DOI：10.16285/j.rsm.2016.2756

基于聚类分析的边坡稳定性研究

秦雨樵[1,2]，汤 华[1]，冯振洋[3]，尹小涛[1]，王东英[1,2]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室，湖北 武汉 430071；
2. 中国科学院大学，北京 100000；3. 重庆大学 土木工程学院，重庆 400030）

摘 要：在边坡稳定性分析中，滑面搜索方法对于得到边坡的稳定性系数至关重要。现今两种常用的边坡稳定性分析方法，极限平衡法以及强度折减法，可以得到极限应力状态下边坡的潜在滑面。而为了评价边坡在当前应力场下的稳定性，提出一种基于聚类分析概念的滑面搜索方法。这种方法综合考虑了边坡各点的位移以及点安全系数，采用 K 均值聚类法将具有相近性质的点进行分类，把边坡体分为潜在危险区以及稳定区。潜在危险区的边界即为边坡在当前应力状态下的潜在滑面，并运用矢量和方法计算得到其稳定性系数。采用上述方法对 3 个算例进行验算，并与极限平衡法以及强度折减法进行对比。结果表明：（1）基于聚类分析的边坡稳定性评价方法具有较好的合理性和可靠性；（2）当边坡处于临界状态附近，通过聚类分析得到的潜在滑面与其他两种方法得到的滑面基本一致；当边坡处于较稳定状态时，当前应力状态下的潜在滑面要比强度折减法得到的滑动带范围要更深更广，但求出的稳定性系数也较高；当存在软弱夹层时，矢量和计算出的滑面更为陡峻，稳定性系数比其他两种方法的结果要小。

关 键 词：边坡稳定性分析；滑面搜索方法；聚类分析；矢量和方法；
中图分类号：TU 42 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018)08－2977－08

Slope stability evaluation by clustering analysis

QIN Yu-qiao[1,2], TANG Hua[1], FENG Zhen-yang[3], YIN Xiao-tao[1], WANG Dong-ying[1,2]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China）

Abstract: Study on searching methods of slip surface plays a crucial role in slope stability analysis to assess the safety factor of slopes. The potential failure surface under ultimate stress state can be found by limit equilibrium method (LEM) and strength reduction method (SRM). The objective of this paper is to present a new slip surface searching method, which considers the distribution of local safety factor and displacement under current stress state. The statistical concept, K-means clustering, is introduced to distinguish the points with similar characters in slope into potential failure set and stable set. Then the boundary of the potential failure set is regarded as the potential slip surface under current stress state and the safety factor of potential slip surface is calculated using vector sum method (VSM). Afterward, three examples were calculated using the presented method to compare with results from LEM and SRM. Results show that 1) Slope stability evaluation by clustering analysis has been proved to be reliable and effective; 2) If the slope is near the limit state, the potential surface obtained from the proposed method is consistent with the slip surfaces obtained from LEM and SRM. If the slope is stable, the potential slip surface under current stress state is deeper and larger but is with higher safety factor. If there is a weak layer in the slope, the potential slip surface is steeper, and the safety factor calculated from VSM is lower than that calculated from LEM and SRM.

Keywords: slope stability analysis; slip surface search; clustering analysis; vector sum method

1 引 言

边坡体发生失稳往往是沿着某一软弱面发生局部或者整体的滑移。在一些土质边坡或者强风化的岩质边坡中，往往不存在贯通性的软弱层位或者结构面。为了得到这些边坡的潜在滑面，学者做了

收稿日期：2016-11-28
基金项目：国家自然科学基金（No.51608518，No.41202226）；云南省交通科技项目（云交科教[2016]163 号一（三））。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51608518，41202226) and the Traffic Science and Technology Project of Yunnan Province [(2016)163].
第一作者简介：秦雨樵，男，1993 年生，硕士，主要从事工程岩体稳定性分析方面的研究工作。E-mail: qinyuqiao_whrsm@163.com

大量的研究。极限平衡法中采用滑面形状为弧形或者多段型的假设，对整个区域进行遍历搜索计算得到最小稳定性系数滑面[1−2]。在有限元分析中，Griffiths 等[3]将变形后网格出现的畸变带视为潜在滑面，但该方法仅适用于不考虑岩土土体剪胀性的特殊情况；连镇营等[4]通过广义剪应变分布图来确定潜在滑面的大致位置；宋二祥[5]则发展了 Riks 方法，得到一种跟踪结构变形曲线软化段的弧长法；孙冠华等[6]搜索一组垂直线段上的等效塑性应变最大点，并用数学方法进行光滑处理得到临界滑面；田东方等[7]采用更为复杂的遗传算法搜索二维以及三维滑体的危险滑面；郭明伟等[8]结合边坡矢量和分析方法以及单纯型法得到潜在滑面，但仍要求以极限平衡法搜索得到的临界滑面作为搜索的初始滑面。聂治豹等[9]则采用小波变换法的思想确定强度折减法中临界滑面问题。

上述方法在实际工程中有着广泛的运用，但是前提均假设边坡体达到极限状态，不能直观地反映真实应力状态下边坡的稳定性状态。然而当前状态下边坡体内部存在具有相近的运动性质或者应力状态的区域。当外部条件恶化或者内部岩土体性质弱化时，这些区域会有相似的响应，有些会趋向发生滑动，有些会趋于稳定，所以有必要了解边坡在真实应力状态下具有相近性质区域的分布状态。在本文中引入了统计学中聚类分析的概念，通过分析边坡内部各点处的总位移以及点安全系数，得到当前状态下边坡内部的潜在危险区以及稳定区的分布规律。并将潜在危险区的边界视为潜在滑面，利用矢量和法计算稳定性系数。最后通过算例验证了上述方法的合理性。

2 聚类分析简介

对一个边坡模型进行研究，可以得到应力、位移、应变等多个观测量。单独采用哪一种观测量来评判边坡的稳定性都具有一定的片面性。为了解决这一问题，引入聚类分析的方法，以有限元划分的节点作为观测对象，同时综合位移场以及应力场的数据，划分出边坡内部具有相似特性的区域。现在简要地介绍聚类分析的概念。

聚类分析是统计学中一种将对象或者样本进行划分的方法，使得同一类中的元素相较其他类中的元素更为相近[10]。这种方法的目的是使类内元素之间具有最大的相似性，而不同类之间的元素具有最大的差异性。在众多的算法中，非谱系聚类法是一种将样品划分为 K 类的方法。这类方法在计算中不用确定样品之间的距离，也不要求记录数据，所以能计算很大的数据组。在本文中采用非谱系方法中的 K–均值聚类法。

K–均值聚类法旨在将 n 个观察对象聚集到其最近形心（均值）的类别中去。设有 K 个聚类为 $S=\{S_1,S_2,\cdots,S_k\}$，给定一组观测对象 $(x_1,x_2,\cdots,x_n)$，每个对象都有 d 种观测指标，此时每个对象可以看作为一个数据空间中的 d 维向量。则 K–均值聚类法的数学表达为

$$\arg\min_{S}\sum_{i=1}^{k}\sum_{x\in S_i}\left\|x-\mu_i\right\|^2 \tag{1}$$

式中：μ_i 为 S_i 中所有点的平均值。

K–均值聚类法的具体实现过程可以简单描述为 3 个部分[11]：

（1）首先将样品分为 K 个初始类。可以先选取组成各类核心的“种子”，也可以从所有对象中随机选取“种子”或者直接将元素分为若干类。

（2）逐一将样品分派到离其最近均值的类中，一般会采用标准化数据或者非标准化数据计算出的欧氏距离来衡量样品与聚类中心的远近。然后重新计算所有接受或失去样品类的中心。

（3）重复步骤（2），直到各类中的样品不再改变。

在一次计算完毕后，可以代入一个新的初始分类种子检验整个聚类过程的稳定性，如果得到的最终分类与之前一样则可以不再计算；若不一样，则需要考虑其他算法进行分析。

3 基于聚类分析的边坡稳定性研究

对边坡内部采用聚类分析的关键在于获得边坡的真实应力场以及选取具有代表性的观测指标。边坡应力分布状态可以由有限元法得到。在本文中，选用总位移以及点安全系数来分别表征边坡内部的位移场以及应力场的分布情况。综合这两个观测指标，就能将边坡划分为潜在危险区域以及稳定区域。再以潜在危险区域的边界为潜在滑面，利用边坡矢量和计算方法求出其稳定性系数，就能评判边坡在当前状态下的稳定性。

3.1 边坡位移场以及应力场的获取

首先采用有限单元法求解边坡内部各点的位移以及应力值。有限单元发的核心思想在于将研究对象离散化处理，利用变分原理以及几何、物理方程联立得到整体刚度矩阵，最后根据平衡方程进行求解，其数学表达形式为

$$[K]\{\delta\}=\{F\} \tag{2}$$

式中：$[K]$、$\{\delta\}$ 以及 $\{F\}$ 分别为整体刚度矩阵、节点位移矩阵以及节点荷载矩阵。这个方程一般很难得到精确的数值解，实际运用中采用高斯积分法求出高斯点上的真实解，再通过插值得到节点的位移以及应力。

3.2　点安全系数的计算

为了从位移以及各点应力状态两个方面来描述边坡的稳定性，选取了总位移以及点安全系数法作为聚类分析的指标。点安全系数是一个描述各点当前应力状态的指标量。基于简单加载的假设，认为 3 个主应力按同比增加并且方向保持不变；则点安全系数可以定义为主应力空间中原点 O 到破坏应力状态 B 的距离 D 与到当前应力状态 A 的距离 d 之比[12]（如图 1 所示），其数学表达为

$$F_{\mathrm{S}}=D/d \tag{3}$$

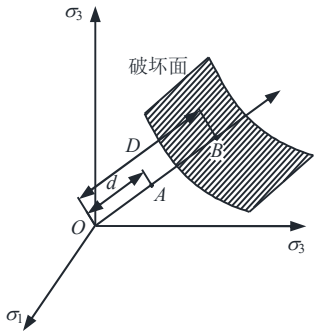


图 1　点安全系数定义示意图

Fig.1　Definition of local safety factor

屈服面在主应力空间中可以表示为

$$f(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)=0 \tag{4}$$

结合式（3）、（4）可得

$$f(\sigma_1 F_{\mathrm{S}},\sigma_2 F_{\mathrm{S}},\sigma_3 F_{\mathrm{S}})=0 \tag{5}$$

如果已知一点的 3 个主应力以及屈服准则就可以求出该点的点安全系数。在岩土分析中，最常用的破坏准则是 Mohr-Coulomb 准则。则采用该准则得到的点安全系数为

$$F_{\mathrm{S}}=\frac{\left[(\sigma_1+\sigma_3)/2+c\cot\varphi\right]\sin\varphi}{(\sigma_1-\sigma_3)/2} \tag{6}$$

式中：c、φ 分别为岩土体黏聚力以及内摩擦角。

3.3　基于聚类分析的分区以及滑面搜索

由上述两个阶段，边坡内各节点的状态用位移和点安全系数来描述。于是将这些节点视为观测样本，采用 *K*–均值聚类法对其进行处理。在聚类计算之前，为了克服由于指标的量纲不同对统计分析结果带来的影响，需要首先对指标进行标准化处理[11]，即做如下变换：

$$X_j^*=\frac{X_j-E(X_j)}{\left[\mathrm{var}(X_j)\right]^{1/2}},\quad j=1,2,3,\cdots,p \tag{7}$$

式中：X_j^* 为标准化处理值；X_j 为指标中任一观测值；$E(X_j)$ 和 $\mathrm{var}(X_j)$ 分别为指标观测量的均值以及方差。

将各节点视为数据空间中的一个二维向量，对其进行聚类分析，就可以得到具有相似位移以及应力状态的区域点集。通过比较不同类最终聚类中心的位置，就能把这些区域划分为潜在危险区或者潜在稳定区。再利用求得潜在危险区的边界，这就找出了在当前状态下边坡内部的潜在滑面。

3.4　边坡矢量和方法（VSM）

为了更好地定量描述边坡在真实状态下的稳定性，采用边坡矢量和方法计算潜在滑面的稳定性系数。矢量和法的基本思想是将沿滑面的抗滑力以及滑动力分别进行矢量求和，其对应的稳定性系数就是这两个矢量在边坡下滑趋势方向投影的比值[13]，其数学表达为

$$F(\theta)=\frac{\sum R(\theta)}{\sum T(\theta)} \tag{8}$$

式中：θ 为边坡下滑趋势方向；$R(\theta)$ 为抗滑力在下滑趋势方向的投影；$T(\theta)$ 为滑动力在下滑趋势方向的投影。

边坡整体下滑趋势方向的求解是矢量和方法中的核心环节。郭明伟等[14]研究了 3 种不同整体下滑趋势方向的定义，分析认为潜在滑面各点极限抗滑力的反方向最为合理。根据 Mohr-Coulomb 准则，整体下滑趋势方向的数学表达为

$$\theta=\arctan\frac{\left|\int_s(c+\sigma_{\mathrm{n}}\tan\varphi)\sin\alpha\mathrm{d}S\right|}{\left|\int_s(c+\sigma_{\mathrm{n}}\tan\varphi)\cos\alpha\mathrm{d}S\right|} \tag{9}$$

式中：S 为潜在滑面长度；α 为潜在滑面任一点切线方向与水平线的夹角。

由于本文提出的方法已经求得了边坡应力场分布以及潜在滑面的位置，采用矢量和方法能比较容易地表征在当前状态下边坡抗滑力和下滑力在下滑方向上的大小关系。

4 算 例

为了说明基于聚类分析的边坡稳定性评价方法的正确性以及合理性，本文给出 3 个经典边坡工程算例，使用聚类分析方法寻找边坡中潜在危险区域，并用矢量和计算方法求出当前状态下边坡的稳定性系数。其结果与极限平衡法（LEM）中 GLE 法以及有限元强度折减法（SRM）对比分析。

4.1 算例 1：均质边坡

本例选取文献[14]中的 ACADS1(a)问题。该算例为一均质边坡，材料参数选取见表 1。模型的两侧以及底部均采用双向约束，具体模型见图 2。为了提高计算精度，采用三角形六节点单元，共划分了 782 个单元，1 663 个节点。在对边坡进行聚类分析过程中，迭代步数设为 100 步（实际迭代到 20 次达到收敛）。

表 1 算例 1 材料参数表
Table 1 Strength parameters of materials in example 1

土层	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / (kN/m³)	弹性模量 / MPa	泊松比
土层一	3.00	19.60	20.00	50.00	0.28

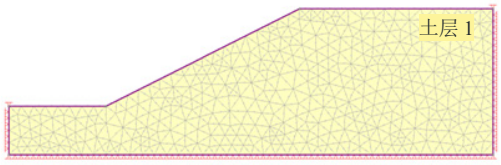


图 2 算例 1 有限元模型示意图
Fig.2 The FEM model of example 1

在 K–均值聚类法中，不恰当的聚类个数选取会导致病态的结果。经过反复试算（见图 3），发现当 $K=2$、3 时，出现了不同程度的病态结果。$K=4$ 时聚类分析得出的结果比较理想。而当 $K=5$ 时，其结果与 $K=4$ 基本一致，仅仅在角点有所不同。所以在之后的分析中均选用 $K=4$ 的情况。

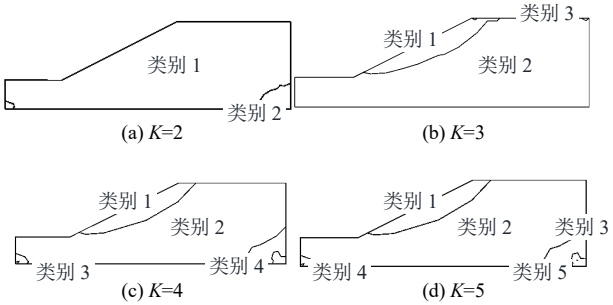


图 3 不同 K 值下聚类分析结果示意图
Fig.3 The results of clustering analysis with different K values

在本方法中，是通过比较各类的聚类中心将区域划分为不同的潜在趋势区域。算例 1 得到的类别 1 与该边坡其他区域相比，点安全系数最小且接近于 1，表明类别 1 中大多数点的应力状态达到或者临近屈服面。同时平均位移达到 2 cm 左右，是类别 2 聚类中心位移的 3 倍。这说明在当前状态下类别 1 所表示的区域相对于其他类别更有可能发生滑动，所以将其视为潜在危险区。而类别 3 和类别 4 聚类中心中的点安全系数异常大，位移异常小，且均集中在模型的交点处，可以认为是有限元模型的边界效应。类别 2 则占据了边坡的大部分区域，其聚类中心的位移以及点安全系数均表示该区域较为稳定，所以划分为稳定区域。观测量描述统计以及聚类分析的结果见表 2、3。

表 2 观测量描述统计（算例 1）
Table 2 The statistic description of observations (example 1)

值	点安全系数	总位移 / mm
均值	3.58	10
标准差	6.33	16

表 3 最终聚类中心以及案例数（算例 1）
Table 3 Final clustering centers & case numbers (example 1)

类别		点安全系数	总位移 / mm	案例数	分区
类别 1	标准最终中心	–0.39	2.45	208	潜在危险区
	实际最终中心	1.14	50.00		
类别 2	标准最终中心	–0.23	–0.31	1 304	稳定区
	实际最终中心	2.14	6.00		
类别 3	标准最终中心	1.76	–0.60	124	角点异常区
	实际最终中心	14.70	0.30		
类别 4	标准最终中心	5.90	–0.68	27	角点异常区
	实际最终中心	40.92	0.12		

注：标准最终中心指由聚类分析得到的各组中心；实际最终中心是指将标准数据转化成实际数据的各聚类中心；案例数指每一个聚类中样品的数量。

判断出了边坡中的潜在危险区域，将其边界视为当前应力状态下边坡潜在滑面。文中提出方法、极限平衡法以及有限元强度折减法得出的滑面位置见图 4、5。对于算例 1，通过聚类分析搜索出的滑面与极限平衡搜索出的滑面更为相似，而强度折减法根据最大剪应变带确定的滑带范围则稍大一些。从稳定性系数上来看（见表 4），3 种方法求出的稳定性非常一致，均在 1 附近，表明该算例边坡处于临界失稳状态，与从聚类中点得出的结论一致。

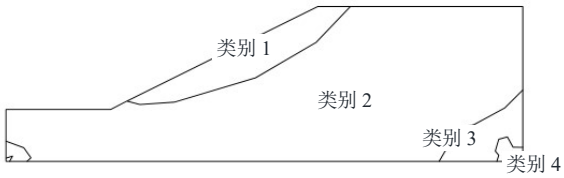


图 4　基于聚类分析的边坡分区图（算例 1）

Fig.4　Division of slope in example 1 by clustering analysis (example 1)

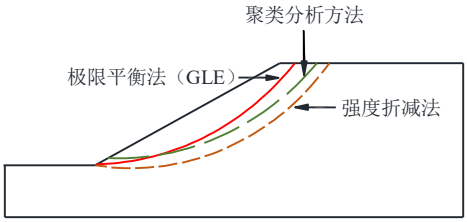


图 5　不同方法滑面对比图（算例 1）

Fig.5　Comparison among three different methods (example 1)

表 4　不同方法稳定性系数统计（算例 1）

Table 4　Safety factors from different methods (example 1)

方法	稳定性系数
极限平衡法（LEM）	1.00
强度折减法(SRM)	0.99
矢量和方法(VSM)	1.06

4.2　算例 2：分层边坡

本例选取文献[15]中的 ACADS1(d)问题。该算例为一分层边坡，材料参数选取见表 5。边界条件同算例 1，具体模型见图 6。为了提高计算精度，采用三角形六节点单元，共划分了 874 个单元，1 847 个节点。在对边坡进行聚类分析过程中，迭代步数设为 100 步（实际迭代到 31 次达到收敛）。

表 5　算例 2 材料参数表

Table 5　Strength parameters of materials in example 2

土层	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / (kN/m³)	弹性模量 / MPa	泊松比
土层 1	0.00	38.00	19.50	50.00	0.40
土层 2	5.30	23.00	19.50	50.00	0.40
土层 3	7.20	20.00	19.50	50.00	0.40

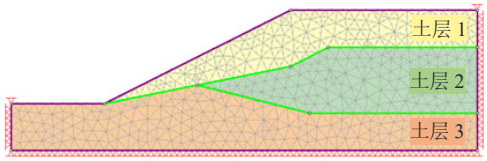


图 6　算例 2 有限元模型示意图

Fig.6　The FEM model of example 2

根据相同的分析方法，可以将算例 2 中类别 1 划分为潜在危险区，类别 2 为稳定区，类别 3、4 均为角点异常区。与算例 1 相比，算例 2 中潜在危险区的点安全系数较大而位移较小。说明算例 2 中的边坡要比算例 1 中的稳定。观测量描述统计以及聚类分析的结果见表 6、7。

表 6　观测量描述统计（算例 2）

Table 6　The statistic description of observations(example 2)

值	点安全系数	总位移 / mm
均值	4.08	6.25
标准差	7.06	5.20

表 7　最终聚类中心以及案例数（算例 2）

Table 7　Final clustering centers & case numbers (example 2)

类别		点安全系数	总位移 / m	案例数	分区
类别 1	标准最终中心	−0.37	1.18	662	潜在危险区
	实际最终中心	1.46	12.00		
类别 2	标准最终中心	−0.19	−0.57	1 002	稳定区
	实际最终中心	2.76	3.30		
类别 3	标准最终中心	1.65	−1.13	151	角点异常区
	实际最终中心	15.71	0.40		
类别 4	标准最终中心	1.55	−1.18	32	角点异常区
	实际最终中心	44.35	0.12		

文中提出的方法、极限平衡法以及有限元强度折减法得出的滑面位置以及稳定性系数见图 7、8。在算例 2 中，聚类分析得到的潜在滑面形态比其他两种方法得到的滑面深度更深范围更大。但通过矢量和得到的稳定性系数也远大于其他两种方法（见表 8），表明在当前状态下边坡是较为稳定的。

4.3　算例 3：含有软弱夹层边坡

本例同样选取文献[14]中的 ACADS3(d)问题。该算例为一含有水平软卧夹层的边坡，材料参数选取见表 9，两种土均只受重力作用。边界条件同算例 1，具体模型见图 9。采用三角形六节点单元，共

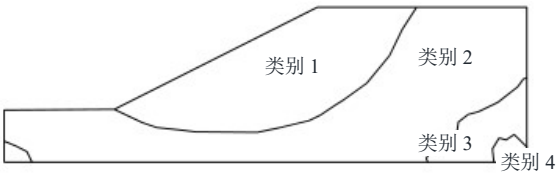


图 7　基于聚类分析的边坡分区图（算例 2）

Fig.7　Division of slope in example 1 by clustering analysis (example 2)

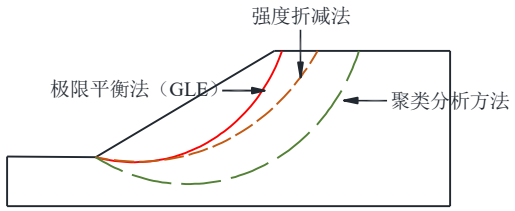


图 8 不同方法滑面对比图（算例 2）
Fig.8 Comparison among three different methods (example 2)

表 8 不同方法稳定性系数统计（算例 2）
Table 8 Safety factors from different methods (example 2)

方法	稳定性系数
极限平衡法（LEM）	1.37
强度折减法(SRM)	1.36
矢量和方法(VSM)	1.90

表 9 算例 3 材料参数表
Table 9 Strength parameters of materials in example 3

土层	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / (kN/m^3)	弹性模量 / MPa	泊松比
土层 1	28.50	20.00	18.84	50.00	0.28
土层 2	0.00	10.00	18.84	50.00	0.28

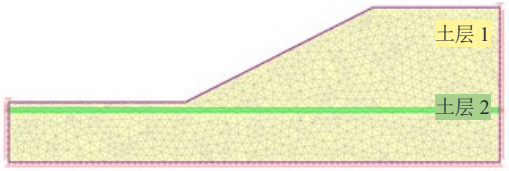


图 9 算例 3 有限元模型示意图
Fig.9 The FEM model of example 3

划分了 1 695 个单元，3 496 个节点。在对边坡进行聚类分析过程中，选取的聚类个数为 4 类，迭代步数设为 100 步（实际迭代到 31 次达到收敛）。

根据相同的分析方法，将类别 1 划分为潜在危险区，类别 2 为稳定区，类别 3、4 均为角点异常区。观测量描述统计以及聚类分析的结果见表 10、11。

聚类分析、极限平衡法以及有限元强度折减法得出的滑面位置见图 10、11。对于算例 3，通过聚类分析搜索出的滑面与强度折减法得出的滑带位置比较接近，但滑面后部更为陡峻，前缘剪出口的范围也更为靠前。由于聚类分析得出的滑面在软弱夹层中的距离更长，后缘角度更大，所以用矢量和法计算真实应力场得到的稳定性系数比其他两种方法得到的稳定性系数小 6%（见表 12），但仍说明此时边坡处于自然稳定状态。该结论也符合从聚类中心得到的结论。

表 10 观测量描述统计（算例 3）
Table 10 The statistic description of observations (example 3)

值	点安全系数	总位移 / mm
均值	4.61	11.67
标准差	7.49	10.81

表 11 最终聚类中心以及案例数（算例 3）
Table 11 Final clustering centers & case numbers (example 3)

类别		点安全系数	总位移 / mm	案例数	分区
类别 1	标准最终中心	−0.33	1.39	1 000	潜在危险区
	实际最终中心	2.10	26.00		
类别 2	标准最终中心	−0.21	−0.49	2 153	稳定区
	实际最终中心	3.06	6.39		
类别 3	标准最终中心	1.55	−0.98	286	角点异常区
	实际最终中心	16.21	1.10		
类别 4	标准最终中心	5.89	−1.07	57	角点异常区
	实际最终中心	48.67	0.11		

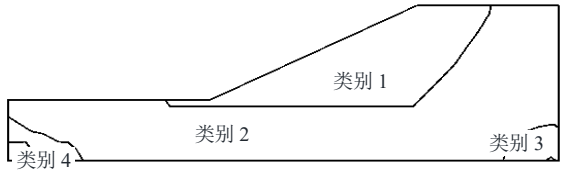


图 10 基于聚类分析的边坡分区图（算例 3）
Fig.10 Division of slope in example 1 by clustering analysis (example 3)

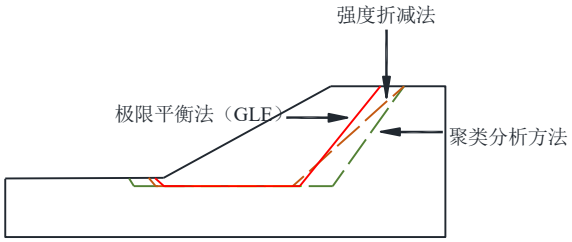


图 11 不同方法滑面对比图（算例 3）
Fig.11 Comparison among three different methods (example 3)

表 12 不同方法稳定性系数统计（算例 3）
Table 12 Safety factors from different methods (example 3)

方法	稳定性系数
极限平衡法（LEM）	1.25
强度折减法(SRM)	1.27
矢量和方法(VSM)	1.12

4.4 结果讨论

从 3 个算例中可以看出，边坡处于临界状态时（稳定性系数 1 附近），当前应力场与临界应力场非常接近，基于聚类分析搜索得到的潜在危险区域与极限平衡法以及强度折减法得到滑动区域基本一致，验证了失稳区域的位移状态以及应力状态具有明显的一致性。当边坡处于较为稳定时（稳定性系数≥1.2），由聚类分析得到的潜在滑面范围较大，潜在危险区域包含了其他两种得到的滑动范围。说明在真实应力状态下，边坡中具有相同运动趋势的区域更大。虽然求得的稳定性系数比较高，表明在当前状态下抗滑力仍具有较大的安全储备，但在边坡逐渐发展到临界状态的过程中，整个潜在危险区都有可能发生失稳。特别是存在软弱夹层的边坡中，由于潜在危险区穿过软弱夹层的区域更长，所求的稳定性系数更小。此时相对于其他两种方法求出的滑动范围更大，对于边坡工程来说更加危险。从这个角度而言，文中所述的方法给出的潜在危险范围是较为保守的，有助于分析当前状态下边坡的稳定性状态。

5 结　论

本文引入统计学中聚类分析的概念，通过分析边坡中各点的点安全系数以及总位移，得到边坡体内部在真实应力状态下具有相似运动趋势的点集，从而将边坡划分为潜在危险区以及潜在稳定区。然后认为潜在危险区边界为边坡在当前状态下的潜在滑面并用矢量和计算方法求得其稳定性系数，从而综合判断其边坡的稳定性状态。通过算例验证，得到以下结论：

（1）基于聚类分析的边坡稳定性评价方法是完全建立在边坡真实应力状态下的分析方法，不需要改变边坡体类岩土体材料，同时从位移、应力状态、整体稳定性 3 个方面综合评价边坡的稳定性状态，流程简单明确，具有很好的客观性和实用性。

（2）聚类分析在边坡处于临界状态下搜索出的潜在滑面与其他两种方法得到的滑面基本相同，矢量和计算得到的稳定性系数基本一致，验证了本方法的可靠性。而在真实应力场下得到的潜在滑面要比极限状态得到潜在滑面更大。当存在软弱夹层时，矢量和计算出的稳定性系数比其他两种方法的结果要小。

参 考 文 献

[1] GRECO V R. Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(7): 517－525.

[2] MALKAWI A I H, HASSAN W F, SARMA S K. Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(8): 688－698.

[3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Géotechnique**, 2001, 51(7): 653－654.

[4] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407－411.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 407－411.

[5] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 1－7.
SONG Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(1): 1－7.

[6] 孙冠华, 郑宏, 李春光, 等. 基于等效塑性应变的三维边坡滑面搜索[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1159－1163.
SUN Guan-hua, ZHENG Hong, LI Chun-guang, et al. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1159－1163.

[7] 田东方, 刘成斌. 基于遗传算法的危险滑面搜索[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2009, 31(3): 18－21.
TIAN Dong-fang, LIU Cheng-bin. Application of genetic algorithm to searching potential sliding plane[J]. **Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)**, 2009, 31(3): 18－21.

[8] 郭明伟, 李春光, 葛修润, 等. 基于矢量和分析方法的边坡滑面搜索[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1775－1781.
GUO Ming-wei, LI Chun-guang, GE Xiu-run, et al. Searching potential slip surface of slopes based on the vector sum analysis method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1775－1781.

[9] 聂治豹, 郑宏, 张谭. 基于强度折减法确定边坡临界滑面的小波变换法[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1827－1831.
NIE Zhi-bao, ZHENG Hong, ZHANG Tan. Determination of slope critical slip surface using strength reduction method and waelvet transform[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1827－1831.

下转第 2990 页