

文章编号:1673-2049(2007)03-0051-05

光纤光栅传感器在桥墩模型试验中的应用

汪日光¹, 叶献国², 孙汝蛟³, 孙利民³

(1. 安徽建筑工业学院 机械与电气工程系, 安徽 合肥 230022; 2. 合肥工业大学 土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:针对光纤光栅传感器在不同受力情况下的测量效果,选取了3个分别采用Pushover和拟静力加载的钢筋混凝土桥墩模型,运用光纤光栅传感器和电阻应变片及电阻位移计,对模型的钢筋和混凝土应变及顶部水平位移进行了同步测量(共9组测量对比试验)。通过比较2类传感器在同一时刻的测量值和整个加载过程的时间-应变(位移)曲线,并结合试验结果对其中差异做了分析。结果表明,2类传感器量测结果符合较好,光纤光栅应用于应变、位移的测量是可靠的、有效的。最后对此类试验中需要注意的问题提出了建议。

关键词:光纤光栅传感器;应变片;位移计;模型试验

中图分类号:TU443.22 **文献标志码:**A

Application of Fiber Grating Sensor on Experiment of Bridge Pier Model

WANG Ri-guang¹, YE Xian-guo², SUN Ru-jiao³, SUN Li-min³

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei 230022, Anhui, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aimed at finding out the measure effect of fiber grating sensor under different loads, the Pushover and pseudo-static experiment were carried out for three reinforced concrete bridge pier models; the strains of the steel bar and concrete as well as horizontal displacements on top of the model were measured simultaneously by using the fiber grating sensor and the strain gauge (9 groups measure contrast tests). The simultaneous measured values and the time-strain (displacement) curves coming from two types of sensor were contrasted, and the points with more dispersion were analyzed according to the fact of experiment. The results demonstrate that the two groups of data are well corresponding. It is dependable and effective that the fiber grating sensor can be applied to measure the strain and displacement. Finally, authors put forward some advices which needed to pay attention to research of this type of experiments in future.

Key words: fiber grating sensor; strain gauge; displacement sensor; model test

0 引言

以光纤布拉格光栅为主的光纤光栅传感器是一

种新型的光纤无源器件。它与传统的传感器相比具有一系列的优点,如灵敏度高、耐腐蚀、电绝缘、防爆性好、抗电磁干扰、光路可挠曲、易与计算机连接、便

收稿日期:2007-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50178053);北京市重点实验室开放基金项目(EESR2002-4)

作者简介:汪日光(1972-),男,安徽宁国人,讲师,工学硕士,E-mail:yexiang@mail.hf.ah.cn.

于遥控测量等,而且结构简单、尺寸小、质量轻、频带宽,可进行温度、应变、压力等多种参数的分布式测量^[1],并且光纤光栅传感器的信号不受光纤弯曲损耗、连接损耗、光源起伏和探测器老化等因素的影响。到目前为止,光纤光栅传感器已应用在桥梁、大坝、大型建筑、石化、电力、钢铁、核工业、飞机船舶制造、医疗等领域^[2-3]。

笔者采用混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器、光纤光栅钢筋计、埋入式光纤光栅应变传感器、光纤光栅小位移计,对3个分别采用Pushover和拟静力加载的钢筋混凝土桥墩模型的混凝土表面应变、内部应变、钢筋应变及构件顶部水平位移进行了测量,并将此结果与对应的电阻传感器所测结果进行了对比和分析。

1 试验概况

试验模型截面为625 mm×250 mm,高度为1 500 mm,混凝土设计强度为C30,纵筋为 $\Phi 8$ 和 $\Phi 10$ 两种。模型、加载方式、光纤光栅传感器、电阻传感器的编号及有关参数见表1。光纤光栅钢筋计、埋入式光纤光栅应变传感器、光纤光栅小位移计的安装位置如图1所示。

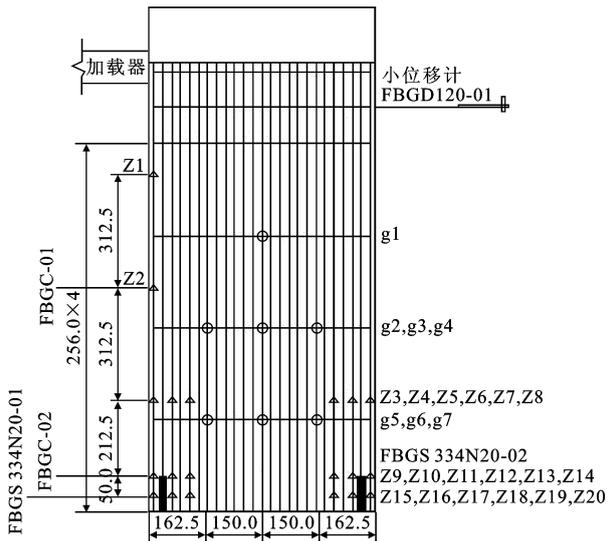


图1 光纤光栅传感器和电阻应变片的分布(单位:mm)

Fig. 1 Arrangement of Fiber Grating Sensor and Resistance Strain Chip (Unit: mm)

1.1 光纤光栅传感器

混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器的测量分辨率为 10^{-6} ,量程为 $\pm 1\,500 \times 10^{-6}$ 。此传感器可重复使用,主要用于测量混凝土表面的应力(应变)变化情况,也可用于测量已产生微裂的混凝土、钢筋混凝土工程裂缝的变化状况等;光纤光栅钢筋计是

测量混凝土构件中钢筋应力变化的光纤光栅传感器,其量程:拉伸为250 MPa,压缩为100 MPa,安装时黏贴于钢筋表面;埋入式光纤光栅应变传感器是专用于测量混凝土构件内部混凝土的应力变化情况的一种光纤光栅传感器,其量程为 $\pm 1\,000 \times 10^{-6}$,测量分辨率为 0.683×10^{-6} ;光纤光栅小位移计是测微小位移的传感器,其量程为0~150 mm,位移测量分辨率为0.05 mm,并且传感器元件盒内部黏贴有2根光纤光栅,可以实现温度自补偿。4种光纤光栅传感器的连接方式为FC/PC法兰连接,光纤封装方式是铠装光缆。

1.2 电阻传感器

混凝土电阻应变片型号为纸基60 mm×5 mm,电阻值为 $(119.5 \pm 0.2) \Omega$,灵敏系数为 $2.068 \times (1 \pm 0.008)$;钢筋电阻应变片型号为BE120-3AA,敏感栅为3 mm×2 mm,电阻值为 $(119.8 \pm 0.1) \Omega$,灵敏系数为 $2.16 \times (1 \pm 0.01)$;电阻位移计型号为WCY10。电阻应变片用502胶水直接黏在处理过的基底上,其中钢筋电阻应变片待焊上导线后用涂了902胶的纱布裹住,以保护应变计并满足绝缘要求。

1.3 数据采集系统

各光纤光栅传感器串联后,由光缆连接到传感网络分析仪进行解调,解调后的信号以数字的形式传回控制主机,物理量的变化曲线和数值可直接在计算机上在线观察。

电阻传感器采用英国IMP数据采集设备,采集软件为清华大学土木工程系编制的采集软件。试验开始后,2种采集系统同时开始采集数据,以便比较同一时刻的测定值。

2 结果对比分析

2.1 混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器与混凝土电阻应变片

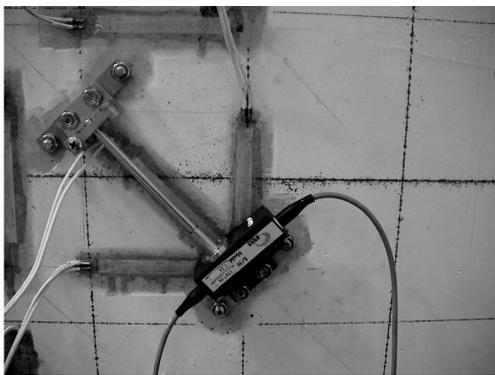
在进行测试前,先在混凝土试件上贴好混凝土应变片,然后在对比试验应变片的附近放线打孔安装混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器,安装时使光纤光栅应变传感器的杆轴线与应变片的纵向中心线对齐,以便减少位置偏差^[4]。2只光纤光栅应变传感器[编号分别为:FBGS 323R20-01(中心波长为1 547 nm)、FBGS 323R20-02(中心波长为1 534 nm)]安装于试件表面(图2),用来测量测试点处的应变变化情况,而另外1只[编号为FBGS 323R20-03(中心波长为1 537 nm)]安装在与混凝土试件同种标号的混凝土试块上,用于温度补偿。混凝土表面安

装式光纤光栅应变传感器与同一测点的电阻应变片 编号见表 1^[5]。

表 1 模型和传感器编号

Tab. 1 Numbers of Models and Sensors

模型编号	加载方式	光纤光栅传感器		电阻传感器		
		编号	名称	编号	名称	型号
P2-60	Pushover	FBGS 323R20-01	混凝土表面安装式 光纤光栅应变传感器	H8X		纸基 60 mm×5 mm
		FBGS 323R20-02		H5		
N1-40	拟静力	FBGG-01	光纤光栅钢筋计	Z2	电阻应变片	BE 120-3AA
		FBGG-02		Z15		
FBGG-01		Z2				
FBGG-02		Z15				
N2-40		FBGS 334N20-01	埋入式光纤光栅应变传感器	Z16		
		FBGS 334N20-02		Z19		
		FBGD 120-01	光纤光栅小位移计	W2	电阻位移计	WCY10



(a)FBGS 323R20-01与H8X



(b)FBGS 323R20-02与H5

图 2 混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器与混凝土电阻应变片

Fig. 2 Fiber Grating Strain Sensors-fixed on Concrete and Resistance Strain Chips of Concrete

混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器与混凝土电阻应变片所测应变值如图 3、4 所示。

图 3 中 2 条曲线差别较大,从试验过程看,在构件破坏前,有一条斜裂缝横向穿过应变传感器并将混凝土应变片撕断。FBGS 323R20-01 在 3 000 s 以后应变急剧上升,显然是裂缝出现并逐渐发展所致,因此 FBGS 323R20-01 更加符合现实。

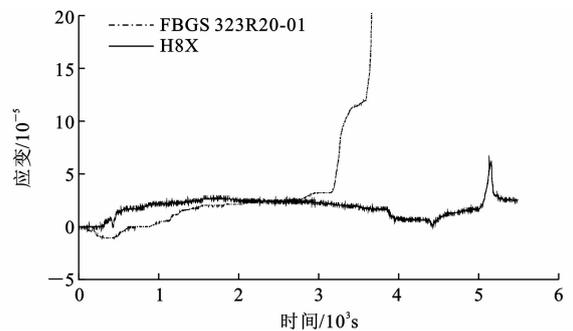


图 3 FBGS 323R20-01 与 H8X 应变对比

Fig. 3 Contrast of Strain of FBGS 323R20-01 and H8X

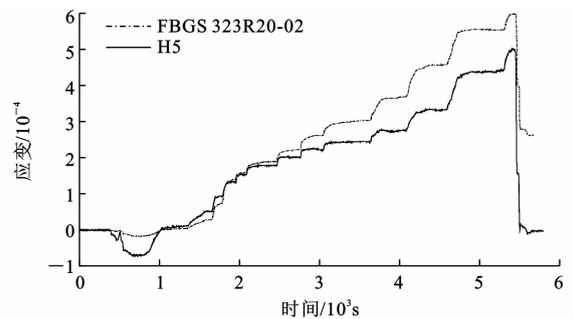


图 4 FBGS 323R20-02 与 H5 应变对比

Fig. 4 Contrast of Strain of FBGS 323R20-02 and H5

图 4 中 2 条曲线趋势及形状基本一致,只是光纤光栅传感器测量得到的应变值相对较大,造成这种现象的原因是:FBGS 323R20-02 的标距要大于电阻应变片的测量长度,因此所测得的平均应变不相同。

2.2 埋入式光纤光栅钢筋计与钢筋电阻应变片

光纤光栅钢筋计于钢筋绑扎前安装,安装前先处理钢筋表面,然后贴电阻应变片,待其凝固后,在电阻应变片所在位置的钢筋另一侧贴光纤光栅钢筋计(图 1),并同电阻应变片一起用涂了 902 胶的纱

布裹好。光纤光栅钢筋计的编号分别为 FBGG-01 (中心波长为 1 556 nm)、FBGG-02 (中心波长为 1 540 nm), 对应的电阻应变片为 Z2、Z15。

埋入式光纤光栅钢筋计与钢筋电阻应变片所测应变值如图 5、6 所示。

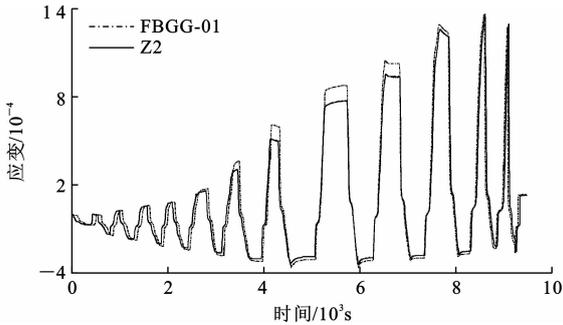


图 5 FBGG-01 与 Z2 应变对比

Fig. 5 Contrast of Strain of FBGG-01 and Z2

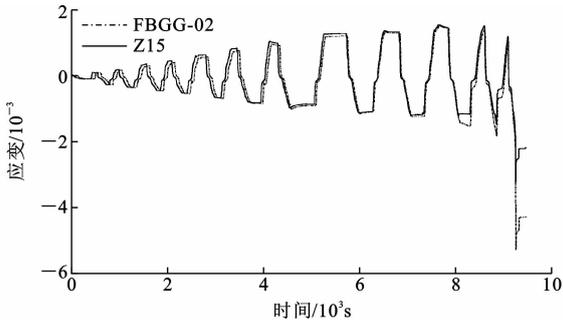


图 6 FBGG-02 与 Z15 应变对比

Fig. 6 Contrast of Strain of FBGG-02 and Z15

由图 5、6 可以看出: 光纤光栅钢筋计和电阻应变片测量得到的 2 条变化曲线的趋势以及形状基本一致。图 5 中 2 条曲线首尾基本重合, 中间段最大的应变差为 110×10^{-6} ; 图 6 中 2 条曲线符合很好, 只是最后一环的应变峰值相差 $2\ 200 \times 10^{-6}$, 可能是钢筋的应变超出了其量程, 而使所测值失真, 因此, 光纤光栅钢筋计能很好地反映试验中钢筋的应力变化情况。

2.3 埋入式光纤光栅传感器与钢筋电阻应变片

为了监测埋入式光纤光栅应变传感器的工作性能及效果, 浇注试件前, 将密封后的埋入式光纤光栅应变传感器绑扎在贴有电阻应变片的钢筋附近, 如图 7 所示。埋入式应变传感器编号为 FBGS 334N20-01 (中心波长为 1 560 nm)、FBGS 334N20-02 (中心波长为 1 563 nm), 其附近的电阻应变片分别为 Z16、Z19。

如图 8 所示, 试验的开始阶段及 2 000 s 以后的负应变方向, 曲线符合较好, 其余处测量值偏差则较



图 7 埋入式光纤光栅应变传感器

Fig. 7 Fiber Grating Strain Sensor-embedded in Concrete

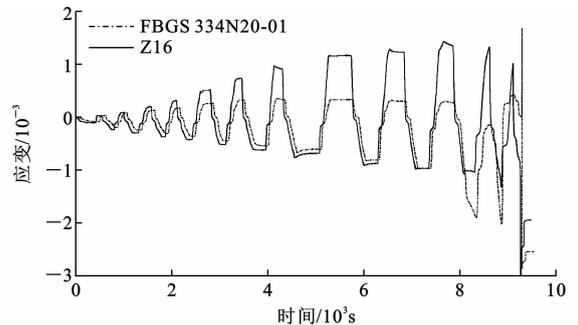


图 8 FBGS 334N20-01 与 Z16 应变对比

Fig. 8 Contrast of Strain of FBGS 334N20-01 and Z16

大, 可能是因为 2 种传感器附于不同的材料上, 随着试验的进行, 钢筋和混凝土协同工作的能力逐渐减弱; 同时从图 8 还可以看出, 试件的裂缝受力闭合时, 钢筋和混凝土的应变相当。图 9 中 FBGS 334N20-02 在 3 800 s 以后, 测试点应变超出了其量程, 造成传感器测得的应变值失真。另外, FBGS 334N20-02 在 4 500 s 以后没有数据, 可能是由于反复拉、压导致光纤光栅反射峰功率降低, 从而使数据丢失。

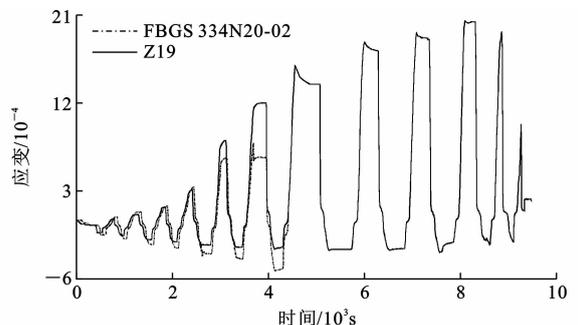


图 9 FBGS 334N20-02 与 Z19 应变对比

Fig. 9 Contrast of Strain of FBGS 334N20-02 and Z19

2.4 光纤光栅小位移计与电阻位移计

如图 10 所示, 在试件的一侧安装了光纤光栅小位移计 FBGD 120-01 (顶端与构件的测点之间用钢丝连接), 与其对应的电子位移计为 W2。

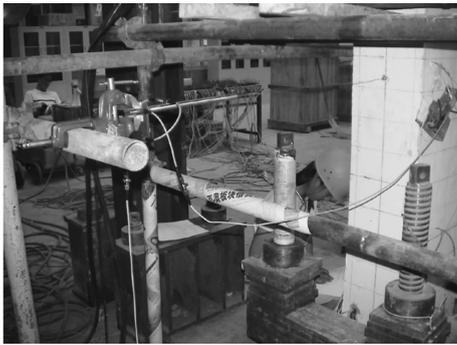


图10 FBGD 120-01 的安装

Fig. 10 Setup of FBGD 120-01

如图11所示,光纤光栅小位移计FBGD 120-01和相对应的电阻位移计W2所测的水平位移变化曲线的趋势和形状基本相同,并且在6 500 s以前接近重合。除最后一环差别较大外,倒数二、三环的峰值位移差分别为0.638、0.827、1.600、1.792 mm,由此可见,测量小变形时,这2种传感器符合得更好一些。

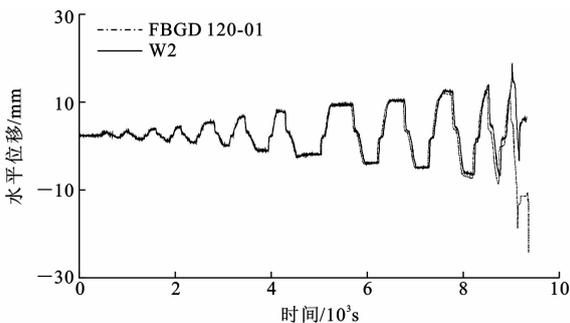


图11 FBGD 120-01 与 W2 水平位移对比

Fig. 11 Contrast of Horizontal Displacement of FBGD 120-01 and W2

3 结语

(1) 光纤传感网络分析仪的每个通道一般可以连接30个测点,最长达40个测点,避免了繁冗的导线分布,并且表面安装式光纤光栅应变传感器可以重复利用,节省了检测时间和成本。

(2) 混凝土内部的受力非常复杂,目前,对它的了解只有借助力学分析,而埋入式光纤光栅应变传感器可以直接测量混凝土内部的应变情况^[6-7],使研究人员对混凝土的认识更加深刻、精确。

(3) 通过对比表明,光纤光栅钢筋计和光纤光栅小位移计与相应的电阻传感器符合很好;混凝土表面安装式光纤光栅应变传感器与电阻应变片符合较好,在以后的对比试验中应选择较长标距的电阻应变片。

(4) 埋入式光纤光栅应变传感器在同一测点预先没有埋设专用于测量混凝土应变的电阻应变计,没有可靠的参考点,但是,根据其测量得到的应变曲线变化趋势及其曲线形状与其他传感器类似的特点,说明埋入式应变传感器处于正常的工作状态。在以后的此类对比试验中,可以加入理论应变值的对比。另外,埋入式光纤光栅应变传感器的埋入和保护^[8]也是需重点解决的问题。

参考文献:

References:

- [1] LEACH H A P, GOLD M P. Distributed Temperature Sensor in Solid-core Fibers[J]. Electron Lett, 1985, 21(23): 1 061-1 062.
- [2] GUPTA S, MIZUNAMI T, YAMAO T, et al. Fiber Bragg Grating Cryogenic Temperature Sensors[J]. Appl Opt, 1996, 35(25): 2 502-2 505.
- [3] 周智, 田石柱, 欧进萍. 光纤传感器在土木工程中的应用[J]. 建筑结构, 2002, 32(5): 65-66.
ZHOU Zhi, TIAN Shi-zhu, OU Jin-ping. The Applications of Fiber Grating Sensor in Civil Engineering[J]. Building Structure, 2002, 32(5): 65-66.
- [4] 张启伟, 周艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 54-58.
ZHANG Qi-wei, ZHOU Yan. Applicability of Bridge Health Monitoring Technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 54-58.
- [5] 张伟刚, 梁龙彬, 赵启大, 等. 光纤光栅与电阻应变片应变测量的对比分析[J]. 传感技术学报, 2001, 6(3): 200-204.
ZHANG Wei-gang, LIANG Long-bin, ZHAO Qi-da, et al. Contrast Analyses of Strain Measurement of Fiber Grating and Resistance Strain Chip[J]. Journal of Sensor and Technology, 2001, 6(3): 200-204.
- [6] ROSSI P. New Method for Detecting Cracks in Concrete Using Fiber Optics[J]. Material and Structures, 1989, 22(13): 437-442.
- [7] 杨军, 刘志海, 梁艺军, 等. 混凝土内部应变光纤测量结果及分析[J]. 实验力学, 2000, 15(4): 421-428.
YANG Jun, LIU Zhi-hai, LIANG Yi-jun, et al. Internal Strain Measuring for Concrete Specimens by Fiber Optical Sensors and Results Analysis[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(4): 421-428.
- [8] 蔡德所. 分布式光纤传感监测技术研究[J]. 广西水利水电, 2001, 28(1): 11-14.
CAI De-suo. Study on the Distributed Fiber Sensing Monitor Technique[J]. GX Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 28(1): 11-14.