



# 南美干燥松散粉细砂振冲施工工艺分析

吴 浩<sup>1</sup>, 张璟泓<sup>2</sup>, 梅涛涛<sup>2</sup>

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 采用振冲法处理粉细砂地基时, 施工工艺及施工参数对最终的地基处理效果有着显著的影响。针对南美秘鲁某港口工程干燥松散粉细砂进行不同施工参数的现场振冲试验, 采用标准贯入试验比较干燥松散粉细砂在振冲密实前、后不同位置处的密实程度变化情况。在加固干燥松散粉细砂时, 传统振冲工艺出现顶部欠密实的问题, 分析其缺陷产生的原因, 并提出了“局部堆填, 及时回填, 减小水压, 分层反插”的工艺改进措施, 结果表明, 改进后的振冲施工工艺可有效加固松散回填粉细砂。

**关键词:** 振冲法; 地基处理; 粉细砂; 施工工艺

中图分类号: U655. 54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0219-05

## Vibroflotation construction process for dry, loose, and fine sand in South American

WU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Jinghong<sup>2</sup>, MEI Taotao<sup>2</sup>

(1. Second Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** When the vibroflotation method is used to treat the fine sand foundation, the construction process and construction parameters have a great influence on the final foundation treatment effect. This paper carries out field vibroflotation tests with different construction parameters for dry, loose, and fine sand in a port project in Peru, South America and conducts standard penetration tests to compare the density changes of the dry, loose, and fine sand at different positions before and after vibroflotation. When dry, loose, and fine sand is reinforced, the traditional vibroflotation process has the problem of insufficient density at the top. Therefore, this paper analyzes the causes of the defects and puts forward the construction improvement measures of “partial filling, timely backfilling, water pressure reduction, and layered counter-insertion”. The results show that the improved vibroflotation construction process can effectively reinforce the loose backfill fine sand.

**Keywords:** vibroflotation method; foundation treatment; fine sand; construction process

振冲法是通过将振冲器插入砂土中进行持续振动, 将砂土振密的一种地基处理方法。饱和砂层在振冲器产生的持续振动下发生液化, 重新排列砂颗粒, 减少颗粒间的孔隙, 增加密实度。干燥砂层则主要依靠振冲器的水平振动力, 在填加回填料情况下, 通过填料使砂层挤压加密<sup>[1]</sup>。关于粉细砂振冲法处理方面的研究, 周健等<sup>[2-3]</sup>通过现场试验的方法, 采用正确的施工工艺和参数,

证实无填料振冲法可有效加固饱和松散的粉细砂地基, 并使其达到中密状态及以上。何开胜等<sup>[4]</sup>通过新吹填饱和松散粉细砂无填料振冲现场试验, 分析总结了适用于吹填粉细砂的无填料振冲施工工艺和质量控制方法。叶观宝等<sup>[5]</sup>通过理论推导粉细砂的临界液化时间, 对施工中振冲留振时间进行了优化, 并分析无填料振冲法在处理液化粉细砂地基的适宜性及处理效果。李继才等<sup>[6]</sup>根据

收稿日期: 2022-09-17

作者简介: 吴浩 (1990—), 男, 工程师, 从事港口工程施工管理工作。

砂中的黏粒含量, 将地基土进行分类, 并针对不同类型的砂土提出了适宜采用的振冲参数。目前, 粉细砂振冲的相关研究主要集中在饱和状态下的振冲可行性, 而关于干燥粉细砂振冲处理的可行性及施工工艺参数选择的研究仍然较少。基于现场实际情况, 针对南美秘鲁某港口工程干燥松散粉细砂进行不同施工参数的现场振冲试验, 采用标准贯入试验比较了振冲密实前、后振冲点及桩间土的强度变化, 旨在为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

南美秘鲁某港口工程地处秘鲁西海岸, 地基处理总面积约 60 万  $m^2$ , 其中入口回填区面积约为 10 万  $m^2$ , 回填区域所用回填料均取自周围砂丘开挖所得的粉细砂, 最大回填深度为 10~14 m, 回填区域内无地下水, 因当地属于热带沙漠气候, 天气干燥, 常年无雨, 回填砂松散且干燥, 地质情况较为特殊。根据设计要求, 回填砂在地基处理后需达到中密以上, 标贯击数需大于 15 击。

### 1.2 地质条件

试验开始前对试验区域进行振冲前标贯试验, 见图 1, 试验区振冲前标贯击数为 2~7 击, 平均标贯击数为 4 击, 回填砂处于松散状态。对回填粉细砂钻孔取样并进行室内土工试验, 得到回填砂各项土工参数指标见表 1, 级配曲线见图 2。

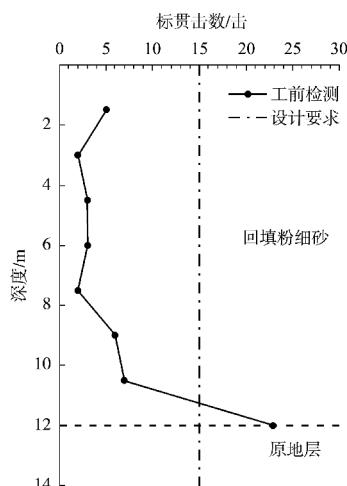


图 1 工前标贯结果

表 1 回填砂土工参数

土体种类	干密度/ $t \cdot m^{-3}$	渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$	天然含水率/%	最优含水率/%
粉细砂	1.700	$1 \times 10^{-4}$	<2	13

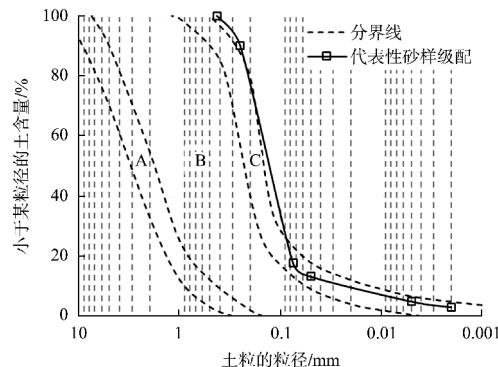


图 2 回填砂级配曲线

分析回填砂代表性砂样级配曲线可知, 回填砂 90% 以上的土颗粒小于 0.25 mm, 属于粉细砂, 回填砂中小于 0.005 mm 的黏粒含量小于 10%, 土体渗透系数较大, 颗粒级配曲线处于振冲处理的适用性曲线中的 C 区, 采用振冲法进行地基处理时需选用适宜的施工工艺。综合实际情况, 拟通过现场试验的方式确定振冲的加固效果并选取振冲施工参数。

## 2 干燥粉细砂振冲施工工艺改进及效果

### 2.1 常规振冲工艺加固干燥粉细砂问题分析

试验区 A 采用常规的振冲施工工艺, 振冲功率为 75 kW, 最高转速为 1 450 r/min, 最大振动幅度为 16 mm, 试验区内振冲点采用等边三角形布置, 振冲点间距 2.5 m, 具体施工步骤为: 1) 场地平整、仪器准备、振冲点位置测量及放点等准备工作。2) 振冲器造孔阶段: 由于现场为干燥粉细砂, 相比饱和粉细砂, 其造孔所需的水压更大, 若采用较小的水压, 则会出现振冲器难以下沉, 或下沉过程被卡在振冲孔中等现象, 极易造成振冲器故障和损坏。振冲过程中控制水压为 0.5~1.0 MPa, 造孔速度由现场造孔难易程度决定, 到达振冲深度后, 孔底留振 30 s。3) 振冲器提升阶段: 控制提升速率为 0.5~1.0 m/min, 每提升 1.0 m 留振 10 s, 密实电流控制为 100~120 A。试验区 A

振冲施工完成后,对其振冲点和桩间形心点进行工后标贯试验检测,见图3。

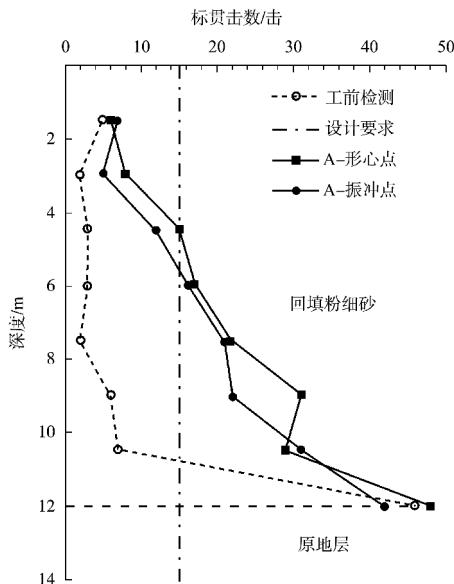


图3 试验区A振冲后标贯试验结果

由图3可知,试验区A采用常规工法进行振冲加固后,振冲点及桩间形心点位置处的标贯击数随深度逐渐增大,6 m以下深度的土体振冲处理后可达到设计要求,但表层0~6 m范围内加固效果较差,未达到设计要求。结合现场施工情况分析,干燥粉细砂地基采用常规振冲工艺施工后,难以达到设计要求的原因主要有:1)相较于中粗

砂地基振冲时振冲孔自行坍塌填满孔洞的情况,粉细砂地基在振冲处理时,上部孔洞会形成直立孔壁,若不及时回填会存在振冲器空振现象,降低加固效果。2)相比中粗砂,粉细砂颗粒粒径较小,顶部振冲过程中水流会带走部分回填料造成局部空隙。3)当地粉细砂天然状态下较为干燥,含水率较小,仅靠振冲水流难以使桩间土达到饱和状态,桩间土加固主要依靠振冲挤密作用,而浅层土体上覆应力较小,挤密效果相对较差。

## 2.2 振冲工艺改进及加固效果

试验区B针对粉细砂顶部6 m范围内加固效果不佳的现象,采用“局部堆填,及时回填,降低水压,分层反插”的改进措施提升振冲效果,具体改进措施为:1)振冲区域局部堆填加高2 m,增加振冲点及地基土体的上覆应力;2)配置专用装载机,振冲上提过程中及时回填,保证振冲孔内填料充足;3)在顶部6 m增加反插工艺,每提升1.0 m,反插0.5 m,并留振20 s,增强顶部6 m深度范围内的振冲效果,保证振冲桩体的均匀性及密实性;4)降低上提阶段水压为0.3~0.5 MPa,减少粉细砂颗粒随水流失造成的局部空隙,施工参数对比见表2。

表2 施工参数对照

试验区编号	振冲间距/m	布置方式	孔底留振时间/s	孔中留振时间/s	水压/MPa	密实电流/A	是否反插
A	2.5	等边三角形	30	10	0.5~1.0	100~120	否
B	2.5	等边三角形	30	20	造孔:0.5~1.0 上提:0.3~0.5	100~120	是(顶部6 m)

试验区B振冲结束后,分别对振冲点和桩间形心点位置进行标贯试验检测,改进工艺的振冲施工效果,对比A、B两个试验区加固后振冲点及振冲形心点的标贯试验典型结果,见图4。

由图4可知,振冲点处采用改进后的施工工艺加固效果较好,不同深度的桩身土加固效果均有较大提升,不同深度处的标贯击数可达到15击以上。采用改进后的施工工艺,振冲形心点提升了振冲加固效果,但仅在采用反插的位置提升较大,额外增加留振时间对桩间土加

固效果提升较小,留振时间对桩间土加固的影响存在阈值。分析其产生的原因:1)振冲头附近土体在振冲水流作用下呈饱和状态,振冲加固原理主要为振动液化作用,增加留振时间使其接近临界液化时间,可保证砂颗粒更大程度上进行重新排列,增强密实效果。2)根据桩间土标贯砂含水率情况,形心点砂层在振冲过程中难以达到饱和状态,其加固主要依靠振冲的振动挤密作用,额外增加的孔中留振时间对其影响较小。

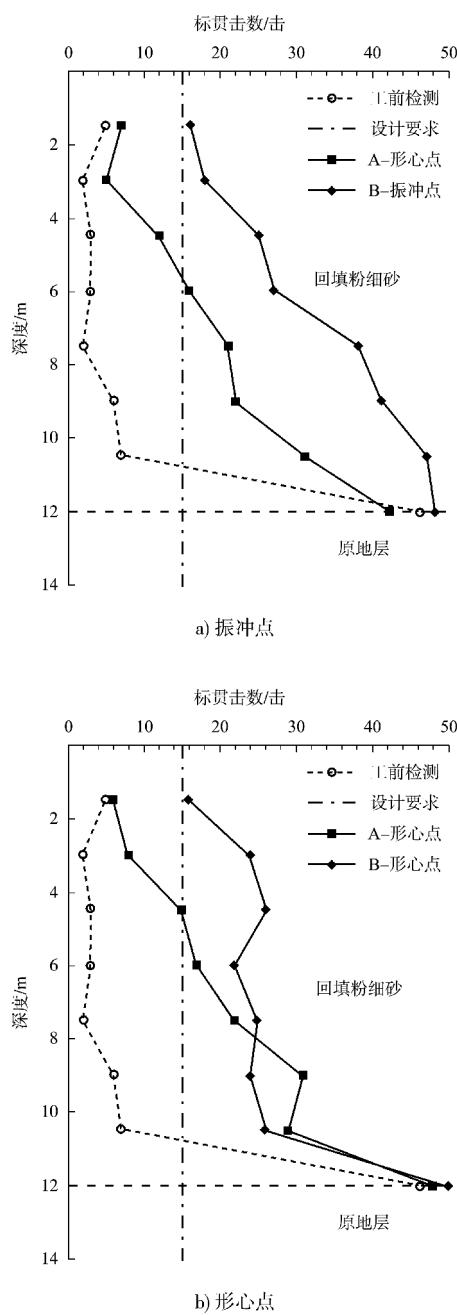


图 4 试验区 A、B 振冲后标贯试验结果

### 3 振冲间距对振冲加固效果的影响

振冲间距的选取在国内外相关规范<sup>[7-10]</sup>中均无明确规定,需根据土体颗粒级配组成、各项土工参数、最终需达到的相对密实程度和现场设备情况等因素综合选取,并通过现场试验验证后确定。为选取最优的振冲间距,保证施工效率与经济效益,工艺改进完成后,对单点振冲的影响范围及不同间距多点振冲的效果进行了相关试验。

### 3.1 干燥粉细砂单点振冲影响范围

为确认振冲的实际影响范围,对单点振冲后振冲中心点至3 m范围内的回填粉细砂进行标贯试验,结果见图5。

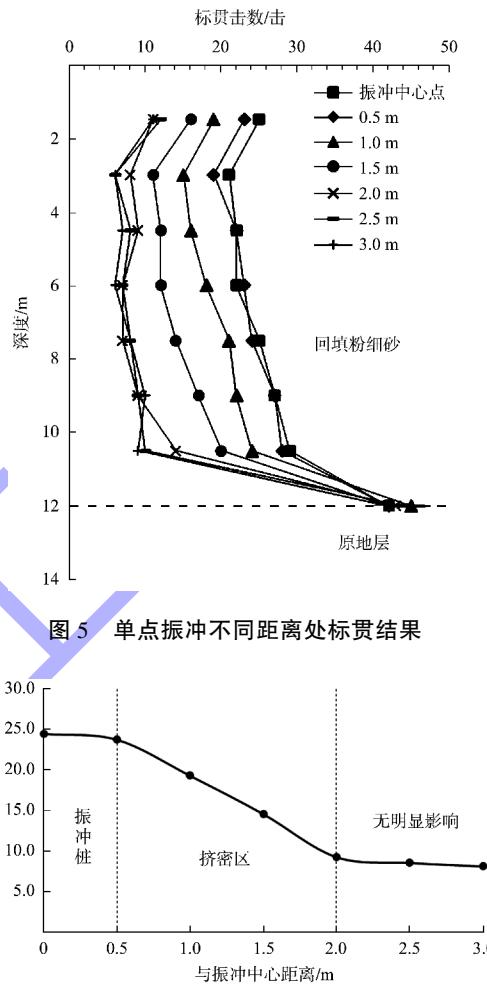


图 5 单点振冲不同距离处标贯结果

图 6 单点振冲标贯均值随距离变化

由图6可知,随着与振冲中心的距离逐渐增加,振冲的作用效果呈现3段式变化,当与振冲中心距离0~0.5 m时,处于振冲桩范围内,振冲加固效果较好;当与振冲中心距离0.5~2.0 m时,振冲效果逐渐减弱,平均标贯击数呈现线性减小趋势,至2.0 m距离时振冲无明显影响。干燥粉细砂振冲时,单个振冲点的影响范围在2.0 m左右。若采用等边三角形布置时,多点振冲为确保形心点处的振冲效果,最大间距不宜超过3.5 m。

### 3.2 振冲间距对振冲加固效果的影响

多点振冲时,振冲作用互相叠加产生综合影响,根据单点振冲试验结果,增加多点振冲施工

振冲点间距至3.0、3.5 m进行振冲施工试验,选取3组不同间距的标准贯入试验,确定振冲加固效果,对比典型试验结果,见图7,对标准贯试验结果进行上覆应力修正,以及相对密实度的换算,绘制相对密实度与振冲间距的关系曲线,并与国内外规范<sup>[11-13]</sup>进行对比(图8),对比结果见表3。

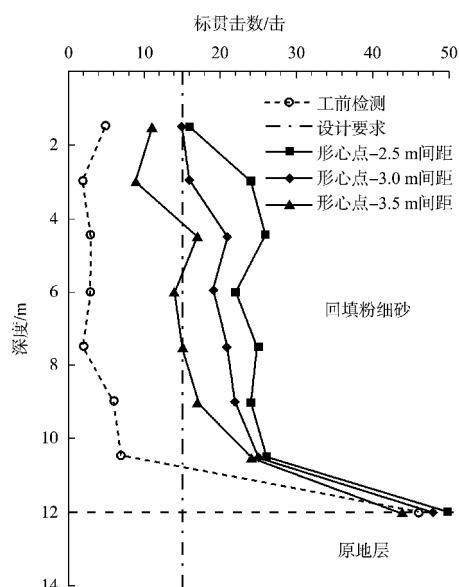


图7 多点振冲改进工艺形心点标贯结果

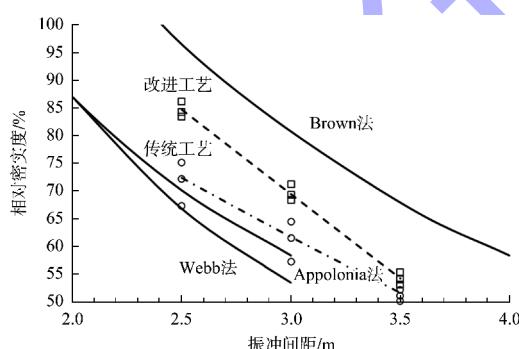


图8 多点振冲形心点相对密实度与振冲间距的关系曲线

表3 不同规范振冲间距设计对比

设计方法	相对密实度对应的间距/m		振冲器功率/kW
	60%	80%	
港口工程地基规范	2.0~3.0	2.0~3.0	30~130
《美国国防部军工手册》	3.9~4.3	1.5~2.8	22~100
Webb法	2.8	2.3	22
Appolonia法	2.9	2.3	30
Brown法	4.2	3.3	75
干燥粉 细砂振冲	传统工艺 3.1	-	75
	改进工艺 3.3	2.7	

由图7可知,振冲间距对桩间粉细砂加固效果的影响较大,随振冲间距的增大,桩间粉细砂加固效果逐渐变差,桩间粉细砂加固后不合格区域逐渐增大,当振冲点间距由2.5 m增至3.0 m时,表层3 m深度范围内标贯击数处于15击要求的边缘,为确保施工质量,施工结束后可采用普夯、冲击碾压等浅层地基处理方法进一步增加表层密实度;当振冲间距增大至3.5 m时,6 m深度范围内不满足要求,振冲法施工效果相对较差。

由图8及表3可知,干燥粉细砂在使用75 kW振冲器进行振冲时所达到的相对密实度偏小,加固效果约为中粗砂地基的70%~90%。另一方面在3.5 m间距范围内,改进工艺可有效提升振冲加固所达到的相对密实度,且间距越小提升效果越明显。干燥粉细砂采用改进工艺进行振冲加固时,若需加固后土体的相对密实度达到80%以上,振冲间距不宜超过2.7 m;若需达到60%以上,振冲间距不宜超过3.3 m。

#### 4 结论

1) 干燥粉细砂在选择合适的参数进行振冲施工后,地基处理效果良好,地基砂密实程度达到中密以上,各深度标贯击数均达到15击以上,满足相关设计要求。

2) 常规振冲法加固干燥粉细砂时,顶部6 m深度范围内的加固效果相对较差,通过采用“局部堆填,及时回填,分层反插,降低水压”的方法改进振冲施工工艺,有效增加振冲密实效果。

3) 振冲间距对干燥粉细砂加固效果的影响较大,随振冲间距的增大,粉细砂加固效果逐渐变差,桩间粉细砂加固后不合格区域逐渐增大。若需桩间砂的相对密实度达80%以上,推荐振冲间距小于2.7 m;若需达60%以上,推荐振冲间距小于3.3 m,可为类似工程提供参考。

(下转第230页)