

Rosenblueth 法在边坡可靠度分析中的应用

李 亮¹, 褚雪松¹, 郑榕明²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 香港理工大学土木与结构工程系, 香港)

摘要 :针对在确定具有最小可靠度指标的滑动面时蒙特卡罗法耗时长的问题,通过两个典型土坡,采用简化 Bishop 法计算滑动面的抗滑稳定安全系数从而构建了边坡可靠度分析的功能函数,利用圆弧构建潜在滑动面,利用 Rosenblueth 法计算每个潜在滑动面的可靠度指标,采用和声搜索算法搜索潜在滑动面的变化以寻求最小可靠度指标滑动面,并与常规极限平衡方法得到的最小安全系数对应的滑动面进行了比较。结果表明:简单均质土坡临界滑动面与最小可靠度指标滑动面基本重合,非均质土坡最小可靠度指标滑动面与临界滑动面相差较大,可靠度指标相差也较大,在具体应用时建议采用 Rosenblueth 法进行最小可靠度指标滑动面的确定。

关键词 :边坡稳定;可靠度分析;极限平衡法;Rosenblueth 法

中图分类号 :TU457 **文献标志码** :A **文章编号** :1006-7647(2012)03-0053-03

Application of Rosenblueth method in reliability analysis of soil slopes // LI Liang¹, CHU Xue-song¹, CHENG Yung-ming²
(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract :The Monte-Carlo method is time consuming when it is used to find the slip surface with the minimum value of the reliability index. This paper aims to compare the slip surfaces calculated with the minimum factor of safety (namely the critical slip surface) and minimum value of the reliability index (namely the critical reliability slip surface). A simplified Bishop method was adopted to calculate the safety factor for a given circular slip surface and to define the ultimate state function. The Rosenblueth method was used to determine the reliability index for the potential slip surface and the harmony search algorithm was used to alter the potential slip surface to find the critical reliability slip surface. The results show that the critical slip surface is identical to the critical reliability slip surface for homogeneous soil slopes, and the critical slip surface is considerably different from the critical reliability slip surface for the complicated soil slopes. The Rosenblueth method is recommended within the determination of the critical reliability of the slip surface.

Key words :slope stability; reliability analysis; limit equilibrium method; Rosenblueth method

岩土工程中的边坡稳定性分析问题是工程设计人员经常遇到的问题之一。目前,在工程设计中常用的边坡稳定分析方法为定值分析法,该法将包含的各种因素(譬如土体的黏聚力、内摩擦角等强度参数、地下水位等)作为确定性数值,进而确定唯一的滑动面抗滑稳定安全系数(以下简称为安全系数)。工程上常采用极限平衡法(Morgenstern-Price 法^[1]、不平衡推力法^[2-4])、临界滑动场方法^[5-7]来计算边坡的整体稳定性。定值分析法是经过长期工程实践证明的一种有效设计方法,但该方法最大的缺点是没有考虑实际存在的不确定性(包括荷载效应以及抗力等不确定性)的影响。由于土的矿物组成、内部结

构及状态等均随空间变化而有所不同,土的参数具有一定的随机性、变异性,因此,定值分析法得出的安全系数并不能客观地反映边坡的真实安全程度。可靠度理论是建立在土体具有的抗力大于荷载的概率基础上进行设计和校核的,因此,采用可靠度理论进行边坡稳定性分析更符合客观实际。

目前常用的可靠性分析方法主要有一次二阶矩法、Rosenblueth 法、蒙特卡罗法等^[8-14]。蒙特卡罗法是一种依据统计抽样理论进行求解问题的方法,其应用非常广泛,但是该法包含了数目极大的随机抽样;一次二阶矩法则需要通过多次迭代才能确定一个滑动面的可靠度指标,这在具有最小可靠度指标滑

动面(以下简称临界可靠度滑动面)的搜索中尤为不现实,就笔者经验而言,利用蒙特卡罗法和搜索算法确定临界可靠度滑动面需要的时间大约为2d以上。本文利用 Rosenblueth 法点估计的优势,结合和声搜索算法对两个典型土坡的可靠性进行比较分析。

1 安全系数计算方法

在进行可靠度分析时,首先要确定极限状态函数或者称功能函数,在边坡可靠性分析时通常结合极限平衡方法进行,即将功能函数 g 定义为安全系数 F_s 与1之差, $g = F_s - 1$ 。针对圆弧滑动面提出的简化 Bishop 法只考虑条间水平力的作用,利用滑动土体的整体力矩平衡条件推导出安全系数 F_s 的计算公式(式(1)式(2)),典型(第 i)土条所受的作用力如图1所示。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\alpha_i}} [(W_i - U_i \cos \alpha_i) \tan \varphi_i + C_i \cos \alpha_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + Q_i R_d / R} \tag{1}$$

$$m_{\alpha_i} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i}{F_s} \sin \alpha_i \tag{2}$$

式中及图1中: F_s 为潜在滑动面的抗滑稳定安全系数; W_i 为土条*i*重力; C_i 为土条底部总黏聚力; α_i 为第*i*土条底部的倾角; φ_i 为第*i*土条底部土体的内摩擦角; Q_i 为水平向的外荷载; N_i, U_i 为条底的有效法向力和孔隙水压力; S_i 为条底剪切力; R 为圆弧滑动面的半径; R_d 为 Q_i 对圆弧滑动面圆心的力臂; E_{i-1} 为第*i*-1条块和第*i*条块之间的条间法向力; E_i 为第*i*条块和第*i*+1条块间的条间法向力; n 为土条数(x_c, y_c)为圆弧滑动面的圆心坐标。

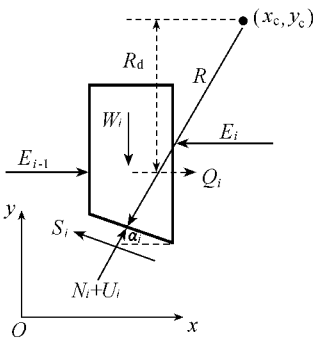


图1 第*i*土条受力分析

2 Rosenblueth 法

Rosenblueth 在 1975 提出了通过点估计的方式来计算岩土工程中的可靠度指标 β ,文献[15]对该法在岩土工程中的应用进行了探讨。本文以两个独

立的随机变量为例介绍其点估计的思想。定义功能函数 $g(x_c, x_\varphi) = F_s - 1$,其中 F_s 由式(1)式(2)简单迭代计算得到;功能函数的一、二阶矩 $E(g)$ 和 $E(g^2)$ 的计算公式为

$$E(g) = \frac{1}{4} g_{++} + \frac{1}{4} g_{+-} + \frac{1}{4} g_{-+} + \frac{1}{4} g_{--} \tag{3}$$

$$E(g^2) = \frac{1}{4} g_{++}^2 + \frac{1}{4} g_{+-}^2 + \frac{1}{4} g_{-+}^2 + \frac{1}{4} g_{--}^2 \tag{4}$$

其中:

$$\begin{aligned} g_{++} &= g(\mu_{x_c} + \sigma_{x_c}, \mu_{x_\varphi} + \sigma_{x_\varphi}) \\ g_{+-} &= g(\mu_{x_c} + \sigma_{x_c}, \mu_{x_\varphi} - \sigma_{x_\varphi}) \\ g_{-+} &= g(\mu_{x_c} - \sigma_{x_c}, \mu_{x_\varphi} + \sigma_{x_\varphi}) \\ g_{--} &= g(\mu_{x_c} - \sigma_{x_c}, \mu_{x_\varphi} - \sigma_{x_\varphi}) \end{aligned}$$

式中; μ_{x_c}, σ_{x_c} 分别为第一个随机变量的均值和标准差; $\mu_{x_\varphi}, \sigma_{x_\varphi}$ 分别为第二个随机变量的均值和标准差。滑动面的可靠度指标 $\beta = \frac{E(g)}{\sqrt{E(g^2) - (E(g))^2}}$,对于两个随机变量的问题而言,Rosenblueth 法只需要4次抽样(4次安全系数计算)即可得到可靠度指标,对于随机变量为*n*个的一般问题,其求解过程可参见文献[8]本文不再赘述。

3 搜索算法

在定值分析方法中,边坡稳定分析时往往需要给出临界滑动面及其对应的安全系数,边坡可靠度分析时,也需要给出最小可靠度指标及其对应的滑动面,即临界可靠度滑动面。在临界可靠度滑动面搜索过程中,需要给出:①潜在滑动面的构造方式;②变化潜在滑动面寻求临界可靠度滑动面的策略,即搜索算法。关于潜在滑动面的构造方法,为简单起见,本文假设滑动面为圆弧滑动面,仅需 x_c, y_c 和 R 3个变量即可确定一条圆弧滑动面,详细策略不再赘述。关于搜索算法,目前算法种类繁多,本文选用简单易行的和声搜索算法[16],和声搜索算法在边坡稳定分析中的具体应用可参见文献[17]。

4 算例分析

首先考虑一均质边坡,其剖面如图2所示,土体的强度参数中密度 ρ 取为 2.0 t/m^3 ,不考虑其随机性,仅考虑黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的随机性,黏聚力 c 的均值 μ_c 与标准差 σ_c 分别为 3.0 kPa 与 0.3 kPa ,类似地,内摩擦角 φ 的均值 μ_φ 与标准差 σ_φ 分别为 19.60° 与 1.72° 。

图2所示的两条圆弧滑动面滑弧1和滑弧2,利用简化 Bishop 法计算得到的安全系数为1.309和1.170,分别利用蒙特卡罗法和 Rosenblueth 法计算其

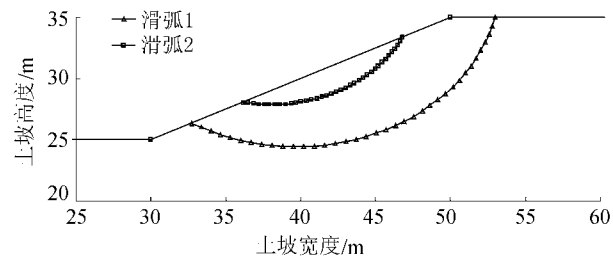


图2 土坡剖面及给定的滑动面

可靠度指标,其中蒙特卡罗法抽样次数为20 000次,对于滑弧1两种方法计算的结果分别为2.48和2.75,对于滑弧2分别为1.52和1.75,可见Rosenblueth法的结果较之蒙特卡罗法偏大,误差10%~15%左右。

目前在边坡可靠性分析时通常采用定值分析法得到的临界滑动面作为临界可靠度滑动面,其相应的可靠度指标可用蒙特卡罗法或者其他方法得到,这种近似处理方法得到了较广泛的应用。本文对临界滑动面和临界可靠度滑动面进行比较。利用和声搜索算法与Rosenblueth法得到的临界可靠度滑动面如图3所示。

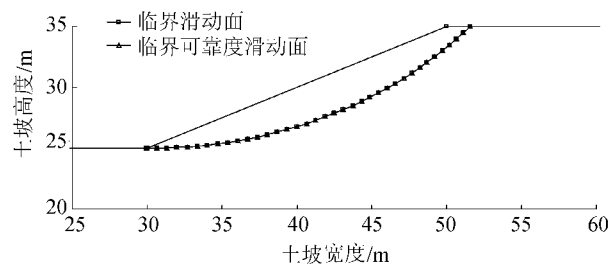


图3 临界可靠度滑动面与临界滑动面比较

由图3可以看出,对于上述简单的均质土坡而言,临界滑动面与临界可靠度滑动面完全重合,为了验证强度参数变异对结果的影响,变化 $\sigma_c = 0.5 \text{ kPa}$, $\sigma_\varphi = 2.72^\circ$,再次进行了比较计算,结果发现临界滑动面与临界可靠度滑动面仍然重合,验证了均质土坡的临界滑动面与临界可靠度滑动面重合。

再给出ACAD(Australia association for computer aided design)中一非均质土坡,其计算参数见表1,土坡剖面如图4所示。

表1 非均质土坡计算参数

土层	$\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa		$\varphi/(\circ)$	
		μ_c	σ_c	μ_φ	σ_φ
1	1.95	0.0	0.0	38.00	5.71
2	1.95	5.3	0.7	23.00	2.86
3	1.95	7.2	0.2	20.00	2.86

对于图4所示的非均质土坡,共有3个土层,由表1可知共有5个随机变量,利用和声搜索算法和Rosenblueth法进行了临界可靠度滑动面与临界滑动

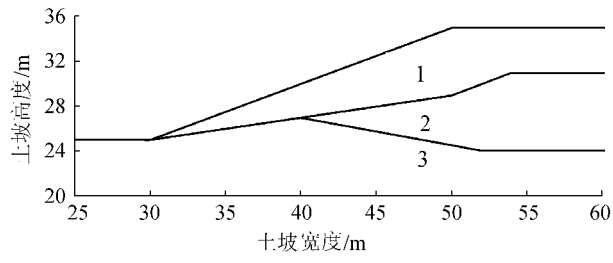


图4 非均质土坡剖面

面的搜索,结果见图5。由图5可见,临界滑动面经过了3个土层,定值分析方法(简化Bishop法)得到的安全系数为1.368,Rosenblueth法得到的可靠度指标为2.93,然而临界可靠度滑动面的位置与临界滑动面发生较大变化,前者均从第一个土层经过,相对应的可靠度指标为1.96,可见两者的区别较大。鉴于蒙特卡罗法的精确性,利用该法分别对临界滑动面与临界可靠度滑动面进行了可靠度指标的计算,抽样次数取为100 000次,得到的结果分别为2.77和1.91,由此可见对于临界可靠度滑动面的可靠度指标来说,蒙特卡罗法与Rosenblueth法给出了基本一致的结果。

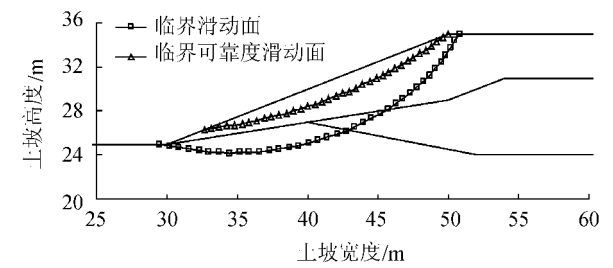


图5 临界可靠度滑动面与临界滑动面比较

5 结 语

针对某均质边坡以及非均质土坡,采用简化Bishop法计算安全系数,利用Rosenblueth法计算滑动面的可靠度指标,对临界滑动面与临界可靠度滑动面进行了比较,结果发现:对于简单的均质土坡,临界滑动面与临界可靠度滑动面基本重合,而对于非均质土坡,临界滑动面与临界可靠度滑动面相差较大,可靠度指标相差也较大,在具体应用时建议采用Rosenblueth法确定临界可靠度滑动面。

参考文献:

[1] CHENG Yung-ming, LI Liang, CHI Shi-chun, et al. Particle swarm optimization algorithm for the location of the critical non-circular failure surface in two dimensional slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(2): 92-103.

(下转第66页)

电网装机利用小时数为 4033.3 h。从统计计算结果可见,广西电网评价指标中只有计划报表合格率稍差,其他几个指标相对较好,统计指标中水能利用提高率为 3.00%,其全网实发电量 2286.5 万 MW·h,考核电量 2211 万 MW·h,较好地反映了广西电网的 2010 年的调度水平,实现了节水增发电的目的,因为广西电网中电站的调节性能普遍为日调节,发生弃水造成电量损失的情况在所难免。

4 结 语

依据《规范》所开发的广西电网水电经济运行评价和统计系统,包括针对水电厂的 3 个评价指标、7 个统计指标和针对电网的 4 个评价指标、6 个统计指标。对广西电网水电厂 2010 年运行情况进行评价,统计结果表明,该评价和统计系统对全面、客观评价水电优化调度和经济运行工作业绩是有效的^[9]。在水电厂指标中通过对评价指标的计算,可按照计算结果对各个水电厂的运行管理水平进行评价,给水电厂一个定量的评级,其他统计指标的结果可为考核水电厂提供参考依据。当然指标的高低不仅仅和水库调度人员的调度工作成效有关,也和水电厂的固有属性有关,这有待进一步探讨。电网的各个指标则反映了整个电网的运行情况,可给电网的上级调度机构提供考核依据^[10]。

参考文献:

[1] 赵玉军.厂网分开后水电经济运行管理办法探索[J].甘肃电力技术,2006(1):2006(1)5-7.

[2] 郎倩.水电类企业中经济增加值考核思考[J].现代商贸工业,2010,22(12):137-137.

[3] 袁世斌,常黎.多重动态规划法在柘林水电站安全及经济运行中的应用[J].水利水电科技进展,2004,24(5):48-51.

[4] 白小勇,冉本银,李广辉,等.黄河上游梯级水电站群节水增发电考核[J].水电自动化与大坝监测,2007,31(1):25-28.

[5] 孙德锁,刘永前,史健,等.水电站节水增发电考核方法研究[J].中国电力教育:上,2007(增刊2):189-191.

[6] 燕爱玲,黄强,刘招,等.刘家峡水电厂空耗水量的计算及考核[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):10-13.

[7] 薛海平.对修订小水电上网力率考核标准的分析[J].陕西水利,2011(2):131-133.

[8] 邓华槟.有小水电上网线路的线损考核[J].农村电气化,2005(12):46-36.

[9] 宋继革.基于水利可持续发展的水利经济运行机制研究[J].水利经济,2007,25(3):67-68.

[10] 曹广晶,蔡治国.水电站经济运行考核评估理论方法及其改进的初步研究[J].中国三峡建设,2008(11):16-23.

(收稿日期 2011-09-13 编辑 熊水斌)

(上接第 55 页)

[2] 时卫民,郑颖人,唐伯明,等.土坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J].岩土工程学报,2004,26(3):313-317.

[3] LI Liang, CHU Xue-song. An improved particle swarm optimization algorithm with harmony strategy for the location of critical slip surface of slopes[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(2):357-364.

[4] LI Liang, YU Guang-ming, CHEN ZU-yu, et al. Discontinuous flying particle swarm optimization algorithm and its application to slope stability analysis[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(4):852-856.

[5] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(Ⅰ):理论基础[J].水利水电科技进展,2000,20(3):63-66.

[6] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(Ⅱ):数值模拟[J].水利水电科技进展,2000,20(4):65-68.

[7] 朱大勇,姜弘道.边坡临界滑动场方法与应用(Ⅲ):工程应用[J].水利水电科技进展,2000,20(6):64-67.

[8] 陈祖煜.土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003:372-373.

[9] XUE Jian-feng, GAVIN K. Simultaneous determination of critical slip surface and reliability index for slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133

(7):878-886.

[10] HONG H P, ROH G. Reliability evaluation of earth slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(12):1700-1705.

[11] CHING Jian-ye, PHOON K K, HU Yu-gang. Efficient evaluation of reliability for slopes with circular slip surfaces using importance sampling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(6):768-777.

[12] AU S K, CAO Z J, WANG Yu. Implementing advanced Monte Carlo simulation under spreadsheet environmen[J]. Structural Safety, 2010, 32(5):281-292.

[13] 吴振君,王水林,汤华,等.边坡可靠度分析的一种新的优化求解方法[J].岩土力学,2010,31(3):713-718.

[14] 吴振君,王水林,葛修润.LHS方法在边坡可靠度分析中的应用[J].岩土力学,2010,31(4):1047-1054.

[15] ROSENBLUETH E. Two-point estimates in probability[J]. Applied Mathematical Modelling, 1981, 5(10):329-335.

[16] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. Harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2):60-68.

[17] 李亮,于广明,褚雪松.边坡临界滑动场方法的优化算法实现[J].岩土工程学报,2010,32(6):827-831

(收稿日期 2011-10-31 编辑 熊水斌)