

DOI:10.11784/tdxbz202412027

AH-FBG 法用于毛细水运移规律的温度效应研究

辛雨凌¹, 徐成华², 孙梦雅¹, 刘 瑾¹, 戴正彬³, 井 淼¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省地质局第一地质大队, 南京 210041;

3. 江苏南京地质工程勘察院, 南京 210041)

摘要: 毛细水运移作为非饱和土体水分运移的重要形式, 其动态特征直接影响土体的力学性质, 并与多种地质灾害、环境岩土问题密切相关。地下水位以上的土体温度分布往往存在差异, 进而对毛细水运移速率产生影响。为了探究毛细水运移规律的温度效应, 本研究利用主动加热光纤布拉格光栅(AH-FBG)法开展室内模型试验, 在定水头条件下, 通过控制加热桶与常温桶的温度变量监测土体中毛细水运移过程, 并对不同温度条件下土体的体积含水率分布变化进行对比, 分析温度效应对毛细水运移的影响。研究表明: 在一定时间内, 毛细水上升高度随时间增加而升高, 湿润峰出现的位置标志着该时刻水分运移的最远位置; 土体温度升高对毛细水运移具有促进影响, 土体温度越高, 毛细水上升同一高度所需的时间越短, 毛细水上升速率越高; 湿润锋界面作为状态界面, 在运移过程中具有动态变化特性, 温度升高会显著促进湿润锋界面的运移速率; 毛细水湿润锋界面变化及其温度效应与外界环境条件紧密相关, 是工程建设中不可忽视的运动与状态界面。

关键词: 毛细水运移; 主动加热光纤布拉格光栅法; 体积含水率; 湿润锋; 温度效应; 状态界面

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)01-0031-10

Effect of Temperature on Capillary Water Migration Using the Actively Heated Fiber Bragg Grating Method

Xin Yuling¹, Xu Chenghua², Sun Mengya¹, Liu Jin¹, Dai Zhengbin³, Jing Miao¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The First Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau, Nanjing 210041, China;

3. Nanjing Geological Engineering Survey Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210041, China)

Abstract: Capillary water migration is one of the key mechanisms of moisture migration in unsaturated soils. Its dynamic characteristics directly influence the mechanical properties of soils and are closely linked to various geological hazards and environmental geotechnical issues. The temperature distribution in soils above the groundwater table is often heterogeneous, which influences the rate of capillary water migration. To investigate the effect of temperature on capillary water migration, indoor model experiments were conducted under constant head conditions using the actively heated fiber Bragg grating(AH-FBG)method. By controlling the temperature difference between a heated water reservoir and a reservoir maintained at an ambient temperature, the capillary water migration process in the soil was studied. The volumetric water content distributions of soil at different temperatures were compared to analyze the influence of temperature on capillary water migration. Results showed that over a given period, the rise height of capillary water gradually increased with time and the location where the wetting front appeared marked the furthest

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-03-24.

作者简介: 辛雨凌(2001—), 女, 硕士研究生, xinyuling@hhu.edu.cn.

通信作者: 孙梦雅, smy@hhu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(42307189); 中国博士后科学基金资助项目(2024T170215, 2023M740974); 江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金资助项目(2023-ZNJKJJ-11).

Supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(No. 42307189), the China Postdoctoral Science Foundation(No. 2024T170215, No. 2023M740974), the Open Foundation of Intelligent Monitoring Research Center of Geological Environment Engineering in Jiangsu Province, China(No. 2023-ZNJKJJ-11).

extent of water migration at that moment. High soil temperatures promoted capillary water transport. In particular, high temperatures led to less time being required for capillary water to reach the same height, resulting in a high rate of ascent. Moreover, the wetting front was a state interface that changed continuously with water migration over time. An increase in the temperature notably increased the migration rate of the wetting front. The wetting front interface, along with its temperature effect, was highly influenced by external environmental conditions and played a critical role in engineering construction as both a motion and state interface that could not be ignored.

Keywords: capillary water migration; actively heated fiber Bragg grating (AH-FBG) method; volumetric water content; wetting front; temperature effect; state interface

非饱和土体中水分运移是土体水分场研究的重要课题。在非饱和土中,土体中水分可以分为毛细水和吸附水,其中,毛细作用是在水分运移中普遍存在的现象,因此,毛细水运移是非饱和土体水分运移的一个重要组成部分,毛细水运移引起土体吸力变化,进而与地质灾害、环境岩土、生态问题密切相关^[1]。

当毛细水运移的强度和速率增大时,可能会对土体稳定性产生影响,甚至在极端情况下引发地基沉降、浸水渗漏等问题(图 1)。在土木建设施工中,地基中的毛细通道可能会引起深部土中水分运移上升,增加土的含水率,从而在外荷载或自重作用下引发破

坏;当地下水位下降时,毛细水也会随之下降,导致土体有效重度降低,从而引起地基下沉^[2]。在干旱或半干旱地区,毛细水可以将地下盐分带到地表,导致土壤盐渍化^[3]。在寒区工程建设中,毛细水沿毛细通道到达未冻地基发生冻结,可能会发生较大的冻胀变形,破坏土体结构的稳定^[4-5]。在河道岸坡地区,毛细水的运移会增加坡体含水率,削弱土体抗剪强度,导致滑坡、坍塌或沉降等稳定性问题,并可能引发土壤盐渍化或冻胀破坏。尤其在水位波动和寒区条件下,毛细水作用更加显著,对工程安全和生态环境构成威胁^[6]。

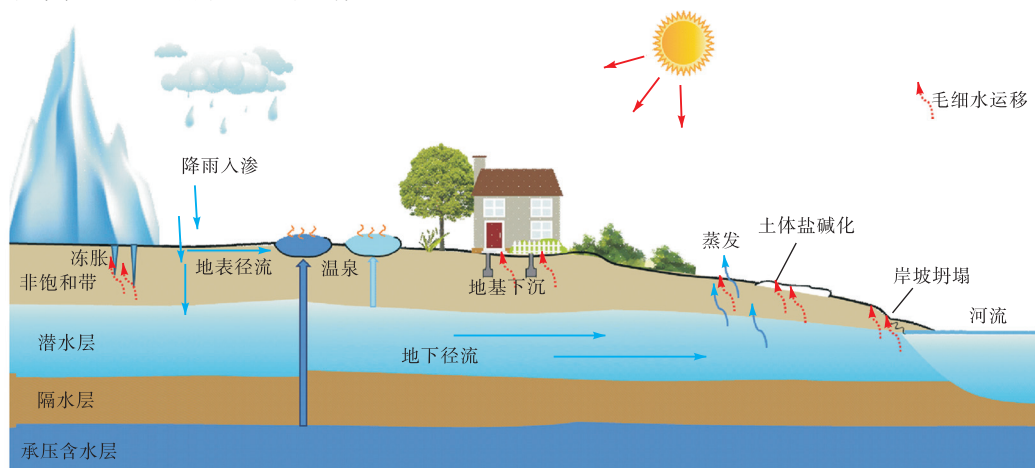


图 1 毛细水运移对土体稳定性影响示意

Fig.1 Schematic of influence of capillary water migration on soil stability

毛细水上升高度是影响工程地质条件的重要因素。在非饱和土体中,毛细水上升高度会受到土体压实程度、土体粒径、水分分布、温度、植被等多种因素的影响。董斌等^[7]对土中毛细水上升的高度做了一系列综合研究,发现细粒砂土的毛细水上升高度随土体压实程度的增加而增加,即孔隙结构更为细密,更有利于毛细水上升,上升高度越高。邓改革等^[8]研究发现,毛细水上升高度与砂土粒径呈负相关,粒径越小,毛细水上升高度越高。栗现文等^[9]开展了砂性土条件下不同粒径及潜水矿化度的毛细水上升试验研究,发现高矿化度和粒径是影响毛细水上升的重要因

素。章求才等^[10]通过试验模拟尾矿坝中毛细水上升过程,发现温度、气压对尾矿砂中的毛细水上升规律均有一定影响^[10]。综上,学者们对非饱和土中毛细水运移的研究大多是探讨土体的颗粒大小、粒径级配、含水率、压实度等因素对毛细水上升高度的影响,而关于温度对其上升高度影响的研究比较少。在原位非饱和土体中,地下水位以上的土体大都是位于地温变化带中,故毛细水运移过程中常常会涉及到温度的变化。

测量毛细水上升的方法通常有直接观测法、电阻率法、示踪剂法、地质雷达法等,但这些方法测量误

差较大,不够精准^[11-12]。近些年来,主动加热光纤(actively heated fiber optic, AHFO)法由于具有高精度、长距离、抗干扰、分布式等优点而迅速发展,已被成功应用于地质与岩土工程监测领域。主动加热光纤布拉格光栅(actively heated fiber Bragg grating, AH-FBG)法是将测温 FBG 和加热材料封装在一起,形成一种既是热源又是温度传感器的技术。AH-FBG 传感器可以实现准分布式、大面积、高精度的土体水分场自动监测^[13]。2018 年,郝瑞等^[14]基于 AHFO 法对描述毛细水运移的 Lucas-Washburn 模型进行了修正,并对修正后 Lucas-Washburn 模型进行了试验验证,进一步开展了毛细水运移模型验证试验^[15];2021 年,王家琛等^[16]采用 AHFO 法对多层土的水分迁移进行试验,为毛细阻滞现象研究提供一种新的监测方法;2022 年,刘喜凤等^[17]通过室内土柱试验,基于 AH-FBG 法对非饱和土毛细水上升和蒸发过程进行了连续监测,探究了 AH-FBG 法在非饱和土水分迁移监测中的适用性。

因此,本文基于 AH-FBG 法开展室内试验,探究不同温度条件下毛细水运移的规律,获取不同时刻毛细水上升的高度,对比加热条件和常温条件下毛细水上升高度和湿润峰位置,分析温度对毛细水上升高度和运移速率的影响,为毛细水的温度效应研究提供理论依据。

1 基本原理

1.1 AH-FBG 含水率测量原理

AH-FBG 含水率测量技术是通过具有内加热功能的 AH-FBG 传感器进行通电加热,根据加热过程中的温度变化值来测定土体含水率。AH-FBG 含水率测量技术的基本原理见图 2。

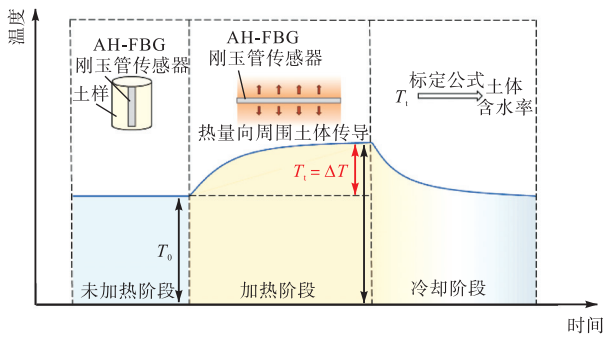


图 2 AH-FBG 法测量原理

Fig.2 Measurement principle of AH-FBG method

埋入土体的 AH-FBG 刚玉管传感器可视为无限长柱形热源,对其通电加热后,将测得的加热过程中

的温度升高值定义为温度特征值 T_t 。

$$T_t = T(t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln t + 4\pi R\lambda + \ln \left(\frac{4K}{a^2 c} \right) \right] \quad (1)$$

$$t \gg a^2 / K$$

式中: $T(t)$ 为加热时间 t 时刻对应的传感器温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为初始环境温度, $^{\circ}\text{C}$; Q 为单位长度的加热功率, W/m ; λ 为土体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; R 为单位长度上 AH-FBG 传感器与土壁的热阻, $(\text{m} \cdot \text{K})/\text{W}$; K 为土体的热扩散系数, m^2/s ; a 为传感器的外径, m ; $c = 1.7811 = \exp \gamma$, γ 为欧拉常数, $\gamma = 0.5772$ 。

由式(1)可知,当加热时间相同时, T_t 仅受土体热参数的影响。可将式(1)整理为

$$T_t = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{Q \ln(4Kt/a^2 c)}{4\pi} \right) + QR \quad (2)$$

相关研究^[18]表明,导热系数是引起温度变化的主要因素,热扩散系数对温度变化的影响较小,故可以将式(2)简化为

$$T_t = \frac{m}{\lambda} + p \quad (3)$$

式中: $m = \frac{Q \ln(4Kt/a^2 c)}{4\pi}$; $p = QR$ 。

在绝大多数情况下,原位土体的矿物成分和干密度不随时间发生变化,可视为恒定值,故原位土体导热系数 λ 可视为仅与体积含水率 θ (%) 有关。土体导热系数 λ 与体积含水率 θ 之间存在唯一确定的单调函数关系,即

$$\lambda = f(\theta) \quad (4)$$

故式(3)可表示为

$$T_t = \frac{m}{f(\theta)} + p \quad (5)$$

由此可知,只要建立温度特征值 T_t 和体积含水率 θ 的标定公式,即可通过测量温度特征值 T_t 来算出体积含水率 θ 。基于 Côté 和 Konrad 导热系数计算模型, Sun 等^[19]推导建立了 T_t - θ 数学模型,其表达式为

$$T_t = \frac{1}{A\theta/(1+B\theta)+C} \quad (6)$$

式中 A 、 B 、 C 均为拟合常数。

1.2 毛细水上升原理

土体中毛细水运移是土体水分场中重要的物理过程之一,而毛细水现象是水分运移的重要机制之一。毛细水上升是指在细小的孔隙或毛细管中,由于表面张力的作用,水分子能够克服重力作用自发上升的现象。19 世纪初,英国科学家 Thomas Young 首次描述了这一现象,随后 Laplace 在其基础上提出了毛

细作用理论和 Young-Laplace 方程. 表面张力是毛细上升的关键原因, 水接触固体表面时, 因表面张力形成弯曲水面, 产生负压, 使水在沿着孔隙或毛细管向上运移, 直至自由水面以上的最大上升高度 $h_{\max}$ 处, 其计算式为

$$h_{\max} = \frac{2\sigma \cos \beta}{\rho g r} \quad (7)$$

式中: σ 为液体表面张力, N/m, 与温度有关; g 为重力加速度, m/s^2 ; r 为毛细管内半径, m; ρ 为水的密度, g/m^3 ; β 为液体表面张力与毛细管的夹角, ($^\circ$), 其大小与土颗粒和水的性质有关.

1856 年, Darcy 提出了适用于饱和土体渗流的达西定律, 并为非饱和土体中的水分迁移研究奠定了基础.

$$v = ki \quad (8)$$

式中: v 为渗流速度, m/s ; k 为渗透系数, m/s ; i 为水力梯度.

在 1943 年, Terzaghi 在假定土体渗透系数和孔隙率恒定不变的基础上, 将毛细水上升的水力梯度近似为毛细水上升最大高度和湿润锋所在高度的差值与湿润锋所在高度的比值^[15], 即

$$i = (h_{\max} - h) / h \quad (9)$$

式中 h 为毛细水实际上升高度, m.

当毛细水上升高度为 h 时, 通过土壤孔隙渗入的总水量近似为

$$V = nSh \quad (10)$$

则

$$v = k \frac{h_{\max} - h}{h} = \frac{dV}{S dt} = n \frac{dh}{dt} \quad (11)$$

式中: V 为渗入土体孔隙的总水量, m^3 ; S 为横断面面积, m^2 ; n 为孔隙率.

根据文献[20], 将初始时刻毛细水的上升高度视作零, 通过积分可以得到毛细水上升高度与时间的关系^[15], 即

$$t = \frac{nh_{\max}}{k_s} \left(\ln \frac{h}{h_{\max} - h} - \frac{h}{h_{\max}} \right) \quad (12)$$

式中 k_s 为饱和渗透系数, m/s .

2 室内试验

2.1 试验材料与设备

本次试验土样为砂土和高岭土质量比为 9 : 1 的混合物, 土样的粒径分布曲线见图 3, 砂土有效粒径 $D_{10} = 0.085 \text{ mm}$, 连续粒径 $D_{30} = 0.2 \text{ mm}$, 限定粒径 $D_{60} = 0.4 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u = 4.706$, 曲率系数 $C_c =$

1.176, 该土样土粒分布均匀, 属于级配不良土.

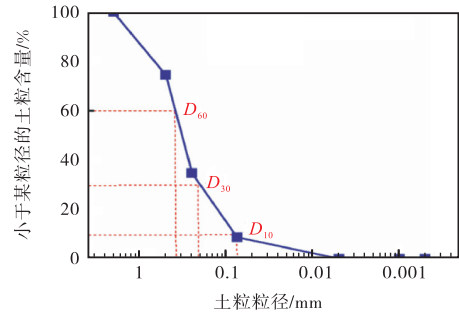


图 3 土样的粒径分布曲线

Fig.3 Particle size distribution curves of soil samples

本次试验采用 AH-FBG 刚玉管传感器进行含水率监测. AH-FBG 刚玉管传感器由 4 孔刚玉管、FBG 光纤、电阻丝、不锈钢尖端以及不锈钢帽组成, 其基本结构见图 4. 刚玉管具有较大的刚度和强度, 能有效保护 FBG 光纤不受损坏, 将 FBG 光纤放置在刚玉管内, 一端保持应力松弛以消除应变对测量结果的影响. 同时, 电阻丝呈 U 形穿过刚玉管的两孔, 接入电源即可对电阻丝加热, 从而实现刚玉管传感器的内加热功能.

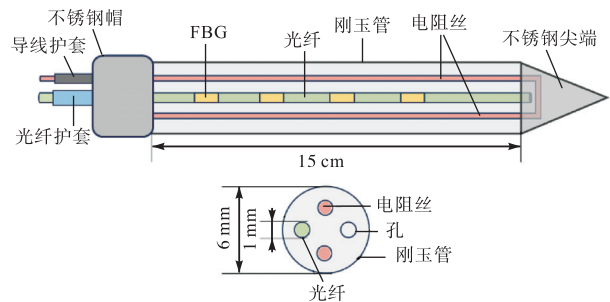


图 4 AH-FBG 刚玉管传感器示意

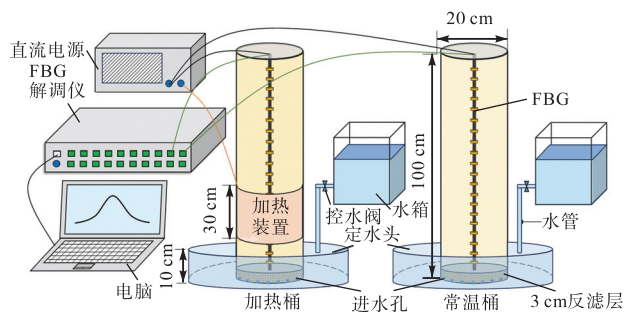
Fig.4 Schematic of AH-FBG alundum tube sensor

AH-FBG 传感器的标定试验是通过将传感器置入不同含水率的土体样本中, 获取其温度特征值 T_t , 同时采用烘干法测定各土样的真实体积含水率 θ . 将温度特征值 T_t 和测得的体积含水率 θ 代入式(5)进行标定拟合, 得到 T_t - θ 标定公式. 利用该公式计算的结果与实际测量值相比, 误差仅为 0.02, 表明该传感器测定体积含水率的效果良好, 具有较高的精度和可靠性.

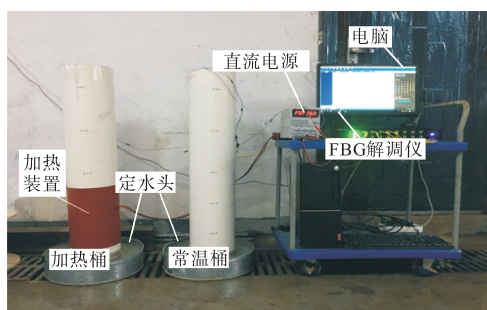
2.2 试验方案

试验装置主要由两个圆柱桶(加热桶和常温桶)、电脑、直流电源、FBG 解调仪、FBG 传感器、水箱等部分组成(图 5). FBG 光纤解调仪(型号 NZS-FBG-A01)来自苏州南智传感科技有限公司, 直流电源(型号 MCH-305A)来自深圳市型美创仪器仪表有限公

司. 通过调节输入电压和电流来实现调控, 并能够保持稳定. 加热桶的外壁上包裹着 30 cm 长的加热装置, 其位于距圆柱筒底部 10~40 cm 范围内, 加热装置的温度设置为 50 ℃.



(a) 示意图

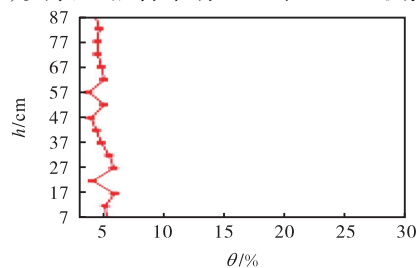


(b) 实物图

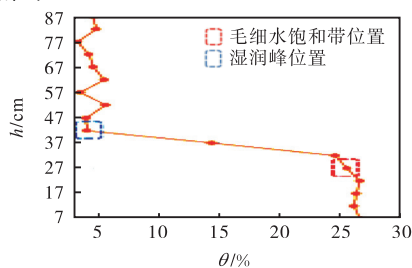
图 5 试验装置

Fig.5 Experimental setup

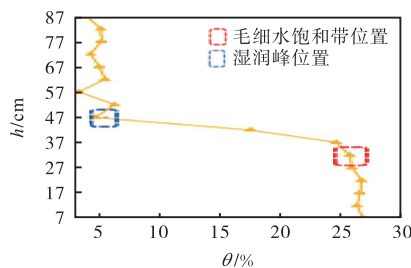
首先, 在每个直径为 20 cm、高为 100 cm 的圆柱桶中, 安装两根各带有 18 个 FBG 测点的 AH-FBG



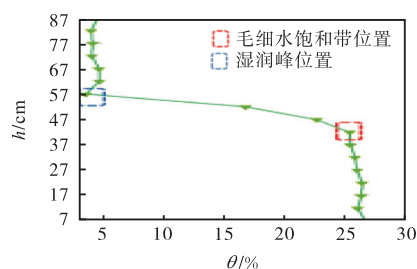
(a) 0 h



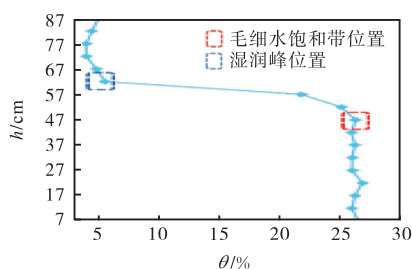
(b) 70 h



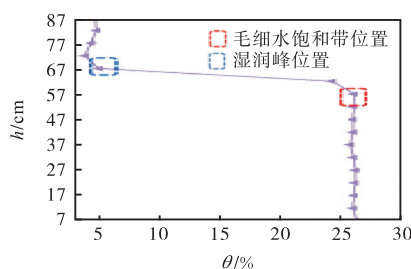
(c) 99 h



(d) 146 h



(e) 211 h



(f) 305 h

图 6 不同时刻下体积含水率分布曲线

Fig.6 Curves of volumetric water content over time

传感器, 将其根据指定的高程精确安置在桶的中心位置. 每个圆柱桶的 AH-FBG 传感器测点分别位于距桶顶 13~98 cm 处, 每隔 5 cm 设置一个测点. 随后, 开始分层填土, 每次装填 10 cm 土样后进行击实, 并进行刨毛处理, 确保土体与 AH-FBG 传感器良好接触. 同时, 将圆柱桶分别放置在高度为 10 cm、直径为 60 cm 的圆柱形水槽内. 为了保持水头恒定, 使用装有水阀的水箱持续缓慢向水槽注水. 为了确保水能够均匀渗入土样柱中, 在每个桶底部开设均匀的进水孔, 与水箱相连. 此外, 桶底铺设了 3 cm 厚的反滤层, 以降低水对土样的侵蚀作用. 此外, 两个圆柱筒顶部均用保鲜膜进行密封, 以防止水分蒸发.

在试验过程中, 室内温度基本保持恒定. 前 24 h 每隔 1 h 测量 1 次体积含水率, 接着在 24~48 h 内每隔 2 h 测量 1 次, 而 48 h 后调整为每隔 12 h 测量 1 次体积含水率. 圆柱桶的试验最终持续 305 h, 加热桶最终持续 795 h.

3 试验结果与分析

3.1 毛细水上升中体积含水率分布

通过 AHFO 法测得毛细水上升后土体的体积含水率运移分布, 并绘制不同时刻下土体的体积含水率分布曲线(图 6). 通过试验测定的结果可知, 在 0 h 时对应的体积含水率即土的初始体积含水率, 约为 4%~6%. 随着时间的推移, 毛细水不断上升. 蓝色框中的拐点通常表示湿润锋的位置, 即干土中刚开始

有水分上升的位置,也就是干土中体积含水率增大的拐点. 可以看到湿润锋随着时间的推移逐渐向上移动,这表明毛细水正在不断上升. 红色框中的拐点是在体积含水率分布曲线中的一个显著变化点,表示毛细饱和带的顶部位置,即在该高度以下的土颗粒中孔隙被水充满,也就是土体体积含水率达到稳定状态. 可以看到,当本试验土体达到饱和时,其体积含水率约为 26%.

3.2 毛细水上升高度与时间关系

图 7 展示了常温桶毛细水上升高度与时间关系,从图 7 中可以看出,在一定的时间内,毛细水上升高度与时间成正比,即时间越长,毛细水上升高度越高. 湿润峰出现的位置标志着水分沿着毛细管道的最远扩展位置,毛细饱和带位置始终位于湿润峰的下方,并且随着时间推移,两者均逐渐向上移动.

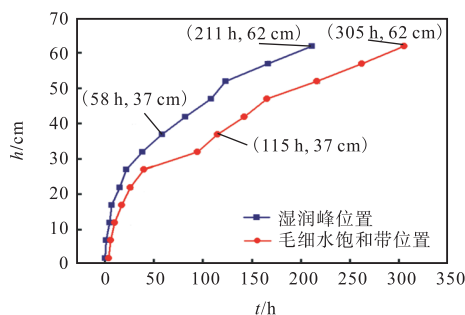


图 7 毛细水上升高度与时间关系

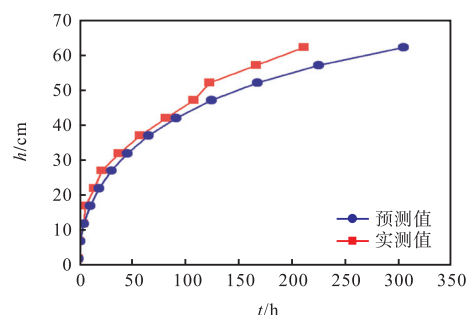
Fig.7 Relationship between rising height of capillary water and time

图 8 展示了毛细水湿润峰上升高度的实测值与理论模型预测值的对比结果. 根据理论模型,结合式 (12),可以预测毛细水湿润峰所处位置的高度与时间的关系,并绘制出模型预测曲线与湿润峰高度的实测值曲线. 总体上,前期的实测值与模型预测值较为一致,表明理论模型能够准确描述初期毛细水的上升过程. 然而,随着时间的推移,特别是后期,实测值与模型预测值之间出现了明显的偏差. 这种偏差可能是由于理论模型假设了湿润锋在运移过程中水分均匀扩散,而在实际试验中,随着时间的延长,后期试验中水分扩散不均匀,导致实际毛细水上升的高度比模型预测值更快. 基于理论模型进行线性拟合,其相关系数 R^2 值约为 0.987,说明拟合度较高,这表明该理论公式在一定程度上能够准确预测湿润峰的运移过程,尤其是在试验的初期阶段,但后期偏差的出现表明模型在长时间预测中存在一定局限性.

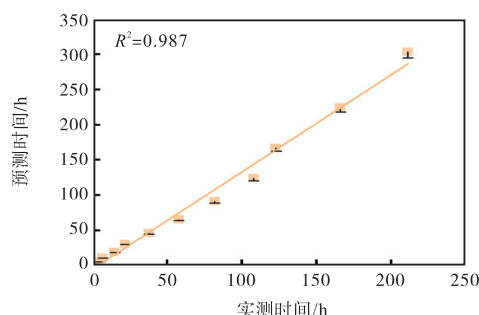
3.3 土体温度对体积含水率分布的影响

图 9 展现了在不同温度条件下土体的体积含水

率分布情况. 由图可知,随着时间变化,不同深度处土体的体积含水率均是先恒定,再不断增加,最终趋于饱和. 随着毛细水不断地向上运移,距离水面越近



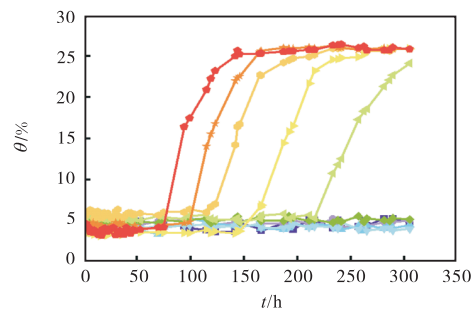
(a) 实测值和预测值对比



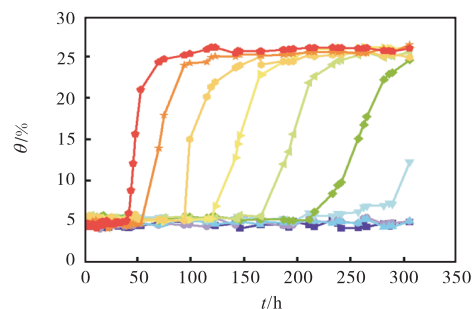
(b) 拟合线

图 8 毛细水湿润峰上升高度实测值与理论模型预测值的对比

Fig.8 Comparison between the measured and predicted rising heights of capillary wetting front



(a) 常温



(b) 加热

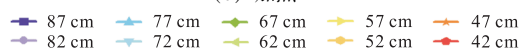


图 9 温度对体积含水率分布的影响

Fig.9 Influence of temperature on volumetric water content distribution

的土体越早出现体积含水率上升现象。通过对比常温桶中不同深度土体的体积含水率变化曲线可以看到,随着土体距离水面高度的增加,毛细水上升 5 cm 所需的时间越来越长,这是因为毛细水上升高度越大,其水力梯度越小,毛细水运移的速度越慢。通过对比常温桶和加热桶的体积含水率时程曲线可知,由于加热桶 40 cm 以下存在一个高温区域,故加热装置以上各深度土体的体积含水率上升的时刻均早于常温桶中同深度处的土体。具体而言,当毛细水升高到同一高度时,土体温度越高,所需的时间越短。在常温条件下,毛细水上升到达 47 cm 高度处需要 100 h,而在加热条件下大约仅需 50 h;在同一时间点,加热条件下的毛细水上升高度高于常温条件下的毛细水上升高度。因此,土体温度升高对毛细水运移具有显著的促进影响。

3.4 土体温度对毛细水上升高度的影响

图 10 是不同温度条件下毛细水上升高度和上升速率的变化。可以看到,随着时间推移,毛细水上升高度也逐渐升高,在毛细水上升的初期,两个桶中的毛细水上升速率均较高,但随毛细水上升高度的增加而逐渐衰减,当毛细水达到 30 cm 高度时,上升速率变慢。加热条件下的毛细水上升高度始终高于常温条件下的毛细水上升高度,同时毛细水上升速率也始终高于常温条件下的上升速率。这是因为水的黏度会

影响流动的速率^[21],而温度升高通常会降低水的黏度,使得水在土壤中的流动更为顺畅,导致上升速率更高;温度变化对毛细水产生向含水率低或者温度低的区域运移的驱动力,导致在室内试验中表现出毛细水上升高度增加。因此,土体温度升高会显著促进毛细水运移速度。

3.5 毛细水运移界面及温度效应讨论与分析

根据前人的研究^[21-22]可知,工程地质界面大致可分为物质界面、状态界面和运动界面 3 类,它们可以相互转化,是土体灾害发生的关键区域。在毛细水运移中,存在 3 个界面,即地下水位与毛细水饱和带的界面(界面 1)、毛细水饱和带和支持毛细水带(界面 2)以及支持毛细水带和非饱和带(界面 3),这 3 个界面既是状态界面,又是运动界面,其示意图 11。其中,界面 3 即为湿润锋界面,它是毛细湿润区和干燥区之间的过渡区域,湿润锋界面在毛细水运移过程中具有动态特性,随着毛细水运移过程中水分的增减或者时间的变化,其界面位置不断发生变化,在复杂的土体系统中,这种变化可能成为土体结构失稳或灾害发生的潜在诱因。试验和理论研究都表明,温度对毛细水运移有显著的影响,因此当试验设置的土体温度条件不同时,湿润锋界面的动态变化特性则会表现显著差异。温度升高可能加速毛细水运移,进而导致湿润锋移动速率变化,最终改变土体内部的水分迁移与分布。

毛细水上升过程中湿润锋的动力学分析是研究土壤中水分迁移过程的关键部分,它直接影响土体的稳定性与水分运移规律。对毛细水上升过程中的湿润锋界面进行动力学分析,其界面的动态移动本质上是一个非平衡过程,受土体的含水量、毛细水作用力和外界环境条件(如温度、湿度、气压等)共同作用^[23]。

非饱和带是连接大气圈和地下水的键过渡带,毛细水作为非饱和带的重要组成部分,其动态变化对地下水补给和地表水分调节有着不可忽视的影响。在昼夜温差大或季节性温差变化剧烈的环境条件下,土体的温度梯度增加,驱使毛细水向较高温区运移,形成“迁移-蒸发”的循环,导致表层土体水分的流失加剧;而在降水充足时,毛细水运移则可能帮助补充地下水位,当毛细水运移与水源补给之间存在不协调时,可能导致地下水资源分配不均衡,增加水资源管理的复杂性。因此,水资源管理还应充分重视毛细水对水资源动态变化的影响。同时,在长期干旱或温度升高的条件下,蒸发速率增加,湿润峰位置范围上下波动,当湿润峰位置过低时,土体表面干裂,影响植被和农作物根系吸水能力,从而影响农业和生态环境。

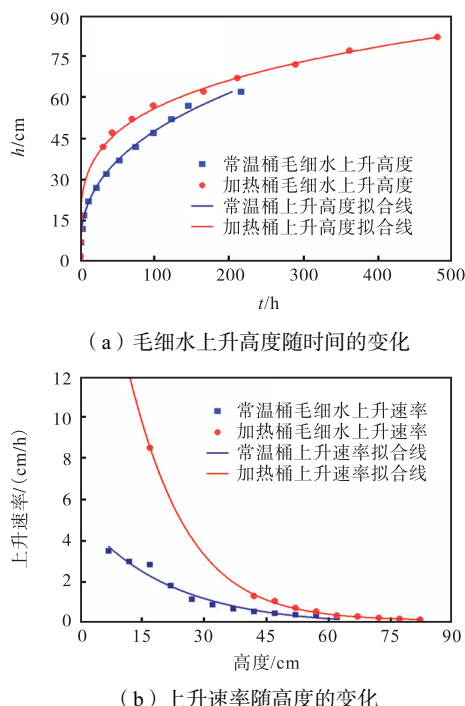


图 10 不同温度条件下毛细水上升高度和上升速率的变化曲线

Fig.10 Curves of rising height of capillary water and rising rate at different temperatures

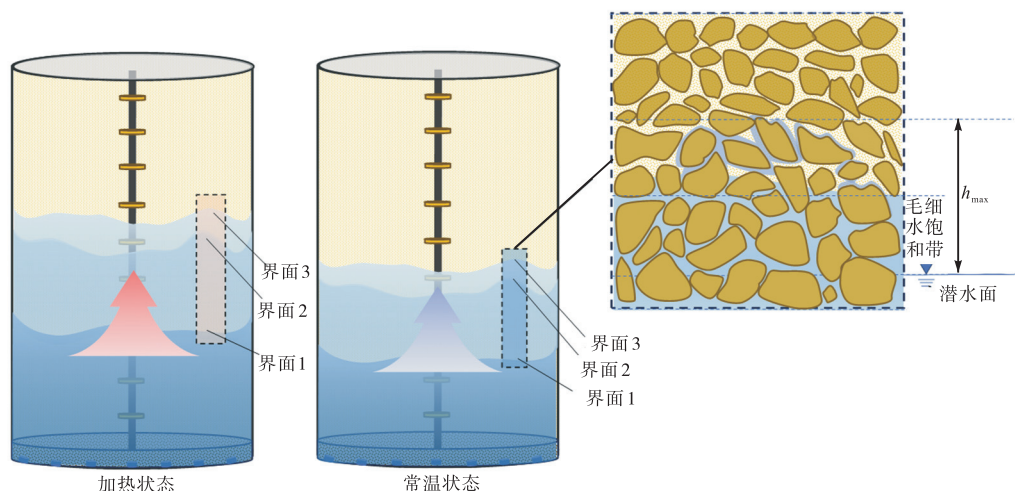


图 11 毛细水运移过程示意

Fig.11 Schematic of capillary water migration process

在实际场景中,如果土体温度不均匀,湿润锋界面会进行多次往复运动,加剧土壤的干湿交替,引发水土流失。在长期含水率波动的环境中,会逐渐改变土壤颗粒之间的结构,使得土体的孔隙率和透水性发生变化^[24],形成不均匀沉降,可能导致地基下沉、建筑物倾斜等负面影响。因此,在工程施工建设上,需要综合考虑毛细水的作用,重视毛细水的动态变化及其温度效应,并采取相应的措施来确保工程质量和结构安全。

综上所述,毛细水对水资源配置管理、生态环境保护和工程建设的影响不可忽视。因此,未来的研究应加强毛细水动态监测与模拟,尤其关注存在显著地温差异或地温异常的地区,为制定更加精准的水资源管理和生态保护政策提供数据支持和理论依据。同时,建议采用分布式的实时监测技术(如 AH-FBG 技术)监测毛细水及湿润锋的动态变化过程。

4 结 论

本文设计了不同温度条件下的毛细水上升室内试验,采用主动加热光纤布拉格光栅(AH-FBG)法对砂-高岭土混合物内部毛细水运移进行了动态监测。在此基础上,对比加热桶和常温桶的水分运移过程,分析了毛细水上升过程中水分运移分布以及温度对体积含水率分布及上升高度的影响,对毛细水上升过程中的影响因素和湿润锋运移界面进行探讨,得到如下结论。

(1) 毛细水上升高度随时间增加逐步升高,初期上升速率较高,随着高度增加逐渐衰减并趋于稳定,湿润锋出现位置标志此时水分运移的最远位置。

(2) 土体温度升高对毛细水运移具有促进影响,毛细水上升到同一高度时,土体温度越高,所需的时间越短;温度越高,毛细水上升速率越高。

(3) 湿润锋界面既属于状态界面又属于运动界面,该界面在毛细水运移过程中具有动态特性,土体温度的不同会显著引起湿润锋界面动态变化的差异。

(4) 毛细水的动态变化对水资源配置、生态环境保护和工程建设有着深远影响,因此加强对毛细水湿润锋界面高度演化及对温度响应的监测是十分重要的。

参考文献:

- [1] 李 强, 李同录, 乔志甜, 等. 非饱和土粒间毛细作用的微观不连续变形分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 834-842.
Li Qiang, Li Tonglu, Qiao Zhitian, et al. Microscopic discontinuity deformation analysis of capillary in unsaturated soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 834-842 (in Chinese).
- [2] 周爱兆, 胡 远, 隋晓岚. 考虑毛细水负压力引起坑外场地沉降量计算方法和潜在威胁性研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 779-784.
Zhou Aizhao, Hu Yuan, Sui Xiaolan. Calculation method and potential threat of settlement outside foundation pit considering negative pressure of capillary water[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 779-784 (in Chinese).
- [3] 毛海涛, 黄庆豪, 吴恒滨. 干旱区农田不同类型土壤盐碱化发生规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增1): 112-117.

- Mao Haitao, Huang Qinghao, Wu Hengbin. Soil salinization features in arid areas farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(Suppl 1): 112-117(in Chinese).
- [4] 杨洪生, 宇德忠, 于立泽. 高寒地区路基土冻胀影响因素研究[J]. 黑龙江交通科技, 2012, 35(2): 52-53. Yang Hongsheng, Yu Dezhong, Yu Lize. Study on the factors influencing frost heave of subgrade soil in cold regions[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2012, 35(2): 52-53(in Chinese).
- [5] 薛珂, 郑涛, 张明礼, 等. 寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 39-46. Xue Ke, Zheng Tao, Zhang Mingli, et al. Research progress of mixed water transport in unsaturated soils of cold region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 39-46(in Chinese).
- [6] 王俊杰, 刘元雪. 库水位等速上升中均质库岸塌岸现象及浸润线试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3231-3236. Wang Junjie, Liu Yuanxue. Experimental study of homogeneous bank caving and phreatic line during uniform rising water level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3231-3236(in Chinese).
- [7] 董斌, 张喜发, 李欣, 等. 毛细水上升高度综合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1569-1574. Dong Bin, Zhang Xifa, Li Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1569-1574(in Chinese).
- [8] 邓改革, 何建国, 康宁波. 基于多物理场耦合的毛细水高度研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 136-141. Deng Gaige, He Jianguo, Kang Ningbo. Research on capillary water height based on multi-physical field coupling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 136-141(in Chinese).
- [9] 栗现文, 周金龙, 赵玉杰, 等. 高矿化度对砂性土毛细水上升影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 84-89. Li Xianwen, Zhou Jinlong, Zhao Yujie, et al. Effects of high-TDS on capillary rise of phreatic water in sand soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 84-89(in Chinese).
- [10] 章求才, 田亚坤, 张志军, 等. 温度和气压对某金属矿山尾矿坝中毛细水上升规律的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(5): 1016-1022. Zhang Qiucan, Tian Yakun, Zhang Zhijun, et al. Influence of temperature and air pressure on rising law of capillary water in tailings dam of metal mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(5): 1016-1022(in Chinese).
- [11] Niu Q F, Fratta D, Wang Y H. The use of electrical conductivity measurements in the prediction of hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 475-487.
- [12] Lee B, Hendry M J, Sean K C. High-resolution profiling of the stable isotopes of water in unsaturated coal waste rock[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534: 616-629.
- [13] 郝瑞. 基于 AHFO 的土中毛细水渗流与分布规律研究[D]. 南京: 南京大学, 2020. Hao Rui. Research on Migration and Distribution of Capillary Water in Soil Based on AHFO[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020(in Chinese).
- [14] 郝瑞, 施斌, 曹鼎峰, 等. 层状土毛细水上升过程中 Lucas-Washburn 模型评价及修正[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 84-92. Hao Rui, Shi Bin, Cao Dingfeng, et al. Evaluation and modification of the Lucas-Washburn model during capillary water rising in the layered soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 84-92(in Chinese).
- [15] 郝瑞, 施斌, 曹鼎峰, 等. 基于 AHFO 技术的毛细水运移模型验证试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 376-382. Hao Rui, Shi Bin, Cao Dingfeng, et al. Experimental study on capillary water transport model based on AHFO technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 376-382(in Chinese).
- [16] 王家琛, 朱鸿鹄, 王静, 等. 基于主动加热光纤法的毛细阻滞入渗模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 147-155. Wang Jiachen, Zhu Honghu, Wang Jing, et al. Laboratory model tests on capillary barrier infiltration using actively heated fiber optic method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 147-155(in Chinese).
- [17] 刘喜凤, 朱鸿鹄, 王家琛, 等. 非饱和土水分迁移感测的主动加热光纤光栅法试验研究[J]. 岩土工程学

- 报, 2022, 44(8): 1443-1452.
- Liu Xifeng, Zhu Honghu, Wang Jiachen, et al. Experimental study on actively heated fiber Bragg grating method for sensing seepage in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1443-1452 (in Chinese).
- [18] 张 向, 黄振宇, 徐 立, 等. 导热系数的测量方法研究现状与发展趋势[J]. 应用物理, 2018, 8(7): 301-308.
- Zhang Xiang, Huang Zhenyu, Xu Li, et al. Research status and development trend of thermal conductivity measurement methods[J]. Applied Physics, 2018, 8(7): 301-308 (in Chinese).
- [19] Sun M Y, Shi B, Zhang D, et al. Study on calibration model of soil water content based on actively heated fiber-optic FBG method in the in-situ test[J]. Measurement, 2020, 165: 108176.
- [20] 李 萍, 李同录, 侯晓坤, 等. 黄土中毛细上升速率的现场测试[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 503-507.
- Li Ping, Li Tonglu, Hou Xiaokun, et al. Field experiment on rate of capillary rise in loess[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(6): 503-507 (in Chinese).
- [21] Ni K, Fang H W, Yu Z W, et al. The velocity dependence of viscosity of flowing water[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 278: 234-238.
- [22] 朱鸿鹄. 工程地质界面: 从多元表征到演化机理[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 1-19.
- Zhu Honghu. Engineering geological interface: From multivariate characterization to evolution mechanism[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 1-19 (in Chinese).
- [23] 付志文, 武海英. 土中毛细水运移阶段理论研究[J]. 工程与建设, 2013, 27(6): 749-751.
- Fu Zhiwen, Wu Haiying. Theoretical study on the phase of capillary water transport in soil[J]. Engineering and Construction, 2013, 27(6): 749-751 (in Chinese).
- [24] 李立宇, 陈远中, 徐思远. 含水率波动状态下公明公路路基土劣化微观机理与本构模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 114-120.
- Li Liyu, Chen Yuanzhong, Xu Siyuan. Study on deterioration meso-mechanism and constitutive model of subgrade soil from Gongming road under the fluctuation of water content[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 114-120 (in Chinese).

(责任编辑: 田 军)