第 53 卷第 10 期
2025 年 10 月

同济大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)

Vol. 53 No. 10
Oct. 2025

文章编号：0253-374X(2025)10-1527-08　　**DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.24148

考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析

何正迎[1]，黄　雨[1,2]

(1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室，上海 200092)

摘要：提出了一种考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析方法。基于偏度和峰度两参数生成系列反映降雨强度时间模式不确定性的降雨序列，作为边坡渗流-稳定性力学模型的输入，并结合蒙特卡洛模拟计算边坡可靠度。将其应用于浙江地区某概化边坡，评估了降雨强度时间模式对边坡失效概率及失效时间的影响。结果表明：在相同降雨总量和持时下，与后峰型高强度的降雨序列相比，前峰型且相对均匀的降雨序列导致更多的水入渗土体，降低土体强度，使边坡具有更高的失效概率与更短的失效时间，强调了在降雨滑坡灾害预警时需考虑降雨强度时间模式。

关键词：边坡可靠度分析；降雨强度时间模式；偏度；峰度；蒙特卡洛模拟

中图分类号：TU43　　**文献标志码**：A

Slope Reliability Assessment Considering Uncertainty Associated with Rainfall Intensity Temporal Patterns

HE Zhengying[1], *HUANG Yu*[1,2]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A novel approach for slope reliability assessment considering uncertainty associated with rainfall intensity temporal patterns is proposed. Stochastic rainfall sequences considering rainfall intensity temporal patterns are generated based on skewness and kurtosis. These series are incorporated into a coupled seepage - stability model of slope, and Monte Carlo simulation is employed to estimate slope failure probability. The proposed approach is applied to a conceptual slope in Zhejiang Province to evaluate the impact of rainfall intensity time patterns on slope failure probability and failure time. The results show that, under the same total rainfall and duration, early-peaking and relatively uniform rainfall patterns lead to greater infiltration, reduce soil strength, and thus increase the likelihood of slope failure while shortening the time to failure. These findings highlight the importance of incorporating rainfall intensity temporal patterns in landslide early warning systems.

Keywords: slope reliability analysis; rainfall intensity temporal pattern; skewness; kurtosis; Monte Carlo simulation

全球气候变化正在增强降雨的频率和强度[1]，进一步加剧了中国东南沿海地区的降雨型边坡失稳，造成严重生命财产损失。已有研究通过理论分析、试验研究和数值模拟等探讨了降雨边坡失稳机理[2-3]。潘俊义等[2]基于现场人工降雨边坡试验研究了不同雨强下黄土质边坡的入渗规律及冲刷效果，并发现在暴雨时候会出现冲蚀沟。熊勇林等[3]发展了考虑水-土-气三相渗流-变形耦合的有限元-有限差分数值方法，模拟了降雨入渗引起的边坡水分运移、孔隙水-气压变化、边坡变形与剪切带发展。然而，上述研究多基于均匀降雨强度条件，未充分考虑降雨强度随时间演化的不确定性(即降雨强度时间模式)对边坡稳定性的影响[4]。

近年来，降雨强度时间模式对边坡失稳的研究受到关注[5-7]。沈秋池等[5]研究了福建省两类降雨强度模式(持续性强降雨与台风型降雨)下的边坡稳定性。结果表明，在相同降雨总量下，持续性强降雨入渗深度深，饱和程度低，边坡在较长降雨历时后失稳，易造成大范围深层滑坡；而台风降雨入渗深度浅，饱和程度高，边坡失稳时间早且多为浅层滑坡。杨国强等[6]分析了中雨、大雨、暴雨三种降雨强度和前峰型、均匀型、后峰型及阶梯型4种降雨强度时间模式对边坡渗流和稳定性的影响。然而，这些研究主要集中于几种

收稿日期：2024-04-19
基金项目：上海市科委技术标准项目(21DZ2207200)、国家自然科学基金重点项目(41831291)
第一作者：何正迎，博士生，主要研究方向为边坡概率分析。E-mail：zhyhe@tongji.edu.cn
通信作者：黄　雨，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为工程地质灾害机理与防治。
E-mail：yhuang@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

特定概化雨型,对可能控制滑坡触发和演化过程的降雨强度时间演化特征的定量描述不足。

此外,考虑岩土参数等不确定性的降雨边坡可靠度研究已成为热点[8-10]。魏红卫等[8]探讨了饱和渗透系数空间变异性对边坡失效概率的影响。Cai等[9]研究了土体饱和渗透系数、粘聚力和摩擦角不确定性对边坡可靠度的综合影响,指出饱和渗透系数变异性主要改变孔隙水压力,而粘聚力和内摩擦角则影响土体有效应力。蒋水华等[10]在反演空间变异抗剪强度参数的基础上,分析了土体多参数变异性与降雨入渗耦合对边坡可靠度的影响。然而,这些研究大多忽略了降雨不确定性,尤其是降雨强度时间模式对边坡可靠度的影响。尽管Tang等[11]基于随机级联模型生成的随机降雨序列进行了非饱和土坡稳定性分析,但仍不能充分反映不同地区的降雨统计特征。因此,降雨强度时间模式不确定性对边坡可靠度的影响研究仍有待深入。

本文旨在构建一种考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析方法,以评估其对滑坡触发的作用。为此,构建了基于蒙特卡洛模拟(MCS)的考虑降雨强度时间模式的边坡可靠度分析框架。以降雨总量和持时为约束,采用偏度(Skewness,s)和峰度(Kurtosis,k)描述降雨特征,基于Pearson分布系统生成小时尺度的随机降雨序列;生成的降雨序列输入渗流-稳定性模型,并通过MCS评估边坡可靠度。以一处概化边坡为例,分析了边坡安全系数的概率密度函数(PDF)随时间的演化,以及失效时间的概率分布。进一步探讨了不同偏度与峰度条件下,边坡失效概率与失效时间的演化规律。

1 考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析方法框架

构建了可考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析框架,如图1所示。主要包括:① 生成考虑降雨强度时间模式不确定性的小时尺度降雨序列;② 建立降雨边坡入渗-稳定性分析力学模型;③ 进行基于MCS的边坡可靠度分析。

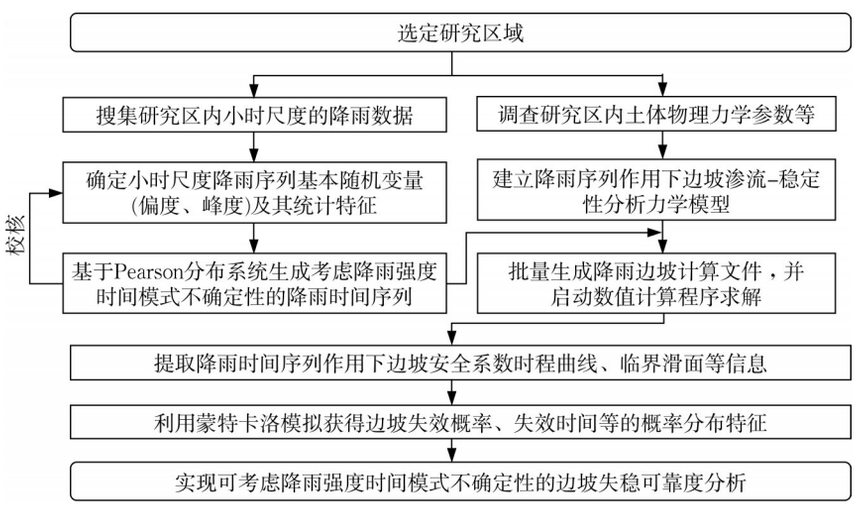

图1 考虑降雨强度时间模式的边坡可靠度分析框架

Fig. 1 Procedure of slope reliability analysis considering rainfall intensity temporal pattern

1.1 考虑降雨强度时间模式的随机降雨序列模拟

已有研究提出了多种降雨时间模式模型,包括基于实测数据或降雨强度-持时-频率关系得出的合成雨型图[12],以及能够描述降雨时间演化特征的统计模型[13]。本文关注的是生成序列中降雨强度随时间变化的不确定性,而非为研究区构建最优雨型或复现观测细节。为此,本文提出了一种稳健而有效的方法来生成考虑降雨强度时间模式的小时尺度人工降雨序列,利用统计学中偏度和峰度的概念来量化表征降雨时间序列的两个主要特征,即降雨序列的非对称性和峰值强度。偏度和峰度的具体定义如下。

偏度是衡量降雨序列对称性的统计学指标,通过计算小时尺度降雨序列数据的三阶矩来确定:

$$s=\frac{E(x-\mu_x)^3}{\sigma_x{}^3}=\frac{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}(x_i-\bar{x})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}(x_i-\bar{x})^2}\right)^3} \tag{1}$$

式中:μ_x和σ_x分别是降雨强度变量x的均值和标准差;$E(\cdot)$是期望值;d是小时尺度降雨序列的持时。

偏度 $s=0$ 表示数据分布为对称分布，$s>0$ 表示数据分布偏向左，$s<0$ 正好相反。

峰度是衡量降雨序列尖锐程度的统计指标，通过计算降雨序列数据的四阶矩来确定：

$$k=\frac{E(x-\mu_x)^4}{\sigma_x{}^4}=\frac{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}(x_i-\bar{x})^4}{\left(\sqrt{\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{d}(x_i-\bar{x})^2}\right)^4} \tag{2}$$

降雨强度时间模式随机模拟的步骤如下：基于拉丁超立方抽样（LHS）方法在一定范围内随机生成不同的偏度和峰度值；结合统计学中的 Pearson 分布系统生成大量随机数序列，计算生成的随机数的直方图；将直方图 x 轴和直方图 y 轴分别线性缩放到降雨历时和降雨强度，以生成具有不同峰度和偏度的人工降雨时间序列。需指出，由于 Pearson 分布系统本质上是随机序列生成器，所生成的降雨序列需要根据研究区域实际降雨数据进行标定与校核偏度和峰度的输入值。

1.2　边坡降雨入渗-稳定性分析

1.2.1　边坡瞬态渗流分析

基于质量守恒原理，根据达西定律可得土中二维饱和-非饱和渗流的控制微分方程[14]：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k_x(\theta)\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[k_z(\theta)\frac{\partial h}{\partial z}\right]+C(\theta)\frac{\partial(h-z)}{\partial t}=0 \tag{3}$$

式中：θ 是土体体积含水率；k_x 和 k_z 分别是 x 和 z 方向的水力渗透系数；h 是总水头；$C(\theta)$ 是比水容量，即由压力变化所引起的土体含水率变化。

上述微分方程的求解需先确定 $k(\theta)$ 和 $C(\theta)$，通常采用 Van Genuchen（V-G）模型[15]：

$$\begin{cases} S_e=\dfrac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\dfrac{1}{\left[1+(\alpha\psi)^n\right]^{(1-m)}} \\ C(\theta)=\alpha(n-1)(\theta_s-\theta_r)S_e^{\frac{1}{m}}\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m \\ k(\theta)=k_sS_e^{\frac{1}{2}}\left[1-\left(1-S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \end{cases} \tag{4}$$

式中：S_e 是有效饱和度；θ_s 是饱和体积含水率；θ_r 是体积残余含水率；ψ 为基质吸力，$\psi\in[0,\ \psi_r)$，ψ_r 为与残余含水量 θ_r 对应的基质吸力；α 是与进气值函数相关的拟合参数；m 和 n 为与流出率函数相关的拟合参数；k_s 是土体饱和渗透系数。

1.2.2　边坡稳定性分析

本文采用 Fredlund 等[16]于 1978 年提出的非饱和土抗剪强度公式，如式（5）所示：

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

式中：c'，φ' 分别为有效粘聚力及内摩擦角；σ 为总应力；u_a，u_w 分别为孔隙气压力及孔隙水压力；u_a-u_w 为基质吸力；φ^b 为基质吸力对应的内摩擦角。

边坡稳定性通过安全系数（F_s）进行评估，采用极限平衡方法中的摩根斯坦-普莱斯方法来计算。该方法通过将滑坡体划分为若干条带，对每条带施加力与力矩平衡条件，安全系数计算如式（6）所示：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{J}\left(W_j\sin\alpha_j-T_j/F_s\right)=0 \\ \sum_{j=1}^{J}\left(W_j\cos\alpha_j+u_{w,j}\right)=\left(T_j\cos\alpha_j+N_j\right)/F_s \\ \sum_{j=1}^{J}\left(\left(c'l_j+(\sigma_j-u_{a,j})l_j\tan(\varphi')+(u_{a,j}-u_{w,j})\tan(\varphi^b)\right)r_j-W_jx_j\right)=0 \end{cases} \tag{6}$$

式中：J 为条带总数；W_j 和 α 为第 j 个条带的重量和倾角；T_j 和 N_j 分别为第 j 个条带的抗剪力和法向力；σ_j，$u_{a,j}$ 和 $u_{w,j}$ 分别为第 j 个条带的总应力、孔隙气压力及孔隙水压力；l_j，r_j 和 x_j 分别为第 j 条带的长度、力臂长度和横向距离。公式（6）结合了力和力矩平衡方程，需通过数值迭代求解获得 F_s。

1.3　边坡降雨入渗-稳定性分析

本文采用以下性能函数进行边坡可靠度分析：

$$g(\boldsymbol{X})=F_s(\boldsymbol{X})-1.0 \tag{7}$$

式中：$g(\boldsymbol{X})$ 是边坡性能方程；$\boldsymbol{X}=(X_1,\ X_2,\ \cdots,\ X_n)$ 表示施加在边坡上的降雨序列或土体性质的随机变量向量。

极限状态超过概率或失效概率 P_f 可描述为

$$P_f=P\left[g(\boldsymbol{X})\leqslant 0\right]=\int_{g(\boldsymbol{X})\leqslant 0}f_X(x)\mathrm{d}x \tag{8}$$

式中：f_X 为 $\boldsymbol{X}$ 上的联合概率密度函数；$g(\boldsymbol{X})<0$ 表示边坡失稳。

MCS 是现有可靠度分析中相对精确的方法。根据式（7）的性能函数，利用 LHS 产生符合随机变量分布的一组随机向量，将其代入功能函数中计算得到功能函数的一个响应值。用同样的方法可以产生 N 个样本响应值，如果其中小于零（即位于失效区

内)的个数为M,则根据大数定理,当抽样次数N足够大时,失效概率P_f可以近似用频率来估计,即:

$$P_{fe}=P\left[g(\boldsymbol{X})\leqslant 0\right]\approx\frac{M}{N} \tag{9}$$

式中:P_{fe}为失效概率P_f的估计值。根据计算得到的N个性能函数值,进一步求出性能函数的均值和标准差,并拟合其概率分布函数。

2 案例分析

2.1 研究区域

浙江省位于我国东南沿海地区,地质条件复杂,构造运动强烈,地层以西北的古生界沉积岩和东南的中生代火山岩系为主[17]。火山岩在常年累月的风化下形成了众多的脆弱边坡,在强降雨地表雨水冲蚀和地下水渗流作用下,粒间胶结作用消失变成松散结构,土体抗剪强度降低,极大提高了此类边坡发生滑动破坏的可能性。浙江省年平均降雨量1 000~2 000 mm,降雨集中在5~10月份,占全年降水的2/3以上。据记录,1990~2013年间全省发生滑坡5 689起,约93 %发生在雨季,多数情况下破坏涉及残积层、崩积层或土层下方的风化岩石基底[17]。因此,强降雨是该区域边坡失稳的主导因素。

根据国家气象信息中心2019~2021年间浙江省丽水雨量站的实测小时降雨数据[18],分析了典型强降雨事件的统计特征(表1),可设定某次降雨事件的降雨总量为200 mm,降雨持时为48 h,并为后续考虑降雨强度时间模式的随机降雨序列生成过程中偏度和峰度的取值范围标定提供依据。

表1 浙江丽水站典型强降雨事件的统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of typical rainfall events in Lishui Rainfall Station, Zhejiang Province

降雨日期	降雨总量/mm	降雨持时/h	最大降雨强度/(mm·h^{-1})	偏度s	峰度k
2019/07/12	98.4	37	22.8	2.83	8.00
2019/08/10	235.4	41	36.0	2.52	7.40
2020/08/05	323.8	16	63.8	0.77	−0.15
2020/09/17	94.8	48	21.7	3.93	15.23
2021/05/18	123.3	54	14.3	1.79	2.24
2021/06/29	201.9	46	44.0	3.27	11.47
均值	179.6	40.33	33.77	2.52	7.365

2.2 边坡力学模型

基于前期现场调研、试验和数值模拟研究[19-20],选取一处典型边坡并建立简化地质概化模型(图2)。由于方程(3)难以解析求解,采用GeoStudio软件中的有限元-极限平衡法对边坡降雨入渗-稳定性过程进行数值模拟:SEEP/W模块求解渗流微分方程,所得孔压分布传递至SLOPE/W模块计算安全系数F_s。相关土体抗剪强度与水力参数详见文献[19-20],模型右侧设置水头边界(H=12 m)。在保持其余输入参数不变的条件下,仅将降雨入渗边界视为不定条件,利用随机降雨序列驱动模型,开展考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠度分析。

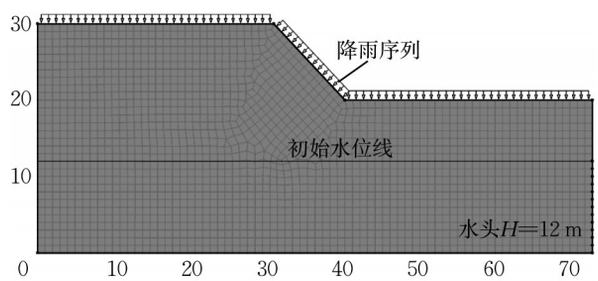

图2 概化的边坡有限元模型(单位:m)

Fig. 2 Finite element model for granite residual soil slope (unit: m)

3 结果分析

3.1 降雨序列随机模拟结果

利用Pearson分布系统生成降雨序列需结合研究区降雨特征进行标定和校核。首先基于1.3节中降雨数据偏度s和峰度k的概率分布(图3a和3b),使用LHS来生成随机偏度和峰度数值。据此在Pearson分布系统中生成10 000条考虑时间模式的小时尺度随机降雨序列(典型样本见图3c),其偏度和峰度超越概率分布分别见图3a和3b,有效反映了研究区域降雨事件的统计特征。

3.2 边坡可靠度分析结果

3.2.1 考虑降雨强度时间模式的边坡可靠度分析

本文MCS计算结果在10 000次后趋于稳定,故选取10 000次模拟。将生成的10 000条考虑降雨强度时间模式的小时尺度随机降雨序列,作为边坡降雨入渗-稳定性分析的流量边界,运用MCS模拟获得了边坡失效概率随降雨历时的演化(图4)。最小

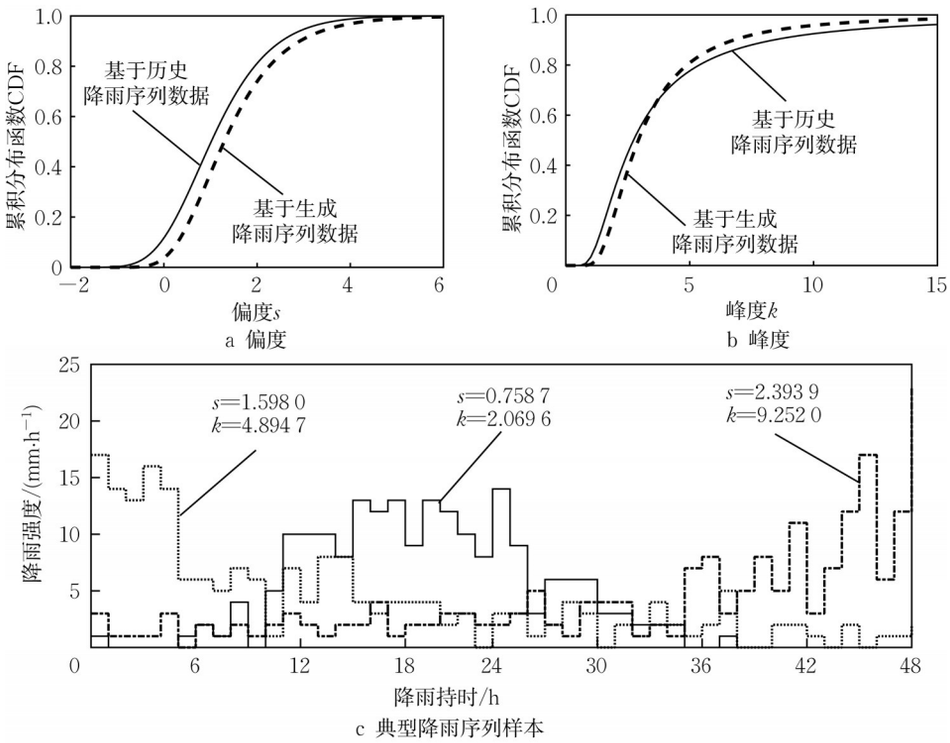

图3　基于Pearson分布系统随机生成的降雨时间序列

Fig. 3　Rainfall time series randomly generated using the Pearson distribution system

二乘拟合表明,累积Weibull分布拟合的均方根误差(RMSE为0.040 6)小于累积对数正态分布的(RMSE为0.061 7)。因此,累积Weibull分布更适合于拟合边坡失效概率的累积概率密度演化(图4)。

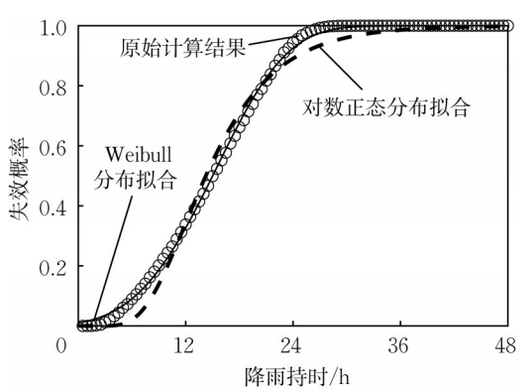

图4　边坡失效概率随降雨历时的演化

Fig. 4　Evolution of slope failure probability with rainfall duration

边坡的失效时间,即其降雨时间阈值,对滑坡风险评估和预警极为关键。图5是基于KDE(核密度估计)得到的边坡失效时间的PDF(概率密度函数)和CDF(累积分布函数)。由于降雨强度时间模式的不确定性,边坡失效时间表现出很大的变异性(深实线),最短失效时间约为2 h,最长失效时间约为31.5 h。随着降雨的持续,边坡逐渐变得不稳定,其失效概率随着降雨时间的延长而逐步增加;特别是在降雨进入后期(约31.5 h),不论哪种降雨强度时间模式,边坡已经不可避免地失稳。

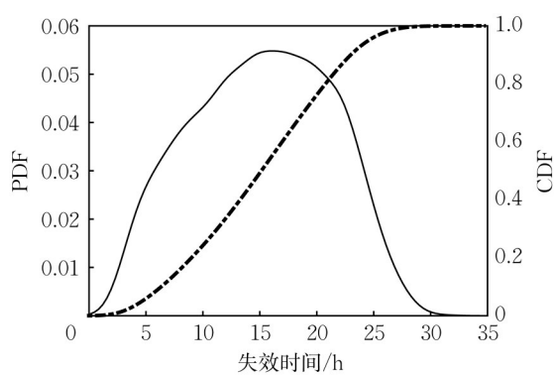

图5　边坡安全系数的概率密度分布特征

Fig. 5　Probability distribution of failure time of slope

3.2.2　考虑降雨强度时间模式偏度的影响

为了深入探讨降雨强度时间模式的偏度s对边坡可靠度的影响,图6比较了在Person分布系统中输入偏度s分别为−0.8,−0.4,0,0.4,0.8时,边坡失效概率随降雨历时的演化,此时峰度k的输入是基

于图3a的概率分布进行随机抽样。由图6可知,在特定偏度下,边坡失效概率随着降雨历时的延长而增大;当偏度变化时,边坡失效概率随着偏度的增加而增大,即前峰型降雨模式(偏度>0)的失效概率高于后峰型降雨模式(偏度<0);尤其在峰度为0.8,边坡可能在较短时间内迅速失稳。这主要是因为较大峰度的降雨会导致在早期更多雨水渗透入土体,降低其强度,进而触发边坡失效。

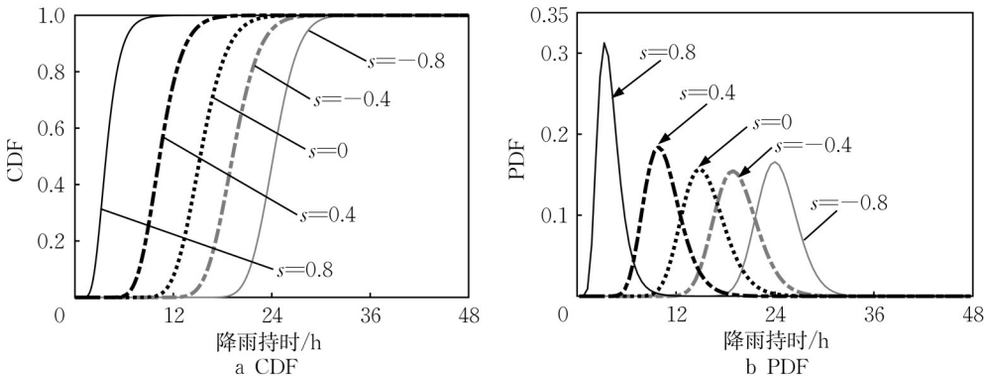

图6 不同偏度下边坡失效概率随时间的演化

Fig. 6 Evolution of slope failure probability with rainfall duration at different degrees of skewness

进一步分析了偏度对降雨边坡失效时间的具体影响,如图7所示。随着偏度的递增,边坡失效时间呈显著减少趋势。偏度较大时,相应的失效时间有效区间较窄,表明失效时间的变异性减小。尤其是在偏度为−0.8的情况下,这一现象尤为显著。由此可见,在前峰型降雨模式明显占主导地位的地区,降雨引发的滑坡事件的发生时间较短,呈现较为急剧的特征。

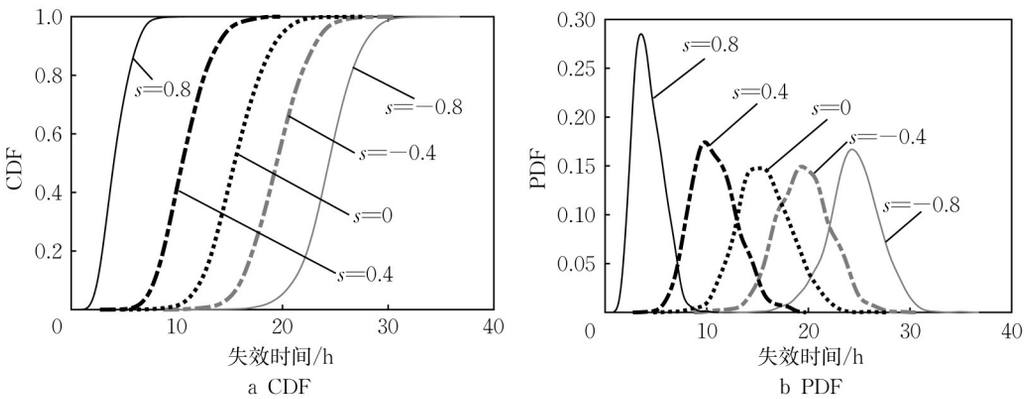

图7 不同偏度下边坡失效时间概率分布特征

Fig. 7 Probability density distribution characteristics of slope failure time at different degrees of skewness

3.2.3 考虑降雨强度时间模式峰度的影响

为说明降雨强度时间模式峰度对边坡可靠度的影响,图8比较了Pearson分布系统峰度输入为2.0,2.5,3.0,3.5,4.0时边坡失效概率随降雨历时的演化,其中偏度的输入基于图3b的概率分布随机抽样。

由图8可知,在给定偏度的情况下,在降雨前期(降雨历时<20 h),边坡失效概率随着峰度的增大而减小;在降雨历时后期,失效概率反而随着峰度的增大而增大,不过变化不明显。可以说,强度分布更均匀(峰度为2.0)比具有极端强度(峰度为4.0)的降雨序列作用下,边坡具有更高的失效概率。

进一步分析峰度对边坡失效时间的影响,如图9所示。随着峰度增大,失效时间整体延后,且分布趋于集中。峰度较小时,失效时间分布范围更广,预警不确定性增加。

特别地,在峰度为2.0和2.5时,失效时间呈“双峰”分布,表明降雨峰值时刻受偏度控制,小峰度降雨下,边坡响应更受偏度影响。因而,降雨峰度与偏度的耦合作用值得进一步重视。

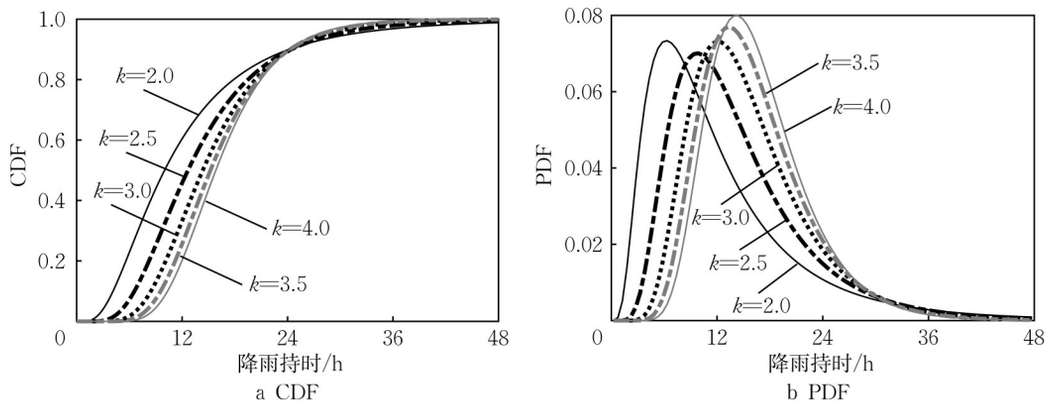

图 8　不同峰度下边坡失效概率随时间的演化

Fig. 8　Evolution of slope failure probability with rainfall duration at different degrees of kurtosis

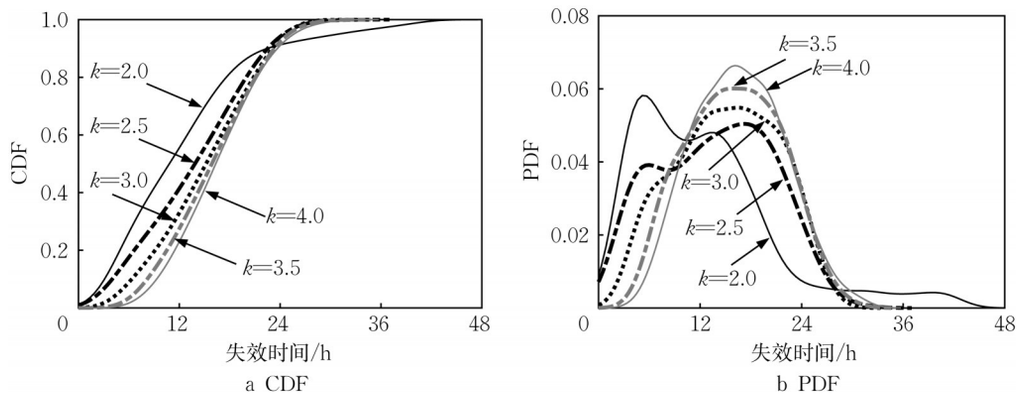

图 9　不同峰度下边坡失效时间概率分布特征

Fig. 9　Probability density distribution characteristics of slope failure time at different degrees of kurtosis

4　结论

本文主要结论如下：

(1)提出了一种考虑降雨强度时间模式不确定性的边坡可靠性分析方法，可更全面评估降雨作用下边坡的安全水平，尤其边坡失效时间即降雨阈值的评估。并将该方法应用于浙江丽水地区边坡案例。

(2)在考虑降雨强度时间模式的影响时，边坡失效概率随着降雨偏度的增加而增加，失效时间则随着偏度的增加而减少；在降雨前期，失效概率随着峰度的增加而减少，失效时间随着峰度的增加而延长。

(3)在进行区域降雨滑坡灾害预警时，降雨强度时间模式的考虑十分必要；尤其在前峰型降雨特征明显的地区，极易在短时间内诱发滑坡，应采取及时排水措施，并维持长期正常运营。

(4)本文聚焦降雨强度时间模式不确定性对边坡可靠度的影响，假设研究区内土体参数均匀，未考虑其空间变异性(参见文献[21])。未来研究可进一步耦合两者影响，实现更全面的边坡可靠度评估。

作者贡献声明：

何正迎：模型实现、数据整理、数据分析、初稿撰写。

黄　雨：文章构思、模型提出、初稿撰写、文章修改。

参考文献：

[1]　HE Z, AKIYAMA M, ALHAMID A K, *et al*. Probabilistic life-cycle landslide assessment subjected to nonstationary rainfall based on alternating stochastic renewal process[J]. Engineering Geology, 2024, 338: 107543.

[2]　潘俊义，侯大勇，李荣建，等. 不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J]. 工程地质学报，2018，26(5)：1170.
PAN Junyi, HOU Dayong, LI Rongjian, *et al*. Rainfall infiltration test and analysis of loess slope under different rainfall intensities[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1170.

[3]　熊勇林，朱合华，叶冠林，等. 降雨入渗引起非饱和土边坡破坏的水-土-气三相渗流-变形耦合有限元分析[J]. 岩土力学，2017，38(1)：284.
XIONG Yonglin, ZHU Hehua, YE Guanlin, *et al*. Analysis of failure of unsaturated soil slope due to rainfall based on soil-water-

air seepage-deformation coupling FEM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 284.

[4] FAN L, LEHMAN P, ZHENG C*et al*. Rainfall intensity temporal patterns affect shallow landslide triggering and hazard evolution[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 47(1): e2019GL085994.

[5] 沈秋池, 苏燕. 雨型对残积土边坡稳定可靠性的影响研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 201.
SHEN Qiuchi, SU Yang. Disaster risk assessment of different rain-type land slide Fujian Province[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2018, 36(2): 201.

[6] 杨国强, 陶虎, 雷少伟, 等. 不同雨型条件下非饱和土边坡渗流及稳定分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 166.
YANG Guoqiang, TAO Hu, LEI Shaowei, *et al*. Analysis of seepage and stability of unsaturated soil slopes under different rainfall patterns [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (6): 166.

[7] 周宏博, 孙树林, 尚文涛, 等. 降雨雨型和强度对土边坡稳定性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 2602.
ZHOU Hongbo, SUN Shulin, SHANG Wentao, *et al*. Analysis of the soil slope stability influenced by rainfall pattern and intensity [J], Science Technology and Engineering, 2012, 12(11): 2602.

[8] 魏红卫, 赵凡. 饱和渗透系数变异性对边坡破坏概率的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 95.
WEI Hongwei ZHAO Fan. Influence of saturated permeability coefficient variation on failure probability of slope[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 95.

[9] CAI J S, YEH T C J, YAN E C, *et al*. Uncertainty of rainfall-induced landslides considering spatial variability of parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 87: 149.

[10] 蒋水华, 刘贤, 黄发明, 等. 融合观测信息的降雨诱发斜坡失稳机理及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1367.
JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Faming, *et al*. Rainfall-induced slope failure mechanism and reliability analyses based on observation information [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1367.

[11] TANG G P, HUANG J S, SHEN D C, *et al*. Stability analysis of unsaturated soil slopes under random rainfall patterns [J]. Engineering Geology, 2018, 245(1): 322.

[12] HUFF F. A. Time distributions of heavy rain storms in Illinois[R]. Champaign: Illinois State Water Survey, 1990.

[13] KOUTSOYIANNIS D, FOUFOULA-GEORGIOU E. A scaling model of a storm hyetograph[J]. Water Resources Research, 1993, 29(7): 2345.

[14] 于玉贞, 林鸿州, 李荣建, 等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2892.
YU Yuzhen, LIN Hongzhou, LI Rongjian, *et al*. Stability analysis of unsaturated soil slope under transient seepage flow state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2892.

[15] VAN GENUCHTEN M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892.

[16] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313.

[17] MA T, LI C, LU Z, *et al*. Rainfall intensity - duration thresholds for the initiation of landslides in Zhejiang Province, China[J]. Geomorphology, 2015, 245: 193.

[18] 国家气象信息中心. 丽水站降雨数据集[EB/OL]. [2024-03-01]. 国家气象科学数据中心服务平台.https://data.cma.cn/.
Chinese National Meteorological Information Center. Rainfall dataset of lishui station [EB/OL]. [2024-03-01]. National Meteorological Science Data Center Service Platform. https://data.cma.cn/.

[19] XU X, XING Y, GUO Z, *et al*. Stability analysis of rainfall-triggered toe-cut slopes and effectiveness evaluation of pile-anchor structures[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(5): 1104.

[20] XU X, HUANG Y, XING Y, *et al*. Investigation of rainfall-induced toe-cut slope failure mechanisms in the southeastern coastal area of China[J]. Natural Hazards, 2022, 110(3): 1761.

[21] HUANG Y, HE Z, YASHIMA A, *et al*. Multi-objective optimization design of pile-anchor structures for slopes based on reliability theory considering the spatial variability of soil properties [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 147: 104751.