

DOI: 10.11779/CJGE202211013

非等温分布条件下压实黏土衬垫中固结与污染物运移耦合模型研究

李江山¹, 江文豪^{*1, 2}, 葛尚奇³, 黄啸¹, 程鑫^{1, 2}, 万勇¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 考虑到污染场地内部产热会使得压实黏土衬垫处于非等温分布状态, 建立了非等温分布条件下压实黏土衬垫中固结与污染物运移的耦合模型, 并采用有限差分法对该耦合模型进行了求解。将所建耦合模型的计算结果分别与热扩散试验结果和已有理论模型的计算结果展开对比分析, 对耦合模型的正确性进行了验证。基于所建耦合模型, 通过某一算例分析了温度梯度 M 、加荷速率 Q 和 Freundlich 吸附系数 K_f 对污染物运移过程的影响。结果表明: 污染物浓度和底部通量会随 M 绝对值的增大而增大, 且一定温度梯度下的底部通量可达不考虑温度梯度时底部通量的 2 倍以上; Q 的增大一方面会减慢污染物运移速率, 另一方面会使得运移过程达到稳态时的污染物浓度增大; K_f 的增大会减慢污染物运移过程, 与不考虑吸附作用相比, 考虑吸附作用可使得运移过程达到稳态时所需时间延长 3 倍及以上。

关键词: 非等温分布; 压实黏土衬垫; 土体固结; 污染物运移; 耦合模型

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)11-2071-10

作者简介: 李江山(1987—), 男, 研究员, 博士, 主要从事污染场地工程修复和固废资源化方面的研究工作。E-mail: jsli@whrsm.ac.cn。

Coupling model for consolidation and contaminant transport in compacted clay liners under non-isothermal condition

LI Jiang-shan¹, JIANG Wen-hao^{1, 2}, GE Shang-qi³, HUANG Xiao¹, CHENG Xin^{1, 2}, WAN Yong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Considering that the heat production inside the contaminated site will make the compacted clay liner (CCL) be in a non-isothermal distribution state, a consolidation-contaminant transport coupling model for the CCL subjected to non-isothermal condition is established, and the finite difference method is used to solve the coupling model. The correctness of the established coupling model is verified by comparing the calculated results of the coupling model with the results of the thermal diffusion tests and those of the existing theoretical models, respectively. Based on the established coupling model, the effects of temperature gradient, loading rate and Freundlich adsorption coefficient on the transport process of contaminant are analyzed through an example. The results show that the concentration and bottom flux of contaminants increase with the increase of the absolute value of temperature gradient. Under a certain temperature gradient, the bottom flux of contaminant can be more than twice the bottom flux without considering the temperature gradient. On the one hand, the increase of loading rate will slow down the transport rate of contaminant. On the other hand, it will increase the concentration of contaminant when the transport process reaches a steady state. The increase of Freundlich adsorption coefficient will slow down the transport process of contaminant. The time required for the transport process to reach the steady state can be prolonged by three times or more when the adsorption effect is considered.

Key words: non-isothermal distribution; compacted clay liner; soil consolidation; contaminant transport; coupling model

0 引言

对于垃圾填埋场、危险废物处置场等污染场地的

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177163, 51625903, 51979267)

收稿日期: 2021-10-21

*通信作者 (E-mail: Geo_Jiang2020@163.com)

防渗阻隔问题,底部衬垫系统是污染场地防渗系统的重要组成部分,主要用于阻止和延缓渗滤液中污染物的向下扩散与迁移^[1-4]。压实黏土是底部衬垫系统的重要组成部分,由于其具有较低的渗透性和较好的化学相容性,因而被广泛用于污染场地的防渗系统中。尽管如此,危害性较大的污染物仍可通过对流、扩散等方式击穿压实黏土衬垫,从而对周围土体及地下水造成污染^[1-9]。为此,许多学者对污染物在压实黏土衬垫中的运移问题展开了研究^[5-9]。

在污染物一维运移的解析理论方面,一些学者探究了压实黏土衬垫中污染物的运移问题^[6-7]。如陈云敏等^[6]求解得到了污染物在成层黏土衬垫中一维扩散运移的解析解;张文杰等^[7]建立了污染物在压实黏土衬垫中的一维对流-扩散-吸附解析模型。与此同时,针对不同情况,一些学者提出了污染物在包含压实黏土衬垫的复合衬垫系统中一维运移的解析解^[5, 8-9]。如Foose^[5]在考虑扩散-吸附情况下,获得了有机污染物在土工膜与黏土层组成的复合衬垫中一维瞬态运移的解析解;Pu等^[9]针对底部衬垫系统为复合衬垫系统的情况,采用解析方法研究了有机污染物在压实黏土衬垫中的运移问题。然而,上述研究均忽略了温度对污染物运移过程的影响。

现场测定数据显示,污染场地(如垃圾填埋场)内污染土中发生的化学反应会使得场地内部的温度高达90℃,而场地外部土体和地下水的温度一般较低,因此压实黏土衬垫中存在温度梯度^[10-12]。温度梯度的存在不仅会使得污染物在压实黏土衬垫中发生热扩散,还会影响土体的物理力学性质以及与污染物运移过程相关的参数,进而影响污染物运移过程^[12-18]。对于非等温分布条件下压实黏土衬垫中污染物的运移问题,目前相关的理论和试验研究较少^[15-17]。

在非等温分布条件下污染物运移问题的试验研究中,Rosanne等^[19-20]通过开展试验研究指出,压实黏土中存在因温度梯度引起的污染物热扩散现象。在理论方面,已有学者开展了考虑不同情况的相关解析理论研究^[12-17]。如吴珣等^[12]通过某些简化假定推导得到了非等温分布条件下有机污染物一维运移的解析解;张春华^[14]通过假定污染物的扩散系数等参数不随温度发生变化,发展了考虑热扩散、降解等作用下有有机污染物在压实黏土衬垫中一维运移的解析解;Yan等^[15]建立了考虑分子扩散-吸附-热扩散情况下污染物在多孔介质中一维运移的解析模型;Peng等^[16-17]研究了考虑热扩散情况下复合衬垫系统中污染物的运移问题,并提出了双层复合衬垫和三层复合衬垫中污染物一维运移的解析模型。但上述研究均未考虑土体固结对污染物运移过程的影响。

在底部衬垫系统服役过程中,由于其上部通常会堆填大量的固废垃圾体,这使得压实黏土衬垫会受到较大竖向应力,从而使得压实黏土衬垫发生固结变形^[21-23],进而影响污染物运移过程。因此,需考虑土体固结对污染物运移过程的影响。目前,有关压实黏土衬垫中固结与污染物运移的耦合问题已有较多的研究^[24-26]。然而,这些研究大多忽略了温度的影响。田改垒等^[27]基于小变形固结理论建立了可考虑热效应的渗透-扩散-固结耦合模型,但该模型忽略了温度变化对污染物运移过程中相关参数的影响,且所对应的工况与污染场地中的工况不一致。此外,为获得污染物在压实黏土衬垫中一维运移时的解析解,上述研究中多采用线性等温吸附方程来描述土颗粒的吸附特征,这与黏土颗粒实际的非线性特性存在区别^[28-30]。

针对以上研究情况,本文在已有研究的基础上,建立了非等温分布条件下压实黏土衬垫中固结与污染物运移的耦合模型,并采用有限差分法对该耦合模型进行了求解。通过将耦合模型的计算结果分别与Rosanne等^[19]所开展的热扩散试验结果、张文杰等^[7]所求解的计算结果、Alshawabkeh等^[31]所提数值模型的计算结果进行对比分析,验证了所建耦合模型的正确性。基于所建耦合模型,分析了相关参数变化对污染物运移过程的影响。

1 压实黏土衬垫中的耦合模型

1.1 计算简图

图1为非等温分布条件下压实黏土衬垫(CCL)中固结与污染物运移耦合模型的计算简图。图1中,从上至下依次为堆填体、渗滤液收集和移除系统、渗滤液、CCL、水平导流层及不透水基层。这里假定CCL始终处于饱和状态,其厚度为 L ,坐标系 z 由CCL上边界垂直向下, h_w 为CCL上部的渗滤液水头; C_0 为污染物浓度,这里假定污染物浓度保持恒定^[16-17, 30]。为研究非等温分布条件对固结及污染物运移过程的影响,同时考虑到温度的传导速度较快,这里假定CCL中的温度 T 随深度呈线性分布, T_a 和 T_b 分别为上部和底部的温度^[12-18]。此外,考虑到污染场地在运行过程会不断堆填固废垃圾体,从而使得CCL受到的竖向应力不断增大,这里设定堆填体产生的加荷速率为 Q ,并记堆填总时间(即加荷时间)为 t_c 。

1.2 基本假定

由于底部衬垫系统的水平面积较大,CCL的固结问题可近似为一维问题。已有试验研究表明,CCL的渗透系数会随温度的升高而增大^[32-33],但温度变化对土体压缩曲线和压缩模量的影响较小^[34-35]。基于试验

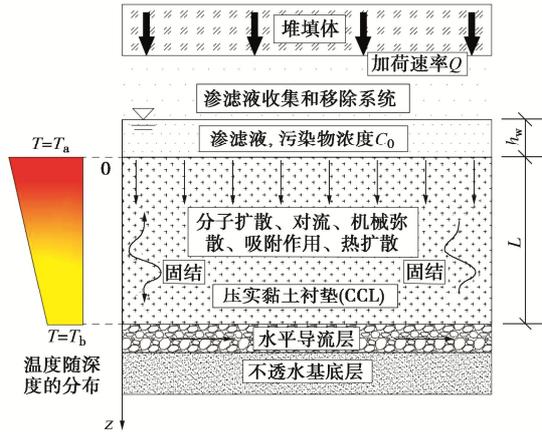


图 1 耦合模型的计算简图

Fig. 1 Calculation diagram for coupling model

研究结果, 作如下基本假定: ①CCL 是均质、各向同性的, 且处于饱和状态; ②CCL 中固相 (土颗粒) 和液相 (孔隙水) 均不可压缩, 土体变形固结是由于液相的排出所引起; ③液相的排出会导致土体的孔隙率减小, 但土体的变形量远小于土体的厚度, 即小变形假定成立; ④液相中污染物的浓度很低, 忽略污染物浓度变化对土体物理力学性质的影响; ⑤土中液相的渗流符合 Darcy 定律; ⑥温度变化不会导致 CCL 的压缩性改变, 仅影响 CCL 的渗透系数。

为研究污染物在 CCL 中的一维运移问题, 在上述基本假定的基础上, 还需补充以下 3 点假定: ①污染物在 CCL 中的扩散遵循 Fick 第二定律, 土颗粒对污染物的吸附状态已达到平衡吸附状态; ②污染物为单一离子或有机物; ③污染物的运移方式考虑分子扩散、对流、机械弥散、吸附和热扩散。

1.3 CCL 的一维固结控制方程

在 CCL 一维固结过程中, 液相和固相的质量守恒方程有^[36]

$$-\frac{\partial(nv_{lc}\rho_f)}{\partial z} = \frac{\partial(n\rho_f)}{\partial t} \quad (1a)$$

$$-\frac{\partial[(1-n)v_s\rho_s]}{\partial z} = \frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} \quad (1b)$$

式中, n 为 CCL 的孔隙率, v_{lc} 为液相中因土体固结产生的流动速度, ρ_f 为液相的密度, v_s , ρ_s 分别为固相的移动速度和密度, t 为时间。

由于固相和液相的密度保持不变, 根据式 (1a), (1b) 有

$$-\frac{\partial(nv_{lc})}{\partial z} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2a)$$

$$-\frac{\partial[(1-n)v_s]}{\partial z} = \frac{\partial(1-n)}{\partial t} \quad (2b)$$

根据式 (2) 可得

$$\frac{\partial v_s}{\partial z} + \frac{\partial v_{dc}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中, v_{dc} 为由于土体中因固结引起的达西流速, $v_{dc} = n(v_{lc} - v_s)$ 。

根据达西定律, 土体中液相的流动速度为

$$v_d = v_{dc} + v_{dh} \quad (4a)$$

$$v_{dc} = -\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial u_{ex}}{\partial z} \quad (4b)$$

$$v_{dh} = -\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial u_h}{\partial z} \quad (4c)$$

式中, k_v 为液相的渗透系数, γ_w 为液相的重度, u_{ex} 为因外荷载作用产生的超孔隙水压力, 其会导致土体发生固结作用, u_h 为渗滤液水头产生的超孔隙水压力, 其会导致液相发生流动, 但不会使得土体发生固结变形^[36], v_{dh} 为因渗滤液水头产生的达西流速。

根据 CCL 中所作的非等温分布假定可得

$$T(z) = T_a + Mz \quad (5)$$

式中, M 为 CCL 中的温度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), $M = (T_b - T_a)/L$ 。

对于液相的渗透系数 k_v , 参考文献[37], 渗透系数 k_v 与温度 T 的关系可近似表达为

$$k_v = (0.029T + 0.420) \cdot k_v(T_0 = 20^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

式中, $k_v(T_0)$ 为温度为 T_0 时的渗透系数。

结合式 (5), (6), 渗透系数 k_v 与深度 z 关系为

$$k_v(z) = k_v(T_0) \cdot (Nz + Q_a) \quad (7)$$

式中, $N = 0.029M$, N 为渗透系数梯度 ($1/\text{m}$), $Q_a = 0.029T_a + 0.420$, $k_v(0) = k_v(T_0)Q_a$, $k_v(0)$ 为 CCL 上部的渗透系数。

对于因渗滤液水头产生的达西流速 v_{dh} , 其不产生固结效应, 这里假定渗滤液水头 h_w 保持不变, 并在该水头下达到了稳定渗流状态, 则有

$$v_{dh} = -\frac{k_v(z)}{\gamma_w} \frac{du_h}{dz} \quad (8)$$

对式 (8) 进行一定的变换, 并利用式 (7) 进行积分可得

$$v_{dh} = \frac{Nk_v(T_0)h_w}{\ln[(N/Q_a)L + 1]} \quad (9)$$

在 CCL 中, 根据液相中的渗流连续性条件可得

$$\frac{\partial v_{dc}}{\partial z} = m_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (10)$$

式中, m_v 为体积压缩系数, σ' 为有效应力。

根据式 (4b), (10) 可进一步写为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v(z)}{\gamma_w} \frac{\partial u_{ex}}{\partial z} \right) = -m_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (11)$$

根据土体的有效原理可知:

$$\sigma' = \sigma - u_{\text{ex}} - u_{\text{h}} - u_{\text{s}} \quad (12)$$

式中, σ 为总应力, u_{s} 为静水压力。

由于渗滤液水头下的渗流已达稳定渗流状态, 且静水压力不随时间变化, 则根据式 (12) 和上部荷载的加荷条件, 式 (11) 可进一步改写为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_{\text{v}}(z)}{\gamma_{\text{w}}} \frac{\partial u_{\text{ex}}}{\partial z} \right) = \begin{cases} m_{\text{v}} \frac{\partial u_{\text{ex}}}{\partial t} - m_{\text{v}} Q & (t < t_{\text{c}}) \\ m_{\text{v}} \frac{\partial u_{\text{ex}}}{\partial t} & (t \geq t_{\text{c}}) \end{cases} \quad (13)$$

式 (13) 即为非等温分布条件下 CCL 的一维固结控制方程。

1.4 CCL 中污染物的一维运移方程

当 CCL 发生固结变形时, 液相会发生流动, 固相 (土颗粒) 也会发生相对移动。根据质量守恒定律, 考虑分子扩散、对流、机械弥散、吸附和热扩散时污染物的一维运移方程可写为^[12-17, 36]

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} + \frac{\partial[(1-n)\rho_{\text{s}}S]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(nD \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial(nv_{\text{t}}C)}{\partial z} - \frac{\partial[(1-n)v_{\text{s}}\rho_{\text{s}}S]}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(nD_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (14)$$

式中, $C(z, t)$ 为液相中污染物的浓度, S 为单位质量土颗粒所吸附的污染物质量, D 为水动力弥散系数, $D = D_{\text{e}} + D_{\text{md}}$, D_{e} 为有效扩散系数, $D_{\text{md}} = \alpha_{\text{L}}v_{\text{t}}$, D_{md} 为机械弥散系数, α_{L} 为纵向弥散度, $v_{\text{t}} = v_{\text{ic}} + v_{\text{th}}$, v_{t} 为液相的流动速度, v_{th} 为液相中因渗滤液水头产生的流动速度, $v_{\text{th}} = v_{\text{th}}/n$, D_{T} 为污染物的热扩散系数。

根据污染物的一维运移机理, 以垂直向下方向为正方向的污染物通量 $J(z, t)$ 的表达式可写为

$$J = -nD \frac{\partial C}{\partial z} + [nv_{\text{t}}C + (1-n)v_{\text{s}}\rho_{\text{s}}S] - nD_{\text{T}} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (15)$$

对于 S 和 C 的关系, 参考已有研究结果, 这里采用 Freundlich 非线性平衡吸附模型来描述固相对污染物的非线性吸附特性^[28-30], 即

$$S = K_{\text{f}}C^F \quad (16)$$

式中, K_{f} 为与吸附能力相关的 Freundlich 吸附系数, F 为拟合常数。

当拟合常数 $F=1$ 时, 则式 (16) 可退化为经典的线性等温吸附模型, 即

$$S = K_{\text{d}}C = K_{\text{d}}C \quad (17)$$

式中, K_{d} 为线性吸附系数。

对于有效扩散系数 D_{e} 。一方面, 有研究指出有效扩散系数 D_{e} 会随孔隙率 n 的减小而减小^[28, 30]; 另一方面, 有效扩散系数 D_{e} 会随温度 T 的增大而增大^[15, 38-39]。综合考虑两者的影响, D_{e} 可表示为

$$D_{\text{e}} = D_0(T_0)n^{\beta} \frac{T}{T_0} \frac{\mu_{T_0}}{\mu_T} \quad (18)$$

式中, $D_0(T_0)$ 为温度为 T_0 时的自由扩散系数, β 为经验指数, μ_{T_0} , μ_T 分别为温度 T_0 和 T 时污染物的动力黏度。

基于文献[15, 38, 39]的研究, D_{e} 可近似表示为

$$D_{\text{e}} = D_0(T_0)n^{\beta}[1 + A(T - T_0)] \quad (19)$$

式中, A 为与有效扩散系数相关的温度系数。

将式 (5) 代入式 (19) 可得

$$D_{\text{e}} = D_0(T_0)n^{\beta}(Gz + H) \quad (20)$$

式中, $G = AM$, $H = 1 + A(T_{\text{a}} - T_0)$ 。

对于污染物的热扩散系数 D_{T} , 参考文献[13~17]和式 (20), 其表达式为

$$D_{\text{T}} = CS_{\text{T}}D_{\text{e}} = CS_{\text{T}}D_0(T_0)n^{\beta}(Gz + H) \quad (21)$$

式中, S_{T} 为索雷特系数。

根据关系式, 式 (14) 可进一步改写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial[nC + (1-n)\rho_{\text{s}}K_{\text{f}}C^F]}{\partial t} &= [D_0(T_0)n^{\beta+1}(Gz + H) + n\alpha_{\text{L}}v_{\text{t}}] \cdot \\ \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} &+ \left\{ \frac{\partial[D_0(T_0)n^{\beta+1}(Gz + H) + n\alpha_{\text{L}}v_{\text{t}}]}{\partial z} - [nv_{\text{t}} + \right. \\ &(1-n)v_{\text{s}}\rho_{\text{s}}K_{\text{f}}C^{F-1}] + MS_{\text{T}}D_0(T_0)n^{\beta+1}(Gz + H) \left. \right\} \frac{\partial C}{\partial z} - \\ &C \frac{\partial \{ [nv_{\text{t}} + (1-n)v_{\text{s}}\rho_{\text{s}}K_{\text{f}}C^{F-1}] - MS_{\text{T}}D_0(T_0)n^{\beta+1}(Gz + H) \}}{\partial z} \end{aligned} \quad (22)$$

同理, 根据关系式, 污染物通量 $J(z, t)$ 的表达式可进一步改写为

$$J = -[D_0(T_0)n^{\beta+1}(Gz + H) + n\alpha_{\text{L}}v_{\text{t}}] \frac{\partial C}{\partial z} + [nv_{\text{t}}C + (1-n)v_{\text{s}}\rho_{\text{s}}K_{\text{f}}C^F - CMS_{\text{T}}D_0(T_0)n^{\beta+1}(Gz + H)] \quad (23)$$

1.5 初始条件和边界条件

为便于分析, 这里以渗滤液水头下的渗流达到稳定时刻为初始时刻, 并假定在该时刻开始堆填固废垃圾体。因此, CCL 一维固结的初始条件可写为

$$u_{\text{ex}}(z, 0) = 0 \quad (24)$$

对于 CCL 一维固结的边界条件, 这里可将上下边界条件均视为完全排水边界情况, 则有

$$u_{\text{ex}}(0, t) = 0 \quad (25)$$

$$u_{\text{ex}}(L, t) = 0 \quad (26)$$

对于污染物在 CCL 中的一维运移问题, CCL 在初始时刻未受到污染, 因而可假定其初始条件为

$$C(z, 0) = 0 \quad (27)$$

由于 CCL 的上边界直接与渗滤液接触, 而下边界为水平导流层, 因而上下边界条件可写为^[6, 16-17]

$$C(0, t) = C_0 \quad (28)$$

$$C(L, t) = 0 \quad (29)$$

上述即为非等温分布条件下压实黏土衬垫 (CCL)

中考考虑固结与污染物运移的耦合模型, 该耦合模型包括 CCL 的一维固结控制方程式 (13) 和 CCL 中污染物的一维运移方程式 (22), 以及相应的初始条件和边界条件式 (24) ~ (29)。

2 耦合模型的有限差分分解

对于非等温分布条件下 CCL 中固结和污染物运移的耦合模型, 由于耦合模型中控制方程的系数均是变化的, 属于变系数偏微分方程, 因而以下将采用有限差分法对耦合模型进行求解。

2.1 一维固结控制方程的有限差分分解

根据式 (7), 对控制方程式 (13) 进行整理可得

$$C_{v0}(Nz + Q_a) \frac{\partial^2 u_{ex}}{\partial z^2} + C_{v0}N \frac{\partial u_{ex}}{\partial z} = \begin{cases} \frac{\partial u_{ex}}{\partial t} - Q & (t < t_c) \\ \frac{\partial u_{ex}}{\partial t} & (t \geq t_c) \end{cases}, \quad (30)$$

式中, $C_{v0} = \frac{k_v(T_0)}{m_v \gamma_w}$, C_{v0} 为温度为 T_0 时 CCL 的固结系数。

设 Δz , Δt 分别为计算空间步长和时间步长, 并将空间坐标和时间坐标分别进行 I 等分和 J_2 等分, 则有 $z_i = i\Delta z$, $\Delta z = L/I$, $t_i = i\Delta t$, $j = 0, 1, 2, \dots, J_1, \dots, J_2$, $\Delta t = t_c/J_1 = t_0/J_2$, t_0 为给定时间。因此, 控制方程式 (30) 的 Crank-Nicholson 型隐式差分格式可写为

$$C_{v0}(N\Delta z_i + Q_a) \left(\frac{u_{exi+1}^j - 2u_{exi}^j + u_{exi-1}^j}{2\Delta z^2} + \frac{u_{exi+1}^{j+1} - 2u_{exi}^{j+1} + u_{exi-1}^{j+1}}{2\Delta z^2} \right) + C_{v0}N \frac{u_{exi+1}^j - u_{exi-1}^j}{2\Delta z} = \begin{cases} \frac{u_{exi+1}^{j+1} - u_{exi}^{j+1} - Q}{\Delta t} & (j \leq J_1) \\ \frac{u_{exi+1}^{j+1} - u_{exi}^{j+1}}{\Delta t} & (j > J_1) \end{cases}. \quad (31)$$

相应的初始条件和边界条件可写为

$$u_{exi}^0 = 0, \quad (32)$$

$$u_{ex0}^j = 0, \quad (33)$$

$$u_{exI}^j = 0. \quad (34)$$

利用式 (29) 中的隐式差分格式以及相应的求解条件式 (32) ~ (34), 即可对非等温分布条件下 CCL 中的一维固结过程进行求解。

对于 CCL 中固相的移动速度 v_s , 对式 (3) 进行整理, 两边积分可得

$$v_s(L, t) - v_s(z, t) = v_{dc}(z, t) - v_{dc}(L, t). \quad (35)$$

由于 CCL 底部固相不发生移动 (即 $v_s(L, t) = 0$), 因此任意位置固相的移动速度 v_s 可表达为

$$v_s(z, t) = v_{dc}(L, t) - v_{dc}(z, t). \quad (36)$$

基于有限差分分解的计算结果和上述关系式, 即可

确定达西速度 v_{dc} 、移动速度 v_s 和孔隙率 n 等参数。与此同时, 利用达西速度 v_{dc} , v_{dh} 可以分别确定对应液相的流动速度 v_{lc} , v_{lh} 。

2.2 一维运移方程的有限差分分解

参考式 (13) 中的有限差分方法, 对式 (22) 展开有限差分, 其 Crank-Nicholson 型隐式差分格式可写为

$$T_i^j \frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} = X_i^j \left(\frac{C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}}{2\Delta z^2} \right) + X_i^j \left(\frac{C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j}{2\Delta z^2} \right) + Y_i^j \frac{C_{i+1}^j - C_{i-1}^j}{2\Delta z} - Z_i^j C_i^j, \quad (37)$$

其中,

$$T_i^j = n_i^j + (1 - n_i^j) \rho_s K_f C_i^{jF-1}, \quad (38)$$

$$X_i^j = D_0(T_0) n_i^{j\beta+1} (G\Delta z_i + H) + n_i^j \alpha_L v_{ti}^j, \quad (39)$$

$$Y_i^j = MS_T D_0(T_0) n_i^{j\beta+1} (G\Delta z_i + H) - [n_i^j v_{ti}^j + (1 - n_i^j) v_{si}^j \rho_s K_f C_i^{jF-1}] + \frac{1}{2\Delta z} \{ D_0(T_0) n_{i+1}^{j\beta+1} [G\Delta z(i+1) + H] + n_{i+1}^j \alpha_L v_{ti+1}^j - D_0(T_0) n_{i-1}^{j\beta+1} [G\Delta z(i-1) + H] - n_{i-1}^j \alpha_L v_{ti-1}^j \}, \quad (40)$$

$$Z_i^j = \frac{1}{2\Delta z} \{ [n_{i+1}^j v_{ti+1}^j + (1 - n_{i+1}^j) v_{si+1}^j \rho_s K_f C_{i+1}^{jF-1}] - MS_T D_0(T_0) n_{i+1}^{j\beta+1} [G\Delta z(i+1) + H] - [n_{i-1}^j v_{ti-1}^j + (1 - n_{i-1}^j) v_{si-1}^j \rho_s K_f C_{i-1}^{jF-1}] + MS_T D_0(T_0) n_{i-1}^{j\beta+1} [G\Delta z(i-1) + H] \}. \quad (41)$$

相应的初始条件和边界条件可写为

$$C_i^0 = 0, \quad (42)$$

$$C_0^j = C_0, \quad (43)$$

$$C_I^j = 0. \quad (44)$$

对于非等温分布条件下 CCL 中污染物的一维运移问题, 利用差分方程式 (37) 及相应的求解条件式 (42) ~ (44) 即可进行求解。

对于污染物通量 J , 其差分格式可写为

$$J_i^j = -X_i^j \frac{C_{i+1}^j - C_{i-1}^j}{2\Delta z} + \Delta_i^j C_i^j, \quad (45)$$

式中,

$$\Delta_i^j = [n_i^j v_{ti}^j + (1 - n_i^j) v_{si}^j \rho_s K_f C_i^{jF-1} - MS_T D_0(T_0) n_i^{j\beta+1} (G\Delta z_i + H)]. \quad (46)$$

需要说明的是, 对于边界处的差分格式, 可利用相邻节点展开有限差分。

基于差分方程式 (31), (37), 可利用 Matlab 软件编制相应的程序, 从而对 CCL 中考考虑固结与污染物运移的耦合问题展开运算。

3 耦合模型的验证

为验证 CCL 中固结与污染物运移耦合模型的正

确性, 以下将耦合模型的有限差分分解分别与 Rosanne 等^[19]热扩散试验结果、张文杰等^[7]所求解析解、Alshawabkeh 等^[31]所提数值模型进行对比分析。

3.1 与热扩散试验结果的对比

Rosanne 等^[19]对非等温分布条件下压实黏土中溶质的一维运移问题开展了室内试验研究。在该试验中, 压实黏土厚度为 2 mm, 孔隙率为 0.6, 溶质为 NaCl 溶液, 其初始浓度为 1 mol/m³。压实黏土上下边界的温度分别为 12, 38℃, 且上下边界的浓度分别为 1.21, 8.83 mol/m³。参考其他文献的模拟方法^[20], 这里采用在 24.9℃时测定得到的有效扩散系数 $D_e = 6.0 \times 10^{-11}$ m²/s 及 $A = 0.025/^\circ\text{C}$ 来近似描述溶质的扩散特性。在该试验中, 测定得到的索雷特系数 $S_T = 0.13/^\circ\text{C}$ 。需说明的是, 对于该热扩散试验, 尽管所建耦合模型的初始条件和边界条件等与该试验的相关条件存在一些不同之处, 但这些不同之处均可通过调整相关参数以实现热扩散试验过程的模拟。

图 2 所示为所建耦合模型有限差分分解的计算结果和 Rosanne 等^[19]热扩散试验结果的对比情况。从图 2 可以看出, 不同时间下所建耦合模型计算所得的溶质浓度分布情况与 Rosanne 等^[19]的试验结果基本吻合, 这一定程度说明了所建耦合模型的正确性。同时, 对比结果也表明本文所建耦合模型可较为准确预测溶质在压实黏土中的热扩散过程。

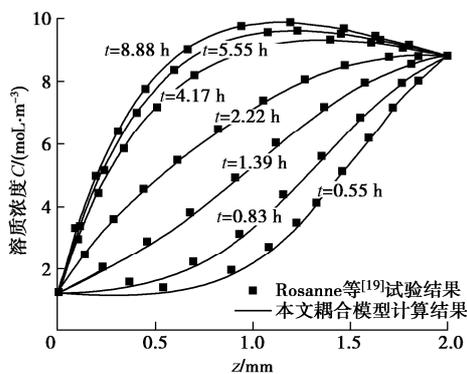


图 2 耦合模型计算结果和 Rosanne 等^[19]热扩散试验结果对比

Fig. 2 Comparison between calculated results by proposed coupling model and test results by Rosanne et al

3.2 与解析解的对比

张文杰等^[7]研究了污染物在 CCL 中的一维运移问题, 并通过假定土颗粒的吸附模型为线性吸附模型推导得到了相应的解析解, 但该解答中未考虑土体固结和温度的影响, 因而相关系数均假定为常数。为进一步验证所建耦合模型的正确性, 将所建耦合模型的有限差分分解与张文杰等^[7]所求的解析解进行对比。除指定参数外, 取如下基本物理力学参数: 厚度 $L=1.0$ m, 体积压缩系数 $m_v=0.05$ 1/MPa, 固相密度 ρ_s 为 2.76

kg/m³, 液相密度 ρ_f 为 1.0 kg/m³, 初始孔隙率 n_0 为 0.42, 加荷速率 Q 为 0.3125 kPa/d, 加荷时间 t_c 为 3200 d, 参考温度 T_0 为 20℃, 渗透系数 $k_v(T_0)$ 为 2.96×10^{-10} m/s, 渗滤液水头 h_w 为 1.0 m, 底部温度 T_b 为 20℃, 温度梯度 M 为 $-30^\circ\text{C}/\text{m}$, 自由扩散系数 $D_0(T_0)$ 为 8.60×10^{-10} m²/s, 经验指数 β 为 1.82, Freundlich 吸附系数 K_f 为 0.63 cm³/g, 拟合常数 F 为 0.8, 索雷特系数 S_T 为 0.05/℃, 温度系数 A 为 0.025/℃, 污染物浓度 C_0 为 10 mg/L, 纵向弥散度 α_L 为 0.02 m。需说明的是, 计算参数的选定参考了相关文献中所采用的数据及相关试验的测定结果^[7, 13-17, 28, 30]。污染物在 CCL 中运移时的初始条件和边界条件取本文所建耦合模型中采用的相应条件, 这里不再赘述。

图 3 所示为本文所建耦合模型有限差分分解的计算结果和张文杰等^[7]所求解析解的计算结果的对比情况。从图 3 可以看出, 所建耦合模型计算所得的浓度分布情况与张文杰等^[7]所求解析解的计算结果十分一致, 这说明所建耦合模型可用于预测考虑对流-扩散-吸附时 CCL 中污染物的一维运移过程。

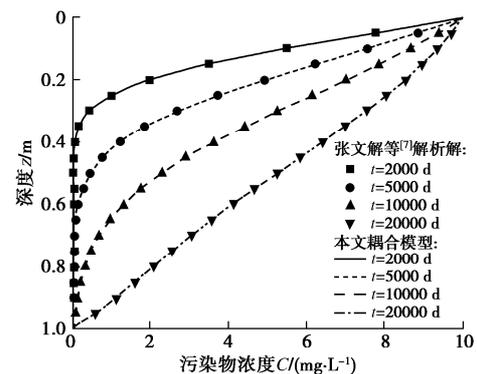


图 3 本文耦合模型与张文杰等^[7]解析解计算结果的对比

Fig. 3 Comparison between proposed coupling model and analytical solution proposed by Zhang et al

3.3 与已有耦合模型的对比

Alshawabkeh 等^[31]建立了考虑小变形固结与污染物运移的耦合模型(简称 Alshawabkeh 耦合模型)。相比于本文所建耦合模型, Alshawabkeh 耦合模型忽略了固结变形引起的相关参数变化以及机械弥散等因素的影响, 且该研究并未考虑温度引起的热扩散对污染物运移过程的影响。为验证本文所提方法用于求解耦合问题的正确性, 可将本文所建耦合模型的计算结果与 Alshawabkeh 耦合模型的计算结果进行对比。除指定参数外, 这里设定相关计算参数同 3.2 节中的参数。需说明的是, 由于 Alshawabkeh 耦合模型中所考虑的吸附模型为等温线性吸附模型^[31], 因而这里取 $K_d = K_f$ 和 $F=1$, 其他条件同本文所建耦合模型时所采用的相应条件, 这里不再赘述。

图 4 所示为本文所建耦合模型的计算结果和 Alshawabkeh 耦合模型的计算结果的对比情况。从图 4 可以看出, 所建耦合模型计算所得污染物通量随时间的变化情况与 Alshawabkeh 耦合模型的计算结果十分一致, 这说明所建耦合模型可用于计算土体固结与污染物运移的耦合问题。

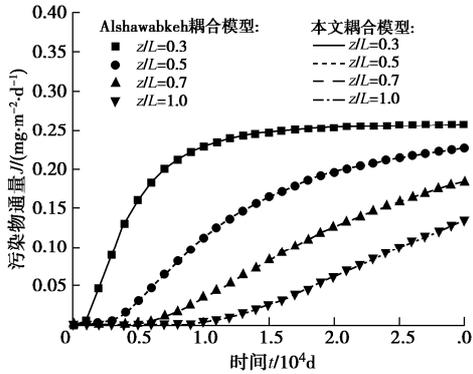


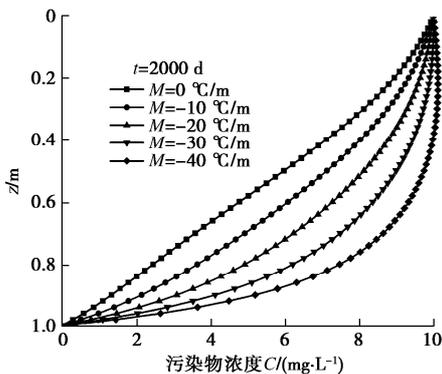
图 4 本文耦合模型与 Alshawabkeh 耦合模型计算结果的对比
Fig. 4 Comparison between proposed coupling model and coupling model proposed by Alshawabkeh et al

4 算例分析

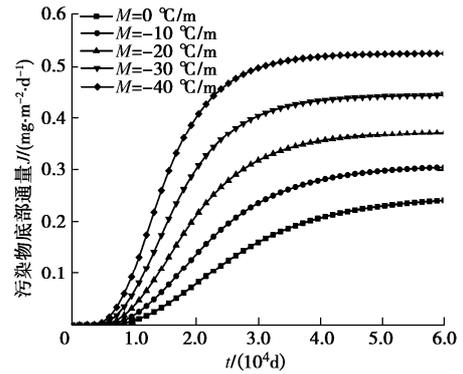
为认识非等温分布条件下 CCL 中考虑固结时污染物的运移特性, 除指定参数外, 这里以 3.2 节中的参数为例, 探究温度梯度、加荷速率及 Freundlich 吸附系数等因素对污染物在 CCL 中运移规律的影响。

4.1 温度梯度的影响

图 5 描述了不同温度梯度 M 下污染物浓度随深度的分布规律和污染物底部通量随时间的变化规律。从图 5 (a) 可知, M 的绝对值越大, 相同时间内同一深度处污染物的浓度越高, 这说明 CCL 中的温度梯度会加快运移速率。从图 5 (b) 可以看出, 污染物底部通量随 M 绝对值的增大出现明显增大, 如 $t=60000$ d 时, 相比于 $M=0$ °C/m 时, M 为 $-10, -20, -30, -40$ °C/m 时的底部通量分别增大了 26.3%, 54.2%, 84.3% 和 117%。此外, 底部通量变化规律表明, M 绝对值的增大会使得污染物运移过程更早趋于稳定。



(a) 污染物浓度随深度的分布



(b) 污染物底部通量随时间的变化

图 5 温度梯度 M 对污染物运移规律的影响

Fig. 5 Influence of temperature gradient on law of contaminant transport

出现上述规律的原因在于: 温度梯度 M 绝对值的增大不仅会加快热扩散过程, 还会增大污染物在 CCL 中运移时的有效扩散系数, 进而加快了污染物的运移速率, 并增大底部通量。分析表明, 温度梯度 M 会加快污染物在 CCL 中的运移速率, 且在一定温度梯度下, 污染物的底部通量可达不考虑温度梯度时底部通量的 2 倍以上。因此, 实际工程中应考虑 CCL 中的温度梯度对污染物运移过程的影响^[12-17]。

4.2 加荷速率的影响

图 6 给出了不同加荷速率 Q 下污染物浓度随深度的分布规律和污染物底部通量随时间的变化规律。从图 6 (a) 可看出, 在运移初期 (如 $t \leq 2.0 \times 10^4$ d), 相同时间内同一深度处污染物浓度会随 Q 的增大而减小, 这反映了 CCL 的固结效应一定程度会减慢运移速率; 但运移过程达到稳态时 (如 $t=6.0 \times 10^4$ d 时), 加荷速率 Q 的增大反而使得污染物的浓度增大。从图 6 (b) 可知, 加荷速率 Q 越大, 相同时间内污染物底部通量越小, 如 $t=6.0 \times 10^4$ d 时, 相比于不考虑固结效应 ($Q=0.0$ kPa/d) 时的情况, $Q=0.3125$ kPa/d 时 (对应最终荷载为 1 MPa) 染物的底部通量减小了约 10.0%。与此同时, 从图 6 (b) 中可以看出, 不考虑固结效应会低估污染物的运移过程达到稳态的时间。

上述规律表明, CCL 的固结效应会减慢污染物的运移速率, 并减小运移时的底部通量, 这与 Pu 等分析得到的规律一致^[30], 但同时, 固结效应也会使得运移过程达到稳态时的浓度增大。对于运移速率减慢和底部通量减小的原因, 这主要是由于固结效应会使得土体孔隙率减小, 进而使得与污染物运移相关的系数减小, 如有效扩散系数和热扩散系数减小。对于运移过程达到稳态时浓度增大的原因, 这主要是由于当考虑固结效应时, 相关参数的比值会发生变化, 如对流速度与水动力弥散系数的比值会增大, 因而改变了运移过程达到稳态时污染物浓度的分布规律^[7, 14]。

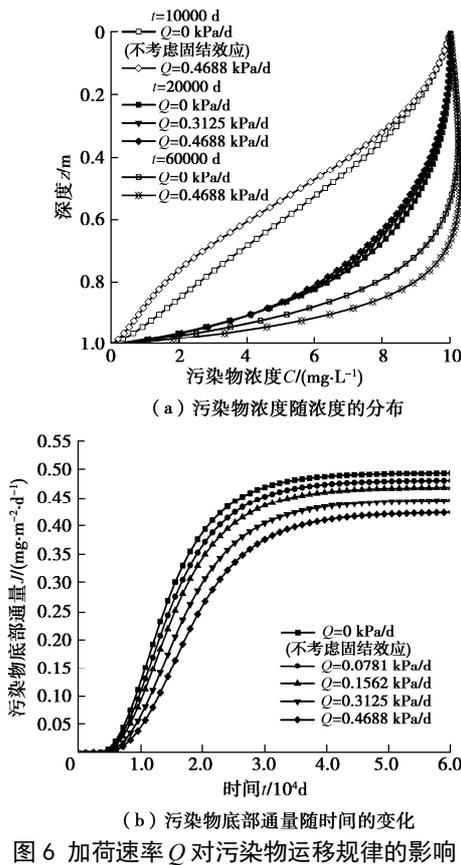


Fig. 6 Influences of loading rate on law of contaminant transport

4.3 Freundlich 吸附系数的影响

图7给出了不同 Freundlich 吸附系数 K_f 下污染物浓度随深度的分布规律和污染物底部通量随时间的变化规律。从图7中可知, Freundlich 吸附系数 K_f 对污染物运移过程有着显著影响, 在运移初期 (如 $t=1.5 \times 10^4$ d), K_f 的增大使得相同时间内同一深度处污染物的浓度显著降低, 同时也使得相同时间内污染物的底部通量减小。但随着运移过程的进行, 当运移过程达到稳态时 (如 $t=6.0 \times 10^4$ d), 不同 K_f 下污染物的浓度分布曲线几乎完全重合, 且不同 K_f 下底部通量趋于同一稳定值。若定义污染物底部通量达 $0.445 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ 时所需的时间为运移稳态时间 (图7(b)), 则相比不考虑吸附作用时, Freundlich 吸附系数 $K_f = 0.63 \text{ cm}^3/\text{g}$ 时的运移稳态时间增大了约 200%。

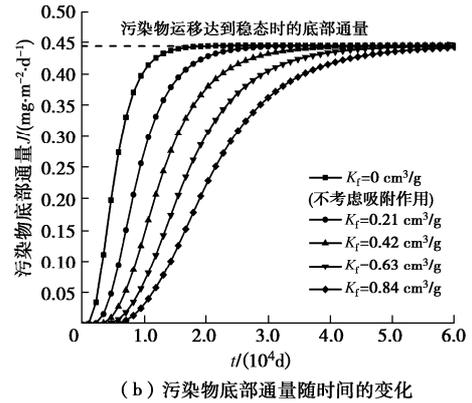
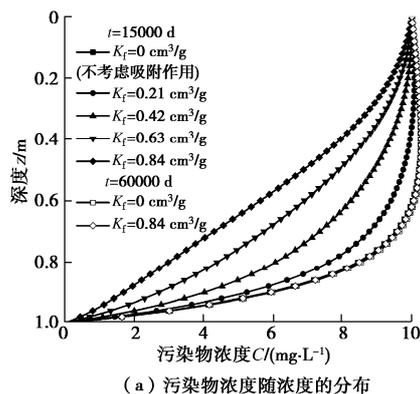


图7 Freundlich 吸附系数 K_f 对污染物运移规律的影响

Fig. 7 Influences of Freundlich adsorption coefficient on law of contaminant transport

出现上述运移规律的主要原因: CCL 的吸附作用主要对污染物运移过程起着阻滞作用, 因而主要影响运移速率快慢^[28-30]。当运移过程达到稳态时, 吸附作用对浓度分布规律和底部通量的影响可忽略。研究表明, CCL 对污染物的吸附作用有利于延缓运移过程, 且与不考虑吸附作用时相比, 考虑吸附作用可使得运移过程达到稳态时所需的时间延长 3 倍及以上。因此, 在选择 CCL 时, 应考虑其吸附特性^[28, 30]。

5 结 论

(1) CCL 中的温度梯度会加快污染物运移速率, 相同时间内污染物的浓度和底部通量会随温度梯度 M 绝对值的增大而增大, 且在一定温度梯度下, 底部通量可达不考虑温度梯度时底部通量的 2 倍以上。因此, 实际工程中应考虑温度梯度对运移过程的影响。

(2) 加荷速率 Q (CL 的固结效应) 对污染物运移过程的影响是多方面的。一方面, Q 的增大会使得土体的孔隙率减小, 从而减慢了运移速率, 也减小了底部通量; 另一方面, Q 的增大也会使得污染物运移过程达到稳态时的浓度增大。因此, 实际工程中应综合考虑固结效应对运移过程的影响。

(3) Freundlich 吸附系数 K_f 的增大会减慢污染物在 CCL 中的运移过程, 且与不考虑吸附作用时相比, 考虑吸附作用可使得污染物运移过程达到稳态时所需的时间延长 3 倍及以上。当污染物的运移过程达到稳态时, 土颗粒对污染物的吸附作用可忽略。在选择 CCL 时, 应考虑土体的吸附特性。

参考文献:

[1] 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))
- [2] SHACKELFORD C D. The ISSMGE Kerry Rowe Lecture: The role of diffusion in environmental geotechnics 1[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(11): 1219 - 1242.
- [3] 张春华, 吴家威, 陈 赟, 等. 基于污染物击穿时间的填埋场复合衬垫厚度简化设计方法[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(10): 1841 - 1848. (ZHANG Chun-hua, WU Jia-wei, CHEN Yun, et al. Simplified method for determination of thickness of composite liners based on contaminant breakthrough time[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(10): 1841 - 1848. (in Chinese))
- [4] TOUZE-FOLTZ N, XIE H J, STOLTZ G. Performance issues of barrier systems for landfills: a review[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, **49**(2): 475-488.
- [5] FOOSE G J. Transit-time design for diffusion through composite liners[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(1): 590 - 601.
- [6] 陈云敏, 谢海建, 柯 瀚, 等. 层状土中污染物的一维扩散解析解[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(4): 521 - 524. (CHEN Yun-min, XIE Hai-jian, KE Han, et al. Analytical solution of contaminant diffusion through multi-layered soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(4): 521 - 524. (in Chinese))
- [7] 张文杰, 黄依艺, 张改革. 填埋场污染物在有限厚度土层中一维对流 - 扩散 - 吸附解析解[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(7): 1197 - 1201. (ZHANG Wen-jie, HUANG Yi-yi, ZHANG Gai-ge. Analytical solution for 1D advection-diffusion-adsorption transport of landfill contaminants through a soil layer with finite thickness[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(7): 1197 - 1201. (in Chinese))
- [8] FENG S J, PENG M Q, CHEN Z L, et al. Transient analytical solution for one-dimensional transport of organic contaminants through GM/GCL/SL composite liner[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 479 - 492.
- [9] PU H F, QIU J W, ZHANG R J, et al. Analytical solutions for organic contaminant diffusion in triple-layer composite liner system considering the effect of degradation[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(4): 907 - 921.
- [10] CALDER G V, STARK T D. Aluminum reactions and problems in municipal solid waste landfills[J]. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 2010, **14**(4): 258 - 265.
- [11] JAFARI N H, STARK T D, THALHAMER T. Spatial and temporal characteristics of elevated temperatures in municipal solid waste landfills[J]. *Waste Management*, 2017, **59**: 286 - 301.
- [12] 吴 珣, 施建勇, 何 俊. 非等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的扩散分析[J]. *水文地质工程地质*, 2014, **41**(3): 120 - 124. (WU Xun, SHI Jian-yong, HE Jun. An analysis of organic contaminant diffusion through clay liner under the condition of transient temperature[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, **41**(3): 120 - 124. (in Chinese))
- [13] XIE H J, ZHANG C H, SEDIGHI M, et al. An analytical model for diffusion of chemicals under thermal effects in semi-infinite porous media[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, **69**: 329 - 337.
- [14] 张春华. 填埋场复合衬垫污染物热扩散运移规律及其优化设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. (ZHANG Chun-hua. Mechanisms for Contaminant Transport in Landfill Composite Liners under Thermal Effect and Its Optimization Design Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese))
- [15] YAN H X, SEDIGHI M, XIE H J. Thermally induced diffusion of chemicals under steady-state heat transfer in saturated porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, **153**: 119664.
- [16] PENG M Q, FENG S J, CHEN H X, et al. Analytical model for organic contaminant transport through GMB/CCL composite liner with finite thickness considering adsorption, diffusion and thermodiffusion[J]. *Waste Management*, 2021, **120**(9): 448 - 458.
- [17] PENG M Q, FENG S J, CHEN H X, et al. An analytical solution for organic pollutant diffusion in a triple-layer composite liner considering the coupling influence of thermal diffusion[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **137**: 104283.
- [18] MON E E, HAMAMOTO S, KAWAMOTO K, et al. Temperature effects on solute diffusion and adsorption in differently compacted Kaolin clay[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(7): 1 - 9.
- [19] ROSANNE R, PASZKUTA M, TEVISSSEN E, et al. Thermodiffusion in compact clays[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, **267**(1): 194 - 203.
- [20] ROSANNE M, PASZKUTA M, ADLER P M. Thermodiffusional transport of electrolytes in compact clays[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **299**(2): 797 - 805.
- [21] YU Y, ROWE R K. Modelling deformation and strains induced by waste settlement in a centrifuge test[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, **55**(8): 1116 - 1129.

- [22] CHEN Y M, ZHAN T L T, WEI H Y, et al. Aging and compressibility of municipal solid wastes[J]. Waste Management, 2009, **29**(1): 86 - 95.
- [23] LIU J Y, XU D M, ZHAO Y C, et al. Long-term monitoring and prediction for settlement and composition of refuse in Shanghai Laogang Municipal Landfill[J]. Environmental Management, 2004, **34**(3): 441 - 448.
- [24] PU H F, FOX P J. Model for coupled large strain consolidation and solute transport in layered soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(2): 04015064.
- [25] YAN H X, WU J W, THOMAS H R, et al. Analytical model for coupled consolidation and diffusion of organic contaminant transport in triple landfill liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, **49**(2): 489 - 499.
- [26] XIE H, YAN H, FENG S, et al. An analytical model for contaminant transport in landfill composite liners considering coupled effect of consolidation, diffusion, and degradation[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, **23**(19): 1 - 14.
- [27] 田改垒, 张志红. 考虑热效应的污染物在土中扩散、渗透和固结耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(2): 278 - 287. (TIAN Gai-lei, ZHANG Zhi-hong. Coupled model for contaminant diffusion, osmosis and consolidation in soil considering thermal effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(2): 278 - 287. (in Chinese))
- [28] LEE J, FOX P J, LENHART J J. Investigation of consolidation-induced solute transport. I: Effect of consolidation on transport parameters[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(9): 1228 - 1238.
- [29] 张志红, 许照刚, 杜修力. 吸附模式及固结变形对溶质运移规律的影响研究[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(1): 104 - 111. (ZHANG Zhi-hong, XU Zhao-gang, DU Xiu-li. Study on the effects of adsorption modes and consolidation deformation on solute transport[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(1): 104 - 111. (in Chinese))
- [30] PU H, FOX P J, SHACKELFORD C D, et al. Assessment of consolidation-induced contaminant transport for compacted clay liner systems[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(3): 04015091.
- [31] ALSHAWABKEH A N, RAHBAR N. Parametric study of one-dimensional solute transport in deformable porous media[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(8): 1001 - 1010.
- [32] CHO W J, LEE J O, CHUN K S. The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 1999, **14**(1/2/3): 47-58.
- [33] 何俊, 胡晓瑾, 颜兴, 等. 黏土渗透性温度效应试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, **37**(3): 55 - 60. (HE Jun, HU Xiao-jin, YAN Xing, et al. Experiments on temperature effect of hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, **37**(3): 55 - 60. (in Chinese))
- [34] 张宇宁, 陈宇龙, 李博. 饱和黏土的一维热固结特性试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, **37**(12): 1794 - 1799. (ZHANG Yu-ning, CHEN Yu-long, LI Bo. Experimental study of one-dimensional thermal consolidation of saturated clays[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, **37**(12): 1794 - 1799. (in Chinese))
- [35] 费康, 戴迪, 付长郅. 热-力耦合作用下黏性土体积变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1752 - 1758. (FEI Kang, DAI Di, FU Chang-yun. Experimental study on volume change behavior of clay subjected to thermo-mechanical loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1752 - 1758. (in Chinese))
- [36] SMITH D W. One-dimensional contaminant transport through a deforming porous medium: theory and a solution for a quasi-steady-state problem[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, **24**(8): 693 - 722.
- [37] 尹铁锋, 刘干斌, 郭桢, 等. 竖井地基热排水固结理论初探[J]. 水文地质工程地质, 2014, **41**(3): 41 - 46. (YIN Tie-feng, LIU Gan-bin, GUO Zhen, et al. A preliminary study of the theory of consolidation by vertical thermal drain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, **41**(3): 41 - 46. (in Chinese))
- [38] HARRIS K R, WOOLF L A. Pressure and temperature dependence of the self-diffusion coefficient of water and oxygen-18 water[J]. Journal of the Chemical Society, 1980, **76**: 377 - 385.
- [39] ROWE R K. Short- and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur casagrande lecture[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(2): 141 - 169.