0	420.0	0.25	1.15	0
10	27.0	50.0	40.0	42.0	407.0	0.25	1.44	1
11	27.0	35.0	35.0	42.0	359.0	0.25	1.27	1
12	27.0	37.5	35.0	37.8	320.0	0.25	1.24	1
13	27.0	32.0	33.0	42.6	301.0	0.25	1.16	0
14	27.0	32.0	33.0	42.2	289.0	0.25	1.30	1
15	27.3	14.0	31.0	41.0	110.0	0.25	1.25	1
16	27.3	31.5	29.7	41.0	135.0	0.25	1.25	1
17	27.3	16.8	28.0	50.0	90.5	0.25	1.25	1
18	27.3	26.0	1.0	50.0	92.0	0.25	1.25	1
19	27.3	10.0	39.0	41.0	511.0	0.25	1.47	1
20	27.3	10.0	39.0	40.0	470.0	0.25	1.43	1
21	25.0	46.0	35.0	47.0	443.0	0.25	1.28	1
22	25.0	46.0	35.0	44.0	435.0	0.25	1.37	1
23	25.0	46.0	35.0	46.0	432.0	0.25	1.23	1
24	26.0	150.0	45.0	30.0	200.0	0.25	1.20	0
25	18.5	25.0	0.0	30.0	6.0	0.25	1.09	0
26	18.5	12.0	0.0	30.0	6.0	0.25	0.78	0
27	22.4	10.0	35.0	30.0	10.0	0.25	2.00	1
28	21.4	10.0	30.3	30.0	20.0	0.25	1.70	1
29	22.0	10.0	36.0	45.0	50.0	0.25	1.02	0
30	22.0	20.0	36.0	45.0	50.0	0.25	0.89	0
31	12.0	0.0	30.0	35.0	4.0	0.25	1.46	1
32	12.0	0.0	30.0	45.0	8.0	0.25	0.80	0
33*	12.0	0	30.0	35.0	4.0	0.25	1.44	1
34*	31.3	68.0	37.0	49.0	200.0	0.25	1.20	0
35*	20.0	20.0	36.0	45.0	50.0	0.25	0.96	0
36*	27.0	40.0	35.0	47.1	292.0	0.25	1.15	0
37*	25.0	55.0	36.0	44.5	299.0	0.25	1.55	1
38*	27.3	10.0	39.0	40.0	480.0	0.25	1.45	1

表中： γ 为重度；黏聚力， c 、 φ 为内摩擦角； φ_r 为边坡角； H 为边坡高度； γ_w 为孔隙压力比。为了分类方便，表 3 中稳定状态危险时以 0 表示，安全时以 1 表示。

把表 3 中的实例样本代入聚类未确知综合识别进行计算，分类结果如表 4 所示。

表 4 计算结果
Table 4 Computing results

编号	极限平衡法	本文方法	编号	极限平衡法	本文方法
1	0	0	20	1	1
2	0	0	21	1	1
3	0	0	22	1	1
4	0	0	23	1	1
5	1	1	24	0	0
6	1	1	25	0	0
7	1	1	26	0	0
8	1	1	27	1	1
9	0	1	28	1	1
10	1	1	29	0	0
11	1	1	30	0	0
12	1	1	31	1	1
13	0	1	32	0	0
14	1	1	33*	1	1
15	1	1	34*	0	1
16	1	1	35*	0	0
17	1	1	36*	0	1
18	1	1	37*	1	1
19	1	1	38*	1	1

由表 4 可以发现，聚类未确知综合识别算法的计算结果同极限平衡法基本相同，回判估计正确率亦在 90% 以上，且预测样本正确率高，进一步说明该算法可以很好的进行边坡稳定分析，是一种有效的边坡稳定分析新方法。

4 结 语

边坡工程由于计算的复杂性，工程类比判断其稳定性是一种有效的工程方法。考虑到边坡工程问题自身的极端复杂性，类似聚类问题必将是一个非常复杂不确定性问题。通过动态聚类分析，求得其分类中心。针对大量的未确知信息，利用未确知测度方法对其进行评价，提出一种分析边坡稳定问题的新方法。该方法在分析边坡工程实例资料的基础上，采用聚类算法及未确知测度方法，以工程类比的思想判断边坡的稳定状态。通过收集到的边坡工程实例对新算法的验证，研究表明该方法回判估计错误率低，精确度高。为比较合理快速的分析边坡稳定分析方法提供了一条新的方法。

参 考 文 献

[1] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

- [2] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 马越平, 宁淑平, 李晓玲, 等. 应用灰色聚类方法评价边坡稳定性[J]. 内蒙古煤炭经济, 2004, (2): 78—81.
MA Yue-ping, NING Shu-ping, LI Xiao-ling, et al. The gray assemble kind in the side slope stable of application[J]. **Inner Mongolia Coal Economics**, 2004, (2): 78—81.
- [4] 谢全敏, 夏元友. 边坡稳定性评价的自适应模拟退火聚类分析法[J]. 灾害学, 2002, 17(1): 15—19.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. A self-adaptive clustering method based on the simulated annealing algorithm for evaluation of slope stability[J]. **Journal of Catastrophology**, 2002, 17(1): 15—19.
- [5] 谢全敏, 夏元友. 岩体边坡稳定性的可拓聚类预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 438—441.
XIE Quan-min, XIA Yuan-you. Extension classification prediction method for the stability of rock-mass slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 438—441.
- [6] 付义祥, 刘世凯, 刘大鹏. RBF 神经网络在边坡岩体稳定性中的预测研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(2): 70—73.
FU Yi-xiang, LIU Shi-kai, LIU Da-peng. Predicting models to estimate stability of tock slope based on RBF neural network[J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2003, 27(2): 70—73.
- [7] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 膨胀土胀缩等级分类的未确知均值聚类方法及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(5): 1075—1080.
DONG Long-jun, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. Unascertained average clustering method for classification of grade of shrink and expansion for expansive soils and its application[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2008, 39(5): 1075—1080.
- [8] 董陇军, 李夕兵, 宫凤强. 开采地面沉陷预测的未确知聚类预测模型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 95—99.
DONG Long-jun, LI Xi-bing, GONG Feng-qiang. Predicting surface subsidence induced by mining based on unascertained clustering method[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2008, 19(2): 95—99.
- [9] 董陇军, 王飞跃. 基于未确知测度的边坡地震稳定性综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 74—78.
DONG Long-jun, WANG Fei-yue. Comprehensive evaluation on seismic stability of slopes based on unascertained measurement[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2007, 18(4): 74—78.
- [10] DONG Long-jun, PENG Gang-jian, FU Yu-hua, et al. Unascertained measurement classifying model of goaf collapse prediction[J]. **Journal of Coal Science & Engineering**, 2008, 14(2): 221—224.
- [11] 刘开第, 庞彦军, 孙光勇, 等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(12): 52—58.
LIU Kai-di, PANG Yan-jun, SUN Guang-yong, et al. The unascertained measurement evaluation on a city's environmental quality[J]. **Systems Engineering Theory & Practice**, 1999, 19(12): 52—58.
- [12] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40—42.
CAO Qing-kui, LIU Kai-zhan, ZHANG Bo-wen. Calculation method of objective index weight by entropy[J]. **Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology**, 2000, 17(3): 40—42.