

# 混凝土内部应变分布式光纤实时检测方法及其试验研究

金伟良, 毛江鸿, 何 勇

(浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058)

**摘要:**布里渊散射光时域分析技术(BOTDA)是一种新型光电监测技术,可对沿光纤轴向的应变、温度进行分布式监测,并具有长距离、分布式、高精度和耐久性等特点,适用于结构的健康监测。系统介绍了基于BOTDA的混凝土内部分布式应变的检测方法,并通过试验研究标定了由气吹再灌浆技术铺设的埋入式传感光纤的工作性能,解决了工程应用中无法将长距离分布式传感光纤埋入混凝土内部的技术难题。试验结果表明,以气吹再灌浆技术铺设的埋入式光纤传感器能有效检测混凝土内部分布式应变,可应用于结构物的全面、长期、稳定、实时的健康监测。

**关键词:**健康监测;应变检测;分布式光纤传感器;埋入式光纤;BOTDA

**中图分类号:**TU317.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)01-0001-06

## Experimental Analysis on Real-time Distributed Strain Measurement in Concrete

JIN Wei-liang, MAO Jiang-hong, HE Yong

(Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

**Abstract:** The Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) is a newly developed technique adopted to measure and monitor the strain and temperature generated along optical fibers. The BOTDA has the characteristics of distributed measurement, long distance, high precision and durability, so it is suitable to structural health monitoring. Then a new optical fiber sensor embedded method based on air-blowing and vacuum grouting is introduced. It can lay the long distance distributed optical fiber into the concrete easily in short time. An experiment has been set up to study the validity of the new method, which shows that the embedded optical fiber can measure the concrete strain accurately, and it can realize the comprehensive, long-term, stable and real-time health monitoring to the civil structure.

**Key words:** health monitoring; strain measurement; distributed optical fiber sensors; embedded optical fiber; BOTDA

工程结构的健康监测与诊断越来越受到社会各界的广泛重视,对灾害的提前预警或灾害发生后结构物的损伤程度及其剩余寿命的评估已成为当前各国学者们研究的热点<sup>[1]</sup>。工程结构特别是大型结构具有损伤位置不确定的特点,同时所处环境条件复

杂,传统监测手段如电阻应变片、钢弦应变计难以实现结构物全面、长期应变监测。光纤传感器具有良好的电绝缘性和化学稳定性,其中分布式光纤传感技术还具有分布式、长距离、高精度、实时性等特点,非常适用于大型结构的健康监测。但如何保证脆弱

收稿日期:2010-04-25

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05026-002);浙江省教育厅科研项目(Y200908617)

作者简介:金伟良(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事为混凝土耐久性及结构可靠度研究,(E-mail) jinwl@zju.edu.cn。

何勇(通讯作者),男,博士,主要从事结构监测及结构可靠度研究,(E-mail) heyong\_ise@zju.edu.cn

的光纤在粗放性混凝土施工过程中的存活率是传感光纤应用于实际工程中首先要解决的关键问题。

分布式光纤传感技术的光纤铺设长度往往达数公里,目前国内外学者在试验研究及工程应用中主要通过表面粘贴的方式布设传感光纤。施斌<sup>[2]</sup>将分布式传感光纤粘贴在隧道二衬混凝土表面对其进行健康诊断,葛捷<sup>[3]</sup>在堤坝表面铺设传感光纤以监测海堤沉降,Matta<sup>[4]</sup>将传感光纤粘贴在钢结构表面以监测钢桥应变。然而结构在碳化、冻融破坏、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀等作用下,往往出现表层混凝土脱落等现象<sup>[5]</sup>,传感光纤也容易受到外界环境如机械车辆、设备安装的损坏。将传感光纤埋入环境相对稳定的混凝土内部,不仅可以获得更加详细的结构应变场,更是保证了结构应变检测的长期稳定性。Zhou<sup>[6]</sup>将传感光纤加工成复合筋的形式埋入钢筋混凝土梁内部并对其进行了试验研究,Wan<sup>[7]</sup>等人通过预制构件的方式将分布式传感光纤埋设至混凝土内部以监测裂缝的开展过程,但上述方法仍不适用于混凝土内部的长距离传感光纤铺设。浙江大学结构工程研究所利用气吹再灌浆技术将长为 5.0 km 的分布式传感光纤成功埋入某在建高速公路隧道二衬混凝土内部<sup>[8]</sup>,并通过理论研究分析了由该工艺得到的埋入式光纤传感器的应变传递的有效性<sup>[9]</sup>。

介绍了基于 BOTDA 的混凝土内部应变检测方法,并通过试验研究标定了由气吹再灌浆技术铺设的埋入式光纤传感器的工作性能。试验结果表明,以气吹再灌浆技术铺设的埋入式光纤传感器能有效检测混凝土内部应变,可应用于结构物的健康监测。

## 1 埋入式光纤应变检测方法

### 1.1 BOTDA 技术

BOTDA 技术从光纤的两端分别注入脉冲光信号和连续光信号,当脉冲光与连续光的频率差与光纤中某个区间的布里渊频移相等时,该区域就会发生受激布里渊放大效应,两束光之间发生能量转移<sup>[10]</sup>。光纤的布里渊频移量与光纤应变、温度之间分别存在线性关系,应变变化值、温度变化值与布里渊频率漂移量之间的关系如式(1)所示<sup>[11]</sup>:

$$v_B(\epsilon, T) - \frac{dv_B(T)}{dT}(T - T_0) = v_B(0) + \frac{dv_B(\epsilon)}{d\epsilon}\epsilon \quad (1)$$

式中,  $v_B(0)$  为初始应变、初始温度时布里渊频率漂移量;  $v_B(\epsilon, T)$  为在应变  $\epsilon$ 、温度  $T$  时布里渊频率漂移量;  $dv_B(T)/dT$  为温度比例系数;  $dv_B(\epsilon)/d\epsilon$  为

应变比例系数;  $T - T_0$  为光纤温度变化值;  $\epsilon$  为光纤应变变化值。

由某一点返回的布里渊散射光到 BOTDA 脉冲光发射端的距离  $Z$  可用下式计算,

$$Z = \frac{c \cdot T}{2n} \quad (2)$$

式中,  $c$  为真空中的光速;  $n$  为光纤的折射率;  $T$  为发出脉冲光至接收到散射光的时间间隔。由式(1)和(2)可求得光纤长度方向各位置的应变及温度信息。

### 1.2 气吹—灌浆技术

混凝土浇筑属于粗放性施工,直接将分布式传感光纤铺设到混凝土内部难以保证传感光纤的成活率,气吹再灌浆技术能有效的解决上述问题,可将长距离分布式传感光纤无损、快速的埋入混凝土内部,实现长距离传感光纤的无损、快速、精确的铺设。

该技术首先在主体施工过程中将硬度较大的微管依据光纤监测网络埋入混凝土内部,等主体施工结束后将各微管连接成整体。再通过光纤气吹技术将分布式传感光纤敷设到预埋微管内部,传感光纤在高压气体的作用下沿着微管向前移动,1 次性直线气吹长度可以达到 500 m。将分布式传感光纤敷设到微管内部后,使用真空辅助灌浆技术将特殊设计配合比的灌浆料灌入微管,待灌浆料硬化后传感光纤就紧密固定在微管中,形成完整的同混凝土协调工作的埋入式光纤传感器,如图 1 所示。

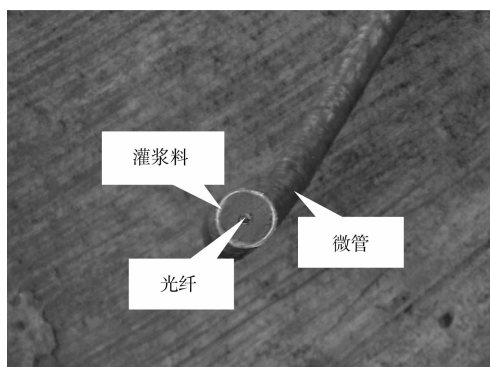


图 1 埋入式光纤传感器实景图

由图 1 可以看出,采用气吹再灌浆技术铺设的光纤传感器具有很好的密实性,传感光纤、水泥净浆填充层、微管之间粘贴紧密。

由 BOTDA 工作原理可知,光纤布里渊频移量与应变和温度共同相关,因此需设置温度补偿光纤消除温度影响。工程应用时可在应变光纤传感器相近位置的埋设微管,采用气吹技术在其内部布设传感光纤但不进行灌浆密实,该温度补偿光纤将不受结构变形影响,可方便地实现温度补偿。

### 1.3 应变传递机理

一般的分布式光纤传感器由传感纤芯、包层、涂覆层组成,纤芯与结构基体之间通过剪力传递应变<sup>[12]</sup>,各传递层之间的弹性模量的差异造成纤芯感应的应变与混凝土真实应变存在差异。文献[9]将埋入式光纤传感器分为纤芯包层、光纤涂覆层、灌

$$k^2 = \frac{2}{r_g^2 E_g \sum_{n=1}^n \frac{1}{G_i} \left[ \left( 1 + \sum_{i=2}^n \frac{r_{i-1}^n - r_{i-2}^n}{r_g^2} \right) \ln \left( \frac{r_i}{r_{i-1}} \right) + \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{2r_g^2} \frac{E_i}{E_g} \right]} \quad (4)$$

式中,  $\epsilon_g(x)$  为纤芯应变,  $\epsilon_m$  为基体应变,  $E_i$  为各中间层弹性模量,  $G_i$  为各中间层剪切模量,  $r_i$  为各中间层半径。

目前 BOTDA 技术的最小空间分辨率为 0.5, 空间分辨率可依据结构物的监测范围大小进行调整。对于室内试验,为获取较高测量精度设置空间分辨率为 0.5;而在实际工程应用中,铺设的传感光纤长度往往达到几公里甚至几十公里,为在合理的监测时间内获取足够精度的应变数据设置空间分辨率为 1.0 或者更大,因此有必要分析设置的空间分辨率内传感光纤应变传递的有效性。

表 1 材料参数表

位置	参数		
	半径	弹性模量/GPa	泊松比
纤芯包层	62.5 $\mu\text{m}$	72	0.16
涂覆层	125 $\mu\text{m}$	3	0.35
砂浆层	6 mm	18	0.25
微管	8 mm	69	0.3

一般认为当应变传递系数  $\epsilon_g/\epsilon_m > 0.9$  时,纤芯能表征混凝土应变,定义该段传感光纤为有效光纤。根据表 1、式(3)及式(4)绘制了有效光纤占光纤传感器全长的比例同光纤传感器长度之间的关系图。

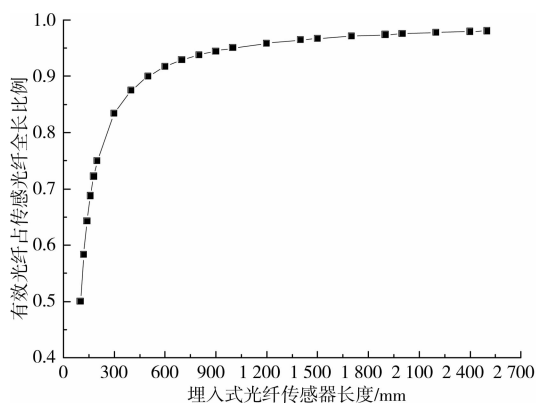


图 2 应变传递系数沿长度变化图

从图 2 可知,随着光纤传感器长度的增加,有效

浆料填充层及微管护套层共 4 个中间层组成的多界面应变传递模型,推导得到埋入式光纤传感器的应变传递公式:

$$\epsilon_g(x) = \epsilon_m \left( 1 - \frac{\cos h(kx)}{\cos h(kL)} \right) \quad (3)$$

光纤长度越来越接近光纤传感器全长,而埋入式传感光纤以全面粘结的形式铺设在混凝土内部,因此,更能有效的传递混凝土的应变。但是,不同紧套光纤的包层、涂覆层及微管的弹性模量差异均会引起应变传递系数的不同,因此,为实现结构应变的准确测量,需通过试验研究准确的将纤芯应变映射到结构基体中。

## 2 试验研究

### 2.1 试验设计

设计的钢筋混凝土梁为 2 600 mm  $\times$  150 mm  $\times$  300 mm,混凝土强度为 C30,配置两根直径 16 mm 的 HRB335 受拉主筋。由于气吹再灌浆技术要求传感光纤具有一定的硬度,通过在 900  $\mu\text{m}$  紧套光纤的基础上外加护套层加工成的 3 mm 紧套光纤作为传感光纤。同时,为使预埋微管不对结构物的力学性能产生影响,选用小直径、高硬度微管,试验采用直径 16 mm 的铝塑复合管作为预埋微管,其中第 1 排受拉微管距离梁底 25 cm,受压微管距离梁顶 25 cm,具体布置位置及编号如表 2 所示。

表 2 传感光纤位置信息表

传感光纤标号	埋设位置	光纤类型
F <sub>T-1</sub>	受拉钢筋表面	900 $\mu\text{m}$ 紧套光纤
F <sub>T-2</sub>	受拉钢筋表面	3 mm 紧套光纤
F <sub>T-3</sub>	受拉微管内部	3 mm 紧套光纤
F <sub>C-1</sub>	受压微管内部	3 mm 紧套光纤
F <sub>C-2</sub>	受压微管内部	3 mm 紧套光纤

3 mm 紧套光纤应变传递性能决定了埋入式传感光纤的应变感应能力,900  $\mu\text{m}$  紧套光纤为广泛应用的紧套光纤,将其用环氧树脂粘贴在受拉钢筋表面作为对比光纤。3 mm 紧套光纤通过夹具施加预拉力后将其定位在微管中间,再利用灌浆技术将特殊设计的灌浆料<sup>[13]</sup>灌入微管内部以固定传感光纤。由式(1)可知,布里渊频率漂移量同时和应变、温度存在线性关系,因此设置长度为 150 m 的自由光纤

作为温度补偿光纤。另外,分别在试验梁受拉钢筋、梁底混凝土、梁顶混凝土以及各微管对应位置的梁侧混凝土的跨中截面共布置 6 只电阻应变片,跨中截面左右 0.5 m 均属于纯弯曲段,可保证分布式光

纤传感器 0.5 m 空间分辨率内为均匀应变段,从而实现光纤应变和电阻应变的准确对比分析。各传感元件布置如图 3 所示。

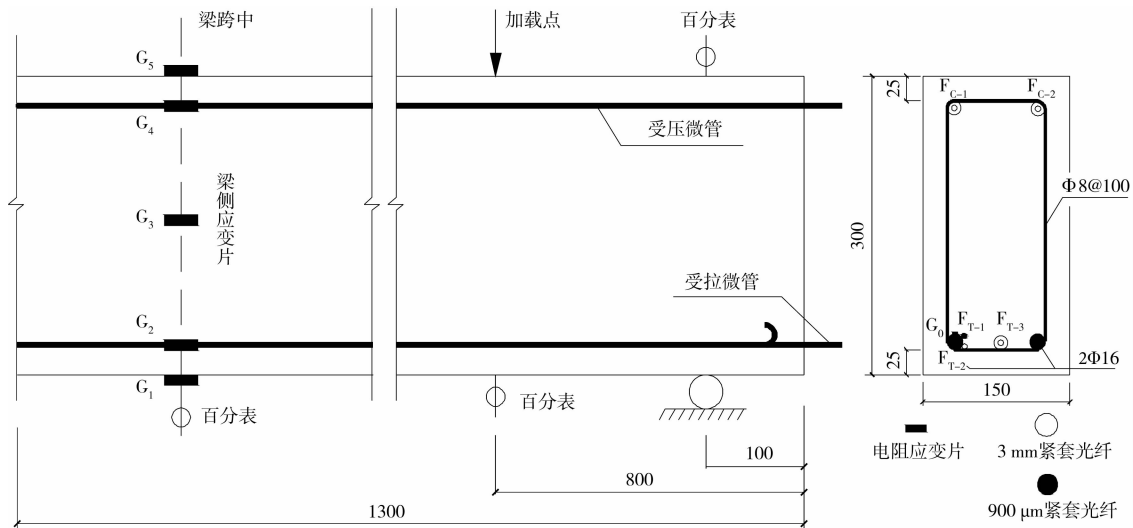


图 3 传感元件粘贴示意图

## 2.2 试验方法

试验中采用的主要仪器设备为:

- 1) 挠度测量采用量程为 12.7 mm 的电子百分表,分辨率为 0.001 mm;
- 2) 电阻应变片数据采集系统为 TS3860 型静态电阻应变仪;
- 3) 加载设备采用 JKF-10 型液压千斤顶;
- 4) 压力传感器采用 GGD-6 型负荷传感器;
- 5) 裂缝观测采用 SW-LW-101 型裂缝观测仪,最小分辨率为 0.04 mm;

6) 光纤应变数据获取采用 Omnisens 公司的 DITEST STA-R 型 BOTDA,该仪器的最小空间分辨率为 0.5 m,应变测量误差为  $\pm 20 \mu\epsilon$ 。钢筋混凝土梁纯弯段长度为 1.0 m,设置空间分辨率为 0.5 m,采样点间隔为 0.1 m。紧套光纤采用标准的 ITU-G652 纤芯,该纤芯布里渊频移量和光纤应变之间的比例关系为 505.5 MHz/%。

根据《混凝土结构试验方法标准》<sup>[14]</sup>,对该梁进行了 2 点加载弯曲试验,共分为 12 个荷载等级,每个加载等级持荷 10 min 以上。正式加载之前,按照计算极限荷载的 10% 对试验梁进行预载,检查仪器设备是否正常工作。正式加载时,每个荷载等级下由 BOTDA 连续测试 3 次应变数据作为该荷载等级下的光纤应变,并用裂缝观测仪观察裂缝位置及宽度,试验布置如图 4 所示。

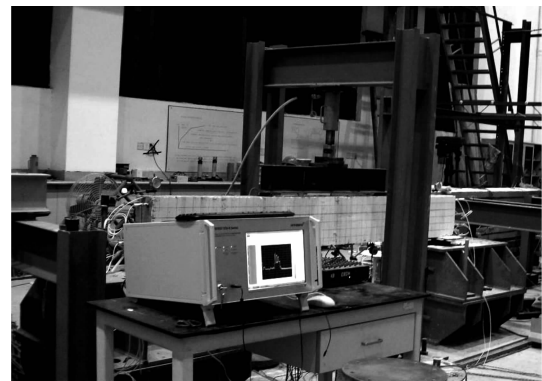


图 4 试验布置图

## 2.3 结果分析

将各传感光纤通过 FSM-50S 型光纤熔接机连接成回路后进行加载试验,每个荷载等级下使用 BOTDA 连续实时采集应变数据,测试曲线如图 5 所示:

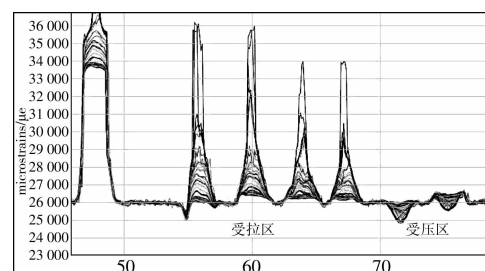


图 5 BOTDA 应变测试图

上图中受拉区多于 3 个是因为该梁在混凝土表面铺设了传感光纤,但不作为该文分析对象。由图 5 可知,整个加载全过程中荷载-应变曲线变化明显,各传感光纤均能够实时的有效感应各荷载等级下的钢筋及混凝土应变。

图 6 为各传感光纤在荷载值为 28 kN、52 kN 及 76 kN 时的荷载-应变曲线。由图 6 可知,随着荷载等级的增加,混凝土的开裂使得钢筋及混凝土个别位置的应变显著增加,因此,纯弯段内布置的传感光纤在相应位置采样点的应变也较周边采样点大。

加载过程中电阻应变片记录的跨中截面混凝土最大压应变为  $-449 \mu\epsilon$ ,钢筋最大拉应变为  $1805 \mu\epsilon$ ,因此加载点至支座之间的混凝土压应变很小,拉应变相对较大,受 BOTDA 空间分辨率及测量误差的综合影响,受拉区传感光纤  $F_{T-1}$ 、 $F_{T-2}$  及  $F_{T-3}$  应变感长度大于受压区传感光纤  $F_{C-1}$  及  $F_{C-2}$ ,与实测结果相符。

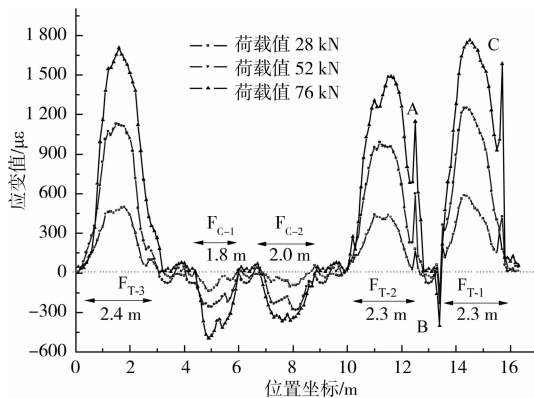


图 6 各传感光纤应变分布

$F_{T-2}$ 、 $F_{T-3}$ 、 $F_{C-1}$  及  $F_{C-2}$  均为 3 mm 紧套光纤,连续铺设在混凝土内部, $F_{T-1}$  为 900  $\mu\text{m}$  紧套光纤,两种传感之间通过熔接连接。由试验结果可知,光纤熔接可造成局部位置(A、B 及 C 点)的光纤应变数据明显失真,因此,数据处理及实际工程应用中需剔除该位置的错误测试结果。

#### 1) 受拉区结果

图 7 是钢筋混凝土梁受拉区传感元件在各荷载等级下的荷载-应变曲线。该梁的计算开裂荷载为 18.9 kN,当加载到 20 kN 时,电阻应变片和各传感光纤的应变数据均发生跳跃,由裂缝观测仪观察到跨中附近出现宽度为 0.02 mm 的微裂缝。随着荷载增加,应变片  $G_1$  在贯穿裂缝的作用下在荷载值为 52 kN 时退出工作,而各传感光纤均能实现全程应变量测。

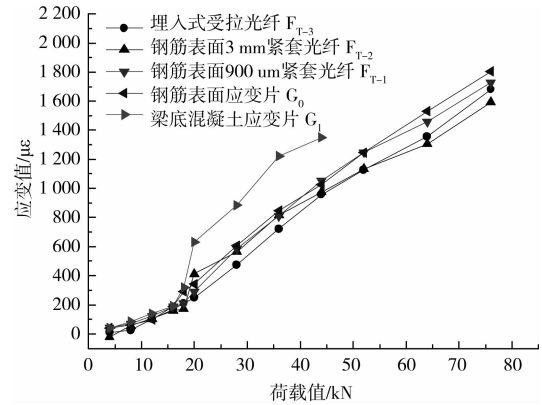


图 7 受拉传感光纤与应变片的应变对比曲线

传感光纤的涂覆层及护套层减弱了纤芯传递基体应变的敏感性,试验结果表明在相同荷载值下,3 mm 紧套光纤  $F_{T-2}$  和  $F_{T-3}$  所测得的应变值均小于 900  $\mu\text{m}$  紧套光纤  $F_{T-1}$ 。同时,由上图可知,无论混凝土开裂前还是开裂后,各传感光纤和钢筋应变片之间都保持较好的相关性。从应变传递性能上分析,传感光纤  $F_{T-1}$  测得的应变值同电阻应变片  $G_0$  最为接近,埋入式传感光纤  $F_{T-3}$  和电阻应变片  $G_0$  同样存在较好的对应关系。由最小二乘法分别拟合开裂前后  $F_{T-3}$  和  $G_0$  的对应关系:

开裂前:

$$y = 1.2512x + 11.511 \quad R^2 = 0.9485 \quad (5)$$

开裂后:

$$y = 1.0156x + 108.27 \quad R^2 = 0.9945 \quad (6)$$

式中  $y$  为电阻应变片  $G_0$  测得的应变, $x$  为埋入式传感光纤  $F_{T-3}$  测得的应变。由式(5)、(6)可知, $F_{T-3}$  和  $G_0$  测得的应变在混凝土开裂后对应的较开裂前好,主要原因是该梁的开裂荷载较小, $G_0$  测得的应变为  $248 \mu\epsilon$ ,BOTDA 的测量误差及光纤护套层的徐变影响测量精度。

#### 2) 受压区结果

图 8 是钢筋混凝土梁受压区传感元件在各荷载等级下的荷载-应变曲线。由图 8 可知,同一高度的两根埋入式传感光纤  $F_{C-1}$  和  $F_{C-2}$  荷载-应变曲线较为一致。当荷载值在 20 kN 之前,混凝土压应变较小、基体材料侧向挤压及测量误差等因素造成传感光纤  $F_{C-1}$  和  $F_{C-2}$  压应变同电阻应变片  $G_4$  测得的压应变相关性较差。

在整个加载过程中,未出现混凝土受压区混凝土压碎,所有传感元件均能全程工作。由图 8 可知,当荷载等级大于 20 kN 时,埋入式传感光纤  $F_{C-1}$  和  $F_{C-2}$  及混凝土应变片之间具有较好的相关性。

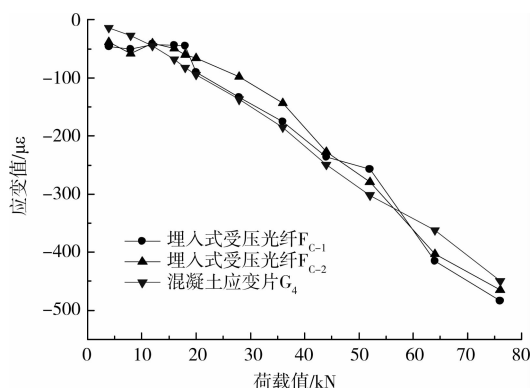


图8 受压传感光纤与应变片的应变对比曲线

由最小二乘法分别拟合整个加载过程及荷载值大于 20 kN 时  $F_{C-1}$  和  $G_0$  的对应关系:

完整加载过程:

$$y = 0.9379x - 17.301 \quad R^2 = 0.9648 \quad (7)$$

荷载值大于 20 kN:

$$y = 0.7939x - 66.963 \quad R^2 = 0.9841 \quad (8)$$

式中,  $y$  为电阻应变片  $G_0$  测得的应变,  $x$  为埋入式传感光纤  $F_{C-1}$  测得的应变。由式(7)、(8)可知, 荷载值较大时,  $F_{C-1}$  和  $G_0$  测得的应变相关性较好。

### 3 结论

介绍了 1 种基于 BOTDA 的混凝土内部应变检测方法, 气吹再灌浆技术可将传感光纤快速、无损、准确地埋入结构物混凝土内部, 解决了无法将长距离分布式传感光纤埋入混凝土内部的技术难题。只需在结构施工过程中预埋微管, 为光纤的气吹—灌浆工序留设通道便可对大型结构及基础设施进行全面、长期、稳定、实时的应变监测。

理论分析表明该类传感光纤能有效的感应结构基体的沿线应变, 钢筋混凝土梁弯曲试验表明, 该应变监测技术具有良好的稳定性及测量精度, 可实现加载全过程中钢筋及混凝土的应变检测。由不同传感光纤、微管材料组成的埋入式光纤传感器的应变传递性能需通过试验进行标定, 因此, 为获取所监测工程结构的准确应变, 应用前需采用工程实际所有传感光纤及微管进行传感器性能试验。

#### 参考文献:

- [1] 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.  
LI HONG-NAN, LI DONG-SHENG. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [J]. Chinese Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3):82-90.
- [2] 施斌, 徐学军, 王镝, 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):2622-2627.  
SHI BIN, XU XUE-JUN, WANG DI, et al. Study on

- BOTDA-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15):2622-2627.
- [3] 葛捷. 分布式布里渊光纤传感技术在海堤沉降监测中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6):1857-1860.  
GE JIE. Application of BOTDR to monitoring sea dyke subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1857-1860.
- [4] FABIO MATTA, FILIPPO BASTIANINI, NESTORE GALATI. Distributed strain measurement in steel bridge with fiber optic sensors: validation through diagnostic load test [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2008, 22(4):264-273.
- [5] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(4):371-402  
JIN WEI-LIANG, ZHAO YU-XI. State-of-the-art on durability of concrete structures [J]. Journal of Zhejiang University, 2002, 36(4):371-402.
- [6] ZHOU ZHI, HE JIAN-PING, YAN KAI, et al. Fiber-reinforced polymer-packaged optical fiber sensors based on brillouin optical time-domain analysis [J]. Optical Engineering, 2008, 47(1): 1-10.
- [7] KAI TAI WAN, CHRISTOPHER K Y LEUNG. Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures[J]. Sensors and Actuators, 2007, 135: 458-464.
- [8] 金伟良. 基于布里渊时域分析技术在公路隧道结构健康监测系统中的研究[R]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [9] 张桂生, 毛江鸿, 何勇, 等. 基于 BOTDA 的隧道变形监测技术研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2009, 56(8):190-192.  
ZHANG GUI-SHENG, MAO JIANG-HONG, HE YONG, et al. Tunnel deformation monitoring method based on BOTDA [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Applied Technique. 2009, 56(8):190-192.
- [10] UCHIYAMA H, SAKAIRI Y, NOZAKI T. An optical fiber strain distribution measurement instrument using the new detection method[J]. ANDO Technical Bulletin, 2002, October:52-60.
- [11] KWON I-B, KIM C-Y, CHOI M. Y. Distributed strain and temperature measurement of a beam using fiber optical BOTDA sensor [J]. Proc SPIE, 2003, 5057:486-496.
- [12] ANSARI, F, YUAN, L. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. J. Engrg. Mech, ASCE, 1998, 124(4):385-394.
- [13] 傅翼, 金伟良, 栗京, 等. 海底管道中长距离微管真空灌浆试验研究[J]. 新型建筑材料, 2005, 10:14-19  
FU YI, JIN WEI-LIANG, SU JING, et al. Experimental study on vacuum grouting for long distance microtubule of submarine pipeline [J]. Chinese Journal of New Building Materials, 2005, 10:14-19.
- [14] GB 50152-92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.