

薄壁圆环分布式光纤测力传感器的性能

王德洋¹, 朱鸿鹄^{1,2*}, 朱泳¹, 施斌¹, 齐贺³

¹南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

²南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏 苏州 215123;

³中建科技有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000

摘要 提出了一种基于分布式光纤应变感测的测力方法,开展了基于布拉格光纤光栅技术(FBG)和布里渊散射光时域分析技术(BOTDA)的薄壁圆环加载实验,详细阐述了分布式光纤传感器的原理、数据拟合及误差分析等问题。为了更进一步验证所提方法的可行性,实验中对 FBG 和 BOTDA 所获结果进行了对比分析。实验结果表明,通过 BOTDA 数据计算的作用力更加接近于实际测量值,证明了分布式光纤监测技术满足土工实验数据采集的精确性要求。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 布里渊光时域分析技术; 分布式监测; 薄壁圆环; 数据处理

中图分类号 P642

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.100602

Performances of Distributed Fiber Optic Strain Sensor with Thin-Walled Ring

Wang Deyang¹, Zhu Honghu^{1,2*}, Zhu Yong¹, Shi Bin¹, Qi He³

¹ School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

² Nanjing University High-Tech Institute at Suzhou, Suzhou, Jiangsu 215123, China;

³ Shenzhen Branch of China Construction Science and Technology Group Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract This study develops a force-measurement method based on distributed optical fiber strain sensing. A thin-walled ring loading test with the fiber Bragg grating (FBG) and Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) techniques is performed. The principles of fiber optic sensing, data fitting, and error analysis are also introduced in detail. The results obtained by FBG and BOTDA are compared and analyzed in the experiment to further verify the feasibility of proposed method. The experimental results show that the load value calculated by the BOTDA data is closer to the actual one. Furthermore, the distributed fiber optical monitoring technology has been proven to meet the accuracy requirements of data acquisition in geotechnical tests.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; Brillouin optical time domain analysis; distributed monitoring; thin-walled ring; data processing

OCIS codes 060.2330; 060.2280; 060.2310

1 引言

传统土工实验仪器中的测力传感器通常以薄壁金属圆环制成,同时采用百分表或应变片等测量圆环的受力变形情况。当测力传感器受力时,金属圆

环的内外壁上会产生环向应力和应变,粘贴在金属圆环上应变片的电阻会随之发生变化,读数仪采集该电阻变化所对应的电压信号,从而得到荷载的大小^[1]。但是该方法抗干扰性差,读数不精确,灵敏系数需要频繁标定,而且无法实时采集数据。因此需

收稿日期: 2018-12-03; 修回日期: 2018-12-11; 录用日期: 2018-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505104)、国家自然科学基金(41722209, 41672277)、苏州市科技计划项目(SYG201612)

* E-mail: zhh@nju.edu.cn

要采用新的技术和方法解决现有的土工实验仪器对力测量精度低、受电磁干扰等缺陷。

近年来,分布式光纤传感技术得到了突飞猛进的发展,其中准分布式光纤布拉格光栅技术(FBG)和全分布式布里渊时域分析技术(BOTDA)在国际上应用较多^[2-5]。光纤传感器具有精度高、准分布、实时性、耐腐蚀及抗电磁干扰等独特优势,已在结构工程、岩土工程监测领域中得到了成功的应用。在岩土变形监测方面,王永洪等^[6]将FBG传感器布设在管桩的内外壁上进行轴力的测试,并和理论公式进行了对比,结果显示FBG传感器的监测误差满足工程测试要求;为了更好地掌握管桩的承载性能,朱友群等^[7]将FBG和BOTDA联合用于管桩打入过程中桩身质量的检测,其结果为管桩的设计、施工提供了很好的借鉴。近期光纤传感器还被引入地下结构健康监测领域:王飞等^[8]发现BOTDA传感光纤可以有效感知盾构隧道横断面变形情况;Mohamad等^[9]采用分布式光纤监测隧道施工过程中管片应变、温度物理量的变化,并给出了由光纤应变数据计算实际隧道各点发生径向位移的方法。

除了以上的一些工程应用,国际上关于FBG和BOTDA在土工实验仪器开发中也有相关的研究。如Xu等^[10]在传统三轴实验中通过粘贴FBG传感器,探究了土样的应力-应变关系。曹鼎峰等^[11]基于碳纤维加热光缆的分布式测温系统,提出了一种土壤含水率分布式测定方法,并通过室内模型实验对该方法的可行性进行了论证。Feng等^[12]利用光纤波长对孔隙水压力敏感的特性,成功发明了基于光纤传感技术的孔隙水压力测试装置并用于室内模型实验。Lee等^[13]探讨了FBG传感器测量三轴实验中的压力和位移的可行性,通过和实际三轴实验结果对比发现,该技术在室内三轴实验中具有很大的优势。但是目前国内外关于分布式光纤测力传感器的研究尚不多见。

本文设计了一种基于光纤应变传感的测力传感器,并开展了室内实验研究。实验中采用FBG和BOTDA两项技术监测了薄壁金属圆环在顶部受力情况下的变形。基于Timoshenko薄壁圆环公式和相关变形假设,提出了由实测环向应变数据计算圆环顶点处作用力的计算方法。FBG和BOTDA计算结果的对比表明,由BOTDA得到的计算值与实测值更加接近。该方法为土工实验仪器的研发提供了理论和技术基础。

2 基本原理

2.1 BOTDA 传感技术

BOTDA是一种以光为载体、光纤为媒介,感知和传输外界信号的全分布式应变、温度传感的技术^[14],其测量原理如图1所示。利用光纤中的布里渊散射光频率变化量(频移量)和光纤轴向应变或环境温度之间的线性关系来实现传感,该关系可以表示为^[15]

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(\epsilon_0, T_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial \epsilon} (\epsilon - \epsilon_0) + \frac{\partial \nu_B(\epsilon, T)}{\partial T} (T - T_0), \quad (1)$$

式中: $\nu_B(\epsilon, T)$ 、 $\nu_B(\epsilon_0, T_0)$ 分别为测量前、后光纤中布里渊散射光的频移量; ϵ 、 ϵ_0 分别为测试前后的轴向应变值; T 、 T_0 分别为测试前后的温度值。比例系数 $\partial \nu_B(\epsilon, T)/\partial \epsilon$ 和 $\partial \nu_B(\epsilon, T)/\partial T$ 的取值分别为0.05 MHz/ $\mu\epsilon$ 和1.2 MHz/ $^{\circ}\text{C}$ 。

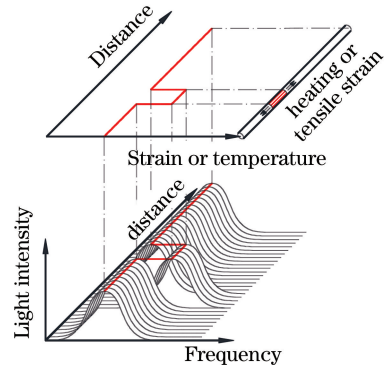


图1 BOTDA全分布式测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of fully-distributed BOTDA

2.2 FBG 传感技术

FBG是指利用掺杂诸如锗、磷等光纤的光敏性,通过某种工艺方法使外界入射光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用,导致纤芯折射率沿纤轴方向周期性或非周期性地永久性变化,在纤芯内形成空间相位结构的光学器件。它的原理如图2所示,其中 λ 为光纤的波长, I 为光强。当入射光进入光纤时,布拉格光栅会反射特定中心波长的光,该波长满足特定条件^[6]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (2)$$

式中: λ_B 为光纤的特定中心波长; n_{eff} 为光纤的有效折射率; Λ 为光栅周期。

温度和应变是引起反射光中心波长变化的两个直接物理量。当环境温度或者光纤所受应变发生改变时,都能引起 n_{eff} 和 Λ 的变化,从而使波长 λ_B 发

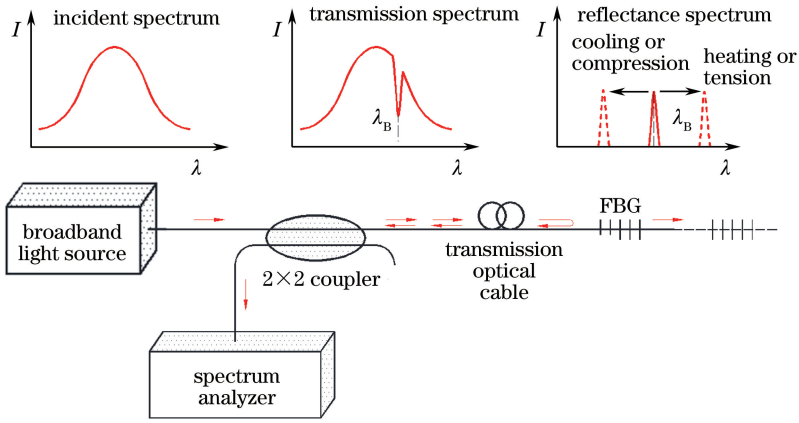


图2 FBG 准分布式测量原理图

Fig. 2 Measurement principle of quasi-distributed FBG

生漂移。通过获取 λ_B 的变化量,可以实现应变或温度测量值的绝对测量。当温度不变时,FBG 拉、压应变作用引起的中心波长漂移 $\Delta\lambda_B$ 可以表示为

$$\Delta\lambda_B = \Delta\epsilon(1 - P_e)\lambda_B, \quad (3)$$

式中: $\Delta\epsilon$ 为轴向应变; P_e 为有效光弹系数。当初始中心波长 λ_B 不同的 FBG 传感器串联在同一根光纤上时,可以实现光纤上各点应变的准分布式监测。

2.3 薄壁圆环分布式光纤测力传感器的原理

薄壁圆环中的应力分布是一个广受关注的问题,国内外很多学者在该领域做了很多理论工作。如图 3 所示,薄壁圆环在对称荷载 F 的作用下,各点处的弯矩和环向应力的计算公式为^[16]

$$\begin{cases} M(\theta) = \frac{1}{2}F \times R_a \left(\cos \theta - \frac{2}{\pi} \right) \\ \sigma(\theta) = \pm \frac{3}{2} \frac{M(\theta)}{\omega\delta^2} = \\ \pm \frac{3}{4} \frac{1}{\omega\delta^2} F \times R_a \left(\cos \theta - \frac{2}{\pi} \right) \end{cases} \quad (4)$$

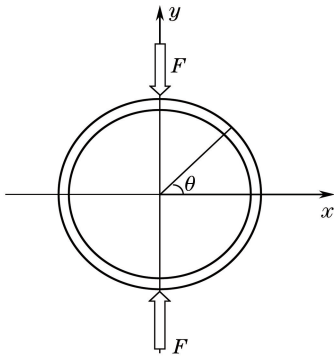


图3 薄壁圆环受力示意图

Fig. 3 Schematic of thin-walled ring under loading

(4)式得到广泛的认同,成为力传感器设计的重要依据。根据材料力学可知,薄壁圆环内、外壁环向

应变为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \pm \frac{3}{4\omega\delta^2 E} F \times R_a \left(\cos \theta - \frac{2}{\pi} \right), \quad (5)$$

式中: ω 为圆环的厚度; δ 为圆环的宽度; F 为圆环上单位厚度所受的两个方向相反的径向作用力; E 为圆环的弹性模量; θ 为方位角; R_a 为圆环的中径。

当 $\theta = 90^\circ$ 时,圆环应变的绝对值达到最大值,即

$$|\epsilon|_{\max} = \frac{3FR_a}{2\pi\omega\delta^2 E}. \quad (6)$$

将(6)式改写为 $F = (2\pi\omega\delta^2 E/3R_a) |\epsilon|_{\max} = K \times |\epsilon|_{\max}$,其中 K 为标定系数,可通过标定实验中测出的应变数据得到。根据以上原理,当 K 确定后,只要测出薄壁圆环上的应变分布,即可推算出圆环径向作用力的大小。

3 实验设计

3.1 实验方案

为了验证分布式光纤测力传感器的可行性,设计如下实验。实验中,FBG 传感器由苏州南智传感科技有限公司提供,具体参数见表 1。BOTDA 光纤采用纤径为 1.2 mm 的聚氨酯紧套光纤,其弹性模量为 1.008 GPa。该光纤具有粘贴方便,与结构体变形协调,初始应变值较为平稳等优点。采用的薄壁铝合金圆环的直径为 0.63 m,弹性模量取 70 GPa。将光纤用环氧树脂等胶水粘贴在薄壁圆环的外壁两圈,并置于室内 24 h,使其与圆环表面粘贴牢固。同时在薄壁圆环外壁布置了一条应变传感光纤,并且在应变传感光纤上串联了 1 个裸 FBG 应变传感器,用胶水将其粘贴在圆环的顶处。具体布设见图 4。

表1 FBG传感器的参数

Table 1 Parameters of FBG sensor

Grating length/cm	Central wavelength/nm	Band width/nm	Reflectivity/%
15	1510-1590	<0.25	>90

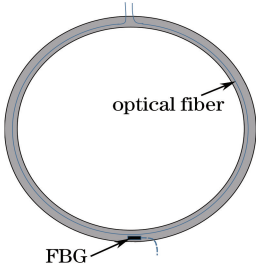


图4 圆环结构图

Fig. 4 Structural diagram of ring

3.2 实验步骤

为了研究薄壁圆环的受力特性,本实验采用0.1 mm/s匀速加载方式,并且保证每次加载后薄壁圆环顶点发生5 mm的位移。实验开始后,利用

表2 FBG与BOTDA监测技术参数对比

Table 2 Parameter comparison of FBG and BOTDA monitoring technologies

Technology	Spatial resolution/cm	Test time/s	Measurement parameter	Measurement accuracy	
				Strain / $\mu\epsilon$	Temperature / $^{\circ}\text{C}$
FBG	—	Real time	Temperature, strain	1	0.1
BOTDA	5	≥ 5	Temperature, strain	7	1

4 分析及讨论

4.1 BOTDA实验结果

图5为匀速加载作用下BOTDA测到的薄壁圆环环向应变分布图。图中传感光纤受拉段的应变为正值,受压段的应变为负值。可以看出,光纤应变值可以很好地反映薄壁圆环的实际变形特征。随着顶端位移的增大,光纤的应变逐渐增加,且应变最大出现在薄壁圆环的上下端点处,这与薄壁圆环的实际受力状态吻合。

4.2 BOTDA结果分析

光纤解调仪的空间分辨率等问题使得测得的光纤应变数据存在一定的波动,故采用移动平均法对应变监测数据进行平滑处理,如图5所示。为了得到薄壁圆环在一定荷载、位移下的最大环向应变值,采用 $\epsilon(x) = a \cos[b(x-c)] + d$ 来拟合光纤的应变数据,其中变量 x 为测量点到圆环顶部的距离,参数 $a = |\epsilon|_{\max}$ 表示最大应变值,参数 b 消除函数周期问题,参数 c 消除加载过程中存在的荷载偏心问题,参数 d 消除实验过程中温度变化带来的影响。采

万能实验机的显示仪记录加载过程中的力和位移关系曲线,该测量值用来验证光纤应变推算出的作用力的准确性。每级荷载作用后,利用光纤解调设备和计算机采集、记录所述薄壁圆环的环向应变值。本实验是在南京大学光电传感工程监测中心完成,由于实验历时较短,室内温差约为 1°C ,忽略了温度变化对光纤应变的影响,因此没有采用任何温度补偿措施。

3.3 实验设备

本实验中FBG数据采集采用美国MOI公司的SM130型FBG解调仪;BOTDA数据采集采用日本Neubrex公司生产的NBX-6050A型解调仪,该解调仪具有极高空间分辨率和测量精度,最大测量距离达20 km。实验中FBG与BOTDA技术参数见表2。利用FBG和BOTDA提供的数字通信接口和网络接口,实现与计算机的通信,其工作状态可以通过人工控制,也可以通过计算机控制,实现数据的自动化采集和处理。

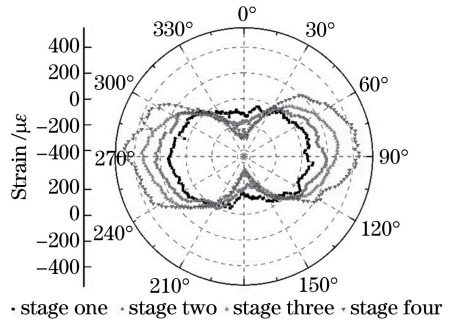


图5 圆环应变分布情况

Fig. 5 Strain distribution of ring

用该拟合函数,一方面可以很好地反映薄壁圆环的应变曲线特征,另一方面是由于该拟合方式可以消除实验中的各种误差,提高测试精度。在此基础上,对拟合方程数值和实际光纤值之间的差值进行误差分析,结果显示,误差分布曲线符合正态分布,各阶段的误差均值为0.002, -0.009, -0.003, 2.554, 方差分别为24.29, 29.50, 33.73, 33.57,且误差的90%置信区间分别为 $[-8.10, 8.11]$, $[-8.94, 8.92]$, $[-9.56, 9.55]$, $[-6.98, 12.08]$ 。从误差分析结果可以看出,采用该余弦函数形式

得到的拟合曲线可以很好地反映实际光纤应变沿着圆环的分布趋势。

根据拟合曲线,每级加载情况下最大微应变分别为 85.50, 183.40, 298.30, 389.10 $\mu\epsilon$ 。由(6)式可以得到圆环顶点处的荷载计算值,并与实际测量的荷载进行对比。结果表明:计算荷载值和最大环向应变之间有一定的比例关系,比例系数即为标定系数 K ,经计算得到标定系数 $K=0.55$ 。从图 6 可以看出,由 BOTDA 应变数据计算出的圆环顶点处的荷载值与实际测量值很接近,且误差范围在 $-2\% \sim 0.7\%F_s$ 之间,满足土工实验仪器的精度要求,其中 F_s 为测量量程。说明圆环在发生椭圆形变形情况下,根据实测的光纤应变数据可以很好地计算出圆环上下端点处的荷载值。但是荷载计算值与实际测量值之间存在一定的误差,这可能和传感器原件的灵敏性、分布式光纤传感器的检测原理、仪器的空间分辨率、应变测量精度等有关,还需要进一步分析研究。总体而言,实验结果显示,单模单芯紧包光纤完全可以作为基于 BOTDA 测量的分布式光纤传感器,其传感性能和稳定性可满足实际土工实验数据采集的精度要求。

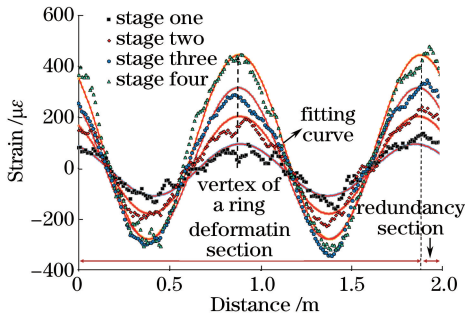


图 6 采用余弦函数拟合的实验结果

Fig. 6 Fitted results of experimental data using cosine functions

4.3 FBG 实验结果及分析

在加载实验中,FBG 监测到了所在位置的环向应变分布以及该位置应变随时间发展的规律。每次加载后最大的测量值分别为 95.22, 198.13, 281.90, 370.11 $\mu\epsilon$,且最大值均出现在圆环顶点和底部。

由(6)式可得到圆环顶点处的荷载计算值,并与 BOTDA 的结果进行对比,如图 7 所示。结果表明:由 BOTDA 应变数据计算出的圆环顶点处的荷载值与万能实验机的测量值更加接近。原因主要是 FBG 测量值为固定点处的应变,存在较大的差异性。采用余弦函数对 BOTDA 数据进行拟合可以避免准分布式监测带来的误差。

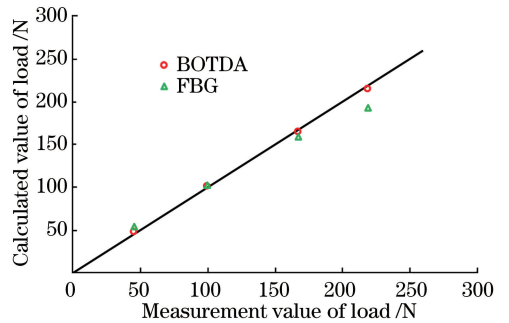


图 7 FBG 与 BOTDA 结果比较

Fig. 7 Result comparison of FBG and BOTDA

5 结 论

根据光纤应变数据所呈现的规律,提出了圆环顶点作用力的计算方法。这为光纤监测技术在室内实验仪器开发中的运用提供了理论基础。实验结果证明,该方法的计算结果和实际测量值之间的误差满足实际土工实验仪器的精度要求,验证了该方法用于室内实验仪器开发的可行性。对比分析 FBG 和 BOTDA 所得到的结果,发现由 BOTDA 数据拟合得到的最大应变值计算出的作用力更加接近于实际测量值,说明全分布式光纤监测技术可以弥补准分布式以点概面的误判,在室内实验仪器开发中具有更大的优势。

通过一组加载实验,初步探究了分布式光纤测力传感器的可行性,但要使分布式光纤传感技术广泛应用于土工实验仪器中,还需要进一步的探索和研究。值得指出的是,国外近期出现了精度更高、空间分辨率更小的基于瑞利散射的背向反射(OBR)技术^[17-18]。未来分布式光纤监测技术在室内土工实验仪器开发中必将起到更加重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Tian Y, Sun Y C. A study on stress distribution in force ring sensors[J]. Sensor World, 2008, 14(7): 33-37.
田义, 孙以材. 圆环力传感器应力分布的研究[J]. 传感器世界, 2008, 14(7): 33-37.
- [2] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [3] Zhou D W, Wang B Z, Ba D X, et al. Fast distributed Brillouin optical fiber sensing for dynamic strain measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328005.

- 周登望, 王本章, 巴德欣, 等. 用于动态应变测量的快速分布式布里渊光纤传感[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328005.
- [4] Ding X D, Zhang Y M, Song Y M, *et al.* Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106003.
丁旭东, 张钰民, 宋言明, 等. 纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106003.
- [5] Zhang K Y, Zhao H, Zhang W C, *et al.* Fiber Bragg grating electrostatic voltage sensor based on uniform strain beam[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0306003.
张开玉, 赵洪, 张伟超, 等. 基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0306003.
- [6] Wang Y H, Liu J W, Zhang M Y, *et al.* Test on axial force of double-walled mode pipe pile based on fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110605.
王永洪, 刘俊伟, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅的双壁模型管桩轴力测试[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110605.
- [7] Zhu Y Q, Zhu H H, Sun Y J, *et al.* Model experiment study of pipe pile driving into soil using FBG-BOTDA sensing monitoring technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 695-702.
朱友群, 朱鸿鹄, 孙义杰, 等. FBG-BOTDA 联合感测管桩击入土层模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 695-702.
- [8] Wang F, Huang H W, Zhang D M, *et al.* Deformation sensing method of shield tunnel based on optical fiber sensing technology of BOTDA [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1901-1908.
王飞, 黄宏伟, 张冬梅, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的盾构隧道变形感知方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1901-1908.
- [9] Mohamad H, Soga K, Bennett P J, *et al.* Monitoring twin tunnel interaction using distributed optical fiber strain measurements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 957-967.
- [10] Xu D S, Borana L, Yin J H. Measurement of small strain behavior of a local soil by fiber Bragg grating-based local displacement transducers [J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(6): 935-943.
- [11] Cao D F, Shi B, Yan J F, *et al.* Distributed method for measuring moisture content of soils based on C-DTS [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 910-915.
曹鼎峰, 施斌, 严珺凡, 等. 基于 C-DTS 的土壤含水率分布式测定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 910-915.
- [12] Feng W Q, Liu Z Y, Tam H Y, *et al.* The pore water pressure sensor based on Sagnac interferometer with polarization-maintaining photonic crystal fiber for the geotechnical engineering [J]. Measurement, 2016, 90: 208-214.
- [13] Lee J T, Tien K C, YEN T E H O, *et al.* A fiber optic sensed triaxial testing device [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(2): 103-111.
- [14] Ding Y, Wang P, He N, *et al.* New method to measure deformation of SMW piles based on BOTDA [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 719-724.
丁勇, 王平, 何宁, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 719-724.
- [15] Zhu H H, Shi B, Yan J F, *et al.* Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821-828.
朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821-828.
- [16] Timoshenko S. XCI. On the distribution of stresses in a circular ring compressed by two forces acting along a diameter[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1922, 44(263): 1014-1019.
- [17] Kogure T, Okuda Y. Monitoring the vertical distribution of rainfall-induced strain changes in a landslide measured by distributed fiber optic sensing with Rayleigh backscattering [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(9): 4033-4040.
- [18] Li B, Zhang D, Chen X X, *et al.* Testing method on performance of deformation coupling between distributed sensing fiber and soil [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(4): 633-639.
李博, 张丹, 陈晓雪, 等. 分布式传感光纤与土体变形耦合性能测试方法研究[J]. 高校地质学报, 2017, 23(4): 633-639.