

DOI: 10.11779/CJGE201507005

# 各向异性随机场下的边坡模糊随机可靠度分析

舒苏荀, 龚文惠, 王 佳, 王 东, 喻 鹏

(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 土性参数具有很大的空间变异性, 且在水平方向和垂直方向上差异显著。基于随机变量模型的传统边坡模糊随机可靠度分析方法并未对此进行考虑。提出一种能合理考虑土性参数空间变异性的边坡模糊随机可靠度分析方法。首先, 视黏聚力和内摩擦角的均值为正态模糊数, 对其取不同的  $\lambda$  截集水平并在各截集水平上进行参数组合。其次, 利用各向异性随机场模拟土性参数的空间变异性, 将有限元法和 Monte-Carlo 模拟相结合, 计算各参数组合对应的可靠度指标。再通过数学方法得到边坡在各截集水平上的可靠度指标。最后, 运用加权平均法计算边坡的模糊随机可靠度指标。算例分析表明: 与水平方向的空间变异性相比, 垂直方向的空间变异性对边坡模糊随机可靠度的影响更为显著; 不考虑土性参数的空间变异性在一般情况下会低估边坡的模糊随机可靠度指标, 但在抗剪强度参数变异性较大时, 反而可能会高估边坡的模糊随机可靠度指标; 此外, 黏聚力与内摩擦角之间的相关性对边坡失效概率的影响趋势基本不受土性参数空间变异性的干扰。

**关键词:** 边坡稳定; 模糊性; 随机性;  $\lambda$  截集; 各向异性随机场

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)07-1204-07

**作者简介:** 舒苏荀(1987-), 女, 博士研究生, 主要从事岩土工程可靠度方面的研究。E-mail: hustssx@163.com。

## Fuzzy-random reliability analysis of slope stability in anisotropic random fields

SHU Su-xun, GONG Wen-hui, WANG Jia, WANG Dong, YU Peng

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Spatial variability is the essential characteristic of the soil properties, which performs remarkable difference between the horizontal and vertical directions. In order to improve the traditional fuzzy-random reliability analysis methods which cannot deal with the spatial variability, a new method for slope fuzzy-random reliability analysis with reasonable consideration of the spatial variability is proposed. Firstly, the mean values of cohesion and friction angle are described by the normal fuzzy numbers and then randomly combined via  $\lambda$  cut set theory at different levels. Secondly, the corresponding reliability index of each parameter combination is calculated by the cooperation of finite element method and Monte-Carlo simulation under the anisotropic random fields of soil properties. And then, the total reliability index at each  $\lambda$  cut set level is obtained through a mathematical method. Finally, the fuzzy-random reliability index of the slope is achieved by the weighted average method. The illustration results show that the vertical-direction spatial variability has a more significant influence on fuzzy-random reliability of the slope, and ignoring the spatial variability of soil properties may also underestimate the probability of failure when the cohesion and the friction angle have great coefficients of variations. Moreover, the effect tendency of the correlation between the cohesion and the friction angle to failure probability is insensitive to the spatial variation of soil properties.

**Key words:** slope stability; fuzziness; randomness;  $\lambda$  cut set; anisotropic random field

## 0 引 言

边坡工程中的不确定性包括模糊性和随机性, 对边坡进行可靠度分析时, 应同时考虑这两种不确定性因素的影响。现有的边坡模糊随机可靠度分析方法<sup>[1-4]</sup>在利用模糊数学相关方法处理模糊不确定性因素的同时, 多采用随机变量模型处理随机不确定性因素。这种做法默认同一土层中不同位置上的土性特征完全相关或一致, 忽略了边坡工程随机不确定性的重要组成

部分——土性参数的空间变异性<sup>[5]</sup>, 得到的边坡模糊随机可靠度分析结果可能存在偏差。

现阶段, 模拟土性参数空间变异性的一种较好方法是 Vanmarcke 的随机场模型<sup>[6]</sup>: 视土层为统计均匀的前提下, 该模型运用方差、方差折减函数、相关函数和波动范围等随机场的数字特征来描述土性参数的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278217)

收稿日期: 2014-07-08

空间分布<sup>[7-8]</sup>。将随机场模型引入边坡可靠度分析, 通常有两种做法: 一种是将土性参数模拟为一维随机场或等效各向同性随机场<sup>[9-12]</sup>, 这种做法相对简单, 方便在极限平衡法等边坡稳定性分析方法中使用; 另一种是将土性参数的空间分布模拟为各向异性随机场<sup>[13-17]</sup>, 这种做法计算复杂, 但能考虑土性参数空间变异性在水平和垂直两个方向上的显著不同, 得到更为精确的结果。然而, 无论是哪种做法, 目前这些研究得到的均是边坡的随机可靠度, 并未涉及模糊性因素。

本文将模糊截集法与随机有限元法结合, 提出一种能考虑土性参数空间变异性的边坡模糊随机可靠度分析方法, 并在此基础上研究了土性参数各向异性随机场下, 水平和垂直波动范围、抗剪强度参数的变异性以及黏聚力与内摩擦角之间的相关性对边坡模糊随机可靠度的影响。

## 1 随机场基本理论

### 1.1 随机场的数字特征

随机场 $\{S(\mathbf{u}); \mathbf{u} \in D \in R^n\}$ 可以被视为定义在场域参数集上的随机变量系, 其基本参数 $\mathbf{u}$ 为位置变量; 当 $\mathbf{u}$ 包含一个或两个分量时, 称相应的随机场为一维或二维随机场<sup>[18]</sup>。本文的各向异性随机场即为包含水平和垂直两个方向分量的二维随机场。

用 $\sigma^2$ 表示随机场的点方差, 用 $\sigma_Z^2$ 表示随机场在范围 $Z$ 内的局部平均方差, 定义无量纲函数:

$$\Gamma^2(Z) = \frac{\sigma_Z^2}{\sigma^2}, \quad (1)$$

式中,  $\Gamma^2(Z)$ 为随机场的方差折减函数。 $\Gamma^2(Z)$ 可以表征局部平均意义下对方差的折减程度, 有 $0 \leq \Gamma^2(Z) \leq 1$ 。

一维随机场中, 定义符号

$$\delta = \lim_{Z \rightarrow \infty} Z \Gamma^2(Z). \quad (2)$$

式中,  $\delta$ 为随机场的波动范围。 $\delta$ 可以看成是任意两点之间特性不相关的最小距离, 是土体的固有属性。二维随机场中, 土体有水平和垂直两个方向上的波动范围; 一般情况下, 土体的水平波动范围 $\delta_H$ 取值介于20~80 m之间, 垂直波动范围 $\delta_V$ 取值介于2~6 m之间<sup>[11]</sup>。

相距在波动范围内的点, 其特性之间的具体相关程度由相关函数描述。根据随机场的不同, 相关函数有一维和二维之分。常用的二维相关函数包括指数函数、高斯函数和可分离的指数函数等形式。由于相关函数的具体形式对可靠度指标影响不大<sup>[19]</sup>, 本文选用形式较为简单的指数函数作为相关函数:

$$\rho(\tau_H, \tau_V) = \exp \left( -2 \sqrt{\frac{\tau_H^2}{\delta_H^2} + \frac{\tau_V^2}{\delta_V^2}} \right). \quad (3)$$

式中,  $\tau_H$ 与 $\tau_V$ 分别为随机场中不同点之间的水平和垂直距离。

### 1.2 各向异性随机场的离散

随机场模型需要转化为随机变量簇才能使用, 这个过程称为随机场的离散。常用的随机场离散方法有局部平均法、Karhunen-Loeve级数展开法、中心点法和线性回归法等。基于局部平均法对原始数据要求低、收敛快、精度高的优点<sup>[18]</sup>, 本文用其对各向异性随机场进行离散。

如图1所示, 定义各向异性随机场 $S(u_1, u_2)$ 在以 $(a_1, a_2)$ 为形心的任意矩形单元 $A$ 内的局部平均为

$$S_A(u_1, u_2) = \frac{1}{A_1 A_2} \int_{a_1 - A_1/2}^{a_1 + A_1/2} \int_{a_2 - A_2/2}^{a_2 + A_2/2} S(u_1, u_2) du_1 du_2, \quad (4)$$

式中,  $A_1$ 和 $A_2$ 分别为矩形单元 $A$ 在 $u_1$ 和 $u_2$ 方向上的边长。

同理, 可以得到 $S(u_1, u_2)$ 在任意矩形单元 $B$ 内的局部平均 $S_B(u_1, u_2)$ 。这两个单元局部平均的协方差为

$$\text{Cov}(S_A, S_B) = \frac{\sigma^2 \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (-1)^{i+j} (L_i M_j)^2 \Gamma^2(L_i, M_j)}{4 A_1 A_2 B_1 B_2}, \quad (5)$$

式中,  $L_i$ 与 $M_j$  ( $i, j=0, 1, 2, 3$ ) 的意义如图1所示,  $\Gamma^2(L_i, M_j)$ 代表以 $L_i$ 和 $M_j$ 为边长的矩形单元的方差折减函数。

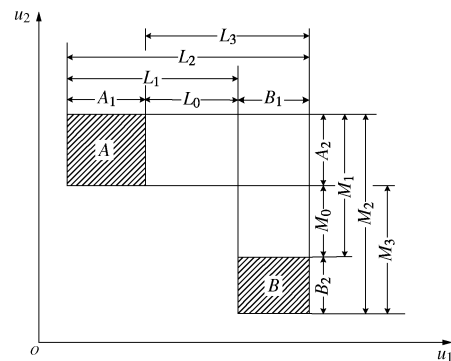


图1 各向异性随机场的局部平均单元

Fig. 1 Local average subdivision elements in anisotropic random field

## 2 边坡模糊随机可靠度分析方法

本文的边坡模糊随机可靠度分析方法由参数的模糊截集处理、土性参数各向异性随机场下各参数组合的可靠度分析、各截集水平上可靠度的求解和边坡模糊随机可靠度的计算这4个主要部分组成, 其分析流程详见图2。

### 2.1 参数的模糊截集处理

边坡工程中的土性参数既具有模糊性, 又具有随机性。本文先考虑参数的模糊性, 视其为模糊变量。

由于参数标准差的模糊性对可靠度的影响远小于参数均值的模糊性所产生的影响, 此处仅视参数的均值为模糊变量, 用正态模糊数进行描述:

$$\mu_{\bar{x}}(x) = \frac{\exp\left[-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] - \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)}, \quad (6)$$

式中,  $m_x$  与  $\sigma_x$  分别为模糊变量  $x$  的均值和标准差。

如图 3 所示, 对  $\mu_{\bar{x}}(x)$  取  $\lambda$  截集, 得到一个截集区间  $[x_{\lambda-}, x_{\lambda+}]$ 。区间左、右端点的数值分别为<sup>[4]</sup>

$$x_{\lambda-} = m_x - \sigma_x \sqrt{-2\ln\left[\lambda + (1-\lambda)\exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right]}, \quad (7)$$

$$x_{\lambda+} = m_x + \sigma_x \sqrt{-2\ln\left[\lambda + (1-\lambda)\exp\left(-\frac{k^2}{2}\right)\right]}, \quad (8)$$

式中,  $k$  为  $\mu_{\bar{x}}(x)$  的形状参数, 有  $0.5 \leq k \leq 3$ , 且  $x$  的变异性越大,  $k$  的取值越大。

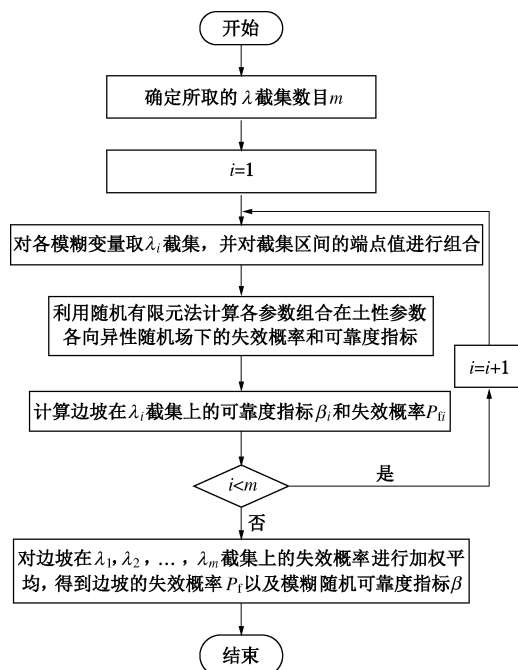


图 2 边坡模糊随机可靠度分析流程

Fig. 2 Flow chart of fuzzy-random reliability analysis of slope

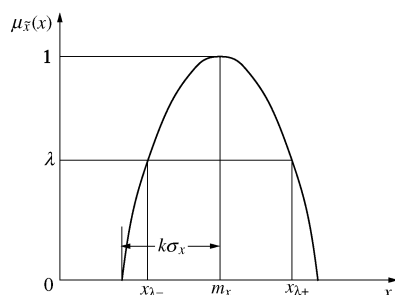


图 3 正态模糊数的  $\lambda$  截集

Fig. 3  $\lambda$  cut set of normal fuzzy number

对每个模糊变量取  $\lambda$  截集, 可以得到该变量对应的截集区间。依次从  $n$  个模糊变量各自的截集区间左、右端点值中任取 1 个进行组合, 有  $2^n$  种不同的参数组合。

## 2.2 土性参数各向异性随机场下可靠度分析

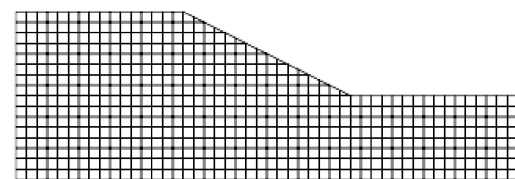
根据 2.1 节中得到的  $\lambda$  截集上各种参数均值的组合 (标准差不变), 由随机有限元法 (random finite element method, RFEM)<sup>[13]</sup> 可以计算土性参数各向异性随机场下对应的失效概率和可靠度指标。RFEM 是随机场理论、有限元法和 Monte-Carlo 模拟相结合所形成的一种综合性方法, 其分析步骤为:

(1) 根据几何参数, 建立边坡剖面的有限元计算模型 (图 4 (a))。

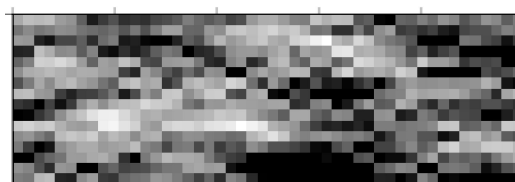
(2) 生成各向异性随机场, 并根据土性参数的统计特征对随机场进行初始化。取离散单元尺寸与有限单元尺寸相同 (也可取离散单元尺寸为有限单元尺寸的整数倍), 利用局部平均法将随机场离散为随机变量簇 (图 4 (b))。

(3) 将随机变量簇作为材料参数赋予相应的有限单元 (图 4 (c)), 进行有限元分析。分析过程中视土体为理想弹塑性材料, 服从 Mohr-Coulomb 破坏准则, 以有限元计算不收敛作为边坡失稳的判据。

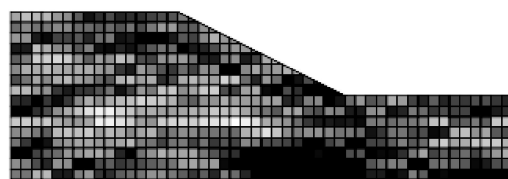
(4) 将步骤 (2) 和 (3) 作为 1 次完整的 Monte-Carlo 模拟, 进行  $N$  ( $N \geq 2000$ <sup>[13]</sup>) 次这样的模拟, 记录其中边坡失稳的次数  $N_f$ 。将  $N_f$  与  $N$  的比值近似作为所求的失效概率  $P_f'$ , 进而由失效概率与可靠度指标的对应关系得到相应的可靠度指标  $\beta'$ 。



(a) 有限元计算模型



(b) 随机场离散



(c) 随机场特性赋予有限单元

图 4 随机有限元法分析过程

Fig. 4 Analysis process of random finite element method

2.3 λ 截集上边坡可靠度的求解

利用 RFEM 得到 λ 截集上 2<sup>n</sup> 种参数组合对应的失效概率 {P<sub>f1</sub><sup>'</sup>, P<sub>f2</sub><sup>'</sup>, ..., P<sub>f2<sup>n</sup></sub><sup>'</sup>} 和可靠度指标 {β<sub>1</sub><sup>'</sup>, β<sub>2</sub><sup>'</sup>, ..., β<sub>2<sup>n</sup></sub><sup>'</sup>} 后, 需计算边坡在该截集上的可靠度指标 β<sub>λ</sub> 和失效概率 P<sub>fa</sub>。文献[2]给出了一种基于区间可靠度运算理论的 β<sub>λ</sub> 计算表达式:

$$\beta_{\lambda} = \frac{1}{\beta'_{\max} - \beta'_{\min}} \left\langle \beta'_{\max} \Phi(\beta'_{\max}) - \beta'_{\min} \Phi(\beta'_{\min}) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp\left[-\frac{(\beta'_{\max})^2}{2}\right] - \exp\left[-\frac{(\beta'_{\min})^2}{2}\right] \right\} \right\rangle, \quad (9)$$

式中, β<sub>max</sub><sup>'</sup> 和 β<sub>min</sub><sup>'</sup> 分别为 {β<sub>1</sub><sup>'</sup>, β<sub>2</sub><sup>'</sup>, ..., β<sub>2<sup>n</sup></sub><sup>'</sup>} 中的最大值和最小值。

根据区间数运算规则, 当函数式中区间变量的出现次数超过 2 次时, 会发生区间扩张现象, 此时得到的函数值可能超过其真实值域<sup>[20]</sup>。显然, 式 (9) 满足发生区间扩张的条件, 由此得到的 β<sub>λ</sub> 计算结果可能会受到较大影响。

实际上, 用 {Q<sub>1</sub><sup>'</sup>, Q<sub>2</sub><sup>'</sup>, ..., Q<sub>2<sup>n</sup></sub><sup>'</sup>} 表示 λ 截集上各参数组合对应的概率 (计算方法参考文献[4]), 边坡在该截集上的失效概率 P<sub>fa</sub> 可以通过加权的方法计算:

$$P_{fa} = Q_1' P_{f1}' + Q_2' P_{f2}' + \cdots + Q_{2^n}' P_{f2^n}' = \sum_{j=1}^{2^n} Q_j' P_{fj}' \quad (10)$$

当各变量相互独立时, 有 Q<sub>1</sub><sup>'</sup>=Q<sub>2</sub><sup>'</sup>=...=Q<sub>2<sup>n</sup></sub><sup>'</sup>=1/2<sup>n</sup>, 此时式 (10) 可以进一步表示为

$$P_{fa} = \frac{1}{2^n} (P_{f1}' + P_{f2}' + \cdots + P_{f2^n}') = \frac{1}{2^n} \sum_{j=1}^{2^n} P_{fj}' \quad (11)$$

再根据 P<sub>fa</sub> 得到相应的 β<sub>λ</sub>。

2.4 边坡的模糊随机可靠度

取 m 个不同的截集水平 {λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>, ..., λ<sub>m</sub>} , 由 2.1 节~2.3 节中的方法可以得到边坡在各截集水平上的失效概率 {P<sub>fa1</sub>, P<sub>fa2</sub>, ..., P<sub>fa<sub>m</sub></sub>} 和可靠度指标 {β<sub>λ1</sub>, β<sub>λ2</sub>, ..., β<sub>λ<sub>m</sub></sub>}。由于截集水平的数值较小时, 可靠度指标的计算结果较为扩散, 建议所取截集水平的数值不小于 0.75<sup>[21]</sup>。

最后, 对 {P<sub>fa1</sub>, P<sub>fa2</sub>, ..., P<sub>fa<sub>m</sub></sub>} 进行加权平均, 可以得到边坡的失效概率为

$$P_f = \frac{\lambda_1 P_{fa1} + \lambda_2 P_{fa2} + \cdots + \lambda_m P_{fa_m}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_m} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i P_{fa_i}}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (12)$$

进而可以得到边坡的模糊随机可靠度指标 β。

3 算例分析

图 5 为一个简单的均质边坡计算模型。取土体重

度 γ=18 kN/m<sup>3</sup>; 弹性模量 E=100 MPa; 泊松比 ν=0.3; 黏聚力 c 与内摩擦角 φ 均为正态模糊随机变量, c 的均值 m<sub>c</sub>=10 kPa, 变异系数 ν<sub>c</sub>=0.25, φ 的均值 m<sub>φ</sub>=20°, 变异系数 ν<sub>φ</sub>=0.3。暂不考虑 c 与 φ 标准差的模糊性, 仅视 m<sub>c</sub> 与 m<sub>φ</sub> 为正态模糊数, 取形状参数 k=1.5。土体的水平波动范围 δ<sub>H</sub>=20 m, 垂直波动范围 δ<sub>V</sub>=2 m。

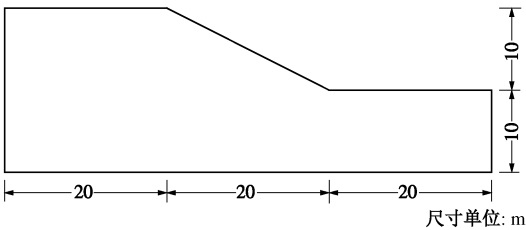


图 5 均质边坡计算模型

Fig. 5 Computational model for homogeneous slope

利用有限元法对边坡进行确定性分析, 得到该边坡的安全系数为 F<sub>s</sub>=1.403。考虑黏聚力和内摩擦角的模糊随机性, 取 6 个不同的截集水平 {0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00}, 利用本文方法计算边坡的模糊随机可靠度, 结果见表 1, 2。

表 1 各截集水平上的可靠度指标

Table 1 Reliability indexes on different fuzzy cut sets			
截集水平	值域	区间方法	加权方法
0.75	[0.298, 3.719]	0.922	1.166
0.80	[0.512, 3.891]	0.943	1.305
0.85	[0.734, 3.719]	0.955	1.432
0.90	[1.052, 3.540]	0.970	1.632
0.95	[1.338, 2.968]	0.975	1.851
1.00	2.108	2.108	2.108

表 2 模糊随机可靠度计算结果

Table 2 Results of fuzzy-random reliability analysis				
截集水平	传统方法		本文方法	
	P <sub>f</sub> /%	β	P <sub>f</sub> /%	β
0.75	14.05	1.078	12.19	1.166
0.80	12.65	1.143	9.60	1.305
0.85	12.38	1.156	7.60	1.433
0.90	11.36	1.208	5.13	1.632
0.95	10.64	1.246	3.21	1.851
1.00	9.95	1.284	1.75	2.108
整体	11.71	1.190	6.23	1.536

表 1 给出了利用区间方法 (式 (9)) 和加权方法 (式 (10)) 得到的边坡在各截集水平上的可靠度指标。从表中可以看出, 采用加权方法得到的不同截集水平上的可靠度指标变化较为均匀; 而采用区间方法得到的前 5 个截集水平上的可靠度指标十分接近, 均与第 6 个截集水平上的可靠度指标差别较大, 且在 0.90 和 0.95 这 2 个截集水平上求得的可度指标均已超出其真实值域。这表明本文采用加权方法计算边坡在各截

集水平上的可靠度指标是相对合理的。

表 2 给出了本文方法和传统方法（未考虑土性参数空间变异性的边坡模糊随机可靠度分析方法）得到的边坡模糊随机可靠度计算结果。表中，传统方法得到的边坡失效概率为  $P_f = 11.71\%$ ，模糊随机可靠度指标为  $\beta = 1.190$ ；本文方法得到的边坡失效概率为  $P_f = 6.23\%$ ，模糊随机可靠度指标为  $\beta = 1.536$ ；且在各截集水平上，传统方法得到的失效概率均偏大，可靠度指标均偏小。这表明在边坡的模糊随机可靠度分析中，土性参数的空间变异性对计算结果存在一定影响。

### 3.1 波动范围对边坡模糊随机可靠度的影响

波动范围是表征土性参数空间变异性的重要参数之一。为研究波动范围对边坡模糊随机可靠度的影响，保持水平波动范围  $\delta_H$  与垂直波动范围  $\delta_V$  中的一个不变，将另一个依次扩大 0.5, 2, 3, 4, 5 倍，得到边坡模糊随机可靠度随波动范围变化曲线见图 6。

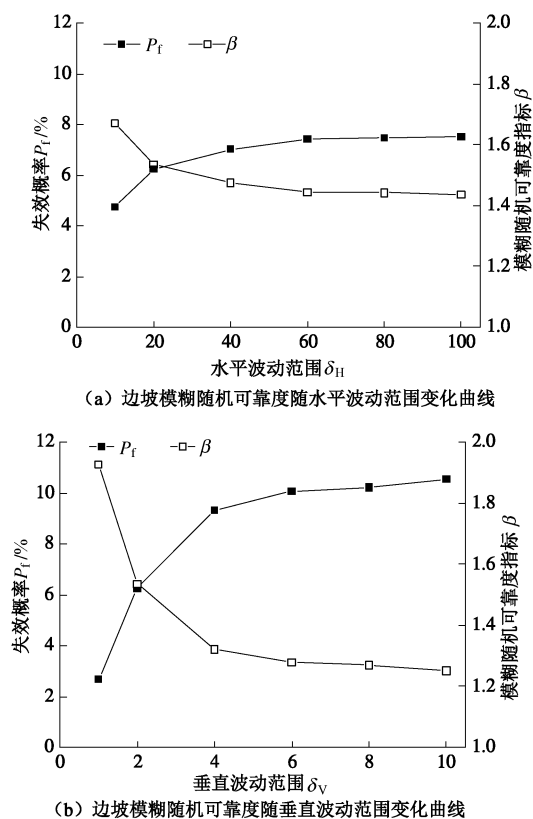


图 6 波动范围对边坡模糊随机可靠度的影响

Fig. 6 Effects of scales of fluctuation on fuzzy-random reliability

图 6 中，随着波动范围的增大，边坡的失效概率增加，模糊随机可靠度指标降低，且增加（降低）的幅度逐渐减缓。对比图 6 (a) 和图 6 (b) 可以发现，垂直波动范围对边坡失效概率和模糊随机可靠度指标的影响远大于水平波动范围所产生的影响，这表明垂直方向空间变异性对边坡模糊随机可靠度的影响更为显著，也从另一方面说明了采用各向异性随机场模拟

土性参数空间变异性的必要性。若因条件限制或计算简化需采用一维随机场或等效各向同性随机场模型时，宜优先考虑土性参数在垂直方向的空间变异性。

### 3.2 参数变异性对边坡模糊随机可靠度的影响

为研究抗剪强度参数变异性对边坡模糊随机可靠度的影响，保持黏聚力变异系数  $v_c$  和内摩擦角变异系数  $v_\phi$  中的一个不变，将另一个依次改变为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5，在  $\delta_H = 20$  m、 $\delta_V = 2$  m 条件下计算边坡的模糊随机可靠度，结果见图 7。图 7 中同时给出了传统方法的计算结果以供对比。

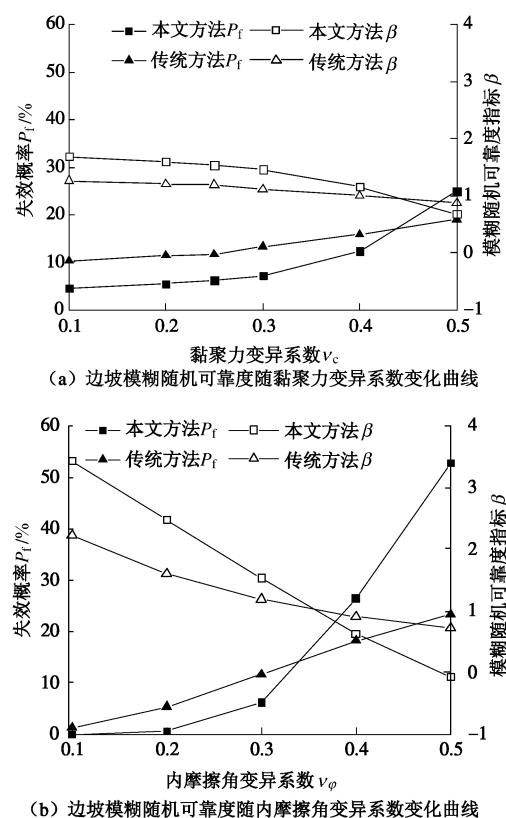


图 7 参数变异性对边坡模糊随机可靠度的影响

Fig. 7 Effects of parameter variability on fuzzy-random reliability

图 7 中，随着抗剪强度参数变异性的增大，边坡的失效概率增加，模糊随机可靠度指标降低；且考虑土性参数的空间变异性时，边坡失效概率和模糊随机可靠度指标随着抗剪强度参数变异系数增大而变化的趋势更为明显。图 7 (a) 中， $v_c \leq 0.4$  时，传统方法得到的失效概率较大，而  $v_c \geq 0.5$  时，本文方法得到的失效概率较大；图 7 (b) 中， $v_\phi \leq 0.3$  时，传统方法得到的失效概率较大，而  $v_\phi \geq 0.4$  时，本文方法得到的失效概率较大，甚至  $v_\phi = 0.5$  时，传统方法与本文方法得到的失效概率相差达 29.49%；这表明忽略土性参数的空间变异性并非总会高估边坡的失效概率，在抗剪强度参数变异性较大时反而可能会低估边坡的失效概率，得到偏于危险的计算结果。此外，对比图 7

(a)与图7(b),还可以发现相对于黏聚力的变异性,内摩擦角的变异性对边坡模糊随机可靠度的影响更为显著。

### 3.3 参数相关性对边坡模糊随机可靠度的影响

土体的物理力学参数之间多存在一定的相关性,其中黏聚力与内摩擦角的相关性对边坡可靠度的影响相对较大。资料表明,黏聚力与内摩擦角之间的相关系数 $\rho_{cp}$ 在 $-0.72\sim 0.35$ 之间<sup>[22]</sup>。考虑这种相关性对边坡模糊随机可靠度的影响,取 $\rho_{cp}$ 分别为 $-0.6, -0.4, -0.2, 0.2, 0.4$ ,在 $\delta_H=20\text{ m}$ ,  $\delta_V=2\text{ m}$ ,  $v_c=0.25$ ,  $v_\phi=0.3$ 条件下,采用本文方法及传统方法计算边坡的模糊随机可靠度,结果见图8。

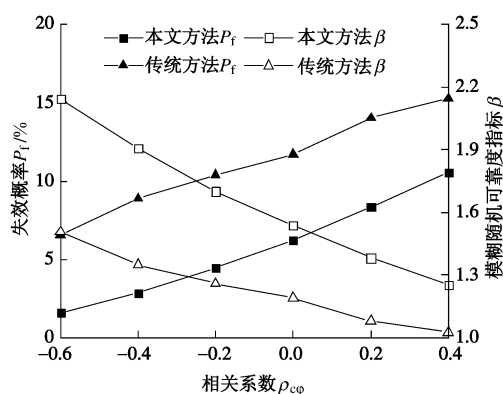


图8 黏聚力、内摩擦角的相关性对边坡模糊随机可靠度的影响

Fig. 8 Effects of  $\rho_{cp}$  on fuzzy-random reliability

图8中,黏聚力与内摩擦角之间的相关系数越大,边坡的失效概率越高,模糊随机可靠度指标越低。虽然考虑土性参数空间变异性时得到的失效概率要小于忽略土性参数空间变异性时得到的失效概率,但两种情况下得到的失效概率之差基本保持稳定,这表明黏聚力与内摩擦角之间的相关性对边坡失效概率的影响趋势基本不受土性参数空间变异性的影响。

## 4 结论与建议

本文将随机有限元法与模糊截集法相结合,提出一种新的边坡模糊随机可靠度分析方法,该方法既考虑了参数的模糊随机性,又考虑了参数的空间变异性,能得到比传统方法更为精确的结果。算例分析表明:

(1)一般情况下,不考虑土性参数的空间变异性会低估边坡的模糊随机可靠度指标。但在抗剪强度参数变异性较大时,不考虑土性参数的空间变异性反而可能会高估边坡的模糊随机可靠度指标,得到偏于危险的计算结果。

(2)垂直波动范围和水平波动范围的增大,均会降低边坡的模糊随机可靠度指标;且垂直波动范围对边坡模糊随机可靠度的影响要远大于水平波动范围所

产生的影响。

(3)抗剪强度参数变异系数的增大,均会降低边坡的模糊随机可靠度指标;且内摩擦角的变异性对边坡模糊随机可靠度的影响更为显著。

(4)黏聚力与内摩擦角之间的相关性对边坡失效概率的影响趋势基本不受土性参数空间变异性的干扰。

### 参考文献:

- [1] YANG Kun, ZHANG Xin. Fuzzy random reliability analysis of blocky rock-mass in slopes[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, **15**(2): 129 - 134.
- [2] 吕玺琳, 钱建固, 吕 龙, 等. 边坡模糊随机可靠性分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3437 - 3442. (LÜ Xi-lin, QIAN Jian-gu, LÜ Long, et al. Fuzzy stochastic reliability analysis of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3437 - 3442. (in Chinese))
- [3] 谭晓慧, 王建国, 胡晓军, 等. 边坡稳定的模糊随机有限元可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(7): 991 - 996. (TAN Xiao-hui, WANG Jian-guo, HU Xiao-jun, et al. Fuzzy random finite element reliability analysis of slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 991 - 996. (in Chinese))
- [4] 王 宇, 贾志刚, 李 晓, 等. 边坡模糊随机可靠性分析的模糊点估计法[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1795 - 1800. (WANG Yu, JIA Zhi-gang, LI Xiao, et al. Fuzzy random reliability analysis of slope based on fuzzy point estimate method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(6): 1795 - 1800. (in Chinese))
- [5] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑不排水抗剪强度空间变异性的条形基础极限承载力随机分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(6): 1095 - 1105. (QI Xiao-hui, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic analysis of ultimate bearing capacity of strip footing considering spatial variability of undrained shear strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1095 - 1105. (in Chinese))
- [6] VANMARCKE E. Random fields: analysis and synthesis [M]. Cambridge: MIT Press, 1983.
- [7] 谢康和, 周 健. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (XIE Kang-he, ZHOU Jian. Theory and application of finite element analysis for geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 舒苏荀, 龚文惠. 考虑参数空间变异性的边坡模糊随机可靠度分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(9):

- 93 - 97. (SHU Su-xun, GONG Wen-hui. Fuzzy random reliability analysis of slopes considering spatial variability of soil parameters[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(9): 93 - 97. (in Chinese))
- [9] 杨继红, 刘汉东, 秦四清, 等. 考虑土性参数空间变异性的边坡可靠度分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 205 - 211. (YANG Ji-hong, LIU Han-dong, QIN Si-qing, et al. Reliability analysis of slope stability taking into consideration of spatial variability of soil parameters[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 205 - 211. (in Chinese))
- [10] 吴振君, 王水林, 葛修润. 约束随机场下的边坡可靠度随机有限元分析方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3086 - 3092. (WU Zhen-jun, WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Slope reliability analysis by random FEM under constraint random field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3086 - 3092. (in Chinese))
- [11] LI Liang, WANG Yu, CAO Zi-jun, et al. Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 53: 95 - 105.
- [12] 潘 健, 周 森. 考虑参数空间变异性的不排水边坡可靠度分析[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2010, 25(3): 74 - 80. (PAN Jian, ZHOU Sen. Analysis of influence of spatial variability on undrained slope reliability[J]. Journal of Shantou University (Natural Science), 2010, 25(3): 74 - 80. (in Chinese))
- [13] GRIFFITHS D V, HUANG J S, FENTON G A. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1367 - 1378.
- [14] 薛亚东, 方 超, 葛嘉诚. 各向异性随机场下的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 77 - 82. (XUE Ya-dong, FANG Chao, GE Jia-cheng. Slope reliability in anisotropic random fields[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 77 - 82. (in Chinese))
- [15] 李典庆, 蒋水华, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的边坡可靠度分析非侵入式随机有限元法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1413 - 1422. (LI Dian-qing, JIANG Shui-hua, ZHOU Chuang-bing, et al. Reliability analysis of slopes considering spatial variability of soil parameters using non-intrusive stochastic finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1413 - 1422. (in Chinese))
- [16] 白 桃, 黄晓明, 李 昶. 考虑土体参数空间变异性的边坡稳定性研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(12): 2221 - 2226. (BAI Tao, HUANG Xiao-ming, LI Chang. Slope stability analysis considering spatial variability of soil properties[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(12): 2221 - 2226. (in Chinese))
- [17] LI Ya-jun, LIU Si-hong, FU Zhong-zhi, et al. Comparative study on different parameters of random finite element models for an embankment supported by multilayered foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 162 - 169.
- [18] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WU Qing-xi. Structural reliability analysis and random finite element method[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese))
- [19] LI K S, LUMB P. Probabilistic design of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4): 520 - 535.
- [20] 曹文贵, 张永杰. 基于区间截断法的地下结构模糊能度可靠性模型研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1455 - 1459. (CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie. Study on reliability model of fuzzy probability of underground structure with interval-truncation approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1455 - 1459. (in Chinese))
- [21] DODAGOUDAR G R, VENKATACHALAM G. Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory[J]. Engineering Geology, 1998, 49(2): 111 - 122.
- [22] KRAHN J. Stability modeling with SLOPE/W: An engineering methodology[M]. Canada: GEO-SLOPE International Ltd, 2004.