

考虑土体材料二维空间变异特性的边坡可靠度分析

褚雪松,李 亮,吕 惠

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:为了更合理地分析边坡的可靠性,提出了考虑土体二维空间变异特性的边坡可靠度分析方法,将边坡区域离散为系列单元,假设单元内土体材料参数完全相关,通过假定的自相关函数确定单元之间土体材料参数的相关系数,采用子集模拟法抽样,运用和声搜索算法搜索最小的安全系数作为该次抽样的结果。将提出的可靠度分析方法应用于两个边坡实例的可靠度分析中,并与已有结果进行对比分析,结果表明,考虑土体材料参数的空间变异特性后,边坡的破坏概率降低,边坡可能的破坏区域逐渐增多。

关键词:边坡稳定;空间变异特性;可靠度分析;子集模拟方法;极限平衡法;破坏概率

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)02-0032-05

Reliability analysis of slope stability considering two-dimensional spatial variability of soil//CHU Xuesong, LI Liang, LÜ Hui(*School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China*)

Abstract: A method for slope system reliability analysis considering spatial variability of soil is developed to rationally evaluate the reliability of slope stability. The basic idea is that the slope domain is discretized into a series of “elements”, within each of which the soil property is fully correlated. The correlation coefficient among soil properties from different elements is obtained assuming autocorrelation function. Sets of random samples are generated by subset simulation, and harmony search algorithm is adopted to search the minimum factor of safety as the corresponding output. The method is applied to two examples to analyze the reliability and then compare it with existing results. Overall, the results show that the failure probability is lower than the case without considering the spatial variability and the potential failure modes are greater than that without taking into account the spatial variability.

Key words: slope stability; spatial variability; reliability analysis; subset simulation method; limit equilibrium method; failure probability

基于极限平衡的确定性分析方法仍然是当前边坡稳定分析的主要手段之一,但是越来越多的研究表明,可靠度分析方法考虑了土体材料的变异特性,可以作为确定性分析方法的有益补充^[1-2]。导致土体材料参数变异特性的原因有很多,比如土体材料本身的空间变异、试验方法、数学模型等^[3],本文仅考虑土体材料本身固有的空间变异特性对边坡可靠度的影响。龚勋等^[4]采用二维随机场与蒙特卡罗方法相结合,将土体的黏聚力作为一个空间二维随机场研究了土体空间变异特性对浅基础极限承载能力的影响;李典庆等^[5]利用随机响应面法进行了边坡可靠度分析;以上方法均是在有限元方法的框架之内完成的,国外 Griffiths 等^[6-8]也在有限元方法的框架之内开展了一系列有意义的工作。而极限平衡方法仍然是相对较简单且易于工程应用的方法之

一,因此有必要在极限平衡框架之内,提出考虑空间变异特性的边坡可靠度分析方法。虽然 JI 等^[9]在极限平衡方法的框架之内,提出了基于 Excel 的边坡可靠度分析方法,然而其模拟土体材料二维空间变异特性的手段较为复杂,本文提出一种基于单元的二维空间变异特性模拟方法(图 1),并与文献[9]的结果进行对比。

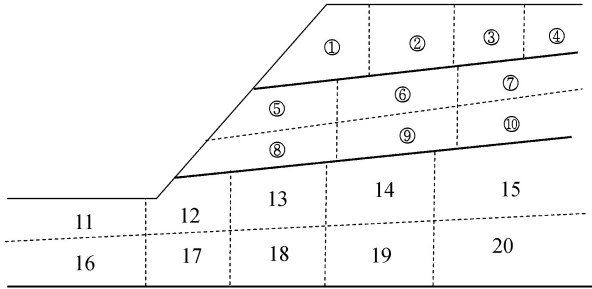


图 1 二维空间变异特性模拟示意图

1 土体材料空间变异特性

将图 1 所示边坡区域离散为 20 个单元,每个单元中土体材料的参数比如密度 ρ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等都是完全相关的,不同单元之间土体材料参数是相关的,相关系数可由自相关函数确定,本文采用经典负指数自相关函数来确定^[10]:

$$\rho_{i,j} = e^{-\left(\frac{|x_i - x_j|}{\lambda_x} + \frac{|y_i - y_j|}{\lambda_y}\right)} \tag{1}$$

式中: $\rho_{i,j}$ 为单元 i,j 中参数的相关系数; x_i,y_i 分别为第 i 个单元形心的 x,y 坐标; x_j,y_j 分别为第 j 个单元形心的 x,y 坐标; λ_x,λ_y 分别为 x,y 方向上土体材料的自相似距离,Degroot 等^[11]研究表明, λ_y 在 0.5 ~ 3.0 之间, λ_x 在 15 ~ 30 之间。由公式(1)可知,在自相似距离一定的前提下,两个单元之间的距离越大,单元土体材料参数之间的相关系数越小。当 $\lambda_x \rightarrow +\infty, \lambda_y \rightarrow +\infty$ 时,所有单元土体材料参数之间的相关系数均为 1,图 1 所示边坡即成为所谓的均质边坡。

如上所述,空间变异特性实际上是通过考虑不同单元材料之间的相关系数来实现的,可根据划分的单元和公式(1)计算相关系数。以图 1 所示的边坡为例,假设只考虑每个单元内土体材料的 c,φ 作为随机变量,则共有 40 个随机变量,需要构造一个 40×40 的相关系数矩阵,图 2 为相关系数矩阵示意图。本文基于单元的二维空间变异特性的模拟实际上是随机场均化的一种特例,单元的尺寸可以控制在其相应 2 倍的自相似距离以内^[12]。图 2 中 $\rho_{c-\varphi}$ 是 c 与 φ 之间的相关系数,其一般是负相关的^[1],图 2 示意图中假设所有单元的 c 与 φ 之间相关系数均相等,当然也可以根据实际情况,指定不同的相关系数,在此不再赘述。

2 基于子集模拟法的边坡可靠度分析

子集模拟法是一种适用于研究小概率事件的高效随机模拟方法,其基本思路是用若干中间失效事件表达小概率的失效事件,小概率失效事件的概率值可以表示为相应中间失效事件概率值的乘

1	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,1}$	$\rho_{1,2}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,2}$	$\rho_{1,3}$	$\cdots$	$\rho_{1,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,20}$
$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,1}$	1	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,2}$	$\rho_{1,2}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,3}$	$\cdots$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,20}$	$\rho_{1,20}$
$\rho_{1,2}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,2}$	1	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,2}$	$\rho_{2,3}$	$\cdots$	$\rho_{2,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,20}$
$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,2}$	$\rho_{1,2}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,2}$	1	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,3}$	$\cdots$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,20}$	$\rho_{2,20}$
$\rho_{1,3}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,3}$	$\rho_{2,3}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,3}$	1	$\cdots$	$\rho_{3,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{3,20}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
$\rho_{1,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,20}$	$\rho_{2,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,20}$	$\rho_{3,20}$	$\cdots$	1	$\rho_{c-\varphi}\rho_{20,20}$
$\rho_{c-\varphi}\rho_{1,20}$	$\rho_{1,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{2,20}$	$\rho_{2,20}$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{3,20}$	$\cdots$	$\rho_{c-\varphi}\rho_{20,20}$	1

图 2 相关系数矩阵

积^[13-16]。通过这种方式,将小概率事件模拟问题转化为一系列发生概率较大的中间失效事件的模拟问题。在模拟过程中,通过马尔科夫链原理进行条件样本抽样,使样本空间逐步逼近小概率事件发生的失效区域,具体说来,在根据当前样本产生备选样本时,采用文献[13]提出的用建议分布函数产生备选样本点,下面在极限平衡方法框架内对子集模拟法的步骤进行描述。

2.1 基于极限平衡法的功能函数

子集模拟法是在蒙特卡罗法的基础上发展而来的。蒙特卡罗法中最基本的方法就是抽样,即产生符合土体参数分布的一系列值,土体参数一般假定服从正态或者对数正态分布,后基于这一系列土体参数值进行确定性分析^[1]。本文基于圆弧滑动面假定,利用简化毕省普法^[17]计算滑动面的安全系数,采用和声搜索算法^[18-20]搜索最小的安全系数及其对应的滑动面作为某次抽样的结果。在可靠度分析中边坡失稳与否是通过判断功能函数值是否小于零来实现的,若某次抽样的结果小于零,则认为边坡失稳,所以本文的功能函数 G 定义为

$$G = F_{\min}(X) - 1 \tag{2}$$

其中 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_m)$

式中: X 为土体参数向量; $F_{\min}(X)$ 为相应于 X 的边坡最小安全系数; m 为随机变量个数。

2.2 子集模拟法步骤

- a. 利用常规蒙特卡罗法产生一系列抽样值 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}) (i = 1, 2, \cdots, N)$, N 为抽样个数,计数器 $J = 0$ 。
- b. 对于某一抽样值 X_i 进行确定性分析,利用和声搜索算法找出最小的安全系数 $F_{si} (i = 1, 2, \cdots, N)$ 。
- c. 将 F_{si} 按升序排列,同时更新 X_i 。
- d. $J = J + 1$, 选择第 $N_c (N_c = Np_0, p_0$ 是一条件概率值,通常取 0.1) 个安全系数,记为 $f_{s,J}$,即将事件 $F_s < f_{s,J}$ 作为第 J 个中间失效事件。判断是否 $f_{s,J} \leq 1.0$,若是,则从 N 个升序排列的安全系数系列中找到 1.0 的安全系数对应的序号 N_g ,则破坏概率

$$p_f = \frac{N_g}{N} p_0^{J-1}; \text{若 } f_{s,J} > 1.0, \text{ 转下一步。}$$

e. 将前 N_c 个抽样值作为初始值,分别产生 $1/p_0$ 个条件抽样值,以第 j 个初始抽样值 X_j 为例,其相应的独立标准正态分布空间内的值为 $\xi_{j1}, \xi_{j2}, \dots, \xi_{jm}$,由公式(3)计算其上、下限:

$$\begin{cases} u_k = \xi_{jk} + w\eta_k \\ l_k = \xi_{jk} - w\eta_k \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

其中

$$\eta_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\xi_{ik} - x_u)^2}{N-1}}$$

$$x_u = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_{ik}}{N}$$

式中: u_k, l_k 分别为第 k 个参数的上、下限; η_k 为 N 个抽样值的标准差; x_u 为 N 个抽样值的均值; w 为常量,一般取 2.0 [12]。

- a. 根据式(3)所求上、下限,随机生成 ξ'_{jk} 。
- b. 利用标准正态分布概率密度函数公式,计算 ξ'_{jk} 和 ξ_{jk} 对应的函数值,分别记为 p' 和 p , 定义接受概率 $\theta = \frac{p'}{p}$, 产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 r_a , 若 $r_a < \theta$, $\xi_{jk}^{new} = \xi'_{jk}$, 否则, $\xi_{jk}^{new} = \xi_{jk}$ 。
- c. 对新产生的抽样值 X_j^{new} , 利用和声搜索算法搜索最小的安全系数,记为 $F_{s,j}^{new}$, 若 $F_{s,j}^{new} < f_{s,j}$, 则接受 X_j^{new} , 否则 $X_j^{new} = X_j$ 。
- d. 执行步骤 a、b、c 共计 $1/p_0$ 次, 储存产生的 X_j^{new} 。
- e. 对前 N_c 个抽样值中的每一个均执行步骤 a、b、c、d, 如此共产生 N 个新的条件抽样值, 即目前 N 个抽样结果均小于 $f_{s,j}$ 。
- f. 执行步骤 c、d、e 直至步骤 4 中的终止准则满足, 则可得到破坏概率 $p_t = \frac{N_g}{N} p_0^{J-1}$ 。

综上可知,子集模拟法共需要 N, w, p_0 这 3 个参数, 根据文献[12]研究的结果, 本文算例分析中取 $N=500, w=2.0, p_0=0.1$ 。子集模拟法得到的 p_t 即是边坡的破坏概率。

3 算例分析

对文献[9]中分析的两个算例利用本文可靠度分析方法(以下简称本文方法)重新进行计算, 并将结果与文献[9]结果进行对比分析。

3.1 算例 1

图 3 为修建在软土地基上的边坡, 其中上部土层的参数作为定值, $\rho = 1\,900\text{ kg/m}^3, c = 5\text{ kPa}, \varphi = 30^\circ$ 。下部软土层的不排水强度 c_u 作为正态分布随机变量, 其均值为 25 kPa , 变异系数 $C_{ov} = 0.25$, 即 c_u

的标准差为 6.25 kPa 。软土层的密度视为定值, 且与上部土层密度相等。文献[11]研究表明, λ_y 在 $0.5 \sim 3.0$ 之间, λ_x 在 $15 \sim 30$ 之间, 所以在划分单元时, 宽度间距要小于土层参数的 λ_x , 高度间距要小于 λ_y , 由于文献[9]假定 $\lambda_x = 20\text{ m}, \lambda_y = 2\text{ m}$, 本文将下部软土层划分为 12 个单元, 宽度间距 10 m , 高度间距 2 m 。

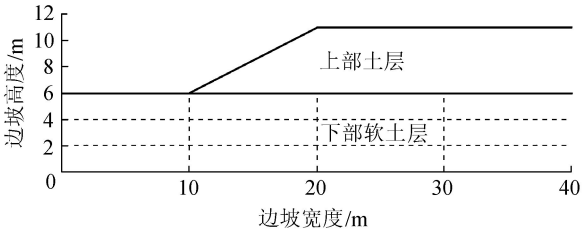


图 3 软土地基上的边坡离散示意图

首先利用自编的 Fortran 程序进行确定性分析, 即将下部软土层的 c_u 取为均值, 利用简化毕肖普法计算给定滑动面的安全系数, 采用和声搜索算法找出最小安全系数及其对应的滑动面(确定性临界滑动面); 其次不考虑软土层的空间变异特性, 即 12 个单元之间的 c_u 是完全相关的, 进行了边坡破坏概率的求解, 最后根据文献[9]给出的自相似距离, 进行 4 种不同参数组合下的计算。

3.1.1 确定性分析

图 4 为确定性分析得到的确定性临界滑动面, 其对应的简化毕肖普安全系数为 1.476 , 文献[9]给出了 Spencer 法的结果为 1.462 , 将本文的确定性临界滑动面用 Spencer 法重新进行了计算, 其安全系数为 1.466 , 这与文献[9]的 1.462 基本一致, 证明本文自编的 Fortran 程序是正确的。

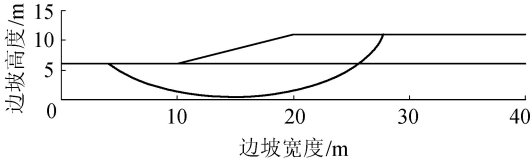


图 4 确定性临界滑动面(算例 1)

3.1.2 完全相关的破坏概率

当下部软土层的 c_u 在空间上完全相关时, 利用本文的可靠度分析方法进行边坡破坏概率的计算, 得到 $p_t = 9.08\%$ 。对于子集模拟法的每次抽样, 均须利用和声算法搜索出对应的最小安全系数及其对应的滑动面, 图 5 为计算过程中每次抽样的最小安全系数对应的滑动面集合(即破坏概率对应的滑动面集合), 由此可以看出, 边坡最可能的破坏区域(下同)。由图 5 可见, 不考虑 c_u 空间变异特性时, 边坡主要有两个破坏模式, 这为边坡的设计与治理提供了决策依据。

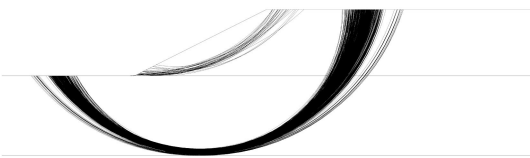


图5 破坏概率对应的滑动面集合(算例1)

3.1.3 几种参数组合的破坏概率

表1为文献[9]考虑的4种参数组合,利用本文方法重新进行了计算,同时与文献[9]的计算结果进行对比,两种方法所得规律基本一致,破坏概率 p_f 在同一数量级,具体的差别有可能是不同的条块数以及不同的搜索算法导致,综合来看,文献[9]计算方法可能没有找到某一抽样的最小安全系数,导致破坏概率偏小。

表1 破坏概率计算结果对比(算例1)

λ_x/m	λ_y/m	$p_f/\%$	
		本文方法	文献[9]计算方法
20	2	5.60	1.20
1000	2	7.54	2.29
20	1000	5.98	4.35
1000	1000	9.04	6.85

图6为破坏概率对应的滑动面集合比较。由图6(a)可见, $\lambda_x=\lambda_y=1000\text{ m}$ 时,所得图形与图5基本一致,即自相似距离趋于 $+\infty$ 时,相当于不考虑土层参数之间的空间变异性,即完全相关。由图6(b)知,当 $\lambda_y=2\text{ m}$ 时,边坡最可能的破坏区域增加为4

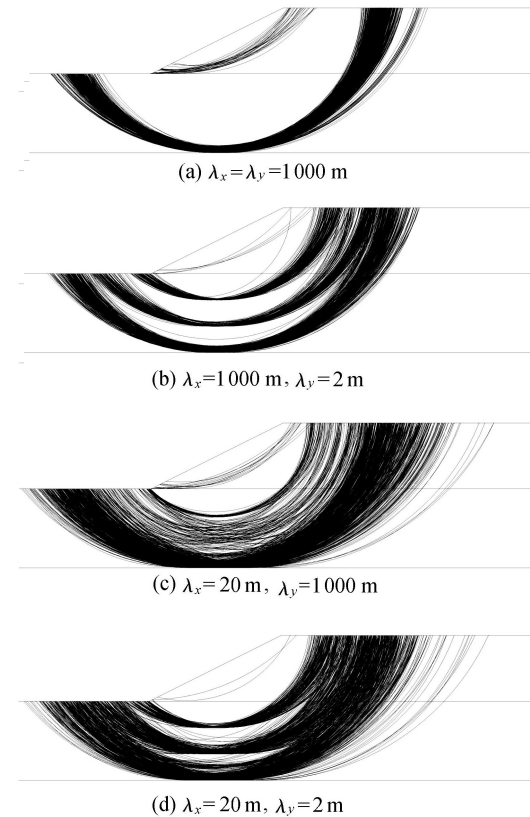


图6 破坏概率对应的滑动面集合比较(算例1)

个,这说明考虑土层参数的空间变异性以后,虽然边坡可能的破坏区域增加,但最终破坏概率降低,这与文献[9]的结论一致。

3.2 算例2

图7为 $c-\varphi$ 边坡离散示意图,其中密度在计算中视为定值(1900 kg/m^3),分别将 c' 、 φ' 作为正态分布随机变量考虑,其均值以及变异系数 C_{ov} 分别为 15 kPa 、 0.3 以及 23° 、 0.1 ,即 c' 和 φ' 的标准差分别为 4.5 kPa 和 2.3° 。将边坡区域划分为28个单元,宽度间距 5 m ,高度间距 2 m ,其示意图如图7所示。 c' 、 φ' 之间的相关系数为 -0.5 。

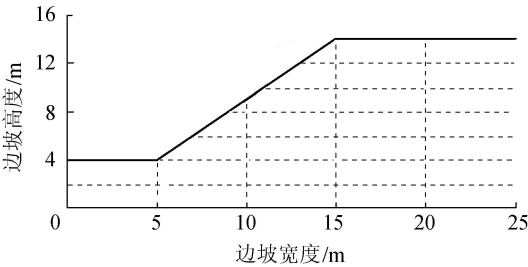


图7 $c-\varphi$ 边坡离散示意图

3.2.1 确定性分析

图8为确定性分析得到的确定性临界滑动面,其对应的简化毕肖普安全系数为 1.213 ,文献[9]给出了Spencer法的结果为 1.226 ,将本文的确定性临界滑动面用Spencer法重新进行计算,其安全系数为 1.223 ,这与文献[9]的 1.226 基本一致。

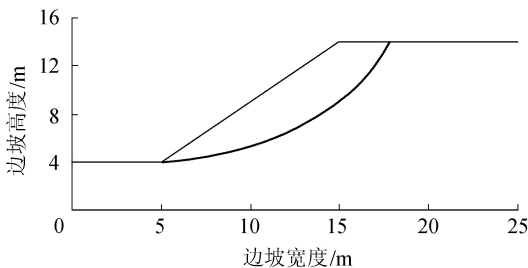


图8 确定性临界滑动面(算例2)

3.2.2 完全相关的破坏概率

当仅考虑 c' 、 φ' 之间的相关系数,不考虑 c' 与 φ' 在空间上的变异特性时,应用本文方法进行边坡可靠度分析,得到的破坏概率为 9.28% ,图9为破坏概率对应的滑动面集合。

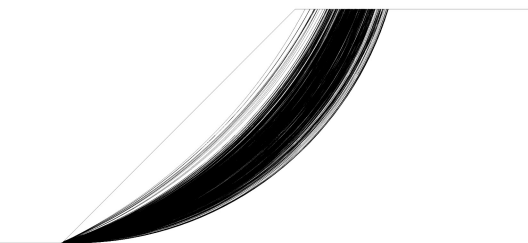


图9 破坏概率对应的滑动面集合(算例2)

3.2.3 几种参数组合的破坏概率

表 2 为文献[9]的 4 种参数组合,利用本文方法进行了计算,同时与文[9]结果进行对比,两种方法所得规律基本一致,破坏概率 p_f 在同一数量级。破坏概率对应的滑动面集合如图 10 所示,可以得到与算例 1 相同的规律,不再赘述。

表 2 破坏概率计算结果对比(算例 2)

λ_x/m	λ_y/m	$p_f/\%$	
		本文方法	文献[9]计算方法
30	3	2.75	1.24
1 000	3	3.25	1.54
30	1 000	7.73	6.26
1 000	1 000	9.25	7.58

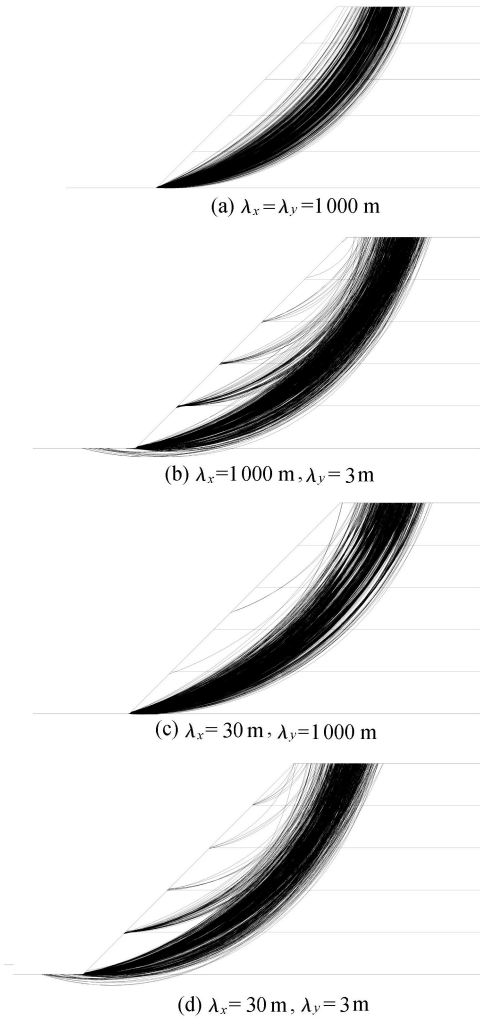


图 10 破坏概率对应的滑动面集合比较(算例 2)

4 结 论

- a. 考虑土体材料参数的空间变异特性后,边坡的破坏概率降低,即不考虑土体材料参数的空间变异特性时,所得破坏概率偏大。
- b. 由最小安全系数对应的滑动面集合来看,考虑土体材料参数空间变异特性以后,边坡可能的破

- 坏区域逐渐增多。
- c. 基于划分单元的空间变异特性可靠度分析方法可以尝试应用于边坡可靠度分析。
- 参考文献:
- [1] 陈祖煜. 土质土坡稳定分析:原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:372-373.
 - [2] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126 (4): 307-316.
 - [3] WHITMAN R V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126 (7): 583-593.
 - [4] 龚勋,张冬梅,黄宏伟. 二维空间随机场的浅基础极限承载力可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2012 (增刊 2): 1676-1679. (GONG Xun, ZHANG Dongmei, HUANG Hongwei. Reliability anlysis of allowable pressure on shallow foundation based on 2D random field [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012(Sup 2):1676-1679. (in Chinese))
 - [5] 李典庆,周创兵,陈益峰,等. 边坡可靠度分析的随机响应面法及程序实现[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29 (8): 1513-1523. (LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, CHEN Yifeng, et al. Reliability analysis of slope using stochastic response surface method and code implementation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(8):1513-1523. (in Chinese))
 - [6] 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.
 - [7] GRIFFITHS D V, HUANG J, FENTON GA. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2009,135 (10): 1367-1378.
 - [8] GRIFFITHS D V, HUANG J, FENTON G A. Probabilistic infinite slope analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2011,38(4): 577-584.
 - [9] JI J, LOW B K. Modeling 2-D spatial variation in slope reliability analysis using interpolated autocorrelations[J]. Computers and Geotechnics,2012,40(3):135-146.
 - [10] LI K S, LUMB P. Probabilistic design of slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal,1987,24(4): 520-535.
 - [11] DEGROOT DJ. Analyzing spatial variability of in situ soil properties [J]. Geotechnical Special Publication,1996,58 (1):210-238.
 - [12] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977,103 (11):1227-1246.

(下转第 66 页)

- [4] 李凤超,樊红刚,王正伟,等. 贯流式机组桨叶与导叶全三维联合设计[J]. 水力发电学报,2012,31(2):206-209. (LI Fengchao, FAN Honggang, WANG Zhengwei. Three-dimensional coupled design for runner blades and guide vanes of tubular turbine [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (2) : 206-209. (in Chinese))
 - [5] YANG Wei, WU Yulin, LIU Shuhong. An optimization method on runner blades in bulb turbine based on CFD analysis [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(2):338-344.
 - [6] 刘树红,杨魏,吴玉林,等. 贯流式水轮机三维定常湍流计算及改型设计[J]. 水力发电学报,2007,26(1):110-113. (LIU Shuhong, YANG Wei, WU Yulin, et al. 3-D steady turbulent simulation and modification of the tubular turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2007,26(1):110-113. (in Chinese))
 - [7] 金燕,梁豪杰,刘超,等. 前置灯泡贯流泵装置内部流动数值模拟[J]. 扬州大学学报:自然科学版,2013,16(1):71-74. (JIN Yan, LIANG Haojie, LIU Chao, et al. Numerical simulation of the internal flow of prepositive bulb tubular pumping system [J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2013, 16(1):71-74. (in Chinese))
 - [8] 施卫东,张德胜,关醒凡,等. 后置灯泡式贯流泵装置模型的优化与试验研究[J]. 水利学报,2010,41(10):1248-1253. (SHI Weidong, ZHANG Desheng, GUAN Xinfan, et al. Optimization and experimental investigation on post bulb type tubular pump device model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10):1248-1253. (in Chinese))
 - [9] 关醒凡,商明华,谢卫东,等. 后置灯泡式贯流泵装置水力模型[J]. 排灌机械,2008,26(1):25-28. (GUAN Xingfan, SHANG Minghua, XIE Weidong, et al. Hydraulic model and its pilot-plant unit for rear bulb-type cross-flow pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(1):25-28. (in Chinese))
 - [10] 陆林广,陈坚,陈阿萍,等. 灯泡贯流泵装置的基本流态分析[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(3):30-32. (LU Linguang, CHEN Jian, CHEN Aping. Analysis of basic flow pattern in bulb tubular pump system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(3):30-32. (in Chinese))
 - [11] 郑源,张德虎,刘益民,等. 贯流泵装置能量特性试验研究[J]. 流体机械,2003,31(2):1-4. (ZHENG Yuan, ZHANG Dehu, LIU Yimin, et al. Experimental study on equipment energy characteristic of tubular pump[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(2):1-4. (in Chinese))
 - [12] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
 - [13] SAEED R A, GALYBIN A N. Simplified model of the turbine runner blade [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7):2473-2484
 - [14] 郑源,杨春霞,周大庆,等. 卧轴双转轮混流式水轮机的优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):341-345. (ZHENG Yuan, YANG Chunxia, ZHOU Daqing, et al. Optimization design of horizontal Francis turbine with two runners[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3):341-345. (in Chinese))
 - [15] 周大庆,张蓝国,郑源,等. 基于脱体涡模型的竖井贯流式水轮机组压力脉动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2013,33(3):29-33. (ZHOU Daqing, ZHANG Languo, ZHENG Yuan, et al. Numerical analysis of pressure pulsation of pit water turbines based on detached-eddy model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3):29-33. (in Chinese))
 - [16] BOGEY C, BAILLY C. Large eddy simulations of round free jets using explicit filtering with/without dynamic Smagorinsky model [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, 27(4):603-610.
(收稿日期:2013-11-27 编辑:周红梅)
- +++++
- (上接第 36 页)
- [13] AU S K, BECK J L. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2001, 16(4):263-277.
 - [14] AU S K, BECK J L. Subset simulation and its application to seismic risk based on dynamic analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(8):901-917.
 - [15] AU S K, CAO Z J, WANG Y. Implementing advanced monte carlo simulation under spreadsheet environment [J]. Structural Safety, 2010, 32(5):281-292.
 - [16] 宋述芳,吕震宙. 基于马尔可夫蒙特卡罗子集模拟的可靠性灵敏度分析方法[J]. 机械工程学报,2009,45(4):33-38. (SONG Shufang, LV Zhenzhou. Structural reliability sensitivity ananlysis method based on Markov Chain Monte Carlo Subset simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4):33-38. (in Chinese))
 - [17] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes [J]. Geotechnique, 1955, 5(1):7-10.
 - [18] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. Simulation, 2001, 76(2):60-68.
 - [19] 李亮,褚雪松. 边坡临界滑动面与临界可靠度滑动面面对比分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(9):81-85. (LI Liang, CHU Xuesong. Comparative analysis between critical slip surface and critical reliability slip surface of slopes [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(9):81-85. (in Chinese))
 - [20] 李亮,褚雪松,郑榕明. Rosenblueth 法在边坡可靠度分析中的应用[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):53-56. (LI Liang, CHU Xuesong, CHENG Yungming. Application of Rosenblueth method in reliability analysis of soil slopes [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3):53-56. (in Chinese))
(收稿日期:2013-11-05 编辑:周红梅)