

电极距对水平电渗排水影响的试验研究

王宁伟, 矫 军, 修彦吉, 张 雷

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 利用室内试验, 研究了两种不同电极距对黏土的水平电渗排水规律的影响, 从电渗排水量、排水速率、有效电势、能量消耗、阳(阴)极接触电阻方面等对黏土电渗特性进行对比分析。结果表明: 减小电极距在一定时间内能够加快电渗排水速率, 可以降低阳(阴)极接触电阻, 减小电势损失; 电渗排水速率与有效电势成正比, 而单位耗能量与有效电势成反比。通过对这些规律的研究, 有助于我们更好地认识和掌握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: 电极距; 水平电渗; 有效电势; 接触电阻; 电极腐蚀

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0177-05

作者简介: 王宁伟(1964-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事滩涂固化、地基处理、基坑工程及城市防灾减灾等方面的研究与教学工作。Email: sy_wnw@163.com。

Effect of electrode spacing on standard electro-osmotic dewatering

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

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

Abstract: A laboratory test program is conducted to investigate the effect of two different electrode spacings on the standard electro-osmotic drainage of clay. From the aspects of the volume of electro-osmotic drainage, rate of electro-osmotic drainage, energy consumption, effective voltage and contact resistance, two tests are compared to analyze the electro-osmotic characters of clay. The results show that decreasing the electrode spacing can improve the rate of drainage in certain time, lower the contact resistance and reduce the voltage drop, moreover, the rate of electro-osmotic drainage is proportional to the effective voltage, while the energy consumption is inversely proportional to the effective voltage. With the above studies, it is significant for us to understand and master the rules of standard electro-osmosis drainage of clay and it also lays a better basis on resolving the drainage problems of clay slope which is rich in water.

Key words: electrode spacing; standard electroosmosis; effective voltage; contact resistance; electrode corrosion

0 引 言

电渗法是指在软土地基中插入阴阳电极并施加低压直流电, 通过产生电动及电蚀等效应, 提高软土地基强度的一种软土加固方法。电渗法应用于软土地基加固^[1-3]已经有很长的历史, 继Reuss发现电渗现象后, Helmholtz首先从双电层的概念出发, 用数学方法来表示电渗现象, 经后人的修正和发展, 形成了Helmholtz电渗公式。Casagrande^[4]于1939年在德国的萨尔兹吉特(Salzgitter)首次将电渗法成功应用于铁路路堑土方工程的排水与稳定, 其后许多学者都对电渗法进行了一些研究, 并逐渐应用于地基固结、基坑开挖、边坡、路堤、土坝和地铁隧道的稳定等方面^[5-6]。房营光、高志艺、刘凤松等^[7-9]则研究了电渗和真空预压联合的作用, 崔红军等^[10]研究结果表明, 在渗透系数小于0.1m/d

的以黏粒为主的流泥、淤泥或淤泥质土中, 电渗法处理地基效果良好。由于电渗涉及多个学科及领域, 是一个多种因素相互作用、相互耦合的过程^[11], 因此目前国内外对于电渗机理的研究并不完善, 在工程应用中, 还存在着有些情形下电渗效果不明显、电极腐蚀严重、耗电量大、对电渗参数的确定随意性较大等问题, 其复杂的作用机理和众多的影响因素一直阻碍实际应用效果。但由于相对于传统的软土地基加固技术, 电渗法具有固结速度快、安全环保等优点, 电渗法的应用一直引起国内学术界和工程界的重视。

本文通过室内试验, 利用电渗排水量、排水速率、有效电势、能量消耗、阳(阴)极接触电阻和土体含水率等指标研究了2种不同电极距对非饱和黏性土的

水平电渗排水规律。通过对这一技术的深入研究，可以解决实际工程中非饱和和高含水率黏性土的水平排水问题，对解决黏性土边坡（基坑）由于土体含水率过高导致的安全问题具有重要的现实意义。

1 室内试验方案

如图1所示室内水平电渗试验原理图。试验装置由用塑料箱盛装土样、集水量杯和电源电极3部分组成，土样的塑料箱长×宽×高为25 cm×17 cm×15 cm，阳极采用为φ8钢筋水平插入土中，阴极采用的是周身打满排水小孔的φ12薄壁钢管，以15° 向下倾角插入土中（利于水的排出）。集水装置（量杯）用于收集阴极排水量，沿试样长度方向插入4根直径为1 mm的铜丝用作电势测针（V1~V4），以测量土体中电势的分布和变化。

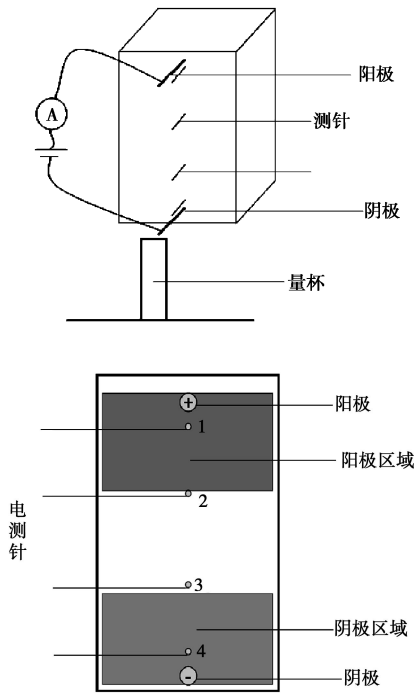


图 1 电渗装置图

Fig. 1 Setup developed for electroosmosis

表 1 电渗试验参数

Table 1 Test conditions of electroosmosis

试验组别	初始含水率/%	电极电压/V	电极距/cm
试验 A	23.3	22	19
试验 B	23.0	22	13

试验用土为沈阳市某工程现场采集的原状黏性土，室内将原状土烘干、碾碎、过筛，然后按目标含水率计算并称取相应重量的干粉和水，配制成重塑土。本次试验分为两组（试验A、试验B），水平电渗试验的基本参数见表1。其中试验A的测针间距为6 cm，阴

阳极与测针相距0.5 cm，试验B的测针间距为4 cm，阴阳极与测针相距0.5 cm，两者通电电压均为22V。试验过程中按一定的时间间隔记录电流表的读数，并测量各测针的电势和阴极的排水量，试验结束后分别测量阳极区域、两极中间和阴极区域的土体含水率。

2 试验结果分析

2.1 电渗排水量与排水速率

相同时间段内电渗的排水量可以直观地反映不同电极距下两组试验电渗排水量与时间的关系，如图 2 所示。由于两组试验的电极距不同（即用于电渗排水的土体体积不同），单纯用排水量来衡量不同电极距对电渗的影响较为不妥，所以增加了不同电极距下的电渗排水速率曲线，如图 3 所示。

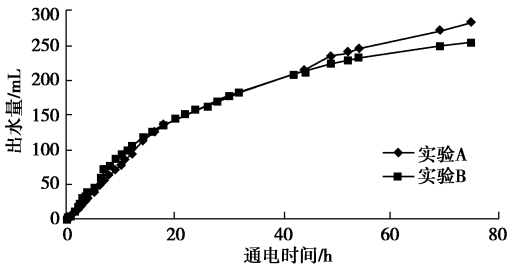


图 2 电渗排水量

Fig. 2 Volume of electro-osmotic drainage

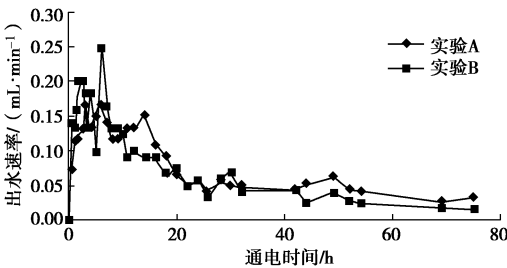


图 3 电渗排水速率

Fig. 3 Rate of electro-osmotic drainage

根据 Esrig 的理论：

$$Q = v_e t \quad (1)$$

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

式中 Q 为时间 t 内电渗排出水的总体积 (mL)； v_e 为电渗排水速率 (mL/s)； t 为通电时间 (s)； k_e 为土体的电渗透系数 ($\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$)； $\Delta\Phi$ 为有效电势 (V)； L 为阳极与阴极间土样的长度 (cm)； A 为通过电流的土体横截面积 (cm^2)。从式 (1) 和 (2) 知，在其他条件不变的情况下，电渗排水量与电渗排水速度成正比，而电渗排水速率与 $k_e \Delta\Phi$ 成正比。电渗透系数 k_e 是变化的，与土体本身的性质（包括含水率，颗粒级配等）有关，且不能直接测定，需用式 (2) 计算得到。

结合图2、3、6可以得出,排水过程大致可以分为3个阶段:排水初期(0~12 h)由于两组试样相同,电渗透系数 k_e 也大致相同,而试验B的有效电势整体大于试验A,所以试验B的排水速率、排水量明显比试验A大,两者排水量均呈直线型增长阶段;排水中期(13~42 h)由于土体含水率的减小和在两极附近的不均匀分布导致排水速率越来越慢,呈曲线型缓慢增长阶段,两者总体大致相同;排水末期(43~75 h)由于土体大量水分的排出、土体电阻的增加、有效电势及电流的下降等原因,两者排水速率均较低,但试验B含水率的更低,不考虑其他因素试验B的电渗透系数要比试验A小,因此试验A的排水速率、排水量则优于试验B,但此时电渗效果已不明显。所以,等电势作用下,减小电极距可以增加电渗排水量和提高电渗效率,对于电渗中前期效果明显,不适用于较长时间的电渗作用。

2.2 电流与能量消耗

试验A、B均用22 V直流电稳压输出,而试验过程中电流是逐渐变化的,如图4所示。为比较不同电极距下电渗的能量消耗,以相邻两个数据观测点的时间间隔为基础定义单位耗能量 C ,其表达式为:

$$C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} UI dt}{\Delta Q} \quad (3)$$

式中 U 和 I 分别为电源的输出电压(V)和在 t_1 到 t_2 的时间段内某时刻 t 的电路电流(A); ΔQ 为在时间 t_1 到 t_2 的时间段内电渗排出水的体积(mL);由公式可知,单位耗能量 C 的单位为 $W \cdot h/mL$,其物理意义为用电渗每排出1mL的水需要消耗的能量。图5给出了随时间变化的单位耗能量曲线。

从图4可以看出,电渗过程中电流的变化,电极距较小的试验B中的电流一直高于试验A,但二者电流随时间的逐渐变小的趋势一致,说明随着土中水分(良导体)的不断排水,土体的电阻也在不断的增加。从图5可以看出,试验A、B的单位耗能量随通电时间的增加整体趋势一直缓慢增大,而在整个电渗过程中,试验B的单位耗能量都比试验A的大。在电渗进行了40 h后,两者排水量大致相同的情况下,试验B的耗能较大,显然不够经济,而在前12 h试验B的排水量、排水速率明显优于试验A,说明在本试验方案中13 cm电极距的最佳电渗时长为12 h。单位耗电量的变化与电渗的排水量及土体的电阻相关。B的电阻增速大,排水量减小得快,耗能量自然也比A大,这说明B比A更快地进入了电渗排水的末期。

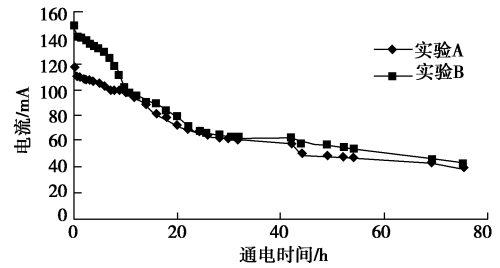


图4 电流随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of current in electroosmosis with time

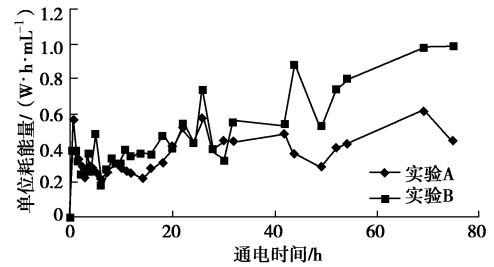


图5 耗能曲线

Fig. 5 Energy consumption curves

2.3 有效电势与接触电阻

两组试验的输入电压皆为22 V,但实际测得测针1和4之间的有效电势(如图6所示)明显小于输入电压,说明测针1(4)与阳(阴)极接触面之间存在很大的电阻—阳(阴)极接触电阻(如图7,8所示)。

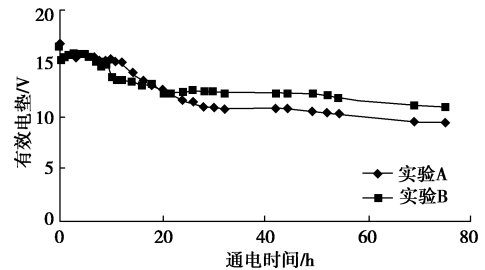


图6 有效电势

Fig. 6 Effective voltage

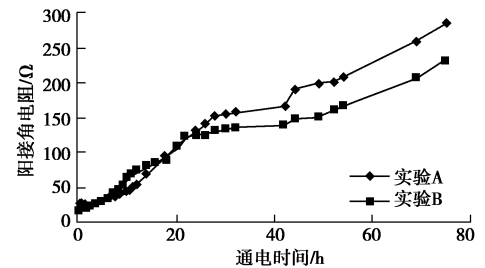


图7 阳极接触电阻

Fig. 7 Anode contact resistance

从图6可以看出,试验B的有效电势整体上一一直大于A,随着电渗试验的进行,作用于土体上的有效电势逐渐降低,排水速率也逐渐变小,导致单位耗能量慢慢变大,说明电渗排水速率与作用于土体的有效

电势成正比, 而单位耗能量与有效电势成反比。从图 7、8 中可以知道, 阳(阴)极的接触电阻是在不断增加的, 试验 B 的阳极、阴极接触电阻始终比 A 小, 说明减小电极距可以降低阳(阴)极的接触电阻, 进而能更多的输入电压转化为有效电势。阳(阴)极接触电阻与很多因素有关, 如阳(阴)极的材料、电极的腐蚀情况、土壤的性质等。

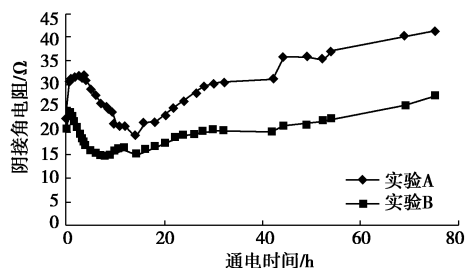


图 8 阴极接触电阻

Fig. 8 Cathode contact resistance

2.4 电渗后的土体和电极

电渗后土体含水率的降低则能很好的说明减小电极间距对试验效率的提升。试验结束后, 分别测得两组试验阳极、阴极和两极之间(测针 2 和 3 之间)土体的含水率, 如表 2 所示。

表 2 试验后土体含水率

Table 2 Water content of soils after experiment

取土位置	阳极/%	两极之间/%	阴极/%
A 含水率	16.7	18.6	26.5
B 含水率	16.1	18.0	24.7

从表 2 可以看出, 经电渗排水后含水率显著降低, 阳极处含水率降低的最大, 由于阴极滞留未及时排出的水分, 所以越靠近阴极含水率越大。电渗试验过程中, A 的阳极附近土体在 10 h 时出现竖向裂缝, 试验结束时, 裂缝宽度约为 2 mm, 长度为 4 cm, 试验 B 在通电 6 h 后, 阳极附近土体开始出现斜向裂缝, 试验完后, 缝宽约为 7 mm, 裂缝深度约为 6 cm。两组阳极表面有红褐色锈迹, 为电渗中土体产生三价铁离子所致, 阴极均未发现有腐蚀现象, 阴极附近产生了一条竖线裂缝, 这主要是渗流导致的裂缝。在两组试验中, 阳极区域土体均有明显沉降, 阳极附近土体坚硬, 阳极与土体紧紧黏连在一起。

3 结 论

(1) 采用室内模型试验研究了相同电压作用下电极距对电渗的影响, 从电渗排水量、排水速率、电流、能量消耗、有效电势、阳(阴)极接触电阻及土体含水率等多方面进行了对比, 证实了减小电极距可以提高电渗效率及效果;

(2) 相同电压作用下, 减小电极距在一定时间内能够加快电渗排水速率, 对提高土体电渗效果有显著的作用;

(3) 电渗排水速率与作用于土体的有效电势成正比, 而单位耗能量与有效电势成反比, 较小的电极距可以降低阳(阴)极接触电阻, 减小电势损失, 从而增大了作用于土体上的有效电势;

(4) 对比两组试验, 较小电极距的试验 B 在 75 h 后排水效果稍优于 A, 但在最佳电渗时长(本试验为 12 h)效率明显高于 A。因此, 减小电极距在一定的时间内才能提升试验的效果, 长时间的电渗效果不突出。

(5) 减小电极距能够提高电渗处理效率, 但会增加电能的消耗成本, 实际工程应用中应力求电渗处理效率和电渗成本之间的平衡。

参考文献:

- [1] 李 瑛, 龚晓南, 焦 丹. 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 Xiao-nan, JIAO Dan. Experimental study on two-dimensional electro-osmotic consolidation of soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 4034 - 4039. (in Chinese))
- [2] 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(增刊 1): 3208 - 3215. (JIAO Dan, GONG Xiao-nan, LI Ying. Experimental study of consolidation of soft clay using electro-osmotic method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3208 - 3215. (in Chinese))
- [3] 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, 29(2): 95 - 99. (WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie. Experimental research onelectro-osmotic consolidation of lacustrine clay[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2): 95 - 99. (in Chinese))
- [4] CASAGRANDE L. Electro-osmotic stabilization of soils[J]. Journal of the Boston Society of Civil Engineerings, 1952, 39: 51 - 83.
- [5] BURNOTTE F, LEFEBVRE G, GRONDIN G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1038 - 1053.
- [6] PACZKOWSKA B. Electroosmotic introduction of methacrylate polycations to dehydrate clayey soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(3): 780 - 786.
- [7] 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 Ying-guang, XU Min, ZHU Zhong-wei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2006, **34**(11): 70 - 75. (inChinese))
- [8] 高志义, 张美燕, 张 健. 真空预压联合电渗法室内模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2000(5): 58 - 61. (GAO Zhi-yi, ZHANG Mei-yan, ZHANG Jian. Laboratory model test of vacuum preload in combination with electro-osmotic method[J]. China Harbour Engineering, 2000(5): 58 - 61. (in Chinese))
- [9] 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 Feng-song, LIU Yun-dong. Application of combined weak soil improvement technology of vacuum preloading-dewatering by electro-osmosis-low energydynamic compaction to improve soft soils[J]. ChinaHarbour Engineering, 2008, **157**(7): 43 - 47. (in Chinese))
- [10] 崔红军, 吕小林, 王孝明. 湖积软土地基的处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(17): 2998 - 3002. (CUI Hong-jun, LU Xiao-lin, WANG Xiao-ming. Reinforcement method of lacustrine soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(17): 2998 - 3002. (in Chinese))
- [11] 庄艳峰, 王 钊, 林 清. 电渗的能级梯度理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(2): 283 - 286. (ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao, LIN Qing. Energy level gradient theory for electro-osmotic consolidation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, **37**(2): 283 - 286. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)