

两极裂缝处理对电渗排水影响的试验研究

宋忠强, 闫雪明, 饶平平

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 通过3组模型试验研究活性炭夹层对电渗过程中两极裂缝进行处理的电渗效果。试验表明:采用活性炭夹层对电渗过程中形成的裂缝进行处理来可改善电渗排水,具体表现为活性炭夹层的加入对于提高土体中水分的排出量、增加土体两端的有效电势、降低土体含水率及降低电极腐蚀有利,且只在阳极附近加入活性炭夹层的土样电渗效果优于在土体两极均加入活性炭夹层的土样。试验结果对电渗固结排水工程有一定参考意义。

关键词: 电渗; 裂缝处理; 活性炭夹层; 有效电势; 电极腐蚀

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0142-05

Experimental research on effect of applied double electrode fracture treatment on electroosmotic drainage

SONG Zhongqiang, YAN Xueming, RAO Pingping

(College of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Three laboratory tests program were conducted in order to investigate the effect of double electrode fracture treatment on electroosmotic drainage. It shows that activated carbon treatment for crack is necessary and it can improve the discharge of moisture in soil increase the voltage of the soil at both end reduce the moisture content of soil and lower electrode corrosion. Only add activated carbon interlayer soil samples near the anode electroosmosis effect is better than that of poles are adding activated carbon in soil interlayer soil samples.

Key words: electroosmosis; crack treatment; activated carbon sandwich; effective voltage; electrode corrosion

电渗法主要用于软土地基处理,自从20世纪30年代 Casagrand 将电渗法成功用于铁路挖方工程以后,电渗法在地基处理中的应用逐渐广泛。其主要用于加固低渗透率、高含水率的土体。但是电渗法在工程中应用也受到一定的限制,主要是由于电渗过程中电极板附近出现大量的裂缝,导致电极接触处耗能过大,电极腐蚀严重及能源利用率低等问题。

针对上述工程中存在的问题,关于电渗法的研究和改进一直受到工程界和学术界的重视。如为减少电渗过程中电极的腐蚀程度, Wan 等^[1]提出了“电极转换”技术; Micic 等^[2-3]研究了间歇通电对减少电极腐蚀和电能消耗的作用; 胡俞晨等^[4-6]采用新型电动土工合成材料来降低电渗过程中电极的腐蚀。李一雯等^[7]研究了不同电极布置形式对降低电极能耗的作用。

电”在实际工程中很难操作,实用性并不强。新型电动土工合成材料由于成本和技术问题,在实际工程中也很难推广。因此电渗法存在的弊端并没有得到很好的解决。本文从改善电渗过程中两极接触来降低裂缝对能量的消耗及降低电极腐蚀的角度出发对电渗进行了研究,通过 T_1 、 T_2 及 T_3 三组试验对比,得出对电渗过程中电极附近出现的裂缝进行处理,可以提高能耗利用率及降低电极腐蚀程度。

1 试验基本情况

本试验采用改进的 Miller soil box,分为左侧试样盒和右侧集水箱两部分,试样盒用于装放试验土体样本,集水箱用于收集试验过程中土样排除的水体并将其排入下部的量筒中。试样盒内部尺寸长宽 高为 20 cm × 10 cm × 10 cm。试验电极均采用铜

收稿日期:2014-04-20; 修回日期:2014-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51208301);上海市大学生创新创业训练计划(52-12-307-200);上海理工大学环境与建筑学院大学生帮困创新基金。

作者简介:宋忠强(1988-),男,山东陵县人,硕士研究生,主要从事软土地基处理方面的研究。

板,尺寸为 10 cm × 10 cm × 0.4 cm(长宽厚)。阴极电极板自底端每隔 0.5 cm 剪成细条状,保证电渗过程中汇集到阴极的水能从试样盒流到集水箱中,进而流入放置在集水箱下面的量筒中进行体积测量。试验过程中在阴极板与土体之间用土工布隔开,起过滤作用。试验过程中沿土样长度方向均匀插入 5 根直径为 1 mm 的不锈钢丝用作电势测针 ($V_0 \sim V_5$),用于测量土体中电势分布。电势测针的分布及试验过程中的电路图如图 1。

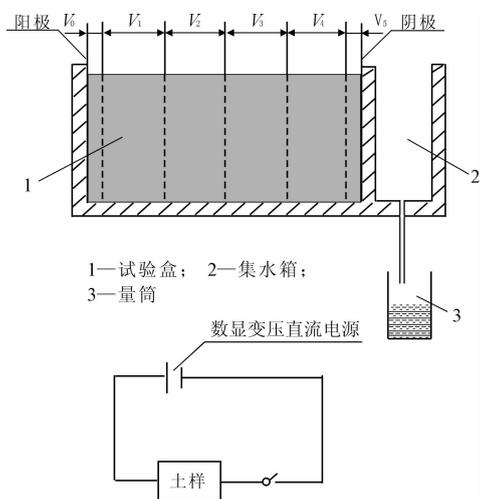


图 1 电渗试验装置图

试验土样取自上海外滩某工地,其基本力学参数见表 1。试验过程中采用原状土。

表 1 原状土的基本物理指标 %

来源	孔隙比	含水率	比重	液限	塑限
外滩	1.3	63	2.73	44.5	23.5

整套试验由 3 组小试验组成,试验条件汇总于表 2 中,活性炭夹层厚度均为 1 cm,活性炭在试验前用水湿润,以免影响电渗排水。

表 2 试验条件汇总表 V, h

试验编号	电源电压	通电时间	阳极板与土体接触条件	阴极板与土体接触条件
T ₁	40	11	直接接触	直接接触
T ₂	40	11	夹活性炭层	直接接触
T ₃	40	11	夹活性炭层	夹活性炭层

试验程序为:先在试验盒中放入已连接好电线的电极,在阴极铺好土工布,T₂ 和 T₃ 还要在相应的电极端夹入厚度为 1 cm 的活性炭层,分层密实填入土样;接着以合适的间距插入电势测针,按试验电路连接线路和电表;装配完毕后,接通电源,开始电渗

排水试验。试验过程中,每隔 0.5 h 记录一次数显电源上电流值和量筒的读数,同时测量一次沿土样长度方向的电势分布,即 $V_0 \sim V_5$ 。

2 试验分析

2.1 电极和土体之间的接触电阻

电渗过程中两极电极板与土体之间裂缝的形成 (T_1) 或活性炭夹层的存在 (T_2 和 T_3) 会产生接触电阻,使得实际作用于土体两端的电压小于电源输出电压。本文将作用于土体两端的实际电压定义为电渗的有效电势 $\Delta\phi_i$ ($i = 1, 2, 3$, 分别代表 T_1, T_2, T_3 组有效电势), 阳极附近与阴极附近引起的接触电势降分别用 $\Delta U_{阳i}$ 与 $\Delta U_{阴i}$ 表示, 见公式(1); 图 2 为 $\Delta\phi_i$ 随时间的变化规律, 图 3 ~ 5 为 3 组试验接触电阻和土体电阻随时间变化的关系。

$$\Delta\phi_i = U - \Delta U_{阳i} - \Delta U_{阴i} \quad (1)$$

试验结果表明 $\Delta\phi_i$ 的变化规律可分为 3 个阶段:

第一阶段为 $t \leq 3$ h, 为试验初始阶段, $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 及 $\Delta\phi_3$ 之间比较接近, 均在 35 V 上下波动, 两极板与土体之间尚无完整的裂缝形成, 可以得出虽然 3 组试验模型电极板与土体的接触方式不同, 但是在试验初期作用在土体两端的有效电势并没有明显的差别, 进而说明在此阶段活性炭夹层的加入对有效电势并没有起到降低或者增加的作用。结合图 3 ~ 5, 此阶段 3 组试验的两极接触电阻均远小于土体自身的电阻, 由接触电阻引起的接触电势降也较小, 保证了在电源输出电压相同的前提下 $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 及 $\Delta\phi_3$ 数值比较接近。

第二阶段 $3 \text{ h} < t \leq 6 \text{ h}$, 两极电极板与土体之间的裂缝形成并逐渐稳定, $\Delta\phi_1$ 与 $\Delta\phi_2$ 先出现骤降, 继而小幅回升。 $\Delta\phi_{1\min}, \Delta\phi_{2\min}$ 分别为 15 V、25 V, 占电源电压的百分比分别为 37.5%、62.5%, $\Delta\phi_{2\min}$ 高出 $\Delta\phi_{1\min}$ 25%。图 3、4 可以看出, 在此阶段 T_1 阳极接触电阻值骤增且超过土体自身的电阻值, 而 T_2 阳极接触电阻值只有小幅增长。接触电阻增长的幅度越大, 由接触电阻引起的接触电势降就越大, 继而导致有效电势越小, 使得 $\Delta\phi_1$ 小于 $\Delta\phi_2$ 。可以推断出在裂缝形成过程中, T_2 阳极活性炭夹层对改善阳极与土体的接触, 减小阳极裂缝引起的接触电势降有明显的作用。

第三阶段 $6 \text{ h} < t \leq 11 \text{ h}$, $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 呈线性增长。主要是由于此阶段电极两端裂缝基本稳定, 由图 3、4 可看出 T_1, T_2 阳极接触电阻值虽有增长, 但是增

长速率远远小于土体自身电阻值的的增长速率,使得 $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 呈增长趋势。 $\Delta\phi_3$ 仍稳定不变,图5可以看出整个试验过程中阴极活性炭夹层接触电阻值非常小变化趋势不明显,阳极活性炭夹层的接触电阻值在第三阶段有所增加,但远远小于土体自身的电阻值,因此整个试验过程中接触电阻引起的电势降无明显变化,与此对应 $\Delta\phi_2$ 基本稳定不变。

图2中对比 T_1 、 T_2 与 T_3 ,可以得出 $\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 > \Delta\phi_3 - \Delta\phi_2$,说明阴极裂缝对有效电势的影响程度小于阳极裂缝,主要原因是由于电渗过程中水体汇集到阴极附近继而排出,阴极附近即使有裂缝产生,汇集到阴极的水体在土体与电极之间形成一层水膜,从而大大降低了裂缝引起的接触电阻,从图3、4、5中可以

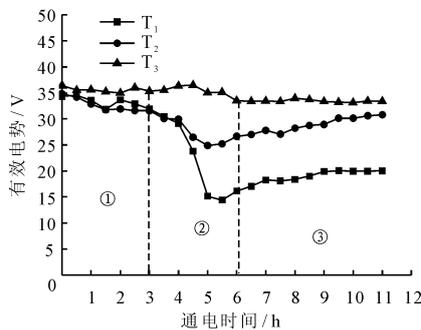


图2 有效电势变化曲线

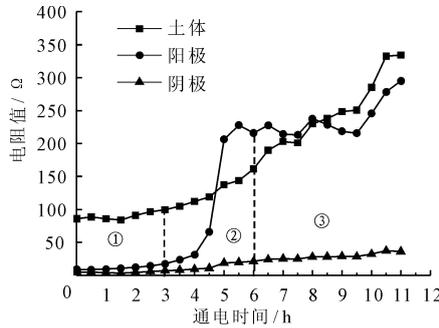


图3 T_1 接触电阻与电渗时间变化曲线

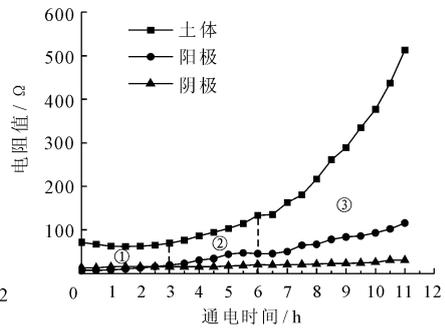


图4 T_2 接触电阻与电渗时间变化曲线

2.2 电渗排水量、排水速率及电渗渗透系数

图6为3组试验排水量与时间的关系,排水量用 Q_i ($i=1,2,3$ 分别代表 T_1 、 T_2 、 T_3 排水量)。由图可以看出, $t < 5$ h 阶段,3组试验排水量呈线性增长,且 $Q_3 > Q_2 \approx Q_1$ 。即在试验前期 Q_1 与 Q_2 之间没有明显差别。从图7电渗排水速率与时间的关系也可以看出, $t < 5$ h 阶段 T_1 与 T_2 的排水速率基本相等,说明 T_2 阳极附近活性炭夹层的加入对电渗排水的影响在此阶段并未体现出。

根据 Esring^[8] 的理论:

$$Q = V_e t \quad (2)$$

$$V_e = k_e \frac{\Delta\phi A}{L} \quad (3)$$

式中: Q 为 t 时间内排出水的体积, mL; V_e 为电渗排水速率, mL/s; $\Delta\phi$ 为有效电势, V; L 为土样长度, cm, 3组试验 L 均为 18 cm; A 为土样横截面面积, cm^2 , 3组试验 A 均为 100 cm^2 ; k_e 为电渗渗透系数, $\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$; 反算出 k_e 的数值,其变化规律如图8所示,对比 T_1 与 T_2 的电渗渗透系数可以看出在试验前期及试验中期, T_2 阳极活性炭夹层的加入对 k_e 并没有明显的影响,至试验末期, T_2 的电渗渗透系数逐渐小于 T_1 的电渗渗透系数,而试验中后期图7

看出整个试验过程阴极附近的接触电阻均在较小值附近且增长缓慢,远远小于土体自身的电阻和阳极接触电阻,因而阴极裂缝引起的接触电势降较小,对有效电势的影响程度非常有限。尤其在试验后期阴极裂缝稳定后, $\Delta\phi_3 - \Delta\phi_2 \rightarrow 0$,说明阴极附近的活性炭夹层对提高土体的有效电势作用并不明显。

可以得出:在裂缝形成前,活性炭夹层的存在并没有对电渗产生影响;在裂缝形成过程中,两极均加入活性炭夹层能有效的降低裂缝引起的接触电势降,使得用于电渗的有效电势波动较小;裂缝稳定后, T_2 与 T_3 的有效电势差值减小,此时阳极活性炭夹层在降低电极接触电势降,提高土体有效电势方面发挥主要作用,而阴极活性炭夹层的作用逐渐削弱。

中可以看出 T_1 与 T_2 的电渗排水速率有明显的差异,结合公式(3)可推导出造成 T_1 与 T_2 两组 k_e 差异的主要原因是 $\Delta\phi_1$ 与 $\Delta\phi_2$ 之间的差异引起的,因此可以得出在整个试验过程中,阳极活性炭夹层对电渗排水速率及排水量的促进作用,主要是通过增加土体两端的有效电势达到的,而对土体的电渗渗透系数并没有明显的影响。从图2可以看出整个试验过程中阳极活性炭夹层都能有效的降低接触电势降,抑制有效电势的降低,对电渗起到促进作用。

对比图7中 T_2 与 T_3 的电渗排水速率,可以看出以 $t = 5$ h 为分界点,两组土样的 V_e 有明显的差别: $t < 5$ h 阶段, $V_{eT_2} > V_{eT_1}$, $t > 5$ h 阶段, $V_{eT_2} < V_{eT_1}$,由公式(3)与图8可知,造成 V_{eT_1} 与 V_{eT_2} 明显差别的原因之一是 k_{eT_1} 与 k_{eT_2} 的明显差别,因此可以推断出阴极活性炭夹层对电渗排水量及排水速率的影响主要是通过改变土体的电渗渗透系数来实现的,而其对土体电渗渗透系数的影响在试验前期起促进作用,在试验中后期反而降低了土体的 k_e ,继而导致 V_e 降低。从图6可以看出试验中后期 $Q_3 - Q_2 \rightarrow 0$,而由图2得出试验中后期 $\Delta\phi_3 - \Delta\phi_2 \rightarrow 0$,说明试验中后期 T_3 中通过阴极活性炭夹层来增加有效电势,继而提高电渗排水

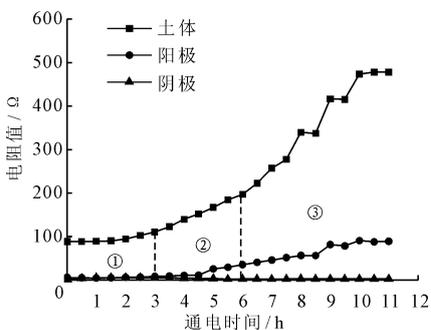


图 5 T₃ 接触电阻与电渗时间变化曲线

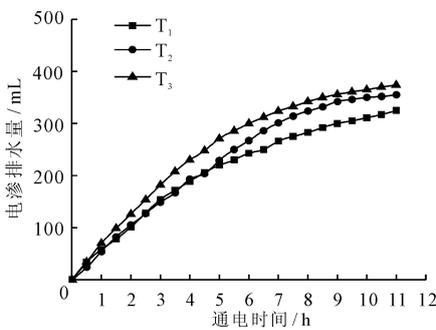


图 6 排水量随电渗时间变化曲线

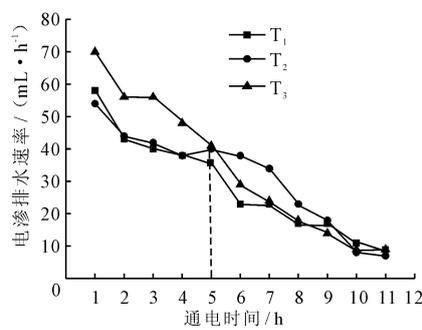


图 7 电渗排水速率随时间变化曲线

速率和排水量的效果并不明显。

综上所述可以得出 T₂ 中阳极活性炭夹层对提高电渗排水速率及电渗排水量比较稳定可靠。与 T₂ 相比, T₃ 中的阴极活性炭夹层对电渗渗透系数及电渗排水速率的促进作用并不稳定, 试验后期反而降低了电渗渗透系数和电渗排水速率。因此只在阳极附近加入活性炭夹层的方案优于在电极两端均加入活性炭夹层。

2.3 电渗能耗

能耗是衡量电渗效果的重要指标, 此处定义排出单位体积的水体所消耗的电能为能耗系数 C^[9]:

$$C = \frac{1}{Q_t} \int_{t_1}^{t_2} I_r \Delta \phi_r d\tau \quad (4)$$

式中: $\Delta \phi_r$ 、 I_r 、 Q_t 分别为 t_1 至 t_2 时间段内有效电势平均值、电路电流平均值及排出水的体积, 图 9 为 C_t 随时间的变化规律, 试验整个过程 C_2 和 C_3 始终大于 C_1 , 说明活性炭夹层的加入虽然降低了接触电阻和接触电势降, 但却增加了排水的单位能耗; C_3 试验前期小于 C_2 与 C_1 , 后期超越 C_2 与 C_1 , T₃ 最终排水量虽然最大, 但 C_3 也是 3 组中最大的, 两极活性炭夹层的加入在短时间内增加了试验样本的排水量,

同时也增加了排水的单位能耗。C₂ 介于 C₁ 与 C₃ 之间, 结合 2.1 及 2.2 关于活性炭夹层对电渗有效电势、电渗排水速率及电渗渗透系数的影响分析, 可以得出只在阳极附近加入活性炭夹层在实际工程中更有应用价值。

2.4 电渗土体含水率的变化

土体最终含水率的变化是衡量电渗效果的重要指标, 图 10 为上部土体含水率降低曲线, 可以看出在 T₂ 阳极附近和中部土体的含水率降低幅度明显大于 T₁, 而在阴极附近 T₂ 土样含水率变化幅度却小于 T₁, 主要原因是试验时间相对较短, T₂ 阳极活性炭夹层的存在加速了阳极附近和中部土体中的水体向阴极汇集, 而在较短的试验时间里, 汇集到阴极的水来不及排出, 导致阴极附近土体含水率降低并不明显, 可以推出阳极活性炭夹层对促进上部土体的阳极和中部土体水分的排出有明显的促进作用; T₃ 上部土体含水率降低幅度只是在阴极附近优于 T₂, 说明阴极附近活性炭夹层对于降低阴极附近上部土体含水率有明显的效果, 而对降低土体其他部分的含水率效果并不明显。

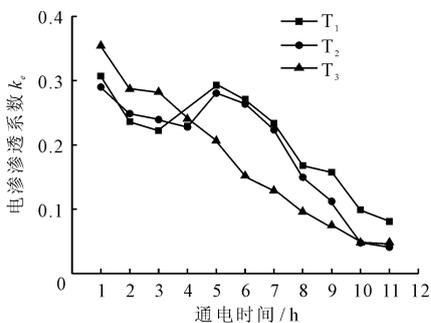


图 8 电渗渗透系数 k_e

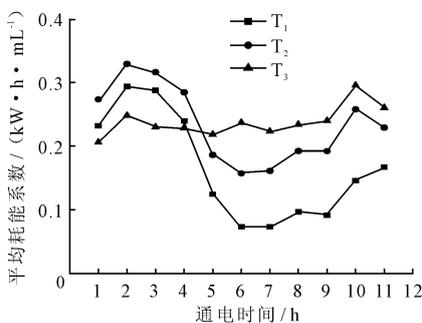


图 9 平均能耗系数变化曲线

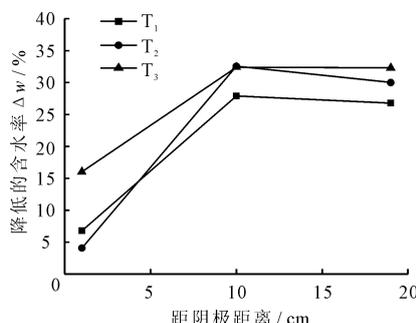


图 10 上部土体含水率变化曲线

图 11 为土样下部土体含水率降低曲线图, T₂ 与 T₃ 含水率降低幅度接近, 得出阴极活性炭夹层对下部土体排水的促进作用并不明显; T₂、T₃ 的降低

幅度明显大于 T₁, 对比试验条件可知, 产生这种试验现象的主要原因是阳极附近的活性炭夹层促进了下部水体的排出。

最终可知,阳极活性炭夹层对于上、下部土体水体的排出都有明显的促进作用,阴极活性炭夹层对水体排出的促进作用更多的体现在上部土体的阴极附近。因此阳极附近的活性炭夹层对促进土体中水分排出作用更大。

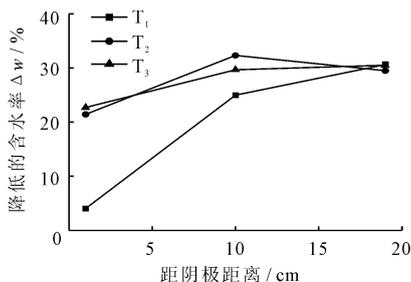


图 11 下部土体含水率变化曲线

2.5 电极反应

图 12 为试验结束后的阳极电极板,左一对应 T₃,中间对应 T₂,右一对应 T₁。可以看出 T₁ 阳极电极板腐蚀的最严重,表层完全被铜绿覆盖。分析电渗过程中阳极发生的电化学反应:



而铜板电极在潮湿的环境里与氧气、水及空气中的二氧化碳发生反应,生成碱式碳酸铜:

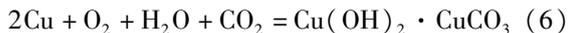


图 12 试验结束后的电极板

T₂ 和 T₃ 由于活性炭夹层的存在,腐蚀并不明显,主要是由于活性炭粉末虽含有水分,但由于其自身渗透系数比较大,电渗初期其含有的水分被排入土体,使得铜片缺少腐蚀的条件,因此 T₂ 和 T₃ 的阳极电极板被腐蚀的较轻。T₃ 阳极铜板下端有腐蚀迹象,主要是由于试验操作失误引起的。可以看出在降低阳极电极板腐蚀的程度阳极活性炭夹层起到了主要作用,而阴极活性炭夹层在此过程中并没有起到很大作用。

3 结语

(1) 对比 T₁、T₂ 及 T₃ 电渗过程中有效电势的变

化规律、试验排水量及排水速率、土体含水率变化及电极腐蚀程度可以得出,通过对电极附近的裂缝进行处理从而提高电渗效果是十分有必要的。

(2) 整个试验过程 $\Delta\phi_3$ 无明显变化,试验前期 $\Delta\phi_2$ 与 $\Delta\phi_3$ 接近,中期 $\Delta\phi_2$ 略有减小,试验后期 $\Delta\phi_2$ 逐渐增大且趋于 $\Delta\phi_3$,因此阳极附近的活性炭夹层对于减小电极接触电势降、提高土体有效电势的作用大于阴极附近的活性炭夹层。

(3) T₂ 中阳极活性炭夹层主要通过提高土体的有效电势来间接的提高土体的电渗排水速率及电渗排水量,与 T₂ 相比,T₃ 中的两极活性炭夹层对电渗渗透系数及电渗排水速率的促进作用并不稳定,试验后期反而降低了电渗渗透系数和电渗排水速率。

(4) 与 T₂ 相比,T₃ 中阴极附近活性炭夹层只在降低阴极附近上部土体的含水率效果上略优于 T₂,其对降低阳极电极腐蚀作用不明显,且提高了能耗系数。

综合上述分析数据,T₂ 中只在阳极附近加入活性炭夹层对于改善电渗效果是经济、有效、可行的。

参考文献:

- [1] Wan T Y, Mitchell J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976,102(5):473-491.
- [2] Micic S, Shang J Q, Lo K Y, et al. Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(2): 287-302.
- [3] 龚晓南,焦丹. 间歇通电下软黏土电渗固结性状试验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(6): 1725-1730.
- [4] 胡俞晨,王钊,庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 582-586.
- [5] 邹维列,杨金鑫,王钊. 电动土工合成材料用于固结和加筋设计[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 319-322.
- [6] 王协群,邹维列. 电渗排水法加固湖湘软粘土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2): 95-99.
- [7] 李一雯,周建,龚晓南,等. 电极布置形式对电渗效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1972-1978.
- [8] Esrig M I. Pore pressure consolidation and electrokinetics [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASC E, 1968, 94(4): 899-92
- [9] 李瑛. 软黏土地基电渗固结试验和理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.