

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.013



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑土体参数空间变异性的双排桩边坡稳定可靠度分析方法

刘新文¹, 邓志平¹, 潘敏¹, 钟敏², 何彬³, 蒋水华²

(1. 江西水利电力大学 水利工程学院; 水利水电工程结构安全江西省重点实验室, 南昌 330099;
2. 南昌大学 工程建设学院, 南昌 330031; 3. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 长沙 410007)

摘要: 现有抗滑桩研究多集中于单排抗滑桩加固均质边坡, 对双排桩非均质边坡可靠度研究相对不足, 为此, 提出一种考虑土体参数空间变异性的双排桩边坡稳定可靠度分析方法。采用切片逆回归(SIR)降维, 再通过多元自适应回归样条(MARS)方法构建代理模型, 进而采用子集模拟(SS)评估双排抗滑桩加固边坡失效概率。以香港西贡区北部边坡和某一摩擦/黏性土坡为例, 验证方法的有效性, 并进行双排桩边坡概率稳定性分析。结果表明: 该方法能为考虑土体参数空间变异性的双排桩加固边坡稳定可靠度分析提供一条有效的途径; 对于双排桩边坡, 前排桩长度的增加对可靠度的提升效益显著优于后排桩; 最优桩位为前排桩布置在坡脚附近, 后排桩布置在边坡中部。

关键词: 边坡可靠度; 双排抗滑桩; 最优桩位; 代理模型; 空间变异性

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-14

Reliability analysis method for double-row pile slopes considering spatial variability of soil parameters

LIU Xinwen¹, DENG Zhiping¹, PAN Min¹, ZHONG Min², He Bin³, JIANG Shuihua²

(1. College of Water Conservancy; Jiangxi Key Laboratory of Structural Safety of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, P. R. China; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China; 3. Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, P. R. China)

收稿日期: 2025-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(52378344, 52509149); 江西省自然科学基金(20242BAB23045); 赣鄱俊才支持计划·青年科技人才托举项目(2023QT08); 湖南省水利科技项目(XSKJ2025056-55)

作者简介: 刘新文(1999-), 男, 主要从事岩土工程稳定概率分析研究, E-mail: liuxinwen1@ncgcyx.wecom.work。

邓志平(通信作者), 男, 特聘教授, 博士生导师, E-mail: dengzhiping@nit.edu.cn。

Received: 2025-10-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52378344, 52509149); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20242BAB23045); the Young Scientific and Technological Talents Sponsorship Project in Ganpo Juncai Support Program (No. 2023QT08); Hunan Province Water Conservancy Science and Technology Project (No. XSKJ2025056-55)

Author brief: LIU Xinwen (1999-), main research interest: probabilistic stability analysis in geotechnical engineering, E-mail: liuxinwen1@ncgcyx.wecom.work.

DENG Zhiping (corresponding author), distinguished professor, doctoral supervisor, E-mail: dengzhiping@nit.edu.cn.

Abstract: Current research on anti-slide piles predominantly concentrates on single-row piles reinforcing homogeneous slopes, while the reliability of double-row piles in heterogeneous slopes remains underexplored. To address this research gap, this paper proposes an efficient framework for the reliability analysis of double-row anti-slide pile-reinforced slopes, with explicit consideration of the spatial variability of soil parameters. The framework integrates Sliced Inverse Regression (SIR) for dimensionality reduction, constructs a surrogate model via Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), and subsequently employs Subset Simulation (SS) to quantify the slope failure probability. The efficacy of the proposed framework is validated through two case studies: a slope in Northern Sai Kung, Hong Kong, and a $c-\varphi$ soil slope, where comprehensive probabilistic stability assessments are conducted. Results indicate that the proposed framework provides a robust and efficient approach for the reliability analysis of double-row anti-slide pile-reinforced slopes considering soil spatial variability. Furthermore, increasing the length of the front-row piles contributes more significantly to enhancing slope system reliability compared to equivalent increases in the rear-row piles. The optimal pile configuration is determined as follows: the front row is installed near the slope toe, and the rear row is positioned in the mid-slope region.

Keywords: slope reliability; double-row anti-slide piles; optimal pile location; surrogate model; spatial variability

滑坡是全球常见的地质灾害。据国家统计局统计数据,2024年中国共发生地质灾害5719处,其中滑坡3316起^[1],远超崩塌、泥石流等其他灾害类型,超过地质灾害总数的一半。边坡防治已成为岩土工程领域防灾减灾研究的热点问题之一^[2-11]。抗滑桩作为一种常见的支挡结构,因抗滑能力强、加固效果明显等优点被广泛应用于边坡治理中^[2,10]。

随着边坡工程规模的不断扩大,对桩体加固的需求提升,双排抗滑桩因具备抗滑能力突出、侧向刚度高等优点,成为主流桩体布设形式^[8-9]。近年来,学者围绕双排抗滑桩的最佳桩位问题进行大量有益研究。例如,Lei等^[12]基于有限差分法对双排抗滑桩加固边坡的稳定性进行分析。Shangguan等^[3]对比分析了双排抗滑桩平行布置与梅花形布置的抗滑作用。Chekroun等^[13]研究了双排抗滑桩在多种工况下对边坡的加固效果。上述研究主要集中在双排抗滑桩的布桩位置、组合设计等方面,但土体在形成过程中经历复杂的物理化学过程,土体参数存在空间变异性^[14-18],这种性质对抗滑桩加固边坡的稳定性评估结果存在显著影响^[19]。

以往研究常采用随机场方法量化土体参数的空间变异性,并结合可靠度分析方法对边坡稳定性进行评估^[4,9]。然而,直接使用传统可靠度分析方法计算边坡失效概率常需反复调用数值模型计算边坡安全系数(Factor of Safety, FS),存在计算效率低下、计算资源占用过大的问题^[20]。为此,有学者提出采用机器学习方法,基于少量样本建立随机场参数与FS之间的映射关系,从而避免进行大规模的边坡FS计算,提高边坡可靠度分析的效率^[21]。常用的

代理模型包括克里金(Kriging)、卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)、极限梯度提升(eXtreme Gradient Boosting, XGBoost)、多元自适应回归样条(Multivariate Adaptive Regression Splines, MARS)等。其中, MARS可无需预设先验模型形式,自适应拟合给定数据样本的内在映射关系^[22]。在边坡可靠度分析领域, MARS方法已被验证具有良好的准确性与计算效率^[6,23]。然而,在利用随机场理论表征土体参数的空间变异性时,代理模型的输入矩阵维度较高,代理模型构建受维度灾难影响,导致其预测精度下降且建模样本需求呈指数增长,从而削弱了代理模型的优势^[23]。为此, Li^[24]提出切片逆回归方法(Sliced Inverse Regression, SIR)对高维随机变量进行降维,此方法已在工程实践中被广泛应用^[7,25]。但是,桩加固边坡通常具有极低的失效概率水平(失效概率 $<10^{-7}$),在采用传统代理模型结合可靠度分析方法计算此类边坡的失效概率时,常因计算规模过大而导致计算机内存溢出。

为此,在考虑土体参数空间变异性的基础上,提出一种融合SIR与MARS,并结合子集模拟(Subset Simulation, SS)的抗滑桩加固边坡可靠度分析方法。首先,介绍Karhunen-Loève(K-L)级数展开方法生成土体参数随机场的过程;随后,介绍评估抗滑桩加固边坡可靠度的SIR-MARS-SS方法及其实现步骤;接着,通过香港西贡区北部边坡验证该方法的有效性;最后,基于某一摩擦/黏性边坡模型案例计算了在不同桩体设计参数组合下双排桩加固边坡的失效概率,并对影响土体空间变异性的参数进行概率敏感性分析。

1 岩土体参数空间变异性模拟

鉴于土体抗剪强度参数的非负性和自相关性^[26],采用相关对数正态随机场刻画黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的空间变异性。为有效表征土体参数的空间变异性,采用 K-L 级数展开法模拟土体抗剪强度参数相关对数正态随机场^[27]。因高斯型自相关函数连续性和平稳性较好,选用该相关函数模拟土体参数空间自相关性^[28],其表达式为

$$\rho = \exp\left(-\left[\left(\frac{|x_1 - x_2|}{l_h}\right)^2 + \left(\frac{|y_1 - y_2|}{l_v}\right)^2\right]\right) \quad (1)$$

式中: ρ 为相关函数; $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 为随机场分析区域内任意两点坐标; l_h 和 l_v 为标准正态空间中水平和垂直波动范围。K-L 级数展开表达式的相关对数正态形式为

$$H_i = \exp\left[\mu_{\ln i} + \sum_{j=1}^n \sigma_{\ln i} \sqrt{\lambda_j} f_j(x, y) \chi_{i,j}(\vartheta)\right] \quad (2)$$

式中: μ_i, σ_i 分别为随机场的均值和标准差; $\mu_{\ln i}, \sigma_{\ln i}$ 分别为相关对数正态随机场的均值和标准差, $\sigma_{\ln i} = [\ln(1 + (\sigma_i/\mu_i)^2)]^{1/2}$, $\mu_{\ln i} = \ln \sigma_i - 0.5(\sigma_{\ln i})^2$; i 为需要离散的参数, $\chi_{i,j}(\vartheta)$ 为第 i 个岩土体参数离散的第 j 个独立标准正态随机变量; ϑ 为外部空间坐标; λ_j 为自相关函数中对应的特征值; $f_j(x, y)$ 为其对应的特征向量; n 为截断项数,由随机场期望能比率因子 $\epsilon \geq 95\%$ 确定^[29]。截断项数的选取会直接影响空间变异性表征与代理模型预测精度,截断项数过小会导致随机场生成结果与现实土体参数统计结果存在偏差;截断项数过大会增加代理模型建模难度,进而导致计算成本增加,预测精度降低。因此,取 $\epsilon = 95\%$ 为选取准则^[29], ϵ 的计算表达式为

$$\epsilon = \sum_{j=1}^n \lambda_j / \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j = \sum_{j=1}^n \lambda_j / (L_x L_y) \quad (3)$$

式中: λ_j 为自相关函数求解得到的特征值; L_x 和 L_y 为计算区域的水平和垂直距离。

2 边坡可靠度分析方法

2.1 切片逆回归方法

SIR 方法是一种基于充分降维理论的有监督特征提取技术,可以将高维自变量空间投影至低维子空间,使得投影后的低维变量能够保留原始数据中与因变量的统计依赖关系^[24]。假设问题的输入量和响应量之间的关系为

$$Y \rightarrow g(\chi) \quad (4)$$

式中:输入量 χ 为用于岩土体参数随机场离散的独立标准正态随机变量矩阵; Y 为响应量,在本研究中

为 FS。

SIR 方法通过 Y 对 χ 进行分组,计算每一组的均值以及协方差矩阵并对协方差矩阵进行特征值分解。为确定最终降维维度 d ,引入累计解释关联强度指标 (Cumulative Explanatory Association Strength Index, CEA)。该指标表征了前 d 个特征向量所能捕捉到的 χ 与 Y 之间统计关联信息的总比例。为确保降维过程能保留关键信息,采用 $I_{CEA} \geq 99.9\%$ ^[24] 确定降维维度和方向向量, I_{CEA} 定义为

$$I_{CEA} = \frac{\sum_{i=1}^d \hat{\lambda}_i}{\sum_{j=1}^N \hat{\lambda}_j} \quad (5)$$

式中: N 为样本数量; $\hat{\lambda}$ 为协方差矩阵对应的特征值。取前 d 个特征值对应的特征向量构建方向向量,进而得到降维后的目标矩阵,具体求解步骤可参考文献[7]。经 SIR 降维后二者关系变为

$$Y \rightarrow g(\beta_1^T \chi, \beta_2^T \chi, \dots, \beta_d^T \chi, \delta) \quad (6)$$

式中: $\beta_i (i=1, 2, \dots, d)$ 为降维后的投影向量; d 为降维后维度; δ 为扰动项。

2.2 多元自适应回归样条法

MARS 是一种根据分段策略构建的回归技术^[30],具有获取变量间复杂非线性关系的优势,可表示为

$$f(X) \approx a_0 + \sum_{m=1}^M a_m B_m(X) \quad (7)$$

式中: $f(X)$ 为边坡 FS 取值; X 为降维后矩阵; a_0 为模型拟合时的基础偏移量, a_m 为第 m 个基函数的系数,可通过训练样本的最小二乘拟合获得; $B_m(X)$ 为第 m 个基函数,可由对应的基函数和含新变量的截断线性函数相乘得到^[31]。

MARS 模型的构建可分为前向选择和后向剪枝两个步骤。前向选择是从常数项开始,逐步引入基函数对,通过最小化残差平方和迭代模型,直至基函数数量达到预设上限,每次引入基函数对后的模型更新为

$$f(X) \approx a_0 + \sum_{m=1}^M a_m B_m(X) +$$

$$\hat{a}_{m+1,1} B_{m+1,1}(X) + \hat{a}_{m+1,2} B_{m+1,2}(X) \quad (8)$$

式中: $B_{m+1,1}(X) = \max(0, X_j - t)$; $B_{m+1,2}(X) = \max(0, t - X_j)$; \hat{a}_{m+1} 为第 $m+1$ 个基函数的系数,可通过对训练样本的最小二乘拟合获得。

前向选择过程通过不断引入基函数,使得模型对训练数据的拟合残差持续减小,但易导致模型过拟合,从而预测能力下降。因此需执行后向剪枝步骤,迭代删除对拟合贡献最小的基函数,最终得到最优模型结构。该过程使用广义交叉验证(GCV)

准则评估模型泛化能力, GCV 最小时模型最优, 可表示为

$$G_{GCV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{f}_M(x_i)]^2 / \left[1 - \frac{C(M)}{N} \right]^2 \quad (9)$$

式中: $C(M)$ 为该模型有效系数的个数; $\hat{f}_M(x_i)$ 是 x_i 对应的模型预测值。

2.3 子集模拟

SS 是一种可用于小失效概率事件的高效概率计算方法, 通过引入中间失效事件, 将原小失效概率分解成多个较大条件概率的乘积, 再通过逐步抽样逼近失效域^[32-33]。具体的表示形式为

$$P_f = P(FS(x) - 1 < 0) = P(F_1) \prod_{i=2}^s P(F_i | F_{i-1}) \quad (10)$$

式中: x 为土体性质参数的随机变量, 本研究中为具有空间变异性的土体参数随机变量; s 为子集模拟层数; $FS(x) - 1$ 为功能函数, 用以反映边坡的稳定情况, $FS(x) - 1 \geq 0$ 时, 边坡处于稳定状态, $FS(x) - 1 < 0$ 时, 边坡发生失稳; $F_i = \{FS(x) - 1 < C_i, i = 1, 2, \dots, s\}$, 表示某一组中间失效事件, 可以由 FS 阈值的递减序列 $C_1 > C_2 > \dots > C_s$ 定义。可根据现场实际情况, 参照工程技术规范选取 FS 阈值。 $P(F_1)$ 可使用蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo Simulation, MCS) 直接进行计算, 条件概率 $P(F_i | F_{i-1})$ 可通过基于 Metropolis 算法的马尔可夫链 MCS 方法求解, 具体求解步骤可参考文献^[32]。

2.4 模型精度评定方法

在使用代理模型之前, 需要验证其准确性。采用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 作为精度评价指标, 具体表达式为

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_s} (F_{SS} - F_{SP})^2}{N_s}} \quad (11)$$

式中, N_s 为总体样本数; F_{SP} 是代理模型预测所得 FS; F_{SS} 是边坡稳定性计算所得 FS。

2.5 计算步骤

双排桩边坡可靠度方法具体流程如图 1 所示, 该流程主要包括 6 步。

1) 确定边坡参数 (如坡高、坡角、坡长、土体抗剪强度参数) 及其统计特征 (如均值、方差、波动范围等)。

2) 使用 ABAQUS 软件对边坡进行建模, 边界条件为底部全约束, 两侧法向约束, 只允许在垂直方向运动, 顶部不约束。自定义土体强度参数折减场, 同时修改关键字, 使得折减系数处于 0.5~2 范围内, 保存模型文件 “slope.inp”。

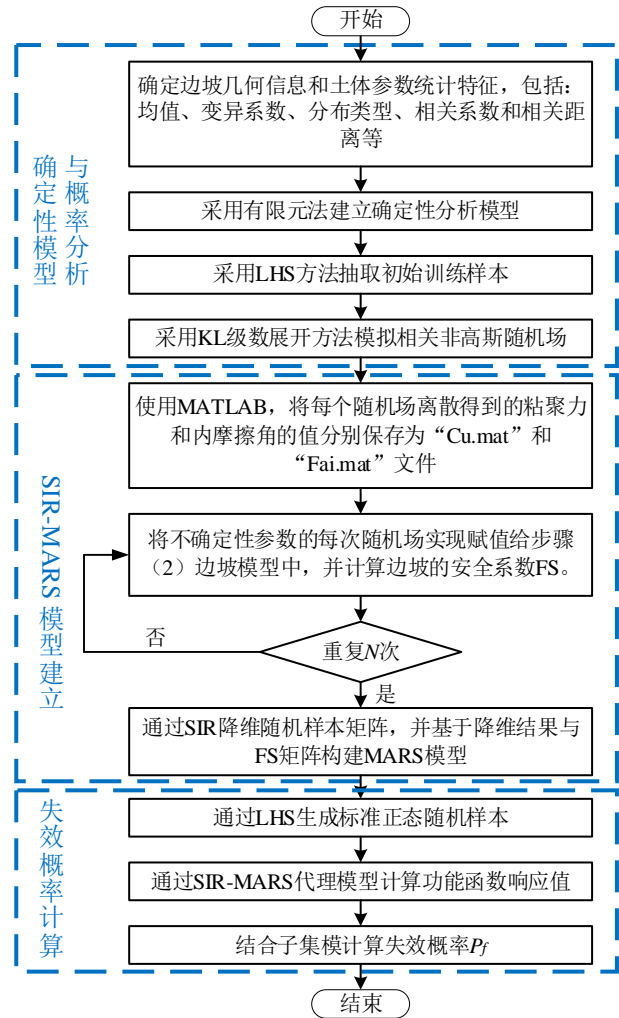


图 1 可靠度计算流程图

Fig.1 Flowchart of reliability calculation

3) 基于拉丁超立方抽样 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 抽取初始随机样本矩阵。采用 K-L 级数展开法生成土体参数随机场, 保存黏聚力和内摩擦角的随机场参数分别为 “Cu. mat” “Fai. mat”。

4) 计算样本的 FS: 将步骤 3) 中生成的不确定性参数的每次随机场实现值, 按照单元中心点坐标依次赋值给步骤 2) 边坡模型中, 并通过批处理语言调用 ABAQUS 内核, 采用强度折减法 (Strength Reduction Method, SRM) 计算边坡的 FS。该步骤重复 N 次, 直至所有随机样本分析完成, 可得到 N 个训练样本对应的 FS。

5) 构建 SIR-MARS 代理模型: 使用 SIR 方法对随机场生成的随机变量矩阵进行降维, 得到维度为 d 的降维矩阵, 结合 FS 矩阵构建训练样本数据集, 从而构建 MARS 模型。

6) 计算失效概率: 将训练好的代理模型与子集模拟方法结合计算 P_f 。

3 算例一:香港西贡区北部边坡

3.1 边坡介绍和确定性分析

香港西贡区北部边坡由厚度为 9 m 的崩积层组成,边坡水平长度为 11 m,土体重度 $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$ 。土体弹性模量取 100 MPa,泊松比取 0.3^[34]。边坡的几何形状、附加荷载和地下水情况如图 2 所示,其中坡面各点坐标为 E(2 m, 7.9 m)、D(4 m, 5.5 m)、C(6 m, 4.6 m)、B(10 m, 1.4 m),L 为坡肩至坡脚的水平距离, L_x 为抗滑桩至坡脚的水平距离。模型边界条件设定为两侧法向约束,底部全约束。设定折减系数范围为 0.5~2,以步长 0.1 递增,边坡概率分析所需的土体参数统计特征见表 1。采用有限元法进行计算,得到无支护边坡的 FS 为 1.341,与 Li 等^[33]得到的 1.330 相近。将抗滑桩设置为边坡中部,桩径为 0.8 m,抗滑桩其他参数如表 3 所示。采用接触对算法模拟桩与土间接触面的相互作用效应,使用 Coulomb 摩擦模型描述接触面的摩擦特性,用摩擦

系数 μ 表征接触间的摩擦行为, $\mu=0.46$ ^[35]。计算得到抗滑桩加固边坡的 FS 为 1.386,与 Li 等^[33]得到的 1.381 十分接近,说明建立模型的正确性。

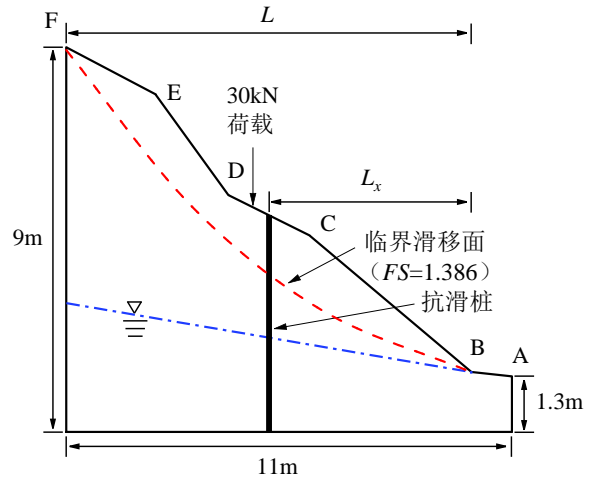


图 2 算例一边坡模型

Fig.2 Slope model of example 1

表 1 土体参数统计指标^[33]

Table 1 Statistical indicators of soil parameters^[33]

土体参数	均值	变异系数	分布类型	波动范围	互相关系数
黏聚力 c/kPa	5	0.2	对数正态	$l_h=10 \text{ m}, l_v=1 \text{ m}$	$\rho_{c,\varphi}=-0.5$
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	33	0.1	对数正态	$l_h=10 \text{ m}, l_v=1 \text{ m}$	
重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	19				

3.2 边坡可靠度结果分析

采用 K-L 级数展开方法对边坡 c - φ 随机场进行离散,并开展桩加固非均质边坡可靠度分析研究。随机场中共包含 1 393 个单元,网格尺寸为 0.2 m \times 0.2 m,随机场网格的划分情况如图 3 所示,与先前研究划分一致^[33]。依据表 1 中的参数生成 c 与 φ 的

随机场,在满足 $\epsilon \geq 95\%$ 的前提下, c 与 φ 的截断展开项数均取 42,得到 84 个随机变量,土体抗剪强度参数 c 与 φ 随机场一次典型实现与临界滑移面如图 3 所示。在边坡安全系数的计算中,潜在滑动面底部的参数情况是影响边坡安全系数计算结果的关键因素^[36]。

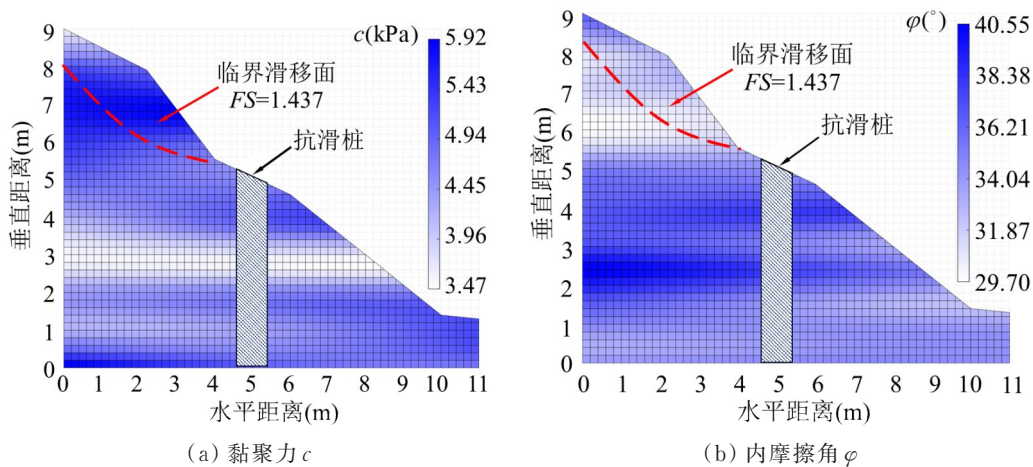


图 3 典型随机场实现

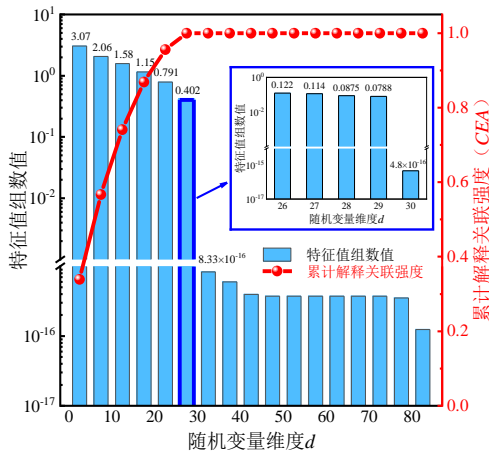
Fig.3 Typical random field realizations

为确定 SIR 降维的最佳维度,采用 LHS 抽取 300 组训练样本,并通过 SRM 计算相应的 FS。将

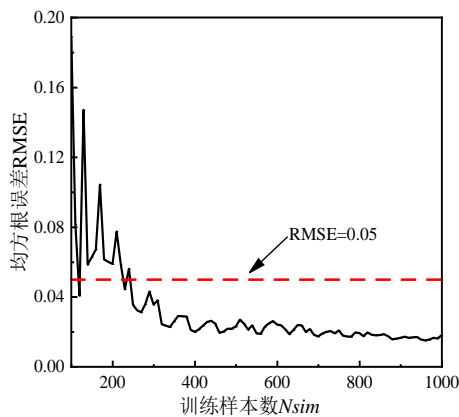
随机变量矩阵与 FS 组合得到样本矩阵,输入 SIR 方法中便可得到每个维度对应的特征值和 CEA 值。

具体数值如图 4(a)所示。图中将 84 个特征值分成 17 组,前 6 组特征值分别为 3.07, 2.06, 1.58, 1.15, 0.791, 0.402。从第 6 组的细节图可以看出,第 30 个特征值骤降至 4.8×10^{-16} 。CEA 曲线持续上升,在 $d=29$ 时出现拐点并逐渐趋于平稳,此时对应的 $I_{CEA} \geq 99.9\%$,这表明前 29 个特征值携带了与 FS 相关的主要信息。因此,本研究将维度降至 29。

确定降维维度后,需进一步确定模型的训练样本数。训练样本数越多,模型预测精度往往越高,但也会导致计算量的增加。为确定最优样本数量,设定当 $E_{RMSE} \leq 0.05$ 时,即可确定训练样本数。基于 LHS 选取 1 000 组训练样本,当训练样本数不小于 260 时, RMSE 满足条件,此时 $E_{RMSE} = 0.032$,计算结果如图 4(b)所示。



(a) 特征值组数与累计解释关联强度



(b) 不同训练样本数对应的 RMSE

图 4 算例一误差分析图

Fig.4 Error analysis diagram of example 1

为验证 SIR-MARS 代理模型在替代确定性分析中的准确性,使用 LHS 选取 260 组训练样本训练代理模型。另取 200 组做测试样本,分别采用有限元法和代理模型计算边坡 FS,两者对比结果如图 5 所示。由图可知,二者计算得到的 FS 基本沿 45° 线

分布,表明代理模型具有较高的精度和可靠性。

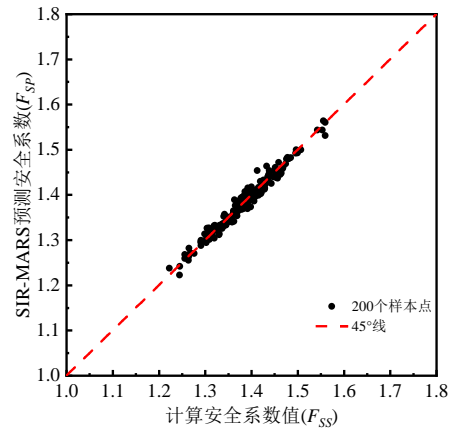


图 5 安全系数对比图

Fig.5 Comparison chart of safety factors

最后,选取 260 个初始训练样本用于构建代理模型,并采用 SS 方法计算得到抗滑桩加固边坡的失效概率为 1.099×10^{-10} 。该结果与 Li 等^[33]的研究结果 (1.566×10^{-10}) 相近,验证了 SIR-MARS-SS 边坡可靠度分析方法的准确性。在计算精度相近的前提下,该方法仅需 260 个样本即可获得较高精度的 P_f ,较直接 SS 方法的 1 000 个样本省去约 70% 的计算时间,在计算效率上具有显著优势。

4 算例二:摩擦/黏性土坡

4.1 边坡介绍和确定性分析

摩擦/黏性土坡坡高 20 m,坡角为 45°。土体弹性模量 $E=100$ MPa,泊松比 $\nu=0.3$ ^[34]。黏聚力 $c=30$ kPa,内摩擦角 $\varphi=17^\circ$,重度 $\gamma=18.5$ kN/m³^[37]。使用四边形与三角形网格对边坡模型进行划分,单元大小设置为 0.5 m×0.5 m,共得到 12 780 个正方形单元和 40 个三角形单元,网格划分情况如图 6 所示。模型边界条件设定为两侧法向约束,底部全约束,边坡稳定性分析所需的土体参数统计特征见表 2。使用有限元软件建模,基于 SRM 进行稳定性分析。设定折减系数范围为 0.5 到 2,以步长 0.1 递增,计算得到的 FS 为 1.05。使用极限平衡法计算得到的 FS 为 1.06,两者计算结果接近,说明建立模型的正确性。

4.2 双排抗滑桩布置形式对边坡可靠度分析结果的影响

图 6 中坡度为 45°、坡高 20 m 的土质边坡尺寸相对较大,拟设计双排抗滑桩,边坡尺寸及桩位布置图如图 7 所示。图中 D 为桩直径, L_s 为坡肩至坡脚的水平距离, L_{x1} 、 L_{x2} 分别为前排桩和后排桩至坡脚的水平距离, L_1 、 L_2 分别为前排桩和后排桩长, S 为桩排间距。抗滑桩参数见表 3。采用 SRM 计算

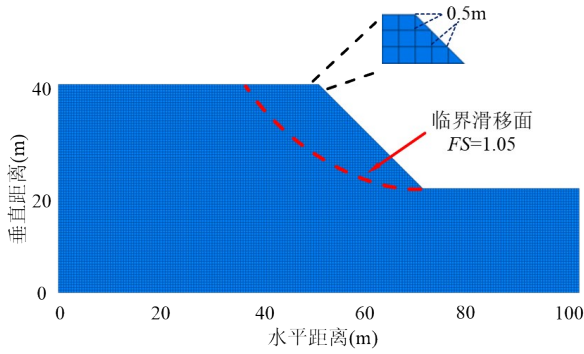


图6 算例二边坡模型几何尺寸图

Fig.6 Geometric dimensions diagram of slope model for example 2

FS,折减系数设定与4.1节保持一致。通过调整抗滑桩桩长、桩排间距和布桩位置,研究双排抗滑桩的布置形式对边坡可靠度的影响。

在进行随机场离散时, c 与 φ 的变异系数、互相关系数和波动范围取自文献[9,39],具体参数见表

表2 算例二土体参数统计指标

Table 2 Statistical indicators of soil parameters for example 2

土体参数	均值	变异系数	分布类型	波动范围	互相关系数
黏聚力 c /kPa	30	0.2	对数正态	$l_h = 40\text{ m}, l_v = 4\text{ m}$	$\rho_{c,\varphi} = -0.5$
内摩擦角 φ /°	17	0.2	对数正态	$l_h = 40\text{ m}, l_v = 4\text{ m}$	
重度 γ /(kN/m ³)	18.5				

表3 算例二抗滑桩力学参数^[38]

Table 3 Statistical characteristics of anti-slide pile parameters for example 2^[38]

弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	容重 γ /(kN/m ³)	截面直径 D /m
28 000	0.25	25	1.0

4.2.1 桩长对边坡可靠度的影响

为研究桩长对双排桩加固边坡失效概率的影响,假定前排桩与后排桩设计长度相同,桩长为10、12、14、16、18和20 m,桩排间距设定为 L_s 的0.4倍,前排桩位置为 $L_{x1}/L_s = 0.35$,后排桩位置为 $L_{x2}/L_s = 0.75$ 。边坡稳定性分析时,假定抗滑桩自身具有足

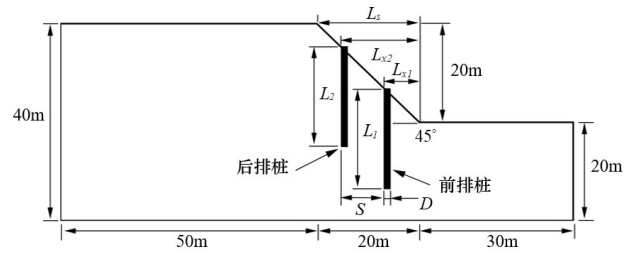
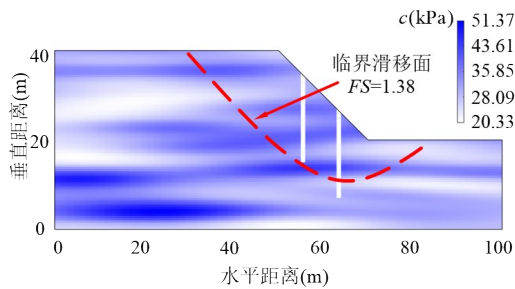


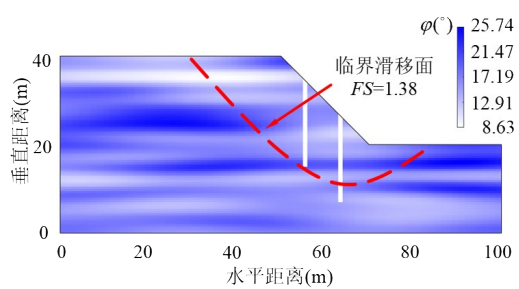
图7 算例二摩擦/黏性土坡桩加固示意图

Fig.7 Diagram of pile reinforcement for $c-\varphi$ slope in example 2

够强度而不发生剪切破坏。土体参数统计指标见表2,抗滑桩参数见表3。摩擦系数取 $\mu = 0.22$ ^[35]。首先,通过更改抗滑桩桩长对边坡进行可靠度分析。通过SIR-MARS-SS代理模型计算不同桩长对应的边坡失效概率,如图9所示。失效概率与双排桩长度呈负相关。从10 m增加到20 m时,失效概率从 6.41×10^{-2} 减小至 1.82×10^{-11} ,显著降低。这表明桩长对边坡加固效果影响显著。这可能是因为随着桩长的增加,边坡内部土体滑移面穿过抗滑桩底部并逐渐向下移动,出现更深层的土体滑移,抗滑力增加,失效概率随之减小。



(a) 黏聚力 c



(b) 内摩擦角 φ

图8 土体参数随机场典型实现

Fig.8 Typical random field realizations of c and φ

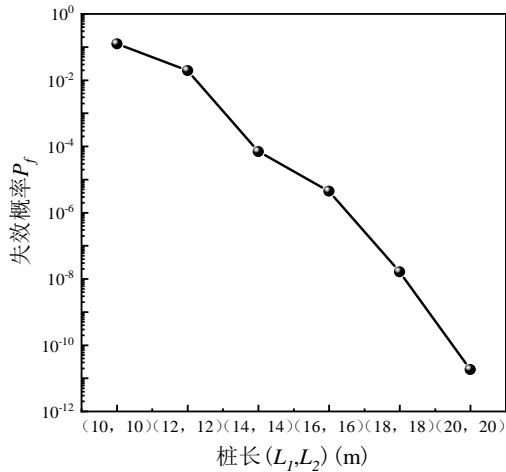


图9 前排桩与后排桩长度相等时边坡失效概率随桩长的变化

Fig.9 Failure probability of slope with equal lengths of front-row and back-row piles versus pile length

为进一步探讨双排抗滑桩方案中前后桩不同长度对边坡失效概率的影响规律,设计两种工况:20 m 桩长接近边坡潜在滑移面最大深度,固定该长度可模拟对应桩充分发挥抗滑作用的场景,同时通过对称工况直接对比前后排桩长度变化的影响差异。具体为:固定前排桩桩长 $L_1=20$ m,改变后排桩桩长 L_2 为 10、12、14、16、18 和 20 m;固定后排桩桩长 $L_2=20$ m,改变前排桩桩长 L_1 为 10、12、14、16、18 和 20 m,其余参数与上文所述一致。可靠性分析结果如图 10 所示,前排桩桩长的变化对失效概率的影响显著,而后排桩长度的改变对失效概率的影响相对较小。当桩长从 10 m 增加到 20 m 时,前排桩导致的 P_f 的变化量为 7 个数量级,而后排桩对应的

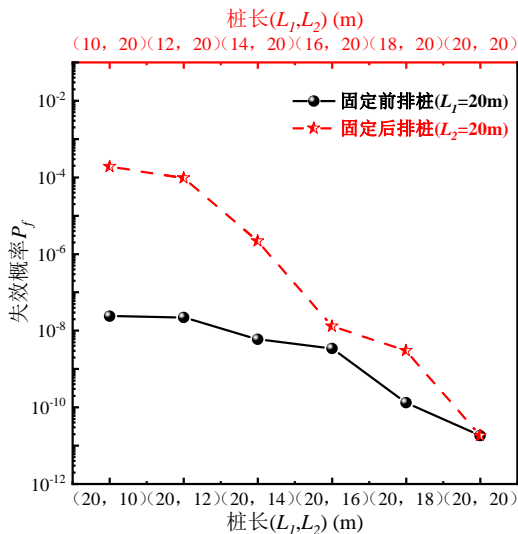


图10 前排桩与后排桩长度不等时边坡失效概率随桩长的变化

Fig.10 Failure probability of slope with unequal lengths of front-row and back-row piles versus pile length

P_f 的变化量仅为 3 个数量级。此外,由图 10 可知,当前排桩和后排桩长度之和相同时,前排桩越长, P_f 值越小。此现象的主要原因可分为 3 方面阐述:在受力传递机制方面,前排桩处于滑动面前缘,直接参与承载与约束,桩长的变化能够改变地-桩耦合作用,从而对整体稳定性产生影响,后排桩在前排桩与周围土体的影响下,其额外延长对荷载传递路径的影响相对有限;桩间作用方面,前排桩与后排桩之间存在群体效应,前排桩长度变化直接改变桩群的传力路径,导致后排桩的加固效应相对更弱;桩体受力特征方面,前排桩承受更大弯矩与轴向荷载变化,长度的增减更加直接地改变临界状态;后排桩的受力分布相对分散,对长度变化的敏感性较低^[40]。

4.2.2 桩位对边坡可靠度的影响

为探讨桩位对双排桩边坡可靠度的影响,设定前排桩和后排桩长度均为 18 m,桩径为 1 m,桩排间距为 L_s 的 0.3 倍 ($S=0.3 \times L_s$)。桩位设计如表 4 工况 1 所示。如图 11 所示,当抗滑桩向坡顶移动时,失效概率先迅速减小再增大,最佳桩位为前排桩位置为 $L_{x1}/L_s=0.1$ 、后排桩位置为 $L_{x2}/L_s=0.4$,失效概率为 8.38×10^{-12} 。

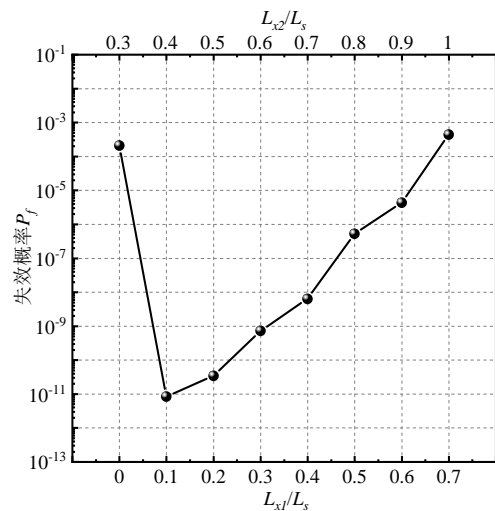


图11 排距 $S=0.3L_s$ 时,边坡失效概率随桩位的变化

Fig.11 Failure probability of slope versus pile position at row spacing $S=0.3L_s$

均质边坡在不同桩位下的塑性应变云图如图 12 所示。当两排桩都位于边坡下部时,滑移面主要出现在坡顶和后排桩之间,塑性应变云图如图 12 (a)、(b) 所示。这是由于前排桩位于坡脚处的潜在滑裂面起始区,直接抑制坡脚处土体的塑性变形,塑性应变主要集中在坡肩下方。FS 在前排桩位置为 $L_{x1}/L_s=0.1$ 、后排桩位置为 $L_{x2}/L_s=0.4$ 时达到最大值。此时,前排桩阻挡浅层下滑力,后排桩约

束中层变形,使得塑性变形区主要集中在坡肩至后排桩之间的小范围区域,滑移面更有效地被截断。随着抗滑桩位置往坡顶方向移动,潜在滑动的塑性变形区显著扩展,FS随之减小,进而产生图 12(c)所示的贯穿桩体的滑裂面。最后,当两排抗滑桩均位于边坡上部时,塑性应变从坡脚全面扩展,形成贯穿坡体的连续滑裂面,最终导致 FS 降低。这是由于桩位远离坡脚时,抗滑桩对坡脚的约束完全失效,边坡的下滑力几乎全由土体自身的抗剪强度承担。

为探究不同桩排距下的最优桩位,选取桩排间

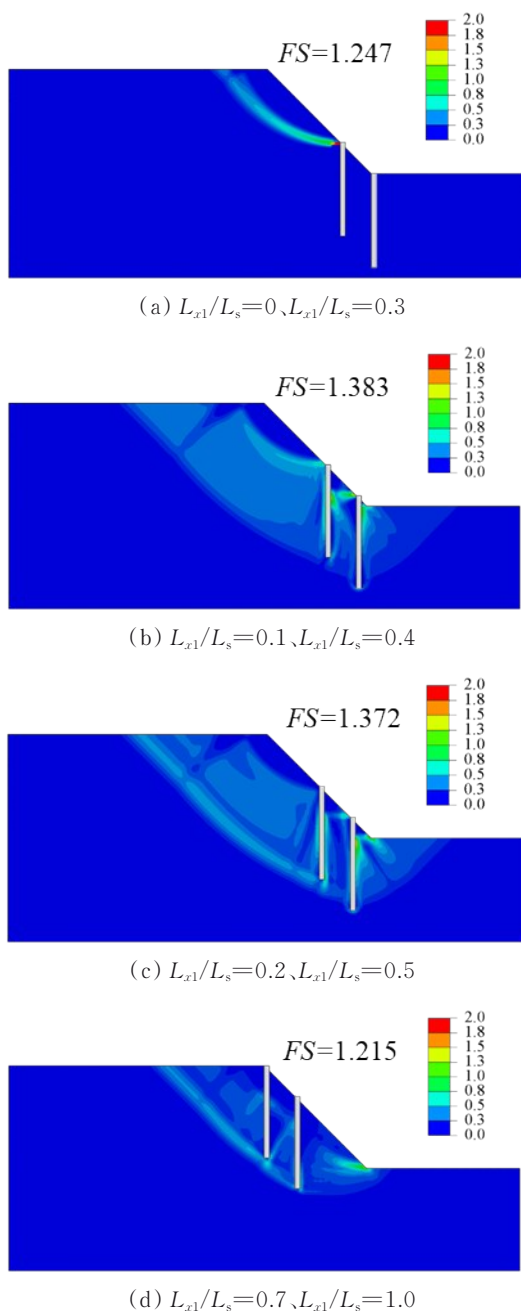


图 12 不同桩位下边坡等效塑性应变云图

Fig.12 Contour maps of equivalent plastic strain of slope under different pile positions

距 $S=0.4L_s$ 和 $S=0.5L_s$ 开展分析,对应的相对桩位配置方案汇总于工况 2 与工况 3(表 4)。当桩排间距 $S=0.4L_s$ 、两排桩均布置于坡脚附近区域时,边坡失效概率整体处于较低水平,且在前排桩位置为 $L_{x1}/L_s=0.1$ 、后排桩位置为 $L_{x2}/L_s=0.5$ 时,失效概率达到最小值 1.09×10^{-12} ,如图 13(a)所示。当桩排距增大至 $S=0.5L_s$ 、前排桩位于坡脚时,失效概率显著偏高,如图 13(b)所示;随着桩位逐渐向坡顶方向移动,失效概率呈现递减趋势,在前排桩位置为 $L_{x1}/L_s=0.2$ 、后排桩位置为 $L_{x2}/L_s=0.7$ 时降至最小值 7.55×10^{-10} ,表明此间距下该桩位具备更优抗失稳效能;然而,随着桩位继续向坡顶偏移,失效概率转而增大。

表 4 不同排距的双排桩定位方案

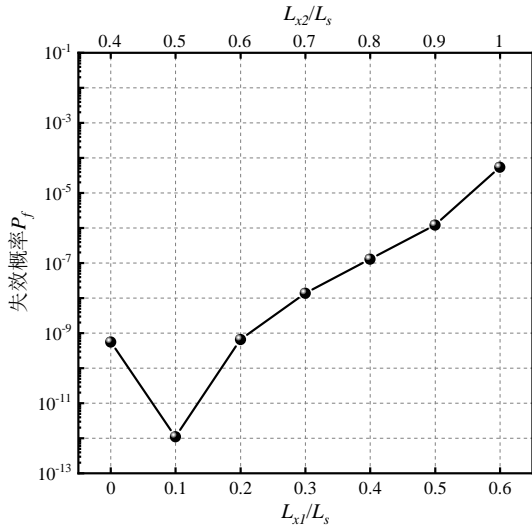
Table 4 Double-row pile layout schemes with different row spacings

工况	桩排距	桩位类型	相对桩位
工况 1	$S=0.3L_s$	前排桩	L_{x1}/L_s 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7
		后排桩	L_{x2}/L_s 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0
工况 2	$S=0.4L_s$	前排桩	L_{x1}/L_s 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6
		后排桩	L_{x2}/L_s 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0
工况 3	$S=0.5L_s$	前排桩	L_{x1}/L_s 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
		后排桩	L_{x2}/L_s 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0

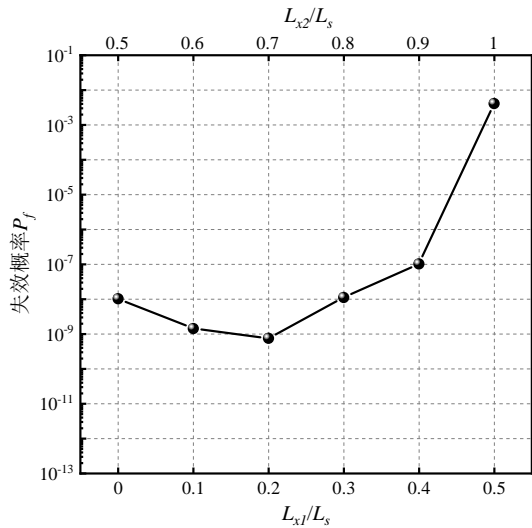
桩排距 $S=0.3L_s$ 、 $S=0.4L_s$ 和 $S=0.5L_s$ 对应的边坡失效概率的变化如图 11、13(a)、13(b)所示,通过比较可以明显看出,当 $L_{x1}/L_s=0$ 时, L_{x2}/L_s 的变化对失效概率产生显著扰动。其中,当 $S=0.4L_s$ 时对应的失效概率明显低于 $S=0.3L_s$ 和 $S=0.5L_s$ 工况。进一步分析发现,在 3 种桩排距设置中,当前排桩位于边坡相对低位,后排桩趋近边坡中部区域时,边坡失效概率均能降至最小值。相应桩位的塑性应变云图如图 14 所示,由图 14 可见,当前排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0$ 、后排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0.3$ 时,坡肩与后排桩间形成稳定滑移面,且该滑移面未贯穿抗滑桩,边坡稳定性受桩体有效约束。当前排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0$ 、后排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0.4$ 和前排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0$ 、后排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0.5$ 时,塑性渗透区位于坡脚,潜在滑移面与桩体相交但未形成连续滑移面。观察图 14(b)、(c)可知,随着后排桩向坡顶方向移动,坡脚处塑性区逐渐扩展。这是因为随着桩排距的增大,两桩之间形成了不受桩体约束的区域,导致坡脚处土体在下滑力的作用下率先发生剪切变形,塑性应变从坡脚向坡体内部扩展。

4.3 变异系数对边坡可靠度的影响

为探究土体参数变异系数对边坡可靠度的影响,选择六组土体强度参数 COV 组合,并根据 COV



(a) 排距 $S=0.4L_s$



(b) 排距 $S=0.5L_s$

图 13 不同排距下失效概率随桩位变化情况

Fig.13 Variation of failure probability with pile position under different row spacings

等增量原则进行可靠度分析。前排桩桩位为 $L_{x1}/L_s=0.3$ 、后排桩桩位为 $L_{x2}/L_s=0.7$ ，桩长 $L_1=L_2=18$ m，其余土体和桩体强度参数与前文一致。

随着 COV_c 和 COV_φ 的等量增加，失效概率随之增大，变化趋势如图 15 所示。这可能是因为 COV 值越大，土体抗剪强度参数方差也越大，相应的 FS 方差变大而均值减小，从而导致失效概率增大^[4-5]。为进一步探究 COV_c 和 COV_φ 对边坡加固效果的影响，分别控制 COV_c 和 COV_φ 的变化，失效概率随二者变化的关系如图 16 所示。当 COV_c 取值为 0.15 时，失效概率为 1.17×10^{-9} ，当 COV_c 增大到 0.5 时，失效概率为 4.97×10^{-4} 。与之相比， COV_φ 的变化对双排桩加固边坡稳定性的影响更为显著。随着 COV_φ 的增大，失效概率呈现明显上升态势，从最初

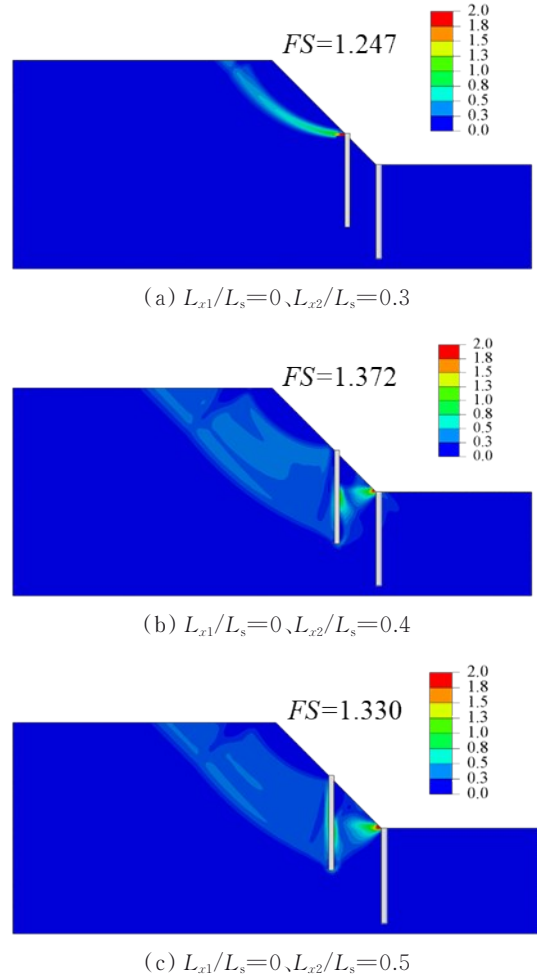


图 14 不同排距下边坡等效塑性应变云图

Fig.14 Contour maps of equivalent plastic strain of slope under different pile row spacings

4.13×10^{-13} 增加到 1.2×10^{-2} 。这种趋势表明， COV_φ 的不确定性对边坡可靠度有显著影响。这是因为

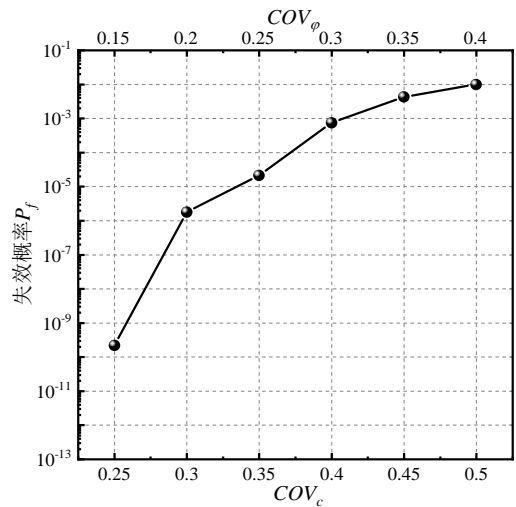


图 15 加固边坡的失效概率随 COV_c 和 COV_φ 等量增加的变化情况

Fig.15 Variation of failure probability of reinforced slope with equal increases in COV_c and COV_φ

内摩擦角直接影响土体抗剪强度,而黏聚力则对剪切强度的贡献有限^[5]。在分析土体参数的不确定性时,内摩擦角的空间变异性应成为重点关注对象。

4.4 波动范围对边坡可靠度的影响

为探究波动范围对边坡可靠度的影响,选取不

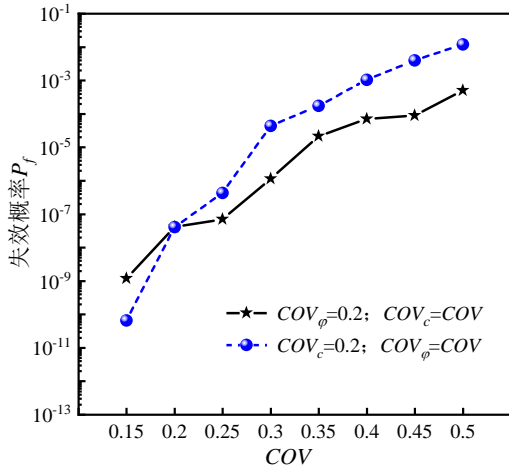
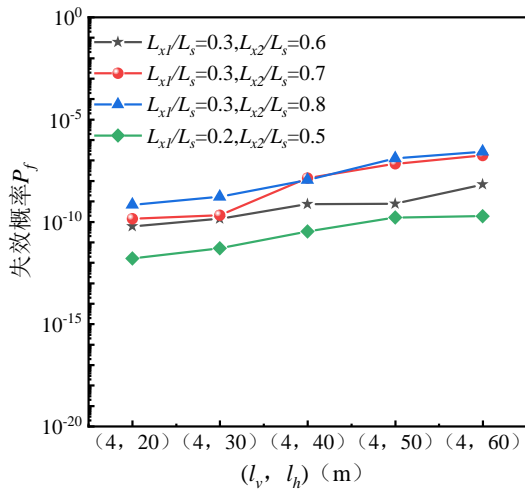
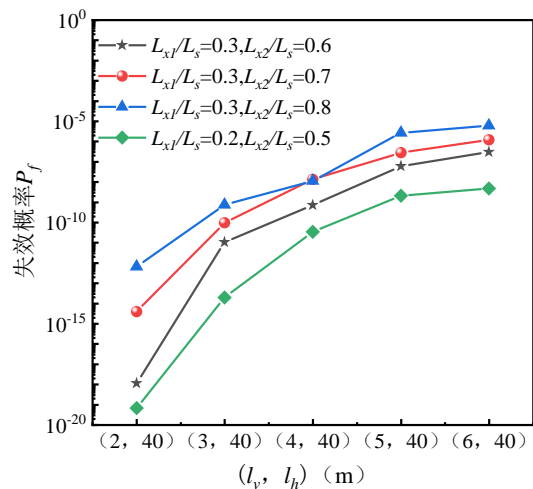


图 16 加固边坡的失效概率随 COV_c 和 COV_ϕ 变化的情况
Fig.16 Variation of failure probability of reinforced slope with COV_c and COV_ϕ



(a) 水平波动范围 l_h 的变化

同的水平波动范围 l_h (20、30、40、50、60 m) 与竖直波动范围 l_v (2、3、4、5、6 m), 计算对应的边坡失效概率。桩长 $L_1=L_2=18$ m, 前排桩位置 L_{x1}/L_s 和后排桩位置 L_{x2}/L_s 分别选择为: $L_{x1}/L_s=0.3, L_{x2}/L_s=0.6$; $L_{x1}/L_s=0.3, L_{x2}/L_s=0.7$; $L_{x1}/L_s=0.3, L_{x2}/L_s=0.8$; $L_{x1}/L_s=0.2, L_{x2}/L_s=0.5$ 。上述工况下边坡的失效概率如图 17 所示。由图 17(a) 可知, 随着 l_h 的增大, 失效概率先增大后逐渐趋于稳定。图 17(b) 则显示, l_v 增大时失效概率持续快速上升, 未呈明显收敛趋势。造成此规律的主因是垂直波动范围的变化会直接改变潜在滑动路径上的应力分布与摩擦条件, 且比水平波动范围的变化更容易改变坡体受力状况, 因此对边坡失效的影响更为显著; 同时, 垂直波动范围的变化会改变桩群受力传递路径, 导致主动阻力与被动阻力的分布呈现不对称性, 从而导致边坡失效概率更容易受垂直波动范围变化的影响^[41]。此外, 图 17 还表明, 土体空间波动范围的变化不会改变桩体的最优布置位置, 这一规律在各类工况中保持一致。



(b) 垂直波动范围 l_v 的变化

图 17 加固边坡的失效概率随波动范围变化情况

Fig.17 Variation of failure probability of reinforced slope with fluctuation range

5 结论

围绕双排抗滑桩对非均质边坡的加固性能展开研究, 探讨了其对土质边坡失效概率与破坏模式的影响, 提出了一种用于分析双排抗滑桩加固性能的方法, 并通过香港西贡区北部边坡案例验证了边坡可靠度分析框架的准确性。基于摩擦/黏性土坡模型, 进一步讨论了双排抗滑桩布桩位置的最优方案, 并开展了参数敏感性分析。主要结论如下:

1) SIR-MARS 模型可准确构建双排桩加固边

坡土体抗剪强度参数与 FS 之间的关系, 使用 SIR 降维后, 代理模型构建过程能够避免陷入维度灾难; 此外, SIR-MARS-SS 方法较直接使用 SS 省去约 70% 的时间, 计算效率提升显著, 为复杂条件下的边坡可靠度分析提供了一条有效的途径。

2) 使用双排桩加固边坡时, 前排桩长度的增加在提升边坡可靠度方面优于后排桩; 在总桩长保持不变的前提下, 增加前排桩长度有助于降低边坡失效概率。当双排抗滑桩由坡脚向坡顶移动时, 失效概率呈现先减小后增大的趋势。最优布置方案为

前排桩设置于坡脚附近,后排桩布置于边坡中部;

3) 双排桩加固边坡的失效概率 P_f 随 COV_c 和 COV_φ 的增加而增大,且 COV_φ 对 P_f 的影响显著强于 COV_c ,垂直波动范围对 P_f 的影响显著高于水平方向,但波动范围的变化不改变双排桩的最优桩位。

该方法适用于考虑土体参数空间变异性的双排抗滑桩加固边坡可靠度分析,在非均质摩擦/黏性土坡及桩位、桩长优化等二维边坡中具有高效性与准确性;但对于考虑外部荷载(如地震)或环境因素(如持续降雨)以及多排桩、桩-锚组合等复杂支护结构,该方法的适用性仍需验证。

参考文献

- [1] 国家统计局. 国家统计数据 [EB/OL]. [2026-02-08]. <https://www.stats.gov.cn/>. National Bureau of Statistics of China. National Statistical Data [EB/OL]. [2026-02-08]. <https://www.stats.gov.cn/>. (in Chinese)
- [2] Li T, Chen G. Analysis of factors influencing anti-slip pile support in tunnel landslide systems for tunnels with different burial depths [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 42: 101079.
- [3] Shangguan Y L, Xue D S, Wang G, et al. A study on soil arching effect of anti-slide pile considering different pile arrangements [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1195552.
- [4] 明思成, 仇文岗, 何昱苇, 等. 考虑各向异性空间变异性的边坡可靠度分析 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(4): 60-74. Ming S C, Zhang W G, He Y W, et al. Analysis on slope reliability considering anisotropic spatial variability of soil parameters [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(4): 60-74. (in Chinese)
- [5] 王钰轲, 邵琳岚, 万愉快, 等. 基于 K-L 展开法考虑土体参数空间变异性的土石坝坝坡可靠度分析 [J]. *水利学报*, 2024, 55(12): 1417-1427. Wang Y K, Shao L L, Wan Y K, et al. Reliability analysis of earth rock dam slope considering spatial variability of soil parameters based on K-L expansion method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(12): 1417-1427. (in Chinese)
- [6] Chen K J, Jiang Q H. Stability and reliability analysis of rock slope based on parameter conditioned random field [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(8): 306.
- [7] 邓志平, 邹艺, 潘敏, 等. 水位降落下考虑多参数空间变异性的非饱和库岸边坡时变可靠度分析 [J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(7): 1410-1421. Deng Z P, Zou Y, Pan M, et al. Time-varying reliability analysis of unsaturated reservoir bank slopes under water level drop considering multi-parameter spatial variability [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(7): 1410-1421. (in Chinese)
- [8] 汤科, 郑达, 程儒淞. 无连梁双排抗滑桩与单排抗滑桩水平推桩模型试验对比 [J]. *水文地质工程地质*, 2025, 52(3): 91-101. Tang K, Zheng D, Cheng R S. Comparison of horizontal push-pile model tests between non-beam double-row anti-slide piles and single-row anti-slide piles [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2025, 52(3): 91-101. (in Chinese)
- [9] Ji J, Yuan X Y, Liao W W, et al. Importance sampling-enhanced reliability analysis of double-row piled earth slopes accounting for soil spatial variability [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2025, 49(11): 2604-2619.
- [10] Jose D, Kolathayar S, Nayak S. 3D finite element analysis of anti-slide pile performance for slope stabilization [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2025, 43(2): 74.
- [11] Liu C Q, Bao H, Lan H X, et al. Failure evaluation and control factor analysis of slope block instability along traffic corridor in Southeastern Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(6): 1830-1848.
- [12] Lei H Y, Liu X, Song Y J, et al. Stability analysis of slope reinforced by double-row stabilizing piles with different locations [J]. *Natural Hazards*, 2021, 106(1): 19-42.
- [13] Chekroun L E H, Boumechra N. Static and seismic stability of a slope reinforced with two rows of piles [J]. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2023, 13(1): 9955-9960.
- [14] Bao H, Song Z T, Lan H X, et al. Analysis of the mechanical effects and influencing factors of cut-fill interface within loess subgrade [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 163: 108488.
- [15] Song Z T, Bao H, Lan H X, et al. Mechanical response characteristics on loess interface during micro cone penetration in borehole [J]. *Measurement*, 2026, 258: 119087.
- [16] 顾鑫, 仇文岗, 欧强, 等. 基于 Chebyshev-Galerkin-KL 展开的土质边坡稳定可靠度分析 [J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(12): 2472-2480. Gu X, Zhang W G, Ou Q, et al. Reliability analysis of soil slope stability based on Chebyshev-Galerkin-KL expansion [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(12): 2472-2480. (in Chinese)
- [17] 刘磊磊, 梁昌奇, 徐蒙, 等. 考虑参数旋转各向异性空间变异性的边坡大变形概率分析 [J]. *地球科学*, 2023, 48(5): 1836-1852.

- Liu L L, Liang C Q, Xu M, et al. Probabilistic analysis of large slope deformation considering soil spatial variability with rotated anisotropy [J]. *Earth Science*, 2023, 48(5): 1836-1852. (in Chinese)
- [18] 蒋水华, 杨建华, 姚池, 等. 考虑土体参数空间变异性边坡失稳风险定量评估[J]. *工程力学*, 2018, 35(1): 136-147.
- Jiang S H, Yang J H, Yao C, et al. Quantitative risk assessment of slope failure considering spatial variability of soil properties [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(1): 136-147. (in Chinese)
- [19] Chen F Y, Zhang R H, Wang Y, et al. Probabilistic stability analyses of slope reinforced with piles in spatially variable soils [J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2020, 122: 66-79.
- [20] Jiang S H, Huang J S. Efficient slope reliability analysis at low-probability levels in spatially variable soils [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 75: 18-27.
- [21] 邓志平, 钟敏, 蒋水华, 等. 土体参数非平稳随机场模拟及三维边坡高效可靠度分析[J]. *岩土力学*, 2025, 46(10): 3243-3252.
- Deng Z P, Zhong M, Jiang S H, et al. Efficient reliability analysis of three-dimensional slopes with nonstationary random field modeling of soil parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(10): 3243-3252. (in Chinese)
- [22] Zhang W G, Goh A T C. Multivariate adaptive regression splines for analysis of geotechnical engineering systems [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 48: 82-95.
- [23] Deng Z P, Pan M, Niu J T, et al. Slope reliability analysis in spatially variable soils using sliced inverse regression-based multivariate adaptive regression spline [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(9): 7213-7226.
- [24] Li K C. Sliced inverse regression for dimension reduction [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1991, 86(414): 316-327.
- [25] Li D Q, Zheng D, Cao Z J, et al. Two-stage dimension reduction method for meta-model based slope reliability analysis in spatially variable soils [J]. *Structural Safety*, 2019, 81: 101872.
- [26] Li D Q, Chen Y F, Lu W B, et al. Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables [J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(1): 58-68.
- [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] 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.
- [29] Laloy E, Rogiers B, Vrugt J A, et al. Efficient posterior exploration of a high-dimensional groundwater model from two-stage Markov chain Monte Carlo simulation and polynomial chaos expansion [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(5): 2664-2682.
- [30] 仇文岗, 洪利, 黎泳钦. 基于多元自适应回归样条的高维岩土工程问题分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(4): 359-365.
- Zhang W G, Hong L, Li Y Q. Analysis of multi-dimensional geotechnical engineering problems based on multivariate adaptive regression splines [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(4): 359-365. (in Chinese)
- [31] Liu L L, Cheng Y M. Efficient system reliability analysis of soil slopes using multivariate adaptive regression splines-based Monte Carlo simulation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 79: 41-54.
- [32] 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.
- [33] Li J Z, Zhang S H, Liu L L, et al. Probabilistic analysis of pile-reinforced slopes in spatially variable soils with rotated anisotropy [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 146: 104744.
- [34] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. *Géotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [35] Wang L P, Wang T, Hu Y N, et al. Reliability analysis of pile stabilized earth slopes using weighted uniform simulation method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 162: 105623.
- [36] Duncan J M, Wright S G, et al. *Soil strength and slope stability* [M]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014.
- [37] 《工程地质手册》编委会. *工程地质手册* [M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Editorial Board of *Engineering Geology Handbook*. *Engineering Geology Handbook* [M]. 5th Edition. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018. (in Chinese)
- [38] Sun Z B, Huang G X, Hu Y N, et al. Reliability analysis of pile-reinforced slopes in width-limited failure mode considering three-dimensional spatial variation of soil strength [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 161: 105528.
- [39] Cherubini C. Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on $c' \phi'$ soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(1): 264-269.
- [40] Liu Y B, Liu B. Monitoring data-driven updating post-assessment of the effectiveness of anti-slide piles for

colluvial slope stabilization [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(5): 246.

- [41] 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.

(编辑 XXX)