基于临界降雨模式曲线的汛期尾矿坝稳定性快速评估方法①

刘佳坤，渠琛，王超，李亮
（青岛理工大学 土木工程学院，山东 青岛 266520）

摘　要：为快速评估汛期尾矿坝稳定性，选取安全系数与可靠度指标确定尾矿坝的临界状态，通过非饱和渗流与极限平衡分析，提出基于临界降雨模式曲线（CRPC）的汛期尾矿坝安全评价方法。正交试验结果表明：尾矿砂有效黏聚力 c'、有效内摩擦角 φ'、饱和渗透系数 K_s 及 V-G 模型拟合参数 a、n 对基于安全系数的 CRPC 影响程度依次为 $\varphi'>K_s>a>c'>n$。c'、φ'、K_s 主要控制 CRPC 水平变化，而 a、n 则主导其垂直变化。基于此，选取 φ'、K_s、a、c' 构建基于可靠度指标的 CRPC。参数分析结果表明：随着 c'、φ'、K_s、a 变异系数增大，基于可靠度指标的 CRPC 稳定区域逐渐减小，其中 φ' 变异系数对其影响最大。基于汛期实测降雨记录，应用 2 种 CRPC 评价汛期尾矿坝稳定性并提出预警建议，与当地安全监测部门的统计数据对比，在土体参数统计特征未知的前提下，推荐使用基于安全系数的 CRPC 法。

关键词：尾矿坝；稳定性；安全评价；安全预警；可靠度分析；降雨；汛期；临界降雨模式曲线；V-G 模型
中图分类号：TD926.4　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.007
文章编号：0253-6099（2026）02-0044-08

Rapid Stability Evaluation Method for Tailings Dam in Flood Season Based on Critical Rainfall Pattern Curve

LIU Jiakun, QU Chen, WANG Chao, LI Liang
(*School of Civil Engineering*, *Qingdao University of Technology*, *Qingdao* 266520, *Shandong*, *China*)

Abstract: To rapidly evaluate the stability of tailings dams in flood season, the safety factor and reliability indices were selected to define the critical state of tailings dams. After unsaturated seepage analysis and limit equilibrium analysis, a safety evaluation method for tailings dams in flood season was proposed based on the Critical Rainfall Pattern Curve (CRPC). An orthogonal test results show that the physical parameters of effective internal friction angle φ', saturated hydraulic conductivity K_s, V-G model fitting parameter a, effective cohesion c' of tailings sand, and V-G model fitting parameter n were in a descending order in terms of their influences on safety factor-based CRPC. The parameters of c', φ' and K_s mainly control the horizontal variation of CRPC, while the parameters of a and n dominate its vertical variation. On this basis, φ', K_s, a and c' are selected to establish the reliability index-based CRPC. Parameter analysis results indicate that the area of the stable region of the reliability index-based CRPC gradually decreases with the increase of the coefficient of variation (COV) of c', φ', K_s and a, among which the COV of φ' exerts the most significant impact. Based on the measured rainfall records in flood season, two types of CRPC were adopted to assess tailings dam stability and early-warnings were provided. Based on comparison with the statistical data from local safety monitoring departments, it is recommended that the safety factor-based CRPC method be adopted when the statistical characteristics of soil parameters are unknown.

Key words: tailings dam; stability; safety evaluation; safety early warning; reliability analysis; rainfall; flood season; critical rainfall pattern curve; V-G model

① **收稿日期**：2025-10-30
基金项目：山东省自然科学基金面上项目（ZR2023ME007）
作者简介：刘佳坤（2002—），男，山东临沂人，硕士研究生，主要从事边坡稳定性分析研究。E-mail：jiakunliu770@ gmail.com
通信作者：李亮（1977—），男，山东济南人，博士，教授，主要从事岩土工程防灾减灾研究。E-mail：liliang@ qut.edu.cn

尾矿坝稳定性分析对保障尾矿库安全运营具有重要作用[1]。已有研究表明[2-6],降雨会导致尾矿坝浸润线升高,是诱发尾矿坝失稳的主要原因之一。众多学者从渗流场演化、抗剪强度削弱机制、浸润线预测及产流侵蚀效应等方面,开展了降雨对尾矿坝稳定性的影响研究。部分研究基于饱和-非饱和渗流理论建立数值模型,分析了降雨入渗导致的孔隙水压力上升及降雨对坝体安全系数的影响,为理解降雨对坝体稳定性的影响提供了重要支撑[2];部分研究从事故案例出发,揭示了浸润线上升和基质吸力降低是诱发尾矿坝局部失稳的关键因素[3]。此外,结构重要度分析、浸润线解析解及降雨模型试验等研究,进一步揭示了尾矿坝不同区域对降雨响应的敏感性,地形与堆积结构对浸润线分布的影响,以及降雨强度对产流侵蚀过程的控制作用[4-6]。这些研究深化了对降雨作用下尾矿坝失稳机制的理解,但在应用方面,多数方法需根据不同降雨条件不断重新建模计算,难以满足汛期快速预警和实时评估的需求,且没有充分考虑尾矿砂参数的变异性对尾矿坝稳定性的影响。文献[7]兼顾渗流与极限平衡分析,计算不同降雨强度下边坡安全系数等于 1 时所对应的降雨持续时间,提出基于安全系数的临界降雨模式曲线(critical rainfall pattern curve, CRPC)用于评估边坡稳定性,为快速识别降雨强度-持续时间组合下的临界状态提供了新的分析思路,但现有 CRPC 多假定材料参数为定值,未能考虑尾矿砂力学与水力学参数的变异性,也尚未揭示不同参数对 CRPC 的影响。

尾矿砂在排放、沉积过程中受物理、化学风化作用,其力学和水力学参数呈现出明显的变异性。鉴于此,本文以某二维尾矿坝为例,研究尾矿砂各参数对尾矿坝稳定性的影响,重点提出基于可靠度指标的 CRPC 流程,最后结合实测降雨记录对尾矿坝进行安全评价,为汛期尾矿坝安全评价与分级预警提供指导。

1　解耦的非饱和土渗流与简化 Bishop 法

1.1　非饱和土渗流理论

Richards 渗流定律是描述非饱和土体中水流动的基本定律。在尾矿坝中,渗流过程受到水头差、孔隙率和渗透系数等因素影响,基本符合 Richards 渗流定律[见式(1)]。

$$\frac{\partial\theta(h)}{\partial t}=\frac{\partial\theta}{\partial x_i}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x_j}\right] \tag{1}$$

式中:h 为压力水头;t 为时间;θ 为体积含水量;$K(h)$ 为渗透系数;x_i,x_j为空间坐标,二维中 $i=1$,$j=2$。

在非饱和土中,体积含水量 θ 与压力水头 h 之间的关系 $\theta(h)$ 可用土-水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)来表示,土-水特征曲线可通过试验或经验确定。本文采用 V-G 模型[8]:

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=S_e=\left\{\frac{1}{1+[a(\mu_a-\mu_w)]^n}\right\}^m \tag{2}$$

式中:θ_s 为饱和体积含水量;θ_r 为残余体积含水量;S_e 为饱和度;a、n 和 m 均为模型拟合参数,$m=1-1/n$;μ_a 为孔隙气压力;μ_w 为孔隙水压力。

非饱和土中渗透系数与压力水头之间的关系由 Mualem 模型[9]进行描述。

$$K(h)=K_sS_e^{1/2}\left[1-(1-S_e^{1/m})^m\right]^2 \tag{3}$$

式中 K_s 为土体饱和渗透系数。

1.2　基于非饱和土抗剪强度的简化 Bishop 法

非饱和土抗剪强度的关键在于如何量化基质吸力对抗剪强度的贡献。非饱和土抗剪强度计算公式[10]为:

$$\tau_f=c'+(\sigma-\mu_a)\tan\varphi'+(\mu_a-\mu_w)\left[\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)\tan\varphi'\right] \tag{4}$$

式中:τ_f 为非饱和土抗剪强度;c' 为完全饱和土体的有效黏聚力;φ' 为完全饱和土体的有效内摩擦角;σ 为法向总应力。根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)[11],采用圆弧滑动面和基于非饱和土抗剪强度的简化 Bishop 法计算尾矿坝安全系数。非饱和土抗剪强度简化 Bishop 法第 i 个土条受力情况如图 1所示。

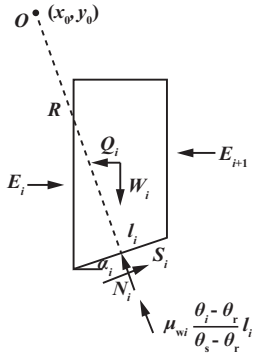


图 1　第 i 个土条受力情况

Fig. 1　Forces acting on the i-th soil slice

以某圆弧滑动面圆心为 O,圆心坐标为(x_0,y_0),半径为 R,将其离散为 n 个垂直土条,其中,第 i 个土条底部倾角为 α_i,底部长度为 l_i,自重为 W_i,所受水平地震力为 Q_i,与相邻第 $i-1$、$i+1$ 条块之间的水平作用力为 E_i 和 E_{i+1},条底剪切力为 S_i,条底部有效法向力为 N'_i,与孔隙水压力 μ_w和体积含水量 θ 相关的作用

力为 $\mu_{wi}\frac{\theta_i-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}l_i$，二者之和为条底总法向力 N_i。由垂直方向力平衡条件得到：

$$N_i\cos\alpha_i = W_i - S_i\sin\alpha_i \tag{5}$$

考虑到 $\mu_a=0$，$\sigma_i=N_i/l_i$，则有：

$$S_i = \frac{c'_i l_i + N_i\tan\varphi'_i - \mu_{wi}\left(\frac{\theta_i-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)l_i\tan\varphi'_i}{F} \tag{6}$$

式中：F 为尾矿坝沿给定圆弧滑动面滑动的安全系数；c'_i、φ'_i、μ_{wi}、θ_i 分别为条底中心点处的有效黏聚力、有效内摩擦角、孔隙水压力和体积含水量。联立(5)、(6)得到 N_i 和 S_i，设 A_i 为 Q_i 对圆心 O 的力臂，考虑滑动体对圆心 O 整体力矩平衡条件，求解得到 F：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n}\dfrac{\left(W_i-\mu_{wi}\dfrac{\theta_i-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}l_i\cos\alpha_i\right)\tan\varphi'_i + c'_i l_i\cos\alpha_i}{\cos\alpha_i + \dfrac{\tan\varphi'_i\sin\alpha_i}{F}}}{\sum_{i=1}^{n}W_i\sin\alpha_i + \sum_{i=1}^{n}Q_i\dfrac{A_i}{R}} \tag{7}$$

采用 GeoStudio 软件中 Slope/W 模块计算尾矿坝安全系数。

2 临界降雨模式曲线

设有 m 个随机变量，即 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\ldots,x_m)$，尾矿坝稳定性分析的功能函数 $g(\boldsymbol{X})=F(\boldsymbol{X})-F_c$，$F(\boldsymbol{X})$ 采用式(7)计算，F_c 为安全系数临界值。根据 Rosenblueth 点估计法[12]，$g(\boldsymbol{X})$ 的一阶矩和二阶矩可由 2^m 个样本点上的功能函数值估计。在给定的降雨强度和降雨持续时间下，采用式(8)计算尾矿坝稳定可靠度指标。

$$\beta = \frac{E(g)}{\sqrt{E(g^2)-[E(g)]^2}} \tag{8}$$

CRPC 的实质是寻找一系列降雨强度与对应的临界降雨持续时间组合，在每种组合下，尾矿坝达到临界状态。临界状态可通过安全系数或可靠度指标来判定，借鉴 GB 50863—2013《尾矿设施设计规范》[11] 以及 GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》[13]，取 $F=F_c=1.15$ 或 $\beta=3.2$ 来判定尾矿坝是否达到临界状态。基于此，所构建的 CRPC 分别称之为基于安全系数或基于可靠度指标的 CRPC。以后者为例，基于可靠度指标的 CRPC 主要包括如下 4 个步骤。

1）确定降雨强度集合 $(R_1,R_1+\Delta R,\cdots,R_N)$，根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012)[14] 规定，取 $R_N=100$ mm/d 模拟大暴雨等级，降雨持续时间集合 $(T_0,T_0+\Delta T,\cdots,T_M)$。采用 Rosenblueth 点估计法分配离散点集合 $(X_1,\cdots,X_{2^m})$，并使用 Seep/W 和 Slope/W 建立尾矿坝渗流和稳定性分析模型。

2）对集合中的每个 X_j，R_i 和 T_k 组合，进行尾矿坝渗流和稳定性分析，计算最小 F，记为 $F(X_j,R_i,T_k)$。

3）对集合中的每个 R_i 和 T_k 组合，使用式(8)计算可靠度指标，表示为 $\beta(R_i,T_k)$。

4）对降雨强度集合中的每个元素，在降雨持续时间集合中确定 2 个特定的降雨持续时间，其中一个相应的可靠度指标大于 3.2，而另一个可靠度指标小于 3.2。通过插值方法确定可靠度指标等于 3.2 时的降雨持续时间 T_i。若无法找到可靠度指标等于 3.2 对应的降雨持续时间，则记 $T_i=\infty$。R_i 和 T_i 的数据对构成基于可靠度指标的 CRPC。

3 算例分析

以山东某尾矿库为例，该库总库容 80 万 m^3，属五级尾矿库，其典型剖面如图 2 所示。初期坝的坝顶宽度为 6 m，坝顶高度为 10 m，初期坝上、下游坡比 1∶1.8，堆积坝的坝顶高程为 29 m，堆积坝下游坡比为 1∶2.84，上游坡比为 3%。简化后的模型总长148 m，高度 29 m。

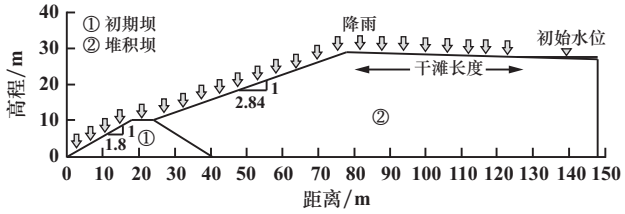


图 2 尾矿坝剖面图

Fig. 2 Cross-section of tailings dam

3.1 材料及边界条件

初期坝采用透水石坝，初期坝和尾矿砂相关参数及 V-G 模型拟合参数取值详见表 1，不考虑初期坝各参数的变异性，仅考虑尾矿砂 c'、φ'、K_s、a 及 n 的变异性，其变异系数(coefficient of variation，COV)取值详见表 2。

表 1 初期坝和尾矿砂相关参数及 V-G 模型拟合参数

Table 1 Parameters related to initial dam and tailings sand, as well as V-G model fitting parameters

材料	容重 γ/(kN·m^{-3})	c'/kPa	φ'/(°)	K_s/(m·s^{-1})	a/kPa	n	θ_s	θ_r
初期坝	21.5	0	40	1.0×10^{-4}	14.5	1.30	0.35	0.10
尾矿砂	21.8	4	26	3.0×10^{-6}	166.7	3.25	0.40	0.06

表 2　尾矿砂参数的变异系数

Table 2　COV of tailings sand

$COV_{c'}$/kPa	$COV_{\varphi'}$/(°)	COV_{K_s}/(m·s^{-1})	COV_a	COV_n
0.2	0.1	0.6	0.4	0.2

Seep/W 中边界条件设置如下:左右两侧为水头边界,左侧初期坝底部总水头为 0,右侧总水头随干滩长度(L_g)变化,当 L_g 为 50 m 时,右侧总水头为 27.5 m。初期坝及堆积坝表面采用单位流量边界条件模拟降雨。给定一系列 ΔR 和 ΔT 的取值组合,开展敏感性分析,从 CRPC 的平滑性和计算精度两个方面综合确定 ΔR=2.0 mm/d、ΔT=2.0 h。

3.2　基于安全系数的尾矿坝 CRPC 参数敏感性分析

3.2.1　*尾矿砂有效黏聚力对 CRPC 的影响*

尾矿砂有效黏聚力 c'分别取 3.2、4.0 和 4.8 kPa,保持表 1 中尾矿砂其余参数不变,R_N = 100 mm/d,T_M=10 d,绘制基于 F 的 CRPC,如图 3 所示。

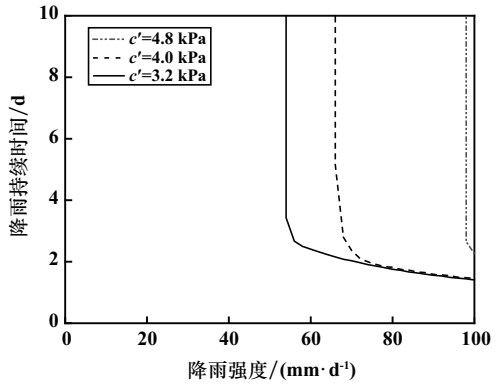


图 3　不同 c' 下基于 F 的 CRPC

Fig. 3　F-based CRPC under different c'

构建的基于 F 的 CRPC 左下方为稳定区域,右上方为失稳区域。对比 CRPC 可知,随着 c'增大,CRPC 整体向右上方偏移,边坡稳定区域逐渐增大,失稳区域相应减小。c'为 3.2 kPa 时,较低的降雨强度和降雨持续时间便可诱发尾矿坝失稳,而 c'为4.0、4.8 kPa 时,导致尾矿坝失稳的降雨强度和降雨持续时间均明显增加。这是因为在强降雨作用下,孔压迅速升高,有效应力大幅降低,增大 c'能更有效地提升土体抗剪强度。c'为 3.2、4.0 和 4.8 kPa 时,相应的临界降雨量(稳定区域)分别为 621.87、720.36 和 977.57 mm。由此可见,随着 c'增大,尾矿坝稳定区域呈非线性增长趋势。

3.2.2　*尾矿砂有效内摩擦角对 CRPC 的影响*

尾矿砂有效内摩擦角 φ'分别取 23.4°、26.0° 和 28.6°,保持表 1 中尾矿砂其余参数不变,R_N = 100 mm/d,T_M=10 d,绘制基于 F 的 CRPC,如图 4 所示。

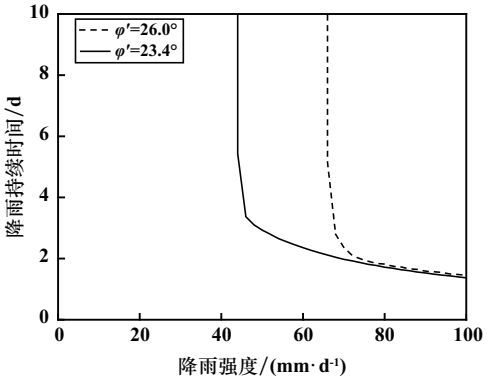


图 4　不同 φ' 下基于 F 的 CRPC

Fig. 4　F-based CRPC under different φ'

由图 4 可知,随着 φ'增大,CRPC 整体向右上方偏移,边坡稳定区域逐渐增大,失稳区域相应减小。φ'为 28.6°时,在所有给定的降雨强度下,均无法找到 F 等于 1.15 对应的降雨持续时间,即所有的 T_i 均为 ∞,因此在图 4 中未能体现。φ'为23.4°、26.0°和 28.6°时,相应的临界降雨量(稳定区域)分别为 533.64、720.36和 1 000 mm。由此可见,随着 φ'增大,尾矿坝稳定区域呈非线性增长趋势。

3.2.3　*尾矿砂饱和渗透系数对 CRPC 的影响*

尾矿砂饱和渗透系数 K_s 分别取 1.2×10^{-6}、3.0×10^{-6} 和 4.8×10^{-6} m/s,保持表 1 中尾矿砂其余参数不变,R_N=100 mm/d,T_M=10 d,绘制基于 F 的 CRPC,如图 5 所示。

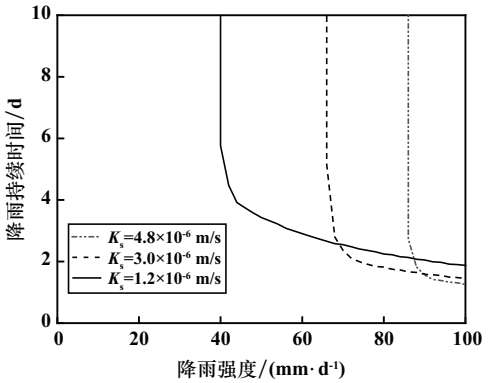


图 5　不同 K_s 下基于 F 的 CRPC

Fig. 5　F-based CRPC under different K_s

由图 5 可知,随着 K_s 增大,CRPC 整体向右下方偏移。K_s 为 1.2×10^{-6}、3.0×10^{-6}和 4.8×10^{-6} m/s 时,相应的临界降雨量(稳定区域)分别为559.88、720.36 和 874.37 mm。随着 K_s 增大,尾矿坝稳定区域呈线性增长趋势。在强降雨条件下,3 条曲线趋于收敛,说明降雨强度为主导因素,K_s 的差异作用减弱。与图 3、图 4

不同的是,图5中的CRPC存在交点。在交点左侧,K_s越大,边坡稳定区域越大,而在交点右侧,K_s越小,边坡稳定区域越大。故在强降雨作用下,K_s越大反而更容易达到临界降雨持续时间,这是因为在强降雨作用下,高渗透性的尾矿砂孔压会迅速增大,浸润线快速抬升,而低渗透性时,降雨入渗被限制在浅层,部分雨水转化为地表径流,需要更长时间才能将浸润线提高到相同位置,因此临界降雨持续时间反而更长。

3.2.4 *尾矿砂* V-G *模型拟合参数* a *对* CRPC *的影响*

a分别取100.02、166.70和233.38,保持表1中尾矿砂其余参数不变,R_N=100 mm/d,T_M=10 d,绘制基于F的CRPC,如图6所示。

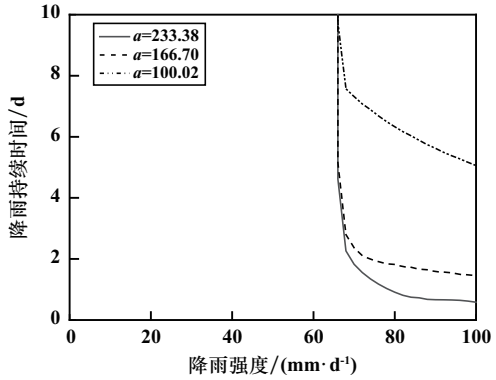


图6 不同a条件下基于F的CRPC

Fig.6 F-based CRPC under different a

随着a增大,CRPC整体向下方移动,边坡稳定区域逐渐减小,失稳区域相应增加。原因在于:较大的a使土体在较小基质吸力下就能迅速湿润,孔压增大更迅速,更容易触发临界状态。a=100.02、166.70和233.38时,相应的临界降雨量(稳定区域)分别为872.83、720.36和692.46 mm。随着a增大,尾矿坝稳定区域呈非线性减小趋势。

3.2.5 *尾矿砂* V-G *模型拟合参数* n *对* CRPC *的影响*

n分别取2.60、3.25和3.90,保持表1中尾矿砂其余参数不变,R_N=100 mm/d,T_M=10 d,绘制基于F的CRPC,如图7所示。

随着n增大,CRPC整体向下方移动,与a对CRPC的影响规律大致相同。原因在于:较大的n使SWCC更陡,基质吸力减小会导致饱和度增大,致使孔压迅速增大并降低抗剪强度,因此临界工况更早出现。n=2.60、3.25和3.90时,相应的临界降雨量(稳定区域)分别为750.78、720.36和718.91 mm。随着n增大,尾矿坝稳定区域呈非线性减小趋势。

值得注意的是,a和n主要通过影响临界降雨时间来改变稳定区域面积,为垂直影响;而c'、φ'、K_s更多是通过影响CRPC的起始位置来改变稳定区域面积,为水平影响。

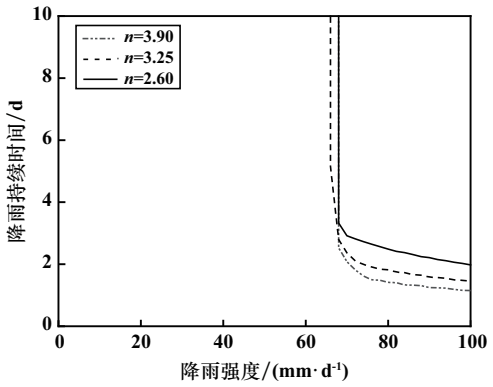


图7 不同n条件下基于F的CRPC

Fig.7 F-based CRPC under different n

3.3 基于正交设计的参数敏感性分析

3.3.1 正交试验设计

对尾矿砂c'、φ'、K_s、a、n这5个因素,各设置高、中、低三个水平,以CRPC稳定区域面积为试验结果,开展正交试验分析,以量化尾矿砂各参数对CRPC的影响程度。五因素三水平设置如表3所示。

表3 五因素三水平设置

Table 3 Setting of five factors and three levels

因素	水平		
	高水平	中水平	低水平
c'	4.8	4.0	3.2
φ'	28.6	26.0	23.4
K_s	4.8×10^{-6}	3.0×10^{-6}	1.2×10^{-6}
a	233.38	166.70	100.02
n	3.90	3.25	2.60

根据表3,在Minitab软件中进行试验设计,随机生成27组试验,如表4所示。然后将每一组试验参数,绘制基于F的CRPC曲线,计算尾矿坝稳定区域面积S,作为试验结果。

3.3.2 正交试验结果分析

正交试验的均值及极差分析结果见表5。φ'的极差值最大,表明φ'对尾矿坝稳定性的影响最显著;其次为K_s与a;最后是c'与n。

方差分析结果如表6所示,表中Adj SS(调整平方和)及Adj MS(调整均方)是评估因素重要性的核心指标,其值越大,说明该因素对试验结果的影响越显著。5个因素的P值均小于0.05,表明在95%置信水平下显著影响稳定性。综合表5和表6可知:各因素对基于F的CRPC影响程度排序为$\varphi'>K_s>a>c'>n$。

表 4　正交试验设计及结果

Table 4　Orthogonal test design and results

试验号	影响因素					S
	c'	φ'	$K_s/10^{-6}$	a	n	
1	3.2	23.4	1.2	100.02	2.60	897.75
2	3.2	23.4	1.2	100.02	3.25	895.58
3	3.2	23.4	1.2	100.02	3.90	887.61
4	3.2	26.0	3.0	166.70	2.60	647.17
5	3.2	26.0	3.0	166.70	3.25	617.77
6	3.2	26.0	3.0	166.70	3.90	596.21
7	3.2	28.6	4.8	233.38	2.60	1 000.00
8	3.2	28.6	4.8	233.38	3.25	1 000.00
9	3.2	28.6	4.8	233.38	3.90	1 000.00
10	4.0	23.4	3.0	233.38	2.60	511.03
11	4.0	23.4	3.0	233.38	3.25	483.67
12	4.0	23.4	3.0	233.38	3.90	467.81
13	4.0	26.0	4.8	100.02	2.60	931.22
14	4.0	26.0	4.8	100.02	3.25	926.06
15	4.0	26.0	4.8	100.02	3.90	920.91
16	4.0	28.6	1.2	166.70	2.60	1 000.00
17	4.0	28.6	1.2	166.70	3.25	1 000.00
18	4.0	28.6	1.2	166.70	3.90	1 000.00
19	4.8	23.4	4.8	166.70	2.60	727.12
20	4.8	23.4	4.8	166.70	3.25	707.30
21	4.8	23.4	4.8	166.70	3.90	693.75
22	4.8	26.0	1.2	233.38	2.60	917.49
23	4.8	26.0	1.2	233.38	3.25	916.00
24	4.8	26.0	1.2	233.38	3.90	915.18
25	4.8	28.6	3.0	100.02	2.60	1 000.00
26	4.8	28.6	3.0	100.02	3.25	1 000.00
27	4.8	28.6	3.0	100.02	3.90	1 000.00

表 5　正交试验的均值及极差结果

Table 5　Mean value and range results of orthogonal test

水平	c'	φ'	K_s	a	n
1	838.0	696.9	936.6	939.9	848.0
2	804.5	820.9	702.6	776.6	838.5
3	875.2	1 000.0	878.5	801.2	831.3
Δ	70.7	303.1	234.0	163.3	16.7
排序	4	1	2	3	5

表 6　方差分析结果

Table 6　Analysis of variance

因素	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
c'	2	22 503	11 251	107.29	<0.001
φ'	2	418 093	209 047	1 993.32	<0.001
K_s	2	267 178	133 589	1 273.81	<0.001
a	2	139 517	69 759	66 517.00	<0.001
n	2	1 263	632	6.02	0.01

3.4　基于可靠度指标的 CRPC 参数敏感性分析

基于 3.3 节的正交试验分析结果,参数 n 对基于 F 的 CRPC 稳定区域面积影响最小,且其物理意义主要体现在土-水特征曲线的形状修正上,因此本节仅考虑 c'、φ'、K_s 及 a 变异系数的影响。

3.4.1　*尾矿砂* $COV_{c'}$ 对基于可靠度指标的 CRPC 影响

采用单因素分析方法,取尾矿砂 $COV_{\varphi'}=0.1$,$COV_{K_s}=0.6$,$COV_a=0.4$,V-G 模型拟合参数 n 取定值 3.25。$R_N=100$ mm/d,$T_M=10$ d。$COV_{c'}$ 分别取0.1、0.2、0.3,并利用式(8)计算可靠度指标,绘制基于可靠度指标的 CRPC 曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,不同 $COV_{c'}$下基于可靠度指标的 CRPC 几乎重合,说明 c'的变异性对基于可靠度指标的 CRPC 影响有限,主要由均值水平决定,而变异性作用相对较弱。

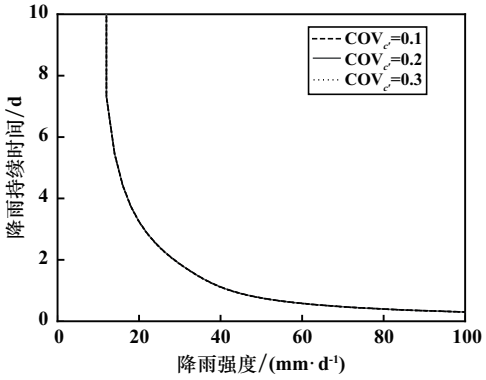


图 8　不同 $COV_{c'}$ 下基于可靠度指标的 CRPC

Fig. 8　Reliability-based CRPC under different $COV_{c'}$

3.4.2　*尾矿砂* $COV_{\varphi'}$ 对基于可靠度指标的 CRPC 影响

取尾矿砂 $COV_{c'}=0.2$,$COV_{\varphi'}$ 分别取 0.05、0.10、0.15,其他参数不变,并利用式(8)计算可靠度指标,绘制基于可靠度指标的 CRPC,如图 9 所示。

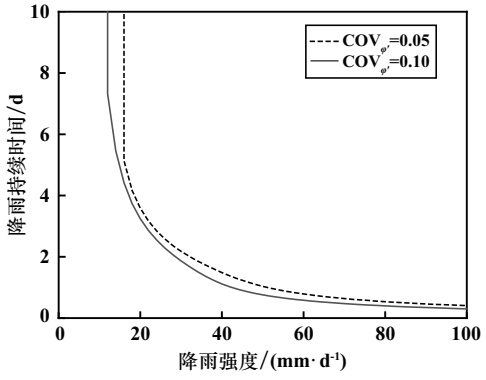


图 9　不同 $COV_{\varphi'}$ 下基于可靠度指标的 CRPC

Fig. 9　Reliability-based CRPC under different $COV_{\varphi'}$

由图 9 可见,随着 $COV_{\varphi'}$增加,CRPC 整体向左下方移动,说明在相同降雨强度下达到临界状态的降雨时间变短。$COV_{\varphi'}=0.15$ 时,土体参数的变异性致使坝体的安全裕度不足,尾矿坝的可靠度指标均小于《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)中规定的临界可靠度指标值 3.2,此时稳定区域面积为 0。

说明 $COV_{\varphi'}$ 对基于可靠度指标的 CRPC 作用尤为显著,若其变异性过大,结构将无法满足设计可靠要求。

3.4.3 *尾矿砂* COV_{K_s} 对基于可靠度指标的 CRPC 影响

取尾矿砂 $COV_{\varphi'}=0.1$,COV_{K_s} 分别取 0.5、0.6、0.7,其他参数不变,利用式(8)计算可靠度指标,绘制基于可靠度指标的 CRPC,如图 10 所示。

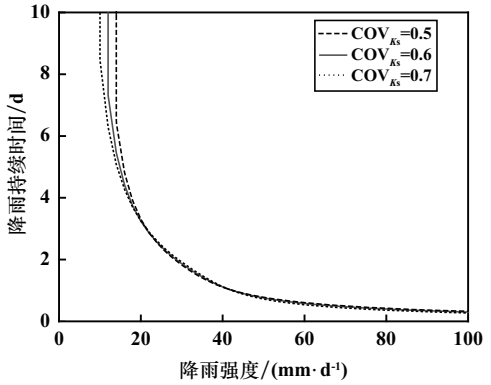


图 10 不同 COV_{K_s} 下基于可靠度指标的 CRPC

Fig. 10 Reliability-based CRPC under different COV_{K_s}

由图 10 可知,随着 COV_{K_s} 从 0.5 增至 0.7,CRPC 整体略向左下移动,其差异主要集中在低强度降雨区间(10~20 mm/d)。低强度降雨条件下,雨水入渗主要受土体渗透能力控制,饱和渗透系数 K_s 的变异性会导致土体渗透能力存在显著差异,进而使尾矿坝更难以满足可靠度要求。而在高强度降雨条件下,土体近乎饱和,K_s 的变异性对土体渗透能力的作用微乎其微,因此曲线趋于重合。

3.4.4 *尾矿砂* COV_a 对基于可靠度指标的 CRPC 影响

$COV_{K_s}=0.6$,COV_a 分别取 0.3、0.4、0.5,其他参数不变,利用式(8)计算可靠度指标,绘制基于可靠度指标的 CRPC,如图 11 所示。

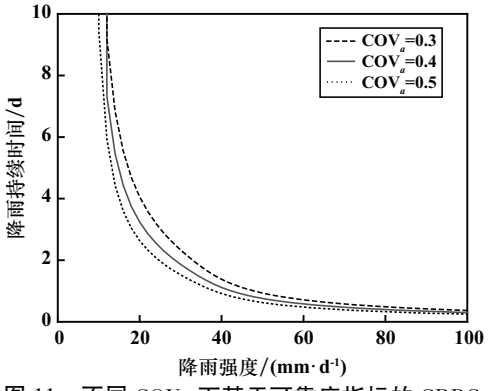


图 11 不同 COV_a 下基于可靠度指标的 CRPC

Fig. 11 Reliability-based CRPC under different COV_a

由图 11 可知,随着 COV_a 从 0.3 增大至 0.5,CRPC 呈现向左下方移动的趋势,COV_a 越大,在相同的降雨强度下,达到可靠度临界所需的降雨时间越短。对比图 10,图 11 中曲线间的间距明显大于图 10,且在 10~60 mm/d降雨区间内持续存在明显间距。在高强度降雨区间(70~100 mm/d)同样出现聚拢现象,但总体仍可观察到 COV_a 对曲线位置的影响。

3.5 尾矿坝预警分析

选取 2 组实测降雨记录,验证本文方法在尾矿坝预警分析中的可靠性。第 1 组降雨记录来自山东省气象局网站,选取山东淄博 2025 年 7 月 20—23 日的降雨记录,分别为 53.9、49.9、12.4 mm 和 0,并计算平均日降雨强度,得到第 1、2、3、4 d 的日均降雨强度分别为 53.9、49.9、38.7、29.1 mm/d。第 2 组降雨记录摘自文献[15]中给出的 2009 年 7 月 11—16 日韩国浦项 6 天实测降雨记录,分别为 37、23、63、2、89 和170 mm,计算第 1~6 d 的日均降雨强度分别为 37、30、41、31.3、42.8 和 64 mm/d。

尾矿砂参数均值取为:$c'=4.0$ kPa、$\varphi'=26°$、$K_s=3.0\times10^{-6}$ m/s,$a=166.7$,相应的变异系数为:$COV_{c'}=0.2$,$COV_{\varphi'}=0.1$,$COV_{K_s}=0.6$,$COV_a=0.4$。V-G 模型拟合参数 n 取 3.25,干滩长度 $L_g=50$ m 时,利用本文所提方法建立基于 F 与可靠度指标的 CRPC,如图 12 所示。由图 12 可见,基于可靠度指标的 CRPC 形状与基于 F 的 CRPC 有显著差别,前者更为平缓。

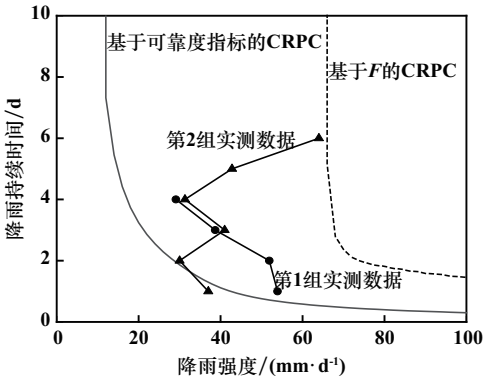


图 12 基于 F 与可靠度指标的 CRPC 应用

Fig. 12 Application of F-based and reliability-based CRPC

由图 12 可知,第 2 组第 1 d 实测数据位于基于可靠度指标的 CRPC 之下的稳定区域,其余 5 天及第 1 组 4 天的实测数据均处于基于可靠度指标的 CRPC 之上,表明尾矿坝可靠度指标均小于 3.2。因此,若采用基于可靠度指标的 CRPC 进行尾矿坝稳定性预警时,淄博地区应从降雨第 1 天启动预警计划,韩国浦项地区应在降雨第 2 天启动预警计划。

当采用基于 F 的 CRPC 进行尾矿坝稳定性预警

时,淄博地区 4 天的降雨记录点均处于 CRPC 之下的稳定区域,不需要展开预警计划;韩国浦项地区只有最后一次降雨记录点接近 CRPC,表明第 6 天的安全系数几乎为临界安全系数 $F_c = 1.15$,建议在连续 6 天降雨后启动预警计划。两者比较表明,基于 F 的 CRPC 和基于可靠度指标的 CRPC 在相同的降雨记录下具有不同的预警决策,与当地安全监测部门的统计数据对比发现,基于 F 的 CRPC 更贴合实际预警情况。

4　结论

1) 正交试验结果表明,尾矿砂 c'、φ'、K_s 以及土-水特征曲线 V-G 模型拟合参数 a 和 n 均对基于 F 的 CRPC 具有显著影响,其影响顺序为:$\varphi' > K_s > a > c' > n$。

2) a 和 n 主要通过影响临界降雨时间来改变基于 F 的 CRPC 稳定区域的面积,为垂直影响;而 c'、φ' 和 K_s 更多的是通过影响 CRPC 的起始位置来改变稳定区域的面积,为水平影响。

3) 土体参数的变异性对基于可靠度指标的 CRPC 具有明显作用,随着 $COV_{\varphi'}$ 增大至 0.15,坝体的安全裕度不足,在此基础上施加不同降雨强度与持续时间,CRPC 退化为纵轴为 0 的水平线,稳定区域面积为 0;K_s 及 V-G 模型拟合参数 a 的变异性也会导致稳定区域的变化。

4) 结合 2 组实测降雨记录,应用本文方法进行了尾矿坝稳定预警,给出了相应的预警计划。与实际预警情况对比,基于 F 的 CRPC 更贴合实际情况。

参考文献(References):

[1] 黄德镛,黄日胜,史凯东,等. 基于 PSO-Kriging 模型的尾矿库三维稳定性分析[J]. 有色金属(中英文), 2025,15(3):474-483.
HUANG Deyong, HUANG Risheng, SHI Kaidong, et al. Three-dimensional stability analysis of tailings pond based on PSO-Kriging model[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2025,15(3):474-483.

[2] 于浩泽,高义军,郭奇峰,等. 强降雨工况尾矿库堆排坝体稳定性分析[J]. 金属矿山, 2022(10):209-217.
YU Haoze, GAO Yijun, GUO Qifeng, et al. Stability analysis of tailings dam stacking under heavy rainfall[J]. Metal Mine, 2022(10):209-217.

[3] 段仲沅,袁兵. 某尾矿坝暴雨蓄洪溃塌原因分析与综合治理措施[J]. 力学与实践, 2008,30(2):40-44.
DUAN Zhongyuan, YUAN Bing. Collapse analysis and comprehensive treatment of a mine tailings dam due to rain storm and flood impounding[J]. Mechanics in Engineering, 2008,30(2):40-44.

[4] 宋宁思,王光进,何明渝,等. 地下水位影响尾矿坝稳定性的结构重要度分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023,19(7):92-98.
SONG Ningsi, WANG Guangjin, HE Mingyu, et al. Structural importance analysis of groundwater level affecting stability of tailings dam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(7):92-98.

[5] 李强,高松,牛红凯,等. 尾矿库浸润线解析解及适用性分析[J]. 岩土力学, 2020,41(11):3714-3721.
LI Qiang, GAO Song, NIU Hongkai, et al. Analytical solution to saturation line of tailings pond and its applicability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(11):3714-3721.

[6] 吴超君,陈娜,郝喆,等. 降雨对废弃尾矿坝坡面土壤侵蚀过程影响的模型试验研究[J]. 安全与环境工程, 2021,28(6):109-117.
WU Chaojun, CHEN Na, HAO Zhe, et al. Model experiment study on the influence of rainfall on the soil erosion process of abandoned tailings[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021,28(6):109-117.

[7] LIU X, WANG Y, LEUNG A K. Numerical investigation of rainfall intensity and duration control of rainfall-induced landslide at a specific slope using slope case histories and actual rainfall records[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023,82(8):333.

[8] 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):892-898.

[9] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976,12(3):513-522.

[10] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996,33(3):379-392.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 尾矿设施设计规范: GB 50863—2013[S]. 北京:中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of tailings facilities: GB 50863—2013[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2013.

[12] ROSENBLUETH E. Point estimates for probability moments[J]. PNAS, 1975,72(10):3812-3814.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构可靠性设计统一标准:GB 50153—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of engineering structures: GB 50153—2008[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2009.

[14] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 降水量等级:GB/T 28592—2012[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Grade of precipitation: GB/T 28592—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.

[15] OH S, LU N. Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes[J]. Engineering Geology, 2015,184:96-103.

引用本文:刘佳坤,渠琛,王超,等. 基于临界降雨模式曲线的汛期尾矿坝稳定性快速评估方法[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):44-51.
LIU Jiakun, QU Chen, WANG Chao, et al. Rapid stability evaluation method for tailings dam in flood season based on critical rainfall pattern curve[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):44-51.