

FRP 与砌体界面粘贴 - 滑移本构关系的适用性研究

李铁军, 郑怡, 高飞, 何静

(重庆市公路工程质量检测中心, 重庆 400060)

摘要:对 8 个外贴 FRP 条加固砌体构件的粘结性能进行了试验,分析 FRP 应变以及局部粘结剪应力发展规律,计算得到了局部粘结应力 - 滑移关系曲线。通过对试验结果的统计回归分析,FRP 与砌体的粘贴强度主要与砌体强度有关,并提出 2 种 FRP 与砌体界面的局部粘结剪应力 - 滑移本构关系数学模型。2 种本构关系与试验的结果均吻合较好,可为砌体加固工程应用提供借鉴。

关键词:FRP;砌体;粘结 - 滑移;本构模型;Popovics 模型;双曲线模型

中图分类号:TU365

文献标志码:A

引言

纤维增强复合材料 FRP(Fiber Reinforced Polymer)具有高强、轻质、耐腐蚀和施工方便等优点。近年来,外贴 FRP 加固混凝土和砌体结构近年来发展非常迅速,已引起国内外工程界的广泛关注^[1-2]。FRP 约束混凝土和砌体应用中的一个关键问题是如何确定其应力 - 应变关系模型。近年来,国内外学者对 FRP 与混凝土的粘结 - 滑移本构关系模型进行了大量的研究与分析^[3-11],如,陆新征模型^[7],CHEN&TENG 模型^[11],对 FRP 加固混凝土设计计算理论的建立起到了推动作用。而对于 FRP 与砌体界面的粘结滑移本构关系则研究的较少,刘明^[3]描述了纤维布加固砌体的破坏形态,分析了拉拔力与纤维布应变关系,讨论了纤维布与砌体的有效粘结长度。虽然,对于 FRP 加固砌体粘结性能开展了一些研究,但是并没有提出可靠的界面粘结滑移本构模型,这不利于认清其工作机理。因此,为建立 FRP 加固砌体的设计计算方法,安全可靠地应用这项加固技术,有必要对 FRP 与砌体的界面行为进行深入研究,并提出准确可靠的界面粘结滑移本构模型。本文在进行了 FRP 约束砌体粘结实验的基础上,对

Popovics 模型和双曲线模型进行修正,建立了可靠的 FRP 与砌体界面粘结滑移本构关系,可为砌体加固工程应用提供借鉴。

1 FRP 与砌体的粘结试验

FRP 与砌体的粘贴试验是在实验室进行,图 1 为现场加载,图 2 为应变测点的布置。

试验时保持匀速加载,测力传感器测量拉拔力,应力传感器测量纤维片材的应力,数据采集系统采集试验数据。

由于砌体粘结面外的 FRP 布如过没有浸渍黏结剂,那么在荷载很低的情况下,就会发生 FRP 布整体撕裂破坏。因此,本试验仅考虑 FRP 浸胶的情况,砌体粘结试验结果见表 1。其中:V 代表纤维片材与试块的剥离破坏,Z 代表试块的剪切破坏。FRP 片材实测的力学性能见表 2。

试验试件的轴心抗压强度平均值为:

M5 砂浆:

$$f_m = k_1 f_1^{\alpha} (1 + 0.07 f_2) k_2 = 4.04 \text{ MPa} \quad (1)$$

M10 砂浆:

$$f_m = k_1 f_1^{\alpha} (1 + 0.07 f_2) k_2 = 4.94 \text{ MPa} \quad (2)$$

收稿日期:2012-09-01

基金项目:重庆市科技攻关计划项目(CSTC2011AC6157);质检公益性行业科研专项(201210040)

作者简介:李铁军(1979-),男,重庆人,主要从事检测与加固等方面的研究,(E-mail)18831838@qq.com

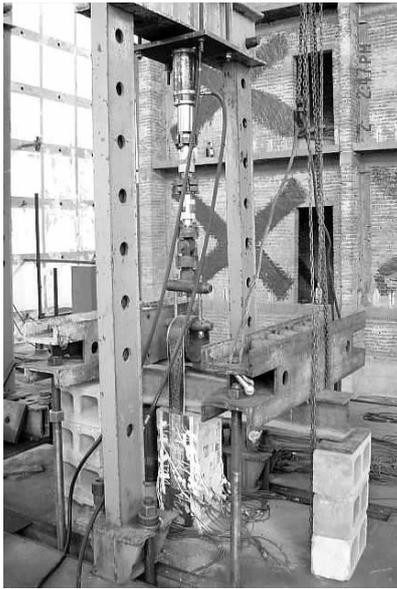


图 1 现场试验加载装置

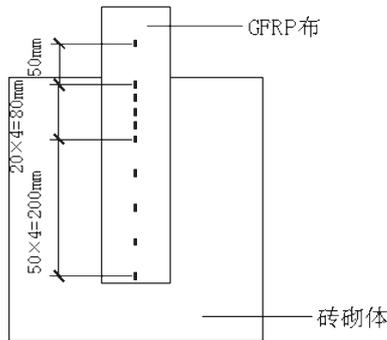


图 2 应力测点布置图

2 试验结果分析

2.1 FRP 应变分布规律

图 3 表明在不同等级荷载工况下,各个试验测点的应变分布随不同荷载的规律变化情况。从图 3 可以得知,在早期加载时,所测测点应变的曲线形式呈凹状,随着纤维距离跨中距离的增加,所测测点应变值陡降,纤维布传力区域部分较短;试件出现开裂现象后,试件中部纤维测点应变和纤维传力区域陡增;当加载量级至一定时,纤维产生应变的区域增加极少,只是纤维产生应变的区域内测点应变随着加载量级增大而增加,直至测点应变的实测线形基本成直线状态;荷载量级进一步增加,加载端纤维产生剥离破坏,其导致测点应变形态出现改变如下:其一试件中部剥离纤维的测点应变增加较慢,但距中部较远的纤维测点应变增加显著,即边纤维应变形状逐渐向水平直线过度,其二是纤维测点量测到的应力区域向两端蔓延。

表 1 砌体黏结试验结果

试块编号	试块尺寸 (cm)	砂浆等级	FRP 类型	极限荷载 (kN)	破坏形态
A	61 × 24 × 37	M5	GFRP	19.00	V 与 Z
B	61 × 24 × 37	M5	GFRP	18.60	V 与 Z
C	61 × 24 × 37	M5	CFRP	30.25	V
D	61 × 24 × 37	M5	CFRP	31.40	V
E	61 × 24 × 37	M10	GFRP	16.60	V 与 Z
F	61 × 24 × 37	M10	GFRP	17.50	V 与 Z
G	61 × 24 × 37	M10	CFRP	28.55	V
H	61 × 24 × 37	M10	CFRP	28.20	V

表 2 FRP 片材的实测力学性能

材料类型	名义厚度 (mm)	抗拉强度 (MPa)	弹模 (MPa)	断裂伸长率 (%)
GFRP	0.169	1805.2	82341	2.51
CFRP	0.167	3335.6	242566	1.61

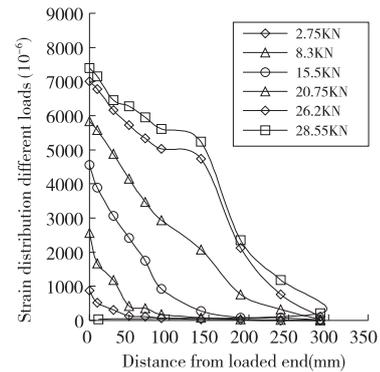


图 3 各种加载工况下 GFRP 实测应变曲线 - G

2.2 粘结应力的分布规律

在加载开始时,受力端的粘结应力随着距加载位置的增长而迅速减小,在荷载量值接近极限荷载的 40% 时,端部的粘结剪应力值最大,此时,A 试块存有粘结剪应力的区域仅为约 5 cm,E 试块存有粘结剪应力的区域为 10 cm 左右。

在荷载量值约至极限荷载的 50% 时,A 试块粘结应力主要集中在距加载位置 7.5 cm 的区域范围,G 试块存有粘结剪应力的区域为 15 cm 左右;随着荷载量级进一步增加,粘结剪应力的传递规律向试件下方,但 A 试块加载至最大荷载时,在粘结长度大于 20 cm 范围粘结剪应力较小,G 试块存有粘结剪应力的区域为 25 cm,见图 4、图 5。

端部的粘结应力最大值为约 3.5 MPa,中部的粘结应力最大值低于 2.5 MPa。这是由于端部的粘接胶较多,使得参与受力的砌体基体范围较大,而计算的时候仅考虑了端部 FRP 布粘结面积所造成的。

2.3 粘结剪应力 - 滑移曲线

图 6 显示不同位置的粘结 - 滑移关系曲线尽管并不相同,但仍具有相似之处,即曲线都有上升和下降段,

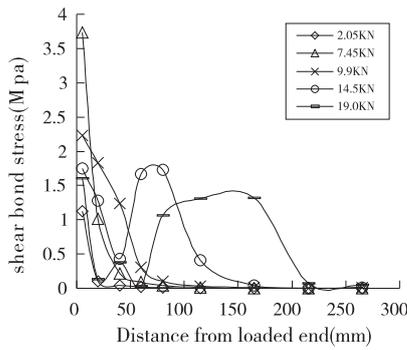


图4 各种加载工况下实测剪切粘结力曲线-A

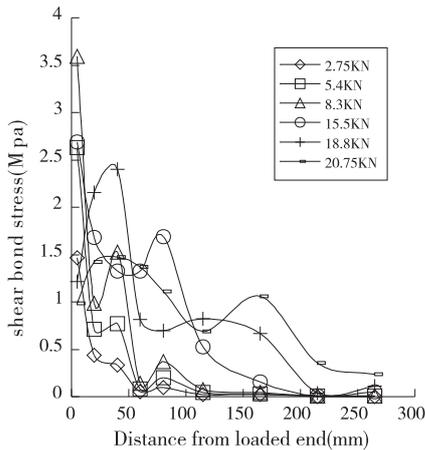


图5 各种加载工况下剪切粘结力曲线-G

且上升段较陡,呈直线形态,而下降段有的呈凹曲形态、有的呈直线形态,曲线形态较为平缓。试件G的局部粘结-滑移曲线特征与A比较接近,不同的是具体滑移量值。上述特点的曲线与很多混凝土相关文献中的粘结滑移曲线相似。因此,尽管砌体材料有异于混凝土材料,但两种材料与FRP之间的粘结特性具有相似之处。

3 粘结滑移本构数学模型

图6可得知,粘结滑移曲线有如下关键点:粘结剪应力极值 τ_{max} 、粘结应力极值对应的最大位移 s_{max} 以及极限位移 s_u 。对以上三个值进行回归分析,得到: $\tau_{max} = \sqrt{f_m}$,试验测得的粘结剪应力最大值对应的位移 s_{max} 为0.09~0.3mm,均值为0.22mm。实测的极限位移 s_u 为0.55~1.5mm,平均值为0.96mm。

3.1 Popovics 模型

Popovics 等式是根据混凝土受压的应力应变关系提出的,Popovics 模型的表达式为^[11]

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{s}{s_{max}} \frac{n}{n-1 + \left(\frac{s}{s_{max}}\right)^n} \quad (3)$$

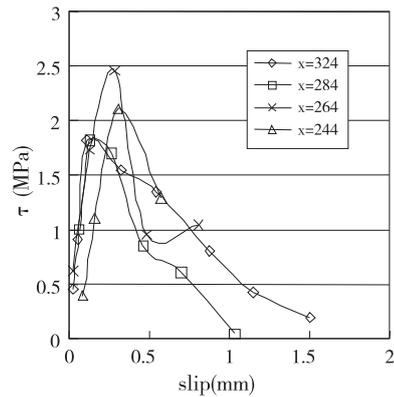


图6 不同位置粘结界面的局部粘结-滑移关系-A

式中: τ 代表粘结应力,单位为MPa; τ_{max} 代表粘结应力最大值; s 代表局部滑移,单位为mm; s_{max} 为粘结应力最大值所对应的位移,单位为mm; n 为回归系数,在此取值2.25。

3.2 双曲线模型

根据试验曲线的上升段及下降段,并对其进行回归分析,得出双曲线模型的表达式为

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_{max}} = 1.05 \left(\frac{s}{s_{max}}\right)^{0.63} & s \leq s_{max} \\ \frac{\tau}{\tau_{max}} = 1.4e^{-0.3\frac{s}{s_{max}}} & s > s_{max} \end{cases} \quad (4)$$

由图7可知,Popovics模型和双曲模型预测的曲线与试验结果均吻合较好。

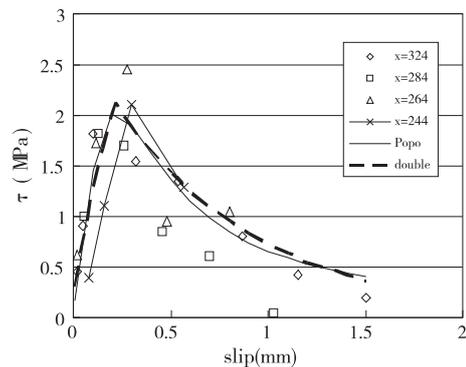


图7 试验结果与双曲模型对比图

4 结论

根据FRP与砌体粘结界面的粘结-滑移本构关系性能的试验结果和理论分析,可得出如下结论:

- (1) FRP与砌体的粘贴强度取决于砌体本身强度;砌体与纤维的粘结界面破坏形式为砌体表层受剪破坏,纤维的剥离是从加载端向锚固端逐渐发展的,纤维应变在其剥离后基本保持不变。

(2)在剪切粘结试验中,粘结力分布在有限的范围内,当加载至一定范围时,粘结力的峰值基本保持不变,但出现向自由端蔓延的现象,证明 FRP 与砌体的粘结界面出现粘结应力峰值上限和有效粘结长度,其是由粘结面剥离所导致。

(3)粘结剪应力-滑移曲线为双曲线,由上升和下降段组成,基本呈抛物线形状;文中提出了 2 种粘结应力-滑移本构数学适用模型,即 Popovics 模型和双曲线模型,两种模型可为 FRP 加固砌体应用提供借鉴。

参考文献:

- [1] Liu Jifu, Liu Ming, Song Yupu. Experimental Investigation on Flexural Performance of Masonry Walls Reinforced with GFRP[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Material Science, 2007, 22(1): 82-84.
- [2] 周新刚, 韦昌芹, 叶列平. CFRP 加固砌体结构的力学性能分析[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 51-59.
- [3] 刘明, 刘新强, 刘骥夫, 等. FRP 加固砌体拉拔力与纤维布应变关系的试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, 33(s1): 223-227.
- [4] 杨菊英, 黄志强, 祝兴虎. FRP 片材与砼粘结界面剥离破坏过程的数值分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(6): 705-711.
- [5] Joaquim A O Barros, Débora R S M. Assessing the Efficiency of CFRP Discrete Confinement Systems for Concrete Cylinders[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(2): 134-148.
- [6] 郭樟根, 孙伟民, 曹双寅. FRP 与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 1-5.
- [7] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 10-18.
- [8] Yao Jian, Teng Jinguang, Chen Jianfei. Experimental study on FRP-to concrete bonded joints[J]. Composites-part B: Engineering, 2005, 36(2): 99-113.
- [9] Lu Xinzhen, Teng Jinguang, Ye Lieping. Bond-slip models for FRP sheets/plates externally bonded to concrete[J]. Engineering Structures, 2005, 27(6): 938-950.
- [10] Chen Jianfei, Teng Jinguang. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(7): 784-791.
- [11] Teng Jinguang, Huang Y L, Lam L. Theoretical Model for Fiber-Reinforced Polymer-Confined Concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 201-210.
- [12] 王全凤, 钱长根, 黄奕辉, 等. FRP 与烧结普通砖黏结性能的试验[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 674-678.
- [13] 陈莹, 王全凤, 黄奕辉, 等. GFRP 复合材料与砖界面黏结性能的数值模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(5): 119-124.

Bond-slip Constitutive Behavior Between Fiber-reinforced Polymer and Masonry

LI Tie-jun, ZHENG Yi, GAO Fei, HE Jing

(Chongqing Test Center of Highway Engineering, Chongqing 400060, China)

Abstract: To study bond-slip constitutive behavior between fiber-reinforced polymer and masonry. In this paper, experiments of eight anchorage strength of FRP attached to masonrys are done, and FRP are dipped treatment before test. The hydraulic jack activated by a manual pump are used to load the specimen. The tensile strength is measured by using a loading transducer, and strain gauges are mounted directly onto the surface of the FRP composite to measure the strain during application of load. Besides the strain and bond stress development and distribution under every grade of loading are studied. Test results show that the maximum local bond stress is not influenced by the FRP bond length, instead it increases with masonry strength. At the same time, the local bond stress-slip curve is obtained. Based on the test results, two new bond stress-slip constitutive models between FRP and masonry are proposed and they turned out to be good matches to the experimental results, which indicate their valuable references for the corresponding codes and engineering applications.

Key words: fiber-reinforced polymer (FRP); masonry; bond-slip; constitutive model; popovics model; hyperbolic model