

层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟

王春颖, 毛晓敏^{*}, 赵 兵

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究夹砂层对入渗强度、湿润锋行进和沿程土壤含水率变化的影响, 进行了室内层状夹砂土柱一维薄层积水入渗试验和相应情况下均质土柱的对照试验。结果表明, 当湿润锋到达夹砂层上界面后, 层状夹砂土柱的入渗过程与均质土入渗表现出明显不同。在湿润峰穿过夹砂层上界面时入渗率有较大波动, 且最终进入稳渗阶段, 其稳渗率明显小于同时刻均质土柱入渗率; 当湿润锋穿过夹砂层后, 夹砂层内的土壤含水率明显小于其饱和含水率。根据试验和分析, 建立了针对层状夹砂土入渗的 S-Green-Ampt 模型, 该模型可以较准确地反映层状夹砂土柱积水入渗的机理和更好地模拟其入渗过程。

关键词: 土壤, 水分, 入渗, 积水入渗, 层状夹砂土柱, Green-Ampt 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.011

中图分类号: S271

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0061-07

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.

Wang Chunying, Mao Xiaomin, Zhao Bing. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 61—67. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

层状土是自然界中普遍存在的土壤结构。国内外学者在均质土壤一维垂直入渗研究的基础上, 对非均质层状土壤的入渗规律进行了大量的试验和理论研究^[1-6]。研究结果表明层状土壤的入渗与均质土壤入渗有明显差异。尤其当入渗水流从细质土进入粗质夹砂层后, 由于下层土壤质地和导水性质与上层土壤不同, 整个入渗过程可能由非线性阶段转变为稳渗阶段, 稳渗率比相同时刻均质土的入渗率减小。因此与均质土入渗过程相比, 夹砂层在一定时间段内可起到减渗作用。

以往的试验研究多是针对入渗率进行的, 对湿润锋行进、土壤含水率变化过程的观测和分析较少。本文针对积水入渗情况下均质土和层状夹砂土(含较粗质砂土夹层)下的入渗过程、湿润锋行进和土柱剖面土壤水分变化规律进行了试验观测, 在均质土 Green-Ampt 模型^[7](本文简称 G-A 模型)和非均匀土壤剖面的 Green-Ampt 模型^[8](本文简称 H-G-A 模型)及计算层状夹砂土稳渗率的修正的 Green-Ampt 模型^[9]的基础上, 建立了针对层状夹砂土的 S-Green-Ampt 模型(本文简称 S-G-A 模型), 对层状夹砂土影响下的入渗规律进行了模拟分析。

1 试验设计与方法

进行了层状夹砂土柱薄层积水入渗试验, 为便于对

照, 同时进行了相同条件下均质土的入渗试验。试验装置见图 1。采用马氏瓶固定水头供水并进行入渗量的测量。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。

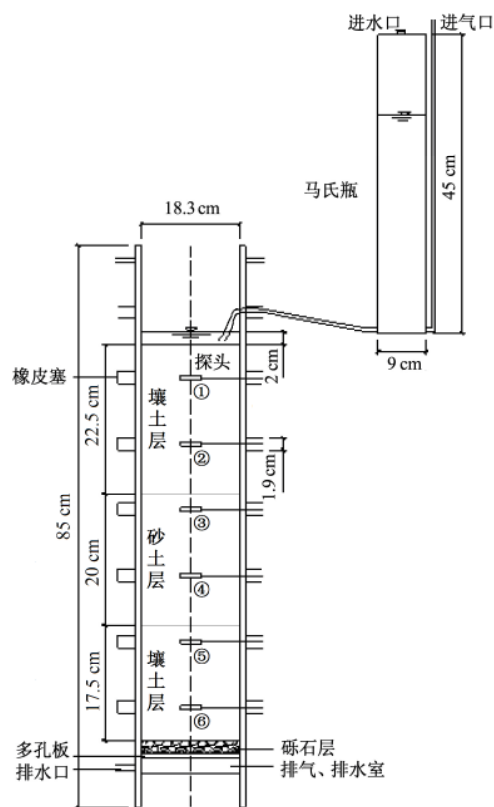


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Sketch map of the experiment equipments

收稿日期: 2010-01-24 修订日期: 2010-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50979105); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(07-0814); 北京市科技计划课题(D090409004009004)

作者简介: 王春颖(1987—), 女, 内蒙古赤峰人, 主要研究方向为水资源与水环境。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: wangchunying1987@yahoo.com

^{*}通信作者: 毛晓敏(1971—), 女, 山东菏泽人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源及农业水土工程研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: maomiaomin@tsinghua.org.cn

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。壤土和砂土的颗粒分析结果见表 1。

表 1 壤土和砂土颗粒组成
Table1 Particle analysis of loam and sand

	小于某粒径/mm	质量分数/%
壤土	2	100
	1	99.2
	0.5	97.8
	0.25	95.7
	0.05	55
	0.01	18
	0.005	14
砂土	0.001	9
	3	100
	2	99.1
	1	95.9
	0.5	83.5
	0.25	42.9
	0.15	17.2
	0.1	11.7
	0.075	7.9

试验步骤：1）按照壤土干体积质量 1.4 g/cm^3 、砂土干体积质量 1.75 g/cm^3 分层装土，层间打毛。土柱装好后，调整马氏瓶高度，保证土柱在恒定水头 2 cm 情况下开始入渗。2）试验过程中记录不同时刻湿润锋的位置和马氏瓶读数，同时通过数据采集器自动记录土壤水分传感器探头处土壤含水率随时间变化。3）当排水室有水流出时，试验结束。由于试验持续时间较短，试验分析中忽略了蒸发对入渗过程的影响。

2 试验结果与分析

2.1 土壤入渗率变化

实测均质土柱与层状土柱的入渗率变化规律如图 2 所示。

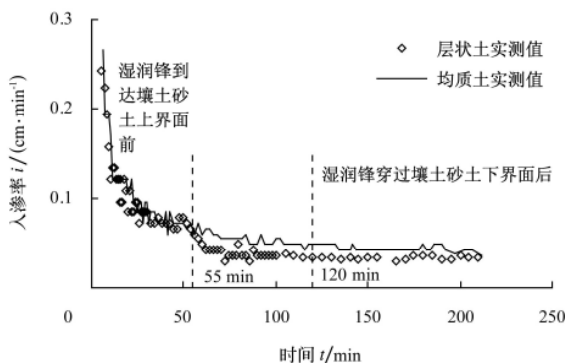


图 2 入渗率随时间变化
Fig.2 Infiltration rate change with time

由图 2 可以看出，在入渗开始时二者入渗率均较大且呈迅速下降趋势。层状土入渗的湿润峰到达夹砂层上界面（入渗约 55 min 左右）之前，二者随时间的变化趋势基本一致（图中入渗率短时间内的上下波动是由观测时刻间隔太短引起的马氏瓶读数误差造成的）。湿润锋到

达夹砂层上界面至湿润锋穿过上界面期间，层状土入渗率波动较大，而均质土入渗率仍呈持续下降趋势。层状土入渗约 62 min 后入渗率趋于稳定，且明显小于相应时刻均质土入渗率。至 120 min 时湿润锋到达夹砂层下界面时，入渗率也未产生明显波动。在层状土入渗过程中，这种入渗率减小且趋于常数的现象，与以往的试验和分析相一致^[10-11]。

2.2 累积入渗量变化

实测均质土柱与层状土柱的累积入渗量变化规律如图 3 所示。由图 3 可以看出，入渗开始至 55 min 左右（湿润锋到达夹砂层上界面），层状土柱与均质土柱累积入渗量随时间变化基本一致。在入渗初期入渗率比较大，累积入渗量曲线斜率比较大，时段内的累积入渗量相应增加较快，湿润锋穿过夹砂层上界面后层状土柱入渗率接近常数，累积入渗量随时间变化趋于线性关系。对比分析表明，湿润锋穿过夹砂层上界面后，相应时段内层状土柱累积入渗量小于均质土柱累积入渗量，说明土柱中设置的夹砂层具有减渗性，可以使下渗水量减少。

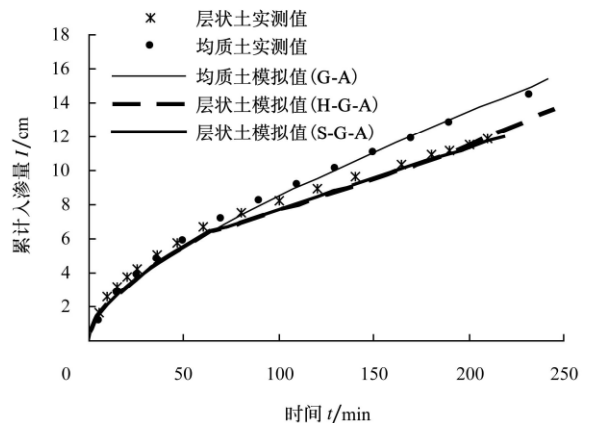


图 3 实测与模拟累积入渗量随时间的变化
Fig.3 Measured and simulated cumulative infiltration

2.3 湿润锋行进

实测均质土柱与层状土柱湿润锋位置随时间变化关系如图 4 所示。由图可以看出入渗开始至 55 min 左右时均质土柱与层状土柱中湿润锋的前进速度基本一致。55~62 min 之间，层状土柱中湿润锋行进稍有降低，表明湿润锋在进入夹砂层时稍有停滞。之后，移动速率明显变快，在图中表现为斜率增加。120 min 左右时湿润锋穿出夹砂层，移动速率放慢，使得其后的均质土柱与层状土柱中湿润锋到达的深度逐渐接近。

2.4 土壤含水率变化

土壤水分传感器实测均质土柱与层状土柱内部探头处土壤含水率随时间变化曲线分别如图 5 所示。

虽然土柱按照统一的设计土壤初始含水率装土，但由于受到人为因素及外界环境影响以及传感器探头的系统误差，导致土柱内部各探头记录的初始含水率并不一致。同时，试验过程中的实测值也与烘干法实测值有一定误差。因此，在实际应用中宜对传感器测量结果进行校正。

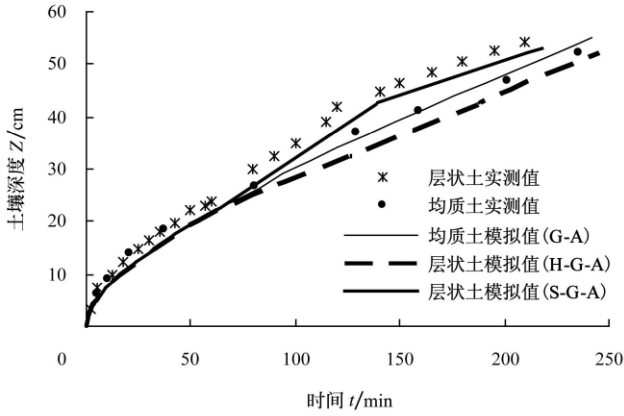
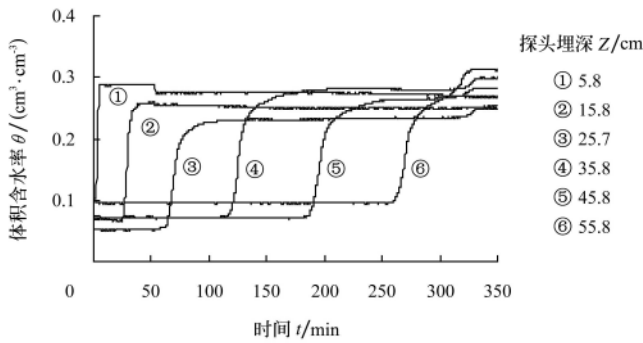
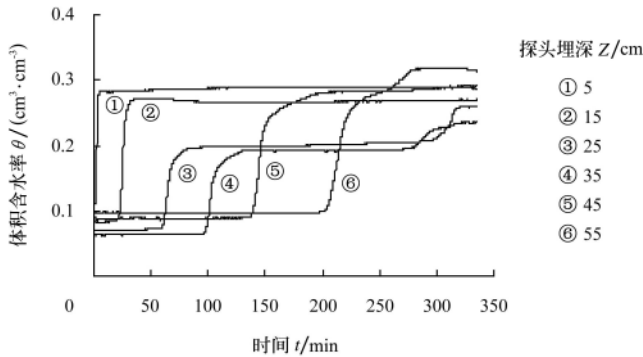


图 4 实测与模拟湿润锋位置随时间变化

Fig.4 Measured and simulated advance of the wetting front



a. 均质土柱



b. 层状夹砂土柱

图 5 土柱传感器探头实测含水率随时间变化

Fig.5 Measured soil water content variation with time at the location of the probes

由图 5 可见,随着入渗的进行,从上至下各土层含水率依次出现骤升并趋于平稳的现象。出现骤升的时刻与湿润锋经过的时刻是一致的。层状土柱中埋于砂土中的探头 3、4 含水率的升高值明显小于其饱和含水率,说明湿润锋经过砂土层后,砂土层并未达到饱和。在两土柱入渗进行 300 min 左右时,此时湿润锋已经到达土柱底部滤层(砾石层),含水率已趋于稳定的探头由下至上又依次出现含水率增大趋势。其原因可能是砾石层具有很低的进水吸力和很强的阻水作用,湿润锋到达该处时受到阻碍停滞使得上层土壤贮水量增加。这也说明湿润锋经过的上层土壤并未完全达到饱和,仍有禁锢空气的存

在。相比壤土层,层状土入渗中砂土层(探头 3、4)的含水率增加则要大多得多,这是因为砂土层在湿润锋经过后并未达到饱和,因此有更大的贮水空间。对比湿润锋到达夹砂层上界面后,壤土层中与该界面距离最近的探头 2 记录的含水率值未出现增加,说明砂土层的进水吸力明显大于砾石层,其阻水作用较小。

3 基于 Green-Ampt 模型的层状夹砂土入渗模型

3.1 试验结果讨论分析和建模依据

3.1.1 湿润锋进入夹砂层后入渗率的确定

在湿润锋到达夹砂层上界面以前,入渗率和土壤含水率变化可以采用经典的均质土 Green-Ampt 模型进行描述。当湿润锋到达夹砂层上界面时,由于壤土的进水吸力大于砂土的进水吸力,湿润锋处的基质吸力尚不能满足砂土进水的要求,因此湿润锋在此出现停滞(如图 4 示)。随着入渗水量的补给,湿润锋处的基质吸力不断降低,直到达到砂土的进水吸力时,湿润锋开始进入砂土层。

此后入渗率如何变化呢?仍取上层壤土作为研究对象,此时壤土层基本达到饱和(忽略禁锢空气的存在)根据达西定律

$$i = \overline{K}_{\text{壤}}(H + D_{\text{壤}} + S_{\text{上界面}})/D_{\text{壤}} \approx K_{s,\text{壤}}(H + D_{\text{壤}} + S_{\text{上界面}})/D_{\text{壤}} \quad (1)$$

式中, i 为土壤入渗率, cm/min; $\overline{K}_{\text{壤}}$ 为壤土层的平均导水率, cm/min; $K_{s,\text{壤}}$ 为壤土层的饱和导水率, cm/min; H 为土壤表层积水深度, cm; $D_{\text{壤}}$ 为上部壤土层厚度, cm; $S_{\text{上界面}}$ 为壤土和砂土交界面处的基质吸力, cm。

当湿润锋穿过夹砂层上界面后,界面处的基质吸力 $S_{\text{上界面}}$ 应当小于砂土湿润锋处的基质吸力 $S_{\text{砂}f}$ (因为被湿润土体的含水率大于湿润锋处的含水率),但由于砂土层并未达到饱和,所以仍大于零,即存在 $0 < S_{\text{上界面}} < S_{\text{砂}f}$ 。亦即进入砂土层后的稳定入渗率 i_{st}

$$K_{s,\text{壤}}(H + D_{\text{壤}} + S_{\text{砂}f})/D_{\text{壤}} < i_{st} < K_{s,\text{壤}}(H + D_{\text{壤}})/D_{\text{壤}} \quad (2)$$

利用实测稳定入渗率(取 62 min 至 120 min 期间的入渗率平均值) $i_{st} = 0.0377$ cm/min, $K_{s,\text{壤}}$ 为 0.034 cm/min (由于实际积水入渗中湿润锋经过后的壤土仍有封闭空气的存在,所以此 $K_{s,\text{壤}}$ 采用均匀壤土土柱薄层积水情况下实测的稳定入渗率代替),反推 $S_{\text{上界面}} = 0.45$ cm,只相当于上部壤土层厚度 $D_{\text{壤}}$ 的 2%,因此可忽略 $S_{\text{上界面}}$ 的影响,取稳渗率

$$i_{st} = K_{s,\text{壤}}(H + D_{\text{壤}})/D_{\text{壤}} \quad (3)$$

这种近似计算方法与文献中采用饱和层的概念推出的公式是一致的^[12],该文献中采用数值模拟进行验证,也证明此公式计算误差较小。Parlange 和 Hill 认为若表面积水深度可忽略的话,入渗率接近上层细砂的饱和导水率^[11],与公式(2)结论相符。王全九等提出计算层状夹砂土稳渗率的修正的 Green-Ampt 模型(M-Green-Ampt 模型): $i_{st} = K_{s,\text{壤}}(1 + H_w/D_{\text{壤}})$,式中 H_w 为下层砂的进水值^[9]。若认为 H_w 近似于砂土湿润锋处的基质吸力 $S_{\text{砂}f}$,则该公式相当于本文公式(2)的上限。

3.1.2 湿润锋进入夹砂层后夹砂层含水率的确定

取砂土层作为研究对象。当湿润锋到达砂土层后, 根据 Green-Ampt 模型

$$i = K_{\text{砂}}(L + S_{\text{砂}f} - S_{\text{上界面}})/L \quad (4)$$

式中, $K_{\text{砂}}$ 为湿润砂土层的平均导水率, cm/min; L 为湿润锋到砂土层上界面的距离, cm; $S_{\text{砂}f}$ 为砂土层湿润锋处平均基质吸力, cm。

设湿润锋经过后被湿润砂土层的含水率是均匀一致的, 为 $\theta_{st, \text{砂}}$, 则 $K_{\text{砂}} = K(\theta_{st, \text{砂}})$ 。由公式 (4) 可见随着 L 的增大, $S_{\text{砂}f} - S_{\text{上界面}}$ 较小可以忽略, 因此得到稳定入渗率 i_{st}

$$i_{st} = K_{\text{砂}}(L + S_{\text{砂}f} - S_{\text{上界面}})/L \approx K_{\text{砂}} = K(\theta_{st, \text{砂}}) \quad (5)$$

结合公式 (3) 和 (5), 可以采用如下关系确定砂土含水率 $\theta_{st, \text{砂}}$

1) 首先由公式 (3), 求得 i_{st} 。

2) 再由公式 (5), 根据导水率和土壤含水率的函数关系, 反求 $\theta_{st, \text{砂}}$ 。

例如本试验中, 由公式 (3), 得 $i_{st} = 0.037 \text{ cm/min}$ 。砂土导水率和土壤含水率的函数关系根据 VGM 模型^[13] 确定 (参数如表 2 示)。由

$$i_{st} = K_{\text{砂}} = K(\theta_{st, \text{砂}}) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2$$

$$S_e = \frac{\theta_{st, \text{砂}} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

通过试算法反求 $\theta_{st, \text{砂}}$, 可得 $\theta_{st, \text{砂}} = 0.2089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

式中, K_s 、 θ_s 、 θ_r 、 m 、 l 分别为 VGM 模型中的饱和导水率、饱和含水率、残余含水率和经验参数, 具体见表 2。

表 2 土壤水力特性参数
Table 2 Soil hydraulic properties

土壤质地	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	α	n	m	l
壤土	0.05	0.3717	0.034	0.012	1.68	0.4048	0.5
砂土	0.01	0.298	2.5	0.4009	1.5219	0.3429	0.5

3.1.3 上述推论与实测值的对比

砂土和壤土的水力特性可根据土样离心机试验结果进行拟合和调试得到, 采用 VGM 模型得到相应土壤水力特性参数见表 2。

根据土壤探头传感器实测值的校正结果, 湿润锋经过后的砂土土壤含水率为 $0.2105 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 与 3.1.2 推论得到的 $\theta_{st, \text{砂}} = 0.2089 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 接近。而实测饱和含水率为 $0.2975 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 也说明砂土层并未达到饱和, 这与前人的研究是一致的^[11]。上述推论得到 $i_{st} = K_{\text{砂}} = 0.037 \text{ cm/min}$, 而根据砂土土壤水力特性函数关系计算可得实际含水率对应导水率 0.0393 cm/min , 实测稳渗率 0.0377 cm/min , 3 个值接近。这说明以上提出的夹砂层稳渗率 i_{st} 、导水率 $K_{\text{砂}}$ 以及含水率 $\theta_{st, \text{砂}}$ 之间的关系是合理的。

由公式 (3), 可知进入砂土层后的稳定入渗率 i_{st} 应稍大于壤土的饱和导水率 $K_{s, \text{壤}}$ 。从试验结果来看, 湿润锋穿过上界面后的稳定入渗率为 0.0377 cm/min , 确实稍

大于壤土的饱和导水率 0.0340 cm/min , 且接近 $K_{s, \text{壤}}(H + D_{\text{壤}})/D_{\text{壤}} = 0.037 \text{ cm/min}$ 。因此, 本文的计算方法误差是相当小的。

3.2 模型描述

由上述分析可知, 当湿润锋穿过夹砂层上界面后, 若界面处的基质吸力 $S_{\text{上界面}}$ 较小时, 采用公式 (3) 进行稳渗率计算的误差较小。在这种情况下建立基于 Green-Ampt 的层状夹砂土入渗模型 (S-Green-Ampt 模型, 简称 S-G-A 模型) 如表 3 所示。为便于对照, 表中同时列出了均质土入渗的 Green-Ampt 模型, 以及韩用德等得到的非均匀土壤剖面的 Green-Ampt 模型 (H-Green-Ampt 模型)。

3.3 模拟结果及讨论

本文利用以上 3 种模型 (表 3) 分别对实测均质土壤和层状土壤入渗过程进行了模拟分析。

表 3 Green-Ampt 模型、H-Green-Ampt 模型和 S-Green-Ampt 模型对比
Table 3 Comparison of Green-Ampt model, H-Green-Ampt model and S-Green-Ampt model

均质土入渗的 Green-Ampt 模型	非均匀土壤入渗的 H-Green-Ampt 模型	层状夹砂土入渗的 S-Green-Ampt 模型
入渗率 表达式 $i = K_s(Z_f + S_f + H)/Z_f$	$i = \overline{K_s}(Z_f + S_f + H)/Z_f$	湿润锋进入夹砂层前: $i = K_{s, \text{壤}}(Z_f + S_f + H)/Z_f$ 湿润锋进入夹砂层后: $i = K_{s, \text{壤}}(D_{\text{壤}} + H)/D_{\text{壤}}$
累计入渗 量表达式 $I = (\theta_s - \theta_0)Z_f$	$I = \sum_{j=1}^M D_j(\theta_{s, j} - \theta_{0, j}) + (Z_f - \sum_{j=1}^M D_j)(\theta_{s, M+1} - \theta_{0, M+1})$	湿润锋进入夹砂层前: $I = (\theta_{s, \text{壤}} - \theta_{0, \text{壤}})Z_f$ 湿润锋进入夹砂层后再次进入壤土层前: $I = (\theta_{s, \text{壤}} - \theta_{0, \text{壤}})D_{\text{壤}} + (\theta_{st, \text{砂}} - \theta_{0, \text{砂}})(Z_f - D_{\text{壤}})$ 湿润锋再次进入壤土层后: $I = (\theta_{s, \text{壤}} - \theta_{0, \text{壤}})D_{\text{壤}} + (\theta_{st, \text{砂}} - \theta_{0, \text{砂}})D_{\text{砂}} + (\theta_{s, \text{壤}} - \theta_{0, \text{壤}})(Z_f - D_{\text{壤}} - D_{\text{砂}})$

接上页

均质土入渗的 Green-Ampt 模型

非均匀土入渗的 H-Green-Ampt 模型

层状夹砂土入渗的 S-Green-Ampt 模型

湿润锋面
深度 - 时间
表达式

$$t = \frac{\theta_s - \theta_0}{K_s} \left[Z_f - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{S_f + H} \right]$$

$$S = t - t_M = \frac{\theta_{s,M+1} - \theta_{0,M+1}}{K_s} \left[(Z_f - D) - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{D + S_f + H} \right]$$

湿润锋进入夹砂层前:

$$t = \frac{\theta_{s, \text{壤}} - \theta_{0, \text{壤}}}{K_{s, \text{壤}}} \left[Z_f - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{S_f + H} \right]$$

(当 $Z_f = D_{\text{壤}}$ 时, $t = t_1$)

湿润锋进入夹砂层后再次进入壤土层前:

$$t - t_1 = \frac{(\theta_{st, \text{砂}} - \theta_{0, \text{砂}}) D_{\text{壤}}}{K_{s, \text{壤}} (D_{\text{壤}} + H)} (Z_f - D_{\text{壤}})$$

(当 $Z_f = D_{\text{壤}} + D_{\text{砂}}$ 时, $t = t_2$)

湿润锋再次进入壤土层后:

$$t - t_2 = \frac{(\theta_{s, \text{壤}} - \theta_{0, \text{壤}}) D_{\text{砂}}}{K_{s, \text{壤}} (D_{\text{壤}} + H)} (Z_f - D_{\text{壤}} - D_{\text{砂}})$$

注: i 为入渗率, cm/min; I 为累积入渗量, cm; t 为入渗时间, min; K_s 为土层的饱和导水率, cm/min; \bar{K}_s 为土层有效饱和导水率, cm/min; H 为土壤表层积水深度, cm; Z_f 为湿润锋深度, cm; S_f 为湿润锋面处的平均土壤基质吸力, 本文根据已有研究成果结合实测资料调试得到, cm; D 为土壤土层厚度, cm; $D_{\text{壤}}$ 为试验层状土柱上部壤土层厚度, cm; $D_{\text{砂}}$ 为试验层状土柱夹砂层厚度, cm; θ 为土壤体积分含水率, cm^3/cm^3 ; 下标中的 0, s, st, j, M 分别代表初始状态, 饱和状态, 湿润锋经过后土壤含水率达到稳定的状态, 土壤层次和湿润锋穿过土壤含水率已经趋于稳定的土层数目。

3.3.1 均质土柱入渗过程

采用传统 Green-Ampt 模型 (表 3) 对均质土入渗过程进行了模拟。由于入渗过程中土壤很难达到完全饱和, 故 Green-Ampt 模型中的 θ_s 和 K_s 均略小于理论饱和含水率和饱和导水率。分析试验也发现传感器探头实测 θ_s 与烘干法实测值之间略有差别, 而且土壤趋于稳定的入渗率与采用饱和渗透仪测得的 K_s 有一定差别。模拟中 θ_s 和 K_s 分别采用烘干法实测的饱和含水率和薄层积水下的稳定入渗率表示。

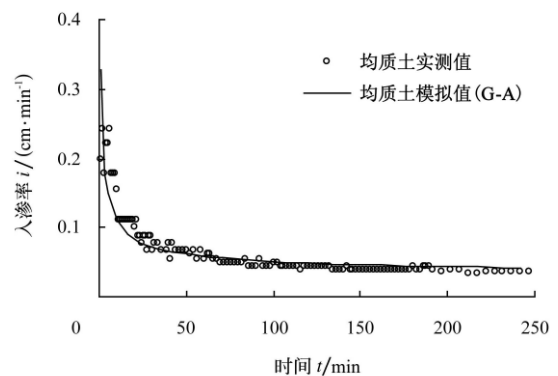
Green-Ampt 入渗模型模拟均质土柱累计入渗量、湿润锋位置和入渗率随时间变化分别如图 3、4 和 6a 所示。可以看出, 模拟值和实测值吻合较好。入渗初期湿润锋行进的模拟值略小于实测值, 这一方面是因为模型中采用的概化土壤水分剖面与实际土壤水分剖面存在差异, 也可能是因为实际入渗过程土壤很难达到真正饱和, 模拟中采用的饱和含水率仍偏大的缘故。总体来说, Green-Ampt 模型可以较好的描述均质土柱薄层积水条件下入渗规律。

3.3.2 层状夹砂土柱入渗过程

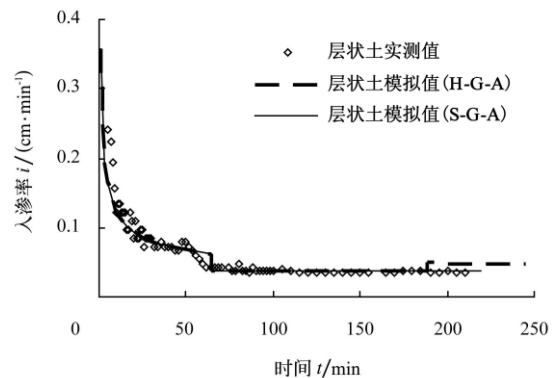
分别采用 H-Green-Ampt 模型和 S-Green-Ampt 模型 (表 3) 对层状夹砂土柱入渗过程进行了模拟。模拟得到的累计入渗量、湿润锋位置和入渗率随时间变化分别如图 3、4 和 6b 所示。可以看到, 相对于均质土 Green-Ampt 模型而言, 两个模型均能较好地描述夹砂层粗砂阻渗的特性。但在描述入渗率变化过程和湿润锋行进方面, S-Green-Ampt 模型模拟结果显著优于 H-Green-Ampt 模型。采用 H-Green-Ampt 对湿润锋随时间变化的模拟值与实测值相差很大 (图 4), 这是因为该模型认为湿润锋经过的土层均达到饱和状态, 而根据上述试验和分析当湿润锋穿过砂土层后砂土并未达到饱和状态。S-Green-Ampt 模型的模拟结果与实测值趋势吻合很好, 但也稍有差别, 这是因为模型中采用的概化土壤水分剖面与实际土壤水分剖面存在差异, 同时模型也未考虑湿润锋在到达上交界面处的停顿。图 6b 对入渗率的模拟中, 当湿润锋穿过砂土层再次进入壤土时, 由于湿润锋处基质吸力发生突

变, 采用 H-Green-Ampt 模型对入渗率模拟值亦发生了突变, 与实测情况不符。而 S-Green-Ampt 模型认为进入夹砂层后即进入稳渗阶段, 所以可以更准确地模拟入渗率变化过程。

M-Green-Ampt 模型详细地描述了层状夹砂土入渗率规律, 认为湿润锋进入砂层后即进入稳渗阶段, 本文所得试验结果和建立的模型与其观点一致。但是 M-Green-Ampt 模型对于累计入渗量和湿润锋行进随时间变化的描述较少, 而利用 S-Green-Ampt 模型可以更全面地反映层状夹砂土壤的入渗规律。



a. 均质土柱



b. 层状夹砂土柱

图 6 实测与模拟入渗率随时间变化
Fig.6 Measured and simulated infiltration rate

3.4 模型验证

选取另一组层状土入渗试验对 S-Green-Ampt 模型的可靠性进行了验证。该入渗试验装置和试验条件同前，选用了不同质地的土壤（壤土 2 和砂土 2），相应的土壤水力特性参数分别如表 4 所示。利用 S-Green-Ampt 模型分别对该组层状夹砂土柱入渗过程进行了模拟，实测与模拟入渗率、累计入渗量、湿润锋位置随时间变化分别如图 7a、7b、7c 所示。由图可以看出 S-Green-Ampt 模型均较好地反映出了层状土入渗规律，说明 S-Green-Ampt

模型在模拟这种具有阻水减渗作用的层状夹砂土薄层积水入渗方面是可靠的。

表 4 第二组试验土壤水力特性参数							
Table 4 Soil hydraulic properties for the 2 nd experiment							
土壤 质地	$\theta_r/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$K_s/$ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	α	n	m	l
壤土 2	0.050	0.400	0.057	0.014	1.58	0.367	0.5
砂土 2	0.005	0.326	0.320	0.400	2.80	0.643	0.5

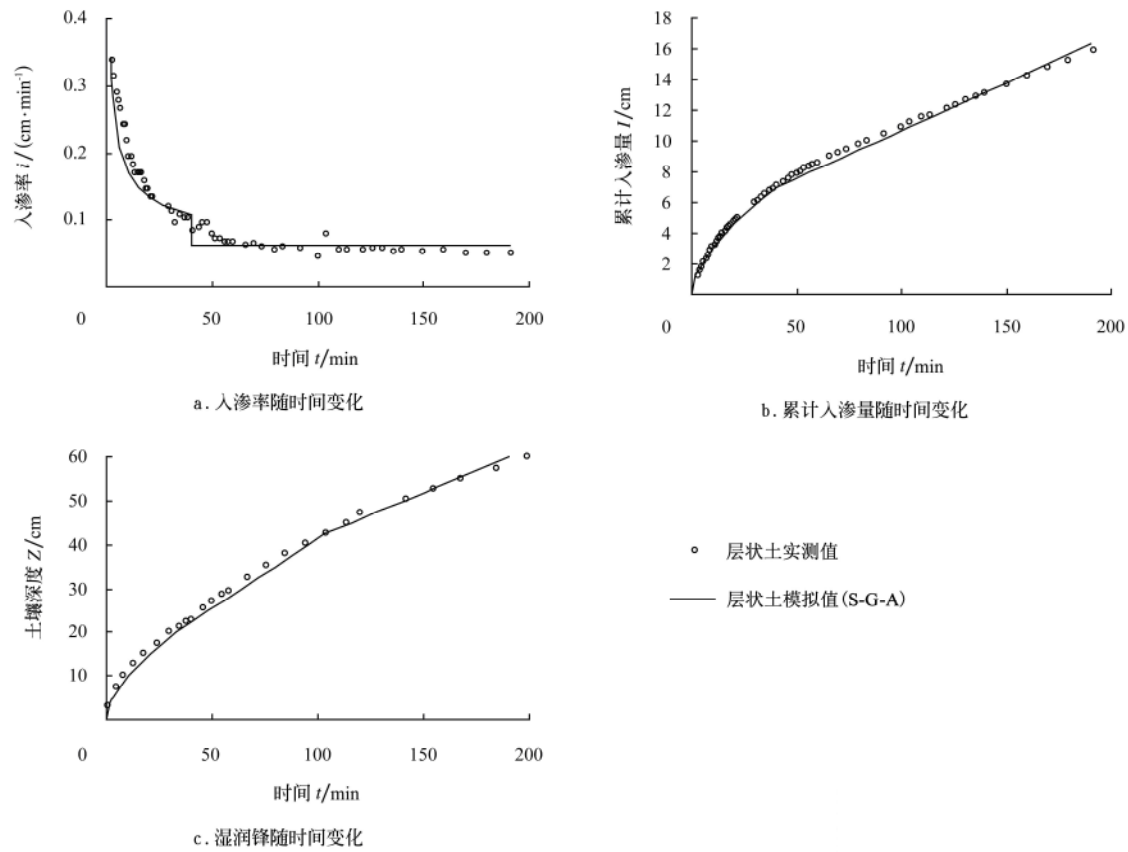


图 7 层状土入渗试验实测与模拟结果对比
Fig.7 Measured and simulated infiltration results of layered soils infiltration

4 结 论

通过室内均质土柱和层状夹砂土柱的一维薄层积水入渗试验，对夹砂层影响下的土壤入渗率、土壤水分变化规律和湿润锋行进过程进行了试验研究、分析和模拟，得出了以下结论：

- 1) 层状夹砂土入渗过程中，当湿润峰穿过夹砂层上界面时入渗率有较大波动，最终进入稳渗阶段，其稳渗率明显小于同时刻均质土入渗率，说明夹砂层具有一定的阻水减渗作用。湿润锋穿过夹砂层上界面时稍有停顿，之后行进明显加快，其经过的砂土层并未达到饱和。
- 2) 当湿润锋穿过夹砂层后，其稳渗率稍大于上层细质壤土的饱和导水率，接近夹砂层砂土的非饱和导水率。
- 3) 根据试验和分析建立了模拟层状夹砂土入渗过程的 S-Green-Ampt 模型，并利用不同质地土壤的层状土入渗试验验证模型的有效性，结果表明该模型可以较好地

描述夹砂层影响下的入渗过程和湿润锋行进。

S-Green-Ampt 模型是在湿润锋进入夹砂层上界面后交界面处达到的基质吸力 $S_{\text{上界面}}$ 较小的情况下建立的。当此基质吸力较大时（如砂土颗粒偏小、吸水性强，与上层壤土性质差别较小等），采用 S-Green-Ampt 模型模拟结果可能误差较大。

层状夹砂土入渗中出现的阻水减渗现象是由于土壤表面的斥水性、禁锢气体等多方面的原因造成的，在此情况下夹砂层也可能有指流出现。由于本文试验条件和时间精力方面的限制，本文仅建立了此情况下的半机理的 S-Green-Ampt 模型，并未对所涉及的物理机制进行更深入地探讨，这方面还有待进一步的研究。

[参 考 文 献]

[1] Colman E A, Bodman G B. Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered

- soils[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1945, 9(C): 3—11.
- [2] Hill D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(5): 697—702.
- [3] Hillel D, Baker R S. A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils[J]. Soil Science, 1988, 146(1): 51—55.
- [4] 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—1110. Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong, et al. Experiment and study on water—tightness and infiltration reduction of sand layer in loess[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(1): 104—110. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王全九, 邵明安, 汪志荣, 等. Green-Ampt 公式在层状土入渗模拟计算中的应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 66—70. Wang Quanjiu, Shao Mingan, Wang Zhirong, et al. Application of green-ampt equation during infiltration in layered soil[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(4): 66—70. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 等. 砂层在黄土中的减渗作用及其计算[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 650—655. Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong, et al. Infiltration reduction effect of sand layer in loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 650—655. (in Chinese with English abstract)
- [7] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [8] 韩用德, 罗毅, 于强, 等. 非均匀土壤剖面的 Green—Ampt 模型[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 31—33. Han Yongde, Luo Yi, Yu Qiang, et al. Green-Ampt model of non-uniform layered soil profile[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 9(1): 31—33. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang Quanjiu, Shao Mingan, Robert Horton. Modified Green-Ampt models for layered soil infiltration and muddy water infiltration[J]. Soil Science, 1999, 164(7): 445—453.
- [10] Miller D E, Carder W H. Water infiltration into stratified soil[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1962, 26: 115—118.
- [11] Parlange J Y, Hill D E. Theoretical analysis of wetting front instability in soils[J]. Soil Science, 1976, 122(4): 236—239.
- [12] 毛晓敏, 尚松浩. 计算层状土稳定入渗率的饱和层最小通量法[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 810—817. Mao Xiaomin, Shang Songhao. Method of minimum flux in saturation layer for calculating stable water infiltration through layered soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 810—817. (in Chinese with English abstract)
- [13] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892—898.

Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition

Wang Chunying, Mao Xiaomin*, Zhao Bing

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Infiltration experiment on soil columns of homogeneous loam and loam with a sand interlayer under ponding conditions were conducted in laboratory. The influence of sand interlayer on infiltration rate, wetting front advancement and the variation of water content along the soil profile was monitored and analyzed. After the wetting front reached the upper interface of the sand interlayer, the infiltration process of the loam with sand interlayer was distinctly different from that of the homogeneous soil, and the infiltration rate varied greatly. Finally a steady infiltration stage reached, and the steady infiltration rate was smaller than that of the homogenous soil. When the wetting front passed the sand interlayer, water content inside this coarse interlayer was less than the saturated water content. According to the observation and analysis, S-Green-Ampt model was established to describe the infiltration process with coarser interlayer. This model can more accurately reflect the mechanism of infiltration into layered soils and better describe the infiltration process of soil with sand interlayer.

Key words: soils, moisture, infiltration, ponding infiltration, soil with sand interlayer, Green-Ampt model