水利工程泵站深基坑施工安全稳定分析

缪宏伟[1]　方　雨[2]　张钟天[3]
1. 徐州市水利工程建设有限公司　江苏　徐州　221000
2. 江苏江博建设有限公司　江苏　南京　211500
3. 镇江市水利建筑工程有限公司　江苏　镇江　212100

摘　要：为解决水利泵站深基坑施工失稳、渗流破坏等安全难题，本文依托基坑稳定核心理论，结合泵站工程水文、地质及施工特殊工况，系统剖析自然环境、人为施工、结构运维等多维度风险因素，完成风险识别与等级划分。通过MIDASGTSNX与FLAC3D软件开展多工况数值模拟，明确基坑变形、支护受力及渗流场变化规律，针对性提出支护优化、渗流防控及现场应急保障措施，为同类工程安全施工提供技术参考。

关键词：水利工程；泵站深基坑；施工安全稳定

引言：泵站作为水利工程核心取水、输水构筑物，多临水布设，配套深基坑工程具有开挖深度大、水文地质条件复杂、渗流风险突出等特点。软土场地易发生沉降、管涌及支护变形失稳问题，加之施工扰动、气象变化等叠加影响，极易引发安全事故。为严控施工风险、保障基坑施工稳定性，本文结合工程实际，开展深基坑施工安全稳定系统性分析，通过数值模拟研判风险隐患，制定精准防控方案，筑牢工程施工安全防线。

1 泵站深基坑施工基础理论与工程概况

1.1 深基坑施工安全稳定核心理论

（1）基坑边坡稳定理论：基坑边坡失稳主要受滑动面剪应力超限及整体倾覆力矩控制。依据极限平衡法计算抗滑力矩与滑动力矩之比（抗滑稳定安全系数），判定标准要求安全系数不小于规范允许值，当边坡位移速率骤增或坡顶裂缝贯通时，判定为失稳前兆。（2）基坑渗流稳定理论：地下水位差作用下，水力坡降超过土体临界坡降时，管涌、流砂随即发生。控制原理在于降低动水压力，通过截渗帷幕延长渗径、减小出逸坡降，确保基坑底部抗渗流稳定安全系数满足设计要求。（3）支护结构受力稳定理论：钢板桩、灌注桩及地下连续墙在土水压力作用下，以"被动土压力抵抗主动土压力"为核心机制。变形稳定取决于支护刚度、嵌固深度及支撑体系，需控制桩顶水平位移及坑底隆起量在警戒值以内。

1.2 泵站深基坑工程工况特点

（1）水文条件特点：泵站紧邻河道、湖泊，地表水补给强烈，地下水位埋深浅，承压水头高，基坑开挖后水力连通性强，渗流场变化复杂，突涌风险突出。（2）地质条件特点：水利工程多分布于河漫滩及冲积平原，广泛分布淤泥质土、粉质黏土，天然含水率高、灵敏度高、承载力低，开挖扰动易引发触变沉降。（3）施工工况特点：基坑深度多超过15m，平面呈窄长形，机械作业空间受限。重型吊装设备、降水运行及开挖卸载产生反复扰动，时空效应明显，对支护体系受力转换提出较高要求[1]。

1.3 常用施工支护与降水技术

（1）基坑支护：排桩支护适于深大、地质差基坑，需内支撑或锚索控变形；钢板桩适于浅层软土，施工快且止水好；复合支护（灌注桩+高压旋喷帷幕）兼具承载与截渗，用于高水位、深厚软土。（2）基坑降水：轻型井点适于粉质黏土，分级降水控水力坡降；深井及管井适于砂层，疏干承压水头、降低内外水头差，井距与流量依渗流场优化。（3）基坑加固：注浆压入水泥浆充填孔隙，增强度与抗渗；换填夯实挖除软弱土，分层回填级配砂石碾压，提高基底承载力与稳定性。

2 水利工程泵站深基坑施工安全稳定影响因素与风险分析

2.1 自然环境因素影响分析

（1）水文因素：地下水水位季节性波动及河道水位变化，改变基坑水头差，增大渗透压力；承压水头击穿薄弱隔水层时，引发基底突涌；汛期河水倒灌，边坡土体饱和后抗剪强度骤降，严重时可致基底顶升失稳。（2）地质因素：冲积平原土层透镜体交错分布，力学参数离散，软土流变特性显著，蠕变沉降持续数月；局部软弱带易成隐蔽滑面，地基承载力不足时坑底隆起超标，周边地表差异沉降威胁相邻建筑安全。（3）气象因素：暴雨致坡面入渗激增，基质吸力丧失，非饱和土体

强度锐减；大风使高耸塔吊产生脉动风振，倾覆力矩增大；高温干旱致膨胀黏土干缩开裂，裂缝形成优先渗流通道，削弱支护整体性，加速水土流失。

2.2 施工人为因素影响分析

（1）开挖施工因素：超挖直接削减被动区土体抗力，使支护结构嵌固深度不足；欠挖导致支护结构额外承受挤压应力；开挖顺序颠倒（如先挖支撑下方土体）破坏预设荷载传递路径；分层厚度超过设计限值时，侧向卸荷速率过快，土体应力来不及重分布，瞬时塑性区贯通诱发滑塌事故。（2）支护施工因素：钻孔灌注桩垂直度偏差或钢筋笼定位偏移，削弱截面抗弯刚度；钢支撑拼装轴线偏心、活络头锁定不牢致轴力损失；锚索成孔角度偏差、注浆不饱满使锚固段粘结力不足，锚索提前拔出失效，支护体系无法有效约束土体侧向挤出。（3）现场管控因素：坑顶临时堆土高度超限、钢筋及管材集中堆放增加附加荷载；挖掘机回转、重载车辆运输产生循环动载扰动敏感地层；监测数据未按时采集、预警阈值设置不合理，导致险情发现滞后，丧失应急处置黄金时间[2]。

2.3 结构与运维因素影响分析

（1）支护结构老化变形：长期水土压力及温度应力交替作用下，灌注桩桩身混凝土碳化加剧、钢筋保护层剥落，钢板桩锁口锈蚀变形、有效截面减薄，地下连续墙接缝止水带老化开裂，结构刚度持续退化，水平位移累计值逼近临界状态。（2）基坑排水系统失效：潜水泵电机过载烧毁、出水软管弯折破裂或滤网被泥砂完全堵塞，导致降水井出水量锐减；坑底排水沟被塌落土体淤填、集水坑边坡坍塌，排水路径中断，地下水位回升后绕流形成管涌通道，细颗粒流失后土体骨架破坏。（3）周边环境扰动：相邻基坑同步开挖引起的叠加应力场重分布、邻近河道清淤疏浚导致坑外水头人为骤降，均改变原有边界约束条件；坑顶施工车辆频繁碾压使土体压密下沉，管线渗漏软化局部土层，间接诱发支护附加变形甚至连锁破坏。

2.4 施工安全风险识别与等级划分

（1）风险识别：系统梳理六大核心风险类型——基坑整体坍塌、边坡深层圆弧滑移、坑底管涌流砂、支护结构倾覆折断、内支撑体系受压失稳、坑周地表不均匀沉陷。逐一分析各类风险的孕险环境（高水位软土）、触发条件（超挖、暴雨、排水失效）及演化路径，编制风险源辨识清单。（2）风险评估：采用层次分析法赋权结合专家打分进行定性研判，同时利用数值模拟量化灾害后果严重程度；按照事故发生概率与损失后果构建二维风险矩阵，将各风险项划分为高（红色）、中（橙色）、低（黄色）三个等级。高风险项须单独编制专项应急预案，加密监测频次至每日两次以上；中风险项加强日常巡查与数据跟踪；低风险项纳入常规安全管理即可。

3 水利工程泵站深基坑施工稳定性模拟分析与安全防控措施

3.1 基坑稳定性数值模拟方案设计

（1）模拟软件选取：依托MIDASGTSNX及FLAC3D专业岩土模拟软件开展数值分析。MIDASGTSNX在复杂结构-土体相互作用及渗流-应力耦合分析方面优势突出，适用于泵站基坑支护体系三维精细化建模；FLAC3D基于有限差分法，擅长模拟土体大变形、塑性区开展及应变软化过程。两软件联合应用可互为校验，提升分析结果可靠性。（2）模型参数设定：依据工程地质勘察报告及室内土工试验，确定各土层天然重度、饱和重度、粘聚力、内摩擦角、压缩模量及渗透系数；支护结构参数包括灌注桩弹性模量、截面惯性矩、配筋率，内支撑轴向刚度，锚杆自由段与锚固段长度及预应力锁定值；边界条件设置侧向位移约束与底部全约束，地表按施工荷载施加超载，地下水按稳态渗流理论施加水头边界。（3）模拟工况设置：综合工程实际与最不利组合原则，选取开挖深度15m、18m、21m三个水平，地下水位设定为坑底以下0.5m（安全水位）、坑底以上2m（高水位风险）、地面以下1m（极端洪水位），施工荷载按20kPa与40kPa两档取值，共计18组工况，系统考察不同条件下基坑位移场、应力场及渗流场演化规律[3]。

3.2 模拟结果与稳定性分析

（1）基坑边坡变形分析：计算结果表明，水平位移随开挖深度增加呈非线性增长，最大位移点位于开挖面以上约2/3桩高处；竖向沉降呈"凹槽型"分布，最大沉降发生于坑边0.5倍开挖深度范围内。水位升至坑底以上2m且荷载40kPa时，坡顶沉降量较降水充分工况增大42%～55%，位移速率连续三日超3mm/d预警值。21m深度高水位工况下坡脚塑性区完全贯通，安全系数仅0.98，低于1.25临界值，判定为不稳定状态。（2）支护结构受力分析：支护桩弯矩沿深度呈"抛物线"分布，最大正弯矩位于开挖面以下3～5m区段，最大负弯矩集中于支撑标高处；锚杆轴力自自由段向锚固段递减传递，高水位工况锚固段粘结应力峰值超极限强度，存在拔出风险。经桩径加大至Φ1000并增设内支撑后，桩顶位移由53.8mm降至29.6mm，满足30mm警戒线要求[4]。（3）渗流稳定性分析：基坑阴角及围护桩接缝处水力坡降集中，局部达0.52，超过粉质黏土临界坡降0.35，管涌风险突出。增设

高压旋喷截渗帷幕后，出逸坡降降至0.28，流砂风险点位由7处缩减至1处，渗流场稳定性显著改善。

汇总代表性工况模拟结果如下：

工况编号	开挖深度(m)	水位高度	施工荷载(kPa)	最大水平位移(mm)	最大沉降(mm)	安全系数	稳定性判定
S-03	15	坑底以下0.5m	20	18.6	12.3	1.48	安全
S-08	18	坑底以上2.0m	20	36.4	28.7	1.16	临界
S-12	18	坑底以下0.5m	40	31.2	22.5	1.29	注意
S-15	21	坑底以上2.0m	40	53.8	41.6	0.98	失稳
S-18	21	坑底以下0.5m(加固后)	40	29.6	18.4	1.37	安全

3.3 施工安全稳定防控技术措施

（1）边坡稳定防控：依据模拟反演参数实施分层分段开挖，每层厚度控制在2.5m以内，分段长度按20m推进；边坡坡度按1:1.5～1:2.0分级放坡，开挖成型后6小时内完成C20喷射混凝土（厚80mm）及挂网防护；开挖速率每日不超过1层，降雨期间立即停工，已开挖面覆盖防水彩条布，严防雨水入渗。（2）渗流风险防控：优化降水井布置，间距由15m加密至10m，井深加深至坑底以下8m，增设应急备用井3口；坑内设置纵横排水盲沟（间距15m×15m）及集水坑（每500m^{2}设1个），排水能力按设计涌水量1.3倍配置；对模拟辨识的7处管涌薄弱区实施袖阀管注浆，压力0.5～1.0MPa，浆液水灰比0.8:1，扩散半径不小于1.5m，注浆后取芯检测强度不低于1.5MPa。（3）支护结构优化：桩身弯矩峰值区加大配筋率，主筋由Φ25@150调整为Φ28@150，箍筋加密至Φ10@100；锚杆自由段由6m延长至8m，锁定预应力提高至设计值1.1倍；变形较大侧增设Φ609钢支撑，竖向间距由6m缩小至4m，预加轴力按设计值70%施加，提升体系抗侧刚度与冗余度。

3.4 施工现场安全管理与应急保障措施

（1）动态监测管控：沿基坑周边布设测斜管16根（间距25m）、地表沉降点32个、水位观测井12口、支撑轴力计24个，实现全方位实时监测。开挖阶段每日采集2次，底板浇筑后每日1次，暴雨及异常变形时加密至每2小时1次。数据超预警值（累计30mm或单日3mm）时自动短信报警，联动数值模拟反演预测趋势，辅助决策。（2）现场施工管控：材料堆放区距坑边不小于5m，堆载限值15kPa，钢筋管材随用随清；机械行走路线铺设路基箱分散荷载，回转半径内设隔离护栏禁入；每道工序前书面技术交底并留存影像，专职安全员全过程旁站，违规操作立即叫停整改[5]。（3）应急处置保障：编制基坑坍塌、管涌流砂、暴雨倒灌三份专项应急预案，明确报送流程、疏散路线及处置措施。现场储备砂石料200t、编织袋3000条、大功率水泵5台、注浆设备2套、150kW应急发电机1台，专库专管。每季度组织全员综合演练，模拟管涌封堵及人员救援全过程，检验响应速度与物资调配效率，演练后总结修订预案。

结束语

本文通过理论分析、风险研判与数值模拟结合的方式，明确了泵站深基坑施工失稳诱因与演化规律，验证了分层开挖、截渗加固、支护优化等技术措施的有效性。研究结果表明，水文条件与施工不规范是基坑失稳的核心诱因，精细化防控与动态监测可大幅提升基坑稳定性。后续施工需严格落实防控措施，强化动态管控，持续优化施工工艺，为水利泵站深基坑工程安全高质施工提供坚实保障。

参考文献

[1]黄学刚,赵伟,马军英.基于雨水泵站结构特征的基坑换撑优化设计及稳定性分析[J].岩土工程技术,2025,39(02):232-238.

[2]刘金豹.复杂地质条件下水利工程泵站深基坑开挖支护及安全稳定控制[J].水利技术监督,2025,42(12):325-327.

[3]王钰雯,管宪伟,刘涛.引江济淮工程泵站深基坑变形特征与稳定性数值模拟研究[J].治淮,2024,9(06):62-65.

[4]段凯,石广.复杂水文地质下水利超深基坑渗流特性及稳定性防控[J].建筑技术,2023,54(13):1591-1595.

[5]王伟,吴恒宇.水利泵站深基坑施工安全隐患及稳定性防控措施[J].内蒙古水利,2024,10(04):11-13.