

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.008



土体固结与溶质运移三维耦合模型

房远方, 张志红, 杜修力

(北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:考虑堆场上覆堆积体自重引起的土体固结与溶质运移的耦合效应已成为环境土工领域中的热点问题。在 Biot 固结理论和溶质运移理论相结合的基础上,以孔隙率作为耦合参量,将固结方程与运移方程相联系,考虑土体固结对溶质运移模型参数的影响,建立了溶质在固结变形土体中运移的三维耦合模型。采用多场耦合有限元软件 COMSOL Multiphysics 对模型进行了数值求解。数值模拟结果表明,土体固结变形对溶质运移过程具有较强和持久的阻滞作用,导致溶质运移深度以及污染羽范围的减小,在模拟运移 20 a 时,运移距离减小率已高达 27.75%,且随着时间的增加而逐渐增大;溶质在水平方向的迁移距离不可忽略,随着横向水力梯度的增大而增大。

关键词:固结;运移;耦合;三维模型**中图分类号:**TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)03-0053-10

Three-dimensional coupled model of consolidation and solute transport for porous media

Fang Yuanfang, Zhang Zhihong, Du Xiuli

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: The coupling effect of consolidation caused by the waste and the cover, and the solute transport has been widely studied in the field of environmental civil engineering. Based on Biot consolidation theory and solute transport theory, a three-dimensional coupled model of consolidation and solute transport is thus developed and in the model the porosity is the coupled parameter and consolidation equations is linked with transport equations. The influence of consolidation on solute transport parameters is taken into consideration as well. Then, the 3D model coupling the consolidation and solute transport is established using the finite element software COMSOL Multiphysics. The numerical results show that consolidation deformation retards the transport process of solute leading to decrease in contaminant plume and the transport depth in vertical direction and has a strong and long-term influence on the transport of solute. The transport distance decreasing rate increased over time and reached 27.75% in 20 years; the transport distance in the horizontal direction of contaminant concentration increases with the increasing of lateral hydraulic gradient.

Key words: consolidation; transport; coupled; three-dimensional model**收稿日期:**2014-11-02**基金项目:**国家自然科学基金(51378035)**作者简介:**房远方(1988-),男,主要从事环境岩土工程研究,(E-mail)fyf198881@163.com**Received:**2014-11-02**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378035)**Author brief:** Fang Yuanfang(1988-), main research interest: environmental geotechnical engineering, (E-mail)fyf198881@163.com

目前,中国存在大量的简易废物堆场和疏浚底泥堆场,直接建立在未作任何防渗措施的天然土层上。渗滤液一旦穿透防渗垫层,对地下水的影响将是长期的和巨大的。因此,研究溶质在黏土防渗层中的运动规律,从保护地下水和保护环境的角度而言,是最值得关注的,亦可评估黏土作为环保防污屏障的有效性。在多种环境岩土工程项目运营机理中,都包含了两类过程:一是物理化学过程(主要是溶质的运移过程和稀释过程);二是岩土体的力学变化过程(主要是渗流过程和固结过程)。目前,对溶质在固结变形土体中的运移规律已引起相关学者的高度重视。

Smith^[1]从固结土的应变分析及溶质质量守恒定律出发,建立了溶质在可变形饱和和多孔介质中运移的一维理论,分别讨论了多孔介质小变形和大变形情况下的溶质运移问题,并指出研究大变形情况下溶质运移问题的重要性^[2]。Alshawabkeh 等^[3-5]将溶质质量输运过程与基于 Terzaghi 固结理论的黏土固结过程相耦合,建立了溶质一维输运模型。Fox^[6]、Arega 等^[7]、Fox 等^[8]以及 Lewis 等^[9]基于大应变固结理论,建立了饱和多孔介质中考虑大应变固结和污染物运移的耦合数学模型。Witteveen 等^[10]以非膨胀伊利土为试验研究对象,开展了土体的化-力耦合特性试验研究,给出了渗透吸力与初始固结系数以及渗透吸力与屈服应力之间的关系表达式,建立了考虑化学-力学耦合特性的本构模型。Zhang 等^[11]提出了部分饱和和多孔介质固结与溶质运移一维耦合模型,同时,考虑了多孔介质的有限应变以及几何与材料非线性的新特征。模型综合比较论证了有限应变、孔隙水的可压缩、纵向弥散以及饱和度的重要性。张志红、许照刚等^[12-16]在比奥固结理论的基础上,通过固相速度这一参量将固结理论与溶质运移理论相耦合起来,建立了考虑土体固结小变形的一维溶质运移模型并分别给出其解析解和数值解。薛强等^[17]基于多孔介质气-水-固耦合和微生物降解理论,建立了描述这一复杂动力学行为的气-水-固耦合数学模型,并给出了耦合模型的数值格式。以上溶质在固结变形粘土防渗层中的运移规律研究大部分理论模型都是一维形式,且较少考虑溶质运移对土体固结变形的影响。

本文在比奥固结理论和溶质运移理论相结合的基础上,通过溶质浓度与孔隙水压力之间的关系,以孔隙率作为耦合参量,建立溶质在固结变形土体中运移的三维耦合模型,并采用数值方法进行求解,揭示了溶质在变形土体中随时空的运移分布规律。该研究对于堆场防渗系统的设计、管理和维护以及环境安

全性评价具有重要的理论价值和实际意义。

1 模型的建立

1.1 基本假定

- 1) 土体为饱和、小变形、线弹性均质连续体;
- 2) 土颗粒和孔隙水不可压缩;
- 3) 渗流服从达西定律;
- 4) 土体为弥散各向同性;
- 5) 土体中渗透速度主方向与选择的坐标一致。
- 6) 假定流场为均匀稳定流场。

1.2 比奥固结理论

比奥固结理论考虑了各向同性的饱和土单元体在外力作用下的平衡条件,土骨架的线性变形和孔隙水渗流的连续性条件。三维比奥固结理论可以用数学方程描述如下:

$$\begin{aligned} -G \nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ -G \nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 \\ -G \nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} &= -\gamma' \end{aligned} \quad (1)$$

式中: G 为土体剪切模量,kPa; ν 为土体泊松比; u 为超孔隙水压力,kPa; γ' 为浮重度,kN/m³; ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2}$; w_x 、 w_y 、 w_z 为土体在 x 、 y 、 z 3个方向的位移,m。

式(1)中含有 w_x 、 w_y 、 w_z 、 u 4个未知数。对于饱和土体,土单元体内水量的变化率在数值上等于土体体积的变化率,故由达西定律可得

$$\frac{1}{\gamma_w} \nabla^2 (ku) = -\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \gamma_w \quad (2)$$

式中: k 为土体的渗透系数,cm/s; ϵ_v 为土体体应变; γ_w 为水的重度,kN/m³。

式(2)提供了水流连续条件的第4个方程。这样,解式(1)与式(2)组成的方程组,即可求得4个未知量。

对于受到固结压力的土体,渗透系数 k 随着固结变形是不断变化的,本文采用土力学大师 Taylor 给出的经验公式(3)来描述,该公式对于黏性土具有很好的适用性^[18]。

$$k = k_0 \times 10^{\frac{e - e_0}{e_k}} \quad (3)$$

式中: k_0 为土体初始渗透系数; e 为土体孔隙比; e_0 为土体初始孔隙比; e_k 为渗透指数,取 $0.5e_0$ 。

1.3 溶质运移理论

传统的溶质运移理论没有考虑土体的固结变

形,只考虑了孔隙水中溶质的质量守恒,如下式:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial(\mathbf{v}_{ii}c)}{\partial x_i} - \frac{(1-n)\rho_s}{n} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (4)$$

式中: D_{ii} 为水动力弥散系数张量,量纲为 $[L^2 T^{-1}]$; $i = x, y, z$; $x_x = x, x_y = y, x_z = z$; \mathbf{v}_{ii} 为实际渗流速度; n 为孔隙率; S 为土骨架吸附浓度, ρ_s 为土体密度。

1.4 土体固结与溶质运移耦合理论

土体在受到上部废物堆体自重作用发生固结变形过程中,土颗粒会发生相对移动,根据质量守恒定律,渗漏到土体中的溶质运移就分为两部分:1)溶质随孔隙水流动;2)吸附在固体土颗粒上,并随土骨架移动。根据这两部分总的质量守恒,建立了考虑渗流场、应力场和浓度场耦合的三维溶质运移方程。

$$\frac{\partial(nc)}{\partial t} + \frac{\partial[(1-n)\rho_s S]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(nD_{ii} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial(n\mathbf{v}_i c)}{\partial x_i} - \frac{\partial[(1-n)\mathbf{v}_{si}\rho_s S]}{\partial x_i} \quad (5)$$

式中: \mathbf{v}_{si} 为土骨架变形速度; \mathbf{v}_i 为达西渗流速度。

与传统的溶质运移模型式(4)相比,式(5)引入了吸附溶质随土颗粒的运移状态参数,从而考虑了土体变形对溶质运移的影响。式(5)中孔隙率、水动力弥散系数、达西速度和土骨架变形速度均为变量,与土体上覆固结压力值密切相关。

2 模型的数值求解

2.1 定解条件

假设填埋场在水平面上具有两条对称轴,由于问题的对称性,将坐标原点设在填埋场中心,取结构体系四分之一进行研究,其剖面图如图 1 所示。

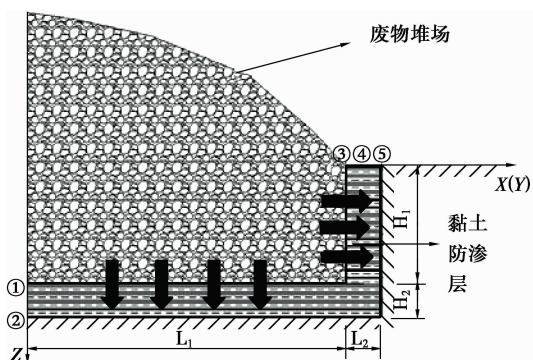


图 1 填埋场示意图

Fig. 1 Sketch map of landfill

部为天然黏土层;2)黏土层的右边界④和下边界②假定为刚性透水边界^[19];3)外荷载即固结压力 p 为瞬时施加,则 $\frac{\partial \sigma_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = 0$;4)黏土层上边界①以及边界③为透水边界;5)不考虑土层中溶质的背景浓度。

由以上假设可得到模型的定解条件如下:

1)三维固结模型(表 1)

表 1 固结模型初始与边界条件

Table 1 The initial and boundary conditions of consolidation model

初始条件	$u(x, y, z, 0) = p(x, y, z) \in \Omega$
边界①	$u(x, y, 0, t) = 0 (i \geq 0)$
边界②	$u(x, y, H_2, t) = 0 (i \geq 0)$
边界③	$u(L_1, y, z, t) = u(x, L_1, z, t) = 0 (i \geq 0)$
边界④	$u(L_1 + L_2, y, z, t) = 0 \quad u(x, L_1 + L_2, z, t) = 0 (i \geq 0)$

2)三维运移模型(表 2)

表 2 运移模型初始与边界条件

Table 2 The initial and boundary conditions of transport model

初始条件	$c(x, y, z, 0) = 0 ((x, y, z) \in \Omega)$
边界①	$c(x, y, 0, t) = c_0 (t \geq 0, 0 \leq x \leq L_1)$
边界②	$\frac{\partial c(x, y, H_2, t)}{\partial z} = 0 (t \geq 0)$
边界③	$c(L_1, y, z, t) = c_0 c(x, L_1, z, t) = c_0 (t \geq 0)$
边界④	$\frac{\partial c(L_1 + L_2, y, z, t)}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial c(x, L_1 + L_2, z, t)}{\partial y} = 0 (t \geq 0)$

2.2 模型数值求解

由于本模型考虑了渗流场、应力场以及浓度场的多场耦合作用,因此,利用大型多场耦合有限元软件 COMSOL Multiphysics 对模型进行数值模拟求解。COMSOL Multiphysics 是以有限元法为基础,通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真。

利用 COMSOL Multiphysics 对模型控制式(1)、(2)、(4)、(5)进行数值模拟求解,得到黏土层中溶质浓度随时空的运移分布规律。

为求得模型的数值解,做出如下假设:1)堆场底

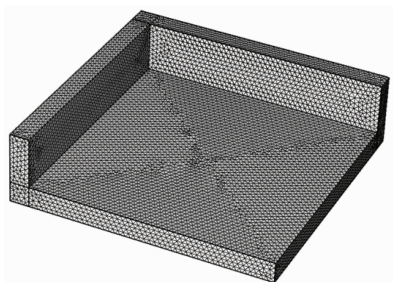


图 2 几何模型及有限单元

Fig. 2 Geometry and finite element

3 计算结果及分析

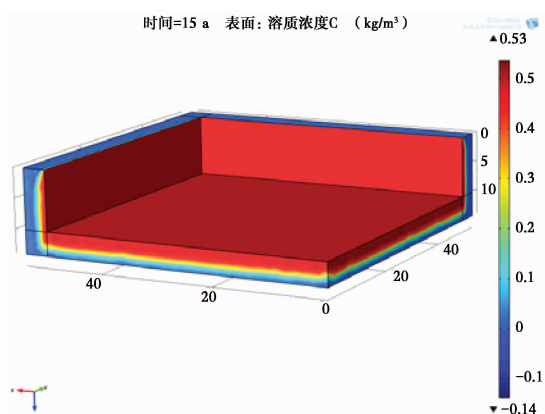
根据所建数学模型,对某一填埋场进行计算(表 3),模拟污染物的种类选为氨氮。

表 3 模型计算的主要参数值

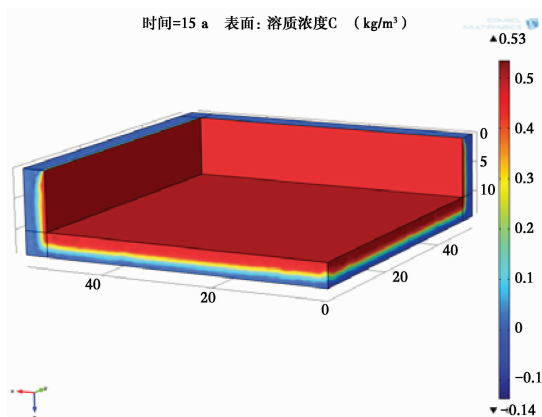
Table 3 The main parameters of model

参 数	取 值
初始源浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.5
初始孔隙比	0.8
土颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2.7×10^3
泊松比	0.3
土体剪切模量/kPa	2.6×10^3
纵向弥散度/m	0.001
横向弥散度/m	0.000 5
分子扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	6.76×10^{-9}
初始渗透系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.7×10^{-9}
纵向水力梯度	5.8
横向水力梯度	2.4

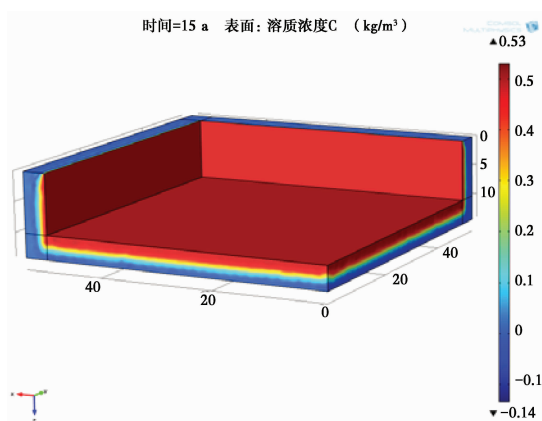
在多种溶质运移模型中,通常较多考虑溶质在黏土层中沿垂直方向的运移,忽略溶质在水平方向上的扩散范围。为了研究溶质在底部防渗土层水平方向的运移特征,模拟了黏土层在不同固结压力作用下 15 年时溶质运移云(图 3),结果表明,溶质在水平向上具有明显的扩散范围,运移距离不可忽略。且随着固结压力的增大,污染羽显示范围逐渐减小。



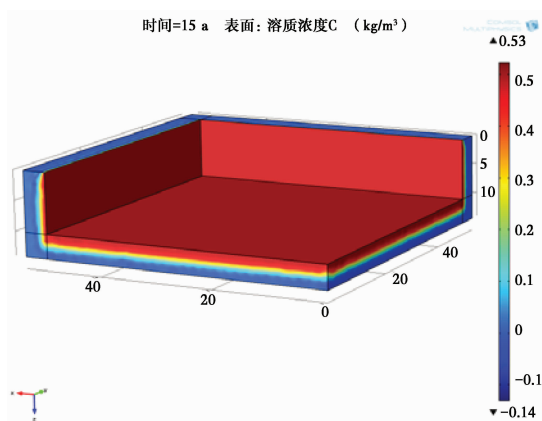
线性吸附 100 kPa 固结压力溶质运移云图



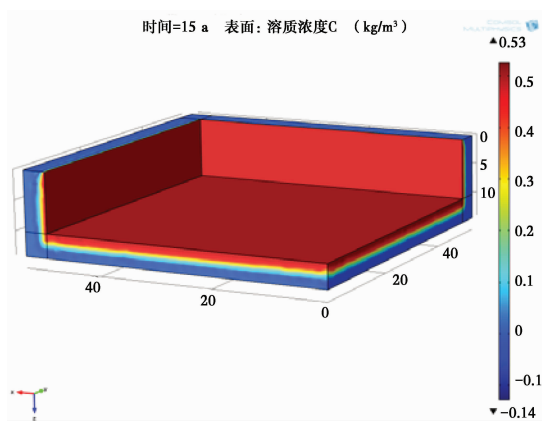
线性吸附 200 kPa 固结压力溶质运移云图



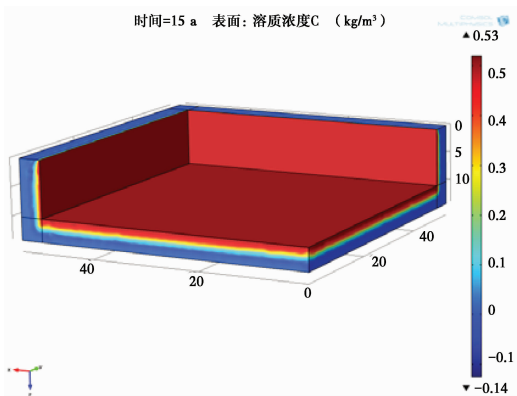
线性吸附 300 kPa 固结压力溶质运移云图



线性吸附 400 kPa 固结压力溶质运移云图



线性吸附 500 kPa 固结压力溶质运移云图



线性吸附 600 kPa 固结压力溶质运移云图

图 3 线性吸附模式下溶质运移云图

Fig. 3 Solute transport contour map with Linear sorption

3.1 固结压力对溶质扩散范围的影响

研究溶质在黏土防渗层中的运移规律,主要目的是为了预测溶质在填埋场规定使用年限内运移的距离,是否穿透了防渗层,会不会对周围环境以及地下水造成二次污染,为废物堆场的风险性评估提供科学依据。

根据《中华人民共和国地下水质量标准》的有关规定,氨氮浓度大于 0.2 mg/L 的地下水视为被污染,故本文定义孔隙水中的溶质浓度超过该限值的范围为溶质运移距离,对于线性吸附模式,不同固结压力作用下溶质在竖直、水平方向运移的距离如表 4 和表 5 所示。

表 4 线性吸附时不同固结压力作用下溶质在竖直 Z 方向运移深度

Table 4 The transport depth in the vertical direction of contaminant concentration with Linear sorption under different consolidation pressures

时间/a	固结压力/kPa						
	0	100	200	300	400	500	600
2	0.85	0.83	0.73	0.67	0.65	0.63	0.58
5	1.88	1.80	1.57	1.48	1.36	1.22	1.14
10	3.28	2.85	2.63	2.55	2.34	2.15	1.98
15	>4.00	3.98	3.51	3.38	3.10	2.88	2.71
20	>4.00	>4.00	>4.00	>4.00	3.92	3.383.18	

表 5 线性吸附时不同固结压力作用下溶质在水平 X(Y)方向运移距离

Table 5 The transport distance in the horizontal direction of contaminant concentration with Linear sorption under different consolidation pressures

时间/a	固结压力/kPa						
	0	100	200	300	400	500	600
2	0.72	0.68	0.66	0.62	0.58	0.52	0.45
5	1.22	1.18	1.12	1.02	0.86	0.78	0.75
10	1.95	1.80	1.68	1.59	1.50	1.45	1.34
15	2.82	2.50	2.31	2.18	2.00	1.91	1.86
20	3.36	3.05	2.83	2.65	2.41	2.34	2.25

表 6 不同情况下溶质运移深度(距离)

Table 6 The transport depth & distance of contaminant in different condition

运移时间/a	竖直 Z 方向			水平 X(Y)方向		
	运移深度/m		R _d /%	运移深度/m		R _d /%
	N	Y		N	Y	
2	0.85	0.58	6.75	0.72	0.45	6.75
5	1.88	1.14	18.5	1.22	0.75	11.75
10	3.28	1.98	32.5	1.95	1.34	15.25
15	>4.00	2.71		2.82	1.86	24
20	>4.00	3.18		3.36	2.25	27.75

注: N 为表示不考虑固结变形(固结压力为 0 kPa); Y 为表示考虑固结变形(固结压力为 600 kPa); R_d 为表示运移深度(距离)减小率。

58

http://qks.cqu.edu.cn

土木工程与环境工程

第 37 卷

从表 4、表 5 可以看出,对于特定的运移年限,固结压力越大,溶质在土层中的运移深度或距离则越小,造成这种现象的原因主要是由于不同固结压力作用下土体压缩变形量不同,导致不同固结压力对溶质扩散规律的影响不同。在外荷载的作用下土体被压缩,孔隙水排出,孔隙率减小,溶质运移通道变窄,而溶质运移中对流、水动力弥散等参数均与孔隙率密切相关,孔隙率变小使得对流弥散作用被削弱,从而阻滞了溶质的运移,并且固结压力越大,土体压缩变形量就越大,对溶质运移的阻滞作用就越强。因此,在相同的运移年限内,溶质运移深度或距离随着固结压力的增大而减小。从表 6 可以更直观

的看出,无论是垂直向还是水平向,防渗层固结变形均会导致溶质运移深度(距离)的减小,并且随着运移时间的增长,运移深度的减小率逐渐增大,表明随着运移时间的增加,压缩变形导致的溶质运移深度(距离)的减小量逐渐增大,即压缩变形对溶质运移过程的影响是持久性的。

将考虑土体固结变形时溶质的运移规律与不考虑土体固结变形时溶质的运移规律(固结压力为零)进行对比,结果表明,对于特定的运移年限,考虑土体固结变形时溶质迁移的距离比不考虑固结变形时溶质迁移的距离要短,对堆场防渗垫层的设计及使用年限的提高具有较强的指导作用。

(a) 不同固结压力作用下 2 a 时运移曲线

(b) 不同固结压力作用下 5 a 时运移曲线

(c) 不同固结压力作用下 10 a 时运移曲线

(d) 不同固结压力作用下 15 a 时运移曲线

(e) 不同固结压力作用下 20 a 时运移曲线

注: $p=0$ - - - - $p=100$ - · - · $p=200$ ····· $p=300$ ——— $p=400$ - - - - $p=500$ - · - · $p=600$

图 4 不同固结压力 (kPa) 作用下溶质竖直方向运移分布规律

Fig. 4 Contaminant concentration distribution with distance in the vertical direction under different consolidation pressures (kPa)

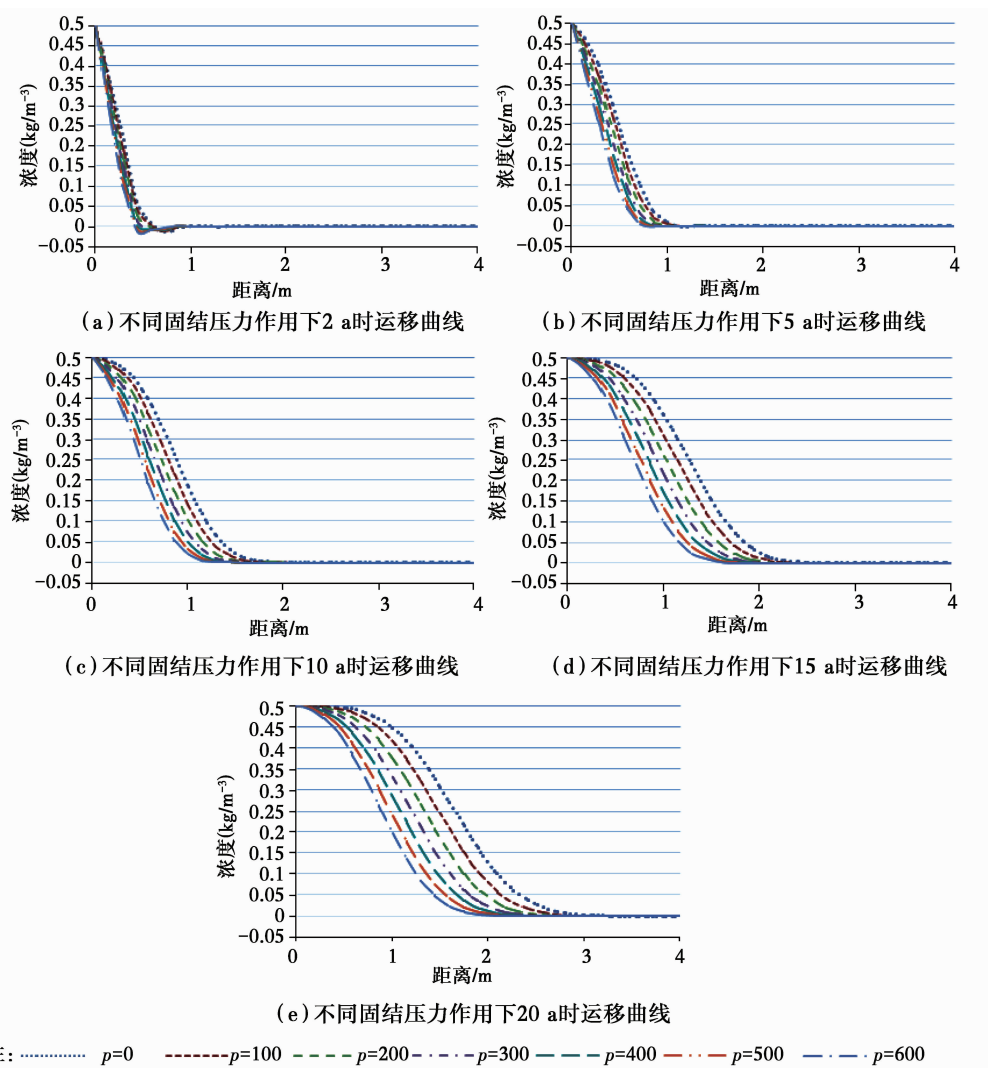


图 5 不同固结压力 (kPa) 作用下溶质水平方向运移分布规律

Fig. 5 Contaminant concentration distribution with distance in the horizontal direction under different consolidation pressures (kPa)

从图 4、图 5 可以看出,对于特定的运移年限,固结压力越大,溶质在土层中的运移深度和水平距离越小,在图 4、图 5 中表现为溶质浓度峰面随着固结压力增大而左移,同时还可以看出,随着运移时间的增加,与不同固结压力对应的溶质浓度峰面逐渐变的稀疏,说明随着运移时间的增加,固结压力取值的不同对溶质运移规律的影响逐渐增大,即相同增量固结压力对应的溶质迁移距离逐渐增大。

3.2 横向水力梯度对溶质水平向运移距离的影响

在计算中,取纵向水力梯度,为分析横向水力梯度对溶质水平向运移距离的影响,改变横向水力梯度,并假定与纵向水力梯度具有一定比例关系,变动方式为:1) $i_x/i_z=1, i_x=5.8$; 2) $i_x/i_z=0.5, i_x=2.9$; 3) $i_x/i_z=0.8, i_x=1.16$ 。上述 3 种情况的计算结果如表 7 所示。

表 7 不同横向水力梯度作用下溶质在水平方向运移距离 m
Table 7 The transport distance of solute in the horizontal direction under different horizontal hydraulic gradient

时间/a	$i_x/i_z (i_z=5.8)$		
	1	0.5	0.2
2	0.75	0.65	0.45
5	1.23	1.07	0.78
10	2.37	1.68	1.26
15	3.22	2.30	1.77
20	3.93	2.88	2.13

模拟的不同横向水力梯度作用下溶质水平向运移如图 6 所示。由图 6 以及表 7 发现,横向水力梯度对溶质水平向运移具有较大影响。随着横向水力梯度的增大,溶质在水平向运移距离也随之增大,对于河流湖泊等疏浚底泥废物堆场,水头可高达到

30 m以上,横向水力梯度也会超过 10,这种实际工
况下溶质在水平向运移距离就比较远,影响范围也

变的很大,故不能将之忽略。在堆场防渗垫层设计
及服役过程中,应考虑这一因素的影响。

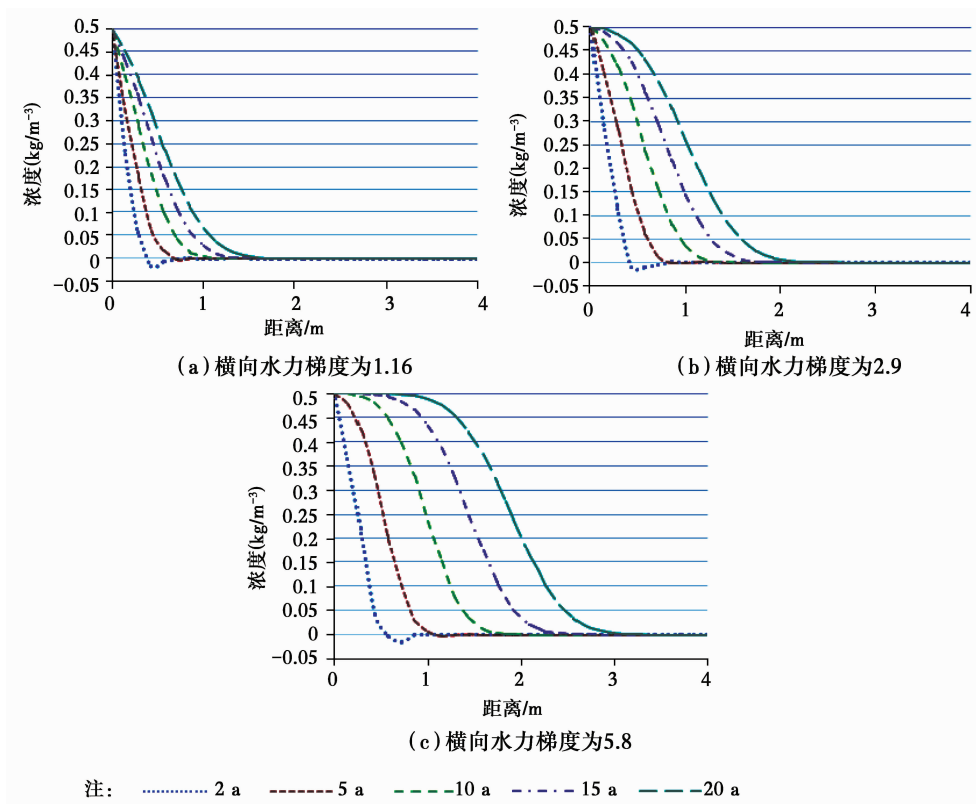


图 6 不同横向水力梯度溶质水平迁移分布规律

Fig. 6 Contaminant concentration distribution with distance in the horizontal direction under different horizontal hydraulic gradient

3.3 模型验证

一方面由于溶质在黏土衬垫中运移速度慢,衬垫设计击穿时间一般达数十年,普通的室内土柱试验,无法进行如此长时间的模拟,另一方面像垃圾填埋场这样比较大的场地,室内实验也是无法进行的,三维实验就更加困难。詹良通等^[20]利用 400 g-t 土工离心机模拟了高水头条件下氯离子在高岭土衬垫中的一维运移及击穿过程。离心机具有缩时缩尺效应,可以大大缩小实验模型的尺寸以及缩短模拟的时间,因此,可以把本文三维模型退化为一维,然后再与詹良通等的实验进行对比验证。

基于此,采用与詹良通等相同的计算条件及参数,对此问题进行了对比计算,计算结果示于图 7,由图 7 可见,对于溶质在变形土体中的运移问题,詹良通等的实验结果与本文的数值模拟结果比较吻合,从而验证了该理论模型的合理性以及计算结果的正确性。

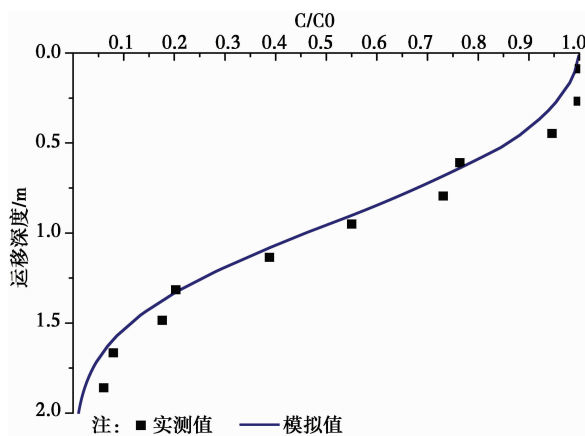


图 7 溶质沿竖直方向的浓度分布(366 d)

Fig. 7 Contaminant concentration distribution with distance in the vertical direction (366 d)

4 结论

1)以孔隙率作为耦合参量,将 Biot 固结理论与溶质运移理论相耦合,建立了溶质在变形多孔介质

中的三维运移模型。采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对三维耦合模型进行数值求解,研究了固结压力与横向水力梯度的变化对溶质浓度随时空分布规律的影响。

2)将考虑土体固结变形时溶质的运移规律与不考虑土体固结变形时溶质的运移规律进行对比,结果表明,对于特定的运移年限,考虑土体固结变形时溶质迁移的距离比不考虑固结变形时溶质迁移的距离要短,对堆场防渗层的设计及使用年限的提高具有较强的指导作用。

3)横向水力梯度对溶质的水平迁移影响较为显著,对于水力梯度较大的河流湖泊等疏浚底泥废物堆场,溶质在水平向的运移范围对周围环境的影响不容忽视。

参考文献:

- [1] 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: 693-722.
- [2] Peters G P, Smith D W. Solute transport through a deforming porous medium [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 683-717.
- [3] Alshawabkeh A N, Rahbar N, Sheahan T, et al. Volume change effects on solute transport in clay under consolidation [C]//Advances in Geotechnical Engineering with Emphasis on Dams, Highway Materials, and Soil Improvement (GPP No. 1) Geo Jordan Conference, 2004: 105-115.
- [4] Alshawabkeh A N, Rahbar N, Sheahan T. A model for contaminant mass flux in capped sediment under consolidation [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2005, 78: 147-165.
- [5] 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.
- [6] Fox P J. Coupled large strain consolidation and solute transport. I: Model development [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 3-15.
- [7] Aarega F, Hayte E. Coupled consolidation and contaminant transport model for simulating migration of contaminants through the sediment and a cap [J]. Applied Mathematical Modeling, 2008, 32 (11): 2413-2428.
- [8] Fox P J, Lee J. Model for consolidation-induced solute transport with nonlinear and nonequilibrium sorption [J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8 (3): 188-198.
- [9] Lewis T W, Pivonka P, Fityus S G, et al. Theoretical investigation of the effects of consolidation on contaminant transport through clay barriers [J]. Numer. Anal. Meth. Geomech, 2009, 33:95-116.
- [10] Witteveen P, Ferrari A, Laloui L. An experimental and constitutive investigation on the chemo-mechanical behavior of a clay [J]. Géotechnique, 2013, 63 (3): 244-255.
- [11] Zhang H J, Jeng D S, Barry D A, et al. Solute transport in nearly saturated porous media under landfill clay liners: A finite deformation approach [J]. Journal of Hydrology, 2013, 479: 189-199.
- [12] 张志红. 疏浚底泥溶质在黏土防渗层中的运移规律研究[D]. 北京: 北京交通大学. 2007.
- Zhang Z H. Research on transport rule of dredged sludge contaminant through clay impermeable layer [D]. Beijing: Beijing University of Technology. 2007. (in Chinese)
- [13] 张志红, 赵成刚, 李涛. 氨氮在黏土防渗层中渗透和运移规律试验研究[J]. 岩土力学. 2008, 29(1): 28-32.
- Zhang Z H, Zhao C G, Li T. Experimental study of infiltration and transportation of ammonia nitrogen through the clayey [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 28-32. (in Chinese)
- [14] 张志红, 李涛, 赵成刚, 等. 考虑土体固结变形的溶质运移模型[J]. 岩土力学. 2008, 29(6):1435-1439.
- Zhang Z H, Li T, Zhao C G, et al. Model of contamination transport considering consolidation deformation of soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1435-1439. (in Chinese)
- [15] Zhang Z, Zhao C, Li T. Experimental study on infiltration and transportation of ammonia nitrogen through the clayey soil layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 28.
- [16] 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 Z H, Xu Z G, Du X L. 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)
- [17] 薛强, 刘磊, 梁冰, 等. 垃圾填埋场沉降变形条件下气-水-固耦合动力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2007, 26(z1): 3473-3478.

- Xue Q, Liu L, Liang B, et al. A gas-hydraulic-solid coupling dynamics model with landfill settlement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(sup1):3473-3478. (in Chinese)
- [18] Taylor D W. Fundamentals of soil mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1948.
- [19] 张问清, 赵锡宏, 宰金珉. 任意力系作用下的层状弹性半空间的有限层分析方法[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(2): 27-42.
- Zhang W Q, Zhao X H, Zai J M. Finite layer analysis for layered and elastic half-space under arbitrary force system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(2):27-42. (in Chinese)
- [20] 詹良通, 曾兴, 李育超, 等. 高水头条件下氯离子击穿高岭土衬垫的离心模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 83-89.
- Zhan L T, Zeng X, Li Y C, et al. Centrifuge modeling for chloridion breaking through kaolin clay liner with high hydraulic head [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 83-89. (in Chinese)

(编辑 胡 玲)