

蒙特卡罗法在水库塌岸预测中的应用

李彦军

(西南科技大学环资学院地质工程系, 四川 绵阳 621010)

摘要:目前土力学方法预测水库塌岸时还没应用可靠度计算, 因为一般预测工作中没有足够的岩土测试结果; 但是定值计算的结果毕竟有不确定性, 最危险滑动部分是否该作为塌岸处理有时较难决定; 基于岩土参数正态分布的特征, 针对这一问题作者提出类比参数情况下, 蒙特卡罗法中岩土统计参数的获取, 计算简单, 方便了应用, 具有一定的理论和实用价值。

关键词:塌岸; 可靠度; 蒙特卡罗法

中图分类号: T V621

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)06-0016-02

Application of Monte Carlo Trials in Reservoir Bank Erosion Forecast

LI Yan-jun

(Institute of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: Soil mechanics with probability analysis has not been applied in reservoir bank erosion because of inadequate testing data for soil. But there is some uncertainty in method of certain factor of safety. Some times whether the critical mass is considered as the mass of bank erosion is still hard to determined. Based on the fact that soil mechanics parameters are confined to normal distribution, the author puts forward a way to obtain the statistic parameter of soil to use Monte Carlo trials under the circumstances that the parameters are attained similarly not from testing but other project, which is easy to applied into practical work. This idea is promising at some extent in theory and practice.

Key words: bank erosion; probability; Monte Carlo trials

1 前言

水库塌岸问题是库区环境地质问题之一, 目前最常用的塌岸预测方法是地质类比法, 卡丘金法、佐洛塔廖夫法、土力学方法等。

对于山区水库而言, 起主导作用的是现代地质作用, 岸坡的破坏主要体现在岩土体在库水作用下物理力学性质的变化, 静止库水位时的浮托力, 水位升降时的渗流力等因素对岸坡稳定性的影响。实践证明, 水库的塌岸绝大部分是在蓄水的一到两年内完成的, 这种破坏可以认为是岸坡沿最危险滑动面滑移破坏为主体的, 因此用土力学方法计算预测山区水库有很大的适宜性。

现在土力学预测塌岸的基本思路是搜索确定最危险滑面, 即将稳定系数最小的滑面作为水库蓄水后新的库岸线。由于岩土体参数存在一定的差异性和其它的不确定因素, 工程设计中常用的稳定系数法的计算结果并不能完全反映边坡的稳定程度, 即稳定性系数并不能完全反映边坡的安全度。在水库的塌岸预测中也存在同样的问题, 作者在用土力学方法对四川某水库的塌岸预测中就遇到类似的问题: 比如确定的最危险滑面的稳定系数是 2.0, 是否应该将该滑动体作为塌岸部分是一个值的讨论的问题, 因为它将直接影响到

塌岸预测的结果。

如果能确定它的失稳的概率, 并与事先界定的失稳概率比较, 就可以决定该计算结果是否作为塌岸处理了。这一问题可以通过边坡的可靠性理论来实现。

2 蒙特卡罗法的基本原理

蒙特卡罗法是用数值计算方法模拟一个真实的实际过程, 这个过程可以是确定的, 也可以是随机的, 模拟的结果就得到所需要的可靠性指标的估计值, 故又称蒙特卡罗随机模拟法。

蒙特卡罗模拟的一般步骤是:

(1) 对所研究的问题建立一个概率模型或随机过程。这里采用的计算模型为条分法, 计算参数为土体的各种参数, 而这些参数都是随机变量, 现对每一个随机变量 X_i 进行抽样以得到一个样本值 \bar{X}_i , 设稳定性功能函数为 $Z = R(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_n)$, 计算后就可得到每次抽样的功能函数 Z 的值, 如果 $Z > 1$ 就认为库岸不会破坏; 如果 $Z \leq 1$, 则认为库岸要发生破坏(塌岸)。

(2) 对已知概率分布的变量的抽样。实验证明岩土体参数值分布符合正态分布特征, 因此可以通过产生 (0, 1) 均匀

* 收稿日期: 2005-12-24

基金项目: 国家电力公司成都勘测设计研究院的委托课题“大岗山电站库区工程地质条件调查”

作者简介: 李彦军(1977-), 男, 西南科技大学环境资源学院地质工程系教师, 讲师, 主要从事地质灾害评价预测与岩土工程的教学与科研工作。

分布的随机变量来实现对正态分布随机变量的抽样。

由数理统计中的独立同分布的中心极限定理可知, 若随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 相对独立, 具有同一分布, 且具有数学期望和方差: $E(x_k) = \mu, D(x_k) = \sigma^2 \neq 0$, 则随机变量

$$Y_n = \frac{\sum_{k=1}^n x_k - E(\sum_{k=1}^n x_k)}{\sqrt{D(\sum_{k=1}^n x_k)}} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k - n\mu}{\sqrt{n\sigma^2}}$$
 服从标准正态分布。

对于服从 $(0, 1)$ 均匀分布的随机变量 $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 则 $E(R) = \int_0^1 r dr = 1/2, D(R) = E(r^2) - [E(r)]^2 = 1/12$, 可

$$\text{得 } X = \frac{\sum_{i=1}^n r_i - n/2}{\sqrt{n/12}} \sim N(0, 1).$$

对于任一正态分布 $X \sim N(\mu, \sigma)$, 其概率密度函数为 $f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, 则可得到 $y = ax + b$ 的分布: $f_y(y)$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{|a|} f_x\left(\frac{y-b}{a}\right) \\ &= \frac{1}{|a|} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(y-b-\mu)^2}{2\sigma^2}} \\ &= \frac{1}{|a|} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(y-b-\mu)^2}{2(\sigma/a)^2}} \quad (-\infty < y < +\infty) \end{aligned}$$

即有 $y = ax + b \sim N[a\mu + b, (\sigma/a)^2]$ 因此, 对于任一标准正态分布 $X \sim N(0, 1)$, 有 $Y = \sigma_X X + \mu \sim N(\mu, \sigma^2)$, 通过以上分析, 就实现了对正态分布的随机变量的抽样; 即首先利用 $(0, 1)$ 的均匀分布 R_i 取值实现符合 $N(0, 1)$ 的 X 的抽样, 再由 $Y = \sigma_X X + \mu \sim N(\mu, \sigma^2)$ 实现对均值为 μ , 方差为 σ 变量的抽样。

(3) 计算确定库岸的失稳概率。设进行了 n 次抽样后, 每次计算的稳定功能函数的值为 $Z_i, Z_i \leq 1$ 的次数为 m , 则可得库岸失稳的概率为: $P_f = \frac{m}{n}$, 随着 n 的增大, P_f 的值将趋于稳定, 此时的 P_f 的值就是库岸失稳的可靠度。

3 塌岸预测中岩土参数的确定

在塌岸预测的实际工作中, 由于条件的限制, 一般不会做很多的实验测试土体的岩土力学参数, 甚至很少做实验, 参数一般采用工程类比的方法。在这种情况下, 如何获得土体的统计参数是一个决定可靠度理论在塌岸预测应用中的关键问题。

在参数类比时一般得到的是值的形式一范围值, 如 $\varphi = 32 \sim 36^\circ, c = 20 \sim 24 \text{ kPa}, \gamma = 18 \sim 22 \text{ kN/m}^2$ 等, 而在蒙特卡罗的可靠度分析中要得到参数的期望值和方差才能求解, 如果我们事先假定得到的参数范围值是某一可靠度的置信区间, 且土体的参数符合正态分布, 设参数的随机变量为 x , 其均值为 μ , 标准差为 σ , 该置信区间对应的概率值为 α , 则有:

$$\text{随机变量 } Z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \sim N(0, 1),$$

$$\begin{aligned} &\text{则有 } P\{-f \leq Z \leq f\} \\ &= P\{Z \leq f\} - P\{Z \leq -f\} \\ &= \alpha, \text{ 即 } P\{Z \leq f\} = \alpha + \frac{1-\alpha}{2} \end{aligned}$$

参考文献:

[1] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
 [2] 潘仲立. 可靠性分析的理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
 [3] 赵欣, 赵雯. 边坡稳定可靠度分析[J]. 安徽建筑, 2004, (4): 100-101.
 [4] 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.

$$= \frac{1+\alpha}{2} \text{ (见图 1);}$$

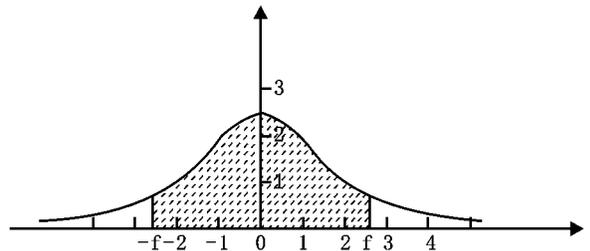


图 1 参数计算示意图

从标准正态分布表中查得 $\frac{1+\alpha}{2}$ 对应的 f 值。设 μ 为已知(参数区间的中间值), 将参数区间的上限值 x_m 代入得: $\sigma = \frac{f}{x_m - \mu}$;

至此就确定了蒙特卡罗可靠度计算用的参数指标。

4 计算举例

某山区一段库岸的剖面如图 2 所示, 类比估计参数为: $\varphi = 28 \sim 32^\circ, c = 45 \sim 55 \text{ kPa}, \gamma = 23 \sim 27 \text{ kN/m}^3$, 设所给参数范围值的置信度, 即 $\alpha = 80\%$, 则根据上面提到的方法可得到 φ, c, γ 三个参数的标准差分别为: $1.56^\circ, 4.0 \text{ kPa}, 1.56 \text{ kN/m}^3$, 就可以利用蒙特卡罗法计算库岸最危险滑动面稳定系数为 1.90, 破坏概率为 0.2%, 如果认为破坏概率小于 5% 不会破坏, 则图 2 中滑面以上的库岸不会塌岸, 即该段库岸蓄水后不会塌岸; 如果只将最危险滑面作为塌岸再造面, 图中滑面上的土体将作为塌岸处理, 这样显然是不合理的。

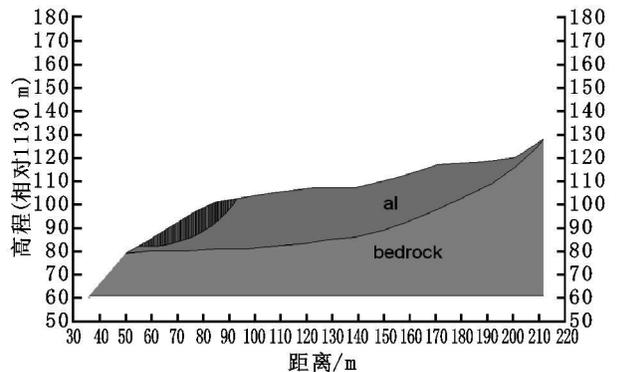


图 2 蒙特卡罗法计算结果示意图

5 小结

蒙特卡罗法理论简单, 没有复杂的数学推导, 在高速计算机普及的条件下很容易实现; 蒙特卡罗法用于计算水库塌岸, 一定程度上解决了用定值法计算塌岸的不确定性; 鉴于塌岸预测参数多靠类比选取, 基于岩土体参数正态分布特征的基础, 提出了计算参数的获取方法, 简便易用, 可操作性强, 具有一定的实用价值。

但是这种统计参数的获取思路和方法的可靠性程度还有待于实践进一步检验。