

# 降雨入渗-重分布下考虑不同降雨雨型的斗龙港岸坡渗流稳定性分析

朱明明, 张林

(盐城市大丰区水利局, 江苏 盐城 224000)

**摘要:**以江苏省盐城市斗龙港一典型岸坡为例,基于非饱和降雨入渗理论和极限平衡法,进行了降雨入渗-重分布下考虑了不同降雨雨型的岸坡渗流稳定性分析。结果表明,随着降雨入渗,岸坡各监测点饱和度和孔隙水压力逐渐增大,岸坡安全系数与降雨入渗时间呈负相关关系,降雨停止后,安全系数先下降后逐渐增大并趋于稳定状态,岸坡安全系数在雨水重分布阶段达到最小值;不同降雨雨型对岸坡孔隙水压力和安全系数影响显著,前锋型降雨下岸坡孔隙水压力增幅度最大,安全系数下降最迅猛,后锋型变幅最小,实际工程中应着重防范前锋型降雨。

**关键词:**降雨类型; 渗流分析; 岸坡稳定; 数值模拟

中图分类号:TV212 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2024)06-0044-0006

## Analysis of seepage stability of Doulong Port Bank Slope considering different rainfall patterns under rainfall infiltration redistribution

ZHU Mingming, ZHANG Lin

(Water Resources Bureau of Dafeng District, Yancheng 224000, China;)

**Abstract:** Taking a typical bank slope of Doulong Port in Yancheng City, Jiangsu Province as an example, based on the unsaturated rainfall infiltration theory and the limit equilibrium method, the seepage stability analysis of bank slope under rainfall infiltration and redistribution is carried out. The results show that the saturation and pore water pressure of each monitoring point on the bank slope increase gradually with the rainfall infiltration, and the safety factor of the bank slope presents a negative correlation with the rainfall infiltration time. After the rainfall stops, the safety factor first decreases and then gradually increases and tends to be stable. The safety factor of bank slope reaches the minimum value in the rainwater redistribution stage. The rainfall pattern has a significant effect on the pore water pressure and safety factor of bank slope. The pore water pressure increases the most and the safety factor decreases the most rapidly under the front rainfall, and the change amplitude of the back rainfall is the smallest. In practice, we should focus on preventing front rainfall.

**Key words:** rainfall pattern; seepage analysis; bank slope stability; numerical simulation

收稿日期: 2023-12-04

作者简介: 朱明明(1994—),男,硕士,主要从事水利工程管理、边坡稳定等工作。E-mail:1583342411@qq.com

通信作者: 张林(1995—),男,硕士,主要从事水利工程管理、泵站及电站水力学等工作。E-mail:775161624@qq.com

为保障河流安全运行、河道上各类水工设施的安全建设以及航船人员的生命财产安全,我国在沿岸地区建造了众多岸坡工程。这些岸坡工程旨在稳固河岸,防止水流冲刷和侵蚀岸边土地,其稳定性直接影响着河道稳定性和通航安全。降雨入渗是诱发岸坡失稳的主要因素之一,每年的6-9月正值汛期雨量旺盛,其带来的强降雨严重威胁着岸坡的稳定性。探索降雨条件下岸坡孔隙水压力变化规律及其稳定性状态变化对岸坡安全评估具有重要的意义。

目前国内外学者对降雨作用的岸坡稳定性问题进行了大量的研究工作<sup>[1-8]</sup>。如Tohari等<sup>[1]</sup>通过一系列边坡降雨入渗模拟试验,测试坡内的饱和度发展过程,发现坡脚处最先发生塑性变形。Rahimi等<sup>[2]</sup>结合新加坡的实际情况研究了前期降雨对于岸坡稳定性的影响。Kim等<sup>[3]</sup>探究了降雨入渗中浸润峰对非饱和土质岸坡失稳破坏的能力。高欣<sup>[4]</sup>采用Midas GTS建立邗江区典型岸坡计算模型,研究了3种护坡方案在不同降雨强度下岸坡安全系数的变化。但鲜有学者进一步探讨降雨入渗-重分布下的岸坡稳定变化情况。从历史滑坡案例来看,滑坡并非完全发生在降雨期间,而是表现为一定的滞后性。边坡一般在雨水重分布阶段达到最不稳定状态,相应的滞后时间从数小时到数天不等。因此,应当合理探讨岸坡在降雨入渗-重分布下的稳定性变化情况,以更好地为岸坡预警和后续治理决策提供理论指导。此外,当前关于降雨型岸坡稳定性研究中大多考虑均匀型降雨,较少考虑不同降雨雨型对岸坡稳定性的影响,关于不同雨型对岸坡渗流场及稳定性的影响规律尚不明确。

针对以上研究不足,本文以江苏省盐城市大丰区斗龙港河岸坡为研究对象,构建了实际尺寸的工程边坡稳定性分析模型,研究了降雨入渗-重分布下不同降雨雨型对斗龙港岸坡渗流稳定的影响,分析了不同监测点处的孔隙水压力演化特征,进而探索不同降雨过程中雨前、雨中、雨后边坡稳定系数的变化规律。本文研究成果可为斗龙港岸坡工程的稳定性评估、预警及防护治理提供一定的理论参考。

## 1 非饱和土理论

降雨入渗-重分布过程将在岸坡内部形成瞬态饱和-非饱和渗流场,根据质量守恒定律和达西定律,可以推导岸坡内部瞬态非饱和渗流场的控制

方程<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_{ij} k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{ij} k_r(h_c) \right] + Q = [C(h_c) + \beta S_i] \frac{\partial h_c}{\partial x_i} \quad (1)$$

式中: $x_i, x_j$ 为*i, j*方向的位置坐标点; $k_{ij}$ 为饱和渗透张量; $k_r$ 为介质相对透水率; $h_c$ 为压力水头; $Q$ 为边界流量; $C$ 为比水溶度; $\beta$ 为非饱和常数; $S_i$ 为贮水量。本文将采用有限元方法合理求解式(1)的偏微分方程以获得岸坡内随时间变化的渗流场分布规律。

## 2 岸坡稳定性分析方法

当获得岸坡渗流场分布规律后,下一步便是在这基础上进行岸坡稳定性分析。一般而言,极限平衡法、强度折减法及有限单元法等都可被用来进行岸坡稳定性分析,而其中极限平衡法因其计算简便、计算效率高得到广泛应用。极限平衡法的思路是将滑体划分为多个土条,计算土体的滑动力与抗滑力的比值、滑动力矩与抗滑力矩的比值,以此来计算安全稳定性系数,从而判断坡体的稳定性。本文采用了极限平衡法中的Morgenstern-price法进行岸坡稳定性分析。Morgenstern-price法可以考虑条间的正应力和剪应力,同时满足力的平衡和力矩平衡需求,且可选择多种条间力函数<sup>[10]</sup>。其计算式为

$$F_s = \frac{\sum [C'\beta R + (N - \mu\beta)R \tan \phi']}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (2)$$

式中: $F_s$ 为岸坡安全系数; $C'$ 为有效黏聚力系数; $\phi'$ 为有效内摩擦角; $\mu$ 为孔隙水压力; $N$ 为条块底部法向力; $W$ 为土条重量; $D$ 为线荷载; $\alpha$ 为土条底部倾斜角; $\beta, R, x, f, d$ 为几何参数。求解式(2)便可获得不同时间下的岸坡安全系数。

## 3 工程分析

斗龙港位于盐城市抬头村境内,上游与兴化对接。河口宽80~90 m,贯穿大丰区直至斗龙闸流入东海,成了兴化盐城两市泄洪入海黄金水道,同时浇灌沿途各乡镇大片农田,斗龙港全长78.2 km,流域面积4 428 km<sup>2</sup>,集灌溉、排涝、航运、养殖多种功能于一身,对盐城发展起着重要的作用,因此斗龙港河的岸坡稳定尤为重要。另外盐城市大丰区属于亚热带与暖温带的过渡地带,气象资料显示,该地区常年平均气温14.4℃,常年降水量1 066.7 mm<sup>[11]</sup>。6—9月为雨季,雨量十分充沛,时常出现暴雨,气象条件对滑坡灾害的发展极为有利,因此对斗龙港河岸坡进行渗流稳定性分析迫在眉睫。

### 3.1 岸坡数值模型构建

依据斗龙港岸坡工程的地质条件选取地质剖面建立分析模型,该剖面模型中考虑的地层主要为粉质壤土、淤泥质粉质黏土、粉质砂壤土一和粉质砂壤土二4种材料,各土层材料分布、层宽和层厚如图1所示。该有限元模型一共划分为1 022个节点和940个网格大小为0.5 m的四边形和三角形混合单元,初始地下水位为3.6 m的。各土层的物理力学参数见表1。因受基质吸力、含水量、渗透率、降雨等因素的影响,对岸坡进行饱和-非饱和渗流

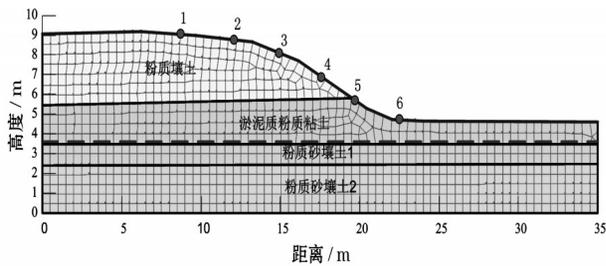


图1 岸坡材料剖面及有限元网格

表1 岸坡土体材料物理力学参数

材料类型	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$	$k_s/(\text{cm}/\text{s})$	粒径 $d_{10}/\%$	粒径 $d_{60}/\%$	液限 $W_L/\%$
粉质壤土	19.2	17.0	9.6	6.6e-5	0.007	0.042	20.7
淤泥质粉质黏土	18.3	6.0	13.0	3.4e-5	0.013	0.066	28.3
粉质砂壤土一	19.5	19.0	9.5	1.1e-4	0.012	0.446	29.5
粉质砂壤土二	19.5	18.5	9.8	9.94e-5	0.009	0.051	29.1

分析十分必要。首先,本文基于GEOSTUDIO软件中SEEP/W模块设置地下水位,计算得到岸坡的初始渗流场;随后,将其作为后续降雨入渗-重分布过程的初始条件,进一步求解不同降雨雨型下随时间变化的岸坡渗流场分布;最后将得到的渗流信息导入到SLOPE/W模块中,在考虑了非饱和渗流之间基质吸力的基础上,采用Morgenstern-Price法进行岸坡时变稳定性分析。为较好地说明问题,本文在该模型上设置6个监测点,按循序依次从坡顶到坡脚进行标记(见图1)。

### 3.2 饱和-非饱和土体参数和降雨量

在进行非饱和降雨的岸坡渗流分析中,关键的一步是设置各土层的土水特征曲线和渗透系数函数,该曲线可以描述土体体积含水率和渗透系数随基质吸力的变化关系。本文根据已有的地质勘探数据(如地层的饱和体积含水量、粒径数据和液限等),拟合求解得到了各土层土水特征曲线和渗透系数函数如图2(a)-(h)所示。

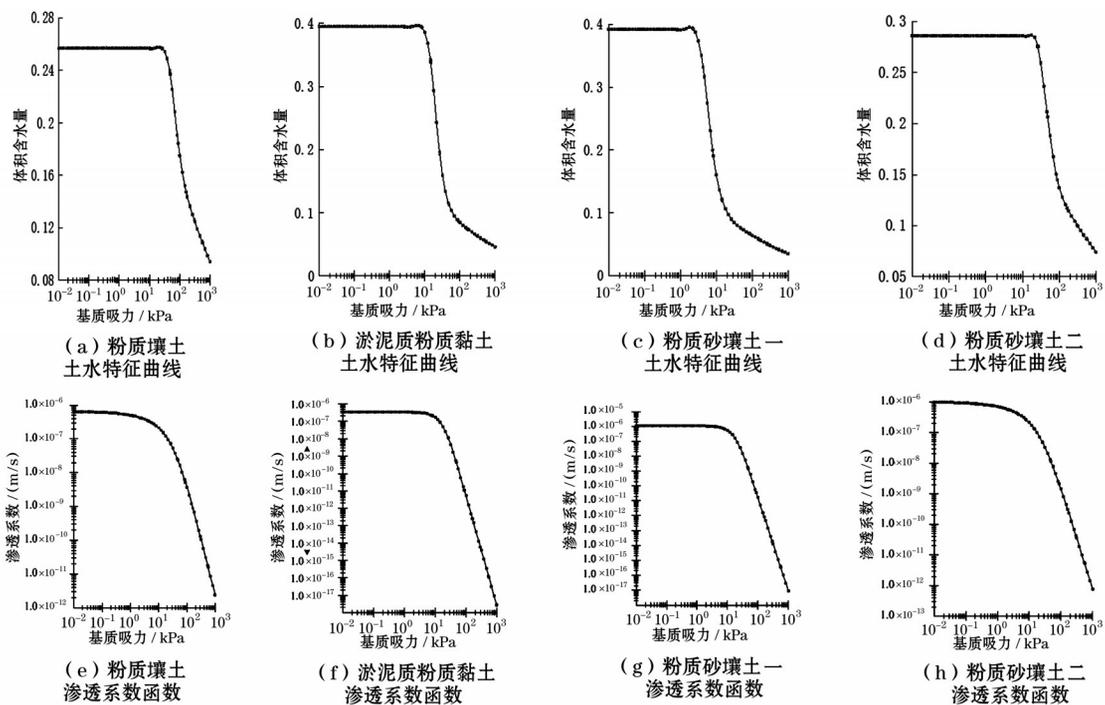


图2 4个土层的土水特征曲线和渗透系数函数

本文查询了2023年最新降雨数据,数据显示从6月17日至7月7日的降雨过程中,大丰区累计降水量为268.9 mm,最大日降水量为87.8 mm,连续两天的降水量不超过120 mm。为研究不同降雨雨型对岸坡渗流稳定的影响,本文综合考虑了2 d降

雨总量为120 mm(暴雨),设置为前锋型、中锋型、后锋型3种雨型,降雨历时48 h,另设置降雨强度为60 mm/d(大雨)的均锋型,4种雨型随时间变化情况如图3所示。本文模型的总模拟时间为96 h,其中前48h降雨入渗阶段,后48 h雨水重分布阶段。

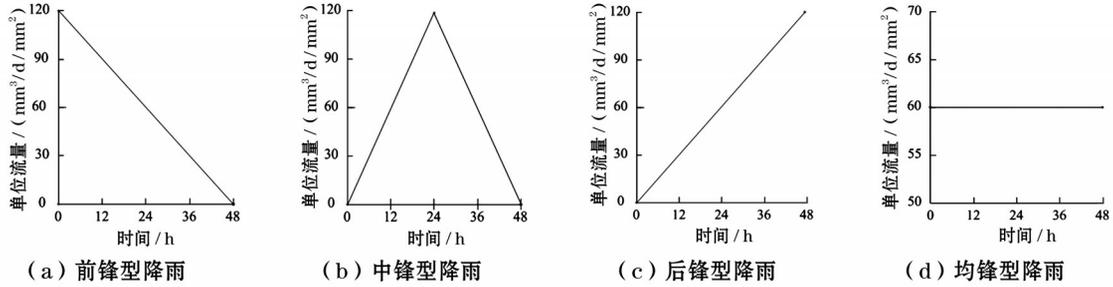


图3 不同雨型条件下降雨强度随时间变化曲线

### 3.3 不同降雨雨型对岸坡渗流的影响

图4为斗龙港岸坡的初始孔隙水压力云图,从图4中可知,岸坡孔隙水压力与高程呈线性负相关关系,随着高程的增高而逐渐降低。坡顶孔隙水压力最低,为-45 kPa,离地下水水位线最远。本文以后锋型降雨为例来进一步描述降雨入渗下岸坡内部孔隙水压力变化情况(图5)。从图5中4个时刻的孔隙水压力图可以看出,降雨前12 h,雨水主要集中在坡面表层,逐渐入渗,岸坡顶部浅层土体孔隙水压力逐渐增大,负孔隙水压力逐渐变小。降雨24 h和

36 h中,表层土壤体积含水量迅速上升,土体逐渐达到饱和,坡顶负孔隙水压力达到0 kPa,此时降雨继续入渗,坡顶负孔隙水压力为0区域继续增大,入渗边界部分雨水形成坡面径流并顺流而下。到48 h时,岸坡上部基本处于完全饱和状态,全过程孔隙水压力坡顶变化远大于坡脚变化。

为较好地比较不同降雨雨型对岸坡孔隙水压力分布的影响,本文提取并绘制了坡面上6个监测点在不同雨型下的孔隙水压力时程曲线,如图6所示。

首先,在同一降雨雨型下,岸坡不同位置的孔隙水压力有所不同,在岸坡处于非饱和状态时,孔隙水压力大小依次随着岸坡位置的变化而变化,岸坡越高孔隙水压力越大,坡脚处(监测点6)在各雨型下土体达到饱和后孔隙水压力基本维持稳定不变,而中部和上部均会随着雨型的变化而发生相一致的改变。孔压的变化幅度也表现为监测点高处的变化幅度大于中下部位置。这主要是由于在雨水入渗过程

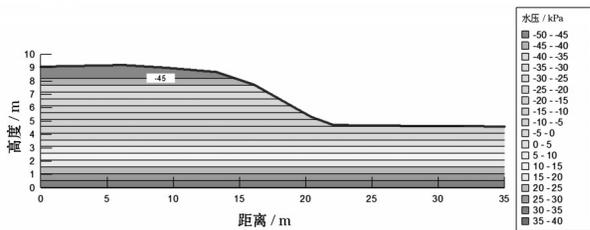


图4 初始孔隙水压力等值线

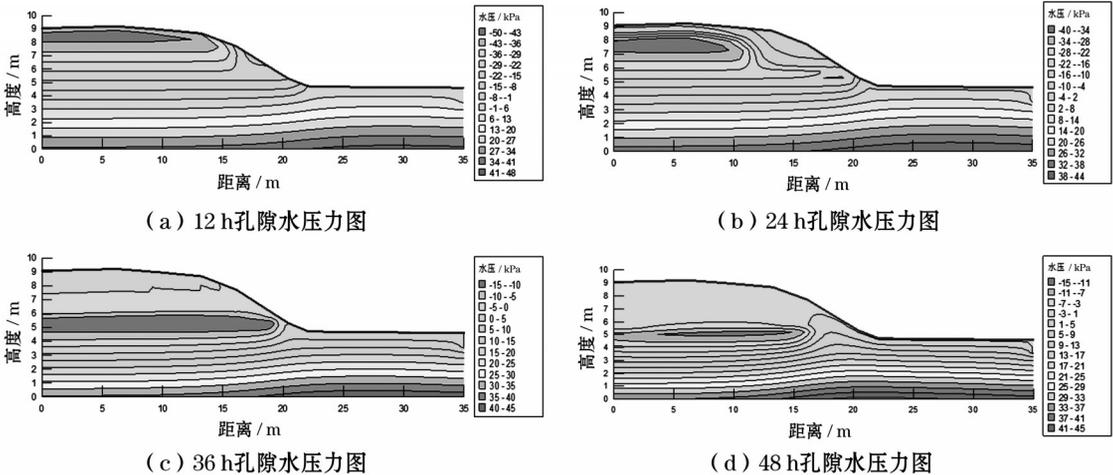


图5 120mm/2d后锋型降雨不同时刻的孔隙水压力

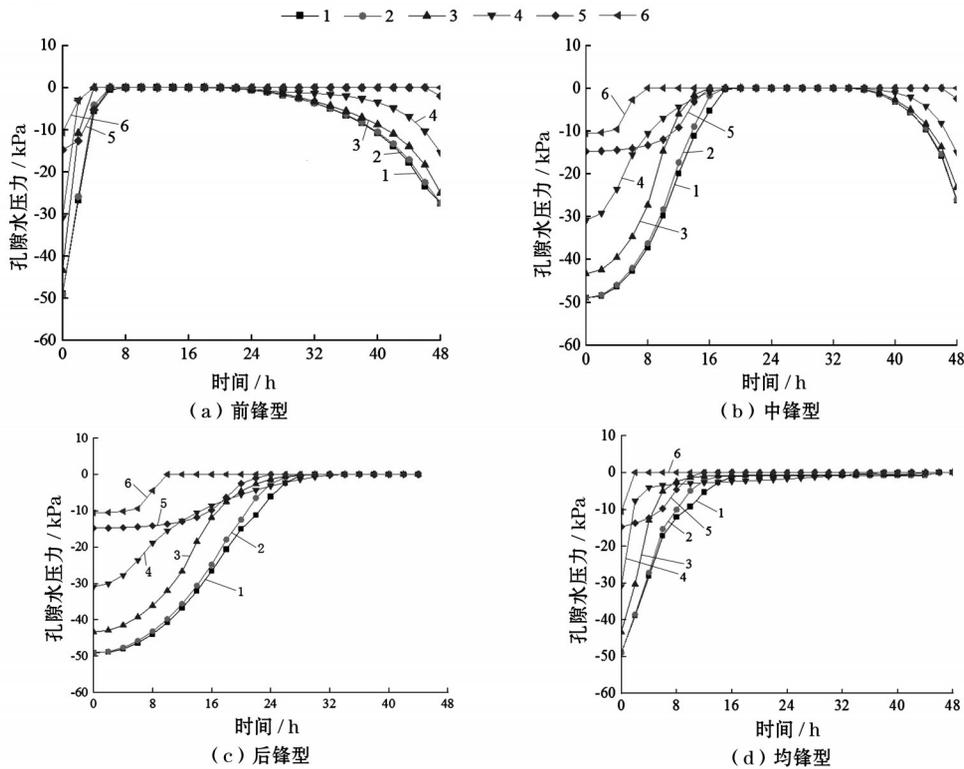


图6 不同雨型下的监测点孔隙水压力时程曲线

中,降雨强度过大,超过了土体的入渗能力,产生了坡面径流,使得部分雨水沿着坡面排走,导致下部监测点孔隙水压力变化幅度不大。可见降雨对岸坡上部影响更大,岸坡上部更容易发生失稳破坏。

对比不同的降雨雨型,前锋型和中锋型孔隙水压力在后期会出现反弹的现象,而后锋型和均锋型在孔隙水压力在达到0 kPa后保持不变。主要因为前锋型和中锋型后期降雨强度逐渐减小,土体有从饱和状态将非饱和状态发生变化的趋势,而均锋型和后锋型后期降雨强度不变或持续升高,土体持续处于饱和状态,产生坡面径流,孔压不变。而中锋型降雨前期降雨特征与后锋型相同,后期降雨特征与前锋型相同,因此,中锋型降雨作用在岸坡上产生的孔隙水压力发展情况兼具了前锋型和后锋型两种雨型的特征。另外,同一位置处前锋型造成的孔隙水压力变化幅度最大,后锋型孔隙水压力变化幅度最缓。由此可见前锋型降雨对岸坡稳定性影响更为恶劣,斗龙港治理工程中应着重防范前锋型降雨对斗龙港岸坡的影响。

### 3.4 不同降雨雨型对边坡稳定性影响

不同降雨雨型下岸坡内部孔隙水压力分布不同,将导致岸坡内部的应力状态也随之发生变化,进而对岸坡稳定性产生不同影响。首先,基于岸坡的初始孔隙水压分布(图4)进行稳定性分析,可得

初始状态下岸坡安全系数 1.535,最危险滑移面如图7所示。随后,进一步探索降雨总量相同条件下,4种不同类型的降雨对岸坡安全系数的影响规律,其  $F_s$  随时间的变化规律如图8所示。

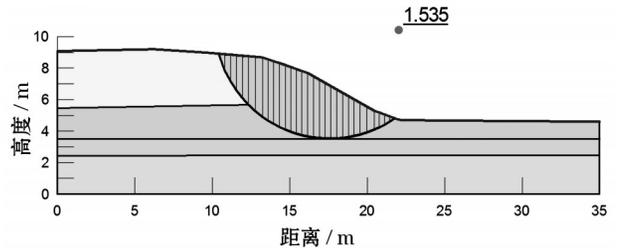


图7 岸坡初始状态下稳定性分析结果

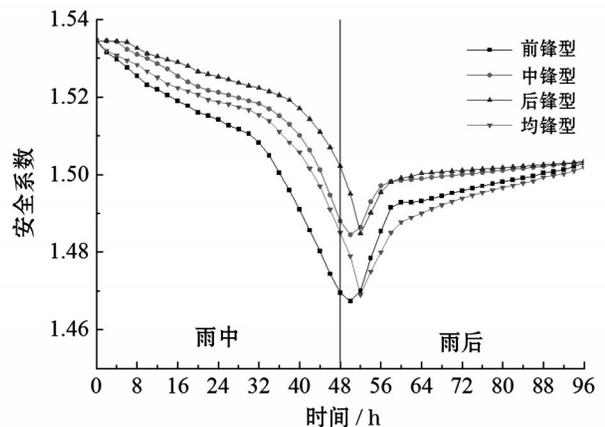


图8 4种雨型下的安全系数时程

总体上,随着降雨的入渗,岸坡的安全系数逐渐减小。降雨强度变化较大的一段时间内,安全系数减小的趋势也更为迅速。如前锋型降雨前期降雨强度最大,短时间内雨水入渗量较多,土体含水量迅速增大,基质吸力逐渐减小,土体抗剪强度下降较快,故岸坡安全系数下降趋势最为明显。降雨结束后,坡内累积的入渗雨水继续下降,湿润锋逐渐下移,湿润区含水率重分布并产生一定的渗透力,致使岸坡安全系数持续降低并达到临界状态,雨后2~4 h安全系数降至最小( $F_s=1.467$ )。随着入渗雨水的继续下渗,湿润区含水率变化速率减缓,土体抗剪强度受影响变小,岸坡基质吸力逐渐回升,安全系数也逐渐增大并趋于稳定。在降雨结束后入渗-重分布过程中,前锋型雨型下岸坡最快累积到入渗最大雨量,湿润锋最早开始下移,因此安全系数最早开始回升,反之后锋型下岸坡安全系数最后开始回升。

## 4 结 论

本文以斗龙港岸坡治理工程为依托,探索了降雨入渗-重分布条件下不同降雨雨型对岸坡渗流稳定的影响,研究结果为可直接为斗龙港岸坡工程的稳定性评估、防护及预警提供理论参考。主要结论如下:

(1)通过有限元软件建立了4种不同降雨雨型下的岸坡数值模拟,对斗龙港岸坡进行了渗流稳定分析,结果发现斗龙港岸坡在4种雨型下安全系数均大于1.46,岸坡处于相对稳定状态,但是如果遇到更为极端的天气状况,仍需对岸坡进行更为细致的稳定性探究,必要时需进行岸坡加固提高其稳定性。

(2)降雨雨型对岸坡内孔隙水压力的变化有着显著影响,孔隙水压力的变化情况与瞬时雨强的大小呈正相关关系。同一边坡位置处前锋型降雨工况下的孔隙水压力变化幅度最大,其次依次为平均型降雨、中锋型降雨和后锋型降雨,实际工程中应着重防范前锋型降雨;降雨强度越大,岸坡孔压变化幅度越大,降雨对岸坡的影响主要为岸坡上部,而对岸坡下部影响的程度较为轻微。

(3)降雨雨型对岸坡稳定有着显著的影响,安全系数随着降雨入渗时间的增长有下降的趋势。前锋型降雨的前期安全系数降幅最大,后锋型降雨后期安全系数降幅最大,安全系数的变化速率与降

雨强度存在一一对应关系。降雨停止后,岸坡安全系数最终也逐渐增大并趋于稳定。

(4)岸坡安全系数并不是在降雨入渗阶段达到最小值,而是在雨水重分布阶段岸坡达到最危险状态,这也就解释了为什么实际工程中一些岸坡常在降雨事件发生后数小时甚至数天内才发生失稳破坏的原因。

### 参考文献:

- [1] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content easurement [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(5): 575-587.
- [2] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(5): 483-491.
- [3] 洪勇,邵珠山,石广斌,等.基于三维极限分析法的GIM和SRM边坡安全系数计算结果对比[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 112-120.
- [4] 高欣.基于Midas GTS的邗江区典型岸坡护坡设计研究[J]. *江苏水利*, 2023(1): 18-23.
- [5] 宋欣玲,陈文蛟.降雨条件下含裂缝岸坡渗流稳定特性研究[J]. *河南水利与南水北调*, 2022, 51(3): 71-73.
- [6] 杨淑惠.基于COMSOL的洛河治理工程中河道岸坡安全稳定性分析研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2020, 3(3): 48-55.
- [7] 蔡亚飞,蔡春明.渗流-应力耦合及降雨入渗作用下的边坡稳定性分析[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2019, 33(3): 33-39, 43.
- [8] 翁新海,王家鹏.降雨入渗对非饱和边坡稳定性影响分析研究[J]. *科技通报*, 2018, 34(2): 188-191.
- [9] 周家文,徐卫亚,邓俊晔,等.降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. *水利学报*, 2009, 39(9): 1066-1073.
- [10] 乔兰,丁新启,屈春来,等.基于Hoek-Brown准则的Morgenstern-Price法在边坡稳定性分析中的应用[J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(4): 409-412.
- [11] 盐城市大丰区地方志编纂委员会办公室. *大丰年鉴* [M]. 北京: 方志出版社, 2021(11).
- [12] AUBERTIN M, MBONIMPA M, BUSSIERE B, et al. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(6): 1104-1122.
- [13] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 892-898.