

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.012

林国财, 谢兴华, 阮怀宁, 等. 降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究[J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 95-102.
(LIN Guocai, XIE Xinghua, RUAN Huaining, et al. Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 95-102. (in Chinese))

降雨入渗边坡非饱和渗流过程及稳定性变化研究

林国财^{1, 2}, 谢兴华², 阮怀宁¹, 朱珍德¹, 卢斌², 徐晨城^{1, 2}, 路晓刚³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 海东市平安区水利局, 青海 海东 810699)

摘要: 天然降雨和高坝泄洪雾化雨入渗对大坝下游边坡有两方面影响, 一是升高含水率使土体重度增加, 导致其下滑力增加; 二是升高土体含水率, 降低土抗剪强度和阻滑力。因此, 降雨入渗引起的滑坡时有发生。对此设计了室内人工降雨物理模型试验, 分析研究砂土质边坡降雨入渗情况下, 边坡内部水分扩散过程和规律以及暂态饱和区扩展过程, 计算各入渗时刻边坡的安全系数, 分析入渗发展对边坡稳定性变化过程及其特征的影响。试验分析结果表明: 降雨入渗率先在边坡表面形成暂态饱和区, 随着降雨持续, 暂态饱和区逐渐扩大; 雨强越大, 降雨期间形成的暂态饱和区越大, 边坡稳定安全系数的降幅就越大; 试验得到了降雨入渗深度随降雨历时和强度变化的经验式。增大降雨强度会使试验砂土的含水率更接近于饱和含水率, 但无法使砂土完全饱和。降雨入渗对边坡稳定性的影响不仅仅发生在降雨过程中, 降雨停止后, 水分入渗过程延续, 边坡稳定性持续降低, 水分入渗在一定的延后时间内继续威胁边坡安全。雨强为 144 mm/h 条件下边坡稳定安全系数在 6 h 时降到了最小值 1.196, 最大降幅达 38.2%。

关 键 词: 降雨入渗; 暂态饱和区; 非稳定渗流; 物理模型试验

中图分类号: TU457; P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)03-0095-08

高坝泄洪时, 由于水流掺气、散裂和水舌入水时的溅水形成雾化流, 雾化流受上游大气与水舌风及下游地形条件的综合影响, 在大坝下游附近一定范围内形成一种密集雨雾现象^[1]。泄洪雾化形成的密集强降雨会引起很多边坡稳定问题。天然降雨尤其是暴雨也是引起边坡发生失稳的原因之一。泄洪雾化雨或强降雨对边坡稳定性的影响主要体现在两个方面, 强降雨落到边坡表面时, 大部分水分在表面形成径流, 带走了边坡表面的土体颗粒; 另一部分水分入渗到边坡内部。雨水的入渗使边坡非饱和区上部的含水量逐渐增大, 基质吸力逐渐降低, 土体的实际凝聚力减小, 导致土体抗剪强度降低, 减小了边坡阻滑力, 使边坡的稳定性下降。随着雨水入渗, 边坡非饱和区的孔隙水压力暂时升高, 产生暂态的附加水荷载使边坡下滑力增加。同时, 在边坡土体非饱和区出现暂态饱和区和暂态水压力虽然是暂时的, 但对边坡稳定性的影响却至关重要。以上两种诱发方式均为土体含水率变化引起的, 可见针对边坡土体含水率的变化来研究边坡失稳具有实际意义。

针对降雨入渗引起边坡失稳问题的研究方法主要有数值模拟和物理模型试验。Sammori 等^[2]用 Galerkin 有限元法模拟暂态渗流过程, 并对边坡稳定性进行了参数研究。Huang 等^[3]建造了长 2.29 m、宽 0.645 m、高 0.84 m 的粉砂边坡, 分析了含水率、孔压、位移随时间变化的规律, 提出了基于含水率、孔压、降

收稿日期: 2018-11-06

基金资助: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401704); 国家自然科学基金重点项目(51539006); 国家自然科学基金雅砻江联合基金资助项目(U1765202)

作者简介: 林国财(1993—), 男, 福建漳州人, 硕士研究生, 主要从事边坡渗流研究。E-mail:354439494@qq.com

通信作者: 谢兴华(E-mail: iamxiexh@163.com)

雨强度和历时的包络线来分析边坡破坏的理论。Tohari 等^[4]在长 2.4 m、宽 0.9 m、高 1.2 m 的模型槽内分别进行同种土质、水位升降快慢和不同土质、雨强不同条件下共 4 组滑坡试验,得出了不同工况下边坡的破坏模式,指出对于初始含水率较低、渗透性较好的土体,在降雨入渗过程中,含水率的显著增加可分为两个阶段。Catane 等^[5]自制了长 2.4 m、宽 0.9 m、高 1.2 m 的室内模型槽,研究了渗流诱发边坡破坏造成的含水率、土体位移变化规律。国内学者对这方面的研究起始于 20 世纪末,张有天等^[6-7]就地表入渗对岩质边坡的稳定性作了研究。王环玲等^[8]认为雾雨区的边坡稳定与渗流场变化有着重要关系,在评价边坡稳定与否时,要考虑渗流场对其影响。林鸿州等^[9-10]采用长 4 m、宽 1.015 m、高 2 m 的模型槽进行试验,进行了粉细砂与粉土边坡的滑坡模拟试验,探讨了不同的初始基质吸力场、雨强以及地质结构在降雨条件下的滑坡特性。李波^[11]选用长 3.8 m、宽 0.5 m、高 2.2 m 的模型槽对松散粉土在不同雨强和边坡厚度条件下进行试验,发现松散粉土边坡在强降雨条件下可能发生静态液化。孙永帅^[12]选用长 2.0 m、宽 1.0 m、高 1.2 m 的模型槽试验,研究砂土、粉土在不同坡度、雨强下的破坏规律,分析在降雨过程中孔压、浸润线的变化。

综上所述,前人对降雨入渗造成边坡失稳进行了大量研究。为了更好地观测降雨入渗到边坡内部的水分扩展过程,本文设计了室内人工降雨物理模型试验,研究在降雨入渗情况下,边坡内部水分扩散的时间过程及分布规律,研究暂态饱和区的扩展过程,计算各个时刻边坡的安全系数,分析降雨入渗对边坡稳定性变化过程的影响。

1 室内人工降雨模型试验设计

1.1 室内人工降雨模型

为分析降雨入渗对边坡稳定性变化过程的影响,设计了一套室内人工降雨模型。模型由 4 部分组成,分别是有机玻璃模型槽、边坡土体、降雨系统、数据采集系统。

图 1 为试验边坡模型,有机玻璃模型槽尺寸为:长 2.4 m,宽 1 m,高 1.4 m。模型槽材质采用 10 mm 厚有机玻璃,模型槽四周用角钢固定;为了显示入渗影响区的移动变化过程,采用坡面局部入渗进行试验。坡面局部入渗情况下,坡面用 6 mm 厚玻璃封盖,在距离底部 1.18 m 处往上开了一个 25 cm 宽的窗口,形成坡面局部入渗,便于观察边坡内部水分运动过程。底部用 9 cm 厚多孔砖将模型整体抬高,防止积水从底部渗入边坡。

人工降雨控制系统由降雨喷头、输水管、水泵、控制系统等组成。人工降雨设备的降雨区域分为 5 个分区域,可模拟不同降雨强度范围的人工降雨,最大降雨强度为 2 700 mm/h。本试验采用的是小降雨区域,可模拟的降雨强度范围为 0 ~ 400 mm/h。监测系统连接的是自制的含水率传感器,与传感器连接的数据采集仪为 INV306u 智能信号采集处理分析仪。含水率的变化对土壤的介电常数起决定性作用,因而可以利用土壤的介电特性测量土壤含水率,通过测量传感器正负极的电压变化来获得边坡相应位置含水率的变化过程。

含水率传感器布置原则是应尽可能地测定边坡内部的含水率分布。本试验研究的是二维条件下的降雨入渗过程,因此可认为每个断面的情况是相同的。为减少边界形成优势渗流面对试验结果的影响,传感器布置的位置应远离模型边界。平行于坡面布置 4 排、总计 24 个含水率传感器。边坡宽度为 1 m,在宽度方向上 20,40,60 和 80 cm 的位置分别设 1,2,3,4 共 4 个观测断面(图 2),每个断面布置 6 个传感器,具体布置见图 3,其中编号 $m-n$ 表示第 m 个断面第 n 个传感器。



图 1 边坡模型

Fig. 1 Slope model

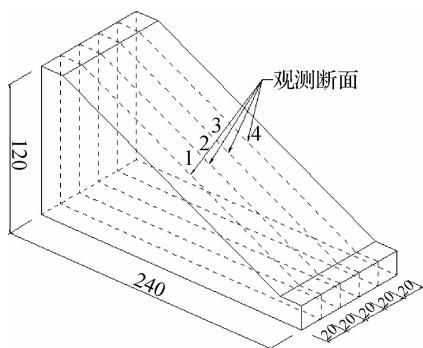


图2 观测断面示意(单位:cm)

Fig. 2 Schematic of observation section (unit:cm)

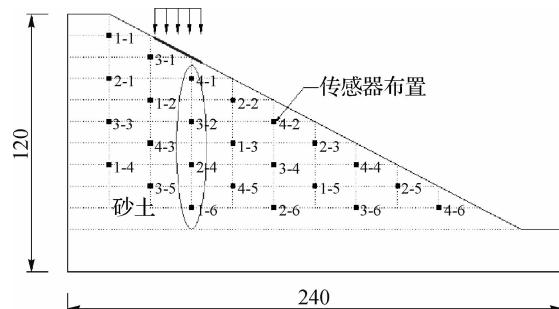


图3 传感器布置示意(单位:cm)

Fig. 3 Sensor layout diagram (unit:cm)

1.2 试验土体

某水电站坝高300余米,DJ4堆积体位于尾水出口下游600 m左右,临河分布,堆积体上未见明显的开裂等变形迹象,说明天然状态下堆积体整体处于基本稳定状态,但堆积体局部临河一带覆盖层地形较陡,且砂层分布不利于堆积体的局部稳定,目前堆积体中部可见小规模的垮塌痕迹也说明了堆积体局部稳定性差。堆积岩土体参数参考库区堆积体试验并结合反算提出,位于表层的第四系覆盖层的平均饱和渗透系数为 5.0×10^{-4} cm/s。

根据该堆积体的表面土层渗透系数,配制得到相似的砂土作为降雨入渗物理试验的介质。试验所用砂土初始含水率为5.4%。降雨试验开始前,控制填筑密度在1.55 g/cm³,进行常水头试验测量得到砂土的饱和渗透系数为 6.54×10^{-4} cm/s。

1.3 工况设计

气象部门规定:当12 h雨量不小于140 mm或者24 h雨量不小于250 mm时即为特大暴雨;香港政府1984年制定:70 mm/h的降雨强度可视为引起滑坡的临界值;南京水利科学研究院研究指出50~200 mm/h对建筑物边坡危害较大^[13-14]。结合DJ4堆积体边坡位置和砂土饱和渗透系数,选取72,108和144 mm/h共3种降雨强度工况,每种工况降雨时长3 h,降雨停止后继续监测24 h边坡各测点的含水率,总监测时长27 h。

2 试验结果分析

2.1 边坡降雨入渗规律

2.1.1 降雨入渗过程 下面以工况1为例说明降雨入渗边坡的过程,图4为降雨强度为72 mm/h条件下边坡内不同埋深监测点的含水率变化过程曲线,图5为降雨强度为72 mm/h条件下3,15和27 h的边坡含水率等值线图。

在初始状态下,土的含水率为5.4%,降雨开始后,雨水开始入渗到边坡内部,表面的砂土率先被润湿,在表面形成一层湿润层,随后水分往下并往两侧扩散。但是传感器还没有检测到任何明显的数值变化,原因是降雨入渗的水分没有到达边坡上层的含水率传感器的位置,布置于边坡上部的4-1号监测点(埋置深度为10 cm)在0.5 h监

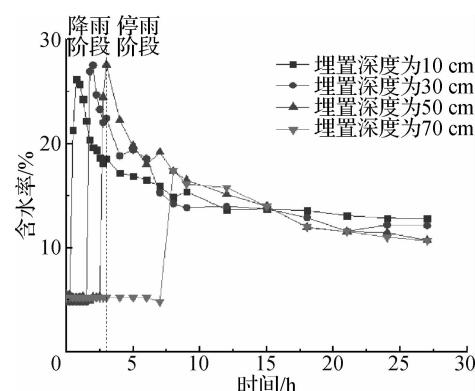


图4 工况1监测点含水率变化曲线

Fig. 4 Water content curve of monitoring points in plan 1

测到明显的含水率变化。而布置于边坡底部的1~6号监测点(埋置深度为70 cm)在3 h的降雨阶段仍未产生较大的含水率变化,试验8 h时刻才有明显的含水率变化。降雨阶段3 h结束后,边坡上部区域形成了一块含水率较大的区域。

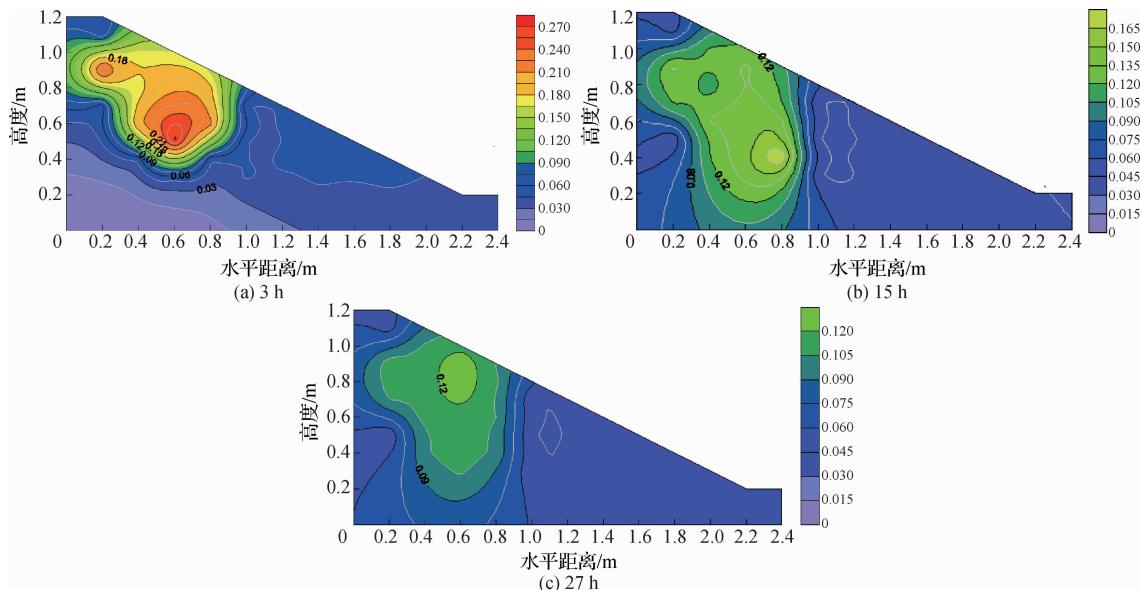


图5 降雨强度为72 mm/h的边坡含水率等值线

Fig. 5 Contour map of slope moisture content with rainfall intensity of 72 mm/h

工况1的试验结果显示:(1)各个监测点位置含水率的变化趋势基本相同,呈现一种先快速上升而后较平缓下降至平稳的过程。但在开始变化的时间点上略有不同,边坡上部的含水率先升高;(2)暂态饱和区率先在边坡上部形成,随着降雨持续进行,暂态饱和区逐渐扩大;(3)降雨停止后,暂态饱和区的水分继续在重力作用下往下扩展,上部暂态饱和区内的土体含水率开始降低,并逐渐趋于稳定,稳定后的土体含水率大于初始含水率。而位于边坡下部的土体,含水率升高,试验结束后的土体含水率同样大于初始含水率。

2.1.2 降雨强度对入渗过程的影响 图6为降雨3 h的边坡含水率等值线分布。

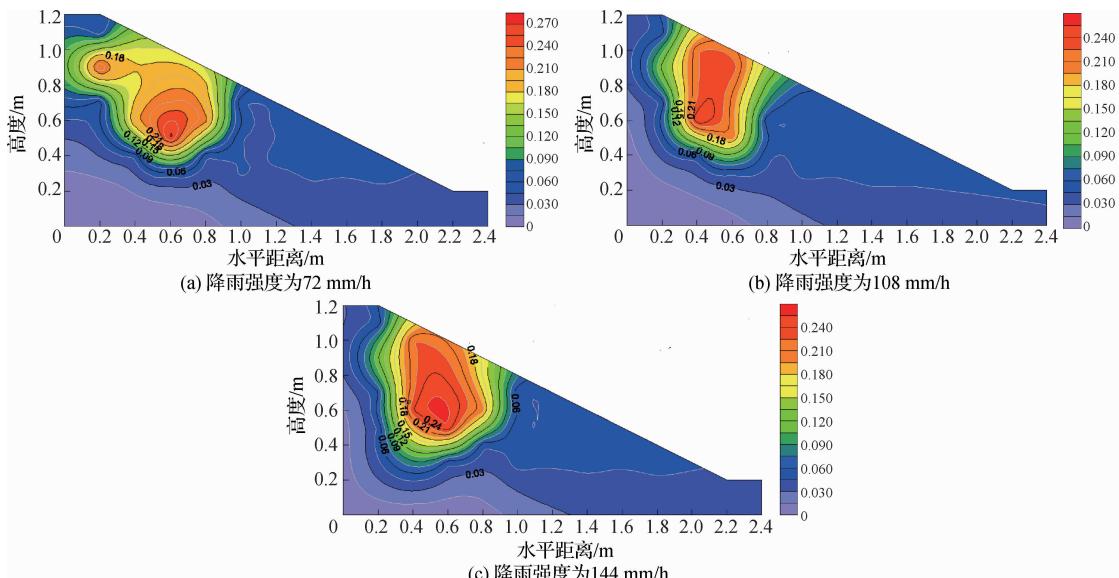


图6 降雨3 h的边坡含水率等值线

Fig. 6 Contour map of slope water cut after three hours

图7为监测点4-1和1-6(监测点位置见图3,埋置深度分别为10和70 cm)含水率变化过程曲线。降雨持续3 h,不同降雨强度条件下水分入渗的深度和范围不同,雨强越大,水分扩散范围越广,暂态饱和区越大。

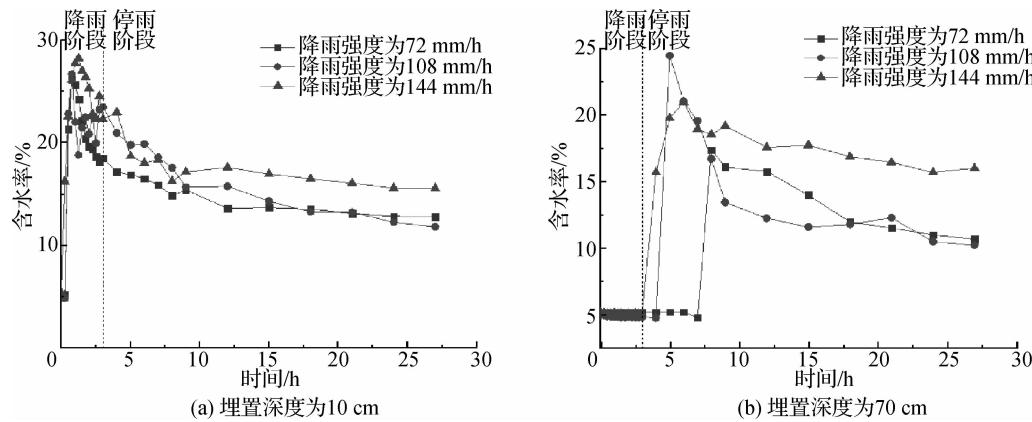


图7 监测点含水率变化曲线

Fig. 7 Moisture content curve of monitoring points

降雨强度对水分入渗边坡形成暂态饱和区的影响主要有以下几个方面:

(1) 水分入渗深度 水分入渗深度-降雨历时曲线如

图8所示。降雨阶段,由于边坡上方源源不断的降雨补给,水分在重力和压力作用下持续向下入渗,水分入渗深度随着时间增长,从图8可以看出,水分入渗最大深度与时间近似为线性关系;水分入渗深度与降雨强度存在正相关关系,降雨强度越大,同一时刻水分入渗的深度越大。降雨阶段3 h结束时,降雨强度为72 mm/h的水分入渗深度为51.4 cm;降雨强度为108 mm/h时,水分入渗深度为58.8 cm,而降雨强度最大的144 mm/h的水分入渗深度达到了65.5 cm。将试验得到的水分入渗数据导入到origin软件进行拟合,得到试验砂土的水分入渗深度随降雨历时和降雨强度的经验计算式:

$$h = 199.385t - 0.319I + 0.466tI - 21.652t^2 + 0.005I^2 \quad R^2 = 0.992;$$

式中:h为水分入渗深度(mm);t为时间(h);I为降雨强度(mm/h)。

(2) 水分入渗速率 降雨强度影响着水分入渗边坡的

速率,对于不同的降雨强度条件,同一埋深的监测点监测到明显的含水率变化的时间并不相同,见表1。埋深小的监测点对含水率变化的时间响应差异并不明显,时间间隔较短。埋深大的监测点对含水率变化的时间响应差异较为明显,降雨强度为144 mm/h时,埋深70 cm处4 h后检测到了明显的含水率变化,降雨强度为72 mm/h该部位在8 h后才检测到,二者相差4 h。降雨强度越大,入渗的水分越多,水分受到的重力和压力越大,迫使其以较快的速率入渗。

(3) 边坡极限含水率 试验过程中,边坡内土体含水率的提高全部来自于降雨的补给,3 h的降雨阶段,

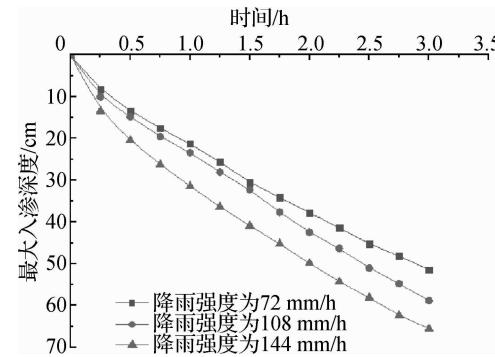


图8 水分入渗深度-降雨历时曲线

Fig. 8 Relationship between infiltration depth and duration

表1 含水率升高响应时间

Tab. 1 Time of water content increasing

工况	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	含水率升高响应时间/h	
		埋深10 cm处	埋深70 cm处
1	72	0.50	8
2	108	0.50	5
3	144	0.25	4

3 种降雨强度条件下土体达到的极限含水率较为接近。降雨强度大的边坡的极限含水率稍大些,但都小于理论饱和含水率 30% (表 2)。砂土内存在一定的孔隙,降雨入渗的水分会填充这些孔隙,部分气体可能被压缩成密闭的气泡,增大降雨强度会使气泡变小,但不能使其完全消失。

降雨强度越大,降雨阶段 3 h 后边坡内部形成的暂态饱和区就越大。降雨结束后,这些存储在暂态饱和区内的水分被释放出来,在重力的作用下向其他区域扩散,试验结束时边坡砂土的极限含水率与降雨强度呈正相关关系,其中降雨强度为 144 mm/h 的极限含水率为 17.8%,比降雨强度为 72 mm/h 的 12.8% 要大得多。

2.2 降雨入渗过程对边坡稳定性变化的影响

为探究降雨入渗对边坡稳定性变化的影响,计算边坡稳定安全系数时,考虑含水率升高导致强度降低和重度增加的影响。根据含水率的范围,把含水率等值线图划分不同的区域,对每个区域采用含水率对应的重大和抗剪强度参数,具体计算参数见表 3,表中不同含水率的黏聚力和内摩擦角的值由三轴剪切 UU 试验测得。采用相应的砂土黏聚力和内摩擦角代替初始的黏聚力和内摩擦角,并根据含水率用实际重度代替初始重度。

计算得到不同工况不同时刻的边坡抗滑稳定安全系数见表 4,边坡安全系数变化曲线见图 9。

表 3 边坡稳定安全系数计算参数

Tab. 3 Calculation parameters

含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	重度/(kN·m ⁻³)	$\phi/^\circ$	c/kPa
0~6	1.596 5	15.965	32.88	32.58
6~12	1.689 5	16.895	32.21	20.79
12~18	1.782 5	17.825	33.74	13.24
18~24	1.875 5	18.755	35.01	9.94
24~30	1.968 5	19.685	33.54	10.89

表 2 边坡极限含水率

Tab. 2 Extremum of water content

工况	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨阶段极限含水率/%	试验 27 h 极限含水率/%
1	72	27.5	12.8
2	108	27.8	14.6
3	144	28.3	17.8

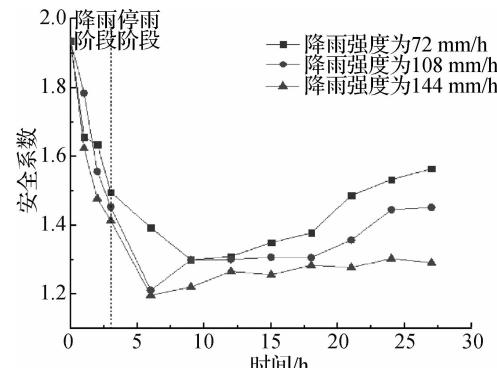


图 9 边坡安全系数变化曲线

Fig. 9 Slope safety factor change curve

表 4 试验过程边坡安全系数变化

Tab. 4 Slope safety factor change during test

工况	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	初始安全系数	3 h 时安全系数	3 h 时降幅/%	最小安全系数	最大降幅/%	最小安全系数时刻
1	72	1.935	1.496	22.7	1.299	32.8	9 h
2	108	1.935	1.453	24.9	1.211	37.4	6 h
3	144	1.935	1.413	27.0	1.196	38.2	6 h

由表 4 和图 9 可见,降雨阶段边坡稳定安全系数降低幅度与降雨强度呈正相关关系,降雨强度越大,边坡稳定安全系数降低得越多,降雨对边坡稳定性危害越大。

降雨结束后,边坡的稳定安全系数会继续下降,会在降雨结束一段时间后的某一个时间点达到最低值,在此时间点后,边坡稳定安全系数会缓慢升高。降雨强度为 72 mm/h 的边坡稳定安全系数在 9 h 时刻达到最低值,降低幅度为 32.8%;降雨强度为 144 mm/h 的边坡稳定安全系数在 6 h 时刻达到最低值,降幅为

38.2%;边坡稳定安全系数最小值与降雨强度的关系是降雨强度越大,边坡稳定安全系数最小值越小。

降雨阶段,降雨入渗在边坡内部形成暂态饱和区,使砂土的含水率升高。一方面,土体重度增加,增大了下滑力;另一方面,土体的黏聚力降低,抗剪强度降低,导致边坡的稳定安全系数下降。降雨停止后,暂态饱和区的水分会继续往边坡下部渗透,在降雨过后一段时间内对边坡稳定性造成持续性危害。

3 结语

本文设计了室内人工降雨物理模型试验,研究在降雨入渗情况下,边坡内部水分扩散的时间过程及分布规律,研究暂态饱和区的扩展过程,计算各个时刻边坡的稳定安全系数,分析降雨入渗对边坡稳定性变化过程的影响。研究得到以下结论:

(1) 降雨入渗率先在边坡表面形成暂态饱和区,随着降雨的进行,暂态饱和区逐渐扩大;降雨停止后,暂态饱和区内的水分会持续向下渗透。

(2) 降雨强度是影响降雨入渗因素,主要体现在边坡的水分入渗深度,速率和极限含水率3个方面。得到了降雨阶段水分入渗深度随降雨历时和降雨强度的经验公式。

(3) 降雨强度越大,降雨阶段形成的暂态饱和区越大,水分入渗越快。增大降雨强度会使试验砂土的含水率更接近于饱和含水率,但无法使砂土完全饱和。

(4) 降雨强度是影响边坡稳定性的因素;降雨强度越大,降雨阶段边坡内部形成的暂态饱和区就越大,边坡稳定安全系数的降低幅度就越大。其中降雨强度为144 mm/h条件下稳定安全系数降低到1.413,降低幅度为27.0%。

(5) 降雨入渗对边坡稳定性的影响不仅仅发生在降雨过程中,降雨停止后一定时间内,水分会继续入渗,对边坡的稳定性持续造成危害。降雨强度为144 mm/h条件下稳定安全系数在6 h时降到了最小值1.196,最大降幅为38.2%。

参考文献:

- [1] 苏建明,李浩然.二滩水电站泄洪雾化对下游边坡的影响[J].水文地质工程地质,2002(2):22-24. (SU Jianming, LI Haoran. The effects of atomization by flood discharge on downstream slope of Ertan hydroelectric station[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2002(2): 22-24. (in Chinese))
- [2] SAMMORI T, TSUBOYAMA Y. Parametric study on slope stability with numerical simulation in consideration of seepage process [C]// Proceedings of 6th International Symposium on Landslides. Christchurch: Balkema Publishers, 1991: 539-544.
- [3] HUANG C C, YUIN S C. Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures[J]. Geomorphology, 2010, 120:326-338.
- [4] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M, et al. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(5): 575-587.
- [5] CATANE S G, ZARCO M A H, CORDERO C J N, et al. Laboratory experiments on steady state seepage-induced landslides using slope models and sensors[J]. Science Diliman, 2011, 23(1): 17-30.
- [6] 张有天,王镭,陈平.有地表入渗的岩体渗流分析[J].岩石力学与工程学报,1991,10(2):103-111. (ZHANG Youtian, WANG Lei, CHEN Ping. Analysis of water percolation in rockmass due to surface infiltration [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(2): 103-111. (in Chinese))
- [7] 张有天,刘中.降雨过程裂隙网络饱和非饱和非恒定渗流分析[J].岩石力学与工程学报,1997,16(4):104-111. (ZHANG Youtian, LIU Zhong. Saturated/unsaturated, unsteady seepage analysis of rock fractured networks due to the percolation of rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 104-111. (in Chinese))
- [8] 王环玲,徐卫亚,童富国.泄洪雾雨区裂隙岩质边坡饱和-非饱和渗流场与应力场耦合分析[J].岩土力学,2008(9):2397-2403. (WANG Huanling, XU Weiya, TONG Fuguo. Coupled analysis of fracture rock mass slope saturated-unsaturated seepage field and stress field in flood discharge atomized rain area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(9): 2397-2403. (in Chinese))

Chinese))

- [9] 林鸿州. 降雨诱发土质边坡失稳的试验与数值分析研究[D]. 北京: 清华大学, 2007. (LIN Hungchou. The study on the mechanism and numerical analysis of rainfall-induced soil slope failure [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese))
- [10] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198-204. (LIN Hungchou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198-204. (in Chinese))
- [11] 李波. 降雨条件下松散粉土边坡稳定性研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2009. (LI Bo. Study on stability of loose sand slopes subjected to rainfall [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese))
- [12] 孙永帅. 降雨对边坡稳定性的模型试验及数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012. (SUN Yongshuai. Model test and numerical simulation study of slope instability induced by rainfall [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese))
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994: 320-324. (QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical principle and calculation [M]. Beijing: China Water and Power Press, 1994: 320-324. (in Chinese))
- [14] 周辉. 泄洪雾化的影响及其分区和分级防护初探[C]// 中国水利学会水力学专业委员会, 中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会, 国际水利工程与研究协会中国分会. 第二届全国水力学与水利信息学学术大会论文集, 成都: 四川大学出版社, 2005: 6. (ZHOU Hui. Impact of flood discharge atomization and its zoning and classification protection [C] // Hydraulics Committee of China Water Conservancy Society, Hydraulic Hydraulics Committee of China Hydropower Engineering Society, China Branch of International Hydraulic Engineering and Research Association. Proceedings of the National Conference on Hydraulics and Hydraulic Informatics Hydraulics, Chengdu: Sichuan University Press, 2005: 6. (in Chinese))

Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall

LIN Guocai^{1, 2}, XIE Xinghua², RUAN Huaining¹, ZHU Zhende¹, LU Bin², XU Chencheng^{1, 2}, LU Xiaogang³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Haidong Ping'an District Water Conservancy Bureau, Haidong 810699, China)

Abstract: Natural rainfall and atomization rain will make infiltration into slope with a certain time process, which influences the slope stability in the downstream of high dam. The influence manifests in two aspects, on the one hand, the increase of water content increases the bulk density of the soil, resulting in an increase in the sliding force of slope; on the other hand, the soil moisture content increases, which makes the shear parameters of slope reduced. Engineering events caused by rainfall infiltration occur frequently. In the study, an indoor artificial rainfall physical model test was designed to study the process and law of water diffusion and the expansion process of transient saturation zone in the slope during rainfall infiltration of sand slope. The safety factor of slope was calculated to analyze the effect of rainfall infiltration process on slope stability. The test results showed that a transient saturated zone was formed firstly in the surface of the slope. As the rainfall continued, the transient saturation zone gradually expanded. The greater the rainfall intensity, the larger the transient saturation zone formed by the rainfall process, and the greater the reduction of the slope safety factor. The empirical formula of the water infiltration depth along with the rainfall duration and rainfall intensity was obtained. Increasing the rainfall intensity would make the water content of the test sand closer to the saturate water content, but the sand wouldn't completely saturate. The effect of rainfall infiltration in slope not only occurred during the rainfall process. After the rainfall stopped, the water infiltration process kept existing, the stability of the slope continued to decrease, and the water did harm to the slope in a certain delay time. In the case of rainfall intensity of 144 mm/h, the stability safety factor of the slope decreased to a minimum of 1.196 at 6 h, with a maximum decrease of 38.2%.

Key words: rainfall infiltration; transient saturated zones; unstable seepage; physical model test