复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 27 卷 第 3 期 6 月 2010 年
Vol. 27 No. 3 June 2010

文章编号：1000-3851(2010)03-0162-07

复合材料 I 形梁分层的光纤超声探测技术数值研究

许 颖*[1]，喻 毅[1]，梁坚凝[2]

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院，深圳 518055；2. 香港科技大学 土木工程系，香港九龙)

摘 要： 针对纤维增强塑料多界面、高阻尼以及体波模式多样性对超声无损检测的影响，介绍了一种利用光纤超声探测技术结合小波信号分析检测 I 形纤维增强塑料梁中分层的方法。该方法利用超声发射器在梁中产生超声应力波，用表面粘贴的光纤干涉仪来探测梁中应力波的传播情况，然后利用小波的多分辨率特性对此信号进行时频分析，结合梁中超声波的传播特性即可确定分层的位置。理论分析和模拟结果都表明了此方法探测复合材料梁腹板/翼缘连接处分层的可行性。

关键词： 光纤干涉仪；分层；复合材料；超声波；小波分析

中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Numerical study on delamination detection in I-section GFRP beam with optical fiber-based ultrasonic technique

XU Ying*[1], YU Yi[1], LEUNG K Y Christopher[2]

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: In order to overcome the effects of FRP multi-interface, high damping characteristics and diversity of the body wave mode on the ultrasonic nondestructive test, a novel technique for detecting delamination is proposed. A PZT transmitter was employed to create the stress waves in the beam, and an optical fiber interferometric sensor was attached to the surface of the beam to detect the stress wave propagation in the beam. By analyzing the propagation characteristics of ultrasound and the wavelet time-frequency spectrum of the signal, the delamination location can be identified. Based on the theoretical analysis and simulation results, the feasibility of delamination detection with the proposed technique is demonstrated.

Keywords: optical fiber interferometer; delamination; composites; ultrasonic; wavelet analysis

复合材料从物理结构角度看是由基体相、增强相和界面相组成的一种多相材料。这种特殊的结构形式可以发挥各种材料的优点，扩大材料的应用范围。纤维增强复合材料(FRP)作为最常用、最具有代表性的复合材料，具有质量轻、强度高、加工成型方便、弹性优良、耐化学腐蚀和耐气候性好等优点，已在航空航天、汽车、船舶和土木工程等领域中得到了迅速的发展应用，成为国内外的研究热点[1-3]。

众多 FRP 材料中，拉挤成型构件由于便于批量生产而得到了更广泛的研究和应用。在建筑结构中，因玻璃纤维增强塑料(GFRP)比碳纤维增强塑料(CFRP)具有更高的性价比、耐久性及更高的强度/质量比，已开始用来替代钢或混凝土以解决钢梁和钢筋混凝土桥梁结构的老化问题[4-5]。如 1982 年，北京密云建成了跨径 20.7 m、宽 9.2 m 的 GFRP 简支蜂窝箱梁公路桥[6]，2006 年英格兰建造了高速公路桥梁 M6 Motorway，2008 年 6 月德国建造了 27 m 长的 Friedberg 桥[7]等。虽然 GFRP 拉挤成型构件已被运用到诸多领域，但由于此类复合材料的高度非均质性和各向异性，很容易使界面相失效，导致相邻两层或多层层面或纤维之间产生

收稿日期： 2009-07-02；**收修改稿日期：** 2009-12-26
基金项目： 国家自然科学基金项目(50808054)
通讯作者： 许 颖，博士，副教授，主要研究方向是复合材料在土木工程中的应用，健康监测和光纤传感器及再生建筑材料
E-mail: cexyx@hotmail.com

分离，并最终导致材料失效造成事故[8]。对于工程中常见的 I 形拉挤型 FRP 梁而言，当梁上施加不均匀载荷时，上翼缘的侧面弯曲将使腹板产生扭曲变形，长期连续的扭曲变形就可能使翼缘和腹板间疲劳破坏产生分层。由于这种分层不在翼缘表面，无法用肉眼看见，通常只能用无损探伤的方法进行检测。

传统的超声探测技术由于 FRP 的多界面、高阻尼特性使其对检测人员和设备要求较高。文献[9－11]中，许颖、江毅等人提出了用 3×3 耦合式光纤干涉仪[12]检测复合材料梁中的分层，得到了较好的实验结果。其检测原理是用外力下压复合材料梁使其产生变形，当力作用在有分层的地方时埋设在复合材料中的光纤就会产生明显变形，光纤干涉仪就有输出峰。然而 GFRP 梁非常坚硬，外力很难使之变形，并且力的大小很难控制一致。

本文作者在文献[13－14]的基础上使用数值模拟的方法模拟压电声发射器(PZT)产生超声脉冲，用高灵敏度的 3×3 耦合式光纤干涉仪代替一般的传感器，对梁中的超声信号进行检测，并用小波对信号进行时频分析，成功检测出了 I 形梁中翼缘与腹板间的分层缺陷。

1　检测原理

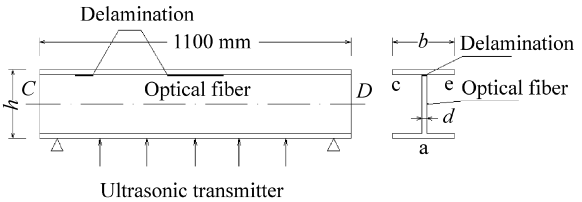
1.1　有限元模型

在模拟中考虑了 2 种截面尺寸，其具体结构和尺寸见图 1 和表 1，材料参数见表 2，GFRP 纤维方向为沿梁长方向。在 ABAQUS 中通过布尔运算在上翼缘和腹板的交接处构造出分层缺陷，分层高 0.1 mm，在模拟中考虑了 3 种常见的分层分布形式：同侧、异侧和贯穿，其示意图如图 2 所示。I 形梁放置在相距 1000 mm 的 2 个支座上，光纤粘贴于腹板的中间位置，在 ABAQUS 中通过计算 C、D 两点(见图 1(a)中所示)的积分应变来表征光纤的应变，并在试算中通过调整 PZT 荷载的大小和作用时间以使分层的上下两个表面不接触并尽量降低 FRP 对信号的衰减影响。

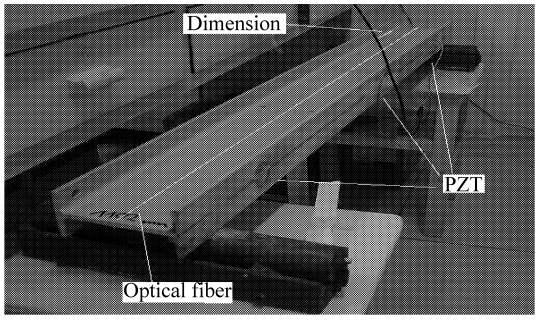
表 1　I 形梁尺寸

Table 1　Size of I-beam　　mm

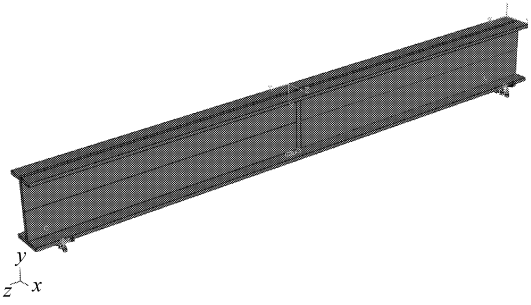
I-beam models	Height h	Wide b	Thickness d
I100	100	68	4.50
I120	120	60	6.25



(a) Dimension of the beam and position of delamination



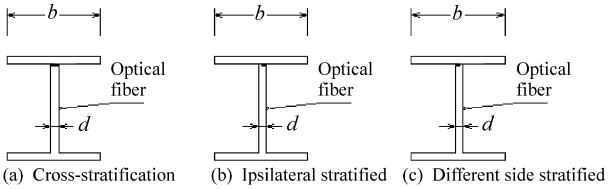
(b) Experimental prototype of FRP element



(c) Diagram of simulation model

图 1　I 形 FRP 梁结构示意图

Fig. 1　Ilustration of the I-FRP beam



(a) Cross-stratification　(b) Ipsilateral stratified　(c) Different side stratified

图 2　分层分布示意图

Fig. 2　Schematic diagram of stratified distribution

表 2　GFRP 复合材料材料参数

Table 2　Material properties of GFRP

Elastic modulus/GPa	Shear modulus/GPa	Poisson's ratio
$E_{11}=25.5$	$G_{12}=5.07$	$\nu_{12}=0.09$
$E_{22}=8.5$	$G_{13}=5.07$	$\nu_{13}=0.09$
$E_{33}=8.5$	$G_{23}=3.07$	$\nu_{23}=0.23$

1.2　应力波波速计算[15]

纤维直径通常为 5～20 μm，要明显小于超声

波波长(频率小于 20 MHz 时，波长大于 100 μm)，故可以把复合材料当作均匀各向异性介质，采用各向异性材料中平面波的传播理论计算应力波波速。王小民[16]通过在计算中引入表示介质各向异性特征的方向矢量导出了准纵波(qP 波)和 2 种准横波(qSV 波和 qSH 波)波速的严格解析解，本文采用的就是这种计算方法。

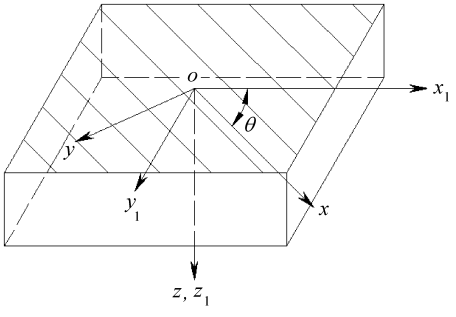


图 3　FRP 材料几何示意图

Fig. 3　Geometry diagram of FRP materials

假定 GFRP 中纤维方向和 x_1 方向一致(即 $\theta=0$)，并建立如图 3 所示的坐标系统。则正交各向异性材料中应力应变关系如下式[17]：

$$[\sigma]=\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & & & \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & & 0 & \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & & & \\ & & & Q_{44} & 0 & 0\\ & & & 0 & Q_{55} & 0\\ & & & 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{23}\\ \gamma_{31}\\ \gamma_{12}\end{bmatrix} \tag{1}$$

由于 GFRP 纤维局部坐标系和全局坐标系一致，所以全局状态下的应力应变关系仍为式(1)。FRP 复合材料中应力波波动方程为

$$Q_{ijkl}\frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l}=\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \tag{2}$$

其中：Q_{ijkl} 为弹性常数；u_i 是质点的位移；ρ 是密度；t 是时间。

$$u_j = A\exp(\mathrm{i}\omega t) \tag{3}$$

其中：A 为振幅；ω 为圆频率。

当有平面谐波(式(3))在介质中传播时，将式(3)代入式(2)，便可得到克里斯托费尔方程为

$$(k^2\Gamma_{ik}-\rho\omega^2\delta_{ik})u_k = 0 \tag{4}$$

其中：δ_{ik} 代表克罗内克符号，克里斯托费尔刚度 $\Gamma_{ik}=Q_{ijkl}n_j n_i$($i$，$j$，$k$，$l$=1，2，3)。若要使式(4)有非零的位移解，其系数矩阵必须为零，即特征方程为

$$|k^2\Gamma_{ik}-\rho\omega^2\delta_{ik}|=0 \tag{5}$$

对于拉挤成型 GFRP 形材由于纤维方向的单一性，属于横观各向同性介质，有 $Q_{22}=Q_{33}$，$Q_{66}=Q_{55}$，$Q_{12}=Q_{13}$ 和 $Q_{44}=(Q_{33}-Q_{23})/2$。代入材料参数可算得 x_2x_3 平面内 3 种模式体波的波速，qP 波波速为 2237.8 m/s，qSV 波波速为 1591.6 m/s，qSH 波波速为 1385.5 m/s。

1.3　小波分析原理

由于梁高较梁长很小($h/l=6/55$)，并且荷载为垂直 x_1 方向，所以在分析中仅考虑 x_2x_3 平面内 3 种应力波的传播情况。通过计算可以得出完整梁和有分层梁中 3 种应力波前 2 次传播到达光纤位置所需的时间，如表 3 所示。从表 3 可以看出 qSV 波和 qSH 波第 2 次到达时间相差很小($<2\times10^{-5}$ s)，考虑到 I 形梁截面的复杂性和梁中应力波形式的多样性，故在研究中主要提取 11×10^{-5} s 之前的信号进行 Morlet 小波分析，综合考察 qP 波第 2 次到达光纤位置的时频特性和到达时间 t 的变化情况，并根据下式确定反射面距光纤的距离：

$$x=\frac{22.378\ t-h/2}{2}(\mathrm{mm}) \tag{6}$$

从而判定梁的完整性，并对分层面大小作进一步分析。

2　分析算例

2.1　完整梁及跨中贯穿式分层可测性分析

用 C3D8R 单元对完整梁和跨中 125 mm 贯穿式分层梁进行模拟，材料参数见表 2，按照应力波在一个周期内传播 10 个网格计算，结构化网格大小取为 2.5 mm。因为梁在长度方向为对称结构，在分析时仅分析梁的左半部分。

通过提取 C、D 两点在不同激励点下的积分应变时程曲线，并对其进行 Morlet 小波时频分析验证得出 qP 波的第 2 次到达时间 t，典型时频分析结果如图 4 所示，然后根据式(6)可算得各个激励点下反射面距中性层光纤的距离 x，其结果如图 5(a)、5(b)所示。从图 5 可以看出，本文所提出的方法可以正确地检测出分层在梁长方向的分布位置，但对分层位置的准确定位还存在一定的误差，在图 5(b)中最大误差为 2.02 mm。初步判断主要原因是梁网格划分过大对超声波反射模拟误差过大所致，为减小网格对其产生的影响，重新对反射模

表 3　I 形梁中超声波传播时间表

Table 3　Ultrasonic dissemination time table for I-beams　　$\times 10^{-5}$ s

		I120 full beam	I120 layered beam	I100 full beam	I100 layered beam
Stress wave reach to FBG for the first time	qP Wave	2.68	2.68	2.23	2.23
	qSV Wave	3.77	3.77	3.14	3.14
	qSH Wave	4.33	4.33	3.61	3.61
Stress wave reach to FBG for the second time	qP Wave	8.04	7.48	6.70	6.29
	qSV Wave	11.31	10.51	9.42	8.85
	qSH Wave	13.00	12.08	10.83	10.16

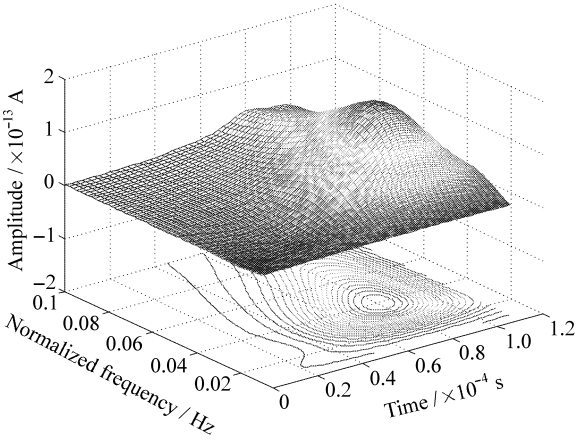


图 4　典型小波时频图

Fig. 4　Typical wavelet time-frequency map

拟精度进行验证，最后采用 1 mm 网格进行模拟计算。

从图 5(b)中可以看出当分层为 125 mm 时分层左右两侧的影响区各有 30 mm，很显然影响区域一方面与分层的大小有关，另一方面与梁高 h 有关。根据检测结果初步判断在检测中测点的单次可动距为 5 mm 时分层的灵敏度可以达到 10 mm，下面仅对 10 mm 分层的可测性进行了研究。

2.2　跨中 10 mm 分层可测性分析

对 I120 和 I100 简支梁通过布尔运算在腹板与翼缘交接处构造出长为 10 mm 的 3 种分布形式的分层，用 C3D8R 单元对分层梁进行模拟，材料参数不变，结构化网格大小取为 1 mm，梁在长度方向上为对称结构，在分析时仅分析梁的左半部分，模拟分析结果如图 6 所示。可以看出当网格为 1 mm 时，提出的这种方法不仅能很好地确定分层在梁长方向的位置，并且在分层的精确定位方面也能达到很高的精度。对比图 6(a)与图 6(b)，图 6(c)

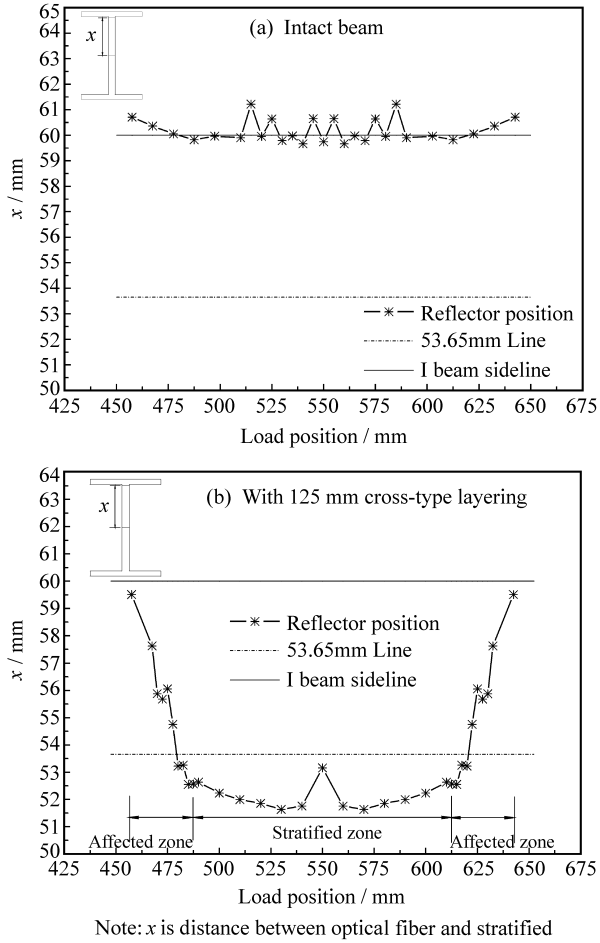


图 5　I120 完好梁和跨中 125 mm 贯穿分层梁分层位置图

Fig. 5　Reflector location of I120 intact beam and I120 layered beam

与图 6(d)可以看出随着分层面的减小反射信号变弱，导致对分层的精确定位误差有变大的趋势，但仍能较准确地判定分层区的范围和位置。对比 2 种不同截面尺寸梁的检测结果可以看出，虽然梁截面尺寸变小在一定程度上会使反射信号成分更复杂，但由于采用光纤干涉仪替代传统的探头来检测梁中

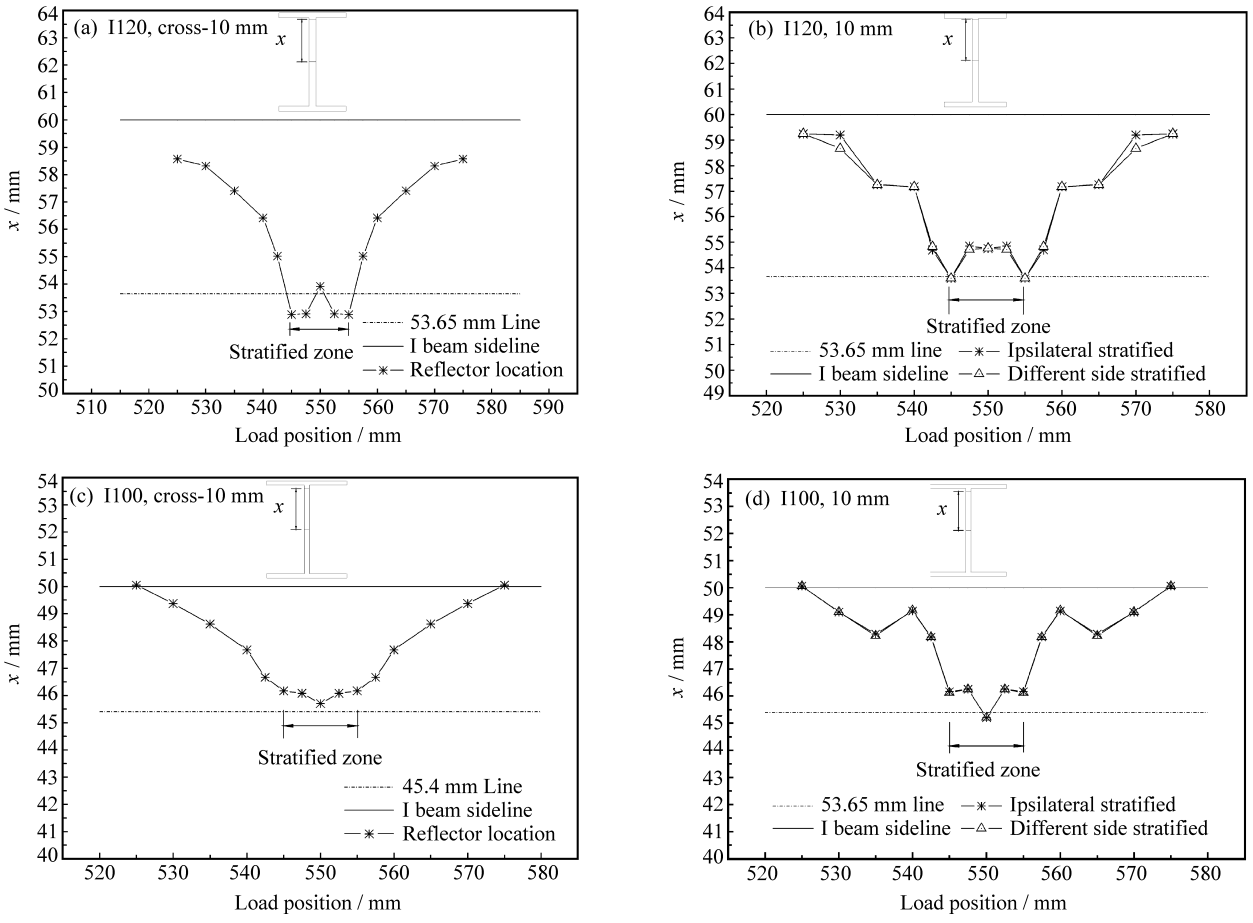


图 6　I120 和 I100 跨中 10 mm 分层梁反射面位置图

Fig. 6　10 mm reflector location of I120 and I100 cross-stratification beam

的超声信号，通过合理的解调方案可以达到很高的精度和采样频率，因而截面尺寸的变化对检测结果影响较小。对比图 6(b)及图 6(d)中的两条分层线可以看出，分层与光纤的相对位置对检测结果的影响很小，同侧和异侧 2 种情况下的检测结果曲线基本重合，所以这种方法中光纤的埋设要求比较低，可以是外贴也可以是预先集成到构件中。

2.3　四分之一跨 10 mm 分层可测性分析

按照前面的方法对 I120 和 I100 四分之一跨位置 10 mm 分层简支梁进行模拟，材料参数见表 2，结构化网格大小取为 1 mm。因为分层在四分之一跨位置，在梁长方向不再为对称结构，在分析时应分析梁的整个部分，模拟分析结果如图 7 所示。从图 7 可以看出分层位于四分之一跨时此方法仍能较好地检测出分层的位置，分层区定位误差最大不超过 2.5%。分别对比 2 种截面尺寸梁的检测结果可以看出：I120 梁对分层区边界很敏感，能很好地确定分层区的大小，但 I100 梁分层区边界不明显，只能大概确定分层区的大小，并且对分层位置的准确定位 I100 梁的精度也没有 I120 梁高。分析其原因可能是超声激励作用在四分之一跨位置时作用点距梁端较近，梁端的反射信号和由于截面尺寸减小产生的干扰信号耦合，使得信号中的第 2 个峰值产生了偏移，从而使得检测得到的 t 变化较缓慢。对比图 7(b)中的两条分层线可以看出，分层与光纤的相对位置对 I120 梁四分之一跨分层检测结果的影响很小；对比图 7(d)中两条分层线可以看出，分层与光纤的相对位置仅对个别点有影响，最大差值不超过 0.5 mm，其检测结果曲线基本重合，所以在光纤布置时仍旧可以不考虑光纤与分层的相对位置的影响。从以上各图中可以看出，虽然在分析时考虑了分层的不对称性，但其检测结果仍旧近似为对称关系，分析其原因主要是模拟过程中我们始终使分层的上下两个表面没有接触，当 PZT 激励引起

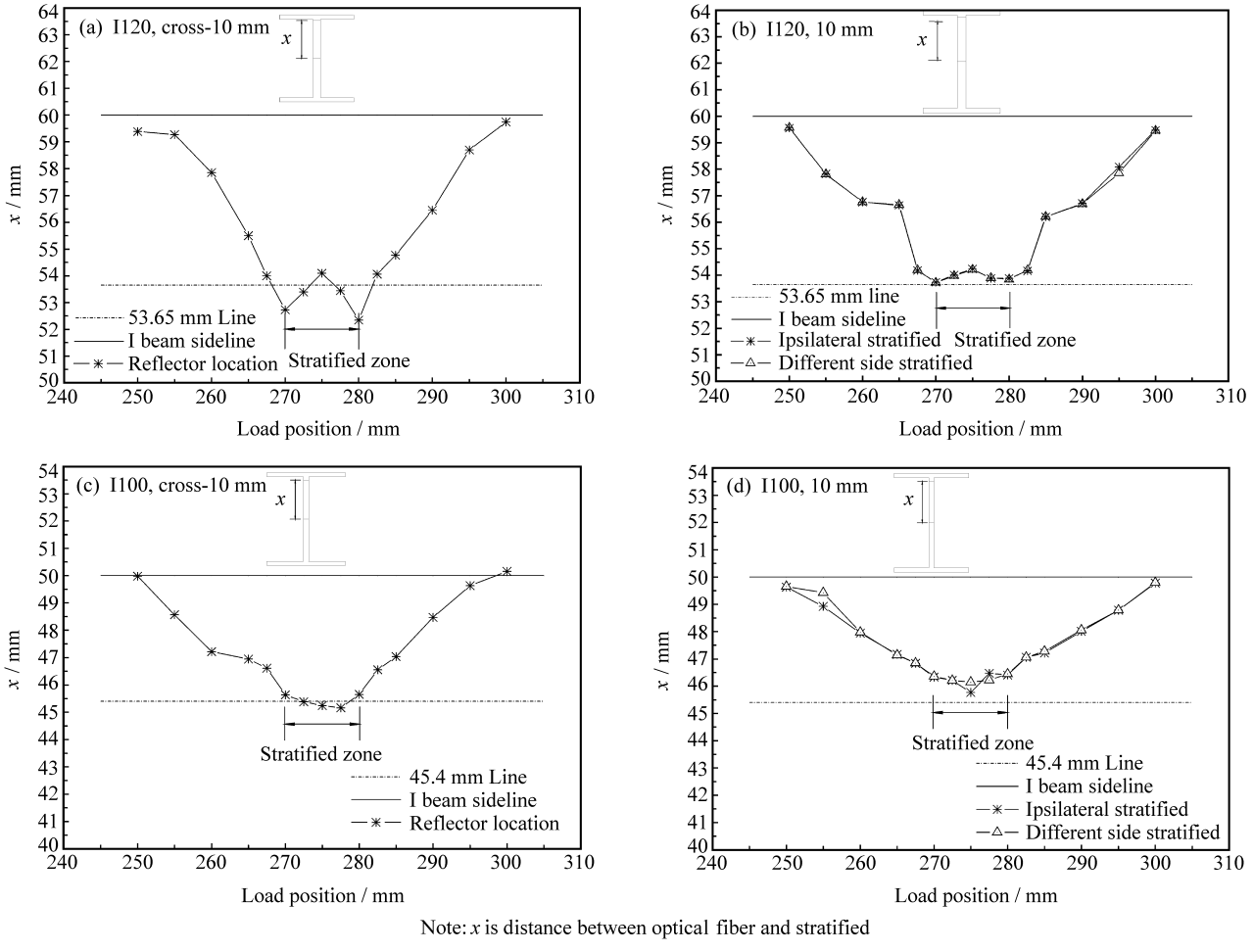


图 7　120 和 I100 四分之一跨 10 mm 分层梁反射面位置

Fig. 7　10 mm reflector location of I120 and I100 a quarter of stratification beam

的梁身震动可以忽略时其它条件仍近似为对称关系，所以其检测结果仍旧近似为对称关系。

3　结　论

（1）通过数值模拟的方法研究了用光纤超声探测技术结合小波信号分析检测拉挤型 GFRP 构件翼缘与腹板交接处分层。

（2）模拟结果表明本文所提出的方法能克服截面形式和材料特性对检测结果的影响，能较准确地检测出不同截面尺寸 I 形梁中分层在梁长方向的分布情况，并能对其进行准确定位。

（3）通过对比发现光纤与分层的相对位置对检测结果影响很小，在实际操作中光纤的布设可以采用外粘法或与构件集成形成智能型构件，从而可对光纤进行综合多次利用。但对梁端部分进行检测时应考虑梁端截面反射信号的影响。

（4）理论计算与模拟结果的一致性，充分说明了此方法的可行性。

参考文献：

[1] Patil S, Kostic M, Majumdar P. Bridges with glass fibre reinforced polymers (GFRP) decks—The new road bridge in Friedberg (Hessen, Germany) [J]. Stahlbau, 2009, 78(7): 462-470.

[2] 滕锦光，陈建飞，史密斯 S T. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005：78-80.

[3] 王利民，卢俊杰，刘灿昌. 炭纤维强化板及其加固混凝土梁的力学性能[J]. 复合材料学报，2008，25(3)：167-169.
Wang Limin, Lu Junjie, Liu Canchang. Mechanical properties of CFRP and its reinforced concrete beams[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(3): 167-169.

[4] Petrou M F, Parler D, Harries K A. Strengthening of reinforced concrete bridge decks using carbon fiber-reinforced polymer composite materials [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(5): 455-467.

[5] Salim H A, Davalos J F, Qiao P Z. Analysis and design of

fiber reinforced plastic composite deck-and-stringer bridges [J]. Composite Structures, 1997, 38(1/4): 295-307.

[6] Ye L P, Feng P, Zhang K. FRP in civil engineering in China: Research and application [C] // 6th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer-Reinforcement for Concrete Structures. Singapore: Fibre-Reinforcement Polymer: Reinforcement for Concrete Structures, 2003, 20(1/2): 1401-1412.

[7] Jacob A. Composite bridge decks cut life cycle costs [J]. Reinforced Plastics, 2008, 9(52): 30-32.

[8] Heredia F E, He M Y, Evans A G. Mechanical performance of ceramic matrix composite I-beams [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996, 27(12): 1157-1167.

[9] Elvin N, Leung K Y C, Sudarshanam V S. A novel fiber optic delamination detection scheme: Theoretical and experimental feasibility studies [J]. Journal of Intelligent Material, Systems and Structures, 1999, 10(4): 314-321.

[10] Xu Y, Leung K Y C, Tong P, et al. Interfacial delamination detection in bonded repair with fiber optical interferometric sensor [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(9): 1428-1435.

[11] Leung K Y C, Yang Z, Xu Y. Delamination detection in laminate composites with an embedded fiber optical interferometric sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 119(2): 336-344.

[12] 许　颖，江　毅，梁坚凝. 基于对称3×3耦合器的马赫-策德尔光纤干涉仪及其在复合材料分层检测中的应用[J]. 深圳特区科技，2005，12(2)：356-365.

Xu Ying, Jiang Yi, Leung K Y C. 3×3 coupler based mach-zehnder interferometer and its application in the delamination detection in composite [J]. Shenzhen Science and Technology, 2005, 12(2): 356-365.

[13] 许　颖，梁坚凝，江　毅. 用光纤干涉仪检测I形复合材料梁腹板/翼缘连接处的分层[J]. 复合材料学报，2007，24(2)：143-150.

Xu Ying, Leung K Y C, Jiang Yi. Delamination detection at web/flange junction of I-section GFRP beam with fiber optical interferomenter sensor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 143-150.

[14] Jiang Y, Leung K Y C, Ng M. Delamination detection in an I-section glass fiber reinforced plastic beam with an optical fiber-based stress wave method [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(6): 1-6.

[15] Zhang H Y, Liu Z Q. Propagation of elastic plane waves in homogeneous anisotropic media [J]. Journal of Shanghai University: English Edition, 2004, 8(2): 164-168.

[16] Wang X M, Li M X. Propagation of elastic plane waves in homogeneous and transversely isotropic media [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1998, 17(03): 280-288.

[17] Kuo Y M, Lin H J, Wang C N. Sound transmission across orthotropic laminates with a 3D model [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(11): 951-959.

[18] Li M, Wu N, Wu L Z. Scattering of anti-plane stress waves by a crack in a non-homogeneous orthotropic medium [J]. Composite Structures, 2007, 79: 174-179.