

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.013

降雨入渗参数对粗粒土路堤暂态饱和区影响的数值模拟

曾 铃¹,付宏渊¹,周功科²

(1.长沙理工大学土木与建筑学院,湖南 长沙 410076; 2.长沙理工大学交通运输工程学院,湖南 长沙 410076)

摘要:为探讨降雨入渗条件下粗粒土路堤边坡暂态饱和区的形成条件,分析降雨入渗参数对暂态饱和区发展规律的影响,基于室内外试验数据与实际气象数据,拟定不同的数值计算方案,采用降雨入渗理论对降雨入渗参数影响下粗粒土路堤边坡雨水入渗过程进行数值模拟。结果表明:降雨强度 q 与饱和渗透系数 k_{sat} 的比值是决定路堤内雨水入渗方式及暂态饱和区形成的关键因素,当 $q/k_{\text{sat}} \geq 1.5$ 时,路堤边坡表面及坡脚水平面将形成一定深度的暂态饱和区,暂态饱和区的形成增大了路堤发生失稳的可能;降雨入渗仅会引起路堤边坡坡面以下水位大幅度上升,对路面中部以下地下水水位影响有限;路堤边坡暂态饱和区的扩展速度主要取决于 q 与 k_{sat} 的大小,而暂态饱和区形成的时间与扩展面积则受到降雨强度、降雨历时与饱和含水率的共同影响。

关键词:道路工程;暂态饱和区;降雨入渗;粗粒土路堤;数值模拟

中图分类号:U416.1+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)03-0250-07

Numerical simulation of effects of rainfall infiltration parameters on transient saturated areas of coarse-grained soil embankment

ZENG Ling¹, FU Hongyuan¹, ZHOU Gongke²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: In order to explore the formation conditions of transient saturated areas of a coarse-grained soil embankment slope with rainfall infiltration, and to investigate the effects of rainfall infiltration parameters on the development of the transient saturated areas, we designed various numerical calculation schemes using field and laboratory data and actual meteorological data, and conducted numerical simulation of the rainfall infiltration process of the coarse-grained soil embankment slope under the influence of rainfall infiltration parameters based on the theory of rainfall infiltration. The results show that the rainfall infiltration direction and formation of transient saturated areas were determined by the ratio of rainfall intensity (q) to saturated permeability coefficient (k_{sat}). When $q/k_{\text{sat}} \geq 1.5$, transient saturated areas with a certain depth formed at the embankment slope surface and slope toe. The formation of the transient saturated areas increased the possibility of embankment failure. The rainfall infiltration only caused the water level under the embankment slope surface to increase significantly, but had limited influence on the groundwater level below the central road. The expanding speed of the transient saturated areas was mainly determined by q and k_{sat} , while the formation time and expansion area of the transient saturated areas were influenced by q , rainfall duration, and saturated water content.

Key words: road engineering; transient saturated areas; rainfall infiltration; coarse-grained soil embankment; numerical simulation

路堤的稳定是确保公路服务能力的关键。对于公路路堤而言,其稳定性受降雨、填料性质、施工工艺及车辆荷载等因素的影响,在众多因素中,降雨入渗导致的路堤填料含水率增加、基质吸力降低是路堤变形与失稳的主要原因^[14]。降雨入渗造成的路堤失稳容易导致路面结构应力集中或过早破损,从而影响公路的服务能力,降低行车安全性。因此,了解降雨条件下路堤稳定性及内部渗流场变化规律对路堤的设计与施工具有指导意义,许多学者对此进行了深入研究,并得出许多可靠的结论。陈晓斌等^[5]认为降雨入渗对路堤变形影响明显,入渗作用扩大了路堤塑性区范围,使路堤稳定性降低。李佳等^[6]认为水在非饱和黄土中的渗流过程是暂态饱和区不断下移扩大的过程。付宏渊等^[7]认为暂态饱和区的形成时间由降雨强度决定,而暂态饱和区扩展面积大小则受降雨历时和降雨强度共同影响,暂态饱和区的形成及扩展范围与初始地下水位线密切相关。邹维列等^[8]认为新建路堤随着荷载、降雨次数和降雨量的增大,堤坡侧向出现破坏的可能性最大;对于上覆荷载小的堤坡部位,若采用具有膨胀性的黏土填筑,压实度不宜过高;路堤坡脚附近含水率与基质吸力受降雨量影响最大。2010 年,Tasi 等^[9]研究了降雨入渗条件下非饱和土体密度与抗剪强度参数的关系,认为在密度增大与抗剪强度参数降低的情况下,极易引起路堤边坡失稳。Oh 等^[10]通过对压实土路堤边坡的研究,得出降雨引起路堤表层含水率增大是造成非饱和区浅层破坏的主要原因。

尽管人们对降雨条件下边坡的渗流过程及暂态饱和区形成特点有了一定的认识,但对于填方路堤而言,不同地域的气候条件及所用的填筑材料均存在差异,其渗流过程比边坡复杂。目前,针对路堤降雨入渗的研究主要侧重于降雨对路堤边坡稳定性的影响及边坡内部渗流过程两方面,而对于暂态饱和区的形成条件,以及不同降雨入渗因素影响下暂态饱和区形成时间与空间变化规律的研究较少。因此,有必要开展相关研究。

笔者以某高速公路路堤断面为研究对象,结合室内外土工试验数据及实际降雨资料,通过数值模拟研究降雨条件下粗粒土路堤边坡暂态饱和区的形成条件,以及在降雨强度、土体饱和渗透系数、土体饱和含水率变化下粗粒土路堤暂态饱和区面积在时间及空间上的分布规律,为进一步分析暂态饱和区对粗粒土路堤稳定性的影响提供参考。

1 降雨入渗基本理论

1.1 降雨入渗过程分析

经过碾压密实后的公路路堤一般处于非饱和状态^[11-12],降雨过程中路堤非饱和区雨水的入渗与饱和区地下水的运动互相联系,雨水在路堤内部的入渗过程属于典型的饱和-非饱和和渗流过程。根据 Coleman 和 Bodman 的研究^[13],当均质土体表面有积水入渗时,典型含水率分布剖面从上往下可分为 4 个区,即表层有一厚度较薄的饱和区,以下是含水率变化较大的过渡区,其下是含水率分布较均匀的传导区,最下层是湿润程度逐渐减小的湿润区,湿润区的前缘称为湿润锋。随着降雨时间的持续,传导区会不断地向路堤内部发展,湿润区与湿润锋会向路堤内部移动,路堤内部的含水率分布曲线逐渐平缓。笔者基于这一认识,对暂态饱和区的形成条件及变化规律进行研究。

1.2 降雨入渗计算模型

由于降雨入渗的影响因素众多,且入渗过程较为复杂,为了便于全面揭示降雨入渗过程,人们提出了多种渗流模型^[14-16]。渗流模型主要分为 2 类:一类是基于长期现场观测数据建立的半经验模型;另一类是基于渗流理论(如 Richards 方程),通过对实际问题进行一定的假设和限定建立的模型,这类模型以 Green-Ampt 模型为代表。对于实际工程中的土坡,其内部土壤与边界条件较为复杂,无法运用 Green-Ampt 模型直接求其解析解,只能根据土壤水运动的基本方程和初始条件,采用有限元或有限差分法求出近似解。本文研究的问题属于典型的二维饱和-非饱和渗流问题,其控制方程为^[17]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + w = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1}$$

式中: h ——岩体裂隙中的总水头; k_x 、 k_y —— x 、 y 方向的渗透系数; w ——源汇项; m_w ——比水容量; ρ_w ——水的密度; g ——重力加速度; t ——时间。

渗透系数 k 为

$$k = \begin{cases} k_{\text{sat}} & \text{饱和区} \\ k(\theta) & 0 \leq \theta < 1 \end{cases} \tag{2}$$

式中: k_{sat} ——饱和渗透系数; $k(\theta)$ ——非饱和土的渗透系数; θ ——体积含水率。其中非饱和区渗透系数随含水率与基质吸力的变化而变化,本文采用 van Genuchten 模型^[18]对其进行拟合。

2 数值计算模型及方案确定

2.1 数值计算模型

公路路堤计算模型的路面宽为 60 m,填方高度为 12 m。路堤中使用土-石(崩解完成后的炭质泥岩)混填粗粒土填料,由于路堤两侧对称,故选取半剖面作为研究对象。路堤典型剖面二维有限元网格如图 1 所示。计算模型单元数为 2 997,节点数为 3 114,为了保证计算精度,通过设置辅助线将网格划分为四边形单元。

渗流边界条件:模型底部、两侧铅直位置、路面设置为不透水边界。当程序运行时,自动判断降雨强度 q 与土体渗透性的关系。如果 q 小于路堤坡面、坡脚水平面表层土体的渗透性,按流量边界处理,大小为降雨强度;如果 q 大于路堤坡面、坡脚水平面表层土体的渗透性,一部分雨水沿路堤坡面与坡脚水平面流失,会在坡面形成一薄层水膜,此时可按定水头边界处理。由于水膜很薄,计算中取水头值等于地表高程。图 2 为公路路堤降雨入渗形象化过程。

渗流初始条件:根据路堤坡面及坡脚多个位置的钻孔取样资料,设置如图 1 所示的初始地下水位进行稳态流计算,以此结果作为边坡初始渗流场。

渗流水力学模型:采用各向异性达西渗流模型。

渗流计算水力特性及参数:预崩解炭质泥岩粒径多位于 0.075 ~ 10 mm 之间,属于中粗粒组,并且崩解后的炭质泥岩泥化成分较大,在压实度为 93% 的炭质泥岩-土混填情况下,路堤填土具有很高的密实性。通过对现场获取的多组原状土样进行室内饱和渗流试验,测得压实度为 93% 的炭质泥岩路堤填料饱和渗透系数为 $9.5\times10^{-8} \sim 7.36\times10^{-7} \text{ m/s}$ 。本文选取饱和体积含水率为 0.15,饱和渗透系数为 $3.0\times10^{-7} \text{ m/s}$,由于路堤非饱和区基质吸力的存在,路堤内部非饱和区渗透系数为非饱和渗透系数,采用 van Genuchten 模型对非饱和区渗透系数进行拟合,渗透系数及体积含水率随负孔隙水压力 p 的变化见图 3、图 4。此外,由于路堤填筑碾压过程造成了其内部土体的各向异性,取各向异性渗透系数比 $K_y/K_x=0.5$ 。

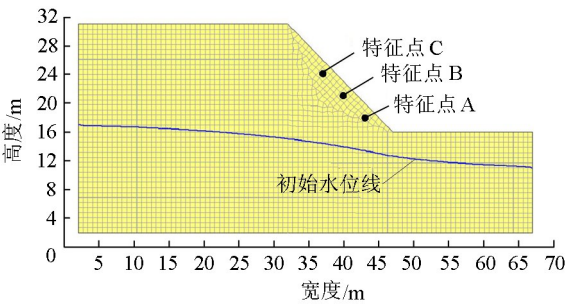


图 1 路堤典型剖面二维有限元网格

Fig. 1 Two-dimensional finite element model of embankment typical section

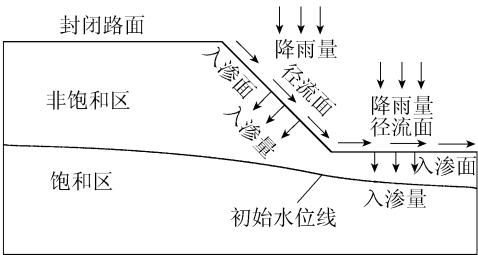


图 2 路堤降雨入渗形象化过程

Fig. 2 Rainfall infiltration process of embankment

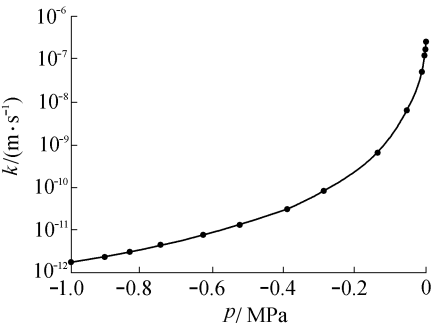


图 3 渗透系数与负孔隙水压力关系曲线

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and negative pore water pressure

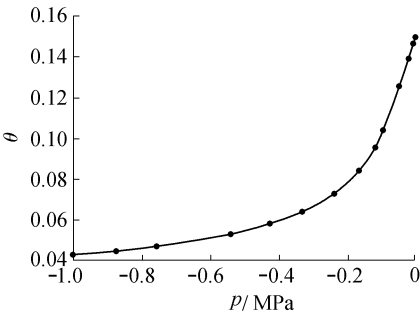


图 4 体积含水率与负孔隙水压力关系曲线

Fig. 4 Relationship between volumetric water content and negative pore water pressure

2.2 数值分析方案

为全面了解粗粒土路堤在降雨条件下的渗流特性,获得不同参数影响下路堤内部渗流过程的变化规律,笔者通过参考当地气象资料,并结合岩土体室内外试验数据,对降雨条件下炭质泥岩粗粒土路堤边坡在降雨强度、土体饱和和渗透系数以及土体饱和和含水率单因素变化情况下路堤边坡暂态饱和区面积在时间及空间上的分布规律进行探讨。主要数值计算模拟方案见表 1。

3 降雨条件下暂态饱和区形成条件分析

对表 1 中数值计算方案进行初步计算可知, q/k_{sat} 是决定路堤边坡暂态饱和区出现与否的关键控制因素。因此,为了对降雨条件下暂态饱和区的形成与发展有更深入的了解,在方案 3 的基础上,保持其 q 不变,不断改变 k_{sat} 的大小,使 $q/k_{\text{sat}} \in [1,4]$ 。

经大量试算可知,降雨过程中 q/k_{sat} 的大小是决定路堤内部雨水入渗方式与暂态饱和区形成的关键因素。当 $q/k_{\text{sat}} \geq 1.5$ 时(图 5(a)),降雨持续一段时间后,路堤边坡坡面及坡脚水平面位置会逐渐出现一定深度的暂态饱和区,暂态饱和区的面积随着降雨历时的增长而逐渐扩大,同时坡脚附近的地下水位也逐渐升高,并在坡脚附近率先与地下水位面连通,连通后路堤边坡坡面以下水位出现大幅度上升;当 $q/k_{\text{sat}} < 1.5$ 时(图 5(b)),路堤边坡随着降雨的持续,在其坡面与坡脚水平面并没有暂态饱和区形成,而是通过雨水的持续入渗直接引起坡脚附近地下水位上升。从图 5 可以看出,坡脚附近地下水位最易受雨水入渗影响,坡脚以下土体也最先趋于饱和,饱和区范围由坡脚附近迅速向周围土体扩散,并逐渐覆盖坡脚水平面以下区域,同时由坡脚处沿着坡面向上延伸。在整个降雨过程中,雨水入渗仅会引起路堤边坡坡面以下水位大幅度上升,对道路路面以下地下水位影响有限。

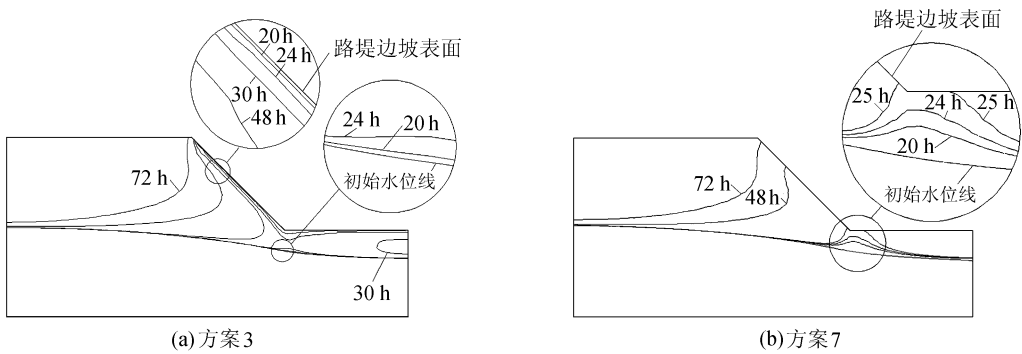


图 5 暂态饱和区及地下水位随时间的变化

Fig. 5 Transient saturated areas and groundwater level vs. time

暂态饱和区的形成及其对路堤渗流场的影响是导致路堤失稳的因素之一,通过在路堤边坡表面附近不同位置设置特征点 A、B、C(图 1),研究路堤在降雨条件下孔隙水压力与体积分水率的变化规律(图 6,限于篇幅,只列出方案 3 与方案 7 的变化过程对比曲线)。从图 6 可以看出,方案 3 中特征点 A、B、C 的孔隙水压力完全丧失所需的时间分别为 28 h、39 h、44 h,孔隙水压力出现的最大值分别为 598. 23 kPa、414. 18 kPa、216. 34 kPa,土体饱和所需时间分别为 28 h、35 h、39 h;方案 7 中特征点 A、B、C 的孔隙水压力完全丧失所需的时间分别为 30 h、37 h、49 h,孔隙水压力出现的最大值分别为 323. 55 kPa、213. 36 kPa、98. 98 kPa,土体饱和所需时间分别为 30 h、38 h、49 h。由此可知,暂态饱和区的出现,缩短了路堤内部非饱和区基质吸力完全丧失

以及土体饱和所需的时间,增大了孔隙水压力的变化幅度,尤其在坡脚处的特征点 A 孔隙水压力变化最显著,其原因是入渗雨水在重力作用下迅速向坡脚汇集。依据加拿大学者 Fredlund 基于摩尔-库伦公式提出的非饱和和土体抗剪强度理论可以得出^[19]:暂态饱和区的出现将导致路堤内部孔隙水压力升高、土体密度增大,从而引起土体抗剪强度减小、路堤边坡下滑力增大,造成路堤边坡发生失稳的可能增大。由于坡脚附近孔隙水压力最大、体积含水率最高,因此边坡发生整体滑移的剪出口位置最有可能出现在坡脚附近。

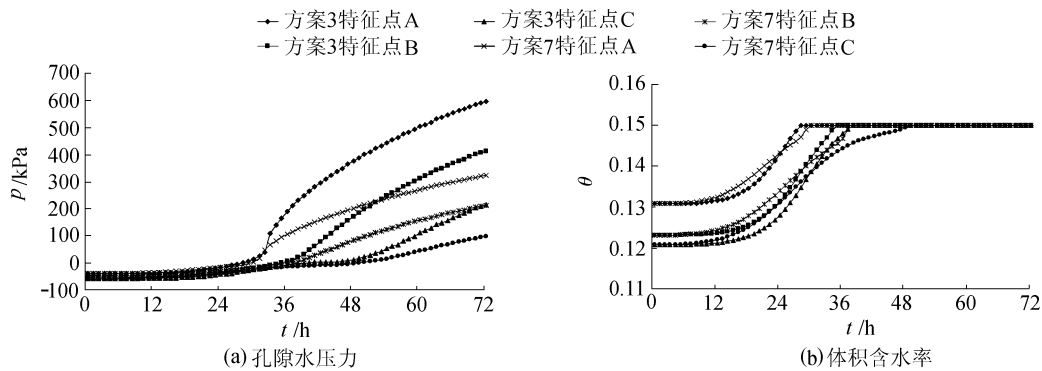


图6 降雨过程中孔隙水压力与体积含水率对比曲线

Fig. 6 Comparison of pore water pressure and volumetric water content during rainfall

3.1 不同降雨强度影响下路堤边坡暂态饱和区变化规律分析

为探讨 q 对路堤边坡暂态饱和区变化规律的影响,分别对第 I 组所列工况进行计算,并选取不同时刻路堤内部暂态饱和区空间分布及暂态饱和区面积随时间的变化进行对比,如图 7 所示(图中编号均为表 1 中的方案编号)。从图 7 可以看出,当 $q=1.85\times10^{-7}\text{m/s}$ (方案 1) 时,经过 36 h 降雨,路堤内部依然没有饱和区出现,而 $q=6.0\times10^{-7}\text{m/s}$ 的方案 4 中,暂态饱和区已经发展到路堤的中上部。由图 7(b) 可知,当降雨持续 72 h 后,各方案暂态饱和区持续增大,但大小关系与 36 h 保持一致。由此可以推断: q 越大,雨水在路堤内部扩展的速度越快,在相同降雨时间内雨水的入渗量也越大。由计算可知,第 I 组中 4 种工况暂态饱和区出现所需的时间(坡脚附近地下水位线上升所需时间)分别为 40 h、30 h、17 h、12 h,所形成的最终面积分别为 98.35 m^2 、 227.62 m^2 、 326.28 m^2 、 406.95 m^2 。由此可知,在降雨时间相同的情况下,路堤内部由雨水入渗所形成的暂态饱和区面积与 q 成正比; q 越大,路堤内部暂态饱和区出现所需的时间越短,最终所形成的面积越大。因此,在路堤的设计阶段,为确保路堤的长期稳定,应充分考虑当地气候条件对路堤运营期稳定性的影响,做好路堤边坡防排水设施的设计。

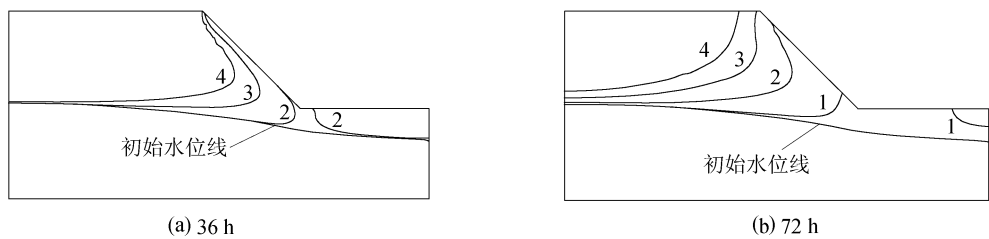


图7 不同降雨强度影响下暂态饱和区及地下水位对比

Fig. 7 Transient saturated areas vs. groundwater level under influence of various rainfall intensities

3.2 不同饱和渗透系数影响下路堤边坡暂态饱和区变化规律分析

图 8 为不同饱和渗透系数条件下不同时刻路堤边坡内暂态饱和区空间分布对比(图中编号均为表 1 中的方案编号)。从图 8 可以看出,降雨持时分别为 36 h 与 72 h 时,在不同饱和渗透系数影响下,路堤内部水位线的变化并不明显。第 II 组的 4 种工况中暂态饱和区出现所需的时间分别为 8 h、17 h、18 h、18 h,所形成的最终面积分别为 342.93 m^2 、 326.28 m^2 、 324.1 m^2 、 322.15 m^2 ,即在相同的降雨强度与降雨时间情况下,改变路堤土体的饱和渗透系数,对路堤内部暂态饱和区出现所需的时间与扩展范围影响较小。

3.3 饱和含水率变化对路堤边坡暂态饱和区变化规律的影响

为分析不同饱和含水率条件下路堤边坡暂态饱和区的变化规律,分别对第 III 组所列工况进行计算,由此

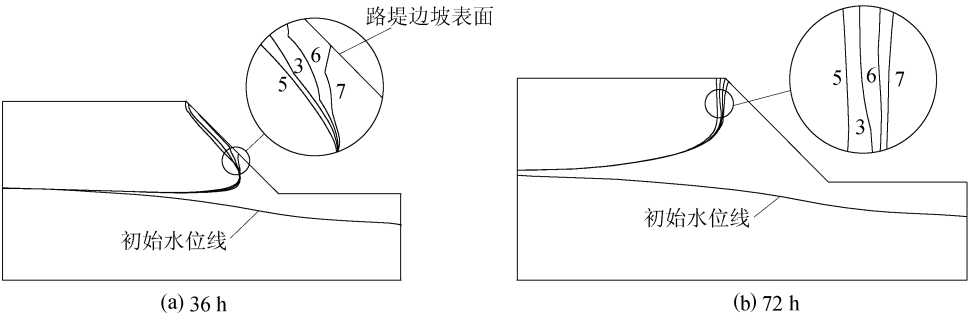


图 8 不同饱和和渗透系数影响下暂态饱和区及地下水位对比

Fig. 8 Transient saturated areas vs. groundwater level under influence of various saturated permeability coefficients

得出路堤边坡内部暂态饱和区空间分布,如图9所示(图中编号均为表1中的方案编号)。由图9可以看出,在降雨时间与初始含水率均相同的情况下,4种工况中暂态饱和区的空间分布与出现的时间差异较大。4种工况暂态饱和区出现所需的时间分别为11 h、17 h、22 h、27 h,所形成的最终面积分别为440.5 m²、326.3 m²、246.1 m²、197.5 m²。以上分析可知:路堤填料的饱和含水率越低,达到饱和所需的时间越短,雨水在路堤内部的人渗速度越快,对降雨条件下路堤的稳定性越不利。

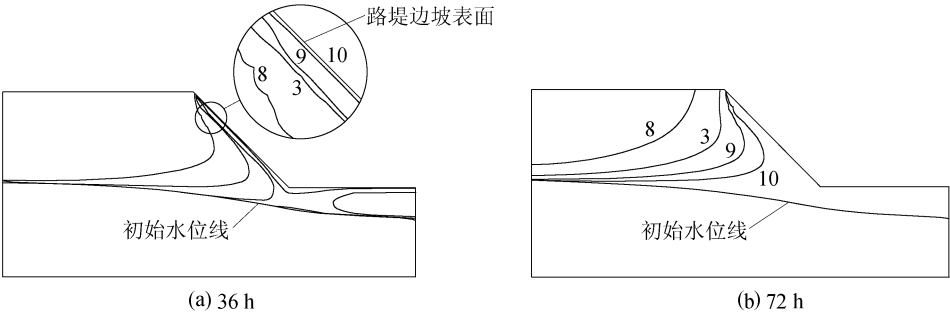


图 9 不同饱和含水率影响下暂态饱和区及地下水位对比

Fig. 9 Transient saturated areas vs. groundwater level under influence of various saturated water contents

4 结 论

- a. q/k_{sat} 是决定路堤内部雨水入渗方式及暂态饱和区形成的关键因素。当 $q/k_{\text{sat}} \geq 1.5$ 时,在路堤边坡坡面逐渐会出现一定深度的暂态饱和区,随着降雨的持续,暂态饱和区在坡脚附近率先与地下水位线联通,并引起路堤边坡坡面以下水位出现大幅度上升;当 $q/k_{\text{sat}} < 1.5$ 时,则是通过雨水的持续入渗直接引起坡脚附近地下水位线上升。
- b. 降雨条件下,坡脚附近地下水最易受雨水入渗的影响,坡脚以下土体最先趋于饱和,饱和区范围由坡脚附近迅速向路堤截面横向扩散,并逐渐覆盖坡脚水平面以下区域,同时由坡脚处沿着坡面向上延伸。在整个降雨阶段,雨水入渗仅会引起路堤边坡坡面以下水位线大幅度上升,对路堤中部地下水位影响有限。
- c. 降雨强度、土体饱和渗透系数以及土体饱和含水率对雨水入渗过程的影响程度不同。路堤边坡暂态饱和区范围的扩展速度主要取决于降雨强度与饱和含水率的大小,暂态饱和区出现的时间与扩展范围主要受降雨强度、降雨历时与饱和含水率的共同影响,受饱和渗透系数的变化影响较小。在路堤的设计与施工过程中,除充分考虑当地的气候条件与路堤填料对边坡稳定性的影响以外,路堤边坡与坡脚附近水平面的防排水措施不可忽视。

参考文献:

[1] 徐海涛,梁超. 降雨条件下顺层边坡稳定性分析[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):73-76. (XU Haitao, LIANG Chao. Stability analysis of bedded slopes under rainfall conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5):73-76. (in Chinese))

[2] 李亮,刘兴旺,赵炼恒. 降雨入渗对路基稳定性影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报,2007,4(2):19-23. (LI Ling, LIU

- Xingwang,ZHAO Lianheng. Factors analysis of subgrade stability due to rainfall infiltration[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2007,4(2):19-23. (in Chinese))
- [3] 刘俊新,刘育田,胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固体耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010,31(3):903-910. (LIU Junxin, LIU Yutian, HU Qijun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(3):903-910. (in Chinese))
- [4] 沈水进,孙红月,尚岳全,等. 降雨作用下路堤边坡的冲刷-渗透耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(12):2456-2462. (SHEN Shuijin, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Scouring-penetration coupling analysis of embankment slope under rainfall action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(12):2456-2462. (in Chinese))
- [5] 陈晓斌,徐望国,刘小平. 降雨入渗对粗粒土路堤变形与稳定性的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(3):766-771. (CHEN Xiaobin, XU Wangguo, LIU Xiaoping. Effect of rainfall infiltration on additional settlement and stability debasement of granular soil fillings embankment[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2011, 42(3): 766-771. (in Chinese))
- [6] 李佳,高广运,黄雪峰. 非饱和原状黄土边坡浸水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(5):1043-1048. (LI Jia, GAO Guangyun, HUANG Xuefeng. Experimental research on immersion for unsaturated intact loess slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(5):1043-1048. (in Chinese))
- [7] 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 Hongyuan, ZENG Ling, JIANG Zhongming, et al. Developing 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))
- [8] 邹维列,李聪,汪建峰,等. 非饱和路堤对加载和降雨入渗响应的模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(10):1512-1519. (ZOU Weilie, LI Cong, WANG Jianfeng, et al. Model tests on responses of unsaturated road-embankments to loading and rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(10):1512-1519. (in Chinese))
- [9] TASI T L, CHEN H F. Effects of saturation on shallow landslides triggered by rainfall[J]. Environmental Earth Sciences,2010, 59(6):1285-1295.
- [10] OH W T, VANAPALLI SK. Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes[J]. Computers and Geotechnics,2010,37(5):649-657.
- [11] 刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学,2007,28(8):1705-1709. (LIU Xinxi, XIA Yuanyou, CAI Junjie, et al. Study on stability on high filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(8):1705-1708. (in Chinese))
- [12] 王瑞钢,闫澍旺,邓卫东. 降雨作用下高填土路堤边坡的渗流稳定分析[J]. 中国公路学报,2004,17(4):25-30. (WANG Ruigang, YAN Shuwang, DENG Weidong. Analysis of seepage stability of high-filled embankment slope due to rainfall infiltration [J]. China Journal of Highway and Transport,2004,17(4):25-30. (in Chinese))
- [13] 张蔚榛. 地下水与土壤水动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [14] SHAHROKHABADI S, TOUFIGH M M. The solution of unconfined seepage problem using natural element method (NEM) coupled with genetic algorithm (GA)[J]. Applied Mathematical Modelling,2013,31:2775-2786.
- [15] GREEN W H, AMPT G A. Studies on physics:flow of air and water through soils[J]. J Agr Sci,1911(4):1-24
- [16] RUSHTON K R, YOUNGS E G. Drainage of recharge to symmetrically located downstream boundaries with special reference to seepage faces[J]. Journal of Hydrology,2010,380:94-103.
- [17] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [18] van GENUCHTEN M T. A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980,44:892-898.
- [19] 刘建华,查旭东,付宏渊,等. 考虑降雨入渗条件下岩质边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技,2009,26(10):33-37. (LIU Jianhua, ZHA Xudong, FU Hongyuan, et al. Analysis of rock slope stability under rainfall infiltration condition[J]. Journal of Highway and Transportation and Research and Development, 2009, 26(10):33-37. (in Chinese))