

杭州软土地区某桩锚支护基坑的监测分析

胡宇飞

[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: 以杭州地区某地下式污水处理厂为背景,结合基坑变形监测数据,探讨了旋喷扩大头锚索+排桩支护方案在软土地区的应用可行性。结论包括:桩锚支护形式在软土地区大面积基坑中能有效控制基坑的变形,减小周边环境的影响,地下式污水处理厂基坑采用扩大头锚索加排桩支护方案是经济可靠的。基坑的桩身侧向位移变形曲线呈“鼓肚型”,围护桩的顶部位移较小,最大水平位移位于开挖面附近。基坑实施期间,应注意锚索在高水位、砂质土层中的施工影响,并可通过局部降水等措施减小锚索施工影响。

关键词: 软土地区;地下式污水处理厂;桩锚支护;扩大头锚索;基坑变形监测

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0378-05

Monitoring and Analysis of a Foundation Pit Supported by Piles and Anchors in Soft Soil Area of Hangzhou

HU Yufei

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

Abstract: Taking an underground wastewater treatment plant (WWTP) in Hangzhou as the research background, and combined with deformation monitoring data of foundation pit, the application feasibility of the rotary jet grouting expanded head anchor cable + row pile support scheme in soft soil areas is discussed. The research conclusions are that the pile-anchor support form can effectively control the deformation of large-area foundation pits in soft soil areas and reduce the impact on the surrounding environment. The scheme of using expanded head anchor cables plus row pile support for the foundation pit of underground WWTP is economical and reliable. The lateral displacement deformation curve of the foundation pit pile presents a “bulging shape”, where the top displacement of the retaining pile is relatively small, and the maximum horizontal displacement occurs near the excavation surface. During the implementation of the foundation pit, the attention should be paid to the construction impact of anchor cables in high-water-level and sandy soil layers, and the measures such as local dewatering can be taken to reduce the construction impact.

Keywords: soft soil areas; underground wastewater treatment plant (WWTP); pile-anchor support; expanded head anchor cable; foundation pit deformation monitoring

0 引言

随着基坑工程的不断发展,基坑的设计理论与施工技术取得了显著的进步与成就,特别是随着岩土施工机械水平的提高,基坑支护的类型也变得多种多样。20世纪80年代,桩锚支护开始加速发展,它拥有节约工期、造价、控制变形效果好等特点,四十年来桩锚支护的设计、施工技术逐步完善,现在已成为一种十分成熟的支护工艺。

在桩锚基坑施工方面,国内学者已进行了探索和讨论。梁孟孟^[1]结合昆明螺蛳湾中心基坑、陈俊

杰^[2]结合北京某基坑工程、郭力群^[3]结合深圳市某相邻基坑工程、张来安^[4]结合兰州某基坑工程,宋建学^[5]结合郑州某基坑工程,对我国各地大型桩锚基坑施工进行了深入介绍,并对施工过程中的问题进行了总结,部分施工案例还分析了第三方监测数据,验证了桩锚支护技术在我国辽阔大地上广泛的适用性。桩锚支护技术的使用效果很大程度上取决于锚索与土体间的黏结强度,对施工工艺要求较高,因而具有一定危险性,国内外也发生过较多起桩锚支护失效的事故。其中,国内以广州海珠城广场基坑工程^[6]坍塌事故影响最大,该事故造成直接经济损失超过两亿元,间接影响难以计量。庄少煌^[7]也结合珠海某基坑险情,王飞飞^[8]结合邯郸市武安某基坑事故对桩锚基坑事故进行了总结分析,他们均指出

收稿日期: 2025-12-01

作者简介: 胡宇飞(1993—),男,硕士,工程师,从事排水结构设计工作。

地下水对桩锚基坑安全有着较大影响,且应重视基坑信息化施工。程雪松^[9]通过试验研究了基坑超载触发锚杆连续破坏的机理,谭鑫^[10]结合监测和数值分析,分析了锚索预应力的传递对周边环境的影响。

本文以杭州地区某地下式污水处理厂为背景,结合监测数据,讨论了旋喷扩大头锚索+排桩支护方案在软土地区的适用性。目前,污水处理厂采用地埋式方案是一个趋势,但仍面临一些问题^[11-14],其中就有基坑工程对整体结构造价、工期影响很大^[14-15],而地埋式污水处理厂基坑工程与普通基坑相比,有其自身的特殊性,因此有必要对这一类型基坑的设计施工展开进一步研究。

1 工程概况

1.1 工程背景

本项目为杭州地区的某地下式污水处理厂深基坑,基坑整体为“L”形,平面尺寸约 347.4 m×292.7 m,总开挖面积约 80 000 m²,总周长 1 200 m。

周边环境见图 1,东侧和东南侧为现状建筑物,其中,东侧建筑物距离坑边 11~58 m;南侧和北侧为现状道路;西侧为现状农田。

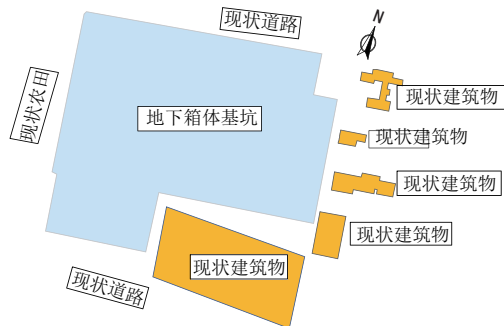


图 1 基坑周边环境图

基坑各个区域的开挖深度汇总表 1。

表 1 各区域开挖深度汇总表			
分区名称	基底标高	开挖深度	局部深坑
预处理区	0.800	4.7	9.8
生物反应池	-4.600	10.1	—
二沉池	-5.400	10.9	14.6
高效沉淀池	-1.950	7.45	10.3
出水泵房	-2.450	7.95	10.6

1.2 工程地质及水文条件

基坑所在场地属于冲海积平原地貌,地形平缓。地层浅部以粉土、粉砂为主,力学性能较好,渗透系数较高;地层浅中部为淤泥质土,呈流塑状,力学性能较差。

基坑开挖范围内有影响的土体主要为①耕土、

②₁层砂质粉土、②₂层砂质粉土、②₃层砂质粉土、②₄层粉砂夹砂质粉土、③₁层淤泥质黏土、③₂层淤泥质粉质黏土、⑤₁层粉质黏土,各土层的岩土参数值见表 2。

表 2 主要土层的岩土参数值

层号	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	土体与锚固体黏结强度特征值 F_{rb}/kPa
①	18	(15)	(10)	—
② ₁	18.21	9	23	36
② ₂	18.65	7	26	42
② ₃	18.43	8	24	38
② ₄	18.83	5	28	52
③ ₁	17	12	9	12
③ ₂	17.18	15.8	13.2	—
⑤ ₁	17.57	17.6	14.5	—

2 基坑方案介绍

结合地质条件、周边环境和主体结构情况,可将本基坑的特点归纳如下:(1)基坑开挖面积大:总开挖面积约 80 000 m²; (2)基坑开挖深度深,深度变化多:不同区域开挖深度为 4.7~14.6 m,存在较多坑内落差部位; (3)周边环境复杂,保护要求高:基坑与原污水厂厂房及办公建筑距离较近,周边紧邻市政道路、市政管线、建(构)筑物等保护对象; (4)主体结构特殊复杂:拟建地下箱体下层水池部分区域无中层楼板,水池内部隔墙众多,分布复杂; (5)地质条件特殊:场地上覆较厚的砂质粉土层,基坑开挖面附近存在深厚的淤泥质土层,属于典型软土地区。

基坑设计采用旋喷扩大头锚索+围护桩方案,通过加大锚固段的直径,有效缩短锚索长度,充分利用粉土和砂土层的黏结强度,支护示意图见图 2。

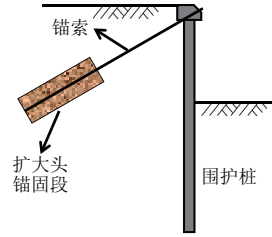


图 2 旋喷扩大头锚索+排桩支护示意图

基坑平面布置见图 3,以生物反应池区域西侧基坑断面为例,该侧基坑开挖深度为 10.1 m。基坑上部设置 3 m 高放坡,放坡边缘设置疏干降水井,将坑外水位降低到坡脚以下。下部采用 $\phi 800@1000$ 钻孔灌注桩围护,围护桩外侧设置三轴搅拌桩止水帷幕。水平方向设置 3 道旋喷搅拌加劲锚索,锚索扩大端直径 0.4 m,锚固段长度均为 8 m,锚索水平间距 2 m。

坑底设置5 m×4 m三轴搅拌桩坑底加固。生物反应池区域西侧基坑断面见图4,预应力可回收锚索照片见图5。

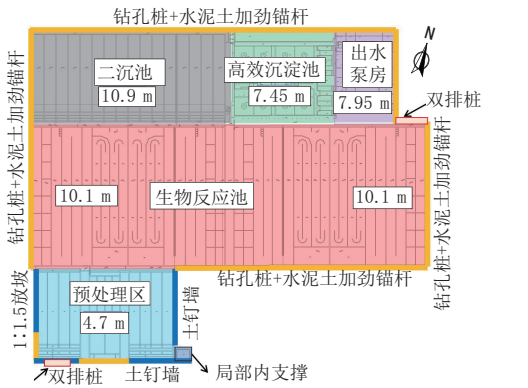


图3 基坑围护平面示意图(单位:mm)

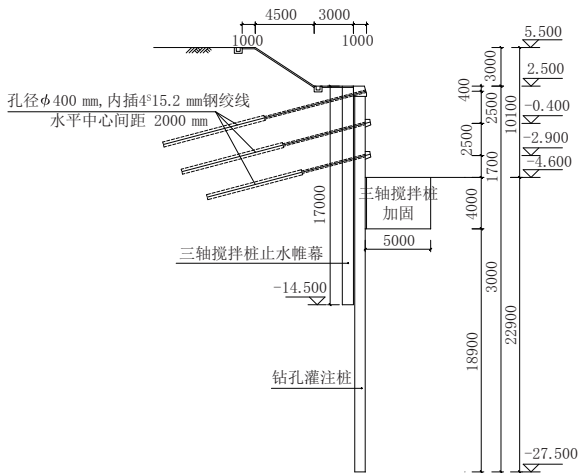


图4 生物反应池区域西侧基坑断面(单位:mm)



图5 预应力可回收锚索照片

3 监测点布置和施工进度

3.1 监测点布置

本文主要对采用桩锚支护形式的生物反应池区域和二沉池区域的基坑监测结果进行讨论。基坑主要监测点布置见图6。CX1~59为围护桩测斜监测点,D1~D25为地面沉降监测点。

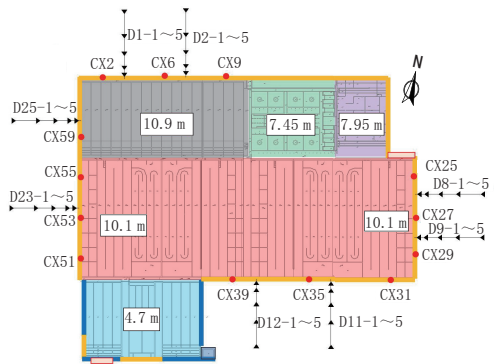


图6 基坑监测点布置图

3.2 施工进度

本项目自2021年初开始实施上部放坡开挖,至2021年12月大部分区域开挖到底。施工现场根据需要进行分区开挖施工,因此基坑区域实际开挖到底的时间相差较大。基坑开挖至坑底时的情况见图7。



图7 基坑开挖照片

4 监测数据

基坑开挖到坑底时,各边围护桩测斜最终结果见图8。需要说明的是,围护桩测斜监测开始时间是在上部放坡区域开挖完成后开始的,因此忽略了放坡开挖引起的围护桩变形。

基坑西侧围护桩最大水平位移约33 mm,一级基坑的变形控制要求为0.2%~0.5% $H^{[17]}$ (H 为开挖深度),该侧围护桩变形在控制范围之内。类似的,基坑北侧及南侧围护桩最大水平位移分别为33.5 mm和33.7 mm,均满足规范要求。同时,从围护桩测斜曲线可以看出,由于锚索拉拽作用,桩身位移曲线呈现鼓肚型。围护桩顶部位移较小,最大水平位移位于开挖面附近,即桩身深度7 m左右。

基坑东侧围护桩最大水平位移为74 mm(测点CX27),超过报警值。东侧基坑围护桩测斜最大值随开挖施工过程的变化见图9,可以看出,在2021年7月9日基坑变形发生了突变,当日围护桩水平位移增量超过30 mm。此时,基坑第2道锚索施工完成,正在进行第3次开挖。基坑变形突变后,施工单位立

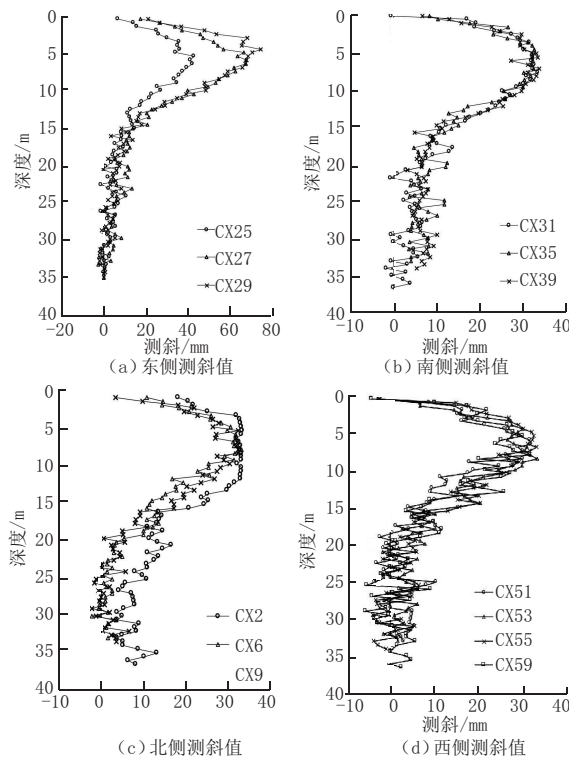


图 8 基坑测斜监测值

即对现场进行了回填处理,通过在第 2 道支撑位置增加锚索,局部增加角撑,并在坑外补设降水井等措施下,顺利完成基坑东侧开挖施工。

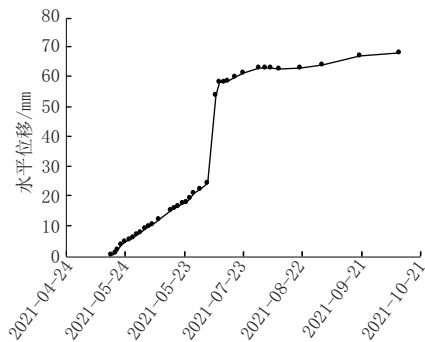


图 9 基坑东侧 CX27 最大水平位移变化

基坑东侧地面沉降随时间变化见图 10,地面沉降在放坡开挖时开始监测,在事故发生之前,坑外土体已有比较大的沉降变形。

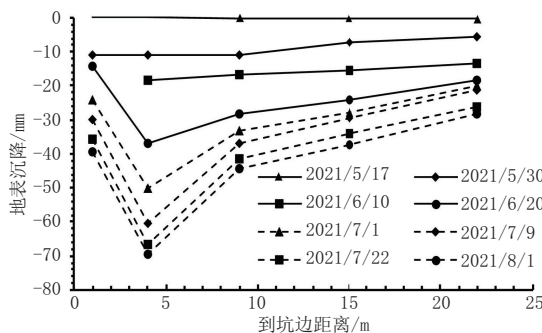


图 10 基坑东侧地面沉降随时间变化情况

虽然基坑东侧围护结构及地面产生了比较大的变形,但监测结果显示,现状厂区内建构筑物变形均在可控范围。距离基坑边缘最近的污泥焚烧厂的基础最大沉降为 8 mm,未超出保护要求限值。

除基坑东侧外,其余各边的坑外地表沉降见图 11。其中,基坑西侧与南侧坑外最大沉降 35~40 mm,可以看到,远离基坑边缘的测点仍有 30 mm 的沉降。一方面,本工程基坑规模很大,开挖深度不变时,大面积基坑开挖的坑外沉降影响范围更大。另一方面,放坡段的开放降水也对坑外土体沉降有一定影响。基坑北侧是本项目的主要施工道路,最大沉降值超过 70 mm,明显大于南侧与西侧的变形值。

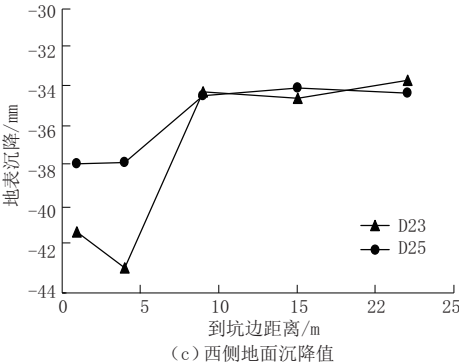
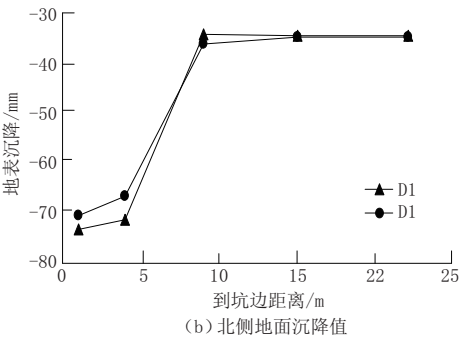
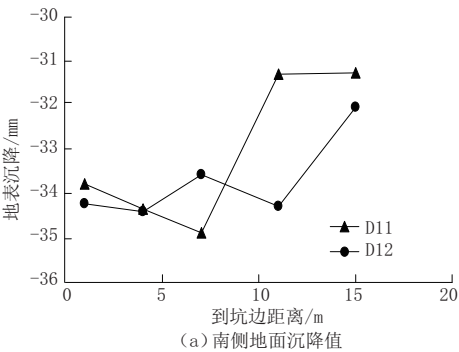


图 11 基坑坑外地表沉降监测值

5 实测值与理论计算值对比

基坑实测值和理论计算值的对比见表 3 和表 4。理论值采用理正深基坑软件,通过竖向弹性地基梁法计算,土的 c 、 φ 值均采用固结快剪指标,计算中考虑 20 kPa 的施工超载。

表3 围护桩测斜值对比表

位置	开挖深度/m	实测值/mm	理论计算值/mm	差值百分比
东侧	10.1	74	22.61	227.3%
南侧	10.1	33.7	22.6	49.1%
北侧	10.9	33.5	22.67	47.8%
西侧	10.1	33	19.83	66.4%

表4 地面沉降值对比表

位置	开挖深度/m	实测值/mm	理论计算值/mm	差值百分比
东侧	10.1	69.6	24	190.0%
南侧	10.1	34.9	24	45.4%
北侧	10.9	73.4	24	205.8%
西侧	10.1	42.7	24	77.9%

从表3和表4可以看出,南侧和西侧的围护桩测斜和地面沉降实测值超过计算值45%~78%,但未达到监测报警值。北侧的围护桩测斜值虽未达到监测报警值,但地面沉降值远超计算值。东侧的围护桩测斜和地面沉降值与计算值均有显著差距,且达到监测报警值。

6 监测报警原因分析

根据分析,基坑东侧地面沉降较大和围护桩水平位移突变的原因可能有以下几项:

(1)该侧原设计未考虑作为施工通道,现场为施工便利,将该侧放坡坡度由1:1.5调整为1:0.5,并增加土钉。重型车辆荷载导致坑边沉降变形显著。

(2)该侧基坑外邻近现状厂区,为避免边坡降水对厂区建筑物影响,在边坡外侧设置了1排三轴搅拌桩止水帷幕。实际施工时,由于该侧原有1条供能管道未及时搬迁,施工方将边坡顶部止水帷幕及降水井均移至贴近放坡顶部的位置,见图12。

这项调整导致坑外降水井只能降低放坡坡面范围地下水。从图12可以看出,原方案中,锚索锚固段基本位于降水范围内,而调整后,锚索锚固段完全位于降水范围外。实际施工时发现,由于地下水位较高,第2和第3道锚索施工时,成孔带出的泥沙量显著大于顶部锚索施工时。结合当地施工经验,锚索施工可能使坑外土体产生了明显的空洞或松动区,叠加坡顶车辆荷载等因素,导致地面产生较大沉降。同时,由于土体空洞或松动区的存在,也为后来基坑变形发生突变埋下伏笔。

(3)根据现场调查发现,该侧基坑边缘处有1条废弃管道及几处检查井,因未及时填埋或挖除,在雨季时管道内充满雨水,大量渗入基坑外,对基坑变形有一定影响。

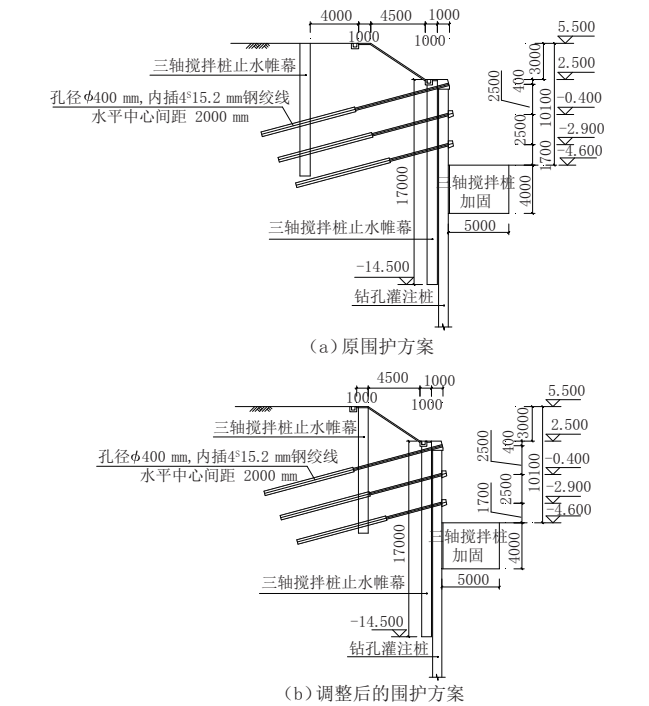


图12 东侧围护方案调整

(4)基坑变形发展时间正处于夏季,曾有多台风影响杭州地区,降雨量大,同时该侧基坑排水不畅,也是导致变形过大的原因之一。

(5)基坑的测斜值突变时,现场基坑施工单位未按要求进行分层分块开挖,在第2道锚索施工完成,第3道锚索尚未施工时就直接开挖到底,造成第2道锚索部分失效。

7 结论和建议

本文通过杭州地区某地下式污水处理厂深基坑的变形监测数据,对桩锚支护结构进行讨论,得到了以下结论:

(1)桩锚支护形式在软土地区大面积基坑中能有效控制基坑的变形,减小周边环境影晌,地下式污水处理厂基坑采用扩大头锚索加排桩支护方案是经济可靠的。

(2)基坑的桩身侧向位移变形曲线呈“鼓肚型”,围护桩的顶部位移较小,最大水平位移位于开挖面附近。

(3)基坑实施期间,应注意锚索在高水位、砂质土层中的施工影响,并可通过局部降水等措施减小锚索施工影响。

参考文献:
[1] 梁孟孟,唐明亮,梅轲.临近超高层建筑超大深基坑桩锚+内支撑与结构一体化施工技术[J].施工技术,2017,46(20):34-37.
[2] 陈俊杰,白少华.超深基坑桩锚支护结构技术创新与工程实践[J].施工技术,2020,49(13):84-87.

(下转第405页)