

重塑非饱和黄土中水-气两相运移规律研究

余娅婷^{1,2}, 王大浩^{1,2}, 董洁³, 王玮^{1,2}

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 干旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 黄土区水分入渗的实质是水、气两相运移共同作用。长时间强降水影响下, 水分入渗更易在远离边坡的土层底部形成封闭条件, 而在靠近边坡区域形成开放条件。为深入剖析黄土中水-气运移规律, 分别在封闭和开放条件下进行了重塑土柱试验, 并统计分析了土柱内实测的含水率和气压数据。结果表明: 在开放和封闭条件下, 湿润锋运移速度初始时最大; 体积含水率均为先增大后减小, 封闭条件下含水率减小后趋于稳定, 而开放条件下含水率仍存在小幅波动; 开放条件下气压差先增大后减小, 最后在 0 附近振荡, 而封闭条件下浅层气压差波动上升, 深层气压差振荡后减小趋于稳定。因此, 在滑坡治理过程中应同时考虑水、气两相共同的影响, 制定更为全面、高效的防治措施。

关键词: 非饱和黄土; 水-气运移; 土柱试验; 湿润锋; 体积含水率; 气压差

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0228-05

Water - air two phase migration law of remolded unsaturated loess

YU Yating^{1,2}, WANG Dahao^{1,2}, DONG Jie³, WANG Wei^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting (SIEP), Xi'an 710068, China)

Abstract: The essence of water infiltration in loess area is the joint action of water and air migration. Under the influence of heavy precipitation of a long period, moisture infiltration is easier to form a closed condition at the bottom of the soil layer away from the slope, and an open condition is formed near the slope area. In order to analyze the water - air migration law in loess, the remolded soil column test was carried out under closed and open conditions, and the measured data of water content and air pressure in soil columns were statistically analyzed. The results showed that under the open and closed conditions, migration velocity of the wetting front was the largest at the beginning, the volume moisture content increased first and then decreased. The moisture content decreased and then tended to stabilize under the closed condition, whereas the moisture content still fluctuated slightly under the open condition. Besides, under the open condition, the air pressure difference increased first and then decreased, and eventually oscillated near 0. While under the closed condition, the air pressure difference of the shallow layer rose with fluctuations, and that of the deep layer oscillated and then decreased to a stable rate. Therefore, in the process of landslide treatment, the influence of water and air should be considered at the same time to formulate more comprehensive and efficient prevention and control measures.

Key words: unsaturated loess; water - air migration; soil column test; wetting front; volume moisture content; air pressure difference

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2020-01-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB744702)

作者简介: 余娅婷(1995-), 女, 陕西商洛人, 硕士研究生, 研究方向为水文地质。

通讯作者: 王玮(1970-), 男, 江西乐平人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为地下水合理开发利用与资源评价。

1 研究背景

通常我国中西部黄土地区滑坡的主要诱因是非饱和土体含水率的变化,即水分入渗所致^[1-2]。而非饱和黄土中的水分下渗与其空隙内气体的运移存在紧密联系^[3]。然而,已有的研究大多仅考虑了非饱和黄土体中的水相流动^[4-8],只有少量研究关注于水-气两相运移。滕继东等^[9]通过数值计算和模型验证,分析了非饱和土中水气迁移过程中伴随的蒸发、冷凝和冻结现象,为极端天气下工程建设提供了参考;魏娟^[10]着眼于非饱和黄土边坡水气交换现象,采用物理力学和室内模型试验,来探究边坡土体的体积含水率与孔隙水压力的关系;王聪^[11]基于非饱和土水-气两相入渗试验装置,经多次试验发现土壤颗粒级配、毛细水上升高度均对水-气两相运移产生显著影响;习念念等^[12]借助有限元法,着重分析了三峡水库大坪滑坡降雨入渗与水气吸入量的关系。

上述研究成果为认识非饱和黄土中水-气两相运移规律奠定了良好基础,但主要集中于非饱和土水-气两相入渗装置的改进、数学方程的推广以及数值模拟的应用^[13-16],缺乏对实际条件下水-气两相运移机理的综合分析。鉴于此,本文针对泾阳南塬离石黄土层,将黄土边坡中水分下渗的实际情况划分为开放和封闭两种条件,对非饱和和重塑土柱试验装置进行改进,并通过试验对不同条件下非饱和黄土中的水气运移规律进行了详细分析,以期对边坡治理和滑坡防治等方面提供借鉴。

2 材料与方法

2.1 试验材料

泾阳南塬地处陕西泾阳县,隶属于渭北黄土台塬,是黄土滑坡的易发区^[17]。截止2018年,共发育黄土滑坡11处,已造成1个村庄被埋,死亡和重伤人数超过40人,并带来巨大的经济损失^[18]。因此,分析研究非饱和黄土中水-气两相运移规律对区内滑坡灾害的预防等具有重要意义。本次试验黄土取样点选择泾阳南塬寨头村东侧黄土台塬区,取自离石黄土层。土样经自然风干,过2 mm细筛后统一放置。

2.2 试验装置

图1为试验装置示意图。试验装置是根据试验需要,在多功能砂柱水气渗流测试仪^[19]的基础上改进而成。供水装置采用马氏瓶和水箱,自动持续补

水使得土柱上端的水位维持于8 cm,通过多次试验,土柱内水位下降1 cm,马氏瓶内水位下降8.8 cm。土柱顶、底部各留有外径1 cm、长2 cm的管嘴分别作为进水与排气口。土柱左侧布置3个气压观测孔,右侧设置6个含水率观测点,分别连接差压计和土壤水分计探头^[20],均与WTHHOT1数据采集器相连。此外,为排除外部大气压及湿度的影响,采用温湿度气压监测记录仪来记录室内各要素。

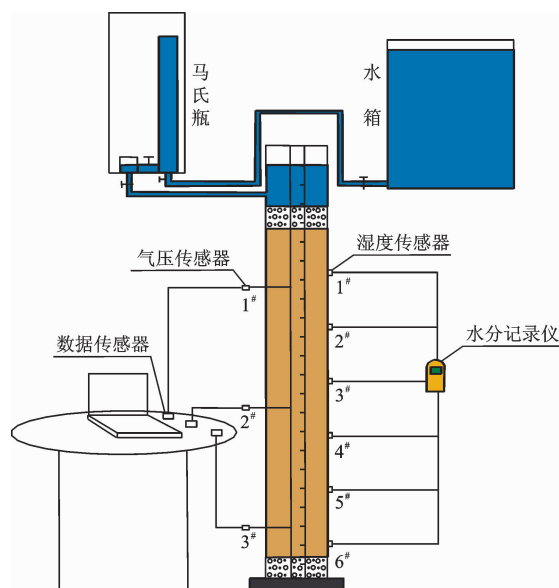


图1 试验装置示意图

2.3 试验步骤

填土过程中,首先在土柱底部铺5 cm厚碎石,其上铺设一层细纱网,以防止土颗粒阻塞碎石间隙影响装置的透气性。其次,进行分次填土,总填土180 cm,每次装填土样厚度控制在10 cm,均匀捣实并将其上表面打毛,以此减少人为误差。最后于土柱上部铺设5 cm厚碎石,避免供水过程中冲刷造成土颗粒的不均匀分布。将填充完成的土柱静置压实,土体的初始体积含水率为2.5%,干密度为1.5 g/cm³,孔隙率约为0.44。试验时,校准好仪器,打开马氏瓶进行供水,定期观测马氏瓶中水位,同时用卷尺量取湿润锋高度,并及时对马氏瓶进行补水,湿润锋运移至土柱底部时则试验结束。

2.4 试验情境

在发生大范围、高强度的降水时,若入渗下界面为不透水层时,远离斜坡的土层接受持续降水入渗,气体将会不断压缩,对潜水面产生压力,使得水头增大,可看作封闭条件。而靠近斜坡的土层由于临空面的存在可看作开放条件。因此,本次试验设置了关闭和打开下端出气口这两种情境分别模拟封闭和

开放条件。

3 结果分析与讨论

3.1 湿润锋运移规律分析

湿润锋位置在时间上的变化可以表征非饱和黄土中水分的人渗速率,图2为开放和封闭条件下湿润锋运移曲线。

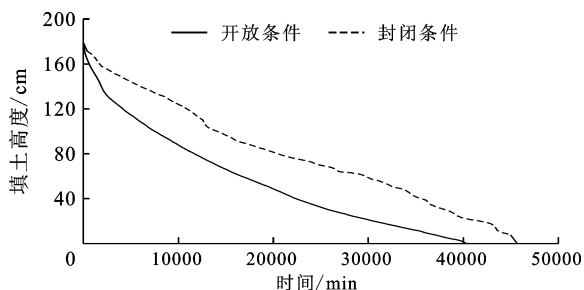


图2 开放和封闭条件下湿润锋运移曲线

由图2可知,封闭条件下湿润锋运移至土柱底部总用时45 660 min,平均运移速度为0.003 9 cm/min,而开放条件下总用时为40 360 min,平均运移速度为0.004 4 cm/min。入渗初期运移速度较快,随后不断减少,其原因为湿润锋位置处体积含水率未饱和,存在一定的基质势,而近水处饱和,基质势为0,形成较大的水力梯度,之后水分持续入渗,湿润锋距近水处越远,水力梯度越小。封闭条件下相同时刻湿润锋的运移深度始终滞后于开放条件,表明空气对水分的阻力作用在封闭条件下更显著。这是因为开放条件下,水分下渗将空隙中的空气挤压至下端排气口排出,水分受到的空气阻力越来越小;而封闭条件下,水分虽会将空气向下压缩,但无法从下端排出,压强持续增大至释压强度后空气向上运移,由上部水面排出土体,但由于土柱上部密封,被排出的气体仍留在土柱内。

3.2 水分运移规律分析

封闭条件下,各观测点的体积含水率变化情况如图3所示。

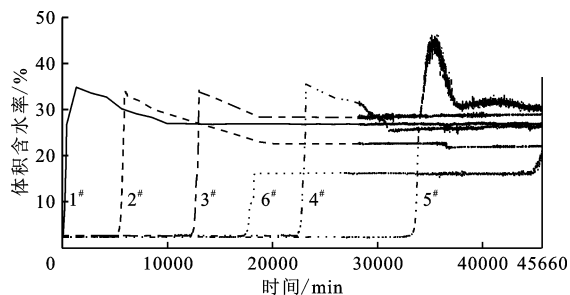


图3 封闭条件下各观测点体积含水率随时间变化曲线

图3表明,在湿润锋未运移到各观测点所处位置时,土体的体积含水率保持不变,维持在初始值2.5%左右。除6#传感器外,土面下10、42、74、106和138 cm处含水率发生变化的时刻分别为第65、5 280、12 305、22 445、35 650 min,依次增大。变化趋势均为先迅速增大至极大值,而后逐渐减小最终趋于稳定。当水分下渗至观测位置时,土体含水率开始突增,当含水率突破极大值,土体的持水能力小于基质吸力时,水分才会运移。当上部水分渗流补给量与向下排泄量平衡时,观测点的含水率将达到稳定。

6#观测点位于土柱底部,为增加气密性,在试验开始前,向底部碎石层中注入了少量水,受毛细力驱动,水分上移,使得6#传感器所测的体积含水率从17 070 min就开始变化并稳定于16.1%,结合湿润锋运移情况,湿润锋在44 185 min才运移到6#传感器位置,含水率也呈现出不断增大的趋势。

开放条件下,各观测点测得的体积含水率变化情况如图4所示。

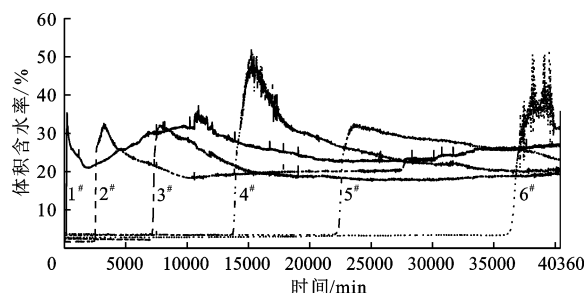


图4 开放条件下各观测点体积含水率随时间变化曲线

图4表明,开放条件下,各观测点所测的土体体积含水率开始变化的时刻分别为第45、2 430、7 055、13 730、22 120和36 220 min,含水率在短时间内减小却未达到稳定。究其原因,开放条件下,气阻作用小,水分在土体中下渗速度较快,水分补给量与排泄量在短时间内还未达到平衡,故含水率在较长时间内仍处于波动状态。

结合图3、4可得,除6#观测点外,封闭条件下各观测位置含水率达最大值的时刻较晚,这是由于封闭条件下,水分入渗驱使气体向下压缩,增大了入渗阻力,从而使入渗速率减小,延长了达到最大含水率的时间。两种条件下,含水率的变化趋势基本相同,即在湿润锋抵达时迅速达到峰值,在湿润锋过境后,又迅速下降至趋于稳定,表明水分在重塑土柱中的入渗为非饱和入渗。

两种条件下观测点处含水率达到最大值的时间间隔见图5。

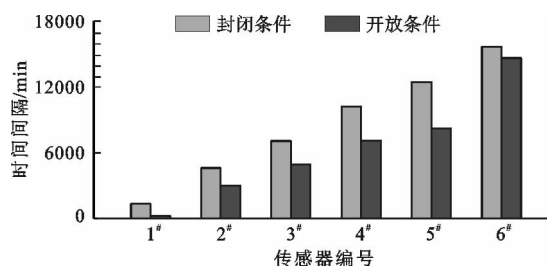


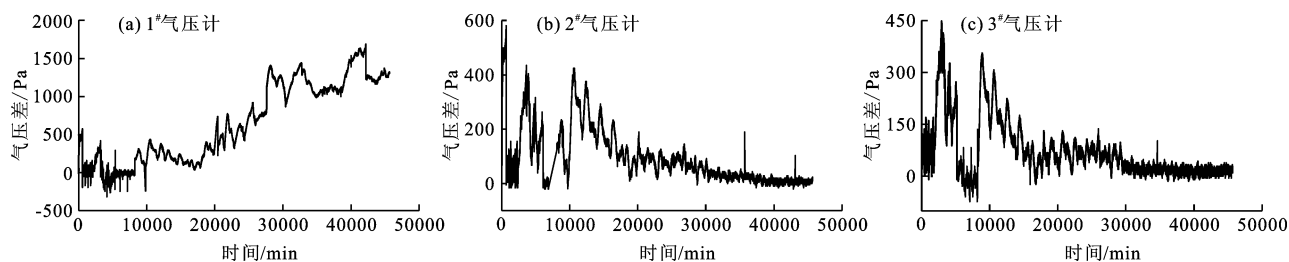
图5 各观测点处含水率达到最大值时间间隔对比图

由图5可看出,相邻两个传感器含水率达到最大值的时间间隔不断增大,这是因为随着观测点埋深的增加,水分下渗补给通道逐渐加长,水头梯度逐

渐减小,使得水分下渗速度减慢,时间间隔不断增加。封闭条件下相邻两个传感器之间的时间间隔为1 315 ~ 15 685 min,而开放条件下的时间间隔较小,为220 ~ 14 650 min,这是因为封闭条件下受到气阻作用较开放条件下大,水分运移速度较慢,达到最大含水率时间间隔始终比开放条件下的长。由此可见,土体中空气在水分运移的过程中极大地限制了水分的运移。

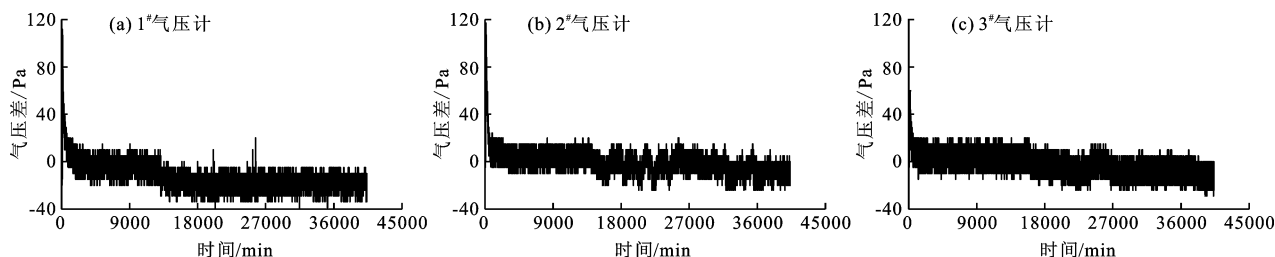
3.3 气压变化规律

封闭和开放条件下各观测孔处气压变化如图6、7所示。



注:图中气压差指试验过程中各点气压差与初始值之差

图6 封闭条件下各观测孔气压随时间变化曲线



注:图中气压差指试验过程中各点气压差与初始值之差

图7 开放条件下各观测孔气压随时间变化曲线

由图6可知,封闭条件下,2#、3#观测孔变化趋势基本相同,0 ~ 17 000 min时,气压差在0 ~ 500 Pa间波动;17 000 ~ 45 660 min时,气压差逐渐减小,最终在0附近振荡。在水分下渗过程中,水分占据了原本气体的空间,在上层形成相对封闭层,使得空气不断向下压缩,气压差不断增大。当空气压缩到一定程度,即气压差达到极值时,空气会在达到释压强度之后从水面逸出,气压差会迅速减小。之后随着水分的继续下渗,空气继续向下压缩到一定程度就会突破上层水柱释压。因此,在整个气体压缩和释压的动态过程中,气压差不断振荡。1#气压差整体呈波动上升态势,其原因为1#观测孔埋深较浅,土柱内所有空气在释放后存留在水面以上不能及时排出,随着向上运移空气的增多,土柱上部受到的压强逐渐增大。

由图7可知,开放条件下,3个观测孔气压的变化规律基本相同,均为迅速减小至0附近波动。当空气被挤压至土柱底部还未排出时,气体压缩程度最大,气压差达到最大;当空气开始从下端排气口不断排出时,气体压缩程度随之减少,相应的气压差也在不断减小。

当湿润锋抵达土柱底部时,水分已将土柱中的大部分空气排出,随后残留在土体空隙中的空气也将陆续被排出。

对比图6、7可知,封闭条件下的整体气压差值比开放条件下大3 ~ 10倍,但气压变化呈现的规律大致相同。由此可见,两种条件下土柱中空气的运移均是在水分下渗的驱动作用下完成的,只是由于空气排出方式不同而造成土柱内各点气压变化规律的不同。

4 结 论

(1) 在开放与封闭条件下,水分初始运移时,湿润锋位置距近水处的距离最近,渗透速率最大。在相同时刻,封闭条件的湿润锋位置总是高于开放条件,湿润峰抵达底部总用时比开放条件久,气阻作用也明显大于开放条件。

(2) 开放与封闭条件下体积含水率均是先增大后减小,但封闭条件下含水率会减小到一个稳定值,而开放条件下含水率在短时间内并未达到稳定。

(3) 开放条件下,气压差均先增大后逐渐减小,最后在 0 附近振荡。封闭条件下,深层气压差先振荡后不断减小,最后在 0 附近上下波动;而浅层气压差先振荡后波动上升。

(4) 非饱和黄土中的水分运移是一个水驱气、气阻水相互影响的复杂物理过程。结合实际可知,大面积强降水情况下,远离斜坡的黄土区会形成底部边界封闭的区域,随着降雨入渗,地层中空气不断压缩,气阻作用增强,使得局部地下水水头增加,地下水会向水头低的边坡流动,从而抬升边坡水位;靠近边坡的黄土区在水分入渗时,空隙中的气体会向临空面释放,加快了水分入渗。上述因素均潜在地加速了滑坡的发生。

参考文献:

- [1] 刘青泉. 水体渗流对滑坡体稳定性的影响研究[C]//中国力学大会-暨钱学森诞辰 100 周年纪念大会:环境力学分会场邀请报告,哈尔滨,2011.
- [2] 李宏伟. 降雨入渗条件下土质边坡非饱和渗流二维数值分析[J]. 水资源与水工程学报 2010,21(6):133-136.
- [3] 李承成. 土中的气对非饱和黄土渗流特性影响的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- [4] 梁冰,姜利国. 非饱和带水分运动模型的 Picard 解法及参数灵敏度分析[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(5):23-27.
- [5] ZHANG Changliang, ZHANG Yaguo, LI Tonglu, et al. In-

situ observation research on the regularities of water migration in loess [C]//International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. IEEE, 2011.

- [6] 林高潮. 黄土非饱和渗流中水盐运移规律研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.
- [7] 石兰君,乔晓英,曾磊,等. 甘肃黑方台黄土水分运移规律模拟[J]. 干旱区研究,2018,35(4):813-820.
- [8] 胡海军,李博鹏,田堪良,等. 积水和降雨下非饱和重塑黄土水分入渗模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(11):1565-1573.
- [9] 滕继东,贺佐跃,张升,等. 非饱和土水气迁移与相变:两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1813-1821.
- [10] 魏娟. 非饱和黄土边坡水气交换及其稳定性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
- [11] 王聪. 非饱和土水气两相入渗研究[D]. 沈阳:沈阳大学,2016.
- [12] 习念念,童富果,刘刚,等. 基于水气二相流的边坡降雨入渗有限元分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(1):120-123+141.
- [13] 彭胜,陈家军,王金生,等. 包气带水气二相流国外研究综述[J]. 水科学进展,2000,11(3):333-338.
- [14] 詹良通,邱清文,杨益彪,等. 黄土覆盖层水-气耦合运移土柱试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报,2017,39(6):969-977.
- [15] 胡耀谱. 基于水气二相流的降雨入渗实验研究[D]. 宜昌:三峡大学,2014.
- [16] 张如如,赵云,徐文杰,等. 温度作用下机场跑道土基中水气运移规律分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(5):822-830.
- [17] 王钰. 泾阳南塬黄土边坡水文地质结构演化及其控灾机理[D]. 西安:长安大学,2017.
- [18] 张秦华,张华勋,张志沛. 泾阳县泾河南塬黄土滑坡形成机理分析[J]. 地质灾害与环境保护,2018,29(1):3-8.
- [19] 陈添斐,王旭升,钱静,等. 多功能砂柱水气渗流试验仪,中国:201120486282.2[P]. 2012-10-03.
- [20] 钱伟. 黄土中水-气运移规律试验研究[D]. 西安:长安大学,2016.