

污水处理厂构筑物地基处理方案比选与工程应用

刘金鹏, 王翔, 吴立鹏

(武汉市市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 在长江一级、二级阶地区域内建设的污水处理厂构筑物地基持力层以软土地基为主,地基处理依据工程地质、抗浮水位和上部荷载,采用浅层换填、桩基础或复合地基等技术。为选择能满足技术、施工、经济要求,保证其适用性和性价比的地基处理方案,以实际案例为依托,从工程设计角度出发,根据构筑物特性与功能需求,对换填法、桩基础、复合地基这3种地基处理方案进行了综合比选,确定其中的长螺旋钻孔压灌桩复合地基处理方案为最优方案;同时通过研究长螺旋钻孔压灌桩复合地基的设计与施工过程,提炼了关键参数和实施要点,可为同类工程提供技术参考。

关键词: 污水处理厂;地基处理;长螺旋钻孔压灌桩复合地基

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0266-05

Comparison and Engineering Application of Foundation Treatment Schemes for Structures of Wastewater Treatment Plant

LIU Jinpeng, WANG Xiang, WU Lipeng

(Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: The bearing stratum of the structures of wastewater treatment plants (WWTPs) constructed within the first and second terraces of the Yangtze River is mainly soft soil foundation. The foundation treatment is based on engineering geology, anti-floating water level and upper load by using the technologies such as shallow layer replacement, pile foundation or composite foundation. In order to select the foundation treatment schemes able to meet the technical, construction and economic requirements and ensure its applicability and cost performance, relying on the practical cases, from the perspective of engineering design, and based on the characteristics and functional requirements of the structures, three foundation treatment schemes of replacement method, pile foundation and composite foundation are comprehensively compared and selected. It is determined that the long spiral borehole pressure grouting pile composite foundation treatment scheme among these schemes is the optimal scheme. At the same time, by studying the design and construction of the long spiral borehole pressure grouting pile composite foundation treatment scheme, the key parameters and implementation essentials are extracted, which can provide the technical reference for the similar projects.

Keywords: wastewater treatment plant (WWTP); foundation treatment; long spiral borehole pressure grouting pile composite foundation

0 引言

随着城市化和工业经济的快速发展,污水处理厂作为城市运维体系的基础设施之一,在污染治理、水质改善和生态平衡维护中发挥了关键作用。污水处理厂内的粗格栅间、进水泵房、细格栅间、曝气沉砂池、生物池、二沉池、滤池、消毒池及出水泵房、浓缩池、调理池等作为实现污水处理工艺功能的核心

基础设施,对地基稳定性和变形控制要求极高。以武汉市为例,考虑缩短尾水管网长度,厂站多建于长江一级、二级阶地近岸,而该区域软土地基含水率高、压缩性强、地下水位高。若不进行地基处理,易引发整体沉降、差异沉降超限等问题,威胁污水处理厂安全运行和工艺效能。

地基处理是污水处理厂工程建设的关键环节,通过工程技术措施,可改善地基土体性能,提升地基承载能力和稳定性,控制地基沉降及变形,为构筑物筑牢安全基础。因此,系统研究相关技术,对污水处理行业发展、生态保护及可持续发展意义重大。

收稿日期: 2025-07-16

作者简介: 刘金鹏(1991—),男,硕士,高级工程师,从事市政结构设计工作。

1 地基处理方案比选

地基处理方案比选是确保污水处理厂构筑物安全、经济、高效建设的关键环节,其核心是从技术可行性、经济合理性、环境适应性等多维度,筛选出最适合具体工程条件的地基处理方法。

本文探讨的污水处理厂构筑物分布于长江一级、二级阶地。长江一级阶地地层的典型特点是:表层为人工填土;上部为软塑或流塑状淤泥质粉质黏土、可塑状一般黏性土及渗透性复杂的互层土;中部为稍密一中密一密实的砂土层;下部为白垩—古近系(K-E)泥岩、砂砾岩、中细砂岩及志留系(S)泥岩、泥质粉砂岩、含钙泥质粉砂岩^[1]。长江二级阶地地层的典型特点是:上部为淤泥质粉质黏土及黏性土;中部为砂性土及砾卵石或部分分布有残积土层;下部为三叠系(T)志留系(S)的砂岩、页岩、灰岩等或白垩系—第三系(K-E)泥质粉砂岩^[2]。

污水处理厂的构筑物根据埋深划分为2类:第一类为粗格栅间、进水泵房,埋深较深;第二类为其他构筑物,埋深相对较浅,埋深范围约1~5 m。第二类构筑物的地基持力层多为软—流塑状淤泥质粉质黏土,该类土层的厚度因构筑物埋深及所在区域的不同而存在差异。依据地基处理原理,经分析可知,不同地基处理方式各有特点,在适用条件、优缺点方面均存在显著差异。因此,需结合工程的具体特点对地基处理方法进行筛选。表1为常用地基处理方案的核心特性。

表1 地基处理方案比选表^[3]

处理方法	原理	特点
换填法	挖除软弱层,换填砂石、灰土等硬料	工艺简单,处理深度0.5~3 m
强夯法	重锤冲击使土体密实,提高承载力	加固深度3~10 m;振动噪声大;不适用于软黏土
排水固结法 ^[4]	堆载或真空预压+排水板,加速孔隙水排出	适合大面积处理
水泥土搅拌桩	水泥与土搅拌形成桩体,形成复合地基	强度增长慢,单桩承载力偏低
高压旋喷桩	高压喷射水泥浆加固土体强度,形成复合地基	强度增长慢,单桩承载力较高
CFG桩	桩与土共同承载	承载力高
碎石桩	碎石挤密土体,形成排水通道	对软黏土承载力提升有限;需压实桩体
注浆加固法	浆液填充孔隙或裂隙,胶结土体	扰动小,浆液扩散难控制
刚性桩基	桩体穿越软层,直接承载于硬层	承载力极高

污水处理厂构筑物在放空检修期间,存在构筑物内无水、构筑物外侧地下水位最高的极端条件,通常需要采取措施来保证其抗浮稳定性。工程上通用结构抗浮措施有配重抗浮、锚杆或桩基抗浮、地下水导渗系统等。工程设计时,应综合考虑地下工程的地质条件、结构特征、施工环境等因素,经过技术、经济比选并结合地区经验,确定抗浮措施^[5]。

一般情况下,粗格栅间、进水泵房、浓缩池、调理池等构筑物自重抗浮或采用配重抗浮可满足抗浮稳定要求;生物池、二沉池、滤池结构自重抗浮或采取配重抗浮不满足稳定要求,抗浮措施需要结合基础设计。本文所述的软—流塑状淤泥质粉质黏土地基持力层的抗浮措施多结合地基处理采用桩基进行抗浮。其中消毒池及出水泵房较为特殊,根据构筑物布置形式不同,可能出现自重或配重抗浮稳定满足或不满足《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)要求这2种情况。

综上所述,考虑抗浮因素,生物池、二沉池、滤池多为桩基础。根据具体工程地质情况和《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),在长江一级、二级阶地区域内建设的污水处理厂构筑物,当其桩基未进入中密—密实的砂土层、密实的粉细砂混砾卵石层时,多采用预制管桩基础以减少造价和加快工期;其他情况多为钻孔灌注桩。

2 工程应用

2.1 项目概况

本文讨论的构筑物地基处理工程应用案例为某污水处理厂的消毒池和出水泵房,由进水管、消毒渠和泵房三部分构成,见图1。

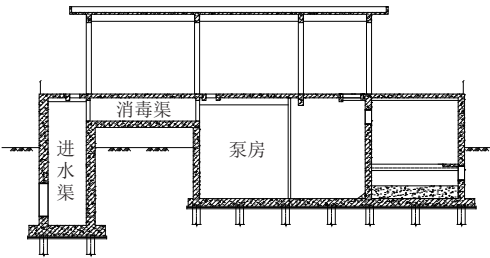


图1 接触消毒池及出水泵房剖面图

构筑物平面总尺寸为33.4 m×25.6 m。其中:进水管平面内净尺寸为22.2 m×3.2 m,竖向净高8.2 m,埋深4.9 m,侧墙壁厚0.5 m,底板厚0.6 m,底板外挑0.8 m,顶板厚0.3 m;泵房平面内净尺寸为24.6 m×20.3 m,竖向净高7.9 m,埋深4.6 m,侧墙壁厚0.5 m,底板厚0.6 m,底板外挑0.8 m,顶板厚0.3 m;消毒渠

横跨进水渠和泵房,净跨为7.9 m,渠道净跨为1.35~3.4 m,总宽22.2 m,外侧墙厚0.5 m,隔墙厚0.3 m,顶板厚0.3 m,底板厚0.6 m,底板与地面净距为1.84 m。构筑物上部设置单层屋面框架结构,层高6.4 m。池体结构混凝土等级为C35,基础垫层为C15,池内填料为C20。

2.2 基础和地基处理

2.2.1 构筑物基础

消毒池和出水泵房采用整板基础,根据该工程地质详勘报告,基础落在②₁淤泥质粉质黏土上,其地基承载力特征值 $f_{ak}=65$ kPa。经计算复核,该地基承载力不满足《建筑地基基础设计规范》要求;整体沉降大于200 mm,也不满足该规范要求。

进水渠和泵房自重不满足抗浮稳定要求,考虑底板外挑和内部填料配重后,才能满足抗浮稳定要求。相对于桩基抗浮方案,底板控制弯矩的造价虽略高于锚杆或桩基抗浮,但对工程总造价影响相对较小,可忽略不计,因此该工程为配重抗浮。

该工程较为特殊,进水渠地基持力层范围内为既有钢筋混凝土进水泵房构筑物,既有泵房底板厚0.9 m,侧墙厚0.5~0.9 m,混凝土强度等级为C20,现场清表已破除既有泵房局部侧墙。既有泵房现状图见图2。



图2 既有泵房现状图

根据构筑物和地基持力层特点,结合构筑物抗浮措施,设计比选了3种地基处理方案。

2.2.2 地基处理方案一

采用换填法,超挖换填厚度为5~7 m。换填费用相对较高,且因换填会引起基坑深度增加,支护风险和造价均有较大增加。

2.2.3 地基处理方案二

采用桩基础,桩基需要穿过④₂含砾粉质黏土,管桩施工较为困难,因此需要采用灌注桩。该工程拟采用直径0.6 m灌注桩,进水渠灌注桩桩长28.2 m,单桩竖向抗压承载力特征值为2 000 kN;泵房桩长

24 m,单桩竖向抗压承载力特征值为1 550 kN。桩端持力层均为④₅含砾粉质黏土。

桩基穿越土层及桩端持力层剖面图见图3。

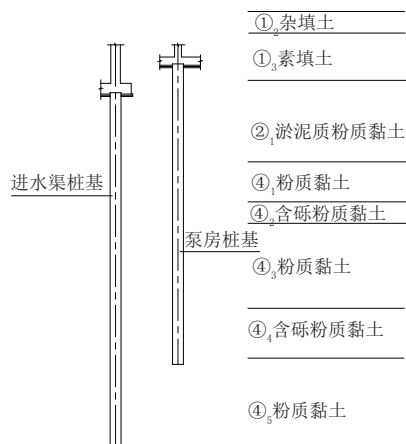


图3 桩基穿越地质剖面图

本方案需要采用冲击钻等措施对既有构筑物冲孔,或采取较强支护措施开挖破除既有构筑物,工程造价最高,工期长。

2.2.4 地基处理方案三

采用复合地基。综合考虑地质情况、地基承载力需求,拟采用素混凝土桩复合地基,施工采用长螺旋钻孔压灌。桩径取0.5 m,矩形布置,桩间距1.75 m×1.75 m,桩长7.0 m,桩端以④₁粉质黏土或④₂含砾粉质黏土为桩端持力层。单桩竖向抗压承载力特征值为350 kN,复合地基承载力特征值为165 kPa。

按照常规设计,进水渠和泵房均采用长螺旋钻孔压灌桩复合地基,但是进水渠下方有现状构筑物,开挖破除难度较大。在保证工程造价合理的前提下,考虑进水渠下方直接采用C15素混凝土回填至进水渠基础底,泵房下部采用长螺旋钻孔压灌桩复合地基。复合地基处理剖面见图4。由于进水渠和泵房的地基处理方式不同,致使其附加应力不同,因此,需要进一步验证不同地基持力层的地基差异沉降是否满足《建筑地基基础设计规范》。

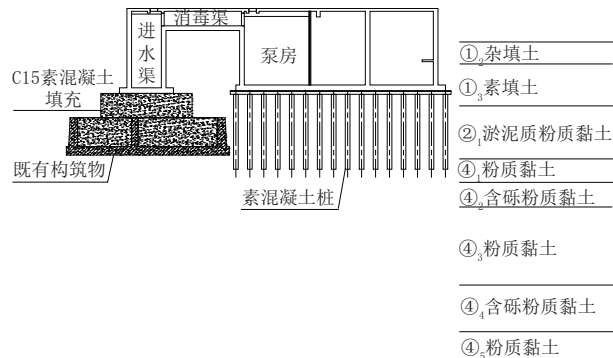


图4 复合地基处理剖面图

综上,考虑技术、经济比选后,本构筑物采用地基处理方案三。

2.3 沉降差验算

进水渠基础底低于泵房基础底 0.3 m,进水渠下部回填 C15 素混凝土+既有钢筋混凝土构筑物,深度共计 6.5 m。根据地勘资料可知,既有钢筋混凝土构筑物下部有厚 0.8 m②₁淤泥质粉质黏土持力层。沉降计算考虑从既有泵房底部开始,上部考虑进水渠、回填素混凝土、钢筋混凝土构筑物为整体。根据《建筑地基基础设计规范》,地基变形计算深度止于⑤₁强风化泥岩上表面。根据计算结果,可得出进水渠沉降计算点(取进水渠中心点)上的各土层压缩情况,见表 2。

表 2 进水渠沉降计算点上的各土层压缩情况

层号	土类名称	层厚/m	压缩模量/MPa	压缩量/mm
② ₁	淤泥质粉质黏土	0.8	3	46.391
④ ₁	粉质黏土	1.6	15	17.524
④ ₂	含砾粉质黏土	1.5	16	12.915
④ ₃	粉质黏土	9.5	13	51.968
④ ₄	粉质黏土	5.0	15	10.736
④ ₅	含砾粉质黏土	5.4	17	6.599

由表 2 可知,主要压缩量发生在厚 0.8 m②₁淤泥质粉质黏土和厚 9.5 m④₃粉质黏土土层,各土层累计压缩量总和为 146.123 mm<200 mm,满足《建筑地基基础设计规范》要求。

泵房下部有约厚 7 m②₁淤泥质粉质黏土地基持力层,地基处理采取长螺旋钻孔压灌桩穿越该土层并计入④₁粉质黏土持力层。考虑桩-土相互作用^[6],依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012),计算得压灌桩复合地基压缩模量 $E=7.6$ MPa。根据《建筑地基基础设计规范》,地基变形计算深度止于⑤₁强风化泥岩上表面。根据计算结果,可得出泵房沉降计算点(取泵房中心点)各土层的压缩情况,见表 3。

表 3 泵房沉降计算点上的各土层压缩情况

层号	土类名称	层厚/m	压缩模量/MPa	压缩量/mm
② ₁	淤泥质粉质黏土 (压灌桩复合地基)	7.0	7.6	56.522
④ ₁	粉质黏土	0.8	15.0	15.429
④ ₂	含砾粉质黏土	1.5	16.0	8.122
④ ₃	粉质黏土	9.5	13.0	48.216
④ ₄	粉质黏土	5.0	15.0	14.194
④ ₅	含砾粉质黏土	5.4	17.0	9.856

由表 3 可知,主要压缩量发生在厚 7.0 m②₁淤泥质粉质黏土(压灌桩复合地基)和厚 9.5 m④₃粉质

黏土土层,各土层累计压缩量总和为 152.339 mm<200 mm,满足《建筑地基基础设计规范》要求。

进水渠与泵房最大沉降差 d 计算如下:

$$d=(152.399-146.123)=6.276\text{ mm}<0.002\text{ }L(L\text{ 为渠道净跨,7 900 mm})=0.002\times 7\text{ }900=15.8\text{ mm}$$
,满足《建筑地基基础设计规范》要求。

3 现场施工

3.1 施工前准备

根据该工程地质勘察资料和设计材料要求进行配合比试验,要求成桩后桩身抗压强度 f_{cu} 不低于 15 MPa。根据设计和规范要求^[4],施打不少于 9 根工艺试验桩,以验证施工工艺中的各项技术参数,同时完成复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验。

施工场地应满足施工机械安全行走的要求,且作业面标高应高于设计桩顶标高,其值不小于 0.5 m。

3.2 成孔施工

该工程采用长螺旋钻中心压灌成桩,现场施工图见图 5。该工艺具有无泥浆污染、低噪声、成孔穿透能力强等特点^[7]。在规范施工的前提下,基本可以保证施工过程中不发生倾斜和移动。成孔质量控制标准包含桩位、孔径、孔深、垂直度、孔底沉渣等^[8]。

3.3 混凝土压灌

成孔质量控制标准满足设计和《建筑地基处理技术规范》要求后,螺旋钻杆停止转动,连续泵送混凝土,桩顶超灌高度不应小于 0.5 m。混凝土压灌的充盈系数为 1.1~1.2。

截除浮桩时,应采用机械切割,并满足以下要求:(1)严禁造成桩顶标高以下的桩身断裂;(2)严禁扰动桩间土;(3)严禁用重锤或重物横向击打桩体;(4)桩顶应凿成水平面,不得出现倾斜面。

桩顶设置厚 0.3 m 褥垫层,采用级配良好的碎石或砂砾,最大粒径不应大于 30 mm,不含植物、垃圾等杂质。褥垫层虚铺后采用静力压实,夯填度不应大于 0.9^[3]。

3.4 质量检验与工程验收

成桩 28 d 后,由专门的检测单位进行质量检测。检测内容包括:桩身完整性检测、复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验。柱身完整性检测采用低应变动力试验。单桩、复合地基静载荷试验均采用慢速维持荷载法,严格遵循《建筑地基处理技术规范》的

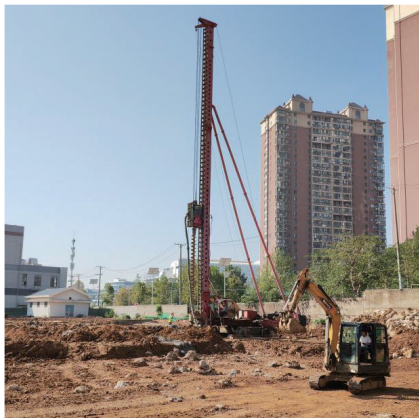


图5 长螺旋钻孔压灌桩现场施工图

规定。

4 结 语

在长江一级、二级阶地区域内,建设污水处理厂时,地基处理需重点应对高地下水位、深厚软一流塑状淤泥质粉质黏土等挑战。针对此类地质条件,抗浮措施多采用桩基础(如预应力管桩、钻孔灌注桩)穿透软弱层,使桩端嵌入稳定持力层;对于大面积水

池类构筑物,也可考虑复合地基提高承载力并控制沉降。复合地基所用桩型可选用水泥土搅拌桩、高压旋喷桩或CFG桩等,同时需采取抗浮措施(如配重、锚杆、地下水导渗系统)以抵消地下水浮力影响。施工中应严格控制桩基质量和地基处理后的沉降观测,确保构筑物长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 刘金鹏,曾丽萍.长江一级阶地沉井设计与施工的若干探讨[J].城市道桥与防洪,2023(10):151-154.
- [2] 郭学农,詹玮.武汉长江Ⅱ级阶地岩溶场地建筑基础选型与应用——以武汉××汽车零部件产业园(二期)项目为例[J].资源环境与工程,2021,35(2):236-240.
- [3] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S].
- [4] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016(1):96-115.
- [5] 袁正如.地下工程的抗浮设计[J].地下空间,2004,24(1):41-43.
- [6] 王小平,张明远,刘飞鹏,等.长螺旋压灌混凝土桩-土相互作用的数值模拟[J].武汉理工大学学报,2006(10):73-76.
- [7] 肖航,曹丹.某工程CFG桩复合地基设计及施工[J].施工技术,2016,45(17):56-59.
- [8] 褚聚敏.钻孔灌注桩长螺旋钻机成孔先灌混凝土后插筋施工技术[J].施工技术,2021,50(6):110-112.

(上接第253页)

参考文献:

- [1] 水利部运行管理司负责同志解读《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》[J].水利建设与管理,2022,42(4):3-6.
- [2] 刘月圆.城市地下空间灾害链特征、模型及应用研究——以上海市为例[D].上海:同济大学,2019.
- [3] 胡威,张海霞,夏昂,等.网络安全挂图作战实践[J].数据与计算发展前沿,2024,6(1):125-135.
- [4] 南水北调东线江苏水源有限责任公司.江苏南水北调河道工程标准化管理[M].南京:河海大学出版社,2022.
- [5] 陆超,胡春媛,贺石良.雅鲁河流域水量统一调度效果综合评价分析[C]//2023(第二届)城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集.北

- 京水利学会;天津市水利学会;河北省水利学会;河海大学;河北工程大学;浙江水利水电学院,2023:1-6.
- [6] 朱祺,张君,王云江.城市河道养护与维修[M].北京:中国建材工业出版社,2021.
- [7] 蔡阳.以数字孪生流域建设为核心构建具有“四预”功能智慧水利体系[J].中国水利,2022(20):2-6;60.
- [8] 赖志勇,曹慧霆,罗翔.滨水区与腹地联动发展策略研究——以黄浦江东岸为例[J].上海城市规划,2024(4):70-77.
- [9] 汤海山.太浦河的生命历程[N].江南时报,2020-10-20.
- [10] 顾良忠.泖港镇志[M].上海:上海辞书出版社,2011.