

# 碳纤维布与木材界面粘结性能的数值模拟

薛建阳<sup>1</sup>, 张凤亮<sup>2</sup>, 赵鸿铁<sup>1</sup>, 谢启芳<sup>1</sup>, 隋 葵<sup>1</sup>, 吴占景<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082)

**摘 要:**随着碳纤维布在木结构古建筑加固领域的广泛应用,明确碳纤维布与木材之间的界面粘结力学性能是进行加固的前提和基础.主要结合碳纤维布-木材的单剪试验,对5个粘贴碳纤维布的试验木块采用 ANSYS 有限元软件进行了非线性数值模拟,研究了碳纤维布粘结长度及宽度变化对极限粘结荷载的影响,分析了碳纤维布的应变分布规律以及界面粘结剪应力的分布特点和传递过程,并给出了试验值和计算值的误差分析.计算结果表明,采用的模拟界面粘结性能的有限元方法具有可行性.

**关键词:**碳纤维布;粘结性能;界面;木材;有限元

**中图分类号:** TU 366; TU 311.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)03-0305-06

近年来,国内外专家学者对碳纤维布加固古建筑木结构技术的研究和应用呈现快速增长的趋势.通过收集国内外的工程实践以及试验研究表明,碳纤维布加固古建筑木结构技术的关键在于碳纤维布与木材之间的粘结性能.界面高质量的粘结是保证两种材料共同工作的前提,如何确定界面的粘结强度是碳纤维布加固技术的一个难题.近几年,国内外专家已经开始对其进行研究,文献[1]通过试验主要得出了纤维布与木材的有效粘结长度;文献[2]通过试验得出了纤维布与木材之间的粘结-滑移本构模型;文献[3]通过剪切粘结试验研究了碳纤维布与木材之间的破坏特征以及应变分布特点,但结果不是很理想;文献[4]主要研究了湿度的变化对界面粘结性能的影响.由于界面粘结性能牵涉到复杂的非线性力学行为,因此很难从理论方面得出精确的解.因此,本文主要基于试验研究的基础上,借助于有限元软件对碳纤维布与木材的粘结性能进行非线性分析,并与试验结果进行对照,使粘结受力机理更加清晰明了.

## 1 碳纤维布与木材的单剪试验

该试验主要研究碳纤维布与木材顺纹方向的粘结性能,试验木材采用福杉,其属性如表1所示.木材的试件长度方向为顺纹方向,长度为240 mm,宽度为120 mm,厚度为60 mm,采用一层纤维布与木块粘结.变化参数为碳纤维布的粘结长度(40 mm、80 mm 以及 120 mm 各三个)及宽度(40 mm、60 mm)(图1所示),碳纤维布的属性如表2所示.将试件固定在如图2所示单剪试验机装置上进行单剪试

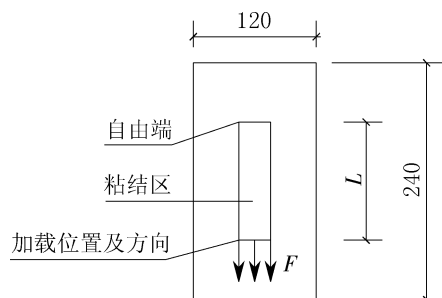


图1 试件尺寸及加载方式(单位:mm)

Fig. 1 Sample size and loading method

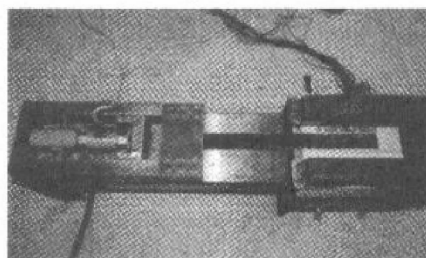


图2 单剪试验装置

Fig. 2 Single shear test device

收稿日期:2012-09-27 修改稿日期:2013-05-05

基金项目:国家科技支撑计划资助课题(2013BAK01B03-02);国家自然科学基金资助项目(51278399);国家文物局文物保护科学和技术研究课题(20110123)

作者简介:薛建阳(1970-),男,河南洛阳人,教授,博士,从事钢与混凝土组合结构、钢筋混凝土结构及古建筑木结构抗震性能研究.

验. 粘结剂采用日产小西 E2500S,其属性如表 3 所示.

表 1 福杉木材相关参数

Tab. 1 The relevant parameter of laceolata

$E_x$ /MPa	$E_y$ /MPa	$E_z$ /MPa	$PR_{xy}$	$PR_{yz}$	$PR_{xz}$	$G_{xy}$ /MPa	$G_{yz}$ /MPa	$G_{xz}$ /MPa
624	10 110	250	0. 2	0. 47	0. 43	650	275	210

其中  $X$  方向为木材横纹径向, $Y$  方向为木材顺纹方向, $Z$  方向为木材横纹弦向; $E$  为弹性模量, $PR$  为泊松比, $G$  为剪切模量.

表 2 碳纤维布的属性

Tab. 2 The attribute of CFRP

宽度/mm	单层厚度/mm	单位面积质量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉伸应变/%
40	0. 111	300	1 859. 1	97. 8	1. 9

表 3 粘结剂的属性

Tab. 3 The attribute of binder

粘结剂	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	极限应变/%	压缩模量/MPa	剪切强度/MPa
E2500S	49. 4	2 677	1. 8	93. 3	16. 4

2 纤维布与木材粘结性能的有限元模拟

2. 1 单元类型的选择及本构关系的确定

2. 1. 1 木材

木材具有轻质、强度高、容易加工等一系列的优点,但也有质地不均、各向强度不同、容易变形、耐久性差等天然缺陷<sup>[5]</sup>. 同时,在其物理及力学性能方面,横纹、顺纹方向性质差异较大,以及在受拉、受压、受剪时有不同的行为,使其有着很强的正交各向异性的特点. ANSYS 有限元软件中, Solid45 实体单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力刚化以及大变形大应变和模拟各向异性等功能,所以本文采用 Solid45 单元来模拟木材. 该单元具有 8 个节点,每个节点有 3 个自由度,即  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的线位移.

木材的特殊力学性能主要表现在低负荷时为弹性,在高负荷时表现为塑性,并且有类似金属在特定条件下才有的蠕变和松弛行为. 考虑到加载荷过程较短,而且木材各方向拥有不同的力学性质,数值模拟中采用如下假定:(1)正交异性弹塑性模型,不考虑蠕变和松弛行为;(2)木材顺纹、横纹径向、弦向成正交异性. 本文木材的各向异性本构关系<sup>[6]</sup>采用如下图 3 所示. 这个模型采用广义 Hill 屈服准则,它不仅考虑了材料的弹性参数的各向异性和屈服强度的各向异性,而且还考虑了拉伸状态和压缩状态下屈服强度的不同. 使用这个模型必须满足以下条件:在各个方向上的拉伸和压缩屈服应力之间必须满足以下方程<sup>[6]</sup>:

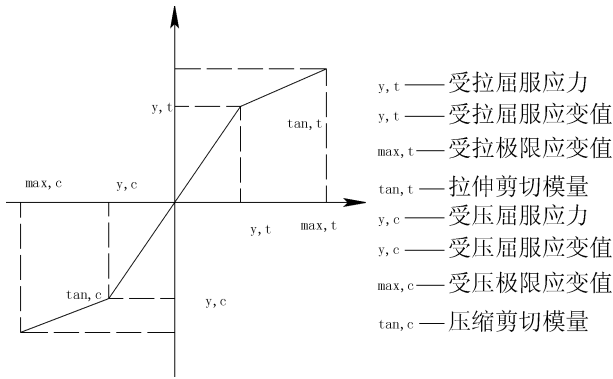


图 3 木材的本构关系曲线

Fig. 3 Wood constitutive relationship

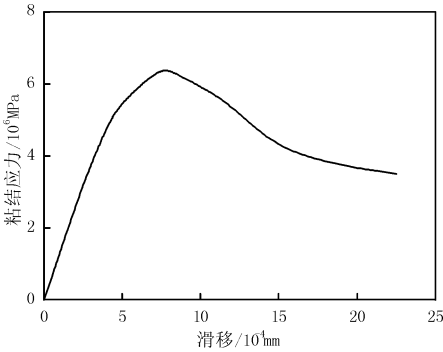


图 4 试验得出粘结剂剪应力-滑移曲线

Fig. 4 Shear stress-sliding curve of binder derived from test

$$\frac{\sigma_{+x}-\sigma_{-x}}{\sigma_{+x}\sigma_{-x}}+\frac{\sigma_{+y}-\sigma_{-y}}{\sigma_{+y}\sigma_{-y}}+\frac{\sigma_{+z}-\sigma_{-z}}{\sigma_{+z}\sigma_{-z}}=0$$

(1)

在塑性区发展时保持一个闭合的屈服面必须满足下面这个不等式:

$$M_{11}^2+M_{22}^2+M_{33}^2-2(M_{11}M_{22}+M_{22}M_{33}+M_{11}M_{33})<0$$

(2)

其中:  $\sigma_{+j}$  和  $\sigma_{-j}$  分别是  $j$  方向的拉伸和压缩屈服强度,在此,压缩屈服应力被作为正值.对剪切屈服,  $\sigma_{+j}=\sigma_{-j}$ .

此外:

$$M_{jj}=\frac{K}{\sigma_{+j}\sigma_{-j}},K=\sigma_{+x}\sigma_{-x}$$

(3)

根据《木材学》<sup>[7]</sup>中提到的福杉的相关参数,木材特性见表 1.

2.1.2 碳纤维布

碳纤维布采用 SHELL63 壳单元,SHELL63 既具有弯曲强度又具有膜强度,可以承受平面内荷载和法向荷载,考虑应力刚化和大变形能力,并且可设置单元厚度.该单元每个节点具有 6 个自由度:沿节点坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的平动和沿节点坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴的转动.

由于碳纤维布具有正交各向异性的特点,只能承受拉力不能承受压力,顺纹抗拉强度很高,没有屈服强度,仅有极限强度.因此,当材料内力达到其极限抗拉强度时,即完全丧失了刚度和强度,是一种脆、弹性材料.本文将碳纤维布的本构模型取为线弹性模型.碳纤维布的参数属性见表 2.

表 4 木材模型相关参数

Tab.4 Relevant parameter of wood model

方向	X	Y	Z
受拉屈服应力/MPa	4.2	29.96	4
$E_{\text{tan,t}}/\text{MPa}$	0	2 064.9	0
受压屈服应力/MPa	4.21	14.84	4.617 7
$E_{\text{tan,c}}/\text{MPa}$	0	2 064.9	0
剪切屈服应力/MPa	5	5	5
$E_{\text{tan,G}}/\text{MPa}$	0	0	0

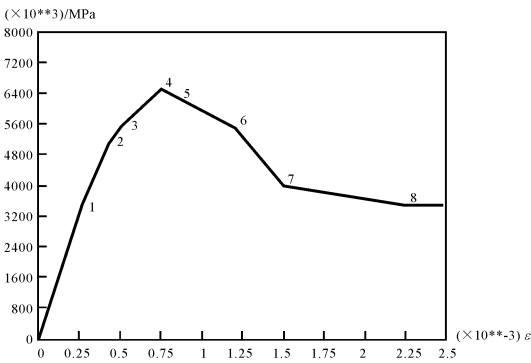


图 5 有限元模型粘结剂剪应力-应变曲线

Fig.5 Shear stress-strain curve of finite element model

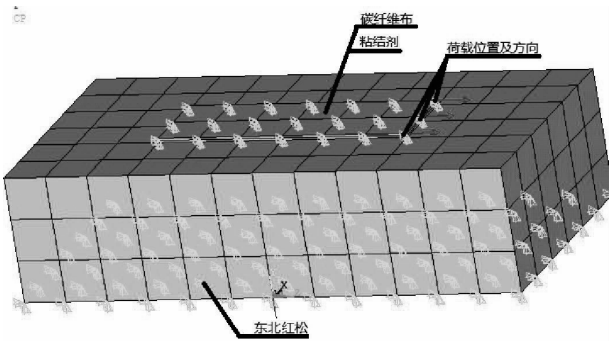


图 6 有限元加载模型示意

Fig.6 The finite element model of loading

2.1.3 粘结剂

通过试验表明,木材和碳纤维布发生粘结破坏时,木材的表面都会被粘结剂粘下来分散的大片木片,大部分破坏面凹凸不平,少数较为平整.这种破坏特征和纤维布与混凝土间的粘结破坏特征相似.因此,为了能够更好的模拟碳纤维布与木材之间的粘结性能,与文献[8]采用零非线性弹簧单元 COMBIN39 单元以及文献[9]采用 Target170、Contac173 接触单元来模拟粘结界面不同的是,本文首次提出采用试验得出的碳纤维布与木材之间的剪应力-滑移曲线<sup>[2]</sup>(如图 4 所示)通过换算作为粘结剂的本构模型,图 5 给出了粘结剂在 Ansys 有限元软件中的应力-应变曲线.根据粘结剂的特性,粘结剂单元类型选用 Solid45 单元来模拟.

2.2 加载方式及求解

为了能够正确的模拟碳纤维布线弹性材料在涂胶之后性能的变化,本文将碳纤维布的节点与非线性材料粘结剂的上层节点耦合;同时,根据试验的破坏形态,将木材的上层节点与粘结剂的下层节点耦合.模型的加载方式采用施加力方式,初始值为 1 kN,每级荷载增量为 1 kN.为了避免应力集中,将碳纤维布施加荷载端部建立一个刚性线区域与加载点耦合(如图 6 所示).

### 3 结果分析

#### 3.1 碳纤维布应变发展规律

为了能够得出界面的粘结应力分布情况,先提取碳纤维布两相邻节点(假定两点之间的粘结应力均匀变化)的应变值,可根据两点的应变值计算出它们之间的平均剪应力.因此,碳纤维布的应变分布能够间接的反映出界面的粘结性能.图7给出了各个粘结长度下不同荷载作用下的碳纤维布的应变分布图.

通过图7可以得出,在加载端附近,碳纤维布的应变值随着荷载的增加逐渐增加,远离加载端的应变值增加缓慢;随着与加载端距离的增加,碳纤维布的应变值逐渐减小;由于受到非线性材料粘结剂的作用,线性材料碳纤维布的应变值的变化并非线性变化,出现了一定的非线性,这与实际情况相吻合,也与试验值基本吻合,说明本文提出的模拟粘结性能的有限元分析方法是正确可行的.同时,应变测量结果在一定程度上能够表明碳纤维布与木材之间存在着“有效锚固区长度”的概念.

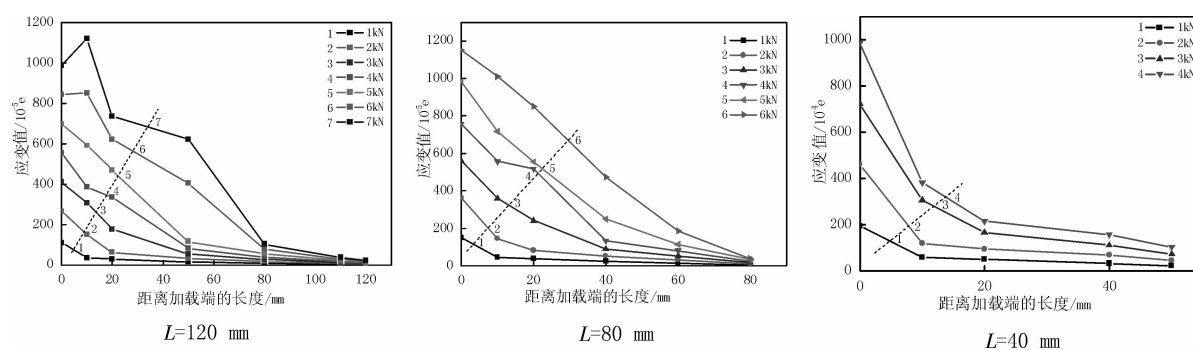


图7 不同粘结长度下碳纤维布在各级荷载下的应变分布图

Fig. 7 Strain distributions of CFRP with different length under different load

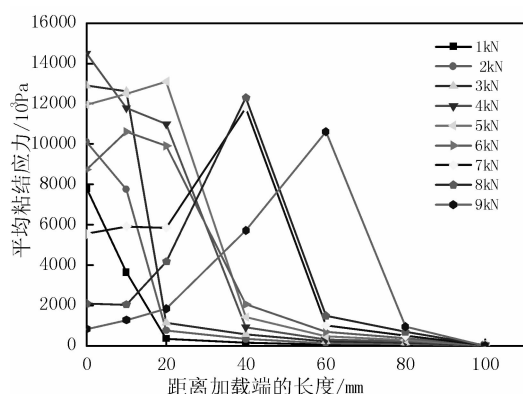


图8 碳纤维布-木材粘结剪应力分布图

Fig. 8 Bond stress distributions of CFRP-wood

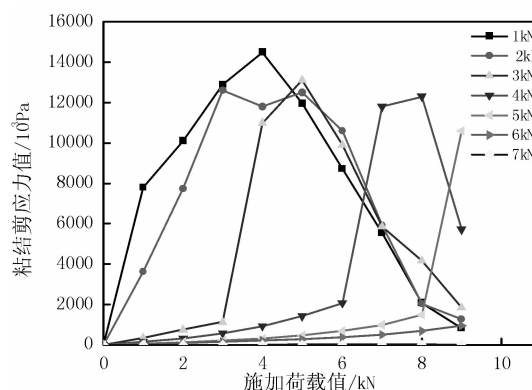


图9 界面各测点的剪应力值随施加荷载的变化规律

Fig. 9 Changing regularity of shearing stress at interface point with load

#### 3.2 碳纤维布与木材的粘结应力分布规律

取粘结宽度  $B=60$  mm, 粘结长度  $L=100$  mm 的模型作为典型试件,分析不同荷载作用下碳纤维布-木材之间的粘结剪应力分布规律如图8所示.为了能够正确的分析各个测点在不同荷载作用下所处的应力状态,绘制如图9所示的界面各测点的平均粘结剪应力值随施加荷载的变化规律.

通过图8和图9可以看出:

加载点( $a=0$ 处)在加载1~4 kN时,界面粘结剪应力基本按照线性增加,说明在外荷载1~4 kN之间,该点的界面状态处于弹性阶段;大于4 kN之后,该点处的粘结剪应力值迅速下降,界面进入完全塑性阶段,该点出现剥离裂缝.

距离加载点  $a=10$  mm 处,外荷载  $1\sim 3$  kN 时,界面剪应力呈线性增加,界面处于弹性状态; $3\sim 6$  kN 时,界面剪应力变化不大,此时,界面处于弹塑性状态;随着荷载的增加,剪应力值逐渐减小,界面进入完全塑性状态,剥离裂缝向加载远端扩展。

距离加载点  $a=20$  mm 处,在加载初期( $1\sim 3$  kN),由于距离加载端比较远,界面粘结应力并未充分发展;外荷载  $3\sim 5$  kN,剪应力线性增长;大于 6 kN 后,界面剪应力线性减小。

距离加载点  $a=40$  mm 处,外荷载  $1\sim 6$  kN 时,该点处的剪应力很小;在 8 kN 左右,剪应力值达到最大。

距离加载点  $a=60$  mm、80 mm 处,剪应力流的发展并不充分,在达到极限荷载 9 kN 时,剪应力值达到最大,此时界面几乎处于完全剥离状态,剪应力流不再继续传递。

距离加载点  $a=100$  mm 处,剪应力值很小,应力流不再传递,说明此点已经超出“有效锚固区长度”范围。

从以上分析可以得出:随着荷载的增加,粘结剪应力峰值向远离加载点方向移动,因此,可以总结为粘结界面的破坏过程就是界面剪应力峰值由加载端向加载远端的传递过程;碳纤维布与木材的“有效锚固区长度”为  $80\sim 100$  mm,这与试验所得结论基本一致。

### 3.3 粘结长度及粘结宽度对极限粘结荷载的影响

图 10 给出了不同粘结长度下,碳纤维布与木材的极限粘结荷载值。可以看出,在“有效锚固区长度”范围内,极限粘结荷载随着粘结长度的增加而增加;超过“有效锚固区长度”后,极限粘结荷载处于平稳甚至有下降趋势,证明了极限粘结荷载并不随着粘结长度的增加而无限增加,这与试验结果也相吻合。

通过图 10 和表 5 可以看出,极限粘结荷载随着粘结宽度的增加也不断的增加。由于试验采用的材料离散性(木材由于含水率的不同、粘贴表面的粗糙程度不同以及防腐剂处理粘贴表面对材料性能的影响等)比较大,而有限元模拟采用的材料性能太理想化(尤其是木材粘贴表面的粗糙度为 0 且不存在含水率的概念);其次,由于木材、粘结剂材料对环境的敏感度比较大,外界环境因素如环境温度及湿度等的变化可能会引起木材和粘结剂的强度的变化,使得试验值和计算值产生一定的误差。

## 4 结 论

本文主要根据碳纤维布-木材粘结性能的试验采用 ANSYS 有限元软件进行界面粘结性能的非线性分析,通过大量的模拟计算得出了碳纤维布粘结长度及宽度对极限粘结荷载的影响,分析了碳纤维布的应变分布规律以及界面粘结剪应力的分布特点和传递过程。分析结果表明:

(1)通过输入粘结剂的本构关系,将粘结剂的节点分别与碳纤维布以及木材耦合的方法来模拟碳纤维布-木材界面粘结性能的分析方法是可行的。

(2)在加载端附近,碳纤维布的应变值随着荷载的增加逐渐增加,远离加载端的应变值增加缓慢;由于受到非线性材料粘结剂的作用,线性材料碳纤维布的应变值的变化出现了一定的非线性。

(3)随着荷载的增加,粘结剪应力峰值向远离加载点方向移动,因此,可以总结为粘结界面的破坏过程就是界面剪应力峰值由加载端向加载远端的传递过程;碳纤维布与木材的“有效锚固区长度”为  $80\sim 100$  mm。

(4)在“有效锚固区长度”范围内,极限粘结荷载随着粘结长度的增加而增加;超过“有效锚固区长度”后,极限粘结荷载处于平稳甚至有下降趋势;极限粘结荷载随着粘结宽度的增加也不断的增加。

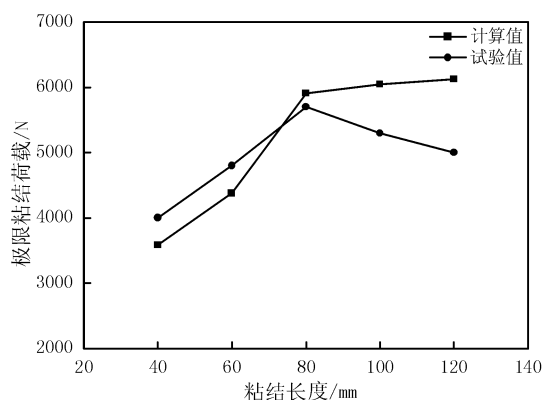


图 10 粘结长度对极限粘结荷载的影响

Fig. 10 Influence of bond length on terminal bond load

表 5 不同粘结宽度下极限粘结荷载计算值

Tab. 5 The calculation values terminal bond load in different bond width

粘结宽度/mm	$L=100$ mm 极限粘结荷载计算值/N
60	6 049
40	5 136

## 参考文献 References

- [1] 庄荣忠,杨勇新. BFRP与木材的有效粘结长度的试验[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(1):74-77.  
ZHUANG Rong-zhong, YANG Yong-xin. Experiment on the effective bond length between BFRP sheet and wood [J]. Journal of Hua-qiao University: Natural Science, 2010, 31(1):74-77.
- [2] 汪健跟,杨勇新,胡 玲,等. 玄武岩纤维布与木材粘结-滑移本构关系的试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2009,10(3):23-27.  
WANG Jian-gen, YANG Yong-xin, HU Ling, et al. Experimental study on bond-slip behavior between BFRP and wood. [J]. FRP/ composite material, 2009, 10(3):23-27.
- [3] 谢启芳. 中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.  
XIE Qi-fang. Experimental study and theoretical analysis on strengthening for chinese ancient timber buildings[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [4] BARBERO E, DAVALOS J, MUNIPALLE U. Bond strength of FRP-Wood interface[J]. Journal of reinforced plastics and composites, 1994, 13(9):835-853.
- [5] 张凤亮. 中国木结构古建筑屋盖梁架体系力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.  
ZHANG Feng-liang. Research on the Mechanical Properties of Chinese Ancient Timber-Frame Buildings Roof-beams System[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [6] 胡 明. 碳纤维加固局部受压区损伤木梁数值模拟分析及试验研究[D]. 西安:西安交通大学,2006.  
HU Ming. Numerical simulation and experiment research on the partial damaged in section pressed area of timber beam reinforced by CFRP[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [7] 尹思慈. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1996.  
YIN Si-ci. Wood science[M]. Beijing: China Forestry Press, 1996.
- [8] 王全凤,薛婷怡,黄奕辉,等. FRP-砖界面粘结-滑移计算模型[J]. 工程力学,2010,27(12):130-134.  
WANG Quan-feng, XUE Ting-yi, HUANG Yi-hui, et al. Computational model for bond-slip behavior between FRP and brick[J]. Engineering mechanics, 2010, 27(12):130-134.
- [9] 陈 莹,王全凤,黄奕辉,等. GFRP复合材料与砖界面粘结性能的数值模拟[J]. 工程力学,2010,24(5):119-124.  
CHEN Ying, WANG Quan-feng, HUANG Yi-hui, et al. Numerical analysis for bonding in the interface between GFRP and clay brick [J]. Engineering mechanics, 2010, 27(5):130-134.
- [10] 黄玉亭,杨勇新,李 平. 碳纤维布与钢材粘结性能的数值模拟[J]. 建筑结构,2010,40(5):34-36.  
HUANG Yu-ting, YANG Yong-xin, LI Ping. Numerical analysis of bond performance between CFRP sheets and steel plates[J]. Building Structure, 2010, 40(5):34-36.

## Numerical analysis for bonding in the interface between CFRP and wood

XUE Jian-yang<sup>1</sup>, ZHANG Feng-liang<sup>2</sup>, ZHAO Hong-tie<sup>1</sup>,  
XIE Qi-fang<sup>1</sup>, SUI Yan<sup>1</sup>, WU Zhan-jing<sup>1</sup>

(1. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;  
2. Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an 710082, China)

**Abstract:** With the CFRP widely used in the field of strengthened ancient structure, explicit bonding property between the CFRP and wood was the premise and foundation of strengthening. Based on the single-shear experiment between CFRP and wood, nonlinear numerical analysis was carried out on 5 wood sticking CFRP by ANSYS finite element software, and the influence of the limit bonding load produced due to the change of CFRP bond length and width. The strain distribution rule of CFRP and distribution characteristics of bonding shear stress in interface and transfer process were obtained, and the error analysis between test value and calculated value was given. The calculated results showed that it was feasible to simulate the bonding property in interface by finite element method.

**Key words:** carbon fiber reinforced polymer (CFRP); bonding property; interface; wood; finite element