

文章编号:1671-6833(2024)03-0022-07

基于分段线性化的泥浆一维电渗脱水模型

岑勋云¹, 刘忠玉¹, 张景伟¹, 罗文培¹, 汪良强²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州三和水工机械有限公司, 河南 郑州 450120)

摘要:为进一步深入探讨泥浆电渗脱水的影响因素,基于分段线性化方法,建立了泥浆一维电渗脱水模型。该模型考虑了电势梯度、孔隙比等因素对泥浆电渗透系数的综合影响,可以描述泥浆的非线性应力应变关系和大变形效应。与相关解析解及室内模型试验的对比结果表明:所提模型分析结果的误差不超过5%。在此基础上,分析了加载电压、压缩指数、电渗透系数等参数对泥浆电渗脱水过程的影响,结果表明:增大加载电压和电渗透系数,可提高最终脱水量和缩短稳定时间;随着泥浆压缩性的提高,泥浆最终脱水量增大、稳定时间延长。

关键词:电渗脱水; 泥浆; 分段线性化; 电势; 电渗透系数; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.03.003

泥浆主要包括河道疏浚泥浆和工业废弃泥浆,往往具有含水量高、渗透性低、自然沉淀分离耗时长、固结过程缓慢等特点^[1-2]。中国每年的泥浆产量巨大,如果采用外运的方式处理废弃泥浆,不仅成本高昂,而且在运输过程中容易对环境造成二次污染。因此,随着经济及城市化进程的快速发展,对泥浆的无害化、减量化处理要求日益凸显。

目前,结合工程具体情况,泥浆处理技术已得到较大发展,通常利用离心、压滤和真空抽滤等设备,采用机械脱水、土工袋、化学固化、化学絮凝等固液分离方法^[3-9]将泥浆中的水分快速排出,从而大大减小泥浆体积,以方便运输或二次利用。但是如果泥浆中含有较多黏粒,则其渗透性很低,泥浆中水分的排出将变得比较困难。

工程实践表明,电渗法对低渗透性软土地基的固结具有良好的适用性,这是因为电渗法可以同时排出软土中的自由水和部分结合水^[10]。而泥浆体的脱水过程类似于软土的固结过程,因此,可将电渗技术引入到泥浆处理中,并参考软土的电渗固结理论研究泥浆的电渗脱水机理。Esrig^[11]于1968年提出的一维电渗固结理论是建立在小变形假定之上的,但考虑到软土的固结变形较大,该假定已不再适用。王柳江等^[12]在拉格朗日坐标下,以有限变形为

基础,以超静孔压为变量,将 Esrig 电渗固结方程修正为一个高度非线性的偏微分方程,并采用有限差分法进行了求解。Fox 等^[13]另辟蹊径,引入分段线性化思想,不推导偏微分方程,仅利用渗流连续性条件,提出了一维大变形固结的分段线性数值模型(consolidation settlement 2, CS2)。在此基础上,周亚东等^[14-15]建立了考虑饱和度变化影响的一维电渗固结模型。该模型同时考虑了孔隙比变化对电渗透系数的影响,可以进行轴对称条件下的电渗-堆载耦合固结分析。这些成果可供泥浆脱水理论分析参考。

为进一步深入探讨影响泥浆电渗脱水过程的主要因素,本文在 CS2 固结模型的基础上,同时考虑电渗透系数与电势梯度及孔隙比的综合关系、材料非线性本构关系和大变形效应,建立泥浆一维电渗脱水模型,并分析相关参数对泥浆一维电渗脱水过程的影响。

1 泥浆一维电渗脱水模型

假定初始泥浆均匀饱和;土颗粒和水本身不可压缩,且二者的电阻在电渗脱水过程中为常量;泥浆的脱水量与泥浆的体积压缩量数值相等;阴极排出的气体不影响电渗脱水过程。

收稿日期:2023-09-10;修订日期:2023-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578511);河南省科技攻关项目(232102320352)

通信作者:刘忠玉(1968—),男,河南延津人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事岩土力学研究,E-mail: zhylu@zzu.edu.cn。

引用本文:岑勋云,刘忠玉,张景伟,等. 基于分段线性化的泥浆一维电渗脱水模型[J]. 郑州大学学报(工学版),2024,45(3):22-28. (CEN X Y, LIU Z Y, ZHANG J W, et al. One dimensional electroosmotic dewatering model of mud based on piecewise linearization[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(3): 22-28.)

如图1所示,以底面为基准面,向上为正。电源正负极分别放置在泥浆顶面和底面,泥浆的上、下边界可以设置为透水或不透水。在初始时刻(图1(a)),泥浆孔隙比处处相同,泥浆表面上覆荷载为 q_0 ,两端加载电压为 U_m ,泥浆只沿竖向发生渗流和变形,泥浆初始厚度为 H_0 ,静水面高度 H_w 始终与泥浆表面高度一致。将泥浆自下而上均匀划分为 n 个单元,每个单元的初始厚度均为 L_0 ,此时单元 j 的中心点高程为 z_j^0 。经过时间 t 后(图1(b)),泥浆层厚度变为 H' ,每个单元的厚度及位置高度随时间同步更新。

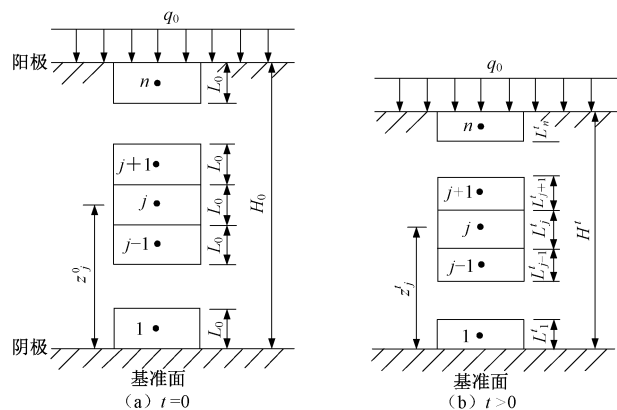


图1 模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of the model

1.1 本构关系

为建立数值模型,采用由一维固结试验获得的孔隙比-有效应力关系曲线,由渗流试验获得的孔隙比-渗透系数关系曲线来描述其本构关系。考虑到泥浆体的脱水过程类似于正常固结土的固结过程,这里引入经典的非线性经验关系来描述其压缩过程:

$$e - e_0 = C_e (\lg \sigma'_0 - \lg \sigma'). \quad (1)$$

式中: C_e 为泥浆的压缩系数; e 和 e_0 分别为对应于有效应力 σ' 和某参考应力 σ'_0 的孔隙比。

假定泥浆由于水头差引起的渗流符合达西定律,但其渗透系数会随孔隙比的变化而变化,并可用式(2)^[16]表示:

$$k_w = k_{w0} \left(\frac{1+e}{1+e_0} \right)^2. \quad (2)$$

假定由电势差引起的渗流符合 Helmholtz-Smoluchowski 理论。Mitchell^[17]认为土的电渗透系数一般为 $2 \times 10^{-9} \sim 8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 。然而,周亚东等^[14]、庞宽等^[18]、李瑛^[19]的试验表明,电势梯度 i_e 对电渗透系数 k_e 有影响,并认为二者之间为线性关系。罗文培^[20]的试验进一步表明,电渗透系数 k_e 与电势梯度 i_e 及孔隙比 e 都是线性相关的,因此本文将把 k_e 表示为 i_e 和 e 的线性函数,即

$$k_e = Ae + Bi_e + C. \quad (3)$$

式中: A 、 B 和 C 为可通过试验数据拟合获得的试验常数,其单位分别为 $10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 、 $10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{s} \cdot \text{V})$ 、 $10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$; k_e 和 i_e 的单位分别为 $10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 和 V/cm 。

1.2 总应力、有效应力和孔隙水压力

每个泥浆单元中心节点的总应力 σ_j^t 为该节点以上所有泥浆层的自重与上覆荷载之和,即

$$\sigma_j^t = \frac{L_j \gamma_j}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} L_i \gamma_i + q_0; \quad (4)$$

$$\gamma_j = \frac{G_s + e_j^t}{1 + e_j^t} \cdot \gamma_w. \quad (5)$$

式中: γ_j 为单元 j 的重度, $j=1,2,\dots,n$; e_j^t 为第 j 泥浆层在 t 时刻的孔隙比; γ_w 为水的容重,在计算过程中取 $9.81 \text{ kN}/\text{m}^3$ 。

在时刻 t ,节点 j 处的有效应力 $\sigma_j'^t$ 可由式(1)得出。这样,节点 j 处的孔隙水压力为

$$u_j^t = \sigma_j^t - \sigma_j'^t. \quad (6)$$

1.3 渗透系数和电渗透系数

在 t 时刻,节点 j 处的水力渗透系数 $k_{w,j}^t$ 和电渗透系数 $k_{e,j}^t$ 可根据时刻 t 对应的孔隙比计算。由于不同单元的水力渗透系数和电渗透系数并不相等,所以相邻单元界面处的等效渗透系数可根据相邻单元的串联原则计算^[11-12],即

$$k_{xs,j}^t = \frac{k_{x,j-1}^t k_{x,j}^t (L_{x,j-1}^t + L_{x,j}^t)}{L_{x,j-1}^t k_{x,j-1}^t + L_{x,j}^t k_{x,j}^t}. \quad (7)$$

式中:下标 x 表示 e 或 w 。

1.4 电势

对于饱和泥浆,可将其电阻视为由水和土颗粒各自的电阻并联产生^[15]。所以,单元 j 泥浆的电阻率可表示为

$$\eta_j^t = \frac{1}{\frac{1}{\eta_s(1+e_j^t)} + \frac{e_j^t}{\eta_w(1+e_j^t)}}. \quad (8)$$

式中: η_s 为泥浆土颗粒的电阻率; η_w 为水的电阻率; e_j^t 为泥浆单元 j 在 t 时刻的孔隙比。

单元 j 泥浆的电阻可表示为

$$R_j^t = \eta_j^t L_j^t. \quad (9)$$

对于整个泥浆层而言,每个单元体是相互串联的,所以在时刻 t ,节点 j 处的电势 V_j^t 可表示为

$$V_j^t = \frac{\frac{R_j^t}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} R_i^t}{\sum_{i=1}^n R_i^t} U_m. \quad (10)$$

式中: V_j^t 为单元 j 中心节点处的电势; U_m 为施加在

试样两端的电压; R_j^t 为单元 j 在时刻 t 的电阻。

j 单元和 $j-1$ 单元中点的电势差为

$$V_j^t - V_{j-1}^t = \frac{R_j^t + R_{j-1}^t}{R_j^t} U_m \circ$$

$$\sum_{i=1}^t R_i^t$$

(11)

1.5 脱水量(沉降)

在时刻 t , 单元 j 和 $j-1$ 之间分别由电势差和水头差引起的水的渗流速度为

$$v_{e,j}^t = k_{es,j}^t i_{e,j}^t;$$

(12)

$$v_{w,j}^t = k_{ws,j}^t i_{w,j}^t \circ$$

(13)

时刻 t 电势梯度 $i_{e,j}^t$ 与水力梯度 $i_{w,j}^t$ 分别为

$$i_{e,j}^t = \frac{V_j^t - V_{j-1}^t}{z_j^t - z_{j-1}^t};$$

(14)

$$i_{w,j}^t = \frac{h_j^t - h_{j-1}^t}{z_j^t - z_{j-1}^t} \circ$$

(15)

节点 j 的水头 h_j^t 为

$$h_j^t = z_j^t + \frac{u_j^t}{\gamma_w} \circ$$

(16)

经过时间 Δt 后, 单元 j 的高度、孔隙比将分别更新为

$$L_j^{t+\Delta t} = L_j^t - (v_{e,j}^t - v_{e,j+1}^t + v_{w,j+1}^t - v_{w,j}^t) \Delta t;$$

(17)

$$e_j^{t+\Delta t} = \frac{L_j^{t+\Delta t} (1 + e_{0,j})}{L_{0,j}} - 1 \circ$$

(18)

同时, 泥浆的高度 $H^{t+\Delta t}$ 为

$$H^{t+\Delta t} = \sum_{i=1}^n L_i^{t+\Delta t} \circ$$

(19)

饱和泥浆的脱水量可用其表面的沉降量来表示。此时, 泥浆表面的沉降量 $S^{t+\Delta t}$ 为

$$S^{t+\Delta t} = H_0 - H^{t+\Delta t} \circ$$

(20)

2 模型验证

根据上述理论分析, 利用 Fortran 编写了一个数值模拟程序。这里, 分别通过将文献[12]中的解析解、室内试验结果与数值计算结果进行对比, 进一步验证该数值模拟程序的正确性。

2.1 与文献[12]的对比

文献[12]针对一维电渗固结课题给出解析解。在其进行参数分析时, 假定电渗固结前泥浆已经完成了自重固结沉降, 初始顶面孔隙比 $e_{00} = 3$; 假定泥

浆孔隙比的改变量与有效应力成正比, 体积压缩系数 $m_v = 4.0 \text{ MPa}^{-1}$; 初始渗透系数 $k_{w0} = 1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$; $G_s = 2.75$; $H_w = 1.0 \text{ m}$; 完成自重固结前的泥浆初始上覆荷载为 $q_p = 10 \text{ kPa}$; 电渗过程开始瞬间加载的上覆荷载为 $q_0 = 100 \text{ kPa}$ 。设电渗透系数为定值, 且按式(21)计算:

$$k_{e0} = \frac{k_i k_e (1 + e)^2}{(1 + e_0)^2} \circ$$

(21)

式中: 电迁移系数 $k_i = 2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 / (\text{s} \cdot \text{A})$; 初始导电率 $k_e = 2.0 \text{ s/m}$ 。

这里取加载电压分别为 0、2、4、8 V 进行模拟, 且假定电势在泥浆内随高度呈现线性分布。图 2 为本文解与文献[12]解析解的对比情况。这里, $T_v = k_{w0} t / (m_v \gamma_w H^2)$ 为时间因子。图 2 表明, 二者基本重合。

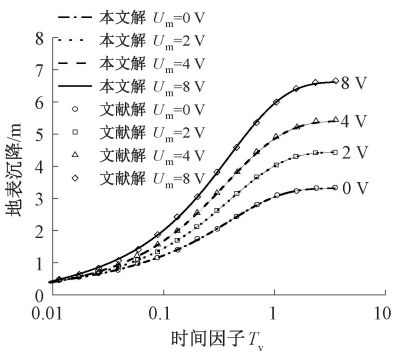


图 2 本文数值解与文献[12]解析解的对比
Figure 2 Comparison between numerical solutions in this paper and analytical solutions in reference[12]

2.2 与室内模型试验结果对比

试样取自信阳市某工地。首先对其进行土粒比重、液塑限、压缩指数等基本参数测定, 结果如表 1 所示。其中, 孔隙水和土骨架的电阻率分别选用了 Zhou 等[21]的分析数据。

为探究泥浆电渗脱水过程的一般规律, 研制了一种泥浆电渗脱水试验装置, 如图 3 所示。该装置主要由泥浆桶、直流电源、测量工具三部分组成, 泥浆桶内径 $d_1 = 15 \text{ cm}$, 桶壁厚 $d_2 = 1 \text{ cm}$, 高度 $H = 30 \text{ cm}$, 桶内主要放置有透水石与电极片, 桶底正中心位置开孔并安插排水管, 下接放在电子秤上的集水容器, 以便实时监测脱水量。同时, 泥浆顶部架设百分表用于监测表面沉降。对于饱和泥浆, 其表面

表 1 泥浆的物理性质指标
Table 1 Physical properties of mud

初始孔 隙比 e	土粒比 重 G_s	初始重度 $\gamma_0 / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	塑性指 数 I_p	压缩指 数 C_c	初始渗透系数 $k_{w0} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	孔隙水电阻率 $\eta_w / (\Omega \cdot \text{m})$	土骨架电阻率 $\eta_s / (\Omega \cdot \text{m})$
2.00	2.67	18.9	40.5	25.6	14.9	0.416	1×10^{-8}	4.5	608

沉降与泥浆桶横截面积的乘积应等于脱水量。所以,同时监测脱水量和泥浆表面沉降可以相互印证数据是否正确。

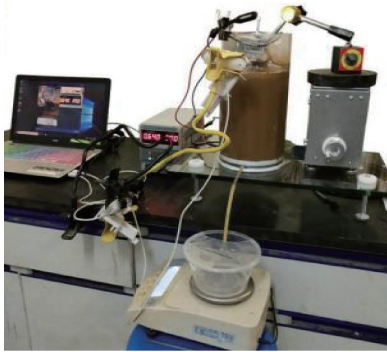


图 3 泥浆电渗脱水试验装置

Figure 3 Test apparatus for mud electroosmotic dewatering

配置含水率为 75% 的 4 组泥浆,泥浆初始高度为 20 cm,其底部设置厚度为 1 cm 的透水石以便脱水。电渗脱水试验方案如表 2 所示。分别加载不同的电压进行脱水试验,实测脱水量与时间的关系见图 4。很明显,电势梯度越大,泥浆排水就越快,且排水量也越大。

表 2 电渗脱水试验方案

Table 2 Electroosmotic dewatering test scheme

试验编号	加载电压 U_m/V	初始电势 梯度/ $(V \cdot cm^{-1})$	实际初始 含水率/%	泥浆 孔隙比 e
F1	0	0	75.1	2.02
F2	10	0.5	75.3	2.03
F3	20	1.0	74.6	2.01
F4	30	1.5	74.9	2.01

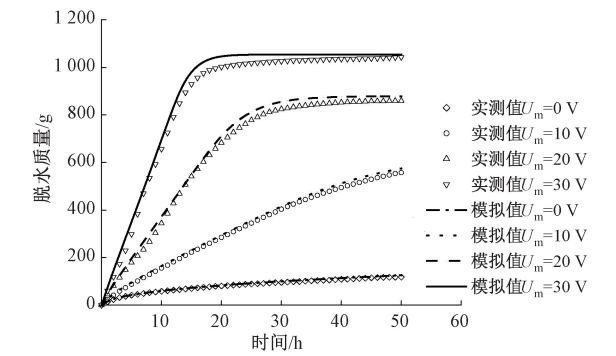


图 4 累计脱水量实测值与模拟值对比

Figure 4 Comparison between measured and simulated cumulative water removal

数值模拟时,取 $n=20$,电渗透系数与电势梯度及孔隙比的关系表达式^[20]为

$$k_e = 4.583e + 0.315i_e - 2.875。 \quad (22)$$

理论计算脱水量见图 4。很明显,对于自重脱水和电压为 10 V 的试验,理论计算结果和试验值符合很好,而对于电压为 20 V 和 30 V 的试验,在试验

初期二者比较一致,但在后期,前者要略大于后者,但二者之间最大相对误差不超过 5%。其原因可能有两点:一是随着试验的进行,上部泥浆的含水率在逐渐下降,可能由饱和状态转为不饱和状态,进而使得电阻增大;二是阴极产生了氢气气泡,也会堵塞孔隙。这两点原因都会减缓脱水进程,使得排水量减少。因此,对于加载电压较大即电势梯度较大时,原则上就需要考虑饱和度变化的影响。

3 参数分析

以下分析中,均取底面为阴极脱水面、顶面为阳极自由面,泥浆的物理性质指标同表 1,取泥浆初始高度 H_0 为 1 m,泥浆顶面荷载 q_0 为 0 kPa。分析除加载电压外其他模型参数影响时,泥浆两端加载的电压 U_m 取为 60 V。

3.1 加载电压的影响

泥浆表面的沉降可以反映脱水量的大小。为考察加载电压对电渗脱水过程的影响,图 5 给出了不同加载电压 U_m 时泥浆表面沉降随时间的变化过程。图 5 表明,电渗脱水导致的沉降分为近似线性脱水、减速脱水和稳定三个阶段,且随着电压的增大,脱水量加大,线性脱水阶段与减速脱水阶段所需要的时间也都不断缩短,即脱水速度也加快。

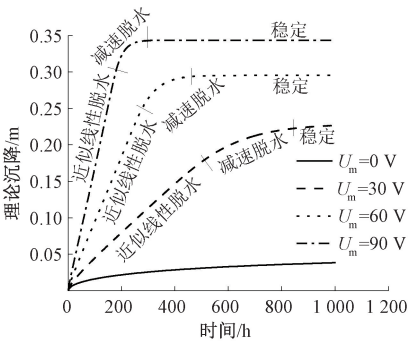


图 5 电压对沉降的影响

Figure 5 Effect of voltage on settlement

图 6 分别给出了几个不同时刻泥浆内孔压的分布情况。图 6(a)表明,脱水 50 h 后,加载电压大于 0 V 的三组泥浆,其上部的孔压均为负值,且随着加载电压的增大,负孔压区增大,孔压绝对值也增大。同时,在高度 0.6 m 以下泥浆内的孔压为正值,这是由于泥浆电渗脱水过程中孔隙水不断从阳极向阴极自上而下排出,上部泥浆先脱水稳定,形成负孔压,下部孔隙水压还没有完全消散。

从图 6 可以看出,随着电渗脱水的进行,泥浆高度不断降低,由于静水面高度始终与泥浆表面高度一致,试验可测得孔压的范围也不断降低。加载电压大于 0 V 的 3 组,负孔压区不断向下延伸,且孔压

绝对值也持续增长,但 500 h 后,对应高度处的孔压变化已经不大,特别是加载电压为 60 V 和 90 V 两

组泥浆中孔压基本趋于稳定。结合图 5 可以看出,此时这两组的沉降已达稳定状态。

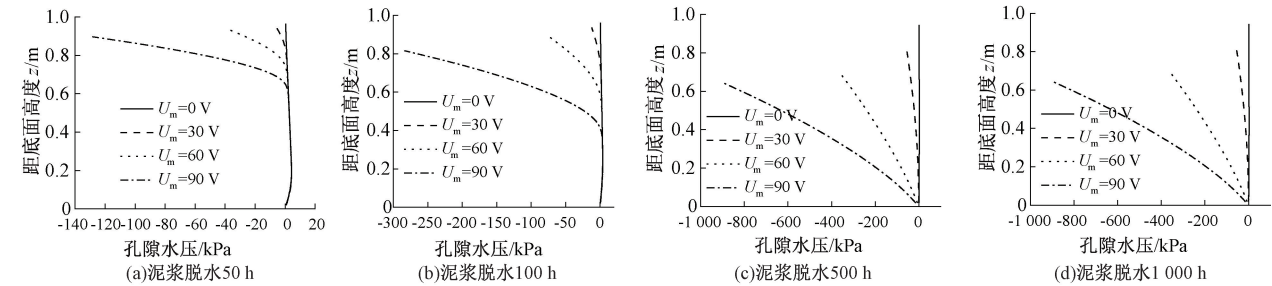


图 6 加载不同电压时泥浆各高度处孔隙水压

Figure 6 Pore water pressure in mud at different voltages

3.2 压缩指数的影响

压缩指数表示泥浆压缩性的高低,图 7 为压缩指数对电渗脱水过程的影响。在前 230 h 内,几条曲线几乎重合,说明压缩指数对泥浆脱水前期的影响很小。但随着时间的推移,几条曲线之间的差异逐渐显著,说明压缩指数对脱水后期的影响较大,而且,压缩指数越大,最终沉降量就越大,达到稳定的时间就越长。

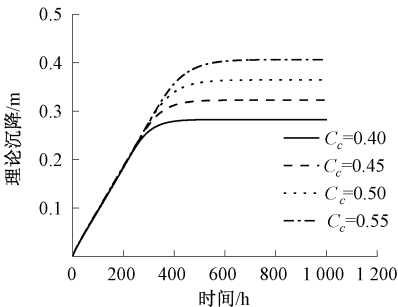


图 7 压缩指数对沉降的影响

Figure 7 Effect of compression index on settlement

3.3 电渗透系数的影响

由式(22)可计算出第 j 层与第 $j-1$ 层接触面的等效电渗透系数 $k_{es,j}$ 。图 8 给出了 $k_{es,5}$ 、 $k_{es,9}$ 、 $k_{es,13}$ 、 $k_{es,17}$ 等 4 个电渗透系数随时间变化的曲线。由图 8 可知,不同层间的等效电渗透系数都是在开始的一段时间内几乎没有变化,然后突然降低,最后逐渐趋于稳定。而且,越靠近底部阴极处的等效电渗透系数在开始阶段保持几乎不变的时间就越长。随着时间的增长,最上层的泥浆由于有效应力最大而孔隙率先缩小,进而导致等效电渗透系数减小。随后从上往下各层泥浆孔隙与电渗透系数都逐步减小,直至最后稳定。很明显,电渗透系数稳定值沿深度也是不均匀的。图 8 表明,等效电渗透系数为 $2.0 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 。为分析电渗透系数对电渗脱水过程的影响,将电渗透系数 k_{es} 设为定值,分别为 2.00×10^{-5} 、 4.25×10^{-5} 、 $6.50 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 。

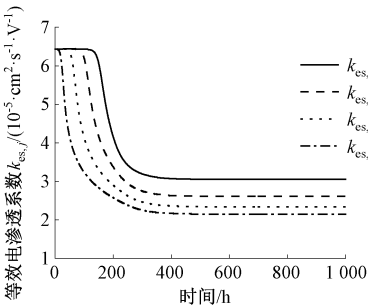


图 8 等效电渗透系数与时间的关系

Figure 8 The relation between equivalent electroosmotic coefficient and time

图 9 分别给出了不同电渗透系数影响下的理论沉降变化曲线。由于自重脱水类似于软土的固结,所以水力渗透系数对最终沉降量并没有影响,只会影响沉降速率。与之不同的是,图 9 表明,电渗脱水时,电渗透系数不仅影响沉降速率,还会影响最终沉降量。电渗透系数越大,沉降量就越大,而且达到稳定的时间就越短。同时,图 9 也说明了电渗计算中考虑电渗透系数变化的重要性。

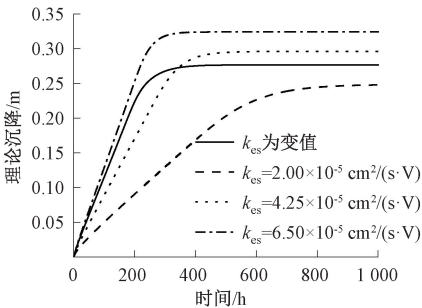


图 9 电渗透系数对沉降的影响

Figure 9 Effect of electroosmotic coefficient on settlement

4 结论

本文建立了一种泥浆一维电渗脱水计算模型。与理论解析解和室内模型试验的对比表明,本文模型的计算误差不超过 5%。

(1) 增大加载电压可以有效提高电渗初期的脱

水速率以及最终脱水量,且使得达到脱水稳定状态的时间缩短。

(2) 泥浆的压缩指数越大,电渗最终脱水量就越大,达到稳定的时间也就越长。

(3) 增大电渗透系数,可提高最终脱水量和缩短稳定时间。电渗分析时应同时考虑电渗透系数与孔隙比和电势梯度的关系。

参考文献:

[1] 詹良通,张斌,郭晓刚,等. 废弃泥浆底部真空-上部堆载预压模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3245-3254.

ZHAN L T, ZHANG B, GUO X G, et al. Physical modeling study on treatment of waste slurry with vacuum preloading at bottom combined with upper surcharge loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3245-3254.

[2] 田浩,赵会军. 废弃油基泥浆处理工艺与研究[J]. 环境工程, 2014, 32(增刊1): 310-313.

TIAN H, ZHAO H J. Waste oil-based mud treatment technology and research[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(S1): 310-313.

[3] 严晓威,柳忠现,王盛,等. 3种污泥机械脱水方式的工程应用[J]. 净水技术, 2022, 41(增刊2): 100-105.

YAN X W, LIU Z X, WANG S, et al. Engineering application of three mechanical dewatering methods of sludge[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(S2): 100-105.

[4] 郑华,尹昭宇,林宇杰,等. 土工管袋用于湿地疏浚淤泥脱水处理效果评估[J]. 浙江水利科技, 2022, 50(4): 51-55.

ZHENG H, YIN Z Y, LIN Y J, et al. Evaluation of dehydration treatment effect of wetland dredged sludge with geotextile pipe bags[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2022, 50(4): 51-55.

[5] 王文军,袁飞飞,蒋建良,等. 高含水率吹填淤泥固化土强度特性及预测模型[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 461-467.

WANG W J, YUAN F F, JIANG J L, et al. Strength properties and prediction models of solidified dredger filled mud with high water-content[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 461-467.

[6] 党星赛,谢靖宇,洪钊,等. 极高含水率疏浚泥浆的絮凝机理和颗粒尺寸变化规律研究[J]. 科技通报, 2022, 38(2): 67-72.

DANG X S, XIE J Y, HONG Z, et al. Study on the flocculation

mechanism and particle size change law of dredged mud with extremely high water content[J]. Bulletin of Science and Technology, 2022, 38(2): 67-72.

[7] 臧小龙. 新型泥水分离处理系统在盾构隧道施工中的应用[J]. 建筑机械, 2012(23): 122-124, 20.

ZANG X L. Application of new slurry separate disposal system for construction of shield machine tunnel[J]. Construction Machinery, 2012(23): 122-124, 20.

[8] 朱群峰,赵士文,杨守华,等. 围海造地软基加固试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(5): 16-21.

ZHU Q F, ZHAO S W, YANG S H, et al. Consolidation of soft foundation of reclamation projects[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(5): 16-21.

[9] 魏雁冰,范明桥,林生法,等. 建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 65-69.

WEI Y B, FAN M Q, LIN S F, et al. Experimental study on construction waste slurry treatment by vacuum preloading[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(1): 65-69.

[10] 王军,张乐,刘飞禹,等. 真空预压-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 4181-4192.

WANG J, ZHANG L, LIU F Y, et al. Experimental study of vacuum preloading combined reinforcement with electro-osmosis in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4181-4192.

[11] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(4): 899-921.

[12] 王柳江,刘斯宏,王子健,等. 堆载-电渗联合作用下的一维非线性大变形固结理论[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 91-98.

WANG L J, LIU S H, WANG Z J, et al. A consolidation theory for one-dimensional large deformation problems under combined action of load and electroosmosis[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 91-98.

[13] FOX P J, BERLES J D. CS2: a piecewise-linear model for large strain consolidation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(7): 453-475.

[14] 周亚东,王保田,邓安. 分段线性电渗-堆载耦合固结模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2311-2316.

ZHOU Y D, WANG B T, DENG A. Piecewise-linear model for electro-osmosis-surgepreloadingcoupled consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engi-

neering, 2013, 35(12): 2311-2316.

[15] 周亚东, 邓安, 刘中宪, 等. 考虑饱和度变化的一维电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1524-1529.

ZHOU Y D, DENG A, LIU Z X, et al. One-dimensional electroosmosis consolidation model considering variable saturation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1524-1529.

[16] 谢康和, 郑辉, LEO C J. 软黏土一维非线性大应变固结解析理论[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 680-684.

XIE K H, ZHENG H, LEO C J. An analytical theory for 1-D nonlinear large strain consolidation of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 680-684.

[17] MITCHELL J K. 岩土工程土性分析原理[M]. 高国瑞, 译. 南京: 南京工学院出版社, 1988: 371-382.

MITCHELL J K. Principle of geotechnical engineering and soil property analysis[M]. Translated by Gao Guorui. Nangjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1988: 371-382.

[18] 庞宽, 刘斯宏, 吴澎, 等. 电渗法加固软土地基基本参数室内试验研究[J]. 水运工程, 2011(3): 148-153.

PANG K, LIU S H, WU P, et al. Lab experimental study on electro-osmotic parameters for soft soil consolidation[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(3): 148-153.

[19] 李瑛. 软黏土地基电渗固结试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

LI Y. Experimental and theoretic study on electro-osmotic consolidation of soft clay foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[20] 罗文培. 泥浆电渗脱水试验与理论研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.

LUO W P. Experimental and theoretical study on electro-osmotic dewatering of mud[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.

[21] ZHOU Y D, DENG A. Modelling combined electroosmosis-vacuum-surchage preloading consolidation considering large-scale deformation[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 109: 46-57.

One Dimensional Electroosmotic Dewatering Model of
Mud Based on Piecewise Linearization

CEN Xunyun¹, LIU Zhongyu¹, ZHANG Jingwei¹, LUO Wenpei¹, WANG Liangqiang²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Sanhe Hydraulic Machinery Co., Ltd., Zhengzhou 450120, China)

Abstract: Based on piecewise-linear method, a one-dimensional electroosmotic dewatering model of mud was proposed in order to further explore the influence factors of mud electroosmotic dehydration. In this model, the combined influence of potential gradient and void ratio on the electroosmotic coefficient of mud and the nonlinear stress-strain relationship and large deformation effect of mud were considered. Compared with the results of relevant analytical solutions and laboratory model tests, the error of this model was less than 5%. On this basis, the influences of loading voltage, compression index and electroosmotic coefficient on the process of mud electroosmosis dehydration were analyzed. The results showed that the increase of loading voltage and electroosmotic coefficient could improve the final water removal and shorten the stabilization time. With the increase of mud compressibility, the final dewatering volume of mud increased, but the stabilization time was prolonged.

Keywords: electroosmotic dewatering; mud; piecewise linearization; electric potential; electroosmotic coefficient; model test