

DOI: 10.11779/CJGE201610024

# 垃圾填埋场中水平导排盲沟渗流模型及间距设计

叶 剑<sup>1</sup>, 兰吉武<sup>\*1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>, 柯 瀚<sup>1</sup>, 王克虹<sup>2</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 深圳市下坪固体废弃物填埋场, 广东 深圳 518000)

**摘 要:** 水平导排盲沟是垃圾填埋场一种重要的堆体内渗沥液导排设施, 其水平间距对导排能力和水位控制效果有直接影响。通过建立水平导排盲沟渗流模型, 得到了盲沟上水位浸润线的解析解, 提出了对应于稳定控制警戒水位要求的水平导排盲沟间距设计方法, 并与数值计算结果进行比较。进一步揭示了入流量、垃圾饱和渗透系数、盲沟尺寸、盲沟等效渗透系数和盲沟水平间距对盲沟水位控制能力的影响规律, 研究结果表明: 当盲沟等效渗透系数小于  $10^{-4}$  cm/s 时, 堆体最大水头及盲沟上水头均明显上升; 控制入流量与垃圾饱和渗透系数比值小于 0.05 时, 有利于实现堆体水位控制。基于上述分析, 提出了无量纲化的盲沟水平间距设计用图。最后, 通过算例分析, 验证了文章提出的水平导排盲沟间距设计方法。

**关键词:** 填埋场; 水平导排盲沟; 渗流模型; 水位浸润线; 间距设计

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)10-1923-07

**作者简介:** 叶 剑(1989-), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事环境土工方面的研究。E-mail: jye1900@163.com。

## Seepage model and spacing design of horizontal trench in landfills

YE Jian<sup>1</sup>, LAN Ji-wu<sup>1</sup>, CHEN Yun-min<sup>1</sup>, KE Han<sup>1</sup>, WANG Ke-hong<sup>2</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Xiaping Solid Waste Landfill Site, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** The horizontal trench is a major leachate drainage facility in municipal solid waste (MSW) landfills, of which the spacing design affects drainage and water level greatly. Based on a new seepage model for horizontal trench, the analytical solution of saturation line and the relationship between design spacing of horizontal trench and warning water level can be deduced. The results of numerical calculation agree well with the analytical solutions. It is further revealed that how the inflow, saturated hydraulic conductivity of MSW, size and spacing and equivalent hydraulic conductivity of the horizontal trench influence the capacity of water level control. The results show that the maximum head of waste body and the head at horizontal trench significantly increase when the hydraulic conductivity of horizontal trench drops below  $1 \times 10^{-4}$  cm/s; and it is in favor of the control of water level when the ratio of the inflow to the saturated hydraulic conductivity of MSW is less than  $5 \times 10^{-2}$ . A dimensionless figure of spacing design of horizontal trench is proposed, and is verified by a typical case analysis.

**Key words:** landfill; horizontal trench; seepage model; saturation line; spacing design

## 0 引 言

中国早期的填埋场, 主要借鉴西方发达国家经验, 通过设置库底导排系统实现渗沥液导排。但由于中国填埋垃圾含水率高, 填埋后渗沥液产量大, 仅靠库底导排系统难以有效导排渗沥液, 造成了堆体水位壅高, 部分填埋场甚至出现了失稳问题。为控制堆体水位, 除库底导排系统外, 需要在堆体内建设渗沥液导排设施, 工程上常用的堆体内渗沥液导排设施主要有竖向抽排井和水平导排盲沟。相对于竖向抽排井, 水平导排盲沟建设方便、造价低廉、采用重力流导排, 运营成本低, 应用前景好。水平导排盲沟随垃圾分层填埋作业构建, 设置于前一层填埋垃圾的顶部, 后一层填

埋垃圾的底部。现阶段, 尚无合适的盲沟渗流模型可用于计算分析, 盲沟水平间距仅凭经验进行设计, 渗沥液导排和水位控制效果受到影响。本文主要针对这两个问题开展研究。

目前, 国内外已有关于水平导排盲沟研究的报道。Beaven 等<sup>[1]</sup>对 3 条水平导排盲沟进行了 600 d 的抽排试验, 结果表明: 水平导排盲沟可有效降低盲沟周边的渗沥液水位; 垃圾的各向异性影响盲沟排水效果,

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2012CB19800); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41502276); 深圳市城管局科研课题 (201319, 201502)

**收稿日期:** 2014-08-13

**\*通讯作者** (E-mail: lanjiwu@zju.edu.cn)

水平向影响范围(约 64 m)明显大于竖向影响范围(约 6 m);盲沟平均排水量为  $4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 随时间明显递减。Cox 等<sup>[2]</sup>通过现场大尺寸试验, 针对水平导排盲沟导排管开孔孔径与垃圾样本颗粒级配关系的研究表明: 导排管开孔孔径至少对应  $D_{30}$  的垃圾粒径才有利于导排管周边形成有效过滤层和垃圾堆体水位的控制。兰吉武<sup>[3]</sup>研究了中间覆盖层、垃圾渗透各向异性对水平导排盲沟运行效果的影响。陈云敏等<sup>[4]</sup>研究了填埋场渗沥液水位壅高机理, 提出了一种以抽排竖井和水平导排盲沟为主的立体导排措施, 应用于现场后, 堆体水位得到控制。然而, 上述研究均未涉及工程中重点关注的水平导排盲沟间距设计问题。

在国外“干坟墓”低水位填埋场中, 也常将水平导排盲沟作为渗沥液回灌设施。McCreanor 等<sup>[5-6]</sup>采用饱和一非饱和模型模拟了水平导排盲沟回灌时的渗沥液运移规律。Haydar 等<sup>[7]</sup>建模分析了盲沟充填骨料渗透系数、盲沟尺寸和间距对渗沥液回灌量以及回灌范围的影响。Jain 等<sup>[8]</sup>采用 SEEP/W 软件对水平导排盲沟渗沥液回灌的运移规律进行了研究, 提出了回灌系统的设计图表。上述研究并未涉及水平导排盲沟作为一种渗沥液外排设施时的渗流问题。

截止目前, 水平导排盲沟间距设计方法尚不明确, 也无系统研究其渗流模型的文献。本文通过建立水平导排盲沟渗流模型, 提出了盲沟上堆体水位浸润线的解析解; 通过数值计算比较后, 进一步探究了水平导排盲沟渗流影响因素; 分析了水平导排盲沟间距与堆体水位控制效果的关系, 提出了对应于堆体稳定控制警戒水位要求的水平导排盲沟间距设计方法, 并进行了算例分析验证。

## 1 水平导排盲沟渗流模型

### 1.1 水平导排盲沟渗流模型

水平导排盲沟上部垃圾堆体内水位浸润线最大水头反映了盲沟的水位控制效果。与之相似, 库底导排层上的水位浸润线最大水头已有学者给出了计算公式<sup>[9-12]</sup>。进一步分析水平导排盲沟渗流情况, 图 1 为设置了水平导排盲沟后的成层垃圾渗流排水示意图。

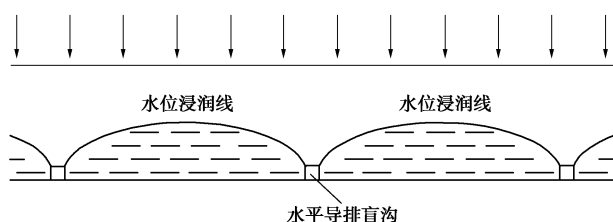


图 1 水平导排盲沟排水示意图

Fig. 1 Schematic of horizontal trench

考虑水平导排盲沟下方垃圾体饱和, 盲沟上填埋垃圾层内的渗沥液在重力作用下运移至水平导排盲沟的开孔导排管内, 从末端排出堆体外。水位在堆体内形成漏斗状分布, 越靠近盲沟, 水头越低。

将整层垃圾自身产渗沥液和来自上层垃圾入渗(或降雨入渗)的渗沥液折算成均布入流量作用在该层垃圾顶端。根据对称原则, 得到如图 2 所示的水平导排盲沟渗流模型。

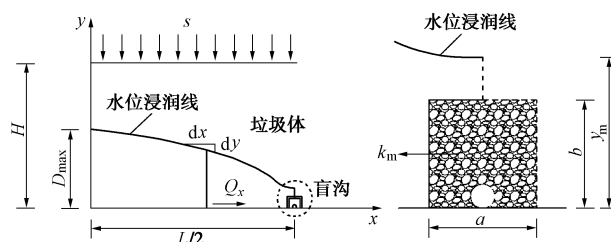


图 2 水平导排盲沟渗流模型

Fig. 2 Seepage model for horizontal trench

图 2 中,  $s$  为填埋场水平单位面积上竖流入垃圾体的入流量 ( $\text{mm}/\text{d}$ );  $Q_x$  为稳态渗流时垃圾堆体单位宽度上的侧向排水量 ( $L^2/T$ );  $L$  为水平导排盲沟水平向间距 ( $L$ );  $H$  为盲沟上填埋垃圾层厚度 ( $L$ );  $D_{\max}$  为盲沟上填埋垃圾层的最大水头高度 ( $L$ );  $y_m$  为盲沟上水头高度 ( $L$ ); 盲沟截面为矩形, 长为  $a$  ( $L$ ), 宽为  $b$  ( $L$ );  $k_m$  为盲沟等效渗透系数 ( $L/T$ )。

### 1.2 水平导排盲沟渗流解析解

基于图 2 的水平导排盲沟渗流模型, 根据 Dupuit 假设, 假定流线水平、等势线铅垂, 过水断面上各处的水力坡降为常数, 且等于水位浸润线的坡度, 得到均质稳定流场的排水量公式<sup>[13]</sup>:

$$Q_x = -ky(dy/dx) \quad (1)$$

式中,  $k$  为垃圾体饱和渗透系数 ( $L/T$ ),  $y$  为从盲沟底部所在高程量起, 距离计算起点(两盲沟中间点, 即最大水头高度对应点)  $x$  处的渗沥液水头。

在稳定状态下, 根据流量的连续性, 任何一处的排水量等于该处之前总的垂直入流量, 则有

$$Q_x = sx \quad (2)$$

式中,  $s$  为填埋场水平单位面积上竖流入垃圾体的入流量 ( $\text{mm}/\text{d}$ ),  $x$  为至计算起点的水平距离。

联立式 (1)、(2), 通过变换可得控制方程:

$$ydy = -\frac{s}{k}x dx \quad (3)$$

两边同时积分, 可得

$$y^2 = -\frac{s}{k}x^2 + c \quad (4)$$

式中,  $c$  为常数, 可根据模型的边界条件求得。

建立假设条件:

(1) 考虑水平导排盲沟导排管处排水状态良好,

处于自由排水状态 (即导排管处为 0 水头)。

(2) 假设盲沟各项同性。

(3) 与整条水位浸润线相比, 盲沟宽度范围内的水头变化忽略不计 (即盲沟处水头沿盲沟宽度方向上相等)。

考虑水平导排盲沟上水头  $y_m$  分别小于 (或等于) 和大于盲沟高度  $b$  的两种工况, 根据盲沟上填埋垃圾层总入流量  $Q_1$  等于盲沟导排管总外排量  $Q_w$ , 建立平衡方程求解盲沟上水头  $y_m$ 。

a)  $y_m \leq b$  (工况 1)

如图 3 所示, 考虑水平导排盲沟左边界距离盲沟底部  $t$  处的渗流情况, 可得该处渗流量:

$$q_t = -k_m \frac{\Delta y}{l_t} A_t, \quad (5)$$

式中,  $q_t$  表示单位宽度上水平导排盲沟左边界距离底部  $t$  处流进导排管的导排量 ( $L^2/T$ ),  $\Delta y$  为  $t$  处渗流至盲沟导排管的水头损失 ( $L$ ), 取值  $-y_m$ ,  $l_t$  为  $t$  处渗流路径长度 ( $L$ ), 取值  $\sqrt{t^2 + (a/2)^2}$ ,  $A_t$  为单位宽度上  $t$  处渗流截面 ( $L$ ), 取值  $dt \cdot \cos \theta$ 。

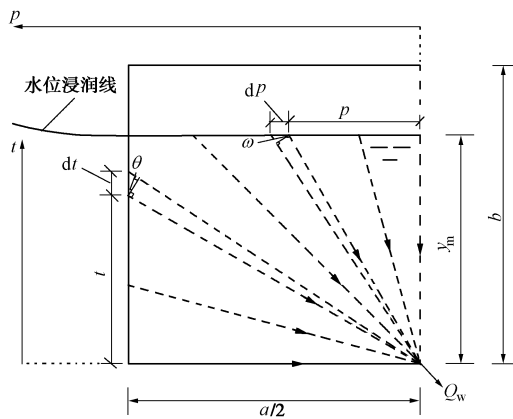


图 3 水平导排盲沟处渗流计算模型 (工况 1)

Fig. 3 Computational model for seepage of horizontal trench (condition 1)

代入上述参数, 可得

$$\left. \begin{aligned} q_t &= k_m \frac{y_m}{\sqrt{t^2 + (a/2)^2}} dt \cos \theta, \\ &= k_m \frac{ay_m}{2} \frac{dt}{t^2 + (a/2)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据式 (6) 可求得盲沟左边界的渗流量:

$$Q_{\text{左}} = k_m \frac{ay_m}{2} \int_0^{y_m} \frac{dt}{t^2 + (a/2)^2}, \quad (7)$$

化解式 (7) 得到

$$Q_{\text{左}} = k_m y_m \arctan \frac{2y_m}{a}. \quad (8)$$

同理, 可求得盲沟上边界的渗流量:

$$Q_{\text{上}} = k_m y_m \arctan \frac{a}{2y_m}. \quad (9)$$

水平导排盲沟导排管总外排量均可表达为

$$Q_w = Q_{\text{左}} + Q_{\text{上}} = k_m y_m \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

水平导排盲沟总入流量:

$$Q_1 = s \frac{L}{2}. \quad (11)$$

建立总入流量和总外排量平衡方程, 可得

$$s \frac{L}{2} = k_m y_m \frac{\pi}{2}. \quad (12)$$

根据式 (12), 计算水平导排盲沟上水头:

$$y_m = \frac{sL}{\pi k_m}. \quad (13)$$

b)  $y_m > b$  (工况 2)

如图 4 所示, 盲沟上水头  $y_m$  大于盲沟高度  $b$ , 考虑盲沟上边界外垃圾体内的渗流为竖向, 盲沟内部渗流为径向 (指向导排管)。分析路径  $E-C-D$ , 根据  $C$  处流量的连续性, 则有

$$k \frac{y_m - y_C}{y_m - b} dp = k_m \frac{y_C - 0}{\sqrt{p^2 + b^2}} dp \cos \omega, \quad (14)$$

式中,  $y_C$  表示  $C$  处的水头 ( $L$ ),  $p$  为  $C$  处到盲沟上边界中心  $B$  处的距离 ( $L$ )。

对式 (14) 进行变换可得

$$y_C = \frac{y_m}{1 + \frac{k_m b (y_m - b)}{k p^2 + b^2}}. \quad (15)$$

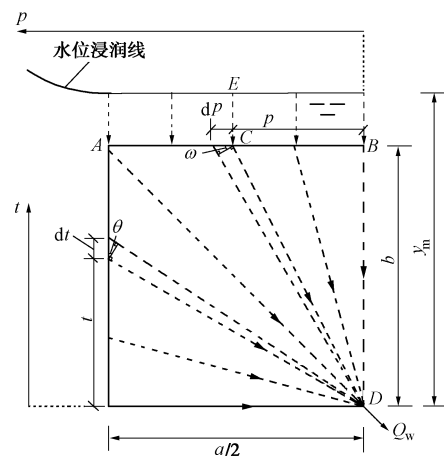


图 4 水平导排盲沟处渗流计算模型 (工况 2)

Fig. 4 Computational model for seepage of horizontal trench (condition 2)

由式 (15) 可得盲沟上边界沿  $p$  方向的水头分布。

考虑计算方便, 将盲沟上边界水头均近似取值为模型上部中心处 ( $p=a/4$ ) 的水头大小, 则有

$$y_A = y_B = y_C = \frac{y_m}{1 + \frac{4k_m a (y_m - b)}{k a^2 + 16b^2}}. \quad (16)$$

表 1 数值计算模型参数取值

Table 1 Values of parameters of numerical model

堆体渗透特性/(cm·s <sup>-1</sup> )		盲沟渗透特性/(cm·s <sup>-1</sup> )	边界条件/(mm·d <sup>-1</sup> )		初始条件/m
上层垃圾	下层垃圾	充填物	入流边界	其他边界	初始水位
1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-2</sup> , 1×10 <sup>-3</sup> , 1×10 <sup>-4</sup>	5	均不透水	6

与工况 1 相似, 可建立总入流量和总外排量平衡方程, 从而得到

$$y_A = \frac{sL}{\pi k_m} \quad (17)$$

联立式 (16)、(17) 可得

$$y_m = \frac{sL - sL \frac{4k_m}{k} \frac{ab}{a^2 + 16b^2}}{\pi k_m - sL \frac{4k_m}{k} \frac{a}{a^2 + 16b^2}} \quad (18)$$

将边界条件  $y|_{x=(L-a)/2} = y_m$  代入式 (4) 中可得

$$c = \frac{s(L-a)^2}{4k} + y_m^2 \quad (19)$$

根据式 (4)、(19), 可得

$$y = \sqrt{-\frac{s}{k}x^2 + \frac{s(L-a)^2}{4k} + y_m^2} \quad (20)$$

将式 (13)、(18) 分别代入式 (20) 中, 可求得盲沟上水头小于 (或等于)  $b$  和大于  $b$  两种不同工况下, 水平导排盲沟上部填埋垃圾层内渗沥液水位浸润线的解析解。

$$y = \begin{cases} \sqrt{-\frac{s}{k}x^2 + \frac{s(L-a)^2}{4k} + \left(\frac{sL}{\pi k_m}\right)^2} & (y_m \leq b) \\ \sqrt{-\frac{s}{k}x^2 + \frac{s(L-a)^2}{4k} + \left(\frac{sL - sL \frac{4k_m}{k} \frac{ab}{a^2 + 16b^2}}{\pi k_m - sL \frac{4k_m}{k} \frac{a}{a^2 + 16b^2}}\right)^2} & (y_m > b) \end{cases} \quad (21)$$

式 (21) 即为不同工况下水平导排盲沟上部填埋垃圾层内渗沥液水位浸润线的解析解。

当  $x=0$  时 (两盲沟连线中点处), 盲沟上填埋垃圾层的最大水头:

$$D_{\max} = \begin{cases} \sqrt{\frac{s(L-a)^2}{4k} + \left(\frac{sL}{\pi k_m}\right)^2} & (y_m \leq b) \\ \sqrt{\frac{s(L-a)^2}{4k} + \left(\frac{sL - sL \frac{4k_m}{k} \frac{ab}{a^2 + 16b^2}}{\pi k_m - sL \frac{4k_m}{k} \frac{a}{a^2 + 16b^2}}\right)^2} & (y_m > b) \end{cases} \quad (22)$$

盲沟间距设计与堆体安全稳定控制直接相关, 要使堆体满足安全稳定控制要求, 则需将堆体水位控制

在相应警戒水位之下 (即  $D_{\max}$ =警戒水位)。

1.3 水平导排盲沟渗流解析解与数值解比较

确定典型工况: 根据现场施工经验, 水平导排盲沟上垃圾层厚度  $H$  取 10 m; 考虑南方填埋场年降雨量和垃圾自身渗沥液产量实情, 折算后的入流量  $s$  取 5 mm/d; 结合垃圾填埋历史及前人试验数据<sup>[14-15]</sup>, 垃圾体饱和渗透系数  $k$  取  $1 \times 10^{-4}$  cm/s; 盲沟边长  $a, b$  均取 1 m; 考虑盲沟长期运行后导排能力降低, 其等效渗透系数  $k_m$  分别取  $1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}$  和  $1 \times 10^{-4}$  cm/s 3 种典型工况。

根据上述典型工况参数条件, 进行数值计算比较。数值计算采用软件 Geo-Studio 中的饱和-非饱和渗流分析工具 Seep/W 模块。建立计算模型, 如图 5 所示。

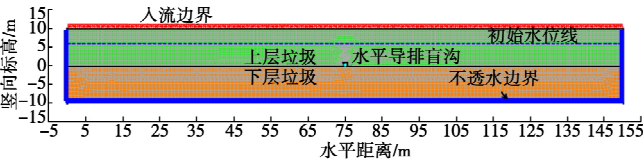


图 5 水平导排盲沟渗流数值计算模型

Fig. 5 Numerical model for seepage of horizontal trench

模型中, 堆体宽度 150 m, 高度 20 m, 分上下 2 层, 每层均为 10 m, 上层底部埋设 1 m×1 m 水平导排盲沟。盲沟由底部多孔导排管以及管外充填骨料组成。模型中各参数取值以及初始边界条件如表 1 所示。

针对不同典型工况, 分别考虑水平导排盲沟设计间距  $L$  为 30, 40, 50, 70 m, 采用式 (21) 和数值方法计算水位浸润线, 结果如图 6 所示。

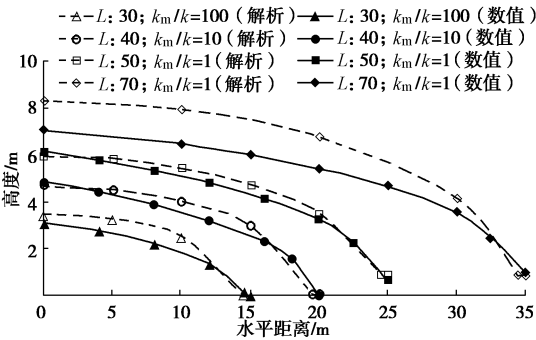


图 6 典型工况下水位浸润线

Fig. 6 Saturation lines in typical cases

可见, 在相同典型工况条件下, 水平导排盲沟间距分别为 30, 40, 50 m 时, 解析方法与数值方法所

得水位浸润线整体均较为相近, 最大浸润线高度分别只相差 0.37, 0.18, 0.18 m; 盲沟间距为 70 m 时, 解析方法所得水位浸润线高于数值方法所得结果, 最大浸润线高度相差 1.27 m。据实际工程经验, 对于 10 m 高的堆体, 最大水头高度应控制在 5 m 以内, 而在此范围内, 上述两种计算结果较为接近。故该解析方法可用于水平导排盲沟间距设计, 且略偏保守。

#### 1.4 水平导排盲沟渗流影响参数分析

根据式 (22), 水平导排盲沟上填埋垃圾层的最大水头  $D_{\max}$  主要受水平导排盲沟间距  $L$ , 入流量  $s$ , 垃圾体饱和和渗透系数  $k$ , 盲沟截面边长  $a$  和  $b$  以及盲沟等效渗透系数  $k_m$  等参数的影响。

首先, 分析水平导排盲沟间距  $L$  确定的情况下, 盲沟渗流受盲沟等效渗透系数  $k_m$  的影响情况。水平导排盲沟间距  $L$  取 30, 40, 50 m 3 种工况, 垃圾饱和和渗透系数  $k$  取  $10^{-4}$  cm/s, 盲沟边长  $a, b$  均取 1 m, 分别计算盲沟等效渗透系数  $k_m$  为  $10^{-2}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$  cm/s 时, 水位浸润线的分布情况, 结果如图 7 所示。

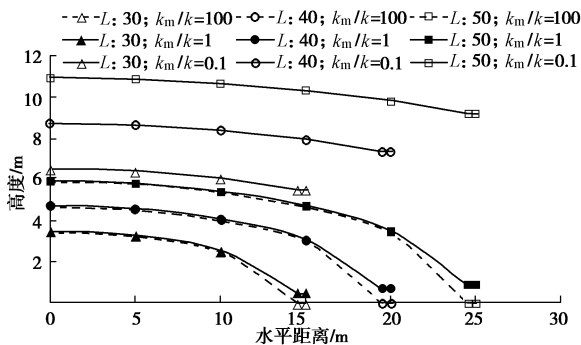


图 7 水位浸润线与盲沟间距、盲沟等效渗透系数关系

Fig. 7 Relationship between saturation lines and spacing or equivalent hydraulic conductivity of horizontal trench

计算结果显示: 当  $L$  为 30 m 时,  $k_m$  从  $10^{-2}$  cm/s 减小至  $10^{-4}$  cm/s, 盲沟上水头由 0 增至 0.55 m, 最大水头几乎保持不变, 约为 3.50 m;  $k_m$  从  $10^{-4}$  cm/s 减至  $10^{-5}$  cm/s, 盲沟上水头迅速增至 5.53 m, 最大水头从 3.50 m 上升至 6.54 m。  $L$  为 40 m 和 50 m 时, 水位浸润线变化规律与  $L$  为 30 m 的情况类似。保持  $k_m$  为  $10^{-2}$  cm/s,  $L$  从 30 m 增至 40 m 和 50 m, 最大水头从 3.50 m 升至 4.70 m 和 5.90 m。可见, 随着水平导排盲沟设计间距  $L$  增加, 水位浸润线最大水头也逐渐升高; 随着盲沟等效渗透系数  $k_m$  逐渐减小 (但均大于等于  $10^{-4}$  cm/s), 水位浸润线最大水头变化不明显, 盲沟上水头逐渐上升; 当盲沟等效渗透系数  $k_m$  小于  $10^{-4}$  cm/s 时, 水位浸润线最大水头及盲沟上水头上升明显。

然后, 分析入流量  $s$  与垃圾饱和渗透系数  $k$  对水

平导排盲沟渗流的影响情况, 盲沟边长  $a, b$  均取 1 m, 盲沟等效渗透系数  $k_m$  取  $10^{-2}$  cm/s, 盲沟设计间距  $L$  取 40 m, 入流量  $s$  取值范围 2.5~15 mm/d, 垃圾饱和和渗透系数  $k$  取值范围  $10^{-6}$ ~ $10^{-3}$  cm/s, 得到  $s < k$ ,  $s = k$ ,  $s > k$  3 种条件下水位浸润线分布的计算结果, 如图 8 所示。

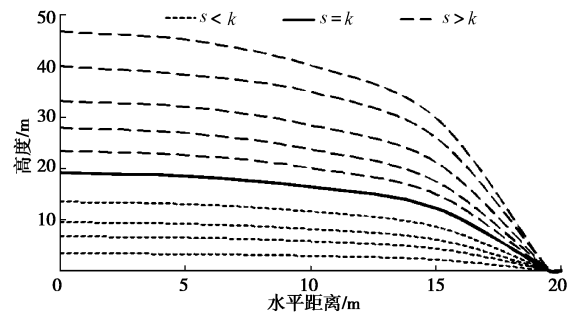


图 8 水位浸润线与入流量、垃圾饱和渗透系数关系

Fig. 8 Relationship between saturation lines and inflow or saturated hydraulic conductivity of MSW

计算结果显示: 在盲沟设计间距为 40 m 的前提下, 当入流量小于 5 mm/d, 垃圾饱和渗透系数大于 (或等于)  $10^{-4}$  cm/s 时 (即  $s/k < 0.05$ ), 水位浸润线的最大水头小于 (或等于) 5 m, 盲沟的水位控制效果较好; 随着入流量逐渐增大, 垃圾饱和和渗透系数逐渐降低, 最大水头不断升高, 盲沟失去水位控制效果。

再分析水平导排盲沟截面边长  $a, b$  对盲沟渗流的影响情况, 入流量  $s$  取 5 mm/d, 垃圾饱和渗透系数  $k$  取  $10^{-4}$  cm/s, 盲沟等效渗透系数  $k_m$  取  $10^{-2}$  cm/s, 盲沟设计间距  $L$  取 40 m。盲沟边长  $a, b$  设为等长, 分别取 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m, 得到 4 种工况下水位浸润线分布的计算结果, 如图 9 所示。

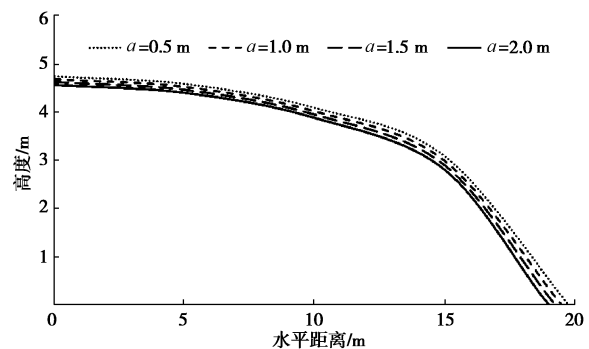


图 9 水位浸润线与盲沟截面边长关系

Fig. 9 Relationship between saturation lines and side length of section of horizontal trench

由图 9 可知, 随着水平导排盲沟截面尺寸增加, 水位浸润线高程逐渐降低。盲沟截面边长  $a$  从 0.5 m 增加至 2 m, 水位浸润线上的最大水头从 4.75 m 降至 4.57 m。可见, 在盲沟等效渗透系数保持不变的情况

下, 增加截面尺寸对水平导排盲沟渗流的影响有限。

## 2 水平导排盲沟间距设计及算例分析

为便于现场设计, 将式 (22) 中各参数无量纲化, 考虑入流量  $s$  为  $10^{-6}$  和  $10^{-5}$  cm/s 两种量级 (范围: 2.5~15 mm/d), 垃圾饱和渗透系数  $k$  范围  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  cm/s, 盲沟边长  $a, b$  均取 1 m, 盲沟等效渗透系数  $k_m$  大于 (或等于)  $10^{-3}$  cm/s (即排水效果良好的情况), 得到了  $D_{\max}/L$  与  $s/k$  的关系曲线, 如图 10 所示。

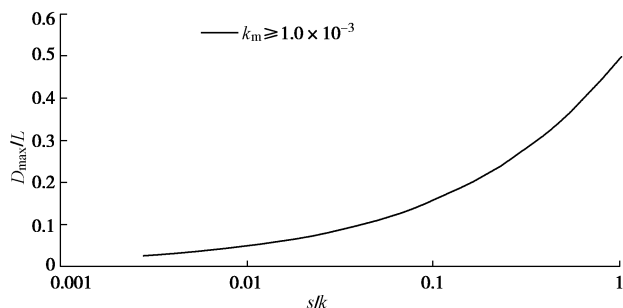


图 10  $D_{\max}/L$  与  $s/k$  关系曲线

Fig. 10 Relationship between  $D_{\max}/L$  and  $s/k$

算例分析:  $s/k=0.05$  时,  $D_{\max}/L$  约为 0.112, 如果控制  $D_{\max}$  为 5 m, 则相应  $L$  约为 45 m;  $s/k=0.1$  时,  $D_{\max}/L$  约为 0.158, 如果控制  $D_{\max}$  为 5 m, 则相应  $L$  约为 32 m;  $s/k=1$ ,  $D_{\max}/L$  约为 0.500, 如果控制  $D_{\max}$  为 5 m, 则相应  $L$  约为 10 m。上述 3 种工况与工程实况均较为符合, 可见, 图 10 适用于现场典型工况下的水平导排盲沟间距设计。

## 3 结 论

通过解析计算、数值模拟和算例分析, 得到如下结论:

(1) 建立了水平导排盲沟渗流模型, 得到了设置水平导排盲沟的成层垃圾内渗沥液水位浸润线的解析解, 并给出了水平导排盲沟设计间距与填埋场稳定控制要求相应的警戒水位高度之间的关系。

(2) 通过数值计算与解析解相比较, 可知: 当盲沟设计间距小于 (或等于) 50 m 时, 两者水位浸润线较吻合, 且最大水头高度相近; 结合工程中水位控制经验, 该解析方法适用于现场设计。

(3) 水位浸润线上的最大水头主要受水平导排盲沟间距、入流量、垃圾饱和渗透系数、盲沟尺寸和盲沟等效渗透系数等参数的影响。结果表明: 随着水平导排盲沟设计间距增加, 最大水头也逐渐升高; 在典型工况条件下, 当盲沟等效渗透系数大于 (或等于)  $10^{-4}$  cm/s 时, 最大水头无明显变化; 当盲沟等效渗透

系数小于  $10^{-4}$  cm/s 时, 最大水头及盲沟上水头均明显上升; 在入流量与垃圾饱和渗透系数各自取值范围内, 控制入流量与垃圾饱和渗透系数比值小于 0.05 时, 有利于实现堆体水位控制; 当盲沟等效渗透系数保持不变时, 增加盲沟尺寸对降低水位浸润线高度的影响范围有限。

(4) 当水平导排盲沟排水效果良好时 ( $k_m$  大于 (或等于)  $10^{-3}$  cm/s), 计算得到了  $D_{\max}/L$  与  $s/k$  的无量纲关系曲线, 该曲线便于水平导排盲沟间距设计时查询使用。

(5) 通过算例分析, 水平导排盲沟设计间距范围一般在 50 m 以内; 考虑现场降雨量增加、堆体渗沥液产量过大以及盲沟长期运行后可能造成淤堵等情况时, 盲沟设计间距宜进一步缩小, 以确保水位控制效果和堆体安全稳定。

## 参考文献:

- [1] BEAVEN R P, COX S E, POWRIE W. Operation and performance of horizontal wells for leachate control in a waste landfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(8): 1040 - 1047.
- [2] COX S E, BEAVEN R P, POWRIE W, et al. Installation of horizontal wells in landfilled waste using directional drilling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(7): 869 - 878.
- [3] 兰吉武. 填埋场渗滤液产生、运移及水位雍高机理和控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (LAN Ji-wu. Mechanism of leachate generation, transport and mound in MSW landfills and control of leachate level[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [4] 陈云敏, 兰吉武, 李育超, 等. 垃圾填埋场渗沥液水位雍高及工程控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 154 - 163. (CHEN Yun-min, LAN Ji-wu, LI Yu-chao, et al. Development and control of leachate mound in MSW landfills[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 154 - 163. (in Chinese))
- [5] MCCREANOR P T, REINHART D R. Hydrodynamic modeling of leachate recirculating landfills[J]. Water Management and Research, 1996, **34**(S7/8): 463 - 470.
- [6] MCCREANOR P T, REINHART D R. Mathematical modeling of leachate routing in a leachate recirculating landfill[J]. Water Research, 2000, **34**(4): 1285 - 1295.
- [7] HAYDAR M M, KHIRE M V. Leachate recirculation using horizontal trenches in bioreactor landfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,

- 131(7): 837 - 847.
- [8] 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.
- [9] MCENROE B M. Steady drainage of landfill covers and bottom liners[J]. Journal of Environmental Engineering, 1989, **115**(6): 1114 - 1122.
- [10] GIROUND J P, GROSS B A, DARASSE J. Flow in leachate collection layers, steady-state condition[R]. GeoSyntec Consultants Report, 1992.
- [11] MCENROE B M. Maximum saturated depth over landfill liners[J]. Journal of Environmental Engineering, 1993, **119**(2): 262 - 270.
- [12] QIAN X D, GRAY D H, KOERNER R M. Estimation of maximum liquid head over landfill barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(5): 488 - 497.
- [13] 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))
- [14] 张文杰. 城市生活垃圾填埋场中水分运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (ZHANG Wen-jie. Experimental and numerical study on water/leachate transport in landfill of municipal solid waste[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [15] 刘 钊. 填埋垃圾渗透特性测试及抽排竖井渗流分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (LIU Zhao. Experimental study on hydraulic conductivity of municipal solid waste and analysis of pumping vertical well[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- 

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 江苏三恒科技股份有限公司  
后插 2 重庆地质仪器厂  
后插 3 济南普业机电技术有限公司  
后插 4 西安力创材料检测技术有限公司