

# 基于破坏概率法的降雨型滑坡失稳破坏分析

曹羽哲, 曹运江

(湖南科技大学, 湖南 湘潭 411201)

**摘 要:**精准分析降雨型滑坡的稳定性,有利于深化对该类型滑坡灾害的评价和预测预报,但传统方法计算滑坡稳定性不仅忽略了计算参数的随机分布对滑坡产生的影响,也无法得出滑坡的失稳概率。以韶关地区典型的降雨型滑坡为例,建立降雨型滑坡分析模型及稳定性系数计算模型,再基于 Monte-Carlo 法,将破坏概率分析法结合剩余推力法运用到模型中,对研究区降雨型滑坡在天然工况和暴雨饱和工况进行了稳定性分析及破坏概率计算。结果表明:滑坡在天然工况下基本稳定,破坏概率范围为 31.3%~37.1%,处于中等偏低危险等级;在暴雨饱和工况下欠稳定,破坏概率范围为 51.6%~55.3%,处于中等偏高危险等级;破坏概率分析法与传统计算方法相比,同样能够得到准确的滑坡稳定性评价结果,并且在计算中更为简便合理;采用破坏概率分析法计算时,不考虑岩土体参数变异系数及偏度系数计算的滑坡破坏概率较考虑岩土体参数变异系数及偏度系数计算的破坏概率偏高,两者计算结果差距范围为 5%~20%。

**关键词:**破坏概率; 降雨型滑坡; Monte-Carlo 法; 稳定系数

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)05-0387-07

## Analysis of Instability and Destruction of Rainfall Type Landslide Based on Failure Probability

CAO Yuzhe, CAO Yunjiang

(Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract:** Accurate analysis of the stability of rainfall-type landslides is conducive to deepening the evaluation and prediction of this type of landslide hazard. However, the traditional method of calculating landslide stability not only ignores the influence of the random distribution of calculation parameters on the landslide, but also fails to derive the landslide. Taking a typical rainfall-type landslide in Shaoguan area as an example, we established a rainfall-type landslide analysis model and a stability coefficient calculation model. Based on Monte-Carlo method, combined with failure probability analysis method and residual thrust method, the stability analysis and failure probability calculation of rainfall landslide in the study area were carried out under natural conditions and rainstorm saturation conditions. The results show that the landslide is basically stable under natural conditions, and the damage probability ranges from 31.3% to 37.1%, which is at a medium to low risk level; it is not stable under the saturated rainstorm conditions, and the damage probability ranges from 51.6% to 55.3%, which is at a moderately high risk level; compared with the traditional calculation method, the failure probability analysis method can also obtain accurate stability evaluation results, and the calculation is more simple and reasonable; when the failure probability analysis method is used, the failure probability calculated by not considering the variation coefficient and the skewness coefficient of the rock and soil parameters is higher than the failure probability calculated by considering these parameters, and the difference between the two calculation results is about 5% to 20%.

**Keywords:** failure probability; rainfall landslide; Monte-Carlo method; stability factor

降雨型滑坡的发生频率较高,分布范围非常广,斜坡破坏形式多种多样,严重制约灾害多发地区的社会经济发展,威胁灾害区人民生命财产安全。因此,

对区域开展降雨型滑坡灾害稳定性评价和滑坡预测预报,对国土规划、防灾减灾、灾害管理与决策等均具有非常重要的研究价值和现实意义<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2020-09-21

修回日期: 2020-10-29

资助项目: 国家自然科学基金“融合地基 SAR 与多传感器的深基坑形变监测关键技术及破坏机理研究”(41877283)

第一作者: 曹羽哲(1996—),男,湖南益阳人,硕士研究生在读,主要研究方向为环境与地质灾害。E-mail: 634694415@qq.com

通信作者: 曹运江(1967—),男,湖南新化人,博士,教授,从事地质资源与地质工程的教学与科研工作。E-mail: caoyj-xt@sohu.com

滑坡稳定性分析是提高滑坡灾害预警预报精度的先决条件。目前评价滑坡稳定性所使用最多的方法是极限平衡法,如简化 Bishop 法和瑞典条分法等,这些定值分析方法虽然能有效得出边坡稳定系数,但忽略了实际存在的不确定性因素及计算参数的随机分布对滑坡产生的影响。大量的研究成果表明,滑坡灾害是一个非常复杂的非线性系统,在不同区域、不同构造背景下,各影响因素对滑坡发生的促进或抑制作用及程度各不相同。因此,需要分析对滑坡的发生具有显著影响作用的工况,建立合理、符合实际的地质灾害分析模型,以获得较好的预测结果。由于在实际工程中,边坡稳定性计算参数分布较为离散,可以视为随机变量,故客观上的稳定性系数亦为随机变量,因而采用概率分析方法进行边坡稳定性评价更为合理。早在 20 世纪 50 年代, Freudental 就提出将概率分析方法引入工程结构可靠性分析中<sup>[2]</sup>;通过不断地学习探索,20 世纪 80 年代,祝玉学将概率分析方法应用到土坡稳定性分析中并出版了中国第一部相关著作《边坡可靠性分析》<sup>[3]</sup>,从此,概率分析也逐渐成为一种热门的稳定性评价手段;对于滑坡发生概率,众多学者采用了多种方法及概率模型进行了分析;王志恒等采用确定性概率系数模型来对高程、坡度、岩土类型及断裂构造等降雨型滑坡孕灾因子进行分析<sup>[4]</sup>。乔建平等提出了将滑坡稳定性分析与滑坡发育率相结合的 KP 模型计算滑坡破坏概率的方法<sup>[5]</sup>。蒲书豪等提出将敏感性分析与概率分析法相结合的分析手段,以敏感性分析结果的针对性来弥补概率分析法参数选取上的不足<sup>[6]</sup>,以期得到更具有针对性、高效的计算结果,更好地为滑坡防治工程提供参考。杜时贵等采用破坏概率分析法,结合不平衡推力传递法,对岩石边坡的稳定性进行了评价<sup>[7]</sup>。

为更好地研究分降雨型滑坡发生破坏的概率,本文采用破坏概率分析法,考虑到稳定性分析传统方法的合理性和局限性,结合稳定性分析中的剩余推力法,以韶关地区典型的降雨型滑坡为研究对象,对其天然工况和暴雨工况进行稳定性分析与评价,以期更好地确定滑坡破坏概率,为滑坡预防治理工程提供参考。

## 1 研究区概况

韶关市地处广东省北部,丘陵山地多,地势起伏大,地形切割强烈,地质构造较为复杂,地质环境脆弱,是广东省地质灾害多发地区之一。滑坡区位于韶关市甘棠工业园区西侧的山坡上,边坡主要为人类工

程活动切坡形成的人工边坡,由于人类活动加剧导致附近原有地质环境发生改变,边坡中一部分坡体相对于另一部份坡体产生相对位移导致其丧失原有稳定性,从而形成滑坡。一般坡度为  $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。区域上有褶皱、断裂构造发育。结合野外地质灾害调查和钻孔揭露资料,研究区山体浅表层的残积土层较厚,地表局部岩石裸露。研究区出露地层为由上至下为第四系( $Q_{el+dl}$ )残坡积层,下石炭统梓门桥组( $C^1z$ )及测水组( $C^1c^2$ ),岩层产状  $65^{\circ} \angle 45^{\circ}$ 。滑坡主滑动方向  $130^{\circ}$ ,长约 91 m,宽约 238 m,前后缘高差约 30 m,滑坡后缘陡坎约 1.1 m。该滑坡抗震设防烈度为 VI 度,地震动峰值加速度值为 0.05 g,场区地震动反映谱特征周期为 0.35 s,区域地壳稳定。滑坡体全貌见图 1。



图 1 韶关市工业园西侧滑坡全貌

根据钻探取心情况以及滑坡的已有变形破坏特征和滑坡微地貌形态综合分析,滑坡体物质组成为残坡积土、全风化泥岩,其平均厚度约为 5 m,体积约  $6.8 \text{万 m}^3$ ,属浅层大型土质滑坡,滑动面应位于全风化泥岩层中,滑动面平均深度 4~6 m。降雨为主要诱发滑坡破坏的因素,滑坡触发原因总体归纳为由于其处于地形地貌环境的特定性结合相应的地层岩土体环境下,力学性质较差的坡体再经降雨入渗及人类活动影响其受力,导致其稳定性进一步变差。由于滑坡下方为韶关市甘棠工业园厂区,若滑坡发生蠕滑破坏,不仅会对工业园厂区造成直接破坏,且也会影响拟建工厂的建设,威胁人数 1 037 人,造成的潜在经济破坏或损失大于 3 000 万元,采取及时合理的工程防治措施刻不容缓。

在对韶关市工业园西侧滑坡进行治理前,需要对滑坡稳定性进行分析评价,本文通过建立降雨型滑坡稳定性系数计算模型,并采用破坏概率分析法来对滑坡在两种不同工况下的破坏概率进行计算,从而更准确的评价滑坡稳定性。

## 2 模型及方法

### 2.1 降雨型滑坡稳定性系数计算模型

对于降雨型滑坡,首先要建立合适的降雨型滑坡

稳定性系数计算模型,以便更精准的分析与评价降雨型滑坡稳定性。

本文没有选取边坡工程常用的简化 Bishop 法及瑞典条分法,而采用剩余推力法进行稳定性计算。对于滑面为任意形状的滑坡稳定性计算,采用剩余推力传递法较为合适。其考虑了滑体自重、坡面荷载、动水压力、静水压力、滑动面处的浮托力、暴雨、地震和不同条块滑面段抗剪强度参数差异对滑坡稳定性的作用和影响,见图 2。

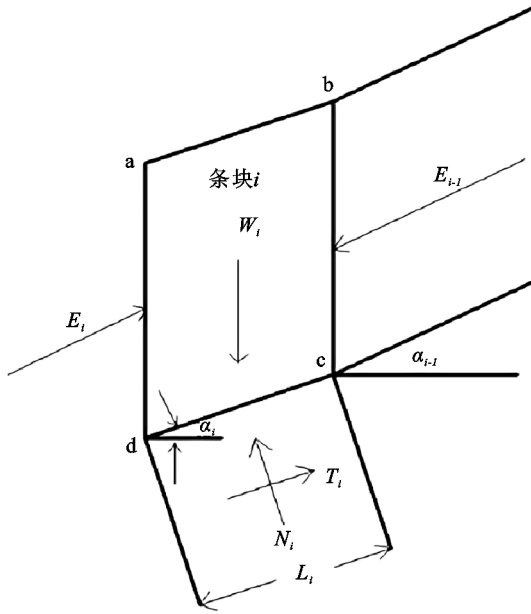


图 2 剩余推力法力学计算模型

剩余推力法计算稳定性系数完整的计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=1}^{n-1} \phi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=1}^{n-1} \phi_j) + T_n} \quad (1)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  块条块的抗滑力;  $T_i$  为第  $i$  块条块的下滑力;  $\phi_j$  为第  $j$  块的传递系数;  $R_n$  为最后一个计算条块的抗滑力;  $T_n$  为最后一个计算条块的下滑力。

由于降雨型滑坡需要着重考虑暴雨工况下坡体受力情况,而在降雨过程中地表水及地下水的活动使得坡体内部的水压力难以精确定义。由此构建降雨型滑坡分析模型,由图 3 所示。

从图 3 可以看出,当对暴雨条件下的滑梯前缘条块进行受力计算时,可将 ABCDEFGHIA 视为一个前缘受静水压力阻力作用的整体滑坡,该条块所受重力应为 DEFG 内所有水、岩重量总和,仿此考虑滑坡中受水作用的条块受力;当水位下降时,孔隙水压力变为 KIHGJ,按此水压线计算滑坡稳定性。即无论何种地表水、地下水活动情况,坡体内部地下水渗流的作用均可视为作用于各个条块边界上的静水压力。这种分析模型就可以获得任意形状滑动面在复

杂荷载作用下的滑坡推力<sup>[8]</sup>,并且滑动面条分后各条块的受力均可快速确定,使得降雨型滑坡在暴雨工况下的稳定性计算分析变得更为简洁合理。

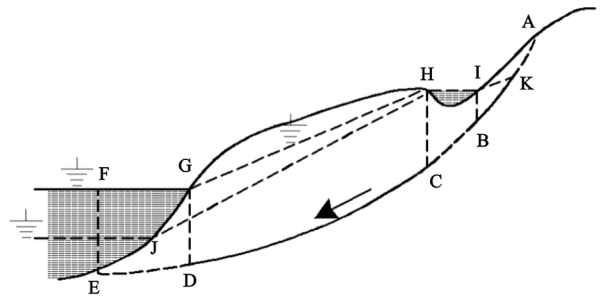


图 3 降雨型滑坡分析模型

## 2.2 滑坡破坏概率计算方法

在对滑坡  $F_s$  稳定性系数进行计算时,往往采用的是传统计算方法,计算滑坡稳定性系数的公式中需要考虑各类因素的具体确定数值,比如研究区岩土体力学性质参数  $C$ ,  $\varphi$  值、各层岩土体的标准重度、条块划分的尺寸大小、倾斜角度以及所受各种力的确定值,由此方法计算得出的稳定性系数  $F_s$  也为一个具体确定数值。但在实际工程条件下,虽然条块划分尺寸及倾斜角度实为可测定值,但各层岩土体物理力学参数分布较为离散,并且测试过程中存在误差,各种受力的大小也会随着外界条件的改变而改变,导致无法取得其准确数值并导致计算产生极大的误差。现将滑坡稳定性系数带入概率框架进行分析,稳定性系数计算参数不为一个定值,而应视为符合某种规律分布的数值集合。当确定滑坡稳定性系数的主要影响计算参数的概率分布,利用 Monte-Carlo 法,通过产生随机数值带入计算参数中,使其符合概率分布,将符合概率分布的计算参数带入稳定性系数公式计算得出符合概率分布的滑坡稳定性系数<sup>[9]</sup>。对于此流程不断重复若干次,计算得出符合概率分布的稳定性系数足够多时,通过大数定律可以将此时滑坡稳定性系数属于破坏的频率视为破坏概率:

$$P(f) = P(F_s < 1) = \int f(F_s) dF_s = \frac{M}{N} \quad (2)$$

式中:  $N$  为滑坡稳定性系数总体数量;  $M$  为滑坡稳定性系数小于 1 的数量。

通过公式(2),对计算得出的滑坡稳定性系数总体数量  $N$  进行统计分析,便可以验证滑坡稳定性系数分布规律是否与主要计算参数分布规律一致。由于各个随机变量对滑坡稳定的影响均不相同,因此可以把影响程度较小的量作为定值以简化计算。在不确定因素中以岩土体黏聚力  $C$  和岩土体内摩擦角  $\varphi$  对滑坡稳定性影响最大<sup>[10]</sup>,故选取这两个参数为随机变量,其他参数则作为定值来处理。由此可以建立



状态方程  $F_s = f(C, \varphi)$ 。

当确定状态方程  $F_s = f(C, \varphi)$  之后, 下一步需要对岩土体黏聚力  $C$  和岩土体内摩擦角  $\varphi$  的概率分布进行分析。首先根据各类工程经验及研究总结广泛应用的绝大多数概率分布类型, 主要有 Bernoulli 分布、Poisson 分布、极值分布、中心极限分布及其他分布。结合各概率分布类型的特点、物理意义以及主要工程应用, 发现中心极限分布与滑坡稳定性主要影响因素分布是较为契合的, 并且通过许多学者的研究也表明是合理可行的。对于中心极限分布, 首先需要了解中心极限定理, 其描述为: 如果一个随机变量由多种(数量较大)的, 并且相互独立的随机因素综合影响所构成, 且其中每个随机因素在总体影响中所起到的作用均十分微小, 则此随机变量往往近似服从正态分布<sup>[11]</sup>。其原理如公式(3)所示:

$$Y = X_1 + X_2 + \cdots + X_n \tag{3}$$

式中:  $Y$  为随机变量;  $X_1, X_2, X_n$  为随机变量  $Y$  的相互独立影响因素。由此可以看出, 当  $n \rightarrow \infty$  时, 随机变量  $Y$  服从正态分布, 由此可以看出, 若随机变量的影响因素互相独立的影响随机变量的分布, 并为相互简单叠加, 即可以视为正态分布。

若各影响因素之间存在相互影响, 不为简单相加方式, 可以将其认为共同联合影响, 类似于相乘关系, 原理公式如式(4)所示:

$$Y = X_1 X_2 \cdots X_n \tag{4}$$

对于公式(4), 两边同时取自然对数, 可得:

$$\ln Y = \ln X_1 + \ln X_2 + \cdots + \ln X_n \tag{5}$$

可以看出当  $n \rightarrow \infty$  时,  $\ln Y$  服从正态分布, 故随机变量  $Y$  符合对数正态分布。当随机变量影响因素不仅仅互相独立, 而是共同作用来规范随机变量的分布可以将其认为规律分布符合对数正态分布。

在确定好概率分布模型之后, 需要确定岩土体黏聚力  $C$  和岩土体内摩擦角  $\varphi$  的分布是否为服从正态分布。当确定滑坡岩土体参数黏聚力  $C$  和岩土体内摩擦角  $\varphi$  的分布符合正态分布或对数正态分布后, 随机数值的抽样可以通过以下公式进行, 来保证数值的范围准确及离散随机<sup>[12]</sup>:

$$R = \sqrt{-2\ln R_1} \times \cos 2\pi \times R_2 \tag{6}$$

$$X = \sigma R + \mu \tag{7}$$

式中:  $R_1, R_2$  为  $[0, 1]$  区间的均匀分布随机数;  $R$  为服从标准正态分布  $N(0, 1)$  的随机变量;  $X$  为服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma$  的正态分布随机变量。

综上所述, 破坏概率分析法的基本计算步骤如下: 首先根据现场勘察和岩土体试验得出多组岩土体黏聚力  $C$  和岩土体内摩擦角  $\varphi$  数值, 并对其分布进

行判别。当确定了  $C$  和  $\varphi$  的分布函数基本满足正态分布之后, 可利用 Monte-Carlo 法, 采用公式(6), (7)进行抽样与变换, 产生一系列满足正态分布的  $C, \varphi$  随机变量数值。随后将产生的一系列  $C, \varphi$  随机变量数值代入公式(1)中, 根据具体工况对滑坡进行条块划分。确定其他基础数据后, 结合剩余推力法进行计算可得出一系列相应的稳定性系数  $F_s$  的分布函数, 将得到的稳定性系数分布函数带入到公式(2)中进行计算, 得出滑坡破坏概率曲线, 统计滑坡稳定性系数小于 1 时的分布密度, 求出其在所计算滑坡稳定性系数中的占比, 便可以求出滑坡破坏概率。计算方法流程见图 4。

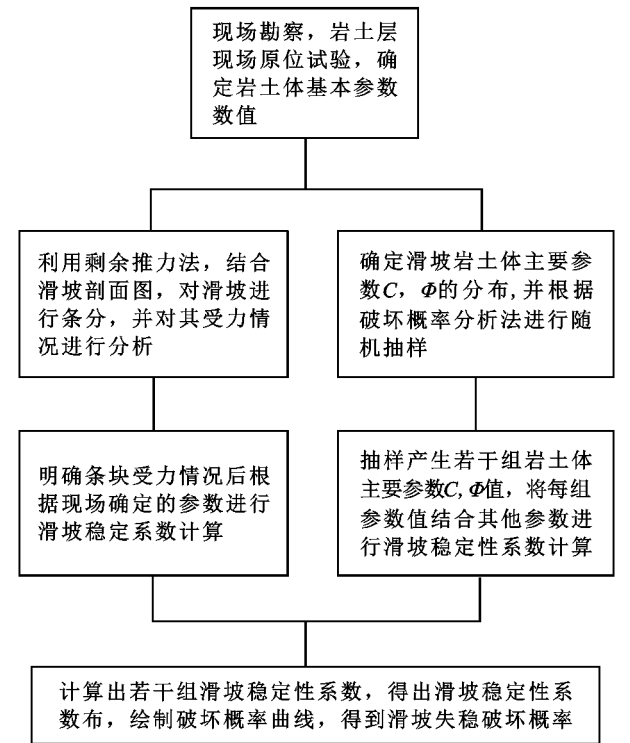


图 4 降雨型滑坡破坏概率计算流程

采用破坏分析概率模型求出滑坡稳定系数和破坏概率的数值后, 可以参考按破坏概率大小滑坡稳定性等级划分表<sup>[13]</sup>(表 1)对滑坡稳定性进行评判。

表 1 按破坏概率大小边坡稳定性等级划分

稳定性等级	I	II	III	IV	V
破坏概率	>90%	60%~90%	30%~60%	5%~30%	<5%
稳定状况	必然破坏	高危险	中等危险	低危险	稳定

### 3 结果与分析

#### 3.1 研究区滑坡天然及暴雨工况破坏概率计算

将采用上述所构建模型及破坏概率分析法对研究区滑坡进行破坏概率计算及稳定性分析评价。根据室内试验, 野外鉴别及现场原位测试, 结合滑坡分布位置范围, 测得多组研究区滑坡在天然状态和暴雨

饱水状态下的主要岩土体参数  $C, \varphi$  值,并根据统计获得滑坡的同一滑带土层主要岩土体参数  $C, \varphi$  在天然与暴雨饱水两种不同工况下的分布,见表 2。

表 2 不同工况状态下主要岩土体参数表					
状态	岩土体参数	平均值	标准差	变异系数	偏度系数
天然状态	黏聚力 $C/\text{kPa}$	19.35	2.3	0.12	0.625
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	15.75	2.55	0.16	0.015
暴雨饱水状态	黏聚力 $C/\text{kPa}$	16.05	2.8	0.17	0.714
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	13.2	2.2	0.16	0.021

通过表 2 可以看出,岩土体参数  $C, \varphi$  分布基本服从正态分布,可以采用公式(6—7)进行随机抽样。

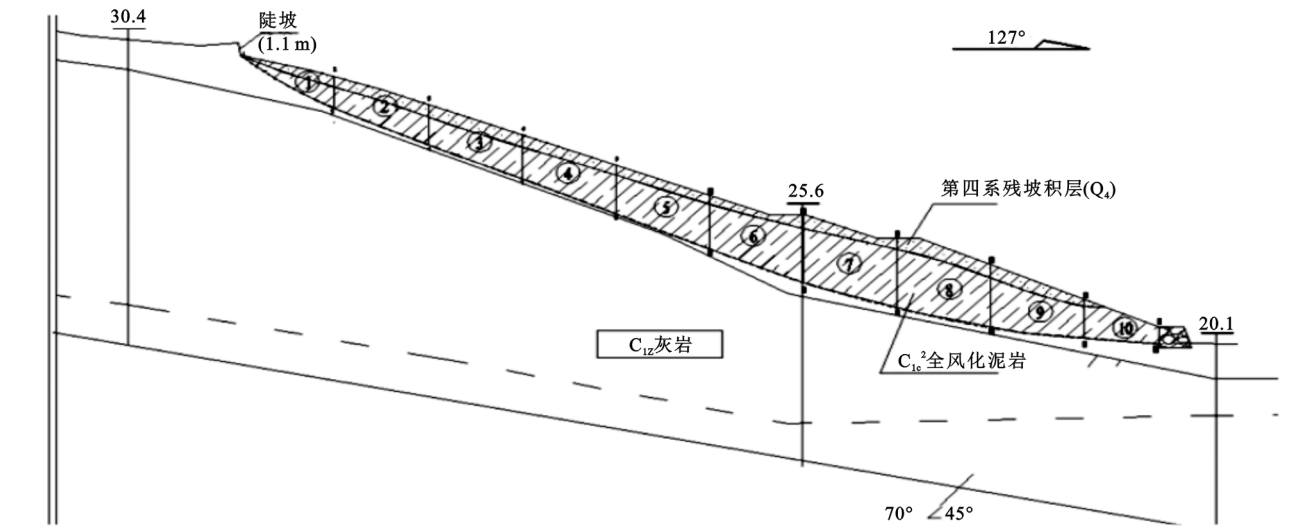


图 5 滑坡滑动面条分结果

在确定好以上参数后,将天然状态和暴雨饱水状态下的 500 组岩土体参数  $C, \varphi$  值代入公式(1)中进行计算,得到天然状态和暴雨饱水状态两种不同工况下的滑坡稳定系数,根据所得到的稳定系数可统计分析出滑坡稳定系数在天然工况和暴雨工况下的分布图,结合 500 组滑坡稳定性系数在各个范围的分布数量,可以得出累计分布概率密度曲线,经过绘制便可得出滑坡破坏概率曲线图,通过分析曲线图,选取滑坡稳定性小于 1.0 的分布频率,此频率即为当前工况条件下滑坡的破坏概率。

经过计算统计得出天然工况下研究区稳定性系数及破坏概率曲线,见图 6。可以看出,在天然工况下计算得出的滑坡稳定性系数也基本满足正态分布,经统计其均值为 1.106,可以认定天然工况下研究区滑坡稳定性系数为 1.106,属于基本稳定状态;通过破坏概率曲线得出研究区滑坡在天然工况下的破坏概率为 37.1%,参考按破坏概率大小滑坡稳定性等级划分表认为研究区滑坡天然状态下的稳定情况属中等危险偏低危险。

当研究区滑坡经历持续降雨达到饱和状态之后,其稳定性系数及破坏概率曲线经计算统计见图 7。

本次分析累计产生 500 个随机数,得到对应的 500 组岩土体参数  $C, \varphi$  值。

在确定岩土体参数分布之后,还需确定研究区滑坡主滑面,并绘制主滑面剖面图;然后在剖面图中将滑动带划分成若干相对规则的条块,并确定各滑块的面积  $s$ 、单位滑面长度  $L$ 、滑块与水平面夹角  $\theta$  以及地下水位线。本次分析将滑动带分割成 10 块相对规则的块体,见图 5。在计算之前,条块基本几何参数可以直接通过 AutoCAD 在计算剖面上标注测量得出,将其作为定值进行运算。

通过对研究区滑坡稳定性系数计算统计,发现暴雨饱和和工况下滑坡稳定性系数降低,暴雨工况下稳定性系数降至 1.026,滑坡整体处于欠稳定状态;破坏概率曲线表明,伴随着稳定性系数的降低,暴雨饱和和工况下研究区滑坡破坏概率增加至 55.3%,稳定性情况属中等危险偏高危险。

3.2 考虑岩土体变异系数及偏度系数下的滑坡破坏概率计算

对于室内试验测定的现场岩土体  $C, \varphi$  值集合,如果不考虑岩土体参数变异系数及偏度系数,便可以按上述方法进行正态分布抽样,但如果考虑岩土体参数变异系数及偏度系数,需要确定其是按正态分布进行抽样还是按对数正态分布进行抽样。根据廖景高等<sup>[14]</sup>人的研究成果来看,正态分布及对数正态分布特性对比,完全且仅受偏度系数的控制影响,当随机变量的变异系数小于 30% 并且偏度系数小于 0.025 时,其特征选择服从正态分布;否则选择对数正态分布。故此次也对天然黏聚力及暴雨饱水黏聚力采取对数正态分布抽样,并对两种工况进行对比计算不同分布下的滑坡破坏概率。

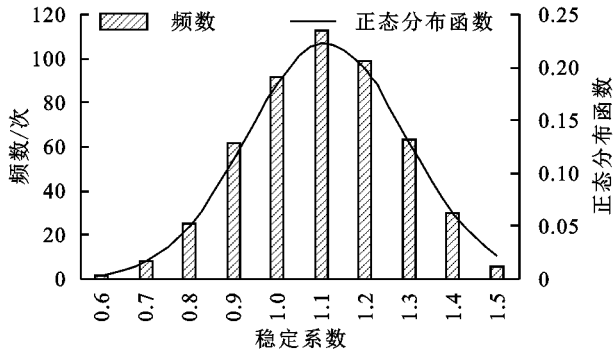


图 6 天然工况下研究区滑坡稳定性系数及破坏概率

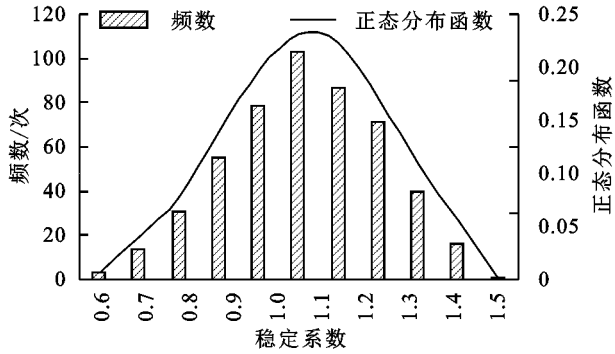
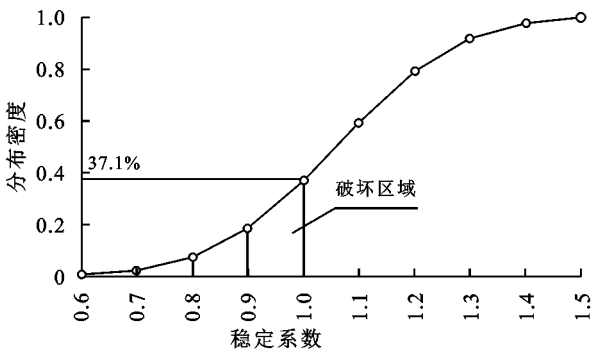
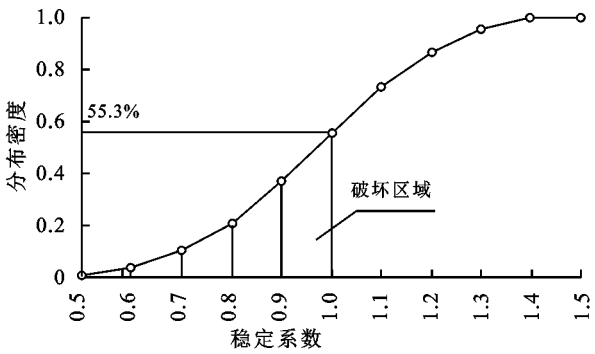


图 7 暴雨工况下研究区滑坡稳定性系数及破坏概率



当考虑岩土体参数变异系数及偏度系数后,研究区滑坡天然状态破坏概率为 31.3%(图 8A),暴雨工况下破坏概率为 51.6%(图 8B),与不考虑岩土体参数变异系数及偏度系数计算结果相比两者分别相差 15%及 7%,并且不考虑岩土体参数变异系数及偏度系数计算的破坏概率比考虑岩土体参数变异系数及偏度系数破坏概率高。分析其中的缘由,认为是:当

考虑岩土体参数变异系数及偏度系数,对岩土体参数数据进行对数正态分布处理之后,其分布较原来更加集中,分布范围减小,导致计算的破坏概率较小;但不考虑岩土体参数变异系数,岩土体参数按照正态分布取值时,由于岩土体参数分布较为离散,其分布范围较宽,计算的破坏概率会较高。推测两者计算结果差距范围在 5%~20%。

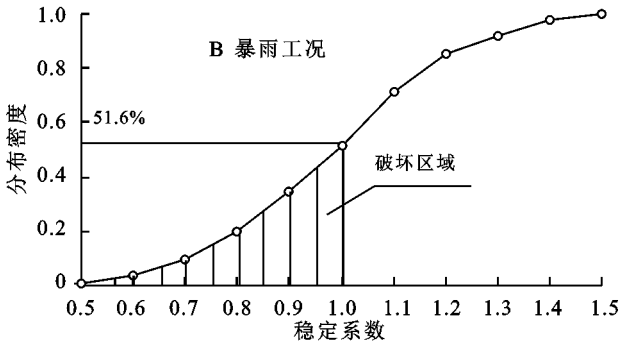
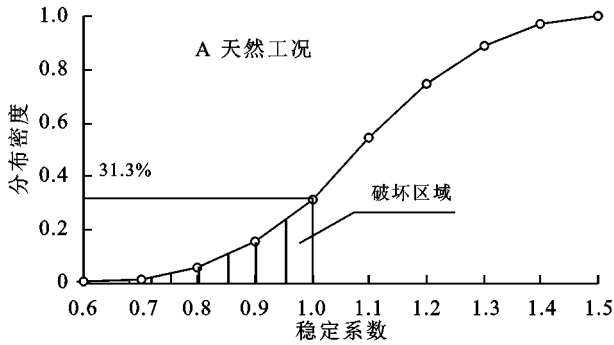


图 8 考虑变异系数及偏度系数下研究区滑坡破坏概率曲线

3.3 传统计算方法对比及降雨特征量确定

当采用破坏概率分析法得出滑坡稳定性系数后,再采用传统的瑞典条分法对研究区滑坡的稳定性系数进行计算,计算结果及对比见表 3。可以看出,破坏概率分析法结合剩余推力法与瑞典条分法所计算的滑坡稳定系数相差较小,均可以得出该滑坡在天然工况下基本稳定,在暴雨工况下欠稳定,计算结果与现场调查研究情况基本一致,由于调查研究前研究区存在持续降雨,滑坡整体受降雨影响饱和度较大,室

内试验所测得滑坡岩土体物理力学参数基本与饱水状态一致。坡表受滑动变形影响较松散,处于蠕变阶段坡脚前缘水沟局部地段受滑坡变形影响造成损毁,并有加剧的趋势。所以,研究区滑坡潜在的安全隐患非常突出。

针对研究区滑坡的提前预警预报,应该综合考虑多种降雨情况,比如前期岩土体含水率、降雨过程中的历史及强度变化及未来降雨特征量<sup>[15]</sup>。但是存在以下难点:(1) 关于岩土体含水率,仅能测定部分范



围,大范围定量定点测定岩土体含水率现在暂时无法实现;(2) 降雨过程不仅一直在变化,还需要考虑到前期累计降水量及降雨时长有关,并不是每次降雨对地质灾害的影响均一致,时间越靠前、越短,影响越小;(3) 未来降雨特征量也需要考虑到累积雨量和降雨强度的变化。因此,考虑到概率定量分析切实可行性,结合韶关市降水历史资料,在统计分析之后,主要选取韶关市多年平均月降水量<sup>[16]</sup>作为降雨外因影响因素进行分析。由图 9 可知,韶关市 4—9 月的月均降雨量较大,对降雨型滑坡的影响加剧,可能诱发滑坡进一步发育,产生蠕动破坏。在雨季来临之前,对研究区滑坡进行合理、有效的防治是十分有必要的。

表 3 两种不同计算方法下的研究区滑坡稳定系数

工况	瑞典条分法	破坏概率分析法
		结合剩余推力法
天然工况	1.114	1.106
暴雨工况	1.038	1.026

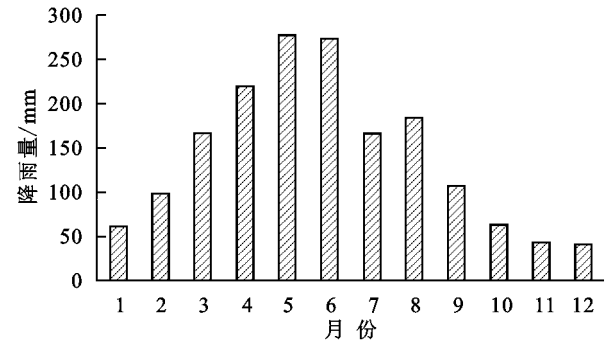


图 9 韶关多年平均月降雨量柱状示意图

4 结论

(1) 韶关市工业园西侧滑坡在天然工况下基本稳定,滑坡稳定性系数为 1.106,破坏概率范围 31.3%至 37.1%,处于中等偏低危险等级;在暴雨工况下欠稳定,滑坡稳定性系数为 1.026,破坏概率范围为 51.6%至 55.3%,处于中等偏高危险等级。

(2) 破坏概率分析法结合剩余推力法所建立的滑坡稳定性计算模型,与传统计算方法相比,同样能够得到滑坡在不同工况下的稳定情况,并且在计算中更为简便合理。

(3) 与考虑岩土体参数变异系数及偏度系数相比,不考虑岩土体参数变异系数及偏度系数计算的滑坡破坏概率相对更高,两者计算结果差距范围在 5%~20%左右。实际情况建议根据岩土体参数情况,若变异系数及偏度系数较大,分布较离散,可以采用

两种方法同步进行计算破坏概率,确定出滑坡的破坏概率范围,确保分析的合理性及有效性。

得出结论之后,针对此次所做出的结果和方法,提出一些展望:对于暴雨工况,本次只根据其饱水状态的岩土体参数进行了随机取样,但是降雨对滑坡的影响是多样的,还需要正确建立岩土体降雨入渗模型,得出滑坡入渗过程,并且已合理的方式确定滑坡破坏临界雨量。在今后需要采用多种方法耦合进行分析,才能更好的分析出滑坡在不同降雨条件下的破坏概率。

参考文献:

[1] AGS. Landslide risk management concepts and guideline, Australian geomechanics society[J]. Australian Geomechanics, 2000,35(1):49-92.

[2] Freudental A M. Safety and the probability of structural failure[J]. Transaction of Asce, 1956,121:1337-1397.

[3] 祝玉学.边坡稳定性分析[M].辽宁大连:大连理工大学出版社.

[4] 王志恒,胡卓玮,赵文吉,等.基于确定性系数概率模型的降雨型滑坡孕灾环境因子敏感性分析:以四川省低山丘陵区为例[J].灾害学,2014,29(2):109-115.

[5] 乔建平,杨宗信,田宏岭.降雨滑坡预警的概率分析方法[J].工程地质学报,2009,17(3):343-348.

[6] 蒲书豪,任光明,王滨,等.基于改进分析方法的滑坡失稳概率研究[J].成都理工大学学报:自然科学版,2020,47(3):367-373.

[7] 杜时贵,何若象.岩坡稳定性破坏概率分析[J].浙江工业大学学报,1996,24(1):65-70.

[8] 王建锋, Wilson H. Tnag,崔政权.边坡稳定性分析中的剩余推力法[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(3):70-78.

[9] 孙小娜.基于 Monte-Carlo 随机数法的滑坡稳定性可靠度分析及应用[D].西安:西安科技大学,2016.

[10] 白宇,刘洁,郝志强.破坏概率分析法在滑坡稳定性评价中的应用[J].岩土工程技术,2015,29(5):256-260.

[11] 张继周,缪林昌.岩土参数概率分布类型及其选择标准[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3526-3532.

[12] 鲁海军.破坏概率分析法在滑坡稳定性评价中的应用[J].中国水运,2007,7(8):85-87.

[13] 徐卫亚,张志腾.滑坡失稳破坏概率及可靠度研究[J].灾害学,1995,10(4):33-37.

[14] 廖景高,赵其华,刘宇,等.基于 Monte-Carlo 的滑坡失稳概率计算研究[J].长江科学院院报,2014,31(7):29-33.

[15] 苗爱梅,郝寿昌,武捷,等.山西省诱发地质灾害的气象因素特征分析[J].气象与环境科学,2009,32(1):39-42.

[16] 文小平.韶关市降水分布规律及变化特征分析[J].广东水利水电,2010,5(5):24-26.