

基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测

吴静红^{1*}, 刘浩¹, 杨鹏^{2,3}, 蒋娜¹

¹苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

²南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046;

³苏州南智传感科技有限公司, 江苏 苏州 215123

摘要 混凝土结构裂缝难以从理论上准确预测。借助混凝土梁模型试验,研究了光频域反射计(OFDR)技术在混凝土结构开裂辨识和发展状况监测上的应用。试验结果表明,OFDR 技术可以实现对混凝土结构 0.002 mm 级别微裂纹的预警,可以定位裂缝位置,空间分辨率达到 1 cm,并可监测裂缝发展过程。相比其他分布式监测技术,采用 OFDR 技术得到的裂缝定位结果和对裂缝发展的监测结果更加准确,具有广阔的应用前景。

关键词 测量; 光频域反射计; 分布式监测; 混凝土; 裂缝监测; 模型试验

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.241201

Identification and Monitoring of Concrete Cracks Based on Optical Frequency Domain Reflectometry Technique

Wu Jinghong^{1*}, Liu Hao¹, Yang Peng^{2,3}, Jiang Na¹

¹School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

²School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

³Suzhou NanZee Sensing Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract The theoretically accurate prediction for cracks in concrete structures is difficult to realize. Applications of the optical frequency domain reflectometry (OFDR) technique in the identification and monitoring of cracks of concrete structures are studied by using the model test of concrete beams. Test results show that the OFDR technique can realize the warning of 0.002 mm micro-crack in concrete structures. The crack position can be located with a spatial resolution of 1 cm. The development process of cracks can also be monitored. Compared with other distributed monitoring techniques, the OFDR technique is more accurate in crack location and development monitoring and has a broad application prospect.

Key words measurement; optical frequency domain reflectometer; distributed monitoring; concrete; crack monitoring; model experiment

OCIS codes 120.51840; 060.2370; 130.6010; 140.3490

1 引言

混凝土作为一种可塑性高、耐久性好、价格低廉的建筑材料,已被广泛应用于各种民用、工业和军事工程上。混凝土的特点是抗压能力强,但抗拉能力差,极易产生微裂缝。微裂缝会破坏混凝土的整体性

和抗渗性,加速混凝土碳化和内部钢筋锈蚀,使裂纹扩展,降低结构强度,影响混凝土的耐久性,严重时会导致结构丧失承载力、造成安全事故^[1]。因此,对混凝土裂缝的位置及其发展变化进行监测极为重要。

传统的监测手段是通过在混凝土结构上布设应变传感装置来实现对结构的健康监测,但该类方法

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-05-31; 录用日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41907232)、江苏省自然科学基金项目(BK20180972)、江苏省建设系统科技项目(2018ZD053)

* E-mail: wjh@mail.usts.edu.cn

大多为点式监测,需要先分析结构的受力情况,通过预估结构薄弱点布设传感器,从而进行裂缝监测。然而,混凝土裂缝的发生具有时空随机性,点式监测常常会造成漏检漏监。光纤布拉格光栅(FBG)是一种准分布式光纤传感器,可以在一根光纤上实现多点测量。田石柱等^[2]在混凝土梁底区域粘贴多个FBG传感器,通过每个区域内FBG的应变变化判断是否出现裂缝。王源等^[3]研究了不同粘贴方式对FBG测量结果的影响,发现粘贴长度越长,误差越小。FBG传感器的精度高,应变测量准确,广泛运用于结构健康监测,但其依旧需要预估结构受力情况,不能实现全分布式监测。如何实现混凝土结构裂缝的连续、分布式、实时、长期监测是工程专家一直探索的关键问题。

近年来,光纤通信技术逐渐成熟,航空航天领域首先将光纤用于应变监测,因其具有可分布式布置、对结构的扰动小、耐腐蚀、抗干扰性强等优势,岩土工程、结构工程等领域也开始广泛采用分布式光纤监测技术^[4-7]。叶宇霄等^[8]研究了布里渊光时域分析技术(BOTDA)中利用分布式光纤传感器测量裂缝时光纤角度的影响,并提出了一种计算公式,所使用的BOTDA解调仪的解调精度为10 cm。贾强强等^[9]将脉冲预泵浦-布里渊光时域分析技术(PPP-BOTDA)用于混凝土结构的开裂辨识和发展情况监测,并对其应变系数和温度系数进行了标定。虽然混凝土裂缝的分布式监测研究已取得一些成果,但受技术限制,分布式光纤感测技术的空间分辨率不高,监测结果相对粗糙。Bremer等^[10]将光纤与纤维编织在一起并布设在混凝土板上,当板受到破坏时,根据光频域反射计(OFDR)应变数据可准确找到裂缝位置,与FBG数据对比,验证了OFDR用于裂缝监测的可行性。Barrias等^[11]将光纤粘贴在混凝土内的钢筋上,当混凝土开裂时,基于OFDR技术可以监测到裂缝的位置,对试件进行循环荷载试验,发现多次循环后,数据开始出现误差,这可能是由光纤残余应变和黏结剂耦合度不好所导致的。Villalba等^[12]对光散射反射计(OBR)应变测量传感器在混凝土开裂监测中的有效性和实用性进行了分析,对裂缝可能产生位置的定位精确度进行了验证。对于分辨率高的OFDR技术,现有研究大多局限在裂缝定位上,没有针对裂缝宽度监测的定量研究,无法满足实际工程中对裂缝进行精确定位和对裂缝发展过程进行监测的需求^[13-14]。

本文利用基于OFDR的分布式光纤感测技术,通过有机玻璃板试验研究了高空间分辨率的分布式

感测技术在混凝土结构开裂监测上的应用可行性,并开展混凝土梁开裂模型试验,用OFDR技术对裂缝的发生位置和发展规律进行监测。

2 OFDR 监测技术原理

分布式光纤感测技术主要基于光纤中的3种光散射,即布里渊(Brillouin)散射光、拉曼(Raman)散射光和瑞利(Rayleigh)散射光,其中,OFDR技术是一种基于瑞利散射光变化的应变测量技术,其工作原理如图1所示。激光器发射的激光经耦合器分光后分为两路,分别进入参考臂和信号臂,参考臂的本振光经反射镜反射后返回,与信号臂的背向瑞利散射光一同进入耦合器,由于二者频率不同,因此发生拍频干涉,其干涉信号的拍频与信号臂发生背向散射位置和光信号入射端的距离成正比,经过快速傅里叶变换(FFT),就可以得到距离域上光纤背向瑞利散射的信号信息。当光纤产生轴向应变时,背向瑞利散射信号的频率就会发生漂移,通过对参考臂和信号臂的测量信号进行相关运算,可以得到光谱漂移值,光谱漂移值与光纤应变成正比。

因此,利用移动窗对光纤逐点进行扫描,就可以同时获得被测光纤各个位置的分布式应变信息,移动窗的大小也就是应变检测的空间分辨率,测得的应变为该移动窗内的平均应变。OFDR技术的空间分辨率与探测器带宽无关,而与频谱分析精度有关,故可以获得远高于传统光时域反射分析类分布式感测技术的空间分辨率与精度^[15-16]。

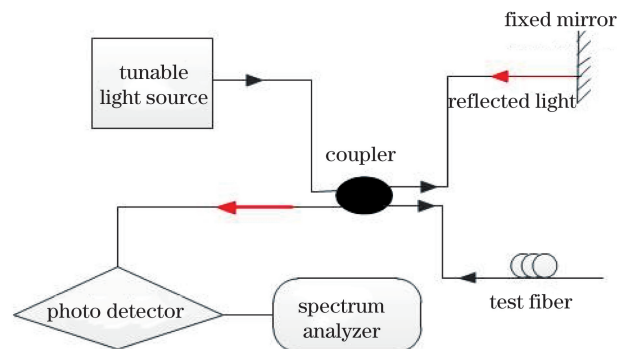


图1 OFDR工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of OFDR

3 裂缝识别可行性试验

3.1 传感光缆与设备

试验采用苏州南智传感科技有限公司生产的0.9 mm高传递紧护套应变感测光缆,封装材料为聚氨酯(图2),弹性模量为1.75 MPa。采用

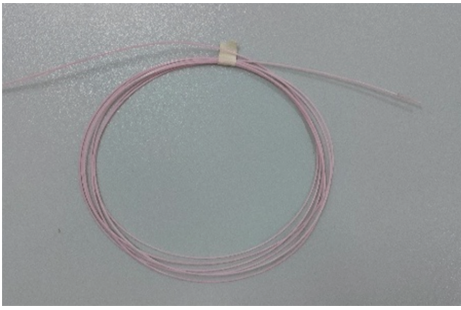


图 2 光缆实物图

Fig. 2 Picture of optical cable

JUNNO 公司生产的 OSI-S 型 OFDR 分布式光纤传感仪,仪器最大测量距离为 100 m,空间分辨率最大可达 1 mm,传感精度为 $\pm 1 \mu\epsilon$ (图 3)。



图 3 OFDR 解调仪

Fig. 3 OFDR demodulation instrument

3.2 光纤布设与试验过程

将尺寸为 60 cm × 45 cm 的有机玻璃板自中间切开,一端用旋转百叶固定连接,通过角度控制器模拟开裂,因开口角度很小,可忽略角度的影响。使用 502 胶将 0.9 mm 应变感测光缆粘贴在玻璃板上。如图 4 所示,光缆从开口端至固定端呈 U 字形布设,共布设 4 根裂缝监测光缆,编号分别为 L1、L2、L3、L4,距离固定端的实测间距分别如表 1 所示。

在开口端张拉 3 次,逐渐扩大裂缝,每次分别使用 1 cm、5 mm、2 mm 三种空间分辨率测量光缆应变,并在拉开端使用海创高科 HC-CK101 裂缝宽度观测仪记录实际开裂宽度,观测仪分度值为 0.02 mm,估读至 0.01 mm。

3.3 裂缝定位识别

图 5 为 1 cm、5 mm、2 mm 空间分辨率下测得的光缆应变图。可以发现,随着张拉程度的逐渐增大,光缆应变也呈现出增大的趋势,其中,第 3 次张拉时 2 mm 分辨率的数据出现噪点太多的情况,数据失效。图中共出现 4 处波峰位置,经测量发现,峰值位置与裂缝处的光缆实测位置基本吻合,即为裂

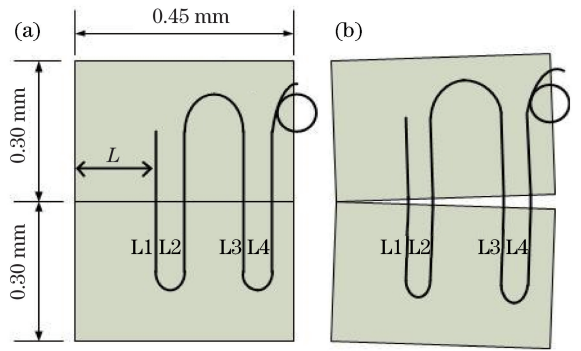


图 4 光纤布设图。(a)开裂前;(b)开裂后

Fig. 4 Schematic of fiber arrangement.

(a) Before cracking; (b) after cracking

表 1 距离固定端的间距

Table 1 Distance to fixed end

Optical fiber number	L1	L2	L3	L4
L / cm	18.6	21.0	37.2	40.2

缝位置。

由表 2 中的数据可以看出,空间分辨率越高,裂缝定位越准确。对第一次张拉的三种分辨率数据进行比较(图 6),可以看出,三种空间分辨率的监测数据基本重合,峰值位置一致;但分辨率越高,对环境的要求也越高,数据量越大,容易出现噪点过多等情况。考虑实际工程应用,1 cm 空间分辨率可以满足实际混凝土裂缝定位的需要。

3.4 裂缝宽度监测

忽略玻璃板受拉应变,将裂缝处光缆的应变进行积分,即可得到裂缝的宽度。光缆测得的裂缝宽度和实际宽度的对比如图 7 所示,图中数据的最大误差为 3.20%,平均误差为 1.25%。

4 混凝土梁开裂模型试验

4.1 试验方案

混凝土小梁试件,截面尺寸为 120 mm × 160 mm,长为 1800 mm。混凝土强度等级为 C30,钢筋采用 HRB335 级,底部受拉筋直径为 12 mm,架立筋直径为 8 mm,箍筋 $\phi 6 \text{ mm} @ 100 \text{ mm}$,保护层厚度为 25 mm。在小梁底部受拉面对称布设 2 根 1 m 长的 0.9 mm 高传递紧包护套光缆,两根光缆间距 3 cm,使用环氧树脂胶粘贴,连接 OFDR 应变解调仪。

混凝土梁受力方式为 4 点受弯,纯弯段长 600 mm,试验方案如图 8 所示。试验开始前,利用 OFDR 监测光缆应变,记录为初始数据,架设分配梁及千斤顶后记为一级荷载,随后每级荷载增加 2 kN,直至混凝土梁开裂。利用 OFDR 监测每级荷载下的光缆

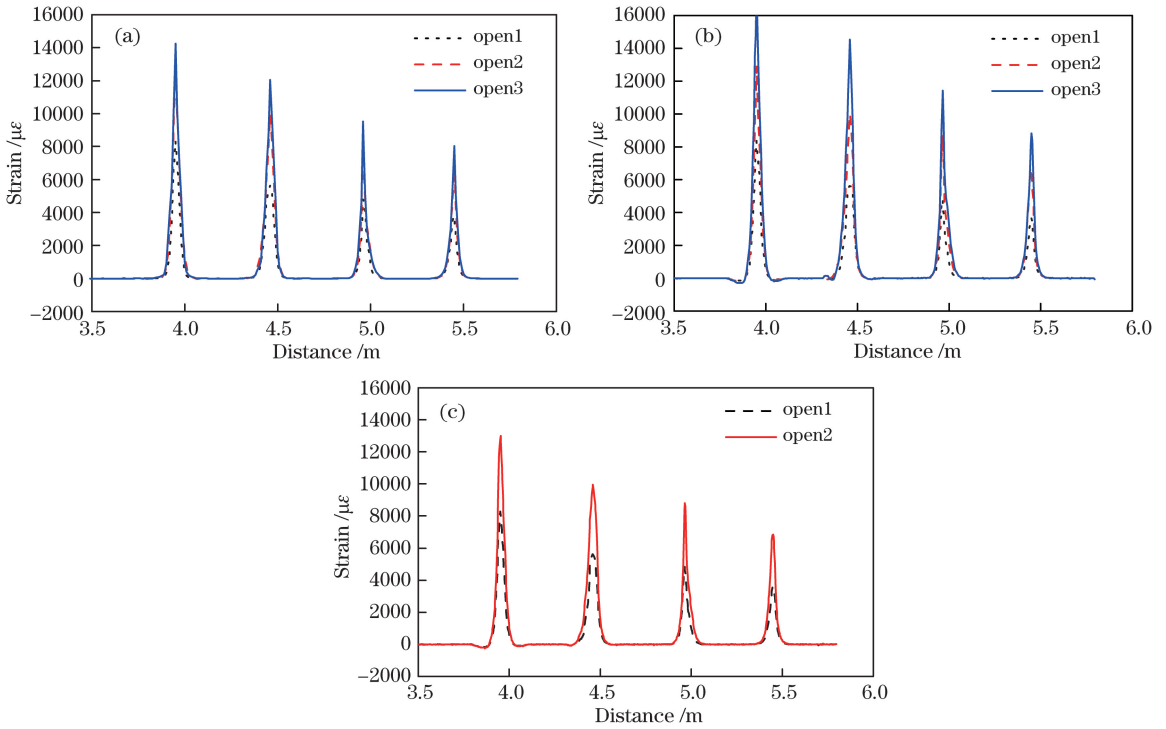


图 5 应变曲线。(a)空间分辨率 1 cm;(b)空间分辨率 5 mm;(c)空间分辨率 2 mm
 Fig. 5 Strain curves. (a) 1 cm spatial resolution; (b) 5 mm spatial resolution; (c) 2 mm spatial resolution

表 2 裂缝位置实测数据与 OFDR 测量数据的对比

Table 2 Comparison of measured crack position data and measurement results of OFDR

Crack Number	Measured position /m	Position under 1 cm spatial resolution			Position under 5 mm spatial resolution			Position under 2 mm spatial resolution		
		First	Second	Third	First	Second	Third	First	Second	Third
1	3.950	3.950	3.950	3.950	3.950	3.950	3.950	3.952	3.952	—
2	4.462	4.460	4.460	4.460	4.460	4.460	4.460	4.460	4.460	—
3	4.963	4.960	4.960	4.960	4.965	4.965	4.965	4.964	4.964	—
4	5.450	5.450	5.450	5.450	5.450	5.445	5.450	5.450	5.450	—

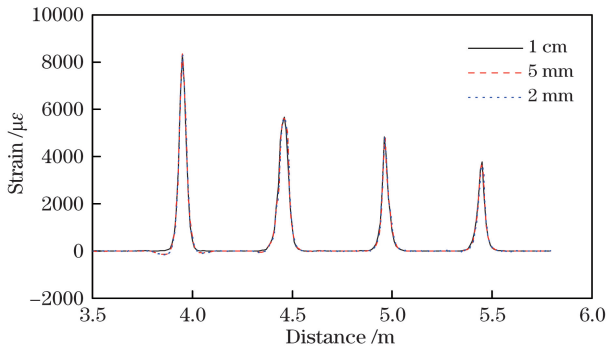


图 6 三种空间分辨率下的监测结果对比
 Fig. 6 Comparison of monitoring results under three spatial resolutions

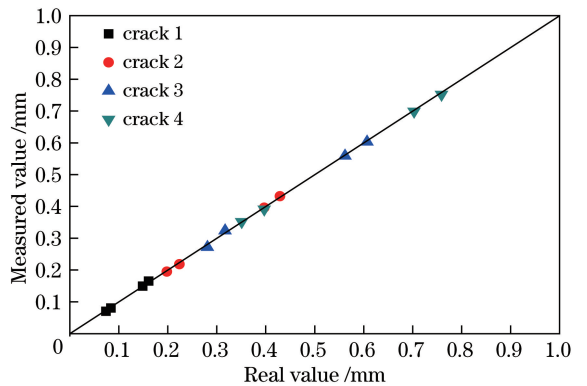


图 7 裂缝宽度的测量值与真实值
 Fig. 7 Comparison of measured and real values of crack width

应变值,利用裂缝测宽仪记录每级荷载下的裂缝宽度。

4.2 试验结果

4.2.1 裂缝定位分析

试验结束时,混凝土梁受拉面共产生 10 条裂

缝,其中有 4 条较大裂缝(图 9)。各级荷载下两根光缆的应变数据如图 10 和图 11 所示,光缆一和光缆二均出现 10 个应变波峰,波峰位置与实际的裂缝位置基本重合。

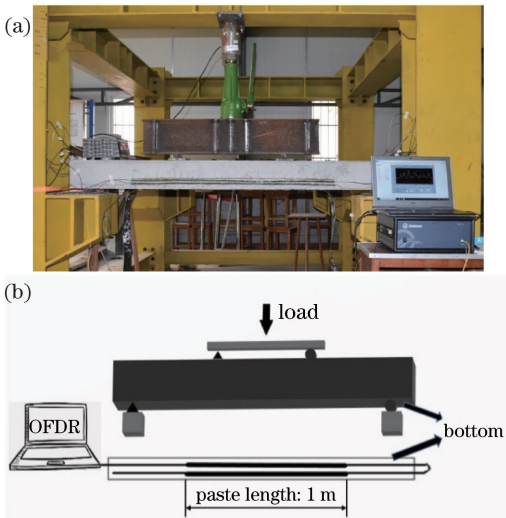


图8 试验方案。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 8 Experimental scheme. (a) Actual picture;
(b) schematic diagram

将分配梁放置在小梁上后,即在第一级荷载作

用下,应变数据出现波峰,如图 11 所示,光缆二应变数据上 0.63 m 等位置处均为裂缝发生处,将此时数据扣除梁体应变后进行积分,计算得到的裂缝宽度约为 0.002 mm,肉眼不可见。加载第三级荷载后,边角处出现肉眼可见裂缝,加载第四级荷载时裂缝宽度约为 0.5 mm。以上结果说明,OFDR 分布式光纤感测技术可以在肉眼可见裂缝发生前监测到该裂缝的存在,可以用于裂缝发生前的预警预报。

4.2.2 裂缝定量分析

由光缆二最后一级应变计算得到 10 条裂缝的宽度,与实际宽度进行对比(表 3),两者的最大误差为 5.63%,平均误差为 1.96%。对同一条裂缝的发展规律进行分析,发现每级荷载下裂缝的扩展程度大致相当。以光缆一第 4 条裂缝在各级荷载下的宽度变化为例(图 12),每级加载裂缝约增大 0.025 mm,在第 7 级、11 级、15 级荷载下,裂缝宽度分别达到 0.10,0.22,0.32 mm,与裂缝观测仪的结果(图 13)基本一致。

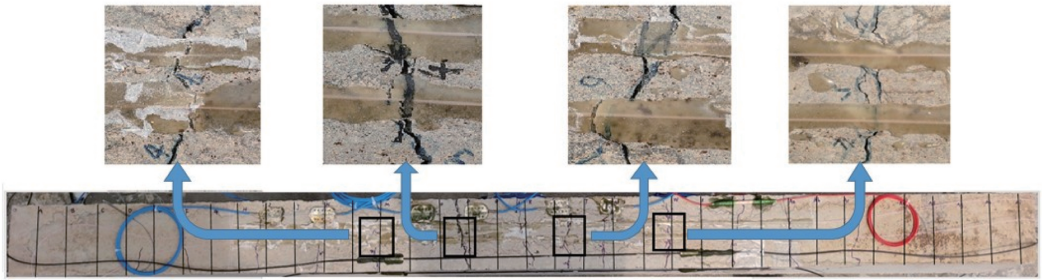


图9 混凝土梁底面开裂图

Fig. 9 Cracking diagram of concrete beam bottom

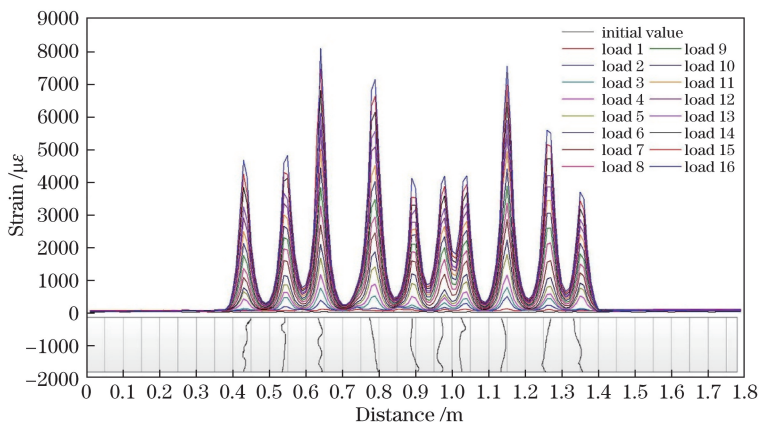


图10 光缆一在各级加载下的应变

Fig. 10 Strain of fiber 1 at each loading level

5 结 论

OFDR 分布式光纤技术具有高空间分辨率,可对混凝土裂缝进行分布式、实时、连续监测。通过试验研究了 OFDR 在混凝土结构裂缝监测中的可行

性,并对裂缝发展位置及发展规律进行了监测。监测结果表明:

1) 利用 OFDR 技术监测混凝土开裂过程中的应变变化,可以定位混凝土结构的裂缝,应变曲线的波峰位置即裂缝位置,定位裂缝空间分辨率可达 1 cm。

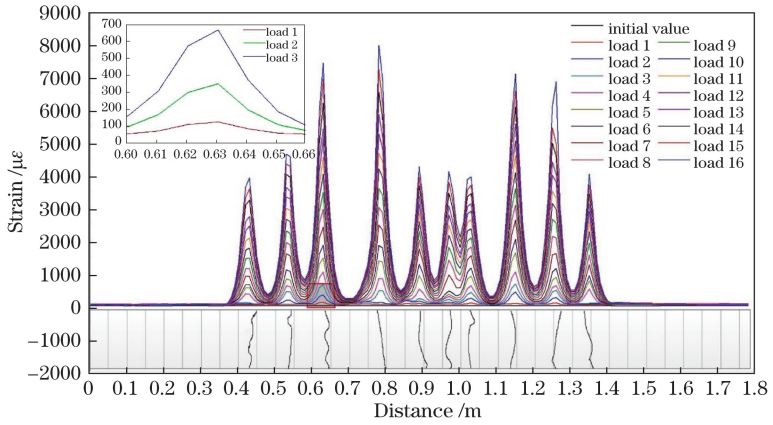


图 11 光缆二在各级加载下的应变

Fig. 11 Strain of fiber 2 at each loading level

表 3 裂缝实际宽度与实测数据对比

Table 3 Comparison of actual and measured values of crack widths

Crack No.	Measurement value /mm	Actual value /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
1	0.178	0.180	-0.002	-1.111
2	0.202	0.200	0.002	1.000
3	0.277	0.280	-0.003	-1.071
4	0.303	0.310	-0.007	-2.258
5	0.166	0.160	0.006	3.750
6	0.199	0.200	-0.001	-0.500
7	0.179	0.180	-0.001	-0.556
8	0.288	0.280	0.008	2.857
9	0.238	0.240	-0.002	-0.833
10	0.151	0.160	-0.009	-5.625

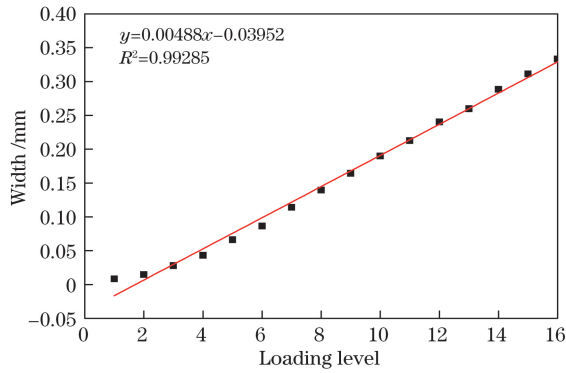


图 12 裂缝 4 在各级荷载下的宽度数据图

Fig. 12 Width of crack 4 at each loading level

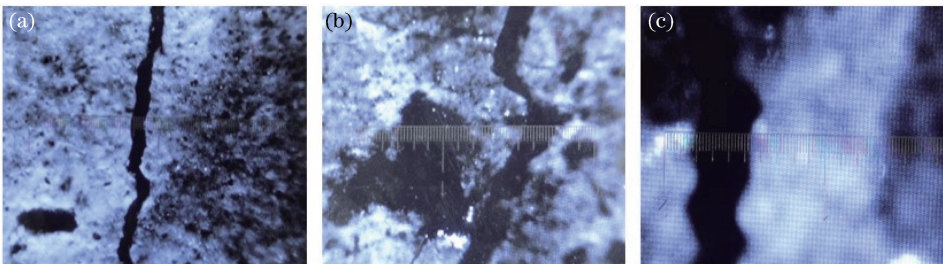


图 13 裂缝实拍图。(a) 0.10 mm 裂缝；(b) 0.22 mm 裂缝；(c) 0.34 mm 裂缝

Fig. 13 Pictures of cracks. (a) Crack with 0.10 mm width; (b) crack with 0.22 mm width; (c) crack with 0.34 mm width

2) OFDR 分布式光纤监测技术可以监测裂缝的发展情况,将裂缝处应变波峰数据积分即可得裂缝宽度,玻璃板试验的最大误差为 3.2%,混凝土梁试验的最大误差为 5.63%,可满足工程需求。

3) OFDR 分布式光纤监测技术可以监测到微小裂纹的出现,在结构裂缝达到 0.002 mm 时即可进行识别预警。

参 考 文 献

- [1] Liu X, Guo Y C, Wang X, *et al.* Research progress in the cause analysis of concrete fracture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(7): 2173-2178.
刘雪, 郭远臣, 王雪, 等. 混凝土裂缝成因研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7): 2173-2178.
- [2] Tian S Z, Cao C C, Wang D P. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土筒支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- [3] Wang Y, Zhang Z L, Sun Y Y, *et al.* The influence of different surface paste on FBG strain transfer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2016, 38(1): 106-110.
王源, 章征林, 孙阳阳, 等. 不同表面粘贴方式对光纤光栅应变传递的影响[J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 106-110.
- [4] He Y, Jiang S, Mao J H, *et al.* Cracking monitoring method and experiment with distributed fiber sensor [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2012, 34(1): 1-6.
何勇, 姜帅, 毛江鸿, 等. 结构裂缝的分布式光纤监测方法及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1): 1-6.
- [5] Sun Y J, Zhang Q, Cheng G, *et al.* Optical frequency domain reflectometry technology based theoretical analysis and experiment on strain transferring of surface-attached optical fiber sensor [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 46-52.
孙义杰, 张强, 程刚, 等. 基于光频域反射技术的表面粘贴分布式光纤传感器应变传递特性分析与试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 46-52.
- [6] Zhang B X. Strain transmission and cracks determination of structures under various loading conditions by distributed optical fiber sensors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
张宝祥. 多种受力状态下结构分布式光纤传感应变传递及裂纹监测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] Ding Y, Wang P, Yu S. A new method for deformation monitoring on H-pile in SMW based on BOTDA[J]. Measurement, 2015, 70: 156-168.
- [8] Ye Y X, Zhao X M, Wu G, *et al.* Application of distributed optical fiber in the monitoring of cracks in concrete structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(1): 24-29.
叶宇霄, 赵新铭, 吴刚, 等. 分布式光纤在混凝土结构裂缝监测中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(1): 24-29.
- [9] Jia Q Q, Su H Z, Feng L L, *et al.* Experimental research on concrete structure crack monitoring based on PPP-BOTDA technology [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(8): 832-837.
贾强强, 苏怀智, 冯龙龙, 等. 混凝土结构开裂监测的 PPP-BOTDA 分布式光纤技术试验研究[J]. 光电子 • 激光, 2016, 27(8): 832-837.
- [10] Bremer K, Alwis L S M, Weigand F, *et al.* Evaluating the performance of functionalized carbon structures with integrated optical fiber sensors under practical conditions [J]. Sensors, 2018, 18(11): 3923.
- [11] Barrias A, Casas J R, Villalba S. Embedded distributed optical fiber sensors in reinforced concrete structures: a case study[J]. Sensors, 2018, 18(4): 980.
- [12] Villalba S, Casas J R. Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 39(1/2): 441-451.
- [13] Chen R Z, Zaghoul M A S, Yan A D, *et al.* High resolution monitoring of strain fields in concrete during hydraulic fracturing processes [J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3894-3902.
- [14] Mao J H, Cui L, Jin W L, *et al.* Experimental research on concrete crack recognizing and monitoring based on distributed fiber sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(9): 1298-1304.
毛江鸿, 崔磊, 金伟良, 等. 基于分布式光纤传感的混凝土裂缝识别与监测试验研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(9): 1298-1304.
- [15] Zhou Z C, Wang X L, Zhang H W, *et al.* Temperature measurement for gain fiber core in all-

- fiber amplifier based on distributed sensing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201013.
- 周子超, 王小林, 张汉伟, 等. 基于分布式传感的全光纤放大器增益光纤纤芯温度测量[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201013.
- [16] Liu K, Feng B W, Liu T G, *et al.* Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0505006.
- 刘琨, 冯博文, 刘铁根, 等. 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0505006.