

同主体柔性连接现浇填充墙 RC 框架 结构抗震性能试验研究

李凯^{1,3}, 苏何先^{1,3}, 赖正聪^{1,3}, 缪易辰^{1,3}, 双超^{1,3}, 朱源杰^{2,3}

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650500;
3. 云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要:为研究 PVC 拉缝板柔性连接的现浇空心填充墙对钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 框架结构抗震性能的影响, 以空心混凝土墙和 PVC 拉缝板为主要因素, 设计制作了 6 榀足尺试件并开展拟静力试验。对比分析纯框架结构、带 PVC 拉缝板柔性连接和无拉缝板刚性连接的现浇空心填充墙框架结构的破坏特征、荷载-位移曲线、骨架曲线、刚度、位移延性及耗能能力等抗震性能指标。研究表明: PVC 拉缝板的加入降低了空心混凝土填充墙对框架结构侧向刚度和承载能力的提升作用, 改善了现浇空心混凝土填充墙框架结构的位移延性和耗能能力, 对填充墙起到了保护作用, 但采用 PVC 拉缝板柔性连接的现浇混凝土空心填充墙仍会显著影响框架结构的抗侧刚度和极限变形, 结构设计时应合理考虑其对整体结构抗震性能的不利影响。

关键词:钢筋混凝土框架; 空心混凝土填充墙; 拟静力试验; 柔性连接; 抗震性能

中图分类号: TU317.1; TU398.9

文献标识码: A

Experimental study on seismic performance of cast-in-place infill wall RC frame structure with flexible connection of the same main body

LI Kai^{1,3}, SU Hexian^{1,3}, LAI Zhengcong^{1,3}, MIAO Yichen^{1,3}, SHUANG Chao^{1,3}, ZHU Yuanjie^{2,3}

(1. Faculty of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
3. Yunnan Earthquake Engineering Technology Research Center, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the impact of cast-in-place hollow infill walls with flexible connections of PVC joint plates on the seismic performance of reinforced concrete (RC) frame structures, six full-scale specimens were designed and manufactured with hollow concrete walls and PVC joint plates as the main factors, and pseudo static tests were conducted. By comparing and analyzing the seismic performance indicators such as failure characteristics, load displacement curves, skeleton curves, stiffness, displacement ductility, and energy dissipation capacity of cast-in-place hollow infill wall frame structures with pure frame structures, flexible connections with PVC joint plates, and rigid connections without joint plates, it is mainly concluded that the addition of PVC joint plates reduces the improvement effect of hollow concrete infill walls on the lateral stiffness and bearing capacity of the frame structure. The displacement ductility and energy dissipation capacity of the cast-in-place hollow concrete infill wall frame structure have been improved, providing protection for the infill wall. However, the cast-in-place concrete hollow infill wall with flexible connections using PVC joint plates still significantly affects the lateral stiffness and ultimate deformation of the frame structure. When designing the structure, reasonable consideration should be given to its adverse effects on the overall seismic performance of the structure.

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52068037)

作者简介: 李凯 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构工程抗震研究。E-mail: 744886443@qq.com

通讯作者: 苏何先 (1982—), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事结构工程抗震研究。E-mail: sxhh870@kust.edu.cn

Key words: reinforced concrete frame; hollow concrete infill wall; pseudo static test; flexible connection; seismic performance

0 引言

框架结构是一种应用广泛的建筑结构体系,具有空间设计灵活,能较好地满足建筑使用功能需求。其空间分隔多采用砌体填充墙,即主体结构施工完成后采用砌体进行二次砌筑。但砌体填充墙施工周期长、工业化程度较低,且产生的砌筑垃圾较多。为提高建筑工业化,减少二次作业,缩短施工工期,控制工程成本,近年来,部分单位提出并尝试了钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架结构采用现浇空心混凝土墙的施工做法^[1-2],即空心填充墙与主体结构一体浇筑成型。其具体做法是主体框架与填充墙钢筋一起绑扎施工,在绑扎填充墙钢筋笼时设置 PVC 空心管,用以减轻自重;填充墙顶部纵向分布筋延伸入框架梁内,墙两侧及墙底与框架断开,仅用拉结筋进行拉结,最后一块浇筑成型。

填充墙作为非结构构件,在结构抗震设计时,通过周期折减方式考虑填充墙刚度贡献。但国内外多次地震震害结果表明^[3-5],填充墙与主体结构相互作用影响不可忽视。已有研究表明不同类型的填充墙及不同的连接方式均会对结构的抗震性能产生较大影响^[6-9]。因此,为了减小填充墙与框架结构的相互作用,GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[10]和 GB 50003—2011《砌体结构设计规范》^[11]均建议在填充墙与框架之间采用柔性连接或彼此脱开。

为减小现浇填充墙对主体结构的影响,结合现有铝模工艺,采用 PVC 拉缝板对填充墙与框架的连接进行弱化是当前采用较多的一种连接做法^[12-13]。其具体做法是在框架与填充墙钢筋笼绑扎时,将 PVC 拉缝板通过拉结筋分别固定在填充墙两边与柱之间及墙底与底梁之间,拉缝板宽度基本与墙厚相等,起到完全断开的隔离作用,最后同主体一起现浇成型。但目前已有的研究主要针对刚性连接和柔性连接的传统砌体填充墙^[14-21],而现行设计规范没有对此类填充墙及连接方式对主体结构性能的影响做出明确规定。因此,如果不能在设计时充分考虑现浇填充墙对结构性能的影响,将会留下结构安全隐患。

针对上述问题,本文以工程中较常用的 PVC 拉缝板和插 PVC 管的空心混凝土墙为主要考察因素,开展钢筋混凝土框架试件拟静力试验。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

根据研究目的,以有无 PVC 拉缝板和 PVC 管空心混凝土墙为因素,设计制作了 3 组共 6 榀单层单跨钢筋混凝土框架试件,其中纯框架试件、有 PVC 管空心墙有拉缝板试件和有 PVC 管空心墙无拉缝板试件每组各 2 榀,所有试件框架均采用同截面尺寸和配筋设计。为减小试件可能受扭造成的影响,本次试验采用 T 形截面异形柱,其具体截面尺寸及配筋设计,如图 1 所示。梁截面尺寸采用 200 mm×400 mm 的矩形截面,混凝土保护层均为 25 mm,地梁顶距框架柱顶高差为 2900 mm。试件主体部分混凝土强度等级为 C30,底座混凝土

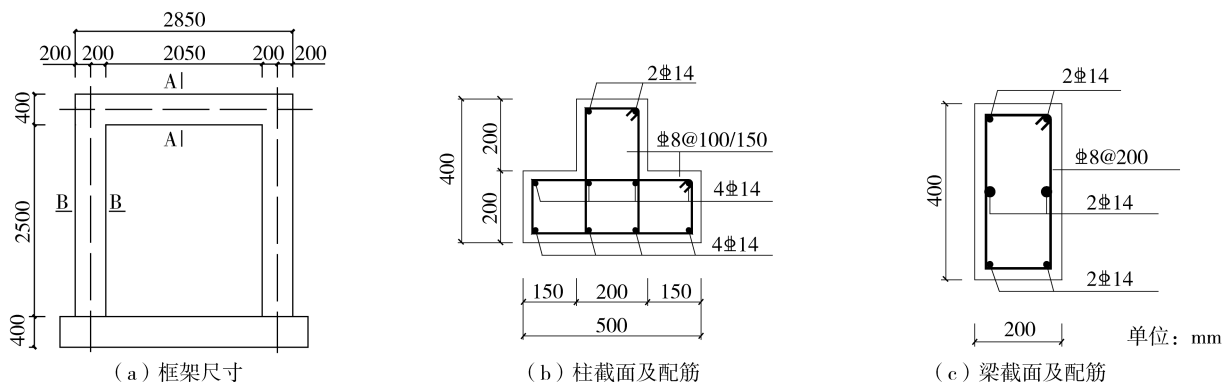


图 1 各试件框架尺寸及梁柱配筋布置图

Fig. 1 Frame dimensions and beam column reinforcement layout of each specimen

强度等级为 C40。纵向受力筋与箍筋均采用 HRB400 级钢筋。试验采用的 PVC 空心管管径为 110 mm,管间距为 200 mm,并在墙与柱及底梁之间均布置了拉结筋,沿柱高度方向拉结筋间距为 500 mm,沿水平方向间距为 600 mm,布置详图如图 2 所示。所用拉缝板采用工程中应用较为广泛的 PVC 结构拉缝板,截面尺寸如图 3 所示。对于有空心填充墙的 2 组试件,二者区别仅在于有无拉缝板,PVC 空心管及拉缝板施工现场图如图 4 所示。

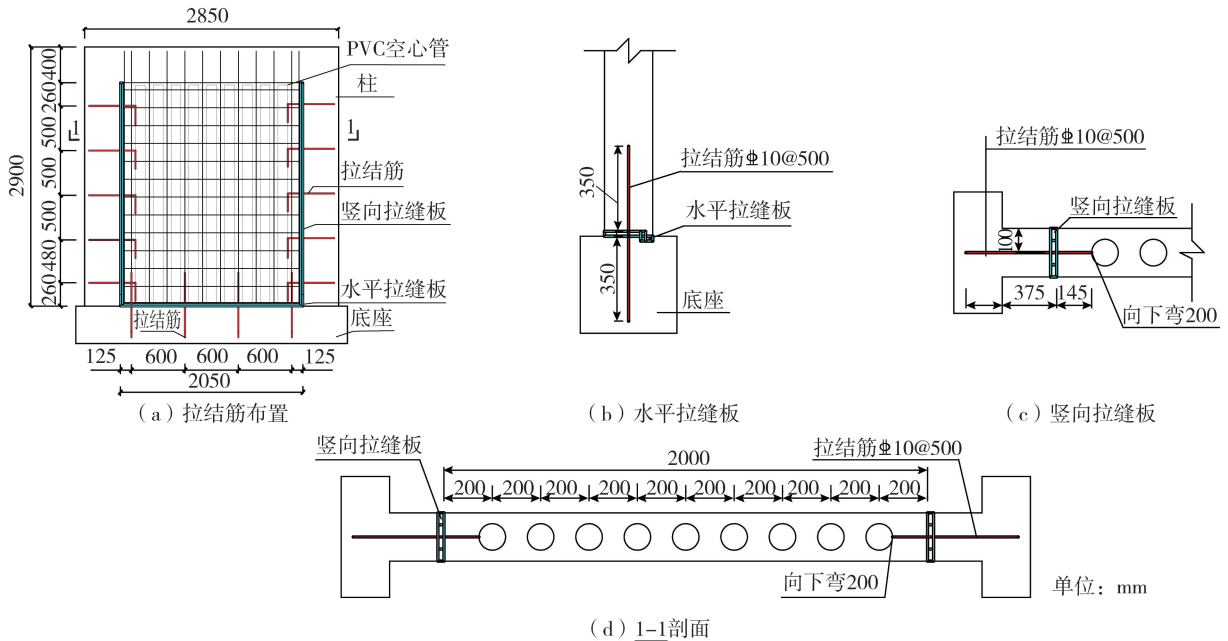
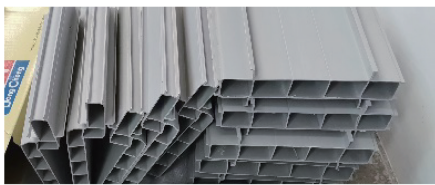
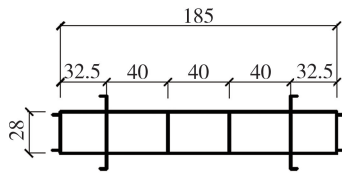


图 2 PVC 空心管及拉缝板布置详

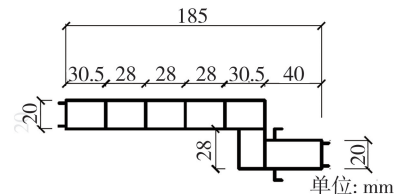
Fig. 2 Arrangement of PVC hollow core pipe and slit plate



(a) PVC拉缝板实物图



(b) 竖向拉缝板截面



(c) 水平拉缝板截面

图 3 PVC 结构拉缝板实物及截面示意图

Fig. 3 Physical and cross-sectional drawings of PVC structure slit plate



(a) 钢筋笼整体



(b) 拉缝板及PVC空心管

图 4 PVC 空心管及拉缝板施工现场图

Fig. 4 Construction site plan of PVC hollow core pipe and tension slit plate

1.2 加载制度

水平往复荷载由最大出力为 1500 kN 的伺服作动器施加,加载全程采用位移控制,开始阶段加载位移级差为 2 mm,加载后期位移级差增至 6 mm,试件承载力下降至峰值荷载 85%后停止加载。试件底座利用地锚螺栓固定,试验加载装置如图 5 所示。

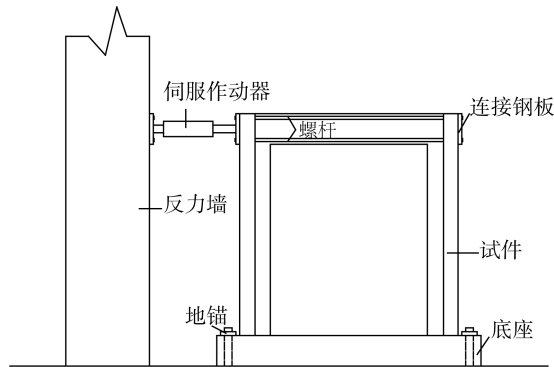


图5 加载装置

Fig.5 Test loading device

1.3 测点布置

位移计布置情况如图6所示。各试件均在梁端和底座位置布置了位移计1#和2#,以此来监测梁端位移和底座滑移情况。对于有填充墙的2组试件,均布置了墙对角位移计3#和4#,用以监测空心混凝土墙的剪切变形。对于有拉缝板的一组试件,沿拉缝板高度方向分别在底部和中部位移布置了跨缝位移计5#~8#,以监测拉缝板在位移循环荷载下的变形。

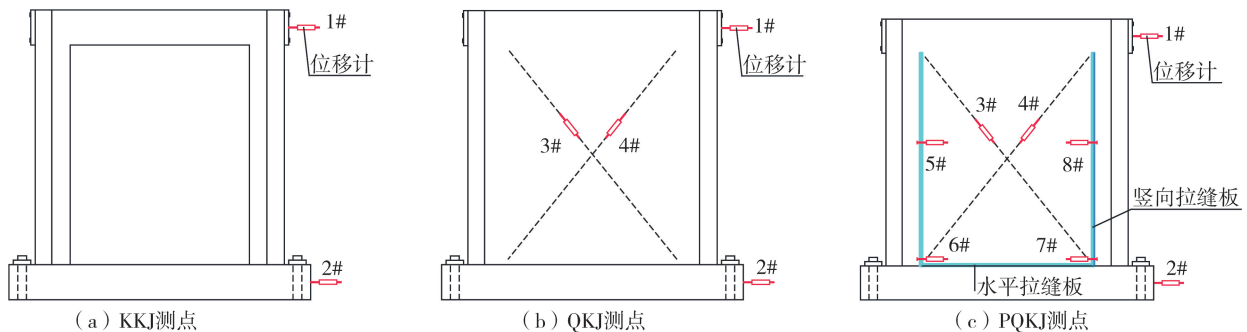


图6 各试件测点布置图

Fig.6 Layout of measurement points of each specimen

1.4 材料力学性能试验

设计强度等级为C30的混凝土实测立方体抗压强度平均值为27.5 MPa。

开展结构拉缝板材性试验,由于试验条件和材料本身的限制,以200 mm为单位长度,选取了较为标准的拉缝板进行截取,实测了水平拉缝板和竖向拉缝板构件的抗压承载力,试验实测结果如表1所示。

表1 PVC结构拉缝板构件抗压承载力

Table 1 Compressive bearing capacity of PVC structure slit plate components

试件名称	平均承载力/kN	平均受压面积/mm ²	平均面压/MPa
竖向拉缝板	17.06	36 174	0.472
水平拉缝板	17.29	36 012	0.480

2 试验现象

2.1 纯框架试件

对于纯框架试件KKJ-1,水平位移为7.5 mm(层间位移角约为 $\Delta=1/360$)时,柱下部翼缘产生裂缝,梁端产生细微裂缝。随着加载位移幅值的增大,梁、柱端新裂缝增多。加载位移幅值 $\delta=20$ mm时,柱脚腹板处出现裂缝,裂缝贯穿柱截面。在 $\delta=66$ mm时,梁端混凝土保护层局部压溃剥落。在 $\delta=72$ mm时,柱脚腹板处混凝土压溃,钢筋暴露。在 $\delta=78$ mm,柱脚腹板处混凝土压溃范围扩大,可见暴露的钢筋明显弯曲。在 $\delta=84$ mm时,梁端混凝土压溃剥落。在 $\delta=90$ mm时,有钢筋断裂声响。在 $\delta=96$ mm(层间位移角约 $\Delta=1/28$)时,整个构件的承载力下降到峰值荷载的85%以下,加载结束。

对于纯框架试件KKJ-2,加载过程与试件KKJ-1的加载过程和试验现象基本相同,水平位移为7.6 mm

(约 $\Delta = 1/355$) 时,柱下部翼缘产生裂缝,梁端产生细微裂缝。在 $\delta = 34$ mm 时,柱脚腹板处出现裂缝,裂缝贯穿柱截面。在 $\delta = 80$ mm 时,梁端混凝土剥落。在 $\delta = 90$ mm 时,柱脚腹板处混凝土压溃。在 $\delta = 98$ mm 时,柱脚腹板处混凝土压溃剥落严重,钢筋暴露。在 $\delta = 106$ mm 时,可见暴露的钢筋明显弯曲。在 $\delta = 114$ mm (约 $\Delta = 1/24$) 时,梁端上下混凝土压溃剥落,加载过程有钢筋断裂声响,整个构件的承载力下降到峰值荷载的 85% 以下,加载结束。

2.2 PVC 拉缝板连接的空心墙 RC 框架试件

对于拉缝板连接的空心填充墙试件 PQKJ-1。水平位移为 5.0 mm (约 $\Delta = 1/540$) 时,柱下部翼缘出现第一条裂缝,梁端出现细微裂缝。在加载位移幅值 δ 为 8、10、12 mm 的加载过程均有拉结筋断裂并发出的短促“咚”的闷响。试件在 $\delta = 10$ mm 时,左下位置拉缝板出现明显的受压变形白色痕迹,位移循环过程中拉缝板表面的混凝土脱落较多。在 $\delta = 14$ mm 时,墙面开始出现 X 形斜裂缝。在 $\delta = 22$ mm 时,拉缝板断裂并发出较大响声。在 $\delta = 24$ mm 时,右侧拉缝板下部与混凝土墙脱离。在 $\delta = 26$ mm 时,柱脚腹板处出现斜裂缝。在 $\delta = 28$ mm 时,拉缝板与墙、柱连接处混凝土剥落,墙面网状交叉裂缝增多。在 $\delta = 36$ mm 时,墙底滑移明显。在 $\delta = 46$ mm 时,柱脚腹板处混凝土压溃。加载至 $\delta = 64$ mm ($\Delta = 1/40$) 时,近加载梁端混凝土破坏严重,此时整个构件的承载力下降到峰值荷载的 85% 以下,加载结束。

对于带拉缝板连接的空心填充墙框架试件 PQKJ-2,水平位移为 5.1 mm (约 $\Delta = 1/530$) 时,柱下部翼缘出现第一条裂缝,梁端出现细微裂缝。试件加载开始后 δ 为 6、8、12 mm 加载过程中,均有拉结筋断裂并发出的短促“咚”的闷响。在 $\delta = 14$ mm 时,墙面开始出现 X 形斜裂缝。随着加载位移幅值增大,墙面新裂缝增多,旧有裂缝发展,整体呈现交叉网状。在 $\delta = 20$ mm 时,右侧拉缝板下部破坏。在 $\delta = 22$ mm 时,柱根部腹板出现斜裂缝。在 $\delta = 34$ mm 时,加载过程中墙体底部滑移明显。在 $\delta = 50$ mm 时,柱脚腹板处局部压溃。随着循环位移的增大,压溃范围增大,拉缝板连接脱落,梁底墙面有明显网状裂缝,在 $\delta = 66$ mm 时,梁端混凝土局部压溃剥落,最终在 $\delta = 70$ mm (约 $\Delta = 1/39$) 时,整个构件的承载力下降到峰值荷载的 85% 以下,加载结束,最终破坏图如图 7 所示。

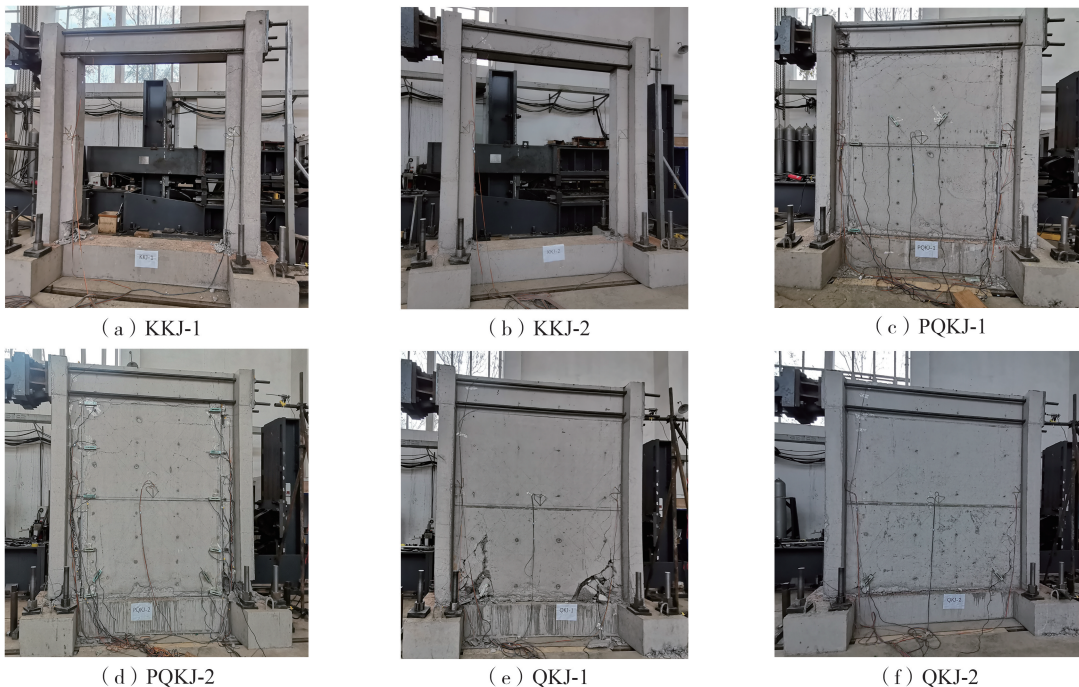


图 7 各试件最终破坏图

Fig. 7 Failure patterns of each specimen

2.3 现浇 PVC 管空心墙 RC 框架试件

对于带刚性连接填充墙的框架试件 QKJ-1,水平位移为 3.2 mm (约 $\Delta = 1/845$) 时,柱下部翼缘出现第一条裂缝,下部墙角出现 45° 斜裂缝。当加载位移幅值 δ 为 6、8、10 mm 时,有拉结筋断裂声响。随着加载位移的增大,墙面的新裂缝增多,旧裂缝扩大加深,在墙面上呈现网状的交叉裂缝。在 $\delta = 20$ mm 时,柱脚腹板处出现斜裂缝,裂缝贯穿柱截面。在 $\delta = 24$ mm 时,柱根部附近出现多条裂缝,加载位移继续增大,裂缝加深,墙

柱交接底部局部压溃。在 $\delta = 40$ mm 时,墙底的滑移明显。在 $\delta = 46$ mm,墙与柱腹板交接处底部混凝土压溃; $\delta = 52$ mm(层间位移角 $\Delta = 1/52$),下部墙角及柱脚腹板处混凝土压溃,大块掉落,墙体钢筋暴露,此时整个构件的承载力下降到峰值荷载的 85% 以下,加载结束。

试件 QKJ-2 的加载过程和试验现象与试件 QKJ-1 基本相似,但试件 QKJ-2 在加载过程中受扭较明显,在试验加载结束时,试件 QKJ-2 面外倾斜明显。水平位移为 5.3 mm(约 $\Delta = 1/510$)时,柱下部翼缘出现第一条裂缝,下部墙角出现 45° 斜裂缝。当加载位移幅值 δ 为 6、8、10 mm 时,有拉结筋断裂声响。在 $\delta = 22$ mm 时,柱脚腹板处出现斜裂缝,裂缝贯穿柱截面。在 $\delta = 32$ mm 时,墙底的滑移明显。在 $\delta = 44$ mm(约 $\Delta = 1/61.5$)时,墙角混凝土局部压溃,此时整个构件的承载力下降到峰值荷载的 85% 以下,加载结束。各试件破坏图如图 7 所示。

2.4 破坏详图对比

对比拉缝板连接试件和刚性连接试件破坏情况,有拉缝板连接试件的墙体由于拉缝板的格构式构造,增大了墙的变形空间,一定程度上保护了墙体,破坏程度较刚性连接试件更轻,墙体基本保持完整。而无拉缝板的刚性连接试件由于墙体分布筋两侧和底部与主体结构断开,仅通过拉结筋进行拉结,同时墙体内也插有 PVC 管,因此虽然是与主体结构整体浇筑而成,但墙体刚度和承载力均被弱化较多,达不到剪力墙的功能和作用,破坏严重,如图 8 和图 9 所示。

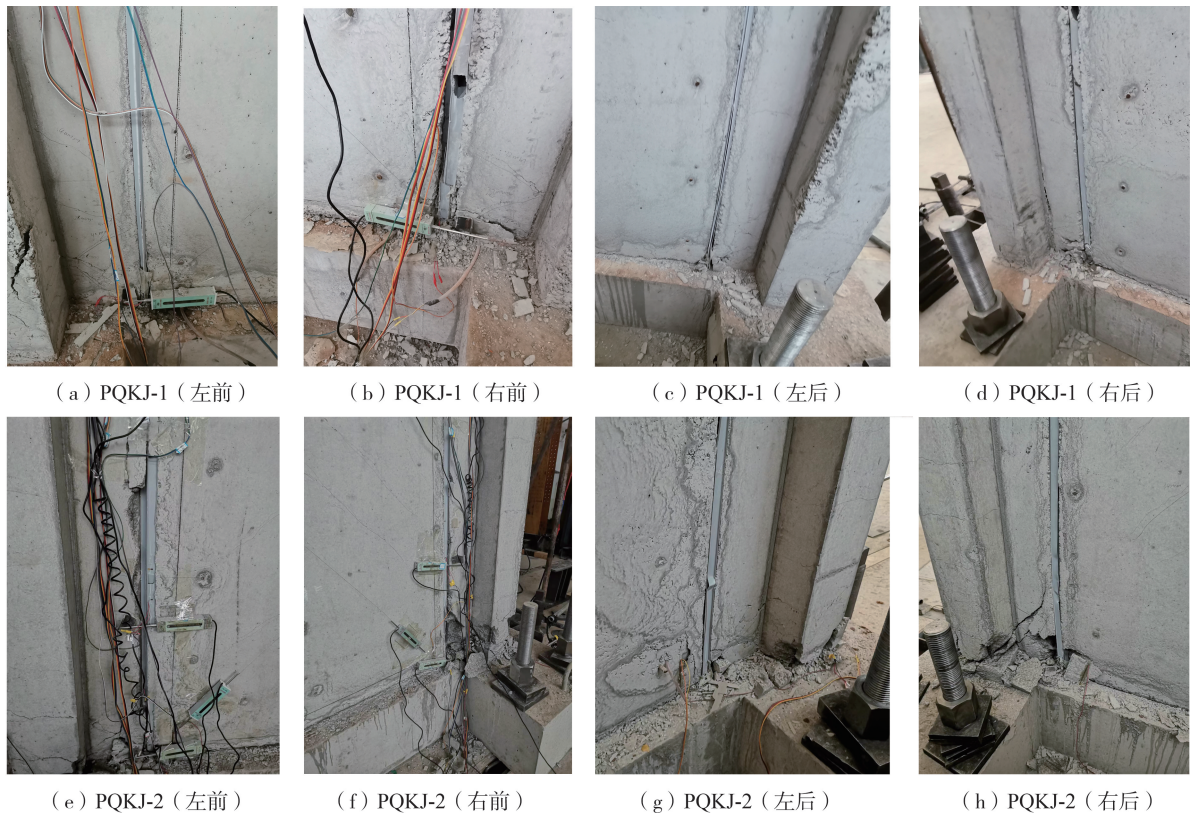
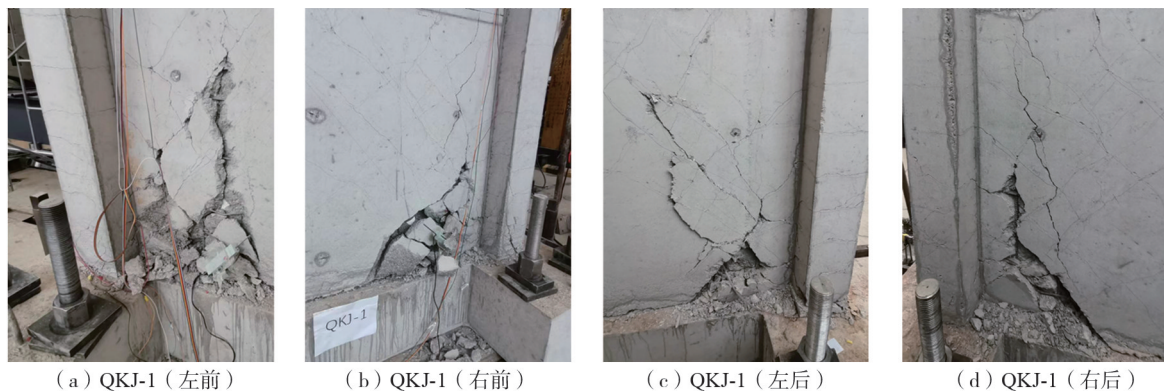


图 8 拉缝板连接试件破坏图

Fig. 8 Damage diagram of tensile jointed plate specimen



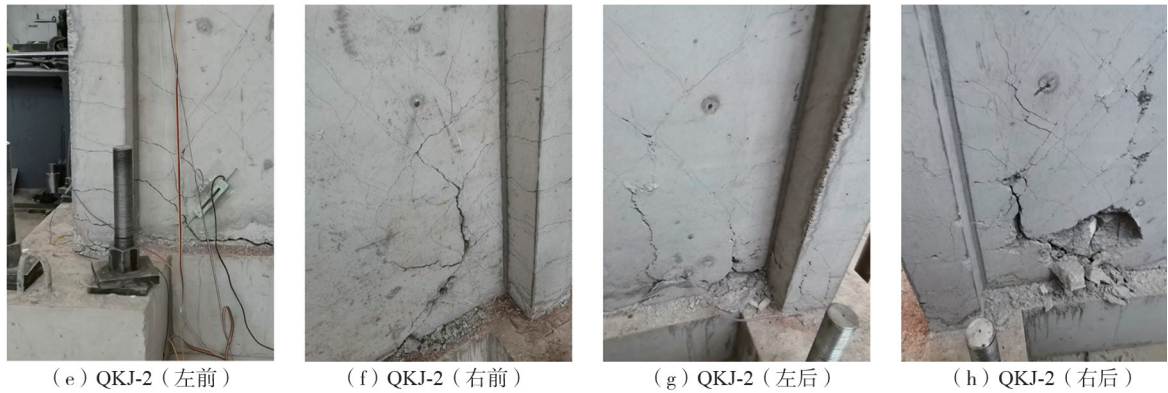


图 9 刚性连接试件破坏图

Fig. 9 Damage diagram of rigid connection specimens

3 试验结果及分析

3.1 荷载-位移曲线

图 10 为各试件的荷载-位移滞回曲线,由图可知:

1) 纯框架试件在达到峰值荷载后的滞回环峰值荷载下降平缓,刚性连接试件在达到峰值荷载后各滞回环峰值荷载下降迅速,拉缝板连接试件在到达峰值荷载后下降较为平缓,介于纯框架试件与刚性连接试件之间。

2) 拉缝板连接试件的滞回曲线较刚性连接试件形状更饱满,且峰值荷载对应层间位移角更大,其中刚性连接试件峰值荷载对应层间位移角分别约为 $\Delta = 1/305$ ($\delta = 8.9 \text{ mm}$) 和 $\Delta = 1/212$ ($\delta = 12.7 \text{ mm}$),拉缝板连接试件峰值荷载对应层间位移角分别约为 $\Delta = 1/90$ ($\delta = 32.04 \text{ mm}$) 和 $\Delta = 1/70$ ($\delta = 38.55 \text{ mm}$),较刚性连接试件提高了 2.27 倍。

3) 由于在浇筑过程中,拉缝板连接试件 PQKJ-1 右侧拉缝板破裂,PVC 结构拉缝板中空格构被灌浆填充,致使滞回曲线正负方向上不对称,峰值荷载后,试件承载力下降迅速。QKJ-2 试件在加载过程中受扭较严重,试件达到峰值荷载后承载力较 QKJ-1 下降更为迅速。

总体而言,现浇空心墙在相同位移幅值下均较框架结构的侧向刚度以及承载能力均有显著提高,拉缝板连接试件峰值荷载到达的位移较刚性连接试件推后。

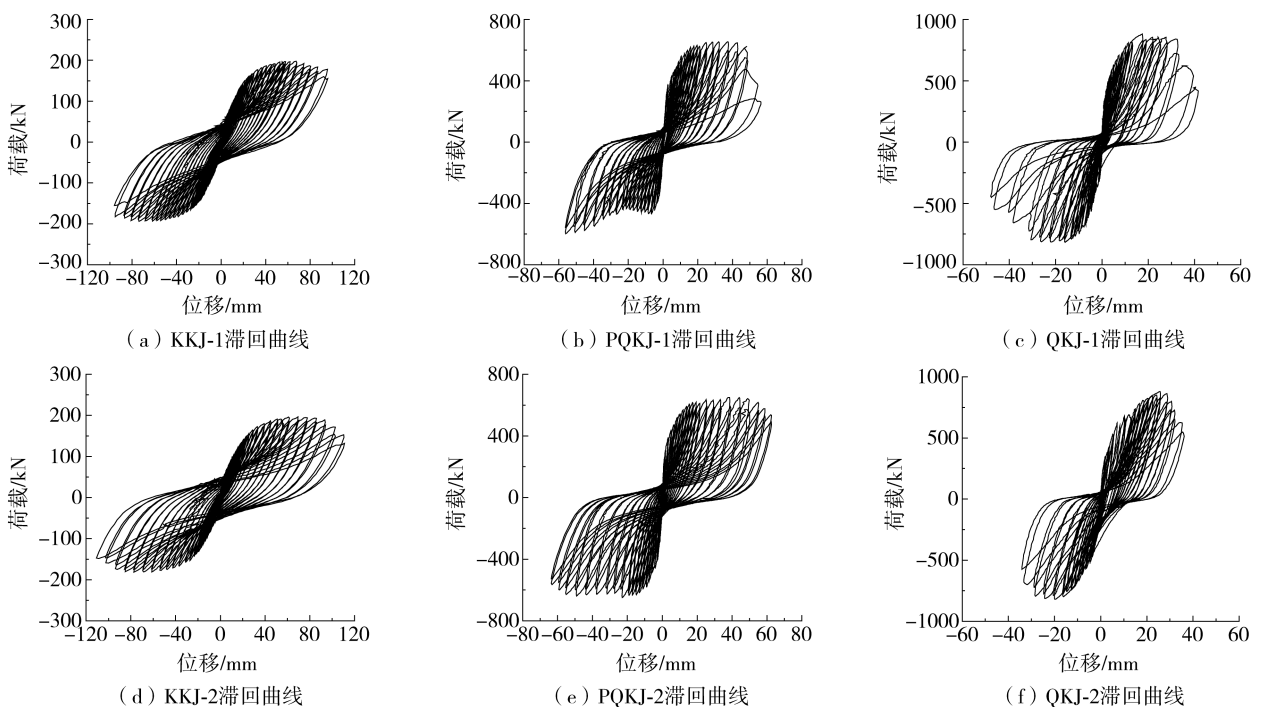


图 10 各试件实测荷载-位移曲线

Fig. 10 Measured load displacement curves of each specimen

3.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线及峰值荷载见图 11 和图 12。可知：

1) 刚性连接试件的峰值荷载平均为纯框架试件的 4.47 倍；拉缝板连接试件的峰值荷载平均为纯框架试件的 3.31 倍，较刚性连接试件平均降低约 25.98%。说明现浇空心填充墙的加入提升了结构的承载力，拉缝板的加入能降低填充墙对结构承载力的影响。

2) 总体而言，空心填充墙的加入显著提高了结构的侧向承载力，降低了结构的极限位移，拉缝板的加入能够降低填充墙对结构的影响。

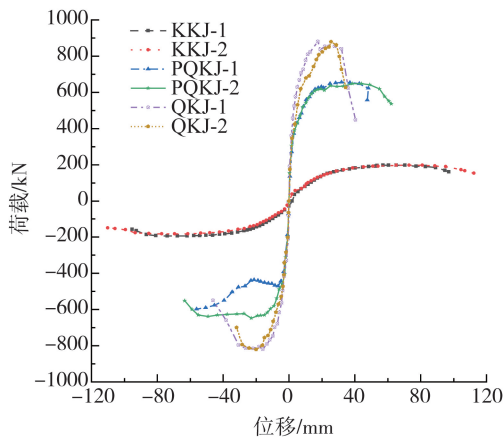


图 11 各试件骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of each specimen

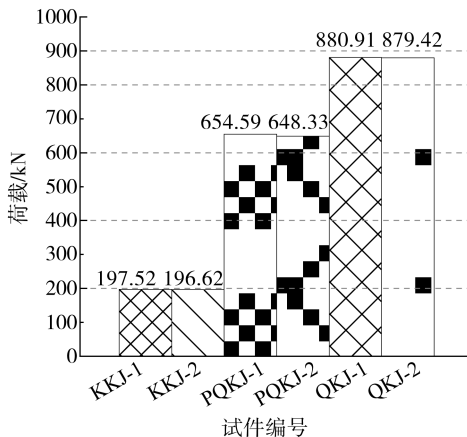


图 12 各试件峰值荷载对比

Fig. 12 Comparison of peak loads of each specimen

3.3 刚度

按 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[22] 中相关公式进行计算试件的割线刚度 K 。相同加载位移幅值下带现浇空心填充墙试件与纯框架试件割线刚度的比值，简称刚度比。各试件的刚度退化曲线见图 13，刚度比曲线见图 14。由图 13、图 14 可知：

1) 刚性连接的 QKJ-1 试件对初始割线刚度的提升作用最为显著，为纯框架试件的约 21.15 倍。拉缝板连接试件次之，平均为纯框架的 15.20 倍。试件 QKJ-2 由于在加载过程中受扭严重，其初始割线刚度较试件 QKJ-1 低，与拉缝板连接试件相近，为纯框架试件的 14.54 倍。拉缝板连接试件的平均初始割线刚度较刚性连接试件平均降低约 14.71%，其中较 QKJ-1 试件降低约 28.65%。

2) 随着位移加载幅值增大，各试件刚度逐渐降低。在同等位移下，刚性连接 QKJ-1 试件刚度均大于拉缝板连接试件。

总体上，空心混凝土填充墙使结构刚度显著提升，拉缝板虽然减小填充墙对结构侧向刚度的贡献，但刚度提升依旧显著，对结构产生的影响不可忽视。

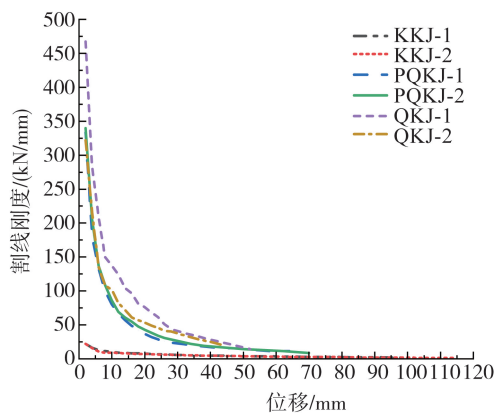


图 13 刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness degradation curves of specimens

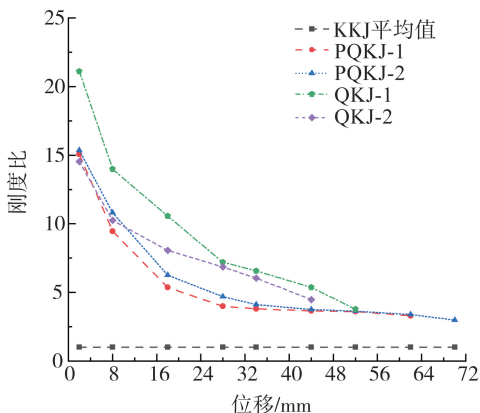


图 14 各试件刚度比曲线

Fig. 14 Stiffness ratio curves of each specimen

3.4 位移延性

位移延性系数 μ 为试件极限位移 δ_u 与屈服位移 δ_y 的比值，其中极限位移 δ_u 为试件水平荷载下降至峰值

荷载 85% 时对应的位移;屈服位移 δ_y 为试件达到屈服荷载时对应的位移。各试件的位移延性系数 μ 如表 2 所示。

表 2 各试件主要阶段试验结果

Table 2 Test results of specimens at main stages

试件编号	加载方向	P_{cr}^*/kN	δ_{cr}^*/mm	P_{cr}/kN	δ_{cr}/mm	P_y/kN	δ_y/mm	P_{max}/kN	δ_{max}/mm	P_u/kN	δ_u/mm	μ
KKJ-1	正向	—	—	79.9	7.5	150.1	21.2	197.5	70.4	167.9	94.8	4.6
	负向	—	—	77.5	6.4	143.8	19.5	194.0	67.8	164.9	92.7	
KKJ-2	正向	—	—	68.5	7.6	149.6	23.4	196.6	65.2	167.1	105.8	4.7
	负向	—	—	67.1	6.3	135.9	20.9	181.3	69.3	154.1	99.9	
PQKJ-1	正向	522.2	8.9	431.2	5.0	547.0	10.0	654.6	32.0	556.4	47.7	4.8
	负向	466.9	8.5	391.4	3.2	—	—	598.4	56.2	—	—	
PQKJ-2	正向	542.5	10.3	431.0	5.1	541.0	10.2	648.3	38.6	551.1	60.8	6.4
	负向	537.5	7.4	402.5	2.6	580.2	9.2	648.1	23.0	550.9	63.3	
QKJ-1	正向	524.1	3.2	524.1	3.2	732.6	8.9	880.9	17.5	748.77	33.6	3.9
	负向	417.1	3.1	417.1	3.1	716.4	9.1	818.3	15.9	695.5	36.1	
QKJ-2	正向	529.5	5.3	529.5	5.3	698.8	12.7	879.4	25.5	747.5	31.6	2.8
	负向	342.0	2.8	342.0	2.8	672.5	9.7	820.2	19.9	697.2	31.8	

注: P_{cr}^* 、 P_{cr} 、 P_y 、 P_{max} 、 P_u 分别为试件的墙面开裂荷载、框架开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载和极限荷载, 框架开裂荷载 P_{cr} 为试件出现可见裂缝时对应的荷载, 屈服荷载 P_y 根据等效能量法确定, 峰值荷载 P_{max} 为试件承受的最大荷载(表征承载力), 极限荷载 P_u 为 P_{max} 的 85% 对应数值; δ_{cr}^* 、 δ_{cr} 、 δ_y 、 δ_{max} 、 δ_u 为各参数对应的位移。

由表 2 可知:

1) 刚性连接试件的极限位移相较于纯框架试件平均降低了约 66.15%; 拉缝板连接试件较纯框架试件的极限位移平均降低约 44.18%, 较刚性连接试件平均提高约 64.91%。表明现浇空心填充墙的加入降低了结构的极限位移, 拉缝板的加入能降低填充墙对结构极限位移的影响。

2) 纯框架试件的位移延性系数分别为 4.6 和 4.7, 介于有空心填充墙的 2 组试件之间。

3) 刚性连接试件的延性系数分别为 3.9 和 2.8, 拉缝板连接试件的延性系数分别为 4.8 和 6.4, 均高于刚性连接的试件。说明拉缝板的加入改善了现浇空心填充墙结构延性。

4) 拉缝板的加入使结构的峰值荷载位移和墙体的开裂位移推后。其中峰值荷载位移平均提高约 90.1%, 墙体开裂位移平均提高约 1.57 倍。

3.5 耗能能力

结构等效黏滞阻尼系数 h_e 按 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[22] 相关公式进行计算, 累积耗能曲线和 h_e - δ 曲线分别见图 15 和图 16, 由图可知:

1) 纯框架试件与有空心填充墙的试件相比, 在加载位移幅值 $\delta < 50$ mm 时, 相同的位移加载幅值下, 纯框架试件的等效黏滞系数及累计耗能均低于有空心填充墙的试件, 表明现浇空心填充墙的加入提高了结构的耗能能力。

2) 有现浇空心填充墙的 2 组试件相比, 刚性连接试件总耗能均低于拉缝板连接试件。试件 QKJ-1 相同加载位移幅值下累计耗能较拉缝板连接的试件小, 整体介于纯框架试件与拉缝板连接的空心填充墙试件之间, 等效黏滞阻尼比系数在 $\delta = 44$ mm 前小于拉缝板连接的试件。试件 QKJ-2 由于加载时受扭, 相同加载位移幅值下累计耗能较拉缝板连接试件大, 但试件在达到峰值荷载后迅速破坏, 继续承载的能力差。

3) 在加载位移幅值 $\delta < 44$ mm 时, 拉缝板连接试件的等效黏滞阻尼系数 h_e 和总耗能均高于纯框架试件及刚性连接试件 QKJ-1。表明拉缝板弱化了现浇空心墙与框架之间的连接, 为现浇空心墙提供了变形空间, 一定程度上保护了现浇空心墙, 使现浇空心墙与框架协同工作, 共同抵抗侧向荷载。

4) 拉缝板累计总耗能较纯框架试件提高约 46.25%, 较刚性连接试件提高约 50.17%。

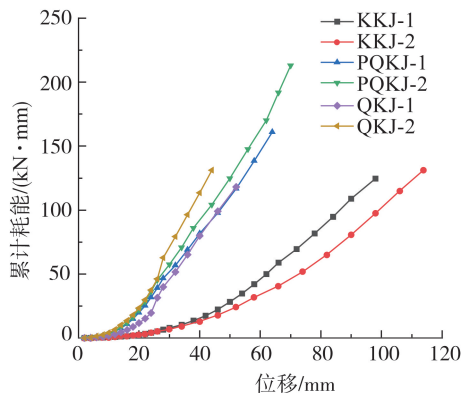
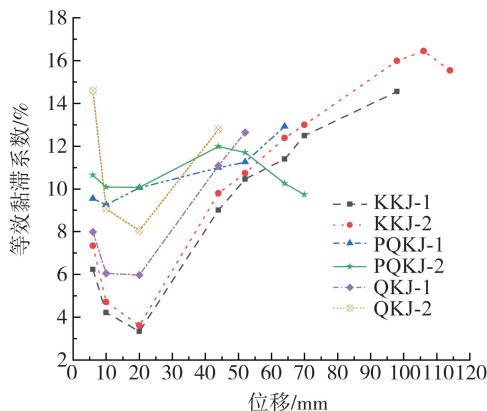


图 15 各试件累计耗能曲线

Fig. 15 Cumulative energy consumption curves of each specimen

图 16 $h_e - \delta$ 关系曲线Fig. 16 Relationship curves of $h_e - \delta$

4 结论

通过开展试件拟静力试验,主要得出以下结论:

1) 带现浇空心填充墙试件在同等位移下较纯框架试件的侧向刚度、承载能力均有显著提升,极限位移均有显著降低。

2) 对比各试件峰值荷载,刚性连接试件为纯框架试件的 4.47 倍;拉缝板连接试件峰值荷载为纯框架试件的 3.31 倍,较刚性连接试件的峰值荷载平均降低约 25.98%。说明现浇空心填充墙的加入提升了结构的承载力,拉缝板的加入降低了填充墙对结构承载力的影响。

3) 刚性连接试件初始割线刚度为纯框架试件的 14.54~21.15 倍。拉缝板连接试件初始刚度为纯框架试件的 15.20 倍,相较于刚性连接试件初始割线刚度最大降低了约 28.65%,平均降低约 14.71%。表明拉缝板的加入能降低填充墙对结构侧向刚度的影响。

4) 对于极限位移,刚性连接试件相较于纯框架平均降低约 66.15%;拉缝板连接试件相较于纯框架平均降低约 44.18%,相较于刚性连接试件平均提高约 64.91%。

5) 拉缝板的加入降低了空心混凝土填充墙对结构侧向刚度和承载力的提升作用,改善了框架结构空心混凝土填充墙的变形能力,但相比于纯框架刚度提升和极限位移降低作用仍然显著,由此带来的对整体结构的不利影响应在计算时加以合理考虑。

参考文献:

- [1] 蒋娜. 中空混凝土墙与主体结构的柔性连接[C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会, 2021 年度学术年会暨首届总工论坛会议论文集. 中国土木工程学会总工程师工作委员会, 2021.
JIANG Na. Flexible connection between hollow concrete wall and main structure[C]// Proceedings of the 2021 Annual Academic Conference of the Working Committee of Chief Engineers of the Chinese Society of Civil Engineering and the First Chief Engineer Forum. Chief Engineer Working Committee of Chinese Civil Engineering Society, 2021. (in Chinese)
- [2] 邹明洋, 刘玉静. 新型现浇混凝土空心隔墙力学性能有限元分析及试验研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(21): 95-99.
ZOU Mingyang, LIU Yujing. Finite element analysis and experimental study on mechanical properties of new cast-in-place concrete hollow partition wall[J]. New Technology & New Products of China, 2022(21): 95-99. (in Chinese)
- [3] 张昊宇, 王涛, 林旭川, 等. 尼泊尔 8.1 级地震钢筋混凝土框架典型震害及讨论[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 59-68.
ZHANG Haoyu, WANG Tao, LIN Xuchuan, et al. Seismic damages of RC frames in Nepal M_s 8.1 earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(9): 59-68. (in Chinese)
- [4] 罗若帆, 金显廷, 郭迅, 等. 泸定 6.8 级地震结构震害调查与分析[J]. 防灾科技学院学报, 2022, 24(4): 46-55.
LUO Ruofan, JIN Xianting, GUO Xun, et al. Investigation and analysis of structure damage in the Sichuan Luding M_s 6.8 earthquake in 2022[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2022, 24(4): 46-55. (in Chinese)
- [5] 陈子峰, 林旭川, 陆新征, 等. 6.4 级漾濞地震某 RC 框架及其非结构部件震害分析[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 138-148.
CHEN Zifeng, LIN Xuchuan, LU Xinzhen, et al. Analysis on damage of a RC frame and its non-structural components in the M_s 6.4 Yangbi earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(1): 138-148. (in Chinese)

- [6] KAKALETSIS D J, KARAYANNIS C G. Influence of masonry strength and openings on infilled RC frames under cycling loading[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, 12(2):197-221.
- [7] MISIR I S, OZCELIK O, GIRGIN S C, et al. Experimental work on seismic behavior of various types of masonry infilled RC frames[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 44(6): 763-774.
- [8] 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.
JIANG Huanjun, MAO Junjie, LIU Xiaojuan. Experimental study on seismic performance of masonry infilled RC frame with different types of connections[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(3): 60-67. (in Chinese)
- [9] MUTHU KUMAR S, SATYANARAYANAN K S. Study the effect of elastic materials as interface medium used in infilled frames[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 8986-8995.
- [10] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 2016年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. 2016 th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [11] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB 50003—2011 Code for design of masonry structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [12] 鲁焯, 王富, 邓军, 等. 结构拉缝在全现浇混凝土外墙中的应用[J]. *工程建设与设计*, 2021(15): 120-123.
LU Ye, WANG Fu, DENG Jun, et al. Application of structural joints in the fully cast-in-place concrete exterior wall[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2021(15): 120-123. (in Chinese)
- [13] 周剑, 田春雨, 王俊, 等. 带现浇混凝土填充墙的剪力墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(8): 86-99.
ZHOU Jian, TIAN Chunyu, WANG Jun, et al. Experimental study on seismic behavior of shear wall with cast-in-situ concrete infilled walls[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(8): 86-99. (in Chinese)
- [14] MEHRABI A B, BENSON SHING P, SCHULLER M P, et al. Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(3): 228-237.
- [15] MISIR I S, OZCELIK O, GIRGIN S C, et al. The behavior of infill walls in RC frames under combined bidirectional loading[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, 20(4): 559-586.
- [16] TSANTILIS A V, TRIANTAFILLOU T C. Innovative seismic isolation of masonry infills using cellular materials at the interface with the surrounding RC frames[J]. *Engineering Structures*, 2018, 155: 279-297.
- [17] ALWASHALI H, SEN D, JIN K, et al. Experimental investigation of influences of several parameters on seismic capacity of masonry infilled reinforced concrete frame[J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 11-24.
- [18] WANG Z X, XIONG L H, CHEN G W, et al. Out-of-plane performance of infilled frames with the improved flexible connection[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 51: 104286.
- [19] 鲁亮, 李远清, 赵菲. 阻尼器连接填充墙在柔性框架结构中的应用研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(1): 70-77.
LU Liang, LI Yuanqing, ZHAO Fei. Study on application of the damper connected wall in flexible frame[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(1): 70-77. (in Chinese)
- [20] 张永兵, 郭新华, 李勇, 等. 柔性连接填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(6): 187-195.
ZHANG Yongbing, GUO Xinhua, LI Yong, et al. Experimental study on seismic performance of masonry-infilled RC frame building with flexible connection[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(6): 187-195. (in Chinese)
- [21] 张茂花, 庞略, 丁俊男, 等. 填充墙 RC 框架结构加固方法的研究现状及展望[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(1): 53-62.
ZHANG Maohua, PANG Lue, DING Junnan, et al. A review of the methods of strengthening RC frames with masonry infilled wall structures[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(1): 53-62. (in Chinese)
- [22] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)