

# 成层介质中填埋场渗滤液水位的瞬态求解

柯瀚<sup>1,2</sup>, 沈磊<sup>1,2</sup>, 李育超<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 现代填埋场排水层或覆盖层设计时, 对排水系统水位深度的估算大都针对稳定状态时的最大水位, 对水位增长过程的模拟鲜有涉及。在扩展的 Dupuit 假定基础上推导了成层排水介质中瞬态水位计算方法, 通过与稳态计算方法的对比, 验证了方法的准确性。通过参数分析发现对双层排水系统来说, 渗透系数减小到一定程度后, 会导致水位的大幅增加, 达到稳定的所需时间也越长。排水距离越长和坡度越小, 达到最高水位也越滞后。合理设置排水距离和适当增加排水系统的坡度可以非常有效地控制水位深度。复合排水材料对减少最大水位深度有着重要的意义。

**关键词:** 填埋场; 渗滤液导排系统; 渗滤液; 最大水位深度; 瞬态

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)08-1204-07

**作者简介:** 柯瀚(1975-), 男, 浙江丽水人, 教授, 主要从事环境土工和土动力学方面研究。E-mail: boske@126.com。

## Transient saturated depth of landfill leachate in layered drainage media

KE Han<sup>1,2</sup>, SHEN Lei<sup>1,2</sup>, LI Yu-chao<sup>1,2</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To design the cover system or leachate collection system of a modern landfill, steady state solutions are usually used to analyze the maximum liquid head in the drainage system, but the increment procedure is rarely involved. Based on the extended Dupuit assumption, a computational solution is presented to calculate the transient liquid head. Compared with the results calculated by Ke Han (2005), the present method is shown to be more rational and accurate. By means of parameter analysis, it is found that in double drainage system the decrease of the permeability coefficient will cause the maximum liquid head to increase greatly, and the stable time will be longer. Reasonable drainage distance and increase of the slope will decrease the maximum liquid depth effectively. The application of the geocomposites will significantly reduce the maximum liquid depth of the drainage system.

**Key words:** landfill; drainage system; leachate; maximum liquid depth; transient state

## 0 引言

在进行填埋场水力学设计时, 填埋场渗滤液水位是设计工程师非常关心的课题。一般来说, 需要对渗滤液导排系统和最终覆盖系统进行渗滤液饱和深度计算。在渗滤液导排系统中, 渗滤液饱和深度的增加会导致防渗系统更容易被穿透, 在最终覆盖系统中, 水头高度的变化会直接影响到最终覆盖层边坡的稳定性。因此, 许多规范都对其最大渗滤液水头作了严格的规定, 美国有关规范就限制衬垫之上渗滤液的最大水头在 30 cm 以内<sup>[1-2]</sup>。

目前, 填埋场导排层渗滤液水头计算研究主要集中在对最大饱和水头的估算, 即导排层中稳态流计算。McEnroe 等<sup>[3]</sup>描述了填埋场中渗滤液的稳定流。Moore 等<sup>[4]</sup>、McEnroe<sup>[5-6]</sup>和 Giroud 等<sup>[7]</sup>分别给出了计算导排

层上浸润水头的最大值的计算公式。Qian 等<sup>[8-9]</sup>在浸润面势函数相等理论提出的等效渗透系数的基础上推导出了成层介质中渗滤液最大饱和深度的计算方法, 柯瀚等<sup>[10]</sup>基于标准 Dupuit 假定的方法给出了成层介质中渗滤液饱和深度的迭代方法, 因其不需要估算平均渗透系数, 显现出准确性方面的优势。但是, 随着降雨量变化、填埋场内压力和温度变化以及导排层的逐渐淤堵, 导排层中渗滤液量很难处于一个稳定的状态。同时, 在降雨量较大的季节或是随着物理生物化学作用排水系统底部逐渐淤堵, 很容易造成排水系统的成层性。Demetracopoulou<sup>[11]</sup>建立了 QSS(Quasi-steady

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50978229); 国家自然科学基金项目(10972195)

收稿日期: 2010-04-27

state model) 模型。该模型是建立在 Wong<sup>[12]</sup>的稳态分析基础上, Wong 稳态分析假设渗滤液在排水层中流动时呈平板状, 即假定浸润线始终与衬垫平行, 因此 QSS 模型虽然计算简便但是模拟效果并不是很好。Korfiatis 等<sup>[13-14]</sup>通过建立进出水量平衡关系式提出了一种更好的渗滤液水位计算方法。该方法是一种瞬态计算方法, 但更倾向于渗滤液流量计算。上述两种瞬态计算方法都是针对单层介质的, 无法解决复合排水层的最高水位问题。而目前复合排水系统在填埋场工程中得到了广泛的应用, 其优点也是非常明显的。例如: 复合排水系统能够相当程度地减少排水系统的体积从而增加垃圾的容量; 土工合成材料的性状比较稳定从而容易进行质量控制; 容易安装并且总的来说成本较低<sup>[5, 7, 15]</sup>。本文基于扩展 Dupuit 假定, 在 McEnroe<sup>[5]</sup>和柯瀚等<sup>[10, 15]</sup>稳态计算方法的基础上给出了成层介质中渗滤液水位的瞬态求解, 并与稳态计算方法进行了对比和验证。通过参数分析, 提出了成层介质中渗滤液水位随时间变化的一些规律。

## 1 分析方法

图 1 给出了填埋场多层排水系统的示意图。第一层排水材料的厚度取为  $T_1$ , 渗透系数为  $k_1$ ; 第二层的厚度为  $T_2$ , 渗透系数为  $k_2$ ; ... 第  $n$  层厚度  $T_n$ , 渗透系数为  $k_n$ 。总的水平排水距离为  $L$ ; 排水系统底部倾角为  $\alpha$ 。

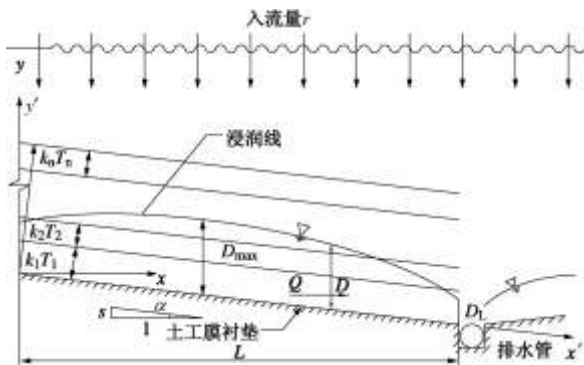


图 1 填埋场多层排水系统的断面示意图

Fig. 1 Drainage system of landfill

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:

$$Q = rx \quad (1)$$

式中,  $Q$  为渗滤液排放层单位宽度的侧向排水量 ( $L^2/T$ ),  $r$  为水平单位面积上竖直流入排水层的入流量 ( $L/T$ ),  $x$  为至上游边界的水平距离 ( $L$ )。

对成层介质条件下的单一坡段, 柯瀚等<sup>[15]</sup>提出扩展 Dupuit 公式可改写为

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

式中,  $k(t)$  为距底部衬垫高度为  $t$  的土体渗透系数,  $D$  是任意位置的水位深度 (竖直方向)。

根据达西定律, 下层衬垫上的渗漏速率可写为

$$q = k_1 \left( \frac{D+d}{d} \right) \quad (3)$$

式中,  $k_1$  为衬垫的渗透系数,  $d$  为衬垫厚度。

从渗流区域内取出一单元来进行研究, 单元示意图如图 2 所示。根据水量平衡原理, 引起单元内水量变化的因素主要是上部下渗的渗滤液补给和下部衬垫的渗漏以及从上下游断面流入流出的水量。dt 时间内进出水量平衡, 因此有:

$$Q(x, t) dt + r dx dt - Q(x + dx, t) dt - q(x, t) dx dt \\ = n_e [D(x, t + dt) - D(x, t)] dx \quad (4)$$

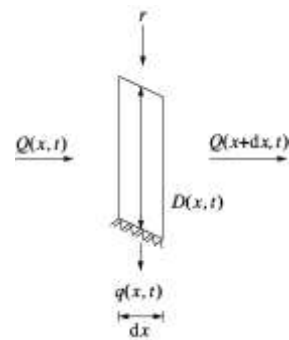


图 2 侧向渗流区域内的任意单元示意图

Fig. 2 Seepage analysis of an element

式中,  $n_e$  为有效的排水孔隙率。

把式 (2)、(3) 代入式 (4), 可得单一坡段下多层排水介质渗滤液水位瞬态方程。

对于双层排水介质条件下, 即图 3 所示情况。

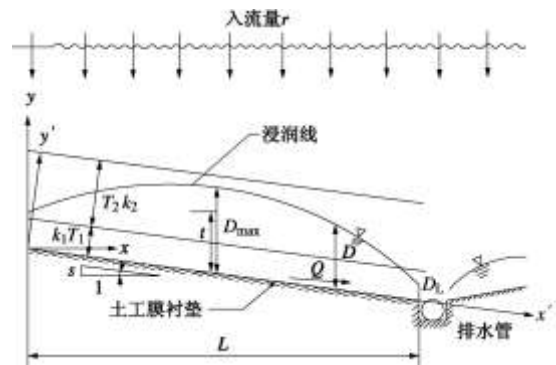


图 3 填埋场双层排水系统的断面示意图

Fig. 3 Drainage system of landfill

$$Q = \begin{cases} -k_1 D \left( \frac{dD}{dx} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha & (D \leq T_1 / \cos \alpha) \\ - \left[ \frac{(k_1 - k_2) T_1}{\cos \alpha + k_2 D} \right] \left( \frac{dD}{dx} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha & (D > T_1 / \cos \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

当浸润线位于底层排水体时, 即  $D \leq T_1 / \cos \alpha$  时, 把式 (3)、(5) 代入式 (4) 得

$$-k_1 D(x, t) \left( \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha dt + r dx dt + k_1 D(x + dx, t) \left[ \frac{\partial D(x + dx, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right] \cos^2 \alpha dt - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] dx dt = n_{e1} [D(x, t + dt) - D(x, t)] dx \quad (6)$$

$$\text{式(6)左边为 } r dx dt - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] dx dt + k_1 \cos^2 \alpha \cdot dx dt \left\{ D(x, t) \frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \left[ \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right] + \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} dx \frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial x^2} \right\}; \text{式(6)右边可以变为 } n_{e1} \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} dt dx; \text{忽略小项可得}$$

$$r - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] + k_1 \cos^2 \alpha \left\{ D(x, t) \frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \left[ \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right] \right\} = n_{e1} \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} \quad (7)$$

通过化简可以变为

$$n_{e1} \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = k_1 \cos^2 \alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [D(x, t) \frac{\partial D(x, t)}{\partial x}] - \tan \alpha \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \right\} + r - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] \quad (8)$$

当浸润线位于上层排水体时, 即  $D > T_1 / \cos \alpha$  时, 把式 (3)、(5) 代入式 (4) 得

$$-[(k_1 - k_2) T_1 / \cos \alpha + k_2 D(x, t)] \left( \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha dt + r dx dt + [(k_1 - k_2) T_1 / \cos \alpha + k_2 D(x + dx, t)] \cdot \left[ \frac{\partial D(x + dx, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right] \cos^2 \alpha dt - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] dx dt = n_{e2} [D(x, t + dt) - D(x, t)] dx \quad (9)$$

$$\text{式(9)左边为 } r dx dt - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] dx dt + k_2 \cos^2 \alpha \cdot dx dt \left\{ D(x, t) \frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \left[ \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} - \tan \alpha \right] + \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} dx \frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial x^2} \right\} + (k_1 - k_2) T_1 \cos \alpha \frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial x^2} dx dt;$$

式 (9) 右边可以变为  $n_{e2} \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} dt dx$ , 忽略小项并化简可得

$$n_{e2} \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = \cos^2 \alpha \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k_1 T_1}{\cos \alpha} + k_2 (D(x, t) - \frac{T_1}{\cos \alpha}) \right] \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \right\} - k_2 \tan \alpha \frac{\partial D(x, t)}{\partial x} \left\{ + r - k_1 \left[ \frac{D(x, t)}{d} + 1 \right] \right\} \quad (10)$$

根据对称性原理以及 Harr<sup>[16]</sup> 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有两个。

(1) 在模型左边边界处的流量为 0。即在  $x=0$  处  $Q=0$

当左边边界浸润线位于底层排水体时, 即  $D(0, t) \leq T_1 / \cos \alpha$  时,

$$Q \approx -k_1 D \left( \frac{dD}{dx} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha = 0 \quad (11)$$

因为  $k_1 \neq 0$ , 所以

$$D(0, t) \left[ \frac{dD(0, t)}{dx} - \tan \alpha \right] = 0 \quad (12)$$

当左边边界浸润线位于上层排水体时, 即  $D(0, t) > T_1 / \cos \alpha$  时,

$$Q \approx -[(k_1 - k_2) T_1 / \cos \alpha + k_2 D] \left( \frac{dD}{dx} - \tan \alpha \right) \cos^2 \alpha = 0 \quad (13)$$

因为  $k_1, k_2 \neq 0$ , 所以

$$\left[ (k_1 - k_2) \frac{T_1}{\cos \alpha} + k_2 D(0, t) \right] \left( \frac{dD(0, t)}{dx} - \tan \alpha \right) = 0 \quad (14)$$

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

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d(D - x \tan \alpha)}{dx} = \frac{dD}{dx} - \tan \alpha = -1 \quad (15)$$

即  $(1 - \tan \alpha) + \frac{dD(L, t)}{dx} = 0 \quad (16)$

因为最初导排层上水位为零, 所以初始条件可以表示为

$$D(x, 0) = 0 \quad (17)$$

## 2 方法验证

柯瀚等<sup>[15]</sup>基于标准扩展 Dupuit 假设, 提出了填埋场复合排水系统中最高水位深度的稳态算法。为了验证本文提出的瞬态计算方法的正确性, 用 2 种方法对 3 个算例进行比较, 参数见表 1。在同样的参数条件下, 将通过 Matlab 求解的瞬态方程水位增长过程及稳定阶段解与柯瀚等<sup>[15]</sup>提出的稳态方程求出的解进行对比, 以验证该控制方程的最终准确性。

表 1 复合排水系统算例的计算参数

Table 1 Parameters for drainage system with geosynthetics

| 算例   | $L$<br>/m | $r$<br>/(mm d <sup>-1</sup> ) | $S$<br>/% | $T_1$<br>/mm | $k_1$<br>/(cm s <sup>-1</sup> ) | $k_2$<br>/(cm s <sup>-1</sup> ) |
|------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 算例 1 | 50        | 3.75                          | 2         | 200          | 0.03                            | 0.01                            |
| 算例 2 | 50        | 3.75                          | 2         | 5            | 3.00                            | 0.01                            |
| 算例 3 | 50        | 3.75                          | 2         | 200          | 0.03                            | 0.10                            |

参数取值如表 1 所示, 其中保持排水距离  $L$ 、入渗量  $r$ 、坡度  $S$  不变, 改变底层排水材料的厚度  $T_1$ 、上下层渗透系数  $k_1$  和  $k_2$ , 使用本文瞬态计算方法计算整个水位增长过程, 使用柯瀚等<sup>[15]</sup>提出的稳态方程计算稳态最高水位。作出算例 1 到算例 3 整个排水段上水位随时间变化的二维图, 用于对比相同条件下瞬态增长变化最终状态和稳态结果。具体计算结果见表 2。

表 2 不同方法的计算结果

| Table 2 Results calculated by different methods |         |      |       |
|-------------------------------------------------|---------|------|-------|
| 计算方法                                            | 最高水位/mm |      |       |
|                                                 | 算例 1    | 算例 2 | 算例 3  |
| 文献[17]                                          | 275.5   | 3.6  | 223.6 |
| 本文                                              | 275.2   | 3.6  | 223.0 |

从图 4~6 以及表 2 可以看出, 瞬态方程计算结果均可以在经过一段时间的增长后趋于稳态解, 说明本文提出的填埋场排水系统水位瞬态计算方法可以很好的与笔者<sup>[17]</sup>较成熟的稳态计算方法拟合, 即证明本文瞬态计算方法的最终状态结果是可靠的。

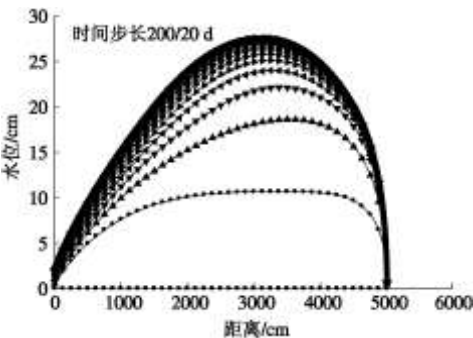


图 4 算例 1 水位增长过程及与稳态计算结果对比图

Fig. 4 Increment procedure of phreatic surface for Case 1

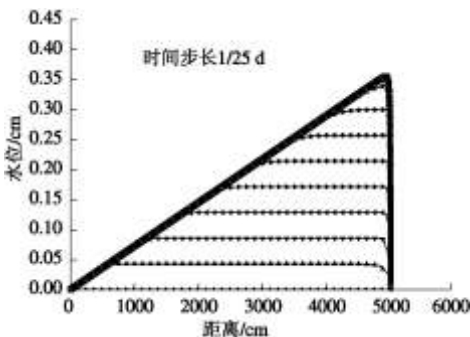


图 5 算例 2 水位增长过程及与稳态计算结果对比图

Fig. 5 Increment procedure of phreatic surface for Case 2

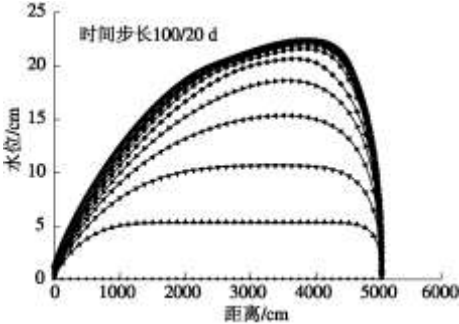


图 6 算例 3 水位增长过程及与稳态计算结果对比图

Fig. 6 Increment procedure of phreatic surface for Case 6

3 参数分析

填埋场衬垫上渗滤液最大水头的影响因素包括单宽有效入流量、排水层渗透系数、排水坡度及水平排水距离。对于复合排水层, 还应包括下层排水层的厚度。为了进一步分析成层介质中不同因素对填埋场瞬态水位的影响规律, 下文将通过一系列算例来分析成层排水材料中水位与各影响因素的定性关系。不同工况条件下计算参数见表 3。

表 3 不同工况条件下计算参数

| Table 3 Parameters for different operating conditions |        |                            |        |           |                              |                              |
|-------------------------------------------------------|--------|----------------------------|--------|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 计算方法                                                  | $L$ /m | $r$ /(cm d <sup>-1</sup> ) | $S$ /% | $T_1$ /cm | $k_1$ /(cm s <sup>-1</sup> ) | $k_2$ /(cm s <sup>-1</sup> ) |
| 算例 4                                                  | 50     | 0.375                      | 2      | 20        | 0.0005~0.5                   | 0.01                         |
| 算例 5                                                  | 50     | 0.375                      | 2      | 20        | 0.03                         | 0.0005~0.5                   |
| 算例 6                                                  | 50     | 0.375                      | 0~10   | 20        | 0.03                         | 0.01                         |
| 算例 7                                                  | 20~200 | 0.375                      | 4      | 20        | 0.03                         | 0.01                         |
| 算例 8                                                  | 50     | 0.05~0.8                   | 2      | 20        | 3                            | 0.01                         |

算例 4 讨论了不同  $k_1$  条件下最大水位深度随时间的增长情况, 结果如图 7 所示。从图中可以看出: ①渗透系数越小, 到达稳定状态所需要的时间越长, 但当最高水位超过  $T_1$  时, 这时渗滤液开始从上层排出, 这时  $k_2$  对稳定时间的影响比较大, 但图 7 中  $k_2$  是不变的, 因此稳定时间的变化并不明显; ②随着  $k_1$  的减小, 单位高度下的导排能力下降, 当总流量不变时, 最高水位将会逐渐增加, 当超过下层排水材料厚度  $T_1$  时, 最高水位会发生跳跃式增加。为保证导排层中水位不高于 30 cm, 建议渗透系数大于 0.01 cm/s。

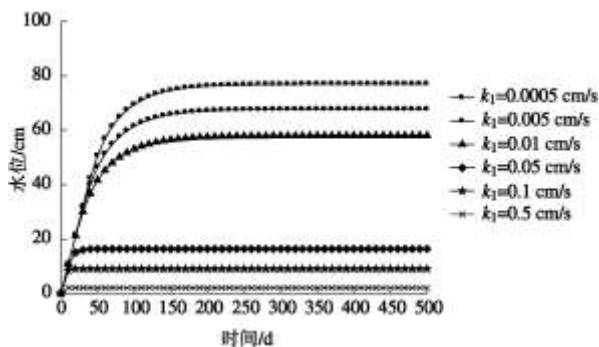
图 7 不同渗透系数  $k_1$  下最高水位增长图

Fig. 7 Increment procedure of maximum liquid head with different values of permeability  $k_1$

算例 5 讨论了不同条件  $k_2$  下最大水位深度随时间的增长情况, 结果如图 8 所示。从图中可以看出: ①渗透系数越小, 到达稳定状态所需要的时间越长, 而且渗透系数越小时, 每变化很微小的值就可以很大的影响到达稳定的时间, 当渗透系数小于  $1 \times 10^{-3}$  cm/s 后, 到达稳态需要的时间变得很长; ②随着渗透系数的减小, 渗透系数的变化对最高水位变化影响变得越来越明显, 渗透系数降低 3 个数量级对排水层水位变化有明显影响。为保证导排层中水位不高于 30 cm, 建议渗透系数大于 0.01 cm/s。

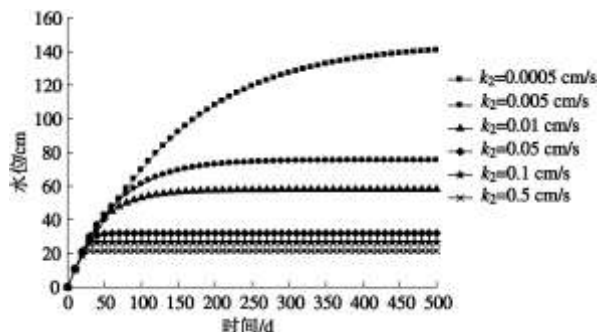
图 8 不同渗透系数  $k_2$  下最高水位增长图

Fig. 8 Increment procedure of maximum liquid head with different values of permeability  $k_2$

算例 6 讨论了不同坡度  $S$  下最大水位深度随时间的增长情况, 结果如图 9 所示。从图中可以看出: ①坡度越大, 到达稳定状态所需要的时间越短; ②最终各种坡度情况下最高水位值有差别, 坡度越大, 对应的水力坡降将变大, 最高水位将越小, 但是当坡度增大到一定程度后, 坡度增大引起的最高水位降低效果开始显得不明显。所以, 对于复合排水系统的设计, 适当的增加坡度是减少最大水位深度非常有效的方法, 建议取 2% 及以上。

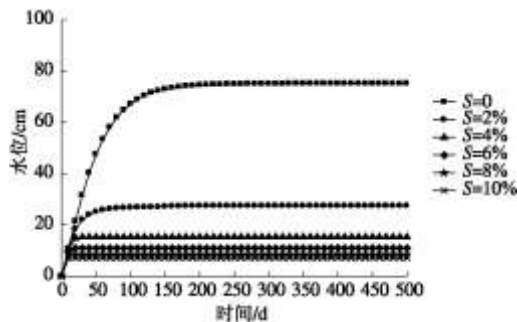
图 9 不同坡度  $S$  下最高水位增长图

Fig. 9 Increment procedure of maximum liquid head with different values of slope  $S$

算例 7 讨论了不同排水距离  $L$  下最大水位深度随时间的增长情况, 结果如图 10 所示。从图中可以看出: ①排水距离越大, 到达稳定状态所需要的时间越长; ②各种不同的排水距离下最高水位有很大差别。排水距离越大, 填埋场顶部总入渗量就越大, 最高水位越大, 例如, 排水距离从 20 m 增大到 200 m 时, 最大水位深度从 9.97 cm 减小到 185.54 cm。所以, 对于复合排水系统的设计, 减小排水距离是减少最大水位深度非常有效的方法, 建议排水距离不大于 50 m。

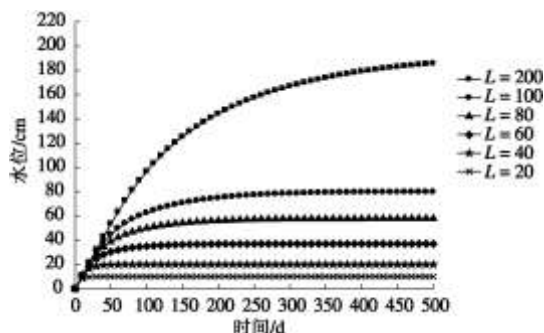
图 10 不同排水距离  $L$  下最高水位增长图

Fig. 10 Increment procedure of maximum liquid head with different values of drainage distance  $L$

算例 8 讨论了不同单宽有效入流量  $r$  下最大水位深度随时间的增长情况, 结果如图 11 所示。从图中可以看出: ①单宽有效入流量  $r$  对最高水位的稳定时间有影响, 但并不明显; ②从计算结果来看, 单宽有效入流量  $r$  对最大水位深度的影响很大, 单宽有效入流量  $r$  越大, 填埋场顶部总入渗量就越大, 最高水位也越大。所以在进行填埋场选址时, 需要考虑地域的气候条件, 最好选择入渗率较小的地区。

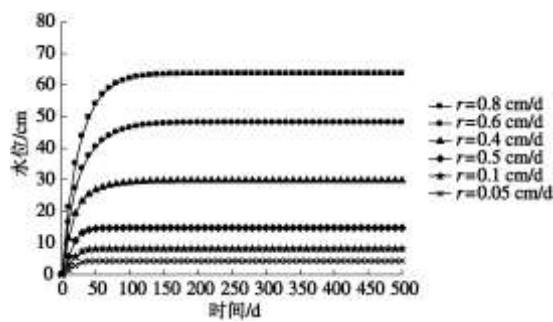


图 11 不同单宽有效入流量  $r$  下最高水位增长图

Fig. 11 Increment procedure of maximum liquid head with different values of infiltration capacity  $r$

通过算例 4~算例 8 的参数分析,可以得到以下结论:①对双层排水系统来说,无论下层排水系统渗透系数 $k_1$ 还是上层排水系统渗透系数 $k_2$ 的减小都将引起最高水位的增加,且渗透系数越小到达最高水位的时间越长,当渗透系数小到一定程度后,渗滤液水位将大大增加,稳定时间也将变得非常长,因此,在考虑淤堵作用等条件下,渗透系数应不小于 0.01 cm/s。②排水距离  $L$  越大或坡度  $S$  越小,到达最高水位的时间越长,最高水位越大。合理设置排水距离和适当增加排水系统的坡度可以非常有效地控制水位深度。鉴于坡度过大会影响稳定,建议坡度取为 2%~4%,排水距离不大于 50 m。③单宽有效入渗量  $r$  对最高水位的稳定时间影响并不大,但对最高水位影响明显,因此在进行填埋场选址时,需要适当考虑地域的气候条件。

4 案例分析

为进一步分析填埋场瞬态水位的发展规律,设计了以下案例。设计的填埋场参数分两种情况:①案例一,导排层饱和和渗透系数  $k=0.02$  cm/s,导排层厚度  $T=50$  cm;②案例二:导排层饱和和渗透系数  $k_1=1$  cm/s,  $k_2=0.02$  cm/s,底层排水体厚度  $T_1=0.5$  cm,上层排水体厚度  $T_2=50$  cm。两种案例的排水距离均为  $L=50$  m,导排层坡度均为 2%。气象条件选用 HELP 程序提供的美国田纳西州的缺省资料,其中降雨量随年份周期性变化,如图 12 所示。将填埋场垃圾体分层,逐层设置垃圾的孔隙比和渗透系数。通过 HELP 模型计算出每日导排层上的入渗量,如图 13 所示。使用本文的瞬态计算公式计算每日导排层中水头,结果见图 14。

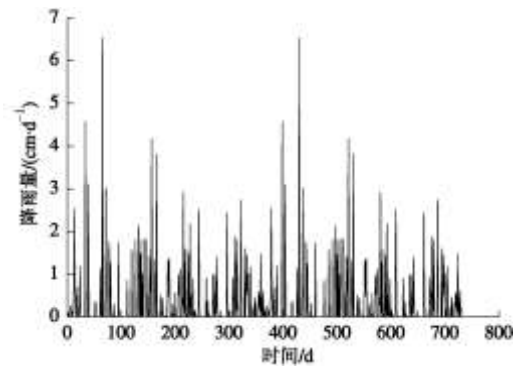


图 12 年降雨量变化图

Fig. 12 Variation of annual rainfall

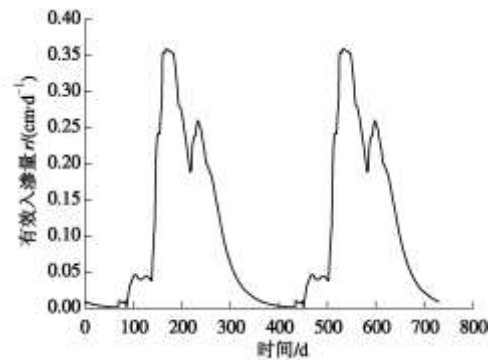


图 13 导排层上单宽入渗量变化图

Fig. 13 Variation of infiltration with time

根据计算结果可以看出:

(1)瞬态计算方法的结果与入渗量变化趋势基本一致,但显缓和且具有滞后性,本案列中无论哪种案例最大水头出现时间均比最大入渗量出现时间滞后,其中案例一滞后 20 d 左右,案例二滞后 30 d 左右。这是因为水位变化是一个随时间发展的过程,实际水位变化是需要一段时间的,这也说明了本文的瞬态计算方法是较为合理的。

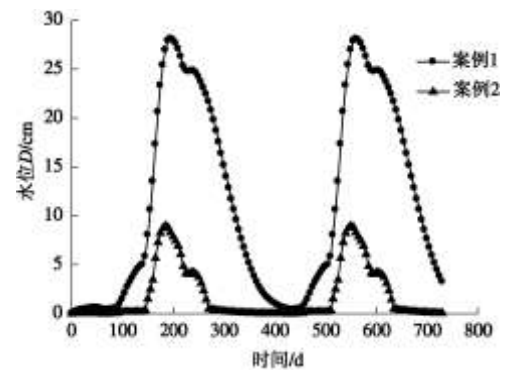


图 14 不同情况下最高水位变化曲线

Fig. 14 Maximum liquid head for different cases

(2)如果导排层上单宽入渗量以 1 a 为周期变化,在填埋场排水层设计参数不变的情况下,瞬态计算方法计算出的水位变化情况也会呈现出周期性的特点。

因此,在一般参数条件下(渗透系数不是特别小)根据瞬态计算方法计算的结果可以在1 a内达到“稳定”,如果使用本文方法为填埋场设计服务,只需选取降雨量最大的一年来计算即可。

(3)在其他条件相同的情况下案例一最高水位为28.1 cm,案例二最高水位为8.9 cm,两者相差非常明显。同时案例二比案例一更早的达到了“稳定”,说明复合排水材料对于减少最大水位深度有着重要的意义。对于成层介质填埋场,适当布置复合排水材料将有效地控制排水层对大水位深度。

## 5 结论和建议

(1)本文在扩展的Dupuit假设的基础上推导了成层介质中填埋场渗滤液水位的瞬态求解公式,并对该公式进行了数值求解。通过与稳态计算方法最终结果的对比验证了该公式计算的正确性。

(2)与稳态计算方法相比,本文的方法可以模拟水位随入渗量变化的状况,考虑了水位增长是一个相对缓慢的过程,较准确地预估最高水位到达的时间。

(3)通过参数分析认为:对双层排水系统而言,上下层排水系统的渗透系数、坡度、排水距离和入渗量均对渗滤液水位的增长过程和最大水位深度有影响,但影响程度有所不同。本文研究后建议导排层渗透系数应大于0.01 cm/s,坡度取2%~4%,排水距离不大于50 m。

(4)复合排水材料对于减少最大水位深度有着重要的意义。对于成层介质填埋场,适当布置复合排水材料将有效地控制排水层最大水位深度。

### 参考文献:

- [1] US Envir Protection Agency (USEPA). Soild Waste Disposal Facility Criteria; Final Rule. Federal Register, Part II, Washington D C, 1991, 40CFR Parts 257 and 258.
- [2] Michigan Department of Enviromental Quality (MDEQ). Waste Management Division, Act 641 Rules. Lansing, Michigan, 1993.
- [3] MCENROE B M, SCHROEDER P R. Leachate collection in landfill: steady case[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1988, **114**(5): 1052 - 1062.
- [4] U S Envir Protection Agency (USEPA). Landfill and surface impoundments evaluation[S]. EPA/530/SW-869-C, Washington D C. 1983.
- [5] MCENROE B M. Steady drainage of landfill covers and bottom lines[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1989, **115**(6): 1114 - 1122.
- [6] MCENROE B M. Maximum saturated depth over landfill liners[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1993, **119**(2): 262 - 270.
- [7] GIROUD J P, GROSS B A, DARASSE J. Flow in leachate collection layers, steady-state[M]. Livermore Geosyntec Consultants Rep, 1992.
- [8] QIAN X. Estimation of maximum leachate head on landfill bottom liner[R]. Lansing, Mich: Michigan Dept of Environmental Quality, Waste Management Division, 1994.
- [9] QIAN X D, DONALD H Gray, KOERNER R M. Estimation of maximum liquid head over landfill barriers[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE, 2004, **130**(5): 488 - 497.
- [10] 柯瀚, 黄传兵, 陈云敏. 成层介质中填埋场渗滤液的最大饱和深度[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1194 - 1197. (KE Han, HUANG Chuan-bing, CHEN Yun-min. Maximum saturated depth of landfill leachate in layered drainage media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1194 - 1197. (in Chinese))
- [11] DEMETRACOPOULS A C. Overview of landfill bottom liner hydraulics[J]. Water Resour Bull, 1988, **24**(1): 49 - 56.
- [12] WONG J. The design of a system for collecting leachate from a lined landfill site[J]. Water Resources Research, 1977, **13**(2): 404 - 410.
- [13] KORFIATIS G P, DEMETRACOPOULS A C. Flow characteristics of landfill leachate collection systems and liners[J]. 1986, **112**(3): 538 - 550.
- [14] KORFIATIS G P, SEIDAS L, DEMETRACOPOULS A C. Experimental-mathematical investigations of the hydraulics of landfill leachage collection systems[C]// 3rd International Conference: Computational Methods and Experimental Measurements, Porto Carras, 1986.
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] HARR M E. Groundwater and seepage[M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1962: 210 - 226.