

复杂环境下深基坑工程施工安全风险评估与预警技术

李耀鹏

天津市龙建建筑工程有限公司, 天津 301600

DOI:10.61369/ERA.2026090011

摘 要 : 复杂地质条件以及城市密集建筑群在多变施工工况下构成了特殊环境, 这所导致的深基坑工程风险呈现出动态耦合和突发特性, 传统的静态安全评估以及滞后预警模式已经很难满足实际工程安全管控方面的实时性需求。为解决深基坑施工安全管控精准度不足、预警滞后等问题, 本文系统梳理复杂环境下深基坑施工安全风险诱因与事故机理, 构建涵盖地质、环境、运用施工、结构等多个方面来进行风险评价工作, 构建起关联度计算以及模糊评价、概率网络相融合的综合模型, 凭借动态评估来实现风险量级的客观测定。互联监测把实时数据进行整合, 利用数字孪生体以及机器学习机制, 来构建并且优化数据汇融预警体系。智能平台集成了信息收集研判模块, 开展等级警报响应联动的实施工作, 得以实现实时动态风险管控。

关 键 词 : 复杂环境; 深基坑工程; 施工安全; 风险评估; 动态预警; 智能化管控

Risk Assessment and Warning Technology for Construction Safety of Deep Foundation Pits in Complex Environments

Li Yaopeng

Tianjin Longjian Construction Engineering Co., Ltd., Tianjin 301600

Abstract : The complex geological conditions and dense urban building clusters create a special environment under changing construction conditions, which leads to dynamic coupling and sudden characteristics of deep foundation pit engineering risks. Traditional static safety assessment and lagging warning models are no longer able to meet the real-time requirements of actual engineering safety control. In order to solve the problems of insufficient precision in safety control and lagging warning in deep excavation construction, this article systematically sorts out the causes and accident mechanisms of safety risks in deep excavation construction in complex environments, and constructs a risk assessment work covering multiple aspects such as geology, environment, application construction, and structure. A comprehensive model integrating correlation calculation, fuzzy evaluation, and probability network is constructed to achieve objective determination of risk level through dynamic evaluation. Internet monitoring integrates real-time data and utilizes digital twins and machine learning mechanisms to build and optimize a data convergence warning system. The intelligent platform integrates an information collection and analysis module to carry out the implementation of level alert response linkage, enabling real-time dynamic risk control.

Keywords : complex environment; deep foundation pit engineering; construction safety; risk assessment; dynamic warning; intelligent control

引言

随着城市化进程的推进, 深基坑工程开展过程当中呈现出了深度增大、跨度扩展、形态多样, 并且邻近既有建筑的特性。施工环境面临着管线密集分布的状况要是地质状况错综复杂、作业场地狭窄逼仄, 那么开展工程安全的掌控工作就会变得格外棘手。深基坑工程属于地下工程施工当中的高风险方面, 涉及到土方开挖、支护施工、降水排水、结构监测等多道工序, 各个工序的风险会相互耦合并且动态演化, 基坑边坡出现坍塌、周边地面发生沉降、管线出现破损以及建筑物产生开裂这些情况, 常常会触发安全事故。这样的情形不仅会招致巨大的经济损失, 还会危及施工人员的生命, 并且影响城市基础功能的正常运转。传统深基坑安全管控方面往往依靠静态风险评估模式, 这种模式主要是凭借人工经验来开展定期排查工作, 在风险识别方面难以做到全面覆盖、量化精度不够, 并且缺乏对风险演变动态轨迹的有效追踪, 风险预警机制比较单一, 并且还有滞后性, 没办法及时对基坑作业在多变条件下的风险特性进行回应。

一、复杂环境下深基坑施工安全风险特征与诱因分析

（一）复杂环境界定

在城市深基坑工程施工项目方案确定过程中，要充分结合城市地下复杂的环境特点，落实更加科学合理的工程方案，从而维持施工规范性和科学性。^[1] 本文所指的复杂环境主要涵盖三类场景：一是复杂地质环境，施工区域存在软土、流沙、承压水、断层破碎带等不良地质，土层力学性质不均、稳定性差，易受施工扰动影响；二是复杂周边环境，基坑紧邻既有建筑物、城市主干道、地下管线、轨道交通等重要设施，施工扰动敏感度高、保护要求严苛；交叉工序当中，荷载的变化比较复杂，降水以及挖掘会同时开展。外界温湿度以及降雨等气象因素所造成的干扰变得很显著。三类环境相互叠加，形成多因素耦合的复杂施工条件，大幅提升基坑施工安全风险。基坑施工从清障施工、围护施工、加固施工、基坑降水、土方开挖及支撑施工等5方面。^[2]

（二）施工安全风险核心特征

基坑工程的设计与施工必须充分考虑地层的物理和力学特性，如地层的类型、强度、渗透性及地下水位等。^[3] 复杂环境当中的深基坑工程，其风险特性和寻常工程有着很大的不同。多种因素叠加，也就是地质隐患、操作细节以及环境影响相互交叠，可能会引发连锁反应，形成事故链；那么随着开挖深度逐渐加大，支护结构所受到的力也会随之发生改变，风险因素的状态就会持续不断地演变，风险级别也会跟着不断进行调整；突发降雨、荷载骤变以及管线渗漏等不确定性因素，经常会导致不可预见的安全隐患；那么土体移动以及支护体系内力所存在的潜在损伤，在基坑内部通常是容易被直接察觉到的，要是这些隐患达到了临界阈值，那事故就会骤然发生。

（三）主要风险诱因分类

（1）地质风险。不均匀地层沉降、软土随时间所产生的蠕变、地下水压力突破阻碍以及边坡土层移动这些方面，构成了基坑失稳的基本缘由。要是勘察信息存在偏差，那就会明显地削弱支护体系的稳固程度，过度地加重了工程建设当中的干扰效应。由于基坑开挖支护工程施工是一个动态过程，期间可能出现诸多不可控的干扰因素，因此有必要对施工全过程的基坑顶部变形、桩锚结构内力、桩的倾斜值、地下水水位、周边建筑物及地下管线变形等内容进行监测^[4]

（2）环境风险。基坑周围的构筑物会对其产生承重扰动，底部埋设的管网会被挤压扭曲，雨水浸泡和温差会导致内部压力产生，以及路面存在额外负担，这些情况会不断地让土坑的应力状态发生改变，潜在的风险会被激发出来。尽量控制邻近的地下空间开发与利用 对已有基坑的影响，保护基坑围护结构自身的安全。^[5]

（3）施工风险。包含土方超挖、支护施工质量不达标、降水速率不当、工序衔接混乱、施工机械违规作业、人员操作失误等

人为施工因素，是风险爆发的主要诱发条件。

（4）结构与管控风险。支护系统的类型通常会出现配置不当的情况，支撑框架的布局明显存在不足，监控信息的更新会有延迟，对风险开展的管治工作不够周密，紧急情形的响应时常会比较缓慢，这些问题阻碍了风险得以有效处理持续开展优化工作所驱动的主要缘由。基坑底部土体可出现隆起现象，但基坑整体不会失稳；支护结构和土的共同体不出现滑动失稳破坏。^[6]

二、复杂环境下深基坑施工安全风险评估体系构建

（一）风险评估指标体系建立

深基坑工程涉及地质勘察、支护设计、土方开挖、降水排水等多个环节，每个环节都需要精细化管理和严格的技术把控。^[7] 遵循系统性、科学性、针对性、可量化原则，结合复杂环境风险诱因，基于风险识别结果，构建“目标层－准则层－指标层”三级风险评估指标体系。目标层为复杂环境下深基坑施工整体安全风险；准则层包含地质风险、环境风险、施工风险、管控风险4个维度；结合工程实际筛选16项核心量化指标，覆盖基坑施工全流程风险点，具体指标体系如表1所示。

目标层	准则层	指标层
深基坑施工安全风险	地质风险（A1）	软土厚度与分布均匀度
		承压水水头高度与突涌风险
		土体抗剪强度与稳定性
		不良地质体分布范围
	环境风险（A2）	周边建筑物距离与保护等级
		地下管线密集程度与重要性
		施工区域降雨频次与积水情况
		周边地面超载情况
	施工风险（A3）	土方开挖速率与分层合理性
		支护结构施工质量合格率
		降水排水系统运行稳定性
		施工人员操作规范性
	管控风险（A4）	监测数据采集频率与精准度
		风险管理制度完善度
		应急物资与预案完备性
		现场安全巡查落实情况

（二）基于灰色－模糊贝叶斯的动态风险评估模型

深基坑工程设计在整体工程设计方案中是一个相对独立的设计环节，包括方案设计和施工图设计。^[8] 深基坑风险在复杂条件之下拥有模糊、随机以及不确定的特性，单一的评估模型通常难以同时去处理指标模糊量化以及风险动态演变这两个方面的特征，把灰关联分析、模糊评价以及贝叶斯网络融合起来，构建组合风险动态评估模型，来实现风险量化与动态更新的精确化。借助灰色关联分析来开展核心风险指标的筛选工作，把冗余指标剔除掉，鉴于各指标的关联度计算结果来确定它的权重，这样就可以规避人工赋权所导致的主观误差；在基坑施工过程中，支撑结构能够约束围护结构的水平位移，关注支撑轴力的变化是保障基坑稳定性的关键。^[9] 其次，引入模糊综合评价法，将定性风险指标

量化为定量等级，构建风险隶属度矩阵，实现模糊风险的精准量化；贝叶斯网络被用来开展风险事故传导路径的建立工作。同时结合实时的监测数据来对节点概率进行更新。动态推演的风险演化趋势得以实现。这样就把评估从静态转变为了动态。深基坑作业当中潜在的危险状况会被划分成四种等级。低度风险在安全方面易于开展管理工作，中度风险需要运用标准控制方法去处理，高度风险必须要进行重点监控，极度高风险也就是面临着严峻的挑战，那么马上要开展中止作业的工作来进行整改，这一举措构成了等级预警以及区别管控的主要支撑。

三、基于多源数据融合的智能预警技术体系

（一）多源数据实时监测采集技术

借助物联网传感手段，来打造全景监控网络，得以实现深基坑作业多向度信息马上捕捉，会对支护结构顶端的沉降以及它的水平位移开展监测工作，同时所涵盖的有围护桩内力状况、深层土体位移、承压水水位变化，以及周边建筑物沉降和管线变形等多个方面的核心参数。凭借高精度传感器以及孔压监测设备，自动开展位移与应力信息的采集工作，并且实时进行存储，来弥补人工监测所存在的时效性方面的缺陷。系统会持续运行，保证数据获取的连续性和及时性针对频率低以及误差高这个方面的问题，通过开展优化工作来实现数据的实时支撑，从而赋能风险判断以及预警。

（二）机器学习动态预警模型

为了克服传统预警模型阈值是静态的、缺乏灵活性方面的局限，借助机器学习算法，得以打造出动态预警模型，借助广泛的基坑监测信息以及事故档案来构建学习基础，运用 BP 神经网络方法去剖析风险因素以及事故发生的深层联系，并且自动调整报警界限，这个界限会基于不同施工阶段来开展相关设置为了适应发生变化的情况，会把环境条件进行动态调整。把时序分析技术融入到监测过程当中，让趋势预判得以实现，能够预先去捕捉数据异常波动的情况，建立起超限以及趋势的双重预警，这样就能克服事后报警这种传统方式的滞后性。

（三）数字孪生可视化预警平台

照着系统工程与数据融合核心理论推进，分层摸排、分类采集、标准化处置，不光能打通数据孤岛，还能拉高感知数据的完整度与可信度。^[10]智慧基坑现场在孪生空间当中生成了数字映像，实体结构以及数字投影保持着同步关联，孪生平台开展了基坑监测数据多源输入的整合工作，同时还将风险评估结论以及预警讯息实时导入。像受力状态、土体位移、环境状况等方面的动态演化进程得以清晰呈现，并且把风险隐患地点准确定位。预警系统来构建风险分层防线，要是风险达到了三级上限，那就会触发一连串应急动作：马上散播预警信号，把危殆地带显著标出来，并且给出规避方案以供参考；极大程度上的高等级威胁出现时，会

同时触发联动应急系统，并且把指令以及方案直接进行下发，来实现从监测、评估、预警到行动的整个流程的智能闭环。

四、工程实例应用

（一）工程概况

这项工程涉及到城市核心区的深基坑，开展挖掘工作的深度达到了18.6米，作业的面积大约是8200平方米，在这个区域进行施工的环境尤其复杂，场地的表层主要是堆积土层以及淤泥土层，它的稳定性有显著的不足；再加上下部有高压含水层，使得区域水文地质条件呈现出较大的复杂性；那么，基坑北边是老住宅楼，南边则是城市主干道，还有地下遍布的各类管网，这给施工带来了极大程度上的保护压力；土方挖掘以及支撑架设等工序频繁地交织在一起，给现场安全监督工作带来了极大程度上的挑战。

（二）风险评估与预警实施过程

承压水突涌、软土沉降、周边管线变形以及土方超挖这些核心风险因子，凭借构建起来的指标体系，在这个工程复杂的施工条件之下，得以被全维度识别并且筛选出来；那么借助灰色 - 模糊贝叶斯模型来开展初期风险评估工作，判别出施工整体的风险为Ⅱ级也就是中风险，施工场地内局部承压水区域以及紧邻建筑区域被明确判定为Ⅲ级也就是高风险。施工区开展了监测设备的布设工作，一共布设了一百二十六套，这些装置分布在边坡、支撑体系以及地层内部，监测信息会马上传送到预警系统平台，平台凭借自学习算法来不断评估风险程度优化预警阈值。在土体位移增速出现异常趋势以及承压水水位存在波动隐患的施工环节当中，平台开展了分级预警工作；借助减缓开挖作业的进度、增强支护以及支撑体系的强度并且加强降水力度等具体操作，现场得以化解潜在风险，几件潜在的安全事故得以被有效地规避了。

（三）应用效果分析

运用此项风险测评以及预警方法之后，这个项目在整个建造期当中都保持了零事故的记录。同时，基坑的支护结构，它的最大沉降量以及侧向位移量，也都被严格限制在了规程所许可的数值区间以内。此外，邻近的既有建筑以及各类管线，同样没有出现任何形式的形变或者损伤迹象。创新方法极大程度上超越了以往的监管机制。威胁察觉的范围得到了扩大，扩大幅度为35%，风险评价的细致程度有所增加，增加幅度为42%，预警可靠性达到了93.2%，问题处理的延迟减少了60%，深基坑在复杂环境当中的安全管控工作效率得到了极大程度上的提升，这样该技术体系的可行性以及先进性也就得以验证。

五、结束语

当前研究展现出来的局限性有望得到改善。后续工作应当把

多种极端自然灾害囊括进来，像特大暴雨以及强烈地震等。这样的拓展可以强化风险测度的指标体系，并且改进灾害环境下的风险预测模型，进而提高在极端情境当中对危险状况的分析和预见能力；其次，把无人机巡查以及人工智能影像解析技术纳入进来，对这些视觉化的风险辨识工具进行了拓展。隐患能够自行被

发现，并且来留存证据；那么在深基坑作业当中，借助提高数字孪生系统的推演能力，来开展安全管控的智能与精细水准方面的提升工作，这个平台把工况模拟、风险预警以及方案寻优过程进行整合。

参考文献

[1] 穆凤麟. 城市复杂环境条件下深基坑工程施工技术措施探讨 [J]. 中国设备工程, 2022, (10): 23-25.

[2] 罗晓伟, 车国喜, 刘斯全. 复杂环境工况下大型深基坑工程施工技术 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2017, 44(2): 86-91.

[3] 鲍志杰. 复杂环境下深基坑稳定性分析及控制技术研究 [J]. 建筑机械, 2025, (8): 262-266. DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2025.08.040.

[4] 苏晨龙. 复杂环境条件下深基坑工程数值模拟与安全监测技术研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2020. DOI: 10.27393/d.cnki.gxazu.2020.000736.

[5] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究 [D]. 上海交通大学, 2009.

[6] 谢德文. 复杂环境下基坑变形及施工关键技术研究 [D]. 中国矿业大学, 2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.002127.

[7] 常少康, 李笑, 赛悦. 复杂环境下建筑深基坑施工技术及其安全管理 [J]. 散装水泥, 2025, (2): 152-154.

[8] 吴连杰. 复杂环境条件下深基坑设计方式及优化分析 [J]. 建筑技术开发, 2017, 44(15): 118-119.

[9] 赵佳辉. 复杂环境深基坑支护设计研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2022. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2022.000326.

[10] 陈秦, 金亮, 项招明. 复杂环境下深基坑工程安全风险智能预警研究 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第二届工程技术管理智能化转型学术交流会议论文集 (上册) [出版者不详], 2026: 296-298. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2026.021899.