

DOI: 10.11779/CJGE201801006

基于赤平极射投影和 K -均值聚类算法的优势结构面分析

王俊杰^{1,3}, 冯登^{*1,3}, 柴贺军², 刘云飞^{1,3}

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司山区道路工程与防灾减灾技术国家地方联合工程实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学重庆市高校水工建筑物健康诊断技术与设备工程研究中心, 重庆 400074)

摘要: 对于结构面多而复杂的岩质边坡, 其优势结构面的选取与分析是极其重要的工作。传统的结构面组数划分方法比较粗糙, 分析结果有很大的主观因素, 无法准确地给出结构面的优势产状, 使得其结果在实际工程中使用不便。以结构面交线的筛选和分析为切入点, 借助于赤平极射投影法, 在楔形体滑移分析中首先确定可能的滑移区域, 筛选出可能滑移的结构面交线, 缩小计算范围, 采用 K -均值聚类算法和有效性检验, 根据赤平极射投影分析得到滑移区域的对称轴中心作为初始凝聚点, 通过多次迭代计算得到滑移区域内的优势结构面交线。将该方法用于重庆万盛黑山谷的岩质滑坡中, 结果表明, 将赤平极射投影与 K -均值聚类算法相结合, 计算得到的优势结构面交线分类合理, 结果可靠, 可以准确地确定结构面交线的优势产状。

关键词: 岩质边坡; 优势结构面交线; 赤平极射投影; K -均值聚类算法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)01-0074-08

作者简介: 王俊杰(1973-), 男, 甘肃陇西人, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程、岩土工程方面的研究。E-mail: wangjunjiehu@163.com。

Dominant discontinuities based on stereographic projection and K -means clustering algorithm

WANG Jun-jie^{1,3}, FENG Deng^{1,3}, CHAI He-jun², LIU Yun-fei^{1,3}

(1. Key Laboratory for Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. National Engineering Laboratory for Road Engineering and Disaster Prevention and Reduction Technology in Mountainous Areas, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 3. Engineering Research Center of Diagnosis Technology and Instruments of Hydro-Construction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: For the rock slope with many complicated discontinuities, the selection and analysis of the discontinuities are a very important work. The traditional analysis methods are insufficient and inadequate. The analysis results have a lot of subjective factors, and are inconvenient to be applied in practice. The selection and analysis of intersection lines of discontinuity are treated as the starting point. With the aid of stereographic projection, the possible sliding zone of sliding wedge can be first determined. The possible sliding line of intersection can be selected. So the range of calculation can be reduced. The symmetric axis center is used as the initial rallying point. The dominant orientations of discontinuities can be selected and analyzed through the probabilistic analysis of the stereographic projection based on the K -means clustering algorithm. A case study on a rock slope in Chongqing is used. The study shows that the results are reliable and reasonable, and the dominant orientations and classification are more precise.

Key words: rock slope; dominant intersection line of discontinuity; stereographic projection; K -means clustering algorithm

0 引言

楔形体破坏是节理岩体常见的一种破坏形式, 在岩石边坡、基础和洞室往往存在着因为相互切割的结构面而形成的不稳定楔形体, 并在一定荷载的作用下

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAK09B01); 重庆市基础与前沿研究计划项目(重点)(cstc2015jcyjBX0139); 2017年度重庆市创新创业团队支持计划项目(81); 重庆市高层次人才特殊支持计划项目

收稿日期: 2016-10-13

***通讯作者** (E-mail: 552510432@qq.com)

发生楔形体的失稳破坏。然而, 楔形体的稳定问题实际上是一个高次非静定问题, 通常采用各种假定使之得解, 因而求出的安全系数并不一定真实^[1-2]。

在楔形体滑移破坏的边坡工程中, 结构面是控制岩体稳定性的重要因素, 现代的重大工程需要对岩体的结构面进行精细的研究和描述。岩质边坡的工程研究中一个重要的难题是其结构面选取的不确定性, 岩质边坡的结构面多而复杂, 结构面的产状具有很大的离散型, 并且现场试验所测得的边坡的物理力学参数有很大的不确定性。因此, 在岩质边坡工程中最重要的是如何在大量的离散型数组中选取合适的结构面进行稳定性分析^[3]。

传统的结构面分组方法^[4-6]是采用节理玫瑰花图或极点等密度图进行分析, 该方法有很强的主观性, 分组结果会因人为因素导致很大的差别。近些年来国内外的学者也试图利用统计分析技术将边坡结构面中多组呈离散型分布的产状数据进行限制和量化处理, 并且采用了多种方法来选取合适的有代表性的结构面。Shanley 等^[7]首次提出了一种客观的结构面产状聚类算法, 该方法的缺点在于其在寻找密度点时需要确定合适的小球半径。1998 年 Hammah 等^[8]采用基于模糊理论的 K-means 算法将结构面组数进行划分, 该方法是一种局部搜索法。多位学者^[9-13]提出了将模糊等价聚类 and 模糊软划分相结合的方法, 将模糊等价聚类方法得到的较优分类结果作为模糊软划分聚类方法的初始划分, 将模糊软化聚类方法得到的聚类中心作为各类的中心产状, 以得到合理的分类结果。在实际的岩质边坡中, 有些结构面的出现是不会对边坡的稳定性造成影响的, 而如果将这类结构面列入稳定性分析中, 势必会对后续的稳定计算造成较大的误差。

本文改变了常规的通过结构面分组的方法来分析楔形体的稳定性, 以结构面交线为切入点进行楔形体稳定性分析, 将赤平极射投影技术和 K-means 聚类算法结合, 并采用有效性检验, 对于楔形体的概率性分析提出了一种合适的分析方法。首先通过赤平极射投影方法确定楔形体可能滑移区域, 筛选出可能引起楔形体滑移的危险结构面交线, 缩小筛选范围, 利用有效性检验 Xie-Beni 指标确定优势结构面交线组数, 然后通过 K-means 聚类算法获得结构面交线的优势产状, 最后将该方法用于重庆万盛黑山谷岩质边坡工程中进行结构面交线的优势分组。

1 赤平极射投影在楔形体中的应用

1.1 楔形体滑移分析

在楔形体滑移中, 坡面和结构面交线的产状影响

着边坡的稳定性。在边坡稳定性分析中, 由两条结构面切割而成的双滑面滑坡稳定条件的分析, 视结构面交线与边坡的自然坡面、开挖坡面的关系, 可分为五种情况: 不稳定条件、较不稳定条件、基本稳定条件、稳定条件和最稳定条件^[14]。这里将对楔形体的不稳定情况进行分析, 如图 1 为楔形体稳定分析。

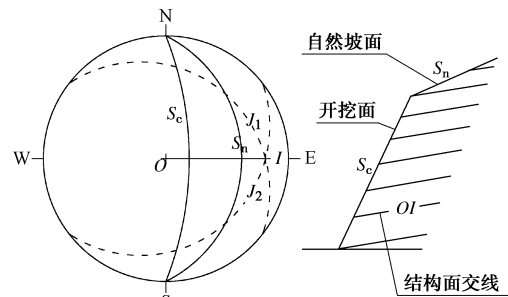


图 1 楔形体稳定分析

Fig. 1 Stability analysis of wedge

根据图 1 所示, 当结构面 J_1 、结构面 J_2 的组合交线 OI 位于自然坡面 S_n 投影大圆外侧时, 即交线倾角比自然坡面要缓时, 组合交线在自然坡面没有出露点。此时在坡顶面没有沿坡面走向的切割面的情况下, 边坡处于较稳定状态。但如果坡顶发育有沿坡面走向的切割面, 则边坡易产生滑动失稳。以上所分析的过程中, 未考虑结构面的抗剪强度, 即假定结构面的内摩擦角 φ 值很小, 将滑动面以上的岩体都当作不稳定体对待。当滑动面的倾角比较大时, 这种误差所引起的问题还不大; 当滑动面的倾角越缓时, 这种分析就越显得不合理。

假定楔形体结构面的内摩擦角都为 φ , 交线的倾角为 φ_i , 真实坡角为 α , 根据赤平极射投影分析可知, 楔形体的滑动条件由 $\alpha > \varphi_i > \varphi$ 规定^[14]。图 2 为楔形体的几何要素及稳定分析。

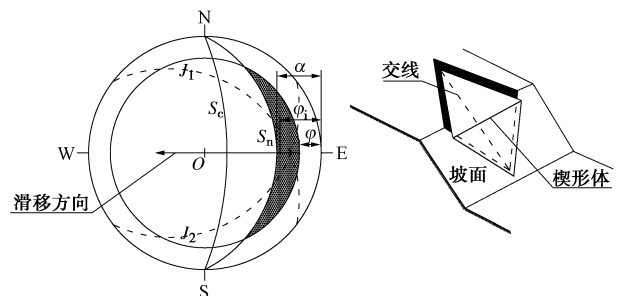


图 2 楔形体的几何要素及稳定分析

Fig. 2 Stability analysis and geometric elements of wedge

在图 2 中, 运用了摩擦圆的原理和方法^[14], 摩擦圆锥的表面规定了摩抗阻力的全部可能方向, 其物理意义为块体处于极限平衡状态下, 也即当多种作用力 (重力、工程作用力、水压或扬压力等) 合成滑移驱

动力的作用方向与滑动面法线的夹角小于 φ 时,则无论滑移驱动力的方向如何,块体都是稳定的。而当结构面交线的倾角 φ_i 满足 $\alpha > \varphi_i > \varphi$ 时,楔形体将会发生失稳滑动。图 2 赤平极射投影图中,当结构面的交线位于其阴影区域内时,楔形体将发生滑移失稳。因此,在分析楔形体滑移稳定性时,将只需要考虑当结构面交线位于阴影区域的情况,分析阴影区域内的优势结构面交线,从而分析边坡的稳定性。

1.2 结构面交线产状的求解

本文以重庆万盛黑山谷顺层岩质边坡工程为例,讨论了如何进行结构面交线的筛选和分析。重庆万盛黑山谷某农村道路(全长约 2 km)大部分路基位于天然顺层岩质坡体上,岩层倾向与地形坡向一致,开挖时极易沿层面发生坍塌。地表出露的岩土体为黏土夹碎石,其中黏土夹 10%~20%灰岩、灰岩碎石。下伏基岩主要为灰岩,高风化层的岩体风化裂隙发育,岩体破碎。中风化层的岩体,受层间裂隙影响,岩石质量一般。在路基开挖施工过程中出现了 5 处边坡滑移垮塌的现象,本文以其中 1 处滑坡为例进行研究。图 3 为该滑坡的全貌图。



图 3 滑坡全貌图

Fig. 3 Overall view of slope

根据现场地勘资料,测得该边坡坡面产状 $NE25^\circ \angle 34^\circ$,在该边坡的中上部,由于页岩岩体自身强风化及挤压,覆盖层黏土体随地下水或降雨下渗到结构面,形成泥质充填或泥夹岩屑状的软弱夹层结构面,一般情况下充填厚度大于结构面的起伏粗糙度,其厚度在边坡不同位置也表现出不同的差异。根据工程岩体分级标准^[15]岩体结构面抗剪断峰值强度表中规定“当结构岩体为较坚硬岩及全部软质岩,结合较差,其内摩擦角小于 13° ,黏聚力小于 0.05 MPa”。因该地区气候湿润,雨水丰富,勘察期间为春夏之交,降雨较多,依据现场经验,拟选取该结构面界面间的摩擦角为 8° 进行试算。本文中产状的表述均以上半球赤平极射投影图^[16]中的倾向和倾角表示,倾向是以正

北方向(N 轴)为基准顺时针旋转所得到的角度值,倾向($0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$),倾角($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$)。表 1 为该岩质边坡结构面的统计参数,图 4 为利用 DIPS^[17]软件在赤平极射图中画出 32 条结构面及其极点分布图。

表 1 岩体结构面产状

Table 1 Discontinuity orientation of rock					
结构面 编号	倾向 /($^\circ$)	倾角 /($^\circ$)	结构面 编号	倾向 /($^\circ$)	倾角 /($^\circ$)
1	15	36	17	26	29
2	136	50	18	257	64
3	60	34	19	153	50
4	336	51	20	69	21
5	38	74	21	50	84
6	225	30	22	128	36
7	196	26	23	59	24
8	264	81	24	227	68
9	120	23	25	269	53
10	36	38	26	312	67
11	69	27	27	19	28
12	53	61	28	286	49
13	351	34	29	199	50
14	268	69	30	254	16
15	139	51	31	216	57
16	341	13	32	110	25

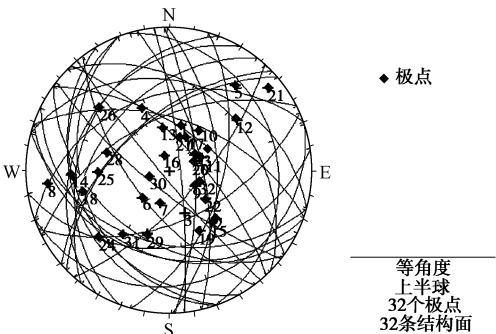


图 4 结构面赤平极射投影分布图

Fig. 4 Stereographic projection of discontinuities

该岩质边坡共有 32 条结构面,每条结构面两两相交,将会产生 496 条结构面交线。

根据楔形体稳定性分析可知,当结构面交线位于楔形体失稳区域时,楔形体可能会发生失稳破坏,结构面交线的倾向和倾角的求解引用 Hoek 等^[18]所提出的赤平极射投影交线法求解,求解公式为

$$\alpha_i = \arctan \left(\frac{\tan \psi_A \cos \alpha_A - \tan \psi_B \cos \alpha_B}{\tan \psi_B \sin \alpha_B - \tan \psi_A \sin \alpha_A} \right), \quad (1)$$

$$\psi_i = \tan \psi_A \cos(\alpha_A - \alpha_i) = \tan \psi_B \cos(\alpha_B - \alpha_i)。 \quad (2)$$

式中 α_i, ψ_i 分别为结构面交线的倾向和倾角; α_A, ψ_A 分别为结构面 A 的倾向和倾角; α_B, ψ_B 分别为结构面 B 的倾向和倾角。

依据式 (1)、(2),求解出结构面交线的产状,利用 MATLAB 软件^[19],编制相关程序,将结构面的交线任意两两配对,共求解出 496 条结构面交线的产状,表 2 列举了部分结构面交线产状的统计参数。

表 2 结构面交线产状统计参数

Table 2 Statistic parameters of intersection line orientation					
交线编号	倾向/(°)	倾角/(°)	交线编号	倾向/(°)	倾角/(°)
1	67.7	25.2	299	338.2	27.2
2	42.6	36.9	300	368.7	73.6
3	31.7	39.9	301	335.3	22.3
4	313.7	20.0	302	343.2	35.8
...
80	270.8	33.0	401	318.8	53.9
81	331.9	1.2	402	202.4	67.4
82	319.8	12.6	403	167.5	1.5
...
186	178.2	26.4	494	298.3	11.7
187	126.4	9.7	495	186.3	6.2
188	144.0	17.0	496	114.3	17.6

1.3 结构面交线的筛选

根据该边坡坡面产状和结构面之间的内摩擦角，运用摩擦圆的原理和方法，绘制出该边坡的赤平极射投影图，图 5 为该边坡的赤平极射投影图。

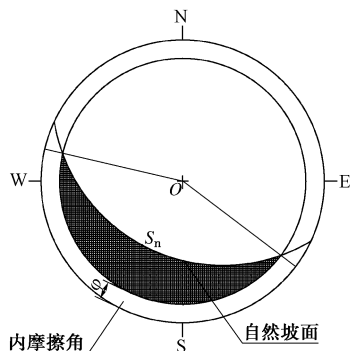


图 5 边坡的赤平极射投影图

Fig. 5 Stereographic projection of slope

该赤平极射投影图中阴影区域为楔形体可能滑移区域，引用 Hoek 等^[13]所提出的赤平极射投影交线法求解，求解出该区域的倾向范围为 127° ~ 283°，倾角范围为 8° ~ 34°。图 6 为通过 DIPS 绘出所有结构面交线极点分布图。

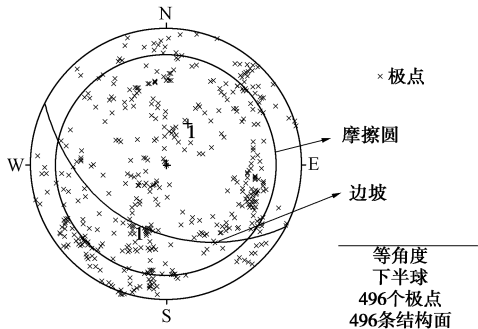


图 6 极点分布图

Fig. 6 Pole plot

根据图 5 边坡的赤平极射投影图分析，需要将所

有结构面交线参数进行筛选，筛选出阴影区域内的结构面交线。

根据 1.2 节中所得 496 组结构面的交线的产状，将上半球赤平极射投影图中的产状数据导入到笛卡尔坐标系中进行结构面交线的筛选。

结构面交线表示为 i ，倾角和倾向分别表示为 δ_i 和 θ_i ，单元体正向量表示为 n_i ， n_i 的笛卡尔分量分别表示为 x_i ， y_i 和 z_i ， n_i 在水平面上的投影表示为 n_{xyi} 。注意：笛卡尔坐标系是遵循右手法则，正 z 轴竖直向上； δ_i 为正 z 轴与 n_i 的夹角，倾向 θ_i 为正 y 轴与 n_{xyi} 的顺时针夹角。图 7 为结构面交线的笛卡尔坐标系。

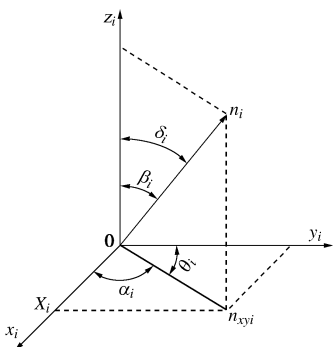


图 7 笛卡尔坐标系(x, y, z)、地理坐标系(δ , θ)和极点坐标系(β , α)描述图

Fig. 7 Illustration of Cartesian coordinate system(x, y, z), geological coordinate system(δ, θ), and polar coordinate system(β, α)

图 7 中 x_i ， y_i ， z_i 为 n_i 的笛卡尔分量，其表达式分别为

$$x_i = \sin \delta_i \cdot \sin \theta_i \quad (3)$$

$$y_i = \sin \delta_i \cdot \cos \theta_i \quad (4)$$

$$z_i = \cos \delta_i \quad (5)$$

利用 MATLAB 软件，对笛卡尔坐标系中 xy 平面内的坐标点进行筛选。

筛选步骤如下：①利用 MATLAB 作图，设定基圆圆心为笛卡尔坐标系的圆心；在 MATLAB 中以半径 R 作圆，圆心为笛卡尔坐标系的圆心，在此将圆心坐标设为 $(0, 0)$ 。②根据笛卡尔坐标系的设定和摩擦圆和边坡产状，分别作出它们的赤平极射投影图。

(1) 边坡产状的作图。在图 5 中， S_n 为自然坡面，自然坡面 S_n 圆弧两端的两点连线经过基圆圆心 O ，因此该两点连线与正北 N 轴方向的夹角 δ 为自然坡面的走向 α ($\delta = \alpha \pm 180^\circ$ 根据倾向判定)，基圆圆心 O 距自然坡面圆弧 S_n 的距离为

$$l = R \cdot \tan(\pi/4 - \psi/2) \quad (6)$$

式中 R 为基圆半径， ψ 为自然坡面的倾角。

因此自然坡面圆弧 S_n 的圆心 O_1 距基圆圆心的距离 t 为

$$t^2 + R^2 = (t + l)^2 \quad , \quad (7)$$

$$t = \frac{R^2 + l^2}{2l} \quad . \quad (8)$$

则自然坡面 S_n 圆心 O_1 的坐标为: $x_{o1}=x_0+t\cdot\cos\alpha$; $y_{o1}=y_0+t\cdot\sin\alpha$ 。根据自然坡面 S_n 的坐标和半径在 MATLAB 中作图, 并可求出在基圆中的圆弧。

(2) 摩擦圆作图。摩擦圆的作图方法为纬度圆作图, φ 为结构面的内摩擦角, 则摩擦圆在纬度圆中的纬度为 $90^\circ - \varphi$, 半径 $r=R\cdot\cos\varphi$ 。以半径 r 作圆, 圆心为笛卡尔坐标系圆心。

(3) 计算边坡与摩擦圆的相交区域, 也即是上述的结构面交线滑移区域, 并求解出该区域在笛卡尔坐标系中 xy 平面内的所属范围。

边坡与摩擦圆的相交区域为楔形体可能滑移区域, 摩擦圆与自然边坡圆弧相交阴影区域即属于可能滑移范围, 在 MATLAB 中以基圆原点为中心建立这两条线的约束范围即可。

(4) 将计算所得到的 496 条结构面交线利用公式 (3) ~ (5) 转换为笛卡尔坐标分量。

笛卡尔坐标系转换的意义是将结构面交线的三维图形投影到二维平面中, 在基圆中表示各个结构面交线, 各个结构面交线以点的形式在基圆中表示。

(5) 根据该区域在笛卡尔坐标系中的所属范围, 对步骤 (4) 中计算得到的结构面交线进行 xy 平面筛选, 共筛选得到 47 条结构面交线。

依据步骤 (3) 建立的楔形体可能滑移的阴影区域和步骤 (4) 求得的结构面交线在基圆中呈现的点, 筛选出位于阴影区域的点, 这些点所代表的结构面交线可能对边坡稳定性产生影响。图 8 为结构面交线筛选的流程图。

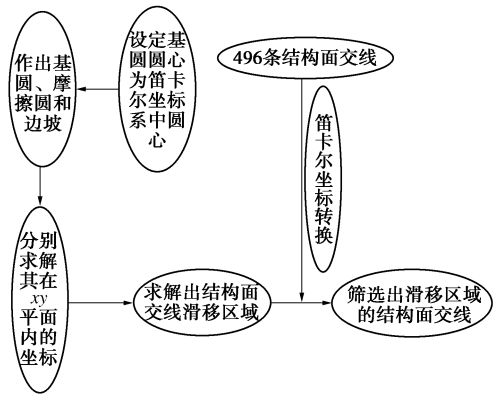


图 8 筛选流程图

Fig. 8 Flow chat of screening

筛选出 47 条位于阴影区域内的结构面交线, 表 3

为筛选出的结构面交线统计参数, 图 9 为利用 DIPS 软件绘出位于阴影区域内结构面交线的极点图, 图 10 为利用 DIPS 软件绘出阴影区域内结构面交线的等密度图。

表 3 结构面交线筛选结果

Table 3 Selected results of intersection line

交线编号	倾向/(°)	倾角/(°)	交线编号	倾向/(°)	倾角/(°)
1	132.4	9.6	25	201.2	28.3
2	137.0	10.8	26	202.0	27.4
3	139.0	9.9	27	202.7	30.3
4	140.7	9.0	28	203.0	30.6
5	163.6	15.6	29	203.3	30.4
6	165.8	16.7	30	203.5	10.4
7	172.9	12.5	31	204.5	9.7
8	174.0	14.1	32	205.3	31.5
9	175.4	11.1	33	205.4	10.8
10	175.8	13.7	34	205.5	31.6
11	176.8	20.0	35	206.1	27.2
12	177.5	22.1	36	208.0	32.5
13	178.1	22.3	37	211.3	17.0
14	181.3	8.4	38	215.2	12.5
15	182.3	24.0	39	218.1	12.9
16	182.4	11.1	40	219.9	26.6
17	186.4	9.6	41	221.3	25.0
18	186.5	21.6	42	228.3	14.8
19	188.2	26.2	43	229.0	16.4
20	188.7	27.5	44	230.3	14.9
21	192.5	27.6	45	231.7	22.5
22	192.6	17.9	46	250.0	16.2
23	200.0	29.6	47	257.0	13.8
24	200.5	27.6			

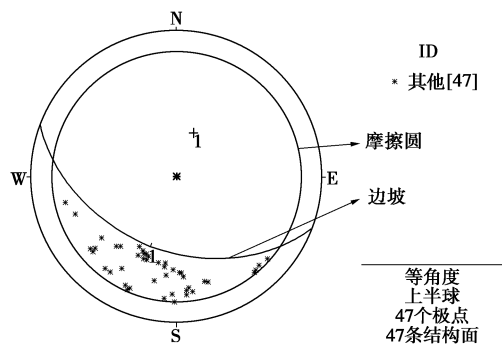


图 9 筛选出结构面交线的极点图

Fig. 9 Pole plot of screening intersection lines of discontinuity

2 岩体结构面交线分组的数学模型

对岩体结构面交线产状进行 K -均值算法聚类分析, 将结构面交线产状的倾向、倾角作为聚类分析的统计指标, 并进行有效性检验。

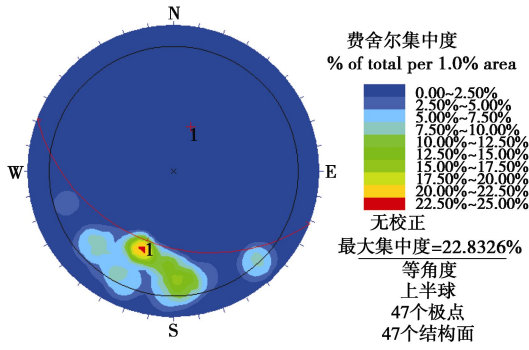


图 10 筛选出结构面交线的等密度图

Fig. 10 Contours of screening intersection lines of discontinuity

2.1 算法介绍

K -均值算法是一种经典的聚类算法, 在模式识别中得到了广泛的应用。对于大数据集, K -均值算法是相对可伸缩的和高效率的, 它的时间复杂度是 $O(nkt)$, 其中 n 是样本数, k 为聚类数, t 为迭代次数。 K -均值算法的基本思想是: 以空间中 k 个点为中心进行聚类, 对最靠近它们的对象归类。通过迭代的方法, 逐次更新各个聚类中心的值, 直至得到最好的聚类结果。假设待分析的数据对象有 n 个, 每个数据对象有 m 个属性, 公式 (9) 则为数据对象定义:

$$X = \{X_i | X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}), i = 1, 2, \dots, n\} \quad (9)$$

结构面交线优势组划分的目的是把具有共同性质的结构面交线归类分组, 所以首先要确定结构面交线数据样本之间的相似性度量——距离。距离越小, 表示两结构面交线越相似; 反之, 两结构面交线差异性越大。在此分析中, 是根据上半球赤平极射投影图中的极点距离作为度量, 式 (10) 分别为两个结构面交线的向量:

$$X_i = (x_i, y_i, z_i); X_j = (x_j, y_j, z_j) \quad (10)$$

所夹角为

$$\theta = \arccos |X_i \cdot X_j^T| \quad (11)$$

则有

$$\sin^2 \theta = 1 - (X_i \cdot X_j^T)^2 \quad (12)$$

对于结构面交线的相似性度量采用欧式距离, 则式 (13) 可以表述为两结构面交线之间的距离:

$$d^2(P_i, P_j) = 1 - (X_i \cdot X_j^T)^2 \quad (13)$$

$$d^2(P_j, V_i) = 1 - (X_i \cdot X_j^T)^2 \quad (14)$$

假设 N 条结构面交线 $P_j (j=1, 2, 3, \dots, N)$, 共划分为 C 组, 每组的聚类中心为 $V_i (i=1, 2, 3, \dots, C)$ 。根据公式 (14) 可得 P_j 与 V_i 之间的距离 $d^2(P_j, V_i)$, 式 (15) 定义 u_{ij} 为第 j 个结构面属于第 i 个聚类中心的隶属度:

$$u_{ij} = \frac{1}{d^2(P_j, V_i) \left[\sum_{k=1}^C \left(\frac{1}{d^2(P_j, V_k)} \right) \right]^{-1}} \quad (15)$$

式 (16) 为所有结构面交线与聚类中心的距离之和, u_{ij} 为目标函数, J 的最小值即为聚类目标:

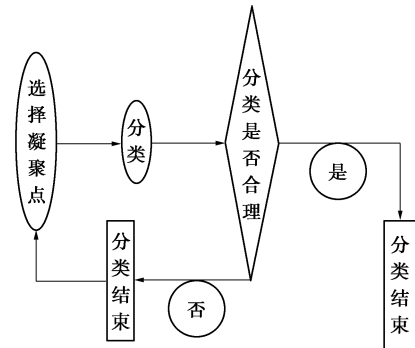
$$J = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C u_{ij}^2 d^2(P_j, V_i) \quad (16)$$

当每一个结构面交线各自为一组时, J 具有全局最小值 0, 但这是没有意义的, 所有事先给定聚类组数, 在给定组数的情况下搜索能够取得最小值的聚类中心。结构面交线的优势组数划分太多会使得划分结果在实际中不易使用, 所有结构面优势组数一般少于 10 个。当结构面交线的优势组数事先不易确定时, 可分别假设从 2~10 进行分组, 最后通过聚类效果的有效性最终确定最优的聚类组数。

2.2 算法检验

K -均值聚类算法步骤如下: ①将筛选出来的结构面交线当做样本, 根据楔形体滑移区域的对称性, 选取 m 个样本作为初始聚类中心 (V_1, V_2, \dots, V_m); ②针对每个样本 X_i 找到离它最近的聚类中心 V_i , 并将其分配到 V_i 所属的类 U_i ; ③采取平均的方法计算重新分类后的各类心; ④计算 $D = \sum_{i=1}^n \left[\min_{j=1, 2, \dots, m} d(P_j, V_j)^2 \right]$; ⑤如果 D 值收敛, 则 $\text{return}(V_1, V_2, \dots, V_m)$ 并终止本算法, 否则转至②。

图 11 为 K -均值聚类算法分析流程图。

图 11 K -均值聚类算法分析流程图Fig. 11 Flow chat of the K -means clustering algorithm analysis

利用 K -均值聚类分析法, 借助于 MATLAB 软件, 编制了相应的程序, 将所筛选出来的 47 条结构面交线进行优化分析。好的聚类结构应该尽可能清晰地划分数据, 每组内的数据越密集, 组与组之间的距离越大, 聚类效果越好。本文采用 Xie 等^[20-21]指标检验聚类效果的有效性, 对所筛选出来的结构面交线进行分组, 不同的分组数对应的聚类效果有效性检验见表 4。

利用 K -均值聚类分析法, 借助于 MATLAB 软件, 编制了相应的程序, 将所筛选出来的 47 条结构面交线进行聚类分析。计算得到 3 个聚类中心, 分别为 $175.6^\circ \angle 13.1^\circ$, $229^\circ \angle 14.9^\circ$, $203.6^\circ \angle 27.6^\circ$ 。图 12 为聚类分析结果图。对比分析结果, 将聚类分析

计算得到的结果代入到原结构面交线极点图中，满足结构面交线的概率性分布，对比结果如图 13 所示。

表 4 模拟数据有效性检验结果

Table 4 Validity measures for clusters of simulation data					
组数	2	3	4	5	6
指标	0.284	0.143	0.156	0.175	0.179
组数	7	8	9	10	
指标	0.205	0.213	0.215	0.226	

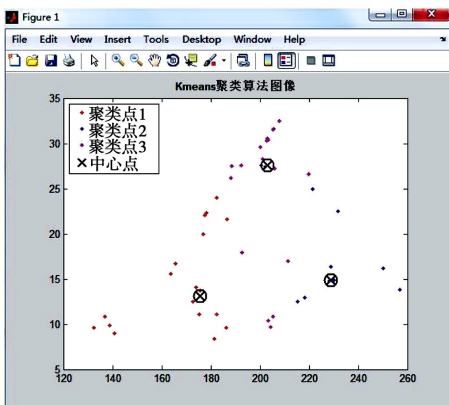


图 12 聚类分析结果图

Fig. 12 Results of clustering analysis

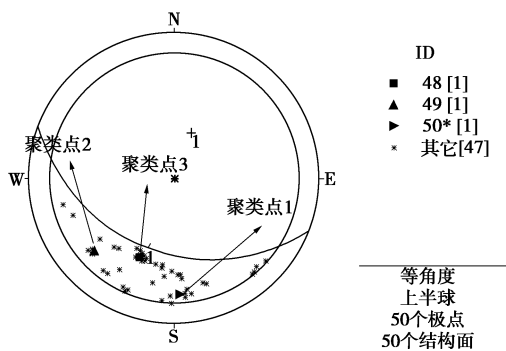


图 13 对比分析图

Fig. 13 Plot of contrasting analysis

3 结 语

将赤平极射投影法与 K -均值聚类分析法相结合，对结构面多而复杂的楔形体滑移边坡进行概率性分析。改变了常规的通过结构面分组的方法来分析楔形体的稳定性，以结构面交线为切入点进行楔形体稳定性分析，先根据赤平极射投影的楔形体稳定性分析，确定结构面交线位于楔形体中的可能滑移区域。

将上半球赤平极射投影图中结构面交线的产状数据转换到笛卡尔坐标系中，在 xy 平面内实现对结构面交线的筛选，筛选出位于可能滑移区的结构面交线，这样可以减小筛选范围，避免考虑一些对坡体稳定性没有影响的结构面。

利用 K -均值聚类法和聚类有效性检验来对筛选出的结构面交线进行聚类分析，根据楔形体滑移区域的对称性大致确定初始聚类中心，避免了选取聚类中心人为的主观性，并利用 Xie-Beni 指标确定组数，检验聚类效果的有效性，最终通过多次迭代计算筛选出可能滑移的优势结构面。实例分析表明，基于赤平极射投影和 K -均值聚类算法的优势结构面分析所筛选出优势结构面交线分类合理，结果可靠，可根据实际问题灵活运用。

参考文献:

[1] WANG J J, ZHAO T L, CHAI H J, et al. Failure of a rock slope 16.5 years after excavation in repeated strata of sandstone and mudstone[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(22): 1458 - 1468.

[2] WANG J J, CHAI H J. Factors resulting in the instability of a 57.5 m high cut slope[C]// Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, 2008: 1799 - 1804.

[3] PARK H, WEST T R. Development of a probabilistic approach for rock failure[J]. Engineering Geology, 2001, 59(3): 233 - 251.

[4] 卢波, 丁秀丽, 邬爱清. 岩体不连续面产状数据划分方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1809 - 1816. (LU Bo, DING Xiu-li, WU Ai-qing. Study on method of orientation data partitioning of randomly distributed discontinuities of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1809 - 1819. (in Chinese))

[5] 卢波, 陈剑平, 王良奎. 基于三维网络模拟基础的复杂有限块体的自动搜索及其空间几何形态判定[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1232 - 1238. (LU Bo, CHEN Jian-ping, WANG Liang-kui. The automatic seeking for complex finite rock block and the judgment of its geometrical shape in 3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1232 - 1238. (in Chinese))

[6] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 397 - 402. (CHEN Jian-ping. Numerical modeling technique for random discontinuities 3D net work of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 398 - 403. (in Chinese))

[7] SHANLEY R J, MAHTAB M A. Delineation and analysis of clusters in orientation data[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1976, 8(1): 9 - 23.

[8] HAMMAH R E, CURRAN J H. Fuzzy cluster algorithm for

- the automatic identification of joint sets[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(7): 889 - 905.
- [9] 周玉新, 周志芳, 孙其国. 岩体结构面产状的综合模糊聚类分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13): 2283 - 2287. (ZHOU Yu-xin, ZHOU Zhi-fang, SUN Qi-guo. Synthetical fuzzy clustering analysis for occurrence of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(13): 2283 - 2287. (in Chinese))
- [10] 蔡美峰, 王 鹏, 赵 奎. 基于遗传算法的岩体结构面的模糊 C 均值聚类方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 371 - 376. (CAI Mei-feng, WANG Peng, ZHAO Kui. Fuzzy C -means cluster analysis based on genetic algorithm for automatic identification of joint sets[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 371 - 376. (in Chinese))
- [11] 陈剑平, 石丙飞, 王 清. 工程岩体随机结构面优势方向的表示法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(2): 241 - 245. (CHEN Jian-ping, SHI Bing-fei, WANG Qing. Study on the dominant orientation of random fractures of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(2): 241 - 245. (in Chinese))
- [12] 匡 青, 鲍 梦. 改进蚁群算法的动态 K -均值聚类分析[J]. 软件导刊, 2008, **7**(1): 154 - 155. (KUANG Qing, BAO Meng. The improvement of the ant colony clustering algorithm in K -means clustering analysis[J]. Software Tribune, 2008, **7**(1): 154 - 155. (in Chinese))
- [13] 范 雷, 王亮清, 唐辉明. 节理岩体结构面产状的动态聚类分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(11): 2405 - 2408. (FAN Lei, WANG Liang-qing, TANG Hui-ming. Dynamic cluster analysis of orientation of jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(11): 2405 - 2408. (in Chinese))
- [14] 孙玉科, 古 讯. 赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980. (SUN Yu-ke, GU Xun. Application of stereographic projection to engineering geological mechanics in rock mass[M]. Beijing: Science Press, 1980: 88 - 102. (in Chinese))
- [15] GB50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 2001. (GB50218—2014 Standard for engineering classification for rock mass[S]. 2014. (in Chinese))
- [16] PRIEST S D. Hemispherical projection methods in rock mechanics[M]. London: George Allen and Unwin, 1985.
- [17] Rocscience DIPS 2014. [CP/OL]http://www.rocscience.com/products/1/Dips>[accessed:19.01.14].
- [18] HOCK E, BRAY J. Rock slope engineering[M]. London: The Institution of Mining Metallurgy, 1997: 18 - 23.
- [19] 张化光, 刘鑫蕊, 孙秋野. MATLAB/SIMULINK 实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. (ZHANG Hua-guang, LIU Xin-rui, SUN Qiu-ye. MATLAB/SIMULINK programming[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 1980. (in Chinese))
- [20] REGINALD E H, JOHN H C. Validity measures for the fuzzy cluster analysis of orientations[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, **22**(12): 1467 - 1472.
- [21] 周世兵, 徐振源, 唐旭清. K -means 算法最佳聚类数确定方法[J]. 计算机应用, 2010, **30**(8): 1995 - 1998. (ZHOU Shi-bing, XU Zhen-yuan, TANG Xu-qing. Methods for determining optimal number of clusters in K -means clustering algorithm[J]. Journal of Computer Application, 2010, **30**(8): 1995 - 1998. (in Chinese))