

光纤光栅传感在建筑结构监测中的应用



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

引言

大型土木工程结构和基础设施，如桥梁、超高层建筑、大跨空间结构、大型水坝、核电站、海洋平台以及输油、供水、供气等生命线系统，由于环境荷载作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等不利因素的影响，结构不可避免的会产生损伤累积、抗力减小，甚至突发事故。目前我国土木工程事故频繁发生，如桥梁的突然折断、房屋骤然倒塌等，造成了重大的人员伤亡和财产损失，已经引起人们对于重大工程安全性的关心和重视。

由于土木工程结构的特殊性，如结构形式多样、服役周期长、影响结构性能的因素复杂多变等，对其进行监测较一般的机械系统要复杂得多。目前，光纤光栅传感器已经在很多实际土木工程健康监测中得到应用，但应用最多的领域当数桥梁的安全监测，而在房屋建筑结构上应用的较少。

由于光纤光栅监测系统的成本高，我国仅在一些大跨桥上安装使用，而在房屋建筑中较少应用。以上介绍的光纤光栅传感器在房屋建筑上的应用都局限于将传感器粘贴于结构的表面，与布设在结构内部的传感器相比，其传感器的成活率高，布设工艺也相对简单很多。本节基于光纤光栅的工作原理对裸光纤光栅进行封装，并将封装好的光纤光栅传感器应用到一幢 5 层的混凝土框架结构建筑上，系统研究了提高传感器成活率的封装方法与现场布设工艺，以及光纤传感网络的布设与传输光纤的保护措施等，在施工的过程中对该结构的温度与应变变化进行了长期监测，为建立基于光纤传感器长期的结构健康监测奠定了基础。

传感器布设位置

XXX 综合实验楼总建筑面积 $12199.79m^2$ ，总层数为地上五层，地下一层。建筑平面成 L 型，工程结构分为 A 和 B 两个区，中间用抗震缝分开，平面图如图 8.1 所示。结构主体均为钢筋混凝土框架结构，一层框架梁和二层框架柱的混凝土强度等级均为 C30，受力纵向钢筋为 HRB335，箍筋为 HPB235 钢筋。

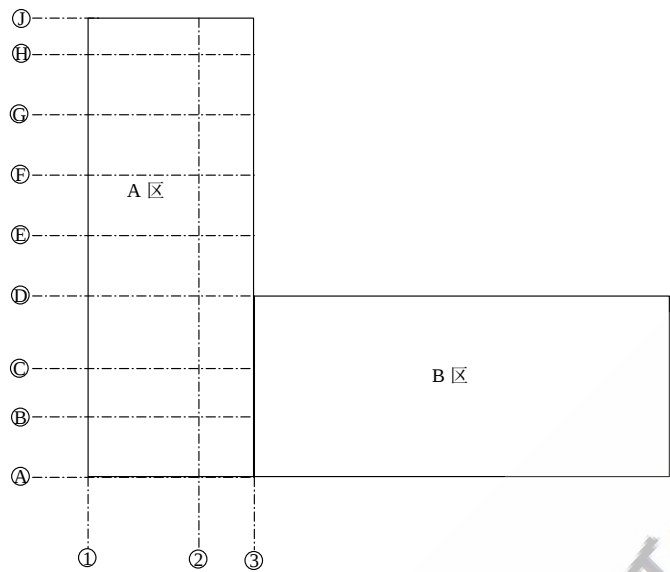


图 8.1 综合实验楼结构平面图

光纤光栅传感器布设在 A 区一层 F 轴的①-②轴之间的框架梁和 F 轴与①轴交接处二层边框架柱根部。该槓框架柱网为 7200×10500，一层框架梁尺寸为：350mm×850mm，框架柱尺寸为：500mm×500mm。光纤光栅传感器布置的示意图如图 8.2 所示，图中各传感器类型见表 8.1。

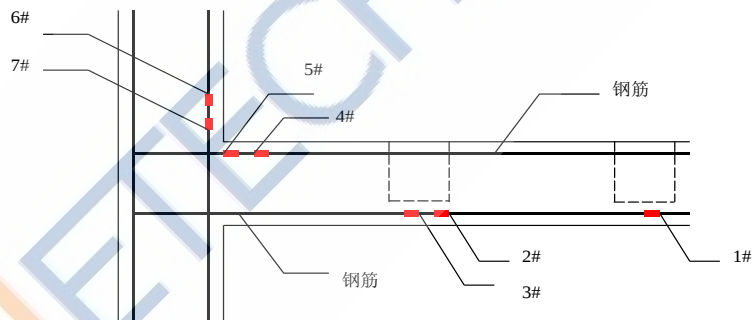


图 8.2 传感器布置示意图

表 8.1 传感器类型及位置表

编号	传感器类型	中心波长（nm）	通道号	布设位置
1#	光纤光栅应变传感器	1551	1	一层梁下部
2#	光纤光栅温度传感器	1560	2	一层梁下部
3#	光纤光栅应变传感器	1536	2	一层梁下部
4#	光纤光栅温度传感器	1546	3	一层梁上部
5#	光纤光栅应变传感器	1528	3	一层梁上部
6#	光纤光栅温度传感器	1553	4	二层柱柱根
7#	光纤光栅应变传感器	1548	4	二层柱柱根

光纤光栅中心波长的测量采用简测科技的四通道解调系统 JEME-iFBG-S08，该设备集成了扫频激光光源和可调光纤滤波器解调模块，仪器的扫描频率为 5Hz，波长分辨率为 1pm。工作波长范围为 1510-1590nm。本工程中的光纤光栅传感系统占用全部四个通道，只有第一通道为一个应变传感器，其他三个通道皆为两个光纤光栅传感器：一个温度传感器和一个应变传感器。

在制作光纤光栅应变传感器时，为了去除温度的影响，应采取温度补偿措施。人们提出了多种温度补偿解决方案，如设置温度测量光栅、双光栅叠加、参考光栅法、采用啁啾光栅等^{错误!未找到引用源。}。本节设置单独测量温度的光纤光栅温度传感器测量温度变化，在数据处理时，从总的波长漂移中去除温度引起的部分，即求得应变变化。除 1#传感器所在的通道无温度传感器外，其他三个应变传感器所在通道内都有用于温度补偿的温度传感器，1#传感器与 3#传感器都布置在同一根梁的下部受拉钢筋，用 2#温度传感器来对 1#和 3#应变传感器进行温度补偿。

传感器布设工艺

为了抵抗混凝土的强碱性，以及浇筑、振捣过程中的冲击对光纤光栅传感器造成的损坏，提高其存活率，必须对埋入的传感器采取有效的保护措施。另外，为防止光纤传输信号线在施工过程中的破坏，传感网络的布设及走线也尤为重要。这里研究了光纤光栅的布设工艺措施，具体过程如下：

(1) 光纤光栅的保护：本工程中应用的光纤光栅传感器皆为自行制作的传感器，传感器外部采用不锈钢管封装，如图 8.3 所示。

钢筋混凝土的施工过程是典型的粗放式作业，如何保护光纤光栅传感器避免在浇注、振捣和压模等过程中的冲击损坏，是光纤光栅传感器成功应用于钢筋混凝土结构的关键。在安装前将光纤光栅应变传感器与温度传感器串联起来，将光纤跳线穿入 5mm 的蛇皮钢管，用于监测的光纤光栅部分露在蛇皮钢管外，温度传感器与蛇皮管接头处用热塑管封好，而应变传感器的端部露出一小段跳线，与蛇皮管接头处不做处理，在现场安装时再行处理。采用蛇皮管封好的传感器如图 8.3 所示。

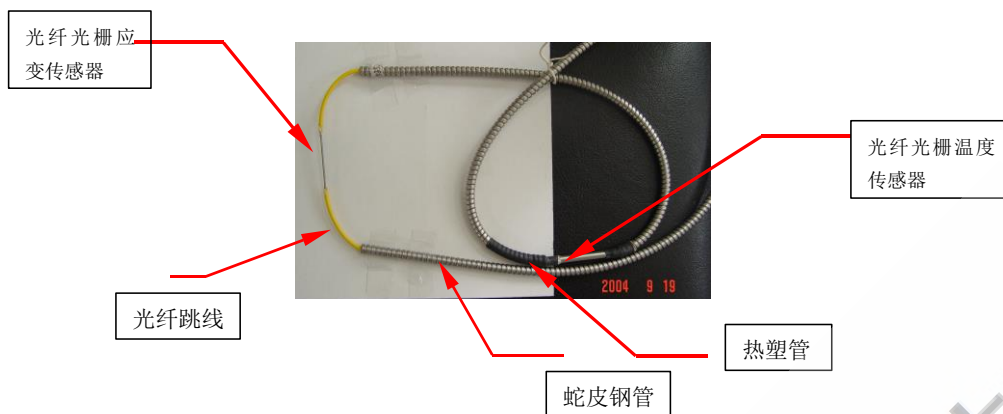


图 8.3 布设前被保护好的光纤光栅传感器

(2) 光纤光栅传感器的现场安装：

为了保证光纤光栅应变传感器与钢筋的充分接触，避免光纤光栅弯曲导致传感误差，应首先用打磨机在钢筋上打磨出一个面积适中的平面，然后用砂纸打磨，使钢筋表面平整光滑。用脱脂棉球沾酒精将打磨处擦洗干净，避免粉尘、油污对表面的污染。然后均匀的涂上一层环氧树脂，将传感器粘贴上，并确保传感器与钢筋轴向一致。待达到一定的粘贴强度后，在其表面涂覆环氧树脂进行保护，然后在外部缠几层纱布。

对于光纤光栅温度传感器其处理就相对比较简单，将其固定在钢筋上就可以了，不需要打磨，也不需要粘贴。

(3) 光纤与接头保护：

为了避免传输光纤直接受到混凝土浇注、振捣与内模板的冲击，将其置于一根直径为 16mm 的铝塑套管内，再将套管与待测钢筋绑扎在一起，经蛇皮钢管保护的传输光纤与铝塑套管的接头如图 8.4 所示。

梁下皮传输光纤经铝塑套管弯折后伸到框架梁的顶部，再经铝塑套管伸入板上的接线盒内；而梁上部的传输光纤经铝塑套管直接伸入接线盒。接线盒内的光纤连接线又经铝塑套管伸到边框架顶部，待主体结构浇注完毕，在框架梁上部砌筑填充墙时，在填充墙内安放铁皮箱，将光纤跳线放在箱内，便于以后的任何时间对结构的应变和温度进行检测。柱上的光纤连接线也伸入箱内。图 8.5 给出梁顶部以及在板上的传输光纤在现场的安装、保护图。图 8.6 为墙体砌筑完后的光纤光栅传感系统的数据采集现场图。

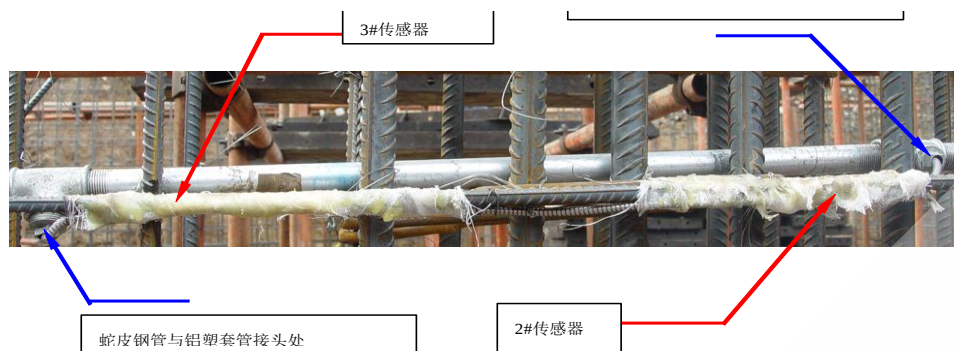


图 8.4 2#与 3#光纤光栅传感器的接头保护图



图 8.5 传输光纤的现场安装、保护图



图 8.6 光纤光栅传感系统的数据采集现场图

在一层框架梁、柱施工过程结束后，及时检查光纤光栅传感器的存活情况。该工程框架梁钢筋的绑扎方式与普通的不同，是先将框架梁在模板外绑扎好，然后将其放入模板中。在放梁的过程中，由于工人的不当操作，1#应变传感器被拉断，其余 6 个光纤光栅传感器全部成活，说明我们所采用的光纤光栅传感系统的保护工艺适用于本工程。

综合实验楼施工阶段的监测

综合实验楼的主体结构的建造历时 8 个月。光纤光栅传感器经受住了考验，工作状态良好，由此说明我们的保护措施是行之有效的，并且光纤光栅传感器适于结构的长期健康监测。

1. 温度变化

利用光纤光栅传感器监测了大楼在施工过程中的温度变化如图 8.7 所示。

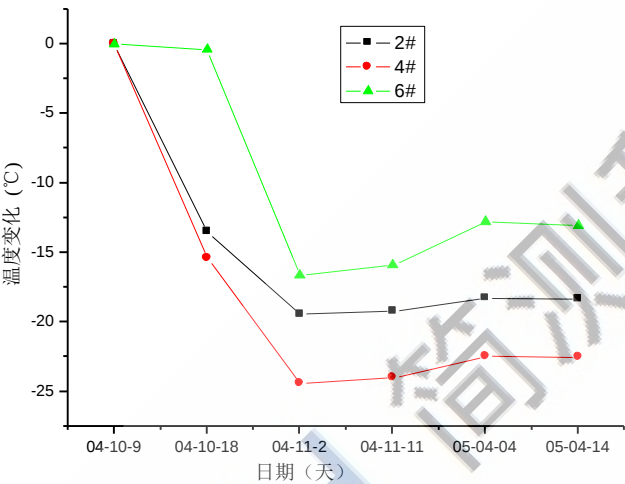


图 8.7 监测点的温度变化曲线

监测点施工时的工况如表 8.2 所示。

图 8.7 中 2#和 4#为一层框架梁监测位置的温度变化，6#为二层框架柱上柱根处的温度变化，从图中可看出，在历时 8 个月的施工过程中，梁柱的温度变化趋势基本一致。在监测时间为 04-10-18 处，柱上的温度变化与梁上的不一致，这是因为在一层框架梁浇筑完成几天后才开始浇筑二层框架柱，在该监测时间，框架梁上的混凝土已基本完成了放热过程，而框架柱还处在放热过程，所以在该监测时间，框架柱的温度相对要高一些。

表 8.2 监测工况

日期	工 况
04-10-09	一层框架梁、柱及一层楼面板浇筑完毕，模板未拆，浇筑时间为 10 月 8 日晚 22：00，监测时间为 10 月 9 日下午 4：00，监测时间为浇筑完 18 小时后
04-10-18	二层框架梁、柱及二层楼面板浇筑完毕，一层和二层的模板都没有拆，二层模板支架支撑在一层楼面及框架梁上，浇筑时间为 10 月 16 日下午 4：00，监测时间为 10 月 18 日上午 9：30，监测时间为浇筑完毕 38 小时

04-11-02	三层、四层框架梁、柱及楼面板浇筑完毕，二层部分模板的支架已经拆除，拆除的模板及模板支架都摆放在二层楼板上，测试框架梁上仍有两个支架支撑在上面，四层的浇筑时间为 10 月 29 日上午 8:30，监测时间为 11 月 2 日上午 10:00
04-11-11	底层、二层的支架全部拆除，五层的浇筑时间为 11 月 8 日下午 2:00，用于砌筑墙体的空心砖摆放在待测框架梁上，监测时间为 11 月 11 日上午 10:30
05-04-04	结构的主体于 04 年 11 月末全部完工，这段时间对结构的墙面进行抹灰处理，门、窗还未安装，外墙面也未贴面砖，二层未抹灰
05-04-14	二层抹灰完成，门、窗未安装

2. 应变变化

利用光纤光栅传感器监测了大楼在施工过程中的应变变化如图 8.8-图 8.10 所示，图中给出的应变变化为经过温度补偿后的结构的实际应变变化。图中 3#和 5#传感器测得的应变为梁上的应变，7#点为柱上的应变。从图中可看出，梁上的应变在施工结束时为拉应变，而柱上的施工结束的应变为压应变，监测结果与实际相符。

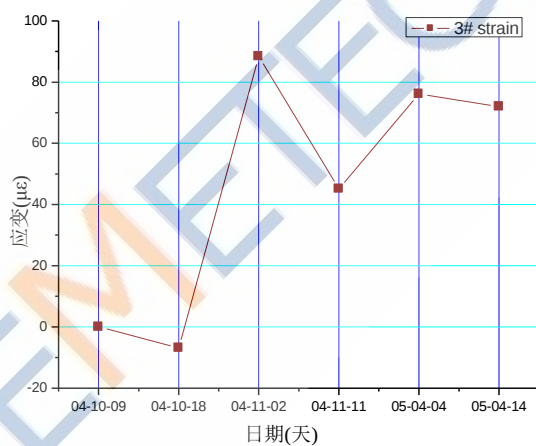


图 8.8 3#光纤光栅应变传感器

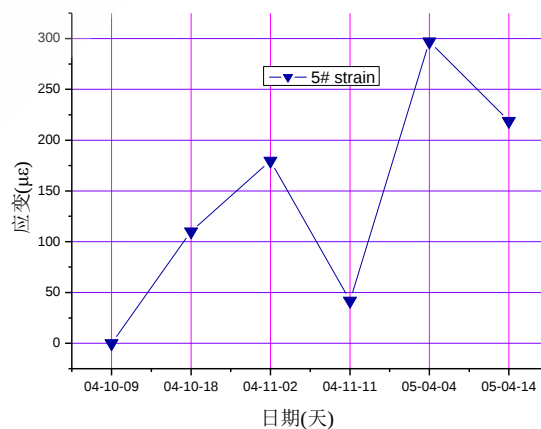


图 8.9 5#光纤光栅应变传感器

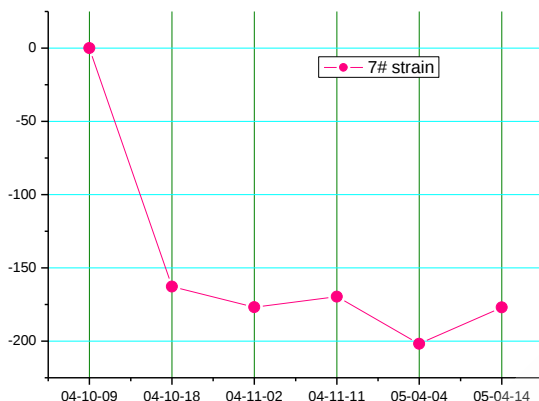


图 8.10 7# 光纤光栅应变传感器监测到的应变变化

基于这些监测数据，可以分析结构的荷载累积，对结构的设计提出建议，从而合理降低结构的造价。该光纤光栅传感系统还可用于今后的应变与温度的监测，用来分析结构的累积损伤，判断结构的整体安全性。

小结

本节基于光纤光栅的应变与温度的特性，将自行研制的光纤光栅应变与温度传感器成功地应用到正在施工的大连理工大学综合实验楼施工过程的温度与应变监测中，探讨了光纤光栅传感器的布设工艺与保护措施。结果表明，对光纤光栅传感网络的保护措施是行之有效的；自行研制的光纤光栅应变传感器具有很好的耐久性与稳定性；光纤光栅传感器可以监测结构的施工变形，是一种有效的施工监测手段。可作为该结构今后长期监测变形与温度系统健康监测手段。此种方法是在建造钢筋混凝土结构的恶劣环境条件下监测的理想手段。如果进一步将多个光纤光栅传感器埋入混凝土结构内的关键部位组成多个光纤测量网络，即可以在大型混凝土结构施工中实现结构内部应变与温度的分布状况的监测，从而实现结构进行长期实时在线健康监测。为改善施工工艺和建筑设计优化以及减少建设的初期投资提供建议与参考，并为提高施工质量提供准确的参考数据。