

超高层建筑基坑支护结构变形监测与安全预警实践

范 权

中国路桥工程有限责任公司 北京 100011

【摘要】：城市化进程推动下超高层建筑快速增长，其基坑工程呈现深开挖、大跨度、周边环境复杂的显著特征，支护结构稳定性直接关乎工程施工安全及周边建（构）筑物、地下管线的正常使用。为解决当前超高层建筑基坑工程监测布设不合理、预警不及时等问题，本文结合超高层建筑基坑工程实践，系统阐述支护结构变形监测的核心内容与技术方法，明确监测点位布设、监测频率的科学原则；基于科学性、实用性等原则构建三级安全预警体系，界定预警指标、设定预警阈值并梳理预警系统运行流程；以某210m超高层建筑一级基坑工程为实例，验证变形监测与安全预警体系的实际应用效果。结果表明，该体系可有效识别支护结构变形发展趋势并实现分级预警，工程实践中支护结构水平位移控制在允许值的75%以内，变形速率显著降低，未出现超限及次生灾害，验证了该体系的有效性与可靠性。研究成果为同类超高层建筑基坑工程的安全管控提供了实践参考与技术支持。

【关键词】：超高层建筑；基坑支护；变形监测；安全预警；自动化监测；三级预警

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.003

1 引言

超高层建筑是城市空间高效利用的核心载体，其基坑工程施工难度远高于普通建筑工程。基坑开挖过程中，土体应力释放、地下水渗流、施工扰动等多因素耦合作用，易导致支护结构产生水平位移、竖向沉降、结构裂缝等变形问题；若变形超出允许范围，将引发支护结构失稳、基坑坍塌等安全事故，造成人员伤亡与财产损失。现阶段，部分超高层建筑基坑工程仍存在监测点位布设缺乏合理性、监测方法选取不当、预警阈值设定不科学等问题，导致监测数据精度不足、预警响应滞后，难以满足工程安全生产管控的实际需求。

为此，本文结合超高层建筑基坑工程的施工特点与管控要求，系统探讨基坑支护结构变形监测的实施流程、技术要点，构建科学的三级安全预警体系；并以某城市核心区域的超高层建筑一级基坑工程为实例，开展变形监测与安全预警的工程实践，验证体系的实用性与可靠性，旨在完善超高层建筑基坑安全管控技术体系，提升工程施工的安全性与可靠性，为同类基坑工程的安全管控提供参考。

2 超高层建筑基坑支护结构变形监测核心内容与技术方法

超高层建筑基坑支护结构变形监测需实现支护结构本体与周边环境的全方位监测，核心目标是实时掌握基坑开挖全过程的各类变形与受力状态，及时识别安全隐患，为施工管控提供数据支撑。监测工作需严格遵循相关规范要求，结合工程地质条件、支护形式及周边环境特征，确定监测内容、选取适宜技术方法，科学布设监测点位并动态调整监测频率。

2.1 监测核心内容

2.1.1 支护结构位移监测

作为基坑监测的核心项目，分为水平位移和竖向位移监测。水平位移监测针对支护桩、地下连续墙等围护结构，重点

监测其顶部及不同深度的水平偏移量，直接反映支护结构抵御侧向土压力的能力；竖向位移监测聚焦支护结构顶部的沉降或隆起变形，防止因不均匀沉降引发支护结构开裂、失稳。

2.1.2 支护结构应力监测

针对支护桩、地下连续墙、内支撑体系等关键构件，监测其内部应力分布及动态变化规律，判断结构受力状态是否符合设计要求，预防因应力集中、局部超载导致的结构破坏。

2.1.3 周边环境变形监测

监测范围涵盖基坑周边土体、建（构）筑物及地下管线：一是基坑周边土体的沉降与水平位移，掌握土体变形对支护结构的反作用；二是周边既有建（构）筑物的沉降、倾斜，避免建筑结构产生裂缝、功能受损；三是地下管线的位移与变形，确保给排水、燃气、电力等管线的正常运行。

2.1.4 地下水动态监测

监测基坑内外地下水位的实时变化及孔隙水压力分布特征，分析地下水渗流对支护结构稳定性的影响，预判并预防流砂、管涌、基坑突水等地质灾害的发生。

2.2 主要监测技术方法

2.2.1 水平位移监测

采用测斜仪监测法与全站仪监测法联合监测，实现支护结构不同深度与顶部水平位移的全覆盖：

测斜仪监测法：将测斜管预埋于支护桩或地下连续墙内，通过测斜仪采集不同深度的倾斜角度，经换算得到各深度的水平位移值，该方法监测精度高、可实现连续监测，适用于深基坑支护结构深层水平位移监测；

全站仪监测法：在基坑开挖影响范围外设置稳定基准点，在支护结构顶部布设监测点，通过全站仪测量监测点的坐标变化，计算水平位移量，该方法操作简便、测量速度快，适用于

支护结构顶部的大面积水平位移监测。

2.2.2 竖向位移监测

选用电子水准仪监测法，在基坑周边设置水准基准点，在支护结构顶部、周边建（构）筑物及地下管线布设竖向位移监测点，通过电子水准仪测量监测点与基准点的高差变化，得到竖向位移值。该方法监测精度高、稳定性好，可满足超高层建筑基坑支护结构及周边环境竖向位移监测的高精度要求。

2.2.3 应力与地下水监测

应力监测：采用传感器监测法，将应力计、应变计、轴力计等传感器预埋于支护结构内部或表面，实时采集结构应力、应变及支撑轴力数据，通过数据传输系统将数据同步至监测终端，实现应力变化的实时监测；

地下水监测：采用水位计与孔隙水压力计分别监测地下水位动态变化与土体孔隙水压力分布，传感器实时采集数据并传输，及时掌握地下水对基坑稳定性的影响。

2.2.4 自动化监测

随着物联网、智能化技术的发展，自动化监测系统在超高层建筑基坑监测中得到广泛应用，该系统整合各类传感器、数据采集模块、无线传输模块（LoRa/4G）与数据处理平台，实现监测数据的自动采集、实时传输、智能分析与异常预警的全过程闭环管控，大幅减少人工干预，提升监测效率与数据准确性，适用于大型、复杂超高层建筑基坑工程。

自动化监测系统可按需设置数据采集频率（10~30分钟/次），数据处理平台具备实时变形曲线绘制、历史数据追溯查询、异常数据自动标红、数据报表自动生成等功能，为工程施工管控提供可视化、数字化的数据支撑。

2.3 监测点位布置与监测频率

2.3.1 布设原则

监测点位布设需遵循全面性、代表性、合理性、稳定性原则，结合基坑形状、支护形式、地质条件及周边环境特征，将监测点布设于支护结构受力关键部位、基坑阳角、周边建（构）筑物敏感部位及地下管线关键节点，确保监测点位能全面、准确反映支护结构及周边环境的变形规律。

2.3.2 具体布设要求

支护结构位移监测点：布设于支护桩顶部、地下连续墙顶部及基坑阳角、受力较大部位，间距控制在15~25m；

周边建（构）筑物监测点：布设于建筑物四角、外墙中部、门窗洞口等结构敏感部位，确保监测建筑整体沉降与倾斜；

地下管线监测点：布设于管线转角、接口、变径处及靠近基坑一侧，间距根据管线类型与重要性调整；

基准点：布设于基坑开挖影响范围外（不宜小于3倍基坑

开挖深度），选取永久性稳定点位，并设置防护装置，防止施工扰动。

所有监测点均需设置明显标识与防护装置，避免施工机械、人员扰动造成监测点损坏，保证监测数据的连续性。

2.3.3 监测频率与精度

监测频率需根据基坑开挖进度、变形情况及周边环境复杂度动态调整，兼顾监测效率与管控成本；监测精度需满足国家现行规范及工程设计要求，各监测项目的具体方法、频率与精度要求如表1所示。若监测数据出现异常、变形速率突增，需立即加密监测频率至1~2小时/次，直至变形趋于稳定。

表1 超高层建筑基坑支护结构变形监测参数要求

监测项目	监测方法	监测频率	监测精度
支护结构水平位移	测斜仪、全站仪	开挖期3-7次/d, 稳定期1-2次/d	全站仪±2mm、测斜仪0.01mm/500mm测段
支护结构竖向位移	电子水准仪	开挖期3-7次/d, 稳定期1-2次/d	±0.01mm
支护结构应力	应力计、应变计、轴力计	开挖期1次/d, 稳定期1次/2-3d	±1%FS（满量程）
地下水位	水位计	开挖期1次/d, 稳定期1次/2-3d	±1cm
周边建筑沉降	电子水准仪	开挖期1次/d, 稳定期1次/2-3d	±0.01mm
周边土体/管线变形	电子水准仪、全站仪	开挖期1次/d, 稳定期1次/2-3d	±0.01mm（沉降）；±2mm（水平位移）

3 超高层建筑基坑支护结构安全预警体系构建

安全预警体系是基坑工程安全管控的核心，通过对监测数据的实时分析、异常判断，及时发出预警信号并指导应急处置，实现基坑工程的事前预防、事中管控、事后处置。体系构建需结合工程实际，遵循科学、实用、及时、可操作的原则，明确预警指标、设定分级阈值、完善系统组成与运行流程。

3.1 预警体系构建原则

科学性原则：结合工程地质条件、基坑支护形式、周边环境特征，依据《建筑基坑工程监测技术规范》（GB 50497-2019 建筑基坑工程监测技术规范）及《建筑基坑工程技术规程》（JGJ 120-2012 建筑基坑工程技术规程）等国家现行规范，结合监测数据变化规律，合理确定预警指标与分级阈值，确保异常判断的科学性；

实用性原则：预警体系设计应简单易懂、操作便捷，适配工程现场施工管控的实际需求，便于现场管理人员快速掌握与应用；

及时性原则：预警系统应具备快速的数据处理与异常识别

能力，及时捕捉变形异常信号并发布预警，为应急处置争取时间；

可操作性原则：针对不同预警级别制定具体、可行的处置措施，明确各岗位职责，确保预警信号发出后能快速开展应急管理管控工作。

3.2 预警指标确定

结合基坑支护结构变形监测的核心内容，预警指标分为四大类，各指标明确监测对象、监测标准与异常判断依据，重点关注监测数值与变形速率双重指标（位移速率过快是基坑突发事件的重要先兆），具体如下：

支护结构位移指标：包括支护结构各深度水平位移、顶部竖向位移的累计值及日变形速率；

支护结构应力指标：包括支护桩/地下连续墙应力、内支撑轴力的实时值，判断是否接近或超过设计承载力；

地下水动态指标：包括基坑内外地下水位的日变化速率、累计变化值，以及土体孔隙水压力变化值，预防流砂、管涌等地质灾害；

周边环境变形指标：包括周边建（构）筑物的沉降/倾斜累计值、日变形速率，地下管线的位移累计值及日变形速率，避免周边环境受损。

其中，建（构）筑物倾斜预警需满足专项要求：砌体结构整体倾斜度累计值达到 3‰、框架结构达到 4‰，或倾斜速度连续 3 天大于 0.0005H/d（H 为建筑高度）时，立即发出预警。

3.3 预警阈值设定

根据监测数据偏离设计允许值的程度及工程风险等级，将预警阈值分为三级（阈值划分参考规范建议值，并结合工程经验与同类项目统计数据确定），对应正常、异常、危险三种状态，明确各等级的判断标准与处置要求，实现基坑风险的分级管控。预警允许值需根据基坑设计安全等级、地质条件及相关规范确定，一级基坑（安全等级最高）预警阈值可适当降低，提升管控严格性。具体分级标准与处置要求如表 2 所示。

表 2 超高层建筑基坑支护结构安全预警分级及处置要求

预警级别	状态类型	判断标准	处置要求
一级预警	正常	监测数据≤70%允许值，位移速率≤0.3mm/d	按原频率开展常规监测，做好数据记录、整理与分析，及时反馈至施工管控部门
二级预警	异常	70%允许值<监测数据≤90%允许值，0.3mm/d<位移速率≤0.5mm/d	由项目技术负责人组织召开分析会，排查变形原因；加密监测频率至 1~2 小时/次；调整施工参数（放缓开挖速度、优化开挖顺序），采取针对性加固措施

三级预警	危险	监测数据>90%允许值，位移速率>0.5mm/d，或出现流砂、管涌、结构裂缝等突发情况	由项目经理立即启动应急处置预案：立即停止基坑开挖及周边施工作业；组织现场施工人员、设备撤离至安全区域；采取应急加固、基坑回填、地下水封堵等措施，同时上报建设、监理及相关监管部门
------	----	---	--

3.4 预警系统组成与运行流程

3.4.1 系统组成

安全预警系统为多模块协同运行的数字化系统，主要由数据采集模块、数据处理模块、预警发布模块、应急处置模块四部分组成，各模块功能相互衔接，实现监测-分析-预警-处置-反馈的闭环管控机制，系统组成如图 1 所示。

数据采集模块：由各类传感器、测量仪器、数据采集仪组成，负责实时采集支护结构位移、应力、地下水动态、周边环境变形等监测数据，通过无线传输（LoRa/4G）同步至数据处理模块；

数据处理模块：为预警系统的核心，通过专业软件对采集的原始数据进行整理、校验、分析，对比预警阈值，自动判断数据是否异常，识别预警等级；

预警发布模块：根据数据处理模块的判断结果，通过现场声光报警、手机短信、监测平台推送、微信通知等多种方式发布预警信号，明确预警级别、监测点位、异常数据及预警时间，预警信号同步发送至项目负责人、监理工程师、施工班组现场负责人及建设单位代表；

应急处置模块：制定各预警级别的专项应急处置方案，明确各岗位职责、应急处置流程、物资设备配置，指导现场管理人员开展应急管理管控工作，同时记录处置过程与效果，实现处置过程的可追溯。

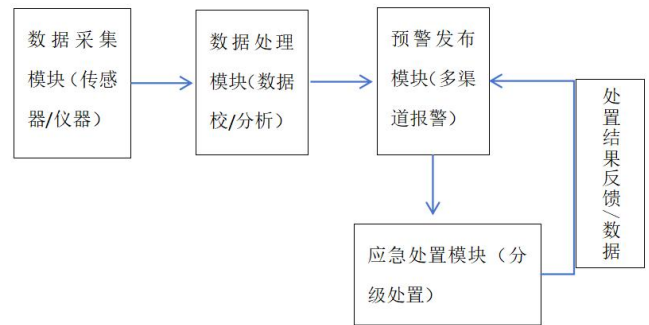


图 1 超高层建筑基坑支护结构安全预警系统组成框架

3.4.2 运行流程

安全预警系统的运行遵循实时监测-数据处理-异常判断-预警发布-应急处置-效果验证-系统复位的闭环流程，具体如下：

1. 数据采集模块实时采集各类监测数据，传输至数据处

理模块；

2. 数据处理模块对原始数据进行校验、剔除无效数据，计算监测值与变形速率，对比预警阈值；
3. 若数据无异常，继续常规监测；若数据异常，自动识别预警等级并推送至预警发布模块；
4. 预警发布模块通过多渠道同步发布预警信号，确保相关人员及时接收；
5. 现场管理人员根据预警级别启动对应的应急处置措施，开展风险管控；
6. 持续监测处置后的变形数据，验证处置效果；若变形趋于稳定，解除预警，恢复常规监测；若变形仍持续发展，提升预警级别，采取更严格的应急措施。

4 工程实践应用

4.1 工程概况

某超高层建筑项目位于城市核心区域，地上48层，地下3层，建筑总高度210m，基坑开挖深度18m，基坑周长约420m，基坑开挖面积约9800 m²。项目周边50m范围内分布有既有居民楼（6~18层）、商业建筑及给排水、燃气、电力等多条地下管线，周边环境复杂，根据《建筑基坑工程技术规程》，确定基坑支护结构安全等级为一级，周边环境安全等级为一级，支护结构重要性系数取1.1。

工程场地地质条件为：表层为杂填土（厚度1~3m），下层为粉质黏土（厚度5~12m），局部含粉砂夹层，地下水埋深6~8m，地下水类型为潜水。结合工程地质条件、周边环境及基坑安全等级，基坑支护采用地下连续墙+钢筋混凝土内支撑体系：地下连续墙厚度800mm，成槽深度32m，混凝土强度等级C35；内支撑共设置3道，均为钢筋混凝土支撑，支撑截面尺寸为800mm×1200mm，支撑间距6~8m。为确保基坑施工安全，本工程构建了完善的变形监测与安全预警体系，对基坑施工全过程开展监测与预警管控。

4.2 变形监测方案实施

结合工程实际，确定本次监测为全方位综合监测，监测内容包括：地下连续墙水平位移/竖向位移/应力、钢筋混凝土内支撑轴力、基坑周边土体沉降、周边居民楼/商业建筑沉降、地下管线位移、基坑内外地下水位及孔隙水压力。

4.2.2 监测点布设

监测点布设严格遵循全面性、代表性原则，结合基坑形状与周边环境，具体布设如下：

地下连续墙监测点：顶部布设水平/竖向位移监测点，间距20m，共21个；墙身预埋测斜管与应力计，共布设18组；

内支撑轴力监测点：在3道内支撑的受力关键部位预埋轴力计，共布设36个；

周边环境监测点：周边居民楼/商业建筑布设沉降/倾斜监测点12个，地下管线布设位移监测点8个，基坑周边土体布设沉降监测点30个；

地下水监测点：基坑内外两侧对称布设水位计与孔隙水压力计，各3个，共6个。

所有监测点均设置防护装置与明显标识，基准点布设于基坑北侧80m处（远离开挖影响范围），共设置3个，形成基准网。

4.2.3 监测方法与频率

根据表1的监测参数要求，结合本工程一级基坑的管控标准，确定监测方法与频率：

地下连续墙水平位移采用测斜仪（深层）+全站仪（顶部）联合监测，竖向位移采用电子水准仪监测；

地下连续墙应力与内支撑轴力采用传感器实时监测，数据采集频率20分钟/次；

周边建（构）筑物、土体及管线变形采用电子水准仪+全站仪监测；

地下水水位与孔隙水压力采用水位计+孔隙水压力计实时监测，数据采集频率30分钟/次；

基坑开挖阶段（核心管控阶段）监测频率为2次/天，开挖完成后3次/天；若数据异常，加密至2小时/次。

4.3 安全预警应用与处置效果

根据工程设计要求、《建筑基坑工程监测技术规范》（GB 50497-2019）及当地同类工程实践经验，确定本工程各类监测指标的允许值：地下连续墙水平位移允许值30mm，竖向位移允许值15mm；内支撑轴力允许值为设计值的80%；周边居民楼沉降允许值10mm；地下水位日变化允许值50mm，累计变化允许值200mm。

本工程基坑施工全过程中共发出2次二级预警，未出现三级预警情况，以首次二级预警为例，阐述预警处置过程与效果：

4.3.1 预警触发

工程施工至基坑开挖深度12m时，监测系统显示基坑东南角地下连续墙水平位移累计值达25mm（占允许值的83.3%），日变形速率0.4mm/d，满足二级预警判断标准，预警系统立即通过现场声光报警、手机短信、平台推送等方式发出二级预警信号。

4.3.2 原因排查

项目技术负责人立即组织技术团队开展原因排查，结合监测数据与现场施工情况，确定变形主要原因：该区域存在粉砂夹层，土体强度较低，且现场开挖速度过快（单次开挖长度8m，分层厚度2m），导致侧向土压力突增，引发地下连续墙局部

水平位移偏大。

4.3.3 处置措施

针对变形原因,采取针对性管控与加固措施:

放缓开挖速度,改为小分段、薄层开挖,每段开挖长度不超过5m,分层厚度不超过1.5m,减少土体扰动;

在该区域增设临时钢支撑,间距3m,增强支护结构的侧向承载力;

对该区域基坑周边土体采用水泥-水玻璃双液注浆加固,加固深度10~18m,提高土体强度与整体性;

加密监测频率至2小时/次,实时跟踪位移变化规律。

4.3.4 处置效果

经过10天的管控与加固,该区域地下连续墙水平位移呈现明显收敛趋势并逐步趋于稳定,累计位移控制在22mm以内,日变形速率降至0.2mm/d以下,恢复至一级预警(正常)状态范围,解除二级预警,恢复正常施工。

本工程基坑施工全过程中,变形监测与安全预警体系运行稳定,所有预警均得到及时、有效的处置,基坑支护结构的位移、应力均控制在设计允许范围内,周边居民楼、商业建筑及地下管线未出现明显变形,无安全事故发生,确保了工程施工安全与周边环境安全,验证了该体系的实用性与可靠性。

5 结论与展望

5.1 结论

超高层建筑基坑支护结构变形监测与安全预警是保障基坑施工安全的核心手段,结合工程实践与研究,得出以下结论:

超高层建筑基坑变形监测应实现支护结构与周边环境的全要素覆盖,通过多源监测手段融合可显著提升数据准确性与时效性,核心监测内容包括支护结构位移/应力、周边环境变形、

地下水动态,需根据工程特点选取测斜仪+全站仪联合监测、电子水准仪监测、传感器监测等技术方法,科学布设监测点位并动态调整监测频率,确保监测数据的准确性与及时性。

构建的三级安全预警体系通过“变形量—变形速率”双指标控制,实现基坑风险的动态分级管控与精准识别,体系遵循科学性、实用性等原则,以支护结构位移/应力、地下水动态、周边环境变形为核心预警指标,结合监测值与变形速率双重标准设定分级阈值,明确各等级处置要求,可精准识别基坑安全风险。

安全预警系统通过数据采集、处理、发布、应急处置四大模块的协同运行,实现监测-预警-处置的闭环管控,多渠道的预警发布方式确保信号传递及时,分级处置措施保障管控工作的可操作性。

工程实践表明,完善的变形监测与安全预警体系可精准捕捉支护结构变形规律,及时发出预警并指导应急处置,有效规避基坑施工安全风险,使支护结构变形始终控制在允许范围内,同时保障周边建(构)筑物及地下管线的安全,为超高层建筑基坑工程安全管控提供了有效手段。

5.2 展望

随着智能化、数字化技术在土木工程领域的不断应用,超高层建筑基坑支护结构变形监测与安全预警技术将向智能化、可视化、一体化方向发展:结合BIM技术构建基坑数字化模型,将监测数据与BIM模型融合,实现支护结构变形的三维可视化展示,直观反映变形规律;引入人工智能与大数据分析技术,通过对历史监测数据的学习,建立基坑变形预测模型,实现基坑风险的事前预判,提升预警的前瞻性;整合自动化监测、物联网、移动终端等技术,构建基坑安全管控云平台,实现监测数据、预警信息、处置过程的远程管控与数据共享,提升基坑工程安全管控的智能化水平。

参考文献:

- [1] 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,2024,(25):77-79.
- [2] 邹辉.深大基坑支护结构变形监测方案设计[J].江西建材,2025,(10):154-157.
- [3] 王建青,刘希辉,王利健.房屋建筑工程深基坑支护施工技术研究[J].工程机械与维修,2025,(10):134-136.
- [4] 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.
- [5] 张正舞.超高层建筑深基坑支护结构变形光纤光栅实时监测研究[J].工程技术研究,2023,10(16):33-35.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑工程监测技术规范:GB 50497-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑工程技术规程:JGJ 120-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.