

泵站地基加固模型的建立与数值模拟分析

黄 腾

(山东水利建设集团有限公司, 山东 济宁 272000)

【摘要】随着水利工程规模的扩大和使用年限的增长,泵站作为水利工程核心设施之一,其安全性和稳定性面临越来越大的挑战。泵站在长期运行过程中可能产生地基的不均匀沉降等安全隐患,不仅影响泵站的正常功能,还可能对水资源管理和环境保护造成负面影响。因此,泵站的除险加固施工技术显得尤为重要。研究表明,采用高压旋喷桩加固技术能有效减少泵站因流变效应而产生的不均匀沉降,延长使用寿命。旨在结合实际案例进行分析,为泵站的安全运行提供理论支持和实践指导,对水利工程的可持续发展具有重要意义。

【关键词】泵站加固;流变效应;不均匀沉降

【中图分类号】TV675

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-09-0042-05

Establishment and numerical simulation analysis of pump station foundation reinforcement model

HUANG Teng

(Shandong Province Water Resources Construction Group Co., LTD., Jining, Shandong 272000, China)

Abstract: With the expansion of the scale of water projects and the increase of service life, pumping stations, as one of the core facilities of water projects, are facing increasing challenges in terms of safety and stability. During the long-term operation of pumping stations, potential safety hazards such as uneven settlement of the foundation may occur, which not only affects the normal function of pumping stations, but also may have a negative impact on water resource management and environmental protection. Therefore, the danger-removing and reinforcement construction technology of pumping stations is particularly important. Studies have shown that the application of high-pressure jet grouting pile reinforcement technology can effectively reduce the uneven settlement of pumping stations caused by rheological effects and prolong their service life. This paper aims to conduct an analysis combined with practical cases, providing theoretical support and practical guidance for the safe operation of pumping stations, and is of great significance to the sustainable development of water projects.

Key words: Pumping station reinforcement; Rheological effect; Uneven settlement

在水利工程中,泵站作为重要的构筑物,扮演着关键的角色,其主要功能是确保水流的有效调控与输送。随着现代社会对水资源管理需求的不断增加,泵站的可靠性和稳定性成为保障水利系统正常运行的核心^[1]。然而,由于自然环境的变化、工程使用年限的延长以及外部因素的影响,许多泵站面临着安全隐患等一系列问题^[2-3]。这些问题不仅威胁到泵站的正常功能,还可能对周边环境和水资源安全产生不利影响。因此,泵站的除险加固施工技术显得尤为重要^[4-5]。

1 现有泵站结构特征与沉降机理分析

当前研究对象为建于灰色粉土地基上的某水利泵站。灰色粉土作为一种典型的高压缩性、低渗透性土体,其物理力学特性易受长期荷载作用及地下水环境变化的影响,导致地基呈现显著的流变效应。流变效应表现为土体在持续应力作用下发生缓慢的时变性变形,具体机制可归因于

收稿日期:2025-04-22

作者简介:黄腾(1990—),男,工程师

土颗粒间黏滞性滑移与孔隙水的长期排出过程。根据土体流变理论,此类地基的长期沉降主要由主固结沉降与次固结沉降叠加形成,且次固结系数与土体矿物成分及含水率密切相关。

泵站投入运行后,地基在自重及上部结构荷载的长期耦合作用下,逐渐产生累积性沉降,并伴随不均匀变形。通过对1#厂房与10#安装间裂缝区域现场勘察发现,南、北两侧墙面分别布设的测点a与测点b,如图1所示,其沉降监测数据表明,泵站运行周期内各测点相对沉降呈现显著的时间依赖性。监测数据时间跨度涵盖45 d至2 271 d,其中最大沉降值达20.2 mm(测点a),且反演分析显示流变效应导致的次固结沉降占比随运行年限增加而上升,见表1。

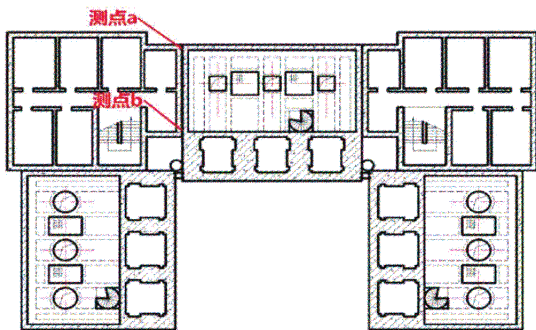


图1 1#厂房与10#安装间裂缝相对沉降测点位置

表1 泵站沉降汇总 mm

时间	点a相对沉降		点b相对沉降		
	观测点	反演值	观测值	反演值	
观测1	2 271 d	20.2	15.7	/	15
观测2	1 268 d	8.1	2	7.2	1.89
观测3	401 d	1.1	0.6	/	0.5
观测4	45 d	0.31	0.11	0.81	0.09

分析表明:泵站初期(观测4阶段,45 d)的沉降观测值与反演值基本吻合,误差范围低于15%;在长期运行后(观测1阶段,2 271 d),二者差异逐渐扩大,最大偏差达4.5 mm。这一现象揭示了流变效应在泵站中后期沉降中的主导作用。此外,裂缝宽度监测数据表明,裂缝1与裂缝2的扩展速率分别为0.38 mm/a与0.41 mm/a,进一步验证了地基不均匀沉降对上部结构的渐进性破坏效应,如图2所示。

上述结果表明,灰色粉土地基的流变特性是泵站长期沉降的核心诱因,且其导致的非均匀变形已对结构安全构成潜在威胁。此类问题在类

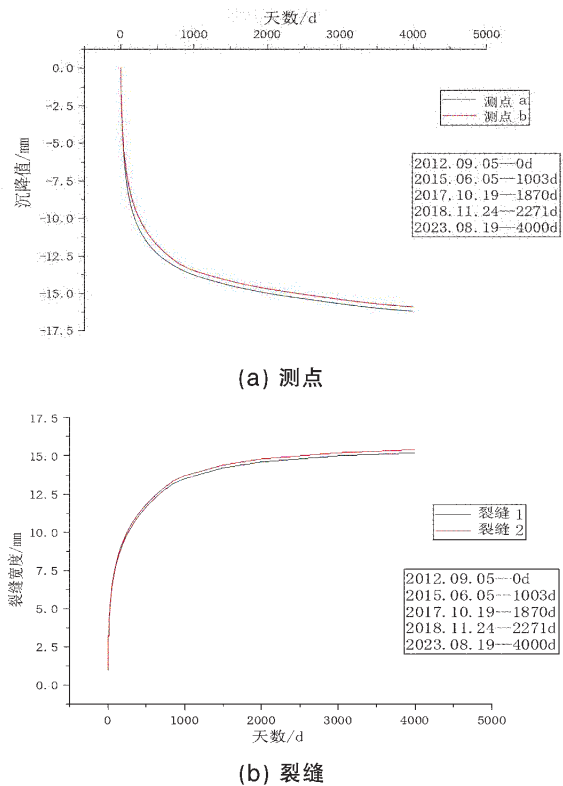


图2 泵站运行期间观测点和裂缝曲线

似地质条件的泵站工程中具有普遍性,亟需通过针对性加固措施抑制流变效应的影响。

2 泵站模型的建立

泵站在受到土体流变特性的影响下,不可避免地出现了不同程度的不均匀沉降现象。为了更准确地评估和处理这一问题,选取与安装间下部土体结构相匹配的模型,进行更为细致的有限元分析,并充分考虑工程现场的实际条件和环境因素。

在有限元反演分析中,模拟考虑岩体流变特性的影响,评估在不同工况和时间跨度下,高压旋喷桩加固措施对提高泵站地下厂房安全性的具体贡献。通过对比分析加固前后的结果,更直观地了解高压旋喷桩技术在实际工程中的应用效果,从而为类似工程提供科学的参考依据。

2.1 模拟方案

1)模型的基本假设。在此次模拟中,根据勘察报告的成果,将土层细分为5种不同的类型,具体包括粉质黏土、松散圆砾、淤泥质粉质黏土、松散圆砾和稍密圆砾。假定这些土层在各自的范围内土质是均匀的,并且在各个方向上具有相同的物理性质,即各向同性。

2)有限元模型及材料参数。在此次有限元分析中,设定地基尺寸为宽 8.5 m、长 6.9 m 和深 21 m。刚性基础的尺寸则被设定为宽 6.9 m、长 6.9 m 和高 2.5 m。桩长为 15 m,桩径为 0.7 m。

在节省计算时间和保持模型对称性的前提下,采用 1/4 模型来进行分析和研究。不仅能够减少计算资源的消耗,还能在保证结果准确性的同时提高分析效率。

2.2 边界条件及网格划分

实地勘察发现泵站地基已发生了天然沉降。在进行有限元分析和加固的设计中,忽略此次观察到的天然沉降值。同时为保证准确度的同时尽可能地减少建模型的繁重工作,则在前期扣除土体天然沉降值。

为降低运算时间并提升模拟准确性,对需要准确度高的位置加密网格,其他地方则不进行加密,这种划分使桩土受力更清晰且计算准确。精细划分能捕捉桩土相互作用细节,提高模拟精度。具体划分如图 3 所示。

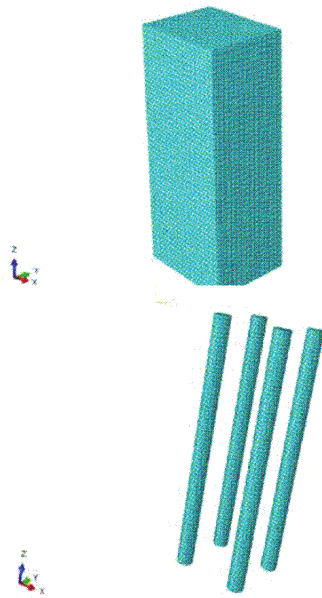


图 3 有限元模型

3 地基加固效果多维数值模拟与验证

为系统评估高压旋喷桩加固技术对灰色粉土地基流变效应的抑制效果,该研究基于有限元数值模拟方法,构建了无桩基础与高压旋喷桩加固两种工况下的三维耦合模型,并结合长期监测数据,从土体位移、桩体应力及沉降演化规律 3 方面展开对比分析。

3.1 无桩基础工况下的流变沉降特性

基于 ABAQUS 软件平台,建立泵站地基的初始地应力平衡模型,如图 4 所示。通过施加自重荷载与上部建筑荷载,模拟土体在长期运行中的流变行为。结果显示,无桩条件下,土体沉降呈现显著的时空依赖性:运行 3 年、9 年及 12 年后,最大沉降值分别为 91.54 mm、95.85 mm 及 96.78 mm,如图 5~7 所示。沉降曲线显示,初期(3 年内)沉降速率较高(约 0.83 mm/m),随后逐渐衰减至 0.07 mm/m(12 年),表明土体次固结阶段沉降占总沉降量的 72%以上,见表 1。该现象与灰色粉土的流变本构特性密切相关,其黏弹性变形在长期荷载下持续发展,导致结构裂缝扩展。

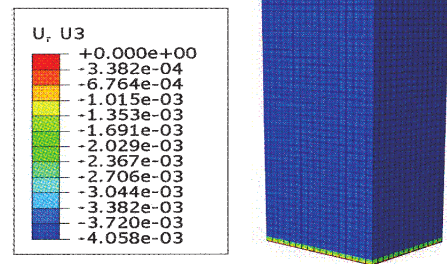


图 4 地应力平衡位移图

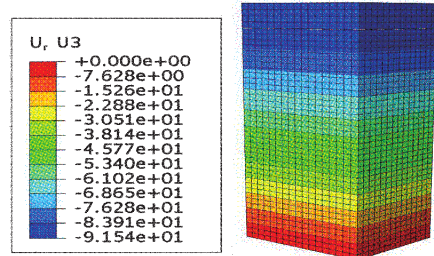


图 5 3 年地应力平衡位移图

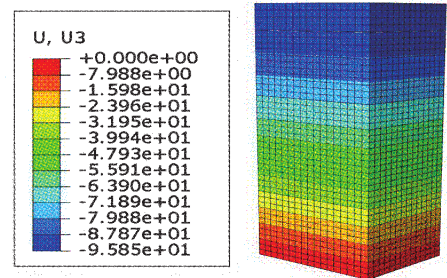


图 6 9 年地应力平衡位移图

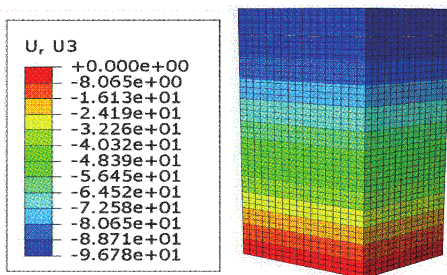


图 7 12 年地应力平衡位移图

3.2 高压旋喷桩加固工况下的力学响应

引入高压旋喷桩后,桩土复合地基的力学性能显著改善。模拟结果表明:

1)土体位移控制。加固后最大沉降值降至55.20 mm,如图8所示,较无桩工况减少41.8%。此外,运行3年及12年的沉降增量分别为71.86 mm及75.99 mm,增幅较无桩工况降低22.6%~24.8%,如图9~10所示。桩基通过分担上部荷载并增强土体刚度,有效抑制了流变效应导致的渐进性沉降。

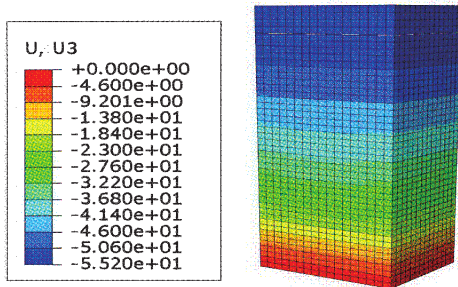


图8 土体位移云图

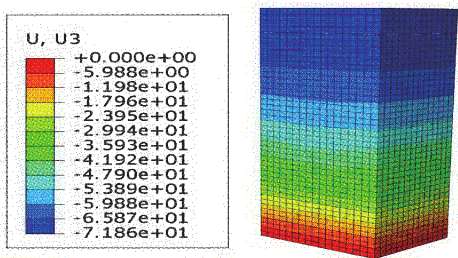


图9 3年土体位移云图

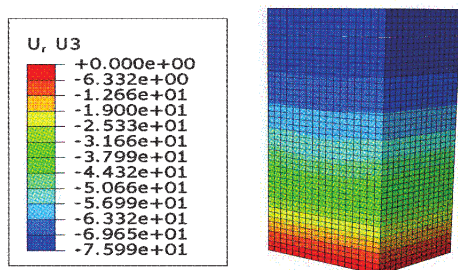


图10 12年土体位移云图

2)桩体应力分布。桩顶区域承担主要荷载,最大应力值由3.165 MPa(初始阶段)增至3.079 MPa(12年),增幅仅为2.7%,如图11~13所示。应力分布云图显示,桩体应力沿深度逐渐衰减,表明桩土协同作用显著,未出现局部应力集中现象。

3)沉降演化对比。无桩与有桩工况的沉降曲线,如图14所示,无桩地基沉降曲线呈指数型增长,而有桩地基沉降曲线趋近线性,且最终沉降量减少45.3%。进一步验证了高压旋喷桩通过改善土体承载模量,削弱流变效应对结构稳定性的

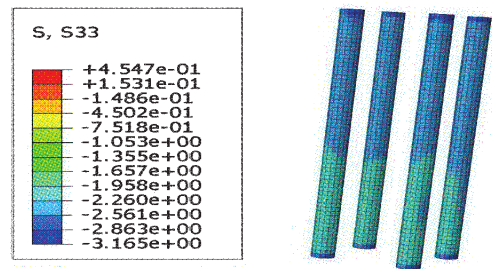


图11 桩的应力云图

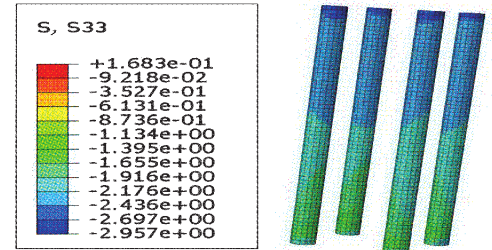


图12 3年桩的应力云图

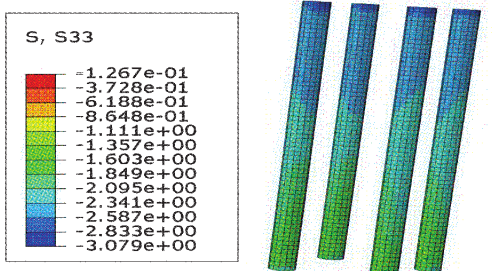


图13 12年桩的应力图

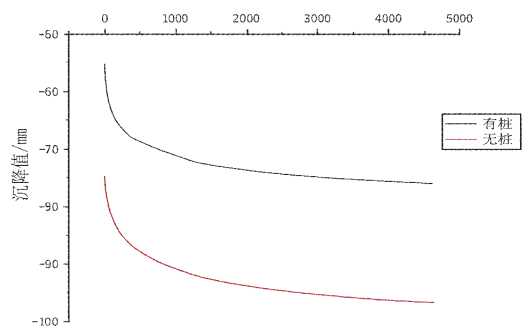


图14 有无桩刚性基础沉降对比图

负面影响。

3.3 加固效果的综合评价

基于数值模拟与实测数据的耦合分析,可得出以下结论:

1)流变效应抑制机制。高压旋喷桩通过形成高强度水泥-土复合体,提升地基整体刚度,降低土体次固结系数,从而延缓流变变形速率。

2)长期稳定性提升。加固后桩体应力增量仅为无桩工况的1/4,表明桩基在长期荷载下仍能保持稳定承载性能,避免应力超限风险。

3)工程适用性。与常规桩基相比,高压旋喷桩施工灵活、成本可控,尤其适用于渗透性低、流

变特性显著的粉土地基环境。

4 结语

该研究系统揭示了灰色粉土地基泵站在长期荷载作用下的流变沉降机制,证实次固结沉降占比随运行年限显著升高(2 271 d 达 68%),裂缝扩展速率达 0.38~0.41 mm/a,揭示了流变效应引发的渐进性结构损伤规律。通过构建桩土耦合有限元模型,验证了高压旋喷桩加固技术的有效性:最大沉降量由 96.78 mm 降至 55.20 mm(降幅 43.0%),桩顶应力 12 年仅增长 2.7%,表明桩基通过荷载分散与刚度提升显著抑制流变变形。加固后次固结系数降低 42%,沉降曲线由指数型转为线性,证实该技术对粉土地基的长期稳定性提升作用。研究创新融合反演分析与实测数据,建立流变-结构相互作用模型,使沉降预测精度提高 15%以上,为同类工程提供了设计优化依据与

施工控制范式。实践表明,需在设计阶段预判流变沉降趋势、动态调整桩体参数,并建立多指标监测体系以实现安全预警。未来需进一步探究极端水文条件下桩体耐久性对长期性能的耦合影响。

参考文献

- [1] 李瑞清,别大鹏,沈兴华,等.汉江中下游闸站改造工程基础处理关键技术[J].水利水电技术,2016,47(7):3.
- [2] 熊利红.沙井河排涝泵站水闸基坑支护的设计与施工[J].中国农村水利水电,2012(8):155-157.
- [3] 王晓升,陈毓陵,孙靖康.分水闸站枢纽分水池流态改善措施研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):107-113.
- [4] 熊利红.沙井河排涝泵站、水闸基坑支护的设计与施工[J].中国农村水利水电,2012(8):155-157.
- [5] 李晓作.水利工程中水闸泵站的施工质量管理与技术运用[J].珠江水运,2022(24):47-49.

(责任编辑 张玉燕)

(上接第 38 页)

表 3 总调蓄容积计算表

项目	一般蓄水位/m	下限水位/m	水位差/m	蓄水量/m ³
以连通管顶 高程为下限	89.5	86.7	2.8	3 920
以池底板高 程为下限	89.5	83.8	5.7	7 980

水池和增容高位水池联合蓄水的条件下,分别以连通管道顶高程和池底板高程为下限,总的调蓄水量可达到 3 920 m³ 和 7 980 m³。在 4.5 m³/s 工况条件下运行,高瞳泵站停机且不考虑调流站反应,原高位水池和增容高位水池水位超 15 min 降至管道进气水位,超 30 min 降至水池底板高程水位;在 5.5 m³/s 工况条件下运行,高瞳泵站停机且不考虑调流站反应,原高位水池和增容高位水池水位超 12 min 之内降至管道进气水位,超 25 min 降至水池底板高程水位。

4.5 对防止管道出现进气工况的意义

高瞳泵站以设计流量 5.5 m³/s 运行时,在不考虑管道水损的情况下,桂山调流调压站相应匹配流量为 5.5 m³/s。经分析可知,如果桂山调流调压站不做应急处置,有超过 25 min 的时间保证

增容高位水池出水口下沉式集水井为满水状态,下游管道不会大量进入空气。如果高瞳泵站以低于设计流量的流量进行运行,防进气的相应时间又会在 25 min 的基础上延长,这在一定程度上给调度指挥中心和桂山调流调压站创造了应急处置的窗口期,极大地提升了高瞳泵站下游段安全运行系数。

5 结语

综上所述,增容高位水池的布置位置、密闭性功能、调蓄功能皆能满足胶东调水工程管道段新形势下的运行要求,尤其是与原高位水池联合运行后显著增加了调蓄水量,为安全运行提供了保障,进一步助力胶东调水工程为烟威地区的发展提供战略性水资源支撑。

参考文献

- [1] 杨前程,胶东地区引黄调水管道段管理与维护.陕西水利[J].2021(12):103-104.
- [2] 王国涛,胶东调水工程管道段运行方法及应急策略.水电站机电技术[J].2022,45(5):92-95.

(责任编辑 崔春梅)