

# 无封装 FBG 应变传感器在不同布设方式下的标定试验研究

朱怀龙<sup>1,2,3</sup>, 王其标<sup>4</sup>, 朱碧堂<sup>1,2\*</sup>, 邱松<sup>4</sup>, 刘俊杰<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013; 3. 江西交通职业技术学院建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 4. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 应变传感器作为一种新型测量应变的仪器逐渐运用到土木工程领域中, 而其能运用的关键在于传感器的布设以及根据不同的使用要求和环境对灵敏度系数进行标定, 目前常规的布设方法有表面直接黏贴和开槽植入。为确定两种布设方法的测量精度, 提出了一种用于沉桩试验的无封装 FBG 灵敏度系数的标定方法, 并通过采用圆形无缝钢管作为基体对两种布设方法进行标定试验研究。结果表明: 在逐级加载阶段, 开圆形凹槽植入黏贴法所得到的标定系数比表面直接粘贴更小, 而表面直接黏贴法更接近理论值, 开槽植入和表面黏贴法所得到的标定系数与理论值相比最大误差分别为 2.84% 和 0.33%; 在逐级卸载阶段, 两种布设方法光纤的中心波长存在一定的滞后, 但标定系数与加载阶段相差不大。因此在 FBG 使用过程中需要根据试验环境情况以及在试验允许误差的范围内在选择合理的光纤光栅布设方案及标定方法。

**关键词:** 光纤光栅; 布设方法; 沉桩试验; 标定试验; 灵敏度系数

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A

## Experimental Study on the Calibration of Unencapsulated FBG Strain Sensors Under Different Mounting Methods

Zhu Huailong<sup>1,2,3</sup>, Wang Qibiao<sup>4</sup>, Zhu Bitang<sup>1,2\*</sup>, Qiu Song<sup>4</sup>, Liu Junjie<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China; 3. Department of Architectural Engineering, Jiangxi V&T College of Communications, Nanchang, 330013, China; 4. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** As a new type of strain measuring instrument, fiber bragg gratings (FBG) strain sensors are gradually used in the field of civil engineering, and the key to their use lies in the deployment of sensors and the calibration of sensitivity coefficients according to different usage requirements and environments. The current conventional FBG installation methods are surface direct bonding and slotting implantation. In order to determine the measurement accuracy of the two installation methods, a calibration method of the unpacked FBG sensitivity coefficient used for the pile sinking test was proposed, the calibration test of the two deployment methods was carried out by using the circular seamless steel tube as the matrix, and the calibration results were compared with the theoretical values. The results show that in the stage of progressive loading, the calibration coefficient obtained by the method of slotted implantation method is smaller than that by surface adhesion method, while the calibration coefficient obtained by the surface adhesion method is closer to the theoretical value. The calibration coefficients obtained by the slotted implantation and surface adhesion methods were 2.84% and 0.33% respectively compared with the theoretical values; In the step-by-step unloading phase, there is a certain lag in the central wavelength of the two deployment methods, but the calibration coefficient is not much different from the loading stage. Therefore, it is necessary to choose a reasonable fiber grating layout scheme and calibration method according to the test environment and within the test tolerance range in the process of using FBG.

**Key words:** FBG; Installation method; pile driving test; calibration test; sensitivity factor

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51725802); 国家自然科学基金 (5202010500, 41972291); 江西省交通厅科技项目 (2021H0037)

近年来, 光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG) 传感技术得到了飞速发展, 极大的推动了我国社会的进步。FBG 具有抗电磁干扰强、测量精度高、体积小等优点<sup>[1]</sup>。因此, FBG 传感器常作为测量变形固体的应变而逐渐运用到土木工程领域中<sup>[2-11]</sup>。

FBG 应变传感器使用的关键在于布设以及灵敏度系数的标定, 目前常用的布设方式有开凹槽植入、埋入式和表面直接黏贴, 许多学者针对于 FBG 应变传感器布设方法的应变传递机理和标定方法进行了研究。在传感器布设方法的应变传递机理研究方面: 张桂花<sup>[12]</sup>通过建立裸光栅和基片式光栅表面黏贴布设方法的应变传递数学模型, 分别得出其应变传递的影响因素。魏世明<sup>[13]</sup>通过在基体表面开半圆形凹槽, 对裸光栅开凹槽黏贴建立理论分析模型, 得出了开凹槽黏贴的应变传递数学表达式, 分析了不同参数对裸光栅开凹槽黏贴的影响。Li 等<sup>[14]</sup>的解析模型指出光纤光栅产生的应变必须经过一个因子(应变传递率)的放大才能等于实际结构应变。刘德华等<sup>[15]</sup>通过采用 ANSYS 有限元分析软件, 分析了光栅表面黏贴三点加压应变传递公式的准确性。在传感器标定方法研究方面: 李慧鹏等<sup>[16]</sup>提出了一种无封装 FBG 传感器的应变灵敏度系数标定方法, 通过理论计算和标定试验证明该方法的可行性。Roths 等<sup>[17]</sup>的通过制作出一种用于透镜阵列的设备从而实现 FBG 应变传感器标定, 但该方法较为繁琐, 实用价值不足。Liu 等<sup>[18]</sup>研制了一种柔性光纤光栅传感器, 利用基于应变传递理论的计算来估计 FBG 传感器的最佳尺寸, 并提出了相应的标定方法。以往关于 FBG 不同布设方法应变传递机理的研究主要采用理论和数值方法, 而采用试验研究的方法较少; 另外, FBG 布设方法测量数据准确性的关键在于根据不同的使用要求和环境对灵敏度系数进行标定<sup>[19-20]</sup>, 以往有关标定的研究主要针对的是已封装的 FBG 应变传感器, 而对无封装且用于沉桩试验的 FBG 应变传感器标定方法的研究鲜有报道。

为此, 本文提出了一种用于沉桩试验的无封装 FBG 应变传感器标定方法, 并对传感器在圆形管钢表面黏贴和开圆形凹槽黏贴两种情况下进行灵敏度系数标定, 将试验标定结果与理论结果进行对比, 以检验两种布设方法标定系数的准确性, 为后续沉桩试验中模型桩的应变监测提供可靠的布设方案和精确的测量数据。

## 1 FBG 应变传感器工作原理

图 1 为 FBG 传感器的工作原理图, FBG 是在光纤纤芯内折射率呈周期性调制的一种光纤传感组件, 其作用相当于在纤芯内形成一个具有透射或反射功能的窄带滤光器或反射镜, 被反射的中心波长用如下公式表示<sup>[11]</sup>:

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

式中,  $\lambda_B$  为 FBG 中心波长,  $n_{eff}$  为 FBG 的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期。

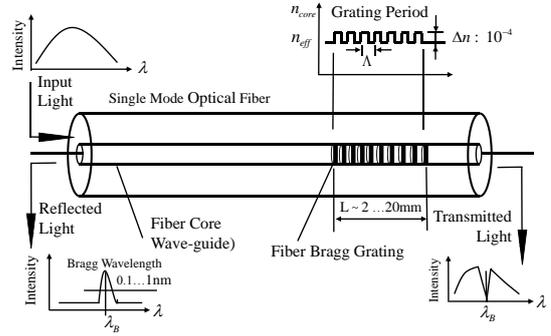


图1 光纤光栅工作原理图

Fig.1 Picture of the working principle of FBG

由以上公式可知, 当  $n_{eff}$  和  $\Lambda$  发生改变时, 就会引起  $\lambda_B$  的变化, 而要使得  $\Lambda$  发生改变, 必然要使得光栅的条纹间距发生改变, 当光栅安装在被测物体上, 由协同作用原理可知, 被测物体的应变和温度改变导致光栅的中心波长发生漂移, 由上述公式(1)可知 FBG 中心波长的偏移为:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff} \Lambda + 2n_{eff} \Delta\Lambda \quad (2)$$

式中:  $\Delta\lambda_B$  为光纤光栅中心波长的偏移量。

由弹性力学和弹光效应等理论, 式(2)可写成:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \left\{ \left[ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right] \varepsilon_1 \right. \\ \left. + (\alpha_s + \xi_s) \Delta T \right\} \quad (3)$$

式中:  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光纤光栅的弹光系数,  $\mu$  为泊松比,  $\varepsilon_1$  为轴向应变,  $\alpha_s$  为热光效应,  $\xi_s$  为热膨胀效应,  $\Delta T$  为温度的变化量。

上述公式简化为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - P_e) \varepsilon + (\alpha_s + \xi_s) \Delta T] \\ = K_\varepsilon \varepsilon_1 + K_T \Delta T \quad (4)$$

式中： $P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]$  为光弹系数；  
 $K_\varepsilon = \lambda_B(1 - P_e)$  为应变灵敏度系数；  
 $K_T = \lambda_B(\alpha_s - \xi_s)$  为温度灵敏度系数。

外界温度恒定不变，可知  $\Delta T = 0$ ，则有：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - P_e)\varepsilon_1] = K_\varepsilon \varepsilon_2 \quad (5)$$

式中： $\varepsilon_2$  为光栅应变。

针对于普通单模石英光纤，光弹系数  $P_e$  约为 0.22。

## 2 FBG 应变传感器标定方法

为了研究在沉桩试验中无封装 FBG 应变传感器在表面直接黏贴和开圆形凹槽植入两种情况下标定效果，采用圆形无缝钢管（模拟钢管桩）作为基体进行试验，标定方法主要是通过万能试验机对钢管进行加卸载，利用材料力学知识可以得出桩身的应变，从而实现对 FBG 应变传感器的标定。

钢管为长薄壁圆管，钢管在压力机作用下，模型桩加载两端之间等截面应力为：

$$\sigma = \frac{F}{\pi(R^2 - r^2)} \quad (6)$$

式中： $F$  为万能机输出的力， $R$  为钢管桩的外径， $r$  为钢管桩的内径。

根据胡克定律可得钢管的应变：

$$\varepsilon = \frac{F}{\pi E(R^2 - r^2)} \quad (7)$$

表1 FBG应变传感器参数

Tab.1 Parameters of FBG strain sensors

Sensor number	Grating area length/mm	Central wavelength/nm	3db broadband/nm	Side-mode suppression ratio/dB	Reflectivity/%
FBG1	10	1531.9	0.24	19	95.19
FBG2	10	1546.8	0.22	21	94.01
FBG3	10	1537.1	0.24	20	96.61
FBG4	10	1542.1	0.24	25	93.55

### 3.2 FBG 在钢管上的布设方案

试验所用的圆形钢管的具体参数如表 2 所示，在钢管桩中段对称的外表面布设 FBG 应变传感器，共计 4 个传感器，其中 FBG1 和 FBG2 为表面直接

式中： $E$  为钢管桩的弹性模量。

根据以上公式可得 FBG 应变传感器的灵敏度系数为：

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta\lambda\pi E(R^2 - r^2)}{F} \quad (8)$$

## 3 FBG 应变传感器标定试验

### 3.1 试验所用 FBG 传感器简介

试验所得的裸光栅由光栅区、热缩管、纤尾和 FC 接头等组成，具体如下图 2 所示，本次试验采用 4 个 FBG 应变传感器，编号分别为 FBG1、FBG2、FBG3 和 FBG4，其光栅区采用黑色 2 点的标记方式，标记间隔为 12mm，栅区长度为 10mm，4 个 FBG 应变传感器的具体参数如表 1 所示。

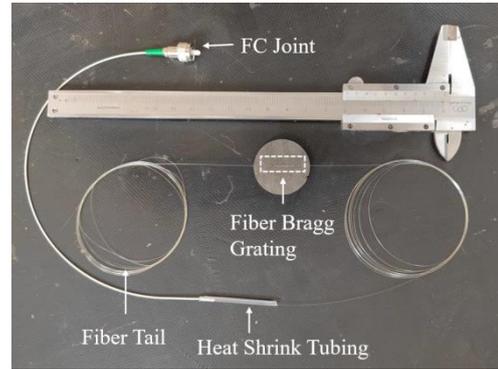


图2 无封装FBG应变传感器图

Fig.2 Diagram of FBG strain sensor without package

黏贴布设，FBG3 和 FBG4 为开圆形凹槽黏贴布设，光栅在钢管上的具体安装位置如下图 3 所示，图 4 为 FBG 表面直接黏贴和开圆形凹槽黏贴的横截面示意图。

表2 圆形钢管参数

Tab.2 Parameters of round steel pipe

Item	Tube length/mm	External diameter/mm	Wall thickness/mm	Elasticity modulus/GPa	Poisson ratio
Seamless round steel pipe	500	140	4	210	0.25

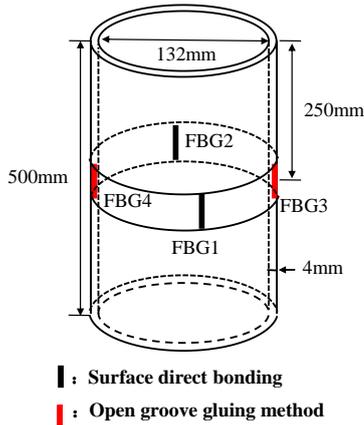
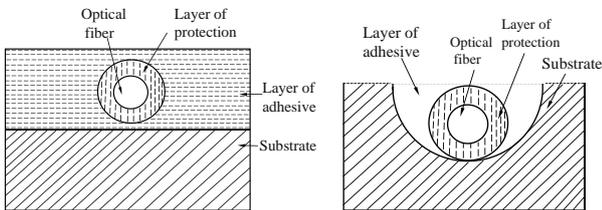


图3 FBG在圆形钢管上布设的三维示意图

Fig.3 Three-dimensional schematic diagram of FBG laid on a circular steel pipe



(a) Surface adhesion (b) Slotted implant adhesion

图4 无封装的FBG表面黏贴和开槽植入黏贴的横截面图

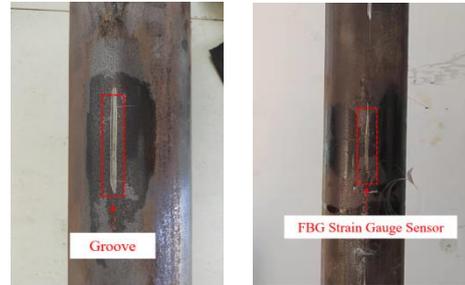
Fig.4 Cross-sectional view of unencapsulated FBG surface adhesion and slotted implant adhesion

### 3.3 FBG 在钢管上的安装

FBG的安装包括表面直接黏贴安装和开槽植入安装，具体安装步骤如下：

①表面除锈：用打磨机械除去钢管表面的铁锈，然后用干抹布擦净；②光栅定位：用卷尺量出圆形钢管沿长度方向中心位置，再用白色记号笔标出光栅区位置；③抛光打磨：用细砂纸在钢管安装光栅位置进行抛光打磨直至光亮为止；④开槽：用电动砂轮在光栅安装位置开深度约为1 mm、宽度约1 mm、长度约为15 mm的圆形凹槽，如图5 (a)所示（此为开槽植入安装独有的步骤，若表面直接黏贴

安装省去此步骤)；⑤光栅黏贴：先用胶带固定拉紧光栅，使其有一定预拉力，再在光栅位置涂抹502胶水，快速凝固后再涂抹一层环氧树脂胶，其中，表面直接黏贴法和开槽植入法胶的总厚度分别约为0.6mm和1.3mm，等待24小时环氧树脂凝固后，再安装另一侧；⑥成活率统计：等光纤安装好后，将光纤光栅接头连接解调仪，对光栅进行初始检测，判断是否安装成功。



(a) Open groove (b) FBG grooved installation

图5 FBG开凹槽安装图

Fig.5 FBG grooved installation diagram

### 3.4 标定步骤

步骤 1: 将安装好 FBG 应变传感器的圆形钢管放置在万能试验机的平台上，如图 6 所示，并在钢管桩两端放置厚度约为 20 mm 的加载板，并调整万能试验机的加载杆对准加载板的中心，保证加载过程中不存在偏压；

步骤 2: 将光纤光栅传感器 FC 接头连接至光纤光栅 M01130 解调仪上，然后将解调仪连接电脑，打开电脑软件，分别对 4 个光栅进行参数设置；

步骤 3: 打开万能试验机，先对钢管进行预压 1 min，结束后卸载到 0，正式对钢管进行加卸载，分六级加卸载，分别为 17.08 kN、34.16 kN、51.24 kN、68.32 kN、84.5 kN 和 102.48 kN，速率控制在 20kN/min，通过公式 (7) 计算可得每级荷载所对应的应变为  $50 \mu\epsilon$ 、 $100 \mu\epsilon$ 、 $150 \mu\epsilon$ 、 $200 \mu\epsilon$ 、 $250 \mu\epsilon$  和  $300 \mu\epsilon$ 。每加载一级后进行保载 2 min，然后重新加卸载，直至试验结束，进行三组平行试验，同时，记录解调仪对应的光纤光栅中心波长的变化。

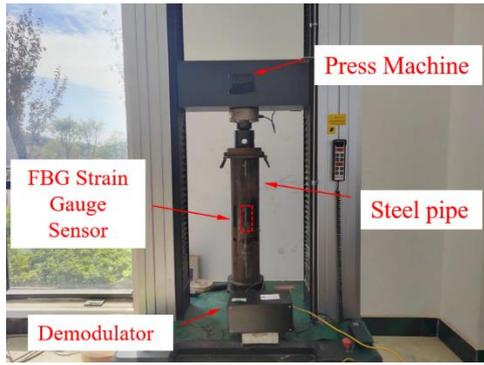


图6 标定试验图

Fig.6 Calibration experimental diagram

## 4 标定结果分析

由于沉桩试验是一种往复加卸载过程，为了较为真实的模拟该过程，通过采用万能试验机对圆形钢管进行反复加卸载<sup>[21]</sup>，图7为荷载与时间变化曲线，图中包括两个部分，前半部分是逐级加载阶段，后半部分是逐级卸载阶段，分别取逐级加载阶段荷载最高点所对应的光纤光栅中心波长和逐级卸载阶段取卸载到最低点所对应的中心波长为标定，绘制中心波长与应变曲线。

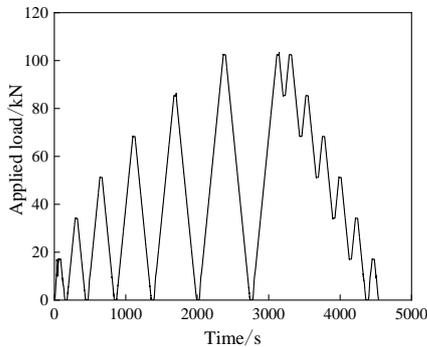


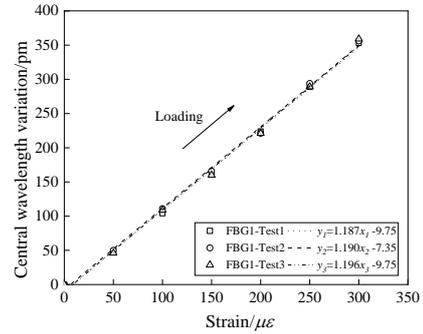
图7 荷载与时间曲线

Fig.7 Curve of load-time

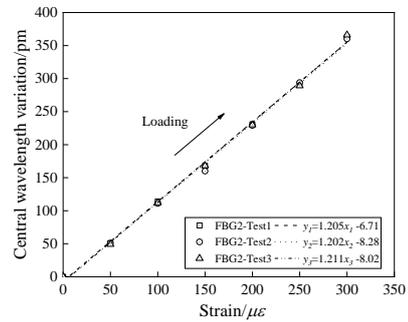
### 4.1 加载阶段标定结果分析

图8为4个FBG应变传感器在三组平行试验下的波长变化与应变之间关系曲线，由图可知，4个FBG应变传感器应变与波长的变化呈现很好的线性关系，采用直线方程  $y=kx+b$  ( $k$ 为光纤光栅的标定系数)对图中的点进行线性拟合，可以发现4个FBG应变传感器在3组平行试验下的结果线性拟合较好，并且标定系数相差不大，如：FBG1应变传感器三组试验的标定系数分别为1.187、1.19和

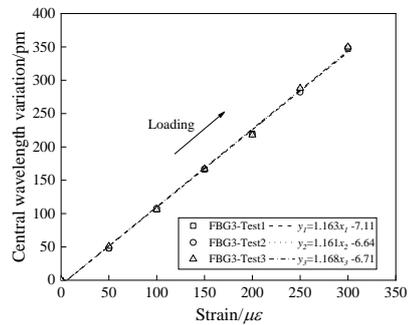
1.196，最大相差仅为0.75%，由此可得三组试验结果的准确性。



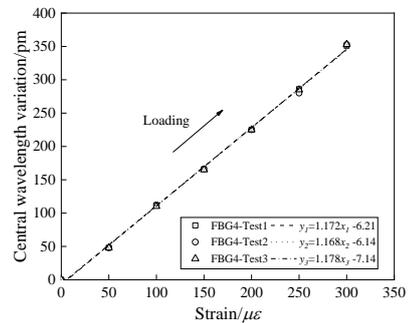
(a) FBG1



(b) FBG2



(c) FBG3



(d) FBG4

图8 FBG波长变化与应变之间关系  
Fig.8 Relationship between FBG wavelength variation and strain

表3 FBG传感器标定系数统计表

Tab.3 Table of calibration coefficient statistics for FBG sensors

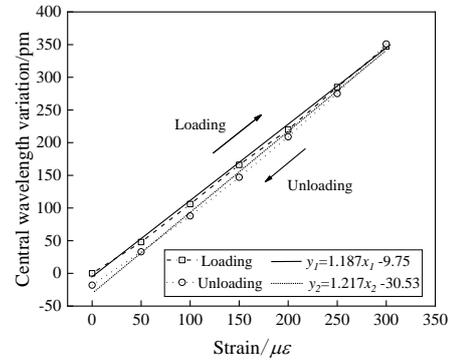
Sensor layout method	Sensor number	Test calibration coefficient			Mean value	Theoretical value of calibration coefficient	Error/%
		Test 1	Test 2	Test 3			
Surface direct adhesive	FBG1	1.187	1.190	1.196	1.191	1.195	0.33
	FBG2	1.205	1.202	1.211	1.206	1.207	0.08
Slotted implant	FBG3	1.163	1.161	1.168	1.164	1.198	2.84
	FBG4	1.172	1.168	1.178	1.173	1.202	2.41

为分析不同布设方案对标定效果的影响，将4个传感器的在三组试验下的标定系数统计于表3，由表可知，在钢管表面直接黏贴的光纤光栅标定系数平均值分别为1.191和1.206，分别接近于理论值1.195和1.207，最大误差仅为0.33%；而开槽植入的光纤光栅标定系数平均值分别为1.164和1.173，比表面直接黏贴的光栅标定系数更小，与理论值相比，最大误差为2.84%。分析原因可能为开槽植入布设光纤的方法在黏贴光栅时所灌入的胶贴层相较于表面直接黏贴更厚，导致应变传递不充分。因此，为了提高FBG传感器的应变传递率，提高测量的精准度，应减小凹槽深度和宽度，从而减小黏贴层的厚度，提高光纤的应变传递和测量精度。

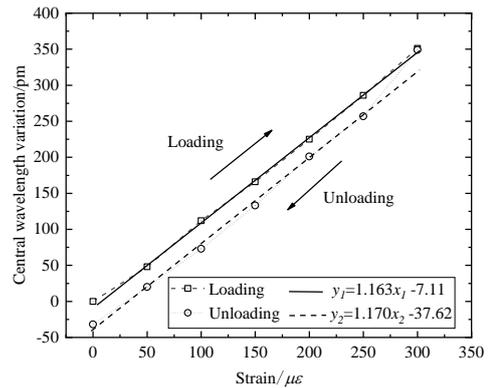
#### 4.2 卸载阶段标定结果分析

为研究卸载阶段对标定系数的影响，考虑论文篇幅有限，仅将传感器FBG1(表面黏贴)和FBG3(开槽植入)在加卸载阶段的应变与中心波长变化曲线绘制于图9。由图可知，传感器FBG1和FBG3在逐级卸载阶段中心波长的变化相较于逐级加载阶段存在一定的滞后，并且传感器开槽植入(FBG3)滞后性比表面黏贴法(FBG1)稍大，如第一级卸载(84.5 kN)时，FBG3的中心波长由原来的286pm变为257pm，而FBG1由原来的285pm变为275pm，滞后率分别为10.1%和3.5%。在逐级卸载阶段，应变与波长的变化线性较好，对卸载阶段的应变与波长变化曲线进行线性拟合，可得FBG1和FBG3的卸载阶段标定系数分别为1.217和1.170，均比加载阶段的标定系数有所增大，原因可能是黏贴剂的胶贴层使得应变传递不充分导致光纤中心波长迟滞，尤其是在卸载到荷载小的情况下。由此可知，不论传感器表面黏贴还是开槽植入在卸载阶段的标定

系数比加载阶段稍大，总体而言变化不大。



(a) FBG1(surface adhesion)



(b) FBG3 (slotted implant adhesion)

图9 加卸载阶段FBG波长变化与应变之间关系

Fig.9 Relationship between FBG wavelength variation and strain during the loading and unloading phase

综上所述，在逐级加载阶段，开圆形凹槽植入布设光纤光栅所得到的标定系数要小于表面直接黏贴，并且表面直接黏贴得到的标定系数更接近理论值；在逐级卸载阶段，两种布设方法的应变与波

长变化曲线都存在一定的滞后,并且传感器开槽植入滞后性比表面黏贴法稍大,但标定系数相差不大。由此可知,表面直接黏贴精度更高,但表面黏贴法又容易损坏光纤光栅,而裸栅开凹槽黏贴法在一定程度上可以保护光纤光栅,因此,需要根据试验具体情况以及试验允许误差范围内选择合理的光纤布设方法。

## 5 结 论

本文为确定无封装 FBG 应变传感器在表面直接黏贴和开圆形凹槽植入情况下的测量精度,提出了一种用于沉桩试验的无封装 FBG 灵敏度系数的标定方法,并将两种布设方法的标定系数与理论值进行比较,得出以下结论:

(1) 与开圆形凹槽植入黏贴法相比,表面直接黏贴法更接近理论值,表面黏贴法测量精度更高。另外,要提高开槽植入法测量的精准度,应减小凹槽深度和宽度,从而减小黏贴层的厚度。

(2) 在逐级卸载阶段,传感器开槽植入和表面黏贴法得到的应变与中心波长有较好的线性关系,但两种布设方法的中心波长变化量存在一定的滞后,并且开槽植入比表面黏贴滞后性稍大。

(3) 在逐级卸载阶段,传感器开槽植入和表面黏贴法得到的标定系数比逐级加载阶段稍大,但总体变化不大。

(4) 表面黏贴法容易损坏光纤光栅,而裸栅开凹槽植入法在一定程度上可以保护光纤光栅,因此,需要根据试验具体情况以及在试验允许误差范围内选择合理的光纤布设方法。

## 参考文献

[1] 孙丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究[D].大连理工大学,2006.  
SUN L. Research of Fiber Bragg Grating sensing technology and engineering application[D].Dalian University of Technology,2006.

[2] DOHERTY P, IGOE D, MURPHY G, et al. Field validation of fibre Bragg grating sensors for measuring strain on driven steel piles[J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(2): 74-79.

[3] YI J, ZHU X, ZHANG H, et al. Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(6): 679-687.

[4] LIU, J., and M. ZHANG. 2012. Measurement of residual force locked in open-ended pipe pile using FBG-based

sensors. *Electron. J. Geotech. Eng.* 17 (2012): 2145–2154.

[5] BUCKLEY, R. M., R. J. JARDINE, S. KONTTOE, and B. M. LEHANE. 2018a. “Effective stress regime around a jacked steel pile during installation ageing and load testing in chalk.” *Can. Geotech. J.* 55 (11):1577–1591.

[6] BYRNE, B. W., et al. 2019. “Monotonic lateral loaded pile testing in a stiff glacial clay till at Cowden.” *Géotechnique*. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.pisa.003>.

[7] MCADAM, R. A., et al. 2019. “Monotonic lateral loaded pile testing in a dense marine sand at Dunkirk.” *Géotechnique*. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.pisa.004>.

[8] 王静,肖涛,朱鸿鹄,梅国雄,刘拯源,魏广庆.透水管桩现场试验光纤监测与承载性能研究[J].*岩土力学*, 2021,42(07):1961-1970.  
WANG J, XIAO T, ZHU H H, et al. Study on bearing capacity of permeable pipe pile by field optical fiber monitoring[J].*Rock and Soil Mechanics*,2021, 42(07): 1961-1970.

[9] 贾立翔,施斌,魏广庆,张振,童恒金.土工离心机光纤光栅测试系统及其模型试验研究[J].*岩土工程学报*,2017,39(05):896-905.  
JIA L X, SHI B, WEI G Q, et al. Fiber Bragg Grating test system and model tests based on geotechnical centrifuge[J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017,39(05):896-905.

[10] 朱鸿鹄,殷建华,靳伟,古冬明.基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J].*土木工程学报*,2010,43(06):109-115.  
ZHU H H, YIN J H, JIN W, et al. Health monitoring of foundations using Fiber Bragg Grating sensing technology[J]. *China Civil Engineering Journal*,2010,43(06):109-115.

[11] 贾永峰,邱婷,宋庆辉等.基于光纤传感技术的大跨连续刚构桥施工阶段张拉预应力监测[J].*华东交通大学学报*,2018,35(02):24-31.  
JIA Y F, QIU T, SONG Q H, et al. Tension Prestress Monitoring of Large Span Continuous Rigid Frame Bridge during Construction Stage Based on Optical Fiber Sensing Technology[J]. *Journal of East China Jiaotong University*,2018,35(02):24-31.

[12] 张桂花.表面黏贴式光纤光栅传感原理及其实验研究[D].西安科技大学,2013.  
ZHANG G H. Study on principle of surface adhesive for Fiber Bragg Grating sensor monitoring and its

experiments[D].Xi'an University of Science and Technology,2013.

- [13] 魏世明.岩体变形光纤光栅传感检测的理论与方法研究 [D].西安科技大学,2008.

WEI S M. Study on theory and method of Fiber Bragg Grating sensing in rock deformation test[D].Xi'an University of Science and Technology,2013.

- [14] LI D S, LI H N, REN L, et al. Strain transferring analysis of fiber bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 024402.

- [15] 刘德华,金伟良,张玉香.光纤传感器与结构基体的应变传递关系[J].浙江大学学报,2006,40(11):1847-1851.

LIU D H, JIN W L, ZHANG Y X. Strain transfer relationship between optical fiber sensor and structure matrix[J]. Journal of Zhejiang University,2006, 40(11):1847-1851.

- [16] 李慧鹏,魏晓马,赵庆松等.一种无封装 FBG 应变传感器标定方法[J].半导体光电,2018,39(06):770-773.

LI H P, WEI X M, ZHAO Q S, et al. A calibration Method for Unencapsulated FBG strain sensor. [J]. Semiconductor Optoelectronics,2018,39(06):770-773.

- [17] ROTH S J, KRATZER P. Intercomparison of optical FBG-based strain sensors and resistive strain gages[J]. TM-TECHNISCHES MESSEN, 2008, 75(12): 647-654.

- [18] LIU Y P, XIE J G, LIU S L, et al. Research on the methodology of development and calibration of flexible encapsulated fiber Bragg grating sensors[J]. Measurement, 2022, 201: 111730.

- [19] 李宏男,任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:151-153.

LI H N, REN L. Fiber Bragg Grating sensing technology for structural health monitoring[M].Bei Jing: China Architecture & Building Press, 2008:151-153.

- [20] 孙俪.光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008:151-153.

SUN L. Fiber grating sensing application problem analysis[M]. Bei Jing: China Architecture & Building Press, 2008:151-153.

- [21] ZHU, B. T., JARDINE, R. J. & Foray, P. (2009). The use of miniature soil stress measuring sensors in applications involving stress reversals. Soils Found. 49, No. 5, 675-688.



**第一作者:** 朱怀龙 (1991—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zhuhl526@sina.com



**通讯作者:** 朱碧堂 (1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土工程。E-mail: btangzh@hotmail.com