

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.02.010

真空预压联合电渗法加固软基的固结方程

徐 伟, 刘斯宏, 王柳江, 汪俊波

(河海大学水利水电学院水工结构研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:在 Terzaghi 固结理论和 Esrig 电渗固结理论的基础上推导真空预压联合电渗法加固软基的二维固结方程, 给出了真空预压联合电渗加固过程中超静孔隙水压力的解析解。通过算例, 分析了真空预压联合电渗引起的土体超静孔隙水压力随时间的发展以及在电极间的分布规律。进行了真空预压联合电渗的模型试验, 试验后实测土体含水率与通过超静孔隙水压力解析解推算出的含水率基本吻合, 且具有相似的分布规律, 表明该固结方程是合理的。

关键词:真空预压联合电渗; 固结解析理论; 软土; 超静孔隙水压力

中图分类号: U655 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)02-0169-07

真空预压是通过在软基中设置水平、竖向排水系统, 在表层铺设塑料密封膜与外界大气隔绝, 抽气后在土体内与排水通道之间形成较大的水力梯度, 使土体中的水排出而加快土体固结的方法。真空预压自 20 世纪 80 年代以来在我国得到广泛应用^[1]。但是对于高黏粒含量、高塑性、低渗透性的软土, 真空度不能有效传递, 排水加固效果不佳。电渗是采用在土体中插入电极施加直流电, 使土中的孔隙水在电场作用下从阳极向阴极移动, 实现土的排水固结的方法, 其特点是对土颗粒大小不敏感^[2]。将真空预压与电渗相结合可以发挥各自的优势, 弥补各自的不足, 是处理细颗粒、低渗透性土的一种有效的方法。真空预压联合电渗法的主要特点表现在^[3]:(a)解决了纯电渗法电能消耗大、工程造价高的问题。前期采用真空预压排出土体中的自由水, 后期通过电渗排出土体中的弱结合水。(b)真空荷载的存在, 可以有效地排出由于电渗产生的聚集在电极附近的氢气和氧气, 减小了界面电阻, 从而减小了在界面电阻上消耗的电能。(c)电渗过程中, 土体特别是电极附近会产生许多的微裂缝。由于微裂缝处电阻率大, 会消耗过多的电能。真空荷载对土体的作用力近似为球应力, 可以使土体向中间挤压, 因此有利于减少微裂缝的产生。高志义等^[4-5]通过室内模型试验, 已证实真空预压联合电渗法较单纯的真空预压法加固效果要显著得多。但是, 目前还未见从理论上论证该方法的有效性, 从而限制了该方法的推广应用。

电渗计算理论首先由 Esrig^[6]提出, 为一维固结理论。在此基础上, Shang 等^[7-8]分别考虑上部荷载的作用, 提出了电渗联合堆载预压加固法的固结理论。苏金强等^[9]给出了不同边界条件下二维电渗固结的理论解答, 但是这些理论都没有考虑真空预压的影响。本文结合真空预压和电渗方法, 基于 Terzaghi 固结理论和 Esrig 电渗固结理论, 在一些假定的基础上, 推导了真空预压联合电渗法加固软基的二维固结方程, 并通过室内模型试验, 验证了该方程的有效性。

1 真空预压联合电渗加固软基固结方程的推导

图 1 为真空预压联合电渗法排水固结示意图。通常的真空预压法在软基表层布置水平砂垫层, 在土中竖插塑料排水板, 真空度在表面水平砂垫层和竖向排水板中形成。真空预压联合电渗法在此基础上, 在土中插入阴(-)、阳(+)电极, 成排间隔布置。阴极通常与塑料排水板绑扎在一起, 阳极通常布置在塑料排水板之间。电极插入土体深度为 H , 阴极(竖向排水层)与阳极之间的距离为 L 。通常同种电极之间的距离比 L 要小得多, 所以电场分布可以按照一维情况处理。真空预压联合电渗法的排水, 一部分通过水平排水层, 一部分通过阴极处的竖向排水系统, 阳极处不排水, 属于二维排水情况。

收稿日期: 2010-03-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA11Z115); 江苏省自然科学基金(BK2009344)

作者简介: 徐伟(1984—), 男, 江苏姜堰人, 硕士研究生, 主要从事岩土与地基处理研究。E-mail: xuwei198410@hhu.edu.cn

为推导真空预压联合电渗加固软基固结方程,首先进行如下基本假定 (a) 土体均匀饱和,土粒与水的压缩忽略不计 (b) 土体的渗透系数、电渗透系数及固结系数不随时间而改变 (c) 不考虑电化学作用,土体中电势线性分布,其在电渗处理时间内是均一稳定的 (d) 不考虑土体中各种浓度差和热差引起的水流移动 (e) 由电势差和水头差引起的水流可以叠加 (f) 真空是一次瞬时施加的,不考虑井阻和涂抹引起的真空损耗。

如图 1 所示,以某一阴极为 y 轴(向下为正),以地表面为 x 轴(向右为正)。在阳极和阴极间施加总电压 U_0 ,由于阴、阳极与土体接触处有电压损耗,因此实际作用于土体中的电压通常小于 U_0 。总电压 U_0 去除了电极与土体接触处电压损耗的电压称之为有效电压 U'_0 。若设土体在阴极($x=0$)处电位 $\varphi=0$,则阳极($x=L$)附近的电位 $\varphi=U'_0$ 。根据基本假定(c),阴、阳极间土体的电位 φ 可以表示为

$$\varphi(x) = \frac{U'_0}{L}x \quad (1)$$

式中 U'_0/L 反映了均质土体中实际的电场强度大小。

根据基本假定(a)和 Terzaghi 固结理论可得

$$\operatorname{div} q = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

式中: q ——孔隙水的流速 $\mu\text{m/s}$; u ——超静孔隙水压力 kPa ; t ——固结排水时间 s ; m_v ——土体体积压缩系数 kPa^{-1} 。

由基本假定(c)可得

$$q = ki + k_e i_e \quad (3)$$

式中: k ——土体的水力渗透系数 $\mu\text{m/s}$; i ——水头梯度; k_e ——土体的电渗透系数 $\text{m}^2/(\text{s}\cdot\text{V})$; i_e ——电势梯度 V/m 。

对于真空预压联合电渗的二维排水固结情况,由式(3)可得

$$\left. \begin{aligned} q_x &= \frac{k_h}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial x} + k_e \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ q_y &= \frac{k_v}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: k_h, k_v ——土体的水平向和竖直向水力渗透系数 $\mu\text{m/s}$; ρ_w ——水的密度 t/m^3 。故式(2)可写为

$$\operatorname{div} q = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = \frac{k_h}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_e \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{k_v}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

令

$$\xi = u + \frac{k_e \rho_w g}{k_h} \varphi = u + \frac{k_e \rho_w g}{k_h} \frac{U'_0}{L} x = u + f_{e0} x \quad (6)$$

式中 f_{e0} 称为电渗压力系数 kPa/m 。

将式(6)代入式(5)得

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = C_h \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + C_v \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} - \frac{k_v k_e}{k_h} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{k_e \rho_w g}{k_h} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (7)$$

式中: ξ ——虚拟变量 kPa ; C_h, C_v ——土体的水平向和竖直向固结系数 m^2/s 。

由式(1)可知,式(7)最后 2 项为零,故方程(7)可简化为

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = C_h \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + C_v \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \quad (8)$$

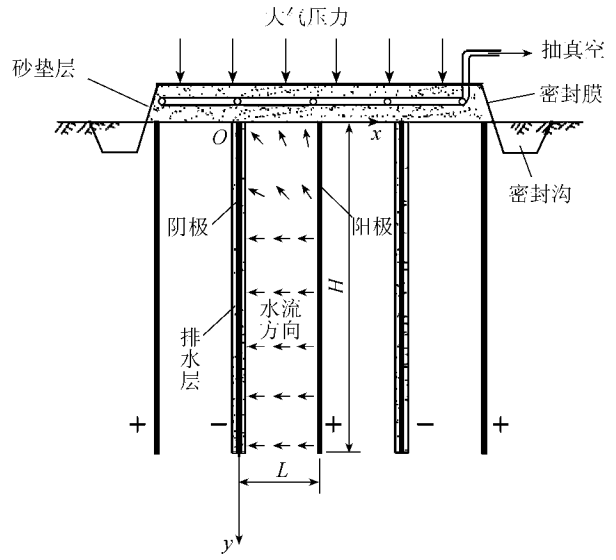


图 1 真空预压联合电渗法排水示意图

Fig. 1 Schematic of drainage by means of vacuum preloading combined with electro-osmosis

对于图 1 所示的真空预压联合电渗法排水的情况 ,令排水层真空度为 P_0 ,则其边界条件与初始条件如下 :

竖向自由排水层 $\xi(0,y,t) = -P_0$ (9)

阳极处不排水层 $\frac{\partial \xi}{\partial x}(L,y,t) = 0$ (10)

表面自由排水层 $\xi(x,0,t) = -P_0 + f_{eo}x$ (11)

电极插入深度处不排水层 $\frac{\partial \xi}{\partial y}(x,H,t) = 0$ (12)

初始状态超静孔隙水压力 $u = 0$,因此 $\xi(x,y,0) = f_{eo}x$ (13)

根据上述条件 ,用分离变量法可求得式 (8) 的解为

$$\xi(x,y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\lambda_n}{H} y \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} [(\alpha_{mn} - \beta_{mn}) e^{-C_{mn}t} + \beta_{mn}] \sin \frac{\mu_m}{L} x - P_0 + f_{eo}x \right\}$$
 (14)

其中 $C_{mn} = C_h \frac{\mu_m^2}{L^2} + C_v \frac{\lambda_n^2}{H^2}$ $\alpha_{mn} = \frac{4P_0}{\mu_m \lambda_n} + \frac{4f_{eo}L}{\mu_m^2 \lambda_n} (-1)^{n+1}$ $\beta_{mn} = \frac{4f_{eo}LC_v \lambda_n}{C_{mn} \mu_m^2 H^2} (-1)^{n+1}$

$\mu_m = \frac{2m-1}{2} \pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$

$\lambda_n = \frac{2n-1}{2} \pi \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$

解出虚拟变量 ξ 后 ,超静孔隙水压力 $u(x,y,t)$ 可由式 (6) 变换求得 $u(x,y,t) = \xi(x,y,t) - f_{eo}x$ (15)

可见 ,真空预压联合电渗法产生的超静孔隙水压力是时间和坐标的函数.

为了更好地理解真空预压联合电渗的概念 ,上述公式中涉及的部分变量说明如下 :真空度的极值是 1 个大气压 ,为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$,实际工程中是达不到的 .电渗过程中 ,电渗透系数变化不大 ,一般在 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 之间 ,与土体的黏粒含量、含水量、离子浓度、电压梯度、pH 值等因素有关^[10] ;电渗一般用来处理渗透系数较小的黏土 , k 一般为 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ m/s}$;现场的电压一般不超过安全电压 36 V ; L 一般为 1 m 至数米 ,而 H 由需要加固的深度决定 ,可以从几米到十几米.

2 算例分析

利用推导出的公式 (14) (15) ,通过 1 个简单算例来说明真空预压联合电渗过程中超静孔隙水压力的发展变化规律 .算例中的变量取值为 : $P_0 = 80 \text{ kPa}$; $k_e = 5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$; $k_h = 2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$; $C_h = 8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $C_v = 4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $L = 1.0 \text{ m}$; $H = 2.0 \text{ m}$; $U_0' = 8 \text{ V}$; $\rho_w = 1.0 \text{ kg/m}^3$.

图 2 为真空预压联合电渗、单独电渗或单独真空预压处理时电极中心点 $A(x = 0.5 \text{ m}, y = 1 \text{ m})$ 处超静孔隙水压力随时间的变化曲线 .从图 2 可以看出 ,真空预压和电渗都产生负的超静孔隙水压力 .真空预压产生的负超静孔隙水压力随着时间逐渐减小 ,最后趋近于 $-P_0$;电渗产生的负超静孔隙水压力也随时间逐渐减小 ,最后趋于一个稳定值 ;真空预压联合电渗产生的超静孔隙水压力是真空预压和电渗分别作用下超静孔隙水压力的叠加 .

图 3 表示真空预压、电渗和真空预压联合电渗 7 d 和 21 d 时 $y = 1 \text{ m}$ (图中 B 线)处超静孔隙水压力在阴极 ($x/L = 0$) 阳极 ($x/L = 1$) 间的分布 .可见 ,真空预压时 ,负超静孔隙水压力从阴极开始发展 ,离阴极越近 ,负超静孔隙水压力越快达到最小值 .在阴极附近 ,真空预压是有效的加固方式 .电渗时负超静孔隙水压力从阳极开始发展 ,离阳极越近 ,超静孔隙水压力减小越快 .在阳极 ($x = L$) 附近 ,电渗是有效的加固方式 .电渗的

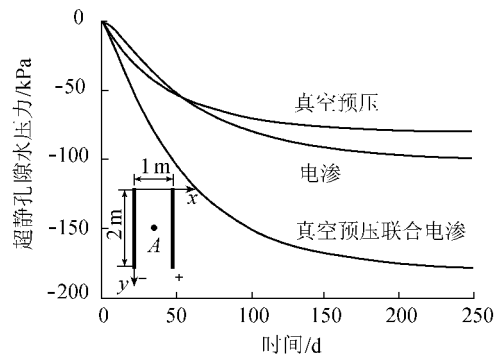


图 2 $x = 0.5 \text{ m}, y = 1 \text{ m}$ 处 (加固区域中心点 A) 超静孔隙水压力的变化曲线

Fig. 2 Development of excess pore water pressure at central point A in consolidated area ($x = 0.5 \text{ m}, y = 1 \text{ m}$)

现场试验已证明了这一点^[11].真空预压会加快阴极附近土体固结,电渗会加快阳极附近土体固结,但两者单独作用都会导致土体水平方向上有效应力增加不一致,土体表层沉降不均匀.真空预压联合电渗法在两者的共同作用下,阴极和阳极附近的负超静孔隙水压力同时减小,并向中间扩展,使土体均匀加固.

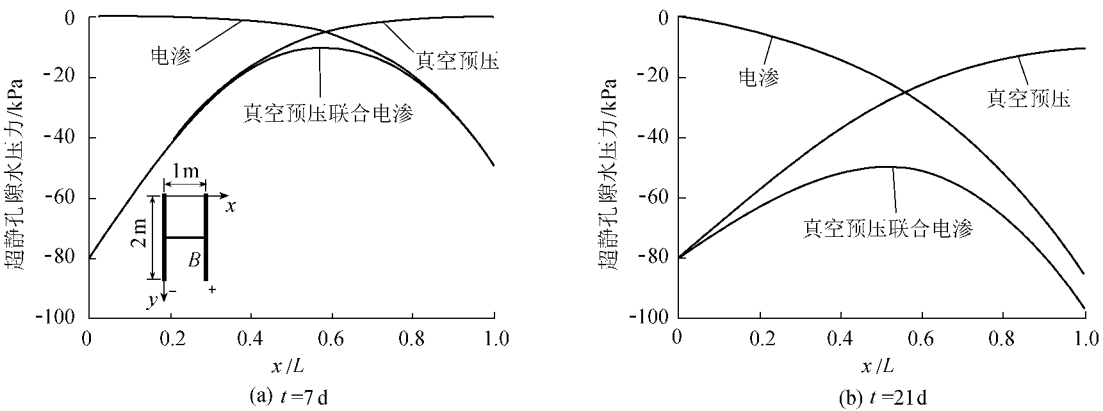


图3 $y = 1\text{ m}$ 处超静孔隙水压力与 x/L 的关系曲线

Fig. 3 Relationship between excess pore water pressure and x/L ($y = 1\text{ m}$)

电渗时,水从阳极向阴极流动,阴极附近来不及固结,而真空预压时,阴极附近的水顺利排出,超静孔隙水压力迅速减小,固结速度较快.所以电渗时在阴极附近采用真空预压可加快阴极附近土体固结速度.

3 试验验证

真空预压联合电渗过程中外荷保持不变,根据基本假定(a)和有效应力原理,土体中有效应力的增长为^[7]

$$\Delta\sigma' = -u(x,y,t)$$
 (16)

相应的土体有效应力 σ' 为

$$\sigma' = \sigma'_0 + \Delta\sigma'$$
 (17)

式中 σ'_0 为土体的初始有效应力.

根据饱和土体的压缩试验,可得含水率 w 与有效应力 σ' 的关系(相当于 $e-p$ 压缩曲线,饱和土体孔隙率 $e = wG_s$,其中 G_s 为土体相对密度),因此,可以通过式(17)计算的有效应力推算出土体含水率的大小.

本文进行了真空预压联合电渗室内模型试验,并测定土体的含水率分布,与通过 $w-\sigma'$ 关系式计算得到的含水率分布进行比较,以验证真空预压联合电渗加固软基固结方程的正确性.

3.1 试样制备

模型试验使用的土样为取自大连大窑湾吹填场的高含水率、高黏粒含量、低渗透性海相土与某河底粉砂质淤泥土2种土按照1:2的质量比充分均匀搅拌而成.混合后的土样,抽气饱和后静置24 h,经取样测定, $w = 46.4\%$, $k = 2.4 \times 10^{-9}\text{ m/s}$, $C_v = 3.5 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$;经电渗模型试验测定,其 $k_e = 6 \times 10^{-9}\text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})^{10[1]}$.

图4为制备的饱和土样经过多次压缩试验得到的 $w-\sigma'$ 的关系曲线,其拟合方程为

$$w = -4.454\ln\sigma' + 48.975$$
 (18)

3.2 真空预压联合电渗模型试验

图5为真空预压联合电渗模型试验布置及照片.模型箱用PVC材料制成,其长、宽、高分别为20 cm、20 cm、25 cm.真空抽气设备采用型号为SHB-Ⅲ的循环水式多用真空泵,其额定功率为180 W,抽气速度为10 L/min.气水分离装置采用ZK-270型真空饱和缸.电源为PS-305D型直流电源,电压在0~30 V范围内连续可调,电流在0~10 A范围内连续可调.

试验步骤如下:

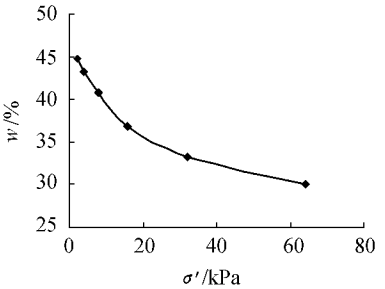


图4 含水率与有效应力关系曲线
Fig. 4 Relationship between water content and effective stress

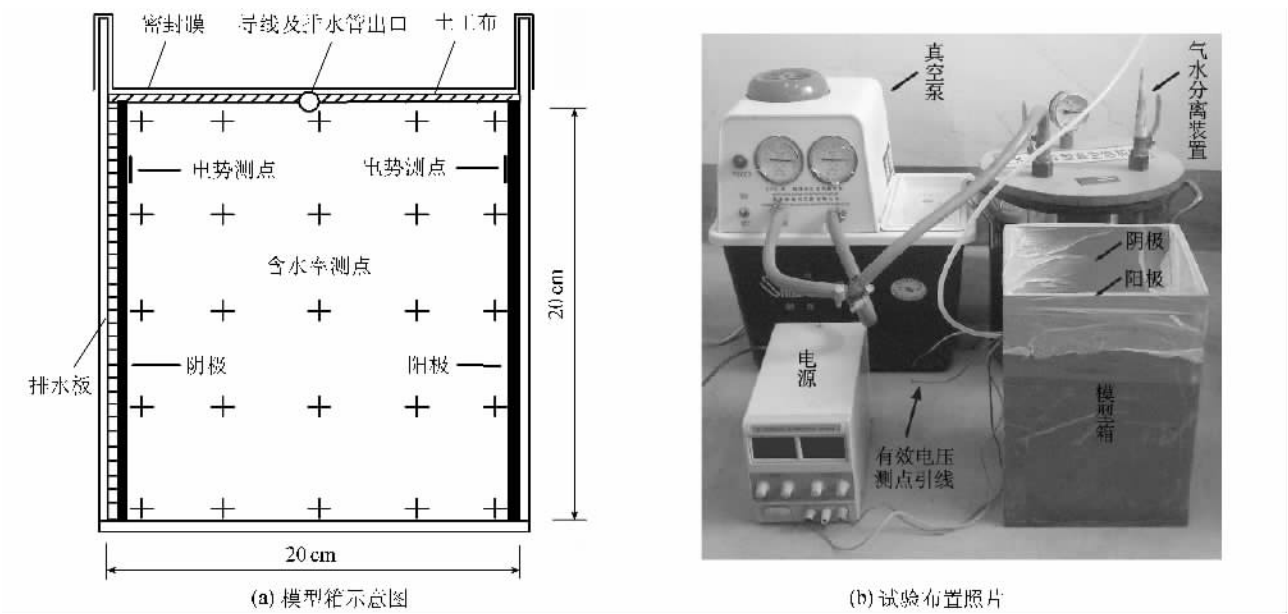


图 5 真空预压联合电渗模型试验布置

Fig. 5 Layout of model tests of vacuum preloading combined with electro-osmosis

- 在模型箱的中间断面,左、右两侧各布置一根电极.电极采用光面钢筋,直径 1 cm,长 20 cm.阴极钢筋与塑料排水板(宽 10 cm)通过细铁丝绑扎在一起,在贴近阴、阳极处布置电势测点,以测量作用于土体上的有效电压,电势测点为粗铜导线内芯,直径 1.5 mm,长 5 mm,电势测点与细铜导线(直径 0.5 mm)连接,从模型箱侧壁引出.
- 将制备好的土样装入模型箱中,装入高度为 20 cm.在土样顶面铺 2 层透水土工布作为排水垫层,阴极处的塑料排水板顶部嵌入 2 层土工布中.
- 布置排水管,排水管一端插入 2 层土工布中,一端通过模型箱侧壁孔口连接到真空泵.土工布上铺塑料密封膜,四周反包到模型箱外壁,并用胶带密封好.
- 打开电源,调节电源电压,控制两电极间的有效电压 $\varphi_0 = 5\text{ V}$;开启真空泵,维持真空度在 36 kPa 上下,开始真空预压联合电渗试验.连续进行 1 d 后,关闭电源.
- 试验结束后,等间距测定模型箱内部土体含水,含水测点的位置如图 5(a)所示.根据测得的含水率数据绘制的等含水率曲线如图 6(a)所示.

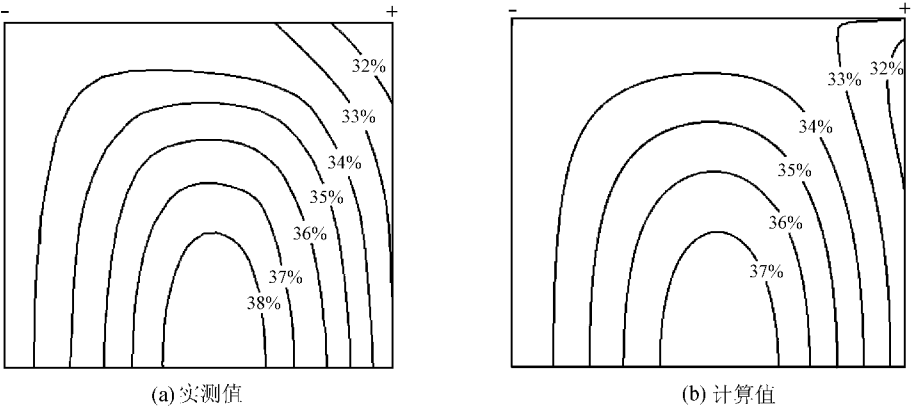


图 6 试验后模型箱内部土体的等含水率曲线

Fig. 6 Observed isoline of water content of soil samples in model box after tests

3.3 与计算含水率的比较

由于模型试验规模较小($L = H = 20\text{ cm}$),可以忽略土体的初始有效应力,故由式(14)~(16)计算得到的有效应力增量 $\Delta\sigma'$ 可近似作为试验结束后土体的有效应力.将式(17)得到的有效应力代入式(18)即可计算

土体中各点对应的含水率,图 6(b)为含水率分布的计算等值线图。

比较图 6(a)(b)可以看出,两者具有相似的分布规律:即在水平方向,电极附近土体的含水率低于中间区域的含水率;在垂直方向,上部土体的含水率低于下部土体的含水率。但实测的含水率与计算值在土体表层有局部的差别,且在土体中下部比计算值稍偏大,其原因如下:

a. 试验时,土体排水固结,因边界效应靠近模型箱四壁的土体沉降较模型箱中心部位小得多,不利于土体表面自由排水层水分的自由流动,此情况不同于计算时土体表层采用的边界条件(式(11)),故在土体表层实测含水率与计算值有所差别。试验时,边界处与中心部位比较,因沉降较小而含水率较小,故在实测含水率曲线上土体表层的含水率有从阳极向中心部位递减的趋势(图 6(a))。理论计算时,假定土体表面自由排水层水分可以自由流动,故计算含水率曲线上土体表层的含水率相同(图 6(b))。

b. 试验过程中,靠近水平和竖向排水层处的土体在真空作用下固结较快,其渗透系数因而降低,阻碍了真空度向内部土体的传递。而计算中假定整个土体的渗透系数为常量,故实测值较计算值偏大。

c. 在电渗过程中,阳极附近孔隙水的 pH 值降到 2 左右。根据文献[12],在 pH 值较低的环境中,电渗流会改变方向,阻碍了孔隙水从阳极到阴极的流动,电渗排水固结效果降低,这也会导致实测值较计算值偏大。

4 结 语

本文在 Terzaghi 固结理论和 Esrig 电渗固结理论的基础上推导了真空预压联合电渗法加固软基的二维固结方程,给出了真空预压联合电渗加固过程中超静孔隙水压力的解析解。通过算例,分析了真空预压联合电渗引起的土体超静孔隙水压力随时间的变化以及在电极间的分布规律,说明真空预压和电渗可以优势互补,使土体得到全面加固。进行了真空预压联合电渗的室内模型试验,试验后实测土体含水率与通过超静孔隙水压力解析解推算出的含水率基本吻合,从而验证了真空预压联合电渗法加固软基二维固结方程的合理性。

致谢:本文在微分方程的求解中得到了河海大学理学院陈才生教授的大力帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 姜炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京:人民交通出版社,1985.
- [2] 黄可明. 电渗法加固软土技术研究[J]. 水利科技,1996(1):5-8.(HUANG Ke-ming. Study on electro-osmotic strengthening technology for soft soil[J]. Hydraulic Science and Technology,1996(1):5-8.(in Chinese))
- [3] 曹永华,高志义,刘爱民. 地基处理的电渗法及其进展[J]. 水运工程,2008(4):92-95.(CAO Yong-hua,GAO Zhi-yi,LIU Ai-min. Characteristics and development of electro-osmotic treatment for ground improvement[J]. Port & Waterway Engineering,2008(4):92-95.(in Chinese))
- [4] 高志义,张美燕. 真空预压联合电渗法室内模型试验研究[J]. 中国港湾建设,2000(5):58-61.(GAO Zhi-yi,ZHANG Mei-yan,ZHANG Jian. Laboratory model test of vacuum preloading in combination with electro-osmotic consolidation[J]. China Harbour Engineering,2000(5):58-61.(in Chinese))
- [5] 房莹光,徐敏,朱忠伟. 碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(11):70-75.(FANG Ying-guang,XU Min,ZHU Zhong-wei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition,2006,34(11):70-75.(in Chinese))
- [6] ESRIG M I. Pore pressure consolidation and electrokinetics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,ASCE,1968,94(SM4):899-922.
- [7] SHANG J Q. Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drain[J]. Canadian Geotechnical Journal,1998,35(3):491-499.
- [8] 李瑛,龚晓楠,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))
- [9] 苏金强,王钊. 电渗的二维固结理论[J]. 岩土力学,2001,25(1):125-131.(SU Jin-qiang,WANG Zhao. Theory of two-dimensional electro-osmotic consolidation of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2001,25(1):125-131.(in Chinese))
- [10] 汪俊波,刘斯宏,徐伟,等. 电渗法处理大连大窑湾超软土室内试验[J]. 水运工程,2010(1):15-19.(WANG Jun-bo,LIU Si-hong,XU Wei et al. Experimental study on electro-osmotic treatment for an ultra-soft clay[J]. Port & Waterway Engineering,2010(1):

15-19.(in Chinese))

- [11] LO K Y ,INLUET I I ,HO K S. Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1991 ,28 (1) :74-83.
- [12] SONDI I ,BISCAN J ,PRAVDIC V. Electrokinetics of pure clay minerals revisited[J]. Journal of Colloid and Interface Science ,1996 ,178 (2) :514-522.

Analytical theory of soft ground consolidation under vacuum preloading combined with electro-osmosis

XU Wei , LIU Si-hong , WANG Liu-jiang , WANG Jun-bo

(*Research Institute of Hydraulic Structures , College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China*)

Abstract : An analytical consolidation theory of soft ground under vacuum preloading combined with electro-osmosis was established based on the Terzaghi 's consolidation theory and the Esrig 's electro-osmotic consolidation theory. The analytical solutions of the excess pore water pressure of the soft ground during consolidation process were obtained. Through an example , the development of the excess pore water pressure with the time and its distribution rules between the electrodes induced by the vacuum preloading combined with electro-osmosis were analyzed. Model tests on soil samples under the vacuum preloading combined with electro-osmosis were carried out. The observed water content of the soil samples after tests agree with those derived by means of the analytical solutions of the excess pore water pressure. They have similar distribution rules , indicating that the analytical consolidation theory is rational.

Key words : vacuum preloading combined with electro-osmosis ; analytical consolidation theory ; soft soil ; excess pore water pressure