

界面强度对 CFRP-混凝土组合梁弯曲性能的影响*

杨文龙, 张亚芳, 刘 浩, 蔡北海
(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) 与混凝土之间的界面黏贴强度是影响 CFRP-混凝土组合梁弯曲性能的一个重要因素。文中按 CFRP 布的黏结长度不同建立了 3 组不同界面强度的数值模型。模拟了采用位移控制梁的四点弯曲加载过程, 分析了界面强度对 CFRP-混凝土组合梁宏观弯曲性能的影响。结果表明: 界面强度对组合梁的宏观承载力与开裂前刚度影响甚微; 但对梁开裂后的刚度与延性影响较大; 黏结长度越长, CFRP-混凝土组合梁对界面强度变化的敏感性越大。

关键词: CFRP; 界面强度; 组合梁; 黏结; 敏感性

中图分类号: TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2012) 06-0068-05

Influence of Interface Strength on Bending Properties of CFRP-Concrete Composite Beam

YANG Wenlong, ZHANG Yafang, LIU Hao, CAI Beihai

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The interfacial bond strength between CFRP (carbon fiber polymer) and concrete is an important factor for bending properties of CFRP-concrete composite beam. Three groups of numerical models are established based on the different bond length and interfacial strength. Four-point bending loading processes controlled by displacement are simulated. Influence of Interface Strength on Bending Properties of CFRP-concrete beam has been discussed. The results show that the interface strength has little effect on the macro-bearing capacity and the stiffness of composite beams pre-cracking, but significant effect on stiffness and ductility after cracking, and it also reflected that the longer CFRP is stuck, the more sensitive to the changes of the interfacial strength.

Key words: CFRP; interface strength; composite beam; bonding; sensitivity

CFRP 纤维增强聚合物具有抗腐蚀性和耐疲劳性好、自重轻、强度高、徐变低等优点, 在加固和翻新中已经得到广泛应用。但 CFRP 为脆性材料, 极限应变很小, 与混凝土具有明显不同的材料性能与力学性能, 组合利用时很难达到理想增强效果。大量工程实例与实验证明 CFRP-混凝土构件的破坏源于界面层的破坏, CFRP 界面黏结强度成为了影响增强效果的关键因素之一。国内外许多学者基于理论推导^[1-2]、有限元分析^[3]、实验研究等方法对

FRP-混凝土界面应力行为和破坏机制进行了大量研究并取得重要成果^[4-5]。但也存在一些不足, 如理论分析边界条件复杂, 求解困难, 传统有限元分析均匀假设与实际情况存在较大偏差, 物理实验费用与时间投入大, 结果较离散。本文利用大连理工大学材料破坏力学数值实验室开发的二维 RFPA^{2D} (Realistic Failure Process Analysis) 从细观角度研究了 CFRP-混凝土不同界面强度的薄腹梁在弯剪作用下的损伤破坏机制, 对 CFRP-混凝土组合结构的

* 收稿日期: 2012-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51278136); 广东省科技计划资助项目 (2011B050300019); 广东省高等学校高层次人才资助项目 (2050205)

作者简介: 杨文龙 (1985 年生), 男, 研究生; 通讯作者: 张亚芳; E-mail: zhangyafang2004@163.com

优化设计提供一种新的数值方法。

1 数值模型的建立

本数值模拟的材料常数为：受力筋和箍筋均为 HPB235，弹性模量 150 GPa，抗拉强度 235 MPa；骨料等级为 MU100，弹性模量 80 GPa，抗拉强度 100 MPa；基体为 C25，弹性模量 30 GPa，抗压强度 25 MPa；碳纤维为 CFS-I-200，弹性模量 235 GPa，抗拉强度 4 100 MPa。三组试件碳纤维布的黏结长度分别为跨长的 95%、55%、33% 即长黏贴 (AS)、中长黏贴 (MS) 和短黏贴 (SS)。本文用厚度为 1 mm 界面层代替界面区域，包括环氧树脂以及环氧树脂和混凝土相互浸渍融合的部分^[6]。加载步长为 0.002 mm/步，总加载步为 150。试件代号 B-AS-3 中，B 代表试件为梁，系数 3 代表界面强度为 3 MPa，其他试件依此类推。

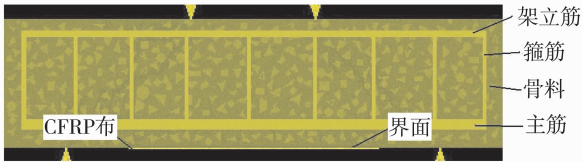


图 1 试件数值模型
Fig. 1 Numerical models

2 破坏模式与机理分析

2.1 界面强度对破坏模式的影响

图 2 (a) 例举出了长黏贴试件 B-AS-3 的部分损伤演化破裂过程图，其中 step10-1 表示第 10 加载步第 1 子步（下同，图中黑色点代表破坏单元）。图 2 (b) 为文献 [7] 的相应的物理实验结果。由图 2 (a) 可以看到，破坏单元首先随机分布在梁下部基体内，部分相邻破坏单元贯通形成微裂缝。继续加载后，出现明显的竖向弯曲裂缝 (Flexural crack)，CFRP 布在端部与保护层的下表面直接剥离，出现了沿界面方向的水平脱黏裂缝 (Debonding)。裂缝形成后，损伤发展更为迅速，弯曲裂缝遇 CFRP 布偏折成水平脱黏裂缝，同时，源于端部的水平裂缝仍继续向跨中移动。随着荷载的进一步增加，由弯曲裂缝偏折出的水平裂缝与端部发展的水平裂缝贯通，加固层发生脱黏破坏。这一损伤演化过程再现了 J. G. Teng^[7] 提及的加固层脱黏破坏模式 (图 2b 中 A、B)。

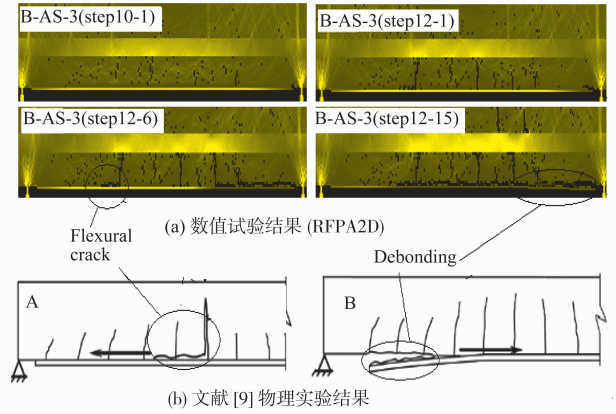


图 2 长黏贴弱界面试件 (B-AS-3) 的破坏过程
Fig. 2 Failure process of B-AS-3

随着界面强度的增加，加固层的破坏模式发生了显著变化。界面脱黏现象随着界面强度的提升而得到有效抑制。但随着加载的进行，试件出现明显的斜裂缝 (Critical diagonal crack)，CFRP 布黏结着保护层混凝土从端部一起被撕下，即发生了黏结破坏模式。图 3 (a) 为数值模拟结果，B-AS-20 试件的破坏模式与文献 [8] (图 3b 所示)、文献 [9] (图 3c 所示) 中的物理实验破坏模式非常一致，都可以观察到黏结破坏现象。

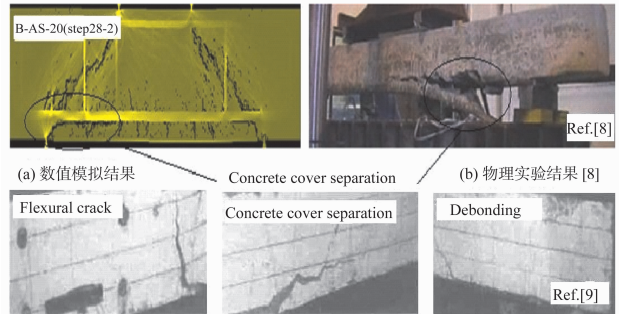


图 3 长黏贴强界面试件的破坏模式
Fig. 3 Failure mode of B-AS-20

对于中长黏贴试件 MS 与短黏贴试件 SS，弱界面短黏贴试件 (B-SS-3) 在 CFRP 布的两端弯曲裂缝与水平脱黏裂缝相交形成“L”形裂缝；强界面短黏贴试件 (B-SS-20) 只在加固层两端形成竖向的弯曲裂缝，黏结破坏不明显。弱界面中长黏贴试件 (B-MS-3) 水平脱黏部分增长，弯曲裂缝数量增加；强界面中长黏贴试件 (B-MS-20) 在加固层端部形成斜裂缝，出现部分黏结破坏现象。图 4 举出了 SS 系列和 MS 系列中具有代表性的破坏模式。

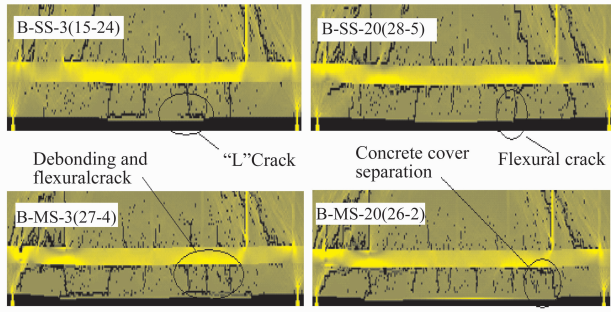


图 4 MS、SS 试件的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of MS and SS

2.2 界面损伤机理分析

CFRP-混凝土界面破坏是个非常复杂的问题, 涉及多种损伤破坏机理的作用, 已有不少学者进行了有益的工作, 出现多种不同的观点和计算方法。A. Tounsi、S. Benyoucef 等^[10]取典型分析微单元法进行应力分析, 采用弹性力学理论进行求解得到一些重要研究成果。Jian Yang^[11]也采用该方法对两相邻裂缝之间的界面脱黏进行应力分析并求解出了较理想结果。本文从细观角度出发, 引入非均匀性概念, 各相力学参数服从 Weibull 分布(式 1)^[12], 通过细观单元变形、破坏的个体行为的积累来反映宏观行为的演化。

$$\varphi(u) = \frac{m}{u_0} \cdot \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1} \exp\left(-\frac{u}{u_0}\right)^m \quad (1)$$

式中, u 代表材料细观单元力学特性参数 (如弹性模量、强度和泊松比等); u_0 为材料细观单元力学性质的平均值; m 是反映 Weibull 分布密度函数的形状参数也称为均值度, 均值度越大材料分布越均匀。

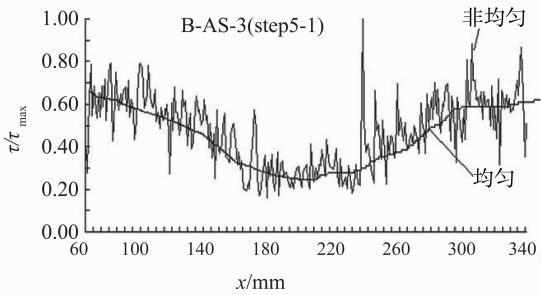
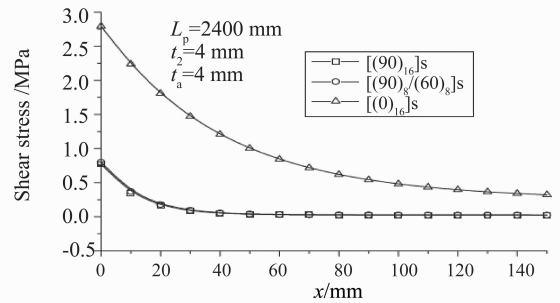
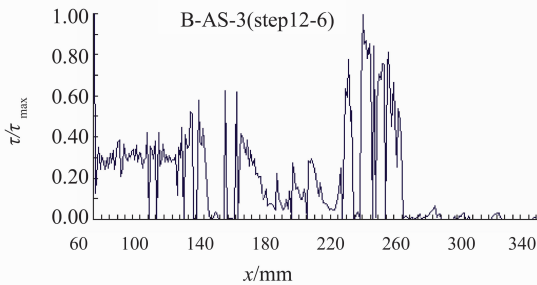
从细观角度分析材料损伤的关键是破坏准则的选择, 本研究采用考虑拉伸截断修正的摩尔-库仑准则, 即最大拉应力准则(式 1)和摩尔-库仑准则(式 2), 最大拉应力准则具有优先权。

$$\sigma_1 \geq \sigma_t \quad (2)$$

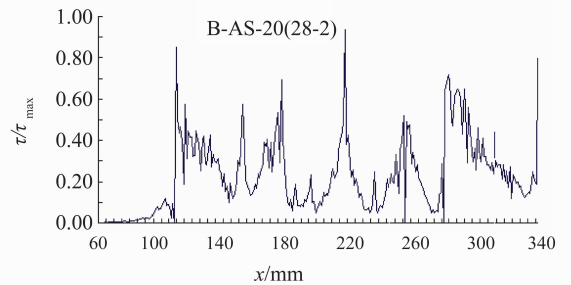
$$\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq \sigma_c \quad (3)$$

式中, σ_1 、 σ_3 分别为细观单元的最大和最小主应力; φ 是细观单元的摩擦角; σ_t 、 σ_c 分别为细观单元的单轴拉伸与压缩极限应力。细观单元应力状态达到摩尔库仑准则后, 通过刚度退化处理来表现损伤, 该部分具体内容请参考文献 [12]。

为探究界面损伤内在机理, 通过数值模拟对试件 B-AS-3 和 B-AS-20 的界面层 (界面层左右两端点横坐标值分别为 50、340) 取多单元信息, 得到切应力相对值沿着界面长度方向的分布曲线 (图 5)。其中光滑曲线为均匀假设时的分布曲线; 波动折线为考虑了材料的非均匀性的分布曲线。界面强度较低时, 界面单元的应力状态比基体单元更易满足破坏准则, 并且应力越大的单元达到破坏阈值

(a) 开裂前界面应力相对分布曲线 (RFPA^{2D})(b) A. Tounsi 等^[13]研究结果

(c) 长黏贴弱界面试件



(d) 长黏贴强界面试件

图 5 沿界面的剪应力分布曲线

Fig. 5 Shear stress along the interface distribution curves

的可能性越大。图 5 (a) 与 5 (b) 一致, 都反映出破坏前剪应力在界面层的两端分布最大, 从而揭示了损伤从端部开始萌发的根源。但由于材料赋值服从 Weibull 分布, 赋相同强度值的界面层中也存在少数较低强度的单元。这些单元破坏阈值低, 即使受力较小也会率先发生破坏, 这使得界面层中破坏单元的分布表现出一定的随机性。界面单元破坏后, 单元的刚度退化为零, 不能再传递应力, 已破坏单元会带动相邻单元的破坏而形成微裂缝, 如图 5 (c) 所示。一旦在界面层端部形成脱黏裂缝, 应力最大部分将出现在界面裂缝尖端, 促使尖端单元迅速破坏, CFRP 与基体的迅速剥离, 出现脱黏破坏模式。当界面强度较高时, 基体单元将先于界面单元破坏, 界面与其周围区域的保护层基体将黏结在一起, 故而出现黏结破坏现象。黏结破坏后界

面单元本身没有破坏, 仍然能传递部分应力, 所以保留部分残余应力。图 5 (d) 为强界面试件发生黏结破坏的应力分布情况图, 反映出黏结破坏现象的应力分布特征。

3 荷载 - 位移曲线分析

为反映界面强度对梁载全过程的影响, 图 6 举出了各试件的荷载 - 加载步曲线。曲线中 B-0-0 是代表无外贴 CFRP 布的数值对比梁, 以用来对比分析各种黏结情况的 CFRP-混凝土组合梁的弯曲性能。本文仿照文献 [15] 将破坏过程分为线弹性 (OA)、线性软化 (AB)、非线性软化 (BC)、脆性破坏 (CD) 四个阶段。图 6 (a) 反映了界面强度对长黏贴试件破坏过程的刚度、极限承载力和延性等弯曲性能的影响。可以看出界面强度对线性阶

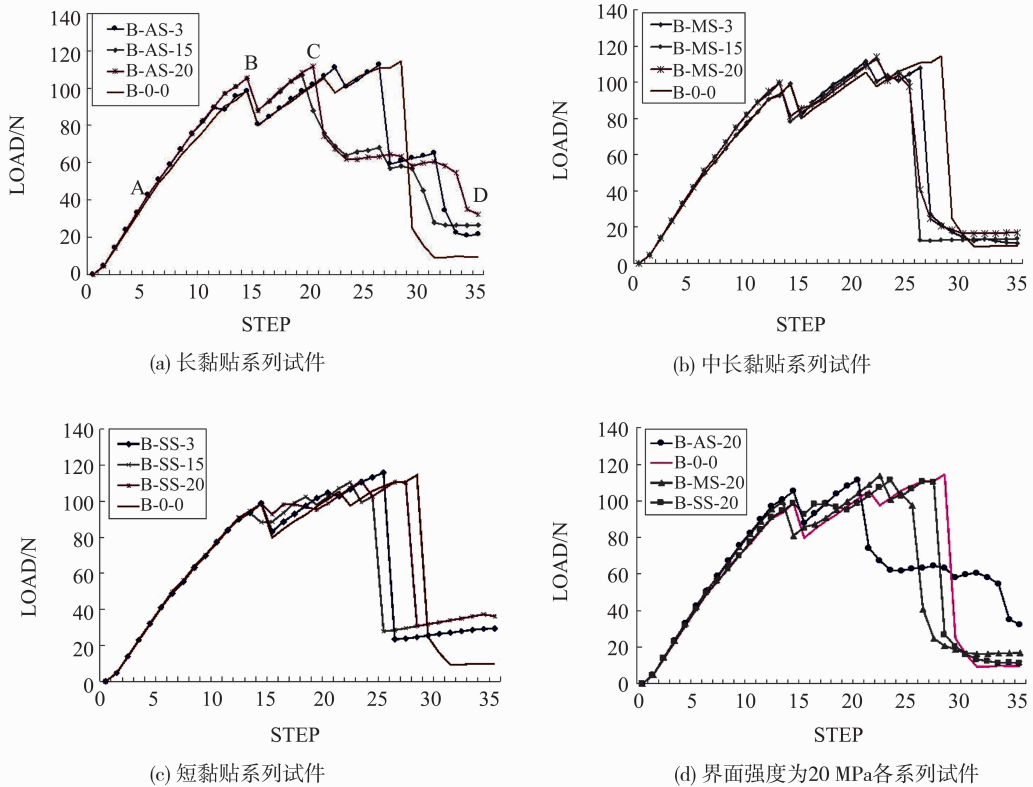


图 6 荷载 - 加载步曲线

Fig. 6 load-step curve

段梁的抗弯刚度无显著作用 (OA 段曲线基本重合), 但对线性软化阶段的刚度退化和宏观开裂荷载 (A 点位置) 有明显影响, 这与文献 [11] 中描述一致, 且界面强度越高作用越明显。文献 [14] 中提到 CFRP 布对试件弯曲变形的约束是难以实现理想增强效果的原因之一。图 6 (a) 中亦

反映出当界面强度从 3 MPa 到 20 MPa 变化时, CFRP 布对试件弯曲变形约束作用越大, 软化过程依次缩短 (BC 段), 表明界面强度越高材料脆性越大, 文献 [15] 研究界面强度对柔颗粒增强复合材料破裂特性的影响具有相同结论; 与 B-0-0 对比发现在基体强度等级较低时, 各不同界面强度

试件对提高构件极限承载力并无明显作用 (C 点位置)。图 6 (b)、图 6 (c) 同样也反映了该情况,这与文献 [7] 阐述的结论一致。文献 [15] 中指出环氧树脂与混凝土之间的界面是影响加固层破坏的重要部分。对比图 6 中 a、b、c, B-AS 系列试件对界面强度最为敏感,即表现为各不同界面强度试件与对比试件 B-0-0 的荷载-加载步曲线偏离程度最大, B-MS 系列试件、B-SS 系列试件破坏对界面强度的敏感性依次降低 (B-SS-3 与 B-0-0 曲线已经基本重合)。由图 6 (d) 可见,相同界面强度时,采用长黏贴方式 (B-AS-20) 提高开裂荷载与开裂前构件刚度最为有效。另一方面,长黏贴使钢筋混凝土构件与周围环境接触部分减少,钢筋能受到更好的保护从而减少了界面由于腐蚀而发生的界面损伤。而且黏结长度越长线性软化阶段越短,各种黏结方式同样也对峰值荷载都没有明显提高。

5 结 论

本文利用 RFPA^{2D} 从细观角度出发,对 CFRP-混凝土组合结构梁进行了加载破坏全过程的数值模拟。从典型加载步的损伤演化状态分析了界面强度对加固加载破坏模式的影响。并对界面层单元进行了应力分析得到应力分布曲线,解释了对应的损伤状态;从荷载-加载步曲线探讨了界面强度对不同黏结长度系列试件弯曲性能的影响。得到如下结论:①界面强度较低时,试件发生沿界面水平方向的脱黏破坏,界面强度较高时,CFRP 布与保护层混凝土一起撕下发生黏结破坏。②剪应力在界面层两端分布最大,故加固层源于端部并向跨中移动。③界面强度的增加能显著提高梁在宏观裂缝出现前的抗弯刚度与开裂荷载,但 CFRP 布强黏贴试件弯曲变形约束作用大,降低了构件的延性。所以选用时要综合考虑刚度与延性要求合理选用。④界面强度对长黏贴 CFRP-混凝土组合梁破坏影响作用显著,中长黏贴与短黏贴试组合梁的破坏状况对界面强度反应的敏感性依次降低。

参考文献:

- [1] BENACHOUR A, BENACHOUR S, TOUNSI A, et al. Interfacial stress analysis of steel beams reinforced with bonded prestressed FRP plate [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30: 3305 - 3315.
- [2] 李春霞, 晏石林, 周毓倩. CFRP 抗弯加固混凝土梁的界面应力分析 [J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32 (23): 35 - 38.
- [3] OBAIDAT Yasmeeen Taleb, EYDEN Susanne. The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modeling retrofitted RC beams with FEM [J]. *Composite Structures*, 2010, 92: 1391 - 1398.
- [4] YAO J, TENG J G. Plate and debonding in FRP-plated RC beams—I: Experiments [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29: 2457 - 2471.
- [5] 关天发, 袁鸿. CFRP 加固钢筋混凝土曲梁的抗弯性能试验研究 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47 (S2): 109 - 113.
- [6] 邓江东, 宗周红, 黄培彦. FRP 加固钢筋混凝土梁界面开裂分析 [J]. *应用力学学报*, 2010, 27 (3): 53 - 59.
- [7] TENG J G, YUAN H, CHEN J F. FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 43: 5750 - 5778.
- [8] TOUNSI A, HASSAINE T D, BENYOOUEF S, et al. Interfacial stresses in FRP-plated RC beams: Effect of adherend shear deformations [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29: 343 - 351.
- [9] 郭永昌, 谢志红. 碳纤维布长度对 RC 加固梁抗弯性的影响研究 [J]. *广东工业大学学报*, 2005, 22 (2): 89 - 95.
- [10] TOUNSI A, BENYOOUEF S. Interfacial stresses in externally FRP-plated concrete beams [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2007, 27: 207 - 215.
- [11] YANG Jian, YE Jianqiao. Interfacial stresses in plated beams with cracks [J]. *Composite Structures*, 2002, 57: 125 - 134.
- [12] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] 褚云朋, 贾彬, 姚勇, 等. CFRP 复合加固损伤 RC 梁抗弯承载力试验 [J]. *建筑结构*, 2011, 41 (2): 120 - 123.
- [14] 郭永昌, 李丽娟. 纤维布混杂形式对混凝土界面力学性能的影响 [J]. *混凝土*, 2007 (5): 11 - 14.
- [15] 张亚芳, 唐春安, 陈树坚. 界面强度对柔颗粒增强复合材料破裂特性的影响 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46 (1): 36 - 39.
- [16] CORONADO C A, LOPEZ M M. Sensitivity analysis of reinforced concrete beams strength-ened with FRP laminates [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2005, 28: 102 - 114.