

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.019

考虑岩土体参数变异性的滑坡破坏概率分析

姚晨辉¹, 魏江波², 任光明¹, 黄细超¹

(1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 稳定性系数评价滑坡稳定状况存在一定的缺陷性, 将其与破坏概率分析结果相结合能够对滑坡稳定性状况作出合理可靠的评价。在分析府谷县新府山安居小区滑坡基本特征及成因机制的基础上, 对滑坡在不同工况下的稳定性系数进行计算。考虑滑坡岩土体参数的变异系数和偏度系数, 利用蒙特卡洛法(Monte-Carlo)对滑坡的破坏概率进行了计算。最终, 将稳定性系数与破坏概率相结合, 对滑坡的稳定状态做出了评价。结果表明, 该滑坡在天然状态下处于基本稳定状态, 而在暴雨或持续强降雨情况下, 滑坡发生破坏的概率较大。

关键词: 滑坡; 参数变异性; 蒙特卡洛法; 破坏概率

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0100-04

The Failure Probability Analysis of Landslide Considering Variability of Soil Parameters

YAO Chenhui¹, WEI Jiangbo², REN Guangming¹, HUANG Xichao¹

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The evaluation of landslide stability by factor of stability has certain defects, together with the failure probability analysis it can make reasonable and reliable evaluation on stability of landslide. Based on the comprehensive analyses of basic characteristics and the formation mechanism of the Xinfushan Anju District of Landslide in Fugu County, this research calculated its factor of stability under different conditions. Considering the coefficient of variation of rock mass parameters and coefficient of skewness, Monte-Carlo method was further adopted to obtain the failure probability of landslide. Finally by combining the stability factor and probability, the stable state of the landslide was evaluated. Results show that the landslide under natural condition is stable state, but the landslide are likely to occur failure under heavy rain or persistent heavy rains.

Keywords: landslide; variability of parameters; Monte-Carlo method; failure probability

滑坡是一种频发性的地质灾害, 在全球范围内分布广泛, 危害非常巨大。它不仅给人民生命安全带来了严重的威胁, 而且对环境、资源、财产等具有严重的破坏性。利用稳定性系数来评价滑坡的稳定性传统方法, 往往忽略了岩土体参数本身的变异性、勘探取样和试验方法造成的误差、计算模型及滑动面的确定是否合理等, 因此, 其所得安全系数并不能真实的反映滑坡的安全程度^[1]。在 20 世纪 80 年代, Wu&Crafe 最早将可靠度分析法应用到边坡的稳

定性分析中, 并取得较好的结果。该方法较合理的考虑滑坡各种不确定性对结果造成的影响, 最终得到评价滑坡可靠度指标, 即破坏概率。

目前常用的破坏概率分析方法主要有一次二阶矩法、随机有限元法、概率矩点估计法、蒙特卡洛法等。其中蒙特卡洛法受问题限制小, 得到的结果相对准确, 因此应用的较为广泛^[2-3]。陈春利等^[4]利用蒙特卡洛法对甘肃黑方台黄土边坡可靠度进行分析, 取得较可靠的结果。李强等^[5]通过实例证明了

蒙特卡洛法是求解滑坡稳定可靠性指标和破坏概率的行之有效的办法。吕文君等^[6]运用 Monte-Carlo 模拟对滑坡的破坏概率进行了模拟分析,认为滑坡的破坏概率分析是滑坡稳定性评价的有效手段之一。陈鹏等^[7]利用 Monte-Carlo 法对尾矿坝失稳概率进行了分析,认为运用概率的方法考虑土体物理力学参数的空间变异性更符合现场实际。本文将蒙特卡洛法计算所得到的破坏概率与极限平衡法计算得到的稳定性系数相结合,对府谷县新府山安居小区滑坡进行稳定性评价。

1 滑坡的发育特征及形成机制

1.1 发育特征

该滑坡位于陕西省府谷县府谷镇新府山安居小区北侧斜坡上,总体西北地势相对较高,而东南地势相对较低。滑坡在空间上呈圈椅状,周界明显,滑坡后缘由于滑坡体下错形成陡壁,滑坡两侧以冲沟为界,长约 40 m,宽 148 m,厚约 3.5 m,面积约 $0.592 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $2.07 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 200° ,属于一小型土质滑坡。滑坡体岩性主要为四系全新统风积粉土(Q_4^{col}),滑床岩性为上古生界二叠系紫红色泥岩(P),产状 $200^\circ \angle 40^\circ$ 。滑坡后缘可见宽约 5 cm ~ 15 cm 的拉张裂缝,坡体中下部可见局部的滑塌(图 1)。对坡体后缘修建的气象局设施及前缘在建的安居小区存在较大的安全隐患。



图 1 滑坡后缘裂缝

1.2 形成机制

由于在坡脚前缘进行安居小区建设而开挖坡脚,使坡体前部形成较大的临空面;滑坡体上部地形陡峻,在后缘可见宽约 5 cm ~ 15 cm 的拉张裂缝,延伸方向约 115° 。由于该滑坡滑床为二叠系泥岩属于相对隔水层,坡体为第四系全新统粉土,土质松软破碎。降雨入渗到坡体后,使上覆土体的重力增大,雨水一旦下渗到基覆界面,在水的长期浸泡下泥岩结构逐渐软化,抗剪强度也随之降低,在上覆土体与基

岩接触面形成软弱带。当坡体内形成一贯通的软弱面时,整个坡体将沿着土体与基岩接触面产生水平为主的滑动,最终失稳破坏。

2 滑坡稳定性分析

(1) 计算模型

本次选择 GeoStudio 边坡稳定性计算软件中的 SLOPE/W 模块建立该滑坡稳定性计算模型。该模块是以极限平衡理论为基础,利用力和力矩平衡来计算滑坡稳定性系数。

(2) 计算剖面

根据钻探资料和滑坡变形及边界特征,选择纵剖面 II—II' 作为主轴断面,利用极限平衡法进行稳定性计算(见图 2)所示。

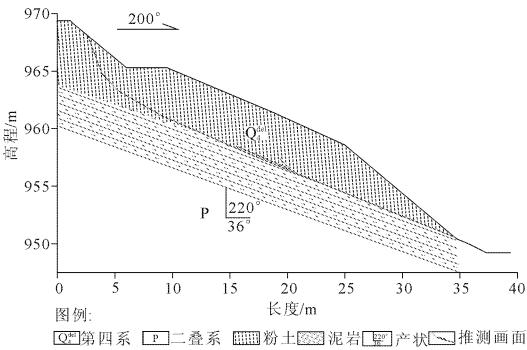


图 2 滑坡 II—II' 地质剖面

(3) 计算工况及参数选取

根据滑坡的地质背景及成因,发生地震的概率很小,而且震级较小,因此主要考虑降雨因素,滑坡稳定性计算采用如下 2 种工况形式:① 工况 1,天然状态(自重);② 工况 2,饱和状态(自重 + 暴雨)。

该滑坡稳定性计算参数依据室内土工试验成果、剖面 II—II' 在天然状态所反演的结果,并参考当地同类工程岩土体参数进行综合取值,具体岩土体强度参数见表 1。

表 1 滑坡稳定性计算参数

岩土类别	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
	天然状态	饱和状态	天然状态	饱和状态	天然状态	饱和状态
粉土	19.5	20.3	21.5	19.6	27.0	25.5
滑带	18.5	19.6	20.4	18.5	25.5	22.8
泥岩	23.0	23.5	46.5	40.3	38.6	35.7

(3) 稳定性计算结果

根据稳定性计算模型、工况及计算参数,利用 SLOPE/W 模块计算了该滑坡体在 2 种工况下的稳

定性系数,其结果如表 2 所示。

表 2 滑坡稳定性计算结果

计算方法	稳定系数	
	工况 1	工况 2
Spencer	1.116	0.981
Ordinary	1.091	0.959
Janbu	1.090	0.958
Bishop	1.170	1.029
平均值	1.117	0.982

从稳定性计算结果中,可以得出该滑坡在天然状态下稳定性系数为 1.117,处于基本稳定状态;在饱和状态状态下稳定性系数为 0.982,处于不稳定状态,在持续强降雨或暴雨状况下具有发生变形失稳的可能。

3 滑坡破坏概率分析

3.1 蒙特卡洛法基本原理

可靠度分析方法中蒙特卡洛法应用比较广泛,其基本原理如下,根据影响滑坡稳定性的因素,建立滑坡稳定性状态函数

$$F_s = f(x_1, x_2 \cdots x_n)$$

式中 F_s 为稳定性系数, $x_i (i = 1, 2 \cdots n)$ 为可能影响滑坡稳定性的因素,如黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、重度 γ 、孔隙水压力 u 、地震加速度 g 等,利用蒙特卡洛法产生符合状态变量概率分布的一组样本值 $x_{1j}, x_{2j} \cdots x_{nj}$, 带入状态函数 $F_s = f(x_1, x_2 \cdots x_n)$ 可计算得到对应的稳定性系数 F_{sj} 。如此重复 N 次,就可以得到 N 个相对独立的稳定性系数样本值 $F_{s1}, F_{s2}, \cdots, F_{sn}$ 。若定义 $\{F_s \leq 1\}$ 为滑坡破坏事件,且在 N 次抽样中,出现该事件有 M 次,则当 N 足够大时,根据大数定律,此时的频率已近似于概率,从而可用式(1) 来确定滑坡破坏概率^[8-11]

$$P_{F_s} = P(F_s \leq 1.0) = \frac{M}{N} \tag{1}$$

3.2 破坏概率的计算

滑坡滑带土抗剪强度参数(c 、 φ) 是滑坡稳定性分析的重要参数,它直接影响滑坡推力和滑坡稳定性验算的结果^[12]。但土性参数具有很强的离散性和变异性,所以需对其分布特征进行分析。目前很多学者已经对黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的概率分布特征进行了研究。但由于研究采用的土样不同,得出的结果也存在差异。一般认为,当不考虑岩土体参数的变异系数和偏度系数时黏聚力 c 和内摩擦角 φ 服从正态

分布,且 c 和 φ 值间存在着负相关性^[13-16]。张继周等^[14] 研究认为,在实际应用中,当变异系数 $< 30\%$ 且偏度系数 < 0.025 时,选择正态分布,反之,选择对数正态分布。

根据室内土工试验(样本数为 13)得到的新府山安居小区滑坡滑带土抗剪强度参数,对其进行统计分析得到其均值、标准差、变异系数和偏度系数,如表 3 所示。

表 3 滑带土抗剪强度统计参数

特征值	c/kPa		$\varphi/(^\circ)$	
	天然状态	饱和状态	天然状态	饱和状态
最小值	16.5	14.7	21.3	19.4
最大值	28.4	26.5	29.5	28.8
均值	20.4	18.5	25.5	22.8
标准差	2.37	2.14	1.18	1.02
变异系数	0.117	0.115	0.046	0.044
偏度系数	0.684	0.549	0.013	0.011

通过表 3 可得,黏聚力 c 值选择对数正态分布,而 φ 值选择正态分布。通过计算机模拟生成多组满足正态分布的 c 和 φ ,见图 3、图 4。

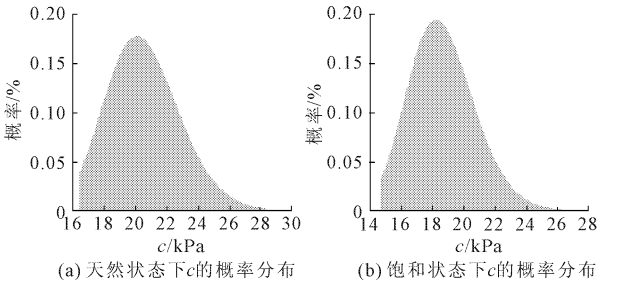


图 3 不同状态下滑带土 c 的概率分布

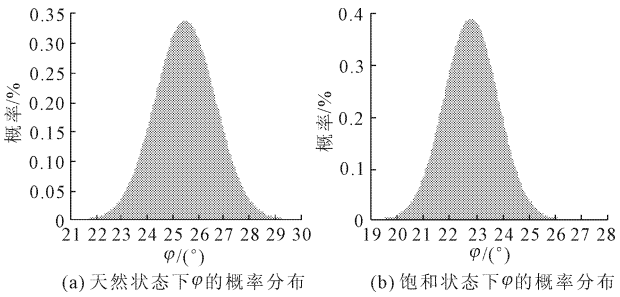


图 4 不同状态下滑带土 φ 的概率分布

在 SLOPE/W 模块,利用蒙特卡洛法,对滑坡最危险滑面在不同工况下的破坏概率进行计算,最终得到不同工况下滑坡的稳定性系数概率密度图和概率分布函数图。其结果如图 5、图 6。

从稳定性系数概率分布图中可以看出,安居小区滑坡在天然状态下失稳概率为 2.05%,发生破坏

的概率较小;在持续强降雨或暴雨时滑坡失稳概率达 63.46%,发生破坏的可能性较大。

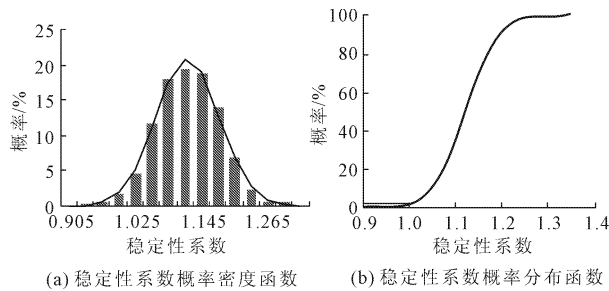


图 5 天然状态稳定性计算结果

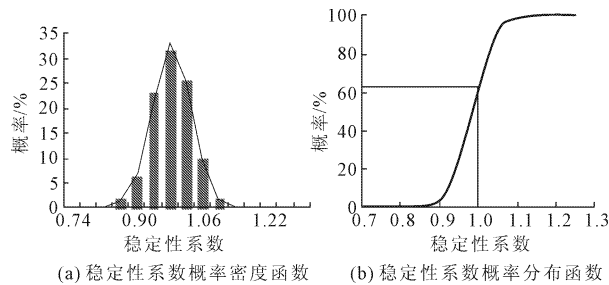


图 6 饱和状态稳定性计算性结果

4 结 论

(1) 通过该滑坡发育特征及形成机制分析,该滑坡的控滑结构面主要为上覆四系全新统风积粉土(Q₄^{col})与下覆上古生界二叠系紫红色泥岩(P)的接触面。

(2) 通过对安居小区滑坡的稳定性分析及破坏概率计算,可以得出在天然状态下滑坡的稳定性系数为 1.117,破坏概率为 2.05%,处于基本稳定状态;在饱水状态下稳定性系数为 0.982,发生失稳破坏的概率约 63.46%。所以可以看出该滑坡在持续强降雨或暴雨时发生失稳破坏的概率较大。在雨季时应加强监测,保持警惕。

致谢:感谢西安科技大学邓念东老师在滑坡野外调查及勘察工作中的指导和帮助。

参考文献:

[1] 吴振君.土体参数空间变异性模拟和土坡可靠度分析

方法应用研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2009.

[2] 祝玉学.边坡可靠性分析[M].北京:冶金工业出版社,1993.

[3] 杨海菲,杨仕教,曾 晟.岩土工程可靠度计算方法研究[J].水利与建筑工程学报,2008,6(2):28-31.

[4] 陈春利,邢鲜丽,李 萍.等.甘肃黑方台黄土边坡稳定性的可靠度分析[J].工程地质学报,2011,19(4):550-554.

[5] 李 强,管昌生,周 武.基于 Monte-Carlo 法的滑坡稳定可靠性分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(S1):1674-1676.

[6] 吕文军,胡国祥.基于破坏概率的滑坡稳定性分析[J].煤田地质与勘探,2004,32(1):34-36.

[7] 陈 鹏,魏作安,夏丽媛.等.考虑土性空间变异的尾矿坝失稳概率分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(1):66-70.

[8] 赵 洲.陕南山区县域滑坡灾害风险管理研究[D].西安:西安科技大学,2012.

[9] 李 侃,巨能攀.基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):23-27.

[10] 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(07):29-33.

[11] 魏雨溪,李先福.基于破坏概率分析的滑坡稳定性评价[J].路基工程,2014(3):69-73.

[12] 张丽萍,刘 超,公路滑坡滑带土抗剪强度参数选取方法研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):57-59.

[13] 赵寿刚,兰 雁,沈细中,等.蒙特卡罗法在土质边坡可靠性分析中的应用[J].人民黄河,2006,28(5):65-66.

[14] 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(A2):3526-3532.

[15] 严春风,刘东燕,张建辉,等.岩土工程可靠度关于强度参数分布函数概型的敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):36-39.

[16] 崔 洁,江 权,冯夏庭,等.石抗剪强度参数的理论概率分布形态研究[J].岩石力学,2015,36(5):1261-1274.