

表面粘贴式塑料光纤与混凝土间应变传递模型及敏感性分析

包腾飞^{1,2}, 李润鸣^{1,3}, 赵津磊⁴

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要:分析不同布设方式下表面粘贴式塑料光纤-混凝土复合体中各相材料间的应变传递关系,建立了表面粘贴式塑料光纤与混凝土间应变传递模型,并通过数值模拟验证模型的正确性,然后对模型中的主要参数进行敏感性分析。结果表明,胶层宽度、总厚度及形状对应变传递效果影响不大,为有利于应变传递,宜选用固化后弹性模量约为 1 GPa 的胶剂,并尽量使塑料光纤靠近混凝土表面粘贴,且粘贴长度大于 300 mm。

关键词:混凝土;塑料光纤;应变传递;结构健康监测;敏感性分析

中图分类号:TV253

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2018)05-0059-06

Modeling and sensitivity analysis of strain transfer between surface-bonded POFs and concrete//BAO Tengfei^{1,2}, LI Jianming^{1,3}, ZHAO Jinlei⁴ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: Strain transfer relationship between surface-bonded plastic optical fibers (POFs) and concrete under different layouts is analyzed, based on which a strain transfer model between surface-bonded POFs and concrete is constructed. Numerical simulation is carried out to verify the correctness of the model and sensitivity analysis of the main parameters in the model is studied. The results show that, the width, thickness and shape of the adhesive layer have little effect on the strain transfer. In favor of the effect of strain transfer, it is suggested that the elastic modulus of the solidified glue is about 1 GPa and the POF is bonded close to the surface of the concrete with the bonding length greater than 300 mm.

Key words: concrete; plastic optical fiber; strain transfer; structural health monitoring; sensitivity analysis

光纤传感器^[1-4]在用于土木水利工程混凝土结构监测时,需与被测混凝土结构通过一定方式结合,结合方式主要分为直接埋入式和表面粘贴式。直接埋入式是在工程的施工期直接将光纤传感器埋入结构内部,可以全面地对施工期及运行期结构内部变形情况进行监测。表面粘贴主要通过专用粘贴材料将光纤传感器粘贴于被监测对象结构表面,可避免粗放施工对其存活率的影响,并可对被监测结构的表面裂缝及贯穿裂缝进行有效的监测。深入研究该布设方式下光纤传感器与被测基体间的应变传递关系是十分必要的。

目前针对表面粘贴式光纤传感器与被测基体间应变传递关系的研究相对较少。周智等^[5]率先对表面粘贴式光纤传感器的应变感知原理进行了研究,其假定光纤涂覆层及胶层为理想矩形,得出了光纤与基体间的应变关系式。魏世明^[6]假定在岩体表面开一理想半圆槽,并将光纤光栅传感器埋设于半圆槽中,研究了此种情况下光纤光栅与基体间的应变关系式。张桂花^[7]研究了不开槽的情况,且不考虑涂覆层的影响时,裸光纤光栅与被测基体间的应变传递关系。

需要指出的是,以上研究的对象均为石英光纤。

近年来,塑料光纤(plastic optical fiber, POF)由于弥补了石英光纤易断裂的不足,具有众多应用优势,在土木水利工程监测领域日益受到关注^[8-14]。但 POF 与石英光纤之间存在较大的差异性,具体表现为:POF 与石英光纤结构尺寸差别较大,目前常用的商业石英光纤纤径为 8.2 μm 左右,而商业 POF 纤径可达 1 mm 以上。POF 与石英光纤材料的弹性模量差别较大,常见商业石英光纤的纤芯弹性模量约为 72 GPa^[15],大于混凝土弹性模量,而商业 POF 纤芯弹性模量仅约 2~4 GPa。

基于以上事实,本文将分析表面粘贴方式下 POF 与混凝土结构之间的应变传递关系,通过数值仿真对模型正确性加以验证,并分析胶体形状对应变传递关系的影响,然后对模型中的主要参数进行敏感性分析,探索有利于应变传递的参数组合。

1 表面粘贴式塑料光纤与混凝土间应变传递模型

实际应用中,POF 与混凝土之间需间隔涂覆层和胶层,以避免 POF 纤芯在使用中损坏。表面粘贴式 POF-胶体-混凝土复合体的横纵剖面如图 1 所示,图中 h 为胶层总厚度, h_u 为 POF 距离胶层顶部的高度, h_d 为 POF 距离胶层底部的高度。

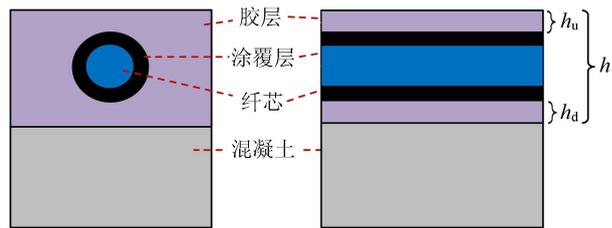


图 1 表面粘贴式 POF-胶层-混凝土多相材料复合体纵、横剖面

在研究 POF 与混凝土间的应变传递关系之前,先做以下两点假定:①假定 POF 纤芯与涂覆层、涂覆层与胶层、胶层与被测基体之间结合情况良好,无相对滑动。②假定涂覆层、胶结层中剪应力呈线性变化。

根据图 1 中 POF-胶体-混凝土复合体纵向剖面的轴对称性,取粘贴长度 ($2L$) 一半中的 dx 长度段进行分析。坐标原点取粘贴段胶层顶部中点位置, x 轴为 POF 轴线方向, y 轴垂直于 POF 轴线方向向下,如图 2 所示,图中下标 f 代表 POF 的纤芯,下标 c 代表 POF 的涂覆层,下标 j 代表胶层,下标 m 代表被测基体(混凝土); $\sigma_f, \sigma_c, \sigma_j$ 分别为纤芯、涂覆层和胶层的轴向应力; $\tau_{cf}, \tau_{jc}, \tau_{jm}$ 分别为纤芯与涂覆层间、涂覆层和胶层间及胶层与混凝土间界面的剪应力。

根据胶、涂覆层和纤芯层轴向 (x 轴) 力的平衡

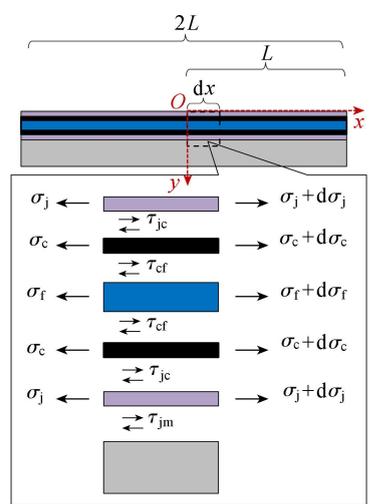


图 2 表面粘贴式 POF-胶层-混凝土多相材料复合体各相材料间的应力分布

关系可得

$$\frac{d\sigma_j}{dx} = \frac{-\tau_{jm}D + 2\tau_{jc}\pi r_c}{Dh - \pi r_c^2} \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_c}{dx} = \frac{2(\tau_{cf}r_f - \tau_{jc}r_c)}{r_c^2 - r_f^2} \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_{cf}}{r_f} \quad (3)$$

式中: D 为胶层宽度; r_f 为 POF 纤芯半径; r_c 为带涂覆层 POF 的半径。

将式(3)代入式(2)得

$$\tau_{jc} = -\frac{1}{r_c} \left[\frac{r_f^2}{2} \frac{d\sigma_f}{dx} + \frac{(r_c^2 - r_f^2)}{2} \frac{d\sigma_c}{dx} \right] \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)得

$$\tau_{jm} = -\frac{\pi r_f^2}{D} \frac{d\sigma_f}{dx} - \pi(r_c^2 - r_f^2) \frac{d\sigma_c}{dx} - \frac{Dh - \pi r_c^2}{D} \frac{d\sigma_j}{dx} \quad (5)$$

由于 POF 纤芯与涂覆层及胶层同步变形,三者的应变梯度接近,即可认为

$$\frac{d\varepsilon_f}{dx} \approx \frac{d\varepsilon_c}{dx} \approx \frac{d\varepsilon_j}{dx} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_f, \varepsilon_c, \varepsilon_j$ 分别为纤芯、涂覆层和胶层的轴向应变。

各层轴向应力与轴向应变的关系为

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_f}{dx} = E_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \\ \frac{d\sigma_c}{dx} = E_c \frac{d\varepsilon_c}{dx} \\ \frac{d\sigma_j}{dx} = E_j \frac{d\varepsilon_j}{dx} \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_f, E_c, E_j 分别为纤芯、涂覆层和胶层的弹性模量。

将式(7)代入式(3)(4)(5),并考虑到 POF 纤

芯与涂覆层及胶层同步变形,三者应变梯度接近,得

$$\tau_{cf} = -\frac{E_f r_f}{2} \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (8)$$

$$\tau_{jc} = -\frac{1}{2r_c} [E_f r_f^2 + E_c(r_c^2 - r_f^2)] \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (9)$$

$$\tau_{jm} = \left[-\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} - \pi(r_c^2 - r_f^2)E_c - \frac{(Dh - \pi r_c^2)E_j}{D} \right] \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (10)$$

首先对基体层分析,根据边界条件可得

$$y = \begin{cases} h + h_m & \tau_m = 0 \\ h & \tau_m = \tau_{mj} \end{cases} \quad (11)$$

式中: h_m 为因POF粘贴产生的混凝土变形的影响深度; τ_m 为混凝土中 y 坐标对应点的剪应力。进一步分析可得

$$\tau_m = -\frac{\tau_{jm}}{h_m} y + \frac{\tau_{jm}}{h_m} (h + h_m) \quad (12)$$

其中 $h \leq y \leq h + h_m$

将式(13)代入式(15)得

$$\tau_m = \left(\frac{h + h_m}{h_m} - \frac{y}{h_m} \right) \left[-\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} - \pi(r_c^2 - r_f^2)E_c - \frac{(Dh - \pi r_c^2)E_j}{D} \right] \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (13)$$

仅考虑轴向变形,则

$$\tau_m = G_m \gamma_m \approx G_m \frac{du}{dy} \quad (14)$$

式中: G_m 为混凝土的剪切模量; γ_m 为基体层剪切应变; u 为轴向位移。

联立式(16)与式(17)并对等式两侧对 y 积分并对 x 求导得

$$\varepsilon_m = \varepsilon_j + \frac{h_m}{2G_m} \left[-\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} - \pi(r_c^2 - r_f^2)E_c - \frac{(Dh - \pi r_c^2)E_j}{D} \right] \frac{d^2 \varepsilon_f}{dx^2} \quad (15)$$

式中: ε_m 为混凝土的轴向应变。在 $h_u + 2r_c \leq y \leq h_u + h_d + 2r_c$ 范围内,根据边界条件

$$y = \begin{cases} h_u + 2r_c & \tau_j = \tau_{jc} \\ y = h_u + h_d + 2r_c & \tau_j = \tau_{jm} \end{cases} \quad (16)$$

得出

$$\tau_j = \frac{\tau_{jm} - \tau_{jc}}{h_d} y + \tau_{jc} - \frac{(\tau_{jm} - \tau_{jc})(h_u + 2r_c)}{h_d} \quad (17)$$

若仅考虑轴向变形,式(17)等式两侧对 y 积分可得

$$G_j(u_j - u_c) = \frac{1}{2} h_d (\tau_{jm} + \tau_{jc}) \quad (18)$$

将式(6)(7)(9)(10)代入式(18),等式两侧对 x 求导得

$$\varepsilon_j = \varepsilon_c - \frac{h_d}{2G_j} \left\{ \frac{\pi r_f^2 E_f}{D} + \pi(r_c^2 - r_f^2)E_c + \frac{(Dh - \pi r_c^2)E_j}{D} + \frac{1}{2r_c} [E_f r_f^2 + E_c(r_c^2 - r_f^2)] \right\} \frac{d^2 \varepsilon_f}{dx^2} \quad (19)$$

下面对涂覆层进行受力分析,在 $h_u + r_c + r_f \leq y \leq h_u + 2r_c$ 范围内,根据边界条件

$$y = \begin{cases} h_u + r_c + r_f & \tau_c = \tau_{cf} \\ h_u + 2r_c & \tau_c = \tau_{jc} \end{cases} \quad (20)$$

得到

$$\tau_c = \frac{\tau_{cf} - \tau_{jc}}{r_f - r_c} y + \tau_{jc} - \frac{(\tau_{cf} - \tau_{jc})(h_u + 2r_c)}{r_f - r_c} \quad (21)$$

仅考虑轴向变形,式(21)等式两侧对 y 积分可得

$$u_c - u_f = \frac{r_c - r_f}{2G_c} (\tau_{cf} + \tau_{jc}) \quad (22)$$

式中: u_c 和 u_f 分别为涂覆层和光纤的位移。将式(6)~(9)代入式(22)并对等式两侧求导得

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f + \frac{r_f - r_c}{2G_c} \left\{ \frac{E_f r_f}{2} + \frac{1}{2r_c} [E_f r_f^2 + E_c(r_c^2 - r_f^2)] \right\} \frac{d^2 \varepsilon_f}{dx^2} \quad (23)$$

根据式(15)(19)(23)可以得出

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f - \frac{1}{K^2} \frac{d^2 \varepsilon_f}{dx^2} \quad (24)$$

其中

$$\frac{1}{K^2} = \frac{h_m}{2G_m} \left[\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} + \pi(r_c^2 - r_f^2)E_c + \frac{(Dh - \pi r_c^2)E_j}{D} \right] + \frac{h - 2r_c}{4G_j} \left\{ \frac{\pi r_f^2 E_f}{D} + \pi(r_c^2 - r_f^2)E_c + \frac{(Dh - \pi r_c^2)E_j}{D} + \frac{1}{2r_c} [E_f r_f^2 + E_c(r_c^2 - r_f^2)] \right\} + \frac{r_c - r_f}{2G_c} \left\{ \frac{E_f r_f}{2} + \frac{1}{2r_c} [E_f r_f^2 + E_c(r_c^2 - r_f^2)] \right\}$$

由式(24)可得POF纤芯应变与被测基体应变之间关系的控制方程为

$$\frac{d^2 \varepsilon_f(x)}{dx^2} - K^2 \varepsilon_f(x) = -K^2 \varepsilon_m \quad (25)$$

由边界条件可以求得POF纤芯应变与基体应变的关系为

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_m \left(1 - \frac{\cosh(Kx)}{\cosh(KL)} \right) \quad (26)$$

因此,POF粘贴段各点应变传递率为

$$\alpha(x) = \frac{\varepsilon_f(x)}{\varepsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(Kx)}{\cosh(KL)} \quad (27)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{\varepsilon_f(x)}}{\varepsilon_m} = \frac{2 \int_0^L \varepsilon_f(x) dx}{2L\varepsilon_m} = 1 - \frac{\sinh(KL)}{KL\cosh(KL)} \quad (28)$$

2 模型数值验证及胶层形状的影响分析

为验证上述理论分析结果的正确性,并探究胶层形状对 POF 与混凝土结构间应变传递的影响,对 POF-胶层-混凝土复合体进行有限元分析,有限元模型如图 3 所示。其中,模型 A 与理论分析中胶体的形状完全一致。模型 B 的胶体与模型 A 中胶体高度、宽度相同,但胶层横截面外侧轮廓为弧形。对比两种模型的横截面可以看出,图 3(b)中胶层横截面小,相同粘贴长度条件下,用胶量较少。因此两种粘贴方式下 POF 与混凝土结构之间的应变传递是否存在差别是值得探究的问题。

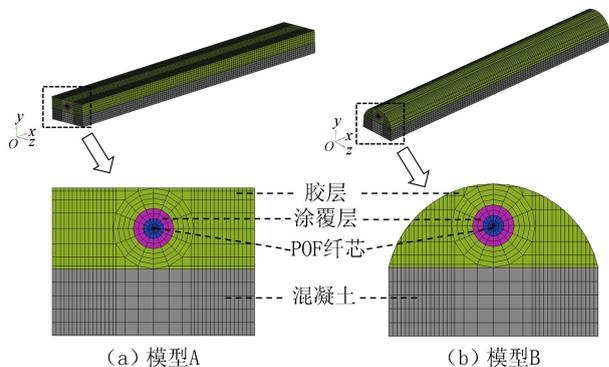


图 3 表面粘贴式 POF-胶层-混凝土多相材料复合体有限元模型

两个有限元模型中,胶体的宽度为 5 mm,高度为 2 mm,胶层中 POF 离胶层顶部和底部的高度为 0.5 mm,轴向长度为 40 mm,POF 各层材料参数参考三菱公司生产的 SH2001-J 型塑料光纤参数取值,POF 纤芯、涂覆层、胶层的弹性模量分别为 4 GPa、140 MPa 和 4 GPa,泊松比分别为 0.4、0.48 和 0.34;纤芯半径和涂覆层厚度均为 0.25 mm。分析中,对混凝土两端分别施加 0.5 MPa 的轴向拉应力,胶层和 POF 各层不受力,POF-胶体-混凝土复合体及纤芯的轴向应变计算结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,粘贴段 POF 中部应变和混凝土应变基本保持一致,而粘贴段两端局部 POF 的应变小于混凝土应变。对比两种模型所得的纤芯轴向应变分布结果可以看出,有限元模型 B 的分析结果中,POF 纤芯与混凝土应变一致的区域比模型 A 的稍大,这说明模型 B 中胶体的形状更有利于 POF 与混凝土间应变的传递。为进一步对比两模型的分析结果,并验证上节理论分析结果的正确性,将两有限

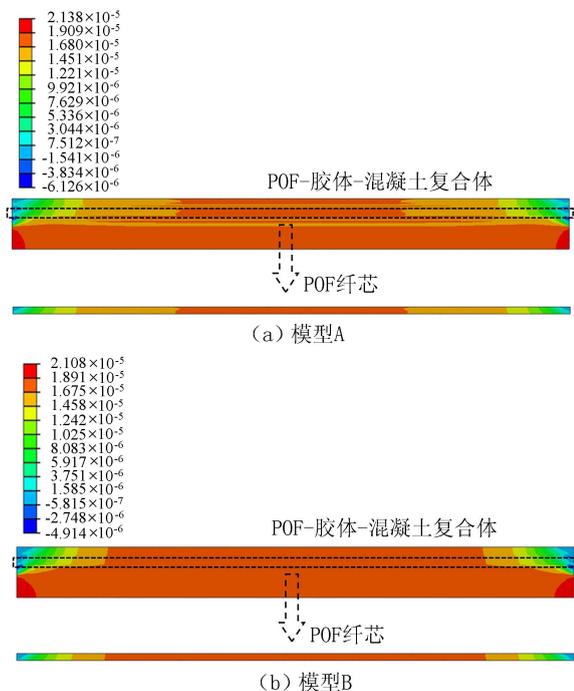


图 4 表面粘贴式 POF-胶层-混凝土多相材料复合体及纤芯轴向应变计算结果

元模型得出的 POF 纤芯轴线各点的应变传递率与式(28)的计算结果绘制于同一图中,如图 5 所示。

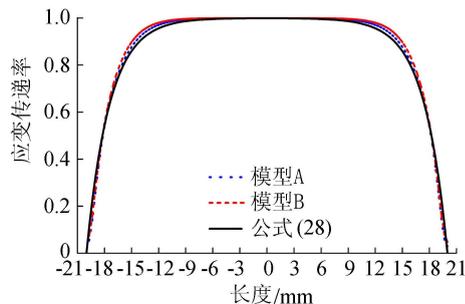


图 5 模型 A、B 以及理论分析所得到的 POF 与混凝土间应变传递率

由图中 3 条曲线可以看出,两种有限元模型和理论分析所得出的结果基本一致,主要差异出现在粘贴段 POF 两端。数值关系为:有限元模型 B 的结果大于有限元模型 A 的结果大于理论分析结果,但总体相差不大。3 条曲线中间大部分区域的应变传递率都接近于 1,这说明混凝土结构的应变可有效传递至 POF 纤芯。因此可用式(28)分析两种表面粘贴方式下 POF 与混凝土结构间的应变传递关系。同时,有限元结果表明,两种粘贴方式对应变传递的影响不大,考虑到采用方式 B 可节省胶剂用量,因此实际应用中宜采用这种粘贴方式。依据式(28)可知,POF 与混凝土间的平均应变传递率可达 0.905,说明若将 POF 粘贴于混凝土表面,能够达到较好的应变传递效果,在进行裂缝监测时,混凝土内部的应变可以有效传递至 POF 纤芯。

3 参数敏感性分析

当POF通过胶剂粘贴于混凝土结构表面时,混凝土结构的应变需通过胶层传递至POF,因此胶层的几何尺寸和材料参数必然对应变的传递有较大影响。在实际应用中可选择不同类型的胶剂,胶剂固化后的弹性模量不同。另外,粘贴时的厚度、宽度、长度都可根据实际情况进行选择。分析上述因素对POF-混凝土间应变传递的影响,有助于实际应用中合理选择胶剂类型和粘贴尺寸。下面将根据式(28),对可能影响POF与混凝土间应变传递的因素进行敏感性分析。

a. 胶层弹性模量对POF-混凝土间应变传递的影响。若胶层宽度为5 mm、高度为2 mm、长度为40 mm,POF位于胶层中间位置,POF与混凝土间的平均应变传递率随胶层弹性模量的变化情况如图6所示。POF与混凝土之间的平均应变传递率随胶层弹性模量的增大而逐渐增加。在弹性模量为10~100 MPa时应变传递率的增长速度较快,当胶层弹性模量为100 MPa以上时,趋势变缓。值得注意的是,当胶层弹性模量增大到1 GPa时,平均应变传递率稍有下降的趋势。可见实际应用中应选用固化后弹性模量为1 GPa左右的胶剂,胶层弹性模量过低或者过高对应变传递都是不利的。

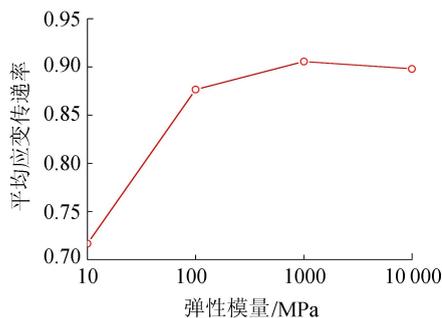


图6 平均应变传递率随胶层弹性模量的变化

b. 平均应变传递率随胶层底部厚度的变化。由理论分析可知,POF与混凝土之间的应变传递率与底部和顶部胶层厚度有关。当胶层宽度为5 mm、长度为40 mm,POF顶部胶层厚度为0.5 mm,底部胶层厚度由0.1 mm变化到2 mm时,平均应变传递率与胶层厚度呈线性递减关系,平均应变传递率随底部胶层厚度的增加而逐渐降低。在底部胶层厚度由0.1 mm增加到2 mm的过程中,平均应变传递率由0.92降低为0.83。底部胶层的厚度对应变传递的影响比较明显。底部胶层厚度越小越有利于POF与混凝土之间应变的传递。因此,实际应用中应尽量使POF靠近混凝土表面粘贴。

c. 平均应变传递率随胶层顶部厚度的变化。

粘贴宽度为5 mm、长度为40 mm、POF底部胶层厚度为0.5 mm时,顶部胶层厚度由0.1 mm变化到2 mm时平均应变传递率随着顶部胶层厚度的增加呈线性递减关系。但在顶部胶层厚度由0.1 mm增加到2 mm的过程中,平均应变传递率仅由0.909下降到0.889,变化范围较小。因此,POF顶部胶层厚度对平均应变传递率的影响不大。胶层厚度对POF与混凝土间应变传递的影响主要体现在底部胶层的厚度。顶部胶层厚度虽有影响,但比底部胶层厚度的影响小得多。因此,实际应用中应尽量使POF靠近混凝土结构表面粘贴,在保证粘贴牢固的前提下,胶层整体厚度越薄越好。

d. 平均应变传递率随胶层宽度的变化。图7为POF粘贴长度为40 mm,底部和顶部胶层厚度均为0.5 mm时,POF与混凝土结构之间平均应变传递率随粘贴宽度变化的情况。平均应变传递率随粘贴宽度的增加稍有下降的趋势,但整体变化范围较小,在粘贴宽度由2 mm增加到11 mm的过程中,平均应变传递率仅从0.907下降到0.904左右。因此,粘贴宽度对应变传递率的影响不大,在保证粘贴牢固的前提下,可适当减小粘贴宽度。

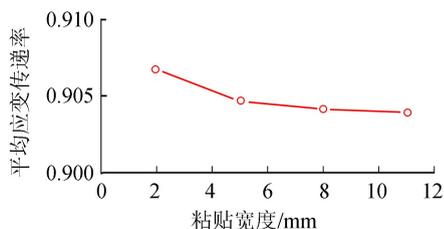


图7 平均应变传递率随胶层宽度的变化

e. 平均应变传递率随胶层长度的变化。图8为粘贴宽度为5 mm,底部和顶部的胶层厚度均为0.5 mm时,POF与混凝土结构之间平均应变传递率随粘贴长度变化的情况。从图8可以看出,平均应变传递率随粘贴长度的增加而逐渐增大。从变化范围来看,在粘贴长度由20 mm增加到300 mm的过程中,平均应变传递率由0.81增加到0.99,增长趋势比较明显。因此在实际应用中,应该尽量保证粘贴

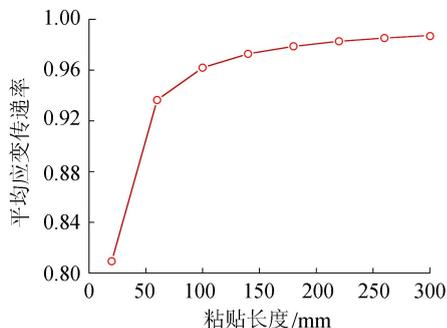


图8 平均应变传递率随胶层长度的变化

长度大于 300 mm。

综上所述,为有利于应变的传递,应使胶层中的 POF 尽量靠近混凝土,并且粘贴长度大于 300 mm,而胶剂宽度、整体厚度和形状对应变传递效果影响不大。良好的应变传递关系可使 POF 纤芯在胶层和涂覆层的双层间隔下有效感知混凝土结构的应变,从而实现对结构开裂的力学感知。

4 结 语

对表面粘贴式 POF 与混凝土基体间应变传递分析式进行了分析,建立了应变传递模型,通过数值仿真验证了模型的正确性,并探究了胶层形状对 POF 与混凝土结构间应变传递的影响,结果表明横截面为矩形和弧形对应变传递影响不大。对胶层弹模、底部和顶部胶层厚度、粘贴宽度和长度等可能影响应变传递效果的参数进行了敏感性分析。结果表明为有利于表面粘贴式 POF 与混凝土之间的应变传递,宜选用固化后弹性模量约为 1 GPa 的胶剂,尽量使 POF 靠近混凝土表面粘贴,粘贴长度大于 300 mm。另外,胶层宽度、总厚度及形状对应变传递效果影响不大。

参考文献:

[1] BARRIAS A, CASAS J R, VILLALBA S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 748.

[2] LEUNG C K Y, WAN K T, INAUDI D, et al. Optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(4): 871-906.

[3] YE X, SU Y, HAN J. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014.

[4] BAO T. Distributed fiber bragg grating sensors for monitoring cracks in concrete structures[C]//Thirteenth ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th NASA/ASCE Workshop On Granular Materials in Space Exploration. Pasadena: American Society of Civil Engineers, 2012.

[5] ZHOU J, ZHOU Z, ZHANG D. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(11): 1117-1122.

[6] 魏世明. 岩体变形光纤光栅传感检测的理论与方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.

[7] 张桂花. 表面黏贴式光纤光栅传感原理及其实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.

[8] 包腾飞, 赵津磊, 戚丹. 塑料光纤在裂缝监测中的性能[J]. *光子学报*, 2015, 44(10): 82-87. (BAO Tengfei, ZHAO Jinlei, QI Dan. Properties of plastic optical fibers in crack monitoring [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 82-87. (in Chinese))

[9] ZHANG C, ZHU H, SHI B, et al. Performance evaluation of soil-embedded plastic optical fiber sensors for geotechnical monitoring [J]. *Smart Structures and Systems*, 2016, 17(2): 297-311.

[10] ZHAO J, BAO T, CHEN R. Crack monitoring capability of plastic optical fibers for concrete structures[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015 (24): 70-76.

[11] LUO D, YUE Y, LI P, et al. Concrete beam crack detection using tapered polymer optical fiber sensors[J]. *Measurement*, 2016, 88: 96-103.

[12] 赵津磊, 包腾飞, 戚丹. 塑料光纤在裂缝监测中应用的可行性研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(10): 1943-1948. (ZHAO Jinlei, BAO Tengfei, QI Dan. Feasibility study on application of plastic optical fiber in monitoring[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(10): 1943-1948. (in Chinese))

[13] LIEHR S, LENKE P, WENDT M, et al. Polymer optical fiber sensors for distributed strain measurement and application in structural health monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(11): 1330-1338.

[14] 赵津磊, 包腾飞, 戚丹. 基于塑料光纤裂缝传感器的裂缝开度预测[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(2): 131-134. (ZHAO Jinlei, BAO Tengfei, QI Dan. Prediction of crack width based on plastic optical fiber crack sensor [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(2): 131-134. (in Chinese))

[15] 吴永红. 光纤光栅水工渗压传感器封装的结构分析与试验[D]. 成都: 四川大学, 2003.

(收稿日期:2018-05-03 编辑:郑孝宇)

