

文章编号: 1674-599X(2021)23-0022-08

不同降雨入渗条件下路堑边坡渗流特性研究

唐静¹, 夏永胜²

(1. 湖南华翌规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410076;

2. 宁远县公路建设养护中心, 湖南 永州 425600)

摘 要: 为研究不同降雨条件下雨水入渗对路堑边坡渗流特性的影响, 采用 Geo-studio 软件对实际工程路堑边坡模拟多种极端降雨的边坡渗流, 分析边坡内部孔隙水压力、体积含水率、暂态饱和区等变化规律。研究结果表明: 不同降雨入渗条件下, 边坡内部较高处其孔隙水压力及体积含水率更易消散, 且积水作用会使得边坡坡脚及各级台阶处出现极值; 暂态饱和区在降雨-停雨全过程中, 其面积大小呈现“凸”型分布; 由于高边坡处的径流补充, 导致低边坡处的各项指标减少较慢。

关键词: 降雨入渗; 路基边坡; 渗流特性; 渗流场; 暂态饱和区

中图分类号: U416.1⁴ **文献标志码:** A

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.004

Study on seepage characteristics of subgrade slope under various rainfall infiltration conditions

TANG Jing¹, XIA Yong-sheng²

(1. Hunan Huagang Communications Planning & Design Research Institute Co., Ltd., Changsha 410076, China;

2. Ningyuan County Highway Construction and Maintenance Center, Yongzhou 425600, China)

Abstract: In order to study the influence of rainfall infiltration on the seepage characteristics of road graben slopes under different rainfall conditions, the Geo-studio software was used to simulate the seepage characteristics of road graben slopes under various extreme rainfall conditions. The change of pore water pressure, volumetric water content and transient saturation zone of slope was analyzed. The results show that as the different rainfall infiltration conditions, the pore water pressure and volumetric water content are dissipated easily at the higher elevation of the slope, and the extreme values caused by the ponding effect appear at the position of the slope foot and the steps of all levels. The area of the temporary saturation zone is characterized by convex distribution during the whole process of rainfall-stopping. The indicators at the low side of slope decrease slowly resulted from the runoff replenishment at the high side of slope.

Keywords: rainfall infiltration; subgrade slope; seepage characteristics; seepage field; transient saturated region

在中国南方湿热多雨环境下, 路堑边坡极易发生溜塌、滑坡、泥石流等自然灾害, 极大地威胁了人们的生命财产安全及高速公路安全运营^[1-2]。尤其在降雨入渗下, 边坡岩土体内湿润锋下移, 表层暂态饱和区增大, 导致边坡岩土体含水率抗

剪强度减小, 重度增加, 而诱发边坡失稳^[3-4]。因此, 在降雨条件下, 边坡暂态饱和区的演化规律及渗流特征一直是土木工程领域研究的热点。

降雨入渗易改变边坡内部的渗流场与渗透特性, 影响其含水率、基质吸力的分布, 使边坡岩

收稿日期: 2021-04-23

基金项目: 长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2019IC04)

作者简介: 唐静(1985—), 男, 湖南华翌规划设计研究院有限公司工程师。

土体强度降低,诱发边坡失稳^[5-6]。针对降雨入渗条件下边坡内部渗流特征及稳定性的研究,已取得许多成果^[7-9]。万思豪等人^[10]探究了含裂隙土质边坡在不同降雨类型下的渗透特性,揭示了裂隙土体内部孔压、渗透系数等在降雨过程中的变化趋势。杨欣^[11]对湖南龙琅高速公路软弱夹层路堑高边坡在不同降雨条件下入渗进行了模拟,得到了边坡内部渗流场的分布情况。这些研究主要针对特定边坡在降雨条件下进行渗流场分析,而上覆黏土岩质边坡的渗流特征研究少见。刘杰等人^[12]采用Geo-studio软件对不同土质在降雨过程中的入渗深度及饱和区进行了研究。曾铃等人^[13-16]基于有限元数值模拟方法,针对降雨入渗后暂态饱和区分布特征进行了研究。付宏渊等人^[17-19]采用饱和和非饱和渗流理论,研究了降雨后地下水位与暂态饱和区的变化规律。这些研究主要对边坡在降雨后的暂态饱和区变化规律及分布特征,未将暂态饱和区分布规律、孔隙水压力和体积含水率共同描述渗透特性,因而不能真实反映出降雨条件下边坡内部渗流场的变化规律。因此,作者拟利用Geo-studio(seep)软件,以益阳-娄底高速公路边坡实际工程的地质勘查资料、边坡开挖情况和真实降雨资料为依托,对不同降雨条件下的边坡渗流规律进行模拟,研究路堑边坡的孔隙水压力、体积含水率和暂态饱和区的变化规律,以期路堑边坡稳定性分析提供借鉴。

1 模型的建立

1.1 工程概况

该路堑边坡位于益阳-娄底高速公路,靠近娄底西阳某处,地貌单元多为侵蚀低山丘陵地貌,地势总体中部高,东西两侧低,山坡坡度为 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$,局部较陡,地表水系较发达,基岩大多裸露,边坡上部为含砾(碎石)粉质黏土,下部为弱风化灰岩,植被较发育。

1.2 几何模型

采用Geo-studio(seep)软件对该边坡在不同降雨入渗条件下的内部孔隙水压力、体积含水率进行模拟计算,分析边坡内部渗流场变化情况,模拟益阳-娄底高速公路某炭质泥岩质边坡,其边坡典型剖面及初始地下水位情况如图1所示。本研

究在该边坡整体上划分5个辅助特征截面I~V-V及截面测点①~⑤,对该边坡整体在不同降雨条件下的渗流场进行边坡渗流特性分析。截面I-I~V-V分别位于各级边坡斜面上与水平方向垂直^[20],边坡测点①~⑤均位于各级边坡地表以下1 m。整个边坡模型一共划分为5 024个节点,4 987个单元,其网格划分如图2所示。

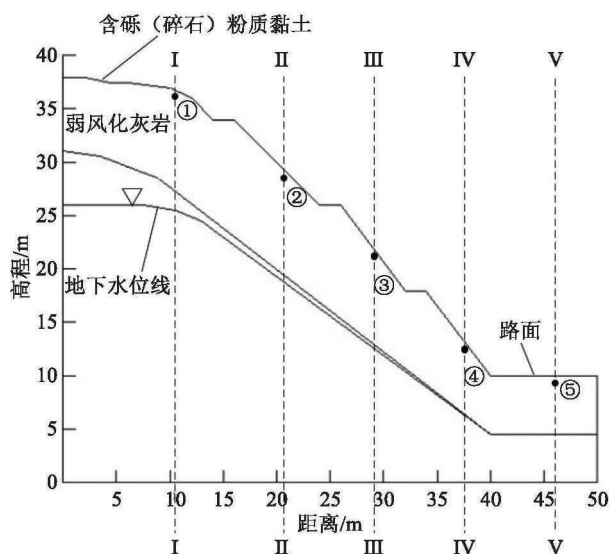


图1 边坡几何模型

Fig. 1 Geometric model of slope

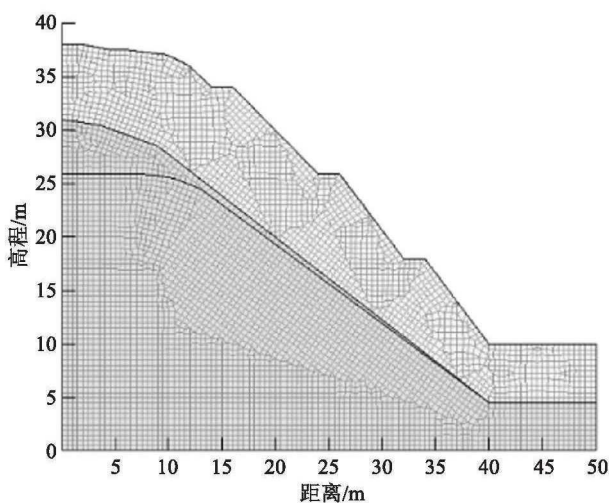


图2 边坡网格单元

Fig. 2 Slope grid cell

边坡模型的表面及各级台阶处的边界条件均设置为渗水面,左、右及底部的边界条件均设置为不透水面。将地下水位处的孔隙水压力设置为0^[21],从地下水位线向上,孔隙水压力呈线性增加的趋势,地下水位线以下为饱和含水率。该边坡在天然状态下具体稳定渗流场分布如图3所示。

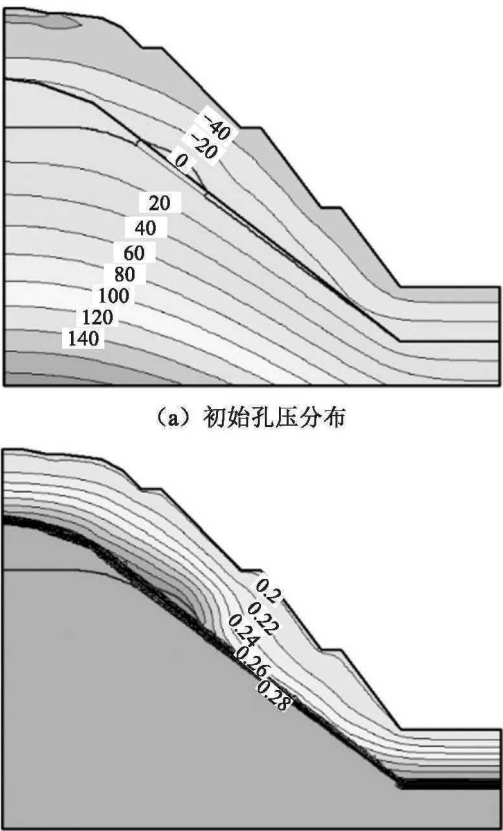


图3 边坡稳定渗流场分布

Fig. 3 Stable seepage field distribution of the slope

1.3 模拟工况

为模拟该边坡在极端降雨条件下边坡内部孔隙水压力、体积含水率、暂态饱和区等分布，对该地区往年的降雨情况进行统计分析，并针对不同降雨影响因素设置了3种降雨条件，分别为T1、T2、T3，各降雨条件分别从降雨强度、降雨时长、计算总时长和计算单位时长对该边坡进行入渗模拟，其设计降雨强度与参数见表1。

表1 降雨强度分布和参数设计

Table 1 Rainfall intensity distribution and parameter design				
降雨方案	降雨强度/ ($\times 10^{-6} \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	降雨时长/d	计算总时长/d	计算单位时长/min
T1	1.280	3	6	60
T2	3.290	1	3	20
T3	0.344	14	30	60

2 降雨入渗对边坡的影响

为研究内部渗流特性规律，通过对孔隙水压力、体积含水率等渗流因素进行分析，得到降雨入渗对边坡内部影响规律。

2.1 孔隙水压力受降雨入渗影响规律

模拟边坡在3种降雨条件下模拟孔隙水压力和体积含水率的变化规律，并随时间与空间的变化对其进行研究，模拟结果如图4所示。

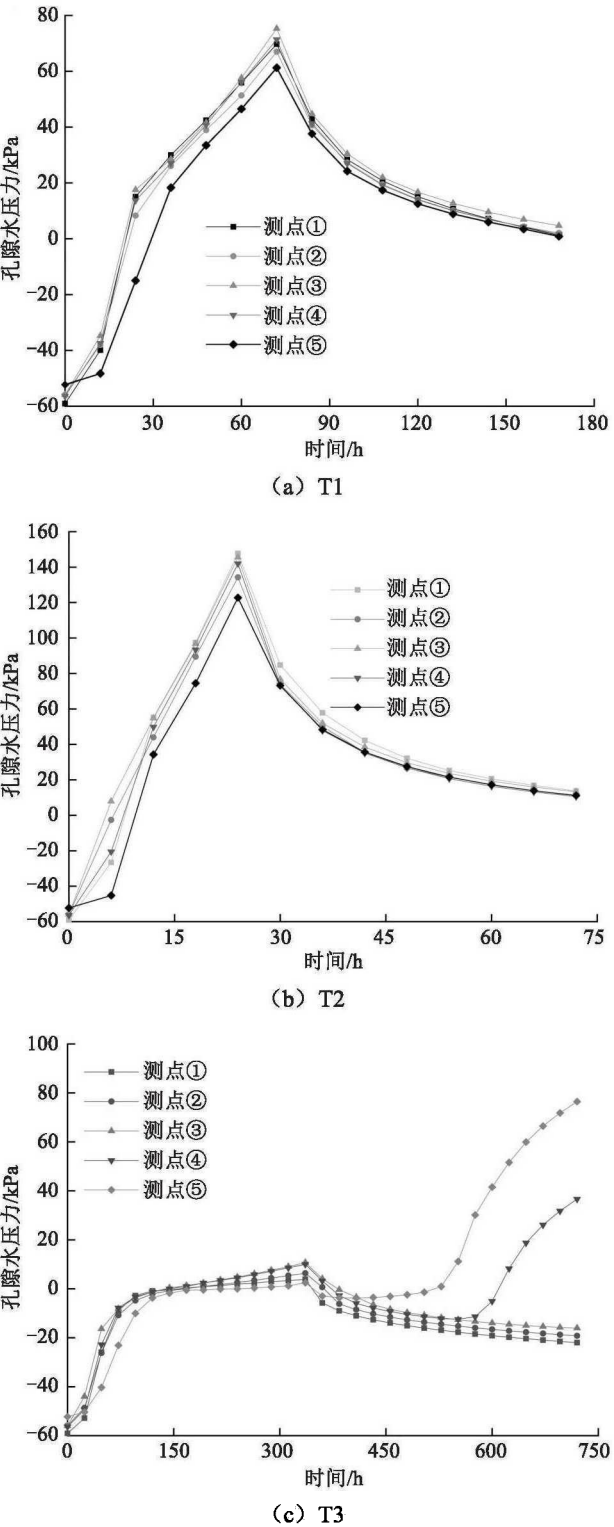


图4 各特征点孔隙水压力随时间变化规律

Fig. 4 The variation of pore water pressure at each feature point changing with time

从图4中可以看出,3种降雨方案在边坡坡脚处的孔隙水压力增长情况相近,而边坡坡脚测点③处的孔隙水压力增长速度最快。相同降雨历时情况下,测点①~⑤由负压力增加为正压力,测点位置越高所需时间越长,与降雨汇集密不可分,随高度逐渐增加,该边坡不同高度的测点若达到相同程度的孔隙水压力,所需时间也随之增加。在T3降雨情况下,边坡坡脚处测点④、⑤出现随时间增加孔隙水压力不减反增的情况。其原因:降雨后,边坡表面雨水向低边坡处逐渐入渗汇聚,导致边坡内部测点在同一降雨历时条件下,随着边坡表面高程的降低,其孔隙水压力均逐渐增大。边坡坡脚测点③处因为边坡上部重力渗流与自身高程两者共同作用,导致其孔隙水压力的增长速度最快。降雨入渗停止后,在长降雨下其孔隙水压力逐渐增大至饱和状态,并且高边坡孔隙水压力也逐渐增大。雨水在重力作用下汇集至低处。在暂态饱和区,边坡表面测点高程越低,孔隙水压力消散越慢。T3降雨情况下,坡脚处测点④、⑤的趋势线出现异常,其孔隙水压力不减反增,这是由于在降雨停止后,经历长时间降雨的边坡并不会因为降雨停止而立即使低坡处孔隙水压力降低,反而会因为积水作用使低坡坡脚处的孔隙水压力得到充分补充,呈现与其他的测点与降雨方案下的不同趋势。

在边坡表面以下1 m连续面上的测点流速趋势如图5所示。从图5中可以看出,在边坡表面以下1m连续面上的节点流速沿边坡坡面向上逐渐减小,并且在边坡的各台阶处产生雨水流速峰值。其原因:各级边坡处设置放坡角度可加快雨水的

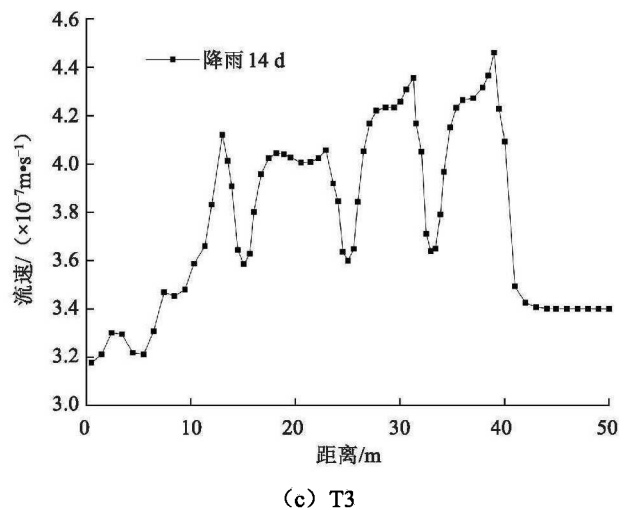
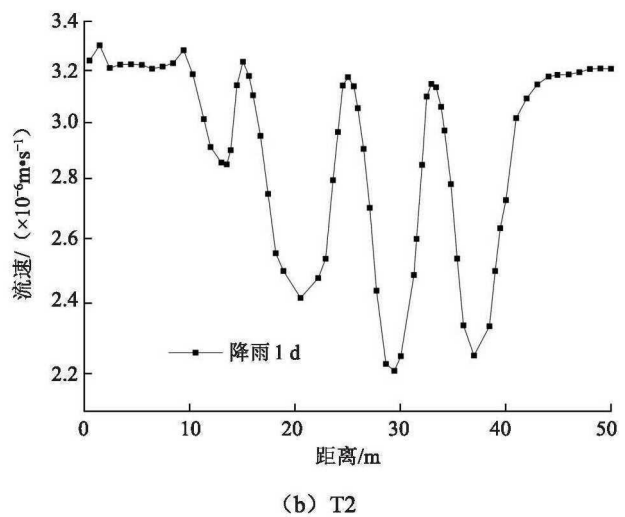
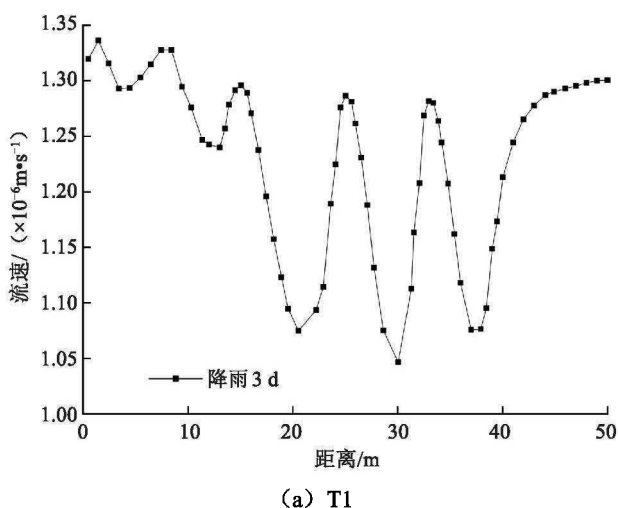


图5 边坡表面下1m连续面节点流速

Fig. 5 Velocity velocity at each node on the continuous surface at 1 m below the slope surface

下渗流量,少于边坡台阶处的积水存储量,各级边坡台阶处的积水易使得该处快速饱和,从而导致边坡台阶处更易出现极值。

2.2 体积含水率受降雨入渗影响规律

降雨入渗引起的边坡体积含水率变化是边坡影响的关键因素之一。孔隙水压力在边坡内部的饱和区内,根据边坡的高程、位置均会产生不同的变化,但是边坡内部饱和区的含水量却不会发生相关的变化。边坡体内空间位置上,体积含水率也有变化,现仅研究在T3降雨条件下,特征截面位置的体积含水率随高程与时间的变化规律。在降雨过程中,坡面处各截面位置均接近饱和程度,在降雨停止后边坡内部由饱和区的非饱和含水率转变成暂态饱和区的饱和含水率。边坡坡体内降雨入渗深度随着降雨时长的增加而逐渐增加。

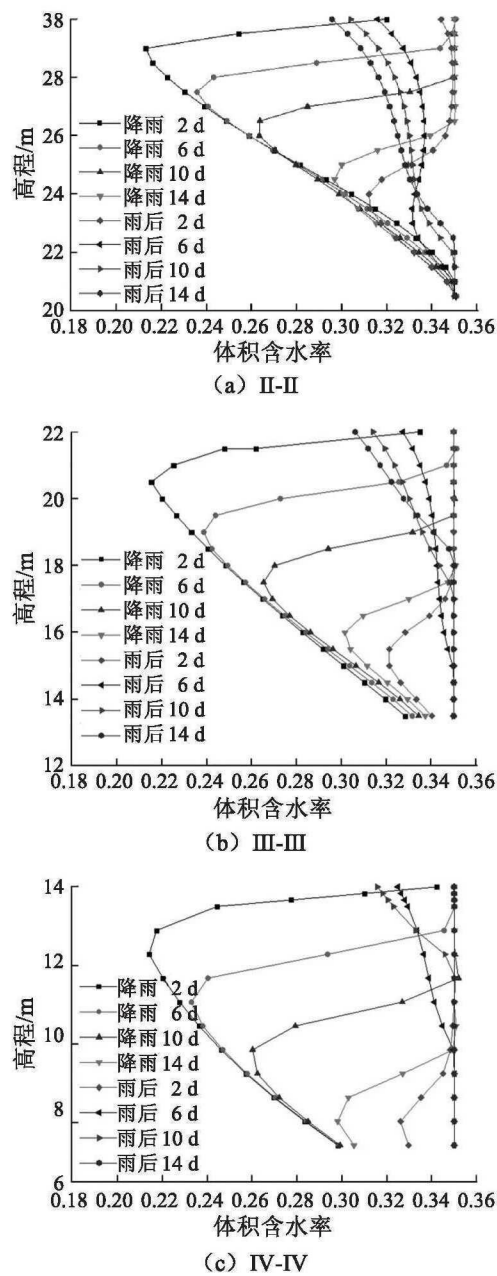


图6 各截面降雨过程中含水率与高程的关系图 (T3)
Fig. 6 Relation between moisture content and elevation in the process of rainfall on each section (T3)

各截面在降雨时含水率与高程的变化如图6所示。从图6中可以看出，在降雨后，高边坡处体积含水率均呈现增长趋势，直至约0.35才停止。在降雨停止后，边坡坡体较高边坡处的体积含水率逐渐降低。土体的体积含水率直接决定土体内部湿润度。当边坡的孔隙间全部充满水时，其达到饱和且渗透性最大，降雨入渗开始后，饱和含水率区域随降雨时间增加，逐渐沿着边坡坡面向坡顶与坡内共同扩大，直至接近饱和。当降雨停止后，由于雨水下渗与外渗，导致边坡上部体积含

水率逐渐减少，不同特征截面处的体积含水率变化趋势一致。

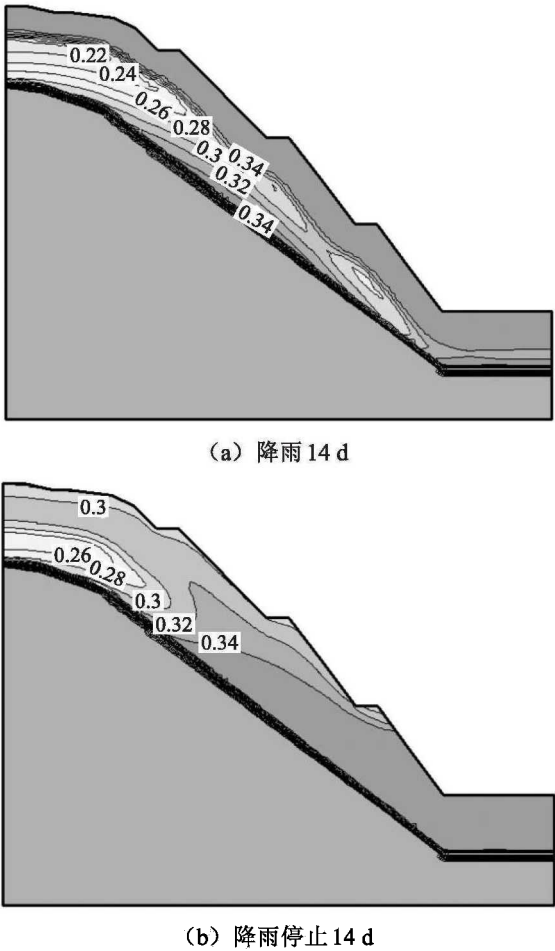


图7 体积含水率等值线图 (T3)
Fig. 7 Contour map of volume moisture content (T3)

边坡在T3降雨方案下，体积含水率变化如图7所示。从图7中可以看出，降雨过程中，地下水位线上的体积含水率逐渐趋于饱和状态；降雨停止后，边坡上部区域因为没有额外雨水补充，加之渗流与重力作用，导致雨水下渗与外渗。在降雨停止后，边坡的下部区域仍能得到上部区域与内部区域的入渗雨水补充，其体积含水率的降低速率较之上部区域的明显缓慢。

3 降雨入渗暂态饱和区变化规律

3.1 暂态饱和区面积受降雨时间的影响

为真实反映出降雨条件下边坡内部暂态饱和区面积的变化规律。本研究拟结合实际边坡工程，探究边坡暂态饱和区面积与降雨时间的变化规律。

本研究仅对 T3 方案进行分析, T3 降雨方案下暂态饱和区和面积随降雨时间变化图像如图 8 所示。

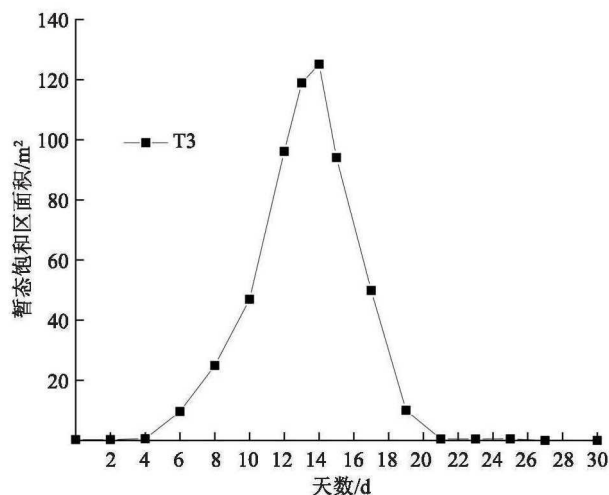


图8 暂态饱和区面积随降雨时间变化图 (T3)

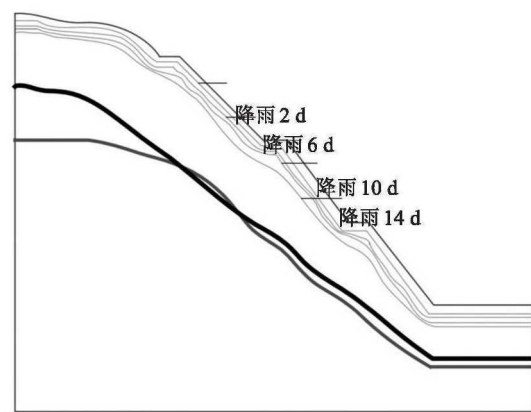
Fig. 8 Diagram of the area of transient saturated zone changing with rainfall time (T3)

从图8中可以看出, 降雨后边坡内部出现的暂态饱和区面积随着降雨时间的增加逐渐增大, 饱和区面积与降雨历时呈现非线性增长关系。在降雨停止后, 暂态饱和区开始逐渐减少, 直至消失不见。这是由于边坡高处重力作用, 水流向下流动, 在边坡坡脚处及边坡各级台阶处暂态饱和区降低程度较缓慢, 致使局部暂态饱和区在该处分布较多, 降雨停止后暂态饱和区继续扩大至最大面积后出现拐点, 降雨全过程中暂态饱和区呈现凸型状态。

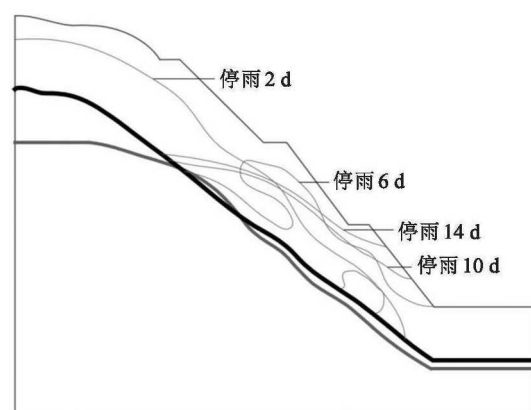
3.2 暂态饱和区空间分布规律

当边坡的降雨入渗条件相同时, 边坡暂态饱和区的面积受降雨强度与降雨时长共同影响。在降雨-停雨全过程中, 暂态饱和区呈现先增后减的趋势, 本研究仅对 T3 方案降雨前后暂态饱和区部分时刻进行空间分布呈现。

边坡暂态饱和区的空间分布变化如图9所示。从图9中可以看出, 在降雨情况下, 暂态饱和区的范围随降雨时长或降雨强度增大, 逐渐延伸至坡面整体与坡内, 呈现出整体均匀下渗的趋势; 当停雨过后, 暂态饱和区的趋势线逐渐下降至坡脚处呈不规则状。降雨 10 d 后, 趋势线与地下水位线分布类似, 这是因为降雨时边坡整体入渗速度相近, 而降雨停止后上部水位下渗, 下部补充, 渗流后仍为饱和区。



(a) 降雨 2~14 d



(b) 雨停后 2~14 d

图9 暂态饱和区变化示意图 (T3)

Fig. 9 Diagram of transient saturation zone (T3)

4 结论

通过对益阳-娄底高速公路地区边坡案例进行研究, 以该边坡所在益阳地区多年来的气象资料为基础, 设计了3种降雨方案, 运用 Geo-studio (seep) 对其进行模拟, 得到结论为:

1) 边坡内部由于重力作用, 导致较高处的孔隙水压力与体积含水率降低速度较快。而下部区域的孔隙水压力与体积含水率因受到上部区域的渗流补充, 导致其降低幅度较小, 还因积水作用, 导致在边坡坡脚处及各台阶处常出现极值。

2) 暂态饱和区随着边坡高程增加面积逐渐减小, 饱和区域随降雨历时增加面积增大。降雨-停雨全过程暂态饱和区面积大小呈“凸”型分布。

3) 边坡在降雨全过程中, 低边坡处由于有高边坡处进行径流补充, 因而低边坡处的各项指标均减少较慢。

参考文献(References):

- [1] 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 Guo-cai, XIE Xing-hua, RUAN Huai-ning, et al. Study on slope stability weakening process along with infiltration by rainfall[J]. Hydro-Science Engineering, 2019 (3): 95-102. (in Chinese))
- [2] 马世国, 韩同春, 徐日庆. 强降雨和初始地下水对浅层边坡稳定的综合影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(3): 803-810. (MA Shi-guo, HAN Tong-chun, XU Ri-qing. Integrated effect of intense rainfall and initial groundwater on slope stability[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45 (3): 803-810. (in Chinese))
- [3] 曾铃, 邱祥, 付宏渊, 等. 水位升降过程中崩解预处理炭质泥岩路堤稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(5): 10-19. (ZENG Ling, QIU Xiang, FU Hong-yuan, et al. Analysis of stability of carbonaceous mudstone embankment after disintegration pretreatment during process of water level fluctuation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(5): 10-19. (in Chinese))
- [4] 曹玲, 王志俭, 张振华. 降雨-蒸发条件下膨胀土裂隙演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 413-421. (CAO Ling, WANG Zhi-jian, ZHANG Zhen-hua. Experimental research of cracking process of expansive soil under rainfall infiltration and evaporation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 413-421. (in Chinese))
- [5] 冯忠居, 于翔, 高雪池, 等. 公路路基边坡失稳风险及处治效果评价研究[J]. 公路, 2020, 65(9): 1-8. (FENG Zhong-ju, YU Xiang, GAO Xue-chi, et al. Evaluation and study of the instability risk and treatment effect of roadbed slope [J]. Highway, 2020, 65(9): 1-8. (in Chinese))
- [6] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征: 基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 32-37. (LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in china: based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 32-37. (in Chinese))
- [7] 蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 等. 降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响: 以福建云平高速云霄段为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 27-35. (CAI Rong-kun, DAI Zi-hang, XU Gen-lian, et al. Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 27-35. (in Chinese))
- [8] 向延虎, 江威. 降雨条件下含裂隙坡积土边坡的渗流特性研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 29-34, 39. (XIANG Yan-hu, JIANG Wei. Research on seepage characteristics of fissured soil slope under rainfall condition[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 29-34, 39. (in Chinese))
- [9] 张立, 刘建华, 夏栋舟. 降雨入渗下软岩边坡可靠度分析及其加固措施[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(1): 30-36. (ZHANG Li, LIU Jian-hua, XIA Dong-zhou. Reliability analysis of soft rock slope and reinforcement under rainfall infiltration[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(1): 30-36. (in Chinese))
- [10] 万思豪, 张继勋, 张景风. 不同降雨条件下裂隙性土质边坡渗流特性分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2019, 41(1): 33-37. (WAN Si-hao, ZHANG Ji-xun, ZHANG Jing-feng. Analysis of seepage characteristics of fractured soil slopes under different rainfall conditions[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science, 2019, 41(1): 33-37. (in Chinese))
- [11] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 38-42. (YANG Xin. Numerical analysis of seepage characteristics of high cutting slope with soft interlayer under rainfall condition [J]. Journal of China & Foreign Highway 2020, 40(4): 38-42. (in Chinese))
- [12] 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 Jie, ZENG Ling, FU Hong-yuan, 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. (in Chinese))
- [13] 曾铃, 史振宁, 付宏渊, 等. 降雨入渗对边坡暂态饱和区分布特征的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 25-34. (ZENG Ling, SHI Zhen-ning, FU Hong-yuan, et al. Influence of rainfall infiltration on distribution characteristics of slope transient saturated zone[J]. China

- Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (1): 25-34. (in Chinese))
- [14] 蒋中明,曾铃,付宏渊,等.降雨条件下厚覆盖层边坡的渗流特性[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(7): 2782-2788. (JIANG Zhong-ming, ZENG Ling, FU Hong-yuan, et al. Seepage characteristics of thick coating slope in raining condition[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(7): 2782-2788. (in Chinese))
- [15] 曾铃.降雨条件下边坡渗流特性及稳定性研究[D].长沙:长沙理工大学,2011. (ZENG Ling. Research on slope seepage characteristics and stability under rainfall infiltration[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011. (in Chinese))
- [16] 蒋中明,熊小虎,曾铃.基于FLAC(3D)平台的边坡非饱和和降雨入渗分析[J].岩土力学,2014,35(3):855-861. (JIANG Zhong-ming, XIONG Xiao-hu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(3):855-861. (in Chinese))
- [17] 付宏渊,曾铃,蒋中明,等.降雨条件下公路边坡暂态饱和区发展规律[J].中国公路学报,2012,25(3):59-64. (FU Hong-yuan, ZENG ling, JIANG Zhong-ming, et al. Development law of transient saturated areas of highway slope under rainfall conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012,25(3):59-64. (in Chinese))
- [18] 曾铃,史振宁,付宏渊,等.降雨入渗对边坡暂态饱和和分布特征的影响[J].中国公路学报,2017,30(1):25-34. (SHI Zhen-ning, ZENG Ling, FU Hong-yuan, et al. Influence of rainfall infiltration on distribution characteristics of slope transient saturated zone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(1):25-34. (in Chinese))
- [19] 付宏渊,曾铃,蒋中明,等.降雨条件下公路边坡暂态饱和区发展规律[J].中国公路学报,2012,25(3):59-64. (FU Hong-yuan, ZENG Ling, JIANG Zhong-ming, et al. Development law of transient saturated areas of highway slope under rainfall conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012,25 (3):59-64. (in Chinese))
- [20] 楼晓昱,曾铃,何忠明.公路边坡降雨入渗对孔隙水压力影响的有限元分析[J].中外公路,2012,32(1):57-61. (LOU Xiao-yu, ZENG Ling, HE Zhong-ming. Finite element analysis of influence of rainfall infiltration on pore water pressure in highway slope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012,32(1):57-61. (in Chinese))
- [21] 潘思渝.降雨条件下土质边坡渗流场及稳定性分析[J].中外公路,2014,34(3):17-21. (PAN Si-yu. Analysis of seepage field and stability of soil slope under rainfall conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(3):17-21. (in Chinese))