 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9319

Analysis of construction technology for prestressed pipe piles in thick sand layers

Xiaowen Min [1] Kunju Wang[1] Hongyu Zhao[1] He Wang[1] Xincheng Lu[2]

1. China Construction Haijia Construction Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528000, China
2. Middling Coal Jiangnan Construction Development Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

Based on the pile foundation project of the resettlement housing project on Fenjiang North Road in Foshan City, this article analyzes the construction technology to address the issue of unable to penetrate the sand layer during the construction of prestressed pipe piles. The construction plan is optimized, and subsequent construction content is verified through on-site inspection. The results show that the resistance to pile sinking mainly comes from the soil compaction effect generated by the soil surrounding the pile. Optimizing the type of pile tip has little effect, and it is necessary to increase the measures for pilot holes. Based on the test pile situation, areas with a large thickness of sand layer in the geological survey report are distinguished, and the plan is optimized. The results of static load and uplift testing show that the optimized plan can meet the design requirements for bearing capacity.

Keywords

Deep sand layer; Prestressed pipe pile; Pilot hole; Pile tip; Bearing capacity

预应力管桩在深厚砂层中的施工技术分析

闵晓文 [1] 王昆举 [1] 赵宏宇 [1] 王赫 [1] 鲁鑫城 [2]

1. 中建海嘉建设有限公司，中国·广东 佛山 528000
2. 中煤江南建设发展集团有限公司，中国·广东 广州 510000

摘　要

本文依托佛山市汾江北路安置房项目桩基础工程，针对施工预应力管桩时无法穿透砂层的问题展开了施工技术的分析，优化了施工方案，后续施工内容经过现场检测验证。结果表明：沉桩阻力主要来源于桩周土体产生的挤土效应，优化桩尖类型效果甚微，需增加引孔措施；根据试桩情况将地勘报告中砂层厚度较大的区域进行区分，并进行方案优化；通过静载、抗拔检测试验结果显示优化方案能够满足设计需求的承载力。

关键词

深厚砂层；预应力管桩；引孔；桩尖；承载力

1 引言

预应力管桩因其优越的材料性能及合理的结构设计，被广泛应用于各类桩基础工程中。从几何和结构设计的角度来看，PHC 预应力管桩的几何形状有利于桩身在施工及使用过程中应力的均匀分布，同时减轻桩体自重。对比实心桩，空心截面设计使预应力管桩在满足强度和刚度需求的情况下，具备更高的经济性。高强度混凝土配比中通常加入了低水灰比和矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣微粉等），从而显著提升其耐久性和抗侵蚀能力。这些特性在富含水地层或可能含有侵蚀性化学物质的环境中尤为重要。在大规模施工时，与传统的灌注桩工艺相比，PHC 管桩施工的泥浆排放量几乎为零，避免了大面积的泥浆污染及随之带来的环境修复成本。

【作者简介】闵晓文（1985—），男，中国新疆和田人，本科，工程师，从事工程技术研究及项目管理研究。

密实砂层的颗粒间接触紧密，孔隙率低，具有较高的内摩擦角和抗剪强度。由于颗粒排列紧密，密实砂层压缩性低，可提供较高的地基承载力。但这也意味着在施工预应力管桩时桩尖难以穿透，易导致桩体无法达到设计深度。密实砂层的高抗剪强度显著增加桩端阻力和侧摩阻力。沉桩过程中，桩体挤压砂层会产生显著的挤土效应，可能导致已施工桩体倾斜、地面隆起或邻近结构受损。

汤红军 [1] 通过预应力高强混凝土管桩在穿越砂层过程中容易出现无法沉桩至设计标高以及桩头破裂、桩身断裂等问题，探讨了地基处理及桩基施工产生的挤土效应对单桩极限承载力的影响；孙亚哲 [2] 通过 GRLWEAP 软件对穿越深厚密实砂层工况的 PHC 桩进行打桩波动方程模拟，同时开展高应变打桩监测试验。发现 PHC 桩穿越深厚密实砂层除了需要选择合理的打桩系统和打桩工艺外，还须采用引孔措施以及对桩身和桩靴进行必要的加强处理。张广彬 [3] 通过对预应力管桩施工进行预钻孔引孔工艺，采用静压桩

机施工，在满足设计要求的情况下，进行单桩极限承载力6200kN 的预应力管桩施工，桩身顺利贯穿标准贯入锤击数平均为 45 击、厚度 8.6-11.5m 的粉细砂层。

预应力管桩为桩基础中一种主要的桩型，在国内外得到了广泛的应用，在部分地区已经成了最主要的桩型。因此，在深厚砂层中分析预应力管桩的施工工艺可促进基础工程施工中相关问题的解决，具有一定的意义。

2 工程及地质概况

项目位于佛山市汾江北路与汾江北路一街交汇处，地处禅城区祖庙街道老城区，西侧为城市主干道汾江北路，北为佛照旧改整治地块，南向高层住宅小区汾江北一街，东邻旧厂房道路。建设内容地下一层，地上 16-19 层，住宅数 936 户。用地面积 4.35 万平方米，总建筑面积 16.6 万平方米。住宅结构形式为剪力墙结构，地下室结构形式为框架结构，建筑等级为一级，地基基础设计等级为乙级。桩基础采用预应力混凝土管桩 PHC500-120AB 型，共计 2943 根，静压方式施工。

根据项目勘察报告，地貌上位于珠江三角洲平原腹地，地形总体较为平整，钻孔孔口标高约为 2.50~3.15m 之间。本场地土层自上而下依次为填土、冲积土，基岩为白垩系强~中风化泥质粉砂岩、局部为泥岩，场地岩土层的种类稍多，各岩土层的厚度、强度和压缩性有差异，综合判定本场地地基为不均匀地基。场地内地基不均匀，② -7 层中粗砂层处于地面以下 14.4 - 22.7m，砂层厚度普遍稍大、密实度局部较高，层厚在 0.3-8.3m 之间，④层风化岩的岩面、厚度、强度、完整性等局部变化较大并存在分布、厚度无规律的相对硬夹层，各地层参数见表 1。

3 工程实施情况

3.1 试桩情况

本工程要求桩基持力层为强风化岩，因此在施工中桩尖必须要穿透砂层。在正式施工前进行了试桩，按照中砂层厚度划分区域选定试桩位置。中砂层厚度在小于 3m 的桩位，按照工程设计要求，可正常施工；中砂层厚度在 3m 与 6m 之间时，部分桩位能穿透砂层；中砂层厚度在 6m 以上时，桩位不能穿透砂层。施工参数见表 2，试桩情况见表 3。

表 1 岩土设计参数

层序	岩土名称	地基承载力特征值（kPa）	重度（kN/m^3）	泊松比	黏聚力（kPa）	摩擦角（°）	压缩模量（MPa）
① -1	杂填土	80	18.5	0.25	3.0	22.0	5.0
① -1	粘性素填土	80	19.0	0.20	15.0	12.0	4.0
② -1	淤泥质土	50	16.5	0.15	7.0	6.0	2.5
② -2	粉砂	100	18.0	0.30	3.0	26.0	5.0
② -3	淤泥质土	60	17.5	0.15	8.0	6.5	3.0
② -4	粉细砂	120	18.5	0.30	3.0	28.0	10.0
② -5	淤泥质土	65	17.5	0.15	8.5	7.0	3.5
② -6	粉质粘土	140	19.5	0.25	22.0	12.0	5.0
② -7	中粗砂	220	19.0	0.40	0.0	32.0	25.0
④ -1	强风化岩	500	19.5	0.40	28.0	25.0	20.0
④ -2	中风化岩	1200	22.0	0.50	/	/	/

表 2 预应力管桩施工参数

管桩规格	有效桩长（m）	持力层	桩尖形式	成桩形式	竖向承载力特征值（kN）	终压值（kN）
PHC500-AB-120	14-26	④ -1 强风化岩	平底十字型	静压	2050	4600/5200

表 3 试桩记录表

桩号	中粗砂层厚（m）	桩位与勘察孔的距离 m（勘察孔号）	入中粗砂距离（m）	终压值（kN）	配桩（m）	备注
D449	6.3	2.5（ZK54）	3.64	5800	11+11	
D611	5.3	1.6（ZK56）	5.3（穿透）	4600	11+11	入岩 0.71m
D442	8.4	3（ZK53）	7.78	5800	12+12	
2-120	3.9	1.85（ZK40）	3.9（穿透）	5800	11+11	入岩 1.35m
2-118	3.9	0.6（ZK40）	2.68	5800	11+10	
D528	8.4	6（ZK53）	5.88	6000	11+11	
D437	7.8	6（ZK38）	5.25	6000	11+11	
D702	7.3	6.9（ZK69）	4.68	5800	10+10	铅笔桩
6-60	2.9	4.35（ZK35）	2.9（穿透）	5200	11+11	入岩 0.5m
D-882	2.9	5.14（ZK82）	2.9（穿透）	5200	11+11	入岩 0.97m

3.2 方案优化

3.2.1 长螺旋引孔

螺旋钻机通过螺旋叶片旋转切削砂层，排渣至地面，形成预钻孔通道，降低砂层对管桩的阻力，使管桩更易穿透密实砂层；直接沉桩会导致砂层挤土，引发邻近桩体偏移或地面隆起。引孔可提前释放部分土体应力，减少挤土对周边环境的影响；长螺旋钻机配备垂直度监测仪和液压支撑系统，可实时调整钻孔垂直度，确保后续管桩沉桩的精度。

螺旋钻机采用履带式行走机构，移位便捷，成孔深度可达 30-50 米，且自动排渣减少停机时间。相比旋挖引孔，无需泥浆护壁，节约泥浆处理费用，且设备能耗和综合成本更低。无泥浆污染，施工现场整洁，符合文明施工要求，可针对不同砂层厚度调整钻杆长度和工艺参数。施工现场引入 2 台螺旋钻机。

3.2.2 改变施打方式

液压锤桩机是一种以液压系统为动力源的打桩设备。液压锤的能量传递效率高，冲击力大且穿透力强，成桩质量高；无废气排放，适合城市施工需求；冲击力和频率可根据土层条件及桩材强度实时调整，适应软土启动、斜桩或水下作业。与静压桩机相比，液压锤冲击力大，穿透速度快，更适用在砂层厚度较大的区域进行管桩施工 [4]。施工现场引入 1 台液压锤桩机，机型为 SWH1。

3.2.3 桩尖优化

预应力管桩桩尖种类多样，其中常见的有十字型、闭口型、开口型。十字型桩尖采用封口设计，成桩后管桩内腔无土体进入，穿透力强，尤其适合硬地层（如强风化岩层）的施工，如平底十字型。但十字型桩尖遇地下障碍物或软硬不均地层时易倾斜，在倾斜岩面（如灰岩地区）可能因侧滑导致断桩。

闭口型桩尖常见的是锥形桩尖、一体化桩尖，它穿越砂层能力较强，适用于密实砂层或一般粘性土层，并且制作工艺简单，价格经济，适合大规模应用，但遇到地下障碍物或软硬突变地层时易倾斜，影响垂直度，封口设计可能导致挤土效应。

开口型桩尖前端开设开口，允许部分土体进入管桩内腔，减少了土体挤压对周边环境的影响，适用于布桩密集或长桩施工。

本工程设计要求桩尖采用平底十字型。根据上述各类型桩尖特点，结合项目桩位分布和地质情况，经甲方和监理单位同意后决定增加尖底十字型和一体式桩尖，进行对比穿越砂层的情况，见表 4 所示。

根据表 4 数据可知，更换桩尖后依旧无法穿透砂层，说明桩体进入深厚砂层时，产生的挤土效应加剧了桩尖周边砂土的密实度，增加了桩尖下穿的阻力，因此需要采取多种措施应对。

表 4 更换桩尖后的试桩情况

桩号	中粗砂层厚（m）	桩位与勘察孔的距离 m（勘察孔号）	入中粗砂距离（m）	终压值（kN）	配桩（m）	备注
D522	6.3	4（ZK54）	4.6	6000	11+12	一体式
D541	5.3	3（ZK56）	4.55	6000	12+12	一体式
D696	7.3	1.6（ZK69）	4.7	5800	10+10	平底十字型
D449	6.3	3.2（ZK54）	5.1	5800	11+11	平底十字型

3.2.4 确定优化方案

经过综合考虑，并结合类似工程的案例，制定如下方案：砂层厚度在 3m 以下，采用静压方式正常施工；砂层厚度超过 3 米，先进行长螺旋引孔，主楼桩位采用液压锤桩机施工，裙楼桩位采用静压机施工。

4 桩位检测情况

本工程经过方案优化后进行施工的砂层厚度大于 5 米的桩位有 136 根，其中有 16 根进行了静载和抗拔试验，占桩位砂层厚度大于 5 米的总桩数的比例为 11.8%。本工程设计中，单桩静载竖向、抗拔承载力特征值分别为 2050kN、350kN，静载、抗拔承载力检测值取特征值的 2.5 倍。通过对比方案优化前后随机抽选的做静载、抗拔试验桩位的试验情况，来判断该工程的优化方案是否可行。桩基检测完成后，通过统计检测站提供的试验报告内的部分数据，得到表 5。

表 5 部分桩位检测结果

序号	桩号	施工方案	检测结果	砂层厚度（m）	桩身完整性检测	成桩方式	检测方式
1	6-80	优化方案	合格	6.3	合格	静压	静载试验
2	1-52	优化方案	合格	8.1	合格	锤击	抗拔试验
3	1-102	优化方案	合格	5.5	合格	锤击	静载试验
4	D-631	优化方案	合格	5.1	合格	静压	静载试验
5	12-16	优化方案	合格	5.6	合格	静压	抗拔试验
6	2-38	优化方案	合格	7.3	合格	锤击	静载试验

通过表 5 可知，在砂层厚度大于 5m 的桩位，优化方案后采取长螺旋引孔后再进行施工预应力管桩，与原方案相比，依然能够满足设计承载力要求，并且不同的成桩方式对桩身承载力不产生影响。

5 结语

（1）深厚砂层地区施工预应力管桩时，根据地质勘查报告中砂层层厚信息及试桩情况，划分出按照原方案可正常施工区域和需优化方案的区域。

（2）更换穿砂能力强的桩尖效果甚微，桩身周围产生的挤土效应增加了沉桩阻力，需增加引孔措施。

（3）长螺旋钻机引孔后施工预应力管桩，通过静载、抗拔检测试验结果表明经过优化方案施工的桩位，承载力能够满足设计需求。

参考文献

[1] 汤红军,张虎,金来建.南昌某预应力管桩沉桩问题及处理[J].建筑结构,2017,47(S1):1082-1084.DOI:10.19701/j.jzjg.2017.s1.233.

[2] 孙亚哲,高倚山,张建龙,等.PHC桩穿越深厚密实砂层可打性分析及现场试验研究[J].工程地质学报,2015,23(06):1079-1084.DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2015.06.007.

[3] 张广彬.大直径静压管桩在厚层密实砂中的施工技术[J].西部探矿工程,2015,27(04):196-198.

[4] 王绍才.深厚砂层地区预应力管桩方案分析[J].低碳世界,2023,13(10):91-93.DOI:10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2023.10.024.