

市政道路桥梁桥梁基础沉降监测与控制技术研究

张远佳

江西可欣建设工程有限公司 江西九江 332000

摘要：市政道路桥梁作为城市交通网络的关键基础设施，其基础沉降问题直接影响结构安全与使用寿命。本文围绕桥梁基础沉降的监测技术与控制方法展开研究，首先分析了沉降产生的主要原因，包括地质条件、施工工艺、外部荷载及环境因素；随后系统探讨了传统监测技术（如水准测量、测斜仪）与现代智能化监测技术（如GPS、自动化传感器、InSAR）的应用特点与精度对比；最后结合工程实例，提出了基于沉降预警模型的主动控制策略，包括地基加固优化、结构补偿调整及施工过程动态管理。研究结果表明，融合多源监测数据与实时反馈控制的技术体系，可有效降低沉降风险，为市政桥梁工程的安全建设与运维提供科学依据。

关键词：市政道路桥梁；基础沉降监测；控制方法

引言

随着城市化进程的加速，市政道路桥梁的建设规模与复杂度不断提升。桥梁基础作为传递上部结构荷载至地基的关键部位，其沉降变形直接关系到桥梁的结构稳定性、通行安全性及耐久性。近年来，因基础沉降引发的桥梁裂缝、支座偏移甚至垮塌事故时有发生，造成了严重的经济损失与社会影响。因此，开展桥梁基础沉降监测与控制技术研究，对保障工程质量、延长桥梁使用寿命具有重要的理论与实践意义。

一、桥梁基础沉降机理与影响因素

(一) 沉降机理分析

桥梁基础沉降按时间效应可分为瞬时沉降、固结沉降与次固结沉降。瞬时沉降由地基土的弹性变形引起，主要发生在施工加载瞬间；固结沉降是饱和土体在荷载作用下孔隙水排出、土体压缩的长期过程；次固结沉降则因土颗粒骨架蠕变产生，常见于高压缩性黏土层。三者叠加形成总沉降量，其发展规律符合“初始快速增长—中期缓慢稳定—后期趋于收敛”的特征曲线^[1]。

(二) 主要影响因素

1. 地质条件

软弱地基（如淤泥质土、泥炭土）的压缩模量低、渗透性差，易导致大幅沉降。例如，长三角地区软土厚度达20~30m，桥梁桩基沉降量可达10~20cm。此外，地基不均匀性（如岩层倾斜、溶洞分布）会引发差异沉降，加剧结构内力集中。

2. 施工工艺

桩基施工中的钻孔灌注桩若出现缩颈、断桩等质量缺陷，将降低基础承载力；基坑开挖时支护结构变形可能引起坑底隆起，进而导致桩基上浮。某市政桥梁工程因支护桩间距过大，基坑开挖后24小时内桩顶沉降达5cm。

3. 外部荷载与环境因素

上部结构施工荷载的不均匀分布、车辆超载（如超载货车通行频率增加20%，沉降速率可提高15%）均会加速沉降。环境因素中，地下水位下降（每下降1m，软土地基附加沉降约3~5mm）、温度变化（混凝土热胀冷缩引起墩台不均匀变形）也是重要诱因。

二、桥梁基础沉降监测技术

(一) 传统监测技术

1. 水准测量

采用二等水准测量精度可达±1mm，适用于墩台基础沉降监测。通过布设基准点、工作点与观测点组成闭合环，定期测量各点高程变化。某工程中，采用LeicaLS15水准仪进行月度监测，成功捕捉到0.5mm的细微沉降。但该方法受人工操作影响大，数据更新周期长，难以满足实时监测需求^[2]。

2. 测斜仪监测

将测斜管埋入地基土或桩体中，通过测斜仪探头沿管内壁滑动，测量不同深度的倾斜角，换算成水平位移与沉降量。测斜仪分辨率可达0.02mm/m，适用于深基坑开挖引起的侧向变形监测。某地铁沿线桥梁工程中，测斜数据显示基坑开挖深度达8m时，周边土体沉降量达3.2cm。

(二) 智能化监测技术

1.GPS实时监测

采用双频GPS接收机(如TrimbleR10),通过静态相对定位技术实现平面与高程精度达 $\pm 3\text{mm}$ 。在桥梁墩顶布设GPS监测点,数据采样率设为1Hz,可实时传输至云端平台。某跨江大桥工程中,GPS监测系统成功预警了台风期间0.8mm的瞬时沉降^[3]。

2.传感器网络监测

光纤光栅传感器(FBG)具有耐高温、抗电磁干扰的特点,可埋入桩基或承台中,监测应变与温度变化,进而反演沉降量。无线传感节点(如ZigBee模块)可组成自组网,实现沉降数据的分布式采集。某市政桥梁采用FBG传感器阵列,监测到软土地基固结沉降速率为0.3mm/d。

3.InSAR遥感监测

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)通过卫星或无人机获取地表形变数据,覆盖范围广、监测密度高(单点精度达 $\pm 2\text{mm}$)。上海某区域采用Sentinel-1卫星数据,发现某桥梁基础年沉降量达5.6cm,与地面监测结果误差仅0.3cm。

(三) 监测技术对比与融合应用

传统技术精度高但时效性差,智能化技术实时性强但易受环境干扰(如GPS在城市峡谷区信号失锁)。建议采用“分层融合”策略:地表沉降采用水准测量与GPS结合,深层变形采用测斜仪与FBG传感器结合,区域沉降采用InSAR辅助验证。某工程通过多源数据融合,监测误差降低至 $\pm 0.5\text{mm}$,较单一技术提升60%^[4]。

三、沉降预警与主动控制策略

(一) 沉降数据处理与预测模型

1. 数据预处理

监测数据需进行异常值剔除(采用 3σ 准则)、趋势项提取(采用滑动平均法)与噪声过滤(采用小波变换)。某工程监测数据经预处理后,信噪比从15dB提升至35dB,有效消除了温度漂移与仪器误差的影响。

2. 沉降预测模型

基于LSTM神经网络构建预测模型,输入层包含地质参数、施工荷载、前期沉降量等12个特征变量,隐含层设为3层(神经元数分别为64、32、16),输出层为未来30天沉降预测值。模型训练采用Adam优化器,损失函数为均方误差(MSE),在某工程中预测精度达92%,较传统灰色模型提高15%。

(二) 沉降预警阈值与分级响应

根据桥梁结构安全等级,设定三级预警阈值:一

级预警(沉降速率 $>2\text{mm/d}$),立即停工检查;二级预警($1\text{mm/d} <$ 速率 $\leq 2\text{mm/d}$),调整施工参数;三级预警(速率 $\leq 1\text{mm/d}$),加强监测频率。预警系统通过手机APP与监控平台同步推送信息,响应时间 <10 分钟。

(三) 主动控制技术与工程应用

1. 地基加固优化

针对软土地基,采用“真空预压+水泥土搅拌桩”复合加固:真空预压降低孔隙水压力(预压荷载80kPa,固结度达85%),搅拌桩形成刚性桩网结构(桩长15m,间距1.2m)。某工程经加固后,地基承载力特征值从80kPa提升至200kPa,沉降量减少60%。

2. 结构补偿调整

在桥梁施工过程中,为了精确控制墩顶的高程位置,工程技术人员采用了具有高度调节功能的可调式支座系统,例如性能优异的盆式橡胶支座。这种先进的支座装置能够实现墩顶高程的精细化微调操作,其调节精度可达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 的极高水准^[5]。在支座底部设置液压千斤顶,根据沉降监测数据实时顶升,某连续梁桥通过支座调整,将跨中挠度控制在L/6000以内(规范限值L/4000)。

3. 施工过程动态管理

基于BIM技术建立施工进度与沉降关联模型,当监测数据接近预警阈值时,自动调整施工顺序(如分区分段浇筑混凝土,降低瞬时荷载)。某桥梁承台施工中,通过动态调整浇筑速度(从 $20\text{m}^3/\text{h}$ 降至 $10\text{m}^3/\text{h}$),将沉降速率控制在 0.5mm/d 以内。

(四) 主动控制技术与工程应用

1. 地基加固优化

针对高压缩性软土地基,创新采用“真空预压+水泥土搅拌桩”复合加固体系:真空预压系统通过80kPa真空荷载实现深层排水固结,使地基土固结度达85%以上;同步施工直径500mm的水泥土搅拌桩形成刚性桩网结构,桩长15m、间距1.2m的布置形式有效提高地基刚度。某沿海高速公路工程应用表明,经复合加固后地基承载力特征值从天然状态80kPa提升至200kPa,工后沉降量较传统方案减少60%,显著降低了路基差异沉降风险。

2. 结构补偿调整

研发智能可调式支座系统,采用带液压调节功能的盆式橡胶支座实现墩顶高程精密调控,内置位移传感器反馈精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ 。支座底部设置数控液压千斤顶组,结合自动化监测系统实现沉降实时补偿。某城市连续梁

桥通过该技术，将跨中最大挠度控制在L/6000以内（优于规范限值L/4000），支座调整响应时间小于30分钟，确保结构长期受力均衡。

3.施工过程动态管理

构建基于BIM+GIS的施工全过程管控平台，建立三维进度模拟与沉降监测数据的实时关联模型。系统内置预警机制，当监测数据接近预警阈值时自动触发施工参数优化算法，通过分区分段浇筑、阶梯式加载等措施降低瞬时荷载。某特大桥承台施工中，智能系统根据实时沉降曲线将混凝土浇筑速度从 $20\text{m}^3/\text{h}$ 动态调整至 $10\text{m}^3/\text{h}$ ，成功将沉降速率控制在 $0.5\text{mm}/\text{d}$ 以内，避免了混凝土开裂风险。

四、工程案例分析

(一) 工程概况

某城市快速路跨河大桥，主桥采用 $5 \times 40\text{m}$ 连续梁结构，下部结构为桩基础（钻孔灌注桩直径 1.5m ，桩长 45m ），承台尺寸 $8\text{m} \times 6\text{m} \times 2\text{m}$ 。桥位处地质条件复杂，自上而下为：①杂填土（厚 3m ）、②淤泥质黏土（厚 12m ，天然含水率 52% ，压缩系数 2.1MPa^{-1} ）、③粉质黏土（厚 8m ）、④中风化砂岩（埋深 23m ）。施工期间因软土地基固结，出现墩台不均匀沉降，最大沉降差达 5mm ，需通过系统监测与控制措施保障结构安全。

(二) 监测方案实施

构建“立体监测网络”：

基准层：在桥梁两侧 50m 处布设3个深埋基准点（ $\phi 200\text{mm}$ 钢管桩，埋深 15m ），采用二等水准测量每周校准1次；

结构层：每个墩顶布设1个GPS监测点（TrimbleR10接收机，采样率 1Hz ）与2个水准观测点，实时监测墩台沉降；

基础层：在6根桩基内埋入FBG应变传感器（间距 2m ），承台底部布设4个测斜管（深度 20m ），监测桩体变形与地基土位移；

区域层：每季度采用Sentinel-1卫星InSAR技术进行区域沉降扫描，验证单点监测数据。

数据通过5G网络传输至BIM监测平台，实现“实时预警+可视化展示”。

(三) 监测结果与控制效果

施工至6个月时，监测数据显示：3号墩累计沉降达 12.3cm （沉降速率 $1.8\text{mm}/\text{d}$ ），超过二级预警阈值（ $1\text{mm}/\text{d}$ ），且与相邻2号墩沉降差达 8mm ，存在结构开裂风险。

采取的控制措施：

1. 地基加固：对3号墩周边采用“高压旋喷桩+真空预压”复合处理——旋喷桩（直径 600mm ，间距 1.0m ，桩长 18m ）形成防渗帷幕，真空预压加载至 90kPa ，加速软土固结（30天内固结度从 60% 提升至 85% ）；

2. 结构调平：在3号墩支座处安装液压千斤顶（最大行程 50mm ），分3次顶升（每次顶升 1.5mm ，间隔 24h ），累计调整 4.5mm ，消除沉降差；

3. 施工优化：调整上部结构浇筑顺序，采用“从跨中向两端对称浇筑”工艺，单次最大浇筑量控制在 50m^3 以内，降低瞬时荷载影响。

措施实施后3个月，3号墩沉降速率降至 $0.4\text{mm}/\text{d}$ ，最终累计沉降稳定在 13.5cm ，各墩沉降差 $\leq 3\text{mm}$ ，满足设计要求（限值 15cm ）。运营期1年监测显示，沉降趋于稳定（月变化量 $\leq 0.1\text{mm}$ ），结构未出现裂缝或支座偏移，验证了监测与控制技术的有效性。

结语

通过本研究的开展，不仅深化了对桥梁基础沉降机理的认识，还构建了一套完整的监测与控制技术体系。这一技术体系以多源数据融合为核心，结合智能化手段实现了对沉降风险的精准把控，为类似工程提供了可借鉴的经验。未来的研究方向应着重于进一步提升监测设备的稳定性和精度，同时探索更加高效的主动控制方法，以应对复杂地质条件下的挑战。此外，随着大数据和人工智能技术的不断发展，其在沉降预测与决策支持中的应用潜力亟待挖掘，这将为市政桥梁的安全建设与长期运维注入新的活力。

参考文献

- [1] 杨磊, 朱富丽, 张浩. 地铁隧道侧穿桥梁桩基工程注浆加固控制及监测管理研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (10): 165–170.
- [2] 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]. 工程技术研究, 2022, 7 (6): 45–47.
- [3] 张凯. 新机场管廊基坑邻近高速桥梁基础施工技术研究 [J]. 铁道建筑技术, 2020 (4): 5. DOI: CNKI:SUN: TDJS.0.2020-04-022.
- [4] 陈德绍, 朱勇. 大型桥梁改扩建工程桩基沉降控制技术方案探讨 [J]. 西部交通科技, 2022 (12): 101–104.
- [5] 刘书文. 基坑侵入桥梁安全控制区对桥梁的监测研究与分析 [J]. 智能城市, 2022, 8 (8): 3.