

地埋式一体化预制泵站 筒体结构强度的数值分析

王 暴¹, 王振华^{2,3}, 单秋雯², 栾 逸³, 杨 帆³

(1. 宿迁市湖滨新区农村工作局, 江苏 宿迁 223800; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127;
3. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了明确大筒径的地埋式一体化预制泵站的筒体强度变化规律, 采用数值模拟方法对地埋式一体化预制泵站的筒体进行了数值计算, 分析了不同水位、不同材料及不同壁厚时筒体的应力应变。结果表明: 不同水位工况时筒体的最大应力均位于筒体与底部交接处, 且水位越低, 筒体最大应力越大, 最大应变也越大。相同工况时, 筒体最大变形位移均随着筒体壁厚的增大而减小。相同壁厚时, 随着筒体内水位的增加而筒体最大变形位移逐渐减小。相同壁厚时筒体材料建议采用玻璃钢。

关键词: 预制泵站; 筒体; 结构; 强度; 数值分析

中图分类号: TV675 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)06-0050-0004

Numerical analysis on structural strength of cylinder of integrated prefabricated pumping station

WANG Bao¹, WANG Zhenhua^{2,3}, SHAN Qiuwen², LUAN Yi³, YANG Fan³

(1. Suqian Hubin New District Rural Work Bureau, Suqian 223800, China;
2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;
3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to clarify the variation law of the cylinder strength of the buried integrated prefabricated pumping station with large cylinder diameter, the numerical simulation method was used to calculate the cylinder of the buried integrated prefabricated pumping station, and the stress and strain of the cylinder under different water levels, different materials and different wall thicknesses were analyzed. The results show that the maximum stress of the cylinder is located at the junction of the cylinder and the bottom under different water level conditions, and the lower the water level, the greater the maximum stress of the cylinder and the greater the maximum strain. Under the same working conditions, the maximum deformation displacement of the cylinder decreases with the increase of the wall thickness of the cylinder. When the wall thickness is the same, the maximum deformation displacement of the cylinder decreases gradually with the increase of the water level in the cylinder. When the wall thickness is the same, glass fiber reinforced plastic is recommended for cylinder material.

Key words: prefabricated pumping station; cylinder; structure; strength; numerical analysis

收稿日期: 2024-01-14

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020029), 江苏省高校自然科学研究重大项目(20KJA570001)

作者简介: 王暴(1975—), 男, 工程师, 主要从事泵站的运行与管理工作。E-mail: 649773305@qq.com

通信作者: 杨帆(1985—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事泵站工程科研与教学工作。E-mail: fanyang@yzu.edu.cn

地理式一体化预制泵站的概念源于欧洲,丹麦的格兰富公司是世界上较早提出预制泵站的公司,且率先于2010年将地理式一体化预制泵站的概念引入到中国,地理式一体化预制泵站因占地小、施工期短、可重复使用、集成度及自动化水平高等优点在我国的城镇排水设施建设、城市内涝防治、工业和矿山雨水及污水提升等工程领域得到了广泛的应用并发挥了重要的作用。当前,学者们对地理式一体化预制泵站的研究主要集中于泵站的内流场^[1-3]、自清洁方面^[4-6]、结构优化设计^[7-10]及智慧运行^[11-13]等方面。随着地理式一体化预制泵站应用的越来越多,预制泵站的筒体直径越来越大,筒体的强度得到了应用单位的关注,为明确大直径的地理式一体化预制泵站的筒体强度,本文以PPS3000地理式一体化预制泵站为研究对象,采用数值模拟方法分析不同水位、不同材料及不同壁厚时筒体的强度特征,以期为大直径地理式一体化预制泵站的设计制造及应用提供参考。

1 研究对象及计算方法

1.1 研究对象

地理式一体化预制泵站的筒体结构如图1所示,筒体直径为3 000 mm,壁厚20 mm,筒体底部厚度为40 mm,筒体顶部进口尺寸为0.7 m×1 m,泵站筒体的底部高程为-6.8 m,高水位为-2.0 m,启泵水位为-4.0 m,停泵水位为-6.2 m。材料为玻璃钢,拉伸弹性模量为11.9 GPa,筒体外部填土为砂壤土,

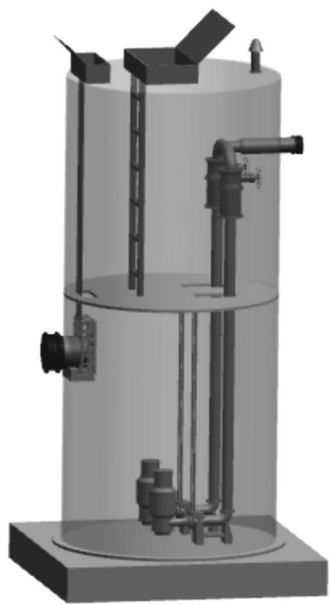


图1 地理式一体化预制泵站的三维模型

重度为17 kN/m³,地下水深度取地面下0.5 m,筒体内部水压力按照特征水位考虑,操作平台上荷载按2 kN/m²计入,筒体底部通过12根螺栓与混凝土板连接,按铰接考虑。

1.2 计算方法

因采用壳单元进行筒体的有限元分析,为了保证应力不集中和计算的准确性,避免剪力自锁,且保证收敛性,采用映射方法对筒体进行网格剖分,网格在筒体环向和径向的单元尺寸为0.1 m,高度方向的单元尺寸为0.2 m,筒体网格如图2所示。由于应力应变求解要考虑非线性及大变形,则采用稀疏矩阵法求解,迭代计算方法采用牛顿-拉普森法,为了保证计算可靠性,收敛精度设置为0.1%。

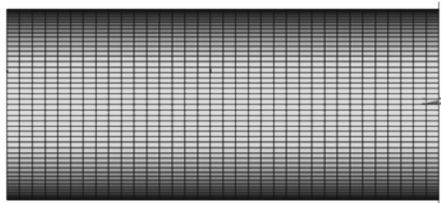
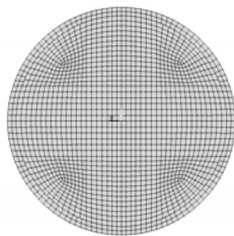


图2 筒体网格

边界约束条件、数值模型和荷载施加均按实际情况执行,影响数值计算的主要因素在于网格划分的尺寸影响,因应力主要受底部浮力影响,所以计算精度主要受其环向和径向尺寸的影响。网格尺寸一般保持单元为正方形时,其计算误差影响最小,为此对比环向尺寸分别为0.05 m、0.1 m和0.15 m 3种情况(竖向尺寸均为0.2 m),经计算,不同网格差异对筒体应力计算结果的影响较小,网格差异引起的误差在0.8%左右,为此,选取环向径向尺寸为0.1 m,竖向尺寸为0.2 m的网格方案。

2 结果分析

2.1 不同水位时筒体应力应变分析

为便于分析,定义低水位为工况1,启动水位为工况2,高水位为工况3,3种不同运行工况时玻璃钢筒体的最大应力及应变如图3所示,筒体的应力主要受筒体外地下水浮力控制,不同运行工况时筒体

的最大应力均位于筒体与底部交接处,且水位越低,筒体最大应力越大,筒体最大应变也越大。在工况1低水位时玻璃钢筒体所受的最大应力最大,为39.7 MPa,分别是工况2和工况3筒体最大应力的1.6倍和2.8倍,按玻璃钢拉伸强度153 MPa计算,此时筒体的最大强度应力比为0.259,满足强度要求。在工况1最低水位时,筒体的最大应变为0.00452,工况3高水位时筒体的最大应变为0.00142。从应力应变曲线分析,不同特征水位时最大应力节点均处于弹性变化范围内,在工况3高水位时,地下水浮力较小,其几何非线性较弱,此时最大应力节点的弹性模量为11.85 MPa,接近玻璃钢的弹性模量11.9 MPa,而在工况1低水位时因筒体地下水浮力较大,几何非线性较大,局部应力较为集中,此时会产生二阶变形,则弹性模量会降低,约在8.68~8.77 MPa的范围内。不同运行水位时筒体的最大变形如图4所示,工况1低水位时筒体的最大变形位移为65.4 mm,工况2启动水位时筒体的最大变形位移为52.94 mm,工况3高水位时筒体的最大变形位移为34.95 mm,筒体最大的变形处均位于筒体底部。

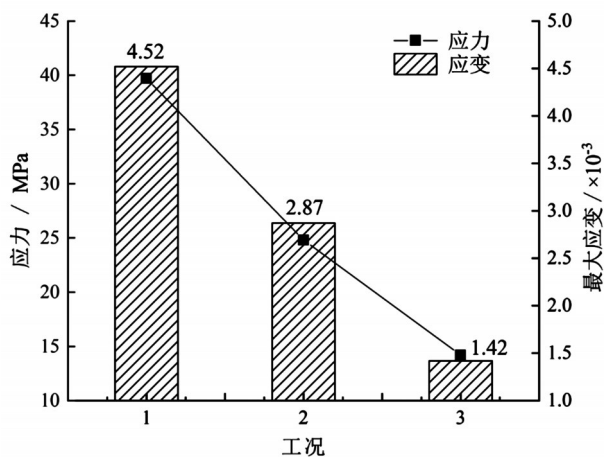


图3 不同工况时玻璃钢筒体的最大应力

2.2 不同壁厚时筒体应力应变分析

选择3种不同壁厚的筒体开展应力应变分析,3种筒体的厚度分别为15 mm, 20 mm和25 mm,筒体材料为玻璃钢,定义壁厚15 mm为方案1,壁厚20 mm为方案2,壁厚25 mm为方案3。3种不同工况时各壁厚方案的筒体最大应力及最大变形位移如图5所示,在工况1低水位时,筒体的最大应力随着壁厚的增大逐渐减小;在工况2启动水位时,筒体的最大应力随着壁厚的增大呈现先减小后增大趋势;在工况3高水位时,筒体的最大应力随着壁厚的

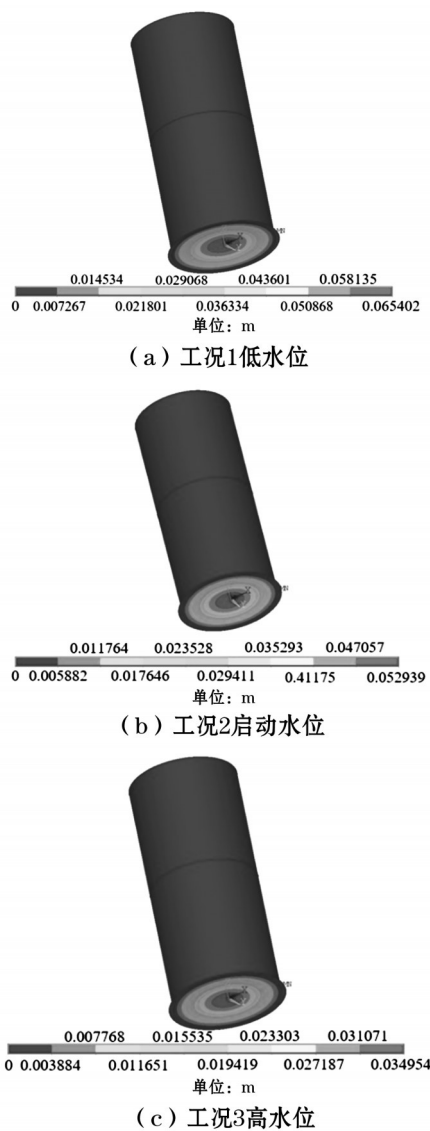


图4 不同工况时筒体的变形位移图(玻璃钢)

增大而逐渐增大。相同工况时,筒体最大变形位移均随着筒体壁厚的增大而减小;相同壁厚方案时,随着筒体内水位的增加而筒体最大变形位移逐渐减小。当筒体壁厚为15 mm时,其筒体最大变形为38.6 mm,当筒体壁厚为25 mm时,其筒体最大变形为31.5 mm,变形量低于方案1的15 mm壁厚,这主要是由于筒体的应力受底部浮力控制,筒体壁厚越大,其对底部的支撑作用越强,约束刚度越大,所以壁厚越大,其变形越小。当壁厚从15 mm增加至25 mm,壁厚增加66.67%时,工况1低水位时筒体最大应力减小了9.38%,工况2启动水位时筒体最大应力减小了1.12%,工况3高水位时筒体最大应力增加了10.37%。当壁厚从15 mm增加至20 mm时,壁厚增加了33.33%,工况1低水位时筒体最大应力减小了4.57%,工况2启动水位时筒体最大应

力减小了7.46%,工况3高水位时筒体最大应力增加了5.19%。不同工况时,从筒体最大应力与材料节省角度,优选筒体壁厚20 mm,表明大筒径的地理式一体化预制泵站的筒体壁厚20 mm是合理的。

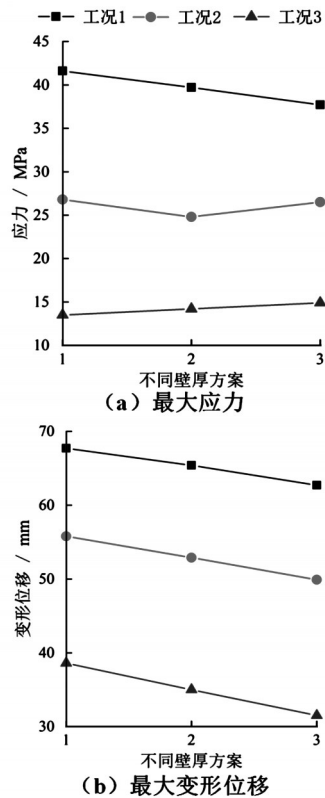


图5 不同壁厚方案时筒体的最大应力及变形位移

2.3 不同材料筒体应力应变分析

当前地理式一体化预制泵站的筒体材料常采用玻璃钢和高密度聚乙烯两种材质,采用数值模拟方法对比分析了同筒径时两种材料的差异,玻璃钢和高密度聚乙烯均采用理想弹塑性本构,高密度聚乙烯的密度为 965 kg/m^3 ,弹性模量为 $1.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。为便于分析,定义玻璃钢为材料1,高密度聚乙烯为材料2,不同工况时两种材料的筒体最大应力及最大变形位移如图6所示。两种材料加工制作的筒体的最大应力及应变均随着筒内水位的升高而减小,最大应力所在位置均为筒体与底部交接位置。在筒内高水位时两种材料的筒体所受的最大应力最小,材料1的最大应力是材料2的1.49倍,而低水位时材料1筒体的最大应力是材料2的1.72倍,采用高密度聚乙烯材料时,因聚乙烯材料的弹性模量远小于玻璃钢,则高密度聚乙烯制作筒体时筒体材料所受最大应力低于材料1玻璃钢。高密度聚乙烯筒体与玻璃钢筒体相似,不同特征水位时最大应力位置均处于弹性变化范围,在工况2启动水位和工况3高水位时,

地下水浮力较小,其几何非线性较小,此时最大应力位置的弹性模量为6.8 MPa,接近材料的弹性模量,而工况1低水位时,地下水浮力较大,几何非线性较大,局部应力较集中,此时会产生二阶变形,大应力时会发生二级变形,所以割线弹性模型会降低,约为6.0 MPa。材料2筒体的变形与材料1玻璃

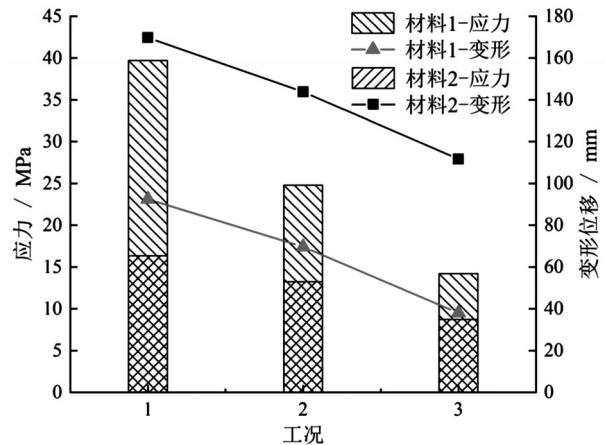


图6 不同材料时筒体的最大应力及最大变形位移

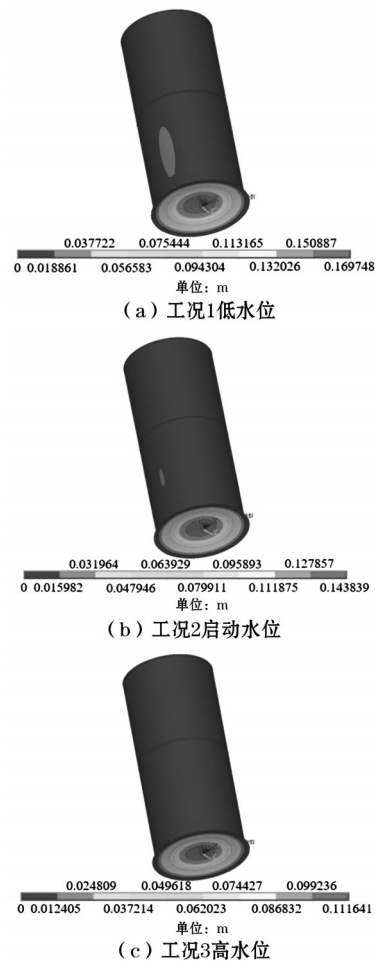


图7 不同工况时筒体的变形位移(材料2—高密度聚乙烯)

(下转第57页)

本次计算采用《水力计算手册》(第二版)弯道的局部损失公式为

$$h_j = 0.05 \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (6)$$

式中, v_1 、 v_2 为急弯两端断面的平均流速。

经计算,工况1新河道局部水头损失为4.5 mm,工况2新河道局部水头损失为2 mm。

综合考虑沿程水头损失和局部水头损失,工况1新河道较老河道新增的水头损失为13.5 mm,工况2新河道较老河道新增的水头损失为2.5 mm,新增水头损失不大,对防洪、排涝基本无影响。

4 结 语

安桥浜迁移改建工程于2022年10月前完成工程设计,2023年1月正式开始施工,至同年5月完工。经

历汛期防洪排涝的运行,防洪排涝符合设计要求。阶梯式生态框新颖的断面形式,加上两侧草坪绿化的配套,河道与周边环境相互融合,水清、河畅、岸绿、景美,得到了沿线领导和群众的赞扬和肯定。

参考文献:

- [1] 华烨,常露,宋伟新. 深入推进无锡市美丽河湖建设的实践与思考[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(9): 47-52.
- [2] 施桢炜,袁萍,王浩渊,等. 锡山全域幸福河湖建设实践与思考[J]. 中国水利, 2022(8): 56-57.
- [3] 李新仕. 阶梯式生态框在建设生态护岸中的应用[J]. 水利科技, 2023(4): 46-48.
- [4] 施红兵,张宇亮,王涛. 阶梯式生态框挡墙在南通中创区水系整治中的应用[J]. 江苏水利, 2020(1): 27-30.

(上接第53页)

钢筒体变形的变化规律相似,最大变形均出现在筒体底部,且筒体内水位越低,筒体最大变形越大。当工况1低水位时,材料2的筒体最大变形位移为169.75 mm;工况3高水位时,材料2的筒体最大变形位移为111.64 mm,因材料2高密度聚乙烯的弹性模量远小于玻璃钢,其变形较材料1玻璃钢大,是材料1玻璃钢筒体的2.6~3.2倍。推荐大筒径地埋式一体化预制泵站的筒体材料为玻璃钢。

3 结 论

(1)筒体的应力主要受筒体外地下水浮力控制,不同运行工况时筒体的最大应力均位于筒体与底部交接处,且水位越低,筒体最大应力越大,最大应变也越大。

(2)相同工况时,筒体最大变形位移均随着筒体壁厚的增大而减小;相同壁厚方案时,随着筒体内水位的增加而筒体最大变形位移逐渐减小。

(3)高密度聚乙烯与玻璃钢加工制作的筒体的最大应力及应变均随着筒内水位的升高而减小,最大应力所在位置均为筒体与底部交接位置,两种材料筒体变形的变化规律相似,最大变形均出现在筒体底部。在相同壁厚时建议优先采用玻璃钢材质。

参考文献:

- [1] 王盼,施建业,张闻,等. 一体化泵站自清洁流动特性研究及优化[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 124-130.

- [2] 胡凯. 一体化预制泵站的自清洁[J]. 通用机械, 2019(11): 15-17.
- [3] WANG K, HU J B, LIU H L, et al. Research on the deposition characteristics of integrated prefabricated pumping station[J]. Symmetry, 2020, 12(5): 760.
- [4] 蒋红樱,李尚红,周春峰,等. 一体化泵站流动特性数值模拟分析[J]. 江苏水利, 2020(2): 56-60.
- [5] 杨雷,李方玉,赵江. 一体化预制泵站的流体分析[J]. 机械制造, 2023, 61(11): 39-42, 53.
- [6] 李清,康灿,孟祥岩,等. 大流量工况下预制泵站内部流动特征[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3): 83-88.
- [7] 夏瑞超,刘厚林,张子旭,等. 基于DPM和RSM的一体化预制泵站结构优化[J]. 流体机械, 2021, 49(5): 33-40.
- [8] 胡凯,周跃,陈晶晶. 一体化预制泵站有效容积的优化设计[J]. 通用机械, 2016(3): 77-79.
- [9] 张子旭,王凯,陈昆,等. 不同运行方式对一体化预制泵站流动特性和筒体强度的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019(4): 162-167, 171.
- [10] 冯俊豪. 一体化泵站泵坑设计及流动数值分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(21): 108-110.
- [11] 彭安群,牟乃景. 基于智慧排水理念的SPS智慧型一体化预制泵站[J]. 通用机械, 2020(9): 49-52.
- [12] 祝雅杰,何智才,杜晓冻,等. 基于工业互联网的一体化泵站智慧运管系统[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 164-168.
- [13] 陆轶,杨雷,牟天伟. 一体化干式预制泵站的检测[J]. 机械制造, 2021, 59(4): 63-64, 70.