

泄洪雾化条件下堆积体边坡渗流-径流分析

刘刚^{1,2}, 江宇翔¹, 童富果^{1,2}, 许莲奇¹, 毛杨阳¹

(1. 三峡大学水利与环境学院; 2. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学))

摘要:为研究泄洪雾化产生的雾化降雨对干热河谷地区堆积体边坡安全稳定性的影响,基于水气两相流理论,建立泄洪雾化和复杂坡面径流-坡体渗流全过程耦合模型,通过欧拉双流体模型对泄洪过程中的水、气运动进行描述,考虑坡体渗流与坡面径流之间的耦合关系,实现对泄洪过程中的水、气运动的数值求解。研究表明,建立的耦合模型将渗流与径流之间的流量边界转化为模型内部边界,解决了边界条件设定不准确带来的计算难题;对堆积体边坡而言,雾化降雨主要形成坡面径流,径流形成时间短,径流量大,消散时间快;在考虑坡面径流对坡体渗流影响的基础上,坡体内雨水入渗的深度和入渗量整体呈增大趋势。

关键词:泄洪雾化;边坡渗流;渗流-径流模型;边坡稳定

Analysis of seepage and runoff of accumulation slopes under flood discharge-induced atomization conditions//Liu Gang^{1,2}, Jiang Yuxiang¹, Tong Fuguo^{1,2}, Xu Lianqi¹, Mao Yangyang¹ (1. College of Hydraulic & Environment Engineering, China Three Gorges University; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University)

Abstract: To investigate the impact of flood discharge-induced atomized rainfall on the safety and stability of accumulation slopes in dry-hot valley regions, a fully coupled model of flood discharge-induced atomization, surface runoff and seepage of complex slope was established based on the water-air two-phase flow theory. The Eulerian two-fluid model was adopted to describe the motion of water and air during flood discharge, and the coupling relationship between slope seepage and surface runoff was explicitly considered, enabling the numerical solution of the water-air flow process. The results show that the developed coupled model transforms the flux boundary between seepage and runoff into an internal boundary of the model, thereby overcoming the computational challenges caused by inaccurate boundary condition specification. For accumulation slopes, atomized rainfall primarily forms surface runoff, which is characterized by short formation time, high runoff volume, and rapid dissipation. When the influence of surface runoff on slope seepage is taken into account, the rainwater infiltration depth and volume within the slope body generally exhibit an increasing trend.

Key words: flood discharge atomization; slope seepage; seepage-runoff model; slope stability

我国西南干热河谷地区一批已建和在建的200 m级以上高坝普遍具有“高水头、大泄量、高边坡、窄河谷”特征^[1-2]。泄洪引起的雾化降雨强度远超自然极端降雨强度,加之干热河谷区域具有气候干燥、植被稀少、生态脆弱等特点,极易因泄洪雾化诱发潜在地质灾害^[3]。准确预测雾化降雨强度及其渗流、径流产生规律,是边坡安全稳定计算的前提^[4]。张华等^[5]建立了挑流泄洪雾化随机喷溅模型,并对漫湾、二滩、乌江渡等工程进行了反馈验证;戴丽荣等^[6]采用BP神经网络模型对挑流泄洪雾化

范围和降雨强度进行了预测;柳海涛等^[7]对随机喷溅模型进行了改进,考虑了水舌入水速度、入水角度等因素的影响。随着数值计算技术的不断发展,薛万云等^[8-11]基于WRF模式和水气两相流理论开展了泄洪雾化数值预测方面的研究工作。与自然降雨不同,雾化降雨具有强度大、梯度变化快、分布集中等特点。因此,雾化降雨在边坡上的径流过程和雨水入渗过程也与自然降雨条件下的不同。

干热河谷地区广泛分布着由残坡积、冲洪积、崩坡积等砂砾石、含砾石的土石混合体形成的堆积体

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2023AFB032);国家自然科学基金项目(52209135);湖北省教育厅科学研究计划青年人才项目(Q20241210);水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金项目(2023KSD16,2024KSD10)

作者简介:刘刚(1991—),男,讲师,博士,主要从事水气两相流研究。E-mail:hkliugang@126.com

通信作者:童富果(1972—),男,教授,博士,主要从事多场耦合研究。E-mail:tf@ctgu.edu.cn

滑坡,具有结构松散、胶结程度低、孔隙度大、透水性强等特征,堆积体的力学特性对含水量十分敏感^[12-13]。通常坡体内的雨水入渗和坡面径流是一个相互耦合的过程,坡体表面的雨水入渗速率与降雨强度之间的差值是决定坡表是否产流的关键,而在坡体表面处的径流和渗流之间应该满足流量及压力协调条件。童富果等^[14]提出了坡面径流与饱和-非饱和渗流耦合计算模型,解决了径流计算中边界流量设定不准确的难题。胡鹏等^[15]建立了坡面降雨径流模型,对不同类型坡面的产流进行了模拟,分析了阻力模式对坡面流模拟结果的影响。Liu等^[16]提出了坡面径流-坡体非饱和渗流耦合模型,考虑了坡体孔隙气压力对坡面径流的影响。然而,这些模型大多针对简单坡面(坡面倾角大于0°)展开,不能对复杂坡面的径流产生情况进行预测,实际坡体表面既有坡度大于0的区域也有坡度小于0的区域。

与自然降雨不同,雾化降雨分布区域较为集中,往往难以覆盖整个坡体表面,即在坡体表面存在明显的降雨分界线。在坡体中下部,由于雾化降雨强度较大,很容易在坡体表层形成饱和区;而在坡体中上部,雾化降雨很小,甚至几乎没有,加之堆积体边坡内的孔隙连通性较好,不能形成较好的封气环境,势必会对坡体中下部的雨水入渗过程产生影响。本文基于水气两相流理论,通过对雾化降雨分布进行预测,建立能够考虑复杂坡面径流的泄洪雾化和复杂坡面径流-坡体渗流全过程耦合模型,实现对复杂坡面径流的模拟,以期掌握雾化降雨引起的坡面径流产生规律。

1 计算模型和方法

泄洪过程中水、气运动之间相互影响,空气在水舌拖曳作用下形成雾化风,雾化风进而带动雾化水滴向河道下游及两岸边坡传播扩散,遇到障碍物形成雾化降雨;雾化降雨除了渗入边坡体外,部分雨水在坡体表面汇集形成径流,坡体内渗流与坡面径流相互耦合。忽略泄洪过程中的温度变化以及土体的变形,基于连续介质力学假定,采用欧拉坐标系建立耦合模型。

1.1 泄洪雾化预测模型

1.1.1 水气运动控制方程

泄洪雾化涉及复杂的水气两相掺混运动,从能量转化角度来看,泄洪过程中水体势能转化为水、气两相的动能和热能。忽略泄洪过程中的温度变化,可采用欧拉双流体模型^[17]对泄洪过程中的水气两相进行描述:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + u_{ki} \frac{\partial \rho_k}{\partial x_i} + \rho_k \frac{\partial u_{ki}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_k \frac{\partial u_{ki}}{\partial t} + \rho_k u_{kj} \frac{\partial u_{ki}}{\partial x_j} - \mu_k \frac{\partial^2 u_{ki}}{\partial x_j^2} - \frac{\mu_k}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_{kj}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho_k f_i + \omega_i = 0 \quad (2)$$

式中: x_i 为空间坐标分量($i=1,2,3$,分别对应笛卡尔坐标系的3个方向); t 为时间; ρ_k 为 k ($k=1,g$,分别对应水和空气)相流体的密度; u_{ki} 为 k 相流体在 x_i 方向的速度; μ_k 为 k 相流体的动力黏滞系数; p 为流体压力; f_i 为重力加速度在 x_i 方向上的分量; ω_i 为水气两相间的相互作用力在 x_i 方向上的分量。

1.1.2 雾化降雨转换方法

通过求解泄洪过程中的水气运动方程,可以得到空间任意点任意时刻的水气浓度分布,但由于雾化降雨强度不是直接求解的未知量,需要建立雾雨之间的转换方法。国内部分学者对雾雨转化方法进行了研究,考虑了雾滴之间的碰并、沉降、风速等因素,但相关方法缺少有效的实测数据支撑^[18-20]。从数值计算的角度来看,雾化降雨主要针对的是地表点,地表为水气运动的边界条件,穿过地表附近截面的水雾通量即为雾化降雨强度 q ,可表示为:

$$q = \oint_s C_1 \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} ds \quad (3)$$

式中: C_1 为水的体积分数; \mathbf{v} 为速度; \mathbf{n} 为法向量。

1.2 复杂坡面径流-坡体渗流耦合模型

泄洪雾雨在坡面除了入渗以外的部分会形成径流,坡体内的雨水下渗通常可用非饱和渗流理论进行描述,忽略渗流过程中孔隙的变化,基于连续介质理论,孔隙中水流动方程和气流动方程可分别表示为^[21]:

$$n \frac{\partial S_1}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k_r k}{\mu_1} (\nabla p_1 + \rho_1 \mathbf{g}) \right] = 0 \quad (4)$$

$$n(1-S_1) \frac{\partial \ln \rho_g}{\partial t} - n \frac{\partial S_1}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k_{gr} k}{\mu_g} (\nabla p_g + \rho_g \mathbf{g}) \right] + \left[-\frac{k_{gr} k}{\mu_g} (\nabla p_g + \rho_g \mathbf{g}) \right] \cdot \nabla \ln \rho_g = 0 \quad (5)$$

式中: n 为孔隙率; S_1 为孔隙水饱和度; k_r 为水相相对渗透系数; k 为表征土体结构的本征渗透系数; p_1 为孔隙水压力; \mathbf{g} 为重力加速度; μ_g 为空气的动力黏滞系数; ρ_g 为空气的密度; k_{gr} 为空气的相对渗透系数。

坡面径流过程通常可采用完整圣维南方程描述,在忽略惯性项和压力项的条件下,可进一步简化为基于曼宁阻力关系的运动波方程^[22]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s = I_n - f \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{q}_s = \frac{h^{5/3}}{n_{\text{man}} \sqrt{S}} \mathbf{S}_f$$

式中: h 为径流水深; I_n 为参与坡面径流形成的有效降雨强度; f 为入渗强度; n_{man} 为曼宁糙率系数; \mathbf{q}_s 为坡面径流单位宽流量矢量; \mathbf{S}_f 为摩擦降阶; S 为坡面几何坡度。

1.3 本构关系模型

模型求解过程中各物理量相互关联,通过引入本构关系可以对模型求解进行简化,本文数值求解中涉及的本构关系模型主要包括4个模型。

a. 流体密度-压力关系模型:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - (p - p_0)/K_m} = \frac{K_m \rho_0}{K_m - p + p_0} \quad (7)$$

式中: ρ 为流体密度; ρ_0 为标准大气压下的密度; p_0 为标准大气压; K_m 为流体的压缩模量。

b. 土水特征曲线模型:

$$p_c = -P_a (S_e^{-1/\lambda} - 1)^{-1/\lambda} \quad (8)$$

式中: p_c 为基质吸力; S_e 为有效饱和度; P_a 为土体进气值; λ 为系数。

c. 水相相对渗透系数模型:

$$k_{lr} = \sqrt{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (9)$$

式中: m 为系数。

d. 气相相对渗透系数模型:

$$k_{gr} = \left(1 - \frac{S_1 - S_{lr}}{1 - S_{gr} - S_{lr}}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{S_1 - S_{lr}}{1 - S_{gr} - S_{lr}}\right)^2\right] \quad (10)$$

式中: S_{gr} 为气的残余饱和度; S_{lr} 为水的残余饱和度。

1.4 模型求解方法

泄洪雾化控制方程的求解在文献[10]中已经提及,此处不再重复。本文重点对复杂坡面的径流-渗流模型的求解进行介绍,对于坡面径流和坡体渗流部分,对坡面上某一点 $N(x_0, y_0)$,水深为 h ,坡角为 α ,则其总水头函数可表示为 $|\Phi| = \frac{h}{m_2} + y_0$,其中

$m_2 = \cos \alpha$,从而得到 $\frac{\partial h}{\partial t} = m_2 \frac{\partial |\Phi|}{\partial t}$ 。故坡面径流-坡体渗流过程的有限元求解格式可表示为:

$$C_h \frac{\partial \Phi}{\partial t} + K_h \Phi = f_h \quad (11)$$

式中: Φ 为总压力水头列向量; $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ 为总压力水头对时间的导数的列向量; K_h 为总渗透矩阵; C_h 为储水矩阵; f_h 为节点流量。

坡体渗流与坡面径流本身是一个相互耦合的过程,传统的非耦合模型需要手动设定入渗边界及产流边界,而这两个边界通常难以同步,数据间的耦合较为复杂,降雨入渗速率与土体入渗能力不容易匹配。因此,耦合求解坡面径流-坡体渗流过程,能够实现入渗→产流→入渗过程的自然过渡,同时降低计算成本。

2 雾化降雨作用下边坡渗流场分析

2.1 雾化雨场分析

以西南干热河谷区域的GS水电站为研究对象,建立泄洪雾化研究模型。该电站采用挑流方式进行消能,百年一遇洪水流量为 $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据溢洪道体型资料及河谷地形建立三维有限元计算模型,经过网格依赖性考证,GS水电站泄洪雾化模型计算网格如图1所示。对溢洪道所在部位进行了加密,而对远离泄洪核心区域的部位则适当放大网格尺寸,计算模型共计118021个节点、108153个单元。

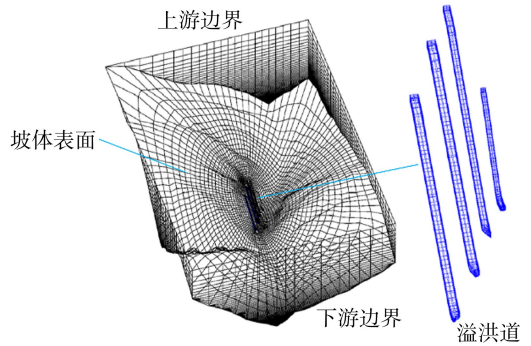


图1 GS水电站泄洪雾化三维计算网格

通过模拟洪水从溢洪道的下泄过程,可得到计算区域内雾化降雨强度的分布,如图2所示。泄洪雾化产生的降雨与自然降雨不同,雾化降雨核心区的降雨强度大于 5000 mm/h ,远超自然降雨强度。泄洪雾化产生的降雨具有局部强度大、降雨强度分布变化快的特征。强降雨会导致两岸河谷在局部区域遭到剧烈的冲刷作用,对河谷边坡的安全稳定产生影响。

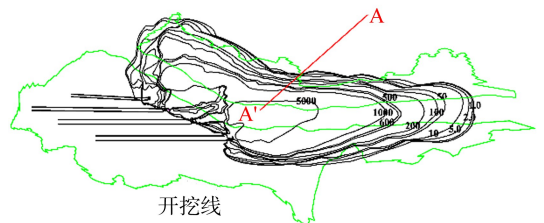


图2 雾化降雨强度分布(单位:mm/h)

2.2 边坡渗流场分析

边坡降雨入渗是一个复杂的非饱和渗流过程,涉及水气两相在土体中的相互驱替效应。传统的降

雨入渗通常基于 Richard 方程展开,认为坡体内的孔隙气压力恒等于大气压力,实质上忽略了水、气之间的耦合作用,仅考虑了水的运动。而坡体中的孔隙气体对雨水的入渗过程均存在明显的阻滞作用。为研究雾化降雨条件下边坡内的渗流场分布情况,选择 A—A'剖面对其降雨入渗过程进行分析,A—A'剖面的地质结构及建立的计算网格如图 3 所示。

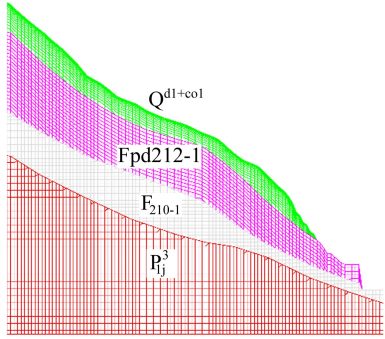


图 3 A—A'剖面几何模型

渗流计算涉及各土层的渗透性、基质吸力参数等,通过现场取样、室内测试的方法,采用三轴饱和渗透仪以及压力板仪得到各土层的计算参数,如表 1 所示。

坡表的雾化降雨强度分布可根据图 2 得到,其中 A 点为坐标原点,A—A'方向为 x 轴正向,雾化降雨强度及坡表高程对应关系如图 4 所示,越靠近河道,雾化降雨强度越大,最大可达到 5 017 mm/h,同时雾化降雨强度的变化梯度也很大,在大约 200 m 的距离内,雾化降雨强度由最大值迅速降至接近 0 mm/h。

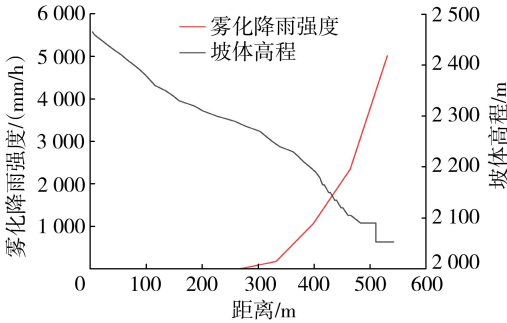


图 4 剖面 A—A'雾化降雨强度及坡表高程

雾化降雨在坡体内的入渗过程从时间上可分为两个阶段:降雨初期,坡表较为干燥,雨水的入渗速率大于降雨强度的部位,所有的雨水均入渗,而不产

流;随着入渗的进行,土体表层逐渐饱和,雨水入渗速率逐渐比降雨强度小,此时坡体表面将产生径流。结合雾化降雨强度的分布特征可将坡体表面分为产流区和不产流区:在不产流区,雾化降雨的强度较小,通常小于土体的饱和入渗强度;在产流区,雾化降雨强度较大,坡表的非饱和入渗过程很短。雾化降雨入渗过程中剖面 A—A'坡体内的饱和度分布如图 5 所示。

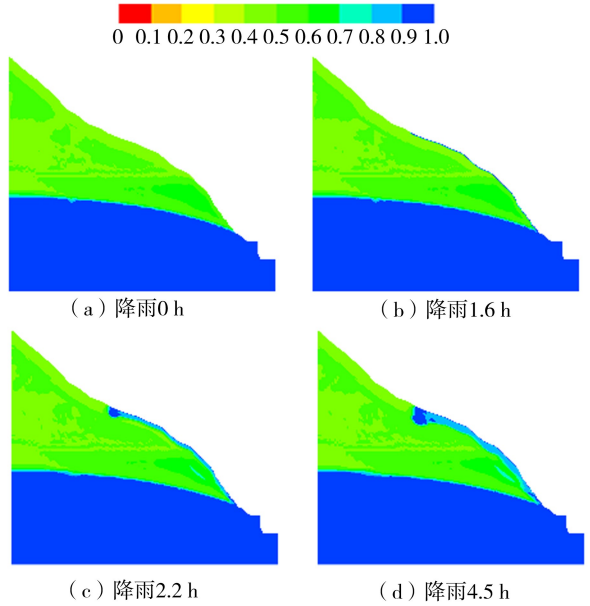


图 5 雾化降雨入渗过程中坡体内饱和度分布

雾化降雨强度在靠近河道中心部分较大,坡面高程越高的地方雾化降雨强度越小,在高程超过 2 250 m 以后,雾化降雨强度几乎为 0,这也导致坡体表面降雨强度的分布不均匀,进而引起雾化降雨的入渗过程并非均匀的。通过 4.5 h 的坡体饱和度分布图可以发现,在坡体中间部位的雾化降雨入渗深度增加较快,而在坡脚部位的雾化降雨入渗深度较浅。引起这一现象的主要原因是坡体中部是雾化降雨强度的分界线,低于这一高程的雾化降雨强度大于土体的饱和入渗强度,而在这一高程以上,雾化降雨强度小于土体的饱和入渗强度。因此,2 250 m 高程以上坡体表面并不能形成良好的封气条件,导致雾化降雨在坡体中部位能够持续不断地入渗,而在坡脚部位,由于孔隙气压力的顶托作用,使得入渗深度较浅。

为进一步分析坡体内的水气两相运动规律,选

表 1 各土层渗流计算参数

土层	渗透系数/(10^{-4} cm/s)	天然容重/(kN/m^3)	饱和容重/(kN/m^3)	初始孔隙率	P_a/kPa	λ	残余饱和度
Q^{dl+col}	50.00	18.0	20.0	0.35	0.025	0.359	0.05
Fpd212-1	2.75	21.5	22.5	0.20	1.33	0.418	0.10
F_{210-1}	3.95	24.5	25.0	0.18	1.33	0.472	0.10
P_{ij}^3	1.90	24.5	24.8	0.18	1.33	0.372	0.10

取坡体中部竖直截面,分析水气沿竖直坡面的运动规律,其孔隙压力和饱和度随时间的变化规律如图6所示。

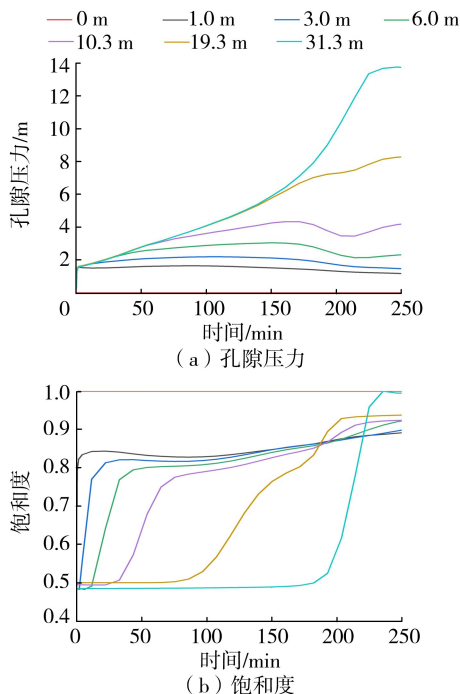


图6 不同深度处孔隙压力和饱和度随时间的变化

由图6可知,土体非饱和区的孔隙压力以气压力为主,而饱和区以水压力为主。降雨初始时刻,坡体不同深度处的孔隙压力均接近0,降雨开始后,坡体内的孔隙压力迅速上升并逐渐趋于稳定,深度越深,其稳定的孔隙压力越大。从坡体内不同深度处的饱和度随时间变化过程来看,深度越深,饱和度变化的起始时间越滞后,坡表处的饱和度随着降雨的进行迅速增加,然后增长速率逐渐减缓。坡表与深层部位相比,其饱和度开始变化的时间点不同,但坡表达到完全饱和所需的时间更短,明显早于其他部位。

2.3 复杂坡面径流规律分析

当坡体入渗强度小于降雨强度时,坡体表面开始产生径流,总体而言,坡面径流与坡体渗流的总水量与雾化降雨的量保持平衡。由于坡体表面形态非常复杂,通常坡面的倾角会不断发生变化,可能大于0也可能小于0,如图7所示。

由图7可知,复杂坡面倾角的正弦值有正有负,对复杂坡面的产流情况进行计算时需要分别进行处理。在坡角正弦值正负转换处的径流既有来自上游侧的水,也有来自下游侧的雨水,当转折处的径流水深超过下游坡体的局部最高点后,径流便继续往下游汇流。为准确模拟正负坡角并存条件下的径流过程,在数值计算中首先根据节点地形高程计算局部坡角 α ,并以 $\sin\alpha$ 的符号作为判别依据。以正负坡角变化点为界,将坡面划分为若干子区域分别计算

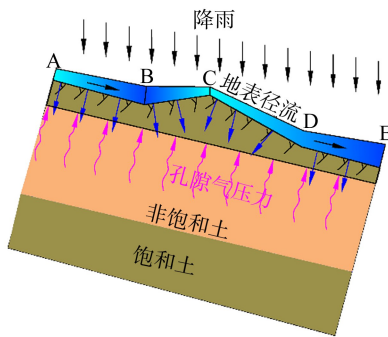


图7 复杂坡面产流示意图

其径流演化过程。在正负坡角转换位置处,净通量由相邻单元之间的水头差及通量方向共同决定。当该处总水头超过其下游节点的局部最高高程时,将触发越流条件,径流继续向下游输移;当未形成有效水头差时,则在该处发生蓄水,更新淹没区各节点的水头,直到积水深度达到越流条件。在时间进一步推进过程中,通过动态比较转折点与相邻节点的总水头势,实时判断通量方向及是否发生越流。当转折点与相邻节点水头梯度始终保持单一方向且未出现局部蓄水时,可将整个坡面作为统一计算域进行整体求解;当出现反向水头梯度或局部积水现象时,则在该处保持子区划分,并引入越流边界,以保证计算结果的物理合理性与数值稳定性。

为验证复杂坡面情况下的径流生成规律,考虑坡体渗流与坡面径流之间的耦合作用,得到不同时刻沿坡表的径流深度变化曲线,如图8所示。通过对比分析可以发现,B点和C点(位置见图7)的径流深度会出现极值,随着降雨的进行,B点处的径流水深会随着雨水的聚集逐渐增加,在局部形成水平面,使水面以下部位的径流水深呈线性分布,只有当B点的高程加上径流深度超过C点的高程以后,C点处才会产生径流。

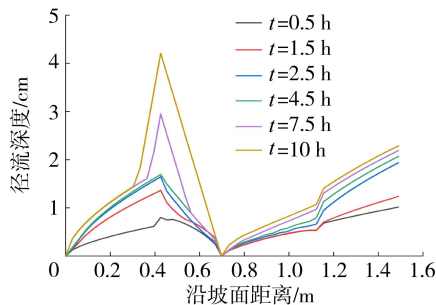


图8 复杂坡面径流深度变化规律

采用复杂坡面径流径流深度计算方法对雾化降雨条件下的边坡表面的径流深度进行计算分析,得到坡表不同位置处的径流深度随时间变化过程曲线和不同时刻径流深度沿坡表的变化情况,如图9和图10所示。

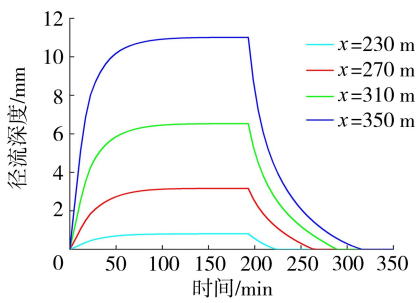


图9 坡表不同部位径流深度随时间变化规律

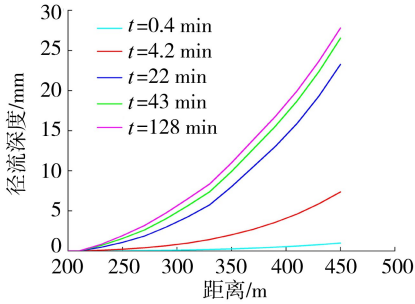


图10 不同时刻径流深度沿坡表分布情况

由于雾化降雨强度较大,坡面径流达到稳定的时间大致在 50 min 左右, x 轴方向距离越短、坡表高程越高,达到稳定的径流深度越浅,当雾化降雨停止后,坡面径流的消散速度也越快。由图 9 可知,在距离坡表顶点 350 m 处的径流水深可达 11.0 mm,此处雾化降雨强度约为 500 mm/h。雾化降雨产生的坡面径流总体具有形成时间短、径流量大、消散时间快的特征,径流深度越大,其消散的时间也越长。由图 10 可知,在坡面径流达到稳定后,根据计算结果,局部最大径流水深可达 27.8 mm,这主要跟雾化降雨强度较大相关。径流深度沿坡表的分布呈现非线性变化趋势,径流深度的增长率随着沿 x 轴方向坡表距离的增大而迅速增加,越往河道中心,径流深度的增长率越大,说明雾化降雨形成的径流在此处越聚集。

3 结论

a. 雾化降雨具有强度大、变化梯度大、分布集中的特点,对堆积体边坡而言,雾化降雨的去向以坡面径流为主,受堆积体饱和渗透系数的影响,入渗至坡体内部的降雨相对较少。

b. 雾化降雨沿坡体表面呈非均匀分布,雾化降雨强度随着高程的增加而减小,导致在雨水入渗过程中,坡体表面并不能形成良好的封气条件,进而引起雾化降雨在雾化降雨边缘部位的入渗深度较大,而在坡脚部位的入渗深度较浅。

c. 坡面高程越高,雾化降雨引起的坡面径流深度越浅,径流达到稳定的时刻越提前,降雨停止后,

径流消散得也越快。

d. 雾化降雨条件下,靠近坡脚部位的降雨强度较大,坡表局部径流深度最大可达 27.8 mm,而在雾化降雨强度较小的区域,径流深度受坡体渗流的影响较为显著,当雾化降雨小于坡体饱和渗流强度时,坡表不产流。

参考文献:

- [1] 练继建,刘丹,刘昉. 中国高坝枢纽泄洪雾化研究进展与前沿[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 283-293. (Lian Jijian, Liu Dan, Liu Fang. Research progress and frontiers on flood discharge atomization of Chinese high dam projects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 283-293. (in Chinese))
- [2] 王思莹,王才欢,陈端. 泄洪雾化研究进展综述[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7): 53-58. (Wang Siying, Wang Caihuan, Chen Duan. Advances in research on flood discharge atomization[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(7): 53-58. (in Chinese))
- [3] 韩建华,陈菲,谢晨希,等. 基于地质演变分析的岸坡堆积体稳定性评价[J/OL]. 工程科学与技术, 2024-10-08. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20241001.0601.002>. (Han Jianhua, Chen Fei, Xie Chenxi, et al. Stability evaluation of colluviums on a river bank based on the analysis of geological evolution[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2024-10-08. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20241001.0601.002>. (in Chinese))
- [4] 张雄,杨泽艳. 我国水电工程边坡治理若干问题的思考与研究[J]. 水力发电, 2018, 44(8): 23-27. (Zhang Xiong, Yang Zeyan. Several problems of slope treatment for hydropower engineering in China[J]. Water Power, 2018, 44(8): 23-27. (in Chinese))
- [5] 张华,何贵成. 泄洪雾化水滴分档随机喷溅数学模型及其验证[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 53-60. (Zhang Hua, He Guicheng. Mathematical model of graded random splashing droplets in flood discharge atomization and its verification[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 53-60. (in Chinese))
- [6] 戴丽荣,张云芳,张华,等. 挑流泄洪雾化影响范围的人工神经网络模型预测[J]. 水利水电技术, 2003, 34(5): 7-9. (Dai Lirong, Zhang Yunfang, Zhang Hua, et al. An artificial neural network model of flood discharge atomization prediction of hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(5): 7-9. (in Chinese))
- [7] 柳海涛,刘之平,孙双科. 水舌入水喷溅的随机数学模型[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(6): 1-4. (Liu

- Haitao, Liu Zhiping, Sun Shuangke. Stochastic mathematical model of splashing from water jets [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6):1-4. (in Chinese))
- [8] 薛万云,杨家修,杜帅群,等. 基于CFD的挑流泄洪雾化特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4):16-20. (Xue Wanyun, Yang Jiaxiu, Du Shuaiqun, et al. Study on characteristics of flood discharge atomization of ski-jump jet based on CFD [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4):16-20. (in Chinese))
- [9] 张华,孙春雨,陈永访. 基于多尺度数值同化模式的泄洪雾化对天气环境影响的数值模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(2):95-103. (Zhang Hua, Sun Chunyu, Chen Yongfang. Numerical simulation of the effects of flood discharge atomization on weather environment based on multi-scale numerical assimilation model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(2):95-103. (in Chinese))
- [10] Liu Gang, Tong Fuguo, Tian Bin, et al. Finite element analysis of flood discharge atomization based on water-air two-phase flow [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 81:473-486.
- [11] 刘刚,童富果,田斌. 基于水气两相流的水布垭电站泄洪雾化有限元分析[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(6):90-102. (Liu Gang, Tong Fuguo, Tian Bin. Finite element analysis on the flood discharge atomization of Shuibuya Hydropower Station based on water-air two-phase flow [J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(6):90-102. (in Chinese))
- [12] 敬静,徐晓亮,卿艳彬,等. 浅析冰碛堆积物滑坡的勘查及防治要点[J]. 冶金管理, 2022(15):73-75. (Jing Jing, Xu Xiaoliang, Qing Yanbin, et al. Exploration and prevention of landsliding in moraine accumulations [J]. Metallurgical Management, 2022(15):73-75. (in Chinese))
- [13] 陈磊,张强,贾朝军,等. 强降雨对库岸堆积体边坡稳定性影响的离心模型试验和数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(5):1423-1434. (Chen Lei, Zhang Qiang, Jia Chaojun, et al. Centrifugal modeling and numerical simulation on stability of reservoir bank accumulation slope caused by heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5):1423-1434. (in Chinese))
- [14] 童富果,田斌,刘德富. 改进的斜坡降雨入渗与坡面径流耦合算法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4):1035-1040. (Tong Fuguo, Tian Bin, Liu Defu. A coupling analysis of slope runoff and infiltration under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1035-1040. (in Chinese))
- [15] 胡鹏,余明辉. 坡面径流阻力计算模式对比研究[J]. 水利学报, 2020, 51(1):14-22. (Hu Peng, Yu Minghui. A comparative study on different roughness models of overland flow simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1):14-22. (in Chinese))
- [16] Liu Gang, Tong Fuguo, Tian Bin. A finite element model for simulating surface run-off and unsaturated seepage flow in the shallow subsurface [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(26):3378-3390.
- [17] 刘刚. 基于水气两相流理论的高坝泄洪雾化计算研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2020.
- [18] 张华,练继建. 底流泄洪雾化对下游环境影响预测[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1):107-112. (Zhang Hua, Lian Jijian. Numerical forecasting of hydraulics jump atomization on environment [J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1):107-112. (in Chinese))
- [19] 李建会,冉从勇,何兰. 猴子岩水电站泄洪雾化区堆积体治理设计[J]. 人民长江, 2014, 45(8):51-54. (Li Jianhui, Ran Congyong, He Lan. Control design for deposit body in flood-discharge atomization zone of Houziyan Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2014, 45(8):51-54. (in Chinese))
- [20] 陈辉,姜伯乐,陈端. 某电站泄洪雾流降雨数值计算研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(8):58-62. (Chen Hui, Jiang Bole, Chen Duan. Study on the flood discharging atomization in hydropower station by mathematical model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(8):58-62. (in Chinese))
- [21] Liu Gang, Tong Fuguo, Zhao Yitong, et al. A force transfer mechanism for triggering landslides during rainfall infiltration [J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(11):2480-2491.
- [22] Tian Dongfang, Zheng Hong, Liu Defu. A 2D integrated FEM model for surface water-groundwater flow of slopes under rainfall condition [J]. Landslides, 2017, 14:577-593.

(收稿日期:2024-11-01 编辑:俞云利)