



新型真空预压法在堆场深厚软土地基处理中的应用

王建华¹, 刘志², 丁小冬³, 潘先龙⁴, 谢学忠³

(1. 深圳市盐田港集团有限公司, 广东 深圳 518081; 2. 天海港湾工程有限公司, 广东 深圳 518000;
3. 中化岩土工程股份有限公司, 北京 102600; 4. 杭州天恒投资建设管理有限公司, 浙江 杭州 310004)

摘要: 针对堆场深厚软土地基处理时传统真空预压法体现的耗时、耗电和施工不便等问题, 进行新型直连式真空预压法在堆场深厚软土地基处理中的应用研究。采用现场试验分析施工工艺中存在的问题并提出改进措施, 同时结合监测和检测数据分析地基处理的效果, 提出新型真空预压技术处理后的场地完全能满足设计要求, 确定了后期大面积处理时的排水板类型和间距, 节能效益明显, 为类似地区的地基处理提供了很好的参考。

关键词: 深厚软土; 真空联合堆载; 施工工艺; 加固机理; 加固效果

中图分类号: TU 447; U 65

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2017)02-0160-06

Application of new vacuum preloading for foundation treatment of yard's deep-seated soil

WANG Jian-hua¹, LIU Zhi², DING Xiao-dong³, PAN Xian-long⁴, XIE Xue-zhong³

(1. Yantian Port Group Co., Ltd., Shenzhen 518081, China; 2. Tianhai Harbor Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;
3. China Zhonghua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China;
4. Hangzhou Tianheng Investment & Construction Supervision Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: In view of the problems of wasting time, electricity and construction inconvenience for the convenient vacuum preloading in the foundation treatment of yard's deep soft soil are obvious now, we study the application of yard deep soft soil to the yard's deep-seated soil foundation treatment. On the basis of field test, we analyze the problems during construction and propose the improvement measures. Besides this, we also analyze the effect of foundation treatment based on the monitoring and testing data. The conclusions are drawn that the soil properties after treatment could satisfy the design requirement completely, which is useful to confirm the type of drain board and spacing, and the energy efficiency is obvious, which could provide reference for the foundation treatment in similar area.

Keywords: deep-seated soft soil; vacuum-surchage preloading; construction technology; treatment mechanism; treatment effect

随着沿海地区经济的快速发展, 港口建设日益增加。对于深厚软土堆场的地基处理, 真空预压法由于其压力的局限性(最大 85 kPa 左右), 往往不能达到设计对堆场处理后承载力及工后沉降的要求, 为此对于深厚软土堆场的地基处理基本采用真空联合堆载预压法。

真空联合堆载预压法具有真空预压法和堆载预压法的双重效果, 可较好地解决堆载过程中的稳定问题, 保证堆载的快速进行, 节省地基处理的时间。吴念一等^[1-4]基于现场试验, 结合监测及检测数据, 分析了真空联合堆载预压地基加固的机理和效果。石啸^[5]对真空联合堆载预压施工过

收稿日期: 2016-07-05

作者简介: 王建华(1978—), 男, 硕士, 工程师, 一级注册建造师, 从事港口建设领域的管理与技术研究工作。

程中的要点进行了详细的介绍和分析。肖策^[6]基于现场试验,对直排式真空联合堆载预压法的应用进行了研究。

现有的真空联合堆载预压地基处理方面的研究多是针对传统真空预压法,新型直连真空预压技术目前正处于推广阶段。本文基于现场试验,分析该技术施工过程中的关键工序,结合各项监测数据分析加固机理,并对比分析不同排水板布置区域的检测结果,为后期大面积处理排水板类型及间距的选取提供参考。

1 工程概况

试验区处理面积 70 552 m²,处理的土体包括经浅层预处理的吹填土和吹填前海底的原状淤泥,经浅层预处理后的吹填土厚度约 4 m,含水率约 100%,基本处于流动状态,海底原状淤泥的厚度约 14 m,海底原状淤泥的物理力学参数见表 1。

表 1 海底原状淤泥物理力学参数

土名	含水率/%	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	固结快剪	
						c _{cq} /kPa	φ _{cq} /(°)
② ₁ 淤泥	76.5	2.10	54.2	29.3	24.9	3.8	13.6

由表 1 可知,海底原状淤泥含水率、孔隙比较大,强度较低,塑性指数较高。

2 试验方案

试验方案的目的是对比不同类型排水板及不同间距的处理效果,以为后期大面积处理时选择合理的排水板类型和间距,同时针对施工中可能出现的问题对后期大面积处理的设计进行适当的优化。

地基处理时选择合资滤膜排水板和国产滤膜排水板,合资滤膜排水板所在区域的排水板间距为 0.95 m,国产滤膜排水板所在区域的排水板间距为 0.9 m。合资滤膜排水板与国产普通滤膜排水板均属于 B 型板,其物理指标见表 2。

表 2 不同类型滤膜排水板的物理指标

排水板类型	设计值及实测值	纵向通水量/(cm ³ /s) (侧压力 350 kPa)	滤膜等效孔径/mm (以 O ₉₅ 计)	滤膜渗透系数/(cm/s) (水中浸泡 24 h)
合资滤膜排水板	设计值	≥25	0.075~0.12 (以 O ₉₈ 计)	≥0.005
	实测值	95.60	0.094	0.01
国产滤膜排水板	设计值	≥25	≤0.075 (以 O ₉₈ 计)	≥0.000 5
	实测值	89.8	0.069 (以 O ₉₈ 计)	0.008 5

表 2 可知,纵向通水量、滤膜等效孔径、滤膜渗透系数 3 个物理指标均是合资滤膜排水板优于国产滤膜排水板。

根据后期对处理区域不同的使用要求,将处理区域分为 A1、A2 及 B1 区,各区的堆载不同。地基处理过程中,对处理区域内进行监测,主要包括真空度、地表沉降、分层沉降、孔隙水压力等,如图 1 所示。

地基处理前后在区内进行十字板剪切试验,同时地基处理后进行取土室内试验和浅层平板载荷试验,各检测点的布置见图 2。

3 施工工艺

浅层预处理完成后,深层真空联合堆载预压处理工艺流程如下:土工布铺设→土工格栅铺设→土垫层回填(1.0 m)→中粗砂垫层铺设(0.4 m)→排水板打设→密封墙打设→管路连接、设备安装→密封膜铺设→抽真空→膜上土工布铺设→中细砂垫层铺设(0.5 m)→分级堆载→真空联合堆载预压→卸载。

浅层预处理完成后,为提高地基的承载力,铺设 1 层土工布和土工格栅;土垫层施工采用 6 m³自卸车,打网格分区进行,施工过程中出现较明显的挤淤现象,分析原因主要是施工车辆荷载较大,

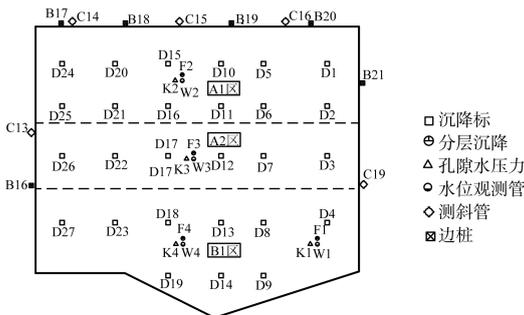


图 1 监测点位平面布置

对浅层预处理完后的表层硬壳层扰动较大，部分区域硬壳层甚至破坏，施工过程中土垫层厚度实际达到 1.5 m，建议在后期大面积处理时选择自重荷载较小的车辆进行。中粗砂垫层可增加排水管路的水平向排水，同时可保护排水管路在堆载过程中避免被压坏。排水板打设严格控制深度达到设计要求。采用蝶形接头将排水板和排水管路连接，并埋设于中粗砂垫层中，见图 3。中细砂垫层的铺设采用改装后的小车进行，打道位置铺设铁板，尽量减小对密封膜的影响。

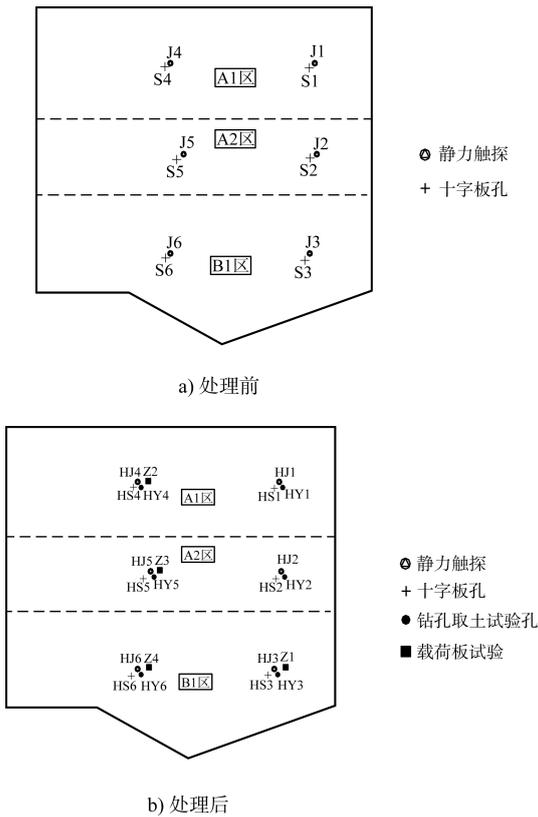


图 2 地基检测点布置



图 3 蝶形接头与钢丝软管支管连接

4 试验结果

4.1 真空度

真空预压及堆载过程中对膜下真空度进行监测，膜下真空度的变化见图 4。

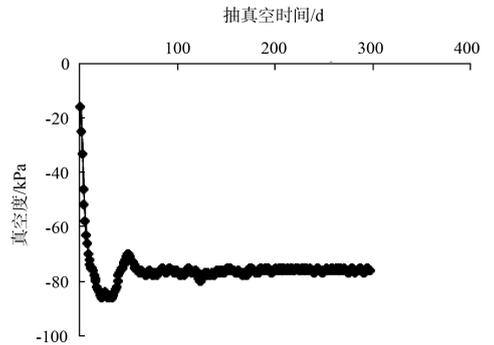


图 4 膜下真空度随抽真空时间变化曲线

由图 4 可知，随着抽真空的进行，膜下真空度开始快速增加，并达到设计要求 85 kPa；在抽真空 35 d 时膜下真空度开始减小，分析其原因是膜上覆水排出，密封膜有漏气现象，同时也说明膜上覆水有助于提高真空预压表面的密封效果；膜上覆水排出后，进行膜上土工布和砂垫层的铺设，随后根据不同区域的要求进行堆载，堆载过程中向区内继续覆水，结果发现膜下真空度有所上升，可达到 80 kPa 左右，说明后期覆水对提高膜下真空度有一定的效果，但未能达到堆载前的水平，其原因有可能是堆载过程中导致密封墙位置处出现漏气或密封膜破坏严重。为保证地基处理效果，在堆载满载后补载 1.0 m，相当于增加荷载 18 kPa 左右，再加上土垫层施工时超出设计要求的 0.5 m (约 9 kPa)，完全能满足设计对于荷载的要求。在后期大面积处理时，可适当减小土垫层的厚度，以保证堆载过程中密封墙位置的密封性。

4.2 地表沉降

真空预压及堆载预压过程中对地表沉降进行监测，B1 区地表沉降平均值随时间变化见图 5。

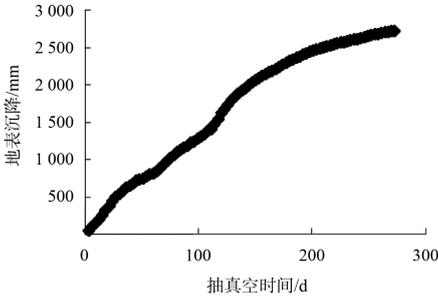


图 5 B1 区地表沉降平均值随抽真空时间变化曲线

由图 5 可知, 抽真空初期地表沉降快速增长, 膜上覆水开始排出并铺设土工布, 膜下真空压力有所下降, 地表沉降速率也相应降低, 抽真空 51 d 后开始堆载, 各区的沉降速率逐渐增大, 尤其是满载后的初期沉降速率达到最大, 之后随着孔压的消散沉降速率逐渐减小、沉降逐渐增大。对于深厚软土, 次固结沉降在工后沉降中占比较大, 不可忽视。为减小次固结沉降, 通常可从以下几方面考虑: 改善土体性质 (包括物理方法和化学方法, 其中物理方法是指通过地基处理的方法减小土体的含水率, 化学方法是指将水泥等外加剂掺入土体), 改变土体的应力状态 (研究认为超固结土的次固结沉降与正常固结土相比可大大减小)。根据实测沉降曲线, 采用双曲线法、三点法、Asaoka 法推算的固结度均大于 85%, 满足设计要求。

4.3 分层沉降

B1 区 F4 不同深度的分层沉降随时间的变化曲线见图 6。

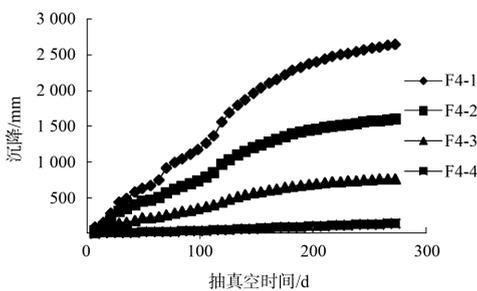


图 6 不同深度处分层沉降随抽真空时间变化曲线

由图 6 可知, 不同深度处沉降环的沉降均随着抽真空的进行不断增长, 且沉降速率的变化与地表沉降类似。为对比分析不同深度范围土层的沉降量大小, 对其进行统计, 结果见表 3。

表 3 分层沉降仪不同深度范围沉降量大小对比

深度范围/m	F4/mm
0~2	1 049
2~6	835
6~10	627

由表 3 可知, 软土层深度越浅, 产生的沉降越大; 软土层整个深度范围内均有沉降产生, 说明地基处理的影响深度达到了整个软土层。

4.4 孔隙水压力

不同深度土体的孔压随时间关系曲线见图 7。

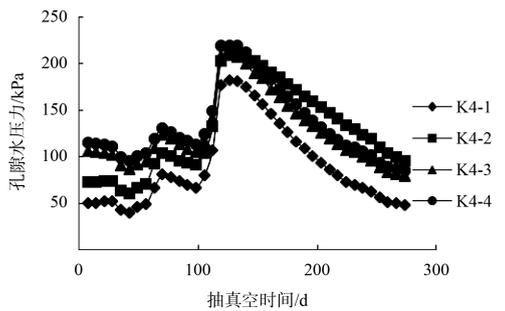


图 7 B1 区孔压位置 K4 不同深度处的孔压-抽真空时间关系曲线

由图 7 可知, 抽真空初期孔隙水压力明显下降, 且深度越浅孔压减小越多, 说明真空度在向排水板深处传递过程中有一定的损耗, 随着堆载荷载的增加, 孔压有所增大, 静载后又逐渐消散, 真实反映了加载全过程; 不同深度处的孔压计在抽真空和堆载过程中孔压变化均明显, 说明地基处理影响的范围包含整个软土层; 由于实际加载并不是一个理想的过程, 孔压曲线较为曲折, 各土层的物理性质、排水通道的畅通与否、孔压计的灵敏度及耐久性等诸多因素都对孔隙水压力的变化有影响。

4.5 物理力学特性

B1 区真空联合堆载预压处理后取土进行室内力学特性试验, 并与处理前土层的物理力学参数进行对比, 结果见表 4。

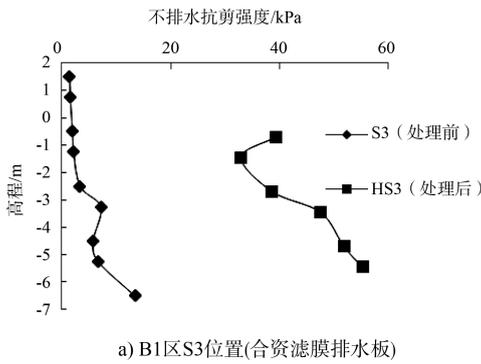
表 4 B1 区处理前后土体物理力学参数对比

项目	含水率/%	孔隙比	固结快剪	
			c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
处理前	76.5	2.10	3.8	8.6
处理后	48.4	1.38	8.0	15.9
差值	-28.1	-0.72	4.2	7.3

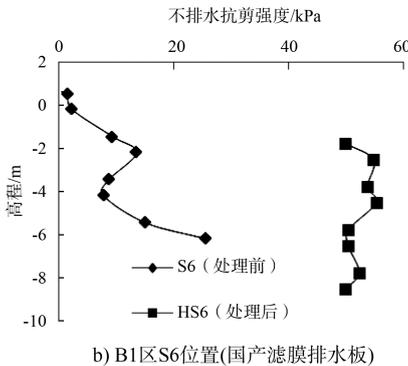
由表 4 可知，真空联合堆载预压处理后，土体的各项物理力学指标显著提高，含水率降低超过 20%，孔隙比降低明显，抗剪强度提高较多。

4.6 十字板剪切试验

对比分析 2 种不同类型滤膜排水板的处理效果，在 B1 区 2 种不同类型滤膜排水板区域分别进行十字板剪切试验，试验结果见图 8。



a) B1区S3位置(合资滤膜排水板)



b) B1区S6位置(国产滤膜排水板)

图 8 处理前后十字板不排水抗剪强度随深度变化曲线

由图 8 可知，真空联合堆载预压处理前后土体不排水抗剪强度提高显著，且国产滤膜排水板在高程-3 m 以上位置抗剪强度大于合资滤膜排水板，主要原因是 S6 位置起初是吹填口，吹填后的土体夹碎贝壳较多，土质较好，因而其上层土体的十字板不排水抗剪强度优于 S3 位置。

4.7 载荷试验

真空联合堆载预压深层处理完成后卸载并进行普夯，普夯完成后进行浅层平板载荷试验，B1 区不同类型滤膜排水板区域的载荷试验结果见图 9。

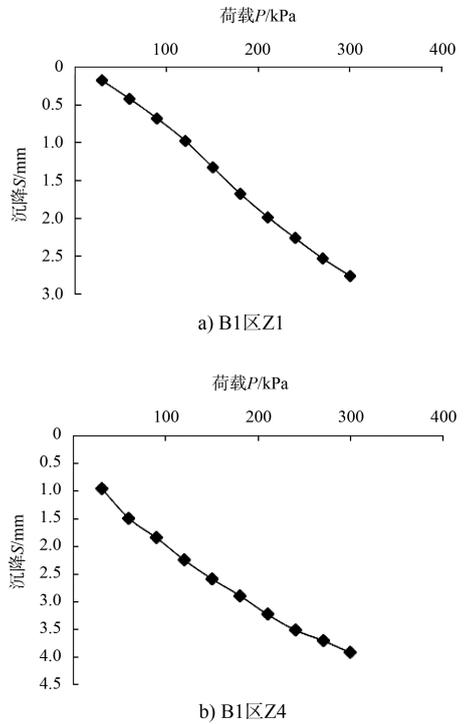


图 9 载荷试验 P-S 曲线

由图 9 可知，P-S 关系曲线呈直线状缓慢下降趋势，300 kPa 荷载作用下地基无破坏迹象，且 150 kPa 荷载作用下的沉降量 $S/B < 0.01$ ，可判定表层回填土地基承载力特征值 ≥ 150 kPa，均满足设计要求。

4.8 效能分析

地基处理面积 70 552 m²，布置 1 套真空泵 (55 kW) 和 8 个水汽分离罐，每个罐内有 2 个抽水泵 (7.5 kW)，总功率约为 175 kW。如采用传统射流泵，每 1 000 m² 布置 1 台射流泵 (7.5 kW)，70 552 m² 需布置 70 台射流泵，总功率为 525 kW，总能耗远高于新型高效节能真空设备。根据以往工程经验，新型抽真空设备可节约电能 60% 左右。

5 结论

1) 土垫层施工对浅层预处理后形成的硬壳层扰动较大，建议后期大面积处理时改用自重较小的车辆施工；结合堆载后膜下真空度的变化，密封沟位置出现漏气，建议在保证土垫层可施工的条件下适当减小土垫层厚度，可调整为 0.5 m，以保证后期堆载时密封墙位置处的密封。

2) 结合分层沉降、孔隙水压力和十字板抗剪强度数据分析可知,真空联合堆载预压地基处理的影响深度包含了排水板整个深度的软土层,有较好的效果。

3) 地基处理后,土体的各项物理力学指标有较大提高,地基承载力满足设计要求;对比分析不同类型滤膜排水板区域的处理效果,结合国产滤膜排水板区域处于吹填口土质稍好的因素,发现国产滤膜排水板区域(排水板间距 0.9 m)与合资滤膜排水板区域(排水板间距 0.95 m)处理效果接近;考虑到经济因素,在后期大面积处理时选择国产滤膜排水板,间距为 0.9 m,同时为类似地区的地基处理提供参考。

4) 新技术真空设备功率与传统技术的比较,新技术可节电达 60%,有较好的社会效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 吴念一,陈伟东,刘嘉,等.真空联合堆载预压技术加固超软弱地基的试验研究[J].水运工程,2010(10):113-118.
- [2] 刘国祥,安庆军,袁伟,等.真空-堆载加固胶州湾软基现场试验研究[J].水运工程,2011(10):145-148.
- [3] 茅兵海,刘华.真空联合堆载预压技术处理某堆场软基的效果分析[J].水运工程,2015(8):151-154.
- [4] 韩宾,张永宏,高公路.连云港某堆场真空联合堆载技术[J].中国港湾建设,2014(9):36-39.
- [5] 石啸,刘淑娟.真空联合堆载预压法加固超软土地基施工要点[J].中国港湾建设,2011(1):70-73.
- [6] 肖策,褚绪绪,姜云龙,等.直排式真空联合堆载预压法在软土路基加固中的应用[J].施工技术,2013,42(S1):88-92.

(本文编辑 郭雪珍)

.....
(上接第 154 页)

3) 根据十字板剪切试验结果发现板间土的硬壳层厚度约 40 cm,距排水板越近,土体的强度越大,硬壳层越厚。结合距排水板不同距离、不同深度土体的剪切强度,可得出“土柱”的深度范围为 1.5~2.0 m。

4) 硬壳层范围内的土体渗透系数随着深度的增加逐渐增大,且距排水板距离越大,土体的渗透系数越大。结合处理后排水板的渗透系数认为,板间土处理较差的原因主要是“土柱”的形成阻碍了真空度向周围土体的传递。

参考文献:

- [1] 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[J].水运工程,2011(11):192-200.
- [2] 董志良,张功新,周琦,等.天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):1 073-1 080.

- [3] 董志良,周琦,张功新,等.天津滨海新区浅层超软土加固技术现场对比试验[J].岩土力学,2012,33(5):1 306-1 312.
- [4] 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,2015(2):88-94.
- [5] 邱长林,闫澍旺,孙立强,等.孔隙变化对吹填土地基真空预压固结的影响[J].岩土力学,2013,34(3):631-638.
- [6] 王永平,王婧.高含水率疏浚淤泥排水板滤膜淤堵机理[J].水运工程,2015(3):6-11.
- [7] 乐超,徐超,吴雪峰,等.两种塑料排水板滤膜淤堵特性试验研究[J].岩土力学,2014,35(9):2 529-2 534.
- [8] 严驰,崔士平,郭伟峰.排水板滤膜加固软基效果模型试验研究[J].中国港湾建设,2015,35(3):21-28.
- [9] 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):3 569-3 576.

(本文编辑 郭雪珍)