

地铁隧道盾构施工的沉降监测

戴少君

天津市地球物理勘探中心 天津 300170

摘要: 地铁隧道盾构施工沉降监测是保障施工安全与周边环境稳定的关键。本文阐述沉降监测定义与分类,介绍几何水准、自动化及分布式光纤传感等监测原理。分析监测点布设、仪器设备及频率周期等关键技术,探讨数据处理方法与分析模型。建立预警机制,制定应对措施,为盾构施工沉降监测提供全面指导,提升工程安全性与可靠性。

关键词: 地铁隧道; 盾构施工; 沉降监测; 预警机制; 应对措施

引言: 地铁隧道盾构施工过程中, 土体开挖会破坏原有应力平衡, 导致周边地层发生位移, 引发地表及邻近结构沉降。系统测量垂直位移变化能够及时掌握施工对环境的影响程度。随着城市地铁建设规模扩大, 施工环境日趋复杂, 沉降控制面临更高要求。精准的监测数据为施工参数调整提供支持, 有效预防工程风险。建立完善的沉降监测技术体系, 有助于提升沉降控制水平, 保障工程建设安全推进。

1 沉降监测的基本原理

1.1 沉降监测的定义与分类

沉降监测, 是盾构施工期间, 对地表及地下结构垂直位移变化, 进行系统性测量的技术活动。通过持续跟踪结构体的下沉或抬升情况, 可及时掌握施工对周边环境的影响程度, 为调整施工参数、保障工程安全提供数据支撑^[1]。根据监测对象的不同, 沉降监测可划分为地表沉降监测、地下管线沉降监测及邻近建筑物沉降监测三类。地表沉降监测聚焦施工区域地面的垂直位移, 通过分析沉降槽形态与范围, 评估盾构掘进对土体的扰动程度。地下管线沉降监测针对供水、排水、燃气等埋地管线, 通过测量管线接口或管身的位移变化, 预防因不均匀沉降导致的管线断裂或接口渗漏。邻近建筑物沉降监测则通过布设监测点于建筑物基础或墙体, 跟踪施工期间建筑物的垂直变形, 避免因差异沉降引发结构开裂或倾斜。

1.2 监测原理

沉降监测依托多种技术原理实现精准测量。几何水准测量是传统且成熟的方法, 通过高差法或三角高程法计算两点间的高程差异, 进而推算沉降量。高差法利用水准仪测量后视点与前视点的高程差, 累计各测段高差得到总沉降。三角高程法则结合竖直角与斜距, 通过三角函数关系计算高程变化, 适用于地形起伏较大的区域。自动化监测技术通过集成传感器与数据传输系统,

实现沉降数据的实时采集与远程传输。静力水准仪利用连通器原理, 通过测量液体在各测点间的压力差, 间接反映结构体的相对沉降。全站仪自动化监测系统结合激光测距与角度测量功能, 通过预设监测点坐标, 自动完成周期性测量并生成沉降曲线。分布式光纤传感技术作为新兴手段, 将光纤沿监测结构布设, 通过分析光纤中应变与位移的关联关系, 实现连续、动态的沉降监测, 尤其适用于长距离、大范围的监测需求。这些技术原理相互补充, 共同构建起沉降监测的技术体系。

2 沉降监测的关键技术

2.1 监测点布设

监测点布设是沉降监测的基础环节, 直接影响数据采集的准确性与代表性。布设时需遵循三大原则: 代表性要求监测点能真实反映监测对象的位移特征, 避免因位置偏差导致数据失真; 可操作性强调布设过程需兼顾现场环境与施工条件, 确保监测点稳定且便于长期维护; 经济性则需在满足监测需求前提下, 合理控制监测点数量与布设成本^[2]。具体布设方法需结合工程特点灵活调整。沿隧道轴线方向, 监测点通常按固定间距设置, 以跟踪纵向沉降规律; 横向断面方向, 监测点需覆盖隧道中心至周边影响范围, 形成沉降槽曲线; 重点区域如建筑物基础、管线接口或地质突变段, 则需加密布设监测点, 捕捉局部变形细节。监测点类型根据功能差异分为三类。基准点作为沉降监测的基准参考, 需布设在稳定区域且远离施工扰动范围; 工作基点用于连接基准点与沉降监测点, 通常布设在施工影响边界外, 便于数据传输; 沉降监测点直接布设于地表、管线或建筑物上, 通过测量其垂直位移反映结构变形情况。三类监测点协同工作, 构建起完整的沉降监测网络。

2.2 监测仪器与设备

沉降监测依赖多样化的仪器设备实现数据采集。传统仪器中, 精密水准仪通过高精度水准测量获取地表沉

降值,适用于对精度要求高的场景;测斜仪可测量土体深层水平位移,辅助分析沉降与侧向变形的耦合关系;应变计则通过测量结构应变间接推算沉降,常用于建筑物或管线监测。自动化设备的应用显著提升了监测效率。全站仪机器人结合激光测距与自动跟踪技术,可实现无人值守的周期性测量,减少人工干预;激光扫描仪通过快速扫描获取三维点云数据,适用于大范围地表沉降监测;GNSS接收机利用卫星定位技术,实现实时动态沉降监测,尤其适用于开阔区域的长期跟踪。新型传感器为沉降监测提供了更多技术选择。光纤光栅传感器通过监测光纤中光栅波长变化,可同时测量温度与应变,进而推算沉降;分布式光纤测温系统则利用光纤沿线温度分布与土体沉降的关联性,实现连续、长距离的沉降监测。这些新型传感器具有抗干扰能力强、耐久性好等优势,逐渐成为沉降监测的重要工具。

2.3 监测频率与周期

监测频率与周期需根据施工阶段与现场条件动态调整。施工阶段可划分为始发、掘进、接收与停机四个阶段,每个阶段的监测重点与频率各有差异。始发阶段需密切关注盾构机姿态与初始沉降,监测频率通常较高;掘进阶段是沉降发生的主要时期,需根据地质条件与施工参数实时调整监测频率;接收阶段需预防盾构机出洞时的突沉,监测力度需加强;停机阶段则需持续跟踪沉降发展,评估施工对周边环境的长期影响。频率调整依据主要包括地质条件、施工参数与监测数据变化速率。软土地层或地质复杂区域沉降敏感度高,需提高监测频率;掘进速度、土压平衡等施工参数变化时,需同步调整监测计划;若监测数据显示沉降速率加快或出现异常变形,需立即加密监测以捕捉变形趋势。通过动态调整监测频率与周期,可确保沉降监测的时效性与针对性。

3 沉降监测的数据处理与分析

3.1 数据采集与传输

沉降监测的数据采集方式直接影响数据质量与监测效率。人工采集依赖测量人员操作仪器完成数据记录,适用于小范围或临时性监测任务,但存在劳动强度大、数据更新慢的局限。自动化采集则通过传感器与数据采集系统实现数据自动记录与存储,可连续跟踪沉降变化,尤其适合长期、大范围的监测场景^[1]。两种方式各有优势,需根据工程需求灵活选择。数据传输是连接采集端与分析端的关键环节。有线传输通过电缆或光纤传输数据,具有稳定性高、抗干扰能力强的特点,适用于固定监测点的数据传输。无线传输利用无线通信技术实现数据远程传输,摆脱了线缆束缚,便于布设移动监测点

或临时监测设备。远程实时传输则结合物联网技术,将数据直接上传至云端平台,实现多终端同步访问与实时分析,为施工决策提供及时支持。

3.2 数据处理方法

原始监测数据往往包含噪声或异常值,需经过预处理提升数据质量。滤波处理通过数学算法剔除高频噪声,保留沉降变化的主要趋势;平滑处理对数据序列进行加权平均,减少短期波动影响;异常值剔除通过设定阈值识别并去除偏离正常范围的数据点,确保分析可靠性。沉降量计算是数据处理的的核心任务。单点沉降计算针对单个监测点,通过对比不同时间点的测量值得到垂直位移量;区域沉降计算综合多个监测点数据,分析特定区域内沉降分布特征;累积沉降计算通过累计各时段沉降量,反映沉降随时间的发展趋势。这些计算结果为后续分析提供基础数据支撑。时空分析是挖掘沉降规律的重要手段。通过绘制沉降随时间变化曲线,可直观观察发展阶段与变化速率,判断沉降是否趋于稳定;空间分布图通过插值算法将离散监测点数据转化为连续曲面,展示空间分布特征,识别沉降集中区域。时空分析结果可为施工调整与风险评估提供科学依据。

3.3 数据分析模型

经验模型基于大量工程实践总结出沉降与施工参数的关联规律。Peck公式通过隧道掘进引起的地面沉降槽宽度与最大沉降量,预测地表沉降分布;修正Peck模型则引入地质条件、隧道直径等修正参数,提升模型在复杂地质条件下的适用性。经验模型计算简便,但依赖特定工程条件,外推应用时需谨慎验证。数值模拟模型通过建立土体与结构的力学模型,模拟盾构掘进过程中的沉降发展。有限元法将连续介质离散为有限单元,通过求解单元应力应变关系得到沉降分布;有限差分法则通过差分方程近似求解偏微分方程,适用于大变形或非线性问题。数值模拟模型可考虑复杂地质条件与施工工况,但计算成本较高,需结合现场数据校准模型参数。机器学习模型通过训练算法从历史数据中学习沉降规律,实现沉降预测与风险评估。神经网络通过多层非线性变换提取数据特征,支持向量机则通过寻找最优分类超平面实现沉降等级划分^[4]。机器学习模型具有强大的数据适应能力,但需足够数量的高质量训练数据,且模型解释性相对较弱。三种分析模型各有侧重,综合应用可提升沉降监测的分析深度与预测精度。

4 沉降监测的预警与应对措施

4.1 预警机制建立

预警机制是沉降监测中防范风险的关键环节,需通

过科学设定指标与分级标准实现风险提前识别。预警指标设定需结合工程特点与地质条件，重点关注沉降速率与累积沉降量两项核心参数。沉降速率阈值根据土体性质与结构安全要求确定，当监测点沉降速率超过设定值时，表明土体变形加速，可能引发结构失稳；累积沉降量阈值则反映沉降的长期影响，当沉降量达到临界值时，需评估对周边环境的破坏程度。两项指标需综合考量，避免单一指标误判导致预警失效。预警分级标准通过颜色区分风险等级，为应对措施提供明确指引。黄色

预警对应沉降速率或累积沉降量接近阈值的情况，提示施工方需关注变形趋势，加强监测频率；橙色预警表示沉降指标已超过阈值，但尚未对结构安全造成直接威胁，此时需暂停部分施工工序，组织技术团队分析原因并制定调整方案；红色预警为最高级别，当沉降速率持续加快或累积沉降量突破安全极限时，表明结构已处于危险状态，需立即启动应急预案，疏散周边人员并采取紧急加固措施，如表1所示。分级标准需动态调整，根据监测数据变化与施工进度适时优化。

表1

预警等级	沉降速率阈值(毫米/天)	累积沉降量阈值(毫米)	应对响应要求
黄色预警	$3 \leq \text{速率} < 5$	$15 \leq \text{沉降量} < 25$	加强监测，频率提升至2次/天，分析原因
橙色预警	$5 \leq \text{速率} < 10$	$25 \leq \text{沉降量} < 40$	暂停掘进，进行技术评估，采取注浆等控制措施
红色预警	$\text{速率} \geq 10$	$\text{沉降量} \geq 40$	立即启动应急预案，疏散人员，进行抢险加固

4.2 应对措施制定

应对措施需从技术、管理与应急三个层面协同推进，形成完整防控体系。技术措施直接作用于沉降控制，通过调整掘进参数降低土体扰动，例如减缓掘进速度、优化土压平衡设置；注浆加固通过向土体注入水泥浆或化学浆液，提升土体强度与稳定性，减少沉降发展；隔离桩施工在沉降敏感区域设置桩体，阻断沉降传递路径，保护周边结构安全。技术措施需根据现场条件灵活组合，确保沉降有效控制。管理措施通过强化监测与决策流程提升风险应对效率。加强监测频率可缩短数据更新周期，及时发现沉降异常；暂停施工能阻断沉降发展，为技术调整争取时间；专家会商集合多领域专业力量，对复杂工况进行综合研判，制定科学应对方案。管理措施需与预警分级标准衔接，确保不同风险等级下采取对应强度的管理手段。应急措施是保障人员安全与减少损失的最后防线。人员疏散根据沉降影响范围划定安全区域，组织周边人员有序撤离；交通管制通过封闭道路或限制通行，避免车辆通行加剧沉降或引发次生灾害；抢险救援预案需提前制定救援路线、物资储备与人

员分工，确保在沉降引发结构破坏时能迅速开展救援行动。应急措施需定期演练，提升执行效率与协同能力。

结束语

地铁隧道盾构施工沉降监测是复杂而系统的工程。通过科学布设监测点、选用合适仪器设备、动态调整监测频率与周期，可获取准确沉降数据。结合数据处理方法与分析模型，能深入挖掘沉降规律，为施工提供科学依据。建立预警机制与制定应对措施，可有效防范沉降风险，保障施工安全与周边环境稳定。未来需持续优化监测技术，提升监测精度与效率。

参考文献

- [1]吴腾.地铁隧道盾构施工的沉降监测研究[J].工程管理,2023,4(3):245-247.
- [2]吴木生.地铁隧道盾构施工中沉降监测研究[J].中国高新科技,2023(22):71-73.
- [3]王通福.地铁隧道盾构施工监控量测及沉降变形预测研究[J].运输经理世界,2025(5):26-28.
- [4]刘勇,曹毅泽,吴薪柳,等.地铁盾构施工下穿既有明挖隧道模型试验研究[J].中国铁道科学,2024,45(1):110-121.