

文章编号: 1000-5013(2008) 04 0575- 05

FRP 与烧结普通砖粘结性能的试验

王全凤, 钱长根, 黄奕辉, 杨勇新

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过 63 块烧结普通砖与碳纤维布(CFRP)、玻璃纤维布(GFRP)的单面剪切试验, 分析纤维增强复合材料(FRP)与烧结普通砖粘结破坏的全过程及破坏特征. 研究普通烧结砖的抗压强度、FRP 种类、FRP 粘结长度、粘结树脂、FRP 粘贴层数等对极限粘结荷载的影响. 结果表明, 极限粘结荷载与 FRP 粘结长度有关, 当粘结长度超过一定长度后, 极限粘强度增加缓慢或不再增加. 烧结普通砖强度对极限粘结荷载有一定影响, 极限粘结荷载随着烧结普通砖抗压强度的增大而增大; 当砖的抗压强度超过 27 MPa 时, 极限粘结荷载增大幅度变小. 粘结树脂的种类对极限粘结荷载有一定的影响, 特别是底层树脂对极限粘结荷载有一定的提高作用. 从试验结果来看, 采用“小西”树脂试件的极限粘结荷载大于采用“Lica”树脂试件的极限粘结荷载. FRP 的种类影响着极限粘结荷载, CFRP 与烧结普通砖的极限粘结荷载高于 GFRP 与烧结普通砖的极限粘结荷载.

关键词: 纤维增强复合材料; 烧结普通砖; 粘结界面; 剥离破坏

中图分类号: TU 532⁺. 302 **文献标识码:** A

纤维增强复合材料(FRP)既可用于局部开裂墙体的加固, 也可用于墙体承载力不足情况下的加固. Bonacci 等^[1]总结了国外 23 组共 127 个抗弯加固试件研究结果, 指出其中 63% 的试件破坏是由于梁端 FRP 与混凝土粘结破坏或梁端混凝土与钢筋剥离所导致的脆性破坏, 相应的纤维应变仅为极限应变的 20% ~ 87%; 因 FRP 拉断或受压区混凝土压坏的试件数量仅分别为总数的 16% 和 12%, 其余 9% 为梁剪切破坏. 试验中经常可以观察到, 发生剥离破坏时, 一般 FRP 中的应力并未达到其抗拉强度, 甚至还在较低的水平上, FRP 性能利用率很低. 这种破坏很突然, 属于脆性破坏. 国内外的试验研究和工程实践表明^[2-6], FRP 加固砌体结构的成功与否主要取决于 FRP 与砌体之间粘结强度的优劣. 在 FRP 加固结构的研究领域中, FRP 与被加固构件界面的粘结机理一直是国内外研究者关注的重点. 本文研究纤维增强复合材料与砖发生剪切粘结破坏的全过程及破坏特征.

1 试件设计

采用单面拉剪受力状态下的粘结性能试验. 考虑砖的抗压强度、粘结树脂种类、FRP 种类、FRP 粘结长度(L)和 FRP 粘贴层数(m)、试件数(n)等影响因素, 试件设计方案如表 1 所示. 表 1 中, 编号的第 4 位数字代表粘结长度(下同, 略). 将第 1, 2, 3 组 GFRP 试件与第 4, 6 组 CFRP 试件进行对比, 分析不同 FRP 种类的影响. 单向 GFRP 和

表 1 试件设计方案

Tab. 1 Design scheme of specimen

组号	测试项目	L /mm	FRP 种类	树脂种类	m	编号	n
1	砖强度	40	GFRP	小西 Lica	1	G1L4	4×3 ^①
2		60				G1L6	4×3 ^①
3		50				G3L5	4×3 ^①
4	粘结长度	40	CFRP	小西	1	C1L4	3
		60				C1L6	3
		80				C1L8	3
		100				C1L10	3
5	粘贴层数	80	CFRP	小西	2	C2L8	3
		100				C2L10	3
6	粘结数脂	40	CFRP	Lica	1	C3L4	3
		60				C3L6	3
		80				C3L8	3

① 即选 4 种不同的强度, 每组强度作 3 个试件, 粘结宽度均为 40 mm

CFRP 的计算厚度(d)、抗拉强度(f_t)、弹性模量(E), 分别如表 2 所示. 砖的抗压强度采用回弹检测技术进行确定.

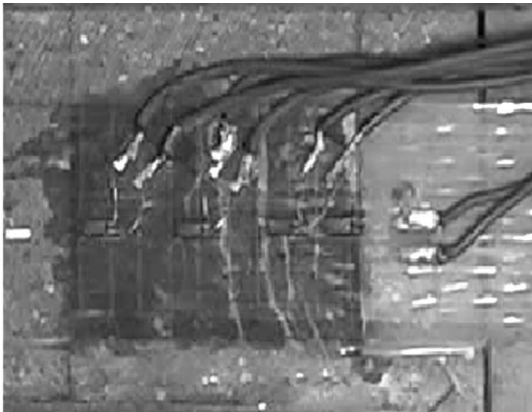
2 试验结果及分析

2.1 破坏过程与试验结果

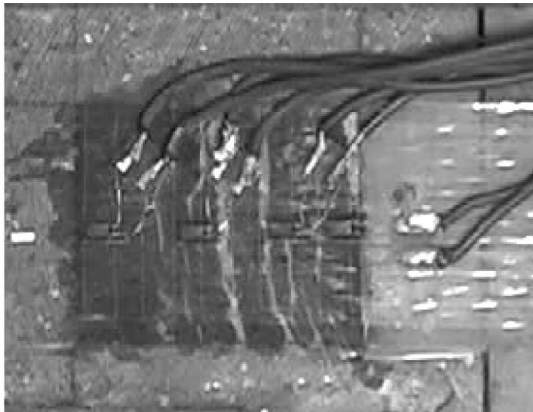
以试件 G3L5-12 为例, 说明纤维布与砖体发生剪切粘结破坏的全过程, 如图 1 所示. 加载初期, 随着载荷的增加, 纤维布表面的应变变化很小, 试件表面无明显变化. 当载荷加载到极限载荷的 50% (5

表 2 纤维布性能指标
Tab. 2 Properties of FRP

FRP 种类	t/mm	F_t/MPa	E/MPa
GFRP	0.169	1.507	93.75
CFRP	0.130	3.720	235.00



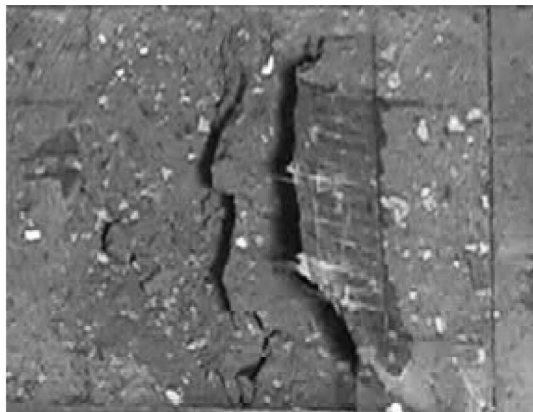
(a) 加载至极限荷载 50% 左右



(b) 荷载继续增加



(c) 接近破坏



(d) 粘结破坏

图 1 纤维布与砖体发生剪切粘结破坏全过程

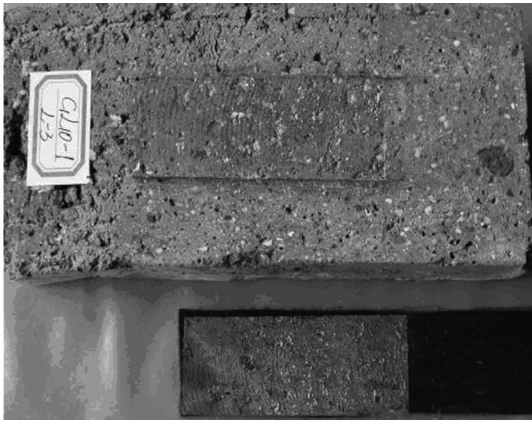
Fig. 1 Whole course of shear bonding failure between FRP and bricks

kN) 时, 试件端部出现波纹状的剥离现象, 裂纹的宽度为 40 mm 左右(纤维布宽度为 40 mm), 纤维布与砖在裂缝处产生轻微剥离(图 1a). 随着载荷的增加, 剥离沿裂缝处向下扩展, 并可听见轻微的剥离声音. 载荷进一步加大, 剥离发展更加迅速, 载荷增加到一定程度后, 就不再继续加大了, 且有一定的波动(图 1b).

当载荷比较小时, 纤维布通过胶粘结剂与砖块一起构成一个整体共同承受载荷, 变形协调一致; 随着载荷的不断增加, 界面粘结应力的分布和峰值位置逐渐发生变化, 砖块内部拉应力也不断增加. 当载荷增加到接近粘结强度的载荷时, 砖块内部应力将达到砖的抗拉强度. 此时, 局部浅层由于内部结构的不均匀而在薄弱处被拉裂, 在该位置首先发生内部砖体的分离(图 1c). 当载荷达到破坏载荷时, 由于粘结的有效面积已经减少, 试件的界面发生一次性剥离破坏, 破坏是瞬时发生的脆性破坏(图 1d).

2.2 FRP 与砖体粘结破坏特征

试件的破坏有两种形式, 即 FRP 剥离和 FRP 断裂现象. 其中, FRP 剥离现象有两种情况. 一种是 FRP 与底层树脂的剥离, 即剥离发生在粘结树脂层(图 2); 另一种是 FRP 与砖的剥离发生在砖表层. 通



(a)



(b)

图 2 FRP 与底层树脂之间的剥离

Fig. 2 Debonding between FRP and epoxy adhesives at bottom

常破坏时, 自由端附近(粘结长度范围内)有砖体被拉出, 而使局部砖凹入表面 1~ 5 mm, 破坏面凹凸不平, 如图 3 所示. 这说明粘结情况良好, 属于理想的剥离形式.

从极限粘结荷载可以看出, 剥离破坏发生在粘结树脂界面处, 试件的极限粘结荷载低于剥离破坏发生在砖表层试件的极限粘结荷载. 说明, 如果剥离发生在粘结树脂界面, 砖与 FRP 之间的粘结强度无法充分发挥, 属于不利破坏形式. FRP 布断裂破坏, 在还没有发生剥离破坏时, FRP 布先被拉断. 发生 FRP 断裂的试件, 大部分 FRP 拉断面位于 FRP 悬空段, 纤维布丝一根一根依次断裂, 如图 4 所示.



图 3 FRP 与砖之间的剥离

Fig. 3 Debonding between FRP and bricks

2.3 砖的抗压强度对极限粘结荷载的影响

由于 FRP 与砖体粘结破坏形式涉及粘结面下砖体的剪切破坏, 砖的强度和密实性将会影响极限粘结荷载. 极限粘结荷载与砖抗压强度关系, 如图 5 所示. 从图 5 中可看出, 随着砖体抗压强度的提高, 极限粘结荷载 (F_1) 也随着增大, 但并不成线形增长趋势. 当砖的抗压强度 (f_c) 达到 27 MPa 左右时, 极限粘结荷载增长趋势变缓. 表 3 为粘结宽度为 40 mm 的 GFRP 与不同抗压强度砖体的粘结试验结果.

2.4 纤维布的种类对极限粘结荷载的影响

当粘结长度分别为 40, 60 mm, 砖的抗压强度相近的情况下, 烧结普通砖分别与 CFRP, GFRP 的极限粘结荷载试验, 结果如表 4 所示. 从表 4 可知, 粘结长度 40 mm, 粘贴 CFRP 砖的抗压强度比粘贴 GFRP 砖的抗压强度低 2 MPa 左右.

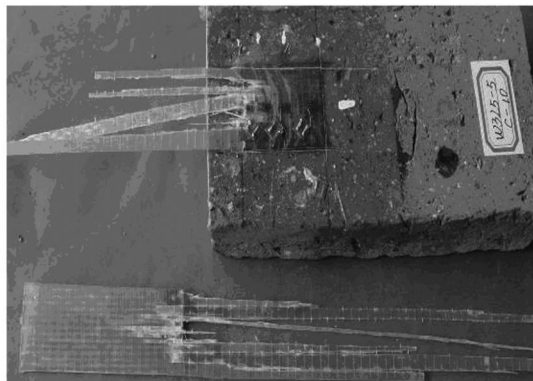


图 4 FRP 布被拉断

Fig. 4 FRP rupture

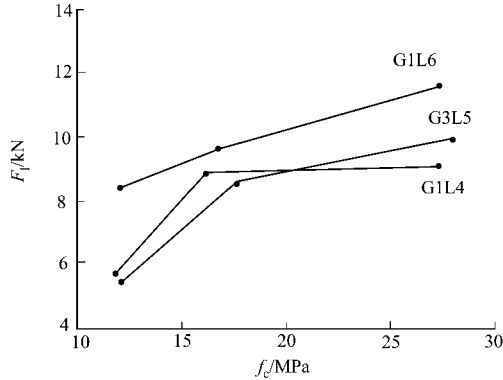


图 5 砖的抗压强度与极限粘结荷载关系曲线

Fig. 5 Relationships between compressive strength and ultimate bonding load of brick

表 3 GFRP 布与不同抗压强度砖体的粘结试验

Tab. 3 Experimental results of bonding between GFRP and bricks with different compressive strengths

编号	L/mm	FRP 种类	树脂类型	f_c/MPa	F_1/kN	\bar{F}/kN
G1L4-1	40	GFRP	小西	11.7	7.183 7	5.708 5
G1L4-2	40	GFRP	小西	11.8	4.361 5	
G1L4-3	40	GFRP	小西	11.8	5.580 2	
G1L4-4	40	GFRP	小西	16.1	7.761 0	8.830 0
G1L4-5	40	GFRP	小西	16.3	10.326 6	
G1L4-6	40	GFRP	小西	16.4	8.402 4	
G1L4-10	40	GFRP	小西	27.2	9.492 7	9.086 5
G1L4-11	40	GFRP	小西	27.2	8.024 4	
G1L4-12	40	GFRP	小西	27.2	9.364. 5	
G1L6-1	60	GFRP	小西	11.8	11.801 8	8.573 4
G1L6-2	60	GFRP	小西	11.9	6.606 4	
G1L6-3	60	GFRP	小西	11.9	7.312 0	
G1L6-4	60	GFRP	小西	16.6	6.542 3	9.642 4
G1L6-5	60	GFRP	小西	16.7	9.921 0	
G1L6-6	60	GFRP	小西	16.9	12.763 9	
G1L6-10	60	GFRP	小西	27.5	12.314 9	11.630 7
G1L6-11	60	GFRP	小西	27.5	10.454 8	
G1L6-12	60	GFRP	小西	27.5	12.122 5	
G1L5-1	50	GFRP	Lica	11.9	5.002 9	5.558 8
G1L5-2	50	GFRP	Lica	12.1	4.618 1	
G1L5-3	50	GFRP	Lica	12.2	7.055 4	
G1L5-4	50	GFRP	Lica	17.4	8.594 8	7.921 3
G1L5-6	50	GFRP	Lica	18.1	7.247 8	
G1L5-10	50	GFRP	Lica	27.8	10.903 8	
G1L5-11	50	GFRP	Lica	28.1	9.877 6	9.941 7
G1L5-12	50	GFRP	Lica	28.1	9.043 8	

由于砖的抗压强度对极限粘结荷载有较大影响,导致 CFRP 的平均极限粘结荷载 5.194 3 kN 小于 GFRP 的平均极限粘结荷载 5.708 5 kN.当在砖抗压强度相近的情况下,粘结长度为 60 mm,CFRP 的极限粘结荷载平均值为 9.813 4 kN,比 GFRP 的极限粘结荷载平均值为 8.573 4 kN 高出 14.46%.CFRP 的极限粘结荷载大于 GFRP 的极限粘结荷载.

表 4 不同种类纤维布与砖粘结试验结果

Tab.4 Experimental results of bonding between different FRP and bricks

GFRP					CFRP				
编号	L/mm	f_c/MPa	F_1/kN	\bar{F}/kN	编号	L/mm	f_c/MPa	F_1/kN	\bar{F}/kN
G1L4-1	40	11.7	7.183 7	5.708 5	G1L4-1	40	9.2	3.784 3	5.195 4
G1L4-2	40	11.8	4.361 5		G1L4-2	40	9.7	4.746 4	
G1L4-3	40	11.8	5.580 2		G1L4-3	40	10.0	7.055 4	
G1L6-1	60	11.8	11.801 8	8.573 4	G1L6-1	60	11.6	11.930 1	9.813 4
G1L6-2	60	11.9	6.606 4		G1L6-2	60	11.8	12.379 0	
G1L6-3	60	11.9	7.312 0		G1L6-3	60	11.9	5.131 2	

2.5 粘结树脂类型对极限粘结荷载的影响

粘结树脂兼作 FRP 复合材料的基体和 FRP 与砖体间的胶粘剂.其性能的优劣直接关系到 FRP 力学性能的发挥,FRP 与砖体的协调变形及相对滑移等.在其他条件相同的情况下(均使用 CFRP,砖强度相近,粘结宽度为 40 mm),分别采用“Lica”胶和“小西”胶进行试验研究,试验结果如表 5 所示.从表 5 可以看出,采用不同的粘结树脂,试件的极限粘结荷载有所不同.采用日本“小西”胶试件的平均极限粘结荷载高于采用南京“Lica”胶试件的平均极限粘结荷载.

表 5 不同类型树脂与砖粘结试验结果

Tab. 5 Experimental results of bonding between different epoxy adhesives and bricks

小西					Lica				
编号	L/mm	f_c /MPa	F_l /kN	\bar{F} /kN	编号	L/mm	f_c /MPa	F_l /kN	\bar{F} /kN
G1L4-1	40	9.2	3.784 3		G1L4-1	—	—	—	
G1L4-2	40	9.7	4.746 4	5.195 4	G1L4-2	40	8.6	3.271 1	4.040 8
G1L4-3	40	10.0	7.055 4		G1L4-3	40	8.7	4.810 5	
G1L6-1	60	11.6	11.930 1		G1L6-1	60	11.9	9.236 2	
G1L6-2	60	11.8	12.379 0	9.813 4	G1L6-2	60	11.9	7.761 0	8.188 6
G1L6-3	60	11.9	5.131 2		G1L6-3	60	11.7	7.568 5	

3 结束语

在已知砖抗压强度的基础上, 分别进行玻璃纤维布和碳纤维布与烧结普通砖之间的单面剪切粘结试验. 通过试验, 分析纤维增强复合材料(FRP) 与砖发生剪切粘结破坏的全过程以及破坏特征.

参考文献:

[1] BONACCI J F, MAALEJ M. Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP[J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2001(5) : 102-113.

[2] EHSANI M R, SAADAT MANESH H. Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays[J]. Journal of Composites for Construction, 1997, 1(1): 17-25.

[3] TRIANTAFILLOU T C. Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates[J]. Journal of Composites for Construction, 1998, 2(2) : 96-104.

[4] ALBERT M, ELWI A E, CHENG J J R. Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs[J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(2) : 76-84.

[5] 张祥顺, 谷 倩, 彭少民. CFRP 对砖墙抗震加固对比试验研究与计算分析[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 77-82.

[6] 王全凤, 柴振岭. GFRP 复合材料加固带壁柱砖墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 65-71, 112

Experimental Research on Bonded Property of Interface
Between FRP and Fired Common Brick

WANG Quan-feng, QIAN Chang-gen,
HUANG Yi-hui, YANG Yong-xin

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: By carrying out single-side shear bonding experiments between 63 pieces of fired common brick and fiber reinforced polymers (FRP), including carbon fiber reinforced polymers (CFRP) and grass fiber reinforced polymers (GFRP), the whole course of the shear bonding failure and failure characteristic between FRP and brick are analyzed. The influence of several factors on the ultimate bond strength is studied, such as compressive strength of fired common brick, type of FRP, bonding length of FRP, bonding epoxy adhesives and the number of FRP layers. Some conclusions are obtained: the ultimate bonding load increases slowly or ceases to increase when the bonding length of FRP exceeds the certain value; the ultimate bonding load increases as increasing the compressive strength of brick, the increased value slows down when the compressive strength of brick is larger than 27 MPa; the influence of type of epoxy adhesives, especially, the epoxy adhesive at bottom and the type of FRP on the ultimate bond strength is presented. The ultimate bonding load of specimen with "Xiaoxi" epoxy adhesive is larger than that of specimen with "Lica" epoxy adhesive, and the ultimate bonding load between the brick and CFRP is larger than that between the brick and GFRP.

Keywords: fiber reinforced polymer; fired common brick; bonding interface; debonding failure

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)