

FBG 应变测试技术在混凝土内爆炸试验中的应用

章征林, 王 源, 孙阳阳, 张文渊, 赵鹏冲

(解放军理工大学 国防工程学院 江苏 南京 210007)

摘 要:在混凝土的内爆炸试验中,利用光纤光栅(FBG)传感技术对混凝土表面应变进行测量,获得了内爆炸荷载作用下的混凝土表面应变历史曲线,并对这些曲线进行了初步分析。分析结果表明试验采用的测量方法可行,同时也验证了重力作用对爆炸荷载混凝土表面应变分布的影响,且捕捉到混凝土试件与实验坑的碰撞响应。

关键词:动态测试; 光纤光栅(FBG)传感技术; 混凝土内爆炸; 表面应变; 试验分析

中图分类号: TN249; TU443

文献标识码: A

Application of FBG Strain Measuring Technique to the Concrete Inward Detonation Test

ZHANG Zhenglin, WANG Yuan, SUN Yangyang, ZHANG Wenyuan, ZHAO Pengchong

(College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The fiber Bragg grating (FBG) sensor technology is used to measure the concrete face strain during the experiment on the concrete inward detonation. The historical curves of the concrete face strain under the load function of the inward detonation are obtained and analyzed preliminarily. The results show that the proposed measurement method is feasible, the effects of gravity on the concrete surface strain distribution of blasting load is verified, and the collision response of the concrete specimen and the test pit was captured.

Key words: dynamic testing; fiber Bragg grating (FBG) sensing technology; concrete inward detonation; surface strain; test analysis

0 引言

建筑物的爆炸破坏效应分析和破坏程度评估在爆炸事故分析、结构抗爆设计、反恐怖袭击和军事领域均是一个重要的课题。建筑物结构的抗爆设计、爆炸事故中的威力评估或爆炸破坏效果评估,首先都需建立破坏效果和爆炸威力间的对应关系^[1]。混凝土作为一种重要的工程材料,已被广泛应用于民用建筑和军事防护工程中。在应用过程中,混凝土处于复杂的力学环境,有时要承受爆炸冲击的作用。因此,其力学性能受到广泛关注,国、内外学者针对混凝土材料进行了大量的研究^[2-4]。但由于爆炸试验成本高,实施难,且可重现差,有关爆炸冲击作用下混凝土动态力学性能的试验研究报道较少。对爆炸作用下混凝土表面应变进行测量,可为数值模拟相关参数的修正提供试验数据,并为防护结构的研

究和设计提供参考依据^[5]。

传统的传感技术在实时性、精确性、抗电磁干扰及信息安全等方面不能很好地满足防护工程实际需求。与传统传感器相比,光纤类传感器具有质量轻,耐腐蚀,耐高温,防水防潮及抗电磁干扰等优点。因此,在恶劣环境中应用较多^[6-8]。而光纤光栅(FBG)传感技术除具备上述特点外,还可将多个光栅串联实现准分布测量,可实时获取栅区周围随时间和空间变化的被测物的温度、应力及应变等信息,实现对目标的实时全方位监测。

1 FBG 传感原理及测量系统

FBG 传感器是利用光栅对环境变化的敏感性原理设计的波长调制型光纤传感器^[9-10]。基于光栅的传感过程是通过外界参量对 Bragg 中心波长 λ_B 的调制来获取传感技术,且 λ_B 为

收稿日期:2016-03-02

基金项目:国家重点基础研究发展(“九七三”)计划基金资助项目(2010CB732003, 2013CB036005);国家科学青年基金资助项目(51608528)

作者简介:章征林(1991-),男,安徽南陵人,硕士生,主要从事国防工程健康监测与损伤识别的研究。通信作者:王源(1970-),男,教授,硕士生导师,主要从事国防工程勘察与安全监测方面的研究。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (1)$$

式中： n_{eff} 为纤芯的有效折射率； Δ 为光栅周期。

FBG传感器由激光器发出光信号，当光栅发生拉伸或压缩时，都导致 Δ 的变化，且光纤本身所具有的弹光效应使 n_{eff} 也随外界应力状态的变化而变化。图1为FBG传感器的工作原理。

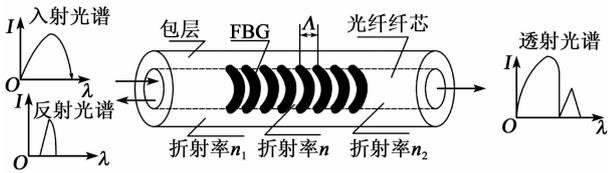


图1 FBG传感器的原理

应力和温度引起的光栅 Bragg 波长漂移 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \nu_e)\epsilon + \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中： ϵ 为轴向应变； ΔT 为温差； $\nu_e \approx 0.22$ 为弹光系数； α 和 ξ 分别为光纤的热膨胀系数及热光系数。

在温度不变时，光栅轴向应变 ϵ 与 $\Delta\lambda_B$ 的关系为

$$\epsilon = \frac{1}{0.78} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

针对爆炸测量试验，建立 FBG 应变测量系统。试验系统主要由传感器、FBG 解调仪及计算机 3 部分组成。试验所用 FBG 为美国康宁公司的 SMF-28C，采用紫外激光刻写技术加工而成，有效反射率大于 90%。试验所用解调仪为美国 Micro Optics 公司生产的 sm130-700 动态 FBG 解调仪，其参数如表 1 所示，可实现 4 通道（扩展至 16 通道）同步 2 kHz 采样。完整试验系统的拓扑网络结构及系统组成如图 2、3 所示。

表 1 sm130-700 动态 FBG 解调仪具体参数

扫描速度/kHz	波长范围/(nm/通道)	测量精度/pm
2	80(1 510~1 590 nm)	1

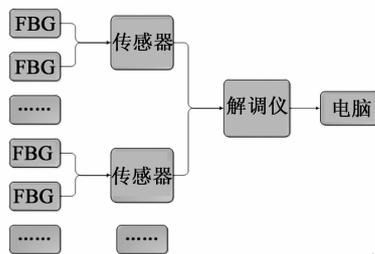


图2 传感器系统拓扑网络结构



图3 测量系统

2 爆炸试验设计

图4为试验混凝土板试件尺寸。试件材料由C40混凝土和HRB335钢筋构成，圆形试件半径为1.5 m，厚1 m。

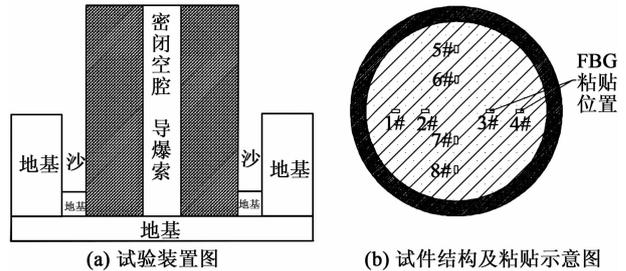


图4 试验装置、试件结构及FBG传感器粘贴示意图

将试件置于实验坑内，用沙袋堆载在试件周围，在试件内部形成密闭空腔，导爆索置于空腔中心，以模拟隧道内部爆炸作用。FBG传感器粘贴位置如图4(b)所示，成十字对称分布，沿半径方向上间隔0.5 m 布设一个FBG传感器，然后将所有传感器串联，实现对混凝土板表面应变准分布测量。

由于混凝土为多孔介质材料，为有效测量混凝土表面应变，试验过程：表面打磨—去污清理—环氧胶将粘贴处表面孔隙填平—光栅预拉—环氧胶涂匀覆盖待固化—引线保护的顺序粘贴去除涂覆层的FBG传感器。为防止光纤在试验过程中被破坏，使用黄色护套对裸露的光纤进行保护，图5为粘贴效果图。

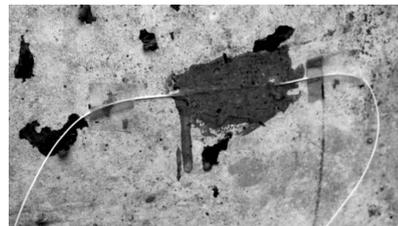


图5 FBG粘贴效果图

爆炸是物质迅速的化学或物理变化过程，炸药点火后，炸药几乎瞬间转化成高温、高压气体，爆轰产物猛烈膨胀，压缩周围空气介质，并推动周围空气向外运动。爆轰波自爆炸中心向各个方向传播时，其波阵面在药包边缘处与周围介质发生撞击，然后，冲击波开始在介质中传播。

3 测量结果及初步分析

3.1 测量结果

通过测量得到了混凝土试件在爆炸荷载作用下

表面各个位置的应变历史曲线,如图 6 所示。由图可知,8 个测点反射波到达时间及峰值规律基本一致。

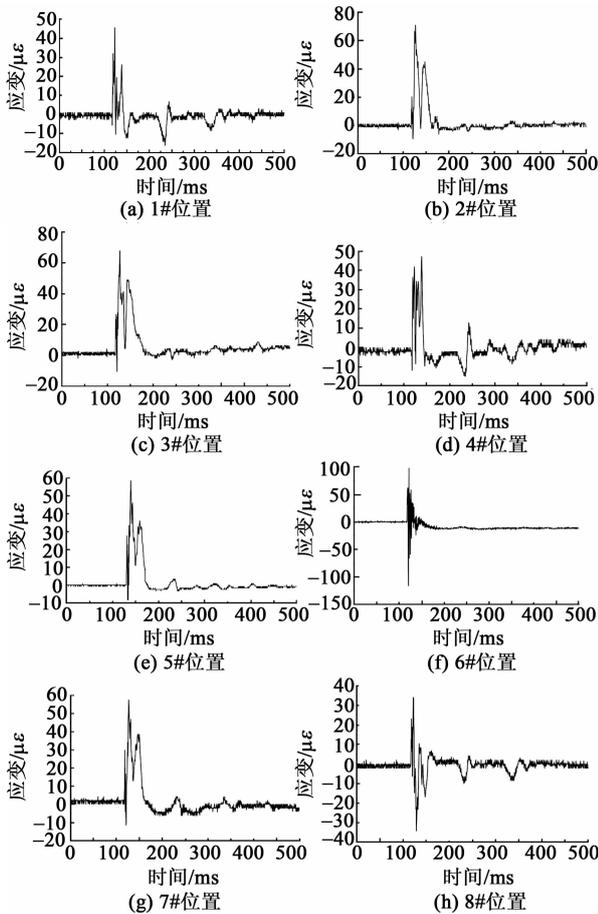


图 6 FBG 传感器测试结果

3.2 初步分析

1) 由图 6 可看出,8 个测点均测出首波。1#~8# 测点的应变峰值分别为 $46 \mu\epsilon$ 、 $53 \mu\epsilon$ 、 $68 \mu\epsilon$ 、 $42 \mu\epsilon$ 、 $55 \mu\epsilon$ 、 $98 \mu\epsilon$ 、 $58 \mu\epsilon$ 及 $34 \mu\epsilon$ 。2#、3#、6#、7# 处的应变比 1#、4#、5#、8# 处的应变大,靠近中心爆炸处的应变比外侧的应变大。1# 与 4#、2# 与 3# 处的应变峰值相近;但 5#、6# 处的应变比 8#、7# 对应位置处的应变大。因此,可认为虽然爆炸荷载处于空腔正中心,但由于重力作用,使同一高度处对称位置的应变峰值接近,而在重力作用方向对应的对称位置,爆炸荷载作用下试件表面应变,靠近地面处比远离处的应变小。

2) 由爆炸荷载响应后的应变时程曲线(见图 6)可知曲线在 200 s 后有 2 个小的应变波动过程。试验试件外围由沙袋堆载,试件与实验坑间存在一定孔隙,由于爆炸荷载的作用,使试件发生一定位移并

与实验坑发生碰撞。

3) 分析 8 个测点的波形,发现所有测点的反射波到达时间及峰值的规律基本一致,可认为测得的结构有效可信,由此表明 FBG 传感器测量混凝土表面爆炸响应的方法可行。

4 结论

1) 试验测得了有效的混凝土表面应变曲线,证实了 FBG 传感技术测量爆炸荷载可行性,通过在结构薄弱位置布设传感器,可对结构进行健康监测,判明损伤位置及损伤程度。

2) 根据图 6 可认为受重力作用,沿重力方向的应变值的分布并非沿中心完全对称。

3) 由于试件与实验坑间的孔隙,使得在爆炸荷载作用下试件发生位移并与实验坑相碰撞,这种碰撞使混凝土表面的应变出现了相应的变化。

4) 混凝土材料在爆炸荷载作用下与静力条件下的动态响应不同,引入抗电磁干扰的 FBG 传感技术这一测量手段,为爆炸测量提供新的可靠方式,对今后的爆炸研究提供测试支撑。

参考文献:

- [1] 方秦,刘锦春. 地下防护结构[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [2] 郭弦,卢芳云,黎小毛,等. 内部爆炸作用下混凝土表面应变测量[C]//合肥:第六届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集,2010:107-109.
- [3] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates[J]. *Materials and Structures*, 1991(24): 425-450.
- [4] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. *工程力学*, 2001, 18(5): 115-118.
HU Shisheng, WANG Daorong, LIU Jianfei. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(5): 115-118.
- [5] 蒲传金,郭学彬,肖正学,等. 护壁爆破动态应变测试及分析[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(10): 1163-1168.
PU Chuanjin, GUO Xuebin, XIAO Zhengxue, et al. Dynamic strain test and analysis on pipe protecting borehole wall blasting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(10): 1163-5.
- [6] 朱萍玉,林玉池,廖传军. 光纤 Bragg 光栅用于动态应变测试的研究进展[J]. *中国工程科学*, 2007, 9(1): 89-94.