

隐形梁柱法加固砖砌体墙抗震性能试验

王凤池,刘妍钊,马一方,李显众

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 提出一种隐形梁柱加固方法,对砌体结构进行加固,以提高其抗震性能。方法 通过墙体拟静力试验,比较不同隐形梁柱尺寸对加固墙体抗震性能的影响,并提出加固后墙体抗剪承载力计算公式。运用 ABAQUS 建立有限元模型,将模拟得出的滞回曲线、刚度退化曲线与试验曲线对比。结果 承载力计算值与实测结果基本吻合,模拟得出曲线与试验曲线基本吻合。隐形柱的宽度越大,竖向钢片应变越小;隐形梁高度越大,横、竖向钢片应变越大。结论 加固后墙体的抗震性能较未加固墙体均有不同程度提高。随着隐形柱宽度的增加,墙体的抗剪承载力增大。

关键词 隐形梁柱法;加固;拟静力试验;砌体结构;弱框架;抗剪承载力

中图分类号 TU362

文献标志码 A

Experimental Study on Seismic Performance of Masonry Walls Reinforced with Invisible Beam-Column

WANG Fengchi, LIU Yanzhao, MA Yifang, LI Xianzhong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to analyze a method of reinforcement of invisible beam and column to strengthen the masonry structure to improve its seismic performance. The method is through the pseudo-static test of the wall, the influence of different invisible beam column sizes on the seismic performance of reinforced wall is compared, and the formula for calculating the anti-shear carrying capacity of reinforced rear wall is proposed. The finite element model is established by ABAQUS, and the hysteresis is simulated. Curve, stiffness degradation curve and test curve comparison. The results show that the calculated bearing capacity is basically consistent with the measured results, and the simulation shows that the curve is basically consistent with the test curve. The wider the width of the invisible column, the smaller the vertical steel sheet strain, and the greater the height of the invisible beam, the larger the horizontal and vertical steel sheet strain. The conclusion is that the seismic performance of the reinforced wall is improved to different extents compared with the unreinforced wall. As the width of the hidden column increases, the shear capacity of the wall increases.

Key words: invisible beam-column; reinforce; quasi-static test; masonry structure; feeble frame;

收稿日期:2019-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51678374)

作者简介:王凤池(1970—),男,教授,博士,主要从土木工程防灾减灾等方面研究。

shear-bearing capacity

砌体结构是我国建筑结构的主要类型之一^[1],但目前许多砌体结构房屋却存在严重问题.大量城镇在役砌体结构房屋已达到或超过设计基准期,许多达到设计基准期的砌体房屋没有采取有效的维护措施;大部分老旧砌体结构房屋在建造时没有考虑抗震的要求,已不能满足现行相关规范要求,抗震性能薄弱^[2-3],抗震设防存在很大缺陷^[4-5].

近年来,许多国内外学者对老旧砌体房屋加固方法进行了研究^[6-11]. E. L. Gawady 等^[12-13]基于纤维增强复合材料对砌体加固进行研究,研究发现该材料在砌体结构加固改造中发挥着重要的作用,但界面层的粘结强度不足会严重影响加固效果;郭猛等^[14]研究发现钢筋网-水泥砂浆面层可以明显提高中高砌体墙的水平承载力和变形能力,可以在一定程度上提高结构抗侧刚度;邓明科等^[15]对高延性混凝土加固砖砌体墙的抗震性能进行了研究,结果表明采用高延性混凝土(HDC)构造带和面层加固无筋砖砌体墙,可以显著提高墙体的开裂荷载与水平承载力;陈再现等^[16]提出在砌体表面粘贴正交扁钢,然后用聚合物砂浆抹面的加固方法能有效提高砖砌体结构的抗震性能.

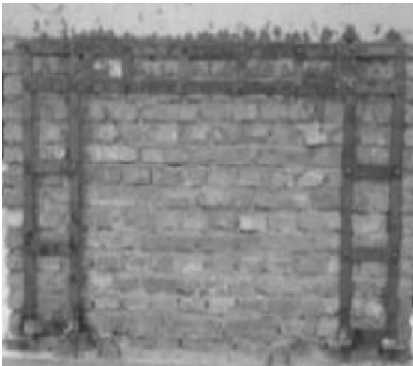
已有研究表明,目前大多加固方法均为采用不同材料在墙体表面进行加固处理,提

升结构抗震性能,但该方法较为复杂,而且造价较高.基于此,笔者提出一种新型隐形梁柱加固法,该方法是在原有粘钢法的基础上^[17-19],结合砖砌体的特点,通过螺栓连接墙两面的钢板,对原有墙体的四周施加预应力,将墙体构造成为弱框架填充墙结构,在钢片加固区域由钢片、螺栓和砖块共同形成具有一定刚度和承载能力的弱框架梁柱.通过对 4 片采用隐形梁柱法加固的墙体及 1 片未加固墙体的抗震性能进行试验和有限元模拟对比分析,研究隐形梁柱加固法对砌体结构抗震性能的提高效果,为实际工程应用提供借鉴.

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验墙体采用 MU10 老旧烧结普通黏土砖以及 M10 混合砂浆砌筑,砂浆实测抗压强度为 12.58 MPa.墙体上下均设有钢筋混凝土横梁,混凝土设计强度等级 C30.加固钢板采用 Q235 碳素结构钢,采用 8.8 级高强螺栓连接墙两面的钢板.制作试验墙体 5 片,加固后墙体见图 1,设计参数见表 1.为防止砌体墙在试验时发生底部滑移,在底梁混凝土初凝前砌筑第一皮砖,并在第一皮砖的砖缝间使用 20 mm 螺纹钢筋与底梁连接.



(a) 隐形梁柱



(b) 抹灰

图 1 隐形梁柱法加固墙体

Fig. 1 The walls reinforced by invisible beam-column

表 1 试件设计参数

试件编号	梁宽 × 高/mm	柱宽 × 高/mm	竖向荷 载/MPa	螺栓预 紧力/kN
W-0	—	—	1.5	—
W-S-1	240 × 150	240 × 180	1.5	13.2
W-S-2	240 × 150	240 × 240	1.5	13.2
W-S-3	240 × 150	240 × 300	1.5	13.2
W-S-4	240 × 180	240 × 240	1.5	13.2

1.2 试验方法及加载制度

采用 MTS 进行低周往复加载,位移计及应变片位置见图 2.

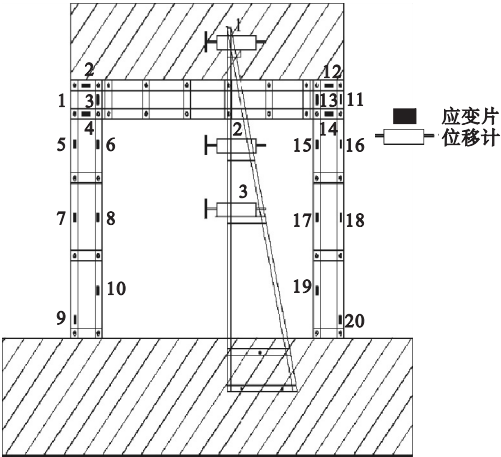


图 2 位移计及应变片布置图

Fig. 2 The sketch map displacement meter and strain gauge

施加恒定竖向均布荷载为 1.5 MPa^[20], 水平加载采用荷载和位移双控制方式. 首先采用预估开裂荷载的 20% 对试件进行两次试推. 墙体开裂前采用荷载控制, 第一级荷载为 50 kN, 荷载增量为 50 kN, 每级循环一次; 墙体开裂后按开裂位移的整倍数控制加载, 每级循环两次, 直至水平荷载下降到极限

荷载 85% 以下时停止加载.

2 有限元模型

笔者通过 Abaqus 建模,模型各单元均采用三维八节点等参单元 C3D8R,六面体单元划分网格见图 3. 砌体墙采用整体式模型,模型下端采用完全固定的形式. 模型中各构件之间采用面面接触,法相硬接触,切向摩擦系数为 0.5,模型选用材料参数与试验一致;钢片加固区域由钢片、螺栓和砖块共同形成具有一定刚度和承载能力的弱框架梁柱,钢片与砌体、螺栓与砌体之间的结构胶通过调节损伤以及相互作用属性中的黏性来模拟.

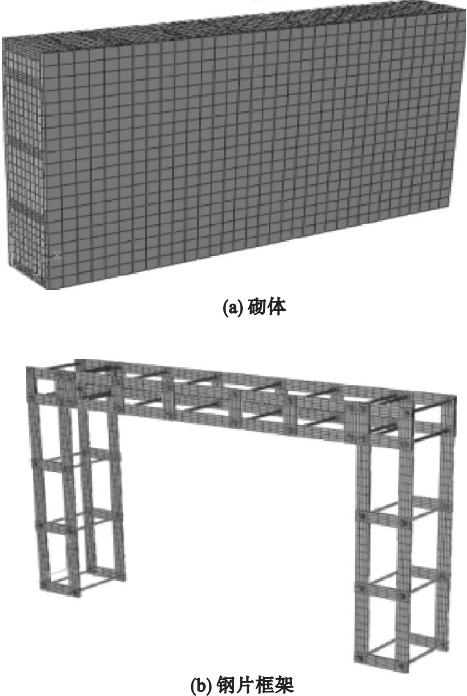


图 3 砌体与钢片框架网格模型

Fig. 3 The model of masonry and steel
模型加载方式与试验相同. 模型基本力学参数见表 2.

表 2 模型力学参数

材料名称	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松比	膨胀 角/(°)	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	k	黏性参数
钢材	7 850	2.06×10^5	0.30	—	—	—	—	—
砌体	1 700	3 177.3	0.15	30	0.1	1.16	0.666 7	0.005
抹面砂浆	1 700	18 900	0.15	30	0.1	1.16	0.666 7	0.005

3 试验结果及分析

3.1 受剪承载力、墙顶位移及位移延性系数

开裂荷载 V_{cr} 取试件受拉区出现第一条裂缝时的荷载值,极限荷载 V_u 取水平荷载峰值,破坏荷载 V_f 取荷载下降至极限荷载 85% 时的荷载值. 三种荷载对应的位移值分别为开裂位移 Δ_{cr} 、极限位移 Δ_u 和破坏位移 Δ_f . 位移延性系数 $\mu_u = \Delta_f / \Delta_u$. 试验结果见表

表 3 试件受剪承载力、墙顶位移及位移延性系数

Table 3 Ultimate shear strength, displacement and ductility coefficients of specimens

试件 编号	V_{cr} 试验 值/kN	V_{cr} 增幅/ %	Δ_{cr} 试 验值/mm	Δ_{cr} 增幅/%	V_u 试验 值/kN	V_u 增幅/%	Δ_u 试 验值/mm	Δ_u 增 幅/%	Δ_f 试验 值/mm	Δ_f 增幅 /%	μ_u
W-0	251.81	—	0.80	—	364.18	—	4.08	—	6.44	—	1.58
W-S-1	258.18	2.53	0.88	10.00	454.39	24.77	4.44	8.82	7.27	12.89	1.64
W-S-2	302.21	20.02	0.91	13.75	436.28	19.80	3.61	-11.52	4.88	-24.20	1.35
W-S-3	399.14	58.51	1.03	28.75	479.86	31.76	1.67	-59.07	6.00	-6.83	3.59
W-S-4	335.67	33.30	1.29	61.25	387.00	6.27	3.92	-3.92	9.05	40.53	2.31

3.2 滞回特性

试件模拟得出的滞回曲线与试验滞回曲线对比见图 4. 从图中可以看出,加固墙体的滞回曲线比未加固墙体的滞回曲线更加饱满,峰值荷载和峰值位移增大,墙体延性、抗震性能和耗能能力都有提高. 通过模拟得到的滞回曲线与试验曲线比较接近,两者基本吻合.

3. 从表中结果可以看出,加固后墙体开裂荷载、极限荷载和破坏荷载均有提高. 比较 W-S-1、W-S-2 和 W-S-3 后发现,随着隐形柱宽度的增加,墙体的受剪承载力增大,当隐形柱宽度大于高度时,对砌体墙延性的提高效果较明显. 比较 W-S-2 和 W-S-4 后发现,随着隐形梁高度的增大,墙体的开裂荷载和开裂位移、极限位移、位移延性系数变大,极限受剪承载力降低.

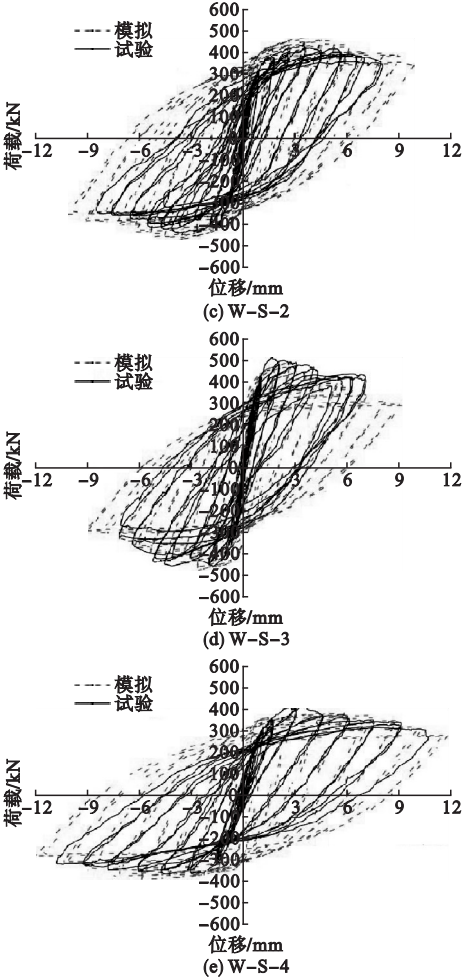


图 4 试件滞回曲线

Fig. 4 The hysteresis curves of specimens

3.3 骨架曲线

试件骨架曲线见图5,骨架斜率表示整体刚度。从图5(a)可以看出,W-S-1、W-S-2、W-S-3的隐形梁尺寸相同,而隐形柱尺寸依次增大,墙体刚度随柱尺寸的增大依次增大;图5(b)分析了在相同柱尺寸下,加固墙体刚度与梁尺寸的关系,由图中曲线

可以看出,随着隐形梁尺寸的增大,墙体侧向刚度不断变小。隐形梁柱宽度的增加,墙体峰值荷载与极限承载力变大。研究表明,加固墙体与未加固墙体初始刚度较接近,但整体刚度有所提高,说明隐形梁柱法能有效提高墙体的刚度,延缓斜裂缝的出现,限制斜裂缝的开展。

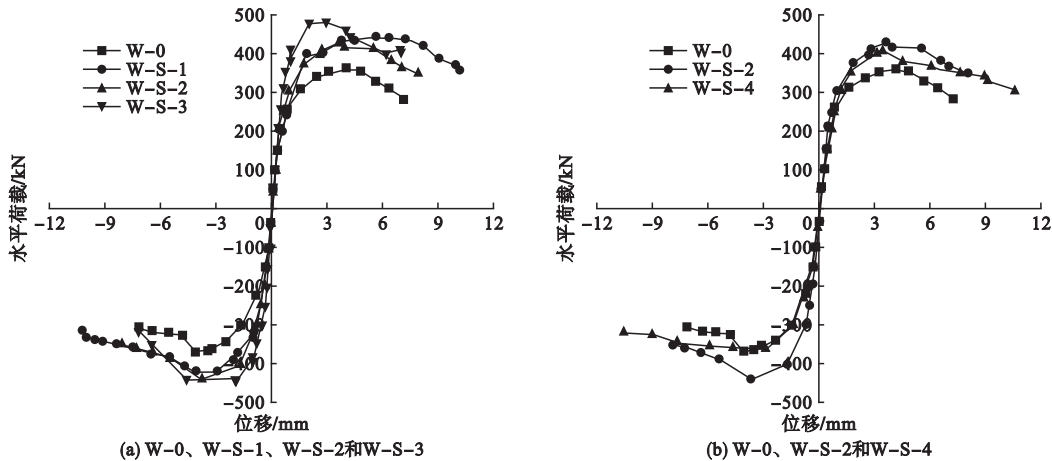


图5 试件骨架曲线

Fig. 5 The skeleton curves of specimens

3.4 刚度退化曲线

试件刚度退化曲线见图6。从图中可以

看出,试件试验曲线与模拟曲线基本吻合。

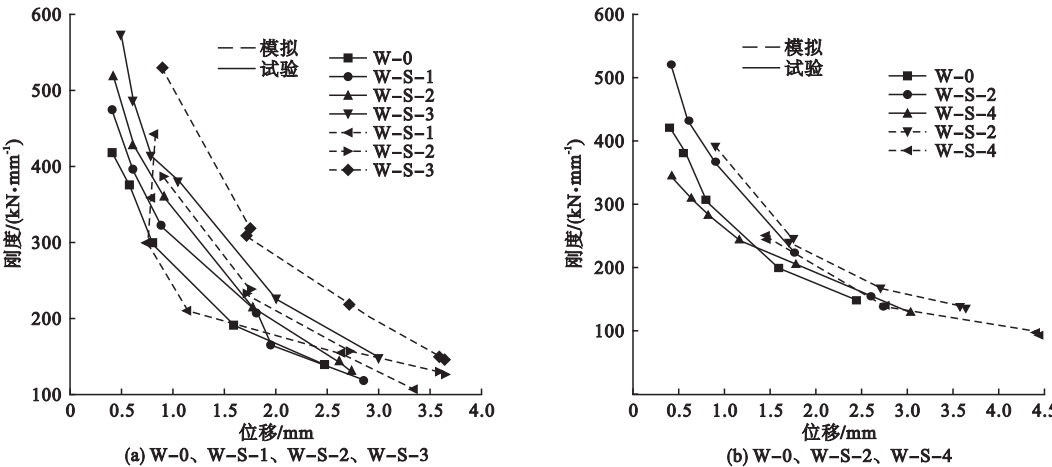


图6 试件刚度退化曲线

Fig. 6 The stiffness degradation curves

由图6(a)可以看出,W-S-1、W-S-2、W-S-3较W-0初始刚度均有所提高,且隐形柱宽度越大墙体初始刚度越大。随着墙顶位移的增大,各试件的刚度在逐渐减

小的同时,相互之间的差异也逐渐减小。说明隐形柱的宽度对砖砌体刚度的影响程度随着位移的增大而减弱。

由图6(b)可以看出,在弹性阶段,W-

S-2 较 W-0 初始刚度提高很多. W-S-2 初始刚度比 W-S-4 大,说明隐形梁的高度越小墙体初始刚度越大. 并且隐形梁的高度对砖砌体刚度的影响程度随着位移的增大而减弱. 墙体开裂后, W-0 刚度急剧减小, W-S-4 刚度降低较缓且开裂后刚度大于 W-0,说明隐形梁柱能有效延缓刚度的减小,从而延缓墙体的破坏.

3.5 钢片应变曲线

横向钢片以钢片最左边的边为坐标起始点,竖向钢片以钢片顶端为起始点,提取破坏状态下沿钢片轴向应变进行比较,钢片各点位置见图 7.

钢片应变曲线见图 8. 由图 8(a)、(b)可以看出,破坏时隐形梁下部应变普遍大于上部,但最大应变未达到屈服应变. 隐形柱中钢

片的最大应变均超过屈服应变,在荷载作用下均会发生不同程度的受拉及受压变形. 由图 8(c)、(d)可以看出,钢片 C、D 应变沿高度拉压相反,且在中部均出现了拉压转换点,

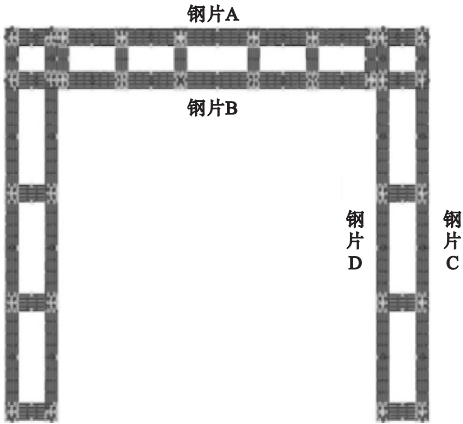


图 7 钢片示意图

Fig. 7 Schematic diagram of steel sheet and points

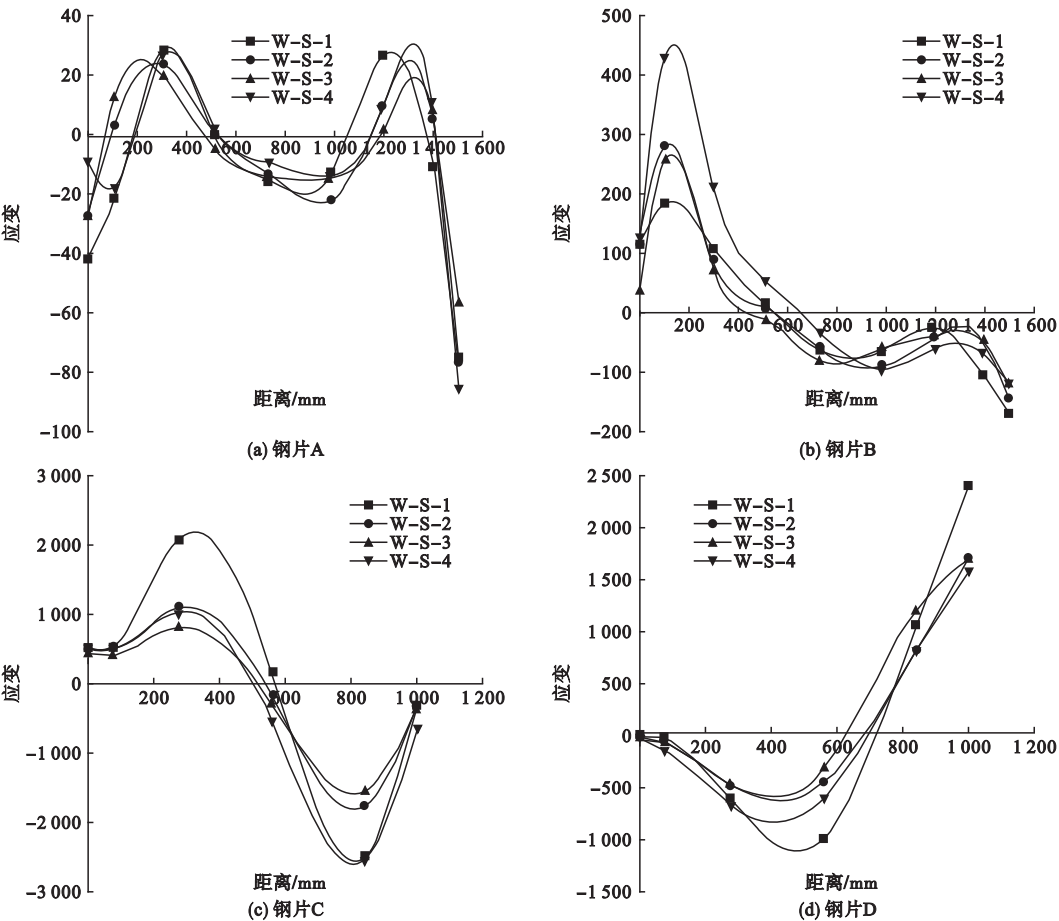


图 8 钢片应变曲线

Fig. 8 Strain curves of steel sheet

说明极限荷载下,隐形柱失效.当隐形梁尺寸相同时,隐形柱的宽度越大,竖向钢片应变越小,但对横向钢片应变影响不大;当隐形柱尺寸相同时,隐形梁高度越大,横、竖向钢片应变均越大.

3.6 耗能计算

在非弹性阶段,结构受到往复荷载作用产生滞变阻尼,阻尼分析采用耗能系数 C_e 和等效黏滞阻尼比 ε_{eq} 来表示:

$$C_e = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}}.$$

(1)

$$\varepsilon_{eq} = \frac{C_e}{2\pi}.$$

(2)

式中: $S_{(ABC+CDA)}$ 为 ABC 和 CDA 所围图形面积; $S_{(OBE+ODF)}$ 为 OBE 和 ODF 所围图形面积(见图 9).

阻尼比越大,结构消耗地震作用的能力

就越大.耗能系数、等效黏滞阻尼比均在墙体处于破坏荷载值时计算得出,结果见表 4.可以看出,随着隐形柱宽度增加,加固后墙体的耗能系数和等效黏滞阻尼比增大,说明隐形梁柱法增大隐形柱宽度能有效提高墙体耗能能力.

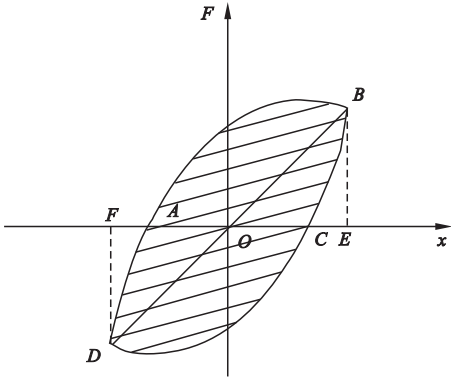


图 9 滞回环所包围面积

Fig. 9 The area of hysteresis loop back surrounded

表 4 试件耗能系数和等效黏滞阻尼比

Table 4 The energy dissipation coefficient and the equivalent viscous damping ratio

试件 编号	E ₁ 吸收 能量/kJ	E ₂ 输出 能量/kJ	耗能系数 C_e		等效黏滞阻尼比 ε_{eq}	
			计算值	增幅/%	计算值	增幅/%
W-0	3.068	2.002	1.53	—	0.24	—
W-S-1	4.899	3.387	1.56	3.27	0.25	4.85
W-S-2	5.051	3.057	1.65	7.84	0.26	9.47
W-S-3	4.825	2.562	1.88	22.88	0.30	24.73
W-S-4	6.192	3.274	1.89	23.53	0.30	25.40

4 抗剪承载力

隐形梁柱加固法是将墙体构造成为弱框架填充墙结构(见图 10),在钢片加固区域墙

和钢片共同作用形成弱框架梁柱.弹性状态下,弱框架填充墙体系的侧向承载力由弱框架与填充墙共同提供;在填充墙破坏时,弱框架与填充墙仍然接触紧密,相互作用.

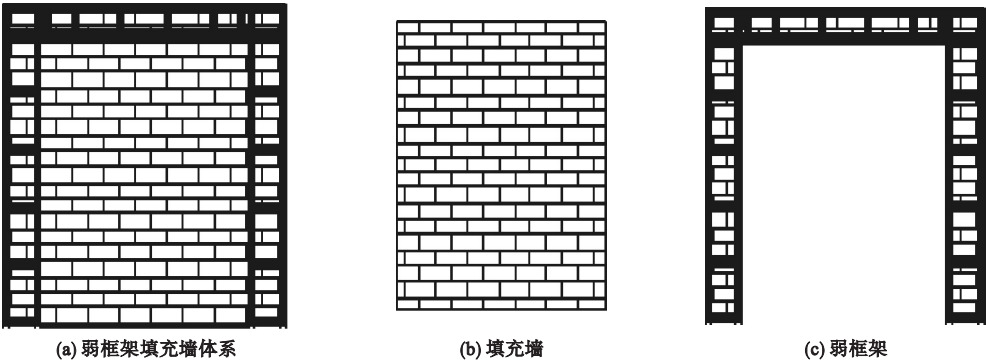


图 10 弱框架填充墙

Fig. 10 Wall-filled weak frame

在弹性阶段,框架填充墙体系的抗剪承载力是将弱框架和填充墙的承载力进行线性叠加,承载力计算公式为

$$V_e = V_{ew} + V_{ef} \tag{3}$$

式中: V_e 为框架填充墙的抗剪承载力; V_{ew} 为弱框架的抗剪承载力; V_{ef} 为填充墙的抗剪承载力。

当弱框架填充墙体系处于极限状态时,填充墙侧向承载力主要是由未开裂的填充墙和竖向荷载引起的摩擦力提供.同时,应考虑弱框架和填充墙之间的附加应力,因此填充墙的侧向承载力计算公式为

$$V_{rw} = 0.65\mu(\sigma_0 + \sigma_0^*)Aw \tag{4}$$

式中: μ 为砌体的摩擦系数,取 0.6~0.7。

对于普通混凝土框架填充墙体系,按破坏机理分为两种破坏形式:一种是由于填充墙支撑着框架柱的底部,使框架柱形成短柱,发生剪切破坏,称这种破坏形式为“剪-弯”破坏;另一种情况为框架柱的顶底、底部均出现塑性铰,称之为“弯-弯”破坏,此时混凝土框架的抗侧力计算公式为

$$V_{uc} = \frac{0.1}{\lambda + 0.1} f_b c h_0 + 0.8 f_{yk} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.7N \tag{5}$$

式中: λ 为框架柱的剪跨比,取 $\lambda = H_w/2h_0$; H_w 为框架柱的净高; h_0 为框架柱的宽度; A_{sv} 为框架柱中箍筋的面积; N 为框架柱的轴压力; s 为框架柱中箍筋的间距。

试验表明,弱框架柱的底部并未出现短柱现象,可按“弯-弯”破坏形态考虑.该体系在达到极限状态时,填充墙出现很多裂缝,墙体大面积破坏,承载力开始不满足要求,此时对应的荷载为极限荷载,一般取 0.85 倍的峰值荷载,因此在计算极限承载力时,弱框架部分的抗剪承载力应有所降低,弱框架是介于混凝土框架和砖框架之间,因此引入弱框架柱抗剪强度降低系数 ζ ,取 $\zeta = 0.85$.弱框架填充墙的极限承载力公式为

$$V_u = V_{rw} + \zeta V_{uc} \tag{6}$$

弱框架填充墙在极限状态下的计算值

V_u 与试验值 V_u' 见表 5. 由表可以看出,各试件在极限状态下,理论计算值和试验值基本吻合。

表 5 弱框架填充墙在极限状态下计算值与试验值

Table 5 The contrast of the regression formula value and the calculating value

试件编号	V_u/kN	V_u'/kN	V_u/V_u'
W-0	305.01	364.18	0.84
W-S-1	407.44	454.39	0.90
W-S-2	436.05	436.28	1.00
W-S-3	481.51	479.86	1.00
W-S-4	438.59	387.00	1.13

5 结 论

(1)隐形梁柱法有效地提高了墙体的延性及刚度,延缓了裂缝的产生,限制了裂缝的发展.单片墙体经隐形梁柱法加固后,开裂荷载和极限荷载提高,加固墙体的位移延性比未加固墙体增大。

(2)当隐形梁尺寸相同时,隐形柱的宽度越大,竖向钢片应变越小,但对横向钢片应变影响不大;当隐形柱尺寸相同时,隐形梁高度越大,横、竖向钢片应变均越大.在极限位移荷载作用下,竖向钢片产生的最大应变超过了钢材的屈服应变,薄弱处主要位于钢片上部及下部。

(3)隐形梁柱加固法能有效提高墙体的耗能能力及抗震性能.随着隐形柱宽度增加,加固后墙体的耗能系数和等效黏滞阻尼比增大。

参考文献

[1] 郑山锁,牛丽华,郑洪,等. 酸雨腐蚀砖砌体组合墙抗震性能试验及恢复力研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(7):162-172.
(ZHENG Shansuo, NIU Hualih, ZHENG Hao, et al. Research on seismic behavior of brick composite walls under acidic atmospheric environment[J]. Journal of building structures, 2019,40(7):162-172.)

[2] LI Wenfeng, WANG Tao, CHEN Xi, et al, Pseudo-dynamic tests on masonry residential buildings seismically retrofitted by precast steel

- reinforced concrete walls [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2017, 3 (16): 587 - 588.
- [3] 蔡贤辉, 李刚, 程耿东. 提高砌体结构抗震能力对策及问题[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 625 - 630.
(CAI Xianhui, LI Gang, CHENG Gengdong. Countermeasures and problems for seismic enhancement of masonry structures[J]. Journal of Dalian university of technology, 2009, 49 (5): 625 - 630.)
- [4] 曹万林, 周中一, 王卿, 等. 农村房屋新型隔震与抗震砌体结构振动台试验[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 209 - 213.
(CAO Wanlin, ZHOU Zhongyi, WANG Qing, et al. Experimental study on base vibration isolation and anti-seismic masonry structure in rural areas by shaking table test [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30 (11): 209 - 213.)
- [5] 曾银枝, 李保华, 徐福全, 等. 村镇砌体结构住宅抗震性能现状分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(3): 121 - 126.
(ZENG Yinzi, LI Baohua, XU Fuquan, et al. Seismic behavior analysis of masonry structures in rural area [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2011, 33 (3): 121 - 126.)
- [6] TRIANTAFILLOU T C. Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates [J]. Journal of composites for construction, 1998, 2(2): 96 - 104.
- [7] SECONDINS T, MORBIN A. Flexural and shear strengthening of unreinforced masonry with FRP bars [J]. Composites science and technology, 2006, 66(2): 289 - 296.
- [8] GILSTRAP J M, DOLAN C W. Out-of plane bending of FRP-reinforced masonry walls [J]. Composites science and technology, 1998, 58 (8): 1277 - 1284.
- [9] EHSANIM R, SAADATMANESH H, VELAZQUEZDIMAS J I. Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading [J]. Journal of composites for construction, 2015, 3(3): 134 - 142.
- [10] AI-SALLOUM Y A, ALMUSALLAM T H. Load capacity of concrete masonry block walls strengthened with epoxy-bonded GFRP sheets [J]. Journal of composites for materials, 2005, 19(19): 1719 - 1745.
- [11] BENEDETTI A S. Analytical models for shear-displacement curves of unreinforced and FRP reinforced masonry panels [J]. Construction and building materials, 2006, 22 (3): 175 - 185.
- [12] BANK L C. Composites for construction: structural design with FRP materials [M]. New York: John Wiley and Sons, 2006.
- [13] GAWADY E L, LESTUZZI P, BADOUX M. A seismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP [J]. Composites part B engineering, 2006, 37(2/3): 148 - 162.
- [14] 郭猛, 张瀛, 徐福泉, 等. 钢筋网-水泥砂浆面层加固中高砖砌体墙抗震性能试验. [J] 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 71 - 77.
(GUO Meng, ZHANG Ying, XU Fuquan, et al. Experiment on seismic performance of medium-height brick masonry wall strengthened with steel-meshed cement mortar [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2014, 31(2): 71 - 77.)
- [15] 邓明科, 杨铎, 梁兴文. 高延性混凝土加固无筋砖砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 43 - 53.
(DENG Mingke, YANG Shuo, LIANG Xingwen. Experimental studies on seismic behavior of unreinforced masonry walls strengthened with HDC layer [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(6): 43 - 53.)
- [16] 陈再现, 孙凯琳, 朱兴吉, 等. 低强度砖砌体粘钢-聚合物砂浆加固抗震性能试验 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 153 - 167.
(CHEN Zaixian, SUN Kailin, ZHU Xingji, et al. Experimental study on strengthening method of low strength brick masonry using steel plate and polymer mortar [J]. Journal of building structures, 2018, 39 (12): 153 - 167.)
- [17] 孙文彬. 粘钢法在框架梁加固中的实践应用 [J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(6): 84 - 86.
(SUN Wenbin. Analytical study on reinforced concrete beam strengthened by steel plate [J]. Building science research of Sichuan, 2005, 31 (6): 84 - 86.)
- [18] 武莽, 崔熙光, 王帅. 外包粘钢法加固柱在建筑结构中的应用 [J]. 四川建筑, 2010, 30 (1): 108 - 109.
(WU Mang, CUI Xiguang, WANG Shuai. Application of reinforced column wrapped with steel plate in the building structure [J]. Sichuan architecture, 2010, 30 (1): 108 - 109.)
- [19] 余琼, 李思明. 柱加大截面与粘钢法加固框架节点的比较分析 [J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 1157 - 1162.
(YU Qiong, LI Siming. Comparison and analysis about RC beam-column's joints strengthened by enlarging column section or by bonding steel plate [J]. Journal of tongji university, 2003, 31(10): 1157 - 1162.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(People's Republic of China Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for seismic test of building: JGJ/T101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)