

文章编号:1674-2974(2016)07-0043-07

嵌筋与外贴钢板加固木框架填充墙 抗震性能试验研究*

敬登虎[†], 颜江华, 曹双寅

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为了研究木框架内砖砌体填充墙的抗震加固方法,共完成了3个缩尺试件的低周往复荷载试验.基于试验研究,得到了试件的破坏特征、滞回曲线、骨架曲线、承载力、延性和耗能能力等抗震性能指标.试验结果表明:未加固试件的破坏主要由填充墙的剪切裂缝控制且伴有平面外倾斜,木框架未见损伤;对砖砌体填充墙采用嵌入水平钢筋与端部外贴钢板进行加固可以有效地提高试件的承载力与延性,且一定程度的裂缝损伤对加固后试件的名义屈服荷载、峰值荷载影响不大,但对延性与能量耗散能力影响明显.

关键词:砖砌体填充墙;木框架;抗震加固;钢板;嵌入钢筋

中图分类号:TU398.4

文献标识码:A

Experimental Study on Seismic Performance of Brick Masonry Infill Walls with Wood Frame Strengthened by Embedded Steel Bars and External Steel Plates

JING Deng-hu[†], YAN Jiang-hua, CAO Shuang-yin

(School of Civil Engineering, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to find a seismic strengthening method of brick masonry infill walls with wood frame, three small-scaled wall specimens were tested under low reversed cyclic loadings. Based on the experimental investigation, structural seismic performances including failure modes, hysteresis curves, skeleton curves, load-carrying capacity, ductility, and energy dissipation capacity were evaluated. The test results showed that the non-strengthened specimen failed due to shear cracks and out-of-plane collapse of masonry wall, but the wood frame was not damaged; the use of the embedded steel bars and externally fixed steel plates to strengthen the brick masonry infill wall effectively improved their load-carrying capacity and ductility; and the limited initial cracks had no influence on the nominal yield strength and peak strength, but decreased the ductility and energy dissipation capacity of the brick masonry infill walls with wood frame.

Key words: brick masonry infill wall; wood frame structures; seismic strengthening; steel plate; embedded steel bars

* 收稿日期:2015-06-16

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAJ14B02)

作者简介:敬登虎(1978-),男,安徽和县人,东南大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: jingdh@seu.edu.cn

木结构在我国古建筑中占有很大的比重,此类建筑物通常采用砖砌体填充墙作为房屋的围护与隔断.基于汶川震害的调查与分析结果,地震作用下木构架基本保持完好,由于填充墙的嵌固作用,木构架产生的位移很小;但是,墙体由于强度不足容易发生破坏^[1],即通常所说的“墙倒屋不塌”.文献^[2]通过对北京古建太和殿的抗震性能分析,认为考虑填充墙的嵌固作用后,整体结构的变形减小,有利于避免木构架发生整体倾覆,类似于带填充墙的RC框架^[3].此外,在欧洲一些国家,如葡萄牙、土耳其、法国、希腊、西班牙、德国等,带砌体墙的木框架结构形式也得到较为广泛的应用,并经历了多次地震灾害的考验.但是,欧洲的木框架通常增设多种斜撑,其对砌体墙的约束能力变强,墙体在经历地震后具有更好的整体性,这点与我国现存古建筑的实际情况相差较大^[4].基于木框架内填充墙破坏特点,为了避免填充墙倒塌造成的财产损失等不利影响,且考虑到古建筑加固时的特殊要求,本文对砖砌体填充墙采用水平灰缝嵌入钢筋与端部外贴钢板相结合的方法进行加固,尽量减少对墙体外貌的改变,其中外贴钢板加固具有很好的可逆性.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计了3个试件(编号依次为KJ-1、KJ-2和KJ-3),其中试件KJ-1直接加载;试件KJ-2先加载至填充墙出现一定裂缝损伤,然后进行裂缝修补与墙体加固,再进行加载;试件KJ-3直接进行填充墙加固,然后进行加载.试件模型取自清工部《工程做法则例》^[5]卷二十四(七檩小式大木)一节中的扇面墙,并以1:1.76的缩尺比例进行设计.木框架的梁柱节点采用改进的燕尾榫,形状为端部宽、根部窄,与之对应的卯口则是里面大、外面小,这样能很好地防止拔榫现象^[6].试件的具体设计如图1所示.木材选用樟子松;砖砌体填充墙采用标准黏土砖砌筑,混合砂浆按M5要求进行配比(水泥:石灰:水=1:0.84:1.53),墙体厚度为115mm;地梁为钢筋混凝土梁,其截面尺寸为300mm×500mm.

试件具体制作时,先浇筑地梁,然后制作木框架,最后砌筑砖砌体填充墙.

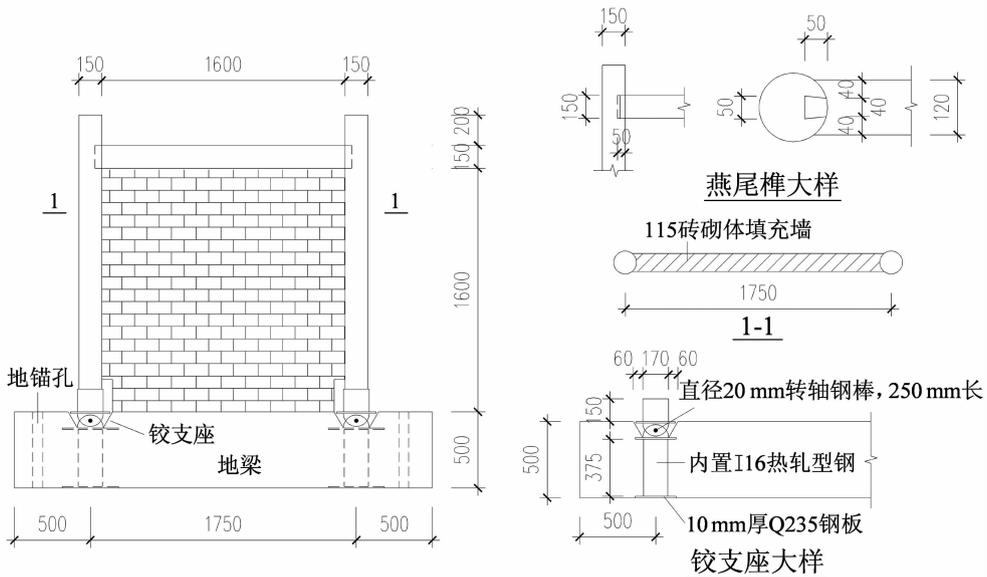


图1 试件设计详图

Fig. 1 Design details of specimens

1.2 试件加固方案

试件KJ-2和KJ-3中的填充墙两侧对称地采用钢筋嵌入水平灰缝内,同时在填充墙端部两侧分别外贴钢板进行加固,相关步骤与构造措施如下:①凿

除需要嵌筋的水平灰缝砂浆,槽的深度为20mm;②洒水润湿已凿好的槽,并用M5混合砂浆填入槽内至深度的一半,然后放入钢筋,每根长1450mm(伸入端部钢板内),并施加一定的挤压力;③在已嵌

入钢筋的槽内再填入 M5 砂浆,直至灰缝平整;④待所有灰缝嵌筋施工完后,在墙端部两侧外贴钢板,钢板与砌体之间用 2 mm 厚 M5 砂浆抹平,且钢板之间用直径 12 mm 的对拉螺杆拧紧。具体的加固详图如图 2 所示。加固所用钢板为 Q235 钢;钢筋为 HPB300 级、直径 6 mm 的光圆钢筋。为了使得钢板有效地工作,需将钢板在基础处进行植筋生根,植筋深度为 150 mm,所用钢筋直径为 20 mm,并与钢板采用单面焊接(连接长度为 100 mm)。

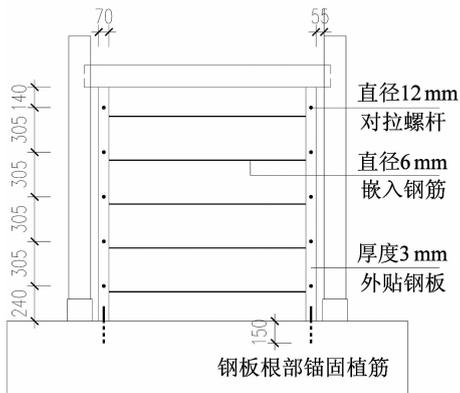


图2 砖砌体填充墙加固详图
Fig. 2 Strengthening details
of brick masonry infill wall

1.3 材料性能

樟子松实测的顺纹抗压强度平均值为 32.4 MPa,横纹抗压强度平均值为 9.5 MPa,抗弯强度平均值为 91.6 MPa。黏土砖的实测抗压强度平均值为 19.03 MPa,混合砂浆的实测抗压强度平均值为 3.18 MPa。Q235 钢的实测屈服强度平均值为 313.8 MPa,极限强度平均值为 493.3 MPa。直径 6 mm 光圆钢筋的实测屈服强度平均值为 332.0 MPa,极限强度平均值为 433.9 MPa。

1.4 试验加载与测量内容

本试验采取水平低周往复加载,柱顶竖向荷载通过手摇千斤顶施加,水平荷载通过支承在反力墙上的 MTS 作动器施加。参考《工程做法则例》中卷二十四,计算扇面墙中金柱的竖向荷载,并考虑到梁、柱、檩、椽等构件自重,本试验中竖向荷载取 10 kN。试验前在紧挨梁底两端固定 20 mm 厚加载端板,通过 4 根长螺杆与作动器端板固定,为了不妨碍燕尾榫节点的转动,同时考虑到布置仪器方便,将作动器作用力中心位置定于距离木梁底 60 mm 处。具体试验装置见图 3。

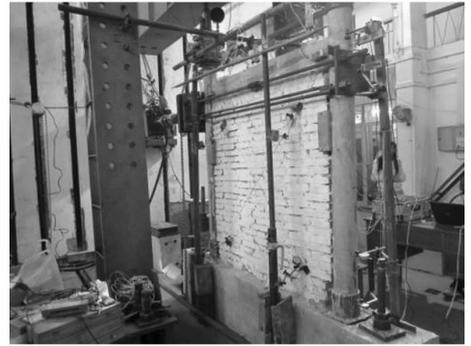


图3 试验装置
Fig. 3 Test setup

水平方向采用荷载-位移混合控制加载方法^[7],荷载与位移控制转折点定在砖砌体填充墙出现斜裂缝时^[8]。具体的加载制度如下:墙体斜裂缝出现之前水平加载由荷载控制,以每 5 kN 一级逐级加载,每级荷载循环一次;墙体出现明显斜裂缝之后,确定控制位移 Δ ,再按照 Δ 的倍数($1\Delta, 2\Delta, 3\Delta, \dots$)进行位移控制加载,每次位移循环 3 次,直至水平荷载下降至极限状态(峰值荷载的 85% 或试件平面外倾斜)停止试验。

试件的主要测量内容为水平荷载 P 与水平位移 Δ 形成的 $P-\Delta$ 滞回曲线。

2 试件破坏过程与特征

为了便于叙述,作动器的水平正向加载定为推方向,水平荷载记为正值;水平负向加载定为拉方向,水平荷载记为负值。此外,靠近作动器的一边为填充墙的右侧,反之为左侧。

2.1 试件 KJ-1

首先通过手摇千斤顶对每根柱子施加竖向力 10 kN,此时除了木头挤紧声外无别的现象。然后,开始施加水平荷载。当加载到 +25 kN 时,右侧墙体底部出现一条水平裂缝(沿着第一、二皮砖之间的灰缝发展,见图 4)。当加载到 -25 kN 时,左侧墙体底部相同位置也出现了一条水平裂缝,但是左右两条水平裂缝并未连通。

当加载到 +30 kN 时,沿着近似平行于墙体右侧顶点对角线方向上同时出现多段明显斜裂缝(见图 5 中 1 号~3 号)。此时控制位移 Δ 确定为 10 mm,然后进入位移加载。在 1Δ 第一次循环负向加载时,墙体左侧出现斜裂缝(如图 5 所示)。在 3Δ 第一次循环负向加载时,墙体右下角最底一皮砖被压

断裂,同时填充墙上部出现平面外倾斜趋势;在 3Δ 第二次循环正向加载时,墙体左下角最底一皮砖也被压断裂.当加载到 5Δ 时第一次循环完成,墙体外倾非常明显,试验停止.



图4 砌体墙水平裂缝发展
Fig. 4 Progress of horizontal cracks in the masonry wall

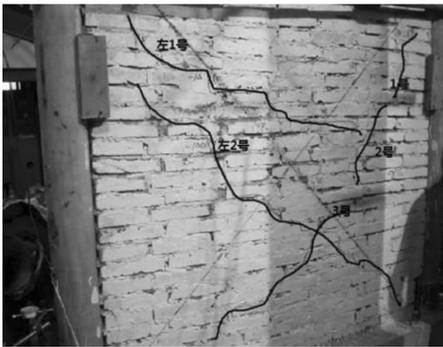


图5 砌体墙斜裂缝发展
Fig. 5 Progress of diagonal cracks in the masonry wall

2.2 试件 KJ-2

首先对试件 KJ-2 进行预开裂加载,最大水平、斜向墙体裂缝宽度达到 15 mm 时停止加载.再次加载之前,首先采用灌注结构胶对裂缝进行灌注修补,然后进行嵌筋与外贴钢板加固.

第二次加载过程中,当加载到 -30 kN 时,左侧出现明显斜裂缝.此后,进入位移加载阶段,控制位移确定为 5 mm.随着位移的增加,墙体斜裂缝逐渐增加.加载到 4Δ 之后,墙体上的斜裂缝数量基本稳定,裂缝宽度不断增加;局部有灰缝砂浆掉落,使得嵌入灰缝的水平钢筋外露.当加载到 10Δ 时,荷载下降至峰值荷载的 85%,试验停止.在加载过程中填充墙体未出现外倾现象,虽裂缝开展增多,但整体性还是很好.试件的最终破坏以 4 条斜裂缝为主,如图 6 所示.



图6 试件 KJ-2 破坏形态
Fig. 6 Failure mode of specimen KJ-2

2.3 试件 KJ-3

当加载到 -30 kN 时,墙体左侧出现明显的斜裂缝.随后,进入位移加载阶段,控制位移同样是 5 mm.当 3Δ 加载完后,裂缝数量已基本稳定,墙体呈现出 5 条主裂缝.在后期加载过程中,5 条主裂缝宽度不断加大,局部同样有灰缝砂浆掉落,使得嵌入钢筋外露(如图 7 所示).当加载到 11Δ 时,荷载下降至峰值荷载的 85%,试验停止.试件的最终破坏形态如图 8 所示,此时填充墙也未出现平面外倾斜.



图7 嵌入钢筋外露
Fig. 7 Exposure of the embedded steel bars



图8 试件 KJ-3 破坏形态
Fig. 8 Failure mode of specimen KJ-3

2.4 破坏特征

3个试件无论加固与否,最终破坏都表现为填充墙剪切裂缝.在试验过程中木框架未发现破坏,燕尾榫节点也未出现拔榫、榫颈剪坏、榫颈弯曲破坏等.未加固试件 KJ-1 中填充墙先出现底部水平裂缝(最底一皮砖上面的水平灰缝),然后随着荷载增加才出现斜裂缝.试件 KJ-2 和 KJ-3 加固后没有出现底部水平裂缝,而是出现数量更多的斜裂缝.试件 KJ-1 在几条主要剪切斜裂缝充分发展后,砌体墙被裂缝分割为几块,墙体的整体性降低,导致砌体墙出现严重平面外倾斜.试件 KJ-2 和 KJ-3 加固后,虽然填充墙裂缝的数量增加,但加固钢筋与外贴钢板能保证墙体的整体性,并有效地防止墙体平面外倾斜.

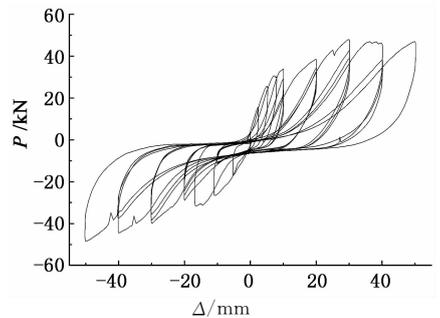
3 抗震性能分析

3.1 滞回曲线

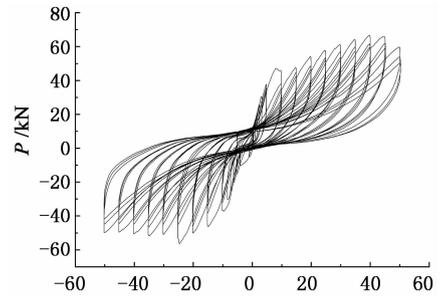
试件实测的 $P-\Delta$ 滞回曲线如图 9 所示.由图 9 可以看出,试件 KJ-1, KJ-2 和 KJ-3 的滞回曲线形状相似,都表现为 Z 形.该现象出现的主要原因在于,带砖砌体填充墙的木框架主要以填充墙剪切破坏为主,滞回曲线受到了大量的剪切滑移影响;同时,填充墙与木框架在加载过程中会出现脱开间隙.因此,在后面循环加载的早期,木框架与墙体的间隙需要闭合,试件的抗侧刚度相对较小,曲线发展平缓.此外,加固试件 KJ-2 和 KJ-3 的循环周数明显大于未加固试件 KJ-1,且试件 KJ-3 的滞回环在前期比试件 KJ-2 略显饱满.

3.2 骨架曲线

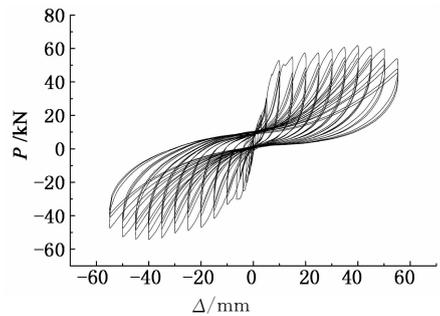
所有试件的骨架曲线如图 10 所示.所有试件的骨架曲线均有明显的刚度转折点,为了后面比较方便,本文将此明显的刚度转折点定义为试件的名义屈服点.此外,需要强调的是,由于试件 KJ-1 后期加载时填充墙出现严重的外倾,其下降段未能加载到峰值荷载点的 85%.从骨架曲线上可以看出,加固试件 KJ-2 和 KJ-3 的正反向平均抗侧刚度在名义屈服点前较未加固试件 KJ-1 有明显提高,幅度达到 90%以上;名义屈服点至峰值荷载点之间,加固试件的平均抗侧刚度较未加固试件提高并不明显,骨架曲线增长开始变缓.上述现象的主要原因在于名义屈服点之前,嵌缝钢筋与外贴钢板贡献逐渐增大;名义屈服点之后,钢筋、钢板可能屈服或与砌体之间发生黏结滑移,其贡献逐渐趋于稳定.



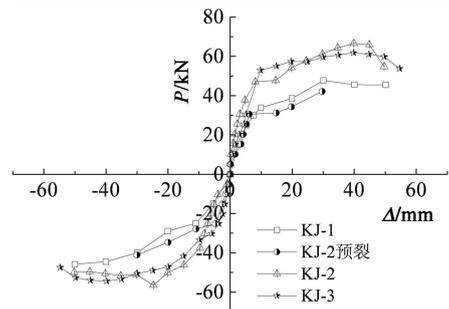
(a) 试件 KJ-1



(b) 试件 KJ-2



(c) 试件 KJ-3

图 9 $P-\Delta$ 滞回曲线Fig. 9 Hysteretic curves of $P-\Delta$ 图 10 $P-\Delta$ 骨架曲线Fig. 10 Skeleton curves of $P-\Delta$

3.3 荷载与层间转角

试件 KJ-1, KJ-2 和 KJ-3 的名义屈服荷载 P_y 与峰值荷载 P_p 见表 1. 由表 1 可知,加固试件 KJ-2 和 KJ-3 的 P_y 相对试件 KJ-1 分别平均提高了 32.1% 和 30.2%; P_p 分别平均提高了 27.8% 和 20.6%. 由

由此可见,本试验中的裂缝损伤对加固后的名义屈服荷载与峰值荷载均影响不大.主要原因在于加固试件中填充墙没出现外倾破坏,对应名义屈服点与峰值荷载点时,墙体均已产生裂缝损伤,此时主要依靠木框架约束、嵌缝钢筋与外贴钢板来加强墙体的受

力性能.这3个外界条件对加固试件而言是相同的.此外,试件 KJ-1, KJ-2 和 KJ-3 对应极限荷载状态的位移见表 1,由此可以得到试件 KJ-1, KJ-2 和 KJ-3 的层间平均转角分别为 1/32, 1/33 和 1/30.

表 1 各阶段荷载、位移和延性系数
Tab. 1 Loads, displacement and ductility coefficient in different stages

试件编号	加载方向	名义屈服点		峰值荷载点		极限状态		延性指标	层间转角
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_p/kN	Δ_p/mm	P_u/kN	Δ_u/mm		
KJ-1	正向	33.9	9.91	47.8	30.08	45.5	50.10	4.0	1/32
	反向	30.0	16.86	48.6	49.98	48.6	49.98		
KJ-2	正向	47.1	8.14	66.7	39.84	56.7	45.01	5.3	1/33
	反向	37.3	9.65	56.5	24.73	48.0	48.93		
KJ-3	正向	53.0	9.78	61.9	39.80	52.6	53.51	7.3	1/30
	反向	30.2	5.90	54.4	39.79	46.2	53.97		

3.4 延性指标和耗能能力

延性指标采用极限状态下位移与名义屈服点位移的比值(正反方向取平均值),计算结果见表 1 所示.由表 1 可知,加固后试件 KJ-2 和 KJ-3 的延性指标分别提高了 32.5% 和 82.5%.因此,本试验中的裂缝损伤对加固试件的延性有明显的影响.

试件的能量耗散能力以荷载-变形滞回曲线所包围的面积来衡量^[7,9],即图 11 中 ABCDA 所围成的面积 $S_{(ABC+CDA)}$.本文采用 Origin 软件对滞回曲线进行数值积分,计算出构件每个滞回曲线所围面积,分别得到名义屈服点和极限状态之前所有滞回曲线所围面积之和,即累积滞回耗能大小^[10].能量耗散能力大小的指标采用能量耗散系数 E 来表示, $E = S_{(ABC+CDA)} / S_{(OBE+ODF)}$.3 个试件的能量耗散能力计算结果见表 2.

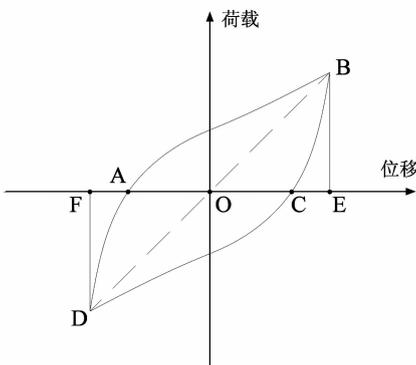


图 11 荷载-变形滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curves of load-deformation

表 2 试件的能量耗散能力

Tab. 2 Energy dissipation capacity of specimens

试件编号	名义屈服点		极限状态	
	累积滞回耗能 / (kN·m)	能量耗散系数	累积滞回耗能 / (kN·m)	能量耗散系数
KJ-1	0.665	0.81	10.497	0.65
KJ-2	0.374	0.72	27.557	0.62
KJ-3	0.962	0.73	30.583	0.56

从表 2 中可以看出,试件 KJ-1, KJ-2 和 KJ-3 在达到名义屈服点时累积滞回耗能分别占极限状态时累积滞回耗能的 6.3%, 1.4% 和 3.1%;加固试件 KJ-2, KJ-3 相对试件 KJ-1,其极限状态时累积滞回耗能分别提高了 162.5% 和 191.3%;在极限状态时,试件的能量耗散系数维持在 0.6 左右.名义屈服点之前,试件整体近似处于弹性状态,耗能相对很小.名义屈服点之后,斜裂缝迅速发展,并且加载后期裂缝两边砌体会发生滑移,钢板与嵌缝钢筋也发挥更大的约束作用,从而消耗更多的能量.此外,该结果也说明本试验中裂缝损伤对试件的能量耗散能力有明显的影响.

4 结论

通过本文试验研究,可初步得到以下几点结论:

1) 木框架内砖砌体填充墙的最终破坏主要以填充墙的剪切裂缝为主,墙体最终发生平面外倾斜,木框架未见明显损伤;加固试件中填充墙未出现外倾,且墙体裂缝数量增多.

2)带砖砌体填充墙木框架在填充墙加固前后,其滞回曲线均呈Z形。

3)采用灰缝嵌入钢筋与外贴钢板加固填充墙后,加固试件 KJ-2 和 KJ-3 的名义屈服荷载相对未加固试件 KJ-1 分别平均提高了 32.1% 和 30.2%;峰值荷载分别平均提高了 27.8% 和 20.6%。

4)加固试件 KJ-2 和 KJ-3 的延性相对未加固试件分别平均提高了 32.5% 和 82.5%;累积滞回耗能分别提高了 162.5% 和 191.3%;3 个试件在极限状态下的层间平均转角分别为 1/32, 1/33, 1/30。

5)当砖砌体填充墙中的裂缝损伤(水平、斜向裂缝宽度不超过 15 mm)不严重时,其对承载力的加固效果影响不大,但对延性与能量耗散能力有明显影响。

6)砖砌体填充墙端部外贴钢板可以有效地防止其发生平面外倾斜。

参考文献

- [1] 周乾, 闫维明, 纪金豹. 含嵌固墙体古建筑木结构震害数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1):100-103.
ZHOU Qian, YAN Wei-ming, JI Jin-bao. Study on damage numerical simulation of an ancient wooden building embedded with masonry walls[J]. Building Structure, 2010, 40(1):100-103. (In Chinese)
- [2] 周乾, 闫维明, 关宏志, 等. 古建嵌固墙体对木构架抗震性能的影响分析——以太和殿为例[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2014, 46(1):81-86.
ZHOU Qian, YAN Wei-ming, GUAN Hong-zhi, *et al.* Influence of embedded walls to aseismic performance of timber structure of Chinese ancient timber buildings—taking Taihe Palace as example[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(1):81-86. (In Chinese)
- [3] 黄靓, 易宏伟, 王辉, 等. 带节能砌体填充墙的 RC 框架抗震试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2014, 41(1):15-20.
HUANG Liang, YI Hong-wei, WANG Hui, *et al.* Experimental research on seismic of RC frames with energy conservation masonry infill walls[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(1):15-20. (In Chinese)
- [4] DUTU A, FERREIRA G, GUERREIRO L, *et al.* Timbered masonry for earthquake resistance in Europe[J]. Materials Construction, 2012, 62: 615-628.
- [5] 梁思成. 清工部《工程做法则例》图解[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 73-77.
LIANG Si-cheng. The Qing Dynasty engineering department's diagram of "Engineering practice rules" [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:73-77. (In Chinese)
- [6] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京:科学出版社, 1991: 41-50.
MA Bing-jian. The construction technology of China ancient wooden buildings [M]. Beijing: Science Press, 1991:41-50. (In Chinese)
- [7] JGJ 101—1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997:13-15.
JGJ 101—1996 Specifications of testing methods for earthquake resistant buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 13-15. (In Chinese)
- [8] 陶继波. 带缝填充墙框架结构抗震性能试验研究[D]. 天津:河北工业大学土木工程学院, 2008: 11-14.
TAO Ji-bo. Experimental study on seismic behavior of infilled frame structures with slit [D]. Tianjin: College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, 2008: 11-14. (In Chinese)
- [9] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构: 试验、理论和方法[M]. 北京:科学出版社, 2009: 201-204.
HAN Lin-hai, TAO Zhong, WANG Wen-da. Advanced composite and mixed structures: testing, theory and design approach[M]. Beijing: Science Press, 2009: 201-204. (In Chinese)
- [10] 王全凤, 郑济坤, 周博, 等. 基于滞回耗能的 HRBF500 RC 柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11):22-28.
WANG Quan-feng, ZHENG Ji-kun, ZHOU Bo, *et al.* Study on seismic behavior of HRBF500 RC column based on hysteretic energy[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11):22-28. (In Chinese)