

软土地区预制管桩施工挤土效应对邻近管线的影响及管控策略

李斐

上海中钱联合基础工程有限公司

DOI:10.32629/bd.v10i1.4594

[摘要] 长三角沿海软土高含水率、低强度,预制管桩静压施工挤土效应易引发土体位移与应力集中,导致邻近管线变形或破坏,影响管网安全运行。本文以某沿海石化热电机组桩基实际工程为依托,结合场区地质水文条件、管桩施工参数及周边地下管线分布特征,剖析软土区域静压管桩挤土效应产生机理、影响范围及主控因素,探究土体挤压位移对邻近给排水、电力通信管线的扰动规律。从施工时序优化、被动防护布设、全过程动态监测三个维度,提出适配厂区受限空间的挤土效应管控措施,以期为提高桩基施工安全性与周边设施保护水平提供工程参考。

[关键词] 软土地区; 预制管桩; 静压施工; 挤土效应; 变形管控

中图分类号: U656.1+14 **文献标识码:** A

Influence of soil squeezing effect of precast pipe pile construction on adjacent pipelines in soft soil area and its control strategy

Fei Li

Shanghai Zhongqian Union Foundation Engineering Co., Ltd

[Abstract] Soft soil along the Yangtze River Delta has high water content and low strength. The squeezing effect of static pressure construction of precast pipe piles can easily lead to soil displacement and stress concentration, which will lead to the deformation or damage of adjacent pipelines and affect the safe operation of the pipeline network. Based on the actual pile foundation project of a thermal power unit in a coastal petrochemical company, combined with the geological and hydrological conditions of the site, the construction parameters of pipe piles and the distribution characteristics of surrounding underground pipelines, this paper analyzes the mechanism, influence range and main control factors of soil squeezing effect of static pressure pipe piles in soft soil area, and explores the disturbance law of soil squeezing displacement to adjacent water supply and drainage and power communication pipelines. From the three dimensions of construction time sequence optimization, passive protection layout and dynamic monitoring of the whole process, the control measures of soil squeezing effect suitable for the limited space in the factory area are put forward, so as to provide engineering reference for improving the safety of pile foundation construction and the protection level of surrounding facilities.

[Key words] soft soil area; Precast pipe pile; Static pressure construction; Soil squeezing effect; Deformation control

1 引言

软土地区的特性是压缩性大、强度低、渗透系数小等,在预制管桩沉桩过程中会产生较大的挤土现象,从而引起周围土体发生侧向挤动、孔压上升以及地面抬升等现象。在石化、电力及市政工程等地下管网密集区,由于挤土作用会使得邻近管线出现下沉、变形甚至开裂的现象,影响既有设施的安全运行。由于近年来城市建设中工业园区密布,复杂环境下的桩基施工对于周边管道的保护也提出更高的要求。目前,针对预制管桩施工

挤土效应的研究多集中于地层变形规律与单一控制措施,对软土地区邻近管线全过程协同管控研究相对不足。基于此,本文将结合某石化热电机组桩基工程实例,分析软土中预制管桩施工挤土效应机理及影响因素,研究邻近管线保护与动态控制措施,构建适用于软土复杂环境的施工管控策略。

2 石化热电机组桩基工程概况

2.1 工程地质与水文条件

某石化热电机组清洁提效改造项目桩基工程场地原始地貌

为沿海滩涂经围海造陆形成，归属湖沼平原Ⅰ2地质分区，勘探深度55.45m范围内地层均为第四纪松散沉积物，自上而下依次分布杂填土、灰色砂质粉土、褐灰色粉质黏土、灰色淤泥质粉质黏土、灰色粉质黏土、粘质粉土及灰色粉砂，软弱土层分布连续且厚度大，整体呈现典型长三角滨海软土工程地质特征。场地平整统一标高为4.200m，不同构筑物单体基准标高存在差异化设置，其中综合楼基准绝对标高4.100m，烟囱及锅炉区域基准绝对标高4.500m。场区地下水以浅层潜水为主，勘察期间地下水水位埋深区间为0.32m至2.35m，水位受大气降水季节性调控，年水位变幅可达1.0m。场地浅部地层以弱透水黏性土为主，地层水平渗透性能远高于垂直渗透性能，地表水与浅层潜水水力联系微弱，桩基施工期间孔壁稳定性主要受潜水水位及淤泥质软土流变特性控制，软土固结周期长、排水滞后，进一步放大预制管桩挤土侧向位移效应。

2.2 预制管桩设计参数与施工工艺

本工程烟囱、锅炉及变电所等构筑物基础采用PHC-600(110)AB型预应力高强混凝土管桩，单节桩长15m，两节拼接总桩长31m，总计施工110根工程桩，桩顶设计相对标高-3.900m。桩基施工采用DH558履带式打桩机搭配10.3导杆式柴油锤开展锤击沉桩施工，施工控制原则以桩端设计标高控制为主、贯入度校核为辅，具体施工流程如图1所示。

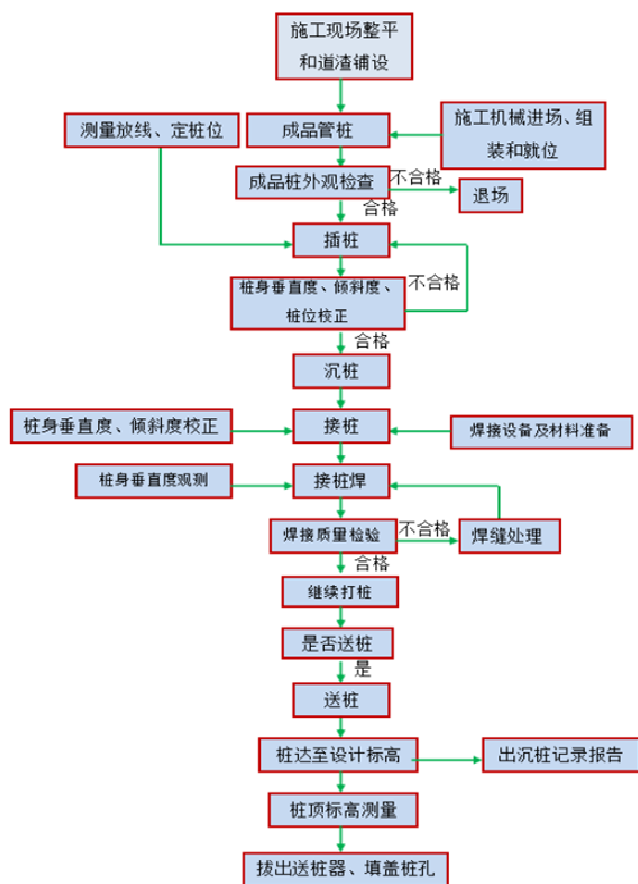


图1 预制钢筋混凝土管桩施工工艺流程

施工过程中严格管控沉桩施工指标，单根桩总锤击数控制在2000击以内，最后一米沉桩锤击数不超过250击，全程遵循重锤轻击施工原则。管桩接桩采用二氧化碳气体保护焊，焊缝执行二级焊缝质量标准，焊接完成后自然冷却时长不低于8min，严禁冷水强制降温^[1]。结合群桩挤土叠加效应，圆形圈层布置桩基采用由内圈向外圈逐圈施打的施工顺序，规避密集群桩同步施工引发的土体应力叠加问题，从施工时序层面初步削弱挤土效应影响。

2.3 施工区域邻近管线环境特征

本次管桩施工区域坐落于石化生产厂区核心地带，施工场区地下管线错综复杂，无冗余安全避让空间，施工边界距离既有地下管线最小净距仅3.2m。场区地下管线涵盖高压电力电缆、生产循环水输送管道、工艺物料输送管道、通信光缆四类核心管线，管线埋设深度区间为1.2m~3.8m，管线服役年限跨度8~22年，老旧管线接口密封性能衰减，抗侧向土体变形能力极差。管线整体沿厂区道路及装置边界呈网状排布，与桩基施工区域走向平行及交叉分布，锤击沉桩产生的连续侧向挤压力、地表隆起变形可直接作用于管线周边覆土，极易引发管线竖向沉降、水平侧向位移及接口剪切变形。同时项目采用边生产边施工模式，管线承担厂区机组生产供电、供水及物料输送功能，无停输检修窗口期，对桩基施工引发的土体变形控制精度要求远高于普通市政及房建桩基工程，管线水平位移控制阈值需低于15mm，竖向沉降控制阈值需低于10mm。

3 软土中预制管桩施工挤土效应机理分析

3.1 挤土效应的成因与表现形式

该石化厂区地处滨海深厚软土区域，土体结构性差、排水固结缓慢，锤击式预制管桩属于闭口挤土桩，沉桩过程中桩体直接排挤原位土体，无泥浆护壁与土体外排通道，原位土体被迫发生侧向挤压、竖向隆起与深层压缩变形，土体原有应力场与渗流场彻底重构。相较于普通市政场地，本场地淤泥质粉质黏土压缩模量仅0.51MPa，固结渗透系数低至 $8.06 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ ，土体排水路径长、孔隙水压力消散速度极慢，超孔隙水压力长期滞留土层内部，进一步加剧土体塑性变形，持续扩大周边地下管线的附加变形量。挤土效应核心成因分为空间土体置换与孔隙水压力骤增两类。闭口管桩贯入地层时，桩身体积直接置换原位土体，单根31m长PHC600管桩置换土体体积可达 8.7m^3 ，群桩施工累计土体置换量大幅提升，周边土体被迫向四周及上方产生塑性流动。如果大量的二氧化硅与三氧化二铝存在黏土矿物质，一旦与水泥进行接触，即可与水泥水化产生大量的钙离子进行反应，从而形成不溶于水且具有良好稳定性的化合物。这些化合物随着时间的推移可在逐渐硬化的同时，有效对水分形成阻挡的作用，从而充分提升水泥土的强度，形成具有良好硬度与稳定性的水泥硬化土。同时沉桩锤击荷载持续扰动土层，土体孔隙快速压缩，场地浅层黏性土渗透性极差，孔隙水无法及时排出，短时间内形成超高超孔隙水压力，有效土体应力大幅降低，土体抗剪强度衰减幅度最高可达42%，土层处于暂时液化流动状态^[2]。

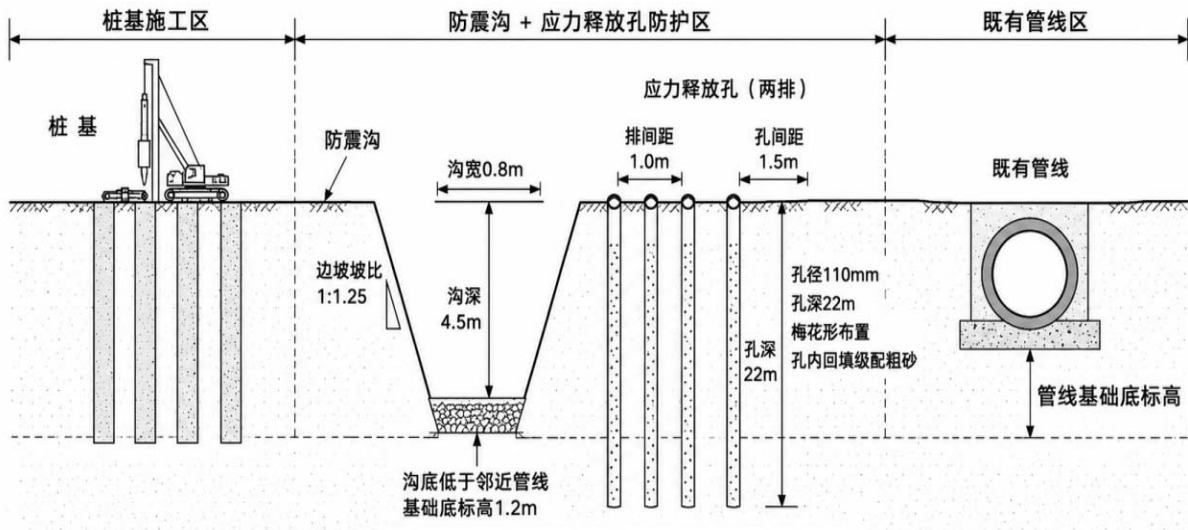


图2 “防震沟+应力释放孔”联合防护体系

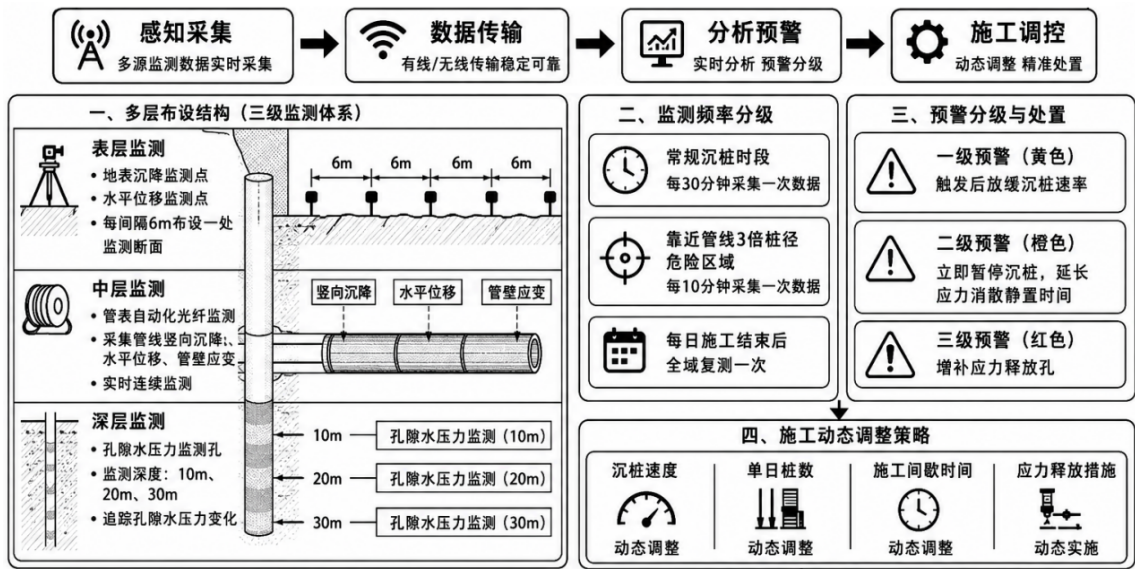


图3 施工全过程监测框架

结合现场监测数据，挤土效应主要存在三类表现形式，一是地表竖向隆起，靠近桩区中心地表最大隆起量可达28mm，由桩区中心向四周逐步衰减；二是土体侧向水平位移，桩周三米范围内土体水平位移最为显著，直接对浅层地下管线产生剪切推力；三是深层土体竖向压缩，深层软土持续固结沉降，引发管线不均匀沉降。三类变形共同作用，造成管线接口错位、管壁附加弯曲应力超标，威胁管网运行安全。

3.2 挤土效应的影响范围与主要因素

结合本工程现场监测结果，预制管桩挤土效应可划分为塑性扰动区、弹性影响区与无影响区，塑性扰动区半径为一倍桩径范围，该区域土体结构完全破坏，永久塑性变形不可恢复；弹性影响区半径为1~4倍桩径，土体以弹性变形为主，施工结束后可

部分回弹；四倍桩径以外区域土体基本不受沉桩施工扰动。结合现场工况，影响挤土效应强弱的核心因素分为四类，第一类为土层物理力学参数，场地淤泥质粉质黏土黏聚力仅13kPa，土体抗扰动能力弱，挤土变形远大于粉砂层；第二类为桩基施工参数，单日沉桩数量超过8根时，土体应力叠加效应明显，孔隙水压力消散不充分；第三类为桩体排布形式，本工程密集群桩区域挤土效应是单桩施工的2.3倍；第四类为施工时序，由外向内沉桩会大幅放大土体累积挤压作用，加剧管线变形。精准厘清上述影响因素，可为后续管线防护措施制定提供理论依据。

4 邻近管线影响的管控策略与措施

4.1 基于施工顺序优化的源头控制

结合该石化厂区深厚软土特性、群桩密集施工工况以及地

下管线近距离分布的施工难点,遵循源头减扰、被动防护、动态调控三级防控逻辑,针对性制定适配厂区不停产施工要求的挤土效应管控体系。源头管控以规避土体应力叠加、降低累积挤土变形为核心,依托群桩空间排布规律优化沉桩时序。本工程桩基呈圆形圈层分布,统一采用由内向外、由远及近的沉桩顺序,优先施工远离管线一侧桩基,逐步向管线近端推进,避免近端先行沉桩形成封闭应力屏障,阻断土体应力向外释放通道^[3]。严格控制单日沉桩施工总量,单日最大沉桩数量限定为6根,相比单日8根以上施工工况,可降低土体超孔隙水压力峰值27%。相邻两根桩基施工间隔不低于45分钟,预留孔隙水压力自然消散时间,适配本场地软土极低的渗透固结特性。同时规避夜间集中连续施工,减少持续性锤击扰动引发的土体塑性累积变形,从施工源头降低土体侧向位移与地表隆起幅度,从根源削减挤土效应对周边管线的剪切扰动。

4.2 防震沟与应力释放孔等专项防护措施

针对本工程滨海软土渗透性低、超孔隙水压力消散缓慢及近距离地下管线对变形敏感的特点,在桩基施工区与既有管线之间设置“防震沟+应力释放孔”联合防护体系,通过隔断土体位移传递路径与加速孔压消散相结合的方式控制沉桩挤土效应,如图2所示。

其中,防震沟沿管线走向连续布设于桩基区与管线之间,靠近桩基侧设置,形成贯通式隔离屏障,沟深4.5 m、宽0.8 m,沟底低于邻近管线基础底标高1.2 m,以彻底切断浅层软土滑移面和侧向变形传递通道;沟体采用放坡开挖,边坡坡比为1:1.25,局部软弱地段铺设土工布防护,沟内保留空沟或填充碎石与粗砂,为挤压变形提供释放空间,从而削弱振动能量和水平位移向管线方向传播。在防震沟靠近桩基一侧同步布设两排竖向应力释放孔,孔径110 mm、孔深22 m,穿透主要淤泥质软土层,孔间距1.5 m、排间距1.0 m,采用梅花形布置,孔内回填级配粗砂形成连续排水通道^[4]。沉桩过程中产生的超孔隙水压力可沿释放孔快速排散,同时为受挤压土体提供竖向变形空间,有效降低水平挤压力和地表隆起。两种措施协同作用,可显著削弱软土挤土效应,降低管线水平位移和不均匀沉降风险,提高邻近既有管线的施工安全性与稳定性。

4.3 施工全过程监测与动态调整

为了实现沉桩全周期数据闭环管控,搭建感知采集、数据传输、分析预警、施工调控一体化全过程动态监测框架,如图3所示。

监测体系分为三层布设结构,表层布设地表沉降监测点与

水平位移监测点,每间隔6m布设一处监测断面;中层针对管线布设自动化光纤监测点位,实时采集管线竖向沉降、水平位移及管壁应变数据;深层布设孔隙水压力监测孔,监测深度分别为10m、20m、30m,追踪不同深度土层孔隙水压力变化规律。设置3个监测频次等级,在正常沉桩过程中,按照半小时为一个周期进行监测;在距离管线路径三倍桩直径范围内的危险区,按十分钟为一个周期进行监测;每天结束前进行全面检查^[5]。同时设置三个警戒级别:当进入第一级警戒状态时,减缓锤击速度,当进入第二级警戒状态时,停止锤击,并适当增加停锤观察等待期,三级预警增加释能孔。根据在线监测结果适时调整打桩速率、日成桩量以及暂停作业的时间长短,做到对挤土效应的预测和及时应对控制,确保打桩施工和管线运营双安全。

5 结语

本文以某石化热机组桩基工程为例,研究了在滨海软土地基条件下,锤击预制管桩施工的挤土效应规律以及临近管线的安全控制技术措施。深厚软土低渗透性、高流变性将增大沉桩过程中的超孔隙水压上升量,并导致较大的土体水平位移及地面抬升变形,在距离较近的地下管线容易产生差异沉降和剪切破坏等问题。采取合理确定沉桩次序、设置防震沟及应力释放孔、采用三层次全周期实时监控的方法能有效地减少挤土效应的影响,在保证质量的前提下满足管线位移的要求。未来可结合数值仿真与智能监测技术,构建自动化挤土变形预测模型,进一步完善软土桩基施工风险智能防控体系。

[参考文献]

- [1]张军菲,杨思凡,郑昆鹏.软土地基预制桩沉桩对邻桩的扰动研究[J].江西建材,2024,(9):248-251.
- [2]黄维鹏.软土地基预制管桩施工垂直度控制技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(24):52-54.
- [3]黄楷锐.软土地基处理中水泥搅拌桩施工技术的应用[J].工程技术研究,2025,10(22):68-70.
- [4]王高生.探析深厚软土地基管桩施工的质量风险及应对措施[J].中国住宅设施,2025,(8):236-238.
- [5]庞永贞.路桥梁工程中软土地基水泥粉喷桩施工技术[J].中国水泥,2025,(4):101-104.

作者简介:

李斐,男,汉族,上海人,身份证号码:430304198209152290,单位名称:上海中钱联合基础工程有限公司,研究方向:工程施工管理,本科,职称:中级工程师。