

FRP束与砌体材料锚固性能试验研究

陶毅¹, 钟灵俊¹, 郑晓龙¹, 史庆轩¹, 陈建飞²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 英国贝尔法斯特女王大学, 英国 贝尔法斯特 BT95AG)

摘要: FRP剥离破坏是FRP加固结构中较为常见的一种破坏模式, 其脆性的破坏特征很大程度上限制了FRP这一高性能材料在加固领域的应用。之前的研究已经证明施加适当的锚固措施能有效的控制和延缓剥离破坏的发生, 提高加固效果。FRP束锚固件是一种将FRP布滚卷或折叠后通过树脂胶植入预钻孔洞的锚固措施。但是目前针对其锚固性能的研究还不完善, 尤其针对其与砌体材料之间锚固性能的研究还很匮乏。相比FRP束锚固混凝土试件, 砌体材料(例如烧结粘土砖)由于尺寸较小会对其锚固性能产生很大影响。本文针对FRP束与砌体材料的锚固性能进行深入研究。首先针对FRP网格加固砌体结构优化了锚固件构造方式, 进而采用拉拔试验方案, 分析研究了FRP束锚固砌体材料的力学性能及其破坏机理, 并通过试验研究分析了锚固件主要参数与锚固强度的相关关系, 最后依据试验结论提出了相应设计建议。

关键词: FRP束; 砌体; 锚固性能; 试验研究

中图分类号: TU522.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0825-05

Pullout behavior of FRP anchors in masonry

TAO Yi¹, ZHONG Lingjun¹, ZHENG Xiaolong¹, SHI Qingxuan¹, CHEN Jianfei²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's University of Belfast, Belfast BT95AG, UK)

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) anchors made from rolled or folded fibers have been shown to be effective for delaying or even preventing premature debonding failure in FRP strengthened concrete structures through externally bonding. This study explores the application of FRP anchors in the FRP strengthening of brick masonry structures. One of the features of such a system is that the brick unit has smaller dimensions compared to common concrete specimens. This paper reports an experimental study on these FRP anchors under pull-off loading. Test parameters include anchor construction, the geometry of pre-drilled holes and FRP anchor itself. The experimental results indicate that FRP anchors can be designed to achieve higher loading capacities and hence is expected to effectively prevent or delay FRP debonding failure. The results also indicate that the geometry of the pre-drilled hole has significant effects on the anchorage strength.

Key words: FRP; masonry; strength; pullout

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, 下文简称FRP)由于其高强、轻质及耐腐蚀等优点已经被广泛的应用于加固既有结构或新建结构。目前加固工程中广泛采用树脂胶外贴FRP加固技术, 但通过树脂胶粘贴的FRP材料极易发生剥离破坏, 使得纤维的强度不能充分发挥, 加固效果明显的降低了^[1-2]。此前的研究已表明适当的锚固措施能有效的控制和延缓剥离破坏的发生。其次, 从增强结构抗震性能的角度上分析, 此前的研究已证明锚固件的采用除了可以延缓剥离破坏的发生, 还能提升结构抗震承载力及耗能能力。

为了延缓和防止剥离破坏的发生, 进一步提升FRP加固结构的效果, 国内外学者陆续提出了一些锚固措施和方法并进行了研究。这些措施可以分为四类:

(1) 机械紧锚固法, 即采用机械紧锚固件实现

对FRP片材的锚固, 但由于FRP材料的局部承压能力有限以及机械紧锚固件自身可能产生的的弯曲变形一定程度上限制了这种方法的应用^[1]。

(2) FRP束或纤维箍锚固法, 即利用由FRP布或纤维束制成的锚固件对片材进行锚固^[2], 通常是将FRP布或纤维束用树脂胶植入预钻(留)孔洞, 再将未植入部分覆盖粘贴在FRP材料表面。

(3) 嵌入法, 即将FRP材料嵌入到加固结构内, 然后再用填充材料(如砂浆等)覆盖填充, 此方法由于需要在待加固结构表面凿刻与FRP对应的凹槽, 导致了工程量的进一步增加^[3-4]。

(4) 组合方法, 即利用上述几种方法的组合对外贴FRP进行锚固^[4]。

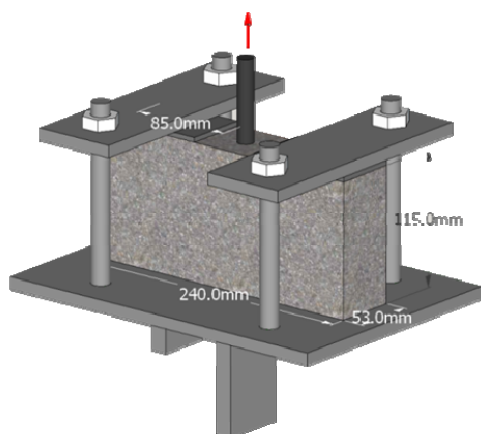
但此前针对锚固性能的研究大都集中在锚固件与混凝土材料之间, 对锚固件与砌体材料之间锚固性能的研究还十分匮乏。考虑到机械紧锚固法及

嵌入法的不足, 本文将针对FRP束与砌体材料的锚固性能进行研究. 首先对锚固件制作方式进行优化, 进而通过拉拔试验对锚固强度、破坏模式、锚固参数进行分析, 最终提出合理的设计建议.

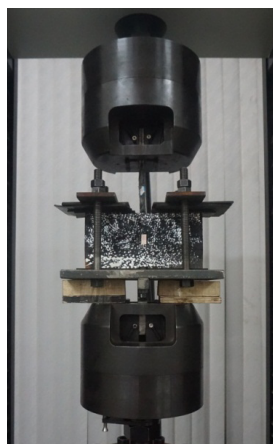
1 试验研究

1.1 试验设计

根据砌块的尺寸及FRP束锚固试件的特点, 本次试验设计了如图1所示的加载装置, 共设计制作试件39个.



(a) 试验装置示意图



(b) 试验及加载装置

图1 试验加载装置

Fig.1 Test setup

试件的制作步骤如下: (1) 在砌块植入面(240 mm×53 mm)的中心位置进行钻孔; (2) 用压缩空气将孔洞及表面浮灰清除干净, 当砌体处于潮湿状态时, 还应对孔洞进行干燥处理; (3) 用针管向孔洞中注入树脂胶, 同时搅拌以去除可能产生的气泡; (4) 向孔洞中植入制作好的FRP束; (5) 室温中静置48 h后将自由部分FRP束的末端粘贴于两块铝板之间以便和试验机上端夹具相连; (6) 室温中再静置48 h后进行测试. 本次试验采用一个300 kN的万能

试验机进行加载, 加载速率为1.4 mm/min. 加载支座和试验机下夹具相连, 通过试验机上夹具施加拉拔荷载. 除了通过试验机输出荷载, 本次试验还采用PIV技术测量了试件的变形, 考虑到文章长度, PIV测试的结果将在后续文献介绍.

1.2 纤维束锚固件制作工艺

针对FRP束的制作方式, 此前的研究多采用滚卷FRP布的方式来制作^[2]. 这种制作方式的主要优点是纤维束整体性较好, 便于纤维束的植入, 但纤维束植入后, 自由端(未锚固部分)的FRP布很难完全展开, 尤其是卷芯部分的FRP会集中在一起. 目前解决这一问题的方法有: 去除编织FRP布时所用的纬线方向的玻璃纤维, 使自由端的FRP形成纤维散束^[2], 或将自由端的FRP布分切成若干小段从而增大展开面积^[5]. 这些措施虽然可以一定程度上增加自由端的FRP束展开面积, 但是制作过程比较繁琐且纤维分散效果较差.

在综合考虑制作便易性以及锚固效果后, 本研究设计采用了三种FRP束制作方式: (1) 传统的滚卷式FRP束, 即把一块FRP布由两边向中间滚卷, 然后用细线进行捆扎, 形成FRP束; (2) 折叠方式制做FRP束, 即采用仿“折扇”的方式折叠FRP布并用细纱进行捆扎来制作FRP束. 这一方式的优点是未锚固部分的FRP束无需任何加工就能完全展开, 方便锚固FRP加固系统; (3) 预浸折叠式FRP束, 即在需植入孔洞的FRP布区域预先涂刷树脂胶再进行折叠, 最后用细纱进行捆扎, 在树脂胶未固化时就植入孔洞中.

1.3 材料参数

本试验所采用的砖砌体为M30的烧结普通砖, 按照《GB2542-2012》^[6]测得的砖砌体抗压强度为31.1 MPa, 其名义尺寸为240×115×53(单位, mm).

FRP布为日本东丽公司出品的碳纤维布(UT70-30), 实测抗拉强度为4 153 MPa, 弹性模量为242 GPa, 厚度为0.167 mm.

树脂胶采用Sikadur-330双组份环氧树脂胶. 其名义抗拉强度及弹性模量分别为30 MPa和4.5 GPa.

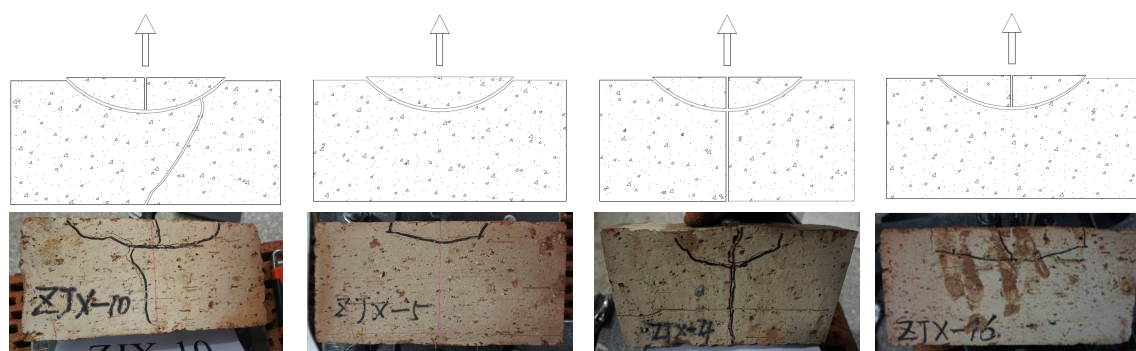
2 试验结果及分析

本文将从破坏形态、极限荷载、试件参数分析FRP束与砌体材料的锚固性能及其影响因素. 表1总结了本次试验的结果, 图2汇总了本次试验的破坏形式.

表1 试验结果
Tab.1 Test results

试件	砖实测尺寸 /mm	孔深 L_h /mm		孔径 d_0 /mm		FRP束长度/mm		FRP束 埋深/mm	FRP布宽 /mm	FRP束 等效直径/mm	极限荷载/kN		破坏 模式
		设计	实测	设计	实测	设计	实测				试验值	平均值 [均方差]	
J-1	236×115×50		31.0		12.2		199.8	30.2		7.56	3.34	3.47	C
J-2	238×115×50	30	32.6	12	11.7	200	202.4	31.8	150	7.36	3.30	[0.25]	C
J-3	238×114×50		32.9		12.0		199.6	31.9		7.58	3.76		C
Z-1	239×116×52		30.3		12.2		205.3	29.7		7.56	5.22	5.14	B
Z-2	237×115×51	30	30.0	12	12.2	200	206.4	29.4	150	7.56	5.08	[0.07]	D
Z-3	240×116×50		31.1		12.1		206.5	30.5		7.52	5.13		D
ZJX-1	235×114×52		30.9		10.3		205.7	29.7		9.04	5.54	5.77	B
ZJX-2	233×115×50	30	32.2	10	10.2	200	199.5	30.4	150	8.87	6.11	[0.31]	B
ZJX-3	236×113×51		30.8		10.3		200.0	30.1		9.03	5.64		D
ZJX-4	239×116×50		31.8		11.6		200.1	30.6		8.54	5.42	5.65	C
ZJX-5	236×115×52	30	32.7	12	11.5	200	200.2	31.9	150	9.07	5.97	[0.28]	A
ZJX-6	236×115×52		32.7		11.5		200.2	31.9		9.07	5.57		A
ZJX-7	240×116×50		32.5		14.0		199.2	31.1		9.03	6.52	6.17	A
ZJX-8	236×115×50	30	30.7	14	14.1	200	200.0	30.0	150	9.55	6.10	[0.32]	D
ZJX-9	236×115×50		31.0		14.0		199.4	30.2		9.06	5.90		A
ZJX-10	239×115×51		20.1		10.1		200.1	21.0		9.01	3.86	3.84	D
ZJX-11	236×115×50	20	21.5	10	10.2	200	199.9	20.0	150	9.05	3.71	[0.12]	B
ZJX-12	238×114×52		22.1		10.0		201.1	19.8		8.94	3.95		D
ZJX-13	237×116×49		21.7		12		201.7	20.7		9.03	4.23	4.16	B
ZJX-14	239×115×51	20	20.4	12	12	200	201	19.8	150	8.72	3.93	[0.21]	B
ZJX-15	236×113×50		19		12		199.4	16.1		9.04	4.32		B
ZJX-16	235×114×49		22.3		14		215.5	21.8		8.89	4.90	4.98	C
ZJX-17	235×115×50	20	20.2	14	14.1	200	206.4	19.8	150	9.14	5.34	[0.33]	D
ZJX-18	237×115×52		20.4		14.1		205.8	18.9		9.09	4.70		B
ZJX-19	234×114×49		40.266		9.6		202.0	9.5		9.02	6.60	6.76	D
ZJX-20	236×114×52	40	41.17	10	10.12	200	200.0	10.0	150	8.98	7.36	[0.54]	A
ZJX-21	235×114×51		40.2		9.1		201.0	8.8		9.04	6.31		D
ZJX-22	240×116×53		39.9		12.4		200.8	38.4		9.01	6.24	6.15	D
ZJX-23	237×115×50	40	40.4	12	11.9	200	200.9	39	150	9.05	6.42	[0.33]	C
ZJX-24	238×114×50		43.4		12		201.7	42.2		9.11	5.78		C
ZJX-25	234×113×49		39.2		13.8		198.6	37.5		9.12	7.46	7.42	C
ZJX-26	236×116×50	40	39.7	14	14	200	203.1	38.7	150	8.97	7.61	[0.21]	A
ZJX-27	240×115×50		42.8		14.1		201.7	40.1		8.76	7.19		D
ZJX-28	240×116×53		31.2		11.7		200.7	30.1		5.10	4.89	4.73	B
ZJX-29	238×117×52	30	32.9	12	12	200	199.6	31.9	50	5.04	4.56	[0.17]	D
ZJX-30	238×115×51		30.3		12		200.5	28.0		5.08	4.75		D
ZJX-31	235×115×50		31.9		11.7		201.4	22.7		7.53	5.55	5.95	A
ZJX-32	239×115×51	30	33.8	12	12.1	200	199.3	32.5	100	7.24	5.99	[0.38]	A
ZJX-33	236×115×50		31.6		12		200.8	30.8		7.54	6.30		B

注: (1) 试件J-表示滚卷方式制作的FRP束; Z-表示折叠方式制成的FRP束; ZJX-表示预浸折叠式FRP束。
(2) 破坏模式A、B、C、D编号分别对应图2所示的四种破坏模式。



(注: 为了便于分析, 本文已重新对试件进行编号, 其与照片所示编号不同)

(a) 破坏模式A
砖锥体+非对称通缝破坏

(b) 破坏模式B
砖锥体破坏

(c) 破坏模式C
砖锥体+对称通缝破坏

(d) 破坏模式D
砖锥体+埋深部分裂缝破坏

图2 破坏模式示意图

Fig.2 Scheme of failure modes

2.1 破坏模式

试验结果表明试件破坏全部呈脆性特征. 破坏都发生在砖砌体, 且都包括砖锥体破坏(如图2所示). 这主要是在加载过程中, 荷载主要通过粘结作用传递到砌体砖当中. 由于砖尺寸的限制, FRP锚固件整体埋深较小, 导致只有植入部分发生砖三棱柱破坏. 锚固件周围有两边的砌体材料很少从而致使较易发生砖劈裂破坏, 尤其是当植入深度较大($>20\text{ mm}$)时更易发生砖劈裂破坏. 试验中未发生FRP束拔出或FRP与砌体剥离破坏说明砌体中植入FRP束是一种有效的锚固方案. 由于锚固件植入面较窄($240\times53\text{ mm}$), 因此破坏时所形成的锥体并不是圆锥而是似三棱锥, 这和FRP束与混凝土试件的锚固破坏有很大区别. 当预钻孔直径或深度较小时, 由于对砌体材料的损伤减弱从而可以阻止沿砖高度方向的通缝出现(图2(a)、(c)).

2.2 锚固件制作方式对锚固强度的影响

针对本文所采用的三种FRP束制作方法, 试验结果表明预浸折叠式FRP束的锚固强度最高(如图3所示).

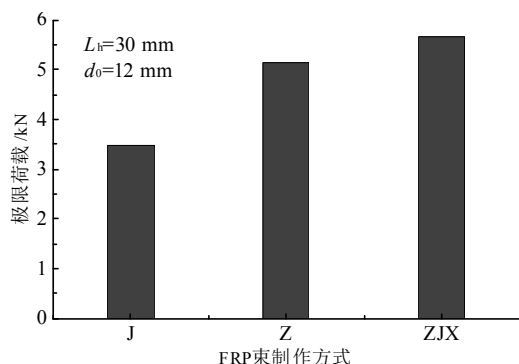


图3 FRP束制作方式与锚固强度的关系

Fig.3 Effects of FRP anchor type on anchorage strength

相比滚卷式FRP束, 折叠式FRP束能使自由端FRP束完全展开, 由于预浸树脂胶, 这种方式能有

效减少FRP束与砌体材料之间的滑移, 以及折叠制作导致的整体性不好的问题. 因此, 本文将主要分析不同参数下预浸折叠式FRP束与砌体材料的锚固性能.

2.3 锚固件参数影响分析

针对孔径 d_0 的影响(如图4所示), 孔径对锚固强度的影响呈非线性关系. 当孔径较小($d_0=10\sim12\text{ mm}$)时, 孔径对锚固强度的影响有限, 这可以归因于孔洞体积较小导致的树脂胶含量较少. 由于预浸折叠式FRP束的等效直径(通过测量成型FRP束周长求得)约为 9.1 mm , 因此当孔径 $d_0=10\text{ mm}$ 时, 预浸折叠式FRP束较难植入孔洞. 当孔径增大($d_0=14\text{ mm}$)时, 锚固强度会明显提升, 这仍然可归因于树脂胶含量的增加. 而且当孔径增加时, 大部分试件的破坏都为砌体纵向和三棱柱组合裂缝模式(图2(a)、(c)、(d)).

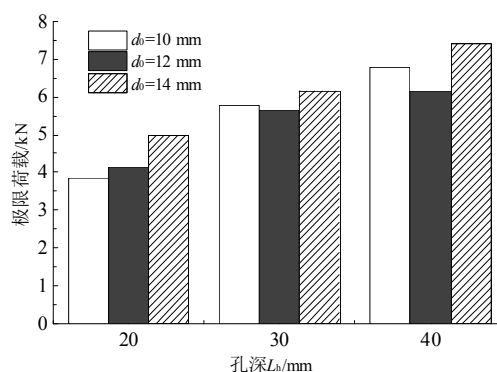


图4 孔径与锚固强度的关系

Fig.4 Effects of diameter on anchorage strength

针对孔深 L_h 的影响(如图5所示), 孔深对锚固强度的影响呈线性关系, 当孔径一致时, 随着孔深的增加, 锚固强度随之增大. 当孔深较浅($L_h=20\text{ mm}$)时, 大部分试件都不会形成贯通砌块的通缝(图2(a)、(c)). 在试件制作时发现, 若孔径和孔深同时增加(如

$d_0=14\text{ mm}$, $L_h=40\text{ mm}$), 虽然锚固强度得到提升, 但较易造成砌体材料破损. 因此, 在实际使用此锚固方案时, 需要进行钻孔试验以确定适合的几何参数, 或者采取中等孔径及孔深参数, 增加锚固件个数的方式达到较好的整体锚固效果.

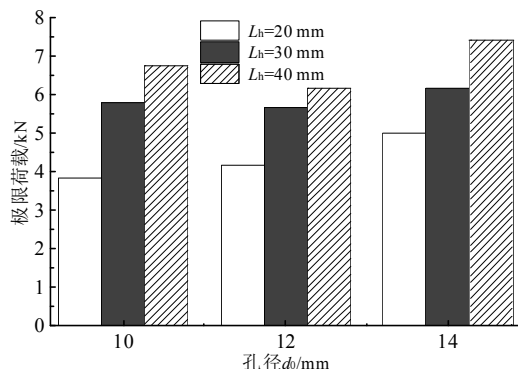


图5 孔深与极限荷载的关系

Fig.5 Effects of hole depth on anchorage strength

FRP布宽, 也即FRP束等效直径, 对锚固强度的影响(如图6所示), 随着布宽的增加, 锚固强度得到提升, 但随着布宽的继续增加, 锚固强度开始减小, 这主要是因为布宽增加后, FRP束直径增大, 导致树脂胶含量减少, 从而会导致锚固强度降低. 从本次试验结果上分析, 预钻孔径与等效直径相差约4 mm时可带来较高的锚固强度. 因此, 布宽的选择一是要根据孔径的大小确定, 二是要考虑自由端覆盖粘贴的面积.

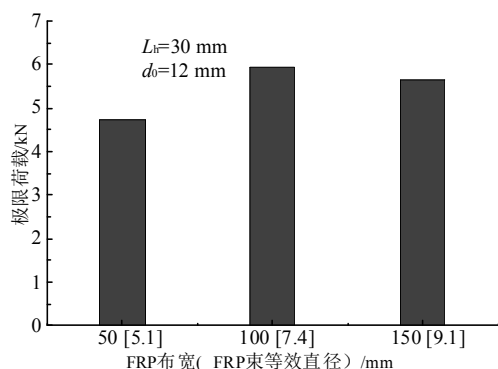


图6 FRP布宽与极限荷载的关系

Fig.6 Effects of FRP width on anchorage strength

3 结论

在结构表面植入FRP束来对外贴FRP加固系统进行锚固能有效的阻止和延缓剥离破坏的发生, 提升结构的加固效果. 由于砌体材料相对于混凝土材料呈现更明显的脆性特征, 而且其几何尺寸相比混

凝土试件有较大差异. 因此本文针对FRP束与砌体材料之间的锚固性能进行了试验研究, 对相关参数的影响进行了试验分析, 得出了如下结论:

(1) 采用预浸折叠式FRP束制作的锚固件具有较好的整体性, 便于FRP束的植入, 并且能产生较高的锚固强度.

(2) 在保证锚固件施工质量的前提下, 锚固系统的破坏全部发生在砌体材料中, 主要的破坏模态为砌块呈三角锥破坏, 纵向裂缝则和预钻孔尺寸有关.

(3) 预钻孔尺寸对锚固强度影响十分明显, 其中孔径的影响呈非线性, 孔深对强度的影响呈线性. 从本次试验的结果上分析, 大孔径及大孔深能提升锚固强度, 但过大的孔径和孔深会对砖砌体造成一定的损伤, 从而弱化了锚固强度, 导致锚固系统过早失效. 因此, 在实际应用时应根据整体锚固性能要求选择锚固件参数(包括孔径、孔深、个数).

(4) FRP布宽(即FRP束等效直径)需要根据孔径来搭配设计. 在FRP束的植入过程中, 孔洞中需要一定的含胶量来保证锚固强度. 因此, 当预钻孔径与等效直径相差约为4 mm时, 即可保证较高的锚固强度.

参考文献 References

- [1] 胡程鹏, 吴智敏, 宿莹, 等. FRP复合锚固技术试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 309-314.
HU Pengcheng, WU Zhimin, SU Ying, et al. Experimental study on composite FRP-anchoring technology[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3): 309-314.
- [2] ZHANG H W, SMITH S T, KIM S J. Optimization of carbon and glass FRP anchor design[J]. Construction and Building Materials, 2012, 32(1): 1-12.
- [3] ISLAM M R, MANSUR M A, MAALEJ M. Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3): 413-420.
- [4] WU Y F, HUANG Y. Hybrid Bonding of FRP to Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(3): 266-273.
- [5] SMITH S T, HU S, KIM S J, SERACINO R. FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors[J]. Engineering Structures, 2011, 33(4): 1075-1087.
- [6] GB 2542-2012 砌墙砖试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 2542-2012 Test methods for wall bricks[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.

(编辑 桂智刚)