

# 基于 RPC 梁的准分布式光纤光栅传感器性能分析

覃荷瑛<sup>1,2</sup>, 汪文琪<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要** 目的 研究内嵌预压式封装的准分布式光纤光栅(FBG)传感器在活性粉末混凝土(RPC)梁中的监测问题及评估其性能。方法 以无粘结预应力 RPC 试验梁为载体,将5个FBG传感器串联并内嵌封装于梁内部钢绞线和钢筋中,构成准分布式传感网络,实现结构整体多点监测;对封装有准分布式FBG传感器的钢绞线进行重复张拉试验,观察传感器监测情况;对分别施加不同预应力的三根RPC梁进行两点集中加载试验,分析传感器对梁的监测情况。结果 准分布式FBG传感器响应灵敏,应变-中心波长变化值拟合线基本重合,应变灵敏度与理论值非常接近,应变监测量程均能达到 $7\,500 \times 10^{-6}$ 以上,可与钢绞线很好的协同变形;同一筋材各测点处FBG传感器的应变发展趋势基本一致,荷载-应变曲线图出现两处明显拐点,对应混凝土梁第一条裂缝出现和钢筋屈服时刻,与理论相符;FBG传感器监测稳定,与同测点位置的电阻应变片数据基本相同,且信号更加稳定。结论 多点准分布式FBG传感器对RPC梁监测精准,稳定性好,该监测方法为预应力结构的分布式监测提供了新思路。

**关键词** 准分布式传感;光纤光栅传感器;封装;活性粉末混凝土;应变监测

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Performance Analysis of Quasi Distributed Fiber Bragg Grating Based on Reactive Powder Concrete Beams

QIN Heying<sup>1,2</sup>, WANG Wenqi<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, China, 541004; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, China, 541004)

**Abstract:** In order to solve the problem of monitoring and evaluate the performance of the embedded prepress packaged quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) sensors in reactive powder concrete (RPC) beams, five fiber Bragg grating sensors are connected in series and

收稿日期:2019-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51768014)

作者简介:覃荷瑛(1972—),女,教授,博士,主要从事结构自感知健康监测以及混凝土结构新材料等方面研究。

encapsulated in steel bars inside unbonded prestressed RPC beams, forming a quasi-distributed sensing network to realize multi-point monitoring of the whole structure. Repeated tension tests were carried out on steel strands encapsulated with quasi-distributed FBG sensors, and the monitoring condition of the sensors were observed. Two-point centralized loading tests were carried out on three RPC beams with different prestressing forces, and the monitoring of the beam by sensors is analyzed. The quasi distributed FBG sensor is sensitive in response and the fitting curve between the strain and the variation of center wavelength are basically coincides, the strain sensitivity is very close to the theoretical value, and the strain monitoring range can reach more than  $7\,500 \times 10^{-6}$ , which can work well with steel strand. The strain development trend of FBG sensor at each measuring point of the same steel bar is basically identical, and there are two obvious inflection points in the load-strain curve, corresponding to the first crack of concrete beam and the yield time of reinforcement, which is consistent with the theory. The FBG sensor is stable in monitoring, which is basically the same as the resistance strain gauge data at the same measuring point, and the signal is more stable. The multi-point quasi distributed FBG sensor is accurate and stable for RPC beam monitoring, which provides a new idea for distributed monitoring of prestressed structure.

**Key words:** quasi distributed sensing; fiber Bragg grating sensor; encapsulation; reactive powder concrete; strain monitoring

光纤光栅传感器<sup>[1-4]</sup>具有体积小、耐高温腐蚀、抗电磁干扰、成本低传输距离远等优点,分布式传感使其实现了对结构大范围的信息提取,是国内外结构健康监测<sup>[5-9]</sup>方面的研究热点. 分布式光纤传感器<sup>[10-13]</sup>主要分为两种:完全分布式光纤传感器,准分布式光纤光栅传感器. 分布式光纤传感器利用单根光纤作为传感和传输元件,实现对整个光纤长度上的构件测量. 朱建朝等<sup>[14]</sup>在桥梁静载试验中应用分布式光纤传感技术,可测得混凝土T梁静载试验时梁底应变的连续分布结果. 王月太<sup>[15]</sup>对分布式光纤传感技术在钢轨应变监测中的应用进行研究,设计出光纤光栅钢轨应变监测系统. 尽管分布式光纤传感技术测量范围大,但其分辨率较低,解调设备要求较高,封装操作较繁琐;准分布式光纤光栅传感技术是将多个光纤光栅传感器串联布置在待测位置,可对结构进行多点精确测量,同时对解调设备兼容性较强,更多的应用于复杂工程中. 温科<sup>[16]</sup>基于准分布式长标距FBG传感器宏应变技术进行钢梁损伤识别研究. 詹亚歌等<sup>[17]</sup>利用一个经过温度补偿封装的长周期光纤光栅解调系统中所有测量点

的传感光栅波长漂移,实现了实时、高效解调的准分布式测量. H. Liu等<sup>[18]</sup>根据推力滑动轴瓦温度分布的特点,采用准分布光纤布拉格光栅(FBG)传感原理和方法对其进行测量,发现光纤光栅温度传感器具有良好的精度、稳定性和一致性. 尽管国内外学者对准分布式光纤光栅传感器进行了各方面的研究,但对其工程应用时的工作性能研究仍是不足.

活性粉末混凝土(RPC)是一种新型超高性能混凝土材料,具有较高的应用价值,但其基本力学性能仍需进一步研究<sup>[19-20]</sup>. 准分布式光纤光栅传感器可对RPC构件的应变进行多点同时监测,同时,其具有其他类型传感器无法比拟的优势. 然而,光纤光栅的极限拉应变一般约为 $4\,500 \times 10^{-6}$ ,工程结构中受力构件的应变往往会超过 $4\,500 \times 10^{-6}$ ,如钢绞线张拉应力一般会达到0.75倍的极限应力,其应变可达 $7\,000 \times 10^{-6}$ 以上,远超光纤光栅的极限应变,因此准分布式光纤光栅传感器量程不足是其应用于监测首需解决的技术难题. 基于此,笔者将前期研发的内嵌预压式封装方法<sup>[21-22]</sup>应用于准分布式FBG传感

器,粘贴传感器于无粘结预应力RPC梁内钢绞线和钢筋中,进行多点应变监测,分析不同预应力程度下RPC内的准分布式FBG传感器的工作性能,为其工程应用提供理论依据。

1 准分布式钢绞线重复张拉试验

1.1 试件制作

机械打散钢绞线取得中心丝并设置深0.5 mm、宽1 mm的轴向平行凹槽,在中心丝持荷 $0.3 P_b$  ( $P_b$ 为中心丝的极限荷载)状态下将制作好的FBG传感器粘贴封装于凹槽中,待粘结剂达到足够强度后卸载中心丝,对钢绞线端部引出的光纤进行封装保护,将中心丝与边丝重新扭绞成型,制得多点准分

布式光纤光栅自感知钢绞线,如图1所示。传感网络选用波分复用技术,以间隔420 mm串联布置5个FBG传感器,构成准分布式FBG传感器。为避免传感器中心波长发生重叠干扰,设置每个FBG传感器的初始中心波长各不相同,中点处的初始中心波长最大,准分布式FBG传感器布置情况如图2所示。

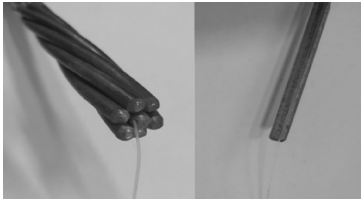


图1 准分布式FBG传感器封装  
Fig. 1 Package of quasi distributed FBG sensor

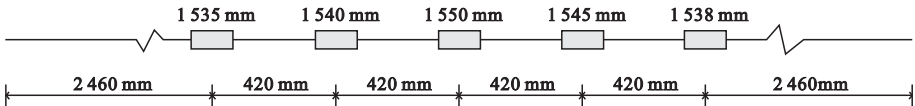


图2 准分布式光纤光栅传感器测点布置图  
Fig. 2 The measuring points layout of quasi distributed FBG sensor

该种封装在自感知钢绞线制作阶段使传感器产生一定的压应变,待钢绞线施工张拉和服役时利用FBG传感器压应变的恢复感知其产生的一部分拉应变,而后再由其拉应变感知,达到扩大监测量程的效果。

1.2 试验概况

试验采用1×7的1860级普通钢绞线,公称直径15.2 mm,横截面积140 mm<sup>2</sup>,极限荷载260 kN,屈服荷载221 kN,有效锚固长度为3 m;光纤光栅解调仪为Agilent86142B光谱仪,波长解调范围1528~1565 nm,波长精度2.5 pm。

试验选用三根准分布式自感知钢绞线,记为T1、T2、T3,重复张拉试验加载方案如下:①将自感知钢绞线穿入张拉台座,使用穿心式千斤顶进行张拉,钢绞线一端引出的光纤与解调仪连接,读取数据;②预张拉荷载 $0.2 P_b=52$  kN(此处 $P_b$ 为钢绞线的极限荷载,260 kN),取50 kN,消除钢绞线内应力,持荷2 min后卸载;③对钢绞线以每级0.05

$P_b$ (取13 kN)的力进行逐级加载,张拉速度不超过100 MPa/min,到达每级荷载后持荷5 min,记录光纤光栅传感器的中心波长;④荷载达到 $0.8 P_b$ (取208 kN)后,持荷15 min,观察传感器数据跟随情况及封装损伤情况;⑤逐级卸载至 $0 P_b$ ;⑥重复步骤③~⑤加卸载3次。

试验现场如图3所示。

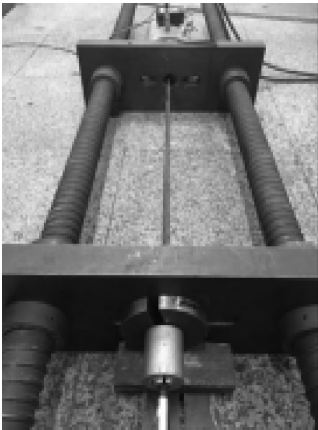


图3 重复张拉试验现场  
Fig. 3 Repeated tension test on site

1.3 数据处理和分析

由光谱特性可知,光纤光栅的中心反射波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \tag{1}$$

式中: $n_{\text{eff}}$ 为光栅区的有效折射率; $\Lambda$ 为光栅周期.

外界温度或应变会引起光纤光栅的周期和折射率发生变化,从而使布拉格光栅反射波长变化.光栅中心波长变化与应变的关系可表示为

$$\Delta\lambda = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \lambda_B \cdot \varepsilon = \lambda_B (1 - P) \cdot \varepsilon = K_\varepsilon \cdot \varepsilon. \tag{2}$$

式中: $\Delta\lambda$ 为波长的变化值; $\mu$ 为泊松比; $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 为光弹效应系数; $P$ 为光弹系数; $\varepsilon$ 为应变; $K_\varepsilon$ 为FBG应变灵敏度.

将钢绞线的应变与准分布式FBG传感器5个测点的中心波长变化量 $\Delta\lambda$ 进行拟合,拟合直线的斜率即FBG传感器的应变灵敏度 $K_\varepsilon$ ,观察传感器的响应情况如图4所示.

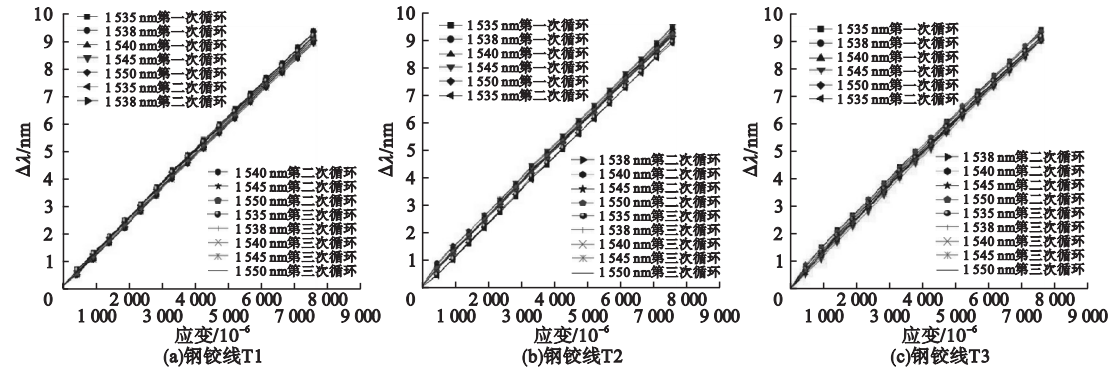


图4 自感知钢绞线应变-中心波长拟合图

Fig. 4 Fitting diagram of self sensing steel strand between strain and center wavelength

由图4可以看出,在三次循环加卸载下应变与中心波长变化值的线性拟合效果非常好,线性相关系数均大于0.99,说明在钢绞线0.8 $P_b$ 的荷载循环张拉下准分布式光纤光栅传感器的中心波长与应变具有很好的线性关系,且监测量程均能达到 $7\,500 \times 10^{-6}$ 以上.5个测点处FBG传感器的拟合直线几乎重合,对钢绞线应变响应保持一致,试验中准分布式自感知钢绞线受轴向荷载,整段有效锚固长度内的钢绞线应变理论上是一致的,因此同一应变作用下准分布布置的5个FBG传感器中心波长变化量一致与理论相符.同一光纤光栅在三次循环张拉后的中心波长偏差很小,说明传感器的迟滞不大,具有很好的线性度和重复性.

拟合结果显示传感器的应变灵敏度均在 $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 左右,理论计算中心波长 $\lambda_B$ 分别为1 535 nm、1 538 nm、1 540 nm、1 545 nm、1 550 nm的FBG传感器应变灵敏度对应为 $1.203 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 、

$1.206 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 、 $1.207 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 、 $1.211 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 、 $1.215 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\varepsilon$ .传感器的拟合应变灵敏度与理论计算值非常接近,说明各测点的光纤光栅响应灵敏,测量精度高,偏差的主要原因可能有以下几种:①理论计算灵敏度是在光纤生产和准分布式光纤光栅传感器制作工序完全理想状态下的,与实际情况必然有误差;②因人工操作的随机性,钢绞线中心丝凹槽不够平滑,FBG传感器粘贴封装过程中,与中心丝不是完全平行,导致传感器轴向应变减少;③FBG传感器由环氧树脂等类似粘结材料粘贴于钢绞线中心丝凹槽中,传感器、粘结剂和钢绞线中心丝三者之间的应变传递使得钢绞线的真实应变与传感器的监测数据存在差异;④温度变化及试验误差等其他因素.

2 两点集中加载试验

2.1 RPC梁制作

试验共设计了3根无粘结预应力活性粉



未混凝土 T 型梁,混凝土组成材料、截面尺寸和配筋率均相同。底部受拉钢筋为直径16 mm 的 HRB400 钢筋,箍筋和顶部架立筋为 10 mm 的 HRB400 钢筋。预应力钢绞线选用制作好的三根准分布式自感知钢绞线(L1、L2、L3),底部两根受拉钢筋记为 R1、R2。

RPC 梁长为 2 600 mm,底部受拉区布置 2 根纵向钢筋,顶部布置 4 根纵向架立筋,箍筋规格为 140 mm × 230 mm,间距 70 mm,顶部向下分布筋规格为 340 mm × 30 mm,间距 150 mm。为避免在施加预应力时,梁端部发生局部受压破坏,配置螺旋箍筋并在梁两端预埋钢垫板;螺旋箍筋内径100 mm,间距40 mm,共 8 匝,钢垫板尺寸为 200 mm × 200 mm × 15 mm,梁截面尺寸和配筋如图 5 所示。

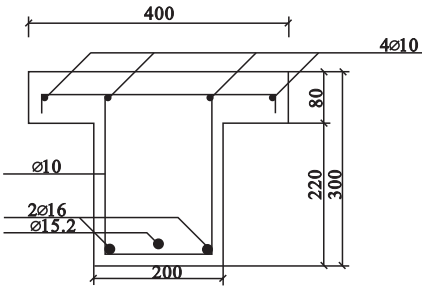


图5 梁横截面和配筋

**Fig. 5** Cross section and reinforcement of the beam

为研究准分布式 FBG 传感器对 RPC 梁不同位置的应力应变监测情况,在梁底部受拉钢筋中也内嵌封装了准分布式 FBG 传感器,但不同的是底部钢筋不采用预张拉,内部封装的 FBG 传感器初始波长未减小。自感知钢筋的制作过程如下:①钢筋表面设置宽为 1.5 mm,深为 1 mm 的凹槽,将如图 2 布置的准分布式 FBG 传感器粘贴封装,其中初始波长为 1 550 nm 的光纤光栅位于钢筋凹槽的中点位置;②除光栅位置外,所有光纤用毛细软管包裹;③将钢筋端部引出的光纤用直径为 3 mm 的软管包裹,避免光纤在混凝土振捣过程中折断;④传感器封装完毕后,在凹槽除光栅位置外的其余部分填充弹性软胶;⑤在 5 个测点的 FBG 传感器同一位置的钢筋

侧面粘贴应变片,钢筋传感布置情况如图 6 所示。

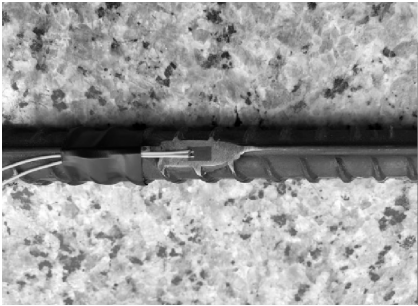


图6 钢筋的传感器封装

**Fig. 6** Package of reinforcement sensor

2.2 试验加载

试验采用两点集中加载,分别在跨中、加载点和支座处设置千分表,记录不同荷载作用下 RPC 梁的挠度变化,同时在梁表面的跨中和加载点处侧面粘贴电阻应变片,记录 RPC 梁的变形情况。使用解调仪现场记录准分布式 FBG 传感器的中心波长,电阻应变片数据由 DHDAS 动态信号采集分析仪自动采集,现场实况图如图 7 所示。



图7 现场实况

**Fig. 7** Site condition

采用 YDC240QXB-200 预应力穿心前卡式张拉千斤顶进行预张拉,钢绞线均为后张法无粘结预应力钢绞线,对三根试验梁分别施加  $0.45f_{ptk}$ 、 $0.65f_{ptk}$ 、 $0.75f_{ptk}$  的控制应力,其中  $f_{ptk}$  为 1 860 MPa。将钢绞线一端固定,另一端单独张拉,以每级  $0.05f_{ptk}$  进行逐级张拉,每级张拉完毕后静置 5 mm,待钢绞线受力变形趋于稳定后,记录 FBG 传感器的中心波长。对钢绞线的预应力和 FBG 传感器中心波长值进行线性拟合,如图 8 所示。

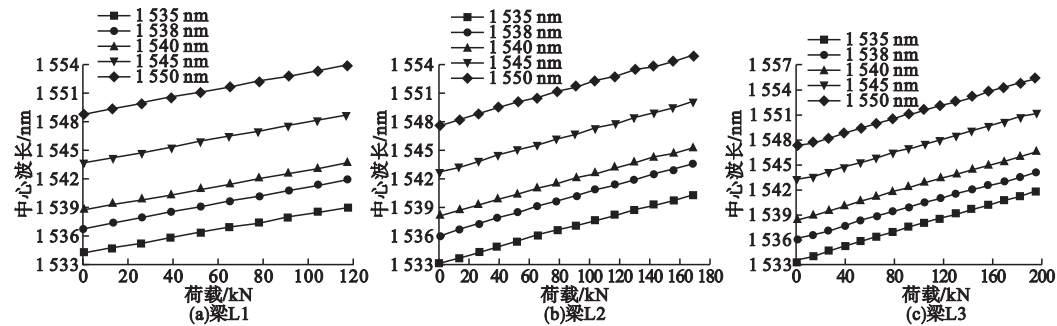


图8 钢绞线的预应力-波长拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of steel strand between prestress and wavelength

由图8可知,不同张拉控制应力下的钢绞线拟合直线斜率基本一致,换算的应变灵敏度与重复张拉试验时的应变灵敏度接近,施加预应力对光纤光栅传感器的应变感知影响不大;混凝土振捣时的强大冲击力没有造成传感器破断,凹槽内嵌封装能很好地解决FBG传感器存活率低的问题;混凝土内部水化反应产生的高温没有造成传感器与钢绞线粘结失效,该准分布式封装方法完全可以应用于混凝土工程中。

从图8可以看出,5个测点的FBG传感器拟合直线斜率几乎相同,对应力的感知基本一致。钢绞线中光纤光栅加载前的中心波长均比图2所示对应的初始波长小,传感器的量程扩大。

对三根RPC梁分别进行两点集中加载,总长2600mm,净跨2200mm,两加载点相距900mm,加载方案如下:①分两级预加载

20kN,每级加载10kN后稳定2min,检查各仪器仪表是否正常工作;②正式加载,以每级10kN逐级加载,每级加载完毕后保持5min,记录应变仪、千分表和解调仪中心波长数据,观察试验梁表面是否出现裂缝;③开裂后,认真观察裂缝扩展情况和新裂缝出现情况并进行标记,用裂缝观测仪记录裂缝宽度,同时记录RPC梁的挠度及FBG传感器中心波长变化情况;④继续加载,观察FBG传感器是否破断或信号减弱,当试验梁出现明显较大裂缝时,撤去千分表,加载至梁完全破坏,记录传感器和各仪器数据。

2.3 试验现象及结果分析

试验完成后,将钢绞线和钢筋的荷载与对应FBG传感器监测中心波长换算的应变值进行拟合,如图9所示。对比分析钢绞线应力应变情况、底部受拉钢筋的应力屈服情况以及不同测点的FBG传感器波长变化情况。

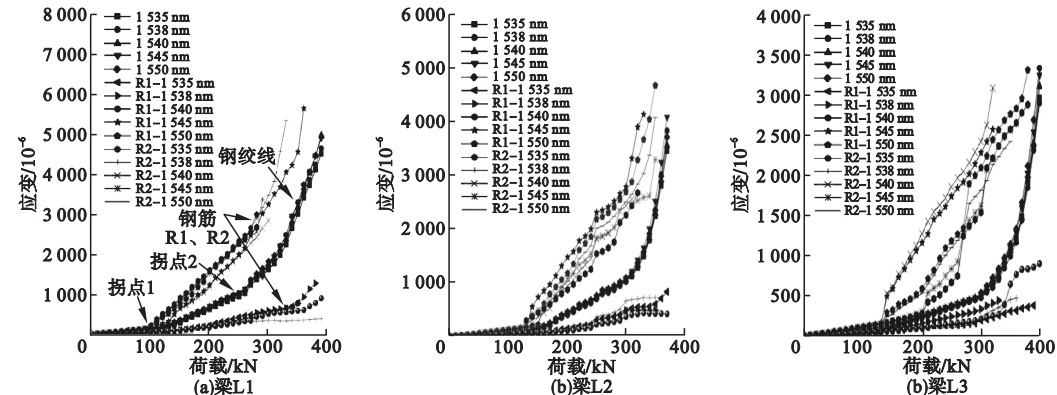


图9 试验梁荷载-应变图

Fig. 9 Load and strain diagram of test beam

由图9可以看出,钢绞线5个测点处的FBG传感器应变发展曲线几乎重合,且前期应变发展缓慢,加载后期应变增加迅速.预应力的施加采用的是无粘结预应力钢绞线,且钢绞线与混凝土隔绝层间涂有润滑油,每级荷载加载完成后5 min,钢绞线的应力传递基本完成,使得各测点处的应变基本一致.应变发展曲线接近重合与理论相符.

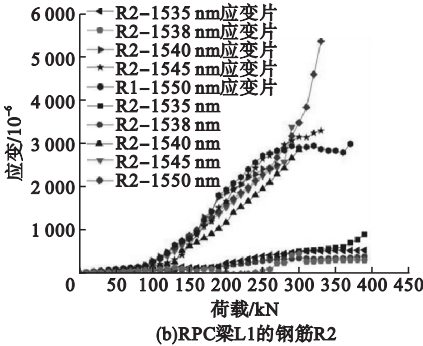
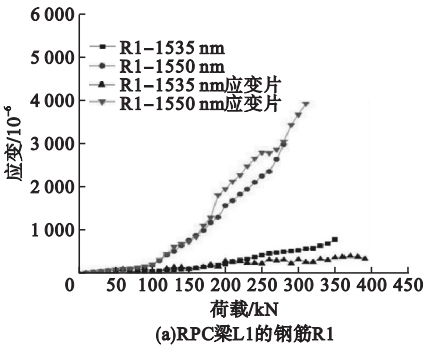
对于底部受拉钢筋,其传感器应变增长速率大于钢绞线,初始波长为1 535 nm和1 538 nm的FBG传感器测点位于梁的弯剪段,初始波长为1 540 nm、1 545 nm和1 550 nm的传感器测点位于梁的纯弯段.在加载过程中纯弯段传感器应变明显大于弯剪段,对称布置的传感器测点应变发展趋势基本一致,底部对称布置的两根钢筋R1、R2应变发展曲线也基本一致,与理论相符.试验梁L2、L3纯弯段钢筋测点的应变值较离散,可能是梁表面不平整,加载时出现偏载所致.纯弯段钢筋的准分布式FBG传感器应变大于钢绞线的传感器应变值,这是由于钢绞线位置高于钢筋,试验梁受弯时,底部受拉钢筋的拉应力大于钢绞线的拉应力.

当荷载达到100 kN时,混凝土梁L1出现第一条裂缝,部分受拉区混凝土退出工作,致使钢绞线和钢筋的应力突然增加,图9(a)出现第一个拐点;荷载达到260 kN左右时,钢筋应变超过屈服应变值( $2\,000\times10^{-6}$ )达到屈服,应变发展迅速,梁变形增大,导致钢绞线拉应力突然增加迅速发展,出现第二个拐点.图9(b)~9(c)也出现类似情况,底部钢筋先于钢绞线承受拉应力,钢筋屈服前应

变增加速率大于钢绞线.梁L2在130 kN时出现第一个拐点,在280 kN左右时钢筋达到屈服,跨中钢筋应变达到了 $2\,250\times10^{-6}$ ,变形迅速增加,出现第二个拐点.梁L3的钢筋应变图较离散,左侧加载点接近的两个FBG传感器应变值相对大于右侧加载点的传感器应变,可能是加载时出现偏载,但应变发展趋势基本一致;R1-1540与R2-1545测点应变曲线出现几次转折,其原因是加载点附近梁表面出现多个裂缝,部分混凝土不再承受拉应力;荷载达到140 kN时,梁表面左侧加载点出现第一条裂缝,部分受拉区混凝土退出工作,荷载增加至300 kN左右,跨中钢筋三个测点应变先后达到屈服状态,钢绞线拉应力迅速增加,应变图出现第二个拐点.

为验证FBG传感器监测RPC应力状态的准确性,对比底部受拉钢筋电阻应变片的应变值和光纤光栅传感器监测的应变,作荷载与应变监测值的曲线图,由于混凝土施工振捣时对部分电阻应变片造成了破坏,导致部分数据缺失,但其对称位置完好,仅对比有效数据,如图10所示.

由图10可以看出,FBG传感器与应变片的应变发展趋势非常接近,但传感器的应变曲线图相对更平滑稳定.裂缝出现前,两者数据几乎一致,应变继续增大后,差异逐渐明显;裂缝出现后,同一荷载处两者应变均急剧增加,应变曲线图出现突变,但趋势相同,且FBG监测过程中未出现迟滞、信号减弱等情况,说明准分布式FBG传感器可准确反映混凝土梁的应变状态,且监测更加稳定.



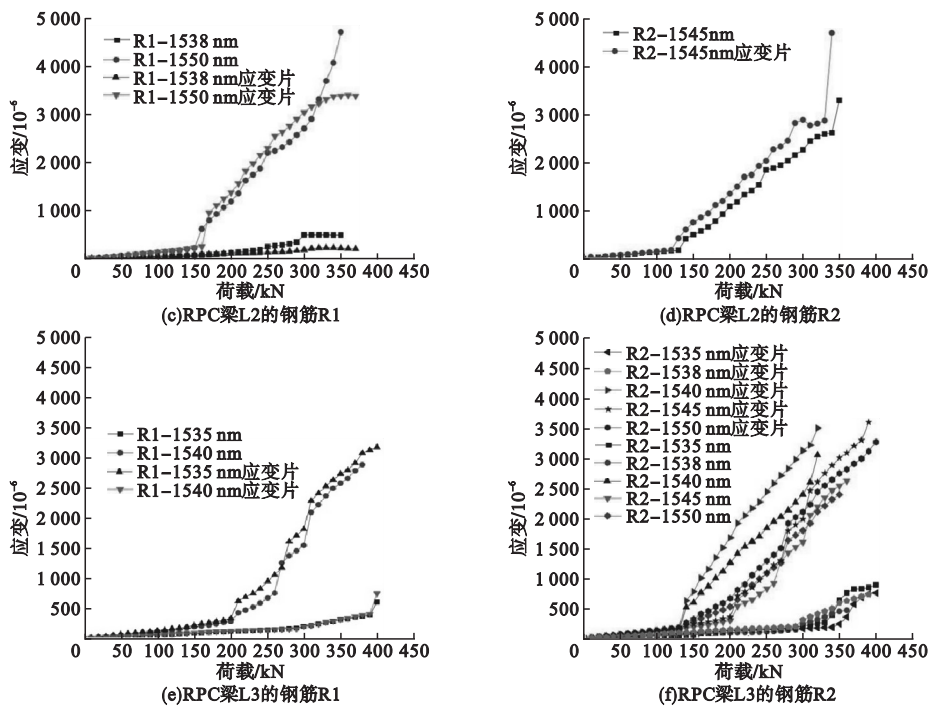


图 10 底部钢筋 FBG 传感器与应变计应变对比图

Fig. 10 Strain comparison diagram of FBG sensors and strain gauges on bottom reinforcement

3 结 论

(1)对内嵌封装准分布式 FBG 传感器的钢绞线进行重复张拉试验,传感器的应变与中心波长变化值具有很好的线性关系,拟合应变灵敏度与理论计算灵敏度非常接近,各测点对钢绞线的应变感知一致,且应变监测量程可达到  $7\,500\times10^{-6}$  以上;经过三次循环张拉,准分布式 FBG 传感器的中心波长偏差很小,数据迟滞小,具有较好的线性度和重复性。

(2)对三根试验梁分别施加  $0.45f_{ptk}$ 、 $0.65f_{ptk}$ 、 $0.75f_{ptk}$  的张拉控制应力,预应力的施加对传感器的应变灵敏度几乎无影响,内嵌式封装能很有效保护 FBG 传感器,该种封装的准分布式 FBG 传感器完全可以应用于混凝土工程中。

(3)对无粘结预应力 RPC 梁进行两点集中加载试验,准分布式 FBG 传感器可真实反映梁中钢绞线和钢筋的应力应变情况;FBG 传感器的荷载 - 应变曲线图均出现两处拐点,分别对应 RPC 梁的第一条裂缝出现和底

部受拉钢筋达到屈服,曲线的发展趋势可反映 RPC 梁在加载过程中的变化情况。

(4)钢筋的 FBG 传感器应变传感情况与电阻应变片基本相同,且其荷载 - 应变曲线图相对更平滑稳定,准分布式 FBG 传感器对应变的监测准确,且稳定性更好。

参考文献

[1] 黄喜新. 光纤传感器在预应力混凝土结构检测中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2013. (HUANG Xixin. Optical fiber sensor in the structure of the detection applied research[D]. Changsha: Central South University, 2013.)

[2] 王子谦. 基于光纤光栅的应变监测研究[D]. 北京:北京交通大学,2010. (WANG Ziqian. FBG-based strain monitoring studies [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.)

[3] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317. (XU Guoquan, XIONG Daiyu. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. Chinese optics, 2013, 6(3): 306- 317.)

[4] 兰春光,王天昊,刘航,等. 光纤光栅缓粘结智能钢绞线的研制及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(6): 100-104. (LAN Chunguang, WANG Tianhao, LIU Hang, et al. Development and application of



- FBG retard-bonded smart steel strands [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2014, 46(6):100-104. )
- [5] 邢厚俊. 光纤光栅传感技术用于铁路边坡滑动监测的试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2):85-88.  
(XING Houjun. Experimental study on railway slope sliding monitoring with optical fiber grating sensing technology [J]. Railway engineering, 2018, 58(2):85-88.)
- [6] 王正方. 桥隧工程安全监测的光纤光栅传感理论及关键技术研究[D]. 济南:山东大学, 2014.  
(WANG Fangzheng. Study on fiber Bragg grating sensing theory and key technology for bridges and tunnels engineering safety monitoring [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014. )
- [7] TAN C H, SHEE Y G, YAP B K, et al. Fiber Bragg grating based sensing system: early corrosion detection for structural health monitoring [J]. Sensors and actuators A: physical, 2016, 246:123-128.
- [8] TAN C H, ADIKAN F R M, SHEE Y G, et al. Non-destructive fiber Bragg grating based sensing system: early corrosion detection for structural health monitoring [J]. Sensors and actuators A: physical, 2017, 268:61-67.
- [9] 何武超, 李劲晖, 江震, 等. 基于光纤传感技术的桥梁拉索健康监测技术试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2019(6):140-142.  
(HE Wuchao, LI Shaohui, JIANG Zhen, et al. Health monitoring of bridge stayed cable based on fiber sensing technology [J]. Urban roads bridges & flood control, 2019(6):140-142. )
- [10] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11):29-33.  
(LIU Deming, SUN Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its application [J]. Laser & optoelectronics progress, 2009, 46(11):29-33. )
- [11] 何俊. 分布式光纤传感系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.  
(HE Jun. Research on some key technologies of distributed fiber sensing system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. )
- [12] 彭蓓, 孟丽君. 分布式光纤光栅传感的研究与发展[J]. 软件导刊, 2012, 11(6):6-8.  
(PENG Bei, MENG Lijun. Research and development of distributed fiber grating sensor [J]. Software guide, 2012, 11(6):6-8. )
- [13] 王鹏致, 刘春桐, 李洪才, 等. 一种基于LabVIEW的准分布式光纤光栅传感解调系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2):206-213.  
(WANG Pengzhi, LIU Chuntong, LI Hongcai, et al. A quasi distributed fiber Bragg grating sensing demodulation system design based on LabVIEW [J]. Laser & optoelectronics progress, 2016, 53(2):206-213. )
- [14] 朱建朝, 李湘云, 冯亚非, 等. 分布式光纤传感技术在桥梁静载试验中的应用[J]. 交通科技, 2019(2):36-38.  
(ZHU Jianchao, LI Xiangyun, FENG Yafei, et al. Application of distributed optical fiber sensing technology in bridge static load test [J]. Transportation science & technology, 2019(2):36-38. )
- [15] 王月太. 分布式光纤传感技术在钢轨应变监测中的应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2015.  
(WANG Yuetai. Research on applying distributed optical fiber sensing technology in rail strain monitoring [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015. )
- [16] 温科. 基于准分布式长标距FBG传感器宏应变技术的损伤识别研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2013.  
(WEN Ke. Study on damage detection based on quasi-distributed long-gage fiber grating sensor [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2013. )
- [17] 詹亚歌, 吴华, 裴金诚, 等. 高精度准分布式光纤光栅传感系统的研究[J]. 光电子激光, 2008(6):758-762.  
(ZHAN Yage, WU Hua, PEI Jincheng, et al. Study on high accuracy quasi-distributed fiber grating sensor system [J]. Journal of optoelectronics laser, 2008(6):758-762. )
- [18] LIU H, YU Q, TAN Y G, et al. Feasibility study on temperature distribution measurement method of thrust sliding bearing bush based on FBG quasi-distributed sensing [J]. Sensors, 2019, 19(14):32-45.
- [19] 罗许国, 王义翔, 汪建群. 无粘结预应力RPC梁疲劳性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 34(6):988-997.  
(LUO Xuguo, WANG Yixiang, WANG Jianqun. Experimental study on fatigue behavior of unbonded prestressed RPC beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008 34(6):988-997. )
- [20] 付强, 罗丽娜, 邓宁, 等. 无粘结预应力RPC简支梁受弯性能分析[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2013, 34(3):69-75.  
(FU Qiang, LUO Lina, DENG Ning, et al. Non-bonded prestressed RPC charpy flexural performance analysis [J]. Journal of Jinggangshan university (natural science), 2013, 34(3):69-75. )
- [21] 覃荷瑛, 张贺丽, 沈全喜, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅智能钢绞线的标定试验[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5):76-81.  
(QIN Heying, ZHANG Heli, SHEN Quanxi, et al. Calibration experiment of large range intelligent steel strand with FBG sensor pre-pressed and embedded in groove [J]. Railway standard design, 2018, 62(5):76-81. )
- [22] 朱万旭, 沈全喜, 覃荷瑛. 体内预应力钢绞线光纤光栅监测技术及其应用[J]. 光子学报, 2019, 48(2):68-75.  
(ZHU Wanxu, SHEN Quanxi, QIN Heying. Research and application of FBG monitoring technology in internal prestressed steel strand [J]. Acta photonica sinica, 2019, 48(2):68-75. )
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)