

# 跨海大桥钢管复合桩施工技术

马进

(中交一航局第五工程有限公司)

**摘要:**为解决复杂海洋环境风、浪、流影响下桥梁深基础建设海域钢管桩打设精度不足及灌注桩成孔质量控制困难的技术难题,对钢管复合桩施工技术进行研究。通过优化钢管桩定位与导向系统、精细化控制打设参数、改进成孔工艺及强化混凝土灌注质量控制等一系列针对性技术方法,显著提升了钢管桩的打设精度,有效保障了灌注桩的实体质量。研究表明,该钢管复合桩施工技术能够有效克服复杂海域条件干扰,确保成桩质量,为类似复杂海域桥梁工程钢管复合桩施工提供了可靠的技术借鉴和实践指导。

**关键词:**海洋环境;打设精度;钢管复合桩;定位与导向系统

## 0 引言

钢管复合桩是由钢管桩和灌注桩组合形成的一种桩基形式。钢管桩具有优异的抗弯刚度、抗剪强度等性能,有利于提高桩身整体稳定性和抗冲击能力;混凝土灌注桩为其提供强大的抗压能力,降低材料成本,混凝土填充钢管防止局部屈曲。近年来,钢管复合桩作为新兴的一种桩基结构形式在港珠澳大桥、翔安大桥等工程中应用,结合了钢管桩和灌注桩特点,具有整体承载力高、刚度大、延性好、抗震性能优越等特性。虽然优势显著,但在钢管桩打设精度、施工工艺等方面仍存在技术瓶颈,因此解决钢管桩打设精度和灌注桩实体质量对工程实施具有重要意义。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

厦金大桥(厦门段)起自厦门市思明区环岛路,止于大嶝岛翔安新机场,全长 20.615 km,全线设置香山、观音山、欧厝、大嶝 4 处互通式立交。本文主要以厦金大桥(厦门段)欧厝互通钢管复合桩施工为工程基础,共有钢管复合桩 316 根,其中 88 根桩位于浅滩区,水深为 1.5~3.5 m,其余 228 根桩位于疏浚区,水深为 7.5~9.5 m,桩基施工采用水上搭设临时钢栈桥进行作业。

### 1.2 特殊地质影响

本项目地质条件较为复杂,存在大量孤石、斜岩,为准确如实了解每个桩位下的地质情况,对全部桩位进行了逐桩钻。通过逐桩钻共揭露孤石 52 块,涉及 29 座承台,存在孤石桩基数量(44

根)占总数量的 13.9%,孤石以中风化岩、中风化岩(破碎)为主,均位于钻孔灌注桩区域。

## 2 钢管复合桩施工参数

### 2.1 钢管复合桩技术参数

本项目钢管复合桩长 24~80 m,其中钢管桩部分 11~23 m,灌注桩部分 6~62 m。钢管桩直径分别为 2.1 m、1.8 m,设计桩顶标高分别为-2.65 m、-2.15 m。钢管桩使用钢材为 Q355C 材质,壁厚 25 mm,底部 2 m 范围壁厚为 32 mm,采用熔透直缝焊接工艺,钢管内壁及顶部外壁设置剪力环,同时外壁设有吊环。灌注桩直径分别为 1.8 m、1.5 m,分别对应直径 2.1 m、1.8 m 的钢管桩,桩基类型为摩擦桩和嵌岩桩两种,桩基采用 C35 水下海工混凝土,钢筋为普通钢筋,螺旋筋等级为 HPB300,主筋与加劲箍等级为 HRB400。

### 2.2 主要设备参数

根据钢管桩可打性分析,本项目钢管桩打设需选用 DZJ-120 型电动振动锤,YC-12 型液压冲击锤。

## 3 施工方法

### 3.1 钢管桩施工

钢管桩打设利用导向架精准定位钢管桩设计位置,钢管桩打设过程中,采用水平尺量测钢管桩垂直度,并采用全站仪全程复测钢管桩平面位置及垂直度,如有超限及时调整。钢管桩采用 DZJ-120 型电动振动锤打设,采用 YC-12 型液压冲击锤复打,钢管桩打至设计标高后,采用冲击钻机进行灌注桩成孔施工,成孔过程中对成孔垂

直度、孔径及孔形等要素利用超声波检测仪进行检测,对遇孤石或斜岩等影响成孔垂直度情况及时处理偏孔情况,保证成孔质量。

### 3.1.1 导向架安装

钻孔平台钢管桩打设完成且分配梁焊接完成后安装导向架。导向架采用钢结构形式,设置上下2层限位装置(上层导向架标高为+5.0 m,下层导向架标高为+1.0 m),限位装置采用顶丝与尼龙轮结合,每层布置8个,如图1所示。



图1 导向架安装示意图

### 3.1.2 钢管桩运输

选择适合钢管桩尺寸和重量的板车,确保车辆有足够的承载能力和稳定性。将钢管桩缓慢放置到板车上方专用支架或托架上,确保固定稳妥。使用绑带、绳索或其他固定装置将钢管桩牢牢固定在板车上,防止在运输过程中滑动或滚动。最后检查钢管桩的固定情况,确保没有任何松动或不稳定因素。

采用板车进行运输,板车以缓慢而平稳的速度行驶,避免急刹车、急加速或急转弯,以减少对钢管桩的冲击。时刻注意路况和周围环境,确保按照规划的路线行驶。板车到达施工区域后,选择合适的卸载位置,确保卸载过程的安全和效率。采用履带吊配合吊装带平吊形式卸车,将钢管桩平放于施工平台上,底部放置枕木进行支垫,两侧使用木质楔子固定钢管桩,防止滚动。卸载过程中,严格遵循安全操作规程,卸载完成后再次对钢管桩进行检查,确保在运输和卸载过程中没有受到任何损伤。

### 3.1.3 钢管桩吊装

采用履带吊进行吊装施工,主钩通过钢丝绳、卡环连接钢管桩顶部2处吊点,主钩缓慢上升,

将钢管桩顶端缓慢提升至站成立桩,然后将钢管桩缓慢放入已经定位并加固的导向架内,穿过导向架后(未进入泥面),利用已设站的全站仪观测露出操作平台部分3个不同位置且处于同一高程平面的钢桩表面,应用平面坐标计算出桩中心坐标并与设计坐标相对偏差。若桩中心位置超限则采用钢管桩双层导向架调整钢桩位置,直至合格为止。导向架上下层限位装置顶紧,使尼龙轮与钢管桩之间接触、顶紧,实现钢管桩沉桩导向作用。限位顶丝顶紧后,对垂直度进行复测,上下层导向架处钢管桩相对偏位控制在10 mm以内。平面位置准确后,履带吊缓慢平稳落钩自沉<sup>[1]</sup>,自沉过程中对钢管桩的姿态进行实时观测,若偏位或垂直度超出允许偏差,立即停止自沉,并使用导向架上下层顶进装置进行微调,自沉完成后,解脱履带吊钢丝绳与钢管桩的连接。

### 3.1.4 振动锤振沉稳桩

采用履带吊悬挂DZJ-120型电动振动锤进行钢管桩振沉施工,为保障桩身受载均匀,使用双夹具对称夹持桩体<sup>[2]</sup>,沉桩前复核桩位偏差及垂直度,确认合格后启动振动锤,沉桩过程中实时监测桩位及垂直度,若超出允许偏差则立即停止沉设,并采取留振调位或调整导向架限位装置等措施纠偏。振动锤工作频率在0~50 Hz范围内自动调节,当激振电流超过300 A或贯入速率低于2~3 cm/min时,终止沉设作业并吊离导向架。

### 3.1.5 冲击锤打设钢管桩

基于现有地质勘察资料,工程区域钢管桩需贯入全风化、强风化岩层。YC-12液压冲击锤可有效弥补振动锤激振力不足、入岩能力有限的缺陷。对于未达设计标高的桩位,采用履带吊吊装YC-12液压冲击锤进行复打,锤体缓慢套入桩顶,避免水平硬接触导致桩位偏差,待稳定接触后,缓慢下放吊钩并启动冲击锤实施复打。初打阶段,使用初始锤击能量6 000 kJ、冲程1 m对钢管桩进行打设。进入能量调整阶段后,根据初打阶段的观察结果和土壤条件的变化,逐步调整锤击能量进行复打,在复打过程中保持锤击能量的稳定和均匀分布,以确保钢管桩的顺利贯入和施工质量。钢管桩如出现下沉速度或贯入度突然变大,则立即停止冲击,查明原因后再继续施工。在整个复打过程中,实时监测桩的贯入度、锤击次数等参数,并记录相关数据。

### 3.1.6 标高控制

钢管桩(含替打段)顶部高程为+0.5 m,沉桩标高控制为主,贯入度校核。桩顶允许+10 cm偏差,若实际施工中发现地质条件有较大差异,上报相关单位,按监理程序处理。

### 3.2 灌注桩施工

钢管复合桩灌注桩施工与普通桩基钻孔冲进、钢筋笼安装、混凝土浇筑方式均一致,承插式护筒安装、变径段桩基成孔与普通桩基施工存在差异,仅对承插式护筒安装与变径段桩基成孔进行分析。

#### 3.2.1 承插式护筒安装

采用承插式可循环临时钢护筒工艺对钢管桩实施接长<sup>[3]</sup>,使桩顶最终达到钻孔平台设计标高(+7.5 m),为确保接长结构的整体性和传力稳定,临时钢护筒设计为与钢管桩替打段等径,壁厚20 mm,承插深度20 cm,并预留1 cm的环形间隙。

为实现承插接口的水密性,在其接触面安装长10 cm、厚3 cm的V形橡胶止水条。钢护筒在安装就位过程中,凭借其自重即可对止水条形成有效挤压,进而确保接口达到可靠的密闭止水状态。安装完成后向护筒内注满水,观察30 min水位下降情况,下降不大于10 cm则判定合格,如出现不合格情况,将护筒拔出重新进行安装。承插式护筒安装完成后,测放出桩基中心,引出4根护桩至栈桥平台,方便后续桩基定位对中。

#### 3.2.2 变径桩基成孔作业

钢管桩桩内钻孔采用分级冲进方法。起始冲进选用大直径锤头,其锤头配置可拆卸钢管刷,在锤头穿出钢管桩桩底后,需更换小直径锤头进行冲进,最终钻进至桩底标高后,采用大直径锤头配带钢管刷清除钢管桩桩身及底部残留泥皮<sup>[4]</sup>,确保钢管桩内无夹泥情况发生。

## 4 质量保证措施

### 4.1 钢管桩打设

1) 钢管下沉应选择风速小、低潮期或流速较小的时段,确保钢管在水流作用下的稳定性。

2) 钢管的插打顺序和分区安排应充分考虑钢管之间的相互影响,尽量减小施工过程中引起的冲刷问题。

3) 导向架具有足够的刚度,且需严格控制导向架的安装精度。

4) 振动锤安装要求有足够的精度,底座基本

水平,防止出现过大的偏心振动,开始振动时先点振,待钢管进入土层一定深度且完全起振后,方可连续振动下沉,振动下沉过程中对钢管垂直度进行监测,及时进行纠偏。

5) 钢管插打过程应加强顶口变形观测、贯入度监测,防止钢管的变形、卷边。

### 4.2 成孔质量

1) 钻进过程中每2 m捞取渣样,与地勘图纸地层比对,核对地质情况。

2) 钻进过程中采用1.5 m冲程冲进,钢管复合桩为变径桩,钢管桩部分采用1.9 m锤头冲进,到达钢管桩桩底标高位置后换用1.78 m锤头对灌注桩部分进行冲进,确保桩孔尺寸。

3) 冲击钻成孔过程中要注意对泥浆各项指标进行检查,一次清孔 $1.15 \leq \text{相对密度} \leq 1.18$ ,胶体率 $\geq 98\%$ ,含砂率 $\leq 1\%$ ,黏度控制在 $17 \sim 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

4) 冲击钻冲进至钢管桩桩脚位置处容易塌孔,在塑性大的软土地层容易缩孔,在圆砾、粉砂层容易局部扩孔,因此在不同的地层采用不同的钻进速度和钻进压力,以及采用不同指标的泥浆护壁。

5) 淤泥、淤泥质土等软弱土层钻进时注意缩孔情况发生,必要时用锤头扫孔以确保孔径满足要求。

### 4.3 混凝土灌注

1) 一次清孔完成后,及时采用超声波成孔检测仪对成孔形状、成孔尺寸、孔底沉渣等进行检测,满足条件后进行钢筋笼安装。

2) 二次清孔后对各项泥浆指标进行严格检查, $1.03 \leq \text{相对密度} \leq 1.15$ ,含砂率、胶体率、黏度指标同一清指标,一旦出现胶体率低或黏度下降情况,需重新导入新浆进行置换,防止塌孔影响质量。

3) 混凝土浇筑前,需对导管水密性试验进行检测,并检查防水胶垫是否完好,有无老化现象,导管使用后应涂油漆,进行编号,以保证灌注混凝土过程中不漏水、不破裂,拆管时按次序进行导管拆除。

4) 混凝土浇筑过程中应严格控制混凝土的扩展度和坍落度,保证混凝土的浇筑质量。在混凝土灌注过程中,设专人测量孔深并记录,准确掌握混凝土面上升高度,严格控制导管埋置深度在2~9 m之间,防止埋管过深出现堵管现象或埋管

过浅发生脱空现象。

5) 混凝土浇筑标高应高出设计桩顶标高 0.8~1.0 m, 导管拔除速度不易过快, 防止拔除位置形成空洞, 砂浆堆积造成混凝土不密实。

### 5 钢管桩打设定位架优化

从钢管桩打设定位架角度进行优化, 双层下卧式导向架在施工过程中耗时较多, 安装和拆除导向架及配套设施超过 12 h, 影响施工工效, 同时安拆过程中人员操作的安全风险较大。将双层导向架改为置于平台顶面单层导向架, 并进行打设试验, 经检查钢管桩偏位、垂直度均满足规范要求。

单层导向架由 4 根长度 3.1 m H400 双拼型钢拼装而成, 呈正方形, 框架上方焊接 4 个导向轮, 用于调节钢管桩位置及垂直度, 如图 2 所示。桩基钻孔平台搭建完成后, 对导向架位置进行测量放样, 导向架安装完毕后, 进行钢管桩打设施工, 钢管桩进入单层导向架稳桩后, 进行振动锤振沉, 钢管桩振沉至导向架顶标高后, 进行钢管焊接接长, 焊接接长完毕后, 继续进行振动锤振沉, 当贯入度为 0 mm, 换冲击锤复打。对钢管桩打设耗时与钢管桩平面位置垂直度数据进行统计, 采用双层或单层导向架钢管桩平面位置、垂直度主要参数均满足设计要求, 单层导向架安装更加便捷, 安全风险低, 极大提高了钢管桩打设效率, 后续施工中将打设定位架体优化为单层定位架。



图 2 单层导向架安装

### 6 结语

本工程钢管复合桩基施工落实高质量发展理念, 自主优化单层定位架体工艺, 施工质量、安全、进度得到了有效控制; 实测垂直度最大偏差为 1/180 mm, 平面位置均控制在 5 cm 范围内。所有施工钢管复合桩均为 I 类桩, 应用该技术降低了安全风险, 同时提高了施工效率和施工质量, 具备较高的应用价值, 可为类似大型钢管复合桩施工提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 杨斌财. 港珠澳大桥桥梁工程钢管复合桩施工及质量控制[J]. 工程质量, 2019, 37(11):1-4, 13.
- [2] 向梨梨, 黄鹏, 胡伟邦. 基于一体式导向架的大直径钢护筒水上快速施工技术[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(2):92-97.
- [3] 林路宇. 浅海域钢管复合桩施工技术的研究与应用[J]. 公路, 2022, 67(11):166-170.
- [4] 伍贤峰. 水中大桩径钢管复合桩钻孔灌注施工工艺及质量控制分析[J]. 广东建材, 2025, 41(1):55-59.