

文章编号: 1005-0523(2022)05-0029-07



## 不同雨型条件下围堰边坡渗流稳定性数值分析

孙洋<sup>1</sup>, 罗伟<sup>1,2</sup>, 荣耀<sup>1</sup>, 李佳宝<sup>2</sup>

(1. 江西省交通科学研究院有限公司, 江西 南昌 330200; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**为分析降雨渗流对围堰稳定性的影响,依托江西省某航电枢纽项目,以非饱和渗流理论为基础,运用Geo-Studio数值模拟软件对不同降雨条件下围堰的渗流情况和稳定性进行模拟分析,得到不同雨型条件下围堰稳定性的变化情况。研究结果表明:降雨对堰体影响具有滞后性,不同雨型对堰体强度滞后性的影响由大到小依次为:后峰型、均匀型、中峰型、前峰型,且滞后性受降雨强度影响;降雨入渗作用受降雨峰值出现的时间影响,堰体的安全系数随降雨强度峰值出现而骤减;相比初始稳定条件,前峰型降雨对围堰稳定性影响最小,后峰型降雨对围堰稳定性影响最大;坡内土体在前期降雨影响下渗透系数会处于一个高水平状态,此时围堰抵抗突发强降雨的能力将随渗透系数的升高而减弱。

**关键词:**围堰工程;稳定性分析;饱和-非饱和渗流;数值模拟;安全系数

**中图分类号:**TU42;U441

**文献标志码:**A

**本文引用格式:**孙洋,罗伟,荣耀,等.不同雨型条件下围堰边坡渗流稳定性数值分析[J].华东交通大学学报,2022,39(5):29-35.

**DOI:**10.16749/j.cnki.jecjtu.20220914.012

## Numerical Analysis of Seepage Stability of Cofferdam Slope Under Different Rain Types

Sun Yang<sup>1</sup>, Luo Wei<sup>1,2</sup>, Rong Yao<sup>1</sup>, Li Jiabao<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Transportation Institute CO., LTD., Nanchang 330200, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:**In order to analyze the influence of rainfall seepage on the stability of cofferdam, focusing on an navigation-powered junction project in Jiangxi Province, based on the unsaturated seepage theory, this study simulates and explores condition of the seepage and the stability of cofferdam under different rainfall conditions by using the Geo-studio numerical simulation software, and the influence of different rain patterns on the stability of cofferdam is obtained. The results show that the influence of rainfall on the cofferdam has a hysteretic quality. The influence of different rainfall types on the strength hysteresis of weir body is as follows: rear peak type, uniform type, middle peak type and front peak type, and the hysteresis are affected by rainfall intensity. The rainfall infiltration is affected by the time of the peak rainfall, and the safety factor of the cofferdam decreases sharply with the peak rainfall intensity. Compared with the initial stability conditions, the front peak type rainfall has the least impact on the stability of the cofferdam, and the rear peak rainfall has the greatest impact on the stability of the cofferdam. Under the influence of early rainfall, the permeability coefficient of soil in the slope would be at a high level. Thus, the ability of cofferdam to resist sudden heavy rainfall weakens with the increase of permeability coefficient.

**收稿日期:**2022-03-28

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52108320,52068033);江西省自然科学基金面上项目(20202BABL204067);江西省交通运输厅科技项目(2021H0042,2020Z0001)

**Key words:** cofferdam works; stability analysis; saturated unsaturated seepage; numerical simulation; safety factor  
**Citation format:** SUN Y, LUO W, RONG Y, et al. Numerical analysis of seepage stability of cofferdam slope under different rain types[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 29–35.

在水利水电设施的修建过程中,大多数建筑物修筑需要在隔水环境下作业,通过修建围堰,能够尽量避免水体作用对工程造成的不利影响,保障排水、基坑开挖、建筑物修筑的顺利进行。围堰作为土木水利工程修筑的重要设施,其稳定性对工程建设的安全性、经济性、可靠性等至关重要<sup>[1-3]</sup>。

在工程建设施工完成进入正常运营状况后,对库岸堰坡稳定性造成影响的外界因素主要为降雨过程中雨水的渗透作用<sup>[4-11]</sup>。国内外学者对降雨条件下堰体稳定性变化情况进行了大量的研究实验。史振宁等<sup>[12]</sup>结合非饱和土抗剪强度理论与极限平衡理论,设计降雨入渗试验模型,探究土体初始含水率分布状态及降雨入渗条件下土体含水量变化规律。Casagli等<sup>[13]</sup>模拟了多种类型滑坡的渗流过程,通过研究土体内正负孔隙水压力以及边坡稳定性的变化情况,发现坡体最不稳定是在降雨量到达高峰后的几个小时内。周璐等<sup>[14]</sup>采用 Abaqus 有限元软件,考虑不同降雨条件,研究砂砾体围堰中轴面和背水面的渗流及稳定性规律。目前国内外学者对降雨条件下围堰稳定性研究仍有不足,尤其是对不同雨型条件下围堰稳定性的变化规律方面的研究需进一步完善。

## 1 工程概况

依托江西省某航电枢纽围堰工程展开研究,正常蓄水位为 15 m。所处流域位于亚热带季风气候区,根据资料统计显示,单测站年最大降雨量 2 833.9 mm,年最小降雨量 923.7 mm,多年平均降雨量为 1 820.5 mm。持续性强降雨多发生在 6 月,平均每次过程持续 2~3 d,单日最大降雨量为

178.4~287.2 mm,以单峰型降雨为主,峰区主要集中在降雨中后期。

据地质勘查资料显示其覆盖层上部为 0.40~5.20 m 厚粉质粘土,中等透水性;覆盖层中部为粉细砂、中细砂等,松散状,中强透水性,分布连续,场均均有分布。为了提高建模分析的准确性,在围堰洪水期拆除之时,进行现场取样并完成土工试验,进而获取实际围堰填筑材料的物理力学特性。

## 2 有限元模型构建

### 2.1 Geo-Studio 数值模拟

Geo-Studio 是适用于岩土工程模拟计算的仿真分析软件,结合软件自带模块中的边坡稳定分析模块 SLOPE/W 与稳定-非稳定渗流模块 SEEP/W,通过选取库中的典型土壤参数,或输入土水函数曲线以及水力传导曲线等材料参数来进行模型的构建,基于渗流情况运用极限平衡法中的 Morgenstern-Price 对堰体的稳定特性进行分析<sup>[15-17]</sup>。

### 2.2 模型建立

以江西省某航电枢纽项目围堰为依托,根据地质勘查资料与土工试验确定土体物理力学性能参数(见表 1),按二维问题对其进行降雨条件下的渗流场数值计算和稳定性分析。表 1 中  $\gamma$  为容重,  $\varphi$  为内摩擦角,  $c$  为黏聚力,  $k$  为渗透系数,  $\theta_s$  为饱和体积含水量。

假设堰体为均质材料,构建长 80 m,高 20 m,堰体高 10 m 的简化模型,上下游堰坡坡比均为 1:2,网格剖分为 1 193 个节点,1 107 个单元。左侧拟定上游初始水位 15 m,右侧拟定下游水位 10 m,现场

表 1 围堰材料主要物理力学性能参数

Tab.1 Main physical and mechanical property parameters of cofferdam materials

Soil layer name	Soil material	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$	$k/(\text{m/s})$	$\theta_s$
Weir body	Filled soils	19	35	7	$1.5 \times 10^{-5}$	0.33
Soil foundation I	Silty clay	18.8	13	15	$9.5 \times 10^{-5}$	0.42
Soil foundation II	Fine medium sand	17	28	0	$2.2 \times 10^{-4}$	0.26

实测数据表明降雨对上下游水位影响较小,故在分析中假定上、下游水位保持恒定,均设置为相应定水头边界;基础底部设置为不透水边界;坡顶和坡面设置为降雨边界。在堰体中部设置一条观测断面以分析堰体内孔隙水压力变化情况(图 1)。

土体材料的体积含水量函数由于其相关参数的及时获取难度较大,为便于研究,采用 1980 年 Van<sup>[18]</sup>提出的闭合基质吸力函数来描述土的体积含水量及渗透系数的计算模型

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_w - \theta_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (1)$$

$$k_w = k_s \frac{[1 - \alpha l r^{n-1} (1 + (\alpha l r^n)^{-m})^2]}{(1 + \alpha l r^n)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中: $\theta_w$ 为体积含水量; $k_w$ 为指定基质吸力计算所得渗透系数,m/s; $\theta_r$ 为残余含水量; $\theta_s$ 为饱和体积含水量; $k_s$ 为饱和渗透系数,m/s; $\psi$ 为负孔隙水压力,

$\alpha, a, m, n$ 为曲线拟合参数, $n > 1$ ,且  $n = 1/(1-m)$ 。

根据材料参数拟合出体积含水量函数与渗透系数曲线结果如图 2,图 3 所示。

运用稳态分析得到边坡内孔隙水压力、体积含水量的分布规律,以设置模型的初始条件。由于堰体材料的入渗能力受体积含水量变化的影响,入渗流量并不完全等同于降雨量,需要对堰坡表面的流量设置不同的边界条件。当降雨强度较大,超出堰坡表面土体入渗能力时,设置该表面入渗速率与土体入渗能力相等;当降雨强度较小,低于堰坡表面土体入渗能力时,降雨强度即为该表面的入渗速率。在本文的分析中,不考虑蒸腾作用对堰坡渗流场的影响。

### 2.3 方案设计

研究中依次设定了 360,600,840 mm 3 种累积雨量,降雨持时 3 d,并设置前、中、后峰及均匀型 4 种不同雨型来模拟降雨条件下堰体内部渗流场的变化规律,具体设计方案见图 4。

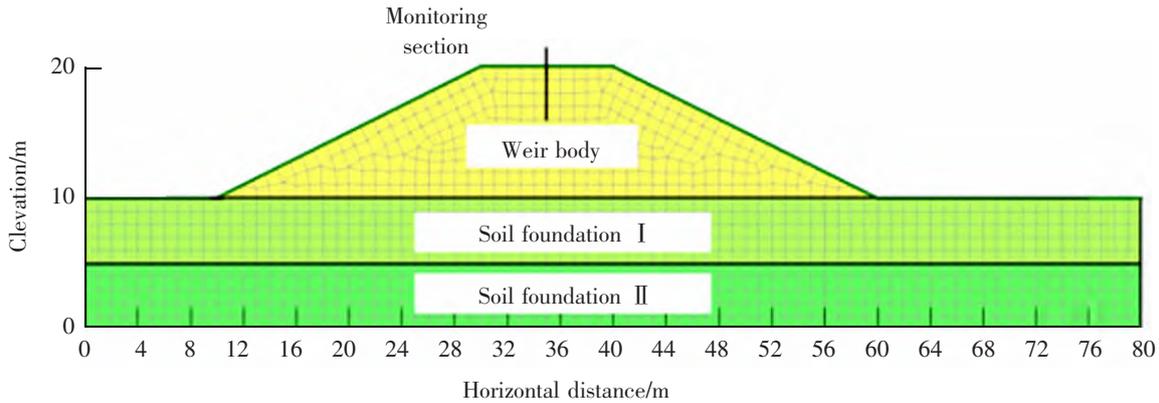


图 1 围堰模型尺寸及网格划分图

Fig.1 Model size of cofferdam and meshing diagram

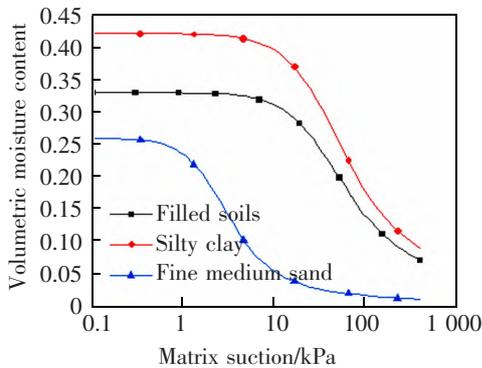


图 2 体积含水量函数

Fig.2 Water content volume function

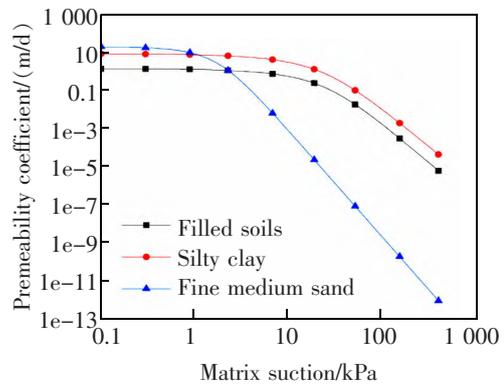


图 3 渗透系数函数

Fig.3 Permeability coefficient function

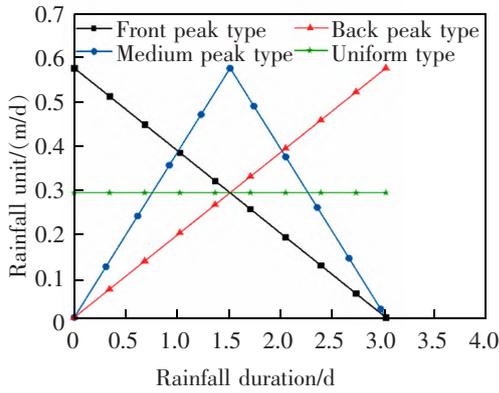


图4 840 mm 雨型方案设计  
Fig.4 840 mm rain pattern scheme design

### 3 围堰渗流稳定性分析

初始条件下围堰内部孔隙水压力分布情况如图5所示,均匀型降雨情况下观测断面孔隙水压力随时间演化情况如图6所示。

在降雨前期,由于堰体表层土体还比较干燥,土体的体积含水量与渗透系数较低,该阶段土体具有极强的入渗能力,一旦少量雨水开始入渗时,就会形成很高的吸力梯度。降雨开始后坡顶处孔隙水压力迅速提高,雨水渗入表层土体后在压力作用下不断向下渗透;随着降雨的持续,雨水持续入渗坡体内部,堰体内部孔隙水压力逐渐增大,这会导致土体有效应力减小,最终弱化堰体抗剪强度,对整体稳定性产生不利影响。在降雨结束后,表层土体缺乏雨水补给后孔隙水压力逐渐消散,而深层土体孔隙水压力保持上升趋势,直至第4天才开始缓慢消散,第6天时围堰内部17 m处仅恢复至初始孔隙水压力的72.8%,这表明降雨对堰体影响具有滞后性,雨停后依旧对堰体深部渗流场造成影响。为探究雨型对堰坡稳定性的影响机理,取总降雨量840 mm时,对4种雨型下不同深度的坡内土体渗透系数进行分析,如图7所示。

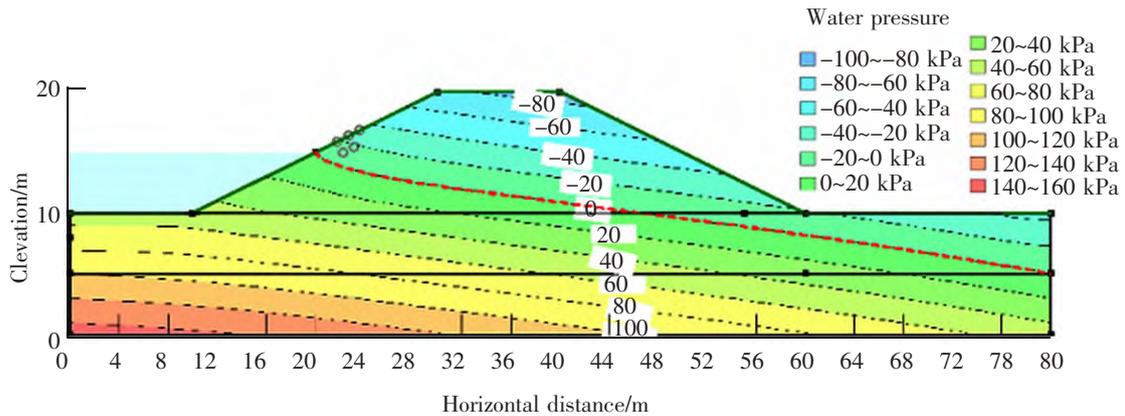


图5 初始条件下孔隙水压力云图(单位:kPa)  
Fig.5 Pore water pressure nephogram under initial conditions(Unit:kPa)

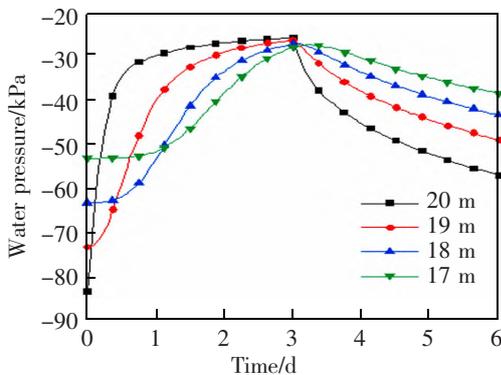


图6 均匀型降雨下观测断面孔隙水压力随时间演化情况  
Fig.6 Pore water pressure evolution of section with time under uniform rainfall

前峰雨型初期雨强较大,堰坡表面土体初始饱和度较低,渗透系数较低,雨水供给速度大于雨水消散速度,导致表层土体在大量雨水作用下迅速饱和,形成暂态饱和区,部分雨水以地表径流形式流走;随着降雨进行,表层土体体积含水量升高,入渗能力随之增强,加速雨水向坡体内入渗,坡内土体渗透系数逐渐上升,入渗饱和区增大,土体抗剪强度降低,由于前峰型降雨中后期雨量较小,外层土体雨量供给不足,雨水消散速度大于供给速度,饱和度开始下降;后峰雨型堰坡表层土体在前中期降雨的作用下体积含水量升高,导致后期雨量较大时

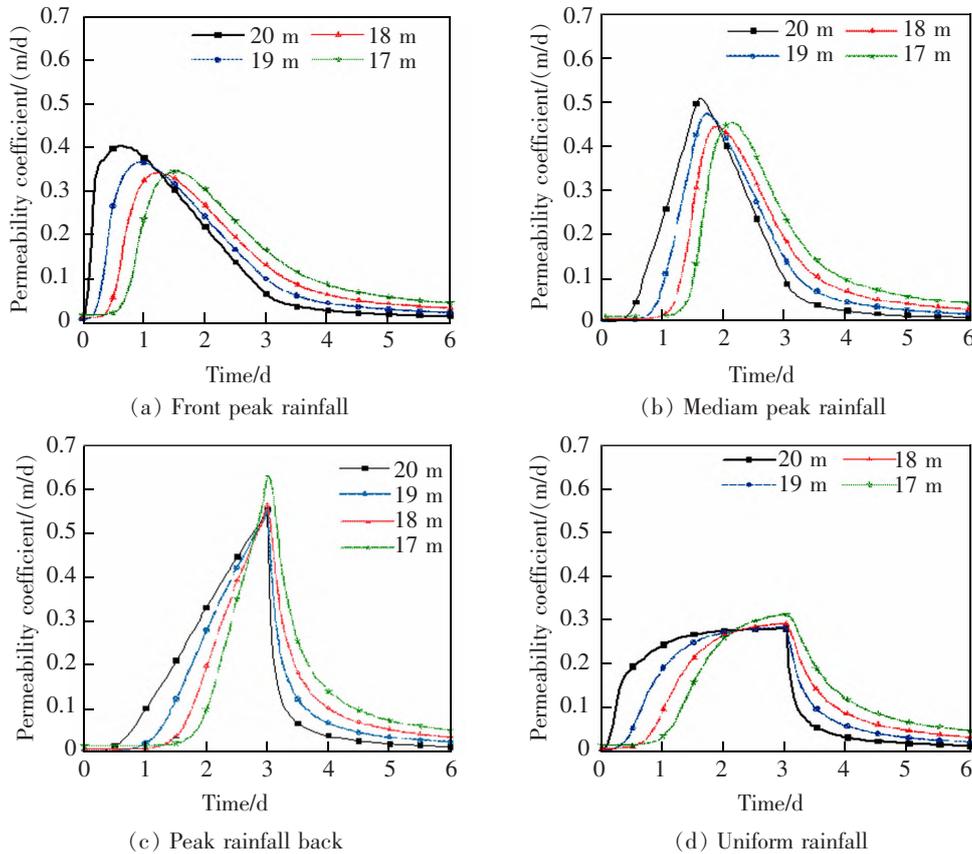


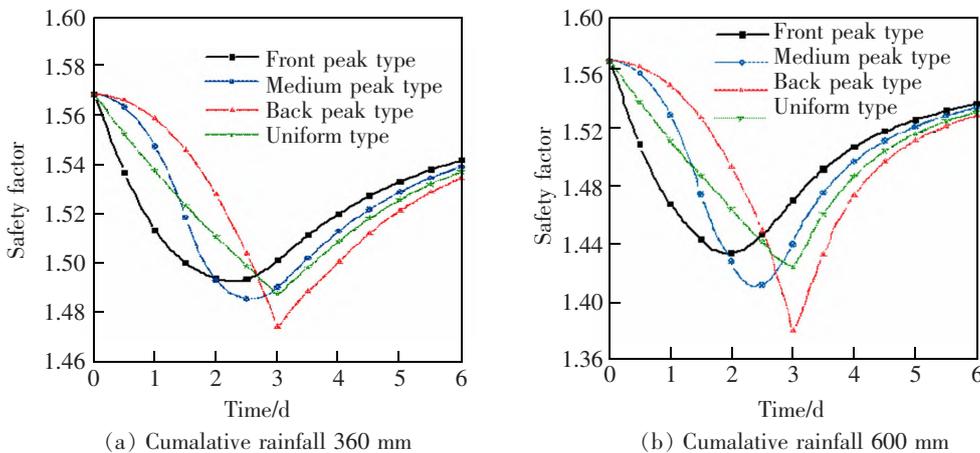
图 7 840 mm 不同雨型下渗透系数变化曲线

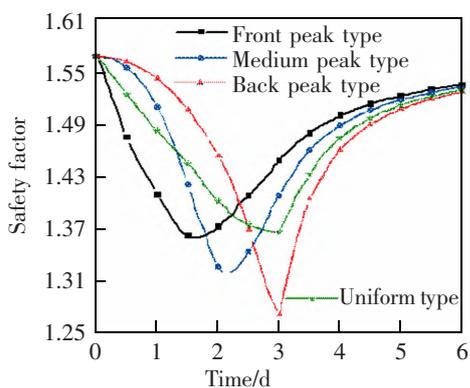
Fig.7 840 mm variation curve of permeability coefficient under different rain patterns

土体渗透系数处于较高水平,大量雨水能够迅速渗入土层内部,堰坡土体强度大幅下降。

由安全系数变化曲线可知:在不同累计降雨总量下,初期前峰型安全系数下降速率最快,随后依次为均匀型、中峰型、后峰型,表明降雨初期雨量越大,堰体稳定性降低越快;不同累计降雨量下,在降雨结束时刻,均为后峰型条件下堰体安全系数最

低,降雨 1.5 d 后,前峰、中峰雨型下堰体安全系数依次开始回升,均匀型与后峰型安全系数均在停雨后开始回升,由于后峰雨型后期雨量较大,堰体内部孔隙水压力需要更长时间消散,安全系数需更长时间回升至初始状态;不同雨型对堰体强度滞后性的影响由大到小依次为:后峰型,均匀型,中峰型,前峰型,如图 8 所示。





(c) Cumulative rainfall 840 mm

图8 不同雨型及累计降雨量下安全系数变化曲线

Fig.8 Variation curve of safety factor under different rain types and cumulative rainfall

上述分析结果表明:降雨过程中,堰体稳定性随降雨时长逐渐降低,在降雨初期,雨强越大,堰坡稳定性下降幅度越大,相同雨量下,后峰型降雨对堰坡土体稳定性影响最大,初期安全系数降低速率最快的是前峰雨型,但其对堰体稳定性的影响最小,后峰型降雨对堰体稳定性的影响最大。

#### 4 结论

通过模拟江西省某航电枢纽围堰工程降雨入渗过程,分析不同雨型条件堰体稳定性变化情况,得出以下结论。

1) 降雨对堰体影响具有滞后性,雨停后依旧对堰体深部渗流场造成影响,不同雨型对堰体强度滞后性的影响由大到小依次为:后峰型、均匀型、中峰型、前峰型,且降雨强度越大,滞后性越强。

2) 降雨入渗作用的影响程度不仅仅由降雨总量决定,同时也受降雨峰值出现的时间影响,同等降雨量情况下,堰体的安全系数随降雨强度峰值出现而骤减,越先出现雨强峰值的初期安全系数降低速率越快,峰值出现时间越晚,总体安全系数下降的幅度越大,对堰体的稳定性越不利。

3) 堰体初始情况下含水量较低,土体渗透系数较弱,对初期强降雨具有一定的抵抗能力;在降雨持续一段时间后,堰坡内土体含水量升高,土体渗透系数将处于一个高水平状态,此时若面临突发强降雨,坡内将渗入大量雨水,大幅影响土体抗剪强度,对堰坡整体稳定性极为不利,建设单位在多发单峰强降雨的夏季应当加强围堰的防排水措施,以消除事故隐患,降低安全风险。

#### 参考文献:

- [1] 郑守仁,王世华,夏仲平,等. 导流截流及围堰工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.  
ZHENG S R, WNG S H, XIA Z P, et al. Diversion intercept and cofferdam works[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.
- [2] 包承纲. 三峡二期围堰创新及其对我国高围堰建设的意义[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(9): 33-42.  
BAO C G. Technical advances in second stage cofferdam of TGP and its significance for high cofferdam construction in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(9): 33-42.
- [3] 何忠明,史振宁,付宏渊,等. 水位下降对沿湖路堤边坡渗流特征及稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9): 3227-3233.  
HE Z M, SHI Z N, FU H Y, et al. Influence of water decline on seepage characteristic and slope stability of embankment along lake[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3227-3233.
- [4] 雷卫佳,刘伟煌,郭生根,等. 水位升降对库坡渗流场及稳定性影响[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(4): 27-32.  
LEI W J, LIU W H, GUO S G, et al. Analysis of influence of water level rise and fall on seepage field and stability of reservoir slope[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 27-32.
- [5] 文海家,张岩岩,付红梅,等. 降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 15-29.  
WEN H J, ZHANG Y Y, FU H M, et al. Research status of instability mechanism of rainfall-induced landslide and stability evaluation methods[J]. China Journal Highway Transportation, 2018, 31(2): 15-29.
- [6] 杨新平. 砂砾体围堰渗流场及稳定性分析研究[D]. 长沙:中南大学, 2020.  
YANG X P. Study on seepage field and stability of gravel cofferdam[D]. Changsha: Central South University, 2020.
- [7] DI B F, STAMATOPOULOS C A, STAMATOPOULOS A, et al. Proposal, application and partial validation of a simplified expression evaluating the stability of sandy slopes under rainfall conditions[J]. Geomorphology, 2021, 395: 107966.
- [8] HUANG K, LIU R L, QIN L, et al. Effects of slope length on soil erosion of Karst slope under different rainfall conditions [J]. The Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 265-271.
- [9] 刘杰,曾铃,付宏渊,等. 土质边坡降雨入渗深度及饱和区变化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 452-459.

- LIU J,ZENG L,FU H Y,et al. Variation law of rainfall infiltration depth and saturation zone of soil slope[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2019,50(2):452-459.
- [10] 罗立哲,胡志根,刘全,等. 土石围堰边坡稳定的多因素综合风险分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(7):617-622.
- LUO L Z,HU Z G,LIU Q,et al. Comprehensive risk analysis of rock-fill cofferdam slope stability considering multiple random factors[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2013,46(7):617-622.
- [11] 章立辰,黄北屹,黄勇,等. 抛填饱和软粘土围堰模型试验相似材料研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(6):20-28.
- ZHANG L C,HUANG B G,HUANG Y,et al. Study on similar materials for model test of dumped saturated soft clay cofferdam[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(6):20-28.
- [12] 史振宁,戚双星,付宏渊,等. 降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究[J]. 岩土力学,2020,41(3):980-988.
- SHI Z N,QI S X,FU H Y,et al. A study of water content distribution and shallow stability of earth slopes subject to rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(3):980-988.
- [13] CASAGLI N,DAPPORTO S,IBSEN M L,et al. Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th-21st November 2000,in Northern Tuscany[J]. Landslides,2006,3(1):13-21.
- [14] 周璐,胡云卿,罗伟,等. 不同降雨条件下的某航电枢纽工程砂砾体围堰稳定性分析[J]. 水电能源科学,2022,40(2):136-140.
- ZHOU L,HU Y Q,LUO W,et al. Stability analysis of the sand-gravel cofferdam of a navigation power junction project under different rainfall conditions[J]. Water Resources and Power,2022,40(2):136-140.
- [15] ALDULAIMI ALI A. Safety evaluation of the chamrga earth dam. a seepage deformation,and stability analysis with GeoStudio[J]. Earth and Environmental Science,2021,664(1):128-135.
- [16] 吴梦喜,宋世雄,吴文洪. 拉哇水电站上游围堰渗流与应力变形动态耦合仿真分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(4):613-623.
- WU M X,SONG S X,WU W H. Dynamic coupled simulation analysis of seepage and stress deformation of upstream cofferdam of Lava Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(4):613-623.
- [17] 刘子振,言志信. 降雨入渗非饱和黏土边坡稳定性的极限平衡条分法研究[J]. 岩土力学,2016,37(2):350-356.
- LIU Z Z,YAN Z X. Limit equilibrium slice method for unsaturated clay slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(2):350-356.
- [18] VAN G 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.



第一作者:孙洋(1988—),男,高级工程师,博士,研究方向为岩土与地下工程。E-mail:530351828@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)