

DOI: 10.11779/CJGE201708021

考虑饱和度变化的一维电渗固结模型

周亚东^{1, 2}, 邓安³, 刘中宪^{1, 2}, 杨爱武^{1, 2}, 张海^{1, 2}

(1. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 3. 阿德莱德大学, 澳大利亚 阿德莱德 5005)

摘要: 现有电渗固结理论和数值模型通常基于饱和土假设, 与实际情况有差距。基于分段线性差分法, 建立一种考虑饱和度变化的一维电渗固结模型 UEC1。该模型考虑了土体电渗固结过程中饱和度的变化及土性参数的非线性关系, 并编制了 FORTRAN 计算程序。UEC1 在考虑饱和度变化情况下的计算结果与实测结果吻合。结合算例, 给出了考虑饱和度变化情况下的电渗固结数值解, 分析了固结过程中孔隙水压、孔隙气压、饱和度及沉降量随时间的变化规律, 其中残余饱和度对土体电渗固结沉降量的影响显著。

关键词: 电渗固结; 非饱和; 饱和度; 非线性; 大变形

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)08-1524-06

作者简介: 周亚东(1985-), 男, 河南商丘人, 讲师, 主要从事软基处理方面的研究。E-mail: zyd476300@126.com。

One-dimensional electroosmosis consolidation model considering variable saturation

ZHOU Ya-dong^{1, 2}, DENG An³, LIU Zhong-xian^{1, 2}, YANG Ai-wu^{1, 2}, ZHANG Hai^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384, China; 2. Department of Civil Engineering,

Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. The University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia)

Abstract: The existing models for electroosmosis are based on the hypothesis of fully saturated soil regime. Variable saturation occurs in the soil regime, thus a new model is expected to improve the calculation accuracy. This study proposes a numerical model, UEC1, for one-dimensional electroosmosis consolidation considering variable saturation. This model employs piecewise linear finite difference method to account for the nonlinear variation of physical and electro-chemical soil properties caused by the large deformation occurring during the consolidation. The FORTRAN programming package is used to implement the computation of the model. An excellent agreement is obtained between the UEC1 and test results. This model is applied to example studies to demonstrate the consolidation progress of partially saturated soils. The numerical calculations indicate that the residual saturation degree has significant influence on soil settlement.

Key words: electroosmosis; unsaturation; degree of saturation; nonlinearity; large strain

0 引言

电渗法在处理低渗透性软黏土地基时具有良好的效果, 但其复杂的作用机制和众多的影响因素是制约电渗法推广的主要原因。已有的研究表明, 土体在电渗固结过程中逐渐从饱和状态向非饱和状态转化, 尤其在靠近阳极附近区域的土体更为显著^[1-2]。现有的电渗固结理论^[3-6]和数值研究^[7-8]通常基于小变形饱和土理论, 假设(部分)土性参数为常数且土体在整个电渗固结过程中始终为饱和。

王柳江等^[9]在非饱和土多孔介质力学理论的基础上, 推导了考虑电场、渗流场以及应力场相互耦合作用的电渗固结理论方程, 并编制了相应的计算程序。但该理论假设孔隙气体始终与大气相通, 与实际情况

有差距。笔者在前人研究的基础上, 建立了一维电渗固结模型 EC1^[10], 二维电渗-堆载耦合固结模型 EC2^[11]。这些模型虽可以考虑土性参数的非线性关系, 但仍基于饱和土体假设, 未能考虑土体电渗固结过程中饱和度的变化, 有必要进一步发展考虑饱和度变化的电渗固结模型。

本文拟在前人和笔者前期研究的基础上, 基于分段线性差分方法, 建立一种考虑饱和度变化的一维电渗固结模型 UEC1。该模型可以考虑固结过程中土性参数的非线性变化, 同时可以模拟土体由饱和状态向非饱和状态的转化过程, 为电渗固结提供计算手段。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608351, 51278327); 天津市自然科学基金项目(13JCQNJC07400)

收稿日期: 2016-04-27

1 考虑饱和度变化的电渗固结模型

电渗固结一般应用于处理高含水率软黏土, 比如吹填土, 可从饱和状态开始固结。在电势梯度作用下, 土体中产生负的超静孔压 u_w [7]。根据非饱和土力学理论 [12], 土体中的基质吸力 $u_s = u_a - u_w$, u_a 为孔隙气压。当 $u_s > u_{sb}$ 时土体中有气体进入, 其中 u_{sb} 为土的进气值, 即气进入土孔隙所须要的最小吸力。土体在初始饱和状态下孔隙气压 $u_a = 0$, 假设此时 $u_s = -u_w$ 也成立, 随着电渗固结, u_w 绝对值增加并超过 u_{sb} , 气体进入土体, 土体由饱和状态转变为非饱和状态。

1.1 模型建立

假设土颗粒和水不可压缩的, 且土层在重力作用下只有垂直变形。 $t \leq 0$ 时刻, UEC1 几何图形如图 1(a) 所示, 土层初始高度为 H_0 , 初始荷载 q_0 。采用欧拉坐标系, 以底面为基准面, 向上为正, 将土体自上而下依次均匀划分 n 个单元, 每个单元初始长度:

$$L_0 = H_0 / n, \quad (1)$$

单元 j 的中心点高程为 $z_{0,j}$ 。

$t=0$ 时刻, 在土体两端施加直流电压 v_m^t , 其中土层顶端面为阳极, 底端面为阴极。土层的阳极和阴极边界可设为渗水(气)或不渗水(气)边界。每个土体单元在电势差的作用下产生自上而下的电渗流。某时刻 t , 土层变形如图 1(b) 所示。

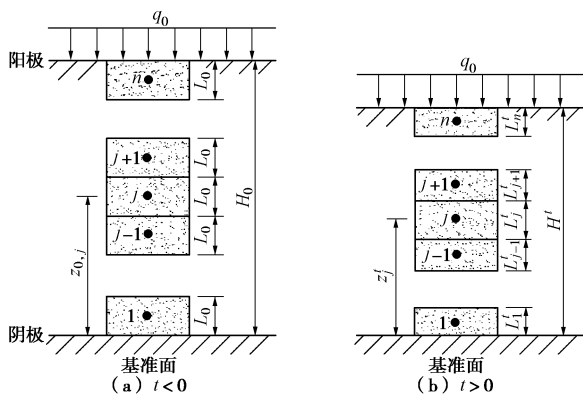


图1 几何图形

Fig. 1 UEC1 model

1.2 本构关系

为建立数值模型, 可假定图2所示基本关系。电渗固结模型UEC1的基本关系曲线包括有效应力关系曲线、渗透系数(水、电、气)关系曲线和水分特征曲线。为描述非饱和情况下固结特性, 该模型在饱和电渗固结模型EC1 [11] 基本关系的基础上增加了气渗透性(图2(c))和水分特征曲线(图2(d))。其中, 水分特征曲线是非饱和土吸力与饱和度之间的关系曲线 [12]。图2中曲线仅为说明变量间趋势性关系, 实际物理关系

由试验或者理论给出。上标 \wedge 、 $-$ 、 \sim 和 \sim 用于区分孔隙比、有效应力、渗透系数、饱和度和吸力在曲线上的输入值。

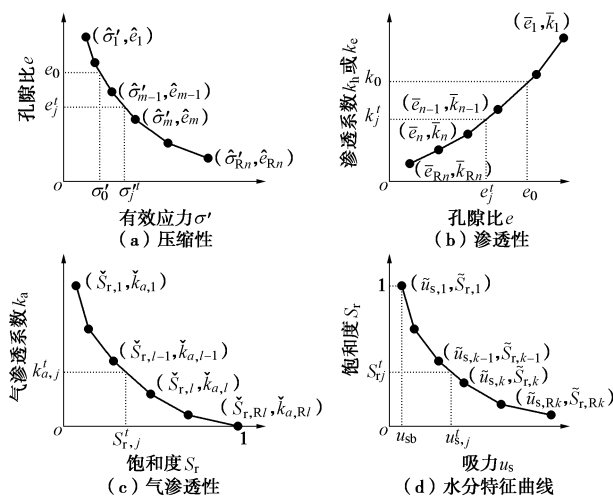


图2 基本关系

Fig. 2 Constitutive relationship of soils

一种典型的水分特征关系式 [12]:

$$u_s = \frac{u_{sb}}{\frac{1}{S_e^\lambda}}, \quad (2)$$

式中, S_e 为有效饱和度, $S_e = (S_r - S_l) / (1 - S_l)$, S_r 为饱和度, S_l 为残余饱和度, 即水能在孔隙中自由流动的最低饱和度, λ 为 $\lg S_e - \lg u_s$ 关系曲线的斜率。

1.3 总应力、有效应力和孔隙水压力

每个单元中心节点的总应力为上部荷载和可压缩土层的自重之和, 由于上部荷载为零, 所以当 $t > 0$ 时, 节点 j 处的总应力为

$$\sigma_j^t = q_0 + \frac{L_j r_j}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} L_i \gamma_i, \quad (3)$$

式中, $j=1, 2, \dots, n$, γ_j 为单元 j 的重度,

$$\gamma_j = \frac{G_s + S_i e_j^t}{1 + e_j^t} \gamma_w, \quad (4)$$

其中, e_j^t 为单元 j 在 t 时刻的孔隙比。

在 t 时刻, 节点 j 处的有效应力 σ_j^t 可由图 2(a) 和对应的孔隙比 e_j^t 计算得出。

孔隙水压力和孔隙气压力的求解可按以下两种情况考虑:

(1) 若土体为饱和状态:

节点 j 处的孔隙水压力和孔隙气压力分别为

$$u_{w,j}^t = \sigma_j^t - \sigma_j^t, \quad (5a)$$

$$u_{a,j}^t = 0. \quad (5b)$$

(2) 若土体为非饱和状态:

根据毕肖普非饱和土有效应力原理 [13]:

$$\sigma = \sigma' + \chi u_w + (1 + \chi) u_a, \quad (6)$$

式中, χ 为有效应力系数, 可用 Aitchison 经验公式近似计算^[14]:

$$\chi = \frac{S_r}{0.4S_r + 0.6} \quad (7)$$

则节点 j 处的孔隙水压力和孔隙气压分别为

$$u_{a,j}^t = \sigma_j^t - \sigma_j'^t + \chi_j^t u_{s,j}^t \quad (8a)$$

$$u_{w,j}^t = u_{a,j}^t - u_{s,j}^t \quad (8b)$$

式中, $u_{s,j}^t$ 可由图 2(d) 和对应的饱和度 $S_{r,j}^t$ 计算得出。

1.4 渗透系数

在 t 时刻, 节点 j 处的水力渗透系数 $k_{w,j}^t$ 、透气性系数 $k_{a,j}^t$ 和电渗透系数 $k_{e,j}^t$ 可由图 2(b)、(c) 和对应的孔隙比 e 或饱和度 $S_{r,j}^t$ 计算得出。考虑土性非线性变化, 单元之间土性 (比如渗透系数) 不等, 因此相邻单元间的渗流计算用等效渗透系数。根据图 1, 相邻单元为串联, 根据流量守恒, 单元 j 和 $j-1$ 之间的水力渗透系数、透气性系数和电渗透系数可以等效为^[10-11]

$$k_{xs,j}^t = \frac{k_{x,j-1}^t k_{x,j}^t (L_{x,j-1} + L_{x,j})}{L_{x,j-1} k_{x,j-1}^t + L_{x,j} k_{x,j}^t} \quad (9)$$

式中, 下标 x 分别代表 w , a 和 e 。

1.5 电势

根据非饱和电阻率模型^[15], j 单元土体的电阻率可表示为

$$\rho_j^t = \frac{1}{\frac{1}{\rho_s(1+e_j^t)} + \frac{S_{r,j}^t e_j^t}{\rho_w(1+e_j^t)}} \quad (10)$$

则 j 单元土体的电阻可表示为

$$R_j^t = \rho_j^t L_j \quad (11)$$

对整块土层而言, 每个单元块是相互串联的, 所以在 t 时刻, j 单元节点处的电势 v_j^t 可用公式表示为

$$v_j^t = \frac{\frac{R_j^t}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} R_i^t}{\sum_{i=1}^n R_i^t} v_m^t \quad (12)$$

式中, v_j^t 为 j 单元节点处的电势, v_m^t 为施加在土体两端的电压, R_j^t 为 t 时刻 j 单元土体电阻。

j 单元和 $j-1$ 单元节点的电势差可用公式表示为

$$v_j^t - v_{j-1}^t = \frac{R_j^t + R_{j-1}^t}{2 \sum_{i=1}^n R_i^t} v_m^t \quad (13)$$

1.6 渗流量、沉降与固结

在 t 时刻, 土体 j 和 $j-1$ 节点之间的电渗流量、水渗流量和气渗流量分别为

$$v_{e,j}^t = k_{e,j}^t i_{e,j}^t \quad (14a)$$

$$v_{h,j}^t = k_{ws,j}^t i_{h,j}^t \quad (14b)$$

$$v_{a,j}^t = k_{as,j}^t i_{a,j}^t \quad (14c)$$

式中, 电力梯度 $i_{e,j}^t$, 水力梯度 $i_{h,j}^t$ 和孔隙气压梯度 $i_{a,j}^t$ 可分别表示为

$$i_{e,j}^t = \frac{v_j^t - v_{j-1}^t}{z_j^t - z_{j-1}^t} \quad (15a)$$

$$i_{h,j}^t = \frac{h_j^t - h_{j-1}^t}{z_j^t - z_{j-1}^t} \quad (15b)$$

$$i_{a,j}^t = \frac{h_{a,j}^t - h_{a,j-1}^t}{z_j^t - z_{j-1}^t} \quad (15c)$$

节点 j 的水头 h_j^t 和孔隙气压头 $h_{a,j}^t$ 可分别表示为

$$h_j^t = z_j^t + \frac{u_j^t}{\gamma_w} \quad (16a)$$

$$h_{a,j}^t = \frac{u_{a,j}^t}{\rho_a g} \quad (16b)$$

式中, ρ_a 为空气密度, $g=9.81$ N/kg。

每个单元的面积随时间步 Δt 不断更新, 经过 Δt 后, 单元 j 的高度、空气体积、孔隙比和饱和度分别更新为

$$L_j^{t+\Delta t} = L_j^t - (v_{e,j}^t + v_{h,j+1}^t - v_{e,j+1}^t - v_{h,j}^t + v_{a,j}^t - v_{a,j+1}^t) \Delta t \quad (17)$$

$$A_{a,j}^{t+\Delta t} = A_{a,j}^t + (v_{a,j+1}^t - v_{a,j}^t) \Delta t \quad (18)$$

$$e_j^{t+\Delta t} = \frac{L_j^{t+\Delta t} (1 + e_{0,j})}{L_{0,j}} - 1 \quad (19)$$

$$S_{r,j}^{t+\Delta t} = 1 - \frac{A_{a,j}^{t+\Delta t} (1 + e_j^{t+\Delta t})}{L_j^{t+\Delta t} e_j^{t+\Delta t}} \quad (20)$$

在 t 时刻, 土体高度为

$$H^t = \sum_{j=1}^n L_j^t \quad (21)$$

土体表面沉降量为

$$S^t = H_0 - H^t \quad (22)$$

1.7 边界条件

本模型涉及到表1所示边界条件。

表1 模型边界条件

Table 1 Model boundaries

项目	渗水 (气) 边界	不渗水 (气) 边界
阴极	$i_{e,1}^t = v_1^t / z_1^t$	$i_{e,1}^t = 0$
	$i_{h,1}^t = h_1^t / z_1^t$	$i_{h,1}^t = 0$
	$i_{a,1}^t = h_{a,1}^t / z_1^t$	$i_{a,1}^t = 0$
阳极	$i_{e,n+1}^t = (v_m^t - v_n^t) / (H^t - z_n^t)$	$i_{e,n+1}^t = 0$
	$i_{h,n+1}^t = (H^t - h_n^t) / (H^t - z_n^t)$	$i_{h,n+1}^t = 0$
	$i_{a,n+1}^t = -h_{a,n}^t / (H^t - z_n^t)$	$i_{a,n+1}^t = 0$

1.8 计算流程

模型 UEC1 采用 Fortran 语言编写计算程序, 计算流程图如图 3 所示。程序运行时首先读取计算所需参数: 单元数目 (n)、土体两端施加的有效电压 (v_m')、土颗粒比重 (G_s)、土体初始几何尺寸 (H_0)、压缩关系、渗透关系和水分特征曲线的数据点、边界条件及程序终止条件。单元数目的选择由用户根据所需的计算精确度和计算时间来决定。然后, 程序根据读入的参数计算初始情况下各单元节点 (L_0, z_j) 和初始孔隙比 $e_{0,j}$ 。当施加电压 v_m' 后, 程序进入循环阶段, 该阶段每个单元属性随时间步 Δt 不断更新。当 $t > t_{\text{final}}$ 或者 $\Delta S < m$ 时循环程序终止, 其中 ΔS 为 Δt 时间内土体表面沉降增量; t_{final} 和 m 分别为用户根据需要设定的终止时间和一个极小值。而当 $\Delta S < m$ 时, 可认为土体中各渗流达到平衡, 电渗固结结束, 此时刻的土体表面沉降量 S' 即为最终平均沉降量 S , 程序结束运算。

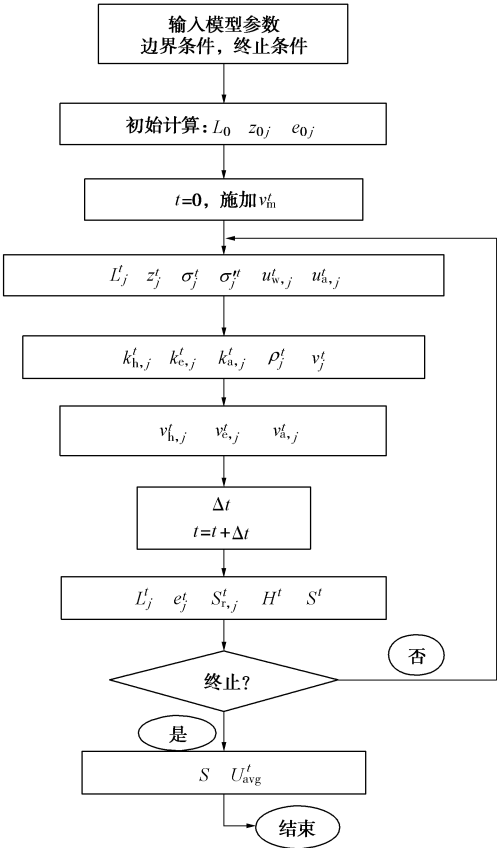


图 3 UEC1 计算流程图
Fig. 3 Flow chart for UEC1

2 模型验证

本文通过一维电渗固结室内试验验证 UEC1, 试验用土为高岭土, 主要成分为二氧化硅, 表面呈乳白色, 物理与化学性质稳定。试验测得土样相关物理力

学参数为: 塑限 $w_p=22.2\%$, 液限 $w_L=43.7\%$, 比重 $G_s=2.62$, 压缩指数 $C_c=0.36$, 渗透系数 $k_v=1.57\times10^{-9}\text{ m/s}$, 电渗透系数 $k_e=2.0\times10^{-9}\text{ m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 孔隙水电阻率 $\rho_w=4.5\ \Omega\cdot\text{m}$, 土骨架电阻率 $\rho_s=608\ \Omega\cdot\text{m}^{[10]}$ 。又根据土性假定, $S_l=30\%$, $\lambda=2$, $u_{sb}=30\text{ kPa}^{[12,16]}$ 。透气性系数采用下式^[12]:

$$k_a = \begin{cases} 0 & ((u_a - u_w) \leq u_{sb}) \\ 1 \times 10^{-12} \text{ m/s} & ((u_a - u_w) > u_{sb}) \end{cases}.$$

试验装置如图 4 所示, 将配制好的土样分层装入模型桶内, 并用铁棒振捣密实使土体初始状态接近饱和。经测定土体初始含水率为 59.8%, 初始高度 25 cm, 直径 17 cm, 初始孔隙比 e_0 为 1.57, 在土体两端施加 30 V 电压, 土体顶面为阳极, 底面为阴极排水面。



图 4 一维电渗固结试验装置

Fig. 4 Apparatus for one-dimensional electroosmosis consolidation

图 5 给出了土体表面沉降量的实测值和 UEC1 计算值。如图所示, 电渗固结 48 h, 土体表面沉降量达 30.1 mm, 变形率达 12.04%, 变形较大。在 UEC1 中考虑饱和度变化, 其数值解与实测值较为吻合。电渗固结后期, 数值解与实测值略有偏差, 这是因为固结后期土体产生一定量的侧向变形。不考虑饱和度变化情况下, 由于假定土体饱和, 忽略基质吸力作用, 沉降量数值解偏大。

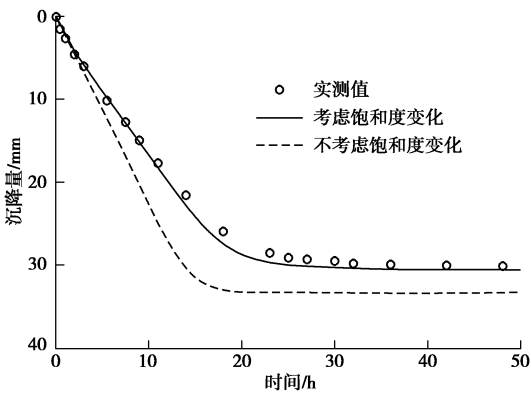


图 5 土体表面沉降量

Fig. 5 Relationship between soil settlement and time

3 算例分析

在上述算例的基础上,考虑固结过程中饱和度的变化,分析电渗固结规律。设土体初始条件为: $S_{r0}=100\%$, $e_0=2$, $H_0=1\text{ m}$, $q_0=50\text{ kPa}$, 以及 $v_m=50\text{ V}$ 。 $t_{\text{final}}=300\text{ d}$, 取 100 个计算单元。考虑工程常见边界条件: 阴极排水, 阳极进气但不补水。

将模型参数、边界条件和终止条件输入编写的 FORTRAN 计算程序。图 6, 7 分别给出了 $t=0, 10, 50, 100, 150, 200\text{ d}$ 土体超静孔压和孔隙气压沿土体深度的分布情况。如图 6 所示, 在 $t=0$ 时刻, 土体中超静孔压为零, 随电渗固结时间延长, 阳极附近土体超静孔压首先转变为负值, 且绝对值随固结时间逐渐增大。由于边界条件阴极排水, 所以此处超静孔压一直为 0。当渗流达到平衡, 固结结束, 超静孔压呈线性分布。图 7 中, $t=0$ 时刻孔隙气压 $u_a=0\text{ kPa}$ 。固结过程中, 阳极边界条件为进气, 此处孔隙气压始终为零。随电渗固结时间延长, 阳极附近土体在一段区域内孔隙气压首先出现负值, 且负值区域随固结进程向阴极逐渐扩展。在 $t=10, 50, 100, 150\text{ d}$, 土体中负孔隙气压区域出现在距阳极距离分别为 0.2, 0.52, 0.81, 0.95 m 范围内, 同一时刻负孔隙气压的绝对值沿深度先增大后减小, 不同时刻负孔隙气压绝对值的峰值随固结进程同样先增大后减小, 分别达到 -0.43, -1.9, -2.82, -0.94 kPa。值得注意的是, 在 $t=200\text{ d}$, 整个土体中负孔隙气压减小为零, 这说明随固结进程土体孔隙最终与大气连通。

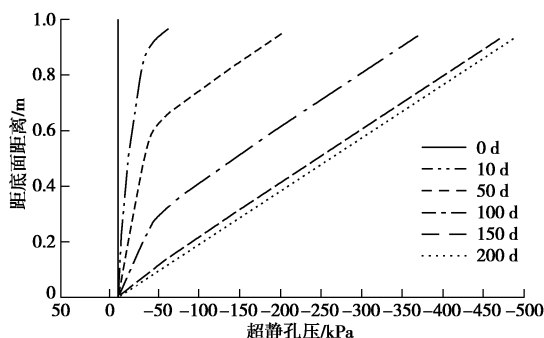


图 6 超静孔压分布曲线随时间的发展

Fig. 6 Excess pore water pressure over time

图 8 给出了 $t=0, 10, 50, 100, 150, 200\text{ d}$ 土体饱和度沿土体深度的分布情况。随着固结进程, 阳极区域土体饱和度最先开始减小, 土体从阳极向阴极逐渐由饱和状态转变为非饱和状态, 非饱和区域逐渐扩大。土体中的最小饱和度趋于残余饱和度 S_l 。

结合图 6~8 可知, 当土体处于饱和状态时, 土体吸力 $u_s = -u_w$ 。随电渗固结时间延长, 负超静孔压的绝对值逐渐增大, 当土体负超静孔压绝对值大于土体

进气值 u_{sb} , 气体进入使土体由饱和土体逐渐转变为非饱和土。阳极附近的土体饱和度最先发生变化, 阴极附近的土体在负超静孔压 u_w 绝对值小于进气值 u_{sb} 时始终饱和。

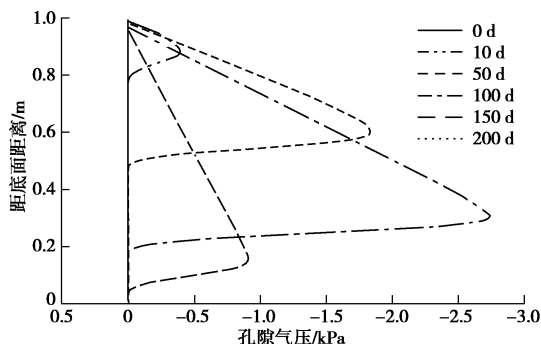


图 7 孔隙气压分布曲线随时间的发展

Fig. 7 Pore gas pressure over time

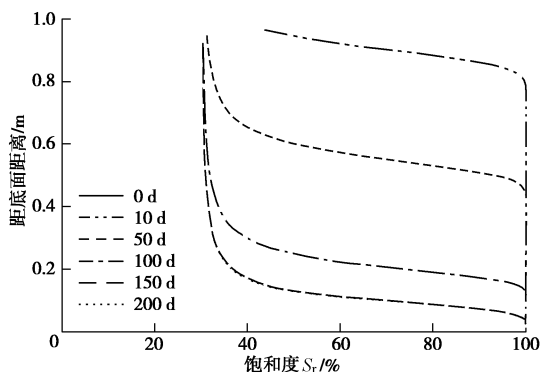


图 8 饱和度分布曲线随时间的发展

Fig. 8 Degree of saturation over time

图 9 给出了不同残余饱和度情况下土体表面沉降量的 UEC1 数值解。由图可知, 当土体残余饱和度 $S_l=0.15, 0.3$ 和 0.5 情况下, 最终沉降量的 UEC1 数值解分别为 0.043, 0.075, 0.111 m, 变形率分别为 4.3%, 7.5% 和 11.1%。可见残余饱和度对电渗固结土体沉降量具有显著影响。而不考虑饱和度变化情况下, UEC1 数值解最终沉降量达到 0.179 m, 变形率达 17.9%。饱和土假设对电渗固结土体表面沉降量预测值偏大。

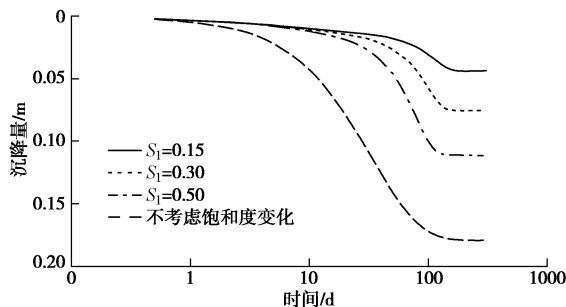


图 9 土体表面沉降量随时间的变化

Fig. 9 Settlement over time under variable residual saturation

4 结 语

本文建立了一种考虑饱和度变化的一维电渗固结模型UEC1,对模型进行了试验验证,开展了算例分析,得出如下结论:①基于分段线性差分理论的UEC1模型可以考虑固结过程中饱和度的变化及土性参数的非线性关系;②UEC1模型可用FORTRAN计算实现,考虑饱和度变化情况下的数值解与实测结果吻合;③电渗固结过程中阳极附近土体首先出现较小的负孔隙气压,并向阴极区域扩展,土体逐渐由饱和状态向非饱和状态转化;④残余饱和度对电渗固结沉降量影响显著,假定土体始终饱和,电渗固结沉降偏大。

参考文献:

- [1] 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 Ying. Experimental and theoretic study on electro-osmotic consolidation of soft clay foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [2] 龚晓南, 焦 丹. 间歇通电下软黏土电渗固结性状试验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(6): 1725 - 1730. (GONG Xiao-nan, JIAO Dan. Experimental study on electroosmotic consolidation of soft clay under intermittent current condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, **42**(6): 1725 - 1730. (in Chinese))
- [3] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, **94**(SM4): 899 - 921.
- [4] WAN T Y, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1976, **102**(5): 473 - 491.
- [5] SU J Q, WANG Z. The two-dimensional consolidation theory of electro-osmosis[J]. Géotechnique, 2003, **53**(8): 759 - 763.
- [6] 李 瑛, 龚晓南, 卢萌盟, 等. 堆载-电渗联合作用下的耦合固结理论[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 77 - 81. (LI Ying, GONG Xiao-nan, LU Meng-meng, et al. Coupling consolidation theory under combined action of load and electro-osmosis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [7] LEWIS W R, HUMPHESON C. Numerical analysis of electroosmotic flow in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1973, **95**(SM4): 603 - 616.
- [8] 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 Li-ming. Numerical simulation for electro-osmosis consolidation considering variation of electrical conductivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 734 - 738. (in Chinese))
- [9] 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 Liu-jiang, LIU Si-hong, WANG Jun-bo, 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))
- [10] ZHOU Y-D, DENG A, WANG C. Finite-difference model for one-dimensional electro-osmotic consolidation[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **54**: 152 - 165.
- [11] DENG A, ZHOU Y-D. Modeling electroosmosis and surcharge preloading consolidation: I model formulation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016(4): 04015093.
- [12] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993.
- [13] BISHOP A W, et al. Factors controlling the shear-strength of partly saturated cohesive soils[C]// ASCE Conference on Shear of Cohesive Soils. Boulder: University of Colorado, 1960: 503 - 532.
- [14] AITCHISON G D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils[C]// Pore Pressure and Suction in Soils Conf, London: Butterworths, 1960: 47 - 52.
- [15] 龚晓南, 焦 丹, 李 瑛. 黏性土的电阻计算模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, **33**(2): 312 - 318. (GONG Xiao-nan, JIAO Dan, LI Ying. Electric resistance calculation model of clay[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2011, **33**(2): 312 - 318. (in Chinese))
- [16] 殷宗泽, 凌 华. 非饱和土一维固结简化计算[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 633 - 637. (YIN Zong-ze, LING Hua. Simplified computation of 1D consolidation for partially saturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 633 - 637. (in Chinese))