

文章编号:1007-2993(2015)05-0256-05

# 破坏概率分析法在滑坡稳定性评价中的应用

白宇<sup>1</sup> 刘洁<sup>2</sup> 郝志强<sup>3</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北武汉 430056;2. 长江工程监理咨询有限公司,湖北武汉 430010;  
3. 陕西省第二综合物探大队,陕西西安 710061)

**【摘要】** 传统滑坡稳定性分析方法中,由于岩土性质的差异性、外界因素变化的随机性、地质体不均匀性以及测试取样的误差等,最终结果掺杂了过多的人工干预成分。将 Monte-Carlo 法引入到原有的分析方法中并根据数理统计学中大数定律原理,建立了更符合实际情况的滑坡破坏概率模型。在此基础上以安康市环城干道滑坡为例,运用破坏概率分析法分别计算出滑坡在天然自重状态、暴雨自重状态、地震自重状态三种工况条件下的破坏概率值,对滑坡稳定性有了更全面准确的评价。

**【关键词】** 破坏概率;稳定性;Monte-Carlo 法;敏感性分析

**【中图分类号】** U 416.2

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.05.008

## The Application of Failure Probability in the Stability Analysis of Landslide

Bai Yu<sup>1</sup> Liu Jie<sup>2</sup> Hao Zhiqiang<sup>3</sup>

(1. Second Highway Consultants Co. Ltd, China Communications Construction Corporation, Wuhan 430056, Hubei, China;  
2. Changjiang Protection Supervision & Consultant Company, Ltd, Wuhan 430010, Hubei, China;  
3. The No. 2 Comprehensive Geophysical Exploration Team of Geology and Mineral Bureau of Shaanxi, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**【Abstract】** The traditional calculation of stability analysis of landslide is impacted by many factors, such as the different properties of soils and rocks, the random variation of external factors, the inhomogeneity of geological bodies and the errors of sampling, etc. The final results are adopted excessive manual intervention. According to the law of large numbers of mathematical statistics, the landslide failure probability model has been established more practically by introducing the Monte-Carlo method to the original analysis method. So taking the road landslide around Ankang city for example, the landslide in three kinds of conditions was calculated respectively with the model mentioned before, and makes the results more correctly and comprehensively.

**【Key words】** failure probability; stability; Monte-Carlo method; sensitivity analysis

### 0 引言

滑坡稳定性分析一直是岩土工程界和学术界极为关注的研究课题,目前对滑坡稳定性进行评价时仍习惯使用极限平衡法,诸如瑞典条分法、简化毕肖普法及在我国水利、交通和铁道部门普遍使用的传递系数法等,上述以极限平衡理论为基础的方法在过去近一个世纪以来都有了长足的发展,但均是建立在确定性概念之上,忽略了材料参数的变异性、计算模型的不确定性等因素,由此就不可避免地造成在很多实际工程项目中,当稳定系数计算结果大于 1 时滑坡却发生了的情况<sup>[1]</sup>。

破坏概率分析法是自 20 世纪 70 年代末—80 年代初发展起来的一种稳定性分析方法<sup>[2]</sup>,该法考虑到滑坡稳定性决定因素的复杂性和随机性特点,将概率统计的理论运用到以极限平衡理论为基础的方法中,推导出滑坡破坏概率分析模型,通过用 Monte-Carlo 法来模拟随机变量的分布,最终概率方法与定值方法的计算结果互补论证,使滑坡稳定性评价更加科学,也更加精确。

本文以安康市环城干道滑坡为例,运用破坏概率分析法对该滑坡在自然工况、暴雨工况及地震工况三种条件下进行稳定性评价,以达到全面、准确的

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41172262);教育部新世纪人才支持计划项目(NCET-12-1044);陕西省青年科技新星项目(KJXX-37)

**作者简介:**白宇,1989年生,男,汉族,内蒙古赤峰人,硕士,助理工程师。研究方向:地质环境保护与灾害防治。E-mail:geobarry@foxmail.com

评价效果。

### 1 破坏概率法基本原理

滑坡的稳定性计算方法如比肖普法、简布法、传递系数法、圆弧法等,均可用函数表示为:

$$F_s = f(c, \varphi, \gamma, h, \mu, \dots) \quad (1)$$

式中:  $F_s$  为稳定系数;  $h$  为地形参数;  $\mu$  为地下水参数;  $\gamma$  为岩土体重度;  $c$  为黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角。

由于岩土性质的差异性、各种参数的随机性、测试和取样的误差、地质体的不均匀性、外界因素变化等特点,影响滑坡稳定性系数的上述各参数从严格意义上来说,均是随机变量,因而稳定系数  $F_s$  也是一个具有一定破坏概率  $P_f$  的随机分布函数<sup>[3]</sup>。

$$P_f = P(F_s < 1) = \int_0^1 f(F_s) dF_s = \frac{M}{N} \quad (2)$$

当式(1)中的各随机变量的分布特性预先确定时,可利用 Monte-Carlo 法产生符合状态变量概率分布的一组随机数,将之代入状态函数,得到符合状态函数的随机数。如此用同样的方法产生  $N$  个状态函数的随机数,即得到一个状态函数的容量为  $N$  的样本。如果  $N$  个状态函数的随机数中有  $M$  个小于 1,则当  $N$  足够大时,根据数理统计中的大数定律,此时的频率已近似于概率。

对状态函数的容量为  $N$  的样本进行统计分析,可得到状态函数的分布规律。在一般的滑坡稳定性分析中由于滑带(岩)土的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  对滑坡稳定性影响较大,因此选取  $c$  和  $\varphi$  作为随机变量进行计算分析,由此建立状态方程  $F_s = f(c, \varphi)$ , 并认为  $c, \varphi$  的分布为正态分布。对于大多数服从正态分布的参数模拟,采用如下的抽样与变换公式:

$$R = \sqrt{-2 \cdot \ln R_1} \cdot \cos 2\pi R_2 \quad (3)$$

$$X = \sigma R + \mu \quad (4)$$

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;  $X$ : 服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma$  的正态分布随机变量;  $\mu, \sigma$  的获取主要根据大量土工试验资料的统计分析来估计。

### 2 滑坡破坏概率模型建立

#### 2.1 稳定性系数计算模型建立

采用《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T 0219—2006)中推荐的滑面折线形滑坡稳定性计算公式为例,建立滑坡破坏概率  $P_f$  模型,该方法是实际工程实践过程中常用的方法,其力学计算模型见图 1。

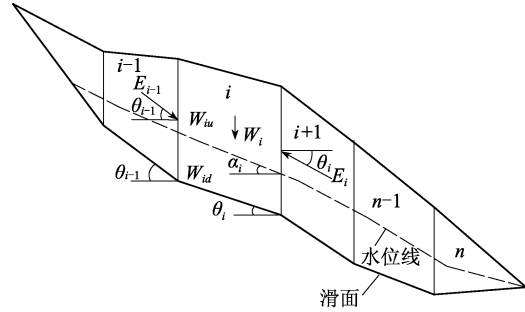


图1 传递系数法力学计算模型

稳定系数  $F_s$  的一般表达式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (5)$$

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;  $\psi_j$  为第  $j$  块传递系数;  $R_n, T_n$  分别为最后一计算条块的抗滑力和下滑力。

#### 2.2 破坏概率模型建立

当确定了影响  $F_s$  的随机变量黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的分布函数后,则可以用 Monte-Carlo 法产生一系列满足随机变量分布的随机数,将这些随机数代入式(5)中计算得出的一系列相应的稳定性系数  $F_s$  的分布函数,将计算结果代入到式(2)中得出破坏概率  $P_f$ 。

破坏概率  $P_f$  的数值直接反映了滑坡破坏的可能性,用其可以判断滑坡的危险程度。目前在工程中常用破坏概率作为滑坡治理设计优化和滑坡稳定性判断的依据,通常采用表 1 的判断标准<sup>[4]</sup>。

表1 滑坡稳定程度分级表

破坏概率 $P_f$ / %	≤5	5~30	30~60	60~90	≥90
危险程度	安全	低危险性	中等危险性	高危险性	不安全

### 3 算例及分析

安康市环城干道滑坡地处北亚热带季风湿润气候区,温暖湿润,雨量充沛。该滑坡于 2010 年 7 月 25 日,在经受强降雨后,发生明显变形破坏,包括坡体推挤反翘,上部楼房出现裂缝,坡脚公路排水沟损毁等。滑坡长约 40 m,前缘宽约 120 m、中部宽约 105 m、后缘宽约 80 m,滑向 194°(见图 2),平均厚度约 10 m,最大厚度 15 m,体积  $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,根据规范,属小型岩质滑坡。主要出露地层由老到新为下志留统( $S_1$ )千枚岩、石英岩夹粉砂岩;中泥盆统大枫沟组( $D_2d$ )千枚岩夹薄层灰岩等;古近系(E)粉砂岩

夹含砾粗砂岩、细砂岩、泥岩等；新近系(N)砂砾石层；第四系(Q)松散堆积层。滑体物质为人工填土、坡残积物及强风化千枚岩，并以强风化千枚岩为主(见图3)，滑带(面)位于强风化千枚岩的节理面发育带处，滑床为志留系强风化千枚岩。滑坡上部为安康市兴华都市花园住宅楼，下部为环城干道，直接威胁新建路段和上部在建基础和邻近34#、35#住宅楼居民的正常生活，受降雨等条件影响，该滑坡活动不断加剧。一旦发生整体滑动，将会对新建道路和上部拟建工程及附近居民造成重大损失<sup>①</sup>。

该滑坡所在地地震设防烈度为Ⅶ度，地震动峰值加速度为0.10g，水平地震影响系数为0.1，地震动参数反应谱特征周期分区为Ⅰ级区，地震动反应谱周期为0.35s。

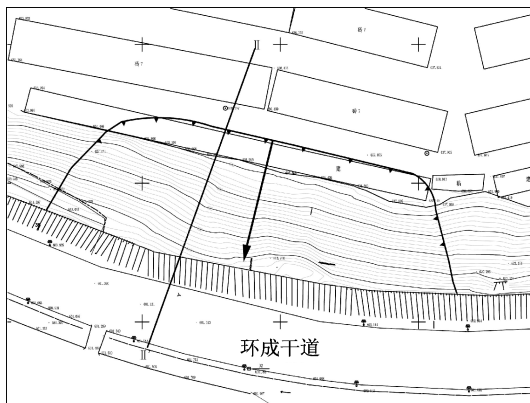


图2 滑坡平面图

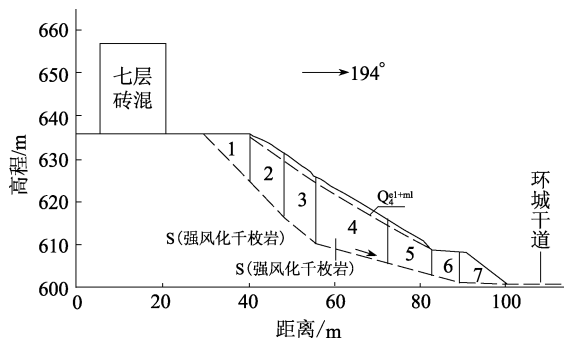


图3 主滑面条分割面图

### 3.1 滑坡稳定性影响因素敏感性分析

滑坡稳定性影响因素取黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ，分别对滑带土的这两个力学参数进行敏感性分析，改变  $c$  和  $\varphi$  值分别计算相应的稳定系数，由图4和图5可知，滑带土的这两个力学参数的改变都会引起滑坡稳定性系数的变化，尤其是内摩擦角  $\varphi$  的影响相对而言更大些。

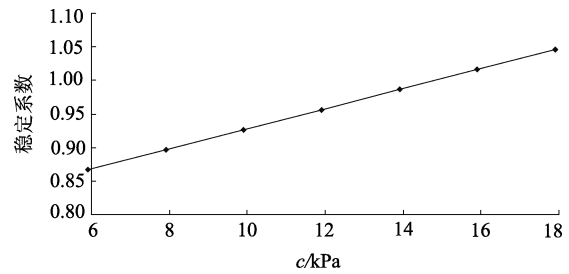


图4 黏聚力对稳定性敏感性分析

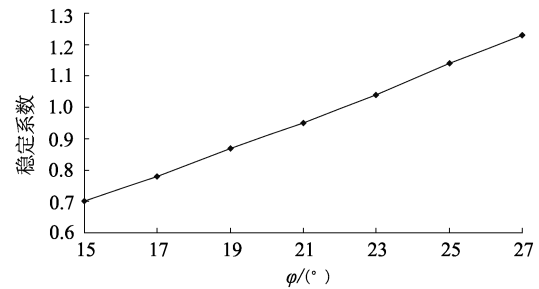


图5 内摩擦角对稳定性敏感性分析

### 3.2 破坏概率计算参数

该滑坡滑体天然重度为  $19.5 \text{ kN/m}^3$ ，饱和重度为  $23.0 \text{ kN/m}^3$ ，滑带土(强风化千枚岩)参数由试验结果和反算结果综合确定，具体数值见表2。

利用 EXCEL 软件中的 RAND() 函数产生 500 个(0,1)之间均匀分布的随机数，代入式(3)和式(4)中，得出 500 个相应地符合正态分布的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

表2 室内土工试验统计结果表

滑带土状态	指标	均值	标准差
天然状态	$c/\text{kPa}$	12.0	2.3
	$\varphi/(\text{°})$	21.0	3.5
饱和状态	$c/\text{kPa}$	10.0	2.0
	$\varphi/(\text{°})$	17.0	3.2

### 3.3 滑坡破坏概率计算

将上述天然状态和饱和状态的 500 组  $c$  和  $\varphi$  值，据图3的条分割面图代入式(5)中，分别计算出滑坡处于工况一：天然状态(天然自重)；工况二：暴雨状态(饱和自重)；工况三：地震状态(地震自重)的三种工况时的稳定性系数。

对通过计算得出的三种工况下各 500 个稳定系数数值进行统计计算，作出稳定系数正态分布，见图6、图8、图11；根据式(2)进行统计计算，作出破坏概率曲线，见图7、图9、图11。

① 陕西工程勘察研究院. 安康市环城干道滑坡勘察报告[R]. 2007.

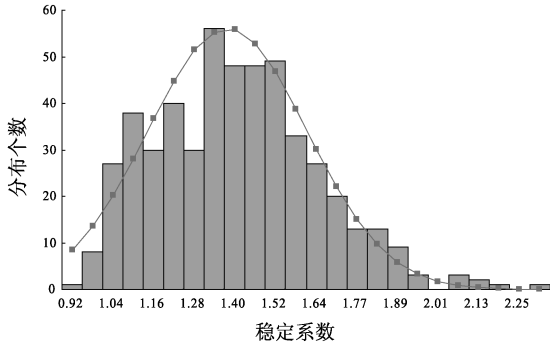


图6 天然工况稳定系数正态分布

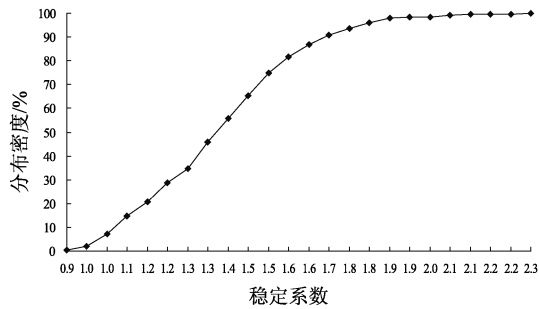


图7 天然工况下滑坡破坏概率曲线图

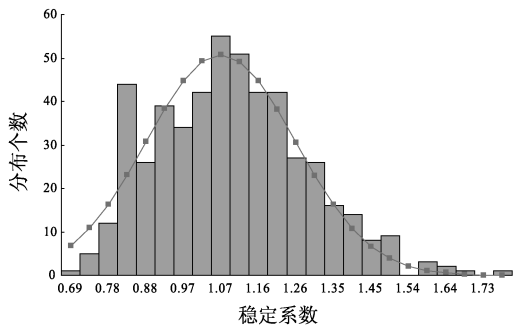


图8 暴雨工况稳定系数正态分布

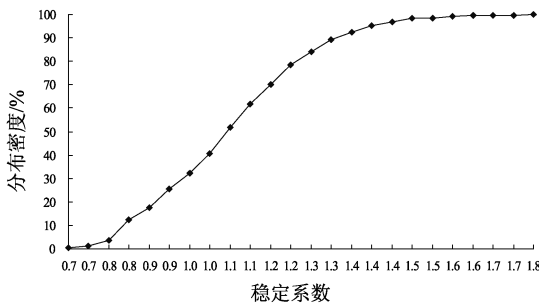


图9 暴雨工况下滑坡破坏概率曲线图

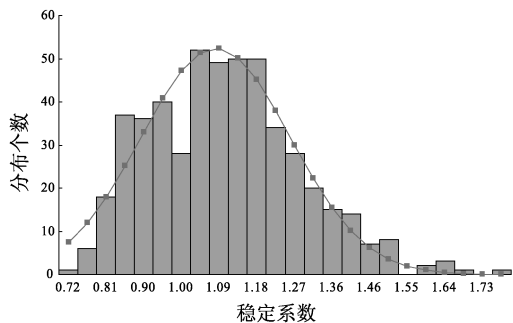


图10 地震工况稳定系数正态分布

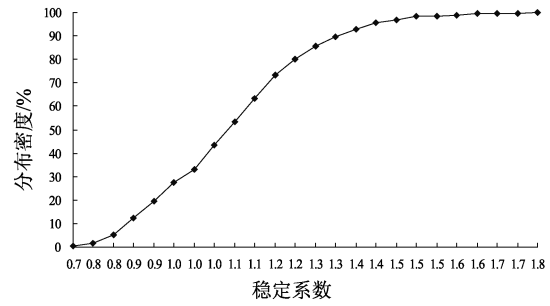


图11 地震工况下滑坡破坏概率曲线图

由图6、图8、图10可知,经过 Monte-Carlo 法计算得出的稳定系数符合正态分布,根据正态分布图可知各工况下稳定系数的分布情况及平均值;由图7、图9、图11可知,通过统计稳定系数各值分布个数,作出累计分布概率,从而得出稳定系数与分布密度之间的关系即破坏概率曲线图,从中可以得出当稳定系数小于1时的分布个数及分布密度,此时得出的数值即为当前工况条件下的破坏概率值,具体计算结果见表3。计算结果显示,安康市环城干道滑坡在天然自重条件下计算得到的稳定系数为1.38,此时稳定系数较高,滑坡处于较稳定状态,破坏概率为2.4%,由表1可知滑坡危险程度为安全;暴雨自重条件下稳定系数为1.07,滑坡处于欠稳定状态,破坏概率为37.2%,即危险程度为中等危险性;地震自重条件下稳定系数为1.08,滑坡亦处于欠稳定状态,破坏概率为33.2%,危险程度为中等危险性。计算结果与实际现场勘察情况一致,勘察前滑坡经过较大降雨的影响,滑坡土体的性状与暴雨条件下的饱和重度近似,处于蠕变阶段,坡体前后部均出现土体破坏迹象,且坡顶建筑物遭受轻微损坏。

表3 稳定系数计算结果统计表

荷载组合	稳定系数均值	标准差	破坏概率/%
天然自重	1.38	0.24	2.4
暴雨+自重	1.07	0.19	37.2
地震+自重	1.08	0.18	33.2

综上所述,安康市环城干道滑坡经过 Monte-Carlo 法计算后综合破坏概率为37.2%,属中等危险性,对应的稳定系数为1.07,现阶段滑坡处于蠕变阶段。根据当地气象资料,安康市的降雨集中在7、8、9月,所以在雨季来临之前,对该滑坡进行有效的治理迫在眉睫。

#### 4 结论与展望

1)影响滑坡稳定性计算结果的参数具有随机性

和不均匀性等特点,所以运用破坏概率分析法进行分析更符合岩土体的特性,更贴近实际情况。

2)通过计算破坏概率及稳定性系数,可知两个评价标准是相互支撑相互印证的,对滑坡的稳定性分析做到了全面准确合理,为滑坡的综合分析和优化设计提供了依据。

3)安康环城干道滑坡综合破坏概率为 37.2%,处于中等危险性,该地区的雨季来临前,应尽快采取合理有效的防治措施。

4)运用 Monte-Carlo 法计算时选用 500 组数据做出的破坏概率曲线平滑度欠佳,在今后运用破坏概率分析法进行滑坡稳定性评价时需增加随机变量的组数,提高计算精度。

5)本文稳定系数计算的基础公式采用规范中的

传递系数法,在今后可采用多种稳定性计算方法进行分析,探讨稳定系数计算公式对破坏概率分析结果的影响。

#### 参 考 文 献

- [1] 徐建平,胡厚田. 土质边坡稳定性的概率分析[J]. 铁道工程学报,1998,3(1):120-125.
- [2] 周超海,梁永国,殷坤龙. 滑坡破坏概率分析方法及应用[J]. 西部探矿工程,2004(6):191-193.
- [3] 殷坤龙,柳源. 滑坡灾害区划系统研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000,12(11,4):28-32.
- [4] 鲁海军. 破坏概率分析方法在滑坡稳定性研究中的应用[J]. 中国水运,2007,7(8):85-87.

收稿日期:2014-04-25

(上接第 246 页)

坝三期围堰建设对滑体采取削坡减载(用作围堰填筑土料)+前缘抛石护岸的工程措施,以消除滑坡对水电站兴建与运行而产生的危害。

#### 参 考 文 献

- [1] Voight B, Faust C. Frictional heat and strength loss in some rapid landslides: error correction and affirmation of mechanism for the Vaiont landslide[J]. Geotechnique, 1992, 42(4): 641-643.
- [2] 姚伟,侯宗博,张永康,等. 某多次治理滑坡的变形机理和经验教训[J]. 工程地质学报,2014,22(s1): 320-325.
- [3] 王启国. 金沙江虎跳峡河段水电开发重大工程地质问题研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(8): 1292-1298.
- [4] 王启国,张良平. 西藏中波河段大型碎屑流成因机制

及防治对策[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11): 2293-2302.

- [5] 李会中,王团乐,段伟锋,等. 金坪子滑坡形成机制分析与河段河谷地貌演化地质研究[J]. 长江科学院院报,2006,23(4):17-22.
- [6] 吴超凡,邱占林,肖树焯,等. 雅砻江右岸某巨型滑坡变形机理及稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(6):110-113.
- [7] 崔杰,王兰生,徐进,等. 金沙江中游滑坡堵江事件及古滑坡体稳定性分析[J]. 工程地质学报,2008,16(1): 6-10.
- [8] 王启国,颜慧明,刘高峰. 金沙江虎跳峡水电站上江坝址若干关键工程地质问题研究[J]. 水利学报,2012,43(7): 816-825.

收稿日期:2015-03-05