

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010026

高岭土电渗固结特性及数值模拟研究

沈美兰, 周太全, 李吴刚

(江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 电渗固结是促进低渗透性软土排水固结的有效方法。为了揭示不同电势梯度影响高岭土电渗固结的基本规律, 在自制电渗试验装置上对高岭土进行电渗试验。试验过程中测量电流、排水量、沉降量以及有效电压随时间的变化, 并进行单位排水能耗分析。基于电渗固结多场耦合控制方程, 实现土体电渗固结全耦合分析的有限元数值方法, 计算结果与解析解吻合良好, 验证了程序的有效性。为预测不同电势梯度下土体沉降量随时间的变化关系, 分别对 0.5, 1.0, 1.5 V/cm 3 种电势梯度电渗固结试验进行数值模拟分析, 获得模型表面沉降量分布、阳极超静孔隙水压力时空发展规律、阳极位置固结度等曲线, 计算结果和试验结果吻合良好, 可为实际电渗试验提供理论指导。

关键词: 电渗; 电势梯度; 固结试验; 数值分析

中图分类号: TU411.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0078-08

A study of the kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation

SHEN Meilan, ZHOU Taiquan, LI Wugang

(School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Electro-osmotic consolidation is an effective way to promote consolidation of soft soil with low permeability. In order to investigate the basic law of electro-osmotic consolidation behavior of soft clay under different potential gradients, electro-osmotic tests are carried out for kaolin with a self-made device. Changes of current, displacement, settlement and potential with time are measured during the tests, and energy consumption per unit drainage is also analyzed. Based on the electro-osmosis consolidation coupling governing equations, the electro-osmosis of soil consolidation full coupling analysis of finite element programs is developed. The finite element program is developed to examine the fully coupled soil electro-osmotic consolidation behavior based on the multi-field coupling governing equations of electro-osmotic consolidation. The numerical analysis is in good agreement with the analytical results, which proves the efficiency of the program. To predict the settlement of soft clay with time under different potential gradients, numerical analysis is performed to study the electro-osmosis consolidation tests of kaolin clay under three potential gradients: 0.5, 1.0 and 1.5 V/cm, respectively. Numerical simulation analysis for the surface subsidence distribution model, the space-time development of anode excess pore water pressure, and the degree of consolidation of the anode are performed. The numerical analysis results for the settlement are in good agreement with those obtained from the experiments. The results can provide theoretical guidance for practical electro-osmosis tests.

Keywords: electro-osmosis tests; potential gradients; consolidation tests; numerical analysis

收稿日期: 2020-10-15; 修订日期: 2020-12-15

基金项目: 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1909); 国家自然科学基金项目(51009071)

第一作者: 沈美兰(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土相关的研究。E-mail: 1839963126@qq.com

通讯作者: 周太全(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学、工程力学教学与科研。E-mail: Zhoutaiquan@163.com

沉积软土具有含水率高、压缩性高、渗透系数低、强度低等特点,采用传统的堆载预压法、真空预压法排水时间过长,施工期间可能引起土体剪切强度破坏。电渗法使得软土内部形成较大孔隙水渗流,从而可以加快软土排水,是固结软土的有效方法。Casagrande^[1]将电渗技术首次运用到铁路工程中。Lamont-Black^[2]对较大范围的路基边坡土进行电渗处理,排出水量 7300 L。为探究电渗排水固结机理,众多学者进行了室内试验研究。胡黎明等^[3]探究不同干密度下土体的排水效果分析,发现随着土体干密度的增大,排水量和排水速率逐渐减小。Hamira 等^[4]对高岭土进行电渗排水试验,发现 25 V 电压下高岭土的排水量为 10 V 电压下的 1.55 倍,但单位体积排水量耗能更高。李瑛^[5]对杭州土的电渗排水试验表明低电压条件下的电渗渗透系数较高。金志伟等^[6]研究表明,真空-电渗联合排水法可以对低含水率盾构泥浆进行脱水分离。

随着电渗技术在岩土工程中的应用,电渗固结理论也得到进一步的发展。为预测土体电渗固结特性,Esrig^[7]首先提出了一维电渗固结理论和解析解。徐伟^[8]基于太沙基固结理论和电渗固结理论,进行了堆载预压-电渗联合工况下的室内试验和数值分析。胡黎明^[9]在 Biot 固结理论的基础上,进行电场、渗流场和应力场等多场耦合模型数值分析,发现试验结果与数值分析结果吻合良好。龚明星^[10]考虑有效电势变化情况下求出平均固结度和孔隙水压力的解析解。Wu 等^[11]采用真空预压联合电渗工况下的轴对称模型,考虑水平和竖向渗流,推导出任一点的超静孔压理论解。本文基于室内电渗试验研究电势梯度对高岭土固结的影响,进行不同电势梯度条件下高岭土电渗固结试验,研究电流、排水量、沉降量和有效电压随时间的变化,测量电渗后土体的含水率分布,并对最终的单位排水能耗进行分析。基于多物理场仿真分析软件 Comsol Multiphysics 实现电渗固结有限元分析,通过室内试验与数值分析对比,研究不同电势梯度条件下电渗固化高岭土固结性状,为电渗试验和工程应用提供技术依据。

1 室内模型试验

1.1 试验装置

试验装置如图 1 所示,其中图 1(a)为整体电渗试验系统,包括电渗试验槽、电路和测量系统,电渗试验槽为自制的有机玻璃电渗槽(图 1b),包括阳极腔室、

矩形盛土器、阴极腔室。电渗装置整体外形尺寸为 370 mm×146 mm×200 mm,底板厚度为 10 mm,其余板厚均为 5 mm。电渗槽左右两侧底部分别设有排水孔,以排出电渗过程中的水。距离电渗装置左右侧板 4 cm 处分别设置 1 块多孔透水板,距多孔排水板 0.5 cm 处,每隔 6 cm 设置 1 个电势测孔,采用钛合金探究电渗过程中土样内部的电势分布。为防止电极腐蚀的影响,电极材料为镀钉钛网。在电渗装置中部和左右两侧分别安装位移传感器,监测试验过程土样的竖向变形。

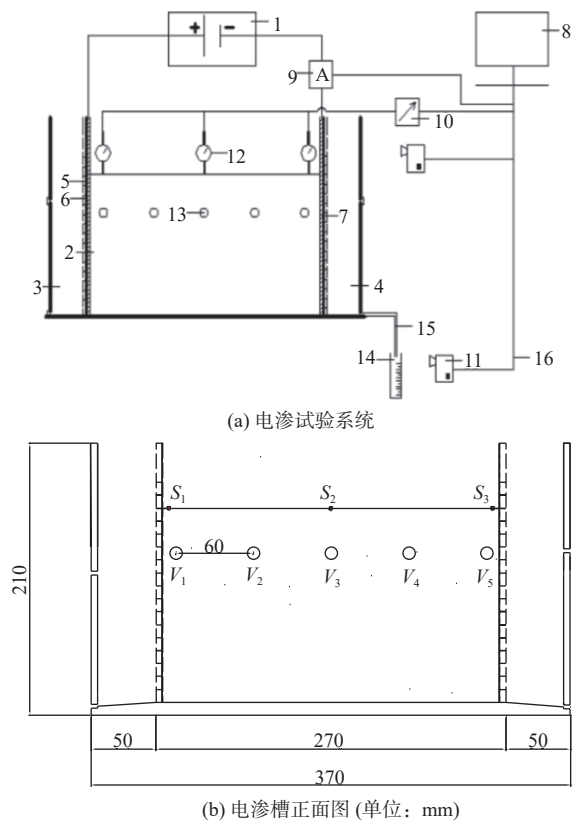


图 1 电渗试验装置图

Fig. 1 Diagram of the electro-osmotic test

1—直流电源;2—土样箱;3—阳极腔室;4—阴极腔室;5—多孔排水板;6—土工布;7—镀钉钛网电极;8—数据采集系统;9—电流采集盒;10—位移采集盒;11—拍照装置;12—位移传感器;13—电压测孔;14—量筒;15—集液导管及开关;16—导线

1.2 试验方法

(1) 土样的配制

本试验采用商品高岭土,含水率 49%,比重 2.72,液限 15%,塑限 49%,塑性指数 34。

将高岭土放入烘箱,在温度 105 °C 条件下烘 24 h,除去水分,取出在室温下冷却。随后将高岭土配制成目标含水率 49% 的土料,搅拌完后对土料抽真空以去除气泡。静置 24 h,使水分分布均匀。

电渗槽内侧壁涂抹凡士林,以减小边界效应对土样固结的影响。将土料分层装入模型箱中,每层土料高度为 5 cm,并对土料振捣以排出装料过程中混入的气泡;装料结束后在上部覆盖保鲜膜,减小试验过程中表层土料水分蒸发对试验结果的影响。

(2) 试验方案

进行 3 组电渗试验,电势梯度分别为 0.5, 1.0, 1.5 V/cm(分别对应 13, 26, 39 V 的电压),电渗时长为 48 h,每隔 1 h 监测电流、排水量和沉降量。电渗结束后分别测量土体阳极、中部和阴极位置处上、中、下三层的含水率。

2 试验结果与分析

2.1 土体电流和排水量

土体中电流和排水量随时间的变化关系如图 2 所示。试验结果表明:电势梯度越大,土样中电流越大且衰减速度越快,在电渗至 24 h 左右,土样中的电流趋于稳定。0.5, 1.0, 1.5 V/cm 电势梯度条件下的最终平稳电流分别为 20, 30, 40 mA 左右。同时,电势梯度越大,土样的前期排水速度越快,之后逐渐减小,直到 20 h 左右趋于平稳,表明 20 h 后土体固结程度接近完成。土样的最终排水量分别为 100, 320, 400 mL,与电势梯度呈正相关。1.5 V/cm 电势梯度条件下,土体最终排水量较 0.5, 1.0 V/cm 电势梯度条件下分别增加 263.3%、21.3% 左右。

3 组高岭土试样初始孔隙比、含水量相同,电势梯度越大,电渗流速度越大,排水总量也越大;电渗流速度和土体电流正相关^[12],所以电势梯度越大,土体中的电流也越大。

2.2 土体沉降和含水率

3 种电势梯度下沉降随时间的变化关系如图 3 所示。在电势梯度 0.5, 1.0, 1.5 V/cm 条件下,阳极处的土体沉降量分别为 4.5, 9.5, 9.8 mm,土样中部的沉降量分别为 6.2, 10.2, 10.6 mm,阴极处的最终沉降量分别为 3.9, 5.9, 6.0 mm。图 4 为最终各位置处含水率分布曲线,呈现阳极处含水率小于阴极处含水率、高电势梯度土体含水率低于低电势梯度土体含水率的现象。由二维电渗固结理论可知^[13]:负超静孔隙水压力从阳极到阴极呈线性减小,阴极处负超静孔隙水压力基本为 0,导致土体竖向沉降量从阳极到阴极逐渐减小,阳极土体靠近电渗槽边缘,受侧摩阻力的影响,限制了阳极土体的沉降,所以最终中间位置处沉降量最大。

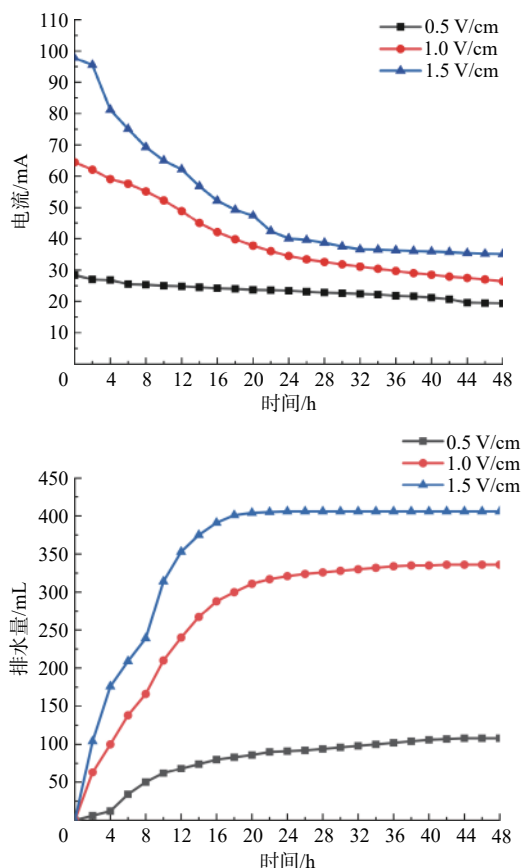


图 2 土体中电流和排水量与时间关系曲线

Fig. 2 Changes of the current and drainage with time of the soil

2.3 土体两端有效电压

从阳极到阴极等间距分布 5 个电势测点,编号为 1~5,电势随时间变化曲线如图 5 所示。假定平行于土体横截面每 1 cm 厚的单位土层电阻值保持不变^[14],两端电势测点距阴阳极都为 1 cm,占盛土器总长度的 4% 左右。可近似认为电势测点 1 和 5 之间的电势差为土体两端有效电压。

由图 5 也可以得出,两端有效电压随时间变化拟合得到的指数曲线基本趋势一致。最终电势梯度越大,有效电压随时间降低速度越大;随着电势梯度减小,有效电压降低趋势减小。有效电压前期降低较快,后期降低较慢。

20 h 之前土体排水量较大,负孔隙水压力逐渐发展,土体发生体缩,电极板与土体脱离,且电势梯度越大排水速率越快,阳极处含水率降低加快,而阴极处含水率变化幅度较小,所以土体与阳极接触电阻增大;且电势梯度越大,裂隙发育程度越高,如图 6 所示。土体电阻变大,电压降速率越快,20 h 后排水量趋于稳定,有效电压也逐渐趋于平稳。

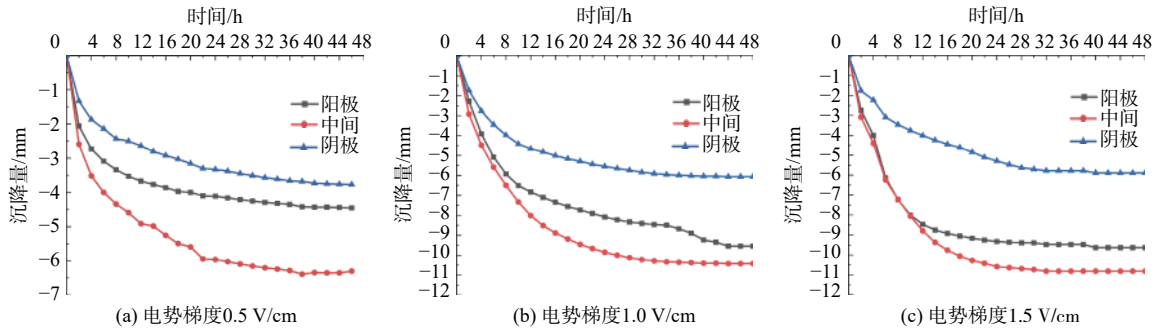


图3 土体沉降量-时间关系曲线

Fig. 3 Changes of soil settlement with time

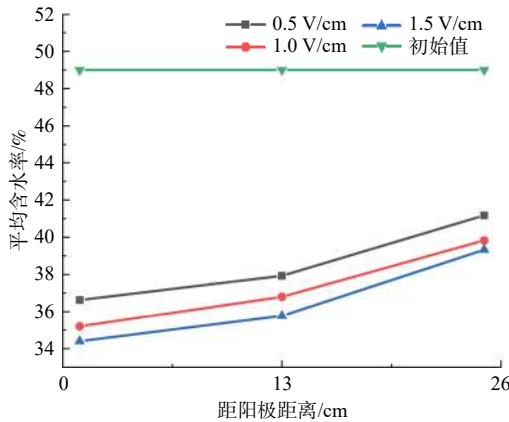


图4 土体最终含水率分布

Fig. 4 Final water moisture distribution of soil

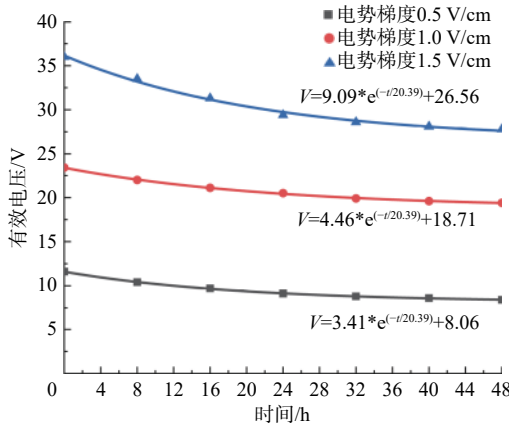


图5 两端有效电压-时间关系曲线

Fig. 5 Changes of the effective voltage at both ends with time

2.4 能耗分析

单位排水能耗的表达式为^[14-15]:

$$C = \frac{C_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} UI dt}{V_{t_2} - V_{t_1}} \quad (1)$$

式中: U ——电源的输出电压/V;

I_t —— t_1 、 t_2 时间段内某时刻的输出电流/A;

C_{t_1} 、 C_{t_2} —— t_1 、 t_2 时刻的能耗值;

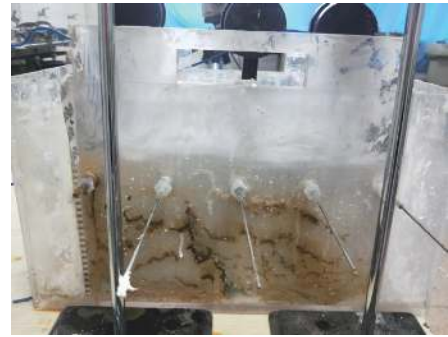


图6 电渗实物图

Fig. 6 Physical picture of the electro-osmosis

V_{t_1} 、 V_{t_2} —— t_1 、 t_2 时刻的排水量。

由图2可以看出,3种电势梯度条件下,前20h土体排水量较大,电流曲线和排水量曲线在前20h区段较为明显,因此,选取0~20h区段排水量和电流数据进行单位排水能耗分析。单位能耗随时间的变化曲线如图7所示,3种电势梯度下,单位时间排水能耗在前0~8h呈现快速增长趋势,8~10h呈现递减趋势,后期随时间增长能耗逐渐增大,但增长趋势减缓。

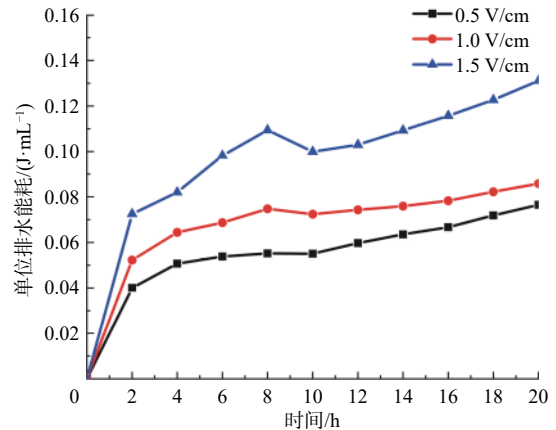


图7 单位排水能耗-时间变化曲线

Fig. 7 Changes of energy consumption of per unit drainage with time

1.5 V/cm 电势梯度试验条件下单位排水能耗最大, 主要是因为在该试验条件下土体含水率下降程度最大, 局部电阻增大产生较大焦耳热且电渗土体出现较大的裂隙, 排水通道下移, 改变了渗流路径(图 6), 电极板与土体脱离导致接触电阻增大。电势梯度 1.0 V/cm 试验条件下, 土体裂缝发育程度较低, 对土体排水通道影响较小, 最终单位排水能耗在相同时间内略大于电势梯度 0.5 V/cm 的能耗, 所以在电渗固结过程中电势梯度并非越大越好, 综合 3 种电势梯度下排水量和单位排水能耗分析, 本文的经济电势梯度为 1.0 V/cm。

3 高岭土电渗固结数值模拟

3.1 电渗固结方程及数值解

土体电渗固结控制方程组包括: 基于有效应力的平衡微分方程、孔隙水流动连续方程、电荷守恒方程^[16-17]。由 Biot 固结理论和有效应力原理可以得到平面应变条件下的平衡方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_y}{\partial y} - \gamma_w + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

土中孔隙水流动会引起土体体积变化, 土体处于饱和状态, 并且土体颗粒不可压缩, 可以得到土体孔隙水流动连续方程^[9]:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\frac{k_w}{\gamma_w} \nabla (p + \gamma_w y) - k_{ek} \nabla V \right) = 0 \quad (3)$$

$$\text{电荷守恒方程: } \nabla \cdot (k_{oe} \nabla V) = 0 \quad (4)$$

式中: σ'_x 、 σ'_y ——土体骨架有效应力;

γ_w ——水的重度;

p ——孔隙水压力;

ε_v ——土体骨架体积应变;

V ——电势。

边界条件: 第一类为 Dirichlet 条件: 位移边界条件, 给定边界孔隙水压力大小; 第二类为 Neumann 边界条件: 应力边界条件, 孔隙水压力边界流量。

渗透系数 k_w 、电渗透系数 k_{ek} 是孔隙比 e 的函数, 可以表示为^[17]:

$$\begin{aligned} k_w &= C_1 e^{C_2} \\ k_{ek} &= C_3 \frac{e}{1+e} + C_4 \end{aligned}$$

电导率 k_{oe} 是孔隙比 e 的函数, 可以表示为^[18]:

$$k_{oe} = 1.016 \times \left(\frac{e}{1+e} - 0.349 \right) \quad (5)$$

参数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为拟合参数, 可采用试验进行拟合; 如缺少试验拟合数据, 可参考文献^[19] 取用。

采用 Galerkin 方法对电渗固结控制方程组进行离散, 利用 Comsol Multiphysics 多物理场仿真软件实现上述电渗固结有限元分析。

3.2 一维电渗固结分析验证

为了验证电渗固结分析程序的有效性, 对具有解析解的 Esrig 一维电渗固结问题进行数值分析。计算模型为: 阴极位于土柱上部, 排水面; 阳极位于土柱下部, 不排水; 阳极电势 13 V, 阴极电势为 0 V。

计算参数: $L=1 \text{ m}$, $m_v=1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$, $E=7.4 \times 10^5 \text{ Pa}$, k_w 、 k_{ek} 、 k_{oe} 均为常量, 其中 $k_w=2.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $k_{ew}=2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$ 。

Esrig 提出一维固结理论模型:

$$\frac{k_w}{\gamma_w} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_{ek} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = m_v \frac{\partial p}{\partial t}$$

阴极排水、阳极不排水情况下, Esrig 一维固结理论具有解析解^[16]。

超静孔隙水压力 Esrig 解析解^[16] 和数值解对比如图 8 所示, 表明编写的电渗固结数值分析程序是可靠的。

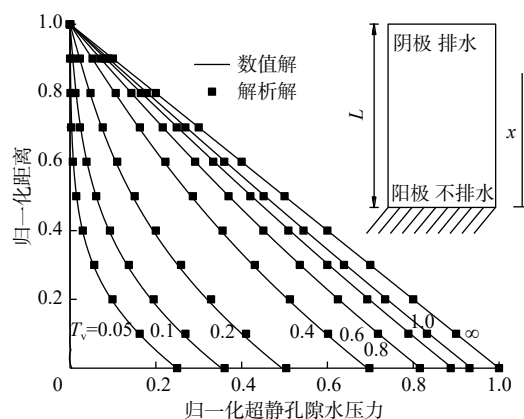


图 8 一维电渗固结超静孔隙水压力时空分布

Fig. 8 Dimensionless excess pore water pressure as a function of dimensionless time and distance for 1D electroosmosis

3.3 高岭土电渗固结试验数值模拟

按照图 1(b) 实验建立有限元模型, 采用四节点单元离散, 对高岭土电渗固结进行数值分析。阳极电势设置为 13, 26, 39 V, 对应电势梯度 0.5, 1.0, 1.5 V/cm, 阳极和底部设置为不排水边界, 阴极和表面为排水边界; 两侧设置侧向弹性约束以反映箱壁对土体摩擦力

影响, 底部设置竖向约束。对 3 种电势梯度电渗固结试验进行了数值模拟分析, 得到模型表面和阳极沉降量、阳极超静孔隙水压力分布、阳极表面固结度。

从图 9(a)可以看出, 表面沉降量最大值发生在距离阳极 5 mm 位置处, 模型表面沉降量呈现出阳极大、

阴极小的“勺子”形状, 这和胡黎明^[18]、吴辉^[20]的试验观测结果一致; 阳极沉降量计算值与试验值的对比分析结果表明, 3 种电势梯度电渗固结沉降量计算值发展趋势和试验结果吻合良好, 说明电渗固结数值模拟结果合理, 如图 9(b)所示。

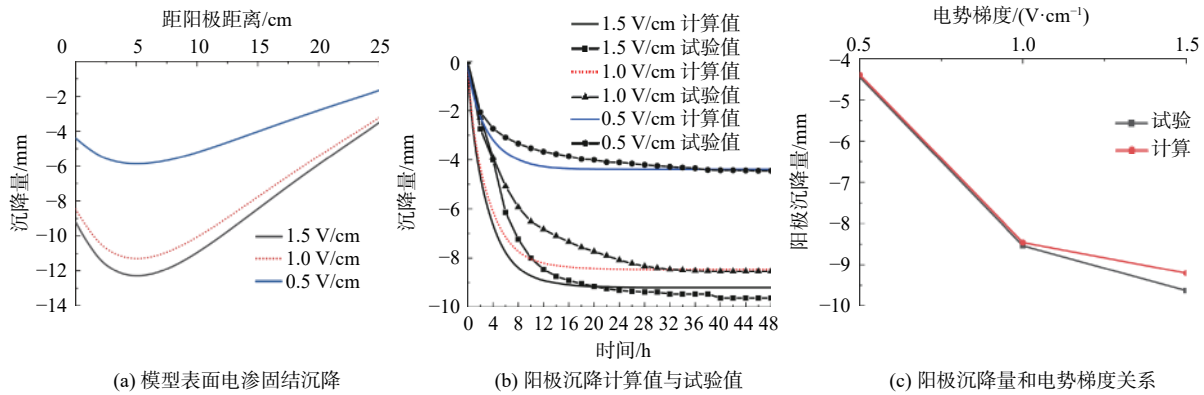


图 9 模型表面及阳极固结沉降

Fig. 9 Consolidation settlement at the model surface and anode

由图 9(c)可知, 随着电势梯度的增加, 阳极土体沉降量逐渐增大; 电势梯度由 0.5 V/cm 增加到 1.0 V/cm 时, 阳极沉降量由 4.45 mm 增加到 8.54 mm, 增加幅度为 92%, 而当电势梯度由 1.0 V/cm 增加到 1.5 V/cm 时, 阳极沉降量由 8.54 mm 增加到 9.63 mm, 增加幅度为 13%; 沉降量和电势梯度呈非线性关系, 表明采用非线性模型进行电渗固结计算是必要的。

由图 10(a)可知, 阳极超静孔隙水压力都是负孔压, 自上往下呈曲线分布, 最大值出现在阳极底部; 随着电势梯度的增加, 阳极底部负孔压呈非线性增长趋势; 当电势梯度由 0.5 V/cm 增加到 1.0 V/cm 时, 土体最大负超静孔隙水压力增长幅度为 93%; 当电势梯度由 1.0 V/cm 增加到 1.5 V/cm 时, 土体最大负超静孔隙水

压力增长幅度仅为 8.8%。可见电渗固结试验时, 电势梯度并非越大越好, 应选择合适的电势梯度。

由图 10(b)可看出, 在 3 种电势梯度作用下, 归一化阳极超静孔隙水压力时空发展关系一致。在电渗固结过程中, 阳极位置超静孔隙水压力都为负孔压, 随时间推移负孔压逐渐增长, 土体内部水分逐渐排出, 固结度逐渐增加。由图 10(c)可知, 在 3 种电势梯度作用下, 阳极位置土体平均固结度发展一致, 在 20 h 时 1.5, 1.0, 0.5 V/cm 电势梯度条件下, 土体固结度试验结果分别为 90%、90%、95%, 计算结果为 100%, 表明 20 h 土体固结接近完成。电渗过程中, 归一化土体超静孔隙水压力时空发展情况一致, 土体平均固结程度基本一致。

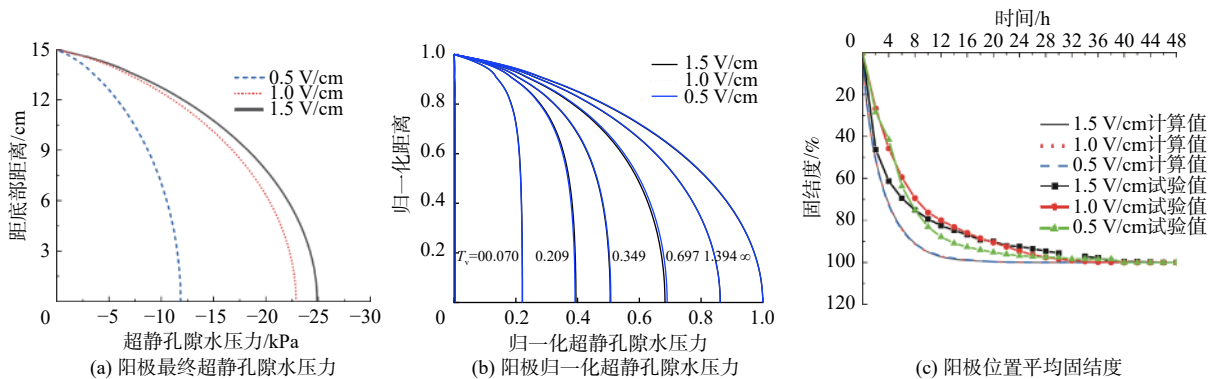


图 10 阳极超静孔隙水压力及固结度

Fig. 10 Anode excess pore pressure distribution and consolidation degree

4 结论

(1) 3 种电势梯度条件下, 土体电流呈现分阶段衰减趋势。前 20 h 电流衰减速率较大, 后 28 h 电流衰减趋于平缓。土体电渗排水量、沉降量均表现出先随时间增大、后趋于平缓的规律。

(2) 土体两端有效电压呈现先沿着指数曲线下降、后逐渐趋于平稳的趋势。单位排水能耗呈现的规律为: $C_{1.5 \text{ V/cm}} > C_{1 \text{ V/cm}} > C_{0.5 \text{ V/cm}}$, 本次试验的经济电势梯度为 1.0 V/cm。

(3) 基于 Comsol Multiphysics 多物理场仿真软件实现了电渗固结试验有限元模拟, 一维电渗固结理论解与数值解吻合良好。

(4) 数值模拟表明, 3 种电势梯度条件下, 归一化阳极超静孔隙水压力时空变化过程一致; 电势梯度由 0.5 V/cm 增加到 1.0 V/cm 较电势梯度由 1.0 V/cm 增加到 1.5 V/cm 时的最大超静负孔压增长幅度大, 说明电势梯度并非越大越好, 在实际工程中可以选择合适的电势梯度进行电渗试验。

参考文献 (References):

- [1] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. *Géotechnique*, 1949, 1(3): 159 – 177.
- [2] LAMONT-BLACK J, JONES C J F P, ALDER D. Electrokinetic strengthening of slopes - Case history[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(3): 319 – 331.
- [3] 胡黎明, 洪何清, 吴伟令. 高岭土的电渗试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(9): 1353 – 1356. [HU Liming, HONG Heqing, WU Weiling. Electro-osmosis tests on Kaolin clay[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(9): 1353 – 1356. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HAMIR R B, JONES C J F P, CLARKE B G. Electrically conductive geosynthetics for consolidation and reinforced soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19(8): 455 – 482.
- [5] 李瑛, 龚晓南, 张雪婵. 电压对一维电渗排水影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 709 – 714. [LI Ying, GONG Xiaonan, ZHANG Xuechan. Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 709 – 714. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 金志伟, 阎长虹, 李良伟, 等. 低含水率盾构泥浆的真空-电渗联合泥水分离技术试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 103 – 110. [JIN Zhiwei, YAN Changhong, LI Liangwei, et al. An experimental study of vacuum negative pressure incorporated with electro-osmosis in mud-water dehydration for shield slurry with low water content[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 103 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [7] ESRIG, MELVIN I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics[J]. *Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division*, 1968, 94(4): 899 – 922.
- [8] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软土的固结方程[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 169 – 175. [XU Wei, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Analytical theory of soft ground consolidation under vacuum preloading combined with electro-osmosis[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(2): 169 – 175. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 胡黎明, 吴伟令, 吴辉. 软土地基电渗固结理论分析与数值模拟[J]. *岩土力学*, 2010, 31(12): 3977 – 3983. [HU Liming, WU Weiling, WU Hui. Theoretical analysis and numerical simulation of electroosmosis consolidation for soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(12): 3977 – 3983. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 龚明星, 王档良, 詹贵贵. 考虑有效电势变化的软土一维电渗固结理论[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(4): 61 – 66. [GONG Mingxing, WANG Dangliang, ZHAN Guigui. 1-D electro-osmotic consolidation theory considering variation in effective potential in soft soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(4): 61 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [11] WU H, HU L M. Analytical and numerical model of electro-osmotic consolidation for soft soil improvement [C]//Geo-Congress 2013. March 3-7, 2013, San Diego, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2013: 2107-2116.
- [12] TANG X W, XUE Z J, YANG Q, et al. Water content and shear strength evaluation of marine soil after electro-osmosis experiments[J]. *Drying Technology*, 2017, 35(14): 1696 – 1710.
- [13] 苏金强, 王钊. 电渗的二维固结理论[J]. *岩土力学*, 2004, 25(1): 125 – 131. [SU Jinqiang, WANG Zhao. Theory of two-dimensional electro-osmotic consolidation of soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(1): 125 – 131. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 谢新宇, 郑凌透, 谢康和, 等. 电势梯度与电极间距变化的滨海软土电渗模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 108 – 114. [XIE Xinyu, ZHENG Lingwei, XIE Kanghe, et al. Experimental study on electro-osmosis of marine soft soil with varying potential gradient and electrode spacing[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 108 – 114. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王宁伟, 孙守刚, 梁家豪, 等. 非金属电极在电渗排水中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 59 – 63. [WANG Ningwei, SUN Shougang, LIANG Jiahao, et al. The application of non-metallic electrodes in electroosmotic drainage[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(4): 59 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [16] YUAN J, HICKS M A. Large deformation elastic electro-osmosis consolidation of clays[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 54: 60 – 68.
- [17] 王柳江, 刘斯宏, 汪俊波, 等. 电场-渗流场-应力场耦合的电渗固结数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1904 – 1911. [WANG Liujiang, LIU Sihong, WANG Junbo, et al. Numerical analysis of electroosmotic consolidation based on coupled electrical field-seepage field-stress field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1904 – 1911. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 吴辉, 胡黎明. 考虑电导率变化的电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 734 – 738. [WU Hui, HU Liming. Numerical simulation of electro-osmosis consolidation considering variation of electrical conductivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 734 – 738. (in Chinese with English abstract)]
- [19] TO P, MALEKZADEH M, SIVAKUGAN N, et al. 3D numerical model of electro-kinetic Sedimentation-Consolidation of dredged mud with variable parameters[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(4): 4333 – 4348.
- [20] WU H, HU L M, WEN Q B. Numerical simulation of electro-osmotic consolidation coupling non-linear variation of soil parameters[J]. Computers & Geosciences, 2017, 103: 92 – 98.

编辑: 张明霞