

基于 BOTDA 光纤传感技术的大体积混凝土 温度测试研究

李春峰, 何文勇, 罗勇, 邹源江

(贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 大体积混凝土浇筑后, 温度监测是混凝土结构健康监测的一个重要内容。基于布里渊光时域分析技术(BOTDA), 开展大体积混凝土温度测试研究。首先阐述 BOTDA 分布式光纤传感技术测温基本原理; 然后介绍温度测试系统; 最后结合工程实例, 研究该技术在工程中的应用, 包括光纤铺设、光纤保护、测试及成果分析, 同时采用点式温度传感器测试光缆部分位置的温度, 采用精密温度计测试环境温度, 并与光缆测试温度对比分析。结果表明: 基于布里渊光时域分析的分布式光纤传感技术可用于大体积混凝土分布式温度精确测试。

关键词: 分布式光纤传感; 布里渊光时域分析; 大体积混凝土; 温度测试

1 引言

布里渊光时域分析技术(BOTDA)是在布里渊光时域反射技术(BOTDR)的基础上, 发展起来的一种新型光电测试技术, 它综合利用布里渊散射光的光谱技术和光时域测量技术, 可分布式测试沿传感光纤的环境温度。该技术具有分布式、测试精度高、实现结构状态参量的绝对测量、测量信号的传输和采集系统简化、兼备传感和传输功能、可实现远距离的检测与传输、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、长寿命、使用期限内维护费用低等一系列优点, 但目前解调设备成本较高。常规点式传感器只能对监测点进行测试, 并且存在测试导线多、埋设不便等缺点。目前, BOTDA 技术在国外已取得丰硕的成果, 测试精度不断提高。日本 Neuberx 公司、瑞士 Smartece 和 Omnisens 公司、美国 MOI 公司、加拿大 OZ 公司等相继推出商用测试系统。近 10 年来, 中国部分研究机构对 BOTDA、BOTDR 技术开展大量理论及试验研究, 并将该项技术应用到重大工程测试, 取得了一系列成果。BOTDA 技术的应用及研发, 对中国重大工程的安全监测、健康诊断、理论研究等具有重大意义。

大体积混凝土浇筑后, 当升温过程中表面拉应力和降温过程中收缩应力超过混凝土的极限抗拉强度

时, 混凝土就会产生裂缝甚至结构破坏。因此温度监测是大体积混凝土结构健康监测的一个重要内容, 应在施工过程中采取相应措施控制混凝土内的温度, 避免在混凝土结构中产生有害裂缝。国内外学者对大体积混凝土温度测试方面开展了大量、持续的研究, 而利用 BOTDA 分布式光纤传感技术测试大体积混凝土温度的研究较少。

该文基于 BOTDA 技术, 通过专门的测温光缆, 开展大体积混凝土温度监测试验研究。

2 BOTDA 光纤传感技术简介

光散射是指光波在光纤中传播时偏离原传播方向向其他任意方向弥散的现象。光散射包括非纯净介质和纯净介质中的光散射现象。纯净介质中的光散射主要包括瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射 3 种类型。

布里渊散射为非线性光散射, 其频率漂移主要取决于光纤介质的声学、弹性力学和热弹性力学等特性。当传感光纤所在环境的应变和温度等发生变化时, 就会引起光纤介质特性的改变, 进而引起频率漂移。基于布里渊光时域分析技术(BOTDA)的基本原理为: 分别从传感光纤的两端注入光源作为泵浦光和探测光, 调节两束光的频差, 使布里渊散射增益值最大, 通过检测传感光纤中受激布里渊散射光频漂, 并根据频

收稿日期: 2018-08-15

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(编号: 2010-122-019, 2010-122-021, 2010-122-022, 2011-122-032)

作者简介: 李春峰, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 20273653@qq.com

漂与传感光纤环境的应变、温度之间的关系,从而实现应变和温度的分布式测量。其系统原理框图见图 1。

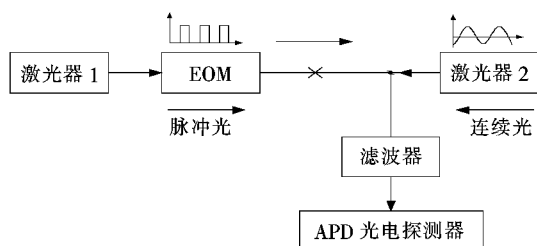


图 1 BOTDA 系统原理图

传感光纤的布里渊频漂与其所在环境的应变和温度变量之间存在线性关系。光纤所受的轴向应变、所在的环境温度变化量与布里渊频漂量之间的关系为:

$$\nu_B(\epsilon, \theta) - \frac{d\nu_B(\theta)}{d\theta}(\theta - \theta_0) = \nu_B(0) + \frac{d\nu_B(\epsilon)}{d\epsilon}\epsilon \quad (1)$$

式中: $\nu_B(0)$ 为初始应变和初始温度时的布里渊中心频率; $\nu_B(\epsilon, \theta)$ 为应变 ϵ 和温度 θ 的布里渊中心频率; $d\nu_B(\theta)/d\theta$ 为温度比例系数; $d\nu_B(\epsilon)/d\epsilon$ 为应变比例系数; $\theta - \theta_0$ 为光纤温度变化值; ϵ 为光纤应变变化值。

3 温度测试系统

基于 BOTDA 的分布式温度测试系统主要包括分布式光纤应变温度传感仪及温度传感光纤;同时,可根据实际情况及需要配置其他的外接控制系统。

3.1 分布式应变温度传感仪

分布式光纤应变温度传感仪为布里渊光时域分析解调设备。仪器主要组件包括:① 泵浦、探测激光器;② 反向散射光接收器;③ 数据采集系统;④ 光信号转化为温度和其位置信号的微处理系统;⑤ 包含外部控制接口的通信模块;⑥ 存储设备;⑦ 操作系统及软件。该设备温度测量范围为 $-270 \sim +800$ $^{\circ}\text{C}$ (取决于传感光纤材料),距离采样分辨率最小 5 cm,空间分辨率为 0.2 m,温度分辨率为 0.005 $^{\circ}\text{C}$,温度测量精度为 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 温度传感器

温度传感器为专门设计定制的测温光缆。该光缆为圆形结构,中心平行结构单元包括松套光缆、不锈钢铠和外套层。测温光缆能消除外界应力,避免采集到的布里渊频漂信号受应变的影响,故光缆应变变化值 ϵ 为 0;经室内标定试验,温度比例系数 $d\nu_B(\theta)/d\theta$ 为 0.998 $\text{MHz}/^{\circ}\text{C}$;光缆布置时测试初始温度 θ_0 及只受环境温度影响的初始中心频率 $\nu_B(0)$;根据以上条件,可通过测试布里渊中心频率 $\nu_B(\epsilon, \theta)$ 实现对环境温度

θ 的测试。

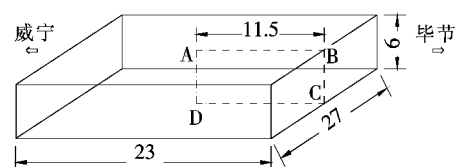
4 工程应用

4.1 工程概况

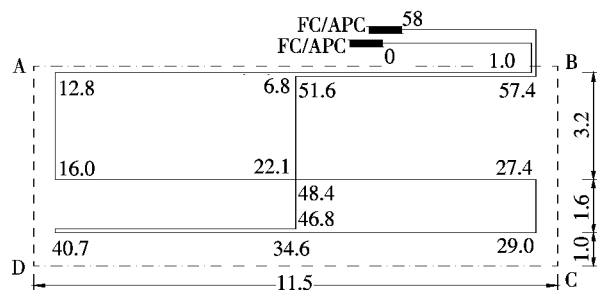
赫章特大桥为整幅桥,全长 1 072.8 m,上部结构为 9×40 m 预应力混凝土简支转结构连续 T 梁桥 + $(96 + 2 \times 180 + 96)$ m 预应力混凝土连续刚构桥 + 5×30 m 预应力混凝土简支转结构连续 T 梁桥。11[#] 主墩为双肢薄壁墩,墩高 195 m,群桩基础,承台体积为 $23 \text{ m} \times 27 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 3\,726 \text{ m}^3$;引桥除 8[#] 墩为薄壁墩,群桩基础外,其余桥墩为双柱式桥墩,桩基础;桥台为重力式 U 形台,其基础为扩大基础。设计荷载:公路—I 级。

4.2 光缆铺设

该文旨在探求基于 BOTDA 在大体积混凝土温度测试中的可行性和可靠性,不侧重对大体积混凝土温度的全面测试。故仅在 11[#] 主墩承台中选取典型的断面布置光缆,见图 2(a),断面内光缆的位置及米标见图 2(b)。测温光缆总长 58 m,0~1.0 m 及 57.4~58 m 在承台外。光缆布设时用扎带沿钢筋绑扎,并将光缆布设于不易被破坏的位置。该种铺设方式有利于光缆的定位,同时能较好地保护光缆,避免施工损坏。承台浇筑完成后,在光缆两端分别连接 FC/APC 跳线,将其保护于接线盒,并修建保护室避免施工破坏。



(a) 测温光缆承台内布置立体图



(b) ABCD 大样图

图 2 承台内测温光缆布置示意图(单位:m)

4.3 测试成果分析及讨论

4.3.1 光缆测试结果

赫章特大桥 11[#] 主墩承台大体积混凝土从 2011

年 2 月 14 日至 2011 年 2 月 17 日连续浇筑 3 d。根据研究目的、大体积混凝土浇筑后温度变化特征、现场测试条件,从 2011 年 2 月 18 日至 2011 年 2 月 21 日连续测试 4 d,温度测试成果见图 3,其横轴表示光缆的位置,沿光缆每隔 5 cm 采集对应点的温度值,对照图 2 可知在承台中的位置,纵轴表示对应位置光缆测试温度值。为研究大体积混凝土内长时间的温度变化,在现场条件允许的情况下,于 2011 年 7 月 19 日、2011 年 11 月 15 日、2011 年 12 月 27 日进行测试,测试成果亦示于图 3 中。

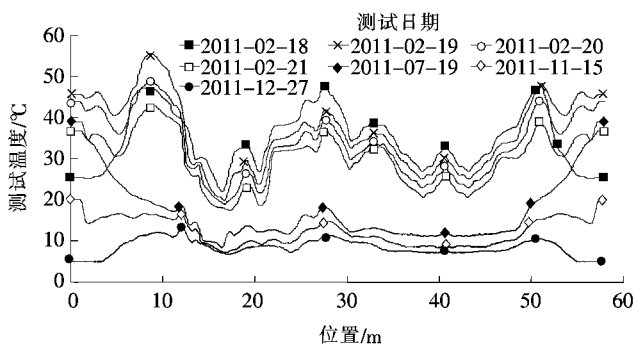


图 3 历次测试位置—温度关系总图

4.3.2 光缆测温结果分析

根据历次测温数据(图 3)及光缆的埋设情况对比分析可知:

(1) 承台内 1.0~6.8 m 与 57.4~51.6 m 光缆埋设位置相同、34.6~40.7 m 与 46.8~40.7 m 光缆以 40.7 m 为中心对称布置、22.1~48.4 m 位置相同,各相同点位历次测试温度值基本吻合,局部位温度存在差异,最大差值为 0.2℃。这说明光缆测试混凝土温度稳定、可靠。

(2) 承台外 0~1.0 m、57.4~58.0 m 光缆各点位测试的是承台外光缆所在环境的温度。各点位同一次

测试温度值相同,在图 3 中该段光缆测试温度为平直线。传感光纤及温度计测试环境温度情况见表 1。

表 1 传感光纤及温度计实测环境温度对照

测试时间	环境温度/℃	
	光缆测试	温度计测试
2011-02-18	25.44	25.50
2011-02-19	45.65	45.62
2011-02-20	43.86	43.79
2011-02-21	36.83	36.81
2011-07-19	39.00	38.98
2011-11-15	20.00	20.07
2011-12-27	5.00	5.08

2011 年 2 月 18 日至 21 日,承台顶蓄水,光缆放置其中,环境温度并不是指气温,而是测温光缆周边的环境温度。从表 1 可知:温度计测试的环境温度与光缆测试的环境温度值在同一次基本吻合,最大差值为 0.08℃。验证了光缆测温的准确性。

4.3.3 点式温度传感器测温对比

为进一步验证 BOTDA 分布式光纤技术测试大体积混凝土温度的准确性及可靠性,分别在测温光缆 12.8、16.0、27.4、29.0、40.7、57.4 m 处埋设点式温度传感器 CD1、CD2、CD3、CD4、CD5、CD6,见图 3。温度传感器采用半导体类电压型 JMT-36B 温度传感器。在设计位置布置完传感器后,利用读数仪测试并计算各状态下各测点的温度值。各测点处光缆及传感器历次测试温度值对比见表 2。根据测试结果可知:不同测试时间,各温度传感器测试温度与传感光纤在该处测试的温度值基本吻合,最大差值仅为 0.23℃。进而验证了光缆测温的准确性。点式温度传感器仅能测试布置位置的温度值,而分布式光纤能实现光纤每个位置的温度测试,便于全面掌握大体积混凝土内的温度。

表 2 传感光纤及温度传感器实测混凝土内温度对照表

测试时间	不同光缆位置(m)的测试温度/℃											
	12.8		16.0		27.4		29.0		40.7		57.4	
	光缆	CD1	光缆	CD2	光缆	CD3	光缆	CD4	光缆	CD5	光缆	CD6
2011-02-18	36.89	36.83	23.10	23.20	47.53	47.30	43.33	43.19	33.39	33.43	25.43	25.40
2011-02-19	30.51	30.66	20.65	20.51	40.90	40.80	38.62	38.60	30.54	30.60	45.64	45.71
2011-02-20	27.99	27.92	19.85	20.00	38.96	39.13	36.03	36.00	28.34	28.33	43.82	43.88
2011-02-21	26.99	27.04	18.11	18.02	36.87	37.02	33.46	33.42	26.11	26.17	36.82	36.81
2011-07-19	14.22	14.15	9.13	9.22	17.78	17.96	15.14	15.16	11.96	12.08	38.99	39.03

续表 2

测试时间	不同光缆位置(m)的测试温度/℃											
	12.8		16.0		27.4		29.0		40.7		57.4	
	光缆	CD1	光缆	CD2	光缆	CD3	光缆	CD4	光缆	CD5	光缆	CD6
2011-11-15	13.45	13.30	7.81	7.70	14.31	14.40	13.62	13.71	8.80	8.91	19.95	19.90
2011-12-27	10.65	10.45	7.38	7.40	10.88	11.02	10.83	10.80	7.87	7.87	5.01	5.00

5 结论

以贵州省赫章特大桥 11# 主墩承台大体积混凝土内温度测试为实例,研究基于布里渊光时域分析(BOTDA)的分布式光纤传感技术在大体积混凝土温度测试方面应用的准确性及可靠性,得到以下主要结论:

(1) 分布式光纤传感技术用于大体积混凝土温度测试时,各相同点位历次测试温度值基本吻合,局部位置温度存在差异,最大差值为 0.2℃。分布式光纤传感技术与传统的温度计对环境温度测试结果相比较,其测试值基本吻合,最大差值为 0.08℃。

(2) 分布式光纤传感技术与传统的温度传感器对混凝土的温度测试结果相比较,其测值基本吻合,最大差值仅为 0.23℃。

(3) 基于布里渊光时域分析的分布式光纤传感技术完全可对大体积混凝土的温度实现分布式精确测试,温度测量精度为 0.3℃,符合客观实际及仪器性能指标,成果可靠、准确。分布式光纤温度测试对全面掌握大体积混凝土内的温度及其变化过程,建立实时三维温度场;进而控制大体积混凝土内、外的温度差,为防止裂缝的产生及结构破坏等提供了先进可靠的测试技术。

参考文献:

[1] Hotate K. Recent Progress in Brillouin Based Fiber Sensor Technology Correlation Based Continuous Wave Technique[J].J OFS, 2002, 15(1): 297-300.
[2] Hotate K, Ong S S L. Distributed Dynamic Strain Meas-

urement Using Correlation Based Brillouin Sensing System[J].IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(2): 272-274.
[3] Fabien R, Bao X, Li Y, et al. Signal Processing Technique for Distributed Brillouin Sensing at Centimeter Spatial Resolution[J].J Lightwave Technol, 2007, 25(11): 3 610-3 618.
[4] Jeffrey S, Li Y, Fabien R, et al. Stabilization of Electro-Optic Modulator Bias Voltage Drift Using a Lock-in Amplifier and a Proportional Integral Derivative Controller in a Distributed Brillouin Sensor System[J].Appl Opt, 2007, 46(9): 1 482-1 485.
[5] Zhang Z, Liang C, Bao X, et al. Partial Bit Delay Correlative Modulation Used to Improve the Dispersion Tolerance of an Optical Duobinary System[J].Opt Express, 2008, 16(15): 11 344-11 353.
[6] 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(3).
[7] 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(增 2).
[8] 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(5).
[9] 胡惠国.BOTDA 分布式光纤应变传感器的布设工艺试验研究[D].东南大学硕士学位论文,2007.
[10] 霍凯成,史凤香.巴东长江大桥承台大体积混凝土温度控制[J].岩土力学,2002(增刊).
[11] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
[12] 江俊波,肖向荣.斜拉桥索塔下横梁大体积混凝土降温效应研究[J].中外公路,2016(3).