

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0191-04

非饱和黏性土电渗排水试验

王宁伟, 张 雷, 修彦吉, 矫 军

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 该室内试验, 主要用于研究非饱和黏性土水平电渗排水的规律。通过实验, 对电渗排水量、电势、电流等进行了测试, 并给出了阳(阴)极接触电阻、阳(阴)区域平均电阻、土体平均电阻的变化规律。通过对这些规律的研究, 有助于我们认识和掌握非饱和黏性土水平电渗排水的规律, 为解决富含水的黏性土边坡排水问题奠定基础。

关键词: 电渗; 接触电阻; 区域平均电阻; 土体平均电阻; 电渗透系数

中图分类号: TU47 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S052

ELECTRO-OSMOSIS DRAINAGE EXPERIMENT OF UNSATURATED CLAYEY SOIL

WANG Ning-wei, ZHANG Lei, XIU Yan-ji, JIAO Jun

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: The indoor experiment is conducted to investigate the law of standard electro-osmosis drainage of unsaturated clayey soil. Through the experiment, water yield, electric potential, electric current, the temperature of soil and the like are monitored and surveyed. Based on the data, the changing regularity of several parameters, including the cathode and anode contact resistance, the average resistance of cathode and anode areas, the average resistance of the soil are deduced and calculated. With the study of the regularity, it is beneficial for understanding and mastering the law of standard electro-osmosis drainage of unsaturated clayey soil and laying the basis on resolving the drainage problems of clayey soil slope full of water.

Key words: electro-osmosis; contact resistance; average resistance of area; average resistance of the soil; electric permeability coefficient

电渗^[1-3]用于软黏土地基的加固已经有很长的历史, 但是其复杂的作用机制和众多的影响因素一直阻碍它成为地基处理中的常规手段, 甚至在很长一段时间内几乎无人问津。时至今日, 我国南方一些地区也进行过一些电渗加固软土的理论 and 现场应用研究^[4-5], 并取得了显著的经济效益。

近几年, 电渗技术在建筑工程领域的应用引起国内学术界和工程界的重视, 尤其是在软土地基处理^[6-7]方面得到了一定应用, 相对于传统的施工技

术, 电渗法具有工期短、成本低, 对环境没有破坏等优点^[8]。

本文通过室内试验, 研究了非饱和黏性土的电渗水平排水规律, 提出了阳(阴)极区域平均电阻的概念, 并给出了其变化规律。通过对阳(阴)极接触电阻、阳(阴)极区域平均电阻和土体平均电阻的研究, 有助于对非饱和黏性土的电渗水平排水规律的认识^[9]。通过对这一技术的深入研究, 可以解决实际工程中非饱和富含水黏性土的水平排水问题^[10],

收稿日期: 2012-05-05; 修改日期: 2013-03-02

基金项目: 沈阳市城乡建设系统科研项目

通讯作者: 王宁伟(1964—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 中国勘察设计协会抗震防灾分会理事, 博导, 主要从事岩土工程和城市防灾减灾的教学与研究(E-mail: sy_wnw@163.com)。

作者简介: 张 雷(1989—), 男, 安徽人, 硕士生, 主要从事电化学加固问题研究(E-mail: ray_chang@163.com);

修彦吉(1987—), 男, 吉林人, 硕士生, 主要从事电渗排水问题研究(E-mail: xiuyanji@163.com);

矫 军(1987—), 男, 辽宁人, 硕士生, 主要从事吹填土地基的加固问题研究(E-mail: jiaojun061@126.com)。

对解决黏性土边坡(基坑)由于土体含水量过高导致的安全问题具有一定的现实意义。

1 室内实验方案

图 1 所示的是室内水平电渗试验原理图。试验装置由用塑料箱盛装的土样、集水装置和电源电极三部分组成。盛装土样的塑料箱长×宽×高为 25cm×17cm×15cm。电极阳极采用的材料为 $\Phi 8$ 钢筋,水平插入土中,阴极采用的材料为 $\Phi 12$ 薄壁钢管,且钢管周围打孔,插入土中的倾角为 18°,以利于水的排出。集水装置主要用于收集阴极排出的水,以进行排水体积的测量。为了测量土体中的电势分布,沿试样长度方向插入 4 根直径为 1mm 的铜丝用作电势测针(V1~V4)。

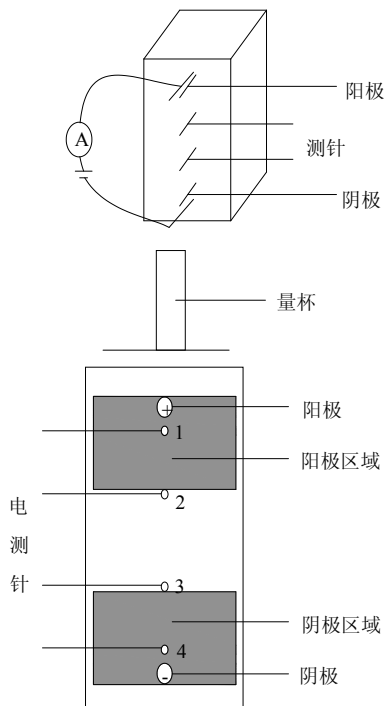


图 1 室内水平电渗试验原理图

Fig.1 The setup developed for electro-osmosis

试验用土为工地上采集的黏性土。水平电渗排水试验的基本参数见表 1。

表 1 电渗试验参数

Table 1 Test conditions of electro-osmosis

	试验 A	试验 B	试验 C
土样初始含水量/(%)	33.3	33.3	39.4
电极电压/V	44	33	22
电极距/cm	20	20	20

本次试验分为三组(试验 A~试验 C),其中试验 A、试验 B 土样的初始含水量相同,均为 33.3%,试验 C 土样的初始含水量略高,为 39.4%;三组试

验的电极电压依次为 44V、33V 和 22V,电极距均为 20cm。测针 1 和阳极间距,测针 4 和阴极间距为 1cm,其余各测针间距为 6cm。按试验电路连接线路和电表;装配完毕后,接通电源,开始电渗排水试验。试验过程中,每隔 0.5h 记录电流表的读数,并测量各测针的电势的读数及排出水的体积。

2 试验结果分析

2.1 电渗时间与排水量关系

三组试验(A、B、C)电渗排水量与时间的关系如图 2 所示。初始排水时,电压越高排水量越大。试验 C 通电电压 22V,刚开始通电 1.0h 内,阴极排水量很小几乎接近零,明显小于通电电压为 44V 和 33V 试验 A 和试验 B; 1.0h 以后,试验 C 排水量呈直线增加,增加的斜率于试验 A 相接近;在 7.5h,超过试验 B 的排水量,此时实验 B 的排水量开始较少。

从长时间通电来看,电渗排水量大致分为三个阶段:第一阶段(初始 15h),排水量与时间呈线性增长阶段;第二阶段为曲线增长阶段,试验 A、试验 B 约在 45h 出现拐点,随后排水量几乎成直线,而试验 C 排水量随时间继续增长;第三阶段,直线段,排水量几乎不随时间的增长而增长。从曲线上可以看出,试验 C 仍然处于第二阶段,即排水量随着时间的增长而增长,而试验 A、试验 B 已经进入第三阶段。

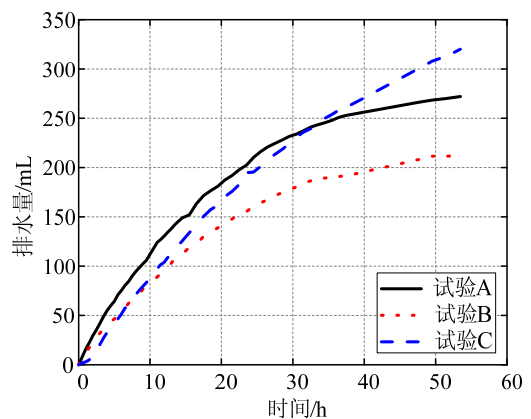


图 2 电渗排水量曲线

Fig.2 The volume of drainage during electro-osmosis drainage

2.2 土体的电阻

土体的电阻较为复杂,由于电极和土样不能完全接触且阳极表面有锈迹,所以实际作用在土样两端的电压小于电源的输出电压。从电渗排水的效果

来看, 电极通电时, 在阳极附近的水向阴极移动, 并通过阴极排水管排出。因此, 在阳极区域土体的含水量较低, 阴极区域土体的含水量较高。由于土体的电阻与土体的含水量有关, 所以在阳极区域土体的平均电阻与阴极区域明显不同, 随着通电时间的增加, 土体中的水不断从阴极排出, 土体的平均含水量不断的降低, 土体的平均电阻也将发生改变。将阳、阴极区域土体的电阻分别定义为阳极区域土体平均电阻和阴极区域土体平均电阻; 将阳极、阴极级之间土体的电阻定义为土体平均电阻。

2.2.1 阳极区域土体电阻

阳极区域土体平均电阻即为测针 1 与测针 2 之间土体的平均电阻。从图 3 可以看出, 试验 A 在 2h 内变化平缓, 电阻在 75Ω 左右波动, 2h 后电阻快速呈线性增长, 并在 47.5h 达到最大值 1049Ω; 试验 B、试验 C 电阻变化相对较小, 长时间通电试验 C 的电阻呈缓慢的线性增长, 并且高于试验 B 的电阻。

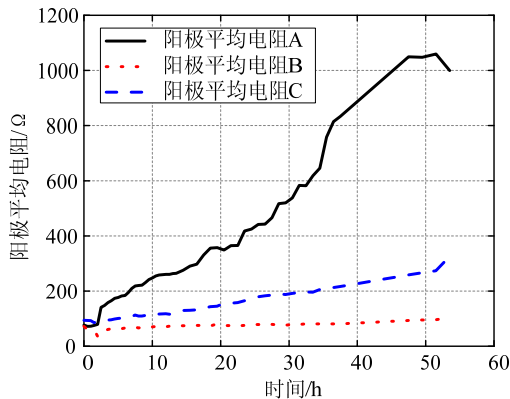


图 3 阳极平均电阻变化曲线
Fig.3 Anode average contact resistances

2.2.2 土体平均电阻

从图 4 可以看出, 试验 A 土体平均电阻在 2h 内基本不变, 随后开始迅速的增长, 而试验 B、试验 C 电阻比较平稳; 12h 后试验 A、试验 C 土体平均电阻继续呈线性增长, 而试验 B 土体的平均电阻变化不大。

2.2.3 电阻与排水量之间的关系分析

从图 2~图 5 可以看出, 电渗排水量与电阻之间存在着密不可分的关系。从最终测定的土体含水率, 试验 A 阴极含水率为 33.93%, 阴阳两极中间为 25.12%, 阳极为 21.88%; 试验 B 的阴极含水率为 34.09%, 阴阳两极中间为 23.86%, 阳极为 19.18%; 试验 C 的阴极含水率为 32.69%, 阴阳中间为 24.26%, 阳极为 23.33%。

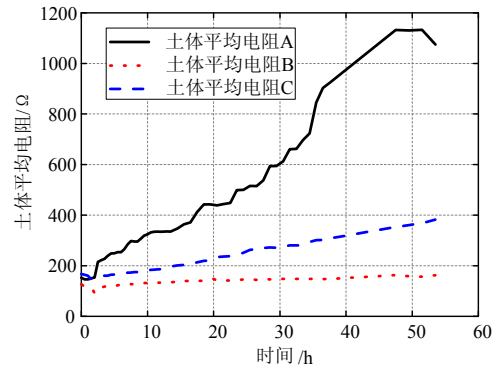


图 4 土体平均电阻变化曲线

Fig.4 Average contact of soil resistances

综合图 2~图 5 和土体初始含水率, 可以得出, 开始阶段, 试验 A 和试验 B 的阴极接触电阻基本一致, 试验 C 的阴极接触电阻略大于试验 A 和试验 B; 通电结束后, 试验 B 的接触电阻大于试验 A、试验 C, 相对应的阴极土体含水率也是 $w_B > w_A > w_C$ 。比较上述各图, 虽然变化规律不同, 但最终的结果均是试验 A 的阴(阳)极平均电阻大于试验 C、试验 B, 所以最终测的阴阳极中间的土体含水率为 $w_A > w_C > w_B$ 。相应的, 土体平均电阻的变化曲线也遵循这个规律。

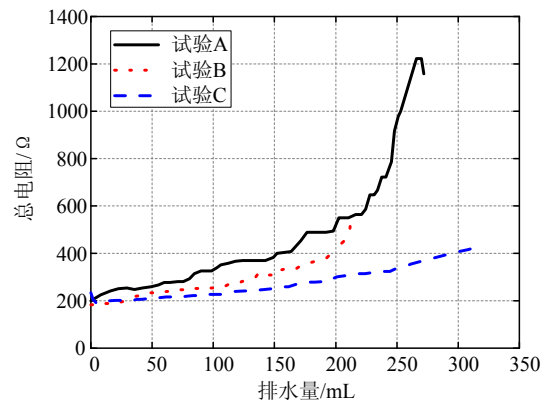


图 5 土体总电阻和排水量之间的关系

Fig.5 The relationship of contact of the soil with the volume of drainage

2.3 电渗透系数

土体的电渗透系数不能直接测出, 根据 Esrig^[11] 的理论:

$$v_e = k_e \frac{\Delta\phi}{L} A \quad (1)$$

v_e /(mL/s)为电渗排水速率; k_e /($\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$)为电渗排水系数; $\Delta\phi$ /V 为有效电势, 即 V1 和 V4 的差; L /cm 为阳极和阴极之间的距离; A / cm^2 为水流或电流的土体横截面积。

由式(1), 可得:

$$k_e = \frac{v_e L}{\Delta\phi A} \quad (2)$$

电渗透系数主要用于研究其变化规律,而非定量计算,因此电渗透系数可以粗略的代表土体的真实值。图6为试验A, B, C的电渗透系数,电渗透系数的值很杂乱,但是整体趋势是下降的。

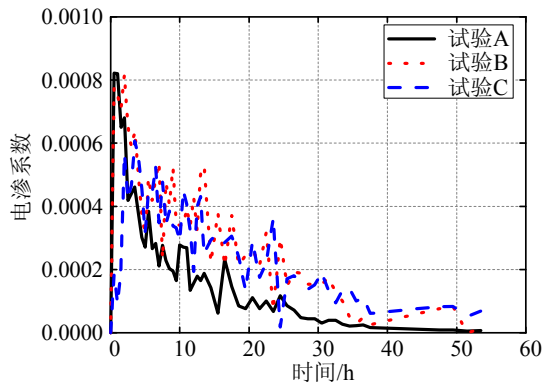


图6 土体电渗透系数

Fig.6 Electric permeability coefficient of soil

3 结论

(1) 比较全面地研究了电源电压对电渗排水的影响,得出电阻、电压、点渗透系数等随电源的变化规律,为电渗在基坑以及山体滑坡的应用上提供了理论依据。

(2) 阴阳极接触电阻的存在使得实际应用于电渗的电压小于电渗的实际输出电压,从试验数据可以看出,排水速率不仅仅和电压有关,还与阴阳极的接触电阻以及有效电压等有着密切的关系。

(3) 土体的有效电压分布比较均匀,电源电压主要通过影响消耗在阳极接触处的电势来改变有效电压的大小,阳极接触电压越大,有效电压越小。

(4) 通电过程中,土体中不同部位的含水率也发生了相应变化,阴极最高,阴阳极中间次之,阳极最小。

(5) 长时间通电结束后,阳极出现了不同程度的腐蚀。

参考文献:

[1] 李瑛, 龚晓南. 等电势梯度下电极间距对电渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 89-96.
Li Ying, Gong Xiaonan. Experimental research on effect of electrode spacing on electro-osmotic dewatering under same voltage gradient [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 89-96. (in Chinese)

[2] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相软黏土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 34(2): 95-99.
Wang Xiequn, Zou Weilie. Experimental research on

electro-osmotic consolidation of lacustrine clay [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 34(2): 95-99. (in Chinese)

[3] 房营光, 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 Yingguang, Xu Min, Zhu Zhongwei. Experimental research on the consolidation characteristic of the vacuum-electro osmosis combination drainage of soda residue soil [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(11): 70-75. (in Chinese)

[4] 曾国熙, 高有潮. 软黏土的电化学加固(初步试验结果)[J]. 浙江大学学报(工学版), 1956, 8(2): 12-35.
Zeng Guoxi, Gao Youchao. Soft clay electrochemical stabilization [J]. Journal of Zhejiang University (Technology), 1956, 8(2): 12-35. (in Chinese)

[5] 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 Xiaonan, 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(Suppl 2): 4034-4039. (in Chinese)

[6] 刘凤松, 刘耘东. 真空-电渗降水-低能量强夯联合软弱地基加固技术在软土地基加固中的应用[J]. 中国港湾建设, 2008, 157(5): 43-47.
Liu Fengsong, Liu Gengdong. Application of combined weak soil improvement technology of vacuum preloading-dewatering by electro-osmosis-low energy dynamic compaction to improve soft soils [J]. China Harbour Engineering, 2008, 157(5): 43-47. (in Chinese)

[7] 韩选江. 大型围海造地吹填土地基处理技术原理及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 73-75.
Han Xuanjiang. Large scale reclamation dredger fill foundation treatment technology principle and application [M]. Beijing: China Building and Industry Press, 2009: 73-75. (in Chinese)

[8] 王志勇. 电渗法在软土路基处理中的应用[J]. 铁道勘察, 2010, 4: 54-57.
Wang Zhiyong. Applications of electro-osmotic method in treatment for soft soil subgrade [J]. Railway Survey, 2010, 4: 54-57. (in Chinese)

[9] 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 Xiaonan, Jiao Dan. Experimental study on electro-osmotic consolidation of soft clay under intermittent current condition [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(6): 1725-1730. (in Chinese)

[10] 李苗, 张林洪, 王苏达. 电渗法处理填土地基的排水效果影响因素分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(1): 4-6.
Li Miao, Zhang Linhong, Wang Suda. Factors affecting electro-osmotic drainage of backfill soil [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(1): 4-6. (in Chinese)

[11] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics [J]. Journal of the SMFD, American Society of Civil Engineers, 1968, 94(4): 899-921.