

文章编号 1004-924X(2015)06-1499-09

## 光纤传感器埋入沥青路面基体的应变传递误差

王花平<sup>1</sup>, 周 智<sup>1,2\*</sup>, 王 倩<sup>1</sup>, 刘婉秋<sup>3</sup>, 贾及汉<sup>2</sup>

- (1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;
3. 大连理工大学 交通运输学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**介绍了光纤传感涉及的应变传递理论,基于该理论建立了基体和感知光纤应变的定量关系,以消除应变传递误差,提高测试精度。针对埋入式光纤传感器用于高黏度的柔性沥青路面基体的最普遍形态,建立了含感知光纤、封装层和基体的典型三层力学模型。采用 Goodman 假设描述层间剪应力关系,引入傅里叶级数法求解微分方程,建立了基体和感知光纤的平均应变传递关系。通过室内试验论证了推导的应变传递理论公式的有效性,并对影响平均应变传递效率的几何参数和材料参数进行了灵敏度分析。分析结果表明:光纤粘贴长度越长,光纤和封装层的层间黏结越紧密,平均应变传递系数越大,应变传递效果越好。本文的研究可广泛用于埋入式光纤传感器的应变传递误差修正及封装设计。

**关键词:**埋入式光纤传感器;光纤感知应变;应变传递误差;光纤粘贴长度;光纤封装

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1499

## Strain transfer errors of optical fiber sensors embedded in asphalt pavement

WANG Hua-ping<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>1,2\*</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, LIU Wan-qiu<sup>3</sup>, JIA Ji-han<sup>2</sup>

- (1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
  2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
  3. Department of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)
- \* Corresponding author, E-mail: zhouzhi@dlut.edu.cn

**Abstract:** Strain transfer theory for optical fiber sensing was introduced, and the quantitative relationship of strains between host material and optical fiber was set up to eliminate the strain transfer errors and to improve the testing precision on the basis of the strain transfer theory. A typical three-layered structural model containing a sensing optical fiber, a package layer and a host was established for the application of an optical fiber sensor embedded in asphalt pavement. The Goodman's hypothesis was introduced to describe the relationship of interfacial shear stresses between layers, and the Fourier series was adopted to solve the differential equation and to establish the average strain transfer relationship between host material and optical fiber. The effectiveness of the

**收稿日期:**2015-01-06;**修订日期:**2015-02-06.

**基金项目:**国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2014AA110401);国家科技支撑计划资助项目(No. 2011BAK02B01);大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室科研专题资助项目(No. DUT1LAB03)

formula of strain transfer theory derived by this paper was validated experimentally. Moreover, the sensitivity of related geometrical and physical parameters effecting on the average strain transfer efficiency was discussed. The analytical results indicate that average strain transfer coefficient increases with the growth of sensing length and the interfacial adhesion coefficient between optical fiber and protective layer. The work in this paper could be widely used for the modification of strain transfer errors and the design of embedded optical fiber sensors.

**Key words:** embedded optical fiber sensor; optical fiber sensing strain; strain transfer error; length of fiber adhesion; optical fiber packaging

## 1 引言

伴随着国民需求,超高层、大跨度/体积的土木工程结构迅速在全国范围内开展,这些复杂结构不仅是重要的生命线工程,而且投资巨大,略有疏忽都会影响人们的生活和社会的安定。有效监测这些工程结构的工作状态,尤其是大型基础设施的服役状态可实现对损伤的预警及结构状态评估,减少人员伤亡和经济损失<sup>[1]</sup>,因此,结构健康监测成为了工程结构施工和运营过程中必不可少的步骤。

光纤和光纤器件是监测系统中最基本的感知元件,因具有高灵敏度、耐腐蚀、抗电磁干扰、长期稳定等优点而广泛应用于工程结构健康监测中<sup>[2-3]</sup>。但 SiO<sub>2</sub> 裸光纤的抗剪能力差、易折断,而且土木工程又常为粗放式施工,因此光纤传感器需要封装以抵抗恶劣的服役环境,实现长期稳定的测试。光纤的封装方式要根据基体及具体测试场合来开发,以实现工程结构的有效、准确测量。不管采用何种封装技术,满足测试需求的工程化光纤传感器均含封装层,而封装层会消耗基体的部分变形<sup>[4]</sup>,致使光纤感知的应变通常与实际的结构应变不同。为了消除这种影响传感器测试精度的传递误差,国内外展开了应变传递理论的研究。1991年, Antonio Nanni 等人在特定假设及材料尺寸下给出了埋入式光纤传感器和混凝土之间的应变关系<sup>[5]</sup>。1992年 Y Eugene Pak 等人引入无限大弹性体概念<sup>[6]</sup>,将埋入式光纤传感测试的力学问题简化为平面应变问题,得出了剪应变传递关系,但他们采用的力学模型与实际应用情况有较大出入。1998年, Farhad Ansari<sup>[7]</sup>等人初次引入复合材料应力传递分析<sup>[8]</sup>的思路,并建立了较成体系及具代表性的应变传递理论。此后的研究均在该理论的基础上,结合实际的工程应用

需求来进行。目前,多种关于光纤传感测试模型的应变传递方程已相继问世。Michel LeBlanc 等人<sup>[9]</sup>认为基体结构可替代封装层保护光纤,故采用简化的几何方程建立了只含基体和光纤两层传感测试模型的应变传递关系。周智<sup>[10]</sup>在 Farhad Ansari 研究的基础上分析了 4 层及以上结构模型的应变传递关系,并给出了传感器用于不同基体的应变传递关系式。李宏男<sup>[11-12]</sup>等人在 Michel LeBlanc 的分析上建立了三层及多层结构模型的应变传递关系,并理论分析了倾斜布置传感器的应变传递关系。Shiuh-Chuan Her 等人<sup>[13]</sup>引入中间层受纯剪切的假定,建立了外贴式传感器的 4 层力学模型,并给出了其应变传递公式。陈伟民等人<sup>[14]</sup>推导了外贴式光纤传感器的应变传递关系,并对封装层的最优设计进行了讨论。冯新等人<sup>[15]</sup>理论推导了基体出现裂缝时四层力学模型的应变传递关系。上述研究均基于剪力滞模型理论来描述剪应力关系,即认为中间层只受纯剪切作用,无轴向力作用。吴入军等人<sup>[16-17]</sup>引入多项式描述多层模型界面的剪应力,采用傅里叶级数法近似求解微分方程得到了平均应变传递系数。这些关于光纤传感器的应变传递误差分析均建立在特定假设及边界条件的基础上,假设及边界条件选取的合理性和工程相关性是影响应变传递理论是否适用的直接因素。

目前还没有关于光纤传感器用于沥青路面基体应变传递误差修正的研究报道。本文针对埋入式光纤传感器用于高黏度柔性沥青路面基体的最普遍形态,提取了含感知光纤、封装层和基体的典型三层力学模型,采用在多层介质路面结构中广泛应用的 Goodman 假定来描述层间的黏结应力关系,运用傅里叶级数法求解二阶微分方程变量的比值,建立了基体和感知光纤的应变传递理论关系,最后通过实验论证了其实用性,并对影响应变传递效果的敏感参数进行了探讨。

## 2 埋入式光纤传感器的应变传递模型

传感领域所使用的光纤通常由纤芯、包层和涂覆层组成,共同承受外界荷载作用引起的变形,其接触界面间不发生滑移或剥离(反之,感知光纤会失效)。光纤纤芯与包层的材料皆为 SiO<sub>2</sub>,它们的有效感知层。涂覆层由与光纤组分差异较大的有机高分子材料组成,包裹在光纤外表面起保护作用,但会吸收外界应变,从而带来测量误差。不过相对工程尺度而言,涂覆层的厚度极小(约为 62.5 μm),因此它所带来的测量误差可忽略。这里将光纤视为一层,即感知层,令光纤半径 r<sub>f</sub> 为 125 μm。感知元件(光纤或光纤光栅)经过封装形成具备抵抗外界恶劣服役能力的工程化光纤传感器。依据基体变形传递到感知元件的不同方式,光纤传感器可分为三类:通过界面传递作用的粘贴式传感器,可实现准分布式和分布式测量;通过对感知元件端部进行扩径处理,依靠两个端部扩径块之间距离的变化传递变形,一般做单点或准分布式测量;第三类传感器依靠接触界面和两端部扩径块的传递作用进行准分布式测量。其中,第一类传感器的应用最为普遍。本文以第一类光纤传感器为研究对象,分析其埋入基体的变形作用机理。

封装的光纤传感器埋入基体后形成多层结构,如图 1 所示。传感器所覆盖区域通常为基体的局部测点,因此基体又分为被测基体和周围环绕基体两部分,如图 1(a)所示。周围环绕基体对中心被测基体的影响体现为接触界面剪应力 τ<sub>m</sub> 的作用。提取的埋入式光纤传感器的典型力学模型如图 1(b)所示,由感知光纤、封装层和被测基体 3 层构成。图中, r<sub>f</sub>、r<sub>p</sub> 和 r<sub>m</sub> 分别表示光纤、封装层和被测基体的半径, 2l 为传感器的感知长度。

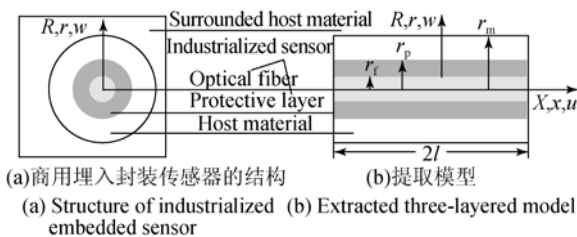


图 1 埋入封装的光纤传感器的基体模型

Fig. 1 Model of host material for packaged optical fiber sensor embedded

## 3 应变传递的理论分析

### 3.1 基体和光纤应变传递关系的理论推导

由光纤传感器的测试原理可知,外界荷载作用传递到感知光纤后引起光纤沿轴向的伸缩,传感器的频移(或波长)会发生改变。换言之,光纤传感器只对沿轴向的变形敏感,因此,典型三层传感测试模型的微元体受力分布如图 2 所示。σ<sub>i</sub>/ε<sub>i</sub> 表示正应力和应变, τ<sub>i</sub> 代表界面之间的剪应力, u<sub>i</sub> 表示沿轴向(即 x 方向)的位移量。角标 i 可取 m, p 和 f, 分别代表基体、封装层和感知光纤。

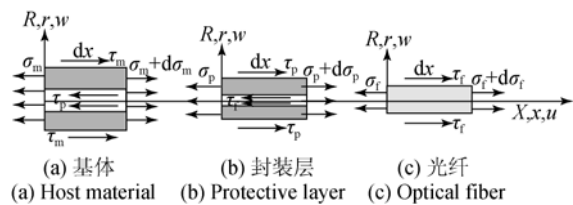


图 2 微元体结构在长为 dx 微段的应力分布

Fig. 2 Strain distribution of micro sections in dx

如图 2(c) 所示,由感知光纤微元体的平衡可得:

$$\tau_f(r_f, x) = -\frac{r_f}{2} \cdot \frac{d\sigma_f(x)}{dx} \quad (1)$$

同理,对被测基体的微元体进行力学分析可得:

$$\frac{r_p}{r_m} \cdot \tau_p(r_p, x) = \tau_m(r_m, x) + \frac{r_m^2 - r_p^2}{2r_m} \cdot \frac{d\sigma_m(x)}{dx} \quad (2)$$

基体和被测基体、被测基体和封装层、封装层和光纤之间存在界面剪应力。目前绝大部分应变传递理论分析使用剪力滞模型,即认为封装层、粘贴层等中间层只承受纯剪切作用,该假设较适合表面粘贴式光纤传感器;而埋入式光纤传感器受周围基体的约束,中间层可能不只承受剪切力。根据 Goodman 模型的物理意义,Goodman 假设被广泛用于描述多层介质路面结构的层间剪应力状态,模型所涉及参数均可由实验测定。这里采用 Goodman 假设<sup>[18]</sup>可得:

$$\begin{cases} \tau_m(r_m, x) = k_m \cdot (u_m^s - u_m) \\ \tau_p(r_p, x) = k_p \cdot (u_m - u_p) \\ \tau_i(r_i, x) = k_i \cdot (u_p - u_i) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $k_m, k_p$  和  $k_i$  为层间黏结系数,  $u_m^s$  为周围基体的位移。当相邻两层之间发生单位位移时, 界面处剪应力即为层间黏结系数  $k_i$ 。当  $k_i \rightarrow 0$ , 层间黏结状态近似于完全光滑; 当  $k_i \rightarrow \infty$ , 层间完全连续; 当  $0 < k_i < \infty$ , 层间处于滑动和连续的结合状态, 且  $k_i$  越大, 层间黏结越紧密。

由于被测基体通常为整个基体结构的一部分, 与周围基体仍然相互接触, 因此当已知基体结构的几何形状、约束和荷载作用形式时, 被测基体和周围基体的位移变量存在固定关系。引入参数  $\alpha$  描述这种联系, 即有  $u_m^s = \alpha \cdot u_m$ , 这里  $u_m^s$  表示周围基体的位移,  $u_m$  为被测基体的位移。当  $\alpha = 1$  时, 被测基体外表面的剪应力  $\tau_m$  为 0, 即周围基体和被测基体之间没有相对位移, 其受力状态是相邻基体发生等效的变形或被测基体独立; 当  $\alpha \neq 1$  时, 周围基体对被测基体有约束作用。

整理式(3)可得:

$$\frac{\tau_p(r_p, x)}{k_p} + \frac{\tau_i(r_i, x)}{k_i} = u_m - u_i \quad (4)$$

将  $\tau_m(r_m, x)$  代入式(2)并应用参数  $\alpha$ , 得到封装层剪应力  $\tau_p$  的表达式为:

$$\tau_p(r_p, x) = \frac{r_m k_m (\alpha - 1)}{r_p} u_m + \frac{r_m^2 - r_p^2}{2 r_p} \frac{d\sigma_m(x)}{dx} \quad (5)$$

将式(1)和式(5)代入式(4), 并求其关于  $x$  的导数可得:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{r_m k_m (\alpha - 1)}{r_p k_p} - 1 \right] \epsilon_m + \frac{E_m (r_m^2 - r_p^2)}{2 r_p k_p} \cdot \\ & \frac{d^2 \epsilon_m(x)}{dx^2} = \frac{E_i r_i}{2 k_i} \cdot \frac{d^2 \epsilon_i(x)}{dx^2} - \epsilon_i \end{aligned} \quad (6)$$

取被测基体和周围基体在接触界面处承受等效变形的情况进行讨论, 即  $\alpha = 1$ , 故式(6)中左边第一项的系数为  $-1$ 。引入常系数  $A_1$  和  $B_1$  替代式(6)中剩余的各常数项, 式(6)可简写为:

$$A_1 \frac{d^2 \epsilon_m(x)}{dx^2} - \epsilon_m = B_1 \frac{d^2 \epsilon_i(x)}{dx^2} - \epsilon_i \quad (7)$$

其中系数  $A_1$  和  $B_1$  的表达式分别为:

$$A_1 = \frac{E_m (r_m^2 - r_p^2)}{2 r_p k_p}; B_1 = \frac{E_i r_i}{2 k_i} \quad (8)$$

采用傅里叶级数法求解该微分方程, 定义基体应变为一个周期  $[-l, l]$  内(即在感知长度  $2l$  区间)的函数, 则有:

$$\epsilon_m(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l} \right] \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l \epsilon_m(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx, n = 0, 1, 2, \dots \\ b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l \epsilon_m(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)代入式(7)并进行积分求和可得:

$$\begin{aligned} B_1 \frac{d^2 \epsilon_i(x)}{dx^2} - \epsilon_i(x) = & - \left[ A_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1 \right] \cdot \\ & \epsilon_m(x) + \frac{a_0}{2} A_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)分解成两个微分方程分别求通解后, 最终采用叠加原理得到通解方程为:

$$\begin{aligned} \epsilon_i(x) = & C_1 \cosh \frac{x}{\sqrt{B_1}} + C_2 \sinh \frac{x}{\sqrt{B_1}} + \\ & \frac{B_1 - A_1}{B_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1} \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 \cdot \frac{a_0}{2} + \frac{A_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1}{B_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1} \cdot \epsilon_m(x) \end{aligned} \quad (12)$$

由光纤两端部自由、不受轴向约束得到边界条件:

$$\epsilon_i(l) = \epsilon_i(-l) = 0 \quad (13)$$

将边界条件代入式(12)解得常系数  $C_1$  和  $C_2$ , 分别为:

$$\begin{aligned} C_1 = & - \frac{\frac{a_0}{2} + \frac{A_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1}{B_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1} (-1)^n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n}{\cosh \frac{l}{\sqrt{B_1}}}, \\ C_2 = & 0 \end{aligned} \quad (14)$$

光纤在对称中心处感知的应变最接近基体的真实应变, 近似有  $\epsilon_i(0) = \epsilon_m(0)$ , 将对应的表达式代入可得:

$$C_1 = - \frac{1 + C}{\cosh \frac{l}{\sqrt{B_1}}} \cdot \frac{a_0}{2} \quad (15)$$

其中:常数  $C$  的表达式为:

$$C = \left\{ \cosh \frac{l}{\sqrt{B_1}} \cdot \frac{(A_1 - B_1)}{\left[ A_1 + \left( \frac{l}{n\pi} \right)^2 \right] (-1)^n} - 1 \right\}^{-1}.$$

由此得到光纤感知应变的方程为:

$$\begin{aligned} \epsilon_f(x) = \frac{a_0}{2} & \left[ 1 - (1 + C) \cdot \frac{\cosh \frac{x}{\sqrt{B_1}}}{\cosh \frac{l}{\sqrt{B_1}}} \right] + \\ & \frac{A_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1}{B_1 \left( \frac{n\pi}{l} \right)^2 + 1} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l} \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

这里光纤感知应变和基体应变在感知长度区间  $[-l, l]$  均随变量  $x$  变化,而实际应用中光纤感知元件测量的是其标距内的平均应变,因此取应变在感知长度内的平均值。定义基体和光纤平均应变之比为平均应变传递系数  $\beta_{av}$ ,用以表征应变传递效果。在区间  $[-l, l]$  分别求式(9)和式(16)关于  $x$  的积分,取两积分的比解得:

$$\beta_{av} = \frac{\int_{-l}^l \epsilon_f(x) dx}{\int_{-l}^l \epsilon_m(x) dx} = 1 - \frac{(1 + C) \sqrt{B_1} \sinh \frac{l}{\sqrt{B_1}}}{l \cosh \frac{l}{\sqrt{B_1}}}, \quad (17)$$

式(17)可修正埋入式传感器的应变传递误差。

### 3.2 比较分析

当前最具代表性的应变传递理论<sup>[7,9-12]</sup>为工程光纤传感器的测试精度提供了有效的修正依据及传感器设计指导,但依然有改进空间。

文献[7]首次建立了较系统的应变传递修正公式,为理论发展奠定了基础。在分析过程中,粘贴长度  $L=40$  mm,保护层半径  $r_p$  不超过 0.6 mm 时,近似有  $(r_p^2 - r_f^2)/L \approx 0$ ,仅适合保护层半径较小的情况,即  $r_p < 1$  mm;理论认为由轴向应变的兼容性可得  $\sigma_m(x) E_m = \sigma_f(x) E_f$ ,这意味着有  $\epsilon_m(x) = \epsilon_f(x)$ ,与  $x \neq 0$  时  $\epsilon_m(x) \neq \epsilon_f(x)$  的结论不一致。该理论中的保护层指光纤涂覆层,是由包层、纤芯组成的复合结构,因此该理论较适合指导裸光纤传感器的应用设计及误差修正。

文献[9]假设了结构弹性模量  $E_m$  远远小于  $E_f$ ,然而若被测结构为混凝土或钢材,其弹性模量

亦可为 30 GPa 或 210 GPa,与光纤的弹性模量 72 GPa 属于同一个量级,不宜被忽略。此外,当测试长度趋于无穷大时,采用光纤应变和结构应变相等的边界条件。因此,该理论适用于指导光纤埋入柔性结构测试的情况。

文献[10]首次提出在感知长度范围内结构的应变为常数,等效于宏观结构中的单点测试,较符合光纤光栅传感器的实际使用特点。同时假定粘贴层、保护层与光纤弹性模量比值可近似忽略,故要求中间层(含保护层和粘贴层)为柔性材料。此外,该理论延续了文献[7]的推理,即由选定的位移关系演化得到应力关系,适用于准分布式光纤测试,但中间层材料与光纤之间的弹性模量比值需控制在可忽略范围内。

文献[11-12]理论同样引入了保护层弹性模量  $E_p$  远远小于  $E_f$  的假设,较适合弹性模量低的保护层材料,其过程延续了 Michel LeBlanc 的思路,即由应力关系推演得到位移关系,但视封装层独立存在。该理论可指导埋入式柔性封装光纤传感器。

与前述应变传递理论相比,本文引入了在层状道路结构领域应用广泛的 Goodman 假设描述层间剪应力,而未对几何尺寸、弹性模量及受力特征有特定要求,使得本文的结论具有更普遍的适用性。采用傅里叶级数法定义被测基体的应变  $\epsilon_m(x)$ ,而没有假设  $\epsilon_m$  在感知长度范围内为定值,更符合光纤传感器的实际情况。与现有理论相比,该理论更适用于分布式光纤传感器的应变传递误差修正;赋予平均应变传递系数  $\beta_{av}$  改进的定义, $\beta_{av}$  等于光纤和基体在被测区域平均应变的比值,为误差修正提供了更精确的参数。

此外,对于以接触界面传递变形的传感器,与保护层的剪切模量相比,层间黏结强度对应变传递效果有更直接的影响。本文应用 Goodman 假设首次建立了平均应变传递系数与层间黏结系数的联系。实际工程应用时,需通过试验确定光纤和保护层、保护层和被测基体之间的层间黏结系数,测量得到光纤、保护层和被测基体半径及粘贴长度,然后将这些材料参数和几何参数及被测基体和光纤的弹性模量等代入式(17),计算出该埋入式光纤传感器的应变传递误差修正系数。将光纤感知应变除以该系数,即可准确获得基体应变。

### 4 实验验证

为检验前述应变传递理论推导的有效性,将柔性沥青胶浆封装的光纤传感器<sup>[19]</sup>埋入沥青混凝土梁基体做论证分析。传感器位于简支梁中心轴下部,测试梁受弯拉区域的拉伸变形,温度补偿光纤自由地放置在埋入沥青混凝土梁的铠装套管内。应用美国 Micro Optics 公司的 BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) 采集光纤感知数据,千分表测试梁中挠度,实验装置如图 3 所示。其中,千分表采集的梁中挠度数据通过材料力学的挠度曲线公式转换为中应变,用作参考。考虑实验时的环境温度较低及作用时间较短,忽略沥青混凝土基体的黏性特征。相关几何及物理参数如表 1 所示。沥青混凝土梁在均布荷载作用下经历了无损、微裂缝发生及扩展等 3 个阶段。

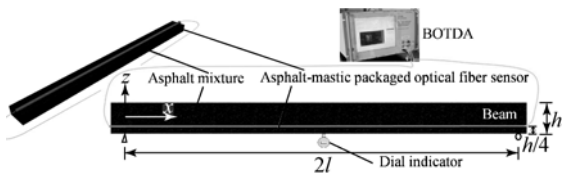


图 3 内置光纤传感器的沥青混凝土梁

Fig. 3 Asphalt-concrete beam embedded with optical fiber sensor

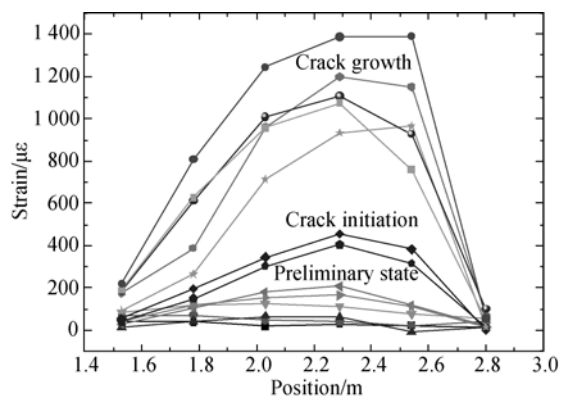
表 1 相关几何参数及物理参数的取值

Tab.1 Values of related geometrical and physical parameters

Content	Lable	Value	Unit
Half of sensing length	$l$	0.4	m
Young's modulus of optical fiber	$E_f$	$7.2 \times 10^{10}$	Pa
Young's modulus of protective layer	$E_m$	$2.2 \times 10^9$	Pa
Radius of optical fiber	$r_f$	$1.25 \times 10^{-4}$	m
Radius of protective layer	$r_p$	$5 \times 10^{-3}$	m
Radius of host material	$r_m$	0.015	m
Interlayer adhesion coefficient	$k_f$	$1 \times 10^9$	Pa/m
Interlayer adhesion coefficient	$k_p$	$1 \times 10^{10}$	Pa/m

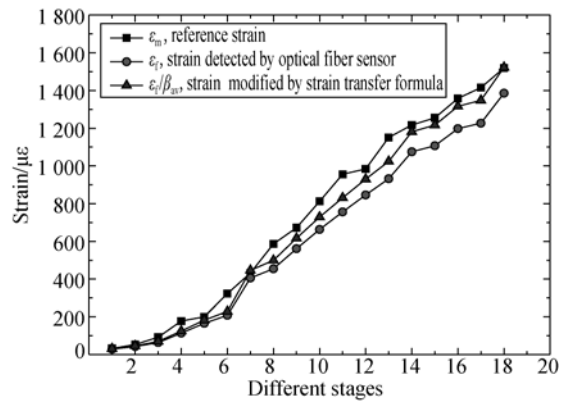
不同阶段光纤传感器测量得到的沿基体跨度

方向、全历程的应变数据如图 4(a) 所示。在梁开裂阶段,截面惯性矩用有效惯性矩替换,梁中心应变仍可通过将千分表所测梁中心挠度代入欧拉伯努利梁理论换算得到。由于所用 BOTDA 的空间分辨率为 0.5 m,需将换算的中心应变在区间  $[l-0.25 \text{ m}, l+0.25 \text{ m}]$  平均化处理。考虑光纤传感器在梁的 1/4 高度处,而千分表在梁底面,将获取的平均应变乘以系数 0.5,由此获取的参考应变与光纤传感器所感知的梁中心处应变具备相同的物理含义。



(a) 光纤传感器感知的梁跨度方向应变

(a) Strain of beam along span direction measured by optical fiber sensor



(b) 梁对称中心处的应变

(b) Central strain of beam

图 4 梁的变形

Fig. 4 Deformation of beam

图 4(b) 为梁对称中心处参考应变  $\epsilon_m$ 、光纤感知应变  $\epsilon_f$  及经应变传递理论修正的应变。由图可知,采用推导的应变传递公式修正光纤感知的应

变后,  $\epsilon_f$  与参考应变  $\epsilon_m$  较接近,能较准确地反映结构的真实应变,平均相对误差由初始的 21.48% 降低为 8.96%。由此可知,本文提出的应变传递关系式能有效地修正传感器的测试精度。

### 5 影响应变传递效果的参数

在埋入式光纤传感器应变传递机理的理论分析及实验论证基础上,以平均应变传递系数  $\beta_{av}$  为评定标准,对影响测试精度的几何参数和物理参数进行灵敏度分析,用以指导传感器的优化设计。对于以接触界面进行应力传递的传感器,层间黏结系数、光纤粘贴长度及封装层厚度等参数均会影响应变传递效果。

#### 5.1 几何参数的影响

当感知长度的一半  $l$  从 0.1 m 起,以 0.02 m 为步长递增到 0.5 m 时,平均应变传递系数  $\beta_{av}$  的变化如图 5 所示。当  $l < 0.15$  m 时,应变传递系数随  $l$  的增长而迅速提升;当  $l \geq 0.25$  m 时,应变传递系数的增涨趋势变缓,平均应变传递系数均达到 91% 以上。因此,在满足测试要求的情况下,应尽可能地增加传感器的感知长度。

封装层半径  $r_p$  从 0.002 5, 0.005, 0.007 5 m 增大到 0.015 m 的过程中,应变传递系数如图 6 所示。当  $l < 0.15$  m 时,平均应变传递系数  $\beta_{av}$  随层厚的增加而小幅度地升高;当  $l \geq 0.15$  m 时,  $\beta_{av}$  不受层厚影响。因此实际应用中,可优先考虑其它几何指标要求。

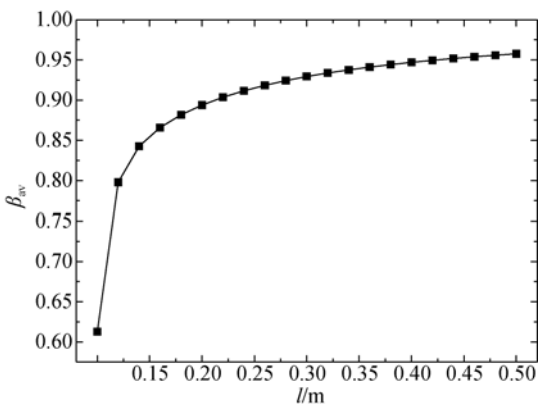


图 5 平均应变传递系数随  $l$  的变化规律

Fig. 5 Variation of average strain transfer coefficient  $\beta_{av}$  with half of sensing length  $l$

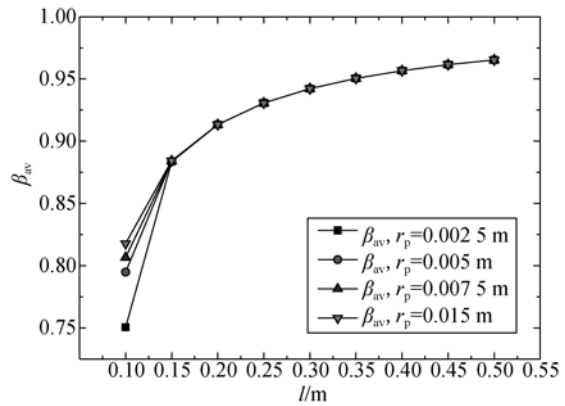


图 6 不同封装层半径下平均应变传递系数的变化规律

Fig. 6 Variation of average strain transfer coefficient  $\beta_{av}$  with different radii of protective layer

#### 5.2 物理参数的影响

感知光纤和封装层界面处的层间黏结系数  $k_f$  从  $1.5 \times 10^9$  Pa/m 增加到  $1.5 \times 10^{11}$  Pa/m 时,平均应变传递系数  $\beta_{av}$  的变化如图 7 所示。应变传递系数随着光纤和封装层层间黏结强度的逐步增强而快速提升,且当  $k_f$  达到  $1.5 \times 10^{11}$  Pa/m 时,  $\beta_{av}$  均在 95% 以上。因此在传感器的工程化设计中,需要保证光纤和封装层界面有足够的层间黏结强度,以较好地传递基体变形。

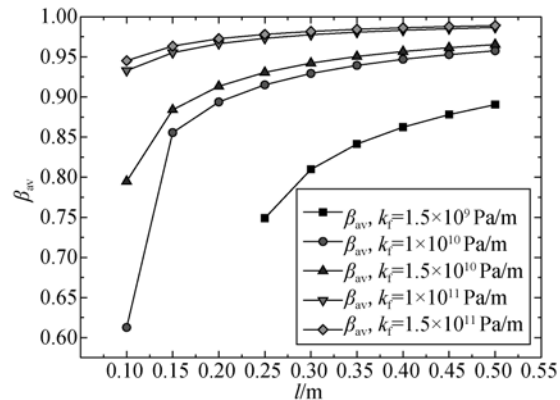


图 7 不同层间黏结系数下平均应变传递系数的变化规律

Fig. 7 Variation of average strain transfer coefficient  $\beta_{av}$  with different adhesion coefficients on interface between fiber and protective layer

封装层和基体界面处的层间黏结系数  $k_p$  从  $1 \times 10^8$  Pa/m 递增至  $1 \times 10^{11}$  Pa/m 时,平均应变传递系数  $\beta_{av}$  如图 8 所示。当  $l < 0.2$  m 时,  $k_p$  的增

加会提升应变传递系数;当  $l \geq 0.2$  m 时,封装层和基体界面间黏结强度的增加对应变传递系数的影响不明显。

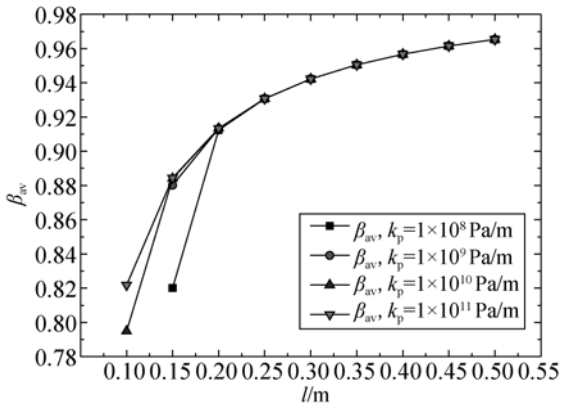


图 8 不同层间黏结系数下平均应变传递系数的变化规律

Fig. 8 Variation of average strain transfer coefficient  $\beta_{av}$  with adhesive coefficients on interface between protective layer and host material

基于现有应变传递理论的传感器设计强调封装层弹性模量的影响而忽视了层间黏结强度的影响。但实际情况是:对于依赖接触界面传递变形的传感器,如不能保证足够的层间黏结强度,即使采用相同模量的封装材料,基体变形依然无法较好地传递到光纤。在本课题组近 20 年的光纤传感器研究中,接触界面出现层间滑移引起传感器

测试失效的现象较普遍,尤其在大变形或服役时间较长的情况下。本文从应变传递理论角度解释了该现象,旨在强调层间黏结强度的重要性,为传感器设计及制作提供参考和指导。综上所述,感知长度越长、层间黏结强度越高,埋入式光纤传感器的测试精度越高。

## 6 结 论

本文针对埋入式光纤传感器应用于沥青路面结构的一般情况,建立了典型的三层结构模型,引入了层状道路结构领域广泛应用的 Goodman 假定描述接触界面处的层间剪应力关系。由于未使用剪力滞模型,对中间层受力状态无特定要求。采用傅里叶级数解法求解了含基体和光纤应变的二元二阶微分方程,推导出了表征其变形传递效果的平均应变传递系数,并通过实验方式论证了该应变传递关系式的有效性。最后,对影响应变传递效果的敏感性几何参数和物理参数进行了讨论。实验结果表明:在满足测试要求及工程化标准的基础上,优先考虑增加光纤的感知长度及增强光纤和封装层之间的层间黏结力,可以获得较好的应变传递效果,提高传感器的测试精度。本文的研究结果适合同类型路面结构监测用光纤传感器的应变传递误差修正及设计指导。

## 参考文献:

- [1] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, *et al.*. Structural control past, present and future[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(9): 897-971.
- [2] MUFTI A. *Guidelines for Structural Health Monitoring; Design Manual No. 2* [M]. Manitoba: I-SIS, 2006.
- [3] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3):306-317.  
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):306-317. (in Chinese)
- [4] LI Q B, LI G, WANG G L, *et al.*. Elasto-plastic bonding of embedded optical fiber sensors in concrete [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(4):471-478.
- [5] NANNI A, YANG C C, PAN K, *et al.*. Fiber-optic sensors for concrete strain/stress measurement [J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(3): 257-264.
- [6] PAK E Y. Longitudinal shear transfer in fiber optic sensors [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1992,1: 57-62.
- [7] ANSARI F, YUAN L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4):385-394.
- [8] CHON T C, SUN T C. Stress distributions along a short fibre in fibre reinforced plastics [J]. *Journal of Materials Science*, 1980, 15(4): 931-938.
- [9] LE BLANC M. *Interaction mechanics of embedded single-ended optical fibre sensors using novel in-situ*

- measurement techniques [D]. Canada: University of Toronto, 1999.
- [10] 周智. 土木工程结构光纤光栅智能传感元件及其监测系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.  
ZHOU ZH. *Optical fiber smart Bragg grating sensors and intelligent monitoring systems of civil infrastructures* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003. (in Chinese)
- [11] LI H N, ZHOU G D, REN L, *et al.*. Strain transfer analysis of embedded fiber Bragg grating sensor under nonaxial stress [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(5):054402-1-8.
- [12] LI H N, ZHOU G D, REN L, *et al.*. Strain transfer coefficient analysis for embedded fiber Bragg grating sensors in different host materials [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135 (12):1343-1353.
- [13] HER C S, HUANG Y C. Experimental measurement of fiber-optic strain sensors [J]. *SPIE*, 2006, 6167: H1-12.
- [14] 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 粘结层弹性模量对光纤 Bragg 光栅传感器应变传递性能的影响分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2941-2946.  
WU J, CHEN W M, ZHANG P, *et al.*. Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2941-2946. (in Chinese)
- [15] FENG X, ZHOU J, SUN C S, *et al.*. Theoretical and experimental investigation into crack detection with BOTDA distributed fiber optic sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139 (12):1797-1807.
- [16] WU R J, ZHENG B L, LIU Z G, *et al.*. Analysis on strain transfer of a pasted FBG strain sensor [J]. *Optik*, 2014, 125(17):4924-4928.
- [17] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 24-30.  
WU R J, ZHEN B L, HE P F, *et al.*. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 24-30. (in Chinese)
- [18] GOODMAN N S, HASSAN Y, HALIM E O H E A. Shear properties as viable measures for characterization of permanent deformation of asphalt concrete mixtures [J]. *Transportation Research Record*, 2002, 1789(17): 154-161.
- [19] WANG H P, ZHOU Z, LIU W Q, *et al.*. Optimization analysis and experimental validation of distributed optical fiber sensors for pavement monitoring based on strain transfer mechanism[C]. *Proceedings of the 6th international Conference on SHMII indexed by Scoups and Compendex, Hong Kong*, 2013, ss07 (6):1-7.

#### 作者简介:



王花平(1985—),女,湖北武汉人,博士研究生,主要从事智能结构健康监测中的力学分析、应变传递误差修正、道路岩土工程结构监测及性能评定的研究。  
E-mail: wanghuaping1128@sina.cn



周智(1973—),男,湖南道县人,教授,博士生导师,1996年,1999年于中南大学分别获得学士、硕士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,2006年在哈尔滨工业大学进行防灾减灾及防护工程博士后研究,主要研究方向为结构监测传感器与物联网,结构损伤探测与健康监测,光纤智能结构等。  
E-mail: zhouzhi@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)