

DOI: 10.11779/CJGE20220980

# 考虑力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维非线性固结与污染物运移耦合模型

江文豪<sup>1,2,3</sup>, 李江山<sup>\*1,3</sup>, 冯晨<sup>1,2,3</sup>

(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. 污染泥土科学与工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 针对力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维固结与污染物运移耦合过程, 考虑了土体压缩性和渗透性的非线性变化, 建立了相应的耦合模型, 并利用有限差分法对该模型进行了求解。通过与有限元软件 COMSOL Multiphysics 计算结果和已有解析解计算结果展开对比分析, 对所建耦合模型正确性进行了验证。基于所建模型, 比较研究了两种假定情况下力学荷载  $p_a$  和渗滤液中污染物浓度  $C_b$  对耦合过程的影响。结果表明: 当忽略非线性压缩和渗透特性时, 力学荷载  $p_a$  的增大会使污染物运移速率降低; 但当考虑非线性压缩和渗透特性时,  $p_a$  的增大会使污染物运移速率增大, 这主要是由于污染物运移过程会受对流和扩散作用的综合影响。污染物浓度  $C_b$  的增大会使沉降量增大, 超孔隙水压力值减小, 也会使得污染物运移速率降低; 相比于忽略非线性的情况, 考虑非线性情况下  $C_b$  对沉降量、超孔隙水压力和污染物运移速率的影响会减弱。

**关键词:** 非线性固结; 污染物运移; 力学-化学荷载; 压实黏土垫层; 耦合模型

中图分类号: TU43; X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2289-10

**作者简介:** 江文豪(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事土体固结与污染物运移耦合方面的理论和试验研究。E-mail: Geo\_Jiang2020@163.com。

## Coupled model for one-dimensional nonlinear consolidation and contaminant transport in a compacted clay liner considering mechanical-chemical loading

JIANG Wenhao<sup>1,2,3</sup>, LI Jiangshan<sup>\*1,3</sup>, FENG Chen<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Province Key Laboratory of Contaminated Sludge and Soil Science and Engineering, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** For the coupled process of one-dimensional consolidation and contaminant transport in a compacted clay liner under mechanical-chemical loading, the corresponding coupled model is established by considering the nonlinear changes of compressibility and permeability of soils, and the finite difference method is adopted for solving the model. The correctness of the proposed coupled model is validated by comparing its results with the calculation ones of the finite element software COMSOL Multiphysics and the existing analytical solution. Based on the proposed model, the effects of mechanical loading  $p_a$  and contaminant concentration  $C_b$  in leachate on the coupled process under two assumptions are compared and investigated. The results show that when the nonlinear compressibility and permeability characteristics are neglected, the increase of  $p_a$  reduces the transport rate of contaminants. However, when the nonlinear compressibility and permeability characteristics are considered, the increase of  $p_a$  leads to the increase of transport rate, which is mainly due to the comprehensive effects of advection and diffusion on the transport process. The increase of  $C_b$  increases the settlement, reduces the excess pore water pressure and decreases the transport rate of contaminants. Compared with the case of ignoring nonlinearity, the effects of  $C_b$  on the settlement, excess pore water pressure and transport rate of contaminants are reduced when the nonlinearity is considered.

**Key words:** nonlinear consolidation; contaminant transport; mechanical-chemical loading; compacted clay liner; coupled model

**基金项目:** 国家重点研发计划课题 (2019YFC1804002); 国家自然科学基金项目 (42177163, 51979267)

**收稿日期:** 2022-08-01

**\*通信作者** (E-mail: jsli@whrsm.ac.cn)

## 0 引言

黏性土体由于具有渗透性低、廉价、易于获取的优点,工程上常被选作为污染场地如垃圾填埋场、固废处置场的防渗阻隔屏障材料<sup>[1-3]</sup>。黏性土体的防渗性能除与黏土颗粒性质有关外,还与其压实程度密切相关。为提高黏性土体的防渗性能,其在使用前通常需进行压密处理。尽管如此,危害性较大的污染物仍会通过通过对流、扩散等方式在压实黏土垫层中发生运移,从而对地下水和周围土体造成污染<sup>[3-7]</sup>。因此,有必要对污染物的运移规律进行研究,以合理的评估压实黏土垫层的服役性能。

近几十年来,考虑到堆填的固体废弃物会使压实黏土发生变形,许多学者在探究压实黏土垫层中污染物的运移特性时融入了固结变形的影响<sup>[5-12]</sup>。例如,Smith<sup>[6]</sup>建立了准稳态状态下黏土垫层中一维固结与污染物运移耦合模型,并分析了固结对污染物运移规律的影响;Lewis等<sup>[9-10]</sup>基于大变形理论发展了黏土垫层中一维固结与污染物运移的理论模型,该模型可考虑固结参数随孔隙比变化;李江山等<sup>[12]</sup>考虑到污染场地内部的生化反应会使压实黏土垫层中的温度发生变化,研究了非等温分布条件对固结与污染物运移耦合过程的影响。然而,上述研究大多针对有机污染物,且忽略了污染物运移过程中化学渗透导致的黏土体积及结构变化<sup>[3, 13-16]</sup>。实际上,在复杂工程环境下,压实黏土垫层的固结变形不仅会受力学荷载影响,还会受污染物浓度变化引起的化学荷载影响<sup>[3, 14-20]</sup>。因此,有必要研究考虑力学-化学荷载影响下压实黏土垫层中污染物的一维运移过程。

Kaczmarek等<sup>[14-15]</sup>建立了黏土中一维化学-力学固结与污染物运移的耦合模型,该模型可考虑污染物浓度变化对沉降量影响。在Kaczmarek等<sup>[14-15]</sup>研究基础上,Peters等<sup>[16]</sup>探究了对流运移对黏土中一维化学-力学固结过程的影响。基于Peters等<sup>[16]</sup>的研究,张志红等<sup>[3]</sup>考虑了固结变形对污染物运移参数如扩散系数的影响,并发展了黏土垫层中一维化学-力学固结与污染物运移耦合模型。进一步,Zhang等<sup>[19]</sup>推导得到了考虑温度影响下黏土垫层中一维化学-力学固结与污染物运移的耦合模型。田改垒等<sup>[20]</sup>分析了考虑一维化学-力学固结情况下,热效应对压实黏土垫层中污染物运移规律的影响。这些研究促进了考虑力学-化学荷载影响下压实黏土垫层中一维固结与污染物运移耦合理论的发展。然而,上述研究大多忽略了固结过程黏土压缩性和渗透性随孔隙比的非线性变化。

在垃圾填埋场等污染场地运行过程中,压实黏土

垫层上部通常会产生较大堆填荷载<sup>[21-23]</sup>。在该种情况下,考虑压缩性和渗透性随应力增大而降低可更为准确的描述黏土固结过程<sup>[9-10, 24]</sup>。Peters等<sup>[7]</sup>通过对比分析发现,相比于非线性的压缩性关系,假定体积压缩系数为常数会高估污染物运移的击穿时间。Li等<sup>[25]</sup>研究指出,上部荷载的增大会使黏土压缩性显著下降。此外,试验研究表明,固结过程中黏土体积压缩系数和渗透系数会随孔隙比发生非线性变化<sup>[26-28]</sup>。因此,为更为合理的分析和评价考虑力学-化学荷载影响下压实黏土垫层中一维固结与污染物运移的耦合过程,有必要融入黏土的非线性压缩和渗透特性。

本文通过引入非线性压缩和渗透关系,推导得到了非线性固结和污染物运移的控制方程,并结合相应的初始条件和边界条件建立了考虑力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维非线性固结与污染物运移耦合模型。基于有限差分法,对该耦合模型进行了求解。通过将所建耦合模型的计算结果与其他数值方法和已有解析解的计算结果进行比较,验证了模型的正确性。最后,利用所建模型,对比分析了两种假定情况下一维固结与污染物运移的耦合行为。

## 1 耦合模型的建立

### 1.1 计算简图和基本假定

为建立考虑力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维非线性固结与污染物运移的耦合模型,这里参考Peters等<sup>[16]</sup>研究,给出了相应的计算简图,如图1。在图1中,从上至下依次为堆填体、一级渗滤液收集系统(primary leachate collection system,简称PLCS)、渗滤液、压实黏土垫层以及二级渗滤液收集系统(secondary leachate collection system,简称SLCS)。对于渗滤液,其水头大小记为 $h_0$ ,污染物浓度记为 $C_0$ 。对于压实黏土垫层,其厚度记为 $L$ 。此外,图1中建立了垂直向下的坐标系 $z$ 。

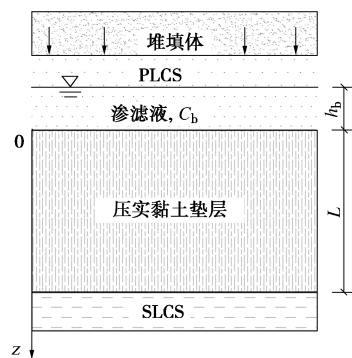


图1 耦合模型的计算简图

Fig. 1 Schematic diagram of coupled model

为发展得到相应的耦合模型,在已有相关理论和

试验研究的基础上<sup>[3, 13-18]</sup>, 作如下假定: ①土体是均质、各向同性, 且完全饱和的; ②污染物是可溶解的无机化学物; ③污染物浓度变化对孔隙水(液相)密度和土颗粒(固相)密度的影响可忽略; ④固结变形和污染物运移只发生在竖直方向; ⑤土体的固结变形满足小应变假定; ⑥液相的渗流过程满足广义的 Darcy 定律; ⑦考虑固结过程中黏土的压缩性和渗透性随孔隙比的减小发生非线性变化。

## 1.2 非线性固结控制方程

在压实黏土垫层一维固结过程中, 液相和固相的质量守恒方程有<sup>[6-7]</sup>:

$$\frac{\partial(nv_t\rho_f)}{\partial z} + \frac{\partial(n\rho_f)}{\partial t} = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial[(1-n)v_s\rho_s]}{\partial z} + \frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} = 0. \quad (1b)$$

式中:  $n$  为压实黏土垫层的孔隙率;  $v_t$  为液相的流动速度;  $\rho_f$  为液相的密度;  $v_s$ ,  $\rho_s$  分别为固相的移动速度和密度;  $t$  为时间。

考虑到污染物浓度的变化对孔隙水和土颗粒密度的影响通常可忽略<sup>[16-18]</sup>, 式(1)可进一步改写为

$$\frac{\partial(nv_t)}{\partial z} + \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial[(1-n)v_s]}{\partial z} - \frac{\partial n}{\partial t} = 0. \quad (2b)$$

对式(2)进行整理可得:

$$\frac{\partial v_s}{\partial z} + \frac{\partial v_d}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

式中:  $v_d$  为达西流速,  $v_d = n(v_t - v_s)$ 。

根据广义的达西定律, 在力学-化学荷载作用下, 达西流速  $v_d$  的表达式为<sup>[3, 16]</sup>

$$v_d = v_u + v_\pi. \quad (4)$$

式中:

$$v_u = -\frac{k_v}{\rho_f g} \frac{\partial u}{\partial z}; \quad (5a)$$

$$v_\pi = \frac{k_\pi}{\rho_f g} \frac{\partial \pi}{\partial z} = \omega \frac{k_v}{\rho_f g} \frac{\partial \pi}{\partial z}. \quad (5b)$$

式中:  $v_u$ ,  $v_\pi$  分别为因力学荷载和化学荷载产生的达西流速;  $k_v$  为压实黏土垫层的渗透系数;  $g$  为重力加速度;  $u$  为超孔隙水压力;  $k_\pi$  为化学渗透系数,  $k_\pi = \omega k_v$ ,  $\omega$  为化学渗透效率系数,  $\omega$  为处于 0~1 的常数;  $\pi$  为化学渗透压力,  $\pi = RTC$ ,  $R$  为通用气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ,  $T$  为绝对温度,  $C$  为压实黏土垫层中无机污染物的摩尔质量浓度。

在压实黏土垫层固结变形过程中, 渗透系数会随孔隙比的减小发生非线性变化<sup>[24-25]</sup>:

$$e = e_0 + C_k \lg(k_v/k_{v0}). \quad (6)$$

式中:  $e_0$ ,  $e$  分别为初始孔隙比和孔隙比;  $k_{v0}$  为初始渗透系数;  $C_k$  为土体的渗透指数。在小应变假定下,  $e = n/(1-n_0)$ , 其中  $n_0$  为初始孔隙率。

因此, 渗透系数与孔隙比的变化关系可改写为

$$k_v = k_{v0} \cdot 10^{\frac{e-e_0}{C_k}}. \quad (7)$$

根据渗流连续性条件, 液相的达西渗流会使得压实黏土垫层发生固结变形, 则有

$$\frac{\partial v_d}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_m}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_\pi}{\partial t}. \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_\pi$  分别为总应变、力学荷载引起的应变和化学荷载引起的应变。

对于力学荷载引起的应变  $\varepsilon_m$ , 有<sup>[3, 16-18]</sup>

$$\frac{\partial \varepsilon_m}{\partial t} = m_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t}. \quad (9)$$

式中:  $m_v$  为土体中力学荷载引起的体积压缩系数;  $\sigma'$  为有效应力。

对于化学荷载引起的应变  $\varepsilon_\pi$ , 有<sup>[3, 16-18]</sup>

$$\frac{\partial \varepsilon_\pi}{\partial t} = m_\pi \frac{\partial \pi}{\partial t}. \quad (10)$$

式中:  $m_\pi$  为土体中化学荷载引起的体积改变系数。

考虑到压实黏土衬垫固结变形过程通常呈现非线性, 则在力学荷载下压缩性的变化关系为<sup>[24-25]</sup>

$$e = e_0 - C_c \lg(\sigma'/\sigma'_0). \quad (11)$$

式中:  $\sigma'_0$  为初始有效应力;  $C_c$  为压缩指数。

结合式(11), 根据小应变假定下体积压缩系数  $m_v$  的定义,  $m_v$  可写为<sup>[25-27]</sup>

$$m_v = \frac{C_c}{(1+e_0)\ln 10 \cdot \sigma'}. \quad (12)$$

结合式(4), (8)~(10)可得

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ -\frac{k_v}{\rho_f g} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \omega \frac{\partial \pi}{\partial z} \right) \right] = m_v \left( \zeta \frac{\partial \pi}{\partial t} + \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \right). \quad (13)$$

式中:  $\zeta = m_\pi/m_v$ 。一般情况下, 可认为  $\zeta$  为常数<sup>[16]</sup>。

根据有效应力原理, 并参考张志红等<sup>[3]</sup>研究, 有

$$\sigma' = \sigma'_0 + p_u + h_b \rho_f g - u. \quad (14)$$

式中:  $p_u$  为施加的力学荷载<sup>[3]</sup>。

进一步, 式(13)可改写为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k_v}{\rho_f g} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \omega RT \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] = m_v \left[ \frac{\partial u}{\partial t} - \zeta RT \frac{\partial C}{\partial t} \right]. \quad (15)$$

式(15)即为考虑力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维非线性固结的控制方程。

参考 Peters 等<sup>[16]</sup>研究, 固结变形会使得土体的孔隙率减小, 进而使得压实黏土垫层发生沉降。考虑到土体的压缩性会随时间和空间位置发生变化, 在任意时刻, 沉降量的表达式可写为

$$S_s = \int_0^t \left[ \int_0^L \left( -\frac{\partial n}{\partial t} \right) dz \right] dt \quad (16)$$

$$-\frac{\partial n}{\partial t} = m_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + m_v \zeta RT \frac{\partial C}{\partial t} \quad (17)$$

式中:  $S_s$  为任意时刻的沉降量。

### 1.3 污染物运移控制方程

对于污染物在压实黏土垫层中的运移过程, 根据 Peters 等<sup>[7]</sup>研究, 液相中污染物运移的连续方程为

$$-\frac{\partial J_f}{\partial z} = \frac{\partial(nC)}{\partial t} + s \quad (18)$$

式中:  $J_f$  为液相中污染物的运移通量;  $s$  为单位体积污染物的汇项<sup>[6-7]</sup>。

对于液相中污染物的运移过程, 考虑到黏性土具有半透膜特性<sup>[3]</sup>, 因而液相中污染物运移通量  $J_f$  的表达式可写为<sup>[16, 18-19]</sup>

$$J_f = -(1-\omega)nD_e \frac{\partial C}{\partial z} + (1-\omega)v_u C + v_\pi C \quad (19)$$

式中:  $D_e$  为污染物在压实黏土垫层中的有效扩散系数,  $D_e = \tau D_0$ ;  $D_0$  为污染物在液相中的自由扩散系数;  $\tau$  为弯曲因子;  $\tau = n^\beta$ ,  $\beta$  为经验系数<sup>[29-30]</sup>。

相似地, 根据 Peters 等<sup>[7]</sup>研究, 固相中污染物运移的连续方程可写为

$$-\frac{\partial J_s}{\partial z} = \frac{\partial[(1-n)\rho_s S]}{\partial t} - s \quad (20)$$

式中:  $J_s$  为固相中污染物的运移通量;  $\rho_s$  为土颗粒的密度;  $S$  为单位质量土颗粒所吸附的污染物质量;  $s$  为单位体积污染物的源项<sup>[6-7]</sup>。

对于固相中污染物运移通量  $J_s$ , 其表达式为<sup>[18]</sup>

$$J_s = (1-n)v_s \rho_s S \quad (21)$$

对于土颗粒对污染物的吸附作用, 参考现有研究<sup>[3, 18-19]</sup>, 采用等温线性吸附模型来描述:

$$S = K_d \cdot C \quad (22)$$

式中:  $K_d$  为线性吸附系数。

结合上述关系式, 整理式 (18), (20) 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(nR_d C)}{\partial t} = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[ (1-\omega)nD_e \frac{\partial C}{\partial z} - (1-\omega)v_u C - v_\pi C - (1-n)v_s \rho_s K_d C \right] \end{aligned} \quad (23)$$

式中:  $R_d = 1 + (1-n)\rho_s K_d / n$ ,  $R_d$  为阻滞因子, 其值反映了固相土颗粒对污染物的吸附作用<sup>[1, 4]</sup>。

式 (23) 即为压实黏土垫层中污染物一维运移的控制方程。

### 1.4 初始条件和边界条件

一般认为, 在初始时刻, 压实黏土垫层未受污染。因此, 结合压实黏土垫层上部的加荷条件, 初始条件

可写为<sup>[3, 16]</sup>

$$u(z, 0) = p_u \quad (24a)$$

$$C(z, 0) = 0 \quad (24b)$$

考虑到渗滤液的水头高度为  $h_b$ , 其污染物浓度为  $C_b$ , 则相应的上部边界条件可写为<sup>[3]</sup>

$$u(0, t) = h_b \rho_f g \quad (25a)$$

$$C(0, t) = C_b \quad (25b)$$

压实黏土垫层底部为二级渗滤液收集系统, 则相应的底部边界条件可写为

$$u(L, t) = 0 \quad (26a)$$

$$C(L, t) = 0 \quad (26b)$$

## 2 耦合模型的解

对于本文所建一维非线性固结与污染物运移的耦合模型, 考虑到模型中相关参数如渗透系数和有效扩散系数会随时间和空间发生变化。因此, 以下将采用有限差分法对耦合模型进行求解<sup>[12, 16]</sup>。

### 2.1 固结控制方程的有限差分格式

设  $\Delta z$  和  $\Delta t$  分别为计算空间步长和时间步长, 并将其在空间坐标和时间坐标分别进行  $I$  等分和  $K$  等分, 则有  $z_i = i\Delta z$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, I$ ,  $\Delta z = L/I$ ,  $t_k = k\Delta t$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, K$ ,  $\Delta t = t_0/K$ ,  $t_0$  为给定时间。因此, 控制方程式 (15) 修正的隐式差分格式可写为

$$\begin{aligned} X_{i+1/2}^k \frac{u_{i+1}^{k+1} - u_i^{k+1}}{\Delta z^2} + X_{i-1/2}^k \frac{u_{i-1}^{k+1} - u_i^{k+1}}{\Delta z^2} - \omega RT X_{i+1/2}^k \frac{C_{i+1}^k - C_i^k}{\Delta z^2} - \\ \omega RT X_{i-1/2}^k \frac{C_{i-1}^k - C_i^k}{\Delta z^2} = m_{v,i}^k \left( \frac{u_i^{k+1} - u_i^k}{\Delta t} - \zeta RT \frac{C_i^k - C_i^{k-1}}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

在式 (27) 中, 相关系数的表达式为

$$X_i^k = \frac{k_{v0}}{\rho_f g} \cdot 10^{\frac{e_i^k - e_0}{C_i^k}} \quad (28a)$$

$$X_{i\pm 1/2}^k = (X_i^k + X_{i\pm 1}^k) / 2 \quad (28b)$$

$$m_{v,i}^k = \frac{C_c}{(1 + e_0) \ln 10 \cdot \sigma_i'^k} \quad (28c)$$

$$\sigma_i'^k = \sigma_0' + p_u + h_b \rho_f g - u_i^k \quad (28d)$$

初始条件和边界条件的差分格式为

$$u_i^0 = p_u \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} u_0^k &= h_b \rho_f g \\ u_I^k &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

此外, 在  $t_k = k\Delta t$  时刻, 沉降量  $S_s$  的差分格式为

$$\begin{aligned} S_s^k = S_s^{k-1} + \\ \sum_{r=1}^I \frac{\Delta z}{2} (m_{v,r-1/2}^{k-1} + m_{v,r-1/2}^k) [(\sigma_{r-1/2}^{rk} - \sigma_{r-1/2}^{rk-1}) + \\ \zeta RT (C_{r-1/2}^k - C_{r-1/2}^{k-1})] \end{aligned} \quad (31)$$

## 2.2 运移控制方程的有限差分格式

相似地, 参考式 (27) 中所采用的差分格式, 控制方程式 (23) 修正的隐式差分格式可写为

$$\frac{(A_i^{k+1}C_i^{k+1} - A_i^k C_i^k)}{\Delta t} = B_{i+1/2}^k \frac{C_{i+1}^{k+1} - C_i^{k+1}}{\Delta z^2} + B_{i-1/2}^k \frac{C_{i-1}^{k+1} - C_i^{k+1}}{\Delta z^2} - E_i^k \frac{(C_{i+1}^{k+1} - C_{i-1}^{k+1})}{2\Delta z} \quad (32)$$

在式 (32) 中, 相应系数的差分表达式为

$$A_i^k = n_i^k R_{d,i}^k = n_i^k + (1 - n_i^k) \rho_s K_d \quad (33a)$$

$$n_i^k = n_i^{k-1} - \frac{(m_{v,i}^{k-1} + m_{v,i}^k)[(\sigma_i^{k-1} - \sigma_i^{k-1}) + \zeta RT(C_i^k - C_i^{k-1})]}{2} \quad (33b)$$

$$B_i^k = (1 - \omega)(n_i^k)^{\beta+1} D_0 \quad (33c)$$

$$B_{i\pm 1/2}^k = (B_i^k + B_{i\pm 1}^k)/2 \quad (33d)$$

$$E_i^k = (1 - \omega)v_{u,i}^k + v_{\pi,i}^k + (1 - n_i^k)v_{s,i}^k \rho_s K_d \quad (33e)$$

相应地, 初始条件和边界条件的差分格式为

$$C_i^0 = 0 \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} C_0^{k+1} &= C_b \\ C_I^{k+1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

需说明的是, 出于简化考虑, 一些参数的差分格式并未给出, 如因力学荷载产生的达西流速  $v_u$  和因化学荷载产生的达西流速  $v_\pi$  等, 但这些参数的表达式均可根据理论模型的推导过程获得。值得注意的是, 在压实黏土垫层的边界处, 参数的差分格式需结合相应边界条件确定。利用上述差分格式和求解条件即对所建耦合模型展开运算。此外, 对于考虑力学-化学荷载下压实黏土垫层中的非线性固结过程与污染物运移过程, 考虑到污染物的运移过程通常较慢, 这里采用了先对非线性固结过程进行差分求解, 后对污染物运移过程进行差分求解的计算方法。因此, 在式 (27) 中, 当  $k=0$  时, 可取  $c_i^0 = c_i^{-1}$ 。对于其他参数, 同该方法进行取值。

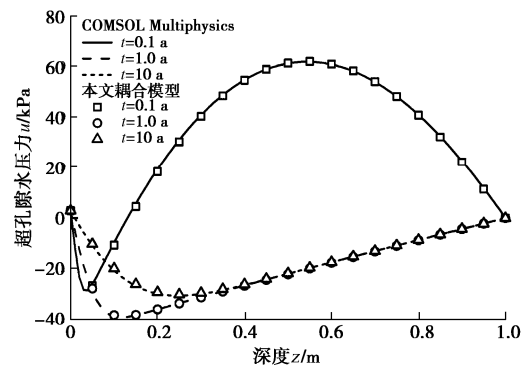
## 3 耦合模型的验证

对于土体中一维固结与污染物运移的耦合过程, 除采用有限差分法进行研究外, 也可利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 展开分析<sup>[18-19]</sup>。因此, 这里可将所建耦合模型有限差分解的计算结果与 COMSOL Multiphysics 的计算结果进行比较, 以验证所建模型的正确性。此外, 当不考虑污染物运移时, 所建耦合模型将退化为传统的一维非线性固结模型。Li 等<sup>[31]</sup>求解获得了土体一维非线性固结近似解析解, 并指出  $C_0/C_k$  越接近于 1, 近似解析解与精确解越为接近。因此可对所建耦合模型进行简化, 并将其有限差分解与 Li

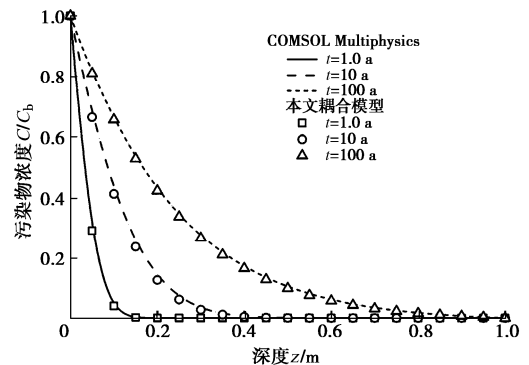
等<sup>[31]</sup>近似解析解展开对比, 以进一步说明所建模型的合理性。在后续分析中, 参考 Peters 等<sup>[16]</sup>研究, 取 NaCl 溶液为例, 其摩尔质量为 0.0585 kg/mol。

### 3.1 与 COMSOL Multiphysics 的计算结果对比

如图 2 为本文所建耦合模型有限差分解计算结果与 COMSOL Multiphysics 计算结果的对比情况, 其中采用了表 1 中所示的计算参数。从图 2 可知, 在不同时刻, 基于两种方法计算所得的超孔隙水压力分布曲线和污染物浓度分布曲线均具有很好的一致性, 这既验证了本文所建模型的正确性, 也表明所建耦合模型可用于研究考虑力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维非线性固结与污染物运移的耦合过程。



(a) 超孔隙水压力分布



(b) 污染物浓度分布

图 2 本文所建耦合模型与 COMSOL Multiphysics 的对比情况

Fig. 2 Comparison between proposed coupled model and COMSOL Multiphysics

### 3.2 与 Li 等<sup>[31]</sup>近似解析解的计算结果对比

为将本文所建模型有限差分解与 Li 等<sup>[31]</sup>近似解析解进行对比, 这里取表 1 中所示参数, 设定渗滤液中污染物浓度  $C_b=0 \text{ mol/m}^3$ , 渗滤液水头  $h_b=0 \text{ m}$ , 并假定  $C_0$  保持不变。如图 3 为不同  $C_0/C_k$  下本文所建耦合模型有限差分解计算结果与 Li 等<sup>[31]</sup>近似解析解计算结果的对比情况。从图 3 可以看出, 在不同的  $C_0/C_k$  下, 两种方法计算所得的超孔隙水压力分布曲线与沉降量随时间变化曲线均较为吻合, 且当  $C_0/C_k$  为 0.99 时, 两种方法所得结果具有很高吻合度, 这进一步说明了本文所建耦合模型的合理性。

表 1 耦合模型的计算参数  
Table 1 Parameters for proposed coupled model

参数	取值
厚度 $L/\text{m}$	1.0
初始孔隙率 $n_0$	0.5
液相密度 $\rho_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1000
固相密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2600
渗透指数 $C_k$	0.198
压缩指数 $C_c$	0.13
初始有效应力 $\sigma'_0/\text{kPa}$	60
渗透系数 $k_{\text{vo}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$1.0\times 10^{-10}$
力学荷载 $p_u/\text{kPa}$	100
渗滤液水头 $h_b/\text{m}$	0.3
比值 $\zeta$	0.005
化学渗透效率系数 $\omega$	0.005
温度 $T/\text{K}$	293.15
污染物浓度 $C_b/(\text{kmol}\cdot\text{m}^{-3})$	4
线性吸附系数 $K_d/(\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	$0.8142\times 10^{-3}$
经验系数 $\beta$	1.82
自由扩散系数 $D_0/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$5.0\times 10^{-10}$

注：表中参数的取值源于参考文献[3, 16~19, 24, 30]。

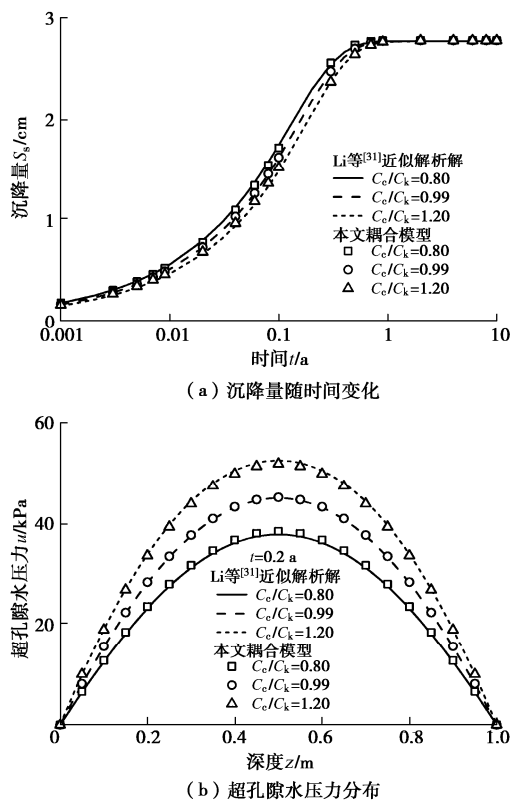


图 3 本文所建耦合模型与 Li 等<sup>[31]</sup>近似解析解的对比情况  
Fig. 3 Comparison between proposed coupled model and Li et al.'s approximate analytical solutions

4 模拟分析

对于压实黏土垫层中一维非线性固结与污染物运移耦合过程，以往研究大多未考虑压缩性和渗透性的

非线性变化<sup>[3, 14-16]</sup>。因此，为认识非线性压缩和渗透特性对该物理过程的影响，可基于表 1 中所示的物理力学参数展开模拟分析，并与忽略非线性压缩和渗透特性的情况（假定体积压缩系数和渗透系数始终为初始值）进行比较。

4.1 力学荷载的影响

图 4 展示了不同力学荷载  $p_u$  下压实黏土垫层中沉降量随时间的变化情况（图 4 中忽略或考虑非线性是指忽略或考虑土体的非线性压缩和渗透特性，下同）。从图 4 可知，无论是否考虑非线性压缩和渗透特性， $p_u$  越大，同一时间下沉降量越大。与此同时， $p_u$  的增大也使得忽略和考虑非线性两种情况下沉降量的差值增大。例如，表 2 给出了  $t=10\text{ a}$  时不同力学荷载  $p_u$  下的沉降量。从表 2 可知，当  $p_u=50\text{ kPa}$  时，两种假定情况下的沉降差为 1.29 cm；当  $p_u=150\text{ kPa}$  时，两种假定情况下的沉降差达 4.39 cm。这说明，忽略非线性压缩和渗透特性不利于准确预测压实黏土垫层的固结变形特性，尤其在力学荷载较大的情况下。

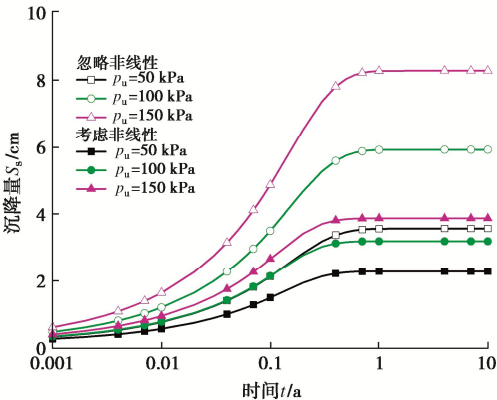


图 4 不同力学荷载  $p_u$  下沉降量的变化  
Fig. 4 Variation of settlement with time under different  $p_u$

表 2  $t=10\text{ a}$  时不同力学荷载  $p_u$  下的沉降量

Table 2 Settlements under different $p_u$ when $t=10\text{ a}$			
力学荷载 $p_u/\text{kPa}$	忽略非线性/ cm	考虑非线性/ cm	沉降差/ cm
50	3.57	2.28	1.29
100	5.92	3.19	2.73
150	8.27	3.88	4.39

图 5 描述了力学荷载  $p_u$  对污染物浓度分布情况的影响。从图 5 可知，当忽略非线性时， $p_u$  越大，同一时间下污染物浓度越低，这主要是由于固结变形会使土体孔隙率降低，从而使有效扩散系数减小。然而，当考虑非线性时， $p_u$  的增大反而使得同一时间下污染物浓度升高。出现这一现象的主要原因在于，在考虑非线性情况下，固结变形不仅会使有效扩散系数减小，也会使化学渗透系数等参数降低。由于化学渗透系数降低会减弱化学荷载产生的达西流速，且该达西流速



的方向是向上的, 因而该达西流速的减小会使阻碍污染物向下运移的作用减弱。对于污染物的运移过程, 其会受对流和扩散作用的综合影响<sup>[3, 16-19]</sup>。在考虑非线性固结特性下, 有效扩散系数减小对运移过程的影响较小, 化学渗透系数降低对运移过程的影响更为显著。此外, 对比考虑非线性和忽略非线性两种情况可知, 考虑非线性情况下污染物浓度较高, 其原因主要在于, 考虑非线性情况下孔隙率的减小量较小。基于上述分析可知, 忽略压实黏土垫层非线性压缩和渗透特性会低估污染物的运移速率<sup>[7]</sup>。

总的来说, 力学荷载  $p_u$  越大, 同一时间下压实黏土垫层沉降量越大。当忽略非线性时,  $p_u$  增大会使污染物浓度降低, 但考虑非线性时,  $p_u$  增大会使污染物浓度增大。相比于忽略非线性情况, 考虑非线性情况下沉降量会减小, 污染物运移速率会加快。

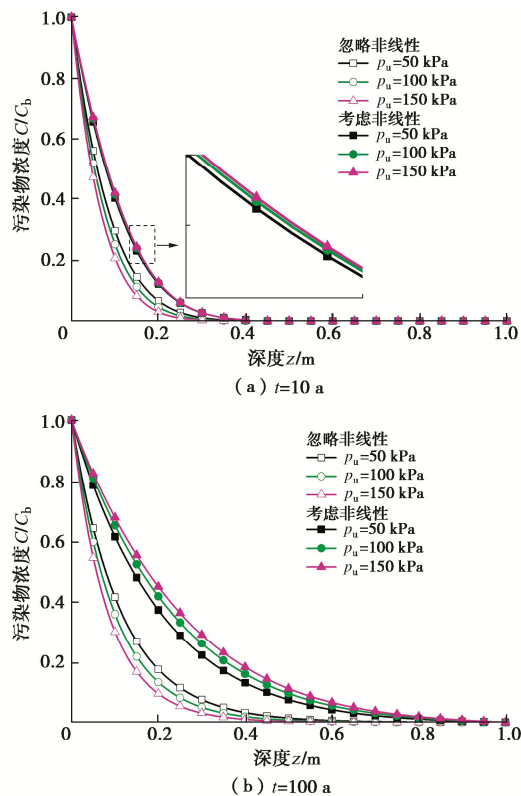


图 5 不同力学荷载  $p_u$  下污染物浓度的分布

Fig. 5 Distribution of contaminant concentration under different  $p_u$

#### 4.2 渗滤液中污染物浓度的影响

图 6 所示为不同渗滤液中污染物浓度  $C_b$  下压实黏土垫层中沉降量随时间变化情况。从图 6 可知,  $C_b$  越高, 同一时间下沉降量越大, 这主要是污染物浓度升高会增强土体的化学固结效应<sup>[3, 16]</sup>。对比忽略和考虑非线性两种情况可以看出, 在忽略非线性情况下,  $C_b$  对沉降量影响更大。出现这一现象的主要原因在于, 在忽略非线性情况下, 土体的压缩性更大。

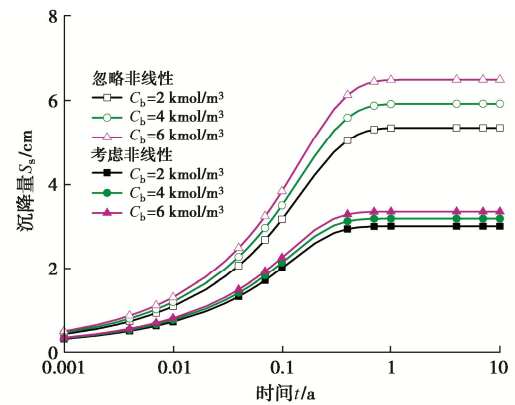
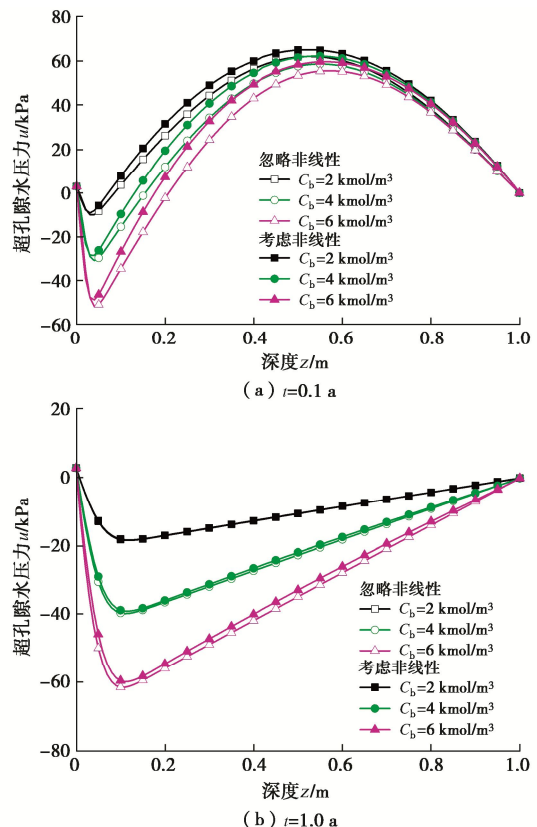


图 6 不同渗滤液中污染物浓度  $C_b$  下沉降量的变化

Fig. 6 Variation of settlement with time under different  $C_b$

图 7 展示了不同渗滤液中污染物浓度  $C_b$  下超孔隙水压力的分布情况。从图 7 可以看出, 对于忽略和考虑非线性两种情况, 同一时间下超孔隙水压力均随  $C_b$  的增大而减小, 且当时间较大时, 如  $t=10$  a 时, 土体中的超孔隙水压力基本变为负值, 这主要是由于化学荷载会使土体中的孔压降低, 从而增大应力<sup>[3, 16]</sup>。与此同时, 对比不同时间下超孔隙水压力的分布规律可知, 负的超孔隙水压力绝对值呈现先增大, 后减小的趋势, 这主要在于前期污染物浓度增大速率较快, 后期的浓度分布逐渐趋于稳定 (结合控制方程式 (15) 开展分析)。与此同时, 相比于忽略非线性情况, 考虑非线性情况下土体中的超孔隙水压力较大, 这可能与压缩性降低会减弱化学荷载产生的固结效应有关。



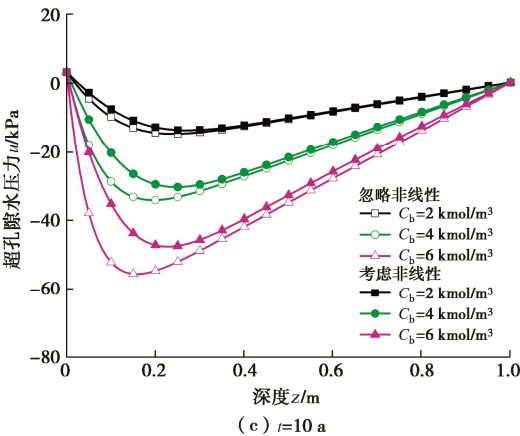


图 7 不同渗滤液中污染物浓度  $C_b$  下超孔隙水压力的分布  
Fig. 7 Distribution of excess pore water pressure under different  $C_b$

图 8 描述了渗滤液中污染物浓度  $C_b$  对污染物浓度分布情况的影响。从图 8 可知,  $C_b$  越大, 同一时间下污染物的相对浓度越低, 这说明污染物浓度的升高减慢了污染物运移速率, 这一现象主要与污染物浓度升高会增大固结变形量有关。此外, 对比可知, 在  $C_b$  相同的情况下, 考虑非线性情况时污染物浓度较高, 且不同  $C_b$  下污染物浓度的差异较小。

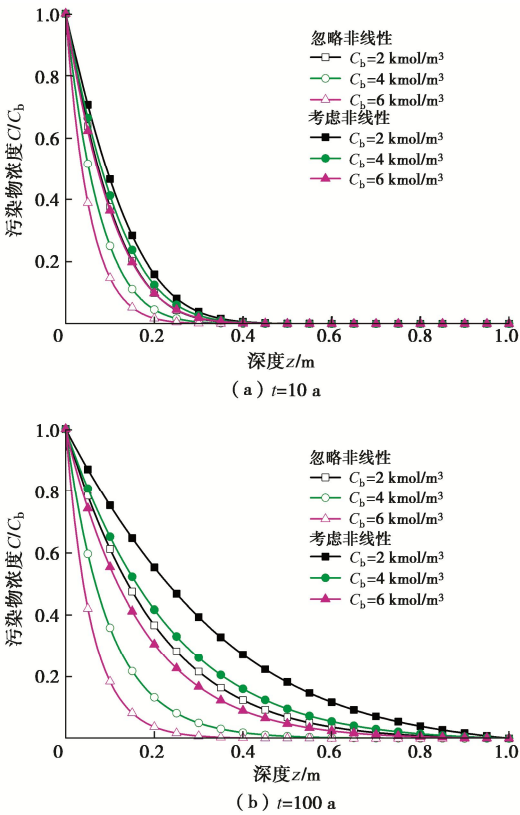


图 8 不同渗滤液中污染物浓度  $C_b$  下污染物浓度的分布  
Fig. 8 Distribution of contaminant concentration under different  $C_b$

从上述分析可以看出, 渗滤液中污染物浓度  $C_b$

越大, 同一时间下沉降量越大, 超孔隙水压力值越小, 污染物相对浓度越低 (即污染物运移速率越慢)。与忽略非线性情况相比, 在考虑非线性压缩和渗透特性情况下,  $C_b$  对沉降量、超孔隙水压力和污染物运移速率的影响会减小。

5 结 论

为认识力学-化学荷载下压实黏土垫层中一维非线性固结与污染物运移的耦合特性, 首先推导得到了非线性固结与污染物运移控制方程, 并建立了耦合模型, 该模型可考虑土体压缩性及渗透性的非线性变化。利用数值方法, 获得了该耦合模型有限差分解。随后, 通过开展对比分析, 验证了所建耦合模型的正确性。最后, 基于所建模型, 对比探究了忽略与考虑土体非线性压缩和渗透特性两种假定情况下一维固结和污染物运移的耦合行为, 得到 4 点结论。

(1) 随着力学荷载  $p_u$  增大, 同一时间下压实黏土垫层中沉降量越大, 且  $p_u$  增大会使忽略和考虑非线性压缩和渗透特性两种情况下沉降量的差值增大。

(2) 当忽略非线性时,  $p_u$  的增大会使得污染物运移速率降低; 但当考虑非线性时,  $p_u$  的增大会使污染物运移速率增大, 这主要是由于污染物运移过程会受对流和扩散作用的综合影响。在考虑非线性固结特性情况下, 相比于有效扩散系数减小对运移过程的影响, 化学渗透系数降低的影响更显著。

(3) 渗滤液中污染物浓度  $C_b$  越大, 同一时间下沉降量越大, 超孔隙水压力值越小, 且污染物的相对浓度越低 (即污染物运移速率越慢), 其原因主要在于污染物浓度的升高会增大固结变形量。

(4) 相比于忽略非线性压缩和渗透特性情况, 在考虑非线性情况下,  $C_b$  对沉降量、超孔隙水压力和污染物运移速率的影响会减弱。

参考文献:

[1] 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, 44(7): 133-141. (XIE Haijian, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, et al. Comparison of the performance of four types of liner systems in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 133-141. (in Chinese))  
[2] 李 涛, 刘 利, 丁洲祥. 大变形黏土防渗层中的污染物迁移和转化规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 687-694. (LI Tao, LIU Li, DING Zhouxiang. Study of transport and transformation of contaminant through a clay layer with large deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3):



- 687-694. (in Chinese))
- [3] 张志红, 师玉敏, 朱 敏. 黏土垫层水力-力学-化学耦合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(7): 1283-1290. (ZHANG Zhihong, SHI Yumin, ZHU Min. Coupled hydro-mechanical-chemical model for clay liner[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(7): 1283-1290. (in Chinese))
- [4] 邱金伟, 权 全, 刘 军, 等. 考虑非等温环境下污染物在黏土中的运移解析模型[J]. 岩土力学, 2022, **43**(2): 423-431, 442. (QIU Jinwei, QUAN Quan, LIU Jun, et al. Analytical solutions of contaminant transport in clay liner system under non-isothermal condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(2): 423-431, 442. (in Chinese))
- [5] 谢海建, 严华祥, 张春华, 等. 考虑固结、扩散和降解耦合作用下污染物在黏土中的运移解析模型[J]. 水利学报, 2015, **46**(增刊 1): 124-128. (XIE Haijian, YAN Huaxiang, ZHANG Chunhua, et al. Analytical models for contaminant transport in clayey soils considering coupled effect of consolidation, diffusion and degradation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(S1): 124-128. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] 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**(7): 683-717.
- [8] 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.
- [9] 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**(1/2): 31-40.
- [10] LEWIS T W, PIVONKA P, SMITH D W. Theoretical investigation of the effects of consolidation on contaminant transport through clay barriers[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, **33**(1): 95-116.
- [11] PU H F, FOX P J, SHACKELFORD C D. Assessment of consolidation-induced contaminant transport for compacted clay liner systems[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(3): 04015091.
- [12] 李江山, 江文豪, 葛尚奇, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(11): 2071-2080. (LI Jiangshan, JIANG Wenhao, GE Shangqi, et al. Coupling model for consolidation and contaminant transport in compacted clay liners under non-isothermal condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(11): 2071-2080. (in Chinese))
- [13] FRITZ S J. Ideality of clay membranes in osmotic processes: a review[J]. Clays and Clay Minerals, 1986, **34**(2): 214-223.
- [14] KACZMAREK M, HUECKEL T. Chemo-mechanical consolidation of clays: analytical solutions for a linearized one-dimensional problem[J]. Transport in Porous Media, 1998, **32**(1): 49-74.
- [15] KACZMAREK M. Chemically induced deformation of a porous layer coupled with advective-dispersive transport. Analytical solutions[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, **25**(8): 757-770.
- [16] PETERS G P, SMITH D W. The influence of advective transport on coupled chemical and mechanical consolidation of clays[J]. Mechanics of Materials, 2004, **36**(5/6): 467-486.
- [17] 张志红, 师玉敏. 双荷载共同作用下土体变形影响机理及计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, **46**(增刊 1): 148-152. (ZHANG Zhihong, SHI Yumin. Influence mechanism and calculation method for soil deformation under double load[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, **46**(S1): 148-152. (in Chinese))
- [18] ZHANG Z H, MASUM S A, THOMAS H R, et al. Modeling fully coupled hydraulic-mechanical-chemical processes in a natural clay liner under mechanical and chemico-osmotic consolidation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(36): 36173-36183.
- [19] ZHANG Z H, MASUM S A, TIAN G L, et al. Modelling non-isothermal volume change and solute transport behaviours of a semi-permeable clay soil under the combined influence of mechanical loading, chemical-osmosis, and thermo-osmosis[J]. Engineering Geology, 2021, **293**: 106271.
- [20] 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 Gailei, ZHANG Zhihong. 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))

- Chinese))
- [21] 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.
- [22] FENG S J, GAO K W, CHEN Y X, et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China[J]. Waste Management, 2017, **63**: 354-365.
- [23] 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.
- [24] PU H F, QIU J W, ZHANG R J, et al. Assessment of consolidation-induced VOC transport for a GML/GCL/CCL composite liner system[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, **46**(4): 455-469.
- [25] LI J S, JIANG W H, GE S Q, et al. General analytical solutions for one-dimensional nonlinear consolidation of saturated clay under non-isothermal distribution condition[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2022, **46**(10): 1811-1830.
- [26] 庄迎春, 刘世明, 谢康和. 萧山软粘土一维固结系数非线性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(24): 4565-4569. (ZHUANG Yingchun, LIU Shiming, XIE Kanghe. Study on nonlinearity of one-dimensional consolidation coefficient of Xiaoshan clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(24): 4565-4569. (in Chinese))
- [27] ABBASI N, RAHIMI H, JAVADI A A, et al. Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability[J]. Computers and Geotechnics, 2007, **34**(1): 41-52.
- [28] 齐添. 软土一维非线性固结理论与试验对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (QI Tian. Theoretical and Experimental Studies on One-Dimensional Nonlinear Consolidation of Soft Soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [29] 刘建国, 王洪涛, 聂永丰. 多孔介质中溶质有效扩散系数预测的分形模型[J]. 水科学进展, 2004, **15**(4): 458-462. (LIU Jianguo, WANG Hongtao, NIE Yongfeng. Fractal model for predicting effective diffusion coefficient of solute in porous media[J]. Advances in Water Science, 2004, **15**(4): 458-462. (in Chinese))
- [30] 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.
- [31] LI C X, HUANG J S, WU L Z, et al. Approximate analytical solutions for one-dimensional consolidation of a clay layer with variable compressibility and permeability under a ramp loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(11): 06018032.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compindex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548, 国内统一刊号 CN 32-1124/TU, 国内发行代号 28-62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)