

# 市政道路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<sup>[1]</sup>。

### (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 $\pm 1\text{mm}$ ,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Leica LS15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<sup>[2]</sup>。

#### 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<sup>[3]</sup>。

### 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%<sup>[4]</sup>。

## 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 $3\sigma$ 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（ $1\text{mm/d} < \text{速率} \leq 2\text{mm/d}$ ），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<sup>[5]</sup>。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 $1.5\text{m}$ ,桩长 $45\text{m}$ ),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 $3\text{m}$ )、②淤泥质黏土(厚 $12\text{m}$ ,天然含水率 $52\%$ ,压缩系数 $2.1\text{MPa}^{-1}$ )、③粉质黏土(厚 $8\text{m}$ )、④中风化砂岩(埋深 $23\text{m}$ )。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 $5\text{mm}$ ,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 $50\text{m}$ 处布设3个深埋基准点( $\phi 200\text{mm}$ 钢管桩,埋深 $15\text{m}$ ),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 $1\text{Hz}$ )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 $2\text{m}$ ),承台底部布设4个测斜管(深度 $20\text{m}$ ),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 $12.3\text{cm}$ (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 $8\text{mm}$ ,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 $600\text{mm}$ ,间距 $1.0\text{m}$ ,桩长 $18\text{m}$ )形成防渗帷幕,真空预压加载至 $90\text{kPa}$ ,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 $50\text{mm}$ ),分3次顶升(每次顶升 $1.5\text{mm}$ ,间隔 $24\text{h}$ ),累计调整 $4.5\text{mm}$ ,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 $50\text{m}^3$ 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 $13.5\text{cm}$ ,各墩沉降差 $\leq 3\text{mm}$ ,满足设计要求(限值 $15\text{cm}$ )。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

通过开展本研究,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:TJJS.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[J].智能城市,2022,8(8):3.