

层状土垂直一维入渗土壤水分运动数值模拟与验证

范严伟^{1,2}, 黄宁¹, 马孝义³

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州理工大学
能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为进一步认识层状土垂直一维入渗土壤水分运动规律。[方法] 依据非饱和土壤水分运动理论, 建立了垂直一维土壤饱和—非饱和水分运动的数学模型, 并用 SWMS-2D 软件进行求解。采用已有文献资料, 对均质土和层状土的土壤剖面含水率、土壤湿润锋运移值和累积入渗量及入渗速率等指标的实测值与模拟值进行分析验证。[结果] 实测值与模拟值具有较好的一致性, 所提出的数学模型既适用于均质土壤, 也适用于层状土壤。[结论] 所建模型能比较真实地反映均质土和层状土垂直一维入渗土壤水分运动的状况, 证明利用 SWMS-2D 软件对层状土柱中土壤水分运动进行模拟具有可行性。

关键词: 层状土壤; 垂直一维入渗; 土壤水分运动; 数值模拟; SWMS-2D

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0215-05

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.040

Numerical Simulation and Verification of Layered Soil Water Movement in Vertical One-dimensional Infiltration

FAN Yanwei^{1,2}, HUANG Ning¹, MA Xiaoyi³

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, The Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. College of Energy & Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To understand the soil water movement in vertical one-dimensional infiltration in layered soil. [Methods] A mathematical model for soil saturated and unsaturated water movement in vertical one-dimensiona was established based on unsaturated soil water movement theory, and the SWMS-2D software was used to solve the model. Using the existing literature, the simulation results of homogeneous soil and layered soil were verified by the measured values of soil moisture content, soil wetting front, cumulative infiltration and infiltration rate in laboratory test. [Results] The simulation result agreed well with measurement values, and the proposed numerical model is applicable to both homogeneous soil, and layered soil. [Conclusion] The model can truly reflect soil water movement in vertical one-dimensional infiltration in homogeneous soil and layered soil. The SWMS-2D software can be used to simulate the soil water movement of vertical one-dimensional infiltration in layered soil.

Keywords: layered soil; vertical one-dimensional infiltration; soil water movement; numerical simulation; SWMS-2D

层状土是田间普遍存在的土壤结构, 水分在均质土壤和层状土壤中的运动具有很大的差异, 使得入渗过程变得较为复杂^[1]。根据土壤质地不同, 可将层状土分成两大类: 一是具有较小渗透性的细质土覆盖着具有较大渗透性的粗质土; 另一类是具有较大渗透性的粗质土覆盖着具有较小渗透性的细质土^[2]。

国内外学者在均质土壤入渗特性研究的基础上, 对非均质层状土壤的入渗规律也进行了大量的试验和理论研究^[3-10]。以往的试验研究多是以室内试验为主, 采用数值模拟方法对层状土壤入渗条件下土壤水分运动规律的研究相对较少^[11]。任利东等^[12]通过 Hydrus-1D 模型对不同类型层状土柱排水过程进行

收稿日期: 2013-12-10

修回日期: 2014-01-21

资助项目: 国家重大研究计划重点支持项目“面向黑河水文模型集成的基于风吹雪动力学过程的积雪分布”(91325203); 国家自然科学基金项目“基于风沙两相流的机械固沙措施防护机理及优化研究”(41371034); 甘肃省自然科学基金资助项目(145RJYA293)

第一作者: 范严伟(1982—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤水动力学研究。E-mail: fanyanwei24@163.com。

模拟,获得了不同类型层状土柱的田间持水量;聂卫波等^[13]采用 SWMS-1D 软件对均质土一维土壤入渗特性进行了数值模拟;陆垂裕等^[14]对复杂上表面边界条件的一维土壤水运动进行数值模拟,并结合室内试验结果和 SWMS-2D 软件进行了验证;范严伟等^[15]利用 SWMS-2D 软件对均质土垂直一维入渗水分分布与入渗特性进行了数值模拟。本文以非饱和土壤水分运动理论为基础,针对层状土壤垂直一维入渗特点,通过 SWMS-2D 模型对均质土和层状土的土壤水分运动规律进行模拟分析,采用已有文献资料对模拟结果进行分析验证。以期借助数值模拟方法,进一步认识层状土垂直一维入渗土壤水分运动机理。

1 数学模型

1.1 基本方程

不考虑土壤内部的空气阻力、温度以及蒸发对入渗的影响,假定各层土壤均质、各向同性,以及各层土壤水分运动参数的表达形式相同而有不同系数值的情况下,可通过一维非饱和土壤水分运动基本方程的定解进行数值模拟。

$$C(\varphi_m) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\varphi_m) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\varphi_m)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $C(\varphi_m)$ ——比水容重 (cm^{-1}); φ_m ——基质势 (cm); φ ——总水势 (cm); t ——入渗时间 (min); $K(\varphi_m)$ ——非饱和导水率 (cm/min); z ——垂向坐标 (cm),规定 z 向上为正。

基本方程中涉及的非饱和土壤基质势 φ_m ,非饱和导水率 $K(\varphi_m)$ 与含水率 $\theta(h)$ 的关系采用 Van Genuchten(VG)模型^[16]进行拟合,即

$$\theta(\varphi_m) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (1 + |\alpha \varphi_m|^n)^m \quad (2)$$

$$K(\varphi_m) = K_s \frac{\{1 - |\alpha \varphi_m|^{n-1} [1 + |\alpha \varphi_m|^n]^{-m}\}^2}{[1 + |\alpha \varphi_m|^n]^{ml}} \quad (3)$$

式中: $\theta(h)$ ——土壤含水率 (cm^3/cm^3); θ_r ——土壤残余含水率 (cm^3/cm^3); α, n 和 m ——土壤物理特性有关的拟合参数 (cm); K_s ——土壤饱和导水率 (cm/min); $n > 1$; $m = 1 - 1/n$; $l = 0.5$,其他符号意义同上。

累积入渗量的表达式为

$$I(t) = \int_0^L [\theta(z, t) - \theta(z, 0)] dz \quad (4)$$

式中: $I(t)$ ——累积入渗量 (cm); L ——土层厚度(比湿润锋所湿润的范围为大) (cm); $\theta(z, t)$ —— t 时刻 z 位置土壤含水率分布 (cm^3/cm^3); $\theta(z, 0)$ ——初始含水率分布 (cm^3/cm^3)。

1.2 初始条件

假定试验开始时土壤水分剖面为稳定剖面,计算域内各点土水势相等。

$$\varphi = \varphi_0 \quad (0 \leq z \leq L, t = 0) \quad (5)$$

式中: φ_0 ——土壤的初始总水势 (cm)。

1.3 边界解条件

假定侧向径流微弱可忽略不计。试验中,保持土柱在恒定水头情况下入渗。

$$\varphi = h_0 \quad (z = 0, t > 0) \quad (6)$$

$$\varphi = \varphi_0 \quad (z = L, t > 0) \quad (7)$$

式中: h_0 ——水头高度 (cm)。

1.4 数值求解方法

利用二维有限元土壤水分运动模拟软件 SWMS-2D^[17]进行数值求解。将模拟计算区域剖分为长方形单元,其中在水面处及分层面,由于水流量变化梯度较大,加密网格,而在离水面较远处,适当减小网格密度。考虑到田间实际和计算精度要求,有限元计算区域的深度为 60 cm,半径为 10 cm。深度间隔先密后疏,宽度间隔为 2.5 cm。

数值模拟中土壤的 Van Genuchten 模型参数取自参考文献[8](见表 1)。

表 1 试验土壤的 VanGenuchten 模型参数

土壤质地	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	残余含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α/cm	n	l	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
壤土	1.40	0.05	0.371 7	0.012 0	1.680 0	0.5	0.034
砂土	1.75	0.01	0.298 0	0.400 9	1.521 9	0.5	2.500

注: α, n 为与土壤物理特征有关的拟合参数; l 为经验系数。

2 模拟求解与验证

2.1 试验设计与材料

为验证模拟结果,采用参考文献[8]的试验资料。在直径为 18.3 cm,高度为 60 cm 的有机玻璃柱内进

行层状夹砂土柱薄层积水入渗试验和相同条件下均质土的入渗试验。

按照均质土柱(壤土)和层状土柱(壤土+砂土+壤土)高度均为 60 cm,层状土柱中夹砂层埋深 22.5 cm,厚度 20 cm 的要求,将壤土干体积质量 $1.40 \text{ g}/\text{cm}^3$,

砂土干体积质量 1.75 g/cm^3 分层装土,层间打毛。试验过程中采用马氏瓶供水以保持土柱在恒定水头 2 cm 情况下入渗,同时记录不同时刻马氏瓶读数,并绘出湿润锋运移曲线。有机玻璃柱内插入土壤水分传感器探头(型号 ECH₂O),连接数据采集器用以观测记录土壤含水率随时间的变化。有机玻璃柱下面部分为排气、排水室。设置侧面排气孔(在湿润锋到达该处前封闭该排气孔,以防漏水)和底部排气以减少禁锢空气对入渗的影响。

2.2 土壤水分运动模拟与验证

用 SWMS-2D 软件求解土壤剖面含水率、土壤湿润锋运移值和累积入渗量及入渗速率等指标,并将模拟结果与试验结果进行对比验证,结果见图 1—4。

2.2.1 土壤入渗率的数值模拟结果分析与验证 土壤入渗率表示单位时间内地表单位面积土壤的入渗水量,反映土壤入渗能力随入渗时间的变化强度。图 1 为层状土柱与均质土柱的入渗率数值模拟值与实测值的比较。

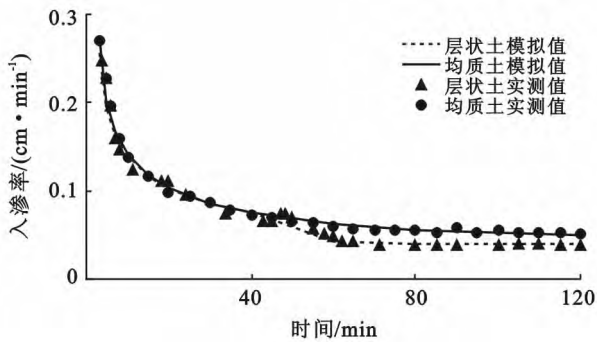


图 1 入渗率数值模拟值与实测值对比

由图 1 可以看出,当入渗锋面处于砂土夹层以上的土层范围内时,层状土入渗率的变化规律和趋势与均质土基本一致,呈逐渐减小趋势。当湿润锋到达砂土夹层界面后(入渗历时约 55 min),层状土入渗率波动较大,相对均质土呈加速下降趋势,表现出小于均质土入渗率的现象。随着入渗时间的增加,层状土入渗率逐渐趋于稳定,但稳渗率明显小于相应的均质土瞬时入渗率。

分析图 1 中层状土柱与均质土柱入渗率的模拟值变化规律和趋势。可知,各时刻的数值模拟结果与实测结果基本吻合。表明,SWMS-2D 软件能较好的模拟层状土和均质土入渗率的变化过程。说明建立的数学模型符合物理模型的特性,数值模拟计算具有较好的稳定性和准确性。

2.2.2 土壤累积入渗量的数值模拟结果分析与验证

分别模拟层状土和均质土累积入渗量变化规律,并与实测值进行比较如图 2 所示。

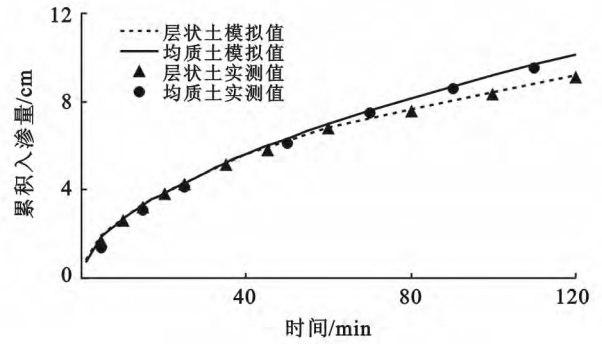


图 2 累积入渗量数值模拟值与实测值对比

由图 2 可以看出:当入渗锋面未到达砂层之前,层状土入渗水量的变化符合一般均质土的非线性变化过程,当入渗锋面到达砂层后(入渗历时约 55 min),入渗水量开始减小,表现出一定的减渗作用。反映在累积入渗量随时间变化曲线上出现明显转折,并转为线性变化。

分析图 2 中层状土柱与均质土柱累积入渗量的模拟值变化规律和趋势。可知,各时段的数值模拟结果与实测结果基本吻合。这表明 SWMS-2D 软件能较好的模拟层状土和均质土累积入渗量的变化过程。说明所建模型是合理的,可以准确反映层状土和均质土垂直一维入渗特性。

2.2.3 土壤湿润锋的数值模拟结果分析与验证

分别模拟层状土和均质土湿润锋位置随时间变化关系,并与实测值进行比较(如图 3 所示)。

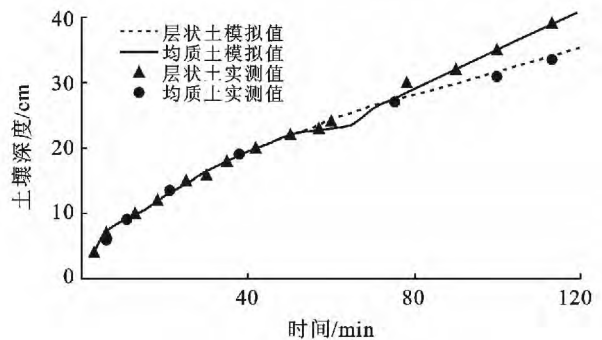


图 3 湿润锋数值模拟值与实测值对比

由图 3 可以看出,当入渗锋面未到达砂层之前,层状土的湿润锋变化符合一般均质土湿润锋的变化过程,为一连续性函数,当入渗锋面在重力势、压力势和基质势的共同作用下继续向下迁移至砂土上界面时(入渗历时约 55 min),层状土入渗的湿润锋不再符合此特征,其锋面不在下移,此时随着入渗水量的补给,界面上层的土壤含水量开始逐渐增加,相应的基

质势亦逐步增大。当界面处的土壤含水量增大到某一含水量状态时,入渗锋面才开始穿过界面继续进入下层。之后,层状土湿润锋移动速率明显加快并呈线性变化。

分析图 3 中层状土柱与均质土柱湿润锋运动的模拟值变化规律和趋势。可知,各时段的数值模拟结果与实测结果基本吻合。这表明 SWMS-2D 软件能较好的模拟层状土和均质土湿润锋运动的变化过程。

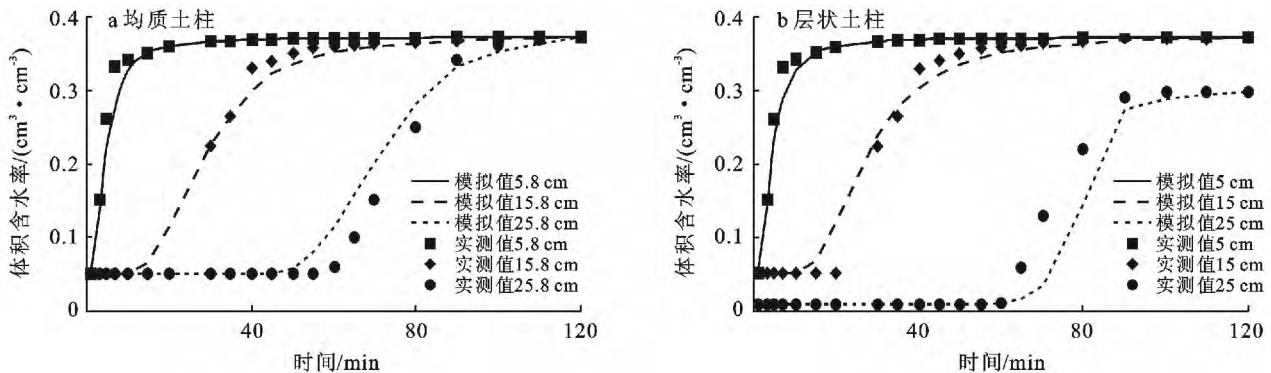


图 4 土壤含水率数值模拟值与实测值对比

由图 4 可以看出,随着入渗过程的进行,从上至下各土层含水率依次出现陡升并趋于平稳的现象。对比图 3 和图 4 可以发现,出现陡升的时刻与湿润锋经过的时刻基本是一致的。均质土柱中,土壤含水率趋于稳定的升高值接近于壤土的饱和含水率。层状土柱中,砂土中内部探头测定的含水率略低于砂土的饱和含水率,可能是因为湿润锋经过砂土层后,砂土层并未达到饱和。

分析图 4 中层状土柱与均质土柱各层土壤含水率的模拟值变化规律和趋势可以发现,在土壤水分饱和区模拟值与实测值误差较小,而在土壤水分湿润区,试验点误差较大,可能是因为土体不够均匀,传感器系统误差等测量误差而造成的,但总体误差较小。这表明 SWMS-2D 软件能较好地模拟层状土和均质土土壤含水率的分布规律。分析证明所建模型是正确的,可以精确反映层状土和均质土垂直一维入渗土壤水分运动规律。

3 结论

为分析对比均质土和层状土土壤水分的运动状况,依据非饱和土壤水分运动理论,借助计算机数值模拟方法,应用 SWMS-2D 软件对均质土和层状土垂直一维入渗进行数值模拟。应用土壤剖面含水率、土壤湿润锋运移值、累积入渗量及入渗速率等指标的实测值与模拟值对模型进行了分析验证,结果表明,

说明所建模型是可靠的,可以准确反映层状土和均质土垂直一维入渗土壤水分运动规律。

2.2.4 土壤含水率的数值模拟结果分析与验证 参考文献[8]试验资料中采用内部探头对土壤含水率进行测定,应用过程中未对传感器测定结果进行校正,故本文对内部探头测定数据进行修正。均质土和层状土条件下,室内试验及数值模拟得到的土壤含水率对比如图 4 所示。

数值计算结果较好地吻合于实测数据,所提出的数值模型既适用于均质土壤,也适用于成层土壤。说明所建模型能比较真实地反映均质土和层状土垂直一维入渗土壤水分运动情况。

试验和模拟均表明,层状土具有良好的阻水作用,可增加上层土体的持水能力,而且还具有一定减渗性,湿润锋在交界层上下表面出现不连续现象。即湿润锋在到交界层后不久,入渗率及湿润锋运移速度明显减小,从而使整个入渗过程由非线性阶段转为线性的稳渗阶段。

文中所建模型及采用 SWMS-2D 软件进行求解是可行的,采用数值方法模拟层状非饱和土壤水分运动具有较高的可靠性。因此,本文研究成果为采用数值模拟方法,进一步研究不同土壤质地、容重、入渗水头、初始含水率和层状厚度等条件下的层状土的土壤水分分布和入渗特性等提供重要依据。

[参 考 文 献]

- [1] Miller D E, Gardner W H. Water infiltration into stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(2): 115-119.
- [2] 王全九,汪志荣,张建丰,等. 层状土入渗机制与数学模型[J]. 水利学报, 1998, 29(S1): 76-79.
- [3] Hill D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soils[J]. Soil Science Society of America Journal,

- 1972,36(5):697-702.
- [4] Hillel D, Baker R S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. Soil Science, 1988,146(1):51-56.
- [5] 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(1):104-110.
- [6] 张建丰,王文焰,汪志荣,等. 具有砂质夹层的土壤入渗计算[J]. 农业工程学报,2004,20(2):27-30.
- [7] 郑燕燕,冯绍元,霍再林. 沟灌条件下层状土壤入渗与排水实验研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(5):30-33.
- [8] 王春颖,毛晓敏,赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(11):61-67.
- [9] 宋日权,褚贵新,张瑞喜. 绿洲农田表层掺砂、覆砂对土壤水分入渗的影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2010,28(3):360-365.
- [10] 李毅,任鑫. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):485-490.
- [11] 王金平. 蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟[J]. 水利学报,1989,10(5):49-54.
- [12] 任利东,黄明斌,樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报,2013,29(19):105-111.
- [13] 聂卫波,马孝义,王术礼. 一维土壤入渗特性数值模拟[J]. 灌溉排水学报,2009,28(3):53-57.
- [14] 陆垂裕,裴源生. 适应复杂上表面边界条件的一维土壤水运动数值模拟[J]. 水利学报,2007,38(2):136-142.
- [15] 范严伟,赵文举,冀宏. 垂直一维入渗土壤水分分布与入渗特性数值模拟[J]. 兰州理工大学学报,2012,38(2):51-55.
- [16] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [17] Simunek J, Vogel T N, Van Genuchten M T. The SWMS-2D code for simulating water and solute transport in two dimensional variably saturated media-Version 1.2[R]. Research Report 132, US Salinity Lab., Agric. Res. Serv. USDA, Riverside, California, USA, 1994.

(上接第 209 页)

- [12] 韩书成,濮励杰. 江苏土地综合承载能力空间分异研究[J]. 水土保持通报,2009,29(5):146-150.
- [13] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia[J]. Ecological Economics, 2001,37(2):229-255.
- [14] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999,29(3):375-390.
- [15] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报,2000,55(5):607-616.
- [16] Meadows D H, Goldsmith E I, Meadow P. The limits to growth[M]. London: Earth Island Limited, 1972.
- [17] 王建洪,任志远,苏雅丽. 西安市土地承载力定量评价与动态分析[J]. 水土保持通报,2012,32(2):233-236.
- [18] 周道玮,刘华伟,孙海霞,等. 中国肉品供给安全及其生产保障途径[J]. 中国科学院院刊,2013,28(6):733-739.
- [19] 李波,张俊飏,李海鹏. 我国中长期粮食需求分析及预测[J]. 中国稻米,2008(3):23-25.