

城市复杂环境下深基坑工程风险评估与控制研究综述

石蒙 孙凤芹

华北理工大学 河北唐山 063000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19773

[摘要] 城市地下空间开发向深部、密集化、复杂环境发展,深基坑工程成了城市建设的重要且高风险环节,在建筑密集、管线复杂、地质多变的核心区,存在多源风险耦合的挑战。本文对近几年来该领域研究进展及实践动态进行了梳理,风险评估方法从多维度定性识别发展到主客观综合量化,用层次分析法(AHP)、模糊综合评价(FCE)和熵权法、机器学习相结合的方式弥补传统方法的主观性缺陷;数值模拟技术以有限元法为主,在高风险工况预测、水土耦合分析、参数反演修正中起到核心作用;结合最新的地方规范,对从设计源头到施工全过程的标准化管理制度和责任体系进行了解析;最后对建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)、人工智能(AI)引领的智能化管控趋势进行了展望。研究表明,深基坑风险管理由原来的依靠经验、静态控制的方式,转变为精准识别、动态评价、智能预警、协同控制的闭环数字化新范式。

[关键词] 深基坑工程; 风险评估; 数值模拟; 智能化管控; 城市复杂环境

引言

城市化进程的加快使得土地资源利用向立体化、集约化的方向发展,地铁、地下综合体、高层建筑地下室等工程使得深基坑的规模和深度越来越大[1]。城市核心区红线限制严格,基坑一般紧挨着重要的既有建筑、交通干道和生命线工程,形成了超深、超大、近接、敏感的典型复杂环境。该类工程在施工过程中除了会遇到地质条件的不确定性、地下水渗流、支护结构受力复杂等传统岩土工程问题外,还会受到施工扰动和周边环境相互影响所造成的影响,风险具有多源、耦合、动态演化等特点[3]。

一旦风险失控,就很容易造成基坑坍塌、支护结构失效、周边设施严重损坏等灾难性事故,造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响[4]。近期的基坑安全事故使各地主管部门紧急部署安全隐患排查整治工作,也说明了基坑安全风险管控的极端重要性和紧迫性[5]。因此创建起一套系统、科学、动态、适用于城市复杂环境的深基坑工程风险评价与控制体系,已经成为保证城市安全运转、工程顺利推进的重大需求[6]。本文主要通过综述该领域在风险评估方法、数值模拟技术、管理制度、智能化应用等方面的最新进展,理清目前研究的热点与不足,给未来理论与实践的发展提供借鉴。

1. 风险评估方法: 从定性识别到综合量化演进

有效的风险控制要从全面准确的风险识别和评价开始,相关研究也由原来的定性经验判断发展为建立多层次指标体系,实现定量、半定量综合评价。

1.1 风险识别与指标体系构建

风险识别是评估的基础。研究者认为城市复杂环境下的深基坑风险是由地质水文、支护结构、施工活动、周边环境、管理监测等各方面构成的系统性问题。由此可以建立系统风险因素集成为共识[7]。例如从地质、支护、施工工艺、周边环境等各方面进行系统识别。深圳市官方管理规定中明确要求建设单位在勘察前必须对周边环境(建/构筑物、道路、地下管线等)进行现状调查,将其作为风险评估和设计的强制性前置条件。这就意味着风险识别由施工环节向前端的工程前期延伸,即在工程设计之前对环境进行调查和评价。

1.2 综合量化评估模型

风险因素权重的确定和等级的评判是主要的环节。传统AHP、FCE法可以整合专家经验、处理模糊性问题,但是AHP主观性较强。因此研究者创建了主客观复合赋权模型,用WBS-RBS法来识别风险,用G2法和熵权法来兼顾指标的客观差异和专家判断的不确定性,从而提高评估的可信度。另外大数据、人工智能促使数据驱动模型出现,机器学习算法已经被应用到基坑坍塌预估、风险评价当中[10],未来会形

成“数据和模型双驱动”的发展趋势。

2. 数值模拟与分析技术：从辅助计算到预测决策核心

数值模拟已成为深基坑风险分析的核心手段，从辅助验证设计转向支撑动态风险评估与决策。

2.1 高保真度数值模型构建

PLAXIS、MIDAS GTS NX 等有限元软件由于有丰富的岩土本构模型库、施工阶段定义功能以及渗流-应力耦合分析能力[11]，可以为复杂施工过程的模拟提供支持。软土地区使用小应变硬化(HSS)模型来考虑土体小应变高刚度特性，模拟的围护结构变形和地表沉降，与实测数据吻合度比传统模型高得多，为敏感环境变形控制提供可靠工具。

2.2 模拟与监测数据的深度融合——参数反演与模型修正

岩土参数不确定性影响模拟精度，用监测数据反演参数是联系虚拟模型和实际工程的关键。以现场位移、应力监测数据为目标，用遗传算法、最小二乘法等优化模型参数，使模拟结果与实测数据最佳拟合，提高模型施工阶段和多工况下预测能力，使数值模拟从“事后解释”变为“事前预测”。

2.3 针对特定风险场景的专项模拟

数值模拟可以分析高风险工况成因及影响范围[12]，针对基坑开挖对临近桥梁桩基的影响，建立桩、土、基坑相互作用三维模型，为隔离加固措施提供定量依据，对“降水失效”“支撑滞后”等极端工况的模拟，可以直观地表现出风险连锁放大的路径，为应急预案的制定提供技术支持。

3. 管理制度与标准规范：从过程管控到源头治理并重

技术手段的进步要依靠严格的管理制度来保证。目前深基坑工程风险控制制度有责任前置、过程严控、标准细化等特点。

3.1 强化建设单位首要责任与前端管理

最新规范中建设单位负有主要责任，深圳市深基坑工程管理规定中要求建设单位对质量安全负责，勘察前要完成周边环境调查、施工前安全影响评估、组织设计方案专家论证（重点是周边环境影响），将风险控制关口前移到勘察、设计阶段。

3.2 实施全过程的标准化与差异化监管

监管实践需要对于深基坑工程实行全生命周期标准化、清单化监管。湖南省安全监管提示中详细列出了开工条件审查、主体责任行为监督、现场实体质量安全检查等各个环节的监督要点，特别强调对第三方监测的真实性、支护结构实体质量、重大事故隐患动态清零的检查。同时监管也存在差异，深圳规定安全等级为一级的基坑，其监测方案必须经过专家论证，湖南对造价、工期明显不合理项目实行差异化重点监管。

3.3 明确各参与方的协同责任

管理制度对设计单位、施工单位、监理单位、监测单位等各方面进行明确的法定职责，并且突出联动机制，设计单位要根据监测数据进行动态分析，当监测数据达到预警值或者控制值时，建设单位立即组织各方进行分析评估并采取措施，形成监测数据触发的应急协同体系。

4. 智能化与信息化管控：风险管理的未来范式

行业共识认为，深基坑工程领域正处在迫切需求和智能建造技术深度融合的时候[14]。以BIM、物联网、人工智能、数字孪生等为代表的信息技术正在改变风险控制的方式。

4.1 BIM 与物联网 (IoT) 的集成应用

用BIM技术创建深基坑全信息三维数字模型，与物联网传感网络（监测位移、应力、水位等）实时对接，形成“数字孪生”雏形。监测数据驱动模型构件状态实时更新，实现风险可视化、空间化定位，大大提高风险识别效率和直观性。

4.2 智能化预警与决策支持

以集成平台为依托，智能预警就实现了。系统可以自定义多级预警阈值（累计值、变化速率等），也可以自动发送报警信息[15]。进一步地，利用历史数据和机器学习算法，系统可以对变形趋势做出预测，从而实现从超限报警到趋势预警的飞跃。利用算法预测未来24小时的沉降发展趋势，在物理指标还没有超限时就发出风险提示。平台可以集应急预案的数字化流程，一旦发生报警就自动推送处置步骤、责任人、资源清单等辅助决策。

4.3 构建协同管理平台

信息化管理系统意在打破信息孤岛,把勘察、设计、施工、监测、监理和政府监督等各方面数据集成共享。该种协同平台一方面可以保证信息传递的准确性、及时性,另一方面又可以基于统一的数据底座进行设计方案比选、施工模拟推演、成本-安全平衡分析等深度应用,从而促使深基坑工程的风险管理由传统的数字化、协同化、智能化。

5. 结论与展望

城市复杂环境下深基坑工程风险评价与控制,已经发展成为一个综合性很强、技术性与管理性并重的交叉学科领域。风险评价越来越细致、量化,数值模拟借助数据融合加强动态预测,管理制度形成起源头治理和全过程监管的防线,智能化技术引导新的管控范式。

目前还存在三个难题,一是数据壁垒、模型泛化,缺少高质量的案例数据库,复杂的本构参数难以获得,需要推进行业数据标准的建设以及智能参数识别技术;二是智能决策深度、可信度不足,应用大多停留在感知预警,需要 XAI 与工程机理模型相结合;三是全生命周期风险管理不完善,研究和实践集中在施工阶段,需要向前延伸到规划设计,向后拓展到运营维护。随着创新、智能、低碳、数字化成为行业共识,深基坑工程风险管理将进入更加安全、高效、智慧的新阶段。

[参考文献]

[1]李澎涛. 紧邻高层建筑和城市轨道交通的深基坑工程施工管理策略研究[J]. 建筑科技, 2024, 8 (4): 17-20.

[2]吴志敏, 陈小丹, 官大庶, 等. 复杂周边环境中超深基坑工程的设计[J]. 广东水利水电, 2023 (8): 77-81, 87.

[3]申建红, 刘树鹏. 模糊动态贝叶斯网络在深基坑施工风险演化分析中的应用[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4211-4221. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2022.2135.

[4]Zhang, L., Wang, Z., Zhang, W., & Liu, S. (2023). Sandy aquifer collapse mechanism and accident treatment of the Qingdao metro tunnel. *Frontiers in Earth Science*, 11.

[5]《关于持续深入开展房屋市政项目深基坑及高边坡工程整治的通知》

[6]Hao H, Jian H, Peiling L, et al. Identification and evaluation of deep foundation pit construction risks based on Grey-DEMATEL-Fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *PLoS ONE*, 2024, 19 (8): e0304095.

[7]田丝雨, 安宏斌, 郭健, 黄鑫元, 王阳, 魏思维. 基于 BTM-BN 的深大基坑事故链生机理研究及重大风险研判[J]. *土木工程*, 2025, 14 (3): 554-569.

[8]高浩宁, 黄喜兵. 基于改进 AHP-BP 的深基坑施工风险评估[J]. *工程管理学报*, 2023, 37 (2): 147-152. DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2023.02.025.

[9]Meng, G., Li, X., Liu, H., et al. (2021). Risk Identification and Assessment during the Excavation of the Deep Foundation Pit. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, Article ID 4291356.

[10]倪小东, 张宇科, 焉磊, 等. 基于 HSS-MCC 融合模型及 SSA-BP 神经网络开展深基坑超大变形预测研究[J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2024, 51 (9): 35-45.

[11]彭广俊. 基于复杂环境下深基坑开挖变形监测数值模拟分析[J]. *城市建设理论研究 (电子版)*, 2024 (16): 105-107.

[12]程雪松, 裴昊田, 衣凡, 赵璟璋, 俞丹瑶, 刘晓敏, 贾建伟, 焦莹. 多道撑式深基坑垮塌事故连续破坏机理研究[J]. *土木工程学报*, 2024, 57 (3).

[13]孙志杰, 路超, 刘佳航, 等. 基于 BIM 技术的基坑工程标准化建模与运维系统研究[J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2025, (4): 79-88.

[14]陈湘生, 洪成雨, 苏栋. 智能岩土工程初探[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44 (12): 2151-2159. DOI: 10.11779/CJG E202212001

[15]刘峰. 基于国产自主 BIM 的基坑安全监测平台[J]. *土木建筑工程信息技术*, 2025, 17 (3): 79-83.