

深基坑支护结构变形监测与安全控制分析

付 煥

温州建设集团有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：廊坊市富水粉砂地层 17.35m 深一级基坑工程，桩锚支护体系配套监测方案涵盖围护桩水平位移、坑周地表沉降等核心项目，明确监测点布设、频率及预警阈值，自动化监测搭配人工复核保障数据可靠。监测数据分析揭示支护结构水平位移呈“弓”形分布，地表沉降呈“马鞍形”发展，开挖卸荷、锚索预应力、地层特性均为主要影响因素。组合支护、动态调控及应急处置等安全控制措施同步提出，工程实践显示所有监测指标均在安全区间，无安全险情发生，研究成果为富水粉砂地层深基坑安全施工提供理论支撑与实践参考。

【关键词】：富水粉砂地层；深基坑；支护结构；变形监测；安全控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.096

引言

城市地下空间开发持续深入，深基坑工程数量大幅增加。富水粉砂地层渗透性强、抗扰动性差，基坑开挖易引发支护结构变形、渗流等安全隐患，威胁周边建筑与管线安全。廊坊地区富水粉砂地层分布广泛，深基坑施工难度较高，桩锚支护体系是该类地层常用支护形式，变形规律与安全控制是施工核心。以廊坊市 17.35m 深一级基坑为实例，设计科学变形监测方案，分析支护结构变形特征及影响因素，提出针对性安全控制措施，解决该类地层深基坑变形管控难题，为同类工程施工提供借鉴。

1 深基坑支护结构变形监测方案设计

1.1 监测项目与监测点布设

以廊坊市富水粉砂地层 17.35m 深一级基坑工程为实例，监测项目围绕桩锚支护体系核心变形特征设置，重点开展围护桩水平位移、坑周地表沉降、锚索内力及地下水监测^[1]。监测点结合基坑平面形态与周边环境差异化布设，围护桩测斜管沿基坑长边中部、短边中部及阳角位置对称布置，对应 CX4、CX9、CX10、CX12 等关键测点，覆盖变形敏感区域；地表沉降测点沿坑边 3 倍开挖深度影响范围布设，间距控制在 8—12m，邻近高层建筑与道路侧加密至 5m，基坑南北侧三分点处增设桩体位移对比测点，捕捉空间效应对变形的影响；地下水位监测孔布设于降水影响核心区与帷幕薄弱段，把控粉砂地层渗流稳定状态，整体布设兼顾空间代表性与数据关联性。

1.2 监测频率与预警阈值确定

监测频率严格匹配施工工序动态调整，开挖前完成初始值采集且连续 2 次读数偏差不超 $\pm 0.5\text{mm}$ ，土方分层开挖期间每开挖一层加密至 1 次/天，锚索张拉与腰梁安装等关键工序实施 12h 监测一次，底板浇筑完成且变形稳定后降至 1 次/3 天，

遇降雨、周边荷载突变等特殊工况实时加密监测。结合一级基坑安全标准与粉砂地层特性，确定围护桩水平位移预警阈值为 25mm、控制值 35mm，地表沉降预警值 20mm、控制值 30mm，位移速率预警阈值 $\geq 2\text{mm/d}$ ，该廊坊工程实测最大水平位移 27mm，始终处于安全区间内，预警体系有效规避变形失控风险。

1.3 监测数据采集与处理方法

采用自动化监测与人工复核结合模式，围护桩水平位移通过固定式测斜仪采集，精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，地表沉降使用电子水准仪观测，锚索内力采用振弦式应力计实时传输数据。数据处理遵循“采集—校核—滤波—分析”流程，剔除施工扰动、温度漂移等异常值，采用滑动平均法平滑处理，结合 FLAC3D 数值模拟结果对比校验，构建实测值与模拟值偏差修正模型，确保数据反映结构真实变形，该工程桩体水平位移模拟与实测曲线拟合度高，最大偏差仅 9mm，为变形规律分析提供可靠支撑（见图 1）。

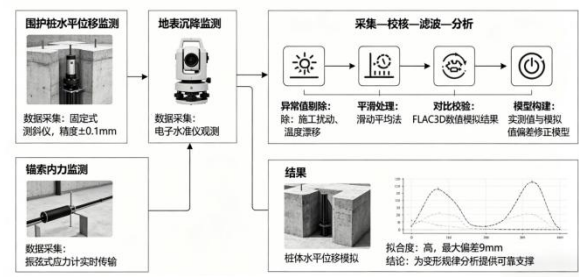


图 1 监测数据采集与处理方法

2 深基坑支护结构变形规律分析

2.1 支护结构水平位移变化特征

廊坊粉砂地层基坑围护桩水平位移呈“弓”形分布，位移

随开挖深度增加,最大值稳定在桩体中部8m处,锚索作用部位位移曲线收敛,预应力锚索可约束桩体变形^[2]。各开挖阶段位移沿深度变化规律相同,开挖初期桩顶位移增长较快,中层锚索施加后变形速率下降,开挖至基底时最大水平位移36mm,与基坑深度比值0.2%,变形受控良好。基坑不同位置测点位移存在空间差异,西侧紧邻高层建筑的CX12测点与北侧近商住楼的CX9测点,位移大于南侧道路侧CX6测点,周边建筑荷载与地下室围护结构会抑制或扰动桩体位移,距离坑壁越远土体水平位移非线性递减,50m处位移趋近于零,开挖影响范围约为3倍开挖深度。

2.2 支护结构竖向沉降变化特征

坑周地表沉降随开挖进程呈马鞍形发展,沉降最大值在基坑西侧中部,角部沉降偏小,北侧受邻近高层建筑荷载作用,沉降分布不对称,与南侧道路侧差异显著。沉降量随开挖深度增大,第一步开挖后最大值13mm,开挖完毕后增至58mm,纵向沉降影响范围超出基坑边界,粉砂地层降水固结与土体蠕变加剧沉降。底板浇筑完成后沉降趋于稳定,桩顶冠梁与上部土钉墙协同,分散桩体竖向应力,降低支护结构整体不均匀沉降风险,实测沉降速率始终低于预警值,未对周边建筑与管线产生不利影响。

2.3 不同施工阶段变形影响因素

开挖阶段变形核心受控于卸荷效应,分层开挖深度、暴露时长决定位移增长速率,超挖与无支撑暴露会引发变形突变。锚索预应力施加是变形调控关键,三道锚索分别在7.95m、11.90m、14.87m位置约束桩体,抵消土压力引发的变形。粉砂地层对扰动高度敏感,降水使土体有效应力增加、孔隙水压力消散,引发土体固结变形,占总变形量7%—10%。周边建筑施工扰动、道路动荷载及空间效应叠加,造成基坑不同部位变形差异,开挖顺序与支护施作时序,直接影响变形发展趋势与最终量级。

3 深基坑支护结构安全控制技术措施

3.1 变形主动控制与预控措施

针对粉砂地层特性,采用“上部土钉墙+钻孔灌注桩+三层预应力锚索+旋喷桩止水帷幕”组合支护体系,灌注桩 $\Phi 800@1600$ 、旋喷桩 $\Phi 700@500$ 形成隔水屏障,从源头控制渗

流与变形。施工前借助FLAC-3D三维建模模拟开挖全过程,优化锚索间距、预应力值及开挖分层参数,提前预控变形发展。降水采用管井与轻型井点结合方式,严控降水速率,防止地下水位骤降引发土体固结沉降,桩顶冠梁同步设置,增强支护整体刚度,减少桩体不均匀变形,该预控体系将基坑变形控制在低水平可控范围。

3.2 施工过程动态调控方法

严格执行“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”原则,分层开挖深度分别控制在4.0m、4.4m、3.6m、5.35m,每段开挖长度不超过25m,需在限小时内完成锚索张拉与腰梁安装,缩短无支撑暴露时长^[3]。结合监测数据实时调整施工参数,位移速率接近预警值时,减小开挖分层厚度、提高锚索预应力,必要时进行坑内回填反压。依托信息化施工平台,实现变形数据实时上传、智能分析及指令下达,构建“监测—分析—调控—再监测”闭环管理,动态适配粉砂地层变形敏感特性,保障支护结构稳定。

3.3 应急处置与安全保障对策

制定粉砂地层渗漏、变形超标、管涌等专项应急预案,现场储备沙袋、注浆设备、止水材料等应急物资。桩体位移突增或地表沉降超速时,立即停止开挖,采取锚索补张、坑内堆载、周边注浆加固等措施;帷幕渗漏时,双液注浆快速封堵,防止粉砂流失引发塌陷。建立多方联动机制,实时共享监测数据,紧急情况快速启动响应,工程全程未出现安全险情,应急体系与保障措施有效,为富水粉砂地层深基坑安全施工提供实践参考。

4 结语

本文结合廊坊市富水粉砂地层深一级基坑工程,完成支护结构变形监测方案设计、变形规律分析及安全控制技术研究,得出以下结论:监测点布设与动态调整的监测频率,可捕捉支护结构变形特征;该类基坑水平位移呈“弓”形、地表沉降呈“马鞍形”分布,受开挖卸荷、锚索作用及地层特性综合影响;“组合支护+动态调控+应急保障”综合措施,能有效控制变形风险,保障基坑施工安全。本次研究贴合工程实际,解决富水粉砂地层深基坑变形管控关键问题,后续可进一步优化监测技术与控制措施,为更复杂地质条件下的深基坑工程提供更完善的技术支撑。

参考文献:

- [1] 贺庭伟.深基坑支护结构变形实时监测与调控技术[J].四川建材,2025,51(05):119-121.
- [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] 陈建民.高深度基坑支护结构拆除安全风险评估与管理研究[J].中国住宅设施,2025,(11):44-46.