

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.009

垃圾填埋场中淋滤液回灌液压变化规律

陈明浩,施建勇,周继东

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为研究垃圾填埋场中因进行淋滤液回灌而对孔隙水压力运移产生的影响,在忽略淋滤液在竖直方向上运移的前提下,在考虑填埋场淋滤液回灌的实际工况、液相本构方程、水量平衡条件和有机物生化降解的基础上,建立孔隙水压力理论方程。补充不同的边界条件,得到群井回灌和单井回灌2种情况下模型的解析解。计算及分析结果表明:(a)在进行单井回灌时,回灌进行到30 d后孔隙水压力基本稳定;孔隙水压力随离开回灌井距离的增加而迅速减小,在离回灌井15 m范围内回灌效果较好,20 m以外的区域回灌效果较差。(b)在进行群井回灌时,回灌前期孔隙水压力迅速增加,填埋单元中各处孔隙水压力最终均达到回灌水头压力;与单井相比,群井的回灌效果较好。(c)淋滤液回灌在垃圾体中会产生较高的孔隙水压力,因此在实际工程中确定回灌的时间和距离时应考虑孔隙水压力。

关键词:垃圾填埋场;生物反应器;淋滤液回灌;有机物降解;孔隙水压力;理论解答;液压变化规律
中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2015)04-0329-06

Change rule of hydraulic pressure during leachate recirculation in landfill

CHEN Minghao, SHI Jianyong, ZHOU Jidong

(Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University),
Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of leachate recirculation on the pore-water pressure migration in a landfill, a theoretical equation of the pore-water pressure was built under the premise of ignoring the leachate migration in the vertical direction and with consideration of the actual working conditions of leachate recirculation in the landfill, the liquid phase constitutive equation, the water balance condition, and biochemical degradation of organic compounds. The equation was solved under different boundary conditions, and analytical solutions were obtained under two conditions of group-well recirculation and single-well recirculation. The results showed the following: (a) In single-well recirculation, the pore-water pressure was stable after 30 days of recirculation, the pore-water pressure quickly decreased with the distance from the well, and the recirculation effect was greater within 15 m of the well and lesser beyond 20 m of the well. (b) In group-well recirculation, the pore-water pressure increased rapidly at the beginning of recirculation, then, the pore-water pressure in the landfill cells finally reached the recirculation head pressure, and the group-well recirculation had a stronger effect than the single-well recirculation. (c) High pore-water pressure is generated during leachate recirculation in the garbage, so, in practical engineering, the pore-water pressure should be considered when determining the recirculation time and distance.

Key words: landfill; bioreactor; leachate recirculation; biochemical degradation of organic compounds; pore-water pressure; theoretical solution; change rule of hydraulic pressure

淋滤液回灌是垃圾填埋场一种比较优化的运行方式^[1-5],但是淋滤液回灌会引起填埋体内淋滤液水头

收稿日期:2014-12-26

基金项目:国家自然科学基金(41372268)

作者简介:陈明浩(1992—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:535858521@qq.com

通信作者:施建勇,教授。E-mail:soft-ground@hhu.edu.cn

(或水压力)升高,影响填埋场边坡的稳定性^[6-7]。因此,合理控制垃圾填埋场中淋滤液回灌参数是最大限度加快生化降解、保证垃圾填埋场安全的前提,对进行淋滤液回灌的垃圾填埋场的建设具有指导作用。

笔者目前搜集到的相关资料中尚未发现进行淋滤液回灌现场试验的报道,研究成果基本集中在数值分析^[1-6]。大部分理论均以水量平衡为基础,导出淋滤液压力(水头)方程,结合相应的初始条件和边界条件进行求解,给出压力、饱和范围变化规律^[2-5]。但在垃圾填埋场,垃圾体多处于非饱和状态,淋滤液的运移还受到气体运移的影响,实际上是液、气2种流体的耦合运移^[1,6],而且垃圾填埋场有机物降解也显著影响着液、气的产生^[8-11]。因此,生物反应器填埋场淋滤液压力变化规律应在遵循水量平衡条件和有机物降解规律的基础上建立,并在相应的定解条件下进行求解,通过计算结果提出对实际工程有借鉴意义的建议。

1 淋滤液水头变化方程的建立

在采用竖井回灌的生物反应器填埋场中(见图1,其中 r_e 为回灌井的影响半径, r_w 为回灌井半径, H 为填埋场深度),垃圾土的分层填埋会导致不同深度处的垃圾土有不同的降解速率和渗透系数,且淋滤液水平方向的渗透系数大于竖直方向的渗透系数^[12],因此可以假定淋滤液的运移只发生在水平方向上。在方程建立过程中,认为垃圾土为均质各向同性介质,淋滤液运移服从 Darcy 定律,渗透系数为常数;井内回灌压力不随井深变化;淋滤液不会从顶部封盖和底部衬垫中溢出。考虑到垃圾土有机物降解^[8],赵义^[12]和施建勇等^[13]在 Liu 等^[14]建立的填埋场力-液-气耦合一维模型基础上,建立了填埋场淋滤液轴对称运移方程:

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = B_1 \left(\frac{\partial^2 u_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_w}{\partial r} \right) - B_2 \frac{18A}{162\rho_w V_0 B} t e^{-t/B} \quad (1)$$

式中: u_w ——垃圾土中的液压,Pa; t ——时间,d; r ——轴向距离,m; V_0 ——垃圾土体积, m^3 ; B_1, B_2 ——垃圾土性质有关的参数; ρ_w ——淋滤液的密度, kg/m^3 ; A, B ——降解规律相关的参数^[8]。

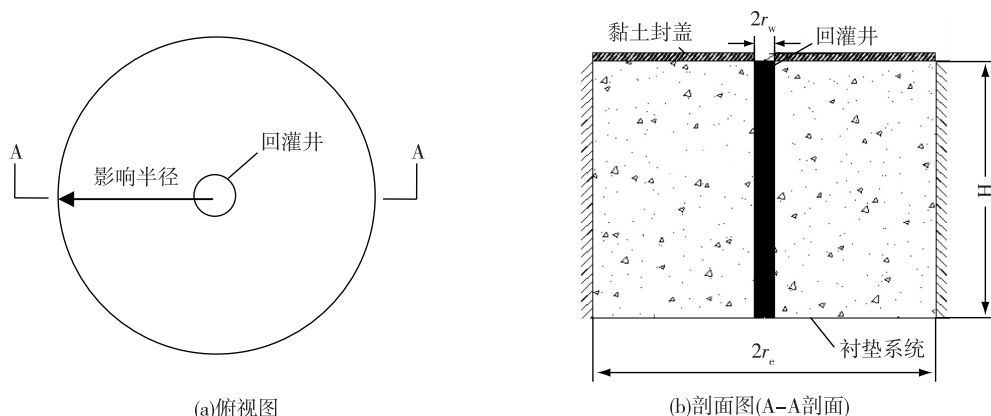


图1 回灌井示意图

Fig. 1 Sketch of recirculation well

2 淋滤液水头变化方程在不同边界下的解答

2.1 单井固定流量回灌时淋滤液压力变化解析解

若回灌井之间间距较大,相互间的影响较小,可以简化成单一回灌井条件;垃圾体中的初始淋滤液压力为 p_{L0} ,采用固定流量 Q 的方式进行回灌,可以补充如下定解条件:

$$u_w(t=0) = p_{L0} \quad \frac{\partial u_w}{\partial r}(r=r_w) = -p'_w = \left| \frac{Q\rho_w g}{2\pi r_w H k_w} \right| \quad u_w(r=r_e) = 0$$

淋滤液压力解析解答为

$$u_w(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{BA_n D}{BB_1 \beta_n^2 - 1} \left(t - \frac{B}{BB_1 \beta_n^2 - 1} \right) e^{-\frac{t}{B}} + \left(-aB_n - bA_n + p_{L0} A_n + \frac{B^2 A_n D}{(BB_1 \beta_n^2 - 1)^2} - \frac{4aA_n}{\beta_n^2} \right) e^{-B_1 \beta_n^2 t} + \frac{4aA_n}{\beta_n^2} \right] \left[Y_1(\beta_n r_w) J_0(\beta_n r) - J_1(\beta_n r_w) Y_0(\beta_n r) \right] \right\} + ar^2 + b \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad a = \frac{p'_w}{2r_w} \quad b = -\frac{p'_w r_e^2}{2r_w} \quad D = -B_2 \frac{18A}{162\rho_w V_0 B}$$

$$A_n = \frac{2r_e R_1(\beta_n r_e)}{\beta_n (r_e^2 R_1^2(\beta_n r_e) - r_w^2 R_0^2(\beta_n r_w))} \quad B_n = \frac{-4[2\beta_n r_e R_1(\beta_n r_e) + (\beta_n r_w)^2 R_0(\beta_n r_w)]}{\beta_n^4 [r_e^2 R_1^2(\beta_n r_e) - r_w^2 R_0^2(\beta_n r_w)]}$$

$$R_0(\beta_n r) = Y_1(\beta_n r_w) J_0(\beta_n r) - J_1(\beta_n r_w) Y_0(\beta_n r) \quad R_1(\beta_n r) = Y_1(\beta_n r_w) J_1(\beta_n r) - J_1(\beta_n r_w) Y_1(\beta_n r)$$

式中: H ——回灌井的有效回灌长度, m ; p'_w ——孔隙液压在井径边界处随径向距离变化的变化率(p'_w 前的负号表示随着径向距离的增加孔隙液压力是减小的), Pa/m ; J, Y ——第一类和第二类贝塞尔函数; β_n ——特征值, 根据方程 $Y_1(\beta_n r_w) J_0(\beta_n r_e) - J_1(\beta_n r_w) Y_0(\beta_n r_e) = 0$ 求得。

2.2 等间距群井固定流量回灌时淋滤液压力变化解析解

在进行回灌时, 若回灌井等间距布置且间距较小, 回灌井间有相互影响, 采用固定流量的方式进行回灌, 可以补充如下的定解条件:

$$u_w(t=0) = p_{l0} \quad \frac{\partial u_w}{\partial t}(r=r_e) = 0 \quad \frac{\partial u_w}{\partial r}(r=r_w) = -p'_w = \left| \frac{Q\rho_w g}{2\pi r_w H k_w} \right|$$

淋滤液压力解析解为

$$u_w(r, t) = p_{l0} - p'_w \left[\frac{r_w}{r_e^2 - r_w^2} \left(2B_1 t - r_e^2 \ln \frac{r}{r_e} - \frac{r_e^2 - r_w^2}{2} \right) \right] -$$

$$\pi p'_w \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-B_1 \beta_n^2 t} J_1^2(\beta_n r_e) [Y_0(\beta_n r) J_1(\beta_n r_w) - J_0(\beta_n r) Y_1(\beta_n r_w)]}{\beta_n^2 [J_1^2(\beta_n r_e) - J_1^2(\beta_n r_w)]} +$$

$$D(B^2 - Bte^{-t/B} - B^2 e^{-t/B}) \quad (3)$$

式中特征值 β_n 根据方程 $Y_1(\beta_n r_e) J_1(\beta_n r_w) - J_1(\beta_n r_e) Y_1(\beta_n r_w) = 0$ 求得。

3 模型验证和计算分析

3.1 回灌时淋滤液压力变化对比分析

Khire 等^[3]通过 HYDRUS-2D 软件, 模拟了 100 m 宽、20 m 深的填埋场内进行淋滤液回灌时淋滤液的水头变化过程, 由于他们在模拟过程中没有考虑垃圾气、温度和生化反应对于淋滤液水头造成的影响, 所以采用单井在固定流量回灌下的解析解(式(2))进行验证。计算参数如下: $r_w = 0.05 \text{ m}$, $r_e = 30 \text{ m}$, $k_w = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $Q = 55 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在建立模型的过程中, 考虑到垃圾土分层填埋造成填埋气和淋滤液的水平方向渗透系数大于竖向渗透系数, 忽略气-液在竖向的流动。根据假定, 不考虑井中回灌压力随着井深度的变化, 可认为井边界处的流量在井深度方向无变化, 因此可以取 $H = H_{\text{well}} = 17 \text{ m}$, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。Khire 等^[3]在计算过程中没有考虑生化降解的影响, 因此忽略方程中的生化降解项对于淋滤液水头的影响。可以补充定解条件如下:

$$u_w(t=0) = p_{l0} = 0 \quad u_w(r=r_e) = 0 \quad \frac{\partial u_w}{\partial r}(r=r_w) = -p'_w = \left| \frac{Q\rho_w g}{2\pi r_w H k_w} \right| = -116.81 \times 10^3 \text{ Pa/m}$$

计算得到衬垫上水头随离开回灌井距离和回灌时间变化的规律, 并与 Khire 等^[3]的计算结果进行对比, 如图 2 所示。

图 2(a) 是 Khire 等^[3]模拟淋滤液回灌试验和本文模型解答之间的对比曲线。从淋滤液水头的对比曲线来看, 在不同回灌流量作用下, 模拟回灌试验的结果与本文模型给出的解答曲线之间有较好的一致性。通过对比曲线可以看出, 在靠近回灌井半径处模拟回灌试验结果比本文模型的求解结果小, 而本文模型求解结果比 Khire 等^[3]的计算结果下降快。这是因为 2 个模型在影响半径处的边界条件不完全相同。本文模型假设在一个填埋单元中淋滤液收集槽是围绕着单元的外边界布置的, 但是在实际工程中这种布置是无法实现的, 实际填埋工程中淋滤液收集槽在衬垫系统上一般只沿一个方向布置; 本文模型加在影响半径上的边界条件是理想化的条件, 实际工程中淋滤液收集系统的工作效率较低。所以, 通过本文模型得出的解答, 衬垫上的水头降低较快, 衬垫上的淋滤液水头比模拟回灌试验得出的结果略小。图 2(b) 实心曲线是 Khire 等^[3]计算的, 在一定回灌流量下填埋场中达到 90% 饱和度区域的宽度随回灌时间的变化规律。图 2(b) 中的实心曲线是在相同回灌流量下, 本文计算的填埋场中 $r = 10 \text{ m}$ 处衬垫上水头高度随回灌时间的变化规律。从对比曲

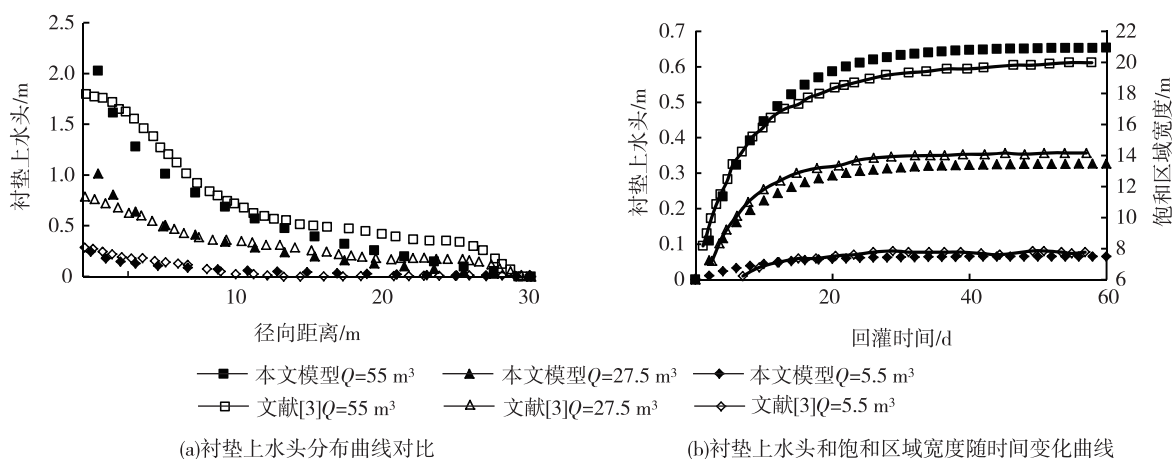


图 2 本文解答和文献[3]中模拟试验结果对比

Fig. 2 Comparison of simulation results of this study with literature [3]

线来看,本文计算所得衬垫上水头的稳定时间与 Khire 等^[3]计算所得填埋场内达到 90%饱和度区域的宽度所需的稳定时间基本相同,在 40 d 左右能达到稳定。说明本文模型可以较好地反映填埋场内孔隙液压随时间的变化规律。

Reddy 等^[1]在假设填埋气体和淋滤液不相溶的基础上,通过联立液相和气相饱和度与压力的关系建立了填埋场的二维压力运移模型,并分析不同工况下用竖井进行淋滤液回灌对于填埋场内部填埋气压和孔隙液压运移的影响。Reddy 等^[1]提出了与 Khire 等^[3]相似的填埋场简化模型,根据此模型,本文采用单井在固定流量回灌时的解答进行验证,求解固定回灌流量下填埋场中最大孔隙液压随时间的变化规律。根据 Reddy 等^[1]的计算参数,得到本文模型的计算参数如下: $r_w = 0.15 \text{ m}$, $r_e = 50 \text{ m}$, $H = H_{\text{well}} = 20 \text{ m}$, $k_w = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $Q = 25 \text{ m}^3/\text{d}$, $p'_w = -150436 \text{ Pa/m}$ 。

图 3 是模拟淋滤液回灌试验中填埋场内最大孔隙液压随时间变化规律,以及与 Reddy 等^[1]计算结果的对比

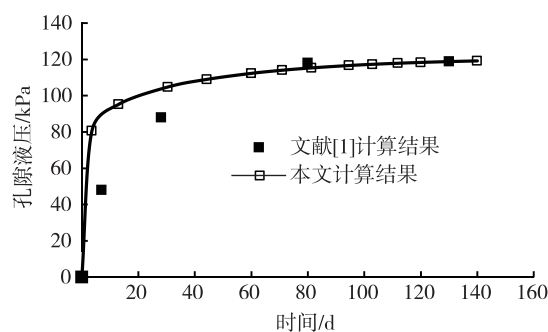


图 3 填埋场中最大孔隙液压随时间变化规律

Fig. 3 Change rule of maximum pore-water pressure with time in landfill

图。从图 3 可以看出,在 120 d 左右,填埋场中的最大孔隙液压达到稳定状态,该结果与 Reddy 等^[1]的计算结果相同,并且最终达到稳定状态时的最大孔隙液压也基本相同(约为 110 kPa)。从对比曲线可以看出,在初始阶段本文计算曲线相对于 Reddy 的计算曲线上升较快,这是由于本文模型并没有考虑淋滤液在竖直方向的运移。

3.2 固定水头回灌情况淋滤液压力变化分析

计算参数如下: $r_w = 0.5 \text{ m}$, $r_e = 30 \text{ m}$, $k_w = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ^[15], $B_1 = 17.633$, $B_2 = 5.900$, $V_0 = 0.1 \text{ m}^3$, $A = 0.03$, $B = 11.13$, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

3.2.1 单井固定水头回灌情况

边界条件和初始条件为: $u_w(r=r_w) = p = 20 \text{ kPa}$, $u_w(r=r_e) = 0$, $u_w(t=0) = 0$, 计算得到的孔隙水压力与时间、离开回灌井距离的关系曲线见图 4。

由图 4(a)可见,回灌开始后,离开回灌井不同距离点的孔隙水压力逐步上升,20 d 以后上升的速率变小,30 d 后基本稳定。由图 4(b)可见,不同时间得到的孔隙水压力,离开回灌井距离越远,孔隙水压力越小。一般在 15 m 范围内有回灌效果,20 m 以外的区域,回灌效果比较差。

3.2.2 群井固定水头回灌情况

边界条件和初始条件为: $u_w(r=r_w) = p = 20 \text{ kPa}$, $\frac{\partial u_w}{\partial r}(r=r_e) = 0$, $u_w(t=0) = 0$, 计算得到的孔隙水压力与时间、离开回灌井距离的关系曲线见图 5。

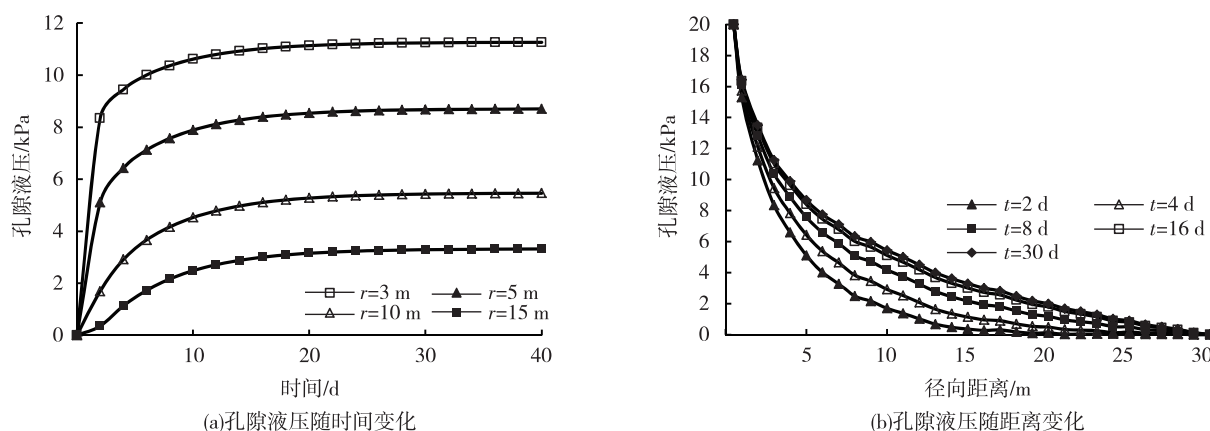


图4 单井固定水头回灌下孔隙液压力随时间和距离的变化规律

Fig. 4 Change rule of pore-water pressure with time and distance in single-well recirculation with stable water head

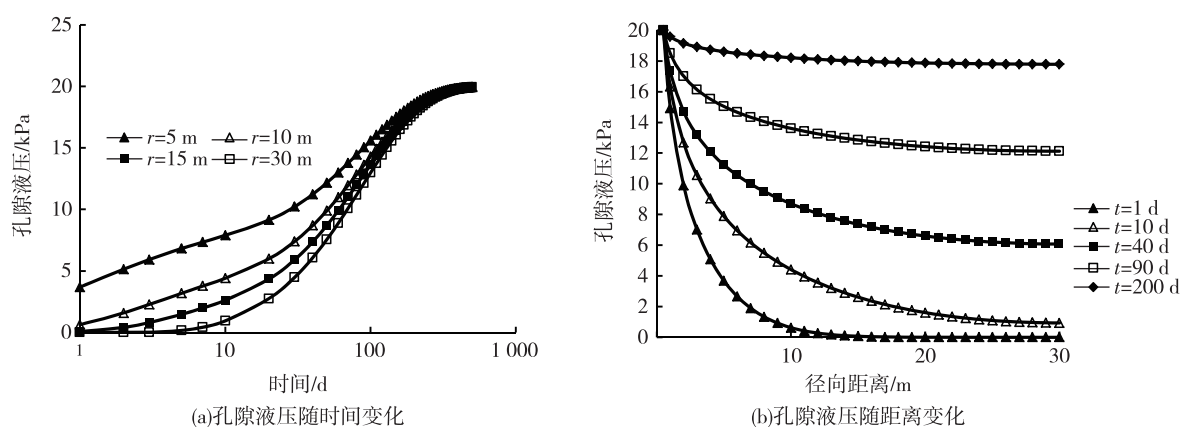


图5 群井固定水头回灌下孔隙液压力随时间和距离的变化规律

Fig. 5 Change rule of pore-water pressure with time and distance in group-well recirculation with stable water head

由图 5(a) 可见, 随回灌时间增加, 孔隙水压力升高, 最终各点的水压力均上升到回灌的水头压力 20 kPa。由图 5(b) 可见, 在回灌开始时仅回灌井附近孔隙水压力受到影响; 最终在垃圾体内的孔隙水压力达到设计的回灌压力。

由图 4 和图 5 可见, 单井回灌影响相对较小, 群井回灌影响较显著。在实际工程中采用回灌井进行回灌时应合理控制井距, 控制回灌方式; 在考虑回灌对垃圾生化降解促进作用时, 还应防止回灌在垃圾体中产生高孔隙水压力集聚的不利影响。

4 结 语

通过淋滤液回灌孔隙水压力理论方程的建立和定解条件的补充, 得到不同运行条件下淋滤液回灌孔隙水压力理论, 并与已有的解答进行对比。通过计算分析, 得到如下结论: (a) 淋滤液回灌轴对称孔隙水压力理论方程是在考虑填埋场回灌井工作实际、水量平衡和有机物降解基础上建立的; (b) 经过与现有解答对比分析, 建立的理论模型能较好地模拟淋滤液回灌过程中垃圾体内部孔隙水压力的变化规律, 可用于进行填埋场淋滤液回灌时间和距离控制的设计指导; (c) 群井的回灌效果好于单井, 但应兼顾回灌在垃圾体中产生高孔隙水压力的影响。

参考文献:

- [1] REDDY K R, KULKAMI H S, KHIRE M V. Two-phase modeling of leachate recirculation using vertical wells in bioreactor landfills[J]. Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste, 2013, 17: 272-284.
- [2] JAIN P, TOWNSEND T, TOLAYMA T. Steady-state design of vertical wells for liquids addition at bioreactor landfills[J]. Waste Management, 2010, 30(11): 2022-2029.

- [3] KHIRE M, MUKHERJEE M. Leachate injection using vertical wells in bioreactor landfill[J]. *Waste Management*, 2007, 27: 1233-1247.
- [4] 王洪涛, 殷勇. 淋滤液回灌条件下生化反应器填埋场水分运移数值模拟[J]. *环境科学*, 2003, 24(2): 66-72. (WANG Hongtao, YIN Yong. Numerical simulation of moisture movement in landfill bioreactors under the condition of leachate recirculation[J]. *Journal of Environmental Science*, 2003, 24(2): 66-72. (in Chinese))
- [5] 冯世进, 张旭. 生物反应器填埋场中水平沟回灌淋滤液非饱和-饱和渗流分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7): 1355-1361. (FENG Shijin, ZHANG Xu. Unsaturated-saturated seepage analysis for leachate recirculation using horizontal trenches in bioreactor landfills[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1355-1361. (in Chinese))
- [6] GIRI R K, REDDY K R. Slope stability of bioreactor landfills during leachate injection: Effects of heterogeneous and anisotropic municipal solid waste conditions[J]. *Waste Management & Research*, 2014, 32(2): 1-12.
- [7] QIAN Xuede. Limit equilibrium analysis of translational failure of landfills under different leachate buildup conditions[J]. *Water Science and Engineering*, 2008, 1(1): 44-62.
- [8] 刘晓东, 施建勇, 胡亚东. 城市固体废弃物(MSW)力-液-气耦合一维沉降模型及其简化计算[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5): 693-699. (LIU Xiaodong, SHI Jianyong, HU Yadong. Coupled mechanical-gas settlement model and calculation for MSW by considering biodegradation [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 693-699. (in Chinese))
- [9] 陈云敏, 谢焰, 詹良通. 城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2): 184-190. (CHEN Yunmin, XIE Yan, ZHAN Liangtong. One-dimensional consolidation model for landfills considering solid-liquid-gas interaction [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 184-190. (in Chinese))
- [10] YOUNG A. Mathematical modeling of landfill gas extraction[J]. *Journal of Environmental Division, ASCE*, 1989, 115(6): 1073-1087.
- [11] 陈继东, 施建勇, 方云飞. 垃圾土降解规律及填埋场沉降计算分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(6): 680-682. (CHEN Jidong, SHI Jianyong, FANG Yunfei. Degradation law of municipal solid waste and settlement calculation of landfills[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2006, 34(6): 680-682. (in Chinese))
- [12] 赵义. 垃圾体气体渗透性质及填埋场气-液耦合迁移规律的研究[D]. 南京: 河海大学, 2014.
- [13] 施建勇, 赵义, 周继东. 考虑竖井作用的填埋场气-液耦合运移规律[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(4): 314-320. (SHI Jianyong, ZHAO Yi, ZHOU Jidong. Flow equation for gas-leachate coupling effect considering vertical wells in landfills [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2014, 42(4): 314-320. (in Chinese))
- [14] LIU XIAODONG, SHI JIANYONG, QIAN XUEDE. One-dimensional model for municipal solid waste (MSW) settlement considering coupled mechanical-hydraulic-gaseous effect and concise calculation [J]. *Waste Management*, 2011, 31(12): 2473-2483.
- [15] 刘晓东, 施建勇. 基于土水特征曲线预测城市固体废弃物(MSW)非饱和和渗透系数研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(5): 856-862. (LIU Xiaodong, SHI Jianyong. Unsaturated conductivity of MSW based on soil-water characteristic curve [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(5): 856-862. (in Chinese))