

结合 OFDR 与 Ko 位移理论的变形估算研究

夏力,王大鹏*

(苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011)

摘要: Ko 位移理论能够很精准地对结构进行变形重构,为了将这一理论应用到实际工程中,选用光频域反射(OFDR)分布式光纤传感器作为测量工具,设计了基于等强度梁的变形估算实验方案。实验在等强度梁上分六级加载,用百分表测得 4 个测点在每级荷载下的真实挠度值,并根据每级所测应变值进行挠度的变形重构,最后将 2 种方法所得到的挠度值进行对比。实验结果表明:光纤的应变系数为 0.71666,变形重构挠度值与真实挠度值之间的最大误差为 0.586 mm,符合实验预期。

关键词: 光频域反射;分布式光纤传感器;标定;应变系数;变形重构;Ko 位移理论

中图分类号: TN929.11; TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)07-0053-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of deformation estimation combining OFDR and Ko displacement theory

XIA Li, WANG Dapeng*

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu 215011, China)

Abstract: The Ko displacement theory can reconstruct the structure accurately. In order to apply this theory to the practical engineering, the optical frequency-domain reflection(OFDR) distributed fiber sensor is used as the measuring tool, and an experimental scheme of deformation estimation based on equal strength beam is designed. The experiment is divided into six stages of loading on the beam of equal strength, and the true deflection values of four measuring points under each stage load are measured by dial gauge. The deformation reconstruction of deflection is carried out according to the strain value measured at each stage. Finally, the deflection values obtained by the two methods are compared. The experimental results show that the strain coefficient of the fiber is 0.71666, the maximum error between the deflection value of deformation reconstruction and the true deflection is 0.586 mm, which is in line with the experimental expectation.

Key words: optical frequency domain reflection; distributed optical fiber sensors; calibration; strain coefficient; deformation reconstruction; Ko displacement theory

0 引言

分布式光纤传感器具有分布式、传感精度高和不受电磁干扰等优点,在国内外成为研究的热点^[1-2]。分布式光纤传感技术根据不同的光的散射原理,主要可分为基于瑞利散射和基于布里渊散射的分布式光纤

应变传感器;根据对散射光谱访问方式的不同,又可分为基于光时域反射(OTDR)和基于光频域反射(OFDR)^[3]的分布式光纤传感器。与 OFDR 相比,OTDR 在空间分辨率、灵敏度、传感精度和响应度上具有明显的不足^[4-5];OFDR 使用普通光纤即可满足测量需求,且光纤本身就可作为传感器,在经济成本和便捷性上都具有优势。基于 OFDR 的分布式光纤应变测量技术具有同时监测局部应变和整体应变的优点,成为结构健康监测领域最具发展前景的方向之一。2007 年,由 WILLIAM L. Ko 等人^[6]提出了 Ko 位移理论,能够很精准地估算出结构的变形值,而且方式简单易操作,仅需在待测结构表面上布置应变传感器,收集结构表面的应变信息,即可根据这些应变来估算出结构的变形

收稿日期:2021-01-01。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:51308369)资助。

作者简介:夏力(1996—),男,江苏泰州人,硕士研究生,现就读于苏州科技大学土木工程学院建筑与土木工程专业,从事桥梁结构健康监测方面的研究,主要研究方向为使用 FBG 光纤光栅传感器和 OFDR 分布式光纤传感器对于工程结构的健康监测。

* 通信作者:王大鹏(1979—),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为桥梁健康监测与抗震。



夏力,王大鹏:结合 OFDR 与 Ko 位移理论的变形估算研究

值。但目前该理论的应用仅局限于飞行器领域。而分布式光纤传感器布置方式简单、成本低和空间分辨率高的优点能够很好地满足 Ko 位移理论的核心需求。因此,为了将 Ko 理论应用到实际工程中,本文结合光纤的标定需求,设计出一种基于等强度梁的变形估算实验方案。

1 分布式光纤传感器标定系统

在实际研究或工程中,由于光纤的加工工艺和使用材料不同,不同型号、不同厂家和不同保护套材料的光纤,其基本参数也不尽相同,与真实应变存在误差,所以在使用前需做标定实验。本文研究应变传递规律使用的实验标定系统如图 1 所示。

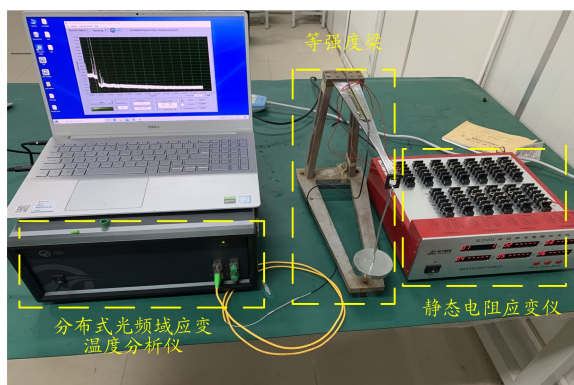


图 1 分布式光纤传感器应变系数标定系统

分布式光纤传感器应变系数标定系统由 30 cm 的等强度梁、应变片、静态电阻应变仪、OFDR 分布式光纤频域应变温度分析仪、光纤(本文所使用的光纤为南智传感生产的 2 mm 高传递紧包应变感测光缆,型号为 NZS-DSS-C07)和跳线等部件构成。在室温为 12 °C 的环境下,等强度梁真实应变以应变片测得的数值为参考值,光纤所测读数由仪器配套的 OSI-C 软件读取。为了保证光纤与等强度梁的形变完全一致,光纤必须完全贴合在等强度梁表面,故选用环氧树脂将光纤完全密封地粘贴在梁上,粘贴前需用酒精将梁表面清洁干净并沿着梁的中轴线粘贴。应变片由 502 胶粘贴在等强度梁上,采用半桥互补法接入电阻静态电阻应变仪,沿着梁的中轴线粘贴。光纤布置方式如图 2 所示。



图 2 光纤布置图

2 Ko 位移原理与变形重构实验

Ko 位移理论的基本思想是用 $n+1$ 个传感器将梁离散成 n 个部分,每个部分的长度为 Δl ,每个部分的应变可以看作 x 的线性函数,用这些传感器测量每个边界点的应变,并用传感器所捕获的应变数据计算局部弯曲斜率和挠度变化应变与挠度的微分方程关系。

局部弯曲曲率 $\tan\theta(x)$ 可通过区域 (x_{i-1}, x_i) 中挠度与应变关系式的积分计算得到:

$$\tan\theta(x) = \int_{x_{i-1}}^x \frac{d\omega^2}{d^2x} dx + \tan\theta_{i-1} = \int_{x_{i-1}}^x \frac{\varepsilon(x)}{c(x)} dx + \tan\theta_{i-1}, x_{i-1} < x < x_i \quad (1)$$

其中, x 为结构的长度坐标, ω 为测点处的挠度值, $\varepsilon(x)$ 为 x 处的应变, $\tan\theta_{i-1}$ 是结构面在 x_{i-1} 处的斜率, c 为 x 处梁表面与中性面之间的距离。

结构面位移函数 $y(x)$ 可通过区域 (x_{i-1}, x_i) 中关系式(1)的积分计算得出:

$$y(x) = \int_{x_{i-1}}^x \tan\theta(x) dx + \omega_{i-1} = \int_{x_{i-1}}^x \int_{x_{i-1}}^x \frac{\varepsilon(x)}{c} dx dx + \int_{x_{i-1}}^x \tan\theta_{i-1} dx + \omega_{i-1}, x_{i-1} < x < x_i \quad (2)$$

其中, ω_{i-1} 是结构面在 x_{i-1} 处的挠度值。

为了得到离散点的挠度值,对挠度的变化进行叠加计算,进而可用插值法重建梁的整体变形。等强度梁是一端固定的,可被视为悬臂梁。固定端的挠度和偏转角为 0,即 $\omega_0 = \tan\theta_0 = 0$ 。变形重构实验系统如图 3 所示。

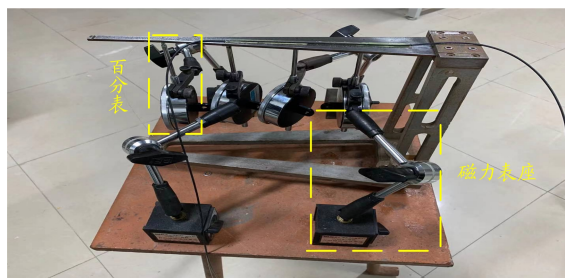


图 3 变形重构实验系统

从等强度梁的端部开始,每隔 6 cm 架设 1 个百分表,一共设置 4 个测点,分别距端部为 6 cm、12 cm、18 cm 以及 24 cm,然后逐级加砝码,从 1~6 个依次加载,加载等级与砝码数量相同,并记下百分表读数。

3 结果与分析

3.1 标定结果与分析

根据应变系数标定原理,将测得的数据拟合,得出的 OFDR 测量值与应变片测量值的关系曲线如图 4 所示。

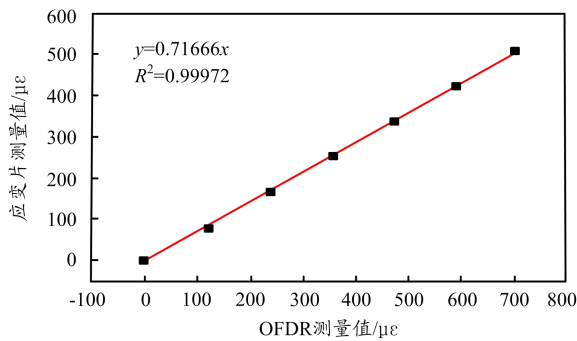


图4 OFDR 测量值与应变片测量值关系曲线

由于光纤的护套效应和粘着情况等原因, 真实应变与光纤所测应变之间具有一种比例关系。由图4可知, 真实应变与OFDR所测应变之间可以线性拟合, 得到一条正比例函数曲线, 曲线的斜率即为应变系数。由所测得数据(应变系数为0.71666, 相关系数 R^2 为0.99972)可知, 光纤所测数值变化也为线性变化, 符合预期结果。

由图4的相关系数(数值越接近1代表拟合效果越好)可知, OFDR所测值与真实值所拟合出来的曲线相关性很好, 仅第二个点误差较大(可能与环氧树脂凝固时内部存在小气泡、光纤粘贴部分不实等因素有关)。除此之外, OFDR高达1 mm的空间分辨率对于现有的健康监测学术研究实用性能极强, 配合光纤能适应多种恶劣环境的能力, 足以满足现阶段实际工程和实验研究的需求。

3.2 变形重构结果与分析

基于 K_0 位移原理, 本文在Matlab内进行编程并计算, 得到的实际变形与重构变形对比图如图5所示。

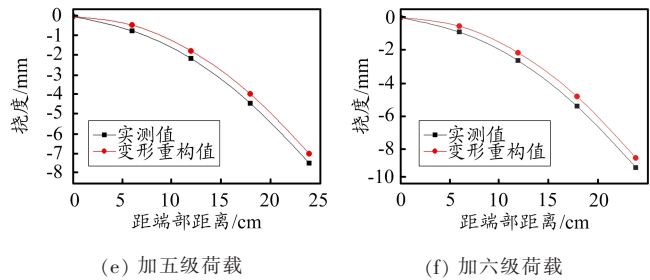
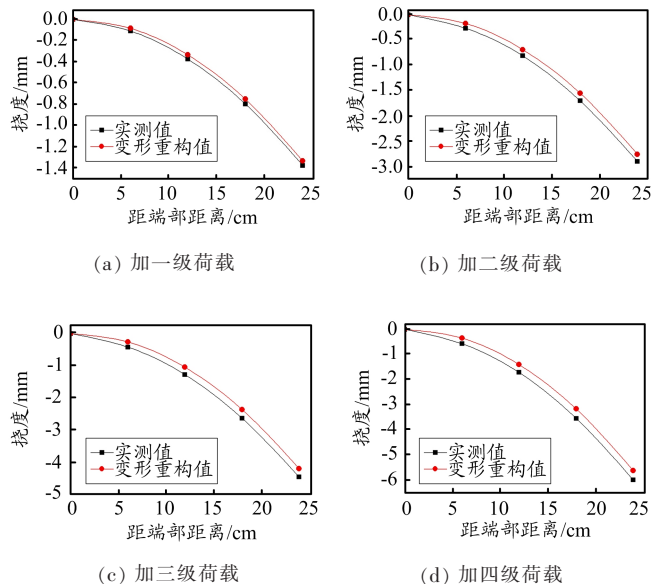


图5 实际变形与重构变形对比图

由图5可知, 实际变形与重构变形挠度值之间的最大差值为图5(f)内距端部为18 cm的点, 误差值为0.586 mm, 相对误差为10.96%; 另外, 变形重构值符合逐级加载的结果, 与真实情况一样, 从图5(a)到图5(f)也是逐级增加的。从整个实验结果可以看出, 实测值与变形重构值具有很好的一致性, 等强度梁的重构挠度与实际挠度之间的误差很小。因此, 在误差允许范围内, K_0 位移理论可以基于梁表面的应变重构出等强度梁的挠度值。

4 结束语

本文基于等强度梁研究了光纤的应变传递规律, 得出了光纤的应变系数, 并在此基础上研究了挠度的变形重构。实验结果表明光纤的应变系数测量符合实验预期。此外, 通过对比变形重构值与真实挠度值可知, K_0 位移原理在等强度梁上也可适用, 为实际工程中结构的健康监测提供一种借鉴方法, 即只需在结构表面粘贴上光纤, 随时可以监测结构的健康状况。

参考文献:

- [1] 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感器技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
- [2] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [3] MASOUDI A, NEWSON T P. Contributed review: distributed optical fiber dynamic strain sensing [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(1): 011501-1-011501-9.
- [4] VENKATESH S, SORIN W V. Phase noise consideration in coherent optical FMCW reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [5] UTTAM D, CULSHAW B. Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using a frequency modulated continuous wave ranging technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(5): 971-977.
- [6] WILLIAM L K, RICHARDS W L, TRAN V T. Displacements theories for in-flight deformed shape predictions of aerospace structures: NASA TP-2007-214612 [R]. Los Angeles: NASA Dryden Flight Research Center, 2007.