

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.041



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



随机降雨下考虑参数空间变异性的边坡稳定 概率分析

曾祥薇, 潘敏, 邓志平, 甘建军, 郑克红

(南昌工程学院 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)

摘要: 准确地进行降雨作用下边坡稳定概率的分析需综合考虑降雨的随机性和土体参数的空间变异性, 但现有研究通常仅考虑其中一种因素对边坡稳定性的影响。提出同时考虑两种因素作用的边坡稳定概率分析方法, 采用 Karhunen-Loève 展开法模拟土体参数的空间变异性, 利用有界随机级联模型模拟降雨随机性, 将生成的降雨时间序列作为边坡的上边界条件, 进行渗流和稳定性分析, 进而采用拉丁超立方抽样(LHS)方法计算边坡失效概率。以江西省吉安市遂川县卷旋村滑坡为例进行分析研究, 结果表明: 同时考虑随机降雨和土体参数空间变异性所得边坡稳定概率分析结果与工程实际相符; 边坡顶部梯田储水的持续下渗对边坡孔隙水压力的影响范围逐渐增大, 而孔隙水压力的上升幅度逐渐减小, 最终趋近于零; 对比降雨入渗, 降雨重分布对边坡稳定性的影响较小。

关键词: 边坡稳定性; 随机降雨; 空间变异性; 降雨入渗

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)06-0021-11

Probabilistic stability analysis of slope considering spatial variability of parameters under random rainfall

ZENG Xiangwei, PAN Min, DENG Zhiping, GAN Jianjun, ZHENG Kehong

(School of Hydraulic Engineering; Jiangxi Key Laboratory of Structural Safety of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, P. R. China)

Abstract: Accurate probabilistic stability analysis of slope under rainfall effects requires a comprehensive consideration of both the randomness of rainfall and the spatial variability of soil parameters. However, existing studies typically focus on only one of these factors. To address this, a method for probabilistic stability analysis of slope that simultaneously considers both factors has been proposed. The Karhunen-Loève expansion method is employed to simulate the spatial variability of soil parameters, while a bounded random cascade model is used

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(52378344); 江西省自然科学基金(20224BAB204076、20242BAB23045); 赣鄱俊才支持计划·青年科技人才托举项目(2023QT08)

作者简介: 曾祥薇(2000-), 女, 主要从事岩土工程稳定概率分析研究, E-mail: xiangwei.zeng@foxmail.com。

潘敏(通信作者), 女, 博士, E-mail: panmin@nit.edu.cn。

Received: 2024-12-03

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52378344); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (Nos. 20224BAB204076, 20242BAB23045); The Young Scientific and Technological Talents Sponsorship Project in Ganpo Juncai Support Program (No. 2023QT08)

Author brief: ZENG Xiangwei (2000-), main research interest: probabilistic stability analysis in geotechnical engineering, E-mail: xiangwei.zeng@foxmail.com.

PAN Min (corresponding author), PhD, E-mail: panmin@nit.edu.cn.

to simulate the randomness of rainfall. The generated rainfall time series is then applied as the upper boundary condition for the seepage and stability analysis of the slope, followed by the calculation of slope failure probability using the Latin Hypercube Sampling (LHS) method. Analysis is conducted using the landslide in Juanxuan Village, Suichuan County, Ji'an City, Jiangxi Province, as a case study. The results indicate that the probability analysis results of slope stability obtained by considering both random rainfall and spatial variability of soil parameters are consistent with engineering practice. The continuous infiltration of water stored in the terraced fields at the top of the slope gradually expands the influential range of the slope's pore water pressure of the slope, while the increase in pore water pressure gradually diminishes, ultimately approaching zero. In comparison to rainfall infiltration, the influ of rainfall redistribution on slope stability is marginal.

Keywords: slope stability; random rainfall; spatial variability; rainfall infiltration

降雨诱发滑坡是常见的地质灾害^[1]。降雨入渗使得土体非饱和区含水率增加,单位重度增大,从而增加了边坡的下滑力;同时,孔隙水压力增大,对维持土体稳定有利的基质吸力逐渐丧失,从而降低了边坡稳定性^[2]。降雨入渗引起的土体性质变化对边坡稳定性的影响至关重要,可间接或直接诱发滑坡。此外,天然土体受沉积、风化等作用以及不同荷载历史的影响,土体参数通常会呈现出空间变异性^[3-4],若忽略该特性,将高估边坡失效概率^[5]。因此,研究降雨条件下考虑土体参数空间变异性的边坡稳定概率分析具有重要意义。

近年来,众多学者针对降雨诱发的滑坡开展了大量研究^[6-11]。有学者研究了降雨参数(降雨强度和降雨历时)阈值对诱发边坡失稳的影响。如 Li 等^[6]通过数值分析探究土壤对降雨强度和饱和渗透率的水力响应,并在此基础上分析了均质边坡的破坏类型和失稳机理;王秀英等^[7]采用 *I-D* 阈值曲线的方法描述平均降雨强度和降雨历时的关系,并分析了降雨与滑坡灾害的关系。但降雨参数不足以涵盖所有可能导致边坡失稳的降雨特征,进而导致不合理的边坡稳定性分析结果。而降雨模式作为降雨事件的主要特征,通过控制地表的流量边界条件来影响边坡稳定性^[12]。由此,一些学者探讨了均匀降雨或 4 种简化的典型降雨模式(延迟型、减弱型、峰值型和均匀型)对边坡稳定性的影响。如 Cho 等^[8]分析了不同重现期的均匀降雨对边坡稳定性的影响;Gu 等^[9]研究了相同最大降雨强度和降雨历时的 4 种典型降雨模式对非饱和边坡稳定性的影响。但事实上,一种或几种典型的降雨类型不能充分表征现实的降雨模式,需要探寻更贴近实际的降雨模拟。为此,有学者采用有界随机级联模型^[13]模拟随机降雨过程,将给定降雨量和降雨历时的降雨事件随机分解为多组不同的降雨时间序列。如 Zhao 等^[10]采用有界随机级联模型将日极端降雨事件分解成最小降雨单元时间尺度为 675 s 的多种降雨模式,

进而分析不同降雨模式诱发滑坡的触发和演化过程;Jiang 等^[11]采用有界随机级联模型将不同重现期的年最大日降雨量分解为更小降雨单元时间尺度的降雨时间序列,并研究了不同极端降雨模式对边坡稳定性的影响。综上,虽然已有研究考虑了随机降雨对边坡稳定性的影响,但大都忽略了岩土体参数空间变异性的重要性,势必会影响边坡稳定概率分析的结果。基于此,有必要对降雨作用下边坡稳定概率分析方面开展更为深入的研究,即:在考虑降雨随机性并精细化其时间尺度的同时,考虑岩土体参数的空间变异性,进而分析边坡在随机降雨模式下失效概率的变化规律。

在考虑土体参数空间变异性的基础上,提出基于有界随机级联模型随机降雨模式下的边坡稳定概率分析方法。以江西省吉安市遂川县卷旋村滑坡为例,利用有界随机级联模型将日降雨量分解成更小时间尺度的降雨时间序列,采用 Karhunen-Loève(K-L)展开法对边坡岩土体参数随机场进行模拟,在同时考虑参数空间变异性和降雨随机性的条件下对该滑坡进行边坡稳定概率分析。

1 研究方法

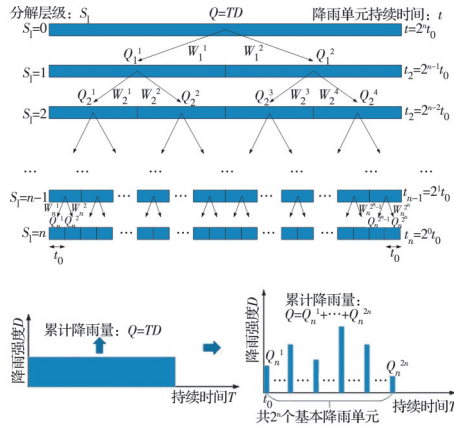
1.1 降雨时间序列生成

有界随机级联模型可以将独立降雨事件(已知降雨量和降雨持续时间)分解为更小时间尺度的降雨单元序列。该模型适用条件较为广泛^[12-14],可适用于各种不同降雨量和不同降雨历时的降雨事件。其原理图如图 1 所示。

各分解层级降雨单元的降雨量计算表达式为

$$Q_{S_i}^i = Q \prod_j^{S_i} W_j^{P(i,j)}, i = 1, 2 \cdots 2^{S_i} \quad (1)$$

式中: S_i 为分解层级, $S_i = 1, 2 \cdots n$; $Q_{S_i}^i$ 为分解后第 i 个子单元的降雨量, mm; Q 为总降雨量, mm; $W_j^{P(i,j)}$ 为总降雨量 Q 分解为第 S_i 级的降雨量 $Q_{S_i}^i$ 所对应的分解系数序列,且每组分解系数之和为 1;分解系数

图 1 有界随机级联模型原理图(改自 Tang 等^[11])Fig. 1 Schematic diagram of Bounded Random Cascade model (modified from Tang, et al.^[11])

W 服从对称 Beta 分布,其概率密度函数表达式为

$$P_W(W) = \frac{1}{B(a)} W^{a-1} (1-W)^{a-1} \quad (2)$$

式中: $B(a)$ 为对称 Beta 函数,其中 a 是对称 Beta 函数的唯一参数,对应降雨单元的时间尺度变化,且 $a > 0$,计算表达式为

$$a(t) = a_0 t^{-H} \quad (3)$$

式中: $t = 2^{(n-s_i)} t_0$, 为第 S_i 步分解后的时间尺度, s ; a_0 和 H 为决定参数 a 值的常数,其中 $H \in [0, 1]$ 。

1.2 边坡渗流及稳定性分析

以改进有界随机级联模型分解生成的降雨时间序列作为边坡的上边界条件,采用 GEOSTUDIO 软件的 SEEP/W 模块对该边坡进行渗流分析。Fredlund-Xing 模型^[15]对于全吸力范围内的各种土体类型有较好的适用性^[16],故选用该模型进行土-水特征曲线拟合。其表达式为

$$\theta = \frac{\theta_s C(\psi)}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (4)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \quad (5)$$

式中: θ 为土体的体积含水率, m^3/m^3 ; $C(\psi)$ 为校正因子; θ_s 为土体的饱和体积含水率, m^3/m^3 ; ψ 为土体基质吸力, kPa; e 为欧拉数; α , n 和 m 为土-水特征曲线模型拟合参数; ψ_r 为残余体积含水率 θ_r 对应的基质吸力, kPa。非饱和渗透系数函数经验模型的广义关系式为

$$k = k_s \Theta^p \quad (6)$$

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (7)$$

式中: k 为非饱和渗透系数, m^3/m^3 ; k_s 为土体饱和渗透系数, m^3/m^3 ; p 为模型拟合参数。将边坡渗流分析结果(孔隙水压力分布)用于边坡稳定性分析,采用 Mohr-Coulomb 抗剪强度公式^[17]估算非饱和土体的抗剪强度,计算表达式为

$$\tau = c' + (\sigma_n - \mu_a) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b \quad (8)$$

式中: τ 为抗剪强度, kPa; c' 为有效黏聚力, kPa; $(\sigma_n - \mu_a)$ 为净法向应力, kPa, 即法向应力 σ_n 与孔隙水压力 μ_a 之差; φ' 为有效内摩擦角, ($^\circ$); $(\mu_a - \mu_w)$ 为基质吸力, kPa, 即孔隙水压力 μ_a 与孔隙水压力 μ_w 之差; φ^b 为对应基质吸力的内摩擦角, ($^\circ$)。

1.3 边坡岩土体参数空间变异性表征

边坡各岩土体参数存在空间变异性,采用 K-L 展开法研究岩土体参数 k_s , c' 和 φ' 的固有空间变异性。该方法适用于各种不同类型的土体^[18-20]。选用高斯型自相关函数模拟土体参数空间自相关性^[21],其表达式为

$$\rho = \exp \left(- \left[\left(\frac{\tau_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{\tau_y}{l_y} \right)^2 \right] \right) \quad (9)$$

式中: ρ 为自相关函数; τ_x 和 τ_y 为随机场中研究区域任意两点在水平方向和垂直方向的距离, m; l_x 和 l_y 分别为水平和垂直方向的相关距离, m。K-L 展开公式相关对数正态形式为

$$H_i^{LN}(x, y; \vartheta) = \exp \left[\mu_{\ln i} + \sum_{j=1}^{\infty} \sigma_{\ln i} \sqrt{\lambda_j} f_j(x, y) \chi_{i,j}(\vartheta) \right] \quad (10)$$

式中: $H_i^{LN}(x, y; \vartheta)$ 为参数的相关对数正态随机场; $\mu_{\ln i}$ 和 $\sigma_{\ln i}$ 分别是相应参数随机场变量 i 取对数之后的均值和标准差, $\mu_{\ln i} = \ln \mu_i - 0.5 \sigma_{\ln i}^2$, $\sigma_{\ln i} = \sqrt{\ln \left[1 + \left(\sigma_{\mu_i}^2 / \mu_i^2 \right) \right]}$; $\xi_{i,j}(\vartheta)$ 为第 i 个岩土体参数采用 LHS 方法^[22]随机生成的第 j 个独立标准正态随机变量; ϑ 为外部空间坐标; λ_j 为自相关函数对应的特征值; $f_j(x, y)$ 为其对应的特征向量; χ 为相关标准正态随机变量。为提高计算效率,通常截取 K-L 展开的前 n 项进行计算^[23],其表达式为

$$H_i^{LN}(x, y; \vartheta) = \exp \left[\mu_{\ln i} + \sum_{j=1}^n \sigma_{\ln i} \sqrt{\lambda_j} f_j(x, y) \chi_{i,j}(\vartheta) \right] \quad (11)$$

式中: n 为截断项数,其值与计算精度和自相关函数有关。

1.4 边坡稳定概率分析

将确定性分析得到的边坡安全系数(F_s)用于

边坡失效概率评估。边坡稳定概率分析的极限状态函数为

$$Z = F_s[\chi] - 1 \quad (12)$$

式中: Z 为功能函数; χ 为随机变量, $F_s[\chi]$ 为 χ 对应的安全系数。当极限状态函数小于 1 时, 表示边坡失稳。在此基础上, 采用 LHS 方法抽取 N 个样本, 极限状态函数小于 1 的样本所占比例即为边坡失效概率。计算表达式为

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I\{F_s(\chi) < 1\} \quad (13)$$

式中: N 为 LHS 抽样次数; $I\{\cdot\}$ 为指示函数, $F_s(\chi) < 1$ 时, $I\{\cdot\} = 1$, 否则为 0。

1.5 计算步骤

考虑随机降雨和土体参数空间变异性的边坡稳定概率分析计算流程如图 2 所示。

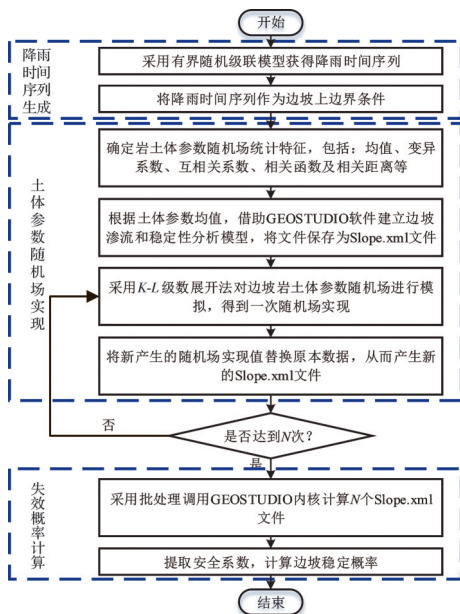


图 2 考虑随机降雨和土体参数空间变异性的边坡稳定概率分析流程图

Fig. 2 Flow chart of slope reliability analysis considering random rainfall and spatial variability of soil parameters

具体步骤如下:

1) 根据日降雨量和模型参数 a_0 和 H 值, 采用有界随机级联模型将日降雨量分解成更小时间尺度的降雨时间序列;

2) 将降雨时间序列作为边坡数值模型的上边界条件;

3) 调查获取边坡相关资料, 确定边坡岩土体参数随机场统计特征, 包括: 均值、变异系数、互相关系数、相关函数及相关距离等;

4) 将边坡岩土体参数值输入 GEOSTUDIO 软件中的 SEEP/W 模块, 进行渗流分析, 并将结果导入 SLOPE/W 模块中, 建立边坡渗流及稳定性分析

模型, 将文件保存为“Slope.xml”;

5) 采用 K-L 展开法离散相关对数正态随机场, 得到一次随机场实现;

6) 将上述所得随机场实现值替换原文件中的岩土体参数值, 产生新的 Slope.xml 文件;

7) 重复步骤 5)~6), 利用蒙特卡罗模拟得到 N 个 Slope.xml 文件;

8) 采用批处理调用 GEOSTUDIO 内核计算 N 个 Slope.xml 文件, 对每个文件进行确定性分析, 计算得到 N 个安全系数结果文件;

9) 提取每个文件中的边坡安全系数, 采用 LHS 方法计算边坡稳定概率。

2 算例

以位于江西省吉安市遂川县高坪镇的卷旋村滑坡为例。该边坡长为 280 m, 高为 100 m, 坡角为 $2^\circ \sim 28^\circ$ 。卷旋村滑坡为两层边坡, 其中上层为残坡积土层, 厚度在 10~25 m 之间, 为全风化黄色花岗岩残积土, 下层基岩为花岗岩。最近 10 年里, 滑坡持续产生蠕变变形, 2020 年 5 月的一场暴雨 (24 h 降雨量 120 mm) 导致该边坡发生显著滑动变形, 之后继续缓慢蠕变。卷旋村滑坡主要包含两种地下水类型: 一种为分布在边坡残破积层中的孔隙水; 另一种为分布在基岩中的裂隙水。又因无明显潜水位, 故取两层边坡交界处作为地下水位。边坡坡顶梯田常年有水下渗, 自上而下形成一条贯通的渗流通道, 入渗点和渗出点位置已在模型中展示, 如图 3 所示。

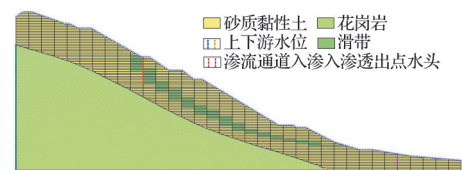


图 3 边坡计算模型

Fig. 3 Diagram of slope model

表 1 给出了该滑坡岩土体力学参数取值情况。其中, 土体重度、黏聚力和内摩擦角的均值取值来源于曾茂宗等^[24]关于卷旋村滑坡的数据。饱和渗透系数的均值来源于文献[25]。根据文献[26-28]确定土体水力参数 k_s 和抗剪强度参数 c' 、 φ' 的变异系数。互相关系数取 $\rho_{c,\varphi} = -0.5$ ^[27]。基质吸力对应的内摩擦角的值取内摩擦角的 $2/3$ ^[29]。该边坡上层残坡积土层为全风化花岗岩, 土体性质为砂质黏性土, 与 Li 等^[30]研究的边坡土体性质相似, 故土-水特征曲线拟合参数采用 Li 等^[30]的数据, 如表 2 所示。

表 1 土体力学参数取值
Table 1 Values of soil mechanical parameters

边坡土层	土体重度 γ / (kN/m^3)	黏聚力 c'/kPa		内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$		饱和渗透系数 $k_s/(\text{m}/\text{s})$		$\varphi_b/(^{\circ})$
		均值 μ	变异系数 COV	均值 μ	变异系数 COV	均值 μ	变异系数 COV	
残坡积土层	18.24	19.19	0.3	18.25	0.2	1.33×10^{-5}	0.5	12.17
滑带	19.54	16.20	0.3	15.07	0.2	1.48×10^{-5}	0.5	10.05
基岩	28.00	2 000		50.00		1.00×10^{-10}		33.33

表 2 土-水特征曲线拟合参数取值
Table 2 Values of fitting parameters for soil-water
characteristic curve

$\theta_s/(\text{m}^3/\text{m}^3)$	α/kPa	n	m	p
0.45	100	1	1	4

2.1 边坡渗流及稳定性分析

采用有界随机级联模型($\alpha_0=4.998, H=0.612$)^[10]将历时 24 h 的 120 mm 降雨进行 2 000 次分解,选取其中 4 次最接近 4 种典型降雨模式(延迟型、减弱型、峰值型和均匀型)的降雨事件,如图 4 所示。

采用 GEOSTUDIO 中 SEEP/W 模块的 Fredlund-Xing 模型进行拟合。边坡上边界为天然降雨,具体边界条件设置如图 3 所示。该边坡共剖分了 7 536 个有限元单元和 7 590 个节点,边坡残坡积土层有限单元尺寸取 1 m×1 m,基岩层由该层上边界的 1 m 向底层边界的 10 m 按比例划分。边坡残坡积土层随机场单元的水平 and 垂直尺寸分别取

8、1 m,基岩层不进行随机场单元格划分。将各参数值输入 GEOSTUDIO 的 SEEP/W 模块,计算 4 种典型降雨类型条件下边坡孔隙水压力分布。

SEEP/W 模块中,总历时 72 h,其中 0~24 h 内无降雨,模拟边坡顶部梯田常年储水下渗对边坡孔隙水压力分布的影响;24~48 h 内模拟 120 mm 大暴雨对边坡孔隙水压力分布的影响;48~72 h 无降雨,模拟边坡顶部梯田常年有水下渗、泉水渗出及降雨重分布对边坡孔隙水压力分布的共同影响。图 5 展示了 4 种典型降雨条件下历时 72 h 后的边坡孔隙水压力分布情况。由图 5 可知,边坡越深,孔隙水压力的数值越大。

以图 4(a)中的延迟型降雨为例,模拟边坡在初始、24、48 和 72 h 末的孔隙水压力分布情况,如图 6 所示。由图 6 可知,在 0~72 h 内,持续的边坡顶部梯田储水入渗及泉水渗出逐步降低了周围土体的负孔隙水压力,对边坡残坡积层的孔隙水压力分布影响较大;降雨分别在 24~48 h、48~72 h 内完成了

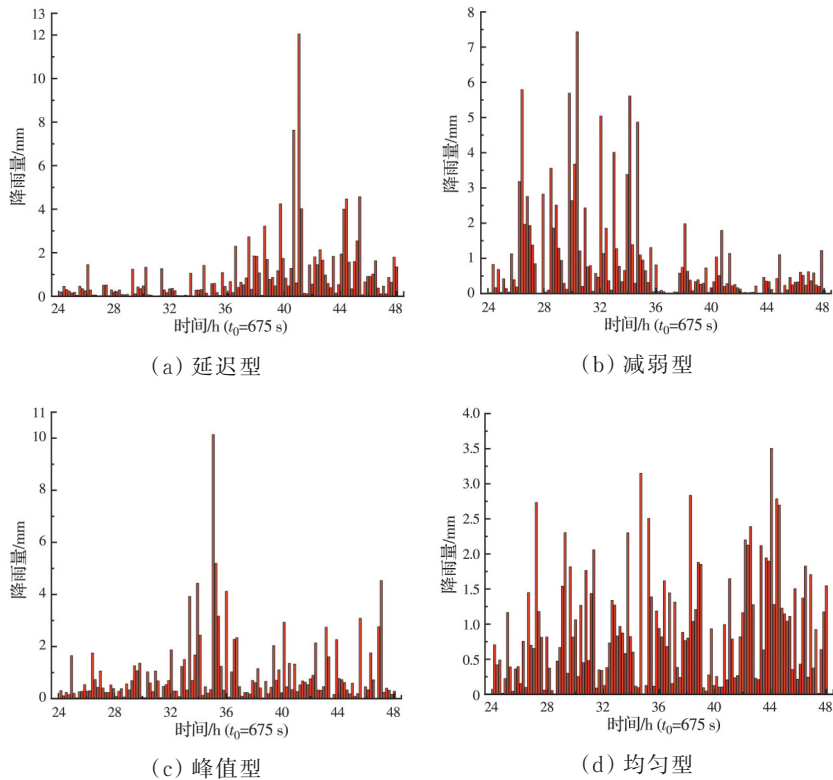
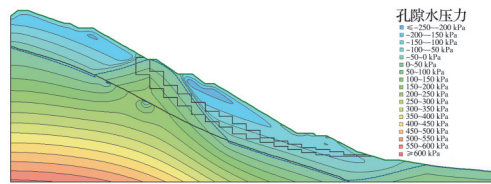
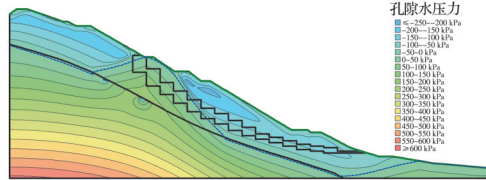


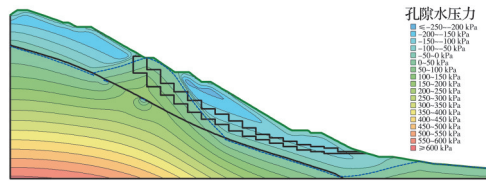
图 4 4 种典型降雨类型
Fig.4 Four typical rainfall patterns



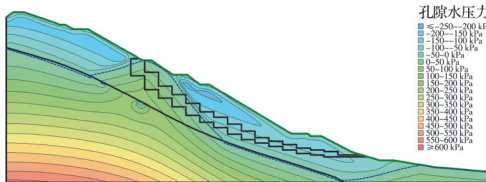
(a) 延迟型降雨孔隙水压力分布



(b) 减弱型降雨孔隙水压力分布



(c) 峰值型降雨孔隙水压力分布



(d) 均匀型降雨孔隙水压力分布

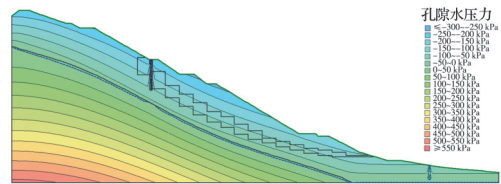
图 5 4 种典型降雨的边坡孔隙水压力分布

Fig.5 Distribution of pore water pressure in slope under four typical rainfall conditions

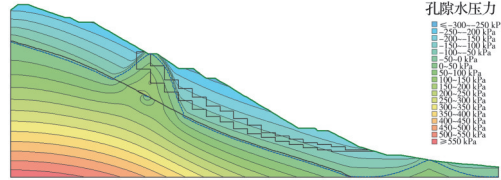
入渗和重分布,改变了边坡表面以下一定深度范围内的孔隙水压力分布;图 6(c)中点 1($x=24\text{ m}$, $z=93.75\text{ m}$)、点 2($x=24\text{ m}$, $z=92.75\text{ m}$)、点 3($x=24\text{ m}$, $z=91.75\text{ m}$)、点 4($x=24\text{ m}$, $z=90.75\text{ m}$)、点 5($x=24\text{ m}$, $z=89.75\text{ m}$)、点 6($x=24\text{ m}$, $z=88.75\text{ m}$)和点 7($x=24\text{ m}$, $z=87.75\text{ m}$),分别为埋深 0~6 m 的点;点 8($x=80\text{ m}$, $z=45.75\text{ m}$)、点 9($x=88\text{ m}$, $z=41.35\text{ m}$)、点 10($x=96\text{ m}$, $z=37.17\text{ m}$)、点 11($x=104\text{ m}$, $z=33.22\text{ m}$)、点 12($x=112\text{ m}$, $z=29.53\text{ m}$)、点 13($x=120\text{ m}$, $z=26.10\text{ m}$)和点 14($x=128\text{ m}$, $z=23.01\text{ m}$),分别为距离边坡顶部储水梯田的水平距离为 0、8、16、24、32、40、48 m 的点。其中,点 1~7 处的孔隙水压力变化主要受降雨入渗和重分布的影响,点 8~14 的孔隙水压力变化主要受边坡顶部梯田储水下渗的影响。

图 7(a)为降雨对边坡孔隙水压力的影响情况。由图 7(a)可知:

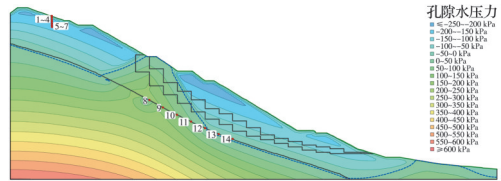
1) 0~24 h 内无降雨,且点 1~7 处的孔隙水压力不受坡顶梯田储水下渗的影响,故点 1~7 孔隙水压



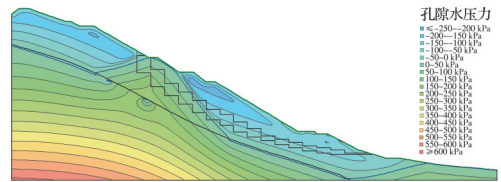
(a) 初始孔隙水压力分布



(b) 24 h 末孔隙水压力分布



(c) 48 h 末孔隙水压力分布



(d) 72 h 末孔隙水压力分布

图 6 边坡孔隙水压力分布

Fig.6 Pore water pressure distributions of the slope

力不变。

2) 24~48 h 内大暴雨,距地表埋深 0 m 的点 1 处实时响应降雨入渗,距地表埋深 1 m 的点 2 处及时响应降雨入渗,其孔隙水压力均在降雨开始后迅速升高。埋深 2、3 m 处的点 3 和点 4 延迟响应降雨入渗,其孔隙水压力在降雨开始一定时间后开始升高。埋深 4~6 m 处的点 5~7 不受降雨入渗影响,孔隙水压力在降雨期间保持不变。

3) 48~72 h 内无降雨,边坡内孔隙水进行重分布,地表点 1 处孔隙水压力迅速下降,埋深 1 m 处的点 2 处孔隙水压力由于上层孔隙水的下渗短暂升高后开始下降。埋深 3~5 m 的点 4~6 处孔隙水压力均逐渐升高,埋深 6 m 处的点 7 处孔隙水压力不受降雨入渗和重分布的影响,在 0~72 h 内保持不变。

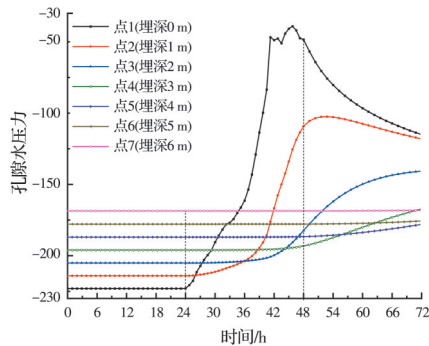
4) 在 72 h 末,点 1~7 处的孔隙水压力均趋于平稳,即降雨重分布在 24 h 内基本完成。

图 7(b)为边坡顶部梯田储水持续入渗对边坡孔隙水压力的影响情况。由图 7(b)可知:

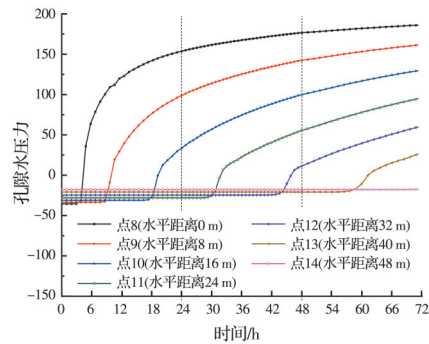
1) 在 0~24 h 范围内,距离边坡顶部储水梯田水平距离 0、8、16 m 的点 8~10 处孔隙水压力开始升

高。在24~48 h范围内,水平距离24、32 m的点11、12处孔隙水压力开始升高。在48~72 h范围内,水平距离40 m的点13处孔隙水压力开始升高。在0~72 h内,水平距离48 m的点14处孔隙水压力不受影响。

2)孔隙水压力上升幅度随时间逐渐减小,点8处的孔隙水压力在72 h末趋于平稳,即孔隙水压力上升幅度几乎为零。



(a) 点1~7处孔隙水压力随时间的变化



(b) 点8~14处孔隙水压力随时间的变化

图7 边坡点1~14处72 h内孔隙水压力随时间的变化
Fig.7 Variation of pore water pressure at locations 1~14 of the slope during 72 h

综上,埋深0~1 m范围内,土体孔隙水压力可及时响应降雨入渗和重分布的影响;历时24 h降雨量120 mm的降雨入渗后,降雨最大下渗深度约3 m;继续历时24 h的降雨重分布,降雨最大下渗深度约5 m;降雨重分布在24 h内基本完成;边坡顶部梯田储水的持续下渗对边坡孔隙水压力的影响范围随时间增大;受边坡顶部梯田储水的持续下渗影响,边坡孔隙水压力升高,但其上升幅度随时间逐渐降低,最终趋近于零。

采用简化毕肖普法进行边坡稳定性分析,得到如图8所示的4种典型降雨条件下边坡安全系数的变化曲线,并和无降雨条件下边坡安全系数随时间变化关系曲线以及均匀降雨(120 mm降雨量对应的均匀降雨)条件下边坡安全系数随时间变化关系曲线进行对比。

由图8(a)可知:

1)无降雨条件下,边坡土体受坡顶部梯田储水下渗影响,单位土壤颗粒重度增大,土体内部孔隙水压力增大,相应的基质吸力(负孔隙水压力)降低,导致边坡稳定性下降。故边坡 F_s 随坡顶梯田储水下渗逐渐降低,由初始的 $F_{s0}=1.2262$ 降低至24 h末的 $F_{s1}=1.0822$ 、48 h末的 $F_{s2}=1.0135$ 及72 h末的 $F_{s3}=0.9591$,且边坡 F_s 的降低幅度随时间逐渐变小。

2)在48 h末,边坡 F_s 在无降雨及降雨条件下的安全系数分别为1.0135和0.9947~0.9957,故降雨诱发了边坡失稳。

3)对比坡顶梯田储水下渗和降雨入渗边坡 F_s 的影响,在0~48 h范围内,坡顶梯田储水使边坡安全系数降低了0.2127,降雨使安全系数降低了0.0865~0.0875,边坡稳定性的主控因素为坡顶梯田储水长期下渗,5月的某日大暴雨是边坡失稳的诱发因素,这一结论与边坡工程实际相符。图8(b)、(c)分别为图8(a)中24~48 h、48~72 h的放大图。

由图8(b)可知:

1)降雨入渗使得边坡土体含水率逐渐上升,与此同时,体积应变增量降低,有效应力降低,孔隙水压力降低。从而导致有利于边坡稳定的基质吸力丧失,进而极大地降低了边坡土体软弱夹层的抗剪强度,进一步降低了边坡安全系数。

2)对比4种典型降雨类型条件下的安全系数变化规律可以发现,均匀型降雨条件下,边坡安全系数与降雨入渗时间的关系曲线基本为直线。延迟型降雨条件下,前期24~40 h降雨量较小时,安全系数降低幅度小,变化曲线在均匀型之上,在40~42 h降雨量较大时,安全系数骤降,变化曲线开始接近均匀型,在42~48 h范围内,安全系数随降雨继续降低,变化曲线与均匀型基本重合。减弱型降雨条件下,安全系数在降雨初期骤降,变化曲线在其余3种降雨类型的安全系数变化曲线下方。峰值型降雨条件下,在24~32 h的降雨量大于延迟型、小于均匀型阶段,安全系数变化曲线在均匀型之上、延迟型之下,在32~37 h的较大降雨量阶段,安全系数骤降至均匀型之下、减弱型之上,在37~48 h阶段,安全系数随降雨持续降低,曲线始终在均匀型和减弱型之间。

3)在48 h末,4种典型降雨类型下的边坡安全系数值差别不大,从大到小排序为均匀型、延迟型、峰值型、减弱型。

由图 8(c)可知:降雨重分布影响了边坡 F_s , 在 48 h 末, 无降雨条件下边坡 F_s 和 4 种典型降雨类型条件下 F_s 的差值在 0.017 8~0.018 8 之间, 经过 24 h 的降雨重分布, 地表孔隙水下渗, 无降雨条件下边坡 F_s 和 4 种典型降雨类型条件下 F_s 的差值缩小至 0.015 2~0.015 6 之间。对比降雨入渗, 降雨重分布对边坡稳定性的影响较小。

图 8 中均匀降雨只能显示降雨强度相等时的降雨事件, 而现实的降雨强度是时刻变换的。采用有界随机级联模型时, 根据需要, 生成若干组不同的降雨时间序列(一个降雨时间序列对应一种降雨模式), 更能反映实际情况。

图 9 为在延迟型降雨条件下边坡完成降雨入渗

(48 h 末)和完成降雨重分布(72 h 末)后采用简化毕肖普法计算的 F_s 和确定的滑动面。由图 9 可知, 降雨结束时的边坡 F_s 为 0.994, 经过 24 h 的降雨重分布, 边坡 F_s 降为 0.944。根据《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000)》(DZ/T 0261—2014)^[31], 滑坡体厚度在 10 m 以内属于浅层滑坡, 在 10~25 m 之间属于中层滑坡, 在 25~50 m 之间属于深层滑坡, 超过 50 m 属于超深层滑坡。卷旋村滑坡的边坡破坏模式和现场勘察资料基本一致: 边坡滑动面基本沿着滑带发生, 长度约 102 m, 最深处约 20 m, 基本属于中层滑坡的圆弧滑动, 滑动面滑入点位于边坡顶部水平距离 $x \approx 80$ m 处, 滑出点位于边坡底部水平距离 $x \approx 160$ m 处。

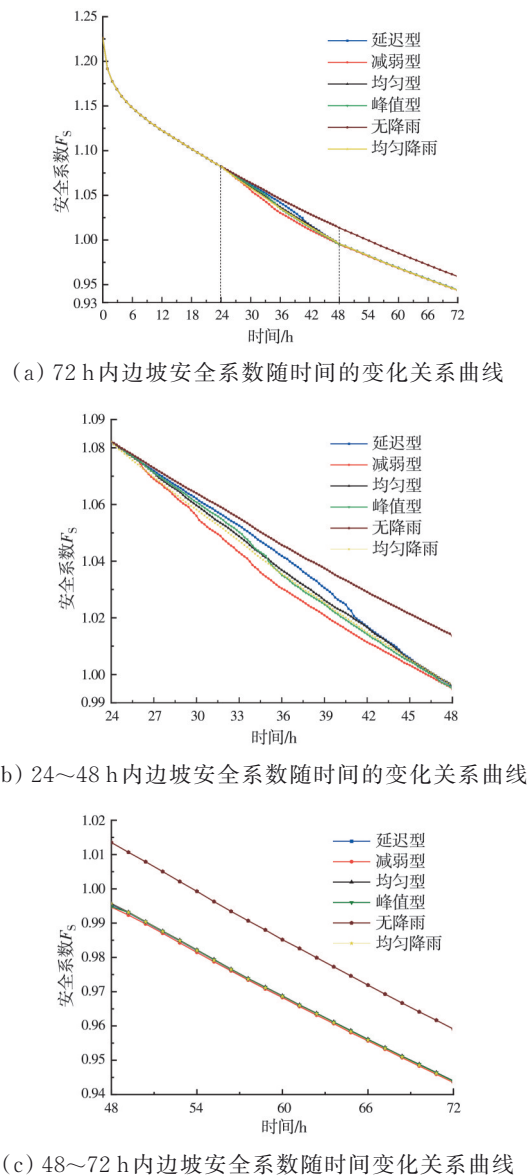


图 8 4 种典型降雨类型及无降雨条件下边坡安全系数随时间的变化关系曲线

Fig. 8 Variation curve of the factor of safety of the slope under four typical rainfall patterns and no rainfall condition

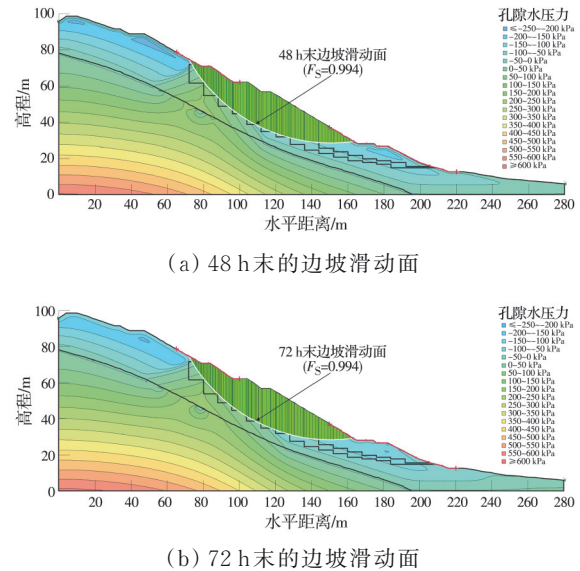


图 9 减弱型降雨条件下 48、72 h 末的边坡滑动面

Fig. 9 Slip surfaces of the slope at the ends of 48 and 72 hours under diminishing rainfall

2.2 边坡确定性分析

采用相关对数正态随机场模拟方法研究参数 k_s 、 c' 和 φ' 的固有空变异性。垂直自相关距离 $l_v = 6$ m^[32], 水平自相关距离 $l_h = 60$ m^[28]。边坡残坡积土区域和滑带区域的截断项数 n_t 分别为 90 和 30 时, 可以保证随机场离散的误差满足精度要求^[23]。采用高斯型自相关函数模拟土体参数空间自相关性时, 随机场网格单元尺寸与自相关距离的比值应小于 0.13~0.17^[33]。卷旋村滑坡随机场网格单元的尺寸为 $8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 故水平方向和垂直方向单元尺寸与自相关距离的比值分别为 $8/60 = 0.133$ 、 $1/6 = 0.167$, 满足该要求。图 10 为土体参数随机场的一次典型实现。

2.3 边坡稳定概率分析

采用 LHS 方法随机产生 2 000 组随机样本, 计

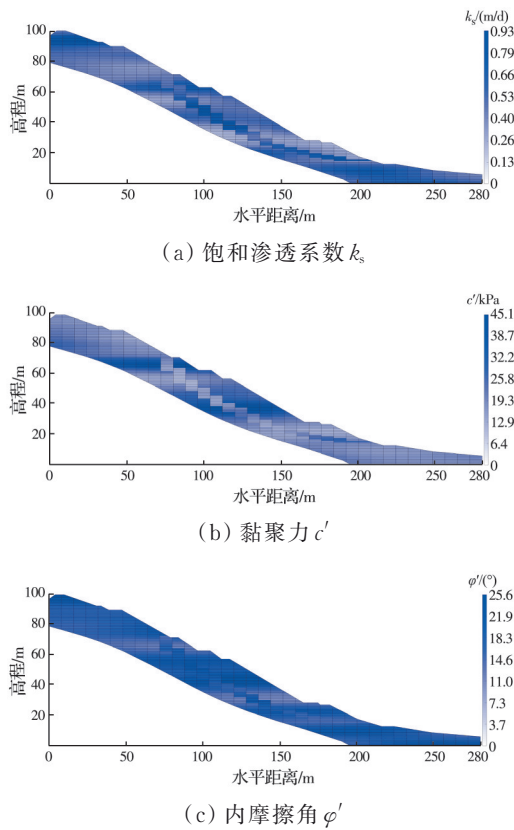


图10 土体参数随机场的典型实现

Fig. 10 Typical realization of the random field of soil parameters

算在延迟型降雨条件下相应的2000组边坡在初始、24、48、72 h末的安全系数,进而计算考虑参数空间变异性的边坡失效概率,如图11所示。计算的边坡失效概率(约2.40%~83.20%)较高,2000次直接LHS方法计算的边坡失效概率完全可以满足计算精度要求。根据U. S. Army Corps of Engineers以失效概率和可靠度指标对岩土工程的性能水平划分标准^[34],且由图11可知,在初始时刻,边坡失效概率为2.4% $>$ 2.3%,边坡稳定性为差(poor);0~24 h范围内,坡顶梯田储水下渗使边坡失效概率增加至6.60% $<$ 7%,边坡的稳定性变差,但与边坡初始状态仍处于同一等级范围(poor);24~48 h范围

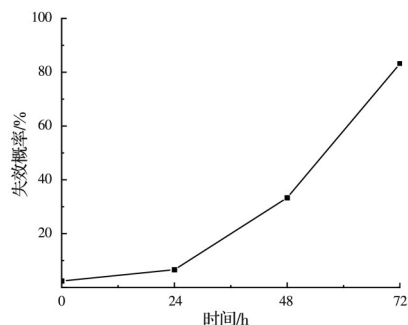


图11 延迟型降雨条件下边坡失效概率的变化关系

Fig.11 Variation relationship of the probability of slope failure under delayed rainfall

内,在坡顶梯田储水下渗和降雨入渗的共同作用下,边坡失效概率增加至33.33% $>$ 16%,边坡发生明显滑动(hazardous);48~72 h范围内,在坡顶梯田储水下渗和降雨重分布的共同作用下,边坡失效概率增加至83.20%,边坡持续蠕滑(hazardous)。这一现象与工程实际相符。由此可证明采用有界随机级联模型能精确模拟随机降雨过程,准确地预测边坡稳定概率需同时考虑降雨的随机性和土体参数的空间变异性。

3 结论

综合渗流理论、随机场理论,利用有界随机级联模型研究了随机降雨下抗剪强度参数 c' 、 φ' 和水力参数 k_s 空间变异性对边坡失效概率的影响,并分析了孔隙水压力和安全系数随时间的变化情况。主要结论如下:

1)边坡顶部梯田储水的持续下渗对边坡孔隙水压力的影响范围随时间增大,但孔隙水压力的上升幅度随时间逐渐降低,最终趋近于零。

2)边坡稳定性的主控因素为坡顶梯田储水长期下渗,5月的某日大暴雨是边坡失稳的诱发因素。对比降雨入渗,降雨重分布对边坡稳定性的影响较小。

3)同时考虑随机降雨和土体参数空间变异性计算得到的边坡失效概率与工程实际相符。由确定性分析得到的滑动面说明卷旋村滑坡的边坡破坏模式和现场勘察资料基本一致。在考虑土体参数空间变异性的同时,采用有界随机级联模型模拟随机降雨过程能准确地预测边坡稳定概率,为降雨作用下考虑土体参数空间变异性的边坡稳定概率分析提供一条有效途径。

考虑了随机降雨和土体参数空间变异性对边坡稳定的影响,研究对象为二维非均质边坡,但当地质条件复杂或岩土体参数空间变异性在三个维度方向均较强时,二维边坡稳定概率分析的结果将与三维的情况存在一定差别。关于三维边坡稳定概率的分析有待进一步研究。

参考文献

- [1] TANG G P, HUANG J S, SHENG D C, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under random rainfall patterns [J]. Engineering Geology, 2018, 245: 322-332.
- [2] PAN M, JIANG S H, LIU X, et al. Sequential probabilistic back analyses of spatially varying soil parameters and slope reliability prediction under rainfall [J]. Engineering Geology, 2024, 328: 107372.

- [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 M, DENG Z P, JIANG S H. 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] 仇文岗, 冉博, 顾鑫, 等. 库水位变化和降雨联合作用下黑水河岸坡稳定可靠度分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(6): 43-51.
- ZHANG W G, RAN B, GU X, et al. Reliability analysis of bank slope stability in the Heishui River under the combined effects of reservoir water level changes and rainfall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(6): 43-51. (in Chinese)
- [5] 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 Z P, ZOU Y, PAN M, 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)
- [6] LI W C, LEE L, CAI H, et al. Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope [J]. Engineering Geology, 2013, 153: 105-113.
- [7] 王秀英, 王朝明, 廖留峰, 等. 基于降雨强度与历时的红层区滑坡降雨阈值分析: 以普洱为例[J]. 气象科技, 2020, 48(5): 758-765.
- WANG X Y, WANG C M, LIAO L F, et al. Rainfall threshold analysis of landslides in red bed areas based on rainfall intensity and duration: Puer as an example [J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(5): 758-765. (in Chinese)
- [8] CHO S E, LEE S R. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9): 756-763.
- [9] GU X, WANG L, OU Q, et al. Efficient stochastic analysis of unsaturated slopes subjected to various rainfall intensities and patterns [J]. Geoscience Frontiers, 2023, 14(1): 101490.
- [10] ZHAO L H, LIU M, SONG Z C, et al. Regional-scale modeling of rainfall-induced landslides under random rainfall patterns [J]. Environmental Modelling & Software, 2022, 155: 105454.
- [11] JIANG H, ZOU Q, JIANG Y, et al. Development of an integrated model for assessing landslide susceptibility on vegetated slopes under random rainfall scenarios [J]. Ecological Engineering, 2024, 199: 107150.
- [12] DE LIMA J L M P, SINGH V P. The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow [J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(7): 817-828.
- [13] MENABDE M, SIVAPALAN M. Modeling of rainfall time series and extremes using bounded random cascades and levy-stable distributions [J]. Water Resources Research, 2000, 36(11): 3293-3300.
- [14] YUAN J, STRAUB D. Probabilistic failure analysis of infinite slopes under random rainfall processes and spatially variable soil [J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2019, 13(1): 20-33.
- [15] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. John Wiley & Sons, 1993.
- [16] 高游, 孙德安. 单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1884-1891.
- GAO Y, SUN D A. Determination of basic parameters of unimodal and bimodal soil water characteristic curves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1884-1891. (in Chinese)
- [17] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [18] 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 slope under water level drop considering multi-parameter spatial variability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(7): 1410-1421. (in Chinese)
- [19] 蒋水华, 曾绍慧, 杨建华, 等. 不排水抗剪强度非平稳随机场模拟及边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1071-1081.
- JIANG S H, ZENG S H, YANG J H, et al. Slope reliability analysis by simulation of non-stationary random field of undrained shear strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1071-1081. (in Chinese)
- [20] 薛阳, 吴益平, 苗发盛, 等. 库水升降条件下考虑饱和和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1709-1720.
- XUE Y, WU Y P, MIAO F S, et al. Seepage and deformation analysis of Baishuihe landslide considering spatial variability of saturated hydraulic conductivity under reservoir water level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1709-1720. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 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 S H, LIU X, HUANG J S, 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)
- [23] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 120-128.
- [24] 曾茂宗, 刘念, 刘杰, 等. 遂川县高坪镇卷旋村滑坡发育特征与变形预测[J]. 山西建筑, 2022, 48(17): 81-84.
- ZENG M Z, LIU N, LIU J, et al. Analysis of developing characteristics and forming mechanism of Juanxuan Village landslide, Gaoping Town, Suichuan County [J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(17): 81-84. (in Chinese)
- [25] LEIJ F J, ALVES W J, VAN GENUCHTEN M T, et al. UNSODA: The UNSODA unsaturated soil hydraulic database: User's manual [M]. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1996.
- [26] 王贺, 张洁, 陈飞扬. 强降雨条件下花岗岩残积土边坡的时变可靠度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(5): 763-767.
- WANG H, ZHANG J, CHEN F Y. Time-dependent reliability of slopes made of completely decomposed granite under intense rainfall [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(5): 763-767. (in Chinese)
- [27] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic analysis of circular tunnels in homogeneous soil using response surface methodology [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(9): 1314-1325.
- [28] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612-624.
- [29] 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 S H, LI D Q, ZHOU C B, et al. Reliability analysis of unsaturated slope considering spatial variability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2569-2578. (in Chinese)
- [30] LI X Y, LIU X, LIU Y D, et al. Probabilistic slope stability analysis considering the non-stationary and spatially variable permeability under rainfall infiltration-redistribution [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(9): 350.
- [31] 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1: 50000): DZ/T 0261—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Specification of comprehensive survey for landslide, collapse and debris flow (1: 50000): DZ/T 0261—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [32] 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)
- [33] CHING J, PHOON K K. Effect of element sizes in random field finite element simulations of soil shear strength [J]. Computers and Structures, 2013, 126: 120-134.
- [34] U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and design: Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering [R]. Department of the Army, Washington, D.C., 1995.

(编辑 王秀玲)