

Study on the Fixation Technique of Optical Fiber Based on BOTDR *

LIU Yongli, SUN Hongyue, SHANG Yuequan^{*}, YU Yang

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Difficulty of optical fiber fixation has restricted the application of optical fiber monitoring in many areas. Aiming at solving optical fiber fixation problem during slope deformation monitoring, the twining method to fix optical fiber is proposed by using the effect of friction on tension distribution. With mechanical analysis of the twined model, pre- and post-load tests on the strain characteristics of the optical fiber and landslide deformation monitoring in Shenze Township, the effectiveness of twining fixation method in optical fiber monitoring is fully discussed. The results show that the optical fiber can be effectively fixed by twining. Based on distance resolution of BOTDR, a method to determine the length of twining fiber is derived. Combined with the engineering practice in landslide monitoring, the proper layout design of optical fiber is proposed, which eliminates the slope surface undulation effects on the optical fiber fixation and also facilitates the timely repair of the monitoring system.

Key words: BOTDR; optical fiber monitoring; twining fixation; slope

EEACC: 7230E

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.09.028

基于 BOTDR 的传感光纤固定方式研究 *

刘永莉, 孙红月, 尚岳全^{*}, 于洋

(浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058)

摘要: 光纤固定困难制约了应用光纤监测的许多领域。针对边坡变形监测中光纤固定方面遇到的问题, 利用摩擦力对张力分布的影响, 提出采用缠绕方式固定光纤的方法。通过对缠绕模型的力学理论分析, 缠绕光纤固定方式下加载前后光纤应变特征的测试研究, 并结合深泽乡滑坡表面变形监测的实际应用, 对缠绕固定光纤监测方法的有效性进行了全面的讨论。结果表明缠绕方法能有效固定光纤。基于 BOTDR 距离分解度, 推导给出了缠绕方式固定光纤时缠绕长度的确定方法; 结合滑坡监测工程实践, 提出了合理设计布线方式, 解决了边坡表面地形起伏对光纤固定的影响, 其铺设方式还便于及时修复监测系统出现的问题。

关键词: BOTDR; 光纤监测; 缠绕固定; 边坡

中图分类号: TU375.4; TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)09-1353-06

光纤传感器具有抗电磁场的干扰, 耐久性好, 监测现场无需用电, 测量范围广等优点而受到广泛关注。而基于布里渊的分布式光纤监测技术, 更具有集传输传感于一体, 利用普通的单模光纤, 即能实现分布式、长距离等监测功能的优点。虽然国内对布里渊光时域反射测量技术(简称 BOTDR: Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)应用的研究起步较晚, 但发展很快, 已经成功地将该技术应用于土木工程监测的许多领域, 如结构健康监测、隧道工程监测、边坡工程监测等^[1-7]。虽然光纤传感技术的研究已经取得了很大的进展^[8], 但是光纤的固定困难问题却严重地制约了该项技术的推广应用。

目前光纤的固定方式主要有两种: 粘贴式和植入式。粘贴式是采用粘合剂把光纤粘贴在被监测对象上; 植入式是把传感光纤植入被监测对象中, 使光纤和被监测对象成为一体, 保持同步变形。目前对于粘贴式和植入式的研究和应用较多, 如在监测对象上刻槽, 用瞬干胶和水泥粘结, 将光纤固定在监测体上, 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心利用此种光纤固定方法监测滑坡体上水泥框格的变形; 南京大学地球环境计算工程研究所采用全粘着的方式将光纤应用于隧道的整体变形监测^[9-10]。

上述研究均是针对有规则几何外形且介质均匀的被监测体, 如钢筋混凝土梁, 隧道的内衬等。但对

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(40972187)

收稿日期: 2010-03-02 修改日期: 2010-06-02

于岩土介质结构复杂且没有规则几何外形边坡,植入式固定需要在边坡体上开挖坑槽,不但工作量巨大且会因受粗颗粒介质的切割而使光纤折断,受到限制。如果将全面粘着式的铺设工艺应用于岩质或含碎石较多的边坡,因为裸露地表要经受日晒雨淋,很难选择有效的粘合剂固定光纤^[11-15]。因此,针对这些岩土介质、地形条件等复杂的边坡,需要提出一种能够解决地形起伏影响的坡体表面光纤固定方式来满足长期监测的需求。

本文提出在边坡中通过缠绕固定光纤的新方式和有效缠绕长度的确定方法,分析了光纤缠绕时摩擦力对张力分布的影响,通过缠绕试验对此固定光纤方式的可行性进行了验证,并分析了距离分解度影响下所测试的图形特征,提出了假应变段的概念。最后将其应用到具体的工程实践中,验证了缠绕固定方式的有效性。

1 光纤缠绕力学模型分析

光纤缠绕在杆体上时,可建立图1和图2所示的力学模型^[16],分析摩擦力对张力分布的影响。

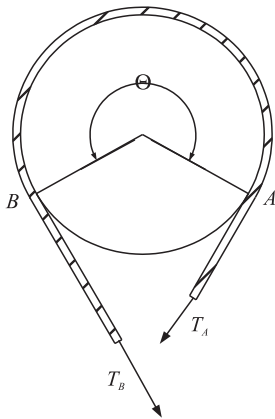


图1 缠绕装置图

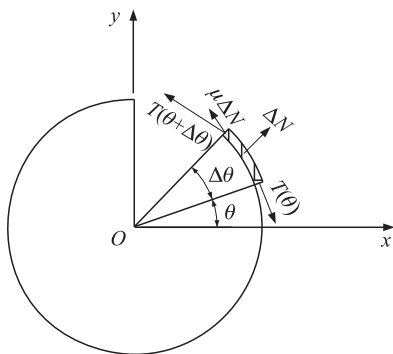


图2 摩擦力对张力分布的影响

图1为一种类似绞盘的装置,光纤缠绕在杆体上,当光纤承受拉力 T_A ,则可以用小得多的力 T_B 拽住光纤。设光纤与绞盘的摩擦系数为 μ ,光纤绕杆体

的张角为 Θ 。如图2所示,用隔离体法,考虑在 θ 处对圆心张角 $\Delta\theta$ 的一段线元,分析其受力情况。忽略光纤的质量,该线元受四个力的作用:两端张力 $T(\theta)$, $T(\theta + \Delta\theta)$,法向力 ΔN ,和摩擦力 $\mu\Delta N$,在没有加速度的情况下四力的合力为0,分解为切向和法向分量,则有:

切向

$$[T(\theta + \Delta\theta) - T(\theta)] \cos \frac{\Delta\theta}{2} = -\mu\Delta N \quad (1)$$

法向

$$[T(\theta + \Delta\theta) + T(\theta)] \sin \frac{\Delta\theta}{2} = \Delta N \quad (2)$$

因 $\Delta\theta$ 很小, $\sin \frac{\Delta\theta}{2} \approx \frac{\Delta\theta}{2}$,

$$T(\theta + \Delta\theta) - T(\theta) \approx \Delta T,$$

$$T(\theta + \Delta\theta) + T(\theta) \approx 2T,$$

故式(1)、式(2)可以写为:

$$\begin{cases} dT = -\mu\Delta N \\ T\Delta\theta = \Delta N \end{cases}$$

消去 ΔN ,可得:

$$\frac{\Delta T}{T} = -\mu\Delta\theta,$$

取 $\Delta\theta \rightarrow 0$ 的极限,

$$\frac{dT}{T} = -\mu d\theta \quad (3)$$

设绞盘上A、B两点分别对应 $\theta = \theta_A$ 和 θ_B ,对式(3)积分:

$$\int_{T_A}^{T_B} \frac{dT}{T} = -\mu \int_{\theta_A}^{\theta_B} d\theta$$

得

$$\ln \frac{T_B}{T_A} = -\mu(\theta_B - \theta_A),$$

或

$$T_B = T_A e^{-\mu\Theta} \quad (4)$$

式(4)中 $\Theta = \theta_B - \theta_A$ 。式(4)表明,张力随 θ 按指数减小,故容易做到使 $T_B \leq T_A$ 。

由以上的力学分析可知,将光纤多道缠绕在杆体上,每缠绕一道,所需 T_B 减小很多,当缠绕一定道数时,摩擦力可平衡 T_A , T_B 的大小可忽略,所以利用摩擦力可将光纤固定在杆体上。

2 光纤缠绕长度的理论分析

通过缠绕可以将光纤固定起来,为了计算有效固定光纤的缠绕长度,对光纤缠绕模型做出如下几点假设:

(1)对单道缠绕光纤进行平面受力分析,多道缠

绕光纤进行算术累加,不考虑空间受力影响。

(2) 缠绕段光纤应变大小不随主动力的变化而变化;

(3) 缠绕段光纤与杆体之间只产生静摩擦力;

(4) 缠绕段光纤的初始应变是均匀的,且缠绕光纤之间没有空隙;

(5) 相邻缠绕段之间的光纤相互不产生力学作用;

(6) 缠绕光纤的长度 L 按圆弧长计算,即 $L = \theta R$, R 为杆体的半径, θ 为缠绕光纤对应的圆心张角。

根据式(4)可知, T_B 的大小只与摩擦系数 μ 、圆心张角 θ 有关,其中 μ 取决于杆体的材质,而 θ 决定了缠绕道数。对于一定的工程环境,所使用的杆体材料是一定的,所以合理的缠绕角度使监测达到经济、合理、有效的关键。

令

$$k = \frac{T_B}{T_A} = e^{-\mu\theta} \quad (5)$$

μ 一定,当 θ 达到一定大小时, T_B 趋于 0, θ_{\min} 即是满足光纤固定要求的最小值。传感光纤要满足监测要求,光纤的应变必须在弹性变化范围内,所以监测仪器所能感应到的传感光纤内最大拉力为:

$$T_{\max} = E\varepsilon_{\max}A$$

其中 E 为传感光纤的弹性模量, ε_{\max} 是测试仪器能测试到的最大应变值, A 是光纤的横截面积。当 $T_A > T_{\max}$ 时,即代表超出了监测仪器的测试量程,所以在监测过程中,光纤上所承受的轴向力 $T_A \leq T_{\max}$ 。

如图3所示,传感光纤承受的拉力分别为 T_1 、 T_2 ,当传感光纤一端受拉力 T_1 时,在缠绕段 1-1' 产生张力,1' 点张力近似等于 0;缠绕段另外一端传感光纤承受拉力 T_2 ,在缠绕段 2-2' 产生张力,2' 点张力近似等于 0。在监测过程中, T_1 、 T_2 在缠绕段光纤内产生的张力不能影响传感光纤受力。由于 T_1 、 T_2 在光纤内产生的张力方向是相反的,1-2 段之间光纤内

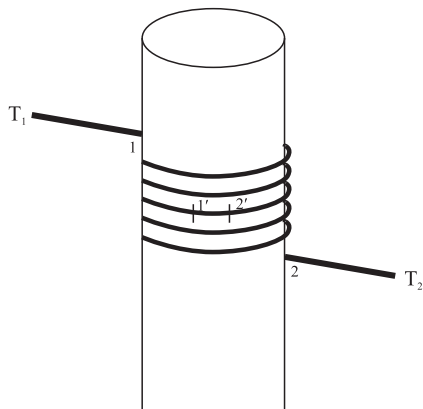


图3 光纤缠绕示意图

任何一点的张力都小于由 T_1 、 T_2 分别产生的张力。所以只需求出在拉力 T_{\max} 下缠绕角度 θ_{\min} 的值,满足 $\theta \geq \theta_{\min}$ 即能满足缠绕固定住光纤的要求。

BOTDR 给出的测量精度是应变的测量精度,无量纲,力的比值 k 也是无量纲,且力与应变之间存在本构关系。因此,为应用方便,选用应变测量精度作为判据。取 BOTDR 仪器的测量精度 δ 作为判据,当 $k > \delta$ 时,即认为 T_B 足够小,可忽略不计。

$$\theta_{\min} = -\frac{\ln\delta}{\mu} \quad (6)$$

考虑到 BOTDR 监测仪器的距离分解度为 1 m,实际应用过程中缠绕段光纤的长度可由下式确定:

$$\begin{cases} L = \theta_{\min} R & (L > 1 \text{ m}) \\ L = 1 \text{ m} & (L \leq 1 \text{ m}) \end{cases}$$

其中, L 为缠绕光纤的长度, R 为杆体的半径。

3 光纤缠绕固定试验

3.1 光纤弯曲特性

光纤的主要成分是二氧化硅,由纤芯、包层、涂覆层组成。光纤重要的特性之一就是它的易弯曲性。但如果光纤弯曲的曲率半径太小,将引起光的传播途径的改变,使光从纤芯渗透到包层,甚至有可能穿过包层向外渗漏。在正常情况下,光在光纤里沿轴向传播的常数 β 应满足: $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$ (n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率, k_0 是光波在真空中的波数)。当光纤弯曲时,光在弯曲部分中进行传输,要想保持同相位的电场和磁场在一个平面里,则越靠近外侧,其速度就会越大。当传到某一位置时,其相速度就会超过光速,这意味着传导模要变成辐射模,所以光束功率的一部分会损耗掉,这也就意味着衰减将会增加^[17]。

另一方面是光纤曲率半径过小时,会造成光纤折断,光纤传输中断。普通光纤的弯曲半径应大于纤芯直径的 20 倍,不允许过度弯折光纤,其曲率半径不应小于 40 mm,这是光纤铺设过程中必须注意的问题。

3.2 测试仪器介绍

试验所用测试仪器为日本安藤公司制造的 AQ8603 型光纤应变分析仪,在测定光纤上任意点应变的最高测距分解度为 1 m,即计算光纤上某测量点应变时,均以测量点为起点向前 1 m 内发生的布里渊散射光频率漂移量为依据,测量应变值实际上反映的是光纤 1 m 范围内发生的平均应变值^[18]。

3.3 试验介绍

如图4所示,将4个直径分别为 80 mm 的圆柱杆体固定在 A、B、C、D 位置处,光纤缠绕在圆柱上,每两

个圆柱杆体之间的光纤是拉紧的。

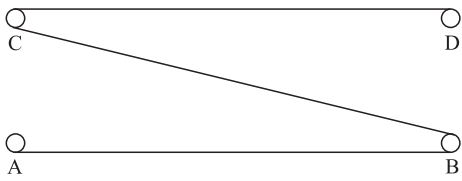


图4 光纤固定试验布置示意图

光纤与杆体之间的摩擦系数约 $\mu = 0.8$, $\delta = 0.004\%$, 则 $\Theta_{\min} = 13$ 。由式(7)确定光纤的缠绕长度 $L = 1\text{ m}$ 。为了能更清楚的表述缠绕效果, 光纤在 A、B 圆柱上缠绕长度分别为 2m, 分别在 A - B、B - C 段施加载荷, 测量加载前后光纤的应变分布。

3.4 测试结果分析

如图 5 所示为光纤在加载前后的应变图, 在缠绕的 A、B、C 点处, 两侧的应变分界清晰。为了能更清晰地表述应变图形特征, 取 A - B 段光纤的测试结果进行分析, 其应变测试结果见图 6。

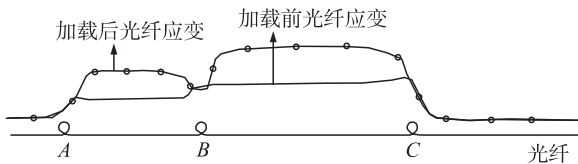


图5 加载前后光纤应变

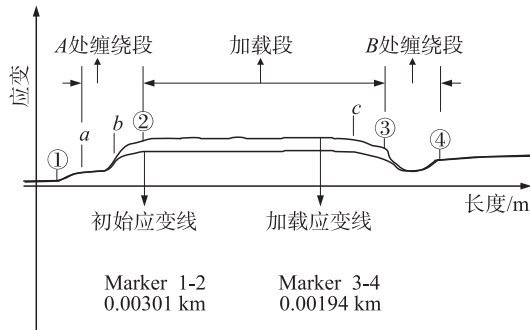


图6 A-B 段光纤应变变化

光纤在加载后应变有明显的增大, 在两缠绕点之间的光纤是悬空的, 施加的荷载在悬空的光纤中产生的拉力是相等的, ② - c 之间应变呈近直线分布; A - B 两端各有一段过渡段, 其中起始过渡段(① - a - b - ②)之间的距离约为 3 m) 和尾端过渡段(c - ③ - ④)之间的距离约为 3 m)。BOTDR 测试方向是从 A 到 B, ① - a、c - ③段光纤应变实际上受力是均匀的, 但是受缠绕段光纤的影响, 该段光纤的应变图形特征为应变呈有一定斜率的近直线分布; b - ②段的应变同样受到②点后 1 m 内光纤应变变化的影响, 试验得到的长度与理论长度值 1 m 吻合较好。

考虑两固定点间监测数据的准确性, 将 b - ②、c - ③由加载引起而又不能真实反应荷载作用的应变

段定名为假应变段, 长度为 1 m。数据分析时要对此段应变进行特殊处理。如图 6 中所示, ② - ③段是悬空且呈拉紧状态的光纤, 理论分析该段光纤受力后, 由于光纤内产生的拉力相等, 所以应变图形应是一条水平线, 实际测试中③点之前有一段是假应变段 c - ③。

试验结果表明通过缠绕可将光纤固定住, 但是缠绕长度应根据距离分解度和杆体的直径确定。

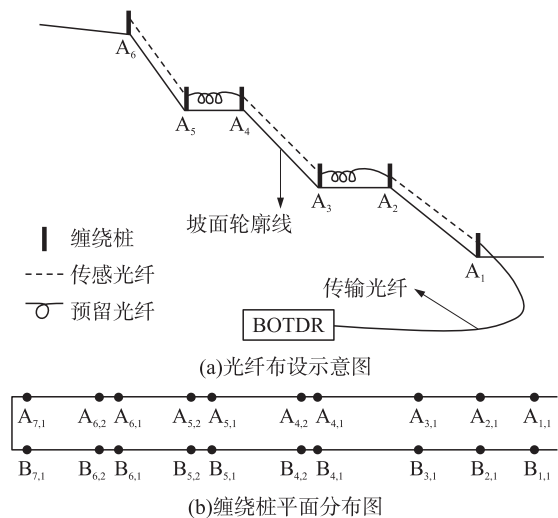
4 工程应用

4.1 工程概况

诸永高速公路深泽滑坡是一处大型古滑坡, 因公路工程施工导致滑坡的复活, 虽然用削坡、加固等工程措施进行了处理, 但因滑坡区地质环境条件的复杂性, 边坡安全仍存在有不确定性。而且该边坡的坡脚是一人口稠密的深泽镇, 如果边坡产生未预见性破坏, 其后果将不堪设想。针对深泽乡滑坡的工程环境条件, 应用缠绕式固定方法, 在其表面布设光纤, 对滑坡的表面变形进行了监测。

4.2 光纤监测布置

该边坡采用分布式光纤监测表面变形, 分布式光纤的布线方案如图 7 所示。在滑坡体上选取两个纵剖面, 分别布置两条监测光纤 A、B。在每一台阶上布置缠绕桩, 编号分别为 $A_{i,j}$ 、 $B_{i,j}$ 。缠绕桩深入到坡体内, 与坡体保持同步变形, 根据每个台阶的宽度布置缠绕桩的数量, 在宽度大于 1 m 的台阶上布设两个缠绕桩, 两缠绕桩之间预留一定长度的光纤, 作为温度补偿和备用光纤; 上下台阶间的光纤为传感光纤, 回路测量。同时为了验证光纤监测的可行性, 在每个缠绕桩点附近设置全站仪观测点。



注: $A_{i,j}$, i表示台阶数, j表示桩号。

图7 坡面光纤布置示意图

4.3 监测结果

在光纤铺设工作完成后,对边坡的坡面变形进行了定期测量。光纤应变变化引起的光纤伸长量与光纤的铺设长度相比可以忽略不计。为了验证光纤缠绕固定布线方式监测坡面变形的可行性,作者对两缠绕桩点之间的传感光纤的伸长量变化与全站仪测试两缠绕桩点之间相对位移的变化进行了对比。

图8是全站仪观测点 $A_{6,2}$ 、 $A_{7,1}$ 相对位移变化与 $A_{6,2}$ - $A_{7,1}$ 段光纤伸长量的监测结果对比图,传感光纤的测试结果与全站仪观测点变化基本一致,说明缠绕固定光纤的布线方式在监测坡体表面变形是完全有效的。

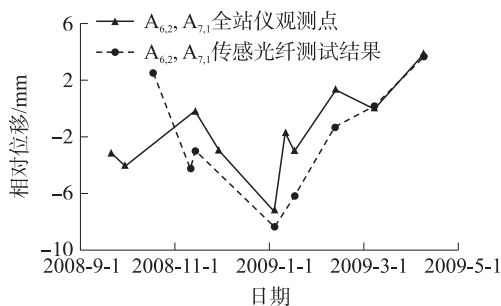


图8 全站仪测点与光纤测试结果对比

4.4 固定方式的可行性讨论

将缠绕桩固定在滑坡体的表面,与坡体保持同步变形,光纤离开坡面缠绕在桩上,避免了坡面起伏对光纤铺设的影响。通过监测两桩之间传感光纤的应变变化来评价坡体的稳定性。监测结果表明,此监测方式能有效监测到坡体表面的微小变形,此种固定方式在光纤局部受到破坏时,不影响整体的监测效果。

由于光纤布置在坡体表面,应变变化受温度的影响,所以同一台阶上两缠绕桩之间的预留光纤可作为温度补偿用;同时光纤布置在坡体表面容易受到外界影响因素的干扰,所以桩间适当预留光纤是必要的,在传感光纤破坏时,可作为备用光纤修补监测系统,以便能在系统破坏时及时恢复监测功能。

如图9所示,在监测过程中,光纤在 $B_{5,2}$ - $B_{6,1}$ 之间断掉,光纤断掉前后的应变对比图显示,断点之前的各段传感光纤没有发生错位,这说明断点的存在并不影响其它传感段光纤的监测功能。发现断点之后,将 $B_{5,1}$ - $B_{5,2}$ 之间的预留光纤重新缠绕到 $B_{5,2}$ 、 $B_{6,1}$ 桩点上,熔接点在 $B_{6,1}$ - $B_{6,2}$ 之间。

此种固定方式和铺设方法不但能保证整体的监测效果不受影响,而且能在监测系统遭到破坏时及时得到修补,无需重新布线,保证了长期监测的可靠性。

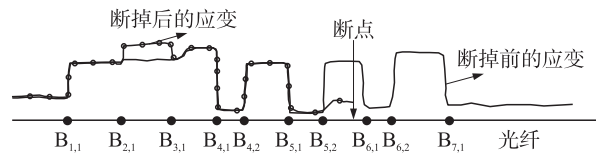


图9 光纤断掉前后应变对比图

5 结论

光纤的固定方式是光纤应用过程中的一个难点,尤其是对于地形起伏较大的边坡,将光纤埋入到坡体内部不仅工程量巨大而且实施困难。本文通过光纤缠绕的力学模型分析,提出了缠绕光纤固定方法。试验研究了缠绕方式固定光纤的可行性,并将此种固定方式应用到具体的滑坡监测工程中进行了应用验证。得到了如下结论:

(1)在对光纤缠绕力学模型分析的基础上,结合BOTDR距离分解度,推导出缠绕方式固定光纤时缠绕长度的确定方法。

(2)通过缠绕试验证明,缠绕可以将光纤很好的固定住;同时得到了在距离分解度的影响下,缠绕固定方式测试结果的图形特征,所以测试结果分析当应变区布线长度小于1 m时,都应考虑到距离分解度的影响。

(3)通过将缠绕固定方式应用到具体的滑坡中,与全站仪监测结果对比分析表明,传感光纤能够监测到坡体微小的变形,而全站仪需要逐点观测,分布式光纤只需要一根光纤即可监测整个坡面的变形状况。

(4)深泽乡滑坡的光纤布线方式简单有效,而且便于修补,每段传感光纤之间不相互影响,通过预留光纤,不仅达到温度补偿的效果,而且便于光纤布线的维护修补。

参考文献:

- [1] 索文斌,王宝军,施斌,等. 基于GIS的大型工程分布式光纤传感监测系统研究[J]. 水文地质工程地质,2005,32(4):88-92.
- [2] 施斌,徐学军,王楠,等. 隧道健康诊断BOTDR分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2622-2628.
- [3] 丁勇,施斌,崔何亮,等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(3):338-342.
- [4] 张丹,施斌,吴智深,等. BOTDR分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. 土木工程学报,2003,36(11):83-87.
- [5] 刘德华,宋牟平,金伟良,等. 应用于土木工程的布里渊散射分布式监测网络[J]. 传感技术学报,2003,16(3):277-281.
- [6] 唐天国,陈春华,刘浩吾. 分布式光纤传感用于大坝基座裂缝监测[J]. 传感技术学报,2007,20(10):2357-2360.
- [7] 何爱勇,程华. 光纤传感技术在结构工程检测中的应用[J].

- 传感技术学报,2002,15(3):211-214.
- [8] 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,2004,23(3):493-499.
- [9] 张丹,施斌,徐洪钟. 基于 BOTDR 的隧道应变监测研究[J]. 工程地质学报,2004,12(4):480-484.
- [10] 丁勇,施斌,孙宇,等. 基于 BOTDR 的白泥井3号隧道拱圈变形监测[J]. 工程地质学报,2006,14(5):649-653.
- [11] 代志勇,袁勇,刘永智. 基于光纤应力传感的山体滑坡监测系统研究[J]. 光学与光电技术,2004,2(3):51-53.
- [12] 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(2):3725-3731.
- [13] 吴智深,施斌,原田隆郎,等. 可用于结构健康监测的 BOTDR 光纤变形检出特性的试验研究[J]. 土木工程学报,2005,38(8):56-73.
- [14] 李焕强,孙红月,刘永莉,等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1703-1706.
- [15] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京:人民交通出版社,2007,1-4.
- [16] 赵凯华,罗蔚茵. 新概念物理教程:力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004,7.
- [17] 姚建永. 光纤原理与技术[M]. 北京:科学出版社,2005,8-18.
- [18] 岳慧敏,代志勇,刘永智,等. BOTDR 分布式光纤传感器研究进展[J]. 激光杂志,2007,28(4):4-5.



刘永莉(1984-),女,浙江大学大学建筑工程学院博士研究生,主要研究方向为光纤传感技术在土木工程中的应用,maryroseli@126.com;



尚岳全(1958-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为工程地质灾害的分析评价、监控技术与防灾工程技术研究;岩土体稳定分析理论与方法研究;岩土工程、地质工程数值模拟与物理模拟,syq@zju.edu.cn。