

入渗条件下粉煤灰基质的水分运动特征及其模拟

单昆仑, 谢飞, 高艺, 黄书旺 (安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232000)

摘要 为了研究确定 Richards 方程能否很好地描述粉煤灰水分运动特征, 采用试验结果与软件模拟结果进行对比的方式获得 Richards 方程的描述效果。在试验阶段, 对土柱模型分别进行不接地下水和接地下水两种情况下的水分运动模拟, 获取粉煤灰的相关水力学参数; 软件模拟阶段, 利用 Hydrus-1D 软件来建立应用 Richards 方程描述的粉煤灰水分运动模型。将两者的试验数据进行拟合对比后, 发现当不接地下水时, Richards 方程能较好地描述粉煤灰的水分运动特征; 但当接地下水时, 应用 Richards 方程对粉煤灰水分运动进行描述时会存在较大的偏差。

关键词 粉煤灰; 水分运动; 土柱; Richards 方程

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)14-263-03

Water Movement Characteristics and Its Simulation of Fly Ash Substrate under Infiltration Condition

SHAN Kun-lun, XIE Fei, GAO Yi et al (School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232000)

Abstract In order to determine Richards equations can be well described with fly ash water movement characteristics, using software simulations and experimental results obtained for comparison Richards equations to describe the effect. In the experimental stage, each of soil column model is not picked up on the ground and two cases of water movement simulation of groundwater, gets the hydraulic parameters of coal ash; software simulation phases, Hydrus-1D software to build applications Richards equation model of fly ash water movement. Fitting the experimental data comparing the two, reached the following conclusions; while not to receive ground – Richards equation can better describe the characteristics of fly ash water; but when equation describing water movement of fly ash can be very large deviations.

Key words Fly ash; Water movement; Soil columns; Richards equation

粉煤灰是在煤粉燃烧和排出过程中形成的, 是由晶体、玻璃体及少量未燃炭组成的一个复合结构的混合物, 孔隙度大都在 60% 以上, 透水透气性好, 水分渗透速度较土壤快, 比表面积较大。虽然粉煤灰与土壤在理化性质上存在明显差异, 但在组成成分上的相似性使其在工业和农业领域具有广阔的应用前景^[1-2]。以粉煤灰作为填充复垦土壤, 重构土壤剖面理论上是可行的^[3]。目前, 国内外对此均有大量研究。2005 年我国粉煤灰的平均利用率仅为排放量的 45%^[4], 这与发达国家相比存在着较大差距。美国学者 Evans 等将粉煤灰作为回填材料, 回填煤矿采空区, 使采空区上部地表沉陷得到有效控制, 利用粉煤灰作为回填材料在美国西弗吉尼亚州应用已相当普遍^[5]。笔者采用试验与软件模拟相结合的方法, 对粉煤灰水分运动特征进行了研究, 验证 Richards 方程描述粉煤灰水分运动特征的效果, 以期为其他类似修复土壤水分循环的研究提供一种可行的方法指导。

1 材料与方法

1.1 土柱设计 在实验室内进行土柱模拟试验基质的水分运动情况。设置 4 组完全相同配置的土柱(图 1)作为平行试验, 采用内径 10 cm、高度 100 cm、上下底面开放的 PVC 圆柱管装载粉煤灰。试验基质粉煤灰来自淮南市上窑镇粉煤灰处置场。粉煤灰初始含水量为 $0.130 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 称取 7.065 kg 粉煤灰充填进圆柱管中, 制作成深度 90 cm、容重 $0.84 \text{ g}/\text{cm}^3$ 粉煤灰柱。分别在土柱深度为 20、40、60、80 cm 处开设 4 个相同圆孔, 作为不同深度监测点。试验分两个阶段进行:

第一阶段模拟无地下水的情况, 每天对土柱一次性灌溉 20 mm 蒸馏水; 第二阶段增加模拟地下水供应装置, 设置土柱地下水位达到土柱深度 -85 cm 处, 并继续开始用蒸馏水灌溉, 灌溉量仍然为 20 mm/d。试验中蒸发量极小, 忽略蒸发的存在。每阶段连续试验 14 d。

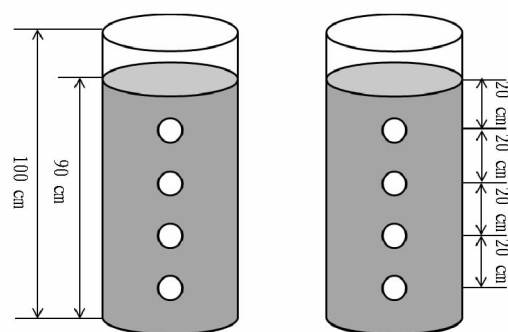


图 1 土柱试验设计

1.2 试验方法 整个试验阶段需要人工进行定时取样, 利用天平、烘箱测定土柱各监测点各时段含水量。各监测点含水量的测量采取取样 – 称重 – 烘干 – 称重的流程, 在烘箱 105 °C 温度下烘干 24 h, 称重计算获得。pF 值为 1.0、1.8 和 2.5 时, 对应含水量的测量用吸力平板仪; pF 值为 4.2 时, 对应含水量的测量用压力膜仪。同时, 用氦气比重瓶测定固体基质的土粒密度, 以近似计算饱和含水量。将试验结果应用 van Genuchten 水保持曲线经验公式进行拟合, 绘制得到固体基质的水保持曲线, 并估计水分运动参数。固体基质的饱和导水率利用渗透仪进行测定, 并应用 Mualem 预测非饱和土壤导水率经验公式进行拟合, 得到非饱和导水率曲线。

1.3 数据处理与分析 利用 Spss17.0 软件进行数据统计分析, 利用 Microsoft Office Excel 2010 软件绘图。

基金项目 安徽省大学生创新创业训练计划项目 (AH201410361106); 安徽理工大学大学生科研项目 (ZY1402)。

作者简介 单昆仑 (1992–), 男, 河南周口人, 本科生, 专业: 资源环境与城乡规划管理。

收稿日期 2015-03-31

2 结果与分析

2.1 基质的水力学参数分析 利用渗透仪测得固体基质粉煤灰的饱和导水率(K_s)为 175.2 cm/d。在粉煤灰容重(DB)为 0.84 g/cm³ 条件下,应用 van Genuchten 经验公式(公式 1)对测试结果进行拟合,获得固体基质水保持曲线(图 2),应用 Mualem 经验公式(公式 2)进行拟合,得到非饱和导水率曲线(图 3)。具体经验公式如下:

$$\theta_h = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + |\alpha h|^n]^m \quad (1)$$

$$K_h = K_s \cdot S_e^L [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})]^2 \quad (2)$$

式中, θ_h 为土壤含水量, cm³/cm³; θ_r 为永久凋萎点, cm³/cm³; θ_s 为饱和含水量, cm³/cm³; h 为土水势, hPa; K_h 为非饱和导水率, cm/d; K_s 为饱和导水率, cm/d; S_e 为有效含水量, $S_e = (\theta_h - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, cm³/cm³; L 为土壤孔隙结构参数(通常取 0.5), 无量纲; m, n, α 为水保持曲线形态参数 ($m = 1 - 1/n$), 无量纲。

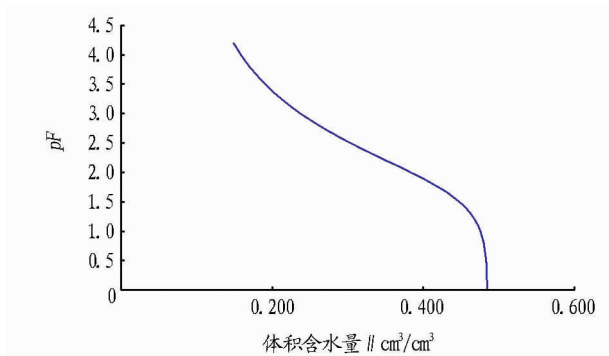


图2 试验用粉煤灰的水保持曲线

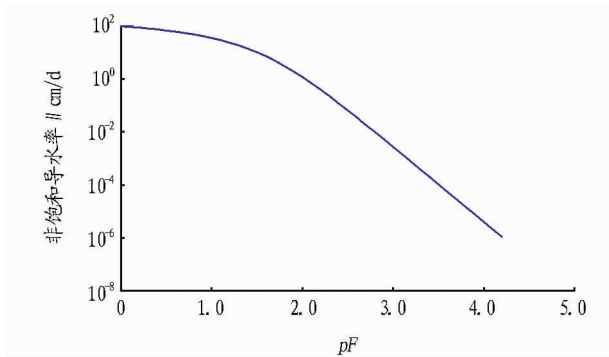


图3 试验用粉煤灰的非饱和导水率曲线

通过拟合,可以得到关于固体基质粉煤灰的水分运动参数, θ_r 为 0.567 cm³/cm³, θ_s 为 0.068 cm³/cm³, n 为 1.338, α 为 0.018, K_h 为 175.2 cm/d。

2.2 灌溉条件下水分入渗 在试验的两个阶段中,分别模拟无地下水供应和存在地下水供应两种情况。根据试验数据,利用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行拟合,得到两种情况下不同深度监测点含水量随时间的变化情况。由图 4 和图 5 可知,当不接地下水时,因土柱底部没有水的供应,不会发生毛细吸水现象,故随着灌溉的开始,含水量升高最先从土柱上部开始,随深度增加不同深度基质含水量呈现依次升高的趋势,即深部基质含水量明显变化晚于较浅部,最终

整个土柱达到统一的饱和含水状态。当有地下水供应时,因存在毛细现象,不同深度的基质含水量几乎同时明显升高,在第 5 天后,整个土柱达到统一的饱和状态。

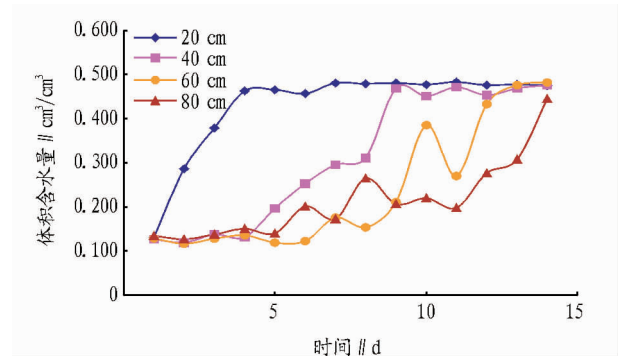


图4 无地下水时含水量与深度的关系

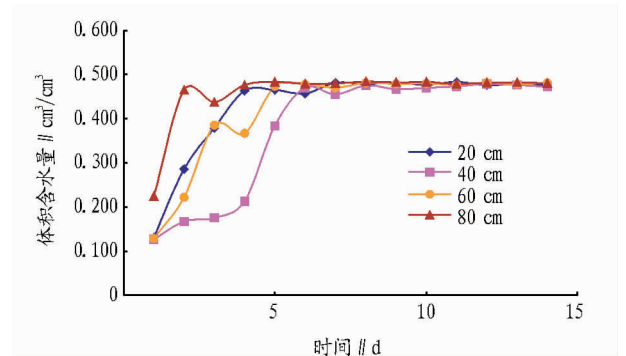


图5 有地下水时含水量与深度的关系

2.3 基质水分运动数学描述

2.3.1 数学分析. 对于垂直一维非饱和和土壤水分运动的模型,一般应用 Richards 方程来描述^[6],公式为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_h \frac{\partial h}{\partial z}) - \frac{\partial K_h}{\partial z} \quad (3)$$

式中, θ 为体积含水量, cm³/cm³; t 为时间, d; z 为垂直坐标(向下为正), cm; K_h 为不饱和渗透率, cm/d; h 为土水势, cm。

由于实验室温度恒定,为 20 ℃ 左右,土柱顶端未安装模拟蒸发设备,蒸发作用微弱。因此,在整个试验阶段土壤的蒸发作用被忽略。土柱上边界条件设定为表层的大气边界,下边界条件在模拟无地下水供应时设定为自由排水,存在地下水供应时设定为定压力水头。初始条件以含水量来设定,基质初始含水量为 0.130 cm³/cm³;当模拟有地下水时,从深度为 -85 cm 处开始至土柱底部初始条件设定为含水量 0.560 cm³/cm³。

应用 Richards 方程描述的粉煤灰水分运动模型是利用 Hydrus-1D^[7] 软件来建立的,同样分为接地下水和不接地下水两种情况进行建模。利用 Hydrus-1D 软件建模完成后,将 OBS_NODE.OUT 输出文件导入到 Microsoft Office Excel 2010 软件中进行数据提取和曲线拟合。通过软件模拟的含水量与深度的关系具有一定的相似性。在不接地下水时,含水量随深度的增大延迟现象更加显著,含水量变化更具有规律性。有地下水供应时,曲线走势大致相同,只是在方程模拟的情况下,达到稳定时随深度增大基质含水量有略微升高,

并非像试验达到基本相同的含水量水平。

2.3.2 模型验证。

2.3.2.1 均方根误差。对试验所得数据进行均方根误差验证。根据均方根误差公式(公式4),计算出试验两个阶段的均方根误差(Re)。

$$Re = \sqrt{\sum di^2/n} \quad (4)$$

式中, di 为测量值与真实值的偏差; n 为测量次数。当无地下水供应时, $Re=0.0212$;当有地下水供应时, $Re=0.0117$ 。因此,两个试验阶段获取的数据具有较高精度,试验所得数据真实可信。

2.3.2.2 1:1 型函数分析。以土柱内粉煤灰基质的体积含水量实测值为横坐标,模拟值为纵坐标,绘制散点图(图8和图9)。在试验的第一阶段中,土柱监测点含水量的变化趋势与模拟值相似,相对应点均围绕1:1拟合线分布。在第二阶段中,散点明显分布在1:1拟合线的一侧,实测值与模拟值具有较大差异。

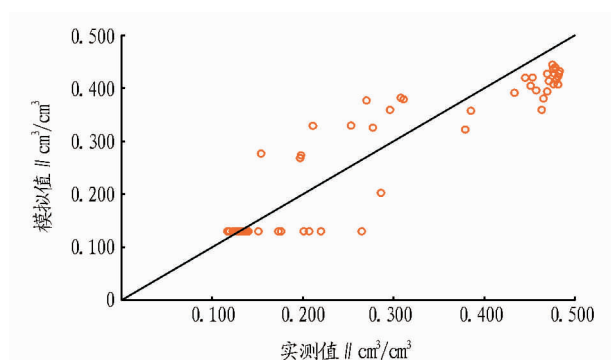


图6 无地下水时实测值与模拟值的散点图

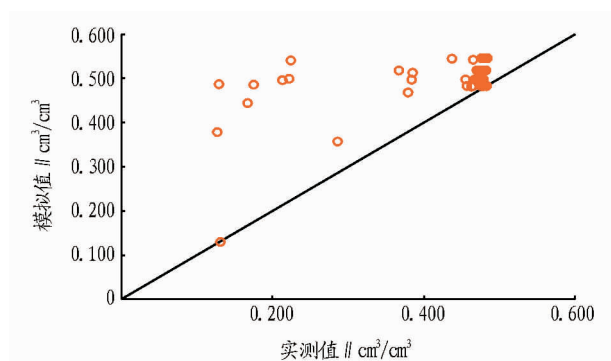


图7 有地下水时实测值与模拟值的散点图

2.3.2.3 相关系数。以4组实测值作为 X 值,模拟值为 Y 值, n 值取56,进行相关性的验证。当不接地下水时, $r_Y=0.9215$;当存在地下水时, $r_N=0.5595$ 。 $r_Y>0.7$,说明当没有地下水时,Reichards方程可以用来描述似土壤基质的水分运动;而 $r_N<0.7$,说明当有地下水存在时,用Reichards方程来描述似土壤基质的水分运动存在较大误差。

2.3.2.4 模型效率 EF 值。对试验数据和模拟数据进行模型效率的考量,判断以Richards方程为基础建立的数学模型能否对试验结果做出完美的描述。模型效率 EF 计算公式为:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{av})^2} \quad (5)$$

式中, P_i 为模拟值, cm^3/cm^3 ; X_i 为实测值, cm^3/cm^3 ; X_{av} 为实测平均值, cm^3/cm^3 。当不接地下水时, $EF=0.8345$;当接地下水时, $EF=-0.1817$ 。在不接地下水的状况中,效率值接近于1,说明模型能给出较完美结果;而当不接地下水时,效率值为负值,说明该模型的模拟结果很差。

3 结论

(1)通过对试验结果进行均方根误差计算,可以确定在试验室条件下所获得试验数据具有高度可信性,满足试验精度的要求。

(2)将实测值与模拟值进行对比验证,1:1函数分布、相关系数和模型效率3个验证结果均反映出Richards方程可较好地描述不接地下水时基质水分运动特征,而对接地下水情形的描述偏差较大。其原因是粉煤灰颗粒的比表面积比土壤颗粒大的多,故当存在地下水时,粉煤灰基质显著的毛细吸水能力使整个试验基质保持较高的含水量,因此Richards方程不能对其水分运动进行准确描述。

(3)实践中,在以粉煤灰等似土壤基质作为充填材料进行土地复垦、整理、修复等工作当中,因Richards方程对存在地下水供应时基质水分运动的描述具有较大偏差,所以必须对Richards方程相关参数进行适当修正,以达到准确描述基质水分运动特征的效果。

参考文献

- [1] RLEHL A,ELSASS F,DUPLAY J,et al. Changes in soil properties in a fluvisol (calcaric) amended with coal fly ash[J]. Geoderma,2010,155:67-74
- [2] CAO D Z,SELIC E,HERBELL J D. Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China[J]. Journal of Zhejiang University - Science A, 2008,9(5):681-687.
- [3] 李世英,刘钦德,倪喜民. 发电厂粉煤灰充填矿区塌陷坑方案可行性分析[J]. 煤炭技术,2002,21(10):73-74.
- [4] PANDEY V C,SINGH N. Impact of fly ash incorporation in soil systems[J]. Agriculture,Ecosystems and Environment,2010,136:16-27.
- [5] 黄谦. 国内外粉煤灰综合利用现状及发展前景分析[J]. 中国矿盐, 2011,43(4):41-43.
- [6] JACQUES D,ŠIMUNE K J,TIMMERMAN A,et al. Calibration of Richards' and convection-dispersion equations to field-scale water flow and solute transport under rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology,2002, 259:15-31.
- [7] ŠIMUNEK J,VAN GENUCHTEN M T,SEJNA M. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water,heat,and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0[R]. California; U. S. Silinity Laboratory,1998.