

DOI: 10.11779/CJGE201810010

具有裂隙的压实黏土衬垫污染物迁移参数研究

李 磊, 汪 俊, 黄 勇

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 压实黏土衬垫中裂隙的存在缩短了渗滤液击穿屏障的时间, 减少了衬垫的服役时间。获得污染物沿裂隙迁移的参数, 用于预测具有裂隙的压实黏土衬垫被渗滤液击穿的时间, 对于防污屏障性能的评价具有重要的意义。采用不同孔隙率的砂模拟压实黏土中的裂隙, 通过室内土柱实验分别获得Cl⁻在裂隙中的分子扩散系数和水动力扩散系数。试验结果表明, 当裂隙开度 $d \geq 15$ mm时, 裂隙中Cl⁻的分子扩散系数与其在纯水中的分子扩散系数基本一致; 当 $d < 15$ mm时, 分子扩散系数随裂隙宽度成指数下降。裂隙的水动力扩散系数约比分子扩散系数大3个数量级, 当裂隙开度 $d \geq 10$ mm时, 在不同水力梯度情况下, 裂隙的水动力扩散系数基本维持不变, 数值上与采用纯砂所获得的水动力弥散系数基本一致; 当水力梯度 $i \geq 0.2$ 时, 水动力弥散系数的变化基本趋于稳定, 不再受到裂隙宽度的影响。

关键词: 压实黏土衬垫; 裂隙; 分子扩散系数; 水动力弥散系数

中图分类号: TU442; X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)10-1836-07

作者简介: 李 磊(1976-), 男, 河南信阳人, 博士, 副教授, 从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: lilei@hhu.edu.cn。

Parameters of contaminant transport of compacted clay liners with fractures

LI Lei, WANG Jun, HUANG Yong

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The service period of landfill liners is reduced because of the fractures in compacted clay liners (CCL), which shorten the breakthrough time of contaminants passing through the barrier. It is very important to predict the breakthrough time of the leachate for CCL with fractures when the parameters of contaminant transport of fractures are acquired. The experiment is carried out to obtain the coefficient of molecular diffusion and dispersion for chloridion in the fractures simulated by the sands with different porosities. The results show that the coefficient of molecular diffusion for chloridion is consistent when the chloridion passes through fractures with the width more than or equal to 15 mm and water, while the coefficient of molecular diffusion is reduced exponentially in the fractures with the width less than 15 mm. The coefficient of dispersion is approximately three orders of the magnitude more than that of molecular diffusion. Based on different hydraulic gradients, the dispersion coefficient of fractures with width more than or equal to 10 mm is essentially constant and almost equal to that acquired from the sand column experiment. While the hydraulic gradient is more than or equal to 0.2, the variation of dispersion coefficient is steady and not influenced by the width of the fractures.

Key words: compacted clay liner; fracture; molecular diffusion coefficient; hydrodynamic dispersion coefficient

0 引言

压实黏土被广泛用作填埋场和废弃堆积物的衬垫, 防止废弃物对外界环境产生二次污染^[1]。压实黏土衬垫不仅是复合衬垫的主要组成部分, 而且自身也是一种重要的单独衬垫形式^[2]。

一般来说, 满足危险废物、工业废物以及城市固体废弃物填埋要求的黏土衬垫渗透系数必须小于或等于 1×10^{-7} cm/s。但是实际上现场测定的压实黏土衬垫的渗透系数比室内实验测试结果大10到10000倍^[3], 造成这种问题的主要原因之一是由于冻融、干湿、存在土块等作用使得压实黏土内部产生裂隙或优先渗流

通道, 造成渗透系数的增加^[4-7]。

压实黏土衬垫的重要功能是阻滞渗滤液向周围环境的迁移, 关于污染物在压实黏土及其组成的复合衬垫系统中的迁移规律研究已有较多的成果^[8-11]。但是这些研究成果主要是针对完整的衬垫系统, 而实际上的压实黏土衬垫由于其中存在的裂隙, 污染物的迁移规律已经与完整的衬垫系统大不相同。关于具有结构缺陷的衬垫中污染物的迁移规律主要集中在关于土工

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478167)

收稿日期: 2017-08-02

膜具有破损的工况下^[12-13], 而关于具有裂隙的压实黏土衬垫方面的研究则主要偏重于渗透系数的研究, 裂隙可以使得压实黏土的渗透系数增加 2 个数量级^[7, 14]。在压实黏土衬垫渗透系数满足设计标准以及渗滤液水头控制在 30 cm 以下时, 污染物通过衬垫的运移主要以分子扩散形式进行^[15-16], 但是现场实际情况下由于裂隙的存在造成压实黏土渗透系数的增加, 加之国内很多填埋场由于渗滤液水位控制不当, 水头甚至高达数十米, 渗滤液迁移的速度将大大增加^[17-18]。文献[19]采用数值方法模拟了示踪剂击穿具有裂隙的压实黏土的工况, 结果表明, 裂隙对衬垫的击穿时间有着显著的影响。

为了明确压实黏土中的裂隙对渗滤液迁移规律的影响, 需要通过相应的方法获得具有裂隙的压实黏土衬垫污染物迁移扩散参数, 为研究渗滤液击穿衬垫时间提供基础参数。论文通过室内土柱实验, 人工模拟了具有不同开度的裂隙的压实黏土衬垫在不同水力梯度条件下渗滤液的迁移扩散规律, 并通过击穿曲线获得了相应工况下裂隙中污染物迁移的水动力参数。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用的示踪剂为 NaCl 溶液, 浓度为 10000 mg/L。黏土的基本指标如表 1 所示, 为高液限黏土。黏土的颗粒曲线如图 1 所示。

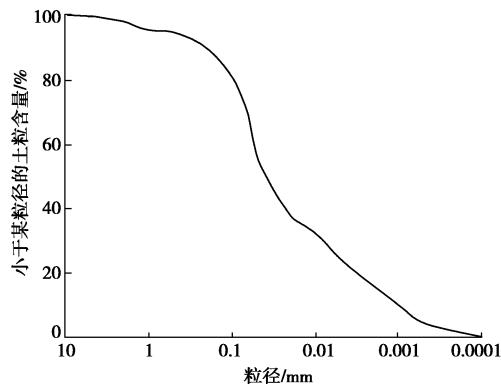


图 1 黏土的颗粒曲线

Fig. 1 Grain-size distributions for clay

根据黏土的颗粒曲线, 黏土中的细粒颗粒占到了 74.2%, 结合其液塑限值综合分析, 所选用的黏土能

够满足作为垃圾填埋场压实黏土衬垫的要求^[20]。

试验中的裂隙的制作较为困难: 如果裂隙开度过大, 不符合现场压实黏土衬垫的实际状况; 如果裂隙开度过小, 则容易闭合, 无法获得污染物从裂隙中迁移的参数。本研究的裂隙采用人工方法控制其开度: 用细钢丝网制成一定宽度和刚度的支撑骨架, 外部包裹细尼龙网制成人工裂隙; 将细砂和中砂按照不同比例混合后灌入裂隙中, 以支撑起人工制作的裂隙, 保证不会因侧壁黏土的挤压作用而闭合或宽度发生改变。细砂和中砂的渗透系数分别为 2.8×10^{-3} cm/s, 5.4×10^{-2} cm/s。所获得的混合砂的孔隙率分别为 33.2%, 36.4%, 41.6% 和 43.7%。理论上无充填状态的裂隙孔隙率为 100%。通过不同孔隙率的裂隙所获得的水动力参数, 外推至孔隙率为 100% 的裂隙, 即为压实黏土衬垫中的平直、光滑、无充填裂隙的水动力参数。

1.2 试验仪器

设备装置模型如图 2 所示, 实物图如图 3 所示。土柱试验采用高 70 cm、直径 18 cm 的有机玻璃柱。有机玻璃柱底部分别填中砂和细砂形成透水层, 然后将人工制备的裂隙放置在土柱中间; 黏土预先饱和然后分层压实填入有机玻璃柱。

NaCl 溶液采用恒流泵循环泵入, 并通过活动隔板的升降控制注入示踪剂的水头。在沿土柱方向设置横向取样管, 取样管直接与人造裂隙侧面紧密接触。取样采用注射器抽负压。

1.3 试验方案

通过土柱实验分别研究无水头差条件下示踪剂通过裂隙的沿程分布和有水头条件下的示踪剂通过裂隙的沿程分布情况。无水头差条件下的土柱高度为 25 cm, 人造裂隙中的砂的孔隙率分别为 33.2%, 36.4%, 41.6% 和 43.7%。分别在 30, 40, 50 d 收集 4, 8, 12, 16, 20 cm 深度下示踪剂, 测定 Cl⁻浓度。有水头差条件下土柱高度为 40 cm, 水力梯度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 砂的孔隙率为 33.2% (试验中使用 36.4%, 41.6% 和 43.7% 孔隙率的砂柱获得的结果基本无差异, 因此最终使用一种孔隙率的砂作为裂隙填充材料), 分别在 2, 3, 4 h 收集 5, 10, 20, 30, 35 cm 深度下示踪剂, 测定 Cl⁻浓度。

表 1 黏土的基本性质指标

Table 1 Basic properties of clay

含水率 /%	比重	液限 /%	塑限 /%	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	有机质 /%	CEC /(meq·100g ⁻³)	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO /%	MgO /%
13.62	2.62	52.34	24.09	2.6×10^{-8}	3.39	7.31	65.70	12.13	3.17	5.05	1.55

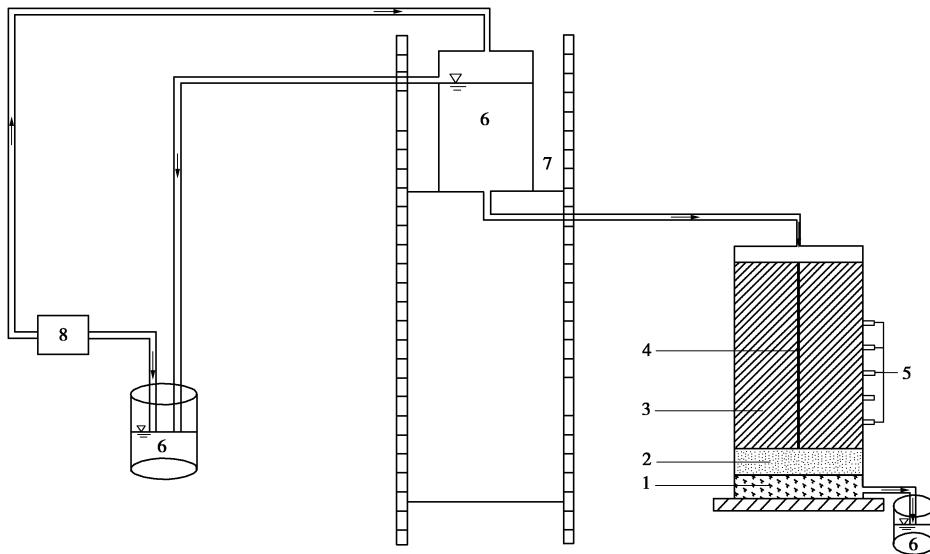


图 2 试验装置模型图

Fig. 2 Model of experiment



图 3 试验装置实物图

Fig. 3 Photo of experiment devices

上述试验可以看作示踪剂通过半无限长土柱，假定示踪剂在裂隙内部发生交换吸附等作用，该条件下的示踪剂在饱和多孔介质中的对流-弥散方程可以表示为^[1]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_s \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1)$$

边界条件可以表示为

$$\begin{cases} C(z, 0) = 0 & (z > 0), \\ C(z, t) = C_0 & (t \geq 0), \\ C(\infty, t) = 0 & (t \geq 0). \end{cases} \quad (2)$$

上述方程在相应边界条件(2)下的解析解为：

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z - v_s t}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \frac{v_s z}{D} \operatorname{erfc} \left(\frac{z + v_s t}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (3)$$

C 为 t 时刻某一深度示踪剂的浓度， C_0 为示踪剂的初始浓度， D 为示踪剂的水动力弥散系数， v_s 为示

踪剂的实际流速。

当纯扩散条件下，则式(3)可以表示为

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{D_m t}} \right) \right], \quad (4)$$

式中， D_m 为示踪剂的分子扩散系数。

通过土柱实验分别获得有水头和无水头条件下的示踪剂在裂隙中和纯砂柱中的沿程分布，根据式(3)，(4) 分别求出相应的水动力弥散系数和分子扩散系数。

2 裂隙的分子扩散系数

无水头条件下裂隙的击穿曲线如图 4 所示。图中实线为通过砂柱试验获得不同粒径砂的分子扩散系数后，计算出的理论击穿曲线。对于裂隙开度为 $d=15 \text{ mm}$

和 $d=20\text{ mm}$ 的情况, 示踪剂浓度的沿程分布和采用纯砂获得的理论穿透曲线基本重合, 表明当裂隙宽度超过一定数值时, 压实黏土衬垫对通过其中裂隙污染物的吸附、阻滞等作用基本可以忽略, 污染物沿大开度的裂隙处穿压实黏土衬垫的时间将明显减少。

对于开度为 $d=5\text{ mm}$ 和 $d=10\text{ mm}$ 的情况, 示踪剂的沿程分布则与纯砂的理论曲线有着较大的差异。在相同的时间和深度条件下, $5, 10\text{ mm}$ 开度裂隙中的示踪剂浓度均小于纯砂理论击穿曲线中的浓度, 而且相同深度下 $d=5\text{ mm}$ 宽度裂隙中的浓度小于 $d=10\text{ mm}$ 宽度裂隙中的浓度。表明裂隙的开度越小, 示踪剂与压实黏土之间的吸附、离子交换作用也越强, 渗滤液击穿衬垫的时间也随之增加。根据所获得的不同开度条件下裂隙的穿透曲线, 可以得到对应孔隙率的裂隙中示踪剂分子扩散系数。孔隙率与分子扩散系数的对

应关系如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 孔隙率与分子扩散系数成对数关系, 当孔隙率等于 100% 时, 可以作为无充填的裂隙状态, 从而获得不同开度裂隙的分子扩散系数。不同开度裂隙的分子扩散系数如图 6 所示。

裂隙的分子扩散系数与裂隙宽度的关系分成两段: 当 $d \geq 15\text{ mm}$ 时, 裂隙中示踪剂的分子扩散系数基本维持不变, 基本与污染物在纯水中的分子扩散系数 ($20.3 \times 10^{-6}\text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) 相等, 表明裂隙宽度超过一定的范围, 示踪剂的扩散类似在水中进行扩散。当 $d < 15\text{ mm}$ 时, 分子扩散系数随裂隙宽度成指数下降。造成这一现象的原因可能是裂隙开度越小, 示踪剂在裂隙中的流速也越小, 因此与侧壁压实黏土的接触时间也越长, 受到裂隙侧壁压实黏土的吸附等阻滞作用越强。

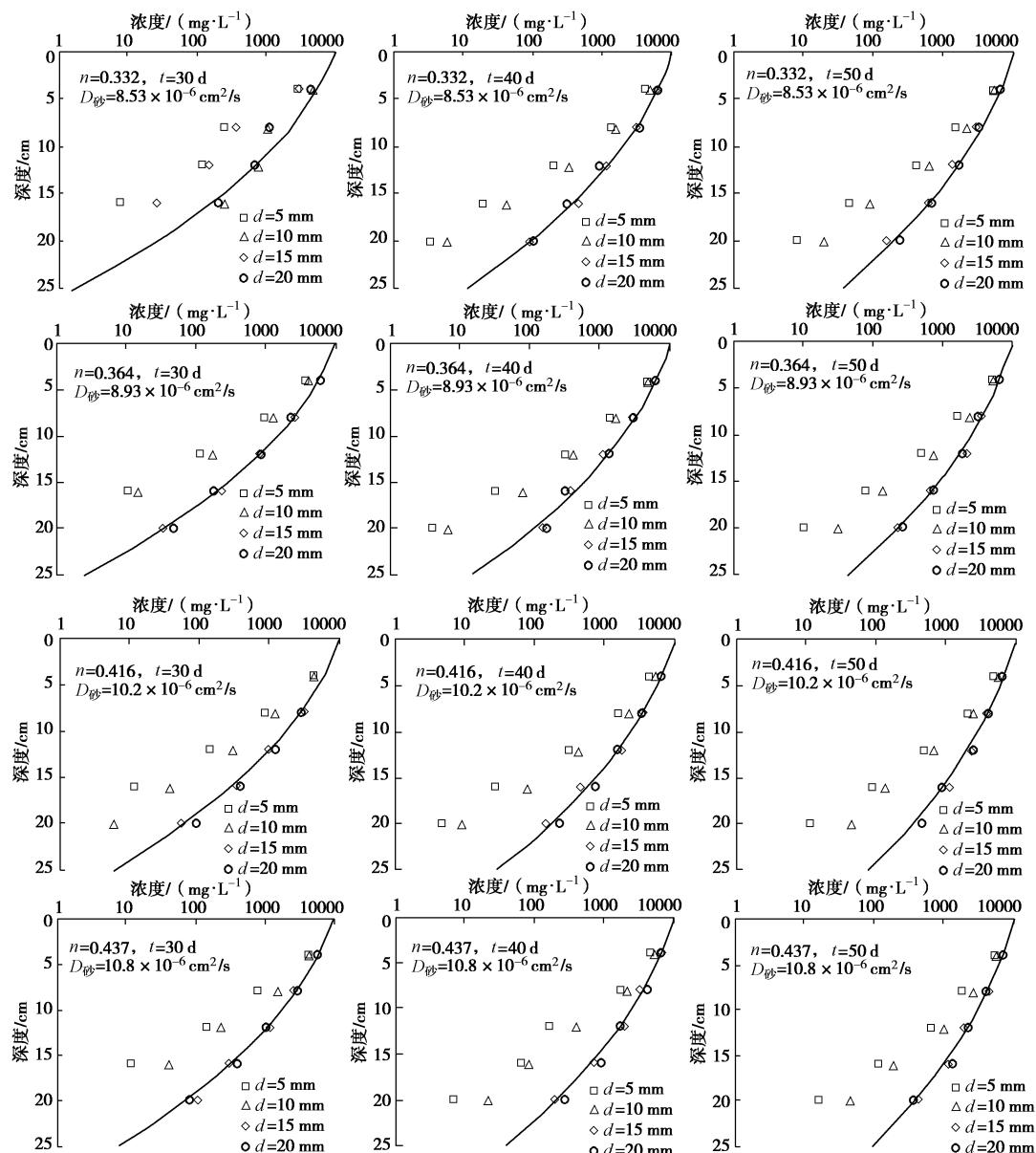


图 4 纯扩散条件下示踪剂浓度沿程分布

Fig. 4 Tracer distribution along depth under diffusion

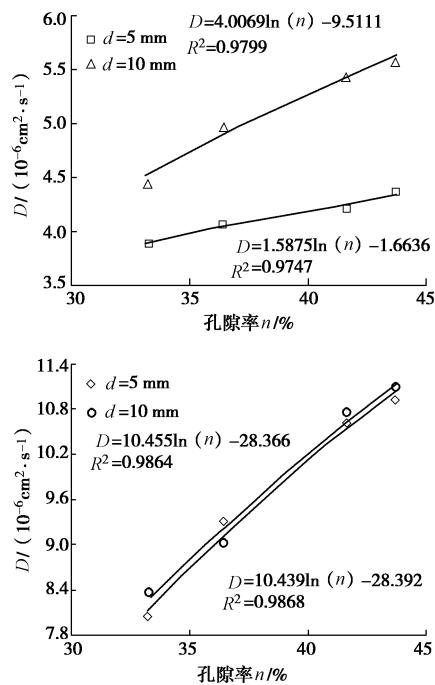


图 5 裂隙孔隙率与示踪剂分子扩散系数关系

Fig. 5 Relationship between porosity of fracture and molecular diffusion coefficient of tracer

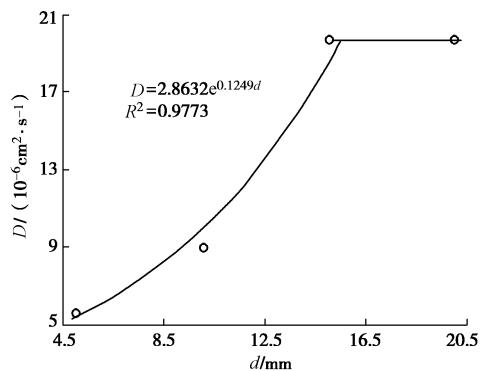


图 6 裂隙开度与示踪剂分子扩散系数关系

Fig. 6 Relationship between aperture of fracture and molecular diffusion coefficient of tracer

3 裂隙的水动力弥散系数

有水头作用下裂隙的击穿曲线如图 7 所示。图中实线为通过砂柱试验获得不同粒径砂的水动力弥散系数后计算出的理论击穿曲线。

从图 7 中可以看出,对于 $i=0.2$ 和 0.3 的条件下,示踪剂浓度的沿程分布和采用纯砂获得的理论穿透曲

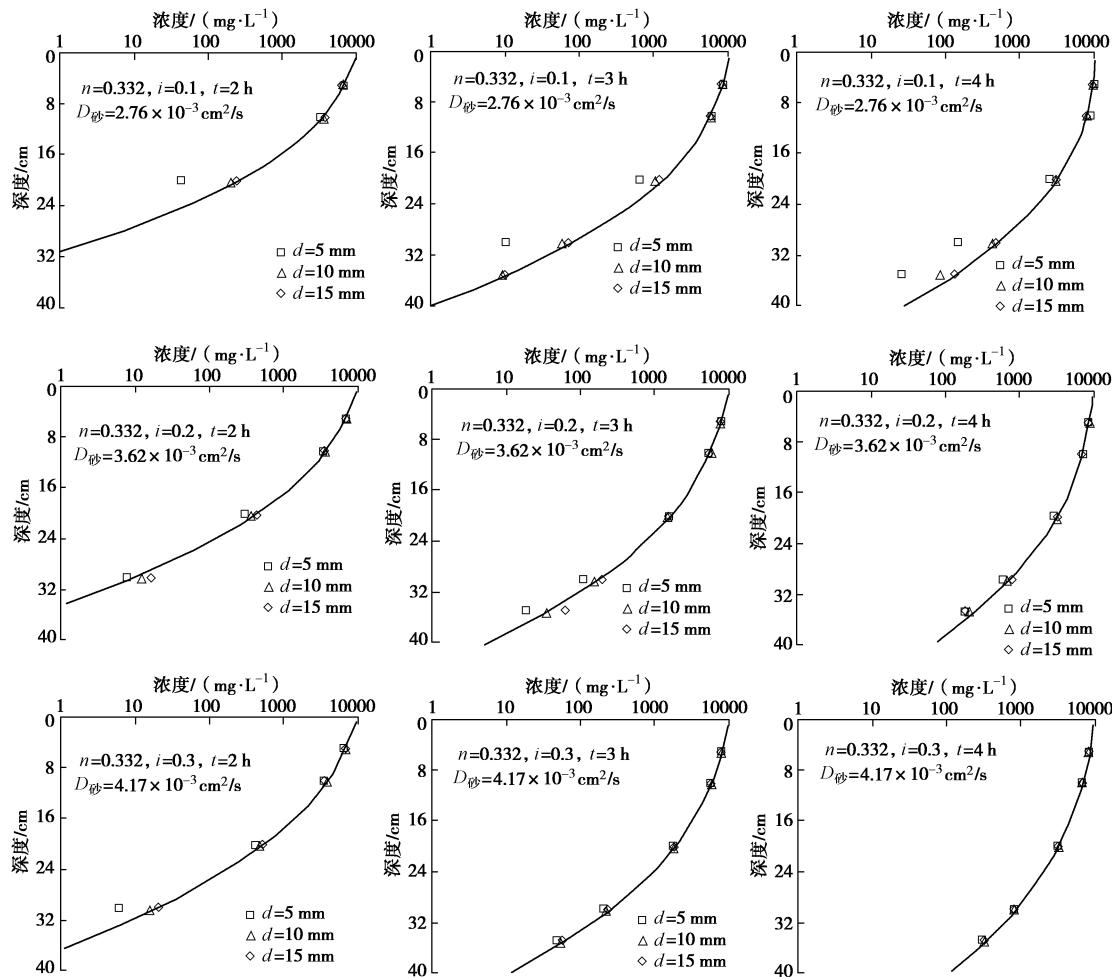


图 7 不同水力梯度条件下示踪剂浓度沿程分布

Fig. 7 Tracer distribution along depth under different hydraulic gradients

线基本重合重合; $i=0.1$ 的条件下, 裂隙开度 $d=10\text{ mm}$ 和 15 mm 的示踪剂浓度沿程分布和采用纯砂获得的理论穿透曲线也基本重合, 但是 $d=5\text{ mm}$ 的裂隙中污染物沿程浓度分布小于纯砂柱的理论浓度分布。在有水头作用下示踪剂的迁移速度显著高于纯扩散情况下, 而且裂隙开度对迁移速度的影响随水力梯度的增加而减小。

图 8 和图 9 分别表示了水动力弥散系数与水力梯度以及裂隙开度的关系。从图中可以看出, 裂隙的水动力弥散系数远大于分子扩散系数, 因此, 在考虑对流条件下, 可以忽略裂隙的分子扩散系数。

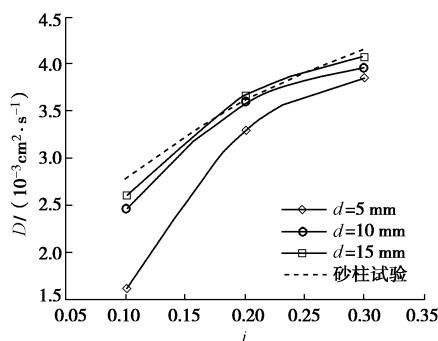


图 8 示踪剂水动力弥散系数与水力梯度的关系

Fig. 8 Relationship between hydrodynamic dispersion coefficient of tracer and hydraulic gradient

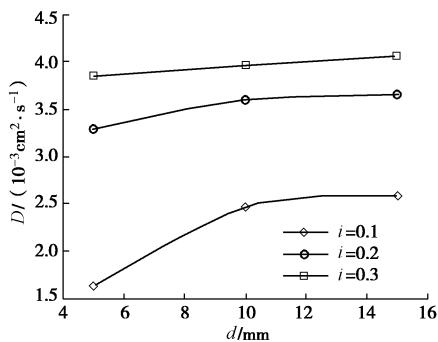


图 9 示踪剂水动力弥散系数与裂隙开度的关系

Fig. 9 Relationship between hydrodynamic dispersion coefficient of tracer and aperture of fracture

当裂隙开度 $d \geq 10\text{ mm}$ 时, 在不同水力梯度情况下, 裂隙的水动力弥散系数基本维持不变, 且开度为 $d=10, 15\text{ mm}$ 裂隙的水动力弥散系数与纯砂的水动力弥散系数基本一致, 说明裂隙开度对压实黏土衬垫的水动力弥散系数已经不存在影响。另外, 从图中还可以看出, 当水力梯度 $i \geq 0.2$ 时, 水动力弥散系数的变化基本趋于稳定, 不再受到裂隙宽度的影响。

根据填埋场压实黏土设计要求, 压实黏土的厚度为 2 m , 当渗滤液水位达到 40 cm 时, 水力梯度即可达到 0.2 。而受到垃圾成分、导排系统设计等的影响,

有些填埋场渗滤液水位甚至高达数十米, 因此, 在具有高水位渗滤液填埋场防渗衬垫击穿时间计算中, 可以不考虑裂隙的宽度以及分子扩散系数的影响。

4 结 论

(1) 压实黏土中的裂隙对渗滤液击穿衬垫的时间有着显著的影响, 通过本文所设计的试验, 可以获得压实黏土衬垫中裂隙的分子扩散系数和水动力弥散系数, 为衬垫的击穿时间计算提供基础参数。

(2) 压实黏土衬垫中裂隙的分子扩散系数显著受到裂隙宽度的影响: 在裂隙宽度小于 15 mm 情况下, 裂隙分子扩散系数随裂隙宽度的减小而成指数型减少; 裂隙宽 $\geq 15\text{ mm}$ 时, 裂隙宽度对分子扩散系数已经基本没有影响, 污染物在裂隙中的扩散系数与其在水中的自由扩散系数基本一致。

(3) 在存在渗滤液水头的情况下, 压实黏土衬垫裂隙中的水动力弥散系数显著增大, 在本文的试验研究中, 裂隙的水动力弥散系数比分子扩散系数约高 3 个数量级。在实际工程中, 考虑到水力梯度往往超过 0.2 , 因此在计算渗滤液击穿屏障时间时可以忽略裂隙的分子扩散系数和宽度对水动力弥散系数的影响。

(4) 实际工程中的压实黏土衬垫中裂隙的形状、分布、充填、张开和闭合等都较为复杂。为试验研究的便利, 本文将裂隙简化为垂直、非闭合的情况, 在实际应用中应结合相应状况进行修正。

参考文献:

- [1] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Design and construction of modern sanitary landfills[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [2] CJJ113—2007 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (CJJ113—2007 Technical code for liner system of municipal solid waste landfill[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [3] DANIEL D E. Predicting hydraulic conductivity of clay liners[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(4): 285 – 300.
- [4] KIM W H, DANIEL D E. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(7): 1083 – 1097.
- [5] OMIDI G H, THOMAS J C, BROWN K W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a

- compacted clay liner[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1996, **89**: 91 - 103.
- [6] BENSON C H, DANIEL D E. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, **116**(8): 1231 - 1248.
- [7] 何俊, 万娟, 王宇. 压实黏土干燥裂隙及渗透性能研究[J]. 工程地质学报, 2012, **30**(3): 397 - 402. (HE Jun, WAN Juan, WANG Yu. Desiccation cracks and hydraulic performance of compacted clay liner via laboratory wet-dry cycling tests[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **30**(3): 397 - 402. (in Chinese))
- [8] ROWE R K, QUIGLEY R M, BRACHMAN R W, et al. Barrier systems for waste disposal[M]. London: Spon Press, 2004.
- [9] DU Y J, SHEN S L, LIU S Y, et al. Contaminant mitigation performance of Chinese standard municipal solid waste landfill liner system[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(3): 232 - 239.
- [10] LEWIS T W, PIVONKA P, FITYUS S G, et al. Parametric sensitivity analysis of coupled mechanical consolidation and contaminant transport through clay barriers[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(1): 31 - 40.
- [11] XIE Hai-jian, YAN Hua-xiang, FENG Shi-jin, et al. An analytical model for contaminant transport in landfill composite liners considering coupled effect of consolidation, diffusion, and degradation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(19): 19362 - 19375.
- [12] 谢海建, 陈云敏, 楼章华. 污染物通过有缺陷膜复合衬垫的一维运移解析解[J]. 中国科学:技术科学, 2010, **40**(5): 486 - 495. (XIE Hai-jian, CHEN Yun-min, LOU Zhang-hua. An analytical solution to contaminant transport through composite liners with geomembrane defects[J]. Science China Technological Sciences, 2010, **40**(5): 486 - 495. (in Chinese))
- [13] ROWE R K. Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications[J]. Soils Rocks, 2007, **30**(1): 3 - 30.
- [14] RAYHANI M HT, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(3): 276 - 283.
- [15] WILLINGHAM T W, WERTH C J, VALOCCHI A J, et al. Evaluation of multidimensional transport through a field-scale compacted soil liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(9): 887 - 895.
- [16] BEZZA A, GHOMARI F. Nondestructive test to track pollutant transport into landfill liners[J]. Environmental Geology, 2009, **57**(2): 285 - 290.
- [17] 谢海建, 詹良通, 陈云敏, 等. 我国四类衬垫系统防污性能的比较分析[J]. 土木工程学报, 2011(7): 133 - 141. (XIE Hai-jian, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Comparison of the performance of four types of liner systems in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2011(7): 133 - 141. (in Chinese))
- [18] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 1 - 46. (CHEN Yun-min. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 1 - 46. (in Chinese))
- [19] LI Lei, CHEN Jing, HUANG Yong. Experimental investigation and numerical simulation of contaminant migration in the compacted clay containing artificial fractures[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(2): 134 - 144.
- [20] DANIEL D E. Geotechnical practice for waste disposal: clay liners[M]. London: Chapman & Hall, 1993: 137 - 163.