

The filler-free vibration method is used at a new terminal in East Africa Application in reinforcing silt sand foundations

Zhang Liang¹ Chen Zhifeng²

1. CCCC FOURTH HARBOR ENGINEERING CO, Ltd., Guangzhou 510310, China

2. China Harbour Engineering Company Limited, Beijing 100010, China

Abstract

Based on the engineering geological conditions of a new yard in East Africa, the silty sand quickly filled under the condition of no masking was carried out by the filler-free vibration punching method for rapid reinforcement construction. Typical construction verification of the process parameters of filler-free vibration punching is carried out. After selecting the construction parameters, large-area construction and continuous monitoring are carried out, and the construction process and testing data are summarized and analyzed, forming a complete set of filler-free vibration punching application scheme.

Keywords

filler-free vibrating method; foundation reinforcement; Fine sand; Engineering geological conditions

无填料振冲法在东非某新建码头加固粉细砂地基中的应用

张亮¹ 陈志锋^{2*}

1. 中交第四航务工程局有限公司, 中国·广东广州 510310

2. 中国港湾工程有限责任公司, 中国·北京 100010

摘要

基于东非某码头新建堆场的工程地质条件, 对无掩蔽条件下快速填筑的粉细砂采用无填料振冲法进行快速加固施工。对无填料振冲工艺参数进行典型施工验证。在选定施工参数后进行大面积施工和持续性监测, 并对施工过程和检测数据进行总结分析, 形成了一整套无填料振冲法应用方案。

关键词

无填料振冲法; 地基加固; 粉细砂; 工程地质条件

1 引言

东非某新建码头堆场因工期影响, 拟在无掩蔽的临海条件下, 采用项目附近丰富的粉细砂资源进行堆场快速推填并进行地基快速加固处理。常见的预压法、真空堆载预压法, CFG 等不具备可实施条件, 拟采用无填料振冲法进行地基处理。

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2012)^[1]的相关规定, 不加填料振冲法适用于处理粘粒含量 $\leq 10\%$ 的中砂以及粗砂地基, 不适用于粉细砂地层进行加固, 因此需要在初步设计阶段进行现场工艺试验, 确定不加填料振密的可行性, 才能进行大规模施工。

【作者简介】张亮(1990—), 男, 中国湖北十堰人, 本科, 工程师, 从事工程管理研究。

【通讯作者】陈志锋(1992—), 男, 中国广东东莞人, 本科, 工程师, 从事工程管理研究。

陈思周^[2]在曹妃甸港区加固新近吹填的在粘粒含量 $\leq 10\%$ 的粉细砂中采用无填料振冲加固工艺取得良好结果。余小宇^[3]在柬埔寨贡布港码头后方堆场软基处理工程中, 使用无填料振冲工艺处理粉细砂取得良好效果。黄国忠^[4]在埃及赛得东港采用无填料振冲粉细砂。因此, 无填料振冲法在加固粉细砂地基具有一定的可行性。

2 工程概况

东非某新建码头位于河流入海口处, 码头设计 10 个泊位, 堆场回填总面积为 40339m², 其中待振冲处理区域面积为 16410 m²。该工程采用标准以英标为主, 同时采用美国、德国、中国等国际认可的规范, 以及坦桑尼亚当地政府颁布的本行业相应的设计标准, 规范及规定。振冲处理完成面标高为 +6.0m。

3 工程条件

3.1 水文条件

据资料显示, 项目所在海域的水文条件如表 1 所示。

表 1 基卢瓦渔港潮位信息

序号	类型	高程 (m)
1	天文大潮 (HAT)	+5.56
2	平均大潮高潮位 (MHWS)	+5.14
3	平均小潮高潮位 (MHWN)	+4.66
4	平均海平面 (MSL)	+3.51

3.2 地质条件

根据地勘报告，待振冲区域的典型地质如表 2 所示。根据对地勘结果进行分析不难发现，①及①t 两个土层均为有机质黏土，含水量较高，处于软塑状态，并含有淤泥，承载力较低，均是影响本工程承载力的不良地质。需要将①及①t 两个土层进行换填处理，然后进行振冲加固处理，提高地基的承载力，同时减少沉降量。

表 2 典型地质断面

地层	土层名称	标高	地层层厚度	DPT/SPT
①	有机砂质黏土：极软 - 软塑状态，深色，为有机砂质黏土，含中等塑性的淤泥，混杂珊瑚碎屑；有机含量低 - 中等，塑性等级为中等。	-2.07	1.7	2
	有机砂质黏土：极软 - 软塑状态，深色，为有机砂质黏土，含中等塑性的淤泥，混杂珊瑚碎屑；有机含量低 - 中等，塑性等级为中等。	-2.07~-3.87	1.8	7
①t	有机砂质黏土：软塑状态，深灰色，为有机砂质黏土，混杂珊瑚碎屑、砂粒及中等塑性的淤泥；有机含量低 - 中等，塑性等级为低 - 中等。	-3.87~-5.37	1.5	15
②c	弱砂质黏土：硬塑 - 坚硬状态，灰黄 - 棕褐色，为弱砂质黏土，局部含少量白色圆状珊瑚灰岩斑块（直径多为 1-8 厘米）；塑性等级为中 - 高。	-5.37~-6.37	1.0	36
②a	高含黏土砾石：中密至密实状态，局部为极密，灰白色，为高含黏土砾石，含全风化珊瑚灰岩形成的珊瑚砾石及海洋碎屑。	-6.37~-8.37	2.0	38
	高含黏土砾石：中密至密实状态，局部为极密，灰白色，为高含黏土砾石，含全风化珊瑚灰岩形成的珊瑚砾石及海洋碎屑。	-8.37~-11.37	3.0	35
	高含黏土砾石：中密至密实状态，局部为极密，灰白色，为高含黏土砾石，含全风化珊瑚灰岩形成的珊瑚砾石及海洋碎屑。	-11.37~-12.87	1.5	35
④	弱砂质黏土：坚硬 - 极硬状态，棕黄色，为弱砂质黏土，含少量 1-5 厘米的白色珊瑚灰岩砾石；塑性等级为高。	-12.87~-20.7	7.5	23

4 验证试验

4.1 无填料振冲法的选择原因

无填料振冲法利用中粗砂颗粒在外力作用下易液化的特性，在振冲过程中周围砂料能自行塌入振冲孔内，实现无填料原地振冲加密。无填料振冲法施工简便、加密效果较好，但粉细砂地层中的砂土颗粒级配较细而均匀，一般在外力作用下较难自行塌孔原地密实。因此，必须在设计阶段进行实地验证试验，以确定无填料振冲法加固粉细砂地基的施工参数。

在海水长期浸泡的饱和状态下，粉细砂层在振冲器高频振动与高压水流联合作用下可显著提高液化效率。该工况能有效克服常规粉细砂液化难度大、易塌孔密实的技术难点，实现无需回填粉细砂的施工条件，具备较好的工程可行性。

4.2 验证试验

项目设计阶段，选择一块 26m*26m 回填砂区域进行验证。验证区域的回填砂层厚度在 4m 左右。通过验证试验的检测结果来确定施工工序以及施工参数，从而保证场地在大规模处理后能够满足承载力和沉降量要求。验证区域待振冲点间距采用设计院建议的 2.5m 进行验证。

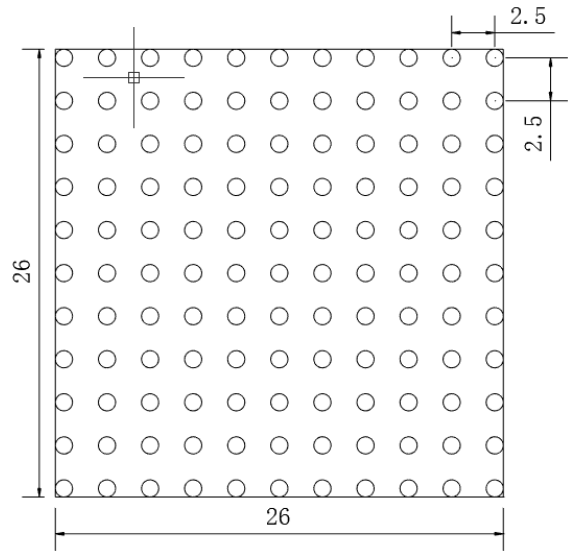


图 1 振冲布置间距 (单位: m)

验证试验振冲采用三遍振冲工艺，第一遍在砂层中进行造孔，第二遍和第三遍在砂层逐层留振。逐层留振时以振冲器电流稳定，土体不出现明显沉降为留振停止标志。分层留振间距拟控制在 1m。水压控制在 200 ~ 600kPa，水量控制在 200 ~ 400L/min，振冲器下沉速率为 1.0m/min ~ 2.0m/min。

表 3 ZCQ132 型潜水电动振冲器性能参数表

型号	潜水电机参数				激振力 (kN)	空载头 部振幅 (mm)	振动频 率(Hz)	振冲器直 径(mm)	主机质量 (kg)
	额定功率(kW)	额定转速(r/min)	额定电压(V)	额定电流(A)					
ZCQ132	132	1470	380	246	220	≥12	24.5	402	2320

4.3 振冲结果分析

验证试验结束后,进行了1次 PLT 检测和2次 SPT 检测以检测回填砂体的承载力。同时对施工前后的场地标高进行了观测,以确定施工沉降参数。

(1) PLT 承载力检测

按照《建筑地基检测技术规范》(JGJ340-2015)^[5],平板载荷层累计沉降量应小于承压板边宽或直径的6%或累计沉降量小于150mm。现场检测所使用的承压板为正方形,边长为1.5m。边长的6%即为90mm。

平板荷载试验(PLT)检测使用设计承载力150Kpa的2倍进行五级加载,两级卸载。检测区域的沉降值为1.2mm,远小于规范中的90mm要求。

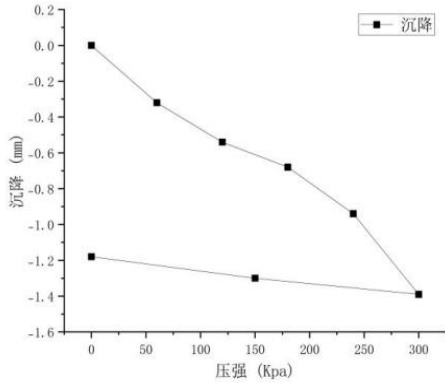


图 2 PLT 检测压力 - 沉降观测曲线

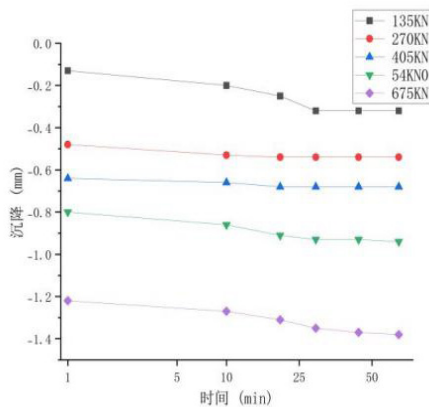


图 3 PLT 检测沉降 - 时间对数 (s-lgt) 曲线

(2) SPT 检测

现场进行了2个点位的SPT检测,实测SPT均大于设计要求的17击的标准。但是两个点位的SPT检测数据分布不均匀,需要对施工过程记录进行分析总结,查出原因,确保地基处理的均匀一致。

表 4 点位 1 的 SPT 检数据

检测深度(m)	SPT 实测值 N (击)	SPT 要求值 N (击)	备注
1	35	17	回填砂
2	50	17	回填砂
3	50	17	回填砂
4	50	17	回填砂
5	21	/	② a 土层
6	24	/	② b 土层
7	23	/	② b 土层

表 5 点位 2 的 SPT 检数据

检测深度(m)	SPT 实测值 N (击)	SPT 要求值 (击)	备注
1	29	17	回填砂
2	31	17	回填砂
3	19	17	回填砂
4	27	27	回填砂
5	24	/	② a 土层
6	22	/	② b 土层
7	20	/	② b 土层

(3) 高程检测

在对试验区处理前后的场地标高测量数据处理后,发现试验场地在振冲过程中平均沉降0.350m,即每米平均下沉0.088m。

(4) 施工过程设备运行记录

对振冲过程中的电流数据分析可知,分层留振过程中,振冲器工作电流到达79A~86A后,砂体基本密实。

从上述检测结果可以看出,无填料振冲法采用2.5m的施工间距,粉细砂能够有效填满孔隙,取得满足承载力的挤密效果。密实时间以验证施工分层留振电流稳定的时间为准。

表 6 振冲前后场地标高 (单位:m)

振冲前场地平均标高	振冲后场地平均标高	平均沉降量	平均每米沉降量
+6.6	+6.25	0.350	0.088

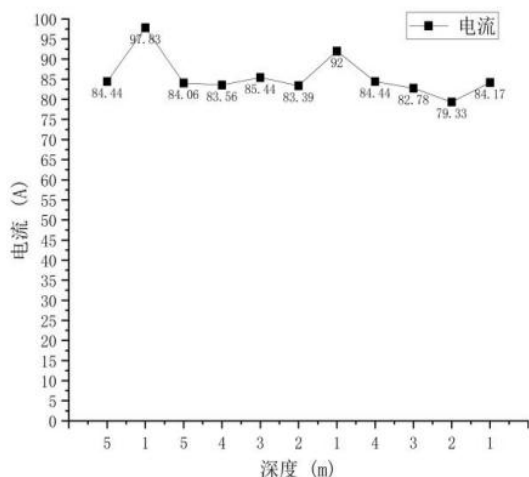


图4 振冲电流表

5 正式施工

5.1 施工工艺

正式施工采用 2.5m 的间距作为无填料振冲的施工间距。回填砂每米回填厚度超填 0.1m, 在振冲完成后清除超填部分。

施工具体施工流程如下:

(1) 测量放点

①在图纸上绘制整个场地的所有处理点位并逐个编号, 然后在现场逐个放出点位。

②将振冲器操作控制系统、泵送输水系统、施工记录仪等设备连接好。

③调整好控制系统中的密实电流、留振时间等参数。

④履带式起重机从导向管头部将振冲器垂直起吊, 对准孔位。

(2) 成孔

①启动供水泵, 将水压控制在 200 ~ 600kPa, 水量控制在 200 ~ 400L/min,

②启动振冲器, 检查振冲器未进入砂层的空振电流, 确定电流值无异常。

③将振冲器下沉造孔, 并在孔口进行扩孔。振冲至距设计深度约 0.3~0.5m 后, 应减小水压, 继续振冲至设计深度, 对接触面为混合倒滤层处振冲深度应至少提高 0.5m。造孔过程中振冲器的贯入速度控制在 1 ~ 2m/min。

④造孔过程中, 振冲器应始终处于悬垂状态, 发现偏斜时应立刻纠正。

(3) 连续分段留振密实

①孔底周围的土体, 包括塌落到孔底的砂在振冲器振动作用下重新密实后, 提升振冲器 50cm。

②振冲器在该段深度达到密实电流和留振时间后, 适当增加留振时间, 确保该段完全密实, 然后提升振冲器。

③振冲器振冲密实作业应由下而上逐段完成。

具体流程如下:

a. 对准振冲孔位, 同时开启水泵和振冲器, 对孔误差不得超过振冲器半径。

b. 慢速振冲下沉至原地面, 留振 10s。

c. 慢速振冲上拔至孔口处, 留振 60s。

d. 慢速振冲下沉至地面以下 0.5m, 留振 10s。

e. 慢速振冲上拔 1m, 留振 10s。

f. 依次按段 1m 上拔, 每段留振 10s, 直至孔口处, 再留振 30s。

g. 再次振冲下沉至 3 ~ 4m 处, 留振 10s。

h. 慢速振冲上拔 1m, 留振 10s。

i. 依次按段 1m 上拔, 每段留振 10s, 上拔至孔口处留振 30s。

j. 振冲结束, 关闭水泵及振冲器, 移机至下一个孔位。

(4) 拔管出砂面

复上一步制桩步骤, 自下而上逐段制桩体至孔口, 拔出振冲器。同时控制和记录各段深度密实电流值和留振时间, 使之均应符合设计规定。

(5) 移机至下一个桩位

关闭振冲器和水泵, 通过起吊装置将振冲器移至下一个桩位。

(6) 施工注意事项

无掩蔽条件下的一次回填砂边缘部分松散, 振冲设备应与回填边缘保持 5m 以上间距, 防止设备发生倾覆。

5.2 施工结果检测

正式施工结束后, 试验人员对场内所有设计要求的点位进行了 SPT 和 PLT 检测, 并对整个场地进行了连续一年的沉降观测。

(1) SPT 检测结果

所有点位的 SPT 检测值均满足回填砂最小 17 击的要求。

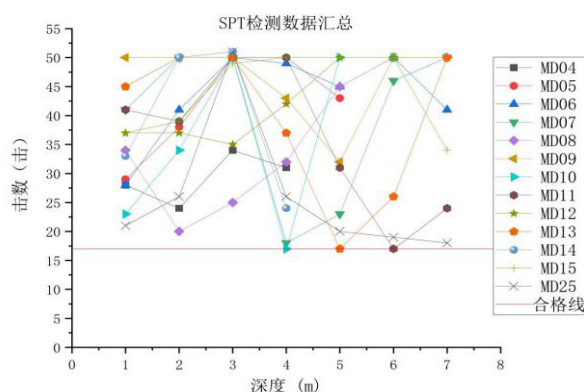


图5 SPT 检测数据

(2) PLT 检测结果分析

所有点位的 PLT 检测的沉降量曲线均未发生突变, 沉降量均小于允许最大沉降量。地基回填模量实测值 E_s 均满足设计要求。

表7 平板载荷试验 (Plate Load Test) 试验结果汇总表

序号	点位名称	检测的承载力 /Kpa	加载结束时的沉降量 / mm	允许最大沉降量 /mm	地基回填模量 Es/Mpa	允许最小地基回弹模量 [Es]/Mpa
1	MD-04	150	3.24	90	112	17
2	MD-05	150	5.08	90	71.4	17
3	MD-06	150	3.96	90	91.6	17
4	MD-07	150	3.91	90	92.8	17
5	MD-08	150	3.68	90	98.6	17
6	MD-09	150	3.58	90	103.3	17
7	MD-10	150	6.68	90	54.3	17
8	MD-11	150	4.32	90	84	17
9	MD-12	150	3.08	90	118.2	17
11	MD-13	150	1.39	90	261	17
12	MD-14	150	5.28	90	68.7	17
13	MD-15	150	2.83	90	128.2	17
14	MD-25	80	2.42	90	149.9	17
15	MD-31	120	3.29	90	110.4	25
16	MD-32	120	2.9	90	125.2	25
17	MD-33	120	2.72	90	133.5	25
18	MD-34	80	1.92	90	189	17
19	MD-48	80	2.04	90	178.1	25
20	MD-49	80	2.66	90	163.3	25
21	MD-50	80	2.82	90	128.7	25
22	MD-51	80	1.94	90	187.5	25
23	MD-52	80	2.33	90	156.1	25

(3) 沉降结果分析

项目测量人员在场地中均匀布置 6 个堆场沉降观测点。沉降观测采用 Leica DNA3 电子水准仪进行, 仪器精度 $\pm 0.3\text{mm/km}$ 。前四个月沉降观测频率为每半个月一次, 然后调整为每月一次。

对项目观测得到的沉降数据汇总分析, 得到累计沉降量曲线, 可知在前三个月沉降速率较大, 然后沉降速率逐渐减小。对累计沉降量曲线进行拟合, 得到函数 ($R^2=0.998$)。对函数进行分析可知, 最大累计沉降量为 5.05mm, 远小于设计要求的最大累计沉降量 20cm。

表8 沉降观测数据

日期	点位 1	点位 2	点位 3	点位 4	点位 5	点位 6	平均值
2024/5/12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
2024/5/27	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.17
2024/6/11	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.35
2024/6/26	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.48
2024/7/11	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.65
2024/7/26	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.9	-0.78
2024/8/10	-0.8	-0.9	-0.9	-0.9	-1.0	-1.1	-0.93
2024/8/25	-1.0	-1.1	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.08
2024/9/24	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.28
2024/10/24	-1.3	-1.4	-1.4	-1.5	-1.4	-1.6	-1.43
2024/11/23	-1.4	-1.5	-1.5	-1.7	-1.6	-1.7	-1.57
2024/12/23	-1.6	-1.7	-1.7	-1.9	-1.8	-1.9	-1.77
2025/1/22	-1.7	-1.9	-1.8	-2.0	-1.9	-2.0	-1.88
2025/2/21	-1.8	-2.1	-2.0	-2.1	-2.1	-2.1	-2.03
2025/3/23	-2.0	-2.3	-2.1	-2.3	-2.3	-2.2	-2.20
2025/4/22	-2.1	-2.4	-2.3	-2.5	-2.5	-2.3	-2.35
2025/5/7	-2.3	-2.5	-2.4	-2.6	-2.5	-2.5	-2.47

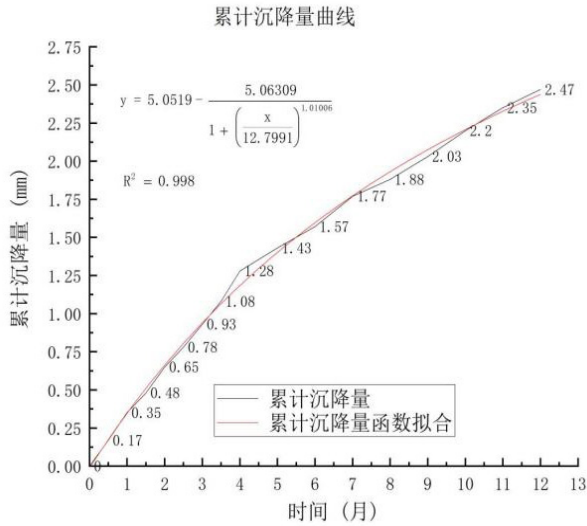


图 6 累计沉降量曲线

6 施工结论

无填料粉细砂振冲施工法在东非某新建码头项目的堆场粉细砂地基处理施工中取得成功。检测结果表明一次性回填粉细砂地基经过无填料振冲处理后能达到加固要求，地基承载力和沉降量均符合标准。无填料振冲法具有高效、施工简便、经济等优点，能够快速提高新建堆场的地基承载力以满足码头的建设需求，可在类似新建沿海工程中推广使用。

(1) 针对场地施工环境和地质条件，判断出液化土层的埋深、厚度及液化风险程度，并据此拟定合适的振冲试验

操作方案，确定振冲电流、留振时间的关键参数。

(3) 无填料振冲的正式施工需要严格按照验证试验确定的参数进行，确保所有已加固区域的加固效果均匀一致。同时加固过程对所有施工点位进行编号记录，确保无漏、错振等现象发生，确保场地加固效果，不发生不均沉降现象。

(4) 振冲后表层砂体残留大量水分，处于液化状态，须在晾干至最佳含水量后进行整平和振动碾压。同时，振冲后孔隙水压力的消散和砂体结构的恢复需要时间进一步强化。建议在施工完成至少 7 天后开展检测。

(5) 无填料振冲过程中会产生大量废水，需要提前开挖截水沟和蓄水池截留污水，防止污水进入大海造成污染。

(6) 无填料振冲工艺与预压法、真空堆载预压法相比，在实现土体密实和消除液化方面效果相当，但具有施工效率更高、成本更低的优势，尤其适用于无掩护工况下一次性回填的粉细砂地基处理。

参考文献

- [1] JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 陈思周. 无填料振冲法地基加固在曹妃甸港区的应用 [J]. 港工技术, 2013, 50 (4).
- [3] 余小宇. 无填料振冲工艺在海外大面积吹填土地基中的应用 [J]. 珠江水运, 2024, 32 (5).
- [4] 黄国忠, 薛展辉. 无填料振冲法在埃及塞得东港集装箱码头中的应用 [J]. 水运工程, 2011 (11).
- [5] JGJ 340-2015 建筑地基检测技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.