

文章编号: 1000-7598 (2012) 04-1094-09

填埋场排水层淤堵条件下渗滤液最高水位研究

顾高莉, 柯 瀚, 李育超, 万晓丽, 陈云敏

(浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 在 Rowe 和 Fleming 提出的用以计算淤堵时间简化模型的基础上, 针对填埋场排水层淤堵时空分布特征, 合理地作了进一步假设和推导, 得到了可以反映淤堵发展的简化模型, 推导出了排水层渗透系数的变化规律。采用水量平衡的单元分析方法, 建立了淤堵条件下最高水位计算模型, 获得了排水层最高水位深度的计算方法, 并与稳态、瞬态方法进行比较。结果表明, 无淤堵时得到的结果与瞬态结果一致, 且都趋于稳态结果; 淤堵较严重时水位受到显著影响, 必须考虑淤堵。通过参数分析发现, 前期渗透系数越小 (后期越大)、排水距离越长、入渗速度越快、离子浓度越高, 则淤堵对水位的影响越严重, 同时提出考虑淤堵条件下改进排水系统的设计建议。

关 键 词: 填埋场; 渗滤液排水层; 渗透系数; 淤堵; 渗滤液最高水位

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Analysis of maximum liquid depth in landfill drainage layers under clogging conditions

GU Gao-li, KE Han, LI Yu-chao, WAN Xiao-li, CHEN Yun-min

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Based on the simplified model for estimating the clogging time which was made by Rowe and Fleming, the assumptions and derivations are developed reasonably due to the time-space distribution of clogging in drainage layers; and a simplified model is obtained which can reflect the development of clogging and the variation of hydraulic conductivity of the drainage layers. Using the cell analysis of water balance, a method for calculating maximum liquid depth in drainage layers which is based on the maximum liquid depth clogging model is proposed. Comparing with the steady and transient results, it is shown that no clogging results are in accordance with the transient results, which all tend to the steady results. And the clogging must be considered when clogging is serious which may affect the liquid depth markedly. Parameter analysis shows that the greater previously (the smaller later) the hydraulic conductivity, the longer the drainage distance, the faster the infiltration rate, the higher the concentration, the more serious the impact of clogging on liquid depth. At the same time design suggestions are proposed for improving the drainage system.

Key words: landfill; leachate drainage layer; hydraulic conductivity; clogging; maximum liquid depth

1 引 言

现代填埋场排水系统中渗滤液最高水位直接影响污染扩散时间和防渗性能, 国际上大多都严格要求衬垫上渗滤液的最高水头小于 $30 \text{ cm}^{[1-2]}$ 。为准确计算填埋排水系统中最高水位, 已有许多学者进行了大量研究^[2-15]。在排水系统渗滤液最高水位的稳态计算方法中^[3-7], McEnroe⁹³ 方法被认为是计算稳态排水层水位的较准确的计算方法^[4]。同时, 柯

瀚等^[6-7]提出了成层介质中填埋场渗滤液的最高饱和深度计算方法以及填埋场复合排水系统中最高水位深度的计算方法。对于时域条件下填埋场导排系统水位变化规律研究方面, Demetracopoulos^[8]基于标准 Dupuit 假设提出了非稳态计算模型, Neuman、Witherspoon 计算了均质土非稳定流的水位, Crowe^[9]提出了可变网格技术用来计算非均质土中的水位变化。柯瀚等^[10], 万晓丽^[11]在扩展的 Dupuit 假设的基础上, 提出了排水系统中水位变化的瞬态

收稿日期: 2010-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50978229); 国际合作与交流重大项目(No. 51010008); 校长专项基本科研业务费专项资助项目(No. 2010XZZX001); 重点实验室科研业务费专项基本科研业务费专项资助项目(No. 2010KYJD006); 省创新团队浙江省重点创新团队支持计划资助(No. 2009R50050); 苏州市科技支撑计划项目“生活垃圾填埋场安全性能关键技术研究项目”(No. 520324)。

第一作者简介: 顾高莉, 男, 1985 年生, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程和基础工程方面的研究工作。E-mail: gugaoli@163.com

通讯作者: 柯瀚, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程和基础工程方面的研究工作。E-mail: boske@126.com

计算方法, 并与其他计算方法进行了对比和验证。

由于填埋场运行过程中物理、化学、生物因素的影响, 渗滤液排水层会发生不同程度的淤堵, 导致排水层渗透系数发生变化^[9, 11-13]。因此, 在填埋场运行过程中排水层的渗滤液水位和初始设计时估算的不一致, 水位常常超出规范要求并最终导致渗滤液收集和排放系统达不到预期目标。合理地估算淤堵条件下排水系统的最高水位, 对填埋场的设计和运行意义重大。但由于淤堵机制复杂, 时间漫长, 难以建立准确的模型, 目前国内外在淤堵条件下排水层最高水位方面的研究很少^[9-11]。本文在 Fleming^[12]和 Rowe^[13]提出的用以计算淤堵时间的简化模型的基础上, 提出了计算淤堵条件下填埋场最高水位的简化模型和方法, 用以分析填埋场长期运行的稳定性及污染状况。

2 分析方法

2.1 淤堵过程的模拟

Fleming^[12]和 Rowe^[13]提出了形成最大淤堵量所需时间的计算模型(见图1)。万晓丽^[11]在此基础上进一步提出以下假设:(1) 在渗滤液收集管附近淤堵最严重, 距收集管越远, 淤堵物越少, 且淤堵孔隙率 v_f 和淤堵厚度 B' 在达到最大值之前随距离的变化呈线性;(2) 距排水管最近处排水层中被淤堵的孔隙率 v_{fL} 和被淤堵的厚度 B'_L 从 0 开始增加, 在 T_1 时刻都达到最大值, 即 $t=T_1$ 时 $v_{fL} = v_f^*$, $B'_L = B$;(3) 在 T_2 时刻淤堵量达到最大, 即: 距离排水管长度为 a 的范围内被淤堵的孔隙率 v_f 和被淤堵的厚度 B' 均达到最大值。其中, 排水层厚度 B 和淤堵厚度 B' 均为竖向厚度。

Fleming^[12]和 Rowe^[13]推导形成最大淤堵量所需时间使用的假设, 只假定了完全淤堵时的情况, 即距离排水管长度 $a(t)$ 是作为定值处理的。万晓丽^[11]在此基础上认为: 排水管处($x=L$)为淤堵最严重的地方, 且随时间增长淤堵不断加剧, 淤堵孔隙率和厚度不断增大, 当该处淤堵达到最大值后, $a(t)$ 开始出现并随时间增加不断增长; 远离排水管的地方被淤堵的孔隙率 v_{fL} 和被淤堵的厚度 B'_L 随距离增加线性减少, 直至排水单元最远处为 0 (未淤堵)。由此得到了整个淤堵的发展过程, 进而可以计算整个过程中水位的变化情况。

对于渗滤液中钙离子含量始终为 c 的情况, 淤堵过程中淤堵孔隙率 $v_f(x)$ 、淤堵层厚度 $B'(x)$ 、渗透系数 $k(x, t)$ 分别为^[11]:

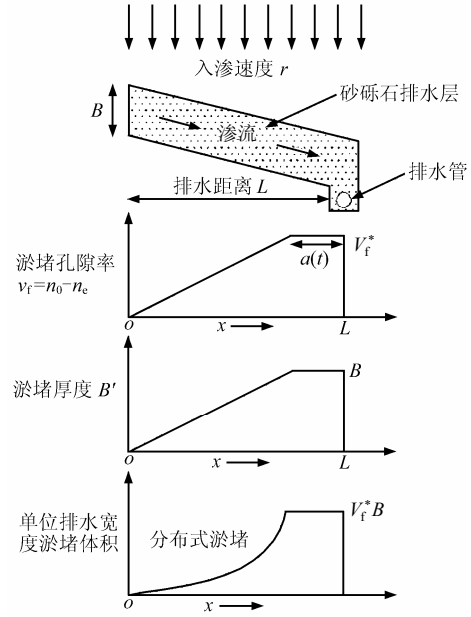


图1 排水层淤堵量随距离变化示意图
Fig.1 Sketch of changes of clogging of the drainage layer with distance

$0 < t \leq T_1$ 时:

$$v_f(x) = \sqrt{\frac{3cq_0 v_f^* t}{B \rho_c f_{Ca}}} \frac{x}{L} \quad (1)$$

$$B'(x) = \frac{B v_{fL}}{v_f^*} \frac{x}{L} = \sqrt{\frac{3cq_0 B t}{\rho_c f_{Ca} v_f^*}} \frac{x}{L} \quad (2)$$

$$k(x, t) = e^{-b_k \sqrt{\frac{3cq_0 v_f^* t}{B \rho_c f_{Ca}}} \frac{x}{L}} k_0 \quad (3)$$

$T_1 < t \leq T_2$ 时:

$$v_f(x) = \begin{cases} v_f^* x / [L - a(t)] & x < L - a(t) \\ v_f^* & L - a(t) < x < L \end{cases} \quad (4)$$

$$B'(x) = \begin{cases} Bx / [L - a(t)] & x < L - a(t) \\ B & L - a(t) < x < L \end{cases} \quad (5)$$

$$k(x, t) = \begin{cases} e^{-b_k v_f^* \frac{x}{L - a(t)}} k_0 & x < L - a(t) \\ e^{-b_k v_f^*} k_0 & L - a(t) \leq x \leq L \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为距离排水管的水平距离; t 为时间; L 为水平排水距离; c 为渗滤液中钙离子的含量; q_0 为单位面积上渗滤液入渗速度; $v_f(x)$ 为 t 时刻 x 处被淤堵的孔隙率; v_f^* 为淤堵最大孔隙率; B 为排水层厚度; B' 为淤堵厚度 (B 、 B' 均为竖向厚度); ρ_c 为淤堵物质的干密度; f_{Ca} 为总淤堵物中钙元素的含

量; B_k 为排水砂砾石渗透系数和材料实际孔隙率之间的关系式的拟合系数; v_f 为任意淤堵程度下的孔隙减少量, $v_f = n_0 - n_e$, n_0 为初始排水孔隙率, n_e 为时刻 t 实际排水孔隙率; $a(t)$ 为 t 时刻排水层顶部淤堵距离排水管长度; T_1 为排水管处达到最大淤堵的时刻; T_2 为整个排水层达到最严重淤堵时刻, 即淤堵完成时间,

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= \frac{3cq_0Lt}{2Bv_f^* \rho_c f_{Ca}} - \frac{L}{2} \\ T_1 &= \frac{B\rho_c f_{Ca} v_f^*}{3cq_0} \\ T_2 &= \frac{B\rho_c f_{Ca} v_f^*}{cq_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

认为当淤堵 $a(t) = L$ 时淤堵已经达到最严重。

2.2 淤堵条件下水位计算模型与控制方程的建立

图 2 给出了填埋场单层排水系统的示意图。排水层的相对厚度取为 T (垂直于下底面量测, 与上文竖向厚度 B 关系: $B = T/\cos \alpha$), 砂砾石被淤堵的厚度为 $B'(x, t)$, 初始渗透系数为 k_0 , 在 t 时刻 x 处淤堵时渗透系数为 $k(x, t)$, 垃圾的渗透系数为 k_w , 排水孔隙率为 n_e , 初始排水孔隙率为 n_0 , 垃圾的排水孔隙率为 n_w , 总的水平排水距离为 L , 排水系统底部倾角为 α 。

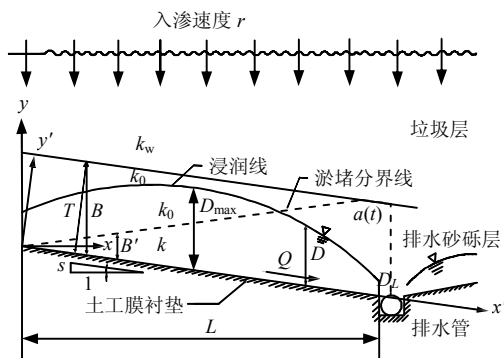


图 2 填埋场排水系统的断面示意图

Fig.2 Cross-sectional sketch of leachate drainage system

在稳定状态下, 由于流量的连续性, 任何一处的排水量等于该处上游垂直入流量, 即

$$Q = rx \quad (8)$$

式中: Q 为渗滤液排放层单位宽度的侧向排水量 (m^2/s); r 为竖流入排水层的入渗速度 (m/s); x 为至上游边界的水平距离 (m)。

本文采用 Dupuit 假定的扩展形式^[4, 6]进行分析。

在单一介质中, McEnroe^[4]提出在竖直断面上总流量表达式为

$$Q \approx -kD \frac{dy}{dx} \cos^2 \alpha \quad (9)$$

式中: k 为单一介质的渗透系数 (m/s); D 为任意位置的水位深度 (竖直方向) (m); y 为到上游坡顶的竖向距离 (m)。

D 和 y 存在下列关系

$$D = y + x \tan \alpha \quad (10)$$

对非均匀介质条件下的单一坡段, 结合式 (9)、(10), 扩展 Dupuit 公式可以改写为下列形式^[6]

$$Q = -\int_0^D k(t) dt \left(\frac{dy}{dx} \cos^2 \alpha \right) = -\int_0^D k(t) dt \cdot \left[\left(\frac{dD}{dx} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha \right] \quad (11)$$

结合上文中前人对淤堵过程的研究成果, 将相关参数代入式 (11) 有

$$Q(x, t) = \begin{cases} -k(x, t)D(x, t) \left(\frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right), & D(x, t) < B'(x, t) \\ -[(k(x, t)B'(x, t) + k_0(D(x, t) - B'(x, t))) \cdot \cos^2 \alpha \left(\frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right)], & B'(x, t) \leq D(x, t) \leq B \\ -[(k(x, t)B'(x, t) + k_0(B - B'(x, t))) \cdot \cos^2 \alpha \left(\frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right)], & D(x, t) > B \end{cases} \quad (12)$$

根据柯瀚和万晓丽^[10-11]的研究成果, 从渗流区域内取出一单元, 根据上述基本假定, 引起单元内水量变化的因素主要是上部下渗的渗滤液和从上下游断面流入和流出的水量。在 dt 时间内进出水量平衡, 因此有

$$Q(x, t)dt + rdxdt - Q(x + dx, t)dt - q(x, t)dxdt = n_e [D(x, t + dt) - D(x, t)]dx \quad (13)$$

在淤堵过程中, x 处的排水孔隙率 n_e 随时间变化, 可由下式求得

$$n_e = \frac{1}{D} \int_0^D n dt = \begin{cases} n_0 - v f_x, & D(x,t) < B'(x,t) \\ ((n_0 - v f_x) B'(x,t) + n_0 (D - B'(x,t))) / \\ D(x,t), & B'(x,t) \leq D(x,t) \leq B \\ ((n_0 - v f_x) B'(x,t) + n_0 (B - B'(x,t)) + \\ n_w (D(x,t) - B)) / D(x,t), & D(x,t) > B \end{cases} \quad (14)$$

则控制方程式 (13) 可写成

$$Q(x,t)dt + r dx dt - \left[Q(x,t) + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} dx \right] dt - \\ q(x,t) dx dt = n_e \left[D(x,t) + \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} dt - D(x,t) \right] dx \quad (15)$$

化简后得

$$n_e \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} + r - q(x,t) \quad (16)$$

根据达西定律, 下层衬垫上渗漏速率 q 可写成

$$q = k_1 \left(\frac{D+d}{d} \right) \quad (17)$$

将式 (12)、(17) 代入式 (16), 结合式 (1)~(6) 有

$$n_e \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} = \left\{ \begin{aligned} & \cos^2 \alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[k(x,t) D(x,t) \left(\frac{\partial D(x,t)}{\partial x} - \tan \alpha \right) \right] \right\} + \\ & r - k_1 \left(\frac{D+d}{d} \right), & D(x,t) < B'(x,t) \\ & \cos^2 \alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[(k(x,t) B'(x,t) + k_0 (D(x,t) - B'(x,t))) \right] \right\} + \\ & \left\{ \frac{\partial D(x,t)}{\partial x} - \tan \alpha \right\} \right\} + \\ & r - k_1 \left(\frac{D+d}{d} \right), & B'(x,t) \leq D(x,t) \leq B \\ & \cos^2 \alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[(k(x,t) B'(x,t) + k_0 (B - B'(x,t)) + \right. \right. \\ & \left. \left. n_w (D(x,t) - B)) \right] \right\} + \\ & \left\{ \frac{\partial D(x,t)}{\partial x} - \tan \alpha \right\} \right\} + \\ & r - k_1 \left(\frac{D+d}{d} \right), & D(x,t) > B \end{aligned} \right. \quad (18)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= \frac{3c q_0 L t}{2 B v_f^* \rho_c f_{Ca}} - \frac{L}{2} \\ k(x,t) &= \begin{cases} e^{-b_k \sqrt{\frac{3c q_0 v_f^* t}{B \rho_c f_{Ca}}} \cdot \frac{x}{L}} k_0, & 0 < t \leq t_1 \\ e^{-b_k v_f^* \frac{x}{L-a(t)}} k_0, & t_1 < t \leq t_2, x < L-a(t) \\ e^{-b_k v_f^*} k_0, & t_1 < t \leq t_2, L-a(t) \leq x \leq L \end{cases} \\ n_e &= \begin{cases} n_0 - v f_x, & D(x,t) < B'(x,t) \\ ((n_0 - v f_x) B'(x,t) + n_0 (D - B'(x,t))) / \\ D(x,t), & B'(x,t) \leq D(x,t) \leq B \\ ((n_0 - v f_x) B'(x,t) + n_0 (B - B'(x,t)) + \\ n_w (D(x,t) - B)) / D(x,t), & D(x,t) > B \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

根据对称性原理以及 Harr^[14] 的研究结果, 简化填埋场浸润线自由面计算模型的边界条件为:

(1) 在模型左边边界处的流量为 0。即在 $x=0$ 处 $Q=0$:

$$Q(0,t) = 0 \quad (20)$$

(2) 在模型右边边界处水力梯度为 -1 ^[14]。即在 $x=L$ 处 $\frac{dy}{dx} \equiv -1$;

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d(D - x \tan \alpha)}{dx} = \frac{dD}{dx} - \tan \alpha = -1$$

$$\text{即} \quad (1 - \tan \alpha) + \frac{dD(L,t)}{dx} = 0 \quad (21)$$

模型的初始条件: 因为最初排水层上水位为 0, 所以初始条件可以表示为

$$D(x,0) = 0 \quad (22)$$

3 方法分析与验证

本文采用 MATLAB 软件中的 pdepe 函数求解。结合填埋场的实际, 工况参数取值如下:

垃圾底下排水层厚 $T=30$ cm, 最大排水距离 $L=50$ m, 坡度为 $S=2\%$, 排水层渗透系数 $k_0=0.01$ cm/s, 排水孔隙率 $n_e=0.35$ ^[9, 12-13], 垃圾的渗透系数为 $k_w=5 \times 10^{-4}$ cm/s^[12-17], 排水孔隙率为 $n_w=0.2$ ^[9, 12, 16], 总淤堵物中钙元素的含量 $f_{Ca}=20\%$, 淤堵物质的干密度 $\rho_c=1.8 \times 10^3$ kg/m³^[9, 12, 16-18], 渗滤液入渗速度 $r=0.375$ m/a, 单位体积渗滤液中钙元素的含量 $c=1500$ mg/L, 最大淤堵孔隙率 $v_f^*=0.245$ ^[9, 12] ($0.7n_e$,

与下文一致)。参照 Cooke^[9]的研究成果,排水砂砾石渗透系数和材料实际孔隙率之间的关系式的拟合系数 $B_k = 38.2$ ^[9, 12-13, 16]。

以上基本参数的取值参考了国内外大量试验的研究结果^[9-18],使用前文 2.2 的模型,可以得到:淤堵时间 $T_1 = 5\ 724\text{ d} = 15.68\text{ a}$, $T_2 = 17\ 173\text{ d} = 47.05\text{ a}$ 。图 3~5 为在淤堵条件下排水层渗透系数和淤堵厚度的变化图。

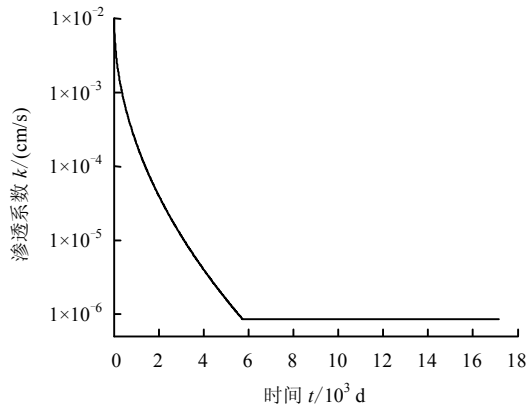


图 3 淤堵条件下排水管处渗透系数随时间变化图
Fig.3 Change of hydraulic conductivity of the pipe with time under clogging

在图 3 中,淤堵随时间发展的过程中,排水管处的渗透系数开始时随时间增加减小很快,5 724 d 时 (15.68 a, 即 T_1 时刻) 减少至 $8.62 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$, 并保持稳定。

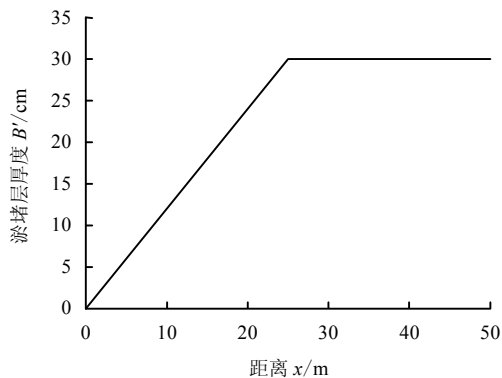


图 4 淤堵最严重时排水距离上淤堵厚度图
Fig.4 Change of clogging thickness under the most seriously clogging conditions with distance

图 4 为 $a(t)=L/2$ 时排水距离上淤堵厚度图。从图可以看到,此时 (31.37 a) 在整个排水距离上,距排水管较远处 ($x=25 \sim 50\text{ m}$) 的淤堵最厚,均达到了整个层厚 30 cm; 距排水管较远处,随距离增加淤堵厚度线性减少,直至最远处 ($x=0\text{ m}$) 淤堵厚度为 0, 即该处没有淤堵。

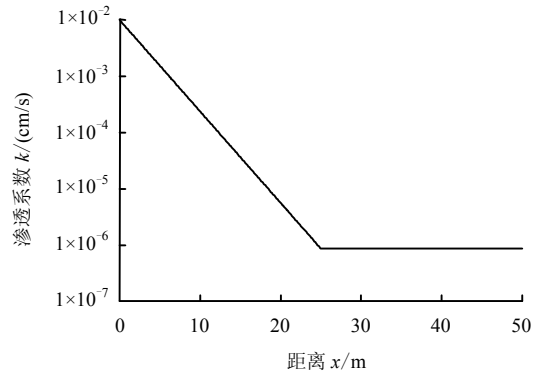


图 5 淤堵最严重时整个排水距离上淤堵厚度内渗透系数变化图

Fig.5 Change of hydraulic conductivity under the most seriously clogging conditions with distance

图 5 给出了淤堵最严重时 ($a(t)=L$, $T_2=47.05\text{ a}$) 整个排水距离上淤堵厚度内渗透系数变化。在 $x=0\text{ m}$ 处 (离管口最远) 渗透系数最大 (0.01 cm/s), 这里并没有淤堵, 随着离排水管距离的减小, 渗透系数迅速减小, 在 $x=25\text{ m}$ 处为 $8.62 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$, 从这里到管口处淤堵都是最严重的, 渗透系数均降为 $8.62 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ 。

为了验证本文提出的淤堵条件下填埋场最高水位计算方法的正确性,用 3 种方法对工况进行比较: 稳态方法^[6]、瞬态方法^[10]和本文方法。在同样的参数条件下,将通过 Matlab 求解的淤堵条件下水位增长过程及无淤堵条件下水位增长过程、与柯瀚等^[6, 10]之前提出的稳态方法、瞬态方法求出的结果进行对比,以验证该控制方程的最终准确性。

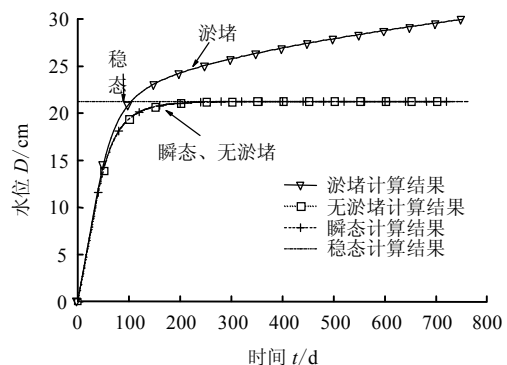


图 6 淤堵与无淤堵、瞬态、稳态条件下最高水位的比较

Fig.6 Maximum liquid head under clogging and no clogging, transient and steady conditions

图 6 为淤堵与无淤堵、瞬态、稳态条件下最高水位的比较。无淤堵即为在考虑淤堵的计算方法中,将离子浓度设为很小的数值 (本文取 $c=1 \times 10^{-10}\text{ mg/L}$), 认为此时没有产生淤堵。由于瞬态和无淤

堵情况下最高水位很快稳定, 故图中只给出了 2 a 时间的结果。从图 6 可以看出: 瞬态和无淤堵情况的计算结果几乎重合, 从开始时迅速增加, 250 d 时基本稳定, 最终都趋于稳态的结果, 稳定在 21.24 cm, 这也说明该淤堵条件下水位计算方法的可靠性; 从图中还可以看到, 在淤堵条件下, 开始时水位和瞬态方法结果一致, 但随时间增加, 水位一直上升, 100 d 达到稳态方法的结果后仍不断上升, 在 750 d 左右超过 30 cm, 并仍在不断增加。

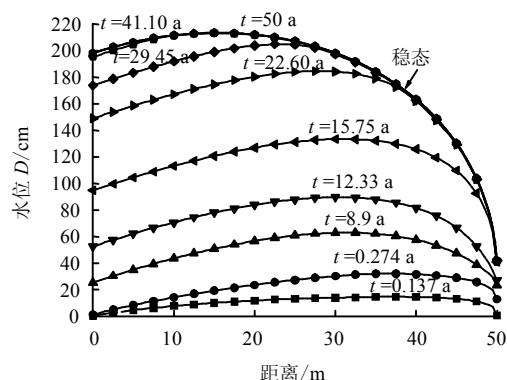


图 7 淤堵与稳态水位增长图

Fig.7 Increment procedures of phreatic surface under clogging and steady conditions

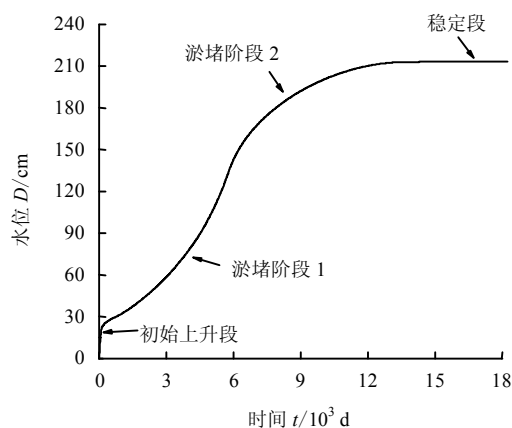


图 8 最高水位随时间增长图

Fig.8 Change of the maximum liquid depth with time

本文认为淤堵最严重时 (即 $a(t) = L$), 此时下部排水层完全淤堵, 渗透系数很低 (8.62×10^{-7} cm/s), 渗滤液基本都从排水层上面的垃圾排出。为进一步验证本文方法在淤堵严重条件下的可靠性, 本文在淤堵最严重时, 根据渗透系数的分布规律 (图 3~5), 利用稳态方法, 计算了该条件下稳态的最高水位, 并与淤堵条件下水位的增长作了比较, 见图

7。如图所示, 淤堵条件下, 水位随时间不断增长, 不断趋近于稳态水位, 在 $T_2 = 47.05$ a 时, 最高水位为 213.45 cm, 这与稳态时的计算结果 213.46 cm 是吻合的, 这也证明了该方法的可靠性。

工况最高水位在淤堵条件下随时间的完整变化情况见图 8。随着时间的增加, 水位逐渐升高。在约 100 d 之前, 水位迅速增加至 21 cm, 而后水位平稳增加, 在 5 724 d 左右 ($T_1 = 15.68$ a) 水位有一拐点, 继续增长直至 17 173 d 左右 ($T_2 = 47.05$ a), 水位基本稳定在 213.45 cm, 达到淤堵严重状态。整个淤堵过程可以分为 3 个阶段: 开始时迅速上升段, 而后分别为淤堵阶段 1 和淤堵阶段 2, 最后为稳定段。其中, 开始时水位升高较快, 对比图 6 可知, 这主要是由于瞬时水位增长较多的缘故; 而后, 由于淤堵的影响, 水位逐渐平稳上升; 当排水层顶部出现淤堵时 (即 $a(t) > 0$), 水位增长会有一拐点, 最终水位增长减慢并逐渐稳定下来。图 8 中水位在迅速上升段末、淤堵初期达到了 30 cm 之后, 继续上升并远远超过了规范中规定的 30 cm, 由前文的对比分析可知, 这的确是由于淤堵引起的。因此, 在实际设计中, 必须考虑淤堵的影响。

由此可见, 如果设计时不预先考虑填埋场的淤堵, 按常规的稳态和瞬态方法计算最高水位 (21.24 cm), 可以满足规范要求, 但现实中由于淤堵的影响, 将造成水位在两年多的时间后超过 30 cm, 并最终可能高达 213 cm, 对环境污染扩散造成严重威胁, 根本无法达到规范要求。因此, 合理考虑填埋场排水层的淤堵, 才能使设计更符合实际。

从以上对比分析可以看出, 本文模型与方法是合理可靠的。模型相对简单, 取值方便, 对合理考虑填埋场排水层淤堵条件下水位有重要意义, 有很强的实用性。

4 参数分析

淤堵条件下填埋场排水层渗滤液最大水位的影响因素很多, 限于篇幅, 下面主要分析排水层渗透系数 k_0 、坡度 S 、水平排水距离 L 、入渗速度 r 及渗滤液浓度 c (一般采用 Ca^{2+}) [9, 12-13] 的影响。

以下算例的基本参数采用工况中的数值, 具体取值和变化见图 9~13。各种参数条件下淤堵时间不一样, 本文给出了各算例整个淤堵时间里最高水位的变化图。为更清晰地说明问题, 同时又给出了无淤堵条件下的最高水位情况。

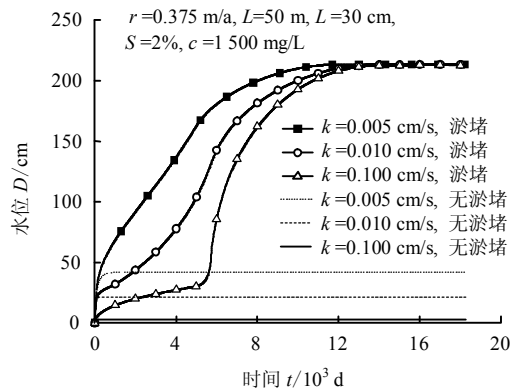


图9 淤堵与无淤堵条件下不同渗透系数最高水位增长过程图

Fig.9 Increment procedures of the maximum liquid depth with different hydraulic conductivity under clogging and no clogging conditions

图9为不同渗透系数 k_0 下最大水位随时间的增长情况。需要说明的是,由于渗透系数 k_0 、排水孔隙率 n_e 和最大淤堵孔隙率 v_f 之间有一定的对应关系,参照Cooke^[9]的研究结果,图9中取 $v_f=70\% \times n_e$,渗透系数 $k_0=0.005$ 、 0.010 、 0.100 cm/s时,孔隙率 n_e 对应分别取为 0.30 、 0.35 、 0.38 。

从图9可以看出:淤堵与无淤堵条件下最高水位相差很大。淤堵条件下,渗透系数 k 越小,同一时刻最高水位会越大,但3种不同渗透系数条件下水位最终将趋于同一个稳定值(213.45 cm),这是由本文的淤堵模型所决定的,这也符合现场的实际情况。不同渗透系数下淤堵完成时间 T_2 相同。淤堵阶段1时渗透系数越小,水位增长速度越快;淤堵阶段2时,渗透系数越大,水位增长速度越快。这表明,开始时渗透系数小,淤堵的影响大,而后来渗透系数大,淤堵的影响逐渐增强。而无淤堵下的水位都很快达到稳定且都较低(50 cm以下)。

排水层采用初始渗透系数较大的砾石(大于 10^{-1} cm/s)^[1,2,18],对于初期控制淤堵条件下最高水位有重要作用。

图10给出了不同坡度 S 条件下最大水位随时间的增长情况。开始时最高水位重合且增加很快,而后无淤堵,结果趋于稳定,淤堵条件下最高水位不断增长并最终达到稳定,不同坡度下的稳定值各不相同。淤堵条件下,坡度越小,同一时刻的最高水位越大,但淤堵完成时间相同。不同坡度下,水位对时间的增长速度差不多,即不同坡度下,淤堵对水位的影响差不多。填埋场设计时,适当增加坡度,可以有效降低淤堵条件下的最高水位。

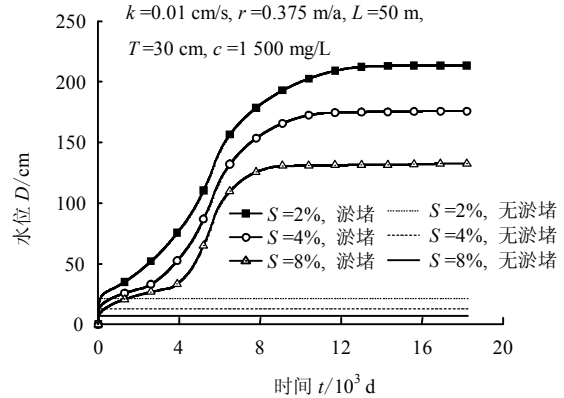


图10 淤堵与无淤堵条件下不同坡度最高水位增长过程图

Fig.10 Increment procedures of the maximum liquid depth with different slopes under clogging and no clogging conditions

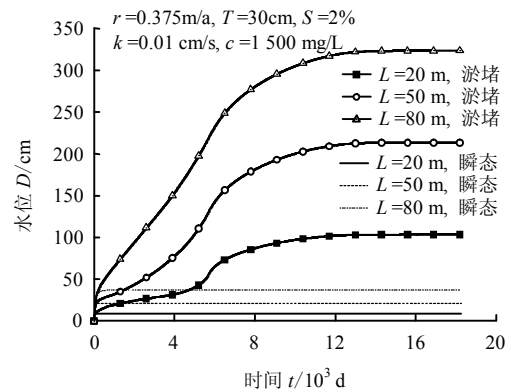


图11 淤堵与无淤堵条件下不同排水距离最高水位增长过程图

Fig.11 Increment procedures of the maximum liquid depth with different drainage distance under clogging and no clogging conditions

图11给出了不同排水距离 L 条件下最大水位随时间的增长情况。淤堵条件下,排水距离越长,水位越高,最终稳定时的水位也越高。不同排水距离下最高水位的稳定值相差明显,差值比未淤堵时的大得多。不同排水距离下淤堵完成时间相同。排水距离越长,水位增长的速度越快。表明排水距离越长,淤堵对水位的影响越强。控制排水距离,对降低淤堵条件下填埋场的最高水位,有现实意义。

图12给出了不同入渗速度 r 条件下最高水位随时间的变化。淤堵条件下,入渗速度 r 越大,水位越高,最终稳定时的水位也越高。不同的入渗速度,最高水位的稳定值差别很大,淤堵完成时间差别也很大。入渗速度越大,水位增长的速度越快。表明入渗速度越大,淤堵对水位的影响越强。

因此,填埋作业时,应当及时覆盖土工膜,减

少入渗,可以有效减少淤堵影响、降低最高水位。

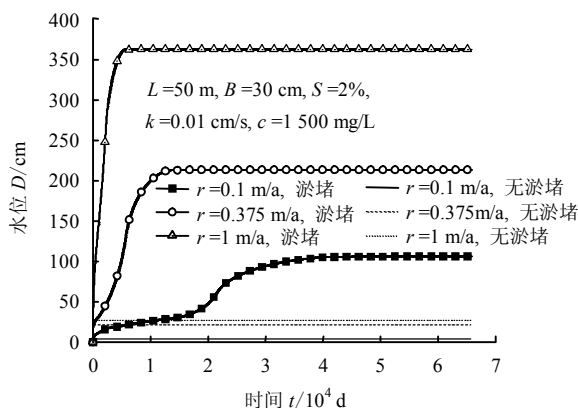


图 12 淤堵与无淤堵条件下不同入渗速度最高水位增长过程图

Fig.12 Increment procedures of the maximum liquid depth with different inflow rate under clogging and no clogging conditions

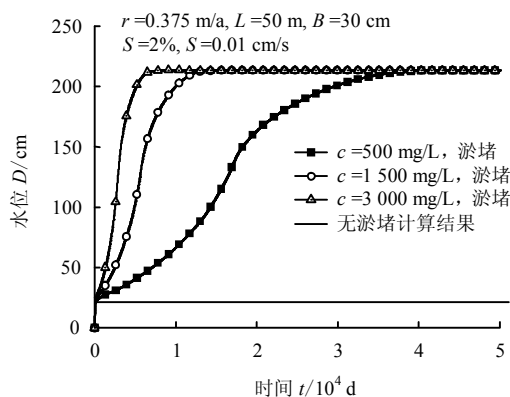


图 13 淤堵与无淤堵条件下不同钙离子浓度最高水位增长过程图

Fig.13 Increment procedures of the maximum liquid depth with different calcium concentration under clogging and no clogging condition

图 13 给出了不同离子浓度 c 条件下最高水位随时间的增长情况。从图可看出:开始时各条件下水位增加相似,约 100 d 后,无淤堵水位趋于稳定,淤堵条件下最高水位继续上升,并且大小各不相同,但最终都趋于稳定值 213.4 cm,最高水位的稳定值与无淤堵条件下相差很大。不同浓度下淤堵完成时间相差也很大。还可以看到,离子浓度越高,水位增长速度越快。这表明离子浓度越高,淤堵对水位的影响越大。因此,垃圾的分类填埋,可以有效降低离子浓度,减少淤堵的影响。

由于我国填埋场填埋垃圾的现状^[11, 17-18],有机物成分相对较高,钙离子浓度普遍较高,这种影响会更明显,应该予以重视。

5 结论和建议

(1) 本文方法数值求解的淤堵及无淤堵条件下最高水位增长结果、与柯瀚等^[6, 10]之前提出的稳态方程、瞬态方程得到的结果对比表明,无淤堵时得到的结果与瞬态结果一致,且都趋于稳态结果,淤堵完成得到的结果与模型稳态计算结果吻合,证明本文方法可靠性。同时淤堵较严重时水位受到显著影响,因此,必须考虑淤堵。

(2) 通过与无淤堵条件的比较发现,不同参数组合情况下,对淤堵的影响不同。开始时渗透系数越小,淤堵的影响越大,而后来渗透系数越大,淤堵的影响逐渐增强。排水距离越长、入渗速度越快、离子浓度越高,那么淤堵的影响越严重,而坡度因素的影响则差别不大。其中,入渗速度与离子浓度对淤堵的影响更为敏感,应当予以重视。

(3) 建议设计时排水层采用初始渗透系数较大的卵石、砾石等,控制坡度、排水距离,运行时垃圾分类填埋、及时覆盖,这样可以有效减少淤堵影响,降低淤堵条件下的最高水位。

(4) 本文方法简单可靠,适合实际工程中应用,为进一步研究填埋场排水层淤堵条件下水位变化规律奠定基础。需要说明的是,本文的模型参数,主要基于 Rowe、Cooke、Qian Xuede^[9, 12-18]等的试验结果,应用到国内填埋场时需注意取值。同时,随着对淤堵机制认识的不断加深,本文的模型可以进一步地修正以更好地模拟真实的填埋场情形。

参考文献

- [1] U.S. EPA. Requirements for hazardous waste landfill design, construction, and closure[R]. Washington, D C: U.S. Environmental Protection Agency, 1989.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. GB16889—2008 生活垃圾填埋污染控制标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [3] MCENROE B M. Steady drainage of landfill covers and bottom liners[J]. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 1989, 115(6): 1114—1122.
- [4] MCENROE B M. Maximum saturated depth over landfill liners[J]. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 1993, 119(2): 262—270.
- [5] GIROUD J P, GROSS B A, DARASSE J. Flow in leachate collection layers, steady-state[M]. [s. l.]: Geosyntec Consultants Rep, 1992.
- [6] KE Han, CHEN Yun-min, HUANG Chuang-bing.

- Estimation of maximum liquid depth in layered drainage blankets over landfill barriers[J]. **Journal of Environmental Engineering, ASCE**, 2008, 134(1): 67—76.
- [7] 柯瀚, 陈云敏. 填埋场复合排水系统中最高水位深度的计算[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 160—165.
KE Han, CHEN Yun-min. Maximum saturated depth of landfill in drainage system with geosynthetics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(2): 160—165.
- [8] DEMETRACOPOULS A C. Overview of landfill bottom liner hydraulics[J]. **Journal of the American Water Resources Association**, 1988, 24(1): 49—56.
- [9] COOKE A J. Modelling the clogging of landfill leachate collection systems[Ph. D. thesis D]. Ontario: The University of Western Ontario, 2007.
- [10] 柯瀚, 万晓丽, 陈云敏, 等. 时域条件下填埋场导排系统水位变化规律研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(4): 688—694.
KE Han, WAN Xiao-li, CHEN Yun-min. Time-domain analysis of variation of liquid head in landfill's drainage system[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2011, 45(4): 688—694.
- [11] 万晓丽. 垃圾填埋场导排层渗滤液水位研究[硕士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] FLEMING I R. Biogeochemical processes and clogging of landfill leachate collection systems[Ph. D. thesis D]. Ontario: The University of Western Ontario, 1999.
- [13] ROWE R K. Long-term performance of contaminant barrier systems[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(9): 631—678.
- [14] HARR M E. Groundwater and seepage[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1962.
- [15] QIAN X, DONALD H G, ROBERT M K. Estimation of maximum liquid head over landfill barriers[J]. **Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE**, 2004, 130(5): 488—497.
- [16] FLEMING I R, ROWE R K. Laboratory studies of clogging of landfill leachate collection and drainage systems[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(1): 134—153.
- [17] 曹丽文, 姜振泉, 张静, 等. 垃圾填埋场排水层淤堵实验特征[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(8): 75—80.
CAO Li-wen, JIANG Zhen-quan, ZHANG Jing, et al. Experimental features on clogging of drainage cager in waste sanitary landfill[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2007, 30(8): 75—80.
- [18] 钱学德, 郭志平, 施建勇, 等. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

上接第 1086 页

- [11] 熊浩, 高广运, 王小岗. 层状地基中空沟对交通荷载的竖向隔振分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1131—1137.
XIONG Hao, GAO Guang-yun, WANG Xiao-gang. Analysis of isolating vertical vibration from traffic loads by open trench in layered ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 1131—1137.
- [12] LU J F, JENG Dong-sheng. A half-space saturated poro-elastic medium subjected to a moving point load[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2007, 44(2): 573—586.
- [13] 高广运, 何俊锋, 李宁, 等. 饱和地基上列车运行引起的地面振动隔振分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2191—2198.
GAO Guang-yun, HE Jun-feng, LI Ning, et al. Analysis of isolating ground vibration induced by trains running on saturated ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2191—2198.
- [14] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range[J]. **The Journal of the Acoustic Social of America**, 1956, 28(2): 168—178.
- [15] BIOT M A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media[J]. **The Journal of the Acoustic Social of America**, 1962, 34(5): 1254—1264.
- [16] NORRIS A N. Radiation from a point source and scattering theory in a fluid-saturated porous medium[J]. **The Journal of the Acoustic Social of America**, 1985, 77(6): 2012—2023.
- [17] ZIMMERMAN C, STERN M. Boundary element solution of 3-D wave scatter problems in a poroelastic medium[J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 1993, 12(4): 223—240.
- [18] XU B, LU J F, WANG J H. Dynamic response of a layered water-saturated half-space to a moving load[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35(1): 1—10.
- [19] 李志毅. 分层及饱和分层地基列车运行引起的地面振动特性分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.