

DOI: 10.11779/CJGE2016S1028

电渗排水固结的设计理论和方法

庄艳峰

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 探讨了电渗法处理大面积深厚软土地基的若干问题, 包括: 电极材料、能耗、电源功率、设计理论和方法。EKG 材料的出现解决了电极腐蚀和电渗能耗过高的问题, 现在电渗法在大面积应用中面临的是电源功率要求过高的问题, 该问题可以通过轮询通电的方法解决。依据电渗能级梯度理论提出了电渗排水固结的设计方法。时间因子和流量系数是电渗设计方法中的两个关键参数, 其中流量系数具有较明显的模型尺寸效应, 设计时需要进行修正。

关键词: 电渗; 电动土工合成材料; 能级梯度理论; 吹填; 软基处理

中图分类号: TU472.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0152-04

作者简介: 庄艳峰(1978-), 男, 副教授, 主要从事电渗和土工合成材料研究。E-mail: zhuang@tsinghua.edu.cn。

Theory and design method for electro-osmotic consolidation

ZHUANG Yan-feng

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The problems of electro-osmotic consolidation for large scale deep soft ground, including electrode, energy consumption, electric power, theory and design method, are discussed. Innovation of EKG materials has solved the problems of electrode corrosion and high energy consumption in electro-osmotic consolidation. High electric power demand is currently a new challenge for large scale application of electro-osmotic consolidation, and the solution will be the roll polling program embedded in novel designed electric power source. The design method based on the energy level gradient theory of electro-osmotic consolidation is proposed. The time factor and flow coefficient are the key parameters of the design method. The flow coefficient has distinct scale effect, and it needs to be corrected before applied in the design.

Key words: electro-osmosis; EKG; energy level gradient theory; reclamation; soft ground improvement

0 引言

软土地基处理是一个古老的课题, 但对于深厚软土地基的处理至今仍然很困难, 各种处理方法或耗时长, 或者成本高。深厚软土地基通常由高含水率、低渗透性的黏土、淤泥构成, 排水固结需要很长时间, 且效果不佳。这些深厚软土通常来自于湖相、海相淤泥的天然沉积, 疏浚吹填, 污泥弃置, 尾矿堆填等。随着吹填造陆技术的大量使用^[1-2], 需要对深厚软土地基进行处理的工程也越来越多。

目前对于吹填淤泥, 常常先用真空预压法进行浅层处理, 形成一个硬壳层; 交付使用之后再根据土地的具体用途, 进行二次处理。二次处理的方法通常是在地表填土或者打桩。地表填土的方法可能遇到如下问题: ①填土把底下未固结的淤泥挤到旁边; ②软土在上部荷载作用下沉降多年不能稳定, 造成上部建筑、道路开裂等工程问题。桩基的成本高, 且在超软淤泥中做桩就像“稀饭中插筷子”, 容易出现桩的漂移、倾斜, 甚至折断。

真空预压技术在国内的应用已有三十多年的历史, 尤其是近七、八年, 在大面积吹填造陆工程中得到了广泛的应用。虽然真空预压技术在三十多年的时间内取得了很大的进展, 但对于深厚吹填淤泥的处理存在局限性, 将处理过程分为一次(浅层)处理和二次处理是不得已而为之, 并且二次处理中出现的困难和问题也常与一次处理效果不佳有关。目前真空预压法的设计和检测方法也间接表明真空预压对于吹填淤泥的作用效果难以深入到深层: 目前真空预压的设计和报价都是按平方米论, 不管深度多深都差不多; 用于检测地基承载力的载荷板试验, 载荷板面积通常都只有 0.5 m^2 , 这个尺寸的载荷板试验只能反映 $1\sim 2 \text{ m}$ 深度范围内土体的承载力^[3]。

电渗法处理深厚软土地基很具有潜力, 排水固结速度快、效果好且能够深入到软土深层, 但电渗法一直未能在工程中得到广泛应用, 因为从室内模型试验

到现场应用，再到大面积（几百亩、上千亩）吹填工程，每一步的进展都要解决不少理论和技术难题。电渗的研究已有 200 多年的历史，本文不赘述电渗基本机理，主要探讨一些电渗方面近来已被解决和正在解决的难题，包括电极材料，电源功率，基于电渗能级梯度理论的设计方法和设计参数及其修正。

1 电极材料和电渗能耗

电极材料腐蚀和电渗能耗过高曾被认为是阻碍电渗应用的主要困难，随着 EKG 材料的出现，这两个困难已被解决。

1.1 EKG 材料

EKG 材料的概念于 1996 年被提出^[4]，但直到 2012 年才有性能合乎要求的 EKG 材料被制造出来，并且能够实现量产。EKG 是一种能够导电并且不会被腐蚀的电极材料，用于代替以前的金属电极，解决了电极材料的腐蚀问题。

EKG 材料的困难之一在于导电塑料的电阻率要求不高于 $10^{-3} \Omega \cdot m$ ，满足该导电性要求的塑料力学性能较差，材料发脆，柔韧性也不好，在模具中难以成型。实际上，高分子材料具有很大的潜力，通过配方的研发，能够满足各种各样的需求，但最初 EKG 的概念非常笼统，不知道有什么要求，该做成什么样子。2012 年获专利的一种 EKG 材料——导电塑料排水板^[5]，将要求具体化了：做成和传统塑料排水板相同的型式且电阻率达到 $10^{-3} \Omega \cdot m$ 。

EKG 材料的另一个问题是通电过程中潜在的碳迁移，导致材料导电性能下降，该问题被称为导电塑料的“腐蚀”，现通过工艺的改进已经解决了这个问题，在电渗处理周期内（1~2 个月），EKG 材料导电性没有明显下降。

1.2 电渗能耗

电渗法一直被认为能耗较大，但对于电渗能耗的认识并不统一，处理每立方米土体的电耗从几度到几十度均有见报道。笔者认为曾经电渗能耗较大可能的原因有两个方面：一是通电时电能利用率不高，电源在电渗效率较低的情况下长时间持续供电；二是金属电极被腐蚀之后产生钝化，导致界面电阻升高，在界面处消耗大量的电能。

EKG 材料的出现解决了电极腐蚀钝化造成的电能浪费；电能利用率不高的问题可以通过优化通电模式的方法解决。目前电渗能耗大约在 10 kWh 以内，与真空预压的能耗相当^[6]。

2 电源功率

虽然电极材料腐蚀和电渗能耗过高的问题已被解

决，但电渗法在大面积推广应用的时候仍然面临新的困难，其中之一是电源功率问题。

虽然电渗能耗和真空预压相当，但因为电渗排水固结比真空预压快得多，因此需要的电源功率也大得多。例如，如果满功率运行， 300 m^2 面积， 5 m 深的吹填淤泥就需要 80V/1000A 功率的直流电源；而同样的功率可以提供给 1000 m^2 的吹填淤泥（而且不论吹填深度）做真空预压处理^[7]。

若电源的功率受到限制，只能通过电源管理程序，对需要处理的吹填淤泥进行分区轮流通电。这将延长电渗处理的时间，但如果将间歇时间和通电时间结合起来，合理配置和管理电源的通电轮换时间，可以达到用电成本和处理时间的合理平衡。这项技术的关键是通电模式的优化，需要对电源进行特别设计。

3 电渗理论

经典的电渗排水固结理论是 Esrig 理论，该理论提出于 1968 年，基本的想法是将电势梯度引起的水流和反向的水力梯度引起的水流叠加，当二者相平衡的时候，电渗排水固结停止^[8]。随后学者们引入更多的非线性并推广到三维，对电渗排水固结过程建立理论模型或者进行数值模拟，但基本理论框架仍然是 Esrig 理论。

3.1 电渗能级梯度理论

Esrig 理论无法用于实际电渗设计：它无法估计所需的电源功率及电学参数在电渗过程中的变化情况；吸力、排水、沉降等参数的计算与实际也存在较大的偏差。为了进行电渗设计，笔者提出了电渗的能级梯度理论^[9]。该理论的基本原理是：外加能量场的能量密度与土体当前能量密度之差所形成的能级梯度是电渗水流的驱动力。在该理论中，电流可以表达为时间的负指数函数：

$$I = (I_0 - I_\infty) e^{-at} + I_\infty \quad , \quad (1)$$

式中， I 为电渗电流（A）； I_0 为初始电流（A）； I_∞ 为最终电流（A）； t 为时间（s）； a 为时间因子（ s^{-1} ）。

电渗排水流速可用下式计算：

$$q = \frac{k_q v}{a \Delta x^2} \frac{(I_0 - I_\infty)}{A} e^{-at} \quad . \quad (2)$$

式中 q 为电渗排水流速（ $m \cdot s^{-1}$ ）； k_q 为流量系数（ $m^2 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$ ）； Δx 为阴极和阳极之间的距离（m）； v 是电压（V）； A 为电流通过的面积（ m^2 ）。

电渗累积排水量 Q 可用下式表示：

$$Q = \frac{k_q v (I_0 - I_\infty)}{a^2 \Delta x^2} (1 - e^{-at}) \quad . \quad (3)$$

3.2 关键参数

流量系数 k_q 和时间因子 a 是电渗能级梯度理论的两个关键参数。流量系数 k_q 反映了土体的透水性和能

量在土体中累积的快慢, 土体透水性越好或能量在土体中越不容易累积, 流量系数越大。时间因子 a 反映的是电渗过程中电流消减的快慢, a 值越小电渗持续时间越长, 但最终电渗的效果也越好。

相对于预压方法, 电渗法速度很快, 因此在实际电渗排水固结法中, 时间长一点没关系, 笔者希望 a 值小一点, 最终能有更好的处理效果。多次试验表明 a 值变化范围不大, 不同土质、不同尺寸的场地, a 值基本上都在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 范围内。参数 k_q 有较大变化范围, 且存在模型尺寸效应, 其值大概在 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。

4 电渗设计方法

EKG 材料与传统塑料排水板型式一样, 其布置和施工方式也与传统预压排水固结类似, 本文仅讨论电渗法区别于传统预压法的设计内容。

4.1 室内参数测定

通过室内模型试验确定电渗参数 k_q 和 a 。模型尺寸可采用 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 电极在 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 过流面积上满铺, 电势梯度采用与实际工程中相同的电势梯度。根据用电安全性的要求, 实际工程中采用的电压一般不超过 80 V ; 电极板的间距一般为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$, 小于 0.5 m 间距时施工不方便, 电极可能在淤泥底部或表面碰在一起; 因此模型试验中采用电势梯度在 $80 \sim 160 \text{ V/m}$ 。

模型试验通电后记录电流 - 时间曲线, 可得到电流负指数消减函数, 即式(1), 因为参数 a 与模型尺寸关系不大, 因此式(1)得到的参数 a 即为实际的时间因子, 实际工程中电渗电流将以类似的速率消减。

k_q 可以通过最终排水量来确定。将 $t=\infty$ 代入式(3)并整理得

$$k_q = \frac{Q_\infty a^2 \Delta x^2}{v(I_0 - I_\infty)} , \quad (4)$$

式中, Q_∞ 为最终排水量 (m^3)。

通过(4)式即可计算出 k_q 值。如前所述, k_q 存在较明显的尺寸效应, 主要原因有如下两个方面: ① 小模型中得到的最终排水量偏小, 因为在排水总量本来就不大的情况下, 电解、蒸发所占的比例就偏大; ② 电流面密度偏大, 实际工程中电极不是满铺的, 而且多个回路之间互相影响, 因此实际工程中电流面密度会比模型试验中的小。所以, 模型试验得到的 k_q 值偏小。

为了更准确地计算排水量, 从而预估电渗处理之后土体含水率以及沉降情况, 可以通过扩大模型试验的尺寸获得更准确的 k_q 值, 或者根据经验对小模型试

验的 k_q 值进行修正。

4.2 电源功率设计

电源功率设计的关键是正确估计电渗电流。在上述测定电流 - 时间曲线的模型试验中, 可以得到初始电流面密度, 由此实际初始总电流可用下式估算:

$$I_{0\text{总}} = Nj_0 A . \quad (5)$$

式中 $I_{0\text{总}}$ 为实际初始总电流 (A); j_0 为初始电流面密度 (A/m^2); N 为实际电流回路数 (量纲为 1); A 为电流通过的面积 (m^2)。

实际初始电流值一般都很大: $j_0=0.5 \sim 1 \text{ A}/\text{m}^2$, 那么对于 10 m 深, 1000 m^2 的吹填淤泥, 电流将达到 $5000 \sim 10000 \text{ A}$ 。这么大的电流, 对于电源、电缆线的配备都是一个挑战, 这也是限制电渗法大面积推广的一个重要因素, 但是这个问题正在逐步被解决。问题的解决方案是: 对整个场地进行轮询通电, 这需要对电源进行重新设计, 尤其是对程控部分的重新设计。

轮询通电与同时通电相比, 牺牲了处理时间, 因此在估算出场地所需要的总电流之后, 应该根据工期和成本的要求, 综合考虑所需要的电源功率。

4.3 排水量计算

实际工程中, 场地是由多个线路组成, 因此电流也应该采用所有回路的总电流。根据现场对电流进行的监测, 可以拟合出总电流表达式:

$$I_{\text{总}} = (I_{0\text{总}} - I_{\infty\text{总}}) e^{-at} + I_{\infty\text{总}} , \quad (6)$$

式中, $I_{\text{总}}$, $I_{0\text{总}}$, $I_{\infty\text{总}}$ 分别是场地的 t 时刻、初始和最终总电流 (A)。

因此电渗总排水量计算式为

$$Q = \frac{k_q v (I_{0\text{总}} - I_{\infty\text{总}})}{a^2 \Delta x^2} (1 - e^{-at}) . \quad (7)$$

排水量的多少直接反映了电渗的效果, 但现场排水量却难以测量, 因此有必要在土体中埋设 TDR 传感器对含水率的分布及随时间变化情况进行监测。通过含水率的监测不仅可以评估电渗排水固结的效果, 还可以通过含水率的变化计算出排水量, 与式(7)的计算结果进行对照。在 k_q 的模型尺寸效应尚未完全清楚的情况下, 这种对照是有益的: 可以通过对照修正实验室测定的 k_q 值, 更准确地计算最终排水量, 预计电渗排水固结之后土体的含水率能够降低到多少。

4.4 固结停止时间和沉降

真空预压的停止时间通常是根据沉降是否稳定来判断, 在电渗法中沉降也可以做为判断停止时间的一个指标。电渗法还有一个判断停止时间的指标, 就是电流; 当电流接近 $I_{\infty\text{总}}$ 的时候, 电渗不再有效, 应该停止。

在没有上覆荷载的情况下, 电渗排水的体积大于

因沉降所减少的体积, 土体处于非饱和状态, 因此不建议用钢弦式孔压计测孔压, 这种孔压计用于饱和砂土真空预压下负孔隙水压力的测试是可以的, 但对于非饱和黏土孔隙水压力测试是不适用的。

试验表明, 流塑状态的吹填淤泥(自重沉淀, 排除上清液之后), 经电渗处理后, 沉降将达到淤泥层厚度的10%~20%。

4.5 电渗主要设计步骤

综上所述, 电渗主要设计步骤如下: ①通过室内试验测定流量系数 k_q 、时间因子 a 和初始电流面密度 j_0 ; ②计算实际初始总电流, 根据工期和成本的要求, 确定电源功率和轮询通电方案, 这是电渗设计的主要内容; ③根据电流-时间曲线, 计算电渗完成所需的时间, 加上轮询通电所耗费的时间, 得出电渗排水固结的工期; ④用修正后的 k_q 计算出电渗总排水量, 估计电渗之后土体的平均含水率, 并估算电渗之后土体可能发生的最大沉降。

5 结 论

(1) EKG材料的出现解决了电极腐蚀和电渗能耗过高的问题。

(2) 电渗需要大功率的电源, 这是电渗法大面积应用时面临的新挑战, 这个问题可以用轮询通电的方法解决。轮询通电将延长电渗处理所需的时间, 因此实际设计中, 应综合考虑工期和成本, 设计电源功率。

(3) 电渗设计可依据能级梯度理论进行, 关键参数 k_q 和 a 可通过室内试验测定。 a 值范围大概在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; k_q 的范围大概在 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4) 参数 k_q 存在模型尺寸效应, 可通过TDR监测数据进行对比修正。

参考文献:

[1] HOEKSEMA R J. Three stages in the history of land

reclamation in the netherlands[J]. Irrigation and Drainage, 2007, 56: 113 - 126.

- [2] YANG L A. Mechanics of the consolidation of a lumpy soft clay fill[D]. Singapore: National University of Singapore, 2003.
- [3] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (GONG Xiao-nan. Development & prospect of foundation treatment technique[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2014. (in Chinese))
- [4] NETTLETON I M, JONES C J F P, CLARK B G, et al. Electro kinetic geosynthetics and their applications[C]// 6th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products. Georgia, 1998: 871 - 876.
- [5] 庄艳峰, 邹维列, 王钊, 等. 一种可导电的塑料排水板: 中国, ZL201210197981.4[P]. 2012. (ZHUANG Yan-feng, ZOU Wei-lie, WANG Zhao, et al. Electric conductive PVD: China, ZL201210197981.4[P]. 2012. (in Chinese))
- [6] ZHUANG Y F. Challenges of electro-osmotic consolidation in large scale application[C]// Geosynthetics 2015. Portland, 2015: 447 - 449.
- [7] ZHUANG Y F, HUANG Y, LIU F, et al. Soft ground improvement using electro-osmosis[C]// 6th Symposium Umweltgeotechnik and 7th Freiberger Geotechnik-Kolloquium “Ressourcen & Geotechnik”. Freiberg, 2013: 97 - 102.
- [8] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 4(SM4): 899 - 921.
- [9] 庄艳峰. EKG材料的研制及其在边坡加固工程中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (ZHUANG Yan-feng. Research on EKG Material and its application in slope reinforcement[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)