

文章编号: 1000-7598(2014) 增 1-365-08

连通过节理岩质边坡稳定性分析

宋玉才¹, 孙旭曙²

(1. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072; 2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 节理岩体的剪切强度由结构面和相邻完整岩块的剪切强度共同决定, 当结构面完全连通时, 岩体的剪切强度完全由结构面决定。蒙特卡罗法能够根据结构面几何参数模拟岩体结构面的空间分布, 通过深度优先搜索算法可搜索到连通的结构面, 相对岩体而言, 连通的结构面的剪切强度最小, 即为节理岩质边坡的潜在滑动面, 通过极限平衡法可以对一系列滑面进行稳定性分析。该方法是对节理岩质边坡稳定分析的补充。

关 键 词: 节理岩体; 结构面优势产状; 滑动面; 蒙特卡罗法; 深度优先搜索算法; 极限平衡法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Stability analysis of rock slope with connected joint

SONG Yu-cai¹, SUN Xu-shu²

(1. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The shear strength of jointed rock masses is determined by the structural surface and the adjacent intact rock shear strength; When the structural surface is completely connected, the shear strength of rock mass is determined entirely by the structural surface. Monte Carlo method can simulate the spatial distribution of the discontinuity in jointed rock masses according to the geometry parameters of the structural surface; and then the connected structural surface can be searched via depth-first algorithm; and compared with the rock mass, the shear strength of the connected structural surface is the smallest; so it can be considered as the potential sliding surface of jointed rock slope. The stability of a series of sliding surfaces can be analysed by the limit equilibrium method. This method is the complement of the jointed rock slope stability analysis.

Key words: jointed rock masses; dominant orientation of structural surface; sliding surface; Monte Carlo method; depth-first algorithm; limit equilibrium method

1 引 言

天然岩体在漫长的地质作用过程中被大小不等、方向各异的结构面(包括断层、层面、节理、劈理、片理、软弱夹层、泥化夹层等不连续面)纵横切割, 形成具有一定结构的不连续体。岩体主要由岩块和结构面所组成, 结构面对岩体的变形、强度、破坏及稳定性起控制作用, 同时, 结构面的力学特性、几何特性及空间分布规律是影响岩体力学特性和水力行为的主要影响因素^[1-2]。

岩质边坡的稳定性主要取决于结构面的强度及其分布形式, 学者们对岩质边坡结构面几何参数(通常指其倾向、倾角、间距、迹长、隙宽等)的采集、

统计分析、计算机模拟、计算方法等方面做了大量研究。Hudson 等^[3-4]、Kulatilake 等^[5]分别提出了测线法和统计窗法。朱宜萱等^[6-8]采用摄影测量方法确定了岩体结构面的产状。Siefko 等^[9-11]采用三维激光扫描及测量技术远距离获取裸露岩体坡面结构面的几何信息。周玉新等^[12-15]采用聚类分析方法对岩体结构面优势产状进行了精确地统计分析。陈征宙等^[16-21]基于结构面几何信息统计参数, 采用蒙特卡罗对结构面进行了计算机随机模拟。王科锋^[22]对岩体裂隙网络图进行智能化处理, 得到连通的裂隙网络图及其节点和线元信息。陈祖煜等^[23]对岩质边坡工程地质、失稳模式判断、岩体结构面网络模拟和抗剪强度、边坡稳定分析原理及方

收稿日期: 2014-01-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(No.2012CB426502); 国家自然科学基金资助(No.51279091)。

第一作者简介: 宋玉才, 男, 1972 年生, 博士研究生, 教授级高工, 主要从事水利工程施工与管理方面的工作。E-mail: yucaai_song@126.com

通讯作者: 孙旭曙, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: sunxs110@126.com

法进行了详细的研究,并开发出了相应的计算程序。刘建东等^[24]采用赤平投影图解法及极限平衡法,分析了岩质边坡潜在破坏模式。张宏涛等^[25]采用 Goodman 节理单元建立了节理岩体边坡稳定的上限分析有限元格式。赵尚毅等^[26]和贺续文等^[27]分别采用有限元强度折减法和离散元法分析了节理岩质边坡稳定性。段荣福等^[28]和沈银斌等^[29]采用岩质边坡临界滑动场搜索了其滑动面。节理岩体的剪切强度是由结构面的剪切强度和相邻完整岩块的剪切强度共同决定的,如果结构面相互连通并延伸至地表,则连通的结构面也成为了一条潜在滑动面,此时岩体的剪切强度完全取决于结构面,所以,对节理岩质边坡连通结构面的搜索也是一项重要的工作。

本文介绍了岩体结构面几何参数的采集、统计分析和计算机模拟方法,采用深度优先搜索算法搜索节理岩质边坡中的连通结构面,并将连通的结构面作为潜在滑动面,运用极限平衡法进行了边坡稳定分析。

2 岩体结构面几何参数采集

岩体结构面几何参数采集通常以人工现场接触测量(地质罗盘仪测量)为主,包括钻孔法、测线法、统计窗法^[2]。

2.1 钻孔法

钻孔法是地质勘察最普遍、最重要的手段,通过钻孔可以获得大量的地质信息。钻孔一般直径为 5~10 cm,钻孔法由于孔径较小,只能得到结构面沿孔轴线的密度和产状。钻孔法分类及测量内容^[2]见表 1。

表 1 钻孔法分类表

Table 1 Classification of hole-drilling method

分 类	勘测内容
一般地质钻孔	①结构面的密度
	②结构面的产状(主要是倾角)
	③结构面有无充填物
	④结构面的粗糙度
	⑤可以对结构面的隙宽做粗略的估计,通过钻孔内的压水试验,求得与钻孔相交裂隙的水力等效宽度
定向取芯地质钻孔	结构面的产状
印模地质钻孔	透水裂隙的分布情况
压模地质钻孔	裂隙压痕的方位和倾角
钻孔内彩色电视装置	可清楚测出钻孔孔壁裂隙产状以及其他各种地质迹象

2.2 测线法

测线法首先由 Hudson 和 Priest^[3-4]提出,它通

常在现场露头面或开挖面布置一条长的测线,首先测量测线的走向和倾角,然后对与此测线相交的结构面的位置、产状、间距、迹长等逐个进行测量,确定结构面端点类型、成因类型,描述结构面充填、胶结和含水状况与起伏程度等。与钻孔法相比,测线法可以对迹线长度进行测量和统计,当探硐高度较大时,也可用摄像法进行测量。

2.3 统计窗法

统计窗法由 Kulatilake 等^[5]提出,是一种估算结构面平均迹长的新方法。通常在岩石露头面上圈定一个矩形范围来测量结构面迹长,统计窗法不需要统计结构面的迹长,只需统计每组结构面中包容、相交和切割关系的结构面的数量,然后由结构面的数量和统计窗的大小估算结构面的平均迹长。缺点是这种方法只能得到结构面迹长的概率分布形式,不能单独使用,只作为测线法的补充。

2.4 摄像及激光扫描技术

随着科学技术的发展和学者们的不断深入研究,摄影和摄像测量^[6-8]、激光测距及扫描技术^[9-11]已经开始应用在岩体结构面测量、识别和统计中。这些新方法的优点有:(1)实现岩体结构面产状完全非接触测量,并有效扩大测量范围,提高了测量效率,避免测量人员暴露于裸露岩体下的危险;(2)具有短时间、远距离、高精度的获得目标表面的坐标点,进而拟和表面,获取出露岩石表面产状要素;(3)通过软件可实现岩体结构面几何信息自动识别和结构面优势产状统计分析;(4)减少局部区域强磁场干扰对结构面的误测。

三维激光扫描系统一般由三维激光扫描仪、数码相机、后处理软件、电源以及附属设备组成,它采用非接触式高速激光测量方式,获取地形或者复杂物体的几何图形数据和影像数据,最终由后处理软件对采集的点云数据和影像数据进行处理,并转换成绝对坐标系中的空间位置坐标或模型,以多种不同的格式输出,满足空间信息数据库的数据源和不同应用的需要。从扫描的空间位置或系统运行平台可划分为 3 类:(1)机载型激光扫描系统;(2)地面型激光扫描系统;(3)手持型激光扫描系统。据文献^[30],3 种典型地面三维激光影像扫描仪技术指标见表 2。

3 岩体结构面优势产状统计分析

结构面分组是构建结构面概率模型、保证结构面网络模拟精度的重要环节之一。传统结构面产状图形分析方法主要是玫瑰花图、极点图、等密度图

等^[31]。这类方法的优点是可以直观地看出结构面的分组数目, 缺点^[15]是不能准确地确定其优势方位, 对优势组数划分粗糙, 统计结果受人为因素影响也较大。

表 2 典型地面三维激光影像扫描仪技术指标
Table 2 Technology indicators of 3D laser scanner

系统名称	ICRIS-3D	Cyrax 2500	LMS-Z420
测距精度/mm	3	在 1.5~50 m 内可达 6	在 2~250 m 可达 10, 距离在 1 000 m 可达 20
测距范围/m	可达 1 500	100	1 000
数据采样率/(点/秒)	2 000	1 000	3 300
最小点间隔/mm	2.6(距离<100 m 时)	0.25(距离<50 m 时)	18(距离=100 m 时)
模型化点定位精度/mm	3	2	20
激光点大小/mm	100 m 时为 29	在 0~50 m 范围内小于 6	在 100 m 时为 30
扫描视场/(°)	水平向 40, 垂直向 40	水平向 40, 垂直向 40	水平向 300, 垂直向 80
激光等级	一级激光	二级激光	三级激光
激光波长/mm	>1 500		近红外光线波长

聚类分析是多元统计分析方法之一, 按照事物间的相似性进行区分和分类过程, 是一种无监督的分类, 它将数据集划分为若干组或类^[32]。结构面聚类分析弥补了传统方法不能精确划分的不足^[12-15], 确保每条结构面都进入分组, 不会造成遗漏, 减少了图形的判读环节, 易于计算机编程操作, 也大大减少了人工工作量, 其分组方法^[33]如下:

①根据野外调查, 把结构面初步分成 N 组, 并以结构面法向方向 n 为最大概率方向。

②确定每组结构面的角半径 θ_i 。

③对每组结构面以最大概率方向为中心, 把角半径 θ_i 范围内的结构面归入该组。

④计算每一结构面组合并矢量方向 $\bar{V}$ 和长度尺 R :

$$V = \sum_{i=1}^N n_i, \quad R = |V| = \sum_{i=1}^N \cos \theta_i \quad (1)$$

⑤按合矢量长度从小到大对结构面组进行排序。

⑥删除结构面数 < 1 的结构面组。

⑦对每组结构面进行假设检验, 如有一组不服从 Fisher 分布则聚类结束, 否则, 继续。

⑧增大合并角半径 θ_i , 重复步骤③~⑦直至满足要求。

4 岩体结构面计算机模拟

岩体结构面的计算机模拟过程实际上是对现场测量统计的逆过程, 一般采用蒙特卡罗法进行模拟^[16-21]。

4.1 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法的理论基础是概率论, 它根据所研究问题某一随机变量的概率分布形式, 利用一定的随机数生成方法, 生成概率分布形式与该研究问题随机变量的分布形式相似或平行的随机数序列。

4.1.1 随机数的产生

蒙特卡罗法关键是产生 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数。线性同余法简单、易懂, 容易实现, 产生的随机数统计性好, 其递推公式^[17]为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= (a_{i-1} + c)(\text{mod } m) \\ r_i &= \frac{x_i}{m}, (i \in N) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: a 为非负的乘子; c 为非负的增量; m 为模数; $(\text{mod } m)$ 为对模数 m 取其数; r_i 为 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数; x_0 为初值。

4.1.2 随机变量的产生

一般利用随机变量 x 的分布函数 $F(x)$ 的反函数 $F^{-1}(x)$ 来推求随机变量^[2], 分布函数 $F(x)$ 的定义域为 $[0, 1]$, 故在 $[0, 1]$ 区间上总存在一个均匀的随机数 r , 且有

$$F(x) = r \quad (3)$$

由此建立 x 与 r 的一一对应关系, 即

$$x = F^{-1}(r) \quad (4)$$

故, 有不同分布函数 $F(x)$, 即可求出不同分布的随机变量。

4.2 随机结构面网络模拟

据文献^[17-19], 岩体结构面几何参数服从以下类型的概率分布: (1) 裂隙的条数依据其密度服从 Poisson 随机过程; (2) 裂隙中心点位置服从研究域内均匀分布; (3) 产状通常符合 Bingham 分布、Fisher 分布、双变量正态分布或半球正态分布等; (4) 迹长(半径)符合负指数分布或对数正态分布; (5) 隙宽符合正态或对数正态分布。

对每一组结构面, 分别拟合出产状、迹长、间距、断距的分布形式及其分布参数, 运用 Monte-Carlo 方法分别产生各几何参数的随机变量, 计算出结构面的起点和终点坐标; 判断生成的结构面中点是否在取样区内, 如果在则存放该结构面, 否则, 放弃该结构面。接着生成下一个结构面, 通常先生

成断距方向的结构面, 然后生成间距方向的结构面; 当取样内该组结构面生成完毕, 再生成第2组结构面, 直至所有的结构面都生成完毕。

4.3 连通结构面的智能搜索

由蒙特卡罗法模拟生成的裂隙网络图可以通过深度优先搜索算法(Depth-First Algorithm)搜索其连通路程。深度优先搜索算法的过程为^[34]: 首先访问出发点 v , 将其标记为已访问过; 然后依次从 v 出发搜索 v 的每个邻接点 w , 若 w 未曾被访问过, 则以 w 为新的出发点继续进行深度优先遍历, 直至所有和 v 有路径相通的顶点均已被访问过为止; 若此时仍有未访问过的节点, 则选一个未访问过的节点作为源点重复上述操作, 直至所有节点均已被访问。连通结构面智能搜索流程图见图1。

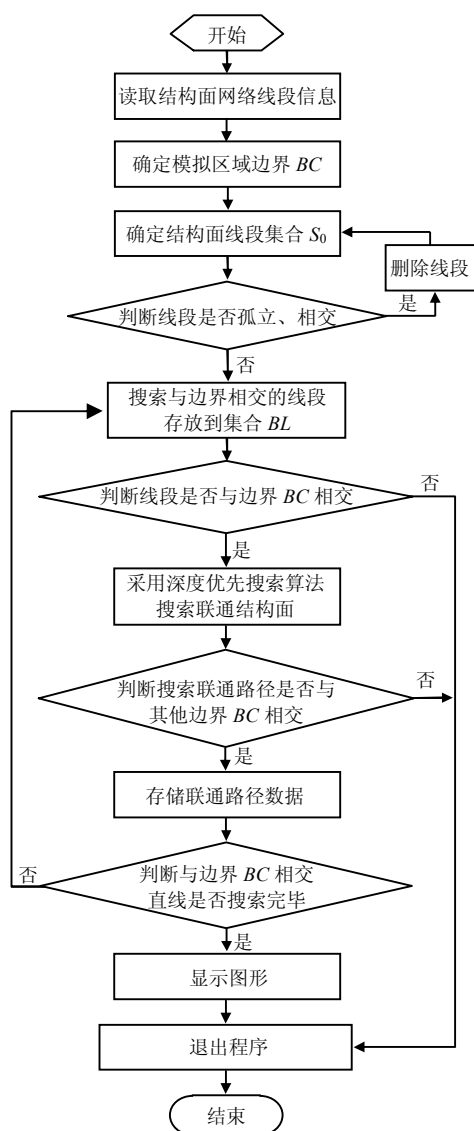


图1 连通结构面智能搜索流程图

Fig.1 Flow chart of intelligent search of structural surface network

节理岩体连通计算机智能处理的步骤如下:

①读取由蒙特卡罗法模拟生成的裂隙网络图中的线段信息, 并将其分为线段集合 S_0 和边界 BC 。

②删除不与其他线段相交、孤立的直线, 并重新生成新的线段集合 S_1 。

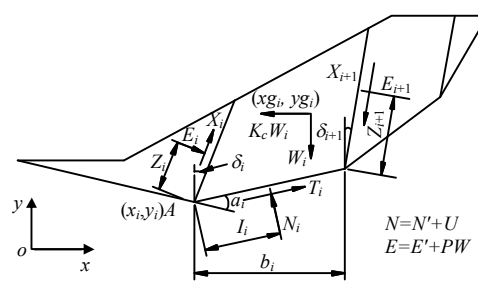
③从线段集合 S_1 中搜索与边界相交的线段, 并存放到 BL , 建立以该线段为根的树, 从集合 S_1 中搜索到与该线段相交的所有线段, 再建立子节点数结构, 直到出现两种情况: 一种是搜索到的线段与边界相交 (即所求路径), 另一种是搜索到的线段不能与剩余的线段相交 (不符合条件删除); 若无线段与边界相交, 跳出处理程序。

④重复③直至所有边界搜索完毕。

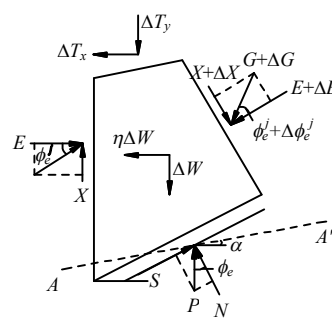
⑤得到所求的结果。

5 边坡稳定计算方法

Sarma 法是基于极限平衡理论的边坡稳定性分析方法, 可以分析具有复杂结构面的圆弧或非圆弧滑动的边坡稳定性问题。Sarma 法计算简图如图2所示。假设滑面和临空面之间的滑体分为 n 块, 且不要求各条块是垂直的, 每个条块都被施加一个水平地震惯性力 $K_c W_i$, 使滑体恰好达到极限状态 (即 $F_s = 1$), 此时水平地震加速度 K_c 称为临界地震加速度, 其中, W_i 为第 i 个条块的重量。



(a) 斜条分模式



(b) 作用在条块上的力

图2 Sarma 法计算简图

Fig.2 Sketch of Sarma method

根据静力平衡原理, 可得

$$\left. \begin{aligned} N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i &= W_i + X_{i+1} \cos \delta_{i+1} - \\ &\quad X_i \cos \delta_i - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_i \sin \delta_i \\ T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i &= K_c W_i + X_{i+1} \sin \delta_{i+1} - \\ &\quad X_i \sin \delta_i + E_{i+1} \cos \delta_{i+1} - E_i \cos \delta_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: E_i 、 E_{i+1} 分别为作用于第 i 条块两侧面的法向力; X_i 、 X_{i+1} 分别为作用于第 i 条块两侧面的切向力; N_i 为作用于第 i 条块底面的法向力; T_i 为作用于第 i 条块底面的切向力; δ_i 、 δ_{i+1} 分别为第 i 条块两侧面与铅直面的夹角, 以铅直线为起始线, 顺时针为正, 逆时针为负; α_i 为第 i 条块底面与水平面的夹角, 其余符号意义同前。

Sarma 法采用类似于蒙特卡罗剪力强度准则的方程来描述条间剪力和法向力之间的关系, 在底面和左右界面有

$$\left. \begin{aligned} T_i &= (N_i - U_i) \tan \phi_i + c_i b_i \sec \alpha_i \\ X_i &= (E_i - PW_i) \tan \phi_i^j + c_i^j d_i \\ X_{i+1} &= (E_{i+1} - PW_{i+1}) \tan \phi_{i+1}^j + c_{i+1}^j d_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: ϕ_i 、 c_i 分别为第 i 条块界面上的平均摩擦角和黏聚力; ϕ_i^j 、 c_i^j 和 ϕ_{i+1}^j 、 c_{i+1}^j 分别为第 i 条块两侧面的平均摩擦角和黏聚力; d_i 、 d_{i+1} 分别为第 i 条块两侧面的长度; b_i 为第 i 条块底面在水平面上的投影长度; PW_i 、 PW_{i+1} 分别为作用于第 i 条块两侧面的水压力; U_i 为作用于第 i 条块底面的水压力。

将式 (6) 代入式 (5), 可得

$$E_{i+1} = \alpha - p_i K_c + E_i e_i \quad (7)$$

式 (6) 第二式是个循环式, 可得

$$\left. \begin{aligned} E_{n+1} &= \alpha_n - p_n K_c + E_n e_n \\ E_{n+1} &= (\alpha_n + \alpha_{n-1} e_n) - (p_n + p_{n-1} e_n) K_c + E_{n-1} e_n e_{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

进一步得到

$$\begin{aligned} E_{n+1} &= (\alpha_n + \alpha_{n-1} e_n + \alpha_{n-2} e_n e_{n-1} + \cdots + \\ &\quad \alpha_1 e_n e_{n-1} \cdots e_3 e_2) - K_c (p_n + p_{n-1} e_n + \\ &\quad p_{n-2} e_n e_{n-1} + \cdots + p_1 e_n e_{n-1} \cdots e_3 e_2) + \\ &\quad E_1 e_n e_{n-1} e_{n-2} \end{aligned} \quad (9)$$

不考虑外荷载作用, 则 $E_{n+1} = E_1 = 0$, 可得水平地震加速度 K_c

$$K_c = \frac{\alpha_n + \alpha_{n-1} e_n + \alpha_{n-2} e_n e_{n-1} + \cdots + \alpha_1 e_n e_{n-1} \cdots e_3 e_2}{p_n + p_{n-1} e_n + p_{n-2} e_n e_{n-1} + \cdots + p_1 e_n e_{n-1} \cdots e_3 e_2} \quad (10)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= \frac{W_i \sin(\phi_i - \alpha_i) + R_i \cos \phi_i + S_{i+1} \sin(\phi_i - \alpha_i - \delta_{i+1})}{\cos(\phi_i - \alpha_i + \phi_i^j - \delta_{i+1}) \sec \phi_i^j} \\ &\quad - \frac{S_i \sin(\phi_i - \alpha_i - \delta_i)}{\cos(\phi_i - \alpha_i + \phi_i^j - \delta_{i+1}) \sec \phi_i^j} \\ p_i &= \frac{W_i \cos(\phi_i - \alpha_i)}{\cos(\phi_i - \alpha_i + \phi_i^j - \delta_{i+1}) \sec \phi_i^j} \\ e_i &= \frac{\cos(\phi_i - \alpha_i + \phi_i^j - \delta_i) \sec \phi_i^j}{\cos(\phi_i - \alpha_i + \phi_i^j - \delta_{i+1}) \sec \phi_i^j} \\ R_i &= c_i b_i \sec \alpha_i - U_i \tan \phi_i \\ S_i &= c_i^j d_i - PW_i \tan \phi_i; \phi_i^j = \delta_1 = \phi_{n+1}^j = \delta_{n+1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

计算不同临界地震加速度 K_c , 直到试算出的 $K_c = 0$ 时, 此时的 F_s 即为无震时的稳定系数。

6 算 例

6.1 工程概况

某水电站泄洪洞进口位于右岸坝轴线上游 400 m 处, 整体坡度约为 50° 。泄洪洞进口部位两侧较低洼处分布有少量崩坡积碎石土, 绝大部分地段基岩裸露。经分析, 共有 2 组优势结构面, 优势结构面产状统计参数见表 3, 岩石和结构面力学参数分别见表 4、5。

表 3 优势结构面产状统计表
Table 3 Dominant orientation of structural surface

参数		节理组		分布
		1	2	
倾角/ $^\circ$	平均值	30.00	60.00	正态
	标准差	3.00	6.00	
迹长/m	平均值	6.00	6.25	负指数
	标准差	0.75	2.95	
断距/m	平均值	1.50	2.20	均布
	标准差	0.80	0.70	
间距/m	平均值	1.75	1.98	均布
	标准差	0.60	0.65	

表 4 岩石力学参数
Table 4 Mechanical parameters of rock

风化程度	重度 /(kN/m^3)	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ / $^\circ$
强风化	27	2.25	0.33	0.30	27.7
弱风化	27	3.00	0.33	0.45	31.0
微新	27	3.50	0.33	0.55	33.0

表 5 结构面力学参数表
Table 5 Mechanical parameters of structural surface

结构面	黏聚力 c /MPa	抗剪摩擦系数 f
岩块岩屑型	0.11	0.48

6.2 滑动面搜索及稳定计算

节理岩体结构面强度较低, 贯通的结构面为主要的潜在滑动面, 边坡结构面模拟图见图 3。结构面连通搜索之后得到 9 条滑动面, 见图 4 (图中数字编号为裂隙结点编号)。各滑动面安全系数见表 6。经过稳定性分析, 各滑动面安全系数均满足规范要求。

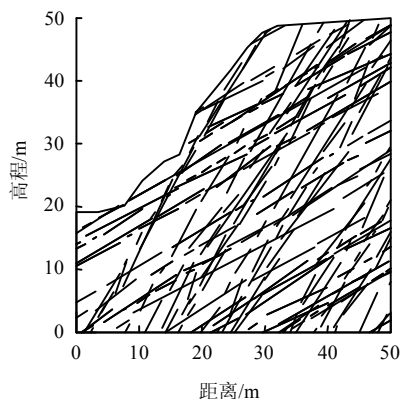


图 3 边坡剖面结构面分布图

Fig.3 Distribution of structural surface in slope section

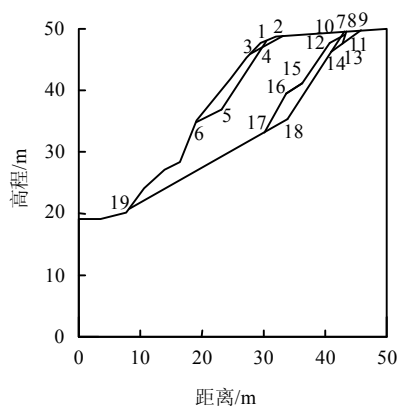


图 4 边坡滑动面

Fig.4 Sliding surface of slope

表 6 滑动面统计表

Table 6 Statistics of sliding surface

序号	滑动面 (裂隙结点编号)	安全系数
1	1、4、3	22.570
2	1、4、5、6	4.750
3	2、4、3	20.072
4	2、4、5、6	4.866
5	7、10、12、15、16、17、19	1.867
6	8、11、10、12、15、16、17、19	1.874
7	7、10、14、18、17、19	1.870
8	8、11、13、14、18、17、19	1.888
9	9、13、14、18、17、19	1.883

7 结 论

(1) 岩体结构面几何参数采集宜采用多种方

法测量, 不同方法之间可以相互弥补不足, 实现工程区精确测量。

(2) 对测量数据的统计分析, 宜采用聚类分析, 提高划分精度, 降低人为因素影响。

(3) 通过深度优先搜索算法可搜索节理岩质边坡中的连通结构面, 并将其作为潜在滑动面进行稳定性分析, 此方法是对节理岩质边坡稳定分析的补充。

参 考 文 献

- [1] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [2] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [3] HUDSON J A, PRIEST S D. Discontinuities and rock mass geometry[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(6): 339—362.
- [4] HUDSON J A, PRIEST S D. Discontinuity frequency in rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(2): 73—89.
- [5] KULATILAKE P H S W, WU T H. Sampling bias on orientation of discontinuities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1984, 17(4): 243—253.
- [6] 朱宜萱, 邵巨良, 王树根. 地面摄影测量测定地质结构面产状和几何要素方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1991, 16(3): 84—93.
ZHU Yi-xuan, SHAO Ju-liang, WANG Shu-gen. Investion of deforming the appearance and geometric elements for geological structure surface by using tenestrial photogrammetry method[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1991, 16(3): 84—93.
- [7] 王凤艳, 陈剑平, 付学慧, 等. 基于 VIRTUOZO 的岩体结构面几何信息获取研究[J]. 岩石力学与工报, 2008, 28(1): 169—175.
WANG Feng-yan, CHEN Jian-ping, FU Xue-hui, et al. Study on geometrical information of obtaining rock mass discontinuities based on VIRTUOZO[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 28(1): 169—175.
- [8] 周春霖, 朱合华, 赵文. 双目系统的岩体结构面产状非接触测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 111—117.

- ZHOU Chun-lin, ZHU He-hua, ZHAO Wen. Non-contact measurement occurrence with of rock mass discontinuity binocular system[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 111—117.
- [9] SIEFKO S, BART V K, ROBERT H, et al. Method for automated discontinuity analysis of rock slope with three-dimensional laser scanning[J]. **Journal of the Transportation Research Board**, 2005, 1913: 187—194.
- [10] 何秉顺, 丁留谦, 孙平. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(1): 43—48.
- HE Bing-shun, DING Liu-qian, SUN Ping. The application of 3D laser scanning technology in rock joint sets identification[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2007, 5(1): 43—48.
- [11] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚. 基于激光点云数据的岩体结构面全自动模糊聚类分析及几何信息获取[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 31(2): 358—364.
- LIU Chang-jun, DING Liu-qian, SUN Dong-ya. Automatic fuzzy clustering analysis and geometric information acquisition of rock mass discontinuities based on laser point cloud data[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 31(2): 358—364.
- [12] 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 joints occurrence of rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(13): 2283—2287.
- [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 discontinuity orientations of jointed rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2405—2408.
- [14] 邓继辉, 陈柏林, 吴小宁, 等. 岩体结构面产状的自组织聚类分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 50—53.
- DENG Ji-hui, CHEN Bo-lin, WU Xiao-ning, et al. Self-organized cluster analysis on texture plane occurrence of rock mass[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2011, 28(3): 50—53.
- [15] 冯羽, 马凤山, 巩城城, 等. 节理岩体结构面优势产状确定方法研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 887—892.
- FENG Yu, MA Feng-shan, GONG Cheng-cheng, et al. Data analysis method for optimized and dominant orientations of joints in rock mass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(6): 887—892.
- [16] 陈征宙, 胡伏生, 方磊, 等. 岩体节理网络模拟技术研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 22—25.
- CHEN Zheng-zhou, HU Fu-sheng, Fang Lei, et al. Technique for simulating joint network of rock masses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 22—25.
- [17] 何杨, 李康宏, 柴军瑞. 由统计规律模拟生成的岩体裂隙网络的非稳定渗流数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 81—86.
- HE Yang, LI Kang-hong, CHAI Jun-rui. Numerical analysis of unsteady seepage through fracture network in rock mass simulated by the monte-carlo method[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2005, 13(1): 81—86.
- [18] 尹彦波, 李爱兵, 袁节平, 等. 岩体结构面二维网络模拟的计算机辅助技术研究[J]. 采矿技术, 2006, 6(4): 19—22.
- YIN Yan-bo, LI Ai-bing, YUAN Jie-ping, et al. Computer aided technology research on simulating two-dimensional joint network of discontinuity structural plane[J]. **Mining Technology**, 2006, 6(4): 19—22.
- [19] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬. 裂隙岩体精细结构描述及工程特性数值试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3936—3940.
- LIU Xiao-li, WANG En-zhi, WANG Si-jing. Fine structure description for fractured rock mass and numerical tests on its engineering properties[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.2): 3936—3940.
- [20] 荣冠, 周创兵. 基于裂隙网络模拟技术的结构面分布分维数计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3465—3469.
- RONG Guan, ZHOU Chuang-bing. Study on fractal dimension of discontinuity distributed based on simulation technique of discontinuity network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3465—3469.
- [21] 张贵科, 徐卫亚. 裂隙网络模拟与 REV 尺度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1675—1680.
- ZHANG Gui-ke, XU Wei-ya. Analysis of joint network simulation method and REV scale[J]. **Rock and Soil**

- Mechanics**, 2008, 29(6): 1675—1680.
- [22] 王科锋, 柴军瑞, 吴坤占. MONTE-CARLO 裂隙网络图的计算机处理与自动剖分[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(增刊): 33—37, 41.
- WANG Ke-feng, CHAI Jun-rui, WU Kun-zhan. Computer graph processing and automatic dissection about fracture network in rock mass simulated by MONTE-CARLO method[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, 26(Supp.): 33—37, 41.
- [23] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定性分析—原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [24] 刘建东, 邵长云, 陈征宙, 等. 裂隙岩体边坡稳定性分析方法[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(3): 255—259.
- LIU Jian-dong, SHAO Chang-yun, CHEN Zheng-zhou, et al. Stability analysis methods of rock mass slope[J]. **Journal of East China Institute of Technology**, 2004, 27(3): 255—259.
- [25] 张宏涛, 赵宇飞, 纪洪广, 等. 节理岩体边坡稳定上限分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 38—42.
- ZHANG Hong-tao, ZHAO Yu-fei, JI Hong-guang, et al. Upper bound limit analysis for stability of jointed rock slopes[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2011, 31(2): 38—42.
- [26] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 54—260.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis on jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 54—260.
- [27] 贺续文, 刘忠, 廖彪, 等. 基于离散元法的节理岩体边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2199—2204.
- HE Xu-wen, LIU Zhong, LIAO Biao, et al. Stability analysis of jointed rock slopes based on discrete element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2199—2204.
- [28] 段荣福, 白世伟. 基于临界滑动场的岩质边坡临界滑动面搜索方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 861—864.
- DUAN Rong-fu, BAI Shi-wei. Searching method for critical slip surface in rock slope based on theory of critical slip field[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 861—864.
- [29] 沈银斌, 朱大勇, 姚华彦, 等. 改进的岩质边坡临界滑动场计算方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 277—284.
- SHEN Yin-bin, ZHU Da-yong, YAO Hua-yan, et al. Improved technique for computing critical slip fields of rock slope[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2010, 42(5): 277—284.
- [30] 王文忠, 冉启发, 孙世国. 高陡软岩边坡控制与智能匹配优化设计技术[M]. 北京: 科技出版社, 2008.
- [31] 徐开礼, 朱志澄. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [32] 鲍正益. 模糊聚类算法及其有效性研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
- [33] 黄运飞, 冯静. 计算工程地质学(理论、程序、实例)[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [34] 王昆仑, 李红. 数据结构与算法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [35] MORGENSTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surface[J]. **Géotechnique**, 1965, 15(1): 79—93.