

文章编号: 1000-5013(2009) 01-0186-05

GFRP 复合材料加固砖墙抗震抗剪承载力

王全凤, 柴振岭, 黄奕辉, 杨勇新

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过对 1 片未加固带壁柱墙体和 8 片玻璃纤维复合材料(GFRP) 加固带壁柱墙体抗震试验的结果, 在理论分析的基础上, 给出壁柱影响系数、间接抗震抗剪承载力修正系数、统计系数和有效工作系数的表达式. 基于未加固墙体的剪摩和剪压破坏模型和纤维复合材料(FRP) 的桁架受力模型, 推导出在不同破坏形态下, GFRP 加固带壁柱砖墙的抗震抗剪承载力理论计算公式. 利用公式所得的计算结果与试验结果吻合.

关键词: 玻璃纤维复合材料; 加固; 带壁柱墙体; 抗剪承载力

中图分类号: TU 377.9⁺ 10.1 文献标识码: A

我国是一个地震多发的国家, 有三分之二的大城市处于地震区. 据统计, 在全国的住宅建设中, 采用砌体结构的房屋占 90% 以上. 但是, 由于设计基准期的接近, 结构设计和抗震标准的不断提高, 设计和施工产生的隐患, 以及人们对建筑物的安全性、实用性和耐久性的要求不断提高, 大部分砌体结构房屋需要维修加固. 对已建砖混建筑进行有效的加固和修复, 已成为土木工程界普遍关心的问题. 20 世纪末, 随着国际市场的纤维价格大幅度降低, 外部粘贴纤维增强复合材料(FRP) 加固法逐渐引起工程技术人员的关注, 并已成为国际上加固技术的一种有效的新方法. 目前, 关于 FRP 加固砌体结构的抗震方面的研究比较少, 且加固的对象多为矩形截面墙. 本文研究玻璃纤维复合材料(GFRP) 加固带壁柱砖墙抗震性能.

1 试验结果

考虑与其他单位试验的对比性, 取试件的高宽比为 1/2, 长为 1 500 mm, 高为 750 mm, 厚为 240 mm. 考虑实际砌筑的难度及砌体模数的选择, 试件壁柱截面取为 240 mm × 240 mm. 试验中采用的 GFRP 选用南京生产的单向玻璃纤维布, 其抗拉强度 f_t 为 1. 507 GPa, 弹性模量 E 为 93. 750 GPa, 延伸率为 1. 5%, 计算厚度 0. 169 mm. 粘结树脂采用南京德谦科技实业有限公司生产的“Lica” 系列建筑结构胶, 其拉伸剪切强度为 24. 29 MPa. 试验中采用 MU 10 普通粘土砖, 尺寸为 240 mm × 115 mm × 53 mm. 为了模拟旧的房屋和受到一定损伤的结构, 砂浆选择了较低设计值的水泥石灰混合砂浆(M2. 5).

竖向荷载由顶部两个千斤顶提供, 通过钢和混凝土压梁转化为均布荷载作用于墙体, 双向水平力由水平推拉千斤顶来完成. 试件的参数和试验, 如表 1 所示. 表 1 中, f_{cu} 为砂浆抗压强度, n 为单面 GFRP 条数, b 为 FRP 条带宽度, η_s 为面积加固率, η_v 为体积加固率, V_{lim} 为极限荷载.

表 1 试件情况和试验结果

Tab. 1 Details and experimental results of masonry specimens

试件	f_{cu} /MPa	加固形式	n	b /mm	η_s /%	η_v /%	锚固形式	破坏形态	V_{lim} /kN
GW1	2. 67	—	—	—	—	—	—	剪压	215. 6
GW2	3. 55	水平	3 (水平)	100	40. 0	0. 056	无	剪摩	251. 8
GW3	3. 38	混合	3 (水平) 2 (斜向)	50 70	40. 3	0. 057	无	剪摩	264. 2

收稿日期: 2008-06-23

通信作者: 王全凤(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程的研究. E-mail: qfwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展(863) 计划项目(2004AA336010)

续表									
Continue table									
试件	f_{cu}/MPa	加固形式	n	b/mm	$\eta_k/\%$	$\eta_v/\%$	锚固形式	破坏形态	V_{lim}/kN
GW4	3.43	斜向分散 (等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	75 75	42.0	0.059	无	剪压	254.1
GW5	3.15	斜向分散 (不等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	60 90	42.7	0.060	无	剪摩	265.0
GW6	2.32	斜向分散 (不等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	80 120	56.1	0.079	无	剥离	222.1
GW7	3.11	斜向分散 (等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	80 120	56.1	0.079	“对拉”锚	剪压	242.4
GW8	2.68	斜向分散 (不等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	60 90	42.7	0.060	“对拉”锚	剪压	228.0
GW9	2.95	混合	3 (水平) 2 (斜向)	70 100	56.7	0.080	“对拉”锚	剪摩	229.0

2 抗震抗剪承载力理论计算

2.1 计算模型

GFRP 加固带壁柱砖墙抗震抗剪承载力计算模型, 如图 1 所示. GFRP 加固后墙体的抗震抗剪承

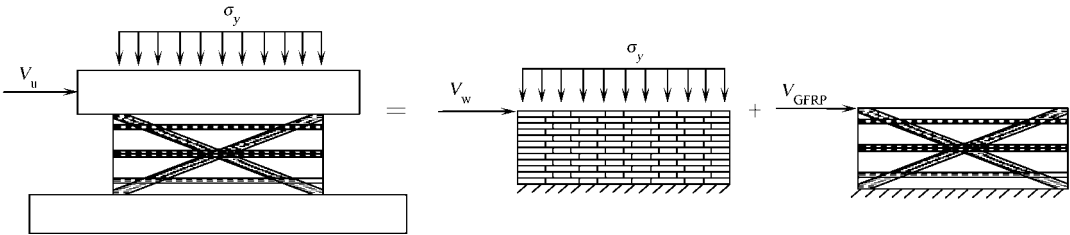


图 1 抗震抗剪承载力计算模型

Fig. 1 Computational model for seismic shear capacity

载力, 等于相同条件下未加固墙体的抗剪承载力与 GFRP 拉杆机制所承担的抗剪承载力之和, 即 $V_u = V_w + V_{GFRP}$. 其中, V_u 为 GFRP 加固后墙体的抗震抗剪承载力, V_w 为未加固墙体的抗震抗剪承载力, V_{GFRP} 为加固后墙体中的 GFRP 所提供的抗震抗剪承载力.

2.2 墙体自身的抗震抗剪承载力

2.2.1 剪摩型抗剪强度公式 文[1]通过对各单位提供的系数进行对比, 指出采用系数 $\alpha = 1.0$ 和 $\mu = 0.4$ 时的计算结果是比较满意的, 同时也为了与现行规范《GB 5003- 2001 砌体结构设计规范》^[2] 吻合. 剪摩型抗剪强度采用公式为

$$f_v = f_{v,0} + 0.4\alpha_v \tag{1}$$

式(1)中, $f_{v,0}$ 为 $\alpha_v = 0$ 时的砌体抗剪强度, α_v 为墙体上的竖向正应力.

2.2.2 主拉型抗剪强度公式 根据主拉应力理论, 当砌体的主拉应力超过其抗拉强度时, 砌体发生主拉破坏. 由主拉应力破坏理论推出的抗剪强度表达式中加入一个统计系数 β , 则有

$$\frac{f_v}{f_{v,0}} = \frac{1.0}{1.2} \sqrt{1 + \beta \frac{\alpha_v}{f_{v,0}}} \tag{2}$$

式(2)中, β 是根据华侨大学等单位研究的 22 片墙的试验原始数据进行回归统计分析, $\beta = 2.10$. 于是, 剪压型抗剪强度平均值计算式为

$$f_v = \frac{f_{v,0}}{1.2} \sqrt{1 + 2.10 \frac{\alpha_v}{f_{v,0}}} \tag{3}$$

在确定了抗剪强度公式后, 就是确定抗剪面积. 抗剪面积的确定应考虑试验墙体带有壁柱, 并且在加固过程中, 每个试件壁柱都有不同程度的损伤, 壁柱与墙体的联结受到削弱. 引入壁柱影响系数 Ψ

来反映这种情况, 则得到带壁柱砌体墙抗震抗剪承载力 $V_{w,b}$ 的表达式为

$$V_{w,b} = f_v(A_0 + \Psi A_b). \tag{4}$$

将式(1), (3) 分别代入式(4), 分别得到墙体的剪摩型和主拉型的抗震抗剪承载力公式为

$$V_{w,lm} = (f_{v,0} + 0.4\sigma_y)(A_0 + \Psi A_b), \tag{5}$$

$$V_{w,lr1} = \left[\frac{f_{v,0}}{1.2} \sqrt{1 + 2.10 \frac{\sigma_y}{f_{v,0}}} \right] (A_0 + \Psi A_b). \tag{6}$$

式(6)中, $V_{w,b}$ 为带壁柱砖墙抗震抗剪承载力, $V_{w,lm}$ 为用剪摩型抗剪强度公式计算的带壁柱砖墙抗震抗剪承载力, $V_{w,lr1}$ 为主拉型抗剪强度公式计算的带壁柱砖墙抗震抗剪承载力, A_b 为带壁柱墙体壁柱横截面积, A_0 为不含壁柱截面面积的墙横截面积, Ψ 为壁柱影响系数 (无壁柱时, $\Psi=0$).

2.3 FRP 提供抗震抗剪承载力的计算

把 FRP 简化为桁架模型中的拉杆、压杆作用. 由于 FRP 为柔性材料, 其压杆作用不予考虑, 即主要通过 FRP 的受拉机制来提高墙体的受剪承载力. 目前, 墙体的加固多数是采用以斜向布为主的加固方式, 提出的公式也是以斜向加固为基础的, 对于其他加固方式的相关计算公式提出的不多. 本文的 9 个试件中共采用了 3 种加固方式, 对不同的加固方式分别给出相应的计算公式^[3]. (1) 斜向加固方式为

$$V_{GFRP-x} = \eta m E_{GF} t_{GF} \left[\sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{GFI} b_{GFI} (\cos \theta_{GFI} + \delta_{GFI} \mu_{GF} \sin \theta_{GFI}) \right]. \tag{7}$$

式(7)中, η 为 GFRP 层数折减系数, m 为墙面 GFRP 总层数, E_{GF} 为 GFRP 弹性模量, t_{GF} 为 GFRP 计算厚度, n_x 为墙面单层单向斜向 GFRP 总条数, ε_{GFI} 为 GFRP 极限应变, b_{GFI} 为 GFRP 宽, θ_{GFI} 为 GFRP 与水平方向夹角, δ_{GFI} 为间接抗震抗剪承载力修正系数, μ_{GF} 为间接摩擦系数. (2) 水平加固方式为

$$V_{GFRP-s} = \eta n \sum_{i=1}^{n_s} E_{GF} \varepsilon_{GFI} t_{GF} b_{GFI}. \tag{8}$$

式(8)中, n_s 为墙面单层水平 GFRP 总条数. (3) 混合加固方式为

$$V_{GFRP-h} = \eta m E_{GF} t_{GF} \left\{ \lambda_1 \left[\sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{GFI-x} b_{GFI-x} (\cos \theta_{GFI} + \delta_{GFI} \mu_{GF} \sin \theta_{GFI}) \right] + \lambda_2 \sum_{i=1}^{n_s} \varepsilon_{GFI-h} b_{GFI-h} \right\}. \tag{9}$$

式(9)中, ε_{GFI-x} , ε_{GFI-s} 分别为斜向和水平 GFRP 的极限应变; b_{GFI-x} , b_{GFI-s} 分别为斜向和水平 GFRP 宽; λ_1 , λ_2 分别为斜向布和水平布的参与工作系数, 暂取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.0$.

2.4 GFRP 加固带壁柱砖墙抗震抗剪承载力理论计算公式

以往研究表明, 试件在反复荷载作用下(拟静力试验)的承载力通常要比单调静力加载下低 10% 左右^[4]. 因此, 理论计算公式也应反映这种由于加载方式不同而引起的差异. 那么, 由式(4), (7), (8), (9) 就可得出不同加固方式的 GFRP 加固带壁柱砖墙抗震抗剪承载力计算公式. 斜向加固方式、水平加固方式和混合加固方式的计算公式分别为

$$V_{w-x} = \zeta (V_{w,b} + V_{GFRP-x}). \tag{10}$$

$$V_{w-s} = \zeta (V_{w,b} + V_{GFRP-s}), \tag{11}$$

$$V_{w-h} = \zeta (V_{w,b} + \lambda_1 V_{GFRP-x} + \lambda_2 V_{GFRP-s}). \tag{12}$$

在式(12)中, ζ 为荷载作用方式效应系数(当单调静力加载时, $\zeta=1.1$; 而低周反复加载(拟静力试验)时, $\zeta=1.0$), V_{w-x} 为采用斜向加固方案加固后墙体的抗震抗剪承载力, V_{w-s} 为采用水平加固方案加固后墙体的抗震抗剪承载力, V_{w-h} 为采用混合加固方案加固后墙体的抗震抗剪承载力.

对于式(12), 当 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$ 时, 式(12)简化为式(10); 而当 $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$ 时, 式(12)简化为式(11). 这说明式(12)同样具有式(10)和式(11)的功能. 因此, 式(12)可以作为计算 3 种加固方式的墙体抗震抗剪承载力的统一表达式. 于是, 将式(5), (6)代入式(12), 分别得到加固后墙体发生剪摩破坏及发生剪压破坏两种破坏模式的抗震抗剪承载力计算公式. 即

$$V_{w-x1} = \zeta [(f_{v,0} + 0.4\sigma_y)(A_0 + \Psi A_b) + \lambda_1 V_{GFRP-x} + \lambda_2 V_{GFRP-s}], \tag{13}$$

$$V_{w-x2} = \zeta \left[\left[\frac{f_{v,0}}{1.2} \sqrt{1 + 2.10 \frac{\sigma_y}{f_{v,0}}} \right] (A_0 + \Psi A_b) + \lambda_1 V_{GFRP-x} + \lambda_2 V_{GFRP-s} \right]. \tag{14}$$

式(13), (14)中, V_{w-x1} 为加固后墙体发生剪摩破坏的抗震抗剪承载力, V_{w-x2} 为加固后墙体发生剪压破坏的抗震抗剪承载力.

2.5 壁柱影响系数的确定

墙体的抗剪承载力与墙体的抗侧移刚度有直接的关系, 一般墙体的抗侧移刚度越大, 墙体的抗剪承载力越高. 壁柱影响系数 ϕ 的最大值, 是通过墙体的等效抗侧移刚度来确定的. 合理的加固方案应该是采用 FRP 条带穿过壁柱加固, 亦即采用对称加固, 这样就必须对壁柱进行钻洞(用于穿 FRP). 不同的加固方案, 布宽可能不同, 钻洞的宽度也就不同. 壁柱开洞后, 墙体的整体抗侧移刚度变小了, 且墙体开的洞口越多, 墙体的抗侧移刚度削弱的越大. 当计算带壁柱墙体本身提供的抗剪承载力时, 应考虑壁柱开洞对墙体抗剪承载力的影响. 为此引入壁柱开洞率 β 来考虑这一影响, 带壁柱墙体的 ϕ 可表示为

$$\phi = \phi_H \phi_b^3 + \left\{ \frac{[N(3 + \frac{\delta^2}{6}) - tb] }{t_0 b_0} - \phi_H \phi_b \phi_b^3 \right\} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N h_{ci}}{H} \right]. \tag{15}$$

上式中, $\phi = \frac{t_0}{t}$, $\phi_b = \frac{b_0}{b}$, $\phi_H = \frac{H^2 + 3b^2}{H^2 + 3b_0^2}$, $\lambda = [\frac{3}{(t_0 b_0 + tb)} + \frac{H^2}{(t_0 b_0^3 + t b_0^3)}]^{-1}$, $\delta = \frac{H}{b}$, H 为墙体的高度, b 为带壁柱墙的长度, t 为带壁柱墙的厚度, b_0 为壁柱正面的宽度, t_0 为壁柱侧面厚度, h_{ci} 为壁柱上第 i 个洞口高度, N 为壁柱上开洞洞口数. 因此, 对于试验墙体, 将已知数据代入式(15), 得

$$\phi = 0.041 + 0.873 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N h_{ci}}{H} \right]. \tag{16}$$

最后需要说明的是, 如果墙体没有壁柱, 则可直接取 $\phi = 0$.

2.6 试验值与理论计算值的对比

试验值与理论计算值的对比, 如表 2 所示. 表 2 中, $V_{u,e}$ 为试验实测值, $V_{u,c}$ 为理论计算值; 文[5]的试验实测数据为静力试验所得, “理论计算值”是根据式(13)或式(14)计算的得到的. 从表 2 可以看出, 所提出公式基本上可以反映实际规律的. 对不同的破坏形态, 采用不同的计算公式与试验值吻合较好, 只是个别试件偏差较大.

表 2 理论计算值与试验对比情况

Tab. 2 Comparisons between the theoretical results and experimental results						
数据来源	试件	破坏形式	加固形式	$V_{u,e}$ /kN	$V_{u,c}$ /kN	$V_{u,e} \cdot V_{u,c}^{-1}$
本文	GW1	剪压	无	215.6	213.6	1.01
	GW2	剪摩	水平	251.8	232.3	1.08
	GW3	剪摩	混合	264.2	241.9	1.09
	GW4	剪压	斜向分散	254.1	236.4	1.07
	GW5	剪摩	斜向分散	265.0	243.6	1.09
	GW7	剪压	斜向分散	242.4	229.7	1.06
	GW8	剪压	斜向分散	228.0	225.1	1.01
	GW9	剪摩	混合	229.0	220.7	1.04
文[5]	W2-1	剪摩	水平	233.5	217.6	1.07
	W2-3	剪压	混合	234.1	236.5	0.99
	W3-1	剪压	斜向分散	244.1	237.6	1.03
	W3-2	剪压	斜向分散	241.4	232.4	1.04
	W3-3	剪摩	斜向分散	255.5	256.8	1.00
文[6]	BW10M5-2	剪压	斜向交叉	488.0	427.7	1.11
	BW10M5-3	剪压	斜向交叉	496.0	476.3	1.16
	BW10M10-2	剪压	斜向分散	659.0	651.4	1.01
	BW10M10-3	剪压	斜向分散	675.0	727.2	0.93
文[7]	CW2-1	剪摩	斜向交叉	134.0	110.5	1.21
	CW2-2	剪摩	水平	156.2	151.8	1.03
	CW2-3	剪摩	水平	156.4	148.6	1.05
	CW2-4	剪摩	混合	165.0	149.8	1.10
文[8]	Wal-4	剪压	倒“V”	332.0	415.9	0.78
	Wal-5	剪压	斜向交叉	326.0	412.3	0.70

续表						
Continue table						
数据来源	试件	破坏形式	加固形式	$V_{u,c}/\text{kN}$	$V_{u,c}/\text{kN}$	$V_{u,c} \cdot V_{u,c}^{-1}$
文[9]	W1	剪压	无	280.0	253.7	1.10
	W2	剪压	斜向交叉	360.0	322.2	1.12
文[10]	CW6	剪压	无	225.0	243.4	0.92
	CW7	剪压	斜向交叉	345.0	331.5	1.04

3 结束语

与传统加固修补方法——钢筋水泥砂浆外加层加固法相比,FRP 加固法具有明显的技术优势.主要表现在建筑空间利用率高、耐性好、施工工效高、没有湿作业,以及加固修补后基本不增加原结构质量及原构件尺寸,不增加下层结构负担和整体结构的地震作用.

参考文献:

[1] 砖石结构设计规范抗震设计研究组. 无筋墙体的抗震剪切强度[J]. 建筑结构学报, 1984, 5(6): 1-12

[2] 中国建筑东北设计研究院. GB 5003- 2001 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 10-20.

[3] 王全凤, 柴振岭, 黄奕辉, 等. GFRP 加固砖墙抗震抗剪承载力的设计公式[J]. 工业建筑, 2006, 36(6): 96-98, 103.

[4] 王庆霖. 无筋砌体的抗剪剪切强度[C] // 砖石结构研究论文集. 长沙: 湖南大学出版社, 2001: 153-158.

[5] 黄奕辉, 王全凤, 刘 迪, 等. GFRP 复合材料加固带壁柱砖墙抗剪性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(5): 67-73.

[6] 温利明. 芳纶纤维加固砖砌体的抗震性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2003.

[7] 林 磊. FRP 加固砌体墙抗震性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.

[8] 张晨军. 碳纤维布增强砖砌体抗震能力的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.

[9] 孙恒军. 配筋砌体基本力学性能及其墙片抗震性能的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2001.

[10] 李浩菊. 碳纤维布增强混凝土小型空心砌块砌体抗震能力的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2001.

Seismic Shear Capacity for Brick Masonry
Wall Strengthened with GFRP

WANG Quan-feng, CHAI Zhen-ling,
HUANG Yi-hui, YANG Yong-xin

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

Abstract: By carrying out the experiment of eight pieces of brick masonry walls with pilaster strengthened with glass fiber reinforced polymer (GFRP) and one piece of normal masonry wall with pilaster, the influence coefficient of pilaster, modified coefficient, statistic coefficient and effective participation coefficient are brought forward theoretically. Based on failure model of brick masonry walls and truss bar model of fiber reinforced polymer (FRP), the formulas of shear capacity of brick masonry wall with pilaster strengthened with GFRP are established, which agree well with the experimental results.

Keywords: glass fiber reinforced polymer; strengthening; brick masonry wall with pilaster; shear capacity

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)