

# 复杂地质条件下深基坑支护结构变形控制与监测分析

胡瑞云

鄂托克前旗政府投资项目代建中心 内蒙古 鄂尔多斯 016200

**摘要:** 随着城市地下空间开发向纵深发展,深基坑工程日益普遍,其开挖深度和规模不断增大。在复杂地质条件下(如软土、高水位、岩溶、断层破碎带、非均质地层等),深基坑支护结构面临显著的变形风险,可能引发支护失效、周边环境破坏甚至重大安全事故。本文系统梳理了复杂地质对支护结构受力与变形的影响机理,归纳了当前主流的支护形式及其适用性,深入探讨了变形控制的关键技术路径,并构建了全过程、多维度的监测分析体系。在此基础上,提出基于“感知—评估—预警—调控”闭环逻辑的动态风险管理框架。研究表明:精准识别地质风险源、合理选择支护体系、强化施工过程控制、融合智能监测与数值模拟,是实现复杂地质条件下深基坑安全高效施工的核心保障。研究成果可为相关规范修订与工程实践提供理论支撑。

**关键词:** 深基坑;复杂地质;支护结构;变形机理;监测体系;动态控制

## 引言

近年来,我国城市化进程加速推进,土地资源日趋紧张,地下空间开发利用成为缓解城市功能压力的重要途径。地铁车站、地下商业综合体、大型设备基础等工程对深基坑的需求持续增长,开挖深度普遍超过15米,部分超深基坑已达30米以上。然而,许多城市区域地质条件复杂,常存在软弱土层、高地下水位、岩溶发育、断层破碎带、砂卵石透镜体等不良地质因素,导致基坑开挖过程中土体应力重分布剧烈、支护结构受力状态高度非线性,极易诱发过大变形甚至失稳。深基坑支护结构的变形不仅关乎自身稳定性,更直接影响邻近建筑(构筑物)、道路、地下管线等既有设施的安全。一旦控制不当,可能造成沉降、开裂、倾斜乃至坍塌,带来严重的社会与经济损失。因此,在复杂地质背景下,如何科学预测、有效控制并实时监测支护结构的变形行为,已成为岩土工程领域的核心课题。现有研究多聚焦于特定地质类型或单一控制手段,缺乏对“地质—结构—施工—监测”全链条耦合机制的系统整合。

## 1 复杂地质条件对支护结构变形的影响机理

### 1.1 主要复杂地质类型及其工程特性

复杂地质条件通常指对基坑稳定性产生显著不利影响的非理想地层组合。其中,软土层因其高含水量、低抗剪强度和显著流变特性,往往在开挖卸荷后发生持续侧向流动,导致支护结构产生不可逆的大位移。高地下水位或承压水的存在则进一步加剧了这一风险,尤其在粉细砂或砾砂层中,若降水或止水措施不到位,极易诱发管涌、流砂甚至坑底突涌等渗透破坏现象。在岩溶发育地区,地下空腔或松散填充体的存在使得支护桩难

以获得有效嵌固,局部悬空或承载力突变问题突出。而断层破碎带或节理密集区则因岩体完整性差、结构面发育,容易形成潜在滑移面,使支护体系承受非对称荷载。此外,地层垂向或水平方向上的非均质性——如砂层夹薄黏土、卵石与粉土互层等——会导致土压力分布高度不均,进而引发支护结构的扭曲或局部屈服。上述地质因素往往并非孤立存在,而是相互叠加、耦合作用,形成复合型复杂地层,显著增加了支护设计与施工过程中的不确定性与风险。

### 1.2 变形诱发机制

在上述复杂地质背景下,深基坑支护结构的变形行为呈现出高度非线性和时变特征。传统土压力理论基于均质、连续、各向同性的理想假设,难以准确反映实际地层中应力传递与土拱效应的削弱,尤其在软硬交替或存在软弱夹层的区域,主动土压力往往远超设计值。同时,地下水渗流不仅降低土体的有效应力,还通过渗透力驱动细颗粒迁移,进一步削弱土体结构,形成“渗流—应力”耦合效应。这种耦合作用在高水头差条件下尤为显著,可能导致局部土体液化或水力劈裂<sup>[1]</sup>。此外,深基坑开挖本质上是一个具有强烈时空依赖性的过程,土体的蠕变、松弛与卸荷回弹特性意味着变形并非瞬时完成,而是随时间持续发展。若设计阶段忽略时间因素,将严重低估长期变形量。支护结构自身的刚度不足、节点连接薄弱或支撑安装滞后,也会在非均匀荷载作用下引发局部失稳或整体倾覆。更为关键的是,施工过程中的扰动——如超挖、不对称开挖或支撑延迟——会打破原有土—结构平衡,造成不可逆的变形累积,且此类累积变形往往难以通过后续措施完全恢复。

## 2 支护结构选型与设计原则

### 2.1 常见支护形式及其适用性

面对多样化的复杂地质条件，支护体系的选择需充分考虑地层特性、开挖深度、环境保护要求及经济性等因素。排桩结合内支撑或预应力锚索的支护形式在中等深度基坑中应用广泛，尤其在软土地区需配合止水帷幕以控制渗流；而在岩层中，预应力锚索可有效提高体系刚度并减少内支撑数量。地下连续墙因其整体性好、刚度大、止水性能优异，成为超深基坑及高水位地区的首选方案，尽管其造价相对较高。SMW工法桩（型钢水泥土搅拌桩）则在软土地区展现出良好的挡土与止水一体化能力，但在砂砾层中成桩质量易受干扰，适用性受限。对于场地狭小、周边环境敏感的城区项目，逆作法通过利用主体结构梁板作为临时支撑，可大幅减少临时支护工程量，降低对周边的影响。在垂向地质条件变化剧烈的场地，复合支护策略——如上部放坡结合下部排桩，或地下连续墙辅以坑内加固——能够灵活适应不同深度的地层特性，实现技术与经济的最优平衡。

### 2.2 设计优化要点

在复杂地质条件下，支护设计不应局限于满足强度与稳定性的基本要求，而应转向以变形控制为核心的性能化设计理念。首先，必须依托高精度的地质勘察数据，包括静力触探、跨孔地震波CT、地质雷达等先进手段，构建精细化的三维地质模型，准确识别潜在的软弱夹层、溶洞、断层等风险源。其次，设计应考虑多种不利地质组合的包络效应，按最不利工况进行验算，确保结构具备足够的安全储备。在此基础上，适当增强支护体系的冗余度与鲁棒性，例如局部加密支撑、增加备用注浆通道或采用可调刚度节点，以应对施工过程中可能出现的意外情况。更重要的是，应明确设定合理的变形控制目标，如将最大水平位移限制在开挖深度的0.2%至0.5%范围内，并以此反推支护刚度、支撑预加力等关键参数，实现从“强度控制”向“变形控制”的范式转变。

## 3 变形控制关键技术路径

### 3.1 地基改良技术

针对软弱地层或岩溶空腔等先天缺陷，地基预处理是控制支护结构变形的基础性措施。通过压力注浆可有效填充土体孔隙或岩溶空腔，胶结松散颗粒，显著提升局部土体的强度与压缩模量，从而改善支护桩的嵌固条件。在需要同时实现挡土与止水的场合，深层搅拌桩或高压旋喷桩形成的连续加固体不仅能限制侧向位移，还能有效阻隔地下水渗流路径。对于局部高风险区域，布设微型桩群可形成“微型桩筏”效应，增强地基整体承

载能力与抗变形能力<sup>[2]</sup>。此外，在高水位地区，科学布置降水井并辅以回灌井系统，可在降低坑内水位的同时维持周边地下水位相对稳定，避免因水位骤降引发的大范围附加沉降，实现降水与环境保护的协同。

### 3.2 施工过程控制

施工阶段是变形控制成败的关键环节。深基坑开挖必须严格遵循“分层、分段、对称、限时”的基本原则，单次开挖深度不宜过大，以避免局部应力集中导致土体失稳。支撑结构的安装应及时跟进，通常要求在开挖完成后24小时内完成支撑架设并施加设计要求的预加轴力，以迅速建立新的力学平衡。施工过程中应避免偏载或不对称开挖，防止支护结构因受力不均而发生扭转或倾斜。更为重要的是，应全面推行信息化施工理念，即将实时监测数据作为指导施工决策的核心依据，动态调整开挖速率、支撑参数甚至支护方案，实现从“按图施工”到“依据施工”的转变。

### 3.3 数值模拟辅助决策

现代数值模拟技术为深基坑变形控制提供了强大的辅助决策工具。通过建立考虑真实地质分层、材料非线性及施工工序的三维有限元模型，工程师可以预先模拟支护结构在整个开挖过程中的内力与变形演化规律，识别潜在的破坏模式，如坑底隆起、整体滑移或支撑屈服。在此基础上，可对支撑位置、预加轴力大小、桩径与嵌固深度等关键参数进行敏感性分析与优化，从而在施工前确定最优方案。常用的本构模型如Hardening Soil模型或修正剑桥模型，能够较好地反映软土的应力路径依赖性与塑性体积变化，显著提升模拟精度。数值模拟与现场监测的有机结合，构成了“预测—验证—修正”的闭环，极大增强了工程决策的科学性与前瞻性。

## 4 监测分析体系构建

### 4.1 监测内容与技术手段

建立覆盖“支护结构—土体—环境”三位一体的监测体系：

表1 监测内容与技术手段

监测对象	监测项目	常用技术手段
支护结构	水平位移、竖向位移、内力	测斜仪、全站仪、轴力计、应变片
坑周土体	土压力、孔隙水压力	土压力盒、孔隙水压力计
地下水	水位、水质	水位计、电导率传感器
周边环境	地表沉降、建筑物倾斜	沉降板、倾斜仪、GNSS、InSAR

近年来，分布式光纤传感（DTS/DAS）、无人机摄影测量、三维激光扫描等新技术逐步应用于基坑监测，实现全场、连续、高精度感知。

#### 4.2 数据分析与预警机制

原始监测数据需经过系统处理与深度分析才能转化为有效的决策信息。通过对位移、轴力等时序数据进行趋势分析,如采用移动平均或指数平滑算法,可清晰识别变形速率的变化拐点,判断结构是否趋于稳定或加速破坏。在此基础上,应建立分级预警机制,通常设定黄色(70%允许值)、橙色(85%)和红色(100%)三级阈值,一旦监测值触及相应级别,即触发对应的应急响应流程<sup>[3]</sup>。更进一步,通过融合多源监测数据——如将位移增量与支撑轴力衰减、水位异常波动进行关联分析——可构建综合风险指数,提升预警的准确性与鲁棒性。随着人工智能的发展,基于LSTM等时序神经网络的预测模型已被用于提前数小时甚至数天预测变形趋势,为风险防控争取宝贵时间。

#### 4.3 动态反馈控制

监测的最终目的是服务于动态控制。为此,应构建“监测—评估—决策—调控”一体化的闭环管理机制。该机制首先依赖于物联网技术,将各类传感器数据实时上传至云平台;平台自动比对预设阈值,一旦超限即发出预警;项目技术团队随即组织专家会诊,结合数值模拟结果,快速制定针对性的调控措施,如局部注浆加固、增设临时支撑或暂停开挖;措施实施后,继续通过监测验证其有效性,并动态调整后续施工计划<sup>[4]</sup>。这一闭环机制实现了从被动的事后处置向主动的事前预防与事中干预的根本转变,是保障复杂地质条件下深基坑工程安全的核心制度保障。

#### 5 智能化与未来发展方向

随着数字孪生、建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)等新兴技术的深度融合,深基坑工程正加速迈向智能化新阶段。数字孪生技术通过构建物理基坑的虚拟映射,可实现从勘察、设计、施工到运维的全生命周期数据集成与动态仿真,为管理者提供沉浸式决策支持。BIM与地理信息系统(GIS)的集成,则能将三维地质模型、支护结构模型与周边环境信息无缝融合,实

现风险的可视化表达与空间分析。5G通信与边缘计算技术的应用,使得海量监测数据得以低延时传输与本地智能处理,大幅提升响应速度。展望未来,自适应支护系统——如配备液压调节装置的智能支撑、可自主导航的注浆机器人——有望实现根据实时监测数据自动调整支护参数,真正达成“感知即响应”的智能控制目标。这些技术的成熟与普及,将从根本上重塑深基坑工程的安全管理模式。

#### 6 结语

本文系统探讨了复杂地质条件下深基坑支护结构变形控制与监测分析的关键问题,得出以下结论:复杂地质条件通过非线性土压力、渗流耦合、非均质性等机制显著加剧支护结构变形风险,需在勘察阶段精准识别地质异常;支护体系选型应基于地质适配性原则,优先选用刚度大、整体性好、止水可靠的结构形式,并引入性能化设计理念;变形控制需贯穿“地基处理—支护设计—施工管理—应急响应”全过程,强调施工时空效应与工序协同;构建多维度、高精度、实时化的监测体系,并融合数值模拟与智能算法,是实现动态风险管控的核心;未来深基坑工程将向数字化、智能化方向发展,数字孪生与自适应控制技术有望大幅提升安全水平与施工效率。建议在工程实践中推广“地质精准识别—支护智能设计—施工精细控制—监测动态反馈”一体化技术框架,推动深基坑工程从经验驱动向数据驱动、智能驱动转型。

#### 参考文献

- [1]姚小波.复杂地质条件下建筑深基坑支护变形响应及支护优化研究[J].工程机械与维修,2025,(09):106-109.
- [2]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.
- [3]李杰.非对称深基坑支护结构的变形控制模拟与实测[J].建筑施工,2025,47(06):915-919.
- [4]刘利杰.高层建筑深基坑支护结构变形控制技术研究[J].工程质量,2024,42(09):89-92.