

# 某地下式污水厂抗浮设计方案比较及实证分析

万玉生

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

**摘要:** 在某全地下式污水处理厂工程抗浮设计中,做了普通锚杆、扩大头锚杆、抗浮桩三种设计方案,并在现场做了设计试桩,对试桩检测结果进行了分析论证,分析了各抗浮方案的承载能力,初步选定满足抗拔承载能力要求的扩大头锚杆、抗浮桩设计方案,再进一步分析了两者的防腐蚀能力,给出防腐蚀解决方案,并进行了两者的施工质量控制及经济分析,最终确定抗浮桩设计方案为最佳。

**关键词:** 普通锚杆; 扩大头锚杆; 抗浮桩; 抗浮设计

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)04-0051-05

## Comparison and Demonstration Analysis of Anti-floating Design Schemes for an Underground Sewage Treatment Plant

WAN Yu-sheng

(North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

**Abstract:** There were three design schemes in the anti-floating design of a whole underground sewage treatment plant: ordinary anchor bolt, expanding head anchor bolt and anti-floating pile. The test pile was constructed on site. The results of the test pile were analyzed and demonstrated. The schemes of expanding head anchor bolt and anti-floating pile meeting the requirements of pulling capacity were preliminarily selected by analyzing the bearing capacity of different anti-floating schemes. An anti-corrosion scheme was proposed by further analyzing anti-corrosion capacity of two schemes. The construction quality control and economic analysis of two schemes were performed. The comprehensive analysis results showed that the design scheme of anti-floating pile was the best.

**Key words:** ordinary anchor bolt; expanding head anchor bolt; anti-floating pile; anti-floating design

### 1 工程概况

青岛高新区污水处理厂一期工程采用全地下式钢筋混凝土结构,设计规模为  $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,主体结构设计高度为 14.7 m,顶部设计覆土深度为 1.5 m,设计覆土顶部高程为 4.5 m,基底埋置深度为 16.2 m,预估基底附加平均压力为  $120 \sim 150 \text{ kPa/m}^2$ 。现状地面平均高程基坑深度约 13.0 m,基底标高约为 -10.9 m。

全地下污水处理厂的抗浮设计很重要,因此针对该工程的抗浮设计进行探讨。

#### 1.1 场地水文条件

本污水处理厂工程场区紧临胶州湾,地下水与海水有一定的水力联系,直接受海水补给,场地抗浮设防水位按 3.10 m (1985 国家高程) 进行抗浮验算。

本实例工程场地内的地下水对混凝土结构具中等腐蚀性,对钢筋混凝土结构中的钢筋在干湿交替情况下具中等~强腐蚀性,在长期浸水的情况下具弱腐蚀性。

场区地下水腐蚀介质及腐蚀强度等级见表 1。

表 1 场区地下水腐蚀介质及腐蚀强度等级  
Tab. 1 Ground water corrosive media and corrosion strength grade

孔号	类型	指标	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>
29	Ⅱ	含量	710.84	191.81	2 764.3
		等级	弱	微	中等
95	Ⅱ	含量	1 040.3	403.3	5 401.1
		等级	弱	微	强
152	Ⅱ	含量	1 180.5	403.3	5 473.8
		等级	弱	微	强
抽水井 1	Ⅱ	含量	2 090.2	1 113.8	15 883
		等级	中等	微	强
抽水井 2	Ⅱ	含量	2 164.2	1 113.88	17 084
		等级	中等	微	强

注: Cl<sup>-</sup>含量为干湿交替状态下的水中 Cl<sup>-</sup>含量,对应腐蚀等级为干湿交替状态下对钢筋混凝土结构中的钢筋腐蚀等级。类型指地下水环境类型。

1.2 场地工程地质条件

本污水处理厂基底高程主要为 -10.9 m,基底坐落于 9<sub>1</sub> 层粉质黏土层及 10 层含有机质粉质黏土层,各岩土层主要物理力学指标见表 2。

表 2 各岩土层主要物理力学指标  
Tab. 2 Main physical and mechanical indexes of every rock and soil layer

层号	岩土层名称	f <sub>a</sub>	侧阻 1	侧阻 2
1	冲填土	—	—	—
6	淤泥质粉质黏土	60	—	—
6 <sub>1</sub>	含淤泥细砂	70	—	—
9	中粗砂	250	85	85
9 <sub>1</sub>	粉质黏土	200	55	60
10	含有机质粉质黏土	160	40	45
10 <sub>1</sub>	含有机质粗砂	250	45	50
12	粗砾砂	380	130	140
12 <sub>1</sub>	粉质黏土	250	65	65
16	泥质强风化粉砂岩	350	120	120
17	泥质中风化粉砂岩	1 500	—	—

注: f<sub>a</sub> 为地基承载力特征值钻孔灌注桩的极限侧阻力标准值;侧阻 1 为钻孔灌注桩的极限侧阻力标准值 q<sub>sik</sub>;侧阻 2 为预制桩的极限侧阻力标准值 q<sub>sik</sub>。

2 抗浮设计试桩(锚杆)试验

2.1 试桩(锚杆)布置

根据本工程的重要性以及地质条件的复杂性,设计了普通锚杆、扩大头锚杆、抗浮桩(长螺旋压灌混凝土桩)三种方案,并进行工程现场试验,根据试验结果,为最终施工图设计优化提供依据,选择最佳抗浮设计方案。

现场在地质钻孔 70 号、96 号右侧分别布置 3 根普通砂浆锚杆、3 根普通砂浆锚杆(带扩大头)和 3 根抗浮桩,桩顶标高为 -10.65 m,锚杆长度为 6 m,桩长为 8 m。全部桩(锚杆)做抗拔极限承载力试验。

抗浮锚杆的设计参数如下:锚杆端锚在砾砂层内,成孔直径为 Ø200 mm,钢筋直径为 C28×3,注浆材料为纯水泥浆。共施工 12 根试验锚杆,其中 6 根为带扩大头锚杆,设计要求锚杆竖向抗拔承载力特征值为 300 kN,6 根为无扩大头锚杆,设计要求锚杆竖向抗拔承载力特征值为 250 kN。锚杆埋深为 6.0 m,带扩大头锚杆扩大头部分不小于 1.5 m,注浆龄期大于 28 d。

2.2 试桩(锚杆)检测

青岛理工大学工程质量检测鉴定中心对 12 根抗浮锚杆(6 根无扩大头,6 根有扩大头)、6 根抗浮桩进行了抗拔试验,并给出检验报告。北京金地通检测技术中心对 12 根抗浮锚杆和 6 根抗浮桩进行了低应变检测,给出检验报告。

2.2.1 抗浮锚杆承载力的检测方法

抗浮锚杆作为永久抗拔结构,应选择《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)中第 5 章“单桩竖向抗拔静载试验”的方法作为检测标准。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中附录 Y“土层锚杆试验要点”和《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)中第 5 章“单桩竖向抗拔静载试验”两种锚杆的试验方法最大的差别在于试验荷载的稳定标准,前者要求 10~20 min“位移增量不大于 0.1 mm”,后者 1 h“拔升值小于 0.1 mm”并且连续 2 次,二者在位移增量控制上有差别,前者是快速法,后者是慢速维持法。

2.2.2 抗浮锚杆承载力的检测数据

施工现场逐根做锚杆的荷载位移试验,其中 5# 锚杆荷载位移试验数据如表 3 所示。

表 3 5#锚杆荷载位移试验数据  
Tab. 3 5# anchor bolt load displacement test data

级数	荷载/kN	累计位移/mm	本级位移/mm
1	110	0	0
2	330	1.68	1.68
3	440	3.45	1.77
4	550	5.46	2.01
5	660	9.66	4.20

注: 级数为荷载加载等级数。

工程现场所有 12 根抗浮锚杆检测数据见表 4。

表 4 抗浮锚杆检测数据

Tab. 4 Anti-floating anchor bolt test data

检测 编号	锚杆 编号	长度/ m	试验荷 载/kN	试验 状态	抗拔 力/kN
1	带 6	6.0	550	破坏	418.0
2	带 5	6.0	660	破坏	522.5
3	带 3	6.0	550	破坏	418.0
4	带 2	6.0	660	破坏	522.5
5	带 1	6.0	660	破坏	522.5
6	带 4	6.0	660	破坏	522.5
7	无 2	6.0	440	破坏	313.5
8	无 1	6.0	550	破坏	418.0
9	无 4	6.0	550	破坏	418.0
10	无 5	6.0	550	破坏	418.0
11	无 6	6.0	550	破坏	418.0
12	无 3	6.0	550	破坏	418.0

注: ①带 1 表示带扩大头的 1#锚杆,无 1 表示无扩大头的 1#锚杆,其他类推;②试验荷载表示最大试验荷载,试验状态为最大试验荷载时锚杆状态描述。

### 2.2.3 抗浮桩抗拔承载力检测

本工程试桩直径为 400 mm,桩长为 8.0 m。桩身混凝土强度等级为 C30,要求单桩抗拔承载力的特征值为 350 kN。

各试验桩的编号及其他参数见表 5。

表 5 抗浮桩设计参数及实测数值

Tab. 5 Design parameters and measured values of anti-floating pile

编号	桩径/ mm	桩长/ m	设计抗拔力/ kN	极限承载力/ kN
1	400	8.0	350.0	560.0
2	400	8.0	350.0	630.0
3	400	8.0	350.0	630.0
4	400	8.0	350.0	700.0
5	400	8.0	350.0	700.0
6	400	8.0	350.0	490.0

注: ①设计抗拔力为抗拔承载力特征值;②极限承载力为各桩的抗拔极限承载力检测数值。

### 2.2.4 抗浮锚杆和抗浮桩的低应变检测

施工现场检测结果显示:无扩大头锚杆的直径比较小,长径比又大,仅有 1 根做出的信号比较好。有扩大头锚杆中除 1 根有扩大头锚杆做出的信号比较差外,另外 5 根低应变检测结果显示杆体完整。

## 3 试桩(锚杆)试验结果分析

### 3.1 承载力检测数据分析

#### ① 长螺旋钻孔压灌混凝土桩抗拔承载力

取各试验桩的最大加载值为极限承载力值,其平均值为 618 kN,极差为 210 kN,略大于平均值的 30% (185 kN),故取用平均值作为单桩抗拔极限承载力,除以安全系数 2 后得到单桩抗拔承载力的特征值,为 309 kN,取整为 310 kN。

#### ② 普通锚杆(带扩大头)抗拔承载力

其平均值为 490 kN(取整),极差为 105 kN,不大于平均值的 30%,故取用平均值作为锚杆的极限承载力,除以安全系数 2 后得到锚杆抗拔承载力特征值,为 245 kN。

抗浮桩低应变检测结果如表 6 所示。结果显示,6#桩在距离桩顶 2 m 处缩径并且桩底反射信号不明显。

表 6 抗浮桩低应变检测结果汇总

Tab. 6 Low strain test results of anti-floating pile

编号	桩径/ mm	测点桩 长/m	波速/ (km · s <sup>-1</sup> )	桩身完整性	等级 类别
1	400	8.0	350.0	1.0 m 处轻微缺陷	Ⅱ类
2	400	8.0	350.0	桩身完整	Ⅰ类
3	400	8.0	350.0	1.0 m 处轻微缺陷	Ⅱ类
4	400	8.0	350.0	桩身完整	Ⅰ类
5	400	8.0	350.0	桩身完整	Ⅰ类
6	400	8.0	350.0	2.0 m 处缺陷	Ⅲ类

#### ③ 普通锚杆(无扩大头)抗拔承载力

对于无扩大头锚杆,其平均值为 400 kN(取整),极差为 105 kN,不大于平均值的 30%,故取用平均值作为锚杆的极限承载力,除以安全系数 2 后得到锚杆抗拔承载力特征值,为 200 kN。

### 3.2 承载力检测值与理论值比较

抗浮锚杆和抗浮桩的抗拔承载力理论值按照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)公式 5.4.5-1 计算。

将计算理论值与实测值比较,除扩大头锚杆因为扩大头部位受力机理复杂,实测数值较理论值偏大外,普通非扩大头锚杆及抗拔桩实测值与理论值基本符合。

按扩大头锚杆上拔力  $N_k = 290$  kN 计算,经理论计算抗浮锚杆长度为 7.5 m 极限抗拔承载力满足设计要求,锚杆长度为 9.5 m 满足设计要求。

非扩大头锚杆上拔力仅能达到 200 kN,远小于扩大头锚杆及抗拔桩上拔力,如果设计布置非扩大头锚杆会出现锚杆间距过密、数量多、不经济等现象,故非扩大头锚杆抗浮设计方案不宜在本工程使

用。

#### 4 桩与锚杆防腐设计

工程场地内的地下水具中等~强腐蚀性,因此抗浮桩或抗浮锚杆设计应考虑防腐设计。

##### 4.1 抗浮桩防腐设计

抗浮桩采用长螺旋钻孔混凝土灌注桩时,桩身防腐措施可采取提高桩身混凝土耐腐蚀性能的方法,也可采取增加混凝土腐蚀余量的方法。但本工程的混凝土灌注桩作为抗拔桩,桩身受拉会产生裂缝,地下水会沿着缝隙腐蚀至桩身内部。因此,增加混凝土腐蚀余量的方法不适合抗拔桩。

抗浮桩提高桩身混凝土的耐腐蚀性能方法有采用抗硫酸盐硅酸盐水泥、掺入抗硫酸盐的外加剂和掺入矿物掺和料等,其中掺入矿物掺和料方法不适用于抗拔桩。因此,只有使用抗硫酸盐硅酸盐水泥或掺入抗硫酸盐的外加剂两种方法。

##### 4.2 抗浮锚杆防腐设计

抗浮锚杆的杆体材料是素水泥浆体,外围是水泥土,与混凝土灌注桩有较大差别,与高压旋喷桩性质接近。

《工业建筑防腐设计规范》(GB 50046—2008)中第4.7.4条:“当污染土对水泥类材料的腐蚀性等级为强、中时,不宜采用水泥粉煤灰碎石桩、夯实水泥土桩、水泥土搅拌法等含有水泥的加固方法。但硫酸根离子介质腐蚀时,可采用抗硫酸盐硅酸盐水泥。”本工程抗浮锚杆为含有水泥的加固方法,因此,只有采用抗硫酸盐硅酸盐水泥这一方法才能符合规范的规定。

##### 4.3 钢筋防腐

###### ① 抗浮桩钢筋防腐

对于抗浮桩中的钢筋,可采用“主筋采用环氧树脂涂层钢筋”;也可按《工业建筑防腐设计规范》(GB 50046—2008)表4.9.5的要求,采用混凝土中掺入钢筋阻锈剂。

对于钢筋的防腐,除满足上述方法以外,还应满足桩身裂缝宽度的要求。抗浮桩的裂缝宽度控制在0.20 mm以下。

裂缝宽度计算,应按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中公式:

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \sigma_s (1.9c_s + 0.08d_{eq}/\rho_{te})/E_s \quad (1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65f_{tk}/(\rho_{te}\sigma_s) \quad (2)$$

裂缝宽度计算结果见表7。

表7 抗浮桩裂缝宽度计算结果

Tab.7 Calculation results of crack width of anti-floating pile

钢筋直径/mm	16		18		20	
	根数	裂缝宽度/mm	根数	裂缝宽度/mm	根数	裂缝宽度/mm
290	9	0.200 1	8	0.178 6	7	0.167 5
230	6	0.195 1	5	0.191 9	4	0.208 3

###### ② 抗浮锚杆钢筋防腐

抗浮锚杆桩芯为纯水泥浆,外围为水泥土。纯水泥浆同混凝土相比,抗压强度等级相同,纯水泥浆的抗拉强度低于混凝土的抗拉强度。混凝土的抗压强度高,其抗拉强度也提高,而纯水泥浆的抗压强度很难达到C35。在相同上拔荷载作用下,纯水泥浆的裂缝宽度要比混凝土大,水泥土的裂缝更大。

目前没有计算水泥土桩或锚杆裂缝的正式方法,因此,也不能确定抗浮锚杆杆体的裂缝宽度是否满足《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)和《工业建筑防腐设计规范》(GB 50046—2008)的要求。

#### 5 桩与锚杆施工质量控制

从试验结果看,试验数据离散性较大,抗浮桩试验数据极差超过平均值的30%,说明施工质量控制尤其重要。

##### 5.1 抗浮锚杆的施工控制

抗浮锚杆的注浆浆体采用水泥净浆,水泥采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥,水灰比为0.50,掺入能够提高浆体密实度及抗腐蚀性能的外加剂,浆体的28 d无侧限抗压强度 $\geq 30$  MPa,采用反向注浆工艺。抗浮锚杆的质量控制主要为杆体强度和杆体尺寸(杆体直径)两大因素。

###### ① 锚杆体的强度

锚杆杆体的杆芯(200 mm以内)的纯水泥浆体强度与水泥浆的水灰比有关,而杆体外围(200 mm以外)水泥土的强度与施工时的旋转速度和提升速度有关。锚杆钻机的旋转速度约为20 r/min,提升速度约为10 cm/min。提升速度的快慢,直接影响水泥土的强度。

###### ② 锚杆体的直径

控制锚杆的直径成为锚杆抗拔力的关键。该抗浮锚杆的直径由旋喷压力决定,压力大则直径大,压力小则直径小。

本工程的抗浮锚杆,水泥浆的水灰比为0.8~



1.0,保证水泥浆能顺利喷出。喷浆压力应根据现场实际情况,确定抗浮锚杆的直径 $\geq 300$  mm时的喷浆压力,扩大头直径 $\geq 500$  mm的喷浆压力。

## 5.2 抗浮桩的施工质量控制

抗浮桩的施工采用长螺旋成孔泵送混凝土后插钢筋笼施工工艺。抗浮桩的施工可分成成孔、浇筑混凝土、后插钢筋笼三大部分。

### ① 抗浮桩的成孔质量

抗浮桩的成孔质量对桩身侧摩阻力影响较大,特别是反复钻孔,将钻孔周围的土钻松,降低桩身侧摩阻力,从而降低抗拔承载力。为避免上述反复钻孔,应选取较大功率的钻机(如60 kW的长螺旋钻机)。

### ② 抗浮桩的浇筑质量

影响抗浮桩施工质量的主要因素为混凝土的坍落度和提钻速度,施工过程中应严格执行浇筑前测量混凝土的坍落度 $\geq 17$  cm。

### ③ 后插钢筋笼

后插钢筋笼需解决钢筋笼插不到桩底的问题。钢筋笼插不到桩底有两种可能,一是混凝土坍落度较低,对钢筋笼的摩阻力很大;二是钢筋笼主筋少,加强筋间距过大,钢筋笼刚度较软,后插钢筋笼过程中弯曲变形。

以上问题可以采取减小加强筋间距的办法,一般加强筋的间距为2.0 m,可减小至1.5 m或更小,同时备用更大功率的振动器加以解决。

综上所述,如果抗浮桩的施工采用长螺旋成孔泵送混凝土后插钢筋笼施工工艺,需选好施工设备(如60 kW的长螺旋钻机、50 m<sup>3</sup>/h以上的混凝土泵),控制混凝土坍落度为18~20 cm,以提高抗浮桩的施工质量。

## 6 工程造价对比

工程造价主要包含人工费、机械费和材料费。设计根据试桩数据调整重新布置扩大头锚杆抗浮方案和长螺旋压灌混凝土桩抗浮方案,并按照定额标准对上述两抗浮方案进行经济比较。

由于本工程场地地下水具有中等以上腐蚀性,故抗浮锚杆只有采用抗硫酸盐硅酸盐水泥这一种方法才能符合规范,因此抗浮锚杆工程造价较高。

## 7 结论

对本工程所采用的抗浮锚杆和抗浮桩从技术、施工和经济三个方面进行比较,最终确定抗浮桩方

案为最佳。分析结论如下:

① 本工程设计的相同长度扩大头抗浮锚杆和抗浮桩的抗拔承载能力基本相同,普通非扩大头锚杆远低于上述两者的抗拔承载能力;

② 有硫酸根腐蚀性环境下抗浮桩的混凝土采用抗硫酸盐硅酸盐水泥或掺入抗硫酸盐的外加剂;

③ 有氯离子腐蚀性环境下抗浮桩的混凝土中掺入钢筋阻锈剂,或采用环氧树脂涂层钢筋;

④ 有硫酸根腐蚀性环境下抗浮桩的混凝土强度等级不应低于C35,水灰比不宜大于0.45,抗渗等级不应低于S8,钢筋的混凝土保护层厚度不应小于55 mm;

⑤ 抗浮桩的防腐蚀优于抗浮锚杆;

⑥ 有腐蚀性水质及耐久性要求较高的工程采用抗浮桩作为抗浮构件裂缝控制及耐久性控制效果较佳;

⑦ 在腐蚀性环境中,抗浮桩的工程造价低于抗浮锚杆,经济效果较佳。

## 参考文献:

- [1] 万玉生,叶雅丽,王长祥,等. 某全地下式污水处理厂结构设计的关键技术及相关问题[J]. 特种结构, 2014,31(2):34-37.
- [2] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [3] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.



作者简介:万玉生(1972—),男,安徽庐江人,本科,高级工程师,从事结构专业设计工作。

E-mail:13802010979@163.com

收稿日期:2016-07-07