

软土地区PHC管桩承载力不足的成因分析与对策

王 兴

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: PHC (prestressed high-strength concrete) 管桩凭借其单桩承载力高、施工环保高效、应用范围广、工程造价经济、沉桩质量可靠、耐久性能优异等优点被广泛应用于基础设施建设领域,但PHC管桩静载试验不合格现象屡见不鲜。以东莞软土地区某污水处理厂工程PHC管桩静载试验承载力仅为设计值50%的工程事故为研究对象,通过对设计文件、地勘报告及施工记录进行核查,详细分析静载试验原始数据,系统研究了事故成因并提出了针对性的处理对策和后续改进建议。为类似软土地区PHC管桩工程的设计优化和事故处理提供了重要参考。

关键词: 软土地区;PHC管桩;Q-s曲线;成因分析;事故处理

中图分类号: TU473.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0359-04

Cause Analysis and Countermeasures for Bearing Capacity Deficiency of PHC Pipe Piles in Soft Soil Region

WANG Xing

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: PHC (prestressed high-strength concrete) pipe piles are widely applied in the construction field of infrastructures due to their notable advantages, such as high single-pile bearing capacity, environmentally efficient construction, wide range of applications, economical project cost, reliable pile-driving quality and exceptional durability. However, the phenomenon of PHC pipe piles failing the static load test is not uncommon. Taking the engineering accident in a wastewater treatment plant (WWTP) project in the soft soil area of Dongguan where the static load test bearing capacity of the PHC pipe pile is only 50% of the design value as the research object, through the inspection of design documents, geological exploration reports and construction records, the original data from the static load test are analyzed in detail, the accident causes are systematically studied, and the targeted treatment countermeasures and the follow-up improvement recommendations are proposed, which provide the important references for design optimization and accident treatment of PHC pipe pile projects in similar soft soil regions.

Keywords: soft soil region; PHC pipe pile; Q-s curve; cause analysis; accident treatment

0 引 言

由于预应力高强混凝土管桩(PHC)同时承受桩侧摩阻力和桩端阻力作用,承载力高,可将粉质黏土层、中粗砂层、强风化粉砂岩层、中风化粉砂岩层作为桩基比选持力层^[1]。能够适应各种地质条件的变化^[2],因而适合东莞水乡功能区这样的软土地区^[3]。PHC管桩凭借其单桩承载力高^[4]、施工环保高效、应用范围广、工程造价经济、沉桩质量可靠、耐久性能优异等优点被广泛应用于城市轨道交通、高速公路与桥梁、港口与码头、高层建筑、工业厂房、水利与水电工程、新能源工程等基础设施建设领域^[5]。但

PHC管桩静载试验不合格^[6-8]现象屡见不鲜,本研究从一工程实例分析原因并提出技术处理措施以及后续改进建议。

1 项目背景

某地上常规污水处理厂项目,主要建(构)筑物单体为预处理、生反池、二沉池、深度处理、污泥脱水车间、综合楼等。其中污泥脱水车间、综合楼采用PHC管桩-承台基础^[9],其余单体采用PHC管桩-筏板基础。

根据施工单位施工进度计划安排,综合楼于2025年5月2日—5日完成74根PHC管桩施工,并按设计图纸要求于2025年6月19日对工程桩进行了低应变检测,检测数量不应少于总桩数的20%,且不应少于10根,每个柱下承台检测桩数不应少于1根^[10]

收稿日期: 2025-07-26

作者简介: 王兴(1993—),男,硕士,工程师,从事排水工程结构设计工作。

(共24根)。2025年6月20日,检测单位出具的检测结果显示,全部24根桩桩身完整,为Ⅰ类桩,部分低应变反射波形曲线^[10]见图1。

而后分别于2025年6月27日、7月1日、4日进行了静载试验检测,同一条件下检测数量不应少于桩基分项工程总桩数的1%,且不应少于3根^[10](共3根)。检测单位于2025年6月30日、7月2日、7日出具的静载试验检测初步结果显示,3根桩极限承载力均为850 kN,而设计文件中明确要求单桩竖向抗压承载力极限值为1 700 kN,受检桩的实际承载力仅为设计值的50%,不满足设计要求。综合楼静载试验不合格的3根桩打桩记录及设计参数见表1。

另外,厂区内深度处理、生反池于2025年3月21日—4月29日完成PHC管桩施工,并于2025年5月13日、27日对工程桩进行了低应变检测,检测数量67根。检测单位出具的检测结果显示,全部67根桩桩身完整,为Ⅰ类桩。而后检测单位于2025年6月4日、24日出具的静载试验检测初步结果显示,6根桩极限承载力均满足设计要求。

2 工程地质条件

根据地质勘察报告,位于东莞市西北部的水乡功能区,地处东江冲积而成的东江三角洲平原,其地层主要由第四系全新统冲积、冲洪积层组成,以淤

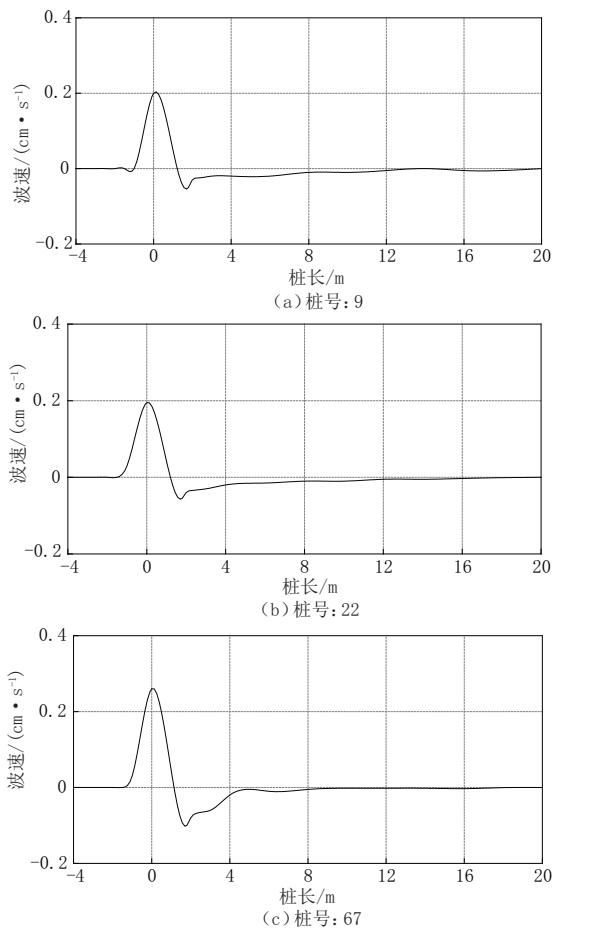


图1 综合楼9#、22#、67#桩低应变反射波形曲线

泥、淤泥质土等软土为主^[11],场地分布的地层见表2。

表1 不合格桩施工记录(静压桩)

桩号	桩径/mm	壁厚/mm	配桩长度/m	持力层	承载力特征值/kN	压桩起止时长/min	焊接自然冷却时间/min	入土深度/m
9#	500	100	12+8	粉质黏土	850	26	8	20.57
22#	500	100	14+6	粉质黏土	850	27	8	20.62
67#	500	100	10+10	粉质黏土	850	24	8	20.66

表2 场地土层分布

序号	土层	厚度/m	液性指数 I_L	压缩模量/MPa	状态	q_{sia} /kPa	q_{pa} /kPa
① ₂	素填土	0.7~3.8	0.71	—	松散	—	—
② ₁	淤泥质土	0.7~8.9	1.19	2.4	流塑~软塑	10	—
② ₂	粉细砂	0.6~8.3	—	12	松散~稍密	10	—
② ₄	粉质黏土	0.6~16.9	0.45	4.2	可塑	30	1 000($L \leq 16$ m) 1 400($L > 16$ m)
② ₅	中粗砂	1.0~6.1	—	12	中密~密实	45	4 000
④ ₁	强风化泥质粉砂岩	0.5~8.7	—	100	软岩	110	4 000
④ ₂	中风化泥质粉砂岩	—	—	—	较软岩~较硬岩	—	—

3 竖向抗压静载试验曲线

3.1 Q-s曲线和s-lgt曲线

针对综合楼进行静载试验检测的3根(9#、22#、67#)PHC管桩,在加载过程中详细记录沉降原始数

据,并进行数据处理分析,得到的Q-s曲线和s-lgt曲线^[10]见图2~图5。

9#、22#、67#PHC管桩加载过程中桩顶沉降量遵循着相同的规律,试验加载到850 kN时,本级沉降量和总沉降量均较小,在加载下一级荷载1 020 kN时,

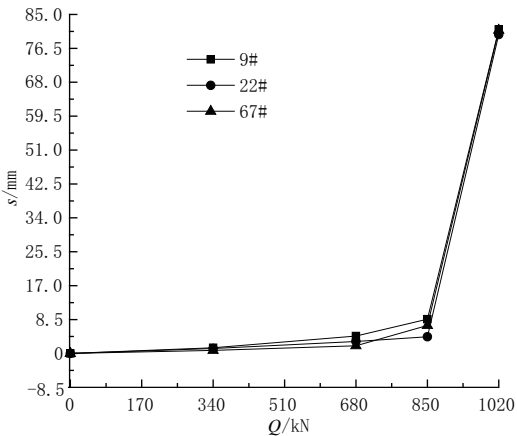


图2 综合楼9#、22#、67#桩 Q-s 曲线

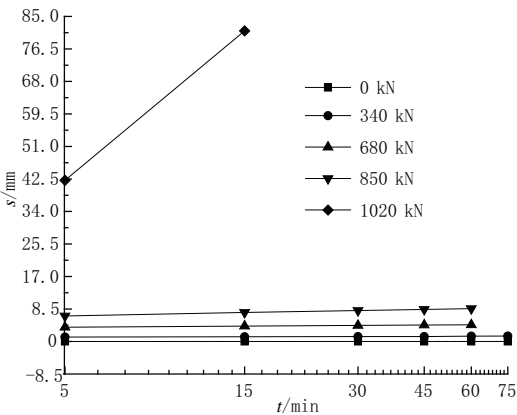


图3 综合楼9#桩 s-lgt 曲线

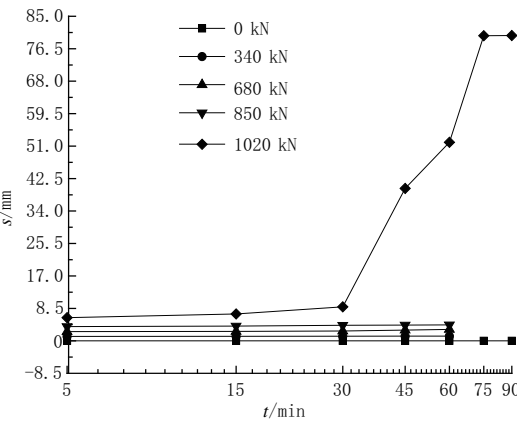


图4 综合楼22#桩 s-lgt 曲线

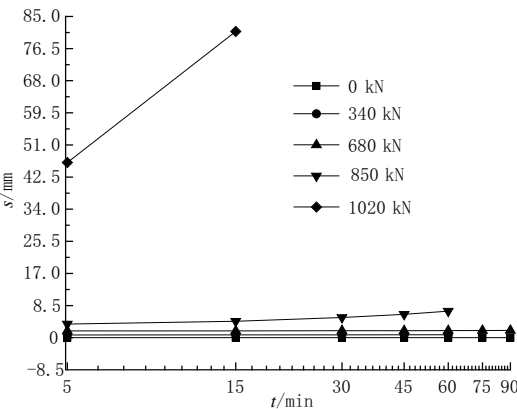


图5 综合楼67#桩 s-lgt 曲线

沉降量开始陡增,本级桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 5 倍,且桩顶总沉降量超过 40 mm,呈现出“陡降型”Q-s 曲线。

3.2 结果分析

通过对上述 Q-s 曲线和 s-lgt 曲线进行分析可以得出,PHC 管桩加载过程中沉降明显分为 2 个阶段,每个阶段的具体情况分述如下。

3.2.1 弹性压缩变形阶段

0~850 kN 加载期间本级沉降量较小,单桩的竖向抗压承载力主要通过部分桩侧摩阻力提供^[12],此时桩端阻力还未参与工作,具体呈现为加载处于该阶段内本级沉降量和总沉降量小,且很快达到稳定标准。

3.2.2 塑性压缩变形阶段

加载荷载达到 1 020 kN 时本级沉降量突然增大,这个阶段内液压千斤顶施加荷载超过总桩侧摩阻力,此时桩端阻力应参与工作^[13],但 Q-s 曲线陡降且 s-lgt 曲线无法达到稳定说明桩侧摩阻力和端阻力未充分发挥承载能力^[10]。

通过上述 2 个阶段的分析可以推断出,加载至 1 020 kN 时沉降量突然增大且无法稳定,是因为 PHC 管桩桩侧土层、桩端持力层未按地勘报告数据充分发挥承载能力。表明综合楼施工区域实际揭露的地层岩土力学参数与地勘报告存在局部差异,属地质条件不确定性风险。

4 原因初步分析

4.1 压桩速率过快

根据打桩记录,综合楼静压桩起止时长普遍 28 min,焊接接桩时间 12 min 左右,焊缝自然冷却时间 8 min,实际压桩时间 8 min,压桩速率达到 2.5 m/min,快于规范规定压桩速率 1~2 m/min (软土地区)^[14]。PHC 管桩按成桩方法分类属于挤土桩,在静压沉桩过程中,桩体贯入土体时使四周的土体结构受到扰动,改变了土体的应力状态,挤土效应十分显著。桩周土为粉质黏土,压桩速率过快,产生的超孔隙水压力来不及消散,造成土体破坏,导致承载力下降。

4.2 持力层粉质黏土存在薄弱层

根据勘察单位提供的静力触探补充勘察资料,持力层所在的粉质黏土层均匀性较差^[15],局部存在软夹层且夹砂。由于施工期间天气降雨较多,粉质黏土层含水量偏高,孔隙水压力消散较慢,导致 PHC 管桩侧阻力和端阻力未能充分发挥,从而降低了单

桩竖向抗压承载力^[16]。对比综合楼旁边深度处理区的PHC管桩静载试验合格的结果,地质条件与勘察成果的不可预见性差异也是导致部分检测桩不合格的原因之一。

4.3 周边环境因素影响

紧贴综合楼的是一条新建道路正在施工,道路路面标高比厂内综合楼现状场地高,附近大型机械施工过程会对浅部土层产生扰动,导致浅部土层岩土力学参数降低,PHC管桩侧阻力和端阻力未按地勘报告数据充分发挥,单桩竖向抗压承载力下降,对静载试验检测结果产生了影响。

5 处理措施及改进建议

鉴于上述情况,经研究分析并综合考虑现场实际情况,为避免影响施工进度,综合楼桩基在现有桩长的基础上进行接桩处理为最优方案。原因有以下3点。

(1)3根静载试验检测桩的实际竖向抗压承载力特征值仅为设计竖向抗压承载力特征值的50%,采用桩侧注浆加固无法准确预估加固后的实际单桩承载力能满足设计要求。

(2)增加筏板基础,考虑桩-土共同作用,鉴于目前桩间距布置和筏板受力,也需要进行补桩,以此来降低单桩依赖度,该方案以综合楼沉降增加为代价,且改变基础形式属于重大设计变更,需要重新审图,这样会严重影响工程进度。而且没有从根本上闭合综合楼静载试验检测不合格事件。

(3)结合补桩方案,扩大原承台尺寸,该方案同样涉及设计变更且没有足够间距实施补桩。

综上所述,考虑原设计桩顶标高近现状地面,接桩处理方便快捷易操作,最终确定为接桩方案。

基于该工程实例问题分析,以后类似工程有如下建议:

(1)对勘察单位:建议加密钻孔(间距不大于15 m)并增加超前钻验证;

(2)对施工单位:严格落实施工工艺专项方案,

重点控制压桩速率和接桩焊缝质量,并在静压桩机退场前进行静载试验检测;

(3)对建设单位:后续项目建议各单体增加“试桩+动态设计”环节,试桩静载试验检测合格后方可进行工程桩的施工;

(4)对设计单位:软土地区慎重选择粉质黏土层作为桩端持力层,建议将中粗砂层、强风化岩层、中风化岩层作为桩端持力层更为稳妥,从根本上增强桩基承载力来对抗不确定性水文条件的影响。也可引入信息化施工与孔隙水压力动态监测技术从源头上规避风险。

参考文献:

- [1] 陈越华. 预应力管桩在不同土层中的应用分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2022, 234(6): 150-152.
- [2] 李多权. 硬黏土地区PHC管桩抗压静载试验异常沉降分析[J]. 安徽建筑, 2019, 26(8): 171-172.
- [3] 苏艳. 预应力管桩在东莞凌屋变电站综合楼工程基础设计与施工中的应用[J]. 岩土工程界, 2003(7): 54-55.
- [4] 张雄水. 软土地区超长PHC管桩承载力加固效果分析[J]. 建筑科学, 2024, 40(7): 42-48.
- [5] 王飞. PHC管桩施工中常见质量问题及防治措施[J]. 安徽建筑, 2019, 26(9): 193-195.
- [6] 李国胜. 管桩施工不合格的处理方法[J]. 建筑结构, 2019, 49(3): 113-119.
- [7] 王兴. 大中型厂站构筑物PHC管桩静载试验沉降异常原因分析及处理措施[J]. 城市道桥与防洪, 2022(12): 193-195.
- [8] 赵振勇, 王利君, 祝志恒. 静载试验在PHC管桩质量控制中的应用[J]. 广东公路交通, 2011(3): 79-81.
- [9] 左阳. 山西省大同市某中学1#办公楼桩基础设计. 北京力学学会第30届学术年会论文集[C]//北京: 北京力学学会, 2024.
- [10] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S].
- [11] 周书东, 张益. 东莞市工程地质特征及常见工程问题[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 78-88.
- [12] 李波, 余建飞. 基于PHC管桩现场静载试验的基桩承载特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 96-102.
- [13] 吕清显, 蒋水兵, 肖昭然, 等. 静压管桩桩端阻力理论解研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 2484-2489.
- [14] JGJ/T 406—2017 预应力混凝土管桩技术标准[S].
- [15] 阙玉萍, 肖亮. 持力层稳定性对管桩竖向承载力设计值的影响[J]. 四川建材, 2023, 49(2): 90-92.
- [16] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].