

DOI: 10.11779/CJGE201606014

考虑概率分布影响的低概率水平边坡可靠度分析

蒋水华, 魏博文*, 姚池, 杨建华

(南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 目前考虑土体参数空间变异性的边坡可靠度分析所研究的边坡几何尺寸相对较小。为有效地分析考虑参数空间变异性的几何尺寸相对较大的边坡可靠度问题, 提出了基于多重响应面与子集模拟的边坡可靠度分析方法。以一个坡高为 24 m 的两层非均质黏土边坡为例验证了提出方法的有效性, 并探讨了正态、对数正态、极值 I 型、Gamma 和 Beta 这 5 种概率分布类型对边坡可靠度的影响。结果表明, 提出方法具有以下优势: ①可以有效地计算考虑多参数空间变异性的低概率水平边坡可靠度; ②可以较好地解决几何尺寸相对较大的边坡可靠度问题; ③有较高的参数敏感性分析计算效率, 可为调查概率分布类型和波动范围等参数统计特征对边坡可靠度的影响提供技术支持。此外, 参数概率分布类型对边坡可靠度具有重要的影响, 常用的正态和对数正态分布分别用于表征参数概率分布特征时, 可能会分别高估和低估边坡失效概率。

关键词: 边坡可靠度; 空间变异性; 低概率水平; 概率分布; 子集模拟

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1071-10

作者简介: 蒋水华(1987-), 男, 江西九江人, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程可靠度和风险控制方面的研究。E-mail: sjjiangaa@ncu.edu.cn。

Reliability analysis of soil slopes at low-probability levels considering effect of probability distributions

JIANG Shui-hua, WEI Bo-wen, YAO Chi, YANG Jian-hua

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The existing geometries of the slopes in slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties are relatively small. An efficient approach based on the multiple response-surface and subset simulation is proposed for solving slope reliability problems involving relatively large slope geometries. An example of reliability analysis of two-layered heterogeneous clay slope with the height of 24 m is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The effect of marginal probability distributions, namely Gaussian, lognormal, Extvalue I, Gamma and Beta on slope reliability is investigated. The results indicate that the proposed approach possesses the following advantages: (1) it can properly evaluate the slope reliability at low-probability levels (i.e., $10^{-9} \sim 10^{-4}$) in spatially variable soils; (2) it effectively solves slope reliability problems involving relatively large slope geometries; (3) it greatly improves the computational efficiency in parametric sensitivity analysis, and provides an effective way to investigate the effects of statistics (e.g., probability distribution, scale of fluctuation) on the slope reliability. Additionally, the marginal probability distributions of soil properties significantly affect the slope reliability. The commonly-used Gaussian and lognormal distributions may overestimate and underestimate the probability of slope failure, respectively.

Key words: slope reliability; spatial variability; low-probability level; probability distribution; subset simulation

0 引 言

天然土体由于受到沉积、后沉积、化学风化、搬运作用与荷载历史、应力环境以及埋藏条件等因素的影响, 即使均质土体特性也呈现一定的空间变异性和层状分布特征^[1-3], 随机场理论和地质统计学中的区域化变量理论均能够较好地描述这种空间变异性^[4]。许多学者^[5-17]采用随机场理论对土体参数空间变异性问

题进行了大量有益的探索, 并且在考虑土体参数空间变异性对边坡稳定性影响方面取得了一定的进展。Li 等^[5]、Suchomel 等^[6]采用一次二阶矩方法 (FOSM) 研

基金项目: 长江科学院开放研究基金项目 (CKWV2015222/KY); 国家自然科学基金项目 (51509125, 51409139)

收稿日期: 2015-12-22

*通讯作者

究了考虑参数空间变异性的边坡可靠度问题。Ji 等^[7]考虑土体参数空间变异性采用一阶可靠度方法 (FORM) 计算边坡可靠度。Hicks 等^[8]、Griffiths 等^[9]、Cho^[10-11]、Huang 等^[12]与 Salgado 等^[13]均采用直接蒙特卡洛模拟 (MCS) 方法分析考虑土体参数空间变异性的边坡可靠度问题。Wang 等^[14]采用子集模拟方法研究了土体参数空间变异性对边坡可靠度的影响。Li 等^[15]、Jiang 等^[16]和 Li 等^[17]采用多项式展开代理模型结合 MCS 方法研究了考虑参数空间变异性的边坡可靠度问题。如表 1 所示, 目前所研究的考虑参数空间变异性边坡可靠度问题的边坡几何尺寸相对较小, 坡高大多在 10 m 以下, 对于几何尺寸相对较大的边坡可靠度问题研究的远远不够; 其次, 大多研究局限于分析考虑参数空间变异性概率水平为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 的边坡可靠度问题, 但是对于概率水平较低 ($10^{-9} \sim 10^{-4}$) 的边坡可靠度问题, 目前还没有较好的分析方法; 最后, 目前大多采用正态 (高斯) 和对数正态分布模拟土体参数概率分布特征, 然而 Lumb^[18]、Popescu 等^[19]、Zhou 等^[20]、Jimenez 等^[21]、张继周等^[22]和 Jiang 等^[23]明确指出土体参数分布类型对岩土结构可靠度具有重要的影响, 因此将正态和对数正态分布常用于表征土体参数概率分布特征的合理性还有待进一步验证。

本文为尝试解决考虑土体参数空间变异性几何尺寸相对较大的低概率水平边坡可靠度问题, 提出了基于多重响应面与子集模拟的边坡可靠度分析方法, 并通过分析一个两层非均质黏土边坡可靠度问题验证了提出方法的有效性。同时探讨了用于表征参数概率分布特征的正态、对数正态、极值 I 型、Gamma 和 Beta 这 5 种概率分布类型对边坡可靠度的影响, 并重点强调常用的正态和对数正态分布的合理性。

1 基于多重响应面的子集模拟方法

1.1 基于多重响应面的功能函数构建

表 1 考虑土体参数空间变异性边坡可靠度研究统计

Table 1 Statistics of studies on slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties

坡高/m	概率分布类型	可靠度计算方法	概率水平	文献来源
10	正态	FOSM	$10^{-8} \sim 10^{-3}$	Li 等 ^[5]
17	正态	FOSM	10^{-1}	Suchomel 等 ^[6]
5, 10	正态	FORM	10^{-3}	Ji 等 ^[7]
5	对数正态	MCS	—	Hicks 等 ^[8]
10	对数正态	MCS	10^{-1}	Griffiths 等 ^[9]
10	对数正态	MCS	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	Cho ^[10]
5, 10	对数正态	MCS	10^{-3}	Cho ^[11]
10	对数正态	MCS	10^{-1}	Huang 等 ^[12]
5.48, 5.78, 8.48, 4.35	正态	MCS	10^{-4}	Salgado 等 ^[13]
10	对数正态	子集模拟方法	10^{-3}	Wang 等 ^[14]
6	对数正态	代理模型+MCS	10^{-3}	Li 等 ^[15]
5, 10	对数正态	代理模型+MCS	10^{-4}	Jiang 等 ^[16]
10	对数正态	代理模型+MCS	10^{-4}	Li 等 ^[17]

边坡可靠度分析最为关键的一步是搜索边坡最危险滑动面, 确定临界安全系数 F_{Smin} , 由于安全系数是输入参数的非线性隐式函数关系, 一般需要通过确定性边坡稳定性分析直接计算 F_{Smin} , 而边坡可靠度分析常需要计算成千上万次 F_{Smin} , 导致计算量非常大。为提高 F_{Smin} 的计算效率, 许多学者采用多项式展开、克里金和神经网络等代理模型建立边坡安全系数与输入参数间的近似显式函数关系。由于考虑土体参数空间变异性时边坡常存在大量空间分布的潜在滑动面^[14], 本文拟采用 2 阶不含交叉项多项式展开建立边坡每条潜在滑动面安全系数与原始空间随机变量 \mathbf{X} (如黏聚力和内摩擦角) 间的函数关系^[15, 17, 24], 称为响应面。如对于第 j 条潜在滑动面, 其安全系数响应面的表达式为

$$F_{Sj}(\mathbf{X}) = a_{1,j} + \sum_{i=1}^N b_{i,j} X_i + \sum_{i=1}^N c_{i,j} X_i^2 \quad (1)$$

式中, $F_{Sj}(\mathbf{X})$ 为边坡第 j 条潜在滑动面的安全系数, $j = 1, 2, \dots, N_s$, N_s 为可覆盖整个边坡失效区域的潜在滑动面数目; \mathbf{X} 为原始空间随机向量, 每个随机场单元中心点处的土体抗剪强度参数常视作空间随机变量; $(a_{1,j}, b_{1,j}, \dots, b_{N,j}, c_{1,j}, \dots, c_{N,j})$ 为待定系数, 其中 N 为随机变量数目, 可见待定系数的数目为 $2N+1$ 。

为建立边坡安全系数的多重响应面, 本文采用 $2N+1$ 组合样本设计方法^[15, 17, 24-25]计算多项式展开系数, 即分别在每个原始空间随机变量的均值附近以其均值加减 2 倍标准差产生输入样本点, $\{\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_N}\}$, $\{\mu_{X_1} \pm 2\sigma_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_N}\}$, \dots , $\{\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_i} \pm 2\sigma_{X_i}, \dots, \mu_{X_N}\}$, \dots , $\{\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_N} \pm 2\sigma_{X_N}\}$, 其中 μ_{X_i} 和 σ_{X_i} 分别为第 i 个空间随机变量的均值与标准差; 然后, 基于 $2N+1$ 组输入参数样本点采用极限平衡或有限元等方法进行 $2N+1$ 次边坡稳定性分析, 并从计算结果中提取每条潜在滑动面对应的 $2N+1$ 个安全系数; 接着, 如对于第 j 条潜在滑动面, 将 $2N+1$

组样本点和与其对应的 $2N+1$ 个安全系数分别代入式 (1) 便可建立线性代数方程组, 求解线性代数方程组得到多项式展开系数, 进而获得第 j 条潜在滑动面安全系数的响应面; 重复 N_s 次建立并求解线性代数方程组, 即可得到边坡安全系数的多 (N_s) 重响应面 (MRS)。在此基础上, 可得到边坡稳定可靠度分析所需的功能函数为

$$G(\mathbf{X}) = F_{S_{\min}}(\mathbf{X}) - 1.0 = \min_{j=1,2,\dots,N_s} F_{S_j}(\mathbf{X}) - 1.0, \quad (2)$$

式中, $\min_{j=1,2,\dots,N_s} F_{S_j}(\mathbf{X})$ 为基于原始空间参数随机场的某一次实现值 \mathbf{X} , 取安全系数 N_s 重响应面函数值的最小值, 可以借助 MATLAB 的 $\min(\cdot)$ 函数实现。综上所述, 多重响应面构建过程中没有涉及随机场实现等信息, 一旦多重响应面建立之后, 只需将原始空间参数随机场实现值代入显式数学表达式计算边坡临界安全系数 $F_{S_{\min}}$ 和功能函数值, 便可进行边坡可靠度分析。本文为了获得原始空间参数随机场实现值, 采用乔列斯基分解技术模拟非高斯参数随机场。

1.2 非高斯参数随机场模拟

对于边坡几何尺寸相对较大的问题, 如采用 EOLE 或 Karhunen-Loève 展开方法^[26-27]离散参数随机场, 为满足计算精度要求, 所需离散的随机变量数目随着边坡几何尺寸的增大而明显增加, 进而导致边坡可靠度计算量急剧增大, 为提高计算效率, 本文采用乔列斯基分解技术离散非高斯参数随机场^[6,17,28]。鉴于自相关函数和波动范围是非高斯参数随机场模拟的重要输入参数, 为此首先对其进行简要介绍。常用的理论自相关函数类型较多, 如指数型、高斯型、二阶自回归型和指数余弦型等^[5], 其中高斯型自相关函数常被用于拟合现场试验数据的空间自相关性从而确定土体特性的波动范围^[29], 并且它是个连续可微函数, 所模拟的参数随机场过渡更为平稳、连续性较好, 在边坡可靠度分析中得到了广泛应用^[5,16], 其计算表达式为

$$\rho(\tau_x, \tau_y) = \exp \left[-\pi \left(\frac{\tau_x^2}{\delta_h^2} + \frac{\tau_y^2}{\delta_v^2} \right) \right], \quad (3)$$

式中, $\tau_x = |x_i - x_j|$ 和 $\tau_y = |y_i - y_j|$ 分别为空间任意两点间的水平和垂直相对距离, δ_h 和 δ_v 分别为水平和垂直波动范围, 常用于表征土体参数空间自相关程度, 是自相关函数的重要组成部分。众所周知, 空间任意两点土体特性之间既存在差异又具有一定的自相关性, 土体特性自身之间的这种自相关性一般随着两点相对距离的增大而逐渐减少, 当距离大于某一特定值后, 自相关性几乎可以忽略不计, 随机场理论中将这一特定值称为波动范围^[4]。波动范围越大, 表示参数空间

自相关性越强, 即空间变异性程度越弱, 土体特性围绕其均质上下变化越平稳; 波动范围越小, 参数空间自相关性越弱, 即空间变异性程度越强, 土体特性围绕其均值上下波动越剧烈。由于沉积环境与地质作用等方面的原因, 土体的空间变异性表现为明显的各向异性^[2, 30], 对于一般沉积土层, 其水平向的变异性比垂直向的要小很多。为了考虑这种变异性的差异, 通常在水平和垂直方向上取不同数值的波动范围将土体参数模拟为各向异性随机场, 一般来说水平波动范围要比垂直波动范围大一个数量级^[2, 8], 再进行边坡稳定可靠度分析更为合理。

由于波动范围对土体参数空间自相关性表征和边坡可靠度分析均具有重要的作用, 故可靠度分析之前首先需要确定某一特定岩土场地土体特性的波动范围。如果容易获得大量的现场试验数据, 便可根据现场实测数据采用常用的相关函数法、递推平均法、平均零跨法、曲线极限法、统计矩法和贝叶斯方法等直接计算土体参数的波动范围^[29-30]。然而, 以上方法确定土体参数波动范围均需要大量的现场实测数据且受取样间距的影响^[2], 对于某一特定岩土场地, 现场实测数据通常十分有限, 要想获得大量的现场实测数据一般需要投入大量的人力物力, 因此这些方法具有一定的局限性。为此, 许多学者一般通过收集国内外类似工程土体参数的波动范围和参考已有文献, 确定不同土体特性的水平和垂直波动范围的取值范围。本文参考文献^[2, 7, 13, 17, 31]的相关统计结果, 总结出黏性土抗剪强度参数水平波动范围约为 10~62 m, 垂直波动范围约为 0.1~8.0 m。另外为保守起见, 可以根据以上取值范围对波动范围进行参数敏感性分析, 调查土体参数波动范围对边坡可靠度的影响, 将导致边坡设计方案偏保守的波动范围选作为某一特定岩土场地土体特性的波动范围。获得自相关函数和波动范围之后, 基于乔列斯基分解技术模拟土体参数非高斯随机场的主要步骤如下:

(1) 针对二维边坡区域 $\Omega = \{(x, y): 0 \leq x \leq L_x; 0 \leq y \leq L_y\}$, (x, y) 为二维区域内的任意点坐标, L_x 和 L_y 分别为边坡区域水平和垂直方向的几何尺寸大小。剖分随机场单元网格, 提取每个单元网格中心点坐标 $Q_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \dots, n_e$, n_e 为随机场单元网格数目。

(2) 随机产生一组独立标准正态空间随机样本向量, $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_2, \xi_{n_e})^T$ 。

(3) 根据自相关函数和随机场单元网格中心点坐标, 计算原始空间不同点处随机场特性值之间自相关系数, 并构成自相关矩阵 \mathbf{C} , 其计算公式为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \rho(\tau_{x_{1,2}}, \tau_{y_{1,2}}) & \cdots & \rho(\tau_{x_{1,n_e}}, \tau_{y_{1,n_e}}) \\ \rho(\tau_{x_{1,2}}, \tau_{y_{1,2}}) & 1 & \cdots & \rho(\tau_{x_{2,n_e}}, \tau_{y_{2,n_e}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(\tau_{x_{1,n_e}}, \tau_{y_{1,n_e}}) & \rho(\tau_{x_{2,n_e}}, \tau_{y_{2,n_e}}) & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, C 是维度为 $n_e \times n_e$ 对称正定的输入参数空间自相关矩阵; $\rho(\tau_{x_{i,j}}, \tau_{y_{i,j}})$ 为第 i 个随机场单元中心点 Q_i 坐标和第 j 个单元中心点 Q_j 坐标代入自相关函数所获得的自相关系数。

(4) 对自相关矩阵 C 进行乔列斯基分解, $LL^T = C$, 得到维度为 $n_e \times n_e$ 的下三角矩阵 L , 将其与随机样本向量 ξ 相乘, 便可得维度为 $n_e \times 1$ 的高斯参数随机场,

$$X^G(x, y) = L\xi \quad ((x, y) \in \Omega) \quad (5)$$

(5) 根据参数随机场的统计特征(均值、标准差和边缘概率分布), 通过等概率变换方法^[32]可将标准高斯参数随机场变换为原始空间非高斯参数随机场,

$$X^{NG}(x, y) = F_i^{-1} \left\{ \Phi \left[X^G(x, y) \right] \right\} \quad ((x, y) \in \Omega), \quad (6)$$

式中, $F_i^{-1}(\cdot)$ 为输入参数随机场边缘累积分布的逆函数, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态变量的累积分布函数。综上, 重复 N_l 次步骤(2)至(5), 便可得到非高斯参数随机场的 N_l 次实现。原始空间参数随机场特性值的每个分量不仅取决于自相关函数和波动范围, 而且还与随机场单元网格中心点相对应。此外, 该方法同样可以拓展到模拟任意多个相关非高斯参数随机场。

1.3 基于子集模拟的边坡失效概率计算

通过1.1节和1.2节分别获得安全系数多重响应面和土体参数随机场实现值之后, 只需将随机场实现值代入式(1)、(2)计算边坡临界安全系数 F_{smin} 和功能函数值, 便可进行边坡可靠度分析, 无需再进行确定性边坡稳定性分析。此时, 理论上完全可以采用 MCS 方法计算边坡失效概率, 然而, 对于几何尺寸较大的边坡, 考虑参数空间变异性时边坡可能存在较多的潜在滑动面, 并为了保证随机场单元尺寸满足计算精度要求, 参数随机场所需离散的随机变量较多, 在此基础上如求解常见的低概率水平边坡可靠度问题, 即使基于多重响应面采用 MCS 方法计算失效概率, 其计算量也非常庞大, 并且常会超出计算机的内存要求。本文另辟蹊径, 为有效计算低概率水平的高维边坡可靠度问题, 提出在多重响应面基础上采用子集模拟计算边坡失效概率。

子集模拟(subset simulation, SS)是一种高效的 MCS 方法, 最早由 Au 等于 2001 年提出, 该方法最大的优势是可以有效地分析高维低概率水平可靠度问题, 目前已在岩土工程、结构工程、航空航天工程和

核工程中得到了广泛应用^[14, 33]。子集模拟利用乘法定理将一个小概率失效事件 F 发生概率表达为一系列中间失效事件条件概率的乘积, 对于边坡稳定性分析问题, 所关心的失效事件定义为 $F = \{G(X) < g\}$, F 的发生概率即为边坡失效概率 p_f , 计算公式为

$$p_f = P(F) = P[G(X) < g] = P(F_1) \prod_{i=1}^m P(F_{i+1} | F_i) \quad (7)$$

式中 $P(F_1)$ 为 F_1 的发生概率; $P(F_{i+1} | F_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为在 F_i 发生的条件下 F_{i+1} 发生的概率; g 为边坡失效临界阈值, 对于边坡失稳问题取 $g = 0$ 。子集模拟通过马尔科夫链蒙特卡洛模拟产生中间失效事件的条件样本, 并估计它们所对应的条件概率, 使之逐步逼近于目标失效区域 F 。其中关键一步是通过对所产生的随机样本进行统计分析, 确定失效事件 F_1, F_2, \dots, F_m 的临界阈值 g_1, g_2, \dots, g_m 使得 $P(F_1)$ 和 $P(F_{i+1} | F_i)$, $i = 1, 2, \dots, m-1$ 均等于条件概率 p_0 , 以及确定每层的样本数目 N_l 和条件概率 p_0 。根据 Au 等^[33], 通常 N_l 取为 500, p_0 取为 0.1~0.3。基于多重响应面和子集模拟的边坡失效概率计算的主要步骤如下:

在第 1 层产生 N_l 组 MCS 样本点, 根据给定的第 k 组 MCS 样本点, 采用第 1.2 节乔列斯基分解技术计算原始空间土体参数随机场的第 k 次实现值 X_k , 其中 $k = 1, 2, \dots, N_l$ 。并将第 k 次实现值 X_k 分别代入式(1)和(2)计算其对应的功能函数值, 类似地可得到 N_l 个 $G(X)$ 值。为使得有 $p_0 N_l$ 组随机样本的 $G(X)$ 值小于阈值 g_1 , $P(F_1)$ 等于条件概率 p_0 , 首先将 N_l 个 $G(X)$ 值按照升序排列, 并把第 $p_0 N_l + 1$ 个 $G(X)$ 值取作 g_1 。然后将从上一步中提取的 $p_0 N_l$ 组 $G(X)$ 值小于 g_1 的随机样本视作种子样本, 采用改进 Metropolis 算法^[33]产生另外 $(1 - p_0) N_l$ 组条件样本, 并基于这 $(1 - p_0) N_l$ 组随机样本也采用乔列斯基分解技术生成对应的原始空间土体参数随机场实现值, 并代入式(1)、(2)得到对应的 $G(X)$ 值, 显然这些 $G(X)$ 值也均小于 g_1 。将这 $(1 - p_0) N_l$ 个 $G(X)$ 值与上一步中提取的 $p_0 N_l$ 组种子样本对应的 $G(X)$ 值再一起按照升序排列, 同样将第 $p_0 N_l + 1$ 个 $G(X)$ 值作为阈值 g_2 , 则也有 $p_0 N_l$ 组随机样本 $G(X)$ 值小于 g_2 , 且有 $P(F_2 | F_1) = p_0$ 。类似地, 依次确定阈值 g_3, g_4, \dots, g_m , 分别用于定义失效事件 F_3, \dots, F_4, F_m , 使得 $P(F_{i+1} | F_i) = p_0$, $i = 2, 3, \dots, m-1$ 。最后, 随机样本在第 $m+1$ 层逼近目标失效事件 F , 也获得失效区域 F_{m+1} 中的 N_l 组随机样本, 计算其所对应的 $G(X)$ 值并按升序排列, 同样将第 $p_0 N_l + 1$ 个 $G(X)$ 值作为阈值 g_{m+1} , 然而与前 m 个阈值不同的是, 此时有 $g_{m+1} \leq 0$, 表明抽样空间已达到失效区域, 子集模拟计算终止。统计 $G(X) < 0$ 的失效样本数目, 计为 $n_{f,m+1}$, 显然有 $n_{f,m+1} \geq p_0 N_l$ 。此时, $P(F_{m+1} | F_m) = n_{f,m+1} / N_l$, 将

$P(F_1), P(F_2|F_1), \dots, P(F_{m+1}|F_m)$ 依次代入式 (7) 便可计算得到边坡失效概率 p_f 如下:

$$p_f = p_0^m \frac{n_{f,m+1}}{N_l} \quad (8)$$

由以上步骤可知, 子集模拟分析共需要执行 $m+1$ 层随机模拟, 有 $m+1$ 个中间失效事件 $F_i = \{G(\mathbf{X}) < g_i, i = 1, 2, \dots, m+1\}$, $F_1 \supset F_2 \supset \dots \supset F_m \supset F_{m+1}$, 对应的临界阈值分别为 $g_1 > g_2 > \dots > g_{m-1} > g_m > 0 \geq g_{m+1}$ 。所产生的随机样本总数 N_{sim} 为

$$N_{sim} = N_l + m(1 - p_0) N_l \quad (9)$$

式中包括第 1 层直接 MCS 的 N_l 组随机样本和其余 m 层基于马尔科夫链蒙特卡洛随机产生的 $m(1 - p_0)N_l$ 组条件样本, 其中对于边坡失效事件 F 共有 $n_{f,m+1}$ 组失效样本。需要说明的是采用子集模拟计算边坡失效概率时, 只需要对式 (2) 所示的显式表达功能函数进行分析, 其中采用式 (1) 计算临界安全系数 F_{Smin} , 而不再需要进行确定性边坡稳定性分析。因此, 本文提出方法可以有效地求解低概率水平的高维边坡可靠度问题, 编程也较为简便, 计算流程图如图 1 所示。

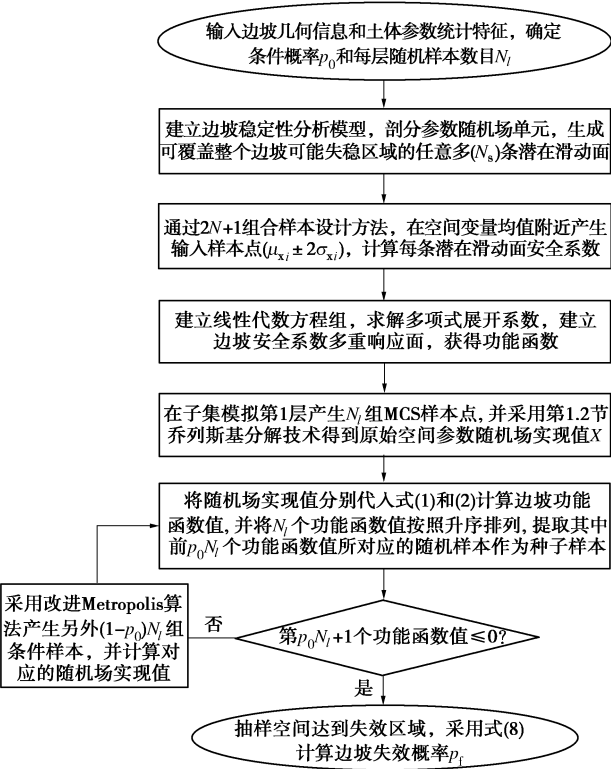


图 1 基于多重响应面的子集模拟方法的计算流程图

Fig. 1 Flow chart of multiple-response surface based subset simulation approach

2 两层不排水饱和黏土边坡

下面以一个两层不排水饱和黏土边坡为例来验证

本文提出方法的有效性, Ji 等^[25]、Ching 等^[34]、Low 等^[35]、Zhang 等^[36]、Cho^[37]和蒋水华等^[38]均对该边坡稳定进行了可靠度分析, 其计算结果可用来验证本文提出方法的有效性。边坡计算模型如图 2 所示, 边坡尺寸相对较大, 坡高为 24 m, 坡度为 0.75 : 1。根据以上文献, 两个黏土层的排水抗剪强度 s_{u1} 和 s_{u2} 的均值分别为 120, 160 kPa, 变异系数 $COV(s_{u1})$ 和 $COV(s_{u2})$ 均为 0.3, 首先假定 s_{u1} 和 s_{u2} 都服从对数正态分布。两个黏土层的土体重度 γ_{sat} 均为 19 kN/m³。取 s_{u1} 和 s_{u2} 的均值采用简化毕肖普法 (Bishop) 计算得到的 F_{Smin} 为 1.993, 与 Cho^[37]采用简化毕肖普法计算的 1.992 和 Ji 等^[25]采用普通条分法计算的 1.997 非常吻合, 自动搜索的最危险滑动面如图 2 虚线所示。

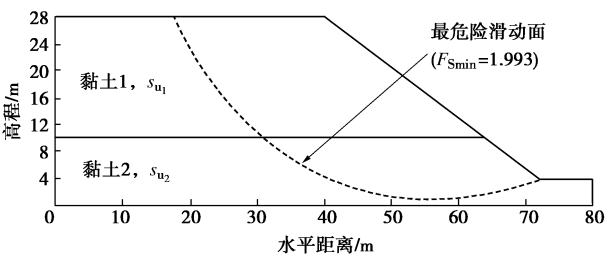


图 2 边坡计算模型及稳定性分析结果

Fig. 2 Slope geometry and stability analysis results

采用二维各向异性对数正态随机场模拟两个黏土层不排水抗剪强度 s_{u1} 和 s_{u2} 的空间变异性, 假定两个黏土层参数波动范围相等, 水平和垂直波动范围 δ_h 和 δ_v 分别取为 40, 4.0 m, 采用式 (3) 高斯型自相关函数模拟 s_{u1} 和 s_{u2} 的空间自相关性。首先将参数随机场共剖分为 856 个水平和垂直尺寸 l_x 和 l_y 分别为 4.0, 0.5 m 的四边形和三角形单元, 如图 3 所示, 上下两层土体分别剖分了 486 和 370 个随机场单元。需要指出的是, 随机场单元大小和数量对边坡可靠度计算结果均具有重要的影响, 本文随机场单元水平和垂直尺寸 l_x 和 l_y 与水平和垂直波动范围的比值分别为 $l_x / \delta_h = 4.0 / 40 = 0.1$ 和 $l_y / \delta_v = 0.5 / 4.0 = 0.125$, 根据文献[4, 39], 当随机场水平和垂直单元尺寸分别为 0.1 和 0.125 倍的水平和垂直波动范围时, 可以满足计算精度要求。

然后, 随机产生可覆盖整个边坡可能失稳区域的 N_s 条潜在滑动面, 根据 Li 等^[15]和 Zhang 等^[24], N_s 为 $10^3 \sim 10^4$ 量级便可满足计算精度要求, 本例随机产生了 $N_s = 7056$ 条潜在滑动面。接着建立 7056 条潜在滑动面安全系数与 856 个随机变量 ($N = 856$, 486 个 s_{u1} 和 370 个 s_{u2}) 之间的近似显式函数关系即多重响应面, 该过程只需要进行 1713 ($2N+1$) 次确定性边坡稳

定性分析。

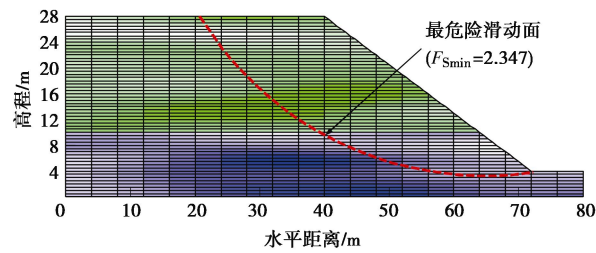


图 3 随机场一次典型实现及边坡稳定性分析结果

Fig. 3 Typical realization of random fields and slope stability analysis results

为验证所建立的安全系数多重响应面能否有效地代替确定性边坡稳定性分析计算临界安全系数 F_{Smin} 。随机产生了 500 组 MCS 样本点，并采用乔列斯基分解技术得到 s_{u1} 和 s_{u2} 随机场的 500 次实现值，其中 s_{u1} 和 s_{u2} 随机场的一次典型实现如图 3 所示，图中颜色较深部分表示参数值较大区域，颜色较浅部分表示参数值较小区域。然后，其一将两参数随机场的 500 次实现值分别代入所建立的多重响应面中计算 F_{Smin} ；其二将两参数随机场的 500 次实现值分别赋给边坡稳定性分析模型，采用简化毕肖普法直接计算 F_{Smin} 。图 4 对由多重响应面和简化毕肖普法计算得到的 F_{Smin} 进行了比较。由图 4 可知，所建立的多重响应面可以有效地代替确定性边坡稳定性分析准确地计算 F_{Smin} 。

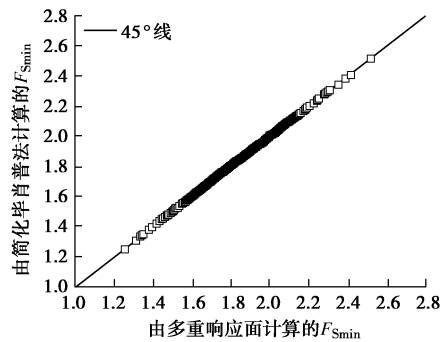


图 4 验证多重响应面的有效性

Fig. 4 Validation of multiple response surfaces

根据多重响应面进而建立式 (2) 所示边坡可靠度分析的功能函数，需要指出的是本例功能函数中的随机变量数目恰好等于随机场单元数目 ($N = 856$)，可见随机变量数目非常多，因此对于低概率水平 (如 $p_f \approx 10^{-9} \sim 10^{-4}$) 的高维边坡可靠度问题，即便在式 (2) 所示显式表达的功能函数上采用直接 MCS 方法计算边坡失效概率，计算量也非常可观，常会超出计算机的内存要求。为此采用子集模拟计算边坡失效概率，每层随机样本数目 N_l 取为 500，条件概率 p_0 取为 0.1，所需层数 $m+1$ 根据边坡失效概率水平确定。如表 2 所

示，本文提出方法 (MRS+SS) 只需要进行 1713 次边坡稳定性分析构建多重响应面，再结合 3200 次子集模拟计算的边坡失效概率为 1.14×10^{-7} ，不仅与基于多重响应面采用 2000 万次直接 MCS 方法 (MRS+MCS) 计算的边坡失效概率为 1.0×10^{-7} 非常吻合，而且与 3200 次直接子集模拟结合确定性边坡稳定性分析 (Bishop+SS) 计算的 p_f 为 1.38×10^{-7} 几乎一致。然而，本文提出方法的计算效率明显高于后两种方法，从而证明了本文提出方法分析考虑参数空间变异性低概率水平边坡可靠度问题的有效性。遗憾的是，此时难以采用直接 MCS 方法结合确定性边坡稳定性分析 (Bishop+MCS) 计算边坡失效概率。但是，为了仍能够利用基于确定性边坡稳定性分析的直接 MCS 方法计算结果来验证本文提出方法的有效性，表 2 中工况 2 分别将变异系数 $COV(s_{u1})$ 和 $COV(s_{u2})$ 增大至 0.4，计算结果也如表 2 所示。同样可见，本文提出方法 (MRS+SS) 计算的边坡失效概率为 1.12×10^{-4} ，不仅与 MRS 结合 20 万次 MCS 方法计算的 1.0×10^{-4} ，1850 次子集模拟结合确定性边坡稳定性分析 (Bishop+SS) 计算的 1.3×10^{-4} 一致，而且与 20 万次直接 MCS 方法结合确定性边坡稳定性分析 (Bishop+MCS) 计算的 1.0×10^{-4} 非常吻合，进一步证明了本文提出方法能够有效地分析考虑多参数空间变异性的低概率水平 ($10^{-9} \sim 10^{-4}$) 边坡可靠度问题。

表 2 边坡可靠度结果的比较 ($\delta_h = 40$ m 和 $\delta_v = 4.0$ m)

Table 2 Comparison of reliability results of slope					
工况	方法	N_{call}	N_{sim}	p_f	
$COV(s_{u1}) = 0.3$ $COV(s_{u2}) = 0.3$	MRS+SS	1713	3200	1.14×10^{-7}	
	MRS+MCS	1713	2×10^7	1.00×10^{-7}	
	Bishop+SS	3200	3200	1.38×10^{-7}	
$COV(s_{u1}) = 0.4$ $COV(s_{u2}) = 0.4$	MRS+SS	1713	1850	1.12×10^{-4}	
	MRS+MCS	1713	2×10^5	1.00×10^{-4}	
	Bishop+SS	1850	1850	1.30×10^{-4}	
	Bishop+MCS	2×10^5	2×10^5	1.00×10^{-4}	

由于文献[25, 34~38]均将两个黏土层的不排水抗剪强度 s_{u1} 和 s_{u2} 视为随机变量进行边坡可靠度分析，因此为了利用文献计算结果进一步验证本文提出方法的有效性，分别将水平和垂直波动范围 δ_h 和 δ_v 取为无穷大 (∞)，即相当忽略参数空间变异性的随机变量模型。此时本文提出方法和文献方法计算的边坡失效概率如表 3 所示。由表 3 可知，本文提出方法 (MRS+SS) 计算的 $p_f = 4.04 \times 10^{-3}$ 与 Ji 等^[25]采用分层响应面法结合一阶可靠度方法 ($[4.02 \times 10^{-3}, 4.11 \times 10^{-3}]$)、Ching 等^[34]采用的重要性抽样方法 (4.1×10^{-3})、Low 等^[35]采用的 Ditlevsen 上下限法

($[4.32 \times 10^{-3}, 4.41 \times 10^{-3}]$)、Zhang 等^[36]采用克里金响应面结合 MCS 方法 (4.58×10^{-3})、Cho^[37]采用多点一阶可靠度方法 (4.36×10^{-3}) 以及蒋水华等^[38]采用随机响应面法 (4.11×10^{-3}) 计算得到的 p_f 基本一致, 同样证明了本文提出方法的有效性。需要指出的是, 与表 2 相比, 边坡失效概率相差近 4 个数量级, 这主要因为考虑参数空间变异性时, 土体抗剪强度参数的不确定性沿着滑动面被均匀化^[4-5], 即沿滑动面的参数变异系数降低, 但参数均值保持不变, 故边坡失效概率降低。又因该边坡几何尺寸较大, 几何尺寸与波动范围的比值较大, 进而导致方差的折减程度较大, 抗剪强度参数变异性沿滑动面降低的较明显。

表 3 边坡可靠度结果的比较 ($\delta_h = \infty$ 和 $\delta_v = \infty$)

Table 3 Comparison of reliability results of slope		
方法	p_f	来源
MRS+SS	4.04×10^{-3}	本文
分层响应面法	$(4.02 \sim 4.11) \times 10^{-3}$	Ji 等 ^[25]
重要抽样方法	4.1×10^{-3}	Ching 等 ^[34]
Ditlevsen 上下限法	$(4.32 \sim 4.41) \times 10^{-3}$	Low 等 ^[35]
克里金响应面法	4.58×10^{-3}	Zhang 等 ^[36]
多点 FORM 方法	4.36×10^{-3}	Cho ^[37]
随机响应面法	4.11×10^{-3}	蒋水华等 ^[38]

由于本文方法在多重响应面建立过程中没有涉及随机场实现等信息, 即多重响应面一旦建立之后, 便无需重新再进行边坡稳定性分析校正多重响应面, 故此时采用子集模拟计算边坡失效概率不依赖输入参数的统计特征, 并且可通过参数敏感性分析研究土体参数统计特征 (如边缘概率分布、波动范围、变异系数和自相关函数等) 对边坡可靠度的影响。由表 1 可知,

由于岩土工程实际中现场试验数据非常有限, 目前一般采用正态和对数正态分布模拟土体参数的概率分布特征, 相比于正态分布, 对数正态分布还能保证土体参数不可能取到负值, 而且偏向于小值, 理论上更适合于表征土体参数的概率分布特征。为了验证正态和对数正态分布的合理性, 下面比较了正态、对数正态、极值 I 型、Gamma 和 Beta 概率分布^[18-23]对边坡可靠度的影响, 表 4 给出了这 5 种概率分布的概率密度函数 $f(x)$ 以及计算参数 q 和 r 与均值 μ_x 和标准差 σ_x 之间的转换关系^[22]。其中正态分布和对数正态分布均属于中心极限分布系列, 可表示大量不确定性因素相乘的极限分布形式; 极值 I 型分布属于极值分布系列, 可表示在随机变量的极值分析中当母体分布尾部特征为指数渐减时, 其渐进分布为极值 I 型分布; Gamma 分布属于 Poisson 分布系列, 可表示 Poisson 过程中事件第 k 次发生时所需时间 t 的概率; 如果随机变量在某一范围内上下变动, 则可以用 Beta 分布描述^[22]。

为了验证常用的正态和对数正态分布表征土体参数概率分布特征的合理性, 图 5 比较了不同水平和垂直波动范围处的边坡失效概率。根据第 1.2 节, 图 5 中的不排水抗剪强度参数水平和垂直波动范围的变化范围分别取为 10~60 m 和 1.0~6.0 m。需要说明的是, 在分析不同概率分布类型对边坡失效概率的影响时, 保持所有参数概率分布的均值和标准差均相同。此外, 当采用正态分布和 Beta 分布模拟土体抗剪强度参数概率分布特征时, 为了防止参数可能会取到负值, 统一对每个参数进行上下限截尾处理, 上下限设为 $[0, 2\mu_x]$ 。由图 5 可知, 垂直波动范围对边坡可靠度的影响明显大于水平波动范围, 本文提出方法甚至可以计

表 4 考虑土体参数空间变异性边坡可靠度研究统计

Table 4 Statistics of studies on slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties		
分布函数类型	概率密度函数 $f(x)$	参数 q 和 r 与 μ_x 和 σ_x 的转换关系
正态分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}r} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-q}{r}\right)^2\right]$	$\begin{cases} q = \mu_x \\ r = \sigma_x \end{cases}$
对数正态分布	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}xr} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-q}{r}\right]^2\right]$	$\begin{cases} q = \ln \mu_x - r^2/2 \\ r = \sqrt{\ln[1+(\sigma_x/\mu_x)^2]} \end{cases}$
极值 I 型分布	$f(x) = r \exp[-r(x-q)] \exp\{-\exp[-r(x-q)]\}$	$\begin{cases} q = \mu_x - 0.5772/r \\ r = \pi/(\sqrt{6}\sigma_x) \end{cases}$
Gamma 分布	$f(x) = \frac{x^{q-1}}{r^q \Gamma(q)} \exp\left(-\frac{x}{r}\right)$	$\begin{cases} q = (\mu_x/\sigma_x)^2 \\ r = \sigma_x^2/\mu_x \end{cases}$
Beta 分布	$f(x) = \frac{1}{B(q,r)}(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}, \quad (a \leq x \leq b)$ $B(q,r) = \frac{\Gamma(q)\Gamma(r)}{\Gamma(q+r)} = \int_0^1 x^{q-1}(1-x)^{r-1} dx$	$\begin{cases} q = \left[\frac{(\mu_x-a)(b-\mu_x)}{\sigma_x^2} - 1\right] \left(\frac{\mu_x-a}{b-a}\right) \\ r = \left[\frac{(\mu_x-a)(b-\mu_x)}{\sigma_x^2} - 1\right] \left(\frac{b-\mu_x}{b-a}\right) \end{cases}$

算 10^{-10} 量级以下的失效概率。土体参数概率分布类型对边坡失效概率具有重要的影响, 由不同概率分布得到的边坡失效概率的差别超过多个数量级。其中基于正态和 Beta 分布所得到的边坡失效概率明显偏大, 可能造成偏保守的设计方案, 相比之下, 由对数正态和极值 I 型分布得到的失效概率明显偏小, 可能造成偏危险的设计方案, 而基于 Gamma 分布计算的边坡失效概率居中。表明常用的正态和对数正态分布尽管计算简便, 但是正态分布用于表征土体参数概率分布特征会高估边坡失效概率, 导致偏保守的设计方案; 而对数正态分布会低估边坡失效概率, 从而导致偏危险的设计方案。此外值得指出的是, 采用本文提出方法获得图 5 (a)、(b) 计算结果只进行了 1713 次边坡稳定性分析, 表明提出方法还具有较高的参数敏感性分析计算效率。

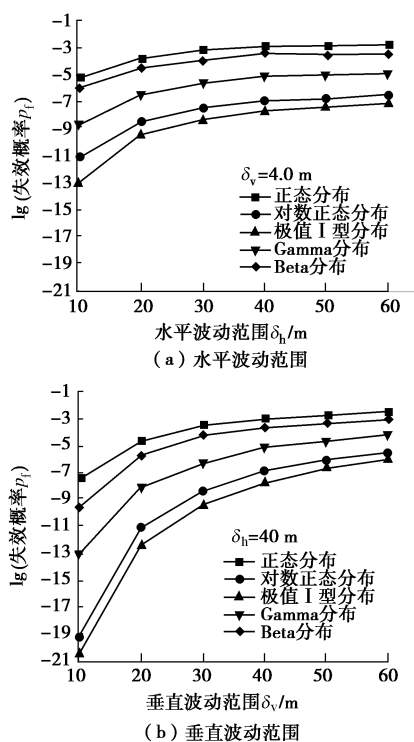


图 5 边缘概率分布对边坡可靠度的影响

Fig. 5 Effect of marginal probability distributions on probability of slope failure

3 结 论

本文提出了考虑参数空间变异性基于多重响应面与子集模拟的边坡可靠度分析方法, 通过分析一个坡高为 24 m 的两层不排水饱和黏土边坡可靠度问题验证了提出方法的有效性, 同时探讨了土体参数概率分布类型对边坡可靠度的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 提出方法巧妙地结合多重响应面代替确定性边坡稳定性分析计算边坡临界安全系数, 子集模拟计

算边坡失效概率。相比于直接蒙特卡洛模拟、子集模拟和代理模型计算方法, 提出方法具有较高的计算效率, 能够有效地分析考虑参数空间变异性低概率水平 ($10^{-9} \sim 10^{-4}$) 的高维边坡可靠度问题。

(2) 提出方法的多重响应面建立过程中没有涉及随机场实现等信息, 一旦多重响应面建立之后, 便无需重新进行边坡稳定性分析校正多重响应面, 因此具有较高的参数敏感性分析计算效率, 为研究参数统计特征如分布类型和波动范围等对边坡可靠度的影响提供了技术支持。

(3) 岩土工程实际中现场试验数据一般非常有限, 为便于计算常采用正态和对数正态分布表征岩土体参数概率分布特征。相对于其他概率分布, 常用的正态分布会高估边坡失效概率, 导致偏保守的设计方案, 而对数正态分布会低估边坡失效概率, 导致偏危险的设计方案。因此, 岩土体参数概率分布类型对边坡可靠度具有重要的影响, 工程实际中需要谨慎选取。

(4) 本文尝试解决考虑参数空间变异性几何尺寸相对较大的边坡可靠度问题, 通过分析一个坡高为 24 m 边坡可靠度问题验证了提出方法的有效性。然而, 对于边坡几何尺寸相对大小的判定标准和几何尺寸较大 (如坡高在 100 m 左右) 的边坡可靠度问题还需要进一步深入研究。此外, 本文提出方法目前仅局限于圆弧失效模式, 这对于旋转失效模式占优的边坡稳定性可靠度问题是合理的, 但对于非圆弧复合型失效模式的边坡稳定可靠度问题还需进一步验证。

参考文献:

- [1] ASAOKA A, GRIVAS D A. Spatial variability of the undrained strength of clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1982, **108**(5): 743 - 756.
- [2] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(4): 612 - 624.
- [3] 张继周, 缪林昌, 王华敬. 土性参数不确定性描述方法的探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1936 - 1940. (ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang, WANG Hua-jing. Methods for characterizing variability of soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1936 - 1940. (in Chinese))
- [4] VANMARCKE E H. Random fields: analysis and synthesis[M]. Beijing: World Scientific Publishing, 2010.
- [5] LI K S, LUMB P. Probabilistic design of slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, **24**(4): 520 - 535.
- [6] SUCHOMEL R, MAŠÍN D. Comparison of different

- probabilistic methods for predicting stability of a slope in spatially variable c - ϕ soil[J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, **37**(1-2): 132 - 140.
- [7] JI J, LIAN H J, LOW B K. Modeling 2-D spatial variation in slope reliability analysis using interpolated autocorrelations[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, **40**: 135 - 146.
- [8] HICKS M A, SAMY K. Influence of heterogeneity on undrained clay slope stability[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2002, **35**(1): 41 - 49.
- [9] 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.
- [10] CHO S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability[J]. *Engineering Geology*, 2007, **92**(3/4): 97 - 109.
- [11] CHO S E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, **136**(7): 975 - 984.
- [12] HUANG J S, GRIFFITHS D V, FENTON G A. System reliability of slopes by RFEM[J]. *Soils and Foundations*, 2010, **50**(3): 345 - 355.
- [13] SALGADO R, KIM D. Reliability analysis of load and resistance factor design of slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, **140**(1): 57 - 73.
- [14] WANG Y, CAO Z, AU S K. Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(1): 162 - 172.
- [15] LI L, CHU X S. Multiple response surfaces for slope reliability analysis[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, **39**(2): 175 - 192.
- [16] JIANG S H, LI D Q, CAO Z J, et al. Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using Monte Carlo simulation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, **141**(2): 04014096.
- [17] LI D Q, JIANG S H, CAO Z J, et al. A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties[J]. *Engineering Geology*, 2015, **187**: 60 - 72.
- [18] LUMB P. Safety factors and the probability distribution of soil strength[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1970, **7**(3): 225 - 242.
- [19] POPESCU R, DEODATIS G, NOBAHAR A. Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2005, **20**(4): 324 - 341.
- [20] ZHOU W, HONG H P, SHANG J Q. Probabilistic design method of prefabricated vertical drains for soil improvement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, **125**(8): 659 - 664.
- [21] JIMENEZ R, SITAR N. The importance of distribution types on finite element analyses of foundation settlement[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, **36**(3): 474 - 483.
- [22] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(增刊 2): 3526 - 3532. (ZHANG Ji-zhou, MIU Lin-chang. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(S2): 3526 - 3532. (in Chinese))
- [23] JIANG T, LIU J, YUAN B, et al. Influence of probability distribution of shear strength parameters on reliability-based rock slope analysis[C]// *Slope Stability and Earth Retaining Walls*. Changsha, 2011.
- [24] ZHANG J, ZHANG L M, TANG W H. New methods for system reliability analysis of soil slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(7): 1138 - 1148.
- [25] JI J, LOW B K. Stratified response surfaces for system probabilistic evaluation of slopes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, **138**(11): 1398 - 1406.
- [26] LI C C, DER KIUREGHIAN A. Optimal discretization of random fields[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, **119**(6): 1136 - 1154.
- [27] PHOON K K, HUANG S P, QUEK S T. Implementation of Karhunen-Loeve expansion for simulation using a wavelet-Galerkin scheme[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2002, **17**(3): 293 - 303.
- [28] ZHU H, ZHANG L M. Characterizing geotechnical anisotropic spatial variations using random field theory[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(7): 723 - 734.
- [29] UZIELLI M, VANNUCCHI G, PHOON K K. Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(1): 3 - 20.
- [30] 李小勇, 谢康和. 土性参数相关距离的计算研究和统计分

- 析[J]. 岩土力学, 2000, **21**(4): 350 - 353. (LI Xiao-yong, XIE Kang-he. Numerical studies and statistic analyses on correlation distances of soil character parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(4): 350 - 353. (in Chinese))
- [31] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay-shale[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(1): 192 - 208.
- [32] 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 Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, CHEN Yi-feng, 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))
- [33] 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.
- [34] CHING J, PHOON K K, HU Y G. 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.
- [35] LOW B K, ZHANG J, TANG W H. Efficient system reliability analysis illustrated for a retaining wall and a soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2011, **38**(2): 196 - 204.
- [36] ZHANG J, HUANG H W, PHOON K K. Application of the kriging-based response surface method to the system reliability of soil slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(4): 651 - 655.
- [37] CHO S E. First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes[J]. Engineering Geology, 2013, **154**: 98 - 105.
- [38] 蒋水华, 祁小辉, 曹子君, 等. 基于随机响应面法的边坡系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 809 - 818. (JIANG Shui-hua, QI Xiao-hui, CAO Zi-jun, et al. System reliability analysis of slope using stochastic response surface method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 809 - 818. (in Chinese))
- [39] CHING J, PHOON K K. Effect of element sizes in random field finite element simulations of soil shear strength[J]. Computers and Structures, 2013, **126**: 120 - 134.

第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会（第 1 号通知）

“第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会”由中国力学学会岩土力学专业委员会主办，中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国地震局兰州地震研究所、兰州大学、兰州交通大学、兰州理工大学、西北民族大学等单位共同承办，将于 2016 年 8 月 12 日~18 日在甘肃兰州召开。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃撰稿、参加会议。

主办单位：中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位：中国科学院寒区旱区环境与工程研究所；冻土工程国家重点实验室；中国地震局兰州地震研究所；黄土地震工程重点实验室；兰州大学；中铁西北科学研究院有限公司；青海省交通科学研究院。

会议专题：岩土力学数值分析与解析新方法。

会议的主题：本次会议主题包括：①岩土本构模型与参数研究；②岩土工程重大工程实例；③岩土试验与测试技术；④环境岩土工程；⑤土动力学与土工抗震；⑥特殊土的力学特性

与工程问题；⑦寒旱区重大工程问题。

会议论文与出版：第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会会议论文征稿截止日为 2016 年 1 月 31 日。2016 年 4 月 30 日通知审稿专家修改意见和退稿意见；2016 年 5 月 31 日前通知录用结果等事宜。论文格式与要求见《岩土力学》征稿启事。投稿范例模板请登录“<http://ytlx.whrsm.ac.cn/CN/column/column108.shtml>”下载。所有投稿稿件请按要求排好版后发至会议秘书处，邮箱：guoyuli@lzb.ac.cn 或 27178345@qq.com，投稿时麻烦注明“第十二届全国岩土力学研讨会”。经严格审稿后，挑选部分优秀论文推荐到《岩土力学》、《冰川冻土》、《地震工程学报》、《防灾减灾工程学报》期刊上发表，其余将以增刊或会议论文集形式出版。

秘书处地址：甘肃省兰州市东岗西路 320 号，中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室，邮编：730000。牛富俊 13893627904；E-mail: niufujun@lzb.ac.cn；李国玉 13893691316；E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn；QQ: 27178345。

（中国力学学会岩土力学专业委员会 供稿）