

## 基于后装分布式光纤的高架桥桩基监测技术研究

胡凤琴

(中铁二十二局集团 市政工程有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 在分析分布式光纤、桩基后装光纤监测原理的基础上,提出一种基于后装分布式光纤的高架桥桩基监测技术。结合实际工程应用,从预埋超声波检测管、安装布置后装式光纤、分布式光纤熔接与监测方面介绍该监测技术的安装工艺;以广州某高架桥B匝道为例,采用该技术监测承台施工后长短组合桩基、独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的轴力和变形,并传统监测方法进行经济效益对比。结果表明,该技术的监测成本低,具有良好的推广应用前景。

**关键词:** 桥梁;高架桥;桩基;分布式光纤传感器;施工监测

**中图分类号:** U446.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2024)02-0126-04

桩基是桥梁的重要部位,起着支撑桥梁和保护桥梁的作用,其质量好坏直接影响整座桥梁的质量及安全<sup>[1-3]</sup>。为研究桥梁桩基的受力及变形规律,须对桩基进行受力和变形监测。传统的监测方法采用单点传感器,其监测精度低且效果差。分布式光纤传感器具有分布式测量、抗电磁干扰、不怕水、耐高温、耐腐蚀、易安装、长距离监测等优点,已广泛应用于桩基、边坡、桥梁等结构的受力监测<sup>[4-7]</sup>。本文采用分布式光纤进行高架桥桩基受力和变形监测,研究后装分布式光纤的安装工艺和监测技术。

## 1 后装分布式光纤的监测原理

### 1.1 分布式光纤的基本原理

分布式光纤利用光纤所受的温度和轴向应变与布里渊散射光的频移变化之间良好的线性关系,通过测量布里渊频移,得到光纤的温度和轴向应变变化。布里渊频移与温度和光纤应变的关系式为:

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(0, T_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial T} \Delta T \quad (1)$$

式中:  $\nu_B(\epsilon, T)$  为布里渊频移;  $T$  为测量环境的温度;  $\nu_B(0, T_0)$  为初始布里渊频移;  $T_0$  为初始环境温度;  $\partial \nu_B(\epsilon, T) / \partial \epsilon$  为应变系数;  $\Delta \epsilon$  为应变变化值;  $\partial \nu_B(\epsilon, T) / \partial T$  为温度系数;  $\Delta T$  温度变化值。

为减轻温度对布里渊频移的影响,进行温度补偿。本文采用前后两次应变值的差值进行温度补偿,不另外铺设专用温度补偿光纤。式(1)简化为:

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(\epsilon_0, T_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_0$  为初始应变。

### 1.2 桩基后装光纤的监测原理

为防止桩基浇筑施工中分布式光纤遭到破坏,采用后装光纤的方法进行长短组合桩施工监测。如图1所示,在PVC管外侧按照U形回路布置分布式光纤,将PVC管安装于桩基预埋的超声波检测管中,浇筑水泥浆固定传感器。

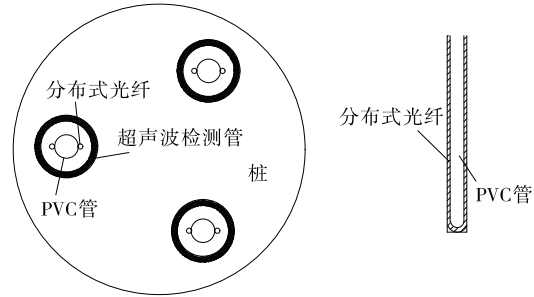


图1 后装分布式光纤安装结构示意图

桩基后装光纤的监测原理:承台及桥墩施工中桩基发生变形并通过混凝土同步传递至超声波检测管,再通过超声波检测管中的混凝土传递至分布式光纤传感器,最终由分布式光纤传感器测得长短组合桩的受力和变形情况。变形传递过程中由于超声波检测管与混凝土材质不同,其应变传递存在一定差异。作用在声测管内侧混凝土无穷小单元上力的总和为:

$$d\sigma_z^c(z) \pi r_1^2 = 2\pi r_1 \tau_{rz}^c(r_1, z) dz = 0 \quad (3)$$

式中:  $\sigma_z^c$ 、 $\tau_{rz}^c$  分别为超声波检测管内侧混凝土垂直

截面方向  $z$  的正应力和剪应力;  $r_1$  为超声波检测管的内径。

对于超声波检测管的无穷小单元,根据力的平衡方程,可得:

$$d\sigma_z^s(z)\pi(r_2^2 - r_1^2) = 2\pi r_1 \tau_{rz}^s(r_1, z) dz - 2\pi r_2 \tau_{rz}^s(r_2, z) dz \quad (4)$$

式中:  $\sigma_z^s$ 、 $\tau_{rz}^s$  分别为超声波检测管外侧混凝土垂直截面方向  $z$  的正应力和剪应力;  $r_2$  为超声波检测管的外径。

将式(3)、式(4)转换成极坐标系下平衡方程,通过傅里叶变换求得超声波检测管内与超声波检测管外混凝土应变传递函数  $H_1(k)$ :

$$H_1(k) = \frac{-1 + 4\pi^2(1 + \mu_s)k^2 \ln(r_2/r_1)r_1^2 E_c/E_s}{-1 + 4\pi^2(1 + \mu_s)k^2 [\ln(r_2/r_1)r_1^2 - (r_2^2 - r_1^2)/2]} \quad (5)$$

式中:  $\mu_s$  为超声波检测管的泊松比;  $k$  为  $z$  的傅里叶变换;  $E_s$ 、 $E_c$  分别为超声波检测管和混凝土的弹性模量。

将超声波检测管的混凝土与超声波检测管视为一个整体,得到应变传递函数  $H_2(k)$  如下:

$$H_2(k) = H_1(k) \cdot \frac{-1 + 4\pi^2(1 + \mu_c)k^2 \ln(r_3/r_2)r_2^2 E_s/E_c}{-1 + 4\pi^2(1 + \mu_c)k^2 [\ln(r_3/r_2)r_2^2 - (r_3^2 - r_2^2)/2]} \quad (6)$$

式中:  $\mu_c$  为混凝土的泊松比;  $r_3$  为超声波检测管外所测混凝土的直径。

混凝土在傅里叶状态下的应变表达式为:

$$\epsilon_c = H_2(k)\epsilon_f \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_c$  为混凝土的应变值;  $\epsilon_f$  为光纤测量的应变值。

对式(7)进行反傅里叶变换,可求得混凝土的应变值。

## 2 工程应用实例

### 2.1 工程概况

广州某高架桥 B 匝道下部结构基础为单排双桩,桩径 1.3 m,桩间距 3.5 m,桩顶承台厚 2.0 m。5# 墩、9# 墩为双柱式预应力混凝土门架墩,5# 墩盖梁高 2.2 m、宽 1.8 m,采用直径 1.6 m 圆桩与边长 1.4 m 方柱组合;9# 墩盖梁高 2.5 m、宽 1.8 m,采用直径 1.8 m 圆桩与边长 1.6 m 方柱组合。预应力混凝土门架墩桩柱采用长 2.4 m、宽 2.4 m、高 2.0 m

的混凝土结构连接。8# 墩采用预应力偏心墩,墩尺寸为 2.2 m×2.3 m,双排双桩,桩径 1.6 m。10# ~ 12# 墩采用板式墩,沿横向进行墩顶扩大,采用双排双桩,桩径为 1.6 m、1.8 m。

D 匝道下部结构基础为单排双桩,桩径 1.3 m,桩间距 3.5 m,桩顶承台厚 2.0 m。8# 墩采用 2.8 m×1.3 m 的板墩,沿横向进行墩顶扩大,基础为单排双桩,桩径 1.6 m。

### 2.2 后装分布式光纤安装工艺

#### 2.2.1 预埋超声波检测管

在钢筋笼加工完成后,预先安装超声波检测管,直接固定在钢筋笼内侧,固定点间距一般不超过 2.0 m,声测管底部及接头位置设固定点,对于无钢筋笼的部位,声测管可采用支架固定(见图 2),固定方式为绑扎或焊接,焊接时避免烧伤声测管或在管内形成焊瘤,防止影响声测管的通直。

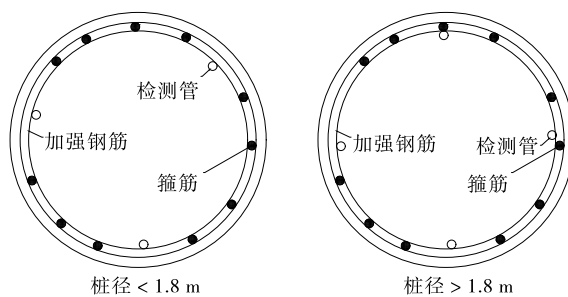


图 2 声测管布置示意图

声测管埋设深度在灌注桩底部以上 50 ~ 150 mm,声测管上端高于灌注桩顶面 300 ~ 500 mm,同一根桩的外露高度宜相同。

#### 2.2.2 后装光纤的安装布置

在混凝土灌注完成后进行分布式光纤安装。将分布式光纤按照 U 形回路方式安装于塑料管上,塑料管根据桩长进行接长(见图 3)。

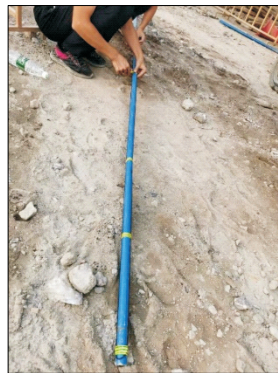


图 3 分布式光纤布置

分布式光纤安装完成后将塑料管插入超声波检测管中,注入水泥浆,使分布式光纤与桩基形成一体。将分布式光纤预留接长段固定于桩头钢筋处并进行临时保护(见图 4、图 5),便于后续光纤的熔接与监测。

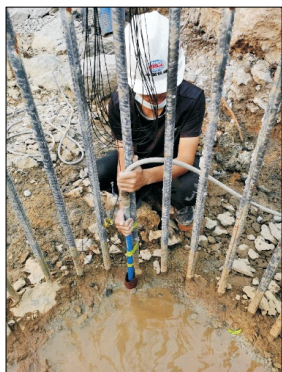


图 4 塑料管内注浆



图 5 超声波检测管注浆

### 2.2.3 分布式光纤的熔接与监测

光纤安装完成后,预留一定长度的光纤传感器,在延伸接口处进行光纤传感器熔接,使光纤传感器与 APC 接头连接。光纤熔接后,用激光发射笔从 APC 接头发射光信号,另一端 APC 接头接收光信号,检测到光信号则说明光纤能正常工作,施工时没有破坏分布式光纤传感器的完整性。将 APC 连接线与分布式光纤解调仪连接,进一步检查光纤传感器能否正常工作。数据采集时,将 APC 接头连接分布式光纤解调仪,通过分布式光纤解调仪得到布里渊频移量,进而求出灌注桩的受力和变形值。

### 2.3 监测数据分析

根据光纤监测数据进行长短组合桩基轴力及变形计算。桩基轴力计算公式如下:

$$Q_i^j = \epsilon_i^j EA$$

式中: $Q_i^j$  为  $j$  工况下第  $i$  段桩基的轴力; $\epsilon_i^j$  为  $j$  工

况下第  $i$  段桩基的应变; $E$  为桩基混凝土的杨氏模量; $A$  为桩基的截面面积。

桩基变形计算公式如下:

$$u_i^j = \Delta l_i^j (\epsilon_i^j - \epsilon_0^j)$$

式中: $u_i^j$  为  $j$  工况下第  $i$  段桩基的位移; $\Delta l_i^j$  为  $j$  工况下第  $i$  段桩基的长度; $\epsilon_0^j$  为  $j$  工况下桩基的初始应变。

#### 2.3.1 承台施工后长短组合桩基轴力及变形

图 6、图 7 分别为承台施工后长短组合桩基的轴力和变形监测结果,其中 1# 桩、2# 桩为短桩,3# 桩、4# 桩为长桩。

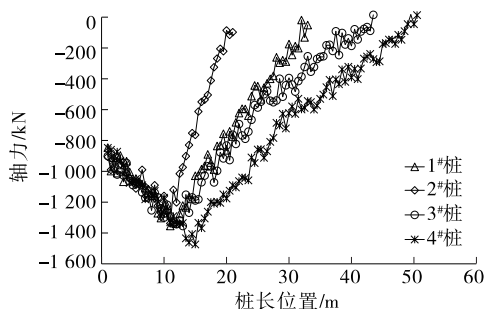


图 6 承台施工后长短组合桩基的轴力

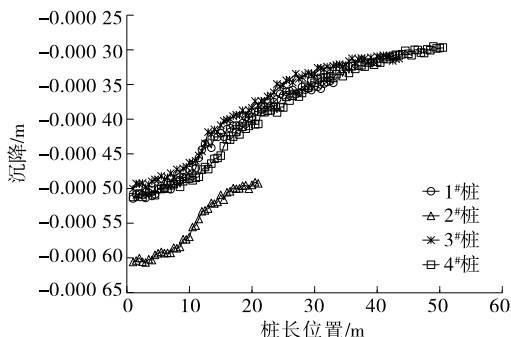


图 7 承台施工后长短组合桩基的沉降

由图 6 可知:随着桩基深度的增加,长短组合桩基的轴力先增加后减小。桩基深度小于 12 m 时,由于杂填土及粗砂凝聚力及弹性模量较小,桩身向下挤压时因土体较松散产生向下的侧摩阻力,即负摩阻力,轴力增大;桩基深度为 12 m 左右时,桩的轴力发生突变,该位置为粉质黏土和灰岩交界处;此后,桩身所承担的荷载通过灰岩与桩身之间的侧摩阻力传递至土体中,桩身轴力逐渐减小,到桩底时趋于零。轴力主要由 3# 桩、4# 桩承担。

由图 7 可知:随着桩长的增加,桩身沉降逐渐减小,且 1# 桩、2# 桩的沉降比 3# 桩、4# 桩的沉降大。这主要是由于 3# 桩、4# 桩较长,所受土层的侧摩阻力较大,限制了桩身的沉降变形。

2.3.2 独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的轴力及变形

图 8、图 9 分别为独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的轴力及变形监测结果。

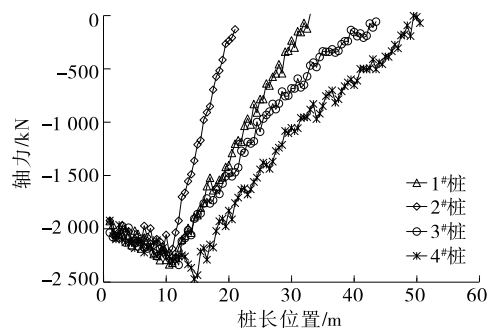


图 8 独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的轴力

从图 8、图 9 可看出:独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的轴力及变形规律与承台施工后长短组合桩基的轴力及变形规律一致,只是数值增大,这主要是由于桥墩施工加大了长短组合桩基的荷载;

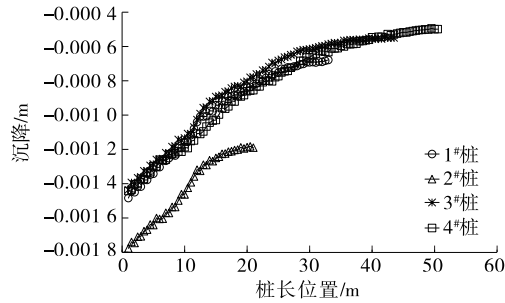


图 9 独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的沉降

2# 桩的沉降最大,这是由于 2# 桩较短,整体变形受到土层的限制较少,且进入灰岩部分不长,而 1# 桩、3# 桩、4# 桩均有较长部分进入灰岩层中。

3 效益分析

相较于传统监测方法,分布式光纤传感器具有分布式测量、易安装、施工成本低的特点,同等监测任务下分布式光纤传感器可创造 35.78 万元的经济效益(见表 1),具有良好的推广应用前景。

表 1 分布式光纤传感器与传统方法的监测效益对比

监测方法	测量人员费用	应力计传感器布置	金属基索状应变感测光缆	分布式光纤解调仪	光纤熔接机	合计费用
传统方法	600 元/d×6 人×30 d=10.80 万元	3 000 元/个×100 个=30.00 万元	—	—	—	40.80 万元
分布式光纤传感器	500 元/d×2 人×30 d=3.00 万元	—	10 元/m×500 m=0.50 万元	500 元/d×30 d=1.50 万元	100 元/d×2 d=0.02 万元	5.02 万元

4 结语

本文采用后装分布式光纤进行高架桥桩基受力和变形监测,总结了超声波检测管预埋、后装式光纤安装布置、分布式光纤熔接与监测工艺。根据后装分布式光纤对承台施工后长短组合桩基轴力及变形的监测结果,随着桩基深度的增加,长短桩的轴力大致先增加后减小;随着桩长的增加,桩身沉降逐渐减小。独柱式大悬臂桥墩施工后长短组合桩基的轴力与沉降变形规律和承台施工后规律一致。相较于传统监测方法,分布式光纤传感器具有分布式测量、易安装、施工成本低的特点,在同等监测任务下可创造 35.78 万元的经济效益,具有良好的推广应用前景。

参考文献:

[1] 冯波,乃麒元,徐华,等.施工期斜坡段桥梁双桩基础受力特性现场监测[J].公路交通科技,2021,38(2):73-

79+109.  
[2] 唐勇,陈志坚.大型群桩基础安全监测传感器选型优化[J].西南交通大学学报,2011,46(2):247-251.  
[3] 韩伟磊.高架桥桩基础施工技术[J].黑龙江交通科技,2011,34(9):186-187.  
[4] 刘永莉,黄思璐,肖衡林,等.DTS 检测灌注桩完整性的光纤布设优化研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊 2):3841-3848.  
[5] 李时宜,李浩,季文斌,等.基于布里渊光时域反射仪的边坡监测光纤传感器结构[J].光子学报,2021,50(9):115-123.  
[6] 邢厚俊.光纤光栅传感技术用于铁路边坡滑动监测的试验研究[J].铁道建筑,2018,58(2):85-88.  
[7] 张龙,郑建国,刘争宏,等.分布式光纤测试灌注桩内力的光纤植入技术研究[J].施工技术(中英文),2022(7):113-117.

收稿日期:2023-01-28