

Analysis of structural settlement and foundation at pump station on soft soil foundation

Xin Zhao

Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

In Xinjiang, soft soil foundations are widely distributed, with complex stratigraphic structures characterized by high compressibility and low strength, which exert a significant impact on the stable operation of pumping station projects. As essential infrastructure for water regulation and supply security, pumping stations are highly sensitive to settlement problems that directly affect structural safety and service life. Due to the pronounced nonlinear settlement behavior of soft soils under loading and seepage conditions, pumping station foundations are prone to uneven settlement, leading to structural deformation, cracking, and abnormal equipment performance. By analyzing the physical and mechanical properties of local soft soils in combination with pumping station loads and groundwater fluctuations, the settlement patterns and evolutionary mechanisms can be revealed. On this basis, the adaptability and optimization of ground treatment technologies are discussed, with measures such as drainage consolidation, composite pile foundations, and soil strengthening proposed to effectively control settlement and enhance structural stability. This study is of great importance for ensuring the safe operation of pumping stations in Xinjiang and for maintaining the reliability of the regional water supply system.

Keywords

soft soil foundation; pumping station structure; settlement analysis; ground treatment; Xinjiang region

软土地基上泵站结构沉降分析及地基处

赵馨

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

新疆地区软土地基分布广泛, 土层结构复杂, 具有高压缩性和低强度的特征, 对泵站工程的稳定运行造成显著影响。泵站作为水资源调控与供水保障的重要基础设施, 其结构沉降问题直接关系到工程安全与运行寿命。由于软土在受荷和渗流条件下表现出较强的非线性沉降特性, 泵站基础易出现不均匀沉降, 导致结构变形、裂缝及设备运行异常。通过对新疆地区软土物理力学性质的研究, 结合泵站荷载与地下水位变化的综合分析, 可以揭示沉降规律与演化机理。在此基础上, 探讨地基处理技术的适应性与优化路径, 提出排水固结、桩基复合地基及地基加固等措施, 以有效控制沉降并提升结构稳定性。本研究对于保障新疆泵站工程的安全运行与供水体系的可靠性具有重要意义。

关键词

软土地基; 泵站结构; 沉降分析; 地基处理; 新疆地区

1 引言

新疆地区水利工程建设规模不断扩大, 泵站作为调蓄与输水系统的重要组成部分, 其结构安全直接关系到区域供水与防洪体系的稳定性。然而, 受特殊地质条件影响, 当地广泛存在的软土地基成为泵站建设中的薄弱环节。软土具有含水量高、压缩性大和抗剪强度低等特点, 在长期荷载和水位波动作用下极易产生不均匀沉降, 导致泵站结构出现基础变形、裂缝扩展与功能衰减等问题。这不仅影响工程耐久性, 还增加了运行维护成本与安全风险。随着水资源调控需求的

提升, 研究软土地基上泵站结构沉降的成因、规律及防控措施, 成为保障新疆地区水利工程顺利运行的关键课题。通过系统分析沉降机理并探索适宜的地基处理方法, 能够为今后泵站建设提供科学依据和技术支持。

2 新疆地区软土地基特征

2.1 软土的物理力学性质分析

新疆地区的软土通常呈现高孔隙比、高含水量与低透水性的特征, 土粒间结合力较弱, 压缩模量偏低, 遇到外荷载时容易发生显著形变。其天然含水率常在 35% 到 55% 之间, 孔隙比可达到 0.8 以上, 导致固结速度缓慢。软土强度随含水量和应力历史变化而显著波动, 当外部荷载超过 30kPa 时即可能产生塑性变形。其剪切强度低, 抗剪强度参

【作者简介】赵馨(1998-), 女, 中国甘肃武威人, 硕士, 工程师, 从事水利设计研究。

数内摩擦角一般不足 12° ，黏聚力常小于 25kPa 。软土在循环荷载下表现出显著的累积变形效应，易引起不均匀沉降。结合新疆独特的气候条件，冻融作用进一步削弱软土的结构稳定性，增加了泵站工程地基沉降与变形的风险^[1]。

2.2 软土地基在泵站工程中的分布特征

新疆泵站工程所处地质环境复杂，软土主要分布在冲积平原、湖泊沉积区及河谷盆地，特别是塔里木盆地北缘、准噶尔盆地部分低洼区和天山南麓的灌区，软土层厚度普遍在5米至15米之间。软土沉积年代较新，成因类型多样，以粉质黏土和淤泥质土为主，常伴随高地下水位条件。泵站选址多依托河流或水库，受地貌及水文环境制约，基础区域普遍存在软弱夹层。这类土层分布的不均匀性使得泵站结构基础受力条件差异显著，部分区域承载力仅为 70 至 120kPa ，远低于泵站荷载要求。在这种条件下，若处理措施不足，极易出现沉降集中带，给泵站运行安全带来长期隐患。

3 泵站结构沉降的影响因素

3.1 地基土层压缩性与承载力不足

新疆地区软土在受荷过程中固结速度较慢，表现出明显的高压缩性。其压缩系数常在 0.5 至 1.2MPa^{-1} 之间，比普通黏性土高出近一倍。在泵站荷载作用下，土体会出现超静孔隙水压力，消散不及时易造成结构长期沉降。由于地基承载力偏低，部分区域不足 100kPa ，远低于泵站荷载需求，当泵站运行荷载超过设计值 20% 时，地基会产生过量变形。承载力不足还会导致基础沉降不均匀，产生结构附加应力，加剧上部构件开裂风险。压缩性与承载力不足的共同作用，使泵站在运行初期与长期阶段均面临沉降威胁，这也是新疆地区泵站建设中最突出的技术难题之一。

3.2 地下水位变化对沉降的诱发作用

新疆属于干旱半干旱地区，但灌溉工程广泛存在，导致局部地下水位较高且波动频繁。地下水位升高会引起软土孔隙水压力增加，削弱有效应力，使土体承载能力下降。当地下水位上升1米，地基承载力可下降 10% 至 15% ，从而引发沉降量急剧增加。而地下水位下降时，土体产生固结沉降，若下降幅度超过2米，则附加沉降量可能超过20毫米。此外，地下水的周期性波动易导致土体结构松散化和孔隙比增加，累积效应最终表现为沉降加剧。泵站运行中，抽排水引起的局部水位骤变也是影响沉降的重要因素，因此地下水位变化是决定新疆地区泵站基础沉降的关键外部动力。

4 软土地基条件下泵站沉降规律

4.1 沉降量的时空分布特征

新疆软土地基泵站在运行初期沉降速率较快，前三个月累计沉降量常达到总沉降量的 60% 以上。例如某泵站基础在运行90天后沉降量达到28毫米，而一年后累计沉降量仅增加至42毫米，体现出明显的前期集中沉降特征。空间分布上，不同地基承载区差异明显，承载力高于 120kPa 的

区域沉降量不足10毫米，而承载力不足 80kPa 的区域沉降量超过40毫米。沿泵站横向方向，沉降曲线常呈抛物线分布，最大沉降出现在机组荷载集中区，差值可达35毫米。纵向上，沉降逐渐向水泵安装端集中，沉降差值一般控制在20至25毫米范围内。整体表现为时间上前快后慢，空间上集中不均的沉降规律。

4.2 不均匀沉降对结构受力状态的影响

不均匀沉降对泵站结构受力状态影响显著，当沉降差值超过20毫米时，厂房框架梁产生额外弯矩，局部应力水平提高约 15% 。若沉降差值达到30毫米，泵站墙体出现裂缝的概率增加 40% ，并可能伴随门机轨道偏移3至5毫米，影响设备运行精度。对机组而言，当沉降差超过25毫米时，转轴中心线偏移量可达2毫米，振动幅值上升至原来的1.8倍，直接威胁运行稳定性。局部不均匀沉降还会使基础应力重新分布，承载力低的区域应力水平上升至设计值的1.3倍，导致潜在失稳风险。由此可见，不均匀沉降通过放大结构内力与位移，显著降低泵站的安全储备，成为最关键的指标。

4.3 长期运行中的沉降演化趋势

新疆地区泵站在长期运行过程中，沉降表现出阶段性演化趋势。运行前2年为快速沉降期，沉降量年均约15至20毫米，累计可达35至45毫米。进入5年后，沉降速率明显减缓，年均不足5毫米，总沉降量一般控制在60至70毫米范围。若地基存在高压压缩性夹层，10年累计沉降量可能超过80毫米。演化趋势显示，沉降发展呈现先快后缓再趋稳定的规律，但受地下水位波动影响，沉降可能出现二次加速。例如某泵站在运行第7年因地下水位下降1.5米，额外沉降量增加12毫米，导致累计沉降超出预期值 15% 。因此，长期沉降趋势不仅取决于地基固结特性，还与水文环境和运行工况密切相关，需要持续监测与调控^[2]。

5 泵站沉降对结构安全的影响

5.1 结构变形与裂缝发展的风险

软土地基上的泵站在沉降过程中容易产生局部不均匀变形，导致基础与上部结构产生额外内力。当沉降差超过25毫米时，框架柱与基础连接部位的应力集中程度显著增加，局部区域混凝土应力水平提升至设计值的1.2倍以上，产生开裂风险。结构内部拉应力与剪应力的耦合作用会引起梁、柱交接处裂缝的萌生，并随着沉降的持续发展逐渐扩展。墙体因附加弯矩作用而出现斜向裂缝，且裂缝宽度随着沉降差的增加呈线性增长，最大可达0.5毫米以上，对结构耐久性和防渗性能造成损害。基础整体变形不均还会导致厂房局部倾斜，当倾斜角超过 $1/500$ 时，泵站结构整体稳定性面临严峻考验，甚至出现承载力衰减与安全储备不足的情况。

5.2 机电设备运行稳定性受损问题

泵站机电设备的运行依赖于精确的安装条件与稳定的

基础环境,当软土地基沉降产生不均匀差异时,设备轴线偏移和振动幅值迅速增加。机组基础一旦发生20毫米以上差异沉降,水泵与电机的同轴度误差可能达到0.5毫米,远超设计允许值,运行时会产生异常振动。振动加剧不仅影响机组效率,还会导致轴承磨损速率增加一倍以上,缩短设备使用寿命。沉降引起的微小位移还会导致联轴器间隙不均匀,使传递扭矩过程中产生附加冲击载荷。若沉降长期未得到控制,机组运行噪声水平将增加3至5分贝,运行效率下降约8%。这些变化会显著提高设备故障率,增加维护与更换成本,影响泵站连续稳定运行^[1]。

5.3 泵站整体功能性衰减的表现

软土地基沉降对泵站整体功能的影响呈现逐步累积趋势。结构不均匀变形会导致水力条件恶化,进出水流道截面偏移,水流损失增加,泵站整体能效下降。若沉降差超过30毫米,水泵运行水头损失可增加5%至7%,导致设计供水能力下降。厂房沉降带来的墙体裂缝和地面不平整还会影响日常检修与人员安全,降低泵站的运维效率。长期运行过程中,沉降引起的基础失衡会破坏设备安装基准,使供水调度灵活性降低。功能性衰减不仅表现在供水量和效率下降,还体现在安全性和经济性上的损失。新疆地区泵站肩负着农业灌溉与城市供水的重要任务,若沉降问题不能有效控制,整体功能衰减将直接威胁区域水资源利用的可靠性与长期保障能力。

6 软土地基地基处理技术路径

6.1 地基加固与改良方法的适应性

新疆软土地基泵站的沉降控制可通过多种加固与改良技术实现。常见方法包括换填垫层、粉喷桩、石灰土搅拌桩和化学加固等,这些方法能够提高土体的抗剪强度和压缩模量,从而减少沉降量。换填垫层适合浅层软土地区,可在2至3米范围内改善承载条件;粉喷桩与搅拌桩则适用于厚度超过8米的软土层,能够显著提升承载力至150kPa以上。化学加固技术通过注入固化剂改善土体颗粒结构,减少孔隙比和压缩性,在地下水位较高的区域表现出良好适应性。不同技术需结合新疆地区气候与土层分布特点选择,既要考虑施工成本,也要兼顾长期效果,确保泵站地基满足结构稳定性与耐久性的要求。

6.2 排水固结与预压技术的应用前景

排水固结与预压技术在新疆软土地基处理中具有广阔的应用前景。通过布设砂井或塑料排水板,加速超静孔隙水压力消散,使软土快速固结,提高承载力并减少后期沉降。实际工程表明,在布设排水板的条件下,固结速度可提高3至5倍,工后沉降量减少40%以上。真空预压技术利用真

空泵抽排形成负压,使地基应力状态改变,固结时间可缩短一半,同时显著降低软土含水量。堆载预压则通过分级堆土模拟运行荷载,使软土提前发生固结沉降,运行期沉降风险大幅降低。该类技术适合大面积场地处理,能够有效解决新疆泵站基础厚层软土固结慢的问题,为工程安全运行提供可靠保障。

6.3 桩基复合地基在新疆泵站中的推广

桩基复合地基是新疆泵站软土处理的重点推广技术,其通过桩体与土体共同承载显著改善基础稳定性。常用的CFG桩、灰土桩和灌注桩在工程实践中表现出良好效果,桩土应力比可控制在6:4至7:3之间,使地基承载力提高到200kPa以上。不均匀沉降量控制在15毫米以内,远优于天然地基条件。桩基复合地基还能够改善地基变形协调性,减少沉降差异,保证泵站结构和设备安装精度。在新疆地区,地下水位波动大,桩基复合地基的适应性更强,既能承受集中荷载,也能抵御水文环境变化带来的附加沉降。随着施工技术成熟和成本优化,该方法具备大规模推广应用的条件,是未来新疆泵站地基处理的关键方向^[4]。

7 结语

新疆地区软土地基条件复杂,对泵站结构安全与运行稳定提出了严峻挑战。软土的高压缩性和低承载力导致沉降问题普遍存在,不均匀沉降更是直接威胁结构耐久性与机电设备的运行效率。通过对沉降机理及影响因素的系统分析,可以明确其发展规律与演化趋势,为工程防控提供理论依据。在此基础上,采取地基加固、排水固结与桩基复合地基等多种处理措施,能够有效减少沉降量并提升地基稳定性,确保泵站长期功能的可靠发挥。加强监测与维护、结合新疆特殊环境条件制定针对性措施,将为区域水利工程的安全运行提供坚实保障,也为类似地质环境下泵站建设积累有益经验。

参考文献

- [1] 李壮.泵站软土地基超长桩的承载特性与数值模拟研究[J].水利技术监督,2025,(03):190-192+281.
- [2] 刘贤才,陈雷,吴佩,邓波,余晖,贾龙,刘莉娜,魏治文,李延春,刘翔.湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司,江汉平原复杂软土地基大型泵站建设关键技术及应用[Z].鉴定日期:2024-05-01.
- [3] 李焘.水利工程软土基础上泵站更新改造的策略研究[J].水上安全,2023,(12):187-189.
- [4] 郭鹏斐,杨以亮,路威,赵卫全,杨晓东.软土地基泵站深基坑支护设计及对周边建筑物的影响研究[A].2023水利水地工程与基础工程技术创新与发展[C].中国水利学会地基与基础工程专业委员会:2023:15-24.