

非饱和土层中污染物运移过程的数值分析

张金利^{1, 2}, 栾茂田^{1, 2, 3}, 杨庆^{1, 2}

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对填埋场下部为压实粘土衬里、非饱和土层和含水层的三层结构体系, 建立了描述填埋场污染物运移的一维控制方程, 在控制方程中考虑了压实粘土衬里的平衡非线性吸附方程与非饱和土层的线性吸附方程。采用数值法求解控制方程, 通过变动参数探讨了污染物在三层结构体系中运移过程的各种影响因素。

关键词: 非饱和土层; 体积含水量; 饱和度; 污染物; 填埋场; 压实粘土衬里

中图分类号: TV131.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2006)02-0221-04

作者简介: 张金利(1964-), 男, 吉林东辽人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境岩土工程方面研究工作。

Numerical analysis of transport of landfill pollutants in unsaturated soil layer

ZHANG Jin-li^{1, 2}, LUAN Mao-tian^{1, 2, 3}, YANG Qing^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The landfill site was idealized as three-layer strata composed of a compacted clay liner, an underlying unsaturated deposit and a layer of aquifer below the landfill. For such a system, one-dimensional mathematical equation for governing landfill pollutant transport through the three-layer strata was established. In the proposed model, steady-state unsaturated moisture distributions were employed in the dispersion-advection equation to simulate the transient distribution of contaminant in the strata beneath landfill. For the compacted clay liner, nonlinear equation of equilibrium sorption for the contaminant was employed, while the linear equation of equilibrium sorption was used for the unsaturated soil layer. The proposed equation of pollutant transport was numerically solved and comparative computations for varying parameters were made to examine the effect of various factors on the transport process of pollutants in each individual layers of the strata.

Key words: unsaturated soil; volumetric water content, saturation degree; contaminant; landfill; compacted clay liner

0 引言

关于填埋场渗滤液运移的多数研究多数假定填埋场下覆介质处于饱和状态。然而在一般情况下, 地下水位往往在地表以下, 此时在防渗层与下部含水层间的土层处于非饱和状态。研究表明, 填埋场下面的包气带中的流体经过 6~8 a 左右的运动后可以达到稳定状态。Kool 等^[1]将填埋场下侧土层分为包气带和饱和带。假设包气带中的体积含水量为常数, 水气运移为一维稳态, 考虑污染物的一维运移; 在饱和区考虑三维稳态渗流和污染物的三维运移。采用固定渗漏率描述防渗效果, 不考虑填埋场中污染物的变化, 建立了填埋场渗滤液运移分析的复合模型。Fityus 等^[2]针对填埋场下部为自然粘土层和复合防渗层两种情况, 不考虑土颗粒的非线性特性, 采用有限层理论分析了有限深度非饱和土层中污染物的运移。本文以压实粘

土衬里防渗层研究对象, 将填埋场下覆地层抽象为压实粘土衬里—非饱和土层—含水层所组成的三层体系, 在考虑垃圾生物降解效应^[3-6]和压实粘土衬里的非线性吸附性和含水层的线性吸附性的条件下, 由此建立了污染物运移控制方程, 进而通过数值计算探讨了填埋场污染物通过压实粘土衬里和非饱和土层后对下覆含水层的危害。

1 非饱和土层中的水气运动规律

压实粘土衬里具有较低的渗透性, 渗滤液由压实粘土衬里浸入到非饱和土层中的渗漏率较低, 可认为

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才培养计划研究基金资助项目(教技函[1999]2号)

收稿日期: 2005-07-12

压实粘土衬里与非饱和土层之间的接触面是一个的低渗透性边界,同时不考虑降雨入渗对地下水水位的影响。采用 Fityus 等^[2]所提出的 θ 表达的 Richards 方程描述水气在非饱和土中运移,

$$D_m(\theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \alpha D_m(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中 z 与 t 为竖向坐标与时间; θ 为体积含水量; $D_m(\theta)$ 为水气扩散函数; α 为表示重力与毛管力对含水率影响的相对重要程度的参数; θ 为与体积含水量有关的一个新变量,可以通过 Kirchhoff 变换得到。求解式(1)可以得到体积含水量在时空上的分布。

2 污染物运移的控制方程及边值条件

假定在各个结构层中污染物仅沿竖向 z 发生单向稳态运移,压实粘土衬里为饱和,含水层的地下水渗流为水平方向。参数下标 c, u, a 分别表示压实粘土衬里、非饱和土层和含水层。

2.1 渗滤液在压实粘土衬里中运移的控制方程

依据污染物在多孔介质中的运移机理为对流、弥散和地球化学反应等运移机理,对于一维问题,其运移控制方程可表示为

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} + n_c \left(v_c \frac{\partial c}{\partial z} - D_c \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中 v_c 为渗流速度; n 为有效孔隙率; D_c 为弥散系数; S 表示颗粒吸附所产生的污染物质量变化率; ρ 为粘土的干密度。研究表明压实粘土衬里对渗滤液中的污染物常表现出非线性吸附特性^[7-10],这里采用 Langmuir 等温吸附方程表示为

$$S = \frac{K_2 K_1 c}{1 + K_1 c} \quad (3)$$

式中, K_1 与 K_2 分别称为吸附强度与吸附能力。

将式(3)代入式(2),得到在压实粘土衬里中污染物运移的控制方程:

$$D_c \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v_c \frac{\partial c}{\partial z} = \left(1 + \frac{\rho K_1 K_2}{n(1 + K_1 c)^2} \right) \frac{\partial c}{\partial t} \quad (4)$$

2.2 污染物在非饱和土层中运移的控制方程

采用下列的对流、弥散方程描述非饱和土层中污染物的运移过程

$$\theta \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta v_u c - \theta D_u \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

式中, D_u 为污染物在非饱和土中的弥散系数。在非饱和土层中,采用下列的平衡线性吸附方程考虑土颗粒对污染物的吸附特性:

$$S = K_d c \quad (6)$$

式中, K_d 为污染物在固-液两相间的分布系数。将

式(6)代入到式(5),可以得到非饱和土层中污染物运移的控制方程:

$$(\theta + \rho K_d) \frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta v_u c - \theta D_u \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (7)$$

对于给定的实际问题,在求解方程前需要事先确定弥散系数 D_u 对于土的体积含水量 θ 的依赖关系。有关试验表明水气扩散系数与体积含水量之间近似地服从下列的线性关系:

$$D_u(\theta) = \begin{cases} A + \Omega \theta, & \theta > \theta_1 \\ 0, & \theta \leq \theta_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, A, Ω 与 θ_1 为经验参数。同时由式(1)所确定的体积含水量沿深度的变化关系一般较为复杂,这里为简化计算,假设土的体积含水量沿深度近似地线性变化,可表示为

$$\theta(z) = A + Bz \quad (9)$$

式中, A, B 为拟合参数。因此将式(8)和式(9)代入到方程(7)便可具体地得到描述非饱和土层中污染物运移的控制方程。

2.3 污染物在含水层中运移

含水层中地下水流速相对较大,污染物在含水层中运移以对流为主,弥散效应可忽略不计。作者们的前期研究^[8]表明,仅当污染物在固-液两相间的分布系数 K_d 较大时含水层吸附性对污染物运移的影响比较显著,因此,一般情况下可不考虑含水层吸附性的影响。在分析填埋场渗滤液对地下水的影响时,对含水层的处理可采用下列方式:①将含水层作为一个独立的物理层,列出相应的底部边界条件;②将含水层视为一个隔水边界条件,这种方法将高估污染物对含水层的影响,偏于保守。这里采用第二种处理方式。

2.4 初边值条件以及层间连续条件

假设在计算的初始时刻,三个结构层均未被污染。在填埋场与压实粘土衬里间的接触面上,考虑填埋场生物降解效应,填埋场渗滤液中某种污染物浓度符合关于时间的指数衰减关系^[4-7],即

$$c(0, t) = c_0 x^{bt} \quad (10)$$

式中, c_0, x, b 为垃圾的降解参数,由试验确定。

在压实粘土衬里与非饱和土的接触面上,必须保证流动的连续条件和污染物的质量守恒条件。对于一维稳态问题, Darcy 速度必须保持连续流条件和质量守恒以及浓度连续条件,即

$$v_{a,c} = m v_c = v_{a,u} = \theta v_u \quad (11a)$$

$$\left(v_c - n D \frac{\partial c}{\partial z} \right)_c \Big|_{z=h_c} = \left(v_u - \theta D_m \frac{\partial c}{\partial z} \right)_u \Big|_{z=h_c} \quad (11b)$$

$$c_c \Big|_{z=h_c} = c_u \Big|_{z=h_c} \quad (11c)$$

将含水层视为一个边界条件处理。设非饱和土层向下的质量通量为 f_{in} , 污染物在厚度为 h_a 的含水层中的浓度为 c_a , 填埋场的平均水平长度和宽度分别为 L 和 W 。在含水层中仅考虑污染物的对流传质, 在含水层中应用质量守恒定律, 可以分别得到含水层污染物质量及其浓度:

$$m = \int_0^L W L f_{in}(c, \tau) d\tau - \int_0^L W h v_a c_a d\tau, \quad (12a)$$

$$c_a = \int_0^L \frac{f(c, \tau)}{n_a h} d\tau - \int_0^L \frac{v_a c_a}{n_a L} d\tau, \quad z = h_c + h_u. \quad (12b)$$

3 对比计算与分析

考虑到上述控制方程的复杂性, 采用数值解法进行求解。假设填埋场长度为 200 m, 垃圾的降解参数取为 $b = 50$, $c_0 = 1.34288697$, $x = 0.99986$ 。对于压实粘土衬里, 厚度为 $h_c = 2$ m, 渗流速度与弥散系数分别取为 $v_c = 0.1$ m/a 与 $D_c = 0.1$ m²/a, 非线性吸附参数分别为 $K_1 = 1$ 与 $K_2 = 0.5$ 。对于非饱和土层, 厚度为 $h_u = 8$ m; 体积含水量沿深度变化的参数分别为 $A = 0.15$ 与 $B = 0.038$; 污染物弥散系数随体积含水量变化的参数分别为 $\Lambda = -0.0044$ 与 $\Omega = 0.029$, 线性吸附参数为 $K_d = 0.1$ 。对于含水层, 厚度为 $h_a = 1$ m, 渗流速度与孔隙率分别为 $v_a = 10$ m/a 与 $n_a = 0.3$ 。

3.1 压实粘土衬里下覆土层的饱和状态对污染物运移过程的影响

为了阐述非饱和土层对污染物运移过程的影响, 在其他参数一致的情况下, 针对压实粘土衬里与含水层间夹有非饱和土层(顶部体积含水量为 $\theta_T = 0.15$) 和压实粘土衬里与含水层间夹有饱和土层两种情况进行了对比数值计算, 计算所得到的压实粘土衬里下侧即 $z = 2$ m 处与非饱和土层下侧即 $z = 10$ m 处的污染物浓度随时间的变化关系如图 1 所示。

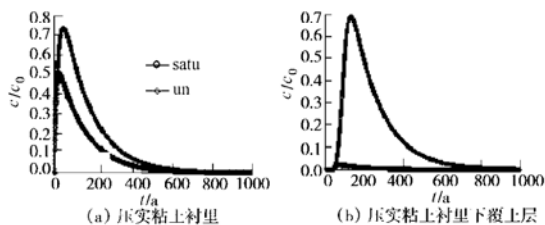


图 1 压实粘土衬里与下覆土层中污染物的运移特性

Fig 1 Characteristics of contaminant migration in the CCL and underlying subsoil stratum

由图 1 可见, 对于压实粘土衬里下覆土层为饱和状态时, 污染物通过压实粘土衬里、饱和土层的能力较强, 各层中污染物浓度曲线形状基本相似, 峰值浓

度出现的时间随深度自上而下有所推迟, 此时压实粘土衬里下覆的饱和土层仅对污染物在运移产生一个缓冲的作用, 不能有效地控制污染物的通过。而当压实粘土衬里下覆土层处于非饱和状态时, 压实粘土衬里、非饱和土层及含水层等各个结构层中污染物通过的能力显著下降, 由此表明非饱和土层能够有效地控制压实粘土衬里及含水层中污染物的运移与通过。

3.2 压实粘土衬里的非线性吸附特性和非饱和土层的饱和度对污染物运移过程的影响

对于填埋场的压实粘土衬里-非饱和土层-含水层的三层结构体系, 为了分别探讨压实粘土衬里的非线性吸附特性、非饱和土层的饱和度及其体积含水量等各种因素对污染物运移过程的影响, 针对下列 4 种参数组合进行了对比计算: ① $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.5$, 土层顶部体积含水量为 $\theta_T = 0.15$, 饱和度为 28%; ② $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.5$, $\theta_T = 0.25$, 饱和度为 50%; ③ $K_1 = 1$, $K_2 = 5$, $\theta_T = 0.15$, 饱和度为 28%; ④ $K_1 = 1$, $K_2 = 5$, $\theta_T = 0.25$, 饱和度为 50%。计算所得到的压实粘土衬里中污染物的穿透曲线及非饱和土层中污染物浓度变化过程如图 2 所示。由图可见, 当压实粘土衬里的吸附能力增大时, 污染物穿过压实粘土衬里的能力显著下降, 而且迟滞作用较强。同时与非饱和土层饱和度的影响相比, 压实粘土衬里的吸附特性对污染物运移过程的影响更为明显。当压实粘土衬里具有较高吸附性时, 吸附能力是控制污染物在压实粘土衬里中运移的主要因素。对于非饱和土层, 吸附性越大, 出流浓度越低, 从而迟滞了污染物的运移, 但是在饱和度较高的情况下, 即使压实粘土衬里的吸附能力较大, 非饱和土层的出流浓度仍然较高。

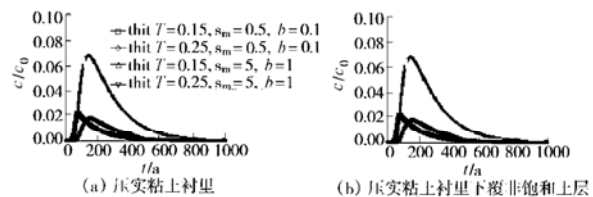


图 2 压实粘土衬里的非线性吸附特性和非饱和土层的饱和度对污染物运移过程的影响

Fig 2 Effects of nonlinear sorption behavior of CCL and saturation degree of underlying unsaturated soil stratum on contaminant transport of landfill

3.3 非饱和土的吸附特性对污染物运移过程的影响

为了考察非饱和土的吸附特性对污染物运移过程的影响, 对于非饱和土层, 分别不考虑吸附性和吸附能力较小与较大等 3 种情况进行了对比计算, 所得到的压实粘土衬里中污染物的穿透曲线及非饱和土层中

污染物浓度变化过程如图3所示。由图可见,当非饱和土的吸附能力增大时,污染物通过压实粘土衬里和非饱和土层及含水层等各个结构层中的能力有所降低,因此,非饱和土的吸附能力较强时,具有抑制污染物通过压实粘土衬里的能力,同时将使污染物在非饱和土层和含水层中浓度下降,而且迟滞能力增强。

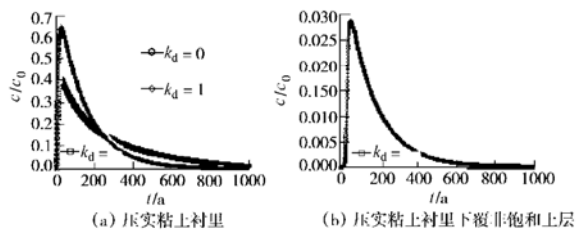


图3 非饱和土层线性吸附对污染物运移的影响

Fig. 3 Effects of linear sorption behavior of the unsaturated soil on contaminant migration

4 结 论

针对填埋场下压实粘土衬里—非饱和土层—有限厚度含水层三层结构体系的理想情况,分别建立了各层内污染物运移过程的控制方程及界面连接条件,对于这样的边值问题,考虑垃圾的生物降解效应、压实粘土衬里的平衡非线性吸附特性和非饱和土层的线性吸附特性,通过求解和数值计算,分别探讨了压实粘土衬里与含水层之间非饱和土层的存在、压实粘土衬里的非线性吸附特性对压实粘土衬里、含水层及两者之间的土层中污染物运移过程的影响,对比分析表明:①压实粘土衬里与含水层间的非饱和土层可有效地限制污染物的通过,特别当非饱和土的体积含水量或饱和度处于较低时,可以极大地控制污染物穿透非饱和土层,因此,为了有效地控制污染物对地下水的污染,填埋场应尽可能选择在地下水埋藏较深的部位处;②压实粘土衬里的非线性吸附特性是污染物运移中的主要控制因素之一。当压实粘土衬里吸附能力较大时,不仅能够显著地降低污染物在压实粘土衬里、非饱和土层和含水层中的浓度,而且迟滞作用也较显著。

参考文献:

- [1] KOOL J B, HUYAKORN P S, SUDICKY E A, SALEEM Z A. A composite modeling approach for subsurface transport of degrading contaminant from land-disposal sites[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1994, **17**: 69 - 90.
- [2] FITYUS S G, SMITH D W, BOOKER J R. Contaminant transport through an unsaturated liner beneath a landfill[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**: 330 - 354.
- [3] ZHAO You-cai, LIU Jiang-ying, HUANG Ren-hua, et al. Long-term monitoring and prediction for leachate concentration in Shanghai refuse landfill[J]. Water, Air Soil Pollution, 2000, **122**: 281 - 297.
- [4] ZHAO You-cai, LIU Jiang-ying, HUANG Ren-hua, et al. A comparison of refuse attenuation in laboratory and field scale lysimeters[J]. Waste Management, 2002, **22**: 29 - 35.
- [5] EL-FADEL M, Bou-ZEID E, CHAHINE W, Alayli B. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content[J]. Waste Management, 2002, **22**: 269 - 282.
- [6] REITZEL S, FARQUHER G, MCBEAN E. Temporal characterization of municipal solid waste leachate[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, **19**: 668 - 679.
- [7] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 天子岭填埋场有机物降解规律的研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(1): 60 - 62. (ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHEN Yun-min. Study on degradation law of organic substance of Tianziling MSW(municipal solid waste) landfill[J]. Rock and Soils Mechanics, 2002, **23**(1): 60 - 62.)
- [8] 张金利, 栾茂田, 杨庆. 固体废物生物降解时污染物运移过程一维数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2004, **44**(6): 870 - 876. (ZHANG Jin-li, LUAN Mao-tian, YANG Qing. One-dimensional numerical analyses of pollutant migration process in solid waste considering bio-degradation effect of contaminants[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, **44**(6): 870 - 876.)
- [9] 栾茂田, 张金利, 杨庆. 非平衡—非线性情况下填埋场污染物运移分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1855 - 1861. (LUAN Mao-tian, ZHANG Jin-li, YANG Qing. Numerical analysis of contaminant transport process through landfill considering nonequilibrium and nonlinear sorption behaviour[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1855 - 1861.)
- [10] 栾茂田, 张金利, 杨庆. 污染物运移过程的一维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 185 - 189. (LUAN Mao-tian, ZHANG Jin-li, YANG Qing. One-dimensional numerical analyses of migration process of pollutants through a clay liner considering sorption of aquifer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(2): 185 - 189.)