

文章编号:1001-4179(2011)22-0032-03

滑坡稳定性可靠度分析方法及应用

邵 中 勇

(水利部长江勘测技术研究所,湖北 武汉 430011)

摘要:山地地区由于特殊的地形地质条件,滑坡灾害较为频繁,由此造成了较大的生命、财产损失。常用的滑坡稳定性分析方法没有考虑滑坡稳定性受很多不确定性和随机性因素的影响,其结果与实际存在一定的偏差。以三峡库区兴山县望岭岩滑坡为实例,将常用的滑坡稳定性分析方法与可靠度理论 Monte-Carlo 法有机结合,考虑岩土体重度、黏聚力、内摩擦角的不确定性,计算得到滑坡体可靠度指标,所得结果更加符合实际情况。

关键词:Monte-Carlo 法;不平衡推力法;可靠度指标;滑坡

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A

从 20 世纪 70 年代起,可靠度理论在国内外工程结构设计中得到了广泛的应用。我国《建筑结构设计统一标准》GBJ68-84 率先采用以概率论为理论基础的极限状态设计法,之后铁路、公路、港口及水利水电工程基于结构可靠度理论的设计统一标准也相继颁布实施。

与上部结构相比,岩土工程领域中概率设计方法的应用相对滞后,其主要原因是,岩土是自然产物,其性质远比人工材料复杂、变异性大;土性指标不仅存在自相关性,而且不同的土工参数之间还存在互相关性;土工参数的离散性大,变异系数一般大于 0.3,用一般结构可靠性分析法如“JC”法来计算时,计算结果有时误差较大,因此要求使用较精确的计算方法如 Monte-Carlo 模拟法。

目前,常用不平衡推力法、Sarma 法等来计算稳定性系数,进而以此来评价滑坡的稳定性。但计算的稳定性系数大于 1 而滑坡失稳或计算的稳定性系数小于 1 而滑坡保持稳定的实际工程很多。其原因在于滑坡稳定性分析的确定性分析方法没有考虑到滑坡各种因素的不确定性和随机性的影响,如岩土体的物理力学性质、滑坡的几何形状、重力场、地震荷载、地下水渗流浮托力等的影响。而可靠性分析方法能考虑以上不确定性影响,用失效概率或可靠度指标来评价滑坡的稳

定性,因而能更加符合实际情况。

1 Monte-Carlo 法计算可靠度指标

土工参数的离散性大,一般不服从正态分布,极限状态方程也常常为非线性。Monte-Carlo 方法不受状态函数是否非线性、随机变量是否非正态这些条件的限制,只要模拟的次数足够多就可以得到一个比较精确的失效概率和可靠度指标。

岩土参数除了变异性大、概率分布复杂的特点外,不同的指标之间亦存在着较强的互相关特性。若忽视这些基本变量之间的互相关关系,会造成可靠度指标 β 计算结果的差异,有时误差可达 40%。为了求得精确解,本文应用直接抽样的 Monte-Carlo 方法求解相关空间中的失效概率 p_f 和可靠度指标 β ,并研制了相应的计算程序。

(1) 随机变量子样的产生。对于岩土工程中一般常见的正态分布、对数正态分布以及极值 I 型最大值分布,都有相应的随机数模拟方法。

(2) Monte-Carlo 模拟法的一般步骤为:① 产生 $[0,1]$ 均匀分布的随机数;② 利用反变换法、舍选法、复合法及变换法等多种方法产生随机变量 x_1, x_2, \dots, x_k 相应的 N 组随机数 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki} (i = 1, 2, \dots, n)$;③ 将这 N 组随机数代入极限状态方程 $Z = g(x_1, x_2, \dots,$

x_i),便可得到随机变量 Z 的容量为 N 的一个样本 z_1, z_2, \dots, z_n , 其中 $z_i = g(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$, 若 z_1, z_2, \dots, z_n 中有 M 个 $z < 0$, 则破坏概率的估计量为 $p_f = \frac{M}{N}$, 随机变量 Z 的均值和均方差的估计量分别为

$$\hat{p}_f = M/N \quad (1)$$

$$\hat{\mu}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (2)$$

从以上计算过程中知,在模拟次数足够多时, Monte - Carlo 模拟方法可以得到较精确的失效概率;但在可靠度分析中习惯用可靠度指标来衡量安全度的大小,将失效概率转化为可靠度指标 β 时,既涉及到可靠度指标的定义,又涉及到极限状态函数 Z 的概率分布。

可靠度指标 β 定义为标准正态化空间中坐标原点到失效点的最短距离;失效面上的垂足就是最可能的失效点(验算点)。根据 β 的这一定义以及当量正态化的条件,将随机变量 Z 在 $z = 0$ 处当量正态化,有:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - \hat{p}_f) \quad (3)$$

研究表明,对于 p_f 不是太小的情况(如不小于 10^{-3}),随机变量 Z 的分布类型对 p_f 的计算结果不敏感。即无论 Z 的实际分布如何,由上式求得的 β 值,与实际结果相差不大。当 Z 为正态分布的随机变量时,上式求得的 β 值为精确值,这时 Monte - Carlo 法可以得到的 p_f, β 的精确值。

2 可靠度分析实例

2.1 滑坡体稳定性的可靠度计算

设滑坡体的物理力学参数中有 n 个随机变量(如滑坡体的几何尺寸、重度 γ 、加载、 c 和 φ 等),并分别用符号 x_1, x_2, \dots, x_n 分别表示,则滑坡体稳定的极限状态方程为

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_s - 1.0 = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (F_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + F_n}{\sum_{j=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} - 1.0 = 0 \quad (4)$$

当 $Z(X_1, X_2, \dots, X_n) > 0$ 时,表明滑坡体稳定处于可靠状态;当 $Z < 0$ 时,表明滑坡体处于失稳状态。滑坡体失稳(失效)的概率为

$$p_f = P\{z(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0\} = \iiint_{f_{x_1, x_2, \dots, x_n}} (x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (5)$$

式中, $f_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为随机变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的联合概率密度函数; D 为失效域。

以上计算需要知道随机变量的联合概率密度函数 $f_{x_1, x_2, \dots, x_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 而这往往是十分困难的。

本文用 Monte - Carlo 法计算滑坡体稳定状态的可靠度指标,并研制了相应的计算程序,计算过程如下:

(1) 划分滑坡体条块并进行编号;

(2) 选定 N 个随机变量(滑坡体几何尺寸、加载、重度 γ (kN/m³)、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等),产生 N 个独立正态分布的随机数;

(3) 当随机数之间存在互相关性,且为正态分布时,用正交变换式得到 M 个 N 维相关随机数;

(4) 依次将 M 个随机数系列 $\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}^T$ 作为参数输入,代入(4)式进行 M 次模拟计算,并对 M 次 $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的模拟计算结果进行一阶矩 μ_z 、二阶矩 σ_z 的统计计算;

(5) 由 $\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z}$ 或 $p_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta)$ 式分别计算滑坡体稳定的可靠度指标或失效概率。

2.2 工程实例

望岭岩滑坡位于湖北省兴山县三峡库区复建公路游峡路段,香溪河支流螃蟹溪右岸,彭家槽滑坡以西 140 m,与峡口镇迁建新址一沟之隔。其下半部分滑体于 2000 年雨季复活变形。根据勘察试验数据,该滑坡体的计算参数取值如下:

(1) 滑坡体, $\gamma = 19.0$ kN/m³、黏聚力 $c = 10$ kPa、内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$;

(2) 滑带土,上部黏聚力 $c = 10$ kPa、内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$;下部黏聚力 $c = 7.5$ kPa、内摩擦角 $\varphi = 18^\circ$ 。

根据该滑坡所处的环境,设计中按以下两种工况考虑:①天然工况,滑坡中地下水位为勘察时实测的水位(约为滑体厚度的 10%);②校核工况,滑体中水位为持久暴雨后水位(约为滑体厚度的 20%)。

首先进行滑坡体主断面的条块划分,原则是:当滑块形状不规则,局部凸起而使滑体较薄时,宜考虑从凸起部位剪出的可能性,可进行分段计算;滑坡的稳定最终反映在最前部条块的稳定性,若前部条块划分过小,在后部传递力不大时,边坡稳定系数将显著地受该条块形状和滑面角度影响而不能客观地反映边坡整体稳定性,因此,在计算条块划分时,滑坡下部分条块不宜分得太小。望岭岩滑坡的条块划分见图 1 所示。

在进行可靠度分析时,将滑坡体重度 γ 、滑带土的抗剪强度参数 c 和 φ 视为随机变量,各随机变量的计算参数取值如下。

湿重度的均值为 19.0 kN/m³,饱和重度的均值为 20.5 kN/m³,变异系数均为 0.1;上部滑带土黏聚力的均值为 10 kPa,下部滑带土黏聚力的均值为 7.5 kPa,

变异系数均为 0.3;上部滑带土内摩擦角的均值为 20° ,下部滑带土内摩擦角的均值为 18° ,变异系数均为 0.15。

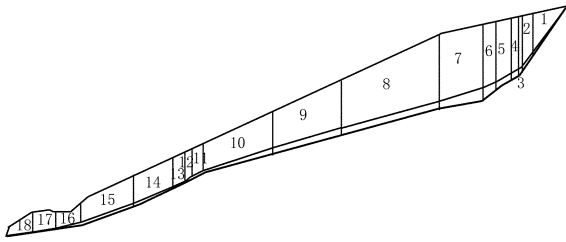


图 1 望岭岩滑坡典型剖面网格划分

用 Monte - Carlo 与剩余下滑力公式来计算该滑坡体稳定状态的可靠度指标,结果为:天然工况, $\mu_z = 0.159, \sigma_z = 0.136$,可靠度指标 $\beta = 1.169$;校核工况, $\mu_z = 0.099, \sigma_z = 0.127$,可靠度指标 $\beta = 0.779$ 。

从计算结果可知,该滑坡整体稳定的可靠度指标较低,失稳可能性较大。

3 结 论

(1) 滑坡体的下滑力计算和滑坡体的稳定性评价,是滑坡治理工程设计中的关键,它关系到滑坡治理工程的投资和加固效果。规范推荐的不平衡推力法在推力计算和某些假定条件上存在不合理之处,对滑坡治理工程的影响和其适用条件有待进一步研究。

(2) 滑带土的黏聚力和内摩擦角是滑坡稳定性定量评价和推力计算的重要参数,其值变化对计算结果有很大影响。试验研究表明,黏性滑带土具有应变软化特性,在滑坡稳定性分析中应加以充分考虑。

(3) 在滑坡稳定性的可靠度分析中,要考虑岩土参数的自相关特性、互相关特性和岩土本构关系的非线性,这些特性对滑坡稳定可靠度指标 β 的影响,需进行进一步的研究。

(编辑:郑毅)

Application of reliability analysis method of landslide stability

SHAO Zhongyong

(Changjiang Reconnaissance Technology Research Institute, Ministry of Water Resources, Wuhan 430011, China)

Abstract: Landslide disasters frequently occur in mountain area due to the special terrain and geological conditions, which cause large loss of life and property. Conventional stability analysis methods often obtain results that do not conform to practice because they don't consider the uncertainty and randomness of landslide. Taking the Wanglingyan Landslide in Xingshan County in Three Gorges area as an example, we combine the traditional analysis method with Monte - Carlo method, considering the uncertainty of density of soil, cohesion, internal friction angle, and obtain the reliability index. The obtained results accord with practical one with better effect.

Key words: Monte - Carlo; unbalanced thrust force method; reliability index; landslide

(上接第 19 页)

Research on main engineering geological problems of dangerous reservoirs and survey

LUAN Yuesheng, WANG Zhou'e, YI Duliangzi

(Changjiang Reconnaissance Technology Research Institute, Ministry of Water Resources, Wuhan 430011, China)

Abstract: Many reservoirs constructed in early age of new China are dangerous due to several causes such as low construction standard, lack of unified standard, engineering aging, and poor maintenance for many years. In view of above problems, the causes for formation of dangerous reservoirs are analyzed; the main types of the dangerous reservoirs, and the geological factors including seepage and landslides of dam, foundation subsidence, seismic instability etc. are presented. The working principles and stages of investigation of dangerous reservoirs are also presented, and the items should be noted in the investigation are summarized.

Key words: dangerous reservoir; types of dangerous reservoir; engineering geology; survey of dangerous reservoirs