

文章编号: 1001-4888(2005)01-0023-07

# 光纤光栅传感器在大体积混凝土 基础温度监测中的应用\*

赵 鸣, 何 涛, 李 杰

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 光纤光栅传感器具有体积小、质量轻、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、传输频带较宽、易于进行分布式测量等诸多其他传感器所不具备的优点,更适用于现场的长期健康监测。大体积混凝土在施工过程中的温度问题如处理不当将会引起混凝土开裂。利用温度计、热电偶等作为传感器的传统的检测手段已经大大的制约了数据的准确性与精度。寻求一种高精度温度检测手段已经成为用于现场结构监测的前提。本文结合具体的工程实例介绍了光纤光栅传感器在基础混凝土温度监测中的应用,介绍了监测系统的组成,传感器的构造和标定,并利用实测温度预测基础混凝土底板中温度应力,及时采取措施防止混凝土的开裂。

**关键词:** 光纤光栅传感器; 健康监测; 温度应力

**中图分类号:** TU375      **文献标识码:** A

## 1 引言

所谓大体积混凝土结构,是指整个结构尺寸已经大到必须采取相应技术措施来妥善处理温度差值,合理解决温度应力并控制裂缝开展的混凝土结构。因此对大体积混凝土结构基础温度在施工期过程中的监测显得尤其重要,但是利用温度计、热电偶等作为传感器的传统的检测手段已经大大的制约了数据的准确性与精度。寻求一种高精度温度检测手段已经成为用于现场结构监测的前提。根据光纤光栅所具备的高精度绝对测量、准分布式数字测量、抗电磁干扰、耐腐蚀、构造简单、使用方便等诸多优点,本文采用光纤光栅温度监测技术来对大体积混凝土的基础温度进行长期的温度监测,从而控制施工过程中的混凝土的温度应力,防止混凝土的开裂。

## 2 光纤光栅传感器的原理

光纤布拉格光栅传感器中利用的光纤光栅是沿光纤轴向折射率周期变化的一种光栅,根据耦合模理论,当宽带光在光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating)中传输时,产生模式耦合,其布拉格反射峰波长  $\lambda_b$  与光纤光栅周期  $\Lambda$  的关系为:

$$\lambda_b = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中  $n$  为光纤的有效折射率。

可导致  $\Lambda$  和  $n$  改变的物理量如温度、应变等均可用 FBG 测量。通常的光会全部穿过布拉格光栅而不受影响,只有特定波长的光(波长为  $\lambda_b$ ) 在布拉格光栅处反射后会再返回到原来的方向(图 1)<sup>[1]</sup>。

在布拉格光栅处施加外力或温度改变,光栅的间隔产生变化后,反射回来的光的波长也会相应发生

\* 收稿日期: 2004-06-06; 修订日期: 2004-12-09

通讯作者: 赵鸣(1963-), 博士, 副教授, 主要从事结构安全检测与监测的研究。E-mail: zhaom@mail.tongji.edu.cn



图1 光纤光栅结构及原理

Fig. 1 The principle and structure of optic fiber grating

变化。布拉格波长  $\lambda_b$  同时受布拉格光栅周期和纤芯有效折射率扰动的影响,因而通过监测布拉格波长的变化即可测出应变和温度扰动。FBG 反射光的中心波长随应变和温度变化的位移为:

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b(1 - \rho_a)\Delta\varepsilon + \lambda_b(1 + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中:  $\Delta\lambda_b$  为应力和温度变化引起的反射波长的改变;  $\Delta\varepsilon$  为应变的变化;  $\Delta T$  为温度的变化量;  $\rho_a$  为光纤的光弹系数;  $\xi$  为光纤的热光系数。当  $\Delta\varepsilon=0$  时,则  $\Delta\lambda_b = \lambda_b(1 + \xi)\Delta T$ ,即反射光波长的变化量与温度的变化量成正比,故对光纤光栅传感器进行温度标定,即可测量绝对温度。标定方法如下:在恒温箱中  $T_1$  °C 时,测量光栅波长  $\lambda_1$ ,在  $T_2$  °C 时,测量光栅波长  $\lambda_2$ ,由于波长和温度呈线性变化,得斜率  $K$ :

$$K = \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

若测量时波长为  $\lambda'$ ,则此时传感器测点处的温度应为:

$$T' = \frac{\lambda' - \lambda_1}{K} + T_1 \quad (4)$$

### 3 光纤光栅温度监测系统

#### 3.1 工程概况

苏州工业园区现代大厦位于苏州工业园区内,采用框架核心筒结构体系,地上 20 层,地下 2 层,结构高度 98.595m,基础为桩加筏板结构形式,主楼下基础底板厚为 2.5m,核心筒基础厚 7.8m,混凝土底板长 118m,宽 48m。混凝土设计强度为 C40。基础底板混凝土施工采用连续浇注。由于基础底板比较大,在浇筑混凝土的过程中混凝土会产生大量的水化热,当混凝土内部温差超过一定限度时,其内部温度应力就会引起混凝土产生裂缝。因此需要监测混凝土表面温度和内部最高温度及其温差值。通过在混凝土内部埋置光纤光栅传感器来对在浇筑以及养护过程中的温度变化进行实时监测,预测基础混凝土中的温度应力,以便及时采取措施控制混凝土的最大温差,从而确保基础底板混凝土的施工质量。

#### 3.2 监测系统

该基础厚度分别有 2.5m、6m、7m,采用光纤光栅传感器(见图 2)进行测温。光纤光栅传感器采用金属套筒保护,使传感器在感受温度变化的同时可以自由伸缩不变形。同时由于我们测量的温度并非瞬时的,而是一个稳定的温度,所以可以认为有足够的时间与套筒里的空气进行热交换,从而可以确保光纤光栅传感器测量的温度就是实际混凝土的温度。在基础混凝土浇注前,先将光纤光栅温度传感器埋设在测点处,并与解调器相接,通过计算机采集波长信号,并转换为温度值,监测系统构成如图 3 所示。由于在电梯井处厚度比较大,水化热就比较大,温差更大,因此这两处应被列为重点测温区。分别在三个测区共布置 13 个光纤光栅传感器,其中测区 1(2.5m 板厚)有 3 个传感器,测区 2(7m 板厚)和测区 3(6m 板厚)分别有 5 个传感器。传感器布置示意图如图 4、5 所示(图中涂黑圆圈代表测区)。温度传感器在安装前,在试验室对其进行标



图2 光纤光栅温度传感器

Fig. 2 Fiber Bragg Grating sensor

温度传感器在安装前,在试验室对其进行标

定,可直接测定混凝土中的温度值。测温结果表明,上述测温点的布置方法具有较好的代表性。

### 3.3 监测数据的采集

本工程基础混凝土自 2004 年 1 月 5 日下午开始浇筑到 1 月 7 日早晨浇筑完毕,我们实时的对各个测区的传感器位置的混凝土温度进行了共 12 天的监测。每天记录一份监测数据报告(前日 12 点~当日 10 点,每 2 小时记录数据一次各传感器的温度,每 6 个小时测量一次气温)。最后汇总出三个测区各个传感器在 12 天内的温度变化曲线,并绘出各个测区的最大温差曲线,见图 5,6。

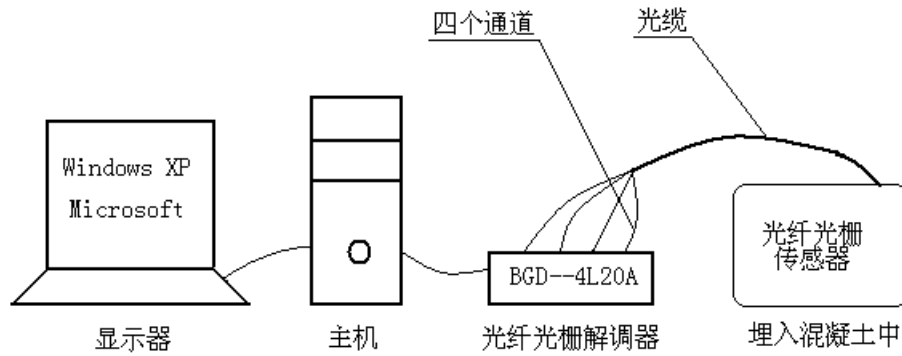
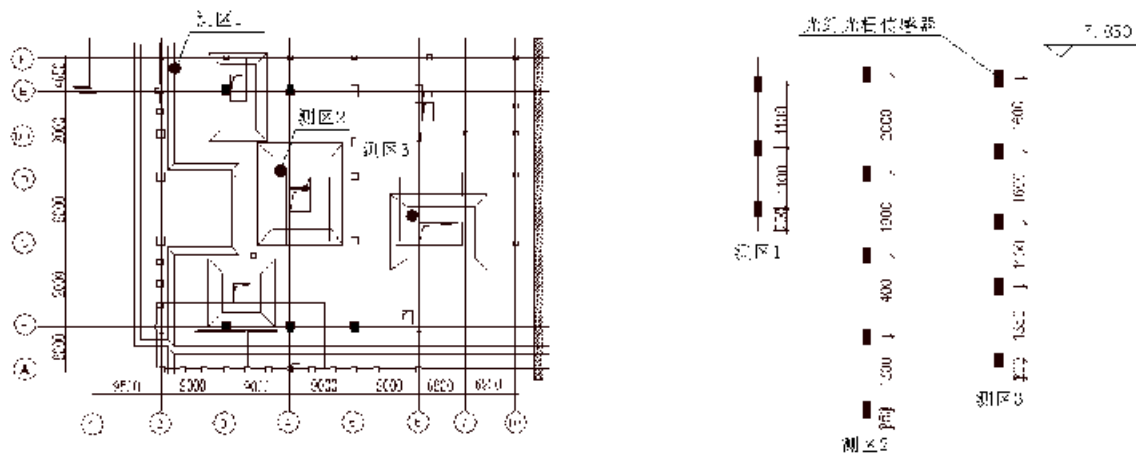


图 3 监测系统构成图

Fig. 3 The temperature monitoring system of FBG in this project



(a) 光纤传感器位置平面示意图

(b) 三个测区传感器竖向位置详图

Fig. 4 The sketch of location of FBG sensors

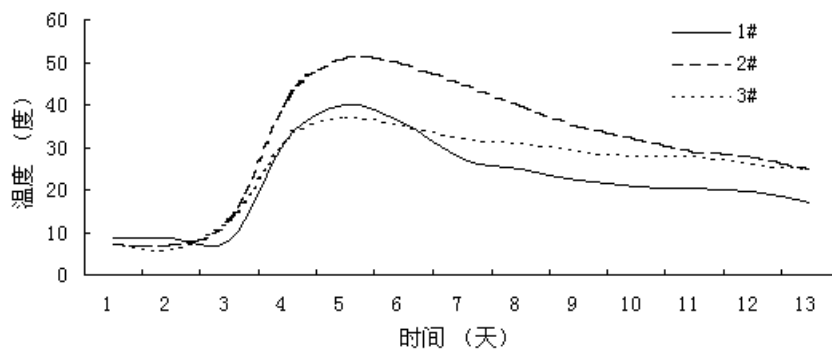


图 5-a 测区 1 各个传感器的温度变化曲线图

Fig. 5-a The variational curve of temperature of each sensor in zone 1

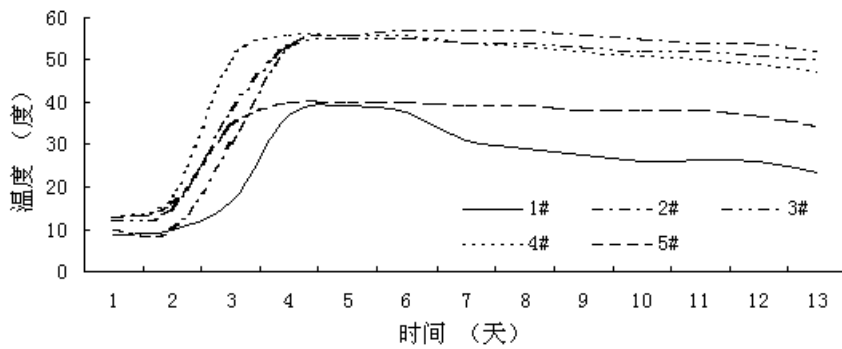


图 5-b 测区 2 各个传感器的温度变化曲线图

Fig5-b The variational curve of temperature of each sensor in zone 2

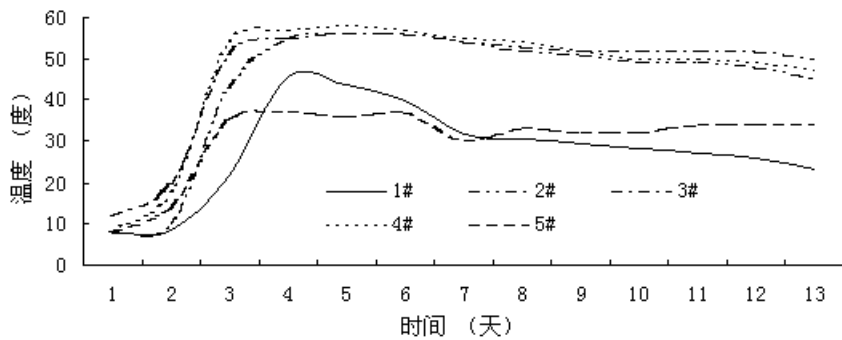


图 5-c 测区 3 各个传感器的温度变化曲线图

Fig5-c The variational curve of temperature of each sensor in zone 3

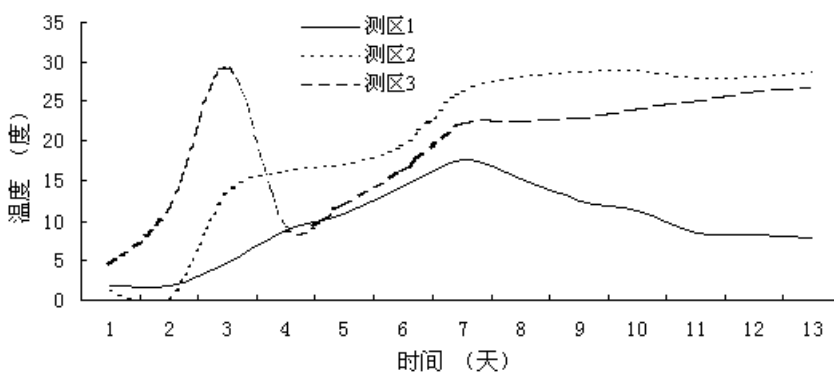


图 6 各个测区的最大温差变化曲线图

Fig. 6 The heaviest difference in temperature curve of measuring zones

#### 4 混凝土温度应力的预测

根据基础底板混凝土的实测温度,考虑混凝土的收缩后,即可算出基础底板中的温度应力的最大值。考虑到早龄期混凝土的强度随时间增长的特点,将基础底板中混凝土温度应力与混凝土抗拉强度相比较,就可预测混凝土是否会开裂。

### 4.1 实测值与理论值的对比<sup>[3]</sup>

混凝土内部的中心温度,可按下式计算:

$$T_{\max} = T_j + \frac{WQ}{c\rho}(1 - e^{-m\xi}) \quad (5)$$

$T_j$  为混凝土的浇筑温度(°C); $W$  为每  $m^3$  混凝土中水泥用量( $kg/m^3$ ); $Q$  为每  $kg$  水泥水化热量( $kJ/kg$ ); $c$  为混凝土的比热,在计算时取  $0.97(kJ/kg \cdot K)$ ;  $\rho$  为混凝土的容重,取  $2400kg/m^3$ ;  $e$  为常数,为  $2.718$ ;  $m$  为随水泥品种、比表面及浇筑温度而异,按文献[3]第 35 页表 3—5 取值; $\xi$  为不同浇筑块厚度的温降系数,按文献[3]第 46 页表 3—9、图 3—5 取值;混凝土的表面温度,可按下式计算:

$$T_{b(\tau)} = T'_q + \frac{4}{H^2} h'(H - h') \Delta T_{(\tau)} \quad (6)$$

$T_{b(\tau)}$  为龄期  $\tau$  时,混凝土的表面温度(°C); $T'_q$  为龄期  $\tau$  时,大气的平均温度(°C); $H$  为混凝土的计算厚度(m), $H = h + h'$ ;  $h$  为混凝土的实际厚度(m); $h'$  为混凝土的虚厚度(m),可按  $h' = K \cdot \lambda / \beta$  计算,其中  $\lambda$  为混凝土的导热系数,取  $2.33W/m \cdot K$ ;  $\beta$  为混凝土模板及保温层的热传系数( $W/m^2 \cdot K$ ),  $\beta =$

$\frac{1}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\beta_q}}$ ,  $\delta_i$  为各种保温材料的厚度(m), $\lambda_i$  为各种保温材料的导热系数( $W/m \cdot K$ ),按文献[3]第 52

页表 3—11 取值, $\beta_q$  为空气层传热系数,可取  $23W/m^2 \cdot K$ ;  $K$  为计算折减系数,取  $0.666$ ;  $\Delta T_{(\tau)}$  为龄期  $\tau$  时,混凝土的中心温度与外界气温之差(°C)。

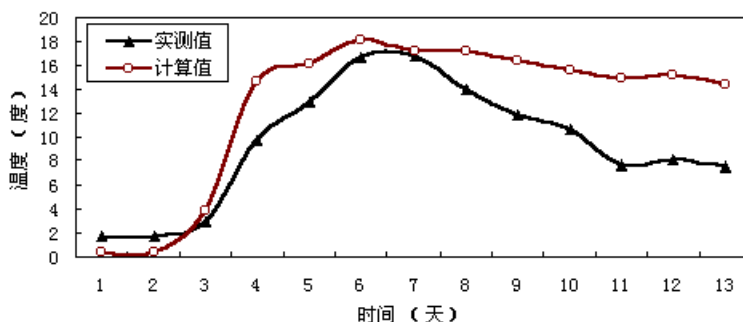


图 7 测区 1 的最大温差计算值与实测值的对比

Fig. 7 The comparison of calculation and measurement of the most difference temperature in zone 1

根据混凝土的级配比可计算出各测点的温度计算值,与实测值进行对比,可以很好的复核实测的可靠性,现以测区 1 的最大温差为例,计算结果与实测结果对比如图 7,可得出变化大致趋势一致,且最高温差相近。这说明采用本文的温度监测系统是可靠的。

### 4.2 混凝土的温度应力和强度

为简化分析,按平面问题计算底板中的温度应力。根据文[3],考虑二维时的混凝土的温度收缩应力可以按下式计算:

$$\sigma = - \frac{E_{(\tau)} \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \mu} S_{h(\tau)} \cdot R_K \quad (7)$$

$\sigma$  为混凝土的温度应力(MPa); $E_{(\tau)}$  为混凝土龄期  $\tau$  时的弹性模量(MPa); $E_{(\tau)} = E_h(1 - e^{-0.09\tau})$ ,其中  $E_h$  为混凝土的最终弹性模量,按文献[3]第 26 页表 2—13 取值, $\tau$  为混凝土从浇筑后到计算时的天数; $\alpha$  为混凝土的线膨胀系数,取  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ;  $\Delta T$  为混凝土的最大综合温度差,当混凝土浇筑后,按实测混凝土的温度进行复核,可按下式计算: $\Delta T = T_1 + \frac{2}{3}(T_2 - T_1) + T_{y(\tau)} - T_q$ ,其中  $T_1$  为实测混凝土的表面温度(°C), $T_2$  为实测混凝土中心最高温度(°C);  $T_{y(\tau)}$  为混凝土收缩当量温差(°C), $T_{y(\tau)} = - \frac{\epsilon_s^0(1 - e^{-0.01\tau}) \times M_1 \times M_2 \times LL \times M_n}{\alpha}$ ,  $\epsilon_s^0$  为混凝土在标准状态下的最终收缩值,取  $3.24 \times 10^{-4}/^{\circ}C$ ,  $M_1$ ,

$M_2 LL$ ,  $M_n$  为考虑各种非标准条件下的修正系数,可按文献[3]第 65 页表 4—1 取值;  $T_q$  为混凝土浇筑后达到稳定时的温度,一般根据历年气象资料取当地年平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $S_{h(\tau)}$  为考虑徐变影响的松弛系数,按文献[3]第 68 页表 4—2 取值;  $R_K$  为混凝土的外约束系数,当为岩石地基时  $R_K=1$ ,当为可滑动的垫层时  $R_K=0$ ,一般地基时  $R_K=0.25:0.50$ ;  $\mu$  为混凝土的泊松比,取 0.15。

对早龄期混凝土,其抗拉强度按下式计算<sup>[4]</sup>

$$R_t(\tau) = 0.50 \cdot R_c(\tau)^{2/3} = 0.50 \cdot \{R_{28} [1 + m \ln(\tau/28)]\}^{2/3} \quad (8)$$

$R_t(\tau)$  为混凝土的轴向抗拉强度;  $R_c(\tau)$  为龄期  $\tau$  的混凝土抗压强度;  $R_{28}$  为 28d 龄期混凝土抗压强度;  $R_{28} = AR_{28}^c (\frac{C}{W} - B)$ , 式中  $C$  为水泥用量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $W$  为用水量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $R_{28}^c$  为 28d 龄期水泥强度(软练法);  $A, B$  为试验系数,见文献[4]第 143 页表 7—2—1;  $m$  为系数,与水泥品种有关,矿渣硅酸盐水泥  $m=0.2471$ ,普通硅酸盐水泥  $m=0.1727$ ,普通硅酸盐水泥,掺 60% 粉煤灰  $m=0.3817$ 。

#### 4.3 混凝土温度开裂预测

根据上述公式,可以计算出不同龄期时混凝土的实际强度以及根据实测温度计算出混凝土底板的温度应力,如图 8 所示,如若温度应力大于混凝土当时龄期的抗拉强度,即可判定混凝土中会产生裂缝。据此,可以预测基础底板是否会产生温度裂缝。图中可见,在施工的前 4 天是最危险的时段,故在施工的前一周内,必须加强温度监测和保温措施。

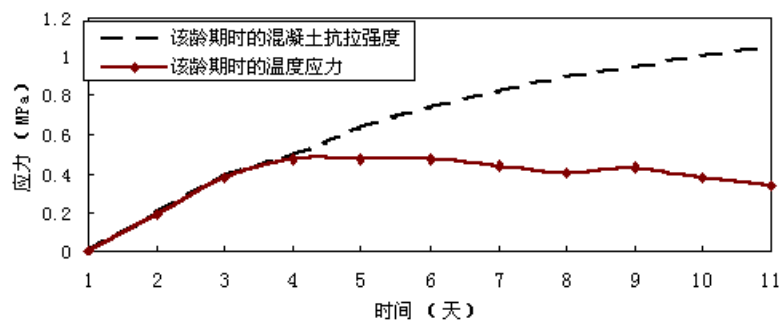


图 8 不同龄期时混凝土强度与温度应力

fig. 8 The relation of the temperature stress and the tensile intensity of concrete in different periods

## 5 监测结果分析

从上述实例数据可以看出,监测的数据比较稳定,监测技术比较理想,对监测结果分析如下:

(1) 混凝土水化热大致在浇筑混凝土第三天至第五天达到最大,2.5m 板厚处的混凝土水化热要比 6m 和 7m 板厚处小,6m 和 7m 板厚处温差较大。

(2) 1月7日浇筑完混凝土即用2层麻袋进行保温,2.5m 板厚处的温差一直控制在  $20^{\circ}\text{C}$ ,但是在 6m 和 7m 板厚处的温差比较大,最大时达到近  $30^{\circ}\text{C}$ ,温差每天呈上升的趋势,并且气温越来越低,而此时混凝土的温度应力已接近其抗拉强度,因此,根据监测结果,在 1月11日在 6m 和 7m 板厚处又分别加上了第 3 层麻袋进行保温,使得后面一段时间温差趋于稳定。现基础混凝土底板已完工,未发现温度裂缝。这说明采取的措施是有效的。

(3) 测区 2 内部的混凝土最高温度不是在底板的中心处,而是在偏上的第 2 个传感器处,可能是由于周围的底板是 2.5m 厚度,在此处的热量难以散去的缘故。

## 6 小结

大体积混凝土以及高层建筑基础的施工过程中的温度裂缝问题一直受到工程界的广泛关注。对施工过程中的混凝土温度进行监测,根据监测结果采取相应的措施是控制施工质量的有效措施之一。本文介绍了光纤光栅传感器在监测混凝土温度当中的应用。根据本文的监测结果,在施工过程中加强了

保温措施,避免了基础中出现温度裂缝。通过本工程测温实例,对今后的类似工程有一定的参考价值。显然,本文提出的光纤光栅温度监测系统也可用于大坝、水池等施工过程中易出现温度裂缝问题的结构的施工监测。

#### 参考文献:

- [1] 姜德生,罗裴,梁磊. 光纤布拉格光栅传感器与基于应变模态理论的结构损伤识别[J]. 仪表技术与传感器, 2003, (2):17~19(Desheng Jiang, Pei Luo, Lei Liang. Fiber Bragg Grating sensors and structure damage identification based on strain mode theory. Instrument technology and Sensor, 2003,(2):17~19 (in Chinese))
- [2] 赵鸣,何涛. 苏州工业园区现代大厦基础混凝土温度监测报告[D]. 同济大学,2004年(Ming Zhao, Tao He. The monitoring report of base concrete temperature of Modern mansion in Industry Garden of Suzhou, Tongji University. 2004 (in Chinese))
- [3] 叶琳昌,沈义. 大体积混凝土施工[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987年(Linchang Ye, Yi Shen. The construction of large volume concrete. Architecture Industry Publication of China, Beijing. 1987 (in Chinese))
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999年(Bofang Zhu. The temperature stress and temperature control of large volume concrete. Electric Power Publication of China, Beijing. 1999 (in Chinese))
- [5] 赵占朝,郑爱萍,刘军. 埋入混凝土的光纤传感器包层力学特性研究[J]. 实验力学,1996,11(2),:103~109 (Zhanchao Zhao, Aiping Zheng, Jun Liu. Mechanical Behavior of Coatings for Optical Fiber Sensors Embedded in Concrete. Journal of Experimental Mechanics, 1996, 11(2):103~109 (in Chinese))
- [6] 张博明,杜善义. 光纤模斑谱传感器复合材料固化监测研究[J]. 实验力学,1998,13(4):560~564 (Boming Zhang, Shanyi Du. Curing Process Monitoring for Composite Materials by Using Fiber Optic Sensor. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(4):560~564 (in Chinese))
- [7] 任鹏,汤立群等. 光纤光栅传感器对钢筋混凝土内部应变的测量及温度效应的研究[J]. 实验力学,2003,18(2):234~238 (Peng Ren, Liqun Tang, et al. The Research of Strain Measurement and Temperature Effect inside Concrete for Fiber Grating Sensor. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2):234~238 (in Chinese))

## The Application of the Fiber Bragg Grating Sensors in the Temperature Monitoring of the Large Volume Concrete Foundation

ZHAO Ming, HE Tao, LI Jie

(Department of Civil Engineering of Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The Fiber optic sensor is a new-type sensor that has been developed in recent years. An optical fiber sensor is characterized by light weight, small volume, high sensitive, anticorrosion, against electric-magnetic wave, wide transmission frequency band and could be designed in distributed way, which the other sensors do not have. So it is suitable for the health monitoring in a long period. Utilizing the traditional sensors such as thermometer, thermoelectric coupling which would restrict the accuracy and precision of the gathered data. Seeking for one kind of high accuracy temperature detection means has already become the premise of the on-the-spot structure monitoring. This paper presents a case study of the application of Fiber Bragg Grating sensors in basic concrete temperature monitoring of a mat foundation construction of a tall building. According to the temperature monitoring results, a more severe isolation method is proposed during the curing period of the mat foundation, preventing the formation of the temperature cracks in the mat.

**Key words:** Fiber Bragg Grating sensors; health monitoring; temperature stress