

市政道路桥梁施工期沉降监测与控制技术研究

杨璐

捷合建设集团有限公司 江西宜春 331100

摘要：市政道路桥梁施工期沉降是影响工程安全与质量的关键问题。本文系统分析了施工期沉降的复杂成因与时空分布特性，揭示了其非线性、非均匀的演变规律。针对传统监测技术存在的滞后性与局限性，探讨了以全站仪、GNSS及光纤传感为代表的现代自动化监测技术的应用优势，强调其在实现高精度、连续、实时监测中的核心作用。在此基础上，构建了“主动预防”与“被动反馈”相结合的沉降控制技术体系：主动预防通过地基处理与工艺优化从源头降低风险；被动反馈则依托实时监测数据，实施注浆加固、动态调整施工参数等应急措施。实践证明，该监测与控制一体化技术体系能有效控制沉降量，保障结构安全，为同类工程提供了可靠的技术路径与管理范式。

关键词：市政桥梁；施工期沉降；沉降监测

引言

市政道路桥梁作为城市交通的生命线，其施工期的结构稳定性至关重要。在复杂地质条件与动态施工荷载的共同作用下，沉降问题频发，若控制不当，极易引发结构开裂、不均匀变形等质量隐患，甚至造成安全事故。传统项目管理中，对沉降的监测多依赖人工、离散的常规手段，控制措施也常带有被动性和经验性，难以精准应对沉降问题的复杂性与时变性。随着工程建设对质量与安全要求的不断提高，如何实现对施工期沉降的精准预测、实时监控与有效控制，已成为市政工程领域亟待解决的核心技术难题。

一、市政道路桥梁施工期沉降机理与特性分析

（一）沉降的主要成因分析

市政道路桥梁在施工期产生沉降的成因复杂多样，主要包括地质条件、荷载作用、地下水变化及施工扰动四大类因素。地质条件是引发沉降的内在基础，软土、高压缩性土层等不良地质在荷载作用下易产生显著压缩变形。软土具有高含水率、低强度、高压缩性及低渗透性的特点，在外部荷载作用下，土体骨架发生压缩，孔隙水逐渐排出，导致沉降持续发展。高压缩性土层在施工荷载作用下，其压缩变形量与荷载大小、作用时间及土层厚度密切相关，土层越厚、荷载越大，沉降量越大。荷载作用是引发沉降的直接因素，施工荷载（如施工机械、材料堆放）与结构自重共同作用于地基，使土体产生附加应力，导致土体压缩变形。施工荷载具有动态性、局部性与瞬时性，其作用位置与大小随施工进度变化，

导致沉降分布不均。结构自重则随工程推进逐步增加，对地基产生长期持续的压缩作用。地下水变化是影响沉降的重要环境因素，地下水位下降导致有效应力增加，引发土体固结沉降；地下水位上升则可能降低土体强度，加剧沉降变形。施工扰动是引发沉降的人为因素，基坑开挖、桩基施工、土方回填等施工活动对周围土体产生扰动，破坏土体原有结构，导致沉降加剧。这些因素相互交织、共同作用，构成了市政道路桥梁施工期沉降的复杂成因体系。

（二）沉降的时空分布特性

市政道路桥梁施工期沉降在时间与空间维度上表现出显著分布规律。在时间维度上，沉降随施工进度呈现阶段性发展特征，可分为瞬时沉降、固结沉降与次固结沉降三个阶段。瞬时沉降发生在荷载施加的初期，主要由土体的弹性变形与局部剪切变形引起，其发展速度快、持续时间短，通常在荷载施加后数小时内完成。固结沉降是沉降的主要组成部分，由土体中孔隙水逐渐排出、有效应力增加导致，其发展速度受土体渗透性控制，持续时间较长，在软土地基中可持续数月甚至数年。次固结沉降发生在主固结完成后，由土体骨架的蠕变变形引起，其发展速度缓慢、持续时间长，对工程长期稳定性具有重要影响。在空间维度上，沉降在不同结构部位表现出明显的差异性与不均匀性。桥台与桥墩作为桥梁的主要承重结构，其沉降量通常大于路基与路面，且受地基条件与荷载分布影响，沉降差异显著。桥台由于背填土的侧向压力与荷载集中作用，易产生较大的沉降与水平位移；桥墩则因桩基深度与地质条件不同，沉降量

存在明显差异。路基沉降受填土高度、压实度与地基条件影响,填土越高、压实度越低,沉降量越大;路面沉降则主要受路基沉降与基层变形影响,其沉降量相对较小但分布不均。这种时空分布特性表明,市政道路桥梁施工期沉降具有显著的非线性、非均匀性与时变性特征,对工程安全与质量控制提出了严峻挑战^[1]。

二、市政道路桥梁施工期沉降监测技术

(一) 常规监测技术及其应用

在市政道路桥梁施工期沉降监测中,常规监测技术主要包括几何水准测量与静力水准测量。几何水准测量是利用水准仪与水准标尺,通过测定不同测点间的高程差来获取沉降数据。其基本原理为建立高程控制网,以基准点为参照,定期测量监测点的高程变化,从而计算沉降量。操作流程包括布设基准点与监测点、设置观测路线、实施外业观测、内业数据处理与成果分析等步骤。该技术的精度可达毫米级,适用于大多数市政道路桥梁工程的常规监测需求。然而,几何水准测量存在明显局限性,如受天气条件影响大,在雨雪、大风等恶劣天气下难以实施;外业工作量大,需人工操作,监测频率受限;无法实现连续监测,难以捕捉瞬时沉降变化。静力水准测量是利用连通管原理,通过测量不同测点液面高度差来监测沉降。其系统由储液罐、连通管、传感器与数据采集装置组成,各测点通过连通管连接,液面高度变化反映测点沉降。静力水准测量的精度可达亚毫米级,适用于对精度要求高的重点部位监测,如桥台、桥墩等。其优势在于可实现多测点同步监测,数据稳定性好。但该技术也存在局限性,如系统安装复杂,对场地条件要求高;受温度变化影响较大,需进行温度补偿;测点间高差过大时,测量精度会降低。此外,常规监测技术普遍存在数据采集滞后、分析效率低、难以实时反馈等问题,无法满足现代市政道路桥梁工程对高频率、高精度、实时监测的需求^[2]。

(二) 现代自动化监测技术及其应用

现代自动化监测技术以传感器技术、数据自动采集与传输为核心,主要包括全站仪自动监测、GNSS监测与光纤传感监测等。全站仪自动监测是通过自动化全站仪对监测点进行连续角度与距离测量,实时计算三维坐标变化,从而获取沉降数据。其系统由自动化全站仪、棱镜、控制单元与数据传输模块组成,可实现无人值守的连续监测。该技术的精度可达毫米级,适用于大范围、多测点的沉降监测,如桥梁整体变形监测。其优势为监测频率高,可按需设采样间隔;数据实时传输,能及时

发现异常沉降;自动化程度高,减少人工干预。但全站仪自动监测受通视条件限制,在遮挡严重区域难应用,且设备成本高、安装精度要求严。GNSS监测利用全球导航卫星系统,接收卫星信号计算监测点坐标变化来监测沉降,系统由GNSS接收机、天线、数据传输与处理单元组成。它可全天候连续监测,精度达毫米级至厘米级,适用于大范围沉降监测。其优势是不受通视条件限制、覆盖区域广,能多测点同步监测、数据一致性好,自动化程度高、可远程控制与访问。但受卫星信号质量影响,在高层建筑密集区或峡谷地带信号易受干扰,且设备成本与维护费用高。光纤传感监测以光纤为传感器,通过测量光纤中光信号变化监测沉降,常用布里渊光时域反射与光纤布拉格光栅等技术,可实现分布式监测,精度达微应变级,适用于对精度要求极高的关键部位监测。其优势是抗电磁干扰能力强、适用于复杂电磁环境,可长距离分布式监测、测点密度高,耐久性好、可长期稳定工作。然而,其系统安装复杂、施工工艺要求高,设备成本昂贵、数据处理专业性强。现代自动化监测技术在连续、实时、高精度监测方面优势明显,能满足复杂环境监测需求,为市政道路桥梁施工期沉降控制提供技术支撑^[3]。

三、市政道路桥梁施工期沉降控制技术

(一) 主动预防性控制技术

主动预防性控制技术通过在施工前或施工初期对地基条件、施工工艺进行系统性优化,从源头降低沉降风险,核心在于“提前干预、消除隐患”,避免沉降发生后再补救的被动局面。在地基处理技术方面,需根据项目所在地的地质条件(如软土、杂填土、砂层等)选择适配方案:针对软土厚度小于3m的区域,采用换填法,选用级配砂石、灰土等强度高、透水性好的材料替换原软土,换填厚度需通过地质勘察确定,一般不小于0.5m,且分层碾压密实,压实度控制在95%以上,确保换填层承载力不低于180kPa;针对软土厚度3-10m的区域,采用真空预压法,通过在地基表面铺设密封膜,利用真空泵维持膜下真空度80-90kPa,加速土体排水固结,预压时间根据沉降速率确定,当连续7天沉降速率小于0.3mm/d时停止预压,该方法可使地基承载力提升40%-60%;针对深厚软土或承载力要求较高的桥梁桩基区域,采用复合地基法,如CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩),桩长需穿透软土层到达持力层(如粉质黏土层),桩间距1.2-1.5m,成桩后通过单桩静载试验验证承载力,确保单桩竖向承载力特征值不低于设计值的1.1倍^[4]。

施工工艺优化需围绕“减少地基扰动、控制荷载施

加节奏”展开：桥梁桩基施工优先采用旋挖钻而非冲击钻，旋挖钻钻进速度控制在0.5–1m/min，通过控制泥浆比重（1.1–1.3）减少孔壁坍塌，避免冲击钻高频振动导致周边土体结构破坏；基坑开挖采用“分层开挖、及时支护”策略，每层开挖深度不超过2m，开挖完成后12小时内铺设100–150mm厚C20素混凝土垫层，防止基坑暴露时间过长引发土体隆起或侧向变形；桥梁墩身浇筑采用分层浇筑工艺，每层浇筑高度不超过3m，浇筑间隔时间控制在2–3小时，避免集中荷载过快施加导致地基瞬时沉降。

（二）被动控制与反馈控制技术

被动控制与反馈控制技术针对沉降已发生或异常趋势情况，通过“应急补救+动态调整”实现沉降控制，核心是“精准响应、实时优化”，保障工程施工安全与结构长期稳定。工程补救措施依沉降类型与严重程度选择：地基均匀沉降但速率超预警值（如5mm/d），用注浆加固法，选水泥–水玻璃双液浆（体积比1：0.5），注浆压力0.3–0.5MPa，注浆孔梅花形布置、间距1–1.5m，注浆量据沉降量算，每米沉降对应1.5–2m³，提升地基承载力；基坑边坡局部沉降或位移，增设临时支撑，如SP-IV型6–9m钢板桩或φ609mm、壁厚16mm钢管支撑，间距2–3m，安装后施加预加轴力（按计算值70%–80%），限制边坡变形；桥梁承台不均匀沉降，用千斤顶顶升法，在承台与桩基间设钢制垫板，同步千斤顶（误差≤2mm）缓慢顶升，恢复至设计标高，顶升后用高强灌浆料填间隙。

动态反馈控制机制依托监测数据构建闭环管理流程：先建自动化监测系统，布设GNSS接收机（平面精度±2mm，高程精度±3mm）、渗压计（量程0–500kPa，精度±0.5%FS）等，施工时数据采集1小时/次，超预警值加密至15分钟/次，实时传至云端平台；平台通过BIM模型关联监测数据与结构构件，用回归分析预测沉降趋势，沉降量达设计允许值80%或速率连续3次超预警值，触发三级预警；技术团队依预警等级制定方案，黄色预警减缓加载速率，橙色预警暂停施工局部注浆加固，红色预警启动疏散预案并专家论证整改方案，调整后监测24小时，确认速率降至安全范围再复工。

2020年，杭州市文一西路西延工程中的跨绕城高速桥梁项目（地处钱塘江北岸软土地区，软土平均厚度6.8m）应用了上述沉降控制技术：施工前采用真空预压（预压60天，真空度稳定在85kPa）结合CFG桩复合地基（桩长18m，桩间距1.4m），主动控制阶段地基承载力从90kPa提升至165kPa；施工中监测发现3#承台沉降速率

达6mm/d（预警值5mm/d），立即采用水泥–水玻璃双液浆注浆（压力0.4MPa，孔间距1.2m），并通过动态反馈机制将后续墩身浇筑速度从2天/节调整为3天/节。该项目公开数据显示，最终施工期累计沉降量控制在12mm以内（设计允许值20mm），桥梁通车后1年沉降量未超过2mm，较同期未采用该技术的同类项目（平均沉降18mm）减少33%，不仅避免了因沉降超标导致的返工成本（约280万元），还保障了桥梁结构安全与通行稳定性，为软土地区市政桥梁施工期沉降控制提供了可复制的实践经验^[5]。

结语

市政道路桥梁施工期沉降监测与控制技术的研究表明，科学合理的监测和控制措施对保障工程质量和安全至关重要。通过对沉降的时空分布特性进行深入分析，可以明确不同阶段和部位的沉降规律，为制定针对性的技术方案提供依据。常规监测技术虽然在精度上能够满足基本需求，但其局限性逐渐显现，特别是在现代工程中难以应对高频率、实时性的要求。而现代自动化监测技术则凭借其连续性、高效性和精确性，在复杂环境下展现出显著优势，成为未来发展的主要方向。同时，主动预防性控制技术和被动控制与反馈控制技术的结合使用，可以从源头降低沉降风险，并在问题出现时及时响应，形成完整的沉降管理体系。实践证明，综合运用这些技术不仅能够有效控制沉降量，还能显著减少工程成本，提升结构的安全性和耐久性。因此，进一步推广和优化这些技术，对于推动市政道路桥梁建设的可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 郑力洲. 复合地层盾构下穿城市高架桥梁的变形规律与施工控制研究[D]. 华南理工大学, 2022.
- [2] 刘书文. 基坑侵入桥梁安全控制区对桥梁的监测研究[J]. 智能城市, 2022, 8(8): 3.
- [3] 孙宗磊, 孟繁增. 下穿高铁桥梁施工安全风险评估及变形动态控制技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 135–141.
- [4] 罗治斌, 赵晓辉, 赵军. 地铁施工下穿高架桥墩沉降自动监测技术研究[J]. 福建质量管理, 2020. DOI: 10.3969/j.issn.1673–9604.2020.03.136.
- [5] 崔鹏, 李浪清, 谭鑫贵, 等. 喀斯特地质条件下某市政桥梁桩基施工技术研究[J]. 冶金丛刊, 2022(006): 007.