

有机污染物在复合衬垫中的运移分析

何俊¹, 高子坤², 詹国才³

(1. 湖北工业大学土木与建筑工程学院, 武汉 430068; 2. 莆田学院土木建筑系, 莆田 351100;

3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610086)

摘要: 有机污染物在垃圾填埋场复合衬垫中有两种不同的运移方式: 土工膜上缺陷处污染物的运移和完好复合衬垫中污染物的扩散。文章分别用有限差分法和解析法对两种方式下污染物的累积量进行计算, 分析了两种方式对有机污染物运移所做的贡献。研究表明: GCL (人工合成材料粘土衬垫) 复合衬垫以有机污染物在完好复合衬垫中的扩散为主, 可以忽略缺陷处污染物的运移; 而 CCL (压实粘土衬垫) 复合衬垫中两种运移方式所做的贡献在同一数量级, 需要考虑两种方式的共同作用。在 GCL 复合衬垫下铺设粘土层能有效改善 GCL 复合衬垫对有机污染物的阻止效果。

关键词: 有机污染物; 复合衬垫; 运移; 污染物累积量

中图分类号: X705; U214.9⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)01-0124-04

1 引言

衬垫系统是防止垃圾填埋场对地下水和土壤产生二次污染的关键部分。目前, 国内外的垃圾填埋场多采用双层复合衬垫, 即由复合衬垫、渗滤液检验层和另外一层复合衬垫共同组成防渗系统^[1]。我国《生活垃圾卫生填埋技术规范 (CJ17-2004)》中规定, 人工合成衬里的防渗系统应采用复合衬里防渗系统^[2]。膜下防渗保护层即为压实粘土衬垫, 粘土厚度应大于 100cm, 渗透系数不应大于 1.0×10^{-7} cm/s。特殊情况下可采用钠基膨润土垫 (即人工合成材料粘土衬垫) 替代膜下防渗保护层。可见, 随着环保意识的加强, 对垃圾填埋场的要求和采用的标准越来越高, 复合衬垫成为最常采用的衬垫形式之一。复合衬垫包括土工膜与压实粘土衬垫 (CCL) 复合和土工膜与人工合成材料粘土衬垫 (GCL) 复合两种。GCL 一般由钠基膨润土夹于土工织物之间或连接于土工膜之上制成, 因其具有渗透系数小、厚度薄 (只有 1cm 左右), 且施工方便等优点, 成为我国今后垃圾填埋场防渗系统建设发展的方向^[3]。

由于施工等原因的影响, 复合衬垫中的土工膜上总是存在缺陷。Young 等对土工膜的统计分析表明, 土工膜上缺陷的平均密度为 43 个/英亩^[4]。缺陷类型有圆孔型、裂缝型和裂纹型等。因此, 很多研究都是针

对复合衬垫缺陷处的渗滤液和污染物运移进行的^[5~8]。垃圾填埋场产生的渗滤液为高浓度废水, 成分复杂, 污染物浓度高。按其成分可以分为两类: 有机污染物和无机污染物。与无机污染物相比, 有机污染物的浓度较低, 但是危害性较大。研究表明, 渗滤液中的有机污染物和无机污染物在复合衬垫中的运移方式是有所不同的。无机污染物主要通过复合衬垫中的缺陷, 发生一定范围的水平运移, 然后在 CCL 或 GCL 中向下运移; 有机污染物除了在缺陷处运移外, 还有一部分先通过完好土工膜扩散, 然后在 CCL 或 GCL 中扩散^[5]。那么有机污染物在不同的复合衬垫中以哪种运移方式为主? 如果运移量较大, 在实际应用中如何减小污染物的运移量以提高衬垫的有效性? 为解决这些问题, 本文首先讨论有机污染物在复合衬垫中的两种运移方式的影响因素和计算方法, 然后对两种方式下污染物的运移量进行分析, 以期对复合衬垫 (尤其是 GCL 复合衬垫) 的性能有进一步的认识, 对 GCL 复合衬垫在垃圾填埋场衬垫系统中的应用提供一定的参考。

2 复合衬垫缺陷处污染物的运移计算

复合衬垫缺陷处污染物运移的简化模型见图 1。缺陷在土工膜的局部存在, 复合衬垫缺陷处污染物的运移是二维或三维对流扩散问题, 得到解析解答比较困难, 一般采用有限差分法求解, 例如采用 PMWIN 软件来计算。裂缝型缺陷处污染物的运移方程为:

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{k_{ix}}{n} \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{k_{iz}}{n} \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

式中: c ——溶质的浓度;

收稿日期: 2008-02-22; 修订日期: 2008-06-24

作者简介: 何俊 (1977-), 女, 讲师, 博士, 从事环境岩土工程方面的研究。

E-mail: hjunas@163.com

R_d ——阻滞系数;

D ——水动力弥散系数,由于粘土中溶液流速很小,水动力弥散系数即为扩散系数;

k ——渗透系数;

n ——孔隙率;

i ——水力梯度。

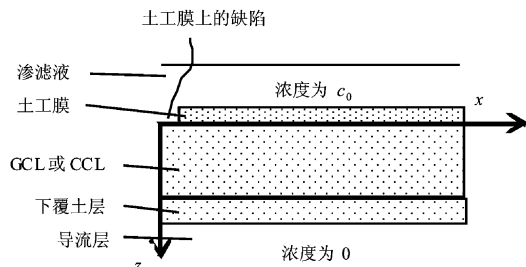


图1 污染物在土工膜上的缺陷处运移的简化模型

Fig. 1 Simplified model of contaminant transport through defect on geomembrane

影响缺陷处污染物运移的主要因素有:渗滤液水头(水头越高,运移量越大)、土工膜与 GCL 或 CCL 之间的接触状态和缺陷数量(当施工质量较差,接触状态不好、缺陷较为密集时,运移量较大)、GCL 和 CCL 的运移参数(由于受施工情况、渗滤液成分和浓度等因素影响,渗透系数变化范围较大,可能存在几个数量级的变化,故运移参数中渗透系数比扩散系数和阻滞系数的影响大)、衬垫的边界条件(如衬垫与导流层之间是否存在一定厚度的粘土层等)。

为计算缺陷处污染物的运移量,首先用 PMWIN 软件计算剖面浓度随时间的变化,求出相应网格处浓度梯度;其次,计算 $z = L$ (L 为 GCL 或 CCL 的厚度)处 z 方向上透过单位长度裂缝、某一网格 δ_j 上污染物累积量 M_{Dj} : $M_{Dj} = - \int_0^T Dn \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{z=L} dt = \sum_i Dn(\bar{c})_i (\Delta t)_i$, 其中, $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, $\bar{c}$ 为 Δt 时间内 $z = L$ 处平均浓度梯度,即 $\bar{c}' = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=L, t=t_{i-1}} + \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=L, t=t_i} \right)$;最后,计算 z 方向上透过单位长度裂缝的累积量 M : $M = \sum M_{Dj} \delta_j$, 其中, δ_j 为网格的长度。 M 乘以缺陷的长度和缺陷的密度后,即得一定计算时间内单位面积上污染物的质量 (mg/cm^2)。

3 完好复合衬垫中有机污染物的运移计算

有机污染物在土工膜中的运移可以分为三个过程^[5]:首先,污染物分配进入土工膜;然后,在土工膜中

扩散;接着从土工膜中分配后进入土工膜下低渗透性土中的孔隙水。将有机污染物在完好复合衬垫中的运移简化为一维模型(图2)。图中, K_1 为分配系数,单位为 mg/L 。当污染物从水中进入土工膜时,浓度增大 K_1 倍,而当污染物从土工膜进入 GCL 或 CCL 的孔隙水中时,浓度降低 K_1 倍。

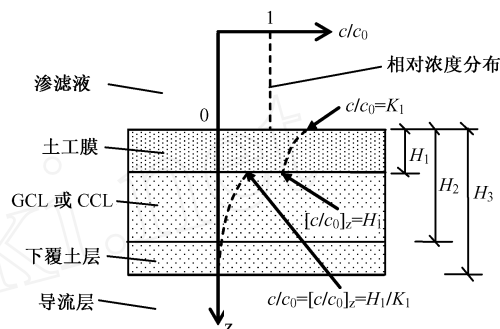


图2 有机污染物在完好复合衬垫中运移的简化模型

Fig. 2 Simplified model of organic contaminant transport through intact composite liner

有机污染物的扩散主要与粘土衬垫的厚度、粘土对污染物的吸附性能、衬垫的边界条件等有关,而与渗滤液水头、粘土衬垫的渗透系数等因素无关。因此,有机污染物两种运移方式的主要影响因素是不同的。

有机污染物的扩散方程为:

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2)$$

有机污染物在完好复合衬垫中的扩散可以参考成层地基固结的解析解求解方法得到浓度解^[7],进而计算出通量和累积量。这种情况下,通量的意义为单位时间单位面积上污染物的质量 ($\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$)。累积量的意义仍然为单位面积上污染物的质量。

4 讨论

4.1 污染物运移量分析及计算参数

对于污染物运移量的描述,可以从衬垫底部浓度、击穿时间、衬垫底部通量、衬垫底部污染物运移量等方面进行。

假设图1和2中边界条件为导流层中污染物的浓度为0。对缺陷处污染物的运移进行分析时,衬垫底部浓度和通量是不均匀的,不同位置处污染物的击穿时间也不相同。而且,两种运移方式下衬垫底部通量单位不一致,无法比较通量。因此只能从污染物累积量来分析。本文中污染物运移量是指累积量。

计算时所选用的参数见表1。缺陷处的运移计算

时,只考虑土工膜上的缺陷,其他位置将土工膜当作不透水材料(没有缺陷的土工膜渗透系数非常小);而完好土工膜处污染物的运移计算只考虑扩散,与渗透系数没有关系。故表1中不考虑土工膜的渗透系数。选甲苯为研究对象,渗滤液中甲苯浓度设为100mg/L, K_1 为135mg/L^[5];渗滤液水头高度选择2m。由于垃圾填埋场填埋期一般为10a,这里以10a作为计算时间。为描述方便,将缺陷引起的污染物运移称为方式I,完好复合衬垫中污染物的扩散称为方式II。

表1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

计算参数	$k(\text{cm/s})$	$D(\text{cm}^2/\text{s})$	$H(\text{cm})$	n	R_d
土工膜	-	3×10^{-9}	0.15	-	-
GCL	5×10^{-9}	2×10^{-6}	0.6	0.79	3
CCL	1×10^{-7}	2×10^{-6}	100	0.54	3
下覆土层	1×10^{-5}	5×10^{-6}	0~100	0.54	3

4.2 导流层位于衬垫之下时污染物累积量分析

当导流层位于衬垫之下时,两种运移方式下污染物累积量的比较见图3和图4。分析表明:

(1)对于GCL复合衬垫,两种运移方式下衬垫底部通量迅速达到稳定值,故累积量随时间匀速增加(图3)。两种运移方式中,方式II产生的累积量为方式I的5000倍以上。这是由于GCL自身的特点造成的:GCL渗透系数很小,有效地阻止了缺陷处污染物的运移;而GCL厚度很小,完好复合衬垫中有机污染物的扩散量很大。因此,在这种边界条件下,方式II是绝对占优的方式。

(2)对于CCL复合衬垫则有不同的结果(图4):在填埋初期缺陷处衬垫底部通量较小,故污染物累积量很小,以完好复合衬垫中有机污染物的扩散运移方式为主;随着时间的增长缺陷处污染物的运移量增大,超过完好复合衬垫中扩散运移量。10a时两种运移方式产生的运移量在同一数量级。

(3)将两种运移方式产生的污染物运移量叠加,可以得到:10a时GCL复合衬垫底部通量约为40mg/cm²,而CCL复合衬垫底部通量只有0.003mg/cm²左右。因此,CCL复合衬垫对于有机污染物的阻止效果远好于GCL复合衬垫。

4.3 导流层与GCL之间存在粘土层时污染物累积量分析

GCL衬垫底部污染物累积量见图5,可以看出,当存在粘土层(100cm厚)时,有机污染物的运移仍然以完好衬垫中的扩散为主,10a时方式II产生的累积量约为方式I的1000倍。图5与图3相比,在GCL衬

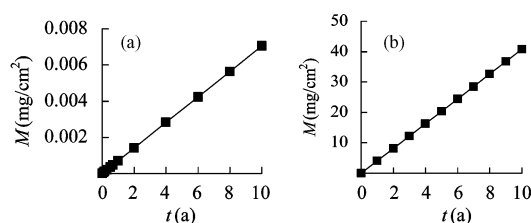


图3 GCL复合衬垫底部累积量

Fig. 3 Accumulated contaminant mass at the base of GCL composite liner

(a):缺陷处(方式I);(b):完好复合衬垫中(方式II)。

图4~6与此相同。

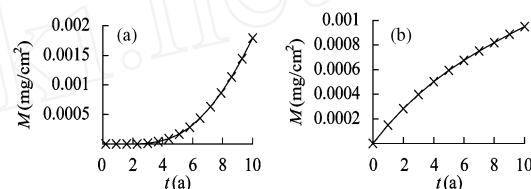


图4 CCL复合衬垫底部累积量

Fig. 4 Accumulated contaminant mass at the base of CCL composite liner

垫底部以方式I产生的累积量为不存在粘土层时的1/2,而以方式II产生的累积量比不存在粘土层时约减小了一个数量级。这表明,GCL之下粘土层的存在对于减小有机污染物的扩散运移的效果是较好的。

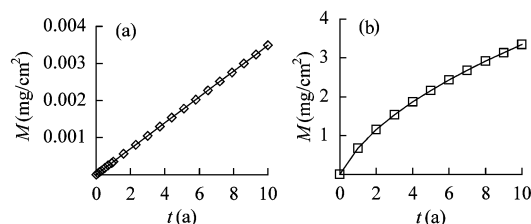


图5 存在100cm厚粘土层时GCL衬垫底部累积量

Fig. 5 Accumulated contaminant mass at the base of GCL with 100cm thick soil liner under GCL

粘土层底部累积量见图6,可以看出,方式II产生的累积量较大,10a时累积量约为方式I产生累积量的10倍。图6与图4相比,由于存在渗透系数较小的GCL,缺陷处产生的累积量较小;计算时粘土层扩散系数选择较大,因此完好衬垫中产生的累积量较大。

以上的分析表明,当GCL与导流层之间存在一定厚度的粘土层时,能够有效改善衬垫对GCL复合衬垫阻止有机污染物扩散的效果;对于GCL复合衬垫中有机污染物的运移可以忽略缺陷产生的运移量,只考虑完好复合衬垫中污染物的扩散带来的误差较小。

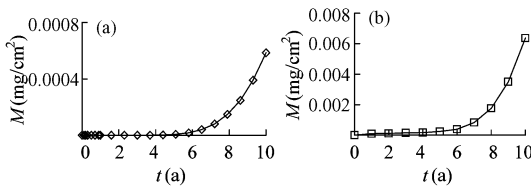


图6 存在100cm厚粘土层时粘土层底部累积量

Fig. 6 Accumulated contaminant mass at the base of soil liner with 100cm-thick soil liner under GCL

5 结论

本文对有机污染物在复合衬垫中的两种转移方式进行了讨论,分析了缺陷引起污染物运移和完好复合衬垫中污染物的扩散的影响因素和计算模型及方法,重点分析了GCL复合衬垫中两种方式下有机污染物的累积量,得到以下结论:

(1) 两种方式主要的影响因素是有所不同的。土工膜上缺陷引起的污染物的运移主要受衬垫的渗透系数、渗滤液水头、缺陷密度及衬垫边界条件影响,而完好复合衬垫中有机污染物的扩散主要受粘土衬垫的厚度、衬垫材料的吸附性能及衬垫边界条件影响。两种方式下污染物的运移应从污染物累积量比较。

(2) 有机污染物在GCL和CCL复合衬垫中的运移时,前者以完好复合衬垫中有机污染物的扩散占据绝对优势,可以忽略缺陷的存在引起的运移量;后者产生的运移量则需要考虑缺陷处污染物的运移和完好复合衬垫中污染物的扩散。

(3) GCL复合衬垫中有机污染物的运移量比CCL

复合衬垫大4个数量级以上,CCL复合衬垫的性能远远优于GCL复合衬垫。可以通过在GCL复合衬垫与导流层之间铺设粘土层的方法改善衬垫的性能,此时,粘土层的渗透系数可以大于CCL(即超过规范中要求的 1×10^{-7} cm/s),对材料的要求可以适当放宽。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CJJ17-2004 生活垃圾卫生填埋技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [3] 栾智慧,王树国.垃圾卫生填埋实用技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [4] Young H M, Johnson B, Johnson A, et al. Characterization of infiltration rates from landfills: supporting groundwater modeling efforts [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004 (96): 283 - 311.
- [5] Foote GJ. Leakage rates and chemical transport through composite landfill liners [D]. Madison: University of Wisconsin, 1997.
- [6] 何俊,夏彩虹,胡景山. GCL 与 CCL 复合衬垫的等效性分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 102 - 106.
- [7] Cartaud F, Touze-Foltz N, Duval Y. Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005 (23): 117 - 143.
- [8] Barroso M, Touze-Foltz N, Maubeuge K, et al. Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006 (24): 139 - 155.

Transport of organic contaminants through a composite liner

HE Jun¹, GAO Zi-kun², ZAN Guo-cai³

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Civil Engineering Department of Putian University, Putian 351100, China;

3. China Southwest Geotechnical Investigation and Surveying Institute, Chengdu 610086, China)

Abstract: There are two different ways for organic contaminants to transport through a composite liner. One is the transport through defect in geo-membranes, and the other is the diffusion through an intact composite liner. The accumulated contaminant mass through a liner was calculated with finite difference method and analytical method. The masses of the two ways were analyzed. For GCL (geo-synthetic clay liner) composite liner, diffusion is the main way and transport through defect can be defaulted. While for CCL (compacted clay liner) composite liner, both the two ways are important. GM + GCL + subsoil liner was very effective to retard the transport of organic contaminants.

Key words: organic contaminant; composite liner; transport; accumulated contaminant mass

责任编辑:汪美华