

DOI: 10.11779/CJGE20230884

水位降落下考慮多參數空間變異性的非飽和庫岸邊坡時變可靠度分析

鄧志平¹, 鄒 藝^{1,2}, 潘 敏^{*1}, 蔣水華², 鄭克紅¹

(1. 南昌工程學院水利工程學院, 江西 南昌 330099; 2. 南昌大學工程建設學院, 江西 南昌 330031)

摘要: 庫水降落及土體參數空間變異性是影響邊坡穩定性的重要因素, 對這兩種因素作用下庫岸邊坡進行可靠度評價具有重要意義。但現有可靠度分析大多僅考慮單一抗剪強度參數或水力參數的空間變異性, 且僅分析某一時刻的靜態可靠度, 忽略了多參數空間變異性及時變因素的影響。為此, 提出了同時考慮這兩種因素的庫岸邊坡時變可靠度分析方法。採用 Karhunen-Loève 展開方法對土體參數隨機場進行離散, 利用分片逆回歸 (SIR) 方法對隨機變量進行降維預處理, 基於降維後的變量構建高斯過程回歸 (GPR) 代理模型, 遂而採用蒙特卡洛模擬 (MCS) 方法評估邊坡失效概率。最後, 以某一非飽和庫岸邊坡為例驗證了所提方法的有效性, 探討了邊坡在不同水位降落工況下的可靠度變化規律, 并對關鍵土體參數進行了敏感性分析。結果表明: 所提方法能準確、高效地描述邊坡失效概率 (P_f) 的時變規律, 為考慮多參數空間變異性的非飽和邊坡時變可靠度問題提供了一條有效的途徑; 庫水降落越快時邊坡安全系數 (F_s) 下降和失效概率上升的速率越快; 多個土體參數的空間變異性和相關性均對邊坡可靠度計算結果有影響。

關鍵詞: 边坡; 可靠度; 空间变异性; 代理模型; 时变水位; 参数敏感性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)07-1410-12

作者简介: 邓志平(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工岩土工程可靠度分析与风险控制方面的研究工作。E-mail: dengzhiping@nit.edu.cn。

Time-varying reliability analysis of unsaturated reservoir bank slopes under water level drop considering multi-parameter spatial variability

DENG Zhiping¹, ZOU Yi^{1,2}, PAN Min¹, JIANG Shuihua², ZHENG Kehong¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. School of Infrastructure Engineering,

Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The reservoir water level drop and the spatial variability of soil parameters are the important factors affecting slope stability, and it is important to evaluate the reliability of reservoir slopes under the action of these two factors. However, most of the existing reliability analyses only consider the spatial variability of a single shear strength parameter or hydraulic parameter, and only the static reliability at a certain moment is analyzed, ignoring the influences of multi-parameter spatial variability and time-varying factors. For this reason, a time-varying reliability analysis method for reservoir slopes that considers both factors is proposed. The Karhunen-Loève expansion method is used to discretize the random field of soil parameters, and the slice inverse regression (SIR) method is used to reduce the dimension of random variables. Based on the reduced variables, the Gaussian process regression (GPR) surrogate model is constructed, and then the Monte Carlo simulation (MCS) method is used to evaluate the slope failure probability. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by taking an unsaturated reservoir bank slope as an example, and the reliability variation law of the slope under different water level plunge conditions is explored, and the sensitivity analysis of key soil parameters is conducted. The proposed method can accurately and efficiently describe the time-varying law of slope failure probability (P_f), which provides an effective way for the time-varying reliability

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20242BAB23045; 20224BAB204076); 国家自然科学基金面上项目(52378344); 赣鄱俊才支持计划·青年科技人才托举项目(2023QT08); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(52222905)。This work was supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (Grant Nos. 20242BAB23045, 20224BAB204076), the National Natural Science Foundation of China General Program (Grant No. 52378344), the National Natural Science Foundation of China General Program (Grant No. 52378344) and the National Natural Science Foundation of China Excellent Young Scientists Fund (Grant No. 52222905)。

收稿日期(Received): 2023-09-12 修回日期(Revised): 2024-12-23 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

*通信作者 (E-mail: panmin@nit.edu.cn)

problem of unsaturated slopes considering multi-parameter spatial variability. The faster the reservoir water plummets, the faster the slope safety factor (F_s) decreases and the failure probability increases. The spatial variability and correlation of multiple soil parameters have an impact on the calculated results of slope reliability.

Key words: slope; reliability; spatial variability; surrogate model; time-varying water level; parameter sensitivity

0 引言

水利工程关乎国计民生, 其在蓄洪、发电和航运等领域发挥着重大作用。但其为国民经济发展带来效益的同时, 也带来了一些地质灾害隐患, 如库岸边坡失稳。库岸边坡失稳不仅会造成水库功能丧失, 而且下泄的水流会给下游人民生命财产造成重大损失^[1]。因此, 开展库岸边坡稳定性研究具有十分重要的现实意义和巨大的经济与社会效益。库岸边坡稳定性受多种因素共同影响, 其中库水位降落引起的土体负孔隙水压力和抗剪强度改变对非饱和库岸边坡稳定性影响较大^[2]。此外, 由于天然土体受不同的沉积、后沉积条件以及不同荷载历史等缘故, 土体参数呈现出空间变异性, 忽略该变异性将导致不准确的边坡可靠度评估结果^[3-4]。因此, 有必要进行库水降落条件下考虑多参数空间变异性的库岸边坡可靠度分析研究。

在边坡可靠度分析研究方面, 学者们最初采用随机变量模型研究土体参数的不确定性, 但随机变量模型不能有效地描述土体参数固有的空间变异性^[4]。随机场理论为土体参数空间变异性的表征提供了一条有效的途径, 为此, 国内外学者结合随机场理论和可靠度理论在非饱和边坡可靠度分析方面做了大量有益的研究工作^[5-9]: 如 Cho^[5]通过 Karhunen-Loeve (K-L) 展开方法离散土体渗透系数随机场, 并通过蒙特卡洛模拟 (MCS) 方法研究了渗透系数空间变异性对库岸边坡渗流量和渗透坡降不确定性的影响; Tan 等^[6]采用中点法离散了非饱和土石坝坝坡的渗透系数和水力参数随机场, 并结合有限差分法和 MCS 方法探讨了水力参数空间变异性及相关距离对土石坝坝坡渗流量和流速的影响; Zhang 等^[7]研究了抗剪强度参数空间变异性、地震系数和水位波动对边坡失效概率的影响; 廖文旺等^[8]通过 K-L 展开方法离散土体渗透系数随机场, 并基于一阶可靠度分析方法研究了降雨强度和降雨持时对边坡可靠度的影响; 王长虹等^[9]采用试验变异函数模拟土体非饱和渗透系数随机场, 结合 MCS 方法开展了考虑渗流作用的非饱和土边坡稳定性可靠度分析。然而, 以上学者的研究工作还存在以下几点不足: ①在分析非饱和边坡可靠度时仅考虑单一渗透系数或水力参数的空间变异性对边坡渗流和稳定的作用, 忽略了抗剪强度参数空间变异性的影响; ②既有非饱和边坡可靠度分析通常只关注某时刻的静态可靠度问题, 对边坡的时变可靠度问题缺乏深入研究, 亟

需发展有效的非饱和边坡时变可靠度分析理论和方法; ③采用传统 MCS 方法计算考虑多参数空间变异性的非饱和边坡失效概率时计算量十分巨大, 针对复杂边坡及小失效概率问题, 这一缺陷更为明显, 因此大多数研究仅分析了土体参数空间变异性对边坡渗流量、流速、渗透坡降及安全系数等统计特征参数的影响, 而参数空间变异性对非饱和边坡失效概率影响的研究仍不充分。

为此, 本文提出了库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方法。首先建立边坡确定性分析模型, 采用随机场模型对土体参数的空间变异性进行模拟。其次, 为避免由于多个关键参数经随机场离散后的随机变量维度过高导致代理模型陷入“维度灾难”问题, 采用分片逆回归 (SIR) 方法先进行降维预处理, 该方法理论严密且易于实现, 在岩土工程研究中应用广泛^[10]。接着, 利用高斯过程回归 (GPR) 机器学习算法构建代理模型, GPR 方法具有严格的统计理论基础、灵活的非参数推断、参数自适应获取等优点, 对于小样本及非线性复杂问题具有良好的适应性^[11]。进而, 基于所构建的 SIR-GPR 模型通过 MCS 评估库岸边坡失效概率。在此, 以水位降落作用下的非饱和库岸边坡可靠度问题为例, 探讨库岸边坡在不同水位降落工况下的安全系数和失效概率变化规律, 验证所提 SIR-GPR-MCS 方法的有效性, 并基于所提方法对土体参数的敏感性进行分析。

1 研究方法

1.1 随机场模型表征土体空间变异性

边坡岩土体参数通常表现出显著的空间变异性, 随机场模型可有效表征该变异性^[12-13]。在此, 采用 K-L 展开方法离散二维随机场, 该方法使用一系列随机变量和确定性空间函数对其进行表示^[14]。本文选用高斯型相关函数, 具体如下:

$$\rho(x, y) = \exp \left(- \left[\left(\frac{|x - x'|}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{|y - y'|}{l_y} \right)^2 \right] \right) \quad (1)$$

式中: (x, y) 和 (x', y') 为随机场空间中任意两点的坐标; l_x 和 l_y 分别为水平和垂直相关距离。第 i 个随机场 H_i 经过 K-L 展开离散为

$$H_i(x, y; \omega) = \mu_i + \sum_{j=1}^{\infty} \sigma_j \sqrt{\lambda_j} f_j(x, y) \xi_{i,j}(\omega),$$

$$\approx \mu_i + \sum_{j=1}^M \sigma_i \sqrt{\lambda_i} f_j(x, y) \xi_{i,j}(\omega) \quad . \quad (2)$$

式中: μ_i 和 σ_i 分别为随机场的均值和标准差; ω 为随机事件; $\xi_{i,j}(\omega)$ 为一组独立标准正态随机变量; λ_i 和 $f_j(x, y)$ 分别为协方差函数的特征值和特征函数; M 为展开项数, 其值取决于期望的精度、相关距离和随机场的维数等, 一般通过期望能比率因子 ε 大于 95% 进行确定^[15], 具体表达式为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^M \lambda_i / \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \quad . \quad (3)$$

土体抗剪强度参数之间 (如有效黏聚力和有效内摩擦角之间) 以及水力参数之间 (如土-水特征曲线的其中两个拟合参数之间) 通常呈现负相关性, 且土体参数值均为正, 因此采用相关对数正态随机场对参数的空间变异性进行表征^[16]。式 (2) K-L 展开公式的相关对数正态形式为

$$H_i(x, y; \omega) = \exp \left[\mu_{\ln} + \sum_{j=1}^M \sigma_{\ln} \sqrt{\lambda_j} f_j(x, y) \xi_{i,j}(\omega) \right] \\ = \exp [\mu_{\ln} + \sigma_{\ln} G(x, y; \omega)] \quad . \quad (4)$$

式中: μ_{\ln} 和 σ_{\ln} 分别为相关对数正态分布随机场的均值和标准差, 计算表达式为 $\sigma_{\ln} = [\ln(1 + (\sigma_i/\mu_i)^2)]^{1/2}$, $\mu_{\ln} = \ln \mu_i - 0.5 \sigma_{\ln}^2$, $G(x, y; \omega)$ 为展开项数为 M 的标准正态分布随机场。

1.2 渗流分析

通过 K-L 展开方法离散了边坡土体参数随机场后, 进而对边坡非饱和渗流进行有限元分析。时变水位作用下的非饱和边坡的稳定性问题是一个典型的流固耦合过程。由达西定律和质量守恒原理推导出的饱和-非饱和渗流控制微分方程为^[17]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = \gamma_w \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial H}{\partial t} \quad . \quad (5)$$

式中: θ 为土体的体积含水量; $k_x(\theta)$, $k_y(\theta)$ 分别为土体在水平和垂直方向的渗透系数; H 为总水头; γ_w 为水的重度; t 为时间, 对于稳定渗流, $\partial H / \partial t = 0$; ψ 为土体的基质吸力; $\partial \theta / \partial \psi$ 为土体体积含水量与基质吸力水头曲线的斜率, 可由土-水特征曲线得到。土-水特征曲线的滞水效应等会影响非饱和土体抗剪强度特性及其力学行为, 根据《非饱和土试验方法标准: T/CECS 1337—2023》开展相关土-水特征曲线测定试验、非饱和土三轴试验、水平土柱渗水试验及渗气试验等有利于帮助工程师准确地评估边坡土质条件^[18]。为拟合或预测土-水特征曲线, 目前常采用的模型有 Brooks-Core 模型、Van Genuchten 模型和 Fredlund-Xing 模型。鉴于 Van Genuchten 模型参数化形式, 对饱和、非饱和条件的全面描述及物理可解释性等优点^[2],

本文采用该模型对土-水特征曲线进行拟合, 其表达式为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad . \quad (6)$$

式中: θ_s 为土体的饱和体积含水量; θ_r 为残余体积含水量; a , n 和 m 均为土-水特征曲线模型拟合参数, $m = 1 - 1/n$, $n > 1$ 。

渗透系数曲线表达式为^[19]

$$k_i(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad . \quad (7)$$

式中: k_s 为土体的饱和渗透系数; $i = x, y$; k_s , a , n 统称为水力参数。由式 (5) ~ (7) 可以进行饱和-非饱和渗流分析, 非饱和土体渗透系数的空间变异性可以直接通过模拟土体饱和渗透系数 k_s 和水力模型参数 a , n 的空间变异性实现。

1.3 稳定性分析

渗流分析得到的孔隙水压力分布结果用于后续的边坡稳定性分析。Fredlund 等^[20]采用净法向应力和基质吸力双应力状态变量, 结合 Mohr-Coulomb 强度理论, 提出的非饱和土抗剪强度公式为

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad . \quad (8)$$

式中: τ 为抗剪强度; c' 和 φ' 分别为有效黏聚力和有效内摩擦角; φ^b 为吸力内摩擦角, 表示抗剪强度随基质吸力变化的速率, 其计算表达式为 $\tan \varphi^b = \tan \varphi' [(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)]$; σ_n 为破坏面上的净法向应力; u_a 和 u_w 分别为破坏面上的孔隙气压力和孔隙水压力。假设条间作用力为半正弦函数, 基于 Morgenstern-Price 方法进行边坡稳定性分析。

1.4 代理模型

采用边坡稳定安全系数代理模型代替复杂的边坡有限元渗流及稳定性分析可以减轻计算量。非饱和边坡土体的多个关键参数随机场经过 K-L 展开方法离散后, 通常仍然会面临维度过高的问题 (特别是针对大区域边坡)。此外, 边坡的极限状态函数具有高度非线性。传统的代理模型无法保证其精度, 而直接进行 MCS 评估边坡失效概率将涉及大量复杂有限元分析, 计算非常耗时^[21]。为此, 本节提出一种基于 SIR-GPR 的代理模型近似替代边坡的真实功能函数。

(1) 分片逆回归降维预处理

随着回归问题维度增加, 计算成本将呈指数级增长, 造成统计分析难度急剧上升, 该现象在统计学领域被称为“维度灾难”^[10]。为避免高维度输入随机变量引起的“维度灾难”问题, 本节采用分片逆回归方法进行降维预处理。其基本原理是将高维的随机变量

向有效降维空间投影, 得到一组相互正交的基向量^[22]。有效降维空间中的信息更加简洁有效, 使得回归分析过程变得简单。在 SIR 分析中, 假设原始数据模型为

$$\mathbf{Y} = f(\boldsymbol{\xi}) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r) \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r]^T$ 为 r 维标准正态输入随机变量向量, \mathbf{Y} 为输出向量。经 SIR 降维后该数据模型变为

$$\mathbf{Y} = g(X_1, X_2, \dots, X_s) = g(\hat{\boldsymbol{\beta}}_1^T \boldsymbol{\xi}, \hat{\boldsymbol{\beta}}_2^T \boldsymbol{\xi}, \dots, \hat{\boldsymbol{\beta}}_s^T \boldsymbol{\xi}, \varepsilon) \quad (10)$$

式中: s 为降维维度; $\hat{\boldsymbol{\beta}}_i$ ($1 \leq i \leq s$) 为投影向量, 这些向量构成有效降维空间; X_i ($1 \leq i \leq s$) 为降维后的映射变量; ε 为随机扰动。式 (10) 成立时, 原始 r 维空间经投影向量 $\hat{\boldsymbol{\beta}}_i$ 投影至 s ($s < r$) 维有效降维空间上, 用预测变量的低维线性组合替换原始变量不损失任何有效信息^[23]。SIR 分析的主要目标就是求出该投影向量 $\hat{\boldsymbol{\beta}}_i$, 形成有效降维空间, 完成以上降维预处理过程。SIR 方法的工作步骤如下。

a) 将 ξ_i 标准化:

$$\xi_i = \sum_{\xi_i \xi_i}^{-0.5} (\xi_i - \bar{\xi}_i) \quad (11)$$

式中, $\sum_{\xi_i \xi_i}$ 为样本的协方差矩阵; $\bar{\xi}_i$ 为样本均值。 ξ_i 经过标准化后, 均值为 0, 方差为 1。并计算 ξ_i 对应的响应 f_i 。

b) 将 f_i 划分为 D 个分片区间 M_d ($1 \leq d \leq D$)。

c) 计算各分片输入变量的均值 $\bar{\xi}_d$ ($1 \leq d \leq D$)。

$$\bar{\xi}_d = \frac{1}{n_d} \sum_{f_i \in M_d} \bar{\xi}_i \quad (12)$$

式中, n_d 为第 d 个分组的样本数目。

d) 计算条件期望 $E(\xi_i | f_i)$ 。

e) 考虑到分片样本数不同, 计算加权协方差矩阵 $\hat{\mathbf{C}}$:

$$\hat{\mathbf{C}} = \sum_d \frac{n_d}{N} \bar{\xi}_d \bar{\xi}_d^T \quad (13)$$

式中, N 为样本总数。

f) 对分片输入变量均值 $\bar{\xi}_d$ 进行主成分分析, 确定 $\hat{\mathbf{C}}$ 对应的特征值 $\hat{\lambda}_i$ 及特征向量 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_i$:

$$\hat{\mathbf{C}} \hat{\boldsymbol{\alpha}}_i = \hat{\lambda}_i \hat{\boldsymbol{\alpha}}_i \quad (14)$$

g) 将特征值 $\hat{\lambda}_i$ 排序, 前 s 个较大特征值对应的特征向量即为有效降维空间的投影向量:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_i = \hat{\boldsymbol{\alpha}}_i \sum_{\xi_i \xi_i}^{-0.5} \quad (15)$$

h) 计算分片在有效降维空间中的投影值:

$$\mathbf{X} = \hat{\boldsymbol{\beta}}_i^T \boldsymbol{\xi} \quad (16)$$

(2) 基于高斯过程回归的蒙特卡洛模拟方法

根据降维后的随机变量矩阵和安全系数矩阵建立 GPR 代理模型, 近似替代边坡稳定性分析的复杂功能函数。 N 组训练样本组成的训练样本集 D 可表示为

$$D = \{(X_e, Y_e)\} = \{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\} \quad (e=1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

式中: N 为训练样本数量; \mathbf{X} 为降维后的所有样本输

入向量; \mathbf{Y} 为降维后所有样本输出响应向量。假设样本集存在噪声且服从标准高斯分布, 据此建立回归问题的一般回归模型为

$$\mathbf{Y} = g(\mathbf{X}) + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma_t^2 \mathbf{I}_n) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_N]^T$ 为受噪声污染的 $N \times 1$ 维观测向量; $\mathbf{X} = [X_{1,s}, X_{2,s}, \dots, X_{N,s}]^T$ 为 $N \times s$ 维输入随机变量, s 为随机变量的维度; ε 为相互独立且服从高斯分布的观测噪声向量; σ_t^2 为噪声方差; \mathbf{I}_n 为单位矩阵。高斯过程回归函数 $g(\mathbf{X})$ 可定义为

$$g(\mathbf{X}) \sim GP[m(\mathbf{X}), \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X})] \quad (19)$$

$$m(\mathbf{X}) = E[g(\mathbf{X})] \quad (20)$$

$$\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) = E\{[g(\mathbf{X}) - m(\mathbf{X})][g(\mathbf{X}) - m(\mathbf{X})]^T\} \quad (21)$$

式中: $m(\mathbf{X})$ 为输入样本 \mathbf{X} 的均值函数, 通常为 0; $\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X})$ 为输入样本 \mathbf{X} 自身的协方差函数。由式 (18), (19) 可得观测目标值 \mathbf{Y} 的先验分布为

$$\mathbf{Y} \sim N(0, \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma_t^2 \mathbf{I}_n) \quad (22)$$

进一步可得训练集输出值 \mathbf{Y} (也称观测值) 和测试集输出值 \mathbf{Y}^* (也称预测值) 的联合高斯先验分布为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}^* \end{bmatrix} \sim N\left(0, \begin{bmatrix} \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma_t^2 \mathbf{I}_n & \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}^*) \\ \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}^*)^T & \mathbf{K}(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}^*) \end{bmatrix}\right) \quad (23)$$

式中: $\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}^*)$ 是训练集输入值 \mathbf{X} 与测试样本输入值 \mathbf{X}^* 之间的 $N \times 1$ 阶协方差矩阵, $\mathbf{K}(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}^*)$ 是测试样本 \mathbf{X}^* 自身的协方差矩阵。本文选用的协方差函数型式为常用的平方指数组型, 其表达式为

$$\mathbf{K}(\mathbf{X}_p, \mathbf{X}_q) = \sigma_t^2 \delta_{pq} + \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{1}{2L^2} (\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_q)^2\right) \quad (24)$$

式中: \mathbf{X}_p 与 \mathbf{X}_q 是一个样本输入值在同一维度上的两个任意元素。 L , σ_f^2 , σ_t^2 为平方指数组型协方差函数的 3 个超参数, 一般通过极大似然法搜索出最优解^[24]。对数似然函数形式为

$$\begin{aligned} L = \ln p(\mathbf{Y} | \mathbf{X}) &= -\frac{1}{2} \mathbf{Y}^T (\mathbf{K} + \sigma_t^2 \mathbf{I}_n)^{-1} \mathbf{Y} - \\ &\quad \frac{1}{2} \ln |\mathbf{K} + \sigma_t^2 \mathbf{I}_n| - \frac{N}{2} \ln 2\pi \end{aligned} \quad (25)$$

获取最优超参数后根据贝叶斯方法通过新的观测值不断更新预测值的概率分布, 在新的 \mathbf{X}^* , \mathbf{X} , \mathbf{Y} 下推断出 \mathbf{Y}^* 的后验分布为

$$p(\mathbf{Y}^* | \mathbf{X}^*, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \sim N[m(\mathbf{Y}^*), \mathbf{K}(\mathbf{Y}^*, \mathbf{Y}^*)] \quad (26)$$

式中, \mathbf{Y}^* 的均值 $m(\mathbf{Y}^*)$ 和方差 $\mathbf{K}(\mathbf{Y}^*, \mathbf{Y}^*)$ 的具体表达式为:

$$m(\mathbf{Y}^*) = \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}^*)^T [\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma_t^2 \mathbf{I}_n]^{-1} \mathbf{Y}, \quad (27)$$

$$\mathbf{K}(\mathbf{Y}^*, \mathbf{Y}^*) = \mathbf{K}(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}^*) - \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}^*)^T$$

$$[\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma_t^2 \mathbf{I}_n]^{-1} \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}^*) \quad (28)$$

采用以上 GPR 模型不断逼近边坡稳定性分析的隐式功能函数, 预测边坡 F_s 。在此基础上, 结合 MCS 方法进行时变水位作用下的边坡稳定可靠度分析, 得

到第 t 时刻边坡的失效概率为

$$P_f(t) = \frac{1}{N_{\text{sim}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{sim}}} I\{F_s(X_i, t) < 1\} \quad (29)$$

式中: N_{sim} 为 MCS 抽样次数; $F_s(X_i, t)$ 为边坡在第 t 时刻的安全系数, $X_i = (c', \varphi', k_s, a, n)$ 为第 i 组土体参数随机场实现值; $P_f(t)$ 为第 t 时刻边坡的失效概率; $I\{\cdot\}$ 为指示函数, $F_s(X_i, t) < 1$ 时 $I\{\cdot\} = 1$, 否则为 0。

(3) 模型精度评估

采用以上代理模型替代原有计算耗时较长的有限元模型, 很大程度上节约了计算成本。但代理模型仅仅是一种近似模型, 其与真实有限元仿真模拟之间仍存在一定偏差^[2, 10]。通常使用精度评价指标来评估代理模型的响应预测能力:

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (30)$$

$$\sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2}{N}} \quad (31)$$

式中: R^2 为决定系数; $\sqrt{\text{MSE}}$ 为均方根误差; y_i 为第 i 个有限元模型仿真计算的 F_s ; Y_i 为代理模型预测的第 i 个边坡的 F_s ; 回归模型的决定系数越接近于 1 或者均方根误差越接近于 0, 表明代理模型的精度越高。

(4) 执行步骤

图 1 给出了采用 SIR-GPR-MCS 方法进行考虑多参数空间变异性的非饱和边坡可靠度分析的流程, 主要步骤如下。

a) 建立边坡确定性模型。用 GEO-STUDIO 软件建立非饱和边坡模型, 包括定义材料属性、边界条件、土-水特征曲线和渗透系数曲线等。流固耦合分析边坡的渗流和稳定性状态, 将模型文件另存为拓展名为 xml 的接口文件, 具体见 1.2 和 1.3 节。

b) 建立新的输入计算模型。首先确定参数 k_s , a , n , c' , φ' 的统计特征, 包括均值、变异系数、分布类型、相关函数、互相关系数和相关距离等。采用 K-L 展开方法离散参数随机场, 之后通过 MATLAB 程序改写原 xml 文件中的参数, 得到 N 个新的输入文件, 具体见 1.1 节。

c) 计算并提取结果。采用 WINDOWS BAT 批处理脚本调用 GEO-STUDIO 软件内核进行 N 个输入文件的计算, 并输出储存着渗流分析结果和可能出现的滑动面信息的结果文件, 再通过 MATLAB 程序提取 N 个最危险滑动面对应的 N 个 F_s 。

d) 回归分析预测。采用 SIR 方法降维预处理随机样本矩阵, 根据 N 个输入样本矩阵和 N 个输出 F_s 矩

阵构建 SIR-GPR 代理模型。评估模型精度, 满足精度要求的代理模型用于后续边坡 F_s 的预测, 具体见 1.4 节。

e) 评估边坡失效概率。采用 MCS 方法评估边坡 P_f , 具体见 1.4 节。

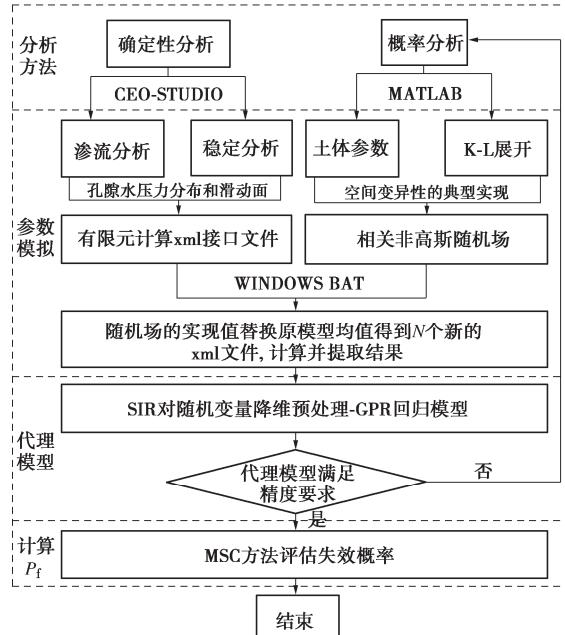


图 1 考虑参数空间变异性的非饱和边坡可靠度分析流程图

Fig. 1 Flow chart of reliability analysis of unsaturated spatially variable reservoir bank slopes

2 算 例

2.1 边坡模型与确定性分析

在此选取文献[2]中一坡高 10 m, 底厚 10 m, 坡比为 1:2 的均质库岸边坡(见图 2)验证所提方法的高效性及实用性。土体饱和重度为 20 kN/m³, 进行该黏性土坡确定性分析所需的其他参数见表 1^[2]。采用 GEO-STUDIO 数值计算软件进行分析, 共设置稳态渗流、瞬态渗流、稳定性 3 个状态。初始稳态渗流分析时, 库水位位于 19 m 处。瞬态渗流分析时边坡坡面边界条件为总水头随时间线性变化的函数, 其余边界为不透水边界。总水头从初始状态 19 m 降落到 10 m 处, 设置了水位降落速率分别为 0.5, 1, 1.8, 3 m/d 的 4 种计算工况(见图 3)^[2]。非饱和土体土-水特征曲线

(Van Genuchten 模型) 所用参数 θ_s 和 θ_r 分别取值 50% 和 3.5%^[2], 土体对应的土-水特征曲线和渗透系数曲线如图 4 (a), (b) 所示。

以水位降落速率为 1.8 m/d 的计算工况为例, 边坡孔隙水压力分布情况如图 5 (a) ~ (d) 所示, 边坡内部孔隙水压力逐渐减小, 浸润线逐渐降低。随后进行稳定性分析, 设置 10 个时间步区间(见表 2)以便观察边坡 F_s 随时间变化规律。随着水位下降, F_s 值由 1.846 逐渐下降至 1.256; 5 d 后库水位达到稳定状

态, 此后 F_s 略微上升至 1.479。水位降落阶段库岸边坡浸润线下降存在滞后效应, 在边坡内部形成较大的水力梯度, 且作用在坡面上的静水压力消失, 导致边坡内部超孔隙水压力和渗透力指向坡外, 在边坡表面形成反向渗流场, 产生向外拖拽力, 边坡下滑力增大, F_s 不断减小^[25]。水位降落越快, 库岸边坡内部渗透力越大, 常在水位降落终止时 F_s 降至最低^[25]。在水位稳定阶段, 边坡内部浸润线由于存在滞后效应而继续下降, 边坡内部应力重分布, 边坡 F_s 小幅度上升。

表1 土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

确定性分析	渗流			稳定	
	$k_s/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	a/kPa	n	c'/kPa	$\phi'/(^\circ)$
均值	1.160	28.44	1.720	5	30
标准差	0.696	11.376	0.344	1.5	6
变异系数	0.6	0.4	0.2	0.3	0.2
互相关系数		-0.25		-0.5	

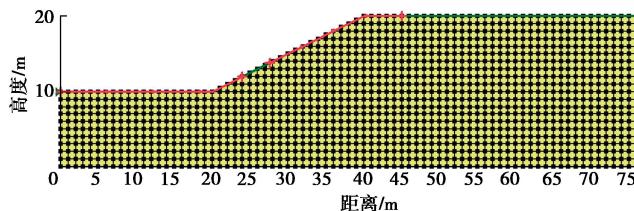


图2 库岸边坡尺寸和确定性模型

Fig. 2 Dimensions and deterministic model for reservoir bank slope

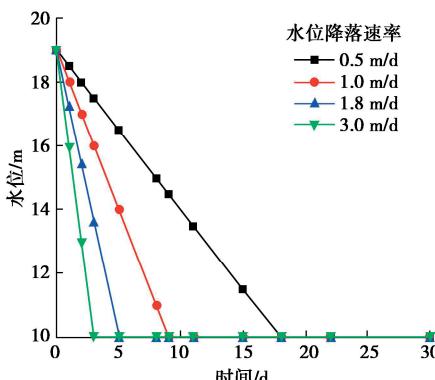


图3 不同计算工况下库水位变化

Fig. 3 Variation of reservoir water level under different working conditions

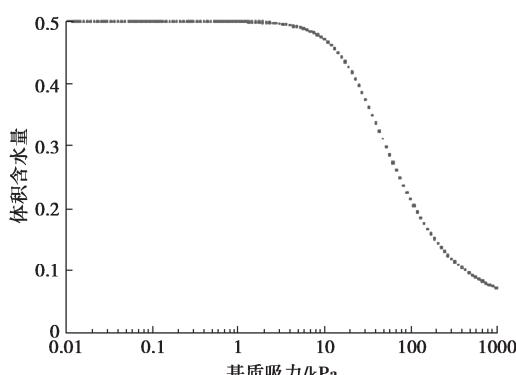


图4 土-水特征曲线和渗透系数曲线

Fig.4 Soil-water characteristic curve and permeability coefficient curve

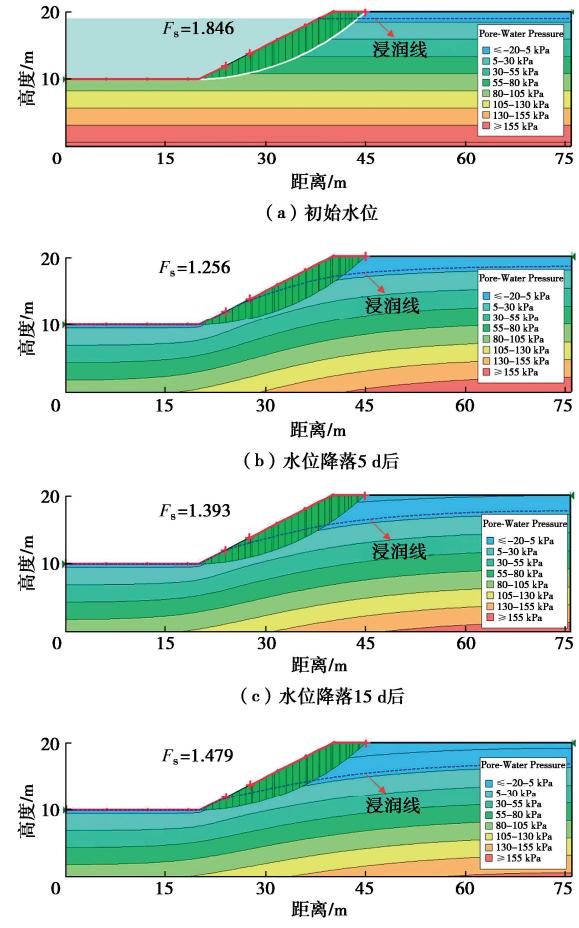


图5 孔隙水压力分布和最危险滑动面

Fig. 5 Distribution of pore water pressure and most dangerous sliding surface

表2 不同时刻库岸边坡安全系数

Table 2 Safety factor of reservoir bank slope at different moments

时间步序号	时间/d	F_s
1	0	1.846
2	1	1.544
3	2	1.358
4	3	1.258
5	5	1.256
6	8	1.316
7	11	1.355
8	15	1.393
9	22	1.441
10	30	1.479

2.2 可靠度分析

根据土体参数统计特征, 利用 K-L 级数展开方法对其进行随机场离散。参数 a 与 n , c' 与 φ' 之间的互相关系数分别取为 $\rho_{a,n}=-0.25$, $\rho_{c',\varphi}=-0.5$ ^[2]。在此, 主要考虑土体参数 k_s , a , n , c' , φ' 的空间变异性。水平向相关距离范围一般为 2~30 m, 垂直向相关距离范围一般为 0.1~5 m, 本文假定水平向相关距离 $l_x=30$ m, 垂直向相关距离 $l_y=3$ m^[26]。选用高斯型自相关函数, K-L 级数展开中截断项数取 10 时随机场的离散误差能满足精度要求。由此, k_s , a , n , c' , φ' 随机场共计离散得到 50 个随机变量。考虑该库岸边坡的实际尺寸将模型划分为 1230 个三角形和四边形有限元单元。图 6 (a)~(e) 给出了土体参数随机场的一次典型实现, 图中 c' 与 φ' , a 与 n 之间随机场的负相关关系也显而易见。

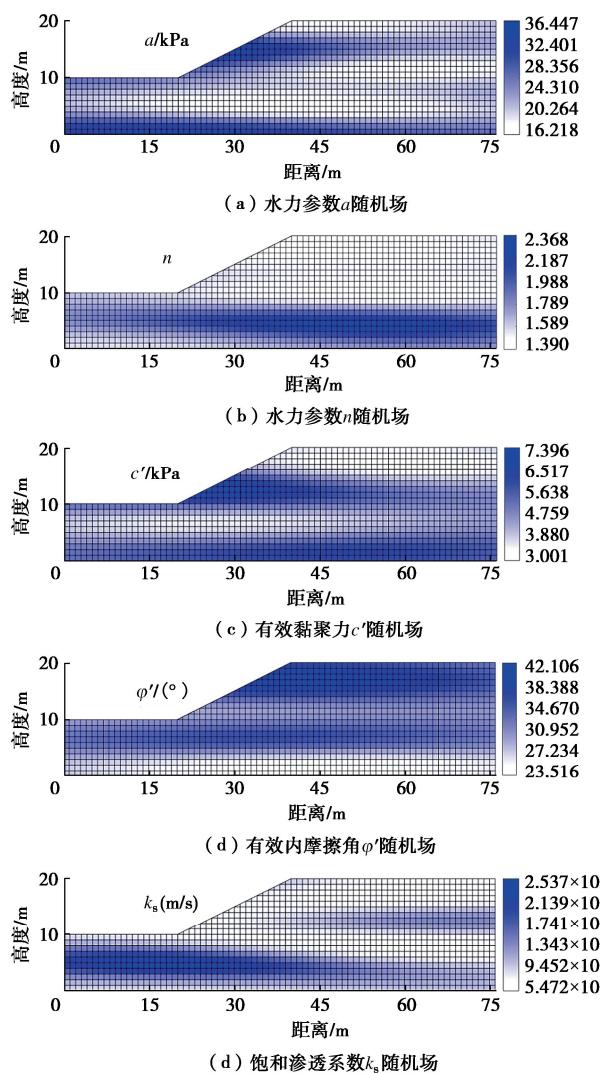


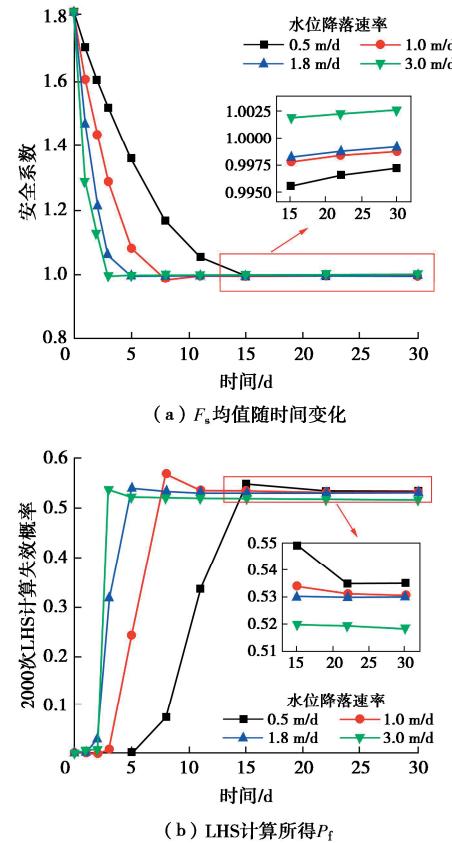
图 6 土体参数随机场的典型实现

Fig. 6 Typical realization of random field of soil parameter

先采用拉丁超立方抽样 (LHS) 方法^[26]对该边坡进行可靠度分析, 作为本文所提 SIR-GPR-MCS 方法

的对照。为保证 LHS 方法的计算精度, 对库岸边坡在四种时变水位工况下抽取 2000 个样本, 之后用 MATLAB 调用 GEO-STUDIO 内核对这 8000 个有限元模型进行 F_S 计算, 再评估边坡的 P_f , 得到 F_S 均值和 P_f 随时间的变化规律, 如图 7 (a), (b) 所示。水位下降初期边坡 F_S 迅速降低, 对应的 P_f 迅速升高, 并且水位降落速率越快时 F_S 和 P_f 的变化速率越快; 之后 F_S 和 P_f 的变化趋势变缓; 当水位分别在第 18 天、第 9 天、第 5 天、第 3 天降到稳定水位时, 库岸边坡 F_S 也分别在对应的时间稳定在 1.0 附近, P_f 稳定在 0.52 附近 (对于本文案例, 水位处于稳定阶段时, 边坡 F_S 上升和 P_f 下降的变化幅度较小, 可忽略不计)。

接着, 采用 SIR-GPR-MCS 方法进行可靠度分析。在各种时变水位工况下, 本文各随机选取 200 组训练样本数据用于构建 SIR-GPR 模型。为确定满足模型精度要求的最佳降维维度, 计算代理模型在不同维度 $r=1, 2, \dots, 50$ 下的均方根误差。结果如图 8 (a) 所示, $r=1$ 时均方根误差为 0.0237, 已满足精度要求, 因此本文选定 SIR 维度为 1。接着进行 1×10^6 次 MCS 计算边坡 P_f , 结果如图 7 (c) 所示。图 7 (b), 7 (c) 的计算结果高度一致, 表明本文所提的 SIR-GPR-MCS 方法用于分析考虑空间变异性的问题较为准确。



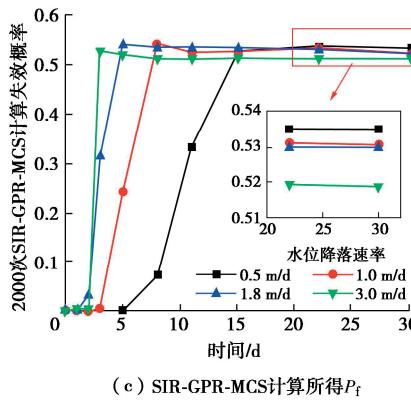
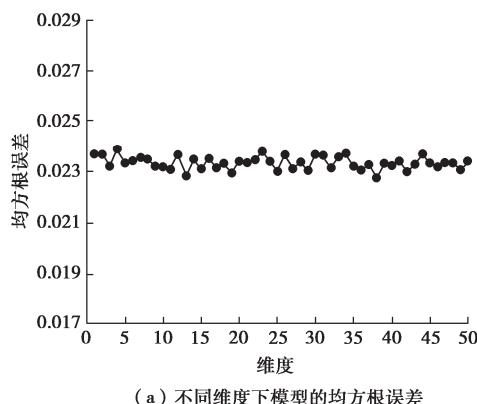


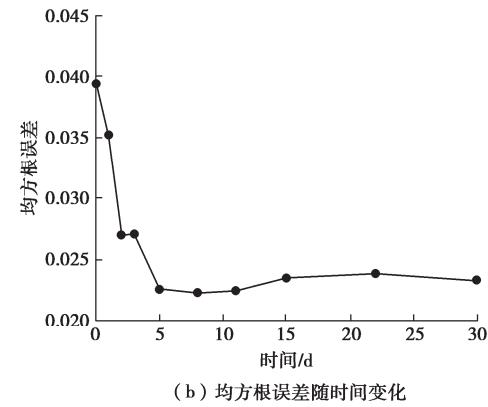
图 7 不同水位降落工况下库岸边坡安全系数和失效概率随时间变化

Fig. 7 Safety factors and probability failure of reservoir bank slope with time for different water level plunge conditions

从代理模型的精度来看, 进一步评估 SIR-GPR 代理模型在水位降落过程中各时刻的回归分析能力。以水位降落速率为 1.8 m/d 的计算工况为例, SIR-GPR 模型误差分析结果如图 8 (b), (c) 所示。水位降落前 5 天 SIR-GPR 模型的均方根误差从 0.04 开始持续下降, 而后有略微上升并稳定在 0.023 附近; 水位降落前 5 天 SIR-GPR 模型的决定系数在 0.94~0.96 波动, 而后稳定在 0.96 附近。此现象出现的原因可能是前 5 天水位降落阶段边坡的 F_s 较大, 对应的 P_f 较小, 代理模型在计算这类失效概率较小的问题时可以通过适当增加训练样本数量来进一步提升计算精度。总的来说, 本文案例中两个模型误差评价指标均在合理范围内, 表明 SIR-GPR 模型用于边坡 F_s 的预测是较为精准的, 考虑到在水位降落阶段重新确定训练样本数量构建代理模型的计算成本较大, 因此本文不再展开研究。此外, 随机选取 200 组样本分别使用有限元计算和代理模型计算 F_s , 计算结果对比见图 9, 两种方法计算的 F_s 拟合于 45° 线也表明代理模型的预测性能较好。



(a) 不同维度下模型的均方根误差



(b) 均方根误差随时间变化

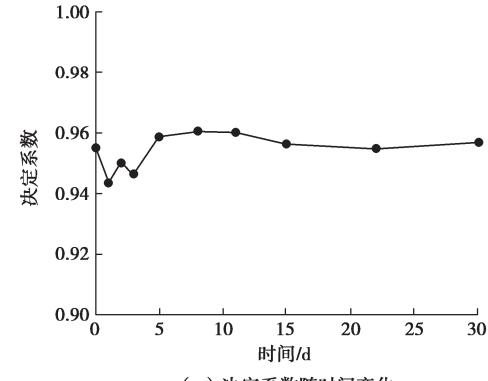


图 8 误差分析

Fig. 8 Error analysis

从代理模型的计算效率来看, 在配置内存为 16 GB、中央处理器为 11th Gen Intel (R) Core(TM) i7-11800H 和主频为 2.3 GHz 的计算机上, 采用本文所提方法计算边坡在某一特定工况下的可靠度总耗时 4.5 h。其中包括前处理生成 200 个随机场样本耗时 3.1 h, 计算 200 个边坡样本的渗流和稳定性耗时 1.2 h, 后处理生成 SIR-GPR 模型和 1×10^6 次 MCS 计算耗时 0.2 h。而 LHS 方法计算需要生成 2000 个随机场样本进行有限元分析再计算 P_f , 总耗时约 32 h。因此, 计算边坡在 4 种水位降落工况下的 P_f , 采用本文所提方法总耗时 18 h, 而 LHS 方法总耗时长达 128 h。显然, 本文所提基于 SIR-GPR-MCS 的非饱和库岸边坡可靠度分析方法能显著提高计算效率。

2.3 参数敏感性分析

本节将 SIR-GPR-MCS 方法用于具有空间变异性 的边坡参数敏感性分析之中, 探讨不同土体参数统计量对边坡 P_f 的影响规律。

(1) 参数空间变异性的影响

本文土体参数变异系数 (COV) 取值参考文献[2], 在此, 分别讨论 COV_{k_s} 在 0.3~0.9, COV_a 在 0.2~0.8, COV_n 在 0.1~0.4, COV_c 在 0.2~0.5, COV_ϕ 在 0.05~0.2 之间变化对 P_f 的影响。当对某一参数的空间变异系数进行敏感性分析时, 其余参数变异系数取值见表 1。

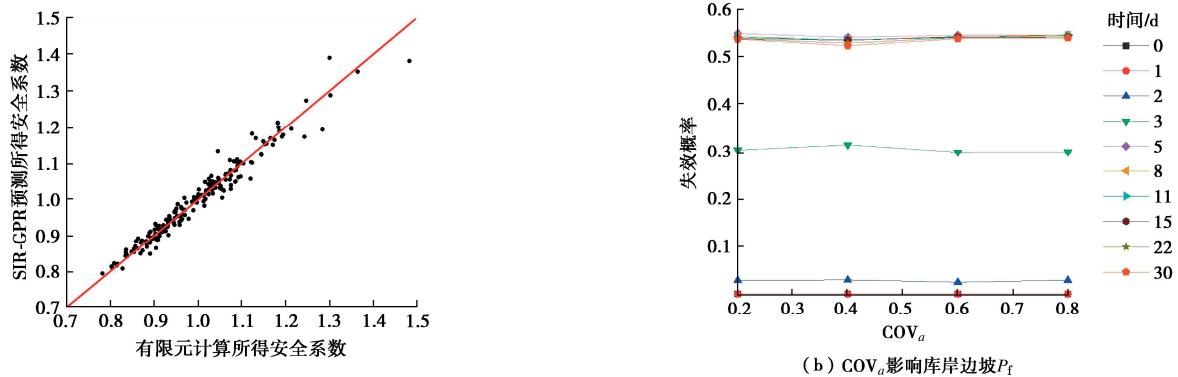
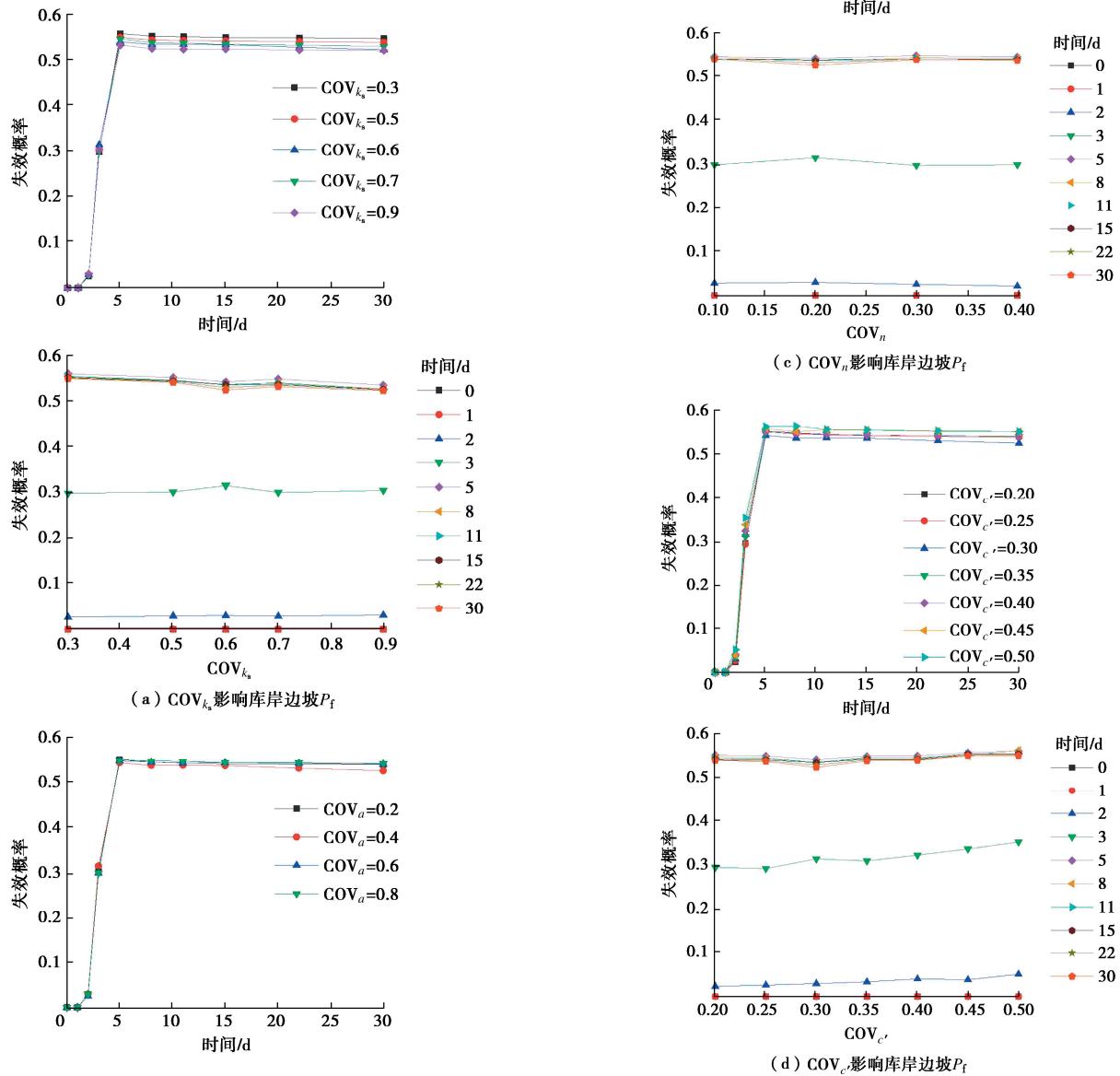
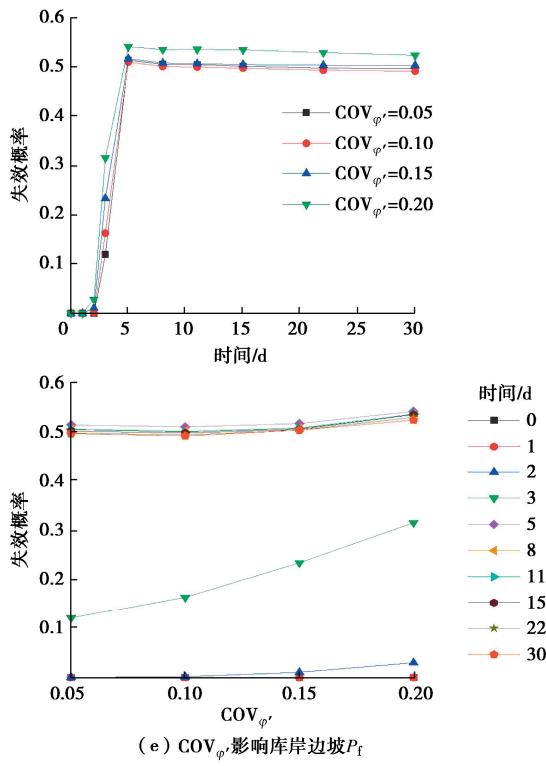


图 9 验证代理模型预测的准确性

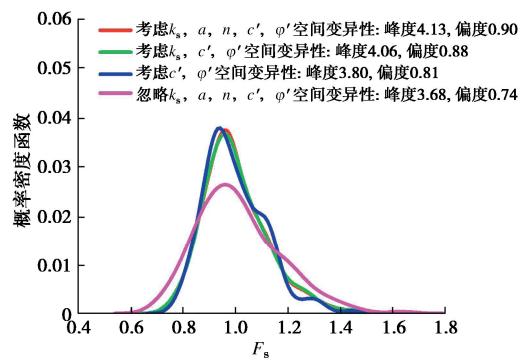
Fig. 9 Validation of accuracy of predictions by surrogate model

以水位降落速率 1.8 m/d 计算工况为例, 边坡 P_f 随参数变异系数的变化规律见图 10 (a) ~ (e)。结果为抗剪强度参数变异系数 COV_c , COV_φ 在较小范围内增加时, 边坡 P_f 明显增大, 表明抗剪强度参数的空间变异性显著影响边坡可靠度计算结果。而 P_f 随水力参数变异系数 COV_a , COV_n , COV_{k_s} 的影响相对较小。



图 10 土体参数空间变异性对库岸边坡 P_f 的影响Fig. 10 Influences of spatial variability of soil parameters on P_f

另外, 图 11 给出了第 30 天时考虑不同参数空间变异性下的边坡 F_s 概率密度函数 (PDF)。如果忽略土体多参数的空间变异性 (水平和垂直相关距离均设成 1000 m), 将得到更低更宽的 PDF。PDF 峰度及偏度减小, 往 F_s 小值区域偏移。可见忽略土体多参数的空间变异性可能高估边坡 P_f , 因此, 在可靠度分析中有必要考虑多个土体参数的空间变异性。

图 11 土体参数空间变异性对 F_s 概率密度函数的影响Fig. 11 Influences of spatial variability of soil parameters on probability density function of F_s

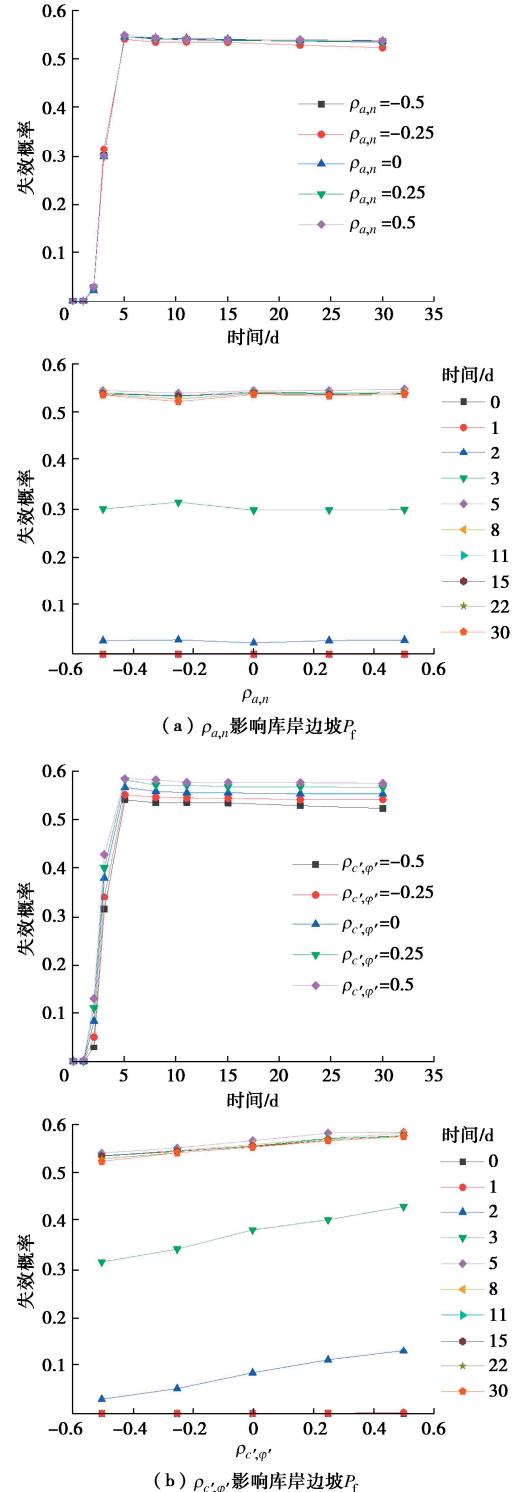
(2) 参数互相关性的影响

本节在参数变异系数不变的情况下, 研究相关系数 $\rho_{a,n}$ 和 $\rho_{c',\varphi'}$ 对边坡 P_f 的影响。 $\rho_{a,n}$ 和 $\rho_{c',\varphi'}$ 的变化范围均为 $-0.5 \sim 0.5$, 当对某一互相关系数进行参数敏感性分析时, 另一互相关系数的取值见表 1。

以水位降落速率为 1.8 m/d 的计算工况为例, 边

坡 P_f 随 $\rho_{a,n}$ 、 $\rho_{c',\varphi'}$ 的变化规律分别见图 12 (a), (b)。结果表明边坡 P_f 与 $\rho_{c',\varphi'}$ 正相关, c' 与 φ' 之间的相关性显著影响边坡可靠度分析计算结果。

图 10, 12 结果均表明, 基于不同的土体参数统计量 (包括变异系数及相关系数等) 得到的边坡失效概率结果截然不同, 因此准确地获取边坡土体参数统计量对于边坡可靠度分析及设计来说至关重要。

图 12 土体参数相关性对库岸边坡 P_f 的影响Fig. 12 Influences of correlation among soil parameters on reservoir bank slope P_f

3 结 论

本文主要综合非饱和土理论、随机场理论、分片逆回归降维预处理、高斯过程回归分析和蒙特卡洛模拟方法, 提出了同时考虑时效特性和土体多参数空间变异性 的 非 饱 和 边 坡 SIR-GPR-MCS 可 靠 度 分 析 方 法。探讨了库岸边坡失效概率在不同水位降落工况下的变化情况, 并运用 SIR-GPR-MCS 方法对关键土体参数的空间变异系数和相关系数进行了敏感性分析, 得到以下 3 点结论。

(1) 所提 SIR-GPR-MCS 方法在求解非饱和边坡失效概率时计算精度较高, 且极大地降低了计算量, 为复杂边坡稳定可靠度问题提供了一种高效的评估途径。

(2) 水位降落作用下库岸边坡的 F_S 逐渐下降, 相应的 P_f 逐渐上升, 且在库水降落初期时变化迅速, 而后变化趋势减缓直至 P_f 趋于稳定。并且对于不同水位降落工况, 水位降落越快时 P_f 前期变化速率越快。

(3) 参数敏感性分析结果表明多个土体参数的空间变异性及相关性均对库岸边坡可靠度计算结果有影响。为准确地进行库岸边坡可靠度分析, 有必要同时考虑多个土体参数的空间变异性。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 邓志平完成方法的提出和论文的写作与修改; 邹艺完成程序的编写和论文的写作与修改; 潘敏完成指导和论文的修改; 蒋水华参与指导和论文的修改; 郑克红参与论文的修改和数据分析。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。DENG Zhiping: Conceptualization, Methodology, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing. ZOU Yi: Software (Code Implementation), Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing. PAN Min: Supervision, Writing – Review & Editing. JIANG Shuihua: Supervision, Writing – Review & Editing. ZHENG Kehong: Writing – Review & Editing, Data Analysis. All authors have read and approved the final manuscript for submission.

参 考 文 献:

- [1] 周家文, 陈明亮, 瞿靖昆, 等. 水库滑坡灾害致灾机理及防控技术研究与展望[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 110-128. (ZHOU Jiawen, CHEN Mingliang, QU Jingkun, et al. Research and prospect on disaster-causing mechanism and prevention-control technology of reservoir landslides[J].

Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 110-128. (in Chinese))

- [2] GUARDIANI C, SORANZO E, WU W. Time-dependent reliability analysis of unsaturated slopes under rapid drawdown with intelligent surrogate models[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(4): 1071-1096.
- [3] 潘 敏, 邓志平, 蒋水华. 基于边界模型和广义耦合马尔可夫链模型的地层变异性模拟方法[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 176-186. (PAN Min, DENG Zhiping, JIANG Shuihua. Simulation method of stratigraphic uncertainty using a boundary model and generalized coupled Markov chain model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 176-186. (in Chinese))
- [4] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性 的 非 饱 和 土 坡 可 靠 度 分 析 [J]. 岩 土 力 学, 2014, 35(9): 2569-2578. (JIANG Shuihua, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Reliability analysis of unsaturated slope considering spatial variability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2569-2578. (in Chinese))
- [5] CHO S E. Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation[J]. Engineering Geology, 2012, 133: 30-39.
- [6] TAN X H, WANG X, KHOSHNEVAN S, et al. Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters[J]. Engineering Geology, 2017, 228: 260-269.
- [7] ZHANG W G, WU J H, GU X, et al. Probabilistic stability analysis of embankment slopes considering the spatial variability of soil properties and seismic randomness[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(5): 1464-1474.
- [8] 廖文旺, 姬 建, 张 童, 等. 考虑降雨入渗参数空间变异性 的 浅 层 滑 坡 时 效 风 险 分 析 [J]. 岩 土 力 学, 2022, 43(S1): 623-632. (LIAO Wenwang, JI Jian, ZHANG Tong, et al. Time-effect risk analysis of shallow landslide considering spatial variability of rainfall infiltration parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S1): 623-632. (in Chinese))
- [9] 王长虹, 杜昊东, 柳 伟, 等. 考虑非饱和渗透系数随机场统计特征的库岸老滑坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 327-335. (WANG Changhong, DU Haodong, LIU Wei, et al. Stability analysis of old reservoir bank landslide by considering spatial random field characteristics of unsaturated hydraulic conductivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 327-335. (in Chinese))

- [10] 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.
- [11] 彭立锋, 苏国韶, 王志成, 等. 基于高斯过程分类与蒙特卡洛模拟的岩土工程结构可靠度分析方法[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(21): 6150-6157. (PENG Lifeng, SU Guoshao, WANG Zhicheng, et al. Reliability analysis method for geotechnical engineering structure using Gaussian process classification based Monte Carlo simulation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, **13**(21): 6150-6157. (in Chinese))
- [12] 邓志平, 邹艺, 潘敏, 等. 考虑多参数空间变异性的非饱和土石坝坝坡可靠度分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, **32**(4): 1108-1123. (DENG Zhiping, ZOU Yi, PAN Min, et al. Reliability analysis of unsaturated earth-rock dam slope considering multi-parameter spatial variability[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, **32**(4): 1108-1123. (in Chinese))
- [13] VANMARCKE E. Random Fields: Analysis and Synthesis[M]. Singapore; Hackensack, NJ: World Scientific, 2010.
- [14] 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.
- [15] 邓志平, 牛景太, 潘敏, 等. 考虑地层变异性和土体参数空间变异性的边坡可靠度全概率设计方法[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1083-1090. (DENG Zhiping, NIU Jingtai, PAN Min, et al. Full probabilistic design method for slopes considering geological uncertainty and spatial variability of soil parameters[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(6): 1083-1090. (in Chinese))
- [16] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous media[J]. *Physics*, 1931, **1**(5): 318-333.
- [17] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated Soils1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892.
- [18] 非饱和土试验方法标准: T/CECS 1337—2023[S]. 北京: 人民交通出版社, 2023. (Standard for Unsaturated Soil Test Method: T/CECS 1337 — 2023[S]. Beijing: Peoples Transportation Press, 2023. (in Chinese))
- [19] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(12): 1118-1126.
- [20] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, **15**(3): 313-321.
- [21] 邓志平, 钟敏, 潘敏, 等. 考虑参数空间变异性和基于高效代理模型的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(2): 273-281. (DENG Zhiping, ZHONG Min, PAN Min, et al. Slope reliability analysis considering spatial variability of parameters based on efficient surrogate model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, **46**(2): 273-281. (in Chinese))
- [22] DUAN N H, LI K C. Slicing regression: a link-free regression method[J]. *The Annals of Statistics*, 1991, **19**(2): 505-530.
- [23] LI L X, NACHTSHEIM C J. Sparse sliced inverse regression[J]. *Technometrics*, 2006, **48**(4): 503-510.
- [24] HU B, SU G S, JIANG J Q, et al. Uncertain prediction for slope displacement time-series using Gaussian process machine learning[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 27535-27546.
- [25] 李卓, 方艺翔, 鲁洋, 等. 前期降雨与库水位变化对土石坝渗流及稳定特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(12): 2177-2186. (LI Zhuo, FANG Yixiang, LU Yang, et al. Influences of antecedent rainfall and change of reservoir water level on seepage and stability characteristics of earth rock dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, **44**(12): 2177-2186. (in Chinese))
- [26] 蒋水华, 刘贤, 黄劲松, 等. 考虑水力模型参数空间变异性土石坝边坡可靠度分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, **29**(4): 939-951. (JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Jinsong, et al. Reliability analysis of slope stability of embankment dams considering spatial variability of hydraulic model parameters[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, **29**(4): 939-951. (in Chinese))