



排水抗液化珊瑚礁砂地基碎石桩成桩工艺

梁小丛^{1,2}, 井 阳³, 周红星¹, 朱明星^{1,2}, 徐 雄³

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 广州港湾工程质量检测有限公司, 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: 基于碎石桩排水抗液化设计要求, 成桩后桩间土密实度以及任意深度桩径均应满足设计指标要求。为了验证碎石桩设备在珊瑚礁砂地基成桩能力并获取合适工艺控制参数和质量控制流程, 设置了现场试验区对比振冲工艺和振管工艺的成桩质量, 分析桩间土挤密效果差异性。结果表明: 1) 在珊瑚礁砂地基, 振冲工艺和振管工艺挤密效果差异不大。2) 为了确保桩间土挤密效果和成桩质量, 振冲工艺应采用分段填料量、反插密实电流和实时桩径图3个指标控制。3) 振管工艺应采用分段填料量控制, 结合造孔密实电流识别相对松散层。在松散层成桩时采取增加留振时间、提高反插深度并减缓反插速度等措施。

关键词: 珊瑚礁砂地基; 排水抗液化; 振冲碎石桩; 振管碎石桩

中图分类号: TU 471; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0163-08

Construction technology of stone column on coral sand strata for drainage liquefaction mitigation

LIANG Xiao-cong^{1,2}, JING Yang³, ZHOU Hong-xing¹, ZHU Ming-xin^{1,2}, XU Xiong³

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

2. Guangzhou Harbor Engineer Quality Examination Co., Ltd, Guangzhou 510230, China;

3. Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on the design requirements for drainage and liquefaction mitigation of stone column, the soil densification between columns and the diameter at any depth should meet the design index requirements after construction. In order to verify constructionability of different equipment on coral reef sand strata and obtain suitable process control parameters and quality control procedures, the field trial test has been performed to compare the pile quality of the vibro-flotation process and the vibrating tube process, and to analyze the difference of soil compaction effect between the piles. The results show that: 1) On coral reef sand strata, there is little difference in the compaction effect between the vibro-flotation process and the vibrating tube process. 2) To ensure the compaction effect of soil between piles and the quality of piles, the vibro-flotation process should be controlled by three indicators: the amount of segmented filler, the reverse -insertion compaction current and the real-time pile diameter chart. 3) The vibrating tube process should be controlled by the amount of segmented filler, and the relatively loose layer should be identified in combination with the hole-making compaction current. Measures such as increasing the vibration retention time, increasing the reverse-insertion depth and slowing down the reverse-insertion speed are taken when the loose layer is formed into piles.

Keywords: coral sand strata; drainage liquefaction mitigation; vibro-flotation stone column; vibrating tube stone column

收稿日期: 2021-06-22

作者简介: 梁小丛(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚吹填土处理、地基抗液化处理、软土地基处理以及边坡、桩基工程等岩土咨询、设计及科研。

采用碎石桩是一种常见复合地基处理方式，可通过在地基中增加碎石等散体材料形成竖向增强体来提高地基承载力，并减少沉降。同时在强震区的砂土地基中可形成排水通道，快速消散地震作用产生的超孔压，从而提高强震液化灾害防御能力。碎石桩根据成桩工艺，一般分为振冲碎石桩和振管碎石桩^[1-2]。目前对于碎石桩工艺研究常见于普通硅质砂土或者软土地基^[3]，对于碎石桩成桩设计要求经常是提高地基承载力和减少沉降^[4]。而对于珊瑚礁砂地质条件，基于排水抗液化要求的碎石桩施工工艺研究较少，可借鉴工程经验较少。

本文主要依托东帝汶 Tibar 港项目开展试验，研究适用于深厚珊瑚礁砂地基的振冲碎石桩和振管碎石桩工艺，并基于排水抗液化要求提出合适的振冲、振管工艺参数和质量控制流程，为后续类似地基中碎石桩施工提供借鉴。

1 项目概况

1.1 工程地质条件

东帝汶 Tibar 港项目位于帝汶岛，帝汶岛地质形成主要由中生代或地质年代更近的沉积物覆盖于基岩上。根据现场地勘报告揭露，码头后方回填陆域地基处理范围内主要为吹填层和原地层。其中吹填层为绞吸吹填，初始状态为松散-中密的珊瑚礁砂/砾层，原地层主要为海相沉积的粉土质或含粉土质珊瑚礁石砂/砾层；①和②为表层泻湖沉积软黏土或者砂质粉土，吹填前进行了清淤；地基处理范围内原地层③根据密实程度主要划分为③_{1a}和③_{1b}层，其中③_{1a}层非常松散-松散，局部中密状态珊瑚礁石砂/砾层，③_{1b}层则为中密，局部密实状态珊瑚礁石砂/砾层。珊瑚礁砂/砾层为高钙质含量砂，其中③_{1a}层平均钙含量 90.18%、③_{1b}层平均钙含量为 66.06%。原地层基本物理指标见表 1。

表 1 加固地层基本物理指标

地层	SPT/击		细粒含量 FC/%		平均粒径 D_{50}/mm	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均
③ _{1a}	0~18	7	2~45	19	0.15~19	1.8
③ _{1b}	7~35	18	1~48	19	0.12~20	2.0

1.2 地基处理设计

根据依托项目技术规格书，地基处理设计准则见表 2。

表 2 地基处理设计准则

项目	设计准则
承载力	基础地基允许承载力应至少满足 250 kPa
沉降	工后长期沉降需满足 25 a 小于 35 mm
抗液化	回填区地震加速度 0.53g，抗液化安全系数须大于 1.1

基于上述地基处理设计要求，地基处理主要控制准则为抗液化。考虑到现场珊瑚礁砂原地层细粒含量高，大部分细粒含量大于 15%、平均细粒含量 19%，采用振冲密实法挤密效果不佳^[5]，难以满足抗液地基处理要求，从而考虑采用排水为主、挤密为辅的碎石桩抗液化设计^[6]。碎石桩采用正三角形布置，设计桩长 15 m，置换率为 10.1%~15.7%，满足抗液化设计最低置换率 10.1%。

1.3 碎石桩质量验收要求

根据碎石桩排水为主、挤密为辅的抗液化设计要求，碎石桩成桩后质量验收主要针对碎石桩挤密作用以及桩体材料排水作用。

1.3.1 桩间土挤密验收准则

根据设计文件要求，碎石桩地基处理后须满足相对密度 $D_r = 50\%$ 要求，参照 Idriss 和 Boulanger^[7]提出的 D_r 与 SPT(标准贯入试验)经验关系，建立了基于 SPT 的验收曲线。

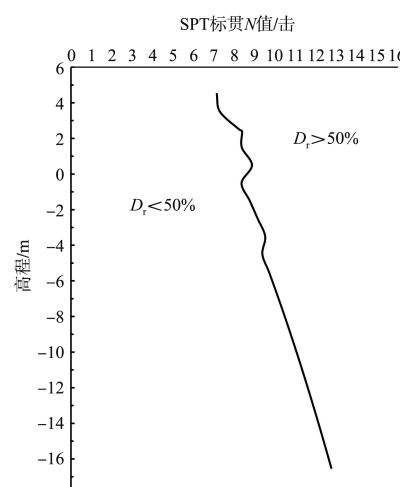


图 1 基于 SPT 的挤密验收曲线

SPT 检测验收准则为优先检测正三角形振冲点挤密效果最弱点位——CP(振冲点正三角形布置形心位置)点位, 如挤密效果满足要求则验收合格, 否则仍需继续开展 $1/2P$ (边长二等分点位置)和 $1/3P$ (边长三等分点位置)点位的检测, 并进行综合评估。因此每组 SPT 检测对应至少 1 个或者 3 个SPT 检测点。其中 CP 、 $1/2P$ 和 $1/3P$ 检测点位相对位置见图 2。

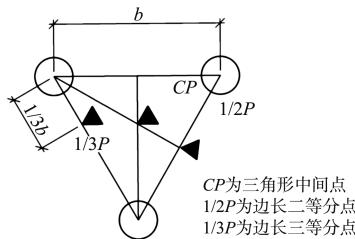


图 2 SPT 检测位置

1.3.2 桩体排水功能验收准则

对于以排水为主的抗液化设计, 其主要目的是通过设置竖向排水体快速消散强震作用产生的超孔压, 因此除了设计参数置换率之外, 排水体设计参数(如长度、直径、渗透系数)是影响排水体排水功能的关键。

考虑到成桩后渗透系数难以测定, 渗透系数控制主要通过设计阶段对碎石料规定级配。施工阶段则主要通过施工管理控制系统深度-时间关系曲线以及实时桩型图进行控制, 以确保施工过程桩径和桩长满足设计要求。施工管理控制系统界面见图 3。

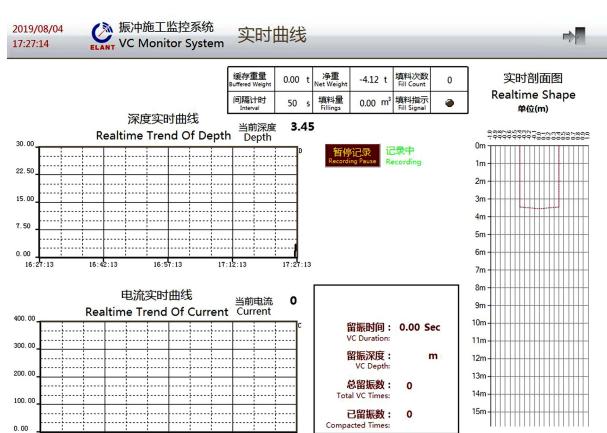


图 3 施工管理控制系统界面

3 碎石桩现场试验

基于上述碎石桩质量验收要求, 碎石桩施工质量控制主要在桩间土密实度以及碎石桩设计几何参数(桩长及任意深度桩径)两方面。基于以往施工经验, 对于深厚砂土地基碎石桩, 施工可采用振冲法、振管法工艺。对于挤密效果而言, 振冲法以水平振动为主、振管法以竖向振动为主, 振冲法挤密效果比振管法明显; 但对于桩径控制而言, 由于振管法采用套管控制, 施工桩径均匀程度比振冲法容易控制。

因此为了进一步对比分析振冲工艺和振管工艺成桩质量以及桩间土挤密效果, 获取适合珊瑚礁砂地基施工参数和质量控制工艺, 同时验证振冲、振管设备成孔能力, 设置了现场试验区见图 4, 试验区具体工况见表 3。

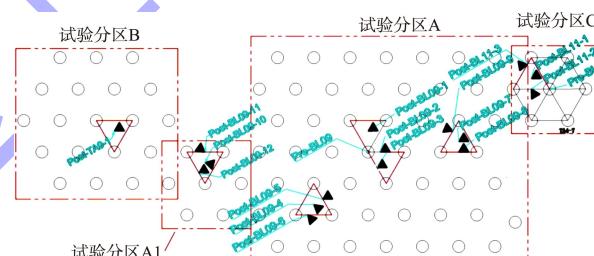


图 4 试验区 L1 位置

表 3 陆域试验区 L1 概况

分区	桩径/ mm	桩间距/ mm	置换率/ %	桩长/ m	SPT 组数/个		工艺
					20	3/9	
A 不控制密实电流施工	800	2 400	10.1	20	3/9	振冲	
A1 控制密实电流	800	2 400	10.1	20	1/3	振冲	
B 控制密实电流	800	2 400	10.1	15	1/3	振冲	
C 同等置换率	800	2 400	10.1	20	1/3	振管	

4 工艺质量控制

4.1 振冲法

陆域振冲试验区主要采用功率为 180 kW 的履带式振冲器, 空载密实电流 107 A, 最大允许电流 380 A。振冲施工过程质量控制采用自动监控振冲记录仪, 自动监控记录仪通过施工管理系统和振冲设备传感器相连接, 可实时显示振冲设备施工过程中的振冲速度、填料量、深度-电流关系曲线

及深度-桩径关系的桩型图等。

碎石桩施工过程可根据实时反馈的参数和桩型图曲线判定振冲碎石桩施工质量是否满足要求, 如不满足可及时做出调整以确保施工过程每段碎石桩的施工质量满足设计要求。结合东帝汶 Tibar 港场地特殊珊瑚礁砂地质条件和现场振冲试验区的成桩质量和挤密效果反馈, 在常规施工工艺流程基础上提出了基于珊瑚礁砂地基的底部出料振冲碎石桩施工质量控制工艺流程, 见图 5。

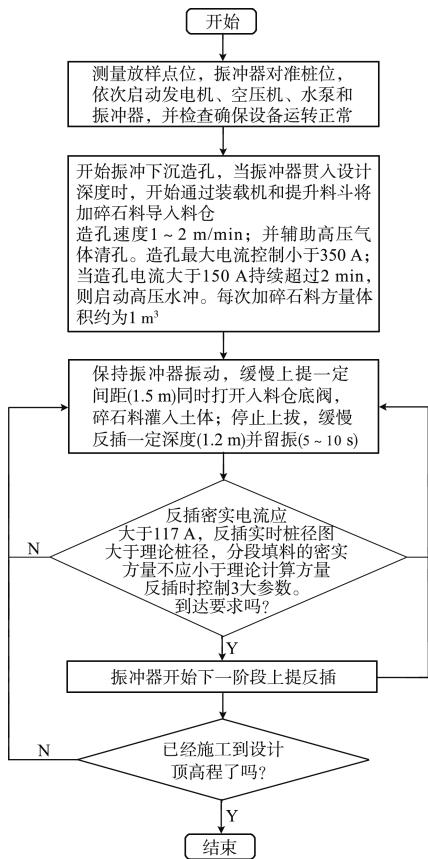


图 5 振冲碎石桩质量控制工艺流程

根据振冲质量控制工艺流程, 提出 3 大指标对成桩质量进行过程控制:

1) 分段填料量控制。上料前利用提升料斗里的称质量设备称出当前填料量, 根据成桩密实后密度换算实际方量, 再根据分段成桩高度计算理论方量, 并控制分段消耗的实际方量大于理论方量。

2) 反插密实电流。进行提升、反插作业时, 须观察反插过程中显示器上显示的电流值, 若反插过程中电流无法达到 117 A (振冲器空载电流约

为 107 A), 则应将振荡器提升到先前的高度并重新反插。在此过程中, 操作员须确保设备中有足够的石料。

3) 实时桩径图。严格控制上述分段填料量和反插电流。在反插过程中, 显示器中会出现实时桩径图和理论桩径图(图 3)。对比两图, 若实时桩径不满足理论桩径, 则应重新反插、重新检测, 重新反插过程中须保证设备中有足够的石料。成桩完成后可由振冲记录仪导出成果图中桩形图进行桩径验收, 成果见图 6。

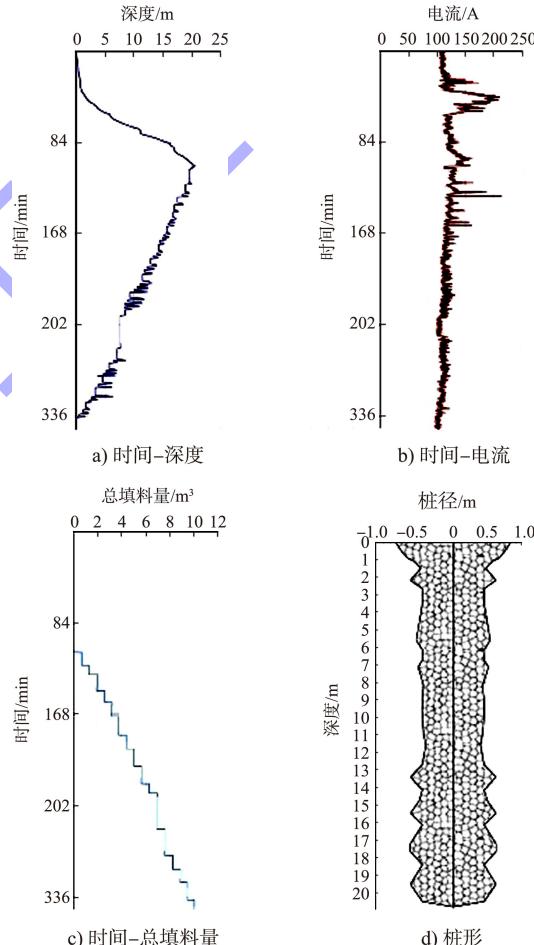


图 6 振冲质量控制系统成果

4.2 振管法

振管工艺主要采用步履式振管设备, 其中振动锤形 DL240 A。振管设备主要可控参数有振动频率和密实电流, 最大激振力 1 610 kN, 允许密实电流 450 A, 振动频率范围 0~50 Hz。振管碎石桩施工过程质量控制采用自动监控记录仪, 可通

过施工管理系统和振冲设备传感器相连接, 实时显示施工过程电流-深度关系曲线、振管碎石桩柱型图以及实时消耗填料量。

结合东帝汶 Tibar 港场地特殊珊瑚礁砂地质条件和碎石桩设计要求, 在常规施工工艺流程基础上, 进一步提出了基于珊瑚礁砂地基的振管碎石桩实时控制工艺流程, 见图 7。

由上述振管碎石桩实时控制工艺流程可知, 现场碎石桩施工关键控制技术主要在于两方面, 通过下沉电流监控, 识别出相对松散层, 即密实电流相对小区域, 见图 8, 对松散层采取减少上提间距、增加留振时间、增大反插深度等加强挤密措施, 具体如下: 1) 相对松散层控制参数为: 上提间距 1.5 m, 每提升 0.75 m 留振时间 5 s, 上提速度控制在 1~2 m/min; 反插深度 0.6~0.8 m, 反插过程持续时间 8 s。2) 其他层位控制参数为: 上提间距 1.5 m, 上提速度控制在 1~2 m/min; 反插深度 0.5 m, 反插过程持续时间 8 s。

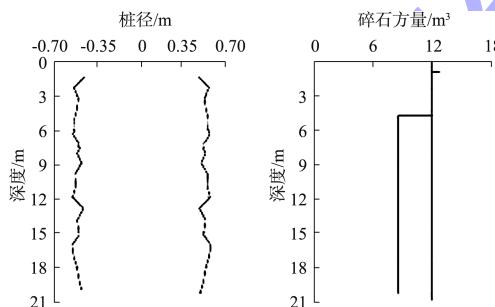


图 8 密实电流判断相对松散层

5 结果分析

5.1 振冲挤密

L1 区对应地层为松散粉土质/含粉土质珊瑚礁砂③_{1a}层和中密粉土质/含粉土质珊瑚礁砂③_{1b}层。L1 区的 L1-A 试验分区成桩过程分别采用了分段填料量和实时桩径图作为过程控制指标, 成桩过程未采用密实电流控制。试验区完成后采用 SPT 进行桩间土检测, 并分别绘制每组 SPT 检测点的标贯击数 N 值的分布以及地层中细粒含量分布, 见图 9。

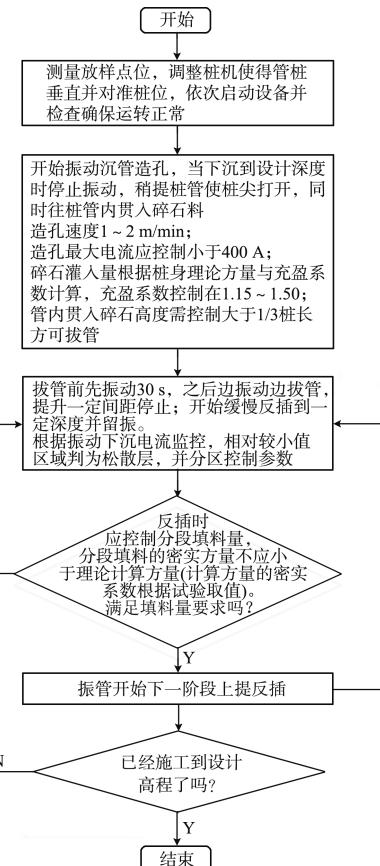
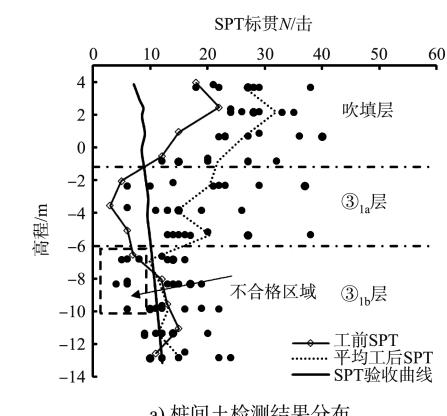


图 7 振管碎石桩质量控制工艺流程



a) 桩间土检测结果分布

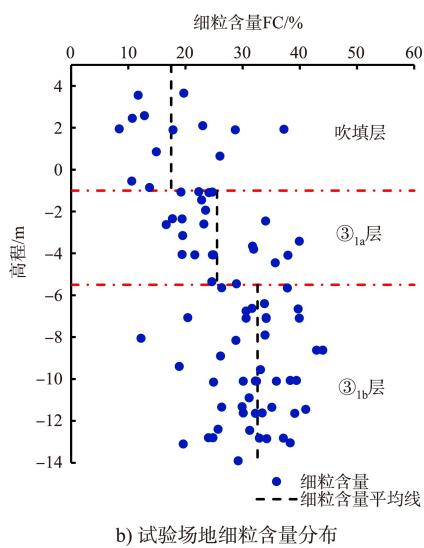


图 9 L1-A 试验区挤密效果分析

由图 9 可见, ③_{lb} 珊瑚礁砂层加固后-8~ -6 m 高程范围内分布有部分标贯 N 值小于验收曲线区域。为了提高桩间土挤密效果, 控制反插密实电流阈值, 提取了不合格检测点位-8~ -6 m 高程范围内反插密实电流进行统计分析, 经对比分析发现不合格区域的平均反插密实电流约 113 A, 而挤密效果合格区域的平均反插密实电流约为 117 A。

因此, 提出在原地层珊瑚礁砂成桩过程增加反插过程密实电流>117 A 控制指标, 并基于改进工艺新开展试验区 L1-A1 和 L1-B, 将改进工艺后试验区所有检测点分布以及平均值曲线进行绘制, 并将平均值曲线与 L1-A 试验区所有检测点平均值曲线对比, 结果见图 10 和表 4。

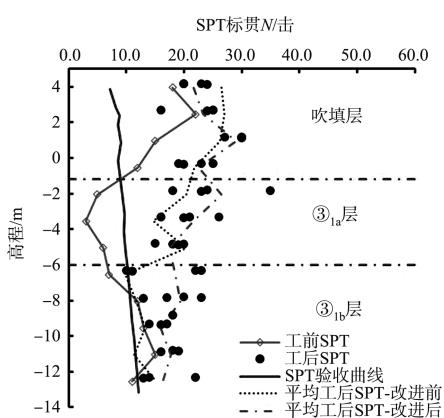


图 10 增加密实电流控制后检测结果分布

表 4 增加密实电流控制后挤密效果分析

地层 土层	振前平均 N	改进工艺后		改进工艺前	
		平均 SPT	平均比值	平均 SPT	平均比值
③ _{la}	4.7	21.9	5.1	18.5	4.1
③ _{lb}	11.6	17.6	1.6	12.3	1.1

由图 10 可知, 采用改进工艺振冲碎石桩, ③_{lb} 层中局部不合格区域桩间土检测结果均满足验收曲线。由表 4 可知: 成桩过程增加 117 A 密实电流控制后, 松散③_{la} 珊瑚礁砂层工后 SPT 平均击数 N 可由 18.5 击提高到 21.9 击, 提高倍数由 4.1 倍增加到 5.1 倍; 中密③_{lb} 珊瑚礁砂层 SPT 平均击数 N 由 12.3 击提高到 17.6 击, 提高倍数由 1.1 增加到 1.6 倍。由此可见改进工艺后加固效果提高显著, 能确保高细粒含量的中密珊瑚礁砂③_{lb} 层桩间土挤密效果满足验收要求。

5.2 振管挤密

由表 3 可知, L1-C 试验区试桩与 A、B 试验区桩径、桩间距相同, 成桩工艺采用振管工艺。成桩工艺参数和质量控制采用图 7 控制流程。成桩完成后, 采用标准贯入试验 SPT 检测了桩间土 3 个点位, 检测结果分布图以及平均值曲线见图 11。

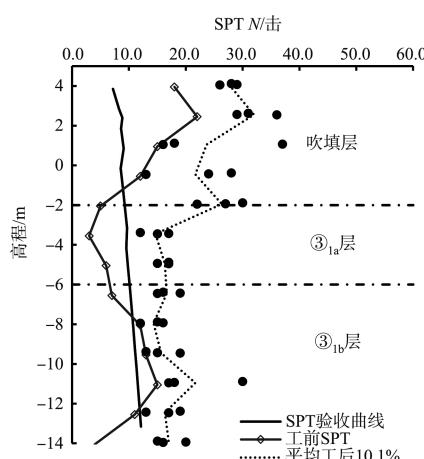


图 11 L1-C 试验分区检测结果

图 11 显示, 成桩后桩间土 3 个点位 SPT 检测结果分布值均大于验收曲线, 且平均值也大于验收曲线, 满足桩间土挤密要求。

5.3 振冲和振管工艺对比

5.3.1 工艺质量控制对比

振冲碎石桩和振管碎石桩工艺区别主要是成桩设备的不同。振冲设备主要通过振冲器水平振

动作用下造孔, 并依靠自重下沉; 振管设备则主要通过振动锤振动沉孔。两种碎石桩成桩过程主要工艺对比见表 5。

表 5 振冲和振管碎石桩关键成桩工艺对比

工艺类型	成桩设备	造孔方式	挤密方式	成桩工艺参数	施工质量控制参数
振冲	振冲器 + 进料管	径向振动 + 自重	径向振动 + 反插	上提间距 1.5 m, 反插 1.2 m, 留振 5~10 s	分段填料量; 实时桩径图; 反插密实电流
振管	振动锤 + 套管	竖向振动 + 自重	竖向振动 + 反插	相对松散砂层: 上提间距 1.5 m, 反插 0.75 m, 留振 5 s; 正常砂层: 上提间距 1.5 m, 反插 0.5 m, 留振 8 s	分段填料控制

由表 5 可知, 两者工艺质量差异性主要如下:

1) 振动方式。振冲成桩的挤密过程主要通过振冲器的水平振动和反插过程对桩间土进行挤密; 而振管成桩过程则主要通过沉管竖向振动及反插过程对桩间土进行挤密。2) 控制参数。振冲主要通过分段填料量、实施桩径图、反插密实电流这 3 个参数控制, 振管则主要通过分段填料量进行控制。

上述两者工艺差异主要原因: 1) 桩径控制方面。振管工艺成桩过程采用套管工艺, 成桩过程选取与设计桩径向匹配套管, 并通过分段填料控制即可确保成桩桩径满足设计要求。但对于振冲工艺, 由于振冲器本身直径较小, 桩径形成主要通过挤密方式, 因此需要通过实时桩径图及分段填料加以控制。2) 挤密效果控制方面。振冲工艺以径向振动为主, 密实电流能很好地反映桩间土体挤密效果; 而振管工艺以竖向振动为主, 密实电流与桩间土体密实度对应关系不明显, 因此密实电流主要用于造孔过程识别相对松散层, 从而在相对松散层采用加强控制措施确保挤密效果。

为进一步对比分析两者工艺成桩质量差异, 统计单根桩实际方量和充盈系数, 基于导出的振冲碎石桩施工自动记录, 分别统计试验区的单根碎石桩的实际方量和桩底设计高程, 见表 6。

表 6 试验区成桩充盈系数

试验区	理论方量/ m^3	平均实际方量/ $(m^3 \cdot \text{根}^{-1})$	平均充盈系数	工艺类型
L1-A	10.05	10.89	1.08	
L1-A1	10.22	13.66	1.34	振冲
L1-B	7.56	9.30	1.23	
L1-C	10.22	12.59	1.23	振管

由表 6 可知, 振冲工艺的 L1-A 试验区充盈系数相比 L1-A1 和 L1-B 偏小, 这主要由于 L1-A 试验区未采用密实电流控制, 而其他试验区则采用密实电流不小于 117 A 进行控制。振管试验区充盈系数与增加密实电流控制后振冲试验区接近。

5.3.2 挤密效果对比

为了对比两种工艺挤密效果, 振管工艺选取分区 L1-C 检测结果, 而振冲分区则选取相同置换率的 L1-A1、L1-B 平均结果作为代表值进行对比, 对比分析结果见图 12 和表 7。

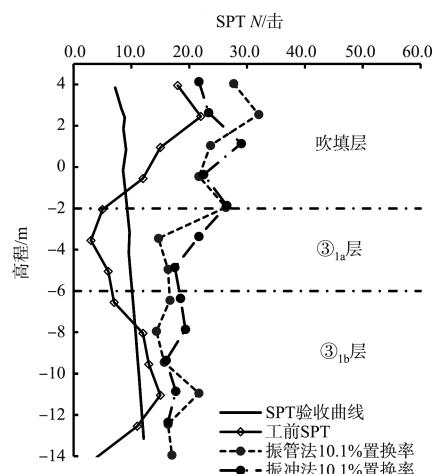


图 12 桩间土检测结果对比分析

表 7 桩间土挤密效果对比分析

地层	振前平均 N	振管工艺		振冲工艺	
		振后 N	平均比值	振后平均 N	平均比值
吹填层	16.8	26.3	1.6	24.1	1.5
③1a 层	4.7	19.1	4.3	21.9	5.1
③1b 层	11.6	16.9	1.5	17.6	1.6

由图 12 和表 7 可知：对于珊瑚礁砂地基碎石桩，当采用相同置换率振管工艺成桩时，振管工艺桩间土挤密后的效果与振冲工艺差异不大，这与传统硅质砂土地基处理中振冲工艺比振管挤密效果明显好的规律略有不同。对于初始状态为中密的③_{1b}层，振冲工艺和振管工艺加固后挤密效果差异不明显；对于初始状态为松散的③_{1a}层，振冲工艺挤密后 SPT 平均值和提高幅度均比振管工艺略高。对于吹填层，振冲工艺加固后密实度比振管工艺略低，这可能是由于吹填表层的振冲能量比振管工艺大，由于上覆地层应力小，振冲对地层扰动较大所致。

6 结论

1) 对于 10.1% 置换率珊瑚礁砂地基碎石桩，当采用振冲工艺成桩时，松散③_{1a}珊瑚礁砂层桩间土挤密后平均击数 N 可由 18.5 击提高到 21.9 击，提高倍数由 4.1 倍增加到 5.1 倍；中密③_{1b}珊瑚礁砂层挤密后平均击数 N 由 12.3 击提高到 17.6 击，提高倍数由 1.1 增加到 1.6 倍。

2) 对于珊瑚礁砂地基碎石桩，当采用相同置换率振管工艺成桩时，振管工艺桩间土挤密效果与振冲工艺差异不明显。具体到不同地层，当初始状态为中密时，两者挤密效果较为一致；当初始状态为松散时，振冲工艺挤密后密实度相比振管工艺略高。

3) 基于排水为主、挤密为辅的抗液化要求，

当采用振冲工艺施工时，为确保桩间土挤密效果和桩体有效截面，应同时采用 3 个控制指标进行实时监控：即分段填料量、反插密实电流和实时桩径图；而当采用振管工艺时，反插过程需采用分段填料量控制指标，其次通过造孔过程密实电流变化识别松散地层，并在松散层区域通过增加留振时间、提高反插深度、减缓反插速度等措施提高桩间土挤密效果。

参考文献：

- [1] 韩冉冉, 徐满意, 乔小利, 等. 水下超软土地基振冲碎石桩试验及参数控制[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 612-616.
- [2] 马肇援. 海上振动沉管碎石桩加固软弱地基[J]. 河南科技, 2013(3): 75-76.
- [3] 张蓓, 杨晓杰, 刘洋, 等. 大直径碎石桩软土成桩工艺研究[J]. 施工技术, 2012, 41(18): 109-112.
- [4] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [5] KIRSCH K, KIRSCH F. Ground improvement by deep vibratory methods[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [6] SEED H B, BOOKER J R. Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drain systems[R]. Richmond: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1976.
- [7] IDRISI I, BOULANGER R. Soil liquefaction during earthquakes [M]. Connecticui: Lynx Communication Group, Inc., 2008.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 138 页)

参考文献：

- [1] 钱意. BIM 与 GIS 的有效结合在轨交全寿命周期中的应用探讨[J]. 地下工程与隧道, 2013(3): 40-42, 65.
- [2] 薛梅. 一种建筑信息模型与三维数字城市集成方法[J]. 地理信息世界, 2014, 21(5): 111-117.
- [3] 朱亮, 邓非. 基于语义映射的 BIM 与 3DGIS 集成方法研究[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(3): 16-19.
- [4] 周汇光, 王宝军, 施斌. 基于 GIS 的大型桥梁工程勘察信

息管理系统设计[J]. 桂林理工学院学报, 2004, 24(2): 172-176.

- [5] 王里, 孙伟, 刘玲, 等. 基于 BIM 和北斗的三维桥梁监测管理研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(7): 5-7, 9.
- [6] 王细钦, 戴炜航, 骆建. 基于 GNSS 接收机导航定位数据的定位产品检测理论研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 67-71.

(本文编辑 武亚庆)