

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.034

光纤布拉格光栅在季节冻土路基应变检测中的应用

孟上九¹, 张书荣², 程有坤¹, 汪云龙³, 王 钰², 孙义强¹

(1.哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2.哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3.中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 介绍了现行光纤布拉格光栅 (FBG) 测试技术的应用领域、传感原理以及常用的封装方式, 探索将 FBG 用于季节冻土路基这种隐蔽工程应变检测中的适应性。主要工作有: (1) 基于 FBG 测试技术的植入梁方法, 在传感器布设方面, 根据不同测试对象提出了两种封装布设方式: 浅置短距离半柔性探测杆和深置长距离半刚性探测杆两种封装布设方式; (2) 针对现场测试需要, 对电源、光纤传感器、数据采集及分析等整套现场测试系统进行了比较优选; (3) 选择两处季节冻土路基作为埋设场地并开展为期 1 a 的观测。测试结果表明: FBG 在 -20~30 °C 的温差范围内保证了很高的存活率, 所提出并实现的季节冻土路基应变测试系统具有较高的测试灵敏度和可靠性。该套测试系统为隐蔽工程的物理性质指标测试提供了新的技术手段。

关 键 词: 季节冻土; 应变检测; 光纤布拉格光栅 (FBG); 植入梁

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 02-0601-08

Application of fiber Bragg grating sensors to strain detection of seasonally frozen subgrade

MENG Shang-jiu¹, ZHANG Shu-rong², CHENG You-kun¹,
WANG Yun-long³, WANG Yu², SUN Yi-qiang¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;
2. School of Measurement-Control Technology and Communications Engineering, Harbin University of Science and Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China; 3.Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: This paper describes the applications, principle and common packaging method of existing fiber Bragg grating (FBG) testing technology. The applicability of FBG to strain detection of seasonally frozen subgrade which is a concealed work is explored. The main works are as follows: (1) Based on the method of embedded-beam for the testing technology of FBG, two ways for the packaging and layout of sensors are introduced taking account of the difference of testing objects, namely the shallow-setting semi-flexible feeler rod for short distance and the deep-setting semi-rigid probe for long distance. (2) To meet the need of tests in field, the systems of power supply, fiber optic sensors, data collection and analysis are compared and selected. (3) Two sites of seasonally frozen subgrade are chosen and a one year observation is conducted. The results indicate that FBG has a high survival rate within the temperature range from -20 °C to 30 °C. The system of strain detection for subgrade in seasonally frozen soil regions presented and achieved here has a high testing sensitivity and reliability. The system provides a new technical means for testing physical indices of concealed works.

Keywords: seasonally frozen soil; strain detection; fiber Bragg grating (FBG); embedded-beam

1 引 言

光纤传感技术兴起于 20 世纪 70 年代末期, 它

的发展速度是其他传统传感器所不能相比的, 原因在于光纤传感器具有灵敏度高、体积小、重量轻、耐腐蚀、损耗低、绝缘性好、抗电磁干扰、易于组

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51378164, No. 51278472)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378164 and 51278472).

第一作者简介: 孟上九, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事土动力学及岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: iemmsj@163.com

网、成本低等特点,尤其是应用十分广泛的光纤光栅传感器更具有宽带宽、线性度好、波长选择性好、便于与光纤连接且可以实现多点和分布式测量的优点^[1],目前已有压力、温度、流量、位移、加速度以及电流等电参量测量的光纤光栅传感器研制成功,在航天、航海、土木、电力等领域广泛应用^[2]。从本质上看,FBG 主要用于高精度温度测量、高分辨率应变测量和高精度液位测量 3 个测量领域^[3],其中以应变、温度测量较为常见。而在土木工程领域,通常应用在桥梁、隧道、大坝等结构表面的应变测量,而研发可测量各类工程及结构内部温度、应变的 FBG 一直备受关注,因为只有对结构内部物理参数进行准确、实时采集,才能保证其安全运行、及时防护及性能评估,具有重要的工程意义。特别是随着寒区工程建设规模逐渐扩大,FBG 在寒区工程检测中的封装、现场布置以及数据处理等方面仍存在一系列尚未解决的问题。本文以季节冻土路基应变检测为工程背景,探索 FBG 在复杂环境、隐蔽工程中的适用性,为寒区岩土工程性能评价及防灾减灾提供新的技术手段。

2 FBG 传感原理及基土竖向位移测量机制

2.1 FBG 传感器工作原理

FBG 内部的折射率改变会引起微小的周期性调制,但折射率周期性变化只能影响光谱宽度介于 0.05~0.3 nm 的窄光谱,因此,当宽带光波通过光纤光栅时,只有对应频率的入射光能够被反射回来,其他频率的入射光则沿初始方向经过光纤光栅透射出去,宽带光波通过光纤光栅的光路示意图见图 1(a),光谱图分别如图 1(b)、1(c)、1(d)所示。可将 FBG 的传感原理进一步理解为,外界被测量对象的改变会引起 FBG 波长的变化,也称被测量对 FBG 具有相应的调制作用,只需要检测出波长的变化量便能推算出被测量的大小。由光纤耦合模理论可知,当光纤光栅达到 Bragg 条件^[4]时,有

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中: n 为光纤光栅的有效折射率(介于 0~1 之间); Λ 、 λ_B 分别为光栅周期和光栅的波长(nm)。

从式(1)中可以看出,当被测物理量因为某种因素发生变化时,FBG 的周期 Λ 和折射率 n 会发生相应的变化,从而引起其波长 λ_B 的变化。要检测待测物理量,只需要间接测量 λ_B 的变化即可。

当前学者们对 FBG 传感器主要从应力和温度

的分布式测量开展研究,当应变 ε 和温度 T 发生改变时,相应波长 λ_B 的改变量为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_\alpha)\varepsilon + \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中: ε 为应变的变化量; P_α 为光栅的光弹系数; α 为热膨胀系数; ΔT 为温度变化(°C); ξ 为热光系数。应力影响 FBG 的机制为光纤因受到轴向应力作用而产生轴向应变,使光纤的包层和芯层的直径减小,进而增大了光栅的周期;温度影响 FBG 的机制为热膨胀效应直接引起光栅周期发生变化,而温度产生的热光效应则会使光纤的折射率发生变化。用温度补偿或者应变补偿等适当的方法使式(2)中应变和温度对光栅的反射波长的改变互不影响,就可以研制出相应的光纤光栅应变检测仪和光纤光栅温度检测仪。

若使用了温度补偿技术,则不考虑温度变化的影响,FBG 轴向应变 ε 与其中心波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 的关系为

$$\varepsilon = \frac{1}{\eta(1 - P_\alpha)} \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] \quad (3)$$

式中: η 体现封装质量,介于 0~1 之间,封装质量越好越接近 1; P_α 为单模 SiO₂ 光纤的有效弹光系数,取 $P_\alpha = 0.22$ 。

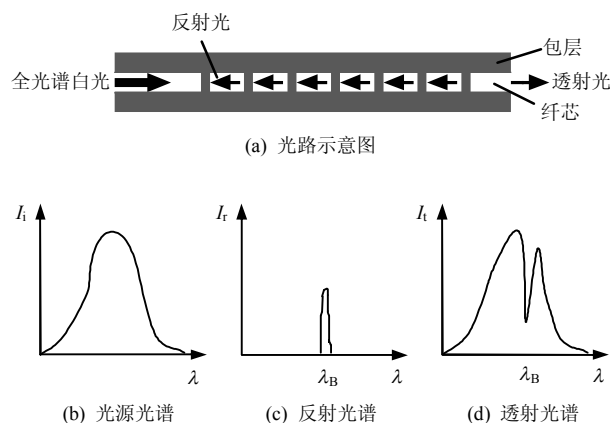


图 1 宽带光波通过光纤光栅的光路示意图及光谱图

Fig.1 Optical path diagram and spectrogram when broadband optical-wave passes the fiber grating

2.2 基土竖向位移测量机制

路基沉陷方面研究的基本力学机制是植入梁的悬臂梁原理。土体的密度远大于植入梁的密度,将植入梁的表面进行粗糙化处理后使其与土体能紧密结合,测试时悬臂梁随土体一起运动,从而可以间接通过梁的挠度来表示基土的竖向位移。悬臂梁

力学示意图如图 2(a)所示, A 端位移即土表位移, B 端位移 (y 方向的位移 v) 即可由悬臂梁的挠度来体现, 以 FBG 应变测量为基础, 由弹性力学理论则可计算基土的竖向位移^[5]。图 2(b)为 FBG 局部放大图, 其中 a 层为基质层, b 层为封装层, c 层为硅胶涂平保护层, h 指 FBG 封装层到中性面的距离。

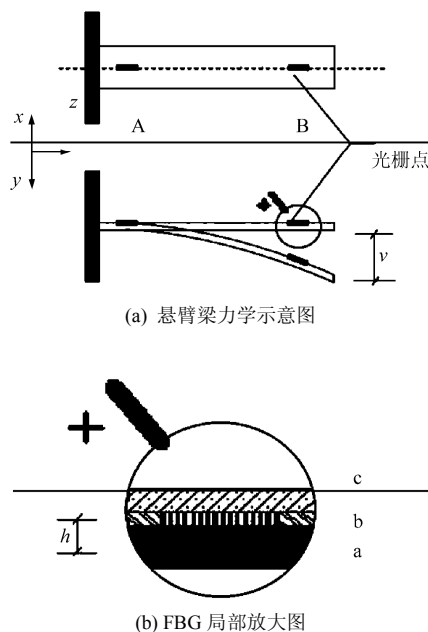


图 2 植入悬臂梁力学机制

Fig.2 Mechanism of implanted cantilever beam

将两个光栅点间的梁段作为一个计算单元, 各单元的变形采用微小变形的几何方程进行计算, 其简化示意图如图 3 所示, l_k 为第 k 个变形单元标记。

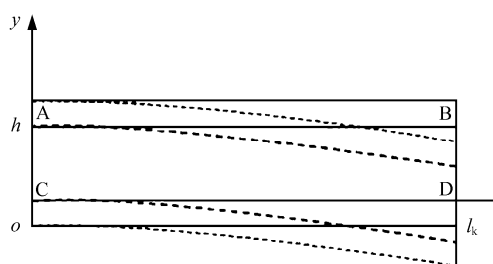


图 3 应变位移转换示意图

Fig.3 Calculation schematic of strain-displacement

3 FBG 传感器基材选择及封装

随着 FBG 在光纤传感器、光纤激光器、半导体激光器和光纤滤波器^[6]等方面的运用, 光纤器件的集成化程度越来越高, 制作时既要保证集成度又不能损坏光学器件。FBG 一般都用于全光纤测试系统, 但它很难与普通光纤进行熔接, 因此, 为了便于利用法兰盘等连接器件与其他光纤进行连接, 在

工程中常把 FBG 封装于陶瓷插芯中加工成标准连接头^[7], 但这样做的不足之处在于光纤光栅基本上都是刻在裸光纤上, 缺少必要的保护, 极易受到损坏, 所以封装保护就变得极为重要, 因为这关系到光纤传感器能否顺利存活。

FBG 最常用的封装方式主要有两种:

(1) 在基底材料上直接粘贴光纤光栅。较为典型的应用方式为贴片封装法^[8]。这种方式是在以铍青铜为基底的材料上采用耐高温有机胶来封装光纤光栅, 要求铍青铜基底的线膨胀系数大于 FBG 的线膨胀系数。

(2) 采用管材或者模具灌封处理。较为典型的应用方式为毛细钢管灌封法^[9]。此方法是在光纤光栅外部包裹上毛细钢管, 内部用改性丙烯酸酯加以灌封, 并在烘烤箱内进行烘干、固化, 以保证光纤光栅的应变及温度灵敏性, 也为 FBG 用于温度测试提供了一种可行的方法。但这种封装方式的不足在于毛细钢管的直径一般都比较小, 给丙烯酸酯灌封带来不便, 且在基底上直接封装光纤光栅容易造成光栅表面的线膨胀分布不均匀。

因而, 上述两种封装方式的实际应用效果都不尽完美。

考虑到本文关注的测试对象——季节冻土具有特殊的水热特性, 且随着冻融循环其应变场、温度场、水分场等因素十分复杂, 而且又是隐蔽工程, 为保证探测工作的安全性、便利性及可靠性, 本文对 FBG 的基材 (探测杆) 的材质、尺寸、封装技术等进行了专门研究。就基材而言, 要使其保持一定强度, 在恶劣现场条件下不破坏, 同时须与周围土体保持一定随动性, 这就要求其刚度不能太大也不能太小; 而断面尺寸与刚度之间也存在矛盾, 尺寸小光纤封装不便, 尺寸大刚度随之增大, 基材随动性就差。面对路基埋深不一, 路面宽度各异的测试对象, 基材及封装方式的选择也要有一定的针对性。经过大量筛选比对, 对于路基较浅、变形较大、探测距离较短的测试环境, 选用浅置短距离半柔性探测杆及相应的封装布置方式 (本文称 A 方案); 而对于路基较深、变形较小、探测距离较长的测试环境选用深置长距离半刚性探测杆及相应的封装布置方式 (本文称 B 方案)。下面分别介绍这两种方案的适用范围、基材选择及封装过程。

3.1 A 方案: 浅置短距离半柔性探测杆封装方式

此方案适用于路基较浅、车辆荷载向路基传递衰减较小的工况, 测试传感器受力断面不宜过大, 以保证探测杆的随动性。浅置短距离半柔性探测杆

封装方式如图 4 所示。

具体选材及操作是：利用直径为 2.5 cm 的非透明塑料管（PPR）作为封装基材，将刻有 FBG 的光纤用环氧树脂胶粘在塑料管的监测位置上，两端的光纤采用铠装跳线方式进行有效保护，除 FBG 以外的光纤处于塑料光缆层的保护中，这部分可以直接用胶带粘贴于探测杆之上。



图 4 浅置短距离半柔性探测杆封装方式

Fig. 4 Packaging method of shallow-setting semi-flexible feeler rod for short distance

3.2 B 方案：深置长距离半刚性探测杆封装方式

此方案适用于路基较深、车辆荷载向路基衰减较大的工况，测试传感器受力断面应适度加大，同时应加大基材刚度，以确保在较大的上覆压力及荷载作用下不致破坏。具体选材及操作是：选择直径较大的非透明 PVC 管作为探测杆。PVC 管具有很好的韧性、耐热性以及延展性，它的主要成份是聚氯乙烯，最外层是油漆。为了实现某一断面不同深度的多点测量，这里选择的 PVC 探测杆直径为 7 cm、长度为 400 cm，在管的表面开有两条相对细缝，尺寸大小便于嵌入并粘贴 FBG；探测杆的两端各预留 25 cm 长度作为固定端的连接位置，FBG 光纤选择的类型为 8-FBG-Array，一条 8-FBG-Array 光纤上均匀分布 8 个光栅，相邻光栅的中心间距为 50 cm，每个光栅的中心波长各不相同，依次按递增的方式排列，FBG 光纤粘接示意图如图 5 所示。

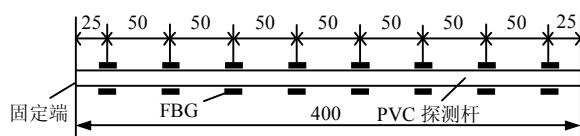


图 5 FBG 光纤粘接示意图（单位：cm）

Fig. 5 Fiber bonding schematic of FBG (unit: cm)

深置长距离半刚性探测杆封装方式如图 6 所示。

PVC 管粘贴光纤光栅的过程为：①对 PVC 管的光滑表面经过打磨处理，以增加探测杆与土体的随动性；②在 PVC 管上标记各个光栅点的位置；③将光栅点用 101 胶水粘贴在 PVC 管细缝中的标记位置处；④待光栅固定后在监测管的细缝中填充 J39 胶粘剂使整条 FBG 光纤牢牢粘贴于探测杆上；⑤在 J39 胶粘剂的表面再涂抹一层柔韧性极好的 703 硅胶进行强化保护。

光纤测试需要连接测试探头，这里将 8-FBG-Array 的两端利用光纤熔焊机焊接于铠装跳线的光纤测试探头上。



图 6 深置长距离半刚性探测杆封装方式

Fig. 6 Packaging method of deep-setting semi-rigid probe for long distance

4 FBG 传感器现场埋设方案

FBG 封装完毕并经室内标定后方可着手现场试验，光纤的存活率以及读数的规律性是现场试验成功与否的重要判据。前面提到的 A、B 两种封装方案都使用了探测杆并在其表面粘接 FBG，使探测杆与 FBG 成为一体，在现场试验中还需要埋设固定端，使其与封装后的探测杆组成悬臂梁结构，只有这样才能保证 FBG 读数可用。与前面提到的两种 FBG 封装方案相对应，本文为现场试验设计了两种固定端埋设方法。

4.1 钢管预制桩式固定端埋设方法（对应 A 方案）

试验场地（后称 A 场地）选取在哈尔滨理工大学校园内，特点是埋深浅、断面窄，工况与 A 方案相适应。钢管预制桩式固定端埋设方法示意图及现场图如图 7、8 所示。为了体现 FBG 对不同埋深土体的应变测量，需要在两根探测杆相对应位置上下表面粘接 FBG（如图 7 所示）。

具体操作是：将长约 50 cm 的钢管嵌入土体内作为探测杆固定端，钢管断面较小，可忽略冻胀变形的影响，这里土体开槽的长×宽×高尺寸为 250 cm×30 cm×40 cm，在钢管上钻一个口径比探测杆略大的孔，把探测杆插入孔内并将其水平放置后，利用环氧树脂胶将钢管孔与探测杆固定在一起。

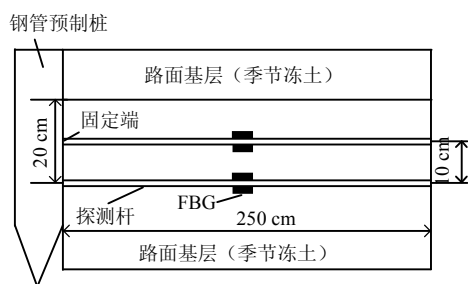


图7 钢管预制桩式固定端埋设示意图

Fig.7 Schematic of pipe laying precast pile-fixed end



图8 钢管预制桩式固定端现场埋设图

Fig.8 Embedded figure of pipe laying precast pile-fixed end on site

4.2 混凝土浇筑式固定端埋设方法 (对应B方案)

试验场地 (后称B场地) 选取哈尔滨松花江北岸防洪通道工程。FBG埋设在即将完工的路基中, 由于路面结构层厚、自重较大, 重载车辆多, 对固定端具有较高要求。试验中利用道路旁边混凝土排污井作为固定端, 其埋深2.5 m左右, 基本不受冻胀影响, 示意图及现场埋设图分别见图9、10所示。

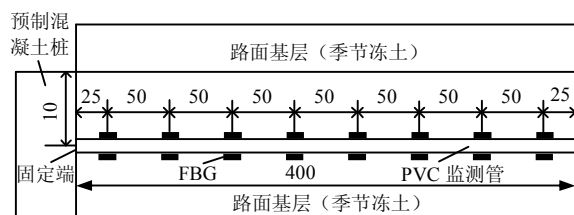


图9 混凝土浇筑式固定端埋设示意图 (单位: cm)

Fig.9 Embedded schematic of concrete pouring fixed end (unit: cm)



图10 混凝土浇筑式固定端现场埋设图

Fig.10 Embedded figure of concrete pouring fixed end on site

上述两种 FBG 埋设方法与两种封装方案一一对应, 基本可以满足不同道路状况下现场实测的需要, 具体埋设时都要使探测杆尽量保持水平, 探测杆周围路基土需夯实, 使其与探测杆紧密接触。最后要对引出的光纤测试探头做好充分保护。

5 FBG 数据采集仪的优选

要验证 FBG 能否适用于季节冻土路基中的应变检测, 必须结合现场测试环境以及 FBG 的参数指标选择适合的 FBG 数据采集仪器。常用的 FBG 传感解调方法主要有光谱仪法、干涉法、波长可调谐光源法、光栅色散解调法以及滤波法等。考虑到测试环境处于季冻区, 尤其是冬季严寒时段会给测试带来不便, 因此, 首选具有集光源、传感、解调和数据分析等多功能于一体的集成化光纤光栅解调设备。此类设备的解调手段普遍采用波长可调谐光源法中的可调窄带光源法 (另一种是有源时域解调法)。

这种调谐系统利用激光器作为光源, 光谱性能好且光信号能量强, 通过对光源波长的改变, 使 FBG 与光源的波长相匹配, 该解调方式能得到较高的信噪比和分辨率^[10]。可调窄带光源法工作原理如图 11 所示。

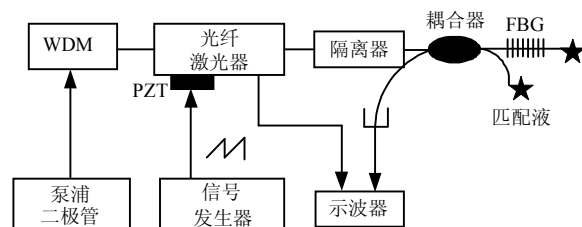


图11 可调窄带光源法

Fig.11 Method of tunable narrow-band light source

为完成现场测试任务, 需要在数据采集仪的便携性、技术参数以及价格之间权衡。

本文对两种光纤光栅解调仪进行了优选。第1种是黑龙江大学光纤传感技术国家地方联合工程研究中心研制的光纤光栅解调仪, 其主要技术参数为: 波长范围为 1 510~1 600 nm、传感器波长分辨率为 1 pm、1~300 Hz 的采样速率、16 个独立通道、动态范围为 20 dB、供电电压为 220 V (50 Hz) 交流电压、温度分辨率为 0.1 °C、应变分辨率为 10⁻⁶、功耗为 40 W、工作温度为 -10~45 °C。第2种是美国 MOI 公司生产的 SM130 光纤光栅解调仪, 其主要规格参数为: 波长范围为 1 510~1 590 nm、稳

定性 2 pm 典型 (5 pm 最大)、扫描频率为 100、500、1 kHz 可选、4 个光学通道 (每通道最大可接 80 个传感器)、动态范围为 25 dB、+7~36 V 直流 (含 100~240V AC/DC Convertor) 电源供电、功率 35 W (最大 50 W)、工作温度为 0~50 °C。

从技术参数来看,第 1 种解调仪只能交流供电,尽管价格低廉,但在现场条件下应用受限。第 2 种解调仪测量精度高、采样率高、功耗低,交直流供电均可,性能明显优于第 1 种,适用于对精度及动态性能要求高的场合,但价格比较昂贵。两种解调仪均采用 FC/APC 光学连接头,可有效降低信号的衰减程度并提高信噪比,可利用网络与上位机进行数据传输。经过比选,笔者选用了美国 MOI 公司生产的 SM130 光纤光栅解调仪,通过对此仪器进行简单设置就可以对埋入式 FBG 进行数据采集、数据分析以及数据存储等操作。

6 FBG 测试结果及分析

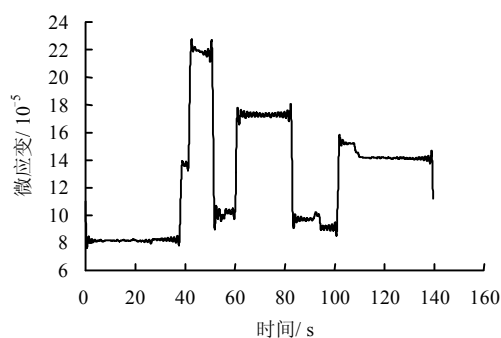
6.1 A 场地测试结果及分析

利用 SM130 光纤光栅解调仪对 A 场地的埋入式 FBG 进行周期为 1 a (考虑冻融循环) 的测试,先用轻载小汽车进行动态加载-卸载试验,观察 FBG 波长的变化。根据光栅的标定系数就能计算出动态荷载所产生的应变。后用重载大客车进行动态加载-卸载试验,若要检测季节冻土路基随冻融循环的应变变化规律则需要采集冻融循环各个时间段的测试数据。A 场地小汽车现场动态加载-卸载试验如图 12 所示。

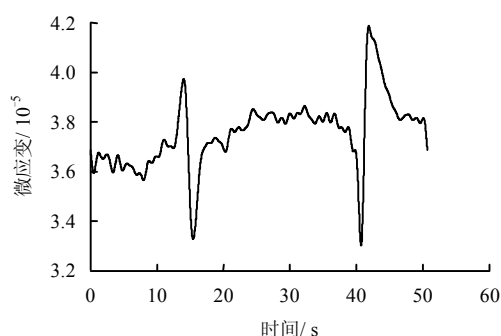


图 12 A 场地小汽车现场动态加载-卸载试验
Fig.12 Car dynamic loading-unloading test on site A

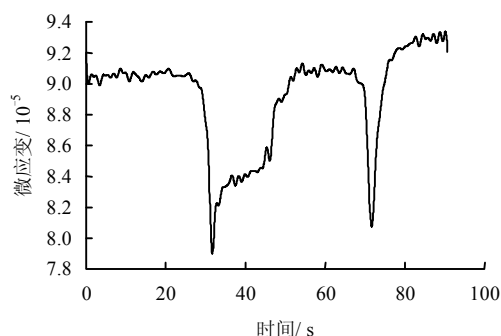
在试验周期内选取 2013 年 11 月初、2014 年 1 月末和 2014 年 3 月末 3 个时段动态数据进行分析,小汽车在 A 场地进行加载-卸载时 FBG 微应变变化情况如图 13 所示。



(a) 2013-11-06 (测试点土体温度为 -2 °C)



(b) 2014-01-22 (测试点土体温度为 -12 °C)



(c) 2014-03-26 (测试点土体温度为 2 °C)

图 13 A 场地小汽车动态加载-卸载测试结果
Fig.13 Results of car dynamic loading-unloading test on site A

从图中可以看出,在 11 月初,即路基土处于渐冻期时,此时段虽然气温较低,但路基并未完全冻结,小汽车动态加载-卸载时 FBG 微应变变化的峰值较大,最大约为 14×10^{-5} ,土体应变比较明显;在 1 月末,即路基处于冻结期,小汽车加载-卸载时 FBG 微应变变化的峰值约为 0.9×10^{-5} ,说明随着土体被冻结,土体内应变也随之急剧减小;在 3 月末,即路基处于融化期,小汽车加载-卸载时 FBG 微应变变化的峰值约为 1.2×10^{-5} ,说明在 3 月末土体的应变较冻结期有增大的趋势,可以定性认为此阶段季节冻土路基的承压能力也相对较弱。这样对几个冻融循环进行不间断观测,可以得到季节冻土路基在冻融循环下的应变规律。

6.2 B 场地测试结果及分析

同样利用 SM130 光纤光栅解调仪对 B 场地的埋入式 FBG 进行了近 1 a 的测试。由于 B 场地为哈尔滨松花江北岸防洪工程二级公路路段, 可以直接借助道路上行驶的车辆进行加载-卸载测试, 现场试验如图 14 所示。



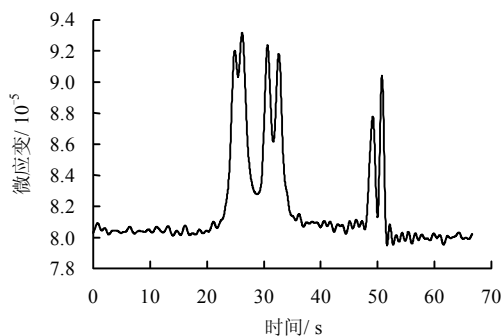
图 14 B 场地现场测试试验图
Fig.14 Field test on site B

在试验周期内选取 2014 年 8 月中旬、2015 年 1 月末、2015 年 3 月末 3 个时段动态数据进行分析。道路中行驶车辆对 B 场地 FBG 的影响如图 15 所示。需要特殊说明的是, 在 B 场地实际埋设的 32 个光栅中, 1 a 后仍存活 31 个, 证明在重载及低温条件下 FBG 具有很强的适应性。

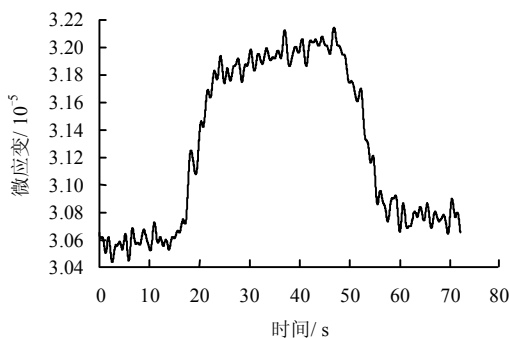
从图 15 可知, 由于 FBG 传感器在 B 场地的埋深比 A 场地要深很多, 荷载衰减幅度大, 应变数值总体上小于 A 场地。

但就 B 场地自身而言, 路基在冻融循环中的应变也有其规律性。首先, 与 A 场地类似, 在 2015 年 1 月末的测试中, 由于路基处于冻结期, 此时 FBG 在车辆动载下的微应变变化峰值约为 0.16×10^{-5} , 应变幅值比 2014 年 8 月中旬 (完全融化期) 的应变峰值 1.2×10^{-5} 要小很多; 而在 3 月末, 测试应变峰值约为 0.5×10^{-5} , 应变增长幅度没有 A 场地明显, 表明高等级公路路基总体强度较高, 也说明尽管气温已逐渐回升, 但由于覆盖层较厚, 路基土还未完全融化, 所以应变没有较大的发展, 但总体应变变化规律与 A 场地一致。

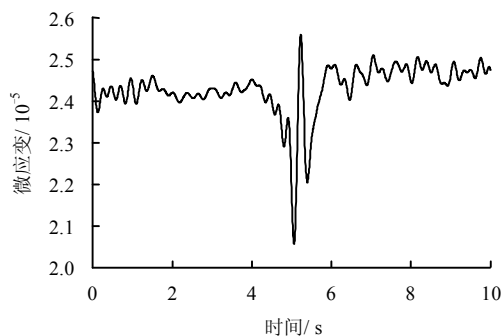
利用本文提出的一整套测试方案, 还可以对测试结果作进一步量化分析, 根据上文提到的基土竖向位移测量机制, 对一组多个 FBG 数据进行总体分析, 还可以得到路基土层在整个测试断面上的土体沉陷。特别是在冻融作用下的沉陷发展规律, 相关工作将陆续开展。



(a) 2014-08-12 (测试点土体温度为 17 °C)



(b) 2015-01-29 (测试点土体温度为 -20 °C)



(c) 2015-03-31 (测试点土体温度为 -1 °C)

图 15 B 场地现场实测结果
Fig.15 Measured results of site B

7 结 论

本文利用 FBG 开展了季节冻土路基的应变检测研究, 为寒区道路工程的性态检测提供了一整套技术方案, 也为隐蔽工程的安全监测及防灾提供了新的手段。现阶段的科研成果如下:

(1) 针对季节冻土这种特殊测试对象及不同现场状况, 在 FBG 基材选择及封装方面设计了两种方式, 即浅置短距离半柔性封装布置方式和深置长距离半刚性封装布置方式。

(2) 基于 FBG 工作原理, 与上述两种封装方式相对应, 配套设计了两种现场固定端埋设方式, 即钢管预制桩式固定端和混凝土浇筑式固定端。论证并采用了新型一体化光纤数据采集设备。

(3) 选择了两处季节冻土路基作为试验场地, 利用文中提出的一整套工艺及方法在现场完成了历时 1 a 多的实测。

(4) 实测显示, FBG 传感器在 $-20 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差范围内具有极高的存活率和灵敏度。通过车辆动态加载-卸载试验可知, 季节冻土路基在冻融循环下的应变反应可测量、有规律、定性符合客观实际, 更详细的量化分析将在后续工作中进行。

参考文献

- [1] 岑晓鹏. 光纤光栅传感器及其在土木工程中的发展应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(28): 52—53.
CEN Xiao-peng. Fiber Bragg grating sensors and their development and application in civil engineering[J]. **Shanxi Architecture**, 2010, 36(28): 52—53.
- [2] 祖伟, 马修水, 李桂华. 光纤光栅传感器原理与应用及其发展趋势[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2008, 7(2): 83—84, 102.
ZU Wei, MA Xiu-shui, LI Gui-hua. The theory, application and development trend of FBG sensors[J]. **Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology**, 2008, 7(2): 83—84, 102.
- [3] 姜志刚. FBG 光纤光栅的原理和应用[J]. 中国水运, 2008, 8(5): 128—129.
JIANG Zhi-gang. Theories and applications of fiber gratings FBG[J]. **China Water Transport**, 2008, 8(5): 128—129.
- [4] 陈昊. 路面动水压力光纤传感测量与模拟分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
CHEN Hao. Simulation and measurement of the dynamic hydraulic pressure in pavement using fiber Bragg grating sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [5] 汪云龙, 袁晓铭, 殷建华. 基于光纤光栅传感技术的测量模型土体侧向变形一维分布的方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1908—1913.
WANG Yun-long, YUAN Xiao-ming, YIN Jian-hua. A measurement method for 1D distribution of lateral deformation of soils in shaking table tests using FBG technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1908—1913.
- [6] 付婧. 光纤布拉格光栅在掺铒光纤激光器中应用[D]. 天津: 天津大学, 2007.
FU Jing. Application of fiber Bragg grating in Er^{3+} -doped fiber laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [7] 王建财, 文敏, 宋杰, 等. 光纤陶瓷插芯同心度的测试技术[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2013, (2): 4—6.
WANG Jian-cai, WEN Min, SONG Jie, et al. The concentricity test technology for fiber ceramic ferrules[J]. **Optical Fiber & Electric Cable**, 2013, (2): 4—6.
- [8] 禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 贴片封装的光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2006, (9): 4—5, 40.
YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, et al. Bonded fiber Bragg grating temperature sensor[J]. **Instrument Technique and Sensor**, 2006, (9): 4—5, 40.
- [9] 张燕君, 王海宝, 陈泽贵, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 53—55.
ZHANG Yan-jun, WANG Hai-bao, CHEN Ze-gui, et al. Study on FBG sensor's steel capillary packaging technique and sensing properties[J]. **Laser & Infrared**, 2009, 39(1): 53—55.
- [10] 邹国飞. 基于 STM32 技术的光纤光栅传感解调系统的研究[D]. 秦皇岛市: 燕山大学, 2013.
ZOU Guo-fei. Study on demodulation system for fiber grating based on stm32 technology[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.