

带新型复合轻质墙体的框架结构抗震性能试验

向 圆^{1,3}, 赵 华^{1,3}, 陈长安², 陈灏源², 魏丞瑾^{1,3}

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 成都魔筑科技有限公司, 四川 成都 610065; 3. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治

重点实验室(福建省地质灾害重点实验室), 福建 福州 350002)

摘要:为研究某种新型装配式复合轻质墙体的抗震性能及对框架结构抗震性能的影响,通过设计制作3榀1:2缩尺的新型复合轻质墙体框架-试件进行拟静力试验,以界面仓的注仓砂浆强度为试验参数,对结构的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、累计耗能及装配连接部位变形情况进行分析。结果表明:1)界面砂浆层的黏结使得加载后框架和轻质墙体能协同作用,加载初期框架柱和墙有相同的变形趋势;2)当加载位移角增大到1%时,交界面开裂,当位移角增大至2%时,梁柱和墙完全脱开;3)在层间位移角范围为2%~4%时的大变形阶段,轻质墙体和框架结构均产生破坏,但墙体与框架的锚钉连接未失效,墙体未发生脱落,框架承载力下降缓慢;4)砂浆强度对连接性能的影响不明显,采用M3.5砂浆注浆强度能使得复合轻质墙体连接于框架时具有适宜的刚度。

关键词:装配式复合轻质墙体; 框架结构; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号:TU398⁺.2

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)05-0001-10

doi:10.13402/j.gcjs.2024.05.055

Seismic performance test of frame structure with new composite lightweight wall

XIANG Yuan^{1,3}, ZHAO Hua^{1,3}, CHEN Chang'an², CHEN Haoyuan², WEI Chengjin^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University

of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Chengdu Mozhu Technology Co., Ltd., Chengdu 610065,

Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards Prevention and Control in Hilly and Mountainous Areas

of the Ministry of Natural Resources (Fujian Key Laboratory of Geological Hazards), Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: In order to research the seismic performance of a new type of prefabricated composite lightweight wall and its influence on the seismic performance of the frame structure, a pseudo-static test is carried out by designing and fabricating three new composite lightweight wall frame-specimens with 1:2 scale, the strength of the injection mortar of the interface bin is taken as the test parameters, the failure mode, hysteresis curve, skeleton curve, stiffness degradation, cumulative energy consumption and deformation of the assembly connection part of the structure are analyzed. The results show that: 1) The bonding of the interface mortar layer makes the frame and the lightweight wall work synergistically after loading, while the frame column and wall have the same deformation trend at the initial loading stage; 2) When the loading displacement angle increases to 1%, the interface cracks, and when the displacement angle increases to 2%, the beam, column and wall are completely disengaged. 3) In the large deformation stage when the interstory displacement angle range is 2%~4%, the

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKL GP2022Z002); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室自主课题(KLGHZ202101)

作者简介: 向 圆(1996—),男,硕士研究生,从事结构抗震性能研究工作。

通信作者: 赵 华(1976—),女,博士,副教授,从事结构抗震性能研究工作。

lightweight wall and frame structure are damaged, but the anchor connection between the wall and the frame does not fail, the wall does not fall off, and the bearing capacity of the frame decreases slowly; 4) The influence of mortar strength on the connection performance is not obvious, and the use of M3.5 mortar grouting strength can make the composite lightweight wall have appropriate stiffness when it is connected to the frame.

Key words: assembled composite lightweight wall; frame structure; pseudo-static test; seismic performance

复合轻质墙体由于其自重轻、施工方便、节能减排等优点,目前是装配结构围护结构中常用的墙体形式^[1-3]。使用复合墙板不仅使装配式结构受力更加均匀,还能提高装配式结构整体的抗震承载能力^[4-5]。其破坏模式主要有延性破坏、整体弯曲破坏、墙体水平砂浆滑移破坏以及填充墙对角开裂^[6-7]。国内对复合墙体研究起步较晚,缺乏完整的设计理论及依据。侯和涛等^[8]对一种固定式墙板连接节点进行了抗震性能研究,发现墙板主要破坏形式为墙板对角线位置的拉压破坏;秦士洪等^[9]开展预应力装配混凝土复合墙板试件的拟静力试验后发现,预应力装配复合墙板可以作为砌体承重墙的一种替代形式;蒋欢军^[10]通过对比刚性和柔性两种连接方式作用填充墙框架,发现设置柔性连接的填充墙框架的抗震性能介于空框架和设置刚性连接的填充墙框架之间,且设置柔性连接的填充墙对框架的影响很小;黄远等^[11]对外墙挂板足尺框架结构进行试验后发现,倒塌角为 1/50 的墙板完整性较好,且具有抵抗大震的能力;杨增科等^[12]对 4 榀采用不同保温构造形式装配式复合墙体试件进行抗震试验,发现保温承重一体化复合墙体有更强的耗能能力,夹芯保温层对墙身裂缝的出现具有一定的抑制作用;谢群等^[13]对 3 榀装配式喷射混凝土夹芯墙板进行抗震性能试验后发现,高厚比大的试件初始刚度退化更慢,耗能能力较好;高宽比小的试件,其初始刚度更大,耗能能力更佳;赵考重等^[14]对混凝土夹芯复合板进行拟静力试验,发现设置一定的连接件可保证该类型混凝土夹芯复合板两侧的混凝土面层共同工作;高舒羽等^[15]对墙板内外叶板均为钢丝网混凝土薄板,中间内嵌发泡水泥块作为保温材料的预制复合墙板承载力进行研究发现,该墙板具有良好的承载力和延性,可以在低层或多层装配式建筑中使用。

为研究某新型装配式复合轻质墙体与主体结构连接后对结构抗震性能的影响,本文通过制作

复合墙体与框架结构连接的试件,进行拟静力试验,在分析其破坏模式和与结构协同作用机制的基础上,分析复合墙体自身的抗震性能及其对框架结构抗震性能的影响,以期为装配式复合轻质墙体结构的设计理论和技术应用提供参考。

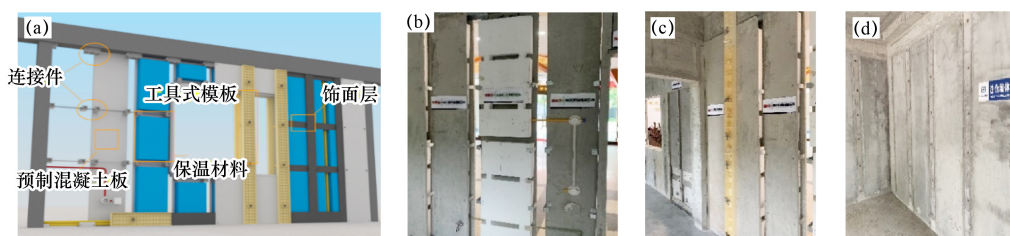
1 复合轻质墙体构造

复合轻质墙体由两片厚度为 30 mm 的预制混凝土板内夹 3 块 40 mm × 200 mm × 350 mm (长 × 宽 × 高) 的泡沫保温板组成,呈夹芯状排列。泡沫板间预留 100 mm 间隙用于铺设水电设施,墙体底部预留 100 mm 高度进行防潮处理。每块墙体厚度为 100 mm,高度根据建筑层高定尺生产。根据结构尺寸进行墙体装配设计,确定墙板数量及装配方式。墙体与主体结构采用外挂式连接。将单片混凝土板与上下层梁用固定卡扣进行金属螺栓连接,用黏结砂浆将泡沫保温层贴于墙体内侧后,再进行另一片混凝土板的安装。各片墙及墙体与框架柱间预留纵向间距。各片墙的横向间距、墙体内部与框架梁纵向间距和保温板之间的间距形成的通路为注仓界面。墙板连接好后,采用工具式一体化模板进行封闭,并在模板上预留注浆口,进行注浆黏接。复合墙体主要作为维护结构使用,兼顾保温隔热和装饰作用,复合墙体构造如图 1 所示,试验墙体装配过程如图 2 所示。

2 试验概况

2.1 试件设计

选择某农村自建房为原型,依据模型试验比例和相似关系,设计 3 榀单层单跨 1:2 比例缩尺平面框架,试件编号分别为 KQ-1、KQ-2 和 KQ-3。界面仓注浆强度影响墙体与主体结构的连接刚度,而连接刚度可能影响其协同作用及破坏形式,因此以界面仓注浆砂浆强度为参数,结合预试验结果确定设计砂浆度分别为 M3.5, M2.5 和 M6。



(a) 墙体构造示意; (b) 墙体内部构造; (c) 墙体封堵形式; (d) 墙体组装完成

图1 装配式复合轻质墙体构造

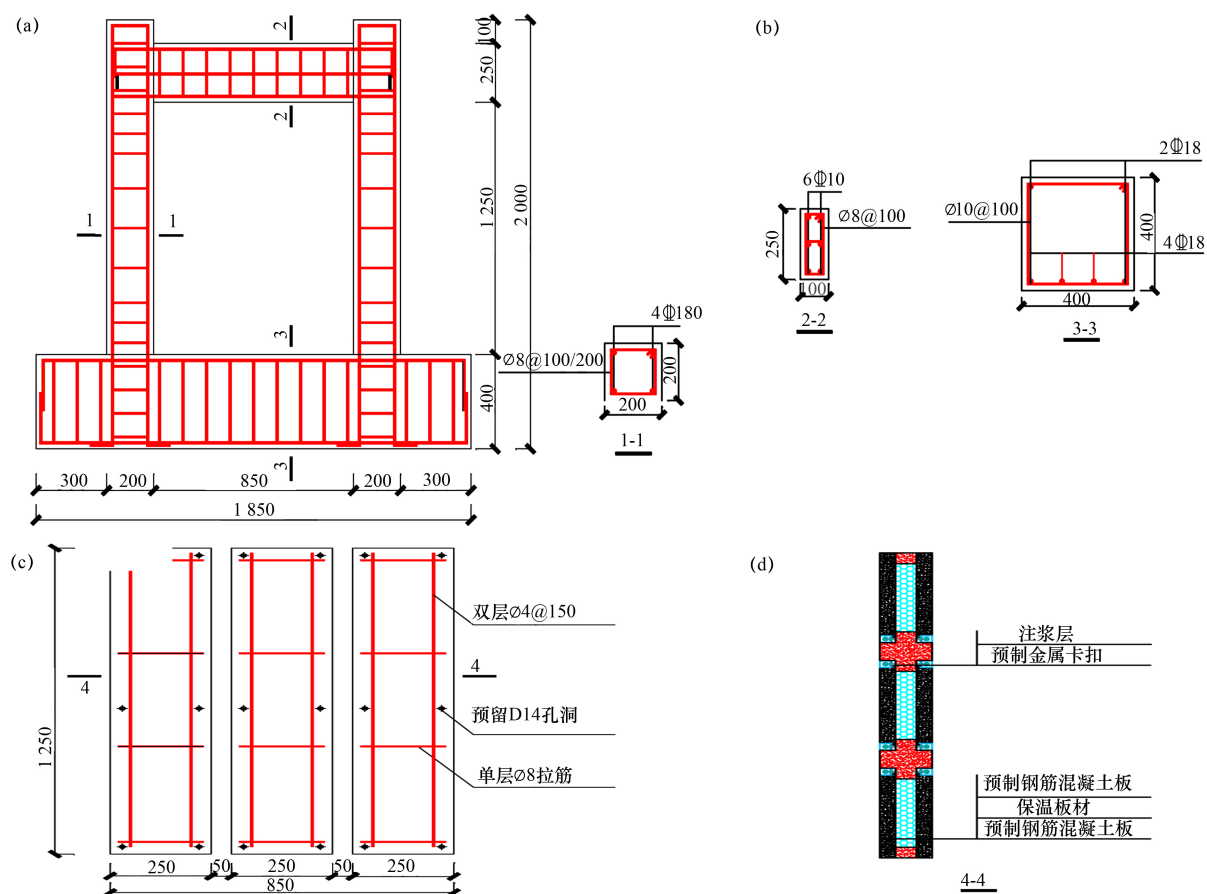


(a) 单块混凝土板安装; (b) 内部泡沫板安装; (c) 对侧混凝土板安装; (d) 模板完成封堵

图2 试验墙体装配施工照片

框架柱截面尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽), 框架梁截面尺寸为 $100\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ (宽 $\times$ 高), 墙体高度为 $1\,375\text{ mm}$, 试验轴压比为 0.3 。单块混凝土

土墙板厚度为 30 mm , 宽度为 250 mm , 高度与框架结构保持一致, 为 $1\,250\text{ mm}$ 。框架柱、梁与墙板均采用 C30 商品混凝土。试件详图如图 3 所示。



(a) 框架尺寸; (b) 框架截面尺寸及配筋; (c) 墙板尺寸及配筋; (d) 墙体截面示意

图3 试件详图

mm

2.2 材料性能

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)对混凝土立方体标准试块进行力学性能试验,测得框架用普通混凝土的立方体抗压强度为 58.7 MPa,弹性模量为 3.6×10^4 MPa;墙板用普通混凝土立方体抗压强度为 47.9 MPa,弹性模量为 3.1×10^4 MPa。按《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJT 70—2009)对注仓砂浆进行力学性能试验,实测值如表 1 所示。按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)对框架和墙板所用钢筋进行钢筋力学性能试验,相关结果如表 2 所示。

表 1 注仓砂浆力学性能 MPa

强度等级	抗压强度
M2.5	3.29
M3.5	3.40
M6	6.29

2.3 加载装置及加载制度

试验加载装置如图 4 所示。竖向荷载由 QF200/200 千斤顶作用在分配梁上,水平往复荷载由 MTS793 电液伺服加载系统施加。

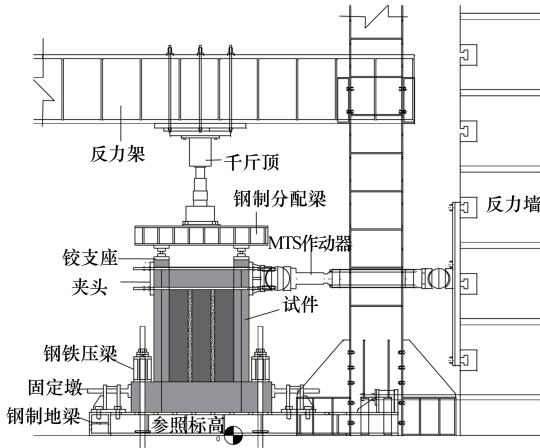


图 4 加载装置示意

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ T 101—2015)要求,拟静力试验采用恒载加载方式,轴力

依据轴压比计算,取 360 kN,在试验过程中保持恒定施加。水平荷载加载通过位移角控制。为研究卸载后残余变形情况,每级卸载采用力控制,加载制度如图 5 所示,直至试件承载力下降至峰值荷载的 85% 或试件破坏,停止试验。

2.4 测点布置

试验位移计测点布置如图 6 所示,沿框架高度方向距离柱脚 100、200、400 mm 的位置,在两

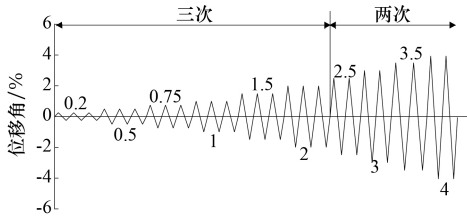


图 5 加载制度

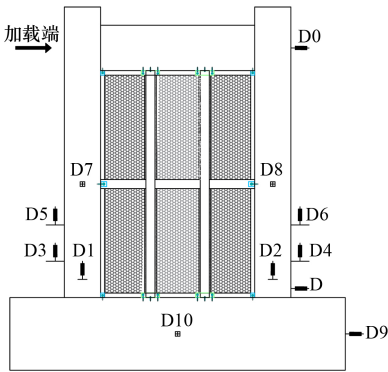


图 6 位移计布置

根框架柱上均布设竖向位移计 $D_1 \sim D_6$ 。在框架梁高度中心与加载点对应的位置和距柱脚 50 mm 处设水平位移计 D 与 D_0 ,以测框架顶部和底部水平位移。为监测加载中框架面外变形情况,设置 D_7 、 D_8 位移监测点;为监测基梁在试验过程中有无位移,设置 D_9 、 D_{10} 监测位移计。

应变片测点布置如图 7 所示。在距框架柱脚 $0.5D$ 、 $1.0D$ 、 $2.0D$ (D 为框架柱截面尺寸宽度)及框架梁柱节点附近设置纵筋和箍筋应变片,编号范围分别为 $ZZ1 \sim ZZ24$ 、 $ZG1 \sim ZG12$ 、 $LZ1 \sim LZ4$ 、

表 2 钢筋力学性能

钢筋类别	屈服强度/($N \cdot mm^{-2}$)	屈服应变/%	极限强度/($N \cdot mm^{-2}$)	弹性模量/($N \cdot mm^{-2}$)
HRB400-18	435.7	0.218	559.2	2.0×10^5
HRB400-10	468.7	0.223	613.3	2.1×10^5
HPB300-8	396.7	0.198	495.2	2.0×10^5
HPB300-4	452.5	0.283	532.3	1.6×10^5

LG1~LG2;在框架柱与墙体相连的界面处设置混凝土表面应变片,编号范围为ZB1~ZB12,位置与柱的纵筋应变片对应;在墙体相应高度的纵筋上也设置应变片,编号范围为QZ1~QZ10;在墙体与墙体间设置混凝土表面应变片,编号为QB1、QB2。

3 试验现象及破坏特征

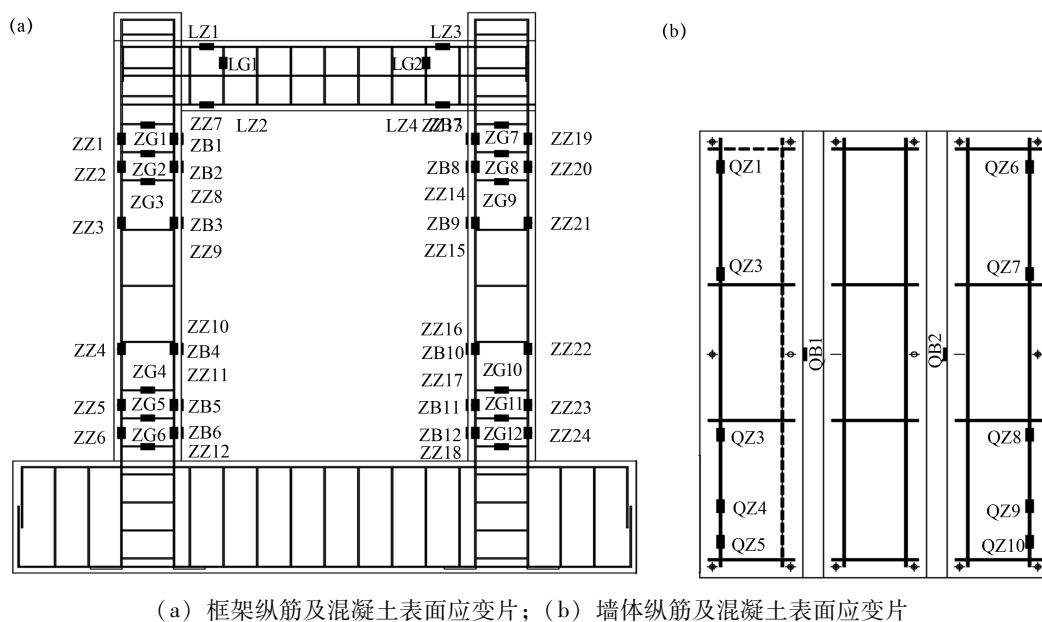
3.1 试件 KQ-1

试件 KQ-1 试验现象如图 8 所示。由图 8 可知:当位移加载至 0.5% 级时,梁柱节点和墙体与墙体交界面处注浆层出现细微斜向裂缝;当加载至 1.0% 时,墙体与墙体交界面注浆层沿斜裂缝界面有轻微剥落;当加载至 2.0% 级时,墙体与框架

连接注浆层有压碎现象;当加载至 2.5% 级时,试件承载力达峰值,穿越固定钉的裂缝发展明显,界面处注浆层碎裂,内部金属卡扣出露,且随着加载位移的增加,墙板四角裂缝逐渐贯通,混凝土碎裂;当加载至 4.0% 级时,墙体与框架梁、柱连接处混凝土压碎,即可终止加载。

3.2 试件 KQ-2

试件 KQ-2 试验现象如图 9 所示。由图 9 可知:当位移加载小于 2.0% 级时,试件 KQ-2 加载变形过程与试件 KQ-1 类似。当加载至 2.0% 级时,墙体注浆层表面开始脱落,由梁下部开始与墙体脱开,墙体四角相继压碎;当加载至 2.5% 级时,墙体两端混凝土与固定钉脱开;当加载至



(a) 框架纵筋及混凝土表面应变片; (b) 墙体纵筋及混凝土表面应变片

图 7 应变片布置



级别%: (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.0; (d) 2.5; (e) 4.0

图 8 试件 KQ-1 破坏现象



级别%: (a) 0.2; (b) 0.75; (c) 2; (d) 2.5; (e) 3.0

图 9 试件 KQ-2 破坏现象

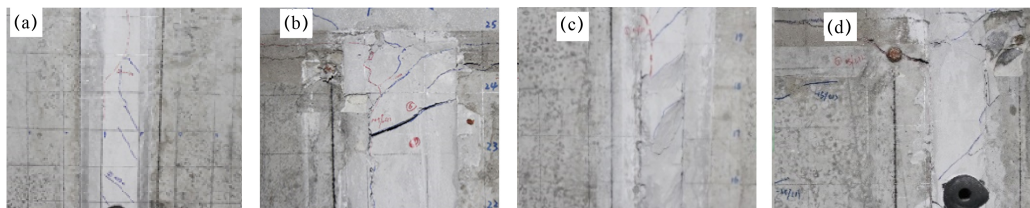
3.0% 级时, 注浆层被压碎, 试验结束。

3.3 试件 KQ-3

试件 KQ-3 破坏现象如图 10 所示。由图 10 可知: 相比试件 KQ-1 与 KQ-2, 试件 KQ-3 较早出现裂缝现象。当加载至 0.75% 级时, 框架梁两端出现竖向裂缝; 当加载至 1.0% 级时, 梁与注浆层交界面注浆被压裂; 当加载至 1.5% 级时, 墙体与梁底部的水平裂缝贯通; 当加载至 2.0% 级时, 墙体四角碎裂, 试验结束。

3.4 试验最终状态

试验结果如表 3 所示, 试件最终状态如图 11 所示。由图 11 可知: 3 种试件均表现为墙板四角产生剪切斜向裂缝, 墙板表面沿注浆层产生碎裂现象, 而墙体既未产生明显的碎裂现象, 也未与主体框架有脱开趋势。由表 3 可知: 试件 KQ-1 最大正向位移角为 2.5%, 其余两根试件最大正向位移角均为 1.5%。3 种试件最大负向位移角均为 1.5%, 水平承载力平均值均相差较小, 仅为 7% 左右。

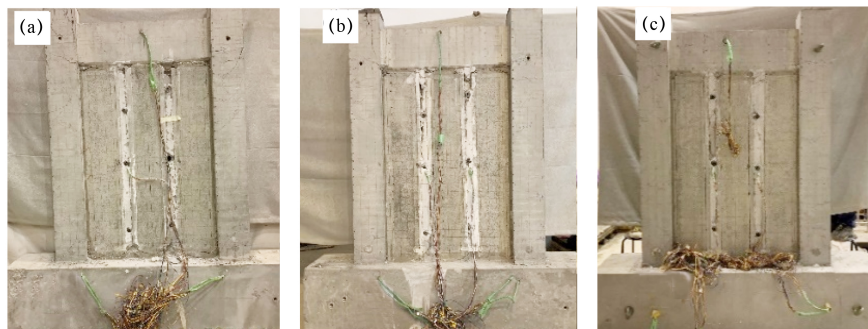


级别%: (a) 0.2; (b) 0.75; (c) 1.0; (d) 2.0

图 10 试件 KQ-3 破坏现象

表 3 试验结果汇总

试件编号	试验轴力/kN	最大正向位移角/%	最大正向承载力/kN	最大负向位移角/%	最大负向承载力/kN	水平承载力平均值/kN
KQ-1	360	2.50	194.63	-1.50	-149.15	171.89
KQ-2	360	1.50	174.60	-1.50	-146.66	160.63
KQ-3	360	1.50	174.23	-1.50	-169.66	171.95



试件编号: (a) KQ-1; (b) KQ-2; (c) KQ-3

图 11 各试件最终状态

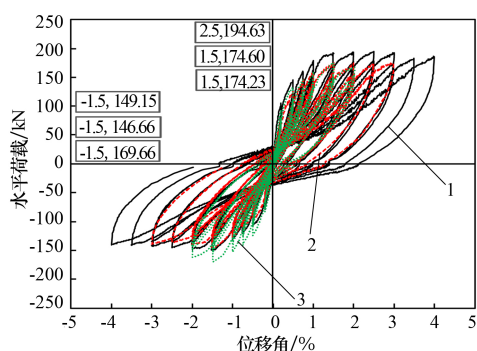
4 试验结果分析

4.1 滞回曲线和骨架曲线

各试件的滞回曲线和骨架曲线如图 12、13 所示。由图 12、13 可知: 各试件骨架曲线规律相似, 在位移角较小阶段(小于 2%)发展趋势相同; 各试件滞回曲线较为饱满, 符合延性框架受力特征。试件 KQ-1、KQ-2、KQ-3 分别在位移角为 2.5%、1.5%、1.5% 时达到正向峰值荷载, 其中试件 KQ-1 水平承载力最高, 相较其余两根试件分别高 11.2%、11.43%。各试件在达到正向与负向承载力峰值后承载力缓慢下降, 其中试件 KQ-1、KQ-2 在位移角大于 2.0% 之后的大变形阶段, 承载力基本保持稳定。

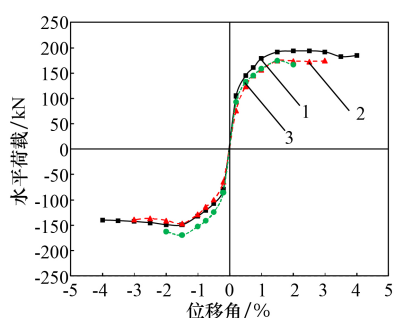
4.2 刚度退化曲线

图 14 为各试件的刚度退化曲线。由图 14 可知: 在反复荷载作用下, 各试件塑性变形不断累积, 混凝土损伤不断累积, 刚度均随顶部水平位



1—KQ-1; 2—KQ-2; 3—KQ-3。

图 12 各试件滞回曲线

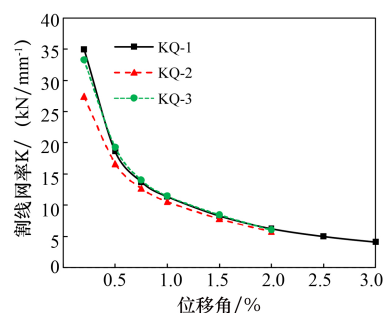


1—KQ-1; 2—KQ-2; 3—KQ-3。

图 13 各试件骨架曲线

移的增大逐渐均匀下降,刚度退化曲线斜率基本不变,无明显刚度突变。在弹性阶段,各试件刚度呈现

KQ-1 与 KQ-3 接近,试件 KQ-2 刚度相对较小,初始刚度较其余两根试件相差 27.3% 和 21.2%。

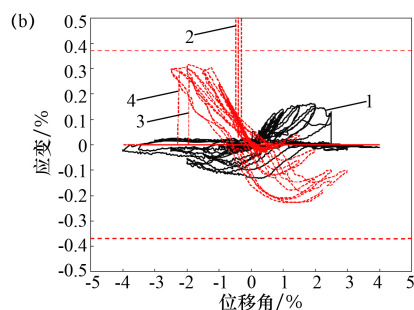
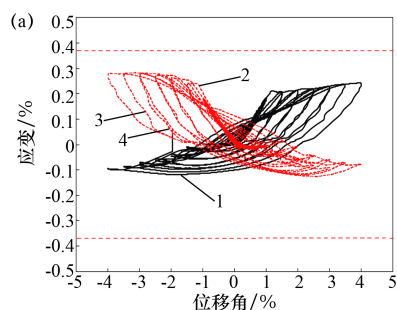


1—KQ-1; 2—KQ-2; 3—KQ-3。

图 14 各试件刚度退化曲线

4.3 柱角纵筋应变

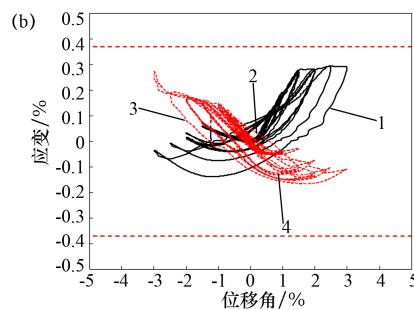
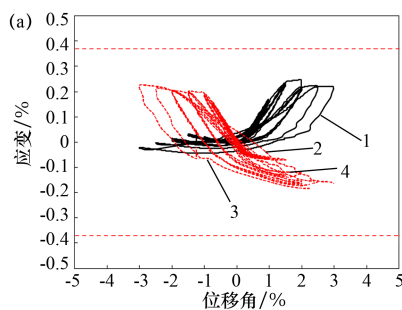
框架柱左柱与右柱纵筋采用对称配筋布置,故选用一根柱角纵筋应变进行分析,各试件右柱柱角纵筋应变如图 15~17 所示。其中 ε_y 为钢筋屈服应变,黑色实线 ZZ17 和 ZZ18 为柱角左侧纵筋应变,红色虚线 ZZ23 和 ZZ24 为右侧柱角纵筋应变。由图 15~17 可知:随着加载位移角的增加,各试件柱角纵筋应变不断加大,试件的抗侧向力也不断提高,直至试验加载结束,柱角纵筋均未屈服。



(a) 1.0D; (b) 0.5D

1—ZZ17; 2—ZZ23; 3— ε_y ; 4— ε_y 。

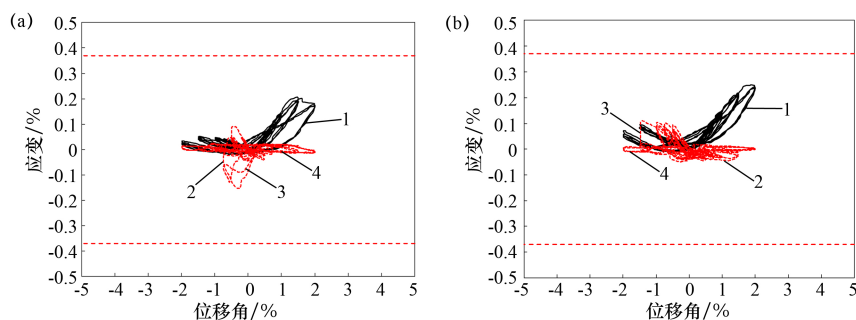
图 15 试件 KQ-1 柱角纵筋应变



(a) 1.0D; (b) 0.5D

1—ZZ18; 2—ZZ24; 3— ε_y ; 4— ε_y 。

图 16 试件 KQ-2 柱角纵筋应变



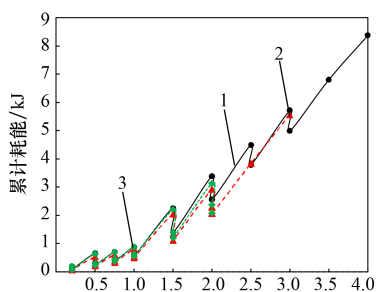
(a) 1.0D; (b) 0.5D

1—ZZ18; 2—ZZ24; 3— ε_y ; 4— ε_x 。

图 17 试件 KQ-3 柱角纵筋应变

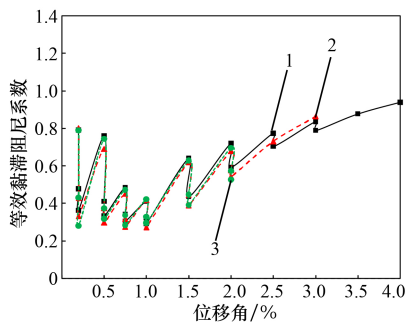
4.4 累计耗能

图 18 为各试件累计耗能对比曲线, 图 19 为黏滞阻尼系数变化曲线。由图 18、19 可知: 当位移角小于 1.5% 时, 各试件累积耗能曲线基本重合; 当位移角为 2% 时, 试件 KQ-1 的累计耗能为试件 KQ-2、KQ-3 的 1.2 倍和 1.1 倍。当加载位移角小于 2% 时, 各试件黏滞阻尼系数曲线大致相同; 当加载位移角大于 2% 时, 曲线增长速度趋于平缓, 试件的耗能能力增长缓慢。试件 KQ-2、KQ-3 的等效黏滞阻尼系数在位移角小于 2.5% 时略低于试件 KQ-1, 但当位移角大于 2.5% 时, 试件 KQ-2 等效黏滞阻尼系数高于试件 KQ-1。



1—KQ-1; 2—KQ-2; 3—KQ-3。

图 18 各试件累计耗能曲线



1—KQ-1; 2—KQ-2; 3—KQ-3。

图 19 各试件黏滞阻尼系数变化曲线

5 墙体与框架协同受力

5.1 墙体正反协同受力分析

图 20~22 为各试件墙板底部纵筋应变情况, 墙体纵筋应变片黏贴于墙体对侧两混凝土板纵筋上, 其中黑色实线 QZ4 与 QZ5 为墙体底部 200 mm 高度处纵筋应变片, QZ9 与 QZ10 为墙体底部 100 mm 高度处纵筋应变。由图 20~22 可知: 试件 KQ-1 墙体最底部纵筋在位移角为 -1% 时屈服, 结合试验现象, 墙体底部破坏情况较为严重, 直至加载结束, 墙体混凝土与固定钉甚至出现脱离现象。试件 KQ-2、KQ-3 在位移角大于 0.5% 时, 其底部纵筋应变开始加大, 此时墙体角部开始出现应力集中现象。试件 KQ-1 正反两叶对角墙板底部纵筋应变差别较大, 这可能是由于墙体装配过程中产生的差异; 试件 KQ-2 正反两叶对角墙底纵筋应变变化情况较为接近; 试件 KQ-3 墙底纵筋应变除 QZ4 有小部分波动外, 正反两叶墙板纵筋应变吻合良好。

5.2 墙与框架交界面

在墙体装配过程中, 通过在框架与墙体界面处框架表面黏贴混凝土应变片, 检测混凝土产生的塑性应变与墙体之间的协同作用。

以 KQ-1 为例, 分析框架与墙体界面受力情况, 如图 23 所示。其中: 黑色实线为框架柱左侧纵筋应变, 红色虚线为框架柱右侧纵筋应变, 蓝色虚线为框架与墙体交界面处混凝土应变片。由图 23 可知: 在加载初期, 框架柱与墙对应位置处变形趋势一致, 应变片 ZZB7 与 ZZ19 变形几乎保持一致, 墙柱协同作用。当位移角增大至 0.5% 时, 界面砂浆产生局部破坏, 黏结失效, 在负向加载时, 应变片 ZZB7 和 ZZ19

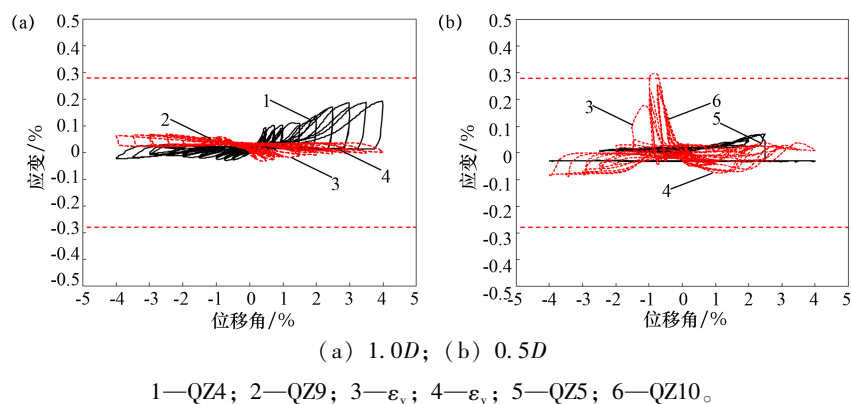


图 20 试件 KQ-1 墙底纵筋应变

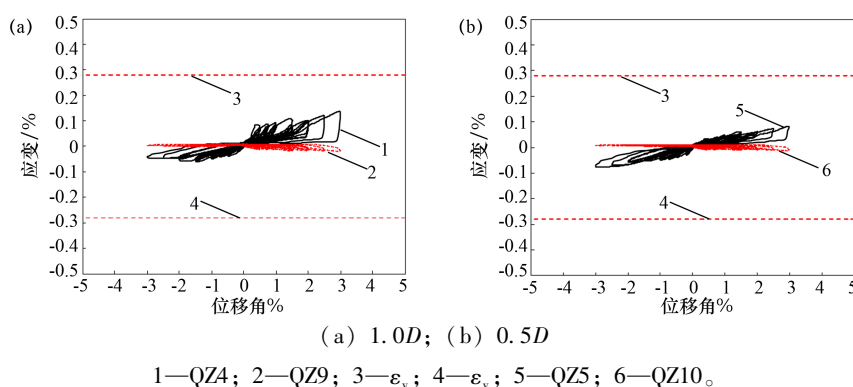


图 21 试件 KQ-2 墙底纵筋应变

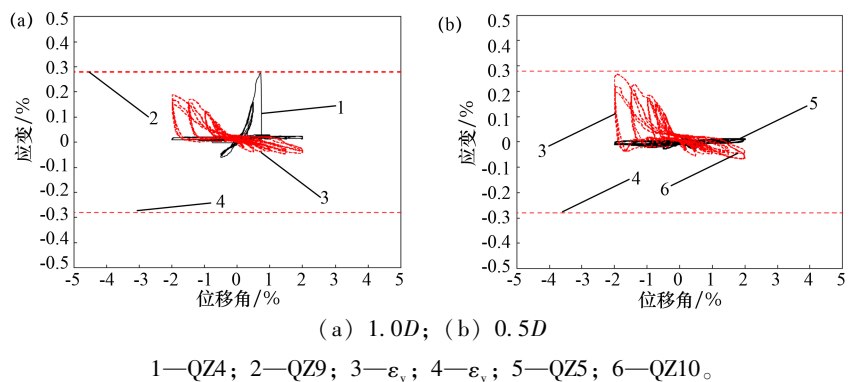


图 22 试件 KQ-3 墙底纵筋应变

变形曲线几乎重合,但在正向加载时,应变片 ZZB7 波动开始变大。随着位移角的继续增大,各处界面均产生破坏,此时混凝土表面应变片损坏,墙体变形加大。当位移角增大至 2% 时,墙板与试件完全脱开,墙板不再参与受力,与试验现象一致。

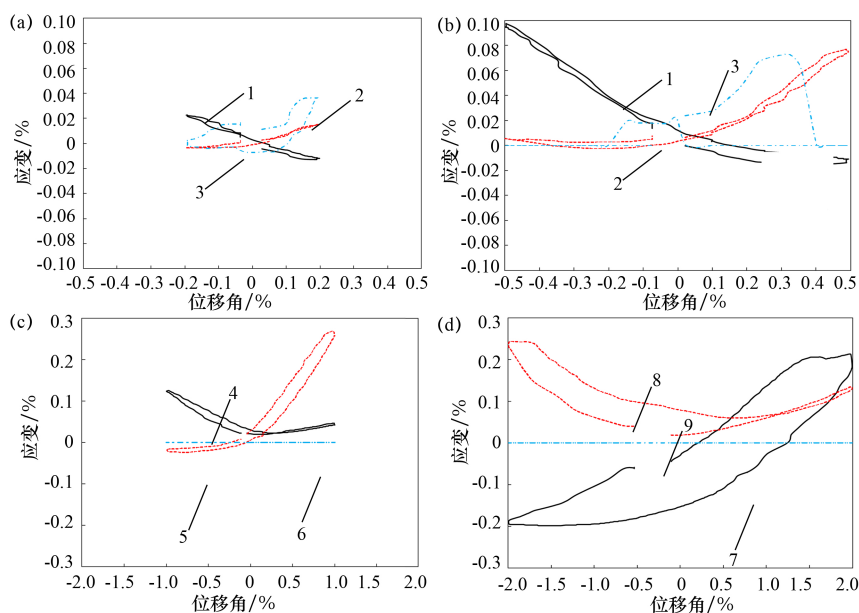
6 结 论

(1) 复合墙体装配于框架结构,两者能形成良好的协同作用。在加载初期,两者保持相近的变形趋势,协同作用效果明显;随着位移角的增大(约为 0.5%),墙板和框架柱界面砂浆开裂,逐渐形成

沿墙体四角的贯通裂缝;在层间位移角为 2% 时,墙体与框架完全脱开,墙体不再参与受力。

(2) 试件加载至大变形阶段(位移角范围为 2%~4%),复合墙体与主体框架陆续破坏,但复合墙体仍能与框架有效连接,未出现墙体混凝土破坏和墙体掉落等现象,框架承载力下降缓慢,表现出良好的延性性能。

(3) 通过对复合轻质墙体-框架结构进行抗震性能试验发现,砂浆强度对框架-复合墙体试件无明显的规律性影响,故在工程应用中选取 M3.5 注浆强度较为适宜。



位移角/%: (a) 0.2; (b) 0.5; (c) 1.0; (d) 2.0

1—ZZ13; 2—ZZ19; 3—ZZB7; 4—ZZ1; 5—ZZ7; 6—ZB1; 7—ZZ6; 8—ZZ12; 9—ZB6。

图 23 墙体纵筋及墙体界面混凝土应变

参考文献:

- [1] 魏江洋. 浅析预制装配式混凝土(PC)技术在民用建筑中的应用与发展[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [2] 朱国阳. 预制混凝土建筑外墙设计初探[D]. 南京: 南京工业大学, 2016.
- [3] 吴香国, 陶晓坤, 于士彦, 等. 高性能复合夹芯外挂墙板应用研究进展[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 611–616.
- [4] MATTEIS G D. Effect of lightweight cladding panels on the seismic performance of moment resisting steel frames [J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1662–1676.
- [5] CHEN A, NORRIS T G, HOPKINS P M, et al. Experimental investigation and finite element analysis of flexural behavior of insulated concrete sandwich panels with FRP plate shear connectors [J]. Engineering Structures, 2015(98): 95–108.
- [6] MEHRABI AB, SHING GPB. Finite element modeling of masonry walls subjected to earthquake motions [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(2): 153–159.
- [7] CHRIS P, PANTELIDES, SURAPANENIR, et al. Structural performance of hybrid GFRP-steel concrete sandwich panels [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12(5): 570–576.
- [8] 侯和涛, 邱灿星, 李国强, 等. 带节能复合墙板钢框架低周反复荷载试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 177–184; 192.
- [9] 秦士洪, 何登伟, 陈鹏, 等. 预应力装配混凝土复合墙板抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(1): 1–8.
- [10] 蒋欢军, 毛俊杰, 刘小娟. 不同连接方式砌体填充墙钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 60–67.
- [11] 黄远, 张锐, 朱正庚, 等. 外墙挂板的混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(7): 36–41.
- [12] 杨增科, 黄炜, 张敏. 基于不同保温形式装配式复合墙抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(1): 51–56.
- [13] 谢群, 周代昱, 于周健, 等. 装配式喷射混凝土夹芯墙板抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 33–39.
- [14] 赵考重, 刘梦璇, 黄良朋. 混凝土夹芯复合板抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(5): 47–52.
- [15] 高舒羽, 郭小农, 刘青, 等. 预制复合墙板承载性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 48–57.