

电渗透系数试验装置研制及其影响因素

刘忠玉¹, 岑勋云^{1,2}, 罗文培¹, 汪良强³

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州科技学院 土木建筑工程学院, 河南 郑州 450064;

3. 郑州三和水工机械有限公司, 河南 郑州 450120)

摘要: 为深入探讨饱和土的电渗透系数及其影响因素, 自制了一种简单便捷的电渗透系数试验装置。该装置可以保证在电渗试验过程中试样含水率和孔隙比相对稳定, 并排除由于试样两端水头差引起水力渗流的影响。利用该试验装置对 5 种不同孔隙比的饱和重塑黏性土试样进行电渗试验, 结果表明, 在低电压和小孔隙比条件下排水量与时间成正比。在此基础上, 探讨了电势梯度及孔隙比对电渗透系数的影响规律。试验结果表明, 电渗透系数随着电势梯度或孔隙比的增大而增大, 且与电势梯度和孔隙比均近似呈线性关系。其中, 孔隙比对电渗透系数的影响较大。

关键词: 电渗透系数; 试验装置; 电势梯度; 孔隙比; 渗流

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Development of a Test Device for Electric Permeability Coefficient and Its Influencing Factors

LIU Zhongyu¹, CEN Xunyun^{1, 2}, LUO Wenpei¹, WANG Liangqiang³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China; 3. Zhengzhou Sanhe Hydraulic Machinery Co., Ltd., Zhengzhou 450120, China)

Abstract: To investigate the electroosmosis coefficient of saturated soil and its influencing factors, a simple and convenient test device for electroosmosis coefficient was developed, which can ensure that the water content and void ratio of the sample are relatively stable during the electroosmotic test, and the influence of hydraulic seepage caused by the difference of the two ends of the sample is eliminated. An electroosmotic test of saturated remolded clay samples with five different void ratios was conducted by using this device. The results show that the water discharge is proportional to time under the

condition of low voltage and small void ratio. On this basis, the influence of potential gradient and void ratio on the electroosmosis coefficient was discussed. The results show that the electroosmosis coefficient increases with the increase of potential gradient or void ratio and is approximately linear with the increase of potential gradient and void ratio, and the void ratio has a great influence on the electroosmosis coefficient.

Keywords: electroosmosis coefficient; test apparatus; potential gradient; void ratio; seepage

1807 年, 俄国学者 Reuss 在实验中发现了电渗现象。在电渗研究中, 电渗透系数是一个重要的指标, 能直接反映土体电渗排水能力的大小, 但是目前关于电渗透系数的研究较少, 而且对于电渗透系数的测定也没有统一的标准, 试验采用的都是自研装置, 不同学者的研究结论有较大出入。Casagrande^[1-2]于 20 世纪首次成功将电渗法应用到铁路工程中的软土地基加固, 并认为电渗透系数是土本身的性质, 一般差别不大。Helmholtz 和 Smoluchowski 最早给出了电渗公式, 并指出电渗透系数与土体的毛细管直径无关, 仅仅与电渗过程中电位的大小和孔隙率的大小有关^[3]。随后, 不断有学者通过竖向和水平室内试验研究了不同内因、外因对土体电渗透系数的影响。胡平川^[4]的试验表明, 含水量对电渗透系数的影响较大, 含盐量次之, 易溶盐种类(pH 值)、腐殖酸(有机质)含量的影响很小; 周亚东等^[5]的试验结果表明, 电渗透系数与孔隙比呈线性关系; Laursen^[6]研究了电渗透系数与含水率、含盐量的关系; 项鹏飞等^[7]研究了含水率和含砂率对土体电渗透系数的影响; 庞宽等^[8]研究了在稳

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(51578511); 河南省科技攻关项目(232102320352)

第一作者: 刘忠玉, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土力学与基础工程。E-mail: zhyliu@zzu.edu.cn



论文
拓展
介绍

压和稳流情况下电渗透系数的变化状况;刘飞禹等^[9]研究了逐级加载电压对电渗透系数的影响;王宁伟等^[10]研究了不同电势梯度下非饱和黏性土的水平电渗排水电渗透系数的变化规律;杨克军等^[11]研究了持续通电、逐级增加电压、逐级降低电压以及电流衰减增加电压等通电方式对软土电渗透系数的影响。

上述研究表明,影响电渗透系数的因素比较多,其中孔隙比和电势梯度是关注最多的因素。一般认为,电渗透系数随试样含水率、孔隙比和试样两端电压(或电势梯度)的增大而增大,但除周亚东等^[5]给出电渗透系数是孔隙比的线性表达式外,其他都是定性的结论。另外,需要说明的是,由于电渗透系数的测定还没有统一的标准,所以上述试验采用的都是自研装置。这些装置大体分为竖向排水和水平排水两类。其中,竖向排水试验中,多采用试样上部设正极、下部设负极的加压方式,此时自重产生的水力渗流和电渗流同时发生^[7-8,12]。在受重力或压力作用且渗流速率很小的情况下,其产生的渗流量可以忽略不计。当水力渗流较强时,周亚东等^[5]建议通过施加反向电压,利用电渗流产生的反向水力梯度与水力梯度相平衡的原理来测定电渗透系数。另外,这些方法忽略了电极与试样之间的界面电阻,所以计算用到的电势梯度比试样中实际存在的要大。水平排水试验的试样水平放置^[9-10,13],能在一定程度上排除自重引起的水力渗流。试验时,在水平放置的试样两侧施加电压,在距离电极一定距离处设置电势探针,可以获得有效电势。但是,在上述2种电渗试验中都存在一个问题,即随着试验的进行,试样内的水分不断被排出,土样的含水率、孔隙比等参数也不断减小,试样的上部也可能由饱和状态转为不饱和状态,甚至出现裂缝。同时单位时间内试样可以排出的水量也随时间而减小,所以,这些试验基本上都可得出电渗透系数随时间延长而减小的结论。另外,这些试验也未就电渗透系数的影响因素(特别是电势梯度及孔隙比的综合影响)进行充分讨论。因此,设计了一种简单便捷的电渗透系数测定装置,该装置能尽量减少试验过程中由水力渗透等因素造成的不利影响,快速测定土体电渗透系数,并制备了多种不同孔隙比的试样,初步探讨了电势梯度及孔隙比这2个因素对电渗透系数的影响,以期能为电渗固结理论提供参数支撑。

1 电渗透系数测定装置及原理

1.1 电渗透系数测定装置

试验装置主要由试样管、电源和电势差量测装置、蓄水盒和排水量测装置组成,如图1所示。其中,试样管内径40mm,总长70mm,距试样管两端10mm、20mm处设有2组圆形孔洞。电源采用DPS-305CM稳压直流电源(最大电压30V,最大电流5A),电极片采用直径1mm的铜线,从距试样管两端10mm的孔洞中穿出,为增大电极片与试样的接触面积、减小试验过程中产生的误差,将电极片弯折成环状。不锈钢电势探针直径为1mm,从距试样管两端20mm的圆形孔洞中插入试样,并连接万能表测量长度为30mm的试样两端电势差。

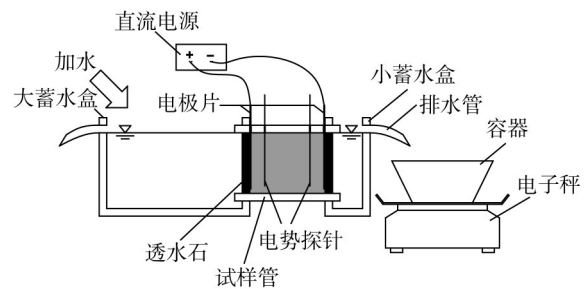


图1 电渗透系数测量装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of electroosmosis coefficient measurement device

为避免试验中试样饱和度、孔隙比变化等因素给试验过程带来不利影响,且保证试样管两端的水头差为零,在试样管两端正负电极片外侧分别设置有大小蓄水盒,大小蓄水盒在同一高度设置排水口,且在试验过程中不断向正极侧的大蓄水盒中注入水,保证大小蓄水盒的水位保持一致,并在小蓄水盒右侧设一排水管,与排水量测装置相连。排水量测装置由盛水容器及精度为0.01g的电子秤组成。同时,考虑到2个蓄水盒中的水直接浸泡试样可能会引起试样的崩解,并避免试样过程中土颗粒的流失,试样两端分别设置了一块透水石。

1.2 基本假定及试验原理

试验引入如下假设:①试样是均匀的、各向同性的、完全饱和的;②在电渗过程中,试样的电阻率不变,且沿长度方向分布均匀;③由试样中各种离子浓度差和温度差引起的水流可以忽略不计;④因试样内微小颗粒电泳作用而产生的电流可以忽略不计。

基于上述假定,根据电渗透系数的定义,即单位

电势差下通过单位试样面积的流量,电渗透系数的计算公式可表示为

$$k_e = \frac{Q}{\frac{\bar{\phi}_{\text{eff}}}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot t} \quad (1)$$

式中: k_e 为电渗透系数; t 为有效试验时间; Q 为有效试验时间内的排水量; $\bar{\phi}_{\text{eff}}$ 为平均有效电势差; d 为试样直径; l 为试样长度。

由于界面电阻的存在,实际用于电渗排水的电势(有效电势)小于电源输出电势。为了研究电渗透系数测量过程中有效电势的变化特性,定义平均有效电势差 $\bar{\phi}_{\text{eff}}$ 与电源输出电势 ϕ 之比为效率因子 β ^[14],即

$$\beta = \frac{\bar{\phi}_{\text{eff}}}{\phi} \times 100\% \quad (2)$$

李瑛等^[13]在电渗试验中发现,沿试样长度方向上的电势分布,除了两电极附近有较为明显的突跃外,试样中的电势分布基本是线性的,因此,电势探针的位置应离开电极一定距离。通过试验发现,这个距离不超过10mm。由于本试验试样总长50mm,所以电势探针设置为间距30mm。这样,由万能表测得插入试样中的两电势探针之间的电势差为有效电势的3/5。

2 试验过程

2.1 试验材料

试验采用饱和重塑土,原土取自信阳市某场地地下3~5m处。首先,将原土风干,用木棒在橡胶垫上碾散,并用筛孔为2mm的筛子筛除较大的杂质;然后在蒸馏水中浸泡数日,待其成泥浆状后备用。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[15]中的相关规定,对其进行土粒比重、液塑限等基本参数试验,结果如表1所示。由于 $I_p=14.9$,所以试样为粉质黏土。

表1 土的物理性质指标

Tab. 1 Physical properties of soil

土粒比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.69	40.5	25.6	14.9

2.2 试验步骤

电渗透系数的测定试验按以下步骤进行:①将原状土削成或采用静压法等方法制作成直径40mm、长度50mm的圆柱体,并缓慢推入试样管内;

②在试样管内试样两端依次放置电极片、滤纸、透水石,并插入电势探针;③将制作好的试样管与大、小蓄水箱组装连接,并将蓄水箱中注满无气蒸馏水,试验过程中一直往大蓄水箱中注水,以保持其水位不变;④将靠近小蓄水箱一端的电极片连接电源负极,另一端连接电源正极,并设定试验电压;⑤每隔20min分别测量一次试验排水量和电势差;⑥当试验达到一定时间或排水量达到某一值时停止试验。

2.3 试验方案

为了研究电势梯度及孔隙比与电渗透系数的关系,首先制备了5种不同孔隙比的试样,在不同的加载电压下进行电渗试验。在试验过程中,所控制的试样实际孔隙比与试验方案中的目标孔隙比产生了一定的偏差,故在接下来的叙述中采用目标孔隙比与实际孔隙比2个术语对试验过程进行描述。具体试验参数如表2所示。

表2 电势梯度、孔隙比对电渗透系数影响的试验方案

Tab. 2 Test scheme for effect of potential gradient and void ratio on electroosmosis coefficient

组别	加载电压/V	电势梯度/ (V·cm ⁻¹)	目标 孔隙比	实际 孔隙比	含水率/ %
A1	4	0.8	1.1	1.12	40.7
A2	4	0.8	1.3	1.32	48.2
A3	4	0.8	1.5	1.51	55.8
A4	4	0.8	1.7	1.69	63.2
A5	4	0.8	1.9	1.91	70.5
B1	10	2.0	1.1	1.12	40.7
B2	10	2.0	1.3	1.31	48.2
B3	10	2.0	1.5	1.49	55.8
B4	10	2.0	1.7	1.71	63.2
B5	10	2.0	1.9	1.91	70.5
C1	16	3.2	1.1	1.11	40.7
C2	16	3.2	1.3	1.32	48.2
C3	16	3.2	1.5	1.48	55.8
C4	16	3.2	1.7	1.68	63.2
C5	16	3.2	1.9	1.89	70.5

3 试验结果及讨论

3.1 累计排水量

以试样有效时间内的排水量 Q 为纵坐标,电渗时间 t 为横坐标,在加载电压分别为4V、10V、16V的条件下,得到15组试验中不同孔隙比时试样排水量随时间变化的关系曲线,如图2—4所示。

从图2—4可以看出,排水量与电渗时间之间基本上呈线性关系,特别是对低电压下小孔隙比的试样更是如此,即电渗排水速率是恒定的,没有出现文献[7-11]电渗排水速率随时间而变小的现象。这是

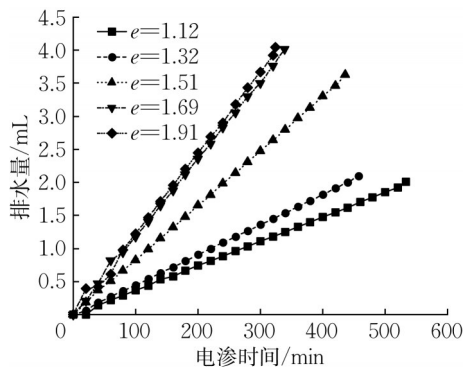


图2 4V电压下排水量与时间的关系

Fig.2 Relationship between water discharge and time at 4V voltage

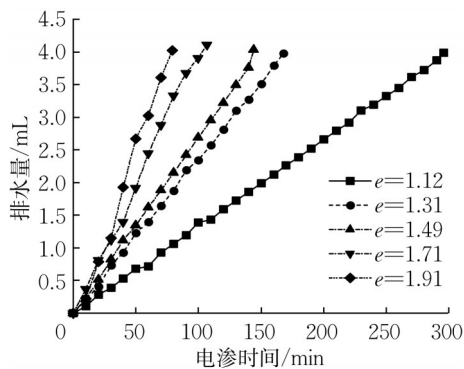


图3 10V电压下排水量与时间的关系

Fig.3 Relationship between water discharge and time at 10V voltage

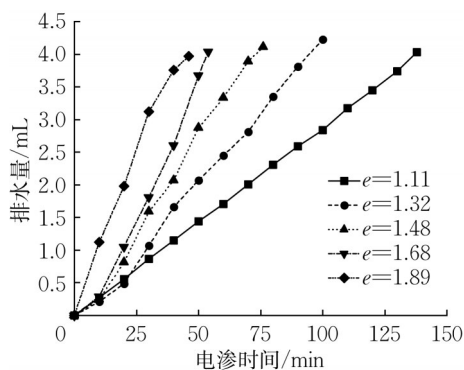


图4 16V电压下排水量与时间的关系

Fig.4 Relationship between water discharge and time at 16V voltage

因为在整个试验过程中,试样由于电渗而引起的孔隙水的排出,可由正极侧的大蓄水盒供给,因而试样始终处于饱和状态,含水率和孔隙比保持不变。可以推断,如果电渗引起的排水速率大于正极侧蓄水盒的供水速率,试样的含水率也会变小,也会出现前述文献试验中出现的电渗透系数逐渐变小的现象。

所以,如果在某个加载电压下出现电渗排水量与时间之间为非线性关系的现象,就说明这个电压过大,本文建议的试验方法在该电压下是不适用的。

图2—4还表明,在电压相同的条件下,排水速率随孔隙比的增大而增大。如图2所示,在电源电压为4V时,孔隙比为1.91的试样排水量达到2mL所需的时间最少,约为160min,而孔隙比为1.12的试样达到相同排水量需要的时间为533min,后者所需时间是前者的3.33倍。孔隙比为1.32、1.51、1.69的试样排水量达到2mL所需时间从大到小依次为440min、240min、180min。另外,相同的孔隙比试样达到相同的排水量所需时间随电压的增大而缩短。在目标孔隙比为1.1的情况下,试样在电源电压为4V达到2mL排水量所需时间最长,为533min,电源电压16V时达到相同排水量所需时间最短,仅为70min,电源电压为10V时需要的时间是150min。

3.2 效率因子与孔隙比、电势梯度的关系

在整个试验过程,每20min所测得的15组试样探针间的有效电势波动很小,将每一组探针间测得的全部有效电势进行平均处理,从而获得该组试验下的平均有效电势 $\bar{\varphi}_{\text{eff}}$ 。通过平均有效电势 $\bar{\varphi}_{\text{eff}}$ 可分别按照式(1)和(2)计算出电渗透系数 k_e 和效率因子 β ,如表3所示。

表3 不同孔隙比与电势梯度时的试验结果

Tab.3 Experimental results at different void ratios and potential gradients

编号	加载电压/V	实际孔隙比	平均有效电势差/V	效率因子	电渗透系数/ $(10^{-5}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1})$
A1	4	1.12	2.68	0.67	0.92
A2	4	1.32	2.48	0.62	1.21
A3	4	1.51	2.44	0.61	2.23
A4	4	1.69	2.20	0.55	3.52
A5	4	1.91	2.04	0.51	4.01
B1	10	1.12	7.60	0.76	1.16
B2	10	1.31	7.40	0.74	2.09
B3	10	1.49	7.00	0.70	2.62
B4	10	1.71	6.90	0.69	3.65
B5	10	1.91	6.60	0.66	5.07
C1	16	1.11	12.96	0.81	1.47
C2	16	1.32	12.80	0.80	2.16
C3	16	1.48	12.16	0.76	2.98
C4	16	1.68	11.68	0.73	4.39
C5	16	1.89	11.36	0.71	4.85

根据表3绘制效率因子 β 与孔隙比、电势梯度的关系图,如图5所示。可见,效率因子随着孔隙比的增大近似呈线性下降趋势。这是由于土体颗粒与水的导电性能不同造成的。土体颗粒的电阻大于水的电阻,当土体颗粒占比增大时(即孔隙比减小),整个

试样的电阻会随之增大,从而分担到更多电势。

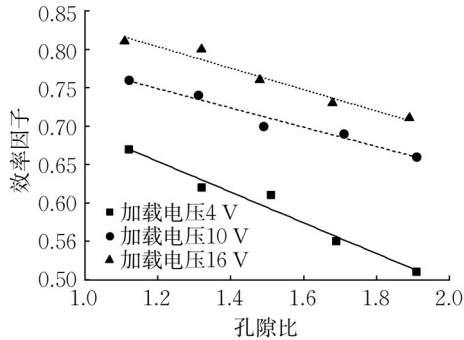


图 5 效率因子与孔隙比、加载电压的关系

Fig. 5 Relationship between efficiency factor and void ratio and loading voltage

3.3 电渗透系数与孔隙比的关系

由表 3 可知,电渗透系数与孔隙比、电势梯度呈正相关关系,且对于孔隙比的变化更加敏感。例如,电势梯度为 $2.0\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,孔隙比 e 为 1.91 所对应的电渗透系数为 $5.07\times 10^{-5}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$,而孔隙比 e 为 1.12 所对应的电渗透系数为 $1.16\times 10^{-5}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$,前者的数值是后者的 453%。

根据表 3,以电渗透系数 k_e 为纵坐标、孔隙比 e 为横坐标绘制二者之间的关系图,并将不同加载电压下的孔隙比与电渗透系数的数据分别用直线进行拟合,结果如图 6 所示,具体参数见表 4、表 4 中拟合公式中 k_e 的单位为 $10^{-5}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ 。由表 4 可见,在加载电压分别为 4V、10V、16V 时,相关性系数 R^2 的最小值为 0.974,即电渗透系数与孔隙比呈现出良好的线性关系。这与周亚东等^[5]的试验结果是相似的。

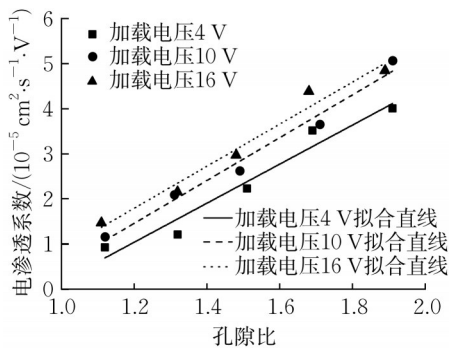


图 6 电渗透系数与孔隙比的直线关系

Fig. 6 Linear relationship between electroosmosis coefficient and void ratio

3.4 电渗透系数与电势梯度的关系

文献[7-11]的试验都表明,电渗透系数随电压或电势梯度的增大而增大,但没有给出二者之间的

表 4 不同电压下电渗透系数与孔隙比的直线拟合

Tab. 4 Linear fitting of electroosmosis coefficient and void ratio at different voltages

加载电压/V	斜率	截距	拟合公式	R^2
4	4.332	-4.164	$k_e = 4.332e - 4.164$	0.995
10	4.750	-4.245	$k_e = 4.750e - 4.245$	0.981
16	4.666	-3.811	$k_e = 4.666e - 3.811$	0.974

定量关系。这里做初步尝试。制作孔隙比为 1.5 的 5 个试样,分别在 4~16V 的电压下进行电渗试验获得电渗透系数,并重复 3 次,取其平均值。另外,由于电极接触电阻的存在使得实际用于电渗的电压小于电渗的输出电压^[13],因此,采用有效电势梯度对试验结果进行描述,结果如表 5 所示。

表 5 电渗透系数与电势梯度的关系

Tab. 5 Relationship between electroosmosis coefficient and potential gradient

编号	孔隙比	含水率/%	加载电压/V	有效电势梯度/ $(\text{V}\cdot\text{cm}^{-1})$	电渗透系数/ $(10^{-5}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1})$
D1	1.5	55.8	4	0.49	2.13
D2	1.5	55.8	7	0.94	2.60
D3	1.5	55.8	10	1.40	2.64
D4	1.5	55.8	13	2.01	2.81
D5	1.5	55.8	16	2.37	2.97

将表 5 中电渗透系数与电势梯度试验结果数据进行直线拟合,如图 7 所示,拟合直线的表达式为 $k_e = 0.427\theta + 1.975$,其中 θ 表示有效电势梯度,单位为 $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$, k_e 的单位为 $10^{-5}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$ 。由于相关性系数 R^2 为 0.982,所以二者之间也具有较好的线性关系。

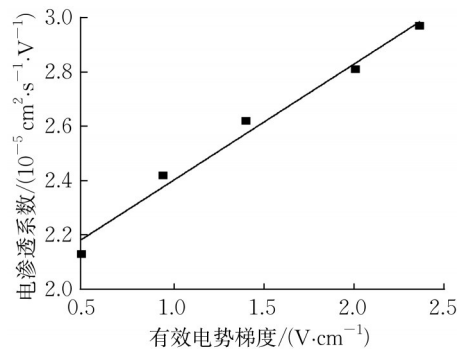


图 7 电渗透系数与有效电势梯度的直线关系

Fig. 7 Linear relationship between electroosmosis coefficient and potential gradient

如果综合考虑孔隙比和电势梯度对电渗透系数的影响,这里用平面方程对试验数据进行拟合,即

$$k_e = 4.711e + 0.431\theta - 4.940 \quad (3)$$

此时,相关性系数 R^2 为 0.962。

4 结论

利用自制的电渗透测量装置进行了室内试验,研究了电渗透系数与电势梯度、孔隙比的关系,得出以下结论:

(1)该试验装置可以用来测量土体的电渗透系数,在试验过程中能够避免试样饱和度及孔隙比变化、水头差等因素给试验带来的不利影响,且试验持续总时长较短,试验装置简单,能快速地测出电渗透系数。

(2)对于本次试验所用试样,电渗透系数随电势梯度或孔隙比的增大而增大,并呈现出较好的线性关系,其中,电渗透系数对孔隙比的变化更为敏感。

作者贡献声明:

刘忠玉:制定研究思路,指导撰写论文。

岑勋云:实施试验研究,数据计算与分析,论文撰写与修改。

罗文培:设计试验方案,提供试验技术指导。

汪良强:搜集研究资料,论文修改与检查。

参考文献:

- [1] CASAGRANDE L. Electric-osmosis on soil [J]. *Geotechnique*, 1949(1): 159.
- [2] CASAGRANDE L. Electro-osmotic stabilization of soils [J]. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 1952, 39: 51.
- [3] 于天仁. 土壤的电化学性质及其研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
YU Tianren. *Electrochemical properties of soils and research methods on Electrochemical properties* [M]. Beijing: Science Press, 1976.
- [4] 胡平川. 软黏土电渗系数影响因素及提高方法的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
HU Pingchuan. *Experimental study on the influential factors and improving method of electro-osmotic permeability of soft clay* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [5] 周亚东, 王保田, 邓安. 分段线性电渗—堆载耦合固结模型[J]. *岩土工程学报*. 2013, 35(12): 2311.
ZHOU Yadong, WANG Baotiao, DENG An. *Piecewise-linear model for electro-osmosis-surcharge preloading coupled consolidation* [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2311.
- [6] LAURSEN S. Laboratory investigation of electroosmosis in bentonites and natural clays [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(5): 664.
- [7] 项鹏飞, 崔允亮, 王新泉. 含水率与含砂率对软黏土电渗透系数的影响试验研究[J]. *铁道建筑*, 2017, 57(12): 75.
XIANG Pengfei, CUI Yunliang, WANG Xinquan. *Experimental Study on Influence of Water Content and Sand Content on Electroosmosis Coefficient of Soft Clay* [J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(12): 75.
- [8] 庞宽, 刘斯宏, 王柳江. 电渗法加固软土地基基本参数室内试验研究[J]. *水运工程*, 2011, (3): 148.
PANG Kuan, LIU Sihong, WANG Liu-jiang. *Lab experimental study on electro-osmotic parameters for soft soil consolidation* [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2011, (3): 148.
- [9] 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): 2582.
LIU Feiyu, FU Wei, WANG Jun et al. *Influence of applying stepped voltage in electroosmotic reinforcement of dredger fill* [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2582.
- [10] 王宁伟, 韩旭, 张雷. 室内水平电渗排水试验研究[J]. *岩土工程技术*, 2014, 28(5): 261.
WANG Ningwei, HAN Xu, ZHANG Lei. *Experimental study of electro-osmotic test* [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2014, 28(5): 261.
- [11] 杨克军, 袁国辉, 符洪涛, 等. 通电方式对电渗加固软土影响试验研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(2): 170.
YANG Kejun, YUAN Guohui, FU Hongtao, et al. *Experimental study on influence of electrification method on soft soil enhanced by electroosmosis* [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(2): 170.
- [12] 曹永华, 高志义. 电渗仪的研制及其典型试验[J]. *中国港湾建设*, 2010(6): 64.
CAO Yonghua, GAO Zhiyi. *Development and typical tests of electroosmotic cell* [J]. *China Harbour Engineering*, 2010 (6): 64.
- [13] 李瑛, 龚晓南, 张雪婵. 电压对一维电渗排水影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 709.
LI Ying, GONG Xiaonan, ZHANG Xuechan. *Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage* [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 709.
- [14] CASAGRANDE I L. Stabilization of soils by means of electroosmotic state-of-art [J]. *Journal of Boston Society of Civil Engineering*, ASCE, 1983, 69(3): 255.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019* [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.