

基坑变形监测测量方法与数据处理分析

李英策

天津港工程监理咨询有限公司 天津 300000

摘 要：基坑变形监测是保障深基坑施工安全的核心技术手段。本文基于基坑变形机理与监测规范标准，系统梳理传统人工监测与自动化智能监测的各类技术方法，对比不同监测手段的精度、效率与适用场景。同时详细阐述监测数据预处理、精准计算、变形规律分析的完整流程，建立分级预警机制，剖析施工全过程变形特征及影响因素，提出针对性工程管控优化措施，为基坑施工安全管控提供技术支撑。

关键词：基坑变形监测；测量方法；数据处理

引言：随着城市建筑工程与地下空间开发规模持续扩大，深基坑施工工况愈发复杂，周边建构筑物、管线密集，施工变形风险隐患大幅增加。基坑开挖卸荷引发的土体位移、结构变形等问题，极易引发坍塌、沉降等安全事故。为精准把控基坑变形动态、规避施工风险，本文依托国家监测规范，全面探究基坑变形监测技术方法与数据处理体系，科学分析变形规律，为现场安全施工与风险防控提供实操依据。

1 基坑变形监测基础理论与监测方案设计

1.1 基坑变形核心类型与变形机理

(1) 基坑变形主要类型：分为围护结构水平位移、竖向沉降、基坑周边土体沉降、坑底隆起、周边建筑物及管线变形等核心类型。(2) 基坑变形产生机理：基坑开挖卸荷导致土体应力重分布，破坏原有土体平衡状态，引发土体位移；围护结构受力不均、支护体系变形进一步加剧基坑整体变形。具体而言，坑内土体开挖使侧向卸荷，围护墙背后主动土压力推动墙体向坑内倾斜，产生水平位移；同时，坑底卸荷引起下方土体回弹，表现为坑底隆起，并带动周边土体发生沉降^[1]。(3) 基坑变形影响因素：包括开挖深度、土体地质条件、支护结构形式、施工荷载、地下水变化、周边环境扰动等内外因素。

1.2 基坑监测基本原则与技术标准

(1) 监测基本原则：遵循可靠性、精准性、及时性、全面性、经济性原则，保障监测数据真实有效，贴合工程实际施工工况。监测点布设应突出重点、兼顾全局，确保数据具备可追溯性与闭环管理能力。(2) 监测技术规范标准：依据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB50497)、《建筑地基基础设计规

范》(GB50007)等国家及行业标准，确定监测精度、监测频率、预警阈值，确保监测工作有章可循。(3) 监测精度分级要求：根据基坑安全等级(一级、二级、三级)，划分不同监测精度标准，明确各类变形监测的允许误差范围。一级基坑水平位移监测精度宜优于 $\pm 1\text{mm}$ ，沉降监测精度宜优于 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

1.3 基坑监测方案整体设计

(1) 监测点位布设：结合基坑尺寸、支护形式、周边环境，合理布设水平位移、沉降、应力监测点位，保证点位覆盖全面、具有代表性。关键断面及风险区域应加密布点，形成完整监测剖面。(2) 监测周期与频率：根据施工阶段(开挖期、支护期、回填期)制定差异化监测频率，施工关键阶段加密监测，稳定阶段适当降低监测频率。开挖期间关键项目宜每日监测1~2次，遇异常情况应加密至每小时1次。(3) 监测预警指标设定：结合规范要求与工程实际，确定各变形项目的预警值、报警值、控制值，建立分级预警机制。预警值取控制值的60%，报警值取控制值的80%，控制值取设计允许上限，并制定对应处置预案。

2 基坑变形监测主要测量方法及应用

2.1 传统人工监测测量方法

(1) 水准测量法：用于基坑周边土体及围护结构竖向沉降监测。采用精密水准仪配钢钢尺，按闭合或附合水准路线施测。操作流程：架设仪器、整平、后视读数、前视读数及记录；观测顺序采用“后—前—前—后”或“后—后—前—前”以消除误差。读数估读至 0.01mm ，每测段往返测误差 $\leq \pm 0.3\text{mm}$ 。精度控制：固定仪器、路线、人员、时间，避开高温大风时段^[2]。(2) 全站仪极坐标法：用于围护结构水平位移监

测。在基坑影响区外设稳定基准点,监测点设反射棱镜或反射片。观测步骤:基准点设站定向,依次测各点水平角与斜距,经极坐标公式计算平面坐标,与初始值比较得位移量。单点测量快,精度达亚毫米级,适用于通视良好基坑,但受大气折射和对中误差影响,需定期检校仪器。(3)钢尺量距与测斜仪法:测斜仪监测深层土体水平位移,在围护结构或土体中预埋测斜管,确保导槽方向与位移方向一致。采集时探头沿管底至管口逐段提升(每0.5m间隔),读取A+和A-两组读数,差分计算消除零漂,换算各深度水平位移。人工监测操作灵活、设备成本低,但受天气影响大、劳动强度高、数据连续性差,适用于短期或辅助场景。

2.2 自动化智能监测测量方法

(1)GNSS 卫星监测技术:利用卫星定位技术实现基坑点位全天候位移监测,无需人工现场作业,适用于大型、开阔场地基坑变形监测。通过布设基准站和监测站,采用静态或RTK动态差分定位,水平精度可达 $\pm(2.5+1\times 10^{-6}D)$ mm,垂直精度可达 $\pm(5+1\times 10^{-6}D)$ mm。数据自动采集、无线传输,可实现远程实时查看,但受卫星信号遮挡影响明显,不适用于地下或深窄基坑。(2)激光扫描监测技术:通过三维激光扫描获取基坑整体形变数据,可实现非接触式、全域监测,精准捕捉局部微小变形。扫描仪以百万点/秒的速率获取点云数据,经多期点云配准与差分分析,生成基坑整体形变云图。该技术监测范围广、信息量大,适用于基坑全景变形趋势分析和突发变形快速评估,但设备昂贵、数据处理复杂,单次扫描耗时较长^[3]。(3)物联网自动化监测技术:依托传感器(应变计、轴力计、水位计、倾角仪等)、数据采集终端(DTU)、无线传输网络,实时采集基坑变形数据,实现数据自动上传、云平台存储与分析、超限即时报警。系统可适配复杂施工环境,实现全天候不间断监测,减少人为误差,但前期部署成本较高,传感器长期稳定性需定期标定。

2.3 各类监测方法对比与选型原则

(1)监测方法精度对比:传统人工监测中水准测量精度最高(可达0.01mm级),全站仪极坐标法精度约1~2mm,测斜仪精度约0.1mm/0.5m;自动化监测中GNSS水平精度约2~5mm,三维激光扫描整体精度约2~5mm,物联网传感器精度因类型而异。人工监测误差主要来源于仪器对中、读数、记录等环节;自动化监测误差主要来源于传感器漂移、信号干扰、环境温度影响。(2)监测效率与成本对比:人工监测单点耗时约3~5分钟,需2~3名技术人员现场作业,人力成本高,但

设备投入低;自动化监测可实现多点同时采集、秒级上传,无需现场值守,人力成本大幅降低,但传感器、采集设备及运维费用较高。三维激光扫描设备昂贵(数十万元级),单次数据处理需数小时,适用于阶段性精细测量。(3)工程选型原则:根据基坑安全等级、施工环境、监测需求、工程预算,匹配最优监测组合方案。一级基坑或环境风险高的工程,优先采用“自动化为主、人工校核为辅”的综合监测体系;二级基坑可采用人工监测结合部分自动化手段;三级基坑以人工监测为主,确保满足基本安全要求。同时应充分考虑现场通视条件、供电网络、信号覆盖等实际情况,选择可靠性高、适用性强的监测方法。

3 基坑监测数据处理与变形分析

3.1 监测原始数据预处理

(1)数据筛选与校验:剔除监测过程中因仪器故障、人为操作、环境干扰产生的异常错误数据,校验数据完整性与有效性。实际处理时,采用 3σ 原则(拉依达准则)或四分位距法识别粗差,对超出均值 ± 3 倍标准差的数据点进行标记和复核,并结合施工日志与现场工况判别数据真伪,严防错误数据参与后续分析。(2)数据降噪与修正:采用均值滤波、中值滤波等方法对原始数据降噪,消除偶然误差;根据仪器精度、环境因素对数据进行系统修正。温度修正按仪器标定温度系数换算,如电子水准仪每摄氏度变化对高差的影响可按给定系数补偿;气压和湿度对全站仪测距的影响通过气象改正公式精确修正,确保数据源头的准确可靠。(3)数据标准化整理:统一数据格式、监测时间维度,完成数据分类汇总,建立基坑监测数据库,为后续分析提供基础。按“工程名称—监测项目—点位编号—采集时间—原始读数—修正值”的层级结构建立标准化表格,同一测点不同期数据纵向排列,实现多期数据快速调取与交叉比对,保证数据索引清晰、调用高效^[4]。

3.2 监测数据精准计算处理

(1)变形量计算:根据监测点位原始坐标、高程数据,计算单次监测变形量、累计变形量,明确变形正负取值规则。规定水平位移以向基坑内倾方向为正、背离为负,沉降以向下为正、向上为负;单次变形量为本次测量值与上期测量值之差,累计变形量为各期单次变化量逐年代数和,各测点独立计算并统一编号归档。(2)变形速率计算:通过不同监测周期的变形数据,计算日变形速率、阶段变形速率,反映基坑变形动态变化特征。日变形速率 = (当日累计变形量 - 前日累计变形量) / 间隔天数,阶段变形速率 = 该阶段总变形量 / 阶段

总天数。速率正值表示变形持续发展, 负值表示回弹或复位, 连续正向速率增大通常预示风险升级。(3) 误差分析与精度评定: 分析监测数据的偶然误差、系统误差来源, 通过误差公式计算数据精度, 验证监测数据可靠性。水准测量按闭合差评定精度, 闭合差应满足 $\Delta h \leq \pm 1.0\sqrt{n}\text{mm}$ (n 为测站数); 全站仪极坐标法按点位中误差公式 $m_p = \pm \sqrt{(m_s^2 + (m_\beta/\rho)^2 \cdot S^2)}$ 评定, 确保整体测量精度满足基坑监测规范相应等级要求^[5]。

3.3 基坑变形规律综合分析

(1) 阶段性变形特征分析: 对比基坑开挖初期、中期、后期及支护完成后的变形变化规律, 总结不同施工阶段变形差异。初期变形以围护墙顶水平位移为主, 速率较快 (可达 $1\sim 2\text{mm/d}$); 中期随开挖深度加大, 墙身中下部水平位移及坑底隆起显著增大; 后期支护体系闭合后, 各变形量增速减缓, 逐步进入收敛稳定阶段, 差异本质源于开挖卸荷量与支护约束时间的动态匹配程度。(2) 变形影响因素相关性分析: 结合施工进度、地质条件、降水作业、施工荷载等数据, 分析各因素对基坑变形的影响程度。采用灰色关联度法或多元回归分析, 以各监测点累计变形量为因变量, 以开挖深度、降水降深、支护刚度、地面超载等为自变量, 定量计算各因素的关联度系数, 识别出对变形贡献最大的主控因素, 通常降水降深和开挖速率对周边沉降影响最为显著。(3) 变形趋势预判: 基于实测数据绘制变形时序曲线, 结合工程经验与数值分析方法, 预判基坑后续变形发展趋势。将实测累计变形量与时间绘制成曲线, 若曲线斜率持续减小且日速率低于 0.3mm/d , 则预判变形趋于收敛; 若曲线呈近似线性增长或斜率递增, 则需警示后续有加速变形风险, 可采用双曲线法或指数平滑法进行短期预测, 为后续施工决策提供量化依据。

3.4 监测风险预警与工程管控建议

(1) 预警判定分析: 将实测变形数据、变形速率与预警阈值对比, 判定基坑安全状态, 识别潜在安全风险。分级判定标准为: 累计变形达预警值 60% 且速率连续 3 日超过 0.5mm/d 时触发黄色预警; 达报警值 80% 且速率超过 1mm/d 时触发橙色预警; 超控制值或速率突增

2 倍以上时触发红色预警, 每级预警对应明确的应急响应流程。(2) 风险成因溯源: 针对超阈值变形、异常变形情况, 结合施工工况溯源风险产生原因。核查近期施工记录中是否存在超挖、支撑架设滞后、降水井失效、坑边堆载超限等情况, 同步对比不同监测项目 (如水平位移与支撑轴力、沉降与地下水位) 的关联变化, 通过多源数据交叉印证, 快速锁定风险触发源头。(3) 施工优化管控建议: 根据变形分析结果, 从开挖节奏、支护加固、降水管控、现场荷载管控等方面提出针对性优化措施。建议包括: 变形速率偏大时暂停开挖、增设临时钢支撑或加密锚索; 由降水引起的沉降过大, 可采取布设回灌井、调整降水井抽水速率等措施控制水位降深; 坑边 10m 范围内严禁超载堆料和重型机械通行, 必要时对邻近建筑物基础采取注浆加固保护。

结束语

本文完整构建了基坑变形监测、数据处理与风险管控的完整技术体系, 明确各类监测方法的适配场景与数据精准处理流程, 总结基坑阶段性变形规律及主控影响因素。通过分级预警机制可有效识别施工安全风险, 配套的施工优化措施能精准管控变形隐患。研究梳理的技术方法与分析思路, 可有效解决基坑监测实操难题, 为同类基坑工程安全监测与施工管控提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 李建伟, 张智博, 刘鑫. 深基坑变形监测精细化测量方法与监测数据处理技术 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(08): 152-159.
- [2] 王浩, 陈阳, 周宇航. 城市深基坑工程动态监测数据预处理与变形规律分析 [J]. 水利水电技术, 2025, 56(S2): 210-216.
- [3] 赵磊, 吴迪. 复杂环境下深基坑自动化监测方法及数据误差修正研究 [J]. 施工技术, 2024, 53(15): 89-94.
- [4] 孙博文, 李佳乐. 基于时序分析的深基坑变形监测数据处理及预测研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 328-332.
- [5] 黄志远. 深基坑支护结构变形监测技术优化与数据分析法 [J]. 工程勘察, 2024, 52(06): 45-50.