



非饱和土边坡降雨失稳机制及可靠度分析

余子熙¹, 王鑫尧¹, 王 春², 董佳琪¹

(1. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001;

2. 山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原 030002)

摘要:为了探究非饱和土边坡在降雨入渗条件下的动态失稳机理及风险,通过 GeoStudio 软件耦合 SEEP/W 非饱和和渗流模块与 SLOPE/W 极限平衡法,系统分析不同降雨强度下边坡孔隙水压力及安全系数的动态演化规律,并运用蒙特卡洛法量化评估失稳风险。结果表明:降雨强度增加致使浅层非饱和带基质吸力显著衰减,孔隙水压力梯度增大驱动渗流向深部扩展,安全系数呈现“快速下降-渐近稳定”的时变响应。采用蒙特卡洛法对强度参数(黏聚力、内摩擦角)进行概率分析得出,边坡失稳概率随降雨强度增大而显著上升:大雨(50 mm/d)时为 5.9%,暴雨(100 mm/d)时增至 15.4%,大暴雨(200 mm/d)时高达 34.6%,这表明极端降雨会显著加剧土体参数变异性的不利影响,导致边坡稳定性大幅降低。研究阐明了“降雨入渗-非饱和渗流-力学响应”的动态耦合机制。本文研究成果可为非饱和土边坡灾害预警与防治提供理论依据。

关键词:边坡失稳; 非饱和土; 降雨强度; 非饱和渗流; 蒙特卡洛

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)02-0024-07

doi: 10.13402/j.gjcs.2026.02.015

Analysis on rainfall-induced instability mechanism and reliability for unsaturated soil slopes

YU Zixi¹, WANG Xinyao¹, WANG Chun², DONG Jiaqi¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

2. Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Taiyuan 030002, Shanxi, China)

Abstract: In order to explore the dynamic instability mechanism and risk of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration, the dynamic evolution patterns of pore water pressure and safety factors of slopes under different rainfall intensities are systematically analyzed by coupling the SEEP/W unsaturated seepage module with the SLOPE/W limit equilibrium method by means of GeoStudio software, and The Monte Carlo method is used to quantitatively assess the risk of instability. The results indicate that increasing rainfall intensity leads to a significant attenuation of matric suction in the shallow unsaturated zone, and the enlarged pore water pressure gradient drives seepage flow to propagate deeper into the slope. The safety factor shows a time-varying response characterized by “rapid decline followed by asymptotic stabilization.” Probabilistic analysis of strength parameters (cohesion and internal friction angle) using the Monte Carlo method shows that the probability of slope instability significantly increases with higher rainfall intensities, it is 5.9% under heavy rain (50 mm/d), rises to 15.4% under rainstorm (100 mm/d), and reaches 34.6% under torrential rain (200 mm/d). This study indicates that extreme rainfall will significantly intensify the adverse effects of variability in soil

收稿日期: 2025-06-22

基金项目: 辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金-博士科研启动项目)(2024-BSLH-113)

作者简介: 余子熙(2000—),男,硕士研究生,从事边坡稳定性分析研究。

通信作者: 王鑫尧(1987—),男,博士,讲师,从事边坡稳定性分析与评价方面的研究工作。

parameters, leading to a substantial reduction in slope stability. This study elucidates the dynamic coupling mechanism of “rainfall infiltration-unsaturated seepage-mechanical response.” The findings of this study can provide theoretical support for early warning and prevention of unsaturated soil slope hazards.

Key words: slope instability; unsaturated soil; rainfall intensity; unsaturated seepage; Monte Carlo method

在地质灾害防治领域, 降雨引发的边坡失稳问题一直是重要的研究课题^[1]。特别是对于非饱和土边坡而言, 雨水渗透所产生的渗流场与应力场的动态耦合效应, 会显著降低边坡的稳定性。工程实践表明, 降雨过程中, 非饱和区域基质吸力的减弱以及暂态饱和区域的形成, 是造成边坡失稳的关键因素。根据全球地质灾害的统计数据, 降雨导致的非饱和土边坡失稳灾害在同类灾害中占比达到了 90%^[2]。由此可见, 深入探究强降雨环境下非饱和土边坡失稳的动态发展规律具有重要意义。

从力学特性看, 非饱和土区别于饱和土的关键在于其孔隙间存在基质吸力(即负孔隙水压力)。降雨入渗过程中, 负孔隙水压力值趋于增大(绝对值减小), 基质吸力随之同步降低。需特别说明的是, 基质吸力是负孔隙水压力的物理量表达, 其作用效应与饱和土体中的正孔隙水压力形成反向力学机制。依据土力学符号规范, 基质吸力数值等于负孔隙水压力的绝对值, 因此负孔隙水压力的升高过程实质反映了基质吸力的衰减^[3]。目前, 已有大量研究围绕降雨作用下边坡渗流特性及稳定性变化规律展开探讨。刘坤等^[4]研究了年均降雨量、渗透系数各向异性、地下水位及吸力摩擦角对非饱和土边坡稳定性的影响。结果表明, 初始孔隙水压力受上述四者影响各异; 边坡稳定性与年均降雨量和地下水位呈负相关, 且在渗透系数为各向同性时最为稳定, 吸力摩擦角是影响安全系数的关键因素。姚云琦等^[5]通过双重渗透模型与蒙特卡洛模拟, 研究了优势流对降雨入渗边坡可靠度的影响。结果表明, 低雨强时优势流有利于稳定, 高雨强则加剧边坡失稳; 均质入渗破坏受土体空间变异性控制, 而优势流破坏则由湿润峰的快速推进引起; 水力交换系数减小会使边坡更稳定, 但极低值可能引发深层失稳。王骞洵等^[6]基于分形理论, 采用孔隙表面分维来描述非饱和土的孔隙结构, 并结合二维渗流计算分析了

降雨-蒸发循环作用下边坡的浅层破坏机制。结果表明, 基质吸力的变化比体积含水率的变化更为显著, 可作为评价土体扰动程度的关键指标; 孔隙表面分维、进气值与饱和渗透系数均与大气影响深度呈正相关, 而降雨强度的影响相对较小, 边坡浅层破坏主要由土体自身的水力特性所主导。

随着边坡研究的不断深入, 边坡自身复杂地质环境及土体参数固有的不确定性与变异性日益受到关注。传统分析方法所得安全系数, 往往难以准确反映边坡的实际安全状态。边坡可靠度分析是在传统定值法基础上发展而来的方法, 借助概率手段量化各类不确定性因素对稳定性的综合影响, 有效提升了评估结果的准确性与可靠性。因此, 本文基于 GeoStudio 软件, 以某露天磷矿高边坡为研究对象, 模拟分析不同降雨强度下孔隙水压力及安全系数的动态演化过程, 并采用蒙特卡洛法对其失稳风险进行概率量化, 旨在为降雨条件下边坡稳定性可靠度评估提供参考。

1 非饱和边坡及可靠度计算原理

1.1 非饱和计算原理

降雨入渗过程可视为由非饱和状态向饱和状态演化的动力学行为, 该过程符合达西定律的渗流本构关系, 其控制方程为非饱和土渗流微分方程^[7]。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_i^3 k_r(h_c) \right] + Q = \left[C(h_c) + \frac{\theta}{n} S_s \right] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中: x_i 、 x_j 分别为 i 和 j 方向上的位置坐标; k_{ij}^s 为不同方向的饱和渗透系数, m/s; k_i 为渗透系数分量, m/s; k_r 为相对透水率; h_c 为压力水头, m; Q 为源汇项; C 为容水度; S_s 为单位贮水量, m^3 ; β 为非饱和常数; θ 为体积含水率; n 为孔隙率; t 为时间, s。

1.2 非饱和抗剪强度原理

非饱和土体抗剪强度公式^[8]:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: τ_f 为非饱和土体的抗剪强度, kPa; c' 为有效黏聚力, kPa; φ' 为有效内摩擦角, ($^\circ$); σ_n 为法向应力, kPa; u_a 、 u_w 为孔隙气压力、水压力, kPa; φ^b 为材料属性。

1.3 蒙特卡洛可靠度分析

蒙特卡洛模拟法^[9](又称统计试验法或随机模拟法)是一种基于数理统计原理的随机抽样技术。该方法广泛应用于众多领域,在边坡稳定可靠度分析中具有显著优势。其在边坡稳定可靠度分析的基本原理如下。

$$F_s = F_s(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{R(x_1, x_2, \dots, x_n)}{S(x_1, x_2, \dots, x_n)} \quad (3)$$

式中: F_s 为安全系数; R 为抗滑力, kN; S 为下滑力, kN; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为一列表征计算参数,包括重度、黏聚力、摩擦系数、孔隙水压力、荷载强度、降雨强度等。在实际工程应用中,上述参数的取值存在不同程度的变异性,故应作为随机变量处理。这些随机变量通常服从特定的概率分布规律(如正态分布或对数正态分布)。

首先对各参数进行随机抽样,生成 n 维样本组 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,代入既定计算模型[式(3)]得到单个安全系数随机样本 F' 。蒙特卡洛模拟的具体流程:重复上述抽样与稳定性计算步骤 N 次,直至模拟结果达到预设精度标准,由此生成包含 N 个独立安全系数样本的序列 $F_2, F_2, \dots, F_N$ 。失稳判据定义:设定边坡失稳的临界安全系数值为 F_{cr} 。统计该序列中所有样本值 F_s ,筛选满足 $F_s < F_{cr}$ 的样本个数为 M 。边坡的破坏概率 P_f 由下式给出:

$$P_f = \frac{M}{N} \quad (4)$$

2 工程实例

2.1 工程概况

云南省某露天磷矿东采区高边坡所在区域地质结构复杂。坡体表层主要为残坡积层土体覆盖,平均厚度约为 20 m;下伏基岩以白云岩、砂质白云岩为主,局部发育薄层状磷块岩及页岩夹层。此外,坡面广泛分布第四系松散堆积物与粉质黏土

层。随着开采作业向深部推进,东采区已形成最大高度超 200 m 的高边坡,其典型特征表现为因台阶式开挖形成 30 m 级高差,边坡坡面角范围为 $42^\circ \sim 51^\circ$,具备高边坡典型工程地质特征(图 1)。

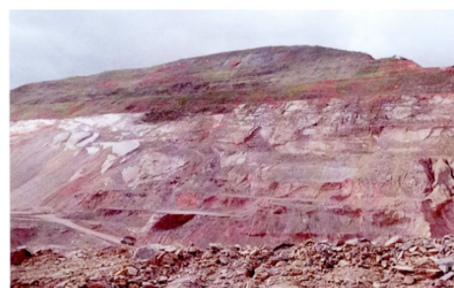
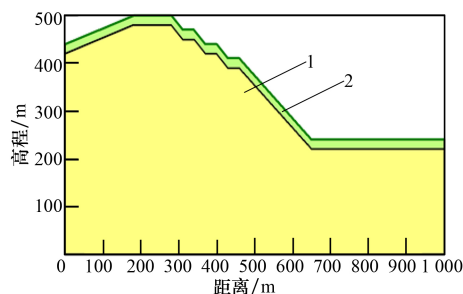


图 1 东采区高陡边坡

矿区属亚热带季风气候,降水和温度均呈现明显的季节性波动。冬季以干旱少雨为主要特征,夏季则呈现高温湿润、降水充沛的特点。该地区多年平均气温约为 15°C ,年降雨量达 950 mm;其中 5–10 月为集中降雨期(占全年降水量的 75% 以上),7 月单月平均降雨量超过 200 mm。鉴于降雨是诱发边坡失稳的关键因素,开展降雨与边坡滑坡的相关性研究,对该矿山高边坡稳定性分析具有重要意义。

2.2 模型构建

基于露天磷矿典型剖面构建计算模型,旨在分析不同降雨条件下瞬态渗流场对边坡稳定性的影响。典型剖面取自工程勘察报告及初步设计文件,构建的模型如图 2 所示。模型空间范围自上而下划分为两个区域:上部为残坡积层,下部为白云岩及砂质白云岩;模型坡脚至右边界设定为 350 m(约为坡高的 1.35 倍), x 轴方向宽度为 1 000 m, y 轴方向垂直高度为 440 m。经网格离散后,模型共划分 10 107 个节点和 9 901 个单元。为模拟强降雨过程中边坡内部渗流场的动态演变,



材料: 1—白云岩; 2—残坡基岩。

图 2 边坡模型

模型顶部边界施加降雨边界条件，侧边与底面设置零流量边界条件。初始水头值可根据钻孔资料、地质勘察成果或工程类比确定，或通过稳态渗流模拟计算结果提供。

2.3 工况设计

结合矿区夏季湿热多雨、5－10 月为雨季集中期且 7 月平均日降雨量达 200 mm 的气候特征，为研究强降雨条件下边坡孔隙水压力及安全系数的动态演化规律，参考国家气象部门对降雨强度的划分标准，故选取接近 7 月平均日降雨量强度的大暴雨(200 mm/d)，以及强度递减的暴雨(100 mm/d)、大雨(50 mm/d)3 种降雨工况。同时，依据矿区雨季降雨持续时间特征，设定 5 d 的降雨时长作为研究工况，以贴近实际降雨过程进行分析。

2.4 岩土层物理参数

地质勘察结果显示，该边坡由表层土体与下伏基岩组成，工程地质分层表征显著：表层为残坡积层，下伏基岩以白云岩夹砂质白云岩为主。为开展边坡稳定性分析，采用摩尔－库伦弹塑性本构模型进行数值模拟；同时，通过现场取样开展系列室内试验(包括直剪试验和渗透试验)，系统测定两类介质的抗剪强度指标及渗透特性参数^[10]，具体试验结果如表 1 所示。

鉴于降雨入渗过程中非饱和土体的水力特性呈现显著非线性特征，基于非饱和土力学理论，研究采用 Van Genuchten 模型^[11]构建非饱和土的土水特征曲线及渗透系数函数，为准确模拟降雨条件下边坡渗流场演变规律提供基础参数支持。

3 计算结果分析

3.1 自然状态下边坡稳定性分析

根据《滑坡防治工程勘察规范》(GB/T 32864—2016)的技术要求，滑坡稳定性评价采用四级分类标准(表 2)，具体分为不稳定、欠稳定、基本稳定与稳定状态。其中： F_{st} 为稳定性安全系

数； F_{st} 为饱和状态下的临界稳定系数。本文基于边坡稳定性保障与工程经济效益的双重目标，将临界安全系数基准值 F_{st} 确定为 1.20。采用 Morgenstern-Price 法计算磷矿高边坡在自然状态下的稳定性，得出其安全系数为 1.314(图 3)。对照表 3 的边坡稳定性状态划分标准，该计算值大于规定的临界安全系数阈值 F_{st} ，表明自然状态下的边坡处于稳定状态。

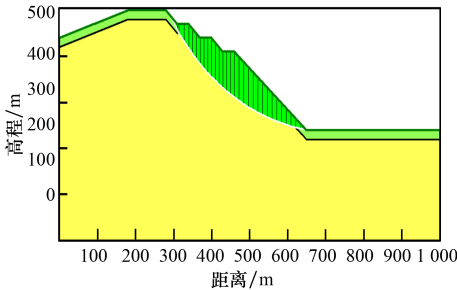


图 3 自然状态下边坡安全系数

3.2 降雨状态下边坡渗流分析

3.2.1 边坡孔隙水压力变化规律

边坡初始状态孔隙水压力如图 4 所示。由图 4 可知：初始状态下，边坡孔隙水压力呈负值分布，表明土体处于非饱和状态，此时基质吸力是维持边坡稳定的关键因素。降雨入渗后，孔隙水压力呈现显著的时空分异特征。模拟初期，表层土体孔隙水压力变化最为剧烈；随着深度增加，其变化幅度逐级衰减，响应滞后效应愈发明显。大暴雨(200 mm/d)工况下，坡体浅层孔隙水压力快速从－3 000 kPa 升至 0 kPa，形成暂态饱和区；相比

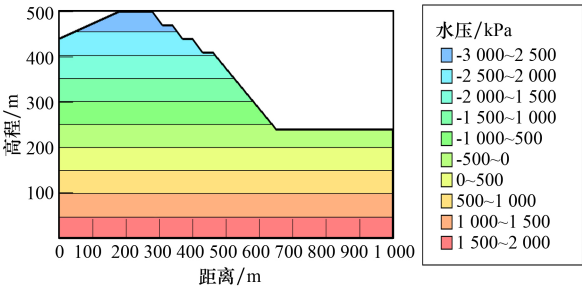


图 4 初始状态孔隙水压力

表 1 岩土体物理参数

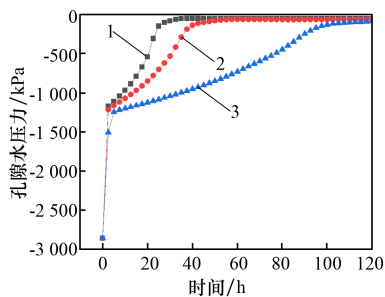
土(岩)名称	天然容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	饱和渗透系数/ ($\times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	体积含水量
白云岩、砂质白云岩	27.6	119	29.9	3.6	0.06
残坡积层	20.0	20	18.0	500.0	0.30

表 2 边坡稳定性状态划分

稳定性系数	稳定状态
$F_s < 1.00$	不稳定
$1.00 < F_s \leq 1.05$	欠稳定
$1.05 < F_s \leq F_{st}$	基本稳定
$F_s \geq F_{st}$	稳定

之下,暴雨(100 mm/d)和大雨(50 mm/d)工况下,孔隙水压力的响应速度与增幅均依次减弱,深层土体的滞后效应更突出。该结果验证了非饱和土渗流理论的基本观点:当降雨强度大于土体入渗能力时,土体将形成饱和区域。

图 5 为不同工况下孔隙水压力随时间变化曲线。由图 5 可知:不同降雨强度下,孔隙水压力的分布范围和强度均与降雨强度呈正相关关系;同时,孔隙水压力随时间呈非线性增长特征。以特大暴雨工况为例,降雨开始后前 24 h 内,孔隙水压力增速高达 120 kPa/h;之后因土体趋近饱和,增速显著放缓,这反映了深部渗流的滞后特性。其内在机理:降雨入渗提升了非饱和土体的含水率,水分填充孔隙空间致使基质吸力降低,从而驱动孔隙水压力上升。总体而言,降雨强度越大,入渗量越充足,孔隙水压力的上升速率越快,影响范围也越广。



1—大暴雨; 2—暴雨; 3—大雨。

图 5 不同工况下孔隙水压力随时间变化曲线

3.2.2 边坡稳定性变化规律

图 6 为不同工况降雨强度下边坡安全系数,图 7 为安全系数随时间变化曲线。由图 6、7 可知:在降雨条件下,边坡稳定性呈现显著的动态变化规律:其安全系数 F_s 随降雨时长变化,表现出“快速下降后缓速趋稳”的两阶段特征。具体而言,降雨初期 F_s 值迅速降低,大约在第 50 小时逐渐趋于平稳。不同降雨强度对 F_s 的影响存在

显著差异:当降雨强度为 50 mm/d 时, F_s 最终稳定于 1.221,较初始值下降约 7%;当降雨强度增至 100 mm/d 时, F_s 降至 1.141,降幅达 13.2%;而在 200 mm/d 的极端降雨工况下, F_s 最终稳定于 1.043,较初始值大幅下降 20.6%。

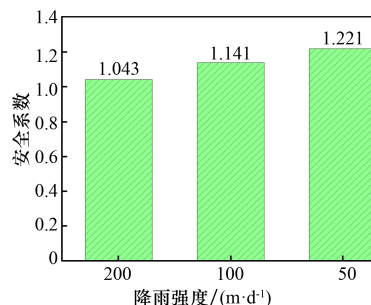
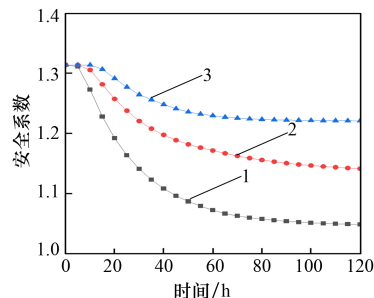


图 6 不同工况降雨强度下边坡安全系数



1—大暴雨; 2—暴雨; 3—大雨。

图 7 安全系数随时间变化曲线

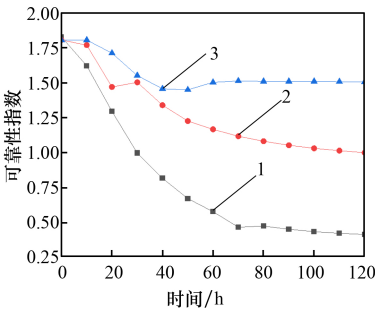
孔隙水压力升高驱动土体抗剪强度下降,是这一变化趋势的核心机制。降雨入渗作用下,坡面孔隙水压力持续上升(伴随体积含水率的增加),渗流场逐步向坡体深部延伸。孔隙水压力增大直接削弱了土体的有效应力,进而显著降低土体抗剪强度。最终,抗滑力减弱与下滑力增强相互作用,致使边坡稳定性在持续降雨过程中持续劣化。因此,降雨强度增大直接加剧了孔隙水压力的上升程度,进而导致安全系数大幅衰减,边坡失稳概率随之显著升高。

3.3 蒙特卡洛法边坡失稳概率分析

为精确量化降雨引发的边坡失稳风险,采用蒙特卡洛法对土体抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 其正态分布特征如表 3 所示)进行 10 000 次随机抽样模拟。图 8、9 分别为可靠性指数、失效概率随降雨强度变化的曲线。由图 8、9 可知:边坡失效概率随降雨强度增加呈指数增长趋势。具体而言,在大暴雨(200 mm/d)、暴雨(100 mm/d)和

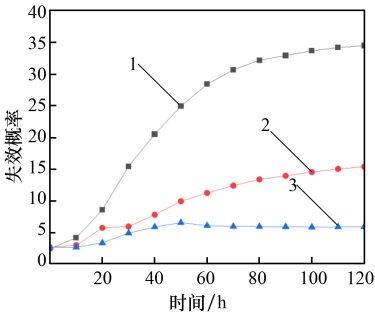
表 3 岩土抗剪强度参数统计

土(岩)名称	黏聚力		内摩擦角	
	均值/(kN·m ⁻³)	标准差/%	均值/(kN·m ⁻³)	标准差/%
白云岩、砂质白云岩	119	17.85	29.9	4.49
残坡积层	20	3.00	30.0	3.00



1—大暴雨；2—暴雨；3—大雨。

图 8 可靠性指数随时间变化曲线



1—大暴雨；2—暴雨；3—大雨。

图 9 失效概率随时间变化曲线

大雨(50 mm/d)3 种工况下, 边坡失效概率依次为 34.6%、15.4% 和 5.9%。不同降雨强度下失效概率的显著差异, 充分体现了降雨强度对边坡稳定性风险的关键主导作用。强降雨通过导致孔隙水压力骤增, 严重弱化土体抗剪强度, 最终使边坡失稳风险急剧升高。这一分析定量揭示了不同降雨强度下边坡失稳的潜在风险特征, 为灾害预警与防治决策提供了重要依据。

4 结 论

(1) 降雨强度与边坡稳定性系数呈显著负相关, 且稳定性系数的降幅随降雨强度增大呈非线性扩展; 当降雨强度为 50、100、200 mm/d 时, 边坡稳定性系数最终分别下降约 7%、13.2% 和 20.6%, 表明降雨强度越大, 边坡稳定性损失越

严重。

(2) 降雨强度是控制边坡渗流场与应力场耦合作用的关键因素。极端降雨工况下, 边坡表层非饱和区基质吸力快速丧失, 孔隙水压力梯度增大, 促使暂态饱和区形成并引发渗流路径向坡体深部迁移, 最终导致抗剪强度参数(黏聚力、内摩擦角)弱化。稳定性系数随降雨时长呈现“快速下降-缓速趋稳”的两阶段特征。

(3) 基于 10 000 次蒙特卡洛模拟的可靠度分析表明:失效概率与降雨强度呈显著正相关。大暴雨(250 mm/d)、暴雨(100 mm/d)、大雨(50 mm/d) 工况下, 边坡失效概率依次为 34.6%、15.4%、5.9%, 定量揭示了不同降雨强度下的边坡风险阈值, 为灾害预警提供了风险量化的科学依据。

参考文献:

[1] 张小东,路喆津,刘敏,等. 强降雨作用下引入分形理论的浅层边坡入渗及稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(11):140-150.

[2] 覃泉雄,冯健雪,甄键,等. 降雨条件下非饱和土边坡稳定性分析[J]. 路基工程,2024(6):15-20.

[3] 郑开欢,罗周全,罗成彦,等. 持续暴雨作用下排土场层状碎石土边坡稳定性[J]. 工程科学学报,2016,38(9):1204-1211.

[4] 刘坤,韩长玉,郝艺丹,等. 基于降雨入渗的非饱和土边坡稳定性影响因素分析[J]. 水电能源科学,2022,40(10):183-186.

[5] 姚云琦,曾润强,马建花,等. 考虑优势流作用的降雨入渗边坡可靠度分析[J]. 岩土力学,2022,43(8):2305-2316.

[6] 王骛洵,蒋函静,许帅,等. 降雨入渗下非饱和土边坡浅层破坏机制分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(7):2701-2711.

[7] 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.

- [8] 柳伟,徐长节,胡世韬,等. 降雨和库水位升降条件下考虑非饱和渗透系数空间变异的边坡可靠度分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):61-72.
- [9] 黄立新,李成,郭伟龙. 基于蒙特卡罗法的黄土滑坡概率与可靠度分析:以榆林市朝阳路滑坡为例[J]. 灾害学,2025,40(1):74-79.
- [10] 刘殿柱. 爆破振动作用下尖山磷矿高边坡动态响应研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
- [11] 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;443.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。