

生物反应器填埋场中水平沟回灌渗滤液 非饱和 - 饱和渗流分析

冯世进^{1, 2}, 张 旭¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 水平沟回灌是生物反应器填埋场中渗滤液回灌的主要模式之一, 为研究水平沟回灌时生物反应器填埋场中渗滤液的非饱和 - 饱和运移规律, 垃圾体的饱和与非饱和区域采用不同水流控制方程, 饱和区域的水流控制方程采用饱和和 Richards 方程, 对垃圾体非饱和区域, 由质量守恒原理, 以修正的 Darcy 定理为基础, 结合 Elagroudy 等提出的垃圾体沉降模型, 建立了考虑垃圾体沉降的非饱和渗滤液运移控制方程。基于建立的考虑沉降特性的二维非饱和 - 饱和水平沟回灌计算模型, 研究了水平沟回灌时渗滤液在生物反应器填埋场中的运移规律, 提出水平沟回灌系统的设计方法。

关键词: 生物反应器填埋场; 渗滤液回灌; 水平沟; 运移规律

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)07 - 1355 - 07

作者简介: 冯世进(1978 -), 男, 安徽东至人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土工程和土动力学方面的教学与研究工作。E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn。

Unsaturated-saturated seepage analysis for leachate recirculation using horizontal trenches in bioreactor landfills

FENG Shi-jin^{1,2}, ZHANG Xu¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The horizontal trench is one of the main methods which are available to recirculate leachates. To study the unsaturated-saturated seepage laws during leachate recirculation process, different flow control equations are used for the saturated/unsaturated zones in bioreactor landfills. The saturated Richards' equation is adopted as the flow governing equation in the saturated area of the waste mass. For the unsaturated area of the waste mass, based on the law of conservation of mass, the modified Darcy's law and the Elagroudy's settlement model, a new flow governing equation considering solid waste settlement is developed. Based on the two-dimensional saturated/unsaturated model which has been developed considering solid waste settlement, the migration laws of recirculated leachates are studied. The simulated results indicate that the various parameters (i.e., settlement of MSW, pressure head, initial void ratio, etc.) have effects on the zone of impact, pressure head, water content of MSW and recirculation leachate volume per m of trench length. The design method of horizontal trenches is proposed for the bioreactor landfills.

Key words: bioreactor landfill; leachate recirculation; horizontal trench; migration rule

0 引言

生物反应器填埋场能有效的控制填埋场中的微生物反应, 使垃圾中能降解的有机组分在封场后5~10 a内完成稳定化的过程, 与传统卫生填埋场相比, 生物反应器填埋场在结构上增加了液体回灌系统, 以增加垃圾体的含水率。在实际工程中, 一般将填埋场底部收集到的渗滤液再重新回灌到填埋场中。生物反应器填埋场主要的回灌方式有填埋场表面回灌(喷洒回灌、回灌池回灌)和填埋场内部回灌(水平沟回灌、竖井

式回灌)。渗滤液回灌到填埋场中可以增加垃圾体的含水率和微生物, 一方面, 处理了大量的渗滤液, 解决了处理困难且费用较高的问题; 另一方面, 加速了填埋场中的生物和化学反应, 增加了产气量和加速填埋场稳定化等。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2012CB719803); 国家自然科学基金项目(41072201, 41172245, 4122021); 上海市浦江人才计划项目(11PJD021)
收稿日期: 2012-10-08

近年来, 针对渗滤液回灌的运移规律国内外学者都进行了一些研究, 目前对填埋场内水分运移的研究, 大多采用水量平衡 HELP 模型研究渗滤液运移规律^[1-2], 但对填埋场内水位及孔压场的研究较少, Townsend 等^[3]为了研究水平沟条件下渗滤液回灌的影响范围, 建立了基于稳定的饱和状态条件下多孔介质水平沟水流方程; McCREANOR 等^[4-5]假设垃圾体为均质和各向同性体, 采用饱和 - 非饱和模型 (SUTRA) 分别模拟了竖直井和水平沟回灌时渗滤液运移规律; Haydar 等^[6]采用 HYDRUS-2D 软件对水平沟回灌渗滤液进行数值模拟, 但忽略了垃圾体各向异性和孔隙率的影响; Jain 等^[7-8]采用 SEEP/W 软件对竖井式和水平沟回灌渗滤液的运移规律进行研究, 并提出了设计回灌系统的图表, 但计算过程中不能考虑垃圾体的变形对渗滤液回灌的影响; White 等^[9]采用达西定律结合实测数据对渗滤液一维表面回灌进行了研究。张文杰等^[10]通过现场试验和理论分析相结合的方法研究了垃圾填埋体中非饱和 - 饱和的渗流; 冯世进等^[11]建立了考虑垃圾体沉降特性的非饱和渗流控制方程, 研究了一维非饱和渗滤液喷洒回灌的渗流规律。

可以发现, 针对渗滤液水平沟回灌的研究还较少, 已有研究未考虑垃圾体沉降的影响。对于生物反应器填埋场, 在渗滤液的回灌过程中, 由于填埋体的自重和生物降解的影响, 垃圾体会产生较大的沉降变形。垃圾体沉降变形会导致生物反应器填埋场中垃圾体的孔隙比减小, 孔隙比的减小会影响垃圾体的渗透系数和填埋场所能容纳的渗滤液量, 这对回灌过程中渗滤液的运移和水平沟回灌系统的设计都有较大影响。本文建立了考虑沉降变形的非饱和 - 饱和渗滤液水平沟回灌的计算模型, 研究了垃圾体沉降变形、回灌水压和垃圾体初始孔隙比等参数对回灌系统设计的影响。

1 计算模型的建立及求解

假设填埋场在渗滤液回灌之前是非饱和状态, 当回灌渗滤液之后, 含水率由靠近回灌水源到远离回灌水源是由饱和状态过渡到非饱和状态, 为了研究回灌过程中渗滤液的运移规律, 建立了非饱和 - 饱和渗滤液回灌模型, 对垃圾体饱和与非饱和区域分别采用不同的水流控制方程。对于垃圾体饱和区域, 水流控制方程采用饱和 Richards 方程^[12]; 对于垃圾体非饱和区域根据质量守恒原理, 以修正的 Darcy 定理为基础, 结合 Elagroudy 等^[13]提出的垃圾体沉降模型, 建立了考虑垃圾体沉降的非饱和水流控制方程。采用建立的非饱和 - 饱和水平沟回灌渗滤液的计算模型, 研究了水平沟回灌时渗滤液在生物反应器填埋场中的运移规律及水平沟回灌系统的设计。

1.1 垃圾体饱和带的渗滤液流动控制方程

对于垃圾体饱和带的渗滤液流动规律, 假设垃圾体为均质各向异性, 渗流符合 Darcy 定理, 根据水量平衡和质量守恒原理, 可推导得饱和瞬态的渗滤液流动控制方程^[14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h_p}{\partial z} \right) = \mu_s \frac{\partial h_p}{\partial t}, \quad (1)$$

式中, h_p 为渗流过程中的水压力水头, μ_s 为贮水率, t 为渗流时间, K_x , K_y 和 K_z 分别为 x , y 和 z 方向垃圾体的饱和渗透系数。

1.2 垃圾体非饱和带的渗滤液流动控制方程

对于垃圾体非饱和带的渗滤液流动规律, 假设垃圾体为均质各向异性, 渗流符合修正的 Darcy 定理, 根据水量平衡和质量守恒原理, 结合 Elagroudy 等^[13]提出的沉降模型, 可得垃圾体非饱和瞬态的渗滤液流动控制方程, 主要过程如下所示。

如图 1, 对于垃圾体非饱和区域, 根据质量守恒定理可得

$$\left(\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \theta \Delta x \Delta y \Delta z), \quad (2)$$

式中, θ 为垃圾体的体积含水率 (如无特殊说明, 本文中的 θ 均为体积含水率), 仅考虑填埋场中垃圾体的竖向变形, 由于垃圾体非饱和带水压变化很小, 忽略渗滤液的密度变化, 对式 (2) 右边可整理为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \theta \Delta x \Delta y \Delta z) = (\theta \rho \frac{\partial (\Delta z)}{\partial t} + \rho \Delta z \frac{\partial \theta}{\partial t}) \Delta x \Delta y. \quad (3)$$

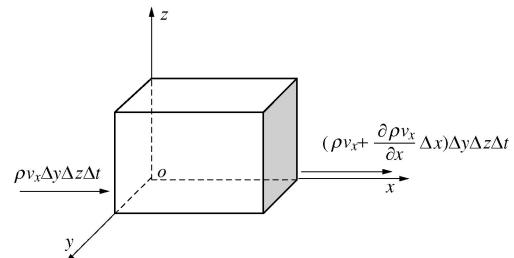


图 1 垃圾体单元

Fig. 1 Element of waste

Elagroudy 等^[13]提出的垃圾体沉降模型中, 垃圾体竖向变形和时间的变化关系为

$$\frac{\partial (\Delta z)}{\partial t} = \Delta z AB \exp(-Bt), \quad (4)$$

式中, A , B 分别为计算参数。

将式 (4) 带入式 (3) 可得

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \theta \Delta x \Delta y \Delta z) = \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} + \theta AB \exp(-Bt) \right] \rho \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (5)$$

式 (2) 左边可变形为^[11]

$$\left(\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K(h_p)_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \right.$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial y} (K(h_p)_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K(h_p)_z \frac{\partial H}{\partial z}) \right] \rho \Delta x \Delta y \Delta z , \quad (6)$$

式中, h_p 为渗流过程中的水压力水头, $K(h_p)_x$, $K(h_p)_y$ 和 $K(h_p)_z$ 分别为垃圾体 x , y 和 z 方向的非饱和渗透系数, $H = z + h_p$ 为总水头。由于

$$C(h_p) = \frac{d\theta}{dh_p} , \quad (7)$$

$$D(h_p) = \frac{K(h_p)}{C(h_p)} , \quad (8)$$

其中, $C(h_p)$ 为容水度, $D(h_p)$ 为扩散系数。

联立式 (2)、(5) ~ (8) 整理可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h_p)_x \frac{\partial h_p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(h_p)_y \frac{\partial h_p}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_p)_z \frac{\partial h_p}{\partial z} \right] + \\ \frac{\partial K(h_p)_z}{\partial z} = C(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} + \theta(h_p) AB \exp(-Bt) . \end{aligned} \quad (9)$$

1.3 二维饱和-非饱和渗流模型的建立及求解

由于本文中渗滤液回灌形式为水平沟回灌, 水平沟的长度尺寸远远大于水平沟横截面尺寸, 可以看成无穷远长度问题, 忽略 y 方向的影响, 仅考虑 x 和 z 方向, 渗滤液通过水平沟回灌到填埋场中, 在填埋场中的运移主要沿着 x 和 z 方向, 为二维运移模式, 因此建立考虑垃圾体沉降特性的渗滤液回灌二维非饱和-饱和渗流模型, 对式 (1)、(9) 分别简化后为

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial h_p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial h_p}{\partial z}) = \mu_s \frac{\partial h_p}{\partial t} , \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h_p)_x \frac{\partial h_p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_p)_z \frac{\partial h_p}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(h_p)_z}{\partial z} \\ = C(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} + \theta(h_p) AB \exp(-Bt) . \end{aligned} \quad (11)$$

对式 (10) 和 (11) 进行合并整理可得式 (12), 且假设 z 坐标轴向下方向为正, 计算示意图如图 2 所示。其中模型的控制方程为

$$\begin{aligned} a \frac{\partial}{\partial x} (k_r(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_r(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial z}) - \frac{\partial k_r(h_p)}{\partial z} \\ = \frac{[\omega \mu_s \frac{\partial h_p}{\partial t} + \xi (C(h_p) \frac{\partial h_p}{\partial t} + \theta(h_p) AB \exp(-Bt))]}{K_z} , \end{aligned} \quad (12)$$

式中, K_z 为垃圾体竖向饱和渗透系数 K_{sat} , $k_r(h_p)$ 为相对渗透系数, a 为横向饱和渗透系数与竖向渗透系数之比, 当垃圾体饱和时水压力水头 $h_p \geq 0$, $\omega=1$, $\xi=0$, 当垃圾体非饱和时水压力水头 $h_p < 0$, $\omega=0$, $\xi=1$ 。

假设生物反应器填埋场内部初始含水率为 θ_0 , 对应初始水头高度为 h_{p0} , 因此初始条件为

$$h_p(x, z, 0) = h_{p0} . \quad (13)$$

由于填埋场顶部覆盖层的存在, 假设计算模型顶部水头高度不变, 故上边界条件为

$$h_p(x, 0, t) = h_{p0} . \quad (14)$$

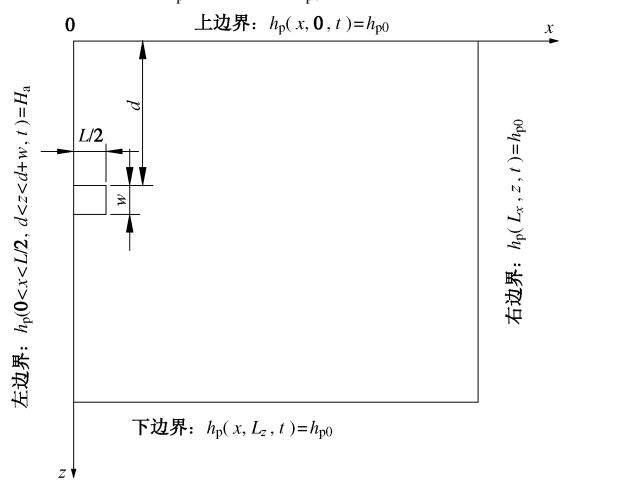


图 2 二维水平沟回灌模型图

Fig. 2 Two-dimensional model recirculation using horizontal trenches

下边界在 L_z 处, 假设在时间 t 内回灌的渗滤液未达到下边界, 因此水头高度为初始值 h_{p0} , 因此下边界条件为

$$h_p(x, L_z, t) = h_{p0} . \quad (15)$$

右边界在 L_x 处, 假设在时间 t 内回灌的渗滤液未达到右边界, 因此水头高度为初始值 h_{p0} , 故右边界条件为

$$h_p(L_x, z, t) = h_{p0} . \quad (16)$$

假设水平沟到顶部的距离为 d , 水平沟的宽为 l , 高度为 w , 给定回灌水头高度为 H_a , 因此

$$h_p(0 < x < L/2, d < z < d + w, t) = H_a . \quad (17)$$

生物反应器填埋场中的垃圾体在沉降过程中孔隙比逐渐减小, 因此渗透系数也在不断减小。McDougall^[15]根据 Beaven^[16]的试验结果提出垃圾体饱和渗透系数和孔隙比的关系为

$$K_{sat} = a \cdot e^b , \quad (18)$$

式中, K_{sat} 为垃圾体饱和渗透系数 (m/s), e 为垃圾体的孔隙比, a 和 b 为计算参数。

冯世进等^[11]根据 Elagroudy 等^[13]提出的垃圾体沉降模型得到垃圾体孔隙比随时间的变化关系:

$$e = e_0 - (1 + e_0) A [1 - \exp(-Bt)] , \quad (19)$$

式中, e_0 为初始孔隙比。

将式 (19) 带入式 (18) 可得

$$K_{sat} = a [e_0 - (1 + e_0) A (1 - \exp(-Bt))]^b . \quad (20)$$

对于填埋场中的非饱和区域, 垃圾体非饱和渗透系数与压力水头之间的关系为

$$K(h_p) = K_{sat} k_r(h_p) . \quad (21)$$

对于非饱和区域水分特征曲线及渗透系数函数本文采用 VGM 模型^[17], 即

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [(1 + |\alpha h_p|)^n]^{-m}, \quad (22)$$

$$k_r(h_p) = \Theta^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2, \quad (23)$$

$$D(h_p) = \frac{(1-m)K_{\text{sat}}}{\alpha m(\theta_s - \theta_r)} \Theta^{\frac{1}{2}-\frac{1}{m}} [(1 - \Theta^{1/m})^{-m} + (1 - \Theta^{1/m})^m - 2], \quad (24)$$

式中, θ_r 和 θ_s 分别为残余含水率和饱和含水率, α , m 为 VGM 模型参数, $D(h_p)$ 为扩散系数。

将模型的控制方程式 (12) 联立初始、边界条件式 (13) ~ (17) 与渗透系数方程式 (20) ~ (24) 进行差分求解。由于本模型是二维问题, 为了避免大量的计算工作量, 本文采用交替方向隐式方法 (简称为 ADI)。在 t 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻之间设想一个过度时刻 $t+\Delta t/2$, 首先对 x 方向使用隐式, 对 z 方向使用显式, 则整理后的饱和与非饱和区域渗流控制方程的差分格式分别为

$$\begin{aligned} & \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 u_s} h_{pi-1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \left[\frac{a\Delta t K_z (k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}} + k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}})}{(\Delta x)^2 u_s} + 2 \right] h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}} + \\ & \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 u_s} h_{pi+1,j}^{k+\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^k}{(\Delta z)^2 u_s} h_{pi,j-1}^k + \\ & \left[\frac{\Delta t K_z (k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^k + k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^k)}{(\Delta z)^2 u_s} - 2 \right] h_{pi,j}^k - \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^k}{(\Delta z)^2 u_s} h_{pi,j+1}^k. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 C_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}} h_{pi-1,j}^{k+\frac{1}{2}} - \left[\frac{a\Delta t K_z (k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}} + k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}})}{(\Delta x)^2 C_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}} + 2 \right] h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}} + \\ & \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 C_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}} h_{pi+1,j}^{k+\frac{1}{2}} = - \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^k}{(\Delta z)^2 C_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}} h_{pi,j-1}^k + \\ & \left[\frac{\Delta t K_z (k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^k + k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^k)}{(\Delta z)^2 C_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}} - 2 \right] h_{pi,j}^k - \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^k}{(\Delta z)^2 C_{i,j}^{k+\frac{1}{2}}} h_{pi,j+1}^k. \end{aligned} \quad (26)$$

式 (25) 和 (26) 中 $h_{pi,j}^k$ 为 t 时刻的已知水头, $h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}}$ 为 $t+\Delta t/2$ 时刻的过渡水头。利用 Matlab 编程求解方程组

(25) 和 (26), 可得出所有格点处的过渡解 $h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}}$,

然后从 $t+\Delta t/2$ 到 $t+\Delta t$ 利用已经求得的 $h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}}$, 对 x 方向

使用显式, 对 z 方向使用隐式, 则整理后的饱和与非饱和区域渗流控制方程的差分格式分别为

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^{k+1}}{(\Delta z)^2 u_s} h_{pi,j-1}^{k+1} - \left[\frac{\Delta t K_z (k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^{k+1} + k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^{k+1})}{(\Delta z)^2 u_s} + 2 \right] h_{pi,j}^k + \\ & \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^{k+1}}{(\Delta z)^2 u_s} h_{pi,j+1}^{k+1} = - \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 u_s} h_{pi-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \\ & \left[\frac{a\Delta t K_z (k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}} + k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}})}{(\Delta x)^2 u_s} - 2 \right] h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 u_s} h_{pi+1,j}^{k+\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^{k+1}}{(\Delta z)^2 C_{i,j}^{k+1}} h_{pi,j-1}^{k+1} - \left[\frac{\Delta t K_z (k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^{k+1} + k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^{k+1})}{(\Delta z)^2 C_{i,j}^{k+1}} + 2 \right] h_{pi,j}^k + \\ & \frac{\Delta t K_z k_{r_{i,j+\frac{1}{2}}}^{k+1}}{(\Delta z)^2 C_{i,j}^{k+1}} h_{pi,j+1}^{k+1} = - \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 C_{i,j}^{k+1}} h_{pi-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \\ & \left[\frac{a\Delta t K_z (k_{r_{i-\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}} + k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}})}{(\Delta x)^2 C_{i,j}^{k+1}} - 2 \right] h_{pi,j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{a\Delta t K_z k_{r_{i+\frac{1}{2},j}}^{k+\frac{1}{2}}}{(\Delta x)^2 C_{i,j}^{k+1}} h_{pi+1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \\ & \frac{\Delta t K_z (k_{r_{i,j-\frac{1}{2}}}^{k+1} - k_{r_{i,j-1}}^{k+1})}{2\Delta z C_{i,j}^{k+1}} - \frac{\Delta t \theta_{i,j}^{k+1} AB \exp[-B(k+1)\Delta t]}{C_{i,j}^{k+1}}. \end{aligned} \quad (28)$$

再利用 Matlab 编程求解方程组 (27) 和 (28), 即可求出填埋场中水头和含水率的分布情况, 再通过回灌后的含水率与初始含水率之差可求得渗滤液的回灌量。从而可得到考虑垃圾体沉降特性、回灌水头和垃圾体特性等参数对渗滤液在生物反应器填埋场中运移规律的影响。

2 考虑垃圾体沉降变形对渗滤液回灌的影响

为了分析考虑垃圾体沉降变形对水平沟回灌时渗滤液运移的影响, 在计算过程中不同参数取值: VGM 模型中的参数参考了 Jain 等^[7-8]的取值, 其中 $n=4$, 参数 m 是关于 n 的函数 $m=1-1/n$, $\alpha=10$, 由于在回灌过程中考虑了垃圾体的沉降变形, 因此饱和含水率为孔隙比 e 的函数 $\theta_s=e/(1+e)$, 残余含水率取值参考了国外学者所做试验数据和数值模拟的取值^[7-8, 18], $\theta_r=0$; 参数 a 和 b 的取值分别为 10^{-8} 和 4.9, 参数的取值参考了 McDougall 等的试验数据; 参数 A 和 B 分别取为 0.25 和 0.045, 参数取值参考了 Elagroudy 等的试验数据; 垃圾体的初始孔隙比 e_0 取值为 4; 回灌水头高度为 5 m。当分析某一参数对渗滤液回灌的影响时, 该参数在容许范围内变化, 而其他参数保持不变。

图3为垃圾体沉降变形对稳定状态下填埋场中水头高度分布规律的影响。可以发现,随着距水平沟回灌距离的增大,水头高度逐渐减小,这是由于渗滤液从回灌源向周围垃圾体渗流的过程中水头不断损失所致。对比图3(a)和图3(b)可发现,考虑垃圾体沉降变形时回灌渗滤液的影响区域要比不考虑沉降的影响区域小,这是由于垃圾体沉降变形使得垃圾体的孔隙比减小,孔隙比的减小使得渗透系数减小所致。

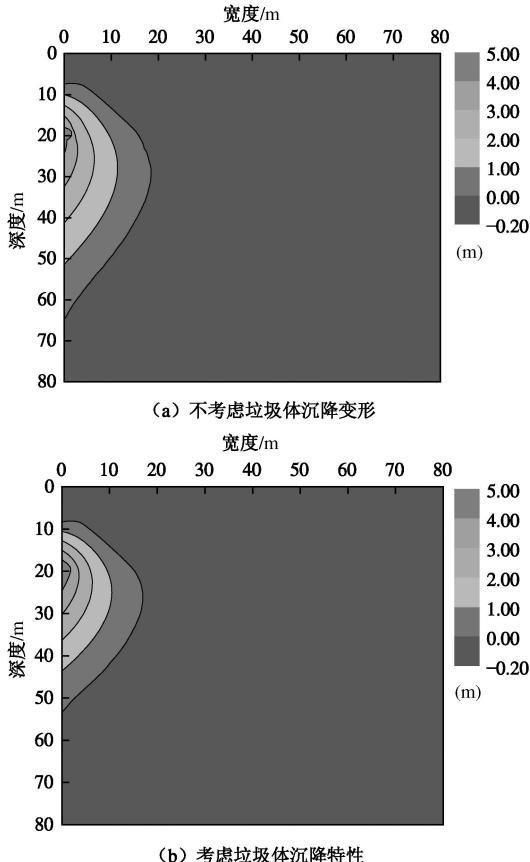


图3 稳定状态下填埋场中水压水头分布规律图

Fig. 3 Distribution of pressure head in landfill in steady state

图4为垃圾体沉降变形对填埋场中垃圾体含水率的影响。由图4(a)可以看出,不考虑垃圾体沉降变形时,垃圾体的含水率在饱和区域为0.8,而在回灌渗滤液未达到的区域含水率为0.15;由图4(b)可知,考虑垃圾体沉降变形时,饱和与非饱和区域的含水率分别为0.77和0.17。这是由于考虑了垃圾体沉降变形,渗滤液在回灌过程中垃圾体的孔隙比减小,导致饱和含水率减小,渗滤液未达到的区域含水率增大。进一步可发现,垃圾体从饱和状态向非饱和状态过渡的区别,不同的含水率等值线对应着不同的饱和度,且饱和度由饱和区域到非饱和区域逐渐减小,这是由于考虑了垃圾体的非饱和水力特性所致,类似的现象在文献[6, 7]中已经发现,其中Haydar等将饱和度大于90%的区域作为水平沟设计间距的依据^[6],Jain等将沿水平沟底部所达到的最大饱和宽度作为水平沟的设计依

据^[7],但实际的最大饱和宽度出现在水平沟下面,该方法过于保守。本文将饱和度大于90%的区域作为影响区域,影响宽度取影响区域内出现的最大影响宽度,影响深度取影响区域内出现的最大影响深度。

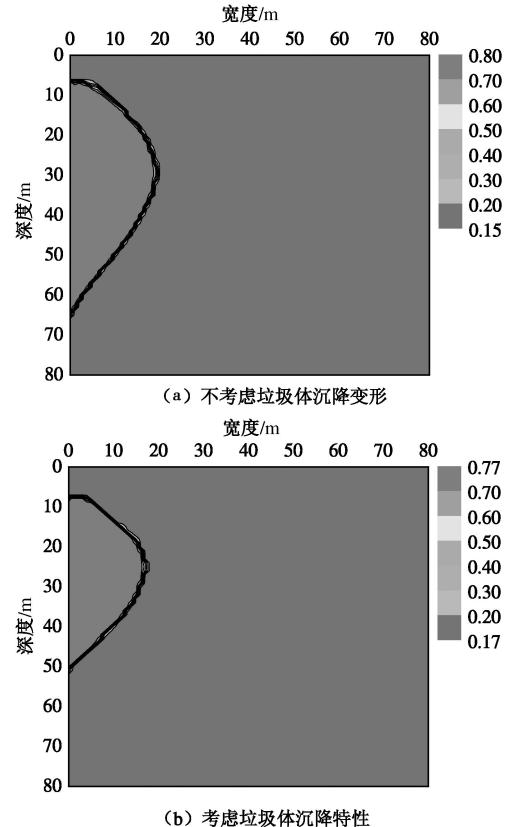


图4 稳定状态下填埋场中垃圾体含水率分布规律图

Fig. 4 Distribution of water content in landfill in steady state

图5为水平沟回灌时影响区域随时间的变化规律。可以看出,随着时间的增加,影响区域在不断增大,不考虑垃圾体沉降时的影响区域大于考虑沉降时的影响区域,并且影响深度大于影响宽度,这是由于影响深度方向有重力的有利作用。进一步可发现,随着时间的增加,影响宽度和深度增加的速率越来越小,当回灌时间为30 d时,影响宽度已不在增加,达到了稳定的状态,影响深度增加的速率也趋于稳定。

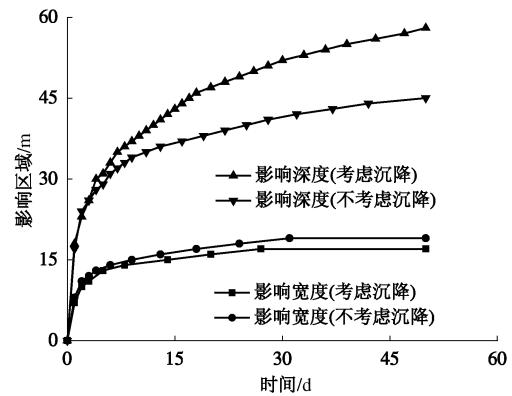


图5 影响区域随时间的变化规律

Fig. 5 Variation of impact zone with time

图 6 为水平沟单位长度回灌量随时间的变化规律。随时间增加, 水平沟单位长度回灌量不断增加, 但增长速率逐渐减小, 且不考虑垃圾体沉降变形的回灌量大于考虑沉降时的回灌量, 这也是由于考虑沉降后垃圾体的饱和渗透系数减小, 回灌速率减小所致。

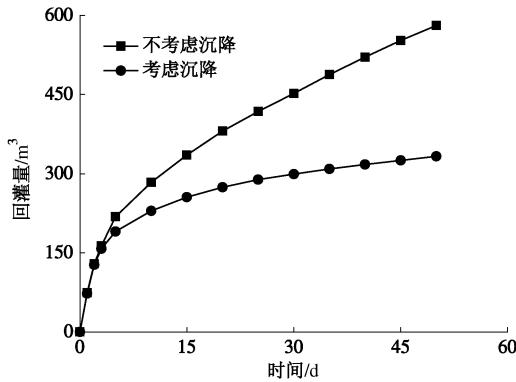


图 6 渗滤液回灌量随时间的变化规律

Fig. 6 Variation of leachate recirculation quantity with time

3 水头高度对渗滤液回灌的影响

图 7 为不同回灌水头高度下, 影响区域范围的变化规律。可以看出, 随着回灌水头的增加, 稳定状态下的影响宽度和深度都在不断增大, 且影响深度大于影响宽度, 这是由于随着回灌水头的增加, 水力梯度不断地增大, 渗流速率也在不断地增大, 且在重力的有利作用下竖向的水力梯度大于水平向的水力梯度。

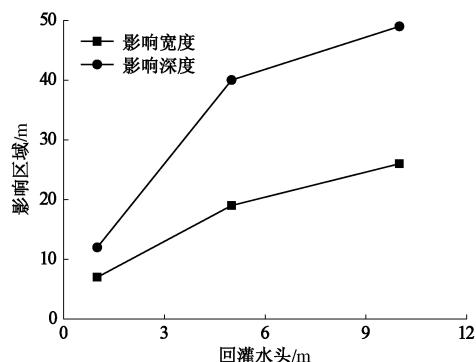


图 7 不同回灌水头高度时影响区域的变化规律

Fig. 7 Variation of impact zone with injection head

图 8 为不同回灌水头高度下, 水平沟单位长度回灌量随时间的变化曲线。可以看出, 在不同回灌水头高度下, 单位长度回灌量随着时间不断增加。且在同一时间, 回灌水头越大, 单位长度的回灌量越大, 这是由于回灌水头越大渗滤液渗流的水力梯度越大, 回灌速率越快。

4 垃圾体初始孔隙比对渗滤液回灌的影响

图 9 为垃圾体初始孔隙比变化对影响区域的影响

规律。可以看出, 随着垃圾体初始孔隙比的增大, 稳定状态下影响宽度和影响深度不断增大, 且影响深度大于影响宽度, 这是由于垃圾体孔隙比越大, 垃圾体的饱和渗透系数越大。

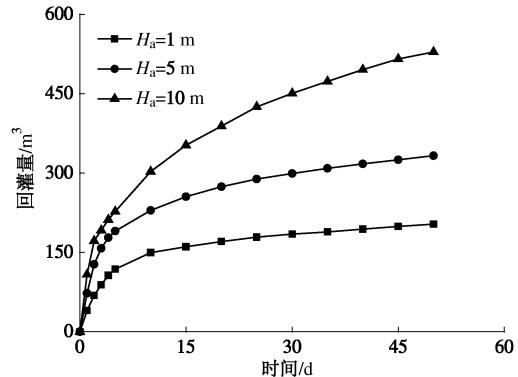


图 8 回灌水头高度对渗滤液回灌量的影响规律

Fig. 8 Variation of leachate recirculation quantity with time under different injection heads

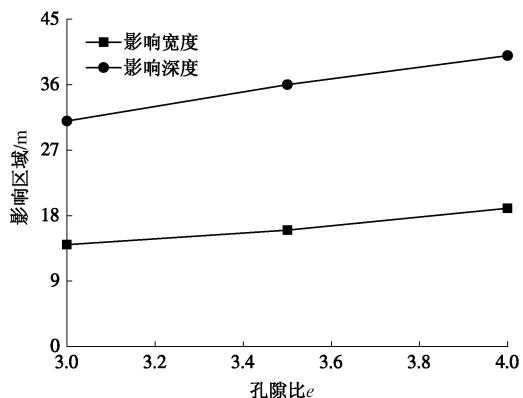


图 9 不同垃圾体初始孔隙比时影响区域的变化规律

Fig. 9 Variation of impact zone with initial void ratio

图 10 为不同初始孔隙比时水平沟单位长度回灌量随着时间的变化曲线。可以看出, 对于不同的垃圾体初始孔隙比, 水平沟单位长度的回灌量随着时间的增加而增大; 在同一时间时, 水平沟单位长度的回灌量随着孔隙比的增大而增加。

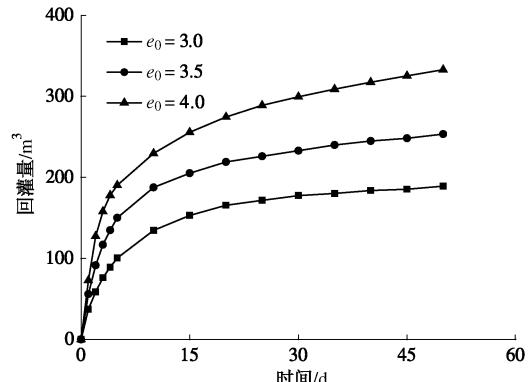


图 10 垃圾体初始孔隙比变化对渗滤液回灌量的影响

Fig. 10 Variation of leachate recirculation quantity with time under different initial void ratios

5 结 论

(1) 随着距水平沟回灌距离的增大, 水头高度逐渐减小, 垃圾体沉降对生物反应器填埋场渗滤液回灌影响较大, 使得回灌影响区域和回灌量都明显减小, 在达到稳定状态时影响区域减小了 10%~20%, 回灌量减少了 33%。

(2) 随着回灌时间的不断增大, 影响区域不断增大, 当回灌时间在 30 d 左右时, 影响宽度不再增加, 达到稳定状态。

(3) 随着回灌水头和垃圾体初始孔隙比的增大, 影响区域不断的增大, 回灌量也在逐渐增大, 但增长速率在逐渐减小, 当达到 30 d 左右时, 回灌量的增长速率趋于稳定。

参考文献:

- [1] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils [J]. *Journal of Agricultural Science*, 1911, **4**(1): 1~24.
- [2] SCHROEDER P R, DOZIER T S, ZAPPI P A, et al. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering Documentation for Version 3, EPA/600/R-94/168b[R]. Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 1994.
- [3] TOWNSEND T G. Leachate recycle at solid waste landfills using horizontal injection[D]. Gainesville, FL: University of Florida, 1995.
- [4] MCCREANOR P T, REINHART D R. Hydrodynamic modeling of leachate recirculating landfills[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(7~8): 463~470.
- [5] MCCREANOR P T, REINHART D R. Mathematical modeling of leachate routing in a leachate recirculating landfill[J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1285~1295.
- [6] HAYDAR M, KHIRE M. Leachate recirculation using horizontal trenches in bioreactor landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2005, **131**(7): 837~847.
- [7] JAIN P, TOWNSEND T G, TOLAYMAT T M. Steady-state design of horizontal systems for liquids addition at bioreactor landfills[J]. *Waste Management*, 2010, **30**(12): 2560~2569.
- [8] JAIN P, TOWNSEND TG, TOLAYMAT T M. Steady-state design of vertical wells for liquids addition at bioreactor landfills[J]. *Waste Management*, 2010, **30**(11): 2022~2029.
- [9] WHITE J K, BEAVEN R P, POWRIE W, et al. Leachate recirculation in a landfill: Some insights obtained from the development of a simple 1-D model[J]. *Waste Management*, 2011, **31**(6): 1210~1221.
- [10] 张文杰, 詹良通, 陈云敏, 等. 垃圾填埋体中非饱和-饱和和渗流分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(1): 87~93. (ZHANG Wen-jie, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Unsaturated-saturated seepage analysis of municipal solid wastes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(1): 87~93. (in Chinese))
- [11] 冯世进, 张旭. 考虑垃圾体沉降的生物反应器填埋场渗滤液回灌运移规律[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1836~1842. (FENG Shi-jin, ZHANG Xu. Leachate recirculation in bioreactor landfills considering settlement of municipal solid waste[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1836~1842. (in Chinese))
- [12] STEPHENS D B. *Vadose zone hydrology*[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995.
- [13] ELAGROUDY S A, ABDEL-RAZIK M H, WARITH M A, et al. Waste settlement in bioreactor landfill models[J]. *Waste Management*, 2008, **28**(11): 2366~2374.
- [14] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 22~23. (CHEN Chong-xi, LIN Min. *Groundwater dynamics*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 22~23. (in Chinese))
- [15] MCDOUGALL J. A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste[J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, **34**(4): 229~246.
- [16] BEAVEN R P. The hydrogeological and geotechnical properties of household waste in relation to sustainable landfilling[D]. London: Queen Mary and Westfield College, 2000.
- [17] GENUCHTEN V M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1980, **44**: 892~898.
- [18] KULKARNIL H S, REDDY K R. Effects of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste on moisture distribution in bioreactor landfills[C]. *Geo-Frontiers*, ASCE, Dallas, TX, 2011: 1932~1403.