

水利工程施工中深基坑支护的安全风险识别与防控措施研究

赵 龙

中国葛洲坝集团第二工程有限公司 四川 成都 610000

【摘 要】：水利工程深基坑施工受地质条件、地下水位、开挖深度、周边荷载等因素的影响，容易造成支护结构失稳、坑壁坍塌、基底隆起、渗漏涌水、周边沉降等事故。根据深基坑施工的特点，分析风险产生的原因和主要表现，从勘察设计、土方开挖、支护施工、降水排水和现场管理等环节建立风险识别体系，提出优化支护参数、规范分层开挖、加强监测预警、控制地下水和完善应急处置等措施。经由开展风险分级管控以及隐患闭环治理工作，可以及时发现施工中的异常情况，从而改善支护体系的稳定状况，给水利工程深基坑的安全施工赋予保证。

【关键词】：水利工程；深基坑支护；安全风险；监测预警；风险防控

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.009

引言

水利工程的泵站、水闸、输水建筑物、地下构筑物施工大多需要进行深基坑作业，开挖面积大、施工周期长，易受复杂地层、地下水变化、交叉作业的影响。支护体系一旦发生变形超限、渗流破坏或者局部失稳，都会对现场人员和机械设备的安全造成威胁，还会导致周边建筑物的沉降以及工程进度的延误。传统的管理方式对于动态风险的重视程度不够，不能及时地反映出基坑状态的变化。因此有必要对各个施工环节的风险因素进行系统的识别，创建起以监测数据为依据的分级预警和协同防控机制，从而提升深基坑施工的安全管理水平。

1 水利工程深基坑施工特征与风险形成机制

1.1 复杂地质条件对基坑稳定性的影响

水利工程深基坑大多处于河谷、库岸或者冲积平原，地层里可能会出现填土、淤泥质土、粉细砂、卵石层、强风化岩以及软弱夹层，各个土层的抗剪强度、渗透系数、压缩模量存在明显差别。开挖卸荷之后，软土容易产生塑性变形，砂层可能会因为扰动而失去稳定，倾斜岩面和软硬交界处很容易形成局部滑移通道。勘察深度、钻孔间距或者水文地质资料不够时，支护设计所用的土压力参数、嵌固深度以及锚固范围就会出现偏差^[1]。地层不均匀还会使支护桩承受不同的荷载，引起围护结构出现局部弯曲、接缝开裂、位移集中，最后造成坑壁滑塌、基底隆起、支护体系失稳。

1.2 地下水变化引发的渗流破坏风险

深基坑开挖破坏了地下水原有的补给、径流和排泄条件，坑内外水位差使水流向开挖面和基底集中。含水砂层、承压水层或者岩体裂隙发育处，止水帷幕接头不密实、墙体有缺陷、嵌入隔水层过浅，都会产生集中渗流通道。当渗透坡降大于土体临界值的时候，细颗粒就会被水流带走，进而出现流砂、管涌、坑底突水以及土体空洞。降水井布置过于密集或者抽水速度过快，会使得坑外水位急剧下降，加大周边地层固结沉降的程度；降水能力不够，则无法降低承压水头，致使基底受到较

大的扬压力。降雨、河道水位和施工排水变化叠加之后，还会引起支护背后水压力突然增大、局部渗漏扩大。

1.3 施工荷载与周边环境的耦合作用

基坑周边堆土、钢筋材料、混凝土运输车辆、起重机械、施工平台等都会产生不同的附加荷载，这些荷载通过土体传给支护结构。大型设备靠近坑边作业时，静载、动载、开挖卸荷载应叠加在一起，会使围护桩弯矩、支撑轴力、锚杆拉力增大。土方分层厚度过大、开挖面暴露时间过长或者支撑安装滞后，都会造成支护体系受力转换不及时，使坑顶位移不断增大。邻近道路、堤防、泵站、输水管线、既有建筑等对于沉降、水平变形有不同的允许值，车辆振动、施工降水、基坑变形三者叠加的时候，很容易造成路面裂缝、管线接口错动、建筑物差异沉降、水工构筑物连接部位损伤。

2 水利工程深基坑支护主要安全风险识别

2.1 支护结构变形与整体失稳风险

支护结构风险主要表现为围护桩水平位移增大、桩顶偏移、桩身弯矩异常、支撑轴力突变及锚杆预应力损失。开挖深度增加后，土压力分布与支护体系受力状态持续调整，若桩间连接薄弱、支撑节点松动或锚固段承载力不足，局部变形可能向整体失稳发展。风险识别应结合桩顶位移、深层水平位移、支撑轴力、锚杆拉力和结构裂缝开展连续监测，重点分析累计变化量、变化速率及相邻测点差异^[2]。监测曲线持续上升、支撑构件异响、围护墙开裂或坑顶裂缝扩展时，应判定支护体系处于异常受力状态。

2.2 坑壁坍塌与基底隆起风险

坑壁坍塌多具有局部掉块、裂缝扩展、坡脚挤出和土体鼓胀等前兆，常发生于放坡不足、土体扰动严重、分层开挖过厚或支护封闭不及时的区域。基底隆起则与坑底土体抗剪强度不足、围护结构嵌固深度偏小及承压水作用有关，具体表现为坑底上拱、局部开裂、积水浑浊和测点高程异常。风险识别应检查坡顶裂缝宽度、坑壁土体完整性、支护施工间隔及基底高程

变化,并关注雨后、停工复工和大量开挖阶段。发现坡面持续剥落、裂缝贯通、坑底明显鼓起或支护构件外露时,应立即划定危险区域并停止邻近作业。

2.3 渗漏涌水与周边沉降风险

渗漏涌水风险可通过渗水位置、水量变化、水体浑浊程度、地下水位及坑内排水量进行识别。围护接缝、止水帷幕转角、管线穿越部位和坑底薄弱区属于重点检查区域,出现带砂渗水、涌水量突然增加或水位异常回升时,可能伴随土颗粒流失和地层空洞。周边沉降识别需同步监测地表、道路、堤防、建筑物和地下管线的竖向位移,并比较不同测点的累计沉降量与沉降速率。地面裂缝扩大、道路局部下陷、建筑门窗变形或管线接口渗漏,表明基坑降水、土体损失与周边变形已产生关联。

3 深基坑支护安全风险产生原因分析

3.1 勘察资料与支护设计参数偏差

水利工程场地地层分布通常具有明显的不均匀性,勘察孔间距过大、孔深未进入稳定持力层或取样位置缺少代表性,会遗漏软弱夹层、砂层透镜体、地下障碍物及局部裂隙带。地下水勘察若仅记录勘察期水位,未查明承压水分布、补给来源及河道水位变化,便难以准确计算水压力和抗突涌稳定性。支护设计中若对黏聚力、内摩擦角、土体重度及渗透系数取值不当,会使主动土压力、支撑轴力和围护结构弯矩计算结果产生偏差。部分设计未充分考虑坑边施工荷载、降水引起的附加沉降以及分层开挖过程中的受力转换,导致围护桩直径、嵌固深度、支撑间距和止水帷幕范围不能满足实际施工条件。

3.2 开挖支护工序衔接控制不足

深基坑开挖与支护施工需要按照分层、分段、对称、限时的原则组织,工序衔接失控会使土体卸荷速度超过支护结构受力调整能力。施工中出现单层开挖厚度过大、局部掏挖、机械碰撞围护结构或坡脚土体提前清除等情况,容易造成坑壁应力集中。支撑安装滞后、锚杆张拉时间不足、喷射混凝土封闭不及时,会延长开挖面无支护暴露时间^[3]。支护构件施工质量也会影响工序安全,钢支撑节点焊接不牢、围檩与围护桩贴合不密实、锚索注浆不饱满,均可能削弱荷载传递能力。土方开挖、降水运行、材料运输及支撑拆换缺乏统一安排时,还会产生交叉干扰,使基坑局部受力状态在短时间内发生突变。

3.3 监测预警与现场管理机制不健全

监测方案未依据基坑等级、开挖深度及周边保护对象确定测点数量和监测频率,会造成围护结构转角、地层薄弱区、管线密集区等关键部位缺少有效数据。仪器未按周期校准、基准点受到施工扰动或监测时间不固定,可能使位移、沉降、水位和支撑轴力数据失真。数据分析若仅比较单次监测值与控制值,忽视变化速率、累计趋势和多项指标之间的关联,难以及时识别变形加速征兆。现场管理中,施工、监测、设计和安全

管理信息传递不畅,异常数据可能停留在记录层面。预警分级不明确、停工条件缺失、应急责任未落实时,监测超限后仍可能继续开挖。巡查记录、整改期限及复查结果未形成闭环,也会使渗漏、裂缝和构件松动等隐患持续发展。

4 水利工程深基坑支护安全风险防控措施

4.1 优化支护结构设计与施工参数

支护方案需依据基坑深度、地层强度、地下水条件及周边保护等级进行比选,合理采用排桩、地下连续墙、内支撑或锚拉体系。设计阶段应复核围护结构抗倾覆、抗滑移、抗隆起及整体稳定性,并按开挖工况验算桩身弯矩、支撑轴力和锚杆抗拔承载力。软弱地层可通过增加桩径、加大嵌固深度、缩小桩间距及设置多道支撑提高结构刚度;透水层范围内需延伸止水帷幕并加强接缝处理。坑边荷载、机械振动及降雨入渗作用应纳入计算模型。施工前开展试桩、锚杆抗拔和支撑预加轴力试验,根据检测结果修正注浆压力、锚固长度、支撑间距及混凝土强度等参数。

4.2 规范分层开挖及地下水控制

土方开挖应按照分层、分段、对称、均衡原则推进,结合支撑竖向间距控制每层开挖厚度,严禁超挖、掏挖和长时间暴露坡脚。开挖到支撑设计标高后,及时完成围檩、支撑或锚杆施工,构件强度及预应力达到要求后方可进入下一层。机械作业范围需避开围护桩、降水井和监测点,坑边堆载与车辆通行距离按方案控制^[4]。地下水治理可采用止水帷幕、管井降水、集水明排和回灌相结合的方式,依据坑内外水位差动态调整抽水量。承压水层区域应验算基底抗突涌稳定性,设置备用水泵、独立电源及封堵材料,降雨前疏通截水沟和排水系统。

4.3 强化动态监测与分级预警管理

监测内容包括围护桩水平位移、桩顶沉降、支撑轴力、锚杆拉力、地下水位、坑外地表沉降、周边建筑物变形等,在支护转角、地层突变、渗漏集中、管线密集处加密测点。监测频率要根据开挖深度以及风险状况来调节,支撑安装、拆换、连续降雨和水位突然变化的时候增多观测次数。预警指标要同时考虑累计变化量、单次变化量、变化速率,分正常、关注、警戒、危险四个等级。出现异常立即复测并核对现场工况,达到警戒等级时限制邻近施工、卸除坑边荷载、加密监测;进入危险等级时停止开挖,增加支撑、回填反压、注浆封堵或者调整降水等处理措施。

5 深基坑支护安全防控体系运行保障

5.1 落实风险分级管控与隐患排查

风险分级管控要依照基坑开挖阶段、危险源种类以及事故后果来确定,对支护失稳、坑壁坍塌、基底隆起、渗漏涌水、周边沉降等风险实施辨识评价,产生重大、较大、一般、低风险

险清单。各等级风险要确定管控责任、检查周期、限制条件和处置要求,把风险分布标注在施工平面图和作业区域警示牌上。隐患排查要涵盖班前检查、施工巡查、专项检查以及停工复工验收,主要对支撑节点、锚杆锁定、坑边堆载、临边防护、排水设施和用电系统进行检查。发现问题之后建立隐患台账,记录位置、表现、责任单位、整改时限、复查结果。重大隐患整改期间停止相关工序的施工,技术复核、现场验收合格后方可恢复施工,防止隐患排查只停留在记录上。

5.2 完善异常险情应急处置机制

应急处置机制要针对支护结构位移突然增大、坑壁局部坍塌、基底突涌、围护接缝漏水、周边设施沉降等情形制订专项方案,明确预警接收、险情报告、现场警戒、人员撤离、技术研判、抢险处置程序。施工现场应设置应急疏散路线和安全集合点,保证通道畅通,配备钢支撑、砂袋、注浆设备、水泵、发电机、照明、通信器材等^[5]。险情发生后立即停止开挖和坑边机械作业,切断危险区域电源,根据现场情况采取增设临时支撑、回填反压、封堵渗漏、降低水头或者保护周边管线等措施。项目部要定时举行坍塌、涌水、人员受困演练,检验指挥衔接、物资调配、救援响应等能力,依照演练显现的不足之处更新处置流程。

参考文献:

- [1] 安丰江.深基坑支护新技术在水利施工现场的实践[J].居业,2026,(1):174-176.
- [2] 李成慧.水利施工深基坑支护安全稳定性分析及控制研究[J].水上安全,2025,(14):190-192.
- [3] 王衍庆.市政道路排水工程建设中的安全管理[J].运输经理世界,2024,(33):28-30.
- [4] 洪振国,潘忠华,陈立松.大型水利工程隧洞进口深基坑支护型式研究[J].灌溉排水学报,2024,43(S1):24-27.
- [5] 朱明.深基坑支护方案评价与优选研究[D].中国矿业大学,2021.

5.3 健全全过程安全责任管理制度

全过程安全责任管理应贯穿勘察、设计、施工、监测、验收及基坑回填各阶段,明确建设、勘察、设计、施工、监理和监测单位的职责边界。勘察单位负责提供真实完整的岩土与水文资料,设计单位负责支护方案验算及重大变更复核,施工单位落实专项方案、技术交底和现场控制,监理单位对关键工序实施旁站与验收,监测单位保证数据准确并及时报告异常。深基坑工程开工前应完成专项施工方案审查和安全技术交底,危险性较大的分部分项工程按规定组织论证。施工过程中严格执行作业许可、设备验收、人员培训及交接班制度,对分包队伍实施统一管理。设计变更、监测报警、隐患整改和应急处置资料应分类归档,保证每项管理行为能够追溯至具体岗位和责任人员。

6 结语

水利工程深基坑支护安全受地质条件、地下水、施工荷载、工序管理等各方面因素的影响。准确地识别出结构变形、坑壁坍塌、基底隆起、渗漏沉降等危险,调整支护参数,分层开挖、降排水作业规范化,加强动态监测、分级预警、隐患闭环、应急处置,可以提高支护体系的稳定性。后续还要完善全过程责任制度,使监测数据同施工决策相协调,保证工程安全建设。