

水利工程深基坑支护结构稳定性分析

姚俊豪

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 水利深基坑受水土耦合、水位波动等特殊工况影响, 支护结构失稳风险远高于普通基坑。本文依托土压力、渗流稳定等核心理论, 梳理各类支护结构适用场景与失稳模式, 从地质、水文、施工运维多维度剖析稳定性影响因素。通过 MIDASGTSNX 软件开展多工况数值模拟, 明确高水位渗流、施工扰动等核心风险, 针对性提出结构、防渗、施工及监测优化对策, 为水利深基坑安全施工提供技术参考。

关键词: 水利工程; 深基坑支护; 结构稳定性

引言: 随着水利工程建设向深水区、复杂地质区域推进, 深基坑施工规模与难度持续提升。临水基坑独特的水土耦合效应、水位动态变化及渗流作用, 极易引发支护结构变形、滑移及渗流破坏等隐患, 直接威胁工程施工安全与整体质量。为有效防控基坑失稳风险, 保障水利工程建设平稳推进, 本文系统分析支护结构稳定性, 通过数值模拟探明失稳规律, 制定科学优化措施, 为同类工程施工提供理论与实践支撑。

1 水利工程深基坑支护结构基础理论与常用类型

1.1 深基坑支护稳定性核心理论

(1) 土压力理论: 核心为朗肯与库仑土压力理论, 前者基于土体半无限弹性假定, 适用于平整土体工况; 后者考虑土体摩擦角与黏聚力, 适配复杂坡面工况。水利基坑存在水土耦合效应, 需对传统公式做渗水、水压修正。土压力是支护结构核心受力来源, 直接影响墙体变形、结构倾覆及整体稳定性。(2) 边坡稳定理论: 主流分析方法为极限平衡法与强度折减法, 前者通过土体抗滑、下滑力矩比值判定边坡稳定性, 后者通过折减土体强度参数模拟边坡渐进破坏过程, 可精准分析水利临水基坑土体滑移、整体坍塌等破坏模式。(3) 渗流稳定理论: 地下水渗流是水利基坑区别于普通基坑的关键因素, 会改变土体应力状态, 引发流土、管涌等破坏, 弱化土体强度, 冲刷基坑土体, 降低支护嵌固稳定性, 诱发结构沉降、倾斜等安全隐患。

1.2 水利工程常用深基坑支护结构类型及适用条件

(1) 钢板桩支护: 结构轻便、施工高效、可循环利用, 具备良好的挡土和临时防水性能, 适配河道周边、临水浅层深基坑。但结构整体刚度较小, 抗变形能力弱, 不适用于深水、大开挖深度的复杂水利基坑工

况。(2) 地下连续墙支护: 整体刚度大、防渗性能优异、支护稳定性强, 结构整体性好, 可适配深水、超深基坑及软硬交错的复杂地质, 是大型水利枢纽、临水深基坑的核心支护形式。(3) 排桩支护: 以钻孔灌注桩、咬合桩为核心, 支护强度高、施工扰动小, 挡土效果突出。但单一排桩防渗能力薄弱, 水利工况中需搭配止水帷幕、注浆加固等配套工艺, 提升抗渗与整体稳定性。(4) 复合支护结构: 常见锚杆+排桩、内支撑+地下连续墙组合形式, 融合各类支护结构优势, 可有效控制结构变形, 适配大跨度、高水压、高风险的水利深基坑工况, 适用性极强^[1]。

1.3 水利深基坑支护结构失稳破坏模式

(1) 结构变形失稳: 主要表现为支护墙体侧移、桩体弯曲、基坑整体沉降等, 多由施工荷载超标、土体不均匀挤压导致, 是最常见的渐进式失稳形式。(2) 边坡滑移失稳: 基坑周边土体沿软弱夹层发生滑移, 带动支护结构偏移、倾覆乃至整体坍塌, 高发于土质松软、河道水位波动频繁的水利基坑区域。(3) 渗流破坏失稳: 地下水持续渗流引发土体渗透破坏, 掏空支护结构底部土体, 造成结构沉降倾斜, 是水利深基坑最具特殊性的核心失稳模式。

2 水利工程深基坑支护结构稳定性影响因素分析

2.1 地质条件因素

(1) 土体特性: 土体物理力学参数是决定基坑支护稳定的基础条件。土层含水率过高会降低土体密实度与抗剪强度, 增大土体压缩性; 黏聚力、内摩擦角越小, 土体抗滑移能力越弱, 极易发生土体坍塌。同时, 压缩模量直接影响土体变形程度, 软弱土层、杂填土层土质均匀性差、承载力低, 受基坑开挖扰动后易出现不均匀

沉降,引发支护结构偏移、变形等问题。(2)地层结构:复杂不良地层结构对基坑稳定性影响显著。土层分层交错分布会造成基坑受力不均,土层界面易成为滑移薄弱面;地层中的软弱夹层抗剪强度极低,是基坑边坡滑移的主要诱因。此外,岩溶、裂隙等不良地质会破坏土体完整性,导致基坑局部应力集中,引发局部塌陷、渗漏等病害,严重威胁支护结构整体稳定。

2.2 水文环境因素

(1)地下水水位变化:水利基坑紧邻水域,水位动态波动频繁。汛期水位骤涨、日常水位反复升降,会大幅提升基坑水土复合压力,持续浸泡软化周边土体,降低土体抗剪与抗压强度,直接削弱支护结构抗倾覆、抗滑移性能,增大基坑失稳风险。(2)渗流作用:地下水持续渗流会产生动态渗透力,打破土体原有应力平衡。渗流水会冲刷、带走基坑底部及侧壁细小土颗粒,逐步形成孔隙通道,进而引发管涌、流土等渗透破坏病害,导致土体结构破损、承载力下降,破坏支护体系受力平衡^[2]。(3)水体冲刷:临近河道、湖泊的水利深基坑,长期水流冲刷会持续侵蚀基坑外侧浅表土体,造成土体流失、坡面缺损,逐步缩减支护结构有效嵌固深度,降低结构嵌固稳定性,诱发支护倾斜、边坡坍塌等隐患。

2.3 支护结构设计与施工因素

(1)设计参数合理性:支护结构各项设计参数直接决定整体受力性能。嵌固深度不足、墙体厚度偏小、内支撑间距过大、锚杆张拉拉力取值不合理等设计问题,会导致支护结构整体刚度不足、受力分布不均,无法抵御水土压力作用,引发结构变形、失稳。(2)施工工艺规范性:施工不规范是支护失稳的常见人为因素。支护桩施工偏移、地下连续墙接缝封堵不严造成渗漏、锚杆张拉锚固不到位、土方超挖超勘等违规操作,会破坏支护体系完整性,大幅降低结构支护与防渗性能。(3)施工荷载影响:基坑施工过程中,周边建材堆载、大型施工机械作业振动、临时设备堆积等荷载,会额外增大支护结构侧向土压力,加剧土体扰动,超出结构承载极限时,会直接诱发支护弯曲、侧移等变形失稳问题。

2.4 外部环境与运维因素

(1)温度与气候条件:暴雨、持续降雨天气会快速加剧土体饱和程度,提升地下水渗流压力,放大基坑渗漏、滑移风险;环境温差反复变化,会使支护结构产生热胀冷缩应力,引发结构细微变形,长期累积会影响整体稳定性。(2)监测运维缺失:基坑施工动态监测是风险防控的关键。若监测频次不足、数据采集滞后、隐患

排查不及时,无法精准预判支护变形、墙体渗漏、土体滑移等初期隐患,会导致微小风险持续扩大,最终引发支护结构失稳坍塌事故。

3 水利工程深基坑支护结构稳定性数值模拟与优化对策

3.1 数值模拟软件与模型构建

(1)模拟软件选取:本次数值模拟选用 MIDASGT-SNX 岩土专用有限元软件,该软件针对性适配水利工程复杂水土耦合工况,具备精准的结构应力计算、渗流分析与变形模拟功能。相较于通用模拟软件,其可以有效模拟临水基坑水位波动、土体渗流、结构受力协同变化规律,能够精准输出支护结构毫米级位移、应力差值数据,可满足水利深基坑高精度稳定性分析需求,适配本次工程基坑开挖、水土耦合、施工扰动等多场景模拟计算。(2)模型基本假设:为提升模拟效率且保证数据准确性,结合水利基坑工程实际进行合理简化。模型采用摩尔-库伦土体本构模型,适配粉质黏土、砂土等常见水利基坑土层;假定各土层均为均质、各向同性弹塑性体,支护结构为线弹性材料。同时设定模型四周为透水边界、底部为固定不透水边界,严格遵循水土耦合渗流计算规则,忽略微小温度应力与远距离地层扰动带来的干扰影响^[3]。(3)模型参数设定:依托工程地质勘察报告确定核心参数,基坑开挖深度设定为 12m,基坑整体尺寸为 80m×45m。土层参数方面,表层杂填土厚度 2.0m,黏聚力 12kPa,内摩擦角 18°;中层粉质黏土厚度 6.5m,黏聚力 28kPa,内摩擦角 24°;下层砂土厚度 8.0m,渗透系数 $3.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。支护结构采用地下连续墙,墙厚 0.8m,嵌固深度 9m。模型采用四面体网格划分,共划分 12860 个网格单元,精准完成三维数值模型搭建。

3.2 不同工况下支护结构稳定性模拟分析

(1)常态水文工况模拟:模拟基坑正常水位、无降雨的常规施工工况,结果显示支护结构整体稳定性良好。支护墙体最大侧向位移为 4.2mm,出现在基坑开挖面中部位置,土体沉降量整体控制在 3.5mm 以内,结构应力峰值为 185kPa,未超出结构设计容许应力范围。该工况下水土压力分布均匀,无明显渗流通道,支护结构变形与应力均处于安全可控区间。(2)汛期高水位工况模拟:模拟河道汛期高水位、强渗流工况,水位抬升 3.5m 后,基坑水土耦合压力显著增大。模拟数据表明,支护墙体最大侧向位移增至 9.8mm,较常态工况提升 133%,结构应力峰值升至 296kPa。地下水渗流速度明显加快,基坑侧壁局部出现微弱渗流现象,土体有效应力降低,支护结构抗滑移、抗倾覆安全系数下降 0.23,

整体稳定性被明显弱化。(3)施工扰动工况模拟:模拟土方分层开挖、周边施工机械堆载扰动工况,在基坑周边施加 20kPa 施工附加荷载。模拟结果显示,基坑上部支护结构应力集中明显,桩体顶部侧向位移增幅最大,最大变形量达 7.1mm。土方超挖 0.5m 工况下,局部土体滑移风险显著提升,是施工过程中最易出现失稳隐患的关键节点^[4]。

3.3 模拟结果与失稳风险总结

(1)支护结构变形规律:综合多工况模拟结果,支护结构变形呈现明显的规律性特征。常态工况下变形量最小,汛期高水位工况变形最为显著;支护墙体、排桩结构最大变形均集中在开挖面中上部区域,底部嵌固段变形量极小。变形超限主要诱因是高水位引发的水土压力激增、施工超挖及临时荷载堆积,是结构侧向变形的核心影响因素。(2)应力分布特征:支护结构应力整体呈现“中部高、两端低”的分布特征,基坑转角处、开挖面支护衔接位置存在明显应力集中现象,最大应力集中区域位于地下连续墙 3~8m 深度区间。该区域长期承受较大水土复合压力,易出现墙体开裂、桩体弯折、接缝渗漏等病害,是支护结构破损失稳的关键薄弱部位。(3)核心风险总结:结合多工况模拟数据,梳理出水利深基坑三大核心失稳风险。一是汛期高水位引发的渗流破坏风险,极易诱发管涌、流土病害;二是施工扰动导致的结构变形超限风险;三是基坑转角、开挖面等薄弱部位应力集中引发的局部失稳风险。其中,水文工况变化引发的失稳风险占比最高,是水利基坑区别于普通基坑的核心风险点。

3.4 提升支护结构稳定性的优化对策

(1)结构设计优化:基于模拟结果针对性优化设计参数,将原地下连续墙嵌固深度由 9m 优化至 11m,墙体薄弱区域厚度由 0.8m 增至 1.0m。调整内支撑间距,由 3.0m 缩小至 2.5m,提升结构整体刚度。针对临水高风险区域,采用“地下连续墙+钢内支撑”复合支护形式,有效降低结构侧向变形,提升结构抗倾覆性能。(2)防渗排水优化:在基坑外侧增设深度 15m 的防渗帷幕,阻断侧向渗流通道;沿基坑周边布置间距 2.0m 的降水井

点,在支护墙体增设泄水孔,及时排出基坑内部积水。通过防渗、降水、泄水协同处理,可降低 30% 以上的水土渗透压力,有效规避渗流引发的土体破坏与结构失稳问题。(3)施工工艺优化:严格执行分层、分段开挖工艺,单次开挖深度控制在 1.5m 以内,严禁超挖、快挖作业。规范支护施工流程,严控地下连续墙接缝施工质量,杜绝渗漏隐患。限定基坑周边临时堆载不超过 10kPa,避开支护薄弱区域开展重型机械作业,最大程度降低施工扰动对支护稳定性的影响^[5]。(4)动态监测与预警优化:搭建全方位实时监测体系,布设位移、沉降、渗流、应力监测点位共计 42 个,实时采集支护结构变形与水土压力数据。设定三级风险预警阈值,当墙体位移超 8mm、渗流量超规范限值时及时预警。通过实时监测、数据反馈、隐患处置闭环管理,提前规避各类失稳风险,保障基坑施工全程安全稳定。

结束语

本文系统探究了水利工程深基坑支护结构稳定性问题,明确了地质水文、施工运维等关键影响因素,揭示了不同工况下支护结构的变形与应力分布规律,识别出核心失稳风险。结合数值模拟结果,从结构设计、防渗排水、施工工艺、动态监测四方面提出优化方案,可有效提升基坑支护稳定性。研究成果可为水利深基坑风险防控提供借鉴,助力提升水利工程施工安全管控水平。

参考文献

- [1] 张驰,孙晓燕,柏东辰.组合支撑体系在水利深窄基坑支护中的稳定性应用研究[J].江苏水利,2025,7(9):45-49.
- [2] 王浩,陈军,刘阳.水利工程深基坑桩锚支护结构失稳诱因及稳定性数值分析[J].水利与建筑工程学报,2024,22(2):112-117.
- [3] 周千凯,刘晓红.临近水工建筑物深基坑开挖支护稳定性及临界参数分析[J].水运工程,2026,9(3):101-108.
- [4] 赵磊,张建军.基于 FLAC3D 的水利深基坑支护结构受力变形与稳定性优化[J].水利技术监督,2023,31(5):89-94.
- [5] 陈明,吴志远.软土地区水利深基坑复合支护体系稳定性影响因素研究[J].岩土工程技术,2022,36(4):312-317.