

电渗联合注浆加固吹填土现场试验研究

吴松华,徐勇平

(中交水利水电建设有限公司,浙江宁波315200)

摘要:海相吹填土黏粒含量、含水率和压缩性都很高,抗剪强度低,渗透性差,后期施工时地基沉降量大,稳定性较差,难以满足工程实际需要,须先行有效排水加固进行地基处理。电渗联合注浆加固吹填土多为室内模型试验研究,现场试验及应用较少,为提高吹填土地基承载力及进一步探究电渗联合注浆法加固吹填土地基的可行性和加固效果,依托具体工程进行现场试验,在无砂垫层真空预压法处理地基的基础上,采用电渗联合注浆的方法加固新近吹填土。结果表明:与无砂垫层真空预压法相比,电渗联合注浆的方法加固时间可缩短30 d以上,地基承载力可提高1.6倍。电渗联合注浆是一种快速加固高含水率、低渗透性的海相吹填土的有效处理方法。

关键词:吹填土;电渗;注浆;电极;电化学加固;真空预压;化学电渗法

中图分类号: U753.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0077—05

Field Test on Consolidation of Dredger Fill by Electroosmosis Combined with Grouting

WU Songhua, XU Yongping

(CCCC Water Resources and Hydropower Construction Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315200, China)

Abstract: The clay content, water content and compressibility of marine dredger fill are very high, which results in its low shear strength, poor permeability, and for the very same reason its foundation settlement is large and its stability is poor in the later stage of construction, so it is difficult to meet the actual needs of the project. Therefore, effective drainage and consolidation should be carried out. In order to improve the bearing capacity of dredger fill foundation and further explore the feasibility and reinforcement effect of electro-osmosis combined grouting method for dredger fill foundation, field tests are carried out relying on specific projects. On the basis of vacuum preloading without sand cushion, electro-osmosis combined grouting method is adopted to treat dredger fill foundation. Reinforcement of newly dredged fill. The results show that compared with the vacuum preloading method without sand cushion, the consolidation time of electroosmosis combined with grouting can be reduced by more than 30 days, and the bearing capacity of foundation can be increased by 1.6 times. Electro-osmosis combined grouting is an effective method for rapid reinforcement of marine dredger fill with high water content and low permeability.

Keywords: dredger fill; electroosmosis; grouting; electrode; electrochemical reinforcement; vacuum preloading; chemical electroosmosis method

沿海城市土地开发利用的有效途径之一,就是资源化利用大量海相淤泥进行吹填造陆,它不仅能很好地解决回淤及污染问题,而且经济快速。

目前关于海相吹填土的处理,一般常用排水固

结法、桩体复合地基法、动力强夯法等^[1]。在实际工程中,通常是先预设临时围堰区,然后吹填海相淤泥,通过真空预压或堆载预压等方法对吹填土进行排水加固,满足一定承载力要求后用作建设用地,

排水固结法具有施工工期短、强度提升速度快等优点,在淤泥质软基处理工程当中得到了大面积的推广应用。

在取得一定加固效果后也存在一些问题^[2],如地基承载力不高,固结速率慢,堆载材料和方式难以为继,工期长,对施工环境要求高等,且加固效果较好的土层一般限于地表以下 1 m~2 m 左右的硬壳层,硬壳层以下土体强度增加不是太多,后期还需要投入大量的人力物力进行二次处理,这也反映出真空预压法的局限性。

软基处理的方法一直在发展,既有对传统方法的改进和创新,也有学者提出新的方法和新的工艺,而电渗法^[3]被视为众多方法当中很有前途的一种。化学电渗法^[4]是在常规电渗法的基础上,在电极处注入化学溶液,在直流电场的作用下发生化学反应^[5],生成沉淀物加固土体,快速固结土体,提高承载力。针对该技术的研究目前主要在室内试验,王宁伟等开展室内试验研究了在阳极分别注入等量纯水和 CaCl_2 盐溶液时软土电化学加固的不同规律^[6],以及氯化钙溶液浓度和注入量对电化学加固软土排水速率的影响^[7]。王军等^[8]采用自制室内玻璃模型桶,研究间歇式真空预压联合电渗对吹填软土的加固效果,表明间歇通电方式可保证电渗阶段的排水效率。沈扬等^[9]通过自主研发的装置,探究了不同注浆浓度对电化学注浆效果的影响,寻求适宜的注浆浓度和方式。任连伟等^[10]利用室内试验联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液研究对软黏土加固效果。崔颖辉等^[11]开展电动化学注浆加固室内试验,研究 CaCl_2 溶液对土体的改性加固效果。张恒等^[12]采用自制电渗试验装置,研究阳极处添加不同质量分数的氯化钙溶液对电渗加固效果的影响。刘艳晓等^[13]通过自行设计的室内模型箱,研究注浆方式对软土加固效果的影响,表明采用 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液间歇注浆比一次性注浆联合电渗对滩涂淤泥的加固效果要好。现阶段大规模的现场试验及应用研究尚不多见。现场试验方面,主要研究了真空预压联合导电排水板和联合金属电极等电渗法对软土的加固效果^[14-17]。刘志涛等^[18]采用新型电动土工合成材料(EKG)电极进行电渗排水法现场试验,研究对软土的处理效果。

为提高吹填软土的地基承载力,结合某海涂围垦吹填造地工程,开展现场试验研究,以研究电渗联合注浆法加固吹填土地基的可行性和加固效果。

1 试验步骤

试验区布置有 1 台真空泵,抽真空时间 140 d,真空泵阀门可以调控真空度的大小,真空逐级加载至 80 kPa。在无砂垫层真空预压法联合电渗的基础上进行化学注浆试验,以寻求更大程度上提高地基承载力。基本思路是金属电极一方面发挥导电的作用,另一方面作为注浆的管道,在电渗作用的基础上,利用化学浆液进一步加固土体。其平面布置图见图 1。

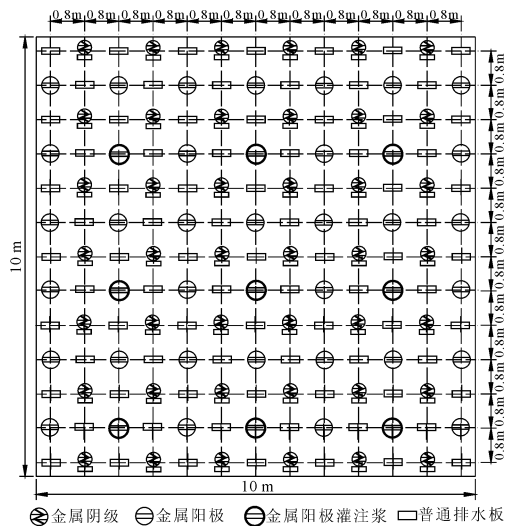


图 1 试验布置图

1.1 场地准备

在现场选择约 100 m² 进行真空预压联合电渗试验,吹填土厚度约为 3 m~4 m。试验区已经铺设好编织布,进行了排水板打设,为下一步打设电极提供较好的工作平台。

1.2 金属电极制作

金属电极使用长度为 3.5 m 的镀锌钢管,在距钢管顶部 10 cm 处进行钻孔,用螺丝进行钢管与电线的连接,并用粘胶带和电胶布进行两次密封。作为注浆使用的金属电极长度为 4.5 m,在钢管体的四周每隔 10 cm 打设 2 mm 的孔洞,同时用滤布包裹,保证孔洞不会被堵死,浆液可以顺利流出。

人工直接把金属电极打入泥面以下 80 cm,在打设过程中注意电线的保护。把边长(10 m)长度范围内的金属电极进行连接形成串联,然后把阳、阴极分别并联,形成统一的阳极和阴极,接到电源的正、负极通电试验检查连接情况。

1.3 注浆管打设

在密封膜铺设完毕后,进行注浆金属电极的打

设。电极顶端出膜距离 20 cm,既有利于密封膜与金属电极的密封绑扎,也有利于灌浆。在注浆管打设完毕后,为防止漏气,在灌浆管的顶管进行密封,并在试验过程中随时观测注浆管与吹填土之间的沉降差值,防止密封膜与注浆管出现脱离导致漏气。

1.4 注浆

在真空预压后期介入电渗后,需要进行注浆,浆液使用的是 1 mol/L 的氯化钙和 1 mol/L 的硅酸钠溶液。注浆使用人工方式,每天注浆一次,氯化钙和硅酸钠交替注浆,连续 10 d。

2 试验结果与讨论

2.1 孔隙水压力

布置有 1 组孔压计,分别在 1 m、2 m、3 m 深度位置处埋设 1 个孔压计,避免串气。

图 2 为孔隙水压力随时间变化曲线,图 3 为孔隙水压力消散随时间变化曲线。由图可知,孔压变化符合一般规律,并且土体上部孔压变化高于下部土体孔压,这主要是因为真空度传递受阻。根据有效应力原理,孔压变化越大,有效应力增加越大,即土体加固效果越好。根据孔隙水压力曲线变化,也能得出土体随深度变化具有不一样的强度,也就是土体加固不均匀。根据电渗原理,可以实现加固均匀的效果,但在真空预压联合电渗法中,本身需要借助排水板,因排水板自身的不足,不可避免出现了土体加固效果不均匀这一现象。由于真空预压过程中地下水位变化、曼德尔效应以及测量孔容易串气等因素的影响,孔压数据的规律往往并不理想。

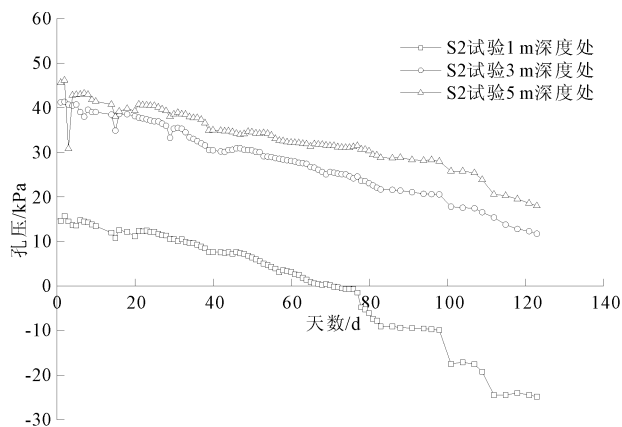


图2 试验区孔压变化曲线图

2.2 表层沉降

图 4 为表层日均沉降曲线图,图 5 为表层总沉降曲线图。由图可知土体在加固前期的沉降速率较大,到后期沉降速率减小到一定程度并趋于稳定。

当抽真空进行到 60 d 左右,出水量明显减少,此时介入电渗,在表层日均沉降曲线上可以看到,60 d 左右沉降速率明显减少,60 d 后沉降速率又出现了一个小高峰,随后沉降速率减小并趋于稳定,可以得出电渗对土体加固有一定的作用。

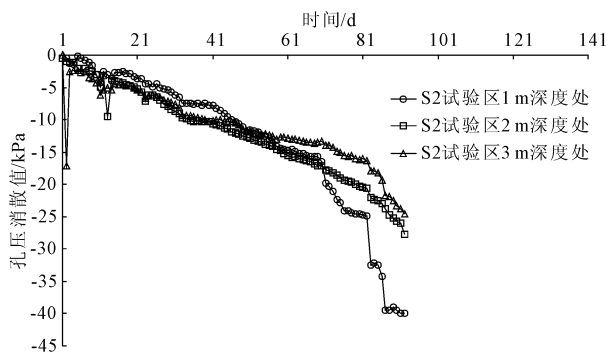


图3 试验区孔压消散变化曲线图

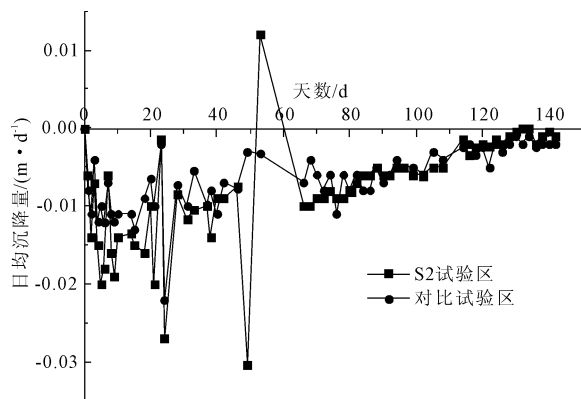


图4 表层日均沉降曲线

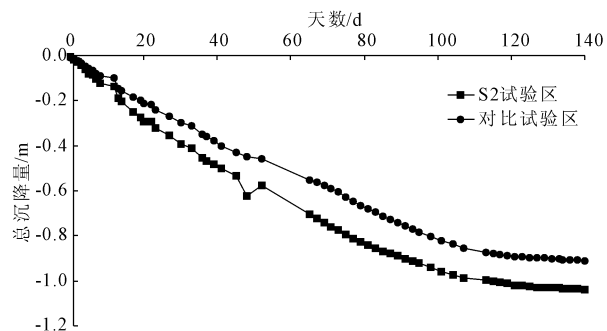


图5 表层总沉降曲线

2.3 电流、电压

考虑到现场试验条件的有限性,我们希望通过采取较小电压,通过延长电渗时间取得较好的加固效果。

试验中,采取了间歇通电和电极反转等方式^[18],电压也是逐步增加。在电流(压)变化曲线过程中,在一定电压条件下,电流是比较稳定的,一方面说明电渗条件较好,另一方面说明土体含水率还

是比较高的。后期电压维持在 5 V 左右,电流维持在 35 A 上下。在本次试验过程中,进行了氯化钙和硅酸钠溶液的灌注,因试验场区面积较大,在电流变化曲线有所体现,但不是很明显。

2.4 地基承载力

由室内土工试验数据计算地基承载力,其特征

表 1 土工试验主要成果及承载力计算表

试验点	天然重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 C /kPa	摩擦角 φ /($^\circ$)	M_d	M_c	f_a /kPa
对比试验点	17.2	12.3	12.0	1.94	4.42	71.0
试验点	17.3	13.3	12.4	1.99	4.48	76.8

2.5 静力触探

加固之前对吹填土进行静力触探取样试验,几乎没有强度。图 6 为加固后土体试验点的比贯入阻力 P_s 随深度 s 的变化曲线。由图可知,对比试验点的比贯入阻力要小于试验点,并且试验点的比贯入阻力在 2 m 范围内比较均匀,2 m ~ 3 m 范围不断减小,这也说明灌浆的有效性。在 3 m 范围内,试验点的比贯入阻力平均值为 0.25 MPa,对比试验点为 0.17 MPa,试验点是对比点的 1.47 倍;特别地,试验点与对比试验点在 1.5 m 范围的比贯入阻力平均值分别为 0.30 MPa、0.22 MPa,试验点是对比试验点的 1.36 倍。可以看出真空预压联合电渗注浆的有效性,当然也存在加固不均匀这一现象。当然静探试验也有其局限性,还要结合其它现场试验综合分析原因。但从现场静力触探试验结果来看,真空预压联合电渗法具有一定的效果。

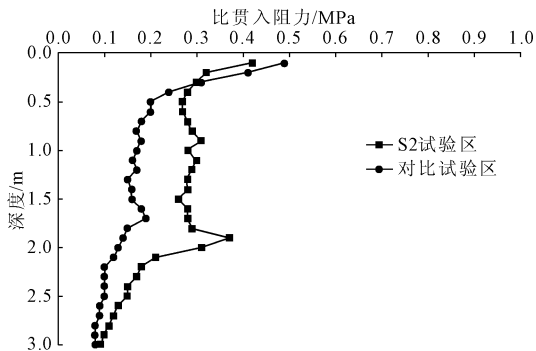


图 6 加固后土体静力触探曲线

2.6 十字板剪切试验结果分析

图 7 为试验点的抗剪强度 C_u 随深度 s 的变化曲线。在图 7 中,同样可以发现试验点的强度也是明显高于对比试验点,试验点的 3 m 范围内抗剪强度的平均值为 22.9 kPa,对比试验点的 3 m 范围内抗剪强度的平均值为 14 kPa,相应的地基承载力分

值按《建筑地基基础设计规范》^[19] (GB 50007—2011) 计算,分别进行试验区 and 对比区的土工试验,得到主要的试验成果,并进行地基承载力计算,其结果列于表 1。可见地基承载力试验点高于对比试验点,电渗法联合化学注浆具有较好的加固效果。

别为 67.25 kPa、45 kPa,试验点是对比试验点的 1.49 倍;特别地,在 1.5 m 深度范围内相应的地基承载力分别为 80.8 kPa、56.4 kPa,试验点是对比试验点的 1.43 倍,可见真空预压联合电渗注浆的有效性。从曲线中也可以发现,试验点上部土体加固效果要好于下部土体,虽然电渗注浆总体对土体加固能起到明显的效果,但对下部土体的加固效果还是有局限性。

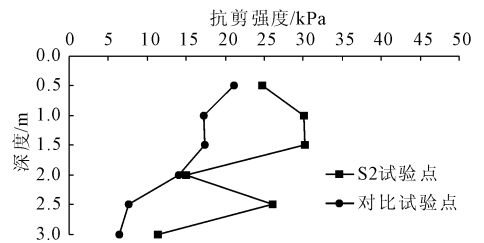


图 7 抗剪强度 C_u 随深度 s 变化曲线

2.7 土工试验

表 2 为根据试验场区取土进行室内土工试验结果,可以看出 2 m 深度范围内含水率有较大幅度的降低,对比试验区、试验区相对加固前吹填土降低幅度分别为 48.17%、50.96%;1.5 m 深度范围降低幅度分别为 45.76%、54.11%。试验区的含水率降低值都高于对比试验区,其他各项指标都有不同程度的改善,这也进一步说明真空预压联合电渗效果明显。

表 2 加固后各区域土体含水率对比

类别	含水率/%		含水率降低值/%	
	1.5 m 深度	2.0 m 深度	1.5 m 深度	2.0 m 深度
对比区	53.43	51.05	45.76	48.17
试验区	45.20	48.30	54.11	50.96

3 经济效益分析

真空预压联合电渗法处理单价是高于无砂垫层

法的,目标地基承载力是无砂垫层法的1.6倍,而施工工期要短于无砂垫层法30d以上。就处理单价而言,试验区是对比区的1.62倍。

在以上的地基承载力对比中可以发现,真空预压联合电渗法加固效果要好于无砂垫层法,单就载板试验得出的地基承载力而言,真空预压联合电渗法明显高于无砂垫层法,当然真空预压联合电渗法的处理单价要高于无砂垫层法。但在一定的目标承载力下,真空预压联合电渗法需要的时间要短于无砂垫层法,这个时间成本还是需要考虑的。

4 结 论

对真空预压联合电渗法的现场试验研究进行了介绍,通过与无砂垫层真空预压法的对比,分析对比了在相同真空压力作用下,两者在表层沉降、孔压和土体加固前后的物理力学性质等方面的不同,具体结论如下:

(1) 电渗联合注浆试验中,土体含水率降低到48.3%,低于同一真空压力件下对比试验区的51.1%,其他物理力学性质指标也得到明显改善。

(2) 在这一试验中,试验点的比贯入阻力平均值为0.25 MPa,对比试验点的为0.17 MPa,试验点是对比点的1.47倍。

(3) 试验点3m范围内抗剪强度的平均值为22.9 kPa,对比试验点的3m范围内抗剪强度的平均值为14 kPa,试验点是对比试验点的1.64倍,说明真空预压联合电渗注浆的有效性。

(4) 综合来看,真空预压联合电渗注浆试验的加固效果良好,平板载荷试验地基土承载力60d的特征值可以达到61 kPa。

参考文献:

[1] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016,49(1):96-115.

[2] 韩舰辉,王宁伟,白小航,等.海相软黏土电化学改性固结试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):9-13,83.

[3] 刘睿,傅少君,张瑞,等.电渗法加固软土地基研究现状及展望[J].福建建筑,2019(6):38-44.

[4] 王宁伟,刘铁,于辉,等.电化学注浆加固软土效果的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):7-11.

[5] 张慧,梧松.电化学方法加固超软土机理现场试验研究[J].建筑科学,2014,30(11):44-50.

[6] 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.

[7] 王宁伟,柴高炯,刘根,等.氯化钙电化学加固软土的试验研究[J].工程勘察,2017,45(1):23-27.

[8] 王军,王逸杰,刘飞禹,等.间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J].中国公路学报,2016,29(10):37-45.

[9] 沈扬,邱晨辰,宋顺翔,等.管状EKG电化学注浆软基加固室内试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(S2):57-61.

[10] 任连伟,肖扬,孔纲强,等.化学电渗法加固软黏土地基对比室内试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(7):1247-1256.

[11] 崔颖辉,张千里,陈锋.软土电动化学注浆加固技术室内试验研究[J].铁道建筑,2019,59(2):8-11.

[12] 张恒,马勤国,胡赫,等.使用氯化钙溶液加固淤泥质黏土的电渗试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(3):119-125.

[13] 刘艳晓,谢新宇,郑凌透,等.间歇注浆联合电渗加固软土的试验研究[J].科技通报,2019,35(6):142-148,153.

[14] 王海建,杨建贵,胡建斌,等.真空预压联合电渗加固吹填土现场试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(34):108-112.

[15] 卜凡波,王海建,吴国强,等.真空预压联合导电排水板电渗法加固海相吹填土现场试验[J].水利水电科技进展,2017,37(4):63-69.

[16] 俞家锐,宋永东.电渗联合真空预压法加固吹填土现场试验研究[J].水资源开发与管理,2019(3):58-62.

[17] 蒋楚生,司文明,曾惜,等.电渗联合真空预压技术处理高速铁路软土地基[J].铁道工程学报,2019,36(6):28-32,96.

[18] 刘志涛,庄艳峰,黄运兰,等.EKG电极的电渗现场试验研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(2):46-51.

[19] 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.