

基于杭州软土的电渗迁移过程试验研究

陶燕丽^{1,2,3}, 周建², 龚晓南², 祝行¹

1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 浙江 杭州, 310023;
2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州, 310058;
3. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州, 310058)

摘要: 为研究电渗迁移过程, 进一步揭示电渗机理, 基于杭州软土和自制电渗模型箱, 分别采用铁和石墨电极开展室内电渗试验, 监测重力排水、电渗排水以及电渗前后土壤中多种金属元素含量的变化; 监测电流和排水量数据并据此计算电渗运移量。研究表明: 在电渗排水过程中, 钠离子和钾离子质量浓度比重力排水过程中的大得多, 镁离子和钙离子质量浓度则比重力排水过程中的小得多, 说明电渗法依赖双电层中低阶、小原子量反离子对水分的转移作用, 土壤本身物理力学性质对电渗过程的影响主要通过双电层体现。电渗运移量对土壤含水率的敏感性与土壤类型密切相关, 而对同一类土壤, 其敏感性也可能会随着含水率范围的不同而呈现较大差异。在 1.58 V/cm 的电势梯度下, 杭州软土电渗处理后的最终含水率为 35%左右, 说明对于含水率小于 35%的杭州软土, 电渗法效果不明显, 不推荐采用电渗法进行处理。

关键词: 杭州软土, 重力排水; 电渗排水; 离子迁移; 电渗运移量; 含水率

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)02-0448-06

Experimental study on transport process of electro-osmosis based on Hangzhou soft soil

TAO Yanli^{1,2,3}, ZHOU Jian², GONG Xiaonan², ZHU Hang¹

1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To study transport process of electro-osmosis and reveal electro-osmotic mechanism, laboratory electro-osmotic tests were conducted using a self-made model box and Hangzhou soft soil, with ferrum and graphite being the electrode materials. Mass concentrations of selected elements in the electro-osmotic drainage, gravity drainage as well as soil mass were monitored. Current and electro-osmotic dewatering were also monitored during the experiments to calculate electro-osmotic water transport per unit charge. The results show that mass concentrations of Na and K ions are much higher in electro-osmotic drainage than those in gravity drainage, while opposite results are obtained for Mg

收稿日期: 2017-03-25; 修回日期: 2017-05-28

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41427802, 41572299, 51478425, 41602308, 51708507); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ17E090001, LZ13D020001, LQ13D020001); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-1080); 浙江省“新世纪 151 人才工程”资助项目(12-1-076); 浙江省交通规划设计研究院资助项目(2013W03); 软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学)开放基金资助项目(2016P01); 浙江科技学院人才建设经费资助项目(F701104F05)(Projects(41427802, 41572299, 51478425, 41602308, 51708507) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects(LQ17E090001, LZ13D020001, LQ13D020001) supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province; Project(NCET-11-1080) supported by the Program for New Century Excellent Talents in University; Project(12-1-076) supported by the “Program for 151 New Century Excellent Talents” in Zhejiang Province; Project(2013W03) supported by the Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research; Project(2016P01) supported by the Open Fund of MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering; Project(F701104F05) supported by the Scientific Research Staring Foundation of Zhejiang University of Science and Technology)

通信作者: 周建, 博士, 教授, 从事软黏土力学及地基处理等研究; E-mail: zjelim@zju.edu.cn

and Ca ions, which indicates that electro-osmosis technique has a dependency on the transferring of water by counters of low order and small atomic mass. Double layer constitutes the primary reflection of the influence of soil physical and mechanical properties on electro-osmotic process. Sensitivity of the electro-osmotic water transport per unit charge to water content is closely related to the soil type, while for a given type of soil, this sensitivity may differ for varied range of water content. Under the potential of 1.58 V/cm, the ultimate water content of the deposited Hangzhou soft soil is 35%, indicating that the electro-osmosis technique is ineffective for Hangzhou clay with water content below 35%. It is thus not recommended to adopt the above technique to dispose Hangzhou clay with water content lower than 35%.

Key words: Hangzhou soft soil; gravity drainage; electro-osmotic drainage; ion migration; electro-osmotic water transport per unit charge; water content

电渗法是通过在插入土体的电极上施加低压直流电, 使得土体渗透排水、加速固结的一种地基处理方法^[1-2]。电渗法中排水速率与土颗粒粒径无关, 相对传统的地基处理方法, 对于渗透性较小的软土地基可在短时间内达到较好的处理效果, 因此, 电渗法曾一度引起人们的广泛关注和研究, 但其至今仍未得到推广应用。分析其原因, 可能是对电渗加固机理研究不够深入, 导致该方法耗能较高, 实践效果不理想^[3]。关于电渗机理, 目前公认的观点是: 离子在电场作用下拖拽周围水分子定向移动, 黏土颗粒负电性使得双电层中阳离子占多数, 这就意味着黏土中阳离子转移的水分子比阴离子要多, 宏观上表现为在阳离子迁移方向产生净渗流, 即电渗^[4-5]。不同土壤类型含有不同的离子成分, 不同离子的迁移过程和对水分子的拖拽能力也可能千差万别^[6], 这些都会对电渗效果产生较大影响, 也意味着应用电渗法时应根据场地土壤类型因地制宜, 区别对待。因此, 有必要对电渗中离子的迁移过程并进而对电渗机理展开深入研究, 但目前这方面的文献报道较少。GRAY 等^[4]指出电渗运移量(即单位电荷移动时所转移水的体积)是决定电渗效率和经济成本以及电渗适宜性评价的关键因素, 并通过室内试验和已有文献成果的分析总结得到不同土壤类型和电解质浓度下电渗运移量与含水量的关系曲线, 进而提出可根据土壤含水量、离子交换力和孔隙水电解质浓度开展电渗适宜性评价。LOCKHART^[7]分别采用铝质黏土和钠质黏土在不同电源电压下开展电渗试验, 结果表明黏土颗粒对高阶阳离子的约束更强, 也就是说电渗中高阶阳离子的迁移能力较弱。SHANG^[8]通过室内试验监测了电渗排水中离子成分的变化, 发现电渗后 Na^+ , K^+ 和 Ca^{2+} 的浓度明显升高, SO_4^{2-} 和 Cl^- 的浓度降低, 其试验结果进一步证实了上述电渗中离子的定向移动规律。王协群等^[9]监测了电渗处理前后排出的水中 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, Ca^{2+} , SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 的含量变化, 其结果表明电渗处理后阴极排水中各种金属离子的浓度均比处理前的高。TUAN 等^[10]监测了电渗中

Na^+ 和 K^+ 浓度变化, 发现在电渗初期二者浓度不断上升, 到达峰值后下降直至试验终止。WU 等^[11]通过试验发现电渗后采用铜电极时的阳极土壤中的铜元素质量浓度和采用铁电极时铁元素质量浓度均比电渗前的显著提高。WU 等^[6]指出 Na^+ 迁移是电渗排水的主要原因。前期研究^[12-13]表明, 不同电极材料的电渗效果会因采用土样的不同而存在差异, 这是不同的土样矿物成分或离子组分不同所造成的, 但其具体影响过程及作用机理还有待进一步研究。以上研究表明, 人们对电渗中离子迁移过程的研究还不够深入。为此, 本文作者分别采用金属电极(铁)和惰性电极(石墨)开展室内电渗试验, 研究电渗中多种金属离子的迁移过程, 以期进一步揭示电渗机理, 为不同类型土壤的电渗适用性评价和设计施工提供参考。

1 试验方案

1.1 试验装置

图 1 所示为试验装置图。试验模型箱主要由试样槽和集水槽组成。试样槽用于装载土样, 其长×宽×高分别为 190 mm×100 mm×100 mm, 集水槽底部中央有 1 个小孔, 汇聚在阴极的水通过该孔流到下面烧杯中, 称烧杯质量即可得到排水量随时间的变化情况。其他试验装置还有: 稳压直流电源 GW SPD-3606; 电感耦合等离子质谱仪(Agilent 7500a 型, 美国安捷伦公司生产, 相对标准偏差小于 5%), 用于测量土壤和排水中金属元素的质量浓度(g/L)及质量分数(g/kg), 其中土壤需用标定溶液稀释后测量; 电极板(厚度为 3 mm, 长×宽分别为 100 mm×98 mm), 用作电势的导体; 土工布, 用于过滤阴极排水。

试验土样取自杭州董家路某一基坑工程, 为典型杭州地区淤泥质黏土。原状土的基本物理力学性质如表 1 所示。将原状土与水充分拌合, 制成试验所需含水量约为 100%的饱和重塑土样。

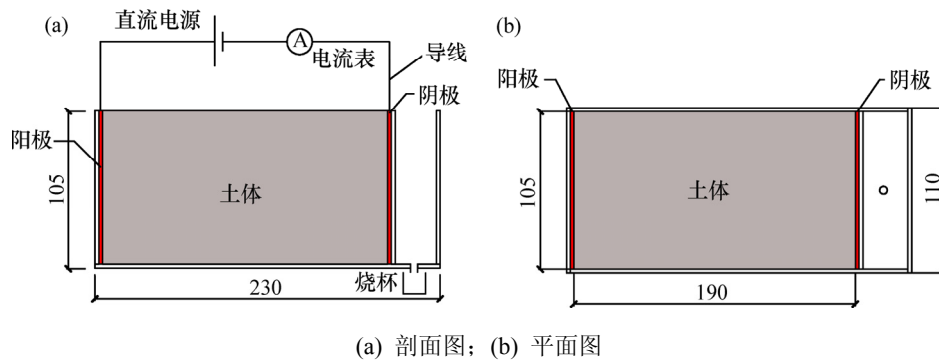


图 1 试验装置图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagrams of testing cell

表 1 原状土的基本物理参数

Table 1 Physical parameters of original soil

含水率 $w/\%$	土粒相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	颗粒质量分数/ $\%$		
					砂粒	粉粒	黏粒
58.3	2.75	1.76	45.4	24.0	7	32	61

1.2 试验设计

本试验采用稳压输出模式, 电源、电压参考文献[6-14], 取值为 30 V(电势梯度为 1.58 V/cm)。为确定合理的通电时间, 本文作者开展了预试验, 发现通电 26~29 h 时每小时排水量低于总排水量的 3%, 故设置本试验通电时间为 29 h。另外, 为从离子迁移角度比较金属电极和惰性电极电渗过程的差异并验证本试验规律的可重复性, 分别采用铁板(金属电极)和石墨板(惰性电极)作为电极材料开展 2 组电渗试验。

试验时, 先取适量原状土和水用电动搅拌机充分搅拌均匀, 制成重塑土样, 连接导线、电流表、电源和电极, 在阴极包裹土工布, 并且将两电极适当润湿后放入模型箱两端, 然后分层装填土样以消除土样中的气泡。将已装填好的模型箱静置 24 h, 让土样在自重下排水。24 h 后, 调节电源输出至 30 V, 接通电路。此时称空烧杯质量后将其置于集水槽出水口下, 之后每隔 1 h 读取电流表读数并称量烧杯总质量, 每隔一定时间从烧杯中取适量水进行元素质量浓度测试。通电 29 h 后, 停止试验, 断开电源, 分别在阴极和阳极附近取适量土壤烘干后进行元素质量浓度测试。另外, 还设置 1 组控制试验, 其中土体仅在重力作用下排水, 收集重力排水, 并对其中的元素质量浓度进行测试。

2 试验结果及分析

土壤中常见的金属阳离子有 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ,

$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, Al^{3+} 和 Cu^{2+} , 测量排水和土壤中这些元素的质量浓度变化, 而元素质量浓度的变化即为离子迁移的结果, 据此可分析相应离子在电渗过程中的迁移规律, 从而进一步揭示电渗机理。

2.1 电渗排水与重力排水

为揭示电渗法和传统地基处理方法所能转移的土壤水类型, 又因试验中 2 种电极材料各时刻的元素质量浓度在数量级上呈现出较好的一致性, 故选取石墨电极通电 6 h 时测得的电渗排水中各元素质量浓度与重力排水中的进行比较, 如图 2 所示。从图 2 可以看出: 电渗排水中 Na 和 K 质量浓度比重力排水中的大, 其中前者的 Na 质量浓度为后者的 7.3 倍, 而电渗排水中的 Mg 和 Ca 质量浓度与重力排水中的相比小 3 个数量级; 对于 Fe, Al 以及 Cu, 在电渗和重力排水中三者的质量浓度均很少。可见, 电渗排水和重力排水中各离子质量浓度差异较大, 电渗排水中 Na^+ 和 K^+ 质量浓度比重力排水的大得多, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 质量浓度则比重力排水的小得多, 但整体来看, 电渗排水中总阳离子质量浓度比重力排水的要高。

上述试验结果可用黏土的双电层结构解释。黏土颗粒的负电性使得极性水分子和反离子(如 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等)吸附在其周围并定向排列, 形成双电层结构; 越靠近土颗粒表面, 水分子和反离子(阳离子)排列得越紧密和整齐, 活动性也越小^[2], 使得强结合水和弱结合水中的反离子浓度比重力水以及毛细水中的要高。重力式排水只能排出土壤中的重力水和少量

毛细水, 无法排出结合水, 因而其离子质量浓度较低。在电渗过程中, 电场作用打破了双电层的既有平衡, 使得反离子发生重分布运动, 并拖拽周围的水分子产生定向迁移, 因而电渗排水中势必存在较多的反离子。

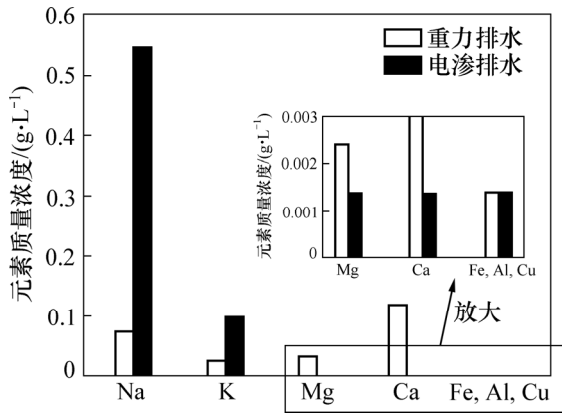


图 2 排出的水中各元素质量浓度

Fig. 2 Mass concentration of elements in the dewatering

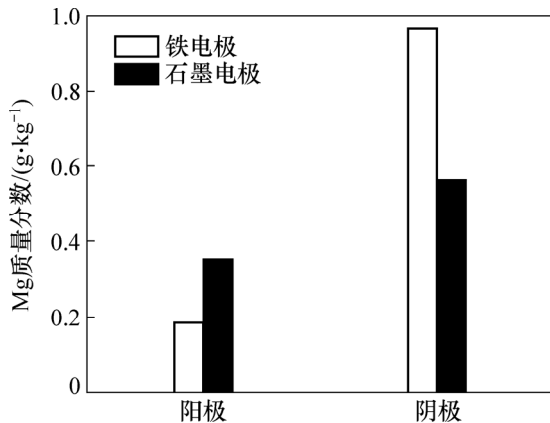


图 3 电渗后土壤中 Mg 质量分数

Fig. 3 Mass fraction of Mg in the soil after electro-osmosis

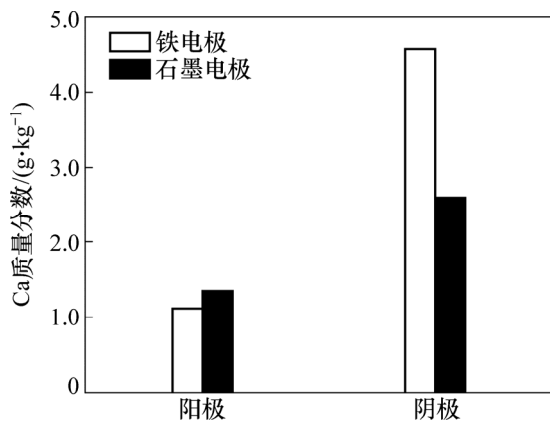


图 4 电渗后土壤中 Ca 质量分数

Fig. 4 Mass fraction of Ca in the soil after electro-osmosis

这些试验结果从微观离子迁移角度有力地验证了电渗机理, 即电渗法依赖双电层中反离子对水分的转移作用。

另外还需指出的是, 双电层中阳离子原子阶和原子量越高, 它与土颗粒之间的静电引力越强, 就越不易移动, 因而阶数较低、原子量较小的离子迁移能力较强。程程^[15]的研究结果表明黄棕壤胶体表面电导率随阳离子的变化由大至小为单价离子、二价离子、三价离子(Cu²⁺除外)。本文试验结果也显示, 电渗排水中 Na⁺和 K⁺质量浓度大幅度增加。图 3~4 所示分别为电渗试验后土壤中 Mg 和 Ca 的质量分数。从图 3~4 可以看出: 铁和石墨阴极附近土壤中 Mg 质量分数分别是阳极的 5.2 和 1.6 倍, 相应 Ca 的质量分数分别为阳极的 4.1 和 1.9 倍。不管是在电渗排水还是阴极附近土壤中其他元素(如 Fe, Cu 和 Al)含量并未显著增加, 这说明对于杭州软土, 电渗排水主要依赖于 Na⁺, K⁺, Mg²⁺和 Ca²⁺等离子, 尤其是 Na⁺和 K⁺, 而 Fe³⁺/Fe²⁺, Cu²⁺和 Al³⁺迁移能力较弱, 对电渗效果贡献较小。由此可见, 低阶、小原子量离子带动水分子的迁移是决定电渗法效果的关键。

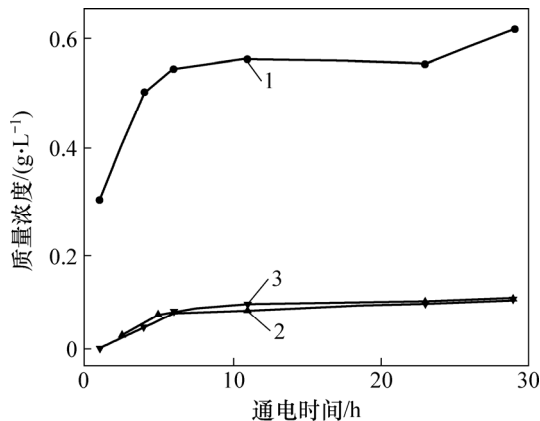
关于 Mg²⁺和 Ca²⁺的试验结果, 是因为阴极反应形成的碱性环境使得其生成沉淀滞留在阴极, 无法随水排出, 这一点从图 3~4 也可以看出, 即阴极附近土壤的 Mg 和 Ca 的质量分数均比阳极附近的高。

2.2 电渗运移能力

由前述分析可知, 电渗排水主要依赖于 Na⁺和 K⁺等低阶、小原子量离子带动水分子迁移。为研究电渗中离子对水分的运移能力, 测量电渗排水中 Na 和 K 元素质量浓度随时间的变化, 如图 5 所示。其中铁电极部分 Na 质量浓度太高, 超出仪器的最大限值(800 g/L), 故只作超限说明, 并未标示。从图 5 可以看出: 在初始阶段, Na 和 K 质量浓度迅速上升, 之后基本维持在恒定值, 最后略有上升。Na 和 K 质量浓度初始迅速增加是因为排出的水中残留有部分重力排水, 之后维持恒定则表明电渗排水中 Na⁺和 K⁺质量浓度基本不变, 也就意味着单位离子转移的水分子数相当, 电渗后期 Na⁺和 K⁺对水分的运移能力减弱, 但减弱并不显著。

由此可见, 电渗过程中 Na⁺和 K⁺对水分的迁移能力变化较小, 但这仅是基于单个离子的分析结果, 不能完全代表总的电渗运移情况。电渗运移量是单位电荷移动时所转移水的体积, 反映电渗过程中总的电渗运移情况, 宏观上表现为排水速率与电流的比值。图 6 所示为排水速率随电流的变化情况, 其中各点纵、横坐标的比值即为电渗运移量。由图 6 可知: 试验前

中段($t < 17$ h), 排水速率随电流呈线性变化(图中也给出了拟合直线, 其斜率 k 约为 $0.42 \text{ mL}/(\text{mA}\cdot\text{h})$), 后半段($t \geq 17$ h)排水速率迅速下降。排水量的试验结果表明前半段铁和石墨电极排水占总量分别为 85.2%和 81.9%, 也就是说, 在电渗效果最为显著的前半段, 土体中的水不断被排出, 而其电渗运移量并未随之发生较大变化, 反而在电渗效率较低的后半段电渗运移量下降显著。



1—石墨电极, Na; 2—铁电极, K; 3—石墨电极, K。

图 5 电渗排水中 Na 和 K 质量浓度变化

Fig. 5 Variations of Na and K mass concentration in electro-osmotic drainage

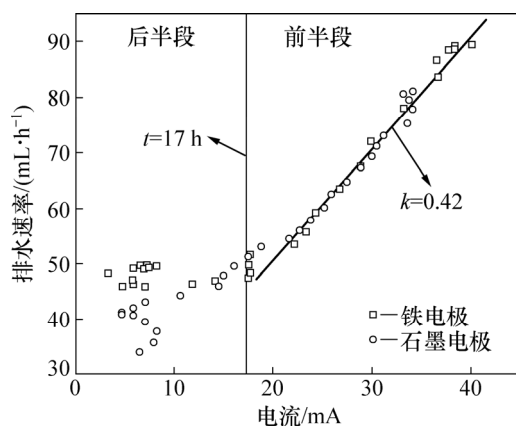


图 6 排水速率随电流的变化

Fig. 6 Variations of drainage rate with current

不管是单个离子还是总的电渗运移量的分析结果均表明, 在排水效率和含水率较高的电渗主体阶段, 单个电荷对水分的转移能力变化不大, 而排水速率和含水率较低的后半段电渗运移量显著下降。

3 讨论

比较电渗排水和重力排水中离子浓度可知电渗法

依赖于扩散层中反离子对水分的转移作用, 而反离子存在于双电层中, 因此, 可认为对于特定土壤, 其双电层结构是决定电渗法效率和最终效果的本质因素, 土壤本身工程性质对电渗过程的影响也是通过双电层结构体现。例如土壤 pH 的降低会导致电动电位绝对值减小^[17], 意味着扩散层厚度减少, 因而, 低 pH 环境不利于电渗开展。再如黏土矿物类型, 3 种常见黏土矿物阳离子交换容量(表示黏土矿物带电性)排序由大至小依次为蒙脱石、伊利石、高岭石, 蒙脱石所带负电荷最多, 吸附较多阳离子, 双电层中阳离子浓度最大, 因而, 蒙脱土电渗运移量最小。

另外, 在排水效果最为明显的试验前期, 土体含水率较高, 随着电渗的开展, 土体含水率势必不断减少, 其电渗运移量变化较小; 而在试验后期, 土体含水率较低, 排水量也很少, 电渗运移量显著下降。分析其原因, 可能是在不同含水率范围下, 杭州软土电渗运移量对含水率变化的敏感性存在差异。在本试验前期土体含水率下, 电渗运移量对含水率的变化不太敏感, 而当含水率小于某一限值时, 电渗运移量会因含水率的降低而大幅度减少。GRAY 等^[4]还发现电渗运移量对含水率变化的敏感性会因土壤类型的不同而不同, 例如对于同样的含水率增量, 伊利黏土的电渗运移量增幅要比蒙脱土的大得多。由此可见, 电渗运移量对土壤含水率变化的敏感性与土壤类型密切相关, 对同一类土壤, 其敏感性也可能随着含水率范围的不同而呈现较大差异。

图 7 所示为软黏土的导电机理^[17]。采用土壤的导电机理可解释电渗运移量与含水率之间的关系。FRIEDMAN^[17]提出软黏土的导电路径主要有 3 种(见图 7): 固-液串联而成(途径 1)、孔隙水(途径 2)以及土颗粒(途径 3)。在电渗初期, 土体含水率较高, 处于饱和状态或接近饱和状态, 主要通过途径 2 传递电荷, 水分相对移动电荷是充足的, 即各移动电荷都能物尽其用; 而随着排水量增大, 土体含水率不断下降,

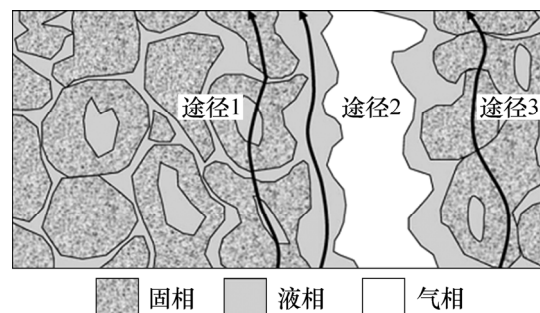


图 7 软黏土的导电机理^[17]

Fig. 7 Conducting mechanism of soft clays

电荷逐渐依赖土-水体系共同传递(途径 1), 其携带水分的能力下降, 导致通电后期电渗运移量降低。不同土壤类型中途径 2 与途径 1 的分界含水率不一致。本文试验结果表明: 在 1.58 V/cm 的电势梯度下, 电渗后土体平均含水率约为 35%。在此含水率下, 杭州黏土由途径 2 转为途径 1 导电, 继续通电时土体几乎不再有水排出, 电渗运移量较低。因此, 可认为杭州软土的分界含水率约为 35%。而对于含水率小于 35% 的杭州黏土, 不宜采用电渗法进行处理。

4 结论

1) 电渗排水中各元素质量浓度远比重力排水中各元素质量浓度高, 说明电渗排水依赖扩散层中反离子(主要为低阶、小原子量离子)对水分的转移作用, 双电层结构是决定电渗法效率和最终效果的本质因素, 土壤本身工程性质对电渗过程的影响也是通过双电层结构体现的。

2) 在一定含水率范围内, 杭州黏土电渗运移量对含水率的变化并不敏感。电渗运移量对土壤含水率变化的敏感性与土壤类型以及含水率范围密切相关。

3) 在 1.58 V/cm 的电势梯度下, 杭州软土电渗处理后的最终含水率为 35% 左右, 说明当杭州黏土含水率小于 35% 时, 电渗法几乎没有效果。对于含水率小于 35% 的杭州黏土不宜采用电渗法进行处理。

参考文献:

- [1] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997: 265-267.
- [2] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 9-10. GONG Xiaonan. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 9-10.
- [3] SHANG J Q, LO K Y. Electrokinetic dewatering of a phosphate clay[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 55(1/2/3): 117-133.
- [4] GRAY D H, MITCHELL J K. Fundamental aspects of electro-osmosis in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1967, 93(6): 209-236.
- [5] PENG Jie, YE Hanming, ALSHAWABKEH A N. Soil improvement by electroosmotic grouting of saline solutions with vacuum drainage at the cathode[J]. Applied Clay Science, 2015, 114: 53-60.
- [6] WU Hui, HU Liming, ZHANG Lin, et al. Transport and exchange behavior of ions in bentonite during electro-osmotic consolidation[J]. Clays & Clay Minerals, 2015, 63(5): 395-403.
- [7] LOCKHART N C. Electroosmotic dewatering of clays, III. Influence of clay type, exchangeable cations, and electrode materials[J]. Colloids and Surfaces, 1983, 6(3): 253-269.
- [8] SHANG J Q. Electrokinetic dewatering of clay slurries as engineering soil covers[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(1): 78-86.
- [9] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相软粘土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2): 95-99. WANG Xiequn, ZOU Weilie. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2): 95-99.
- [10] TUAN P A, SILLANPÄÄ M. Migration of ions and organic matter during electro-dewatering of anaerobic sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/3): 54-61.
- [11] WU Hui, HU Liming. Microfabric change of electro-osmotic stabilized bentonite[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 503-509.
- [12] 陶燕丽, 周建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 388-394. TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, et al. Comparative experiment study of the influence of Ferrum and Cuprum electrode on electroosmosis effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 388-394.
- [13] 陶燕丽, 周建, 龚晓南. 电极材料对电渗过程作用机理的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(9): 1618-1623. TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Experimental study on the function mechanism of electrode materials upon electro-osmotic process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(9): 1618-1623.
- [14] 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): 709-714. 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): 709-714.
- [15] 程程. 土壤胶体的双电层结构及其影响因素[D]. 南京: 南京农业大学资源与环境科学学院, 2009: 23-27. CHENG Cheng. The structure of electrical double layers of soil colloidal particles and its influencing factors[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University. College of Resources and Environmental Sciences, 2009: 23-27.
- [16] CORWIN D L, LESH S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1/2/3): 11-43.
- [17] FRIEDMAN S P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1/2/3): 45-70.