

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

卜凡波¹,王海建¹,吴国强¹,沈林¹,胡建斌²,彭劼²

(1. 中交上航局航道建设有限公司,浙江 宁波 315200; 2. 河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:为推动真空预压联合导电排水板电渗法在大规模吹填土地基加固中的应用,依托温州某海相淤泥吹填工程进行了真空预压联合导电排水板电渗法试验,并与真空预压联合金属电极电渗法和常规真空预压法进行了对比试验,对膜下真空度、地表沉降、电流电压变化进行了分析,着重分析了加固后地基承载力增长规律。试验结果表明:导电排水板可以取得与金属电极同等加固效果,导电排水板在电渗加固中具有一定的有效性和可行性,导电排水板的布置方式对加固效果也具有一定的影响;真空预压联合导电排水板电渗试验的地表沉降量超过常规真空预压法9%以上,地基承载力超过常规真空预压法21.4%,土体深层承载力也得到一定程度提高,加固效果显著。

关键词:真空预压法;电渗法;导电排水板;海相吹填土;地基加固;地基承载力;现场试验

中图分类号:TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)04-0063-07

Field tests on marine dredger fill reinforced by vacuum preloading combined with electro-osmosis using electric vertical drains//BU Fanbo¹, WANG Haijian¹, WU Guoqiang¹, SHEN Lin¹, HU Jianbin², PENG Jie²(1. SDC Waterway Construction Co., Ltd., Ningbo 315200, China; 2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to promote the method of vacuum preloading combined with electro-osmosis using electric vertical drain (EVDs) in large dredger fill foundation reinforcement, field tests on marine dredger fill in Wenzhou City reinforced by this method were conducted. Comparisons of this method with the method of vacuum preloading combined with electro-osmosis using metal electrodes and the conventional vacuum preloading method were performed. Changes in the vacuum pressure, surface settlement, current, and voltage were analyzed, and as was the growth rule of bearing capacity of the foundation after reinforcement. The test results show that EVDs can obtain the same reinforcement effect as metal electrodes, that their use is effective and feasible for electro-osmosis, and that their arrangement has an influence on the reinforcement effect. The surface settlement of the method of vacuum preloading combined with electro-osmosis using EVDs is over 9% larger than that of the conventional vacuum preloading method, and the bearing capacity of the foundation of the former is over 21.4% larger than that of the latter. The bearing capacity of the deep soil increases, and the reinforcement effect is significant.

Key words: vacuum preloading; electro-osmosis; electric vertical drain; marine dredger fill; foundation reinforcement; bearing capacity of foundation; field test

软土的加固处理是最重要的岩土工程课题之一。近年来世界各地均有较多的围海吹填造陆工程,以增加土地供应量^[1]。沿海海底往往都是沉积的淤泥,被吹填上来的泥水混合物为流动~流塑状态,所形成的吹填地基承载力极低,难以满足工程和进一步开发的需要。各种软土地基处理方法中,只有真空预压法由于施工荷载小,可在这种承载力极低的地基中施工,目前已广泛应用于淤泥场地的加固工程中。真空预压法是在加固区插入塑料排水板,再用密封膜将加固区密封,通过抽真空使密封膜下以及塑料排水板中的孔压降低,而土体由于渗透性差,孔压下降缓慢,因此在土体和塑料排水板之间产生孔压差,在此孔压差作用下,土体中的孔隙水流向塑料排水板被排出从而固结^[2]。真空预压法最初由 Kjellman^[3]提出,一些学者用试验论证了真空预压是负压作用下的固结过程^[4-5],多位学者进一步

研究了真空预压下的固结机理^[6-9],并研究、完善了基于固结理论的真空预压计算方法^[10-12]和施工工艺。真空预压法已经在软土地基处理工程中得到了较广泛的应用。由于受限于大气压力,真空荷载一般不超过 90 kPa,因此真空预压的加固效果会受到限制。

将真空预压法与电渗法联合应用是一个比较新颖的、有潜力的方法。电渗法是近年来逐渐得到学术界关注的软土处理方法。在土体中插入电极,并通以直流电,在土粒表面及其附近的液体内会有电性相反、电荷量相等的两层离子,即双电层,扩散层中的离子在电场作用下朝反向电极移动,并带动水分子一起移动从而排出孔隙水,这种现象即为电渗^[13]。在电渗作用下,可达到降低土体含水量、提高强度的目的。土中的电渗现象由俄国科学家 Reuss 发现,Casagrande 首次将电渗法应用到边坡加固工程中^[14],之后学者们对电渗法在岩土工程中的加固效果^[15]、土的类型对电渗效果的影响^[16-17]、提高电渗效率的措施^[18-19]、新型电极材料^[20-21]、土的电导率或电渗透系数及 pH 值的变化规律^[22-23]以及固结理论和计算方法^[24-26]等进行了进一步研究。由于电渗法也存在金属电极易腐蚀、电量和电极消耗较大、电渗过程中逸出的气泡影响加固效果等缺点,发挥两种方法的优势,将真空预压法与电渗法结合起来就形成真空预压联合电渗法,即在前期使用真空预压法加固软土地基,抽出土体孔隙中的部分自由水,到后期真空预压法加固效果逐渐减弱的时候,开始进行电渗,同时抽真空不停止,电渗促使土体孔隙中的部分自由水和弱结合水排出,因此可以进一步改善加固效果。由于电渗法是在加固工程的后期才介入,所以总的电量成本增加不多。关于真空预压联合电渗法的相关研究成果并不多,彭劼等^[27-28]采用真空预压联合电渗法进行了软土处理的室内试验,刘汉龙等^[29]进行了真空预压联合电渗法的现场试验,结果表明联合作用能有效提高排水速度和排水量,但是上述研究中电渗法所用电极均是金属电极,金属电极易腐蚀且随地基变形而变形的能力差。为了克服金属电极易腐蚀的缺点,导电塑料排水板^[30]被应用到电渗加固中,即用导电塑料为材料做成排水板,排水板中再加入更易导电的金属丝或金属片,在电渗过程中金属跟电极连接,排水板一方面将电流传导至土壤中,另一方面保护了电极不会被氧化、腐蚀。目前尚无真空预压联合导电排水板电渗法加固软土的现场试验研究报道。

为了深入研究真空预压联合导电排水板电渗法加固软土的效果,本文结合浙江温州围海吹填造陆

工程,开展了真空预压、真空预压联合金属电极电渗、真空预压联合导电排水板电渗的现场试验,对比研究了各种方法对海相吹填淤泥的加固效果和经济性,并从机理上对真空预压联合导电排水板电渗法进行了探讨。

1 现场试验

1.1 现场地质条件

现场试验场地位于浙江温州市的龙港吹填区,为新近吹填土,回填淤泥厚度约为 3.8 m,其下为原有淤泥,现场试验检测地基承载力几乎为零。真空预压法处理的目的是使淤泥层快速变成有一定强度的软土,可以在上面进行机械作业,但是真空预压加固效果有限,后期还需要进行二次处理,浪费大量资源,基于此提出了采用真空预压联合电渗法进行地基加固,并选择合适区域开展现场试验研究。

通过现场勘察,将试验场地自上而下划分为如下工程地质层:①吹填后的淤泥,该层厚度约为 3.8 m;②黏土,层厚 0.40 ~ 2.20 m;③含细砂淤泥,层厚 8.00 ~ 12.70 m;④细砂,层厚 3.50 ~ 13.70 m;⑤黏土,层厚 1.00 ~ 9.60 m;⑥粉质黏土,层厚 1.20 ~ 9.80 m;⑦黏土,层厚 1.30 ~ 18.80 m;⑧粉质黏土,层厚 2.10 ~ 7.60 m。其中吹填淤泥层的物理参数如下:含水率为 98.5%,液限为 58.1%,塑限为 26.4%,孔隙比为 2.61,天然密度为 1.462 g/cm³,渗透系数为 8×10⁻⁶ ~ 10×10⁻⁶ cm/s。

1.2 试验方案设计

a. 试验材料。试验方案的关键点是电极材料的选择,在真空预压联合电渗试验中选择两种电极材料,一种为镀锌钢管,一种为导电塑料排水板(electric plastic vertical drains, EVD)。在钢管端部打孔,使用金属螺栓将导线与钢管连接。EVD 由两面均设有排水凹槽的基板、金属丝和滤膜组成,其中基板由聚乙烯、炭黑、石墨等材料组成,2 根金属丝贯通整个基板以方便与外接导线连接。为做好接头的防水处理,电极与导线的连接先用绝缘级自黏胶带缠绕,再用防水胶带包裹。

b. 试验区域划分。试验区面积共有 1 000 m²,分成 A、B、C 3 个区(图 1)。A 区为真空预压联合导电排水板电渗试验区,面积为 100 m²;B 区为真空预压联合金属电极电渗试验区,面积为 100 m²;C 区为常规真空预压试验区,面积为 800 m²。其中 A 区被分成 A1 和 A2 两个试验区,各为 50 m²;B 区被分成 B1 和 B2 两个试验区,各为 50 m²。

c. 电极和排水板布置。在真空预压联合导电排水板电渗试验中,EVD 既起到普通排水板的作用,

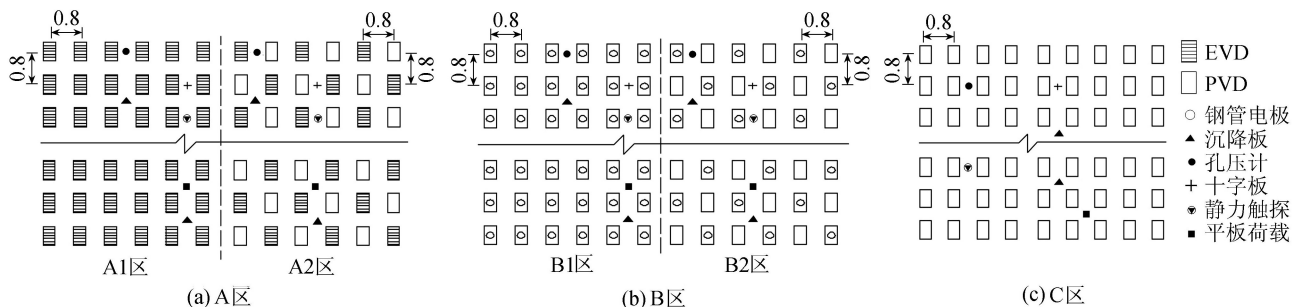


图1 试验方案布置示意图(单位:m)

也起到电极的作用,A1 试验区排水板全部由 EVD 组成,正方形布置,间距为 0.8 m,共 6 列,每列 13 根 EVD;A2 试验区由 EVD 和普通塑料排水板 (plastic vertical drains,PVD)交错正方形布置,间距 1.6 m,共 6 列,每列 13 根 EVD,其平面布置见图 1(a);A1、A2 试验区之间间距 0.8 m,A1 试验区和 A2 试验区之间的相互影响很小。在真空预压联合金属电极电渗试验中,电极和 PVD 平面布置与真空预压联合导电排水板电渗试验平面布置方式一样,区别在于金属电极布置在 PVD 旁边,这样可以更好地发挥真空预压和电渗的作用,其布置见图 1(b)。常规真空预压试验的平面布置图见 1(c),PVD 按正方形布置,间距为 0.8 m。在试验过程中的检测仪器布设和试验结束后效果检测点位布置见图 1。吹填土厚度约为 3.8 m,PVD 与 EVD 打设深度都为 3.8 m,按正常要求布置,而金属电极打设在 PVD 旁边,对金属电极而言,为防止金属把密封膜刺破,影响真空预压效果,结合以往沉降规律,金属电极长度定为 3 m,打入泥面以下 80 cm,顶端用较长导线与外界电源相连。软土地基加固立面示意图见图 2 与图 3。

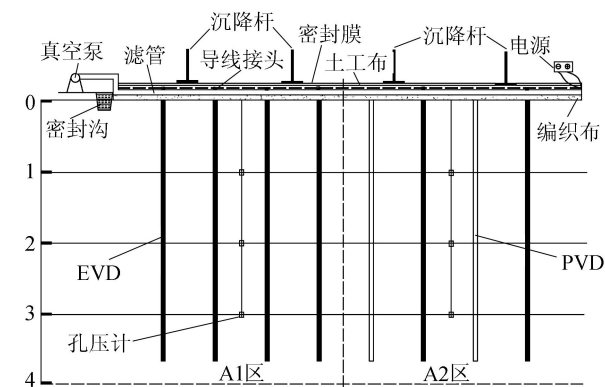


图2 真空预压联合导电排水板电渗试验立面示意图(单位:m)

d. 电源设计。在真空预压联合电渗试验中,每一列电极材料串联成阳极或负极,并与直流电源的正、负极直接连接。直流电源量程为 60 V/50 A,功率为 3 kW,电压、电流可控。在 A、B 区各布置 1 台电源,A1 和 A2 区的电压在试验过程中保持一致,

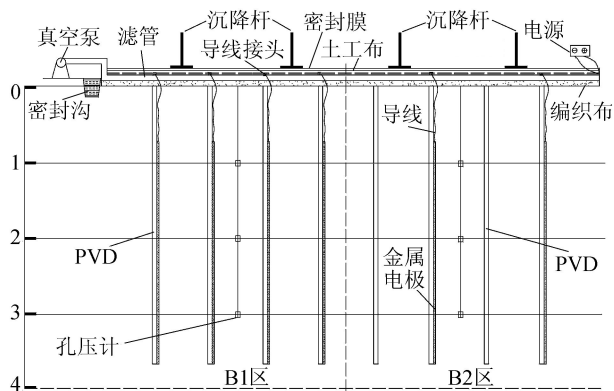


图3 真空预压联合金属电极电渗试验立面示意图(单位:m)

B1 和 B2 区的电压在试验过程中也保持一致。

e. 试验过程控制。试验区布置 1 台真空泵,真空泵的阀门可以调控,方便真空度大小的调节,使 3 个试验区处在相同的真空预压条件下。试验为探索真空预压和电渗的联合加固效果,发挥两者的各自优势,前期只进行真空预压,试验过程中多次检测含水率,发现含水率降低到 70% 左右时真空泵抽出的水量较小,此时介入电渗。

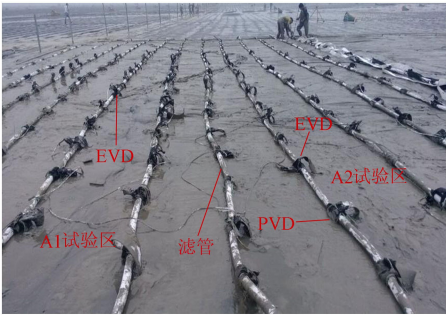
1.3 施工工艺

真空预压联合电渗试验是在常规无砂垫层真空预压法的基础上进行的,其主要的施工工艺流程如下:①铺一层编织布;②人工加工 EVD、PVD 和金属电极;③根据试验设计方案人工打设 EVD、PVD 和金属电极,并将 EVD 和金属电极用导线连接,所有导线通过密封沟连接到直流电源;④接通电源,检查线路连接情况;⑤铺设 2 层土工布;⑥铺设 2 层密封膜,并人工踩入密封沟一定深度;⑦安装 1 台真空泵,并做好出膜口的密封处理;⑧埋设监测仪器;⑨启动电源抽真空,在土体含水率降低到 70% 左右时介入电渗;⑩随时做好现场检查。A 区和 B 区的施工布置见图 4。

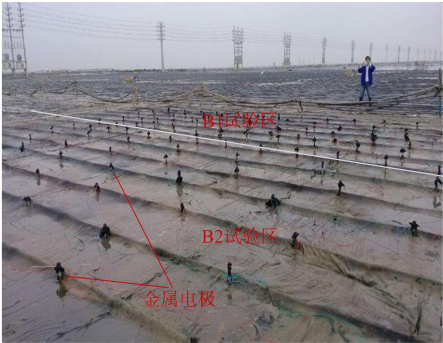
2 试验结果与分析

2.1 真空度

图 5 为真空度随时间变化曲线。在刚开始抽真



(a) A区



(b) B区

图4 施工布置

空时因停电、破膜和真空泵问题等原因,真空度不是很稳定,同时考虑到真空度太大容易形成土柱问题,真空度维持在 40 ~ 60 kPa,然后逐渐增大到 80 kPa 并维持稳定。在加固后期,因现场条件原因,真空度出现了一定幅度的波动,对试验结果有一定的影响。

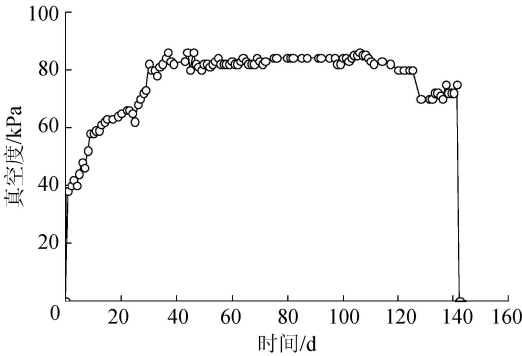


图5 真空度随时间变化曲线

2.2 沉降

图6为试验区地表的沉降时程曲线。试验初期沉降速率较大,从图6可以看出累计沉降曲线斜率接近直线,因地质情况不同,在介入电渗之前,累计沉降是有差别的。在试验进行到60 d时真空泵出水量明显减小,经检测含水率降为68%,此时介入电渗,可以看出A区和B区的累计沉降逐步超过C区,也可以看出常规真空预压C区的沉降曲线逐渐变缓,而真空预压联合电渗的2个试验区却有增大的趋势,到试验后期累计沉降曲线才逐渐变缓和。试验结束后真空预压联合导电排水板电渗A1和A2区的累计沉降分别为1.01 m和1.13 m,真空预压联

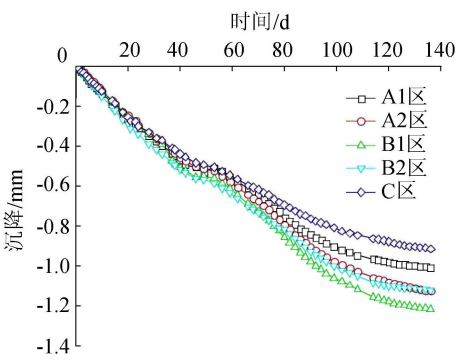


图6 沉降时程曲线

合金电极电渗 B1 和 B2 区的累计沉降分别为 1.22 m 和 1.13 m,而常规真空预压 C 区的累计沉降为 0.93 m,可以看出 A1、A2、B1、B2 区累计沉降大于 C 区,A1、A2、B1、B2 区累计沉降分别超过 C 区 9%、22%、31% 和 22%。从沉降来看,也可以看出真空预压联合电渗的有效性。当然由于地质条件的不同和测量沉降中的误差原因,沉降可以作为观测试验效果的一个辅助手段。

2.3 电流与电压

图7为真空预压联合导电排水板电渗试验区(A区)的电流与电压变化曲线;图8为真空预压联合金属电极电渗试验区(B区)的电流与电压变化曲线。为了更好地对比,在A区和B区分别各布置1台电源,使A1、A2区试验置于同一电压条件下,B1、B2区试验置于另一相同电压条件下。

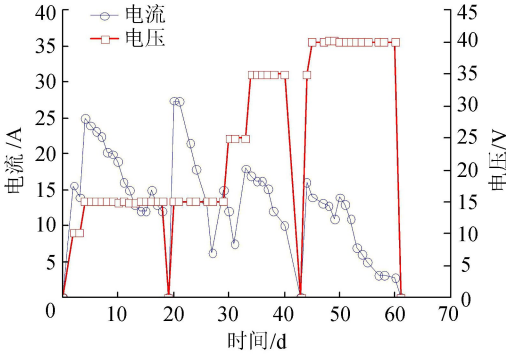


图7 A区电流与电压随时间变化曲线

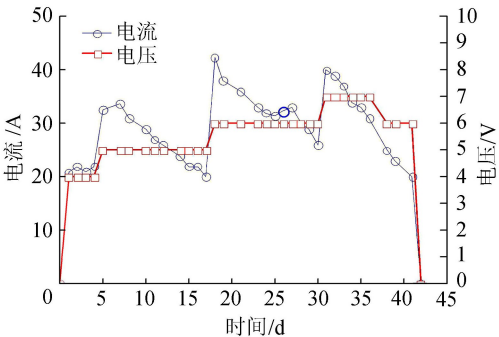


图8 B区电流与电压随时间变化曲线

在真空预压联合导电排水板电渗试验中,电压

是根据电流变化逐步增大的,并在试验过程中断电2次,在电压变化曲线上有所反映。在设定的一定电压条件下,电流逐渐降低到一定程度,然后再增加电压值,使电流重新增大到一定值,这有助于维持电渗的进行。不过在试验后期,即使电压增大到一定程度,电流值也很小,结合沉降和出水量,此时可以结束试验。

在真空预压联合金属电极电渗试验中,对比真空预压联合导电排水板电渗试验可以看出,电压增大到一个不大数值,电流就可以出现较大值,可能是因为金属电极的导电性要好于EVD。与真空预压联合导电排水板电渗试验类似,根据电流变化调节电压。出于对比考虑,A区和B区的电渗时间一样,同时开始,同时结束。

2.4 加固后土体参数

为进一步检验试验区加固效果和对比分析,在每个试验区取土进行室内土工试验,取土深度2 m。表2为各个试验区土体物理力学指标的平均值。每个试验区的物理力学指标都有不同程度的改善,其中含水率由加固之前的98.5%降低到约50%,降低约49.2%,效果显著。真空预压联合电渗的各个试验区的含水率降低到50%以下,孔隙比有较大幅度的降低。其余物理力学指标也较好。

表2 加固后试验区土体物理力学性质指标								
试验区	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	孔隙比	密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
A1	47.3	42.3	23.7	18.6	1.264	1.77	12.0	12.9
A2	47.5	42.3	23.7	18.6	1.252	1.77	12.0	12.8
B1	49.7	45.0	24.6	20.4	1.207	1.76	14.3	11.6
B2	49.8	43.6	24.2	19.4	1.278	1.78	12.8	12.2
C	51.1	44.2	24.4	19.8	1.326	1.76	12.3	12.0

2.5 加固后土体强度

2.5.1 十字板剪切试验

图9为加固后土体抗剪强度随深度变化曲线。总体上来看,上部土体的抗剪强度要好于下部,真空预压联合电渗试验(A区与B区)的抗剪强度要高于常规真空预压试验(C区),真空预压联合金属电

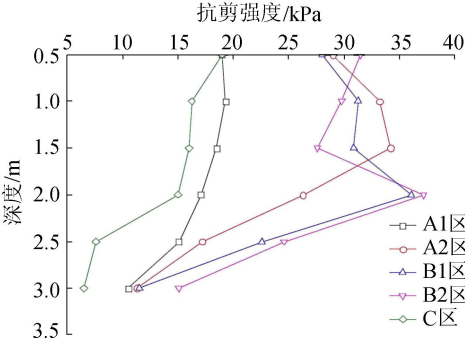


图9 加固后土体抗剪强度随深度变化曲线

极电渗试验(B区)的抗剪强度要高于真空预压联合导电排水板电渗试验(A区)。A1、A2、B1、B2、C区的抗剪强度平均值在整个1.5 m范围内分别为18.9 kPa、32.1 kPa、30.1 kPa、29.6 kPa和17.1 kPa,在3 m范围内分别为16.6 kPa、25.2 kPa、26.7 kPa、27.6 kPa和13.4 kPa。可以看出真空预压联合电渗法的有效性,同时也可以看出真空预压联合金属电极电渗试验加固效果较好。

2.5.2 静力触探试验

图10为加固后土体静力触探试验曲线。与十字板试验类似,上部加固效果好于下部,A1、A2、B1、B2、C区的比贯入阻力平均值在整个1.5 m范围内分别为0.257 MPa、0.252 MPa、0.321 MPa、0.221 MPa和0.201 MPa;在整个3 m范围内分别为0.205 MPa、0.232 MPa、0.273 MPa、0.163 MPa和0.155 MPa。A区和B区的比贯入阻力都大于常规真空预压试验区(C区),其中真空预压联合金属电极电渗试验区(B1区)的加固效果最好,其次是真空预压联合导电排水板电渗试验区(A1、A2区),而且A2区的加固效果好于A1区。

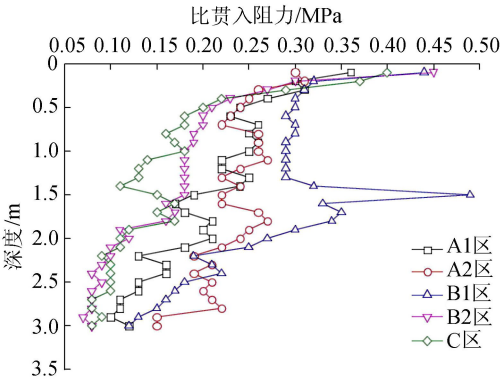


图10 比贯入阻力随深度变化曲线

2.5.3 平板载荷试验

试验结束后进行平板载荷试验检测得到A1、A2、B1、B2、C区的地基承载力特征值分别为51 kPa、63 kPa、59 kPa、57 kPa和42 kPa,A1、A2、B1、B2区相对C区地基承载力分别提高了21.4%、50.0%、40.5%和35.7%。由此再一次证明了真空预压联合电渗法的有效性。

3 经济效益分析

在本次试验过程中,真空预压联合导电排水板电渗试验和真空预压联合金属电极电渗试验与常规真空预压试验相比关键是多了电极材料,也就是说从单位面积处理成本上看,电极材料是影响真空预压联合电渗法能否大面积推广应用的关键。导电排水板是正在研制的新型电极材料,价格相对普通排水板较昂

贵。经测算,A1、A2、B1、B2、C 区的每平方米处理费用分别是 192 元、103 元、49 元、33 元和 18 元,可以看出真空预压联合导电排水板电渗法成本还是比较高的,随着材料技术的进步,成本会有较大幅度的降低。不过从地基承载力提高方面来看,真空预压联合导电排水板电渗法还是显示出一定的优越性。

4 结 论

- a. 真空预压联合导电排水板电渗试验的累计沉降超过常规真空预压法 9% (A1 区) 和 22% (A2 区),地基承载力相对常规预压法提高了 21.4% (A1 区) 和 50.0% (A2 区),加固效果明显,且导电排水板和普通排水板间隔布置反而有利于提高地基承载力。
- b. 真空预压联合金属电极电渗试验的累计沉降超过常规真空预压法 31% (B1 区) 和 22% (B2 区),地基承载力相对常规真空预压法提高了 40.5% (B1 区) 和 35.7% (B2 区),符合真空预压联合电渗法的一般规律。真空预压联合金属电极电渗法加固效果要稍好于真空预压联合导电排水板电渗法。
- c. 单纯从提高地基承载力方面考虑,真空预压联合导电排水板电渗法和真空预压联合金属电极电渗法效果基本相同,但是从材料本身出发,导电排水板处于试验研究阶段,预计效果要好于普通金属电极。
- d. 在真空预压联合导电排水板电渗试验中,导电排水板和普通排水板间隔布置试验区地基承载力可以达到 63 kPa,这表明导电排水板布置对加固效果有影响。

参考文献:

[1] 尚金瑞,杨俊杰,孟庆洲,等. 围海造陆填土技术及其应用研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2015, 45(6):100-107. (SHANG Jinrui, YANG Junjie, MENG Qingzhou, et al. Filling technology and application of reclamation project [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(6):100-107. (in Chinese))

[2] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4):45-56. (GAO Zhiyi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11 (4): 45-56. (in Chinese))

[3] KJELLMAN W. Consolidation of clay by means of atmosphere pressure[C]//Proceedings of a Conference on Soil Stabilization. Boston: M. I. T. Press, 1952:258-263.

[4] 陈环,鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984 (5): 39-47. (CHEN Huan, BAO Xiuqing. Consolidation effective stresses in soil under the negative pressure condition [J]. Chinese Journal of

Geotechnical Engineering, 1984 (5): 39-47. (in Chinese))

[5] 鲍树峰,莫海鸿,董志良,等. 新近吹填淤泥地基负压传递特性及分布模式研究[J]. 岩土力学,2014,35(12): 3569-3576. (BAO Shufeng, MO Haihong, DONG Zhiliang, et al. Research on transfer properties and distribution model of negative pressure in fresh hydraulic reclamation muck foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12):3569-3576. (in Chinese))

[6] 邵旭. 真空预压加固港口软土地基的机理研究[J]. 港工技术, 2015(1):84-87. (SHAO Xu. Mechanism study of port soft base reinforced by vacuum preloading [J]. Port Engineering Technology, 2015 (1): 84-87. (in Chinese))

[7] 付冠杰,范明桥,李杰,等. 软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术[J]. 水利水电科技进展,2014,34(6):82-88. (FU Guanjie, FAN Mingqiao, LI Jie, et al. A synchronous vacuum preloading technique for treating soft ground and its overlying hydraulic surcharge fills[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014,34(6):82-88. (in Chinese))

[8] 徐宏,邓学均,齐永正,等. 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(2): 285-290. (XU Hong, DENG Xuejun, QI Yongzheng, et al. Development of shear strength of soft clay under vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2):285-290. (in Chinese))

[9] 孙立强,闫澍旺,邱长林. 考虑新近吹填土固结系数为变量的固结理论研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊1): 312-316. (SUN Liqiang, YAN Shuwang, QIU Changlin. Consolidation theory considering coefficient of consolidation of hydraulic fill as variable [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup1): 312-316. (in Chinese))

[10] 刘锋,余湘娟,倪小东. 真空预压土体强度增长计算方法[J]. 水利水电科技进展,2012,32(6):56-59. (LIU Feng, YU Xiangjuan, NI Xiaodong. Method for calculating strength growth of soft foundation with vacuum preloading treatment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(6):56-59. (in Chinese))

[11] 李菲菲,谢康和,邓岳保. 考虑指数流的真空预压竖井地基固结解析解[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1075-1081. (LI Feifei, XIE Kanghe, DENG Yuebao. Analytical solution for consolidation by vertical drains with exponential flow under vacuum preloading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3):1075-1081. (in Chinese))

[12] 周琦,张功新,王友元,等. 真空预压条件下的砂井地基 Hansbo 固结解[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3994-3999. (ZHOU Qi, ZHANG Gongxin, WANG Youyuan, et al. Asbo's consolidation solution for sand-

- drained ground under vacuum preloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Sup2):3994-3999. (in Chinese))
- [13] 曹永华,高志义,刘爱民. 地基处理的电渗法及其进展[J]. 水运工程, 2008(4):92-95. (CAO Yonghua, GAO Zhiyi, LIU Aimin. Characteristics and development of electro-osmotic treatment for ground improvement [J]. Port & Waterway Engineering, 2008 (4): 92-95. (in Chinese))
- [14] CASAGRANDE L. Electro-osmosis in soils [J]. Geotechnique, 1949, 1(3):159-177.
- [15] KARUNARATNE G P, CHEW S H, LIM L M, et al. Electro-osmotic consolidation of soft clay based on laboratory and field trials [C]//Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics. Nice, France: [s. n.], 2002.
- [16] 王协群,邹维列. 电渗排水法加固湖相软黏土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2):95-99. (WANG Xiequn, ZOU Weilie. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2):95-99. (in Chinese))
- [17] 王柳江,刘斯,汪俊波,等. 真空预压联合电渗法处理高含水率软土模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(6):671-675. (WANG Liujiang, LIU Sihong, WANG Junbo, et al. Model test for high-water-content soft soil treatment under vacuum preloading in combination with electroosmosis [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(6):671-675. (in Chinese))
- [18] 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 Ying, GONG Xiaonan. 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. (in Chinese))
- [19] 刘飞禹,宓伟,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))
- [20] 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, 2013, 22(1/2):17-35.
- [21] JONES C J F P, GLENDINING S, HUNTLEY D T, et al. Case history in-situ dewatering of lagooned sewage sludge using electrokinetic geosynthetics (EKG) [C]//Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama, Japan: Millpress Science Publishers, 2006:539-542.
- [22] 王宁伟,韩旭,张雷. 室内水平电渗排水试验研究[J]. 岩土工程技术, 2014, 28(5):261-264. (WANG Ningwei, HAN Xu, ZHANG Lei. Experimental study of electro-osmotic test [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2014, 28(5):261-264. (in Chinese))
- [23] 胡黎明,洪何清,吴伟令. 高岭土的电渗试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(9):1353-1356. (HU Liming, HONG Heqing, WU Weiling. Electro-osmosis tests on kaolin clay [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(9):1353-1356. (in Chinese))
- [24] 吴辉,胡黎明. 考虑电导率变化的电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4):734-738. (WU Hui, HU Liming. Numerical simulation of electro-osmosis consolidation considering variation of electrical conductivity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4):734-738. (in Chinese))
- [25] 王军,符洪涛,蔡袁强,等. 线性堆载下软黏土一维电渗固结理论与试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1):179-188. (WANG Jun, FU Hongtao, CAI Yuanqiang, et al. Analyses of one dimensional electro-osmotic consolidation theory and test of soft clay under linear load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):179-188. (in Chinese))
- [26] 金浩然,姬文广,蔡正旺,等. 考虑酸碱迁移的电渗一维固结计算方法[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(6):93-98. (JIN Haoran, JI Wenguang, CAI Zhengwang, et al. One-dimensional computing method of electro-osmosis consolidation considering migration of acid and alkali [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(6):93-98. (in Chinese))
- [27] PENG Jie, XIONG Xiong, MAHFOUZ A H, et al. Vacuum preloading combined electroosmotic strengthening of ultra-soft soil[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11):3282-3295.
- [28] 房营光,徐敏,朱忠伟. 碱渣土的真空-电渗联合排水固结特性试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(11):70-75. (FANG Yingguang, XU Min, ZHU Zhongwei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2006, 34(11):70-75. (in Chinese))
- [29] LIU Hanlong, CUI Yunliang, SHEN Yang, et al. A new method of combination of electroosmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement [J]. China Ocean Engineering, 2014(4):511-528.
- [30] KARUNARATN G P. Prefabricated and electrical vertical drains for consolidation of soft clay [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(4):391-401.

(收稿日期:2016-09-08 编辑:熊水斌)