

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201905051

基于 OFDR 的不连续管道竖向错开变形定量监测*

杨晓蔚¹, 刘春^{1,2}, 张晓宇¹, 乐天呈¹

(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)

摘要:近年来逐步发展起来的分布式光纤传感技术被大量应用于管道变形监测当中,而现有的光纤传感技术无法满足高空间分辨率的要求,采用一种新型的光频域分布式光纤传感技术(OFDR),对不连续管道在加荷条件下的竖向错开变形进行室内模型试验研究,提出了一种定量计算方法,并将计算值与千分表监测的实际值进行对比分析。室内试验的结果表明,OFDR能够精确地反映监测部位的应变,揭示不连续管道接缝处的变形规律。通过所提出的算法将应变值转化为竖向错开变形量,并与千分表的监测值进行对比分析。提出的算法能够定量监测不连续管道的竖向变形量,为实际工程提供竖向错开变形的下限值,为实际工程中的管道安全和预警提供依据。

关键词: OFDR; 不连续管道; 竖向错开变形; 分布式光纤监测

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1087-09

Quantitative Monitoring of Vertical Staggered Deformation of Discontinuous Pipeline based on OFDR

YANG Xiaowei¹, LIU Chun^{1,2}, ZHANG Xiaoyu¹, LE Tiancheng¹

(1. School of Geosciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023;

2. Nanjing University (Suzhou) High-tech Institute, Suzhou 215123, China)

Abstract: In recent years, distributed optical fiber sensing technology has been widely used in pipeline deformation monitoring, but the existing optical fiber sensing technology can not meet the requirements of high spatial resolution. A new optical frequency domain distributed optical fiber sensing technology (OFDR) is used to conduct laboratory model tests on vertical staggered deformation of discontinuous pipelines under loading conditions, a quantitative calculation method is proposed, and the calculated value is compared with the actual value of the micrometer monitoring. The results of laboratory tests show that OFDR can accurately reflect the strain at the monitoring site and reveal the deformation law at the joints of discontinuous pipelines. The strain value is transformed into the vertical staggered deformation value by the proposed algorithm, and is compared with the monitoring value of the micrometer. The proposed algorithm can quantitatively monitor the vertical deformation of discontinuous pipelines. This calculation method can provide lower limit value of vertical staggered deformation for practical engineering, and provide a basis for pipeline safety and early warning in practical engineering.

* 收稿日期:2019-05-26;修回日期:2019-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41761134089)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20170393)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(QNLM2016ORP0110)资助

作者简介:杨晓蔚(1996—),男,硕士研究生。主要从事构筑物应力监测及岩土工程数值分析等方面的研究。

E-mail: MF1829034@smail.nju.edu.cn

Keywords: OFDR; discontinuous pipeline; vertical staggered deformation; distributed optical fiber monitoring

引言

光纤传感技术^[1]是一种以光波为载体,光纤为传播媒介的传感技术,最早在20世纪70年代由美国应用于航天领域。近二十年来,由于边坡、隧道、大坝、高速公路、桥梁等构筑物的结构健康监测愈发重要,光纤传感技术被广泛应用于岩土工程领域,并取得大量研究成果。

对于地下管道竖向错开变形,已有一些学者做了相关研究工作。王相超^[2]运用布里渊光时域分析(Brillouin Optical Fiber Time Domain Analysis, BOTDA)技术,将管体整体旋转不同角度,并逐级加载,推导出管体挠度及加载角度计算公式;冯新等^[3]将光时域背向拉曼散射(Raman Optical Time Domain Reflectometry, ROTDR)分布式光纤温度传感器BOTDA应变传感器平行布设于管道顶部,实现地下管道结构状态定量评估;胡盛等^[4]应用布里渊光时域反射(Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, BOTDR)技术,对聚乙烯管道纯弯曲变形进行试验研究,并推导出管道船湾区变形下的转角计算公式;毅力琦等^[5]运用基于布里渊散射的光纤传感技术,根据梁大变形理论中挠度与应变的关系,用数值计算的方法计算出管道挠度值;张丹等^[6]将BOTDR技术用于钢筋监测钢筋的弯曲变形,并与有限元计算结果对比,证明BOTDR技术在结构健康监测中的可行性;王飞等^[7]应用BOTDA光纤传感技术,对盾构隧道接头在分级加载下的变形量、张开量和转角进行研究,验证了室内模型试验的可行性;冷建成等^[8]应用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感方法对管道应力进行监测,为其它结构的健康监测提供借鉴意义;J.Buco等^[9]研究管道连接处在压缩、剪切和弯曲条件下的变形,对管道连接处在不同因素下变形特征给出定性描述,并对结果进行验证;S.Zhang等^[10]设计悬臂梁试验,对不同位置进行分级加载,并用光纤实时监测应变,将计算值与理论值相对比,证明其计算方法的可行性。

近年来,对管道沉降及变形的研究多用BOTDR和BOTDA^[11],但由于这两种技术的空间分辨率

受到脉冲宽度的影响,脉冲宽度不能做到无限小,难以突破分辨率的局限性。而光频域反射传感(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)技术具有测量范围大、精度高、空间分辨率高、分布式测量等特点^[12],与其它技术相比显示出足够的优越性,适合对管道进行远程分布式监测,已被应用于超大断面隧道开挖模型和储油罐温度监测,但还未被广泛应用于不连续管道竖向错开变形监测中。因此本文针对实际工程中直埋管道竖向变形难以定量处理的问题,在室内模型试验中应用光频域反射(OFDR)分布式光纤传感技术,对聚乙烯管道在均布荷载下的竖向错开变形进行研究,提出了一种竖向错开变形的定量计算方法,并将计算值与千分表实测值进行对比,实现了利用分布式光纤传感技术对不连续管道竖向错开变形的定量监测。

1 光频域反射技术原理

光通过不均匀介质时会向其它方向传播,称之为光的散射。光的散射又分为瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射三种^[13],光纤中的散射光如图1所示。瑞利散射中,入射光发生散射后其波长和频率均不发生改变,故又称之为弹性散射;拉曼散射和布里渊散射中,由于光线中声波场作用,入射光散射后会产生高于和低于原入射光频率的光,故称为非弹性散射。

光源发出的光经耦合器分为两路,一路传入光纤中称之为信号光,另一路称为参考光,信号光与参考光通过耦合器传递到光电探测器上进行相干混频。当传感光纤的不同位置受到温度场或应变场刺激时,该位置的光纤折射率发生改变,从而引起信号光频率的变化,信号光与参考光的频率差随

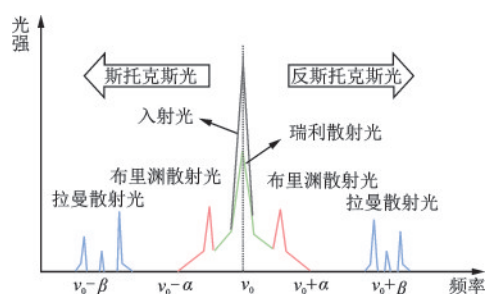


图1 光纤中的散射光

Fig.1 Scattered light in optical fibers

之改变,OFDR就是一种基于瑞利散射的背向反射技术。OFDR就是通过这种方法对光纤全线路进行诊断,OFDR技术路线如图2所示。

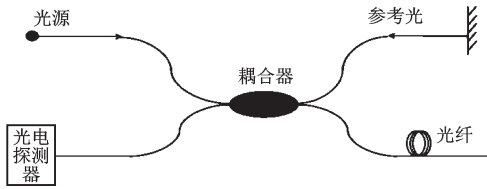


图2 OFDR技术原理^[14]

Fig.2 Technical principle of OFDR^[14]

目前发展较为成熟的是光时域反射(OTDR)技术。但OTDR的空间分辨率受探测光脉冲宽度影响,难以同时满足较高的空间分辨率和较大的动态范围,导致其精度不足,具有一定局限性。几种光纤传感技术的优缺点对比见表1。

表1 几种光纤传感技术的特点及参数

Table 1 Characteristics and parameters of several optical fiber sensing technologies

类别	测试方法	优点	缺点	最高空间分辨率/m
瑞利散射	OTDR	测量距离长	空间分辨率较低	0.4
	OFDR	空间分辨率高	测量距离较短	0.001
布里渊散射	BOTDR	测量距离长	测试时间较长	1
	BOTDA	空间分辨率较高	测试系统复杂	0.1

OFDR技术是利用扫频光源相干检测技术对光信号进行检测的分布式光纤传感技术,相干检测是一种把高频光信号转化为中频信号的间接检测技术;OFDR不受脉冲宽度及动态范围的限制,在高空间分辨率的同时也具有较大动态范围。OFDR空间分辨率最高可达1 mm;在相同动态范围下,OFDR所需光功率远小于OTDR,因此其灵敏度也高于OTDR。

2 管道竖向错开变形室内监测试验

2.1 试验概况

本次试验在90 cm×40 cm×60 cm的模型箱中

进行,模型箱由五块板构成,顶部开口,两侧壁分别打有两列钻孔,为管道提供四段可选高程,每段高程为7 cm。试验过程中千分表和OFDR对管道竖向错开变形量和光纤轴向微应变进行连续自动采集。试验采用OSI-S型OFDR分布式光纤解调仪,可监测0~80 m光纤沿线的微应变,应变测量精度为±1.0 με,最高空间分辨率可达1 mm,应变测量范围为±15 000 με,最低测量间隔为3 s。本次试验采用的采样间隔为6 s,空间分辨率为5 mm,完全满足对管道竖向错开变形的监测要求。

2.2 仪器布设

光纤布设采用“十字型”布设法,即将一根光纤沿管道外壁分四段布设,横截面方向分别在0°、90°、180°、270°的位置布设,每段光纤在两管连接处左、右两侧5 cm处用胶水进行定位处理,两定点之间的10 cm光纤为自由段,自由段在光纤粘贴过程中设置预拉力使其绷直,光纤轴向布设方法如图3所示,光纤横截面布设方法如图4所示。

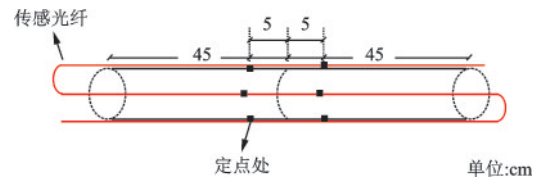


图3 光纤轴向布设示意

Fig.3 Scheme of axial layout of optical fiber

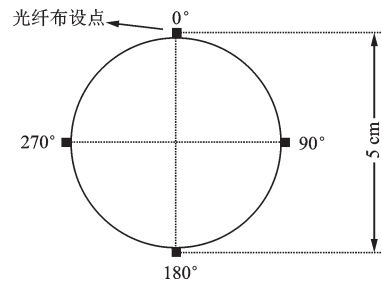


图4 光纤横截面布设示意

Fig.4 Scheme of cross section layout of optical fiber

试验使用两段长45 cm、直径5 cm的PVC管,管道两侧与模型箱侧壁通过特制连接器连接,连接器中间设置四个方形凹槽,使得光纤能够顺利通过。连接器四周的钻孔与模型箱侧壁的钻孔完全匹配,通过螺杆和螺母进行固定,连接器如图5所示。

千分表量程为1 cm,精度为0.001 mm,千分表

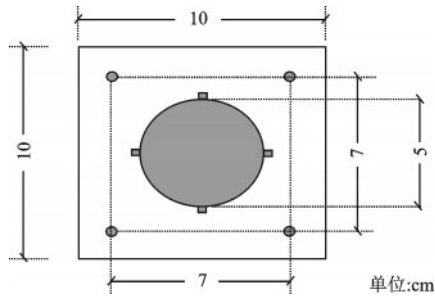


图5 连接器示意

Fig.5 Schematic diagram of the connector

从左到右依次编号为1号、2号、3号、4号、5号、6号；千分表下方焊接相同直径的钢棒作为沉降标，利用沉降标自身重力顶在管道上方并随管道发生竖向错开变形。填土试验中，为消除土颗粒与沉降标间摩擦力对试验结果的影响，在沉降标外套上直径为5 mm的塑料管；每段管道上方布设三个千分表，管道连接处两侧的3号、4号千分表间距为3 cm，其余每个千分表间距为12 cm。

2.3 试验过程

试验过程分为悬臂梁试验、剪切试验、填土试验三部分。三次试验都在3号和4号千分表之间的位置进行加压，但加压方式有所不同。填土试验通过对上覆土层施加重物对管道加压，气囊放气过程等效为加压过程；剪切试验通过调节升降台高度控制管道的竖向位移；悬臂梁试验采用悬挂重物的方式加压。

填土试验中，使用两段直径为5 cm、长度为45 cm的PVC管，在右段(加压段)管道下方布设三层气囊，填土后在4号和5号千分表中间放置一块30 cm×7 cm的加压钢板，通过在加压板上施加不同重量的砝码实现分级加压。试验过程中，首先加载0.637 kg，后分三次将三层气囊放气(等效为三级加载)，最后分别进行三级加载，加载重量分别0.637、1.275、2.55 kg，每一级加载后待OFDR与千分表数据稳定后进行下一级加载，共七级加载。填土试验过程如图6所示，气囊布置如图7所示。

剪切试验中，左段管道为20 cm，右段管道为45 cm。左管套有金属卡具，放置于高度可调的升降台之上，金属卡具上方放置足够重量的砝码，通过调整升降台高度控制管道竖向变形。试验过程中每次操作之间的时间间隔为2 min，共十级加载，剪切试验过程如图8所示。

悬臂梁试验中，左、右两段管道均为直径为5 cm、长度为45 cm的PVC管，将两段管道两端用



图6 填土试验过程

Fig.6 Filling test process

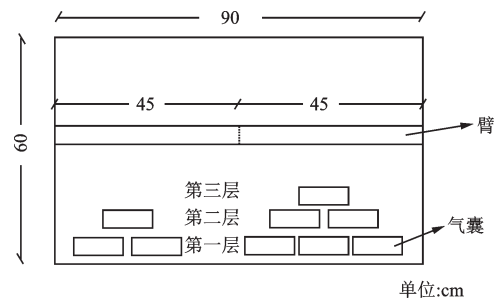


图7 气囊布置示意

Fig.7 Scheme of airbag layout

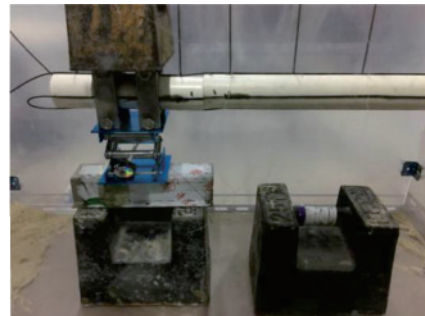


图8 剪切试验过程

Fig.8 Shear test process

连接器固定于模型箱侧壁，左段(非加压段)管道用足够重量的砝码和升降台固定，升降台高度在试验过程中不改变。整个试验过程中升降台高度不改变。通过对右段管道悬挂重物进行分级加压，每级加荷荷时间间隔2 min，共七级加载，悬臂梁试验过程如图9所示。

3 结果分析

3.1 千分表、应变数据分析

经数据汇总，得到OFDR在试验过程中测得的轴向微应变值，该应变值已经去除初始应变值。因



图9 悬臂梁试验过程

Fig.9 Cantilever beam test process

三次试验均在温度恒定的实验室进行,且每次试验持续时间在1 h以内,故没有进行温度补偿。从中取较典型的监测结果如图11、图13~图15、图17所示,图中虚线之间为管道连接处附近的应变曲线。可以发现,三种试验中随着加载级数增加,相同位置的光纤应变曲线形态分布一致,因此可以判断OFDR较为真实地反应了管道错开后的变形状态。

观察填土试验千分表数据(图10),可以发现明显的七级曲线。曲线形态表明,随加载级数增加,每个千分表沉降量逐渐增加,3号千分表(50 cm处)在每一级荷载曲线中位移量均为最大,4、5、6号千分表位移量仅有微小变化。在填土试验应变曲线(图11)中5.0 m处出现明显峰值,峰值应变大小随加载级数增加而增大,判断此处为管道上方错开处;6.0 m处也出现峰值,峰值大小同样随级数增加而增大,判断此处为管道左侧错开处。由于这两个处峰值应变均为负值,分析是在粘贴光纤时两定点之间的光纤没有进行足够的预拉,导致试验过程中自由段光纤发生收缩,故应变数据上体现为负值。

观察剪切试验千分表数据(图12),可以发现明显的十级曲线。5号千分表(约7.0cm处)、6号千分

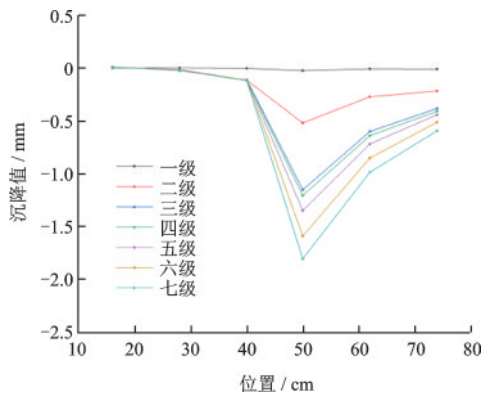


图10 填土试验千分表数据

Fig.10 Micrometer data of filling test

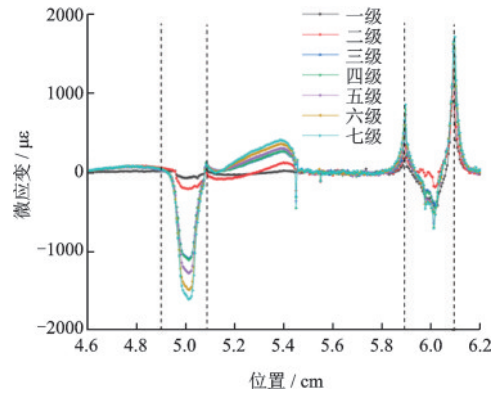


图11 填土试验应变数据

Fig.11 Strain data of filling test

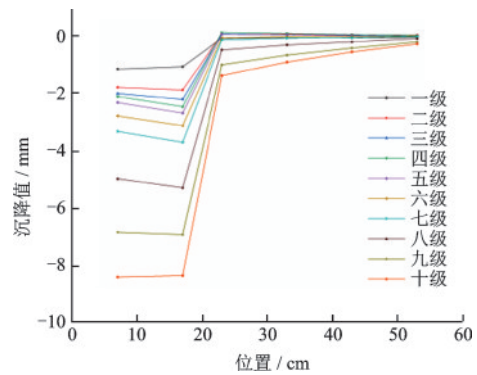


图12 剪切试验千分表数据

Fig.12 Micrometer data of shear test

表(约17.0 cm处)每级加载的沉降值相近,与实际操作相符。从剪切试验应变曲线(图13)中可以发现四个明显的峰值,从左到右依次代表左侧、下侧、右侧和上侧错开处,每一级曲线中峰值大小随加载级数增加而增大。观察发现在左侧接缝(3.64 m)处的峰值为负值,分析是在粘贴光纤时自由段光纤未进行足够预拉,导致试验过程中自由段光纤发生收缩,在应变数据上体现为负值。剪切试验上方和下

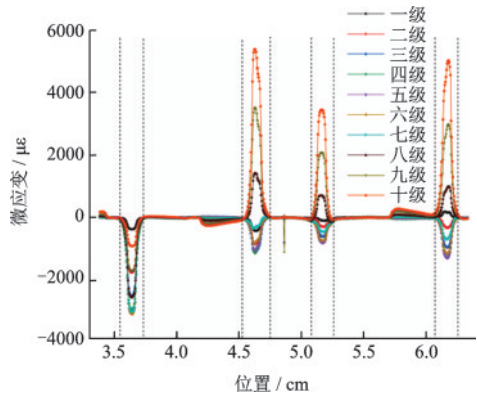


图13 剪切试验应变数据

Fig.13 Strain data of shear test

方错开处的光纤应变数据(以第八、九、十级加载数据为例)如图14、图15所示。观察可以发现,在每级应变峰值附近都出现了次级峰值,加载级数越大次级峰值越明显。结合光纤布设方法可以推测,峰值处为光纤与管口直接接触的位置,管道在荷载作用下此位置处出现明显应力集中;而次级峰值位于另外一段管道的定点处,此处由于受到峰值应力集中区的拉伸,光纤受到与管道接触面相反的拉力,有剥离管道的趋势,因此推测此处为次级峰值所在处。

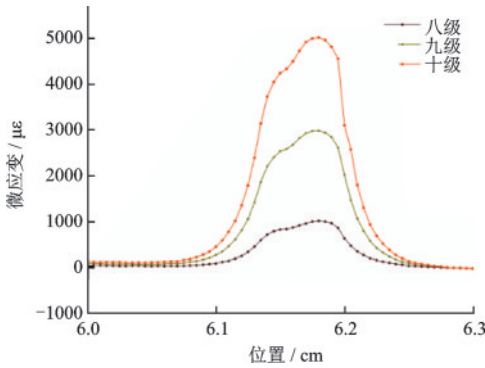


图14 剪切试验上方错开处应变数据
Fig.14 Strain data at the upper staggered position of shear test

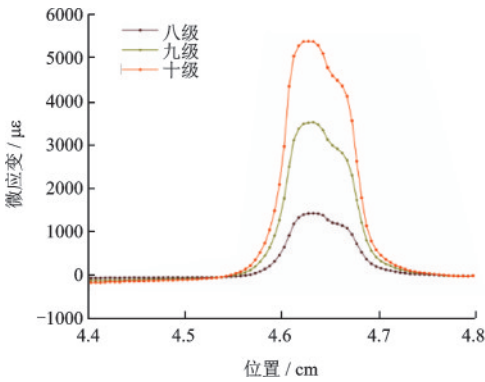


图15 剪切试验下方错开处应变数据
Fig.15 Strain data at lower staggered position of shear test

观察悬臂梁试验千分表数据(图16),可以看到明显的七级曲线。每个千分表所在位置的沉降量随加载级数增加而增大。由于3号千分表距加载处最近,故每一级加载时3号表所在位置沉降量最大。观察悬臂梁试验应变数据(图17),可以发现明显的四处峰值,从左到右依次为左侧、下侧、右侧和上侧错开处,峰值大小随加荷级数增加不断增大,四处峰值在每一级加载时都呈现为正值,说明本次试验在光纤布设时为自由段设置了足够的预拉力,自由

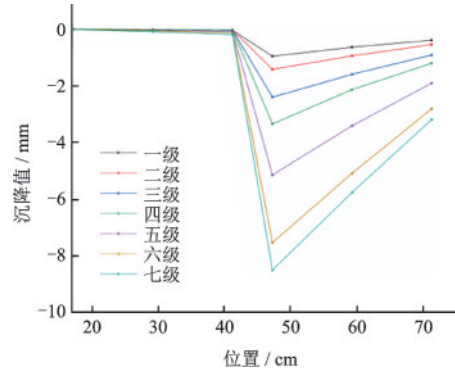


图16 悬臂梁试验千分表数据
Fig.16 Micrometer data of cantilever beam test

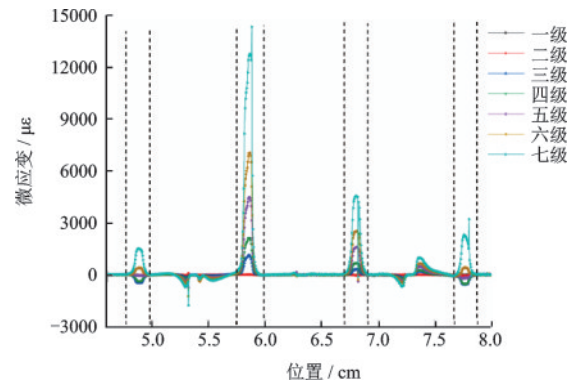


图17 悬臂梁试验应变数据
Fig.17 Strain data of cantilever beam test

段光纤在试验过程中没有发生收缩的情况。

3.2 定量分析

本文对不连续管道的竖向错开变形进行定量计算,先提出几个假设:(1)管道连接处只产生竖向变形,且不沿固定端(即模型箱侧壁)转动;(2)管道在试验过程中不沿中轴线转动;(3)两管连接处紧密贴合没有缝隙。

计算原理如下:定点A、B的距离 L 为已知量;当管道发生竖向错开变形后,自由段光纤被拉长至 ΔL ,此时A、B间距离为 $(L + \Delta L)$ 。用峰值应变求出 ΔL 的值,即可求得管道的竖向错开变形,定量计算原理如图18所示。

管道竖向变形计算公式推导过程如下:

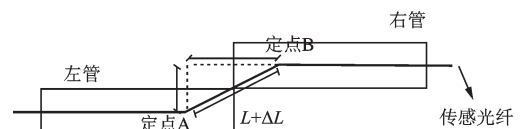


图18 定量计算原理
Fig.18 Quantitative calculation principle

$$\epsilon = \Delta L \div L \quad (1)$$

$$x = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - L^2} \quad (2)$$

因此：

$$x = \sqrt{(L^2 \times (1 + \epsilon)^2 - L^2)} \quad (3)$$

式中, ϵ 为光纤轴向应变变量, ΔL 为光纤长度的变化量, L 为光纤原长, x 为管道竖向变形量。

本文以剪切试验和悬臂梁试验为例进行定量计算, 两次试验都选择光纤形态良好的右侧错开处光纤数据进行计算。剪切试验挑选第八、九、十级应变数据计算, 并与千分表监测值对比。剪切试验错开量对比如图 19 所示, 计算结果见表 2。观察可以发现计算值与监测值曲线的整体变化趋势一致, 计算值整体低于监测值, 分析是因为本文提出的算法忽略了挠曲变形量(假设 1), 故计算值小于监测值。

在悬臂梁试验中, 以第三至七级(共 5 级)应变数据进行计算, 并与千分表的监测值对比。悬臂梁试验错开量对比曲线见图 20, 计算结果见表 3。观

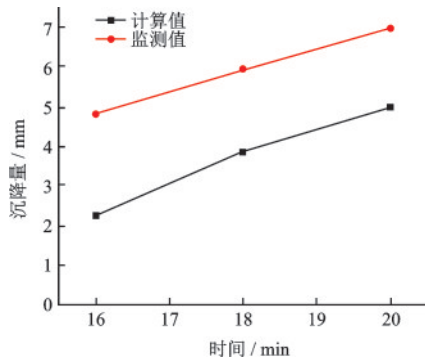


图 19 剪切试验错开量对比

Fig.19 Comparison of vertical staggered deformation of shear test

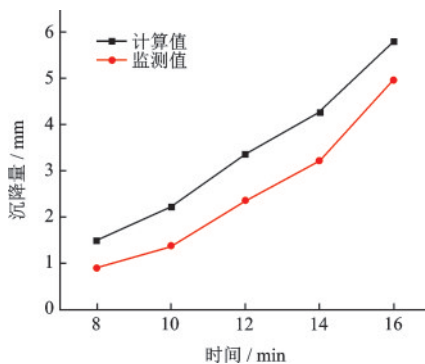


图 20 悬臂梁试验错开量对比

Fig.20 Comparison of vertical staggered deformation of cantilever beam test

察可以发现两支曲线的整体变化趋势一致, 而计算值略大于监测值, 分析是因为当两段管道沿中轴线处发生转动(假设 2), 或沿固定端发生微小挠曲变形时(假设 1)都导致光纤局部拉应力增大, 而计算时把这两部分变形都考虑为管道竖向变形, 因此造成计算值偏大。

两组试验中, 随加载级数增大, 计算值与监测值之间的相对误差明显减小。试分析原因, 首先, 本文提出的定量计算方法忽略管道挠曲变形, 而剪切试验中右段管道与悬臂梁试验中的两段管道受荷后会产生微小挠曲变形, 故定量计算结果实际是竖向错开变形与挠曲变形之和。随着加载级数的增加, 挠曲变形在计算值中所占比例逐渐减小, 竖向错开变形占比逐渐增大, 因此相对误差逐渐减小, 计算值的准确性增加。

表 2 剪切试验竖向错开变形计算数据

Table 2 Calculating data of vertical staggered deformation of shear test

加载级数	计算值/mm	千分表/mm	相对误差/%
八	2.25	4.81	53.30
九	3.86	5.93	34.90
十	4.98	6.98	28.70

表 3 悬臂梁试验竖向错开变形计算数据

Table 3 Calculating data of vertical staggered deformation of cantilever beam test

加载级数	计算值/mm	千分表/mm	相对误差/%
三	1.49	0.92	62.60
四	2.22	1.39	59.90
五	3.38	2.37	42.80
六	4.28	3.24	32.10
七	5.81	4.99	16.60

3.3 误差分析

3.3.1 耦合性测试

观察三组试验的整体应变曲线(图 11、图 13、图 17), 发现在峰值出现应力扩散, 分析可能的原因如下:

(1) 管道发生竖向时光纤脱胶, 导致应力影响范围增大, 即胶水种类对光纤和管道的耦合性可能有影响;

(2) 光纤外侧有三层涂覆层, 在管道发生相对错动时, 局部发生应力集中, 光纤内涂覆层与外涂

覆层之间发生错动,在曲线上表现为影响范围增大;

对于胶水种类与光纤和管道耦合性有相关的推测,分别使用免钉胶、环氧树脂AB胶、瞬干胶对此推测进行验证。测试试验时分别使用三种胶水将光纤粘贴在一段管道上,光纤布设方法为前文介绍的“十字型”布设,将光纤的自由段通过定滑轮并悬挂重物,进行三级加载。观察应变曲线发现,每级加载曲线都有一段倾斜,倾斜段距滑轮越近应变值越大,最后过渡为一段平台。随加载级数增加,应变倾斜段的斜率越来越大,平台处对应的应变值也随之增大。倾斜段起始位置与终止位置之间的距离即为光纤的应力影响范围。免钉胶、胶环氧树脂AB胶、瞬干胶的应力影响范围分别为11、10、10 cm。所得结论如下,免钉胶、环氧树脂AB胶、瞬干胶对峰值附近应力传递范围影响不大。孙义杰等^[15]对分布式传感光纤应力传递范围进行了室内试验,得出的结论是当光纤黏贴长度大于24 cm时,低传感段距离在12.5 cm以内,其结论与此次应力传递范围测试试验的结果相符,验证了测试结果的准确性。

3.3.2 其它误差

(1)光纤布设。在各组试验数据中,可以发现多处,理论上应处于拉伸状态的光纤,其监测值监测值为负。这是由于光纤布设时对自由段预拉不充分,导致自由段光纤正式试验时发生弯曲。同时,管道连接处无法做到无缝隙紧密贴合(假设3),导致粘贴完成后发生微小移动,对预拉段光纤也有一定影响;

(2)计算假设。在进行定量计算之前,我们假设光纤的峰值应变完全由管道竖向错开变形位移引起。实际上,管道会发生微小挠曲变形和转动变形,导致计算值偏大,在位移量较小时尤其明显,当位移量稍大时,相对误差迅速降低,但这部分误差仍不可避免。

4 结论及展望

本文采用光频域分布式光纤传感技术,通过在不连续管道外壁布设传感光纤,根据不同条件下管道连接处竖向错开变形的定量监测及分析,所得结论如下:

(1)本文在不连续管道竖向错开变形室内模型

试验中应用光频域分布式光纤传感技术,此技术具有精度高、空间分辨率高、分布式监测等特点。

(2)本文提出了一种不连续管道竖向错开变形的定量计算方法,利用剪切试验和悬臂梁试验的应变值计算出管道竖向错开变形量,并与千分表监测值对比,发现计算值与实际值的相对误差随加载级数增加而减小。

(3)观察光纤沿线的应变分布曲线,发现管道错开处有明显峰值,但峰值区附近应力影响范围较大,推测是胶水在较大荷载下脱胶所致。因此用三种不同种类的胶水粘贴光纤进行测试试验,发现三种胶水应力峰值区附近的影响范围均约为10 cm,得出的结论是测试所用的三种胶水对峰值附近应力传递范围无明显影响。

本研究分析了光频域分布式光纤传感技术(OFDR)相对于其它传统技术的优越性,并将其成功应用于不连续管道竖向错开变形室内定量监测试验中,揭示了此技术在地下工程模型监测试验中的潜力。但仍然需要注意其监测距离较短的局限性;此外,如何在埋地小尺度管道上布设光纤,还需要进一步研究。另外,可以尝试用更大尺度的管道进行试验,将光纤布设在管道内壁,消除外部土颗粒对光纤受力的影响,这些问题还需要进一步探究。

参考文献:

- [1] 刘泉声,徐光苗,张志凌. 光纤测量技术在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 310-314.
Liu Q Sh, Xu G M, Zhang Zh L. Application of optical fiber measurement technology in geotechnical engineering[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 310-314. (in Chinese)
- [2] 王相超. 地质灾害诱发的输油管道变形光纤监测技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
Wang X Ch. Study on optical fiber monitoring technology of oil pipeline deformation induced by geological disaster [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)
- [3] 冯新,张宇,刘洪飞,等. 基于分布式光纤传感器的埋地管道结构状态监测方法[J]. 油气储运, 2017, 36(11): 1251-1257.
Feng X, Zhang Y, Liu H F, et al. A method for monitoring the structural state of buried pipelines based on

- distributed optical fiber sensors [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2017, 36 (11): 1251-1257. (in Chinese)
- [4] 胡盛,施斌,魏广庆,等. 聚乙烯管道变形分布式光纤监测试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4): 436-440, 453.
Hu Sh, Shi B, Wei G Q, et al. Distributed optical fiber monitoring of polyethylene pipeline deformation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 436-440, 453. (in Chinese)
- [5] 毅力琦,丁克勤,钱才富,等. 长输管道沉降变形分布式监测方法[J]. 无损检测, 2011, 33(11): 55-57.
Yi L Q, Ding K Q, Qian C F, et al. Distributed monitoring method for settlement and deformation of long-distance pipeline [J]. Nondestructive Testing, 2011, 33 (11): 55-57. (in Chinese)
- [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 D, Shi B, Wu Zh Sh, et al. BOTDR distributed optical fiber sensor and its application in structural health monitoring [J]. Journal of Civil Engineering, 2003, 36(11): 83-87. (in Chinese)
- [7] 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.
Wang F, Huang H W, Zhang D M, et al. Shield tunnel deformation sensing method based on BOTDA optical fiber sensing technology [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (9): 1901-1908. (in Chinese)
- [8] 冷建成,刘扬,周国强,等. 基于光纤光栅传感的管道应力监测方法研究[J]. 压力容器, 2013, 30(1): 70-74.
Leng J Ch, Liu Y, Zhou G Q, et al. Research on pipeline stress monitoring method based on FBG sensing [J]. Pressure Vessel, 2013, 30(1): 70-74. (in Chinese)
- [9] Bucu J, Emeriault F, Kastner R. 混凝土管道节点性能的全尺寸试验确定及其建模[J]. 基础设施系统学报, 2008, 14(3): 230-240.
Bucu J, Emeriault F, Kastner R. Full-scale experimental determination of concrete pipe joint behavior and its modeling [J]. Journal of infrastructure systems, 2008, 14(3): 230-240. (in Chinese)
- [10] Zhang S H, Liu B, He J P. Pipeline deformation monitoring using distributed fiber optical sensor [J]. Measurement, 2019, 133: 208-213.
- [11] 王兴,施斌,魏广庆,等. 土木与岩土工程监测新技术——BOFDA 的性能与特点[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 763-768.
Wang X, Shi B, Wei G Q, et al. Performance and characteristics of BOFDA, a new monitoring technology for civil and geotechnical engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35 (6): 763-768. (in Chinese)
- [12] 柴敬,张丁丁,李毅. 光纤传感技术在岩土与地质工程中的应用研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 28-37.
Chai J, Zhang D D, Li Y. Progress in the application of optical fiber sensing technology in geotechnical and geological engineering [J]. Journal of Architectural Science and Engineering, 2015, 32(3): 28-37. (in Chinese)
- [13] 刘泉声,王俊涛,肖龙鸽,等. OFDR 光纤传感技术在十字岩柱暗挖法物理模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1063-1075.
Liu Q S, Wang J T, Xiao L G, et al. Application of OFDR fiber optic sensing technology in physical model test of cross pillar subsurface excavation method [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (5): 1063-1075. (in Chinese)
- [14] 顾一弘. 高分辨率 OFDR 关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
Gu Y H. Research on key technologies of high resolution OFDR [D]. Chendu: University of Electronic Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 孙义杰,张强,程刚,等. 基于光频域反射技术的表面粘贴分布式光纤传感器应变传递特性分析与试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 46-52.
Sun Y J, Zhang Q, Cheng G, et al. Analysis and experiment of strain transfer characteristics of surface-mounted distributed optical fiber sensor based on optical frequency domain reflection technology [J]. Science and Technology and Engineering, 2018, 18 (33): 46-52. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)