

光纤光栅应变传感器在仿真混凝土拱坝模型试验中应用

李宏男^{*1}, 嵇雪霏^{1,2}, 任亮¹, 陈健云¹, 朱彤¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 中国建材国际工程集团有限公司, 上海 200093)

摘要: 采用了一种基于两端夹持不锈钢管封装技术的光纤光栅应变传感器, 利用万能试验机对该传感器进行了应变性能标定试验, 研究了不同基体材料上传感器的应变灵敏特性. 测试结果与理论结果吻合较好. 将埋入式光纤光栅应变传感器应用到仿真混凝土拱坝的抗震安全性分析试验中. 试验结果表明, 基于两端夹持封装技术的光纤光栅传感器具有良好的灵敏度、低噪以及测量长期稳定性好等优点, 可以很好地监测拱坝模型在动荷载作用下的弹性应变和启裂应变变化趋势, 是动载环境下工作的结构长期安全监测的理想器件.

关键词: 光纤光栅; 应变传感器; 模型试验
中图分类号: TU317.1 **文献标志码:** A

0 引言

大坝是一种特殊的水工建筑物, 具有投资和效益巨大的特点, 结构、边界条件及运行环境极其复杂; 为了准确判断大坝的工作状态, 需要对大坝进行安全监测. 我国在 20 世纪 60~70 年代修建的一批大坝, 由于受设计、施工质量限制, 基本没有安装安全监测系统. 随着使用年限的增长, 这一批坝体已进入不同程度的病险状态; 同时, 新建的坝体也需要进行安全监测. 鉴于上述情况, 病险库坝急需采取有效手段监测并评定其安全状况, 及时修复并控制损伤, 加强预警机制; 新建的库坝应积极考虑增设长期的健康监测与损伤控制系统, 实时地掌握工程结构的全寿命质量与安全状况, 确保大坝结构的安全、适用和耐久性^[1].

以光纤光栅和光纤传感技术为代表的信息和传感技术在近几十年来得到了飞速的发展^[2], 广泛应用于桥梁、大坝及建筑等工程领域. 光纤光栅传感器用于健康监测与传统传感技术相比, 具有以下优势: (1) 灵敏度和测量精度高; (2) 抗电磁干扰、稳定性好; (3) 耐腐蚀、耐久性好, 维护成本低; (4) 分布式或准分布式测量, 便于成网^[3].

裸光纤光栅, 直径仅有 125 μm , 抗剪能力差, 极易损坏, 除在良好的工作环境中使用外, 一般不直接使用. 在实际应用中需要先对其进行封装. 目前较常用的封装形式主要有 3 种: 基片式、嵌入式及两端夹持式.

本文采用了两端夹持式的封装方式, 这种光纤光栅传感器具有受力明确、结构简单、造价低的优点, 同时该传感器具有应变放大机制, 并可以通过改变固定支点的位置来调节增减敏系数. 这种传感器不仅可以埋入结构中, 也可以通过一些辅助构件组成夹持式传感器安装于被测结构的表面. 本文在万能试验机上对该传感器进行应变性能标定试验, 研究不同基体材料上传感器的应变灵敏特性; 并将该传感器应用于仿真混凝土拱坝的抗震安全性分析试验中, 以监测仿真混凝土拱坝模型在动荷载作用下的弹性应变和启裂应变变化趋势.

1 试验设计与准备

1.1 试验背景介绍

大岗山水电站坝址位于四川省雅安市石棉县境内. 电站正常蓄水位总库容约为 $7.42 \times 10^9 \text{ m}^3$, 调节库容 $1.17 \times 10^9 \text{ m}^3$, 具有周调节能力, 最大坝

收稿日期: 2008-11-06; 修回日期: 2010-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重点项目 90815026); 国家地震专项资助项目(200808074); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B08014).

作者简介: 李宏男^{*} (1957-), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, E-mail: hnli@dlut.edu.cn.

高 210 m, 电站为一等工程, 混凝土双曲拱坝为 1 级建筑物. 经国家地震局烈度评定委员会审查, 确定大岗山水电站工程区地震基本烈度为 8 度.

根据《水工建筑物抗震设计规范》规定, 大岗山拱坝抗震设防类别为甲类. 鉴于大岗山拱坝坝址区的地震烈度高, 且大岗山拱坝坝高超过 200 m, 拱坝的抗震安全对工程的可行性至关重要, 因此, 除了进行数值分析之外, 进行大坝动力反应和地震模型试验是十分必要的. 本文对大岗山混凝土拱坝进行振动台模型试验, 通过试验确定大坝的地震安全性.

1.2 模型设计及激励系统

本次试验模型材料采用仿真混凝土, 该材料与混凝土材料具有相似的基本均匀、线弹性和破坏断裂脆性, 试验中可以很好地反映大型混凝土结构的动力弹性—弹塑性—断裂破坏的全过程. 同时仿真材料较低的强度能方便地进行结构从弹性微振、弹塑性强振直到断裂破坏的各个不同阶段的全过程模型动力模拟试验^[4].

模型试验的激励装置采用大型双向 3 自由度水下陆上两用地震模拟系统, 可以在水平、垂直两方向同时输入地震波, 以激励出结构模型的动力特性. 试验采用人工波激励, 按地震加速度从高至低逐级加载, 实现拱坝从结构弹性微振、弹塑性强振直到断裂破坏的各个不同阶段的全过程模型动力模拟.

1.3 传感器布置及数据采集系统

本次试验的应变测试系统由管式封装光纤光栅应变传感器、波长解调器及相应软件构成. 在距离坝顶表皮 10 mm 混凝土内部埋入光纤光栅应变传感器, 用以测试在地震荷载作用下的应变变化^[5].

本试验中将 10 个夹持式封装光纤光栅应变传感器布设于模型中, 安装位置及局部图如图 1 所示, 中心波长及通道如表 1 所示.

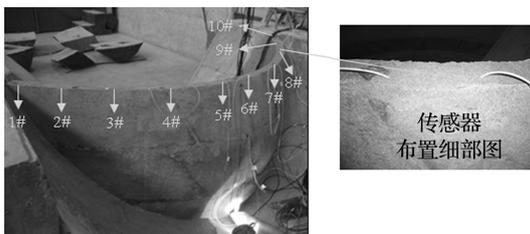


图 1 光纤光栅传感器的安装位置及局部图
Fig. 1 The positions of FBG sensors and the partial enlarged drawing after installation

表 1 光纤光栅传感器中心波长及通道

Tab. 1 The central wavelength and channel of FBG sensors

传感器	通道	中心波长/nm	传感器	通道	中心波长/nm
1#	1	1 545.56	6#	3	1 544.88
2#	1	1 548.53	7#	3	1 552.75
3#	1	1 550.95	8#	4	1 544.77
4#	2	1 548.93	9#	4	1 548.19
5#	2	1 550.90	10#	4	1 553.12

由于仿真混凝土在凝结硬化前属于干性松散材料, 一方面, 在大坝模型的制作过程中, 需要对混凝土进行振捣, 这对光纤光栅应变传感器的布设很不利; 另一方面, 如果传感器采用表面粘贴的安装方式, 粘结剂的使用会将模型表面局部加强, 使传感器与拱坝剥离, 所测数据也不能够真实反映拱坝的实际变形. 因此, 试验中将传感器埋入结构中, 为了便于安装传感器, 先将拱坝浇筑、振捣完成, 然后立即从坝顶向传感器安装位置划出深 10 mm 左右、宽 35 mm 左右的槽, 将传感器水平置入槽内, 再用振捣过的混凝土填满压实, 待混凝土凝结硬化到要求的龄期(24 h)后就可以拆模进行试验. 本次试验中除 4# 传感器由于拆模等原因出现故障, 无法正常使用外, 其他传感器在试验中均表现正常.

2 试验结果与分析

2.1 试验现场观测结果

本次试验采用人工波进行激励, 表 2 为拱坝现场观测记录, 图 2 为大岗山拱坝在试验过程中破坏的位置及状态.

表 2 拱坝现场观测记录

Tab. 2 The observation record of arch dam

地震等级	破坏描述	基底加速度/g
1	无明显裂缝	0.065
2	无明显裂缝	0.134
3	无明显裂缝	0.181
4	无明显裂缝	0.242
5	无明显裂缝	0.280
6	无明显裂缝	0.333
7	无明显裂缝	0.373
8	无明显裂缝	0.431
9	无明显裂缝	0.465
10	无明显裂缝	0.507
11	4#、7# 传感器处出现竖向裂缝	0.581
12	竖向裂缝进一步扩展, 5#、6# 传感器间出现竖向裂缝	0.696
13	5#、6# 传感器下部 20 cm 处出现横缝, 竖向裂缝贯通	0.776
14	坝顶混凝土块脱落	0.859

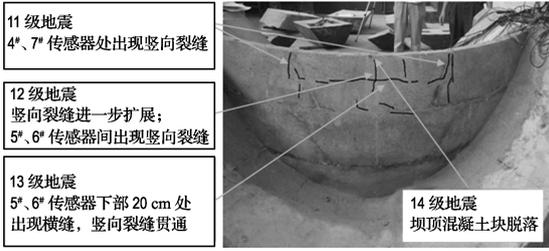


图 2 大岗山拱坝上游面破坏状态

Fig. 2 The damaged behavior of Dagangshan arch dam in the face of upstream

2.2 试验结果与数值分析结果的比较

试验前对拱坝采用有限元分析软件 ANSYS 进行数值模拟. 坝体网格模型剖分如图 3 所示. 采用八节点六面体单元进行有限元网格划分. 单元总数为 8 716, 节点数为 11 139; 坝体单元数为 2 300, 节点数为 3 190. 整个模型分为山体、底板、坝体以及模拟地基 3 部分. 山体、底板为 C30 混凝土. 根据《水工混凝土结构设计规范 SL/T 191-96》, 其弹性模量取 30 GPa, 泊松比取 0.17, 密度为 2 400 kg/m³, 动弹性模量按静弹性模量的 1.3 倍来取值. 坝体和模拟地基材料为仿真混凝土, 密度为 2 850 kg/m³, 动弹性模量为 327.4 MPa, 阻尼比为 0.043, 泊松比为 0.25. 计算时, 模型底部采用固定约束^[6].

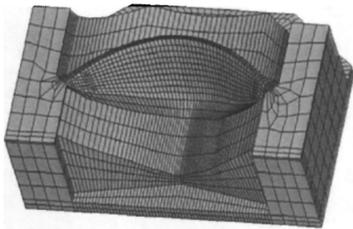


图 3 拱坝有限元网格剖分

Fig. 3 Finite element mesh of arch dam

拱坝在前 5 级地震作用下各光纤光栅应变传感器所测坝顶应变如图 4 所示, 从图中可以明显看出坝顶的应变分布, 坝顶中部应变最大, 坝顶两端应变最小; 同时, 坝顶应变随地震等级增加而逐渐增加.

表 3 为 3 级地震作用下, 光纤光栅传感器所测的坝顶拉、压峰值应变, 从结果中可以看出, 同一传感器所测峰值应变差不超过 5×10^{-6} . 当拱坝处于弹性工作状态时, 在其他各级地震作用下, 坝顶所产生的最大拉应变和最大压应变也相差不

大. 而仿真混凝土材料的抗压强度为抗拉强度的 25 倍左右, 由此可以认定拱坝的破坏是由拉应变过大造成的, 因此在试验过程及结果分析中应主要关注拱坝顶部所受拉应变的变化.

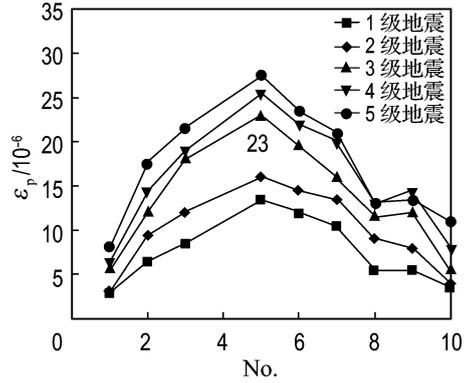


图 4 不同等级地震作用下的坝顶峰值应变
Fig. 4 The peak strain along the top of arch dam model induced by different grade input earthquakes

表 3 3 级地震下的测量应变

Tab. 3 The measured strain during the 3rd earthquake

传感器	拉峰值应变/ 10^{-6}	压峰值应变/ 10^{-6}
1#	5.5	7.5
2#	12.0	13.0
3#	18.0	18.0
5#	23.0	18.0
6#	19.5	19.0
7#	16.0	20.0
8#	11.5	13.5
9#	12.0	12.0
10#	5.5	6.5

图 5 为 3 级地震作用下 (峰值加速度为 0.18g) 人工波坝顶 2[#]、3[#]、5[#] ~ 9[#] 传感器测得的拱向拉应变试验值及相应位置处计算值. 拱向应变计算值通过 x 、 y 、 z 3 个方向应变、以及 xy 、 xz 、 yz 3 个切向应变进行分量转换得来, 其转换公式^[7] 如下:

$$\epsilon'_x = \epsilon_x l_1^2 + \epsilon_y m_1^2 + \epsilon_z n_1^2 + 2\tau_{xy} l_1 m_1 + 2\tau_{yz} m_1 n_1 + 2\tau_{xz} n_1 l_1 \quad (1)$$

其中 l_1 、 m_1 、 n_1 为新坐标系 x'_1 轴在老坐标系中的 3 个方向余弦. 新坐标系其他两坐标应变可以通过改变以上公式相应下标得出.

由图 5 中现场试验观测数据和数值分析结果对比可知, 试验监测值与理论计算值相差不大, 并

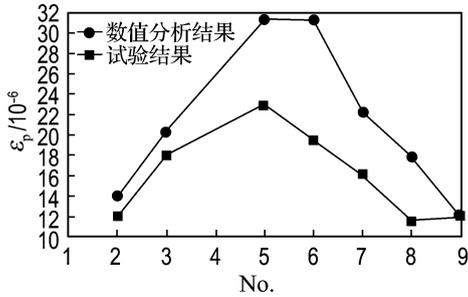


图5 3级地震下峰值应变试验结果与数值分析结果比较

Fig. 5 The comparison of peak strain between measured values and theoretical results during the 3rd earthquake

且变化趋势相同,说明夹持式光纤光栅应变传感器可以有效监测地震作用下拱顶的应变值.分析误差产生的原因如下:光纤光栅传感器自身在测量过程中存在 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 的偏差,因外界(温度、湿度等)因素干扰造成试验数据采集的偏差;有限元模型单元尺寸不够细密,对计算精度造成影响;模型材料离散性比较大,与模型完全理想化的条件不符,对物理力学性能指标测试产生影响.

2.3 大坝模型损伤识别

由于坝顶中部为拱坝的薄弱环节,在实际监测过程中更注重坝顶中部应变的变化.图6为3[#]、5[#]~8[#]光纤光栅应变传感器在前10级地震下所监测的每级地震的拉峰值应变,从图6和表2中可以看出,在最大加速度峰值为0.33g的地震波作用下,模型基本完好,处于弹性阶段.当地震波最大加速度峰值为0.37g时,坝顶中部的5[#]、6[#]、7[#]传感器的峰值应变同时出现了明显的

增加趋势,说明坝顶中部开始启裂,开裂坝段不能保持弹性的整体工作状态.伴随着地震等级的增加,5[#]、6[#]传感器应变也出现明显的增加,3[#]、7[#]次之.当地震波最大加速度峰值达到0.58g时,4[#]、7[#]传感器位置发现可见裂缝;当地震波最大加速度峰值达到0.70g时,5[#]、6[#]传感器位置也出现了明显的竖向裂缝,3[#]、7[#]传感器处裂缝也继续扩展.当输入的地震波加速度峰值达到0.86g时,坝顶中部的混凝土已出现块状脱落的现象,如图7所示.



图7 坝顶中部的破坏

Fig. 7 The damaged behavior of middle position at the top of arch dam

假定第一次地震开始前各传感器的初始应变值为零,之后每次地震动结束后应变值与初始应变之差为残余应变.图8为5[#]~7[#]传感器在前12级地震作用下残余应变的变化,可以看出当结构处于弹性工作状态时,各传感器在地震动结束后的残余应变基本为零,当结构内部出现裂缝后(第7级地震),相应位置传感器残余应变在地震前后出现明显变化,说明传感器产生了不可回复的变形,结构出现了裂缝.

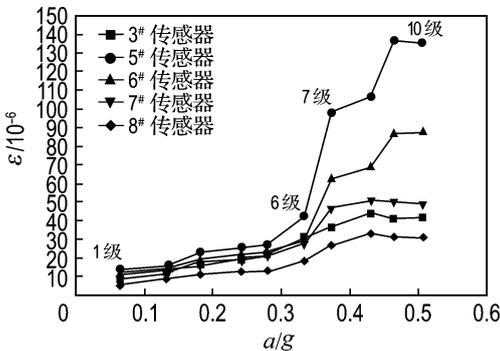


图6 3[#]、5[#]~8[#] FBG 应变传感器在各级地震下的峰值应变

Fig. 6 The maximum strain variation of 3[#], 5[#]-8[#] FBG sensors during different earthquakes

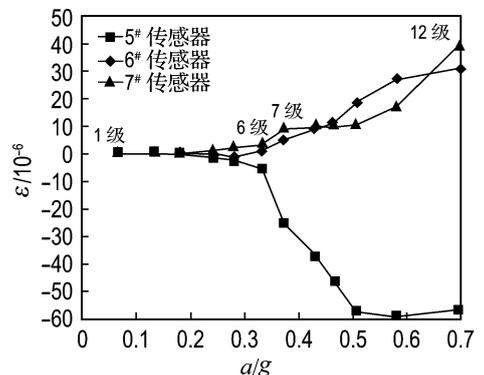
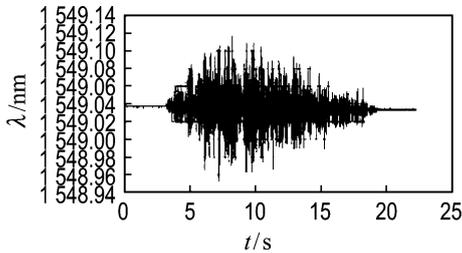


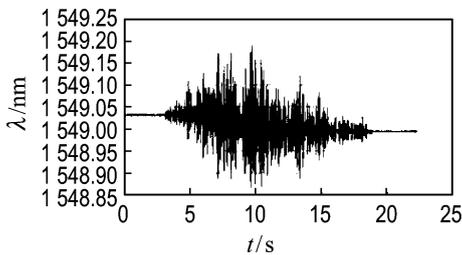
图8 5[#]~7[#] FBG 应变传感器在各级地震下的残余应变

Fig. 8 The residual strain variation of 5[#]-7[#] FBG sensors during different earthquakes

由上述分析可知,大坝在7级地震作用下产生裂缝,且主要在5[#]~7[#]传感器所埋设的部位.现绘出5[#]传感器在6、7级地震作用下的时程曲线(如图9所示),6级地震作用下,尚未产生裂缝,拱坝处于弹性阶段,传感器的中心波长在地震前后也基本保持不变;随着地震输入加速度的增加,传感器中心波长在地震前后出现明显变化,说明拱坝内部相应位置出现裂缝,产生了不可回复的变形即残余应变,坝体失去整体性.



(a) 6级地震下



(b) 7级地震下

图9 6级和7级地震下5[#]FBG传感器波长变化Fig. 9 The wavelength of 5[#] FBG sensor during the 6th and the 7th earthquake

综合对比表2、图2、6和图8、9的分析结果,可以很容易地判断出结构薄弱部位内部微裂缝出现的时间.肉眼能观察到裂缝出现的时间是地震动输入峰值为0.58g时的时段,而前面通过对薄弱部位的最大应变分析发现,结构的薄弱部位在地震动输入峰值为0.33g时已进入裂缝出现前的临界状态,在地震动输入峰值为0.37g时,一部分薄弱部位内部已经出现了微裂缝,通过这样的分析可以在结构明显裂缝出现前对结构提前预警.

我国《混凝土结构设计规范》GB 50010—2002将裂缝控制等级划分为三级:一级是严格要求不出现裂缝的构件,二级是一般要求不出现裂缝的构件,三级是允许出现裂缝的构件,但按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响计算时,构

件的最大裂缝宽度不应超过其最大裂缝宽度限值.影响建筑观感和结构耐久性的主要因素是裂缝的最大开展宽度,而设计中控制的裂缝宽度应当是某一协议概率下的相对最大裂缝宽度^[8].应用光纤光栅应变传感器对实际结构进行健康监测,对于一级和二级构件,光纤光栅应变传感器监测到的应变接近于裂缝出现时的 ϵ_{or} 就对构件进行报警;对于三级构件,应变接近于 ϵ_{or} ,提示一下,然后根据监测到的应变计算构件的最大裂缝宽度,在计算的最大裂缝宽度接近最大裂缝宽度限值时进行报警.

3 结 论

(1)光纤光栅传感网络中,各通道中串联的光纤光栅无波长交叉现象,网络中各传感器的设置合理.

(2)管式封装的光纤光栅应变传感器采用埋入式布置能够很好地与拱坝结合,并监测在地震作用下拱坝顶部的应变峰值及应变变化趋势,而且与数值分析结果吻合较好.

(3)光纤光栅应变传感器用于监测大坝应变时,从各级地震下峰值应变与基底加速度关系观察可知,当峰值应变与基底加速度呈线性增长关系时,认为结构处于弹性工作阶段;当峰值应变出现明显增加时,则说明结构内部出现裂缝,已经不能保持弹性的整体工作状态.

(4)通过对光纤光栅传感器监测到的最大拉应变及应变曲线的分析,监测到的应变变化能对结构构件的危险状态进行预警,分析的结果与实际监测到的结果一致.

(5)光纤光栅应变传感器不仅能给出单次地震动作用下的应变变化,还能通过对比前后几次的初始波长的变化,给出结构的残余应变.从光纤光栅应变传感器监测所获的时程曲线可知,当地震发生前后传感器中心波长基本保持不变,即结构在地震后的残余应变基本为零时,结构处于弹性工作状态;而当传感器的中心波长在地震前后出现明显阶跃,即残余应变出现明显增大时,则说明结构内部相应位置出现裂缝.由此可知,光纤光栅应变传感器可以对大坝健康状况进行监测和预警,也可以对大坝在各个震级作用下损伤程度给予客观的评价.

(6)该试验存在一定的不足:其中两个传感器在试验过程中信号无明显变化,还需分析是由于拆模还是其他原因造成;对于埋入式传感器的布设方法在实际应用中还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 李宏男. 结构健康监测 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005
- [2] LI Hong-nan, LI Dong-sheng, WANG Su-yan. Study and application of health monitoring by fiber optic sensors in civil engineering [J]. **American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP**, 2003, **468**:217-224
- [3] LI Hong-nan, LI Dong-sheng. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil

- engineering [J]. **Engineering Structures**, 2004, **26**(11):1647-1657
- [4] 林 皋,朱 彤,林 蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, **40**(1):1-8
(LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2000, **40**(1):1-8)
- [5] 倪汉根,金崇盘. 大坝抗震特性与抗震计算 [M]. 大连:大连理工大学出版社, 1994
- [6] 王建涌. 大岗山拱坝动力模型破坏试验研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2007
- [7] 陆明万,罗学富. 弹性理论基础 [M]. 北京:清华大学出版社, 2001
- [8] 李晓文. 钢筋混凝土结构 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004

Application of FBG strain sensors to experiments of artificial concrete dam models

LI Hong-nan^{*1}, JI Xue-heng^{1,2}, REN Liang¹, CHEN Jian-yun¹, ZHU Tong¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. China Triumph International Engineering Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: A small dimensional sensor with two holders in both sides of fiber Bragg grating (FBG), which is protected and packaged by a stainless steel tube, is used for strain measurement. Experiments were conducted on the universal material testing machine to calibrate the strain transferring characteristics in different parent materials. The strain measured by FBG sensor agrees well with the theoretical result. The tube-packaged strain FBG sensors are applied to the vibration experiments of artificial concrete dam models. The results show that this FBG strain sensor, which has the advantages of high sensitivity, low noise and long-term measure stability, can effectively monitor the changing trends of elastic strain and crack initiation strain of artificial concrete dam model in the vibration experiments. It is testified to be a promising potential instrument in long-term vibration-based structural health monitoring.

Key words: fiber Bragg grating; strain sensor; model test