

Analysis on Flexural/Shear Crack Induced Debonding between FRP-Concrete Interface

Hongchang Ju¹, Beiyi Zhang²

¹Lushan College of Guangxi University of Technology, Liuzhou

²Department of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou
Email: 418228466@qq.com

Received: Feb. 4th, 2013; revised: Mar. 16th, 2013; accepted: Mar. 28th, 2013

Copyright © 2013 Hongchang Ju, Beiyi Zhang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: In order to analyze the debonding failure of concrete beams strengthened with externally bonded fiber-reinforced-polymer (FRP) plates, which may be induced by a major flexural/shear crack in the span, this paper adopts a nonlinear fracture mechanics approach and proposes a cohesive zone model that uses a novel nonlinear bond-slip model to simulate the shear stress-separation of the FRP-concrete interface, while the normal stress-separation law of the interface is approximated by a linear elastic model. We can obtain the closed-form solutions of interfacial stresses, FRP stress for a typical single-lap specimen for the whole debonding process and verified with experimental results. The comparison confirms the validation of the CZM in modeling the mixed-mode debonding of FRP-concrete interface.

Keywords: Fiber Reinforced Polymer (FRP); Cohesive Zone Model; Mixed-Mode; Flexural/Shear Crack; Debonding

弯剪裂缝引起的 FRP-混凝土界面剥离分析

琚宏昌¹, 张贝宜²

¹广西科技大学鹿山学院, 柳州

²广西科技大学土木工程系, 柳州
Email: 418228466@qq.com

收稿日期: 2013 年 2 月 4 日; 修回日期: 2013 年 3 月 16 日; 录用日期: 2013 年 3 月 28 日

摘 要: 采用非线性断裂力学方法, 分析了由弯剪裂缝引起的 FRP-混凝土界面剥离。通过对界面采用三线性剪切本构关系和双线性正应力本构关系, 考虑了由弯剪裂缝引起的正应力对界面剥离作用, 得出了单悬臂构件在整个剥离过程中的应力解析解, 并与实验结果进行验证。结果表明, 该模型能够有效地分析混合模式下界面剥离。

关键词: FRP; 内聚力区域模型; 混合模式; 弯剪裂缝; 剥离

1. 引言

外贴纤维增强复合塑料(Fiber Reinforced Polymer)板已经成为加固混凝土结构的普遍方法。FRP 板与混

凝土基体间的界面对加固技术起关键作用。通过将应力从已有结构传递给 FRP 板, 使 FRP-混凝土组合结构保持完整组合作用。FRP-混凝土界面剥离能导致结构提前破坏。

文献中有三种方法研究 FRP-混凝土界面: 材料强度法; 线弹性断裂力学方法(LEFM); 非线性断裂力学

*基金项目: 广西科技厅项目(2011GXNSFA018024); 广西教育厅项目(200911MS115, 201010LX215); 广西柳州市应用技术与开发计算项目(2010020603)。

方法。由于 FRP 末端存在应力奇异, 限制强度理论的实际应用, 应力波动, 采用 LEFM 很难获得混合模式下的剥离分析。已有研究^[1-9]集中于单一模式下裂缝引起的剥离。Suo 等^[10]证明所有界面断裂本质上是混合模式, 然而非常少的研究^[11-13]进行弯剪裂缝引起的剥离问题, 因为它是混合模式, 并且正应力对 IC 剥离作用很小并没有严格的分析。

本文采用非线性断裂力学方法研究弯剪裂缝引起的混合模式下界面剥离。

2. 界面分析

2.1. 弯剪 IC(中部裂缝)剥离的混合模式内聚力模型(CZM)

采用外贴 FRP 加固钢筋混凝土简支梁。在 RC 梁的任意位置有一条弯剪裂缝。本文假设裂缝位于中跨的左边。

取图 1 所示 FRP 加固混凝土梁的无穷小隔离体建立平衡方程(见图 1)。

由于只研究 FRP-混凝土界面剥离, 因此 RC 梁和 FRP 板用线弹性伯努力梁进行模型化。两个梁的本构关系为

$$N_i = C_i u_i', M_i = -D_i w_i'', i = 1, 2 \quad (1)$$

N_i 和 M_i 分别为梁 $i(i = 1, 2)$ 的轴力和弯矩; u_i 和 w_i 分别为梁 $i(i = 1, 2)$ 的轴向位移和垂直位移; C_i 和 D_i 分

别为梁 $i(i = 1, 2)$ 的轴向刚度和弯曲刚度; 并且 $C_i = E_i b_i h_i$, $D_i = E_i I_i$; E_i 为梁 $i(i = 1, 2)$ 的弹性模量; b_i 和 h_i 为梁 $i(i = 1, 2)$ 的宽度和高度; I_i 为梁 i 的惯性矩。

建立以下平衡方程:

$$\begin{aligned} \frac{dN_c(x)}{dx} &= b_p \tau(x), \\ \frac{dM_c(x)}{dx} &= Q_c - b_p \tau(x) \frac{h_c + h_0}{2}, \\ \frac{dQ_c(x)}{dx} &= b_p \sigma(x); \\ \frac{dN_p(x)}{dx} &= -b_p \tau(x), \\ \frac{dM_p(x)}{dx} &= Q_p - b_p \tau(x) \frac{h_p + h_0}{2}, \\ \frac{dQ_p(x)}{dx} &= -b_p \sigma(x); \\ N_p + N_c &= N_T, \quad Q_p + Q_c = Q_T, \\ M_p + M_c + \frac{h_p + h_c + 2h_0}{2} &= M_T. \end{aligned} \quad (2)$$

其中 N_T , Q_T 和 M_T 为关于 FRP 板中性轴产生的力。 σ 和 τ 分别为界面正应力和切应力。 Y_1 和 Y_2 分别为梁 1 底和梁 2 顶到各自中心轴的距离。

采用图 1 所示的协调体系, 得界面在张开和剪切方向的位移

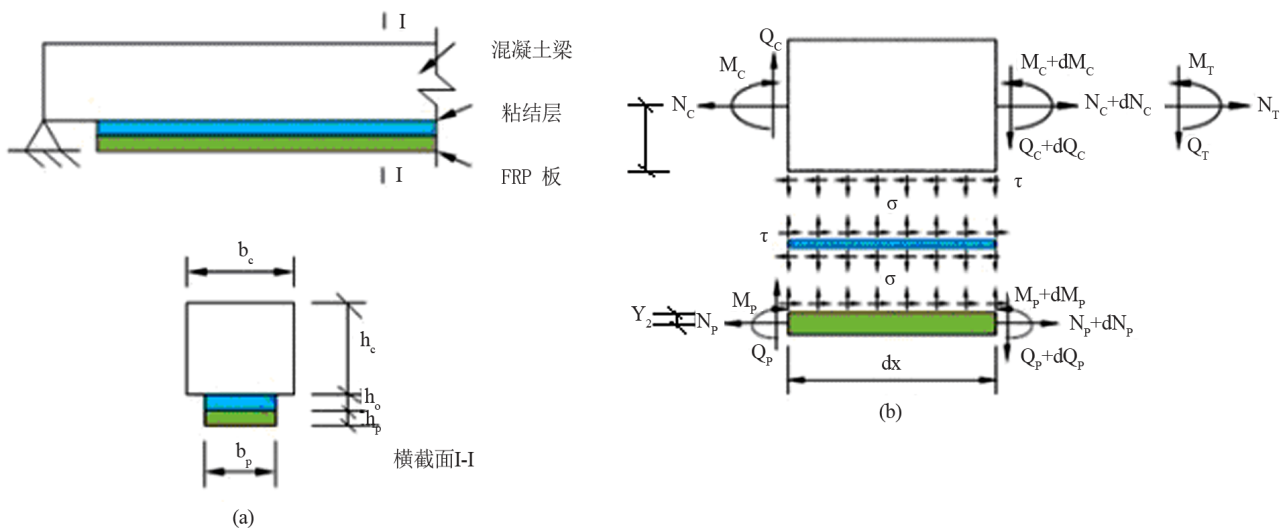


Figure 1. Idealized model for FRP-concrete bonded joint. (a) Scheme of structure for beam; (b) Infinitesimal isolated body of the FRP strengthened concrete beam

图 1. FRP-混凝土粘结面理想化模型。(a) 梁的结构示意图; (b) FRP-混凝土梁隔离体

$$\delta_n = w_1 - w_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \delta_t &= (u_1 + Y_1(-w'_1)) - (u_2 + Y_2(-w'_2)) \\ &= u_1 - Y_1 w'_1 - Y_2 w'_2 \end{aligned} \quad (4)$$

2.1.1. 混合模式非线性粘结应力 - 滑移模型

FRP 板通过 FRP-混凝土界面层粘贴到混凝土上, 界面层当作一个大的断裂过程区进行模型化。如图 2 所示, 剪切本构关系和正向本构关系。

剪切本构关系可分为四段, 对应相应的剥离区。

1) 线性区: 切应力随着剪切位移线性增加; 2) 变弱区: 切应力随着剪切位移线性减少; 3) 局部区: 剪应力降到局部强度并且随着剪切滑移线性降低到零; 4) 完全剥离区: 应力为零, FRP 板从混凝土梁完全剥离。采用以下方程表述该非线性关系:

$$\begin{cases} \frac{\tau_{f1}}{\delta_1} \delta_t, & \delta_t < \delta_1 \\ \tau_{f1} - \frac{\tau_{f1} - \tau_{f2}}{\delta_2 - \delta_1} \delta_t, & \delta_1 \leq \delta_t < \delta_2 \\ \tau_{f3} - \frac{\tau_{f3}}{\delta_f - \delta_2} (\delta_t - \delta_2), & \delta_2 \leq \delta_t < \delta_f \\ 0, & \delta_f \leq \delta_t \end{cases} \quad (5)$$

本文采用不依据模式的黏聚规律, 即假设 FRP-混凝土界面剪切本构关系与正向开口本构关系不相

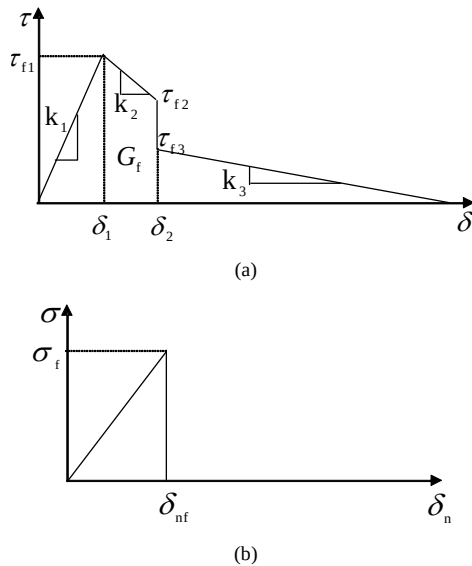


Figure 2. Traction-separation models used in this study. (a) Shear traction-separation; (b) Normal traction-separation law
图 2. FRP-FRP-混凝土粘结面本构模型。(a) 剪切本构关系; (b) 正应力本构关系

关。采用线弹性模型来估计界面开口本构关系。

$$\sigma = \begin{cases} \frac{\delta_n}{\delta_{nf}}, & \delta_n < \delta_{nf} \\ 0, & \delta_n \geq \delta_{nf} \end{cases} \quad (6)$$

界面总的断裂能量为

$$G_T = G_I + G_{II} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} G_I &= \int_0^{\delta_n} \sigma(\delta_n) d\delta_n, \\ G_{II} &= \int_0^{\delta_t} \tau(\delta_t) d\delta_t \end{aligned} \quad (8)$$

剥离模式混合度用相位角表示即:

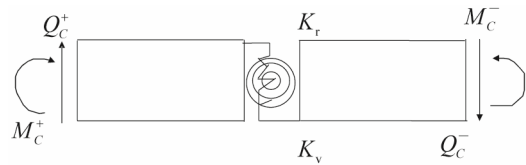
$$\tan \psi = \sqrt{G_{II}/G_I} \quad (9)$$

本文采用一个简单的线性剥离准则

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (10)$$

2.1.2. 弯剪裂缝弹簧模型

在混凝土梁的底部轴向混合垂直位移不连续是由弯剪裂缝的开口和剪切引起的。为了获得由裂缝引起的局部变形, 才弯剪裂缝处采用一个厚度无限小的旋转和横向弹簧。



局部变形表述为:

$$\begin{aligned} w'_1|_{0-} - w'_1|_{0+} &= \frac{1}{K_r} M_1|_{x=0}, \\ w'_1|_{0+} - w'_1|_{0-} &= \frac{1}{K_v} Q_1|_{x=0} \end{aligned} \quad (11)$$

3. FRP-混凝土界面剥离分析

在外荷载作用下, 界面应力沿着 FRP-混凝土界面发展。起初, 外荷载很小并且最大界面应力小于它们的最大允许值, 整个界面处于线性阶段。在这个阶段, 界面只出现区域 1。随着荷载的增加, 部分界面进入变弱阶段和局部阶段, 知道完全剥离。在这个阶段,

界面出现区域 2, 3, 4。然而, 由于正应力的存在, 在局部区 3 和变弱区 2 开始前, 完全剥离能够产生。如此情况中, 区域 3 或区域 2 和 3 不存在界面上。

剪应力与正应力耦合结果相当复杂, 为了简化分析, 假设 FRP 板和混凝土梁有同样的弯曲。即

$$w_1'' = w_2'' \quad (12)$$

采用以上假设, 则本构关系可表述为:

$$w_1'' = -\frac{M_T}{D_1 + D_2} + \frac{Y_1 + Y_2}{D_1 + D_2} N_2 \quad (13)$$

$$\tau' = \frac{\tau_{f1}}{\delta_1} \left(\frac{N_1}{C_1} - \frac{N_2}{C_2} + \frac{Y_1 + Y_2}{D_1 + D_2} (M_T - (Y_1 + Y_2) N_2) \right) \quad (14)$$

方程(14)两边关于 x 进行微分, 并且采用平衡方程(2), 则沿 FRP-混凝土界面的切应力控制方程为

$$\begin{aligned} \tau'' = & \frac{\tau_{f1}}{\delta_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{(Y_1 + Y_2)}{D_1 + D_2} \right) b_2 \tau \\ & + \frac{\tau_{f1}}{\delta_1} \left(\frac{(Y_1 + Y_2)}{D_1 + D_2} M_T + \frac{N_T}{C_2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

方程的解为

$$\tau = A e^{-\lambda_1 x} + B e^{\lambda_1 x} + \tau_c,$$

其中

$$\lambda_1 = C_\lambda \sqrt{\frac{\tau_{f1}}{\delta_1}}, \quad C_\lambda = \sqrt{b_2 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{(Y_1 + Y_2)^2}{D_1 + D_2} \right)} \quad (16)$$

通过对方程(2)的第二个方程两边进行积分, 得 FRP 板的轴力

$$N_2 = N_{20} e^{-\lambda_1 x} + N_{2c} \Big|_0^x \quad (17)$$

其中 N_{20} 为 FRP 板受拉端的应力, N_{2c} 为基于组合梁理论所得组合板的轴力:

$$\begin{aligned} N_{2c} = & \frac{Y_1 + Y_2}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \left(1 + \frac{D_1}{D_2} \right) + \frac{(Y_1 + Y_2)^2}{D_2}} M_T \\ & + \frac{D_1 + D_2}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \left(1 + \frac{D_1}{D_2} \right) + \frac{(Y_1 + Y_2)^2}{D_2}} \frac{N_T}{C_2} \end{aligned}$$

采用上述公式, 对于不同区域, 得到 FRP 板的轴力和界面切应力。

区域 1: 弹性区

$$\begin{aligned} \tau = & \tau_{f1} e^{-\lambda_1 (x - a_1 - a_2 - d)}, \\ N_{2e} = & N_{2c} \Big|_0^x + \frac{b_2 \tau_{f1}}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 (x - a_1 - a_2 - d)} \end{aligned} \quad (18)$$

区域 2: 变弱区:

$$\begin{aligned} \tau = & \tau_{f1} \left(\cos(\lambda_2 (x - a_1 - a_2 - d)) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sin(\lambda_2 (x - a_1 - a_2 - d)) \right), \\ N_{2s} = & N_{20} - \frac{b_2}{\lambda_2} \left(\sin(\lambda_2 (x - a_1 - a_2 - d)) \tau_{f3} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cos(\lambda_2 (x - a_1 - a_2 - d)) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

区域 3: 局部区:

$$\begin{aligned} \tau = & \tau_{f3} \cos(\lambda_3 (x - a_2 - d)) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \tau_{f1} \left(\sin(\lambda_2 a_1) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cos(\lambda_2 a_1) \right) \sin(\lambda_3 (x - a_2 - d)) \\ N_2 = & N_{20} + \frac{b_2}{\lambda_3} \left(-\sin(\lambda_3 (x - a_2 - d)) \tau_{f3} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \tau_{f1} \left(\sin(\lambda_2 a_1) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cos(\lambda_2 a_1) \right) \cos(\lambda_3 (x - a_2 - d)) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

区域 4: 完全剥离区

$$\tau = 0, \quad N_2 = P_{\max} = N_{20} + \left(\frac{b_2}{\lambda_3} \sin(\lambda_3 a_2) \tau_{f3} + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \tau_{f1} \left(\sin(\lambda_2 a_1) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cos(\lambda_2 a_1) \right) \cos(\lambda_3 a_2) \right) \quad (21)$$

其中 a_1 , a_2 和 d 分别是区域 1, 2, 2, 4 的尺寸; 并且

$$\lambda_2^2 = \frac{\tau_{f1} - \tau_{f2}}{\delta_2 - \delta_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{(Y_1 + Y_2)^2}{D_1 + D_2} \right) = \frac{k_2}{k_1} \lambda_1^2,$$

$$\lambda_3^2 = \frac{\tau_{f3}}{\delta_f - \delta_2} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{(Y_1 + Y_2)^2}{D_1 + D_2} \right) = \frac{k_3}{k_2} \lambda_2^2,$$

其中

$$k_1 = \tau_{f1} / \delta_1, \quad k_2 = (\tau_{f1} - \tau_{f2}) / (\delta_2 - \delta_1),$$

$$k_3 = \tau_{f3} / (\delta_f - \delta_2).$$

由方程(21)给出了作用在 FRP 板上最大拉应力 $P_{\max}$ 表明, FRP-混凝土界面的最终荷载转移能力。应该强调的是, 当 G_I 显著, 区域 2 和区域 3 可能就不会出现在界面上。

采用方程(12),

$$\sigma''' + K_n b_2 \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \sigma = K_n b_2 \left(\frac{Y_1}{D_1} - \frac{Y_2}{D_2} \right) \tau' \quad (22)$$

因此, 获得界面正应力为:

$$\sigma = e^{-\beta x} (E_{li} \cos(\beta x) + F_{li} \sin(\beta x))$$

$$+ e^{\beta x} (G_{li} \cos(\beta x) + H_{li} \sin(\beta x)) + \sigma^* + \sigma_c \quad (23)$$

其中

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{b_2 K_n}{4} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right)}.$$

其中 σ^* 为对于 τ' 方程(22)的特解。在不同区域有不同的表达式。

$$\text{弹性区: } \sigma^* = \frac{b_2 K_n \left(\frac{Y_1}{D_1} - \frac{Y_2}{D_2} \right)}{\beta^4 + \lambda_1^4} \tau',$$

变弱区:

$$\sigma^* = \frac{b_2 K_n \left(\frac{Y_1}{D_1} - \frac{Y_2}{D_2} \right)}{\beta^4 + \lambda_2^4} \tau' \quad (24)$$

$$\text{局部区: } \sigma^* = \frac{b_2 K_n \left(\frac{Y_1}{D_1} - \frac{Y_2}{D_2} \right)}{\beta^4 + \lambda_3^4} \tau'$$

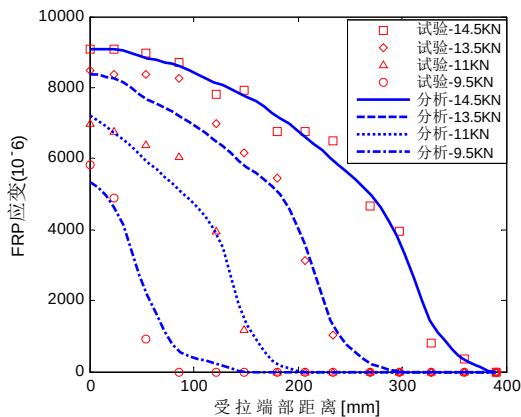
4. 实验验证

为了验证该混合模式模型, 将该模型计算所得的轴向应变 - 受拉端部距离曲线与文献^[13]试验结果进行比较, 如图 3、图 4 所示。图 3 为 CFRP 厚度为 0.22 mm, 垂直位移分别为 0 mm、4.0 mm 和 8 mm 情况下的应变 - 距离曲线分析与试验结果比较。图 4 为 CFRP 厚度为 0.44 mm, 垂直位移分别为 0 mm、4.0 mm 和 8 mm 情况下的应变 - 距离曲线分析与试验结果比较。

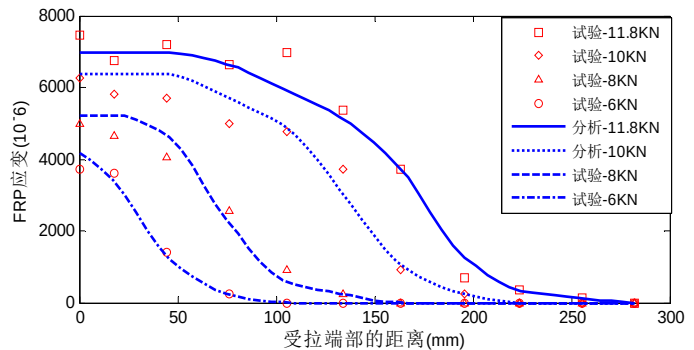
由图 3、图 4 对比可知, 模型计算结果与试验结果相吻合。

5. 结论

在本文中, 采用模式不耦合的本构关系来模拟界面剪切和起层作用, 对不同剥离阶段, 得到界面正应力、切应力、FRP 板轴力的解析解。剥离开始于传播统一到一个模型中。通过该模型数值与试验数据一致吻合, 证明该模型在模拟 FRP-混凝土界面在混合模式



(a)



(b)

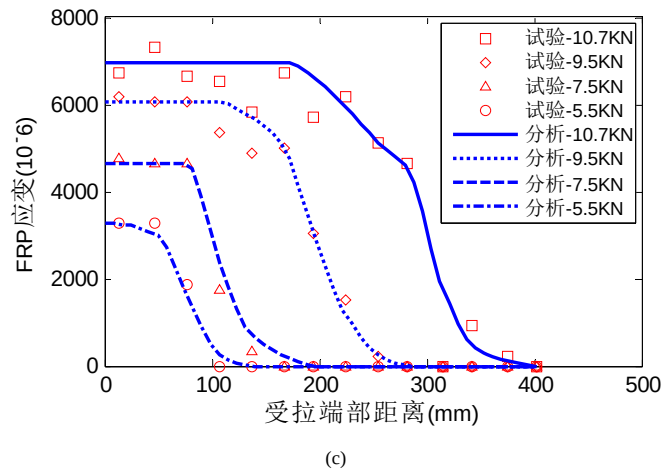


Figure 3. Comparison of analytical and experimental strain versus di-ance curves, CFRP thickness = 0.22 mm: (a) Vertical displacement = 0.0 mm (mode II load); (b) Vertical displacement = 4.0 mm; (c) Vertical displacement = 8.0 mm
图 3. FRP 板 - 受拉端部距离曲线的分析结果与试验数据比较

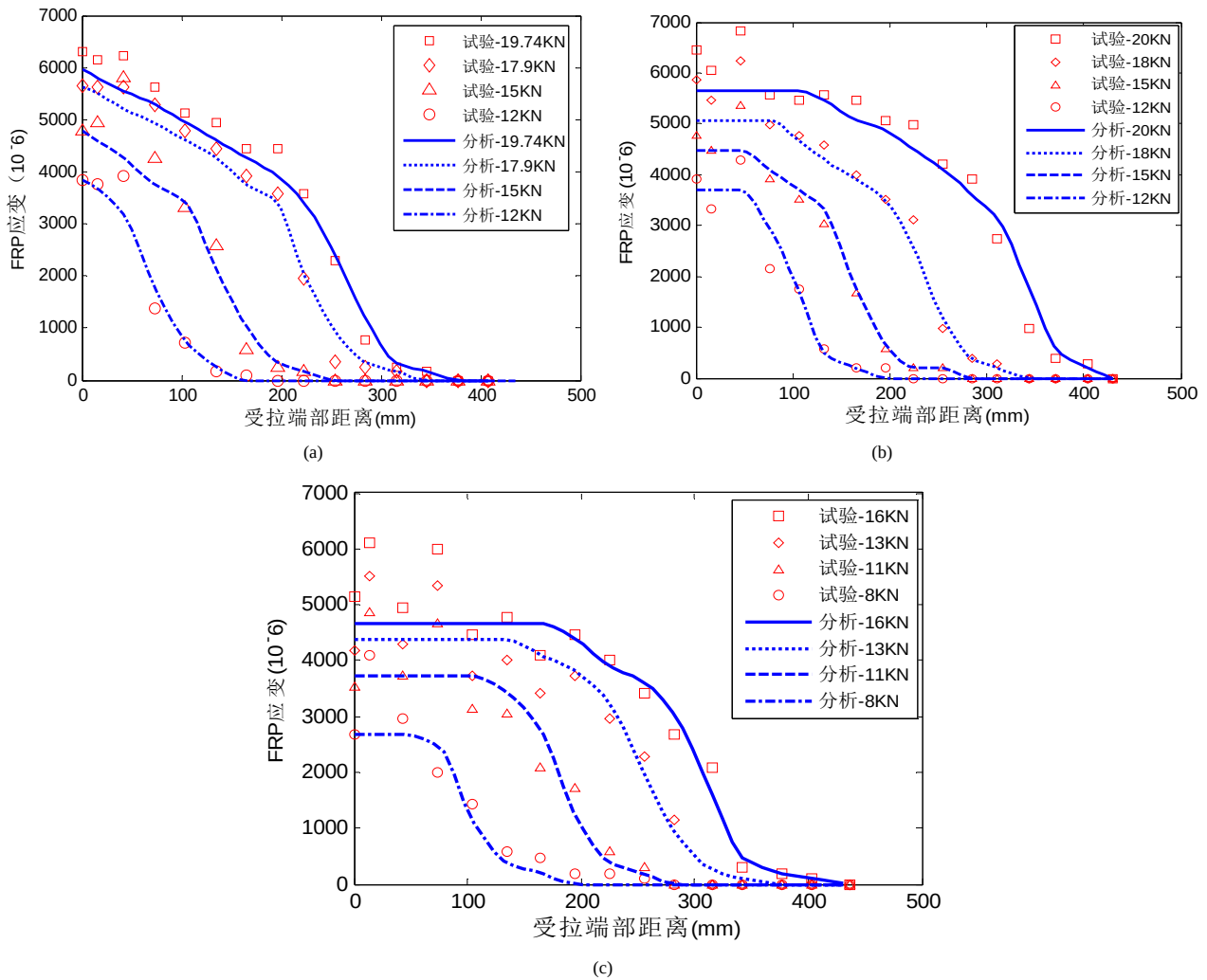


Figure 4. Comparison of analytical and experimental strain versus di-ance curves, CFRP thickness = 0.44: (a) Vertical displacement = 0.0 mm (mode II load); (b) Vertical displacement = 4.0 mm; (c) Vertical displacement = 8.0 mm
图 4. FRP 板 - 受拉端部距离曲线的分析结果与试验数据比较

加载下剥离分析的准确性, 该 CZM 为研究和表征界面混合模式剥离提供了有效的工具。

6. 致谢

感谢广西科技厅项目(2011GXNSFA018024); 广西教育厅项目(200911MS115、201010LX215); 广西柳州市应用技术研究与开发计划项目(2010020603)的支持。

参考文献 (References)

- [1] 郭樟根, 孙伟民, 曹双寅. FRP 与混凝土结构界面黏结 - 滑移本构关系的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 3(40): 1-5.
- [2] 叶列平, 陆新征, 滕锦光等. FRP 片材加固混凝土梁剥离承载力计算与设计[J]. 建筑结构, 2007, 12(37): 79-82
- [3] F. F. Lu, A. Syoub. Evaluation of debonding failure of reinforced concrete girders strengthened in flexure with FRPlaminates using finite element modeling. Construction and Building Materials, 2011, 25: 1963-1979.
- [4] 吴亚飞, 陈伟球. 基于内聚力模型的 FRP-混凝土粘结强度分析[J]. 工程力学, 2010, 7(27): 7-13.
- [5] S. T. Liu, D. J. Oehlers and R. Seracino. Study of intermediate crack debonding in adhesively plated beams. Journal of Composites for Construction, 2007, 11: 175-183.
- [6] S T Smith, R J Gravina. Modeling debonding failure in F-RP flexurally strengthened RC members using a local deformation model. Journal of Composites for Construction. 2007, 11: 184-191.
- [7] S.-K. Woo, Y. Lee. Experimental study on interfacial behavior of CFRP-bonded concrete. Structural Engineering. 2010, 14(4): 385-393.
- [8] 据宏昌, 陈国荣. 混凝土梁裂纹扩展的内聚区模型的数值模拟[J]. 郑州大学学报, 2008, 29(3): 5-10.
- [9] 潘元, 刘伯权, 黄华. FRP 片材加固混凝土结构黏结界面损伤分析[J]. 混凝土, 2008, 11: 25-28.
- [10] Z. Suo, J. W. Hutchinson. Interface crack between two elastic layers[J]. International Journal of Fracture, 1990, 43: 1-18.
- [11] L. De Lorenzis, G. Zavarise. Modeling of mixed-mode debonding in the peel test applied to superficial reinforcements[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 5419-5436.
- [12] H. Niu, V. Karbhari and Z. Wu. Diagonal macro-crack induced debonding mechanisms in FRP rehabilitated concrete. Composites Part B: Engineering, 2006, 37: 627-641.
- [13] J. Pan, C. K. Y. Leung. Debonding along the FRP-concrete interface under pulling/peeling effects. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 74: 132-150.