

# 软土地基上引调水泵站结构抗浮设计及稳定性分析

张 鹏

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘 要:** 软土地基因高压缩性、低强度等特性, 给引调水泵站结构抗浮设计与稳定性带来挑战。本文阐述软土地基特性与泵站结构受力特点, 介绍抗浮设计原则、方法及关键参数, 分析软土地基上泵站结构稳定性分析内容、方法与影响因素, 探讨软土地基处理技术和泵站结构优化设计, 为保障泵站在软土地基上的安全稳定运行提供理论依据。

**关键词:** 软土地基; 引调水泵站; 抗浮设计; 稳定性分析; 地基处理

引言: 引调水泵站作为水利设施关键部分, 对区域水资源调配意义重大。软土地基在水利工程中广泛分布, 其高压缩性、低强度、高含水量等特性, 使泵站结构面临诸多问题, 如结构开裂、倾斜、上浮等, 严重影响泵站安全运行。深入探究软土地基上引调水泵站结构抗浮设计及稳定性分析, 对于提升泵站建设质量、保障水利设施长期稳定运行具有重要现实意义。

## 1 软土地基特性与泵站结构受力分析

### 1.1 软土地基的工程特性

软土地基具有显著的高压缩性, 在外荷载作用下易产生较大压缩变形, 且变形持续时间长, 会直接影响泵站结构基础的均匀性, 可能导致结构出现开裂、倾斜等问题。其低强度特性表现为地基承载力较低, 难以承受泵站结构传递的上部荷载, 若未采取有效处理措施, 易引发地基失稳, 威胁泵站整体安全<sup>[1]</sup>。高含水量是软土地基的典型特征之一, 过高的含水量会进一步降低土体强度, 加剧土体的流变性, 使地基在长期荷载作用下持续发生变形, 对泵站结构的长期稳定性不利。同时, 软土地基的低渗透性导致水分难以快速排出, 在基坑开挖或水位变化时, 易形成较高的孔隙水压力, 增加地基处理难度与结构失稳风险。软土的流变性表现为在恒定荷载作用下, 土体变形随时间不断发展, 这种特性会使泵站结构在长期运行过程中出现缓慢沉降, 可能导致设备安装精度下降、管道连接错位等问题。此外, 软土地基常存在不均匀沉降特性, 由于土体成分、厚度及固结程度的差异, 地基不同区域沉降量不同, 易使泵站结构产生附加应力, 引发结构损伤。

### 1.2 泵站结构受力特点

地下水浮力是泵站结构面临的核心竖向荷载之一, 其作用机制与地下水位高度、结构浸没体积密切相关。当地下水位高于结构基础底面时, 水压力会对结构产生向上的浮力, 若浮力大于结构自重及其他抗浮荷载, 易

导致结构上浮、基础脱空, 破坏结构整体性。软土地基与泵站结构存在复杂的相互作用关系, 一方面, 结构荷载通过基础传递给地基, 使地基产生应力分布与变形; 另一方面, 地基的变形反作用于结构, 影响结构内力分布。这种相互作用在软土地基中更为显著, 由于软土刚度较低, 地基变形对结构受力的影响更为敏感, 易导致结构出现局部应力集中现象。地震荷载会使泵站结构与软土地基产生动态响应, 软土地基的低刚度特性可能放大地震作用效果, 导致结构产生较大水平位移与振动, 威胁结构抗滑、抗倾覆稳定性。同时, 水位波动会改变地下水浮力大小与分布, 水位上升时浮力增大, 可能突破结构抗浮极限; 水位骤降时则可能引发地基土固结变形, 对结构基础产生附加拉力, 加剧结构受力复杂性。

## 2 泵站结构抗浮设计原则与方法

### 2.1 抗浮设计基本原则

安全性原则要求确保结构整体与局部抗浮稳定, 需全面考虑软土地基可能出现的变形及荷载变化, 包括水位骤升、地基固结沉降等情况, 避免因局部抗浮失效引发整体结构隐患, 从基础到上部构件形成完整的抗浮体系, 保障泵站在长期运行及极端工况下均能抵御浮力作用。经济性原则强调优化材料选择与施工工艺, 在满足抗浮要求的前提下, 合理选用性价比高的材料, 简化施工流程, 减少不必要的成本投入, 同时避免过度设计导致的资源浪费, 实现抗浮功能与经济成本的平衡, 例如优先选用本地易得且适配软土的建材。适应性原则需结合软土地基特性与工程需求, 充分考量软土地基高压缩性、低强度等特点, 选择与地基条件适配的抗浮方案, 同时兼顾泵站的功能需求与运行环境, 确保抗浮设计方案能适应工程所处的地质条件与使用场景, 避免方案与实际情况脱节。

### 2.2 抗浮设计方法

自重平衡法通过增加结构自重抵抗浮力, 常见方式

包括在顶板铺设覆土、浇筑配重混凝土等,这种方法操作相对简便,适用于软土地基承载力可承受额外自重的情况,需注意新增自重需均匀分布,避免因局部荷载过大引发地基不均匀沉降,比如覆土厚度需结合软土压缩性分层控制<sup>[2]</sup>。抗浮构件法采用抗拔桩、抗浮锚杆等构件提供抗拔力,抗拔桩可深入软土地基下部较硬土层,通过桩体与土体的摩擦力传递抗拔力,抗浮锚杆则通过锚固段与地基的粘结作用提供抗拔力,两种构件均需根据软土地基的力学特性确定长度与布置密度,确保能有效传递抗拔力。复合抗浮法结合自重平衡与抗浮构件实现协同抗浮,当单一抗浮方法难以满足要求时,可通过增加结构自重减少抗浮构件的受力负担,同时利用抗浮构件弥补自重抗浮的不足,两种方式相互配合,提升整体抗浮效果,尤其适用于软土地基浮力较大或承载力有限的工程场景。

### 2.3 抗浮设计关键参数

抗浮水位取值标准需综合考虑工程区域的地下水位变化规律、地质勘察数据及水文条件,结合软土地基的渗透性特点,确定可能出现的最高地下水位,作为抗浮设计的基准依据,避免因水位取值偏低导致抗浮能力不足。抗浮安全系数与验算方法需符合工程设计规范,根据泵站结构的重要性及受力复杂程度确定合理的安全系数,验算过程中需全面计算浮力与抗浮力,确保抗浮力大于浮力且满足安全系数要求,同时考虑软土地基变形对受力的影响,使验算结果更贴合实际情况。抗浮构件的布置与构造要求需结合结构受力分布,抗拔桩、抗浮锚杆的布置需与结构荷载传递路径一致,避免出现受力集中区域,构造上需保证构件与结构的连接强度,防止连接部位因抗拔力作用发生破坏,同时适应软土地基的变形特性,减少构件因地基沉降产生的附加应力。

## 3 软土地基上泵站结构稳定性分析

### 3.1 稳定性分析内容

整体稳定性分析需重点关注抗滑移、抗倾覆与抗浮稳定性。抗滑移稳定性针对软土地基低抗剪强度特性,评估泵站结构在水平荷载作用下沿地基表面或内部滑动的风险,需考虑水流冲击力、地震作用等外力与地基抗滑力的平衡关系。抗倾覆稳定性聚焦结构在竖向与水平荷载共同作用下绕基础边缘转动倾覆的可能性,软土地基不均匀变形可能改变结构受力分布,进一步影响抗倾覆能力。抗浮稳定性则围绕地下水浮力与结构抗浮荷载的平衡展开,软土地基低渗透性可能导致地下水位长期维持高位,增加结构上浮风险,需纳入整体稳定性综合考量。局部稳定性分析以基础底板为核心,重点评估其

抗冲切与抗剪切能力。基础底板直接承受上部结构荷载并传递至软土地基,荷载集中区域易产生冲切力,若底板厚度或配筋不足,可能出现冲切破坏。抗剪切能力分析则关注底板在剪力作用下的受力状态,软土地基反力分布不均会加剧底板剪力集中,需通过合理设计确保底板能抵御剪切破坏,避免局部失效引发整体结构隐患。长期稳定性分析聚焦软土固结沉降对结构的影响。软土地基在荷载作用下会经历长期固结过程,沉降量随时间逐渐增加,若沉降不均匀,会使泵站结构产生附加应力,可能导致构件开裂、设备安装精度下降。长期沉降可能改变结构与地基的受力平衡状态,影响抗浮、抗滑等整体稳定性,需在分析中预判沉降趋势及对结构的长期影响。

### 3.2 稳定性分析方法

极限平衡法常用于抗滑移、抗倾覆稳定性验算。该方法通过建立力学平衡模型,计算结构在极限状态下的受力平衡条件,判断是否满足稳定性要求。针对抗滑移验算,需计算水平荷载与地基抗滑力的比值;抗倾覆验算则通过对比抗倾覆力矩与倾覆力矩,确定结构抗倾覆安全程度,操作简便且能快速获取关键稳定性指标,适用于初步设计阶段的稳定性评估。有限元法可模拟软土地基与结构的相互作用,分析应力、变形分布。该方法能考虑软土地基的非线性力学特性,将结构与地基划分为多个单元,通过数值计算呈现不同荷载工况下的应力传递路径与变形规律。借助有限元法,可清晰识别结构应力集中区域与地基变形较大部位,为优化结构设计、调整地基处理方案提供依据,尤其适用于复杂地质条件下的精细化稳定性分析。流固耦合分析重点考虑地下水渗流对结构稳定性的影响。软土地基低渗透性使地下水渗流过程缓慢,渗流产生的动水压力会改变地基受力状态,可能诱发管涌、流土等问题,进而影响结构稳定性。流固耦合分析通过建立渗流场与应力场的耦合模型,模拟不同水位条件下的渗流规律及对地基、结构的作用力,为抗浮设计、基坑降水方案制定提供支撑。

### 3.3 稳定性影响因素

软土地基的物理力学性质直接影响泵站结构稳定性。压缩模量决定地基在荷载作用下的变形程度,压缩模量越低,地基沉降量越大,易加剧结构不均匀受力;抗剪强度则与地基抗滑能力密切相关,抗剪强度不足会增加结构滑移、倾覆风险,需通过地基处理改善这些特性以提升稳定性。泵站结构形式与荷载分布对稳定性有显著影响。不同结构形式的受力特点差异较大,例如框架式结构与箱式结构的荷载传递路径不同,对地基反力

分布的要求也不同；荷载分布不均会导致局部地基应力集中，软土地基难以承受集中荷载，易引发局部沉降或结构损伤，需通过合理的结构布置优化荷载分布<sup>[3]</sup>。施工工艺与质量控制是保障稳定性的关键环节。地基处理工艺的选择与实施质量直接决定地基改良效果，若换填不彻底、排水固结不充分，会导致地基承载力未达设计要求；构件连接质量影响结构整体性，若基础与上部结构连接不牢固，会削弱结构抗浮、抗滑能力，施工过程中需严格把控各环节质量，避免因施工缺陷影响结构长期稳定性。

#### 4 软土地基处理与泵站结构优化

##### 4.1 软土地基处理技术

排水固结法通过预压排水加速软土固结，该方法需在软土地层中设置排水系统，如塑料排水板、砂井等，再施加预压荷载，使软土中的孔隙水通过排水系统排出，减少土体孔隙比，提高土体密实度与承载力。预压过程需根据软土固结特性控制加载速率，避免因加载过快引发地基失稳，适用于处理深厚软土地基，为泵站结构提供稳定的地基支撑。复合地基法采用水泥搅拌桩、碎石桩等提高地基承载力，通过在软土地基中植入增强体，与周围软土共同形成复合地基，发挥增强体的承载作用与软土的协同作用。水泥搅拌桩通过水泥与软土的化学反应形成固化体，提升地基强度；碎石桩则通过桩体的置换与排水作用改善地基性能。选择复合地基类型时需结合软土厚度、含水量及泵站荷载要求，确保复合地基能满足结构对地基承载力与变形的控制需求。加筋土法在软土中铺设土工格栅或加筋带，增强整体稳定性，加筋材料通过与土体间的摩擦力约束土体变形，传递拉应力，减少软土地基的不均匀沉降，同时提升地基抗滑能力。铺设过程中需保证加筋材料的平整度与锚固长度，确保能有效发挥作用，适用于软土地基表层处理或与其他地基处理方法配合使用，进一步提升地基整体稳定性。

##### 4.2 泵站结构优化设计

基础形式优化需根据软土地基特性选择筏板基础、

桩基础或复合基础。筏板基础通过扩大基础受力面积，均匀传递上部荷载，减少软土地基局部应力集中，适用于软土厚度较浅、荷载分布较均匀的情况；桩基础将荷载传递至下部较硬土层，避免软土地基承载力不足问题，适用于深厚软土地基；复合基础结合筏板基础与桩基础的优势，通过桩体与筏板协同作用，平衡地基承载力与变形控制要求，适应复杂软土地基条件。结构刚度调整通过增加结构截面尺寸或配置钢筋，提高抗变形能力。针对软土地基易产生沉降的特点，合理增大梁、柱等构件的截面尺寸，或优化钢筋配置，增强结构整体刚度，减少结构在地基变形作用下的附加内力，避免构件因变形过大出现开裂。调整过程需兼顾结构受力合理性与经济性，避免过度设计增加成本。动态荷载响应优化考虑地震、水位波动等动态荷载，优化结构抗震与抗浮性能。针对地震荷载，通过合理布置抗震构件、优化结构体型，减少地震作用对结构的影响；针对水位波动，调整抗浮措施，如优化配重分布或增强锚固强度，确保水位变化时结构抗浮稳定性。优化设计需结合工程所处区域的动态荷载特性，使结构能适应不同工况下的荷载作用，保障长期安全运行。

#### 结束语

软土地上引调水泵站结构抗浮设计与稳定性分析至关重要。通过明确软土地基特性、结构受力特点，合理选择抗浮设计方法与关键参数，全面分析结构稳定性及影响因素，并采用适宜的地基处理技术和结构优化设计，可有效提升泵站结构在软土地基上的抗浮能力与稳定性，确保泵站安全可靠运行，为水利工程建设与发展提供有力支撑。

#### 参考文献

- [1]郑熙凌.关于地下工程抗浮设防水位问题探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(27):154-156.
- [2]王小亮,马立东,郑健.岩土工程勘察中抗浮设防水位的确定[J].建材发展导向,2024,22(18):32-34.
- [3]王永吉,李志刚,刘宏伟,等.水工建筑物抗滑稳定性分析及设计方法研究[J].水利学报,2021,52(10):1273-1280.