

污水厂氧化沟基桩倾斜原因分析及加固处理

王玉华, 汤锦锋, 汪健

(中机国际工程设计研究院有限责任公司 华东分院, 江苏 南京 210023)

摘要: 某污水处理厂氧化沟桩基施工结束后,在氧化沟北侧进行了管道开挖施工。因管道施工未对原氧化沟基桩采取保护措施,在氧化沟区域开挖至设计标高时,发现桩基部分区域桩头发生了倾斜。由于目前基桩倾斜加固处理缺乏相关的工程经验和理论,在处理时较为复杂。结合实际工程,利用传统计算与有限元软件 Abaqus 建立桩土模型对基桩倾斜进行了损伤分析与研究,最终确定对偏位较小基桩进行灌芯加固,对偏位较大基桩采用树根桩进行补桩处理。经检测证明,处理后的桩基符合设计要求,同时氧化沟后期运行监测结果良好,为今后类似工程问题的处理提供了参考及理论依据。

关键词: 氧化沟; 倾斜基桩; 加固处理

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)22-0071-06

Reason Analysis and Reinforcement Treatment of Inclined Pile in Oxidation Ditch of WWTP

WANG Yu-hua, TANG Jin-feng, WANG Jian

(EastChina Branch, China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210023, China)

Abstract: After the completion of pile foundation construction of oxidation ditch in a WWTP, pipeline excavation was carried out on the north side of the oxidation ditch. Since there was no protective measure for pile foundation in pipeline construction, the pile foundation was inclined when the oxidation ditch area was excavated to design elevation. Due to the lack of relevant construction experience and theory for reinforcement of the inclined pile, it was more complicated to deal with pile inclination situation. In this paper, the traditional calculation and finite element software Abaqus were both used to analyze the damage of pile slope. It was finally determined that the small offset pile was reinforced with core, and the large deviation pile was treated with root pile. The test results showed that the treated pile foundation could meet the design requirements, and the monitoring results of the later operation of the oxidation ditch were good. It could provide reference and theoretical research basis for similar project problems in the future.

Key words: oxidation ditch; pile inclination; reinforcement treatment

1 工程概况

某污水处理厂规模为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中氧化沟平面尺寸约 $118.15 \text{ m} \times 33.90 \text{ m}$,总高度为 7.45 m ,地面以上 2.45 m ,地面以下 5 m ,采用现浇钢筋

混凝土池体结构。因长度方向超长,设计将其沿长度方向分为四个区格,区格间底板采用诱导缝连接。氧化沟底板下基础设计采用 $\varnothing 400 \text{ mm}$ 预应力混凝土抗拔管桩,布置间距约 $2.00 \text{ m} \times 2.00 \text{ m}$,总桩数

为1 136根,具体布置见图1。



图1 氧化沟底部平面布置

Fig. 1 Layout of oxidation ditch

桩基施工结束后,在氧化沟北侧(三、四区格处)进行了管道开挖施工,管道沟槽深度约4.5 m,与氧化沟池体底板持平。管道施工结束后,对水池区域进行开挖,开挖至设计标高时,发现区格三和区格四交界处大片区域桩头向北侧倾斜,且越靠近北侧桩基倾斜越大。

由于持力层埋深变化,区格三和区格四区域桩长分别为18 m和21 m。

2 工程地质情况

根据地勘报告,氧化沟底板下土层自上而下描述如下:

②-2层淤泥质粉质黏土:灰色,流塑,夹流塑~软塑状态粉质黏土,不均匀,高压缩性,干强度低,韧性低。

③-1层粉质黏土:褐黄色,硬塑,夹可塑状态土,不均匀,中压缩性,干强度中等,韧性低,土切面光滑具光泽,该层在场区局部缺失。

③-1A层粉土:褐黄色,中密,很湿,夹粉质黏土,不均匀,成分为石英质,中压缩性,干强度低,韧性低,摇震反应弱。

③-2层粉质黏土:褐黄色,可塑,不均匀,中压缩性,干强度中等,韧性低,土切面光滑具光泽。

各土体参数见表1(桩端持力层为③-2层粉质黏土)。

表1 土层参数

Tab. 1 Soil layer parameters

层号	天然容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	固结快剪标准值		E_s (1-2)/ MPa	地基承载力特征值/kPa
		内聚力/ kPa	内摩擦角/(°)		
②-2	18.1	12.1	9.2	3.4	60
③-1	19.8	44.1	20.3	8.7	240
③-1A	18.6	10.4	16.1	6.0	120
③-2	19.3	35.9	18.6	6.1	200

氧化沟底板下土层分布断面见图2(桩基倾斜

主要发生在J21~J22之间)。

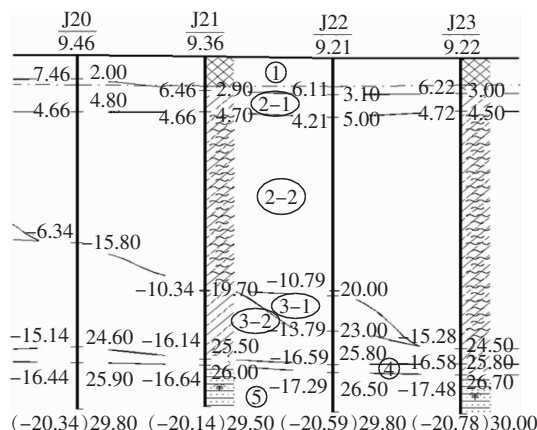


图2 土层分布断面图

Fig. 2 Map of soil layer distribution

3 桩基倾斜事故及原因分析

现场测量桩基偏位统计结果见图3。

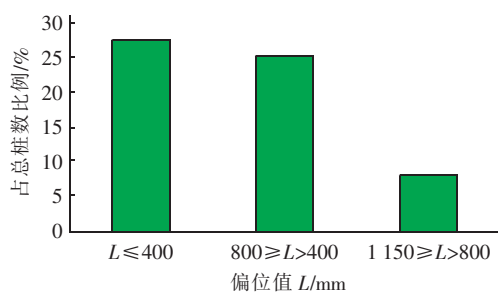


图3 桩基偏位统计

Fig. 3 Pipe deflection statistics

原因分析:

根据场地地质情况可知,在桩偏位区②-2淤泥质粉质黏土层深厚,为夹流塑~软塑状态粉质黏土,触变性强。土体开挖后,造成桩承受不平衡土压力,由于桩侧土为淤泥质粉质黏土,流塑性,桩侧土的抗力不足致使桩基发生倾斜。

根据现场测量结果统计,桩头偏位最大处有1 150 mm,桩头偏位800 mm以上的基桩91根,占总桩数约8%;桩头偏位400~800 mm之间桩数约285根,占总桩数25.1%;桩头偏位210~400 mm之间桩数313根,占总桩数约27.4%,且基桩偏位主要集中在区格三和区格四连接缝处。

另对现场基桩偏位大于800 mm的桩进行了桩孔内摄像检测和桩倾斜度检测。摄像检测结果显示,上节桩至桩接头处(21 m桩下节桩为13 m,上节桩为8 m;18 m桩下节桩为11 m,上节桩为7 m)均未发现桩身有明显裂纹、裂缝、断桩现象,接桩处

基本平滑,接桩良好。桩身小应变检测结果也均属于Ⅰ类桩,桩身完整。桩身倾斜角度检测结果显示桩的倾斜角度较大,最大倾斜角为 6.75° ,最小倾斜角为 4.44° 。

4 斜桩受力分析

根据上述现场情况及检测结果,虽然桩身完整,但在斜桩顶施加竖向荷载后,必定会导致桩顶产生更大的水平位移,荷载过大,有可能使桩身出现开裂甚至断桩,从而影响桩身耐久性和承载力等,给后期构筑物的运行埋下极大的隐患。由于此次倾斜的桩数量较多,如果全部废除,完全替换,会造成较大的经济损失,所以必须认真研究并加以利用,争取最大限度降低工程损失。

由于原基桩倾斜但并未破坏,其抗拔承载力不受影响,竖向承载力应根据实际情况进行分析,对不能满足桩设计承载力特征值部分需要补强,以满足构筑物承载力使用要求。

斜桩竖向承载力能力的计算,目前尚缺乏工程经验,需经分析研究确定。斜桩基桩桩身完整,但偏位较大,在桩顶施加加载竖向荷载后,斜桩受力与垂直桩不同,除产生竖向位移同时还有水平位移,使得桩受侧摩阻力外,同时会因为竖向荷载偏离原轴线而产生弯矩^[1,2]。由于桩周土的存在,也会对桩提供抗力,所以斜桩受力非常复杂。目前弹性支点法分析作为传统分析方法在国内外都获得了较多有价值的成果,该方法参数比较少,比较容易被选取,计算简单,在选取过程中主观意识影响小,桩基规范也推荐利用弹性理论进行桩基分析^[3]。Abaqus 有限元分析软件目前也比较成熟,该软件通过把桩和土划分为不同单元,通过求解所建立的矩阵方程,来得到桩土的工作性状^[4,5]。

利用弹性支点法基本原理对偏位 $L \leq 400$ mm (即1倍桩径以内)、 $400 \text{ mm} < L \leq 800$ mm (即1~2倍桩径)以及 $800 \text{ mm} < L \leq 1\,150$ mm (即2倍桩径以上)三种状况计算分析,桩设计承载力特征值为460 kN。并就最大偏位 $L = 1\,150$ mm 桩计算与有限元软件 Abaqus 计算结果进行对比。

4.1 弹性支点法

① 弹性支点法基本原理

对倾斜基桩加载竖向荷载时,桩身会产生水平及竖向位移,桩周土体会有反方向抗力作用。弹性支点法是将桩视作竖向放置的弹性地基梁。其变形

微分方程是通过弹性地基梁法的不同的边界条件及变形方程分段列出。对文克尔地基模型而言也同理,地基上任一点所受压强 p 与该点地基变形量 y 成正比,该点变形量与其他各点压强无关。所以桩周土层则采用一系列弹簧进行模拟,这样就可以把桩作为弹性支承的地基梁进行计算,模型见图4,进行模拟分析计算。

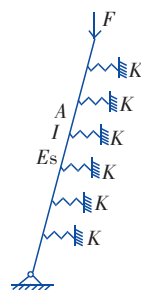


图4 计算模型

Fig.4 Calculation model

根据工程需要,计算以下内容:

- 以桩顶水平位移量为控制标准,计算出桩顶能承受的竖向荷载值;
- 验算在此荷载下桩身产生的弯矩,是否大于桩自身能够承受的抗裂弯矩;
- 试算基桩在检测荷载(单桩竖向极限承载力标准值)作用下,桩身弯矩是否大于桩身设计弯矩。

计算模型中弹簧间距均设为1 m,用弹簧的 K 值模拟土的抗力作用,并运用理正结构平面钢桁架模块进行建模计算。

模型中 K 为弹簧的刚度,即单位长度桩长范围内土的水平反力系数(kN/m); A 为杆件的面积,即基桩面积(mm^2); I 为杆件(基桩)惯性矩(mm^4); E_s 为杆件(基桩)弹性模量(kN/mm^2)。

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)第4.1.5条^[6],土的水平反力系数可按下列式计算:

$$k_s = m(z - h) \quad (1)$$

式中 z ——计算点距地面深度

h ——基坑开挖深度

桩土反力计算宽度:

$$b_0 = 0.9(1.5d + 0.5) = 0.99 \text{ m}$$

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)第4.1.6条,土的水平反力系数的比例系数可按经验公式计算:

$$m = \frac{0.2\Phi^2 - \Phi + c}{v_b} \quad (2)$$

式中 Φ 、 c ——分别为地基土内摩擦角和粘聚力
 v_b ——桩顶位移量

根据弹性支点法理论及《基坑工程技术规范》(DG/TJ 08—61—2010)第 9.1.7 条^[7],水平弹性支座的压缩弹簧刚度 $K = k_s \cdot b_0 \cdot h$,式中 h 为弹簧垂直计算间距(即将桩分段进行概化处理,本计算取间距为 1 m)。

② 根据现场实测资料,桩头偏位最大为 1.15 m。

当 v_0 为 10 mm 时, $m = 1.9828 \text{ MN/m}^4$ 。计算参数见表 2。

表 2 计算参数

Tab. 2 Calculation parameters

z/m	$K/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$0.5 K/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	z/m	$K/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$0.5 K/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
1	1 963	981	11	21 593	10 796
2	3 926	1 963	12	23 556	11 776
3	5 889	2 994	13	25 519	12 759
4	7 852	3 926	14	27 482	13 741
5	9 815	4 907	15	29 445	14 722
6	11 778	5 889	16	31 408	15 704
7	13 741	6 870	17	33 371	16 685
8	15 704	7 852	18	35 333	17 667
9	17 667	8 833	19	37 296	18 648
10	19 630	9 815	20	39 259	19 630

注: 0.5 K 是根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)表 5.7.5 注 2 说明^[8],考虑其受长期荷载作用 m 值按 0.5 系数折减选用(规范为 0.4,考虑斜桩仍为少数)。

经试算,按桩顶水平位移 10 mm 控制时,桩顶最大竖向荷载为 150 kN,同时桩身最大弯矩为 30.1 kN·m,小于桩身抗裂弯矩 $M_{\text{cr}} = 63 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

另试算桩顶检测竖向荷载为 300 kN 时的桩身弯矩(此时桩顶位移为 30 mm,相应的 m 值需做调整, $m = 0.6609 \text{ MN/m}^4$,此时 K 值不折减),试算结果为 66.9 kN·m,乘以分项系数 1.27,转化成设计值为 84.96 kN·m,小于桩身设计弯矩 99 kN·m。

③ 根据试算结果,偏位 $L \leq 400 \text{ mm}$ (即 1 倍桩径以内)桩满足设计要求,所以计算中控制依据:偏位 $L \leq 400 \text{ mm}$ 采用竖向荷载控制,偏位 $L > 400 \text{ mm}$ 采用水平位移控制(10 mm 不计初始偏移量)。桩身最大弯矩均小于桩身抗裂弯矩 M_{cr} ,具体计算结果见表 3。

表 3 计算结果

Tab. 3 Calculation results

项 目	偏位值 L/mm	最大竖向 荷载/ kN	桩顶最大水平 位移(不计初 始偏移量)/ mm	桩身最 大弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
设计竖向 荷载控制	$L \leq 400$	460 (设计荷载)	3	55.6
桩顶最大 位移控制	$400 < L \leq 800$	291	10	31.2
	$800 < L \leq 1\ 150$	200	10	30.1

4.2 Abaqus 有限元桩土模型

按最大偏位 $L = 1\ 150 \text{ mm}$ 计算。

① 桩土模型及参数选取

根据桩体倾斜情况,选取最大斜度(桩径 $\varnothing 400 \text{ mm}$,桩长为 21 m,桩头偏位最大为 1 150 mm,桩身混凝土强度 C80)为模型计算原型。为减小边界条件对模型计算影响,同时提高模型计算精度,取桩周半径 10 m,桩端下部土层 7 m 为模型边界。在计算中桩体采用弹性模型,土体采用扩展的 Drucker-Prager 模型,计算单元大小为 $0.25 \text{ m} \cdot 0.25 \text{ m} \cdot 0.25 \text{ m}$ 。桩与土之间接触行为采用 Abaqus 软件提供的主-从接触算法。其他具体计算参数见表 4。

表 4 模型计算参数

Tab. 4 Model calculation parameters

土层及 桩混凝土 强度	桩进入 土层深度/ m	杨氏 模量/ 10^3 kPa	泊松 比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ($^\circ$)	侧阻 力/ kPa
②-2	14.5	18.05	0.25	1 810	12.1	9.2	22
③-1	6.5	46.7	0.30	1 980	44.1	20.3	75
C80	—	3.8×10^4	0.20	2 500	—	—	—

② 弯矩计算结果分析

分别选取竖向荷载 150、200、250 及 300 kN 进行计算,各竖向荷载下桩身弯矩见图 5。

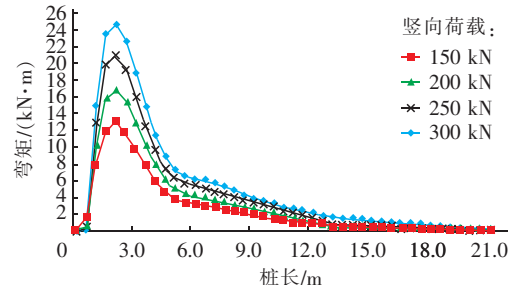


图 5 各竖向荷载对弯矩的影响

Fig. 5 Effect of vertical load on bending moment

根据计算结果,竖向荷载为 150 kN,桩身最大弯矩为 13.01 kN·m;竖向荷载为 200 kN,桩身最大弯矩为 16.94 kN·m;竖向荷载为 250 kN,桩身最大弯矩为 20.92 kN·m;竖向荷载为 300 kN,桩身最大弯矩为 24.85 kN·m;各竖向荷载作用下最大弯矩出现在离桩顶 2.0 m 处左右,同时各桩身最大弯矩均小于桩身抗裂弯矩 $M_{cr} = 63 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

③ 计算结果对比

Abaqus 有限元模型,相对于弹性支点法计算方法,其结果最大弯矩比传统计算所得结果小 56.7%~62.8%,充分考虑桩土共同作用,通过有限元模型计算,进一步验证了弹性支点法的安全可靠性,适合工程设计应用,对实际工程具有指导意义。

5 倾斜基桩加固处理

① 根据计算结果,同时为保障氧化沟安全稳定运行,最终决定对偏位 400 mm 以下(即 1 倍桩径)基桩不做处理,对偏位 400 mm 及以上基桩进行钢筋混凝土灌芯处理。另外对偏位大于 400 mm 及以上的基桩按计算结果进行桩竖向承载力检测,同时为控制沉降量,参考未倾斜基桩试桩检测记录和

模型计算结果,控制基桩检测时桩顶竖向累计位移不得大于 5 mm。待基桩竖向位移检测结束后对检测基桩进行桩身完整性检测。

② 补桩:根据计算结果和现场检测结果,基桩偏位较大后,竖向承载力已不能满足原设计要求,需要进行补桩施工。由于现场基坑已开挖,桩头均已暴露在外,同时考虑到补桩与现有基桩的桩间距的要求(倾斜桩基是部分受力,而补桩桩基是按设计要求满荷载受力,须满足规范要求的桩间距的要求),经研究和比较,最终选用影响较小的树根桩,桩径 300 mm,桩长以实际计算为准。

6 处理结果及沉降观测

按照上述要求进行倾斜基桩加固和补桩后,利用锚桩反力装置(4 锚 1),采用 1 台最大作用力 1 000 kN 油压千斤顶加载,根据率定的值,由油压表读的数值换算荷载。

竖向位移采用大量程百分表测量进行单桩竖向抗压静载试验,检测结果见表 5[根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)第 5.2.2 条,安全系数取 2 来确定最终加载值]。

表 5 检测结果

Tab. 5 Test results

偏位 L/mm	设计要求承载力特征值/kN	最终加载值/kN	最终桩顶累计沉降量/mm	最终桩顶残余沉降量/mm
$400 < L \leq 650$	290	580	4.13	2.29
$650 < L \leq 800$	200	400	4.62	2.38
$800 < L \leq 1\ 150$	150	300	4.52	2.34

倾斜基桩承载力都能满足处理后的设计要求,且桩身完整性检测也均显示桩身完整。主体结构浇筑完成后进行满水工况运行,池体未出现不均匀沉降、裂缝、漏水等现象。对沉降观测值进行比较分析,整个池体沉降量较均匀,基桩倾斜区域沉降量与其余区域沉降量相当,未出现桩基倾斜区域沉降量过大或过小的现象。

7 结论

斜桩受力分析采用弹性支点法简单易行,安全可靠,同时通过理论分析及实际检测验证,当基桩倾斜量达到 1 倍桩径以上时,不能忽视倾斜对承载力的影响,应加以计算分析处理。在今后的设计施工中为避免此类事故的发生,应注意以下几点:

① 饱和软黏土地,大型水池下采用预应力管桩,挤土效应明显,尽量加大间距,必要时设置砂

袋或排水板等。

② 施工时应合理安排工序,不能有造成四周土压力不平衡的行为。包括开挖管道、边沟、堆载以及各个机械进出场顺序等。

③ 桩基验收应具备打桩完成未开挖前桩位图及开挖后桩位图,并进行对比,准确定位基桩及基桩倾斜情况,以便后期核对和分析处理;反之则可能导致对基桩倾斜判断不清,大大降低工程安全性与可靠性,同时加大后期问题处理的难度及不确定性。

参考文献:

- [1] 吕凡任,陈云敏,陈仁朋,等. 任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(2): 191-194.
Lu Fanren, Chen Yunmin, Chen Renpeng, et al. Analysis of batter pile under arbitrary inclined loads in semi-infi-

- nite solid[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(2): 191 - 194 (in Chinese).
- [2] 王来义. 斜桩群桩力学性能模拟分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
Wang Laiyi. Stress Simulation Analysis of Inclined Pile Group[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015 (in Chinese).
- [3] 李龙起, 罗书学. 非均匀地基中倾斜桩基竖向承载特性模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1300 - 1305.
Li Longqi, Luo Shuxue. A simulation test study of vertical bearing capacity of inclined pile foundation in inhomogeneous strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1300 - 1305 (in Chinese).
- [4] 傅花. 竖向荷载作用下斜桩承载特性模型试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(5): 90 - 94.
Fu Hua. Model test study on bearing behavior of inclined pile under vertical load[J]. Yangtze River, 2016, 47(5): 90 - 94 (in Chinese).
- [5] 秦力, 许慧, 张冬生, 等. 斜桩单桩水平静载试验及 MIDAS GTS 有限元模拟分析[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(1): 29 - 35.
Qin Li, Xu Hui, Zhang Dongsheng, et al. Static load testing and MIDAS GTS finite element simulation analysis of batter single pile[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(1): 29 - 35 (in Chinese).
- [6] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
JGJ 120 - 2012, Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese).
- [7] DG/TJ 08 - 61 - 2010, 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2010.
DG/TJ 08 - 61 - 2010, Technical Code for Excavation Engineering[S]. Shanghai: Shanghai Building Materials Industry Market Management Station, 2010 (in Chinese).
- [8] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
JGJ 94 - 2008, Technical Code for Building Pile Foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese).



作者简介: 王玉华(1963 -), 女, 江苏徐州人, 本科, 高级工程师, 结构副总工程师, 长期从事市政给排水结构设计工作。

E-mail: lyslys9012@126.com

收稿日期: 2018 - 05 - 25

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力