

FBG-相似材料传感器埋入模型内部实验研究

曾 鹏, 孙阳阳, 由泽伟, 章征林

(陆军工程大学 爆破冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘 要:针对模型实验内部关键点的应变测量,设计并制作了光栅-相似材料传感器,与传统的应变砖法中,将光栅粘贴在立方体试件表面相比,该文将光栅埋入相似材料立方体试件内部,以消除边界效应的影响。通过对比实验,研究去涂覆层光栅在相似材料中的布设工艺,为验证所设计传感器应用于模型实验内部应变测量的可靠性,基于圣维南定理,将传感器埋入一边长是其3倍大的相似材料试件中心,以此在模拟实验中有围压的条件及消除边界效应的影响,实验结果验证了测量结果的可靠性。

关键词:圣维南原理;光纤布喇格光栅;相似材料;内部应变

中图分类号:TN253;TM23;TU 41 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.011

Experimental Study on Embedded Model of FBG-similar Material Sensor

ZENG Peng, SUN Yangyang, YOU Zewei, ZHANG Zhenglin

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,
the Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: A grating-similar material sensor has been designed and fabricated for the strain measurement of the key points in the model experiment interior. Different from the conventional brick strain method of which the grating is pasted on the surface of the cube specimens, the grating used in this work is embedded into the similar material cube specimens in order to eliminate the influence of boundary effect. Through the contrast experiment, the layout process of the decoated grating in the similar material is studied. In order to verify the reliability of the sensor used in the internal strain measurement experiment, based on Saint Venant theorem, the sensor is embedded into the center of the similar material specimen with the side length of 3 times larger over the sensor to simulate the conditions of the actual experiment with the confining pressure and eliminate the boundary effect. The experimental results verify the reliability of the measurement results.

Key words: Saint Venant theorem; fiber Bragg grating(FBG); similar material; internal strain

0 引言

相似材料^[1]一般由骨料、填料和胶结材料共同组成,它的性质可以通过调节各组分的性质和配比来调整。一般采用若干天然材料(河砂、黏土、石膏、石灰、石英砂、重晶石等)和人工材料(水泥、酒精、石蜡、松香、树脂、甘油等)按照一定比例配置并胶结而成。

在将光纤应用到相似模型实验中,相似材料弹性模量普遍较低,特别是对于深地下的模型实验,相似材料的弹性模量小于1 GPa(200~300 MPa)。而光纤模量一般约在72 GPa,实际应用中,相似材料与光纤匹配性不好,难以做到协同变形^[2]。因此,

为实现应变的精确测量,必须进行传感器标定,测出应变传递率。

文献[3-4]的研究中,在压力试验机上进行相似材料应变砖的标定,由压力机测得的平均变形作为应变砖的真实变形,进而求得真实应变。但由于实际应变分布不均匀,试件平均变形并不能准确反映材料的真实变形情况,标定实验的可靠性不高^[3-4]。

吴祖堂等^[5]对有涂覆层的光纤光栅进行封装保护,应用于模拟硐室开挖的模型实验中,测得开挖过程中不同位置处的应变-时间曲线,测量结果与开挖围岩内部应变规律相吻合。魏世明等^[6]将有涂覆层的光纤布喇格光栅(FBG)传感器用于模拟岩体变形

收稿日期:2018-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608528);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161467);中央军委委员会国防科技基金资助项目(3602052)

作者简介:曾鹏(1993-),男,重庆人,硕士生,主要从事光纤传感监测方面的研究。通信作者:孙阳阳(1983-),男,辽宁沈阳人,讲师,硕士,主要从事地质力学模型试验应变测量方面的研究。

的实验,建立了光纤与相似材料的应变传递方程,用理论分析的方法研究了岩体埋入带保护层的光纤光栅的应变传递规律,通过实验验证了将 FBG 与相似材料相结合制成传感器的可行性。张强勇等^[7]将光纤光栅传感器应用于大型分岔隧道工程,并进行了三维地质力学模型实验研究,有效揭示了分岔隧道围岩位移场、应力场的变化规律。王静等^[8]设计了一种三向 FBG-相似材料传感器,运用数值模拟分析了其应变传递特性,并将其应用于隧道开挖的模型实验中。

大量的研究表明,光纤光栅测量技术具有其他测量技术所不具备的优点,目前已成为地质力学模型实验中应变测量的最主要手段,但仍存在一些问题有待解决^[9-10]。

对于点式应变测量,国内普遍是采用在立方体试件表面粘贴光栅的应变砖法,但仍无法解决试件单轴压缩过程中的边界效应问题,难以进行有效的标定。为实现点式应变的精确测量,必须重新设计应变砖的制作过程及模具,将光栅埋入相似材料立方体试件内部,以消除标定过程中边界效应的影响。

本文以地质力学模型实验内部应变测量技术为主,围绕基于光纤传感技术的点式测量及分布式测量展开研究。主要工作如下:提出了一种验证所设计传感器能否应用于模型实验中的方法。根据圣维南定理,将传感器埋入一边长是其 3 倍大的相似材料试件中心,以此模拟有围压的条件及消除边界效应的影响,进行单轴压缩实验,将标定结果应用于内部 FBG 测得数据的修正,对比修正结果与真实应变,以此来检验标定结果是否正确。

1 FBG-相似材料传感器埋入方法

由于在实际模型实验中,FBG 传感器是在有围压的条件下工作,且相似材料试件本身尺寸较小,其直接在压力机上进行加载会由于端部效应、围压等因素导致受力情况复杂,产生应变分布不均匀的结果。因此,为验证标定结果在真实模型实验环境中是否有效,根据材料力学中的圣维南定理,设计将传感器埋入一个边长是其 3 倍(12 cm)大的相似材料试件中心,如图 1 所示,以模拟实验中有围压的状态及消除加载装置带来的误差。将此装置放在压力试验机上进行单轴压缩实验,利用应变传递率 0.621 的标定结果对光栅测得的实际数据进行修正,对比修正结果与真实应变,以此来检验标定结果是否正确。

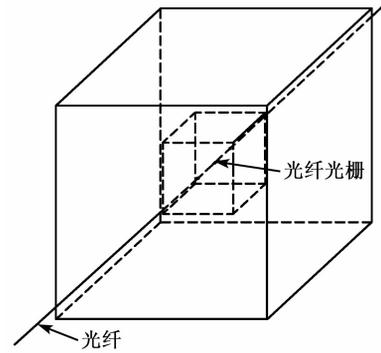
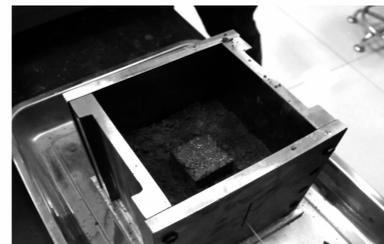
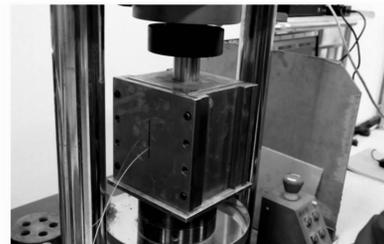


图 1 试件示意图

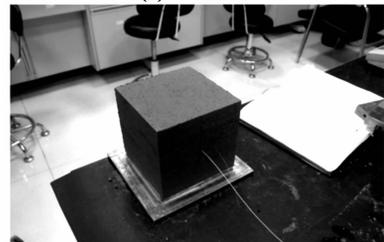
相似材料试件制作过程如图 2 所示。首先制成 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的小相似材料试件,并将光栅置于内部,制成传感器。设计大试件尺寸为 $12\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 12\text{ cm}$,所需重晶石砂、重晶石粉、松香、酒精质量分别为 1 872 g, 2 808 g, 28 g, 234 g。将 4 种材料混合均匀。称取混合材料的一半,倒入模具中,将小试件埋入大试件内部,保证小试件位于大试件正中心,光纤从特制模具侧壁穿出,为保证小试件与大试件较好的结合在一起,在小试件的 6 个侧面涂上酒精,让松香暂时溶解,倒入另一半相似材料,在力学测试与模拟(MTS)微机控制电子压力试验机上加载压实。



(a) 传感器埋设到相似材料方块内部



(b) 压实成型



(c) 成型试件

图 2 制作过程

拆模烘干后进行单轴压缩实验,如图3所示,通过模具将试件架起,进行沿光纤轴向的加载。

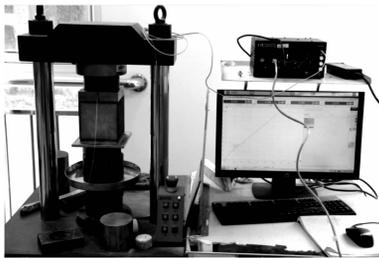


图3 单轴压缩实验

2 实验结果

进行两组实验,由表面点粘的FBG测得真实值,由内部FBG得到测量值,并利用传递率0.621对测量结果进行修正,得到修正值,三者的应变-时间曲线如图4所示。

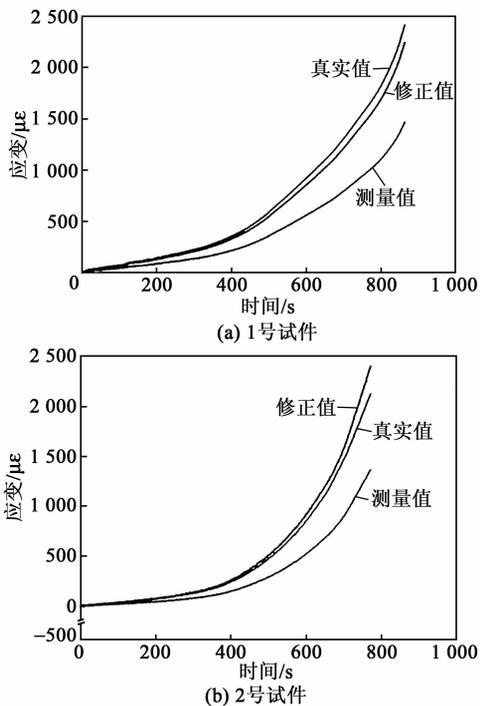


图4 应变-时间曲线

由图4可知,修正后的应变-时间曲线与真实值吻合较好,表明标定结果有效,应变传递率0.621可用于修正内部FBG测得数据。即测量值与真实值之间存在一个稳定的应变传递率,可通过标定实验得到,并通过理论分析验证其可靠性。

试件破坏时的形态如图5所示。由图可知,小试件与大试件结合的边界部分未出现明显的分层现象,表明将所设计的传感器埋入模型内部后,能较好的和模型结合在一起。

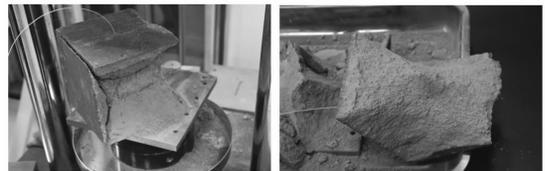


图5 试件破坏情况

3 结束语

将光纤传感技术引入到地质力学模型实验测量中,其优越的性能可实现对模型实验关键点应变的精确测量及应变场分布测量,为分析深部开挖规律提供准确的实验数据。

通过将传感器埋入一个边长是其3倍大的相似材料试件中心,模拟实验中有围压的条件,同时消除边界效应的影响。进行单轴压缩实验,并将应变传递率0.621用于修正内部FBG的实测值,得到应变-时间曲线与真实值吻合较好,验证了标定结果的有效性。

参考文献:

- [1] QIAN Qihu. New developments of technology in rock engineering in China[J]. Engineering Sciences, 2012, 129(2):2-15.
- [2] NANNI A, YANG C C, PAN K, et al. Fiber optic sensors for concrete strain stress measurement[J]. Aci Materials Journal, 1991, 88(3):257-264.
- [3] JOANNA W, MOLEND A M, HORABIK J, et al. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling [J]. Powder Technology, 2012, 217(2): 435-442.
- [4] 袁亮,顾金才,薛俊华,等.深部围岩分区破裂化模型试验研究[J].煤炭学报,2014,39(6):987-993.
- [5] 吴祖堂,陈志军,邹虹,等.采用光纤光栅传感器测量模型材料应变的原理和应用[J].机械设计与研究,2012, 28(1):82-84.
- [6] 魏世明.岩体变形光纤光栅传感检测的理论与方法研究[D].西安:西安科技大学,2008.
- [7] 张强勇,李术才,郭晓红.组合式地质力学模型试验系统及其在分岔隧道工程中的应用[J].岩土工程学报, 2007, 29(9):1337-1343.
- [8] 王静.光纤光栅多参数传感理论技术及在地下工程灾害监测中的应用[D].济南:山东大学,2011.
- [9] 柴敬,赵文华,李毅,等.采场上覆岩层沉降变形的光纤检测实验[J].煤炭学报,2013,38(1):55-60.
- [10] 孙阳阳,王源,章征林,等.表面粘贴式光纤布拉格光栅应变传递规律分析与实验研究[J].功能材料,2016,3(47):02001-02006.