

DOI: 10.11779/CJGE201902017

基于 AHFO 技术的毛细水运移模型验证试验研究

郝瑞¹, 施斌^{1*}, 曹鼎峰¹, 魏广庆², 张岩¹, 梅世嘉¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 为了验证常用的描述毛细水运移模型的准确性, 设计了室内模型试验, 采用主动加热光纤法 (简称 AHFO) 对砂土模型中的毛细水运移进行了测试。根据测试结果, 分析了毛细水入渗模型 Green-Ampt 模型、Terzaghi 毛细水上升模型和毛细水最大上升高度预测模型 Lane 模型、Peck 模型的特点和预测精度。试验分析结果表明: 对于砂性土, 毛细水上升过程可以分为两个阶段, 第一阶段 (约前 50 h), Green-Ampt 模型和 Terzaghi 毛细水上升模型预测的毛细水上升高度值均低于实测值, Terzaghi 模型拟合精度高于 Green-Ampt 模型; 第二阶段 (约 50 h 后), Green-Ampt 模型和 Terzaghi 模型预测值均高于实测值, 且 Green-Ampt 模型拟合精度高于 Terzaghi 模型。这两个模型预测精度随时间的变化现象是与其所用的假设条件和土体物理性质变化有关。Peck 模型的误差低于 Lane 模型, 为 2.60 cm, 而 Lane 模型由于只考虑了有效粒径 D_{10} , 误差高达 8.58 cm。利用 Green-Ampt 模型可反演土的饱和渗透系数与湿润锋处基质吸力。研究成果为常用毛细水运移模型选择和误差分析提供了实测依据。

关键词: 毛细水运移模型; 主动加热光纤法 (AHFO); 砂土模型试验; 误差分析; 对比分析

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)02-0376-07

作者简介: 郝瑞 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事非饱和土方面的研究工作。E-mail: hrarm123@gmail.com。

Experimental study on capillary water transport model based on AHFO technology

HAO Rui¹, SHI Bin¹, CAO Ding-feng¹, WEI Guang-qing², ZHANG Yan¹, MEI Shi-jia¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, China)

Abstract: In order to verify the accuracy of commonly used capillary water transport models, several laboratory model tests are carried out based on the active heated fiber optic method (AHFO). During these tests, the soil moisture profiles determined by capillary force are measured using AHFO. Based on the experimental results, the characteristics and prediction accuracy of Green-Ampt and Terzaghi models are analyzed, so as to describe the moving rate of capillary water. In addition, the Lane and Peck models that predict the maximum capillary heights are evaluated as well. The results indicate that for sand, the capillary water rise process can be divided into two stages. During the first stage (first elapsed 50 hours), the predicted capillary water heights by the Green-Ampt and Terzaghi models are lower than the measured values collected by AHFO, and the accuracy of Terzaghi model is higher than that of the Green-Ampt model. During the second stage (after 50 hours), the predicted values are higher than the actual measured ones, and the Green-Ampt model has a higher accuracy. This accuracy change with time depends on model assumptions and physical properties of soils. The results also suggest that the error of the Peck model (2.60 cm) is lower than that of the Lane model (8.58 cm). The saturated hydrologic conductivity of the soils and the matric suction at the wetting front can be calculated by the Green-Ampt model. These discoveries provide basic data for selecting effective and high-precision models to reflect capillary rise in soils.

Key words: capillary water transport model; active heating fiber optic method; sand model experiment; error analysis; comparative analysis

0 引言

非饱和土体由于基质吸力的存在, 产生毛细现象。上升的毛细水导致其结构改变、强度降低, 对地基、大坝、路基、边坡等工程产生了严重不良影响^[1]。为了评价毛细水可能带来的危害, 很多学者建立了模型

方程预测毛细水运移过程及最大上升高度。目前应用于毛细水运移的模型主要有 Washburn 模型、Brooks-

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目 (41427801); 国家自然科学基金重点项目 (41230636)

收稿日期: 2017-12-25

***通讯作者 (E-mail: shibin@nju.edu.cn)**

Corey 模型^[2]、Van Genuchten 模型^[3]、Green-Ampt 模型^[4]及 Terzaghi 模型^[5]。Washburn 模型可以较好地描述饱和区传导距离与传导时间的关系,但在考虑饱和区和非饱和区的传导距离与传导时间的关系时,Washburn 方程则不适用^[6];Green 等^[4]基于均质土毛管理论提出的 Green-Ampt 模型由于表达形式简单,模型参数均为土水特征参数,因而得到了广泛应用,并已推广到了非均质土和初始含水率不均匀的情况;Brooks-Corey 模型和 Terzaghi 模型假设毛细水上升过程中土水关系为饱和状态,利用达西定律推导出毛细水上升速率的预测模型。

毛细水上升高度是影响工程地质条件的最重要因素,直接决定了毛细水影响的砂土层厚度,因此有必要对毛细水最大上升高度作出预测,从而进一步评价毛细水可能对工程建设产生的影响。土体孔隙分布非常复杂,因此毛细水上升高度的预测值往往误差较大。目前预测毛细水最大上升高度的模型主要有 Lane 模型、Peck 模型、Kumar 模型等^[7]。Lane 等^[8]对 8 种不同土壤进行的毛细管上升试验分析表明,毛细管上升的最大高度 h_c 与土的有效粒径 D_{10} 相关,并且可以近似用 $\ln D_{10}$ 的线性函数表示;Peck 等^[9]在此基础上进一步研究,发现毛细水最大上升高度 h_c 与土的有效粒径 D_{10} 呈负相关,而且还和土的孔隙比呈负相关,并得到了 Peck 模型。

上述模型多是基于一定的假设条件,通过一定的理论推导而获得。由于受到毛细水测量技术的限制,这些模型的准确性和适用范围还有待实测试验验证。目前,测量毛细水上升的方法主要有直接观测法、示踪剂法、电阻率法、时域反射仪法、中子仪法、 γ 射线透射法、遥感法等^[10-11]。每种方法都有自己的优点、缺点和限制范围。在讨论各种方法的适用范围时,应充分考虑其准确性、测试深度、响应时间、成本和对人体健康影响^[12-13]。直接观测法、示踪迹法是在透明有机玻璃器皿中进行,通过试验人员目测读出管壁处土的湿润锋高度^[14],这种方法误差较大;虽然遥感法可以测得一个区域内地表土壤含水量分布,但受环境因素,如植被、土壤表面温度、表面反射率等影响,其测量精度较差,测量深度也仅限于浅表^[15];电阻率法、时域反射法(TDR)、频域反射法(FDR)、 γ 射线透射法都是点式测量,不能满足原位土壤含水量的分布式实时测量要求^[16-17]。土壤含水率的测定精度取决于测量仪器的精度、土壤湿度的空间分布特征及样本容量等^[18],点式监测方法只能测量各个传感器处的含水率,难以应用于大面积和长距离分布式含水率监测,含水率拐点等关键位置信息也容易漏测^[19]。

近年来,主动加热光纤法(actively heated fiber optic,简称 AHFO)由于具有高精度、长距离、分布式监测等优点而发展迅速,已被成功应用于室内试验及现场监测^[20-21]。AHFO 法所用的测试系统是分布式温度传感系统(distributed temperature sensing, DTS)。在监测过程中,激发的探测光在光纤中传输时发生拉曼散射,产生斯托克斯光和反斯托克斯光。向后的反斯托克斯光对温度敏感,随温度的升高而增强。使用 DTS 可以测得反斯托克斯光的变化值,同时结合光时域反射技术空间定位,即可以得到光纤沿线各点的温度信息,进而计算出各点的含水率信息。

基于 AHFO 法的上述优点,本文设计了毛细管水上升室内试验,采用 AHFO 技术,对砂土模型中的毛细水运移进行了测试,分析了毛细水上升规律、最大上升高度,并验证了 Green-Ampt 模型、Terzaghi 毛细水上升模型和 Lane 模型、Peck 模型的准确性。

1 基本原理

1.1 AHFO 法技术原理

主动加热光纤法是通过碳纤维对土体施加温度场,根据热量向周围土体扩散快慢程度计算土体的导热系数,并根据土体导热系数与含水率之间的关系计算出岩土体的含水率。曹鼎峰等通过试验测试发现,土壤含水率与温度特征值(即加热后某一时间段温度平均值)的关系可用一分段函数描述^[22],所以本文采用该分段函数模型,含水率较低时采用二次函数模型,含水率较高时采用线性函数模型,其函数表达式为

$$T_t = \begin{cases} a\theta^2 + b\theta + c & (0 < \theta \leq \theta_c) \\ k\theta + d & (\theta_c < \theta \leq \theta_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中 a, b, c, k, d 为常参数; θ_c 为界限含水率,是 $T_t - \theta$ 曲线上曲率半径最小点所对应的含水率; θ_s 为饱和含水率;试验时通过烘干测得的含水率与温度特征值拟合出 a, b, c, k, d 5 个参数。

Striegl^[23]研究证明,采用 AHFO 技术和分段函数测得土壤含水率在试验中的绝对误差低于 2.1%,在工程允许的范围内时,可以实现对土壤含水率的分布式监测。影响 AHFO 技术测试精度的因素主要有土的干密度、化学成分及有机质含量,但是对于同一场地,非饱和带中影响导热性的变量只有含水率,因此,可通过现场原位标定减小其他干扰因素的影响。

1.2 毛细水入渗模型

Green-Ampt 模型与 Terzaghi 毛细水上升模型都对毛细水入渗过程进行了描述,但是两者在考虑因素与假设条件上有较大差异。Green-Ampt 模型假设土体中

含水率只有初始含水率和湿润锋以下的饱和含水率两种状态。并由达西定律得出 Green-Ampt 模型表达式:

$$t = \frac{w_s - w_0}{k_s} \left(h_c \ln \frac{h_c}{h_c - h} - h \right) \quad , \quad (2)$$

$$q = k \left(\frac{u - h}{h} \right) = ku \frac{1}{h} - k \quad . \quad (3)$$

式中 t 为时间 (s); q 为毛细水入渗速率 (m^3/s); k 为饱和渗透系数 (m/s); w_s 为饱和体积含水率; w_0 为初始体积含水率; u 为基质吸力。

Terzaghi 模型主要基于两个假设: ①适用于饱和土渗流的达西定律同样适用于非饱和土渗流; ②毛细水上升的水力梯度可近似为毛细水最大上升高度和湿润锋的差值与湿润锋高度的比值, 即

$$i = \frac{h_c - h}{h} \quad , \quad (4)$$

式中, i 为水力梯度, h_c 为毛细水最大上升高度 (m), h 为毛细水实际上升高度 (m)。同时, Terzaghi 模型还假设, 达西定律可以表示为

$$q = k_s i = n \frac{dz}{dt} \quad , \quad (5)$$

式中, q 为毛细水入渗速率 (m^3/s), k_s 为土的饱和渗透系数 (m/s), n 为孔隙率。

将初始时刻毛细水的上升高度为零的初始条件带入, 最终推导出湿润峰高度与时间的关系式:

$$t = \frac{nh_c}{k_s} \left(\ln \frac{h_c}{h_c - h} - \frac{h}{h_c} \right) \quad . \quad (6)$$

1.3 毛细水最大上升高度估测模型

为了更好地量化毛细水最大上升高度, 一些学者建立了关于土体物理性质的毛细水最大上升高度估测模型, 如 Lane 模型、Peck 模型等。Lane 模型是 Lane 等^[8]通过对多种不同土壤的毛细管上升试验结果分析拟合得出, 毛细水上升的最大高度 h_c 可以近似用 $\ln D_{10}$ 的线性函数表示, 其表达式为

$$h_c = -990 \ln D_{10} - 1540 \quad . \quad (7)$$

Peck 等综合前人的研究成果, 在 Lane 模型的基础上引入土的空隙比 e 和经验参数 C , 将毛细水最大上升高度 h_c 表述为

$$h_c = \frac{C}{e D_{10}} \quad . \quad (8)$$

式中 h_c 为毛细水上升最大高度 (mm); e 为砂土的孔隙比; D_{10} 为砂土的有效粒径 (mm); C 为经验系数, 由颗粒的粗糙程度和洁净情况决定, 一般取值范围为 10~50。

表1中简要总结了各毛细水入渗模型和毛细水最大上升高度估测模型的优缺点。

表 1 各预测模型优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of each prediction model

模型	优点	缺点
Terzaghi	公式简单实用	无法考虑非饱和渗透系数
Green-Ampt	测试手段成熟, 表达式简单	未考虑过渡区尺寸
Lane	参数少、易确定	估计偏差大
Peck	参数多、精度高	参数难以准确确定

2 室内试验

为了分析以上模型的准确性和适用性, 设计了毛细水上升试验。土体半径 r 的大小取决于碳纤维光缆的加热功率与土壤的热阻抗能力, 通过傅里叶定律计算后确定土体半径 r 与加热管 r' 的近似关系为 $r < 8r'$ ^[24]。本研究中加热管直径为 5 cm, 因此铁桶直径定为 40 cm。本试验采用定水头补给, 试验装置如图 1 所示, 铁桶直径为 40 cm, 高度为 90 cm, 上部有密封盖防止水分蒸发, 为了保证水槽和铁桶内保持相同水位, 在距桶底部 3 cm 处侧面均匀设置 8 个半径 2 cm 小孔与水槽连通。下部水槽直径为 60 cm, 高度为 10 cm, 试验时持续缓慢向水槽注水使水槽一直处于满水状态。为防止试验材料堵塞小孔, 先在桶底铺垫 10 cm 厚粒径约为 4~8 mm 砾石, 模拟地下反滤层。在砾石上覆盖一层纱布后, 将光纤埋置于砂土体正中心, 再将试验材料分层装满铁桶, 每次装填 10 cm 后击实, 并做刨毛处理, 减小分层装填对模型整体性的影响。试验时在铁桶里填装砂土材料, 在干燥状态下通过碳纤维感测光缆测量砂土的初始含水率, 然后向水槽中加水保持满水状态, 并记录下每次加水时间和加水量。前 24 h 每 1 h 测试一次含水率, 24 h 后每隔 12 h 测一次含水率并取样, 最终测试 500 h。

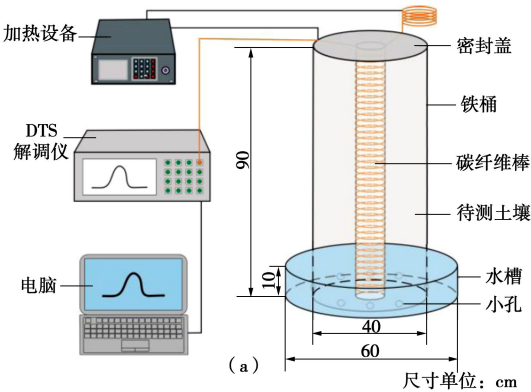


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

本次试验所用解调仪为苏州南智传感科技有限公司所产 NZS-DMS-02 型 DTS, 解调仪的主要技术指标见表 2 所示。

表 2 DTS 解调仪主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of DTS demodulator

光纤 类型	测量距离 /km	空间分辨 率/m	测温范围 /℃	测温精 度/℃	功率/W
62.5/125	10	1	-40~120	0.1	300

为了提高光纤分布式监测的空间分辨率, 制作碳纤维感测光缆测管, 将碳纤维感测光缆紧密缠绕在直径 50 mm 的 PVC 管上, 并在光缆外侧紧套热缩管, 在 PVC 管的上下端用环氧胶密封, 防止水分可能沿光纤上移对试验结果造成误差。已知光纤本身的空间分辨率为 1 m, 则沿测管方向空间分辨率达到 20 mm, 参考其他学者的研究, 如由文献[25]中图 11, 13 可以看出其空间分辨率大于 2 cm。本文可以确定含水率的空间分辨率为 2 cm, 相对其他学者的研究方法, 空间分辨率较高, 满足本次试验需求。

本次试验采用 90%工业砂与 10%高岭土均匀混合土体, 采用工业砂和高岭土按照 9:1 比例, 是借鉴严珺凡^[26]、梅世嘉^[27]的试验所用材料, 几位学者发现该配比的土样配置均匀, 填土容易, 渗流观测效果最明显。因此, 笔者采用工业砂和高岭土按照 9:1 比例均匀混合材料研究毛细水的入渗过程。土样干密度为 1.53 g/cm³, 初始含水率 7.85%, 饱和含水率 27.24%, 常水头试验测得砂土的饱和渗透系数为 2.179×10⁻⁷ m/s, 颗粒级配曲线如图 2 图所示。

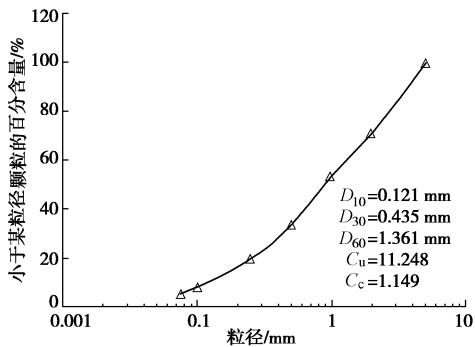


图 2 砂土材料颗粒分析结果

Fig. 2 Particle analysis results of sand materials

3 试验结果

3.1 温度特征值与土体含水率关系率定

配置不同体积含水率的砂土, 装于 PVC 管中, 将碳纤维加热光缆埋于管中央, 利用 DTS 测试不同体积含水率砂土的温度特征值, 通过最小二乘法对砂土含水率-温度特征值分段拟合。拟合过程中, 首先确定分段点, 在不同分段点时计算拟合曲线的相关系数、拟合值的平均偏差和均方根误差。相关系数最大, 平均偏差和均方根误差最小时对应的分段点即为最佳分段点, 然后对分段点前后点分别拟合, 如图 3 所示。标定过程可参见文献[22]。

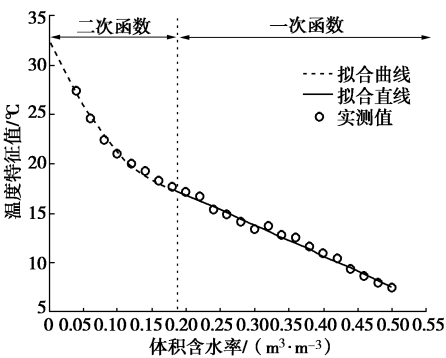


图 3 温度特征值与体积含水率关系

Fig. 3 Relationship between temperature characteristic value and volume water content

得到分段拟合的分段点为 0.18 m³/m³, 曲线的函数表达式:

$$T_t = \begin{cases} 372\theta^2 - 150.55\theta + 32.495 & (0 < \theta \leq 0.18) \\ -31.07\theta + 23.0414 & (0.18 < \theta \leq 0.41) \end{cases} \quad (9)$$

相关系数 $R^2=0.9920$, 平均偏差为 0.3127℃, 均方根误差为 0.3364℃, 相关系数较高, 平均偏差和均方根误差较低, 可以判断该分段函数模型对温度特征值与砂土含水率的关系拟合精度较高。当体积含水率低于 0.18 m³/m³时, 曲线呈二次函数形式; 当体积含水率高于 0.18 m³/m³时, 曲线呈一次函数形式。

3.2 毛细水上升高度与时间关系

基于 AHFO 法所测毛细管水 500 h 内的上升过程如图 4 所示。

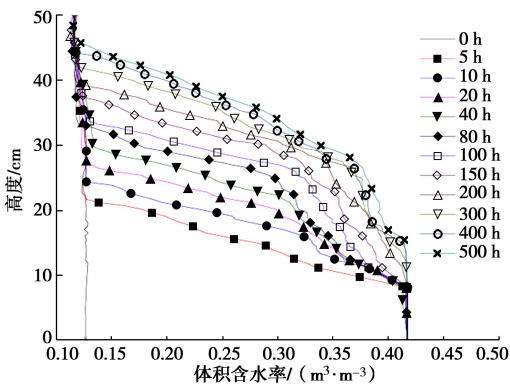


图 4 不同时刻砂土体积含水率曲线

Fig. 4 Curves of volumetric water content over time

从图 4 中土壤含水率分布曲线可以看出, 随着时间延长, 湿润锋逐渐向上推移, 饱水界面与湿润锋之间岩土含水率逐渐升高。而且越到后期湿润锋上升速度越慢, 含水率增长速度也越慢。湿润锋上升高度与时间关系如图 5 所示。

由图 5 试验数据可以看出, 在初期阶段毛细水上升速率较快, 前 200 h 上升了约 40 cm, 占总上升高度(500 h 的湿润锋上升量) 46.5 cm 的 86%, 随着时间推移而逐渐变慢。原因是在毛细上升初期, 毛细水量

较少,所受重力势较小,而基质势相对较大,毛细水所受向上的驱动力较大,因此毛细水上升速度较快。随着毛细水上升,毛细水量增加,重力势增大,基质势不变,毛细水所受驱动力逐渐减小,毛细上升速率逐渐减小。当重力势与基质势持平时,毛细水上升高度达到最大值。

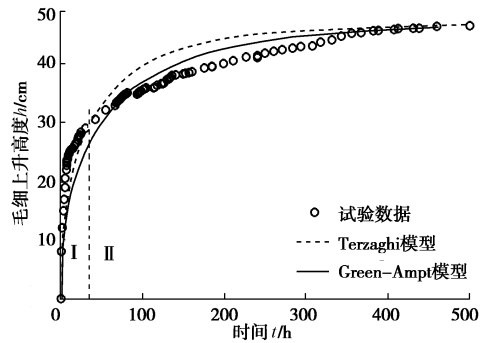


图5 试验测得毛细上升高度与模型预测值

Fig. 5 Heights of measurement and predictions of model

3.3 基于 Greet-Ampt 模型反演水土特征参数

通过式(3)可知,通过毛细水入渗速率 q 和毛细水上升高度的倒数 $1/h$ 拟合得到的直线在 q 轴的截距为饱和渗透系数 k ,直线的斜率为 ku ,即可以求得基质吸力 u 。通过试验测得的毛细水入渗速率与毛细水上升高度,绘制出毛细水入渗速率 q 与上升高度倒数 $1/h$ 的关系如图6。

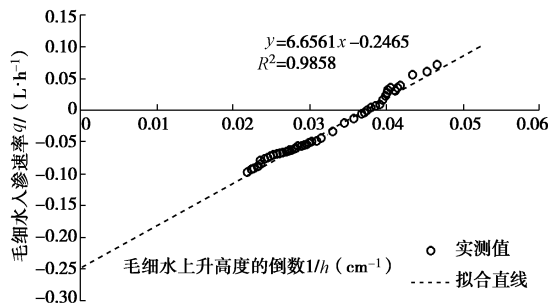


图6 毛细水入渗速率与上升高度倒数的关系

Fig. 6 Relationship between infiltration rate of capillary water and reciprocal of rising height

通过试验测得的毛细水入渗速率与毛细水上升高度倒数的函数图像,拟合出砂土的函数关系式为

$$q = 6.6561 \frac{1}{h} (\text{dm})^4 - 0.2465 \quad (R^2=0.9858) \quad (10)$$

由式(3)可知,拟合直线在纵坐标轴的截距即为饱和渗透系数 k_s ,可得砂土的饱和渗透系数为 $k_s = 0.2465 \text{ cm/h}$,即 5.9165 cm/d ,要高于试验测得渗透系数 1.883 cm/d ,误差值为 4.034 cm/d ;拟合直线的斜率为 $k_u = 6.6561$,则 $u = 1.125 \text{ kPa}$ 。 k 的误差主要来自于Green-Ampt模型,该模型假设湿润锋以下土体为饱和含水率,实际情况下湿润锋以下土体并不能达到饱和,因此由Green-Ampt模型推测的渗透系数 k 值大于实测值。 k 和 u 的乘积为定值, k 值偏大,则理论上通

过Green-Ampt模型计算出的湿润锋处基质吸力 u 值偏小。Mao等^[28]也发现湿润锋后的土体饱和是一个渐进过程,非饱和土的渗透系数小于饱和土的渗透系数,与本研究观测到的结果一致。因此,在将来的研究中,应定量描述非饱和土中的渗透系数与含水率的关系。

4 模型精确性分析

4.1 Green-Ampt模型与Terzaghi模型对比分析

图5表明,毛细水上升过程可以分为两个阶段:第一阶段(约前50 h),Terzaghi模型和Green-Ampt模型预测值均低于实测值,且Terzaghi模型拟合精度高于Green-Ampt模型;第二阶段(约50 h后),Terzaghi模型和Green-Ampt模型预测值均高于实测值,且Green-Ampt模型的拟合精度高于Terzaghi模型。其原因分析如下:在第一阶段,土体中含水率较低,毛细水量少,所受重力小,在受到向上基质吸力的作用下,毛细水上升速度很快。在Terzaghi模型和Green-Ampt模型中渗透系数取饱和渗透系数,均高于实际渗透系数,但Green-Ampt模型中湿润锋以下含水率取饱和含水率造成的偏差更大,因此Green-Ampt模型的拟合精度低于Terzaghi模型;第二阶段,随着毛细水量增多,所受重力大,在受到与第一阶段相等基质吸力作用下,毛细水上升速度减慢。而且,根据在应力传递中的表现,土体颗粒可以分为主体颗粒和松散颗粒^[29],主体颗粒传递应力,在土体中起支撑作用。松散颗粒不直接贡献应力传递,这部分颗粒在土体中毛细水含量升高后,受重力的作用沉降到底部,降低了土体的基质吸力,因此实测毛细水上升高度值低于模型预测值,并导致Green-Ampt模型的拟合度高于Terzaghi模型^[30-31]。因此,本试验中,建议第一阶段可以采用Terzaghi模型,而第二阶段采用Green-Ampt模型更为准确,误差分析见表3所示。

表3 各模型在I和II阶段误差

Table 3 Errors of models at stages I and II		
模型	误差/cm	
	第I阶段	第II阶段
Terzaghi	3.8	4.5
Green-Ampt	6.6	2.3
分段模型	3.8	2.3

表3中两种模型不同阶段误差不同主要是其受力特征决定。毛细水在入渗过程主要受到3种作用力:基质吸力、毛细管侧壁黏性阻力及流体自身重力。根据支配作用力不同,可以分为惯性力作用阶段、黏性力-惯性力作用阶段、黏性力作用阶段和黏性力-重力作用阶段^[32]。随着支配作用力的变化,Terzaghi模型和Green-Ampt模型的假设条件受毛细管侧壁黏性阻力、流体重力的影响较小,受基质吸力影响较大。随

着基质吸力支配程度的增大, 假设条件产生的误差相应发生变化, 导致两模型的拟合精度也会发生变化。

根据建议采用分段模型: 第 I 阶段采用 Terzaghi 模型, 第 II 阶段采用 Green-Ampt 模型后, 全过程最大误差降低为 3.8 cm, 大大降低了其误差值。

Terzaghi 模型的误差主要源于渗透系数的假设, 将渗透系数取值饱和渗透系数, 高估了毛细水的入渗速率; 而 Green-Ampt 模型的误差源于饱和渗透系数和只有初始含水率与饱和含水率理想状态的假设。因此在今后的工作中, 需要根据两者的物理机制进行修正, 具体体现在以下两个方面: ①通过饱和渗透系数进行修正而求得非饱和渗透系数; ②将土壤分为饱和层、过渡层和干土层, 各层采用不同的渗透系数, 利用 Richards 方程和室内试验分析不同入渗条件下各层厚度的划分及各层内含水率的变化规律。

4.2 Peck 模型和 Lane 模型对比分析

通过毛细水上升高度与时间的关系曲线, 500 h 后, 毛细水上升高度基本趋于稳定, 毛细水升高了约 46.5 cm。本次试验所用砂土孔隙比为 0.421, 砂土的有效粒径为 0.121 mm, C 暂取中值 25。采用 Lane 模型, 推测出毛细水最大上升高度 h_c 为 55.08 cm, 相比于实测值高了 8.58 cm; 而采用 Peck 模型得到毛细水最大上升高度为 49.1 cm, 与实测值 46.5 cm 相比误差 2.60 cm。由此可见在本试验中 Peck 模型的误差远低于 Lane 模型, 其原因主要是由于两种模型的参数取值方法不同造成。Lane 模型只考虑了有效粒径的影响, Peck 模型考虑了孔隙比和有效粒径两个影响因素, 并引入了经验常数 C , 因此其误差低于 Lane 模型。而且由于本次试验只测试了 500 h, 500 h 后毛细水还会有少量上升。另外, Peck 模型形式简单, 参数易得, 因此在实际工程中建议采用 Peck 模型。

5 结 论

本文设计了毛细水上升试验, 采用主动加热光纤法 (AHFO) 对均质砂土内部毛细水运移进行了测量。据此, 分析了 Green-Ampt 模型、Terzaghi 模型、Lane 模型和 Peck 模型的区别和计算误差, 可得以下 3 点结论。

(1) 利用毛细试验测得的毛细水入渗速率和上升高度, 通过 Green-Ampt 模型可以反演得到土体的饱和渗透系数和湿润锋处基质吸力, 并且验证了非饱和土的渗透系数小于饱和土的渗透系数。

(2) 砂性土的毛细水上升过程可以分为两个阶段, 第一阶段 (约前 50 h), Green-Ampt 模型和 Terzaghi 毛细上升模型预测毛细水上升高度值均低于实测值, Terzaghi 模型拟合精度高于 Green-Ampt 模型; 第二阶段 (约 50 h 后), Green-Ampt 模型和 Terzaghi 模型预

测值均高于实测值, 且 Green-Ampt 模型精度高于 Terzaghi 模型。

(3) Peck 模型的预测值要比 Lane 模型更加准确, 且 Peck 模型形式简单, 参数易得, 在实际工程的毛细现象中应用是有重要参考价值的。

参考文献:

- [1] 吴世余, 余金煌. 粉性土毛管水的力学和工程特性[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 80 - 84, 91. (WU Shi-yu, YU Jin-huang. Mechanical and engineering characteristics of capillary water of silty soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 80 - 84, 91. (in Chinese))
- [2] 马东豪, 张佳宝, 黄 平. 确定 Brooks-Corey 土壤水力特性模型参数的垂直入渗方法[J]. 水科学进展, 2011, **22**(2): 235 - 241. (MA Dong-hao, ZHANG Jia-bao, HUANG Ping. Determination of Brooks-Corey soil hydraulic parameters through vertical infiltration experiments[J]. Advances in Water Science, 2011, **22**(2): 235 - 241. (in Chinese))
- [3] LIANG X, LIAKOS V, WENDROTH O, et al. Scheduling irrigation using an approach based on the van Genuchten model[J]. Agricultural Water Management, 2016, **176**: 170 - 179.
- [4] SOURBEER J J, LOHEIDE S P. Obstacles to long term soil moisture monitoring with heated distributed temperature sensing[J]. Hydrological Processes, 2016, **30**(7): 1017 - 1035.
- [5] YAKIMOV N D, KACIMOV A R. Darcian flow under/through a leaky cutoff wall: Terzaghi-Anderson's seepage problem revisited[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2017, **41**(9): 1182 - 1195.
- [6] LAGO M, ARAUJO M. Capillary rise in porous media[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2001, **234**(1): 35.
- [7] LU N, GODT J. Hillslope hydrology and stability[M]. London: Cambridge University Press, 2013: 90 - 91.
- [8] LANE K S, WASHBURN S E. Capillary tests by capillarmeters and by soil filled tubes[J]. Highway Research Board Proceedings, 1947, **26**.
- [9] PECK R B. Foundation engineering[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1974.
- [10] NIU Q, 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.
- [11] BARBOUR S L, HENDRY M J, CAREY S K. High-resolution profiling of the stable isotopes of water in unsaturated coal waste rock[J]. Journal of Hydrology, 2016,

- 534: 616 – 629.
- [12] SUSHA L S U, SINGH D N, BAGHINI M S. A critical review of soil moisture measurement[J]. *Measurement*, 2014, **54**(8): 92 – 105.
- [13] DOBRIYAL P, QURESHI A, BADOLA R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **458/459**(3): 110 – 117.
- [14] 张志军, 李亚俊, 贺桂成, 等. 某尾矿坝毛细水带内的坝体材料物理力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(6): 1561 – 1568. (ZHANG Zhi-jun, LI Ya-jun, HE Gui-cheng, et al. Study of physico-mechanical properties of dam body materials in capillary water fringe of a certain tailings dam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(6): 1561 – 1568. (in Chinese))
- [15] SCHROTT L, SASS O. Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies[J]. *Geomorphology*, 2008, **93**(1/2): 55 – 73.
- [16] DOBRIYAL P, QURESHI A, BADOLA R, et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **458/459**(3): 110 – 117.
- [17] SUSHA L S U, SINGH D N, BAGHINI M S. A critical review of soil moisture measurement[J]. *Measurement*, 2014, **54**(8): 92 – 105.
- [18] 陶士珩, 王立祥, 胡希远, 等. 土壤含水率测定的误差分析及控制[J]. *干旱地区农业研究*, 1997(2): 87 – 91. (TAO Shi-heng, WANG Li-xiang, HU Xi-yuan, et al. Analysis and control of Errors in soil water content rate determination[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997(2): 87 – 91. (in Chinese))
- [19] YIN Z, LEI T, YAN Q, et al. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2013, **99**: 101 – 107.
- [20] SAYDE C, GREGORY C, GIL-RODRIGUEZ M, et al. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics[J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**(6): 2840 – 2849.
- [21] CAO D, SHI B, ZHU H, et al. A distributed measurement method for in-situ soil moisture content by using carbon-fiber heated cable[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, **7**(6): 700 – 707.
- [22] 曹鼎峰, 施斌, 顾凯, 等. 土的含水率 AHFO 法测量中分段函数模型建立[J]. *水文地质工程地质*, 2016, **43**(6): 41 – 47. (CAO Ding-feng, SHI Bin, GU Kai, et al. Establishment of the piecewise function model in the process of soil moisture monitoring with the AHFO method[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, **43**(6): 41 – 47. (in Chinese))
- [23] STRIEGL A M. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring[J]. *Ground Water*, 2012, **50**(3): 340 – 347.
- [24] 曹鼎峰. 土壤含水率分布式光纤测量试验研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. (CAO Ding-feng. Experimental study on distributed optical fiber measurement of soil moisture content[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. (in Chinese))
- [25] 陈赟, 陈伟, 陈仁朋, 等. TDR 联合监测土体含水量和干密度的传感器的设计及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(2): 418 – 426. (CHEN Yun, CHEN Wei, CHEN Ren-peng, et al. Design and application of sensors for joint monitoring of soil water content and dry density by TDR[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(2): 418 – 426. (in Chinese))
- [26] 严珺凡. 基于分布式光纤感测技术的土质边坡稳定性模型试验研究[D]. 南京: 南京大学, 2012. (YAN Jun-fan. Model test study on soil slope stability based on distributed optical fiber sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012. (in Chinese))
- [27] 梅世嘉. 土中水分迁移 AHFO 监测方法及其应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2018. (MEI Shi-jia. Study on monitoring method and application of moisture transfer AHFO in soil[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. (in Chinese))
- [28] MAO L L, LI Y Z, HAO W P, et al. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green-Ampt model[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, **31**(7): 31 – 37.
- [29] KENNEY T C, CHAHAL R, CHIU E, et al. Controlling constriction sizes of granular filters: reply[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, **22**(1): 32 – 43.
- [30] TO H D, SCHEUERMANN A, GALINDO-TORRES S A. Probability of transportation of loose particles in suffusion assessment by self-filtration criteria[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2016, **142**(2): 04015078.
- [31] PREVEDELLO C L, LOYOLA J M T, REICHARDT K, et al. New analytic solution related to the Richards, Philip, and Green-Ampt equations for infiltration[J]. *Vadose Zone Journal*, 2009, **8**(1): 127 – 135.
- [32] 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(6): 749 – 751. (FU Zhi-wen, WU Hai-ying. Theoretical study on the movement stage of capillary water in soil[J]. *Engineering and construction*, 2013(6): 749 – 751. (in Chinese))