

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.046>



考虑移动非达西流界面的弱透水层释水固结模型

赵月春, 王全荣*

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

摘要: 弱透水层中渗透流速慢, 不利于监测其释水过程, 于是常借助固结模型来综合评价地面沉降的演化过程。然而, 传统的固结模型假定弱透水层中的渗流规律满足达西定律, 可能与实际不符合。为此, 本研究建立了考虑移动非达西流界面的固结模型, 并采用有限差分法建立了该模型的数值解。其中, 假设渗透系数与孔隙比都是应力的函数。通过与现有模型和室内实验数据的对比, 验证了本研究模型的可靠性。结果表明新模型能更精确地模拟水位瞬时下降诱发的弱透水层固结过程。考虑移动非达西流界面的固结模型会延缓超孔隙水压力的消散过程, 但不影响孔隙水压力的总消散量和总沉降量。考虑渗透系数衰减的固结模型, 其孔隙水压力的消散与沉降量达到稳定的时间明显延长, 且变渗透系数延缓了移动界面达到稳定的时间, 致使移动界面稳定位置上移。

关键词: 地面沉降; 弱透水层; 固结; 非达西流; 水文地质; 环境工程。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2023)09-3494-10

收稿日期: 2022-12-22

Water Release and Consolidation Model of Aquitard Considering Moving Non-Darcy Flow Interface

Zhao Yuechun, Wang Quanrong*

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: The slow seepage velocity in the aquitard is not conducive to monitoring its water release process, so the consolidation model is often used to comprehensively evaluate the evolution process of land subsidence. However, the traditional consolidation model assumes that the seepage law in the aquitard meets Darcy's law, which may be inconsistent with the actual situation. Therefore, a consolidation model considering the interface of moving non-Darcy flow region is established in this study, and the numerical solution of the model is established by using the finite difference method, in which the permeability coefficient and void ratio are assumed to be functions of stress. Compared with the existing models and indoor experimental data, the reliability of this research model is verified. The results show that the new model can more accurately simulate the consolidation process of aquitard induced by the instantaneous drawdown of water level. The consolidation model considering the moving non-Darcy flow interface delays the dissipation process of excess pore water pressure, but does not affect the total dissipation and total settlement of pore water pressure. For the consolidation model considering the attenuation of permeability coefficient, the time for the dissipation of pore water pressure and the settlement to reach the stability is obviously prolonged, and the variable permeability coefficient delays the time for the moving interface

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(No. 42222704); 湖北省自然科学基金项目(No. 2021CFA089); 国家自然科学基金面上项目(No. 41972250)。

作者简介: 赵月春(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事弱透水层固结规律数值模拟研究。ORCID:0000-0001-5860-2897。E-mail: yczhao@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 王全荣, ORCID:0000-0002-6560-6340。E-mail: wangqr@cug.edu.cn

引用格式: 赵月春, 王全荣, 2023. 考虑移动非达西流界面的弱透水层释水固结模型. 地球科学, 48(9): 3494-3503.

Citation: Zhao Yuechun, Wang Quanrong, 2023. Water Release and Consolidation Model of Aquitard Considering Moving Non-Darcy Flow Interface. *Earth Science*, 48(9): 3494-3503.

to reach the stability, causing the stable position of the moving interface to move upward.

Key words: land subsidence; aquitard; consolidation; non-Darcy flow; hydrogeology; environmental engineering.

地面沉降给城市运营和人民生活造成了严重的经济损失(金必晶等,2023),国内外研究表明超采地下水是产生大面积、大幅度地面沉降的主要诱因.因此,查明地下水开采下弱透水层的固结问题对于科学防治地面沉降意义重大(骆祖江等,2023).1924年, Terzaghi (1924)最早建立的饱和粘土一维固结理论是研究土体固结的基础.但其包含多个假设条件;为刻画黏土的蠕变特性, Taylor and Merchant (1940)在 Terzaghi 线弹性模型中引入了 Kelvin 模型,发现修正后的模型能较好地拟合固结曲线.随后,许多学者将 Merchant 模型引入到固结理论中,通过改变粘土的加载方式、荷载情形,推导了一系列解析解模型(Lo, 1961; 王盛源, 1981; 谢康和, 1994; 李之达和邵玉, 2017; 卢慈荣等, 2017). Liu *et al.* (2012)和徐进等(2021)在水位下降诱发含水层一弱透水层固结问题中引入 Merchant 模型,并求得解析解;杨伟涛等(2020)选取长三角区饱和粘土样进行单轴蠕变试验,并用 Merchant 模型拟合实验数据,效果较好.然而,上述流变固结理论大多采用达西渗流定律.

事实上,弱透水层中,地下水流速十分缓慢,可能产生非达西效应.HANSBO引入分段函数描述了细粒土的低速非达西渗流过程,模型假设水力梯度 $i < i_c$ 时,流速 v 与梯度 i 呈指数关系;当水力梯度 $i > i_c$ 时,流速 v 与梯度 i 呈线性关系(Hansbo, 1960). HANSBO 渗流模型受到了学者的广泛关注,谢海澜等(2007)建立了非达西流动固结沉降模型,对比了达西流和非达西流对深部弱透水层固结时间的影响,但模型推导中假定渗透系数不变,无法考虑变渗透系数对固结作用的影响.王素等(2018)分析非均质地基土的固结机理时,考虑了压缩模量、渗透系数随深度的变化规律,但未研究渗透系数在固结过程中与孔隙比的关系.李传勋等(2017)在研究变荷载下非达西固结沉降问题时,考虑了结构性软土中渗透系数随孔隙比的变化,但未研究沉降过程中的移动非达西流界面.李传勋等(2019)研究非达西渗流与软黏土流变固结理论时,将 HANSBO 渗流模型简化为考虑起始水力坡降的渗流模型,并研究了不同参数对移动边界的影响,但模型中没有考虑渗透系数的非线性变化.刘忠玉等(2019)和 Li *et al.* (2020)将指数型非

达西流模型引入流变固结理论,深入分析了非达西流、非线性渗透系数对饱和粘土变形的影响.

然而,现有模型在处理非达西流问题时假设整个透水层满足指数型非达西流(李传勋等, 2012; Li *et al.*, 2020)或者折线型非达西流(李传勋等, 2019).事实上,非达西流的发生类型与流速相关,即非达西流区界面是移动的,目前关于这方面的理论研究甚少.为此,本研究将构建考虑移动非达西流效应、随压实作用衰减的变渗透系数和粘土流变特性的弱透水层固结模型,采用有限差分法获得了模型的数值解,并研究移动非达西流、变渗透系数对弱透水层固结过程的影响机制.

1 问题的提出与数学模型

考虑水位下降的弱透水层一维固结模型如图1所示.弱透水层中的渗流分为两个区,当 $z \leq h(t)$ 时为指数型非达西渗流区,其他为直线型非达西渗流区,其中, z 为距弱透水层顶部的距离(cm), $h(t)$ 为指数型非达西流区与直线型非达西流区的交界面位置(cm).对于非稳定流, $h(t)$ 随时间变化,其位置可根据 HANSBO 模型中的临界水力梯度确定.

假定弱透水层厚度为 B ; E_0 为 Merchant 模型中独立弹簧的弹性模量(MPa); E_1 、 η 分别为 Merchant 模型中 Kelvin 体弹簧的弹性模量(MPa)与牛顿黏壶的粘滞系数(s^{-1}), 0 为基准面位置; z 为垂向空间轴,向下为正方向;初始时刻顶部、底部总水头相等且为 H ,由于浅层含水层与地表水圈关系密切,弱透水层顶部水位基本保持恒定,而下伏承压含水层受地

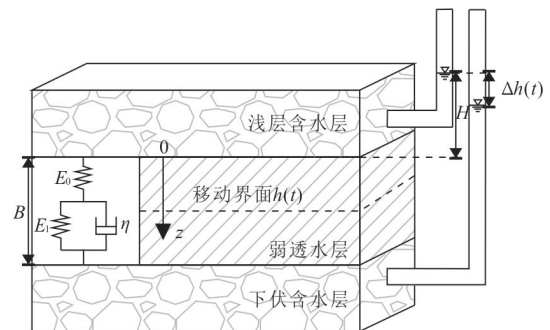


图1 水位降深下弱透水层固结沉降的概念模型

Fig.1 Conceptual model of consolidation settlement of aquitard under drawdown

下水开采影响,水位下降 $\Delta h(t)$.

1.1 基本假定

为了开展地下水开采条件下的饱和弱透水层非线性固结蠕变研究,做如下假设:

(1)假定弱透水层为饱和的均质黏土,且其在应力历史中为正常固结土.

(2)假定固结过程中粘土颗粒与水不可压缩,且土体变形和渗流只发生在竖直方向.

(3)假定土的有效重度 γ_s 为常数,且其不随深度变化.

(4)假定弱透水层中的渗流服从 HANSBO 渗流模型,但固结过程中渗透系数与孔隙比在半对数空间下 ($e-\lg k_v$) 呈线性关系 (Tavenas *et al.*, 1983; Sridharan and Prakash, 2001),有效应力与孔隙比在半对数空间下 ($e-\lg \sigma'$) 呈线性关系 (Lambe and Whitman, 1969; Burland, 1990),小变形条件下,认为弱透水层中的水力梯度由超静水压力引起.

(5)假定弱透水层的固结流变特性满足 Merchant 蠕变模型.

1.2 数学模型

根据土体连续性条件和有效应力原理,得到粘土固结的控制方程为:

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon_z}{\partial t}, \quad (1)$$

式中, q 为粘土中的渗流速度 (m/s); z 为垂向空间轴; ϵ_z 为垂向应变; t 为时间 (s).

HANSBO 非达西渗流模型可以表征低水力梯度下粘土中的渗流规律.因此,模型中的渗流速度 q 可表示为:

$$q = \begin{cases} \frac{k_v}{mi_1^{m-1}} i^m, & i < i_1 \\ k_v \left(i - \frac{m-1}{m} i_1 \right), & i \geq i_1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, k_v 为渗透系数 (m/s); m 为经验参数; i 、 i_1 分别为实际水力梯度和临界水力梯度, $i = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z}$; γ_w 为单位体积水的重量 (kN/m³); u 为超静水压力 (kPa).

在弱透水层固结变形中,粘土的有效应力随着超静水压力的消散而增大,土体的渗透系数相应减小.为此,本研究采用 $e-\lg \sigma'$ 和 $e-\lg k_v$ 关系表示弱透水层固结中的非线性压缩性和渗透性:

$$\begin{cases} e = e_0 - C_c (\lg \sigma' - \lg \sigma'_0) \\ e = e_0 - C_k (\lg k_{v0} - \lg k_v) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, e 为计算时刻孔隙比; e_0 为初始孔隙比; C_c 为弱透水层的压缩指数; σ' 为计算时刻的有效应力 (kPa); σ'_0 为初始有效应力 (kPa); 两者满足 $\sigma' = \sigma'_0 - u$; k_{v0} 为初始渗透系数 (m/s); C_k 为弱透水层的渗透指数.

根据公式(3),渗透系数可写为:

$$k_v = k_{v0} \times \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'} \right)^{\frac{C_c}{C_k}}. \quad (4)$$

引入 Merchant 蠕变模型描述土体的粘滞性,结构见图 1,该模型可以较好地刻画弱透水层的蠕变特性,土体应变可表示为:

$$\epsilon_z = \int_0^{\sigma'} \frac{d\sigma'}{E_0} + \int_0^{\sigma'} \frac{\sigma' - \sigma'_0}{\eta} \exp \left[-\frac{E_1}{\eta} (t - \tau) \right] d\tau, \quad (5)$$

式中, E_0 为 Merchant 模型中独立弹簧的弹性模量 (MPa); E_1 、 η 分别为 Merchant 模型中 Kelvin 体弹簧的弹性模量 (MPa) 与牛顿黏壶的粘滞系数 (s⁻¹).

将公式(2)~(5)代入公式(1),将坐标原点设在弱透水层顶部,且临界水力梯度位于 $h(t)$ 位置.得到考虑移动非达西流效应、变渗透系数和蠕变的一维固结模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_{v0} \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_0 - u} \right)^{\frac{C_c}{C_k}}}{mi_1^{m-1}} \left(-\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right)^m \right] = \\ -\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{u}{E_0} + \int_0^t \frac{u}{\eta} \exp \left[-\frac{E_1}{\eta} (t - \tau) \right] d\tau \right\}, \\ 0 < z \leq h(t) \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[k_{v0} \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_0 - u} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} \left(-\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{m-1}{m} i_1 \right) \right] = \\ -\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{u}{E_0} + \int_0^t \frac{u}{\eta} \exp \left[-\frac{E_1}{\eta} (t - \tau) \right] d\tau \right\}, \\ h(t) < z \leq B \end{cases}, \quad (6)$$

$$u(z, 0) = 0, \quad (7)$$

$$u(0, t) = 0, \quad (8)$$

$$u(B, t) = -\gamma_w \Delta h(t), \quad (9)$$

式(6)中, z 为弱透水层中任意点距弱透水层顶部的距离 (cm); $h(t)$ 为指数型非达西流区与直线型非达西流区的界面位置 (cm); B 为弱透水层厚度 (cm); 式(7)为初始条件,表示初始时刻弱透水层各位置处的超孔隙水压力处处相等,且为 0; 式(8)为弱透

水层的顶边界条件,表示弱透水层顶部的超孔隙水压力保持恒定;式(9)为弱透水层的底部边界条件,其中底部水头变化为 $\Delta h(t)$.

2 模型的数值解

考虑变渗透系数、移动非达西流效应和粘土流变性的新模型为一个高度非线性模型,求解困难.本研究采用有限差分法建立公式(6)~(9)的数值模型,并通过迭代计算求出指数型非达西流区与直线型非达西流区的交界位置和模型的数值解.

2.1 有限差分数值模型

由于弱透水层满足小变形固结,为简化计算,认为弱透水层顶边界位置的变化可以忽略.将弱透水层均匀剖分为 N 个长度为 Δz 的网格,每个网格位置均由中心节点 z_i 表示.模型的顶边界位于 $1 - 1/2$ 节点处,底边界位于 $N + 1/2$ 处.节点 z_i 为:

$$z_i = \frac{z_{i-1/2} + z_{i+1/2}}{2}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

式中, $z_{i+1/2}$ 可表示为:

$$z_{i+1/2} = \frac{B}{N} \times i, i = 0, 1, \dots, N. \quad (11)$$

控制方程(6)的有限差分格式为:

$$\frac{q_{i+1/2} - q_{i-1/2}}{z_{i+1} - z_{i-1}} = -\frac{1}{E_0} \left(\frac{u_i^{k+1} - u_i^k}{t_{k+1} - t_k} \right) - \frac{1}{E_1} \times \exp\left(-\frac{E_1}{\eta} t_{k+1}\right) \times \sum_{j=1}^{k+1} \frac{u_j^k - u_j^{k-1}}{t_j - t_{j-1}} \times \left[\exp\left(\frac{E_1}{\eta} t_j\right) - \exp\left(\frac{E_1}{\eta} t_{j-1}\right) \right]. \quad (12)$$

由 HANSBO 渗流定律可知,渗透速度的有限差分格式可以写成:

$$\left\{ \begin{aligned} q_{i+1/2} &= \frac{k_{v0}}{mi_1^{m-1} \gamma_w^m} \left(\frac{\sigma'_{0i+1} + \sigma'_{0i}}{(\sigma'_{0i+1} + \sigma'_{0i}) - (u_{i+1}^{k+1} + u_i^{k+1})} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} \left(\frac{u_i^{k+1} - u_{i+1}^{k+1}}{z_{i+1} - z_i} \right)^m \\ q_{i-1/2} &= \frac{k_{v0}}{mi_1^{m-1} \gamma_w^m} \left(\frac{\sigma'_{0i} + \sigma'_{0i-1}}{(\sigma'_{0i} + \sigma'_{0i-1}) - (u_i^{k+1} + u_{i-1}^{k+1})} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} \left(\frac{u_{i-1}^{k+1} - u_i^{k+1}}{z_i - z_{i-1}} \right)^m \end{aligned} \right., 0 < z \leq h(t), \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} q_{i+1/2} &= k_{v0} \left(\frac{\sigma'_{0i+1} + \sigma'_{0i}}{(\sigma'_{0i+1} + \sigma'_{0i})/2 - (u_{i+1}^{k+1} + u_i^{k+1})/2} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} \left[\frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{u_i^{k+1} - u_{i+1}^{k+1}}{z_{i+1} - z_i} \right) - \frac{m-1}{m} i_1 \right] \\ q_{i-1/2} &= k_{v0} \left(\frac{\sigma'_{0i} + \sigma'_{0i-1}}{(\sigma'_{0i} + \sigma'_{0i-1})/2 - (u_i^{k+1} + u_{i-1}^{k+1})/2} \right)^{\frac{C_c}{C_k}} \left[\frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{u_{i-1}^{k+1} - u_i^{k+1}}{z_i - z_{i-1}} \right) - \frac{m-1}{m} i_1 \right] \end{aligned} \right.,$$

$$h(t) < z \leq B. \quad (14)$$

各网格变形量 S_{ki} 可以写为:

$$S_{ki} = \left\{ \frac{\sigma'_{0i} - u_i^k}{E_0} + \frac{1}{E_1} \times \exp\left(-\frac{E_1}{\eta} t_{k+1}\right) \times \sum_{j=1}^{k+1} (\sigma'_{0i} - u_i^k) \times \left[\exp\left(\frac{E_1}{\eta} t_j\right) - \exp\left(\frac{E_1}{\eta} t_{j-1}\right) \right] \right\} \times \Delta z, i = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

总沉降量 S_k 可表示为:

$$S_k = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\sigma'_{0i} - u_i^k}{E_0} + \frac{1}{E_1} \times \exp\left(-\frac{E_1}{\eta} t_{k+1}\right) \times \sum_{j=1}^{k+1} (\sigma'_{0i} - u_i^k) \times \left[\exp\left(\frac{E_1}{\eta} t_j\right) - \exp\left(\frac{E_1}{\eta} t_{j-1}\right) \right] \right\} \times \Delta z. \quad (16)$$

2.2 求解数值模型

随着超静水压力的消散,指数型非达西流区与直线型非达西流区的交界面位置逐步上移.识别移动界面位置,将弱透水层分区计算是求解新模型的前提,本研究采用迭代法确定移动界面的位置,并根据有限差分数值模型求得超静水压力和总沉降量.

在时间域上均匀剖分 k_{max} 个时间步长.迭代计算思路为:(1)赋初值.根据初始条件,弱透水层超静水压力处处相等,移动界面位于弱透水层底边界,全区超静水压力采用指数型非达西流模型求解.(2)识别移动界面位置.计算各节点水力梯度,并按照临界水力梯度 i_c 确定移动界面位置.(3)判别是否收敛.若 $|h_{new} - h_{old}| < \xi$ (给定的收敛标准),则第 k 个时间步长的移动界面位置为 $h(t) = h_{new}$.(4)计算超孔隙水压力.根据非达西流分区,求解第 k 个时间步长的超孔隙水压力.(5)计算沉降量.根据有效应

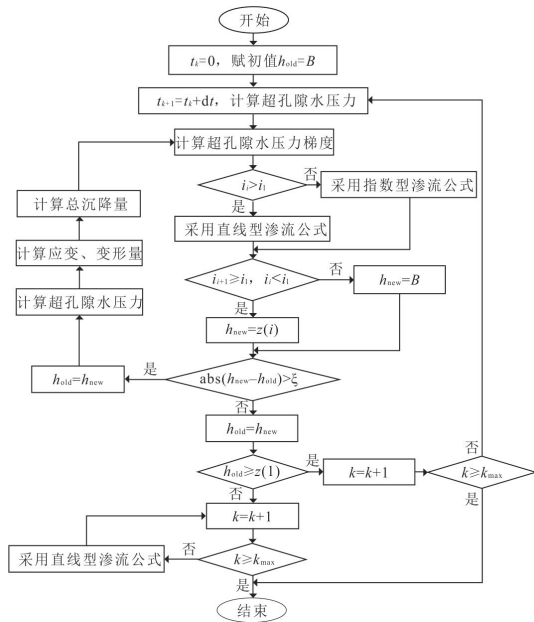


图 2 迭代计算流程

Fig.2 Iteration flow chart

力原理, 获取弱透水层各位置有效应力, 并根据公式 (15) 和 (16) 求解各网格变形量和总沉降量. (6) 若 $k \leq k_{max}$, 令 $k = k + 1$, 重复步骤 (2) ~ (6); 反之, 程序结束. 具体流程如图 2 所示.

2.3 数值解的验证与对比

传统的 Newton-Raphson 方法计算周期较长、效率低, 本研究调用 MATLAB 中的 ODE15s 函数求解新模型, 为验证新模型计算方法的精度, 本研究采用已有半解析模型进行验证, 并采用室内实验数据测试新模型的性能.

2.3.1 模型验证 基于达西定律和 Merchant 模型, Liu *et al.* (2012) 研究了水头瞬时下降诱发的弱透水层固结问题, 求得模型的半解析解. 令 $m = 1$, $i_1 = 0$, $C_k \rightarrow \infty$, 新模型可变为 Liu *et al.* (2012) 讨论的流变固结模型. 为考察新模型的计算精度, 选取 $t = 100$ d 和 $t = 500$ d 时刻, Liu *et al.* (2012) 模型与新模型的超静孔隙水压力分布进行对比. 除 $m = 1$, $i_1 = 0$, $C_k \rightarrow \infty$ 外, 模型其他参数取值见表 1. 对比结果如图 3 所示. 可以看出, 不考虑非达西流效应的情形下, 新模型的模拟结果与 Liu *et al.* (2012) 模型的解吻合较好, 其中 100 d 的误差范围为 0.052%~4.780%, 500 d 的误差范围为 0.022%~0.831%. 表明新模型的有限差分近似推导过程无误, 模型求解方法合理, 精度可以接受.

2.3.2 室内实验数据验证 徐海洋等 (2011) 研发了模拟地面沉降的室内实验装置, 并研究了水位瞬

表 1 模型参数 (Liu *et al.*, 2012)

Table 1 Parameters used in this study (Liu *et al.*, 2012)

参数	符号	单位	取值
粘土层厚度	B	cm	10
水位变化	$\Delta h(t)$	cm	10
独立弹簧的弹性模量	E_0	MPa	2
Kelvin 体弹簧的弹性模量	E_1	MPa	5
Kelvin 体牛顿黏壶的粘滞系数	η_1	s^{-1}	5×10^{14}
渗透系数	k_v	m/s	1×10^{-8}

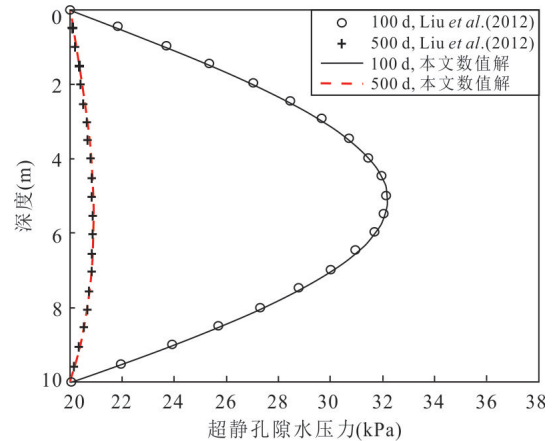


图 3 新模型与 Liu *et al.* (2012) 模型的超静孔隙水压力对比
Fig.3 Comparison of excess pore water pressure between the new model and Liu *et al.* (2012) model

时下降诱发弱透水层固结变形的过程. 试样黏土选自泰州长江大桥北锚, 其测定的物理力学参数见表 2, 实验采用测压管量测 0 min、2 min、5 min、10 min、20 min、50 min、100 min、300 min 时, 黏土 0 cm、4 cm、8 cm、12 cm、16 cm、20 cm 处的超静孔隙水压力水头, 采用百分表量测了沉降量随时间的变化曲线. 详细实验流程见徐海洋等 (2011), 本研究选择实测的超静孔隙水压力水头数据和最终沉降量数据验证新模型的适用性. 除表 2 列出的试样实测物理力学参数外, 新模型与 Liu *et al.* (2012) 模型的模型参数见表 3. 临界水力梯度 i_c 根据宋新江和钱财富 (2010) 经验公式获得, m 为经验参数, 通过调参拟合确定.

图 4a、4b 分别为新模型、Liu *et al.* (2012) 模型在 2 min、5 min、10 min、20 min、50 min、100 min、300 min 时超静孔隙水头模拟值与室内实验数据的对比图. Liu *et al.* (2012) 模型在模拟超静水压力水头时, 在固结初期 (2 min) 能较好地拟合实验数据, 而在其他时段, 超静孔隙水头消散速度太快, 50 min

表 2 试样实测物性力学参数(徐海洋等,2011)

Table 2 Measured physical and mechanical parameters of sample (Xu *et al.*, 2011)

参数	符号	单位	取值
粘土层厚度	B	cm	20
干密度	ρ_d	g/cm^3	0.883
饱和密度	ρ_{sat}	g/cm^3	1.88
相对密度	d	-	2.71
水位变化	$\Delta h(t)$	cm	120
孔隙比	e_0	-	1.30
压缩指数	C_c	-	0.308
渗透系数	k_{v0}	m/s	5.8×10^{-7}

已基本完成消散,而新模型的模拟精度得到了显著提高,且固结时间越久,拟合精度越高.图 4c 在沉降量模拟初期,Liu *et al.* (2012)模型与新模型的计算结果均大于实测值,而新模型的计算结果远好于 Liu *et al.* (2012)模型,在模拟后期,最终沉降量与实验数据均较吻合,通过室内实验数据验证,考虑变渗透系数和移动非达西流的新模型适应度优于 Liu *et al.* (2012)模型.

3 结果与讨论

由上述对比发现,影响水位瞬时下降时弱透水层固结沉降的主要因素有移动非达西流和变渗透系数,下面将着重研究这两个因素对弱透水层超静水压力消散和沉降量的影响,除 $i_1=5$ 、 $m=3$ 外,其余参数取值与表 3 相同.

3.1 移动界面对固结性状的影响

随着超孔隙水压力的消散,由临界水力梯度表征的移动界面自弱透水层底边界逐步上移,为了探究移动界面对弱透水层固结性状的影响,本研究设置了达西渗流、固定界面非达西渗流($h=10\text{ cm}$)、移动界面非达西渗流 3 种情形.图 5a 为 3 种情形下弱透水层($z=10\text{ cm}$)处超孔隙水压力的消散曲线.对比达西渗流固结模型,移动非达西流固结模型在固结初期明显减缓了超孔隙水压力的消散,而在固结后期达到了达西流固结模型的消散水平;相比固定界面非达西流模型,移动界面非达西流模型得到的超孔隙水压力在固结前期消散较慢,固结中后期两者保持恒定的压力差消散.这是因为固结前期,移动界面 $h(t) > 10\text{ cm}$,观测点处的渗流满足指数型模型,消散较慢,而在 3 min 后,移动界面越过观测点,观测点处的渗流满足直线型模型,孔压消散

表 3 模型最佳拟合参数

Table 3 Model best fit parameters in this study

参数	符号	单位	新模型取值	Liu <i>et al.</i> (2012)模型取值
独立弹簧的弹性模量	E_0	MPa	0.193	0.193
Kelvin 体弹簧的弹性模量	E_1	MPa	0.595	0.595
Kelvin 体牛顿黏壶的粘滞系数	η_1	s^{-1}	7×10^9	7×10^9
临界水力梯度	i_1	-	1.026	-
低速非达西流指数	m	-	1.5	-
渗透指数	C_k	-	0.36	-

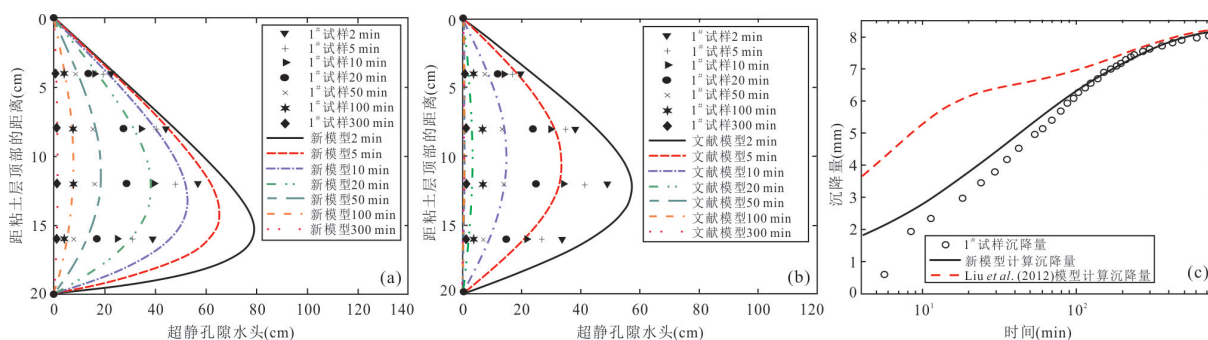


图 4 新模型和 Liu *et al.* (2012)模型与实验数据对比

Fig.4 Comparison between the new model, Liu *et al.* (2012) model and experimental data

a. 新模型与实验数据的超静孔隙水头;b. Liu *et al.* (2012)模型与实验数据的超静孔隙水头;c. 沉降量

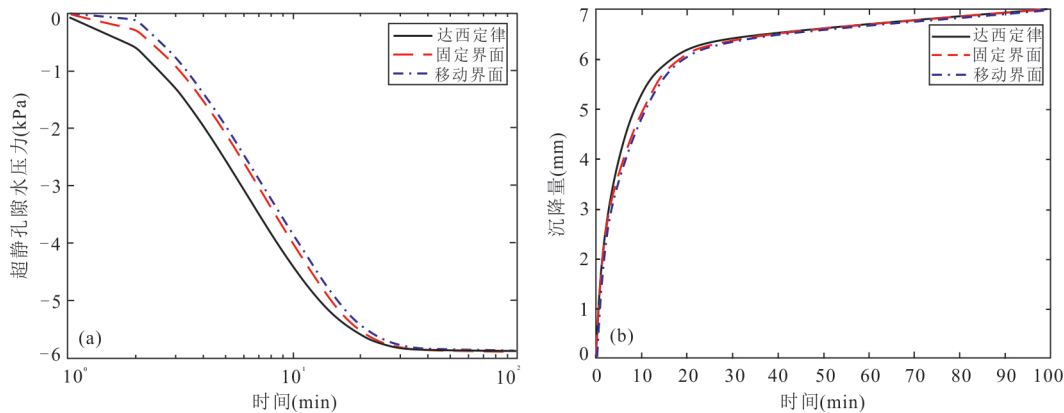


图 5 移动界面对固结性状的影响

Fig. 5 Influence of moving interface on consolidation behavior

a. 超孔隙水压力; b. 沉降量

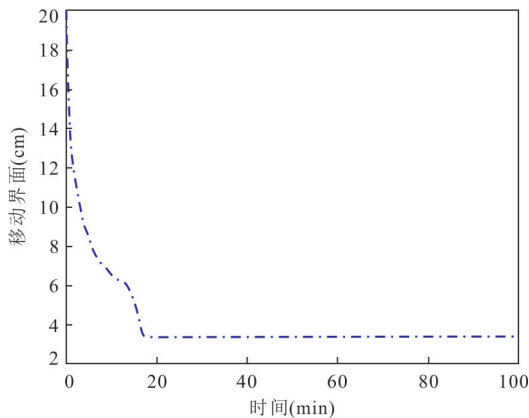


图 6 移动界面随时间的变化规律

Fig. 6 Change rule of moving interface with time

规律与固定界面非达西流模型相似,略有滞后,这与图 6 中移动界面位置变化规律一致.图 5b 为 3 种情形下弱透水层的沉降量曲线图,与图 5a 类似,固结初期,移动非达西流固结模型沉降量的计算值小于达西渗流固结模型和固定界面非达西渗流模型.而在固结后期,总沉降量的计算结果趋于一致.

图 6 为考虑移动非达西流界面的弱透水层固结模型中移动界面随时间的变化曲线,随着压实作用下孔隙水压力的消散,移动界面逐渐上移,最终移动界面稳定在距弱透水层顶部 3.4 cm 处,整个过程在固结开始后的 17 min 内完成.

3.2 渗透系数的非线性对固结性状的影响

渗透指数 (C_k) 是描述渗透系数随粘土压实作用衰减的主要参数.为了研究非线性渗透系数对弱透水层固结性状的影响,本研究设置了常渗透系数达西流固结模型、变渗透系数达西流固结模型、变渗透系数移动非达西流固结模型 3 种情

形.当 $C_k \rightarrow \infty$ 时,渗透系数不随孔隙比变化,变为常渗透系数.图 7a 为 3 种情形下弱透水层 ($z = 10$ cm) 处超孔隙水压力的消散曲线,图 7b 为 3 种情形下弱透水层的总沉降量.对比常渗透系数固结模型,变渗透系数固结模型中超孔隙水压力的消散过程和固结变形稳定期更为滞后,而且这种差异在固结中期最为显著,这是因为渗透系数随压实作用衰减,弱透水层中孔隙水较难排出.对比变渗透系数达西流固结模型和变渗透系数移动非达西流固结模型的计算结果,变渗透系数移动非达西流固结模型更为滞后.从观测点处超孔隙水压力消散曲线来看,固结初期差异更大,这是因为初期,移动界面未到达观测点.对于沉降量而言,固结前期和中期考虑常渗透系数达西固结模型的沉降量最大,考虑变渗透系数达西固结模型的沉降量次之,考虑变渗透系数非达西渗流模型的沉降量最小,而 3 条曲线的最终沉降量稳定于 8.2 mm,说明变渗透系数通过影响超孔隙水压力的消散过程间接影响了弱透水层的沉降量,但并不影响弱透水层的最终沉降量.

图 8 为变渗透系数移动非达西流固结模型中移动界面随时间的变化曲线.对比图 6 中常渗透系数下移动界面的变化曲线,变渗透系数下移动界面位置变化持续时间更久 (145 min),且移动界面稳定的位置更靠近弱透水层顶部 ($h(t) = 1.4$ cm).这是因为固结作用导致渗透系数减小,超孔隙水压力消散过程减缓,移动界面变化缓慢,最终改变了弱透水层中超孔隙水压力的分布,致使移动界面稳定位置上移.

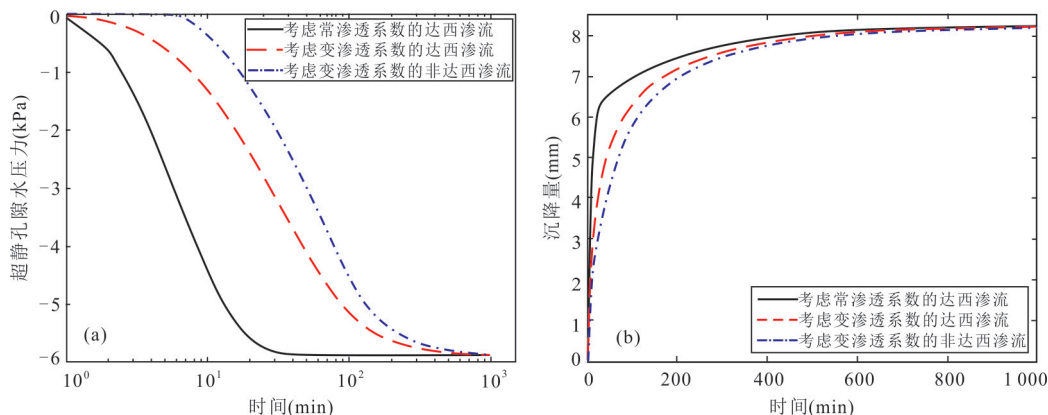


图7 非线性渗透系数对固结性状的影响

Fig.7 Influence of nonlinear permeability coefficient on consolidation behavior

a. 超孔隙水压力;b. 沉降量

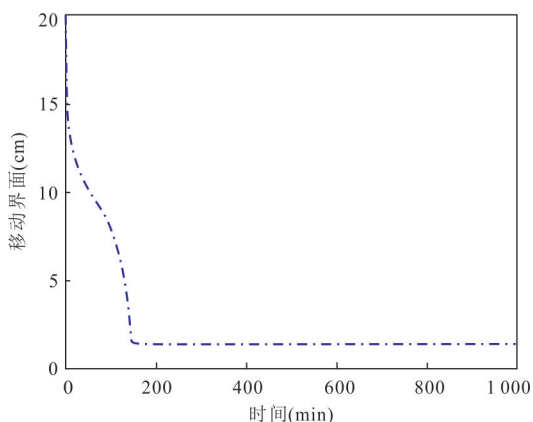


图8 移动界面随时间的变化规律

Fig.8 Change rule of moving interface with time

4 结论

考虑渗透系数随压实作用衰减现象、流变特性的研究工作前人已有报道,而对弱透水层固结中移动非达西流效应的研究甚少.为此,本研究建立了考虑移动非达西流界面的弱透水层释水固结模型,采用迭代法计算了指数型非达西渗流区与直线型非达西渗流区交界面的位置,并采用有限差分法得到了模型的数值解,模型精度得到了已有半解析模型的验证,并采用室内实测数据检验了模型的适用性.主要结论有:

(1)对于水位瞬时下降诱发的弱透水层固结问题,移动界面随时间增加逐渐上移,直到流场达到稳定状态,且考虑变渗透系数下移动界面的固结模型能更好地拟合实验数据.

(2)考虑移动非达西流界面的固结模型会延缓超孔隙水压力的消散过程,且这一影响在

移动界面未达到观测点时最为显著,但不影响孔隙水压力总消散量和总沉降量.

(3)考虑渗透系数随压实作用衰减时,超孔隙水压力消散与沉降量明显滞后于常渗透系数,且变渗透系数会延缓移动界面达到稳定的时间、致使移动界面稳定位置上移.

References

- Burland, J. B., 1990. On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays. *Geotechnique*, 40(3): 329—378. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.329>
- Hansbo, S., 1960. Consolidation of Clay with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains. *Swedish Geotechnical Institute Proceeding*, 18: 45—50.
- Jin, B. J., Yin, K. L., Gui, L., et al., 2023. Transmission Line Pole Tower Land in Salt Lake Area Based on Remote Sensing Interpretation. *Earth Science*, Online (in Chinese with English abstract). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220413.1713.004.html>
- Lambe, T. W., Whitman, R. W., 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York, 553—554.
- Li, C. X., Ma, H. T., Jin, D. D., 2019. Analytical Solution for Rheological Consolidation of Soft Clay with Threshold Hydraulic Gradient. *Advanced Engineering Sciences*, 51(2): 53—60 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. X., Wang, C. J., Wang, S., et al., 2017. Analysis on Nonlinear Consolidation of Structural Soft Soil by Considering Non-Darcian Flow. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 38(4): 472—478 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. X., Xie, K. H., Hu, A. F., et al., 2012. Analysis of One-Dimensional Non-Linear Consolidation with Expo-

- nential Flow. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 43(7): 2789–2795 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Xia, X. H., Li, M. G., et al., 2020. Nonlinear Drainage Model of Viscoelastic Aquitards Considering Non-Darcian Flow. *Journal of Hydrology*, 587: 124988. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124988>
- Li, Z. D., Shao, Y., 2017. Consolidation Characteristics of Soft Clay Ground Subject to Non-Uniformly Distributed Initial Pore Pressure. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 36(10): 45–50 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. C., Lei, G. G., Mei, G. X., 2012. One-Dimensional Consolidation of Visco-Elastic Aquitard Due to Withdrawal of Deep-Groundwater. *Journal of Central South University*, 19(1): 282–286. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1002-9>
- Liu, Z. Y., Cui, P. L., Zheng, Z. L., et al., 2019. Analysis of One - Dimensional Rheological Consolidation with Flow Described by Non-Newtonian Index and Fractional-Order Merchant's Model. *Rock and Soil Mechanics*, 40(6): 2029–2038 (in Chinese with English abstract).
- Lo, K. Y., 1961. Secondary Compression of Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 87(4): 61–88. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0000365>
- Lu, C. R., Cao, Y., Jiang, J., et al., 2017. Long-Term Surface Settlement of Shield Tunnel in Visco-Elastic Soft Soil. *Low Temperature Architecture Technology*, 39(5): 64–67 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. J., Wang, X., Dai, J., et al., 2023. Research on the Influence of Land Subsidence on the Movable Groundwater Resources. *Earth Science*, Online (in Chinese with English abstract). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220505.1823.006.html>
- Song, X. J., Qian, C. F., 2010. Analysis of Hydraulic Gradient of Cohesive Soil in Water Seepage. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 8(5): 65–67 (in Chinese with English abstract).
- Sridharan, A., Prakash, K., 2001. Consolidation and Permeability Behavior of Segregated and Homogeneous Sediments. *Geotechnical Testing Journal*, 24(1): 109–120. <https://doi.org/10.1520/gtj11287j>
- Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., et al., 1983. The Permeability of Natural Soft Clays. Part II: Permeability Characteristics. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 645–660. <https://doi.org/10.1139/t83-073>
- Taylor, D. W., Merchant, W., 1940. A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression. *Journal of Mathematics and Physics*, 19(1–4): 167–185. <https://doi.org/10.1002/sapm1940191167>
- Terzaghi, K., 1924. Die Theorie der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen und Ihr Erdbautechnisches Anwendungsgebiet. Proceedings of the first International Congress for Applied Mechanics, Delft.
- Wang, S., Li, C. X., Jin, D. D., 2018. Analysis on the Consolidation of Non-Homogeneous Soil with Non-Darcian Flow Law. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 35(2): 285–291, 449 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Y., 1981. One Dimensional Consolidation of Viscoelastic Material under Variable Load. *Hydro-Science and Engineering*, (2): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. L., Wu, Q., Zhao, Z. M., et al., 2007. Consolidation Computation of Aquitard Considering Non-Darcy Flow. *Rock and Soil Mechanics*, 28(5): 1061–1065 (in Chinese with English abstract).
- Xie, K. H., 1994. Theory of one Dimensional Consolidation of Double-Layered Ground and Its Applications. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 16(5): 24–35 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. Y., Zhou, Z. F., Gao, Z. Q., 2011. Experimental Research of Hysteresis Effect of Land Subsidence Caused by Water Releasing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(S2): 3595–3601 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Yang, W. T., Chen, Z., et al., 2021. One-Dimensional Viscoelastic Consolidation Analysis of Aquifer - Aquitard Due to Drawdown of Water Level. *Advanced Engineering Sciences*, 53(5): 89–97 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. T., Xu, J., Wang, S. W., 2020. Experimental Study on Rheological Models of Saturated Clay with Weak Permeability. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 33(2): 225–231 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 金必晶, 殷坤龙, 桂蕾, 等, 2023. 基于遥感解译的盐湖地区输电线路杆塔地面沉降易发性评价. 地球科学, 在线发表. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220413.1713.004.html>
- 李传勋, 马浩天, 金丹丹, 2019. 考虑起始水力坡降的软黏土流变固结解析解. 工程科学与技术, 51(2): 53–60.
- 李传勋, 王昌建, 王素, 等, 2017. 考虑非达西渗流的结构性软土非线性固结分析. 江苏大学学报(自然科学版), 38(4): 472–478.

- 李传勋, 谢康和, 胡安峰, 等, 2012. 基于指数形式渗流下的软土一维非线性固结分析. 中南大学学报(自然科学版), 43(7): 2789—2795.
- 李之达, 邵玉, 2017. 基于初始孔压非均布条件的软黏土地基固结特性分析. 重庆交通大学学报(自然科学版), 36(10): 45—50.
- 刘忠玉, 崔鹏陆, 郑占垒, 等, 2019. 基于非牛顿指数渗流和分数阶 Merchant 模型的一维流变固结分析. 岩土力学, 40(6): 2029—2038.
- 卢慈荣, 曹奕, 蒋军, 等, 2017. 粘弹性软土中盾构隧道的长期沉降. 低温建筑技术, 39(5): 64—67.
- 骆祖江, 王鑫, 代敬, 等, 2023. 地面沉降对地下水可采资源影响研究. 地球科学, 在线发表. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220505.1823.006.html>
- 宋新江, 钱财富, 2010. 渗流作用下黏性土水力梯度分析. 南水北调与水利科技, 8(5): 65—67.
- 王素, 李传勋, 金丹丹, 2018. 考虑非达西渗流的单层非均质地基固结分析. 应用力学学报, 35(2): 285—291, 449.
- 王盛源, 1981. 变荷载下的粘弹性体一维固结问题. 水利水运科学研究, (2): 10—17.
- 谢海澜, 武强, 赵增敏, 等, 2007. 考虑非达西流的弱透水层固结计算. 岩土力学, 28(5): 1061—1065.
- 谢康和, 1994. 双层地基一维固结理论与应用. 岩土工程学报, 16(5): 24—35.
- 徐海洋, 周志芳, 高宗旗, 2011. 释水条件下地面沉降的滞后效应试验研究. 岩石力学与工程学报, 30(S2): 3595—3601.
- 徐进, 杨伟涛, 陈征, 等, 2021. 水位下降诱发含水层-弱透水层 1 维黏弹性固结分析. 工程科学与技术, 53(5): 89—97.
- 杨伟涛, 徐进, 王少伟, 2020. 弱透水性饱和黏土流变模型试验研究. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 33(2): 225—231.