

粘土衬垫系统污染物迁移规律研究

钱学德 施建勇 郭志平 吕 进

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 对通过土工合成粘土衬垫(GCL)和压实粘土衬垫(CCL)的污染物质量浓度分布、平流量、扩散量及积聚等进行了计算分析并讨论了污染物通过 GCL 和 CCL 迁移的各种情况.计算分析结果表明:GCL 底部质量浓度比的增长速度比 CCL 的快得多,通过 GCL 和 CCL 的扩散量随时间减小,平流量随时间增加,但二者随时间的变化不同步.前 11 a,污染物通过 GCL 的迁移量大于通过 CCL 的迁移量,11 a 以后,通过 CCL 的迁移量大于通过 GCL 的迁移量,这种趋势贯穿于废弃物处理系统的整个有效运行期间.

关键词 填埋物;土工合成粘土衬垫;压实粘土衬垫;污染物迁移;平流;扩散

中图分类号 TU442 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2004)04-0415-06

土工合成粘土衬垫(GCL)是已经商业生产的衬垫材料,是由大约 5 kg/m^2 的膨润土夹在土工织物中间或黏结在土工膜上制成的.膨润土的渗透系数约为 $1.0 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$,比压实粘土衬垫(CCL)的 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 要小得多^[1].土工合成粘土衬垫厚度大约为 7 mm,单片长 30 m,宽 5 m,并且各片之间不用机械焊接方法搭接,而是当膨润土水化时在搭接处自动封闭.GCL 的工程特性以及 CCL 与 GCL 的比较有关文献^[1~3]已做了描述,本文仅研究 CCL 和 GCL 衬垫的渗漏特性.

现有规范对在固体废弃物填埋场衬垫(或封顶)使用的压实粘土衬垫已有详细说明.因此,GCL 要成为 CCL 的替代物,必须有根据说明 GCL 的性能可与 CCL 等同甚至比 CCL 更好.

目前,工程师们普遍接受的一种方法是:仅根据通过衬垫的平流量判断它们是否具有相同的性能.也就是说,在相同的水头差下,若两种衬垫系统具有相同的渗透能力,那么就可以认为它们在性能上是等价的.然而,这种方法忽略了在扩散量上可能出现的差异,例如在化学属性或者浓度存在差异时,溶质渗漏临界值和渗漏速率就有差异.忽视扩散的差异判断性能等价与否是不恰当的.因为对低渗透系数的衬垫,如 CCL 和 GCL,扩散是一条重要的污染物迁移途径.

在工程实践中,通常将土工膜放在 GCL 或 CCL 上面以形成复合衬垫.这就使实际情况比这里提供的例子复杂得多.因此先分析污染物迁移直接在 GCL 和 CCL 上面进行的情况,即没有土工膜共同作用的情况.

本文的主要目的是由全面的计算分析给出污染物通过 GCL 和 CCL 迁移的规律.分析时考虑了衬垫中溶质浓度分布随时间的变化、平流量和扩散量随时间的变化以及通过衬垫的污染物累积量随时间的变化.GCL 和 CCL 衬垫关于污染物迁移的等价性评估不仅取决于通过衬垫的流量,而且取决于填埋场使用寿命期内衬垫底部污染物浓度和通过衬垫的污染物总量.

1 污染物在衬垫中的平流与扩散

1.1 稳定平流

平流指的是在整个水头梯度作用下溶质和溶剂同时迁移的现象.单位面积上溶质平流量的一维表达式为

$$J_A = C_0 v = C_0 k (H + L) / L \quad (1)$$

式中: J_A ——平流量; C_0 ——衬垫上部水中溶质的质量浓度; v ——通过衬垫的平均渗透速率; k ——渗透系数; H ——衬垫上的渗滤液水头; L ——衬垫的厚度.

通常用平流量之比 R_A 来评价通过 GCL 的平流量是否与 CCL 等价, R_A 的定义为

$$R_A = \frac{(J_A)_{GCL}}{(J_A)_{CCL}} = \frac{k_{GCL} L_{GCL} (H + L_{GCL})}{k_{CCL} L_{CCL} (H + L_{CCL})} \quad (2)$$

若 $R_A < 1$ 则 GCL 性能优于 CCL, 若 $R_A > 1$ 则 GCL 性能不及 CCL. 根据工程中两种衬垫常用的特性参数 $k_{GCL} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ mm/s}$, $L_{GCL} = 7 \text{ mm}$, $k_{CCL} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$, $L_{CCL} = 600 \text{ mm}$, 假定衬垫上的渗滤液水头 $H = 300 \text{ mm}$, 则可算出 $R_A = 0.29$. 即通过 GCL 的稳定平流量约为通过 CCL 稳定平流量的 $1/3$, GCL 性能优于 CCL.

1.2 稳定扩散

填埋场渗滤液中的溶质也能够以分子扩散的形式通过粘土衬垫迁移. 尽管扩散的实际推动力是溶质的化学势能梯度, 扩散也可以被看作在浓度梯度的作用下化学物质发生迁移的一种过程. 污染物的这种扩散迁移是不需要水力梯度作用的.

土体中基本的扩散公式是菲克第一定律, 在一维迁移情况下, 定律为

$$J_D = Dn \frac{\partial C}{\partial z} = Dn \frac{\Delta C}{L} \quad (3)$$

式中: J_D ——扩散量; D ——有效扩散系数; n ——孔隙率; $\frac{\partial C}{\partial z}$ ——质量浓度梯度; ΔC ——衬垫顶部和底部的质量浓度差; $\Delta C = C_0 - C_e$; C_e ——衬垫底部的溶质质量浓度.

有效扩散系数由化学属性(如离子大小、电荷和溶质的化合价等)以及扩散条件(如通过自由溶液和孔隙水扩散、孔隙的扭曲度等)确定. 溶质在土体孔隙中的扩散速度要比在自由溶液中的扩散速度慢得多.

通常用扩散量之比 R_D 来评价通过 GCL 的稳定扩散量是否与 CCL 性能等价, R_D 定义为

$$R_D = \frac{(J_D)_{GCL}}{(J_D)_{CCL}} = \frac{D_{GCL} n_{GCL} L_{GCL}}{D_{CCL} n_{CCL} L_{CCL}} \quad (4)$$

若 $R_D < 1$ 那么 GCL 性能优于 CCL, 若 $R_D > 1$ 那么 GCL 性能不及 CCL. 两种衬垫有效扩散系数及其他特性参数的典型值为: GCL 中的钠膨润土: $D_{GCL} = 2 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$, $n_{GCL} = 0.6$, $L_{GCL} = 7 \text{ mm}$; CCL 中的压实高岭土: $D_{CCL} = 6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$, $n_{CCL} = 0.5$, $L_{CCL} = 600 \text{ mm}$. 由此可算出 $R_D = 34.3$. 即在稳定状态下, 通过 GCL 的污染物扩散量要比通过 CCL 的多得多. 所以, 若以通过衬垫的稳定扩散量为依据进行判断, GCL 的性能远不及 CCL. 由于 CCL 和 GCL 的扩散系数是同一个数量级, 通过 GCL 的扩散量增大完全是由于它的厚度大幅减小所致.

1.3 不稳定扩散

菲克第一定律描述了溶质在稳定状态下的扩散量. 而对于土体中惰性溶质与时间相关的(不稳定的)迁移, 可用下式表示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5)$$

这就是菲克第二定律. 式(5)给出了多孔介质中扩散溶质在时空上的变化. 公式的解答取决于初始条件和边界条件. 如果假定 $t = 0$ 时衬垫顶部溶质的质量浓度为 C_0 ($C_0 > 0$), 且 C_0 不随时间而变, 而衬垫底部溶质的质量浓度为 0, 那么公式的解答为

$$C(z, t) = C_0 \text{erfc} \left[\frac{z}{\sqrt{4Dt}} \right] \quad (6)$$

式中: $C(z, t)$ ——深度 z 处 t 时刻的溶质质量浓度; z ——深度; t ——时间; erfc ——余误差函数符号.

1.4 平流临界时间

上面在稳定状态下通过两种衬垫的稳定平流量和扩散量的比较结果表明: 以稳定平流量为判断依据, GCL 性能优于 CCL; 以稳定扩散量为判断依据, GCL 性能不及 CCL. 通过 GCL 的扩散量比通过 CCL 的高 34 倍多, 而通过 CCL 的平流量是通过 GCL 的 3 倍多.

实际上, 在填埋场的使用寿命期内, 平流和扩散都没有达到稳定状态, 都在随着时间发生变化, 并且这些变化在时间上是不同步的. GCL 和 CCL 具有不同的平流临界时间, 也就是说溶质通过两种衬垫开始发生平流的时刻是不同的. 所以, 单独使用平流量之比和扩散量之比作为性能等价的判断依据会引起误导, 故有必要进行更加全面的分析.

通过衬垫平流的平均速率或近似速率 v , 是由体积流量除以整个代表面积(孔隙和固体)定义的. 在实际

情况中 ,平流只发生在代表面积中的孔隙部分 ,其平均速率为

$$v_s = v/n = ki/n = k(H + L)(Ln) \tag{7}$$

式中 v_s ——通过衬垫中孔隙的平流平均速率 ; i ——水力梯度.

平流临界时间 T_B 则用下式进行计算 :

$$T_B = L/v_s \tag{8}$$

2 平流与扩散组合下衬垫中污染物的迁移量

在稳定均匀的流动状态下 ,饱和均匀各向同性的材料中惰性溶质的一维平流-扩散公式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_s \frac{\partial C}{\partial z} \tag{9}$$

式中 D_l 为水力分散系数. 公式的解答取决于初始条件和边界条件. 污染物在衬垫中迁移的最不利情况是 : (a) 衬垫顶部的污染物源头质量浓度保持不变 (b) 不透水层上面没有溶质的吸附 (如惰性溶质) (c) 水力梯度和溶质浓度梯度在同一个方向作用. 根据填埋场衬垫中溶质时空分布受到其源头浓度消耗的影响和溶质吸附的影响的研究^{[4][10]} ,此时衬垫的初始条件和边界条件为 : $z \geq 0, C(z, 0) = 0 ; t \geq 0, C(0, t) = C_0 ; t \geq 0, C(\infty, t) = 0$.

式(9)在饱和均一的多孔介质中的解答为

$$\begin{aligned} C(z, t)/C_0 = & 0.5\{\operatorname{erfc}[(z - v_s t)/(4D_l t)^{0.5}] + \\ & \exp(v_s z/D_l) \operatorname{erfc}[(z + v_s t)/(4D_l t)^{0.5}]\} \\ D_l = & D_m + D \end{aligned} \tag{10}$$

式中 $C(z, t)/C_0$ ——深度 z 处 t 时刻的浓度比 ; D_m ——机械分散系数.

水力分散系数是平流速率的函数 ,当平流速率为 0 时 ,机械分散系数 D_m 也为 0. 根据已有研究^[5] ,在细颗粒不透水材料中 ,流速低时扩散是迁移的主导因素 ,可取 $D_m \approx 0, D_l \approx D$. 因而 ,式(10)就变成

$$\begin{aligned} C(z, t)/C_0 = & 0.5\{\operatorname{erfc}[(z - v_s t)/(4Dt)^{0.5}] + \\ & \exp(v_s z/D) \operatorname{erfc}[(z + v_s t)/(4Dt)^{0.5}]\} \end{aligned} \tag{11}$$

对于填埋场衬垫 ,任何时刻底部的溶质质量浓度比都可以在式(11)中使 $z = L$ 进行近似估计 :

$$\begin{aligned} C_e(t)/C_0 = & 0.5\{\operatorname{erfc}[(L - v_s t)/(4Dt)^{0.5}] + \\ & \exp(v_s L/D) \operatorname{erfc}[(L + v_s t)/(4Dt)^{0.5}]\} \end{aligned} \tag{12}$$

式中 $C_e(t)$ 为 t 时刻衬垫底部溶质的质量浓度.

t 时刻的平流量为

$$J_A = C_e(t)v \tag{13}$$

Δt 时间内因平流通过衬垫单位面积的污染物量为

$$\Delta M_A = C'_e v \Delta t \tag{14}$$

式中 ΔM_A ——给定时间 Δt 内衬垫单位面积上因平流产生的污染物量 ; C'_e ——在 Δt 时间内衬垫底部溶质的平均浓度 , $C'_e = 0.5[C_e(t_2) - C_e(t_1)]$.

衬垫单位面积上通过平流产生的污染物累积量为

$$M_A = \sum_{i=1}^n (C'_e)_i v (\Delta t)_i \quad (t \geq T_B) \tag{15}$$

式中 $(C'_e)_i$ 为在时间 $(\Delta t)_i = t_i - t_{i-1}$ 内衬垫底部的溶质平均质量浓度.

t 时刻通过衬垫的污染物扩散量为

$$J_D = Dn[\Delta C(t)/L] \tag{16}$$

式中 $\Delta C(t)$ 为 t 时刻衬垫底部和顶部之间的溶质质量浓度差 $\Delta C(t) = C_0 - C_e(t)$.

① GULLICK R W , WEBER W J , GRAY D H. Organic contaminant transport through clay liners and slurry cutoff walls. In : SAHWANEY B , eds. Clay Minerals Society Lectures , Vol. 8 , Organic Pollutants in the Environment. Boulder , CO : The Clay Mineral Society , 1996. 95—136.

Δt 时间内衬垫单位面积由扩散产生的污染物通过量为

$$\Delta M_D = Dn(\Delta C'/L)\Delta t \quad (17)$$

式中 ΔM_D ——在一定时间段 Δt 内衬垫单位面积由扩散产生的污染物通过量; $\Delta C'$ ——在时间段 Δt 内衬垫底部和顶部的平均质量浓度差 $\Delta C' = C_0 - C'_e$.

单位面积由扩散通过的污染物累积量为

$$M_D = \sum_{i=1}^n Dn[(\Delta C')_i/L] \Delta t_i \quad (18)$$

在 dt 时间段内单位面积上由扩散和平流组合产生的通过衬垫的污染量为

$$dM = dM_D + dM_A = Dn[\Delta C(t)/L]dt + C'_e(t)vdt \quad (19)$$

当 $t < T_B$ 时 $dM_A = 0$.

在 Δt 时间段内单位面积上由扩散和平流组合产生的通过衬垫的污染量近似为

$$\Delta M = \Delta M_D + \Delta M_A = Dn[\Delta C'/L]\Delta t + C'_e v \Delta t \quad (20)$$

当 $t < T_B$ 时 $\Delta M_A = 0$.

单位面积上由扩散和平流组合产生的通过衬垫的污染物累积总量为

$$M = \sum_{i=1}^n Dn[(\Delta C')_i/L] \Delta t_i + \sum_{j=1}^n (C'_e)_j t(\Delta t)_j \quad (21)$$

式中 $(C'_e)_i$ ——在时间段 $(\Delta t)_i = t_i - t_{i-1}$ 内衬垫底部的溶质平均质量浓度; $(C'_e)_j$ ——在时间段 $(\Delta t)_j = t_j - t_{j-1}$ 内衬垫底部的溶质平均质量浓度. 平流只能在 $t_j = T_B$ 时才能进行计算.

3 污染物通过 GCL 和 CCL 迁移的比较

利用前述两种衬垫常用的代表性特性参数,可对污染物通过 GCL 和 CCL 的迁移(扩散和平流)进行比较. 考虑衬垫上渗滤液水头为 $H = 300 \text{ mm}$, 填埋场的使用寿命为 $T = 50 \text{ a}$ (例如 20 a 的工作期及封顶后 30 a 的维护期),则由式(7)可算得 GCL 和 CCL 的平流速率为 $(v_s)_{\text{GCL}} = 7.31 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$ ($(v_s)_{\text{CCL}} = 3 \times 10^{-6} \text{ mm/s}$).

由式(8)算得 GCL 和 CCL 的平流临界时间为 $(T_B)_{\text{GCL}} = 111 \text{ d}$ ($(T_B)_{\text{CCL}} = 2315 \text{ d} = 6.34 \text{ a}$).

任何时刻衬垫中不同深度的浓度比可用式(11)进行计算. 严格地说,式(11)只适用于厚度无限大的单一均匀的不透水层. 当在双层复合衬垫系统中 GCL 和 CCL 被用作第 2 层衬垫时,它们通常直接放置在地基土上. 地基土的有效扩散系数值与 GCL 和 CCL 的可能不同,但总的来说,它与 CCL 有效扩散系数值相对接近,但大于 GCL. 因而由式(11)算出的 CCL 质量浓度比与实际场地条件相当接近. 而由于 GCL 非常薄,只有 7 mm,即使地基土的有效扩散系数与 GCL 的不同,GCL 底部的质量浓度比也基本不受这种差异的影响.

计算表明,由于 GCL 比 CCL 薄得多,在 GCL 中质量浓度比增长比在 CCL 中快得多. GCL 底部的质量浓度比 12 h 内就可以增长到 0.1,250 d 内就可增长到 0.95,而 CCL 底部的质量浓度比需 2 a 才能达到 0.1,大约要 16.5 a 才能达到 0.95.

任意时刻经过 GCL 和 CCL 的平流量和扩散量的值分别用式(13)和(16)进行计算. 计算结果也表明,尽管 GCL 具有较短的平流临界时间 $(T_B)_{\text{GCL}} = 111 \text{ d}$ CCL 为 $(T_B)_{\text{CCL}} = 2315 \text{ d} = 6.34 \text{ a}$,但 GCL 的平流量要比 CCL 低得多. 50 a 内 GCL 的最大平流量仅为 $0.438 \times 10^{-7} C_0$,而 CCL 的最大平流量增加到 $1.500 \times 10^{-7} C_0$,是 GCL 的 3.4 倍.

由前面的结果可知,假定通过填埋场衬垫的平流和扩散同时达到稳定状态是不妥的. 因此,简单的稳定状态下的分析也不能被用来进行填埋场使用寿命期内通过 GCL 和 CCL 的污染物迁移的比较和评价. 实际情况是,渗滤液的流量随时间而变,并且两种衬垫平流量和扩散量改变的速率也不同步. GCL 和 CCL 具有不同的平流临界时间,即通过两种衬垫的平流量分别在不同的时刻达到它们的最大值和稳定值. 因此,仅将平流量比值和扩散量比值的比较作为判断依据是不正确的.

单位面积上 dt 或 Δt 时间段内由平流和扩散产生的污染量可分别用式(14)(17)进行计算. 平流量的计算从它们的临界点开始. 也就是说,对于 GCL,从 $t = 111 \text{ d}$ 开始计算;对于 CCL,从 $t = 2315 \text{ d}$ (6.34 a)开始计算.

单位面积上由扩散和平流产生的污染物累积量分别通过(15)(18)算得. 计算结果如图 1、图 2 所示. 通

过 GCL 的污染物累积量 ,前 8.2 a(3000 d) 扩散高于平流 ,8.2 a 以后 ,通过 GCL 的平流量是总的污染物迁移量的主要部分 .通过 CCL 的污染物累积量 ,前 8.7 a(3200 d) 扩散要高于平流 ,8.7 a 以后 ,平流产生的污染物也迅速占据主导地位 .经过 50 a ,通过 GCL 的污染物累积量 ,由平流产生的为 $68.402C_0$,由扩散产生的为 $15.742C_0$,由扩散产生的污染物质占总的污染物迁移的 19% .经过 50 a ,通过 CCL 的污染物累积量 ,由平流产生的为 $197.996C_0$,由扩散产生的为 $9.950C_0$,由扩散产生的污染物质占总的污染物迁移的 5% .

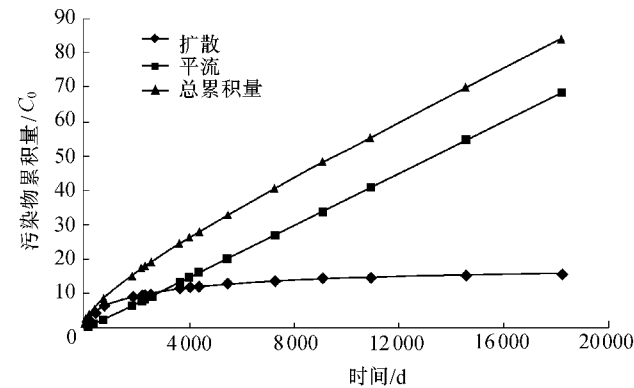


图 1 经过 GCL 的污染物累积量
Fig.1 Contaminant accumulation through
a geosynthetic clay liner

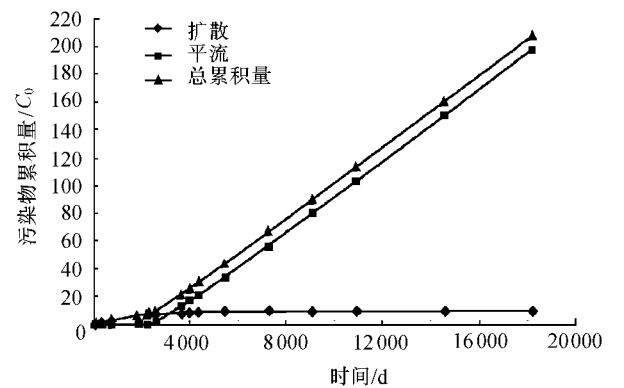


图 2 经过 CCL 的污染物累积量
Fig.2 Contaminant accumulation through
a compacted clay liner

同时 ,还可以用式 (21) 计算不同时间通过 GCL 和 CCL 由平流和扩散组合产生的污染物总累积量 .如图 3 所示 ,前 11 a 内 ,通过 GCL 的污染物总累积量高于通过 CCL 的 ;11 a 后 ,情况相反 ,通过 CCL 的高于通过 GCL 的 .进一步可以看出 ,11 a 后 ,通过 CCL 的污染物总累积量的增长速度远大于通过 GCL 的情况 .经过 50 a ,通过 CCL 的污染物总累积量达到通过 GCL 的 2.5 倍 .随着服务时间的增加 ,差距还将进一步扩大 .

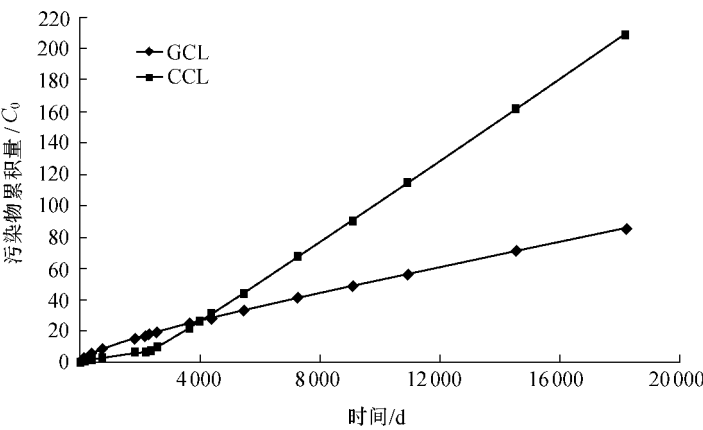


图 3 平流与扩散组合下经过 GCL 和 CCL 的污染物总累积量
Fig.3 Comparison of total contaminant accumulation through
a GCL and a CCL combining advection and diffusion effects

由前面的分析可以看出 ,如果以通过 GCL 和 CCL 产生的污染物总累积量作为判断它们等价与否的依据 ,GCL 在填埋场前 11 a 的工作时间内性能不及 CCL .相反 ,当时间超过 11 a 时 ,GCL 的性能高于 CCL ,通过 GCL 的污染物迁移量比通过 CCL 的少 .而如果用平流量和扩散量作为判断依据 ,当时间少于 670 d(1.8 a) 时 ,通过 GCL 的平流量和扩散量都大于 CCL .这就意味着 ,GCL 在初始阶段的性能比不上 CCL .在 670 d(1.8 a) 到 2315 d(6.34 a) 之间 ,通过 GCL 的扩散量比通过 CCL 的略少 ;平流量则仍然比通过 CCL 的高 ,这是由于 CCL 还未达到平流临界时间所致 .GCL 在这段时间内的性能也可能不及 CCL .时间超过 2315 d(6.34 a) 后 ,通过 GCL 的平流量比通过 CCL 的少得多 ,并且在 2600 d(7.1 a) 后 ,通过 GCL 的扩散量比通过 CCL 的略高一点 ,在这种情况下 GCL 性能优于 CCL .

4 结 论

a. GCL底部质量浓度比的增长速度比CCL底部质量浓度比的增长速度快得多.GCL底部的溶质质量浓度12h内几乎增长到 $0.1C_0$,250d内达到 $0.95C_0$,而CCL底部的溶质质量浓度需要2a才能达到 $0.1C_0$,16.5a才能达到 $0.95C_0$.

b. 通过两种衬垫的扩散量都随时间的增加而减小,平流量都随时间的增加而增大.但由于GCL和CCL具有不同的厚度、不同的有效扩散系数、不同的平流临界时间及不同的渗透系数等,通过它们的扩散量和平流量的变化是不同步的.因而,在填埋场使用寿命内对平流和扩散进行简单的稳定状态分析得出的通过GCL和CCL的污染物迁移量的比较结果是不正确的.

c. 因平流产生的污染量是溶质迁移的主导因素.在填埋场50a的服务年限内,由平流产生的污染物累积量在GCL中达到81%,在CCL中达到95%.而由扩散产生的污染物迁移在早期比较重要.

d. 如果将污染物迁移总量的比较作为评价两种衬垫防渗漏性能的依据,那么在填埋场前11a服务年限内,GCL的防渗漏性能要比CCL差,但在11a后,GCL的防渗漏性能将大大超过CCL.

应特别指出:以上结论都是建立在“最不利情况”假定前提上的,也就是说,溶质或者污染物不和衬垫中的土颗粒发生反应,也不被它们所吸附,污染物进口处的质量浓度保持不变,水力梯度和质量浓度梯度是在同一方向上的.污染物和溶质的被吸附会使临界时间大幅增加,并且在给定时间内会减少通过防渗层的溶质迁移总量.污染物溶质质量浓度的降低也会减少一定时间内通过衬垫的溶质迁移总量.

参考文献:

- [1] 钱学德,郭志平.卫生填埋场中的压实粘土衬垫[J].水利水电科技进展,1997,17(4):55—59.
- [2] 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,2001.38—75.
- [3] BOARDMAN B T, DANIEL D E. Hydraulic conductivity of desiccated geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996(3):204—208.
- [4] GRAY D H. Containment strategies for landfilled wastes[A]. In: Geoenvironment 2000, Proceedings of Speciality Conference[C]. New Orleans: Geotechnical and Environmental Engineering Divisions, ASCE, 1995. 484—498.
- [5] SHACKELFORD C D, REDMOND P L. Solute breakthrough curves for processed kaolin at low flow rates[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995(1):17—32.

Regularity of contaminant transport through geosynthetic clay liners

QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, GUO Zhi-ping, LU Jin

(Geotechnical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: The details regarding contaminant transport through geosynthetic clay liners (GCLs) and compacted clay liners (CCLs) are obtained by a numerical analysis, which include distributions of concentration ratio, changes of advective and diffusive mass fluxes, and contaminant accumulation. It is shown that the concentration ratio at the base of a GCL increases much faster than that at the base of a CCL, that the diffusive mass flux decreases and the advective mass flux increases with time for both GCLs and CCLs, and that the changes of diffusive and advective mass fluxes for the GCL and CCL are not synchronous with one another. Results also indicate that the total contaminant accumulation across a GCL is greater than that across a CCL during the first 11 year. After 11 years, the total contaminant accumulation through a CCL exceeds that through a GCL. This trend continues throughout the lifetime of the respective systems.

Key words: landfill; geosynthetic clay liner; compacted clay liner; contaminant transport; advection; diffusion