

水利工程深基坑施工风险识别与智能防控体系构建

孙先进 冯宪勇

邳州市水利建筑安装工程有限公司 江苏 邳州 223100

【摘要】：水利工程中深基坑的施工受到复杂地质条件、地下水环境以及施工工序的多重影响，风险种类繁多、演变过程复杂且突发、传统的凭经验管理安全模式已经很难适应现代工程建设的需要。本文通过对水利工程深基坑风险的形成机制和风险识别需求的分析，对风险指标体系的构建、多源监测数据的融合以及智能算法识别预警模型的建立等方面进行了研究、智能识别平台的运营等关键技术，进一步提出全过程的智能防控体系、风险分级响应机制、智能监测协同管控模式和持续优化策略等，构建深基坑建设风险智能识别和防控体系。研究得出将物联网、大数据与人工智能相结合，能够有效地提高风险识别的准确性与预警的及时性，从而实现对整个建设过程的动态安全管理，以期对提升水利工程中深基坑的建设安全提供技术参考。

【关键词】：水利工程；深基坑施工；风险识别；智能防控

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.076

随着中国水利基础设施建设的日益扩大，泵站、水闸、引水工程以及水库的深基坑建设也在不断增多。由于深基坑建设涉及到复杂的地质，水文环境以及多工序交叉操作，容易受到地下水变化、支护结构受力以及外部环境的影响，其施工风险呈现出动态性、隐蔽性以及突发性的特点。传统的安全管理方式多依靠人工巡检与经验判断相结合的方式，具有风险识别落后、预警能力不强、管理效率低下等特点。近年来物联网、大数据、人工智能等智能建造技术迅猛发展，为深基坑施工风险的准确识别与全过程智能防控开辟了一条全新技术路径。在此基础上，对水利工程深基坑施工风险识别关键技术与智能防控体系构建进行研究，对提高工程安全管理水平、确保施工安全以及推进智慧水利建设等方面都有重要的实际意义。

1 水利工程深基坑施工风险形成机理与风险识别需求分析

1.1 水利工程深基坑施工特点及主要风险源分析

水利工程中的深基坑施工一般位于河道、水库、泵站、闸坝等水文地质条件比较复杂的地区，其开挖深度较大、地下水位较高、渗流作用强烈、工期较长，对环境扰动显著。相较于普通建筑基坑，水利工程深基坑更易受水位涨落、降雨补给、软弱土层、砂卵石层以及施工导流条件改变等因素影响，其安全风险表现出多源性、隐蔽性以及突发性等特点。主要风险源有支护结构变形、边坡失稳、坑底隆起、管涌突涌、降排水失效、周边沉降、机械荷载扰动和极端天气的影响。

1.2 深基坑施工风险形成机理与影响因素分析

深基坑施工风险主要来源于开挖卸荷、地下水扰动、支护受力变化以及外部环境影响等因素耦合作用。基坑开挖改变了原土体的应力平衡并引起坑壁土体的位移和变形；如果支护结构的刚度不够、锚固体系破坏或者施工顺序不尽合理，局部变

形会逐渐向整体失稳延伸。地下水渗流使土体的抗剪强度下降，引发管涌、流砂以及坑底突涌。同时地质勘察不到位、监测预警滞后、施工荷载堆载不适宜、强降雨和水位骤变也将进一步放大风险，加大防控难度。

1.3 深基坑施工风险识别体系构建需求分析

水利工程中深基坑施工的风险识别不应仅仅依靠人工经验判断来完成，应建立一个涵盖整个施工过程、全要素以及动态变化的识别系统。系统需重点关注水文地质条件、支护结构状态、基坑变形特征、地下水位变化、周边环境响应、施工工序控制以及气象水情变化情况等方面的风险指标，通过监测数据不断追踪风险的演化趋势。通过结合现场巡查、自动化监测、数据分析以及风险分级等手段，能够做到提前识别隐蔽风险，及时报警异常状态，从而为后续智能防控体系的建设提供可靠依据。

2 水利工程深基坑施工风险智能识别关键技术研究

2.1 深基坑施工风险指标体系构建与风险分级方法

深基坑施工风险智能识别是建立在构建一个科学、完备的风险指标体系基础之上。水利工程中的深基坑受到水文地质、支护结构、地下水渗流、施工荷载及外部环境等多种因素的影响，其指标的选择要涵盖基坑变形、支护受力、地下水位、周围沉降、边坡稳定、降排水状态及施工工序。采用静态地质条件和动态施工数据相结合的方法可以增强风险识别的系统性、针对性。

在风险分级的方法中，可以根据风险发生的概率，影响的程度以及演化的速度将深基坑施工的风险分为风险较小的、风险一般的、风险较大的以及风险较大的几个级别。不同级别对应着不同监测频率、预警阈值、处置措施等。比如在支护位移、

地下水位发生变化或者坑底隆起等在控制值附近出现的情况下,要及时提升风险等级、启动预警响应以使风险由定性判断过渡到定量分级。

2.2 多源监测数据融合与风险动态感知技术

多源监测数据融合为动态感知深基坑风险提供了重要的技术支持。施工现场可以布置位移计、测斜仪、水位计、应力计、沉降监测点、视频监控及气象水情采集设备等设备进行基坑支护结构、土体变形的监测、地下水的变化,周围环境及施工状态的持续监测等。通过多维数据采集可以打破单一监测指标信息缺失的局面,增强风险识别全面性。

数据融合时要对不同源、不同频、不同精的数据经过清洗、校准、匹配、综合分析等处理,从而形成风险感知的统一信息。动态地分析变形速率、地下水位波动、支护受力变化与降雨水位之间的联动关系,可以及时发现风险的异常趋势。如在连续降雨和基坑水平位移增长同步进行的情况下,系统要辨识它们之间的耦合风险,提高预警级别。

2.3 基于智能算法的风险识别与预警模型构建

以智能算法为基础建立风险识别模型,可以增强对深基坑施工过程中风险评判的准确性与前瞻性。可以通过机器学习、神经网络,支持向量机、随机森林来训练历史监测数据、施工记录、地质资料及风险事件,构建风险状态识别模型。该模型通过研究不同风险因素间的非线性关系可以综合评判支护变形,渗流异常及边坡失稳风险。

预警模型的建立要综合考虑监测阈值预警和趋势预测预警,切忌仅仅依赖固定限值而导致预警的滞后性。通过预测位移发展速率、地下水位变化趋势以及结构受力波动情况,可以事先判断风险演化的方向。该模型在确定异常增长趋势后,能够自动产生预警信息并给出加固支护、调节降水、限制堆载或者优化施工工序的防治建议。

2.4 深基坑施工风险智能识别平台运行机制

深基坑施工风险智能识别平台要以数据采集、传输、分析、预警与反馈等环节作为核心运行链条来集中管理施工现场的风险信息。该平台可以与自动化监测设备、人工巡检记录、施工进度信息以及气象水情数据等连接,通过数据看板可以直观地显示基坑变形、支护受力、地下水位以及风险等级的变化。从而促进管理人员实时把握现场状态。

从运行机制来看,该平台应该形成“实时监测—智能分析—风险预警—处置反馈—模型优化”闭环管理模式。系统发现异常数据或者风险等级升高后,将预警信息自动推送给项目管理、监理、施工等相关责任人员并对处理过程进行记录。处置结束后,反馈结果再次并入数据库以优化识别模型及预警阈

值,使平台适应性及智能化水平持续增强。

3 水利工程深基坑施工智能防控体系构建与实施路径

3.1 深基坑施工全过程智能防控体系总体架构

深基坑施工智能防控体系要遵循全过程、全要素及动态管理的理念,重点是风险防控、数字化平台是勘察设计,施工前的准备工作、基坑开挖及支护施工等环节、降排水管理,主体结构施工和基坑回填纳入统一管理。该系统要将物联网、BIM、大数据及人工智能技术有机结合,构建“数据采集—风险识别—智能分析—预警发布—应急处置—效果反馈”闭环运行机制,对施工风险进行全过程动态管控。同时实现了对人、设备、材料、环境以及施工工序关键因素的协同管理,实现了风险控制从事后处理到事前预测再到事中介入的转变,促进了深基坑施工的安全管理。

以某泵站深基坑工程为例,施工单位通过BIM模型模拟启动前的开挖情况,结合地质勘察成果确定高风险区域。在施工过程中通过位移监测、水位监测和支撑轴力监测对数据进行实时采集,同步上传到智能管理平台。系统在检测到局部支护位移的增长速率出现异常后,会自动进行报警,提出了调整开挖次序,增设临时支撑及优化降排水方案等措施。项目管理人员根据平台提出的建议,适时组织施工调整使得支护结构一直处于稳定状态,从而避免风险的进一步膨胀。

3.2 施工风险分级响应与智能决策控制机制

施工风险分级响应机制在智能防控体系中起着至关重要的作用,要根据风险出现的可能性,危害程度和发展趋势等因素把施工风险分为常态,注意、预警与应急等不同层次,设置了相应管理措施。对风险较小的等级,主要采取日常巡查与常规监测相结合的方式;在监测数据出现异常趋势时应及时增加监测频率,开始专项分析;对高等级风险则要迅速启动应急预案并采取措施进行停工,加固和降水。该智能决策系统对监测数据、施工工况以及历史案例进行综合分析,可自动产生风险处置建议以增强风险响应科学性与时效性。

以某水闸深基坑施工期为例,持续降雨引起地下水位不断上升,系统监测表明坑外水位不断上升,但支护结构水平位移却逐渐加大。该平台经过全面分析,风险等级从关注状态上升到预警状态,预警信息自动发送至施工、监理以及项目负责人,还提出了增设降水设备、停止局部开挖以及强化边坡巡查等措施。施工单位在快速实施相关措施之后,各监测指标均恢复平稳,避免坑壁变形的继续发展,表明风险分级响应机制能有效促进风险处置效率的提高。

3.3 施工现场智能监测与风险协同管控模式

施工现场智能监测要以自动化监测设备为支撑,以视频监控、无人机巡检和物联网传感器为手段,实现支护结构的变形、地下水位的变化、土体沉降、支撑轴力和施工环境的全天候监控。通过搭建统一数据管理平台实现监测数据的实时采集、自动分析与可视化展示以及施工进度、气象信息与水文数据融合分析形成动态风险评价结果。同时施工单位、监理单位、设计单位与建设单位共用同一个监测平台,做到了信息的同步、协同决策与共同处理,增强了施工现场的风险协同管理能力。

以某引水枢纽深基坑为例,工程进入汛期时,该平台与气象预报、水位监测及基坑变形等资料同步连接。当该系统预测接下来的24小时会有大量降雨,并且观察到地下水位持续上升,它会立刻向所有参与建设的单位发送风险警告。施工单位预先停止深层开挖并开动备用排水设备;监理单位强化现场巡视力度;设计单位针对监测结果,建议增设支撑措施。各参与方依靠统一平台,迅速完成信息共享与协同决策,从而有效地避免因暴雨造成基坑安全事故。

3.4 智能防控体系应用效果评价与持续优化策略

智能防控体系在投入使用之后,要从风险识别准确率、预警及时率、监测数据完整性和隐患整改率等方面建立起一套科学健全的效果评估机制、安全事故的发生率和施工效率几个方面来综合评估。在评估过程中应充分利用整个施工期资料,不断分析风险识别模型、预警阈值和防控措施,发现系统运行存

在缺陷,并结合实际项目不断优化算法模型,健全监测指标体系以及调整风险控制策略等,以促进智能防控体系应用效果的不断提高。

以某大型泵站工程为例,项目管理团队通过对该智能防控体系的运行总结和分析发现,该体系可以提前20多个小时辨识出大部分支护变形的风险,风险预警准确率显著优于传统人工巡检,现场隐患整改效率显著提高。同时针对一些特殊地质条件下误报警的问题,技术人员根据现场监测数据对预警阈值进行了再优化,在风险数据库中加入了工程案例,可供后续同类项目参考。智能防控体系预测能力与工程适应能力通过工程数据的不断累积与识别模型的持续优化而进一步提高。

4 结论

水利工程深基坑风险存在多因素耦合,动态演化及全过程贯穿的特征,构建科学高效的智能风险识别及防控体系,是促进施工安全管理水平提高的重要手段。重点从风险形成机理,风险识别关键技术和智能防控体系构建等方面进行系统分析,并提出风险指标体系,多源数据融合等、智能算法识别,风险分级响应与协同管控为重点举措,形成涵盖风险识别、动态预警、智能决策与持续优化全过程的防控模式。今后要进一步强化智能监测设备、数字孪生、人工智能算法及智慧水利平台深度融合建设,持续完善风险预测模型及智能决策机制,促进了深基坑施工安全管理向着数字化、智能化以及精细化的方向迈进,从而为水利工程的高质量施工提供了较为可靠的技术保证。

参考文献:

- [1] 吕翰,洪银潮,魏红春.水利工程深基坑施工规划及支护关键技术研究[J/OL].中国建筑知识仓库,1-7[2026-07-09].
- [2] 耿云华.水利施工中深基坑支护技术与安全监测应用[J].湖北应急管理,2026,(10)27-29.
- [3] 李默.复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降排水施工技术[J].工程技术研究,2026,11(9)87-89.
- [4] 冯云龙.水利工程泵站深基坑施工安全稳定分析[J].水上安全,2026,(5)164-166.
- [5] 王杰,韩振华.水利工程中深基坑支护优化及稳定性验证[J].四川建筑,2026,46(1)116-118.