

文章编号: 1000-7709(2018)05-0106-04

湖相淤泥一维电渗试验与影响因素分析

林融冰¹,朱栋梁²,柏 巍^{1,3},周卫文²,杨爱武³,刘永红⁴

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 湖北水总水利水电建设股份有限公司, 湖北 武汉 430034; 3. 天津市软土特性与工程环境重点实验室,
天津 300381; 4. 中国葛洲坝集团基础工程有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为探究电渗各参数对湖区吹填超软淤泥土加固效果的影响,以鄂州市梁子湖区超软淤泥为例,自主设计制作了试验模型箱开展了一维电渗试验。试验采用温湿度传感器监测模型阴极、阳极附近土体含水率和温度在电渗过程中的变化,采用万用表检测土体中的电流、各监测点的电势,采用阴极集水装置收集并测量了电渗过程中的排水量,分析了通电电压、电极材料对电渗排水时间与电渗后土体强度的影响。结果表明,电压越大,排水越快,但电压大小对总排水量影响不大;金属电极的排水速率优于导电塑料排水板;阳极跟进可有效提高电流强度、减低含水率和提高阴极端阻力且能使土体处理效果更加均匀。

关键词: 湖相淤泥; 含水率; 影响因素; 电渗试验

中图分类号: TU43

文献标志码: A

1 引言

天然土体中,正离子吸附在水分子上,固体颗粒带负电。当在土体两端插入电极时,阳离子拖动水分子向阴极移动,土壤含水率逐渐减少,达到排水效果。电渗技术先后在吹填土固结^[1]、海相软粘土排水固结^[2]等方面得到广泛应用。一般来说,电渗影响因素包含内因和外因两类。内因指土体性质,包括土颗粒粒径和矿物类型、含盐量、pH值及水力传导系数等四个方面;外因指电渗系统设置,包括电极材料和构造、电极布置形式、通电方式等三方面^[3]。在既定工程中,提高电渗效率应从外因出发。一维电渗试验,电极布置方式较为简单,通常只采用两块平行排水电极板加在土体两侧。为此,本文以鄂州市梁子湖区超软淤泥为例进行一维电渗试验,研究了电极材料、通电电压、阳极跟进对电渗效果的影响,对工程参数优化具有重要指导意义。

2 试验方法

2.1 试样

试验以鄂州某吹填土地超软淤泥土为例,

该场地吹填土厚约3~12 m,静置数月后仍为流塑状态。含水率80%~160%,比重2.6~2.7,天然密度平均值为1.42 g/cm³,最小渗透系数为1.75×10⁻⁷ cm/s。试验时,将多处土样混和并搅拌均匀,搅拌后土样的颗粒组成为0.075~0.005 mm颗粒占比51.4%,粒径小于0.005 mm的占46.5%,Al₂O₃/SiO₂比值为0.31,液限69.0%,塑限38.5%,塑性指数30.5。

2.2 试验装置

试验采用20 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高)的有机玻璃箱,在有机玻璃箱的底侧开设三个直径为6 mm的孔洞,开孔侧作为阴极,其作用是收集并记录电渗过程中土体向阴极聚集并排出的水量;电极板厚5 mm,长10 cm,高11 cm,电极板高度略高于有机玻璃箱高度以便于在电极板上端连接电源线。板上均布有16个直径为5 mm的圆孔,其作用一是保证电极与淤泥接触良好,二是作为排水通道排出阴极汇集的水。电极与有机玻璃箱之间垫有一层无纺布,防止排水孔被土颗粒堵塞,同时为避免无纺布吸水可能会减小排水量,在电渗试验开始前,将无纺布润湿饱和,使其悬空刚好不滴水。固结排水是电渗试验主要目标,土体湿度能直接反映土体含水率的变化。试

收稿日期: 2017-11-13,修回日期: 2018-01-06

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB370); 天津市软土特性与工程环境重点实验室(2014SCEEKL01)

作者简介: 林融冰(1990-),男,助理工程师,研究方向为特殊土土力学,E-mail: robin_lin@163.com

验采用温湿度传感器监测模型阴极、阳极附近土体含水率和温度在电渗过程中的变化,采用万用表检测土体中的电流、各监测点的电势,采用阴极集水装置收集并测量了电渗过程中的排水量,分析了通电电压、电极材料对电渗排水时间与电渗后土体强度的影响。

2.3 试验方案

为探究通电电压、电极材料、阳极跟进对电渗效果的影响,设置试验方案见表 1。由表 1 可知,试验共分为三组,分别考察通电电压(第一组)、电极材料(第二组)、阳极跟进(第三组)对电渗效果的影响。为考察通电电压对电渗效果的影响,第一组试验电极材料均采用钢板,电压分别为 14、24、28 V;为探究不同电极板材料对电渗效果的影响,第二组试验通电电压均为 24 V,电极材料分别采用钢板、铜板、铝板与导电塑料排水板;为考察阳极跟进对电渗效果的影响,第三组试验通电电压为 24 V、电极板材料为钢板,当试验中电流与含水率达到表 1 终止条件时,分别将电极阳极板拔出,并分别向阴极跟进 10、7 cm。

表 1 试验方案表

Tab.1 Test schedule

影响因素	电极	试验参数与控制条件		备注	
		初始含水率/%	电压/V		终止条件
通电电压	钢板	84.6	14	阳极含水率低于 40%, 阴极含水率低于 60%, 电流强度低于 0.05 A。	第一组
	钢板	83.9	24		
	钢板	84.2	28		
电极材料	钢板	85.5	24	阳极含水率低于 40%, 阴极含水率低于 60%, 电流强度低于 0.05 A。	第二组
	铝板	83.5	24		
	铜板	83.7	24		
	塑料导电板	83.7	24		
阳极跟进	钢板	82.7	24	阳极含水率低于 40% 时, 阳极板跟进 10 cm, 新的阳极含水率低于 40%, 阴极含水率低于 55%, 电流强度低于 0.05 A。	第三组
	钢板	82.5	24		

3 试验结果与分析

3.1 电压对电渗效果的影响

阴、阳两极土体含水率变化规律见图 1。由图 1(a)可知,在电场力作用下,自由水与部分弱结合水向阴极渗透,阳极含水率迅速下降。电压越高,电场力作用越强,排水速度越快,阳极含水率降低速度越快。28 V 电压下,电渗开始 1 h 后阳极含水率便有了明显下降,而在 14、24 V 电压下,4 h 后阳极含水率才出现明显下降。随着阳极土体中自由水和弱结合水的排出,排除剩余的水分愈来愈困难,因此在后期,含水率基本趋于稳定,28 V 电压下,含水率大约稳定在 37.5%,24、

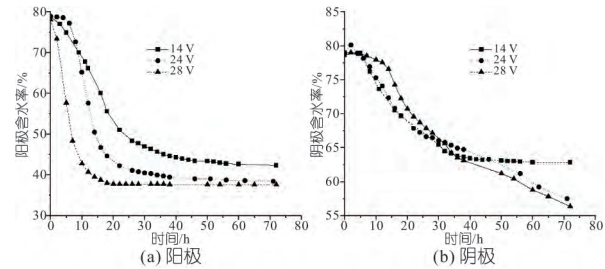


图 1 不同电压作用下阴阳极含水率随时间变化

Fig.1 Time-history curves of cathode and anodic moisture under different voltages

14 V 电压作用下分别稳定在 39%、45%,电压越大,阳极处理效果越好。

由图 1(b)可知,排水初期,阴极含水率并未明显降低,其原因为在电场的作用下,土体中水分从阳极向阴极渗透,从而导致阴极含水率的下降幅度较小。而试验开始一段时间后(10~20 h),阴极含水率开始明显减少,到试验后期阴极含水率逐渐趋于稳定。28 V 电压下,阴极含水率最终趋于 56%,24、14 V 电压下分别趋于 57%、63%。试验过程中,阳极含水率明显低于阴极,且阴极趋于稳定要滞后于阳极。当阴极含水率趋于稳定后,电渗效率很低,应考虑改变通电方式或与其他处理方法联合使用。

3.2 电压对土体电流的影响

随着电渗的进行,土体含水率逐渐降低,土体逐渐开裂,致使总电阻增大,在恒压条件下电流逐渐降低,电流随时间变化见图 2。由图 2 可知,在试验刚开始时,各试验条件土体电阻相等,因此电流与电压成正比;电渗试验开始后 20 h,电流迅速减小,14 V 电压下,前 20 h 电流下降 0.18 A,占整个试验过程电流降幅的 54.5%,下降速率为整个过程的 1.91 倍;24 V 电压下,前 20 h 电流下降 0.36 A,占整个试验过程电流降幅的 72.0%,下降速率是平均速率的 2.59 倍;28 V 电压下,前 20 h 电流下降 0.52 A,占整个试验过程降幅的 74.3%,下降速率为平均速率的 2.67 倍。20 h 后,电渗加固效果不再明显,土体电阻变化减缓,

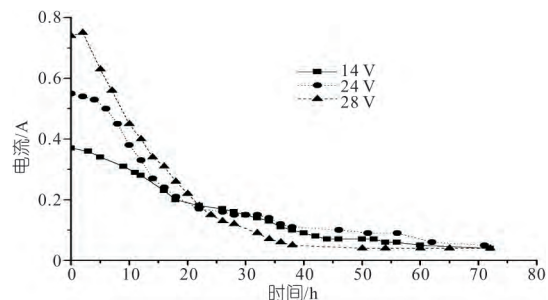


图 2 不同电压作用下电流随时间的变化

Fig.2 Time-history curves of electric current under different voltages

因此电流减小速度变慢,且此时不同电压下电阻的大小有明显的差别,电流大小与电压关联性不大。一般在试验进行到 40 h 后,电流低于 0.1 A,电流较小,此时阳极含水率变化不大,阴极含水率缓慢降低。

电流大小与阳极含水率有明显相关性,电流大小随阳极含水率变化见图 3。电流随阳极含水率的降低明显下降。当阳极含水率下降到一定值,电流加速下降,28 V 电压下,当阳极含水率小于 42% 时,电流迅速减少;24、14 V 电压下,当阳极含水率在 41%、48% 时,电流急速下降。

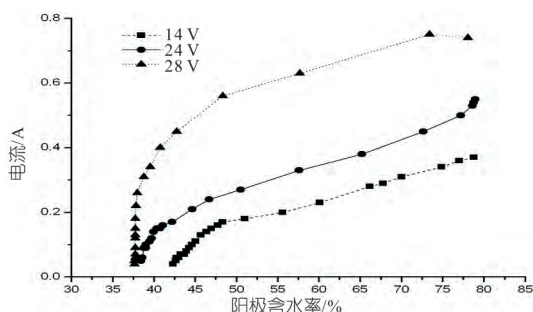


图 3 电流随阳极含水率的变化

Fig.3 The change of current with anode moisture

3.3 电压对排水量的影响

较高的电势梯度(电压)下前期排水速率较快,随着土体含水率的降低,土体中出现较多无规律的裂缝,此时有效电压大小与电源电压并无直接联系,排水总量与电压大小无明显的相关关系。不同电压下的排水量变化见图 4。由图 4 可知,前期排水速率随电压增大而增大,14、24、28 V 电压作用下,分别需要 22、12、11 h 即可使排水量达 150 mL。

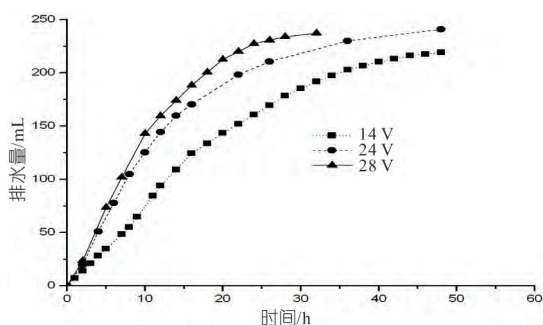


图 4 不同电压条件下的排水量随时间变化图

Fig.4 Time-history curves of displacement under different voltages

3.4 电极板材料对含水率的影响

不同电极材料作用下阴阳极附近土体含水率随时间变化见图 5。由图 5(a)可知,铜板和钢板阳极含水率在试验开始后很快便开始快速降低,20 h 后基本达到稳定,而此时导电塑料排水板阳极含水率刚开始降低,这与试验刚开始时导电塑

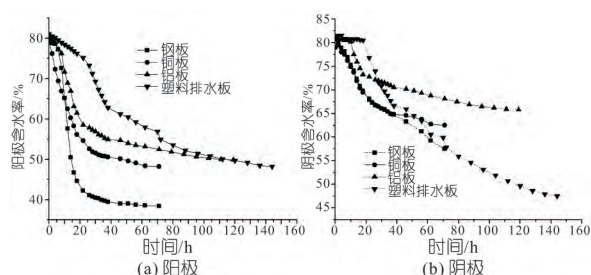


图 5 不同电极材料阴阳极含水率随时间变化

Fig.5 Time-history curves of cathode and anodic moisture with different electrode materials

料排水板电流较小一致,电流小则通过某截面的阳离子数目较小,排水速率较小。试验结束时,导电塑料排水板所用时间几乎是金属板的 2 倍,且最终电渗效果不如钢板、铜板电极。

3.5 阳极跟进对阳极含水率的影响

阳极跟进对阴极含水率的影响见图 6。由图 6 可知,当阳极含水率下降趋于稳定时,进行阳极跟进,阴极含水率再次快速降低,最终阴极的含水率与未进行阳极跟进的试验组相比明显降低。连续通电方式下,阴极电极含水率最终稳定在 60% 左右,而在阳极跟进作用下,阴极的含水率能够达到 52%,有效提高了阴极处理效果。试验结束后,利用微型贯入仪对处理效果进行分析,在不跟进的情况下,阴极土体端阻力仅有 0.29 MPa,当阳极进行跟进 10 cm 时,阴极土体端阻力提高至 0.58 MPa,比不进行阳极跟进提高至 200%;阳极跟进 7 cm 时,阴极土体端阻力提高至 0.55 MPa,比不进行阳极跟进提高至 190%,证明阳极跟进对提高阴极加固效果显著。

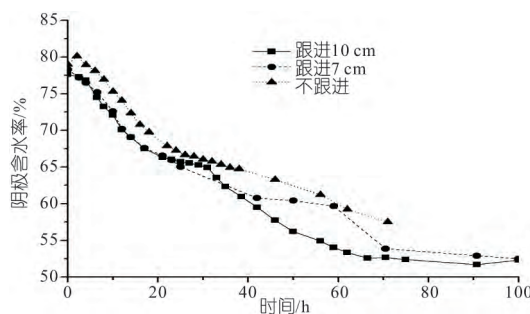


图 6 阳极跟进对阴极含水率的影响

Fig.6 Effects of anode follow-up on cathode moisture

4 结论

a. 28 V 电压作用下,鄂州市梁子湖区超软淤泥排水量为 150 mL 所需时间是 14 V 电压下的 50%,但不同电压试验结束时,土体含水率、总排水量差别不大。

b. 钢板与铜板排水速率优于导电塑料排水

板与铝板。

c. 阳极跟进可在跟进后 5 h 内将电流强度提高至 5 倍, 阴极含水率从 60% 降低至 52%, 阴极端阻力提高 90%, 使得土体处理效果更加均匀。

参考文献:

[1] 刘飞禹, 宓炜, 王军, 等. 逐级加载电压对电渗加固吹

填土的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2 582-2 591.

[2] 李瑛, 龚晓南, 郭彪, 等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4 027-4 032.

[3] 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.

One-dimensional Electro-osmosis Test of Lake Silt and Analysis of Its Influencing Factor

LIN Rong-bing¹, ZHU Dong-liang², BAI Wei^{1,3}, ZHOU Wei-wen², YANG Ai-wu³, LIU Yong-hong⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Hubei Shuizong Water Resources and Hydropower Construction Co., LTD., Wuhan 430034, China; 3. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300381, China; 4. China Gezhouba Group Foundation Engineering Co., LTD., Yichang 443002, China)

Abstract: To explore the influence of electro-osmotic parameters on the consolidation effects of super soft silt soil in lake area, taking super soft mud in Liangzihu District of Ezhou City as an example, one-dimensional electro-osmosis test were carried out with the self-made test box. The soil moisture and temperature near the cathode and anode were monitored through the temperature and humidity sensors during the electro-osmotic test process. The current and potential were detected by the universal instrument. The drainage was collected and measured by means of the cathode water collecting device. According to analysis of the influence of electric voltage and electrode material on the drainage time of electro-osmosis and the strength of soil, the greater the voltage is, the faster the drainage is. However, the voltage has little impact on the total drainage. The drainage rate of metal electrode is faster than that of conductive plastic drainage plate. The anode follow-up can effectively improve the current strength and reduce soil moisture as well as improve the cathode end resistance and homogenize the soil treatment effect.

Key words: lake silt; moisture content; influencing factor; electro-osmosis test

(上接第 97 页)

参考文献:

[1] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2 624-2 630.

[2] 郝杰, 侍克斌, 陈功民, 等. 基于围岩力学参数概率分布模型的变形敏感性灰关联分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 854-860.

[3] 侯哲生, 李晓, 王思敬, 等. 金川二矿某巷围岩力学参数对变形的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 406-410.

[4] 孙毅, 戴龙侠, 范春竹, 等. 淋溪水电站地下厂房开挖过程中材料敏感性的非线性有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 149-154.

[5] 申艳军, 谷拴成, 闫蕊鑫, 等. 力学参数对围岩塑性变形影响的敏感性分析[J]. 人民长江, 2013, 44(11): 85-89.

[6] 李炎延, 郑颖人, 康楠. 隧洞稳定性影响因素的敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 491-498.

[7] 王辉, 陈卫忠. 嘎隆拉隧道围岩力学参数对变形的敏感性分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1 548-1 553.

Sensitivity Analysis of Rock Mechanical Parameters to Deformation of Surrounding Rock of Underground Caverns

SU Chao, WU Chao, ZHAO Ye-bin, WEI Lin-fan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The uncertainty of rock mechanics parameters is the main factor affecting the stability analysis of surrounding rock of underground caverns. Taking an underground powerhouse of a hydropower station as an example, considering the geological conditions of the engineering area, a three-dimensional elastoplastic finite element model was established. And then the sensitivity of the elastic modulus, cohesion, internal friction angle and Poisson ratio of rock block and fault to the displacement of key points of the typical unit sections after excavation was analyzed based on the single factor sensitivity analysis method. The results show that at the top of the arch, the internal friction angle of rock block is the most sensitive parameter, followed by the elastic modulus of the block; The elastic modulus and the internal friction angle of rock block are the most sensitive to the side wall region; The sensitivity of fault parameters is small. Therefore, when choosing the parameters of the project, the elastic modulus and internal friction angle of rock block need to be evaluated and measured accurately so as to improve the reliability of numerical simulation. The research results can provide reference for similar projects.

Key words: deformation of surrounding rock; mechanical parameter; fault; sensitivity; three-dimensional finite element