

瓜洲泵站工程桩基础处理 及结构数值计算分析

张 伟¹, 吴 昊¹, 夏国春¹, 姚兆仁¹, 刘占午¹, 仇建春^{2,3,4}

(1. 江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225002; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225100;

3. 江苏省水利动力工程重点实验室, 江苏 扬州 225009;

4. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要:瓜洲泵站工程面临地基地质条件差、轻粉质和重粉质砂壤土居多、地基渗透性强和易出现液化的问题,不宜作为工程天然地基持力层。对无桩基础的瓜洲泵站进行稳定分析,据此引入含钻孔灌注桩基础的瓜洲泵站工程设计方案,并对其进行了稳定分析,提出了钻孔灌注桩地基处理施工技术的注意事项。最后,利用三维空间有限元法,对校核洪水运行工况下的瓜洲泵站结构进行数值模拟计算,通过分析泵站结构的应力和变形,验证设计方案的有效性。研究成果有望为泵站工程的地基处理及安全性能分析提供价值性参考。

关键词:泵站; 地基处理; 桩基础; 有限元; 位移; 应力

中图分类号:TV675 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2024)06-0024-0006

Pile foundation treatment and numerical simulation analysis of Guazhou Pumping Station project

ZHANG Wei¹, WU Hao¹, XIA Guochun¹, YAO Zhaoren¹, LIU Zhanwu¹,
QIU Jianchun^{2,3,4}

(1. Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225002, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China;

3. Hydrodynamic Engineering Laboratory of Jiangsu Province, Yangzhou 225009, China;

4. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;)

Abstract: The Guazhou Pumping Station project faces problems such as poor geological conditions of the foundation, a majority of light and heavy sandy loam soils, strong permeability of the foundation, and susceptibility to liquefaction, making it unsuitable as a natural foundation bearing layer for the project. A stability analysis was conducted on the Guazhou Pumping Station without pile foundation, and based on this, a design scheme for the Guazhou pumping station project with drilled cast-in-place pile foundation was introduced. The stability analysis

收稿日期: 2023-09-25

作者简介: 张伟(1975—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设和管理的研究与工作。Email: jssjzw@163.com

通信作者: 仇建春(1989—),男,博士,主要从事水工结构领域的研究工作。Email: qiuji@yzu.edu.cn

was conducted, and precautions for the construction technology of drilled cast-in-place pile foundation treatment were proposed. Finally, using the three-dimensional finite element method, numerical simulation calculations were carried out on the Guazhou pumping station structure under the verification of flood operation conditions. The effectiveness of the design scheme was verified by analyzing the stress and deformation of the pumping station structure. The research results are expected to provide valuable references for the foundation treatment and safety performance analysis of pump station engineering.

Key words: pump station; foundation treatment; pile foundation; finite element; displacement; stress

我国已建各类大、中、小型泵站工程超过50万座,总装机容量超过7 000万kW。泵站工程作为我国水利工程建设中的一个重要组成部分,已在机电排灌、跨流域调水、城市给水排水和电厂供水等方面得到了广泛应用,并被应用到各类引水调水工程中,如南水北调东线江都水利枢纽工程^[1]、南水北调中线刘湾泵站工程^[2]和广州市雁塔排涝泵站工程^[3]等。泵站工程常修建于河道上,所处地质条件一般较为复杂,在水流的长期侵蚀、冲刷与泥沙淤积等因素共同影响下,地基常面临软土分布广泛、承载力低下、地质条件较差的问题^[4]。除了地基承载力和变形问题外,还可能存在渗流、砂土液化等问题^[5-6]。地基问题若不能得到有效的解决,可能会引起上部泵站结构出现较大的不均匀沉降,进而导致泵站结构的倾斜与开裂,水泵和电机主轴也将可能出现倾斜,致使泵站机组难以正常工作,影响泵站工程结构安全和工程效益的发挥^[7-8]。因此,泵站工程的地基处理及结构安全性能分析显得十分重要,这对确保泵站工程的长期安全有效运行、充分发挥工程效益具有重要意义。

瓜洲泵站工程作为2019—2020年度中国水利工程优质(大禹)奖获奖工程,同时也是2022—2023年度中国建设工程鲁班奖唯一入选的水利工程,其工程具有代表性意义。瓜洲泵站工程作为扬州市城市防洪的重要组成部分,对扬州市区调水、防洪和排涝起到关键作用。该泵站工程同样面临地质条件较差的问题,地基层多以轻粉质和重粉质砂壤土居多,地基渗透性能强,易出现液化问题,不宜作为工程天然地基持力层。为此,鉴于瓜洲泵站工程的安全重要性以及所面临的地基问题,本文以该泵站工程为研究对象,对该泵站工程的钻孔灌注桩地基处理技术进行分析,随后采用三维空间有限单元法,对瓜洲泵站进行应力和位移分析,评价瓜洲泵站结构的安全性能。本文研究成果有望为泵站工程的地基处理及安全性能分析提供参考。

1 工程概况及地基应力分析

1.1 工程概况

瓜洲泵站工程位于扬州市古运河南端的入江口门处,为扬州市古运河和仪扬河流域排洪的主要外排泵站。作为按照长江流域治理、淮河流域治理与区域水环境治理协调统一要求建设的重大民生工程,瓜洲泵站工程为古运河、仪扬河流域增加机排出路,有效控制古运河水位、改善区域水质和保障扬州主城区排水安全做出了重要贡献。瓜洲泵站工程开建于2016年年底,2019年正式投入运行,古城区古运河排涝标准由此提升至20年一遇,扬州城市的防洪标准提升至100年一遇。该泵站工程共安装6台立式轴流泵机组,单机功率为1 600 kW,总装机容量为9 600 kW,单机流量28.4 m³/s,总设计流量为170 m³/s。泵站规模为大(2)型,泵站等别为Ⅱ等,主要水工建筑物等级为2级。

该泵站工程场地土层分布壤土、砂壤土,泵站基底土承载力一般,场地地震动峰值加速度值为0.15 g,相应场地基本烈度为Ⅶ度。图1为泵站站身段地质剖面图,表1为对应各土层情况及其物理力学参数。

1.2 无桩基础的泵站稳定分析

泵房稳定分析的荷载主要包括:自重、静水压力、扬压力、波浪压力、土压力等,其中基底渗透压力采用规范规定的全截面直线分布法进行计算^[9-10]。

泵房抗滑稳定安全分析按下式计算:

$$K_c = f \sum G / \sum H \quad (1)$$

式中: K_c 为抗滑稳定安全系数; $\sum G$ 为作用于泵房底板以上全部竖直向荷载; $\sum H$ 为作用于泵房底板以上的竖直向荷载之和; f 为泵房底板与地基之间的综合摩擦系数。

按照《泵站设计规范》GB 50265—2010,泵房基底地基应力按下式计算:

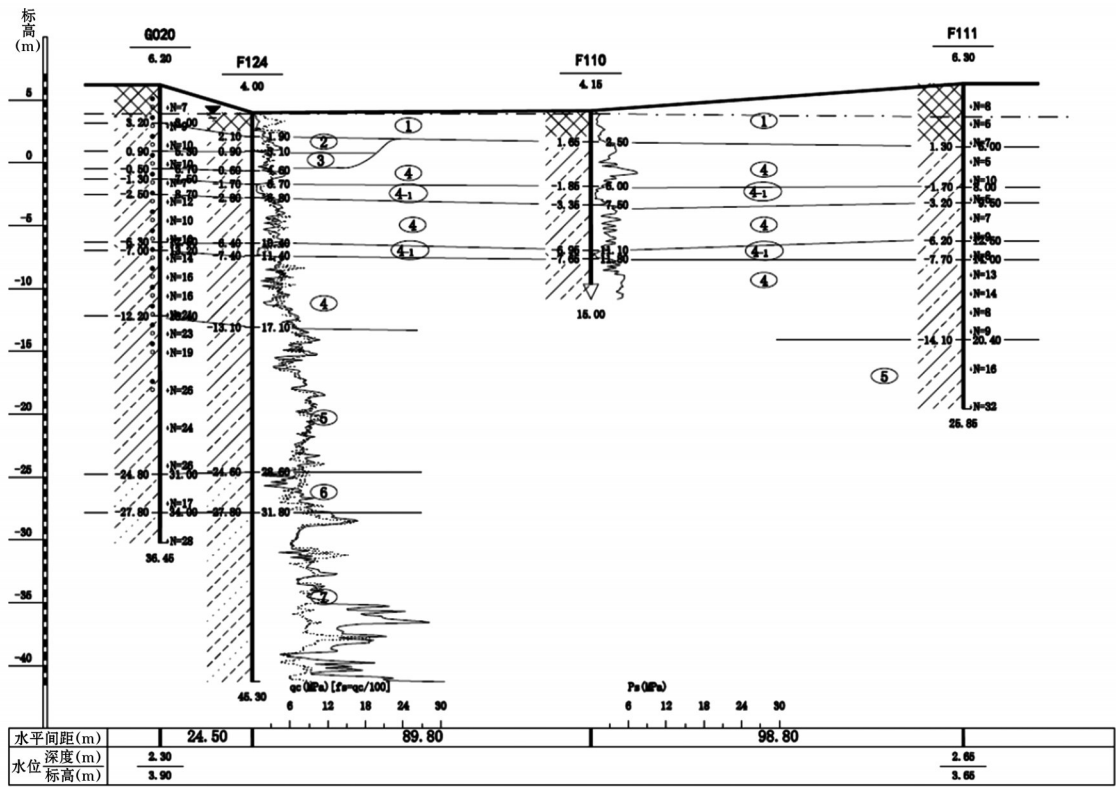


图1 瓜州泵站站身段地质剖面

表1 地基各土层物理力学参数统计

土层号	土层描述	比重 G_s	天然湿密度 ρ_l (g/cm^3)	浮密度 ρ_f (g/cm^3)	天然孔隙比 e	固结快剪		弹性模量 [R]/MPa
						黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	
①	人工堆土	2.70	1.84	0.99	0.926	18	20.0	9.74
②	灰、青灰色轻粉质砂壤土夹重粉质壤土	2.70	1.86	1.49	0.824	5	31.0	16.40
③	灰色重、轻粉质壤土,局部夹砂壤土	2.73	1.75	1.34	1.153	12	18.5	10.06
④	灰、青灰色轻粉质砂壤土夹粉砂	2.74	1.67	1.29	1.399	10	11.5	19.98
④-1	灰、青灰色轻粉质壤土、重粉质砂壤土	2.74	1.73	1.52	1.195	12	12.5	9.80
⑤	青灰色轻粉质砂壤土、粉砂	2.73	1.79	1.52	1.015	15	19.0	27.28
⑥	青灰色轻、重粉质砂壤土、轻粉质壤土	2.73	1.78	1.58	1.017	14	19.0	16.20
⑦	青灰色粉砂、轻砂壤土,局部夹细砂	2.73	1.79	1.54	1.004	15	19.5	27.40

$$p_{max}^{min} = \frac{\sum G}{A} \pm \frac{\sum M_x}{W_x} \pm \frac{\sum M_y}{W_y} \tag{2}$$

式中： p_{max}^{min} 为泵站基础底面应力的最大值或最小值； $\sum M_x$ 和 $\sum M_y$ 分别为作用于泵房基础底面以上的全部水平向和竖向荷载对于基础底面形心 X 、 Y 轴的力矩； W_x 和 W_y 分别为泵站基础底面对底面形心 X 、 Y 轴的截面矩。

泵站站身底板底高程为-5.60 m,基础坐落于④土层,根据瓜洲泵站《工程地质勘察报告》,泵站站身

的基底摩擦系数为0.35,地基允许承载力 130 kPa。边墩外回填土取 $C=0$ kPa、 $\varphi=28^\circ$ 。

根据泵房进水池、出水池的特征水位,按不同运行工况进行站身抗滑稳定和地基应力计算,计算成果如表2所示。

根据表2计算成果,各种工况下站身水平合力方向的不均匀系数、抗滑稳定安全系数均满足规范要求;完建期时平均地基反力较地基允许承载力大,最大地基反力也大于地基允许承载力的1.2倍,

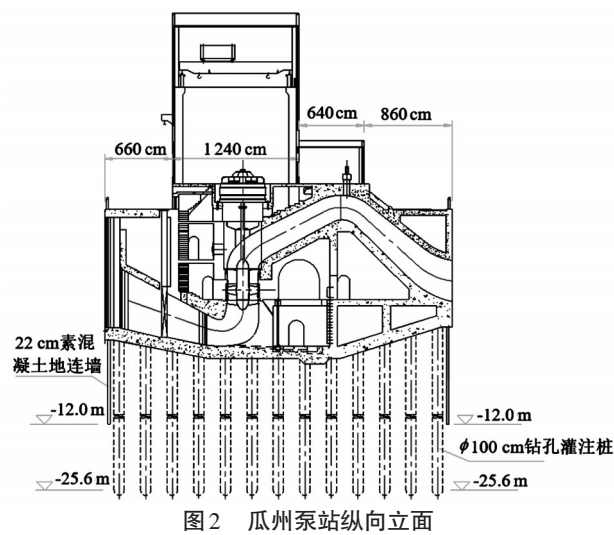
表2 无桩基础下站身段稳定计算成果

工况	水位/m		偏心 <i>e</i> /m		地基反力/kPa			不均匀 系数η	抗滑安全系数	
	站上	站下	<i>e_x</i>	<i>e_y</i>	<i>P</i>	<i>P_{max}</i>	<i>P_{min}</i>		<i>K_c</i>	[<i>K_c</i>]
完建期	-0.50	-2.60	0.16	-1.14	183.18	234.62	131.73	1.78	2.20	1.30
正向设计	7.48	4.65	1.12	-0.53	142.78	142.78	74.16	1.93	1.65	1.30
正向校核	7.72	4.65	1.19	-0.53	107.18	142.31	72.05	1.98	1.63	1.15
反向设计	3.63	5.21	0.59	-0.61	101.28	125.46	77.11	1.63	1.39	1.30
反向校核	3.63	6.36	0.53	-0.61	100.44	123.53	77.34	1.60	1.36	1.15
检修工况	2.82	4.80	0.47	-0.72	111.68	138.77	84.59	1.64	1.50	1.15
地震期	3.63	4.80	1.45	-0.42	106.87	144.33	69.40	2.08	1.46	1.05

不满足规范要求。

1.3 含桩基础的泵站稳定分析

针对无桩基础的瓜洲泵站站身不稳定分析结果,考虑到该泵站基底位于第4层土以上,由于4层土承载力一般,且土层液化,不宜作为工程天然地基持力层。因此,泵站设计采用22 cm地连墙围封防渗,站身则采用Φ100 cm钻孔灌注桩进行地基处理。图2为瓜洲泵站的纵向立面图,泵房和钻孔灌注桩基础均采用C30混凝土。



根据站身稳定分析,泵站在各运行工况下,每块底板最大水平力为26 577 kN,最大垂直力为168 156 kN。控制灌注桩桩顶位移不超过0.50 cm,单桩允许水平承载力为150~200 kN,同时考虑桩间土体作用,沿每块底板长度方向布置13排、每排10根、共130根φ100 cm钢筋砼灌注桩,单桩竖向承载力标准值为1 293 kN。灌注桩容许承载力按下式计算:

$$[P]=\frac{1}{2}[U\sum q_{Ri}l_i+q_{Rn}A]$$
 (3)

式中:[*P*]为单桩容许承载力;*U*为桩身截面周长;

*q_{Ri}*为单桩第*i*层土的极限摩阻力标准值;*l_i*为桩身穿过第*i*层土的长度;*q_{Rn}*为单桩极限桩端阻力标准值;*A*为桩身截面面积。

按照图2所示的钻孔灌注桩进行计算,此时灌注桩最大桩长为23.00 m时,底高程为-25.6 m,进入⑥土层下1.6 m。⑥土层为轻、重粉质砂壤土,地基允许承载力150 kPa,是良好的桩端持力层。经计算,[*P*]=2 281 kN>1 862 kN(1 293 kN×1.2×1.2),承载力满足设计要求。

因此,相比于无桩基础的泵站结构,设计的含钻孔灌注桩基础的瓜洲泵站结构站身更加稳定。

1.4 钻孔灌注桩施工注意事项

钻孔灌注桩通过钻孔、使用钢管挤压或人工挖掘等方式来构建桩孔,然后向孔内注入混凝土,使其凝固为混凝土桩,实现加固软土地基的目的。瓜洲泵站工程地基砂层较厚,砂性土黏聚力较小,在钻孔振动过程中易引起砂层出现流砂问题,甚至引起孔壁坍塌。因此,为确保施工质量,在施工过程中需要注意以下事项:

- (1) 钻孔施工底面应及时清理,并做好放线测量工作,以便明确桩位,避免钻孔位置偏差;
- (2) 在钢护筒的埋设中,钢护筒的内径大于桩径20 cm至40 cm左右,以避免后期施工中与钢护筒发生碰触;
- (3) 要确保好钻具中心平直稳定,与桩位中心的偏差控制在2 cm以内,同时在前后作好固定,避免摇晃;
- (4) 安装钢筋笼时需对准孔位,避免触孔壁,安装检查无误后使用钢筋绳进行固定,避免后期混凝土导管安放、二次清孔和混凝土填筑时发生位移变化;
- (5) 安放混凝土导管并浇筑混凝土时,需在浇

筑的同时提升导管,浇筑完毕后 1~2 h 将钢护筒拔出,同时检查浇筑情况,确保无误。

2 瓜洲泵站数值模拟分析

2.1 计算模型

为进一步验证瓜洲泵站设计方案的有效性和合理性,确保瓜洲泵站工程的有效安全运行,有必要采用有限单元法对瓜洲泵站进行数值模拟计算分析。为此,本文采用大型三维有限元建模软件 Hypermesh 对该泵站建立三维有限元模型。经计算发现,有限元模型自泵站向四周延伸 3~4 倍泵站高度即可满足计算要求,因此,自泵站上游边缘和下游边缘分别向上、下游各,取 65 m,考虑到钻孔灌注桩深入到地基以下一定深度,因此自泵站底板向下延伸 90 m,由此建立瓜洲泵站整体有限元分析模型。泵站整体模型如图 2 所示,整个模型共有 828 156 个单元,其中泵站部分由 294 166 个 C3D4 单元组成,灌注桩和地基等则为 C3D6 和 C3D8 单元。图 3 和图 4 分别为泵站及桩基础模型以及泵房内部结构网格。

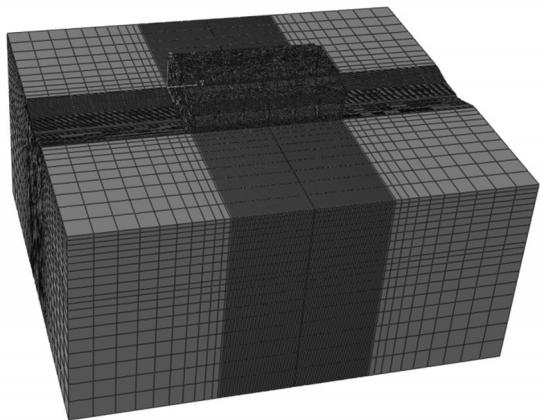


图3 瓜州泵站整体有限元模型

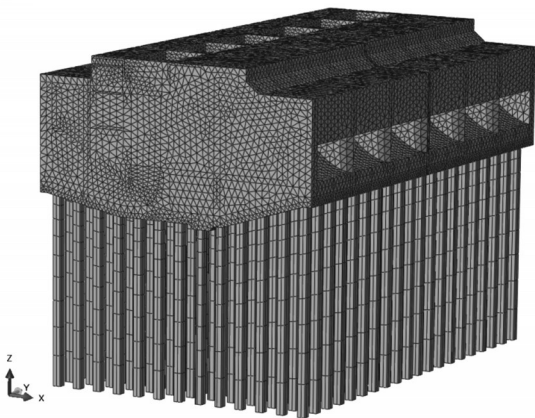


图4 泵站及桩基础有限元模型

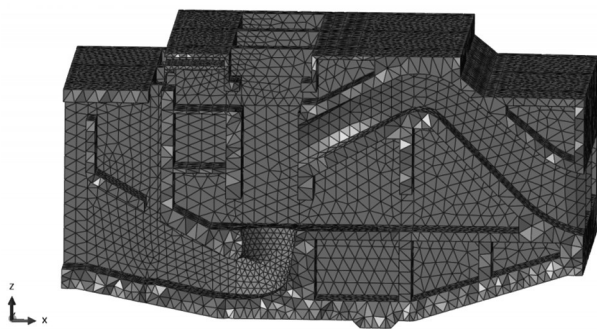


图5 泵房内部结构有限元网格

模型四周施加水平约束,底面施加固定边界约束。由于泵站及混凝土灌注桩均为 C30 混凝土材料,因此采用线弹性本构模型模拟。地基土层采用理想弹塑性 Mohr-Coulomb 本构模型模拟,其材料力学参数如表 1 所示。此外,地下水位以下土层采用浮容重,地下水位以上土层采用湿容重。

对于泵站的设计水位运行工况和校核水位运行工况,经比较发现校核水位运行工况的站上水位更高,上下游水位差更大,因此选取该工况进行分析。校核洪水运行期工况中,泵站上游侧水位为 7.72,下游侧水位为 4.65 m,泵站结构所承受的上、下游侧水压力为对应水位下的静水压力。泵站所受荷载包括自重、扬压力、上部结构引起的竖向荷载、上下游水压力及泵站两侧的水土压力。

2.2 泵站数值模拟计算结果分析

以泵站结构完建期为初始位移场,经数值仿真计算,可得泵站结构的位移和应力。图 6 和图 7 分别为校核洪水运行期工况下泵站及灌注桩的顺河向位移和横河向位移,最大顺河向位移为 0.67 cm,可以发现由于顺河向水推力的作用,泵站向下游发生位移,且位移最大值位于泵站顶部,泵站横河向位移较小。

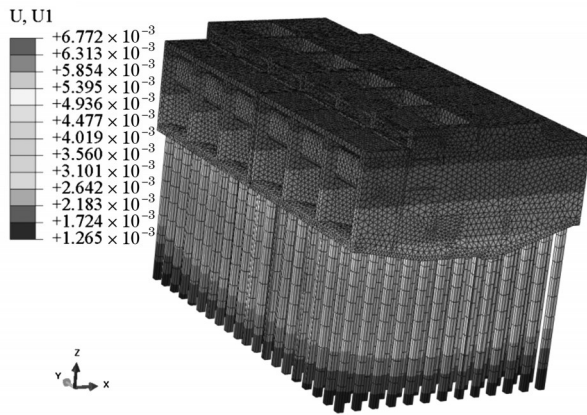


图6 校核洪水运行期工况下泵站顺河向位移(单位:m)

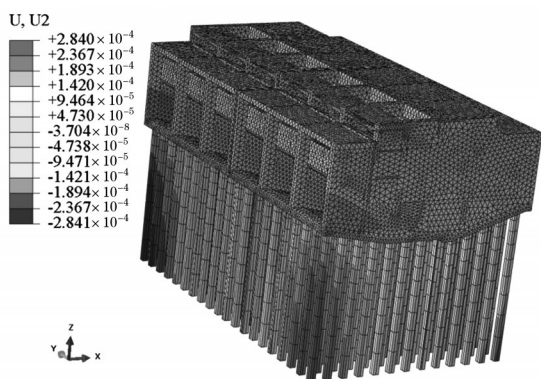


图7 校核洪水运行期工况下泵站横河向位移(单位:m)

图8、图9和图10分别为泵站结构的顺河向应力、横河向应力和竖直向应力,为方便展示,取泵站结构一半进行展示。可以看到泵站最大顺河向拉应力、最大横河向拉应力及最大竖直向拉应力分别为0.28 MPa、0.16 MPa和0.43 MPa;最大顺河向压应力、横河向压应力和竖直向压应力分别为0.15 MPa、0.43 MPa和1.03 MPa。泵站整体拉应力均在0.45 MPa以下,压应力均在1.03 MPa以下,泵站结构应力处于安全状态,按照规范进行配筋即可满足要求。

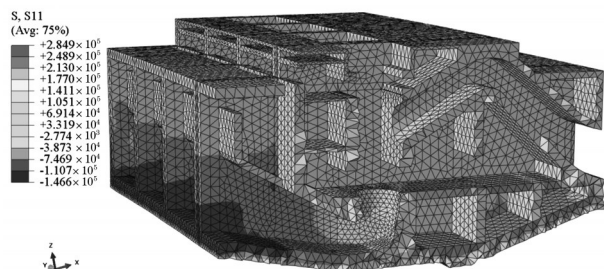


图8 校核洪水运行期工况下泵站顺河向应力(单位:Pa)

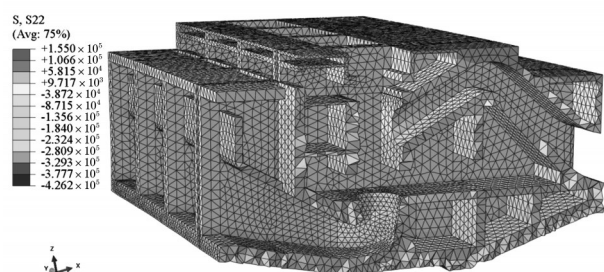


图9 校核洪水运行期工况下泵站横河向应力(单位:Pa)

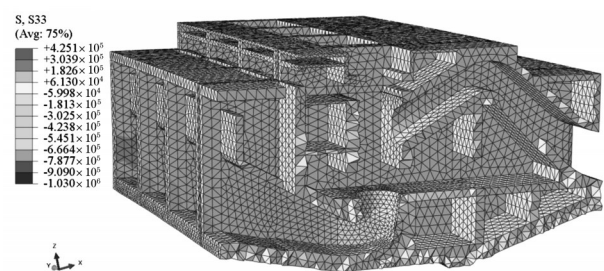


图10 校核洪水运行期工况下泵站竖直向应力(单位:Pa)

3 结 语

本文以瓜洲泵站工程为研究对象,该工程面临地地质条件差、轻粉质和重粉质砂壤土居多、地基渗透性强和易出现液化的问题,不宜作为工程天然地基持力层。分别对无桩基础和含桩基础的瓜洲泵站进行站身稳定计算,得出了无桩基础瓜洲泵站地基承载力不能满足要求的结论,而含桩基础的设计方案能够满足站身稳定要求,这也验证了含钻孔灌注桩基础的瓜洲泵站结构设计方案的有效性。在此基础上,考虑钻孔灌注桩地基处理技术的复杂性,为确保施工质量,对钻孔灌注桩施工注意事项进行了分析。最后,利用三维空间弹塑性有限单元法,对含桩基础的瓜洲泵站结构设计进行了数值模拟计算和分析,分析了瓜洲泵站结构的位移和应力,可以观察到随着高程的增加,泵站结构的顺河向位移也在不断增加,泵站结构位移和应力均处于安全状态,进一步验证了含桩基础的瓜洲泵站结构设计方案的有效性和可行性。本文研究成果对于类似泵站工程的地基处理和结构推广,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 孙正兰,司存友,华骏,等.江都水利枢纽下游潮水位变化规律及影响分析[J].长江科学院院报,2021,38(5):34-39.
- [2] 赵杰.南水北调中线刘湾泵站工程地质问题评价[J].治淮,2018(8):21-22.
- [3] 钟振宏.广州市雁塔排涝泵站扩容重建工程设计研究[J].中国水运,2023(8):61-64.
- [4] 朱湃.软土地基处理方法对泵站结构抗震性能的影响分析[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [5] 高广运,洪洋,耿建龙,等.饱和砂土液化判别与放大效应数值模拟研究[J].工程地质学报,2022,30(6):1874-1881.
- [6] 郝少雷,张兵,徐世光,等.基于SPT-APD-DDA的砂土液化评价方法研究[J].地震工程学报,2023,45(4):877-886.
- [7] 曹诚.分离式闸室结构不均匀沉降条件下闸墙结构受力特性分析[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [8] 朱德龙,周子江.胥口水利枢纽节制闸不均匀沉降的特性分析[J].江苏水利,2016(3):49-51.
- [9] 曹睿思.复合地基上闸站结合工程有限元分析[D].扬州:扬州大学,2021.
- [10] 刘金林.基于有限元法的某泵站底板结构静动力分析[D].郑州:华北水利水电大学,2021.