

电势作用下非饱和黄土水分迁移试验研究*

王铁行¹, 曹怀长^{1,2}, 焦丹^{1,3}, 何欢¹

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055; 2.中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004; 3.西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

摘要:采用自制的试验装置,基于电渗法试验,笔者对以下问题进行了探究:电渗作用能否导致非饱和黄土土体含水量降低?电势、土体含水量水平等因素对非饱和黄土电渗结果有何影响?非饱和黄土电渗时效如何评价?试验结果表明:在电渗作用下,非饱和黄土试样内的水分从正极迁移向负极,达到降低正极区含水量的目的,说明电渗作用能使非饱和黄土土体内的含水量降低;电渗过程中,沿电渗方向的电势大致呈线性分布,电渗电势越大,降低正极区土体含水量的效果越好;由于正极水化反应增强和土体电阻发热量引起了水分耗损,高电势作用下土体内的含水量水平低于低电势作用土样。在试验土样含水量范围,土体初始含水量越低,电渗作用下正极区土体含水量降低值越大,但初始含水量差异引起的正极区含水量变化的差异性不大。电渗作用下非饱和黄土的水分迁移前期快,后期慢,随着电渗时间的延长,正极区含水量会进一步降低,负极区的含水量会进一步升高。

关键词:非饱和黄土;电渗;电势;含水量;水分迁移

中图分类号:TU444

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-0994-05

Experimental Research on Unsaturated Loess Moisture Migratio under the Action of Electric Potential

Wang Tiehang¹, Cao Huaizhang^{1,2}, Jiao Dan^{1,3}, He Huan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, P.R.China;

2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, P.R. China)

Abstract: One-dimensional With the application of laboratory tests of electroosmosis a self-made test device, a serious of problems were investigated, such as: whether unsaturated loess soil moisture content decreased under electroosmosis? What effect do electric potential, moisture content of soil and other factors have on the result of unsaturated loess electroosmosis? How to evaluate the unsaturated loess electroosmosis aging? Test results show that under the action of electroosmosis, the moisture content of unsaturated loess migrates from the anode to the cathode, which achieve the purpose of reducing the moisture content of soil of the anode region, indicating that electroosmosis make the moisture content of unsaturated loess soil decreased; on the process of electroosmotic, along the direction of the electroosmotic electric potential being roughly linear distribution, with increasing electroosmotic electric potential, the soil moisture content in the cathode area is lower; Since the enhancement of the anode hydration reaction and heat resistance of soil leading to water loss, the moisture content of soil on the action of high electric potential is less than that on the low electric potential. In the range of the moisture content of test samples, the lower initial moisture content of soil lead the greater lower value of moisture content of anode region of soil on the action of electroosmosis,

* 收稿日期:2018-01-12(修改稿)

作者简介:王铁行(1968-),男,陕西富平人,博士,教授,博士生导师,主要从事黄土、冻土工程设计理论和方法等方面的教学与科研工作。E-mail: wagttx@xauat.edu.cn

基金项目:陕西省教育厅专项基金(15JK1399)

but the anode region moisture difference caused by the initial moisture content difference is not obvious; unsaturated loess moisture migration is rapid early but slow in later stage. With the extension of the electroosmotic time, the moisture content of soil on the anode region will be further reduced, and that on the cathode region will be further increased.

Keywords: unsaturated loess; electroosmosis; electric potential; moisture content; moisture migration

0 引言

黄土高原属于干旱半干旱地区,浅层土体基本上是非饱和的,工程项目大多处于浅层土体。非饱和黄土工程性质与其含水量水平密切相关,含水量降低时不仅使黄土强度增加^[1-4],而且弱化了冻融性^[5-6]。通过实地调研,在黄土高原,高度介于 10~20 m 的直立边坡比比皆是,并且土体含水量多介于 6%~10% 之间。根据地质类比法,对于黄土基坑、隧道等工程项目,若能采用一种手段降低土体含水量,对增加工程稳定性是大有好处的,并且坑坡影响区以外含水量增大对坑坡稳定性影响较小。根据查阅国内外有关电渗方面的研究^[7-12]发现,若在电势作用下能促使土体内水分迁移,使坑坡土体含水量大幅降低,该土体的强度就会增大,这样就可以把电渗法作为单一的基坑支护措施。基于这一想法,笔者试图采用电渗法降低非饱和黄土含水量。但目前电渗在非饱和土体方面的研究尚缺乏文献,对于电渗作用能否导致非饱和土体含水量降低,电势、土体含水量水平等因素对非饱和土电渗结果有何影响,非饱和土电渗时效如何评价等此类问题均未知。本文基于非饱和黄土电渗试验就此开展研究工作。

1 试验方案

在土体两端施加电位后,土中的阳离子向阴极移动,这些阳离子同时拖拽水使水朝向阴极运动,这称为电渗。与此同时,表面带负电荷的土颗粒在电场的作用下移向阳极。

采用自制一维试验装置(图 1),该装置采用 8 mm 厚玻璃制成,由上下两部分组成,下面为固定支座,上面由可自由组拆的 4 个边框构成,试验后的土样可以完整地取出。试验中用于盛装试验土样的主体盒内部净尺寸为 21.5 cm×10 cm×16 cm (长×宽×高)。电渗渗流方向为水平方向,左右两端采用钢丝网格(钢丝直径为 1 mm、网格为 1 cm×1 cm)作为正负电极材料,在电极材料与玻璃盒之

间用土工布隔开,确保电渗水流的顺利排出,负极处设橡胶导水管排水。采用 5 根同材质的铁丝,沿长度方向按一定的距离插入土体作为电势测针(V1~V5),用以测量电渗过程中土体的电势分布。试验装置上部用塑料膜封闭,确保整个试验过程中是一维电渗。

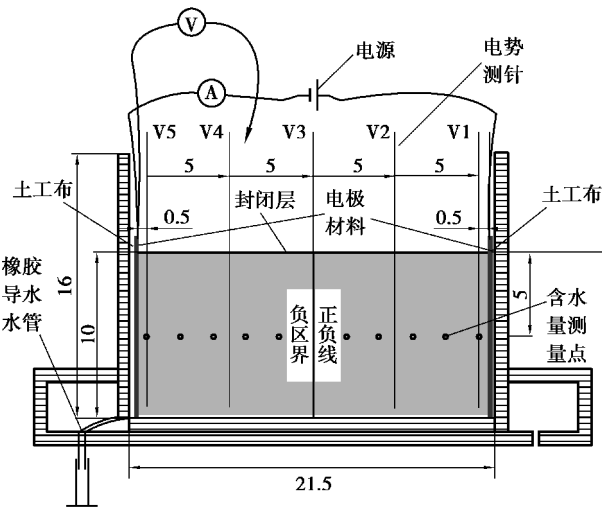


图 1 一维电渗装置图(单位:cm)
Fig. 1 Aet-up diagram for one-dimension electroosmosis (unit:cm)

试验用土取自西安市碑林区西安建筑科技大学一基坑内,距地面 6 m 深处,该土为晚更新世 Q₃ 马兰黄土,天然状态下该土液限为 29.9%、塑限为 18.3%,试验试样的尺寸为 21 cm×10 cm×10 cm (长×宽×高)。试验土样见表 1。

表 1 试验土样汇总表
Table 1 Parameters of test soil sample

试验编号	初始干密度/(g·cm ⁻³)	初始含水量/%	饱和度/%	电源电压/V	通电时间/h
①	1.55	22	80	20	15
②	1.55	22	80	20	30
③	1.55	22	80	20	45
④	1.55	22	80	20	96
⑤	1.55	22	80	10	45
⑥	1.55	22	80	30	45
⑦	1.55	19.3	70	30	45
⑧	1.55	16.6	60	30	45

试验土样①、②的通电土体未安装电势测针,待试验完成后,仅对其含水量进行测量;试验土样③、④安装了电势测针,用来测量试验过程中的电势变化情况;试验①~④的电渗时间逐渐延长;试验⑤、⑥在试验③基础上,改变了试样两端所加的电渗电势,试验目的是为得到电势因素对电渗结果的影响;试验⑥、⑦、⑧仅土体的初始含水量水平不同,试验目的是为得到初始含水量水平因素对电渗结果的影响。在以上所有试验过程中,采取固定的时间间隔对试验过程中的现象进行记录,并读取试验数据。

试验样制好后,先静置 24 h,再进行电渗试验。对试验①、②,在电渗试验开始后,定时观察试验过程中的现象,在试验③、④、⑤、⑥、⑦、⑧通电前,先按距离布置好电势测针,并从通电零时刻开始,按照每小时测量一次的频量,测量电流表及 5 个电势测针的读数,并时刻观察试验过程中是否有液态水流出。试验完成后将土样取出,按从负极到正极的顺序,依次从距负极为 0.5 cm、2.5 cm、4.5 cm、6.5 cm、8.5 cm、10.5 cm、12.5 cm、14.5 cm、16.5 cm、18.5 cm、20.5 cm 的截面上,取出每个截面上中点的土体测量其含水量。

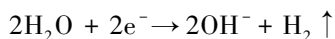
2 试验结果和分析

2.1 试验后含水量的分布

所有试验结果如图 2。图中给出了电渗后非饱和黄土样的含水量分布,表明初始含水量均匀的土样,在电渗作用下其含水量分布发生了明显变化。

在本次试验中,所有电渗试样都无液态水的排出,原因是:电渗前土样为非饱和的,电渗后水分迁移引起的土样内最高的含水量点未达到按初始孔隙比计算的饱和含水量。

为了便于下面对土体内含水量变化的描述,把试验土体沿水平方向分为两大区,与负极对应的一半土体称其为负极区,与正极对应的一半土体称其为正极区。由图 2 显示,电渗后土体正极区的含水量降低到初始含水量以下,负极区的含水量升高到初始含水量以上,且越靠近正极降低的越多,最大的降低值达到 6.4%。另外,所有电渗后的土体在靠近负极 0.5 cm 处的含水量出现了陡降,出现这种现象的主要原因是由于在负电极处发生了电化学反应造成的。负电极处的电化学反应为:



2.2 电势对非饱和黄土电渗结果的影响

图 3 给出了试样⑤的测针 V1 与测针 V5 之间

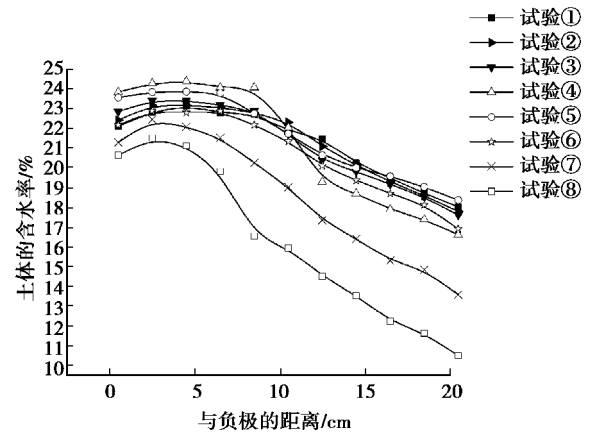


图 2 电渗后土体含水量分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of moisture content of soil after electroosmosis

的电势分布情况。在本次试验中,测量的所有试样沿电渗方向的电势分布都是近似呈线性的,这一点和饱和土电渗过程中的电势分布相同。

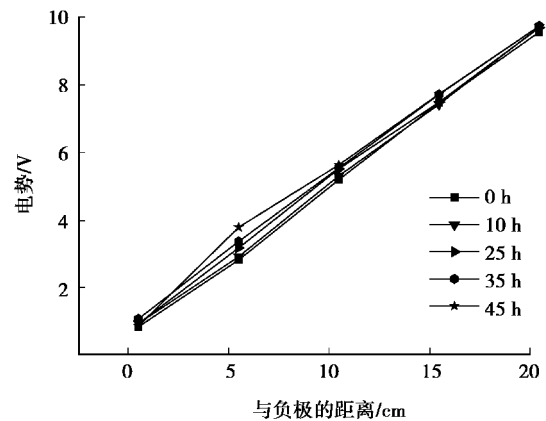


图 3 试验⑤的电势分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of electric potentials of test ⑤

初始含水量均匀相同的试样分别在 10 V、20 V 和 30 V 电势下,经 45 h 电渗后,测得的试样内含水量的分布结果如图 4。图中显示,经高电势电渗后的试样,由于正极水化反应增强和土体电阻发热量增大引起了水分耗损,导致整个土体内的含水量水平都会低于低电势电渗后的试样,电渗后的试样与电渗前相比,电渗作用引起了正极区的水分向负极区迁移,正极区的含水量水平降低,负极区的含水量水平升高。结论:电渗电势的大小会对非饱和黄土电渗的结果产生影响,增大电渗电势能更多地降低正极区的含水量,同时也能减小负极区含水量的升高量。

2.3 含水量水平对非饱和黄土电渗结果的影响

初始含水量分别为 22%、19.3% 和 16.6% 的 3 组均匀试样(16%~22%是黄土基坑天然土层含水

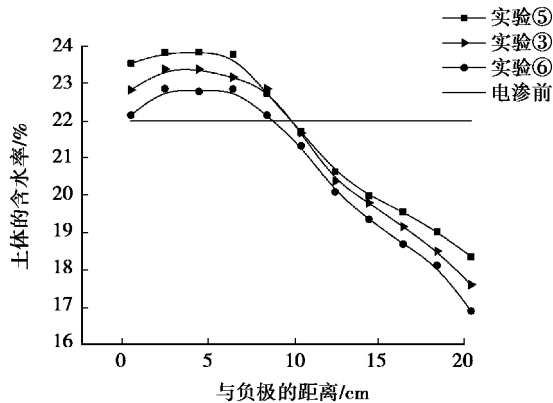


图4 不同电势下电渗后土体含水量的分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of moisture content of soil after electroosmosis under different electric potential

量常见范围),饱和度分别为80%、70%和60%,在30 V电势下,经45 h电渗后,测得的试样内含水量的分布曲线如图5所示,距正极一定距离电渗前后含水量的差值如表2所示。由图中曲线及表中数据显示,初始含水量水平较低的试样,经电渗后正极区土体的含水量分布梯度较大,与电渗前相比正极区土体的含水量降低较多。土样的初始含水量水平会对电渗结果产生一定影响,在试验土样含水量范围,土体初始含水量越低,电渗作用下正极区土体含水量降低值越大,但初始含水量差异引起的正极区含水量变化的差异性不大。

表2 电渗前后正极区土体含水量的差值 %

Table 1 D-value of moisture content of anode region of soil before and after electroosmosis %

实验	距正极的距离/cm				
	0.5	2.5	4.5	6.5	8.5
试验⑥电渗前后含水量差值	5.1	3.9	3.3	2.6	1.9
试验⑦电渗前后含水量差值	5.7	4.5	4.0	2.9	2.0
试验⑧电渗前后含水量差值	6.1	5.0	4.4	3.1	2.1

2.4 电渗时间对非饱和黄土电渗结果的影响

初始含水量均匀相同的3组试样(试样①、②、③),在20 V电势下,从0时刻开始通过等级别加长电渗时间(15 h、30 h、45 h),电渗后测得的试样内含水量的分布曲线如图6所示。图中显示延长电渗时间,会增加水分从正极区向负极区的迁移量,但从15 h到30 h和从30 h到45 h的水分迁移量没有从0时刻到15 h的水分迁移量多。说明电渗作用下非饱和黄土的水分迁移前期快,后期

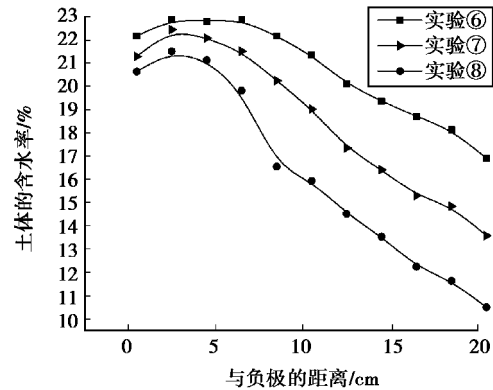


图5 不同初始含水量下电渗后土体含水量的分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of moisture content of soil after electroosmosis under different initial moisture content

变慢。

针对上述现象,图中又增加了一组电渗96 h的试样内含水量分布曲线。通过对比,显示从45 h到96 h水分迁移依旧在进行,并且水分迁移的快慢情况和上述规律是吻合的。同时也说明,随着电渗时间的延长,能进一步引起水分从正极区迁移向负极区。

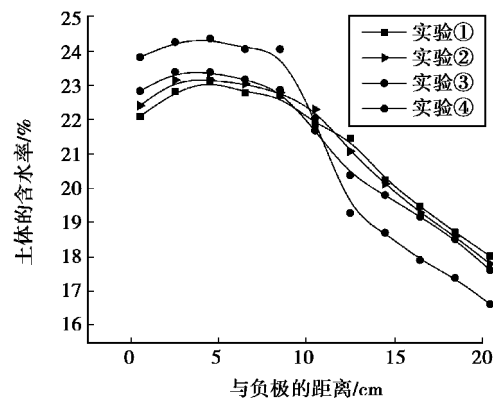


图6 不同电渗时间下电渗后土体含水量的分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of moisture content of soil after electroosmosis under different electroosmosis time

2.5 电渗电势和电渗时间两因素对非饱和黄土电渗结果影响的对比

实验⑥和实验④分别在实验③的基础上增大了电渗电势和加长了电渗时间。图7中显示,增大电渗电势和加长电渗时间,电渗后试样正极区土体的含水量都会进一步降低,但加长电渗时间会使负极区的含水量进一步升高,而增大电势会减小负极区含水量的升高量。结论:加长电渗时间主要是引起水分的物理性迁移,以更多地提高负极区含水量为代价,来降低正极区含水量。

3 结论

(1)在电渗作用下,非饱和黄土试样内的水分

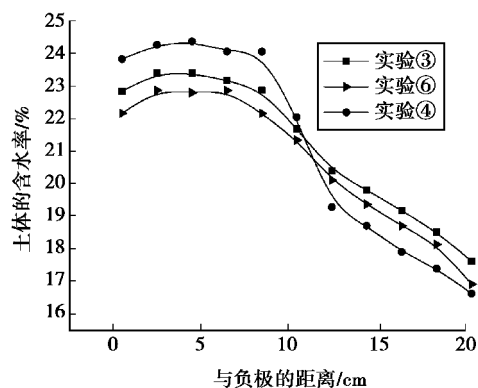


图7 增加电势和增长电渗时间电渗后土体含水量的分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of moisture content of soil after electroosmosis under increase voltage and prolong electroosmosis time

从正极迁移向负极,达到降低正极区含水量的目的,说明电渗作用能使非饱和黄土土体内的含水量降低。

(2)电渗过程中,沿电渗方向电势大致呈线性分布,电渗电势越大,降低正极区土体含水量的效果越好。由于正极水化反应增强和土体电阻发热量引起了水分耗损,高电势作用下土体内的含水量水平低于低电势作用土样。

(3)在试验土样含水量范围,土体初始含水量越低,电渗作用下正极区土体含水量降低值越大,但初始含水量差异引起的正极区含水量变化的差异性不大。

(4)电渗作用下,非饱和黄土的水分迁移前期快、后期慢,随着电渗时间的延长,正极区含水量会进一步降低,负极区的含水量会进一步升高。

参考文献 (References)

- [1] 李永乐, 张红芬, 余小光, 等. 原状非饱和黄土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2859-2863. (Li Yongle, Zhang Hongfen, Shi Xiaoguang, et al. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2859-2863. (in Chinese))
- [2] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1195-1200. (Zhang Maohua, Xie Yongli, Liu Baojian. Analysis of shear strength characteristics of loess during moistening process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1195-1200. (in Chinese))
- [3] 张宁宁, 骆亚生, 沙磊. 含水率对非饱和原状黄土强度的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 101-104. (Zhang Ningning, Luo Yasheng, Sha Lei. Effect of water content on strength of undisturbed unsaturated loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(5): 101-104. (in Chinese))
- [4] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1-14. (Wu Hongwei, Chen Shouyi, Pang Yuwei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 1-14. (in Chinese))
- [5] 王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2378-2382. (Wang Tiehang, Luo Shaofeng, Liu Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2378-2382. (in Chinese))
- [6] 张辉, 王铁行, 许健. 黄土高原边坡冻融病害调查及现场测试研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1339-1343. (Zhang Hui, Wang Tiehang, Xu Jian. Investigation and field test studies on freezing-thawing disease of the loess plateau slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1339-1343. (in Chinese))
- [7] 吴辉, 胡黎明. 考虑电导量变化的电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 734-738. (Wu Hui, Hu Liming. Numerical simulation of electro-osmosis consolidation considering variation of electrical conductivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 734-738. (in Chinese))
- [8] 焦丹, 龚晓南, 李瑛. 电渗法加固软土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增1): 3208-3216. (Jiao Dan, Gong Xiaonan, Li Ying. Experimental study of consolidation of soft clay using electroosmosis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl. 1): 3208-3216. (in Chinese))
- [9] 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): 2311-2316. (Zhou Yadong, Wang Baotian, Deng An. Piecewise-linear model for electro-osmosis-surcharge preloading coupled consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2311-2316. (in Chinese))
- [10] Zhang Y F, Zhao W. Interface electric resistance of electroosmotic consolidation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1617-1621.
- [11] Wan T Y, Mitchell J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(5): 473-491.
- [12] Lewis W R, Humpheson C. Numerical analysis of electroosmotic flow in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 99(8): 603-616.