

文章编号: 1000-5013(2009)01-0089-06

GFRP 加固带壁柱砖墙抗剪面积的简化计算

柴振岭, 王全凤, 黄奕辉, 杨勇新, 曾志兴

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过 1 片未加固带壁柱砖墙和 9 片玻璃纤维增强复合材料(GFRP) 加固带壁柱砖墙的抗震性能试验, 分析带壁柱墙体中壁柱对墙体抗剪承载力的影响, 并提出壁柱影响系数. 从等效抗侧移刚度入手, 推导出壁柱影响系数最大值的计算表达式; 运用壁柱隔离法, 推导出壁柱影响系数的最小值计算表达式, 并结合壁柱的开洞损伤情况, 给出壁柱影响系数的统一表达式, 从而简化了计算. 最后, 通过试验验证该系数提出的合理性.

关键词: 带壁柱砖墙; 抗剪承载力; 玻璃纤维增强复合材料; 侧移刚度; 影响系数

中图分类号: TU 364.01 **文献标识码:** A

目前, 由于种种原因, 我国多数砌体结构房屋需要进行维修加固. 纤维增强复合材料(FRP) 已被广泛应用于混凝土结构加固中, 然而, FRP 加固砌体结构技术目前仍处于试验研究的初始阶段, 对 FRP 加固带壁柱墙体的研究目前仍属空白. 文[1-6] 进行了砖墙抗剪、抗震性能的试验研究, 并提出了相应墙体的抗剪承载力计算公式. 文[7-15] 进行了 FRP 加固砌体墙抗剪、抗震性能的试验研究, 也给出了砌体墙加固后的抗剪承载力计算公式, 但研究的墙体主要是矩形截面墙. FRP 加固带壁柱墙研究的难点和创新点是, 对带壁柱墙体如何加固和对壁柱如何参与抗剪. 本文对壁柱如何参与抗剪计算进行研究, 并结合带壁柱砖墙加固的实际情况, 给出带壁柱砖墙抗剪承载力计算公式.

1 试验概况

试验墙体的高宽比定为 1: 2, 长为 1 500 mm, 高为 750 mm, 厚为 240 mm. 试件壁柱截面取为 240 mm × 240 mm, 墙体尺寸如图 1 所示. 图 1 中, 竖向荷载为 320 kN($\sigma \approx 0.76$ MPa), 并在试验过程中保持不变. 试件制作时, 墙体采用

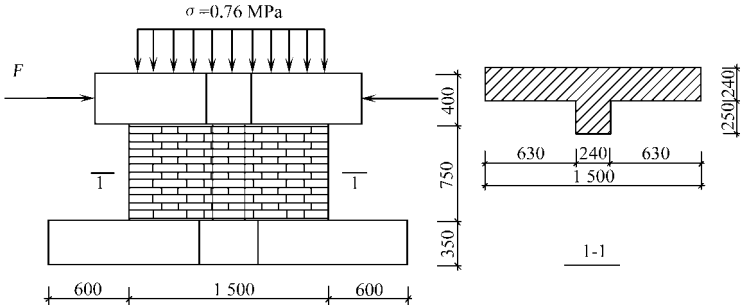


图 1 试件尺寸(单位: mm)
Fig. 1 Dimensions of specimens(unit: mm)

MU 10 的普通粘土砖, 砖实测强度为 10.15 MPa, M2.5 的混合砂浆. 试验共制作 9 个试件, 其参数变化及加固方案如表 1 所示. 表 1 中, f_{cu} 为砂浆抗压强度, n 为单面 FRP 条数, c 为 FRP 条带宽, η_s 为面积

表 1 试件参数及加固方案

Tab. 1 Details of the masonry specimens

试件	f_{cu} / MPa	加固形式	n	c / mm	η_s / %	η_v / %	锚固形式
GW 1	2.67	—	—	—	—	—	—
GW 2	3.55	水平	3 (水平)	100	40.0	0.056	无
GW 3	3.38	混合	3 (水平) 2 (斜向)	50 70	40.3	0.057	无

收稿日期: 2008-06-19

通信作者: 柴振岭(1977-), 男, 实验师, 硕士, 主要从事工程结构检测与抗震加固改造的研究. E-mail: dzlc@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863) 项目(2001AA336010); 华侨大学科研基金资助项目(07H ZR06)

续表

Continue table

试件	f_{cu}/MPa	加固形式	n	c/mm	$\eta_s/\%$	$\eta_v/\%$	锚固形式
GW 4	3.43	斜向分散 (等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	75 75	42.0	0.059	无
GW 5	3.15	斜向分散 (不等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	60 90	42.7	0.060	无
GW 6	2.32	斜向分散 (不等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	80 120	56.1	0.079	无
GW 7	3.11	斜向分散 (等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	80 120	56.1	0.079	“对拉”锚
GW 8	2.68	斜向分散 (不等宽)	4 (次斜) 2 (主斜)	60 90	42.7	0.060	“对拉”锚
GW 9	2.95	混合	3 (水平) 2 (主斜)	70 100	56.7	0.080	“对拉”锚

加固率, η_v 为体积加固率。

如果纤维布不沿墙面穿过壁柱而是绕过壁柱进行加固, 纤维布容易在壁柱转角处出现应力集中, 并很可能导致 GFRP 由于面外受拉而剥离, 从而起不到理想的加固效果. 另一方面, 不对称加固容易导致墙体发生扭转^[6]. 因此, 所有试件不考虑壁柱加固, 且采用对称加固, 加固方案如图 2 所示.

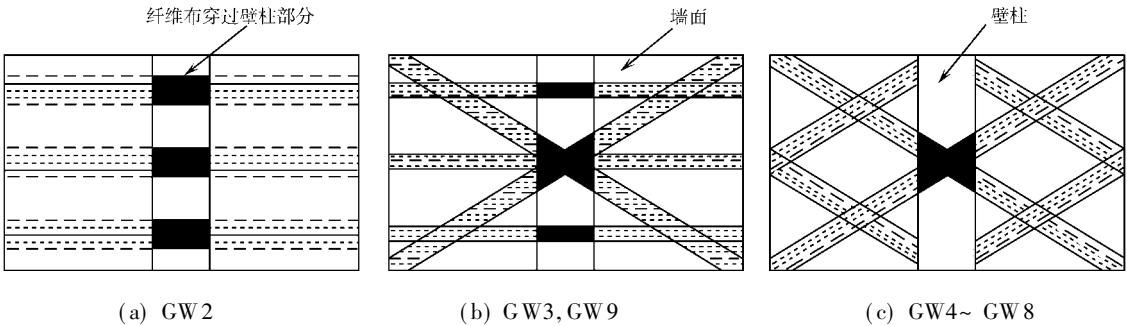
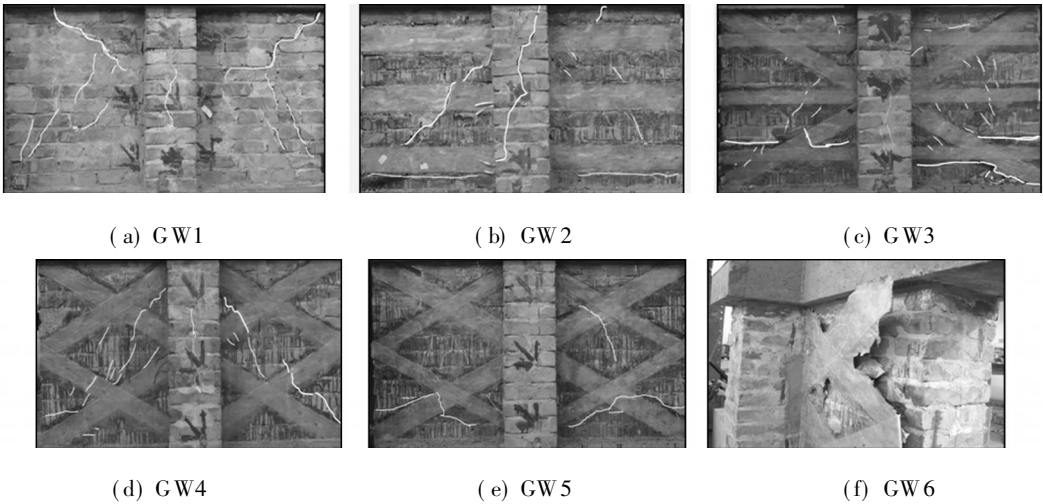


图 2 试件的加固方案

Fig. 2 Strengthening scheme of specimens

2 试验过程与现象

不论是加固试件还是未加固试件, 壁柱在整个试验过程中同主体墙一起参与受力作用, 并最终随主体墙的破坏而破坏. 所不同的是, 主体墙出现剪摩和剪压破坏两种破坏模式, 而所有试件的壁柱都只出现剪压一种破坏模式. 试件的具体破坏情况如图 3 所示.



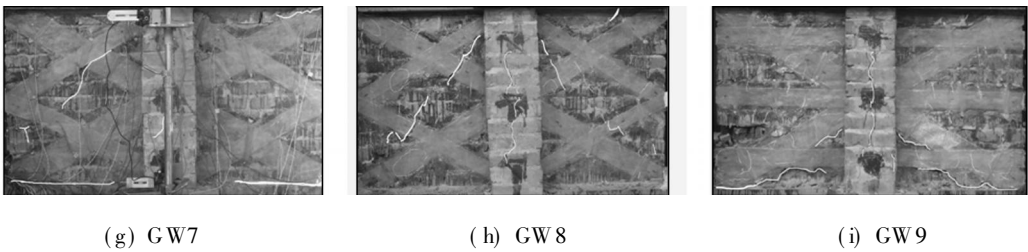


图 3 试件破坏图

Fig. 3 Failure modes of specimens

3 带壁柱墙体抗剪分析

3.1 承载力分析

对于一般矩形截面墙体, 设其截面面积为 A_w , 墙体的抗剪强度为 f_v , 则墙体的抗剪承载力 F 为

$$F = f_v \times A_w. \tag{1}$$

对于如图 1 所示的带壁柱墙体, 文[17] 直接取 A_w 为整个截面的总面积, 这显然是不合理的. 因为, 截面的形状不同, 剪应力在截面内的分布是不同的, 从而截面的抗剪刚度也就不同. 另外, 截面的形状不同, 墙体的抗弯刚度一般也是不同的. 墙体的极限承载力直接与墙体的侧移刚度相关, 而墙体的侧移刚度是墙体的抗剪刚度和抗弯刚度之和. 因此, 对于非矩形截面墙体, 只有通过墙体的等效抗侧移刚度转换后计算出抗剪计算面积 A_w , 然后再利用式(1) 计算出的抗剪承载力才是带壁柱墙体的抗剪承载力.

3.2 计算面积的确定

由式(1) 及上面的分析可知, 对于矩形截面, 截面的总面积等于抗剪计算面积. 为简化计算, 可设想把带壁柱墙面的截面通过抗侧移刚度等效转化为矩形截面, 转化后的矩形截面面积就可作为抗剪计算面积. 为了达到这一目的, 将带壁柱截面分为主体截面和壁柱截面, 并引入壁柱影响系数 Ψ 来解决带壁柱墙体的抗剪截面面积问题. 带壁柱墙体的实际墙体截面, 以及通过等效抗侧移刚度转化后的矩形截面墙体, 如图 4 所示. 图 4(a) 中, 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. 图 4(b) 中, x 为带壁柱墙经等效抗侧移刚度转化后矩形截面墙的厚度.

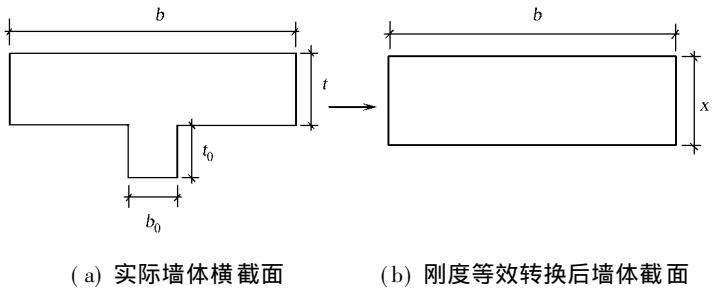


图 4 带壁柱墙体等效抗侧移刚度转换示意图

Fig. 4 Conversion of equivalent lateral rigidity for brick masonry wall with pilaster

现将带壁柱墙体转换为等长度、等高度、变宽度(先设宽为 x) 的矩形截面的墙体(图 4), 则 x 应满足两种截面形状情况下墙体的抗侧移刚度相等. 根据文[18], 墙体的抗侧移刚度可表示为

$$\frac{1}{K} = \frac{H^3}{12EI} + \frac{\gamma H}{AG}. \tag{2}$$

式(2) 中, A 为墙体的截面面积, I 为墙体水平截面惯性矩, K 为墙体的抗侧移刚度, H 为墙体的高度, E 为砌体的弹性模量, G 为砌体的剪切模量(一般取 $G = 0.4E$), γ 为截面的应力分布不均匀系数(矩形截面 $\gamma = 1.2$). 带壁柱墙体横截面的惯性矩 $I_0 = \frac{t_0 b_0^3 + t b^3}{12}$, 截面面积 $A_0 = t_0 b_0 + t b$, 转换后矩形截面的惯性矩 $I_x = \frac{x b^3}{12}$, 截面面积 $A_w = x b$.

设带壁柱墙体的抗侧移刚度为 K_b , 截面形状转换后墙体的抗侧移刚度为 K_w , 则 K_w 为墙体矩形截面宽度 x 的函数, 即 $K_w = K_w(x)$. 由抗侧移刚度等效条件可得

$$K_b = K_w(x), \tag{3}$$

将 $I_0, A_0, I_x, A_x, G, E, H$ 和 γ 分别代入式(2), 求得 K_b 和 $K_w(x)$, 再联立式(3)可求得

$$x = \frac{(3b^2 + H^2)}{b^3 \left[\frac{H^2}{(t_0 b_0 + tb^3)} + \frac{3}{(t_0 b_0 + tb)} \right]}.$$

根据力学知识, 在两墙体的抗侧移刚度相等条件下, 墙体的抗剪承载力理论上相等, 那么, 在式(1)中也就表现为两种条件下墙体的抗剪截面面积相等. 设壁柱截面为 A_b , 带壁柱墙体的主体截面面积为 A_0 , 等效抗侧移刚度转换后墙体截面面积为 A_w , 再引入壁柱影响系数 Ψ , 则应有

$$\begin{aligned} A_0 + \Psi A_b &= A_w, \\ \text{即} \quad \Psi_{\max} &= (A_w - A_0)/A_b. \end{aligned} \quad (4)$$

将 A_0, A_w 以及 A_b 代入上式, 整理化简得

$$\Psi_{\max} = [\lambda(3 + \delta^2) - tb]/t_0 b_0, \quad (5)$$

式(5)中, $\lambda = \frac{1}{\left[\frac{3}{(t_0 b_0 + tb)} + \frac{H^2}{(t_0 b_0^3 + tb_0^3)} \right]}$, $\delta = \frac{H}{b}$. 至于 Ψ 的最小值 Ψ_{\min} , 可通过壁柱隔离法近似确定. 墙

中壁柱的高宽比一般比主体墙的高宽比大得多, 且多处于弯曲破坏的范围内, 试验墙体壁柱的高宽比为 3:1. 如果单独在壁柱顶部施加水平荷载, 壁柱将发生弯曲破坏. 由于壁柱与墙联结在一起, 两者之间存在耦合关系, 但目前很难从理论上找出两者之间的确切的关系.

可以形成共识的是, 墙体的存在提高了壁柱本身的破坏承载力, 也就是说, 壁柱在与墙体完全脱离的状态下, 其破坏荷载是最小的. 设壁柱“隔离”主体墙后的抗侧移刚度为 $K_{b,0}$, 主体墙的抗侧移刚度为 $K_{w,0}$, 则 Ψ_{\min} 可表示为

$$\Psi_{\min} = K_{b,0}/K_{w,0}, \quad (6)$$

联立式(2), (6), 整理化简得

$$\Psi_{\min} = \left(\frac{t_0}{t}\right) \left(\frac{b_0}{b}\right)^3 \frac{(H^2 + 3b^2)}{(H^2 + 3b_0^2)}. \quad (7)$$

令 $\varphi_t = \frac{t_0}{t}$, $\varphi_b = \frac{b_0}{b}$, $\varphi_H = \frac{(H^2 + 3b^2)}{(H^2 + 3b_0^2)}$, 则式(7)可简化为

$$\Psi_{\min} = \varphi_t \varphi_b \varphi_H^3. \quad (8)$$

对于采用 FRP 加固的带壁柱墙体, 通过 9 片带壁柱墙的试验研究发现, 合理的加固方案应该是采用 FRP 条带穿过壁柱加固, 即采用对称加固. 这样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. 但是值得肯定的是, 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. 因此, 对于采用 FRP 加固后墙体, 当计算带壁柱墙体本身提供的抗剪承载力时, 应该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. 即

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N h_{c,i}}{H}. \quad (9)$$

上式中, $h_{c,i}$ 为壁柱上第 i 个洞口高度, N 为壁柱上开洞洞口数, β 为壁柱开洞率.

在壁柱处开洞墙体(加固后墙体), 洞口与墙体主体之间形成间断的薄弱面, 这在一定程度上影响了壁柱与墙体的联结耦合作用. 因此, 壁柱影响系数 Ψ 值应该满足 $\Psi_{\min} \leq \Psi \leq \Psi_{\max}$. 用开洞率对 Ψ_{\max} 进行折减, 带壁柱墙体的 Ψ 可以统一表示为

$$\Psi = \varphi_t \varphi_b \varphi_H^3 + [1 - \beta] \left\{ \frac{[\lambda(3 + \delta^2) - tb]}{t_0 b_0} - \varphi_t \varphi_b \varphi_H^3 \right\}. \quad (10)$$

式(10)中, Ψ 的取值满足 $\varphi_t \varphi_b \varphi_H^3 \leq \Psi \leq \frac{[\lambda(3 + \delta^2) - tb]}{t_0 b_0}$. 本文的试验墙体, $b = 1500 \text{ mm}$, $H = 750 \text{ mm}$, $t_0 = b_0 = t = 240 \text{ mm}$, 则可得

$$\Psi = 0.041 + 0.873 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N h_{c,i}}{H} \right], \quad 0.041 \leq \Psi \leq 0.914. \quad (11)$$

最后需要说明的是, 如果墙体没有壁柱, 可直接取 $\Psi=0$; 而如果壁柱没有开洞损伤, 则取 Ψ 的最大值 Ψ_{\max} .

4 试验验证

GFRP 加固后墙体的抗剪承载力, 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震抗剪承载力之和, 即 $F_u = F_w + F_{\text{GFRP}}$. 其中, F_u 为 GFRP 加固后墙体的抗震抗剪承载力, F_w 为未加固墙体的抗震抗剪承载力, F_{GFRP} 为加固后墙体中的 GFRP 所提供的抗震抗剪承载力. 基于 GFRP 的桁架受力模型, F_{GFRP} 表示为

$$F_{\text{GFRP}} = \eta m E_{\text{GF}} t_{\text{GF}} \left\{ \lambda_1 \sum_{i=1}^{n_x} \varepsilon_{\text{FL},x} b_{\text{GFL},x} (\cos \theta_{\text{GFI}} + \delta_{\text{GFI}} \mu_{\text{GF}} \sin \theta_{\text{GFI}}) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{n_s} \varepsilon_{\text{FL},s} b_{\text{GFL},s} \right\}. \tag{12}$$

上式中, m 为墙面 GFRP 总层数, E_{GF} 为 GFRP 弹性模量, t_{GF} 为 GFRP 计算厚度, μ_{GF} 为间接摩擦系数, n_s 为墙面单层单向水平 GFRP 总条数, n_x 为墙面单层单向斜向 GFRP 总条数, θ_{GFI} 为 GFRP 与水平方向夹角, $\varepsilon_{\text{FL},x}$ 为斜向 GFRP 的极限应变, $\varepsilon_{\text{FL},s}$ 为水平 GFRP 的极限应变, δ_{GFI} 为间接抗震抗剪承载力修正系数, λ_1 为斜向布的参与工作系数, η 为 GFRP 层数折减系数, λ_2 为水平布的参与工作系数.

对于未加固的带壁柱墙体, 截面的抗剪计算面积可通过式(4)计算. 联立式(1), (4), 可以得到计算未加固墙体(包括带壁柱)抗剪承载力的统一公式为

$$F_w = f_v (A_0 + \Psi A_b). \tag{13}$$

于是, GFRP 加固带壁柱砖墙的抗剪承载力 F_u 可以求得. F_w, F_{GFRP} 以及 F_u 的计算值如表 2 所示. 表 2 中, $\sum_{i=1}^N h_{c,i}$ 为壁柱上开洞的总高度, f_v 为砌体抗剪强度, $F_{u,c}$ 为 GFRP 加固后壁柱的抗震抗剪承载力 F_u 的计算值, $F_{u,e}$ 为 GFRP 加固后壁柱的抗震抗剪承载力 F_u 的试验值. 从表 2 中可以看出, 提出的抗剪承载力计算公式与试验值符合较好. 这间接地说明了带壁柱墙体通过等效侧移刚度进行转化, 确定了墙体抗剪计算面积的可行性和正确性.

表 2 理论计算值与试验值的对比

Tab. 2 Contrast between calculation values and test values

试件	f_v/MPa	$\sum_{i=1}^N h_{c,i}/\text{mm}$	Ψ	A_w/mm^2	F_w/kN	$F_{\text{GFRP}}/\text{kN}$	$F_{u,c}/\text{kN}$	$F_{u,e}/\text{kN}$	$\frac{F_{u,c}}{F_{u,e}}$
GW1	0.518	0	0.914	412 646	213.6	0	213.6	215.6	1.01
GW2	0.556	360	0.504	389 030	216.2	16.1	232.3	251.8	1.08
GW3	0.551	180	0.707	400 723	220.6	21.3	241.9	264.2	1.09
GW4	0.554	180	0.707	400 723	222.3	14.1	236.4	254.1	1.07
GW5	0.543	180	0.707	400 723	217.4	26.2	243.6	265.0	1.09
GW6	0.498	240	0.638	396 749	197.6	22.3	220.0	222.1	1.01
GW7	0.540	240	0.638	396 749	214.2	15.5	229.7	242.4	1.06
GW8	0.518	240	0.638	396 749	205.5	19.6	225.1	228.0	1.01
GW9	0.535	480	0.361	380 794	203.8	16.9	220.7	229.0	1.04

5 结束语

(1) 考虑到目前计算墙体抗剪承载力公式的局限性, 在基于等效抗侧移刚度的力学基础上推导出壁柱影响系数的具体表达式, 从而给出带壁柱墙体的等效抗剪计算面积计算表达式. (2) 基于已经认可的纤维布的桁架受力模型, 利用式(12) 计算出 GFRP 的抗剪承载力; 基于等效抗侧移刚度求解等效抗剪计算面积的方法, 利用式(13) 计算出带壁柱砖墙的抗剪承载力. 最后, 通过试验值与理论计算值的对比, 说明了提出的通过等效抗侧移刚度进行求解等效抗剪计算面积的合理性和正确性.

参考文献:

[1] 朱伯龙, 吴明舜, 蒋志贤. 在周期荷载作用下砖砌体基本性能的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1980.
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2): 1-14.

- [2] 阎开发. KP1 型承重粘土空心砖墙片抗震性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 1985(1): 34-40.
- [3] 梁建国, 李 卫, 陈行之. 烧结页岩粉煤灰砖砌体与墙片的抗剪性能[J]. 四川建筑科学研究, 1993(1): 33-42.
- [4] 候汝欣, 梁 爽. 粉煤灰砖墙片抗震性能的研究[J]. 四川建筑科学研究, 1993(3): 26-32.
- [5] 翁大根, 吕西林, 任晓崧, 等. 砖砌体墙片抗震修复与加固伪静力试验[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 1-8.
- [6] MOGHADDAM H A. Lateral load behavior of masonry infilled steel frames with repair and retrofit[J]. Journal of Structural Engineering, 2004(1): 56-63.
- [7] 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: 12.
- [8] 林 磊, 叶列平. GFRP 布加固砌体墙的试验研究[C] // 第二届全国土木建筑工程用纤维增强复合材料应用技术学术交流会. 北京: 清华大学出版社, 2002: 215-223.
- [9] 张顺祥, 管克俭, 张开溶, 等. 碳纤维布加固砌体结构试验研究[C] // 第二届全国土木建筑工程用纤维增强复合材料应用技术学术交流会. 北京: 清华大学出版社, 2002: 210-214.
- [10] 阮积敏. 普通玻璃纤维布加固多孔砖砌体的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 1-46.
- [11] 夏春红, 王 博. 玻璃纤维布加固空心砖砌体抗震性能试验研究[C] // 第三届全国 FRP 学术交流会议. 南京: 东南大学出版社, 2004: 283-286.
- [12] 王 博, 夏春红. 纤维布加固砖砌体抗弯试验研究[C] // 第三届全国 FRP 学术交流会议. 南京: 东南大学出版社, 2004: 287-289.
- [13] 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: 12.
- [14] 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: 10-11.
- [15] CECCHI A, MILANI G, TRALLI A. In plane loaded CFRP reinforced masonry walls: Mechanical characteristics by homogenisation procedures[J]. Composites Science and Technology, 2004(64): 2097-2112.
- [16] 刘 迪. GFRP 加固带壁柱砖墙抗剪性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2005: 6.
- [17] 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: 40-52.
- [18] 陈国兴, 陈忠汉, 马克俭. 工程结构抗震设计原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 171-173.

Simplified Calculation of Shear Area for Brick Masonry Wall with Pilaster Reinforced with GFRP

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

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

Abstract: Based on the seismic performance experiments on one brick masonry wall with ordinary pilaster and eight masonry walls with pilaster strengthened with glass fiber reinforced polymer (GFRP), the influence of pilaster in brick masonry wall on shear capacity is investigated. Through the factor analysis of shear capacity, interaction coefficient of pilaster is obtained. According to the equivalent lateral rigidity, the expression to calculate the maximum of interaction coefficient of pilaster is presented, and by means of "segregated pilaster from the main wall", the expression to calculate the minimum of the coefficient is also presented. Considering the damage of interaction coefficient of pilaster, the uniform expression to calculate the coefficient is presented, which simplifies the calculation. The validity and rationality of interaction coefficient of pilaster are examined by experiments.

Keywords: brick masonry wall with pilaster; shear capacity; glass fiber reinforced polymer; lateral rigidity; interaction coefficient

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)