

文章编号: 1007-2993(2026)03-0343-08

振冲密实法在珊瑚砂地基处理中的应用研究

刘 锋^{1,2} 江文豪³ 梅涛涛^{1,2} 徐 超³

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东广州 510230; 2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东广州 510230; 3. 中交四航局第二工程有限公司, 广东广州 510230)

【摘要】 通过介绍珊瑚砂吹填料地基处理工艺,并结合东南亚某港口堆场的地基处理工程实例,开展了振冲密实法在吹填珊瑚砂地基中的应用研究,确定了施工流程及关键施工参数。研究表明,振冲密实法对淤泥层及泥砂混合层的加固效果较差,建议振冲处理底面标高控制在淤泥层顶面以上 0.5 m;采用 180 kW 振冲器施工时,3.8、4.3、4.8 m 振冲孔间距均能满足施工要求,且 4.3 m 间距处理效果最佳。通过拟合分析,得到振冲孔间距 x 与回填砂体积 V 及工后下沉高度 H 的关系式分别为: $V = -1494.37 + 790.61x - 91.61x^2$, $H = -3.46 + 1.85x - 0.21x^2$ 。

【关键词】 珊瑚砂;地基处理;振冲密实法;静力触探试验

【中图分类号】 TU472

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0086

Application with vibroflotation compaction method in coralline sand foundation treatment

LIU Feng^{1,2} JIANG Wenhao³ MEI Taotao^{1,2} XU Chao³

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, Guangdong, China; 2. CCCC Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, Guangzhou 510230, Guangdong, China; 3. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, Guangdong, China)

【Abstract】 The foundation treatment method of coralline sand was introduced. By combining it with one port of the container terminal in Southeast Asia, research on applying the vibroflotation compaction method in the foundation treatment of coralline sand has been carried out, and the construction process and key construction parameters were determined. The results show that the vibroflotation compaction method for silt or silt mixed with sand layer reinforcement effect is poor, so the bottom elevation of treatment can be controlled in the above top of silt layer 0.5 m; when adopting 180 kW vibrator, 3.8 m, 4.3 m, 4.8 m vibration spacing all can meet the construction requirements and 4.3 m was the best. The relationship between vibration spacing x and the volume of backfill sand V and the sinking height after vibroflotation H was $V = -1494.37 + 790.61x - 91.61x^2$ and $H = -3.46 + 1.85x - 0.21x^2$, separately.

【Key words】 coralline sand; foundation treatment; vibroflotation compaction method; static cone penetration test

0 引言

集装箱堆场作为港口的重要配套设施,在港口建设中占据着举足轻重的地位。热带岛礁国家由于陆域面积狭小、海域广阔且海底资源丰富等原因,其新建港口堆场多采用吹填造陆的方式形成陆域,吹填材料则主要取自周边海域的珊瑚砂。吹填造陆的具体施工过程为:挖泥船航行至指定海域采挖泥砂,返航后通过管线将泥仓中泥水混合物吹填堆积到近海形成陆域,随后采用强夯或振冲等地基处理技术进行加固,以确保地基承载力满足要求^[1-3]。

振冲法根据地基土的加固方式可分为振冲置换

法和振冲密实法。振冲置换法通过振冲器的反复水平振动和高压水流在地基土中形成孔洞,随后充填碎(卵)石以置换部分土体,从而形成由碎(卵)石桩柱及周围挤密土体构成的高强度复合地基^[4]。李波等^[5]依托野马坝试验工程,研究振冲沉管碎石桩对泥炭土地基的加固效果;王雅雯等^[6]通过标准贯入和动力触探等原位试验,评估西昌某河谷型风电场振冲碎石桩地基的处理效果;王家辉等^[7]利用大型叠环剪切仪,研究振冲碎石桩复合地基的抗剪机制。然而,由于振冲置换法成本较高、加固效果较难控制,且其在解决场地不均匀沉降问题上仍存在争议,因此在加固面积

大或不均匀沉降要求高的项目中存在很大局限^[8-9]。振冲密实法(又称无填料振冲法)则不掺入高强度材料,仅依靠振冲过程中产生的振动和液化作用使地基土密实从而增强地基承载力,由于其造价低、加固效果显著、施工效率高,在珊瑚砂地基中得到广泛应用^[10-11]。赵津桥等^[12]基于室内振冲模拟系统,开展饱和珊瑚砂地基的振冲模型试验;邱伟健等^[13]依托海外堆场项目,研究振冲法在不良级配疏松礁砂地基中的应用;徐雄等^[14]以东帝汶Tibar港地基处理工程为背景,探讨不同工艺参数下的无填料振冲试验;周健等^[15]通过改进施工工艺及参数,研究无填料振冲法在级配较差地基加固中的应用;陶然等^[16]依托阿什杜德港项目,分析振冲法处理吹填砂地基时局部欠密实的原因。

本文以东南亚某港口堆场地基处理工程为背景,开展振冲密实法在吹填珊瑚砂地基加固中的应用试验研究。首先,介绍振冲密实法在地基处理中的施工流程及验收标准,并利用工前与工后静力触探试验数据,分析振冲孔间距及土质对加固效果的影响。然后,基于研究结果优化并确定现场关键工艺参数,以期为今后类似工程提供指导。

1 工程概况

项目位于东南亚某港口,地基加固区域为港口码头后方堆场。堆场陆域通过绞吸挖泥船抽取邻近海域的珊瑚砂吹填形成。吹填前,对珊瑚砂样品进行颗粒分析试验,结果显示其细颗粒含量小于3%,满足振冲密实法对原材料的要求。珊瑚砂孔隙比介于0.78~1.03,颗粒级配曲线如图1所示。

吹填区原海床平均高程为-7.0 m,历史资料显示,本区域最高潮位为+0.7 m,最低潮位为+0.1 m。原

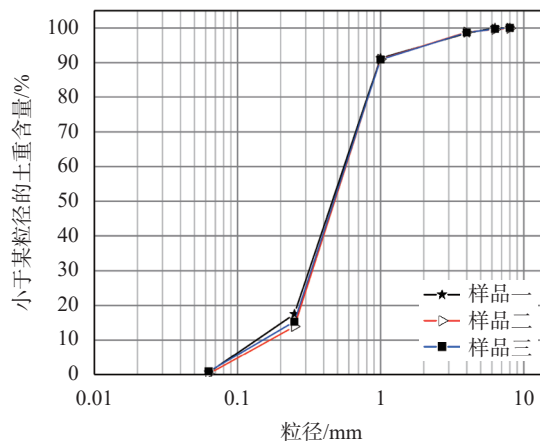


图1 吹填砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of coralline sand

海床以下土层自上而下依次为淤泥、淤泥夹砂、粗砂、全风化岩及岩石。陆域吹填后,场地顶面标高为+3.8 m,地下水位设计值为+0.4 m。根据设计要求,整个堆场地基处理方法为振冲密实法,处理范围为原海床以上的吹填珊瑚砂,处理后地基的承载力需达到150 kPa,场地顶面设计标高为+3.0 m。

2 施工方案

2.1 场地及施工参数

在大面积振冲施工前,选取3块试验区(20 m×20 m)分别进行“单机单点”振冲试验,以确定振冲孔间距及振冲器工艺参数。试验区振冲孔间距分别按3.8 m(1区),4.3 m(2区),4.8 m(3区)呈等边三角形布置。施工前后场地的密实度均采用静力触探试验进行检测,工前检测点位于相邻两个振冲点的连线中点,工后检测点位于上述两个振冲点及周边第三个振冲点组成的三角形形心处。试验区施工参数如表1所示,场地布置如图2所示。

表1 试验区施工参数

Tab. 1 Construction parameters of the trial area

区域	场地设计标高/m	原海床标高/m	振冲孔间距/m	振冲孔数	造孔速度/(m·min ⁻¹)	底部留振时间/s	提升速度/(m·min ⁻¹)	留振时间/s	密实电流/A
1区	+3.8	-6.8	3.8	39	2.0~3.0	45~60	1.0	30	100~130
2区	+3.8	-7.0	4.3	27	2.0~3.0	45~60	1.0	30	100~130
3区	+3.8	-6.8	4.8	23	2.0~3.0	45~60	1.0	30	100~130

注:试验区地基处理底部标高为-8.0 m。

2.2 原理及设备

振冲密实法工作原理是利用振冲器内部的偏振块产生的强力振动,使土体原有结构破坏,砂土颗粒重新排列,孔隙减小,同时,利用上覆回填砂填补施工产生的孔洞,从而使土体密实并最终达到加固效果^[9]。现场试验设备及参数如表2所示,振冲密实法施工

示意图如图3所示。

2.3 施工步骤

振冲密实法具体施工步骤如下:

- (1)确定试验区及振冲孔位置。
- (2)开展工前静力触探试验,检测场地密实度。
- (3)履带吊、振冲器、挖掘机等设备就位。

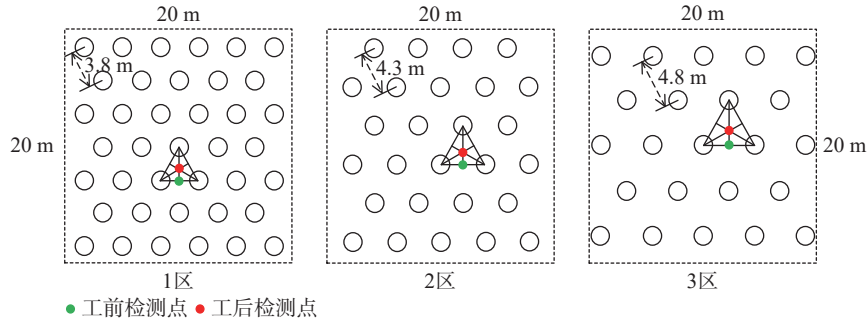


图2 试验区场地布置

Fig. 2 Layout of the trial area

表2 施工设备及其参数

Tab. 2 Construction equipment and parameters

序号	名称	规格	用途
1	履带吊	55 t	提升振冲器
2	振冲器	180 kW	
3	数据记录仪		记录施工参数
4	高压潜水泵		施工供水
5	发电机	800 kW, 50 Hz	
6	挖掘机	PC200	材料回填

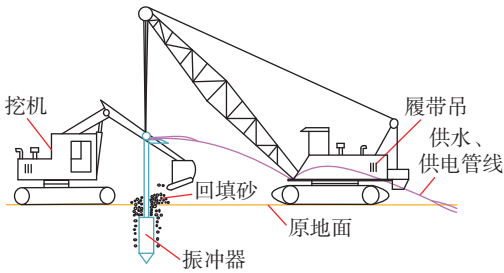


图3 振冲密实法施工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vibroflotation construction

(4)启动振冲器及水泵,使振冲器在振动及高压水流作用下以 2.0~3.0 m/min 的速度下穿原地面,下放过程中间隔 1~2 min 将振冲器提升一定高度,以保证成孔均匀。振冲器下放至设计标高后,挖掘机挖取表层珊瑚砂回填振冲孔。随后,振冲器按照设计留振时间逐步向上提升直至离开地面,挖机操作人员则根据振冲孔上覆回填砂的下沉情况及时补充回填砂。

(5)振冲器移动到下个设计点位,重复步骤(4),直至完成所有振冲桩施工。

3 验收标准

根据设计要求,顶面设计标高以下 1.5 m 范围内的相对密实度应不小于 85%,其余吹填层的相对密实度应不小于 65%。利用 Baldi^[17] 提出的相对密实度与锥尖阻力换算公式(式(1)),计算并得出施工结

束后锥尖阻力随深度变化应该满足的要求,即验收曲线(见图 4)。

$$D_r = \frac{1}{2.61} \ln \left(\frac{q_c}{181(\sigma_{v0}')^{0.55}} \right) \quad (1)$$

式中: D_r 为相对密度; q_c 为锥尖阻力, kPa; σ_{v0}' 为有效上覆土重, kPa。

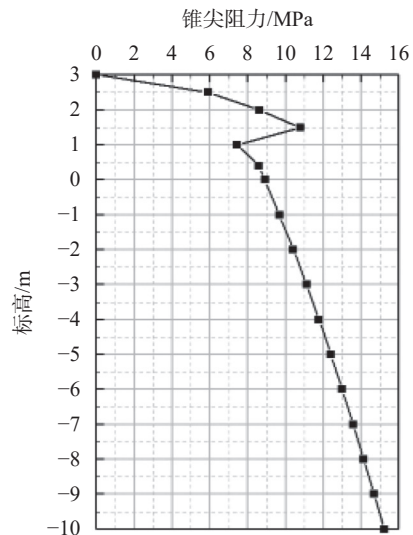


图4 吹填珊瑚砂地基验收曲线

Fig. 4 Acceptance criteria of coralline sand foundation

4 试验结果及分析

4.1 锥阻分析

根据规范^[18]规定,施工完成后 7 天进行工后静力触探试验,以评估地基处理效果。各试验区施工前后的锥尖阻力及工前摩阻比 R_f 结果如图 5 所示。

通过对图 5 进行深入分析可得出如下信息:

(1)原海床以上,工后锥尖阻力相比工前有明显提升。珊瑚砂在振冲器剧烈振动和高压水流的作用下,土体原有结构遭到破坏,土颗粒重新排列,颗粒间孔隙减小,土体结构变得密实,从而使得锥尖阻力增大。

(2)工后验收不合格区域均分布在原海床附近,

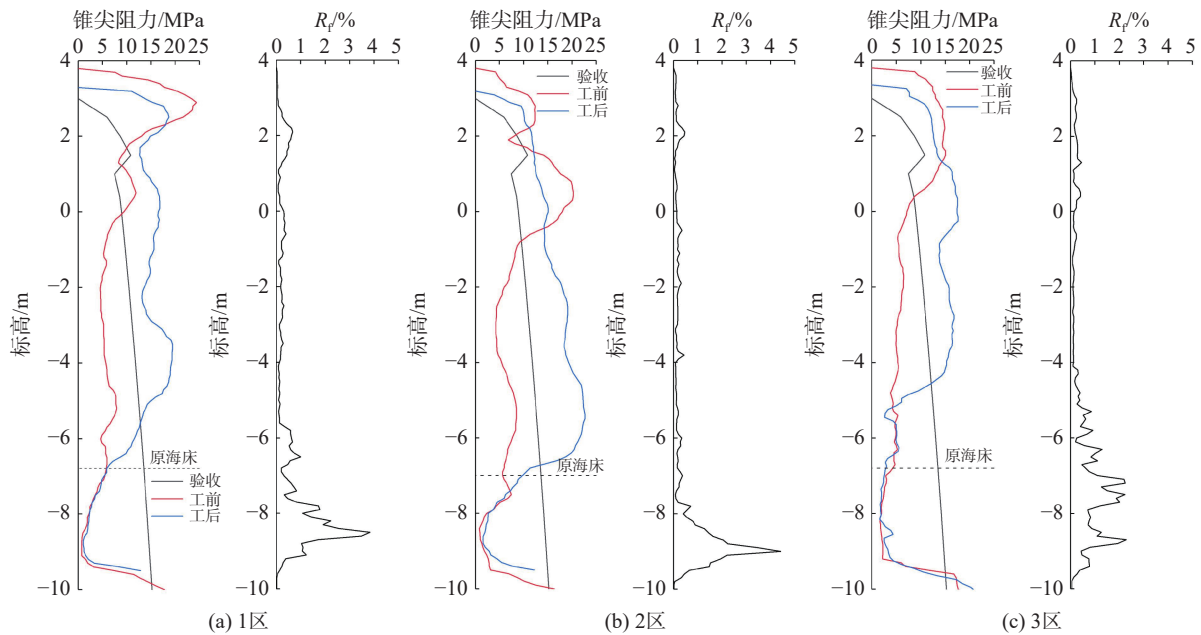


图5 锥阻及摩阻比随深度变化曲线
Fig. 5 Cone resistance and friction ratio versus depth

其工后锥阻值与工前基本相同。结合工前摩阻比曲线及文献 [19] 中的土质判别方法,可初步判定该区域的土质为淤泥或泥砂混合层。为验证上述推断,在临近 3 区工后静力触探点 1 m 范围内开展标贯试验并取样,结果如表 3 所示。标贯试验及取样结果表明,10.00 ~ 15.00 m 范围内的土层为淤泥或淤泥质砂,

与通过摩阻比判定的结果一致,由此可知,振冲密实法对淤泥及泥砂混合物的加固效果有限。其原因可能是珊瑚砂与淤泥混合后,淤泥中的细颗粒堵塞砂土内部的排水通道,导致振冲过程中的水流无法及时排出,同时削弱振冲器能量向周围扩散,最终导致土体密实效果减弱。

表 3 标准贯入试验结果
Tab. 3 Standard penetration test results

深度范围/m	土样描述	标贯击数	深度范围/m	土样描述	标贯击数
0.00~1.00	棕黄色夹杂贝壳细到中粗砂	44(1.00 m)	8.00~9.00	棕黄色非常密实细到中粗砂	28(9.00 m)
1.00~3.00	棕黄色夹杂贝壳密实状细到中粗砂	31(2.00 m) 28(3.00 m)	9.00~9.45	棕黄色中密状细到中粗砂	16(9.45 m)
3.00~4.00	棕黄色夹杂贝壳中密状细到中粗砂	38(4.00 m)	9.45~10.50	黑灰色中密淤泥质砂	18(10.50 m)
4.00~5.00	棕黄色密实状细到中粗砂	26(5.00 m)	10.50~15.00	黑灰色夹杂少量黏土淤泥质砂	12(15.00 m)
5.00~7.00	棕黄色中密状细到中粗砂	30(6.00 m) 38(7.00 m)	15.00~15.50	黑灰色非常密实细到中粗砂	18(15.50 m)
7.00~8.00	棕黄色密实状细到中粗砂	78(8.00 m)	15.50~16.00		23(16.00 m)
			15.50~17.45	黑灰色中密状细到中粗砂	30(16.50 m) 26(17.00 m)

注: 试验点地面标高为+3.18 m; 标贯击数后括号内数值为测试深度。

(3) 分别采用两种方法统计施工前后各检测点的锥尖阻力算术平均值。方法一为设计处理范围内的平均值,方法二为达到验收要求范围内的平均值,统计结果如表 4 所示。由表 4 可知,采用两种方法统计的锥阻增长率从高到低依次均为: 2 区、1 区、3 区。其中,2 区采用两种方法统计的锥阻增长率分别为 69%, 73%。方法一统计的 3 区锥阻增长率相比 1 区

和 2 区明显偏低,其主要原因是 3 区原海床位置处淤泥层较厚。方法二统计的各区锥阻增长率差异较小,由此可初步推断,采用 180 kW 振冲器施工时,3.8, 4.3, 4.8 m 振冲孔间距均可保证地基处理满足要求,且 4.3 m 间距最佳。

(4) 珊瑚砂经振冲处理后,其密实度随深度变化曲线并非光滑均匀曲线,中、下部区域的锥阻值略高

表 4 施工前后平均锥阻
Tab. 4 Average cone resistance before and after construction

编号	方法一			方法二		
	工前锥阻/MPa	工后锥阻/MPa	增长率/%	工前锥阻/MPa	工后锥阻/MPa	增长率/%
1区	8.2	13.7	68	9.0	15.5	71
2区	8.6	15.2	69	9.4	16.2	73
3区	7.3	11.4	56	8.6	14.4	68

于其他区域。首先, 场地表层的上覆荷载相较于中、下部区域偏小, 导致振冲时密实效果稍差; 其次, 工前静力触探结果表明, 珊瑚砂在不同深度的固结效果差异显著, 其中顶面以下 2~3 m 范围内的固结效果优于其他位置; 最后, 施工工艺也会产生影响, 在强烈振动力作用下, 其土体结构迅速破坏, 粗颗粒逐渐沉积在底部, 而细颗粒则向上迁移, 导致土层沿深度方向发生离析。因此, 即使同一振冲孔沿深度方向采用相同工艺处理, 其加固效果也难免存在差异。因此, 为确保振冲处理的均匀性, 施工时应结合现场情况适当调整施工参数。

4.2 沉降量分析

施工结束后, 对现场标高进行测量及统计, 得到各试验区沉降及用砂量情况, 如表 5 所示。

表 5 各试验区工后沉降及用砂量情况
Tab. 5 Site settlement and backfill sand volume

编号	下沉高度/m	回填砂体积/m ³	单孔平均用砂量/m ³
1区	0.476	188.91	4.84
2区	0.534	213.42	7.90
3区	0.484	191.66	8.33

由表 5 可知: 三个振冲试验区的工后场地下沉高度基本相同, 约为 0.5 m。1 区的单孔平均用砂量约为 2 区及 3 区的一半。各试验区的面积和处理深度基本相同, 但 1 区的振冲孔数比 2 区和 3 区多近 50%, 振冲孔越多, 相邻振冲孔间距越小, 先前振冲施工的挤密作用使后续振冲孔周围土体相对更密实, 因此单孔平均用砂量会更低。利用分析软件对振冲孔间距、回填砂体积及场地下沉高度间的关系进行拟合, 拟合公式选用二次多项式, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 拟合曲线相关性良好, 相关系数 R² 分别为 0.96729 和 0.96225, 根据拟合结果得到相关变量间的关系式如下:

$$V = -1494.37 + 790.61x - 91.61x^2 \quad (2)$$

$$H = -3.46 + 1.85x - 0.21x^2 \quad (3)$$

式中: x 为振冲孔间距, m; V 为施工中回填砂体积, m³;

H 为振冲后场地下沉高度, m。式(2)应用条件为 400 m² 施工区域, 其他规格施工区域则应乘以相应比例系数。

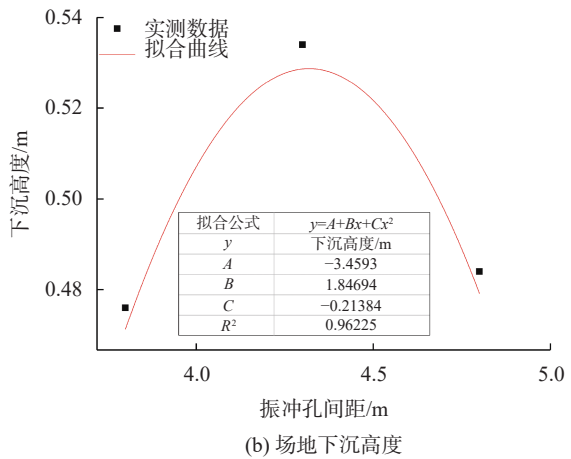
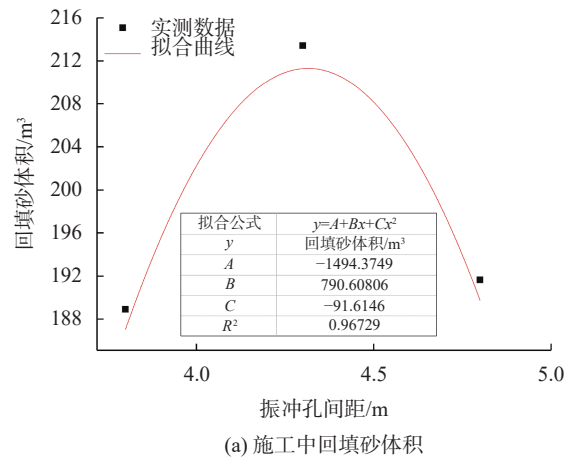


图 6 不同参数与振冲孔间距关系拟合
Fig. 6 Curve fitting of parameters versus vibroflotation spacing

5 工艺参数优化

根据 4.1 节的分析结果, 可尝试将振冲底部设计标高由初始值 -8.0 m 优化至原海床或夹层以上, 以确保施工质量并提高施工效率, 同时进一步确定最优振冲孔间距。为此, 在邻近前期试验区的周边区域另选两处 20 m×20 m 试验场地(编号分别为 4 区和 5 区), 再次开展振冲试验。4 区和 5 区对应振冲孔间距分别为 4.3 m 和 4.8 m, 根据 4.1(2)中的结论及

工前静力触探结果,将振冲底部标高设定为-6.5 m(即夹层以上 0.5 m),其余施工参数均保持不变。施

工前开展工前检测,施工结束后 7 天开展工后检测,检测结果如图 7 所示。

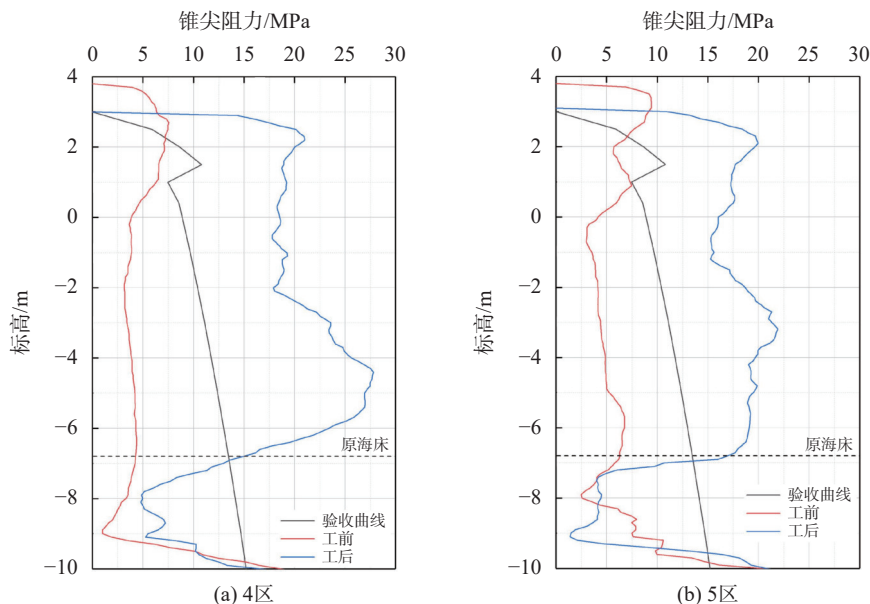


图 7 静力触探试验结果

Fig. 7 Cone penetration test results

由图 7 可知,4 区和 5 区在原海床以上的锥阻均满足验收要求,原海床以下施工前后锥阻相差不大。因此,为保证地基处理效果,后续施工时可将振冲底部标高控制在夹层以上至少 0.5 m。对两次试验区的锥阻数据进行统计,结果如表 6 所示。

表 6 不同振冲孔间距处理效果对比
Tab. 6 Comparison of treatment effects for different vibroflotation spacings

编号	间距/m	工前平均锥阻/MPa	工后平均锥阻/MPa	增长率/%
2区	4.30	8.97	15.16	69.0
3区	4.80	7.27	11.37	56.4
4区	4.30	4.60	20.93	355.3
5区	4.80	5.56	18.08	225.0

注:工前/工后平均锥阻指设计处理深度范围锥阻算术平均值。

由表 6 可知:4 区和 5 区施工前后的锥阻增长率均超过 200%,而 2 区和 3 区的增长率均小于 100%。2 区和 3 区施工时穿过淤泥层,而 4 区和 5 区未穿过。如图 8 所示,振冲器穿透淤泥层后,淤泥在水流作用下扩散至整个振冲孔甚至溢出地面,此时若继续向孔内回填珊瑚砂,砂颗粒在振动和水流作用下会与淤泥混合形成夹层,由于珊瑚砂内部排水通道会被淤泥中的细颗粒堵塞,最终导致夹层密实效果不佳。因此,为确保施工质量,建议振冲底部标高控制在淤泥层以上。4 区工后平均锥阻及锥阻增长率均为最大,平均锥阻达 20.93 MPa,较施工前提升约 3.5 倍,表明

180 kW 振冲器配合 4.3 m 振冲孔间距能保证地基处理效果达到最佳。工后锥阻成倍增长,进一步验证表 1 中造孔速度、留振时间、提升速度及密实电流等参数值设置的合理性,表 1 中参数数值可作为后续施工的固定参数值。



(a) 第一次试验

(b) 第二次试验

图 8 现场施工照片

Fig. 8 On-site construction photos

为验证拟合关系式的可靠性,将 4 区、5 区振冲孔间距代入式(2)、式(3),得到场地下沉高度及回填砂体积的计算值,将其与现场测得的实际值进行对比,结果如表 7 所示。

由表 7 可知,场地下沉高度及回填砂体积的计算值与实际值均较为接近。4 区、5 区下沉高度的计算值与实际值的相对误差分别为 7.57% 和 10.36%,回填砂体积的计算值与实际值的相对误差分别为 7.06% 和 9.93%,表明拟合关系式具有较高的可靠性。

表 7 实际值与拟合值结果对比
Tab. 7 Comparison between actual values and fitted values

编号	下沉高度/m			回填砂体积/m ³		
	实际值	计算值	相对误差/%	实际值	计算值	相对误差/%
4区	0.569	0.612	7.57	227.42	211.35	7.06
5区	0.527	0.581	10.36	210.81	189.87	9.93

6 结论

通过开展振冲密实法在珊瑚砂地基处理中的应用研究,确定了振冲施工流程及关键施工参数。基于试验区施工前后地基处理效果的对比分析,可得出以下结论:

(1)工后现场实测锥阻值明显低于验收曲线要求的区域,与工前锥阻值偏低或摩阻比值异常突增的区域高度重合,表明振冲密实法对淤泥层及泥砂夹层的加固效果有限。为确保施工质量与效率并降低成本,建议后续振冲施工范围控制在吹填层内,或将施工底部标高控制在夹层以上至少 0.5 m。

(2)通过对现场实测数据进行拟合,建立了本工程振冲孔间距 x 与回填砂体积 V 、工后场地下沉高度 H 间的关系式(见式(2)、式(3)),可为本项目现场施工用砂储备量的估算或后续类似吹填造陆项目吹填砂量及标高的控制提供参考。

(3)采用 180 kW 振冲器加固珊瑚砂地基时,振冲孔间距选用 3.8, 4.3, 4.8 m 均能保证工后验收满足设计要求,其中 4.3 m 的加固效果最佳,建议将其作为大规模振冲施工间距的首选。其余施工参数如留振时间、密实电流等的初始设置,亦可参照本次试验。

参 考 文 献

[1] 董志良,张功新,李 燕,等. 大面积围海造陆创新技术及工程实践 [J]. *水运工程*, 2010(10): 54-67. (DONG Z L, ZHANG G X, LI Y, et al. Innovation of large-area reclamation engineering and practice in projects[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2010(10): 54-67. (in Chinese))

[2] 程旭东,廖朝昶,易 伟. 绞吸船超长距离多点吹填专项方案设计 [J]. *水运工程*, 2023(2): 171-175. (CHENG X D, LIAO C C, YI W. Design of special construction scheme of extra-long distance and multi-point filling for cutter suction dredger[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2023(2): 171-175. (in Chinese))

[3] 孙兰宁,魏海涛. 吹填珊瑚砂地基处理技术比较分析 [J]. *岩土工程技术*, 2023, 37(3): 361-364. (SUN L N, WEI H T. Comparison and analysis on treatment technology of dredged coral sand foundation[J].

Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(3): 361-364. (in Chinese))

- [4] 谷海娇. 振冲碎石桩在软土地基加固中的应用 [J]. *路基工程*, 2010(2): 189-191. (GU H J. Application of vibro-replacement crushed stone column in soft soil foundation reinforcement[J]. *Subgrade Engineering*, 2010(2): 189-191. (in Chinese))
- [5] 李 波,张建平,杨 蕾. 振动沉管碎石桩加固软土地基的效果评价 [J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(19): 4835-4838. (LI B, ZHANG J P, YANG L. The evaluation of soft earth foundation treatment with vibro replacement stone columns[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(19): 4835-4838. (in Chinese))
- [6] 王雅雯,田世军,胡中波. 河谷型风电场振冲碎石桩处理效果试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(8): 237-243. (WANG Y W, TIAN S J, HU Z B. Experimental study on treatment effect of vibro replacement stone column for valley wind farm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(8): 237-243. (in Chinese))
- [7] 王家辉,饶锡保,江泊洵,等. 振冲碎石桩复合地基抗剪机制的模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(4): 1095-1103. (WANG J H, RAO X B, JIANG J W, et al. Model experimental study of the shear mechanism of vibroflotation stone column composite foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4): 1095-1103. (in Chinese))
- [8] 戚秀莲,周 健. 无填料振冲法加固粉细砂地基的试验研究及应用 [J]. *港工技术*, 2011, 48(4): 48-51,59. (QI X L, ZHOU J. Test research and application of non-additional backfill material vibroflotation reinforcing for silty and fine-sand foundation[J]. *Port Engineering Technology*, 2011, 48(4): 48-51,59. (in Chinese))
- [9] 楼晓明,于志强,徐士龙. 振冲法的现状综述 [J]. *土木工程与管理学报*, 2012, 29(3): 61-66. (LOU X M, YU Z Q, XU S L. Review on the present situation of vibroflotation improvement method[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2012, 29(3): 61-66. (in Chinese))
- [10] 段志刚,王建平,赵津桥,等. 振冲密实加固珊瑚砂地基地震响应振动台模型试验研究 [J]. *岩土工程技术*, 2023, 37(6): 720-724. (DUAN Z G, WANG J P, ZHAO

- J Q, et al. Shaking table test on seismic response of coral sand foundation reinforced by vibroflotation compaction[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2023, 37(6): 720-724. (in Chinese)
- [11] 周 健,王冠英,贾敏才.无填料振冲法的现状及最新技术进展 [J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 37-42. (ZHOU J, WANG G Y, JIA M C. Situation and latest technical progress of vibroflotation without additional backfill treatment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 37-42. (in Chinese))
- [12] 赵津桥,丁选明,刘汉龙,等.珊瑚砂振冲密实加固响应室内模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2327-2336,2349. (ZHAO J Q, DING X M, LIU H L, et al. Laboratory experiment study on response of vibroflotation compaction of coral sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(8): 2327-2336,2349. (in Chinese))
- [13] 邱伟健,杨和平,刘 岩,等.振冲挤密加固深厚吹填珊瑚礁砂地基试验研究 [J]. *地震工程学报*, 2021, 43(2): 459-467. (QIU W J, YANG H P, LIU Y, et al. Experimental study on the reinforcement of deep filled coral reef sand foundation through vibroflotation compaction method[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43(2): 459-467. (in Chinese))
- [14] 徐 雄,梁小丛,冯振周,等.珊瑚礁砂地基无填料振冲密实加固工艺分析 [J]. *水运工程*, 2022(6): 215-220. (XU X, LIANG X C, FENG Z Z, et al. Analysis on vibro-compaction technique for reinforcement of coral sand foundation[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(6): 215-220. (in Chinese))
- [15] 周 健,贾敏才,池 永.无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(8): 1350-1355. (ZHOU J, JIA M C, CHI Y. Vibroflotation compaction of silty fine sands without additional backfill materials[J]. *Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2003, 22(8): 1350-1355. (in Chinese))
- [16] 陶 然,乐 砾,黄睿奕,等.无填料振冲法在吹填砂地基处理中的应用 [J]. *水运工程*, 2018(7): 210-214. (TAO R, YUE L, HUANG R Y, et al. Application of vibro-compaction in hydraulic-filled ground improvement[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(7): 210-214. (in Chinese))
- [17] BALDI G, BELLOTTI R, GHIONNA V, et al. Interpretation of CPTs and CPTUs. Part 2: drained penetration of sand[C]//*Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar*. Singapore, 1986.
- [18] 中华人民共和国交通运输部.水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for foundation design on port and waterway engineering: JTS 147—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese))
- [19] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册 [M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (Editorial Board of Engineering Geology Manual. Geological engineering handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2018. (in Chinese))

收稿日期: 2025-02-26