

引用格式: LI Shiyi, LI Hao, JI Wenbin, et al. Optical Fiber Sensing Structure for Slope Monitoring Based on Brillouin Optical Time Domain Reflectometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906005

李时宜, 李浩, 季文斌, 等. 基于布里渊光时域反射仪的边坡监测光纤传感器结构[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0906005

基于布里渊光时域反射仪的边坡监测光纤 传感器结构

李时宜¹, 李浩¹, 季文斌¹, 王峰¹, 周霄¹, 袁新宇¹, 张益昕¹, 张旭革¹,
李海涛², 李井增³, 薄冠中⁴

(1 南京大学 智能光传感与调控技术教育部重点实验室, 南京 210023)

(2 江苏省交通工程建设局, 南京 210004)

(3 江苏东南工程咨询有限公司, 南京 210000)

(4 中交第一公路二工程有限公司, 南京 210000)

摘 要: 分布式布里渊光纤传感技术在边坡监测领域中有极大的应用潜力。坡体局部产生的大应变往往会超过光纤的承受能力导致光纤断裂, 并且由于系统空间分辨率的限制, 难以获得一个准确的测量结果。为适应边坡监测, 开发了用于分布式布里渊光纤传感的光纤传感结构, 通过管子和滑轮构成具有保护作用的往返式结构, 在短距离上增加了传感光纤的长度, 不仅扩展了光缆对局部变形的耐受度, 同时也提高了应变监测准确度。设计对比校准实验, 验证了其在空间分辨率为 1 m 时的性能, 并在人工浅层边坡上进行现场监测实验, 验证了其对滑坡监测的有效性。此外, 由于光缆在改良装置的保护下不与外界接触, 光缆的存活率显著提高。

关键词: 光纤传感器; 布里渊光时域反射仪; 边坡监测; 应变测量; 位移; 光时域反射

中图分类号: TU454

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215009.0906005

Optical Fiber Sensing Structure for Slope Monitoring Based on Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

LI Shiyi¹, LI Hao¹, JI Wenbin¹, WANG Feng¹, ZHOU Xiao¹, YUAN Xinyu¹,
ZHANG Yixin¹, ZHANG Xuping¹, LI Haitao², LI Jingzeng³, BO Guanzhong⁴

(1 Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University,
Nanjing 210023, China)

(2 Jiangsu Traffic Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China)

(3 Jiangsu Southeast Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

(4 China Communications Construction Company First Highway Two Engineering Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Distributed Brillouin optical fiber sensor has great potential for slope monitoring. The sensing fiber is easy to be broken due to extensive local strain, and it is often difficult to obtain accurate measuring results due to the limitation of the spatial resolution. In order to fit for the slope monitoring, an Optical Fiber Sensing Structure (OFSS) for the distributed Brillouin optical fiber sensing network is developed.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61975076, 61627816), 江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目, 江苏省自然科学基金(No. BK20180328), 江苏省重点研发计划(No.BE2018047), 内蒙古重点研发计划(No.2019GG374), 光电信息获取与控制教育部重点实验室开放课题(No.OEIAM202005)

第一作者: 李时宜(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式光纤传感技术。Email: zorolsy@163.com

导师(通讯作者): 王峰(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为分布式光纤传感技术。Email: wangfeng@nju.edu.cn

收稿日期: 2021-01-18; **录用日期:** 2021-05-13

<http://www.photon.ac.cn>

The OFSS composes of a PVC pipe and two pulleys, constructing multiple round-trips for the sensing fiber. The length of sensing fiber for a short spatial length is extended significantly. So both the sensing accuracy and the tolerance to local deformation of the fiber are improved effectively. A comparative calibration experiment is designed in the laboratory to verify its performance with the spatial resolution of 1 m. What's more, the effect of the proposed OFSS for landslide monitoring is confirmed through an on-site monitoring test on a shallow artificial slope. In addition, since the optical cable has no contact with the outside under the protection of the modified device, the survival rate of the cable is increased significantly.

Key words: Optical fiber sensor; Brillouin optical time domain reflectometer; Slope monitoring; Strain measurement; Displacement; Optical time domain reflectometry

OCIS Codes: 060.2370; 120.4825; 230.0040

0 引言

根据2019年全国地质灾害通报,滑坡灾害占比约为68%,边坡的失稳是山区、矿区和坝区常见的灾害,严重威胁交通运输和人民生命安全。因此,研究有效可靠的边坡形变监测技术具有十分重要的意义。不同于光纤布拉格光栅的准分布式监测^[1],布里渊光时域反射仪(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)是一种具有分布式监测能力的应变传感技术,在边坡变形监测中得到了广泛应用^[2-4]。南京大学最早提出了基于BOTDR的边坡监测方案并验证了其可行性^[5]。边坡监测方式可以分为表面监测和深度监测,DING Yong等提出了应用于边坡工程的光纤传感网络,通过将光纤传感网铺设在边坡地表以下一定深度的位置来监测边坡地表的变形^[6]。研究者们还利用土工布、土工格栅以及框架梁耦合等方式来监测边坡表面形变。在其深度监测的研究方法中,基于BOTDR的测斜仪可以用来获取边坡的内部变形^[7]。将传感光纤和边坡锚杆或者抗滑桩耦合,可以监测边坡深度支护的工程质量和状态^[8]。除此之外,一种基于OTDR的蝴蝶结形式的复合光纤装置也可以用于坡体深部剪切位移^[9]。在光纤耦合保护的问题中,为了解决光纤布设在土体中变形协调差、缺乏保护措施以及难以定位等问题,WANG Baojun等提出可以将光纤植入土工布和土工格栅等柔性复合材料中^[10]。同时,将光纤定点缠绕的方法,也能克服光纤的粘贴困难和容易断裂的问题^[11]。SUN Haibo等设计了一种将光纤嵌入边坡框架梁的安装方法^[8],之后的研究表明,BOTDR可以准确测量出钢筋混凝土的应变大小并识别裂缝位置^[12]。

在边坡监测中,有些情况下混凝土的开裂或者土体的局部变形会发生在很小的长度范围内(小于1 m),却有很大的局部应变,所以需要仪器具有较高的空间分辨率才能进行精确测量。一般情况下,BOTDR的空间分辨率为米量级,无法准确测量局部范围较小的应变^[13]。虽然已有一些提高空间分辨率的方法,如双脉冲方案^[14]、布里渊谱分析^[15]和迭代细分^[16]等,但在实际应用过程中仍难以满足空间分辨率的要求。与BOTDR技术相比,布里渊光时域分析仪(Brillouin Optical Time Domain Analyzer, BOTDA)的空间分辨率和精度都相对较高^[17]。一些研究人员利用BOTDA技术进行了一系列边坡监测应用^[18-21]。然而,BOTDA的空间分辨率也难以达到厘米量级,且成本较高,最重要的是一旦光纤断裂,整个光纤链路将失去监测能力。另外,当光缆与边坡全部紧密连接时,边坡的局部变形会造成较短长度上的光纤产生较大的应变,容易导致光缆断裂。综上所述,为了解决边坡监测中空间分辨率匹配和光纤保护的问题,提出了一种基于BOTDR的专用光纤传感器结构(Optical Fiber Sensing Structure, OFSS),该结构极大地扩展了光纤对局部变形的耐受度,同时提高了应变监测精度。

1 传感器设计原理

BOTDR系统是基于光纤中的自发布里渊散射光来进行传感,其散射光的频率相对于入射光频率 ν_0 存在 ν_B 的偏移。光纤中的布里渊频移 ν_B 和光纤中的声波速度 V_a 以及光纤的折射率 n 有如下关系^[22]

$$\nu_B = 2n\nu_0 \frac{V_a}{c} \quad (1)$$

当边坡和光纤耦合后,一旦坡体产生了变形,就会导致光纤受力,在微观上会改变光纤的折射率等物理参数,其中,影响光纤中声波速度的参量是应变的函数,所以,布里渊频移随应变的变化可以表示为^[22]

$$\nu_B(\epsilon) \approx \nu_B(0)(1 + 4.48\Delta\epsilon) \quad (2)$$

式中, $v_B(\epsilon)$ 为光纤受到应变时的布里渊频移, $v_B(0)$ 为同一环境下光纤自由状态时的布里渊频移。因此, 根据式(2), 当传感光纤产生应变后, 布里渊频移就会发生变化, 其变化量 Δv_B 随光纤应变的变化量 $\Delta\epsilon$ 近似成线性比例关系, 其中 $C_{v,\epsilon}$ 为应变系数, 最终表示为^[22]

$$\Delta v_B \approx C_{v,\epsilon} \Delta\epsilon \quad (3)$$

光纤中的自发布里渊散射光非常微弱, 因此, BOTDR 通常采用外差相干探测的方式对布里渊散射信号进行接收和解调^[23], 其系统结构如图 1。激光器输出的连续光被耦合器分成两路, 一路经过调制器调制成脉冲光后, 再经过放大器放大光信号, 将脉冲光输入至传感光纤中; 另一路参考光为连续光, 通过扰偏器后, 和由环形器回来的携带有外界信号的自发布里渊散射光在耦合器中形成拍频信号。随后探测器将光信号转换为电信号, 该差频电信号的频率即为布里渊频移, 最终通过数据处理模块解调出光纤沿线的布里渊频移分布。

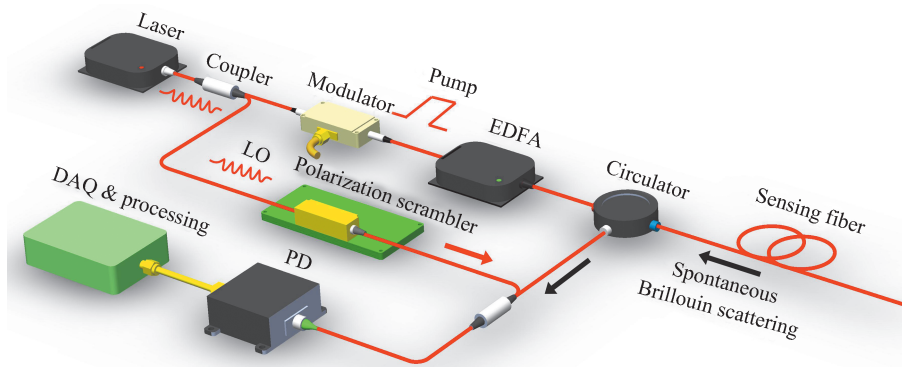


图 1 自外差相干探测 BOTDR 结构示意图

Fig.1 Sensing structure based on coherent self-heterodyne BOTDR

BOTDR 系统利用脉冲光进行探测, 脉冲光前部产生的散射光会在向后传播的过程中与脉冲光后部产生的散射光叠加在一起, 所包含的信息为脉冲光一半长度上的整体信息, 难以分离, 所以其空间分辨率可表示为^[13,23]

$$\Delta Z = c\tau / (2n) \quad (4)$$

式中, τ 为入射光的脉冲宽度。因此减小脉冲宽度可以提高 BOTDR 的空间分辨率。但是脉冲宽度的减小会降低信噪比, 并且当脉宽小于光纤中声子寿命 (10 ns 左右) 时, 会导致布里渊频谱急剧展宽, 大大降低对布里渊频移的测量精度。因此, BOTDR 系统脉冲光宽度一般大于 10 ns, 对应的空间分辨率大于 1 m。

为了通过传感光缆较好地进行应变监测, 需要对光缆进行合理的铺设。对于 BOTDR 来说, 传感光缆的铺设方法一般有两种。第一种是全面粘贴法, 即将光缆完全粘贴在结构体表面; 第二种是定点粘贴法, 是指在光缆施加预应力后, 按一定的间隔将其固定在结构表面。在全面粘贴方法中, 当结构发生变形时, 巨大的局部应变很容易损坏光缆, 因为常规光缆所能承受的最大应变仅为 1%~2%。定点粘贴法可以将局部应变扩散到相邻两个定点之间的一段光缆上, 但这种方法也缺乏对光缆的良好保护, 很难避免光缆在监测期内发生断裂。此外, 定点间距需要大于传感系统的空间分辨率, 使定位误差增大。

为了配合 BOTDR 传感系统解决上述问题, 开发如图 2(a) 所示的光纤传感器结构。在设计思路中, 让该结构兼顾对光纤的保护、匹配系统空间分辨率、提高应变量程等。在实际制作过程中, 用普通的细光缆、PVC 管体、滑轮、橡胶管等材料对设计思路进行再现和验证。每段 PVC 管体的两端都内嵌一个滑轮, 构成一对滑轮组, 光缆经过滑轮引导, 在每段管体内形成三段式往返结构, 再由护盖、橡胶管封装管体。管体两端用夹具紧贴护盖外侧夹住光缆, 让管体内的光缆获得一个预应力。在进行大范围传感时, 将多个同样的管体用一根光缆串联起来, 管间光缆用橡胶管保护。如图 2(b) 所示, 当整个结构被埋入坡体时, 管壳和橡胶管会与坡体的土壤或框架梁的混凝土结合在一起, 同时使其中的光缆受到隔离。因此当坡体发生应变时, 会拉动相应位置的管体, 使局部应变传递到相应管体中的传感光缆上, 分散了应变对局部光缆的作用。并且多段式往返结构极大提高了单位空间长度上传感光缆的长度, 进而也提高了定位精度。

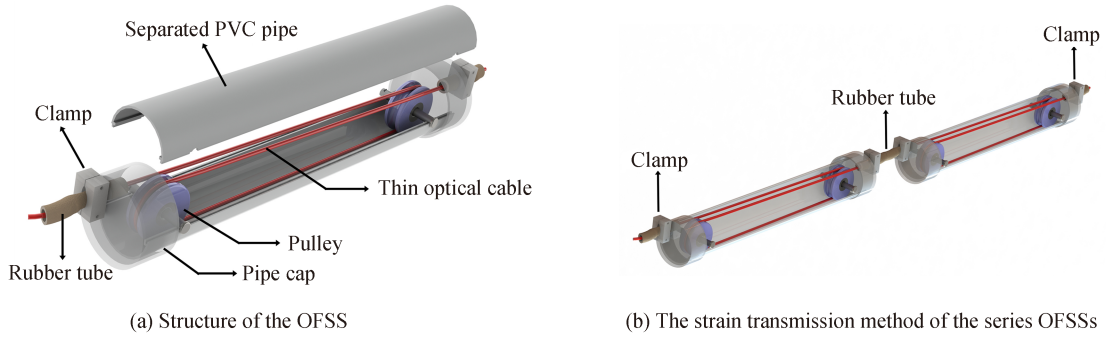


图2 基于BOTDR的光纤传感器结构
Fig.2 Optical fiber sensing structure based on BOTDR

单个OFSS的尺寸可根据实际情况进行调整。光缆的弯曲会引起光信号的衰减^[24]为

$$\alpha_c \approx (1297) R_0^{-\frac{1}{2}} \exp(-736R_0) \quad (5)$$

选择滑轮的弯曲直径为42 mm,每次弯曲产生的衰减为0.000 85 dB。对于20 dB动态范围的BOTDR,可以支持超过10 000个OFSS串联。PVC管的直径为50 mm,为滑轮的自由转动预留了空间。

在经济可行性分析上,采用普通的KFRP加强芯的皮线光缆,市场价为每米1.3元,当把每段OFSS设计成90 cm长时,整个光纤传感器串联结构成本为每米15.5元,相比于专用的EPR涂覆的钢绞线光缆成本在每米29元到63元,同时具有价格优势。其中,在滑轮的选择上选用内嵌金属轴承的专用滑轮,成本较高,每只4元,滑轮的选择上有很多更具性价比的可替代方案。

从理论上分析,针对应用于边坡监测的新型光纤传感器(OFSS)来说,由于传感结构平均了光缆上的局部应变,所以测量到的应变与实际应变不同,必须对其进行校准。当该OFSS被布置在边坡中时,综合考虑两种OFSS和边坡的耦合状态:状态一为边坡土体和OFSS发生相对滑动,但由于两个管体之间的空隙会起到对边坡土体的阻挡作用,会将边坡的形变传递到相邻两个管体中的光缆上;状态二为边坡土体和OFSS完全耦合,类似于将其用混凝土浇筑在框架梁内,且整体结构和混凝土绝对保持同步变形,混凝土的开裂仅会拉伸单一的管体直至其断裂,此时边坡的形变会传递到单个管体中的光缆上,但这种状态是一种较为理想的情况。其次,在外力作用范围上,有三种情况发生:情况一,相对位移发生在两管体间,且范围小于管间距离;情况二,相对位移发生在一根管子上,且范围小于管子长度;情况三,相对位移分散作用在一段距离上。情况一和情况二是两种极端情况,但是由于接触面积的不同,管体和外界的摩擦力远远大于管间细橡胶管和外界的摩擦力,所以这两种极端情况都会将极短范围的应变扩散到相对应的管体当中,所以相当于传感器将系统的空间分辨率从米量级提高到小于1 m。综上所述,OFSS会将外界应变转换成结构体内与外界隔离的光缆中的应变。通过应变与光纤长度的关系,可以得到边坡上实际的相对位移大小 Δx ,其表达式为

$$\Delta x = \epsilon \cdot L \quad (6)$$

式中, ϵ 为测量得到的应变大小, L 为受影响的光缆长度。

2 室内实验

为了验证所提出结构的有效性,首先进行如图3所示的实验。实验中,将两根OFSS串联,并将上面的OFSS固定在支架上,使下面的OFSS自然悬挂。每根管子的长度为60 cm,管间距离10 cm。管体内部的光缆长度为135 cm。在该结构外同时设置一段裸光缆进行对比实验。

实验分为两组,在实验1中,将外部光缆固定在装置两端的 a 点和 b 点, a 点到 b 点的距离是131 cm,等于整个串联OFSS的总长度。同时在外部光缆上施加预应变,以保证OFSS和外部光缆在荷载作用下具有相同的位移。负载设置在点 b ,并以1.5 kg的步进增加。本实验共有8个步进。实验2的过程与实验1相同,不同之处在于外部光缆固定在装置上的 c 点和 d 点, c 点到 d 点的距离为36 cm。在对比实验中,由于OFSS和裸光缆的受力方式不一样,监测到的应变值虽然不同,但随载荷产生的实际位移大小应该是相同的。

实验中,BOTDR的空间分辨率为1 m,应变测量精度为 $\pm 20\mu\epsilon$ 。因此,在实验1中,OFSS内部光缆和

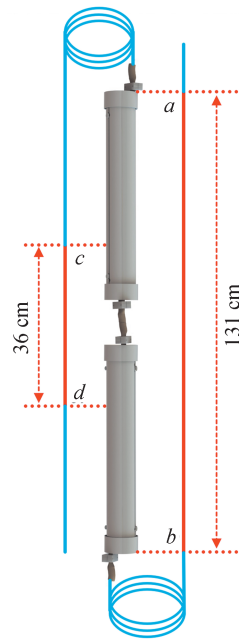


图3 室内校准实验装置

Fig.3 The setup of the calibration experiment

外部光缆的长度都与系统的空间分辨率相匹配。应变监测结果如图4(a)。可以看出,与外部光缆相比,OFSS具有较小的应变和较大的空间长度。根据式(6),荷载下的位移可以通过监测应变计算得到。在本实验中,OFSS中光缆的实际长度为290 cm,外部光缆的实际长度为131 cm。所以,不同荷载下的位移对比如图5(a)。可以看出,OFSS与外部光缆得到的位移结果相同,因此,所提出的传感结构能够准确地监测到实际位移的大小。由于在原理上是用较长的光纤去感知位移,所以在相同位移下对光纤产生较小的应变,从而避免了光纤受到过大局部应变的损坏。

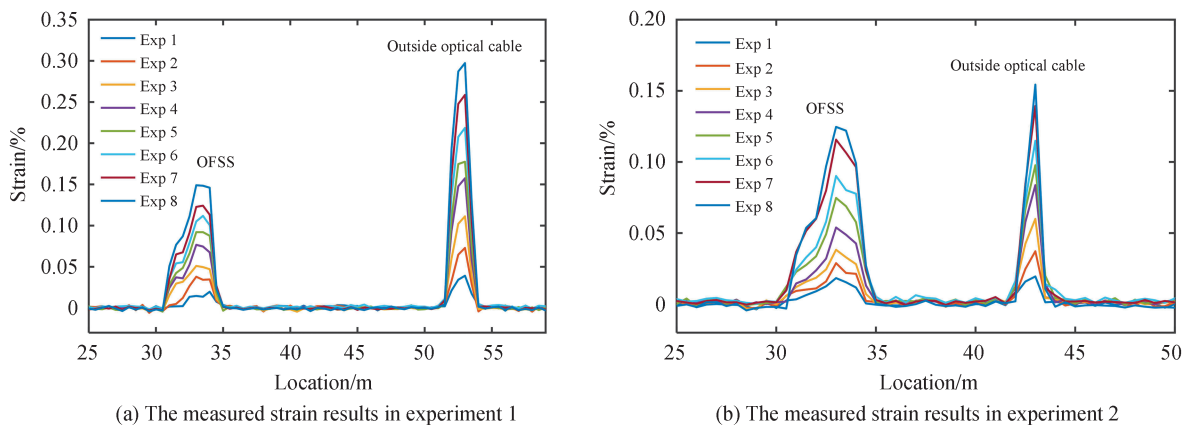


图4 光纤传感器和外部光缆的应变测量结果

Fig.4 The measured strain results of the OFSS and different outside optical cable

在实验2中,外部光缆在荷载影响下的长度为36 cm,小于系统的空间分辨率。图4(b)为OFSS和短光缆在不同荷载下的实测应变,可以看出,短光缆的实测应变远小于实验1中长光缆的实测应变。同样,将图4(b)中的应变根据式(6)转化为位移,结果如图5(b)所示。可以看出,短光缆的实测位移远小于OFSS的实测位移,说明当变形长度小于空间分辨率时,监测的应变不准确。因此,在实际应用中,直接将光缆埋入边坡可能会无法监测出边坡的实际位移,但OFSS却可以将任意范围上的应变转换到相对应的管体内的光缆中,监测的位移值更为准确。

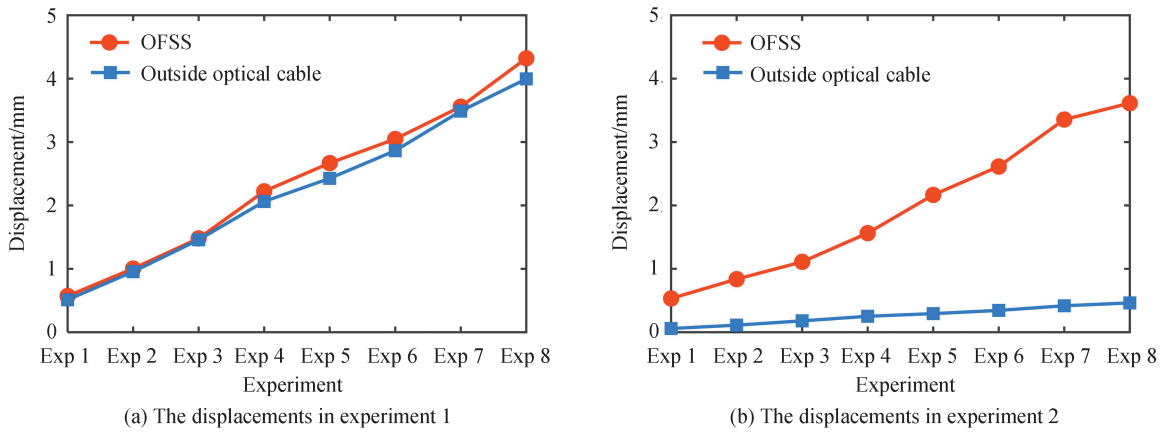
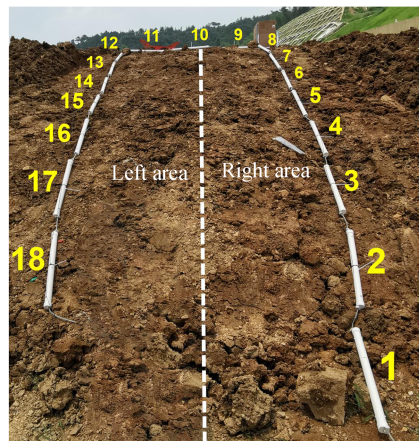


图5 不同时刻下的位移计算结果
Fig.5 The displacements for different measurement time obtained

3 外场实验

为了验证该传感结构在实际工程应用中的作用,制作了一个由18个传感元件组成的长传感结构。每根PVC管体长为80 cm,管体间距为10 cm。每根OFSS中的实际光缆长度为2 m。同时将两根光缆串联在OFSS后面进行比较。光缆1从最后一段OFSS的光缆尾端引出,按照OFSS正序号的方向平行铺设在OFSS旁边,并且被定点固定在每根管体上,两个相邻固定点之间的距离为90 cm。光缆2接在光缆1的尾端,顺着同样的方向自由铺设在OFSS旁边,不做任何固定。图6(a)为实验总体的布置图,监测区域分为左侧区域和右侧区域。布置完成后,如图6(b)和(c)所示,利用挖掘机将整体结构埋入坡体内部,并压实。实



(a) The layout of OFSSs on the slope



(b) Excavator buries OFSSs in the shallow surface of an artificial slope



(c) Excavator exerts force on the slope

图6 外场测试实验
Fig.6 The situ monitoring experiment

验中,通过挖掘机铲头对土壤施加沿着坡面的下滑作用力,模拟滑坡。

如表1,为了使坡面受力均匀,挖掘机在坡面左右区域交替施加作用力。

表1 每组实验的滑坡区域
Table 1 The landslide area of each experiment

Experiment number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Position	Right	Right	Left	Left	Left	Right	Right	Left	Right	Left	Right

在图7中,根据图6(a)的左右区域划分,将11组实验结果拆分为左侧区域和右侧区域的监测结果。每条应变曲线在空间分布上由三个不同的部分组成,按顺序分别对应于OFSS、光缆1和光缆2的监测结果。从实验1到实验8中可以看出,光缆1监测到的应变始终最大,这是因为管体的表面和土壤的摩擦力较大,固定在管体上的光缆1通过管体间的拉伸作用力直接感知土壤的移动。另一方面,光缆2测得的应变最小,这是由于光缆2很细,与土壤的摩擦力很小,即和土体耦合程度较差,存在相对滑移,并未完全感知到土壤的移动。然而,对光缆1来说,由于相邻固定点之间的距离略小于系统的空间分辨率,其监测到的应变不是真实大小。OFSS监测到的应变小于光缆1,是因为它将局部应变平均到更长的光缆上,可以通过式(6)换算出真实位移场的大小。

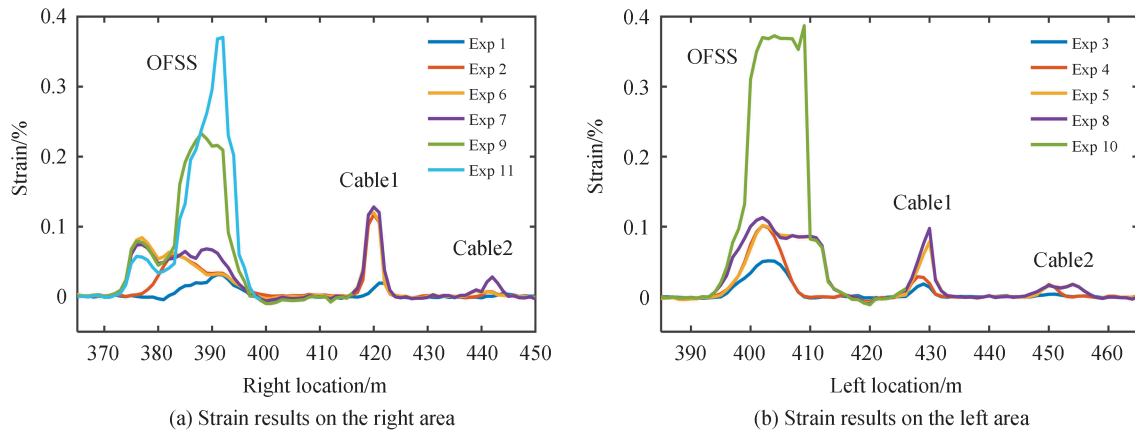


图7 不同铺设方式下光纤传感器和光缆的应变结果
Fig.7 Strain results of OFSS and optical cable by different laying styles

将图7中监测到的应变根据式(6)转化为位移,结果如图8。可以看出,OFSS监测到的位移在各组实验中均保持最大,应该更接近滑坡产生的实际位移。光缆1所监测到的位移较小,说明它反映的并不是真实的应变场。光缆2对土体的相对滑动最大,因此其监测到的位移最小,结果最为不可信。从实验9开始,对土

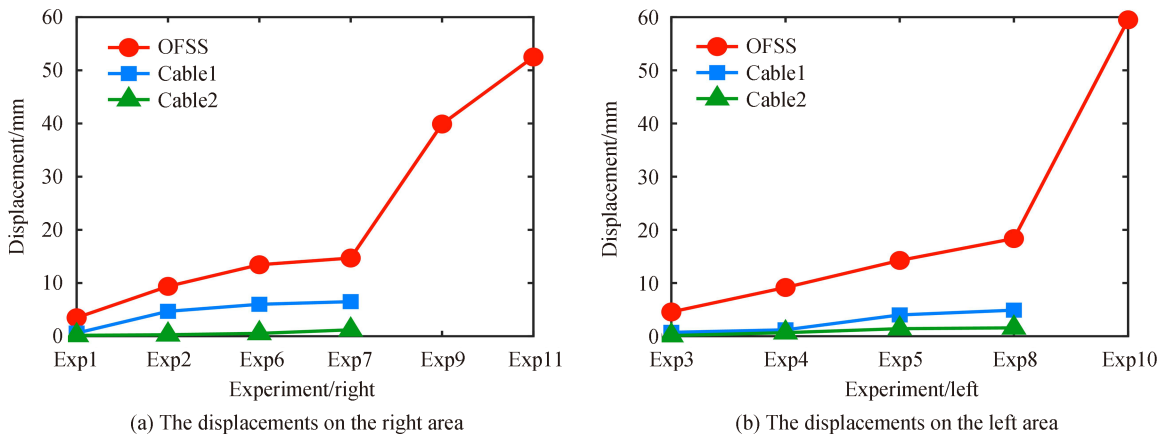


图8 不同实验下的位移结果
Fig.8 The displacements in different experiment

壤的外力急剧增大,光缆1因为无法承受而发生断裂,又因为光缆2布设在光缆1后,此时光缆2的信号也随之消失,但由于BOTDR单端监测的优势和OFSS在设计上对光缆的保护作用和扩大量程的特点,OFSS中的光缆仍具有监测功能。因此,在实际应用工程中,该结构设计方案仍具有很强的可行性。

4 结论

为了使BOTDR系统更加适用于边坡监测,并满足边坡监测中空间分辨率和光缆承受力的要求,提出了一种新的光纤传感器结构设计。不仅可以为光缆提供直接的物理保护,而且可以将短距离的局部应变平均到较长的范围内,防止局部大应变对光缆造成破坏,提高了光缆的存活率。还可以根据系统空间分辨率的要求,设计每段管体中光缆的长度,灵活匹配系统的空间分辨率。并且,由于是通过较长的光缆感知变形,系统可以提供更多的采样点,提高了测量精度。除此之外,外界的应变仅会传递到相应的一段管体中的传感光缆上,同时也提高了定位精度。必要时,甚至可以根据实际工程要求单独设计每段长度。本文通过理论分析、室内试验和外场试验充分验证了方案的可行性。

参考文献

- [1] GAO Chao, LIU Bang, GUO Yongcai, et al. Optical fiber bragg grating sensor using cantilever beam of equal strength for slope sliding displacement monitoring[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0306002.
高潮, 刘邦, 郭永彩, 等. 面向边坡滑移的剪切位移传感装置[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0306002.
- [2] WANG Baojun, SHI Bin, Distributed fiber monitoring test and its application to slope deformation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1): 28-34.
王宝军, 施斌. 边坡变形的分布式光纤监测试验研究及实践[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 28-34.
- [3] GAO Lei, GONG Yunhao, YU Yanjie, et al. Development and application of distributed measurement optical fiber inclinometer tube based on Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(30): 81-85.
高磊, 龚云皓, 余彦杰, 等. 基于布里渊散射光时域反射测量技术的分布式光纤测斜管研发与应用[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(30): 81-85.
- [4] QIN Shiwei, GU Chuan. Principle and application of BOTDR and wavelet processing of its signal[J]. Mechatronics, 2008, 14(11): 54-56.
秦世伟, 谷川. BOTDR原理、应用及其信号的小波处理[J]. 机电一体化, 2008, 14(11): 54-56.
- [5] SHI Bin, XU Hongzhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 2(3): 493-499.
施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 2(3): 493-499.
- [6] DING Yong, SHI Bin, CUI Heliang, et al. A fiber optic sensing net applied in slope monitoring based on Brillouin scattering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 338-342.
- [7] SUN Yijie, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Internal deformation monitoring of slope based on BOTDR[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 9496285.
- [8] SUN Haibo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Study on distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3725-3731.
隋海波, 施斌, 张丹, 等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3725-3731.
- [9] GAO Chao, LIU Bang, GUO Yongcai, et al. A composite optical fiber transducer for landslide monitoring[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 0812003.
高潮, 刘邦, 郭永彩, 等. 一种用于滑坡监测的复合光纤装置[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0812003.
- [10] WANG Baojun, LI Ke, SHI Bin, et al. Simulation experiment for distributed fiber monitoring on deformation of soil slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 325-332.
王宝军, 李科, 施斌, 等. 边坡变形的分布式光纤监测模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 325-332.
- [11] LIU Yongli, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Study on the fixation technique of optical fiber based on BOTDR[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(9): 1353-1358.
刘永莉, 孙红月, 尚岳全, 等. 基于BOTDR的传感光纤固定方式研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(9): 1353-1358.
- [12] SUN Yijie, SHI Bin, CHEN Shenan, et al. Feasibility study on corrosion monitoring of a concrete column with central rebar using BOTDR[J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(1): 41-53.
- [13] ZHANG Dan, XU Hongzhong, SHI Bin, et al. Brillouin power spectrum analysis for partially uniformly strained optical fiber[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(9): 976-981.
- [14] KOYAMADA Y, SAKAIRI Y, TAKEUCHI N, et al. Novel technique to improve spatial resolution in Brillouin optical

- time-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007,19(23):1910-1912.
- [15] MURAYAMA H, KAGEYAMA K, SHIMADA A, et al. Improvement of spatial resolution for strain measurements by analyzing Brillouin gain spectrum[J]. SPIE, 2005,5855:551-554.
- [16] WANG Feng, ZHAN Weiwei, ZHANG Xuping, et al. Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,31(23):3663-3667.
- [17] PENG Yingcheng, QIAN Hai, LU Hui, et al. New research progress on distributed optical fiber sensor technique based on BOTDA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013,50(10):36-40.
彭映成,钱海,鲁辉,等. 基于BOTDA的分布式光纤传感技术新进展[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(10):36-40.
- [18] PANG Weijun, DENG Qinglu, XIONG Jian, et al. Application study of optical fiber sensing technology to slope deformation monitoring based on BOTDA[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012,19(6):28-33.
庞伟军,邓清禄,熊建,等. 基于BOTDA的光纤传感技术在边坡变形监测中的应用研究[J]. 安全与环境工程,2012,19(6):28-33.
- [19] ZHU Honghu, SHI Bin, ZHANG Jie, et al. Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under surcharge loading[J]. Journal of Mountain Science, 2014,11(4):979-989.
- [20] LIU Bo, ZHANG Dan, XI Peisheng, et al. Mechanical behaviors of SD and CFA piles using BOTDA-based fiber optic sensor system: A comparative field test study[J]. Measurement, 2017,104:253-262.
- [21] LI Xuhui, HUANG Yixing, WU Xingyan, et al. Application of distributed optical fiber monitoring technology in slope project[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018,37(3):34-36.
李旭辉,黄奕辉,吴兴颜,等. 分布式光纤监测技术在边坡工程中的应用[J]. 南昌工程学院学报,2018,37(3):34-36.
- [22] 王峰. 基于布里渊散射的全分布式光纤传感系统空间分辨率的研究[D]. 南京:南京大学,2009.
- [23] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, IZUMITA H, et al. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry[J]. IEICE Transactions on Communications, 1993,E76-B(4):382-390.
- [24] MIYAMOTO M, SAKAI T, YAMAUCHI R, et al. Bending loss evaluation of single-mode fibers with arbitrary core index profile by far-field pattern[J]. Journal of Lightwave Technology, 1990,8(5):673-677.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.61975076, 61627816), Qing Lan Project of Jiangsu Province, Natural Science Foundation for Young Scientists of Jiangsu Province (No. BK20180328), Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No. BE2018047), Key Technology Research and Development Program of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2019GG374), Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education (No. OEIAM202005)