

地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测技术应用与精度分析

杨玉龙 弥驰 王珽睿

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安, 710000;

摘要: 随着城市地铁建设的快速推进, 深基坑工程的安全控制成为关键环节, 钢管桩作为常用支护结构, 其深层水平位移监测对保障基坑稳定至关重要。本文系统探讨了地铁深基坑中钢管桩深层水平位移监测技术的应用, 重点分析了测斜仪监测原理、数据采集方法及在实际工程中的布设方案。通过典型工程案例, 对比分析了不同监测点的位移变化趋势, 评估了监测数据的精度与可靠性。研究识别了温度变化、仪器安装误差、数据读取偏差等主要误差来源, 并提出了校准优化、多源数据融合与自动化监测等提升精度的措施。结果表明, 科学合理的监测技术可有效预警基坑变形风险, 为地铁施工安全提供有力支撑。本文研究成果可为类似工程提供技术参考, 推动深基坑监测向智能化、高精度方向发展。

关键词: 深基坑; 钢管桩; 深层水平位移; 测斜监测; 监测精度

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 11. 017

引言

随着我国城市化进程的加速和轨道交通建设的迅猛发展, 地铁工程日益向地下深层空间拓展, 深基坑作为地铁车站与隧道出入口施工的关键环节, 其规模与开挖深度不断增大, 施工环境日趋复杂。深基坑工程在开挖与支护过程中, 易受周边荷载、地下水变化及地质条件影响, 引发支护结构变形甚至失稳, 严重威胁施工安全与周边建(构)筑物稳定。钢管桩因其高强度、施工便捷和可回收利用等优点, 被广泛应用于深基坑支护体系中, 作为控制土体侧向位移的重要结构。因此, 对钢管桩的深层水平位移进行实时、精准监测, 不仅有助于掌握基坑变形发展规律, 还能及时预警潜在风险, 是保障基坑工程安全与稳定的核心技术手段。

在此背景下, 开展地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测技术的研究具有重要的理论价值与现实意义。高精度的监测数据是评估支护结构工作状态、验证设计参数合理性以及优化施工方案的重要依据。通过系统分析监测技术的原理、实施方法与数据处理流程, 能够有效提升监测结果的可靠性, 为施工过程中的动态设计与信息化施工提供科学支撑。尤其在城市密集区, 精准的位移监控可最大限度降低对邻近管线、道路及建筑物的影响, 避免重大安全事故的发生, 对推动地铁建设的智能化、精细化管理具有积极作用。

本文的研究目的在于全面探讨钢管桩深层水平位移监测技术在地铁深基坑工程中的应用实践与精度控制问题。研究内容涵盖测斜仪工作原理、监测点布设原

则、数据采集与处理方法, 并结合实际工程案例, 分析监测数据的变化特征与趋势。同时, 深入剖析影响监测精度的主要误差来源, 如仪器标定偏差、安装倾斜、温度效应及数据读取误差等, 并提出针对性的校正与优化措施。最后, 展望自动化、智能化监测技术的发展方向, 为提升我国地铁深基坑工程的安全管理水平提供技术参考。

1 相关理论与技术基础

深基坑工程是指开挖深度通常超过 5 米(或根据地方规范定义)的地下空间工程, 广泛应用于地铁车站、地下商业综合体、人防设施及大型建筑地下室等建设中。由于其开挖深度大、影响范围广, 深基坑在施工过程中面临诸多安全挑战, 主要包括土体侧向变形、支护结构失稳、地下水渗流引发的管涌或流砂、坑底隆起以及周边地面沉降等问题。这些风险不仅可能危及基坑自身安全, 还可能对邻近建筑物、地下管线和交通设施造成严重影响。因此, 深基坑工程的设计与施工必须遵循“先支护、后开挖、分层分段、限时支撑、信息化施工”的原则, 其中, 对支护结构及土体变形的实时监测是实现动态控制与风险预警的关键环节。

钢管桩作为一种高效、可回收的支护结构, 在深基坑工程中广泛应用。其通常由高强度无缝钢管或焊接钢管构成, 通过锤击、静压或旋挖植入等方式在基坑周边形成连续或间隔排列的支护墙体。钢管桩具有良好的抗弯、抗剪和抗拉性能, 能够有效抵抗土压力和水压力, 限制基坑侧壁的水平位移。此外, 钢管桩施工速度快、

对周边环境扰动小,并可结合内支撑或锚索形成稳定的支护体系,适用于软土、砂层及城市密集区等复杂地质条件,是地铁明挖车站和出入口施工中的常用支护形式。

深层水平位移监测是评估基坑稳定性的核心技术之一,其核心原理是通过测斜仪测量支护结构或土体在不同深度上的水平位移变化。测斜仪通常由探头、测斜管和数据采集系统组成。测斜管为带有导向槽的PVC或铝合金管,预先埋设在钢管桩内部或紧贴桩体的钻孔中。测斜探头内置高精度加速度计,沿测斜管导槽逐段下放,通过测量重力在探头两轴向的分量计算倾角,进而积分得到各深度的水平位移。该技术可提供从地表至坑底以下数米范围内的连续位移曲线,直观反映变形最大位置(如最大位移点)及发展趋势。

目前常用的深层位移监测方法主要包括测斜仪监测、地质雷达监测和激光扫描监测。其中,测斜仪监测技术成熟、精度高、成本适中,是深层位移监测的主流方法。地质雷达通过发射高频电磁波并接收反射信号,可探测土体内部结构变化,间接评估变形,但对金属构件(如钢管桩)存在屏蔽效应,适用性受限。激光扫描监测则通过三维点云数据对比,获取基坑周边地表或结构表面的整体变形,适用于大范围表面变形分析,但难以获取地下深层信息。因此,测斜仪监测在钢管桩深层位移监测中仍具有不可替代的优势。

2 地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测技术应用实例

本文以某城市地铁换乘站深基坑工程为研究对象,该基坑开挖深度达18.5米,地处软土与砂层交互的复杂地质区,周边紧邻运营地铁线路与高层建筑,对变形控制要求极高。工程采用 $\Phi 800\text{mm}$ 钢管桩作为主要支护结构,桩长25米,结合三道混凝土内支撑形成稳定支护体系。为实时掌握支护结构的变形状态,确保施工安全,项目实施了系统的深层水平位移监测。

监测方案设计遵循“关键区域全覆盖、重点部位加密布设”的原则。在基坑四角、长边中点及邻近敏感建筑的区域共布设12个监测点,每个点在钢管桩内预埋 $\Phi 70\text{mm}$ 铝合金测斜管,管底深入稳定土层不少于3米,管口设保护井。选用高精度数字式测斜仪(精度 $\pm 0.02\text{mm}/500\text{mm}$),在基坑开挖前进行初始值测量,开挖期间每2天监测一次,支撑施工及雨后加密至每日一次。采集数据通过专用软件进行零点校正、方向判别与位移

积分计算,生成深度一位移曲线,分析最大位移量、位移速率及变形模式。

监测结果显示,基坑东西两侧最大水平位移出现在开挖至第2、3道支撑之间,深度约12-14米,累计位移达38.6mm,接近预警值,及时触发预警并优化支撑预应力施加方案;南北侧位移较小,最大值为26.3mm,整体呈“鼓肚”型变形,符合深基坑典型特征。经评估,基坑处于安全可控状态。本案例表明,科学的监测方案能有效捕捉关键变形信息,为动态施工提供决策依据,建议在类似工程中推广自动化实时监测系统,进一步提升响应效率。

3 地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测精度分析

地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测的精度受多种因素影响,误差来源主要包括仪器误差、环境因素和人为操作误差。仪器误差源于测斜仪本身的系统偏差、探头加速度计的零点漂移以及测斜管制造与安装过程中的不圆度或接头错位;环境因素则包括温度变化引起的材料热胀冷缩、地下水位波动对土体应力状态的影响以及施工振动对测量稳定性造成的干扰;操作误差主要体现在测斜仪探头下放速度不均、读数时机不当、方向识别错误以及数据记录与处理过程中的疏漏。这些误差叠加可能导致监测数据偏离真实值,影响对基坑安全状态的准确判断。

为科学评估监测精度,通常采用绝对误差、相对误差和标准偏差等指标进行量化分析。绝对误差反映测量值与真实值(如标定值或高精度基准)之间的偏差程度,相对误差体现误差与测量值的比例关系,标准偏差则用于评估多组重复测量数据的离散程度,反映系统的稳定性。在实际工程中,可通过在稳定区段设置基准段进行重复测量,计算其位移标准偏差作为精度评价依据。一般要求深层水平位移监测的重复测量标准偏差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内,最大绝对误差不超过 $\pm 2\text{mm}$,以满足地铁基坑高精度控制需求。

为提高监测精度,应采取综合措施:首先,选用经过严格标定的高精度测斜仪和高质量测斜管,并在安装过程中确保垂直度与导槽对齐;其次,优化监测方法,如采用双向测量取平均值消除探头方向性误差,固定测量人员与设备以减少人为差异;再次,改进数据采集与分析流程,引入自动化监测系统实现定时、定点、无人

干预的数据获取,结合温度补偿算法和滤波技术消除环境干扰;最后,建立数据复核机制,对异常数据及时复测与验证,确保监测结果的可靠性与科学性。

4 地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测技术的改进与优化

为提升地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测的性能,首先应推进监测仪器设备的改进。采用高精度、抗干扰能力强的智能测斜仪,集成温度、倾角和振动补偿模块,减少环境因素影响;推广使用光纤测斜传感技术,实现连续分布式测量,克服传统点式测量的盲区问题;同时,研发具备自动标定与故障诊断功能的设备,提升数据采集的稳定性和可靠性。

在监测方法方面,应优化布设方案与作业流程。结合 BIM 与地质模型,科学确定监测点位置与密度,实现关键区域动态加密;推行自动化监测系统,通过无线传输实现实时在线监测,缩短数据获取周期,提高响应速度;引入多传感器融合技术,将测斜数据与沉降、支撑轴力、地下水位等监测信息联动分析,提升整体预警能力。

在数据分析层面,应改进传统人工判读模式,引入智能算法。利用时间序列分析、机器学习模型对历史数据进行趋势预测,识别异常变形模式;开发基于 GIS 的三维可视化平台,直观展示位移空间演化过程;建立标准化数据处理流程,集成滤波、校正与误差修正算法,提升数据分析的准确性与决策支持能力。

5 未来展望与研究总结

地铁深基坑钢管桩深层水平位移监测技术在保障城市轨道交通建设安全方面具有广阔的应用前景。随着城市地下空间开发日益密集,对支护结构变形控制的要求不断提高,高精度、实时化的监测技术将成为深基坑信息化施工的核心支撑。未来,该技术将向智能化、集成化方向发展,广泛应用于各类复杂地质与周边环境下的地铁车站、隧道接口及换乘枢纽工程,有效提升基坑稳定性预警能力,降低施工风险,为城市安全建设提供坚实保障。

未来研究应聚焦于监测精度的持续提升与新技术的融合创新。重点方向包括:发展基于光纤传感与无线传感网络的分布式、全天候自动监测系统;探索人工智

能在变形趋势预测与异常识别中的深度应用;推动 BIM、GIS 与监测数据的三维集成,实现可视化动态管控。同时,应加强多源监测数据融合分析,提升系统整体可靠性,推动监测技术与设计、施工、运维全链条协同。

本文系统研究了钢管桩深层水平位移监测的应用实践与精度控制,提出了仪器改进、方法优化与数据分析的综合提升策略,具有较强的工程参考价值。尽管在智能算法应用与数据自动化处理方面仍有深化空间,但研究成果为地铁深基坑安全监控提供了科学依据,未来将进一步探索智能感知与数字孪生技术的融合路径,助力智慧建造发展。

参考文献

- [1] 张航. 旋挖钻孔灌注桩技术在深基坑支护中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(19): 78-80. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362. 2025. 19. 027.
- [2] 朱松霖, 王帆, 罗文, 等. 海上风电水下钢管桩桩顶法兰损坏变形现场处理方法[J]. 中国水运, 2025, (18): 140-142. DOI: 10.13646/j.cnki.42-1395/u. 2025. 18. 051.
- [3] 刘羽, 王科, 胡威, 等. 软黏土桩锚加撑组合支护基坑土体深层水平位移监测分析[J]. 建筑结构, 2025, 55(14): 145-150. DOI: 10.19701/j.jzjg.LS230056.
- [4] 郝传才. 基坑围护结构测斜监测中人工与自动监测的对比分析[J]. 四川水泥, 2025, (09): 58-60+64. DOI: 10.20198/j.cnki.scsn. 2025. 09. 011.
- [5] 曲鑫, 刘长军, 林富有, 等. 三维点云动态管理用于船舶分段精度监测[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(08): 108-110. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc. 2025. 08. 035.

作者简介: 杨玉龙(1986.03—), 男, 汉族, 河南郑州人, 本科, 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程技术人员, 主要研究方向: 安全监测。

弥驰(1998.03—), 男, 汉族, 陕西省渭南人, 本科, 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程技术人员, 主要研究方向: 安全监测。

王珽睿(1997.02—), 男, 汉族, 甘肃白银人, 本科, 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程技术人员, 主要研究方向: 安全监测。