

文章编号:1671-8879(2016)05-0029-08

降雨条件下炭质泥岩-土分层路堤含水特征试验

曾 铃^{1,2}, 邱 祥³, 付宏渊³, 周功科⁴, 陈向阳⁴

(1. 道路结构与材料交通行业重点实验, 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004; 3. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 4. 现代公路交通基础设施
先进建养技术湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410004)

摘 要:为研究降雨条件下炭质泥岩-土分层填筑路堤的含水特征, 采用室内试验与数值模拟相结合的研究方法, 开展人工模拟降雨的路堤物理模型试验, 分析雨水入渗时路堤内部含水率的变化特征、暂态饱和区演化过程, 并结合数值试验对试验结果进行了验证。研究表明:短时降雨对路堤表层土体含水率影响较小, 随着降雨的持续, 其影响程度增大; 受填筑形式的影响, 各截面含水率分布曲线呈“S”形或倒“S”形; 路堤边坡坡面以下同一深度处土体含水率增大的幅度和速率与其高程呈反比, 路堤内部同一高程处土体含水率增大的幅度和速率与其距坡面的距离呈反比; 降雨入渗形成的暂态饱和区由坡面向路堤内部整体扩展, 其上部扩展速度小于路堤下部, 同时在预崩解炭质泥岩中的扩展速度快于土中的速度, 当暂态饱和区扩展到一定深度后将引起地下水位的升高; 模型试验人眼观察的局限性、填筑过程中水分的迁移及尺寸效应, 使得模型试验与数值试验结果之间存在一定差异; 路堤特征点、截面含水率变化特征以及暂态饱和区分布形式的研究试验成果, 对开展炭质泥岩-土分层填筑路堤在降雨条件下的后续崩解机理及失稳模式研究具有参考意义。

关键词:道路工程; 炭质泥岩; 降雨条件下; 模型试验; 含水特征

中图分类号:U411 文献标志码:A

Moisture characteristics test of carbonaceous mudstone-soil stratified filling embankment under the rainfall condition

ZENG Ling^{1,2}, QIU Xiang³, FU Hong-yuan³, ZHOU Gong-ke⁴, CHEN Xiang-yang⁴

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 4. Co-Innovation Center for Advanced Construction and Maintenance Technology of Modern Transportation Infrastructural Facility, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: To study the moisture characteristics of carbonaceous mudstone-soil stratified filling embankment in the rainfall condition, combined laboratory model test with numerical simulation, the embankment model test under the condition of artificial rainfall was carried out, the variation of water content evolution of transient saturation zone in the embankment during the rainwater infiltration were analysed, and the test results were verified by numerical experiment. The

收稿日期:2016-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51278067, 51578079, 51508040, 51508042); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ3010); 长沙理工大学土木工程重点学科创新性项目(15ZDXK08); 长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金项目(kfj140302)

作者简介:曾 铃(1986-), 男, 重庆江津人, 讲师, 工学博士, E-mail: zlbinqing3@126.com.

results show that short term rainfall has little impact on water content of surface soil of embankment. The impact increases as the rain continues, and with the influence of filling forms, moisture content curve of every cross section presents "S" shape or inverted "S" shape. The increased magnitude and the rate of soil moisture content under the same depth of embankment slope is inversely proportional to elevation, the increased magnitude and the rate of soil moisture content under the same depth of the embankment internal is inversely proportional to the distance to the surface of slope. Transient saturated zone caused by rainfall extends from surface to internal of embankment, the extending speed at top of the embankment is smaller than that at the bottom. At the same time, the extending speed at the pre-disintegrating carbonaceous mudstone is faster than that at the soil. When the transient saturation zone extends to a certain depth, it may cause the rising of groundwater. The limitations of visual observation and moisture migration of filling process and the size effect of model experiment lead to some differences between the results of model experiment and the consequence of numerical experiment. Through the exploration of the variation of moisture content of embankment characteristic and the cross section, and the distribution form of transient saturation zone, the test results have reference significance for the study of the subsequent disintegration mechanism and the design of slope drainage and the unstable model of carbonaceous mudstone-soil stratified filling embankment under the condition of rainfall. 1 tab, 13 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; carbonaceous mudstone; rainfall condition; model test; moisture characteristic

0 引言

炭质泥岩遇水崩解的特性是阻碍其用于路堤填筑的主要原因^[1]。在实际工程中,若将炭质泥岩直接用于路堤的填筑,在降雨条件下遇水将迅速崩解,强度劣化明显,存在严重的安全隐患。为此,提出了让炭质泥岩在自然条件下进行充分的崩解,然后将崩解的炭质泥岩与土进行分层交错填筑的施工技术,其目的是利用土体材料渗透性较小的优势,阻隔水分进入路基内部,防止炭质泥岩材料后续崩解导致的工程灾变^[2]。该路堤填筑方法在广西六寨一河池高速公路建设中率先进行了尝试。但经过长期现场监测表明,利用该设计方法进行填筑的路堤变形量明显大于普通优质填料填筑后的路堤变形量,究其原因,仍然是由于雨水的渗入引起了填筑炭质泥岩的后续崩解所导致的。因此,需要对炭质泥岩-土分层路堤的长期稳定性进行研究,且应首先开展其在降雨条件下的路堤含水特征研究^[3]。

目前,对降雨入渗影响下边坡内部水汽运移及形态特征变化的探讨大多是采用数值模拟与室内试验的方法,主要研究思路为:(1)基于饱和-非饱和渗流理论,设计降雨条件下的边界条件,进行边坡内部孔隙水压力、含水特征的变化特征分析,数值模拟的方法在一定程度上能够对雨水的入渗过程及对边坡稳

定性的影响进行定性的评价,但确定计算的初始条件必须有正确计算结果的保证,然而一般很难对初始渗流场进行准确拟合^[4-5]; (2)有针对性地就某一类型的边坡进行室内降雨入渗试验,通过对边坡外观形态变化以及孔隙水压力的监测,从机理上分析其对边坡稳定性的影响机理^[6-7]; (3)在降雨入渗现场试验的基础上,通过观测天然边坡含水率、入渗深度的变化规律,揭示边坡在降雨条件下的含水特征演化规律及其受降雨入渗的影响程度^[8-11]。但需要重视的是,不论是数值模拟、室内试验还是现场试验,目前开展的研究多是针对均质土体进行的,而炭质泥岩-土分层填筑路堤则是近年来出现的一种新的路堤填筑形式,由于炭质泥岩遇水崩解的特殊性质,故针对其在降雨入渗影响下的含水特征变化的研究对路堤的长期稳定性分析极为重要,但目前还未有学者开展过相关的室内试验研究。为此,本文建立了人工模拟降雨的路堤物理试验模型,分析降雨过程中含水率沿深度方向的变化规律;探讨了边坡内部不同位置含水率受降雨影响程度的大小;分析了降雨的影响深度及暂态饱和区的演化特征,对炭质泥岩-土分层填筑路堤防排水措施的布设形式进行了初步探讨。

1 试验模型及其过程

1.1 试验模型

本次降雨入渗试验在如下页图 1 所示的钢板与

有机玻璃相结合的模型内进行,模型由模型箱与降雨支架组成。模型箱后设置长 100 mm、宽 1 435 mm、高 400 mm 的水箱,钻孔与模型箱内部相通,用于模拟试验过程中模型箱内部的地下水位情况。模型箱路堤高度为 90 cm,其中路堤边坡上部为 50 cm,下部为 40 cm,边坡坡度为 1 : 1.5。模型箱两侧均用 15 mm 厚的透明有机玻璃组成,其尺寸与填筑路堤尺寸一致,便于降雨试验时观察路堤内部浸润线的变化过程;同时透明有机玻璃用红色油性笔根据每层材料的分层填筑厚度,绘有边长为 8 cm 的正方形网格线(最上层为 10 cm),一方面保证路堤填筑准确、顺利的进行;另一方面又能精确地观测降雨时路堤内部暂态饱和区的变化情况。模型箱除两侧外,其余各部分由厚度为 5 mm 的钢板焊接而成。降雨系统由直径为 0.01 m 的承压软管搭配雨雾喷头、增压水泵、流量控制阀共同组成,经多个雨量器测试,其降雨均匀性达到 95% 以上。模型箱内部由 7 块厚 10 mm 的透明有机玻璃将试验模型分隔成 8 个等距的试验区域,即 8 个不同切面,从左至右 8 个切面分别用编号 I ~ VIII 代替。每个切面均是相互独立的整体,使得整个试验过程在不影响入渗效果的前提下可以单独对每个切面的特征点与特征截面进行原位取样,测定其含水率,以获得降雨过程中不同时刻路堤模型内部含水率的分布情况,提高了试验的真实性与准确性。本次模型试验每个单独区域均有 5 个特征截面 1-1、2-2、3-3、4-4、5-5 和 5 个特征点 A、B、C、D、E,如图 2 所示。

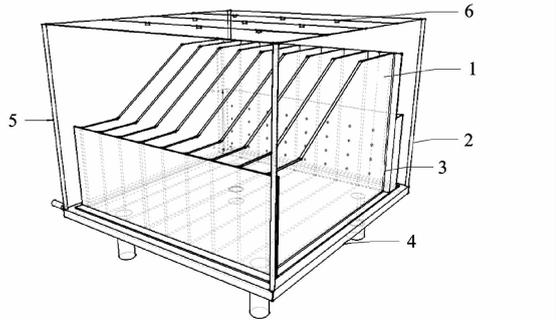


图 1 模型箱整体效果

Fig. 1 Whole effect of model box

1.2 试验模型参数

试验前,对试验所用材料的基本物理力学参数进行仔细测定,相关参数见曾铃等的研究^[4,8],用于本文试验及数值分析的主要有最佳含水率、最大干密度、饱和渗透系数以及试验模型填筑时的调配含水率,见表 1。

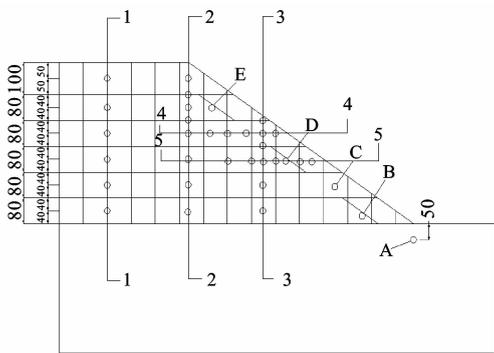


图 2 特征点与特征截面示意

Fig. 2 Schematic of characteristic points and characteristic cross section

表 1 试验材料基本参数

Tab. 1 Basic parameters of test materials

试验参数	最佳含水率/%	最大干密度/(g · cm ⁻³)	饱和渗透系数/(m · s ⁻¹)	调配含水率/%
炭质泥岩	9.90	2.086	2.0 × 10 ⁻⁷ ~ 7 × 10 ⁻⁷	9.90 ± 0.2
粉质粘土	11.10	1.893	6.95 × 10 ⁻⁸ ~ 4.52 × 10 ⁻⁷	11.10 ± 0.2

降雨装置:降雨喷嘴(图 1)为标准实心锥形喷嘴,液体最大流量为 4 L/min,覆盖率为 99%;流量控制阀型号为 2W-160-15,流量控制范围为每分钟 0~10 kg/cm³;增压水泵(热带雨林牌)最大压力为 1.4 MPa,最大流量范围为 4.2 L/min;雨量器型号为 ZX45005,最高水测量测值为 50 mm。设计降雨时间持续 7 h,降雨量为 75 mm。为了便于控制降雨范围,采取模型路堤全坡面与坡顶同强度降雨的方式,但由于本试验模拟的是路面不渗水的情况,因此在路堤顶面布置防水薄膜以防止雨水渗入。

1.3 试验过程

试验过程为试验模型所测数据正确性的验证及降雨入渗条件下的含水特征变化规律测试^[12-13]。

(1)首先进行预备性试验,验证其试验设备、所测数据的可靠性,以及路堤填筑的均匀性、压实度大小是否达到预期设定目标。试验过程中关于路堤压实度、均匀性等方面的控制不做详细介绍。另外,对文中的降雨装置进行了标定,在模型表面设置了 6 个雨量器,经多次测定,降雨量得到较好控制,降雨均匀性达到 95% 以上。

(2)路堤上部选用预崩解炭质泥岩与粉质粘土按照 96% 的压实度进行分层交错填筑,路堤下部根据实际工程情况,选取粉土进行填筑,路堤模型填筑完成后,将其静置 24 h,以待其水气尽可能扩散均

匀,路堤填筑过程如图3所示。本试验设计降雨时间持续7 h,降雨量为75 mm,试验过程中,按照切面编号I~Ⅷ的顺序,每1 h拆卸1块有机玻璃,并采用环刀按照图2所示的特征点位置在所拆卸的截面提取土样,及时对所取土样进行编号、密封称重,待试验完成后在烘箱内烘干至恒重,依此计算其含水率,并对所测含水率进行拟合分析。试验过程中可通过切面Ⅷ最外侧的有机玻璃直观地观测到降雨作用下的饱和区扩展情况。



图3 炭质泥岩-土分层路堤填筑过程

Fig. 3 Filling process of carbonaceous mudstone-soil stratified filling embankment

2 路堤边坡含水率测试结果分析

2.1 特征点含水率变化特征

依据试验方案,每降雨1 h从左至右按照编号I~Ⅷ拆卸1块有机玻璃,并对该独立区域内的特征点含水率进行量测及拟合。图4为特征点A~E含水率随时间的变化过程。由图可知,受降雨影响,边坡内部特征点含水率的增大速率由大到小依次为:A、B、C、D、E,在降雨持续一段时间后,各个特征点位置的含水率都达到饱和含水率。达到饱和后,特征点B、D、E含水率小于特征点A、C。这是由于特征点A、C位于粉质粘土填筑区域,而B、D、E位于炭质泥岩填筑区域引起的,说明在相同压实度条件下,预崩解炭质泥岩相对于粉质粘土更易饱和。含水率的变化可以分为3个过程,分别为降雨初期的缓慢增大、降雨中期的急速上升、降雨后期的保持不变。在本文设计的降雨强度下,短时降雨对含水率影响不大,降雨时间达到2 h才会对含水率产生较大影响;对比同在粉质粘土中的A点和C点,在同等降雨条件下,A点更早达到饱和状态,说明相对位置越低,土体含水特征更易受到影响。这一变化规律在特征点B、D、E同样得以体现。

2.2 特征截面含水率变化特征

图5、下页图6~图7为特征截面1-1~3-3含水

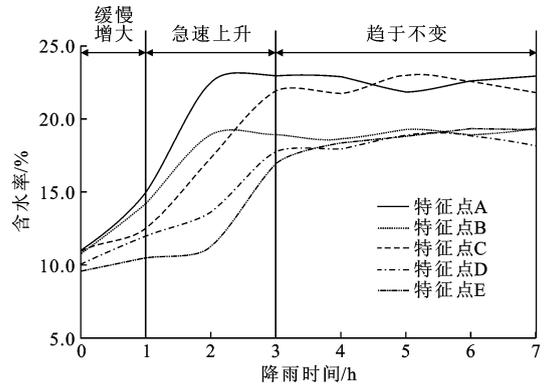


图4 特征点A~E含水率随降雨时间的变化过程

Fig. 4 Changing process of moisture content on the characteristic points A~E during rainfall

率随时间的变化过程曲线。对比图5、图6和图7可知,特征截面1-1含水率相对于截面2-2与3-3受到降雨入渗的影响程度较小,1-1截面在整个试验过程中含水率变化不大,是由于截面1-1位于路面下部,路面在无下渗雨水的情况下很难对其下部土体含水率进行直接影响;而2-2截面含水率在高程0.5 m以上位置受持续降雨5 h后变化明显,整个截面都呈现逐渐增大的特征,由上往下表现为逐渐减小,说明受降雨作用,边坡表层含水率相对于边坡深部含水率增大更为显著;截面3-3在降雨1 h后整个截面含水率都逐渐上升,且较高高程位置上升速率明显大于较低位置的上升速率;3个截面的含水率分布曲线由上往下呈现“S”形或者倒“S”形分布,这是由于路堤采用崩解炭质泥岩与土交错填筑引起的,在该填筑方式下,崩解炭质泥岩与土的含水率具有差异。通过以上对比可以认为:降雨入渗引起边坡沿坡面向下各个位置的含水率都逐渐增大,但增大的幅度和速率与该点所在截面的位置以及该点至坡面的距离有关。一般地,越靠近坡脚的截面各点含水率开始增大的时间较早、幅度较大;反之亦然。

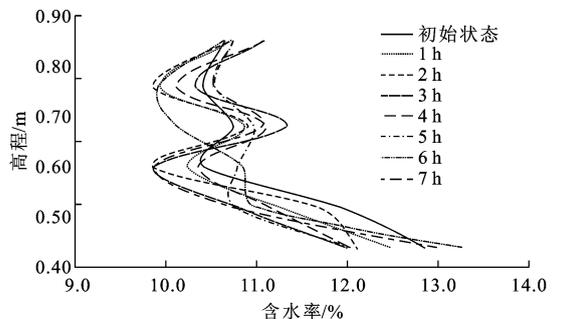


图5 特征截面1-1含水率随降雨时间变化过程

Fig. 5 Changing process of moisture content on the characteristic cross section 1-1 during rainfall

下页图8、图9为特征截面4-4~5-5含水率随

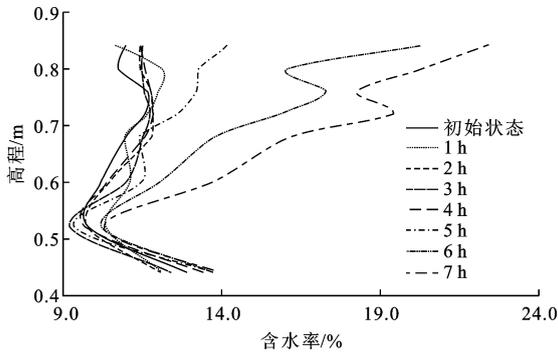


图 6 特征截面 2-2 含水率随降雨时间变化过程
Fig. 6 Changing process of moisture content on the characteristic cross section 2-2 during rainfall

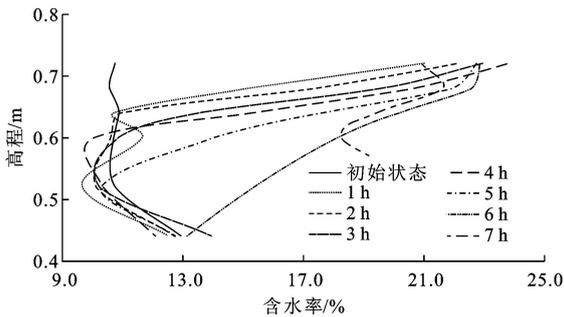


图 7 特征截面 3-3 含水率随降雨时间变化过程
Fig. 7 Changing process of moisture content on the characteristic cross section 3-3 during rainfall

时间的变化过程曲线。截面 4-4 与截面 5-5 为水平截面,其含水率随时间的分布体现了同一水平位置在降雨过程中的含水率变化。由图 8、图 9 可知,随着降雨时间的增长,截面上各点含水率逐渐增大,所在位置距离边坡表面越近,含水率增大的速率与幅度更大,且在降雨影响下,靠近边坡表面的点已经达到饱和状态。总体而言,距离坡面的距离大小与含水率增大的幅度呈反比。截面 4-4 最左端位置含水率在降雨 6 h 后开始增大,而截面 5-5 在距离坡面 0.25 m 位置向路堤内部几乎在整个降雨过程中含水率都无明显变化。由此可以推断:在降雨作用下,沿横向方向往边坡内部,同一时刻含水率受降雨的影响逐渐减小,就整个降雨过程而言,同一位置的含水率受到的影响不断增大直至饱和,且影响深度在沿横向往边坡内部不断发展。

3 路堤边坡暂态饱和区分布规律分析

由于试验设计降雨量较小,试验中路堤坡面无明显坡面径流产生,只在局部小范围内有积水,降雨停止后逐渐渗入路堤边坡内部,限于篇幅,此处不对路堤坡面渗流情况做过多分析。通过对开挖过程中土样的浸润线扩展速度和有机玻璃与土样间隙之间

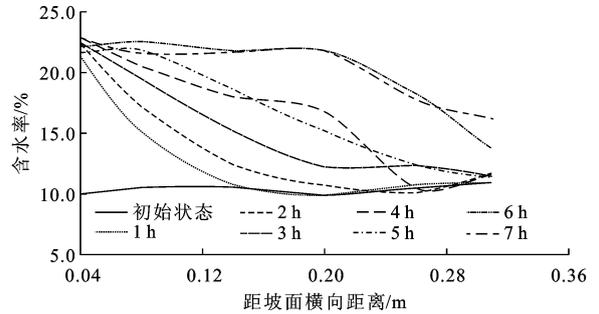


图 8 特征截面 4-4 含水率随降雨时间变化过程
Fig. 8 Changing process of moisture content on the characteristic cross section 4-4 during rainfall

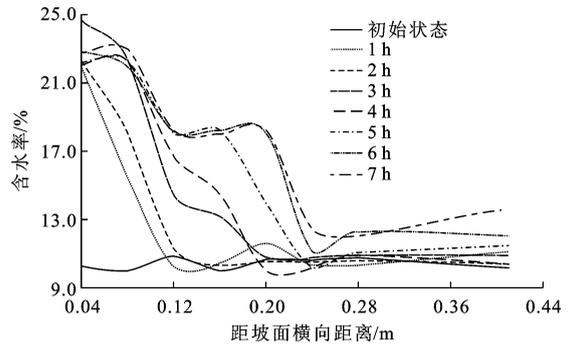


图 9 特征截面 5-5 含水率随降雨时间变化过程
Fig. 9 Changing process of moisture content on the characteristic cross section 5-5 during rainfall

的浸润线扩展速度对比,发现有机玻璃和土样之间的间隙并未形成雨水下渗的优势路径,这表明模型内土样填筑较为均匀,达到了预期压实度。

暂态饱和区的发展变化规律分析是研究路堤含水特征的途径之一,本文通过观察降雨入渗过程中的试验现象,结合数值模拟结果探讨暂态饱和区的发展变化规律^[14-15]。图 10、下页图 11、图 12 分别为降雨 2、4、6 h 后的暂态饱和区分布。

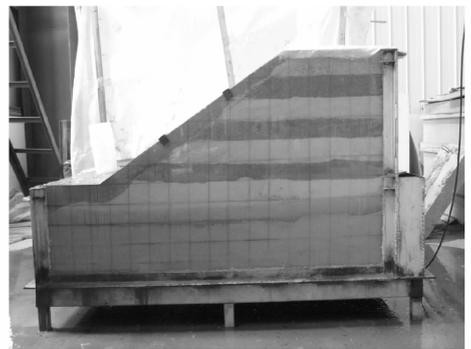


图 10 降雨 2 h 时路堤暂态饱和区分布
Fig. 10 Distribution of transient saturation zone of embankment after 2 hours rainfall

由图 10~图 12 可知,路堤边坡在降雨入渗作用下将形成一定深度的暂态饱和区,其深度随着降

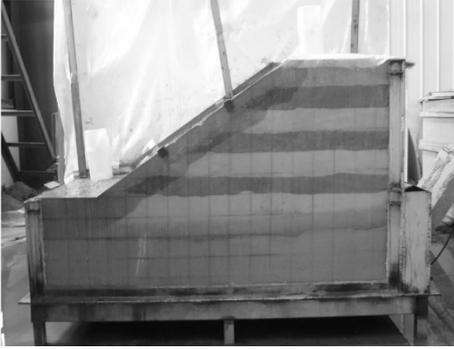


图 11 降雨 4 h 路堤暂态饱和区分布

Fig. 11 Distribution of transient saturation zone of embankment after 4 hours rainfall

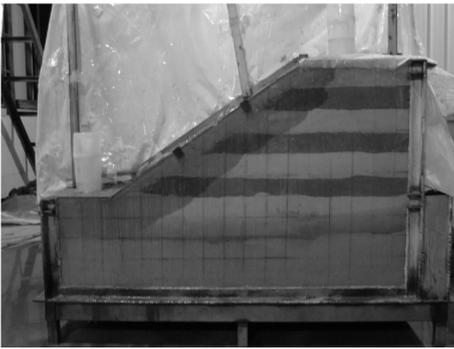


图 12 降雨 6 h 路堤暂态饱和区分布

Fig. 12 Distribution of transient saturation zone of embankment after 6 hours rainfall

雨时间持续增大。当降雨 2 h 后,路堤表面形成了平均深度为 8 cm 左右的饱和区,该饱和区主要分布在包边土范围内,分布深度表现为上浅下深。降雨持续 4 h 后,暂态饱和区的范围继续向边坡内部延伸,入渗的深度达到 16 cm 左右,在坡脚处与地下水位相连通。当降雨持续 6 h 后,雨水入渗深度及范围进一步扩大,在纵向深度上达到 24 cm 左右,坡顶处的横向深度则达到 12 cm,并且通过对比初始水位线的高度,可发现地下水位高度明显上升。

为了对试验得出的人渗现象有更深入认识,本文基于饱和-非饱和渗流理论,采用与试验模型相同的数值模型进行降雨条件下的路堤暂态饱和区分布规律的数值研究^[16-20]。数值计算中采用与室内模型试验相同的降雨强度、降雨时间等参数,数值模型尺寸采用路堤的实际尺寸,预崩解炭质泥岩与粉质粘土的饱和渗透系数分别取 2.0×10^{-7} m/s 与 2.6×10^{-7} m/s(试验中间值),其他试验参数限于篇幅,本文不详细介绍。图 13 为降雨 1、3、5、7 h 后的暂态饱和区分布,其分布变化规律与本文试验所得现象基本一致,仍然为边坡在降雨持续一段时间后,路堤

边坡表面出现一定深度范围的暂态饱和区,暂态饱和区面积随着降雨历时的增长而逐渐扩大。图 13 中暂态饱和区分布范围曲线出现较大折线的原因在于数值模拟中所设置的土体与崩解炭质泥岩饱和和含水率不一致,因此导致雨水在崩解炭质泥岩填筑区域向边坡内部发展更迅速。数值试验结果与室内试验所得规律基本一致,但仍存在一定差异,主要原因有:(1)在非饱和土力学中,一般认为含水率达到 90% 以上则已经饱和,因此模型试验中实际的暂态饱和区面积比试验观察到的浸润线以内的区域要大,则本文模型试验与数值试验结果的差异性是可以接受的;(2)由于在填筑过程中水分的蒸发作用,以及填筑完成后炭质泥岩层与粉质粘土层相互之间的水分迁移,使其初始含水状态的差异性降低(土水特征的差异性降低),因此导致在降雨入渗作用下,模型试验所得暂态饱和区的扩展范围在炭质泥岩与粉质粘土层中并不十分明显;(3)由于室内模型试验尺寸较小,而数值试验采用的路堤尺寸为实际尺寸,因此两者之间存在一定的尺寸效应,如将较小尺寸的模型试验结果予以累计放大,则将在一定程度上降低模型试验与数值试验结果的差异性。

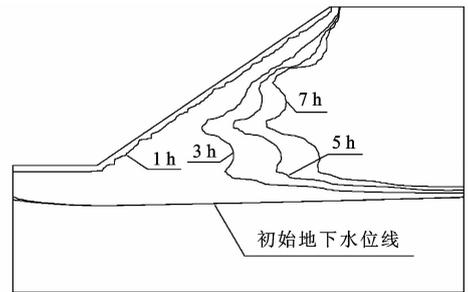


图 13 降雨过程中不同时刻的路堤浸润线分布

Fig. 13 Distribution of saturation line of embankment at the different rainfall times

可以得出:降雨入渗作用下,暂态饱和区是由于雨水的入渗引起路堤内部非饱和区逐渐饱和和形成的,且饱和区域随着降雨的持续,不断向横向、纵向方向延伸,受重力的影响,雨水不断向坡面下部汇集,导致坡面上部延伸的速度与范围小于坡面下部,当暂态饱和区与地下水位相连后,将引起地下水位的升高。通过本文对暂态饱和区发展变化规律的研究,炭质泥岩-土分层填筑路堤排水措施的布置形式值得思考,以往单纯采用明沟、排水沟、截水沟相结合的地面排水措施已经不能满足炭质泥岩-土分层填筑路堤排水要求。因此,在路堤边坡中有针对性地设置长短相间的排水管,能够将炭质泥岩与土中

的深部及浅层水体都及时排出,该设计思路将在后续研究中采用室内试验及数值模拟的方法进行验证。

4 讨 论

雨水入渗在引起土体抗剪强度降低的同时,还将导致其重度的增加、基质吸力的降低,最终造成边坡的失稳,这一过程可概括为:降雨→地表水→水向边坡内部渗流→边坡土体重度增大、强度降低→破坏概率增大→边坡滑动破坏。这一认识对解释普通土质边坡的失稳具有普遍性,但对炭质泥岩-土分层填筑路堤边坡,由于其与普通均质边坡在材料、结构上存在较大差异,因此在关于炭质泥岩-土分层填筑路堤失稳的评价指标上难以利用上述普遍认识进行评判。这是由炭质泥岩所具有的特殊物理力学性质决定的:一是炭质泥岩、土交错填筑方式将引起雨水的入渗路径发生改变,导致其失稳模式发生改变;二是雨水入渗后在一定程度上会引起预崩解炭质泥岩的后续崩解,加速预崩解炭质泥岩强度的进一步降低。本文开展的降雨条件下炭质泥岩-土分层填筑路堤含水特征的研究主要针对雨水在路堤内部渗流过程中含水率的变化、暂态饱和区的发展进行,是研究具有后续崩解特性的炭质泥岩-土分层填筑路堤长期稳定性的必然工作,特别是对炭质泥岩-土分层路堤在降雨条件下的失稳破坏模式、排水和支护措施的布设研究具有参考价值。

5 结 语

(1)在降雨入渗影响下,路堤内部含水率的变化可分为3个过程:降雨初期缓慢增大、降雨中期急速上升、降雨后期保持不变。处于路堤边坡坡面下同一深度处的特征点相对位置越低,土体含水率更易受到影响,相同时间内的含水率上升速率越大。

(2)由坡面垂直向下,各截面的含水率分布曲线呈“S”形或倒“S”形,且截面各点含水率都表现为逐渐增大,但增大的幅度和速率与该点所在截面的位置以及距坡面的距离有关。一般地,越靠近坡脚的截面,其含水率开始增大的时间较早、幅度较大;反之亦然。

(3)通过室内试验与数值模拟研究表明:暂态饱和区的形成是由于入渗雨水引起路堤表面非饱和区逐渐饱和和形成的,持续降雨作用下,暂态饱和区将向路堤内部横向、纵向方向扩展,在暂态饱和区域与初始地下水水位线交汇后,将在一定程度上引起地下水

位的升高。对于炭质泥岩-土分层路堤排水措施的设计,可以考虑根据暂态饱和区的分布形式进行有针对性的设置。

参考文献:

References:

- [1] 罗根传,付宏渊,贺 炜.炭质页岩崩解特性的试验研究[J].中外公路,2012,32(3):309-311.
LUO Gen-chuan, FU Hong-yuan, HE Wei. Experiment on disintegration characteristics of carbonaceous shale[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(3):309-311. (in Chinese)
- [2] 杨天鸿,芮勇勤,朱万成,等.炭质泥岩泥化夹层的流变特性及长期强度[J].实验力学,2008,23(5):396-402.
YANG Tian-hong, RUI Yong-qin, ZHU Wan-cheng, et al. Rheological characteristics and long term strength of siltized intercalation interbedded in peat mudstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(5):396-402. (in Chinese)
- [3] 郑明新,左 威,涂文靖,等.填土控制对施工中软土路基稳定的影响分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2011,26(1):48-51.
ZHENG Ming-xin, ZUO Wei, TU Wen-jing, et al. Influence of filling control to the stability of soft soil embankment[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2011, 26(1):48-51. (in Chinese)
- [4] 曾 铃,付宏渊,贺 炜,等.降雨入渗因素对炭质泥岩路堤边坡稳定性的影响[J].公路交通科技,2013,30(3):39-44,58.
ZENG Ling, FU Hong-yuan, HE Wei, et al. Effects of rainfall infiltration factors on stability of carbonaceous mudstone embankment slope[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(3):39-44,58. (in Chinese)
- [5] 吴 谦,王常明,宋朋燃,等.黄土陡坡降雨冲刷试验及其三维颗粒流-固耦合模拟[J].岩土力学,2014,35(4):977-985.
WU Qian, WANG Chang-ming, SONG Peng-ran, et al. Rainfall erosion experiment for steep loess slope and fluid-soil coupling simulation with PFC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):977-985. (in Chinese)
- [6] 李龙起,罗书学,王运超,等.不同降雨条件下顺层边坡力学响应模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(4):755-762.
LI Long-qi, LUO Shu-xue, WANG Yun-chao, et al.

- Model tests for mechanical response of bedding rock slope under different rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 755-762. (in Chinese)
- [7] 李焕强, 孙红月, 孙新民, 等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 589-594.
LI Huan-qiang, SUN Hong-yue, SUN Xin-min, et al. Influence of rainfall infiltration on slopes by physical model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 589-594. (in Chinese)
- [8] 刘海松, 倪万魁, 杨泓全, 等. 黄土路基降雨入渗现场试验[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 60-63.
LIU Hai-song, NI Wan-kui, YANG Hong-quan, et al. Site test on infiltration of loess subgrade under rainfall circumstance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(1): 60-63. (in Chinese)
- [9] 张常亮, 李萍, 李同录, 等. 黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 728-734.
ZHANG Chang-liang, LI Ping, LI Tong-lu, et al. In-situ observation on rainfall infiltration in loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 728-734. (in Chinese)
- [10] 李萍, 李同录, 付昱凯, 等. 非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(10): 3551-3560.
LI Ping, LI Tong-lu, FU Yu-kai, et al. In-situ observation on regularities of rainfall infiltration in loess[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(10): 3551-3560. (in Chinese)
- [11] 罗根传, 付宏渊, 贺炜. 预崩解处理后炭质页岩路用性能试验研究[J]. 中外公路, 2012, 32(1): 34-37.
LUO Gen-chuan, FU Hong-yuan, HE Wei. Experiment on pavement performance of carbon mudstone after pre-processing disintegration[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(1): 34-37. (in Chinese)
- [12] 江守一郎. 模型试验的理论与应用[M]. 郭廷玮, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
EMORI I. Theories and application of model experiments[M]. Translated by GUO Ting-wei, LI An-ding. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [13] 李龙起, 罗书学, 魏文凯, 等. 降雨入渗对含软弱夹层顺层岩质边坡性状影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1772-1778.
LI Long-qi, LUO Shu-xue, WEI Wen-kai, et al. Model test of rainfall infiltration effect on bedding rock slope with weak interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1772-1778. (in Chinese)
- [14] 曾铃, 付宏渊, 周功科. 降雨入渗参数对粗粒土路堤暂态饱和区影响的数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 250-256.
ZENG Ling, FU Hong-yuan, ZHOU Gong-ke. Numerical simulation of effects of rainfall infiltration parameters on transient saturated areas of coarse-grained soil embankment[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(3): 250-256. (in Chinese)
- [15] 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, 88.
XU Hai-tao, LIANG Chao. Stability analysis of bedded slopes under rainfall conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 73-76, 88. (in Chinese)
- [16] TASI T L, CHEN H F. Effect of saturation on shallow landslides triggered by rainfall[J]. Environment Earth Sciences, 2010, 59(6): 1285-1295.
- [17] OH W T, VANAPALLI S K. Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5): 649-657.
- [18] 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(1/2): 94-103.
- [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, 43.
LIU Jian-hua, ZHA Xu-dong, FU Hong-yuan, et al. Analysis of rock slope stability under rainfall infiltration condition[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 33-37, 43. (in Chinese)
- [20] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于FLAC^{3D}平台的边坡非饱和降雨入渗分析[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)