

基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价

李 侃, 巨能攀

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 作者将蒙特卡洛模拟方法应用于边坡可靠性评价, 以岩土体物理力学参数作为输入变量, 安全系数作为输出结果。利用得到的安全系数样本计算可得边坡均值安全系数、可靠度指标和破坏概率, 作为边坡可靠度评价的定量判据。试验过程中运用 MATLAB 统计获得各参数的分布类型及参数, 再利用蒙特卡洛模拟生成符合相应分布律的岩土参数抽样值, 将抽样值用自编接口程序 MC to Slope 导入 GeoStudio 逐次计算得到边坡安全系数, 最后统计获取边坡的可靠性指标和破坏概率。试验结果说明该方法操作易实现且计算精度高, 在边坡稳定性评价工作中具有实用性。

关键词: 边坡; 可靠性分析; 蒙特卡洛模拟

文章编号: 1003-8035(2014)01-0023-05

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

0 引言

据已有经验和证据, 影响边坡稳定性的因素均在不同程度上有不确定性。在目前边坡稳定性评价方法中, 人们常用定值的方法计算稳定性系数, 得到边坡稳定性的评价指标。如: 瑞典条分法、简化 Bishop 法、简布法及 M-P 法等^[1]。这种传统的边坡稳态评价方法, 将安全指标视作常数, 忽略了岩土体物理力学参数的不确定性、变异性和离散性。边坡稳定性分析计算结果的正确性不仅取决于计算模型与实际边坡的吻合程度, 还取决于各物理力学参数的取值, 在很大程度上依赖于工程人员经验。事实上安全系数值完全不是一个常数, 而是一个由各种设计因素的变异性所决定的随机变量^[2]。那么在计算之初, 可以通过运用数学的方法先得到计算参数的均值和标准差或变异系数, 在假定稳定系数符合一定概率模型的前提下, 恰当地考虑影响稳定系数的各因子所包含的不确定性, 进行可靠度分析, 可以提高分析结果的科学性。常用可靠性分析方法有一次二阶距法、JC 法、随机有限元法、蒙特卡罗法等^[3-4]。在目前的可靠性分析方法中, 蒙特卡洛模拟方法不受分析条件的限制, 无论极限状态函数是否线性, 变量分布是否服从正态分布, 都可以简明地模拟出边坡系统的主要状态和特征^[5]。只要模拟的次数足够多, 就能够得到一个相对精确的破坏概率、可靠指标。蒙特卡洛模拟方法相对精度较高, 方法简单容易实现, 适应性强。因此, 本文选取典型边坡, 采用蒙特卡洛方法, 通过确定可靠指标和失效概率, 进行了边坡可靠度评价。

1 蒙特卡洛模拟法基本原理

蒙特卡洛模拟法 (Monte Carlo Simulation, MC) 是一种依据统计理论, 利用随机抽样方法评估风险因素发生概率的一种概率估计方法。其基本原理, 是以随机抽样的方法抽取一组满足输入变量概率分布特征的数值, 再输入状态函数, 从而得到各指标抽样值下的多个评价指标值, 再用这些值得到评价指标的概率分布, 计算出项目可行性概率。即在大量抽样的前提下, 计算出一个风险发生的频率值, 将频率值的数学期望与理论概率对比, 相等或接近, 则以此频率值作为风险因素的概率估计值^[6-8]。具体针对边坡稳定性问题, 进行蒙特卡洛模拟基本步骤如下:

根据边坡稳定性的决定因素, 建立状态函数:

$$K(X) = K(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 分别可以是容重、粘聚力、摩擦系数、空隙水压力、地震加速度等随机变量, 它们中大部分服从正态分布或对数正态分布, 并且统计值已知。

设状态函数为安全系数, 且随机地从各个随机变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 母体中抽取具有相同分布变量的 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 由式(1)求得安全系数的随机样本 K_i 。经多次试验, 直至满足预期精度的充分次数 N , 可得到 N 个相对独立的安全系数样本值 $K_1, K_2, \dots, K_n$ 。

安全系数所表征的极限状态为 $K = 1$, 可构造随

收稿日期: 2013-06-14; 修订日期: 2013-07-24

作者简介: 李 侃 (1987—), 男, 硕士, 地质工程专业, 主要地质工程防灾减灾工作。

E-mail: geokan@163.com

机变量:

$$M = M_1 + M_2 + \cdots + M_n \quad (2)$$

其中, $K_i \leq 1$ 时, $M_i = 1, i = 1, 2, \cdots, n$; $K_i > 1$ 时, $M_i = 0, i = 1, 2, \cdots, n$

那么在 N 次实验中, 则斜坡的破坏概率为: $M_i = 1, i = 1, 2, \cdots, n, K_i > 1$

$$P_f = \frac{M}{N} \quad (3)$$

当 N 足够大时, 由安全系数的统计样本值 $K_1, K_2, \cdots, K_n$ 可较精确地拟合安全系数的概率分布 $F(k)$, 并可估计其分布参数, 其均值和标准差分别为:

$$\mu_k = \sum_f^N K_i \quad (4)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\left[\frac{1}{N-1} \sum_f^N (K_f - \mu_k)^2 \right]} \quad (5)$$

由中心极限定理, $N \geq 50$ 的条件下, 破坏概率的积分表达式为:

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \int_0^1 e^{-\frac{(x-\mu_k)^2}{2\sigma_k^2}} dK \quad (6)$$

由(3)和(6)式, 可得破坏概率, 那么可靠性指标为:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$$

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

有学者建议蒙特卡洛模拟次数 N 需要满足 $N \geq 100/P_f$ 。由于 P_f 是一个很小的数值, N 就会很大, 实践证明在模拟次数上升到一定程度时误差将趋于稳定。因此对于一般性的边坡工程, 模拟次数可取 5000 ~ 10000, 即可满足精度要求^[9]。

2 边坡可靠性的蒙特卡洛法综合应用

根据以上原理, 运用蒙特卡洛方法在边坡可靠性评价的应用具体步骤如图 1, 在具体的模拟过程中使用商业数学软件 MATLAB 对各变量数理统计, 得到分布规律及其参数, 再通过随机数发生器产生服从相应分布的随机数^[10-11], 这个过程完成了蒙特卡洛方法的核心工作, 即完成随机抽样。接着将所得数据用 GeoStudio 软件的 Slope/W 模块, 逐次计算, 通过 Morgenstern-Price 及 Bishop 等方法(状态函数)得到一组稳定性系数, 此步骤解决了状态方程的选择和应用^[12]。但是蒙特卡洛方法产生的大量随机数, 无法人工逐次输入软件计算。因此, 运用软件提供的接

口, 通过自编软件“MC to Slope”(图 2)一次导入, 并计算稳定性系数, 结果以文本文件的形式输出。最后并用 MATLAB 对稳定性系数进行数理统计, 得到稳定性系数的分布律, 从而得到可靠性指标和破坏概率。最后, 判断得到的可靠性指标和破坏概率是否满足安全要求, 从而对边坡进行合理的评价。

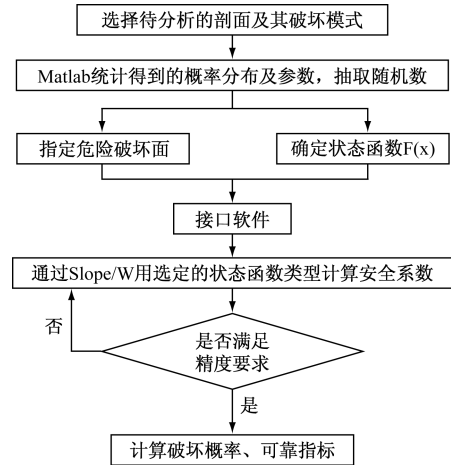


图 1 蒙特卡洛模拟流程图

Fig. 1 Flow Chart of Monte-Carlo Simulation

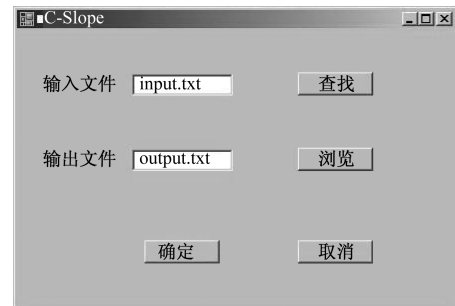


图 2 MC-Slope 接口程序界面

Fig. 2 Interface of MC-Slope

3 工程应用实例

3.1 边坡概况

重庆市忠县屏忠线某滑坡出现局部滑塌现象, 滑坡体上支撑气管线的挡墙鼓出现张拉裂破坏, 变形破坏显著, 影响沿线用气。

该滑坡由陡倾层(板)状岩石组成的斜坡。当走向与坡面平行(基本平行)时, 在重力作用下发生的向临空方向的同步弯曲的弯折倾倒滑坡的岩质滑坡堆积体上的沿强风化层面滑移的岩质滑坡堆积体, 滑坡前缘高程 158.47m, 后缘高程 229.50m, 纵长约 176.17m, 宽约 158.30m, 滑体厚 15.3 ~ 18.6m, 面积

27888 m², 体积约 51.6 × 10⁴ m³。滑坡区内地形东南较高西北较低,起伏较大的阶状斜坡地貌,整体斜坡自然坡度 18.6° ~ 23.5°;局部坡度大于 25°,局部有陡坎;勘察区内地面标高最高 225.75m 左右,最低为 158.47m,相对高差 68.45m。根据现场调查,近期降雨后坡体均在不同程度地向临空方向蠕滑,后缘下沉,原来的拉裂缝开始由张开向闭合转变,结合勘察资料,综合判断该滑坡的破坏模式为蠕滑拉裂型。

3.2 工程地质计算剖面

根据现场勘查确定了滑坡的主滑动方向,并以主滑方向地质剖面作为计算剖面(图 3),河流水位 150m。地层岩性:

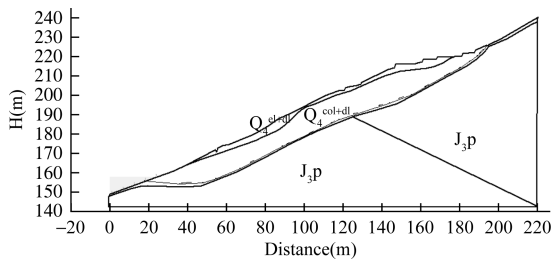


图 3 滑坡典型计算剖面图

Fig. 3 Typical calculation section of landslide

(1) 全新统残坡积层 (Q_4^{el+dl}): 紫红色粉质粘土含少量碎石组成。黄灰色,褐红色,紫红色,粉质粘土。呈可塑,稍湿,手搓易成条;该层厚度 2.5 ~ 4.50m,分布于斜坡前沿地层。

(2) 第四系全新统崩坡积层 (Q_4^{col+dl}): 黄灰色,紫红色,粉质粘土夹少量碎粒,饱水后呈可塑 - 软塑状,手搓滑腻感强,砂感不明显,粘土矿物富集,可见明显

的揉搓现象,擦痕光滑、起伏,擦面较新鲜,岩芯呈饼状。滑带位于该层,该层共厚 6.8 ~ 10.0m。

(3) 蓬莱镇组 (J_3p) 页岩: 紫红色,黄灰色,灰黑色,主要由粘土矿物组成含少量钙质矿物,泥质结构,页理状构造。岩芯暴露地表易崩解呈碎状。强风化岩层岩质软,岩芯呈碎粒、散粒状,网状风化裂隙发育。中风化岩层岩芯成碎块状、片状,饼状。

3.3 各种工况下可靠性计算结果

根据《滑坡防治工程设计与施工技术》(DZ 0240 - 2004)要求并结合滑坡环境,稳定性系数计算时考虑的三种工况和荷载组合如下:

工况一:天然工况,只考虑自重。

工况二:暴雨工况,考虑自重及地下水。其中土体的强度参数在天然状态基础上折减得到。

工况三:暴雨加地震,考虑自重、地下水及地震加速度。

根据《中国地震危险区划》,该区抗震设防烈度为 VI 度,基本地震加速度为 0.05g。

由于影响滑坡体稳定各个岩土参数中,滑带物质的抗剪强度指标受到野外采样、室内试验、数据处理等多因素的影响,具有不确定性。结合试验结果,本文选取 c 和 φ 参数值作为随机变量,重度 γ 变异性相对较小视为常值^[13]。根据统计结果显示 c 和 φ 具有正态分布的特点,基于蒙特卡洛法计算边坡时则应采取相应的抽样。

滑面的抗剪强度取值主要根据现场 5 个钻孔及 4 个探槽所取土样直剪试验。共 12 组,每组 3 个试样。取值见表 1。

表 1 边坡滑带土物理力学指标试验统计值

Table 1 Statistical Physical and mechanical parameters of landslide for stability calculation

项目	天然重度 (kN/ m ³)	饱和重度 (kN/ m ³)	粘聚力 (KPa)	内摩擦角 (°)	粘聚力 (KPa)	内摩擦 (°)
最小值	18.80	19.50	17.00	12.87	13.13	10.62
最大值	19.50	20.10	23.00	14.27	18.00	12.27
平均值	19.13	19.77	19.67	13.50	15.50	11.39
标准差	0.25	0.22	2.16	0.46	1.87	0.62

备注:按照《岩土工程勘察规范》(GB50021—2002)进行统计

本文参考边坡的破坏概率等级评价标准,对该边坡进行稳定性的评价。经过 10 000 次的蒙特卡洛模拟,以 Janbu 法为功能函数计算出的稳定性系数直方图,得到该边坡在三种工况下的平均稳定性系数、破坏概率及可靠度。计算结果如表 2 及图 4 ~ 6。

表 2 分析结果

Table 2 Result of stability analysis

工况	稳定性系数均值	可靠度	破坏概率 (%)
工况一	1.15	0.958	16.38
工况二	1.03	0.822	32.57
工况三	0.95	0.714	47.36

据图 4 ~ 6,三种工况条件下模拟计算得到的稳

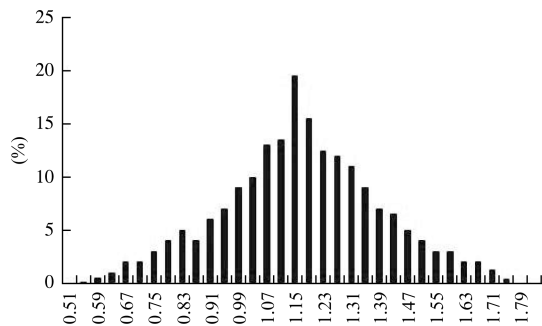


图4 工况一下的安全系数概率密度

Fig. 4 Probability density of Safety factor under condition one

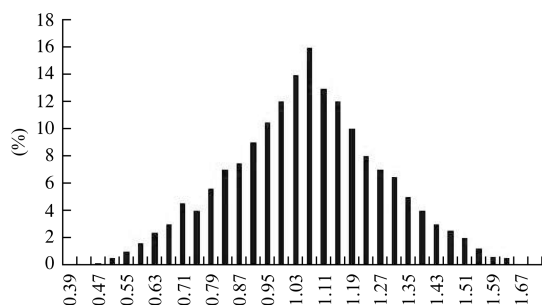


图5 工况二下的安全系数概率密度

Fig. 5 Probability density of Safety factor under condition two

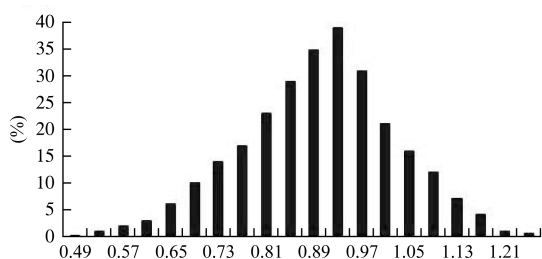


图6 工况三下的安全系数概率密度

Fig. 6 Probability density of Safety factor under condition three

定性系数显示出正态分布特征,极端数据分布在两侧,并且占份额小,比较接近平均稳定系数的主要集中在图的中间部位,这种分布符合实际的稳定性分布规律。

边坡在天然状态下的安全系数均值为 1.15,破坏概率为 16.38%,属于低危险边坡。在饱水状态下,经过模拟计算该边坡的安全系数均值为 1.03,破坏概率为 32.57%,中等危险边坡。地震工况下,安全系数均值为 0.95,但破坏概率为 47.36%。

4 结论

(1)充分考虑了岩土介质的物理力学参数的分布类型,通过试验得出的破坏概率可以有效减少边坡过度治理。试验受问题条件的限制小,与状态函数无关,可靠性强,结果是在特定情况下的特解,不是针对一般情况的通解。

(2)结合 MATLAB 和自编接口程序 MC to Slope 使用,可一次性导入数据并在 GeoStudio 中计算得出以 Janbu、Bishop、M-P 等方法的计算结果。使得蒙特卡洛方法不会因大量重复而增加工作量。

(3)采用定量分析的研究方法,针对重庆忠县某滑坡,试验得到天然、暴雨、地震加暴雨三种不同工况下的可靠度及破坏概率。为常规安全系数方法提供了有效的补充,能为滑坡的预防、预警提供更可靠的科学依据。

参考文献:

- [1] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 140-143.
ZHU Yuxue. Reliability analysis of slope[M]. Beijing: Met allurgical Industry Press, 1993:140-143.
- [2] 陈伟, 许强, 王朝阳. 蒙特卡洛法在滑坡稳定性可靠度分析中的应用[J]. 路基工程, 2011, 157(4): 135
CHEN Wei, XU Qiang, WANG Chaoyang. Application of monte carlo method in reliability analysis of slope stability [J]. Subgrade Engineering, 2011, 157(4): 135.
- [3] 林立相, 徐汉斌. 边坡稳定性分析的可靠度方法[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 235-239.
LIN Lixiang, XU Hanbin. Reliability method for slope stability analysis [J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(3): 235-239.
- [4] Sivakumar Babu, G, Srivastava A. Reliability analysis of earth dams [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7), 995-998.
- [5] 郭长宝, 张永双. 陕北砂黄土高边坡可靠度分析及边坡优化设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 5-6.
GUO Changbao, ZHANG Yongshuang. Reliability analysis and optimizing design of the high sandy loess slope in Northern Shaanxi [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 5-6.
- [6] 罗文强, 黄润秋, 张倬元, 等. 几种边坡可靠性数学模

- 型的对比[J]. 山地学报, 2000, 18(1):42-46.
- LUO Wenqiang, HUANG Runqiu, ZHANG Zhuoyuan, et al. Contrast of some mathematical model of slope reliability[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(1):42-46.
- [7] WANG Y, CAO Z J. Efficient monte carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7):1015-1022.
- [8] Jafarnejad Chaghooshi, Mona Pfister, Michael S, et al. Failure risk analysis of riverbank ripraps with Monte Carlo simulation[J]. River Flow 2012-Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, 2012, 2:1325-1330.
- [9] 李贺华, 赵辉, 谭跃虎. 雅砻江某边坡稳定性蒙特卡洛模拟方法的改进[J]. 山西建筑, 2010, 36(1):2.
- LI Hehua, ZHAO Hui, TAN Yuehu. Improved monte carlo method for a slope's stability analysis on the Yalong river area[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(1):2.
- [10] 刘勇健, 刘义建, 陈昌文. 基于 MATLAB 的边坡稳定性评价方法[J]. 路基工程, 2009, (144):24-25.
- LIU Yongjian, LIU Yijian, CHEN Changwen. Slope stability assessment based on MATLAB[J]. Subgrade Engineering, 2009, (144):24-25.
- [11] 姜健, 余湘娟, 毛尚礼. 基于几种最优化方法的边坡稳定分析及在 MATLAB 中的实现[J]. 水运工程, 2011, 452(4):9-13.
- JIANG Jian, YU Xiangjuan, MAO Shangli. Slope stability analysis based on optimization methods and their achievements in MATLAB[J]. Port & Waterway Engineering, 2011, 452(4):9-13.
- [12] 李显燕. 基于 Geo-slope 软件对某高边坡的稳定性分析与评价[J]. 工程地质计算机应用, 2010, 57(1):24-27.
- LI Xianyan. Geo-slope software applied in a high slope stability analysis and evaluation[J]. Engineering Geology Computer Application, 2010, 57(1):24-27.
- [13] 韩飞. 基于蒙特卡洛法的黄延高速公路边坡稳定性分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2008, 10(6):140.
- HAN Fei. Stability analysis on the slope of Huangling-Yan'an highway based on Monte Carlo method[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2008, 10(6):140.

Integrated application of Monte-Carlo simulation for landslide reliability analysis

LI Kan, JU Neng-pan

(State Key Laboratory of Geohazard and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The authors present a landslide reliability analysis based on Monte Carlo simulation. In this analysis, rock-soil physical and mechanical parameters are sampled as importing data and safety factors will be got as exporting data. Accord to the safety factors, the average safety factor, reliability and failure probability can be calculated. It provides the basis for slope reliability assessment. During the simulation, the authors used MATLAB for getting parameters' distribution types and its indexes. And random samples of those parameters can be generated by Monte Carlo simulation. Interface program "MC to Slope" is used for imputing the random data sampled into GeoStudio to calculate safety factors. According to safety factors, statistical results of reliability factors and failure probability can be obtained. The experimental results show that the method is easy to implement and high precision in the evaluation of slope stability has practicality.

Key words: slope; stability analysis; Monte Carlo simulation