

复杂地质条件下深基坑支护施工安全关键技术研究

徐斌

甘肃信达建设工程咨询有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i7.4864

[摘要] 在复杂地质条件下推进深基坑支护施工时,多源地层的不均性、水文结构的突变性与软弱介质的敏感性叠加,使基坑变形模式更为多变,支护体系的安全裕度亦受到显著压缩,施工风险由此呈现出连锁性、隐匿性与快速放大性并存的特征。围绕地层结构扰动、地下水动力变化、支护构件受力重分布等关键影响环节展开研究,可将地质响应规律与支护受力机制加以联动,经由支护结构优化、水控制度完善与加固技术协同,施工安全边界得以重新建立,而以智能监测和预警为支点的动态控制体系,使深基坑在复杂地质中的稳定性获得可量化、可预测的保障。

[关键词] 深基坑支护; 复杂地质; 安全控制; 地下水; 变形监测

中图分类号: P624 文献标识码: A

Research on Key Safety Technologies for Deep Excavation Support Construction under Complex Geological Conditions

Bin Xu

Gansu Xinda Construction Engineering Consulting Co., Ltd.

[Abstract] When advancing the construction of deep foundation pit support under complex geological conditions, the unevenness of multi-source strata, the abrupt change of hydrological structure, and the sensitivity of weak media combine to make the deformation mode of the foundation pit more variable, and the safety margin of the support system is also significantly compressed. Therefore, the construction risk presents the characteristics of interlocking, concealment, and rapid amplification. Research on key influencing factors such as geological structure disturbance, groundwater dynamic changes, and redistribution of support components can be carried out to link geological response laws with support force mechanisms. Through optimization of support structures, improvement of water control systems, and coordination of reinforcement technologies, construction safety boundaries can be re established. The dynamic control system based on intelligent monitoring and early warning provides quantifiable and predictable guarantees for the stability of deep foundation pits in complex geology.

[Key words] deep foundation pit support; Complex geology; Security control; Groundwater; deformation monitoring

引言

深基坑工程的建设在快速城市化的背景下愈显频繁,而复杂地质条件的出现,使施工稳定性的脆弱性逐渐凸显,地层扰动传播路径的不确定、水土耦合行为的敏感以及局部软弱夹层的突然失稳,使安全控制被迫置于更高的难度等级;支护结构在受力重分布下表现出的非均衡响应,又让施工阶段的每一次变形都可能成为系统性风险的触发点。为在这种高度变异的环境中维持工程稳定,需要将地质信息的真实性、支护体系的适应性、地下水条件的可控性与监测预警的及时性相互贯通,使深基坑在复杂地质中的受力演化更加清晰、潜在危险更加可识别、施

工策略更加可调节,而安全性的重建亦因此具备现实基础。

1 复杂地质条件对深基坑支护施工的主要影响机制分析

1.1 复杂地质层状结构对支护稳定性的影响

在多类型地层叠置与结构突变不断交替的区域内,深基坑开挖阶段的受力传递路径往往更为迂回而复杂,支护体系的稳定性因此显得脆弱而敏感^[1];土体力学性质因材料组成差异而呈现非均质响应,刚性层与软弱夹层相邻分布时,基坑变形模式便会形成明显跳跃,局部沉降、侧向位移与结构受力重新分布相互交织,使支护结构的安全储备被持续削弱。地层之间的接触关

系一旦发生扰动,变形会沿软弱界面迅速扩散,使应力集中区域呈现隐匿放大趋势,而在岩土参数波动较大的区段,围护体系的受力非对称性更会加剧。因而在复杂层状结构中,支护体系的工作状态并非线性变化而是动态演化,其安全边界依赖于地质特征、施工节奏与结构抗力三者的协调一致。

1.2地下水条件与不良地质因素对施工安全的制约

地下水动力的变化在复杂地质中极易产生放大效应,渗透系数突变、承压水上升通道意外贯通以及潜水层结构破坏,均会使土体抗剪强度降低,支护结构在卸荷过程中出现额外位移,风险因水的扰动而迅速累积;局部破碎带、溶蚀带与软塑黏土的存在,使土体结构稳定性随微小扰动而改变,基坑侧壁在应力重新分配下形成滑移面或剪切带的可能性随之上升。不良地质因素在受力体系中常呈链式反应,渗流压力增强、变形加剧与土体结构破坏相互牵动,使施工环境呈现高度敏感性,而在施工节奏稍有变化时,支护体系便可能面临新的不稳定趋势。因此,在此类地质背景下,安全控制的核心在于使地下水、土体与结构响应始终处于平衡状态,使突发性风险得到提前识别并获得有效抑制。

2 复杂地质条件下深基坑支护施工的关键技术体系构建

2.1支护结构优化技术:柔刚协同、因地成型

在复杂地层的交错分布下,支护体系若未能适配不同土性,其稳定性便会受到持续削弱,而柔性构件与刚性构件之间一旦形成协同关系,受力系统便会呈现更高的韧性。强度高、变形小的硬质土层与松散、渗透性强的软弱土层并存时,支护设计需在刚度配置与变形协调之间取得平衡,使结构整体受力路径更稳定^[2];地下连续墙可在强风化岩或硬黏土中形成可靠阻隔,SMW工法桩在软塑黏土中可塑造良好整体性,而柔性放坡一支护复合体系又可使上部扰动更为缓和。若结构体系与施工节奏相互契合,受力曲线便更趋平滑,而结构刚度、侧向位移控制与变形协调三者一旦形成统一逻辑,支护安全边界便更清晰也更充足。

2.2变形控制技术:机理研判、参数优化

深基坑在复杂地层中出现的变形往往并非连续,也难呈对称性,若变形机理未被充分识别,支护体系便可能在微扰中进入潜在失稳状态。地层力学属性受含水量、结构面方向、沉积演化等多因素制约,使变形曲线常随开挖深度、卸荷时机与渗压分布而改变;分析模型若不能体现土体弹塑性演变,其参数便难以支撑真实受力状态。数值模拟在工程中可形成重要的技术支点,模型经多轮迭代后往往可将变形趋势可视化,使关键部位的应力集中区提前暴露,从而使开挖分层厚度、支撑间距、墙体刚度等参数得以更精准地调整。若再以现场量测信息对参数进行动态校核,设计精度便随之提升,使风险在萌芽阶段便得到抑制。

2.3地下水控制技术:识别精细、降排灵活

复杂地质中的地下水呈现强空间差异与高时间敏感性,其扰动机制一旦激发,将迅速改变支护体系的安全边界;地下水的

真实流向、压力分布与渗透路径必须精细识别,使降排技术具备灵活调节能力。承压水突升、局部破裂带渗透增强、弱透水层渗压突然失衡等常在开挖中后期集中体现,因此降压井、截水帷幕与注浆固结需形成联动体系,使水压削减更为稳定。砂性土层中水流扩散呈多向发散,而软黏土中渗流更易集中于薄弱界面,因此降排系统需具备“可调节性”,在水位波动时及时调整运行方式、增补局部帷幕或提高渗控能力。水文结构一旦以真实状态被复原,支护结构的受力反应便更可控,而土体的抗剪能力与整体稳定性也会随之提高。

2.4地基加固技术:多法协同、整体提能

深基坑中最易触发变形放大的往往不是整体地层,而是隐藏其间的软弱夹层,因此加固技术必须在增强局部强度的同时提升整体受力链条的连续性。高压旋喷可在土体内部构建高强度固结体,使松散颗粒间形成稳定连接;深层搅拌可在不同深度建立“加固区带”,使承载能力与抗变形能力同步提高;复合注浆可沿结构弱面精准扩散,使抗渗性与结构性同步增强。多种方法组合使用时,加固效果呈现层级递进特征,使软弱层面的整体性能获得明显提升,而支护结构的受力状态亦随地基性能的提升而趋于稳定。地基加固技术并非局部补强,而是贯穿支护体系稳定性的关键力量,使深基坑在复杂地质中的安全储备更为可靠。

3 复杂地质条件下深基坑支护施工安全控制与监测反馈技术应用研究

3.1风险辨识系统化,工程应用场景多维展开

深基坑在复杂地层中施工时,风险往往表现为隐蔽性强、传播路径长、触发机制多样,因此风险辨识若不能系统化,应用价值便会削弱^[3]。将风险识别由“静态记录”转向“体系化建模”,是工程中最具操作性的手段;其核心在于让地质结构、周边荷载、地下水动力和支护体系受力共同进入风险框架,使每一次扰动都有迹可循、每一种风险都能在工程中找到对应的控制点。

在某市综合体项目的深基坑施工中,由于软弱层与砂层交替分布,基坑初期就出现侧向位移波动。项目团队构建风险辨识系统,将地层分区、变形阈值与监测点布置共同纳入动态图谱,并将危险等级与施工工序联动,使开挖顺序与风险等级实时匹配。应用体系化辨识后,支护结构在关键区段的应力峰值降低近20%,工程节奏更加稳健,风险控制效果显著提升。

风险辨识要具备可直接用于现场决策的属性,因此需要借助结构化的列表进行工程化呈现。基于上述思路,形成了可在不同项目中复用的风险应用框架(见表1)。

表1 复杂地质条件下深基坑典型风险在工程中的应用控制要点

风险类型	工程诱因	应用措施
地层失稳风险	层间剪切、结构软弱	开挖分区化、局部加固、支护结构增韧
水力破坏风险	承压水突涌、渗透破坏	降压井联动运行、帷幕连续性检测
结构受力异常	刚度不足、内力重分布	关键段支撑加密、构件刚度提升
环境影响风险	周边建筑沉降敏感	监测点加密、振动源削减、开挖步距优化

此表不是静态模板,而是工程应用中可动态调整的工具,使风险控制体系真正进入施工决策链条。

3.2 监测体系立体化,智能技术在现场应用深化落地

深基坑监测若只停留在“记录层面”,其工程价值并不充分;监测体系在实际应用中需要形成立体结构,使数据成为“可分析、可预测、可决策”的核心资源。围护结构的内力变化、支撑体系的受压状态、地下水位的实时波动以及周边沉降的持续演化,都需在三维监测体系中立体呈现,而光纤传感、激光扫描与智能终端的联合应用,使监测体系向智能化跃升。

某市轨道交通基坑工程曾因地层夹杂粉土与卵石层,变形趋势难以判断,项目采取光纤分布式监测,将围护墙应变以连续曲线呈现,而三维激光扫描技术则在基坑外部形成高密度点云模型,使沉降形变不再零散,而是空间整体呈现。监测数据在智能系统中快速迭代后形成预判曲线,使施工团队能够提前调整支撑轴力、优化开挖顺序。最终工程中基坑最大变形较预判值偏差不足 10%,监测体系的应用价值得以完全体现。在工程实践中,智能解析能力成为监测体系的关键附加值,使数据不再是“被动结果”,而是能够指导“主动决策”的前置信号,使深基坑在复杂地质条件下具备更强的可控性。

3.3 施工节奏可控化,工序联动在工程中形成闭环应用

在复杂地质中,深基坑行为对施工节奏极为敏感,节奏稍有失衡便可能引发位移异常,因此施工节奏必须在工程实际中形成“可控—可调—可验证”的闭环机制^[4]。分层开挖若能与支护施作同步响应,地层卸荷便会更加温和,支护结构的受力亦更为平稳。

在某类软硬相间地层的基坑工程中,传统开挖模式使围护墙产生明显侧移。工程团队实施“微循环开挖模式”,即每层土体仅做短距离开挖、即时支护、快速稳固三项连续动作,使地层扰动被限制在最小范围;同时,采用“工序联动调度平台”使支撑安装、水位调控和监测反馈实现同步更新。节奏可控后,墙体位移下降 30% 以上,沉降范围明显缩小,工程安全储备大幅提升。此类应用显示,施工节奏控制不只是组织形式,更是结构安全的关键技术路径,工序联动越紧密,变形越可控。

3.4 预警体系多维化,实时决策在工程现场得以应用

深基坑的预警体系只有在工程现场发挥作用,才能体现实

际价值。在多维监测数据的支持下,预警系统应具备实时识别、快速诊断、前置响应三种能力,使结构异常在发展初期便被捕捉,使施工决策更具提前量。

在某高层建筑地下结构基坑工程中,项目团队构建多维预警矩阵,将位移速度、地下水位、支撑轴力、振动频率等信息作为联合指标输入智能分析模型,模型在识别位移加速度轻微上升时便触发预警,尽管这一变化尚未达到传统报警值,但现场团队立即调整支撑节奏并增设监测点,使变形趋势在短时间内回归稳定,从而避免了进一步恶化的可能性。此例显示,多维预警体系不仅能“发现风险”,还能“阻断风险”,其应用使深基坑进入提前防控、主动调控的新阶段,使安全决策脱离被动模式,逐渐具备智能化特征。

4 结语

在复杂地质背景下,深基坑支护的安全性愈显依赖体系化思维,而稳定性亦愈发取决于地层本构的真实把握、结构抗力的精准调校、地下水行为的有效约束以及监测预警的敏捷响应,工程安全因多源要素而变得立体,却也因技术体系的成熟而具备更高的可控性;当地质信息被细致解读、支护体系在动态环境中保持韧性、施工节奏在扰动链条中维持平衡、智能预警在风险未成形前便能介入时,深基坑的安全边界便不再是被动维持,而是向主动塑造延展,工程建设也在这一体系的支撑下呈现出更稳健、更具预见性的趋势,使复杂地质不再是限制,而是推动技术不断走向精细化的催化力量。

[参考文献]

- [1]潘长治.复杂地质深基坑支护施工关键技术研究[J].建筑机械化,2025,46(05):177-180.
- [2]刘俊鹏,张文恺,王清标.滨海复杂地质条件下深基坑钢支撑安全施工关键技术[J].建筑技术开发,2022,49(2):158-161.
- [3]魏久坤.水利工程深基坑支护技术在复杂地质条件下的应用研究[J].水上安全,2025,(22):193-195.
- [4]黄金福.建筑工程中的深基坑支护施工关键技术的应用研究[J].中国住宅设施,2025,(08):209-211.

作者简介:

徐斌(1994—),男,汉族,甘肃武威人,本科,工程师,研究方向:铁路隧道施工技术。