

激光与光电子学进展

基于增材制造技术的光纤布拉格光栅土压力传感器

刘文丽^{1,2}, 洪成雨^{1,3*}, 鲍成志⁵, 段景川⁴, 娄在明²¹深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;²中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384;³深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060;⁴中电建南方建设投资有限公司, 广东 深圳 518000;⁵上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海 200444

摘要 基于增材制造(AM)技术和光纤布拉格光栅(FBG)制备了一种土压力传感器。标定实验结果表明,FBG 土压力传感器的灵敏度为 0.2 pm/kPa,最小分辨率为 5 kPa,量程为 1000 kPa;且该传感器的灵敏度可根据需求用 AM 参数(填充密度、填充材料)进行调整,从而减小测量误差。室内模型箱的实验结果表明,该传感器能有效测量加载过程中土体内部的压力,且测量范围广,分辨率、量程可以根据实际情况定制,为土体内部的压力监测提供了一种新思路。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 增材制造技术; 土压力测量

中图分类号 TP212;TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106006

Fiber Bragg Grating Soil Pressure Sensor Based on Additive Manufacturing Technology

Liu Wenli^{1,2}, Hong Chengyu^{1,3*}, Bao Chengzhi⁵, Duan Jingchuan⁴, Lou Zaiming²

¹College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060 China;

²Stecol Corporation, Tianjin 300384, China;

³Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060 China;

⁴Power China South Construction Investment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000 China;

⁵Department of Civil Engineering, School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract In this study, a soil pressure sensor based on additive manufacturing (AM) technology and fiber Bragg grating (FBG) is designed. The calibration experiment results indicate that the sensitivity, minimum resolution, and measurement range of FBG soil pressure sensor are 0.2 pm/kPa, 5 kPa, and 1000 kPa, respectively, and that the sensitivity of the sensor can be adjusted as per requirement using AM parameters (filling density, filling material) to reduce measurement errors. The experimental results of the indoor model box show that, the sensor can effectively measure the internal pressure of soil during test loading and that measurement range is wide. The resolution and range can be customized according to real-world conditions, which provide a new approach for internal pressure

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-09; 录用日期: 2020-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(52078303)、国家重点研发计划(2018YFB2100901)、中国电建集团铁路建设有限公司项目(4403012020000095)

*E-mail: cyhong@szu.edu.cn

monitoring of the soil.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; additive manufacturing technology; soil pressure measurement

OCIS codes 060.3735; 160.4890; 040.1880

1 引言

土压力一般指挡土墙或抗滑桩后的填土因自重或外载荷作用对墙背产生的侧压力^[1],地质结构、环境的复杂性,使土压力的准确测量在岩土工程领域具有重要意义^[2]。Hill等^[3]制作出光纤布拉格光栅(FBG)以来,FBG传感技术成为传感领域发展最快的技术^[4],FBG传感器也成为测量物理参数(应力、应变、温度和位移)最高效的传感器;且FBG传感器具有体积小、质量轻、耐腐蚀性强以及不受电磁干扰等特性,被广泛应用于隧道、桥梁等结构的健康监测^[5-9]。

目前,基于FBG测量压力的研究较少,邵军等^[10]设计了一款悬臂梁式FBG压力传感器,内置悬臂梁,但不能很好地解决FBG的保护问题。王花平等^[11]设计了一款考虑温度补偿的FBG压力传感器,但其结构包含悬臂结构,稳定性及抗震性较差。陈富云等^[1]研制了一种双模式FBG土压力传感器,能提高偏心时压力测量的准确性,但其采用金属制作,内部结构复杂、灵敏度低且制作成本过高。胡珊等^[12]设计了一种FBG压力传感器,采用横向挤压FBG的方式测量压力,极易造成光纤受剪破坏。对于结合增材制造(AM)即3D打印技术制备压力传感器的研究,Lin等^[13]利用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)作为FBG传感器的封装材料,可测量静水的压力。Zhang等^[14]结合AM技术与FBG传感器制备出液压传感器,并在现场测试中成功验证了该传感器的可靠性。Hong等^[15]将FBG传感器成功嵌入AM材料中,在封装过程中不会明显损失传感器的性能。

本文基于AM技术与FBG传感器,设计了一种土压力传感器,改善了传统薄膜应变片式和钢弦式土压力传感器防水、防电磁干扰、耐久性差等^[16]缺陷。通过调节AM的参数,如FBG的封装密度、封装材料,封装尺寸实现传感器模量和测量土体模量的匹配,从而协调传感器与测量土体的变形,减弱传统常规土压力传感器由土拱效应^[17]引起的土压力测量误差。该FBG压力传感器采用AM技术一次成型,在保证高灵敏度和精度的同时能有效保护

FBG传感器。此外,AM技术具有制作时间短、成本低等优势^[18-19],具体规格尺寸也可根据测量环境定制,在监测领域具有广泛的应用前景。

2 传感器的基本工作原理

2.1 FBG传感器的原理

根据FBG的传感理论可知,一束复合光入射到光纤且FBG的中心波长满足 $\lambda = 2n\Lambda$ (其中, Λ 为FBG的周期, n 为纤芯的折射率)时会产生有效反射,该反射光的峰值波长被称为布拉格波长,该波长与应变、温度的变化关系可表示为^[20]

$$\Delta\lambda/\lambda = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (1)$$

式中, α_f 为光纤的热膨胀系数, ξ 为光纤材料的热光系数, P_e 为光纤的有效弹光系数, ΔT 为温度的变化量。相同环境下,将参数 α_f 、 ξ 、 P_e 、 ΔT 视为定值,测出波长变化量 $\Delta\lambda$,就能得到FBG的应变变化量 $\Delta\epsilon$ 。图1为FBG传感器的原理,在实验室恒温状态下使用FBG传感器时,可认为FBG传感器受到的温度影响为常量,即实验过程中可以忽略环境温度对FBG传感器波长的影响。在非恒温状态下使用FBG传感器时,需要将第二根FBG传感器放置在第一根FBG传感器的附近,以进行温度补偿,消除温度对光纤波长变化的影响。实验使用的光栅解调仪最小分辨率为1 pm,数据采集频率最高可达25 Hz。

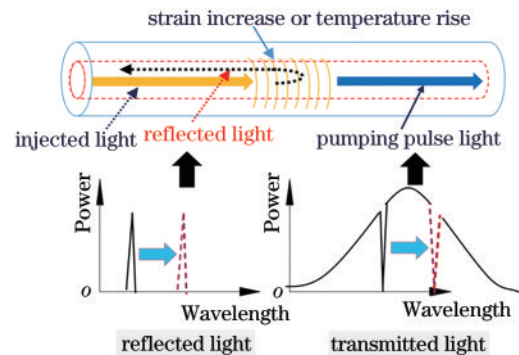


图1 FBG传感器的原理

Fig. 1 Principle of the FBG sensor

2.2 FBG土压力传感器的压力感知原理

FBG压力传感器的测量原理:土压力作用于压力传感器受压面时,传感器中模型的上下表面会受到挤压,侧向会向外膨胀变形,如图2所示。采用

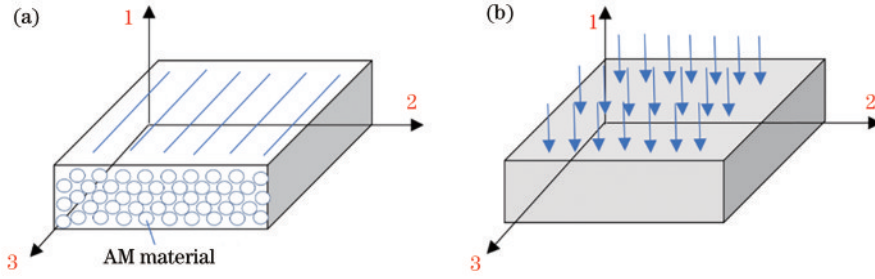


图 2 各向异性 AM 材料。(a)微观结构;(b)连续模型

Fig. 2 AM material with anisotropy. (a) Microstructural detail; (b) continuum model

AM 技术封装时,压力传感器向外拉伸变形会带动 FBG 光栅部分的变形,从而将压力转化为光栅的变形(应变)。

图 2 标注了 AM 力学模型三个方向(1、2、3),根据广义胡克定律^[21]得到的应力应变关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, E_i 为 AM 材料在方向 $i(i=1,2,3)$ 上的杨氏模量,如 $\sigma_1=E_1\epsilon_1$ 为单向拉伸或压缩下,方向 1 的应力分量。 ν_{ij} 为泊松比,即横向应变与纵向应变的比值, σ_{ij} 和 ϵ_{ij} 分别为三个方向对应的应力分量和应变分量,对于承受垂直荷载的压力传感器, $\sigma_{22}=\sigma_{33}=0$ 且 $\epsilon_{22}=\epsilon_{33}$, (2) 式可简写为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(3) 式可以被分解为

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{E_1} \sigma_{11}, \epsilon_{22} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \sigma_{11}, \epsilon_{33} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} \sigma_{11}. \quad (4)$$

可通过 FBG 传感器的波长变化定量反映嵌入 AM 材料内部的 FBG 传感器受垂直压力的影响。当 FBG 传感器沿方向 2 嵌入 AM 材料时,由 (1) 式和 (4) 式直接获得 FBG 压力传感器在垂直压力 σ_{11} 作用下的波长变化量为

$$\Delta\epsilon_{22} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \Delta\sigma_{11} = \frac{\Delta\lambda}{(1-P_e)\lambda} - \frac{(\zeta + \alpha_i)\Delta T}{(1-P_e)}, \quad (5)$$

与 FBG 压力传感器温度和波长变化量相关的垂直压力变化量可表示为

$$\Delta\sigma_{11} = \frac{E_2}{\nu_{21}} \left[\frac{(\zeta + \alpha)\Delta T}{(1-P_e)} - \frac{\Delta\lambda}{(1-P_e)\lambda} \right]. \quad (6)$$

(6) 式通过 FBG 传感器的波长变化量计算 AM 封装压力传感器上方的垂直压力,可以发现,通过 FBG 传感器的波长变化量 $\Delta\lambda$ 可计算出 3D 打印压力传感器上方的垂直压力 $\Delta\sigma_{11}$ 。FBG 土压力传感器的灵敏度可表示为

$$S = \Delta\lambda / \Delta\sigma. \quad (7)$$

文中所有实验均在恒温条件下进行,因此无需对 FBG 传感器进行温度补偿,即 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$,将 (6) 式代入 (7) 式,得到 FBG 压力传感器的灵敏度为

$$S = -\frac{\nu_{21}(1-p_e)\lambda}{E_2}. \quad (8)$$

由 (8) 式可知,当改变 AM 封装的模型参数,如填充密度或填充材料时,会直接引起 FBG 土压力传感器灵敏度的变化,从而实现对传感器灵敏度的调节。这表明 AM 压力传感器可根据实际需求,定制 FBG 压力传感器。可通过降低传感器 AM 封装模型的填充密度或使用模量更小的热塑性聚氨酯橡胶(TPU0)封装材料制备 FBG 土压力传感器,以优化 FBG 土压力传感器的灵敏度。调节 AM 技术对于模型材料的填充密度,可以实现 0% 到 100% 范围内填充密度的任意调节。填充密度越大,内部耗材填充的越密实,填充密度为 100% 时为完全密实状态;且每次的填充密度和材料都可保持一致,嵌入 FBG 的方式也可以保持一致,从而保证传感器生产过程的一致性。

3 FBG 压力传感器的制备

3.1 FBG 压力传感器的结构

图 3 为 AM 土压力传感器的结构,该结构为同

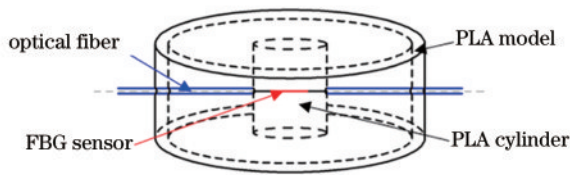


图 3 FBG 压力传感器的结构

Fig. 3 Structure of the FBG pressure sensor

轴柱状结构,中间是一个直径为 15 mm 的圆柱实体,外侧是一个厚度为 2 mm、直径为 50 mm 的外壳,外壳与内部圆柱实体之间是中空结构。AM 过程中将 FBG 传感器嵌入中间圆柱实体部分,并对应连接 FBG 传感器的裸光纤,从外壳走线出来。

3.2 FBG 土压力传感器的制备流程

FBG 土压力传感器的制备流程,首先,用 CAD 软件建模。然后,选取打印材料(PLA),用 3D 打印机打印(开放式,填充密度为 80%、45°线型打印)FBG 压力传感器的主体部分。当模型打印进行到 50% 时,快速嵌入 FBG 传感器,加装完成后继续打印,直至模型打印完毕。FBG 与 PLA 封装外壳紧密嵌固,基本制作步骤如图 4 所示,最终成型的 FBG 压力传感器如图 5 所示。与家用打印机不同,实验采用的 3D 打印设备能很好地规避机器暂停状态时的耗材下垂流出问题,避免模型外观受损;且将 FBG 传感器嵌入 3D 打印模型内部时,无需移动模型,只需将 FBG 传感器平行放置在暂停后的模型面上。安装 FBG 传感器时,会对光纤进行一定程度的预拉伸,约为 50 μm ,使 FBG 传感器封装到模型内部后,避免因耗材收缩导致的 FBG 松弛状态。安装过程中只需保证 FBG 传感器与模型面平行接触,就能保证后续的 3D 打印,成功将 FBG 传感器封装到模型内部。

传感器制备过程用 APC (Angled physical contact) 光纤解调采集仪采集 FBG 传感器的中心

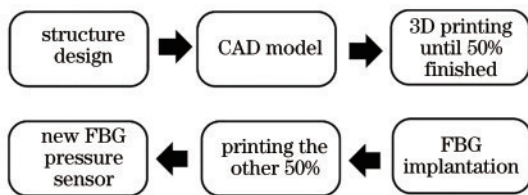


图 4 FBG 压力传感器的制备流程

Fig. 4 Preparation process of the FBG pressure sensor

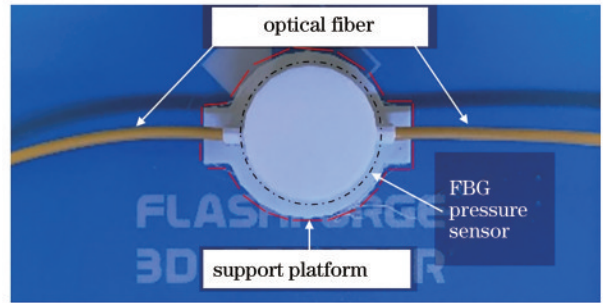


图 5 基于 AM 技术的 FBG 压力传感器

Fig. 5 FBG pressure sensor based on AM technology

波长,实时监测制备过程中 FBG 传感器是否被损坏。首先,将 FBG 连接到 APC 光纤解调采集仪中,打印机打印至 50% 时,暂停打印,快速加装连接光纤线缆的 FBG;然后,在继续打印过程中采集 FBG 波长随时间的变化曲线,结果如图 6 所示。可以发现,打印过程中 FBG 的波长大致分为 3 个阶段:第 1 阶段(0~90 s)波长基本稳定在 1548.85 nm 左右,此时 FBG 在恒温实验室内;第 2 阶段(90~850 s)波长发生振动变化,振幅从 1.75 nm 逐渐减小至 0 nm,原因是该阶段打印材料的逐层堆叠使内部材料发生了收缩与拉伸现象;第 3 阶段(850~1150 s)的波长平缓减小,最终保持在 1548.35 nm,原因是刚结束封装的模型温度下降到环境温度过程中,PLA 材料导致 FBG 传感器的轴向应变由拉伸变为压缩。

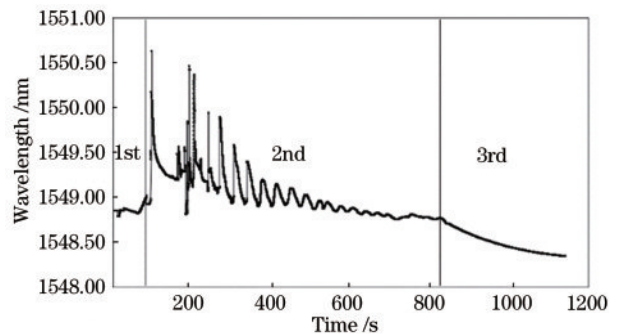


图 6 打印过程中 FBG 中心波长随时间的变化曲线

Fig. 6 FBG center wavelength change curve with time during printing

4 标定实验

4.1 标定实验方案

实验时用 CTM20t 万能机进行循环加载卸载实验,光纤解调采集仪为 APC,采样频率为 25 Hz,标定设备如图 7 所示。标定方法:采用 200,400,600,

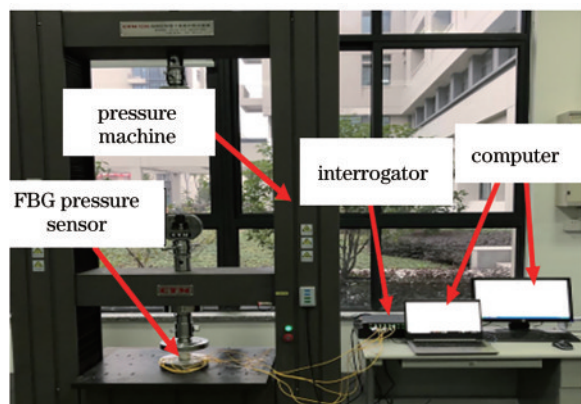


图 7 标定测试系统的设备

Fig. 7 Equipment of the calibration test system

800 kPa 进行递增加载,同一级荷载下重复加载 9~10 次。不同荷载对应不同的波长,通过波长随荷载的变化关系,求出相应的标定系数 k 和 b (标定方程的斜率和截距),完成标定。该土压力传感器为扁平结构,竖向受力面积远大于水平侧向受力面积,因此标定时可忽略侧向土体围压的影响。实验中的土体内部压力为局部均匀分布状态,且制备的 AM 土压力传感器体积很小。实际测量时,不同类型土体的颗粒强度、内摩擦角、含水率等土工参数差异巨大,因此将砂土作为一种典型的土体颗粒代表。

4.2 标定实验的结果

加载得到的波长曲线如图 8 所示,可以发现,每级荷载下 9~10 次加载过程中,FBG 波长的变化均比较稳定且变化趋势相同,一定程度上证明了本传感器的稳定性。当压力为 600 kPa、800 kPa 时,FBG 传感器的初始波长有明显变化,原因可能是实验的温度发生变化或传感器的二次加载扰动。还可以发现,波长变化量随荷载的增大而增大。不同荷载与采集的波长对应,整理得到压强与波长的关系如图 9 所示 (R^2 为线性度),得到 FBG 压力传感器的波长 λ 与 FBG 压力传感器表面压强 P 的关系为

$$\lambda = 0.0002P + 1548.9133, \quad (9)$$

式中,1548.9133 为 FBG 传感器未受压力前的初始波长。可以发现,FBG 压力传感器的波长与 FBG 压力传感器表面压强之间具有良好的线性关系,线性拟合方程的斜率即为 FBG 压力传感器的灵敏度 $\Delta\lambda/\Delta P$, 计算得到 FBG 压力传感器的灵敏度为 0.2 pm/kPa, 最小分辨率为 5 kPa。

FBG 压力传感器的量程在标定实验中确定,标定时缓慢匀速加载,直至 FBG 传感器的波长随荷载的变化呈非线性变化,此时的压强即为传感器的量程,测试结果表明,该 FBG 土压力传感器的量程为 1000 kPa。

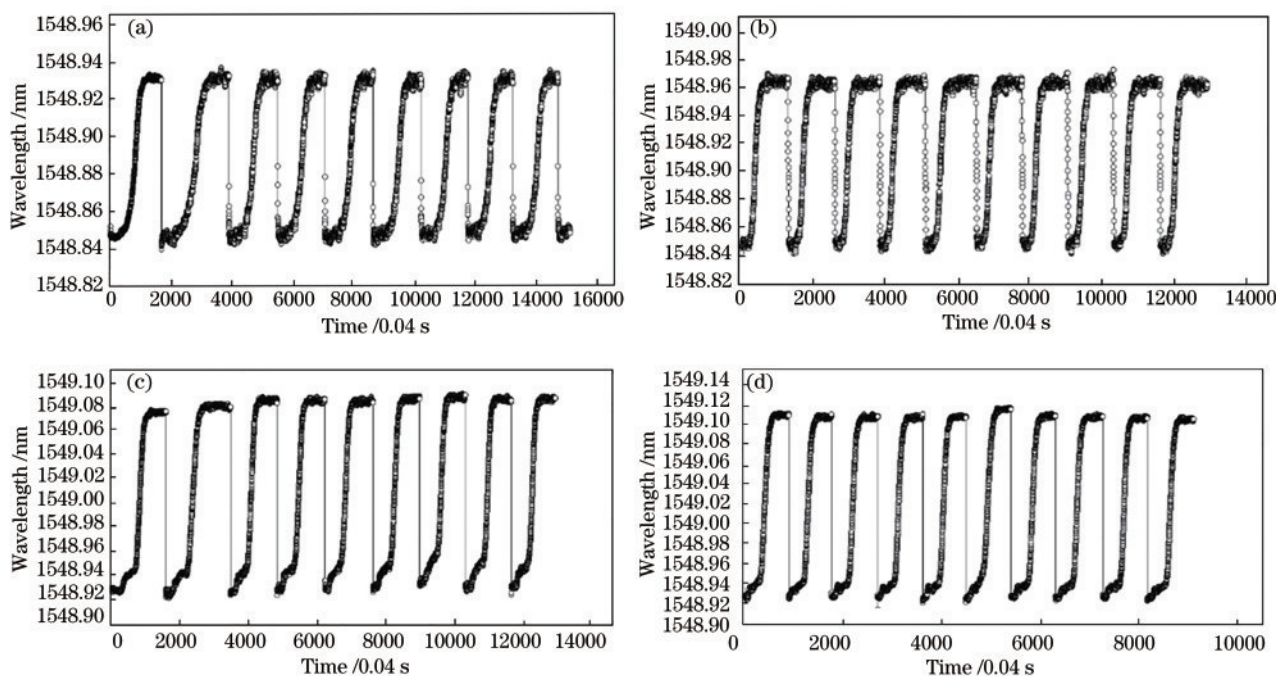


图 8 标定过程中压力传感器波长随时间的变化曲线。(a) 200 kPa; (b) 400 kPa; (c) 600 kPa; (d) 800 kPa,

Fig. 8 Pressure sensor wavelength change curve with time during the calibration process. (a) 200 kPa; (b) 400 kPa; (c) 600 kPa; (d) 800 kPa

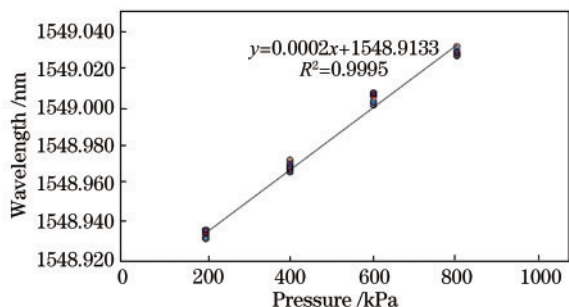


图 9 FBG 压力传感器波长与表面压强之间的关系

Fig. 9 Relationship between wavelength and loading pressure of the FBG pressure sensor

5 加载实验

5.1 实验方案

实验器材:尺寸相同(半径为 25 mm、厚度为 8 mm)的传统电阻式压力传感器与 FBG 压力传感器、标准砂、钢架透明模型箱(尺寸为 500 mm×500 mm×800 mm)、20 t 万能液压加载机、APC 光纤解调采集仪(采样频率为 10 Hz)、动态采集仪(采样频率为 10 Hz)。实验条件:常温(25 ℃)常压(101 kPa)下进行对比实验。实验步骤:1)将标准砂按照 18 kN/m³的密实度加入模型箱的 1/2 高度处暂停;2)在砂水平中间并排(尽可能接近)放置传统压力传感器和新型 FBG 光纤压力传感器,如图 10 所示;3)继续按照 18 kN/m³的密实度埋入剩余 1/2 高度的标准砂;4)开始加载,直至砂土结构被破坏时停止。

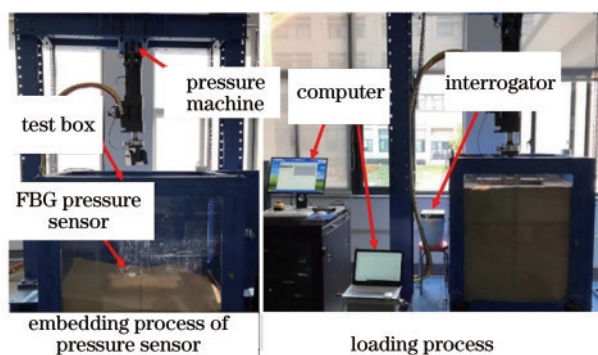


图 10 实验加载系统的模型

Fig. 10 Model of the experimental loading system

室内模型实验通常用砂模拟土体颗粒,原因是砂也是一种土颗粒,砂体和土体只是材料强度、内摩擦角、含水率等土工参数不同。实际测量中土体颗粒的强度、内摩擦角、含水率等土工参数差异巨大,因此仅将砂土作为一种典型的土体颗粒代表,

并未对不同颗粒的土工参数进行对比。解调仪的最高采集频率为 25 Hz,为方便后期数据处理,实际测量时的数据采集频率为 10 Hz。本研究并未涉及传感器的温度稳定性测试,一方面是传感器的制备、标定实验均在恒温环境下进行,以保证传感器不受环境温度变化的影响;另一方面,在加载实验中已经为土压力传感器进行了温度补偿,消除了温度变化对实验结果的影响。

5.2 实验结果

利用光纤解调仪采集的 FBG 压力传感器波长数据计算得到对应的压强,并将对应压强与电阻式压力传感器得到的压强进行对比,绘制出压力传感器表面压强随时间变化的数据曲线,结果如图 11 所示。可以发现,整条曲线大致分为 3 个阶段:第 1 阶段(加载 0~40 s)中,FBG 压力传感器测得的压强值大于传统电阻式压力传感器,且 FBG 压力传感器测得的压强值增长得比传统压力传感器快。原因是 FBG 传感器使用模量较小的 PLA 材料封装,灵敏度更高,传感器表面压强较小时也能及时感知到压强变化。第 2 阶段(加载 40~100 s)中,FBG 压力传感器和传统电阻式压力传感器测得的压强值基本相同,原因是传统压力传感器已经感知到压力,且处于同一位置的连续加载。第 3 阶段(加载 100 s 以后)中,FBG 压力传感器测得的压强值小于传统压力传感器,原因是 FBG 压力传感器在砂土结构被破坏后对压力更敏感。除此之外,FBG 压力传感器比传统压力传感器先 2 s 到达峰值,两个传感器测得的压力峰值几乎相同,新型 FBG 压力传感器的峰值为 301.629 kPa,传统压力传感器的峰值为 304.315 kPa,这表明实验制备的 FBG 压力传感器与常规土压力传感器测量结果的一致性较好。

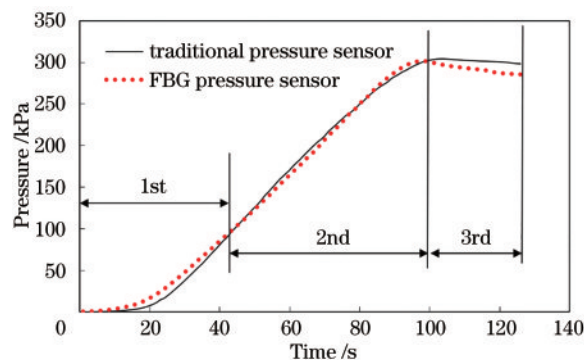


图 11 两种压力传感器测得的压强随时间的变化曲线

Fig. 11 Pressure change curves measured by two pressure sensor with time

6 结 论

结合 AM 与 FBG 传感器技术, 实现了 FBG 土压力传感器的制备。实验结果表明, 采用 AM 技术将 FBG 传感器嵌入 PLA 实体进行外壳封装的过程中, FBG 传感器的性能稳定, 且嵌入的 FBG 传感器波长随嵌入时间呈循环变化, 这表明 FBG 传感器在 AM 封装过程中无损坏, 且检测到了封装材料的逐层封装变化。室内标定实验结果表明, 制备的 FBG 土压力传感器波长变化量与压力具有良好的线性关系, FBG 压力传感器的分辨率可达 5 kPa、灵敏度为 0.2 pm/kPa, 量程为 1000 kPa。模型箱实验结果表明, 在相同位置, 基于 FBG 的压力传感器与传统压力传感器得到的加载曲线相似, 且 FBG 压力传感器的迟滞性更低。但实验制备流程需要在暂停阶段快速植入 FBG, 容易导致 FBG 传感器的损坏, 且封装制作的传感器数量有限, 此外, PLA 材料的抗腐蚀性还有待改进。

参 考 文 献

- [1] Chen F Y, Li C, Chen E K, et al. Dual-diaphragm fiber Bragg grating soil pressure sensor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3340-3344.
陈富云, 李川, 陈尔阔, 等. 双膜式光纤 Bragg 光栅土压力传感器的研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3340-3344.
- [2] Liang B, Li Y J, Ling X P, et al. Determination of earth pressure by miniature earth pressure cell in centrifugal model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(2): 818-826.
梁波, 厉彦君, 凌学鹏, 等. 离心模型试验中微型土压力盒土压力测定[J]. *岩土力学*, 2019, 40(2): 818-826.
- [3] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [4] Zhou Z, Ou J P. Study on smart FBG sensors and their applications in civil engineering[J]. *Journal of Functional Materials*, 2004, 35(z1): 152-156.
周智, 欧进萍. FBG 智能传感器及其在土木工程中的应用研究[J]. *功能材料*, 2004, 35(z1): 152-156.
- [5] Hong C Y, Zhang Y F, Zhang M X, et al. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 244: 184-197.
- [6] Chen B J, Liu J, Jia P G, et al. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on FBG temperature-decoupling for high-temperature applications[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2020, 34(4): 321-326.
陈宝杰, 刘佳, 贾平岗, 等. 基于 FBG 温度解耦的光纤法布里-珀罗高温压力传感器[J]. *测试技术学报*, 2020, 34(4): 321-326.
- [7] Wang Y H, Zhang M Y, Ma J X, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706004.
王永洪, 张明义, 马加骁, 等. 光纤布拉格光栅用于黏质土中静压沉桩贯入特性的测量研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0706004.
- [8] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for "土"-shaped beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004.
魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106004.
- [9] Chen C. Application of FBG technology on monitor in civil engineering[J]. *Study of Science and Engineering at RTVU*, 2017(3): 75-77.
陈晨. FBG 传感技术在土木工程压力监测中的应用[J]. *电大理工*, 2017(3): 75-77.
- [10] Shao J, Liu J H, Qiao X G, et al. A FBG pressure sensor based on bourdon and cantilever beam of uniform strength[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(7): 807-809.
邵军, 刘君华, 乔学光, 等. 基于弹簧管悬臂梁的 FBG 压力传感的研究[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(7): 807-809.
- [11] Wang H P, Wang H Z, Lan C G, et al. Design of novel fiber Bragg grating sensor for monitoring soil pressure[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(4): 4-6.
王花平, 王赫喆, 兰春光, 等. 适合于土压力测试的新型光纤光栅传感器性能研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(4): 4-6.
- [12] Hu S, Hao F, Zhou Y A, et al. Optical fiber pressure sensor by 3D printing[J]. *Physics Experimentation*, 2017, 37(S1): 48-51.
胡珊, 郝峰, 周聿安, 等. 3D 打印光纤压力传感器[J]. *物理实验*, 2017, 37(S1): 48-51.
- [13] Lin Y K, Hsieh T S, Tsai L, et al. Using three-dimensional printing technology to produce a novel

- optical fiber Bragg grating pressure sensor[J]. *Sensors and Materials*, 2016, 28: 389-394.
- [14] Zhang X J, Luo W Z, Zhang J, et al. Development of a FBG water content sensor adopting FDM method and its application in field drying-wetting monitoring test[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 297: 111494.
- [15] Hong C Y, Yuan Y, Yang Y Y, et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 285: 269-274.
- [16] Ma H H, Liu B J, Weng X L, et al. Application of optical fiber Bragg grating sensing technology to tunnel model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (S2): 185-190.
马豪豪, 刘保健, 翁效林, 等. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道模型试验中应用[J]. *岩土力学*, 2012, 33 (S2): 185-190.
- [17] Lin Q T, Zhu J M, Kang Y. Active spatial earth pressure behind retaining wall considering arching effects of soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(9): 1918-1927.
林庆涛, 朱建明, 康瑶. 考虑土拱效应的挡土墙空间土压力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(9): 1918-1927.
- [18] Zein I, Huttmacher D W, Tan K C, et al. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications[J]. *Biomaterials*, 2002, 23(4): 1169-1185.
- [19] Lin X C, Liu H G. Continuous liquid interface production 3D printing technology and its application in fabrication of architecture models[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0816002.
林宣成, 刘华刚. 连续液面成型 3D 打印技术及建筑模型制作[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0816002.
- [20] Othonos A, Kalli K, Kohnke G E. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[J]. *Physics Today*, 2000, 53(5): 61-62.
- [21] Fei B P. The buckling analysis based on 3-D elastic solid structure and its implementation with boundary face method[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
费柏平. 基于三维实体的弹性结构屈曲分析及其边界面法实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.