

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.037



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑各向异性空间变异性的边坡可靠度分析

明思成^a, 仇文岗^{a,b,c}, 何昱苇^a, 陈龙龙^a, 覃长兵^a

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; c. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045)

摘要:在边坡可靠度分析中,通常采用横观各向异性或各向同性随机场来刻画土体参数的空间变异特性,而忽略了土体参数的各向异性空间变异性,从而可能会得出错误的可靠度评价结果。为此,建立考虑各向异性空间变异性的边坡可靠度随机有限差分方法(RFDM)计算框架,并以一般各向异性空间变异性边坡为参考边坡,从波动范围方向结构、互相关系数、变异系数和波动范围等方面系统地探讨各向异性空间变异性对边坡可靠度的影响。结果表明:基于坐标转换的各向异性随机场模拟方法可以有效地刻画土体参数各向异性空间变异性;应变聚类边坡临界滑面搜索算法适用于复杂临界滑面的精确搜索;相比一般各向异性空间变异性,旋转各向异性空间变异性会高估边坡失效概率,横观各向异性空间变异性会严重低估边坡失效概率,而各向同性空间变异性会在较大和较小的波动范围内分别高估和低估边坡失效概率。

关键词:随机有限差分;边坡可靠度;蒙特卡洛模拟;各向异性空间变异性;临界滑面

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0060-15

Analysis on slope reliability considering anisotropic spatial variability of soil parameters

MING Sicheng^a, ZHANG Wengang^{a,b,c}, HE Yuwei^a, CHEN Longlong^a,
QIN Changbing^a

(a. School of Civil Engineering, Chongqing University; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; c. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In current slope reliability analysis, the failure probability might be wrongly calculated because of the inadequate consideration of anisotropic spatial variability of soil parameters. Therefore, a random finite difference method (RFDM) framework considering anisotropic spatial variability is established. Taking the general anisotropic spatial variability slope as a reference slope, the influence of anisotropic spatial variability on slope reliability is systematically studied from the aspects of fluctuation range direction structure, cross-correlation coefficient, variation coefficient and fluctuation range. The results show that the coordinate-

收稿日期:2022-12-24

基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-jq0087);在渝高校与中国科学院所属院所合作项目(HZ2021001)

作者简介:明思成(1998-),男,主要从事岩土工程可靠度研究,E-mail:20164823@cqu.edu.cn.

仇文岗(通信作者),博士,教授,博士生导师,E-mail:zhangwg@cqu.edu.cn.

Received: 2022-12-24

Foundation items: Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2020jcyj-jq0087); Cooperation Projects Between Universities in Chongqing and Institutes of Chinese Academy of Sciences (HZ2021001)

Author brief: MING Sicheng (1998-), main research interest: reliability of geotechnical engineering; E-mail: 20164823@cqu.edu.cn.

ZHANG Wengang (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

transformation-based anisotropic random field simulation method can effectively characterize anisotropic spatial variability of soil parameters. Strain-clustering-based slope critical slip surface searching algorithm can accurately determine the complex critical sliding surface of slope. Compared with the general anisotropic spatial variability, the slope failure probability is overestimated and greatly underestimated when considering rotational anisotropy and transverse anisotropy, respectively. In addition, considering isotropic random fields can overestimate and underestimate the slope failure probability in case of greater and smaller scale of fluctuation, respectively.

Keywords: random finite difference method; slope reliability; Monte Carlo simulation; anisotropic spatial variability; critical slip surface

由于受到沉积、物理化学风化、矿物组成、构造运动、侵蚀作用和搬运作用等影响,即使看似均质的土体,其属性参数也在空间上表现出一定的变异性和成层特征^[1-3]。Lumb^[4-5]通过大量试验研究逐渐认识到不同空间位置处的土体参数值存在相关性和变异性,并提出了土体参数空间变异性这一概念。Vanmarcke^[6]引入随机场模型将土体参数描述为服从某种分布的随机变量,用均值、变异系数来描述其在数值上的变异性,而用自相关函数中的波动范围来衡量任意两点处参数值间的空间相关性程度。在波动范围内不同位置处的土体参数值具有较强相关性,超出这个范围则认为不相关。一般来说,波动范围越大,土体越趋于均质状态,其参数空间变异性程度越低,反之则越高^[7]。

忽视边坡土体参数空间变异性会带来意料不到的灾难性后果。例如,在旧金山港的一个码头建设过程中,一个在稳定性评估中被评估为“安全”的水下“均质”边坡发生了失稳^[8]。鉴于此,许多学者开展了考虑空间变异性的边坡可靠度分析研究。Zhou等^[9-10]采用各向同性随机场模拟给定滑面上的土体抗剪强度参数空间变异性,推导了单层土坡发生坡脚和深层圆弧滑动概率的一维极限平衡法解析解。类似地,Gravanis等^[11]推导了一维平面滑动下的空间变异性边坡失效概率积分解析解。这些研究只描述了单一固定滑面上的抗剪强度参数空间变异性,把相应的参数空间变异结构考虑为各向同性结构,进而忽略了其各向异性结构的本质。虽然简化了边坡可靠度分析,但是适用范围窄,也未能真正反映各向异性空间变异性对边坡可靠度的影响。为此,学者们从许多方面进行了考虑各向异性空间变异性边坡可靠度的分析研究。Luo等^[12]分析了不排水抗剪强度的垂直空间变异性对基坑边坡开挖过程中稳定性的影响,认为垂直波动范围越大,边坡失效概率越大。Cami等^[13]采用随机极限平衡法对Sugar Creek土堤进行了非圆弧滑动下的空间变异性边坡可靠度分析,发现合理细化随机场网

格、增加条块数目和模拟次数能提高边坡可靠度评价的准确性。Wang^[14-15]研究发现,忽视土体水力渗流参数空间变异性将明显低估土坝渗流稳定性和高估失效风险。蒋水华等^[16]考虑了在岩土体参数横观各向异性下不同自相关函数对边坡可靠度的影响,发现高斯型自相关函数最为高估失效概率。陈朝晖等^[17]对比不同方法对空间变异性边坡可靠度的影响发现,随机极限分析方法所得结果与随机有限元方法很接近。朱彬^[18]则将空间变异性边坡的研究视野从陆地扩展至海洋,建立了海床沉积物强度参数非平稳随机场模型并应用于海底斜坡可靠度分析。但是,由于未建立坐标系几何转换关系,这些研究只能局限于横观各向异性随机场。实际工程中,土体物理、力学参数空间变异性往往表现出倾斜层状的旋转各向异性或一般各向异性特征^[19-20]。Liu等^[21]指出,最大和最小波动范围的方向并不总是对应于水平和竖向;Liu等^[22]也发现,最大波动范围方向也可以是斜向的。由上述研究可知,还需进一步研究各向异性空间变异性对边坡可靠度的影响。

笔者将随机场理论与边坡稳定有限差分方法相结合,利用批处理调用方式,建立适用于各类各向异性空间变异边坡可靠度分析的通用随机有限差分计算框架。在该计算框架内,提出基于坐标转换的各向异性随机场模拟方法和应变聚类边坡临界滑面搜索算法,开发以通用有限差分商业软件三维连续介质快速拉格朗日方法FLAC3D与各向异性空间变异性边坡稳定概率分析模块的接口程序,系统研究了所提方法在多参数各向异性空间变异性边坡可靠度分析中的应用。

1 各向异性空间变异性刻画

1.1 各向异性空间变异性类型

在现实情况中,土体参数在不同空间方向上的空间变异性程度不一致,即空间变异性的各向异性特征。图1展示了6种典型的二维空间变异性类

型,两条白线代表自相关结构中的波动范围(Scale of Fluctuation, SOF, 记为 δ)主轴,较长的为最大波动范围 δ_{\max} ,较短的为最小波动范围 δ_{\min} 。在各向同性类型中,最大波动范围和最小波动范围相等,表明岩土体参数在每个方向上的空间变异性程度相同。横观各向异性中,水平向的波动范围最大而垂直向的最小,表明垂直方向上的岩土体参数值要比水平向表现出更大的空间变异性。旋转各向异性则是将波动范围主轴 δ_{\max} 和 δ_{\min} 保持正交而整体逆时针地赋予一个旋转角 α ,此时,最大和最小的空间变异性程度相应表现在两个互为正交的倾斜方向上。一般各向异性中,一个波动范围主轴被固定在水平向上而另一个波动范围主轴则与其成一交错角 β 。一般旋转各向异性是在一般各向异性的基础上,波动范围主轴 δ_{\max} 和 δ_{\min} 整体逆时针旋转了 α 角度,此时最大和最小的空间变异性程度都位于倾斜方向上。图1(f)展示了含有两种各向异性的组合型各向异性。相较于各向同性而言,岩土体参数空间变异性的各向异性特征更常见于各类岩土工程中^[20, 22-23]。

1.2 基于坐标转换的各向异性随机场模拟方法

在平稳或准平稳随机场理论中,自相关函数常用来量化空间中任意两点处的土体参数间的自相

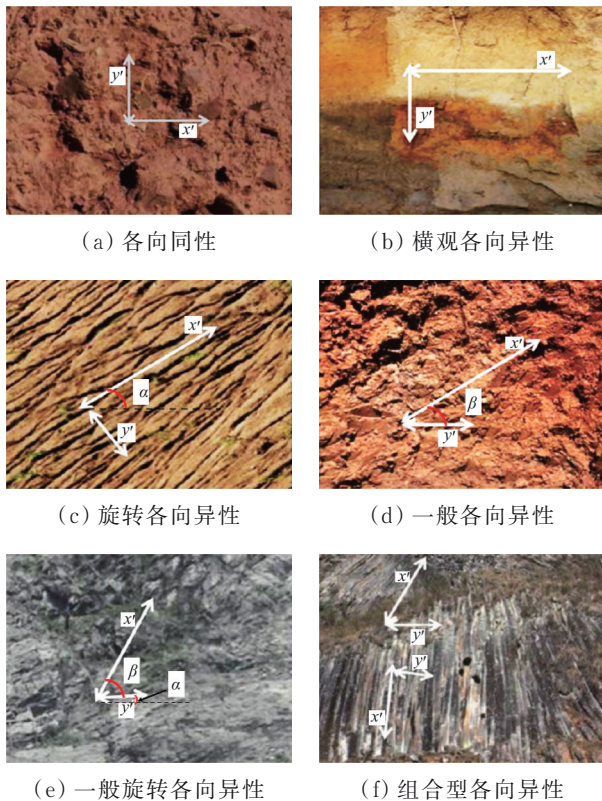


图1 典型二维空间变异性类型^[23]

Fig. 1 Illustration of six typical spatial variability patterns in geo-material^[23]

关性。实际工程中常采用理论自相关函数来计算自相关系数。然而,目前的理论自相关函数只能描述在笛卡儿直角坐标系下的土体参数空间自相关性,且只适用于各向同性和横观各向异性类型,而无法描述斜坐标系下其他各向异性类型的土体参数空间自相关性。

为了将理论自相关函数应用到更多各向异性类型中,引入笛卡儿直角坐标系和斜坐标系间的转换关系。如图2所示,将点 P 的直角坐标 (x, y) 以平行投影的方式分别分解到斜坐标系主轴 X' 和 Y' 上,其在斜坐标系主轴上的截距就是点 P 的斜坐标 (x', y') 。 θ 是直线 OP 的方向角,也是任意方向上的波动范围方向角。各向异性类型下的直角坐标和斜坐标转换关系的统一表达式为

$$\begin{cases} x' = (x \sin(\alpha + \beta) - y \cos(\alpha + \beta)) / \sin \beta \\ y' = (y \cos \alpha - x \sin \alpha) / \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

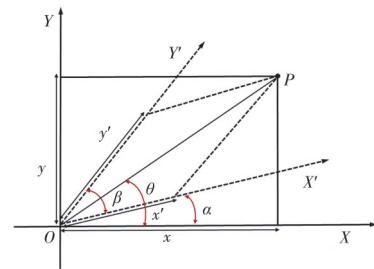


图2 空间某点 P 分别在直角坐标系 XOY 和斜坐标系 $X'OY'$ 中的坐标

Fig. 2 Cartesian coordinate and oblique coordinate of point P

将式(1)中斜坐标代替理论相关函数中的直角坐标,则可确定相应的各向异性自相关函数。

表1列出了经过坐标转换后常用的指数型自相关函数及其变体(平方根指数型自相关函数)在各向同性和各向异性下的表达式 $\rho(d_x, d_y)$, d_x 和 d_y 分别是空间任意两点在笛卡儿直角坐标系下的水平和垂直方向上的相对距离。可以看出,经过坐标转换,各向异性自相关函数可以直接计算任意两点的直角坐标在斜坐标系中的自相关系数,从而刻画了斜坐标系下土体参数的空间自相关性。

图3对比了采用指数型和平方根指数型自相关函数的波动范围 δ_θ 随方向角 θ 变化的包络线。从图3可以看出,当自相关函数采用平方根指数型时,波动范围包络曲线光滑,表明采用平方根指数型自相关函数计算得出的波动范围的变化准确。因此,采用平方根指数型自相关函数。

表 1 各向异性自相关函数

Table 1 Anisotropic autocorrelation functions

类型	指数型自相关函数	平方根指数型自相关函数
各向同性	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\left(\frac{d_x + d_y}{\delta}\right)\right]$	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\sqrt{\frac{d_x^2 + d_y^2}{\delta}}\right]$
横观各向异性	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\left(\frac{d_x}{\delta_{x'}} + \frac{d_y}{\delta_{y'}}\right)\right]$	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\sqrt{\frac{d_x^2}{\delta_{x'}^2} + \frac{d_y^2}{\delta_{y'}^2}}\right]$
旋转各向异性	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\left(\left \frac{d_x \cos \alpha + d_y \sin \alpha}{\delta_{x'}}\right + \left \frac{d_y \cos \alpha - d_x \sin \alpha}{\delta_{y'}}\right \right)\right]$	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2 \times \sqrt{\left(\frac{d_x \cos \alpha + d_y \sin \alpha}{\delta_{x'}}\right)^2 + \left(\frac{d_y \cos \alpha - d_x \sin \alpha}{\delta_{y'}}\right)^2}\right]$
一般各向异性	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\left(\left \frac{d_x - d_y \cot \beta}{\delta_{x'}}\right + \left \frac{d_y / \sin \beta}{\delta_{y'}}\right \right)\right]$	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2 \sqrt{\left(\frac{d_x - d_y \cot \beta}{\delta_{x'}}\right)^2 + \left(\frac{d_y / \sin \beta}{\delta_{y'}}\right)^2}\right]$
一般旋转各向异性	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2\left(\left \frac{(d_y \cos \alpha - d_x \sin \alpha) / \sin \beta}{\delta_{x'}}\right + \left \frac{(d_x \sin(\alpha + \beta) - d_y \cos(\alpha + \beta)) / \sin \beta}{\delta_{y'}}\right \right)\right]$	$\rho(d_x, d_y) = \exp\left[-2 \times \sqrt{\left(\frac{d_y \cos \alpha - d_x \sin \alpha}{\delta_{y'} \sin \beta}\right)^2 + \left(\frac{d_x \sin(\alpha + \beta) - d_y \cos(\alpha + \beta)}{\delta_{x'} \sin \beta}\right)^2}\right]$
组合型	以上不同类型的组合	以上不同类型的组合

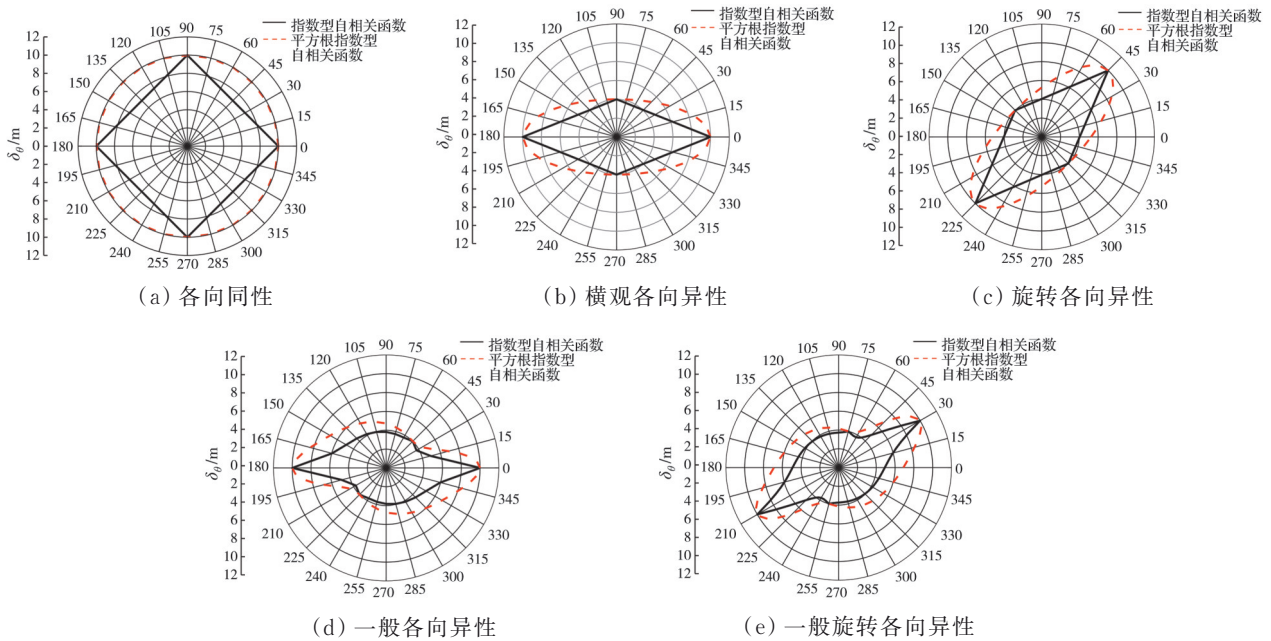


图 3 指数型和平方根指数型自相关函数形式下的波动范围 δ_θ 随方向角的变化

Fig. 3 Scales of fluctuation δ_θ of exponential and square-root exponential auto-correlation function

在随机场离散方法中,由于乔列斯基分解技术实现过程简单且不受具体随机场空间形态的限制^[14],因此被广泛应用于岩土体参数随机场模拟。只需将建立的坐标系转换关系嵌入乔列斯基分解技术即可实现各向异性随机场的离散。基于坐标转换的乔列斯基分解技术模拟相关非高斯各向异

性随机场的流程如下。

1)将随机场空间离散成若干单元,根据目标各向异性类型,通过转换关系(式(2))将提取到的单元中心点的直角坐标 $P_i(x_i, y_i)$ 转换为斜坐标 $P'_i(x'_i, y'_i)$, $i=1, 2, 3 \dots n, n$ 为随机场单元数目。

2)在标准正态空间下采用拉丁超立方抽样

(LHS)生成一组独立随机样本 ξ ,并重构成 $n \times 2$ 的矩阵 $\xi = [\xi_c = (\xi_{c,1} \cdots \xi_{c,n})^T, \xi_\varphi = (\xi_{\varphi,1} \cdots \xi_{\varphi,n})^T]$ 。

3)对互相关系数矩阵 $\rho_{c,\varphi}^r$ 进行乔列斯基分解 $L_1 L_1^T = \rho_{c,\varphi}^r$ 得到 L_1 ,相关标准正态随机样本矩阵 $\xi^D = \xi L_1^T = [\xi_c^D = (\xi_{c,1}^D \cdots \xi_{c,n}^D)^T, \xi_\varphi^D = (\xi_{\varphi,1}^D \cdots \xi_{\varphi,n}^D)^T]$ 。

4)用目标各向异性随机场单元的中心点斜坐标 P' 替代直角坐标代入理论自相关函数中,得到表1中的各向异性自相关函数,计算得出不同点之间的自相关系数,构成自相关矩阵 C 。

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \rho(d_{x_{1,j}}, d_{y_{1,j}}) & \cdots & \rho(d_{x_{1,n}}, d_{y_{1,n}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho(d_{x_{1,j}}, d_{y_{1,j}}) & \cdots & 1 & \cdots & \rho(d_{x_{1,n}}, d_{y_{1,n}}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(d_{x_{1,n}}, d_{y_{1,n}}) & \cdots & \rho(d_{x_{1,n}}, d_{y_{1,n}}) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

值得注意的是,转换坐标系并不会改变实际不同两点之间的自相关性。

5)对自相关系数矩阵 C 进行乔列斯基分解($L_2 L_2^T = C$)得到 L_2 ,左乘矩阵 ξ^D 得到 $n \times 2$ 的相关标准高斯参数随机场。

$$\chi_R^G(x', y') = \chi_R^G(x, y) = L_2 \xi^D = L_2 \xi L_1^T, R = c, \varphi \quad (3)$$

6)将标准相关高斯参数随机场 $\chi_R^G(x, y)$ 经等概率变换^[24]为相关对数正态参数随机场 $\chi_{c,\varphi}^{LN}(x, y)$,具体变换为

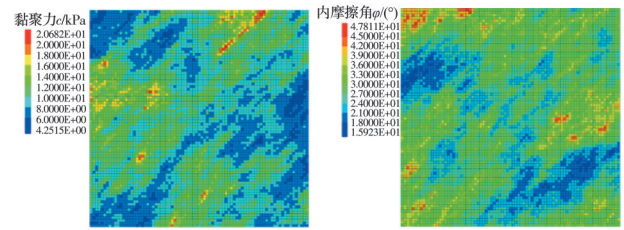
$$\chi_{c,\varphi}^{LN}(x, y) = \exp(\mu_{\ln R} + \sigma_{\ln R} \chi_R^G(x, y)), R = c, \varphi \quad (4)$$

式中: $\mu_{\ln R}$ 和 $\sigma_{\ln R}$ 为高斯参数随机场 $\ln c, \ln \varphi$ 的均值和标准差。

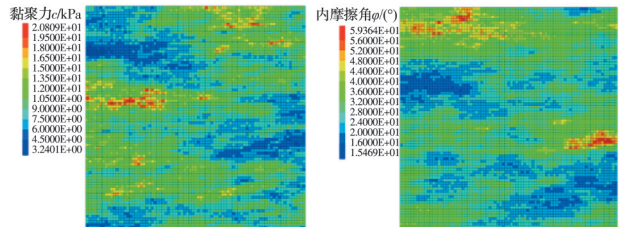
至此,完成了相关对数正态各向异性参数随机场。以上步骤重复 N 次,可以得到 N 个各向异性随机场样本。

利用上述方法,得到旋转各向异性、一般各向异性 and 一般旋转各向异性参数随机场。随机场模拟的结果如图4所示。

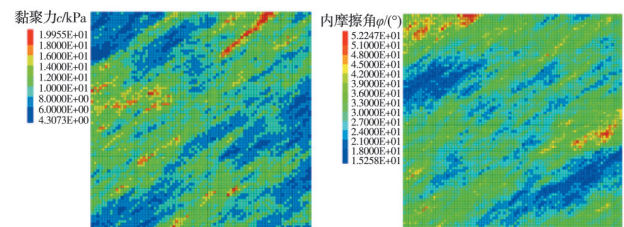
为了验证基于坐标转换的乔列斯基分解技术,需对模拟的随机场样本(图4)进行精度分析。由于给定两点处的参数值之间的自相关系数理论值本质上由波动范围决定,因此,可以通过对比其理论值和模拟值来分析随机场的精度。此外,引入波动范围还可以实现随机场任意方向角 θ 上的精度分析。图5比较了某黏聚力波动范围 δ_ρ 的模拟包络线(基于1000次随机场实现)和理论包络线。图中包络线十分吻合,表明基于坐标转换的乔列斯基分解技术适用于非横观各向异性参数随机场的模拟,并



(a) 旋转各向异性($\delta_{x'} = 10 \text{ m}, \delta_{y'} = 4 \text{ m}, \alpha = 45^\circ$)



(b) 一般各向异性($\delta_{x'} = 10 \text{ m}, \delta_{y'} = 4 \text{ m}, \beta = 45^\circ$)



(c) 一般旋转各向异性($\delta_{x'} = 10 \text{ m}, \delta_{y'} = 4 \text{ m}, \alpha = 30^\circ, \beta = 45^\circ$)

图4 基于坐标转换的三种各向异性随机场的一次典型实现

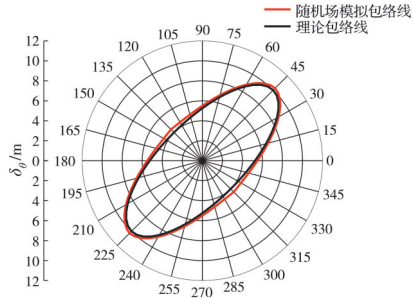
Fig. 4 One typical realization for each among three patterns of anisotropic random field based on coordinate transformation

且可以较高精度地离散随机场。

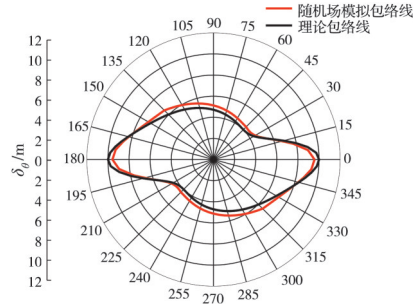
2 边坡可靠度分析随机有限差分计算框架

2.1 随机有限差分法

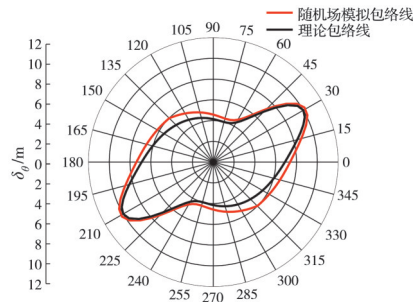
随机有限差分方法(Random Finite Difference Method, RFD)是对生成的 N 个边坡随机场样本进行蒙特卡洛模拟(Monte Carlo Simulation, MCS),即进行 N 次边坡稳定确定性分析,并得到 N 个边坡安全系数 F_s 值。如要更为准确地估计边坡失效概率,需执行大量的边坡稳定有限差分确定性分析,这无疑会大大加重计算负担和降低计算效率。鉴于此,采取类似文献[25-26]的做法,通过观测随机分析统计量(如安全系数均值 μ_{F_s} 和标准差 σ_{F_s})的收敛情况来确定随机有限差分中的确定性分析次数。如图6所示,安全系数的均值 μ_{F_s} 和标准差 σ_{F_s} 会随蒙特卡洛模拟次数 N 的增加而趋于稳定,一般最多执行1000次有限差分确定性分析就可以获得稳定的边坡安全系数 F_s 分布。根据文献[7,27],边坡安全系数一般服从正态或对数正态的概率分



(a) 旋转各向异性 ($\delta_x = 10 \text{ m}, \delta_y = 4 \text{ m}, \alpha = 45^\circ$)



(b) 一般各向异性 ($\delta_x = 10 \text{ m}, \delta_y = 4 \text{ m}, \beta = 45^\circ$)



(c) 一般旋转各向异性
($\delta_x = 10 \text{ m}, \delta_y = 4 \text{ m}, \alpha = 30^\circ, \beta = 45^\circ$)

图 5 波动范围 δ_θ 的随机场模拟包络线和理论包络线比较
Fig. 5 The comparison between the random-filed-simulated and the theoretical envelope curve of scale of fluctuation δ_θ

布,故对边坡安全系数进行正态和对数正态分布类型的K-S检验。之后,将 μ_{F_s}, σ_{F_s} 代入最可能分布类型的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)来构建相应具体的累积分布函数表达式,从而求出 $F_s < 1$ 区域的累积分布 $P_{F_s < 1}$,即边坡失效概率 P_f ,计算式为

$$P_f = P_{F_s < 1} = \Phi(\mu_{F_s}, \sigma_{F_s}, F_s = 1) \quad (5)$$

式中: Φ 为累积分布函数。

2.2 应变聚类边坡临界滑面搜索算法

对于基于数值模拟的边坡临界滑面的搜索,目前存在单元表征和滑面位置刻画这两类方式。单元表征是基于塑性剪切带来刻画滑面的大致范围^[28-30],而滑面位置刻画则可以基于应变信息精确识别边坡临界滑面^[31],故常用于边坡临界滑面搜索

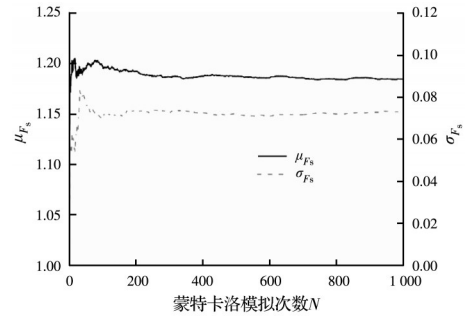


图 6 边坡安全系数均值和标准差随蒙特卡洛模拟次数 N 的变化
Fig. 6 Mean and standard deviation of slope factor of safety varying with the number of MCSs

Fig. 6 Mean and standard deviation of slope factor of safety varying with the number of MCSs

中^[32-34]。但是,这类传统方法无法搜索多重临界滑面。因此,引入应变聚类的方法来实现。

应变聚类是对土体应变信息进行聚类分析,将附带应变信息的离散土体单元“聚”成剪切带和非剪切带两类区域。聚类分析是一种无监督学习过程,可以自动确定和标记数据类别。由于K均值聚类算法具有模型稳健、迭代速度快、适用于大样本量集合等特点,选用该算法执行聚类分析。图7展示了采用K均值聚类算法对二维空间中若干点的坐标属性聚为两类的分析结果。

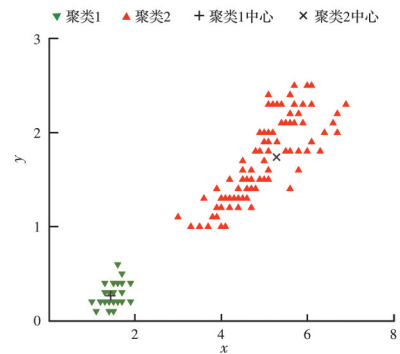


图 7 K 均值聚类分析示例

Fig. 7 A simple case of K-means clustering analysis

将聚类分析与传统应变信息滑面搜索算法结合构成应变聚类边坡临界滑面搜索算法,算法流程如下:

1)根据有限差分强度折减法的数值计算结果,获取边坡临界状态下土体单元剪切应变增量的空间分布,并对附带该信息的土体单元编号。

2)聚类数目设定为2,采用K均值聚类分析算法,对附着在单元上的剪切应变增量进行聚类分析。聚类结果通过单元编号一一映射到空间中相应的土体单元,则自然地将附带应变信息的土体单元划分成了剪切带单元和非剪切带单元。通过统计比较,确定土体单元数目较少的聚类区域为边坡

剪切带。值得注意的是,由于聚类分析具备自动对特征量进行分类的功能,因此,可以识别出多条可归属于剪切单元聚类的滑带。这一优点是传统应变信息滑面搜索算法所不具备的。

3)构建若干条穿越剪切带的虚拟垂线,将剪切带内部附带最大剪切应变增量的土体单元选择为剪切带在该虚拟垂线上的临界单元(图 8(a))。

4)将一个剪切带内部所有临界单元的中心点坐标连接起来,形成一条非圆弧的临界滑面(图 8(a))。

5)如果边坡存在多条剪切带(图 8(b)),则依次重复步骤 3)和 4)直到每一条剪切带内部所有临界单元的中心点坐标都连接完毕并形成相应的非圆弧临界滑面。考虑到边坡岩土体物理、力学性质普遍存在空间变异性,故边坡临界滑面本质上具有复杂形态的折线。滑面搜索算法未对滑面进行圆弧化拟合,保留了边坡滑面最真实的形态。这也为日后空间变异性边坡的加固和优化设计提供了最为可靠、真实的滑面资料。

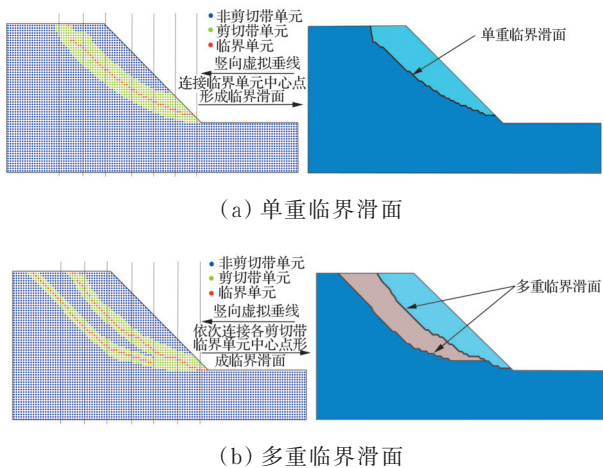


图 8 应变聚类边坡临界滑面搜索算法

Fig. 8 Strain-clustering-based slope critical slip surface searching algorithm

从图 9 可知,应变聚类边坡临界滑面搜索算法可以很好地完成简单和复杂形态滑面的搜索任务,由此确定的临界滑面位置与剪切带中附有最大应变信息的塑性单元位置吻合度高。

2.3 计算框架流程

图 10 为各向异性空间变异性边坡可靠度分析

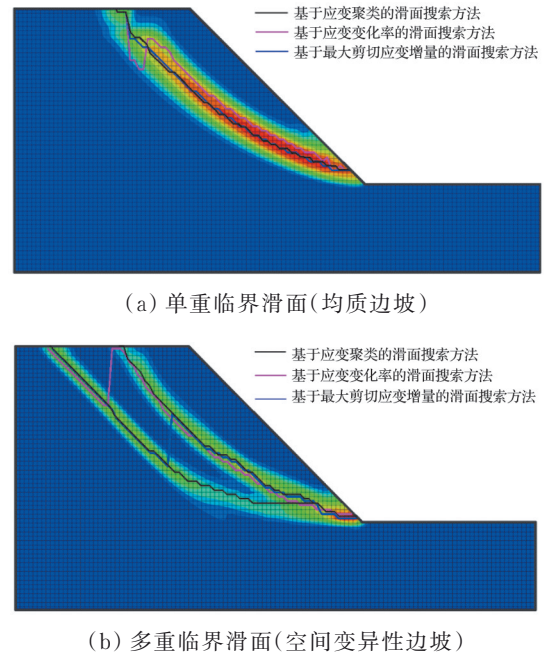


图 9 不同滑面搜索方法的对比

Fig. 9 The comparison among various slip surface searching methods

随机有限差分方法的计算流程,其中有限差分分析模块的批处理计算流程如图 11 所示。

3 边坡模型

采用文献[35]中的摩擦/黏性边坡算例验证所提方法。如图 12 所示,边坡坡高 10 m、长 30 m、底厚 5 m,被离散成 3 780 个 8 节点立方体单元和 60 个 6 节点楔形体单元,单元边长为 0.25 m。采用对数正态随机场来刻画土体抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)的空间变异性。由于侧重于研究抗剪强度参数空间变异性对边坡稳定性的影响,因此,其他如重度、泊松比和弹性模量等小变异性参数^[36]均视为常量。边坡土体的确定性参数及随机场参数^[35]见表 2。

基于 FLAC^{3D}有限差分强度折减法计算边坡安全系数为 1.195,这与 Cho^[35]、Jiang 等^[37]和 Li 等^[38]采用简化毕肖普法得出的 1.204、1.206 和 1.208 基本吻合,且误差在 Duncan^[39]推荐的 $\pm 6\%$ 以内,说明有限差分强度折减法可以获得可靠的边坡安全系数。

表 2 边坡土体参数

Table 2 Slope soil parameters

对数正态随机场参数						确定性参数			
均值		变异系数		波动范围		互相关系数 $\rho_{c,\varphi}$	弹性模量 E/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比 ν
黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	COV_c	COV_φ	δ_h/m	δ_v/m				
10	30	0.3	0.2	40	4	-0.5	100	20	0.3

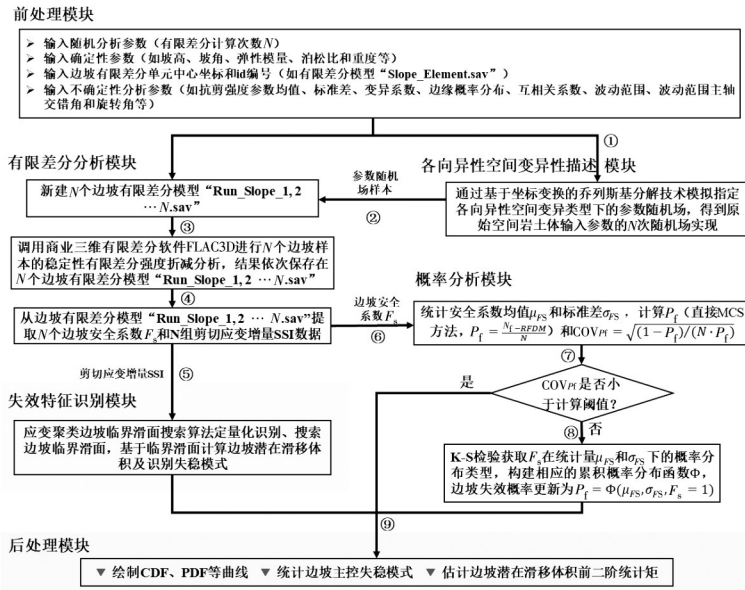


图 10 各向异性空间变异性边坡可靠度分析随机有限差分计算框架

Fig. 10 Random finite difference calculation framework for reliability analysis on anisotropic-spatially variable slope

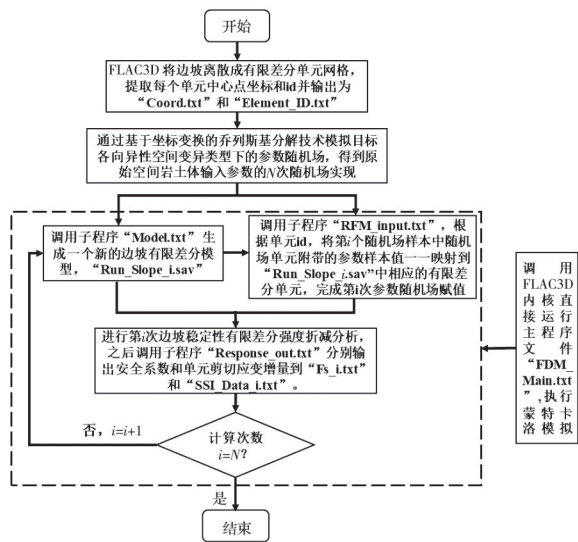


图 11 FLAC3D 环境下的边坡稳定性有限差分批处理计算流程图

Fig. 11 Flowchart of finite difference batch calculation of slope stability in FLAC3D environment

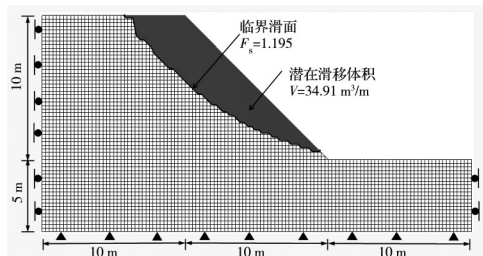


图 12 边坡有限差分模型

Fig. 12 Slope finite difference model

4 边坡可靠度分析

以一般各向异性空间变异性为研究类型,从波动范围方向结构、互相关系数、变异系数和波动范

围等方面系统地探讨各向异性空间变异性对边坡可靠度的影响。根据最大波动范围方向可将一般各向异性空间变异性的波动范围方向结构分为水平向($\theta_{\delta_{\max}}^{GA} = 0^\circ$ 和 $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = \beta$)和非水平向($\theta_{\delta_{\max}}^{GA} = \beta$ 和 $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = 0^\circ$)。以水平结构和非水平结构提法分别代表这两类波动范围方向结构,并简记为 $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = \beta$ 和 $\theta_{\delta_{\max}}^{GA} = \beta$ 。

4.1 波动范围方向结构的影响

将一般各向异性空间变异性的波动范围方向结构与各向同性、横观各向异性和旋转各向异性的结构进行了对比分析。为便于对比,互相关系数 $\rho_{c,\varphi}$ 暂时取0,其他参数如表2所列。

4.1.1 水平结构

图 13 展示了 $\theta_{\delta_{\min}}^{GA}$ 的变化对边坡可靠度的影响,其中 $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = 90^\circ$ 也代表横观各向异性。由图 13 可以看出, $\theta_{\delta_{\min}}^{GA}$ 的变化显著影响边坡可靠度, P_f 的最大值(8.56%, $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = 90^\circ$)为最小值(1.25%, $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = 15^\circ$)

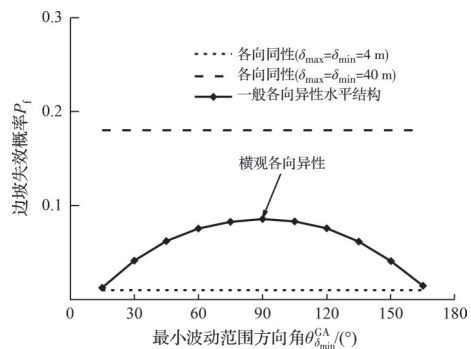


图 13 一般各向异性空间变异性水平结构对边坡可靠度的影响

Fig. 13 The influence of horizontal structure of general anisotropic spatial variability on slope reliability

的 7 倍。其中, P_{fmin} 略高于 $\delta_{max} = \delta_{min} = 4\text{ m}$ 下的失效概率(1%), 而 P_{fmax} 大约只有 $\delta_{max} = \delta_{min} = 40\text{ m}$ 下失效概率(18%)的一半, 说明采用各向同性随机场会在较大的波动范围内高估边坡的失效概率, 而只适用于较小波动范围个别情况(如 $\theta_{\delta_{min}}^{GA} = 15^\circ$)。因此, 各向同性随机场不适用于实际边坡的可靠度分析。从图中还能看出, 水平结构下 P_f 曲线以 $\theta_{\delta_{min}}^{GA} = 90^\circ$ 为轴呈对称分布形态, 如 $P_{f60^\circ} \approx P_{f120^\circ}$ ($7.54\% \approx 7.57\%$)。

图 14 为不同 $\theta_{\delta_{min}}^{GA}$ 下的边坡安全系数概率密度函数(PDF)曲线。可以看出, 当 $\theta_{\delta_{min}}^{GA} = 15^\circ \sim 90^\circ$ 时 PDF 曲线趋向矮胖型, 而 $\theta_{\delta_{min}}^{GA} = 90^\circ \sim 165^\circ$ 时 PDF 趋向高瘦型。其中, 曲线越缓表明在某次随机场实现中沿深度方向上越多土体单元在强度上存在着强自相关性, 即土体强度参数的变异性越低, 进而提高了低强度均质区域的出现概率, 意味着失效概率增加。此外, 任一对称工况(如 $\theta_{\delta_{min}}^{GA} = 60^\circ$ 和 120°)下安全系数的均值 μ_{F_s} 和标准差 σ_{F_s} 的分布都几乎一致, 这意味着对称工况下土体强度参数的空间变异性程度基本一致, 这才是失效概率对称性出现的根本原因。

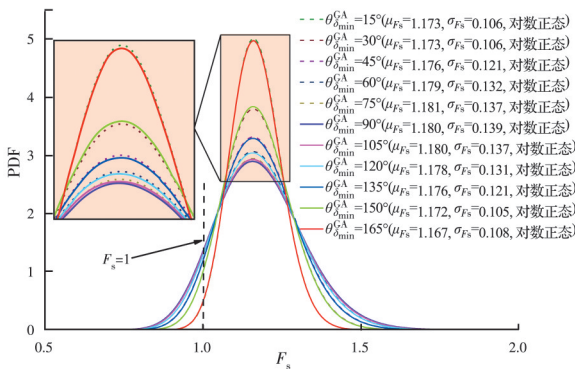


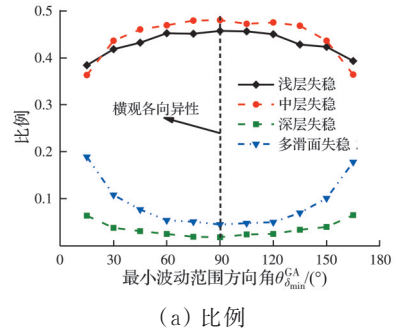
图 14 不同 $\theta_{\delta_{min}}^{GA}$ 值下的边坡安全系数 PDF 曲线

Fig. 14 The PDF curves of factor of safety for various $\theta_{\delta_{min}}^{GA}$ values

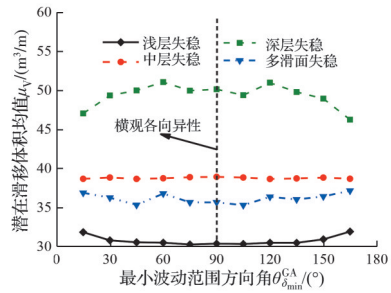
图 15 为边坡失稳模式比例及相应潜在滑移体积前二阶统计矩随 $\theta_{\delta_{min}}^{GA}$ 变化的情况。如图 15(a) 所示, 中层失稳模式为水平结构下的边坡主控失稳模式。对于潜在滑移体积均值 μ_v 而言, 其次序为深层 > 中层 > 多滑面 > 浅层失稳(图 15(b)), 而标准差 σ_v 的次序为浅层 > 多滑面 > 深层 > 中层失稳(图 15(c))。

4.1.2 非水平结构

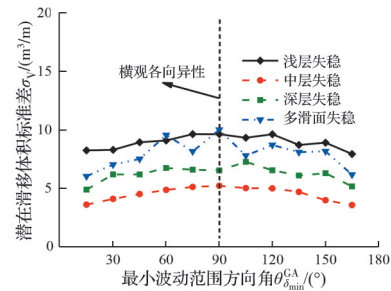
图 16 展示了 $\theta_{\delta_{max}}^{GA}$ 的变化对边坡可靠度的影响。可以看出, 除个别情况下($\theta_{\delta_{max}}^{GA} = 15^\circ$ 和 165°), 各向同性随机场在较大和较小的波动范围内分别高估



(a) 比例



(b) 潜在滑移体积均值



(c) 潜在滑移体积标准差

图 15 不同 $\theta_{\delta_{min}}^{GA}$ 下的边坡失稳模式比例及相应潜在滑移体积均值和标准差

Fig. 15 The proportion of slope failure modes and associated statistics of mean and standard deviation of potential slip mass volume for various $\theta_{\delta_{min}}^{GA}$ values

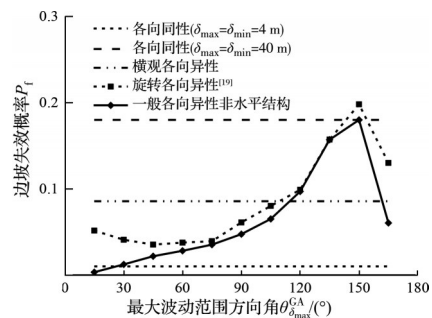


图 16 一般各向异性空间变异性非水平结构对边坡可靠度的影响

Fig. 16 The influence of non-horizontal structure of general anisotropic spatial variability on slope reliability

和低估了各向异性空间变异性边坡失效概率 P_f 。当考虑土层方向($\theta_{\delta_{max}}^{GA} \neq 0^\circ$)时, 与一般各向异性空间变异性非水平结构(P_f 变化值为 $0.3\% \sim 18\%$)相比, 旋转各向异性空间变异性(P_f 变化值为

3.53%~19.8%)会高估边坡失效概率1~31.1倍。这是因为旋转各向异性的波动范围始终正交而不考虑交错角 β ,因此其具有的空间变异性程度较非水平结构(考虑交错角 β ,此时 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=\beta$)要小,进而导致失效概率增加。而在实际情况中,对于非水平层状岩土体,波动范围是否像水平层状岩土体中那样也保持正交则无实测数据和相应研究验证。因此,对于非水平层状边坡的可靠度分析,有必要考虑一般各向异性空间变异性非水平结构的影响。与旋转各向异性空间变异性一样,一般各向异性空间变异性非水平结构在 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=150^\circ$ (土层倾角 30° ,出露于坡面的外倾产状)时对边坡可靠度影响最大($P_{f150^\circ}=0.18$)。

图 17 为不同 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ 下的边坡安全系数概率密度函数(PDF)曲线。由图 17 可以看出,当 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=150^\circ$ 时,安全系数 PDF 曲线最为矮胖且 $F_s < 1$ 的面积最大,相应失效概率也最大($P_{f150^\circ}=18.0\%$)。这可能是因为:1)据文献[18, 31],土体参数的某方向自相关性越强,在该方向范围内土体参数空间变异性程度越低进而相应的低强度均质区域越多,而不同随机场实现间的土体强度参数全局均值的变异性越大,进而 $F_s < 1$ 的样本越多(即 P_f 增加),这间接表明当 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=150^\circ$ 时边坡土体强度参数的自相关性较高(即空间变异性程度较低);2) $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=150^\circ$ 代表了土层外倾于坡面,这为滑体向坡外滑动提供了十分有利的临空面条件,因此边坡更容易失稳。前者是土体内在的力学因素,后者是其外在的几何因素,二者共同作用导致 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=150^\circ$ 时边坡可靠度最低。

图 18 为边坡失稳模式比例及相应潜在滑移体积前二阶统计矩随 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ 变化的情况。注意,图中无

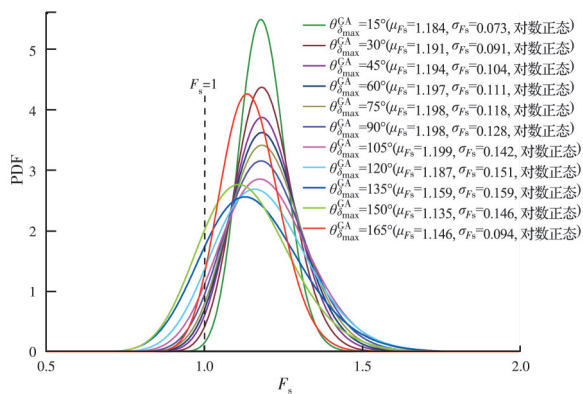
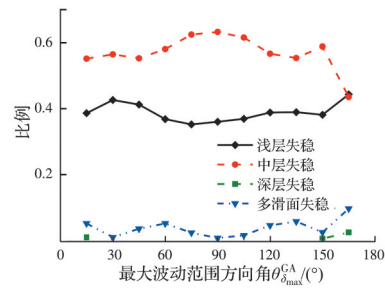


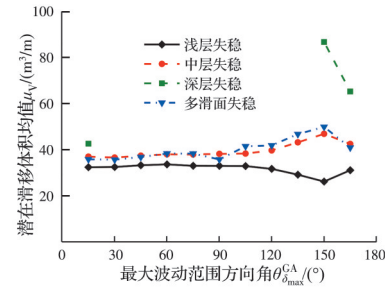
图 17 一般各向异性空间变异性非水平结构下不同 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ 值的边坡安全系数 PDF 曲线

Fig. 17 The PDF curves of factor of safety for various $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ values of non-horizontal structure of general anisotropy

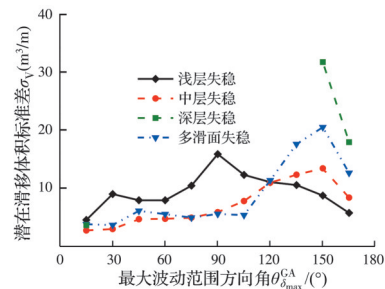
相应线条代表该失稳模式在某一 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ 值下的比例为 0。中层失稳模式为非水平结构中的主控失稳模式且其比例远高于其他模式(图 18(a))。除浅层失稳,其他失稳模式(随机场样本比例之和大于 0.6)的 μ_V 和 σ_V 均在 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}=150^\circ$ 取得最大值(图 18(a)、(b)),这也证明当波动范围方向角为 150° 时边坡失稳的后果最严重。



(a) 比例



(b) 潜在滑移体均值



(c) 潜在滑移体标准差

图 18 不同 $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ 下的边坡失稳模式比例及相应潜在滑移体均值和标准差

Fig. 18 The proportion of slope failure modes and associated statistics of mean and standard deviation of potential slip mass volume for various $\theta_{\delta_{\max}}^{\text{GA}}$ values

4.2 互相关系数的影响

图 19 为抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ) 之间的相关性对边坡可靠度的影响。其中,互相关系数 $\rho_{c,\varphi}$ 范围为 $[-0.7, 0.5]$,与文献[26]一致。可以看出,相比横观各向异性的 P_f 变化值(如蒋水华^[40]采用的 $P_f=[4.9 \times 10^{-3}, 0.12]$),考虑一般各向异性非水平结构的互相关系数 $\rho_{c,\varphi}$ 会将边坡失效概率放大 2~3 倍($P_f=[1.3 \times 10^{-2}, 0.283]$)。Fenton 等^[41]

将这种变化解释为:较强的负互相关性会降低土体的抗剪强度方差,进而导致安全系数方差也降低而其均值基本不变,故出现低水平失效概率 P_f 。

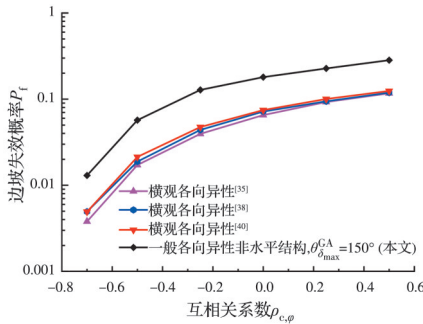


图 19 互相关系数 $\rho_{c,\varphi}$ 对边坡可靠度的影响

Fig. 19 The influence of cross-correlation coefficient $\rho_{c,\varphi}$ on slope reliability

图 20 为不同 $\rho_{c,\varphi}$ 的概率密度函数 PDF 曲线。随着 $\rho_{c,\varphi}$ 不断增大,PDF 曲线越为矮胖,即 F_s 均值不断降低而标准差 σ_{F_s} 持续增加,导致 $F_s < 1$ 的面积也不断扩大,相应的失效概率 P_f 持续增加。

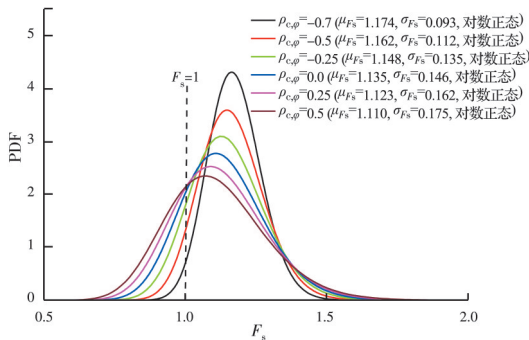


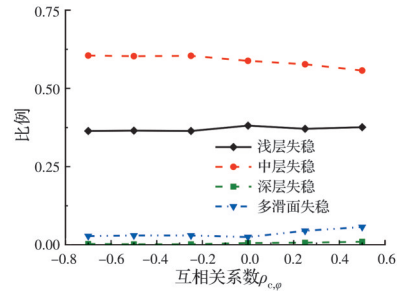
图 20 一般各向异性非水平结构下不同 $\rho_{c,\varphi}$ 值的边坡安全系数 PDF 曲线

Fig. 20 The PDF curves of factor of safety for various $\rho_{c,\varphi}$ values of non-horizontal structure of general anisotropy

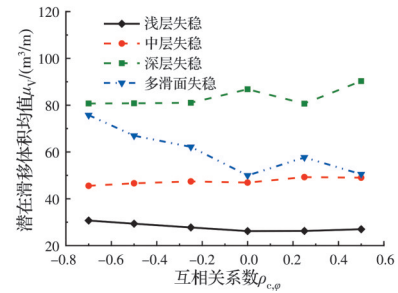
图 21 为一般各向异性非水平结构中边坡失稳模式比例及相应潜在滑移体积前二阶统计矩随 $\rho_{c,\varphi}$ 变化的情况。由图 21 可以看出, $\rho_{c,\varphi}$ 对边坡失稳模式比例及次序影响很小,中层失稳仍为主动破坏模式且其比例要远高于其他失稳模式(图 21(a))。值得注意的是,深层失稳的 μ_v 在任一互相关性水平下都大于 $80 \text{ m}^3/\text{m}$;这意味着边坡中一旦发生深层滑动,巨大的滑体及影响范围将是普遍性的存在(图 21(b))。

4.3 波动范围的影响

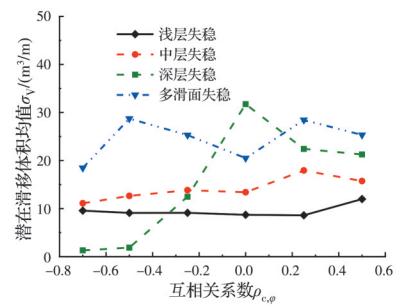
图 22 为波动范围变化 ($\delta_{\max}=[10 \text{ m}, 60 \text{ m}]$, $\delta_{\min}=[1 \text{ m}, 6 \text{ m}]$) 对边坡可靠度的影响。可以看出,失效概率 P_f 随 δ_{\max} 变化的规律与蒋水华^[40]考虑横观各向异性空间变异性的 P_f 变化规律基本一致。但实际



(a) 比例



(b) 潜在滑移体积均值



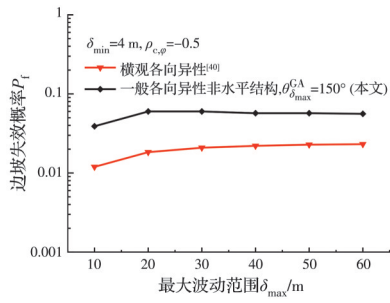
(c) 潜在滑移体积标准差

图 21 不同 $\rho_{c,\varphi}$ 下的边坡失稳模式比例及相应潜在滑移体积均值和标准差

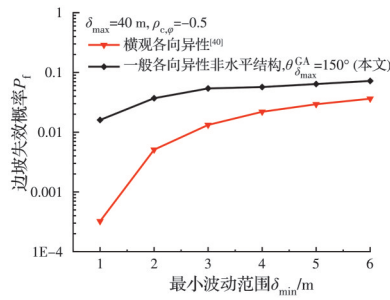
Fig. 21 The proportion of slope failure modes and associated statistics of mean and standard deviation of potential slip mass volume for various $\rho_{c,\varphi}$ values

情况下土层参数空间变异性可能表现为非水平层状,因此,横观各向异性的边坡失效概率 P_f 可能会被低估为本文结果的 $1/4 \sim 1/2$ 。图 22(b)中, P_f 从 $\delta_{\min}=1 \text{ m}$ 时的 1.6×10^{-2} 显著增加至 $\delta_{\min}=6 \text{ m}$ 时的 7.2×10^{-2} ,这是横观各向异性下 P_f 变化值的 $2 \sim 50$ 倍。此外,也远远高于 δ_{\max} 对边坡可靠度的影响(图 22(a)),这与文献[37, 42-43]的结论一致。

图 23 为不同 δ_{\max} 和 δ_{\min} 的概率密度函数 PDF 曲线。图 23(a)中,随着最大波动范围增加,均值几乎不变而标准差小幅增长。这是因为该方向上的土体参数自相关性随着 δ_{\max} 增加只略微加强,从而不同随机场间的土体参数全局均值的变异性小幅增加,相应安全系数 F_s 的方差也小幅扩大,故高估 δ_{\max} 只会略微高估失效概率 P_f 。图 23(b)中,随着 δ_{\min} 增加,相应 PDF 曲线更为矮胖。这是因为此时最小波



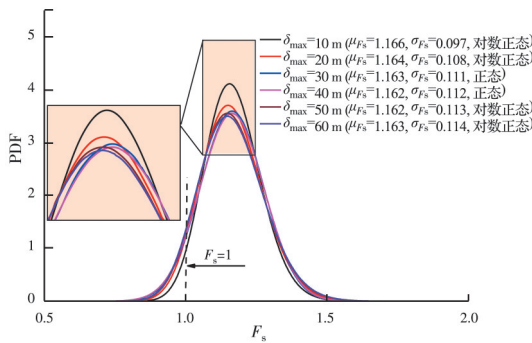
(a) 最大波动范围



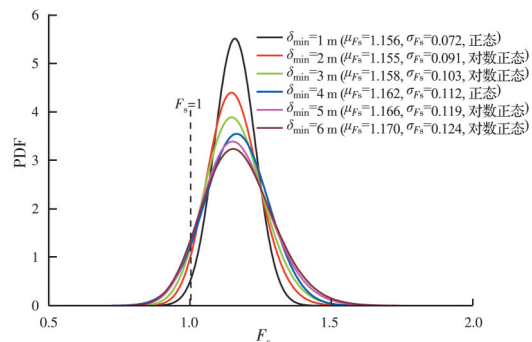
(b) 最小波动范围

图 22 波动范围对边坡可靠度的影响

Fig. 22 The influence of scale of fluctuation on slope reliability



(a) 不同 δ_{max} 值



(b) 不同 δ_{min} 值

图 23 一般各向异性非水平结构下不同波动范围的边坡安全系数 PDF 曲线

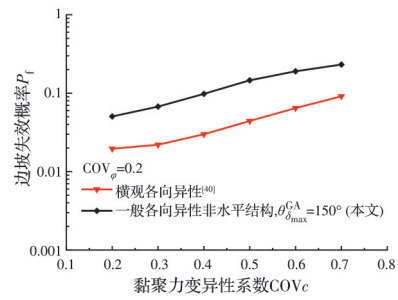
Fig. 23 The PDF curves of factor of safety for various scales of fluctuation of non-horizontal structure of general anisotropy

动范围方向上的土体参数自相关性显著加强。这会显著降低空间变异性程度,从而导致边坡更容易

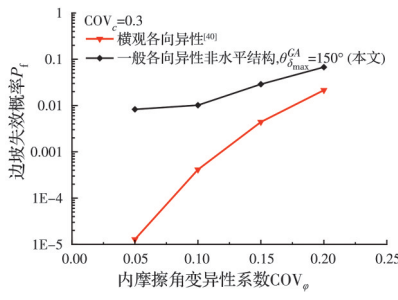
失稳。此外,不同随机场间的土体参数均值的变异性会显著增加,故高估 δ_{min} 将明显高估失效概率 P_f 。

4.4 变异系数的影响

图 24 为抗剪强度参数的变异系数变化对边坡可靠度的影响,根据文献[40],黏聚力变异系数 COV_c 取 $[0.2, 0.7]$,内摩擦角变异系数 COV_ϕ 取 $[0.05, 0.2]$ 。如图 24(a)所示,在 COV_c 的变化范围内,一般各向异性非水平结构的 P_f 是横观各向异性 P_f 变化值的 2.5~3.2 倍。这表明,相比于横观各向异性,在一般各向异性非水平结构中, COV_c 对边坡可靠度的影响更为显著。如图 24(b)所示,当 $COV_\phi = 0.05$ 时,一般各向异性非水平结构下的 P_f (8.3×10^{-3}) 竟是横观各向异性下的 P_f (1.29×10^{-5}) 的 643 倍。这说明在低内摩擦角变异系数下,选择合适的土体参数空间变异性类型有助于避免出现极端失真的边坡可靠度分析结果。



(a) 黏聚力变异系数 COV_c



(b) 内摩擦角变异系数 COV_ϕ

图 24 变异系数 COV 对边坡可靠度的影响

Fig. 24 The influence of coefficient of variation COV on slope reliability

图 25 绘制了不同 COV_c 和 COV_ϕ 的概率密度函数 PDF 曲线。如图 25(a)所示,随着 COV_c 增大,相应的 PDF 曲线越为矮胖并往左偏移,失效概率 P_f 明显增大。这是因为, COV_c 越大而 COV_ϕ 保持不变,则土体的总抗剪强度方差也越大,相应的安全系数方差越大而均值越小。如图 25(b)所示,随着 COV_ϕ 增大,均值 μ_{F_s} 略微减小且标准差 σ_{F_s} 增大,其根本原因与 COV_c 变化的原因一致。

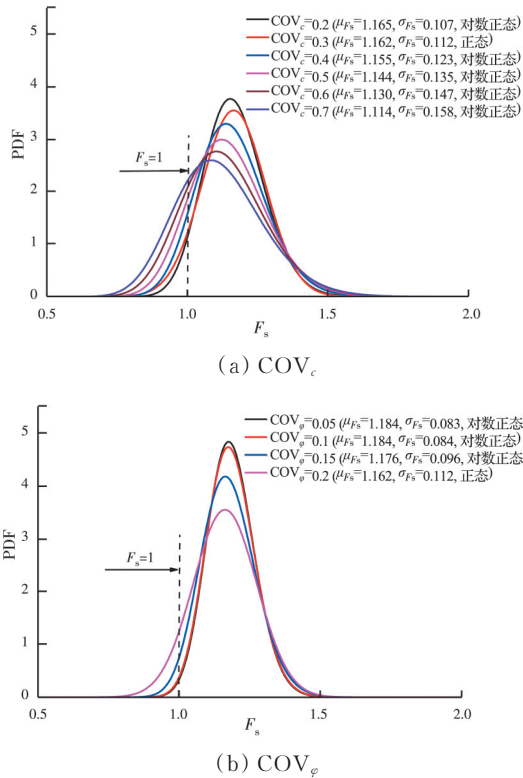


图 25 一般各向异性非水平结构下不同 COV 值的边坡安全系数 PDF 曲线

Fig. 25 The PDF curves of factor of safety for various COV values of non-horizontal structure of general anisotropy

5 结论

建立了各向异性空间变异性的边坡可靠度分析随机有限差分计算框架,将笛卡儿坐标系与斜坐标系间的转换关系有机地嵌入乔列斯基分解技术中来模拟和生成各向异性随机场。提出一种新的滑面刻画方法,即应变聚类边坡临界滑面搜索算法。利用随机有限差分计算框架进行了土体多参数一般各向异性空间变异性的边坡可靠度分析。主要结论如下:

1) 各向异性空间变异边坡可靠度分析随机有限差分计算框架实现了各类各向异性空间变异性描述、复杂滑面精确搜寻和边坡可靠度计算的一体化分析。

2) 基于坐标转换的乔列斯基分解技术可以有效地刻画土体参数空间变异性的非横观各向异性特征并高精度地离散相应随机场。

3) 提出的应变聚类边坡临界滑面搜索算法适用于空间变异性边坡中精确地搜索单一或多重临界滑面。

4) 以一般各向异性空间变异性为参考,分析土体参数空间变异性类型对边坡可靠度的影响发现,考虑旋转各向异性会明显高估边坡失效概率,而考

虑横观各向异性则会极大地低估边坡失效概率,最严重时可低估为实际失效概率的 $1/643$; 相比各向异性空间变异性,各向同性会在较大和较小的波动范围下分别高估和低估边坡失效概率,较小波动范围的各向同性随机场只适用于个别情况下(如 $\theta_{\delta_{\min}}^{GA} = 15^\circ$) 的可靠度分析。

5) 波动范围方向结构对边坡可靠度的影响显著。对于水平结构而言,最小波动范围方向角取 90° 时,边坡失效概率最大;而对于非水平结构而言, $\theta_{\delta_{\max}}^{GA} = 150^\circ$ 时,边坡失效概率最大。

6) 对于考虑的一般各向异性空间变异性边坡而言,失稳模式比例为中层 > 浅层 > 深层 > 多滑面失稳,主控失稳模式为中层失稳。虽然深层和多滑面失稳为小比例失稳模式,但是其潜在滑移体积均值和变异性远高于中层失稳,一旦失稳,造成的失效后果将是灾难性的。

参考文献

- [1] DASAKA S M, ZHANG L M. Spatial variability of in situ weathered soil [J]. *Géotechnique*, 2012, 62(5): 375-384.
- [2] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior [M]. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] 刘东升, 刘汉龙, 吴越, 等. 岩土材料的基因特征及其测试方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(4): 1-9.
LIU D S, LIU H L, WU Y, et al. Genetic features of geo-materials and their testing method [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(4): 1-9.
- [4] LUMB P. The variability of natural soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1966, 3(2): 74-97.
- [5] LUMB P. Spatial variability of soil properties [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Application of Statistics and Probability in Soil and Structure Engineering (ICASP), 1975.
- [6] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [7] GUO X F, DIAS D, PAN Q J. Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 113: 103093.
- [8] DUNCAN JAMES M, BUCHIGNANI ALBERT L. Failure of underwater slope in San Francisco bay [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(9): 687-703.
- [9] ZHOU X P, ZHU B Z, WONG L N Y. A stability analysis of landslides based on random fields - Part I:

- Toe circle slope [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(1): 103-115.
- [10] ZHOU X P, ZHU B Z, WONG L N Y. A stability analysis of landslides based on random fields, part II: Base circle slope [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(1): 117-130.
- [11] GRAVANIS E, PANTELIDIS L, GRIFFITHS D V. An analytical solution in probabilistic rock slope stability assessment based on random fields [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 19-24.
- [12] LUO Z, DI H G, KAMALZARE M, et al. Effects of soil spatial variability on structural reliability assessment in excavations [J]. *Underground Space*, 2020, 5(1): 71-83.
- [13] CAMI B, JAVANKHOSHEL S, YACOUB T, et al. 2D spatial variability analysis of sugar creek embankment: comparative study [C]//SHEHATA H, DESAI C. *International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"*. Cham: Springer, 2019: 118-125.
- [14] WANG L, WU C Z, LI Y Q, et al. Probabilistic risk assessment of unsaturated slope failure considering spatial variability of hydraulic parameters [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(12): 5032-5040.
- [15] WANG L, WU C Z, TANG L B, et al. Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(11): 3135-3150.
- [16] 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 S H, LI D Q, ZHOU C B, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(3): 508-518. (in Chinese)
- [17] 陈朝晖, 雷坚, 黄景华, 等. 考虑参数空间变异性的边坡稳定可靠性有限元极限分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(6): 985-993.
- CHEN Z H, LEI J, HUANG J H, et al. Finite element limit analysis of slope stability considering spatial variability of soil strengths [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 985-993. (in Chinese)
- [18] 朱彬. 基于可靠度理论的海床稳定性分析及评价方法[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2021.
- ZHU B. Analysis and evaluation method of seabed stability based on reliability theory [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] 程红战, 陈健, 王占盛, 等. 考虑旋转各向异性相关结构的黏土边坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(Sup2): 3965-3973.
- CHENG H Z, CHEN J, WANG Z S, et al. Stability analysis of a clay slope accounting for the rotated anisotropy correlation structure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup2): 3965-3973. (in Chinese)
- [20] 王占盛, 陈健, 戎虎仁, 等. 土性参数各向异性随机场的表征与建模方法[J]. *计算力学学报*, 2021, 38(1): 29-36.
- WANG Z S, CHEN J, RONG H R, et al. Characterization and modeling of anisotropic random field of soil parameters [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(1): 29-36. (in Chinese)
- [21] LIU W F, LEUNG Y F. Characterising three-dimensional anisotropic spatial correlation of soil properties through in situ test results [J]. *Géotechnique*, 2018, 68(9): 805-819.
- [22] LIU W F, LEUNG Y F. Spatial variability of saprolitic soil properties and relationship with joint set orientation of parent rock: insights from cases in Hong Kong [J]. *Engineering Geology*, 2018, 246: 36-44.
- [23] ZHU H, ZHANG L M. Characterizing geotechnical anisotropic spatial variations using random field theory [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(7): 723-734.
- [24] DITLEVSEN O, MADSEN H. *Structural reliability methods* [M]. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2007.
- [25] 文明. 高速铁路隧道围岩空间变异性的力学响应分析及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- WEN M. Mechanical response and its application of the spatial variability of surrounding rock for G-series high-speed railway tunnels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [26] ZHU H H, ZHANG L, XIAO T. Evaluating stability of anisotropically deposited soil slopes [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(5): 753-760.
- [27] ABBASZADEH M, SHAHRIAR K, SHARIFZADEH M, et al. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability: a case study from Sungun copper mine[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(4): 581-596.
- [28] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [29] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(3): 137-150.

- [30] 陈建平, 边坡强度折减法判据及点安全系数研究及工程应用[D]. 江西 赣州: 江西理工大学, 2012.
CHEN J P. Research and engineering application of slope strength reduction criterion and point safety factor [D]. Ganzhou, Jiangxi: Jiangxi University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [31] WANG Z Y, ZHANG W G, GAO X C, et al. Stability analysis of soil slopes based on strain information [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(11): 3121-3134.
- [32] 孙冠华, 郑宏, 李春光. 基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1159-1163.
SUN G H, ZHENG H, LI C G. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1159-1163. (in Chinese)
- [33] 孙冠华, 郑宏, 李春光. 基于等效塑性应变的三维边坡滑面搜索[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 627-632.
SUN G H, ZHENG H, LI C G. Searching critical slip surface of three-dimensional slopes based on equivalent plastic strain [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 627-632. (in Chinese)
- [34] 袁维, 胡叶江, 李小春, 等. 一种基于位移场分析的临界滑动面确定方法研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1791-1798.
YUAN W, HU Y J, LI X C, et al. An approach to determining critical slip surface based on displacement field analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1791-1798. (in Chinese)
- [35] 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.
- [36] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4): 307-316.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 122(7): 577-596.
- [40] 蒋水华. 水电工程边坡可靠度非侵入式随机分析方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
JIANG S H. A non-intrusive stochastic method for slope reliability in hydroelectricity engineering [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [41] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Bearing-capacity prediction of spatially random c - ϕ soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(1): 54-65.
- [42] CHO S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability [J]. *Engineering Geology*, 2007, 92(3/4): 97-109.
- [43] JI J, LIAO 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.

(编辑 胡英奎)