

深基坑支护技术的关键挑战与创新解决方案

李 峰

(泗阳县住房和城乡建设局, 江苏 宿迁 223799)

摘 要 随着城市化向立体空间深化, 深基坑工程面临规模增大、环境复杂的严峻挑战。本文系统剖析了深基坑支护工程面临的四大核心挑战: 复杂的地质水文条件、严格的周边环境保护要求、工程的动态时空效应以及传统技术的局限性。构建了面向未来的三维创新解决方案体系, 包括“硬核”技术创新、“智慧”赋能系统与“绿色”可持续理念。通过沿海软土区临近地铁超深基坑和城市历史区狭长基坑两个典型案例, 验证了该综合体系的有效性, 以期对相关人士提供借鉴。

关键词 深基坑工程; 支护技术; 数字孪生; 智能感知; 绿色施工

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.014

0 引言

我国城市化逐渐从平面扩张转向立体深化, 地下空间开发成为必然选择。深基坑工程作为地下建设的先导与基础, 其规模、深度与环境复杂性持续升级, 已成为影响工程安全、工期、成本及周边环境的决定性环节。研究其核心挑战与创新解决方案, 对保障重大工程安全、推动行业技术升级、践行城市可持续发展具有紧迫的现实意义与重要的科学价值^[1-2]。

在国际上, 研究侧重于精细化数值模拟、智能感知与风险预警。国内则在复杂条件下新型工法(如TRD、装配式支撑)的工程应用方面成果显著。然而, 现有研究多聚焦单一技术或局部问题, 缺乏对“地质—环境—施工—管理”系统性挑战的整合剖析, 以及“硬技术—智能化—绿色化”协同创新体系的构建, 这正是本文拟深入探讨的切入点^[3-4]。

本文首先系统剖析深基坑工程面临的四大核心挑战; 其次, 从“硬核创新、智慧赋能、绿色理念”三个维度构建综合解决方案体系; 再次, 通过典型案例验证方案的有效性; 最后, 总结结论并展望未来。技术路线遵循“问题识别→理论构建→实证分析→总结展望”的逻辑闭环, 旨在为工程实践提供系统参考。

1 深基坑支护工程面临的核心挑战深度剖析

1.1 挑战一: 复杂性与不确定性极高的工程地质与水文地质条件

城市地质条件的复杂性与不确定性是深基坑工程面临的首要物理挑战。工程常穿越软土、深厚填土、

砂层等不良地层, 其强度低、压缩性高, 易引发支护结构位移过大甚至整体失稳。同时, 高承压水头、丰富的地下径流构成严峻的渗流与突涌风险, 降水不当极易导致基坑管涌、流砂乃至周边地面沉降与建(构)筑物开裂。此外, 岩溶、孤石、断裂带等不良地质体的存在, 使得勘探难以完全揭示, 给支护设计与施工带来极大的不确定性与潜在风险。

1.2 挑战二: 极度敏感与约束严格的周边环境保护要求

现代深基坑工程多位于建成区核心, 周边环境约束日益严苛, 控制要求从“保证自身安全”升级为“微扰动保护”。基坑紧邻运营地铁隧道、历史保护建筑、重要市政管线等生命线工程, 其允许变形值常以毫米计, 对支护体系的刚度和变形协调能力提出极限要求。狭窄的施工场地限制了大型设备作业与土方运输, 对施工组织与工艺选择构成严峻考验。环境保护已从技术问题上升为社会责任, 任何失误都可能造成巨大的经济损失与社会影响^[5]。

1.3 挑战三: 基坑工程自身的动态时空效应

深基坑是一个典型的动态时变系统, 其力学行为表现出显著的时空效应。土体具有流变性, 基坑暴露时间越长, 土体蠕变导致的变形累积越显著。开挖顺序、支撑安装时机与预加力大小等施工工序直接影响着支护结构与土体的应力路径和重分布过程, 不当的施工步序可能诱发局部应力集中与过大变形。这种“过程决定结果”的特性, 使得设计必须与施工紧密结合, 对施工的精细化、信息化管控能力提出了极高要求。

作者简介: 李峰(1970-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 科技管理。

1.4 挑战四：传统技术与管理模式局限性

面对上述新挑战，部分传统支护技术与管理模式已显露出局限性。例如：某些支护形式（如部分土钉墙、钢板桩）在超深、复杂地层中可能刚度不足或止水效果欠佳；依赖人工经验的粗放式施工管理，难以实现对复杂动态过程的精确控制与风险预判；资源消耗大、产生大量建筑垃圾的传统工艺，也与绿色低碳的发展理念相悖。因此，推动支护技术体系、施工工艺与项目管理模式的全面创新与升级，已成为行业发展的必然选择。

2 面向未来发展的创新解决方案体系

2.1 解决方案一：支护结构体系与施工工艺的“硬核”创新

为应对复杂地质与严苛环境，支护结构与施工工艺逐渐向高强、高效、高精度方向进行“硬核”创新。在结构体系上，等厚度水泥土搅拌墙（TRD）工艺通过横向切割搅拌，可形成连续、均质、高强度的地下连续墙，有效解决深厚砂层、复杂夹层中的成墙与止水难题；装配式钢支撑系统凭借其标准化、快拆装、可施加高预应力的特点，能精确控制基坑变形，尤其适用于对位移敏感的核心城区。在工艺创新上，旋挖、铣槽等机械实现了坚硬地层的高效、低扰动成槽；超高压喷射注浆（RJP）等工艺则能在地下形成大直径、高强度的加固桩体，用于抢险加固与地基处理。这些“硬核”技术，共同构成了保障工程本体安全与效能的物理基石。

2.2 解决方案二：基于数字孪生与智能感知的“智慧”赋能

针对工程的动态性与不确定性，以数字孪生与智能感知为核心的“智慧”技术正深度赋能基坑工程全流程。首先，通过物联网（IoT）技术，布设智能传感器网络，对支护结构内力、深层土体位移、地下水位、周边建筑物沉降等关键参数进行全天候、自动化、高频率的实时感知与传输。其次，基于 BIM/GIS 与监测数据，构建与物理基坑同步映射、虚实交互的数字孪生模型。该模型不仅能直观展示三维状态，更能通过内置的力学分析算法，实时反演土体参数、预测未来变形趋势，并对超出预警阈值的情况进行智能预警与风险溯源，实现了从“被动应对”到“主动预测、精准调控”的管理范式变革，是应对时空效应、保障环境安全的核心神经中枢。

2.3 解决方案三：贯穿全生命周期的“绿色”可持续理念

为响应双碳目标与可持续发展要求，“绿色”理念必须贯穿于基坑工程的设计、施工、运维乃至拆除

的全生命周期。在设计阶段，优先选用可回收、可重复利用的支护材料（如可回收锚索、钢支撑），并优化方案以减少土方开挖量与混凝土用量。在施工阶段，推广低噪声、低振动、少排浆的静力施工工艺（如静压植桩），应用智能化降水与回灌一体化系统以保护地下水资源，并对建筑渣土进行现场资源化处理和再利用。在基坑服役期后，注重支护结构的拆除与场地生态恢复。这一理念将工程活动对资源环境的负面影响降至最低，推动基坑工程从传统的“消耗型”向未来的“环境友好与资源循环型”转型升级，实现了经济效益、社会效益与环境效益的统一。

3 案例分析

3.1 案例一：沿海软土地区临近运营地铁的超深基坑项目

1. 项目概况：该项目位于沿海软土地区，基坑开挖深度达 28 m，一侧紧贴正在运营的城市地铁隧道，隧道结构允许变形控制值极为严格（ ≤ 10 mm）。

2. 核心挑战：软土的高压缩性与低承载力、高地下水位的渗流风险，以及对邻近地铁隧道近乎“零扰动”的严格保护要求。

3. 创新解决方案应用：（1）“硬核”创新：采用“地下连续墙（厚 1.2 m）+ 四道装配式预应力钢支撑”作为支护体系。地下连续墙兼作止水帷幕，其高刚度为控制变形奠定基础；装配式钢支撑可实现快速安装与精准施加预应力，主动控制围护墙变形。坑内采用“钻孔灌注桩 + 三轴搅拌桩”进行地基加固，提高坑底土体稳定性。（2）“智慧”赋能：沿地铁隧道及基坑周边布设自动化监测网络，实时采集隧道收敛、沉降、支护结构变形与内力数据。数据实时传输至基于 BIM 的数字孪生平台，平台结合地质与施工参数进行动态反演与预测分析。当预测变形接近预警值时，系统自动报警，并指导施工方动态调整钢支撑的预应力值，实现“感知—预警—调控”的闭环管理。（3）“绿色”理念：采用可重复使用的装配式钢支撑，大幅减少混凝土消耗和建筑垃圾。对基坑降水进行精细化控制与回灌，最大限度减少地下水抽排对周边环境的影响。

（4）实施效果：项目全程地铁隧道实际最大变形控制在 7 mm 以内，远低于控制标准，确保了地铁的安全运营，验证了“硬核技术 + 智慧管控”体系在极端敏感环境下的卓越效能。

3.2 案例二：城市历史风貌保护区内的狭长型深基坑项目

项目概况：项目位于城市核心历史风貌保护区，需在密集的里弄建筑群中开挖一个长约 150 m、宽仅

20 m、深 15 m 的狭长型基坑，周边多为砖木结构的百年历史建筑，对振动、沉降极度敏感。

核心挑战：施工场地极度狭窄、大型设备进场困难，历史建筑基础脆弱且对差异沉降容忍度极低，施工噪声与振动控制要求严格。

创新解决方案应用：（1）“硬核”创新：创新性地采用“静压植入式钢管桩+预应力锚索”的组合支护方案。静压植入工艺无振动、低噪声，完美契合保护区要求；钢管桩可兼作微型钢管桩基础，为后续基础施工提供便利。针对狭长基坑的“长边效应”，在长边中部增设了高强度对撑，有效控制了中部的最大位移。（2）“智慧”赋能：对每一栋临近历史建筑的关键结构部位（墙角、门窗过梁）布设高精度无线倾角计与裂缝计。监测数据与三维激光扫描获得的建筑点云模型结合，在数字孪生平台上直观展示建筑的毫米级形变与历史裂缝的发育情况。通过大数据分析，建立了施工活动（如土方开挖、锚索张拉）与建筑响应的关联模型，指导施工步序优化。（3）“绿色”理念：全程采用电驱动静压设备，实现施工现场的零排

放。开挖土方经筛分后，部分用于现场基坑肥槽回填，部分外运至指定场所进行资源化利用。支护用钢管桩在项目后期大部分可回收。（4）实施效果：在极其受限的场地内，成功完成了基坑开挖，周边历史建筑的最大沉降被控制在 5 mm 以内，未出现新增结构性裂缝，完美实现了工程建设与历史保护的平衡，展现了精细化、低影响施工技术的强大适应性。

通过案例对比分析表明（见表 1），未来深基坑工程需深度融合“硬核技术创新”（物理保障）、“智慧系统赋能”（决策大脑）与“绿色理念贯穿”（价值导向），以应对复杂挑战，实现安全、智能、可持续发展。

4 结论与展望

4.1 主要结论

深基坑工程的核心矛盾已从确保结构强度安全转向“变形控制”与“环境干扰最小化”。单一技术创新不足以应对综合挑战，必须构建“硬核技术创新”“智慧系统赋能”与“绿色理念贯穿”的三维协同体系。技术选择需高度场景化，如沿海项目侧重高刚度支护

表 1 案例对比分析表

对比维度	案例一	案例二	核心启示
核心矛盾	软土地质与地铁保护叠加	空间限制与建筑脆弱性	核心矛盾已转向“变形控制”与“环境干扰最小化”
技术侧重	高刚度体系（连续墙+钢支撑）	低扰动工艺（静压植入）	技术选择须与具体“地质-环境”约束精准匹配
智慧应用	对线性基础设施的预测性全局控制	对点状保护对象的精细化监测分析	智能感知与数字孪生是实现精细化管理的必备工具
绿色体现	材料可回收、水资源保护	施工零排放、资源原地利用	绿色理念需在项目策划阶段进行系统性设计

与全局变形控制，历史区项目侧重低扰动工艺与精细化监测。智能化与数字化是实现从经验驱动到数据驱动管理范式变革的必然路径，是对抗工程不确定性的有效手段。

4.2 未来展望

（1）技术融合：推动新材料、新工艺与智能化技术深度融合，研发兼具高强、轻质、可回收特性的新型支护构件，探索支护结构“本体智能化”。（2）智能决策：发展基于 AI 的智能决策支持系统，利用海量数据训练模型，实现方案智能优选、风险自动识别与自适应调控。（3）绿色低碳：建立全生命周期碳足迹核算标准，研发低能耗、高资源利用率工艺，推动支护结构模块化设计与循环利用。

参考文献：

- [1] 何书龙,黄绪龙.高层建筑施工中深基坑支护技术研究[J].新城建科技,2025,34(03):167-169.
- [2] 刘艳,宗允建.深基坑支护技术在建筑施工中的应用与创新探索[J].新城建科技,2025,34(01):159-161.
- [3] 杨斌.深基坑支护结构施工技术及其变形控制研究[J].砖瓦,2025(12):154-156,160.
- [4] 万小现.土体施工中的深基坑支护施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):122-124.
- [5] 杨明.高层建筑深基坑支护结构选型及变形监测技术研究[J].城市建设,2025(25):77-79.