DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2026.05.001 文章编号:1671-2579(2026)05-0001-09

降雨诱发土质边坡失稳的雨型响应及可靠度分析

吴煜[1,2],冯学茂[3*],王洋[4],鲁润妮[4],韦慧[4]

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.广西新发展交通集团有限公司,广西 南宁 530029;
3.广西国土资源规划设计集团有限公司,广西 南宁 530000;4.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为深入研究不同降雨雨型对土质边坡稳定性的影响规律,并预测边坡的失效概率。首先,该文基于非饱和流-固耦合理论,拟定均匀型、递增型、递减型、凸峰型和凹峰型5种雨型方案,探讨了不同雨型对土质边坡地下水位、饱和度、水平位移和稳定性系数影响的变化规律;其次设计正交试验进行边坡稳定的敏感性分析,通过极差分析确定敏感因素;最后选择敏感因素为随机变量,结合Monte Carlo法和神经网络预测模型,计算不同雨型下土质边坡的失效概率和可靠概率。结果表明:强降雨期间,不同雨型对土质边坡非饱和渗流场、位移场和稳定性呈现出复杂的非均匀时空分布,安全系数变化过程受雨强、持时与雨型共同影响,应重点考虑降雨诱发边坡失稳的雨型响应过程。各因素对边坡稳定性的影响由强到弱依次为有效内摩擦角、有效黏聚力、杨氏模量和泊松比。递增型降雨对边坡稳定性的降低作用明显,且递增型的失效频率最大(16.529%),凸峰型、凹峰型、均匀型的失效频率依次衰减,递减型的失效频率最小(3.624%)。研究成果可为不同雨型下土质边坡的稳定性防治及安全预警提供一定参考依据。

关键词:边坡工程;流-固耦合;雨型;正交试验;神经网络;失效概率

中图分类号:U416.167 **文献标志码:**A

Rainfall pattern response and reliability analysis of rainfall-induced soil slope instability

Wu Yu[1,2], Feng Xuemao[3*], Wang Yang[4], Lu Runni[4], Wei Hui[4]

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;
2. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China; 3. Guangxi Land and Resources Planning and Design Group Co., Ltd. Nanning, Guangxi 530000, China; 4. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: This paper aims to deeply study the influence of different rainfall patterns on soil slope stability and predict slope failure probability. Firstly, based on the unsaturated fluid-solid coupling theory, five rainfall pattern schemes of uniform, increasing, decreasing, convex peak and concave peak patterns were developed, and the variations of the groundwater level, saturation, horizontal displacement and stability factor of soil slopes under different rainfall patterns were discussed. Then, the orthogonal test was designed to perform the sensitivity analysis of slope stability, and sensitive factors were determined through range analysis. Finally, the sensitive factors were selected as random variables, and the failure probability and reliability probability under different rainfall patterns were calculated by combining the Monte Carlo method and neural network prediction model. The results show that during heavy rainfall, the unsaturated seepage field, displacement field and stability of soil slopes under different rainfall patterns show a complex non-uniform spatiotemporal distribution. The variation process of the safety factor is jointly affected by rainfall intensity, duration and rainfall patterns. Emphasis should be placed on considering the rainfall pattern response process of slope instability induced by rainfall. The effects of various factors on slope stability from strong to weak levels are the effective internal friction angle, effective cohesion, Young's modulus and Poisson's ratio. The increasing pattern obviously

收稿日期:2025-04-09 **修回日期:**2026-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278436);湖南省教育厅重点项目(编号:24A0241);湖南省青年科技人才项目(编号:2022RC1024)

作者简介:吴煜,男,高级工程师.E-mail:215446120@qq.com

***通信作者:**冯学茂,男,博士.E-mail:407352709@qq.com

reduces the slope stability, and has the largest failure frequency (16.529%), the convex peak, concave peak and uniform patterns have sequentially attenuating failure frequency, and the decreasing pattern has the smallest failure frequency (3.624%). The research results can provide certain reference for the stability prevention and safety early warning of soil slopes under different rainfall patterns.

Keywords: slope engineering; fluid-solid coupling; rainfall pattern; orthogonal test; neural network; failure probability

0 引言

边坡失稳是一种普遍存在、频繁发生、破坏剧烈的世界性自然灾害，在工程上较为频发、破坏范围大、影响程度高，常给人民群众生命财产安全带来不可估量的损失。随着极端强降雨出现的频率越来越大，中国由降雨直接诱发或与降雨强度相关的滑坡事故，约占滑坡总数量的90%[1]，大量滑坡实例及相关事故报道表明，边坡失稳多集中在雨季[2-3]。

降雨诱发边坡渐进失稳是典型的非饱和流-固耦合过程，相关文献[4-6]揭示了边坡变形及稳定性变化与降雨入渗过程密切相关：一方面，雨水沿土体孔隙通道入渗至边坡内部，逐渐驱替土体孔隙内的空气，引起非饱和区土体重度和孔隙水压力的增加，以及地下水位的抬升，导致其基质吸力和有效应力的降低，从而造成土体抗剪强度降低、边坡稳定性下降[7-8]；与此同时，渗流场与应力场相互耦合，降雨入渗的过程伴随着土体变形的产生，土体变形会引起土体水分运移通道和渗流过程发生改变[9]。大量研究[10-11]侧重于分析不同雨强和持时下土质边坡稳定性的动态演化规律和破坏机制，然而，一些学者[12-13]通过统计滑坡灾害与降雨雨型的对应关系，发现降雨诱发边坡失稳不仅与雨强、持时有关，还与雨型有关，强降雨期间应重点关注降雨触发滑坡灾害的雨型特征。因此，如何合理反映非饱和流-固耦合作用下土质边坡的雨型响应过程，归纳雨型与边坡稳定性的关系有待深入研究。

目前，降雨诱发边坡失稳的研究多采用确定性分析方法，即假定土体参数为恒定值并均匀分布。但实际工程中由于土体存在物质组成、空间分布、沉积条件和应力历史等差异，土体参数表现出显著的不确定性和变异性，其随机性会对边坡稳定性产生不可忽视的影响[14]。随着一次二阶矩概率法、随机有限元法、响应面法、Monte Carlo抽样法和机器学习预估法等可靠度评估方法的发展，许多学者[15-17]据此开展了大量针对土体参数变异性对边坡可靠度影响的探讨。然而，作为坡体失稳的重要诱因，现有研究中对于考虑随机性的降雨条件分析较少，特别是不同雨型下边坡失效概率的相关成果鲜见。实际上，不同的雨型会使得坡体的失效概率以及失效时间存在较大差异，进而影响边坡防护工程的决策。因此，有必要在基于边坡可靠度随机性评估方法的基础上，进一步针对降雨雨型影响边坡失效概率的规律开展研究。

本文拟定均匀型、递增型、递减型、凸峰型和凹峰型5种雨型方案，基于非饱和流-固耦合理论，建立三维边坡数值模型，运用FLAC^{3D}探讨了土质边坡非饱和渗流场、位移场和稳定性的雨型响应过程。以确定性分析为基础，对有效黏聚力、有效内摩擦角、杨氏模量和泊松比进行4因素5水平正交试验设计，通过极差分析获得边坡稳定的敏感因素。采用Monte Carlo法对敏感因素进行随机抽样，结合BP神经网络预测模型，预测不同雨型下边坡的失效概率和可靠概率，以期为不同降雨雨型下边坡防治及安全预警提供参考。

1 研究方法

1.1 非饱和流-固耦合理论

在应用有限差分FLAC^{3D}进行非饱和流-固耦合模块（忽略孔隙气压力的影响）[18]计算时，非饱和渗流变形的计算过程遵循Darcy定律[19]：

$$q_i = -k_{il}k(s)\left[p_w - \rho_f x_j g_j\right]_{,l} \tag{1}$$

式中：q_i为单位流量，i=1～3，j=1～3，l=1～3；k_{il}为介质的饱和渗透系数张量；$k(s)$为介质的相对渗透系数，$k(s)=s^2(3-2s)$；p_w为孔隙水压力，ρ_f为流体密度；x_j为笛卡尔坐标；g_j为重力加速度分量；s为饱和度。

在降雨入渗过程中，渗流场中的孔隙水压力和饱和度通过Biot理论与应力场中流体的体积改变量建立联系，其三者关系如下：

$$\frac{1}{s}\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{M}\frac{\partial u_w}{\partial t} + \frac{n}{s}\frac{\partial s}{\partial t} + \alpha\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \tag{2}$$

式中：ζ为孔隙水运移过程中发生的流体体积改变

量；M为比奥模量；n为孔隙率；t为时间；α为比奥系数；u_w为孔隙水压力；ε为应变。

饱和度和渗透系数随基质吸力的变化规律是非饱和渗流计算不可或缺的水力参数，其非饱和参数常采用经典的VG模型（Van Genuchten模型）拟合土水特征曲线，并根据饱和度与体积含水率的关系，换算VG模型关系式为[20]：

$$\frac{s-s_r}{1-s_r}=\left[1+(\psi/a)^n\right]^{-m} \tag{3}$$

式中：s、s_r分别为饱和度、残余饱和度；ψ为基质吸力；a、n、m为曲线拟合参数，满足$0<m=1-1/n<1$。

其非饱和区渗透系数定义为相对渗透系数与饱和渗透系数的乘积：

$$k=k_s k(s)=k_s s^2(3-2s) \tag{4}$$

公式(1)～(4)为非饱和渗流分析的基本理论，再结合动态变化的降雨入渗边界条件，构成了饱和-非饱和渗流场模块。

计算渗流影响区域后，需考虑非饱和区土体基质吸力对抗剪强度的影响，再通过强度折减法计算对应瞬态渗流步下的稳定性系数，其中，非饱和土质边坡的抗剪强度采用基于双应力状态的非饱和抗剪强度理论[21]：

$$\tau=c'+(\sigma-u_a)\tan\varphi'+(u_a-u_w)\tan\varphi^b \tag{5}$$

式中：c'和φ'分别为有效黏聚力和有效内摩擦角；$(\sigma-u_a)$和(u_a-u_w)分别为破坏面的净法向力和基质吸力；φ^b为非饱和抗剪强度随基质吸力增加的速率。

此时，边坡的安全系数为：

$$F_s=\frac{\tau}{\tau'} \tag{6}$$

式中：τ为滑动破坏面的抗剪强度；τ'为滑面实际剪切力。

1.2　基于Monte Carlo法的神经网络预测模型

人工神经网络由输入层、隐含层和输出层构成，是一种模仿生物学中神经元传递信号的行为特征。在人工神经网络中，使用最为普遍的是反向传播（Back Propagation，BP）神经网络，BP神经网络在外部输入样本的刺激下不断改变神经网络的连接权重，以使实际输出信号不断地接近期望输出信号。其适合处理模糊的、非线性的预测模拟问题，其人工神经元的基本组成如图1所示，图中$X=(X_1,X_2,\cdots,X_n)$代表输入信号向量，$W=(W_1,W_2,\cdots,W_n)$代表输入信号的连接权重向量，θ代表阈值，激活信号通过图中$f(*)$的形式输入，最终神经元输出信号Y的表达式为：

$$Y=f(W^{\mathrm{T}}X-\theta) \tag{7}$$

式中：激活函数$f(*)$通常包括阈值型、分段线性型、Sigmoid函数型和Tan函数型四大类，而Sigmoid函数型具有高度的非线性特征，常用于边坡位移预测及可靠度研究，其激活函数为：

$$f(x)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-x}} \tag{8}$$

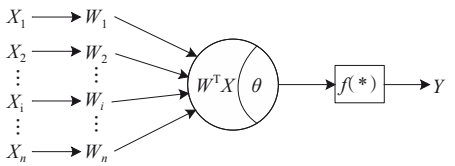


图1　神经元结构图

Figure 1　Neuron structure

期望输出和实际输出的误差函数E可用最小平方差来表示[式(9)]，并将E作为损失函数，即其迭代至局部最优时模型收敛。

$$E=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{l}(T_{ij}-Y_{ij})^2 \tag{9}$$

式中：T_{ij}为目标（期望）输出值；Y_{ij}为网络实际输出值。

在神经网络学习过程中，将上一次权重调整值的一部分叠加到本次误差的计算权重调整值，为降低学习过程中网络对误差曲面局部敏感性，抑制网络出现局部最优解，在连接权重向量上附加一个权重小量[22]：

$$\Delta W(n)=-\eta\nabla E(n)+\mu\Delta W(n-1) \tag{10}$$

式中：η为学习率，本文取0.001；μ为动量系数，$\mu\in(0,1)$。

通过多次试算，本文使用的BP神经网络结构为输入层-隐含层-输出层的三层单元，各层节点分布为2-10-1。

随机变量的产生是实施Monte Carlo法的基础，为重点研究降雨入渗条件下参数变异性对土质边坡可靠度的影响，在正交试验结果基础上，选择一种或多种敏感程度高的影响因素作为随机变量。将随机变量按照其服从的概率分布函数进行Monte Carlo抽样，把抽样样本数据代入改进BP神经网络训练模型中，将Monte Carlo随机抽样样本代入改进BP神经网络预测模型，并依据功能函数统计失效事件和可靠事件的发生频率，进而计算失效概率和可靠概率。其中，根据边坡稳定性系数临界值的大小，将边坡可

靠度评价的构造功能函数设置为：

$$g(X)=F_s(X)-1 \tag{11}$$

边坡的失效概率$P_f(X)$可表示为：

$$P_f(X)=P\left[g(X)<0\right]=\int_{F_s<1} f(F_s)\mathrm{d}F_s \tag{12}$$

同时，边坡的可靠概率$P_r(X)$可表示为：

$$P_r(X)=P\left[g(X)\geqslant 0\right]=\int_{F_s\geqslant 1} f(F_s)\mathrm{d}F_s \tag{13}$$

式中：$f(F_s)$为边坡稳定性系数的概率密度函数。

2 流固耦合稳定性分析

2.1 计算模型

计算模型以广西某高速公路二级土质边坡为原型，建立三维边坡数值模型如图2所示，边坡材料参数见表1。几何模型在X、Y、Z 3个方向的长度分别为48 m、14 m和24 m，每级边坡高度均为8 m，坡比均为1∶1.5，各级台阶及坡顶宽度均为2 m；设置初始水位面位于坡脚水平面以下2 m处（Z=6 m），并通过Fish函数按基质吸力沿高度线性分布的假设条件生成初始孔压场。

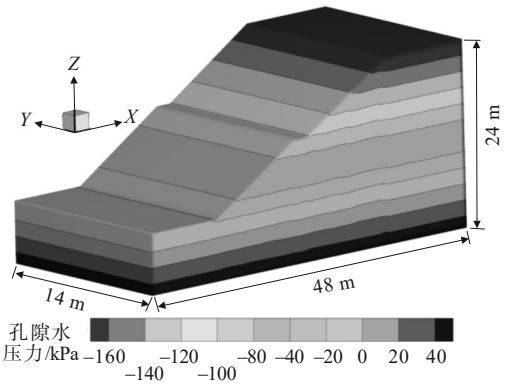


图2 边坡数值模型

Figure 2 Numerical model of slopes

为探究不同降雨雨型条件下土质边坡流-固耦合稳定性分析，根据广西某高速公路对应降雨强度随降雨时间的变化规律，将降雨雨型划分为均匀型、递增型、递减型、凸峰型（先增后减）和凹峰型（先减后增），其降雨雨型划分的分布状况如图3所示。5种降雨雨型的平均降雨强度为400 mm/d（相当于4.63×10^{-6} m/s），总降雨量均为1 600 mm。降雨入渗影响边界设置在边坡模型上边界，假设当降雨强度高于坡面入渗能力时，边界条件按水头边界处理，否则按流量边界处理[6]。

表1 边坡材料参数

Table 1 Slope material parameters

材料参数	单位	参数取值
变形参数	MPa	E=30 ν=0.3
抗剪强度参数	kPa (°) (°)	c'=22 φ'=15 φ^b=12
VG模型参数	kPa	a=20 n=2，m=0.5
表观渗透张量	m/s	4.75×10^{-6}
初始孔隙率		0.24
土体密度	kg/m^3	ρ=1 800，ρ_s=2 100
液相体积模量	GPa	2
液相密度	kg/m^3	ρ_w=1 000

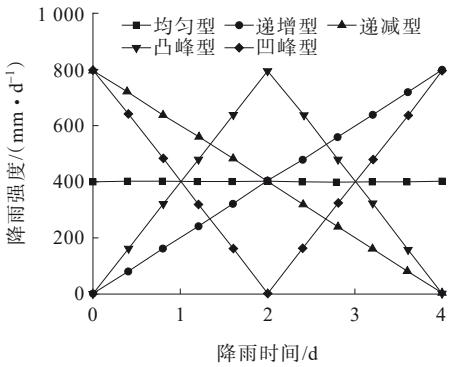


图3 降雨雨型划分

Figure 3 Rainfall pattern division

2.2 计算结果与分析

为计算流固耦合作用下土质边坡非饱和渗流场、位移场和稳定性的变化规律，首先采用饱和-非饱和渗流模块计算非耦合的渗流场，再对应力场模块进行迭代计算，最后将其计算结果代入非饱和渗流场进行流固耦合分析，经过非饱和渗流场模块与应力场模块的交互式反复迭代，得到双场收敛条件下的非饱和渗流场和应力场。

采用暂态分析法每隔0.4 d保存一次计算结果，并在每级边坡坡中、距坡面深度以下1 m的位置布设监测点[下部监测点和上部监测点的坐标分别为(16，7，11)和(30，7，19)]，实时监测饱和度和水平位移的变化。

图4代表不同雨型在连续降雨4 d后水位面的分布状况。从图4可以看出：随着降雨历时的持续，地下水位逐渐抬高，但不同雨型的水位面位置变化和抬升幅度不同，降雨结束后，地下水位面由低到高依

次为递减型、凸峰型、均匀型、凹峰型和递增型。这是由于坡面入渗受不同降雨历时下降雨强度和土壤入渗能力共同影响。降水强度的时间导数对不同含水层的影响不同,表明降雨初期坡体表面吸力较大,水分难以迅速入渗,但随着湿润锋的推进和暂态饱和区范围的增加,降雨入渗影响区的基质吸力逐渐降低,土壤渗透系数迅速扩大,坡面入渗能力增强。

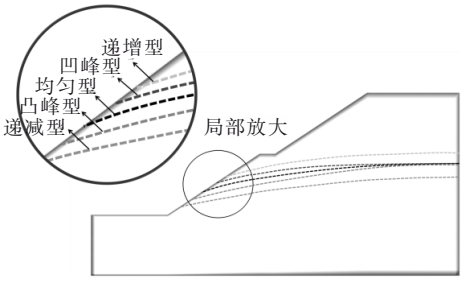
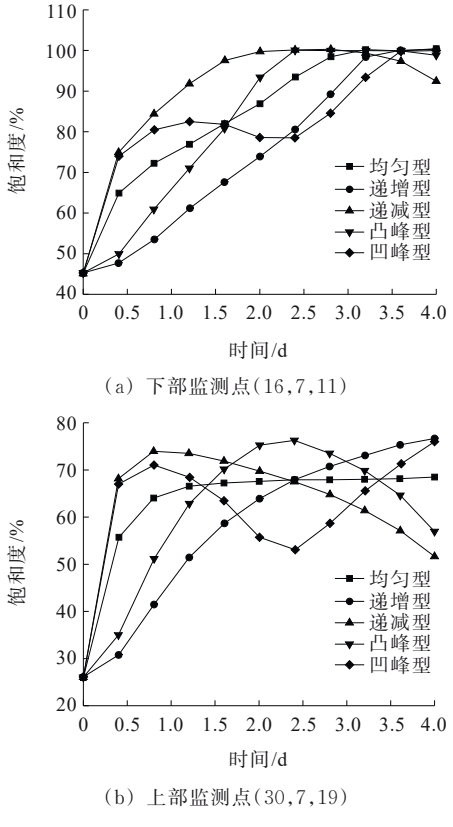


图4　连续降雨4 d时水位面分布

Figure 4　Water level distribution under continuous rainfall of 4 days

两个监测点在不同降雨雨型下饱和度随降雨时间的变化规律如图5所示。



(a) 下部监测点(16,7,11)

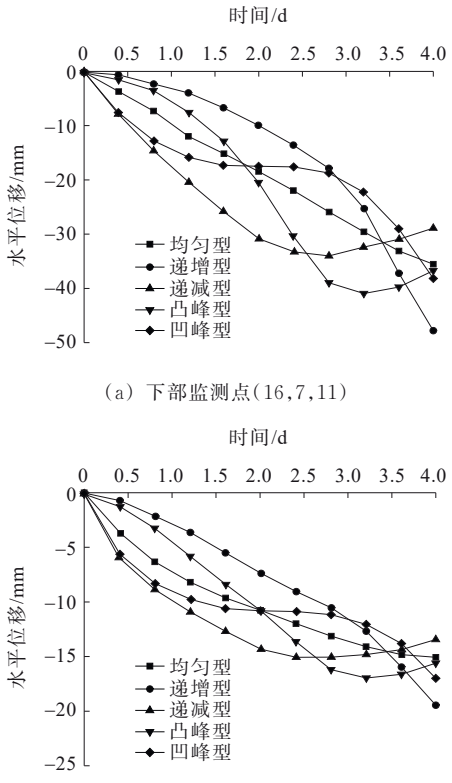
(b) 上部监测点(30,7,19)

图5　不同雨型下饱和度随降雨时间的变化

Figure 5　Variation of saturation with rainfall time under different rainfall patterns

从图5可以看出:受坡面排水影响雨水向坡外出渗,加上由于重力作用,上部坡体赋存的雨水向坡内入渗,补给地下水,下部监测点在各雨型下的降雨中后期被水位面浸没,逐渐达到饱和状态,其整体饱和度的大小高于上部监测点。饱和度的变化幅度与降雨雨型密切相关,降雨前期,递减型>凹峰型>均匀型>凸峰型>递增型,饱和度的变化主要集中在递减型和凹峰型,引起递减型和凹峰型率先进入暂态饱和区;降雨后期,递减型和凹峰型的变化幅度小于凸峰型和递增型,且在降雨后期,由于雨水出渗,可能引起递减型和凹峰型的饱和度呈一定程度下降趋势,非饱和渗流场受不同雨型的影响呈现出时空分布不均匀性。因此,在实际边坡的气象监测中应重点关注雨型信息,当出现短时间的递减型、凹峰型与均匀型降雨时,需及时对坡顶做好必要的维稳措施;当出现凸峰型与递增型降雨时,则需考虑雨水历时的影响,如为短期降雨则坡顶稳定性能的劣化概率不大。而对于坡脚而言,当降雨历时超过半天时,任何雨型均会显著提高失稳概率。

图6为两个监控点水平位移随时间变化的规律,图中负号代表位移方向。



(a) 下部监测点(16,7,11)

(b) 上部监测点(30,7,19)

图6　不同雨型下水平位移随降雨时间变化

Figure 6　Variation of horizontal displacement with rainfall time under different rainfall patterns

从图6可以看出:随降雨历时的持续,湿润锋向坡内扩展,地下水位不断抬升,产生水平向外的渗透力,土体抗剪强度逐渐降低,各雨型下水平位移呈现整体增加的趋势,但其变化具有复杂的时程波动性。下部监测点的孔隙水压力和重度的增长速度大于上部监测点,导致其水平位移远大于上部监测点。递减型和凸峰型的水平位移表现为先快速下降再缓慢回升,降雨前期和中期,坡面初始含水率较小,水平位移的变化速度与雨强和雨时呈正相关,递减型和凸峰型水平位移持续下降,递减型的水平位移发展最快。降雨后期,递减型和凸峰型的瞬时雨强较弱,地下水位面和土体重度有所下降,加上土体在应力重分布后发生卸荷回弹,水平位移缓慢回升。均匀型、凹峰型、递增型的水平位移在整个降雨阶段呈单调下降趋势,均匀型表现为匀速下降,凹峰型表现为"增-缓-增"形式下降,递增型表现为先缓慢下降后快速下降,三者最大水平位移均发生在降雨结束时。水平位移最终下降幅度最大的雨型为递增型,其最大值为47.7 mm。分析原因在于:递增型前期表现为缓慢滑动,当降雨强度递增致使坡体暂态饱和区范围扩大,坡体内部下滑力大于抗滑力,其水平位移发生跳跃式变化。

图7为不同雨型边坡下安全系数随降雨时间的变化。

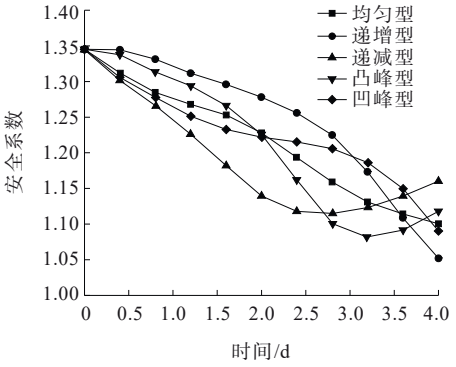


图7 不同雨型下边坡安全系数随降雨时间的变化

Figure 7 Variation of safety factor with rainfall time under different rainfall patterns

从图7可以看出:边坡安全系数随降雨时间增加不断降低,但同一降雨时间边坡安全系数的大小与变化速度不同。初始安全系数为1.351,均匀型、递增型和凹峰型的安全系数随降雨时间的增加而持续下降,当降雨停止时,此时安全系数最小,其最小值分别为1.101、1.054和1.092,降低幅度分别为18.5%、22%和19.2%;递减型和凸峰型安全系数呈先快速下降后缓慢回升的趋势,最小安全系数分别为1.115和1.082,降低幅度分别为17.5%和19.9%。这是由于随着降雨的进行,坡顶与坡脚饱和度持续增加,一方面通过加大滑动块体的重力提高了下滑剪力;另一方面,水分降低了边坡土体的抗剪强度指标,综合作用下导致坡体安全系数整体呈现出降低趋势。在同一降雨历时阶段,不同降雨雨型对边坡稳定性的影响差异明显,需重点考虑降雨诱发边坡失稳的雨型响应过程。

3 边坡失效概率预测

3.1 基于Monte Carlo的机器学习数据库设计

降雨入渗诱发土质边坡失稳受多因素影响,其中强度和刚度参数最为关键。为此,通过Monte Carlo方法建立各参数(有效黏聚力c'、有效内摩擦角φ'、杨氏模量E和泊松比ν)的变异性对边坡稳定性的分析数据库。试验设计了4因素5水平的因素水平表,如表2所示。

表2 因素水平设计

Table 2 Factor level design

水平	影响因素			
	c'/kPa	φ'/(°)	E/MPa	ν
1	17.6	12.0	24	0.26
2	19.8	13.5	27	0.28
3	22.0	15.0	30	0.30
4	24.2	16.5	33	0.32
5	26.4	18.0	36	0.34

根据正交表$L_{25}(5^6)$设计试验方案,分别建立25组不同影响因素的数值模型,利用强度折减法计算每组试验在不同参数条件下每一瞬态时间对应的安全系数,并以降雨过程中出现的最小安全系数为输出结果,并对25组试验结果进行极差分析。得到一种雨型的正交试验结果后,重复上述操作,进行余下4种降雨雨型正交试验,不同雨型的数值计算结果和极差分析结果分别见图8和表3。

由图8可知:不同降雨雨型对同一参数的极差值相差不大,即不同雨型对同一参数的敏感程度一致。参数c'、φ'、E和ν的平均极差分别为0.209、0.230、0.052和0.015,表明降雨雨型边坡稳定性的影响因素敏感程度由大到小依次排列为:φ'、c'、E和ν,φ'和c'对边坡稳定性影响较大,为主要影响因素;E和ν对边坡稳定性无显著影响,为次要影响因素。

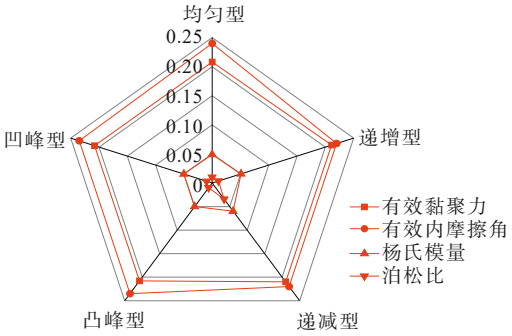


图 8　不同雨型极差分析结果

Figure 8　Range analysis results under different rainfall patterns

表 3　正交试验结果

Table 3　Orthogonal test results

编号	试验参数				边坡安全系数				
	c'/kPa	φ'/(°)	E/MPa	ν	均匀型	递增型	递减型	凸峰型	凹峰型
1	17.6	12.0	24	0.26	0.856	0.820	0.868	0.842	0.850
2	17.6	13.5	27	0.28	0.926	0.884	0.937	0.910	0.918
3	17.6	15.0	30	0.30	0.993	0.949	1.007	0.978	0.983
4	17.6	16.5	33	0.32	1.061	1.015	1.077	1.047	1.049
5	17.6	18.0	36	0.34	1.129	1.078	1.148	1.117	1.116
6	19.8	12.0	27	0.30	0.913	0.876	0.927	0.901	0.908
7	19.8	13.5	30	0.32	0.985	0.944	0.999	0.970	0.979
8	19.8	15.0	33	0.34	1.058	1.012	1.071	1.040	1.049
9	19.8	16.5	36	0.26	1.116	1.068	1.131	1.099	1.105
10	19.8	18.0	24	0.28	1.143	1.092	1.161	1.127	1.130
11	22.0	12.0	30	0.34	0.974	0.940	0.986	0.964	0.967
12	22.0	13.5	33	0.26	1.058	1.018	1.076	1.044	1.051
13	22.0	15.0	36	0.28	1.132	1.085	1.146	1.113	1.122
14	22.0	16.5	24	0.30	1.134	1.085	1.151	1.118	1.127
15	22.0	18.0	27	0.32	1.201	1.147	1.116	1.182	1.189
16	24.2	12.0	33	0.28	1.048	1.017	1.061	1.039	1.042
17	24.2	13.5	36	0.30	1.119	1.081	1.135	1.107	1.112
18	24.2	15.0	24	0.32	1.118	1.072	1.134	1.101	1.106
19	24.2	16.5	27	0.34	1.193	1.142	1.209	1.174	1.184
20	24.2	18.0	30	0.26	1.278	1.223	1.298	1.261	1.271
21	26.4	12.0	36	0.32	1.109	1.077	1.118	1.097	1.102
22	26.4	13.5	24	0.34	1.100	1.062	1.115	1.090	1.092
23	26.4	15.0	27	0.26	1.191	1.148	1.210	1.177	1.183
24	26.4	16.5	30	0.28	1.266	1.217	1.289	1.248	1.257
25	26.4	18.0	33	0.30	1.339	1.286	1.357	1.321	1.333

3.2　边坡失效概率和可靠概率预测

根据正交试验的极差分析结果，选取有效内摩擦角 φ' 和有效黏聚力 c' 作为随机变量，假设两个随机变量的概率分布函数服从正态分布，φ' 和 c' 的平均值分别取 15°和 22 kPa，变异系数均为 0.05，按 3 倍标准差进行 Monte Carlo 抽样，生成随机抽样样本数据带到神经网络训练模型中，此时期望输出与实际输出之间的均方误差较小，最大误差为 0.079。经式(11)构造功能函数进行边坡可靠度评价，由式(12)获得边坡失效概率，由式(13)获得边坡可靠概率。

为保证抽样样本在训练过程中神经网络模型具有良好的误差收敛性能，模拟抽样样本数分别取 200 000、500 000、1 000 000 三组，并在各组数据中抽样 10 次取平均值。通过神经网络训练，当抽样次数达 100 万次时，随机事件的发生概率收敛于该事件的频率。经抽样 100 万次，获得均匀型、递增型、递减型、凸峰型和凹峰型 5 种雨型的可靠频数分别为 915 740 次、834 710 次、963 760 次、906 460 次、912 480 次，从而绘制图 9 所示不同雨型的失效概率结果图。

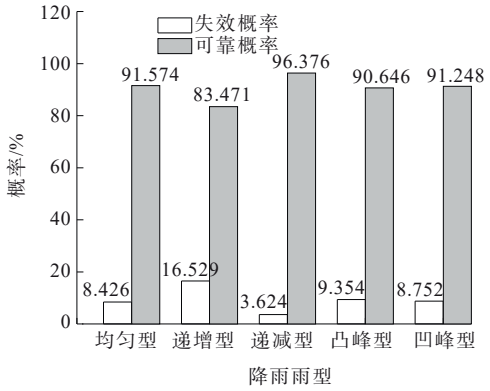


图 9　失效概率结果

Figure 9　Failure probability results

由图 9 可知：递增型的失效概率最大，高达 16.529%，凸峰型、凹峰型、均匀型的失效概率依次衰减，分别为 9.354%、8.752% 和 8.426%，递减型的失效概率最小，低至 3.624%。

4　结论

本文基于非饱和流-固耦合理论，探讨了土质边坡非饱和渗流、位移场和稳定性的雨型响应过程，并以正交试验结果的敏感因素为随机变量，结合 Monte Carlo 法和神经网络预测模型，预测边坡的失效概率，得出以下结论：

(1) 非饱和渗流场的变化过程与雨强、持时和雨型有关，随着降雨时间的持续，在不同雨型下水位面的位置变化和饱和度的变化幅度均不相同，降雨结

束时暂态饱和区的范围由小到大依次为递减型、凸峰型、均匀型、凹峰型和递增型。

（2）强降雨期间，边坡变形及稳定性受非饱和渗流的影响，呈现出复杂的时空分布不均匀性，递减型和凸峰型的水平位移表现为先快速下降后缓慢回升，均匀型表现为匀速下降，凹峰型表现为“增–缓–增”形式下降，递增型表现为先缓慢下降后快速下降，其稳定性变化也有类似结论。递减型和凸峰型应重视降雨前期和中期的滑坡预警，均匀型、凹峰型、递增型应重视降雨后期的滑坡预警。

（3）不同雨型对同一参数的敏感程度相同，各因素对边坡稳定性影响敏感性由强到弱依次为：有效内摩擦角、有效黏聚力、杨氏模量和泊松比，有效内摩擦角和有效黏聚力对边坡稳定性具有显著影响。

（4）通过Monte Carlo法抽样和神经网络学习，预测各雨型对边坡失效概率由大到小依次为：递增型（16.529%）、凸峰型（9.354%）、凹峰型（8.752%）、均匀型（8.426%）和递减型（3.624%）。在实际边坡的防治工作中，若单独考虑均匀型降雨，势必由于时效性的存在误判边坡风险等级，应根据工程实际情况，重点考虑降雨诱发边坡失稳的雨型响应过程及不同雨型对边坡安全预警的影响。

参考文献：

References：

[1] 罗渝，何思明，何尽川. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学，2014，39(9)：1357-1363.
Luo Yu, He Siming, He Jinchuan. Effect of rainfall patterns on stability of shallow landslide[J]. Earth Science, 2014, 39(9): 1357-1363.

[2] 张永闯. 基于全尺寸斜面模型试验的降雨边坡破坏机理研究[J]. 中外公路，2023，43(2)：43-50.
Zhang Yongchuang. Study on failure mechanism of rainfall slope based on full-scale slope model experiment [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 43-50.

[3] 邹文华，刘辉，邓小钊，等. 连续强降雨工况土质边坡非饱和渗流及稳定性分析[J]. 中外公路，2019，39(6)：11-15.
Zou Wenhua, Liu Hui, Deng Xiaozhao, et al. Analysis of soil slope with unsaturated seepage and stability under continuous heavy rainfall condition[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 11-15.

[4] 薛海斌，党发宁，尹小涛，等. 非稳定渗流条件下非饱和土质边坡稳定性的矢量和分析法研究[J]. 岩土力学，2016，37(增刊1)：49-56.
Xue Haibin, Dang Faning, Yin Xiaotao, et al. Study on stability of unsaturated soil slope under unsteady seepage by vector sum analysis method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 49-56.

[5] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析[J]. 中外公路，2020，40(4)：38-42.
Yang Xin. Numerical analysis of seepage characteristics of high slope with soft interlayer under rainfall infiltration condition[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 38-42.

[6] 黄洪超. 某高速公路巨型滑坡稳定性分析及处置方案研究[J]. 中外公路，2023，43(4)：24-29.
Huang Hongchao. Study on stability analysis and treatment of an expressway landslide[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 24-29.

[7] 齐向阳，苏成，宋宏芳，等. 降雨入渗下强风化泥岩高边坡失稳模型试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版)，2024，41(6)：18-24.
Qi Xiangyang, Su Cheng, Song Hongfang, et al. Model tests of instability of highly weathered mudstone high slope under rainfall infiltration[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(6): 18-24.

[8] 陈贺，鲁志强，李果，等. 滇西北高原山区不同降雨条件下斜坡深部响应的试验研究[J]. 中外公路，2023，43(1)：11-18.
Chen He, Lu Zhiqiang, Li Guo, et al. Field experiment on deep response of slope subjected to different rainfalls in plateau mountainous area of Northwest Yunnan[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 11-18.

[9] 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.
Zhang Xiaodong, Lu Zhejin, Liu Min, et al. Analysis of infiltration and stability of shallow slopes under heavy rainfall conditions with fractal theory corrections[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(11): 140-150.

[10] 李满意，周洪燕，魏燕珍，等. 类土质边坡失稳机理分析与稳定性研究[J]. 长江科学院院报，2016，33(5)：111-115.
Li Manyi, Zhou Hongyan, Wei Yanzhen, et al. Instability mechanism and stability analysis of soil-like slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 111-115.

[11] 杨煜，何忠明，王保林，等. 不同降雨条件下含软弱夹层土坡渗流特性数值分析[J]. 矿冶工程，2018，38(3)：15-19.
Yang Yu, He Zhongming, Wang Baolin, et al. Numerical analysis for seepage characteristics of soil slope with weak intercalations under different rainfall conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(3): 15-19.

[12] 戚蓝，王守甲，傅长锋. 短历时强降雨下边坡滑移特征时空分布规律的研究[J]. 水资源与水工程学报，2018，29(6)：190-195.

Qi Lan, Wang Shoujia, Fu Changfeng. Spatial and temporal distribution characteristics of slope-sliding under short duration high intensity rainfall[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6): 190-195.

[13] 张勇, 温智, 程英建 . 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 178-182.
Zhang Yong, Wen Zhi, Cheng Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 178-182.

[14] 豆红强, 韩同春, 龚晓南, 等 . 降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1144-1152.
Dou Hongqiang, Han Tongchun, Gong Xiaonan, et al. Reliability analysis of slope stability considering variability of soil saturated hydraulic conductivity under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1144-1152.

[15] 黄景华, 陈朝晖, 莫玻, 等 . 参数特性及分布形式对边坡稳定可靠性的影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 23-30.
Huang Jinghua, Chen Zhaohui, Mo Bo, et al. Influence analysis of characteristics and distribution types of soil parameters on slope reliability[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(3): 23-30.

[16] 蒋水华, 刘贤, 黄发明, 等 . 考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 900-907.
Jiang Shuihua, Liu Xian, Huang Faming, et al. Failure mechanism and reliability analysis of soil slopes under rainfall infiltration considering spatial variability of multiple soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 900-907.

[17] 王小兵, 夏晓舟, 章青 . 基于正交试验和神经网络的堤防边坡抗滑稳定可靠度研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 89-93.
Wang Xiaobing, Xia Xiaozhou, Zhang Qing. Reliability analysis on anti-sliding stability of levee slope based on orthogonal test and neural network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 89-93.

[18] 贾羽, 王晅, 丁瑜, 等 . 铁路路基降雨入渗过程中水-气两相渗流特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3225-3234.
Jia Yu, Wang Xuan, Ding Yu, et al. Characteristics of water-air two-phase flow in railway subgrade under rainfall infiltration[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3225-3234.

[19] Itasca Consulting Group, Inc. Online manual of FLAC^{3D} fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. Version 3.0, Minneapolis: Itasca Inc, 2003.

[20] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃 . 基于 FLAC^{3D} 平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855-861.
Jiang Zhongming, Xiong Xiaohu, Zeng Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 855-861.

[21] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明,陈愈炯,等,译 . 北京:中国建筑工业出版社,1997.
Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Chen Z Y, Zhang Z M, Chen Y J, et al., trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.

[22] 于国强, 张茂省, 王根龙, 等 . 支持向量机和 BP 神经网络在泥石流平均流速预测模型中的比较与应用[J]. 水利学报, 2012, 43(增刊 2): 105-110.
Yu Guoqiang, Zhang Maosheng, Wang Genlong, et al. Application and comparison of prediction models of support vector machines and back-propagation artificial neural network for debris flow average velocity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S2): 105-110.