

文章编号: 1001-1986(2010)03-0051-04

随机地震作用下滑坡稳定性可靠度分析

李元雄

(中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 应用边坡可靠性分析中常用的蒙特卡罗法, 并结合稳定性计算的剩余推力法和 Sarma 法, 研究随机地震作用下边坡的可靠性。以三峡库区黄土坡滑坡为例, 分析了地震效应对边坡稳定性的影响。计算结果表明: 地震加速度对滑坡稳定性影响显著; 竖向地震加速度小于水平地震加速度 2/3 时, 对滑坡稳定性影响较小, 大于水平加速度时, 对滑坡稳定性影响明显。因此在一般工程设计中, 可以只考虑水平向的地震作用, 而对于设计烈度较大的大型工程, 则应同时考虑水平向和垂直向的地震作用。

关键词: 地震加速度; 边坡; 可靠度; 蒙特卡罗法; 剩余推力法; Sarma 法

中图分类号: P642.22 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.012

Study on reliability of slope under the random earthquake effect

LI Yuanxiong

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: By combining Monte Carlo simulation with residual thrust and Sarma method, the reliability of slope under the random earthquake effect was studied. In the case of a slope in Three Gorges Reservoir area, calculation results show that the safety factor with the random earthquake has close relation with the seismic acceleration; vertical seismic acceleration has less effect on the stability of slope when it is less than two thirds of that of horizontal seismic acceleration, and has notable effect when it is more than that of the horizontal seismic acceleration. It is clear that the influence of the earthquake is notable.

Key words: seismic acceleration; slope; reliability; Monte Carlo simulation; residual thrust method; Sarma method

地震作用是触发边坡失稳的重要因素之一, 而它产生的影响范围、造成的危害要远远超过其他因素, 因此地震作用下边坡的稳定性问题, 成为近年来工程地质、岩土工程及地震工程领域研究的热点^[1]。我国是全球性大陆地震最集中、活动性最高的地区, 在一些地震灾害中, 例如 2008 年的汶川地震, 诱发的坡体失稳形成滑坡所酿成的灾害远远超过地震本身直接造成的灾害。

地震作用下边坡稳定性分析, 传统上用定值方法的稳定性系数作为边坡稳定性的评价指标, 这种方法经过长期的工程实践证明是一种有效实用的方法。然而, 在实际工程中, 边坡失稳现象却频繁发生, 其中很重要的一个因素就是在边坡稳定性分析中, 对工程中的不确定性因素未充分考虑。实际上, 稳定性系数完全不是一个常数, 而是一个由各种影响因数的变异性所决定的随机变量^[2]。随着可靠性理论的发展, 边坡的稳定性研究从确定性分析到

概率分析的转变, 岩土体参数的变异性在分析中得以充分考虑, 并应用到工程实践中^[3]。

然而, 在以往地震作用下边坡的可靠性分析中, 对地震作用的不确定性考虑较少。实际上, 地震作用无论是发生的时间、地点、还是发生的强度以及传播途径等都存在着不确定性, 因此在研究边坡的可靠性时应该考虑地震力的不确定性。本文在考虑地震作用随机性的基础上, 应用边坡可靠度分析中常用的蒙特卡罗模拟法, 并结合稳定性计算的剩余推力法和 Sarma 法, 研究地震作用下边坡的可靠性。

1 边坡可靠度分析的蒙特卡罗法

1.1 基本原理

蒙特卡罗法(Monte-Carlo method), 又称随机抽样技巧法或统计试验法, 是目前可靠度计算中的一种相对精确的方法^[4]。其基本思想是: 若已知随机变量 x_1, x_2, \dots, x_k 的概率分布及极限状态条件

收稿日期: 2009-08-27

作者简介: 李元雄(1974—), 男, 湖北远安人, 博士研究生, 从事岩土工程勘察设计及地质灾害风险评估研究。

$g(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ ，利用蒙特卡罗法产生 N 组符合状态变量概率分布的随机数 x_1, x_2, \dots, x_k ，带入极限状态方程得 $z_i = g(x_1, x_2, \dots, x_k)$ ，若其中有 L 组随机数对应的状态函数值 $z_i \leq 0$ ，则当 N 足够大时，根据大数定理，则其破坏概率(P_f)为：

$$P_f = P\{g(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq 0\} = L/N \quad (1)$$

对 N 个 $g(x)$ 求其均值 μ_g 和方差 σ_g ，从而可得可靠度指标： $\beta = \mu_g / \sigma_g$ 。

1.2 随机变量样本的产生

影响边坡稳定性的不确定因素有许多，主要有地震作用、坡面形态和边坡岩土体参数等。对于某一边坡坡面形态是确定的，土体参数可以通过各种技术手段得到比较详细的数据。本文暂不考虑坡面形态和岩土体参数的影响，只考虑地震作用对边坡稳定性的影响。

传统上分析边坡稳定性时，一般以地震加速度的形式表示地震效应，以震加速度作为随机变量样本，首先采用统计近似方法编写随机函数，然后利用该随机函数可在开区间(0,1)上产生均匀分布的随机数序列{ u }。设随机数 u_i 和 u_{i+1} 是(0,1)区间中的两个均匀随机数，则可用下列变换得到标准正态分布 $N(0,1)$ 的随机数 r_i ，

$$r_i = \sqrt{-2 \ln u_1} \cdot \cos 2\pi u_2 \quad (2)$$

据国内外统计资料，地震时地面峰值加速度 A 是随机变量，并符合极大值 II 型分布^[5]，其分布函数为

$$F(A) = \exp \left[- \left(\frac{A}{A_c} \right)^{-k} \right] \quad (3)$$

式中 k 为形状参数， A_c 为众值加速度。则其随机数 A_i 算式为

$$A_i = A_c (-\ln r_i)^{-1/k} \quad (4)$$

1.3 极限状态方程的建立

边坡的极限状态就是其稳定性系数为 $F_s=1$ 时的状态。 F_s 求解方法有很多，最常用的为剩余推力和 Sarma 法，本文采用这两种方法建立极限状态方程。

1.3.1 剩余推力法

剩余推力法是条分法的一种，它假定条块间仅有剩余推力的作用，并且剩余推力的方向与上部条块的滑面方向一致；在滑面上，有效法向力与切向力符合莫尔-库仑准则^[6]。

对于第 i 条块，其剩余推力为

$$E_i = T_i - R_i + E_{i-1} \psi_i \quad (5)$$

其中：

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + KW_i \cos(\alpha_i + \gamma) + (P_{wi-1} - P_{wi}) \cos \alpha_i ;$$

$$R_i = [W_i \cos \alpha_i - KW_i \sin(\alpha_i + \gamma) - (P_{wi-1} - P_{wi}) \sin \alpha_i - U_i] \cdot \tan \varphi_i + c_i l_i ;$$

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \tan \varphi_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)。$$

式中 E_i 为第 i 条块的剩余推力； W_i 为第 i 条块重力； KW_i 为地震力， K 为比例系数； α_i 为第 i 条块滑面倾角； γ 为地震力与水平方向的夹角； P_{wi} 为第 i 条块侧边水压力； U_i 为第 i 条块底边水压力； C_i 、 φ_i 和 l_i 分别为第 i 条块滑面粘聚力、内摩擦角和滑面长度。

1.3.2 Sarma 法

Sarma 法是极限平衡分析法的一种，其基本思想是：边坡岩土体除非是沿一个理想的平面圆弧而滑动，才可能作为一个完整刚体运动，否则，岩土体必须先破坏成多块相对滑动的块体才可能滑动，亦即在滑体内部发生剪切^[7]。根据极限平衡原理，当边坡在某一地震作用下处于极限平衡状态时，根据摩尔-库仑准则，可推导出极限平衡公式：

$$K_c = \frac{a_n + a_{n-1} \cdot e_n + a_{n-2} \cdot e_n \cdot e_{n-1} + \dots + a_1 \cdot e_n \cdot e_{n-1} \dots e_3 \cdot e_2}{P_n + P_{n-1} \cdot e_n + P_{n-2} \cdot e_n \cdot e_{n-1} + \dots + P_1 \cdot e_n \cdot e_{n-1} \dots e_3 \cdot e_2} \quad (6)$$

式中：

$$a_i = \theta_i [W_i \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i) + R_i \cos \varphi_{bi} + S_{i+1} \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - S_i \sin(\alpha_i + \delta_i - \varphi_{bi})] ;$$

$$P_i = \theta_i W_i \cos(\gamma + \alpha_i - \varphi_{bi}) ;$$

$$e_i = \theta_i [\sec \varphi_{si} \cos(\varphi_{bi} - \alpha_i + \varphi_{si} - \delta_i)] ;$$

$$\theta_i = \cos \varphi_{si+1} \sec(\varphi_{bi} - \alpha_i + \varphi_{si+1} - \delta_{i+1}) ;$$

$$R_i = C_{bi} l_i - U_i \tan \varphi_{bi} ;$$

$$S_i = C_{si} d_i - P_{wi} \tan \varphi_{si} 。$$

式中 C_{bi} 、 φ_{bi} 为第 i 条块底面粘聚力和内摩擦角； C_{si} 、 φ_{si} 为第 i 条块侧面粘聚力和内摩擦角； d_i 为第 i 条块侧面长度； δ_i 为第 i 条块侧面与垂直方向的夹角，其他参数含义同剩余推力法。

应用剩余推力和 Sarma 法研究地震作用下边坡稳定性系数，是采用强度折减法，折减系数为 F_s ，通过调整 F_s 来改变 E_i 和 K_c 值。假定地震加速度系数为 K ，经过反复迭代，当最后条块的剩余推力 E_n 和 $K-K_c$ 绝对值小于迭代误差，则此时的 F_s 即为所求的边坡稳定性系数。

确定边坡稳定性系数计算方法后，则可建立其极限状态方程，其功能函数为地震加速度系数 K 的函数，即

$$z = g(K) = F_s - 1 \quad (7)$$

2 实例分析

黄土坡滑坡位于三峡库区巴东县城黄土坡小

区, 是一个多期次形成的大型复杂地质灾害体。前后缘高差约 550 m, 面积 1.38 km², 体积 4×10⁷ m³, 是目前三峡库区最大的滑坡^[8]。滑坡体物质成分复杂, 上部是以紫红色粉砂岩、泥岩为主的碎裂岩, 以及紫红色碎块石夹砂质粘土; 下部以灰黄色泥质灰岩碎裂岩为主, 以及部分紫红色粉砂岩块夹砂质粘土。基岩属三叠系巴东组第二段(T₂b²)紫红色泥岩夹

粉砂岩, 第三段(T₂b³)深灰色中厚层—厚层泥灰岩、泥质灰岩、灰岩、白云质灰岩夹钙质泥岩。滑坡属黔江至兴山地震小区, 据国家地震局 2001 年版《中国地震烈度区划图》, 巴东县新城处于 VI 度区内。本文选取其典型断面对其进行抗震稳定性评价, 断面形式如图 1 所示。根据地质勘察资料^[9], 滑坡物理学参数见表 1。

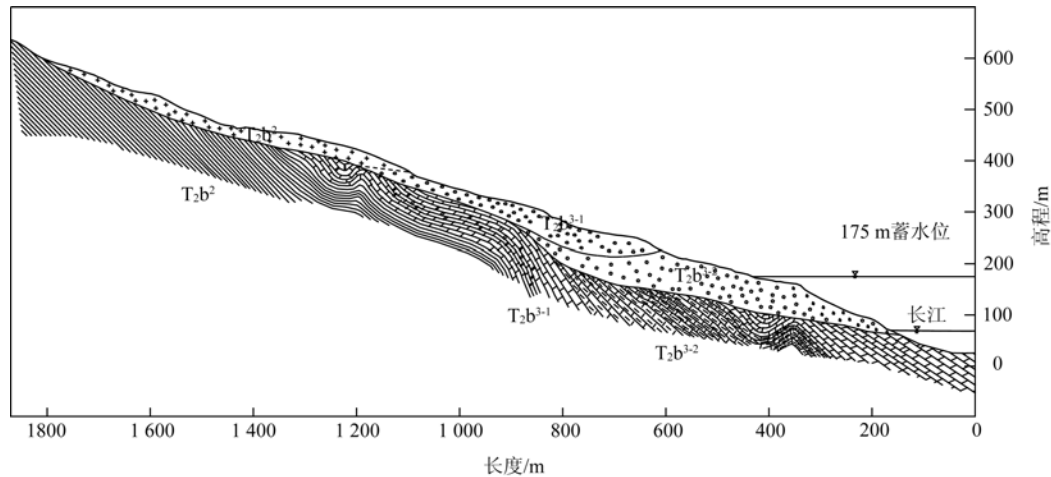


图 1 滑坡地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of slopes

表 1 滑坡岩土体强度参数
Table 1 Strength parameters of the slopes

位置	容重 /kN·m ⁻³	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)
滑坡体上部	20.0	24.0	18.0
滑坡体中部	21.0	31.0	23.0
滑坡体下部	21.5	27.0	18.0
滑带上部	22.0	19.0	14.0
滑带下部	22.0	17.0	14.0

2.1 水平地震加速度对滑坡可靠度的影响

在图 1 所示断面的情况下, 不考虑地震作用, 求得滑坡稳定性系数为 1.152。在仅考虑水平地震作用下, 改变地震众值加速度值, 分别用剩余推力和 Sarma 法, 可得地震加速度对滑坡稳定性的影响规律(表 2), 求其均值, 可做出滑坡稳定性随地震加速度的变化曲线(图 2、图 3)。从表 2、图 2 和图 3 可以看出, 随着众值加速度增加, 滑坡破坏概率逐渐增大, 可靠度逐渐降低, 并呈非线性变化。图 4 是不同众值加速度下滑坡稳定性系数的概率分布, 图中由右向左依次是众值加速度取 0.05g、0.1g、0.15g 时滑坡稳定性系数的概率分布曲线。随着众值加速度的增加, 曲线向左移动, 概率分布逐渐分散。从以上分析可以看出, 地震效应对滑坡可靠性的影响是显著的, 因此, 在进行滑坡边坡设计时应充分考虑地震的影响效应。

表 2 滑坡在不同水平地震加速度下的稳定性
Table 2 Stability of slope under different horizontal seismic accelerations

水平地震 加速度 A _e	破坏概率		可靠度	
	剩余推力法	Sarma 法	剩余推力法	Sarma 法
0.05g	0.142 2	0.137 6	1.080	1.091
0.10g	0.530 2	0.527 6	-0.076	-0.069
0.15g	0.856 2	0.863 8	-1.063	-1.098
0.20g	0.978 2	0.981 0	-2.018	-2.075
0.25g	0.998 6	0.999 2	-2.990	-3.170
0.30g	0.999 8	0.999 8	-3.600	-3.600

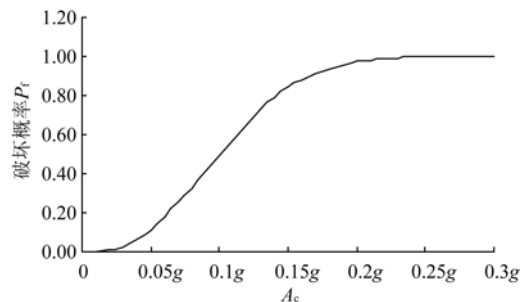


图 2 滑坡破坏概率与水平地震加速度的关系曲线

Fig. 2 Curve of slope failure probability and the horizontal seismic accelerations

2.2 竖向地震加速度对滑坡可靠度的影响

传统上分析滑坡稳定性时, 一般不考虑竖向地震的影响, 但是竖向地震确实存在, 并对滑坡稳定性有一定影响。考虑众值加速度为 0.1 g 时, 在不改变水

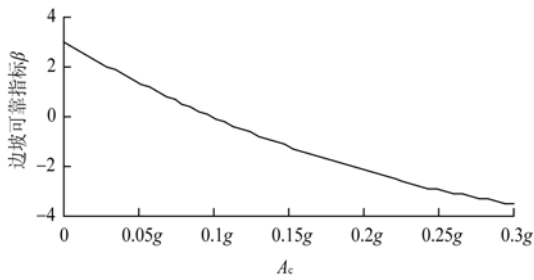


图 3 滑坡可靠指标与水平地震加速度的关系曲线
Fig. 3 Curve of slope reliability index and the horizontal seismic accelerations

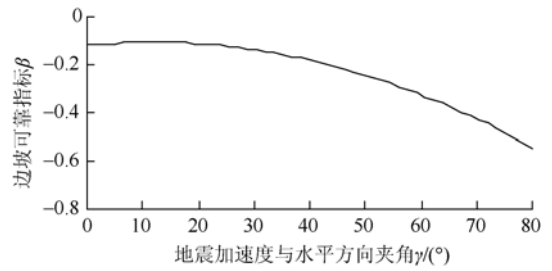


图 6 滑坡可靠指标与竖向地震加速度的关系曲线
Fig. 6 Stability factor of slope under different vertical seismic accelerations

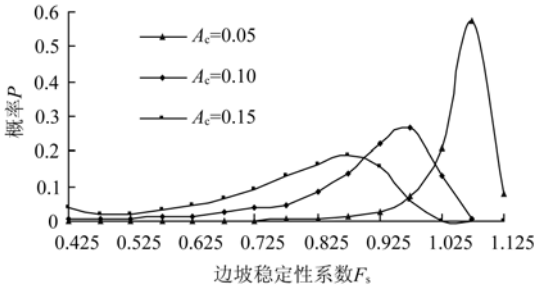


图 4 不同水平地震加速度下滑坡稳定性系数的概率分布
Fig. 4 Stability factor of slope under different horizontal seismic accelerations

平地地震力的基础上，通过改变地震力与水平方向的角度来调整竖向地震力大小，可得到竖向地震加速度对滑坡稳定性的影响规律，如表 3 和图 5、图 6。

表 3 滑坡在不同竖向地震加速度下的稳定性($A_c=0.1g$)
Table 3 Stability of slope under different vertical seismic accelerations

角度 /(°)	破坏概率		可靠度	
	剩余推力法	Sarma 法	剩余推力法	Sarma 法
0	0.532 4	0.537 6	-0.081	-0.094
10	0.548 4	0.543 6	-0.122	-0.110
20	0.563 4	0.555 8	-0.160	-0.140
30	0.573 4	0.555 8	-0.185	-0.140
40	0.575 0	0.569 2	-0.189	-0.174
50	0.582 8	0.587 6	-0.209	-0.221
60	0.624 4	0.606 0	-0.317	-0.269
70	0.659 6	0.663 4	-0.411	-0.422
80	0.748 6	0.752 4	-0.607	-0.608

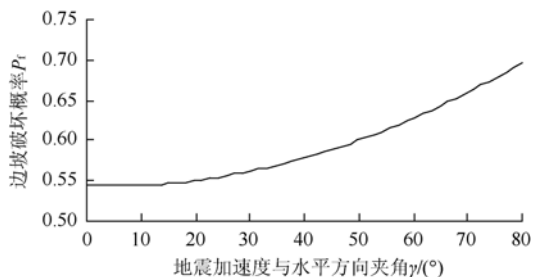


图 5 滑坡破坏概率与竖向地震加速度的关系曲线
Fig. 5 Curve of slope failure probability and the vertical seismic accelerations

从计算结果可以看出，在地震加速度与水平方向夹角小于 30°，即竖向地震加速度约小于水平地

震加速度 2/3 时，竖向地震对滑坡稳定性影响较小；而当地震加速度与水平方向夹角大于 45°，即竖向地震加速度大于水平地震加速度时，竖向地震对滑坡稳定性影响明显，并随着角度呈近似线性变化。

黄土坡滑坡位于三峡库区，设防烈度为 VI 度，取 A_c 为 0.05 g，仅考虑水平地震力作用，其破坏概率为 0.14，可靠度为 1.09。虽然滑坡在该设防烈度内破坏概率较小，但存在一定风险，在稳定性分析中应考虑地震因素。

3 结论

在考虑地震作用随机性的基础上，应用边坡可靠性分析中常用的蒙特卡罗法，并结合边坡稳定性计算的剩余推力法和 Sarma 法，对滑坡的稳定性进行了可靠度分析。通过对黄土坡滑坡的可靠度计算，分析了随机地震作用对滑坡稳定性的影响。计算结果表明：地震加速度对滑坡的稳定性影响显著；竖向地震加速度小于水平地震加速度 2/3 时，对滑坡稳定性影响较小，大于水平地震加速度时，对滑坡稳定性影响明显。因此在一般工程设计中，可以只考虑水平向的地震作用。而对于设计烈度较大的大型工程，则应同时考虑水平向和垂直向的地震作用。

参考文献

- [1] 祁文生, 伍法权, 严福章, 等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 祝玉学. 土坡可靠度分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [3] 谢守益, 张年学, 许兵, 等. 地震诱发下黄腊石滑坡的概率分析[C]//第五届全国工程地质大会论文集. 北京: 地震出版社, 1996: 142-148.
- [4] 方再根. 蒙特卡罗方法与计算机模拟[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [5] 陈厚群, 侯顺载, 梁爱虎. 拱坝抗震可靠度设计的研究[J]. 西北水电, 1996, 56(2): 4-10.
- [6] 张宜虎, 尹红梅, 简文星. 剩余推力法及其在斜坡稳定性评价中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 628-631.
- [7] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 邓清禄, 王学平. 黄土坡滑坡的发育历史: 坠覆-滑坡-改造[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000(8): 44-50.
- [9] 湖北省地质灾害防治工程勘查设计院. 长江三峡工程库区湖北省巴东县黄土坡滑坡区滑坡与塌岸勘查报告[R]. 2001.