

两种土压力水平下防渗帷幕的防污能力

何俊,胡晓瑾,阮晓晨,颜兴

(湖北工业大学土木工程与建筑学院,湖北武汉 430068)

摘要:为探究防渗帷幕材料在不同荷载作用下导致的渗透性和厚度变化对其防污能力的影响,在对土-膨润土防渗帷幕工程性质分析的基础上,进行了污染物运移计算,分析了不同压力和边界条件下帷幕的击穿时间。结果表明:土-膨润土帷幕材料多属于中压缩性土,帷幕材料在底端压力下渗透系数与初始渗透系数的差异可达 1 个数量级;常用的相对浓度为 10% 和稳定通量为 5% 两种击穿标准所得击穿时间存在较大差异,两者的比值为 1.42 ~ 2.21;以帷幕底端参数计算的帷幕下游处相对浓度和通量均小于以初始参数计算的结果,前者击穿时间大于后者,以最大压力对应参数所得的设计结果偏于危险。

关键词:防渗帷幕;土-膨润土;污染物运移;土压力;击穿时间

中图分类号:TV223.4⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)02-0063-05

Pollution prevention capacity of cutoff wall under two earth pressures//HE Jun, HU Xiaojin, RUAN Xiaochen, YAN Xing(*College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

Abstract: To investigate the effects of permeability and thickness of materials under different loads on the pollution prevention capacity of a cutoff wall, contaminant transport was calculated based on analysis of the engineering properties of the soil-bentonite cutoff wall, and the breakthrough time of the cutoff wall was analyzed under different pressures and boundary conditions. Results indicate that soil-bentonite has a moderate level of compressibility, and the difference between the hydraulic conductivities at the top and bottom of the cutoff wall may reach one order of magnitude. There is a large difference in the breakthrough time calculated with two standards, i. e., the relative pollutant concentration reaching 10% and the stable pollutant flux reaching 5%, with the ratio of calculated breakthrough time ranging from 1.42 to 2.21. The pollutant flux and relative concentration downstream of the cutoff wall calculated with parameters of the bottom of the cutoff wall are less than those calculated with the initial parameters, and the corresponding breakthrough time of the former is longer than that of the latter. According to the results obtained with the parameters under the maximum pressure, the designed cutoff wall will be dangerous.

Key words: cutoff wall; soil-bentonite; contaminant transport; earth pressure; breakthrough time

防渗帷幕是抑制卫生填埋场渗滤液对地下水和土体污染的措施之一,其较低的渗透系数是达到预期防污效果的关键性能指标。国内外常用的防渗帷幕材料有土-膨润土、水泥-膨润土以及黏土固化注浆等^[1-2],其中土-膨润土防渗帷幕具有施工简便、成本低廉和抗渗能力强等优点,广泛应用于垃圾填埋场及污染场地修复领域。

一般情况下,土-膨润土防渗帷幕材料施工时,含水率需满足施工坍落度 100 ~ 150 mm 的要求,此时土样含水率较高、干密度较小。Barben 等^[3-4]研究发现,土-膨润土坍落度满足要求时含水率约在 43.2% ~ 53.1% 范围内。Baxter 等^[5]研究表明,达

到坍落度要求的含水率约为液限的 1.0 ~ 1.5 倍。此外,防渗帷幕在使用过程中,由于受到竖向压力和水平压力作用,防渗材料将发生压缩,且渗透系数随压力的变化范围较大。Malusis 等^[6-7]研究表明,当土-膨润土所受压力从 24 kPa 增大到 383 kPa 时,渗透系数从 2.6×10^{-10} m/s 减小至 1.3×10^{-10} m/s,压缩指数为 0.21 ~ 0.24,属于中等压缩性土。Yeo 等^[4]对不同黏粒含量和膨润土含量的土-膨润土材料研究发现,压缩指数随黏粒含量及膨润土含量的增大而增大,最大为 0.27;当压力从 5 kPa 增大到 320 kPa 时,渗透系数降低约 1 个数量级。杜延军等^[8]也得到类似的结果。不同深度处土-膨润土防渗帷幕所受的

压力不同,其厚度、渗透系数也将与施工时有所差异,相应的防污能力也可能随深度而变化。

卫生填埋场渗滤液中污染物的运移是一个包括对流、扩散、水化消解、沉淀、吸附、离子交换等作用的极其复杂的过程,仅单一、定性地研究防渗帷幕材料的渗透性、对污染物的阻滞吸附作用还不足以以为帷幕的设计提供足够的依据。詹良通等^[9]通过设定3种不同的地质透水条件,基于 Ogata 经典半无限边界条件解析解,分析了渗透系数、防渗帷幕厚度以及水头差等因素对防渗帷幕服役寿命的影响,发现渗透系数降低1个数量级,防渗帷幕的服役年限增加近10倍;厚度从0.6 m增加到1.6 m时,击穿时间延长至原来的6~7倍;水头差对防渗帷幕服务性能的影响更加不能忽视,水头差由10 m减小至0.3 m,服役时间可达原来的23~30倍。文献^[9]及我国现行规范(CJJ 176—2012《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》)服役年限均以相对浓度为10%作为击穿浓度的控制标准来计算确定。

防渗帷幕中污染物运移计算有多种边界条件,Rabideau 等^[10]对此进行了系统的分析,给出了有限厚度边界条件下污染物运移的解答,并推荐在现场尺度下选择入口定浓度、有限厚度出口零浓度作为边界条件进行设计。Britton 等^[11-13]在研究防渗帷幕中污染物的运移时,均选用有限厚度边界条件,并以污染物通量达到5%的稳定通量时所需的时间作为击穿时间。实际上,在防渗衬垫和屏障设计时,通常需要针对具体的污染物,根据饮用水浓度标准和污染物通量共同确定。Foose^[14]在设计衬垫时以CH₂Cl₂为对象,以衬垫底部质量浓度小于5 μg/L和通量小于1 500 mg/(hm²·a)为标准,其中质量浓度标准是根据美国环保局饮用水标准确定的,而通量标准没有明确给出确定方法。防渗帷幕常用的边界条件(即半无限和有限厚度边界条件)、击穿标准(即相对浓度和通量击穿标准)对设计和评价的影响如何,目前还缺乏相关研究。

本文以土-膨润土防渗帷幕为研究对象,分析帷幕材料的厚度和渗透系数等参数随压力的变化规律,选定两种土压力水平下材料性质参数,采用半无限和有限厚度两种边界条件进行污染物运移计算,并分别以相对浓度和通量作为击穿标准探讨防渗帷幕击穿时间的差异,以期对土-膨润土防渗帷幕的性能评价和合理设计提供参考。

1 研究方案

1.1 防渗帷幕所受的土压力

防渗帷幕在使用过程中,厚度将发生3个阶段的变化:初始阶段,由于沟槽开挖和泥浆填充,防渗帷幕受到挤压向内产生侧向位移;第二阶段,由于防渗帷幕的密度大于泥浆密度,可能导致帷幕回弹;第三阶段,防渗帷幕随时间发生固结,向帷幕内侧产生位移^[15]。沟槽中土体所受的压力随深度而增大,水平有效应力 σ'_h 和竖向有效应力 σ'_v 可以表示为^[16]

$$\sigma'_h = k_{am}\sigma_v \tag{1}$$

$$\sigma'_v = \rho'gZ \tag{2}$$

式中: k_{am} 为主动土压力系数; ρ' 为帷幕材料的有效密度; g 为重力加速度; Z 为防渗帷幕的深度。为简化计算,取 k_{am} 等于静止侧压力系数 $1-\sin\varphi'$,其中 φ' 为有效摩擦角(取为30°),有效密度取为0.97 g/cm³^[5]。依据文献^[9]中苏州七子山填埋场防渗帷幕情况,假设帷幕深度为40 m(图1(a)),可计算得防渗帷幕最深处所承受的水平有效应力为194 kPa。

1.2 研究方法

考虑两个工况(图1(b)(c)),工况1运移参数选为帷幕顶部初始厚度及低压力下的相应系数,工况2运移参数选为帷幕底端在194 kPa土压力下的厚度及相应参数),分别进行污染物运移计算,探讨两种工况下帷幕材料的防污性能。其中,工况1对应帷幕施工完成后没有固结压力时的情况,工况2对应整个帷幕承受最大固结压力、固结变形完成后的情况。

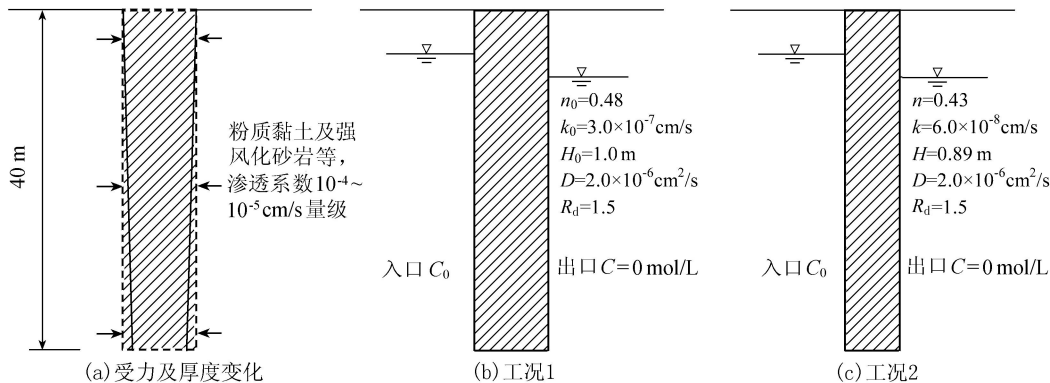


图1 计算模型示意图

污染物在防渗帷幕材料中的运移可用对流弥散方程来描述^[10]：

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \tag{3}$$

式中： R_d 为阻滞系数； C 为污染物浓度； D 为水动力弥散系数，由于帷幕材料中流速很小，水动力弥散系数可取为扩散系数； v 为平均孔隙流速， $v=ki/\theta$ ，其中 k 为渗透系数， i 为水力梯度， θ 为体积含水量，饱和土样的体积含水量即为孔隙率 n 。

分别考虑半无限边界条件和有限厚度边界条件，入口边界污染物浓度恒为 C_0 ，出口边界污染物浓度恒为 0 mol/L ；初始浓度为 0 mol/L 。在半无限边界条件下， $x=H$ 处浓度 C 与 C_0 的比值（即相对浓度）为^[9]

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{HR_d - vt}{2\sqrt{DR_d t}} \right) + \exp \left(\frac{vH}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{HR_d + vt}{2\sqrt{DR_d t}} \right) \right] \tag{4}$$

式中： H 为防渗帷幕厚度； t 为时间。

在有限厚度边界条件下， $x=H$ 处通量 $J^{[10]}$ 为

$$J = \frac{nDC_0 \exp(vH/2D)}{H} \left\{ \frac{vH/2D}{\sinh(vH/2D)} + 2\pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m m^2}{(vH/2D)^2 + m^2 \pi^2} \cdot \exp \left[- \left(\frac{v^2}{4D} + \frac{Dm^2 \pi^2}{H^2} \right) \frac{r}{R_d} \right] \right\} \tag{5}$$

稳定通量 J_{ss} 为

$$J_{ss} = \frac{nvC_0 \exp(vH/2D)}{2 \sinh(vH/2D)} \tag{6}$$

选择两种击穿标准：①浓度标准^[9-10]，即 $x=H$ 处污染物浓度达到 C_0 的10%时防渗帷幕被击穿；②通量标准^[13-14]，即 $x=H$ 处污染物通量达到稳定通量的5%时防渗帷幕被击穿。

1.3 运移参数

选用高岭土-膨润土、添加胶粉的高岭土-膨润土进行一维固结试验，试验结果如表1所示。在高岭土-膨润土中添加胶粉的目的是增强帷幕材料对有机污染物的吸附阻滞能力。

表1 固结试验结果

材料种类	孔隙率	固结压力/kPa	压缩指数	压缩系数/ MPa ⁻¹	渗透系数/ (10 ⁻⁷ cm · s ⁻¹)
高岭土-膨润土	0.49~0.56	12.5~200	0.12	0.39	0.84~3.20
15% GR	0.44~0.52	12.5~200	0.17	0.50	0.99~2.30
15% PR	0.43~0.51	12.5~200	0.16	0.37	0.31~5.40

注：15% GR、15% PR 分别表示添加12目和30目胶粉的改性高岭土-膨润土，胶粉与高岭土的质量比为0.15。

试验时，用5%的膨润土浆液与高岭土或胶粉-

高岭土混合土拌和，参考相关研究^[3-7]中含水率的控制方法，取满足110 mm 坍落度要求的含水率为控制含水率；土样密封静置24 h后开展固结试验。渗透系数由 $k=C_v m_v \rho_w g$ 间接得出，其中 C_v 为固结系数， m_v 为体积压缩系数， ρ_w 为水的密度， g 为重力加速度。

分析发现，土样在100~200 kPa 竖向压力下压缩系数为0.3~0.5 MPa⁻¹，属于低-中压缩性土；压缩指数为0.12~0.17。土样渗透系数随竖向压力的增大而减小，在10⁻⁸~10⁻⁷ cm/s 数量级之间变化。参考固结试验结果，污染物运移计算时所用孔隙率及渗透系数取值见图1(b)(c)。参考文献[9,17]中的统计结果，本文扩散系数选为2.0×10⁻⁶ cm²/s；考虑屏障材料对污染物有一定的吸附阻滞能力，阻滞系数选为1.5。另外，分别选用30 cm 和200 cm 模拟上下游低水头差和高水头差。

CJJ 176—2012《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》要求垂直防渗帷幕厚度不小于0.6 m 且不宜大于1.5 m，本文选为1.0 m。假设防渗帷幕只在水平方向上发生一维固结压缩，运用分层总和法，按照一层计算，防渗帷幕的压缩量 s 可表示为

$$s = \frac{e_0 e}{1 + e_0} H \tag{7}$$

式中 e_0 、 e 分别为初始孔隙比和水平压力作用下对应的孔隙比。根据上式可计算出194 kPa 水平压力下防渗帷幕的厚度为0.89 m。

2 计算结果与分析

2.1 相对浓度

图2为半无限边界条件下防渗帷幕下游处($x=$

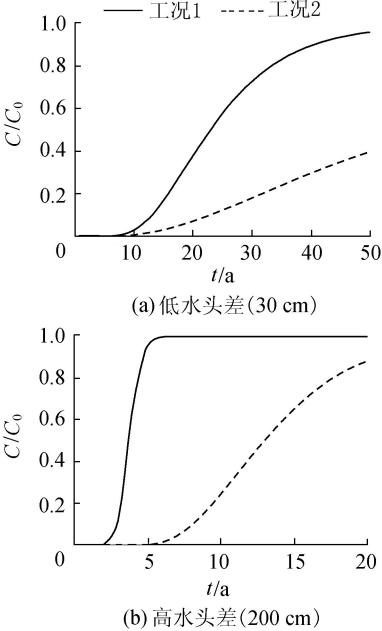


图2 帷幕下游相对浓度与时间的关系

H) 相对浓度与时间的关系曲线。可以看出:①在水头差一定的条件下,工况 1 相对浓度远高于工况 2,二者差异显著。例如,低水头差、20 a 时,工况 1 和工况 2 相对浓度分别为 0.247 和 0.079,前者约为后者的 3.1 倍;高水头差时,工况 1 相对浓度在 6 a 时就接近 1.0,而工况 2 相对浓度在 20 a 时约为 0.84。②上下游水头差增大导致击穿时间提前,且水头差越大,两种工况下击穿时间的差异越大。以 C_0 的 10% 为击穿标准(浓度标准)时,低水头差条件下,工况 1 和工况 2 击穿时间约分别为 13.0 a 和 22.5 a,后者约为前者的 1.73 倍;高水头差条件下,工况 1 和工况 2 击穿时间约分别为 3.0 a 和 8.0 a,后者约为前者的 2.67 倍。

2.2 污染物通量

图 3 为有限厚度边界条件下防渗帷幕下游处污染物通量 J 与稳定通量 J_{ss} 的比值与时间的关系曲线。可以看出,与图 1 类似,在一定水头差下,工况 1 通量大于工况 2 通量;上下游水头差增大导致击穿时间提前。以 5% 稳定通量为击穿标准时,低水头差条件下,工况 1 和工况 2 击穿时间约分别为 9.2 a 和 10.2 a,后者约为前者的 1.11 倍;高水头差条件下,工况 1 和工况 2 击穿时间约分别为 2.3 a 和 6.1 a,后者约为前者的 2.65 倍。与图 1 相比,低水头差条件下工况 1 和工况 2 相对通量的差异略小于相对浓度的差异;以通量标准所得击穿时间小于以浓度标准所得结果。

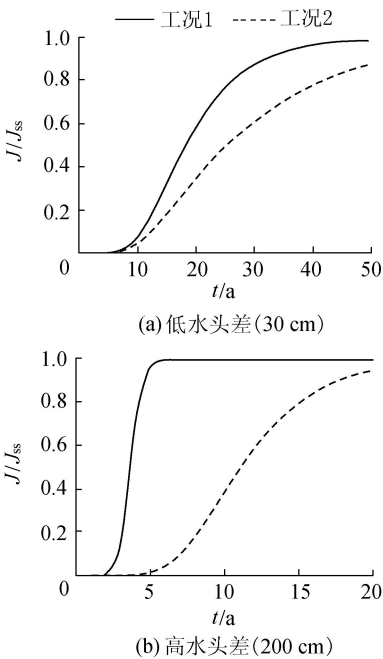


图 3 帷幕下游相对通量与时间的关系

2.3 击穿时间

在低水头差、不同击穿标准下,击穿时间 t_j 与

阻滞系数 R_d 的关系曲线如图 4 所示,击穿时间 t_j 与帷幕初始厚度 H_0 的关系曲线如图 5 所示。可以看出:①随着阻滞系数和帷幕初始厚度的增大,击穿时间大幅增加。增强帷幕材料的吸附能力对延长击穿时间是非常重要的,尤其是在帷幕厚度已经很大但仍不能满足要求的情况下。例如,以工况 1、浓度标准来计算,当初始厚度为 1.0 m 的帷幕材料的阻滞系数由 1.5 增大到 3.0 时,击穿时间由 13.0 a 增加到 26.1 a;当阻滞系数为 1.5 的帷幕材料的初始厚度由 1.0 m 增大到 1.5 m 时,击穿时间由 13.0 a 增加到 29.4 a。②以 C_0 的 10% 作为击穿标准所得的击穿时间大于以 5% 稳定通量标准所得结果。对于工况 1,浓度标准与通量标准所得结果的比值为 1.42;对于工况 2,二者比值为 2.21;当水头差一定时,该比值基本不随阻滞系数和初始厚度的变化而变化。③工况 2 击穿时间均大于工况 1 计算结果。浓度标准下,工况 2 与工况 1 所得击穿时间的比值约为 1.72;通量标准下,二者比值约为 1.11。④在本文计算条件下,工况 2 浓度标准得到的击穿时间最长,工况 1 通量标准得到的击穿时间最短。

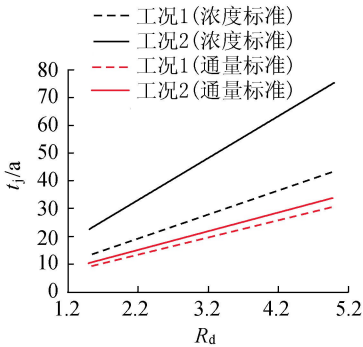


图 4 击穿时间与阻滞系数的关系 ($H_0 = 1.0$ m)

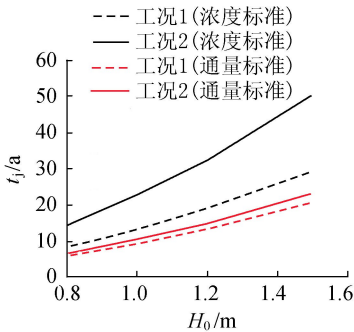


图 5 击穿时间与帷幕初始厚度的关系 ($R_d = 1.5$)

2.4 讨论

刘庭发等^[18]在复合衬垫对重金属离子防污性能研究中指出,采用击穿时间作为评价指标的合理性值得探讨。实际上,对于防渗帷幕而言,用击穿时间作为评价和设计指标也需要注意:①边界条件和击穿标准的选择。半无限边界条件相对简单,并可

以采用浓度标准进行分析,根据 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》中地下水质量指标即可确定污染物浓度限值。但是,有限厚度边界可能更符合实际工况,此时只能选择通量作为击穿标准。本文依据文献[12-13],选择5%的稳定通量作为击穿标准,但5%的选择有一定的主观性,如何选择合适的通量击穿标准还有待于深入研究。②帷幕不同位置的击穿时间存在差异,且差异随着上下游水头差的增大而增大。帷幕材料受压后厚度变薄、渗透系数减小,前者对防污不利而后者对防污有利,但总体而言渗透系数减小对增强帷幕防污效果的影响更大。设计时若选用压力偏大则相应渗透系数偏小,如果再不考虑帷幕厚度的变化,得到的设计结果将偏于危险。

3 结 论

a. 土-膨润土防渗帷幕材料一般属于中压缩性土,在水平应力作用下发生固结压缩,厚度变薄且渗透系数减小。在本文试验和计算条件下,防渗帷幕在40 m深处所受水平应力约194 kPa,与初始厚度相比其厚度减小约10%,渗透系数由低压力下的 10^{-7} cm/s数量级减小至194 kPa压力下的 10^{-8} cm/s数量级。

b. 选取不同的击穿标准所得的结果存在较大的差异。以5%稳定通量作为击穿标准所得击穿时间小于以 C_0 的10%作为击穿标准所得结果。在30 cm水头差情况下,浓度标准与通量标准所得击穿时间的比值为1.42~2.21。

c. 以帷幕底端参数(工况2)计算的帷幕下游处相对浓度和通量均小于以初始参数(工况1)的计算结果,两种工况下击穿时间有较大差异。在30 cm水头差情况下,以 C_0 的10%作为击穿标准得到工况2击穿时间约为工况1击穿时间的1.73倍,以5%稳定通量标准得到的约为1.11倍,且该比值随水头差的增大而增大。在设计时,防渗帷幕所受荷载的大小、材料厚度及渗透系数随压力的变化都有必要考虑,以最大水平压力对应参数所得的设计结果偏于危险。

参考文献:

[1] 陈永贵,邹银生,张可能,等.城市垃圾卫生填埋场垂直防渗技术[J].中国给水排水,2007,23(6):95-98. (CHEN Yonggui, ZOU Yinsheng, ZHANG Keneng, et al. Vertical anti-seepage technology for municipal sanitary landfill site[J]. China Water and Wastewater, 2007, 23(6):95-98. (in Chinese))

[2] D' APPOLONIA D J. Soil-bentonite slurry trench cutoffs [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 106(4): 399-417.

[3] BARBEN E J, MALUSIS M A, EVANS J C. Slump evaluation of soil-bentonite backfill amended with activated carbon [J]. Geotechnical Special Publication, 2008, 177:636-643.

[4] YEO S S, SHACKELFORD C D, EVANS J C. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10):1189-1198.

[5] BAXTER D Y, FILZ G M, HESLIN G M. Strength and compressibility of soil-bentonite mixtures for cutoff walls [C]//Geo-Frontiers 2005: Waste Containment and Remediation. Austin: ASCE, 2005, 142:1-14.

[6] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(5):664-672.

[7] HONG C S, SHACKELFORD C D, MALUSIS M A. Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfills [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(1):15-25.

[8] 杜延军,范日东.改性土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J].岩土力学,2011,32(增刊1):49-54. (DU Yanjun, FAN Ridong. Experimental study on the compression and permeability of vertical wall material of the modified soil bentonite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1):49-54. (in Chinese))

[9] 詹良通,刘伟.垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式[J].岩土工程学报,2013,35(11):1988-1996. (ZHAN Liangtong, LIU Wei. Parametric study on breakthrough time of vertical cutoff wall for MSW landfills and simplified design formula for wall thickness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11):1988-1996. (in Chinese))

[10] RABIDEAU A, KHANDELWAE A. Boundary conditions for modeling transport in vertical barriers [J]. Journal of Environment Engineering, 1998, 124(11):1135-1139.

[11] BRITTON J P. The effect of variability in hydraulic conductivity on contaminant transport through soil-bentonite cutoff walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(8):951-957.

[12] MALUSIS M A, MANEVAL J E, BARBEN E J, et al. Influence of adsorption on phenol transport through soil-bentonite vertical barriers amended with activated carbon [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2010, 116(1):58-72.

[13] ZHAN L T, ZENG X, LI Y C, et al. Analytical solution for one-dimensional diffusion of organic pollutants in a geomembrane-bentonite composite barrier and parametric analyses [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 140(1):57-68.

(下转第77页)

的幅度越来越小。

参考文献:

[1] 赖锡军,傅国圣,孙波,等. 非恒定水流计算的最优控制问题及其变分求解[J]. 水科学进展,2008,19(4):537-545. (LAI Xijun, FU Guosheng, SUN Bo, et al. Optimal control problems in unsteady flow computation and their variational solutions [J]. Advances in Water Science, 2008,19(4):537-545. (in Chinese))

[2] 葛守西,程海云,李玉荣,等. 水动力学模型卡尔曼滤波实时校正技术[J]. 水利学报,2005,36(6):687-693. (GE Shouxi, CHENG Haiyun, LI Yurong, et al. Real time updating of hydrodynamic model by using Kalman filter [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005,36(6):678-693. (in Chinese))

[3] 周全. 洪水预报实时校正方法研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[4] 王船海,吴晓玲,周全,等. 卡尔曼滤波校正技术在水动力学模型实时洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(3):300-305. (WANG Chuanhai, WU Xiaoling, ZHOU Quan, et al. Application of Kalman filter technique in real-time flood forecasting[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36 (3): 300-305. (in Chinese))

[5] 李大勇,董增川,刘凌,等. 一维非恒定流模型与卡尔曼滤波耦合的实时交替校正方法研究[J]. 水利学报,2007,38(3):330-336. (LI Dayong, DONG Zengchuan, LIU Ling, et al. Real-time alternative updating model coupling 1-D unsteadyflow computation with Kalman filter [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(3):330-336. (in Chinese))

[6] 吴晓玲,王船海,向小华,等. 实时校正中系统噪声均值的空间分布[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(4):448-451. (WU Xiaoling, WANG Chuanhai, XIANG Xiaohua, et al. Spatial distribution of mean value of system noise in real-time updating[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008,36(4):448-451. (in Chinese))

[7] MADSEN H, SKOTNER C. Adaptive state updating in real-time river flow forecasting-a combined filtering and error forecasting procedure [J]. Journal of Hydrology, 2005, 308 (1/2/3/4): 302-312.

[8] EVENSEN G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(5):10143-10162.

[9] HOUTEKAMER P, MITCHELL H. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique[J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(3):796-811.

[10] HAUGEN V, EVENSEN G. Assimilation of SLA and SST data into an OGCM for the Indian Ocean [J]. Ocean

Dynamics, 2002, 52(3):133-151.

[11] MCCLAUGHLIN D. An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering [J]. Advances in Water Resources, 2002, 25 (8): 1275-1286.

[12] MORADKHANI H, SOROOSHIAN S, GUPTA H, et al. Dual stateparameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter [J]. Advances in Water Resources, 2005, 28:135-147.

[13] 赖锡军. 水动力学模型与集合卡尔曼滤波耦合的实时校正多变量分析方法[J]. 水科学进展,2009,20(2):241-248. (LAI Xijun. Real-updating multivariate analysis for unsteady flows with ensemble Kalman filter [J]. Advances in Water Science, 2009, 20 (2): 241-248. (in Chinese))

[14] 陈一帆,程伟平,钱镜林,等. 基于集合卡尔曼滤波的河网水情数据同化[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(4):26-32. (CHEN Yifan, CHENG Weiping, QIAN Jinglin, et al. Data assimilation of river networks using ensemble kalman filtering algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(4):26-32. (in Chinese))

[15] 赖锡军,姜加虎,黄群,等. 漫滩河道洪水演算的水动力学模型[J]. 水利水运工程学报,2005(4):29-35. (LAI Xijun, JIANG Jiahu, HUANG Qun, et al. Hydrodynamicmodel for flood routing in a flood plain river [J]. Hydro-Science and Engineering, 2005 (4): 29-35. (in Chinese))

[16] 汪德燿. 计算水力学理论与应用[M]. 南京:河海大学出版社,1989.

(收稿日期:2016-01-28 编辑:骆超)

(上接第67页)

[14] FOOSE G J. Transit-time design for diffusion through composite liners [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(7):590-601.

[15] PAN Q, WEN Y D, CHEN Y M, et al. Sresses in soil-bentonite slurry trench cut-off walls [J]. Geotechnique, 2015, 65(10):1-8.

[16] RUFFING D G, EVANS J C. Prediction of earth pressures in soil-bentonite cutoff walls [J]. Geotechnical Special Publication, 2010, 199:2416-2425.

[17] 谢海建. 成层介质污染物的迁移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.

[18] 刘庭发,张鹏伟,温庆博,等. 填埋场防渗垫层服役性能数值模型[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊1):275-281. (LIU Tingfa, ZHANG Pengwei, WEN Qingbo, et al. Numerical study on performance of anti-seepage liner of landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup1): 275-281. (in Chinese))

(收稿日期:2016-03-22 编辑:熊水斌)