

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.010



海南海花岛软基处理工程中真空预压法的改进与机理分析

陈祥龙¹, 江舜武², 金亚伟³, 邓永锋¹

(1. 东南大学 交通学院, 南京 210096; 2. 江苏新苏港投资发展有限公司, 江苏 连云港 222042; 3. 江苏鑫泰岩土科技有限公司, 江苏 宜兴 214267)

摘要: 疏浚淤泥这种超软土地基目前主要采用排水固结法进行加固, 然而, 工程实践发现, 淤堵是一个重要的问题, 新型防淤堵材料和施工工艺是研究的热点。依托恒大海南海花岛真空预压处理工程, 引入一种应用于超软土地基处理的新型防淤堵真空预压法。该方法是直排式真空预压方法的进一步改进, 将防淤堵排水板取代传统排水板, 在连接方式上, 将无孔钢丝软管取代了水平波纹管, 也将传统的包扎捆绑改进成了三通密封接头, 枪钉固定。结合施工动态监测和加固后检测, 表明了该方法的加固效果和实用性。在此基础上, 结合已有的室内模型试验研究, 阐述其抽真空过程中在排水板附近防淤堵的原理和改善机制。

关键词: 真空预压; 防淤堵; 现场试验; 室内模型试验; 机理分析

中图分类号: TU471.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0075-09

Amendment of vacuum preloading technique in the application at Hainan sea flower Island and its improvement mechanism

Chen Xianglong¹, Jiang Shunwu², Jin Yawei³, Deng Yongfeng¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Xinsugang investment Company L. T. D., Lianyungang 222042, Jiangsu, P. R. China; 3. Xintai Geotechnical Technology Company L. T. D., Yixing 214267, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: At present, despite that the super soft soil foundation of the dredging silt is mainly strengthened by the vacuum-PVD consolidation method, the clogging is an important issue during the field application. With the vacuum preloading project of the Hengda Sea Flower Island in Hainan Province, a new type of anti-clogging vacuum preloading method for the super soft soil foundation is developed. It is the further improvement of the straight-line vacuum preloading method. The traditional PVD is replaced by the anti-clogging PVD, and the nonporous steel hose and tee sealing joint are also applied to update the traditional connections. Thereafter, the in-situ monitoring during vacuum and quality evaluation after construction is detailed introduced. The results verify the effectiveness and applicability of the preloading vacuum method' amendment. Combined with the existed laboratory model test, the principle of clogging in

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(41572280, 51378117)

作者简介: 陈祥龙(1991-), 男, 主要从事地基处理的研究, (E-mail) chenxl910325@qq.com。

邓永锋(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) noden@seu.edu.cn。

Received: 2016-07-22

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 41572280, 51378117)

Author brief: Chen Xianglong(1991-), main research interest: foundation treatment, (E-mail) chenxl910325@qq.com。

Deng Yongfeng(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) noden@seu.edu.cn。

the vicinity of the PVD during vacuum preloading, and the mechanism of improved vacuum preloading are also discussed.

Keywords: vacuum preloading; anti-clogging; field test; laboratory modeling test; mechanism analysis

港口、航道在开挖、建设、维护的过程中以及河流、湖泊在进行水环境治理的过程中会产生大量的疏浚泥^[1-2]。很长一段时间疏浚泥都是作为废弃材料而丢弃,随着环境保护的日益严格,疏浚泥又禁止外抛。与此同时,中国城镇发展尤其是沿海地区建设规模不断扩大,建设用地越来越紧张,吹填造陆与围海造地成为解决土地紧张问题的主要途径^[3-6]通过绞吸式、耙吸式、水力冲挖等工艺形成的疏浚淤泥,具有粘粒含量高,渗透性差,排水速率慢,强度和承载力极低等特征,导致了土地资源的大量占用^[7-8]。

由疏浚淤泥所形成的超软土地基,工程实践中一般采用排水固结法进行处理,然而在工程实践中,排水体系的淤堵是该加固方法进一步推广的主要技术障碍。为了解决疏浚淤泥地基真空预压工程实践中的淤堵问题,学者们从不同方面进行了研究,其中高效滤水性能的土工织物是一个研究热点^[9-12]。也有从施工工艺角度出发,相继产生了直排式真空预压、新型防淤堵真空预压。直排式真空预压相较于传统真空预压改进了传递真空负压和水平排水的路径,用水平波纹管取代砂垫层,并将塑料排水板直接捆绑在水平波纹管上,形成一个独立的排水系统。新型防淤堵真空预压在直排式真空预压的基础上进行了演变,不仅用防淤堵排水板取代了传统排水板,改善了垂直排水路径;而且采用了无孔钢丝软管取代了水平波纹管,避免了水平波纹管在抽真空过程中因地基不均匀沉降拉裂;连接方式也从包扎捆绑改进成了三通密封接头,枪钉固定,解决了垂直排水路径与水平排水路径接头处易堵,形成了一个密闭贯通的独立排水系统。

本文依托恒大海南海花岛围堰填海项目展开了新型防淤堵真空预压的现场试验,结合现场监检测明确其加固效果,为今后类似工程的设计与施工提供参考。在此基础上,总结已有室内对比试验,明确其内在机制。

1 工程技术方案

1.1 工程概述

恒大海南海花岛项目 1# 岛 A 区于 2013 年 9 月采用吹填淤泥形成陆域,落淤晾晒后的泥面高程

约为 3.50 m。A 区内的 6 区、9 区、10 区淤泥厚度约 5.0 m,采用真空预压法进行加固。处理总面积约 6.9 万 m²,共分 3 个分区,平面位置如图 1 所示。

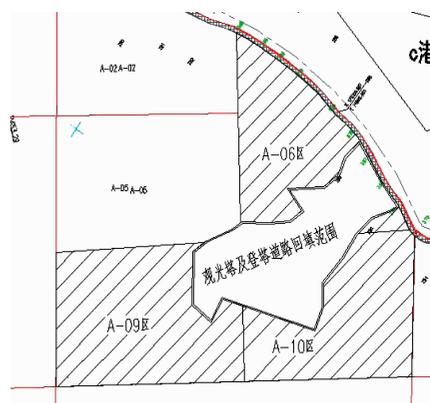


图 1 真空区平面位置图

Fig. 1 Planar polygon of vacuum preloading

1.2 排水板材料

新型防淤堵真空预压在直排式真空预压的基础上进行了演变,该真空预压技术采用防淤堵排水板,其滤膜为无凹凸结构亲水性材料,滤膜与芯材轧在一起,提高排水效果。防淤堵塑料排水板的各项指标见表 1。塑料排水板施工采用轻型轨道式打板机进行打设,施工顺序采用后退式施工,以保证打设完成的排水板不受碾压;排水板完成后,拔出插板机套管,剪断排水板,塑料排水板超过地面的长度不小于 50 cm。

表 1 防淤堵塑料排水板的指标

Table 1 The indicators of the anti-clogging PVD

	项目	技术指标	备注
材料	芯板	共聚乙烷, 共聚丙烯	纯新材料
	滤膜	涤纶丙纶 无纺织物	板芯滤膜热
熔板芯	厚度/mm	4.0±0.2	
	宽度/mm	100±3	
	抗弯折/mm	无撕裂	180度对折5次
复合体	抗拉强度/ (kN·10 cm ⁻¹)	≥2.0	干态, 延伸率10%
	纵向通水量/ (cm ³ ·s ⁻¹)	≥40	侧向压力为350 kPa

续表 1

项目	技术指标	备注
滤膜	抗拉强度/ (N·cm ⁻¹)	纵向干态 ≥20 验收率 10% 纵向湿态 ≥20 延伸率 15%, 水中浸泡 24 h
	有效孔径/μm	80~130 O ₉₈
	气力比降 (直径 3 cm)	686~ 1 000 Pa 工业酒精 98%

排水板打设完毕,连接三通密封手型接头,并用枪钉把三通密封接头和两侧排水板分别固定在一起,接着把无孔钢丝软管支管道与三通密封接头连接(如图 2),主管和支管间采用变径三通、四通连接(如图 3),主管道通入集水系统,这样就形成一个密闭贯通的独立排水系统。真空主管为 φ50 mmPVC 钢丝软管,真空支管为 φ25 mmPVC 钢丝软管。新型真空预压施工工艺见图 4。



图 2 三通密封接头
Fig. 2 Three ways' sealing joint



图 3 主、支管道
Fig. 3 Main and branch pipe

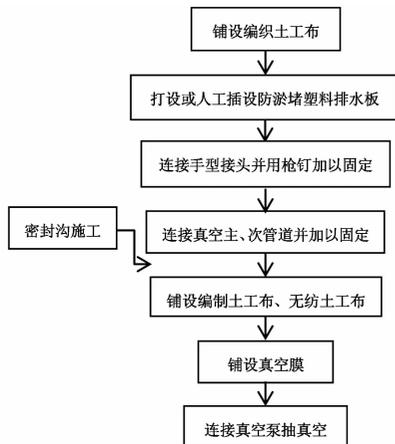


图 4 新型真空预压施工工艺

Fig. 4 Construction technology of new type vacuum preloading

1.3 现场施工工艺与控制要求

工程采用新型防淤堵真空预压法,要求膜下真

空度不小于 80 kPa,抽真空时间 2 个月,施工工艺如图 2 所示。塑料排水板间距 1.0 m 正方形布置,打穿软土层。抽真空达到设计要求恒载满载时间,停泵卸载时,监测结果需达到设计卸载要求标准^[13]:

1)最后 10 d 沉降速率小于 2 mm/d。

2)据实测沉降曲线推算地基土预压荷载下固结度不小于 85%。

2 施工监测与检测结果评价

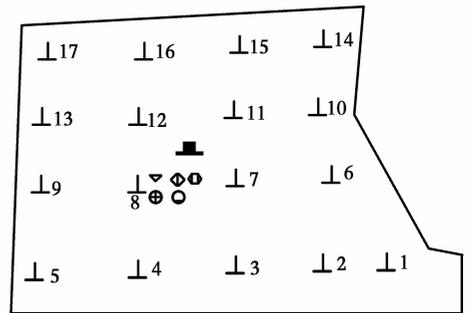
2.1 监检测

现场监(检)测内容主要包括两方面,一方面是地表沉降观测、分层沉降观测、孔隙水压力观测、水位观测等通过加固前预埋仪器在预压过程中的动态监测;另一方面,加固后原状取土及室内试验、现场十字板剪切试验、浅层平板载荷试验等在抽真空卸载结束后的加固效果检测。现场抽真空时间为 2015 年 9 月—2015 年 12 月。施工结束后进行地基测试以评价加固效果,检测时间为 2015 年 12 月—2016 年 1 月。监检测布置如表 2 所示。AGH9 区块的监测设备布置图如图 5。

表 2 监测(检测)工作量

Table 2 Monitoring measurement work

区号	分层沉降(孔)	地表沉降(点)	孔隙水压(孔)	水位(孔)	十字板(孔)	取土试验(孔)	平板载荷(点)
AGH6	1	11	1	1	2	2	1
AGH9	1	17	1	1	2	2	1
AGH10	1	6	1	1	2	2	1
登塔道	1	3	1	1	2	2	1
合计	4	37	4	4	8	8	1



A—09区监(检)测仪器平面布置图

注: ⊥ 地表沉降标 ◊ 分层沉降仪 ○ 水位 ▬ 平板载荷试验
▽ 孔隙水压力计 ⊕ 取土孔 ⊗ 十字板剪切孔

图 5 AGH9 区块的监测设备布置图

Fig. 5 Layout of monitoring equipment in AGH9 area

2.2 加固结果分析

各个区块的观测数据较为类似,现选取其中 AGH9 区块的典型观测数据进行分析各区加固过程特征和效果。

2.2.1 竖向变形

1) 插板施工期沉降 新近吹填形成的淤泥含水率非常高,为欠固结土。排水板的打设形成竖向排水通道,减小真空度损失,缩短排水路径,在薄膜内外形成的接近一个大气压负压下,地基排出孔隙水,有效应力增大,产生固结沉降。该场地插板施工期沉降平均为 265~308 mm。

2) 真空预压沉降 真空预压共分为 4 个区块,每块真空预压区真空预压持续时间 60 d。AGH9 区块的地表沉降曲线如图 6 所示。AGH9 区在绞吸形成淤泥场时就形成了中间有洼地,北侧高程比南侧低的地形,结合图 3 可以发现,沉降最大的 14#、10#、12#、7# 和沉降较小的 3#、9#、2#、17# 的沉降特征是符合经现场勘测情况的预测结果。

3) 固结度及残余沉降 在数据处理的过程中,根据双曲线沉降预测公式(1)~(3)^[14-15]推算地基土的固结度,可反映出地基的总体加固效果。

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} \quad (1)$$

$$S_\infty = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

$$U_t = \frac{S_t}{S_\infty} \times 100\% \quad (3)$$

表 3 各真空区沉降、固结度、残余沉降汇总表

Table 3 Settlement, degree of consolidation, the residual settlement

区号	插板沉降及前期沉降/mm	预压期沉降/mm	总沉降/mm	卸载时沉降速率/(mm·d ⁻¹)	固结度/%	残余沉降/mm
AGH6	285	392	676	1.0	85.1	110
AGH9	265	351	616	1.0	85.1	105
AGH10	308	316	624	1.0	85.2	103
登塔道	265	273	538	1.0	85.2	83
最小值	265	273	538	1.0	85.1	83
最大值	308	392	677	1.0	85.2	110
平均值	281	333	614	1.0	85.2	100

4) 分层沉降 在每个加固区的中间位置埋设了 1 组深层分层沉降仪,从而掌握待加固地基中各土层的竖向变形情况。

根据观测数据绘制分层沉降-时间关系曲线如图 7。AGH9 区预压期间分层沉降的大小和速率都很平均,由于 0.5 m 的沉降是深层土层沉降叠加,所

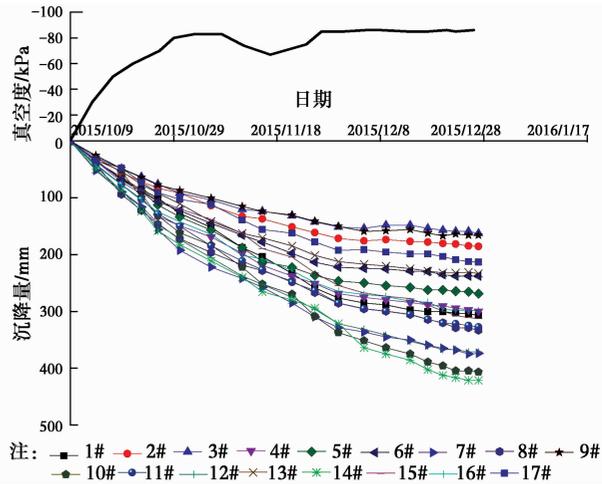


图 6 AGH9 区 1#—17# 沉降表曲线

Fig. 6 Settlement curve in AGH9 area

式中: α 、 β 为待定系数; U_t 为某时刻沉降固结度,%; S_0 为满载时地基沉降量,mm; S_t 为某时刻沉降量,mm; S_∞ 为最终沉降量,mm。

卸载时,利用式(1)~(3)推算地表沉降固结度,结果汇总见表 3。

如表 3 所示,各真空预压区总沉降量为 538~677 mm 之间,卸载前 10 d 的沉降速率为 1.0 mm/d,满足最后 10 d 沉降速率小于 2 mm/d 的要求,另一方面,沉降实测资料推算地基土固结度均不小于 85%^[13],残余沉降在 83~110 mm 之间,平均值 100 mm。各真空区满足设计卸载要求,基本达到设计标准。

以沉降最大,分层总沉降量 360 mm,与地表竖向沉降能吻合。

2.2.2 孔隙水压力观测 在每个真空预压区中间位置埋设 1 组孔隙水测头,埋设深度为 4.5 m,孔隙水压力测头用以监测真空预压施工期间土体内部孔隙水压力消散情况。孔隙水压力变化曲线见图 8。

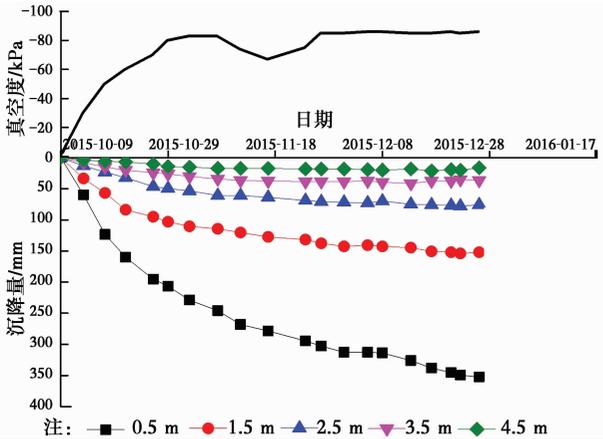


图 7 AGH9 区分层沉降曲线

Fig. 7 Layered settlement curve at AGH9 area

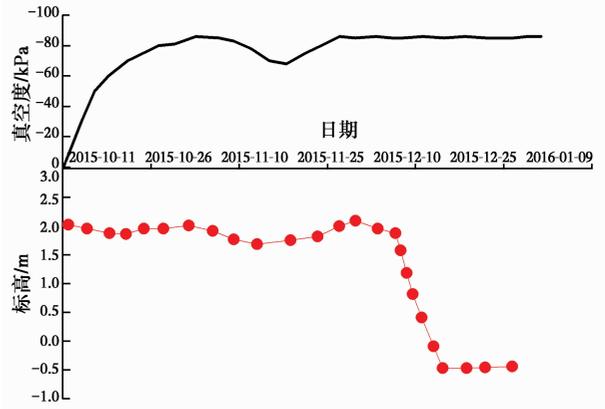


图 9 AGH9 区真空预压区水位时间关系曲线

Fig. 9 Water level curve in AGH9 area

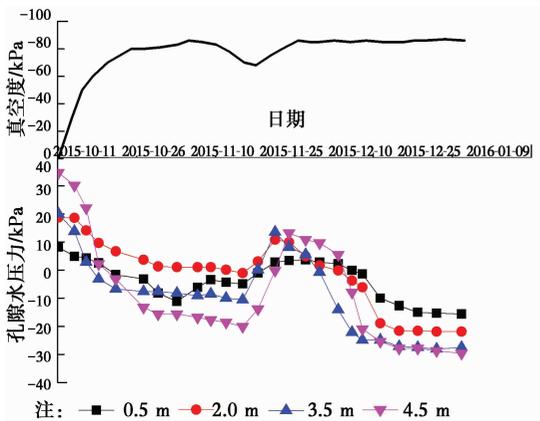


图 8 AGH9 区孔隙水压力变化过程曲线图

Fig. 8 Time-dependent pore water pressure curve

在抽真空过程中,施工场地周围区域进行了大面积的填土施工,填土高度 2~5 m,填土造成的主动土压力对真空区压膜沟产生了挤压,造成漏气,导致真空度出现小幅跌落。AGH9 区土体的孔隙水压力在真空预压加固期间产生了明显消散,场地处理范围内土体有效固结。

2.2.3 水位观测 在抽真空期间,地基中的孔隙水会在荷载作用下通过竖向排水板、横向管道排水通道排出地基土体,地基中水位会持续下降。铺真空膜之前,在加固区中间位置埋设地下水位管。根据观测数据绘制水位-时间关系曲线见图 9。

由图 9 可知,11 月 10 号到 11 月底明显的水位反常“回弹”现象,正常的地下水位在抽真空过程中是持续下降的,其出现“回弹”现象主要原因是 11 月初加固区周围有大量填土堆积导致压膜沟受到挤压,造成漏气。经过与现场恒大项目部协商处理暂停加固区周围填土,以及重新挖筑压膜沟和埋设密封膜,11 月底基本完成施工,抽真空过程正常运转,最终地下水位下降幅度达 2.45 m。

2.3 加固效果检测

加固前后进行了现场十字板剪切试验及钻孔取土及室内试验,加固后进行了浅层平板载荷试验,下面根据检测资料对加固效果进行综合分析。

现场验收时,发现有一个普遍的“土柱”现象,如图 10,“土柱”的立体空间形态是个倒立锥体,现场采用的是 1 m×1 m 正方形排水板布置,土柱之间的强度要明显小于土柱强度^[16]。相比传统真空预压工艺处理软基的“土柱”现象(图 11),采用新型防淤堵真空预压工法的土柱不明显。“土柱”现象反映了排水体周围的淤堵以及处理效果沿排水体径向不均匀问题。从微观上就是颗粒随着孔隙水移动,在持续抽真空过程中,颗粒集中到了排水板附近,产生涂抹区,形成排水板-涂抹区-周围土体整体淤堵机制,但现在的文献多把淤堵归为土工材料淤堵。“土柱”现象的明显与否对应微观淤堵程度强弱,“土柱”越明显,淤堵越严重。这进一步表明了新型防淤堵真空预压工艺比传统真空预压在防淤堵处理效果更好。



图 10 新型真空“土柱”
Fig. 10 “soil column” by
the new method



图 11 传统真空“土柱”^[17]
Fig. 11 “soil column”
by old method

2.3.1 十字板剪切试验 整个场地主要加固土层的十字板抗剪强度由加固前 3.7~80.0 kPa 增到加固后 16.9~80.0 kPa,增幅明显,见表 4。结合十字

板剪切现场试验数据,各区各加固土层抗剪强度明显提高。AGH9 区加固前后十字板抗剪强度详细对比见表 5。

表 4 加固前后十字板对比表

Table 4 Vane shear strength comparison before and after reinforcement

深度/m	加固前抗剪强度/kPa			加固后抗剪强度/kPa			平均增长/%
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
0.5~1.5	3.7	10.2	6.1	16.9	33.1	24.4	301.9
1.5~3.5	2.5	23.6	11.0	18.5	34.4	25.6	133.6

表 5 AGH9 区十字板剪切试验结果表

Table 5 Vane shear test result in AGH9 area

加固前				加固后			
标高/m	深度/m	原状土强度/kPa	重塑土强度/kPa	标高/m	深度/m	原状土强度/kPa	重塑土强度/kPa
2.4	0.5	10.2	5.1	1.7	0.5	16.9	7.4
1.4	1.5	9.7	4.6	0.7	1.5	18.5	10.1
0.4	2.5	6.5	2.3	-0.3	2.5	24.4	12.2
-0.6	3.5	23.6	7.4	-1.3	3.5	80.0	

表 6 AGH9 区加固前后土的物理力学指标对比表

Table 6 Physical and mechanical indexes before and after reinforcement in AGH9 area

层号	土层名称(加固前)	土层名称(加固后)	前后增减	含水率 $\omega/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e_0	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	液性指数 I_L	压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	试验方法	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$
1	淤泥	淤泥质粘土	加固前	61.4	1.64	1.716	46.7	25.3	1.35	1.51	1.80	Cq	11.2	5.4
			加固后	45.4	1.75	1.288	45.9	24.8	1.01	0.92	2.51	Cq	14.3	2.5
			增减/%	-26.1	6.7	-24.9	-1.7	-2.0	-24.9	-39.4	69.2	增减量	3.1	-2.9
2	淤泥质粉质粘土	粉质粘土	加固前	55.5	1.67	1.559	41.0	23.5	1.87	0.94	3.22	Cq	17.8	9.6
			加固后	33.3	1.85	0.966	39.7	22.8	1.01	0.52	3.91	Cq	20.25	12.50
			增减/%	-40.0	10.7	-38.1	-3.2	-3.0	-46.0	-44.7	21.4	增减量	2.5	2.9

3 新型防淤堵真空预压加固效果的室内对比模型试验

3.1 传统与新型防淤堵真空预压对比

龚济平等^[18]开展了传统与新型防淤堵真空预压对比模型试验。传统与新型防淤堵真空预压仅仅在施工工艺和塑料排水板实验条件不同以外,其它实验条件均相同,持续抽真空 48 h,膜下真空度 80 kPa。试验结束后相同位置分别取土样测试含水率。采用新型防淤堵真空预压技术加固后,浅层土和深层土的含水率分别为 55.18% 和 55.21%,仅相差

2.3.2 浅层平板载荷试验 对卸载后的真空预压区进行浅层平板载荷试验,浅层平板载荷试验数据表明,真空区地表地基承载力特征值不小于 60 kPa,满足设计要求。

2.3.3 加固后各土层土性变化 室内试验结果表明,加固前后地基土的物理力学指标都有较大改善,AGH9 区的土体含水率、孔隙比明显变小,主要加固土层土性指标均有较大幅度提高。加固前后各真空区土层物理力学指标见表 6。

0.03%;经传统砂垫层法处理后。浅部土样和深部土样的平均含水率分别为 65.6% 和 77.8%,相差达 12.2%;采用新型防淤堵真空预压和传统砂垫层法处理后土样的平均含水率分别降至 55.2% 和 71.7%^[18]。由表 6 可知,在海南海花岛真空预压现场,浅层淤泥加固前后的含水率分别是 61.4% 和 45.4%,增减量-26.1%;深层淤泥质粉质粘土含水率分别是 55.5% 和 33.3%,增减量-40.0%。通过以上对比发现,经新型防淤堵真空预压法处理后软土的含水率更低,可以推断新型防淤堵真空预压法较传统砂垫层法具有更高的真空度传递效率,孔隙

水压力差更大、真空度损失更小。真空度沿深度方向的传递更均匀。

3.2 直排式与新型防淤堵真空预压对比

王军等^[19]开展了直排式与新型防淤堵真空预压对比模型试验。直排式与新型防淤堵真空预压分别采用普通 B 型塑料排水板与防淤堵塑料排水板,施工工艺不同,其它试验条件相同,试验过程中,分别实时监测表面沉降;试验结束后拆膜,对 2 个试验分别进行含水率试验和十字板抗剪强度试验。

沉降量的观测每组选取 3 个点,一一对应。中心点的沉降明显大于边点的沉降值,这是由于中心点的真空度更大,渗透路径更短。同时,新型防淤堵真空预压法相应点最终沉降量和前期沉降速率明显优于直排式真空预压法。所以,达到相同承载力强度,新型防淤堵真空预压法在功耗和时间消耗上优于直排式真空预压法。

在对尾水收集过程中,两组试验有明显区别,直排式真空预压尾水清澈伴随泡沫,而新型防淤堵真空预压则是起初水浑浊,伴随抽真空时间增长,逐渐清澈,说明细小颗粒是与尾水一起排出,而直排式真空预压细小颗粒滞留在了 B 型排水板以及塑料排水板在水平波纹管捆绑处,体现了新型防淤堵排水板以及密闭贯通的独立排水系统的优越性。这一点在海南海花岛真空预压现场也得到了验证(图 12),抽真空结束后,拆模后会发现直排式真空预压水平波纹管存在不均匀沉降带来的拉伸现象,一个原因是新型防淤堵真空预压采取的无孔钢丝软管质量上优于水平波纹管,主要原因直排式真空预压模下真空强度很高,但传递效率很低,表面形成硬壳层。

十字板抗剪强度试验和含水率试验分别对两组实验径向离排水板 10、40 cm,纵向 0、25、50、75 cm 对应点。直排式真空预压法浅层位置相应点处理强度比新型防淤堵真空预压稍强,这是由于以绑扎来处理水平排水路径与竖直排水板的结合方式,能在待处理软基表面形成更大的强度,如图 13。深度达到 35 cm 附近,新型防淤堵真空预压法距排水板 40 cm 处的抗剪强度已经大于直排式真空预压法 10 cm 处,随着深度加深,差距不断增大。试验结果表明新型防淤堵排水板以及密闭贯通的独立排水系统可以增强真空度的传递,预防竖直排水路径与水平排水路径接头处易堵,排水板易堵。含水率与十字板抗剪强度值情况基本吻合,结合十字板强度检测值,说明了新型防淤堵真空预压加固深层土体的效果优于直排式真空预压^[19]。

在海南海花岛真空预压现场,十字板抗剪强度由加固前 3.7~80.0 kPa 增到加固后 16.9~80.0 kPa,增幅明显,见表 4。结合十字板剪切现场试验数据,各区各加固土层抗剪强度明显提高。AGH9 区加固前后十字板抗剪强度详细对比见表 5。现场试验数据同样表明深层土的十字板抗剪强度增量比浅层土的幅度更大,新型防淤堵真空预压施工工艺可以增强真空度的传递,预防竖直排水路径与水平排水路径接头处易堵,排水板易堵。



图 12 尾水

Fig. 12 Consolidated water by PVD method

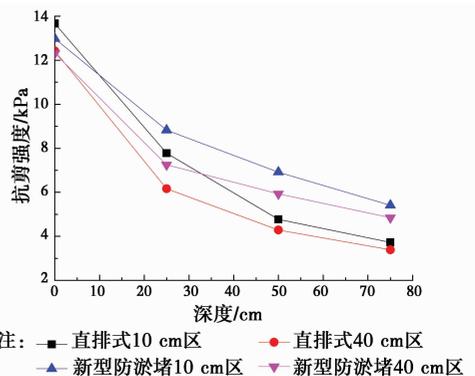


图 13 十字板抗剪强度随深度变化曲线

Fig. 13 Depth-dependent vane shear strength

4 结论

在超软土地基加固的实践中,真空预压过程中淤堵导致的加固效果受限是困扰工程和学术界的一个问题,本文结合海南海花岛真空预压的工程实践,引入了新型的防淤堵真空预压技术。该技术是直排式真空预压方法的进一步改进,将防淤堵排水板取代传统排水板,在连接方式上,将无孔钢丝软管取代了水平波纹管,也将传统的包扎捆绑改进成了三通密封接头。通过现场施工过程中的动态监测和加固效果检测,表明了现场应用效果,表明该改进的有

效性。在此基础上,结合已有的室内模型试验研究,分析了对比了新型防淤堵真空预压法技术能取得良好效果的机制。

1) 现场监测(检测)各加固区土体的孔隙水压力在真空预压加固期间产生了明显消散,场地处理范围内土体有效固结,真空区区域各加固土层的十字板抗剪强度均有所提高。真空区地表地基承载力特征值不小于 60 kPa,各真空预压区按实测沉降推算固结度为 85.1%~85.2%,按交工 25 a 后,推算得出残余沉降为 83~110 mm,平均值为 100 mm,满足设计要求。室内试验结果表明,加固前后地基土的物理力学指标都有较大改善,各加固区的土体含水率、孔隙比变小,主要加固土层土性指标均有较大幅度提高。

2) 新型防淤堵真空预压法用防淤堵排水板取代了传统排水板,改善了纵向排水路径,而且采用了无孔钢丝软管取代了水平波纹管,避免了水平波纹管在抽真空过程中因地基不均匀沉降拉裂;连接方式也改进成了三通密封接头,枪钉固定,解决了竖直排水路径与水平排水路径接头处易堵问题,形成了一个密闭贯通的独立排水系统。在恒大海南海花岛项目软基处理效果显著,改善了真空度传递效率,避免淤堵现象,预压区地基得到了改善。

3) 结合现场试验数据以及他人已有模型试验研究成果,高效滤水性能的土工织物在克服滤水通道的淤堵问题效果明显,尤其对于处理深层土体,新型防淤堵真空预压法处理吹填淤泥的排水效率以及防淤堵比传统真空预压法的效果更好。该新型防淤堵真空预压法可以大幅缩短施工工期和节约工程造价,在人工吹填(超)软土地基处理工程实践中具有良好实用价值和重大的社会应用前景。

参考文献:

[1] 黄华梅,高杨,王银霞. 疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2571-2570.
HUANG H M, GAO Y, WANG Y X. The present situation of the application of dredging coastal wetland ecological engineering and potential application in China [J]. Journal of Ecology, 2012, 32(8): 2571-2570. (in Chinese)

[2] CHAN C M, MIZUTANI T A, KIKUCHI Y. Solidification of dredged marine clay for sustainable civil engineering applications: a laboratory study [J]. Penang, Malaysia: Planetary Scientific Research Center,

2012, 3(6):1257-1268.

- [3] 张建新. 沿海城市围海造地的综合效应分析与可持续发展[J]. 城市发展研究, 2011, 18(3): 93-98.
ZHANG J X. The analysis of the combined effect of reclaiming land from seawaters in coastal cities sustainable development [J]. Urban Development Research, 2011, 19(3): 93-98. (in Chinese)
- [4] 朱凌,刘百桥. 围海造地的综合效益评价方法研究[J]. 海洋信息, 2009, 20(2): 18-20.
ZHU L, LIU B Q. Research on the evaluation method of comprehensive benefit of land reclamation [J]. Marine Information, 2009, 20(2): 18-20. (in Chinese)
- [5] 董志良,张功新,陈平山,等. 吹填造陆超软土地基加固理论与工艺技术创新[R]. 广州:中国土木工程学会港口工程分会, 2011.
DONG Z L, ZHANG G X, CHEN P S, et al. Land reclamation and super soft soil foundation reinforcement theory and technology innovation [R]. Guangzhou: Port Engineering Branch, China Civil Engineering Association, 2011. (in Chinese)
- [6] LOU A G, HU Y B, KUANG L, et al. Analysis and Prediction of influence imposed on jiaozhou bay tidal currents and tidal energy of m² tidal system by jiaozhou bay reclamation [J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 8(1): 23-29.
- [7] 沈杰. 高含水率疏浚泥真空预压室内模型试验研究[D]. 南京:东南大学, 2015
SHEN J. Laboratory model test of vacuum preloading on dredged clays at high initial water contents [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [8] CHU J, BO M W, CHOA V. Improvement of ultra-soft soil using prefabricated vertical drains [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(6): 339-348.
- [9] HUANG C C, LUO S Y. Dewatering of reservoir sediment slurry using woven geotextiles. Part I: Experimental results [J]. Geosynthetics International, 2007, 14(5): 253-263.
- [10] BENSON C H, KUCUKKIRCA I E, SCALIA J. Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2010, 28(6): 536-546.
- [11] QUARANTA J D, TOLIKONDA R. Design of non-woven geotextiles for coal refuse filtration [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2011, 29(6): 557-566.
- [12] PALMEIRA E M, GARDONI M G. Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques

- [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2002, 20 (2): 97-115.
- [13] 港口工程地基规范:JTS 147—1—2010 [S].
Code for soil foundation of port engineering: JTS 147-1-2010 [S]. (in Chinese)
- [14] 孙常青,饶锡保,王月香. 沉降观测曲线的拟和和最终沉降量的确定[J]. 长江科学院院报,2002(5):58-61.
SUN C Q, RAO X B, WANG Y X. Determination of final settlement by fitting observed curve method [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002 (5): 61-58. (in Chinese)
- [15] 夏彩虹, 仝磊. 双曲线配合法在某路基沉降反分析中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005(1):48-50.
XIA C H, ER L. The hyperbolic matching method in settlement back-analysis of a road foundation [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2005 (1): 48-50. (in Chinese)
- [16] 吉锋,邓东升,洪振舜,等. 高含水率疏浚淤泥透气真空防淤堵模型[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(1):26-31.
JI F, DENG D S, HONG Z S, et al. The model of the high water content dredging silt with the air permeability and anti-clogging model [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35 (1): 26-31. (in Chinese)
- [17] 陈平山,董志良,张功新. 新吹填淤泥浅表层加固中“土桩”形成机理及数值分析[J]. 水运工程,2012(1):158-163.
CHEN P S, DONG Z L, ZHANG G X. Mechanism and numerical situation of the “soil piles” in the fresh hydraulic mud fill treated by surface-layer improvement technique [J]. *Port & Water Engineering*, 2012(1): 158-163. (in Chinese)
- [18] 龚济平,徐超,金亚伟. 采用改进真空预压技术加固软土地基的试验研究[J]. 港工技术,2012,49(3):50-52.
GONG J P, XU C, JIN Y W. Experimental study on the technology of improving the soft soil foundation by using the improved vacuum preloading technique [J]. *Port Engineering Technology*, 2012, 49 (3): 50-52. (in Chinese)
- [19] 王军,蔡袁强,符洪涛,等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1257-1268.
WANG J, CAI Y Q, FU H T, et al. Laboratory and field experimental study on the new method for the vacuum preloading of anti clogging and blocking [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (6): 1257-1268. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)