

黏性土体干缩变形分布式光纤监测试验研究

李 科, 施 斌, 唐朝生, 魏广庆, 王宝军

(南京大学 地球科学与工程学院 光纤传感工程监测中心, 南京 210093)

摘 要: 土体变形监测是岩土工程监测中的一项重要工作, 具有规模大、工程环境差异性大、实时动态监测等特点, 因此, 常规的一些点式监测手段已不能满足要求。布里渊散射光时域反射测量技术 (BOTDR) 是一项新型光电传感监测技术, 它利用布里渊散射光的光谱和光时域测量技术, 可对沿光纤的轴向应变进行分布式监测。应用这一技术对土体干缩变形进行了监测, 并对土体干缩变形规律进行了分析, 验证了该技术应用于土体变形监测中的可行性。

关 键 词: 土体变形; BOTDR; 分布式监测; 传感光纤

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Feasibility research on soil deformation monitoring with distributed optical fiber sensing technique

LI Ke, SHI Bin, TANG Chao-sheng, WEI Guang-qing, WANG Bao-jun

(ACEI, College of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Soil deformation monitoring is an important task in geotechnical engineering monitoring, of which characters are large scale, big diversity of engineering environment and high requirements of real-time. Hence the conventional measurement and monitoring methods and techniques are more and more not to meet the monitoring demands. The Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) is a newly developed innovative measuring technique, which utilizes Brillouin spectroscopy and optical time domain reflectometry to measure strain generated in optical fibers as distributed in the longitudinal direction. Based on experiment, the drying shrinkage of soil is monitored by BOTDR. Characteristics are analysed; and finally, the feasibility of the distributed optical fiber sensing technique for soil deformation monitoring is verified.

Key words: soil deformation; Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR); distributed monitoring; sensing optical fiber

1 引 言

土体变形监测是岩土工程的重要课题, 具有规模大、工程环境差异性大、实时动态监测等特点。传统的监测方法按其监测变量可归纳为两类^[1]: 一类是监测两点之间的轴向分量, 如应变计、收敛计、多点伸长计等; 另一类为垂直于两点连线的横向分量, 如倾斜仪、三向位移计等。这些方法一般能满足工程的要求, 但也存在诸多不足^[2-3], 如人为因素多、偶然误差较大、测量结果为离散的数据点, 不能实现分布式和远程实时监测等, 因此, 不能完全满足土体变形监测的要求。

布里渊光时域反射计 (简称 BOTDR) 是国际

上近几年来研制成功的一项新型光纤传感监测技术, 该技术具有如下优点^[4]: ①能实现分布式监测, 由光纤一端的一次数据采集就可以准确地得到光纤沿线任一点的应力、温度等信息, 提高了监测效率; ②测距很大, 有的解调仪器可达 80 km, 能够满足大型或超大型结构的需要, 可以实现长距离、全方位监测; ③光纤是非金属绝缘材料, 抗干扰性强。④通过网络可以将其与计算机终端连接在一起, 实现远程监控。

目前该技术在岩土工程的监测中已得到成功应用^[5-6], 但在土体变形监测中, 该技术的应用尚处于起步阶段, 这是因为存在以下几个难点: ①光纤与土体的协调变形问题, 光纤表面多为光滑保护层

材料,与土体间摩擦力较小,必然产生相对滑移,影响监测结果;②土体变形一般较大,甚至超过光纤传感器的量程,造成光纤的损坏;③BOTDR 的空间分辨率问题。针对上述问题,本文通过土体变形的分布式光纤应变监测试验研究,探讨了将 BOTDR 技术应用于土体变形监测的可行性。

2 BOTDR 基本原理

布里渊散射光时域反射测量仪的核心技术是检测光纤中的背向自然布里渊散射信号,当光纤沿线发生轴向应变时,光纤中的背向布里渊散射光的频率将发生漂移,频率的漂移量与光纤应变和温度呈良好的线性关系。为了扣除温度变化对频移的影响,可利用温度传感器或一段不受外力作用的自由光纤进行温度补偿,并根据式(1)中布里渊频移变化量与应变的关系,求得光纤的应变量:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \nu_B}{\nu_B(0)C} = \frac{\nu_B(\varepsilon) - \nu_B(0)}{\nu_B(0)C} \quad (1)$$

式中: $\nu_B(\varepsilon)$ 为某应变下的布里渊频移; $\nu_B(0)$ 为无应变下的布里渊频移; C 为应变传感系数,在入射脉冲光波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时约为 $500 \text{ MHz}/\%$ 。

由光纤的一端向光纤中注入脉冲光,并在同一端用 BOTDR 接收布里渊背向散射光。因此,由某一点返回的布里渊散射光到 BOTDR 的距离 Z 可用下式计算:

$$Z = cT/(2n) \quad (2)$$

式中: c 为真空中的光速; n 为光纤的折射系数; T 为发出脉冲光至接收到散射光的时间间隔。

光纤应变分析仪是脉冲光的发射以及信号接收处理装置。表 1 为本次试验所采用的 AQ8603 型光纤应变分析仪的主要技术性能指标。

表 1 AQ8603 的主要技术性能指标
Table 1 Major technique performance indexes of AQ8603

技术指标	可选参数
脉冲宽度/ ns	10, 20, 50, 100, 200
空间分辨率/ m	1, 2, 5, 11, 22
应变测量精度/ %	± 0.004 , ± 0.003
重复率/ %	< 0.04 , < 0.02
测量距离/ km	1, 2, 5, 10, 20, 40, 80
空间采样间隔/ m	1.00, 0.50, 0.20, 0.10, 0.05
空间定位精度/ m	$\pm (2.0 \times 10^{-5} \times d_1 + 0.2 \text{ m} + 2 \times d_2)$
应变测量范围/ %	$-1.5 \sim 1.5$

注: d_1 为测量距离(m); d_2 为采样间隔(m)。

3 试验设计

土体在干缩过程中会对植入其中的光纤产生摩擦力,摩擦力的大小决定了光纤传感性能的优劣,通过试验监测土体的干缩变形过程,对比了 3 种不同光纤的传感性能。

3.1 光纤的选用

本次试验采用了 3 种传感段长度均为 2 m 的光纤(F1、F2、F3)进行传感性能对比,其直径分别为 2 mm 、 $900 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$,表面材料分别为聚氨酯、尼龙和聚氨酯甲酸乙脂,3 种光纤具体参数如表 2 所示。

表 2 光纤基本参数
Table 2 Basic parameters of optical fibers

光纤编号	长度/cm	直径/mm	表面材料	应变传感系数/(MHz/%)	温度传感系数/(MHz/°C)
F1	200	2.00	聚氨酯	498	2.96
F2	200	0.90	尼龙	505	2.99
F3	200	0.25	聚氨酯甲酸乙脂	492	2.89

3.2 试验布置

试验采用一 U 形槽作为泥浆模具,如图 1 所示,模具尺寸为 $200 \text{ cm} \times 9 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$,其中以 3 cm 间距平行安装了 3 根不同的光纤(F1、F2、F3),光纤两端穿过 U 形槽两端挡板上的小孔并绷紧,用环氧树脂固定,并将 3 个传感光纤串联。考虑到本次试验的观测时间较长,温度变化幅度大,在模具的一端设置一温度计(测量范围为 $0 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$,测量精度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)进行温度补偿。将配制好的泥浆注满模具,使其自然干燥,并在此过程中连续监测泥浆含水率、温度及光纤应变的变化。

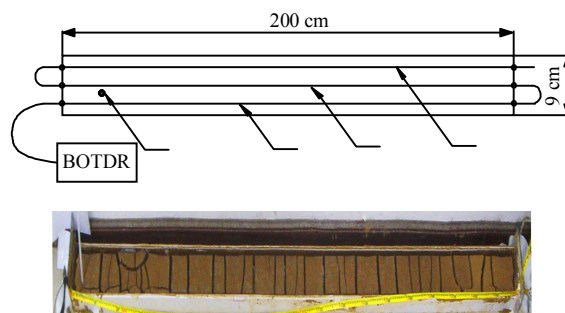


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Experimental installation diagram

4 试验中的几个技术问题

4.1 含水率的测定

为了分析土体的干缩变形与土中含水率的关系,必须定时测定土的含水率。为了避免取样扰动光纤,在试验模型旁放置了一个与试验模具等宽、等高、长度缩小5倍且注满相同含水率泥浆的模具,定时测定其中泥浆的含水率,并将其作为试验模型中的含水率。

4.2 裂隙率的统计

模具中的泥浆失水后会不断产生干缩裂缝,裂缝发育的程度用裂隙率表示,定义为平面上裂隙面积占总面积的百分比。裂隙率采用了作者自主开发的土体裂隙分析系统(CIAS)进行统计,其方法是将图像导入软件系统,经过二值化、区块识别后统计黑色像素占总像素的百分比即为裂隙率。

4.3 黏结应力的计算

光纤在土体干缩变形过程中起到了加筋作用,其受力状况如图2所示,两者接触面上的剪应力为 τ ,可以由光纤所受拉力的变化率确定。设光纤直径为 D ,弹性模量为 E ,则由光纤微段 dx 的平衡条件可以获得光纤与土体之间的剪应力 τ :

$$dT = (\pi D) \tau dx = \left(\frac{1}{4} \pi D^2 \right) E d\varepsilon \quad (3)$$

$$\tau = \frac{DE}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (4)$$

$d\varepsilon/dx$ 可采用差分法求解,即

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\varepsilon(x + \Delta x) - \varepsilon(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (5)$$

计算得到的剪应力 τ 即为光纤与土体之间的黏结应力。黏结应力的分布和大小直接与光纤应变的监测结果有关。

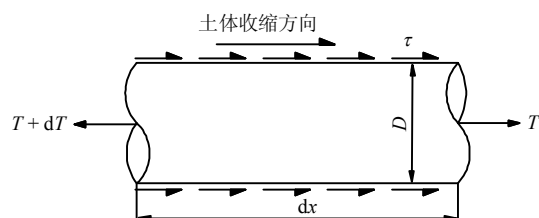


图2 光纤微段受力图

Fig.2 Micro-segment force diagram of optical fiber

5 结果分析

5.1 应变分析

经过了22 d对试样的监测,共获得76组有效

应变数据,选取其中有代表性的几组数据生成3种传感光纤应变-距离曲线,如图3所示。

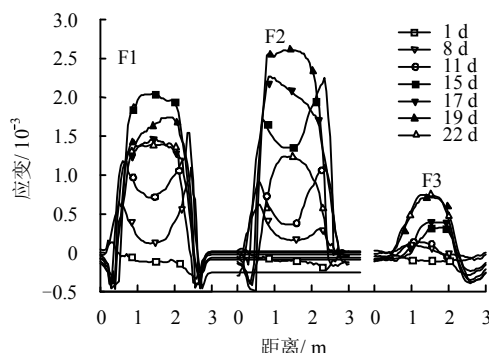


图3 3种传感光纤距离-应变分布曲线

Fig.3 Distance-strain distribution curves of the three optical fibers

从图中可以清楚地看出,随着试验时间的增加,3种传感光纤F1、F2、F3均出现了不同程度的拉应变,但在相同时间点,F3所测到的应变值明显小于F1、F2,这主要是由于F3表面为光滑的涂敷层材料,它与土体之间不能够形成产生足够应变的黏结应力,并且裸纤脆弱易折。从试验结果看,采用裸纤进行土体变形监测不可行。

F1、F2应变-距离曲线形态较为相似,现截取F2应变曲线与各时间段不同含水率和裂隙率的图像进行比较分析(见图4)。

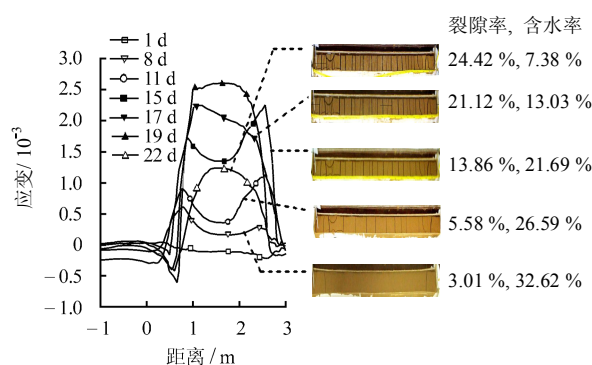


图4 F2距离-应变分布曲线

Fig.4 Distance-strain distribution curves of F2

从图中可以看出,试验初期由于土体含水率很大,土颗粒间存在较多的自由水,这些自由水在土颗粒与光纤表面形成润滑层,导致土颗粒与光纤间黏结应力很小,光纤监测到的应变值变化不大。试验进行8 d后,随着含水率的减小,土体两端边界与模具脱离,两端土体失水速度加快,率先出现干缩裂纹,此时传感光纤监测到的应变曲线呈马鞍形,

两端应变大,中间段应变小。随着含水率的进一步减小,土体中间段也相继出现一系列的裂纹,这时光纤监测到的应变曲线呈抛物线型分布,应变在时间序列上出现最大值。试验后期,干缩裂纹的分布趋于平均,随着裂缝密度和宽度的增加,局部高应力区域发生相对滑动,应力调整后应变反而减小。

利用式(4)、(5)及分布式传感光纤 F2 检测的应变值,可得到传感光纤与土体间黏结应力分布,见图 5。从图中可以清楚地看出,黏结应力呈对称分布。随着土中含水率不断减小,传感光纤与土之间的剪切力不断增大。当它超过传感光纤与土之间的黏结应力时,土体与传感光纤间就会产生相对滑动,传感光纤中的应力就会得到释放,测到的应变反而减小。由于模型两端的土体失水率较快,因此,传感光纤与土体间的相对滑动先从两端开始,然后不断向模型中间发展。此过程在黏结应力分布上表现为模型两端土体与光纤间黏结应力先增大到一极值后减小,黏结应力发挥区域逐步增大并向中部扩展。

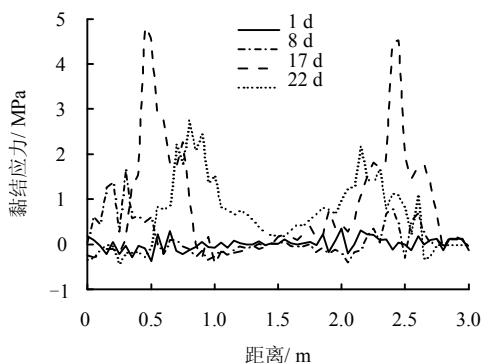


图 5 黏结应力分布曲线
Fig.5 Bond stress distribution curves

5.2 应变与含水率和裂隙率的关系

图 6、7 分别为传感光纤上某点的应变、含水率和裂隙率与时间的关系。从图 6 中可以看出,光纤应变随着含水率的减小而增大。试验进行到第 4 d 时, F1 两端光纤应变开始增大,此时含水率为 58%。试验进行到第 8 d 时, F2 两端光纤应变开始增大,此时土中含水率约为 30%,并且含水率变化率由大变,说明该时间点是泥浆中自由水蒸发至土中结合水的过渡点,在该点之前大量的自由水在光纤与土体间形成润滑层,光纤所监测到的应变变化值较小,该时间点后随着结合含水量的不断减小,光纤与土体间的黏结应力逐渐加强,光纤应变也同步增

大。同种光纤,两端应变均大于中间段应变,说明土体与光纤间的黏结应力由两端向中部先后发挥,这与失水过程以及干缩裂纹产生的顺序是吻合的。对比 F1、F2 应变曲线,两条光纤应变变化趋势相同,但 F1 应力发挥早于 F2,提前 2 d 左右,这主要是因为 F1 表面为粗糙的聚氨酯材料,在土体含水率减小的过程中同一时刻最大黏结应力 $f_{F1max}(\omega) > f_{F2max}(\omega)$,因此,在试验进行的 19 d 中,同一时刻 F1 应变均高于 F2。此外, F1 应变曲线在增大过程中出现明显的波动,波动点与两端的传感光纤与土体间的相对滑动处于相同时间点上,并且对应了图 7 中裂纹大量发育的一个时间点,此时土体含水率为 23%,裂隙率由 10% 剧增为 14%,裂隙的大量产生使 F1 上聚集的大量拉应力得到释放,应变相应减小。

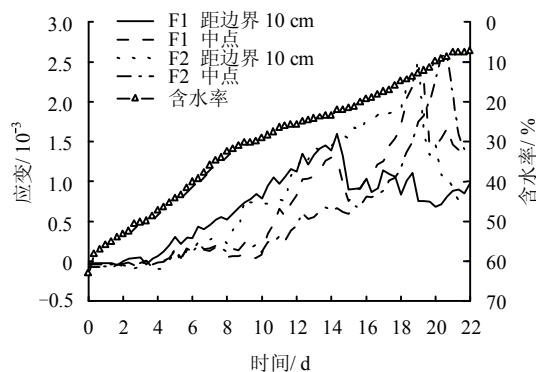


图 6 时间-应变-含水率分布曲线
Fig.6 Time-strain-moisture content distribution curves

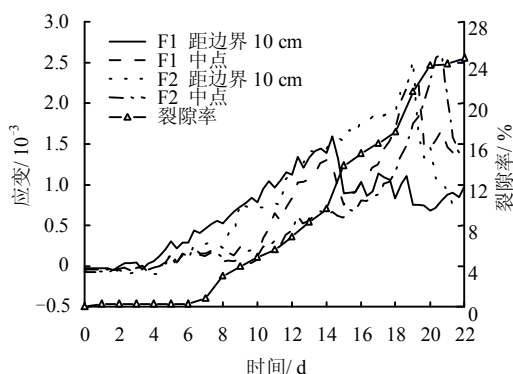


图 7 时间-应变-裂隙率分布曲线
Fig.7 Time-strain-cranny ratio distribution curves

从整体上看, F1 在高含水率下,仍具有较高的灵敏度,当土体含水率在 23%~58% 区间时,其传感性能较 F2 更为优越。当土体含水率小于 23% 时,

F2 较 F1 稳定性更好,但当土体含水率小于 8%时,两种光纤都与土体发生了明显的相对滑移,整个传感系统开始失效。

5.3 误差分析

由于试验段光纤长度固定,其上拉、压应变总积分应为 0,但试验中没有监测到压应变,这主要是受到 BOTDR 系统的空间分辨率的影响。光纤在 1 m 的空间分辨率范围内可能出现多个受拉段和受压段,实测的布里渊散射光谱实际上是由多个峰值频率不同、呈洛仑兹型的布里渊增益谱叠加后形成的谱线。对 BOTDR 系统而言,通常是取功率较高的波峰作为计算光纤应变的依据,而峰值功率取决于传感段的长度,传感长度较长者的散射光谱在叠加谱线中的能量较大。本次试验中由于裂纹的产生,土体以干缩裂纹为中心向反方向收缩,与光纤之间产生相对滑动,以干缩裂纹为中心的相当范围的光纤都处于拉张状态,其长度较压缩状态光纤长,峰值功率也较大,布里渊散射光谱经 AQ8603 系统拟合后光纤总体呈受拉状态。另外,光纤受压时有可能发生局部的屈曲现象,使土体的收缩量并不能完全转化为光纤的压应变,这也是光纤总体呈受拉状态的一个原因。

6 结 语

应用 BOTDR 监测土体的变形规律在一定条件下是可行的,其测量精度和准确性取决于土与传感光纤之间的黏结力。当土中含水率过大或传感光纤表面很光滑时,土与传感光纤之间的黏结力很小,二者间易发生相对滑动,影响测量结果。在另一种情况下,如果土中含水率过小或土的密度过大,当土中干缩应力大与土与传感光纤之间的黏结力时,二者也会发生相对滑动。从本次试验来看,土中含水率在 8%~58%区间时,光纤监测结果的精度和准确性较高。

参 考 文 献

[1] 李光煜,黄粤. 岩土工程应变监测中的线法原理及便携式仪器系列[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1):

99—109.

LI Guang-yu, HUANG Yue. Linewise observation and portable instruments on strain monitoring in geomechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(1): 99—109.

[2] 胡春林,陈琨,罗仁安,等. 高层建筑深基坑开挖施工期的监测和险情预报[J]. 岩土力学, 1996, 17(2): 64—69.

HU Chun-lin, CHEN Li, LUO Ren-an, et al. Monitoring technique and danger situation forecast during the excavation of deep foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(2): 64—69.

[3] 肖武权,冷伍明,律文田. 某深基坑支护结构内力与变形研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1271—1274.

XIAO Wu-quan, LENG Wu-ming, LÜ Wen-tian. Study on inner force and deformation of supporting structure for deep foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1271—1274.

[4] 强锡富. 传感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[5] 施斌,徐学军,王镒,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.

SHI Bin, XU Xue-jun, WANG Di, et al. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2622—2628.

[6] 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.

ZHANG Dan, SHI Bin, WU Zhi-shen, et al. Distributed optical fiber sensor based on BOTDR and its application to structural health monitoring[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2003, 36(11): 83—87.