

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2023.03.001

【桩基工程专栏】（专栏主持人：刘汉龙）

竖向电渗增强桩承载理论及试验验证

周子健¹, 钟方涛¹, 齐昌广^{1*}, 张智超²

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211;

2. 福建省地质工程勘察院 自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福建 福州 350002)

摘要: 为将电渗固结理论应用于竖向电渗增强桩承载力研究中, 以 Esrig 一维电渗固结理论为基础, 推导得到了考虑有效电势非线性变化的一维电渗固结理论, 并将其与承载时效理论结合得到竖向电渗增强桩承载理论。同时开展竖向电渗增强桩模型试验, 通过控制变量法, 将试验工况分为自下而上电渗组与自上而下电渗组, 通过模型试验得到各组有效电势、增强桩承载力、桩周土体抗剪强度等数据。分析得到两组试验的有效电势变化情况基本符合按线性下降再保持不变的规律, 将有效电势变化情况拟合运用于所推导的竖向电渗增强桩承载理论中, 并计算得到竖向电渗增强桩承载力理论值。通过试验结果与理论值的验证对比发现, 自下而上电渗组与自上而下电渗组计算误差分别为 17.47% 与 10.0%, 考虑到重力效应在竖向电渗中的影响, 因此存在一定的合理计算误差, 可验证竖向电渗增强桩承载理论的准确性。

关键词: 竖向电渗; 电渗固结理论; 承载理论; 电渗增强桩; 模型试验; 电渗复合地基

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)03-0181-06

Bearing theory and experimental verification of vertical electroosmosis reinforced pile

ZHOU Zi-jian¹, ZHONG Fang-tao¹, QI Chang-guang^{1*}, ZHANG Zhi-chao²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

2. Technology Innovation Center of Monitoring and Restoration Engineering of Ecological Fragile Zone in Southeast China, Ministry of Natural Resources, Fujian Geological Engineering Survey Institute, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: In this work, the traditional electroosmotic consolidation theory is applied to the research of the bearing capacity of vertical electroosmotic reinforced piles. Basing on Esrig's one-dimensional electroosmotic consolidation theory, the one-dimensional electroosmotic consolidation theory considering the nonlinear change of effective potential was deduced, and then combined with the bearing aging theory to derive the bearing theory of vertical electroosmotic reinforced pile. Meanwhile, the model test of vertical electroosmosis reinforced pile was carried out. Using the control variable method, the experimental conditions were divided into two directions of electroosmosis from bottom to top and from top to bottom. Results such as effective potential, enhanced pile bearing capacity and shear strength of soil around the pile were obtained. The analysis shows that the variation of the effective potential of the two groups of tests basically conforms to the law of decreasing linearly and then remaining the same. The change of effective potential in the electroosmosis test was applied to the deduced bearing theory, and the theoretical value of the bearing capacity of vertical electroosmotic reinforced pile was calculated. Comparing the theoretical results with the experimental results, it is found that the calculation errors of the bottom-top electroosmosis group and the top-bottom electroosmosis group are 17.47% and 10.0%, respectively. Considering the influence of gravity effect in vertical electroosmosis, certain calculation errors are reasonable, and also can verify the accuracy of the bearing theory of vertical electroosmosis reinforced piles.

Key words: vertical electroosmosis; electroosmotic consolidation theory; bearing theory; electroosmotic reinforced pile; model test; electroosmotic composite foundation

收稿日期: 2022-06-02

作者简介: 周子健 (1999—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 从事软基处理等研究工作。E-mail: 1012036508@qq.com。

*通信作者: 齐昌广 (1986—), 男, 山东济南人, 副教授, 博士, 从事基础工程、软基处理、透土等研究领域。E-mail: qichangguang@163.com。

0 引言

1807年, REUSS^[1] 首先发现电渗现象。1939年, CASAGRANDE^[2] 首次将电渗法成功运用于岩土工程中。随后, 学者对电渗法开展了诸多研究, 但在20世纪60年代以前的岩土工程领域, 电渗法仅仅是用于开展室内模型试验, 对电渗现象的机理认识仍不够清晰。1968年, ESRIG^[3] 提出电渗固结理论, 开启了对电渗法理性认识的新阶段。

在水头梯度和电势梯度可叠加的假设前提下, ESRIG^[3] 提出了一维电渗固结理论。LEWIS等^[4] 考虑了电渗过程中电流的变化情况, 并给出了电渗固结的数值解法。WAN等^[5] 研究堆载作用和阴阳电极相互反转对电渗固结的影响, 推导得到这两种情况下固结度的计算方法。EYKHOLT^[6] 为研究土体各点电场强度和颗粒表面电动电位随时间变化的影响, 推导得到了不均匀电渗理论。FELDKAMP等^[7] 以电渗渗透系数非线性变化为假设, 推导出了一维大变形电渗固结理论。SHANG^[8] 假设电渗渗透系数为常量, 推导出了在堆载作用下的二维电渗固结理论。苏金强和王钊^[9] 在假设处理面积为矩形的条件下, 推导出了二维电渗固结理论, 并通过分离变量法计算得到了在3种不同排水边界条件下的理论解析解。李瑛等^[10] 推导出了轴对称电渗固结理论, 并通过计算得到了其理论的解析解。徐伟等^[11]、吴辉等^[12] 建立了真空预压-电渗联合法处理软土地基的固结理论。胡黎明等^[13] 在多场耦合理论的基础上, 考虑了土体在电渗过程中性质会发生变化的因素, 模拟了电渗过程中土体超静孔压、位移以及场度变化, 并对其进行了分析。HU等^[14] 考虑了电渗过程中参数的非线性变化, 推导得到软黏土的二维电渗固结理论及数值解。YUAN等^[15-16] 基于弹塑性土体、非饱和土体的假设推导了多维电渗固结理论。关于电渗固结理论方面的研究较为完善, 但针对电渗固结理论应用于竖向电渗增强桩复合地基承载力计算的研究鲜见, 进而导致竖向电渗增强桩承载理论研究不足, 并且无对应模型试验为其验证, 导致理论可行性与准确性有待商榷。

综上, 为了将传统电渗固结理论应用于竖向电渗增强桩承载力研究中, 本文推导得到了考虑有效电势非线性变化的一维电渗固结理论, 并将其与承载时效理论结合得到竖向电渗增强桩承载理论, 计

算得到竖向电渗增强桩承载理论值并与模型试验结果进行对比分析, 探讨竖向电渗增强桩承载理论的可行性, 解决电渗增强桩基承载理论研究不全面的问题。

1 竖向电渗增强桩承载理论

1.1 考虑非线性因素的电渗固结理论

由 ESRIG^[3] 提出的水头梯度和电势梯度可叠加的假设可得:

$$v = k_h \cdot i_h + k_e \cdot i_e \quad (1)$$

式中: v 为排水速率; k_h 为土的渗透系数; i_h 为水头梯度; k_e 为电渗系数; i_e 为电势梯度。

则 dt 时间内, 距离阴极 y 处, $1 \times 1 \times dy$ 单元体内排水量为:

$$\Delta q = \frac{k_h}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dy dt + k_e \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} dy dt \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的重度; u 为孔压; y 为与阴极的距离; t 为时间; φ 为有效电势。

而 dt 时间内, 相同单元体体积变形量为:

$$\Delta v = \frac{\alpha}{1+e} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} dy dt \quad (3)$$

式中: α 为土的压缩系数; e 为孔隙比。

又根据排水量等于土体压缩量的假设得到:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_h} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

同时, 考虑电渗过程中有效电势按线性下降再保持不变的变化形式, 得到:

$t < t_m$ 时,

$$\varphi(y, t) = \varphi(y) - \frac{m}{L} y t \quad (5)$$

$t > t_m$ 时,

$$\varphi(y, t) = \varphi(y) - \frac{m}{L} y t_m \quad (6)$$

式(4)~(6)中: c_h 为固结系数, $c_h = \frac{(1+e)k_h}{\alpha \cdot \gamma_w}$;

$\varphi(y)$ 为距离阴极 y 处的初始电势; y 为有效电势维持稳定的时间; m 为有效电势削弱系数; L 为排水距离, 即阴阳极间的距离。

令 $\xi = u + \frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \varphi$, $a^2 = c_h$, 再分别将式(5)

与式(6)代入式(4)便可得到考虑有限电势非线性变化的一维电渗固结方程:

$t < t_m$ 时,

$$a^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \frac{m}{L} y \quad (7)$$

$t > t_m$ 时,

$$a^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (8)$$

考虑到阳极为不排水边界, 阴极为排水边界, 则边界条件为:

$$\xi(0, t) = 0 \quad (9)$$

$$\xi_y(L, t) = 0 \quad (10)$$

而初始条件分别为:

$t < t_m$ 时,

$$\xi(y, 0) = u(y, 0) + \frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \varphi(y, 0) \quad (11)$$

$t > t_m$ 时,

$$\xi(y, 0) = u(y, t_m) + \frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \varphi(y, t_m) \quad (12)$$

将边界条件与初始条件代入一维电渗固结方程, 通过分离变量法解得:

$t < t_m$ 时,

$$u(y, t) = -\frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \varphi(y, t) + \sum_{n=0}^{\infty} (A_n + B_n \cdot e^{-\frac{(n+1/2)^2 \pi^2 c_h t}{L^2}}) \sin \frac{(n+1/2)\pi}{L} y \quad (13)$$

$t > t_m$ 时,

$$u(y, t) = -\frac{k_e \cdot \gamma_w}{k_h} \cdot \varphi(y, t_m) + \sum_{n=0}^{\infty} C_n (A_n + B_n \cdot e^{-\frac{(n+1/2)^2 \pi^2 c_h (t-t_m)}{L^2}}) \cdot e^{-\frac{(n+1/2)^2 \pi^2 c_h (t-t_m)}{L^2}} \sin \frac{(n+1/2)\pi}{L} y \quad (14)$$

式中: $A_n = -\frac{2mk_e \gamma_w (-1)^n L^2}{c_h k_h (n+1/2)^4 \pi^4}$;

$$B_n = \frac{2k_e \gamma_w \varphi_0 (-1)^n}{k_h (n+1/2)^2 \pi^2} + \frac{2mk_e \gamma_w (-1)^n L^2}{c_h k_h (n+1/2)^4 \pi^4};$$

$$C_n = \frac{2}{(n+1/2)\pi}; \quad \varphi_0 \text{ 为 } t=0 \text{ 时的有效电势。}$$

1.2 竖向电渗增强桩承载力计算

通过承载时效理论将竖向电渗增强桩承载力通过侧摩阻力和端阻力之和表示, 通过控制时间因素, 对侧摩阻力进行计算研究, 从而准确计算得到

在电渗处理一定时间后电渗增强桩承载力理论值。又由于常见的电渗复合地基模型试验中, 通常是以水平方向电渗这一电渗形式进行研究, 因此电渗流是由阳极流向阴极, 从而电化学反应导致的胶结作用主要产生于阳极周围。而开展的竖向电渗模型试验研究中, 阳、阴极竖向布置于桩体表面, 阳极只占桩身的一部分, 在电渗后期, 阳极周围土体的确因电化学反应产生一定的胶结产物, 但相比起土表以下整段桩体周围土体摩擦角作用而言, 部分土体的胶结作用可以忽略。

考虑到竖向电渗排水方向, 增强桩桩身范围内的土层孔隙压力随着电渗方向以及电渗时间进行变化, 因此引入考虑有效电势非线性变化的电渗固结理论所计算得到的土体孔压, 即式 (13) 与式 (14), 遵循桩周土体无初始应力的假设, 推导得到桩身范围内土层单位侧摩阻力值 q_s 随时间 t 变化的计算公式为:

$$q_s(y, t) = [-u(y, t)] \tan \delta \quad (15)$$

式中: δ 为桩土界面摩擦角, 根据 KULHAWY^[17] 研究可知, δ 的大小与桩体表面粗糙程度相关, 桩体表面越粗糙, δ 与土体内摩擦角 φ 越接近, 模型试验中采用的塑料管桩桩体表面较光滑, 因此 δ 取 0.8φ ; $u(y, t)$ 为式 (13) 与式 (14) 推导得到的增强桩桩周土体孔压。

根据 YU^[18] 得到桩端阻力的计算公式如下:

$$Q_b = q_b \cdot \pi r^2 \quad (16)$$

式中: q_b 为单位端阻力, $q_b = \frac{4s_u}{3}$, s_u 为不排水抗剪强度; r 为桩身半径。

综上, 可得竖向电渗增强桩极限承载力 P_u 随时间 t 的变化关系为:

$$P_u(t) = \int_0^L q_s(y, t) \cdot 2\pi r \cdot y dy + Q_b \quad (17)$$

2 竖向电渗增强桩模型试验

2.1 试验装置

试验用土为浙江宁波某处基坑内的淤泥质软土, 土样的基本物理力学指标如表 1 所示。模型箱用钢板支撑, 总体长 2 m, 宽 1 m, 高 1 m, 用不透水的钢板分隔为两个 1 m×1 m×1 m 的模型箱, 如图 1 所示, 分别进行自下而上和自上而下两个电渗方向的试验。试验用桩为 PVC 材质塑料桩, 直径

90 mm, 壁厚 2 mm, 长 75 cm, 一端封闭, 一端敞开, 在桩体上下两处分别布置正极和负极, 通过改变正负电极位置改变电渗方向, 并且为了达到更好的电渗效果, 在桩体外侧包裹有塑料排水板, 加快土中水的汇聚。含水率传感器型号为 JX-BS-3001-TR, 为实时读数传感器, 精度为 0.1%。其他主要试验装置为 MP-1005D 型直流稳压电源。输出电压为 0~100 V 直流电压, 输出电流为 0~5 A。

表 1 土的基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil

重度 γ / (kN/m ³)	土粒相对 密度 d_s	孔隙比 e	含水率 w / %	电导率 σ / (S/m)
17.2	2.14	1.41	48.3	0.062



图 1 竖向电渗模型试验装置

Fig. 1 Vertical electroosmosis model test device

2.2 试验设计

如图 2 所示, 对于自下而上电渗组, 分别在桩体距顶部 20 cm 和桩体距底部 10 cm 处布置金属钢丝线圈作为电极, 桩体上、下部电极分别连接负极和正极, 桩体以封闭端为下, 埋入深度为 65 cm, 埋设桩体的同时, 分别距离桩身 1 cm 处的位置插入两根电势测针, 分别插入至两极所处的土体深度, 电势测针为直径 5 mm 的钢筋, 采用万用表实时测量有效电势。电渗后土中水在电渗作用下向上运动, 通过塑料排水板提供的排水通道排出土体表面, 在土表放置集水杯, 收集电渗后渗出土表的土中水。

如图 3 所示, 对于自上而下电渗组, 桩体上、下部电极分别连接正极和负极, 且在桩底部 5 cm 处进行规则打孔, 孔径 5 mm, 用透水土工布包裹透水孔, 防止土进入桩内, 在桩内布置塑料抽水管, 可直接用抽水器从桩内部进行抽水。在距离桩体 5 cm, 深度分别为 10 cm、32.5 cm、55 cm 处埋设含水率传感器。在土表距桩体 5 cm 处对称布置两个百分表, 测量土体沉降。为减小土体表面水分蒸发对试验的影响, 在试验开始后在土表面用塑料薄

膜密封, 避免土表面露出。

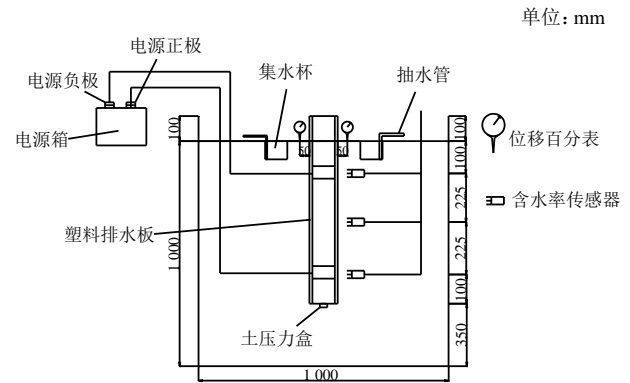


图 2 自下而上电渗组试验布局图

Fig. 2 Bottom-top electroosmosis group test layout

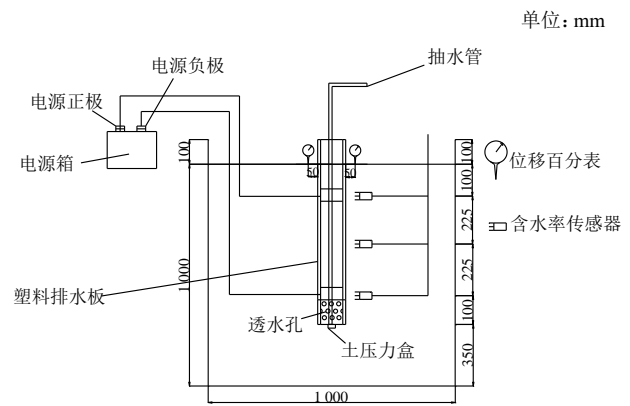


图 3 自上而下电渗组试验布局图

Fig. 3 Top-bottom electroosmosis group test layout

试验开始前对黏土进行烘干粉碎浸泡, 使得土体初始平均含水率为 40%, 采用分层填土的方式, 并且在此过程中放置仪器, 静置 24 h 使其在自重作用下固结。用环刀取土, 测量未电渗时的土体抗剪强度。两组试验同时接通电源后, 观测土中含水率变化、土体沉降、排水量大小、桩底土压力变化、裂缝产生情况。试验前期 1 h 观测一次数据, 试验中期 2 h 观测一次数据, 试验后期 3 h 观测一次数据, 直至土体沉降基本停止, 抽水量基本为 0, 含水率停止变化时, 试验停止。对试验后的桩周土体用环刀取土, 进行抗剪试验, 并对电渗后的桩体进行静载试验, 得到电渗后的电渗增强桩承载力。

3 模型试验与理论验证对比

通过模型试验得到土体的基本参数如下: 渗透系数 $k_h=4 \times 10^{-9}$ m/s, 电渗渗透系数 $k_e=6 \times 10^{-9}$ m²/(s·V), 不排水抗剪强度 $s_u=15$ kPa, 固结系数 $c_h=8 \times 10^{-8}$ m², 水的重度 $\gamma_w=9.8$ kN/m³, 排水距离 $L=0.45$ m。电渗后土体抗剪强度变化见表 2。

表 2 电渗后阳极周围土体内摩擦角

Table 2 Friction angle in soil around anode after electroosmosis

土体内摩擦角	自下而上电渗组	自上而下电渗组
$\phi/(\circ)$	21.1	23.2

图 4 为两组电渗试验有效电势变化的情况, 基本符合有效电势按线性下降再保持不变的变化形式, 分别将两组变化情况进行拟合, 分别得到有效电势削减系数 $m_{\text{自上而下}}=1.444 \times 10^{-4} \text{ V/s}$, $m_{\text{自下而上}}=1.498 \times 10^{-4} \text{ V/s}$, 以及电渗稳定时间点 $t_{\text{m 自上而下}}=72\ 000 \text{ s}$, $t_{\text{m 自下而上}}=82\ 800 \text{ s}$ 。

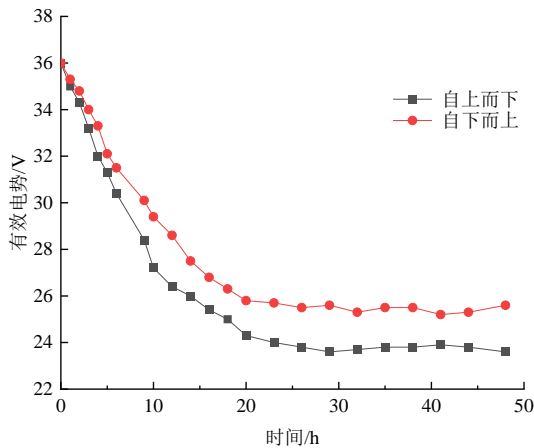


图 4 竖向电渗模型试验有效电势变化情况
Fig. 4 Variation of effective potential in vertical electroosmotic model test

3.1 超静孔压理论值对比分析

将所测得的参数分别代入式 (13)、式 (14) 与 Esrig 所推导的一维电渗固结理论中, 分别求得对应两个电渗固结理论的超静孔压理论计算值。图 5 为施加 36 V 电压下阳极处考虑有效电势非线性变化得到的超静孔压理论值以及 Esrig 理论超静孔压理论值随时间的变化曲线。

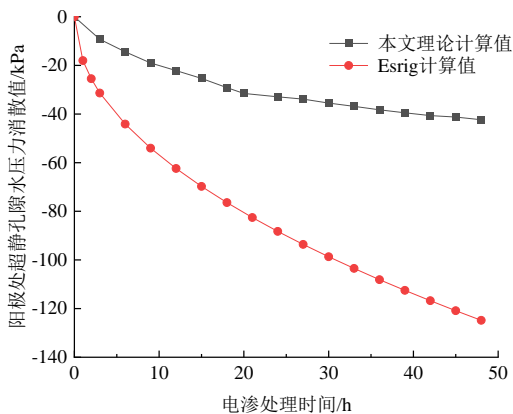


图 5 自上而下电渗组超静孔压理论值对比
Fig. 5 Comparison of theoretical values of excess pore water pressure in top-bottom electroosmosis group

通过比较 Esrig 理论计算值以及考虑有效电势非线性变化的超静孔压理论计算值, 可以发现 Esrig 理论计算值远大于本文所推导理论值, 这主要是由于理论推导未考虑土体的有效电势变化, 并且土体与阳、阴极接触的界面电阻也会使得实际有效电势小于施加电势。

通过将参数代入式 (13)、式 (14) 分别求得自上而下与自下而上两个电渗组超静孔压理论计算值。图 6 所示为电渗处理 48 h 时考虑有效电势线性变化得到的超静孔压理论值沿电势方向的分布曲线。可以发现, 不考虑有效电势变化的 Esrig 理论值明显偏大。结合图 4 有效电势变化情况对比分析发现, 有效电势对超静孔压影响较大。

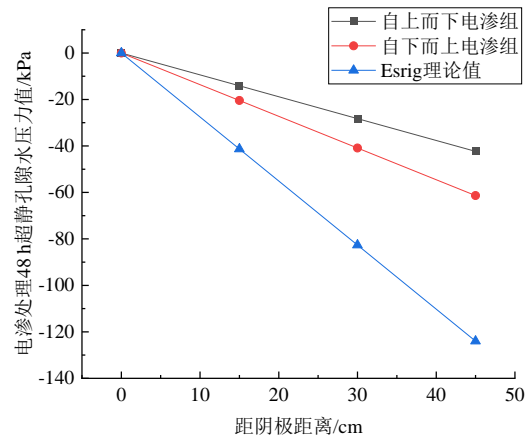


图 6 电渗处理 48 h 超静孔压理论值分布曲线
Fig. 6 Distribution curve of excess pore water pressure after electroosmotic treatment for 48 hours

3.2 理论与试验对比分析

将图 6 所求得的超静孔压理论值代入式 (15) 求得单位侧摩阻力值, 再根据式 (16)、式 (17) 求得竖向电渗增强桩承载力 P_0 。将理论值与试验结果进行对比分析, 如表 3 所示。

表 3 竖向电渗增强桩承载力实测值与理论值对比
Table 3 Comparison between measured and theoretical values of bearing capacity of vertical electroosmotic reinforced piles

试验工况	电渗固结 48 h 后增强桩承载力/N	
	实测值	理论值
自下而上电渗	755.6	887.6
自上而下电渗	881.8	793.3

分析表 3 可得, 两种试验工况下竖向电渗增强桩承载力实测值与理论值计算误差为 17.47% 与 10.0%。其中自下而上电渗工况下的误差偏大, 考虑到实际情况下, 重力效应对自下而上电渗过程中排

水存在一定的抑制作用,而电渗作用的不充分导致增强桩阳极部分腐蚀程度较小以及桩体与土体的接触电阻减小,从而使得有效电势偏大。通过理论分析可知,有效电势对超静孔隙水压力影响较大,这也直接影响到自下而上电渗增强桩承载理论值偏大。同时,电渗作用的不充分一定程度上抑制了增强桩阳极部分与土体形成的胶结作用,使得电渗效果略差于自上而下电渗组,因此存在一定的计算误差,可验证所推导理论的准确性。

4 结论

为将传统电渗固结理论应用于竖向电渗增强桩承载力研究中,推导得到了考虑有效电势非线性变化的一维电渗固结理论,并将其与承载时效理论结合得到竖向电渗增强桩承载理论。同时开展竖向电渗增强桩模型试验,试验工况包括自下而上电渗组与自上而下电渗组。电渗试验中,发现有效电势变化基本符合先线性下降再保持不变的变化形式,将其拟合运用于所推导的承载理论中,并计算得到竖向电渗增强桩承载力理论值。将理论值与试验结果对比发现,自下而上电渗组与自上而下电渗组计算误差分别为 17.47%与 10.0%,考虑到重力效应在竖向电渗中的影响,因此存在一定的合理计算误差,可验证竖向电渗增强桩承载理论的准确性。

专栏主持人 刘汉龙



博士,博士生导师,重庆大学党委常委、常务副校长,教育部长江学者特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者,获何梁何利基金科学与技术奖、第十四届光华工程科技奖、首届全国创新争先奖、茅以升土力学与岩

土工程学术大奖和 16 项国家与省部级科学技术奖,担任国际土力学与岩土工程学会 TC303 技术委员会主席,《土木与环境工程学报》主编。长期从事软弱地基加固与桩基工程、环境岩土力学与工程领域的教学与科研工作。

参考文献

[1] REUSS F F. Charge-induced flow[C]//Proceedings of the Imperial Society of Naturalists of Moscow. Moscow,

1809.

- [2] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. *Geotechnique*, 1949, 1(1): 159-177.
- [3] ESRIG M I. Pore pressure consolidation and electrokinetics[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(4): 899-921.
- [4] LEWIS R W, HUMPHESON C. Numerical analysis of electro-osmotic flow in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division*, 1973, 99(3): 603-616.
- [5] WANTY, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102(5): 473-491.
- [6] EYKHOLT G R. Development of pore pressures by nonuniform electroosmosis in clays[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 55(1): 171-186.
- [7] FELDKAMP J R, BELHOMME G M. Large-strain electrokinetic consolidation: theory and experiment in one dimension[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(4): 557-568.
- [8] SHANG J Q. Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drains[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(3): 491-499.
- [9] 苏金强, 王钊. 电渗的二维固结理论[J]. *岩土力学*, 2003, 53(8): 759-763.
SU Jin-qiang, WANG Zhao. Theory of two-dimensional electro-osmotic consolidation of soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 53(8): 759-763.
- [10] 李瑛, 龚晓南, 焦丹, 等. 软黏土二维电渗固结性状的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊 2): 4034-4039.
LI Ying, GONG Xiao-nan, JIAO Dan, et al. Experimental study on two-dimensional electro-osmotic consolidation of soft clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2): 4034-4039.
- [11] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(2): 169-175.
XU Wei, LIU Si-hong, WANG Liu-jiang, 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.
- [12] 吴辉, 胡黎明. 真空预压与电渗固结联合加固技术的理论模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2012, 52(2): 182-185.