

边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析

谭晓慧¹, 王建国², 胡晓军³, 毕卫华¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥学院建筑工程系, 安徽 合肥 230009)

摘要: 边坡工程中同时存模糊性与随机性, 应进行边坡稳定的模糊随机可靠度分析。在边坡稳定的随机有限元可靠度分析的基础上, 提出了边坡稳定的模糊随机有限元可靠度的敏感性分析方法, 它可以利用随机有限元分析的相应程序, 能同时考虑参数的模糊性与随机性, 能同时求得边坡的模糊可靠指标及模糊滑面位置。该方法利用了随机有限元敏感性分析的结果, 在模糊截集上只需进行两次随机有限元分析即可求得该截集上可靠指标的极值, 因此计算效率较高。算例分析表明: 随着参数变异系数的增加, 边坡的模糊可靠指标明显减小; 对于均质土坡, 模糊滑面的位置相对集中, 形成模糊滑带; 对于非均质土坡, 模糊滑面的位置受边坡破坏机理的影响, 参数的微小变异可能导致滑面位置发生较大变化。

关键词: 边坡稳定; 模糊; 随机; 有限元; 可靠度分析

中图分类号: TU31

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-0991-06

作者简介: 谭晓慧(1971-), 女, 安徽宣城人, 副教授, 博士, 从事岩土力学的教学与研究。E-mail: tantan9666@126.com。

Fuzzy random finite element reliability analysis of slope stability

TAN Xiao-hui¹, WANG Jian-guo², HU Xiao-jun³, BI Wei-hua¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Architecture Engineering, Hefei University, Hefei 230009, China)

Abstract: It is necessary to carry out fuzzy random reliability analysis of slopes because there are fuzziness and randomness simultaneously. Based on the stochastic finite element reliability analysis of slope stability, a sensitivity analysis method of fuzzy random finite element reliability analysis of slope stability is presented. It can make use of the existing codes of stochastic finite element reliability analysis, can consider fuzziness and randomness of parameters at the same time, and can get both the possible distribution of fuzzy reliability index and the positions of fuzzy slip surfaces. Since the method is based on the results of sensitivity analysis of stochastic finite element, the maximum and minimum values of the reliability index on a certain fuzzy cut can be obtained by running the stochastic finite element reliability analysis only twice, which means that this method is very efficient. It is demonstrated by two examples that the reliability index will decrease when the coefficients of variation increase. For a uniform slope, the positions of fuzzy slip surfaces are relatively concentrated. Therefore, there is a fuzzy slip zone in the uniform slope. However, for a two-layer nonuniform slope, the positions of fuzzy slip surfaces are affected by the failure mechanism, and the small variation will probably induce a relatively large change of the positions of slip surfaces.

Key words: slope stability; fuzziness; randomness; finite element method; reliability analysis

0 引言

边坡的稳定性分析是岩土工程中十分重要的研究课题之一。由于有限元法能考虑岩土体的非线性本构关系、各种复杂的边界条件及施工过程等因素的影响, 可靠度分析能考虑边坡工程中存在的不确定性, 因此, 应进行边坡稳定的有限元可靠度分析。

不确定性有很多种, 其中最主要的两种不确定性是随机性和模糊性, 它们是两种完全不同的因素, 随机性是因果关系不充分所致, 表现为因果率的缺失所

造成的结果不可预知性, 而模糊性是指事物的差异在中介过渡中所呈现出的亦此亦彼性, 表现为排中律的缺陷造成的事物边界的不清晰^[1]。

人们对于边坡工程中的随机性已不再陌生, 相应的研究也较多。如: Mellah 等^[2]、刘宁^[3]分别基于滑

基金项目: 国家自然科学基金项目(50748033); 安徽省教育厅青年基金项目(2005jq1021)

收稿日期: 2008-06-05

面应力分析法对边坡进行了弹塑性非线性随机有限元可靠度分析,得到了剖面上各点位移均值、应力均值及可靠指标的等值线。Griffiths 等^[4]考虑土体的空间变异性,利用强度折减法及蒙特卡罗模拟法求解了边坡整体的可靠指标及破坏概率。谭晓慧等^[5-8]分别从基于滑面应力及基于强度折减法这两方面进行了边坡的随机有限元可靠度分析,得出了剖面上各点的可靠指标、边坡整体可靠指标及相应的滑面位置。

由于边坡工程中模糊性与随机性是同时存在的,因此,应同时进行边坡的模糊随机可靠度分析。蒋中明等^[9]在边坡的稳定性分析中考虑了模糊性,求解了边坡剖面各点的模糊安全系数,但没有考虑随机性。李胡生等^[10]、王亚军等^[11]采用模糊概率测度的方法,考虑失效状态的模糊性,分别求解了堤坝边坡剖面各点的模糊可靠指标及陡峭岩石边坡的模糊可靠指标。为了考虑参数的模糊性,Giasi 等^[12]假设土工参数为梯形模糊数,采用 α 截集上的凸集法及一阶可靠性方法进行了边坡的模糊随机可靠度分析。该方法的优点是在边坡的模糊随机有限元可靠度分析中可利用相应的随机有限元可靠度分析程序;但缺点是采用凸集法进行模糊随机分析时,需在每个 α 截集上进行 2^n 次随机可靠度分析,因此计算量随着变量数 n 的增加而急剧增加。为了减少计算工作量,提高计算效率,本文拟进行参数的敏感性分析,并根据敏感性分析结果在 α 截集上选取模糊参数的两个极值组合,再在这两个极值组合进行模糊随机有限元可靠度分析。

1 随机有限元可靠度分析

1.1 非线性随机有限元可靠度分析的基本原理

随机有限元分析的实质是在有限元分析的基础上,考虑各种计算参数的随机性,计算由于参数的变异性而引起的响应变异性,与定值法有限元分析的主要不同之处在于它在非线性有限元的基础上加入了计算位移、应力对随机变量的偏导数^[13]。计算出偏导数之后,即可根据极限状态函数和可靠度理论求解单元及边坡潜在滑面的可靠指标。

在进行有限元计算时,假设边坡岩土体为 Mohr-Coulomb 理想弹塑性材料,其屈服函数形式为^[14]

$$F = \sigma_m \sin \varphi + \sqrt{J_2} (\cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) - c \cos \varphi, \quad (1)$$

式中, σ_m , J_2 及 θ_σ 为应力的 3 个不变量, c , φ 为黏聚力及内摩擦角。

弹塑性非线性有限元计算采用增量初应力法,位移、应力对随机变量导数的计算采用偏微分法,具体的计算过程及相关公式参见文献[5~8]。

1.2 一阶可靠度分析方法

可靠度分析方法很多,如一阶可靠度分析方法、蒙特卡罗模拟法、响应面法等,其中最常用的是是一阶可靠度方法,它分为中心点法和验算点法^[15]。

对于正态基本变量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 当采用验算点法进行可靠度分析时,可靠指标的计算需要按下述方程组进行迭代求解:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x &= -\frac{\rho_x \sigma_x \nabla g(x^*)}{[\nabla g(x^*)^T C_x \nabla g(x^*)]^{1/2}}, \\ \beta &= \frac{g(x^*) - \nabla g(x^*)^T (x^* - \mu_x)}{[\nabla g(x^*)^T C_x \nabla g(x^*)]^{1/2}}, \\ x^* &= \mu_x + \sigma_x \alpha_x \beta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 β 为可靠指标; $\mu_x = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})^T$ 及 $\alpha_x = (\alpha_{x_1}, \alpha_{x_2}, \dots, \alpha_{x_n})^T$ 分别为基本变量 X 的均值向量及方向余弦向量;上标 T 表示对矩阵进行转置; $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 表示基本变量 X 在迭代过程中的实现; σ_x , ρ_x , C_x 分别表示基本变量 X 的均方差矩阵、相关系数矩阵、协方差矩阵; $g(x^*)$, $\nabla g(x^*)$ 分别表示在点 x^* 处的功能函数值及其对基本变量的梯度向量。

由式(2)在进行可靠度分析时,必须先确定极限状态函数的形式。设边坡破坏为平面应变情况下的剪切破坏,应力以受拉为正,则对于任一滑弧,相应的极限状态函数可取为^[6]

$$Z = g(X) = \sum_{i=1}^{n_e} Z_i \Delta l_i, \quad (3a)$$

式中, n_e 为弧上的单元个数, Δl_i , Z_i 分别为第 i 单元切割的滑弧长度及极限状态函数,

$$Z_i = g_i(X) = -\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right) \tan \varphi_i + c_i - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta\right), \quad (3b)$$

其中, σ_x , σ_y , τ_{xy} 及 θ 分别为应力分量及滑面与水平面的夹角。

极限状态函数确定之后,即可采用一阶可靠度分析方法来求解整个边坡的最小可靠指标,这一求解过程包括可靠指标的迭代求解循环、非线性随机有限元迭代求解循环、滑面最小可靠指标的搜索循环等过程,其详细迭代流程可参见文献[5]。

2 模糊随机有限元可靠度分析

2.1 参数的模糊随机处理方法

由于模糊随机变量理论能同时考虑参数的模糊性与随机性,本文设基本变量为模糊随机变量。有关模糊随机变量的定义可参见文献[16~17]。与普通随机变量的数字特征相对应,模糊随机变量也可用均值、

均方差等数字特征来描述。当前对于模糊随机变量特征值的统计方法尚未形成共识: 文献[10]认为模糊随机变量的均值、均方差都为定值; 文献[16]认为模糊随机变量的均值是模糊数而其均方差是定值; 文献[17]认为模糊随机变量的均值和均方差都是模糊数。由于均方差的变异性对可靠指标的影响远小于均值变异性的影响^[7], 因此, 本文只取模糊随机变量的均值为模糊数。图1所示为三角型模糊数。图中, $\mu(X_i)$ 为模糊数 X_i 的隶属度, X_{iN} 为 X_i 的中值, X_{iL}^α , X_{iR}^α 分别为 α 截集上 X_i 的左右两个端点值, $\alpha=0$ 时的 X_{iL}^α , X_{iR}^α 可简记为 X_{iL} , X_{iR} 。对于对称模糊数, 可取

$$\begin{cases} X_{iL} = X_{iN}(1 - f\delta_{X_i}), \\ X_{iR} = X_{iN}(1 + f\delta_{X_i}). \end{cases} \quad (4)$$

式中, f 为表示参数模糊性的系数, δ_{X_i} 为参数 X_i 的变异系数。

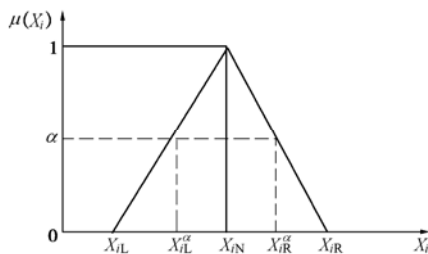


图1 三角型模糊数的隶属函数

Fig. 1 Membership function of triangular fuzzy number

2.2 模糊随机有限元可靠度分析的凸集法

采用凸集法进行模糊随机可靠度分析的思路^[18]:

(1) 对模糊数 X_i 取 α 截集($i=1,2,\dots,n$), 得到 α 截集上 X_i 的区间表示 $[X_{iL}^\alpha, X_{iR}^\alpha]$ 。

(2) 在 α 截集上任取 X_i 的某一端点值, 可得向量 X 的一种组合 C_{aj} 。在此变量组合下利用随机可靠度分析程序进行随机可靠度分析, 得可靠指标 $\beta(C_{aj})$ 。对于 n 个变量, 这种变量的二元组合共有 2^n 个, 即 $j=1,2,\dots,2^n$ 。因此, 在 α 截集上可得 2^n 个可靠指标 $\beta(C_{aj})$ 。

(3) 根据扩展原理, 在 α 截集上可靠指标的极小值 β_L^α 、极大值 β_R^α 可为

$$[\beta_L^\alpha, \beta_R^\alpha] = [\min_{\lambda,j} (\beta(C_{\lambda,j})), \max_{\lambda,j} (\beta(C_{\lambda,j}))] \quad (\lambda \geq \alpha; j=1,\dots,2^n) \quad (5)$$

(4) 对于其它 α 截集, 重复步骤 (1) ~ (3)。

由以上步骤可知: 若 α 截集的个数为 m , 则共需进行 $(m-1)2^n + 1$ 次随机有限元计算, 即模糊随机分析的计算量随着变量个数 n 的增加而呈指数量级增加。由于随机有限元分析本身的计算量就较大, 因此, 适当缩减随机有限元的计算次数就显得非常迫切。

2.3 模糊随机有限元可靠度分析的敏感性分析法

为了提高模糊随机有限元可靠度分析的效率, 本文提出边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析的敏感性分析法。

在随机可靠度分析中进行敏感性分析的主要目的是分析参数的敏感性, 找出可靠指标的主要影响因素, 从而有针对性地减少可靠度分析中的参数个数, 提高随机可靠度分析的计算效率。文献[7]推导了可靠指标对随机变量的敏感性分析公式:

$$\frac{\partial \beta}{\partial X_i} \sigma_{X_i} = \frac{1}{[\nabla g(x^*)^T C_X \nabla g(x^*)]^{1/2}} \frac{\partial g(x^*)}{\partial X_i} \sigma_{X_i} \quad (6)$$

由式 (6) 即可得出变量 X_i 对可靠指标的相对影响的大小, 从而找出主要的影响因素。事实上, 由式 (6) 还可得出 $\frac{\partial \beta}{\partial X_i}$ 的符号, 并由此判断 X_i 是抗力项还是荷载项: 当 $\frac{\partial \beta}{\partial X_i} > 0$ 时, 表示 X_i 是抗力项, 即 X_i 的增加

能提高结构可靠度; 当 $\frac{\partial \beta}{\partial X_i} < 0$ 时, 表示 X_i 是荷载项, 即 X_i 的增加将减少结构可靠度^[19]。

能提高结构可靠度; 当 $\frac{\partial \beta}{\partial X_i} < 0$ 时, 表示 X_i 是荷载项, 即 X_i 的增加将减少结构可靠度^[19]。

结合上述分析, 本文提出的模糊随机有限元可靠度的敏感性分析方法如下:

(1) 在参数的中值处进行随机有限元敏感性分析, 判断各基本变量是抗力项还是荷载项。

(2) 对模糊数 X_i 取 α 截集($i=1,2,\dots,n$), 得到 α 截集上 X_i 的区间表示 $[X_{iL}^\alpha, X_{iR}^\alpha]$ 。

(3) 在 α 截集上: 若 X_i 是抗力项取 X_{iR}^α , 若 X_i 是荷载项取 X_{iL}^α , 此时将会得到向量 X 的一种组合 C_{a1} , 它对应于 α 截集上可靠指标的极大值 β_R^α ; 反之, 若 X_i 是抗力项取 X_{iL}^α , 若 X_i 是荷载项取 X_{iR}^α , 此时将会得到向量 X 的另一种组合 C_{a2} , 它对应于 α 截集上可靠指标的极小值 β_L^α 。在基本变量的这两种极端组合情况下, 分别进行随机有限元可靠度分析, 求得 β_R^α 及 β_L^α 。

(4) 对于其它 α 截集, 重复步骤 (2) ~ (3)。

综上所述, 模糊随机有限元可靠度的敏感性分析法与凸集法的总体过程类似, 区别主要是敏感性分析法在同一 α 截集上用 X 的 2 种极端组合来代替凸集法的 2^n 次组合, 因而计算效率大为提高。

3 算例分析

(1) 例1

某坡比为 1:2 的均质土坡, 其黏聚力、内摩擦角、膨胀角、重度、弹性模量、泊松比分别为 $c=15$ kPa, $\varphi=20^\circ$, $\psi=0^\circ$, $\gamma=18$ kN/m³, $E=10^5$ kPa, $\nu=0.3$ 。设 c , φ 为不相关的正态模糊随机变量, 其均值为三角型模糊数, $f=1$ 。

(2) 例 2

某边坡由二层土组成，其几何参数参见图 2。各层土的材料参数见表 1。取土层 1, 2 的黏聚力为不相关的正态模糊随机变量，其均值为三角型模糊数， $f=1$ 。

对以上两个算例分别用凸集法及敏感性分析法进行了边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析。有限元计算采用 8 节点四边形网格，二者的有限元网格剖分结果见图 2，约束条件是底边界固定，左右边界水平约束。计算时，设两个参数的变异系数相同，其变化范围为 0.1~0.3；取截集水平分别为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0。图 3, 4 表示可靠指标的模糊分布，图 5, 6 表示模糊滑面的位置。

表 1 土层参数表(例 2)

Table 1 Soil parameters (case 2)

土层号	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	ψ /($^{\circ}$)	γ /(kN $\cdot$ m $^{-3}$)	E /kPa	ν
1(上层)	50.0	0	0	20.0	10^5	0.3
2(下层)	73.1	0	0	20.0	10^5	0.3

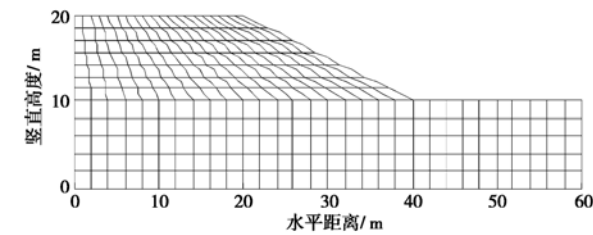


图 2 边坡剖面的网格剖分图

Fig. 2 Mesh of slope section

3.1 模糊可靠指标

图 3 中，从右到左的 3 个峰值曲线分别表示变异系数为 $\delta_c=\delta_\varphi=0.1$ 、 $\delta_c=\delta_\varphi=0.2$ 、 $\delta_c=\delta_\varphi=0.3$ 时的模糊可靠指标。图 4 中，从右到左的 3 个峰值曲线分别表示变异系数为 $\delta_{c1}=\delta_{c2}=0.1$ 、 $\delta_{c1}=\delta_{c2}=0.2$ 、 $\delta_{c1}=\delta_{c2}=0.3$ 时的模糊可靠指标。由图 3, 4 可知：在各种变异系数组合情况下，对于均质土坡（例 1），由凸集法及敏感性分析法计算所得的可靠指标的模糊分布规律完全一致；对于非均质土坡（例 2），由凸集法及敏感性分析法计算所得的可靠指标的模糊分布规律亦非常接近。这表明用敏感性分析法进行边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析是可行的。由图 3, 4 还可以看出：随着变异系数的增加，两个算例的模糊可靠指标值均明显减小，这表明参数的变异性对可靠指标有较大的影响。

3.2 滑面位置

由边坡稳定的随机可靠度分析可以得到临界滑面的位置，此滑面是边坡中可靠指标最小的滑面。当既考虑参数的模糊性又考虑参数的随机性时，边坡临界滑动面的位置将不再是一个滑面，而是由若干个可

能滑面组成的一组滑面。

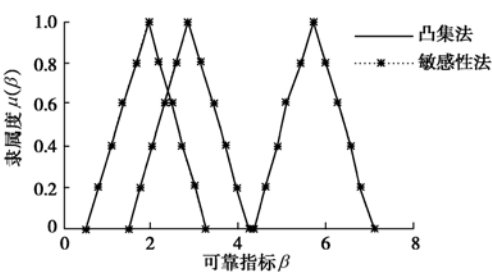


图 3 可靠指标的模糊分布(例 1)

Fig. 3 Possibility distribution of reliability index (case 1)

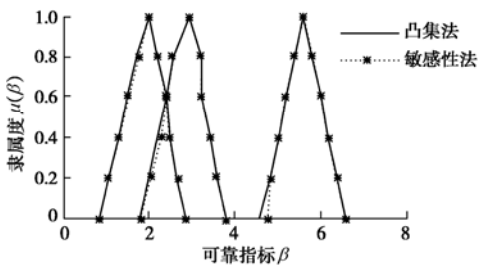


图 4 可靠指标的模糊分布(例 2)

Fig. 4 Possibility distribution of reliability index (case 2)

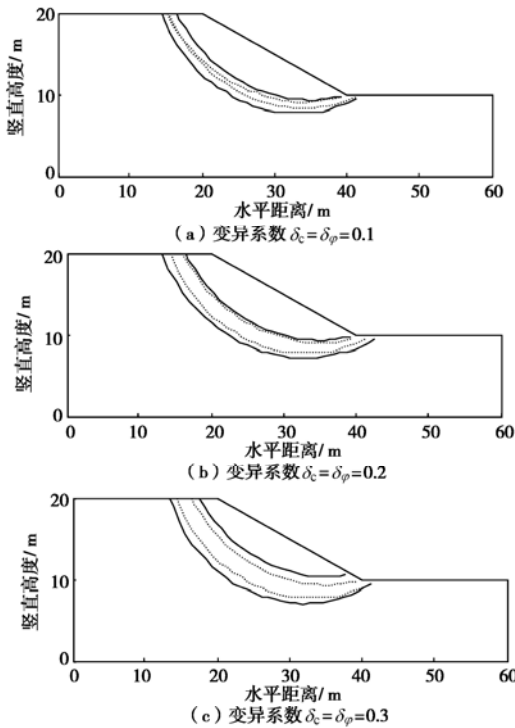


图 5 模糊滑面的位置(例 1)

Fig. 5 Positions of fuzzy critical slip surfaces (case 1)

图 5 是例 1 的计算结果。对于此均质土坡，若干个可能的模糊滑面位置相对集中，形成了一个滑带。为了清晰起见，图形中只绘制了相应变异系数情况下滑带最外侧的两个滑面，而略去了这两个边界滑面中的若干滑面。图中两条实线表示凸集法的滑带范围，虚线表示敏感性分析法的滑带范围。可见在各种变异系数组合情况下，敏感性分析法的滑带范围均比凸集

法的滑带范围略有减小; 当参数的变异系数增加时, 二种方法的滑带范围也相应增加。

图6是例2的计算结果。对于此二层土非均质土坡, 二种方法的滑面位置相同, 它们都集中于图中的两条实曲线处, 在其它位置处没有临界滑面; 而且, 在三种变异系数组合情况下 ($\delta_{c1}=\delta_{c2}=0.1$, $\delta_{c1}=\delta_{c2}=0.2$, $\delta_{c1}=\delta_{c2}=0.3$), 滑面位置仍集中于这两个滑面。这是因为对于此二层土坡, 当不同土层的参数发生微小变异时, 边坡的滑动位置将从一层土中移至另一层土中, 边坡的破坏机理发生了变化, 因而滑面位置也发生了较大的变化。而对于均质土坡, 在各种参数情况下, 滑面位置不会发生突变, 也即滑面只会随着基本变量的变化而有微小的变化, 故形成了集中的模糊滑带。

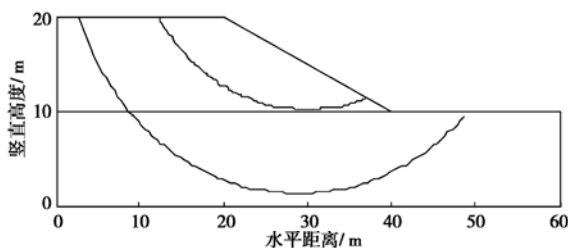


图6 模糊滑面的位置 (例2)

Fig. 6 Positions of fuzzy critical slip surfaces (case 2)

4 结 语

边坡工程中同时存在模糊性与随机性。为了能同时考虑这两种不确定性, 并且能考虑土体复杂的应力应变关系, 应进行边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析。当前常用的模糊随机有限元可靠度分析方法是凸集法, 但其计算量较大。为了提高计算效率, 本文提出了边坡稳定模糊随机有限元可靠度分析的敏感性分析法。它可同时考虑参数的模糊性与随机性, 能同时计算出边坡的模糊可靠指标及模糊滑面的位置。边坡稳定模糊随机有限元可靠度分析的敏感性分析法的实质是先根据随机有限元分析找出参数的敏感性, 再依据敏感性分析的结果在 α 截集上选取参数的合理组合。由于该方法在每一个模糊截集上只需进行二次随机有限元分析, 而传统的凸集法在每一个模糊截集上需进行 2^n 次随机有限元分析, 因而前者的计算效率大为提高。

算例分析表明: 对于文中的均质土坡及二层土非均质土坡, 采用凸集法及敏感性分析法所得边坡可靠指标的模糊分布规律一致, 证明了敏感性分析法的合理性。就滑面位置而言, 敏感性分析法所得的滑带范围比凸集法所得的滑带范围略窄或相等。对于均质土坡, 滑面位置随着参数的变化而略有变化, 因此形成的相对集中的模糊滑带; 随着参数变异系数的增加,

模糊滑带的范围也相应增加。对于非均质土坡, 滑面位置主要受破坏机理的影响。当材料参数有微小变化时, 滑面可能会从一个土层移至另一土层, 因此需仔细研究参数变化对滑面位置的影响。

参考文献:

- [1] 吕震宙, 冯蕴雯. 结构可靠性研究问题的若干进展[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 21 - 28. (LÜ Zhen-zhou, FENG Yun-wen. Advances in structural reliability studies[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(1): 21 - 28. (in Chinese))
- [2] MELLAH R, AUVINET G, MASROURI F. Stochastic finite element method applied to non-linear analysis of embankments[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 15(3): 251 - 259.
- [3] 刘 宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 76 - 105. (LIU Ning. Reliability SFEM and its application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001: 76 - 105. (in Chinese))
- [4] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(5): 507 - 518.
- [5] 谭晓慧, 王建国, 吴礼年, 等. 边坡稳定的非线性随机有限元加速收敛算法的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1030 - 1034. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, WU Li-nian, et al. Studies on accelerating convergence method in nonlinear stochastic finite element analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1030 - 1034. (in Chinese))
- [6] 谭晓慧, 王建国. 边坡的弹塑性有限元可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 44 - 50. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo. Slope reliability analysis using elasto-plastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 44 - 50. (in Chinese))
- [7] 谭晓慧, 王建国, 刘新荣, 等. 边坡稳定的有限元可靠度计算及敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 115 - 122. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, LIU Xin-rong, et al. Finite element reliability computation and sensitivity analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 115 - 122. (in Chinese))
- [8] 谭晓慧. 边坡稳定的非线性有限元可靠度分析方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007. (TAN Xiao-hui. Research on the method of nonlinear finite element reliability analysis of slope stability[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese))

- [9] 蒋中明, 张新敏, 徐卫亚. 岩土边坡稳定性分析的模糊有限元方法研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 922 - 927. (JIANG Zhong-ming, ZHANG Xin-min, XU Wei-ya. Study on fuzzy element method of rock and soil slope analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 922 - 927. (in Chinese))
- [10] 李胡生, 叶黔元. 陡峭岩石边坡随机-模糊可靠度算法[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1019 - 1022. (LI Hu-sheng, YE Qian-yuan. Calculation of random-fuzzy reliability of steep slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1019 - 1022. (in Chinese))
- [11] 王亚军, 张我华, 金伟良. 一次逼近随机有限元对堤坝模糊失效概率的分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 52 - 56. (WANG Ya-jun, ZHANG Wo-hua, JIN Wei-liang. Stochastic finite element analysis for fuzzy probability of embankment system failure by first-order approximation theorem[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(1): 52 - 56. (in Chinese))
- [12] GIASI C I, MASI P, CHERIBINI C. Probabilistic and fuzzy reliability analysis of a sample slope near Aliano[J]. Engineering Geology, 2003, 67: 391 - 402.
- [13] BRUNO S, ARMEN D K. Comparison of finite element reliability methods[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2002, 16(4): 337 - 348.
- [14] SMITH I M, GRIFFITHS D V. Programming the finite element method[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [15] 贡金鑫. 工程结构可靠度分析方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2003. (GONG Jin-xin. Computational methods for reliability of engineering structures[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [16] FENG Y H, HU L J, SHU H S. The variance and covariance of fuzzy random variables[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 120: 487 - 497.
- [17] MÖLLER B, GRAF W, BEER M. Safety assessment of structures in view of fuzzy randomness[J]. Computers and Structures. 2003, 81: 1567 - 1582.
- [18] AKPAN U O, KOKO T S, ORISAMOLU I R, et al. Practical fuzzy finite element analysis of structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 38: 93 - 111.
- [19] 秦权, 林道锦, 梅刚. 结构可靠度随机有限元-理论及工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. (QIN Quan, LIN Dao-jin, MEI Gang. Theory and applications - reliability stochastic finite element methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese))

中国工程院 2009 中国上海国际建筑科技大会 会议通知 (2 号)

1. 会议主题

2009 中国上海国际建筑科技大会是继 2006 年西安国际建筑科技大会之后的第二届会议, 同时也是中国工程院土木水利与建筑学部学术年会。本次大会以“大型公共建筑与基础设施建设理论与实践”为主题, 旨在交流国内外大型公共建筑与基础设施建设经验, 展示大型公共建筑与基础设施规划、设计、施工、质量管理等科技成就, 同时为与会者提供探讨如何提高城市建设与发展质量水平、推动城市可持续发展进程的学术平台。

2. 论文征集

大会论文集将收录大会主题报告及所有被学术委员录用的论文。论文全文语言为英文, 并将由同济大学出版社正式出版。论文集拟送 EI 等相关机构检索。论文撰写格式参考具体见 http://journal.hep.com.cn/webarticle/hep/009_b.html。

3. 会议地点: 中国同济大学, 上海市四平路 1239 号

4. 重要时间及注册费用

全文提交截止日期: 2009 年 6 月 30 日

通知论文全文录用截止日期: 2009 年 7 月 30 日

提前注册截止日期: 2009 年 8 月 30 日

国内代表: 1600RMB (提前注册 1400RMB); 学生代表: 800RMB

5. 联系方式

获取更多会议信息及提交论文, 请访问大会网址: www.icat2009.cn。

中国土木工程学会

联系人: 张凌、李丹、文捷、李应斌; 地址: 北京市三里河路 9 号建设部内中国土木工程学会学术部 (100835); 电话: 010-58934710, 58934591, 58933071; 传真: 010-58933953; E-mail: cceslidan@yahoo.com.cn, cces.china@263.net。

同济大学

联系人: 张其林、李元齐、宋晓光、周 玮; 地址: 上海市四平路 1239 号同济大学建筑工程系; 电话: 021-65980586; 传真: 021-65986345; E-mail: liyq@tongji.edu.cn。

(大会组委会 供稿)