

地下水位对垃圾填埋场衬垫性能的影响

何俊范瑛

(湖北工业大学土木工程与建筑学院,湖北武汉 430068)

摘要:为研究地下水位上升时垃圾填埋场衬垫的性能,针对我国规范中规定的各种衬垫系统,对地下水进入填埋区的水量和透过衬垫底部的无机污染物累积量进行数值计算。研究表明,衬垫渗透系数是控制地下水进入填埋区水量的主要因素,GM + GCL 复合衬垫的效果最好,进入填埋区的水量最少,但是从衬垫底部污染物累积量来看,GM + GCL 复合衬垫的效果最差,在地下水位升高时对地下水污染的威胁最大。得出 GM + 改性 CCL 复合衬垫对地下水变化的适应性最强的结论。

关键词:垃圾填埋场;衬垫;地下水;渗水量;污染物累积量

中图分类号:X523 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2008)01-0031-04

Effect of groundwater table on performance of liners in waste landfill/HE Jun, FAN Ying(College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: For research of the performance of liners with the rise of ground water table in waste landfill, the volume of groundwater infiltrating through the landfill area and the amount of inorganic pollutants accumulating at the bottom of the liners were calculated for different liners in the specifications of China. The research shows that the permeability coefficient of liners is the main factor controlling the infiltration rate. From the angle of groundwater infiltration, the effect of the GM + GCL composite liner is the best because of the minimal infiltration rate through the landfill area, while from the angle of pollutant accumulation, the effect of the GM + GCL composite liner is the worst, because it might cause serious groundwater pollution. As a result, GM + modified CCL composite liner is of the highest adaptability to the change of groundwater.

Key words: waste landfill; liner; groundwater; infiltration rate; amount of pollutant accumulation

当填埋场位于地下水丰富地区,或为了增大填埋场的容量而加大填埋场的埋深,或遇到连续降水使得地下水位上升时,都可能出现衬垫位于地下水位以下的情况。国外对于垃圾填埋场场址的选择有较为明确的规定。例如美国联邦环保局(USEPA, 1991)和密歇根州环保署(MDEQ, 1993)规定,城市固体废弃物填埋场应保持与地下水位的最小间距为(从主要衬垫顶部算起):离天然地下水位 3 m,离持久降低的地下水位 2.1 m^[1]。德国危险垃圾安全填埋场规定黏土层下的底土距离地下水面不小于 1 m。英国固体垃圾填埋场要求地下水位必须总是低于衬垫^[2]。我国建设部 CJJ 17—2004《生活垃圾卫生填埋技术规范》中对填埋场与地下水位间距没有明确规定,只是规定垃圾填埋场应位于地下水贫乏地区^[3]。据经验数据,地下水位应位于垃圾填埋场场底之下至少 1 m^[4],但在所有季节都符合这项原则是很难的。例如,位于平原地区的填埋场地下水位很高,山谷型填埋场在雨季时地下水位也会高于填埋

场底部。

CJJ 17—2004《生活垃圾卫生填埋技术规范》中强制规定,填埋场必须进行防渗处理,防止对地下水和地表水的污染,同时还应防止地下水进入填埋区^[3]。垃圾填埋场场底高程设计,对于平原填埋有下挖和不挖两种^[5],其中下挖式是指在场地原地平面以下再下挖一定深度以增加垃圾填埋场容量,且基底开挖出的土可以作为覆盖材料。如果填埋场场底低于地下水位,有两个方面需要注意:①衬垫设计应考虑地下水渗入填埋场的可能性及对渗沥液产生量的影响,注意渗沥液收集排出系统的收集能力,控制因地下水位上升而对衬垫系统施加的压力。例如,北京阿苏里垃圾填埋场,场底设计在原地基础下深 5 m 后建设防渗层。由于场址地区潜水平埋深较浅(0~2 m),施工完成后有 26 km² 的面积不能在较短时间内将开挖的基坑完全填满垃圾,坑壁承受潜水压力使改性黏土—膨润土防渗层局部出现地下水涌入现象,后期不得不进行包括帷幕灌浆在内的补建

工作。②对地下水污染的影响 :当地下水位埋深很大时 ,则填埋场到地下水的距离较远 ,从填埋场渗漏的含有污染物的水在到达地下水之前已经过较大程度的净化 ,对地下水的污染较轻 ;反之 ,当地下水位较高时 ,从填埋场渗漏的含有污染物质的水未经充分净化就与地下水混合 ,造成地下水污染。

现有文献对填埋场衬垫防渗效果的分析一般是假设渗沥液水头高于地下水位 ,而对于衬垫防止地下水进入填埋区及其对衬垫性能影响的研究还较少。另外 ,对于钠基膨润土替代黏土衬垫后对整个衬垫系统的影响的研究也较为缺乏。本文对衬垫系统处于地下水位以下的情况进行分析 ,想要解决的问题主要有 :地下水位对渗沥液产生量的影响 ;地下水位对各种衬垫防污性能的影响 ;当为了增加填埋场的容量而加深填埋场或填埋场处于地下水位变化较大的地区时 ,如何选择衬垫。

1 计算模型及求解

1.1 衬垫的选择

CJJ 17—2004《生活垃圾卫生填埋技术规范》中规定 :人工合成衬垫的防渗系统应采用复合衬垫防渗系统 ,位于地下水贫乏地区的防渗系统也可采用单层衬垫防渗系统 ,在特殊地质和环境要求非常高的地区应采用双层衬垫防渗系统。各种衬垫的具体要求是 :

复合衬垫 :HDPE 土工膜 + 膜下防渗保护层(库区底部为大于 1 m 黏土层 ,库区边坡为大于 0.75 m 黏土层 ,渗透系数 k 不大于 1×10^{-7} cm/s) ;

单层衬垫 :HDPE 土工膜 + 膜下保护层(库区底部为大于 1 m 黏土层 ,库区边坡为大于 0.75 m 黏土层 ,渗透系数 k 不大于 1×10^{-5} cm/s) ;

双层衬垫 :HDPE 土工膜 ,之下为渗滤液检测层 ,然后是 HDPE 土工膜 + 膜下保护层(大于 1 m 黏土层 ,渗透系数 k 不大于 1×10^{-5} cm/s)。

衬垫与地基之间为 30 cm 厚地下水导流层。地下水导流层有利于降低填埋场场底之下的地下水位 ,当地下水来不及从导流层中排出时 ,则导流层中的水存在一定的水头压力。规范规定 ,特殊情况下可采用钠基膨润土垫替代膜下防渗保护层(即渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s 的黏土衬垫) 。基于规范中对于防渗层的规定 ,本文研究的衬垫如表 1 所示。

表 1 计算所选择的衬垫汇总

衬垫类型	黏土材料
A :GM + CCL 复合衬垫	1 m 厚 , $k = 1 \times 10^{-7}$ cm/s
B :GM + GCL 复合衬垫	0.01 m 厚 , $k = 1 \times 10^{-9}$ cm/s
C :GM 单层衬垫	1 m 厚 , $k = 1 \times 10^{-5}$ cm/s

注 :C 类衬垫将土工膜与膜下黏土一起计算。

1.2 计算模型

计算物理模型如图 1 所示。其中 ,衬垫指表 1 中 3 种衬垫类型中的 1 种。

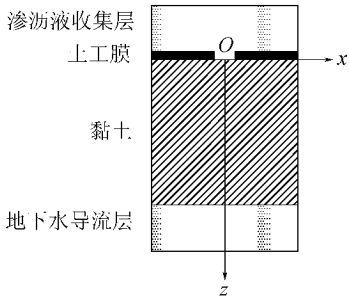


图 1 计算模型示意图

当衬垫中有 HDPE 土工膜时 ,无机污染物主要在膜上存在的缺陷中迁移。对于圆孔型缺陷中污染物的运移需要用三维模拟 ,花费的时间很长 ,而裂缝型缺陷可以简化为二维问题 ,相对简单。本文考虑裂缝型缺陷(垂直于 xz 平面)处无机污染物的运移 ,裂缝中心位于 O 点处。运移方程为

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

式中 : c 为溶质的浓度 ; R_d 为阻滞系数 ; D 为水动力弥散系数 ,由于黏土中溶液流速很小 ,水动力弥散系数即为扩散系数 ; k 为渗透系数 ; n 为孔隙率 ; i 为水力梯度 , $i_x = -\frac{\partial h}{\partial x}$, $i_z = -\frac{\partial h}{\partial z}$, h 为水头 ,根据水流方程确定 :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

2 计算方法

水头分布和浓度分布的计算采用 PMWIN 软件。PMWIN 是国际上较为先进的模拟地下水流动和污染物运移的软件 ,包括模拟地下水流动过程的 MODFLOW 和模拟污染物在地下水中运移过程的 MT3D 等。该模型操作简便 ,界面良好 ,能解决不同类型的地下水流动和水质问题。其中 MT3D 使用欧拉-拉格朗日方法求解对流弥散方程。该软件可以在 <http://www.pmwin.net/pmwin5.htm> 中免费下载。本文应用 PMWIN 时 ,首先用 MODFLOW 计算水头分布 ,然后用 MT3D 计算浓度分布。

二维情况下 ,网格的划分和边界条件见图 2 和表 2。考虑到裂缝的对称性 ,取 1/2 宽度的裂缝及其下的黏土衬垫来计算。

初始条件为 $h(x, z, 0) = h_{\text{初始}}$, $c(x, z, 0) = c_{\text{初始}}$ 。

2.1 通过衬垫的水量计算

当地下水通过衬垫进入垃圾填埋场时 ,水量的

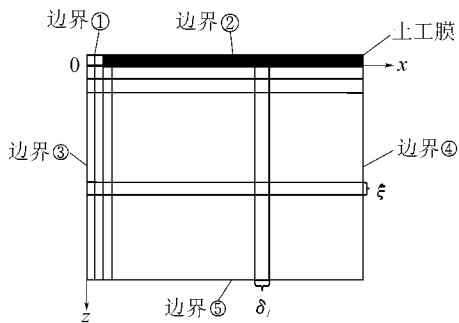


图2 网格划分

表2 计算模型的边界条件

边界	渗透模型	运移模型
①	定水头边界($h = h_1$)	定浓度边界($c = c_1$)
②	隔水边界	无质量通量边界
③	隔水边界	无质量通量边界
④	隔水边界	无质量通量边界
⑤	定水头边界($h = h_2$)	定浓度边界($c = 0$)

计算步骤为：

- 用 PMWIN 软件计算水头分布 ,得到缺陷处相应网格水头梯度；
- 计算缺陷处沿 z 方向单位长度裂缝 δ_j 网格上的水量 $Q_j = k \frac{\partial h}{\partial z}$ ；
- 通过单位衬垫的水量 $Q = \sum Q_j \delta_j l_d f$ 其中 , l_d 为裂缝长度 f 为土工膜的裂缝密度。

2.2 通过衬垫的污染物累积量计算

衬垫底部无机污染物累积量计算步骤如下：

- 用 PMWIN 软件计算浓度剖面随时间的变化 ,求出相应网格处浓度梯度；
- $z = z_1$ 处 z 方向上透过单位长度裂缝 δ_j 网格上的污染物扩散累积量 M_{Dj} 和对流累积量 M_{Aj} 分别为

$$M_{Dj} = - \int_0^T Dn \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_1} dt = \sum_{i=0}^m Dn(\bar{c}')_i (\Delta t)_i$$

$$M_{Aj} = \int_{T_b}^{T_t} cv dt = \sum_{i=1}^n (\bar{c})_i v (\Delta t)_i$$

式中： $\bar{c}$ 为 Δt 时间内 $z = z_1$ 处的平均浓度 ,即 $\bar{c} = \frac{1}{2} [c(x, z_1, t_{i-1}) + c(x, z_1, t_i)]$; $\bar{c}'$ 为 Δt 时间内 $z = z_1$ 处的平均浓度梯度 ,即 $\bar{c}' = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_1, t=t_{i-1}} + \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_1, t=t_i} \right)$ 。

- z 方向上透过单位长度裂缝的累积量 $M = \sum (M_{Dj} + M_{Aj}) \delta_j l_d f$ 。

3 计算结果及讨论

Young 等^[6]对垃圾填埋场土工膜的情况进行了统计 ,缺陷密度为 $0 \sim 774$ 个/ hm^2 ,平均为 43 个/ hm^2 ；

缺陷尺寸的资料较为有限 ,从针尖状缺陷到长度为 30 cm 的裂缝型缺陷都存在 ,约有 78% 为圆孔型缺陷 , 13% 为裂缝型缺陷 , 9% 为裂纹型缺陷。这里对单位厚度为 1 cm 的裂缝型缺陷进行计算 ,缺陷密度选 43 个/ hm^2 ,裂缝长度 l_d 选 30 cm ,宽度 w_d 为 1 cm (文献 [6])。其他材料计算参数见表 3。

表3 计算参数

材料类型	$k/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$D/$ ($10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	n	$l/$ m
GCL	1×10^{-9}	2	0.75	0.01
黏土	1×10^{-7} 或 1×10^{-5}	5	0.54	1

3.1 地下水位对渗沥液产生量的影响

当地下水位高于填埋场场底时 ,将引起渗沥液产生量的增加。选择不同类型的衬垫 ,对地下水的阻隔效果存在差别。地下水位上升至填埋场场底以上 2 m 时 ,从衬垫底部渗入填埋区的水量如表 4 所示。从表 4 中可以看出 ,本文研究的 3 种衬垫中 ,衬垫 B 防止地下水进入的效果最好 ,渗入量只有衬垫 A 的 0.09 倍 ,这是由于 GCL 渗透系数很小引起的。而衬垫 C 与衬垫 A 相比 ,渗入量高 2 个数量级。

表4 地下水位为填埋场场底以上 2 m 时渗入量比较

衬垫	渗入量/($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	与衬垫 A 渗入量的比值
A	1.05×10^{-6}	1
B	9.49×10^{-8}	0.09
C	1.05×10^{-4}	100

当连续降雨等原因造成地下水位上升时 ,渗沥液还会因上部覆盖层降雨引起产生量的增加 ,进而可能造成渗沥液水头增高。此时 ,填埋场内外水头差可能降低 ,甚至出现渗沥液水头比地下水位高的情况。而且 ,当地下水进入垃圾填埋场时 ,渗沥液水头也可能增加。以上的计算是在假设填埋场中渗沥液水头为 30 cm 的条件下进行的 ,因此得到的结果夸大了地下水位的影响。

3.2 地下水位变化对渗沥液中污染物运移量的影响

衬垫对污染物的阻滞能力可以通过衬垫底部污染物累积量来判断。对于给定的衬垫 ,当地下水位发生变化时 ,衬垫底部污染物累积量也将发生变化 (表 5)。表 5 中计算结果是假设渗沥液中污染物浓度为 1 mol/L ,模拟时间为 3 年时得到的。可以看出 ,当地下水位在填埋场场底之上时 ,污染物累积量较小。当地下水位从填埋场场底处上升到填埋场场底之上 2 m 时 ,衬垫 A 底部污染物累积量从 $2.81 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2$ 减小至 $9.89 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2$,这是由于地下水位相对较高阻止了渗沥液的对流运移引起的。

当地下水位在填埋场场底之上 2 m 时 ,透过衬垫 B 底部的污染物累积量最大 ,衬垫 B 与衬垫 A 相比 ,污染物累积量约相差 4 个数量级。这表明 ,衬垫

表 5 衬垫底部污染物累积量比较

地下水位	R_d	污染物累积量/(mol·m ⁻²)		
		衬垫 A	衬垫 B	衬垫 C
场底之上 2 m	1	9.89×10^{-6}	0.187	0
场底处	1	2.81×10^{-4}	1.213	0.98
场底之下 1 m	1	3.37×10^{-11}	—	—
场底处	2	3.28×10^{-8}	—	—
场底处	4	5.82×10^{-11}	—	—

注:当地下水位在填埋场场底处时,计算衬垫 C 底部污染物累积量的模拟时间为 1 年。

B 对防止地下水污染的能力相对较差。当地下水位在填埋场场底之上 2 m 时,衬垫 C 的底部污染物累积量为零,但是当地下水位下降到场底处时,污染物累积量在 1 年时增至 0.98 mol/m²,表明衬垫 C 对地下水位的变化很敏感。

3.3 黏土吸附能力的影响

当地下水位较高时,减小了从垃圾填埋场渗漏的带有污染物质的水与地下水位之间土层的厚度,污染物的净化较少,对地下水的污染程度和范围可能较大。由于土工膜无法阻止有机污染物的扩散,因此地下水位较高情况下有机污染物对地下水的潜在危害可能更大。为了减轻其危害,增加黏土对污染物的吸附性能是非常关键的,这样能将更多的污染物相对固定在地下水导流层之上的黏土内,减轻对地下水的污染。吸附对污染物在衬垫中运移的影响可从阻滞系数中反映。从表 5 可以看出,当衬垫 A 地下水位在填埋场场底处、 R_d 增至 4 时,衬垫底部污染物累积量为 5.82×10^{-11} mol/m²,与衬垫 A 地下水位在填埋场场底之下 1 m 时衬垫底部的污染物累积量(3.37×10^{-11} mol/m²)在同一个数量级。这表明,添加活性材料从而增大 GM + CCL 中黏土对污染物的吸附能力即形成 GM + 改性 CCL,将有效地增强衬垫对地下水位变化的适应性。

4 结 语

本文通过数值计算对地下水位变化时我国规范中规定的常用衬垫的性能进行分析,得到的结论主要有:①衬垫渗透系数是控制地下水进入填埋区水量的主要因素,GM + GCL 复合衬垫的效果最好,进入填埋区的水量最少;②当地下水位位于填埋场场底之上时,地下水位相对较高对于阻止渗沥液的对流运移有利,因此衬垫底部污染物累积量较小;③地下水位较高时,GM + GCL 复合衬垫底部污染物累积量比 GM + CCL 复合衬垫高 3 ~ 4 个数量级;④3 种衬垫相比而言,GM + CCL 复合衬垫对于防止污染地下水的效果较好。当黏土中加入活性材料形成 GM + 改性 CCL 以增加其对污染物的吸附能力时,这种

衬垫的优势更为显著。

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] 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.
[3] CJJ17—2004,生活垃圾卫生填埋技术规范[S].
[4] 刘长礼,张云,殷密英.城市垃圾地质环境影响调查评价方法[M].北京:地质出版社,2006.
[5] 李颖,郭爱军.城市生活垃圾卫生填埋场设计指南[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
[6] YOUNG H M, JOHNSON B, JOHNSON A, et al. Characterization of infiltration rates from landfills: supporting groundwater modeling effort[J]. Environmental Monitoring and Assessment 2004 96 283-311.
[7] FOOSE G J. Leakage rates and chemical transport through composite landfill liners[D].Madison:University of Wisconsin, 1997.

(收稿日期 2007-01-24 编辑:方宇彤)

· 简讯 ·

2007 全国大坝抗震防灾高级学术研讨会在河海大学举行

由中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会主办、河海大学水工结构研究所和中国水利水电科学研究院工程抗震中心承办的“2007 全国大坝抗震防灾高级学术研讨会”于 11 月 11 ~ 12 日在河海大学隆重举行。中国工程院陈厚群院士、中国科学院林皋院士和张楚汉院士、国家自然科学基金委水利学科主任李万红教授以及来自全国水利水电勘测设计、建设单位及高等院校、科研院所的 50 余名高级专家参加了研讨会。中国水电顾问集团公司昆明勘测设计研究院、成都勘测设计研究院等单位也参加了本次研讨会。

研讨会分两个专题“高混凝土坝抗震设计中的关键问题”、“高土石坝抗震设计中的关键问题”进行研讨。针对目前我国高坝抗震研究现状,选择具有代表性的高混凝土坝、高土石坝,分别邀请中国水电顾问集团公司成都勘测设计研究院和昆明勘测设计研究院,选择大岗山、溪洛渡、糯扎渡、长河坝、双江口等典型高坝,介绍或提出高混凝土坝抗震设计、分析和施工中存在的关键技术问题,与会专家进行了深入的研讨、交流。本次研讨会的举行对我国的高坝抗震防灾研究起着积极的推动作用。

(本刊编辑部供稿)