

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.008

阳极跟进作用下软黏土电渗固结室内试验研究

刘飞禹¹, 张乐¹, 王军², 张斌³

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035;
3. 上海市电力公司, 上海 200122)

摘要:在等电势梯度的前提下, 针对电渗法加固软黏土地基提出了阳极跟进技术, 设计了 8 组电渗对比试验, 对不同阳极跟进方案作用下电渗试验的电流、抗剪强度、排水量、含水率、pH 值和土体电导率等指标进行了监测, 分析了不同方案下的电渗加固效果。试验结果表明: 采用阳极跟进技术时, 第 1 次阳极跟进作用效果最为显著; 在电流密度处于高位时进行阳极跟进会在一定程度上降低电渗效率, 在电流密度处于低位时进行阳极跟进能够促进电渗作用; 针对阴极区土体开展阳极跟进无法获得显著的加固效果。研究结果表明, 阳极跟进技术能够降低电路中的阳极区电阻, 有效提高电渗加固效果。

关键词:电渗法; 阳极跟进; 土体电阻; 剪切强度

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2014)01-0052-07

Experimental Analysis of the Electro-Osmosis Consolidation of Soft Clay Under Anode Follow-up

Liu Feiyu¹, Zhang Le¹, Wang Jun², Zhang Bin³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, P. R. China;
2. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, P. R. China;
3. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, P. R. China)

Abstract: Under the equipotential premise gradient, anode follow-up technical was proposed in the electro-osmosis reinforcement of soft clay. Eight electro-osmosis contrast tests were conducted through the experimental test. Currently, shear strength, displacement, moisture content, pH, conductivity of the soil and other indicators were monitored in the electro-osmosis test. Different electro-osmotic reinforcement effects were analyzed. The results show that: when the anode follow-up is used, the first anode follow-up can get a most significant effect. When the current density is high, arranging the anode follow-up will lead some extent reduce of the effect of the electro-osmosis, while the effect will be promoted when the current density is low. By carrying out the anode follow-up on the cathode region soil, a significant reinforcement effect can be obtained. Anode follow-up can reduce the resistance of the circuit in the anode region and effectively promote the electro-osmosis reinforcement effect.

Key words: electro-osmosis; anode follow-up; soil resistance; shear strength

电渗法具有加固速度快, 对细颗粒、低渗透性土有良好的加固效果等优点^[1], 且具有排出土体中弱结合水的功效。Esrig^[2]于 1968 年最早进行了电渗固结理论研究, 提出了电渗的一维固结经典理论。

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(50808119); 浙江省科技攻关项目(2010C33182); 上海市电力公司科技项目

作者简介: 刘飞禹(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事加筋土及地基处理研究, (E-mail) lfyju@shu.edu.cn。

之后,Shang^[3]推导了电极平面内的二维固结理论。Su 等^[4]在 Esrig 一维固结理论的基础上采用分块处理的方法进行了二维固结理论的解析,提出了电渗的二维固结理论。Zhuang 等^[5]对电渗过程中的界面电阻问题进行了分析。李瑛等^[6-8]开展了含盐量对软黏土电渗排水、电压对一维电渗排水影响的试验研究,并建立了堆载与电渗法联合作用下的耦合固结理论。Glendinning 等^[9-11]对 EKG 开展了研究,并对其使用范围进行了推广。Chew 等^[12]使用铜丝与塑料排水板制作 EVD,尽管现场未达到预期效果,但 EVD 的设计理念对电渗排水具有积极影响。Micic 等^[13],龚晓南等^[14]利用室内试验的方法,分别证明了间歇通电技术对电渗加固过程的促进作用,但间歇通电技术也造成了加固周期过长等实际问题。Gray 等^[15]、Lo 等^[16]对电极转换技术进行了研究,表明了电极转换技术的有益性,但也暴露了电极转换过程不易有效控制的难题。李瑛等^[17]开展了等电势梯度下电极间距对电渗影响的试验研究,表明采用较小的电极间距能够促进电渗加固效果。

但是,电渗法的应用也受到电渗过程中界面电

阻增大、阴阳极区域土体含水率下降不均匀、土体电渗透系数降低等问题的困扰。针对上述问题,若是在试验进行过程中,当阳极区土体因固结排水产生土体收缩,进而脱离阳极导致阳极区界面电阻急剧增大时,能够将阳极拔出(或使用新阳极)向阴极跟进,插设于靠近阴极且土体含水率较高的区域,将能够使阳极与周围土体重新接触,使急剧增大的界面电阻有效减小,并能够使原先远离阳极区而未能得到有效加固的土体得以进一步加固。笔者将上述方法命名为阳极跟进技术,并设计了 8 组室内试验,以期通过试验得到关于阳极跟进技术的有益结论。

1 试验介绍

1.1 土样制备

试验土样取自温州龙湾吹填现场。试验前,将土样烘干、磨成干粉并加水搅拌,制成目标含水率 65% 的重塑土样,密闭静置 24 h 以保证土样均匀。土样制备过程中,对试验土体基本物理参数进行测试,相关参数如表 1 所示。

表 1 软黏土基本物理参数

含水率 $w/\%$	比重 G_s	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_l/\%$	电导率	pH
65.00	2.75	16.90	1.54	99.70	26.00	56.50	4.96	8.16

1.2 试验装置

试验主体采用有机玻璃模型箱,模型箱由左右两侧的集水室和中间的试样室组成。试样室与两侧的集水室通过下端带有切口的有机玻璃隔板分隔,切口高 20 mm,使试样室与集水室联通以收集电渗排出水,集水室中心处预留小孔并安装导管,供电渗排出水流入量筒。试样室内部长宽高尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm。上述有机玻璃箱左右两端各设置一个集水室的构造特点,可满足试验过程中进行电极转换试验的要求。

阳极和阴极均采用金属铁板制成,电极宽度与试样室宽度相同,为 100 mm,电极高度 110 mm,高出模型箱 10 mm,以便于通过电源夹将阴阳极接入电路,电极板厚度为 3 mm。其中,电渗阳极表面平整密实不做加工处理,电渗阴极在阳极的基础上进行表面钻孔处理,并于一侧表面平贴一层纱布作为过滤层,以防止土颗粒流入集水室。试验用跟进阳极采用不锈钢金属网制成,电极高宽尺寸 110 mm×100 mm,厚度小于 1 mm。

试验电源采用固纬 SPD-3606 稳压直流电源,

可提供最大 120 V 的输出电压或最大 12 A 的输出电流。电源能够实时显示电路中的电流值与电压值。试验量测装置中,采用量筒量测电渗流量,采用万用表与电势测针进行土体电势测量。在阴阳两极中轴线上每间隔 25 cm 设置 1 根电势测针,共设置 7 根测针,从阴极到阳极依次编号为 D1、D2、D3、D4、D5、D6 和 D7。测针采用长度为 10 cm、直径 1 mm 的不锈钢丝,竖直插入土体,入土深度为 7 cm。

1.3 模型安装

将配制好的土样静置 24 h 后,如图 1 所示,按下述安装步骤进行模型安装。首先,将电渗电极适当湿润后安装在试验盒中,并开始分层装填小心挤压以使土样处于密实状态。按照电势量测要求,在土中插入电渗测针,按照试验电路图设置要求连接电极、电源、万用表。最后,根据试验方案施加电压开始电渗排水。

2.4 试验方案

此次阳极跟进作用下软黏土电渗试验共设置 8 组对比试验,试验方案如表 2 所示。

试验开始前,取样测量土样的含水率、pH 值、电

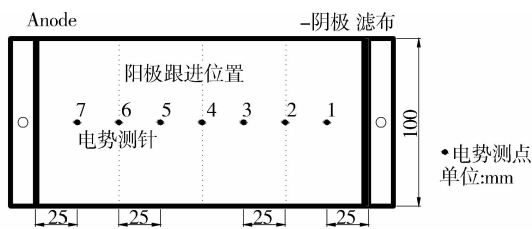


图 1 模型安装平面图

导率、电渗电极质量等基本参数。试验过程中,间

隔 1 h 记录 1 次电流强度、电势变化以及电渗流出,定时拍照记录土样产生的变化。试验结束后,利用室内微型十字板对土体进行抗剪强度测量,并同时取样进行含水率、土体 pH 值和电导率测试。

阳极跟进位置为土样 3 等分处,共 3 处位置,从阳极到阴极依次命名为间隔 1、间隔 2、间隔 3,表中所示时间为每次阳极跟进作用的持续时间。此次阳极跟进选取电势梯度 1 V/cm,在不同跟进位置输出相应电压。

表 2 试验方案

试验组次	试验方法	阳极跟进试验示意图	电源电压/V	通电时间/h	电极转换方式
I	阳极不跟进	A ----- 24 h ----- C	20	24	无
II	预插跟进阳极	A * * * C	20	24	无
III	电极转换试验	A(C) ----- 24 h ----- C(A)	20	24	有
IV	6 h 启动跟进,跟进 3 次	A 6h * 6h * 6h * 6h * C	20/15/10/5	24	无
V	6 h 启动跟进,跟进 1 次	A 6h * ----- 18 h ----- C	20/15	24	无
VI	6 h 启动跟进,跟进 2 次	A 6h * 6h * ----- 12 h ----- C	20/15/10	24	无
VII	6 h 启动跟进,跟进 2 次	A 6h * ----- 12 h ----- 6h * C	20/15/10	24	无
VIII	6 h 启动跟进,跟进 2 次	A 6h * ----- 12 h ----- * 6h C	20/15/5	24	无

表 2 中所示试验 I 为基本实验,阳极不跟进。试验 II 为预插跟进阳极试验,在土样 3 等分位置,预插 3 块跟进阳极。试验 III 为电极转换试验,试验进行 12 h 后进行电极转换,继续作用 12 h。试验 IV 到试验 VIII 为阳极跟进试验,跟进方案如表 2 所示。

2 试验结果分析

2.1 电流变化

试验中,以初始土体截面积 0.01 m^2 换算电流密度,则电流密度为 80、50、20 A/m^2 时,电路中电流值分别为 0.8、0.5、0.2 A。

图 2 为试验 I 到试验 VIII 电路中电流强度的变化情况。由图可知,除去各试验中由于阳极跟进或电极转换作用引起的电流跳跃之外,电路中的电流强度呈现整体先增大后减小的变化规律;阳极跟进作用以及电极转换作用均可引起电路中电流的显著增加。由于电路中的电势梯度保持不变,故可从电阻的变化情况对电流强度的变化规律进行解释。进行电阻分析时,将电路中的电阻划分为阳极区电阻、中间部位土体电阻、阴极区电阻 3 个部分进行考虑。其中阳极区设定为从金属阳极到离开阳极 25 mm 的区域范围内,阴极区设定为从金属阴极到离开阴极 25 mm 的区域范围内,则阴极区、阳极区电阻分

别包含电极与土体的界面电阻以及区域内 25 mm 范围内的土体电阻 2 个部分。

由图 2(a)可见,试验 III 中电极转换作用引起了电流增加,然而电极转换引起的电流增加持续时间较短,1 h 内电流密度便迅速降至 20 A/m^2 之下,表明电极转换 1 h 后电渗作用便基本失去了加固效果,反映了电极转换不易操作控制的事实,其实际处理效果也弱于试验 I。同时,试验 II 预插跟进阳极时,电流强度值低于试验 I,表明预插跟进阳极对电渗作用具有一定的不利影响,这主要与预插跟进阳极会额外产生金属阳极与土体间的界面电阻有关。

由图 2(b)、(c)、(d)、(e)可以看出,相同电势梯度作用下阳极跟进引起的电流增加持续时间较长,这与阳极跟进作用改变了各部分电阻的构成情况密不可分。电渗中,阳极区土体干燥收缩以及气体排出,导致阳极区界面电阻增加;阴极区气体排出引起阴极区界面电阻增加。阳极区土体干燥也会引起土体电阻的增加。此外,中间部位土体因含水率降低等原因也会引起电阻增加。

然而,本次试验中对电势变化监测的情况表明,阳极区电势突变最为明显,表明阳极区内电阻增加值占电路中整体电阻增加值比例最高,阳极区内的电阻增加对电渗电路中电流的下降起到了决定性作

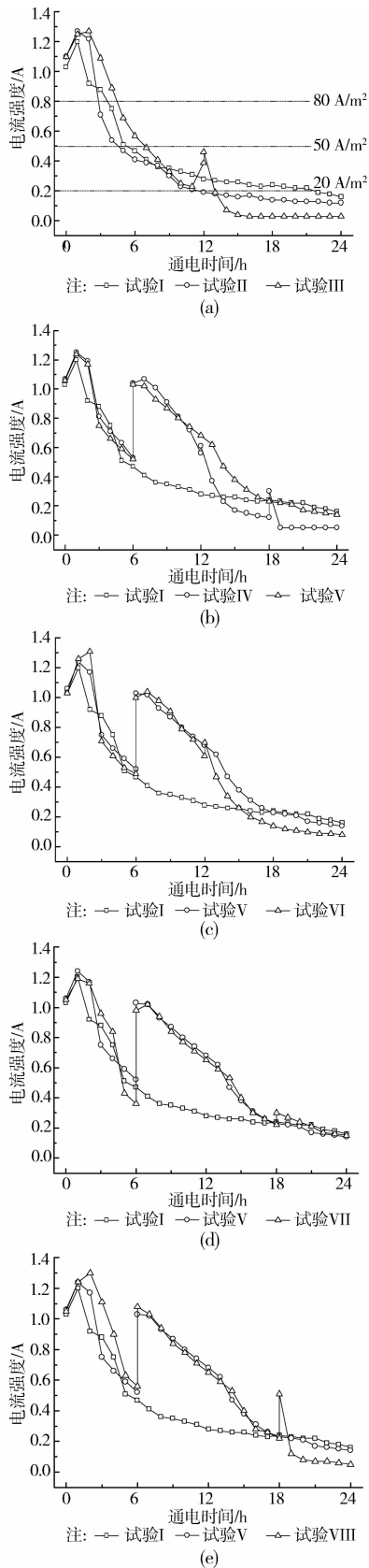


图 2 电流强度曲线

用。因此,当阳极区土体达到处理效果之后,将阳极相对阴极进行跟进,使得电渗电路规避了原先的阳极区电阻,电渗效率得以大幅提高,这是阳极跟进技

术得以发挥作用的原因所在。

由图 2(b)可见,试验 IV、V 的电流强度在试验早期与试验 I 的变化规律一致,试验中期高于试验 I,试验末期略低于试验 I。电流值低于试验 I 可能与试验 IV、V 早期土体处理效果较好,土体电阻增加值较大有关。试验 IV、V 的电流强度变化要优于试验 I,试验 V 的电流强度值要优于试验 IV。

试验 IV 在进行第 2 次阳极跟进后,电流强度值下降速率增大,进行第 3 次阳极跟进后,电流在瞬间增加后迅速降低并趋于 0,表明频繁(间隔时间较短)进行阳极跟进反而会降低电渗效率。试验 IV 在进行第 2 次阳极跟进时,电路中电流密度在 60 A/m^2 的高位,此时进行阳极跟进可能会打破土体中已形成的导电体系,进而降低电渗效率。

由图 2(c)可以看出,试验 VI 在阳极跟进后电流强度值高于试验 I,其中试验 VI 在进行第 2 次阳极跟进后电流值降低速率增大。第 2 次阳极跟进发生在电流密度在 60 A/m^2 的高位。综上可见,与试验 I、V、VI 相比,试验 V 的电流强度变化值表现最优。

图 2(d)显示了试验 I 与试验 V、试验 VII 的电流强度变化情况。试验 VII 在阳极跟进后电流强度值高于试验 I。当试验 VII 在试验开始后 18 h、电流密度 20 A/m^2 时进行第 2 次阳极跟进时,电流强度有小幅跳跃增长,这可能与土体经历 18 h 的电渗处理后,跟进部位土体已较为干燥、电阻较大有关。从整体电流变化来看,试验 VII 的第 2 次阳极跟进对电渗效果仍有促进作用,但由于电流密度为 20 A/m^2 时电渗效率已较低,其最后 6 h 的电渗加固效果有限。

图 2(e)显示了试验 I 与试验 V、试验 VIII 的电流强度变化情况。试验 VIII 在第 1 次阳极跟进后电流强度值高于试验 I。当试验 VIII 在试验开始后 18 h、电流密度 20 A/m^2 时进行第 2 次阳极跟进时,电流强度在明显跳跃增加后迅速降低并趋于 0。试验 VIII 的第 2 次阳极跟进与试验 IV 的阳极跟进位置一致,均为间隔 3 处,即阴极区土体界面位置。上述试验表明,针对阴极区土体进行阳极跟进,但阳极跟进并未出现电流值增大现象,表明对阴极区土体进行阳极跟进是无效的。

2.2 抗剪强度

试验结束后,将土体沿深度方向等分为两层、沿阴极到阳极方向等分为 4 段,共 8 个区块。于第 1 层表面每段中心部位利用室内微型十字板剪切仪进行抗剪强度测试,于每个区块表面的中心部位取土进行含水率、土体 pH 值等指标测试,每处取土不少于 40 g。

表 3 列出了试验 I 到试验 VIII 第 1 层土体各测试位置的十字板抗剪强度值。靠近阳极区的土体抗剪强度高于靠近阴极区的土体,且阳极跟进提高了原先远离阳极区的土体抗剪强度。试验 IV 到试验 VIII 中阳极跟进作用形成的新阳极区,其土体抗剪强度甚至高于初始阳极区土体的抗剪强度,显示了阳极跟进技术的有效性。由于试验 IV 中阳极跟进间隔时间相同,试验 IV 中除阴极区土体抗剪强度值较低外,其余位置抗剪强度值较为均匀。

表 3 土体抗剪强度

试验组次	抗剪强度 /kPa			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
I	2	15	17	35
II	4	8	13	30
III	4	10	15	24
IV	5	28	24	22
V	1	26	64	23
VI	3	29	22	20
VII	1	36	56	21
VIII	1	23	54	23

抗剪强度的差异性表明,当阳极区土体达到处理要求时,便可进行第 1 次阳极跟进,跟进位置设在尚需处理的土体中。在进行后续阳极跟进时,优先根据土体处理效果决定何时进行跟进,以免造成局部土体处理效果过好,导致能耗过高资源浪费。

2.3 排水量和含水率变化

图 3 为各组试验土体累积出流量随时间的变化规律。由图 3(a)、(b)可以看出,试验 I 土体排水优于试验 II 与试验 III,而试验 IV 土体排水则优于试验 I,同时阳极跟进作用下各组试验的土体排水均优于试验 I,表明了阳极跟进的有效性。试验 IV、VI 土体累积排水较少的原因,可能与第 1 次阳极跟进后作用时间较短有关,未能充分利用第 1 次阳极跟进产生的较高电流密度。

图 4 显示了各组试验不同位置处土体含水率的分布情况。各试验中土体含水率均表现出阳极区土体含水率低,阴极区土体含水率较高的规律。由图 4(a)、(b)可以看出,试验 I 的土体处理效果优于试验 II 与试验 III,试验 IV、试验 V、试验 VI 在阳极跟进作用下土体处理效果均优于试验 I,其中试验 V 处理效果较试验 IV 与试验 VI 处理效果要好。

由图 4(c)可以看出,试验 V、试验 VII、试验 VIII 在阳极跟进作用下土体处理效果均优于试验 I,其中

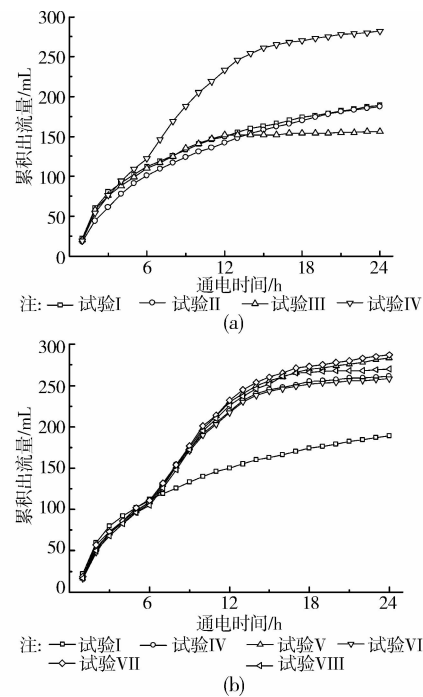


图 3 土体累积出流量

试验 VII、试验 VIII 的处理效果优于试验 V。试验 VII 与试验 VIII 在一层土体含水率分布情况上表现较为接近。由图 4(d)、(e)可以看出,在各组不同阳极跟进方案的试验中,试验 VII 的处理效果表现最好。

2.4 土体电导率和 pH 值

表 4 为各组试验不同位置土体 pH 值的分布情况。由表 4 可见,在电渗作用下由于试验过程中的电化学反应,阴极区土体 pH 值较处理前土体的 pH 值普遍提高,阳极区土体 pH 值较处理前土体的 pH 值有所降低。处理效果越好的组次,其阴极区土体 pH 值越高、阳极区土体 pH 值越低。pH 值变化的越显著,表明了土体内部电化学反应越强烈,也反映出阳极跟进能够促进电渗过程。

表 4 土体 pH 值

试验组次	pH 值			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
I	10.68	8.76	8.04	7.32
II	10.62	8.69	8.43	7.37
III	10.54	8.58	8.17	7.39
IV	10.74	8.73	7.46	7.44
V	10.68	9.07	7.24	7.47
VI	10.81	8.81	7.52	7.48
VII	10.90	8.85	7.28	7.46
VIII	10.84	8.54	7.31	7.45

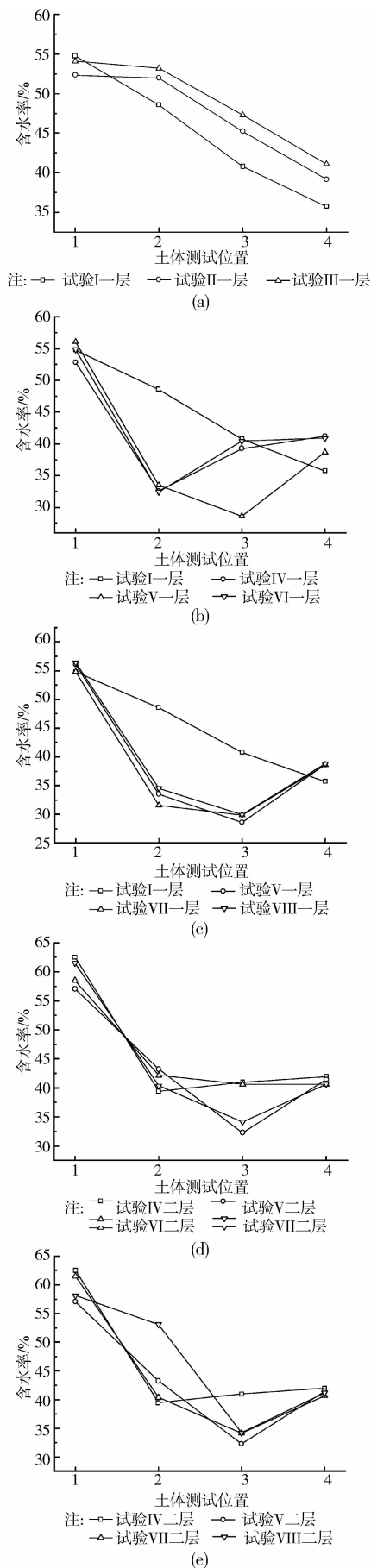


图 4 土体含水率分布

表 5 为各组试验不同位置土体电导率值的分布情况。电渗作用后,越靠近阳极区,土体电导率值越大,大于处理前的土体电导率值 4.96,越靠近阴极区,土体电导率值越小。同时,阴极区土体 pH 值越高,土体电导率值越低,表明土体电导率的降低与电化学反应引起的酸碱度的变化密切相关。

表 5 土体电导率

试验组次	土体电导率 /ms			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
I	3.83	1.58	4.52	8.07
II	3.49	2.69	4.45	7.93
III	3.52	2.94	4.17	6.96
IV	3.27	1.41	4.23	6.72
V	3.69	1.15	5.86	6.76
VI	3.19	1.48	4.2	6.74
VII	3.06	1.24	5.78	6.75
VIII	3.09	1.51	5.73	6.74

2.5 阳极腐蚀量

图 5 为各组试验中阳极质量减小值,此处定义为阳极腐蚀量。试验中阳极 1 到阳极 4 的命名根据实际作用时阳极跟进的次数与先后顺序确定,其中,阳极 1 为初始阳极,阳极 2、3、4 均为跟进阳极。由图 5 可以看出,电渗处理效果与阳极腐蚀量成正比,阳极腐蚀量越大,表明电渗作用效率越高;当电渗作用基本停止时,阳极腐蚀量也基本为 0。

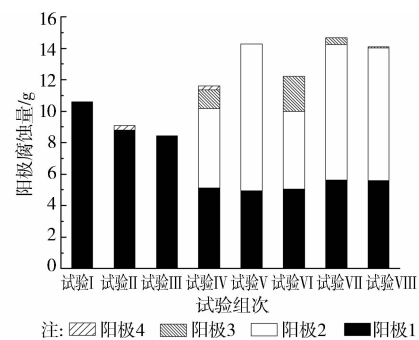


图 5 阳极腐蚀量

此外,试验 IV、V、VI、VII、VIII 的阳极腐蚀量大于试验 I、试验 II、试验 III,表明阳极跟进导致了阳极腐蚀量的增加,也间接表明阳极跟进促进了土体的电渗固结。从试验 II 阳极 2 的质量减小可以看出,预插跟进阳极会使跟进阳极产生一定的腐蚀。从试验 IV 可以看出,阳极 2、3、4 的阳极腐蚀量依次减小,表明第 2 次与第 3 次阳极跟进其电渗加固效果均小于第 1 次阳极跟进。试验 V、VI、VII、VIII 也得到同样

的结论。

3 结论

1) 采用阳极跟进技术可有效降低电路中阳极区电阻, 提高电渗加固效果。

2) 采用阳极跟进技术时, 第1次阳极跟进效果最为显著。

3) 电渗法加固软黏土地基过程中, 针对阴极区土体开展阳极跟进无法获得显著的加固效果。

参考文献:

- [1] 曹永华, 高志义. 电渗法中排水固结理论与实践的若干问题[J]. 中国港湾建设, 2010(3): 22-24, 78.
Cao Y H, Gao Z Y. Some problems on theory and application of drainage consolidation in electroosmotic for ground improvement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(3): 22-24, 78.
- [2] Esrig M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics [J]. Journal of the SMFD, American Society of Civil Engineers, 1968, 94(4): 899-921.
- [3] Shang J Q. Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drains [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 491-499.
- [4] Su J Q, Wang Z. The two-dimensional consolidation theory of electro-osmosis [J]. Geotechnique, 2003, 53(8): 759-763.
- [5] Zhuang Y F, Wang Z. Interface electric resistance of electroosmotic consolidation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(12): 1617-1624.
- [6] 李瑛, 龚晓南. 含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1254-1259.
Li Y, Gong X N. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1254-1259.
- [7] 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 Y, Gong X N, Zhang X C. Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 709-714.
- [8] 李瑛, 龚晓南, 卢萌盟, 等. 堆载-电渗联合作用下的耦合固结理论[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 77-82.
Li Y, Gong X N, Lu M M, et al. Coupling consolidation theory under combined action of load and electro-osmosis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 77-82.
- [9] Glendinning S, Lamont-Black J, Jones C J F P, et al. Treatment of lagooned sewage sludge in situ using electrokinetic geosynthetics [J]. Geosynthetics International, 2008, 15(3): 192-204.
- [10] Glendinning S, Lamont-Black J, Jones C J F P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(3): 491-499.
- [11] Glendinning S, Jones C J F P, Pugh R C. Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics [J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2005, 5(2): 138-146.
- [12] Chew S H, Karunaratne G P, Kuma V M, et al. A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, 22(1/2): 17-35.
- [13] 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(22): 287-302.
- [14] 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.
Gong X N, Jiao D. Experimental study on electro-osmotic consolidation of soft clay under intermittent current condition [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(6): 1725-1730.
- [15] Gray D H, Somogyi F. Electro-osmotic dewatering with polarity reversals [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(1): 51-54.
- [16] Lo K Y, Ho K S. The effects of electroosmotic field treatment on the soil properties of a soft sensitive clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(6): 763-770.
- [17] 李瑛, 龚晓南. 等电势梯度下电极间距对电渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 89-95.
Li Y, Gong X N. Experimental research on effect of electrode spacing on electro-osmotic dewatering under same voltage gradient [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 89-95.

(编辑 王秀玲)