

复杂地质条件下水利工程深基坑施工风险识别

陆永勇 孟德威

灌南县水利建筑工程有限公司 江苏 连云港 222500

摘要: 针对复杂地质条件下水利工程深基坑施工风险隐蔽性强、耦合度高、管控难度大的行业痛点,本文系统梳理了该类施工场景的核心技术特征,明确划分土体变形失稳、地下水渗流破坏、支护体系受力失效三类主要风险类型,深入阐释各类风险的形成机理。结合现场施工实际,分析当前风险识别工作存在的核心难点,厘清地质条件、施工行为两类核心影响要素的作用机制,最终形成精细化地质勘测前置识别、全过程动态监测识别、分层分段系统化风险甄别三类核心技术方法。研究成果可为复杂地质区水利深基坑施工风险识别体系搭建提供标准化技术参考,有效提升风险预判精准度,降低施工安全事故发生概率。

关键词: 复杂地质; 水利工程; 深基坑; 施工风险; 风险识别

引言: 水利工程深基坑施工普遍面临软土地基、破碎岩层、岩溶地层、地下水富集等复杂地质环境,该类区域岩土力学参数离散性强、施工扰动敏感度高,历来是水利基建领域安全事故的高发场景。当前多数项目的风险识别工作仍沿用常规均质地质条件下的传统模式,未充分适配复杂地质下风险隐蔽性强、耦合演化快、动态随机性大的特殊属性,频繁出现风险漏判、误判问题,极易诱发边坡坍塌、基底突涌等重大安全事故。在此背景下,本文针对复杂地质条件下水利工程深基坑施工风险识别体系开展系统性研究,明确风险类型、形成机理、识别难点与核心管控方法,为现场施工安全管控提供严谨的技术支撑。

1 复杂地质条件下深基坑施工基本特征

水利工程施工场景中的复杂地质环境,主要涵盖软土地基、破碎岩层、岩溶地层、透水砂层、地层交错不均、地下水富集等特殊地质结构,该类地质整体结构稳定性差、岩土力学性能离散性强、受外部施工扰动敏感度高。相较于常规均质地质条件下的深基坑作业,复杂地质环境中的水利工程深基坑施工具备鲜明的技术特殊性。(1) 岩土体自身稳定性弱,软土、破碎岩层的天然地基承载力低、固结性能差,基坑开挖卸荷后易出现应力快速释放、岩土体滑移变形等问题,直接破坏基坑支护结构的受力平衡。(2) 地下水文干扰性强,地层内地下水分布无序、隐蔽渗透通道杂乱,施工扰动后易形成局部集中渗流,诱发周边土体软化、作业面流沙、基底管涌等典型水文地质灾害。(3) 风险耦合叠加性突出,原生地质缺陷、人为施工扰动、水环境动态影响三类要素相互耦合,单一局部隐患可在短时间内快速演化成多因素复合型施工风险。四是施工过程可控性差,地层物

理力学参数空间分布极不均匀,全作业面统一标准化施工参数难以确定,风险出现位置、发育程度具备较强随机性,大幅提升深基坑施工全流程风险识别与精准管控的整体难度^[1]。

2 复杂地质下深基坑施工主要风险类型及形成机理

2.1 土体变形与基坑失稳风险

土体变形与基坑失稳是复杂地质深基坑施工的核心结构性风险,多源于地层力学性能薄弱与施工扰动叠加作用。软土地层孔隙比大、含水率高、抗剪强度低,基坑开挖卸荷后,原有土体应力平衡被打破,浅层土体易出现侧向位移、坑壁鼓胀、边坡沉降等变形问题。破碎岩层、风化岩层整体性差,开挖临空面形成后,岩体裂隙逐步扩张、贯通,易出现局部掉块、岩体坍塌。当地层应力持续释放、变形不断累积,超出土体自身承载极限时,会引发基坑边坡整体滑移、坑壁大面积失稳坍塌。该类风险的核心形成机理为复杂地质自身结构缺陷提供风险基础,基坑开挖、机械作业、荷载叠加等施工行为触发应力重组,最终导致土体变形失稳,具备明显的累积性与突发性特征^[2]。

2.2 地下水诱发渗流破坏风险

水利工程深基坑多处于地下水活跃的复杂地质环境,地下水渗流是诱发基坑隐患的重要诱因。透水砂层、岩溶裂隙、地层夹层等复杂结构中,地下水分布不均、渗流路径复杂,基坑开挖后形成高低水位差,产生持续渗流作用。渗流过程中会持续带走土体细小颗粒,逐步掏空基坑底部及边坡内部土体结构,形成空洞、裂隙通道,进而引发流沙、管涌、坑底隆起等渗流破坏问题。同时,地下水长期浸润会软化周边土体,大幅降低土体抗剪强度与固结能力,加剧边坡变形、沉降、滑移

隐患。在多层交错地质中,上层透水、下层隔水的结构易形成承压水层,承压水压力突破上部土体承载力时,会造成坑底突涌,严重破坏基坑整体结构稳定性。

2.3 支护体系受力与变形风险

深基坑支护体系是维持基坑稳定的核心载体,复杂地质的不均匀受力特征易引发支护结构异常变形与受力失效风险。复杂地质土体硬度、承载力、侧压力分布不均,导致支护结构承受的侧向土压力、水压力呈现区域性差异,支护构件受力不均,局部位置出现应力集中现象。长期受力失衡会引发支护桩偏移、墙体变形、支撑构件挠曲、锚固体系松弛等问题。同时,地下水动态变化会持续改变土体压力参数,使得支护体系长期处于动态荷载作用下,易出现疲劳变形、连接松动、受力衰减等隐患。此外,复杂地质开挖过程中土体沉降不均,会导致支护体系竖向、水平向位移偏差,逐步破坏支护结构整体性,引发支护局部失效乃至整体失稳风险。

3 深基坑施工风险识别难点与影响因素

3.1 风险识别主要难点

复杂地质环境下水利工程深基坑施工的风险识别工作,存在显著的技术层面与现场工况层面难点。首先是风险隐蔽性极强,多数土体内部裂隙、隐蔽渗流通道、局部软弱夹层完全隐藏于基坑岩土体内部,无直观观特征,常规表层排查手段无法有效识别深层潜伏隐患。其次是风险发生随机性大,复杂地质条件下岩土力学参数空间离散性强,风险出现位置、发育速度、最终破坏形式不存在固定规律,难以通过通用统一标准精准预判风险演化趋势。同时,风险耦合关联关系复杂,土体变形位移、地下水渗流运动、支护结构受力缺陷三类要素相互影响,单一局部隐患会快速诱发多次衍生风险,导致风险识别过程难以精准区分风险源头、准确判定实际危害等级。此外,施工过程动态干扰性强,随着开挖深度持续增加、各工序依次推进,地层应力、地下水文状态持续动态变化,各类风险始终处于动态发育状态,传统静态识别方式无法适配动态风险排查的实际需求^[1]。

3.2 地质条件识别影响因素

地质条件是决定复杂地质下水利工程深基坑风险类型与实际危害程度的基础性要素,也是全流程风险识别工作的核心底层依据。地层土质类型直接决定土体变形类风险的发育概率,软土、粉土、破碎风化岩等力学性能偏弱的土质天然稳定性差,对应的滑移、变形类风险发育概率显著高于常规均质土层。地层结构均匀度直接决定风险的整体分布状态,多层地质交错、软弱夹层

发育、岩溶孔洞集中分布的区域,风险整体呈现多点分散、局部集中的分布特征。地下水赋存状态是渗流类风险的核心影响要素,地下水位高低、承压水水压大小、地层渗透系数、地下水径流方向直接决定渗流破坏、坑底突涌等典型水文风险的发生概率。同时,地层初始应力状态、岩体完整度、土体天然固结程度等基础参数,会直接影响基坑开挖卸荷后的地层应力重组规律,间接作用于各类风险的演化速度与最终破坏强度,是风险识别过程中必须重点考量的核心基础参数。

3.3 施工行为识别影响因素

现场施工行为是触发复杂地质条件下深基坑风险的直接动态要素,也是全流程风险识别工作的核心研判维度。基坑开挖作业的施工方式、开挖推进速率、分层开挖厚度、先后作业顺序直接决定地层内部应力的释放速度,过快开挖、无序开挖易造成岩土体应力骤变,直接诱发突发变形与边坡坍塌风险。支护施工作业的及时性、安装施工精度、构件之间的贴合度,直接决定支护体系的整体受力稳定性,支护工序滞后、施工参数偏差会大幅放大地质原有缺陷,显著加剧风险的发育速度。降水施工作业的参数控制精度、降水推进节奏、止水帷幕实际封堵效果直接改变地下水渗流状态,降水方案执行不当易引发周边土体不均匀固结沉降、局部渗流状态突变。同时,作业面内施工机械动荷载、材料临时堆载、多工序交叉作业扰动等外部附加荷载,会持续改变基坑周边岩土体的原有受力状态,诱发局部土体变形偏移,进一步提升风险识别的动态管控难度。

4 复杂地质下深基坑施工风险识别核心方法与把控要点

4.1 精细化地质勘测前置识别

依托全域覆盖的精细化地质勘测工作,实现施工全周期风险的前置识别,从源头精准掌握深基坑各类风险的基础分布特征。通过多手段结合的分层地质探测作业,精准探明基坑开挖影响范围内的土层分布规律、不同层位土质特性、软弱夹层空间位置、岩体破碎带延展范围、岩溶孔洞发育形态等不良地质要素的具体坐标与影响边界,逐一明确不同区段岩土体的力学强度参数、固结性能指标与天然稳定特性。针对性开展专项水文地质勘测,全面摸清区域地下水位动态变化规律、深层承压水赋存分布状态、隐蔽渗流通道走向、地下水补给径流规律,精准圈定渗流破坏风险、基底突涌风险的高危区域。基于全部勘测数据构建三维精细化地质模型,系统研判不同开挖深度、不同施工区段对应的潜在风险类型,严格划分风险高危区域、中危区域、低危区域,实

现所有潜在风险的提前预判,为后续施工过程动态风险识别与精准管控提供可靠的底层数据支撑^[4]。

4.2 施工全过程动态监测识别

建立覆盖深基坑全施工周期的动态监测体系,实现各类隐蔽风险的实时捕捉、动态识别与提前预警。针对岩土体变形类风险,在基坑边坡、周边土体、坑底区域布设全方位分层监测点位,实时采集基坑边坡沉降量、坡体水平位移值、坑底隆起变形等核心数据,通过连续监测得到的数据变化速率、阶段累积变形量研判不同区段土体的实时稳定状态,及时识别土体缓慢蠕变、参数异常突变等早期隐蔽隐患。针对地下水文类风险,在不同深度含水层布设水位监测、孔隙水压力监测、渗流量监测专用设备,动态掌握全层位水文参数的连续变化特征,精准识别渗流路径异常发育、承压水水压突变、局部管涌发生前兆等关键风险信号。针对支护体系结构类风险,在支护桩、支撑梁、连接构件等关键部位布设监测元件,持续采集支护结构位移、内部应力变化、构件不均匀沉降等指标,精准捕捉支护结构应力集中、变形量超标、整体受力失衡等结构性隐患,实现复杂地质条件下所有隐蔽风险、动态演化风险的常态化精准识别,为现场风险处置预留充足响应时间。

4.3 分层分段系统化风险甄别

结合水利工程深基坑分层开挖、分段施工的典型工序特点,建立分层分段系统化风险识别模式,从机制上杜绝局部隐蔽风险漏判、不同类型风险误判的问题。严格按照开挖深度逐层开展专项风险排查,浅层开挖作业阶段重点识别表层土体滑移、边坡局部坍塌、浅层常规渗流等直接暴露类风险;中层开挖作业阶段重点研判开挖卸荷引发的土体应力重组、软弱夹层遇水软化、支护体系受力失衡等演化类风险;深层开挖作业阶段重点排查承压水突涌、基坑整体失稳、深部隐蔽渗流破坏等高危极端风险。按照不同施工区段的地质条件差异化甄

别风险,针对地质破碎带、地下水富集区、土质软弱层对应的高危作业区段,加密监测点位布设密度、提升风险识别工作频次,细化风险研判的技术维度。同步系统梳理不同风险要素之间的耦合关联关系,严格区分原生地质固有风险、现场施工诱发风险、灾害次生衍生风险三类不同属性的风险类型,精准判定风险源头位置与实际危害等级,构建形成全覆盖、多层次、精准化的深基坑专项风险识别体系,保障复杂地质条件下水利工程深基坑施工各类风险全面可控^[5]。

结束语

复杂地质条件下水利工程深基坑施工风险识别是保障工程全周期安全稳定的核心技术环节,其核心逻辑在于打破传统静态识别模式的局限,建立覆盖前期勘测、施工过程、分层分段全链条的系统化识别体系。通过精准把握地质条件、施工行为两类核心影响要素的作用规律,可从源头破解风险隐蔽性强、耦合关联复杂、动态演化难预判的行业痛点。后续工程实践中,需进一步推动地质勘测数据、动态监测数据与智能研判技术的深度融合,持续优化风险识别的精准度与响应效率,为复杂地质区水利工程深基坑施工安全构建坚实的技术屏障。

参考文献

- [1]孙建薇.复杂地质条件下水利工程深基坑施工关键技术研究[J].科技资讯,2026,24(12):160-162.
- [2]李默.复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降水施工技术[J].工程技术研究,2026,11(9):87-89.
- [3]权旭阳.复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026,(2):034-037
- [4]高光松.复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术分析[J].中国厨卫,2026,25(7):124-126.
- [5]李青,刘洋,侯杰.复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术[J].中国科技期刊数据库 工业C,2026,(6):017-020