DOI：10.11779/CJGE201810014

基于贝叶斯更新和信息量分析的边坡钻孔布置方案优化设计方法

蒋水华，刘 贤，尧睿智，姜清辉*，黄劲松，周创兵
（南昌大学建筑工程学院，江西 南昌 330031）

摘 要：为在节省岩土工程勘察成本的前提下获得最有价值的现场试验数据，通常需要事先设计最优的工程勘察方案。提出了基于贝叶斯更新和信息量分析的边坡钻孔布置方案优化设计方法，其中采用贝叶斯方法更新空间变异土体参数统计特征和计算边坡后验失效概率，在此基础上进行场地信息量分析确定边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距。此外，为更加准确地表征土体参数的先验信息，发展了非平稳随机场模型以表征土体参数均值和标准差随埋深逐渐增加的特性。最后通过一个不排水饱和黏土边坡算例验证了提出方法的有效性。结果表明：所提出的方法能够在现场勘察试验之前仅利用现有的土体参数先验信息有效确定边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距。对了解边坡稳定性能所需的试验数据，并不是钻孔间距越小所获得的信息量越大。

关键词：边坡；空间变异性；贝叶斯更新；信息量分析；钻孔位置和间距
中图分类号：TU413 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2018)10－1871－09

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

Optimization design approach for layout scheme of slope boreholes based on Bayesian updating and value of information analysis

JIANG Shui-hua, LIU Xian, YAO Rui-zhi, JIANG Qing-hui, HUANG Jin-song, ZHOU Chuang-bing
(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To obtain more valuable site-specific test data with the minimal site exploration effort, it is of great significance to design an optimal site exploration program before geotechnical site investigation. This paper aims to propose an optimization design approach for layout scheme of slope boreholes based on the Bayesian updating and value of information analysis. The BUS (Bayesian updating with structural method) with subset simulation is employed to update the posterior statistical properties of spatially varying soil properties and to estimate the posterior probability of slope failure. Then, the value of information analysis is used to determine the most optimal borehole locations and separation distances between two boreholes. Additionally, to accurately characterize the prior information of soil parameters, a non-stationary random field model is developed wherein the depth-dependent nature of soil parameters is addressed. Finally, a clay slope example under undrained conditions is investigated to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. The results indicate that the proposed approach can effectively determine the most optimal borehole locations and separation distances between two boreholes prior to performing site investigation tests based on the prior information of soil parameters. To design a separation distance between two boreholes as small as possible during geotechnical site investigation is not necessarily the best choice to understand the performance of the slope.

Key words: slope; spatial variability; Bayesian updating; information analysis; borehole location and separation distance

0 引 言

为降低岩土工程不确定性和了解地层特性，使得边坡稳定可靠度分析结果更加接近于工程实际，通常需要通过现场试验如十字板剪切试验（VST）和原位静力触探试验（CPT）等获得特定岩土场地的试验数

基金项目：国家自然科学基金项目（41867036，51509125，51679117，U1765207）；江西省自然科学基金项目（20171BAB206058，2018ACB21017，2018ACB20008）
收稿日期：2017－08－05
*通讯作者（E-mail: jqh1972@ncu.edu.cn）

据[1-4]，再基于这些试验数据估计岩土体参数统计特征包括均值、标准差、分布类型、自相关函数和波动范围等和评价边坡稳定可靠度[2-5]。然而，岩土工程勘察经费通常十分有限，为在节省工程勘察成本的前提下获得最有价值的现场试验数据，亟需事先设计最优的边坡钻孔布置方案包括设计最优的钻孔位置、钻孔间距、钻孔深度和钻孔数目等[6-12]。

在岩土工程现场勘察试验之前，虽然特定场地的岩土体参数及地层真实信息通常不得而知，但是可以通过工程经验，工程类比和相关文献资料等收集一些关于岩土体参数的先验信息[5]。然而，仅在已知岩土体参数先验信息前提下如何优化设计边坡钻孔布置方案仍然是一个关键难题。为了解决类似难题，国内外学者进行了一些有益的探索。如 Goldsworthy 等[6]在基于可靠度的垫式基础设计中以均方差最小确定最优钻孔位置。Gong 等[7]通过多目标优化方法求解某岩土场地勘察设计优化问题，并分析了现场钻探成本投入对隧道开挖引起的地面沉降预测精度的影响。彭功勋等[8]探讨了岩溶区嵌岩桩钻探勘察的方案优化问题。Zetterlund 等[9]通过信息量分析调查了某隧道工程现场勘察设计方案。邓志平等[10]利用耦合马尔可夫链模拟和蒙特卡洛模拟方法研究了钻孔布置方案对边坡稳定性的影响。Sousa 等[11]提出了基于贝叶斯更新和虚拟钻探的岩土工程勘察方案设计方法。Gong 等[12]采用基于马尔可夫链蒙特卡洛模拟（MCMCS）的贝叶斯推断方法，获得了稳健性较好的土体参数统计特征和勘察成本较低的岩土工程地质勘察方案。虽然这些研究工作对边坡钻孔方案优化设计具有重要的参考价值，但是仍然存在以下不足：①多目标优化方法不仅寻优过程计算量非常大，而且不能较好地利用有限的现场试验数据等场地信息；贝叶斯方法如 MCMCS 难以解决考虑土体参数空间变异性的边坡钻孔布置方案高维优化设计问题[13-14]。②现有的钻孔布置方案优化设计较少涉及到工程师们最为关心的岩土场地失效概率如边坡失稳破坏概率等。③土体参数先验信息对钻孔布置方案优化设计非常关键[5, 10]，然而目前在表征土体参数先验信息时基本没有考虑土体参数均值和标准差沿埋深逐渐增加的这一特性，会造成所设计的钻孔布置方案与工程实际存在较大偏差。

本文以边坡工程为例，提出了基于贝叶斯更新和信息量分析的边坡钻孔布置方案优化设计方法，其中采用贝叶斯方法更新空间变异土体参数统计特征和计算边坡后验失效概率，在此基础上进行场地信息量分析确定边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距，并以不排水饱和黏土边坡算例验证了提出方法的有效性。

1 土体参数非平稳随机场模拟

不同埋深处的土体由于受到不同沉积、后沉积、化学风化和搬运作用与荷载历史等因素的影响，导致土体特性参数不仅呈现一定的空间变异性，而且还存在明显的非平稳分布特征[2-4, 15]。如不排水抗剪强度的均值和标准差存在沿埋深逐渐增加的变化趋势已是不争的事实[16-17]。本文以不排水抗剪强度为例，发展了如下非平稳随机场模型用于表征土体参数沿埋深逐渐增加的特性。对于超固结土，不排水抗剪强度 s_{u} 通常由某一初始值随埋深逐渐增加，对应的非平稳随机场模型为

$$\begin{aligned} s_{\mathrm{u}}(x,z) &= s_{\mathrm{u0}} + b\sigma'_{\mathrm{v}} \exp\left[w(x,z)\right] \\ &= s_{\mathrm{u0}} + b\gamma z \exp\left[w(x,z)\right] \quad 。 \end{aligned} \tag{1}$$

式中 s_{u0} 为地面土体不排水抗剪强度；b 为不排水抗剪强度随埋深增加的速率，即 s_{u} 趋势分量参数；σ'_{v} 为垂直有效应力，$\sigma'_{\mathrm{v}} = \gamma z$，$\gamma$为土体重度；$w(x,z)$ 为随机波动分量。由于受地面降雨、风化、植被蒸腾和交通等因素影响，导致 s_{u0} 存在一定的不确定性[17]。另外受样本量的影响，b 也具有一定的不确定性[18]。为避免土体参数取值出现负值，一般采用对数正态分布模拟 s_{u0} 和 b 的不确定性。另外通常将 $w(x,z)$ 模拟为均值为 $\mu_{\mathrm{w}} = 0$ 和标准差为 σ_{w} 的平稳正态随机场[3]。本文基于 Quasi 随机抽样[19]采用 Karhunen-Loève（KL）级数展开方法[20]离散平稳正态随机场 $w(x,z)$，在保证计算精度的前提下，通常只截取前 n 项 KL 级数展开以提高计算效率。一旦获得平稳正态随机场 $w(x,z)$ 实现值，进而根据式（1）便可得到非平稳对数正态随机场 $s_{\mathrm{u}}(x,z)$ 实现值。综上可知，离散非平稳对数正态随机场 $s_{\mathrm{u}}(x,z)$ 共需要（n+2）个随机变量。提出的非平稳随机场模型不仅可以单独模拟不排水抗剪强度趋势分量（b）和随机波动分量[$w(x,z)$]的不确定性，而且能够较好地描述不排水抗剪强度的均值和标准差随埋深逐渐增加的特性。

2 边坡可靠度贝叶斯更新方法

从特定场地收集的现场试验数据和监测资料等场地信息可用来更新土体参数统计特征，场地信息对土体参数概率分布的影响，可通过贝叶斯分析估计土体参数的后验概率密度函数 $f''_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x})$ 来体现，根据贝叶斯理论，$f''_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x})$ 的计算表达式为[13-14]

$$f''_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x}) = aL(\boldsymbol{x}) f'_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x}) \quad 。 \tag{2}$$

式中 $f'_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x})$ 表示土体参数的先验联合概率密度函数；a 为比例常数，以保证在 $\boldsymbol{X}$ 的整个区域上对 $f''_{\boldsymbol{X}}(\boldsymbol{x})$

的积分为 1.0；$L(\boldsymbol{x})$为似然函数，表示在已知土体参数 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{X}$ 前提下场地信息事件 Z 发生的概率[13]。大多数情况下式（2）没有解析解，需要数值求解，本文采用 BUS（Bayesian Updating with Structural methods）方法[13]有效计算 $f_X''(\boldsymbol{x})$ 数值解。该方法利用似然函数定义一个新的失效区域来建立贝叶斯更新与结构可靠度分析之间的桥梁，将复杂的贝叶斯更新问题转换为一个典型的结构可靠度问题，然后采用子集模拟[21-23]等结构可靠度方法求解。本文在原始 BUS 方法的基础上，提出了考虑土体参数空间变异性的边坡可靠度贝叶斯更新方法，用于更新空间变异土体参数统计特征和计算边坡后验失效概率。

2.1　空间变异土体参数统计特征更新

为建立贝叶斯更新和结构可靠度分析之间的桥梁，BUS 方法基于似然函数及与似然函数有关的常数 c，定义一个新的失效区域 Ω_X [13]，

$$\Omega_X=\{H(\boldsymbol{x}_+)\leqslant 0\}\quad 。\tag{3}$$

式中　$H(\boldsymbol{x}_+)$为功能函数，$H(\boldsymbol{x}_+)=p-cL(\boldsymbol{x})$；$\boldsymbol{x}_+$为扩展随机向量 $\boldsymbol{x}_+=[\boldsymbol{x};p]^{\mathrm{T}}$，其中 p 为[0，1]均匀分布随机变量；c 为对于所有空间变异土体参数 $\boldsymbol{x}$ 总满足 $cL(\boldsymbol{x})\leqslant 1.0$ 的常数。这样对空间变异参数后验统计特征的估计便转换为对功能函数为 $H(\boldsymbol{x}_+)$的高维结构可靠度问题的求解，即转换为计算场地信息事件 Z 的发生概率 $P(Z)$，$Z=\{\boldsymbol{x}_+\in\Omega_X\}$。采用子集模拟方法计算 $P(Z)$的表达式为

$$P(Z)=P\left[H(\boldsymbol{x}_+)\leqslant 0\right]=P(Z_1)\prod_{i=2}^{m}P(Z_i\mid Z_{i-1})\ 。\tag{4}$$

式中　$P(Z)$也称作接受概率，表示由先验概率分布产生的样本被接受作为服从后验概率分布样本的概率；中间事件 $Z_i=\{H(\boldsymbol{x}_+)<g_i\}$，$g_i$ 为失效临界阀值，$i=1, 2, \cdots, m$；m 表示为达到失效区域所需的子集模拟层数；$P(Z_1)$为 Z_1 的发生概率；$P(Z_i\mid Z_{i-1})$，$i=2, 3, \cdots, m$ 为在 Z_{i-1} 发生的条件下 Z_i 发生的概率。为提高计算效率和稳健性，本文采用 Papaioannou 等[23]提出的条件抽样方法产生中间事件条件样本，依次估计对应的临界阀值 $g_1, g_2, \cdots, g_m$，使得 $P(Z_i\mid Z_{i-1})$，$i=1, 2, \cdots, m$ 均等于条件概率 p_0，并满足如下关系：$Z_1\supset Z_2\supset\cdots\supset Z_{m-1}\supset Z_m$ 和 $g_1>g_2>\cdots>g_{m-1}>g_m=0$。如果似然函数 $L(\boldsymbol{x})$值较小（当试验数据较多、样本量较大时），为保证数值稳定性，在保持失效区域不变前提下可对功能函数 $H(\boldsymbol{x}_+)$取自然对数：

$$H(\boldsymbol{x}_+)=\ln(p)-\ln\left[cL(\boldsymbol{x})\right]\quad 。\tag{5}$$

BUS 方法的关键一步是根据似然函数确定常数 c 的取值，大多数情况下 c 值不能解析计算[13]。由式（5）可知，c 值越大，失效区域 Ω_X 越大，$P(Z)$值便会越大，进而子集模拟计算效率越高。因此，在满足 $cL(\boldsymbol{x})\leqslant 1.0$ 前提下，常数 c 的取值越大越好。本文根据文献[24]，在子集模拟过程中自适应计算 c 值，在每层子集模拟中 c_i 值的计算表达式为

$$c_i=\frac{1}{\max\left[c_{i-1}^{-1},\{L(\boldsymbol{x}_{i,k}),k=1,2,\cdots,N_l\}\right]}\quad (i=1,2,\cdots,m)\ 。\tag{6}$$

式中　N_l 为子集模拟每层样本数目；c_{i-1} 表示在第 $i-1$ 层常数 c 的计算值。为了保证子集模拟中间事件 Z_m 完全包含在事件 Z_{m-1} 中，需保证在每层子集模拟计算的 c 值满足 $c_1\geqslant c_2\geqslant\cdots\geqslant c_m$[24]。一旦随机样本抽样空间在第 m 层达到目标失效区域 Ω_X，子集模拟计算便终止，从第 m 层中可提取 N_{f} 组失效样本，基于这 N_{f} 组失效样本产生更多的失效样本来估计空间变异土体参数后验统计特征，并得到 $P(Z)=p_0^{m-1}N_{\mathrm{f}}/N_l$。

2.2　边坡后验失效概率计算

融合特定场地的现场试验数据和监测资料等场地信息，除了可更新空间变异土体参数统计特征，还可计算边坡后验失效概率 $P(F|Z)$。为提高计算效率，根据文献[14]，在第一轮子集模拟估计空间变异土体参数后验统计特征的基础上，进行新一轮子集模拟计算边坡后验失效概率 $P(F|Z)$，计算表达式如下：

$$\begin{aligned}P(F\mid Z)&=\frac{P\left(\bigcap_{i=0}^{M}F_i^*\right)}{P(Z)}=\frac{P\left(\bigcap_{i=1}^{M}F_i^*\,\middle|\,F_0^*\right)P(F_0^*)}{P(Z)}\\&=P\left(\bigcap_{i=1}^{M}F_i^*\,\middle|\,F_0^*\right)=\prod_{i=1}^{M}P\left(F_i^*\,\middle|\,F_{i-1}^*\right)\quad 。\end{aligned}\tag{7}$$

式中　F 为边坡失稳破坏事件，定义为 $\{G(\boldsymbol{x})=F_{\mathrm{Smin}}(\boldsymbol{x})-1.0<0\}$，其中 $G(\cdot)$和 $F_{\mathrm{Smin}}(\cdot)$分别为边坡功能函数和最小安全系数；M 表示为达到边坡失效区域所需的新一轮子集模拟层数；中间失效事件为 $F_0^*=F_0\cap Z=Z$ 和 $F_i^*=F_i\cap Z$，$i=1, 2, \cdots, M$，其中 $F_i=\{G(\boldsymbol{x})<f_i\}$，$f_i$ 是临界阈值。同样采用文献[23]方法产生中间失效事件条件样本，依次估计对应的临界阀值 $f_1, f_2, \cdots, f_M$，使得 $P(F_i^*\mid F_{i-1}^*)$，$i=1, 2, \cdots, M$ 均等于条件概率 p_0，并满足如下关系：$F_1^*\supset F_2^*\supset\cdots\supset F_{M-1}^*\supset F_M^*$ 和 $f_1>f_2>\cdots>f_{M-1}>f_M=0$。类似地，一旦随机样本抽样空间在第 M 层达到边坡失效区域 F，第二轮子集模拟计算便终止，从第 M 层中可提取 N_F 组失效样本，得到边坡后验失效概率为 $P(F\mid Z)=p_0^{M-1}N_F/N_l$。

3　场地信息量分析

在概率论或信息论中，信息量（Value of Information，VoI）可用于表示特定场地信息对了解地

层特性和结构安全性能所提供的价值量大小[9, 25]，目前在岩土工程中得到了一定的应用[9]，通过比较由不同边坡钻孔布置方案获得的试验数据信息量大小来指导设计最优的边坡钻孔布置方案（即确定最优钻孔位置和最佳钻孔间距等）。对于连续随机向量 $\boldsymbol{X}$ 而言，场地信息量 VoI 定义为[25]

$$\mathrm{VoI}=c_F(a_{\mathrm{opt}},\boldsymbol{x})P(F)-c_F(a_{\mathrm{opt}|Z},\boldsymbol{x})P(F\,|\,Z)\text{。}\quad(8)$$

式中 c_F 为边坡失稳破坏后果；a_{opt} 和 $a_{\mathrm{opt}|Z}$ 分别表示为先验最优决策事件和后验最优决策事件；$P(F)$和 $P(F|Z)$分别为边坡先验和后验失效概率。引入 $p_{\mathrm{f,threshold}}$ 表示边坡临界失效概率，如果边坡实际失效概率小于 $p_{\mathrm{f,threshold}}$，则说明边坡处于平均安全水平以上，否则需要采取有效的排水和加固等边坡维护措施提高边坡稳定性。由此可得边坡维护成本 $c_m=c_F\times p_{\mathrm{f,threshold}}$。一般来说，边坡可靠度先验分析对边坡真实的安全性能了解不多，导致 $p_{\mathrm{f,threshold}}<<P(F)$，进而有

$$c_F(a_{\mathrm{opt}},\boldsymbol{x})P(F)=\min\left[c_F\,p_{\mathrm{f,threshold}},c_F\,P(F)\right]=c_m\text{，}\quad(9)$$

另外假设采取有效的排水和加固等边坡维护措施之后，边坡发生失稳破坏的概率远远小于 $P(F)$，即边坡维护后发生失稳破坏的后果几乎可以忽略不计。由此可得

$$c_F(a_{\mathrm{opt}|Z},\boldsymbol{x})P(F\,|\,Z)=\min\left[c_F\,p_{\mathrm{f,threshold}},c_F\,P(F\,|\,Z)\right]=\begin{cases}c_m & (p_{\mathrm{f,threshold}}<P(F\,|\,Z))\\ c_F\,P(F\,|\,Z) & (p_{\mathrm{f,threshold}}\geqslant P(F\,|\,Z))\end{cases}\text{，}\quad(10)$$

根据式（8）可得，第 i 次钻孔试验获得的试验数据可为了解地层特性和边坡稳定性能提供的信息量为

$$\mathrm{VoI}_i=\begin{cases}0 & (p_{\mathrm{f,threshold}}<P(F\,|\,\boldsymbol{z}^{(i)}))\\ \left[p_{\mathrm{f,threshold}}-P(F\,|\,\boldsymbol{z}^{(i)})\right]c_F & (p_{\mathrm{f,threshold}}\geqslant P(F\,|\,\boldsymbol{z}^{(i)}))\end{cases},\quad(11)$$

式中，$\boldsymbol{z}^{(i)}=\left[z_1^{(i)},z_2^{(i)},\cdots,z_{n_d}^{(i)}\right]^{\mathrm{T}}$，$i=1,2,\cdots,n_s$，表示第 i 次现场试验获得的现场试验数据，n_s 为现场试验次数，每次试验可以获得 n_d 个试验样本。本文将信息量分析拓展到确定边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距。VoI 值越大，表示通过某钻孔布置方案获取的试验数据对了解边坡稳定性能提供的信息量越大，即所设计的钻孔位置和钻孔间距越合理；反之，VoI 值越小，表示通过某钻孔布置方案获取的试验数据对了解边坡稳定性能提供的信息量越小。

为了考虑所模拟的现场试验数据的无偏性，通常利用 VoI 期望值 $E(\mathrm{VoI})$来反映场地信息对边坡可靠度更新和信息量分析的影响，对于连续型试验事件$\{\boldsymbol{z}=\boldsymbol{Z}\}$，$E(\mathrm{VoI})$计算表达式为

$$E(\mathrm{VoI})=\int_{\boldsymbol{z}}\left[p_{\mathrm{f,threshold}}-P(F\,|\,\boldsymbol{z})\right]c_F\,f_Z(\boldsymbol{z})\mathrm{d}\boldsymbol{z}\text{，}\quad(12)$$

式中，$f_{\boldsymbol{Z}}(\boldsymbol{z})$ 表示场地信息事件的联合概率密度函数。对式（12）直接积分计算的难度较大，本文基于不同现场试验数据模拟值进行蒙特卡洛模拟计算 $E(\mathrm{VoI})$，

$$E(\mathrm{VoI})=\frac{1}{n_s}\sum_{i=1}^{n_s}\left[p_{\mathrm{f,threshold}}-P(F\,|\,\boldsymbol{z}^{(i)})\right]c_F,\quad \text{当 } p_{\mathrm{f,threshold}}\geqslant P(F\,|\,\boldsymbol{z}^{(i)})\text{，}\quad(13)$$

综上可知，在贝叶斯更新的基础上进行信息量分析计算 $E(\mathrm{VoI})$，无需进行额外的边坡稳定性分析。

4 不排水饱和黏土边坡

下面以一个不排水饱和黏土边坡为例来验证提出方法的有效性，边坡计算模型如图 1 所示，坡高为 10 m，坡脚为 26.6°。Griffiths 等[26]和 Wang 等[22]均对该边坡稳定进行了可靠度分析，但是都没有考虑土体不排水抗剪强度参数非平稳分布特征。本文将不排水抗剪强度 s_{u} 模拟为非平稳对数正态随机场。另外根据以上文献，将土体重度$\gamma_{\mathrm{sat}}=20\ \mathrm{kN/m^3}$ 视作常量。

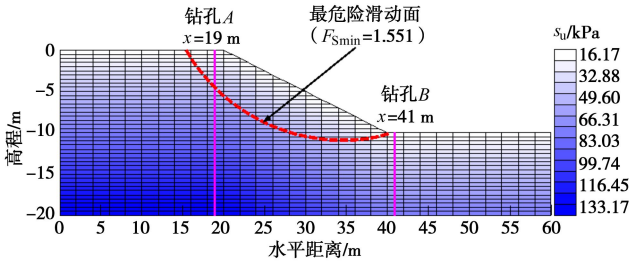

图 1 基于先验均值边坡稳定性分析结果

Fig. 1 Stability analysis results of clay slope with prior mean

4.1 土体参数先验信息

土体参数先验信息对边坡钻孔布置方案优化设计具有重要的影响[5, 10]，下面首先探讨式（1）不排水抗剪强度非平稳随机场模型参数取值问题。根据文献[27]可知，软、硬和很硬塑性无机黏土层的不固结黏聚力分别在 10～20 kPa、20～50 kPa 和 50～100 kPa 之间变化，本文以软塑性无机黏土层为例，采用对数正态分布模拟 s_{u0} 的不确定性，将相应的下限和上限值 10 和 20 kPa 分别取作 s_{u0} 的 10%和 90%分位数，获得 s_{u0} 的先验均值 $\mu'_{s_{\mathrm{u0}}}$ 和标准差 $\sigma'_{s_{\mathrm{u0}}}$ 分别为 14.669 kPa 和 4.034 kPa。根据文献[5]可知，$\left[s_{\mathrm{u}}(z)-s_{\mathrm{u0}}\right]/\sigma'_{\mathrm{v}}$ 均值和标准差的统计范围分别为 0.23～1.4 和 0.01～1.26，本文将趋势分量参数 b 模拟为先验均值 μ'_b 为 0.3 和标准差 σ'_b 为 0.09 的对数正态随机变量。将随机波动分量 $w(x,z)$ 模拟为先验均值 $\mu'_w=0$ 和标准差 $\sigma'_w=\sqrt{\ln(\delta^2+1)}\approx\delta$ 的平稳正态随机场。Phoon 等[3]统计得出，由十字板剪切试验获得的不排水抗剪强度变异系数 δ 的变化范围为 4%～44%，均值为 24%，本文取$\delta=0.24$。如第 1 节所述，采用 KL 级数展开方法模拟二维各向异性平稳正态随机场 $w(x,z)$，选用指数

型自相关函数表征 $w(x,z)$ 的空间自相关性[28]。根据文献[3]可知，由现场十字板剪切试验获得的 s_{u} 的水平和垂直波动范围可分别取 38 m 和 3.8 m。接着将 s_{u} 非平稳随机场共剖分为 910 个水平和垂直尺寸分别为 l_x = 2.0 m 和 l_y = 0.5 m 的四边形和三角形混合单元，如图 1 所示。一旦确定参数取值和随机场单元网格之后，便可通过式（1）模拟计算非平稳随机场 $s_{\mathrm{u}}(x,z)$ 实现值。

将 s_{u} 的先验均值 $\mu'_{s_{\mathrm{u}}}$ 赋给边坡模型，如图 1 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。显然，土体不排水抗剪强度均值沿埋深逐渐增加。在此基础上，采用简化毕肖普法计算的边坡最小安全系数 F_{Smin} 为 1.551，自动搜索的最危险滑动面如图 1 虚线所示。该边坡失效模式与均质黏土边坡深层破坏模式明显不同，其不受边坡边界条件的约束，主要表现为沿坡趾发生浅层失稳破坏，与实际情况更为吻合。不利用现场试验数据进行贝叶斯分析，重复进行 20 次独立子集模拟计算取平均值，每层样本数目和条件概率分别取 N_l = 1000 和 p_0 = 0.1，得到边坡先验失效概率 $P(F)$ 为 3.52×10^{-2}。

4.2　试验数据及似然函数

接着根据土体参数先验信息模拟来自现场十字板剪切试验的多组不排水抗剪强度试验数据，用于贝叶斯更新计算和场地信息量分析。根据文献[13，14]，空间某一位置 q_i^m 处的不排水抗剪强度试验数据 $s_{u_i}^m$ 与融合了测量和转换不确定性的总误差 ε_i 之间满足如下乘法关系：

$$s_{\mathrm{u}_i}^m = s_{\mathrm{u}}(q_i^m)\varepsilon_i \quad (i=1,2,\cdots,n_d) \quad , \tag{14}$$

式中，$q_i^m=(x_i^m,z_i^m)$ 是二维空间区域Ω内第 i 个试验点坐标，$s_{\mathrm{u}}(q_i^m)$ 为 q_i^m 处不排水抗剪强度参数随机场实现值。对式（14）两端同时取自然对数，可得

$$\ln\varepsilon_i = \ln s_{\mathrm{u}_i}^m - \ln s_{\mathrm{u}}(q_i^m) \quad , \tag{15}$$

根据一阶近似理论，每个试验点处的总误差 ε_i 的自然对数可近似表示为测量误差 $\varepsilon_{\mathrm{m}_i}$ 和转换误差 $\varepsilon_{\mathrm{t}_i}$ 的自然对数之和，

$$\ln\varepsilon_i = \ln\varepsilon_{\mathrm{m}_i} + \ln\varepsilon_{\mathrm{t}_i} \quad 。 \tag{16}$$

一般来说，因试验装置与仪器问题以及操作不当造成的不同试验点处的测量误差 $\varepsilon_{\mathrm{m}_i}$ 相互独立[2, 18]，同一土层不同试验点处的转换误差 ε_{t_i} 完全相关[29]，同一试验点处的测量误差 $\varepsilon_{\mathrm{m}_i}$ 与转换误差 $\varepsilon_{\mathrm{t}_i}$ 之间通常相互独立。由此可得不同试验点处的总误差 ε_i 相互之间存在一定的相关性。根据式（16），可计算得到任意两个试验点 q_i^m 和 q_j^m 处 $\ln\varepsilon_i$ 和 $\ln\varepsilon_j$ 之间的协方差 $\Sigma_{i,j}$ 为

$$\Sigma_{i,j} = \begin{cases} \ln(\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{m}}}^2+1)+\ln(\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{t}}}^2+1) & (i=j) \\ \ln(\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{t}}}^2+1) & (i\neq j) \end{cases} \quad , \tag{17}$$

式中，$\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{m}}}$ 和 $\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{t}}}$ 分别为测量误差和转换误差的变异系数。由文献[4]可知，对于现场十字板剪切试验，$\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{m}}}$ 和 $\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{t}}}$ 的变化范围分别为[0.1，0.2]和[0.075，0.15]，本文分别取 $\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{m}}}$ = 0.1 和 $\mathrm{COV}_{\varepsilon_{\mathrm{t}}}$ = 0.075。

不同试验点处沿钻孔方向 s_{u} 试验数据的模拟步骤如下：①采用 KL 级数展开方法结合式（1）计算随机场实现值 $s_{\mathrm{u}}(q_i^m)$；②将 $s_{\mathrm{u}}(q_i^m)$ 与总误差 ε_i 实现值相乘得到沿钻孔方向的 s_{u} 试验数据 $s_{\mathrm{u}_i}^m$。重复进行 n_s 次，便可获得 n_s 组现场试验数据模拟值。其中关键一步是计算总误差 ε_i 实现值，假设 ε_i 服从中位数 $\mathrm{median}_\varepsilon$ 为 1，标准差为某一常数的对数正态分布，ε_i 实现值的计算表达式如下：

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \exp(\mu_{\ln\varepsilon} + \boldsymbol{L}\boldsymbol{\xi}) \quad 。 \tag{18}$$

式中　$\boldsymbol{\xi}=(\xi_1,\xi_2,\ldots,\xi_{n_d})^{\mathrm{T}}$ 为维度为 n_d 的独立标准正态样本向量，同样采用 Quasi 随机抽样方法[19]产生；$\boldsymbol{L}$ 是维度为 $n_d\times n_d$ 的下三角矩阵，通过对维度为 $n_d\times n_d$ 的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 进行乔列斯基分解得到

$$\boldsymbol{L}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{\Sigma} \quad 。 \tag{19}$$

需要指出的是，模拟来自现场十字板剪切试验的不排水抗剪强度试验数据时，需遵照现场十字板剪切试验规程，同一钻孔试验数据的常规取样间距一般取为 1.0 m[1]。一旦模拟得到现场试验数据，便可建立贝叶斯分析所需的似然函数：

$$L(\boldsymbol{x}) = k\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\ln \boldsymbol{s}_{\mathrm{u}}^m - \ln s_{\mathrm{u}}(\boldsymbol{q}^m)\right]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\left[\ln \boldsymbol{s}_{\mathrm{u}}^m - \ln s_{\mathrm{u}}(\boldsymbol{q}^m)\right]\right\}。 \tag{20}$$

式中　$k=\left[(2\pi)^{n_d/2}\left|\boldsymbol{\Sigma}\right|^{1/2}\right]^{-1}$ 为比例常数；$\boldsymbol{s}_{\mathrm{u}}^m = (s_{u_1}^m,\cdots,s_{u_{n_d}}^m)^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{q}^m=(q_1^m,q_2^m,\ldots,q_{n_d}^m)^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ 为协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的逆矩阵。似然函数建立之后，便可采用 BUS 方法计算边坡后验失效概率 $P(F|Z)$，见式（7），为保证计算稳健性，同样重复进行 20 次独立子集模拟计算取平均值得到 $P(F|Z)$，N_l 和 p_0 也分别取为 1000 和 0.1。接着利用式（13）估计场地信息量期望值 $E(\mathrm{VoI})$，并通过比较 $E(\mathrm{VoI})$ 值大小来优化设计边坡钻孔布置方案。

综上，边坡钻孔布置方案优化设计流程简化如下：①提前从坡面上选择一些代表性的钻孔位置和钻孔间距；②以不同代表性的钻孔位置和钻孔间距模拟现场十字板剪切试验获得多组不排水抗剪强度试验数据；③基于这些试验数据进行贝叶斯分析和信息量分析获得代表性钻孔位置和钻孔间距对应的 $E(\mathrm{VoI})$；④分别将最大 $E(\mathrm{VoI})$ 对应的钻孔位置和钻孔间距视作最优钻孔位置和最佳钻孔间距。

4.3　边坡钻孔布置方案优化设计结果

为了说明现场试验模拟次数 n_s 对场地信息量

表 1 c 值自适应计算过程

Table 1 Adaptive calculation of c value

子集模拟层数 i	c_{i-1}	$\max\{L(\boldsymbol{x}_{i,k}),k=1,2,\cdots,N_l\}$	$\max\left[c_{i-1}^{-1},\{L(\boldsymbol{x}_{i,k}),k=1,2,\cdots,N_l\}\right]$	c_i
1	—	1.06×10^{-7}	1.06×10^{-7}	9476353.55
2	9476353.55	5.23×10^{-6}	5.23×10^{-6}	191103.47
3	191103.47	3.52×10^{-5}	3.52×10^{-5}	28438.07
4	28438.07	1.91×10^{-4}	1.91×10^{-4}	5241.34
5	5241.34	9.48×10^{-4}	9.48×10^{-4}	1055.30
6	1055.30	1.17×10^{-2}	1.17×10^{-2}	85.65
7	85.65	0.149	0.149	6.73
8	6.73	0.149	0.149	6.73
9	6.73	0.149	0.149	6.73

E(VoI)的影响，下面以位于 x = 23 m 单钻孔 A 为例，取 n_s 由 100 变化至 200 进行参数敏感性分析。以模拟的任一组（n_s = 1）现场十字板剪切试验数据为例，采用 BUS 方法计算场地信息事件 Z 的发生概率 $P(Z)$，其中利用式（6）的 c 值自适应计算过程如表 1 所示，从中可得到最终的 c 值为 6.73 和 $P(Z)$为 9.49×10^{-9}。然后基于 c = 6.73 以边坡失效区域为目标区域再进行新一轮子集模拟计算，见式（7），获得边坡后验失效概率 $P(F|Z)$ = 2.41×10^{-4}，再通过式（11）计算得到 VoI = $7.59\times10^{-4}c_F$。类似地，可计算得到其它所模拟的试验数据对应的 VoI。图 2 给出了信息量期望值 E(VoI)及其 95%置信区间随 n_s 的变化关系曲线。为简化计算，本文取 c_F = 1.0，需要说明的是这样取值不会影响边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距的确定。由图 2 可知：①由 95%置信区间表征的 E(VoI)变异性随着 n_s 增加而逐渐减小；②当 n_s 达到 200 时，E(VoI)变异性减小得不明显，并且 E(VoI)围绕其平均值的上下波动处于可接受的范围内。一般来说，所模拟的现场试验次数越多（即 n_s 越大），获得的 E(VoI)越准确，但是相应的计算量也急剧增加。这是因为对于每次现场试验，均需进行 20 次独立的 BUS 计算。此外由图 3 可知，当 n_s 分别取 160，180，200，所获得的 E(VoI)随钻孔位置的变化趋势基本保持一致。需要指出的是，边坡钻孔布置方案优化设计恰恰关注的是 E(VoI)随钻孔位置或钻孔间距的变化趋势。为兼顾计算精度和计算效率要求，下面将沿每一钻孔模拟 n_s = 200 次现场十字板剪切试验。

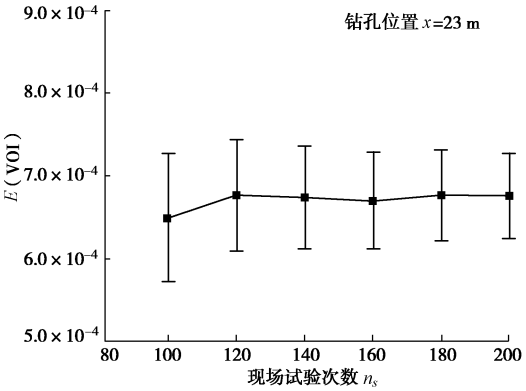

图 2 信息量期望值及其 95%置信区间随现场试验次数的变化关系（x = 23 m）

Fig. 2 Variation of expected value of information and 95% confidence interval with number of field tests

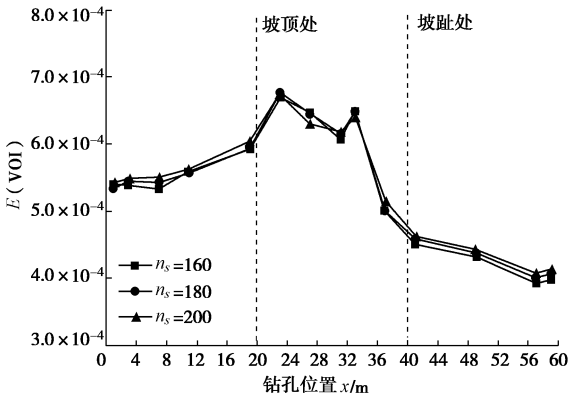

图 3 信息量期望值随钻孔位置的变化关系

Fig. 3 Variation of expected value of information with borehole location

为了降低边坡工程勘察成本，十分必要事先确定边坡最优钻孔布置方案以避免进行不必要的现场钻孔试验。如前所述，E(VoI)越大，表示从某一钻孔位置获得的现场试验数据对了解地层特性和边坡稳定性能提供的信息量越大，即这一钻孔位置越关键。为此，图 3 给出了 E(VoI)随钻孔位置的变化关系曲线，根据其变化趋势可确定边坡最优钻孔位置。由图 3 可知，当钻孔位置由边坡左侧（x = 1 m）逐渐变化到边坡右侧（x = 59 m），E(VoI)先增加后减小，在坡顶附近位置处（x = 23 m）达到最大值，E(VoI) = 6.76×10^{-4}，在坡趾右侧（x=57 m）降低至最小值，E(VoI) =

4.09×10^{-4}。由此可推测，坡面靠近坡顶区域为现场试验的最优钻孔位置。这主要因为考虑不排水抗剪强度随埋深逐渐增加的特性，坡面靠近坡顶区域是边坡最易发生失稳破坏的区域。换言之，如在这一区域开展现场勘察试验，所获得的试验数据能够更准确地反映地层特性和边坡稳定性能。

为获得更多的地层信息，所需的边坡钻孔数目一般较多，在耗费最少工程勘察成本的前提下，为获得更有价值的现场试验数据，还常会涉及最佳钻孔间距的确定问题。下面以确定 2 个钻孔之间最佳水平间距为例来进一步说明提出方法的有效性。第 1 个钻孔 A 的位置取由图 3 确定的最优钻孔位置（$x_0 = 23$ m），第 2 个钻孔 B 的位置 x_i 任取，钻孔 A 与 B 之间的水平间距定义为“$d = x_i - x_0$”。根据 Lloret-Cabot 等[30]建议，为反映土体参数水平空间变异性的影响，选取的钻孔水平间距 d 需小于参数水平波动范围 $\delta_h = 38$ m。在此前提下，取钻孔 A 与 B 之间有不同的水平间距 $d < 38$ m，来模拟现场十字板剪切试验数据，再分别进行贝叶斯分析和信息量分析计算信息量期望值 E(VoI)。图 4 比较了不同钻孔间距 d 对应的 E(VoI)。由图 4 可知，钻孔间距对场地信息量期望值也具有一定的影响，当钻孔间距 d 由−22 m 变化到 34 m，E(VoI)变化较为明显。根据 E(VoI)随钻孔间距的变化趋势可以确定最大 $E(\text{VoI}) = 7.17\times10^{-4}$ 对应的 $d = 10$ m 为最佳钻孔间距。这也表明并不是钻孔间距越小所获得的试验数据对了解边坡稳定性能提供的信息量越大。

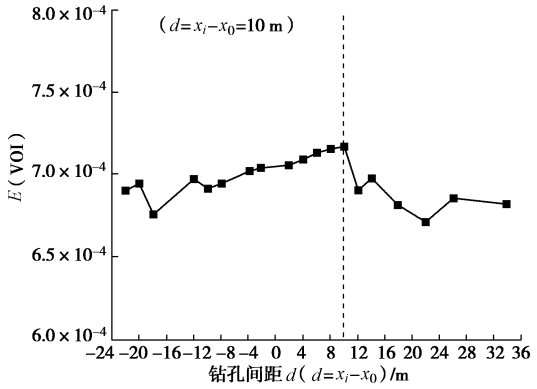

图 4 信息量期望值随两个钻孔之间水平间距的变化关系

Fig. 4 Variation of expected value of information with separation distance between two boreholes

提出方法还可以估计任意给定的两个钻孔 A 和 B 之间不同水平间距（$d = x_B - x_A$）对应的信息量期望值 E(VoI)，表 2 给出了任意给定两个钻孔之间不同水平间距对应的 E(VoI)。由表 2 可知，不同钻孔间距对应的 E(VoI)相差很大，通过比较可知最大信息量期望值 $E(\text{VoI}) = 7.13\times10^{-4}$ 对应的最佳钻孔间距为 $d = 6$ m。即从坡面附近的两个钻孔（$x_A = 23$ m 和 $x_B = 29$ m）中获得的试验数据可对了解边坡稳定性能提供更多的信息量。类似地，提出方法可以拓展到优化设计多个钻孔位置及多个钻孔之间的钻孔间距。

表 2 不同钻孔间距对应的信息量期望值

Table 2 Expected values of information for different separation distances between two boreholes

x_B	x_A			
	23 m	27 m	31 m	35 m
13 m	6.92×10^{-4} ($d = -10$ m)	6.72×10^{-4} ($d = -14$ m)	6.50×10^{-4} ($d = -18$ m)	5.91×10^{-4} ($d = -22$ m)
21 m	7.04×10^{-4} ($d = -2$ m)	6.76×10^{-4} ($d = -6$ m)	6.85×10^{-4} ($d = -10$ m)	6.16×10^{-4} ($d = -14$ m)
29 m	**7.13×10^{-4} ($d = 6$ m)**	6.54×10^{-4} ($d = 2$ m)	6.49×10^{-4} ($d = -2$ m)	6.16×10^{-4} ($d = -6$ m)
37 m	6.97×10^{-4} ($d = 14$ m)	6.57×10^{-4} ($d = 10$ m)	6.37×10^{-4} ($d = 6$ m)	5.43×10^{-4} ($d = 2$ m)
45 m	6.71×10^{-4} ($d = 22$ m)	6.33×10^{-4} ($d = 18$ m)	6.37×10^{-4} ($d = 14$ m)	5.43×10^{-4} ($d = 10$ m)

注：括号内的数据表示任意给定的两个钻孔 A 和 B 之间的水平间距 $d = x_B - x_A$。

5 结　　论

在耗费最少工程勘察成本的前提下，为获得更多有价值的现场试验数据，本文提出了基于贝叶斯更新和信息量分析的边坡钻孔布置方案优化设计方法，并通过一饱和黏土边坡算例验证了提出方法的有效性。主要结论如下：

（1）提出方法采用基于子集模拟的 BUS 方法更新空间变异土体参数统计特征和估计边坡后验失效概率，在此基础上通过信息量分析（无需进行额外的边坡稳定性分析）确定边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距，实现了在现场勘察试验之前仅利用土体参数先验信息有效确定边坡最优钻孔位置和最佳钻孔间距。

（2）提出方法需要根据土体参数先验信息模拟现场试验数据，为更加准确地表征土体参数先验信息，本文发展了非平稳随机场模型以表征土体参数均值和标准差随埋深逐渐增加的特性。就文中边坡算例而言，最优钻孔位置为 $x_A = 23$ m，其次为 $x_B = 33$ m，对应的最佳钻孔间距为 10 m。

（3）现场试验模拟次数对边坡钻孔布置方案优化设计具有一定的影响，需要保证随着现场试验模拟次数的变化，场地信息量随钻孔位置和钻孔间距的变化

趋势基本保持不变。此外，并不是钻孔间距越小所获得的试验数据对了解地层特性和边坡稳定性能提供的信息量越大。

（4）本文仅研究了边坡钻孔布置方案（钻孔位置和钻孔间距）的平面优化设计问题，然而实际边坡钻孔布置方案优化设计通常是一个三维问题，所涉及到的钻孔数目更多，钻孔位置、钻孔间距以及钻孔布置形式更为复杂，值得进一步深入研究。

参考文献：

[1] MAYNE P W, CHRISTOPHER B R, DEJONG J. Subsurface investigations - geotechnical site characterization, No. FHWA NHI-01-031[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, U S Department of Transportation, 2002.

[2] DEGROOT D J, BAECHER G B. Estimating autocovariance of in-situ soil properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **119**(1): 147－166.

[3] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(4): 612－624.

[4] PHOON K K, KULHAWY F H. Evaluation of geotechnical property variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(4): 625－639.

[5] CAO Z J, WANG Y, LI D Q. Quantification of prior knowledge in geotechnical site characterization[J]. Engineering Geology, 2016, **203**: 107－116.

[6] GOLDSWORTHY J S, JAKSA M B, FENTON, G A, et al. Effect of sample location on the reliability based design of pad foundations[J]. Georisk, 2007, **1**(3): 155－166.

[7] GONG W, LUO Z, JUANG C H, et al. Optimization of site exploration program for improved prediction of tunneling-induced ground settlement in clays[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **56**: 69－79.

[8] 彭功勋, 刘元雪. 嵌岩桩基岩溶洞钻探数据概率分析与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(5): 1129－1136. (PENG Gong-xun, LIU Yuan-xue. Probability analysis and application of drilling data of karst cave in bedrock of socketed piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(5): 1129－1136. (in Chinese))

[9] ZETTERLUND M S, NORBERG T, ERICSSON L O, et al. Value of information analysis in rock engineering: a case study of a tunnel project in Äspö Hard Rock Laboratory[J]. Georisk, 2015, **9**(1): 9－24.

[10] 邓志平, 李典庆, 曹子君, 等. 考虑地层变异性和土体参数变异性的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 986－995. (DENG Zhi-ping, LI Dian-qing, CAO Zi-jun, et al. Slope reliability analysis considering geological uncertainty and spatial variability of soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 986－995. (in Chinese))

[11] SOUSA R, KARAM K S, COSTA A L, et al. Exploration and decision-making in geotechnical engineering: a case study[J]. Georisk, 2017, **11**(1): 129－145.

[12] GONG W, TIEN Y M, JUANG C H, et al. Optimization of site investigation program for improved statistical characterization of geotechnical property based on random field theory[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, **76**(3): 1021－1035.

[13] STRAUB D, PAPAIOANNOU I. Bayesian updating with structural reliability methods[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, **141**(3): 04014134.

[14] STRAUB D, PAPAIOANNOU I, BETZ W. Bayesian analysis of rare events[J]. Journal of Computational Physics, 2016, **314**: 538－556.

[15] 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))

[16] ASAOKA A, GRIVAS D A. Spatial variability of the undrained strength of clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1982, **108**(5): 743－756.

[17] ZHU D, GRIFFITHS D V, HUANG J S, et al. Probabilistic stability analyses of undrained slopes with linearly increasing mean strength[J]. Géotechnique, 2017, **67**(8): 733－746.

[18] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic slope stability analysis for practice[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(3): 665－683.

[19] SHINODA M. Quasi-Monte Carlo simulation with low-discrepancy sequence for reinforced soil slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(4): 393－404.

[20] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element

method[J]. Engineering Geology, 2014, **168**: 120－128.

[21] 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.

[22] WANG Y, CAO Z J, AU S K. Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **48**(1): 162－172.

[23] PAPAIOANNOU I, BETZ W, ZWIRGLMAIER K, et al. MCMC algorithms for subset simulation[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2015, **41**: 89－103.

[24] BETZ W, PAPAIOANNOU I, STRAUB D. Adaptive variant of the BUS approach to Bayesian updating[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN). Porto, 2014: 3021－3028.

[25] STRAUB D. Value of information analysis with structural reliability methods[J]. Structural Safety, 2014, **49**: 75－85.

[26] 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.

[27] RACKWITZ R. Reviewing probabilistic soils modelling[J]. Computers and Geotechnics, 2000, **26**(3): 199－223.

[28] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 508－518. (JIANG Shui-hua, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 508－518. (in Chinese))

[29] CAO Z J, WANG Y, LI D Q. Site-specific characterization of soil properties using multiple measurements from different test procedures at different locations: a Bayesian sequential updating approach[J]. Engineering Geology, 2016, **211**: 150－161.

[30] LLORET-CABOT M, FENTON G A, HICKS M A. On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics[J]. Georisk, 2014, **8**(2): 129－140.

第十五次中国岩石力学与工程学术年会第二十八分会场会议通知

第十五次中国岩石力学与工程学术年会分会将于2018年11月19日—22日在北京九华国际会展中心举行。总会由中国科学技术协会指导，中国岩石力学与工程协会主办，大会主题：展示中国岩石力学与工程进展，服务“一带一路”建设与发展。

大会内容包括学术报告、技术培训、工业展览和青年竞赛四个部分。学术报告邀请了国内外岩石力学与工程知名专家做特邀报告，引领学科发展方向。举办的新技术培训，进一步的提升中国岩石力学与工程领域技术水平，促进行业技术进步。工业展览对新材料、新工艺、新仪器、新装备展览展示，推动了创新成果转化和工业化应用。举办全国青年岩土力学与工程创新创业大赛，将激励广大青年奋发向上、创业创新。

大会第二十八分会场由河北地质大学主办、河北建设勘察研究院有限公司、美国科罗拉多大学、河北科技大学、中国兵器工业北方设计勘察院、中交河北土木工程有限公司和吉林大学等多个机构和部门协办。分会场主题为城市地下资源地下空间开发利用研讨会。

该分会场的会议议题：①城市地下空间的合理开发利用；②城市地下空间开发中的岩土工程问题；③雄安新区的地热资源利用；④城市地下空间开发中地下水资源利用；⑤城市地下空间开发中岩溶地基勘查与处理。

投稿邮箱地址：Chinarock_2018@163.com。投稿论文可采用中文或英文，中文来稿格式请参考《岩石力学与工程学报》论文格式，英文来稿格式请上大会网站论文征集页面下载英文模版（http://chinarock2018.csrme.com/）。

（第十五次中国岩石力学与工程学术年会
第二十八分会场河北地质大学　供稿）