

电渗作用下工程废泥加固效率试验研究

陶燕丽, 于泽一, 朱剑锋, 龚晓南, 周建, 李凯强

Experimental study of the strengthening efficiency of engineering waste sludge using electro-osmosis

TAO Yanli, YU Zeyi, ZHU Jianfeng, GONG Xiaonan, ZHOU Jian, and LI Kaiqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高岭土电渗固结特性及数值模拟研究

A study of the kaolin electro-osmotic consolidation characteristics and their numerical simulation

沈美兰, 周太全, 李吴刚 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 78-85

低含水率盾构泥浆的真空电渗联合泥水分离技术试验研究

§{suggestArticle.titleEn}

金志伟, 阎长虹, 李良伟, 杨晓勇, 温亮, 范旭阳 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 103-110

基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74

砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究

A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology

程瑾, 曹凯, 吴玉涛, 金亚伟, 张勇, 张珍, 高天宇, 王小东 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 125-134

云母影响水泥软黏土强度的试验研究

Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay

张亚玲, 赵晓彦, 严群 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 101-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311003

陶燕丽, 于泽一, 朱剑锋, 等. 电渗作用下工程废泥加固效率试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 141-148.

TAO Yanli, YU Zeyi, ZHU Jianfeng, et al. Experimental study of the strengthening efficiency of engineering waste sludge using electro-osmosis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 141-148.

电渗作用下工程废泥加固效率试验研究

陶燕丽¹, 于泽一¹, 朱剑锋¹, 龚晓南², 周建², 李凯强¹

(1. 浙江科技大学土木工程系, 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)

摘要: 目前城市化进程的加剧产生了大量的工程废泥, 亟需进行适当处理, 而传统的处理方式脱水效果难以达到预期目标。电渗法由于在软基处理和污泥加固方面拥有很大的发展潜力而受到广泛关注, 因此国内外专家针对快速脱水、降低初始含水率等方面开展相关研究, 但对电渗效率的认识存在不足。文章基于杭州某工程废泥, 分别采用金属电极和惰性电极, 在不同电源电压下开展试验研究, 从总能耗、有效能耗和电极损耗 3 个方面对电渗加固效率进行探讨, 根据试验结果和电渗理论模型对有效能耗系数与有效电压的关系进行了分析。结果表明: 总能耗和有效能耗随电压增大而增大, 且电压越大, 总能耗和有效能耗的增加幅度也越大; 总电渗效率和有效电渗效率随电源电压增大而降低; 电极材料类型对总电渗效率影响较小, 对有效电渗效率的影响通过有效电压间接实现, 这是因为阳极板存在不同程度的损耗, 降低了有效电渗效率; 有效能耗系数与有效电压之间近似线性相关; 低电压阻碍电渗效果的发挥, 高电压不利于电渗效率的发展, 实际工程中, 应综合考虑电渗效果和效率选取适当电源电压值。基于试验结果可以有效减少电渗能耗, 为电渗技术在实际工程的进一步推广应用提供科学依据。

关键词: 电渗法; 电压; 铁电极; 碳电极; 电渗效率

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0141-08

Experimental study of the strengthening efficiency of engineering waste sludge using electro-osmosis

TAO Yanli¹, YU Zeyi¹, ZHU Jianfeng¹, GONG Xiaonan², ZHOU Jian², LI Kaiqiang¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang

310023, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University,

Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The intensification of urbanization has resulted in a significant increase in the generation of engineering waste sludge. Traditional treatment methods on engineering waste sludge often fail to achieve desired dewatering targets. Electroosmosis has garnered considerable attention for its substantial potential in soft ground treatment and sludge consolidation. Consequently, both domestic and international experts have studied rapid dewatering and reducing initial moisture content. However, there is still an incomplete understanding regarding the efficiency of electroosmosis. A series of experiments were performed under different potentials with Hangzhou engineering

收稿日期: 2023-11-02; 修订日期: 2024-03-27

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078455; 52378378); 浙江省自然科学基金项目(LTGS23E080002; LGG22E090002); 浙江科技学院基础科研专项基金项目(2023JLZD0003); ZUST 研究生教学改革计划(2022yjsjg02)

第一作者: 陶燕丽(1989—), 女, 博士, 副教授, 主要从事地基处理及环境岩土工程研究。E-mail: tmgctyl@163.com

waste sludge, using ferrum and graphite electrodes. Electro-osmotic efficiency was analyzed in terms of total energy consumption, effective energy consumption, and electrode loss. The relationship between the effective energy coefficient and effective potential was explored based on the experimental results and theoretical models. It was found that total and effective energy consumptions increase with the potential. The rates of increase are larger with higher potentials. Total and effective electro-osmotic efficiency decreases with the increasing potentials. Electrode materials possess little influence on the electro-osmotic efficiency, but have indirect impact through effective potential due to the anode material loss. A linear relationship was obtained between the effective energy coefficient and effective potential. Low voltage is a disadvantage to the electro-osmotic effect, while high voltage is a disadvantage to electro-osmotic efficiency. Therefore, both the electro-osmotic effect and efficiency should be considered when determining the optimal voltage value in practice. The experimental results on the significant reduction of the energy consumption of electroosmosis can provide a scientific basis for the further promotion and application of electroosmotic technology in practical engineering projects.

Keywords: electro-osmosis; potential; ferrum electrode; graphite electrode; electro-osmotic efficiency

随着我国城市化进程的加快和建筑行业的飞速发展,工程施工产生的废泥量呈现快速增长趋势。据不完全统计,我国每年废弃淤泥高达 3 亿 m^3 以上^[1],且预计年增长率为 10%。工程废泥具有含水率高、渗透性低、强度低、压缩性高等特点,且往往含有重金属、有机质等有毒有害物质,亟需进行合理处置。传统废泥处置方法主要有抛泥和填埋,存在污染环境、占用大量土地、耗时长、成本高等系列问题^[2],严重违背了“绿色低碳发展”战略目标,目前已逐渐被舍弃,新型、环保、高效的工程废泥处理技术成为当下研究新方向。

1809 年,俄国学者 Reuss 在实验室发现电渗现象^[3],其后各国学者陆续对电渗现象开展研究,并探索将之应用于地基加固^[4]、堤坝稳定^[5]、边坡加固^[6]、污泥脱水与修复^[7-8]等诸多领域,并发展了一种新的方法,即电渗法。电渗法是通过在插入土体中的电极上施加直流电,使得土体加速排水的一种方法,其排水速率与土颗粒尺寸无关,尤其适用于处理高含水率、低渗透性软土,被广泛研究用于淤泥减水处理,具有良好应用效果,是具有巨大潜力和工程实用价值的工程废泥加固技术^[9]。

已有学者从理论研究、数值模拟、模型试验和现场试验等方面对电渗法开展了大量研究,但多集中于对电渗效果的探讨,如排水量或排水速率、电流和电势分布、土体孔压和沉降发展及抗剪强度变化等^[9-11],此外,一些学者也对电渗效率开展了相关研究,李瑛等^[12]采用一维电渗固结仪对电压影响电渗过程进行了试验研究,结果表明电压越大排水量越大,但相应单位体积排水量的能耗也增大。陈明华^[13]对不同电

势梯度、电极材料和不同含水率软土的电渗效率开展了试验研究,指出电渗效率降低主要因为电渗过程中阳极周围土体产生开裂,并提出采用抑制土体开裂、增强电极与土体接触的方法提高电渗效率。以上学者均采用单位排水量能耗表征电渗效率,而实际上,电渗过程中有很大一部分能耗损失在电极与土体接触处^[10-11],如何考虑这部分能耗损失进而研究电渗过程中有效电渗能耗的变化特性对于电渗规律的揭示具有重要意义,这也是本文的主要研究内容之一。

为了全面揭示电渗过程中工程废泥加固效率的变化特性,并从电渗效率角度为电源电压的选择提供理论依据,本文在不同电源电压下,采用铁和碳电极对电渗过程中电渗效率的变化开展试验研究,从总能耗、有效能耗和电极损耗 3 个方面对试验结果进行探讨,分别基于试验结果和已有电渗理论模型对有效能耗系数与有效电压的关系进行分析,以期对电渗法的实际工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土样取自杭州市某基坑工程,其基本工程性质如表 1 所示。为了模拟工程废泥的加固过程,将原状土与适量水拌合,用电动搅拌机充分振动搅拌,制成一定含水率的饱和和重塑土样。

1.2 试验装置

试验主体装置由试验模型箱、直流电源、电流表以及电压表组成(图 1)。模型箱由有机玻璃制成,尺寸为 230 mm×110 mm×105 mm,分为主箱和辅箱,主箱用来装载试验土体,辅箱用来收集试验排出的水。直

表 1 原状土样基本工程指标
Table 1 Engineering parameters of the original soil

土样	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	比重	孔隙比	液限/%	塑限/%	压缩系数/MPa ⁻¹	颗粒组成/%		
								砂粒	粉粒	黏粒
淤泥	1.58	58.3	2.75	1.76	45.4	24.0	1.55	7	32	61

流电源采用 GW SPD-3606 型电源, 用来提供稳压直流电。电流表串联于电路中, 用以测量线路中的电流, 据此可计算各试验的电渗能耗。电压表并联于电路中, 用来量测土体两端有效电压; 试验中, 取距离阴阳极板 5 mm 处的电压差值作为有效电压^[12, 14]。其它试验装置有: 烧杯, 放置于辅箱所设小孔之下, 收集电渗排水作为排水量量测依据; 电极板, 分为阳极板和阴极板, 尺寸均为 100 mm×100 mm, 阴极板上设有若干小孔, 易于排水。

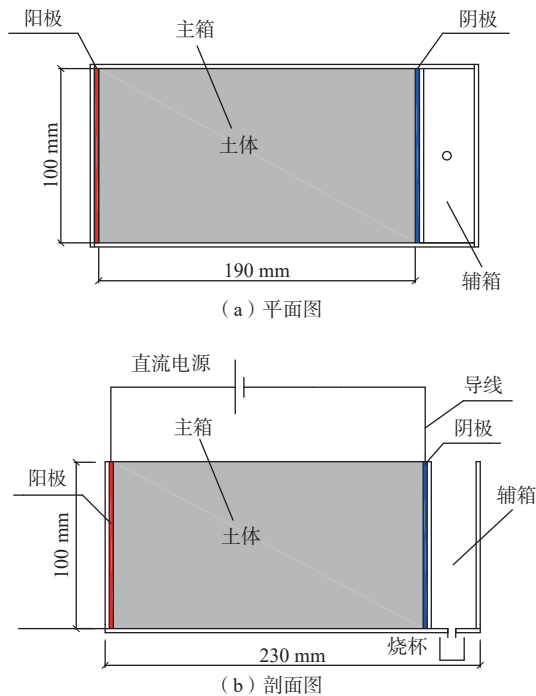


图 1 主体装置示意图
Fig. 1 Main device diagram

1.3 试验方案

本文采用 3 种等级电源电压^[12-14], 分别为 10, 15, 30 V。设定土样初始含水率为 95%^[15-16], 根据前期准备试验通电 29 h 时每小时排水量已经连续 3 h 低于总排水量的 3%, 故设置本试验通电时间为 29 h。各电源电压下, 分别采用铁和碳 2 种电极材料, 一方面互为验证试验结果的合理性, 另一方面也可探索金属电极和惰性电极对试验结果的影响。因此, 本文共开展 6 组试验, 各组试验具体条件见表 2。

表 2 试验条件汇总表

Table 2 Summary of the experimental conditions

试验编号	电极材料	初始含水率/%	电源电压/V	试验时间/h
T1	T1.1 铁	106.2	30	29
	T1.2 碳	106.5		
T2	T2.1 铁	95.0	15	29
	T2.2 碳	92.6		
T3	T3.1 铁	95.4	10	29
	T3.2 碳	95.3		

1.4 试验方法

试验中每隔 1 h 监测试验排水量、电流、电压。能耗计算公式为:

$$C = \int_0^t U_t I_t dt \quad (1)$$

式中: U_t —— t 时刻电压/V;

I ——电流/A;

t ——通电时间/h;

C ——0 ~ t 时间的能耗/(kW·h)。

单位排水量能耗(N)计算公式为:

$$N = \frac{\int_0^t U_t I_t dt}{Q} \quad (2)$$

式中: Q ——0 ~ t 时间的排水量/L。

由于电渗过程中, 电流不断变化, 取前后两次电流监测结果平均值作为该小时的平均电流值, 则第 i 小时的能耗(C_i)和单位排水量能耗(N_i)可改写成:

$$C_i = U_i \times \sum_{i=1}^n I_i, N_i = C_i / \sum_{i=1}^n Q_i, I_i = \frac{I_{i-1} + I_i}{2} \quad (3)$$

式中: I_i ——第 i 小时的电流监测值/A;

Q_i ——第 i 小时内的排水量/L。

当 U_i 采用电源电压 U 时, 式(3)计算得到的是总能耗 C_i 和总能耗系数 N_i ; 当 U_i 采用有效电压 U_e 时, 式(3)计算结果为有效能耗 C_e 和有效能耗系数 N_e 。

1.5 试验流程

①取适量原状土和水制备目标含水率的重塑土样, 直到得到均匀的流塑状淤泥, 密封静置 24 h; ②按照图 1 所示连接电极、导线、电源, 将阴阳极电极板包

裹土工布后适当润湿,放入模型箱;③将土样分层
 入电渗装置,达到约模型箱体积 90%,确保没有明显的
 气泡,称量空烧杯质量后将其放置在出水口;④电

渗系统连接完毕后,接通电源,调节输入电压,定期测
 量和记录排水量、电流和电位的变化。具体流程如
 图 2 所示。

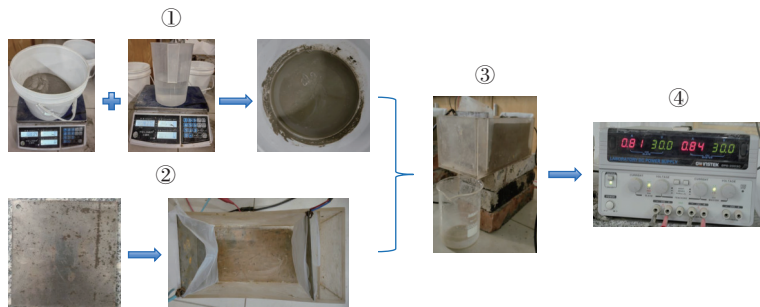


图 2 试验流程图

Fig. 2 Test flow chart

2 试验结果

2.1 总能耗与总能耗系数

由上述分析知,总能耗的计算公式为:

$$C_t = U \times \sum_{i=1}^n I_i \quad (4)$$

根据式(4)计算得到各试验总能耗变化曲线如图 3 所示。由图 3 看出,同一电压下,总能耗变化趋势相近,不同电压下,总能耗差异较大;能耗随电压增大而增大,且电压越大,能耗的增加幅度也越大,如 20 h 时,15 V 和 30 V 的平均总能耗(铁和碳电极能耗的平均值)分别为 10 V 能耗的 2.1 倍和 5.3 倍。

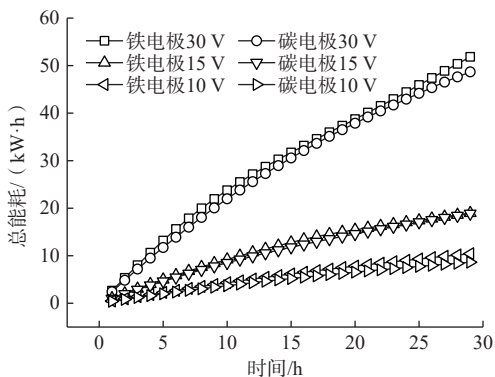


图 3 电渗中总能耗变化情况

Fig. 3 Variation of total energy consumption during electro-osmosis

能耗是电渗成本的表征,而排水量是电渗效果的直观体现,为了研究电渗过程中电渗排水效率的发展,基于相同排水量比较电渗效率,计算各时段单位排水量能耗,即能耗系数^[12-13],公式如下:

$$N_i = C_i / \sum_{i=1}^n Q_i \quad (5)$$

式中: N_i ——总能耗系数/($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{L}^{-1}$)。

根据式(5)计算得到各试验中能耗系数变化,如图 4 所示。由图 4 可知,电源电压越大,单位排水量能耗越大,说明总电渗效率随电源电压增大而降低^[17-18];30 V 电源电压下,铁电极和碳电极的曲线呈现出较为一致的特征,即 0~4 h 小幅下降,4~17 h 基本稳定,17 h 后显著上升,说明电渗效率初始小幅提高,中间逐步稳定,后期显著降低^[19-20];15 V 和 10 V 的电源电压下,铁和碳电极的整体曲线变化趋势基本一致;10 V 电压下,碳电极 0~4 h 总能耗系数变化较为平缓,直接原因是 0~4 h 铁电极与碳电极总能耗差异较排水量差异更大,类似的现象已有文献报道^[21-24]。30 V 下电渗效率与 15 V、10 V 差异较大且后期显著降低,这可能是因为 30 V 下排水量最大,使得后期土体性质(含水率)发生变化,进而对电渗效率产生影响^[25]。特别指出,对排水量数据的分析表明^[26],T1 试验 4~17 h 排水量占最终排水量约 60%,T2 和 T3 试验 4~17 h 排

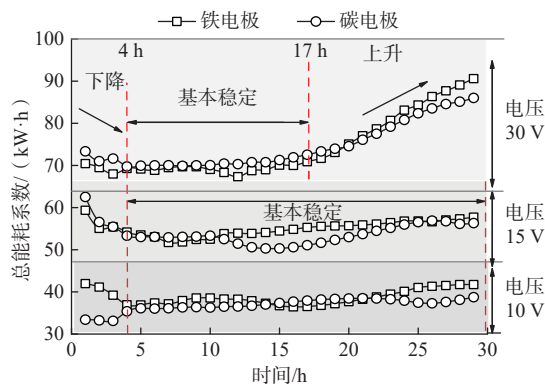


图 4 电渗中总能耗系数变化情况

Fig. 4 Variation of total energy consumption coefficient during electro-osmosis

水量占总排水量的 75% 以上, 而各试验 4~17 h 有效能耗系数基本稳定; 也就是说, 在主要排水阶段(4~17 h), 电渗效率基本稳定。各电源电压下, 铁电极和碳电极的曲线变化趋势相近, 表明电极类型对总能耗和系数不具有明显影响^[27]。

2.2 有效能耗和有效能耗系数

有效能耗为总能耗扣除阴阳极处的能耗损失, 即实际用于电渗排水的电能消耗。有效能耗的计算公式为:

$$C_e = U_e \times \sum_{i=1}^n I_i \quad (6)$$

试验前, 在距阳极板 5 mm 截面均匀设置 3 个电势探针, 试验时每小时测量 3 个电势探针的电势, 当所测数据差值不超过 20% 时(若超过 20% 应重新监测直至满足要求), 取其平均值与阳极电势差值作为阳极电势损失, 采用同样的方法监测阴极电势损失, 有效电势 U_e 为总电势与阳极和阴极的电势损失差值^[12]。

根据式(6)计算得到各试验有效能耗变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 有效能耗表现出与总能耗较为一致的特征, 但各电压下, 铁与碳电极的有效能耗曲线相近程度不如总能耗曲线, 这可能是因为阴阳极处电压损失受电极材料影响, 导致同一电源电压下, 不同电极的有效电压存在差异, 引起有效能耗的变化^[28]; 这也说明了电极材料对有效能耗的影响通过有效电压间接实现, 不具有直接影响。

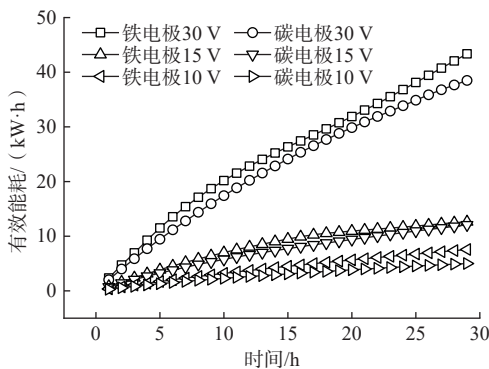


图 5 电渗中有效能耗变化情况

Fig. 5 Variation of the effective energy consumption during electro-osmosis

为了研究电渗过程中有效电渗排水效率的发展, 需计算各时段单位排水量有效能耗, 即有效能耗系数 (N_e), 公式如下:

$$N_e = C_e / \sum_{i=1}^n Q_i \quad (7)$$

根据式(7)计算得到各试验中有效能耗系数变

化, 如图 6 所示。图 6 中有效能耗系数与总能耗系数(图 4)表现出类似的整体特征, 即 30 V 的电压下, 曲线可分为下降期(0~4 h)、平稳期(4~17 h)和上升期(17~29 h)三个阶段, 而 15 V(铁电极和碳电极)和 10 V(铁电极)下仅可见下降期(0~4 h)和平稳期(4~29 h)两个阶段, 10 V 下碳电极 0~4 h 有效能耗系数变化不明显同样与其排水量有关。另外, 图 6 中各电压下的 2 条曲线较图 4 中更为分散。

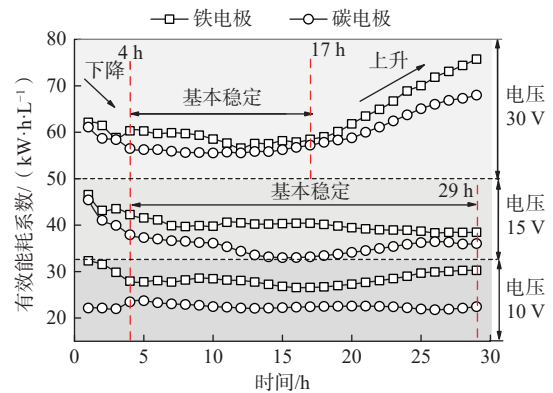


图 6 电渗中有效能耗系数的发展

Fig. 6 Effective energy coefficient during electro-osmosis

为了探索电渗效率与电源电压的变化关系, 取有效能耗系数与有效电压数据, 绘制有效能耗系数随有效电压的变化图。由于 30 V 电压下(T1.1、T1.2 试验), 土体初始含水率(分别为 106.2% 和 106.5%)明显大于另 4 组试验(约为 95.0%), 为了保证试验条件的一致性, 仅选取 15 V 和 10 V 的试验数据; 另外, 试验初始电渗排水受重力排水影响, 而随着试验进行, 土体逐渐呈现出不均匀性^[10, 14], 会对有效能耗系数产生影响, 因此选取 5~10 h 的试验数据。根据 15 V 和 10 V 试验 5~10 h 的有效能耗系数和有效电压, 得到图 7。

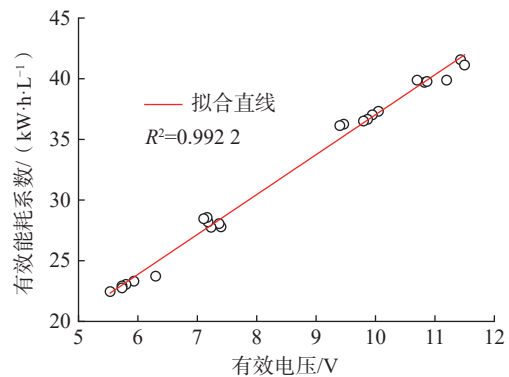


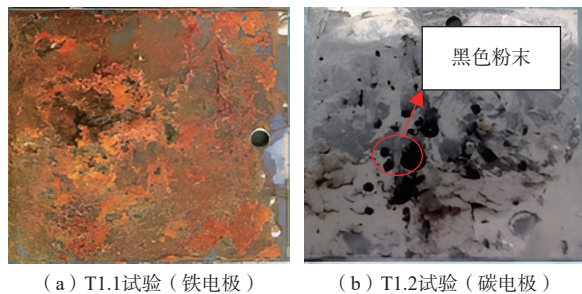
图 7 有效能耗系数与有效电压的关系

Fig. 7 Relationship between effective energy coefficient and effective potential

图 7 中对试验数据点进行了直线拟合, 相关系数为 0.992 2, 表明有效能耗系数与有效电压之间具有很高的线性相关性。有效能耗系数和有效电压之间的关系将在后续理论部分进一步探讨。

2.3 电极材料的损耗

电渗效率还体现在电极材料的损耗。因试验前后阴极板未有明显差异, 图 8 仅给出试验后代表性阳极板表面示意图(T1.1 和 T1.2)。由图 8 看出, 铁阳极表面 90% 以上区域覆盖了大片的黄褐色铁锈, 且较为坚硬、不易祛除; 石墨电极表面可看到黑色粉末堆积, 这些粉末易被水冲刷流走, 使得电极表面产生深浅不一的凹陷, 说明石墨电极在电渗过程中存在分解现象。图 8 表明铁阳极和碳阳极具有不同程度的损耗。电极损耗一方面增加电极成本, 另一方面阻碍电势的有效传递, 引起电势损失和电能损耗, 降低有效电渗效率^[19, 28-29]。



(a) T1.1 试验 (铁电极) (b) T1.2 试验 (碳电极)

图 8 电极材料的损耗

Fig. 8 Loss of electrode materials

3 理论分析

为了研究有效能耗系数和有效电压之间的关系, 有必要基于电渗机理对有效能耗系数进行探讨。已有学者提出了诸多电渗理论以解释电渗过程, 其中以 Helmholtz - Smoluchowski 模型应用最为广泛, 该模型最早由 Helmholtz 提出, 后由 Smoluchowski 修改完善。模型示意图如图 9 所示, 该模型得到电渗渗透系数公式为^[3]:

$$k_e = \frac{\zeta D}{\eta} n \quad (8)$$

式中: k_e ——电渗渗透系数;

ζ ——电动电势;

D ——孔隙液体的介电常数;

η ——流体黏滞系数;

n ——土体孔隙率。

若土体两端有效电压为 U_e , 土体长度为 L , 则 Δt 时

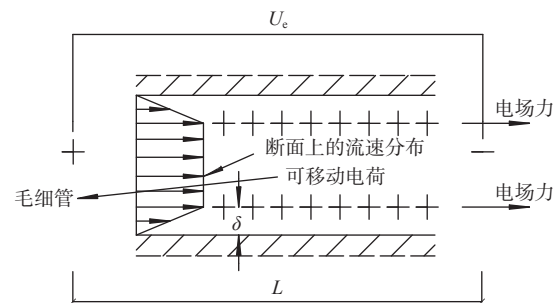


图 9 Helmholtz - Smoluchowski 模型示意图

Fig. 9 Helmholtz - Smoluchowski theoretical model

间段内电渗排水量公式为:

$$Q = \frac{\zeta D n A}{\eta L} U_e \Delta t \quad (9)$$

式中: A ——土体截面积。

Δt 时间段内电渗有效能耗为:

$$C_e = U_e I \Delta t \quad (10)$$

$$I = \frac{U_e}{L} A \sigma \quad (11)$$

式中: σ ——电导率。

$$C_e = \frac{U_e}{L} U_e A \sigma \Delta t \quad (12)$$

进而有效能耗系数为:

$$N_e = \frac{\sigma \eta}{\zeta D n} U_e \quad (13)$$

对于特定土体, $\zeta, D, \eta, n, \sigma$ 均为常数, 故由式(13)可知, 有效能耗系数 N_e 与有效电压 U_e 成正比, 本文试验也证实了这一理论推导结果(图 7)。由式(13)还可以看出, 有效能耗系数与有效电压的比例系数可能不一致, 这与土体本身电动电势、孔隙液体介电常数、孔隙率、流体黏滞系数和电导率有关, 不受电极材料类型影响(图 7), 且电动电势、孔隙液体介电常数和孔隙率越小, 流体黏滞系数和电导率越大, 有效能耗系数与有效电压的比例系数越大。

有效能耗系数表征了有效电渗排水效率, 进一步分析表明, 有效电渗排水效率与有效电压负相关。结合上述试验结果可知, 高电压虽然有利于电渗排水效果的发挥^[9-12], 但电源电压越高, 总能耗和有效能耗均增大, 总电渗排水效率和有效电渗排水效率均降低, 高电压不利于电渗效率的发展。因此, 实际工程中, 应从电渗效果和效率两方面综合考虑, 根据土体性质和工程目的选取合适的电源电压值。

4 结论

本文采用铁和碳电极, 在不同电源电压下开展电

渗法加固工程废泥试验研究,从总能耗和有效能耗两个方面研究了电压对电渗加固效率的影响,根据试验结果和电渗理论模型对有效能耗系数与有效电压的关系进行了分析。得到以下结论:

(1)同一电极材料下,电压越大,能耗、能耗系数越大,导致电渗效率越低,电压增加 20 V,能耗可增加 80% 左右,且较高电压下,电渗后期能耗系数更容易不稳定。

(2)同一电压下,电极材料类型对总能耗和总能耗系数影响不大,对有效能耗和有效能耗系数的间接影响主要通过有效电压实现。

(3)试验和理论分析结果均表明,有效能耗系数与有效电压之间成正比,两者系数误差率仅为 0.78%,也即有效电渗效率与有效电压线性负相关。

(4)低电压阻碍电渗效果的发挥,高电压不利于电渗效率的发展,实际工程中,应综合考虑电渗效果和效率选取合适电源电压值。

参考文献 (References) :

- [1] 高宇,周普玉,杨霞,等.絮凝剂对工程废弃泥浆脱水性能的影响[J].环境工程学报,2017,11(10):5597-5602. [GAO Yu, ZHOU Puyu, YANG Xia, et al. Effect of flocculants on dehydration properties of construction waste slurry[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(10): 5597 - 5602. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王东星,肖杰,李丽华,等.基于碳化-固化技术的武汉东湖淤泥耐久性演变微观机制[J].岩土力学,2019,40(8):3045-3053. [WANG Dongxing, XIAO Jie, LI Lihua, et al. Micro-mechanism of durability evolution of sludge dredged from East Lake, Wuhan based on carbonation-solidification technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3045 - 3053. (in Chinese with English abstract)]
- [3] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. Géotechnique, 1949, 1(3): 159 - 177.
- [4] BJERRUM L, MOUM J, EIDE O. Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay[J]. Géotechnique, 1967, 17(3): 214 - 235.
- [5] LO K Y, HO K S, INCULET I I. Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 74 - 83.
- [6] 陈雄峰,荆一凤,吕鑑,等.电渗法对太湖环保疏浚底泥脱水干化研究[J].环境科学研究,2006,19(5):54-58. [CHEN Xiong feng, JING Yifeng, LV Jian, et al. The research of environmental dredged sludge dewatering in Taihu Lake by electro-osmotic[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5): 54 - 58. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KALUMBA D, GLENDINNING S, ROGERS C D F, et al. Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(11): 1227 - 1236.
- [8] TUAN P A, SILLANPÄÄ M. Migration of ions and organic matter during electro-dewatering of anaerobic sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3): 54 - 61.
- [9] 吴辉.软土地基电渗加固方法研究[D].北京:清华大学,2015. [WU Hui. Soft soil improvement by electro-osmosis techniques[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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 on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 388 - 394. (in Chinese with English abstract)]
- [11] MALEKZADEH M, LOVISA J, SIVAKUGAN N. An overview of electrokinetic consolidation of soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(3): 759 - 776.
- [12] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈明华.软土电渗特性及电渗效率的理论及试验分析[D].广州:华南理工大学,2016. [CHEN Minghua. Theoretic and experimental analysis of electro-osmotic character and efficiency for soft clay[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [14] MOHAMED ELHASSAN E, SHANG J Q. Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis[J]. Ground Improvement, 2001, 5(1): 3 - 11.
- [15] COLIN P R. The application of electrokinetic geosynthetic materials to uses in the construction industry[D]. Newcastle, UK: University of Newcastle upon Tyne,

- 2002.
- [16] 李丽华, 杨俊杰, 徐维生, 等. 电渗法联合化学固化法改良淤泥试验 [J]. 中国科技论文, 2022, 17(12): 1340 – 1345. [LI Lihua, YANG Junjie, XU Weisheng, et al. Experiment on improving sludge by electroosmosis combined with chemical solidification[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(12): 1340 – 1345. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 罗文培. 泥浆电渗脱水试验与理论研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2022. [LUO Wenpei. Experimental and theoretical study on electroosmotic dewatering of mud[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 殷燕翔. 不同电压下给水污泥真空电渗脱水效果分析 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3753 – 3758. [YIN Yanxiang. Vacuum-osmosis dewatering effect analysis of DWTS on different voltage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(6): 3753 – 3758. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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 – 2591. [LIU Feiyu, MI 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 – 2591. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李能, 彭劼, 洪雷, 等. 考虑地下水补给的高岭土电渗法固结试验研究 [J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 117 – 120. [LI Neng, PENG Jie, HONG Lei, et al. Consolidation test study of Kaolin using electro-osmosis method in consideration of groundwater supplement[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(4): 117 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 臧俊超, 郑凌透, 谢新宇, 等. 生活源污染土电渗加固试验 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 245 – 254. [ZANG Junchao, ZHENG Lingwei, XIE Xinyu, et al. Electro-osmosis reinforcement experiment of life source polluted soil[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(2): 245 – 254. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王颂科. 混合电极对电渗加固软黏土的影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016. [WANG Songke. Experimental Study on the influence of mixed electrode onelectro-osmosis of soft clay[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张雷, 王宁伟, 景立平, 等. 电渗排水固结中电极材料的对比试验 [J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3493 – 3501. [ZHANG Lei, WANG Ningwei, JING Liping, et al. Comparative experiments of different electrode materials on electro-osmotic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3493 – 3501. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈红兵. 不同电极材料对电渗效果影响的试验研究 [J]. 水科学与工程技术, 2020(6): 32 – 35. [CHEN Hongbing. Experimental study on the effect of different electrode materials on electroosmosis[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2020(6): 32 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李一雯. 电极布置形式对电渗效果的试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [LI Yiwen. Experimental research on the effect of electrodes array to electro-osmotic dewatering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 陶燕丽. 不同电极电渗过程比较及基于电导率电渗排水量计算方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015. [TAO Yanli. Electro-osmotic process under different electrode materials and a novel method for discharge calculation based on electrical conductivity [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王宁伟, 孙守刚, 梁家豪, 等. 非金属电极在电渗排水中的应用 [J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 59 – 63. [WANG Ningwei, SUN Shougang, LIANG Jiahao, et al. The application of non-metallic electrodes in electroosmotic drainage[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(4): 59 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 吴攀. 城市河道底泥电渗脱水及模型构建 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019. [WU Pan. Electroosmotic dewateringand modelconstruction ofurban river sediment [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 高井超. 软土地基多电渗联合排水试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019. [GAO Jingchao. Experimental study on multi-electro-osmosis combineddrainage of soft soil foundation [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真