

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



板土交界处裂隙发育与化学注浆时间 对一维电渗固结的影响

高程, 顾佳杰, 孙秀丽, 刘文化

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:通过一维电渗固结试验,研究了板土交界处裂缝(板土脱开)与注浆时间对软土电渗固结过程的影响。采用紧序注入 CaCl_2 溶液和 Na_2SiO_3 溶液的方式,进行注浆时间对照试验。基于沉淀或胶体和离子对电渗固结的综合效应,研究了电流、排水量、土样含水量与抗剪强度、裂缝与体缩,以及电渗能耗等随注浆时间的变化规律。结果表明:板土交界处裂隙(板土脱开)总是先于其他土体裂缝产生,板土脱开导致电流值的急剧减小是造成电渗效果下降的主要原因;一维电渗固结过程中存在板土交界处裂隙发展旺盛时间 t_{cr} ,以 t_{cr} 为表征指标确定最佳注浆时间,可达到最佳的电渗效益。为防止在土体中出现明显的含水量突变现象,应尽可能避免在 $1/3t_{cr}$ 时刻前注浆,在 $2/3t_{cr}$ 时刻注浆能够实现最佳电渗固结效果。

关键词:电渗固结;注浆时间;裂缝;排水量;软土

中图分类号: TU411.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)04-0067-09

Influence of electrode crack development and chemical grouting time on one dimensional electroosmosis consolidation

Gao Cheng, Gu Jiajie, Sun Xiuli, Liu Wenhua

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The effects of cracks (soil disengagement) and grouting time at the interface between slab and soil on the osmotic consolidation process of soft soil were studied through one-dimensional electroosmosis consolidation test. The “grouting time” control test was performed by injecting CaCl_2 solution and Na_2SiO_3 solution in a tight sequence. Based on the combined effects of “precipitation or colloid” and “ion” on electroosmosis consolidation, the variation of current, drainage, soil moisture content and shear strength, cracks and body shrinkage and energy consumption of electroosmosis with grouting time were studied. The test results show that cracks at the interface between slab and soil (slab detachment) always occur before

收稿日期: 2019-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51609102, 51709129); 江苏省自然科学基金(BK20170187)

作者简介: 高程(1995-), 男, 主要从事电渗固结软土研究, E-mail: 1205520089@qq.com.

孙秀丽(通信作者), 女, 博士, 副教授, E-mail: sunxiuli@jiangnan.edu.cn.

Received: 2019-10-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51609102, 51709129); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20170187)

Author brief: Gao Cheng (1995-), main research interests: electroosmosis consolidation soft soil, E-mail: 1205520089@qq.com.

Sun Xiuli (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: sunxiuli@jiangnan.edu.cn.

other parts, and the sharp decrease of current value caused by slab detachment is the main reason of the reduction of electroosmotic effect; During the consolidation process, there is a time t_{cr} for the fast development stage of crack at the slab-soil interface. Using t_{cr} as the indicator to determine the optimal grouting time can achieve the best electroosmosis effect. In order to prevent the obvious abrupt change of water content in the soil, it should be noted that the grouting time should be not earlier than $1/3 t_{cr}$, and grouting at $2/3 t_{cr}$ can achieve the best electroosmotic consolidation effect.

Keywords: electro-osmosis consolidation; grouting time; crack; displacement; soil

吹填土和河道淤泥等软粘土孔隙比大、含水率高、抗剪强度极低^[1],因此,形成的地基土必须经过加固处理才能满足工程要求。电渗法是一种能使土体快速排水固结的方法,其排水速率与土颗粒的大小无关,适用于含细颗粒、低渗透性、高含水率的软粘土地基处理^[2]。

然而,电渗普遍存在电势传递效率低、界面电阻增加导致电流减小等问题。为了改善电渗处理效果,Gray 等^[3-4]提出了电化学处理的方法。Lefebvre 等^[5]、Zhang 等^[6]、Xue 等^[7]发现在阳极处加入化学溶液可以减小电极处的功率损耗以及改善土壤与电极间的接触,从而降低了界面电阻。学者们对化学注浆的研究主要集中在注浆位置^[8-9]、浆液类型和离子种类^[10-11]、注入浓度^[12]以及双液注浆时溶液配比等方面^[13],并取得了较好的效果。但对注浆时间的研究却很少关注,注浆时间对电渗效果可能存在较大影响。

笔者从解决电渗过程中板土交界处裂隙(板土

脱开)现象出发,通过注入氯化钙和硅酸钠产生的沉淀物质来填充板土交界处裂隙,研究注浆时间对电渗过程的影响。注浆时间过早,浆液的胶结作用会降低土体的孔隙率,阻塞排水通道;而注浆时间过晚,裂缝开展较大,显然也得不到最佳的电渗固结效果。因此,最佳注浆时间的确定对电渗固结具有重要意义。通过浆液注入时间的对比试验,对试验中电流、排水量、抗剪强度、能耗等数据进行测定分析,基于“沉淀或胶体”和“离子迁移”对电渗的综合效应确定最佳注浆时间范围。

1 试验装置和方法

1.1 试验材料

试验用土为太湖淤泥,将淤泥混合均匀后自然风干,磨细之后过 2 mm 筛,将过筛的土密封保存备用。经测定,土样的液限为 49%,试验用土的含水率为 55%,其基本物理性质如表 1 所示。

表 1 淤泥的物理性质指标

Table 1 Physical properties of the sludge

土样名称	相对土粒密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	55%含水率下湿密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	55%含水率下抗剪强度/kPa	pH 值
太湖疏浚淤泥	2.74	1.68	49	0.375	11.7

1.2 一维电渗试验装置

试验采用有机玻璃制的电渗固结装置。装置主体由中间的土壤槽和侧边的集水槽组成,装置容器壁厚 5 mm,宏观尺寸 200 mm×100 mm×145 mm,其他参数见图 1。考虑到有机玻璃是一种具备良好透明性、力学性能和化学稳定性的易加工材料,整个水平一维电渗装置均由有机玻璃材料制成。在有机玻璃容器内部设有一块多孔的固定隔板(固定方式为胶结)，“多孔”的目的是让电渗出的水顺利地通过孔洞而流至储水室,再通过储水室壁面上的排水孔洞,最后流入量筒。

试验的阴极板为纯钛板,尺寸为 100 mm×100 mm×1 mm,开有小孔,具有良好的透水性,便

于水的流出。阳极板为镀钨钛板,具有极为优越的导电性和耐腐蚀性,可承受阳极剧烈的氧化反应。在电极和透水隔板之间有一层滤纸,防止土颗粒的流失。电源采用直流稳压电源,输出电压为 0~60 V,输出电流为 0~3 A。

1.3 试验方案

为研究不同注浆时间对电渗效果的影响,设计了 6 组试验。具体如表 2 所示:T1 作为基准试验,是为了找出在不注浆的情况下的板土交界处裂隙发展规律,确定板土交界处裂隙开展最旺盛时间 t_{cr} 。在 T1 组试验结果的基础上确定 T2~T6 注浆时间。试验电源采用稳压输出模式,输出电压为 30 V,即电势梯度为 1.5 V/cm,试验环境温度为 25 ℃左右。

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

组别	注浆溶液(注浆量和注浆浓度)	注浆时间/h	注浆位置
T1	不注浆	无	无
T2	NaCl(50 mL, 浓度 20%)	0	阳极附近与阴极附近
T3	Na ₂ SiO ₃ :CaCl ₂ = 1:1(各 25 mL, 浓度 20%)	0	阳极附近与阴极附近
T4	Na ₂ SiO ₃ :CaCl ₂ = 1:1(各 25 mL, 浓度 20%)	1/3t _{ei}	阳极附近与阴极附近
T5	Na ₂ SiO ₃ :CaCl ₂ = 1:1(各 25 mL, 浓度 20%)	2/3t _{ei}	阳极附近与阴极附近
T6	Na ₂ SiO ₃ :CaCl ₂ = 1:1(各 25 mL, 浓度 20%)	t _{ei}	阳极附近与阴极附近

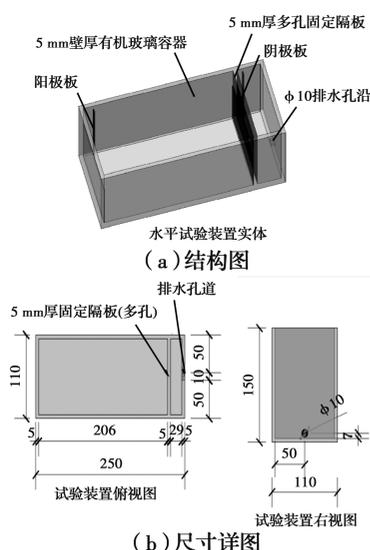


图 1 水平一维电渗装置示意图

Fig. 1 Horizontal one-dimensional electroosmosis device

1.4 试验步骤

1) 在有机玻璃槽的内壁均匀涂抹凡士林以减小土体和内壁之间的摩擦。

2) 将 55% 含水率的疏浚淤泥分 3 次倒入有机玻璃槽内, 每次振捣均匀以排出土体内的气泡。

3) 放置电极板, 同时在阴极电极板和开孔隔板之间放置滤纸, 连接电路, 放置好集水量筒, 安装好摄像头以进行试验期间的观察。

4) 在指定时刻采用针管注射器进行注浆。注浆方法为: 将氯化钙和硅酸钠溶液分别装在两支注射器中(各 25 mL, 浓度 20%), 沿着板土之间的裂隙先后紧序地将两管溶液慢慢地一次性全部注入到裂隙中。

5) 每隔 1 min 测定一次试验电流, 每隔 0.5 h 读取一次出水量, 试验共进行 23 h。

6) 试验结束后, 立刻检测土样的含水率、抗剪强度等指标, 土体抗剪强度由微型十字板剪切仪测定。

2 板土交界处裂隙发展旺盛时间的确定

2.1 电流

T1 试验的时间-电流变化如图 2 所示, 在试验开始的初期阶段, 电流大致呈线性下降, 大约在 2 h 左右, 电流下降速率开始变大, 此时对应的正好是阴阳极电极板处的板土交界处裂隙开始发育的时间。在 2~7 h(图 2 中箭头区域)左右的这一段时间内, 是电渗排水发展迅速的时段, 电流下降速率非常快, 从 210 mA 降低到 139 mA, 共降低了 71 mA, 占电流总降低值的 44%。造成电流迅速下降的主要原因是阴阳极电极板与土体逐渐脱离, 造成电极板和土体之间的界面电阻^[14]迅速增大, 以及随着水分子从土体中快速排出, 土体电阻增大, 试验电流下降速率迅速增大。7~15 h 之间, 随着板土交界处裂隙发展速度慢慢降低直到发育稳定, 电流下降速率逐渐放缓, 但是, 随着土中孔隙水的排出以及土体中一些细微裂缝的产生, 土体电阻逐渐变大, 电流值还是持续稳步下降的趋势。15 h 之后随着大部分水被排出以及土体裂缝的进一步发展, 试验进入了中后期阶段, 电流值降低值且变化比较平缓直至试验结束。

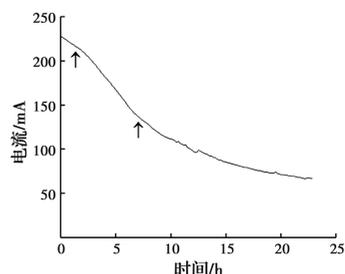


图 2 T1 时间-电流变化曲线图

Fig. 2 T1 Time-current curve

2.2 排水量

如图 3 所示, 排水量的变化和电流变化之间有着很好的对应关系。从试验开始到板土交界处裂隙

发展速率最快的6 h内,是电渗排水的快速发展阶段,此时,排水速率保持在较高值,试验0~6 h内排出了107.7 mL的水,占整个试验总排水体积的60.5%。而随着这个时段内电渗固结速率的快速发展,也造成了土体收缩进而产生了板土交界处裂隙,同时水分子从土中的大量迁出也使得土体电阻值进一步升高,导致电流值的快速下降。6 h后,电渗速率慢慢放缓,电流和排水量的变化速率也随之放缓。到23 h,试验土体虽然还有电流,但是此时的排水速率近乎为0,继续通电只会浪费能耗,可以认定此时试验可以终止。

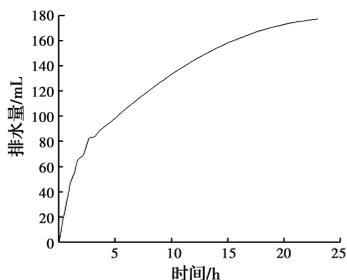


图3 T1 时间-排水量变化曲线图

Fig. 3 T1 Time - displacement curve

2.3 板土交界处裂隙宽度随时间的改变

通过摄像头连续记录试验过程,依据电流及排水量的变化规律,截取了几个关键时段的土体样貌图,如图4所示。图5为通过摄像头每0.5 h拍摄采集的整个电渗过程的板土交界处裂隙宽度随时间的变化曲线图。在0 h时段,由于土样是处于液限以上的高含水量可流动状态,因此,阴阳极电极板在土体侧向压力的状态下,紧紧地贴着电极板。试验开始后,由于土体中负孔隙水压力的快速发展,有效应力的增大,使得土体颗粒之间相互挤密,土体水平方向发生了明显的体缩现象^[15]。由于负孔隙水压力是一种吸力,当这种吸力大于土体和阴阳极电极板之间的粘合力时,就会表现出土体表面和电极板脱开的现象。由于土体在高度方向上还有自重沉降,越是靠下的部分自重应力越大,所以,只有表面以及上部的土体与电极板脱开,下部土体还是与电极板相粘合接触的。在2 h左右,阴阳极电极板开始出现与土体脱开的现象;随着电渗的进一步发展,4 h时板土交界处裂隙宽度增大;通过多组试验观察,在6 h时左右板土交界处裂隙的发展速率达到最大值,此时对应的电流的下降速率也开始慢慢变缓。6 h之后的电渗速率开始逐渐降低,排水量速率开始减慢,板土交界处裂隙的变化速率开始降低直到15 h之后基本稳定不变。在试验条件下,6 h

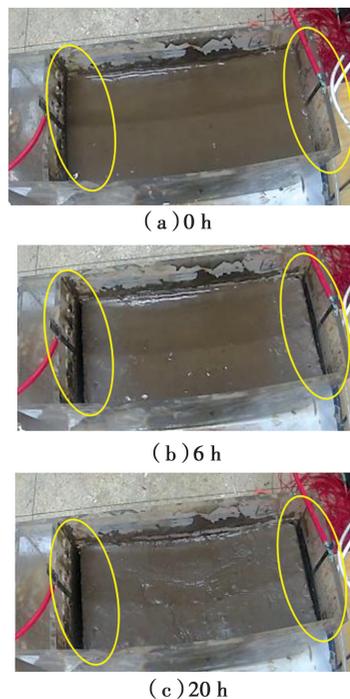


图4 T1 板土交界处裂隙变化实物图

Fig. 4 Physical map of fissure change at T1 plate soil interface

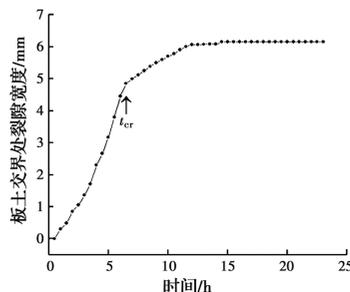


图5 T1 板土交界处裂隙宽度-时间变化曲线图

Fig. 5 Fracture width-time curve of T1 plate soil interface

左右是一个关键的转折点,0~6 h为电渗排水的高峰期,6 h之后电渗速率开始放缓。在20 h时可以看到,虽然板土交界处裂隙有所增大,但是相比6 h时而言并未增长多少,而且其增长速率在后期慢慢减小直到为0。同时,整个土段的样貌比较完整,除了在12 h后产生几条细微的裂缝之外,整个土体并没有明显的宽裂缝的产生。主要是因为,土体中裂缝的产生的主要原因是电渗时土体中负孔隙水压力快速发展,当土体中某一点的负孔隙水压力的值大于土体的抗拉强度时,这一点的土会被拉开,从而产生了裂缝^[16]。在试验条件下,由于排水量比较少,负孔隙水压力发展没有达到大于土体抗拉强度的程度,所以,整个土段没有明显的宽裂缝,直到试验后期才有细微土体裂缝慢慢产生。在本试验条件下,板土交界处裂隙是导致电渗进程变慢的主要原因,

并且板土交界处裂隙的发展时间远远早于土体中裂缝的发展时间。通过分析电流、排水量及板土交界处裂缝开展规律,确定试验条件下的板土交界处裂隙发育旺盛时间 t_{cr} 为 6 h,以板土交界处裂隙发育旺盛时间作为确定化学注浆时间的表征指标,以期达到最优的修复板土交界处裂缝,提高电渗效果的目的。

3 化学注浆时间对一维电渗的影响

由基准试验可知,为达到最优的弥合板土交界处裂缝的效果,化学注浆应在 t_{cr} 之前进行。因此,进行了 4 个注浆时间点的对比试验:0、 $1/3t_{cr}$ 、 $2/3t_{cr}$ 和 t_{cr} ,分析不同时间点注浆对电流、排水量、土体含水量、抗剪强度、土体体缩及能耗的影响规律。

3.1 化学注浆时间对电流的影响

T2~T6 时间-电流变化曲线如图 6 所示。由于相同的初始条件,T2~T6 的 5 组试验的初始电流值均在 215 mA 左右,注浆导致电流发生了突变,化学注浆之后的峰值电流均在 870~910 mA 的范围内。除了 T2 和 T6,其他组的电流在注浆后均呈现慢慢降低的趋势。T2 在注浆 2 h 后发生了电流增大,原因是在阳极和阴极注入 NaCl 溶液之后,溶液向土中扩散, Na^+ 和 Cl^- 离子分别向阴极和阳极迁移,在土体孔隙中形成了贯通的通道,离子在土体中开始慢慢扩散开来,使得土体中的离子浓度变大,使得电流有所回升,而后随着试验的进行,土体含水率减少,土体电阻增大,电流自然又慢慢降低。T6 在 15 h 时电流变化速率增大也很有可能是这个原因(也有可能是试验的偶然性导致)。此外,从图 6 可知,各组试验在注浆完成之后的前期(注浆后的 4~5 h 内)的电流下降速率情况: $T6 > T5 \approx T4 > T3 \approx T2$,即较晚注浆的组别电流下降的速率较快,因为较晚注浆的组别在注浆之前电极板和土体之间的裂隙已经十分明显,虽然注浆生成的沉淀可以弥补电极板和土体之间的裂隙,但是由于裂隙过大并且只要在随后的时间内再次重新开裂,电流就会急剧下降;而较早注浆的组别由于电极板和土体本身之间的连接就比较紧密,此时注浆产生的沉淀会进一步巩固板土之间的连接,所以电流下降的速率会相对缓慢一些。

3.2 化学注浆时间对排水量的影响

由图 7 可知,基准试验 T1 的排水量远小于 T2~T6 试验,主要是因为 T1 中的导电离子数量最少,且出现板土交界处裂隙,增大了界面电阻,导致

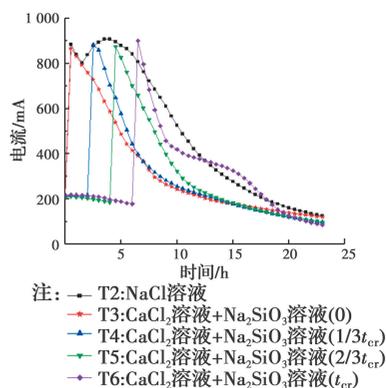


图 6 T2~T6 时间-电流变化曲线

Fig. 6 Time-Current Curves under T2~T6

试验中电流降低,从而排出的水最少,这也可以证明化学注浆对电渗固结排水有明显的提高作用,各组试验的排水速率在注浆后均有明显的上升。

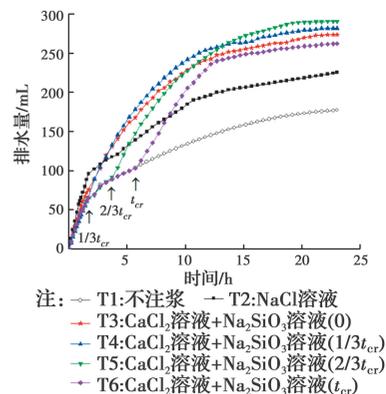


图 7 T1~T6 时间-排水量变化曲线

Fig. 7 Time-Displacement Curve under T1~T6

从图 7 中注浆时刻的曲线斜率来看,T2 的排水速率在注入 NaCl 溶液后的 2 h 内保持领先,之后,由于开始出现板土交界处裂隙,其排水速率第一次降低,在大约 10 h 之后,由于土体中裂隙的发展(见表 3),其排水速率有第 2 次下降。T3~T6 在注浆后的排水速率大小基本相等,主要是因为电渗注浆后试验电流相对于未注浆时提高巨大,注浆后相当于一次全新的电渗试验的开始。并且在未注浆之前,T3~T6 试验组排水量虽然有差别,但是由于此时试验电流不大,所以排水量差别不是很大,导致各个试验组的土体性质相差不大,所以,在注浆之后的排水速率大小基本相等。此外,注浆之后 T3~T5 的排水量变化均较为缓和,没有出现任何突变现象,只有 T6 的排水速率在大约 13 h 时有较为明显的减小,这是由于此时出现的土体裂缝在之后的时间里过于迅速的发展而导致的(见表 3)。

表 3 T2~T6 土体状态
Table 3 Soil State of T2~T6

组别	注浆时间	水平体缩/mm	注浆时刻阳极裂隙宽/mm		注浆时刻阴极裂隙宽/mm	
T2(NaCl)	0	12	0		0	
T3	0	11	0		0	
T4	$1/3t_{cr}$	8	1		1	
T5	$2/3t_{cr}$	11	3		2	
T6	t_{cr}	12	4		4	

组别	其他裂缝 I				其他裂缝 II			
	位置	方向	出现时间	尺寸、形状	位置	方向	出现时间	尺寸、形状
T2(NaCl)	容器中央	起初垂直于电极板后与电极板平行	10 h10 min	长 180 mm 宽 4 mm(弧形)				
T3	容器中央	与电极板平行	7 h10 min	长 110 mm 宽 3 mm(细小折线裂纹)				
T4	容器中央	与电极板平行	4 h	长 90 mm 宽 4 mm(折线型)	容器中央靠向阳极	与电极板垂直	8 h10 min	长 70 mm 宽 8 mm(直线型)
T5	容器中央靠向阴极	与电极板平行	6 h20 min	长 95 mm 宽 2 mm(直线型)				
T6	容器中央	与阴极板成 70°角	13 h10 min	长 80 mm 宽 5 mm(弧型)				

T1~T6 的最终排水量情况如表 4 所示,各组排水量大小为 $T5>T4>T3>T6>T2>T1$,由此可以看出:T2 作为对照试验,其排水量要远小于其他双液注浆的 4 组,因此可以证明, $CaSiO_3$ 沉淀的生成确实有利于促进电渗进程,其具体作用主要表现在弥补板土脱开的过程中。并且 Ca^{2+} 离子的离子交换能力很强,可以置换出土壤颗粒表面的低价阳离子,使得土壤双电层的水膜厚度减小^[17],水化离子的半径减小,促进水分的排出。土壤中除了生成沉淀的 Ca^{2+} 外,还有一些游离的 Ca^{2+} ,对电渗排水也会有促进作用。T5 取得了本次试验中的最大排水量,即当注浆时间约为板土交界处裂隙发展旺盛时间的 2/3 时刻时,电渗排水效率最高。

表 4 T1~T6 最终排水量

Table 4 Final displacement of T1~T6

组别	最终排水量/mL
T1	177
T2	226
T3	271
T4	282
T5	294
T6	259

3.3 化学注浆时间对含水量和抗剪强度的影响

在刮去土体表面的沉淀物质与其他杂质后进行局部取样,取样位置为距阴极 3、7、10、18(靠向阴极)、18(靠向阳极)、20 cm 处的位置,取样完成后进行样品含水量和抗剪强度的测定。

各工况试样不同位置的含水量如图 8 所示,基准试验 T1 的含水率从阳极到阴极慢慢提高,其平均含水率是所有试验中最高的,因为 T1 排出水的量最少。由于土体靠近阴极处是水流出的边界条件,所以 T1~T6 试验的阴极处的含水率都比较高。试验结束后的土体在距阴极 18 cm 的位置处存在明显的含水量突变界线,该突变现象在 T3 试验中尤为明显。在试验的开始阶段,T3 便实施了化学注浆,生成了 $CaSiO_3$ 沉淀,并且还有少量游离的 SiO_3^{2-} 在阳极的酸性环境下生成少量的硅胶颗粒,沉淀和硅胶颗粒填充了土壤孔隙^[18],堵塞了阳极的电渗排水通道,阻碍了水分子的运移,从而导致阳极区域的土体含水量居高不下。从测定结果中可以看出,注浆时间越早,此种“含水量突变现象”就越明显。因为越晚注浆,阳极区域往阴极运移的水分子数量越多,使得“含水量突变现象”越弱。

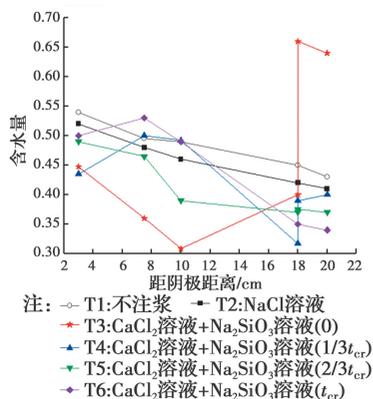


图 8 T1~T6 位置-含水量变化情况

Fig. 8 Water content of different Location for T1~T6

根据图 8 可得出各组试验的含水量情况: T2 注入的是纯 NaCl 溶液, 距阴极越远, 样品的含水量越低, 与不注浆的单纯电渗试验的土体含水量规律类似。T3 由于含水量突变现象的存在, 在靠近阳极的区域过早产生的沉淀和硅胶颗粒阻塞了电渗排水通道, 使得最低含水量的位置出现在了土体的中部。T4 在距阴极 18 cm 位置处也存在较为明显的含水量突变现象, 但与 T3 不同的是, 其含水量突变处成为了最低含水量的位置, 而最高含水量区域则在土体中部, 这表明在试验结束时, 大部分水分子已从阳极渗透至土体中部并停留在土体中部附近。与 T3、T4 相比之下, T5 和 T6 的含水量突变现象并不明显, 其中 T5 的含水量规律更接近于 T2, 大部分水分子在试验结束时已排至阴极; 而 T6 由于是在板土交界处裂隙旺盛时刻注入化学溶液, 随着电渗的继续进行, 在电压梯度的驱使作用下, 阳极处新加入的溶液被运移到阴极, 因此, 阳极成为了含水量最低的位置, 此外 T6 最高含水量所处位置的情况则与 T4 相似, 都是在中部附近。

图 9 为各组试验不同位置处的抗剪强度。在试验结束后立刻测量各组不同位置的土体抗剪强度, 因此, 不考虑 CaSiO_3 沉淀的龄期对抗剪强度的影响。基准试验 T1 的平均抗剪强度为 12.75 kPa, 是所有试验组中最低的, 由此可见, 化学注浆有助于提高土体的抗剪强度。但是, 由于试验中化学物质的加入和化学反应的生成, 土体性质发生了改变, 因此, 土体含水率和土体抗剪强度之间不存在绝对的一一对应关系。由图 9 可知, 除 T3 以外, 其他组别的最大抗剪强度位置均位于阳极附近, 主要原因是硅酸钙沉淀的附着、水化硅酸钙胶体的粘附以及少量硅胶颗粒的堵塞大大提高了阳极区域的抗剪强度。而 T3 由于阳极处发生了含水率的突变, 导致

高含水量区的存在, 在刮去表面的硅酸钙沉淀后, 样品的抗剪强度很低, 其最大抗剪强度的位置存在于土体中部。各组试验的阴极区由于靠近排水口, 有大量孔隙水的堆积, 即使有 CaSiO_3 沉淀的生成也弥补不了高含水率对抗剪强度的削弱作用, 造成了各组在阴极处的抗剪强度值都比较低且相差不大。T5 试验组的平均抗剪强度值最大, 为 19.8 kPa, 比基准试验 T1 高出 55%, 说明在 $2/3t_{cr}$ 时注浆可以对土体抗剪强度提高起到最好的效果。

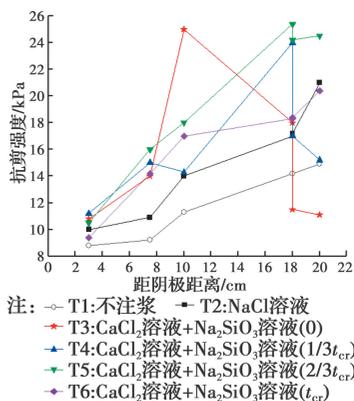


图 9 T1~T6 位置-抗剪强度变化情况

Fig. 9 Shear strength of different Location for T1~T6

3.4 化学注浆时间对土体裂隙与体缩的影响

图 10 为 T2~T6 的裂隙实物图, 最显而易见的是 T2 与 T3~T6 的土体样貌区别: T2 的板土脱开现象较为明显, 且其在阳极板和阴极板位置处有很多不规则裂纹, 相比之下, T3~T6 由于沉淀的弥补作用, 板土交界处裂隙较为规整。

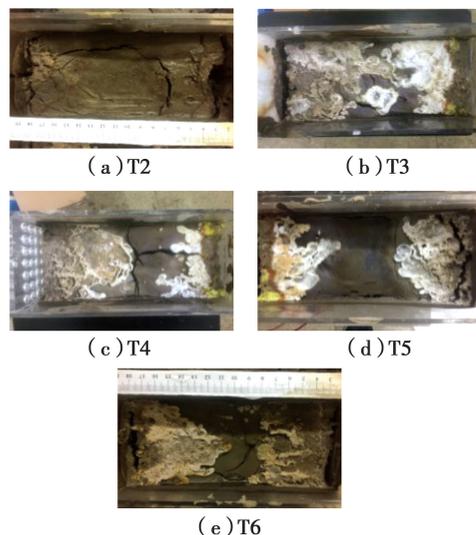


图 10 T2~T6 土体裂隙实物图

Fig. 10 T2~T6 Soil crack physical map

根据表 3 中关于水平体缩量的结果可知: T2 由于不存在板土交界处裂隙的弥补, 阴阳极电极板和

土体之间的收缩十分厉害,因此,水平体缩量较大; T3、T5 和 T6 虽然存在板土交界处裂隙的弥补,但注浆后生成的胶体牢牢附着于土粒,一旦土体和电极板之间脱开,收缩也比较大,因此,水平体缩量也较大;而 T4 由于土体中的多条宽裂缝的出现和发展减小了土体沿水平方向的体缩,其最终水平体缩量较小。

根据表 3 中关于板土交界处裂隙的情况可知:由于 T6 是所有组别中最晚注浆的,因此,其在注浆时刻的板土交界处裂隙宽度是所有组别中最大的,其阳极裂隙和阴极裂隙的宽度均已达至 4 mm,而此时此刻的土体尚未出现其他裂缝,却又经过注浆溶液与沉淀的巩固,从而更进一步地延迟了土体裂缝的出现时间。另一方面,T6 实施注浆的时间 t_{cr} 相对于其他注浆组别来说晚一些,所以此时 T6 组别的电渗排水强度会低一些,此时注浆溶液与沉淀作用的发挥尚需一段时间的缓冲,因此,与 T3~T5 相比,其在注浆后的前期排水速率未能达到 T3~T5 的高度,也正是因为如此,其土体裂缝的出现时间相比于其他组来说会推迟,从中可以得到结论:虽然土体裂缝的出现存在极大的随机性,但总体而言,在本试验条件下相比其他注浆时间,在板土交界处裂隙旺盛时间 t_{cr} 时刻实施注浆可以起到延缓土体裂缝出现的最佳作用。

3.5 能耗

根据图 11 和表 5 反映的能耗情况,可以得知:T2 的总能耗最大,主要是因为缺少沉淀和胶体的弥补,土体电渗的速率较慢,电流变化比较缓慢,在后期一直保持较高的电流值,从而大幅度地增大了能耗。在双液注浆的 4 组工况中,T3 的总能耗略大,剩下 3 组的总能耗很接近。但是由于各组的排水量不同,不能由总能耗来评判各组的耗能情况。从平均单位排水能耗来看: $T5 < T4 < T6 < T3 < T2$,所以能够实现最佳电渗效益的化学注浆时间约为板土交界处裂隙旺盛时间的 $2/3$ 时刻。

表 5 T2~T6 能耗情况

Table 5 Energy consumption of T2~T6

组别	总能耗/Wh	平均单位排水能耗/(Wh · mL ⁻¹)
T2	340.08	1.504 8
T3	218.94	0.799 1
T4	199.73	0.708 3
T5	199.67	0.686 2
T6	201.95	0.767 9

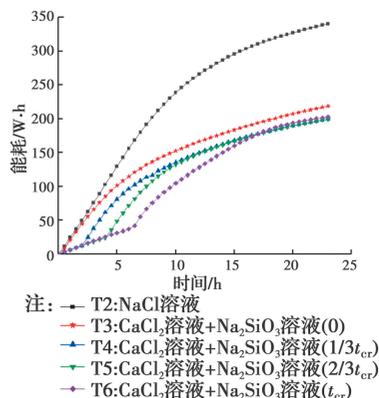


图 11 T2~T6 时间-累计能耗变化曲线

Fig. 11 Time-Energy Consumption Curve under T2~T6

4 结论

通过基准试验及化学注浆对比试验,在试验的特定条件下(电压梯度为 1.5 V/cm,所用土壤为初始含水率 55% 的太湖淤泥),研究了板土交界处裂隙开展规律及注浆时间对电渗固结的影响,得出以下结论:

- 1) 板土交界处裂隙总是优先于土体裂缝产生,且板土交界处裂隙的出现大大降低了电渗固结的效率。
- 2) 采用氯化钙和硅酸钠溶液进行双液注浆产生的沉淀对电极和土体之间裂隙的弥补作用巨大,增加了高效率电渗的时间并且对土体强度的提高也很有帮助。
- 3) 为防止在土体中出现明显的含水量突变现象,应尽可能避免在 $1/3 t_{cr}$ 时刻前注浆。
- 4) 能够实现最佳电渗效益的化学注浆时间约为板土交界处裂隙旺盛时间的 $2/3$ 时刻,主要体现在排水量大、单位能耗较低和土样平均抗剪强度相对较高的优点上。
- 5) 虽然板土交界处裂隙旺盛时间 t_{cr} 不是最佳注浆时刻点,但是在 t_{cr} 时刻实施注浆可以起到延缓土体裂缝出现的最佳作用。

参考文献:

- [1] 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.
LI Y W, ZHOU J, GONG X N, et al. Experimental research on influence of electrode array on electroosmotic effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1972-1978. (in Chinese)
- [2] LIU F Y, WEI M, ZHANG L, et al. Experimental

- study of the electro-osmosis consolidation of soft clay under anode follow-up [C]//Geo-Shanghai 2014, May 26-28, 2014, Shanghai, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [3] GRAY D H. Electrochemical alteration of clay soils [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1969, 17(5): 309-322.
- [4] GRAY D H. Electrochemical hardening of clay soils [J]. *Géotechnique*, 1970, 20(1): 81-93.
- [5] LEFEBVRE G, BURNOTTE F. Improvements of electroosmotic consolidation of soft clays by minimizing power loss at electrodes [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(2): 399-408.
- [6] ZHANG H, ZHOU G X, WU J L, et al. Mechanism for soil reinforcement by electroosmosis in the presence of calcium chloride [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2017, 204(4): 424-433.
- [7] XUE Z J, TANG X W, YANG Q, et al. Mechanism of electro-osmotic chemical for clay improvement: Process analysis and clay property evolution [J]. *Applied Clay Science*, 2018, 166(2): 18-26.
- [8] OU C Y, CHIEN S C, LIU R H. A study of the effects of electrode spacing on the cementation region for electro-osmotic chemical treatment [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 104: 168-181.
- [9] CHIEN S C, TENG F C, OU C Y. Soil improvement of electroosmosis with the chemical treatment using the suitable operation process [J]. *Acta Geotechnica*, 2015, 10(6): 813-820.
- [10] 刘飞禹, 李玲玉, 王军, 等. 阳极灌浆溶液对电渗加固软土地基的影响[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(3): 44-52.
- LIU F Y, LI L Y, WANG J, et al. Effects of anodic grouting with different solutions during electro-osmosis on a soft foundation treatment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(3): 44-52. (in Chinese)
- [11] HU L M, ZHANG L, WU H. Experimental study of the effects of soil pH and ionic species on the electro-osmotic consolidation of Kaolin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 885-893.
- [12] 王宁伟, 刘根, 王心哲, 等. 软土电化学加固的排水作用研究[J]. *工程勘察*, 2016, 44(1): 26-30.
- WANG N W, LIU G, WANG X Z, et al. Study on drainage effect of electrochemical reinforcing for soft soil [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2016, 44(1): 26-30. (in Chinese)
- [13] 任连伟, 曹辉, 孔纲强. 试剂注入配合比对化学电渗法处治软黏土加固效应对比研究[J]. *岩土力学*, 2019, 41(4): 1-8.
- REN L W, CAO H, KONG G Q. Contrast study on reinforcing effect of reagent injection on soft clay treated by chemical electroosmosis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 41(4): 1-8. (in Chinese)
- [14] 刘飞禹, 张乐, 王军, 等. 阳极跟进作用下软黏土电渗固结室内试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(1): 52-58.
- LIU F Y, ZHANG L, WANG J, et al. Experimental analysis of the electro-osmosis consolidation of soft clay under anode follow-up [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(1): 52-58. (in Chinese)
- [15] 薛志佳. 电渗加固软土地基影响因素和方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- XUE Z J. Study on influencing factors and methods of strengthening soft soil foundation by electroosmosis. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] WU H, HU L M, WEN Q B. Electro-osmotic enhancement of bentonite with reactive and inert electrodes [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 111: 76-82.
- [17] CAMESELLE C, PENA A. Enhanced electromigration and electro-osmosis for the remediation of an agricultural soil contaminated with multiple heavy metals [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 104: 209-217.
- [18] 石振明, 周圆媛, 彭铭, 等. 含盐量对蒙脱石粘土电渗影响试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(5): 1005-1013.
- SHI Z M, ZHOU Y Y, PENG M, et al. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmosis in montmorillonite clay [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(5): 1005-1013. (in Chinese)